제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기법 연구” 과제의 제3차년도 최종연구보고서로 제출합니다.

2012. 10. 25.

주관연구기관명 : 한국수자원공사
사 장 김 건 호
공동연구기관명 : 한국철도기술연구원
원 장 홍 순 만
공동연구기관명 : 중앙대학교 산학협력단
단 장 윤 기 봉
공동연구기관명 : (주)희송지오텍
사 장 김 기 석

■ 총 괄 연 구 책 임 자 /	책임연구원	김 남 룡	주관연구책임자
■ 주관연구기관 참여연구원 /	책임연구원	오 병 현	
	책임연구원	신 동 훈	
	책임연구원	이 종 욱	
	선임연구원	구 방 서	
	연 구 원	김 민 섭	
■ 공동연구기관 참여연구원 /	선임연구원	이 성 진	공동연구책임자
	책임연구원	이 진 욱	
■ 공동연구기관 참여연구원 /	책임연구원	조 성 호	공동연구책임자
	연 구 원	노 리 나	
	연 구 원	하 사 눌	
	연 구 원	이 영 복	
■ 공동연구기관 참여연구원 /	책임연구원	김 기 석	공동연구책임자
	선임연구원	김 종 훈	
	선임연구원	안 희 윤	
	선임연구원	정 래 철	
	선임연구원	정 지 민	
	연 구 원	정 완 순	
	연 구 원	김 종 성	
	연 구 원	김 현 우	
■ 위탁연구기관 참여연구원 /	책임연구원	전 제 성	위탁연구책임자

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>09기술혁신
F05</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>3차년도</td><td>단 계
구 분</td><td>3차년도/
3차년도</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">대형 지반구조물 대입경(大粒徑) 조립재료 동적물성 산정 기법 연구</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">김 남 룡</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 21 명
내부 : 21 명
외부 : 0 명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부: 310,000 천원
기업: 314,000 천원
계: 624,000 천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 23 명
내부 : 23 명
외부 : 0 명</td><td>총연구비</td><td>정부: 830,000 천원
기업: 859,000 천원
계:1,689,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국수자원공사
Kwater연구원</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">(주)희송지오텍
네스지오
삼우공간건축사사무소</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 : 인덕대학 연구책임자 : 전제성</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">1) 대형 공진주시험시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
▪ 대형공진주시스템 설계 및 제작
▪ 대형공진주시스템의 검증

2) 대형진동삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
▪ 상사입도법 등 시험 조건 영향 평가
▪ 중간주응력이 강성에 미치는 시험법 연구
▪ 조립재료 최대탄성계수 평가

3) 표면파 현장탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
▪ 사면경계가 있는 지표면에서의 표면파 전파해석을 위한 유한요소 해석</td></tr>
</table>

▪ 표면파 속도 측면에서 3차원 형상 효과
▪ 조립재료 지반에 적합한 최적 발진원 제안
▪ 조립재료 지반구조물을 위한 빔형성 기법의 제안

4) 반사법탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
▪ 97개지역 4,548개의 시추공탐사, 검층, 지표탐사등을 이용한 현장동적물성 D/B 분석
▪ 현장동적물성 기법 비교 검토를 위한 고분해능 반사법 탄성파탐사 자료처리
▪ 시추조사 및 다양한 현장시험 수행 및 분석
▪ 현장시험 결과로부터 대입경 조립지반의 동적물성 범위 제시

5) 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발
▪ 국내 2개댐(횡성댐, 소양강댐) 지진계측기록 확보 및 분석(고유진동수 산정 등)
▪ 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석에 의한 사력죤 동적물성 산정기법 제시

6) 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증
▪ 댐 실대규모 발파진동 실험 수행
▪ 댐 발파진동 실험기법 정립

7) 3차원 개별요소법 기반 조립재료 정적 수치시험 모델링 기법 및 응용기술 개발
▪ 3차원 개별요소생성 및 미시물성치 산정, 입도분포 생성 알고리즘 개발, 스케일 영향분석
▪ 정적 및 동적 개별요소 수치모델링 기법과 수치시험실 활용기법 정립

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	대형공진주 시험	대형진동 삼축시험	표면파 탐사	대입경 조립재료	동적물성
	영 어	large scale resonance column test	large scale cylic triaxial test	surface wave method	large-size granular geomaterials	dynamic properties

요 약 문

Ⅰ. 제 목

대형 지반구조물 대입경(大粒徑) 조립재료 동적물성 산정 기법 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 목 적

대형실내시험, 현장탄성파시험, 진동계측결과를 이용한 수치해석에 의한 역산법으로부터, 대입경 조립재료의 동적물성을 산정하는 기법을 개발·제시하고, 제시된 기법으로부터 각 대형 지반구조물을 이루는 대입경 조립재료의 동적물성 범위를 제시함으로써, 대형 지반구조물의 지진 및 진동하중 작용시 응답 거동을 정확히 파악하는데 필요한 기초 물성을 제공한다.

1) 대형 공진주시험시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
2) 대형진동삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
3) 표면파 현장탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
4) 반사법탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
5) 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발
6) 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증
7) 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험 모델링 기법 및 활용기술 개발

○ 필 요 성

최근 지반구조물이 더욱 더 대형화되어 가는 추세인 점을 고려할 때, 대입경 조립재료는 대형 필댐, 저수지 제방, 항만 방조제 및 방파제, 철도 노반 및 암성토, 교대 및 지하철 박스 뒷채움 등 다양한 구조물에 지속적으로 활용도가 증가될 것으로 예상된다. 이러한 대입경 조립재료로 축조된 대형 구조물은 경제적·사회적으로 국가 중요 기반시설에 해당되는 경우가 태반이다.

이러한 활용도의 증가에 비해 그 동적물성에 대한 평가는 용이하지 않은 상황이다. 대입경 조립재료의 경우, 대부분 입경이 매우 커서 시료에 대한 직접적인 실내시험이 시험기 크기 한계로 인해 수행이 어렵고, 시추공을 이용한 현장시험은 대입경 특성에 의해

시추공 형성이 어려워 시험이 거의 불가능하고, 비파괴 표면파 탐사의 경우에도 대입경 조립재료의 불연속성으로 인한 측정 신호의 품질에 대한 신뢰성 문제와 반무한 평면 가정에서 출발된 표면파 기법의 한계로 인해 현장시험에 의한 물성 취득도 매우 어렵기 때문이다.

그러나 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물의 내진설계 및 내진안정성 평가, 건설 및 운영 중 진동요인에 따른 동적하중에 대한 안정성 평가 및 설계, 내부 공동, 잠재적 결함 등과 같은 지반구조물의 건전성 평가 등을 위해서는 신뢰성 있는 동적물성 산정을 위한 실내 및 현장시험 기법의 개발이 절대적으로 요구되며, 개발된 기법의 검증 및 구조물별 물성범위 제시 또한 연구개발의 중요성을 부각시킨다.

본 연구는 상기 필요성외에도 국가 방재대책에도 부응하며 대국민 안전인식 제고를 위해서 필요하고, 건설교통기술의 국가 경쟁력 확보차원에서도 지반구조물외의 다양한 시설물에도 적용될 수 있어 그 파급효과가 매우 크다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1) 대형 공진주시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정기법 및 물성범위 제시

- ○ 대형 공진주시험기 개발 기초자료 조사·분석 및 설계개념 도출
- ○ 조립재료 동적변형특성 평가에 적합한 최적의 대형 공진주시험기 설계 및 제작
- ○ 대형 공진주시험시스템의 동적응답특성 교정 및 다양한 검증시편, 지반재료를 이용한 적합성 검증
- ○ 대입경 조립재료의 최대입경, 입도분포특성 등에 따른 동적변형특성(미소변형 최대전단탄성계수, 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비 평가
- ○ 댐 축조용 사력재, 고속철도 강화노반, 공사용 가설재료 등 조립재료 사용유형에 따른 동적변형특성 평가 및 물성범위 제시

2) 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

- ○ 대형삼축압축시험장비 검증
- ○ 상사입도조정법/자갈입도보정법 등 입도조정방법에 대한 평가
- ○ 하중패턴, 최대입경, 세립분함유율, 함수비 등 시편 및 시험조건 영향 평가
- ○ 조립재료 최대탄성계수시험법/중간주응력이 강성에 미치는 시험법 개발 및 평가

○ 댐, 철도, 도로 등 주요 지반구조물 조립재료의 동적물성(탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수) 산정 및 가이드라인 제시
○ 기본 물성과 재료특성을 반영한 국내 조립지반재료의 동적물성 예측 모델 및 모델 재료 상수 제시

3) 표면파 현장탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법 개발을 위한 기초연구
- 조립재료 지반에서 기존 지표면 탐사 기법의 특성 평가
- 조립재료 지반에 대한 표면파 시험에서 다양한 발진원의 영향 평가
- 탄성파 탐사의 하드웨어 특성 평가
○ 댐, 성토노반 등 비반무한체에서의 표면파 전파특성 연구
- 비반무한체에서의 표면파 전파특성 평가를 위한 수치해석적 연구
- 표면파 속도측면에서 3차원 형상 효과의 정성적, 정량적 평가
○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 제안
- 조립재료 지반에 적합한 최적 발진원 제안
- 조립재료 지반에 적합한 최적 탄성파 해석기법 제안
- 지층분포 또는 국부 이상체 평가를 위한 전기비저항 기법과 표면파 기법의 병합 활용
○ 조립재료 지반에 적합한 최적 탐사기법을 위한 측정 하드웨어 시스템의 제안
- 제안된 최적 탐사기법을 위한 전용 소프트웨어의 개발
- 제안된 최적 탐사기법을 위한 전용 하드웨어의 제안
○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 정립 및 검증
- 시험시공 지반 또는 모형 지반에서 시추공 탐사기법과 비교
- 다양한 조립재료 지반구조물에서의 현장적용을 통한 실용성, 적용성 검증
- 조립재료 지반구조물별 동적물성의 데이터베이스 작성
○ 지반구조물별 최적 탄성파 탐사기법의 실무적용을 위한 매뉴얼 작성
- 제안된 기법의 현장적용 및 실용화를 위한 매뉴얼 제시
- 측정자료 및 해석결과의 신뢰성 제고를 위한 체계화 작업

4) 반사법탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
○ 현장동적물성 산정 기법의 데이터베이스 구축
- 지층별, 재료별 현장동적물성 데이터 베이스 구축
- 국내지반의 지층별/재료별 탄성파 속도 범위 산출
○ 댐, 성토노반 등의 고분해능 반사법 탄성파 탐사수행
- 국내최초로 댐구조물에서 진동형 송신원인 바이브로사이즈를 이용한 반사

법탄성파탐사 수행
- 진동형/임펄스형 송신원의 신호특성별 탄성파 특성 비교분석
- 대입경 조립재료 성토노반에서의 S-반사법탐사 수행 및 분석
- 구조물의 규모에 따라 반사법 탐사의 적용유무 특성평가

○ 시추조사 및 다양한 현장탐사 수행
- 철도성토노반, 대형 댐 구조물, 소규모 성토노반 등에서 다양한 현장시험 수행
- 현장탐사의 신뢰성 검증을 위해 시추조사 및 시추공 탐사를 수행
- 대입경 조립재료 구조물에서 다운홀테스트, MASW, S-굴절법탐사, 상시미동탐사 등 다양한 현장탐사 결과 비교 분석

○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장동적물성 범위 및 기법 산출
- 입경사이즈별 탄성파 속도 범위 및 현장 동적물성 범위 제안
- 다양한 현장시험 결과로부터 신뢰성 있는 전단파 속도범위 제안 및 산출
- 조립재료 지반구조물별 동적물성의 데이터베이스 작성: 사력댐의 코아영역, 사석 영역의 대표 전단파속도

5) 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발

○ 댐 사력죤 수치해석에 의한 역산사례와 댐 실지진계측자료 수집 및 분석
- 미소지진 계측기록 활용을 위한 전처리 기법 제안

○ 국내 주요 댐 지진계측기록 확보 및 특성 분석

○ 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석에 의한 사력죤 동적물성 추정기법 제시
- 강성 변화에 따른 반복적 수치해석 결과와 계측 데이터에 의한 댐 고유주기 비교 분석을 통한 사력재료 전단탄성계수 산정

○ 3차원 수치모형을 이용한 지진응답해석에 대한 제안 기법의 확장성 평가

6) 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증

○ 지반구조물 실대규모 진동실험 사례조사 및 발파진동실험 준비를 위한 주요 설계인자 분석

○ 실대규모 발파진동 실험 수행을 위한 현장조사 및 발파진동실험 설계

○ 발파진동실험 계측 데이터 분석 & 댐 인접 발파에 의한 정상부 가속도 응답특성 분석 및 효과적인 댐 고유주기 산정기법 제시

○ 제안 기법을 활용한 댐 축조재료의 심도별 전단파속도 추정 & 반복적 수치해석 분석 기법의 적정성 검증

7) 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험 모델링 기법 및 활용기술 개발

○ 2차원 개별요소법 기반 대형 동적시험 수치모델링 기술 개발
○ 정적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소법 기반 수치모델링 기술 개발
○ 동적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소법 기반 수치모델링 기술 개발

Ⅳ.연구개발결과

1) 대형 공진주시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정기법 및 물성범위 제시

○ 대형 공진주시험기 개발 기초자료 조사·분석을 통하여 총 14개 기본 원칙을 바탕으로 하는 설계개념 최종 도출
○ 조립재료 동적변형특성 평가에 적합한 최적의 대형 공진주시험기 설계 및 제작, 3개 금속 검증시편을 이용한 교정 시험 수행
○ 신규 시험시스템의 적용성 평가 - 검증시편에 대한 비교검증 시험 수행 및 지반재료에 대한 적용성 시험적 검증 완료
○ 대입경 조립재료의 최대입경, 입도분포특성 등에 따른 동적변형특성(미소변형 최대전단탄성계수, 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비) 평가
○ 댐 축조용 사력재, 고속철도 강화노반, 공사용 가설재료 등 조립재료 사용 유형에 따른 동적변형특성 평가 및 물성범위 제시
○ 전체 연구결과를 종합하여, 대입경 조립재료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 모델 파라미터의 계수 범위 등을 제시

2) 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

○ 우레탄 시편과 검증된 다른 시험법(공진주시험, 비틂전단시험, 충격반향시험 등)을 활용한 장비 및 시험 결과 검증
○ 대형 실내시험을 이용한 조립재료의 동적물성 평가 시 미소변형 수준에서의 탄성계수 시험 결과에 미치는 입도조정방법의 영향 평가
○ 시험법에 따라 일관된 시험을 수행하여 재료입도를 포함한 시편에 대한 조건과 하중모드, 주파수 등의 시험 조건의 인자들이 저변형률 수준의 동적물성에 미치는 영향 평가를 통하여 조립재료의 합리적 대형삼축압축시험 결과의 적용과 향후 예측모델 고려 인자 선정에 활용할 수 있는 기초 자료 제공 정리
○ 주파수 및 진폭 제어 가능한 Piezoelectric actuator와 타격식 에어실린더를 활용한 최대탄성계수 시험장치와 계측 신호 분석 프로그램 구축
○ 중간주응력 및 평면변형률 조건의 제어가 가능한 대형반복삼축압축시험 장비 구축 및 시험 평가

○ 댐, 철도, 도로 등 국내 대형지반구조물의 주요한 성토재료인 대입경 조립지반재료들에 대해 여러 조건에서의 동적물성산정시험을 수행하여 탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수 등의 시험 결과를 확보, 유사한 재료에 대한 적용이 가능하도록 시험 결과를 정리 및 물성 모델의 대표적 재료 상수를 제시

3) 표면파 현장탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법 개발을 위한 기초연구
- 기존의 조립재료 지반구조물에서 현장시험수행
- 기존의 조립재료 지반구조물에서 다양한 발진원을 사용하여 현장시험 수행
- 탄성파 탐사에 사용되는 하드웨어의 특성 비교 평가

○ 댐, 성토노반 등 비반무한체에서의 표면파 전파특성 연구
- 유한요소해석에 의한 사면 구조물에서의 표면파 전파특성 평가

○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 제안
- 조립재료 지반에 적합한 최적 표면파기법, UBF 기법 제안.

○ 조립재료 지반에 적합한 최적 탐사기법을 위한 측정 하드웨어 시스템의 제안
- UBF 기법 위한 전용 소프트웨어 개발: Beamforming 1.0
- UBF 기법 위한 전용 하드웨어 제안: DS-USB-6289 시스템, MEMS 가속도계 유니트

○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 정립 및 검증
- 대입경 조립골재 지반(구조물)에서 시추공 탐사기법과 비교: 대형 사력댐, 사력댐 진입로, 암버럭 성토 호남고속철 노반, 평화의댐 사석 성토구간.
- 다양한 조립재료 지반구조물에서의 현장적용을 통한 실용성, 적용성 검증: 철도노반, 사력댐, 암버럭성토 비포장도로, 일반 자연지반 등
- 조립재료 지반구조물별 동적물성의 데이터베이스 작성: 사력댐의 코아영역, 사석 영역의 대표 전단파속도

○ 지반구조물별 최적 탄성파 탐사기법의 실무적용을 위한 매뉴얼 작성
- UBF 기법을 위한 현장시험 매뉴얼 작성
- 개발된 소프트웨어 Beamforming 1.0을 위한 사용자 매뉴얼 작성

4) 반사법탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

○ 현장동적물성 산정기법의 데이터베이스 구축
- 국내 97개 지역 암반층 및 토사층 탄성파 속도 D/B 구축
- 통계분석기법을 이용한 지층별, 재료별 탄성파 속도 범위 산출

○ 댐, 성토노반 등의 고분해능 반사법 탄성파 탐사수행

- 국내최초로 댐구조물에서 진동형 송신원인 바이브로사이즈를 이용한 반사법탄성파탐사 수행
- 진동형/임펄스형 송신원의 신호특성별 탄성파 특성 비교분석
- 대입경 조립재료 성토노반에서의 S-반사법탐사 수행 및 분석

○ 시추조사 및 다양한 현장탐사 수행
- 철도성토노반, 대형 댐 구조물, 소규모 성토노반 등에서 다양한 현장시험 수행
- 대입경 조립재료 구조물에서 다운홀테스트, MASW, S-굴절법탐사, 상시미동탐사 등 다양한 현장탐사 결과 비교 분석

○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장동적물성 범위 및 기법 산출
- 입경사이즈별 탄성파 속도 범위 및 현장 동적물성 범위 제안
- 다양한 현장시험 결과로부터 신뢰성 있는 전단파 속도범위 제안 및 산출
- 조립재료 지반구조물별 동적물성의 데이터베이스 작성: 사력댐의 코아영역, 사석 영역의 대표 전단파속도

5) 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발

○ 댐 사력죤 수치해석에 의한 역산사례와 댐 실지진계측자료 수집 및 분석
- 미소지진 계측기록 활용을 위한 전처리 기법 제안

○ 국내 주요 댐 지진계측기록 확보 및 특성 분석

○ 국내 2개 댐 지진계측기록을 이용, 응답스펙트럼비에 의한 고유진동수 산정기법 제안 및 실효성 검증

○ 국내 7개 댐 지진데이터 활용 제안 기법의 검증 수행 및 적정성 분석

○ 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석에 의한 사력죤 동적물성 추정기법 제시
- 강성 변화에 따른 반복적 수치해석 결과와 계측 데이터에 의한 댐 고유주기 비교 분석을 통한 사력재료 전단탄성계수 산정

○ 3차원 수치모형을 이용한 지진응답해석에 대한 제안 기법의 확장성 평가

6) 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증

○ 지반구조물 실대규모 진동실험 사례조사 및 발파진동실험 준비를 위한 주요 설계인자 분석

○ 실대규모 발파진동 실험 수행을 위한 현장조사 및 발파진동실험 설계

○ 발파진동실험 계측 데이터 분석 - 댐 인접 발파에 의한 정상부 가속도 응답특성 분석 및 효과적인 댐 고유주기 산정기법 제시

○ 제안 기법을 활용한 댐 축조재료의 심도별 전단파속도 추정 - 반복적 수치

해석 분석 기법의 적정성 검증

○ 발파진동이용 고유주기 산정과 반복적 2차원 수치해석 기법을 병행한 결과 제체 심도별 전단타속도를 신뢰성있는 범위에서 추정 가능 - 제안 기법의 검증 완료

7) 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험 모델링 기법 및 활용기술 개발

○ 개별요소생성, 미시물성치 산정, 2차원 및 3차원 입도분포 모델링, 응력상태 구현

○ 실내시험에 대한 대한 2차원 및 3차원 개별요소해석 알고리즘 개발, 시험사례 해석

○ 3차원 개별요소해석시의 스케일영향 분석

○ 개별요소법 기반 물성평가 기법 및 수치시험실 활용방안 도출

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

- 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 개발 연구결과는, 대입경 조립재료 및 지반에 대한 최대전단탄성계수(또는 전단파속도 분포), 변형률에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형 변화 곡선을 산정할 수 있어, 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물의 내진설계 및 내진안정성 평가, 건설 및 운영중 진동요인에 따른 동적하중에 대한 안정성 평가 및 설계, 내부 공동, 잠재적 결함 등과 같은 지반구조물의 건전성 평가에 직접적으로 활용될 수 있다.
- 최종 성과물의 종합적 공유 및 활용을 위하여 공개되어 설계 요령 및 지침으로 이용되고 있는 각종 설계기준 및 요령서(댐설계기준, 기존 댐의 내진성능평가 요령서 등)에 물성산정 방법 및 물성범위가 반영될 수 있도록 하며, 연구성과에 의한 구조물별 물성범위를 DB화 하여 연구성과 DB시스템에 등록하며, 실내외 산정기법은 지침서화 및 매뉴얼화하여 실무에 적극 활용될 수 있도록 한다.
- 파괴에 이르지는 않지만 구조물의 사용성에 큰 영향을 미칠 수 있는 미소한 변위에서의 조립지반재료의 거동을 평가하고 예측하여 대형 재난에 대비할 수 있는 설계 기술을 확보한다.
- 조립지반을 활용하는 지반구조물(철도, 도로, 댐 등)의 효율적인 유지관리 기

술 확보지반조건, 환경조건, 하중조건 등 각종 영향 요소에 대한 국내 조립지반 재료의 거동을 정확히 파악하여 대상 구조물의 조건에 맞는 하부구조의 합리적, 안정적, 경제적 설계, 시공이 가능하다.

- 기존에 외국사례나 경험적 자료에 의존하여 신뢰수준이 저하되어 과다하지만 안정성을 확보하지 못하는 설계 수준에서 벗어나 국내 조립지반 재료에 대한 합리적 설계 물성치를 얻을 수 있는 기술력을 확보하고 지속적인 연구를 통해 유용한 데이터베이스를 구축한다.
  - 본 연구에서 개발한 UBF (Unbiased-Short-Array Beamforming) 기법은 신규 구조물의 설계와 기존 구조물의 안정성 평가에 효과적으로 활용될 수 있다. 즉 지진하중과 교통하중, 시공시 야기되는 충격하중 등과 같은 동적하중에 대한 지반구조물의 거동을 해석하는데 필수적인 설계상수를 측정할 수 있기 때문에, UBF 기법의 활용은 설계의 신뢰성과 안정성 평가의 정확도를 현저히 향상시킬 수 있다. 따라서 신규 구조물의 설계에 필요한 설계상수를 유사구조물에 대한 측정장치로부터 준용하는 경우, 또한 기존 구조물의 정밀안전 진단 과정에서 현재 상태의 강성평가를 위하여 활용하는 경우 등에 매우 긴요하게 적용할 수 있다. 본 연구에서 개발한 UBF 기법은 전용 하드웨어와 전용 소프트웨어의 개발도 같이 성과물로 도출되었는데, 이들 하드웨어-소프트웨어는 하나의 시스템 패키지로 실용화-제품화가 가능하며, 충분히 상용화가 가능하다고 판단된다.
  - 본 연구에서는 대입경 조립재료를 대상으로 동적물성 산정을 위한 다양한 조건의 대형 실내시험을 실시할 것이며, 이러한 실증 시험결과에 대한 DEM 해석기술 개발을 통해, 단순 시험결과만에 의존했던 기존의 물성 산정방식이 아닌, DEM 기반의 수치모델링 기술을 조립재료 물성 산정에 활용할 수 있는 수치 시험실 활용기술로의 기술진보를 도모하고자 한다. 이러한 기술은 향후 대입경 조립재료에 대한 물성 취득의 신뢰성을 높이는 원천기술로 큰 활용성을 갖게 될 것이며, 일반 조립재료의 물성산정시 시험회수와 경우의 수를 최소화 할 수 있게 하는 경제적 실용화 기술로 발전할 수 있을 것이다.
- 일관된 물성치로 설계, 시공, 유지 관리에 대한 기준을 확립함으로써 합리적

시공관리 기준 및 재료 품질 기준 정립에 활용한다.

- 대입경 조립재료의 효율적인 동적물성 산정을 위한 기 조사 자료 및 다양한 분석기법을 이용하여 신뢰성 있는 동적 물성 결과 도출
- 시험방법별 차이 및 비교분석을 통해 합리적인 대입경 조립재료의 동적물성 산정 기법을 제시하고, 지침마련
- 연구성과의 활용도를 높이기 위해서 연구성과는, 전문학회지 기술기사에 게재 및 기고하고, 매해 국토해양부 주최로 개최되는 “국토해양기술대전”연구성과발표회 및 성과전시관/체험관에 출품한다. 구축된 장비는 국가과학기술지원연구원 홈페이지에 대형첨단기술장비 목록에 등록 공개하여 공동활용이 가능하도록 한다. 아울러, 연구기관의 경우, 시험기 이용비용에 할인율을 두거나, 국가과학기술지원연구원내 첨단실험기 활용지원사업중, 이용기관과 협약을 체결하여 시험기 이용비용을 연구원에서 지원 받도록 하고 연구성과는 상호 공유할 수 있도록 추진한다.

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 1
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 3
1. 연구개발의 목적 3
2. 연구개발의 필요성 3
제 2 절 연구개발의 범위 5
1. 연구개발의 최종 목표 5
2. 연구개발의 범위 및 내용 5
제 3 절 연구수행 추진전략 및 방법 9
1. 연구개발과제의 차별화 방안 9
제 2 장 국내외 기술개발 현황 12
제 1 절 국내외 관련기술 및 산업동향 14
1. 국내 기술 및 산업동향 14
제 2 절 대형공진주시험을 통한 대입경 조립재료 동적물성 산정 15
1. 국내 기술개발 수준 15
2. 국외 기술 및 산업동향 16
제 3 절 대형진동삼축압축시험을 통한 대입경 조립재료 동적물성 산정 18
1. 지반재료의 미소변형 수준의 물성 연구 18
2. 지반재료의 동적물성 18
제 4 절 대입경 조립재료 지반의 동적물성 산정을 위한 표면파 기법 20
1. 현재 활용되고 있는 비파괴 표면파 기법의 개요 20
2. 위상속도 분산곡선의 결정 기법 21
가. SASW 기법 21

나. MASW 기법 23
다. HWAW 기법 23
라. ReMi 기법 25
마. CSW 기법 25
3. 전단파속도 주상도 결정 기법 간 이론적 배경의 비교 28
4. 표면파 탐사를 이용한 댐 구조물의 전단파속도 평가에 관한 연구 30
가. 개요 30
나. 사용된 표면파 기법과 시험 및 해석방법 33
다. HWAW 탐사로 유추한 전단강성 모델 36
5. 방향성 신호 감지를 위한 빔형성 (Beamforming)기법 38
가. 개요 38
나. Zywicki 와 Rix (2005)의 빔형성 기법 39
다. Tran and Hiltunen (2005)의 빔형성 기법에 대한 평가 42

제 5 절 반사법탄성파탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정 45

제 6 절 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발 46
제 7 절 실 대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증 47

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 50
제 1 절 대형 공진주 시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성산정기법 및 물성범위 제시 52
1. 대형 공진주시험기 개발 기초자료 조사·분석 및 설계개념 도출 52
가. 공진주시험 및 시험기 관련 기준 조사 52
나. 대형 공진주시험기의 구축 및 활용 현황 53
다. 대형 공진주시험시스템의 사양 결정 및 기본 설계 58
2. 대형 공진주시험시스템의 설계 및 제작 62
가. 대형 공진주시험기 구축 기본 사항 62
나. 제어 및 계측 시스템 64

다. 대형공진주시스템 제어용 시험 알고리즘 개발 66
3. 대형공진주시스템의 검증 69
가. 금속 시편을 이용한 시험시스템의 교정 69
나. 폴리우레탄 시편을 이용한 시험시스템의 검증 71
다. 조립질 지반재료를 이용한 대형-일반 공진주시험 비교 검증 75
라. 대형 공진주시험에 의한 조립질 지반재료의 동적물성 평가 79
4. 조립재료의 입도분포특성에 따른 동적변형특성 평가 86
가. 시험대상 시료 87
나. 대입경 지반 조립재료에 대한 공진주시험 91
5. 조립재료 유형에 따른 동적변형특성 평가 100
가. 시험조건 100
나. 대형 공진주시험에 의한 재료별 동적 변형특성 103
다. 타 시험기법과의 기교 검증 110
6. 요약 및 결론 113

제 2 절 대형반복삼축압축시험을 통한 대입경 조립재료 동적물성 산정 115
1. 서론 115
2. 대형삼축압축시험장비 시스템 검증 118
가. KRRI 대형삼축압축시험장비 개요 119
나. KRRI 대형삼축압축시험장비 동적물성 산정 시스템 검증 122
다. 시험 재료 및 시편 조건 130
3. 동적물성 산정을 위한 반복삼축압축시험 조건별 검토 131
가. 시험 재료 및 시편 조건 131
나. 하중 패턴별 시험법 144
다. 입도조정법 평가 147
라. 기타 시편 및 시험 조건 영향 평가 159
마. 조립재료의 최대탄성계수 평가 165
바. 중간주응력 영향 평가 180
4. 대입경 조립재료의 구조물별 동적물성 183
가. 탄성계수 183
나. 감쇠비 201
다. 회복탄성계수 205

5. 대입경 조립재료의 동적물성 예측 ····· 213
가. 탄성계수 ····· 213
나. 감쇠비 ····· 228
다. 회복탄성계수 ····· 232

제 3 절 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법의 제안 ····· 239
1. 개요 ····· 239
2. 사면경계가 있는 지표면에서의 표면파 전파해석을 위한 유한요소 해석 ····· 239
가. 댐구조물의 유한요소모델 ····· 239
나. 표면파 속도 측면에서 3차원 형상 효과 ····· 241
3. 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법의 개발 ····· 244
가. 조립재료 지반에 적합한 최적 발진원 제안 ····· 244
나. 조립재료 지반구조물을 위한 빔형성 기법의 제안 ····· 245
다. 대입경 골재로 조성된 사력댐에서의 빔형성 기법의 적용 ····· 258
4. 조립재료지반에 적합한 최적탐사기법을 위한 측정 하드웨어시스템의 제안 271
가. 제안된 최적 탐사기법을 위한 전용 소프트웨어의 개발 ····· 271
나. 제안된 최적 탐사기법을 위한 전용 하드웨어의 제안 ····· 273
5. 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법의 정립 및 검증 ····· 277
가. 시험시공 지반 또는 모형지반에서 시추공 탐사기법과 비교 ····· 277
나. 다양한 조립재료 지반구조물에서의 현장 적용을 통한 실용성, 적용성 검증 ····· 284
다. 조립재료 지반구조물별 동적물성의 데이터베이스 작성 ····· 286
라. 지반구조물별 최적 탄성파 탐사기법의 실무적용을 위한 매뉴얼 작성 ····· 287

제 4 절 물리탐사를 이용한 대입경 조립재료의 동적물성 산정 ····· 289
1. 현장물성 DB화 ····· 289
가. 개요 ····· 289
나. 지층별 탄성파 속도분석 ····· 290
다. 대입경 조립재료의 탄성파 속도 범위 추정 ····· 308
라. 결론 ····· 310

2. 현장 동적물성 기법 비교 검토를 위한 고분해능 반사법 탄성파탐사

자료처리 312
가. 탐사측선 및 위치도 312
나. 측정시스템 312
다. 고분해능 반사법 탄성파탐사 결과 및 고찰 313

3. 현장 자료 검증을 위한 현장 시추조사 수행 324
가. 시추조사 324
나. 표준관입시험 325
다. 시추조사 결과 326
라. 지층분석특성 요약 328
마. 표준관입시험 결과 328

4. S파 굴절법탐사 330
5. MASW 탐사 331
6. 상시미진동탐사 332
7. 동적물성 산정을 위한 물리탐사 방법의 현장 적용 333
가. Site A(성덕댐 건설현장) 334
나. Site B(호남고속철도 건설현장) 356
다. Site C(평화의댐 현장) 364
8. 대입경 조립재료의 크기에 따른 전단파속도 분포 384
가. 성덕구댐 전단파 속도 분포 384
나. 3개 지역 전단파 속도 분포 385
9. 3차원 측선을 활용한 공간 초동 주시 산출 기법 388
가. 3차원 초동 주시 산출 기법 제안 389
나. 3차원 초동 주시 산출 기법 구현 390

제 5 절 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발 392
1. 댐 사력죤 수치해석에 의한 역산사례 및 분석 392
가. 역산사례 392
나. 사례분석 394
2. 댐 실지진계측자료 수집 및 분석 396
가. 댐 실지진계측자료 개요 396
나. 계측지진기록 신호처리 및 분석 402

다. 물성역산을 위한 계측지진기록 확정 412

3. 국내 2개댐 지진계측기록 확보 및 분석 412
가. 지진계측기록 Ⅰ (H댐) 412
나. 지진계측기록 Ⅱ (S댐) 413
4. 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석에 의한 사력죤 동적물성 산정기법 제시 414
가. 실지진 계측기록을 활용한 사력댐의 고유주기 산정방법 제안 414
나. 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석에 의한 사력죤 동적물성 산정기법 제안 427
5. 3차원지진응답해석에 대한 확장성 평가 431
가. 3차원 지진응답해석에 의한 사력존 전단파속도 역산 431
나. 3차원 해석에 의한 물성 평가 결과의 검증 435
다. 분석결과 및 제언 436

제 6 절 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증 437
1. 지반구조물 실대규모 진동실험 사례조사 437
가. 미소지진 및 미소진동 437
나. 여진 438
다. 발파 438
2. 발파진동의 특성 443
가. 지반진동 성분 444
나. 지반진동의 크기 445
다. 지반진동속도 예측 446
라. 주파수 대역 447
마. 발파진동이 구조물에 미치는 영향과 각국의 진동허용기준 448
3. 실대규모 발파진동 실험 현장조사 452
가. 대상 구조물 개요 452
나. 발파예정지 위치 452
다. 발파예정지 주변현황 453

라. 발파 예정지 현장조사 결과 454
4. 발파설계 및 계측계획 455
가. 진동 및 소음 허용수준 설정 455
나. 적용 발파진동추정식의 선정 456
다. 선정 발파진동추정식에 의한 발파규모 선정 458
라. 발파설계 459
5. 발파진동실험 결과 및 분석 467
가. 발파진동실험 계측 결과 467
나. 계측기록을 이용한 댐 고유진동수 산정 469
6. 댐 축조재료의 심도별 전단파속도 역산 471
가. 계곡효과(canyon effect)와 댐 고유진동수 471
나. 댐 2차원 지진응답해석 개요 472
다. 댐 2차원 지진응답해석 결과 및 성토존 전단파속도 역산 473
7. 결론 479

제 7 절 개별요소법 기반의 수치시험 모델링 기법 개발 481
1. 개별요소법 (distinct element method) 481
가. 개별요소법의 활용 481
나. 2차원 및 3차원 PFC (Particle Flow Code) 482
다. 개별요소 해석 방법 484
2. 개별요소법에 의한 실내시험 수치모델링 486
가. 개별요소 생성 486
나. 개별입자간 접촉모델 (contact models) 489
다. 미시 물성치(micro parameter) 495
3. 2차원 개별요소 수치모델링 기법 498
가. 연구내용 및 방법 498
나. 2차원 개별요소에 대한 입도분포 모델링 498
다. 응력조건 구현 504
4. 3차원 개별요소 수치모델링 기법 507
가. 연구내용 및 방법 507
나. 3차원 개별요소에 대한 입도분포 모델링 507
다. 초기조건 및 응력조건 구현 511

5. 2차원 개별요소 수치모델링 적용 511
가. 소형 삼축압축시험 511
나. 대형 삼축압축시험 516
6. 3차원 개별요소 수치모델링 적용 525
가. 소형 정적 삼축압축시험 525
나. 대형 정적 삼축압축시험-1 528
다. 대형 정적 삼축압축시험-2 539
라. 대형 동적 삼축압축시험-1 545
마. 대형 동적 삼축압축시험-2 556
7. 3차원 개별요소 수치모델의 스케일 영향 561
가. 해석모델 및 개별요소에 대한 스케일 적용 561
나. 해석모델 스케일 변화 561
다. 개별요소 스케일 변화 565
라. 해석모델 및 개별요소 동시 스케일 변화 567
8. 개별요소 기법의 적용 및 수치시험실 활용 방안 570
가. 개별요소 수치모델링 과정 및 방법 570
나. 수치시험실 활용 방안 597

제 8 절 결 론 599

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 601

제 1 절 연구목표의 달성도 603
1. 연구개발 수행 진도율(당해연도 연구기간 12개월 환산) 603
2. 연구개발 목표의 달성도 604
제 2 절 관련분야에의 기여도 606
1. 대형공진주시험시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시 606
2. 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성범위 제시 607
3. 표면파 현장탐사를 통한 대입경 조립지반 동적물성 산정 609
4. 반사법탄성파탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정 611

5. 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발 611
6. 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증 612
7. 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험모델링 기법 개발 613

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 615
제 1 절 연구개발 결과의 활용계획 617
1. 대형공진주시험을 통한 대입경 조립재료 동적물성 산정 617
2. 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정 618
3. 표면파 현장탐사를 통한 대입경 조립지반 동적물성 산정 619
4. 반사법탄성파탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정 621
가. 현장동적물성 DB화 621
나. 고분해능 반사법 탄성파 탐사 수행 622
다.시추조사 및 다양한 현장탐사 622
5. 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발 622
6. 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증 623
7. 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험모델링 기법 개발 624
8. 연구 결과 활용 계획 625

제 6 장 참고문헌 627

부 록 644

부록 A. UBF 기법의 현장시험 매뉴얼 645
부록 B. 소프트웨어 Beamforming 1.0의 사용설명서 658
부록 C. MEMS 가속도계의 Calibration Chart 664

제 1 장 연구개발 과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

입경이 큰 조립재료로 축조된 대형 지반구조물의 지진응답해석 및 진동영향 평가를 위해 필요한 동적물성을 대형실내시험, 현장시험, 지진동 및 진동 계측기록을 이용한 역산법으로부터 산정하고, 해체 예정에 있는 실구조물에 대한 실대형 발파진동실험을 통한 검증과정을 거쳐 대입경(大粒徑) 조립재료의 동적물성 산정기법을 개발한다. 개발된 산정기법은 각 구조물별로 동적물성 범위를 제시하는데 이용될 것이며, 이로부터 지반구조물의 내진설계, 안정성평가 등을 신뢰성 있고 효과적으로 수행할 수 있는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

2. 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 중요성

최근 지반구조물이 더욱 더 다양화되어 가는 추세인 점을 고려할 때, 대입경(大粒徑) 조립재료는 대형 필댐, 저수지 제방, 항만 방조제 및 방파제, 철도 노반 및 암성토, 교대 및 지하철 박스 뒷채움 등 다양한 구조물에 지속적으로 활용도가 증가될 것으로 예상된다. 이러한 대입경 조립재료로 축조된 대형 구조물은 경제적·사회적으로 국가 중요 기반 시설에 해당되는 경우가 대부분이다.

이러한 활용도의 증가에 비해 그 동적물성에 대한 평가는 용이하지 않은 상황이다. 대입경 조립재료의 경우, 대부분 입경이 매우 커서 시료에 대한 직접적인 실내시험이 시험기 크기로 한계로 인해 수행이 어렵고, 시추공을 이용한 현장시험은 대입경 특성에 의해 시추공 형성이 어려워 시험이 거의 불가능하고, 비파괴 표면파 탐사의 경우에도 대입경 조립재료의 불연속성으로 인한 측정 신호의 품질에 대한 신뢰성 문제와 반무한 평면 가정에서 출발된 표면파 기법의 한계로 인해 현장시험에 의한 물성 취득도 매우 어렵기 때문이다.

그러나 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물의 내진설계 및 내진안정성 평가, 건설 및 운영 중 진동요인에 따른 동적하중에 대한 안정성 평가 및 설계, 내부공동, 잠재적 결함 등과 같은 지반구조물의 건전성 평가 등을 위해서는 신뢰성 있는 동적물성 산정을 위한 실내 및 현장시험 기법의 개발이 절대적으로 요구되며, 개발

된 기법의 검증 및 구조물별 물성범위 제시 또한 연구개발의 중요성을 부각시킨다.

본 연구는 상기 필요성외에도 국가 방재대책에도 부응하며 대국민 안전인식 제고를 위해서 필요하고, 건설교통기술의 국가 경쟁력 확보차원에서도 지반구조물외의 다양한 시설물에도 적용될 수 있어 그 파급효과가 매우 크다.

나. 기술적 측면

국제적 경쟁력을 갖춘 대형공진주시험시스템 개발 기술과 함께 대입경 조립재료 동적물성 산정 대형공진주시험 기술을 개발하고, 기 확보된 대형삼축압축시험 기술과 상호 보완 및 검증을 통한 대입경 조립재료 동적물성 산정 실내시험 기술을 개발한다. 기존 표면파탐사의 기본 가정조건을 극복할 수 있는, 부정형 지반구조물에 적합한 맞춤형 현장 표면파탐사기술을 개발한다. 개발된 실내시험 및 현장시험 기술에 지진계측기록을 이용 수치해석에 의한 물성역산기술을 더하고 댐 축조 대입경 조립재료의 경우에는 실대규모 발파진동 시험을 통한 물성산정 기술 검증을 통해 대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기술의 완성이 필요하다.

다. 사회·문화적 측면

최근 4대강 사업, 경인운하 등 대형 국책사업 등 국가 현안사업이 증가하고 향후 더욱 증가될 것으로 예상되는 시점에서, 지반구조물의 대형화에 따른 대입경 조립재료의 활용도는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 또한, 최근 기상이변이나 아이티와 칠레에서 발생한 강진으로 인한 피해에 국민들의 불안이 가중되고 있는 가운데, 기반시설물의 안정성 확보에 대한 전국민적 지지가 있는 시점에서 관련 시설물의 지진에 대한 안정성 평가를 위한 구성재료의 동적물성 산정기술 개발은 매우 필요하다 하겠다.

제 2 절 연구개발의 범위

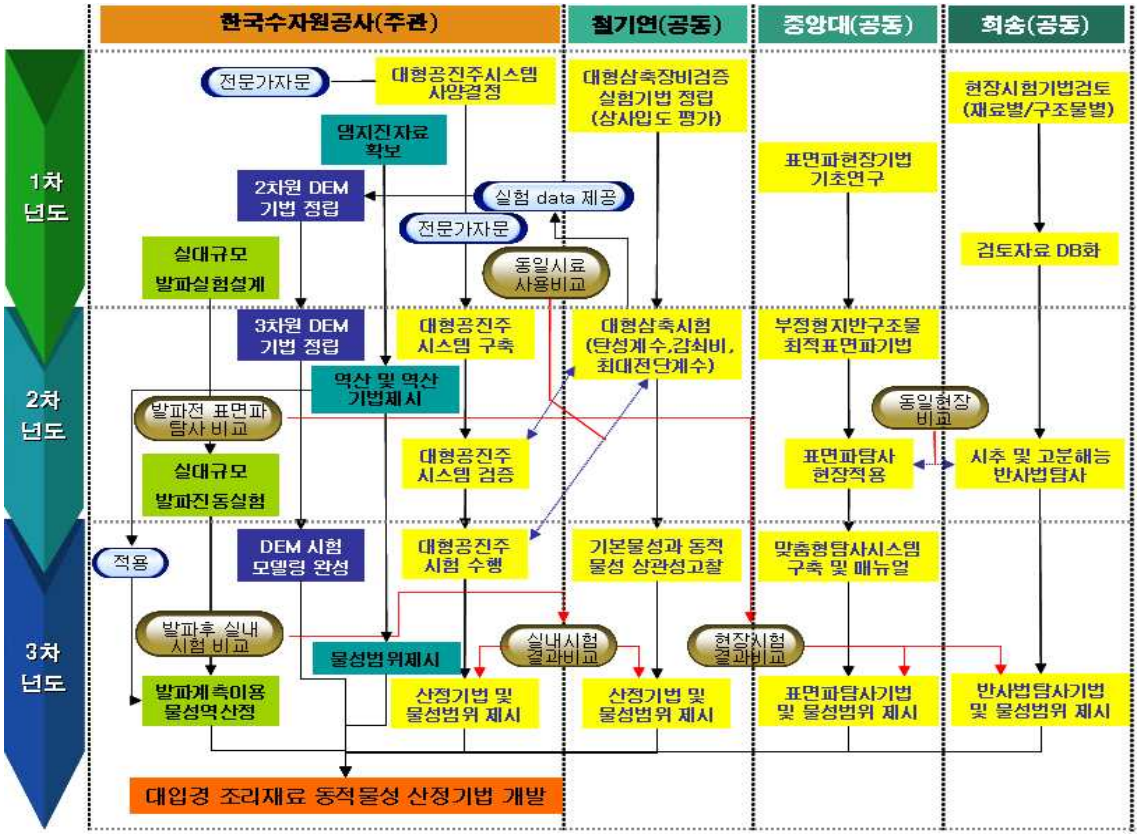
1. 연구개발의 최종 목표

대형실내시험, 현장탄성파시험, 진동계측결과를 이용한 수치해석에 의한 역산법으로부터, 대입경 조립재료의 동적물성을 산정하는 기법을 개발・제시하고, 산정된 기법으로부터 각 구조물을 이루는 대입경 조립재료의 동적물성 범위를 제시함으로써, 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물의 동적 응답 특성을 면밀히 파악하는데 적극 활용될 수 있도록 한다.

2. 연구개발의 범위 및 내용

연구목표의 범위는 대입경 조립재료의 동적물성을 산정하는 다양한 기법을 개발하고 적용하는 데 더 큰 비중을 두며, 개발 기법을 통해 각 구조물별 조립재료 동적물성 범위는 향후 더 많은 재료에 대한 물성산정 결과를 보충함으로써 연구결과가 보다 완성될 수 있을 것으로 판단된다. 각 구조물별 물성범위는 국내 실제 시공사례로부터 구조물별 재료기준의 범위를 분석하여 구조물별 대표적 입도특성치를 선정하고 그로부터 물성값을 산정한다. 본 연구에서는 대입경 조립재료라 함은 재료내 최대입경이 2.5cm 이상의 재료를 포함하는 조립재료로 정의한다.

본 연구를 위하여 주관연구기관인 한국수자원공사는 「대형 공진주시험시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시」,「실지진계측 자료활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발」,「실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증」의 세부 연구목표를 직접 수행하며, 「개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험 모델링 기법 개발」은 인덕대학에 위탁 의뢰하여 연구내용을 수행한다. 본 연구의 상세 추진체계는 [그림 1.2.1]과 같다



[그림 1.2.1] 본 연구개발과제의 추진 체계

가. 연구개발의 세부 최종목표

(1) 대형 공진주시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

실내 토질 시험시 사용하는 공시체의 크기는 일반적으로 3.5cm, 5.0cm, 7.0cm 및 10cm 이다. KS, JIS, ASTM 등 세계 각국의 시험규정에도 직경 10cm, 높이는 직경의 1.5~2.5배인 공시체를 사용하도록 규정하고 있으며, 대부분 점토나 모래질 흙에 대한 시험방법으로 분류하고 있다. 본 연구에서는 '대형'이라 함은 표준형(최대 직경 10cm) 보다 큰 직경이 20cm 이상인 공시체를 사용하는 경우를 말한다.

대입경 조립재료의 강도-변형율-감쇠비 특성을 밝힐 수 있는 대형 공진주시험시스템을 개발한다. 시스템의 개발이란 대입경 조립재료 특성 및 최적 운영 효율을 반영한 공시체 크기 및 시험기 규모 결정을 위한 사전 문헌연구, 지구, 셀, 가진장치 등의 하드웨어, 제어 및 분석을 위한 소프트웨어 개발을 모두 포함한다. 공시체 직경은 최소 20cm 이상의 시스템 구축을 목표로 한다.

대형공진주시스템으로부터 실험으로 산정 불가했던, 대입경 조립재료의 대형구조

물별 입경특성을 반영한 최대전단탄성계수, 최소감쇠비, 변형율에 따른 전단탄성계수/감쇠비의 변화곡선을 직접적으로 산정한다.

대입경 조립재료에 대한 공진주시험을 수행하여 대입경 조립재료의 동적물성을 산정할 수 있는 실험기법 및 실험기법에 의해 각 구조물별 대입경 조립재료의 동적물성 범위를 제시한다. 연구목표는 장비검증, 시료 최대입경의 영향 평가, 물성산정, 시험시 공시체 다짐관리기법, 각 구조물별(입도특성이 다름) 동적물성 범위 제시를 그 범위로 한다. 제시된 물성범위는 종합적으로 진동삼축압축시험, 현장시험, 댐의 경우 역산법에 의한 결과와 상호 비교 검증된다.

(2) 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

시험적으로 평가가 어려웠던 대입경 조립재료의 미소변형 수준의 탄성계수와 감쇠비 등의 동적물성을 대형삼축압축시험을 통해 합리적으로 산정하기 위한 시험방법과 물성 범위를 제시하는 것을 최종목표로 하였다.

즉 대입경 조립재료에 대한 반복삼축압축시험을 수행하여 대입경 조립재료의 동적물성을 산정하는 시험방법 중, 하중 패턴, 입도조정방법(상사입도법, 자갈입도보정법) 등이 시험 결과에 미치는 영향을 시험적으로 검토하여 시험 결과의 합리적 적용을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다. 또한 실내 시험에서 시편의 최대탄성계수를 산정할 수 있는 방법을 제시하고 구속응력제어방법(중간주응력/평면변형률)에 따른 영향도 검토한다.

이상의 연구 결과를 바탕으로 댐, 철도, 도로 등 중요 인프라의 지반구조물 재료에 대해 반복삼축압축시험으로 동적물성(탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수)을 산정하여, 그 범위를 제시하고, 최종적으로 본 연구의 시험대상에 대해 기본 물성을 고려하여 동적물성의 추정이 가능하도록 예측기법을 제시하고자 한다.

(3) 표면파 현장탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

최종목표는 대입경 조립재료로 축조된 지반구조물의 동적 물성을 산정하는 최적의 현장시험 기법을 개발하고 물성범위를 제시하는 것이다. 현장시험기법 개발은 탄성파를 이용하는 비파괴 지반조사 기법 자체의 개발과, 이를 구현하기 위해 요구되는 하드웨어와 소프트웨어 개발을 포함한다. 표면파탐사로부터 대입경 조립지반의 미소변형률하의 최대전단탄성계수를 산정한다.

(4) 반사법탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

최종목표는 대입경 조립재료 동적물성산정을 위한 분석 기법을 비교하고, 신뢰성 있는 자료분석을 위한 통계학적 자료처리 기법으로 재료별 동적물성 범위를 산정하고, 3차원 지진응답해석을 위한 합리적인 동적물성을 제공하는 것이다. 기술개발을 위하여 대입경 조립재료 시험분석 및 검증을 위한 시추조사를 수행하고, 재료별 시추조사 위치 선정을 위한 반사법 탄성파 탐사를 수행하며, 신뢰성 있는 현장 동적물성 측정결과의 통계학적 처리기법을 적용하여 합리적인 동적물성 범위를 산정한다. 반사법탐사로부터 대입경 조립지반의 미소변형률하의 최대전단탄성계수와 종파와 횡파의 상관식에 의한 동적 포아송비를 산정한다.

(5) 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발

국내 운영 중인 댐에서 계측된 미소지진계측기록을 활용하고 반복적 수치해석 수행을 통해 계측된 구조물 응답에 근사하는 사력죤의 동적물성을 산정하는 기법을 개발한다. 이로부터 대입경 조립재료 중 필댐 축조재료로 이용되는 사력재료의 미소변형율하의 최대전단탄성계수를 역산 제시한다. 연구대상 댐은 실효성 있는 댐부지 지진계측 자료를 확보한 2개의 댐(횡성다목적댐과 소양강다목적댐)을 우선 대상으로 한다. 수치해석은 3차원 계곡효과를 인위적으로 감안한 2차원 지진응답해석을 그 범위로 한다.

(6) 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증

2차년도 연구목표는 실대규모 발파진동시험을 수행하는 것이다.

본 연구의 공동연구기관과 연계하여 발파구조물의 발파전 현장탐사를 수행하여, 탐사기법별(표면파탐사, 반사법탐사, 시추공탐사) 결과를 비교할 예정이다. 형성된 시추공이나 구조물 정상에는 계측기를 설치하여 발파시 그 응답을 계측할 예정이다. 이러한 일련의 구조물 응답을 위해 수해 수행된 인위적 발파진동실험 기법을 정립한다.

(7) 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험 모델링 기법 개발

대입경 조립재료에 대한 동적물성 산정과 검증시 적용될 수 있는, 개별요소법 기반의 수치시험 모델링 기술 완성, 다양한 시험조건 및 재료조건에 대한 응용 수치모델링 기법 개발을 그 범위로 한다.

제 3 절 연구수행 추진전략 및 방법

1. 연구개발과제의 차별화 방안

가. 전체변형률 범위에서 풍화토 지반 구조물 변형거동평가를 위한 실험·해석 통합시스템 연구

연구대상이 일반적인 성토재료인 토사로서 풍화토를 대상으로 하였다. 따라서 실험장비와 대상이 완전히 다른 연구 과제임, 다만 미소변형률 영역에서부터 대변형률 영역까지의 비선형적 동적물성을 목적으로 한 부분에서는 실내실험과 현장실험 등에 대해 유용하게 결과를 활용할 수 있을 것으로 판단됨

나. 구조물 단면절감을 위한 조립질 토목재료 변형 특성 연구

연구대상은 쇄석, 자갈 등의 조립재료로 같으나 직접전단시험방식으로 연구를 수행하여 본 연구에서 제한하고자 하는 지반의 구속조건을 보다 현실적으로 재현하는 삼축압축실험과는 근본적으로 실험 방법이 다른 연구임. 또한 기존 연구과제는 정적인 전단강도에 국한된 연구였으나 본 제안 과제는 삼축조건 하에서 미소변형 수준에서의 동적인 물성을 획득하기 위한 연구가 주된 목표로서 중복 연구의 내용이 없는 것으로 판단됨

다. 응력이력과 cementation효과를 고려한 지반특성치 최적화 평가방법 연구 / 고효율 하이브리드 대형 기초공법 개발

기존의 개별요소법에 대한 연구는 일반 건설재료의 cementation효과 모델링 및 정적상태에서의 대형직접전단시험에 관한 모델링을 주 내용으로 하고 있는 반면, 본 연구에서는 대입경 조립재료에 대한 대형 동적시험 모델링 및 입도등 다양한 재료상태에서의 강도특성변화를 연구하고자 하기에, 금회 연구내용은 기존 연구내용과 차별화 된다고 할 수 있다.

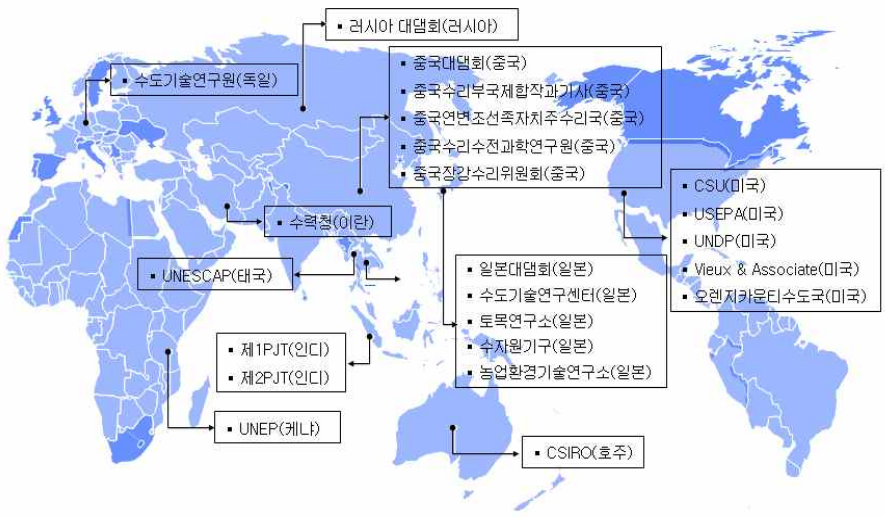
라. 타 산업 및 국내외 연계·협력 가능성

대형삼축압축시험장비, 대형공진주시험장비와 첨단계측기술로 다양한 조건 하에서

지반의 거동 특성에 대한 실험을 바탕으로 이론적 연구도 활발히 이루어지고 있어 입경이 큰 조립재료로 이루어진 지반구조물의 거동을 매우 신뢰할 수 있을 정도로 예측/분석할 수 있게 될 것이다. 입경이 큰 조립재료에 대한 지반공학적 관심사는 조립재료와 그 재료로 이루어진 지반의 거동을 정밀하게 예측할 수 있는 응력/변형 거동에 대한 이론 구축, 현장시험을 통한 지반의 역학적 특성 조사 및 분석, 비교란 시료의 채취 및 시험, 실내실험장비 및 기술 개발 등이 있다. 이들은 유기적으로 서로 밀접하게 관련이 있다. 그러므로 보다 합리적인 실내실험 장비와 실험법 그리고 그 적용에 대한 연구는 조립재료에 대한 현장실험, 이론적/해석적 연구 등과 유기적으로 발전해나갈 수 있는 기틀을 마련할 수 있을 것이다. 결과적으로 입경이 큰 조립재료를 이용한 지반구조물(철도, 도로, 댐 등)을 설계할 때 대형삼축압축시험 및 대형공진주시험을 이용해서 얻어진 물성을 활용하여 거동을 예측하고, 정확한 해석이 이루어져야만 안전하고 경제적인 설계와 시공이 가능해질 것이다.

대입경 조립재료로 축조된 지반구조물의 동적 물성을 측정하기 위한 전용 현장시험기법은 댐, 도로, 철도, 항만 등 다방면의 토목공학 분야에 적용될 수 있는 기법이며, 설계상수 평가, 시공 품질 평가, 기존 구조물의 안정성 평가 등 계획, 설계, 시공 등 전 영역에 걸쳐서 도입될 수 있는 기법이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 기법의 완성은 하드웨어, 소프트웨어를 통합하는 시스템의 성과물로 제시되는데, 이는 국내외적으로 경제성, 실용성 등을 겸비한 전략 상품으로 도출되어질 수 있다.

주관연구기관인 한국수자원공사는 국제대댐회(ICOLD)와 연계되어 댐기술과 연계한 세계의 많은 기관과 MOU 등을 체결하여 주기적인 정보 및 기술교류를 하고 있어, 본 연구와도 관련하여 많은 국제적 기술협력을 얻어낼 수 있을 것으로 확신한다.



[그림 1.3.1] 한국수자원공사 MOU 체결 현황(R&D 네트워크)

[표 1.3.1] 한국수자원공사 국제 연구협력 대상기관

대상기관	체결일	형식	내 용	유효기간
러시아대댐회	'04.05.18	MOU	기술협력 및 수자원사업 공동추진	3년 (2년 합의연장)
중국대댐회	'04.05.18	MOU	한중일 댐관련 기술교류 및 상호협력	3년 (2년 합의연장)
일본대댐회	'04.05.18	MOU	한중일 댐관련 기술교류 및 상호협력	3년 (2년 합의연장)
중국수리부 국제합작과기사	'04.05.20	의향서	수자원분야 경제, 기술협력	5년 (합의연장)
이란 수력청	'04.05.22	MOU	기술협력 및 수자원사업 공동추진	3년 (2년 합의연장)
CSU	'04.07.05	MOA	수자원사업 공동연구추진	3년 합의연장
미국 공정최적화연구소 (USEPA)	'04.09	MOU	국제 공동연구 및 프로젝트 공동참여	5년 합의연장
수도기술 연구센터(일본)	'04.10.01	MOU	수도기술에 관한 협력	1년 합의연장
호주 CSIRO	'04.10.13	MOU	기술협력 및 수자원사업 공동추진	5년 합의연장
중국연변조선족자치주 수리국	'04.11.24	MOU	수자원 분야 협력	3년
벤처기업 (Vieux & Associate)	'05.03.15	MOA	수자원사업 공동연구추진	3년 합의연장

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내외 관련기술 및 산업동향

1. 국내 기술 및 산업동향

가. 국내시장 현황 및 예측

대입경 조립재료가 사용되는 분야는 댐, 제방, 도로, 철도, 공항 활주로, 항만 방파제, 해안제방 및 지하철 공사 등과 같은 사회기반시설 공사이다.

2009년 6월 초에 발표된 정부의 4대강 살리기 프로젝트(2009-2012)의 경우 총사업비가 약 22조원으로서 [표 2.1.1] 같이 하천제방의 보강, 신규댐의 건설, 농업용댐의 증고 등 대입경 조립재료를 이용하는 공사가 전체 사업의 많은 부분을 차지하고 있어 대규모 성토공사시 조립재료에 대한 강도와 변형특성에 대한 조사와 시험에 대한 수요가 급증할 것으로 예상된다.

[표 2.1.1] 4대강 살리기 프로젝트의 주요 사업 및 물량

구 분	사 업	물 량				
		계	한 강	낙동강	금 강	영산강
국 토 부	준 설	5.7억㎥	0.5	4.4	0.5	0.3
	보	16개	3	8	3	2
	생태하천	537㎞	127	213	124	73
	제방보강	377㎞	75	214	71	17
	댐, 조절지	5개	-	3	-	2
	자전거길	1,206㎞	189	549	248	220
농식품부	농업용저수지	87개	12	31	30	14
환 경 부	수질개선(총인처리)	353개	106	124	99	24

또한, 한국수자원공사의 경우 관리중인 댐 27개 댐 중에서 필댐은 24개(용수전용댐 포함)이며, 현재 건설중인 댐을 포함하면 약 30개에 이르고 있고, 국가 기반시설인 이들 댐들에 대한 정확한 안정성 평가와 거동의 분석은 필수적이다. 필댐의 거동을 정확하게 분석하기 위해서는 축조에 사용된 재료의 전단강도, 응력-변형율 관계, 전단변형율-전단탄성계수-감쇠비 관계 등에 대하여 현장 및 실내 시험결과가 필요하다.

이 밖에도 도로, 항만 및 철도 시설물 공사에 포함된 성토구조물 공사 등에도 대입경 조립재료가 많이 사용될 것으로 예상되고 있다.

제 2 절 대형 공진주 시험을 통한 대입경 조립재료 동적물성 산정

1. 국내 기술개발 수준

댐이나 제방 등이 국가경제개발 계획에 따라 1970년대부터 1980년대 후반까지 전국적으로 활발하게 건설되면서 대입경 조립재료를 활용하는 기술에 관하여 많은 시공경험이 축적되어 왔으나, 지반공학 등의 이론적인 기반은 매우 취약하고, 그나마 일본, 네덜란드 또는 미개척국(USBR)등의 기술과 경제원조를 받아서 공사가 이루어졌으므로 기술수준이 높지 않았다.

1990년대에 들어오면서 임하댐, 남강댐, 보강댐, 보령댐 등이 건설되면서 현장에서 대형직접전단시험기(Large Scale Direct Shear Testing Apparatus)가 제작되어 사용되면서 댐축조용 록필재료의 전단강도정수(parameters for shear strength)가 제작되어 사용되면서 댐축조용 록필재료의 전단강도정수(parameters for shear strength)인 점착력과 내부마찰각을 산정하여 설계보고서상의 설계정수가 만족되는지 여부를 확인하게 되었다. 이후, 2000-2001년에 한국수자원공사에서 대형진동삼축압축시험기(Large Scale Cyclic Triaxial Testing Apparatus)를 국내기술로 자체 개발, 제작하여 대곡댐 축조재료의 설계정수(design parameters)와 댐체의 응력-변형거동을 수치해석기법으로 분석하는데 필요한 Hyperbolic model의 입력 파라메타(input parameters)를 산정하였다. 또한, 산정된 해석 파라메타를 사용하여 공사가 진행 중이던 대곡댐에 대하여 응력-변형해석을 실시하여 단면변경을 하여, 댐의 안전성을 확인하고, 축조재료로 사용되는 석산재료의 양을 줄여서 공사비를 크게 절감(약 40억원)하는데 대형삼축시험이 크게 기여를 하였다. 그 이후 축조된 평화의댐 2단계 부분, 평림댐, 감포댐, 화북댐 및 부항댐 등의 설계정수 산정과 응력-변형거동 분석, 안정성 검토 등에 대형삼축시험 결과가 반영되었다.

한편, 1996년 영월에서 지진이 발생한 이후 국가 주요시설물들에 대한 내진설계기준이 강화되면서 지반 및 지반재료의 동적물성에 대한 조사·실험 등의 연구개발이 활발하게 이루어져 왔다(김동수 등, 1998). 전반적으로 조립재료 동적물성 산정을 위한 실내시험과 관련한 국내기술은 연구기관이나 대학의 연구자들의 경우 이미 국제적인 수준에 이르러 있다고 할 수 있다. 그러나 대입경 조립재료에 대한 실내시험에 대한 기술 수준은 이 분야의 전공자가 적고, 복잡하고 고가의 시험장비를 사용하여야 하는 관계로 이 분야의 기술 수준은 국제적 수준에 비해 낮은 상태이다.

최근 한국철도기술연구원과 한국수자원공사에 대형삼축압축시험기가 구축되었고, 본 연구를 통해 대형공진주시험 시스템까지 구축된다면 향후 기 발전된 국내 조립재료 시험기술이 접목되어, 괄목상대한 기술수준 향상이 기대된다.

[표 2.2.1] 국내 공진주시험기 보유 현황

기관	장비 특색
한국과학기술원	표준형(시료직경 5cm 이하)
경희대학교	표준형외 시료직경 15cm 공진주시험기 구축중
서울대학교 등 대학실험실	표준형
네스지오 등 실험용역업체	표준형

2. 국외 기술 및 산업동향

세계 각국의 건설회사, 대학교 및 연구소에서는 약 60여 년 전부터 시료의 직경이 200~1500mm인 대형삼축시험 기를 사용하여 큰 입경의 조립재료의 전단강도와 응력-변형특성에 대한 조사와 연구를 해오고 있다. 최초의 대형삼축시험장치는 1936년 독일의 베를린 수공연구소에서 댐재료에 대한 연구를 하기 위하여 공시체의 직경 300mm ×높이 900mm를 사용할 수 있도록 개발하였으며, 점차 발전되어 직육면체 공시체(230mm×230mm×570mm)를 사용하거나 평면변형율시험이 가능한 시험장치 등이 개발되어 연구와 실무에 활용되고 있다.

고속전철의 진동 또는 지진으로 인해 지반에 생기는 전단변형이 미소할 때에는 공진주 시험으로 전단탄성계수와 감쇠비, 포아송비를 조사해서 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물의 동적해석에 고려한다. 멕시코전력/대학교에서 사용하는 공진주시험기의 직경은 70mm, 높이가 100mm이며, 구속압력은 1Mpa까지 가할 수 있다. 독일 칼스루헤공대에서는 시료의 직경이 100mm이며, 최대입자가 10mm이다. 구속압력은 압축공기를 사용해서 최대 1.1MPa까지 가할 수 있다. 그리고 직경이 500~1,000mm인 큰 시료에는 구속압력을 95kPa까지 가할 수 있다. 전단변형이 작은 기계가 진동하는 공장기초와 고속전철의 진동을 일으키는 지반의 변형특성 파악에도 대형 공진주시험이 이용된다.

최근에 두꺼운 관형의 시료(hollow sample)를 시험하는 공진주시험기가 개발되어,

큰 전단변형이 가능하며 지진시의 전단변형을 시뮬레이션할 수 있게 되었다. 그러나 시료 준비상의 난점은 관형의 시료를 만들기가 힘들며, 시험기의 크기가 작기 때문에 세립자의 시료에서만 가능하다.

2003년 텍사스오스틴 대학에서는 대입경 조립재료의 동적시험에 사용하기 위해 대형 공진주시험기를 신규 제작하였다. 신규 제작된 공진주시험기는 시험이 가능한 시료의 최대입경을 2.5㎝로 결정하였기 때문에 공시체의 직경은 ASTMD4015-87에서 제안한 최소 공시체 직경-재료의 입경비를 만족시키도록 15㎝로 제작되었다. 공시체 높이는 지반공학 분야에서 일반적으로 사용되는 높이-직경 비율을 기초로 30㎝로 하였다. 이 크기의 공시체로는 기존 표준 공진주시험기보다 약 2~3배 큰 조립재요의 입경에 대해서 시험할 수 있다.

[표 2.2.2] 국외 공진주시험기의 크기

댐명	실험실명	국가	시료(㎜)	
			직경	높이
다수의 댐	켄터키 대학	미국	36	78
	한지연구소(CRREL)	미국	75	460
	수리시험소(WES)	미국	100	370
	멕시코 대학	멕시코	70	100
바쿤	칼스루헤 공대	독일	800	800
			100	100
마쉐드 솔레이만	칼스루헤 공대	독일	100	100
고속전철	칼스루헤 공대	독일	500	1,000
			1,000	2,000
다수의 댐	취리히 공대	스위스	80	250
			150	450
테리	중앙재료 연구소	인도	76	불명

제 3 절 대형진동삼축압축시험을 통한 대입경 조립재료 동적물성 산정

1. 지반재료의 미소변형 수준의 물성 연구

과거 지반공학분야에서는 극한상태의 지반거동, 강도에 대한 연구가 중심을 이루어 왔다. 그러나 최근 구조물이 대형화되고 도심재개발로 인한 근접공사들이 증가함에 따라 지반의 변위, 토류구조물의 변형, 건물기초의 침하예측이 지반공학분야의 문제로 많은 관심을 받고 있다.

정적실험에서의 계측의 정확도가 증가하여 정적물성치와 동적물성치 사이의 차이가 줄어들고 하중의 종류(정적/동적)보다 유발되는 변형률의 크기가 지반의 거동 예측에 중요한 변수임이 인식되고 있다(김동수, 1995; Burland, 1989; Tatsuoka, 1991). 파괴전의 지반구조물에 대해 계측을 실시한 결과, 실제 구조물에서 지반이 거동하는 변형률 범위가 0.1-1% 이하이고, 이때의 지반변형은 비선형적인 특성을 보이게 되어 이를 고려한 해석의 필요성이 인식되고 있다. 또한 원자력발전소, 장대교량, 고층건물들에 대한 내진설계와 합리적인 변형특성평가에 대한 필요성이 늘어남에 따라, 정적 및 동적하중을 받는 토목구조물의 해석 및 설계를 위해 저변형률($10^{-5}\% < \gamma < 10^{-3}\%$) 및 중간변형률($10^{-3}\% < \gamma < 10^{-1}\%$) 하에서 지반의 변형 특성을 신뢰성있게 규명하는 것이 지반구조물의 해석/설계에 필요한 합리적인 입력변수 제공을 위하여 매우 중요하게 되었다.

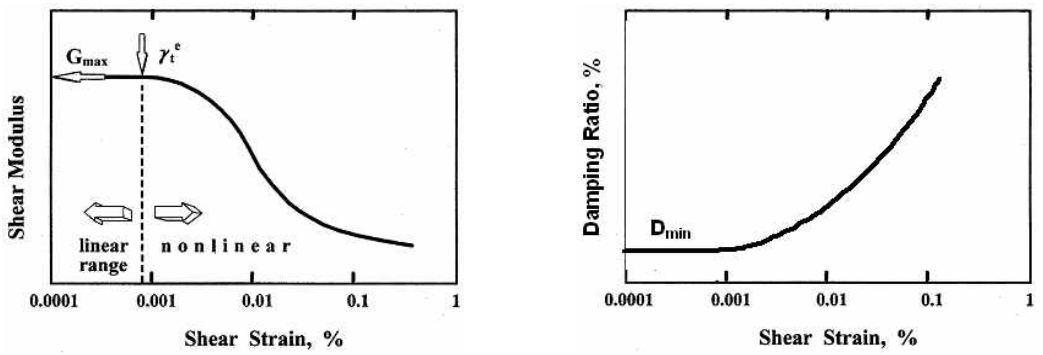
2. 지반재료의 동적물성

지진하중, 파랑하중, 폭발하중과 같은 반복적인 동적하중을 받는 지반구조물의 설계에서 전단탄성계수(Shear modulus, G) 및 감쇠비(Damping ratio, D)로 표현되는 동적물성치는 매우 중요한 변수이다. 미소변형률 영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 기본적으로 변형률의 크기에 무관하여 일정한 값을 가지고, 전단탄성계수는 최대값인 최대전단탄성계수(Gmax)로서 감쇠비는 최소값인 최소감쇠비(Dmin)로서 고려된다. 반면, 지진하중이 작용할 경우 지반재료는 변형 정도에 따라 비선형 거동특성을 보이는데, 이러한 비선형 거동특성을 신뢰성 있게 평가하기 위하여 지반재료의 전단변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선으로 표현되는 비선형 동적 변형특성의 결정이 중요해진다. 특히, 등가선형 및 비선형 지반응답해석에

서 비선형 동적 변형특성이 중요한 설계입력변수로 이용된다(Bardet과 Tobita, 2001; Schnabel 등, 1972; Yoshida와 Towhata, 1997).

지반의 비선형성은 [그림 2.3.1 (a)]과 같이 동적물성치-log(전단변형률, γ)의 관계로 나타내는 것이 일반적이다. 이것은 실제 작용하는 하중의 범위에서 지반 재료가 경험하는 변형률의 범위인 1% 이하에서 탄성계수를 보다 정확하게 표현하기 위해서이다. [그림 2.3.1]에서 볼 수 있듯이 탄성계수와 감쇠비가 변형률의 크기에 무관하게 일정한 선형영역과 변형률이 증가함에 따라 감소하거나 증가하는 비선형 영역으로 구분되며, 두 영역을 구분 짓는 변형률의 크기를 선형한계변형률(γ_t^e)라 한다. 일반적으로 지반재료의 선형 한계 변형률은 $10^{-4}\% < \gamma < 10^{-2}\%$ 범위에 존재하며, 입자가 큰 자갈 등 점성이 없는 지반재료는 낮은 선형한계변형률을 갖는 반면, 점성이나 세립분을 갖는 지반재료는 상대적으로 높은 선형한계변형률을 갖는다.

지반의 전단탄성계수와 변형률의 관계는 지반의 종류, 함수비, 구속응력, 하중주파수, 교란상태 등 다양한 조건에 따라서 매우 다르게 나타나게 된다. 그러나 전단탄성계수를 최대전단탄성계수(Gmax)로 정규화한 정규화 전단탄성계수(G/Gmax)와 전단변형률의 관계로 나타내면 이러한 영향 요소에 비교적 무관하며, 재료에 따라 비교적 일정한 범위의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Seed 등, 1984; 권기철, 1999).



(a) 전단변형률에 따른 전단탄성계수 경향 (b) 전단변형률에 따른 감쇠비 경향

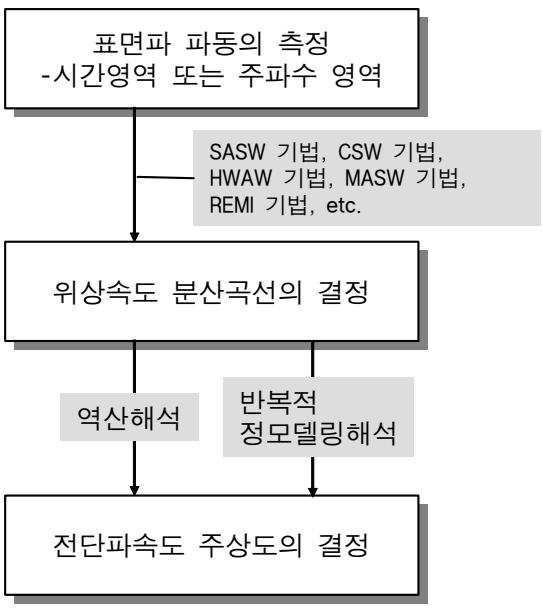
[그림 2.3.1] 전형적인 전단탄성계수 및 감쇠비 경향

Seed 등(1986)은 많은 자료 조사를 통하여 모래와 자갈에 대한 대표 비선형 동적변형특성을 제안하였으며, 국내에서는 이세현 등(2009)이 국내외 연구결과를 바탕으로 D/B를 구축하고 대표곡선을 제안한 바 있다.

제 4 절 대입경 조립재료 지반의 동적물성 산정을 위한 표면파 기법

1. 현재 활용되고 있는 비파괴 표면파 기법의 개요

SPT, CPT, FVT 등과 같이 한 지점에서 지반의 물성을 조사하는 일반적인 지반조사기법과는 달리, 표면파 기법은 지표면 위에서 비파괴적, 비관입적으로 측선하부의 매질의 평균 물성을 측정하는 기법이다. 표면파 기법은 지구물리학 영역에서 연구 발전되어 온 영역이었고 주로 지구의 지각구조의 규명, 석유 탐사 등에 활용하여 온 분야였는데, 토목공학 영역에 활용도록 수정하고 보완한 최초의 방법이 SASW 기법이다. SASW 기법이 1980년대 초에 개발되어 실무에 적용되기 시작한 이후에 많은 연구가 이어졌고 CSW 기법, MASW 기법, HWAW 기법 등의 새로운 기법 등이 개발되었다. 한편으로는 상시미동 측정기법 (passive method), 시간-주파수 기법, 주파수-파수 스펙트럼 기법 등에 관한 연구도 진행되었다.



[그림 2.4.1] 표면파 기법의 기본 개념도

표면파 기법은 [그림 2.4.1]에 설명된 바와 같이 기본적으로 표면파의 전파파동을

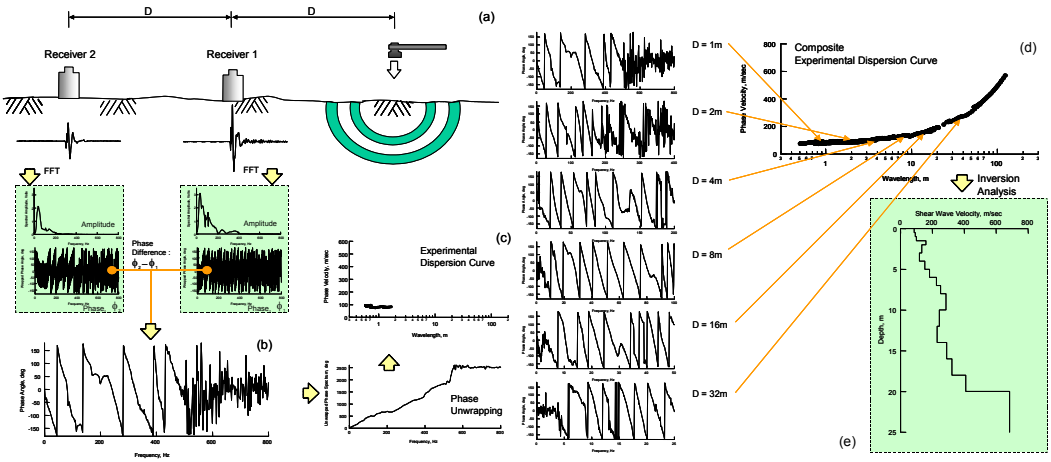
측정하여 최종적으로 지반의 전단파속도 주상도를 결정하고자 하는 것이다. 표면파 기법에서는 표면파의 전파파동을 시간영역 또는 주파수 영역에서 측정한 이후, 위상속도 분산곡선의 결정과 전단파 속도 주상도의 결정이라는 두 가지 단계를 추가적으로 거쳐야 한다. 특히 위상속도 분산곡선을 결정하는 방법에 따라 [그림 2.4.1]에 도시한 바와 같이 여러 가지 표면파 기법의 종류가 나뉘어 진다고 할 수 있다. 그리고 결정된 위상속도 분산곡선에 대하여 정모델링 기법을 이용하여 역산해석이나 반복적 정모델링 해석으로 지반의 전단파속도 주상도를 결정짓게 되는 것이다.

본 절에서는 여러가지 표면파 기법의 원리와 개념을 간략하게 살펴보고, 그 특징과 장단점을 요약하여 보았다.

2. 위상속도 분산곡선의 결정 기법

가. SASW 기법

SASW 기법은 표면파의 전파를 두 개의 감진기를 이용하여 측정하고, 감진기 신호를 주파수별로 분리한 후에 각 주파수의 전파속도를 위상각 차이를 이용하여 결정하는 방법이다. SASW 기법의 기본 절차는 [그림 2.4.1]에 도시한 바와 같이, 두 감진기를 이용한 표면파의 측정[그림 2.4.2(a)], 전달함수의 결정[그림 2.4.2(b)], 주파수별 위상각 결정 (즉, 위상스펙트럼의 계산)[그림 2.4.2(b)], 마스킹 작업에 의한 위상스펙트럼의 분석, 위상속도 분산곡선의 결정[그림 2.4.2(c), 2.4.2(d)], 역산해석에 의한 전단파 속도 결정[그림 2.4.2(e)] 등의 순서로 진행된다.



[그림 2.4.2] SASW 기법의 기본개념 (Stokoe et al, 2004)

표면파가 지표면을 따라 전파되는 속도를 겉보기 속도(apparent velocity)라고 한다. 일반적으로 겉보기 속도는 어느 특정지층의 탄성파 속도와 일치하지 않고 각 층의 속도를 적절히 조합한 임의의 속도에 해당된다. 한편 균질한 반무한 지반에서 표면파가 전파될 때는 표면파 전파속도는 한 매질의 탄성파 속도로 전파하게 되지만, 다층구조 지반에서는 각 층마다 탄성파 속도가 달라지게 때문에 전파되는 탄성파 그룹 속에는 각기 다른 층의 탄성파 속도로 전파하는 여러 종류의 파들이 혼재하게 된다. 각기 다른 지층으로 구성된 다층구조 시스템에서는 표면파 전파에 있어서 지층구조의 특성에 따라 여러 개의 모드를 발생시키며, 각 모드는 다층구조 시스템의 각 지층과 연관성을 갖게 된다.

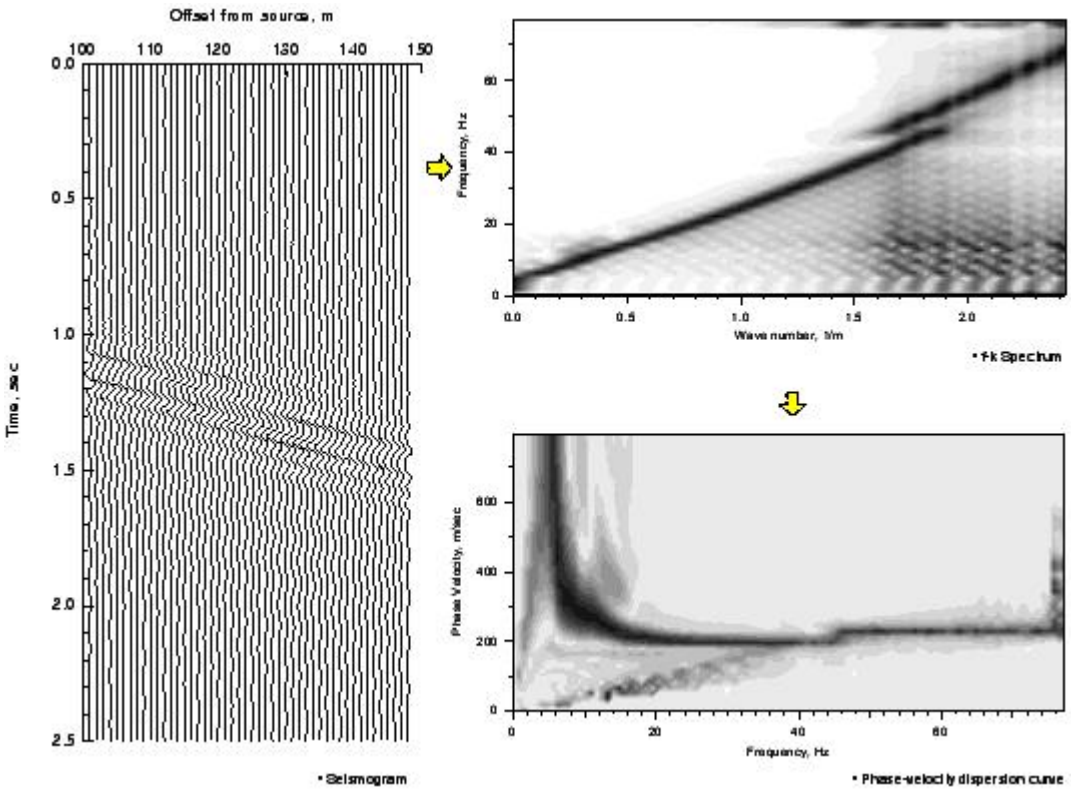
표면파 기법에 따라서 측정하는 표면파 속도에는 차이가 있다. SASW 기법에서는 겉보기 속도를 측정하고, 지구의 거시적인 지각구조를 주로 탐사하는 지구물리 탐사기법에 근거를 둔 타 기법에서는 다층구조시스템의 개별 모드를 측정한다. 이는 SASW 기법이 측정하게 되는 영역은 일반적으로 제한된 작은 영역이어서 비교적 표면파의 전파거리가 짧고 지층의 횡방향 변화가 크기 때문에, 다층구조 시스템의 개별모드를 측정하기가 용이하지 않기 때문이다.

일반적으로 겉보기 표면파 속도에는 주파수에 따라 낮은 지층에서부터 깊은 지층에 이르도록 다양한 지층의 탄성파 속도 성분이 포함되어 있다. 따라서 특정 모드를 측정하여 특정 지층의 조사에 치중하기 보다는, 깊은 지층에서 표층에 이르도록 여러 지층의 정보를 포함하는 겉보기 표면파 속도를 측정하여 깊은 지층까지 조사하고자 하는 것은 의미있는 접근이라고 할 수 있다. 그리고, 동강성 행렬법이나 전파행렬법 등의 표면파 모델링 기법에 의하면 다층구조 시스템의 개별모드 뿐만 아니라 겉보기 표면파 속도도 이론적으로 계산할 수 있기 때문에, 두 개의 감진기와 작은 영역을 탐사하는 SASW 시험에서 겉보기 표면파 속도를 측정하는 것은 합리적이고 바람직한 접근이라고 할 수 있다.

한편 SASW 기법에 의해서 표면파 속도를 결정하기 위해서는 전달함수나 크로스 파워스펙트럼의 위상스펙트럼을 이용하게 되는데, 위상스펙트럼의 분석은 SASW 기법의 난제로 여겨져 왔다. 그러나 위상스펙트럼은 겉보기 탄성파 속도를 측정하기 위한 최적의 수단으로, 기타 표면파 방법에서와 같이 원신호를 왜곡하는 신호처리를 적용하지 않기 때문이다. 한편, 최근 위상스펙트럼의 분석을 용이하게 하는 IRF 기법과 같은 알고리듬이 개발되어 위상스펙트럼 분석의 자동화와 전문가적 경험을 배제하는 연구가 진행되고 있다.

나. MASW 기법

MASW 기법은 SASW 기법의 개념과 CMP 모음기법을 중합하여 개발된 방법으로 CMP 모음기법을 통하여 신호 품질의 개선을 기하고, SASW 기법의 개념을 도입하여 분산곡선 결정과 역산해석을 수행하는 기법이다. 즉, 다수의 채널(보통 12채널 이상)을 이용한 동시측정으로 레일리파 위상속도 결정을 위하여 충분한 잉여의 자료를 확보하고, 탄성파 시간-공간 영역 자료에서 표면파 성분의 추출을 용이하게 함으로써 신호대 잡음비를 향상시키는 기법이라고 할 수 있다. [그림 2.4.3]에 도시한 바와 같이 측정 신호의 주파수-파수 그림을 작성한 후 그로부터 위상속도를 추출해 내는 MASW 기법의 기본 개념을 보여주고 있다.



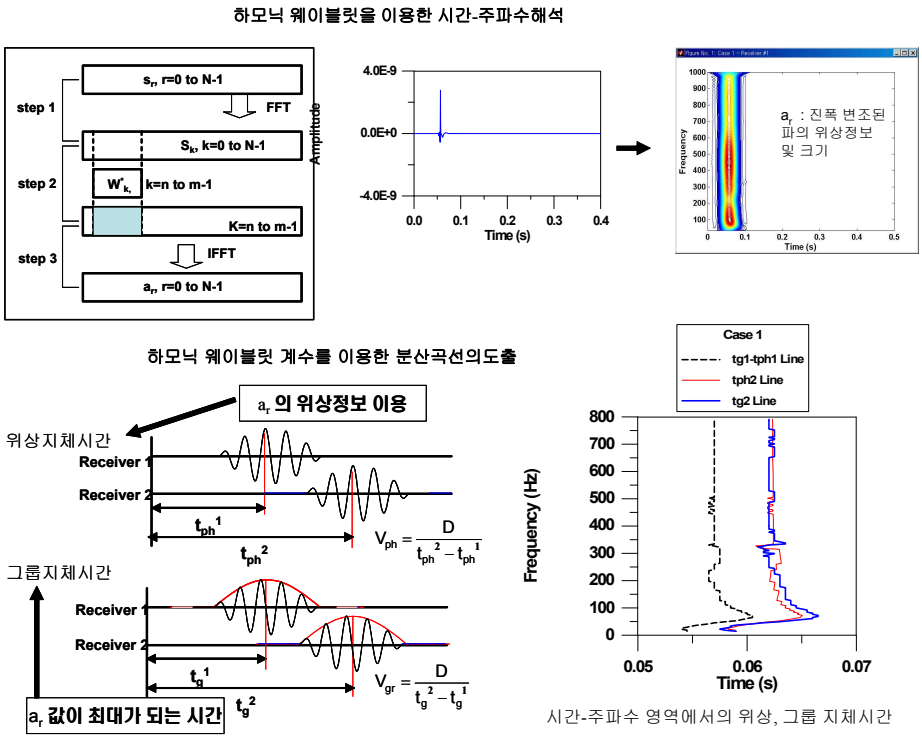
[그림2.4.3] MASW 기법의 기본개념 (Stokoe et al, 2004)

다. HWAW 기법

HWAW 기법은 두 감진기를 이용하여 표면파의 파동을 시간영역에서 측정한 후, 각 신호에 대하여 다중필터기법을 적용하고 각 주파수별로 계산된 역학함수

(analytical function)의 동일 위상각 시간 차이를 이용하여 표면파의 파동전파 속도를 계산하는 방법이다.

HWAW 방법은 짧은 간격의 두 감지기를 이용하는 시험 방법으로, 표면에서 계측되는 파의 근접장 성분을 적극적으로 이용하며 배경잡음의 영향을 신호처리과정에서 효과적으로 제거할 수 있기 때문에 단일한 실험구성을 이용하여 대상지반의 전체 분산곡선을 한번의 실험으로 결정할 수 있다. 해석시 신호의 윤곽선이 최대가 되는 결과를 사용하며 독립적인 위상속도의 결정이 가능하다. 역산과정시에는 지반의 횡방향 불균일성에 의한 오류의 최소화와 계산시간의 단축을 위하여 단일 어레이 역산을 수행하여 대상지반의 전단파 속도 주상도를 도출한다. 그리고 HWAW기법은 시험수행자의 주관적인 판단을 배제한 분산곡선을 자동으로 도출한다. 이러한 HWAW기법은 신호발생 및 감지신호 획득, 하모닉 웨이블릿을 이용한 시간-주파수 해석, 하모닉 웨이블릿 계수를 이용한 분산곡선의 자동 도출, 반복적 정모델링을 통한 전단파 주상도 획득의 순서로 수행되어진다. [그림 2.4.4]는 HWAW 기법에서의 하모닉 웨이블릿을 이용한 시간-주파수해석, 하모닉 웨이블릿 계수를 이용한 분산곡선의 도출과정을 나타낸다.

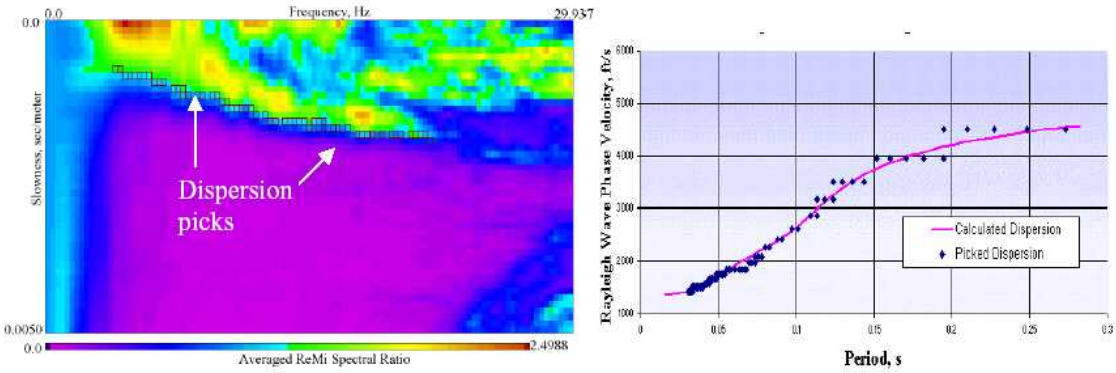


[그림 2.4.4] 위상속도계산을 위한 시간-주파수 기법의 기본개념 (Park, 2001)

라. ReMi 기법

ReMi (Refraction Microtremor; Louie, 2001) 기법은 지반 내에 존재하는 상시 미진동을 측정하고 분석하여 위상속도 분산곡선을 결정하는 기법이다. 상시 미진동이라고 하는 것은 파랑, 바람, 눈, 비 등과 같은 자연하중으로, 교통하중과 같은 인위적 하중과 함께 지반에 간헐적 또는 지속적으로 내포되어 있다. ReMi 기법은 상시 미진동을 측정함으로써 주로 저주파의 전파속도를 측정하는 기법이다.

ReMi 기법은 굴절법 탐사에 사용되는 측정장비와 감진기를 사용해서 수행하며 24개의 감진기를 굴절법 탐사시와 동일하게 배치하여 상시 미진동을 측정한다. ReMi 기법으로 측정한 미진동 신호는 느리기-주파수(slowness-frequency) 변환으로 처리를 하게 되는데, 이는 측정된 미진동 신호에서 레일레이파만 분리해 내기 위해서이다. 분산속도는 [그림 2.4.5]에서와 같이 분산속도는 ReMi 스펙트럼비-느리기 그래프에서 결정하게 되는데 주로 기본모드로 결정된다. 고차모드도 결정할 수 있지만, 고차모드의 에너지가 기본모드만큼 에너지가 클 때 가능하다. 기본 모드 분산곡선은 Saito (1988)에 의해서 개발된 정모델링 기법을 활용하는 역산해석에 의해서 결정된다.



[그림 2.4.5] ReMi 기법의 기본개념 (Louie, 2001)

마. CSW 기법

(1) CSW 기법의 개념과 원리

CSW 기법은 1996년 영국에서 개발된 기법으로 (Matthews, Hope and Cayton, 1996), [그림 2.4.6]에 도시한 바와 같이 4~6개의 감진기와 일정 주파수의 정현파를 발생시키는 발진원을 이용해서 표면파의 속도를 결정하는 기법이다. CSW 시험에

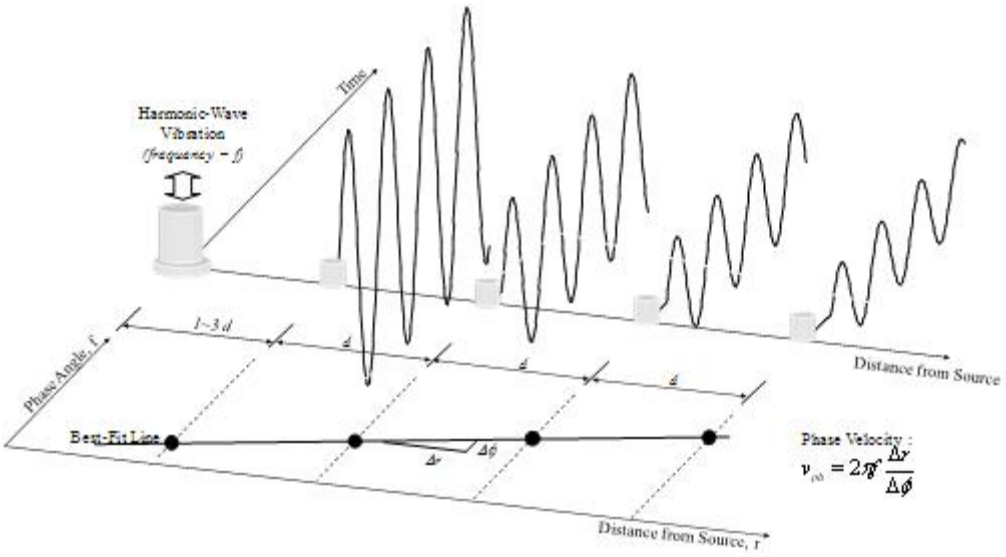
서는 전기-기계식 발진기를 이용하여 고정 주파수의 정현파를 발생시키고 이에 대한 감진기의 응답을 측정하여, 해당 주파수의 표면파에 대한 전파속도를 측정하는 기법이다. 측정가능한 주파수는 전자기식 발진기의 기계적인 제원 때문에 일반적으로 5~200 Hz 범위로 국한된다.

감진기로 측정한 시간이력 자료는 FFT 변환에 의해서 주파수 영역으로 변환되며, 일정 거리 떨어진 감진기에서 각 감진기 위치에 해당되는 위상각을 결정하고, 위상각과 감진기 위치 사이의 선형 관계식을 구한다. 이 때 선형관계식의 기울기가 파수 (wavenumber)가 되고, 이를 이용하여 위상속도 즉 표면파 속도를 계산할 수 있다. 표면파 속도를 구하는 식은 [식2.4.1]과 같다.

$$v_{ph} = 2\pi f \frac{\Delta r}{\Delta \phi} = \frac{2\pi f}{k} \qquad \text{[식2.4.1]}$$

여기서 v_{ph} 는 위상속도, f는 발진원의 진동 주파수이다.

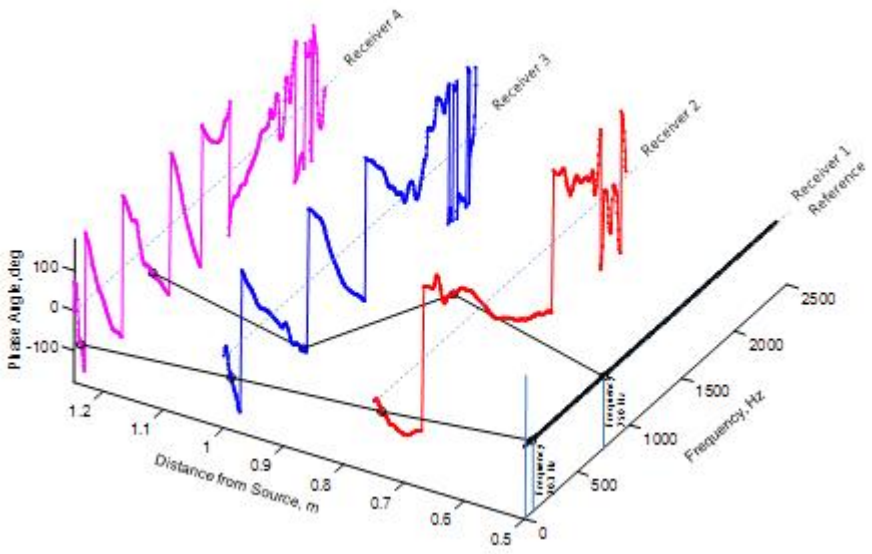
CSW 기법은 특정 주파수만의 표면파를 발생시키고 특정 주파수만의 전파속도를 측정한다는 측면에서 다른 표면파 기법보다 우위에 있다. 이를 테면 저주파 표면파의 경우 다른 표면파 기법에 있어서는 충격파에 대한 주파수변환 결과에 의지하여 저주파 성분의 표면파 속도를 측정하게 되는데, 이 저주파 성분이 실제 저주파 에너지가 있는지 없는지 확인하기 어렵고, 단지 수치적인 부산물일수도 있기 때문에, 실제 주파수 성분을 하나 하나 발진하고 측정하는 것이 더 정확하다고 할 수 있다. 그리고 감진기를 배열한 구간의 매질에 대한 표면파 속도 대푯값을 측정하게 되며, 국부적인 이상체에 의한 영향을 최소화할 수 있다는 측면에서도 CSW 기법의 장점이 부각된다. 그러나 CSW 기법은 단위길이당 위상각 변화를 결정하는데 있어서 삼각함수연산관련 문제 때문에 180도 범위내로 국한되며, 단지 저주파의 표면파 또는 큰 파장의 표면파만 측정가능한 문제점이 있다. 또한 전기-기계식 발진기의 사용에 있어서도 사용가능한 최대 주파수는 200 Hz 정도로 제한받게 되는데, 이 또한 천층의 매질을 평가하는데 충분한 주파수가 아니다. 따라서 CSW 기법의 장점을 일부 살리고, 상기와 같은 문제점을 해결하는 새로운 방법이 조성호 등(2008)에 의해서 개발되었고, 그 기법을 Impulse CSW (ICSW) 기법이라고 하였다.



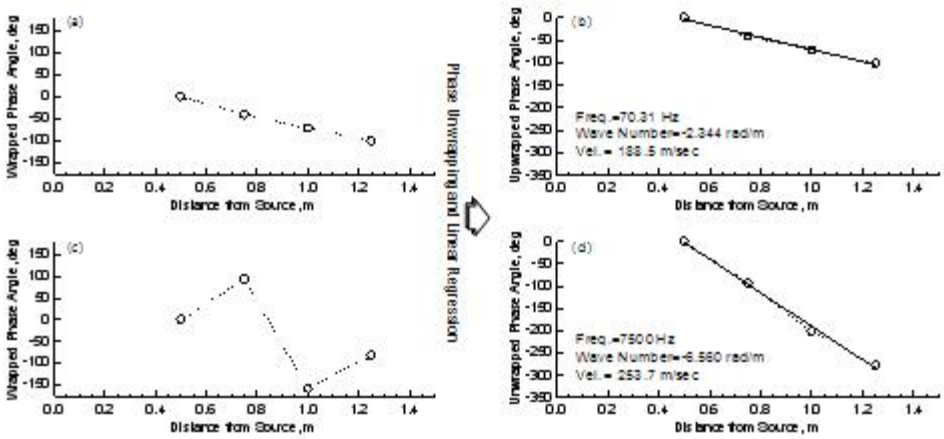
[그림 2.4.6] CSW 기법의 개념도

(2) ICSW (Impulse CSW) 기법

CSW 기법에서 전기-기계식 진동기보다 해머를 사용하게 되면, 고주파 성분을 발생시켜서 작은 파장에 대한 정보도 측정할 수 있으며, 측정시간이 대폭 단축되기 때문에 실시간으로 측정하고 해석할 수 있고, 끝으로 휴대해야할 하드웨어가 현저히 감소된다는 장점이 있다. [그림 2.4.6]에 도로의 노상에 대한 다짐현장에서 측정한 전형적인 CSW 측정자료를 도시하였다. 해머를 사용하는 CSW 시험은 거의 SASW와 동일하나 감진기를 4~6개 사용한다는 측면에서 차이가 있다. [그림 2.4.7]을 살펴보면 주파수 대역 2,500 Hz 까지 주파수 응답신호를 측정하였고, 그 위상각 스펙트럼에는 약 3개의 점프가 포함되어 있는 것으로 나타났다. 각 주파수에 대한 측정자료에 대해서 감진기 위치에 대한 위상각 분포를 결정하여 위상속도를 결정하게 된다. [그림 2.4.8]에 대표적으로 두 개의 주파수 70.31 Hz, 7500 Hz에 대해 감진기위치-위상각 관계를 도시하였고, 그에 대한 위상속도를 계산한 결과를 그림에 포함해서 나타내었다.



[그림 2.4.7] 충격하중 CSW 시험으로 결정한 위상각 스펙트럼



[그림 2.4.8] 위상각 스펙트럼과 위상속도

3. 전단파속도 주상도 결정 기법 간 이론적 배경의 비교

일단 표면파 파동의 측정으로 위상속도 분산곡선, 즉, 주파수별 전파속도를 결정하고 난 이후에 전단파속도 주상도를 결정하게 된다. 현장에서 표면파를 측정하여 결정한 위상속도 분산곡선은 실험분산곡선이라고 하며, 이는 지반의 층서구조, 각 층의 전단파 속도 등과 같은 정보를 포함하고 있다. 이러한 실험분산곡선을 동일하게 이론적으로 재현해내는 전단파속도 주상도가 있으면, 바로 이 전단파속도 주상

도가 실험분산곡선에 상응하는 전단파속도 주상도가 된다. 이처럼 현장에서 측정한 실험분산곡선에 상응하는 전단파속도 주상도를 결정하는 과정을 역산해석(inversion analysis)이라고 한다. 내부적으로는 전단파속도 주상도의 가정, 이론분산곡선의 계산, 이론분산곡선과 실험분산곡선의 비교, 새로운 전단파속도 주상도의 가정 등의 단계를 거치게 된다. 새로운 전단파속도 주상도를 결정할 때는 경험이나 전문가적 판단보다는 최적화 이론을 적용하여 최적의 전단파속도 주상도를 결정하도록 한다.

한편, 전단파속도 주상도를 결정하는 방법으로 역산해석이외에 반복적 정모델링 기법(iterative forward modeling analysis)을 활용할 수 있다. 역산해석이 최적해를 찾는 과정에서 최적화 이론에 기반하는 컴퓨터 프로그램을 활용하는 반면, 반복적 정모델링 기법은 최적의 해를 찾는 과정을 인간의 판단과 경험에 의지하여 인간이 직접 해를 찾는 시행오차 기법이다. 반복적 정모델링 기법은 전문가의 판단과 시추주상도같은 기존의 타 정보를 활용할 수 있는 특징이 있기 때문에 단순한 수학적 최적해와는 달리 물리적으로 더 합리적인 전단파속도 주상도를 결정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 한편으로는 최적해를 찾는 과정에서 전문가적 경험에 의존해야 하기 때문에 경우에 따라 숱한 시행오차 과정을 거쳐야 하고, 최적해를 찾기가 용이하지 않은 문제점이 있다. 따라서 대부분의 경우 반복적 정모델링 기법으로 획득한 전단파속도 주상도는 역산해석으로 구한 전단파속도 주상도보다 RMS 오차가 크게 되어 정확도와 신뢰성이 작게 된다.

또한, 가정된 전단파속도 주상도로부터 이론적으로 위상속도 분산곡선을 계산하는 파동전파 정모델링 기법도 신뢰성 있는 전단파속도 주상도의 결정에 큰 영향인자가 된다. 이는 두 가지 측면에서 논할 수 있다. 첫 번째는 실험분산곡선 측정방법과 이론분산곡선 계산방법이 일치해야 한다는 측면과, 두 번째는 고유모드 (normal mode)의 측정과 해석에 있어서 일관성이 있어야 한다는 측면이다. 우선 실험분산곡선 측정시 고유모드를 측정하는 것인지 또는 중첩모드를 측정하는 것인지를 구별하여야 한다. 예를 들어 SASW 기법에서는 여러 가지 고유모드가 중첩된 중첩모드의 위상속도를 측정하고, 이론적으로 위상속도를 계산하는 정모델링 기법(동강성행렬법)에서도 중첩모드를 계산한다. 한편, HWAW 기법, MASW 기법과 ReMi 기법에서는 현장 측정 자료에서 기본모드와 1차 모드를 분리하여내고 이론적으로 위상속도를 계산할 때에도 고유모드를 별도로 계산하여 각각의 모드를 비교하게 된다.

따라서, SASW 기법의 경우 중첩모드의 측정뿐만 아니라 중첩모드의 이론적 계산이 중요한 과제가 되며, HWAW 기법, MASW 기법과 ReMi 기법에서는 현장데이터에서 고유모드를 분리해 내어 그 모드가 어떤 모드에 해당되는지를 구별해 내

는 것이 중요한 과제가 된다. 또한 지층의 구조가 단순하지 않은 경우, 이를테면 심도가 증가함에 따라 전단강성이 증가하지 않는 경우 또는 층간 전단강성 차이가 큰 경우에는 탄성파의 주파수에 따라서 기본모드나 1차 모드의 측정이 용이하지 않는 경우가 있다. 따라서 이러한 경우에는 모드를 인지할 때 실수하지 않도록 주의를 기할 필요가 있다.

위상속도 분산곡선에서 전단파속도 주상도의 결정은 표면파 기법의 신뢰성을 좌우하는 중요한 해석단계이다. 즉, 역산해석 수행시 국부최소치를 찾지 아니하고 전 영역 최소치를 찾을 수 있도록 하는 역산해석 기법의 신뢰성과 안정성이 중요하다. 또한, 역산해석에서 필수적으로 포함하고 있는 파동전파 정모델링 해석 기법의 활용과 선택에 있어서도 측정한 위상속도 분산곡선에 이론적을 상응하는 정모델링 기법을 선택하여 활용하는 것도 중요한 과제이다.

4. 표면파 탐사를 이용한 댐 구조물의 전단파속도 평가에 관한 연구

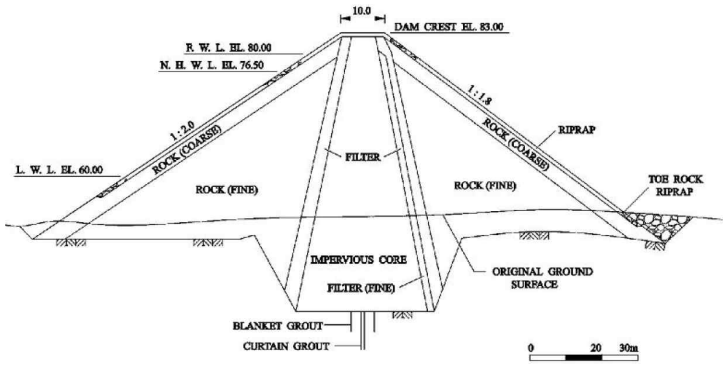
가. 개요

2009년 하반기에 수자원공사의 주관으로 사력댐 내진성능 평가를 위한 동적물성 산정에 관한 연구가 진행되었고 그와 관련하여 보고서가 발간되었다. 본 연구에서는 이 연구보고서에 수록되어 있는 결과를 정리하고 분석하였다.

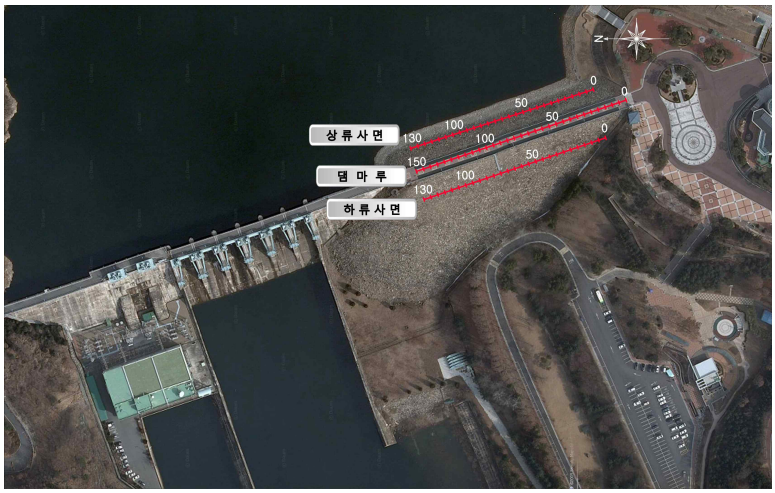
당 보고서에서 조사를 수행하였던 댐구조물은 대청댐, 밀양댐, 소양댐 등이고 각 댐 구조물의 사력존과 코아존에 대한 전단파 속도 주상도를 평가하였다. 각 댐구조물의 제원과 표준단면도는 [그림 2.4.9~2.4.11], 제원은 [표 2.4.1~2.4.3]에 제시한 바와 같다.

[표 2.4.1] 대청댐의 제원

구 분	내 용
위치	금강(금강하구로부터 150㎞ 상류지점인 대전시 동북방 16km 지점에 위치)
용도	다목적 댐
댐형식	복합댐(콘크리트 중력식/사력식)
댐높이	72m
총저수용량	1490백만 ㎥



(a) 표준단면도

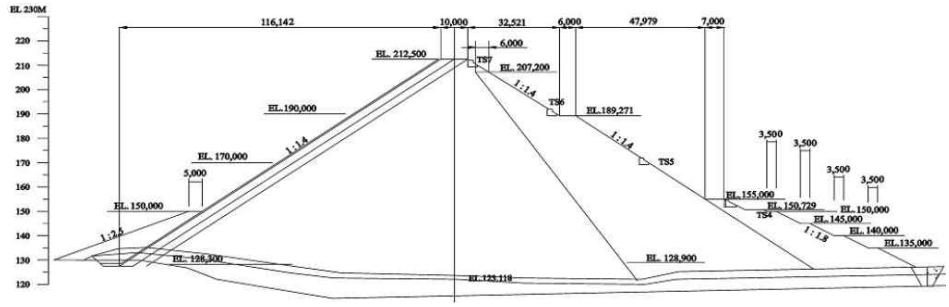


(b) 항공사진

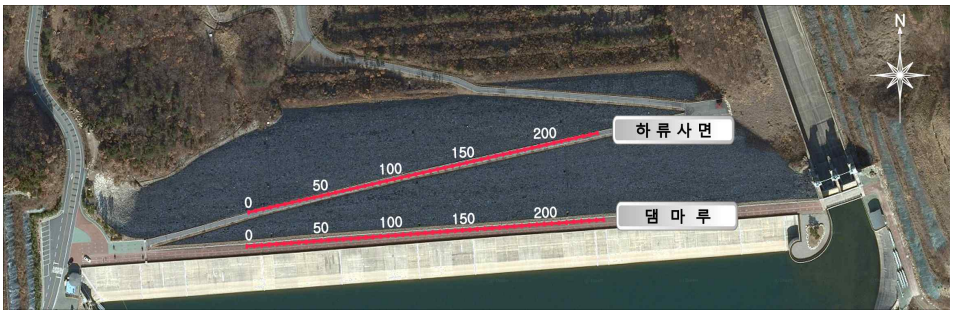
[그림 2.4.9] 대청댐의 표준단면도와 항공사진

[표 2.4.2] 밀양댐의 제원

구 분	내 용
위치	단장천
용도	다목적댐
댐형식	CFRD
댐높이	89m
총저수용량	73백만 m^3



(a) 표준단면도

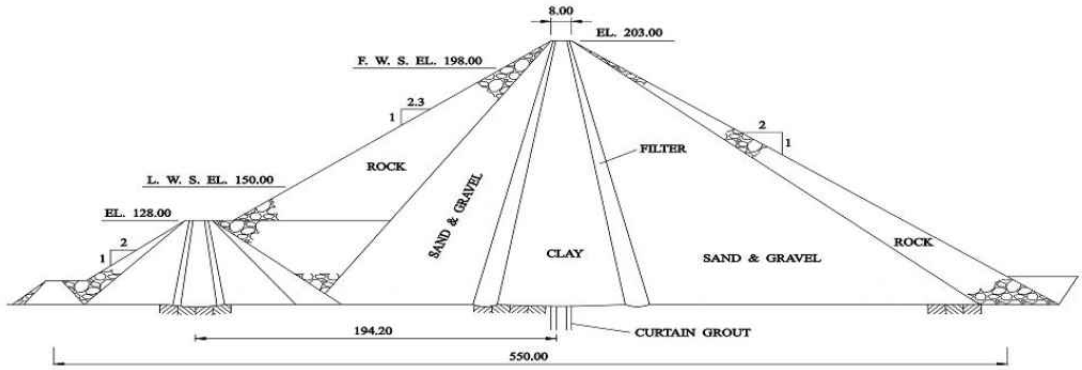


(b) 항공사진

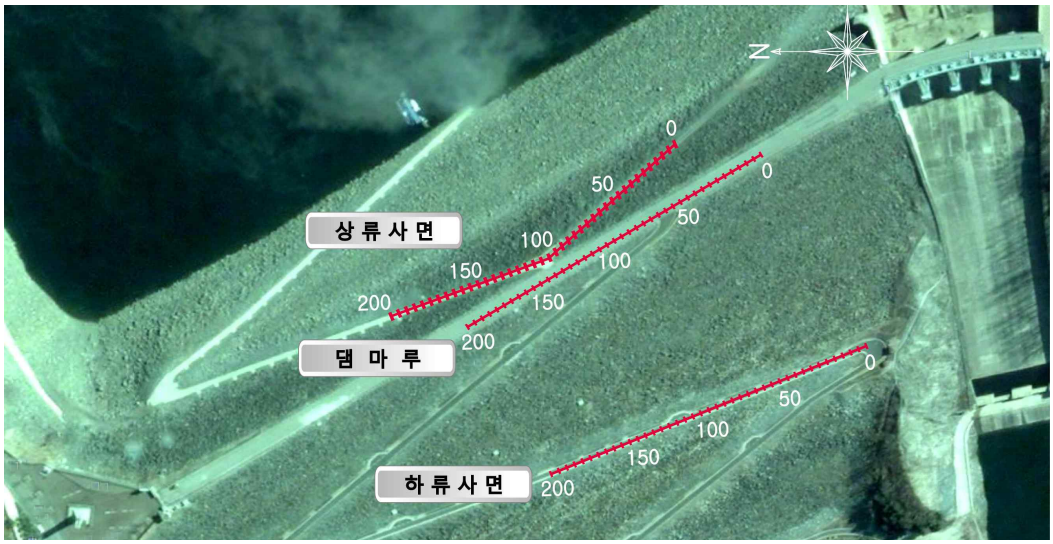
[그림 2.4.10] 밀양댐의 표준단면도와 항공사진

[표 2.4.3] 소양댐의 제원

구 분	내 용
위치	소양강(춘천시 동북방 13km에 위치)
용도	다목적 댐
댐형식	사력댐
댐높이	123m
총저수용량	2900백만 m^3



(a) 표준단면도



(b) 항공사진

[그림 2.4.11] 소양댐의 표준단면도와 항공사진

나. 사용된 표면파 기법과 시험 및 해석방법

당 보고서에서 채택된 표면파 기법은 HWAW 기법으로서, KAIST에서 개발된 기법이다. HWAW 기법은 감진기 2개와 해머타격으로 시험을 진행하는 것으로 매우 효율적으로 시험을 진행할 수 있으며, 한 번의 타격으로 목표 탐사심도에 요구되는 짧은 파장에서 긴 파장까지 측정가능한 방법이라고 HWAW 개발자는 말하고 있다.

HWAW 탐사는 상·하류 사면, 댐마루 등에서 시험이 진행되었는데, 가속도계를 고정하기 위하여 점토찰흙을 사용하였으며, 수직성은 고려하지 않았다고 한다. 그리고 보도블록이 설치된 댐마루에서는 보도블록 위에 직접 가속도계를 설치하였고, 아스팔트가 포장되어 있는 구간에서는 아스팔트 위에 가속도계를 설치하였다고 한

다. 표면파를 생성하기 위한 발진원으로는 슬레지해머와 중추낙하 발진원인 붐져를 사용하였다. [그림 2.4.12]

측정한 표면파의 최대파장은 측정위치별로 차이가 있으나, 최소 20 ~ 최대 100여 m에 이르고 있다. 그런데 역산해석으로 결정한 전단파속도 주상도는 최대파장과 관계없이 모두 심도 42.5m까지 평가되어 보고되었다 [그림 2.4.13].

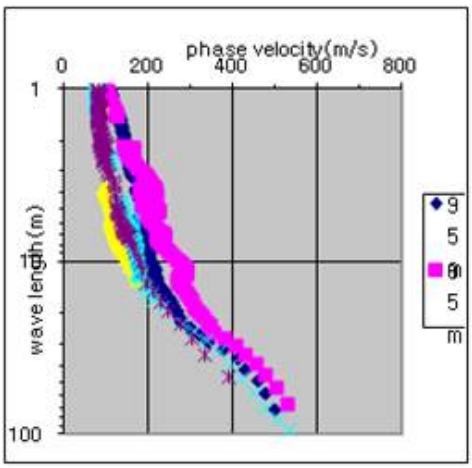


대청댐 사력죤(상류사면) 자료획득　　대청댐 코아죤 햄머 가진원

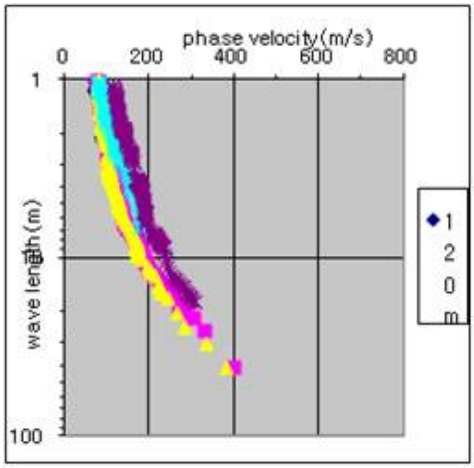


밀양댐 사력죤(하류사면) 자료획득　　소양댐 코아죤 붐져 가진원

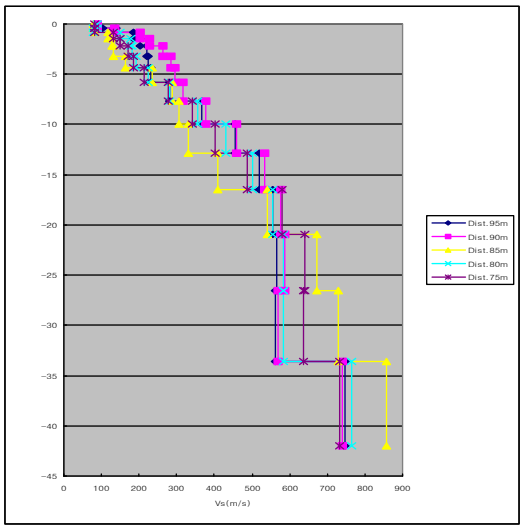
[그림 2.4.12] HWAW 탐사 현장 자료 취득 장면



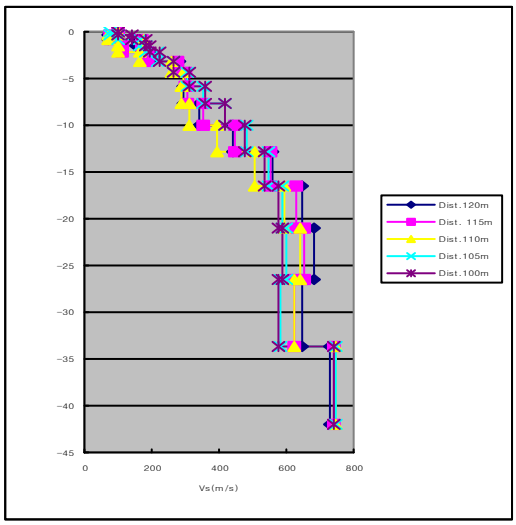
(a)상류사면 80~95m 구간의 분산곡선



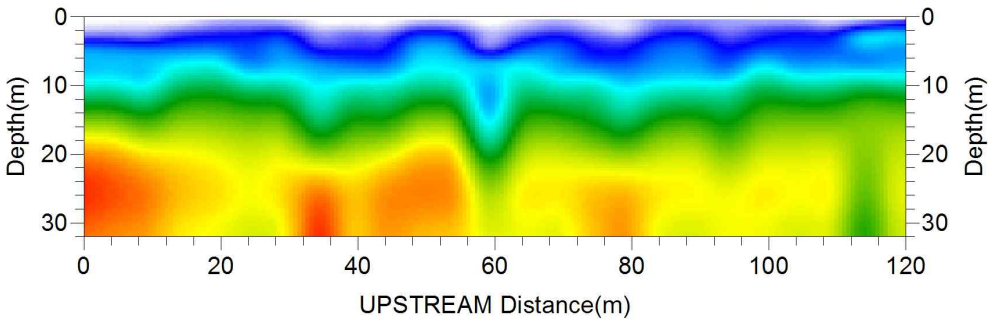
(b)상류사면 100~120m 구간의분산곡선



(c)분산곡선(a)에 대한 전단파속도 주상도



(d)분산곡선(b)에 대한 전단파속도주상도



(e) 대청댐 상류사면 2차원 전단파 속도 영상

[그림 2.4.13] 대청댐 상류사면에서 측정한 실험분산곡선과 2차원 전단파속도 영상

실험분산곡선에서 전단파속도 주상도를 결정하기 위하여 사용한 역산해석 방법은 반복 정모델링 기법이었고, 정모델링은 동강성행렬법의 이차원 모델을 구현한 것으로 KAIST의 박헌준이 개발한 프로그램이었다.

다. HWAW 탐사로 유추한 전단강성 모델

당 보고서에서는 일본의 Sawada와 Takahashi (1975)가 제시한 사력댐 코아존의 심도별 전단파 속도에 대한 모델을 준용하여, 국내 3개 댐에 대한 유사한 모델을 제시하였다. Sawada와 Takahashi (1975)가 제시한 모델은 [식 2.4.1]과 같으며, 전단파속도(v_S)는 깊이 (Z)에 따라 기하학적으로 증가하는 것으로 표현하였다. [식 2.4.1]의 계수 a, b는 현장시험을 결정되는 것으로, Sawada와 Takahashi (1975)의 경우는 일본의 Kisenyama 댐(높이 95m), Shimokotori 댐(높이 107m), Niikappu 댐(높이 102.8m)에 대해 시추공 탄성파 시험을 수행하였고, 이로부터 측정한 전단파 속도와 측정 심도를 이용하여 관계식을 [표 2.4.4]과 같이 결정하였다.

$$v_S = az^b \qquad \text{[식 2.4.2]}$$

여기서, v_S는 전단파 속도 (m/sec), z는 댐 표면으로부터 심도 (m), a, b는 상수 (코어죤의 경우 a는 140~180, b는 0.29~0.37)이다.

[표 2.4.4]사력댐에서 코어재료의 댐 심도에 따른 전단파속도 제안식(Sawada & Takahashi, 1975)

심도(m)	전단파속도(Vs) 상한값	전단파속도(Vs) 하한값
0~5	Vs = 210 m/s	
5~30	Vs = 180 $Z^{0.35}$ m/sec	Vs = 140 $Z^{0.34}$ m/sec

한편, 이종옥 외(2008)는 비파괴 표면파 기법인 MASW 기법을 이용하여 국내 7개의 사력댐 코아존에 대한 전단파 분포를 조사하였으며, 그 결과를 [식 2.4.2]의 형태로 정리하였으며, [표 2.4.4]에 제시한 바와 같다. 이종옥 외(2008)의 조사 결과에 의하면 a 값은 약 180~240의 분포를 보이고, b 값의 분포는 0.18~0.29의 분포를 보이고 있다. 이 관계식을 구하기 위한 r^2의 값도 0.48~0.77의 범위로서 현저히 낮은 분포를 보이고 있다.

또한 당 보고서에서는 측정한 HWAW 탐사결과를 이용하여 Sawada와

Takahashi 관계식으로 정리하였고, 관련 상수 a는 [표 2.4.5]에 제시한 바와 같다. [표 2.4.5]의 상수를 이용하여 심도 45m 까지 전단파 속도를 그림으로 나타나 보면 [그림 2.4.14]와 같다.

[표 2.4.5] MASW 기법에 의한 국내 7개 사력댐 코아존의 깊이별 전단파속도 분포 관계식(이종욱외, 2008)

구 분	a	b	상관계수(r^2)
임하댐	236.47	0.2103	0.6213
주암댐	177.74	0.2785	0.7661
주암조절지댐	180.6	0.2354	0.6206
대청댐	199.07	0.2518	0.7709
사연댐	237.49	0.1918	0.4650
영천댐	198.76	0.2084	0.7715
수어댐	234.42	0.175	0.4807

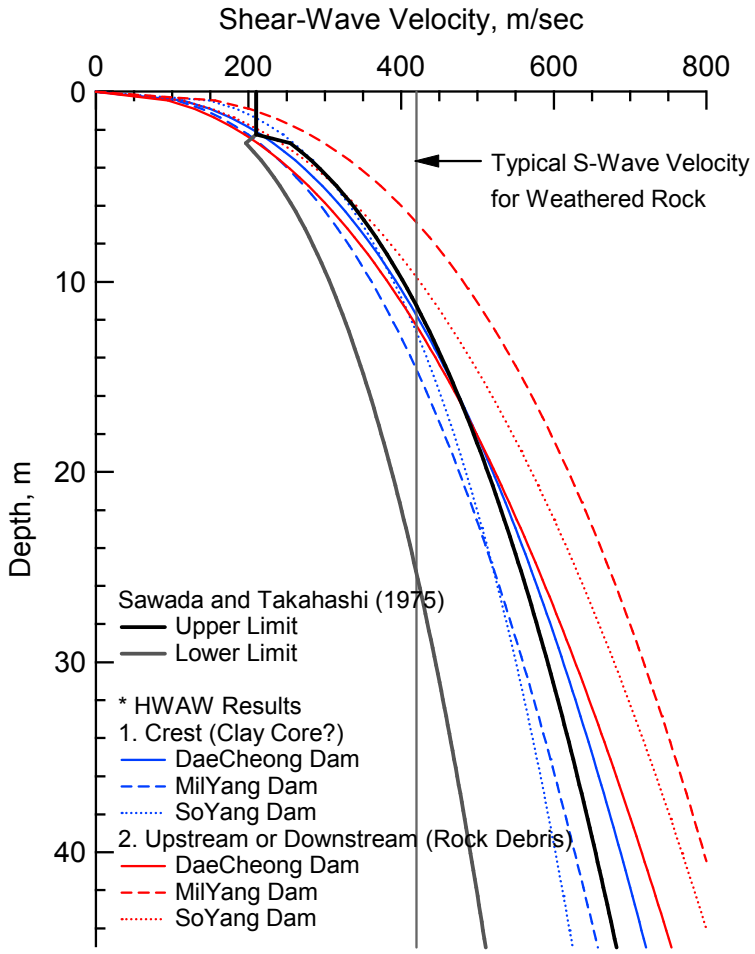
[표 2.4.6] HASW 기법에 의한 국내 3개 사력댐 코아존의 깊이별 전단파속도 분포 관계식

구 분	코아존			사력존		
	a	b	r^2	a	b	r^2
대청댐	157.86	0.4023	0.8951	135.23	0.4515	0.9166
밀양댐	144.36	0.3983	0.7885	208.66	0.3632	0.8635
소양댐	189.99	0.3127	0.7348	158.69	0.4274	0.8165

[그림 2.4.14]를 검토해 볼 때 다음과 같은 사실을 확인할 수 있다.

- 댐마루에 설정한 측선으로 측정한 전단파 속도는 약 12~15m 심도에서부터 풍화암의 전단파 속도를 보이고 있다. 만일 댐마루 측선 하부가 점토 코아라고 한다면, 점토 코아에 대한 다짐정도가 지나치게 과대 평가되었다고 판단된다. 심도 45m 위치에서는 전단파 속도가 거의 600 m/sec에 이르기 때문이다.
- 댐마루 측선하부 매질이 대체적으로 사력존 측선 하부매질보다 약하게 측정되었다. 그러나 대청댐과 소양댐의 경우는 각각 심도 약 18m, 6m 상부에서는 댐마루 측선 아래의 매질이 사력존 측선 하부매질보다 더 단단한 것으로 측정되었다.
- 밀양댐의 경우는 댐마루 측선하부 매질이 사력존 측선 하부매질보다 현저하게 작게 측정되어, 사력존의 암괴가 약한 점토코아를 덮고 있는 형국으로 나타났다.
- Sawada & Takahashi (1975)의 결과와 비교하여 보면, HWAW 시험으로 측정

한 국내 3개 댐제체의 전단파 속도가 약 20% 정도 과다하게 산정된 것으로 보인다. 특히 Sawada & Takahashi의 경우 시추공 탄성파 탐사로 측정한 전단파 속도를 사용하였다고 하였는데, 댐제체와 같은 형상에 있어서 시추공탐사 결과가 표면파 결과보다 더 크게 측정되기 때문에, [그림 2.4.14]에서 보이는 차이는 더욱 커지게 될 것이다.



[그림 2.4.14] HASW기법에의한 국내 3개 사력댐코아존의 깊이별 전단파속도 분포

5. 방향성 신호 감지를 위한 빔형성 (Beamforming) 기법

가. 개요

빔형성 기법은 방향성 신호의 감지 및 송출을 위한 센서배열에 사용되는 기법이다. 빔형성 기법은 전자기파나 음파, 탄성파 등에 활용되고 있으며, 레이다, 소나,

지진, 무선통신, 천문학, 음성인식, 음향학, 의공학 분야 등 매우 다양한 분야에 활용되고 있다.

특히 최근에는 지반 매질 내부 또는 표면을 따라 전파하는 탄성파의 전파특성을 평가하기 위하여 빔형성 기법을 도입하고 있다. 그 대표적인 사례는 Zywicki 와 Rix (2005)의 연구로서 표면파 속도에 대한 근접장 효과를 최소화하기 위하여 도입한 원통형 빔형성기법 (Cylindrical Beamformer)을 들 수 있다. 또한 2007년에는 Zywicki 와 Malladi 가 전방형-후방형 원통형 빔형성기법 (Forward- Backward Cylindrical beamformer)을 소개함으로써 해상도를 더 향상시켰다. 한편 Tran and Hiltunen (2008)은 지반의 전단파 속도 주상도를 평가하는데 활용되는 SASW 기법, MASW 기법, ReMi 기법 등을 상호비교하여 각 방법의 장단점에 대한 평가를 수행하였다.

본 장에서는 빔형성 기법이 특별히 표면파의 전파 속도를 결정하는데 적용된 사례에 대한 기존의 연구를 살펴보고 정리하였다.

나. Zywicki 와 Rix (2005)의 빔형성 기법

Zywicki 와 Rix는 표면파 시험의 대명사인 SASW 기법에 대한 문제점 또는 한계점을 지적하면서, 그 문제를 해결할 수 있는 기법으로 빔형성 기법을 제안하였다. 사실 이들은 SASW 기법의 문제점으로 여러 가지를 지적하고 있지만, 이는 이들이 SASW 기법에 대한 이해가 부족했기 때문이기도 하고, 또한 학문적 견지가 다르기 때문이기도 해서 SASW 기법이 가지는 특징을 문제점이라고 인식하고 있다고 판단된다. 또한 나아가서 일반적인 빔형성 기법이 평면파를 가정하고 있는데, 이 평면파에 대한 가정이 근접장에 대한 문제를 초래하고 있다고 판단해서 원통형 빔형성 기법을 개선책으로 제안하였다. 즉 표면파를 평면파가 아니고 원통형 파형이라고 가정하였을 때, 그에 준하는 빔형성 기법을 제안한 것이다. 빔성형 기법의 기본 개념은 그 형태를 유지하고, 단지 감진기 배열에 표면파가 도착하는 시간차를 반영하기 위해 도입하는 조타벡터 (steering vector)를 계산하는데 있어서 표면파의 입사각이 평행이 아니고 원통형 파형에 대한 조타벡터로 수정하는 방향으로 구현한 것이 원통형 빔성형 기법이다. 여기서 원통형 파형에 대한 조타벡터를 구하기 위해서 행켈 함수, H_0를 도입하여 간단하게 해결하였다. 즉 평면 표면파에 대한 조타벡터는 [식 2.4.3]로 나타내고, 원통형 표면파에 대한 조타벡터는 [식 2.4.4]로 표현하였다.

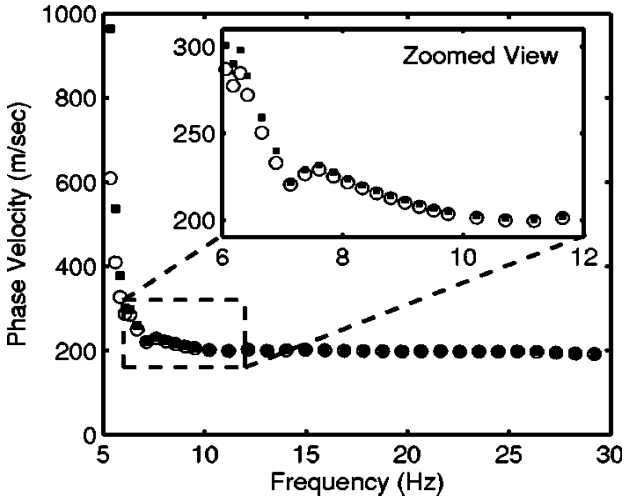
$$\boldsymbol{e}(k) = \begin{Bmatrix} e^{-j\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{x}_1} \\ e^{-j\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{x}_2} \\ \\ \vdots \\ \\ e^{-j\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{x}_N} \end{Bmatrix} \qquad \text{[식 2.4.3]}$$

$$\boldsymbol{h}(k) = \begin{Bmatrix} e^{-j\phi(H_0(\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{x}_1))} \\ e^{-j\phi(H_0(\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{x}_2))} \\ \\ \vdots \\ \\ e^{-j\phi(H_0(\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{x}_N))} \end{Bmatrix} \qquad \text{[식 2.4.4]}$$

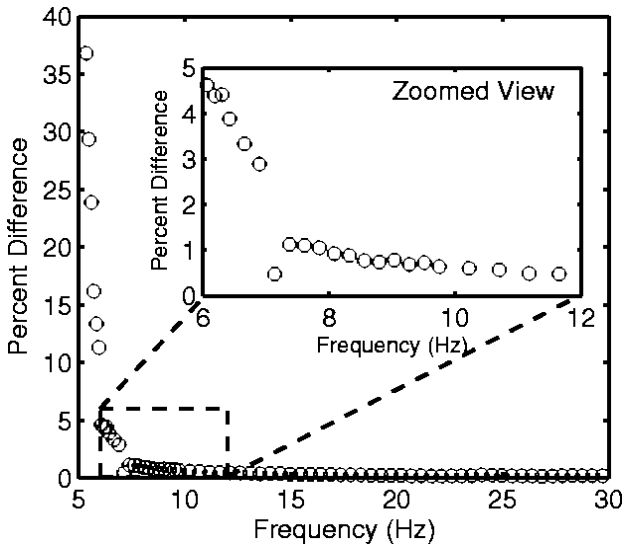
여기서 ϕ는 ()안에 주어진 변수의 위상각을 의미하는 것이고, $\boldsymbol{h}(k)$는 변수 k에 대한 조타벡터의 행켈함수를 의미한다. $\boldsymbol{k}$는 파수 (wavenumber), $\boldsymbol{x_i}$는 i번째 센서의 위치좌표를 의미한다.

Zywicki 와 Rix (2005)는 이와 같은 표면파의 파형을 평면파에서 원통형파로 수정하여 빔형성 기법을 구현함으로써 표면파의 속도가 더 증가하고 있다고 보고하고 있다 [그림 2.4.15]과 [그림 2.4.16] 표면파 속도의 차이는 저주파일수록 증가하며 무려 40% 정도에 이르기까지 표면파 속도가 증가하고 있다고 주장하였다. 이러한 주장에 대한 근거로 원통형 빔형성 기법이 근접장 효과를 약화시킴으로써 정상적인 표면파 속도가 측정되었기 때문이라고 하고 있다. 그러나 이는 이들의 주장일뿐, 본 연구진이 평가하기에는 근접장효과가 실제로 감소되었다라고 판단하지는 않는다. 대신 빔형성기법에 센서간 파동도달에 소요되는 시간차가 생겼을 뿐 실제로 근접장 효과를 감소시키는 이론적인 수정이 이루어진 것은 아니라고 판단된다.

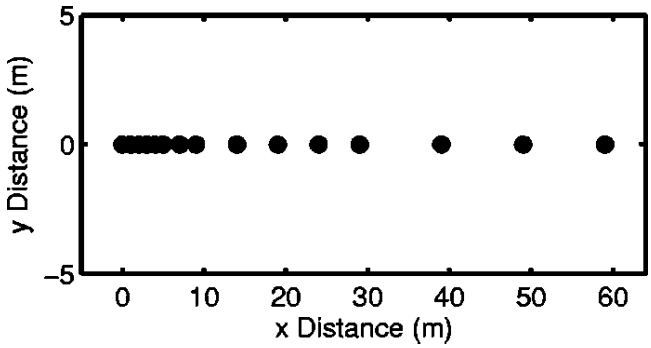
표면파 속도를 측정하는 Zywicki 와 Rix (2005)의 기법은 센서배열을 직선으로 설치하여야 하는데, 이들은 감진기가 간격을 균등하게 하지 않고 1m~60m 로 다양하게 설정하여 표면파 시험을 수행하고 있다. 이는 균등한 배열을 사용하여 빔형성 기법을 적용할 때에 공간영역에서 엘리어싱 문제가 생기기 때문이라고 했다. 이와 같이 엘리어싱 문제를 해결하기 위하여 센서배열을 다양하게 취한 것은 바람직하지만, 그러나 고주파수 대역 즉 큰 파장영역에서는 해상도가 현저히 감소되어 고주파수, 큰 파장 영역에서 자료의 결핍이 발생하게 되어 또 다른 문제를 초래하게 된다.



[그림 2.4.15] 원통형 빔형성 기법과 평면 빔형성 기법의 차이로 인한 위상속도 차이



[그림 2.4.16] 원통형 빔형성 기법과 평면 빔형성 기법의 차이 (퍼센트)



[그림 2.4.17] 빔형성 기법을 위한 선형 센서배열

다. Tran and Hiltunen (2005)의 빔형성 기법에 대한 평가

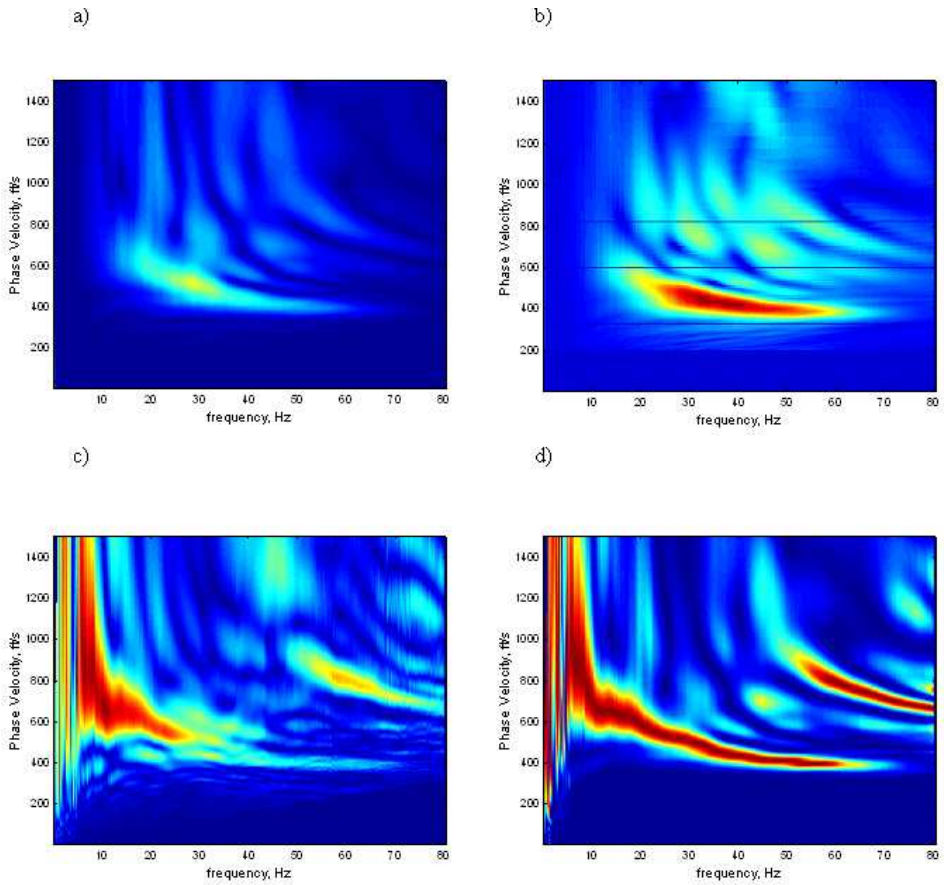
Tran과 Hiltunen은 MASW 기법을 구현하는 세부 요소기술로서 f-k 변환, f-p 변환, 박춘병 박사가 제안한 변환기법, 그리고 원통형 빔형성기법 등을 비교하였는데, 논문에서 사용한 사례의 경우는 원통형 빔형성기법이 가장 우수한 해상도를 제시하는 것으로 주장하고 있다. [그림 2.4.18]를 참고하면 원통형 빔형성기로 구한 스펙트럼이 가장 선명하게 즉 명확하게 위상속도를 결정할 수 있게 된다. 따라서 Tran and Hiltunen의 주장은 다채널을 사용하는 표면파 기법 (통칭 MASW 기법)에는 원통형 빔형성기법이 최적의 방법이라고 하였다.

또한 위상속도 분산곡선을 구하는 방법으로 SASW 기법, 능동형 MASW기법, Passive SASW 기법 등을 비교하였다. [그림 2.4.19]에는 각각의 방법으로 획득한 위상속도 분산곡선이 비교되어 있는데, SASW 기법으로 획득한 분산곡선에 대해서 특별히 부정적인 시각을 보여주고 있다. 이를테면 MASW 기법으로 획득한 분산곡선은 부드럽게 연속적으로 평가되지만, SASW 기법으로 획득한 분산곡선은 요철이 심하게 측정된다. 이는 횡방향 변이성이 있는 지반에서 감진기 간격을 다르게 하여 시험을 수행하면 각각의 감진기 간격에 대해 다른 매질을 측정하기 때문에, 대표 분산곡선을 도출해 내는 과정에서 요철이 생길 수 밖에 없다고 했다. 이는 두 가지 면에서 크게 잘못된 시각을 가지고 있으며, 논문 저자의 제한된 지식의 문제점을 표출하는 매우 잘못된 편견이다.

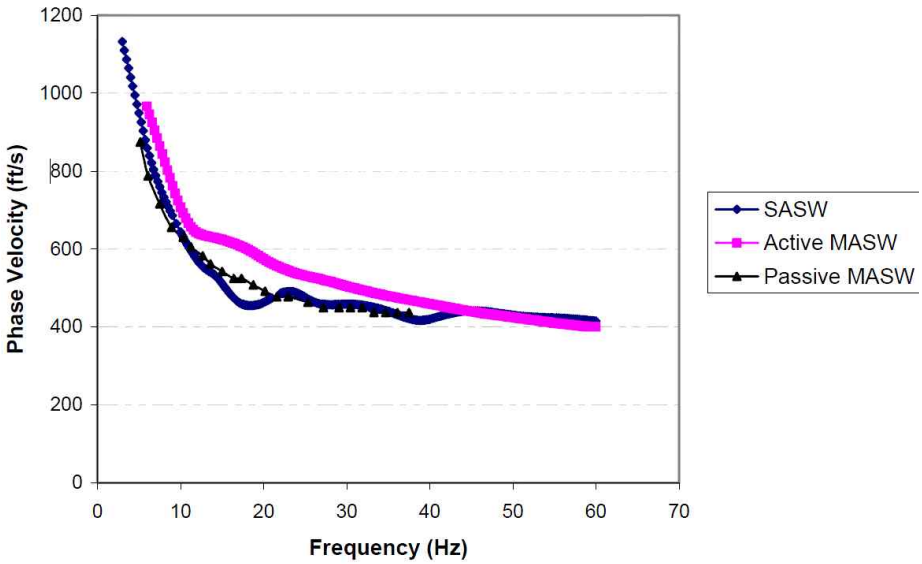
우선 그 첫 번째는 횡방향으로 균질한 지반이라고 해도 감진기 간격이 다르면 그 구성에서 획득되는 분산곡선은 동일 주파수라고 하더라도 표면파 속도는 다르게 측정되게 된다. 바로 이러한 점이 대부분의 사람들이 가지고 있는 오해의 여지가 있는 부분이다. 즉 일정 주파수에 대해 표면파 시험을 수행하면 시험구성이 어떠하던 간에 하나의 표면파 속도가 측정되어야 한다는 지식을 가지고 있는데, 이는 너무나도 잘못된 정보이다. 유한요소해석이나 표면파의 3차원 정해를 본다면 감진기 간격, 발진원의 위치도 표면파 속도를 결정하는데 매우 중요한 인자로 작용하고 있다.

그리고 두 번째 잘못된 것은 각 기법이 표면파 속도를 결정하는 방법이 다르기 때문에 역산해석도 그 기법에 준하는 모델링 기법을 사용하여 진행되어야 하는데 본 논문에서는 모두 동일하게 SeisOpt Remi 라고 하는 하나의 모델링 기법으로 진행하였다. 그 결과 [그림 2.4.20]에 도시된 바와 같이 세가지 전단파 속도 주상도 중에서 어느 것도 크로스홀 시험결과에 근접하는 것이 없음을 알 수 있다. 심지어는 N-치 주상도와도 큰 차이를 보이고 있다.

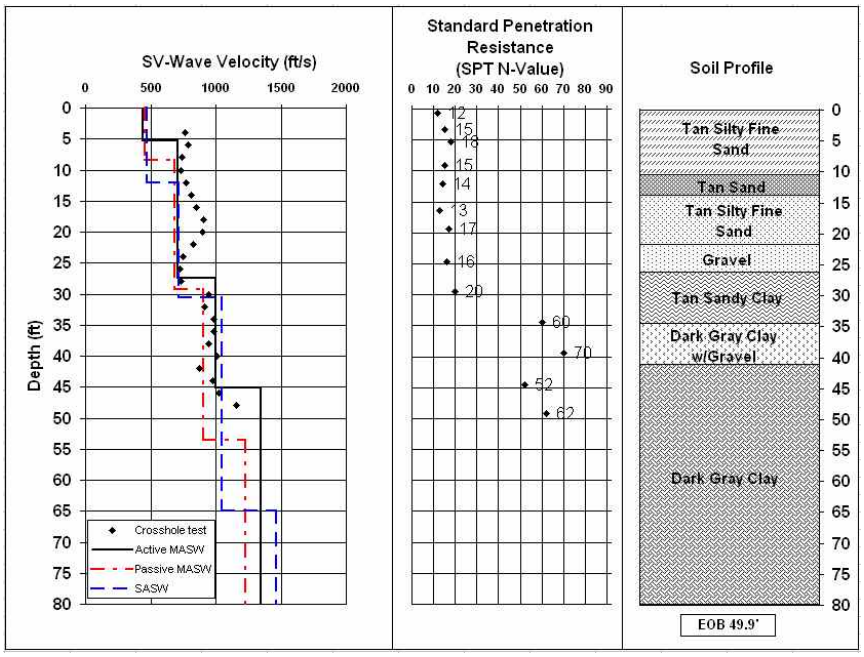
따라서 Tran과 Hiltunen의 연구는 잘못된 시각으로 진행되어 잘못된 결론을 도출한 논문으로 매우 문제점이 많은 논문이 되었다.



[그림 2.4.18] 주동 MASW 시험으로 결정한 스펙트럼: (a) f-k 변환, (b) f-p 변환, (c) Park, et. al, (d) 원통형 빔형성 기법



[그림 2.4.19] SASW, Active MASW 그리고 Passive MASW 시험에 의해서 획득한 위상속도 분산곡선



[그림 2.4.20] 그림 2.4.5의 위상속도 분산곡선에 대하여 역산해석을 수행한 결과

제 5 절 반사법탄성파탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정

지반의 동적특성을 파악하기 위한 현장탄성파 탐사는 다양한 방법을 적용할 수 있다. 각 탐사방법은 부지의 특성에 따라서 적용성이 높은 탐사기법을 적용해야 하며, 지반의 탄성파 속도를 측정하는 탄성파탐사 방법들은 가진원과 수신기의 위치에 따라서 지표탐사와 시추공탐사로 분류할 수 있다. 일반적으로 시추공을 이용하는 기법은 정확하나 비용이 많이 들고 본 연구과제인 대입경 조립재료를 이용한 사석이나 댐구조물의 특성상 시추가 어려운 경우가 많아 탐사가 불가능한 경우도 많이 존재한다. 특히, 댐 전체 부피의 80%이상을 차지하며 강성유지에 주요한 역할을 하는 사력재의 경우, 사석을 이용하여 시공되므로 시추공 확보에 어려움이 있다.

탄성파 속도는 암반의 밀도, 함수비 및 일축압축강도와 높은 상관성을 가지는 것으로 알려져 있으며(Yoshikazu et al., 1997), 우리나라에서 기존에 실험한 결과는 암상과 RQD 및 절리 틈에 크게 영향을 받는 것으로 밝혀졌다(송무영 외, 2002; 이벽규, 2004). 이러한 특성을 연구하고자 이벽규와 이수근(2008)은 국내 편마암 지대의 암질별 탄성파 속도의 범위 및 종파 및 전단파속도의 상관관계를 파악하여 동탄성계수의 특성을 제시하였다.

기존 연구자들의 실험 결과에 의하면 Vs 는 Vp에 비해 암반 내에 발달되어 있는 파쇄대나 불연속면에서 감쇄가 심한 것으로 알려져 있다. 따라서 어떤 특정한 층서단위 내에서 Vp, Vs의 수평적 변화를 검토하면 고결정도, 파쇄의 정도 및 절리의 발달 상태를 추정하는데 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있다(민경덕, 1987). 한국지반공학회(2000)의 지반공학 시리즈 '토목기술자를 위한 암반공학'에 따르면, Vs= A × Vp 의 관계로 분류되고 있으며, 국내의 이벽규, 이수곤(2008)에 따르면 경기편마암체에서는 A는 0.5~0.559의 범위로 나타났다. 반면에 외국의 사례로 Castagna et al.(1985)는 Vp와 Vs의 선형적관계의 분석을 시추공으로부터 a, b의 계수를 도출하였으며, 그 관계식은 Vs = a + (b × Vp)로 나타냈다. 한편, Brian et al.(2004) P-검층 및 S-검층을 이용하여 $V_S = a + bV_p + c\rho + d\gamma$의 관계식을 도출하였으며, 수식에서 γ는 gamma ray 검층에 의한 결과이다.

제 6 절 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발

1981년 Vyrmoed는 Oroville Dam에 대한 유한요소 수치모델을 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 계측자료로부터 산정한 댐의 고유진동수와 등가 선형방법을 사용하는 방법에 의해, 계측자료를 활용한 사력죤의 동적물성을 산정한 바 있다.

우리나라의 경우는, 상기 연구(상기 연구 사례는 지진다발지역인 미국 서부지역에서의 사례임)와는 다르게 중약진 지역에 해당되므로 본 연구결과를 그대로 적용할 만한 충분히 큰 지진이 발생할 수 없고(댐 정상부에서 인지할 수 있을 만한 변위값의 관측사례는 얻기 어렵다), 오히려 미소 지진기록을 이용하는 것이 바람직할 수 있다.

미소지진기록을 이용하는 경우에는, 지진에 의해 발생되는 최대변형율을 미소변형에 의한 탄성영역에 해당되므로 변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 별로로 차용하거나, 산정할 필요는 없는 것으로 분석된다.

2008년까지 국내 주요 대댐인 다목적댐과 용수전용댐에는 102개의 지진계가 설치되어 있고, 현재 실시간으로 미소지진기록까지도 계측할 수 있고, 그 자료를 활용할 수 있기 때문에 계측자료는 충분한 것으로 판단된다. 따라서, 향후 이러한 미소지진기록을 이용한 댐 사력죤의 물성산정은 직접탐사가 불가한 경우나 예비조사 차원에서는 매우 유용할 것으로 판단된다.

제 7. 절 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증

가장 확실하고 유용한 실대규모 실험방법은 발파를 이용하여 강진동을 시뮬레이션하는 것이다. Rogers 등(1979), Rogers 등(1984) 및 Borcherdt와 Gibs(1976)는 입사 지진동의 국부적인 증폭을 연구하기 위해 핵폭발에 의한 지진동을 이용하였다. 핵폭발로 방출되는 에너지는 1022~1024 erg이며 핵폭발의 파괴적인 힘에 대한 ASCE(1975)와 Blume과 Skjei(1973)에 의해 일부 연구가 수행되었지만 핵실험에 대한 반대로 향후 이러한 연구는 더 이상 수행할 수 없다. 채석, 터널공사, 암석파쇄, 도로공사 및 깊은 암반기초의 굴착 등의 인공 발파와 충격 및 발파해체는 지진 또는 핵폭발보다 작은 에너지, 규모를 나타낸다(Henrych 1979).

발파는 지진보다 에너지 방출이 매우 빠르며 작은 폭원지역에서 높은 응력변화가 나타난다. 최대 압력은 10~150 kbar이고 2,000~9,000 m/s의 충격파로 전파된다. 일반적으로 단일 발파는 길이 100m, 깊이 500m를 초과하는 경우는 드물고 지속시간은 1초의 몇 분의 1정도로 순간적으로 발생한다.

이러한 특성의 결과로 대부분의 발파진동 에너지가 방출되는 주 주파수는 자연지진보다는 높다. 발파진동의 지속시간과 유효 크기는 주변지반(암반 또는 토층)과 폭원 주변의 파쇄대의 크기에 관련된 발파의 임피던스에 의해 결정된다. 일반적으로 지진파의 형태로 방출되는 에너지는 총에너지의 1% 이하이다(Negmatullaev 등 1999).

구조물의 실대규모 발파진동 실험에서 발파를 통해 자연지진을 모사하는 방법을 개발하기 위해서는 사전에 발파실험을 통해 대상지반에 대한 발파진동 추정식을 파악하여야 한다. 발파진동의 세기는 폭원의 깊이, 폭원으로부터의 거리의 함수로 나타낸다.

Mills(1972)와 Chrostowski(1979)는 구조물의 실대규모 발파진동 실험을 위해 지연뇌관을 사용한 다단발파기법을 이용하였다. Bruce 등(1979)과 Higgins와 Triandafilidis(1977)는 광대역 지진 스펙트럼을 모사하고 가속도 기록의 지속시간을 연장하기 위해 다중발파(Multiple explosion)와 관련된 여러 가지 방법들을 이용하였다. 이 방법들은 2차원 배열에서 다단(Multiple) 및 디커플링(Decoupling) 발파와 순차적인 장약 점화방법을 적용하였다.

Negmatullaev 등(1999)은 타지키스탄의 Lyaur 시험지구에서 1977년 실시된 10회의 시험발파시 SMA-1 지진계로 측정된 가속도 기록을 분석하였다. 시험발파는 지

연뇌관을 사용한 다중발파로 실시되었다. 총 장약량은 85~10,830kg이었고 시추공의 깊이는 6~10m 깊이로 시험발파를 실시하였다. 측정된 지반 가속도는 최대 1.6g를 나타내었다. 발파진동에 의한 가속도 기록의 진폭과 스펙트럼 특성은 강진시의 지진기록들과 비교한 결과 단일 발파에 의한 푸리에 진폭은 대지진 보다 3-4배 높은 진동수에서 최대값을 나타내며 장주기에서 진폭이 작은 것을 확인할 수 있었다.

Jafari와 Davoodi(2006)는 이란 서부의 카룬강에 위치하는 높이 177m의 중심코어형 사력댐인 Masjed Soleiman댐을 대상으로 기계진동(Forced vibration), 미소진동(Ambient vibration) 및 발파진동 실험을 실시하여 댐체의 응답을 측정하였다. 발파진동 실험에는 2종류의 실험을 실시하였다. 첫 번째 실험에서는 댐체로부터 약 300m 우안측에 지하발전소 굴착시의 발파진동을 측정하였고, 두 번째 실험에서는 댐체로부터 1-2㎞ 떨어진 채석장에서의 발파에 의한 진동을 측정하였다. 발파로 인한 댐체의 진동은 단주기(Short-period) 속도계와 가속도계를 그림 와 같이 댐마루와 상·하류사면의 표면에 설치하여 측정하였다. 현장실험 및 3차원 유한요소해석 결과는 차이가 있었는데 이것의 원인으로는 본 연구에 적용된 신호처리(Signal processing) 방법이 적합하지 않았고 측정에 사용된 센서들의 민감도가 낮고, 댐체의 유한 요소해석의 계산 오차에 기인하는 것으로 추정되었다.

국내에는 기존 구조물의 진동특성을 파악하기 위한 발파진동 실험보다는 주로 신규 건설공사시 수행되는 발파공사로 인해 주변지역의 기존 구조물의 피해 가능성을 평가하는 사례들이 많다.

양현식(1992)은 3개의 광산과 5개의 건설부지의 지표발파에 의한 진동을 측정하여 지표발표의 진동특성을 분석한 결과 동시발파보다는 지발이, 근거리 보다는 원거리의 경우가 더 발파진동 지속시간이 긴 것으로 나타났고 지발발파는 동시발파보다 파형이 복잡하고 우세 진동수도 다양한 것으로 나타났다.

고영선과 김종우(1999)는 장약량, 측정거리 등과 같은 발파조건들이 지반진동에 미치는 영향을 조사하기 위해 골프장 조성공사를 위한 지표발파와 고속도로 건설공사를 위한 터널발파에서 지반진동을 측정하였다.

연관희와 이종림(1999)은 운영중인 영광원자력 4호기 터빈발전기 및 격납건물의 진동수준을 규제하기 위해 터빈발전기 기초로부터 약 310m 떨어진 비상원수조 축조 공사장 내에서 6회의 벤치컷(Bench-cut)형 시험발파를 실시하여 발파진동 허용수준을 제시하였다. 이때 사용된 진동센서는 측정 주파수 범위가 0~200Hz 범위인 서보형 가속도계를 사용하였고 계측된 가속도는 최대지반속도를 파악하기 위해 수치적으로 적분하여 속도로 환산되었다.

최준성 등(2006)은 실제의 발파현상 및 지반진동을 더욱 정확히 반영할 수 있도록 시험발파에 의한 계측자료와 역해석기법을 사용하여 발파하중을 산정하였고 이를 이용한 수치해석을 통해 구조물의 진동영향을 평가한 결과 타당한 결과를 얻었다.

백승규 등(2006)은 임하댐 비상여수로 터널건설을 위한 발파 설계시 시험발파 결과를 이용하여 최대 허용 지발당 장약량을 구하고 3차원 수치해석으로 진동식과 최대 허용 지발당 장약량을 산정하였다. 최대 허용 지발당 장약량은 시험발파의 경우 24kg이고 수치해석의 경우 13kg으로 계산되었다. 터널 주변 주요 구조물들의 안전을 위해 최대 허용 지발당 장약량은 13kg으로 적용하여 최종 발파설계는 이것의 75% 수준인 9.75kg을 적용하였다. 수치해석결과 9.75kg의 지발당 장약량을 사용할 경우 임하댐 발전소, 가배수 및 발전수로터널, 임하댐 및 기존 여수로의 발파진동 영향은 모두 허용 진동기준치인 1㎝/sec를 만족하는 것으로 나타났다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 대형 공진주 시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성산정기법 및 물성범위 제시

본 연구에서는 대입경 조립재료의 최대전단탄성계수, 변형율에 따른 탄성계수의 감소 특성, 감쇠비와 같은 동적물성을 정밀히 평가하기 위한 방안으로 대형 공진주 시험시스템을 개발하였으며, 각종 지반구조물에 이용되는 대입경 재료의 동적변형 특성을 평가함으로써 신규 개발된 장비의 적용성을 검증하고 재료 특성이 대입경 조립재료의 동적변형특성에 미치는 영향 등을 확인하였다.

신규 장비의 개발을 위하여 국내외 주요 연구기관에서 사용 중인 다양한 공진주 시험시스템의 현황과 그 특성을 조사함으로써 대입경 조립재료의 재료적 특성에 적합한 장비의 사양을 결정, 이에 따라 제작하였다. 해당 장비는 공진주시험 관련 기준 등이 명시하는 일반적인 방법에 의하여 교정을 실시하고 일련의 검증시편을 이용한 실험을 통하여 통상적인 지반재료의 동적변형특성 평가에 대한 적용성을 검증하였다. 또한 대입경의 자갈을 포함하는 여러 종류의 조립질 지반재료에 대한 다수의 실험을 수행하였으며, 이를 바탕으로 대입경 조립재료의 동적변형특성에 대한 영향요소를 평가하고 다양한 구조물 재료의 특성을 평가하였다.

1. 대형 공진주시험기 개발 기초자료 조사·분석 및 설계개념 도출

가. 공진주시험 및 시험기 관련 기준 조사

공진주시험 방법 및 시험기에 대한 기준은 일반적으로 미국 ASTM D4015 - Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Resonant-Column Method (ASTM, 2000)을 따른다. 해당 기준은 공시체 직경 70mm 이하의 일반적 시험기에 대하여 기술하고 있으며, 공시체 직경 100mm 이상의 대형 시험기에 대한 적용성에 대해서는 기술된 바가 없다. 본 연구에서 개발·적용하고자 하는 대형 공진주시험시스템의 개발을 위하여 1차년도 연구 수행 중 시험 기법의 일반적 사항을 조사하여 분석하였으며, 이를 바탕으로 적절한 설계 개념을 도출하고자 하였다.

공진주시험 관련 조사 항목은 시험의 기본 개념에서부터 일반적인 시험장치의

구성, 탄성계수 및 감쇠비의 결정 방법, 시험에 소요되는 각종 제어 계측 장치, 공시체 및 시험의 준비, 시험기의 교정, 결과의 분석 및 보고 방법 등 공진주시험에 요구되는 전 과정을 포함하며, 이와 관련된 상세 조사 항목은 아래와 같다. 해당 사항은 본 연구과제 1차년도 중간보고서에 상세히 기술하였다.

ASTM D 4015 (2000)

공진주시험법에 의한 흙의 전단탄성계수와 감쇠정수 산정 시험법

(Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Resonant-Column Method)

1. 적용범위
2. 관련 시험방법
3. 용어의 정의
4. 중요성과 활용성
5. 시험장치
6. 시험 공시체
7. 캘리브레이션
8. 시험순서
9. 계산방법
10. 보고방법

나. 대형 공진주시험기의 구축 및 활용 현황

소형 공진주시험기의 경우 전 세계적으로 일반화되어 널리 사용중이나, 공시체 직경 150mm 이상의 대형 공진주시험기를 구축하여 활용하는 기관은 소수에 불과하다. 현재 국제적으로 알려진 주요 대형 공진주시험기의 구축 및 활용 현황은 [표 3.1.1]과 같이 조사되었다. 이들 장비 중 본 연구에서 목표로 하는 신규 장비 구축을 위하여 각국의 주요 대형 공진주시험기의 구축 및 활용 사례를 다음과 같이 조사하였다.

[표 3.1.1] 외국의 공진주 시험기 구축 및 활용 예

보유기관	국가	사업명칭	시료의 크기 (mm)	
			직경	높이
Kentukey대학교	미국	다수의 댐	36	78
미공병단 寒地연구소(CRREL)			75	460
미공병단 수리실험연구소(WES)			100	370
Texas대학교			150	300
멕시코 대학교	멕시코		70	100
칼수루헤 공과대학교	독일	바쿤댐 (말레이시아)	800	800
			100	100
		마쉐드 솔레이만 (이란)	100	100
		고속전철	500	1000
			1000	2000
Ruhr-Bochum대학교		철도	100	200
Kassel대학교		철도	500	1000
쮜리히 공대	스위스	다수의 댐	80	250
			150	450
중앙재료 연구소	인도	테리 댐	76	불명
경희대학교	한국	철도	150	300

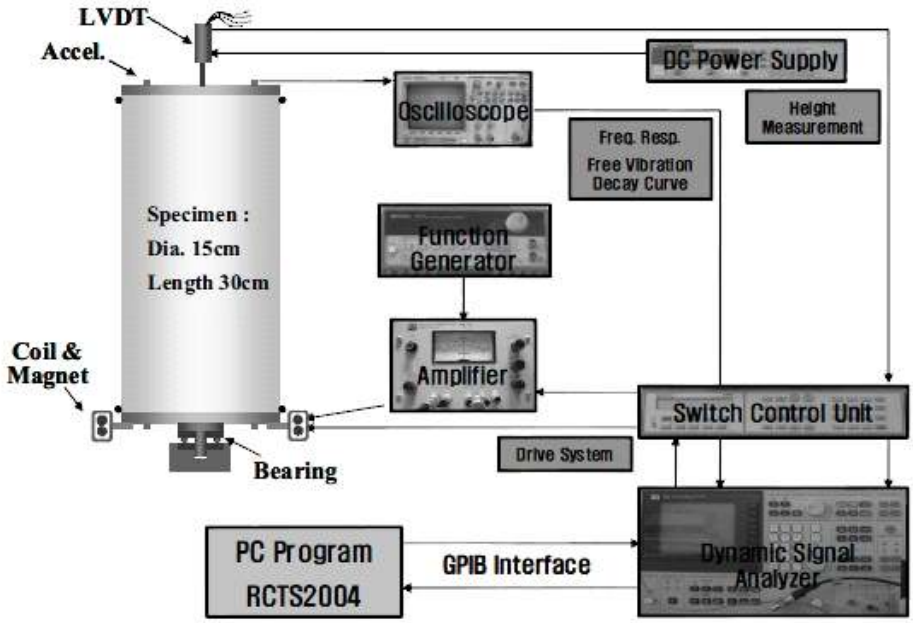
(1) 경희대학교 (대한민국)

- 미국 the University of Texas at Austin의 대형 공진주시험기를 참고하여 직경 15cm, 높이 30cm의 원주형 공시체에 대하여 적용 가능한 시험장비 개발하여 (박인범, 2010) 도로노반, 철도 발라스트 재료 등의 탄성계수 산정에 활용
- 공시체 하부에 코일-자석 시스템에 의한 가진이 가능한 자유-자유 양단조건의 공진주시험기



(a) 시험기 전경　　(b) 코일-자석 가진시스템

[그림 3.1.1] 경희대학교 대형 공진주 시험기

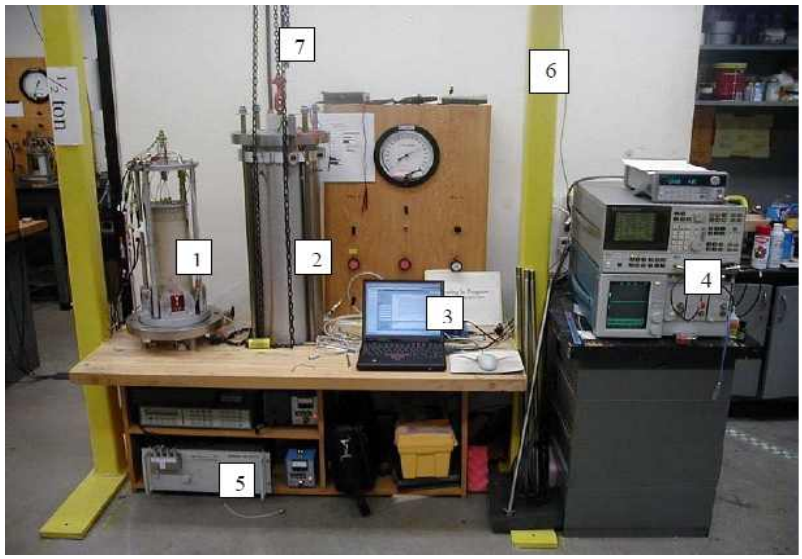


[그림 3.1.2] 경희대학교 대형 공진주 시험기의 제어·계측 시스템 구성도

(2) the University of Texas at Austin (미국)

- 사질토 및 자갈질 재료의 동적 변형특성 평가를 위하여 직경 6inch (약 15cm), 높이 12inch (약 30cm)의 원주형 공시체에 대하여 시험 가능한 대형 공진주시험기 개발 및 활용

- 공시체 하부에 코일-자석 시스템에 의한 가진이 가능한 자유-자유 양단조건의 공진주시험기로서 스프링을 이용하여 공시체를 지지하여 양단 자유조건 구현
- 비틂 형태의 공진주시험 (RC), 종방향 가진에 의한 P파 측정 등의 시험 가능
- 국제적으로 공진주시험기 개발 관련 최고 수준의 노하우를 보유하고 있으며, 제어 계측 시스템 구축 현황 참고 가능



[그림 3.1.3] University of Texas at Austin 대형 공진주시험시스템 (Menq, 2003)

(3) Karlsruhe Institute of Technology (독일)

- 철도 발라스트 재료 댐 축조재료 등의 동적물성 산정을 위하여 직경 50cm 또는 80cm, 높이 100cm의 원주형 공시체에 대하여 적용 가능한 공진주시험기 구축 활용
- 상부 electro-dynamic 가진시스템을 이용하는 양단 자유 조건의 시험시스템으로 하부 페데스탈을 볼베어링으로 지지하여 자유단 경계조건 구현
- 각종 댐 축조재료, 고속철도 발라스트 재료에 대한 다수의 공진주시험 성과를 보유하고 있으며, 시간 경과에 따른 동적 변형특성 평가 등에 활용



[그림 3.1.4] Karlsruhe Institute of Technology 대형 공진주시험기 (Prange, 1983)

(4) University of Kassel (독일)

- 조립재료의 장기변형거동 조사 및 철도교통하중과 같이 반복하중을 받는 발라스트 재료의 동적물성 산정을 위하여 개발한 대형 공진주시험기로 직경 50cm, 높이 100cm의 원주형 공시체에 대한 시험 가능
- 양단 자유 형태이며, 특히 하부 페데스탈의 경우 공기압에 의하여 공시체를 부양함으로써 하부 자유단 조건을 구현



[그림 3.1.5] University of Kassel 대형 공진주시험기

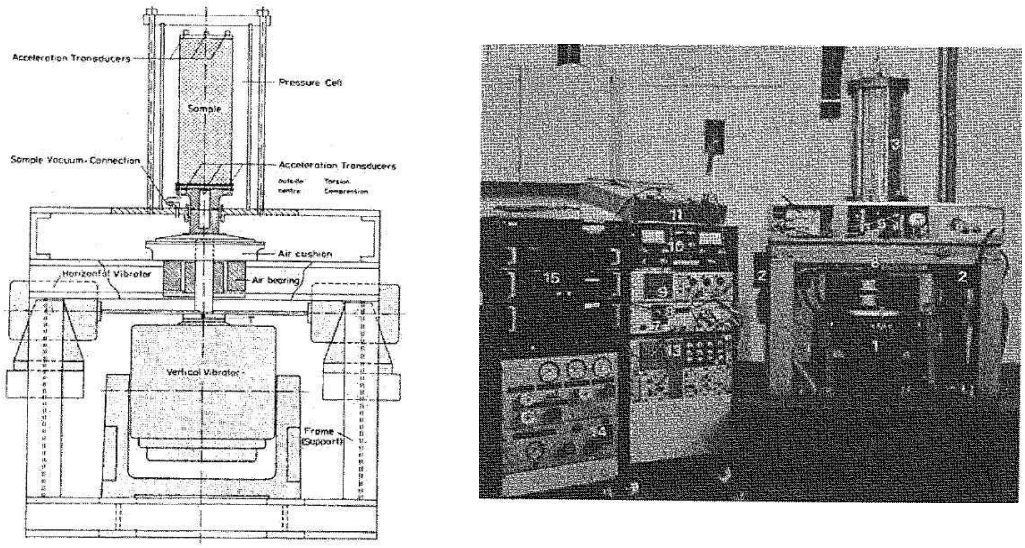
- 철도 발라스트 재료 댐 축조재료 등의 동적물성 산정을 위하여 직경 50cm 또는 80cm, 높이 100cm의 원주형 공시체에 대하여 적용 가능한 공진주시험

기 구축 활용

- 상부 electro-dynamic 가진시스템을 이용하는 양단 자유 조건의 시험시스템으로 하부 페데스탈을 볼베어링으로 지지하여 자유단 경계조건 구현
- 각종 댐 축조재료, 고속철도 발라스트 재료에 대한 다수의 공진주시험 성과를 보유하고 있으며, 시간 경과에 따른 동적 변형특성 평가 등에 활용

(5) Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich (스위스)

- 최대입경 25mm 이상의 조립질 지반재료의 미소변형 동적 변형특성 평가를 위한 공진주시험기 구축 활용
- 직경 15cm, 높이 45cm의 원주형 공시체를 이용하는 고정-자유 단부조건 형태의 공진주 시험기로서 electro-dynamic 가진시스템 이용



[그림 3.1.6] ETH Zurich 대형 공진주시험기

다. 대형 공진주시험시스템의 사양 결정 및 기본 설계

본 연구의 목표인 대입경 조립재료의 동적물성 평가를 위한 대형 공진주시험시스템은 관련 기준인 ASTM D4015와 국내외 여러 기관의 시험장치를 참고하여 개발 사양을 결정하였다. Drnevich (1977)와 Clayton 등 (2009)은 공진주시험 수

행 시 장비의 특성 또는 시험상의 오차에 의하여 발생할 수 있는 다양한 문제에 대하여 분석하였는데, 본 연구에서 신규 개발한 공진주시험기는 이러한 오류의 원인을 최소화할 수 있는 방안을 고려하고, 또한 개발 목적에 부합하는 사양을 도출하였다.

최종적으로 최소 25mm 이상의 최대입경을 나타내는 조립질 재료에 대하여 시험이 가능하도록 직경 200mm, 높이 400mm (직경:높이 = 1:2)의 중실 원주형 (solid cylindrical) 공시체를 이용하고, 최대 1MPa의 구속압 상태에서의 시험이 가능한 시험기 사양을 제시하였다. 더불어 시험 시 단부조건을 이상화하고, 고정밀의 제어·계측 시스템의 활용, 시험기의 교정 및 운용의 효율성을 고려한 시스템 사양을 결정하였다. 시험기의 개발을 위한 필수 고려 항목은 [표 3.1.2]과 같이 도출하였으며, 이를 바탕으로 설계·제작을 위한 상세 사양은 [표 3.1.3]과 같이 정리하였다. 이들 항목에 대한 상세 사항은 1차년도 보고서에 상세히 기술하였다. [그림 3.1.7]은 해당 시스템의 상세 구성도를 나타낸다.

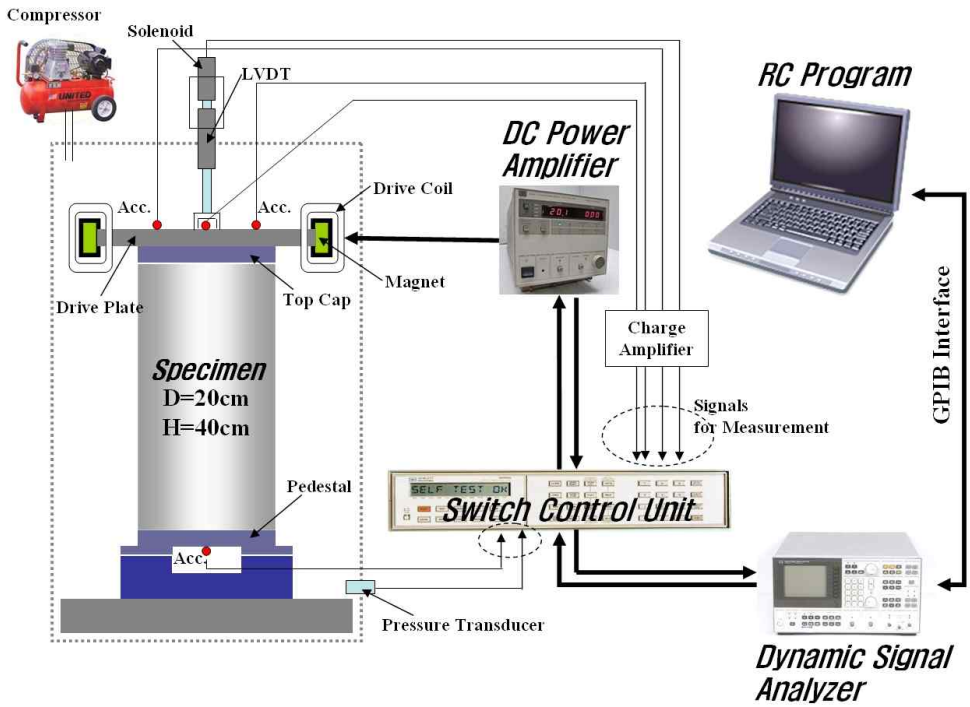
[표 3.1.2] 대형 공진주시험기 개발을 위한 필수 항목

구분	고려 사항	필수 사양
1	시험목적에 적합한 크기의 공시체 사용 가능성	시료 입경 25mm 이상
2	중실 원주형 공시체 이용	공시세 균질성 고려
3	공시체의 크기 비율	D:H = 1:2
4	구속압 재하가 용이할 것	최대 1MPa 구속압
5	공시체 거치·철거가 용이하고, 시험 단부조건 만족	단부 강성비 고려 설계
6	가능한 시험의 종류	RC, TS, P-wave
7	시험에 필요한 충분한 비틂가진력 정밀 제어	
8	배경 노이즈 영향 최소화	제어계측, 시험기 설계
9	공시체의 크기를 변화시킬 수 있을 것	확장성 확보
10	정밀한 가진제어 및 계측	제어계측장치 사양 확인
11	공진주시험의 이상적 조건 구현 가능성	강성, 단부조건 설계
12	캘리브레이션 용이성	캘리브레이션 장치 개발
13	구속압 셀 안정성 확인	설계 시 검증
14	운영 소프트웨어	정밀제어 계측

[표 3.1.3] 대형 공진주시험시스템 개발·구축을 위한 제안 사양

	Items			Specifications	Descriptions	Remarks (ASTM D4015)
A	Summary	Specimen Size		• **d=200mm, h=400mm (minimum)** • d=300mm, h=600mm (optional)	• Maximum grain size: ≤ 30mm or ≤ 50mm • h:d=1:2	• 최소 d=33mm이상 되어야 함 d ≤ 70mm인 경우 : 1/10이하 d > 70mm인 경우 : 1/6이하
		Specimen Shape		• Solid Cylinder		
		Strain level		• 10^{-3} to 10^{-6} (10^{-1} to 10^{-4} %)		• 10^{-3} to 10^{-6}
		Confining Pressure		• Maximum : 1 MPa		
		Available Tests		• Resonance test • Torsional shear • Damping		
		Driving System	Torsional	• Coil-magnet drive	• Maximum torque : 500N-m • Vibration frequency : 10 to 2000Hz	• 최대 토오크 규정: 없음 • 진동주파수 0.5% 이내로 조정가능할 것 • 코일에 가해진 전류량을 최소 5%의 정확도로 제어할 수 있을 것
			Vertical	• Solenoid Hammer	• Impact method	
		End Condition		• **Fixed(bottom)-Free**	• As accelerometer will be attached on the bottom, therefore certain space for its installation is required between pedestal and bottom plate.	
		Measurement		• Acceleration • Velocity • Displacement • Pressure	• Accelerometer : 0.1 to 30g • Velocity transducer : 0.1 to 30 cm/sec • LVDT : 0.01 to 20mm • Proximitor : 0.01 to 3.0mm • Pressure transducer : 1MPa	• 변위량 2.5×10^{-6}m 및 회전량 10^{-5}rad 를 10%의 정확도로 측정할 수 있을 것
		Software		• For control of torsional and longitudinal excitation • Programmable software	• For control • For measurement	
		Sample Preparation Device		• Large automatic compactor		
B	Driving system	Torsional		• Coil-magnet driving	• Excitation force : Max. 500N-m	
		Vertical		• Solenoid hammer	• Solenoid hammer shall be isolated from top cap of specimen	
C	Specimen Support System			• Fixed-support		
D	Confining System			• Steel chamber • Compressor with regulator		

E	Vibration Control System	• Coil-magnet drive • Dynamic signal analyzer • Amplifier	• Vibration frequency : 10 to 2000Hz (normal operation : 20 to 300Hz) • Continuously frequency variation with adjuster • Vibration measurement : -Acceleration : 0.1 to 30g -Velocity : 0.1 to 30 cm/sec -Displacement : 0.01 to 3.0mm	
F	Measurement System	• Acceleration : 30g -Vertical : -Tangential : • Velocity : 30 cm/sec • Displacement : -Vertical(LVDT) : 20mm -Horizontal(proximitor) : 3mm • Amplifier		
G	DAQ System	• High speed 8 Ch • Oscilloscope : 2 Ch		
H	Air-Water Supply & Control Unit	• Air compressor : 1MPa • Precision air regulators • Measuring gauges	• Gauges: -Master gauge: 1000kPa(ϕ200) -Slave gauge: 1000kPa(ϕ100)	
I	Calibration system	• Calibration devices • Metal Dummy samples	• Metal dummy samples with various diameter and Inertia moment	
J	Sample preparation system	• Large scale compactor • Latex Membrane		
K	Auxiliary devices	• Steel frame with crane		



[그림 3.1.7] 대형 공진주시험시스템 개발 구성도

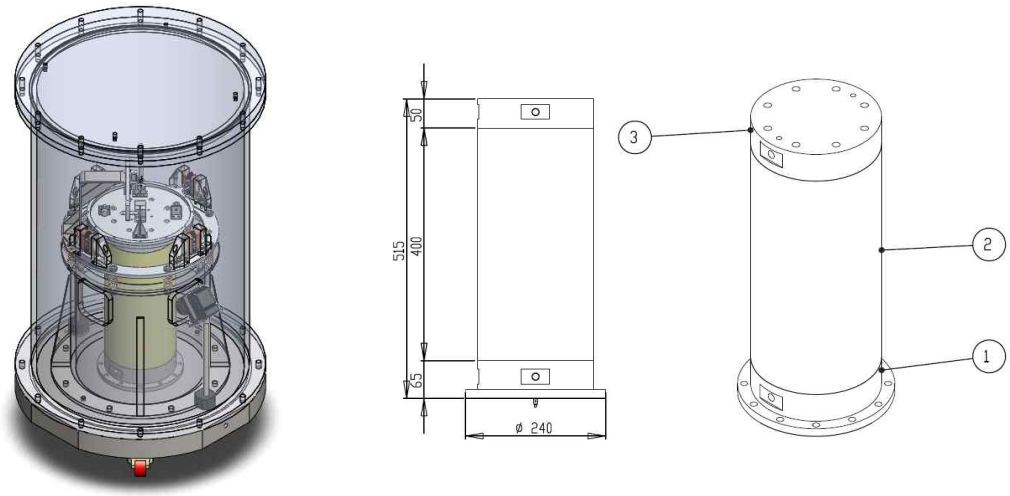
2. 대형 공진주시험시스템의 설계 및 제작

대입경 조립재료의 동적물성 평가에 적합한 대형 공진주시험시스템의 개발을 위하여 1차년도 연구 수행에 의하여 도출된 설계 개념을 바탕으로, 2차년도 연구기간 중에는 제작을 위한 설계 도면을 개발하고 시험시스템을 제작, 검증하였다. 본 대형 공진주시험시스템은 [표 3.1.2]에 열거한 총 14개 설계 원칙에 부합되도록 설계·제작되었으며, 상세 사항은 다음과 같이 소개하고자 한다.

가. 대형 공진주시험기 구축 기본 사항

대형 공진주시험시스템 설계의 기본 방향은 최소 25mm 이상의 최대입경을 갖는 조립질 지반재료에 대하여 ASTM D4015의 공진주시험 기준을 만족하는 시험이 적절히 수행될 수 있도록 결정하였다. 따라서 공시체의 표준 직경을 200mm로 선정하고 높이는 직경:높이 비 1:2에 상응하는 400mm로 설계·제작하였다. 조립재의 특성에 따라 중공형 (hollow cylindrical) 공시체를 이용할 수 없으므로, 중실

원주형 (solid cylindrical) 공시체를 사용하도록 하였다. 본 시험기는 향후 확장성을 고려하여 최대 직경 300mm, 높이 600mm의 공시체에 대해서도 시험이 가능하도록 제작되었다. 시험기의 기본적 설계 개념도는 [그림 3.1.8]과 같다.



[그림 3.1.8] 개발된 대형 공진주시험시스템의 개요 및 공시체 형상

본 연구에서 개발된 대형 공진주시험기는 조립재의 다짐 시 용이성과 이상적 단부조건을 확보하기 위하여 하부 고정단, 상부에 첨부질량이 포함된 자유단 조건(fixed and free with additional mass) 형태의 전형적인 Stokoe 식 공진주시험기이다. 이를 위하여 하단부의 강성을 최대한 확보하기 위하여 스테인리스 스틸 재질의 페데스탈(pedestal)을 제작하여 설치하였다. 공시체 상부에 놓이는 수동단 플레이트는 작업이 편리하고 실험시스템의 회전관성모멘트를 작게 하되 공시체와의 충분한 강성차를 확보할 수 있도록 경량의 두랄루민(duralumin)으로 제작하였으며, 이와 같은 조건을 통하여 이상적인 단부조건을 구현할 수 있도록 구성하였다. 시험기의 이용 시 적용 가능한 최대 구속압은 2MPa 이상으로 목표한 1MPa을 초과하며, 해당 압력 상태에서의 안정성은 수치적으로 검증하였다.

시험기의 사용 시 편의를 도모하기 위하여 자동 시료 다짐기, 중량 운반용 호이스트 등 다양한 시스템을 통합적으로 구축하였으며, 해당 장비의 설치 현황은 [그림 3.1.9]에 나타내었다.



[그림 3.1.9] 대형 공진주시험시스템의 설치 현황

나. 제어 및 계측 시스템

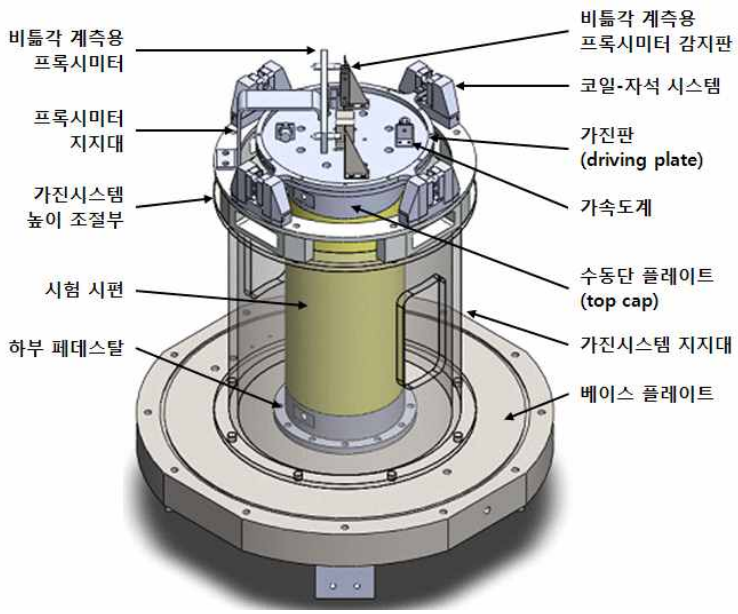
본 시험기는 기본적으로 일반적인 Stokoe 식 공진주시험장치로서 코일과 자석으로 구성된 가진 시스템에 일정한 파형의 전류를 작용하여 반복적인 정현파 형태의 비틂력을 공시체에 가하도록 구성되어 있다. 현재의 비틂하중제어 및 계측 시스템은 공진주시험(Resonant Column Test)과 비틂전단시험(Torsional Shear Test)을 병행하여 수행할 수 있도록 구성되어있다. 공진주시험의 경우 비교적 광범위한 대역의 가진주파수를 변화하여 비틂하중을 제어함과 동시에 가진판 상부에 부착된 가속도계의 응답 진폭을 계측함으로써 비틂하중에 대한 주파수응답곡선을 획득하고, 최대 응답이 발생하는 공진주파수를 찾아내어 공시체의 전단탄성계수를 평가하는 방법이다. 이와 같은 시스템의 구성은 가진하중의 파형 제어를 위한 임의파형발생기(Function / Arbitrary Waveform Generator, Agilent 33220A), 단단한 조립질 공시체에 적합한 수준의 가진력을 제공하기 위한 전류증폭기 (Current Amplifier, Eliezer EA Power Amplifier), 가진판의 응답 수준을 평가하기 위한 가속도계 (Accelerometer, PCB 353B15) 등의 제어 및 계측 장비가 사용된다.

한편 Stokoe 식 시험장치는 동일한 가진 시스템의 운용을 달리 함으로써 비틂전단시험도 수행이 가능한 장점을 갖는다. 비틂전단시험의 경우 0.1Hz 이하의 낮은 하중주파수 수준에서 전단응력-전단변형률 관계를 직접적으로 정밀하게 계측

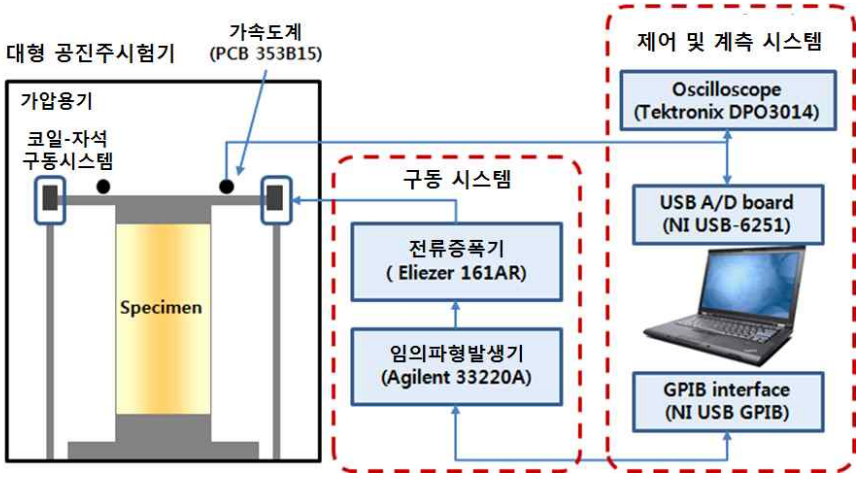
할 수 있는 장점이 있으며, 특히 점토와 같이 가진하중의 주파수에 영향을 받는 재료에 대한 전단변형특성의 평가가 가능하다 (Kim, 1991). 비틂전단시험을 위하여 공진주시험과 동일한 가진시스템을 이용하여 비교적 낮은 주파수 범위에서 하중을 제어함과 동시에, 프록시미터(Proximetor, AEC-5509)를 이용하여 보다 정밀한 전단변형률을 계측하게 된다. 특히 가진 시스템에 전달하는 전압 및 전류에 대하여 실제 공시체에 전달되는 비틂하중의 엄밀한 평가가 필수적으로 요구되며, 이를 위하여 토크셀을 이용, 전압/전류-비틂력 관계에 대한 캘리브레이션을 수행하였다.

또한 공시체의 전단강성평가 외에 가진판 상부에 공압 실린더를 이용한 충격파 발생장치를 설치하고, 공시체 양단에 진동 감지용 가속도계를 설치함으로써 공시체를 통하여 전파되는 압축파(P-wave) 속도를 계측할 수 있는 시스템을 구성하였다. 계측된 공시체의 P파 속도는 공진주 또는 비틂전단시험을 이용하여 획득한 전단탄성계수와의 비교를 통하여 포아송비(Poisson's Ratio) 도출 등에도 이용될 수 있다.

본 연구에서 개발한 공진주시험기의 상세 구성 사항은 [그림 3.1.10]에 나타내었으며, 시스템의 제어 및 계측을 위한 통합 시스템 구성은 [그림 3.1.11]와 같이 도시하였다.



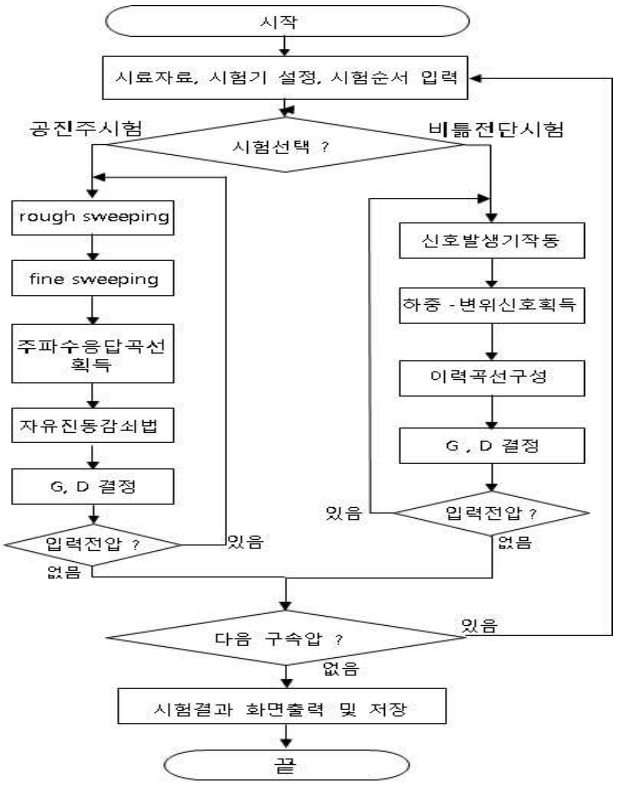
[그림 3.1.10] 대형 공진주시험기의 상세 구성



[그림 3.1.11] 대형 공진주시험시스템의 구동·계측 계통도

다. 대형공진주시스템 제어용 시험 알고리즘 개발

본 대형공진주시스템은 하나의 통합된 시스템에 설치된 공시체에 대하여 공진주시험과 비틂전단시험이 병행될 수 있도록 제어 및 계측 장비가 설치되어 있으며, 요구되는 시험을 효율적이고 정밀하게 수행할 수 있도록 통합 소프트웨어를 구축하고자 하였다. 운영 소프트웨어는 National Instrument 社의 LabVIEW 기반으로 제작었으며, 그래픽유저인터페이스(Graphic User Insterface, GUI) 기반의 전자동 제어 시스템으로 구성되었다. 하나의 소프트웨어의 구동을 통하여 공진주시험 뿐만 아니라 비틂전단시험 또한 제어할 수 있으며 다양한 전단변형율 크기에 대하여 순차적인 자동 시험이 가능하다. 통합 소프트웨어의 개요는 [그림 3.1.12]와 같다.

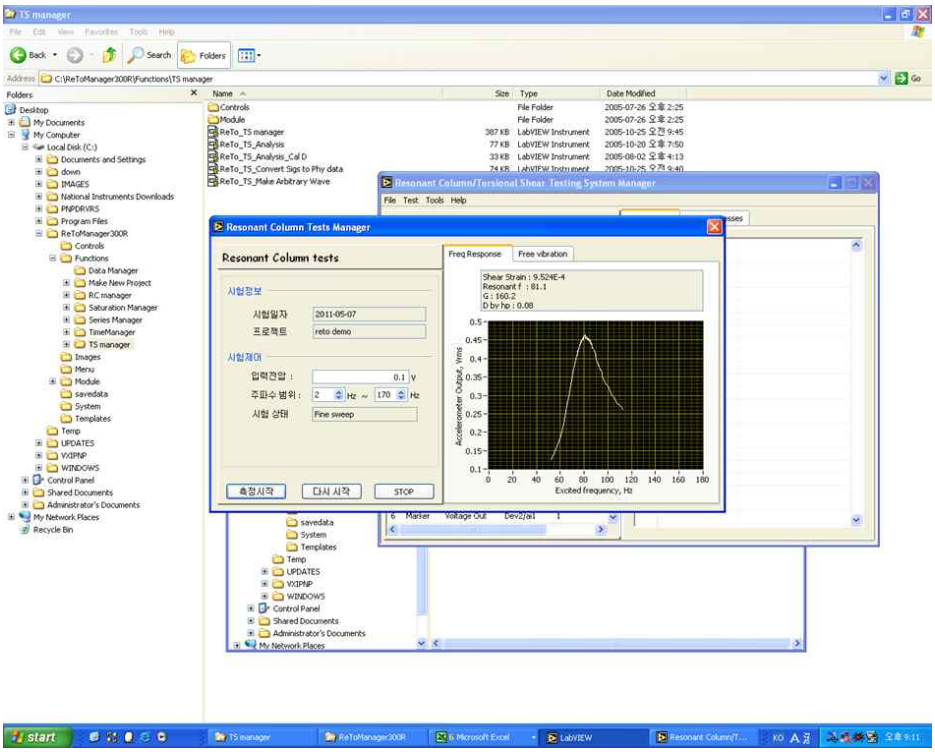


[그림 3.1.12] 대형 공진주시험시스템의 시험수행 개요 및 알고리즘

통합 시스템을 이용한 공진주시험의 경우 공시체의 기하학적 형상과 공학적 특성에 따른 비틂전단력에 대한 공진주파수를 찾기 위하여, 적절한 전단변형률 수준에 해당하는 입력전압의 정현파를 초기 선택된 광범위한 주파수 대역에서 주파수를 변화시키며 가진하고 이 때의 가속도계 응답을 전압신호 형태로 측정하게 된다. 공시체의 전단탄성계수 또는 전단파속도에 해당하는 공진주파수를 효율적으로 찾기 위하여 주파수 변화율을 달리 적용하는 'Rough Sweeping', 즉 주파수 변화간격을 넓게 하여 대략적인 공진점을 추정하는 방법과 'Fine Sweeping', 즉 초기 찾아낸 공진대역 인근에서 세밀하게 주파수를 스캔하여 공진점을 찾아 주파수 응답곡선을 만들 수 있도록 구성되어 있다.

주파수응답곡선을 측정한 후에는 가진 시스템의 회로를 모두 끊어주어 자유진동감쇠 시험을 자동적으로 수행할 수 있도록 구성함으로써 해당 전단변형율 수준에서의 자유감쇠비(Damping Ratio)를 자동으로 계산할 수 있다. 전단변형율 크기에 따른 전단탄성계수 감소곡선(Shear Modulus Reduction Curve) 또는 감쇠비곡선 등을 도출하고자 하는 경우 사전에 준비된 입력전압 리스트를 이용하여 입력전압을 순차적으로 바꾸어 가면서 공진주시험을 반복수행하게 된다. 공진주시험

진행을 위한 소프트웨어의 사용자 인터페이스 및 시험 수행을 통한 전형적인 주파수응답곡선은 [그림 3.1.13]과 같다.



[그림 3.1.13] 대형공진주시스템의 공진주시험 사용자 인터페이스

3. 대형 공진주시험시스템의 검증

공진주시험기, 삼축압축시험기와 같은 지반시험기의 재료 물성 평가에 대한 적용성을 검증하기위해서는 구동 및 계측시스템의 교정과 지반재료와 유사한 특성을 나타내는 재료에 대한 검증시험, 또는 유사 시험기와의 비교 등의 절차를 수행하는 것이 일반적이다. 특히 공진주시험기의 경우 지반재료의 변형계수와 더불어 양 단부의 복잡한 기하학적 특성이 재료물성평가에 중요한 요소로 작용하므로 이에 대한 교정이 필수적이다. 본 연구에서는 신규 구축된 대형 공진주시험시스템에 대하여 기존에 제시된 일반적 교정절차에 따라 가진부의 동적 특성을 평가하고, 지반재료와 유사한 변형계수 특성을 나타내는 폴리우레탄 시편에 대한 시험을 실시함으로써 시험기의 역학적인 적합성을 검증하였다. 최종적으로는 자갈질의 지반재료에 대한 대형 공진주시험을 실시하고 기존 일반 크기의 시험기로부터 동일 재료에 대한 시험 결과를 획득하여 비교함으로써 지반재료의 동적 변형특성 평가에 대한 신뢰성을 확인하고자 하였다.

가. 금속 시편을 이용한 시험시스템의 교정

공진주시험기의 교정은 일반적으로 상단부의 공진 특성을 측정하기 위한 계측기(가속도계)의 민감도(sensitivity)와 시험시편 양단에 설치되는 복잡한 기하학적 형상의 강성체의 질량관성모멘트(mass polar moment of inertia, I)의 측정을 의미한다. 하단부가 고정되고 상부에 코일-자석 형태의 가진시스템이 설치되는 공진주시험기의 경우 측정되는 공진주파수와 지반재료의 전단파속도 V_S 사이에 식(1)과 같은 관계가 성립하며, 이를 바탕으로 전단파속도를 측정하고자 하는 경우 시편 상단의 전체 시스템의 질량관성모멘트 I_0의 사전 평가가 필수적이다.

$$\frac{I_0}{I}=\frac{\omega_n l}{V_S}\tan\frac{\omega_n l}{V_S} \qquad \text{[식 3.1.1]}$$

여기서 I는 시험시편의 질량관성모멘트, ω_n은 시스템의 고유진동수, l은 시험시편의 길이 또는 높이를 나타낸다. I_0는 시험시편 상부에 설치되는 전체 시스템의 재료적 특성과 기하학적 형상에 의하여 계산될 수 있으나 그 형태가 매우 복잡하므로 이상적인 탄성체로 구성된 교정용 시편(원형 봉)을 이용하여 실험적으로 측

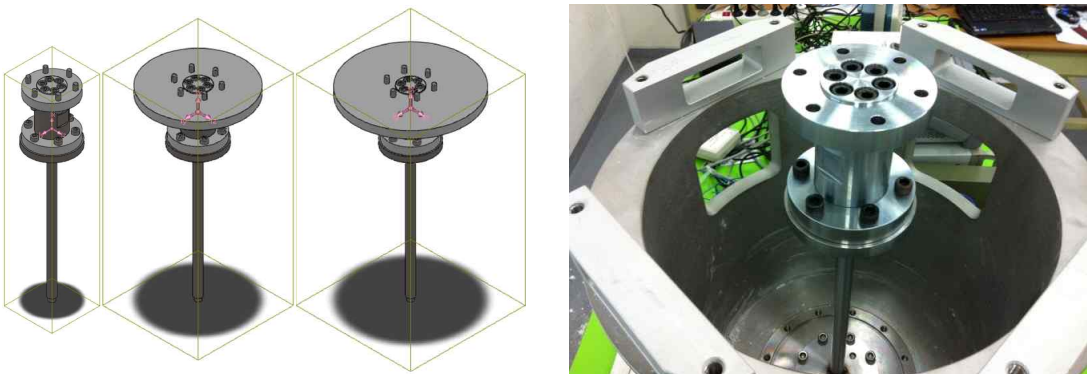
정하는 것이 일반적이다 (Drnevich et al., 1978).

공진주시험기에 회전강성 $(K_{rod})_T$를 갖는 금속 봉 형태의 검증용 시편을 설치하여 공진주파수 f_S를 측정할 때 가진시스템과 검증용 시편의 질량관성모멘트 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$I_0 + I_S = \frac{(K_{rod})_T}{(2\pi f_S)^2} \qquad \text{[식 3.1.2]}$$

따라서 금속 봉 형태의 검증시편에 추가적으로 설치가 가능한 임의의 대칭형 회전질량을 추가 설치하여 최소 2개 시편에 대한 공진주파수를 측정함으로써 가진시스템의 질량관성모멘트를 비교적 정확히 측정할 수 있으며, 이러한 방법은 상용되고 있는 공진주시험기에 대해서도 일반적으로 이용된다.

[그림 3.1.14]은 본 시험기의 교정에 이용된 3개 검증시편의 수치적 설계 형상과 교정을 위하여 시험기에 설치한 현황을 나타낸다. 시험시편의 질량관성모멘트는 설계 시 작성된 3차원 도면에 실제 사용된 재료의 밀도를 이용하여 수치적으로 계산하였다. 총 3개 시편에 대한 시험 결과를 [식 3.1.2]에 대입, 총 3개 조합의 이원 일차 연립방정식의 해를 바탕으로 I_0 값을 획득하였으며, 그 결과는 상호간 오차 범위 ± 1 % 수준의 정확성을 나타내었다[표 3.1.4]. 또한 이 값은 기존 설계 시 추정한 결과와 유사함을 확인하였다. 본 시험기의 사용 시 I_0는 시험을 통하여 획득한 결과의 평균값을 적용하여 재료의 강성을 측정하였다[표 3.1.5].



(a) (b)

[그림 3.1.14] 대형 공진주시험기의 가진시스템 교정을 위한 금속 시편 (a) 시편의 설계 및 질량관성모멘트 계산 (b) 시험기 교정용 금속 시편의 설치

[표 3.1.4] 금속 검증시편의 질량 관성모멘트 및 비틂 공진 주파수

시험 시편	질량 관성모멘트 ($kg \cdot mm^2$)	공진주파수 (Hz)
#1	10,683.74	37.7
#2	65,303.82	27.7
#3	132,316.39	22.1

[표 3.1.5] 가진판의 질량 관성모멘트

비교 시편	비틂 강성 ($N \cdot m$)	가진판 질량 관성모멘트 ($kg \cdot mm^2$)	평균 I_0 ($kg \cdot mm^2$)
#1 - #2	3,595.6	53,398	**52,817**
#2 - #3	3,555.0	52,057	
#3 - #1	3,573.2	52,997	

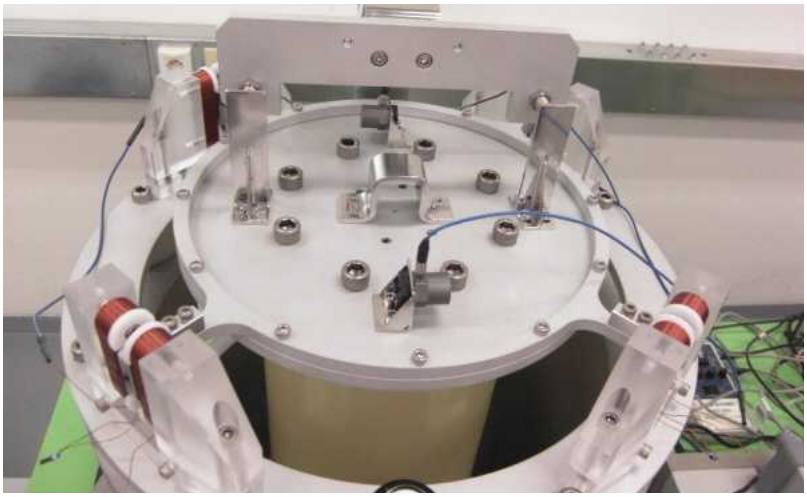
나. 폴리우레탄 시편을 이용한 시험시스템의 검증

신규 구축된 대형 공진주시험시스템의 재료의 변형특성 평가에 대한 적정성을 검토하기 위한 방법으로 총 3개의 경도와 강성을 달리하는 원주형 폴리우레탄(polyurethane) 검증 시편을 제작하여 전단탄성계수를 측정하였다. 또한 해당 시험 결과의 신뢰성을 확인하기 위한 방법으로 각 시편에 대한 양단자유 공진주시험을 수행하고, 동일한 재료로 이루어진 소형 검증 시편에 대하여 일반 크기의 공진주시험을 수행, 그 결과를 비교하였다.

폴리우레탄의 재료적 특성은 변형율 크기에 따라 변형계수가 일정한 선형 거동을 나타내고 응력이력 또는 구속응력에 영향을 받지 않으며, 성형이 자유롭고 내구성이 확보되므로 검증시편 제작을 위한 재료로서 적합한 것으로 알려져 있다(권기철, 1999; Stokoe et al., 1990). 따라서 해당 재료는 삼축압축시험기 또는 공진주시험기의 검증을 위한 시편의 재료로 사용된 사례가 다수 보고된 바 있으며, 본 연구에서도 해당 사례들을 참고하여 신규 구축된 대형 공진주시험기의 검증을 위한 시편의 재료로 활용하였다.

[그림 3.1.15]와 [그림 3.1.16]은 본 연구에서 사용된 대형 폴리우레탄 검증시편

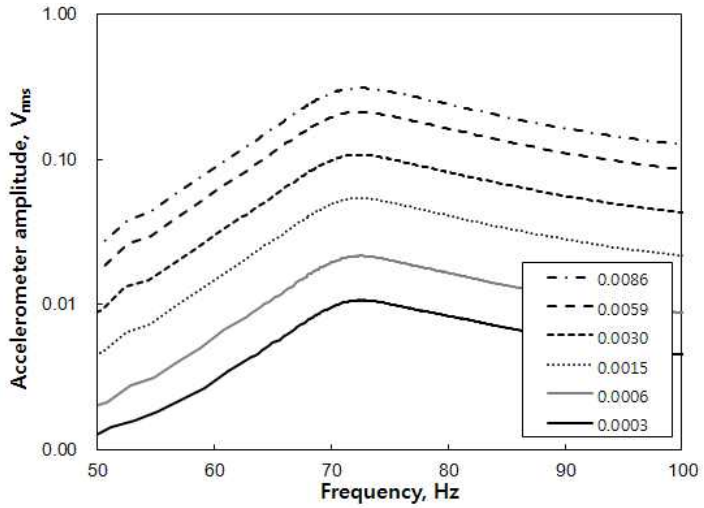
의 설치 현황 및 양단자유 공진주시험(free-free resonant column test)을 위한 시험 구성을 나타낸다. 시편의 형상은 대형 공진주시험기에 적합하도록 지름200 mm, 높이 400 mm의 원주형으로 제작하였다. 시험 시 시험기와 검증시편 양단의 체결은 석고를 이용하여 고정하였으며, 이에 따른 일체화된 거동은 실험적으로 확인하였다.



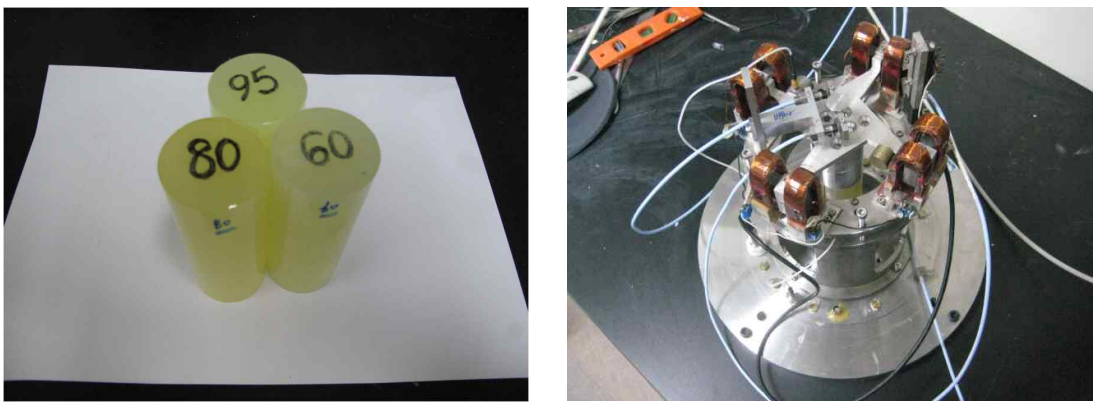
[그림 3.1.15] 폴리우레탄 시편에 대한 대형 공진주시험 수행



[그림 3.1.16] 폴리우레탄 검증시편에 대한 양단자유공진주시험

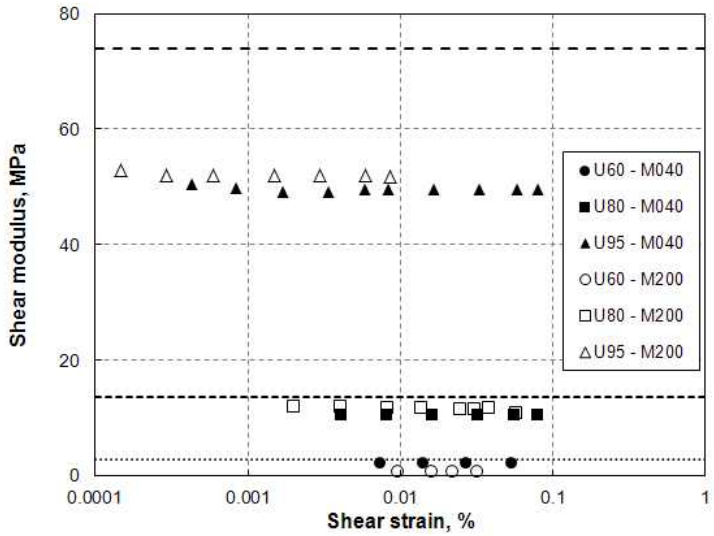


[그림 3.1.17] 폴리우레탄 검증시편(U95)에 대한 대형 공진주시험 결과 - 전단변형율에 따른 주파수응답 특성



(a) 소형 우레탄 검증시편 (b)공진주시험기 거치 현황

[그림 3.1.18] 소형 폴리우레탄 검증시편에 대한 공진주시험 수행



[그림 3.1.19] 3개 폴리우레탄 검증시편에 대한 대형-일반 공진주시험 결과 (변형율에 따른 전단탄성계수)

[그림 3.1.17]는 3개 검증시편 중 가장 강성이 큰 U95 시편에 대한 공진주시험 시 획득한 주파수응답곡선(frequency response curve)을 나타낸다. 본 시험 시 입력 전압을 달리하며 약 10^{-5} %에서 10^{-1} %의 전단변형율 조건에 상응하는 주파수응답곡선을 비교할 때 72 Hz의 동일한 공진주파수를 나타내며, 입력전압 또는 전단변형율에 정확히 비례하는 주파수응답곡선의 특성을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 폴리우레탄의 변형 특성이 변형율에 관계 없이 탄성계수와 감쇠비 특성이 일정한 선형탄성변형특성을 나타냄에 기인한다.

[그림 3.1.19]는 각각의 강성을 나타내는 대형-소형 검증시편 세 쌍에 대하여 대형 시험기와 일반 시험기를 이용한 공진주시험 결과를 나타내며, 또한 전단파 가진 및 계측에 의한 양단자유공진주시험 결과를 도시하여 비교하였다. 시험 결과를 살펴보면 세 시편 모두 대형 및 일반 공진주시험에서 검증시편의 강성을 거의 동일하게 평가함을 알 수 있다. 다만 U95 시편과 U80 시편의 경우 대형 공진주시험에 의한 강성이 다소 크게 평가됨을 알 수 있다([표 3.1.6] 참조). 폴리우레탄 재질의 검증시편의 경우 점탄성의 재료적 특성에 의하여 하중주파수에 따라 탄성계수가 달리 평가될 수 있으며, 일반적으로 하중주파수의 대수적 증가에 따라 탄성계수가 선형으로 증가하는 특성을 나타낸다. 폴리우레탄 검증시편을 이용한 기존의 연구 결과를 살펴보면 하중주파수가 약 10배 증가할 때 시편의 특성에 따라 최소 약 4 % 에서 최대 약 38 %에 이르기까지 측정되는 강성이 증가하는 것으

로 알려져 있다(권기철, 1999). 본 비교시험의 경우 시편의 기하학적 형상에 따라 시험 시 측정되는 공진주파수가 달라지고, 또한 양단의 경계조건에 따라 하중주파수가 달리 발현되므로 탄성계수 또한 차이가 발생할 수 있으며(Stokoe et al., 1990), 실제 검증시편의 크기에 따른 공진주파수 또는 하중주파수는 소형의 일반 공진주시험 시 측정되는 주파수에 비해 비해 각각 약 2.5배 (대형 공진주시험), 11배 (양단자유 공진주시험) 크게 나타난다. 이러한 시험적 특성을 고려할 때, 신규 개발된 공진주시험기는 폴리우레탄 검증시편을 이용한 성능 검증 결과 기존의 일반 소형 장비와 동일하게 시편의 재료적 특성을 평가하는 것으로 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 신규 구축된 대형 공진주시험기는 적용 대상 시편의 강성 및 형상 조건에 대하여 적합한 사용성을 나타내는 것으로 판단된다.

한편, U60 시편의 경우 공진주시험 시 측정되는 공진주파수가 10 Hz 미만으로 작은 강성을 나타내고 작은 입력전압에서도 큰 진폭을 나타내는 현상을 보이며, 상대적으로 측정 오차가 큰 이유로 인하여 다른 시편과 비교할 때 하중주파수의 영향이 일관적이지 않은 것으로 판단된다.

[표 3.1.6] 폴리우레탄 검증시편에 대한 대형-소형 공진주시험 결과 비교

시험시편	전단탄성계수 (MPa)		감쇠비 (%)		전단변형율 범위 (%)	
	대형	소형	대형	소형	대형	소형
U60	0.7	2.0	N/A	N/A	0.01-0.03	0.008-0.054
U80	11.9	10.2	2.72	3.73	0.002-0.05	0.004-0.080
U95	52.9	49.9	8.08	6.87	0.0001-0.01	0.004-0.080

다. 조립질 지반재료를 이용한 대형-일반 공진주시험 비교 검증

대형 공진주시험시스템의 목적은 궁극적으로 조립재료의 동적 변형특성을 평가하는 데에 있으므로, 구속압에 따른 강성의 변화와 변형율에 따른 비선형성을 나타내는 실제 지반재료에 대한 시험을 수행하여 시험기의 적용성을 검증하는 절차는 필수적이다. 이를 위하여 공시체 지름 200 mm의 대형 장비와 지름 50 mm의 일반 장비에 대하여 ASTM D4015 기준을 동시에 만족하는 조건의 자갈질 입자를 포함하는 시료를 조성하고, 두 장비에 대하여 동등한 조건에서의 비교 실험을 실시함으로써 대형 공진주시험기의 신뢰성을 확인하고자 하였다. 또한 실험 결과

로부터 장비의 크기가 지반재료의 동적 변형특성 평가에 미치는 영향도 함께 평가하였다.

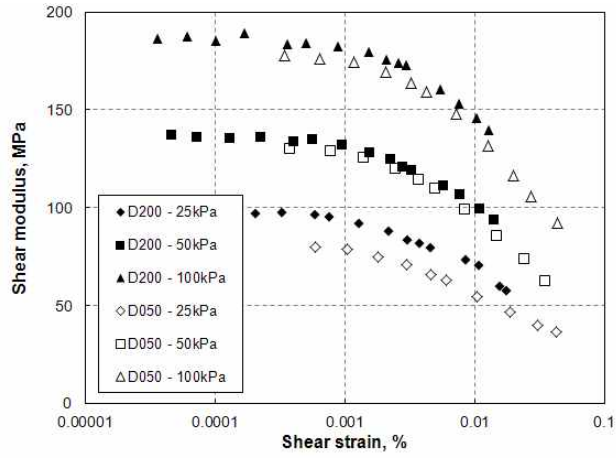
비교 검증용 지반재료는 국내 건설 중인 댐 현장의 축조용 사력재로부터 시험조건에 적합한 입도의 입자만을 선별적으로 구분하여 조제하였다. 해당 시료는 최대입경 4.75 mm의 자갈을 포함하며 통일분류법 상의 SP로 구분되는 모래질 시료로서 공진주시험 관련 표준(ASTM D4015)의 재료 최대입경과 공시체 지름의 비를 고려할 때 지름 50 mm의 공진주시험기를 이용한 시험에 적합하다. 시료의 조제 시 입도분포는 세립분의 영향을 배제하기 위하여 4.75 mm의 최대입경과 0.25 mm의 최소입경을 직선으로 연결한 단순화된 분포를 선정하였다. 시험시편의 기본 특성은 [표 3.1.7]과 같다.

[표 3.1.7] 공진주시험의 크기 효과 비교를 위한 시험시편의 특성

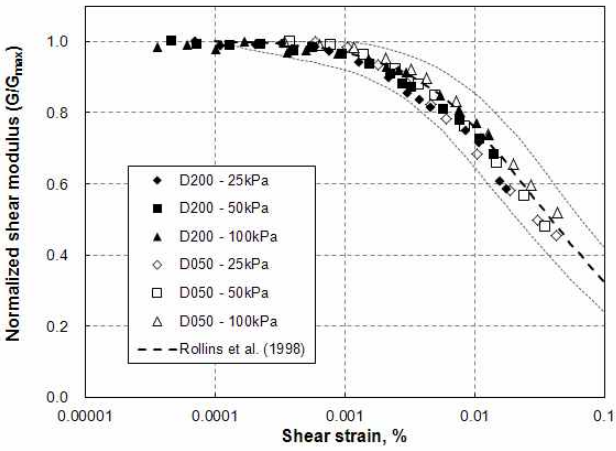
D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	USCS	G_s	γ (kN/m^3)	e
4.75	1.23	3.86	0.76	SP	2.79	18.09	0.513

[그림 3.1.20]은 자갈질의 최대입경 입자를 포함한 동일한 지반재료에 대하여 지름 200 mm, 높이 400 mm로 제작된 시편을 대상으로 대형 공진주시험을 수행한 결과와 지름 50 mm, 높이 100 mm 시편을 이용한 일반 공진주시험 결과를 비교한 것이며, 각각 D200과 D050으로 구분하여 표시하였다. [그림 3.1.20] (a)는 각각의 각기 다른 두 시편 크기 및 사용 장비에 대하여 25, 50, 100 kPa 세 단계의 구속압 상태에서 획득한 변형율에 따른 전단탄성계수의 특성을 나타내어 비교한 것으로 상호 유사한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. D200에 대한 결과는 전반적으로 D050에 비하여 전단탄성계수를 다소 크게 평가하며, 그 차이는 50 kPa와 100 kPa의 구속압 조건에서 약 5 % 미만으로 나타난다. 특히 25 kPa의 구속압에 대하여 실험을 실시한 경우 대형 공진주시험 결과 상의 전단탄성계수가 상대적으로 크게 나타난다. 이러한 현상의 원인은 시편의 높이가 400 mm인 경우 100 mm의 시편에 비하여 평균적으로 3 kPa 정도 큰 시편 자중에 의한 연직방향 응력 차이가 나타나고, 이에 따른 구속압의 증가가 시편의 전체적인 강성 증가의 효과로 나타남에 기인하는 것으로 판단된다. 그러므로 대형의 시험장치를 이용하여 미소변형 최대전단탄성계수의 구속압에 대한 민감도를 평가하고자 하는 경우, 약 50

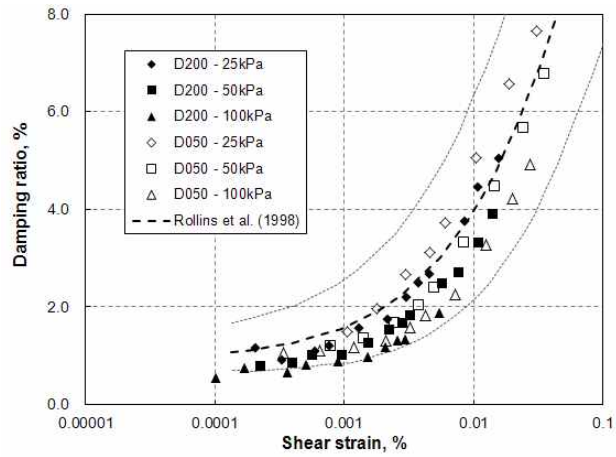
kPa 이하의 작은 구속압 단계에서 획득한 시험 결과가 동일 구속압에 대하여 상대적으로 탄성계수를 크게 평가하여 결과적으로 재료의 구속압 영향계수를 작게 평가하는 원인으로 작용할 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다.



(a) 구속압과 변형율에 따른 전단탄성계수



(b) 전단탄성계수 감소곡선



(c) 자유진동감소법에 의한 감쇠비

[그림 3.1.20] 자갈질 시료에 대한 공진주시험 결과 비교

[그림 3.1.20] (b)는 [그림 3.1.20] (a)의 결과를 10^{-4} % 이하의 미소변형 최대전단탄성계수로 정규화한 곡선이며 D200, D050 시험 결과를 기존 연구결과에서 제안된 자갈 재료의 대표적 정규화 전단탄성계수감소곡선(Rollins et al., 1998)과 함께 도시하여 비교하였다. 지반재료의 비선형 변형특성으로 인하여 전단탄성계수의 감소가 나타나기 시작하는 탄성한계변형율(elastic threshold strain, γ_e^t)은 구속압의 증가에 따라 증가하고 중간변형율 이상의 영역에서 정규화 전단탄성계수감소곡선은 상승한다. 본 실험 결과에서도 두 가지 크기의 시편에 대한 정규화 곡선은 구속압에 따라 상승하며, 100 kPa의 구속압 조건에서의 곡선이 Rollins 등이 제안한 자갈질 지반재료에 대한 평균 곡선과 거의 일치함을 확인할 수 있다. 또한 재료의 정규화 곡선은 장비 및 시편의 크기와 관계 없이 동일하게 나타난다.

[그림 3.1.20] (c)는 두 종류의 시험 조건에서 획득한 자유진동감소법(free vibration decay method)에 의한 감쇠비를 나타낸다. 두 시험 조건 모두 Rollins 등이 제안한 감쇠비 곡선의 평균과 하한(표준편차) 사이의 감쇠비 특성을 나타내며, 구속압에 따라 감쇠비가 감소하는 전형적인 결과를 확인할 수 있다. 본 결과에서는 대형 시험 결과에서 감쇠비를 다소 작게 평가하는 경향을 나타내었으나 그 정도는 미미하다.

결과적으로 동일 재료에 대하여 시편의 크기를 달리하여 수행한 공진주시험 결과, 재료의 변형특성을 동일하게 평가하는 것으로 나타나 신규 구축된 대형 공진주시험기의 지반재료 시험에 대한 적용성을 확인할 수 있다. 특히 정규화 전단탄성계수감소곡선과 감쇠비의 경우 시험 장비의 규모와 관계없이 동등한 결과를 나타내며, 이에 대한 시편 또는 장비의 크기 효과는 미미한 것으로 판단된다.

라. 대형 공진주시험에 의한 조립질 지반재료의 동적물성 평가

본 연구를 통하여 개발된 대형 공진주시험기의 주 목적은 자갈 이상의 입경이 큰 조립질 지반재료의 동적 변형특성을 평가하기 위함이다. 기존 연구 결과에 따르면 자갈질 지반재료의 경우 일반적으로 사질토에 비하여 탄성계수가 크고 변형특성에 대한 비선형성 또한 크게 나타나는 등 의 차이를 보이며, 따라서 이러한 해당 재료의 특성에 적합한 장비와 시험 방법이 요구된다. 본 연구에서는 신규 개발된 대형 시험기를 이용하여 대입경의 자갈질 시료에 대한 공진주시험을 실시하고 그 결과를 분석함으로써 해당 시험기의 적용성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 신규 시험기의 수용 범위를 고려한 대입경 재료를 선정하여 실험을 실시하

였으며, 기존의 전형적인 자갈질 시료의 변형특성과 실험 결과를 비교함으로써 그 적정성을 평가하였다.

(1) 시험 시료의 기본 사항

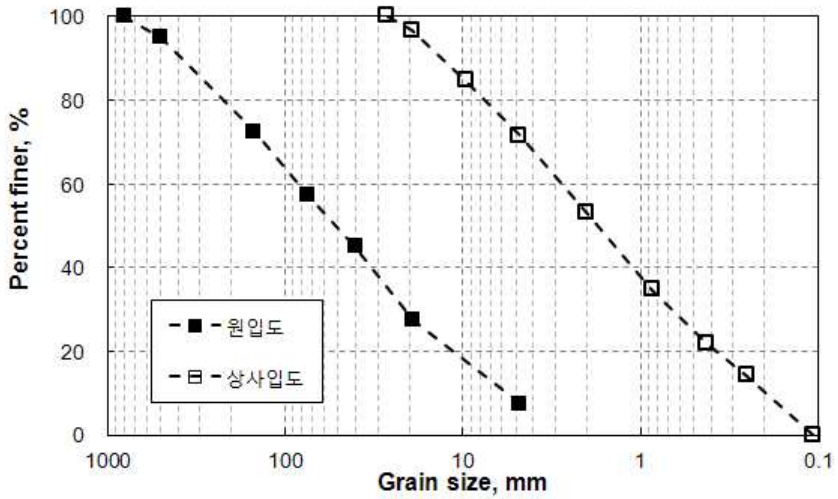
시험에 사용된 시료는 전술한 장비의 검증을 위하여 사용한 시료와 동일한 재료원으로부터 확보한 것으로 최대입경이 약 800 mm에 달하는 댐 축조용 사력재료이다. 대입경 조립지반재료의 공학적 거동 특성을 평가하기 위하여 실내시험을 수행하는 경우 일반적으로 시험장비의 크기에 의한 제약조건에 맞추어 재료의 입도를 재조정하여 시편을 제작한다. 입도를 조정하는 경우 가장 중요한 사항은 원재료의 물리적, 역학적 특성을 적절히 유지하는 것이다. 대표적인 입도조정방법인 평행입자분포법(parallel grading method)은 조성되는 시편에서 목표로 하는 최대입경을 기준으로 원입도의 분포곡선을 평행이동함으로써 다짐 특성에 영향을 미치는 요소인 균등계수를 동일하게 하는 방법으로 입자의 기하학적 배열 특성을 유사하게 유지할 수 있다. 이와 같은 방법으로 준비된 상사입도 시료는 원 재료와 유사한 거동 또는 변형 특성을 나타내므로, 실내시험 결과를 실대형 지반재료의 거동 특성으로 간주하여 구조물의 설계 및 해석에 이용할 수 있다.

본 연구에서 대형 공진주시험기의 적용성 평가를 위하여 사용한 시료는 전술된 관점에서 실제 댐 현장에 적용된 입도분포를 기준으로 상사입도를 적용하여 준비하였다. 시험에 이용한 시료의 입도 및 주요 특성은 [표 3.1.8]에 나타내었으며, 입도분포곡선은 [그림 3.1.21]과 같이 본래 실대형 재료원의 입도분포곡선과 비교하여 나타내었다.

시료의 성형은 시험기의 하단부 바닥판에 멤브레인과 다짐틀을 고정하고 총 5층의 과소다짐법에 의하여 수행하였다. 건조상태의 비점성인 조립재료를 표준 직경의 램머를 이용하여 다지는 경우 표면 상의 입자가 튀거나 파쇄되는 문제가 발생할 수 있으므로 150 mm 직경의 금속판을 전동식 진동해머에 연결하여 다짐을 실시하였다. 시료 성형 시 다짐 밀도는 원재료의 밀도에 최대한 근접하되, 압자의 파쇄가 발생하지 않는 범위에서의 최대 밀도로 조성하였다.

[표 3.1.8] 공진주시험의 크기 효과 비교를 위한 시험시편의 특성

D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	USCS	G_s	γ (kN/m^3)	e
26.0	1.73	14.21	0.82	SW	2.79	20.16	0.358



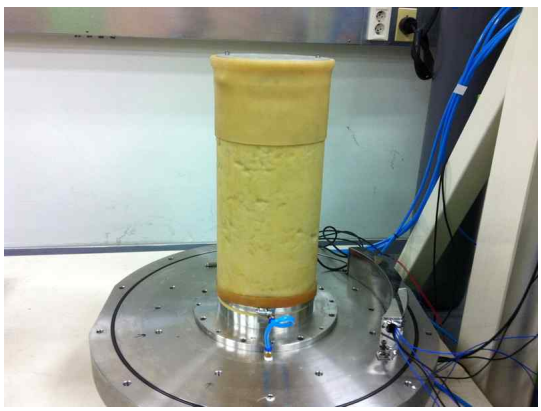
[그림 3.1.21] 시험 시료와 원재료의 입도분포곡선



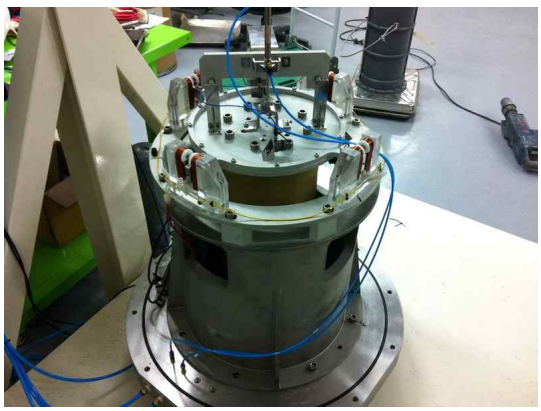
(a) 시험 시료



(b) 대형 공진주시험용 다짐틀



(c) 시험기 내 시험시편 설치



(d) 가진시스템 체결

[그림 3.1.22] 시험 시료의 준비

(2) 시험 결과 및 분석

댐 축조용 사력재료의 상사입도 시료에 대한 공진주시험은 앞서 성형된 시험시편을 대형 공진주시험기에 상단 가진시스템과 함께 설치하고 가압용기를 체결한 후 공기압에 의한 구속압을 적용하며 실시하였다. 구속압 단계는 25 kPa로부터 두 배씩 증가하여 최종적으로 400 kPa에 이르기까지 총 다섯 단계의 구속압 조건에서 진행하였다. 공진주시험의 하중 조건은 입력 전압의 제어에 의하여 최소 전단변형율 10^{-4} % 이하, 최대 약 10^{-2} %에 이르는 전단변형율 영역에서의 전단탄성계수를 측정할 수 있도록 설정하였으며, 각 하중 또는 전단변형율 단계에서 자유진동감소법에 의하여 감쇠비를 측정하였다.

[그림 3.1.23]은 댐 사력재료에 대한 대형 공진주시험 결과를 나타낸다. [그림

3.1.23] (a)는 총 5개의 구속압단계에서 측정한 변형율에 따른 전단탄성계수 특성으로서 구속압에 따라 변형계수가 증가하는 특성을 나타낸다. 모든 단계에서 탄성한계전단변형율은 약 10^{-4} % 대역에서 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 그 이하의 변형율에서의 전단탄성계수를 최대전단탄성계수로 판단할 수 있다. 최대전단탄성계수는 일반적으로 간극비, 선행압밀하중, 구속응력 상태 등의 영향을 받으며, Hardin (1978) 또는 Hardin and Blandford (1989) 등에 의하면 비등방 구속압 조건에서 다음과 같은 관계로 표현할 수 있다.

$$G_{ij}^{e} = \frac{OCR^{k}}{F(e)} \frac{S_{ij}}{2(1+\upsilon)} p_a^{1-n} (\sigma_i' \sigma_j')^{\frac{n}{2}} \qquad \text{[식 3.1.3]}$$

여기서 $F(e)$는 간극비의 영향을 나타내는 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$F(e) = 0.3 + 0.7 e^{2} \qquad \text{[식 3.1.4]}$$

[그림 3.1.23] (a)에 나타낸 결과에서 구속압에 따른 최대전단탄성계수를 위 식에 근사하여 각각의 계수를 정리하면 본 시험 대상 시료의 최대전단탄성계수에 대한 강성계수와 구속압 영향계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{\max} = \frac{711.5}{F(e)} p_a^{0.44} \sigma_m'^{0.56} \qquad \text{[식 3.1.5]}$$

한편, Seed and Idriss (1970)는 다양한 실험 사례를 바탕으로 최대전단탄성계수와 구속압의 관계를 다음과 같이 정리하였으며, 지반재료의 특성에 따른 강성계수 K_2의 범위를 제시하였다.

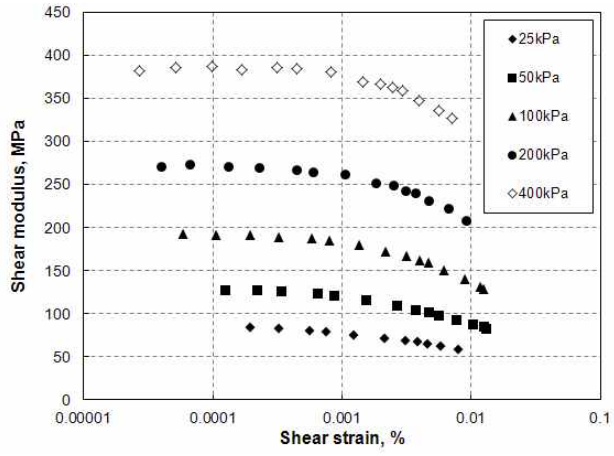
$$G_{\max} = 1{,}000 K_2 \sqrt{\sigma_m'} \text{ (in psf)} \qquad \text{[식 3.1.6]}$$

[식 3.1.5]와 [식 3.1.6]을 비교하는 경우 강성계수 K_2는 43으로 Seed and Idriss가 제시한 일반적인 사질토의 강성 범위에 포함되며, 구속압영향계수 n은 0.56으

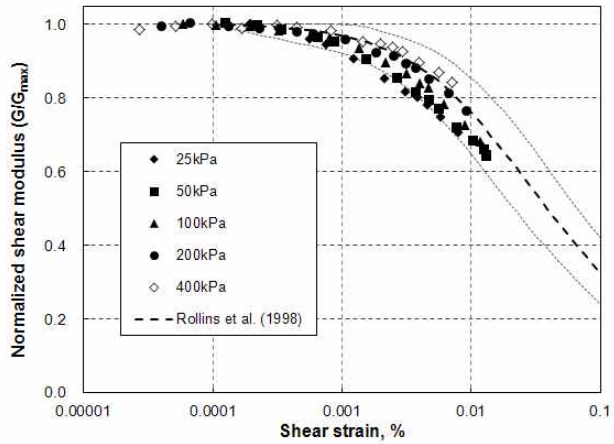
로 조립토의 특성을 확인할 수 있다.

[그림 3.1.23] (b)는 [그림 3.1.23] (a)의 결과를 바탕으로 작성한 정규화 전단탄성계수감소곡선으로 Rollins 등이 제시한 자갈질 지반재료의 대표적인 변형곡선과 비교하였다. 본 시험결과의 경우 400 kPa 이하의 구속압 조건에서 기존의 자갈질 지반재료에 대한 평균곡선과 표준편차를 고려한 하한 범위 사이에 나타나며, 약 200 kPa의 구속압 상태에서 평균 곡선과 일치하는 것으로 나타나는 등 전형적인 자갈질 재료의 변형특성을 확인할 수 있다. 이세현 등(2009)이 국내외 자갈질 지반재료의 동적 변형특성을 분석한 결과에 의하면 평균적으로 약 100 kPa의 등방구속압 상태의 정규화 전단탄성계수감소곡선이 Rollins 등의 평균 곡선과 일치하는 것으로 나타난다. 자갈질 재료의 경우 일반적으로 최대입경이 클수록 탄성한계변형율이 작고 균등계수가 클수록 탄성한계변형율이 크게 나타나는데 (Menq, 2003; 하익수와 김남룡, 2012) 본 시험의 경우 시료의 최대입경이 기존의 타 공진주시험에 비하여 큰 관계로 보다 큰 비선형성이 나타나는 것으로 판단된다.

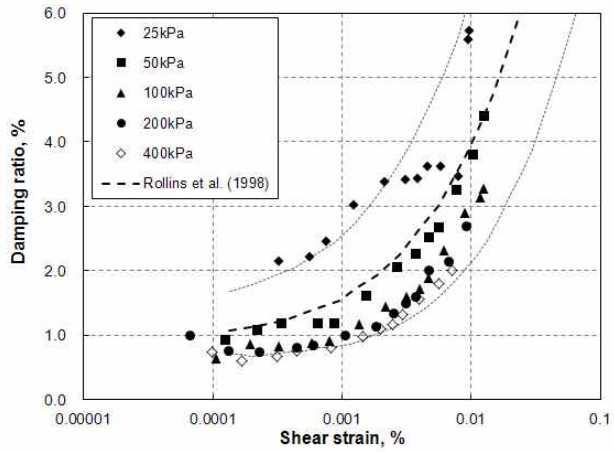
[그림 3.1.23] (c)는 각각의 구속압과 변형율 조건에서 자유진동감소법에 의하여 측정한 감쇠비 특성을 나타낸다. 해당 결과는 지반재료의 일반적 특성과 같이 구속압의 증가에 따라 미소변형율 영역에서의 최소감쇠비(Dmin)와 변형율에 다른 감쇠비의 증가 특성이 미세하게 감소함을 나타내며, 최소감쇠비는 약 1% 이하의 대역으로 평가되었다. 25 kPa의 구속압 상태에서 측정한 감쇠비 특성을 살펴보면 50 kPa 이상의 결과와는 달리 불규칙적인 증가 특성이 관찰된다. 실제 작은 구속압 상태에서의 자유진동감쇠곡선을 살펴본 결과 측정 신호에 비교적 큰 수준의 잡음이 섞이는 현상을 확인하였으며 이는 감쇠비 계산의 신뢰성을 저하시키는 원인으로 작용하므로 재료 본연의 동적 특성의 평가 시 왜곡된 결과를 도출하게 된다. 이러한 잡음은 공시체의 전단 과정에서 발생하는 물리적 진동으로 추정되는데, 앞서 대형-소형 시험기의 비교에서 살펴본 바와 같이 대형 공시체의 경우 상부와 하부의 유효응력 조건이 달라 전단변형이 상단부에서 상대적으로 크게 발생하고, 작은 구속압 상태에서 상대적으로 쉽게 발생할 수 있는 상부 조립질 입자 간의 미끄러짐은 기계적 진동을 유발하므로 측정의 불확실성을 키우는 요인으로 판단할 수 있다.



(a) 구속압과 변형율에 따른 전단탄성계수 특성



(b) 정규화 전단탄성계수감소곡선



(c) 자유진동감소법에 의한 감쇠비

[그림 3.1.23] 댐 축조용 조립재료에 대한 대형 공진주시험 결과

4. 조립재료의 입도분포특성에 따른 동적변형특성 평가

자갈질 조립재료의 전단변형율에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 특성은 Seed 등(1984)에 의하여 발표된 이래, 다수의 연구자들이 수행한 대형 반복삼축압축시험 결과를 바탕으로 조립재료의 변형계수 범위가 제시되었다. Rollins 등(1998)은 기존에 발표된 총 15개의 시험 사례로부터 최대입경이 15mm에서 최대 150mm에 이르는 조립질 자갈 시료에 대하여 대표적 전단탄성계수감소곡선, 감쇠비 곡선 등을 제시한 바 있다. Stokoe 등(2004)은 대형 공진주시험기를 이용한 다수의 결과를 종합하여, 자갈질 시료의 동적 변형특성에 대한 쌍곡선모형(hyperbolic model) 계수의 범위를 제안한 바 있으며, Hardin과 Kalinski(2005)는 다양한 입도분포를 나타내는 자갈 시료에 대한 공진주시험 결과를 종합하여 시료의 입도분포특성이 재료의 비선형 변형특성에 미치는 영향을 검토하고, 전단탄성계수와 전단변형율을 각각 정규화하였을 때 구속압에 관계 없이 하나의 함수로 표현될 수 있음을 확인하였다. 국내의 경우 이세현 등(2009)은 댐 축조용 사력재의 동적물성 범위를 제시하고자 기존 문헌에 보고된 135개의 반복삼축압축시험과 대형공진주시험 결과를 분석하여 구속압 수준에 따른 대표적 전단탄성계수감소곡선을 제안한 바 있다. 이들 결과를 종합할 때, 전단탄성계수감소곡선은 시험 시 구속압 조건에 따라 다소 차이를 나타내지만, 전반적으로 일관성있는 경향을 나타내었다.

조립재료의 동적 변형특성에 대한 데이터가 확보되어 실무에 적용이 가능하다 하더라도, 실제 건설현장에 이용되는 대입경 시료의 물성 파악은 여전히 쉽지 않다. 최근 대형 지반시험기의 개발로 조립재료의 동적 변형특성의 평가가 가능한 상황이지만, 실제 건설현장의 대입경 재료는 시험기의 수용범위 이상의 대형 입자를 포함하는 경우가 많아 재료 본연의 동적 특성을 직접 평가하는 것은 어렵다. 실제 댐 축조용 사력재와 같은 대입경 재료의 경우 평행입자분포법(parallel grading method)과 같은 상사입도에 의하여 재조합된 시료를 이용하여 강도 및 변형특성을 평가하는 것이 일반적이며, 이경우 재료 입도의 상사비가 크고 입경이 작아질수록 강도와 변형계수를 더 작게 평가하는 것으로 나타난다(김광일 등, 2009; 이성진 등, 2011). 따라서 지반구조물의 동적성능평가 시 해석에 대한 신뢰성 확보를 위하여 대입경 조립재료의 비선형 동적 변형특성을 실험적으로 평가하고자 할 때, 시편 및 시험 조건이 재료의 동적물성에 미치는 영향을 명확히 이해하여 해석에 반영할 필요가 있다.

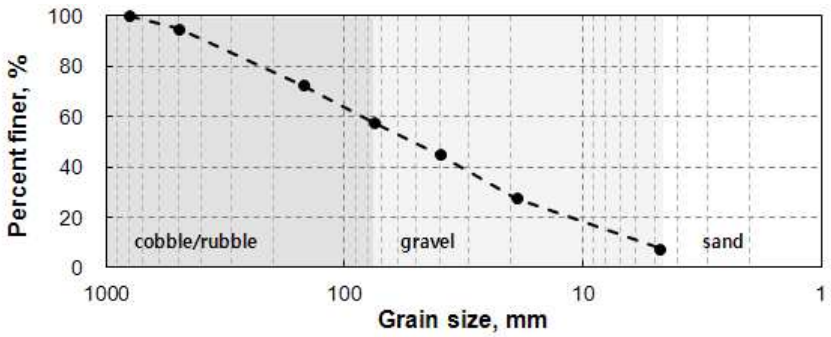
본 연구에서는 대입경 조립재료의 동적 변형특성을 평가하기 위하여 신규 구축된

대형 공진주시험기를 이용한 실험을 수행하였다. 특히 대표적인 대입경 조립재료인 댐 축조용 사력재에 대한 상사입도의 영향을 평가하기 위하여 동일 재료원에 대하여 상사비를 달리하는 다수의 시편을 조성하여 실험을 수행하였으며, 각 시험시편의 구속압에 따른 최대전단탄성계수, 전단탄성계수감소곡선 곡선 및 감쇠비 특성을 비교하였다. 더불어 동일한 최대입경 시료에 대하여 균등계수(C_u)와 단위중량 차이가 동적 변형특성에 미치는 영향 또한 평가하였다.

가. 시험대상 시료

(1) 시험대상 시료의 기본 특성

본 연구에서 시험 대상으로 이용한 조립질 재료는 국내에서 건설 중인 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐인 Y댐의 사력존 축조재료로서, 최대입경이 약 800mm에 달하는 대입경의 입자를 포함한다. 본 재료는 규장암으로 분류되는 암석재료로 석영, 사장석, 미사장석, 백운모, 견운모, 녹니석 등의 광물이 포함되어 있으며, 현장 상태의 입도분포 특성 및 주요 공학적 변수는 [그림 3.1.24]와 [표 3.1.9]에 나타내었다.



[그림 3.1.24] 시험 대상 Y댐 사력재의 원입도분포

[표 3.1.9] 시험 대상 Y댐 사력존 원재료의 기본 특성

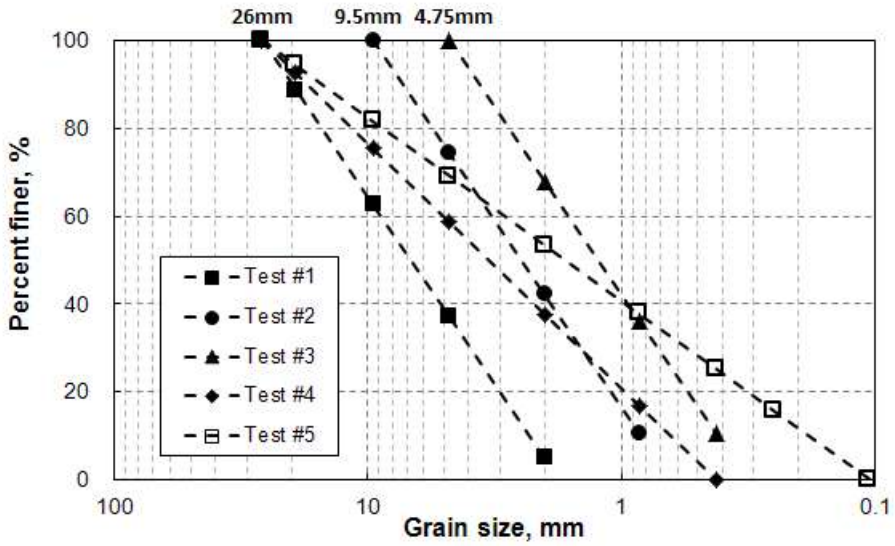
D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	Porosity	Absorption	C_u	C_c	G_s	USCS
800	51.4	0.59%	0.21%	14.9	0.94	2.79	GW

대입경의 조립지반재료는 시험 장비의 크기에 대한 제약조건에 맞추어 재료의

최대입경을 재조정하되, 재료 본연의 물리적, 역학적 특성이 잘 반영되도록 입도를 조정하여 실내시험을 수행하는 것이 일반적이다. 대표적으로, 평행입자분포법은 조절하고자 하는 최대입경 수준에 따라 원입도분포곡선을 평행이동하여 다짐특성에 영향을 미치는 요소인 균등계수를 동일하게 함으로써 입자의 기하학적 배열 특성에 차이를 최소화할 수 있으므로 상사입도 조정방법으로 널리 적용된다. 그러나 입경에 따라 초기밀도나 입자파쇄특성이 달라질 수 있으므로 시료의 다짐밀도나 전단거동에 영향을 미칠 수 있으며, 또한 입경이 작아지면서 세립분 함량이 증가하기 때문에 시험 조건에 따라 역학적 특성에 영향을 미칠 가능성도 있다. 특히 입도 구간에 따른 입자의 형상 또는 마모 상태에 차이가 나타나는 경우 지반재료의 강도, 강성과 관계된 주요 공학적 특성이 달라지므로 이에 대한 고려 또한 필요하다. 따라서 본 연구에서 상사입도에 따른 조립재료의 동적 변형특성을 평가함에 있어서 세립분의 영향을 배제할 수 있는 상사입도 조건을 계획하였으며, 입도 구간별 입자의 구형도를 비교하여 입자 형상에 의한 효과 유무를 사전에 확인하였다.

(2) 시험 시편의 계획

본 연구에서는 입도특성에 따른 조립재료의 변형특성을 평가하기 위하여 총 5개의 시험시편을 제작하여 대형 공진주시험을 수행하였다. 시험 시료의 최대입경은 공진주시험 표준인 ASTM D4015(ASTM, 2003)에 따라 사용 장비 공시체 직경인 200mm의 1/6 이하가 되도록 26.5mm 체(sieve) 통과분으로 제한하였으며, 상사비 효과를 비교하기 위한 시편의 경우 각각 9.5mm, 4.75mm 체 통과분을 기준으로 최대입경을 설정하였다. [그림 3.1.25]는 5개 시료에 대한 각각의 입도분포를 나타낸다. 시험시편 1, 2, 3은 최대입경을 변화시키되 입도분포 특성을 나타내는 균등계수와 곡률계수(C_c)가 동등한 이상적인 비교조건이 되도록 임의의 직선형태의 입도분포를 설정하여 조제하였으며, 각 시편 내 포함된 토립자의 크기가 극명히 차이날 수 있도록 균등계수가 작은 빈입도의 입도분포를 설정하였다. 한편, 시험시편 4와 5는 동일한 최대입경에 대하여 입도분포를 달리하는 경우 해당 입도특성이 재료의 동적 변형특성에 미치는 영향을 평가하고자 균등계수를 각기 달리한 직선형 입도분포로 계획하였다. 각 시료의 입도특성 및 시료성형 조건은 [표 3.1.10]과 같다.



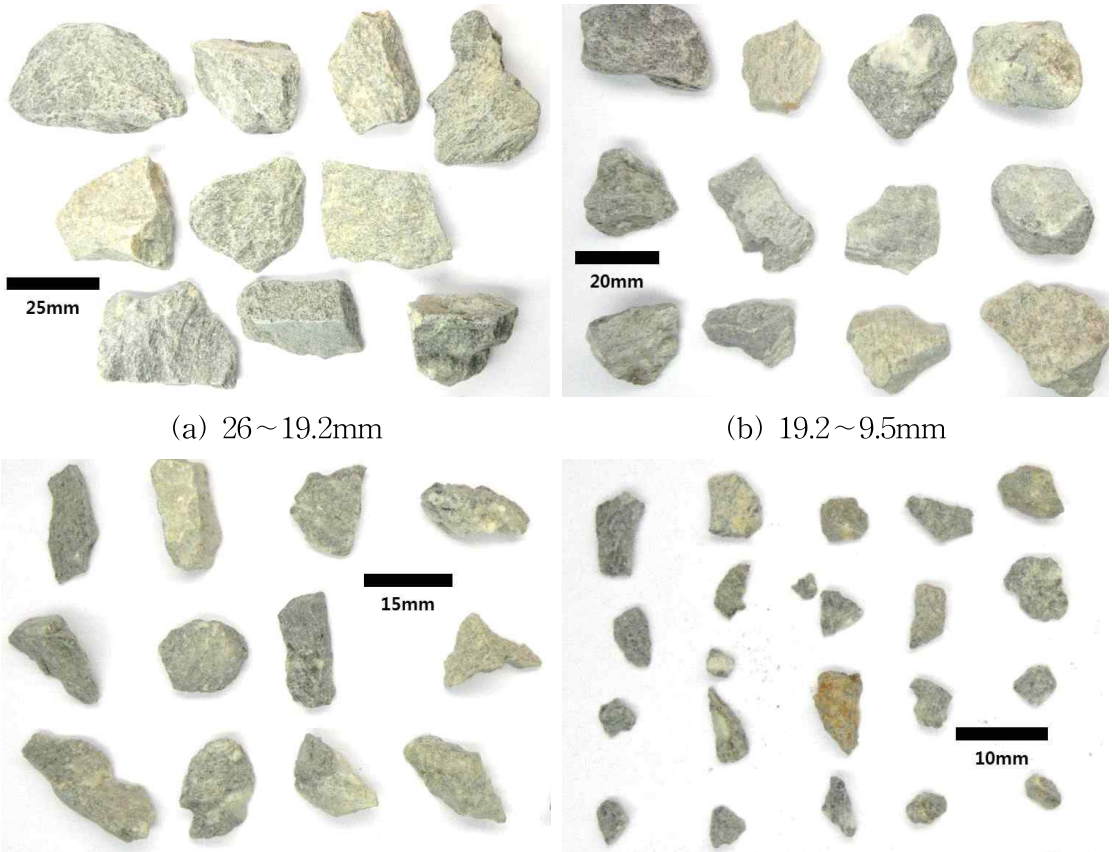
[그림 3.1.25] 각 시험시편의 입도분포

[표 3.1.10] 각 시험 시편의 입도 특성과 공시체 성형 조건

ID	D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	USCS	γ (kN/m^3)	e
Test #1	26.00	6.74	3.86	0.76	GP	17.96	0.524
Test #2	9.50	2.46	3.86	0.76	SP	17.92	0.527
Test #3	4.75	1.23	3.86	0.76	SP	18.09	0.513
Test #4	26.00	3.32	7.82	0.66	SW	19.56	0.400
Test #5	26.00	1.66	15.66	0.57	SW	20.82	0.315

한편 입자의 형상은 전단파속도(또는 최대전단탄성계수)와 응력-변형율 특성에 영향을 미치는데, 기존 연구에 따르면 입자의 구형도(sphericity)와 원마도(roundness) 등은 미소변형 전단탄성계수와 관계되는 전단파속도의 크기와 구속압 영향계수 등에 영향을 미치게 된다. Cho 등(2006)의 연구결과에 따르면 입자의 형상이 원형에 가까운 경우 구속압에 따른 전단탄성계수 증가 양상이 상대적으로 작게 나타나며, 모나고 부정형 입자 형상 특성을 나타낼수록 구속압에 민감하게 전단탄성계수가 증가한다. 본 연구에서 사용된 시편의 경우 동일한 재료에 대하여 각각 다른 입도구간의 입자를 이용하여 조성하였으므로, 입도 구간별 입자의 형상 특성에 차이가 있을 경우 이에 따른 변형특성의 차이가 발생할 가능

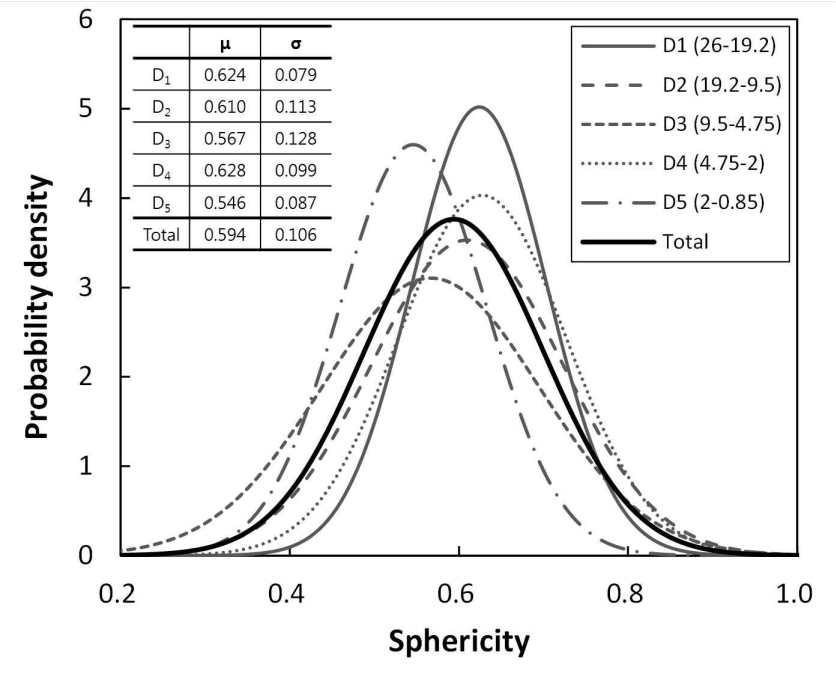
성이 있다. 그러므로 [그림 3.1.26]과 같이 각각의 입도 구간별 입자에 대한 형상 특성을 구형도를 기준으로 비교함으로써 해당 특성이 미소변형 전단탄성계수 특성에 영향을 미칠 가능성을 확인하고자 하였다.



(a) 26~19.2mm (b) 19.2~9.5mm

(c) 9.5~4.75mm (d) 4.75~2.0mm

[그림 3.1.26] Y댐 사력재에 포함된 자갈의 입도 구간별 입자 형상



[그림 3.1.27] Y댐 사력재 입자의 입도 구간별 구형도 분포 특성

입자의 구형도는 각각의 입도 구간에서 최소 30개 이상의 입자를 무작위로 선별하여 최소 외경에 대한 최대 내경의 비로 측정하였으며, 이러한 구형도는 정규분포를 가정하여 [그림 3.1.27]과 같이 표현될 수 있다. [그림 3.1.27]의 입도 구간별 분포 특성에서 구형도의 평균은 약 0.55에서 0.63 사이로 일반적인 모래의 구형도에 비해 다소 작은 값을 나타낸다(분쇄모래: 0.7-0.8, 자연모래: 0.5-0.9, Cho 등, 2006). 결과 상에서 입경이 감소할수록 평균 구형도가 다소 감소하는 경향이 일부 나타나지만 일관성이 크지 않으며, 구간별 구형도의 차이가 큰 의미를 나타내는 것으로 판단하기는 어렵다. 그러므로 본 연구에서 관심사로 두는 최대입경에 따른 변형특성에서 입자 형상에 의한 효과는 미미한 것으로 판단하였다.

나. 대입경 지반 조립재료에 대한 공진주시험

(1) 시험 절차 및 방법

대형 공진주시험에 의한 조립재료의 입경 특성에 따른 동적 변형특성을 평가하기 위하여, [그림 3.1.25]와 [표 3.1.10]의 입도 및 밀도조건의 대형 공시체 시편을 각각 제작하여 실험을 수행하였다. 시험 시편은 시편 바닥판에 멤브레인과 다

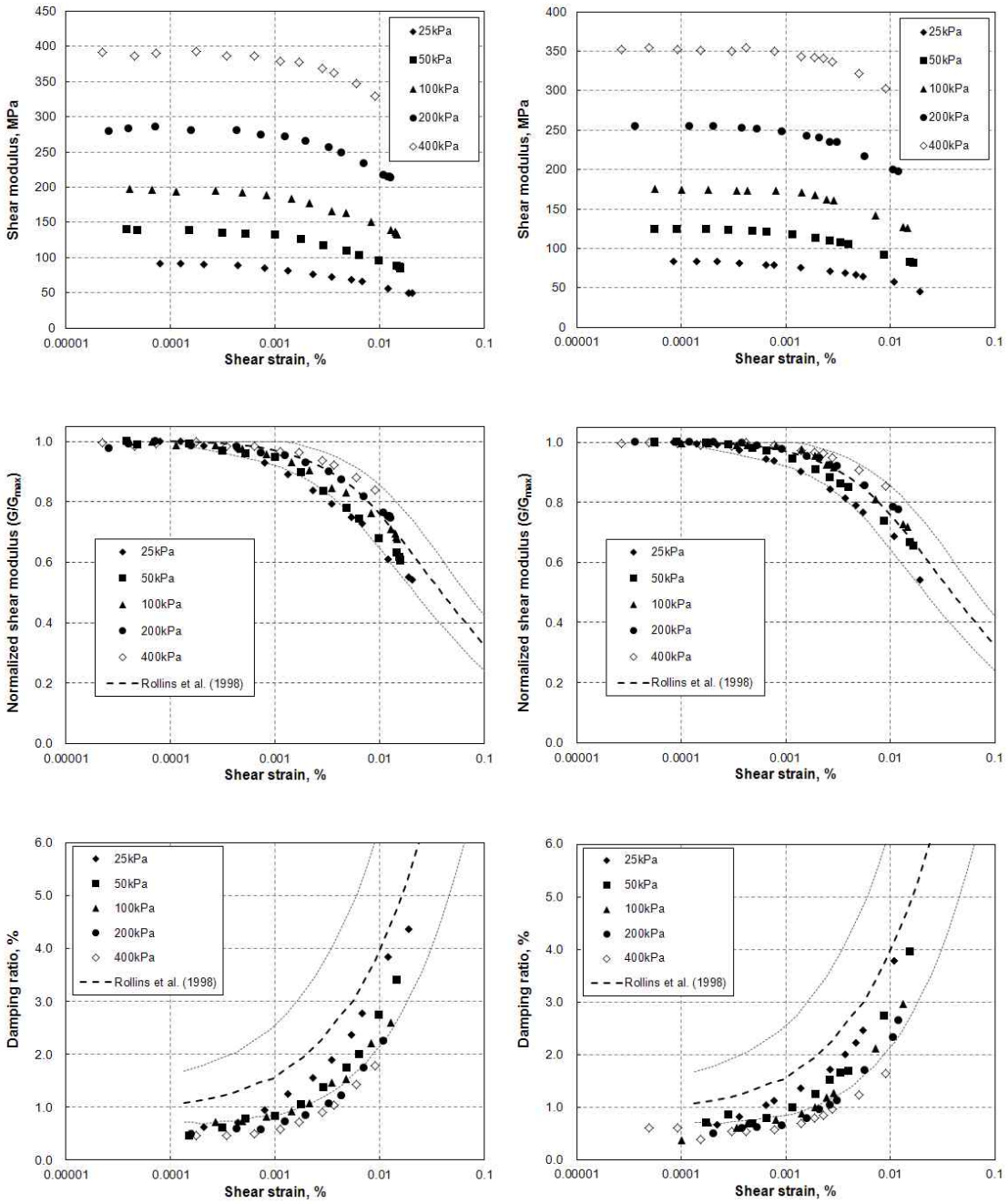
짐틀을 고정하고, 총 5층의 과소다짐법에 따라 직경 200mm, 높이 400mm로 제작하였다. 표준 직경의 램머를 이용하여 시료를 다질 경우 표면의 입자가 튀거나 파쇄가 발생하므로, 150mm 직경의 금속판을 전동식 진동해머에 연결하여 각 시편마다 동일한 조건으로 다짐으로써 시험 시편을 제작하였다. 결과적으로 최대입경을 달리하여 동일한 입도분포특성으로 제작한 시험시편 1, 2, 3의 경우 거의 동일한 밀도조건의 시험시편의 조성이 가능하였다.

대형 공진주시험은 모든 시험시편에 대하여 25kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa, 400kPa 총 다섯 단계의 구속압 상태에서 진행하였으며, 최소 10^{-4}% 이하, 최대 10^{-2}%의 전단변형율에 이르도록 시험을 수행하였다. 여기서 최대 전단변형율은 현 시험시스템에서 구현 가능한 최대 가진하중 조건에 상응하는 값으로 제한되었다. 각 구속압 단계에서는 입력전압 변화에 따라 주파수응답곡선을 이용한 전단탄성계수와 자유진동감소곡선(free-vibration decay curve)을 이용한 감쇠비를 측정함으로써, 재료 물성의 변형율에 따른 비선형성을 평가하였다.

(2) 시험 결과 및 분석 - 비선형 변형특성

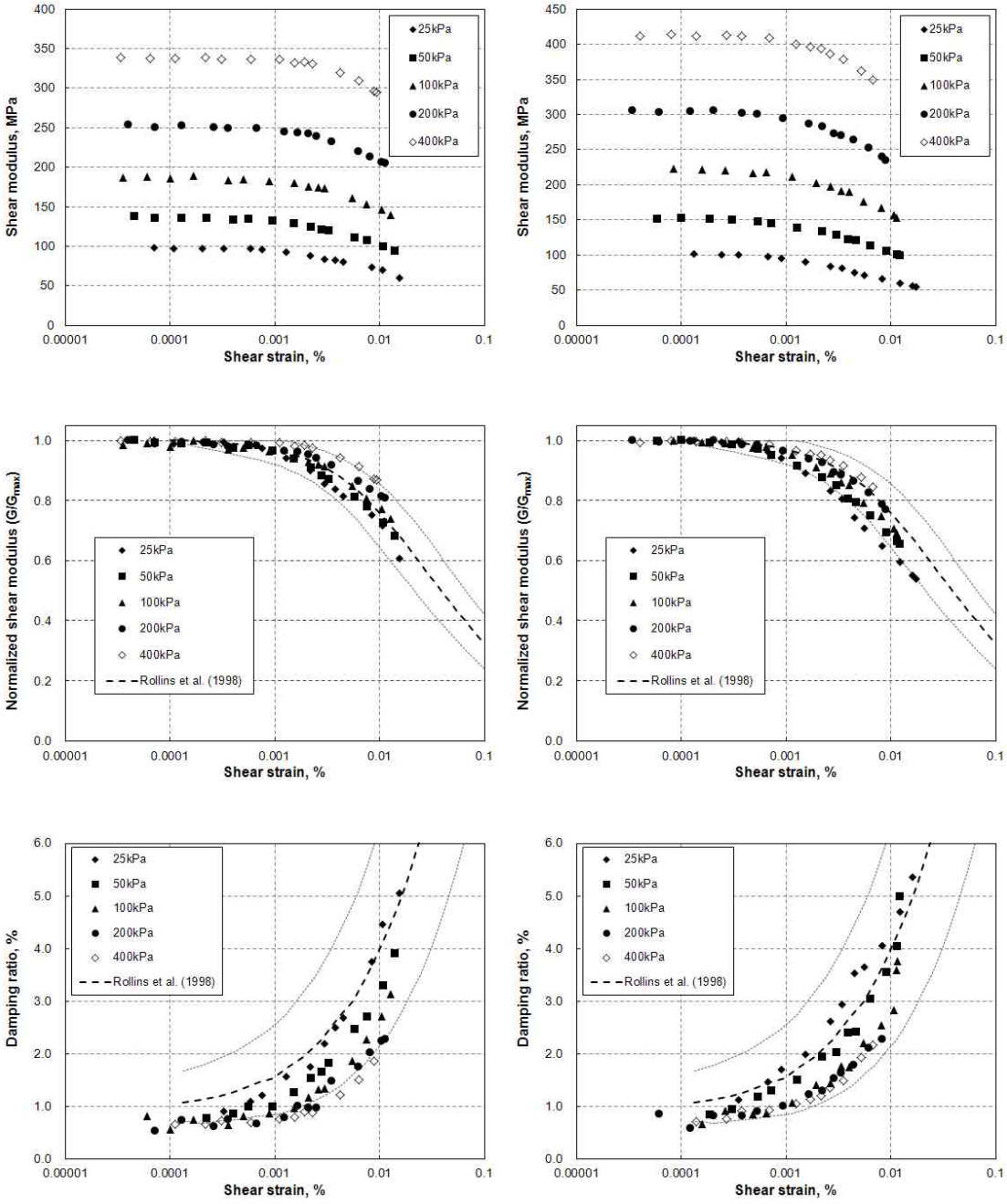
(가) 최대입경의 영향

[그림 3.1.28]의(a), (b), (c)는 각각 시험시편 1, 2, 3에 대한 대형 공진주시험 결과를 도시한 것으로 구속압과 변형율에 따른 전단탄성계수 특성, 변형율에 따른 전단탄성계수감소곡선 및 감쇠비 증가 특성 등을 나타낸다. 각각의 경우 전단탄성계수 특성을 살펴보면 공통적으로 10^{-4}% 이하의 미소변형율 영역에서 선형에 가까운 최대전단탄성계수를 나타내며, 탄성계수의 감소가 시작되는 탄성한계변형율(elastic threshold shear strain, γ_{et})은 약 10^{-4}% 대역에서 나타나는 전형적인 자갈질 재료의 특성을 확인할 수 있다. 전단탄성계수감소곡선은 구속압의 증가에 따라 상승하는 일반적인 지반재료의 특성을 나타내며, 세 가지 모든 경우에서 100kPa 구속압 조건에서 획득한 곡선이 Rollins 등(1998)이 다수의 시험 결과로부터 도출한 자갈의 대표적인 전단탄성계수감소곡선과 근접하여 위치하는 결과를 나타낸다. 감쇠비의 경우 세 가지 모두 Rollins 등이 제시한 감쇠비곡선의 하한에서 평균까지의 범위에 위치하며, 입경이 작은 시료일수록 중간변형율 이하에서의 최소감쇠비(Dmin)의 크기가 증가 또는 감쇠비곡선의 위치가 상승하는 경향이 있으나 그 정도는 미미하였다.



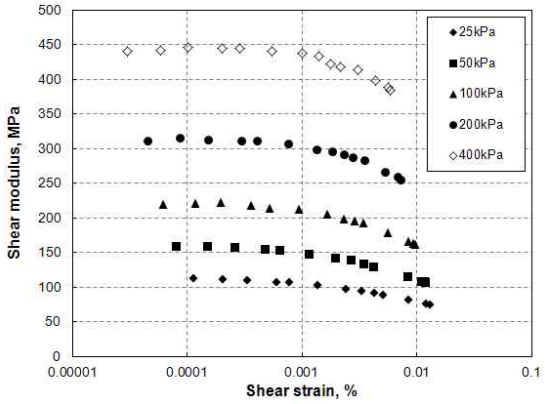
(a) 시험시편 1　　(b) 시험시편 2

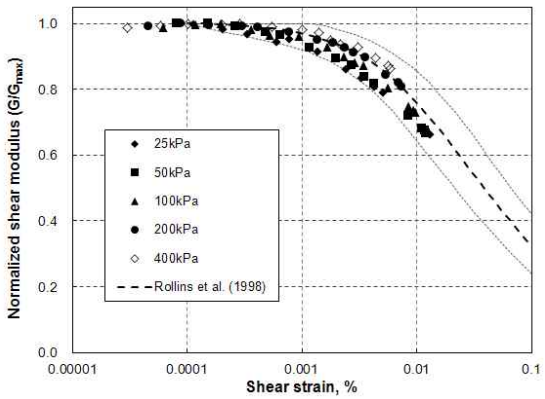
[그림 3.1.28] 조립재료의 입도분포에 따른 전단탄성계수 및 정규화 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비 특성 (계속)

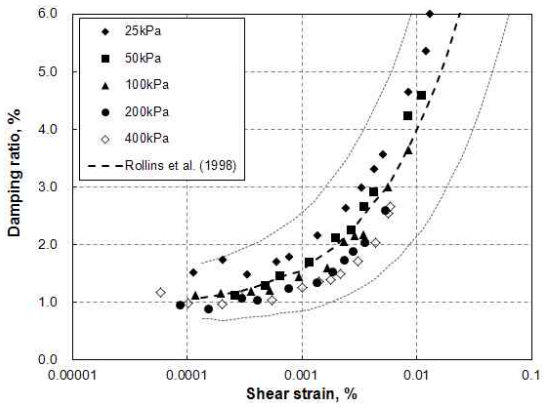


(c) 시험시편 3　　(d) 시험시편 4

[그림 3.1.28] 조립재료의 입도분포에 따른 전단탄성계수 및 정규화 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비 특성 (계속)

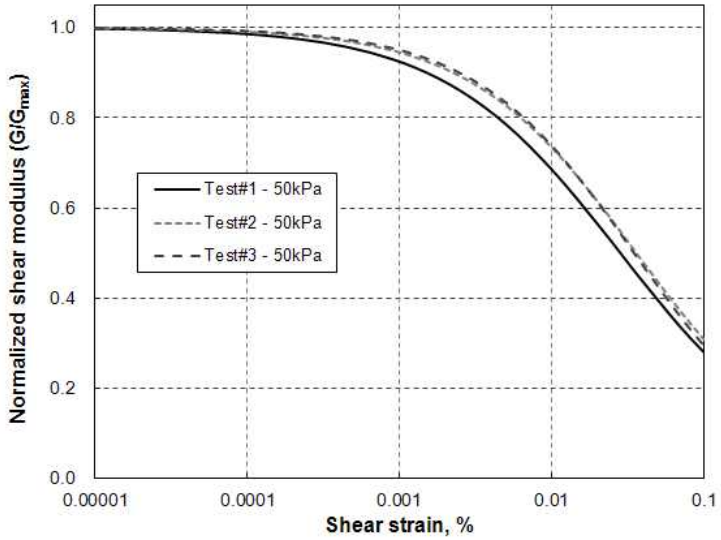




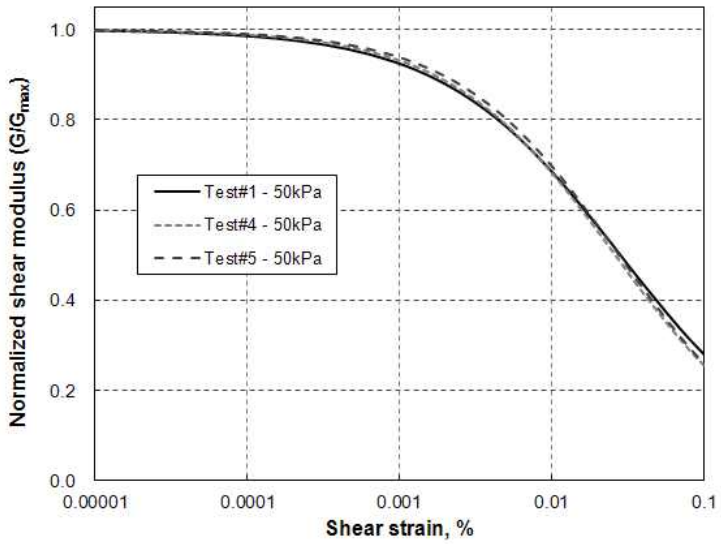


(e) 시험시편 5

[그림 3.1.29] 조립재료의 입도분포에 따른 전단탄성계수 및 정규화 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비 특성



(a) 상사입도 시료의 최대입경에 따른 G/G_{max}곡선



(b) 동일최대입경 하의 균등계수 차이에 따른 G/G_{max}곡선

[그림 3.1.30] 입도분포에 따른 전단탄성계수감소곡선 특성

Seed 등 (1984)의 연구 결과에서 자갈과 모래의 특성을 비교할 경우 일반적으로 자갈질 재료의 전단탄성계수감소곡선은 모래보다 작은 전단변형율에서 감소하는 특성을 나타내며 감쇠비는 일반적인 모래와 유사하게 평가된다. 본 실험결과에서도 [그림 3.1.30] (a)에 나타나는 바와 같이 최대입경이 작아짐에 따라 전단탄성계수감소곡선의 위치가 다소 상승하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 최대입경 26mm의 자갈질 시료와 최대입경 4.75mm의 모래 시료의 특성을 비교함에

따라 동일한 입도분포 특성에서도 자갈과 모래의 특성에 따른 차이가 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 시험시편 2의 경우에도 최대입경은 자갈로 분류되나 입경 4.75mm 이하의 모래가60% 이상 포함된 모래로 분류되는 시료이므로, 시험시편 3의 모래시료와 동일한 변형 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

(나) 입도분포 특성 - 균등계수의 영향

[그림 3.1.28]의 (d), (e)는 각각 시험시편 4, 5에 대한 공진주시험 결과를 도시한 것으로, [그림 3.1.28] (a)의 시험시편 1에 대한 결과와 함께 비교함으로써 동일한 최대입경 조건에 대하여 입도분포곡선의 기울기, 즉 균등계수의 차이가 재료의 비선형 변형 특성에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 기존의 유사한 연구 사례를 살펴보면, 동일한 D50 입경에 대하여 균등계수를 달리하는 직선형태의 입도분포를 나타내도록 다수의 시편을 제작하여 공진주시험을 수행한 경우 균등계수가 클수록 전단탄성계수감소곡선이 상승하고, 감쇠비 곡선은 하강하는 특성이 나타난다(Menq, 2003). [그림 3.1.30] (b)를 통하여 본 연구에서의 시험시편 1, 4, 5의 비선형 변형특성을 비교할 경우 전단탄성계수감소곡선의 위치는 Rollins 등이 제시한 평균 곡선과 유사한 위치에서 큰 차이를 나타내지 않으며, Menq의 결과와는 달리 균등계수가 클수록 전단탄성계수감소곡선의 위치에 변화가 없거나 오히려 약간 상향으로 이동함을 확인하였다. 이와 같은 현상은 앞선 최대입경의 차이와 같이 자갈과 모래의 전단탄성계수감소곡선 차이와 일관된 것으로 분석할 수 있다. 해당 결과를 앞서 살펴본 최대입경에 따른 비선형 변형특성과 더불어 분석할 때, 동일한 D50 조건에서 균등계수의 증가는 최대입경의 증가를 수반함에 따라 전단탄성계수감소곡선이 감소하는 반면, 동일한 최대입경을 갖는 조립재료에서 균등계수의 증가는 모래의 함량이 증가하므로, 전단탄성계수감소곡선이 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 한편, 동일한 최대입경에 대한 실험 결과에서 균등계수에 따라 전단탄성계수감소곡선이 약간 증가하는 것으로 미루어 볼 때, 조립질 재료의 입도 특성은 균등계수보다 최대입경이 재료의 비선형 변형 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

한편 감쇠비의 경우 균등계수가 클수록 데이터의 범위가 미세하게 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 기존 연구 사례에 알려진 바와 유사한 현상으로 해석할 수 있다.

(3) 시험 결과 및 분석 - 최대전단탄성계수

지반재료의 최대전단탄성계수는 일반적으로 간극비, 선행압밀하중, 구속응력상태 등의 영향을 받으며, 비등방 구속압력 조건에서 응력과 최대전단탄성계수에 대한 관계는 [식 3.1.7]과 같이 표현된다(Hardin, 1978 Hardin과 Blandford, 1989).

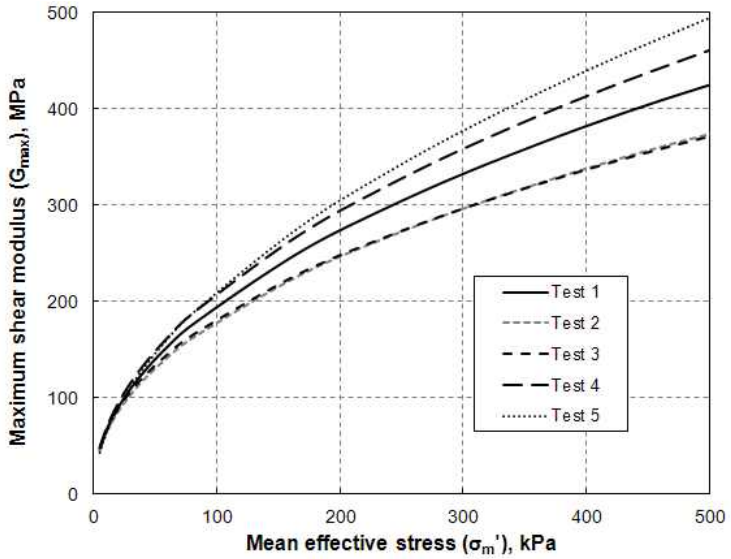
$$G_{ij}^{e}=\frac{OCR^{k}}{F(e)}\frac{S_{ij}}{2(1+\upsilon)}p_{a}^{1-n}(\sigma_{i}'\sigma_{j}')^{\frac{n}{2}} \qquad \text{[식 3.1.7]}$$

여기서 $F(e)$는 간극비 함수이며, 다음과 같이 표현된다.

$$F(e)=0.3+0.7e^{2} \qquad \text{[식 3.1.8]}$$

등방구속압 상태에서 비점성토의 선행압밀하중을 고려하지 않을 때 [식 3.1.7]의 재료상수와 관련된 항을 정리하면 평균유효응력 σ_m'에 대하여 다음과 같이 간략히 표현될 수 있다.

$$G_{\max}=\frac{A}{F(e)}p_{a}^{1-n}\sigma_{m}'^{n} \qquad \text{[식 3.1.9]}$$



[그림 3.1.31] 입도분포에 따른 구속압-최대전단탄성계수 관계

[표 3.1.11] 각 시험 시편의 최대전단탄성계수 결정 계수

ID	*A*	*F(e)*	*n*
Test #1	955	0.492	0.48
Test #2	879	0.494	0.46
Test #3	874	0.484	0.44
Test #4	854	0.412	0.49
Test #5	774	0.369	0.53

[그림 3.1.31]은시험 대상인 5개 시편에 대하여 10^{-4}% 이하의 미소변형율 구간에서 측정한 구속압에 따른 최대전단탄성계수를 [식 3.1.7] 또는 [식 3.1.9]을 바탕으로 근사하여 도시한 결과이며, [식 3.1.9]의 각 계수는 [표 3.1.11]에 정리하였다. 동일한 균등계수를 나타내는 시험시편 1, 2, 3의 경우 동등한 간극비 조건에서 최대입경의 감소에 따라 강성계수 A와 구속압 영향계수 n이 모두 감소하는 것으로 평가되었으며, 그 차이는 최대입경 26mm인 시험시편 1에서 두드러지는 것으로 확인할 수 있다. 일반적으로 동일 재료에 대하여 균등계수가 동일한 경우 최대입경에따라 강성계수는 증가하고 구속압 영향계수는 크게 변하지 않는데, 본 연구결과에서도 구속압영향계수의 변화량은 5% 미만으로 작은 값을 나타낸다. 시험시편 2, 3의 경우 구속압에 따른 최대전단탄성계수가 유사한 값을 나타내는

데, 이러한 차이는 각 시험시편이 통일분류법과 입도특성 상에서 유사하게 구분되는 모래시료이기에 나타나는 현상이라 판단되며, 시험시편 1의 자갈과 구분되는 특성으로 볼 수 있다. 자갈과 모래의 구분되는 특성은 앞서 전단탄성계수감소곡선에서 나타난 차이와 일관성을 나타내는데, 결과적으로 동일 재료에 대하여 준비된 상사입도 시험시편이 최대입경, 평균입경(D50) 등에서 자갈과 모래와 같은 상이한 재료적 특성으로 구분될 경우, 전단탄성계수감소곡선과 최대전단탄성계수에서 유의미한 차이를 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다.

한편, 그림 [3.1.31]의 결과에서 동일 최대입경에 대하여 균등계수를 달리한 시험시편 1, 4, 5를 비교할 경우 균등계수가 큰 시편일수록 구속압의 증가에 따른 최대전단탄성계수 증가 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. [표 3.1.11]을 살펴보면 균등계수가 약 2배, 4배 증가할 때 구속압 영향계수 n은 증가하고 강성계수 A는 감소하는 경향을 확인할 수 있으나, 본 연구 결과만으로는 명확한 상관관계를 유추하기 어렵다. 해당 세 시편의 재료는 입도분포의 차이를 고려할 때 동일 재료로 간주하기 어려우므로, [식 3.1.9]을 적용하여 계수를 직접 비교하기에는 한계가 있다. 단, 대기압 p_a에 대한 기준강성 $k=A/F(e)$에 대하여 비교할 경우 균등계수의 증가와 함께 강성도 증가하는 것으로 확인할 수 있다. 결론적으로 동일 재료원에 대하여 양입도로 조성된 시료일수록 전단탄성계수의 값이 크고, 구속압에 보다 민감한 것으로 확인하였다.

본 연구결과를 종합할 때, 동일 재료원에 대하여 최대입경과 균등계수를 달리함으로써 실험을 수행한 결과 재료의 최대입경은 전단탄성계수감소곡선과 최대전단탄성계수에, 균등계수는 최대전단탄성계수에 주된 영향요소로 작용하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 원 재료의 최대입경을 최대한 유사하게 반영할 수 있는 대형 시험기의 활용은 재료의 동적변형특성을 엄밀히 평가하는데 유용하며, 시험기의 한계로 인하여 소형 시험기를 이용하는 경우, 실제 재료의 최대전단탄성계수를 다소 작게 평가할 수 있으므로, 설계・해석을 위한 물성 적용 시 이를 감안하여 이용하는 것이 필요할 수 있다.

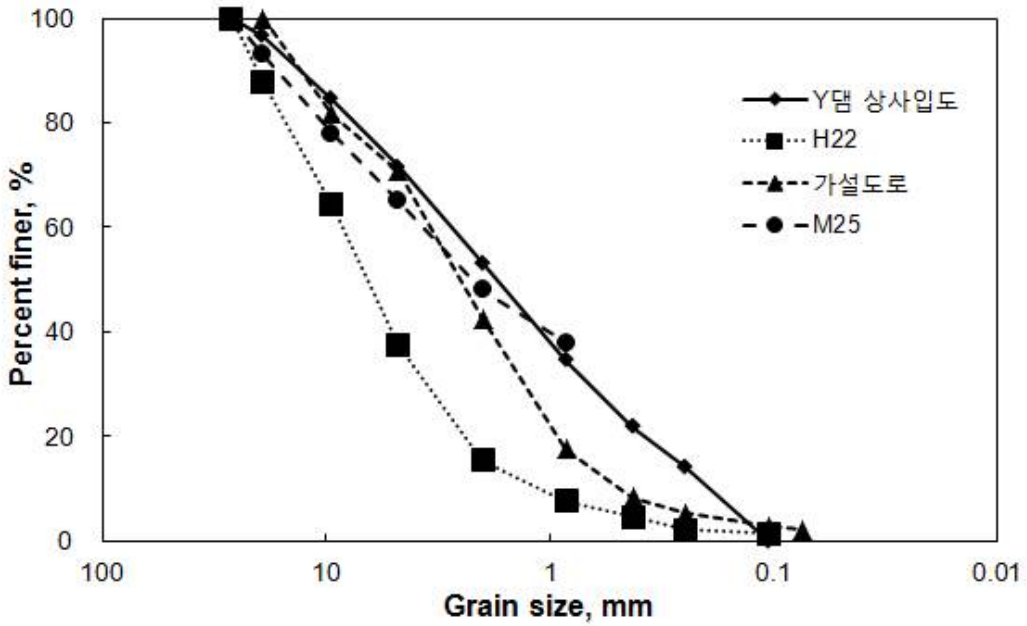
5. 조립재료 유형에 따른 동적변형특성 평가

대입경 조립재료는 댐, 항만, 도로, 철도 등 다양한 지반구조물 건설 현장에 채움재로써 그 사용 범위가 다양하다. 그러나 각 구조물의 종류에 따라 재료원의 입도

분포나 다짐특성과 같은 공학적 특성이 상이하며 이로 인한 재료의 동적변형특성에도 차이가 발생한다. 본 연구에서는 총 4개의 각기 다른 건설 현장에서 이용되는 조립재료 시료를 이용하여 대형 공진주시험을 수행하였으며, 이를 바탕으로 각 구조물 유형에 따른 조립재료의 동적변형특성을 평가하고자 하였다. 재료원의 유형은 각각 댐 축조용 사력재료부터 획득한 상사입도시료, 고속철도 시공현장의 강화노반 재료 2개, 그리고 일반 건설현장에서 가설용 성토재료로 사용하는 자갈질 골재 재료를 이용하였다.

가. 시험 조건

[그림 3.1.32]는 재료별 동적변형특성의 비교 시험을 위하여 준비된 시료의 입도분포곡선을 비교하였다. 각각의 시료는 댐 축조용 사력재 (Y댐 상사입도), 고속철도 강화노반 재료 (H22, M25), 건설현장 가시설 축조용 골재(가설도로)로 구분하였다. 시험 시료의 준비는 재료원의 입도분포로부터 최대입경 26 mm를 기준으로 상사입도 시료를 조성하거나(Y댐 상사입도, M25), 최대입경 26 mm 이상의 암석이 미량 포함된 경우 해당 암석을 걸러낸 상태의 원입도를 가정하여 준비하였다. 미량의 대입경 재료가 포함되는 경우 전체 지반재료 상에 부유한 (floating) 상태의 특성을 나타내며, 해당 입자가 재료의 전단 또는 변형 거동에 큰 영향을 미치지 않으므로 이러한 소량의 대형 입자를 제거하더라도 재료 본연의 특성은 유지하는 것으로 간주할 수 있다.



[그림 3.1.32] 각 시험재료의 입도분포특성

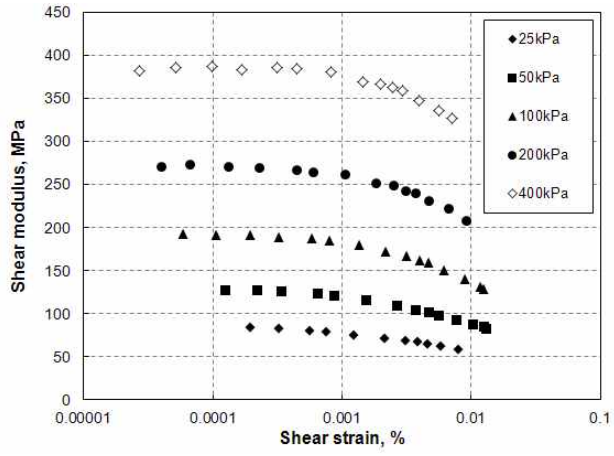
[표 3.1.12] 각 시험 재료의 입도분포특성 계수 및 시험 조건

ID	D_{60}	D_{10}	C_u	D_{50}	D_{30}	C_C	G_S	ρ (t/m^3)	e
Y댐상사	2.76	0.194	14.2	1.73	0.663	0.82	2.79	2.06	0.358
H22	8.50	1.096	7.7	6.57	3.548	1.35	2.68	2.19	0.223
가설도로	3.41	0.480	7.1	2.51	1.301	1.03	2.63	1.94	0.357
M25	3.70	0.074	50.0	2.20	0.420	0.64	2.68	2.11	0.269

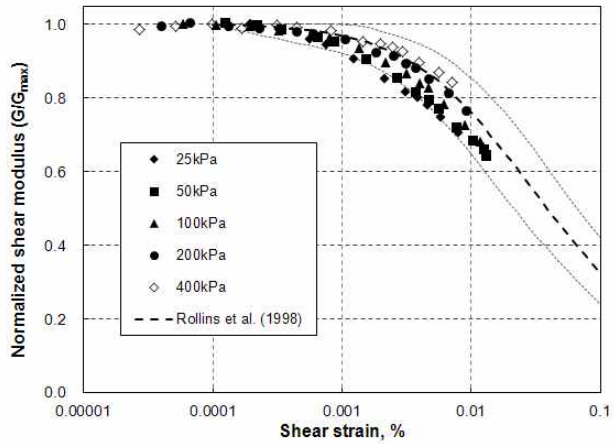
재료의 입도분포 특성을 살펴보면 Y댐 상사입도 재료, M25 고속철도 강화노반 및 가시설 골재의 경우 통과율 40 % 잔류량에 대하여 비교적 유사한 경향을 보이며, M25 고속철도 강화노반 재료의 경우 입경 4 mm 이상의 자갈질 재료가 상대적으로 적게 함유되어 있다. 균등계수와 곡률계수를 살펴보면 M25 재료가 가장 작고, H22 재료가 가장 크게 나타난다. 앞서 동일한 재료원으로부터 입도분포를 달리하는 경우 균등계수 등의 증감에 따라 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 형태, 즉 비선형성이 변화하는 결과를 고려할 때, 이러한 차이는 재료의 비선형 변형특성에 차이를 유발할 것으로 예상할 수 있다. 시험 시료의 입도분포특성 및 대형 공진주시험 시 밀도조건 등은 [표 3.1.12]와 같다.

나. 대형 공진주시험에 의한 재료별 동적 변형특성

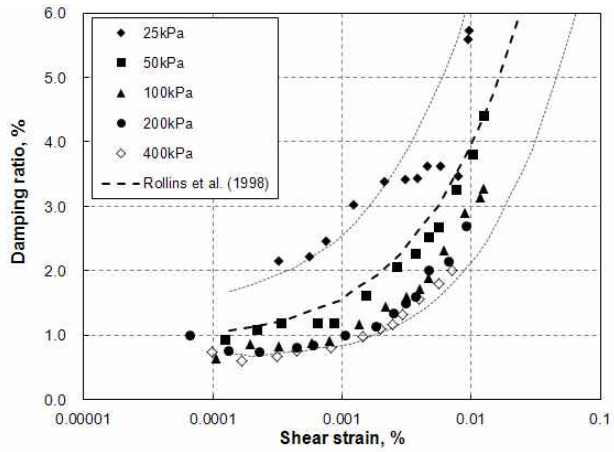
전술된 재료에 대한 대형 공진주시험 결과는 각각 구속압과 변형율에 따른 전단탄성계수 특성, 정규화 전단탄성계수 감소곡선, 자유진동 감쇠법에 의하여 측정한 감쇠비를 시료별로 [그림 3.1.33]에서 [그림 3.1.36]까지 나타내었다. 시험 시 구속응력 조건은 최소 25 kPa에서 시료에 따라 최대 400 kPa 까지 적용하였으며, 비교적 성토고가 낮게 적용되는 고속철도 현장 재료에 대해서는 최대 200 kPa 까지 적용하였다.



(a) 구속압과 변형율에 따른 전단탄성계수 특성

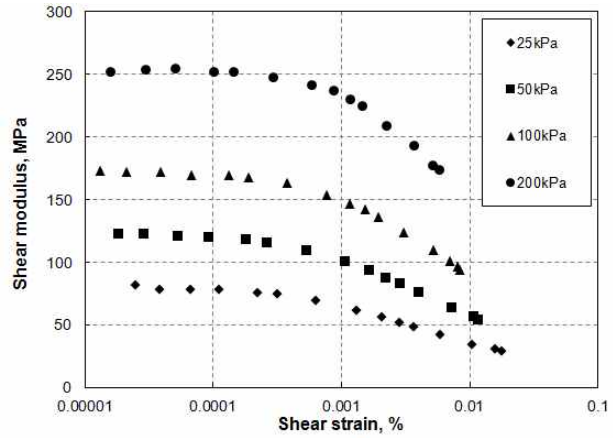


(b) 정규화 전단탄성계수감소곡선

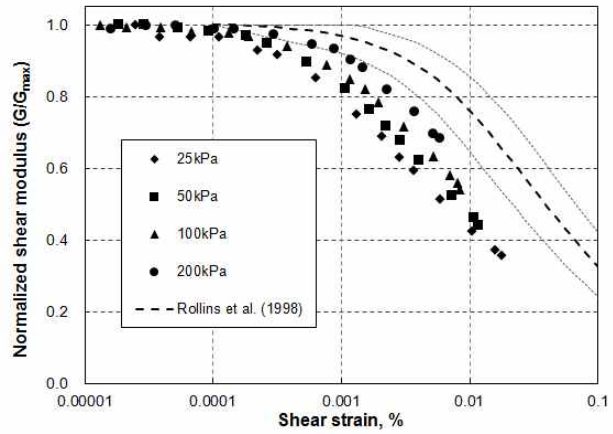


(c) 자유진동감소법에 의한 감쇠비

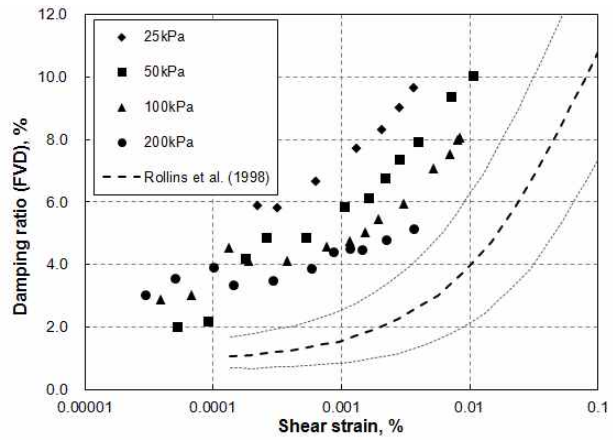
[그림 3.1.33] 댐 축조용 조립재료에 대한 대형 공진주시험 결과



(a) 구속압과 변형율에 따른 전단탄성계수 특성

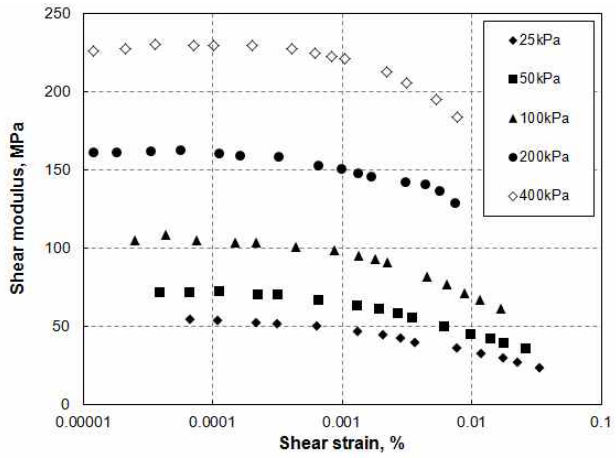


(b) 정규화 전단탄성계수감소곡선

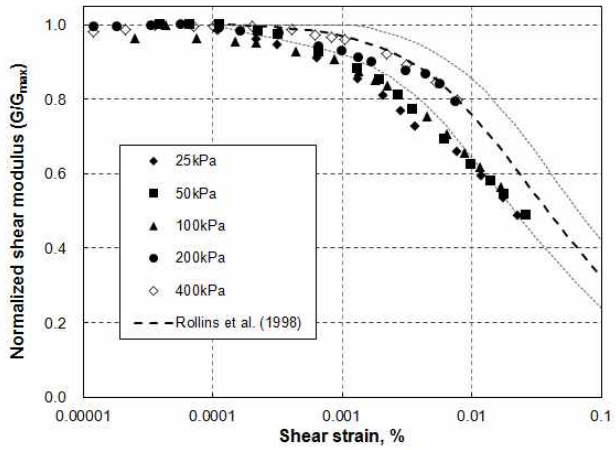


(c) 자유진동감소법에 의한 감쇠비

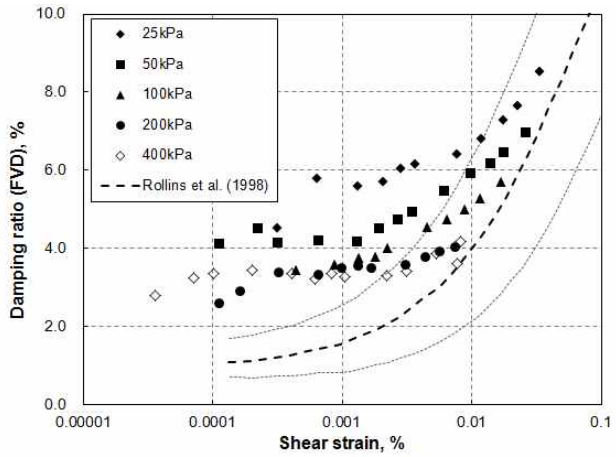
[그림 3.1.34] 고속철도 강화노반재료(H22)에 대한 대형 공진주시험 결과



(a) 구속압과 변형율에 따른 전단탄성계수 특성

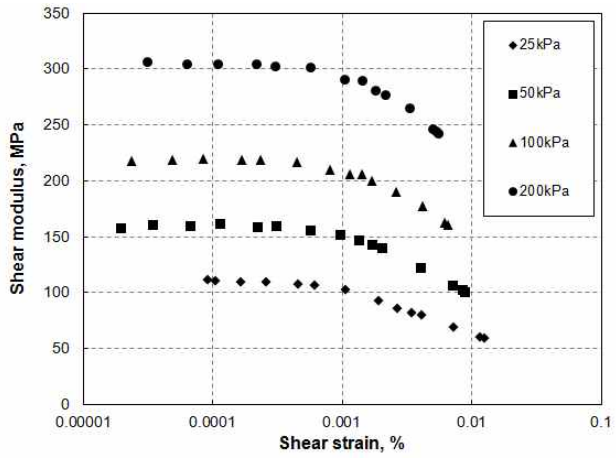


(b) 정규화 전단탄성계수감소곡선

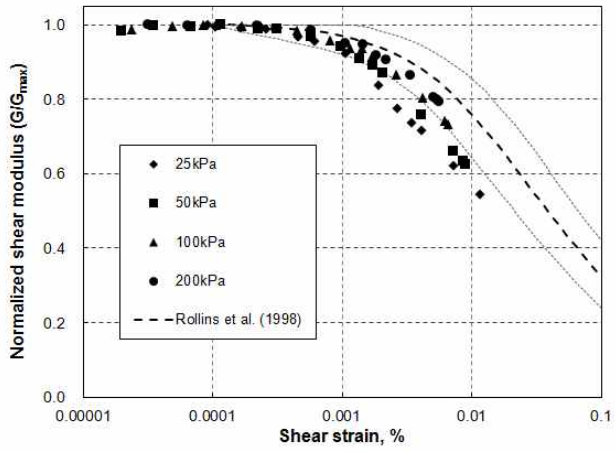


(c) 자유진동감소법에 의한 감쇠비

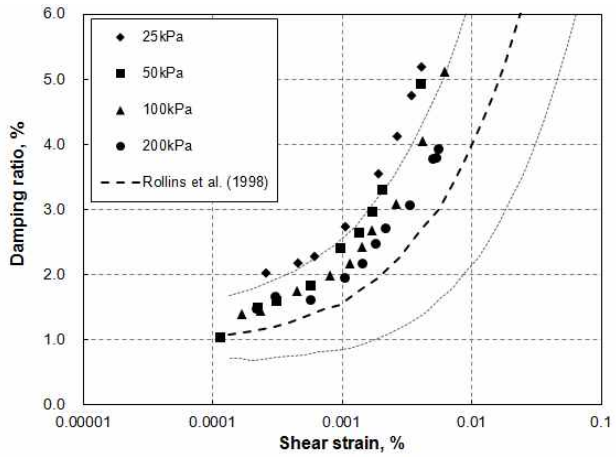
[그림 3.1.35] 건설현장 임시포설용 자갈재료에 대한 대형 공진주시험 결과



(a) 구속압과 변형율에 따른 전단탄성계수 특성



(b) 정규화 전단탄성계수감소곡선



(c) 자유진동감소법에 의한 감쇠비

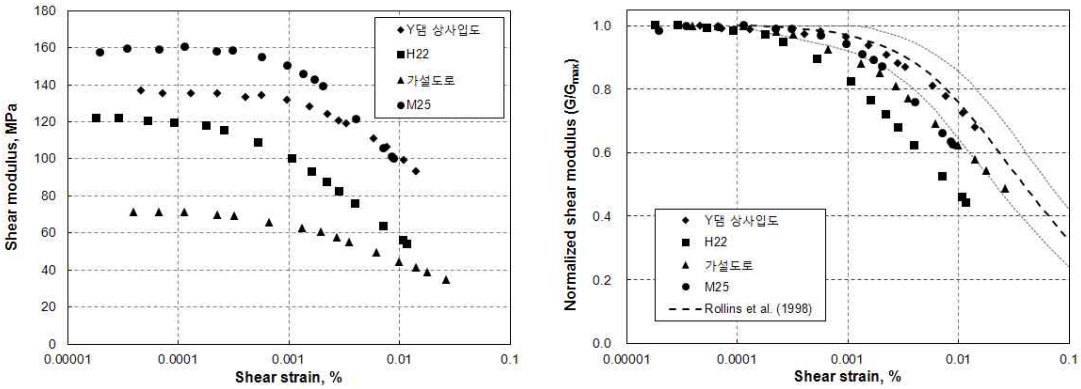
[그림 3.1.36] 고속철도 강화노반재료(M25)에 대한 대형 공진주시험 결과

시험 결과의 재료별 특징을 살펴보면 재료에 따라 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 위치, 즉 재료의 변형율에 따른 비선형성이 각기 달리 나타나며, 구속압에 따른 최대전단탄성계수의 크기도 차이가 나타남을 알 수 있다. [그림 3.1.37]과 [그림 3.1.38]은 각 재료별 시험 결과에서 50 kPa와 100 kPa 구속압 조건에 대한 결과만을 비교 도시한 것으로 그 차이를 명확히 확인할 수 있다.

[그림 3.1.37]과 [그림 3.1.38]의 (a)에 도시된 최대전단탄성계수를 살펴보면 동일 최대입경에 약 10% 수준의 단위중량 차이에 대해서도 재료에 따라 약 2배의 차이가 나타남을 알 수 있으며, 비선형성에 의한 탄성계수의 감소 또한 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. (b)의 나타낸 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 경우 M25 재료의 곡선은 Seed와 Idriss의 사질토 평균 곡선에 근접한 반면 Y댐 상사입도시료의 경우 Rollins 등의 자갈 평균곡선과 일치하는 정도의 차이를 보인다. 결과적으로 재료의 최대전단탄성계수보다 정규화 곡선에 입도분포의 영향이 크게 나타나는 것으로 판단할 수 있는데, 예를 들어 본 실험 결과에서 2 mm 이상 입자의 함량이 가장 큰 H22 시료의 경우 비선형성이 가장 크게 나타나고, 동일 입도 함량이 가장 작은 Y댐 상사입도의 경우 비선형성이 가장 작게 나타난다. 또한 네 경우에서 [그림 3.1.32]에 나타난 2 mm 이상 입자 함량과 동일한 순서대로 비선형성도 나타나는 것을 확인할 수 있다.

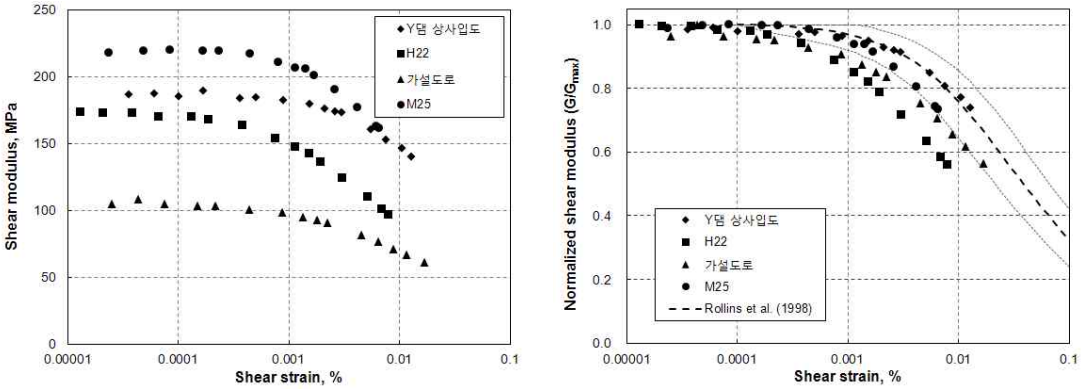
한편 구속압에 따른 각 재료의 미소변형 최대전단탄성계수를 [식 3.1.9]에 따라 표현할 때, [표 3.1.13]에 나타낸 바와 같이 재료에 따라 강성계수 A는 약 450에서 1000 사이에 나타나는 것을 확인할 수 있다. 구속압에 대한 민감도를 나타내는 구속압영향계수 n의 경우 통상적으로 이용되는 0.5에 평균적으로 근접한 결과가 나타나며, 재료에 따라 0.45에서 0.55 사이의 값을 나타낸다. 각 재료별 시험 결과를 바탕으로 구속압에 따른 미소변형율 최대전단탄성계수의 관계를 예측할 때 [그림 3.1.39]와 같이 나타낼 수 있다.

감쇠비의 경우 재료에 따라 미소변형율 영역에서의 최소감쇠비 D_{min}에 차이가 발생하지만, 가설도로 재료를 제외하면 Rollins 등이 제안한 곡선과 유사한 형태로 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 대입경 조립재료의 감쇠비 특성은 미소변형율에서 측정한 최소감쇠비를 기준으로 Rollins 등이 제안한 감쇠비의 평균 또는 하한 값을 이동하여 근사할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 재료별 전단탄성계수 특성 (b) 정규화 전단탄성계수감소곡선

[그림 3.1.37] 재료 유형에 따른 동적변형특성 비교 - 50kPa 시험 조건

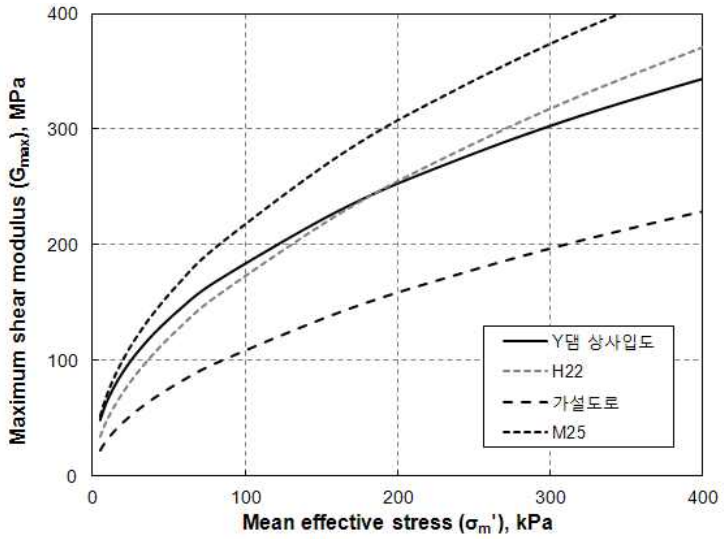


(a) 재료별 전단탄성계수 특성 (b) 정규화 전단탄성계수감소곡선

[그림 3.1.38] 재료 유형에 따른 동적변형특성 비교 - 100kPa 시험 조건

[표 3.1.13] 각 시험 시편의 최대전단탄성계수 결정 계수

ID	ρ (t/m^3)	e	A	$F(e)$	n
Y댐상사	2.06	0.358	1012.5	0.484	0.45
H22	2.19	0.223	559.1	0.335	0.55
가설도로	1.94	0.357	448.7	0.389	0.53
M25	2.11	0.269	766.3	0.351	0.48

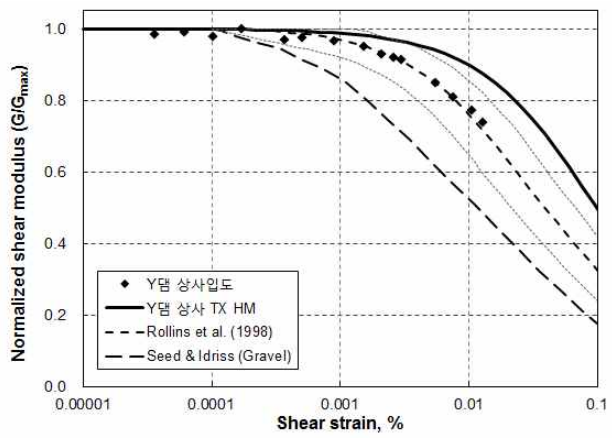


[그림 3.1.39] 각 재료별 구속압 - 최대전단탄성계수 관계

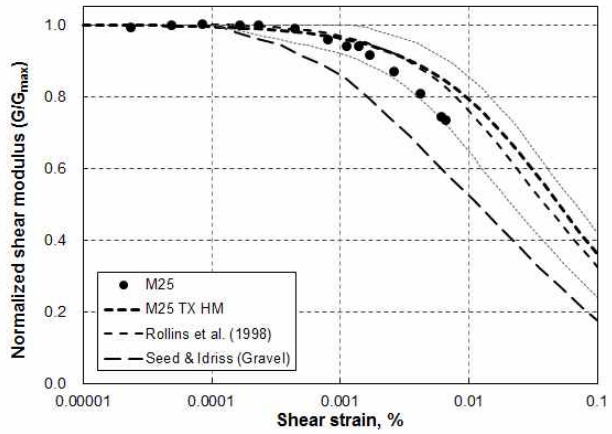
다. 타 시험기법과의 비교 검증

일반적으로 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 시험에 대한 중요 조건인 구속압에 따라 약간의 변화가 나타날 수 있으므로, [그림 3.1.38]과 같이 특정 구속압 단계에서의 결과를 비교하는 것이 타당하다. 실제 이세현 등(2009)은 국내외 주요 자갈질 재료에 대한 삼축압축시험 또는 공진주시험 결과를 바탕으로 지반구조물의 동적 해석에 요구되는 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 구속압 수준을 고려하여 각각 제시한 바 있으며, 대다수의 최대전단탄성계수의 모델링 시 기준응력으로 표현되는 1 atm(≒ 100 kPa)에 대한 결과는 Rollins 등(1998)이 제시한 자갈질 재료에 대한 대표곡선과 일치하는 경향을 나타낸다.

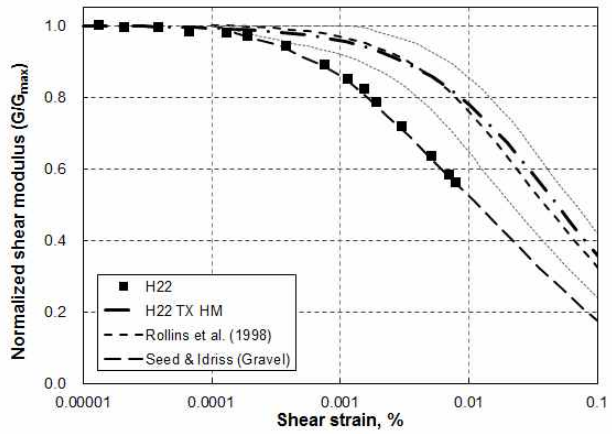
본 연구에서는 대형 공진주시험을 이용한 대입경 재료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 적합성을 평가하기 위한 방안으로 동일 재료에 대한 대형 반복삼축압축시험 결과와 상호 비교하였다. [그림 3.1.40]은 총 3개 대입경 조립재료에 대한 공진주시험 결과를 다음 절에 제시한 대형 반복삼축압축시험에 의하여 획득한 각 재료별 Modified Hyperbolic Model과 비교한 결과로 기존에 통상적인 자갈질 재료에 대한 대표적인 곡선인 Rollins 등의 결과, Seed와 Idriss의 결과 등과 비교하였다.



(a) Y댐 상사입도 재료



(b) 고속도로 강화노반 M25 재료



(c) 고속도로 강화노반 H22 재료

[그림 3.1.40] 각 재료별 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 비교
(대형 공진주시험 & 대형 반복삼축압축시험)

각 재료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 대략적으로 Rollins 등이 제시한 자갈질 재료의 평균 곡선과 Seed와 Idriss가 제시한 자갈질 재료의 평균 곡선 사이에 위치함을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 대상으로 삼는 대입경 조립재료의 대형 공진주시험으로부터 획득한 비선형성이 기존에 연구된 대다수의 자갈질 재료에 비하여 비교적 크게 나타남을 시사하며, 실제 지반구조물의 채움재료로 사용되는 대입경 재료의 최대입경 (시험시료 최대입경 이상) 또는 입도분포특성을 고려할 때 이러한 판단은 타당하다고 할 수 있다.

한편 [그림 3.1.40]에 나타난 대형 반복삼축압축시험 결과는 공진주시험에 의한 결과에 비하여 비선형성을 작게 평가하는 경향을 나타내며, 이러한 경향은 [표 3.1.14]에 정리한 각 재료의 Modified Hyperbolic Model 계수로 명확히 나타난다. 해당 결과는 Darendeli (2001)이 제안한 일반적인 지반재료의 정규화 전단탄성계수를 표현하는 다음 식의 두 계수를 나타낸다.

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^{a}} \qquad \text{[식 3.1.9]}$$

여기서 γ_{ref}는 $G/G_{\max}$ 값이 0.5로 나타나는 기준 변형율(reference strain)을 의미하며, a는 곡선의 곡률을 표현하는 지수이다. 대형 반복삼축압축시험 결과는 공진주시험에 비하여 일반적으로 γ_{ref}와 a 모두 다소 크게 평가하는 경향이 나타난다. 이는 삼축시험의 경우 공진주시험에 비하여 10^{-4}% 이하의 전단변형율 범위에서 탄성계수 측정이 어려움으로 인하여 최대전단탄성계수를 다소 작게 평가할 수 있으며, 따라서 10^{-3}% 이상의 중간변형율 범위에서 $G/G_{\max}$ 값을 다소 크게 평가하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 세 종류의 시료에 대한 정규화 전단탄성계수를 비교할 경우 대형 반복삼축압축시험의 결과에서도 공진주시험과 유사하게 재료별로 일관된 차이를 나타내므로, 양 시험기법 모두 재료의 비선형 변형특성 평가에 효과적으로 이용될 수 있는 것으로 판단된다.

[표 3.1.14] 각 재료의 100 kPa 정규화 전단탄성계수 감소곡선 계수 비교 (Modified Hyperbolic Model, Darendeli. 2001)

ID	대형 공진주시험		대형 반복삼축압축시험	
	γ_r (%)	a	γ_r (%)	a
Y댐상사	0.04426	0.8386	0.09750	0.95
H22	0.01043	0.7926	0.04815	0.80
가설도로	0.02497	0.6523	-	-
M25	0.01729	1.0000	0.04975	0.83
Rollins 등 (1998)	0.03962	0.8577	-	-
Seed와 Idriss (1970)	0.01150	0.7351	-	-

6. 요약 및 결론

본 절에서는 대입경 조립재료의 동적 변형특성을 평가하기 위한 방안으로 국내외 다양한 대형 공진주시험기의 활용 현황을 조사하고, 이를 바탕으로 지름 200 mm, 높이 400 mm의 원주형 시편에 대한 시험이 가능한 국내 최대 규모의 대형 공진주시험기를 개발하였다. 해당 시험기의 동적 응답특성은 기존에 제안되어 널리 적용되는 교정 방법에 의하여 평가하였으며, 다양한 검증시편과 실제 지반재료에 대하여 시험을 수행한 결과 조립질 지반재료의 동적 변형특성 평가에 적합한 것으로 확인하였다.

시험기의 일반적인 적용성 및 성능을 검증하기 위한 방안으로 동일한 지반재료에 대하여 대형-일반 공진주시험기를 이용하여 시험을 병행한 결과, 지반재료의 전형적인 변형특성이 두 방법에서 동일하게 평가되었으므로 지반재료의 동적 변형특성 평가에 적합한 것으로 판단하였다. 그러나 낮은 구속압 단계에서의 최대전단탄성계수를 비교한 결과, 공시체 크기의 차이에 따라 발생하는 시편 내 유효응력 차이로 인하여 상이한 결과가 나타날 수 있음을 확인하였으며, 따라서 대형 시험기를 이용하여 최대전단탄성계수를 평가하는 경우 평균유효응력에 대한 민감도를 과소평가할 수 있다.

다양한 입도 조건의 시험시편을 준비하여 대형 공진주시험을 실시한 결과, 조립재

료의 입경이 커질수록 구속압에 따른 최대전단탄성계수가 증가하고, 변형율에 따른 변형계수의 비선형성도 증가한다. 실내시험을 통하여 대입경 조립재료의 동적 변형특성을 평가할 때 일반적으로 시험장비 조건에 맞추어 입도를 조정하는 것을 감안할 때, 상사입도에 의한 시험 결과는 지반구조물의 해석 또는 설계를 위한 다소 보수적 변수로 사용될 수 있다.

또한 댐, 철도 노반과 같이 다양한 종류의 대입경 조립재료에 대하여 시험을 수행한 결과 대다수의 경우 대형 공진주시험이 재료의 동적 변형특성에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 해당 연구 결과로부터 재료별 최대전단탄성계수 및 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 범위 등을 제시하였다.

제 2 절 대형진동삼축압축시험을 통한 대입경 조립재료 동적물성 산정

1. 서론

가. 연구 목표

본 연구는 입경이 큰 조립재료로 축조된 대형 지반구조물의 지진응답해석 및 진동 영향 평가에 필요한 동적물성을 구하기 위하여 대형삼축압축시험법을 확립하고 평가하여 가능한 적용 대상 및 재료 그룹별로 동적물성 범위 및 예측식을 제시하는 것을 최종 연구목적으로 하고 있다.

나. 연구 필요성

일반적으로 조립재료(coarse materials)라 함은 입경이 0.075mm 내지는 300mm 이상인 모래, 자갈, 암석(cobble or boulder)을 포함한 토질 및 암석질 재료를 총칭한 것으로 입상재료(granular materials)라고 불리기도 한다. 조립재료는 주로 암석입자의 집합체로서 점착력이 없는 마찰성 재료이며, 입자의 크기가 상대적으로 크고 파쇄에 의하여 성질 변화가 크게 발생하는 재료로 그 특성이 세립토와는 상이하다고 알려져 있다(한국수자원공사, 2001).

최근 지반구조물이 더욱 더 대형화되어 가는 추세인 점을 고려할 때, 대입경 조립재료는 대형 필댐, 저수지 제방, 항만 방조제 및 방파제, 철도 노반 및 암성토, 교대 및 지하철 박스 뒷채움 등 다양한 구조물에 지속적으로 활용도가 증가될 것으로 예상된다. 이러한 대입경 조립재료로 축조된 대형 구조물은 경제적·사회적으로 국가 중요 기반시설에 해당되는 경우가 대부분이다. 그러나, 이러한 활용도의 증가에 비해 그 동적물성에 대한 평가는 용이하지 않은 상황이다.

따라서 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물의 내진설계 및 내진안정성 평가, 건설 및 운영 중 진동요인에 따른 동적하중에 대한 안정성 평가 및 설계, 내부 공동, 잠재적 결함 등과 같은 지반구조물의 건전성 평가 등을 위해서는 신뢰성 있는 동적물성 산정을 위한 실내 및 현장시험 기법의 개발이 절대적으로 요구되며, 여기에는 개발된 기법의 검증과 구조물별 물성범위 제시가 동반되어야 합리적이고 실용적인 적용이 가능할 것이다. 본 연구는 상기 필요성외에도 국가 방재대책에도

부응하며 대국민 안전인식 제고를 위해서 필요하고, 건설교통기술의 국가 경쟁력 확보차원에서도 지반구조물외의 다양한 시설물에도 적용될 수 있어 그 파급효과가 클 것으로 예상된다.

다. 동적물성 산정을 위한 대형삼축압축시험

시험은 일본 지반공학회 기준(JGS 0542-2000)을 기본으로 수행하였으며, JGS에서 제안하는 실험조건 및 순서는 다음과 같다. 먼저 대상지반의 구속, 배수조건을 최대한 반영하여 재현하고, 등방압밀 또는 이방압밀 중 시험 조건과 목적에 맞는 구속압, 배압, 축방향 압력 등을 제어한다. 시편 제작은 다음 그림과 같은 다짐장비를 활용하였으며, 시험 대상 재료를 입도분포에 맞게 준비하고 시험하고자 하는 밀도를 위해 다짐 하중과 시간을 조절하여 최대한 입자의 부서짐이 이루어지지 않도록 다짐을 수행하였다. 시편 다짐은 10층으로 나누어 다짐을 수행하였으며, 높은 밀도를 필요로 하는 경우 [그림 3.2.1]의 (c)의 바이브로 햄머를 이용하여 추가 다짐을 수행하였다.



(a) 다짐장비



(b) 층다짐



(c) 다짐 몰드



(d) 공시체 및 LDT 부착

[그림 3.2.1] 시편 제작 및 시험 준비 과정

등방압밀과정에서는 대상 등방압력을 작용시켜 압밀하고 1차 압밀이 종료될 때까지 압밀을 계속한다. 이방압밀과정에서는 초기등방압밀 상태의 유효축방향응력과 유효측방향응력을 5단계 이상으로 등분하여 축방향응력을 가하며, 재하속도는 공시체 내의 과잉간극수압 증분이 유효측방향응력의 10% 이하가 되도록 한다. 축방향 변형률의 축방향 응력 재하 단계별로 변화율이 0.1%/min 이하가 되는 것을 확인하며 다음 축방향 응력을 추가로 재하하며 최종 목표의 유효축방향 및 측방향 응력 조건이 만족되도록 응력 조건을 제어한다. 시험 조건을 만족하는 등방 또는 이방압밀 상태를 확인한 후 다음과 같은 과정으로 반복 축하중을 가한다. 하중은 변형률이 0.0001% 수준에서 0.1% 수준까지 발생할 수 있도록 하중을 단계적으로 증가시켜서 시험을 수행한다. 각 하중단계에서는 일정 진폭의 연속적인 반복축하중을 정현파로 재하하여 하중과 변위를 측정한다. 이때 주파수는 0.05~1.0Hz를 표준으로 하며 이때 각 하중단계에서는 11번의 정현파를 가한다. 각 하중단계별로 5회째와 10회째의 정현파에서 측정된 하중과 변위로 축차응력의 편진폭, 축변형률의 편진폭, 등가탄성계수(Equivalent elastic modulus), 감쇠비(Damping ratio)를 산정한다.

먼저 반복 편차응력의 편진폭 $\sigma_d(kN/m^2)$, 축변형률의 편진폭 $(\epsilon_a)_{SA}$, 등가탄성계수 E_{eq}, 감쇠비 $h(\%)$를 각각 다음 식으로 산정한다.

(가) 편차응력의 편진폭 $\sigma_d(kN/m^2)$

$$\sigma_d = \frac{P_C + P_E}{2A_n} \qquad \text{[식 3.2.1]}$$

여기서, P_C, P_E : 압축, 인장 반복 축하중 편진폭

A_n : 반복 재하 단계의 시편의 단면적

(나) 축변형률의 편진폭 $(\epsilon_a)_{SA}$

$$(\epsilon_a)_{SA} = \frac{\Delta L}{2H_n} \qquad \text{[식 3.2.2]}$$

여기서, ΔL : 반복 하중싸이클에서 시편의 축변위의 양진폭

H_n : 반복 재하단계에서 시편의 변위측정 구간

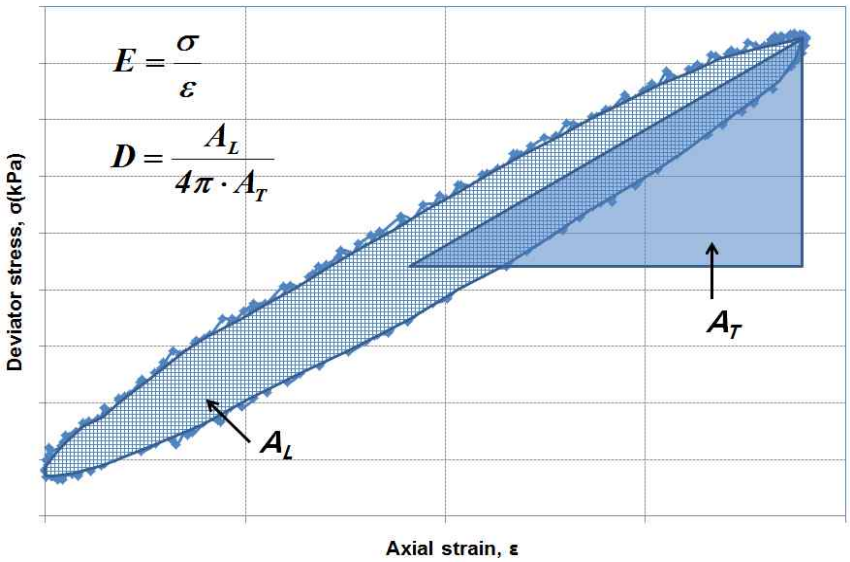
(다) 등가탄성계수 E_{eq}

$$E_{eq} = \frac{\sigma_d}{(\epsilon_a)_{SA}} \qquad \text{[식 3.2.3]}$$

(라) 감쇠비 $h(\%)$ 또는 $D(\%)$

$$D(\%) = \frac{2}{\pi} \frac{\Delta W}{\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon} \times 100 \qquad \text{[식 3.2.4]}$$

여기서, ΔW : 반복재하 싸이클에서의 감쇠에너지로 축차응력과 축변변형률로 이루어진 이력곡선의 면적(A_L)



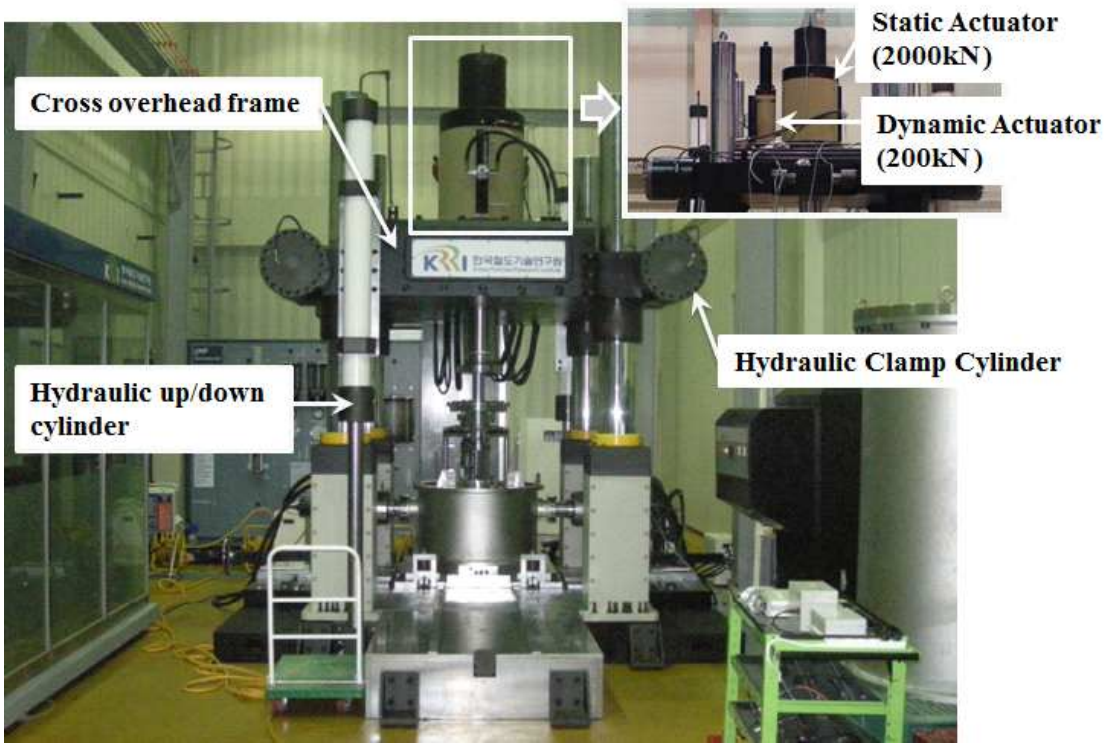
[그림 3.2.2] 전형적인 응력-변형률 이력곡선

2. 대형삼축압축시험장비 시스템 검증

시험장비 구축 이후 시험장비의 검증은 향후 수행되는 시험 결과의 신뢰성 확보를 위해서 반드시 필요한 과정이다. 이러한 검증과정에는 시험장비에 사용된 하중, 변위 등 측정용 센서들의 일반적인 검증과 더불어 시스템의 역학적 순응성(System compliance)에 대한 전체적인 검증이 필요하다(권기철 1999). 본 연구에서는 시험장비 시스템의 역학적 순응성 검증을 위해 동적물성 결과를 중심으로 검증작업을 수행하였으며, 이를 위하여 고유의 역학적 특성치(탄성계수)가 같은 직경 300mm와 50mm의 검증시편을 5종류로 제작하여 검증시험에 활용하였다. 검증 시험에는 대형삼축압축시험, 소형의 공진주시험, 비틂전단시험, 충격반향시험 등이 이루어졌다.

가. KRRI 대형삼축압축시험장비 개요

본 장비의 메인프레임은 2개의 액츄에이터(2000kN, 200kN)를 거치하고 하중의 반력대로 사용되는 Cross Head(약 180kN), Cross Head의 상하이동을 위한 400kN급의 유압실린더, Cross Head를 4축 Post에 고정시키는 4800kN의 유압클램프가 설치되어 최대하중 또는 최대속도로 하중재하 시에도 시험장비에서 유발되는 변형이 시험결과에 영향을 주지 않도록 하였다. 본 시험에 앞서 수행된 최대성능 시험에서 2200kN 재하 시 반력대(Cross Head) 중앙부 최대 변위량이 0.26mm로 실제 시험하중 범위에서는 시험체 변위 이외의 시스템 자체 변위는 무시할 수 있음을 확인할 수 있었다.



[그림 3.2.3] 대형삼축압축시험장비(한국철도기술연구원, KRRI)

본 시험장비에는 주로 정적인 압축시험과 오이도미터시험을 위한 대용량(2000kN)의 액츄에이터와 별도로 미소변형수준의 동적 시험을 위한 200kN 액츄에이터를 분리 설치하여 작은 범위에서의 하중제어를 효율적으로 할 수 있도록 하였다. 200kN 액츄에이터는 총 스트로크 400mm로 최대하중 하에서 ±10mm/10Hz의

속도로 고속제어가 가능하다.

본 시험장비에서는 보다 다양한 입도의 조립재료와 다양한 현실적인 환경 및 구속조건에 대한 요소시험이 가능하도록 여러 종류의 삼축셀을 구축하였다. 먼저 일반 삼축압축조건의 시험을 위해서 150Ø×300H, 300Ø×600H, 500Ø×1000H의 공시체의 거치와 미소변형 측정용 센서 및 케이블의 설치와 시험이 가능한 셀(cell)을 500Ø×900H, 700Ø×1200H, 900Ø×1650H으로 각각 구성하였다. 모든 시험 셀(cell)은 최대 구속압 2MPa하에서 안전하도록 설계, 제작되었다. 삼축압축시험을 위해서는 시료의 포화, 시료 내부 배압 및 구속압 제어와 부피 측정 등을 위해 공압공급장치(Air Compressor), 공기건조시스템(Air Drying system), 탈기수 장치, 이산화탄소 공급장치, 고압레귤레이터, 진공펌프 등으로 구성된 루프시스템을 구축하였으며, 루프상의 밸브와 압력제어는 컨트롤러에서 컴퓨터로 제어가 가능하도록 구성하였다.

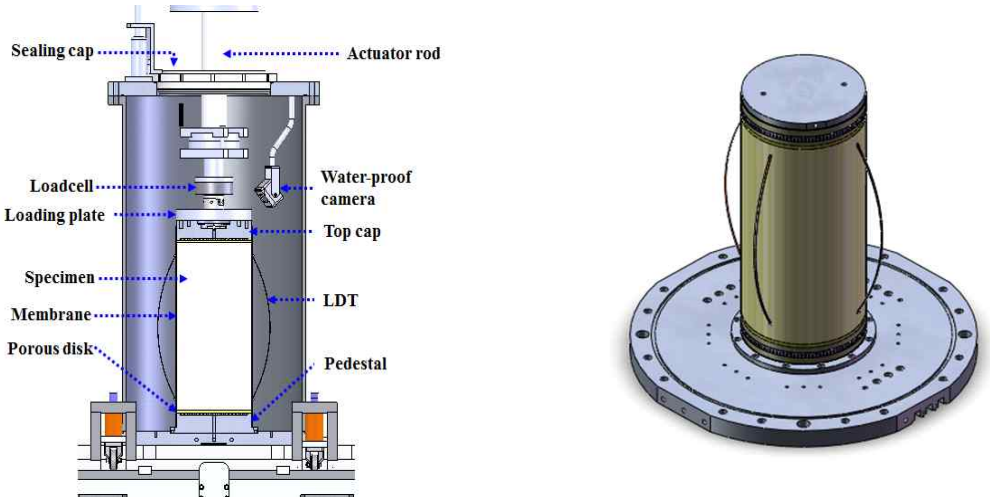
또한 시료의 포화작업이 필요할 경우 이산화탄소로 시편 내부의 공기를 치환하고 이중부압법 또는 배압법 등으로 포화도를 높일 수 있도록 하였다. 그리고 시험도중 시편 내부의 배압(back pressure) 제어 시 고압에서 공기가 시편 내부 간극수로 녹아들어 발생될 수 있는 포화도 저하를 최소화 하기 위해 질소, 산소 등 일반 대기의 기체에 비해 그 용해도가 약 10-20%에 불과한 헬륨을 이용해 배압을 제어할 수 있는 시스템이 추가되었다. 포화시료의 시험 중에 시료의 부피변화는 시료 내부 간극수의 변화량으로 측정할 수 있으며, 불포화 시료의 경우 셀내부의 구속압을 제어하는 물의 부피변화로 부피변화를 측정할 수 있도록 하였다.

삼축압축시험을 위해서는 시험조건에 맞는 공시체의 제작이 중요한 과정이다. 시험에서 목적으로 하는 밀도를 정하고 그에 맞는 시료를 성형하기 위해서는 공시체를 균일하게 반복 재현가능한 하중으로 성형할 수 있어야 할 것이다. 본 장비에서는 현장다짐조건에 유사한 하중조건에서 공시체를 제작하기 위하여, 하중크기(최대 100kN)와 주파수제어(30Hz, ±1.85mm at 100kN)가 가능한 전용 다짐장비를 제작하여 시편의 일관된 품질 재현의 수준을 향상시켰으며, 높은 다짐밀도가 요구되는 경우, Vibro hammer로 추가 다짐을 수행하여 목표밀도에 맞도록 시편을 제작하였다.

본 연구에서 사용한 삼축압축시험장비는 하중 및 변위제어가 가능한 장비이며 정확한 하중제어를 위해 로드셀을 셀내부에 설치하였다. 특히 본 장비에 구축된 로드셀은 2MPa 압력까지 내압 방수형으로 삼축셀 내부에 위치하도록 하여 삼축셀과 재하로드(rod)와의 마찰이 시험에서 측정되는 하중에 미치는 영향을 제거하였으며, 압축과 인장 시험이 모두 가능한 타입으로 설치하였다.

변위측정은 내부와 외부에서 측정하는 방법이 있으나, 외부 측정 변위는 미소변

위의 측정을 위한 정밀도 확보가 어렵고, 단부오차(bedding error)를 포함하기 때문에 미소변형수준의 변위 측정에 적합하지 않다. 단부오차는 시료의 양쪽 끝부분에서의 평탄성 등의 문제로 인하여 실제보다 큰 변위가 계측되어 변형률이 크게 평가되는 것으로 시료를 성형할 때 아무리 정밀하게 하더라도 완전히 배제할 수 없는 오차 요인이다. 따라서 본 시험장비에서는 국부(local)변형 측정법을 도입하였고, 이를 위해 셀 내부의 시편 측면에 변위센서(LDT, Local Deformation Transducer) 를 부착하여 미소변위를 측정하였다.



(a) 셀 내부 단면도 (b) LDT 센서 설치 개요도

[그림 3.2.4] 미소변형 수준의 하중제어를 위한 셀 내부 단면도 및 변형률 측정 장치 설치 개요

LDT는 국부변위 측정방법의 하나로 1% 이하의 변형률을 측정하고자 할 때 널리 사용되며, 일본의 Tatsuoka 등(1991)이 개발하여 사용되고 있다. LDT(Local Deformation Transducer)는 얇은 인청동판에 4개의 변형률계(Strain gauge)를 Full bridge 형태로 붙여서 동판이 휘어질 때 발생하는 응답을 측정하여 변위를 측정하는 장치이다. 본 연구에서 사용한 동판은 길이 520mm로서 인가전압 3V에 출력은 약 4.5mV/V 범위 이내에서 측정되어 앰프를 이용해 최대 7.3V까지 최대 25mm 변위까지 측정할 수 있다.

LDT를 사용하여 삼축압축시험을 하는 경우 [그림 3.2.4]와 같이 멤브레인에 LDT 거치를 위한 힌지를 일정한 거리고 정확히 붙이고, 힌지에 LDT의 양끝을 거치하고 시험을 수행한다. [그림 3.2.5]는 LDT를 시편에 부착한 일례를 나타내며, [그림

3.2.6]은 Calibration 장치 및 하나의 LDT에 대해 변위 대비 출력값의 변화를 보여주고 있다.



(a) LDT가 부착된 검증시편

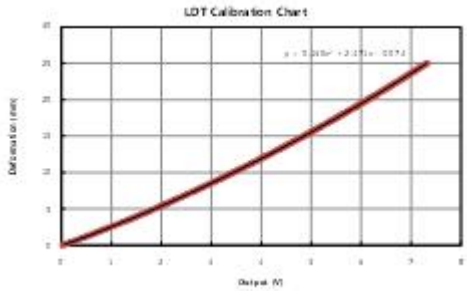


(b) LDT 지점 힌지

[그림 3.2.5] LDT 부착 공시체 및 힌지 사진



(a) LDT 센서 Calibration 장치



(b) LDT 센서 Calibration Chart

[그림 3.2.6] LDT 센서 교정 장치 및 결과

나. KRRI 대형삼축압축시험장비 동적물성 산정 시스템 검증

(1) 검증시편

본 연구의 검증 시험에서는 강성이 서로 다른 우레탄 5개 종류의 우레탄 검증시편을 사용하여 시험장비를 검증하였다. 우레탄 재질의 검증시편은 변형률 크기에 따라 탄성계수가 일정한 선형거동을 나타내고, 강성이 구속응력이나 응력이력에 영향을 받지 않으며, 내구성이 좋아 반복사용에 따른 특성치 변화가 없어 취급이 용이한 장점을 갖고 있다(Stokoe 등, 1990). 따라서 우레탄 재질의 시편은 시험장비의

검증시편으로 적합한 것으로 평가된다(권기철 1999). 그러나 이러한 장점이 있는 반면 검증시편의 점탄성으로 인해 하중주파수가 증가하거나 온도가 감소할수록 강성이 증가하는 경향이 있다(Stokoe 등, 1990). 그러므로 각 시험을 유사한 실내온도에서 실시하고, 각 시험이 수행되는 하중주파수를 고려하여 탄성계수를 비교하는 방법을 적용하였다.

5종의 다른 강성을 갖도록 배합된 우레탄 재료를 직경 300mm와 50mm로 즉 강성별로 한 쌍의 대형 및 소형 우레탄 검증시편을 제작하였다.



(a) 소형 우레탄 시편 (b) 대형 우레탄 시편

[그림 3.2.7] 우레탄 검증시편

(2) KRRI 대형삼축압축시험장비 시험 결과

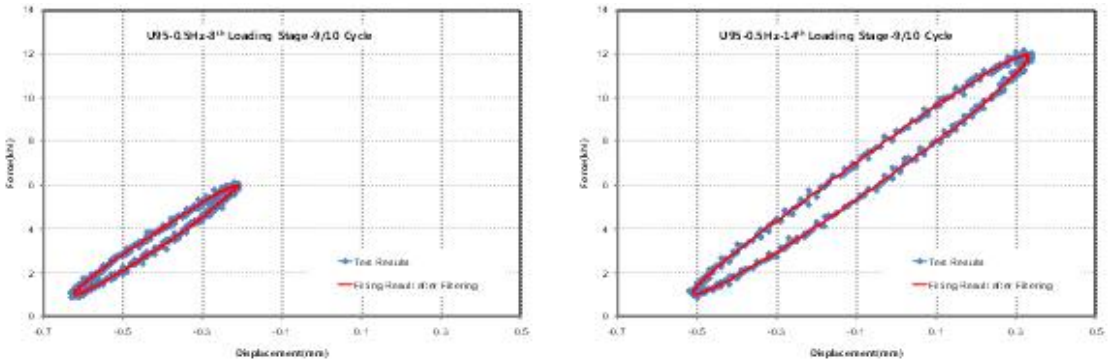
대형삼축압축시험장비의 검증시험은 대형우레탄시편(직경 3500mm)에 대해 수행하였다. 검증시편은 균질, 등방, 탄성이라는 가정 하에서 탄성계수와 전단탄성계수를 서로 계산하기 위해 다음 식을 적용하였다. 두 식에 적용되는 포아송비는 충격반향기법(Impact Echo Test)에서 얻어진 다음 표 1의 값을 각 시편에 적용하였다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad \text{[식 3.2.5]}$$

$$\gamma = \epsilon_a(1+\nu) \qquad \text{[식 3.2.6]}$$

검증시험을 위해 수행된 우레탄 검증시편에 대한 대형삼축압축시험의 이력곡선

의 일례는 [그림 3.2.8]과 같다.



(a) U95시편 8번째 하중단계 9-10cycle (b) U95시편 14번째 하중단계 9-10cycle

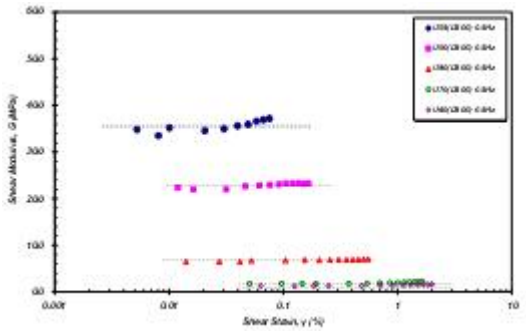
[그림 3.2.8] 하중-변위 이력 곡선



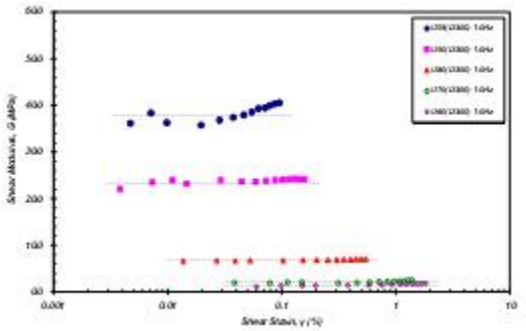
(a) 우레탄 시편 (b) 대기압 중 우레탄 시편 시험

[그림 3.2.9] 우레탄 시편 검증 시험

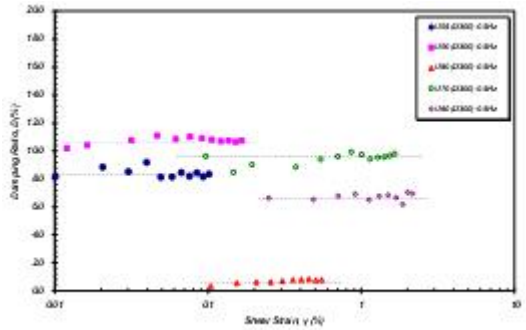
앞서 언급된 바와 같이 구속압과 변형률 수준에 영향을 받지 않는 우레탄 검증 시편의 탄성계수값이 시험결과에서도 변형률에 따라 일정한 값을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 우레탄 재료 특성상 하중주파수에 따라 증가하는 강성의 경향도 합리적으로 반영하는 것으로 확인되었다.



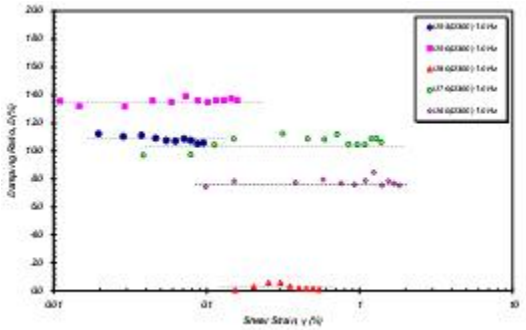
(a) 0.5Hz에서의 LTX 전단탄성계수 결과



(b) 1.0Hz에서의 LTX 전단탄성계수 결과



(c) 0.5Hz에서의 LTX 감쇠비 결과



(d) 1.0Hz에서의 LTX 감쇠비 결과

[그림 3.2.10] 대형삼축압축시험(LTX)로 수행된 동적물성 결과

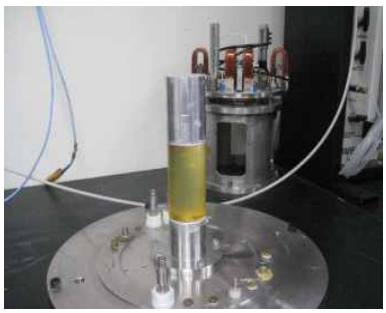
(3) 다른 시험법과의 비교 검증

본 검증 시험에는 동일 재질로 만들어진 직경 300mm와 50mm의 한쌍의 우레탄 시편을 5종류로 제작하여 대형삼축압축시험과 소형 공진주시험, 비틂전단시험, 충격반향시험등을 수행하였다. 이 결과를 이용해서 2가지 방법으로 대형삼축압축시험장비 시험 결과를 평가하였다.

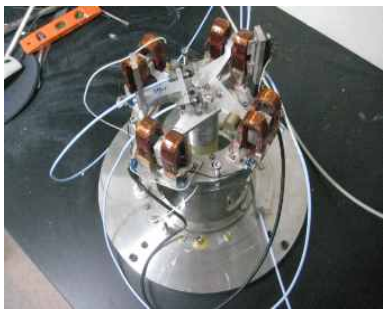
앞서 구축된 시험장비의 자체 검증시험을 통해 하중이나 변형률 수준에 따른 시스템의 성능을 확인할 수 있었다. 이번에는 보다 합리적인 검증을 위해 다른 시험법과의 절대적 시험결과값의 교차검증을 추가로 실시하였다. 즉, 대형우레탄시편에서 수행된 대형삼축압축시험 결과를 소형 우레탄시편에 대해 수행된 공진주/비틂전단시험, 충격반향(Impact Echo)시험 결과와 비교 검증하였다. 또한 시험법별로 다른 주파수로 수행된 결과를 반영하여 다른 주파수에 따른 영향도 검토하였다.

(가) 공진주/비틂전단시험

총 5종의 소형 우레탄 시편(직경 50mm)에 대해 구속압을 가하지 않은 대기압 상태에서 공진주/비틂전단시험을 수행하였다. 먼저 낮은 변형률 단계부터 변형률 크기를 증가시켜 가면서 비틂전단시험과 공진주시험을 번갈아가며 시험을 수행하였다. 비틂전단시험의 경우, 하중재하횟수는 11회로 하였고, 시험 시편의 하중주파수에 따른 전단탄성계수의 영향을 평가하기 위해 하중주파수를 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 5Hz, 10Hz로 달리하여 비틂전단시험을 수행하였다. 본 시험에서도 변형률에 따른 강성이 일정한 우레탄 재료의 특성을 그대로 반영하고 있으나, 공진주시험과 비틂전단시험에서 구해지는 전단탄성계수는 차이를 보이고 있고, 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 하중주파수의 영향을 받는 우레탄재료의 특성에 기인한 것으로 이에 대한 영향을 뒤 절에서 검토하였다.

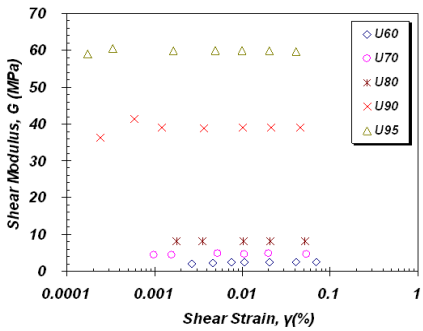


(b) 석고를 이용하여 시편 거치

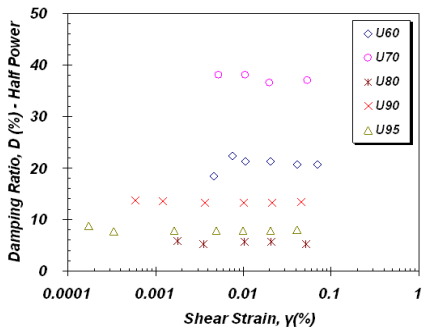


(c) 공진주/비틂전단시험 시스템 세팅 완료

[그림 3.2.11] 우레탄 시편의 공진주/비틂전단시험 수행 과정

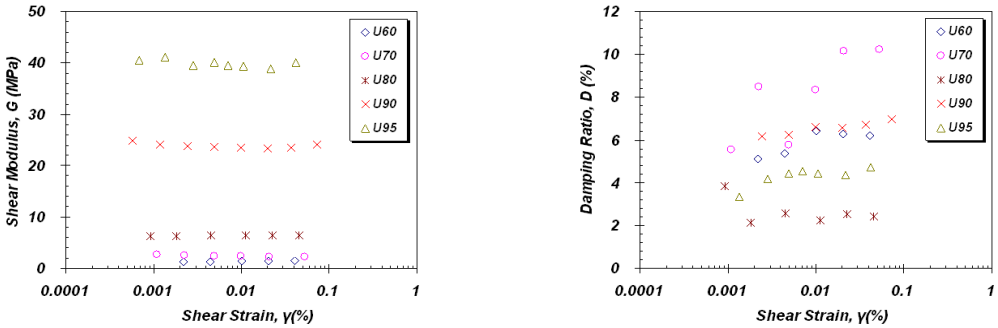


(a) 변형률에 따른 전단탄성계수(G-logɣ)



(b) 변형률에 따른 감쇠비(D-logɣ) - Half Power Bandwidth Method

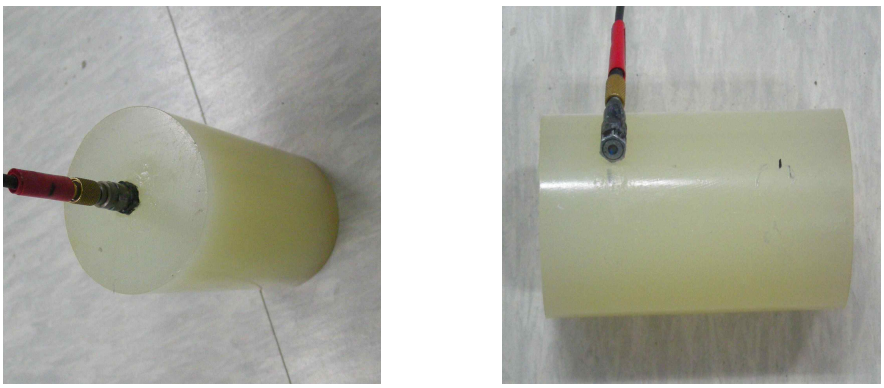
[그림 3.2.12] 공진주 시험을 통해 획득한 우레탄 시편의 동적물성치



(a) 변형률에 따른 전단탄성계수(G-logɣ) (b) 변형률에 따른 감쇠비(D-logɣ)

[그림 3.2.13] 비틂전단 시험을 통해 획득한 우레탄 시편의 동적물성치

(나) 충격반향시험



(a) Rod Wave (b) S Wave

[그림 3.2.14] 소형 우레탄 시편의 충격반향시험

우레탄 시편에 대하여 5종류의 우레탄 강도별 타입에 대하여 충격반향기법에 의해 동적물성치를 평가하였으며, 그 결과는 [표 3.2.1]에 요약한 바와 같다. 본 연구에서는 구속 압축파 (P wave) 속도는 측정하지 않았으며, 측정한 동적 물성치는 비구속 압축파 (Rod wave) 속도, 전단파 (S wave) 속도이다. 그리고, 비구속압축파 속도와 전단파 속도로부터 구속 압축파 (P wave) 속도를 추정하였다. 또한, 이들 탄성파 속도로부터 Poisson 비를 측정할 수 있었다. 이와 더불어, 본 연구에서 조사한 우레탄 코아의 단위중량을 계산하였고, 탄성파 속도와 단위중량을 이용하여 전단탄성계수 (G), 영탄성계수 (E) 등을 평가하였다.

[표 3.2.1] 충격반향시험 결과(직경 50mm 우레탄 검증시편)

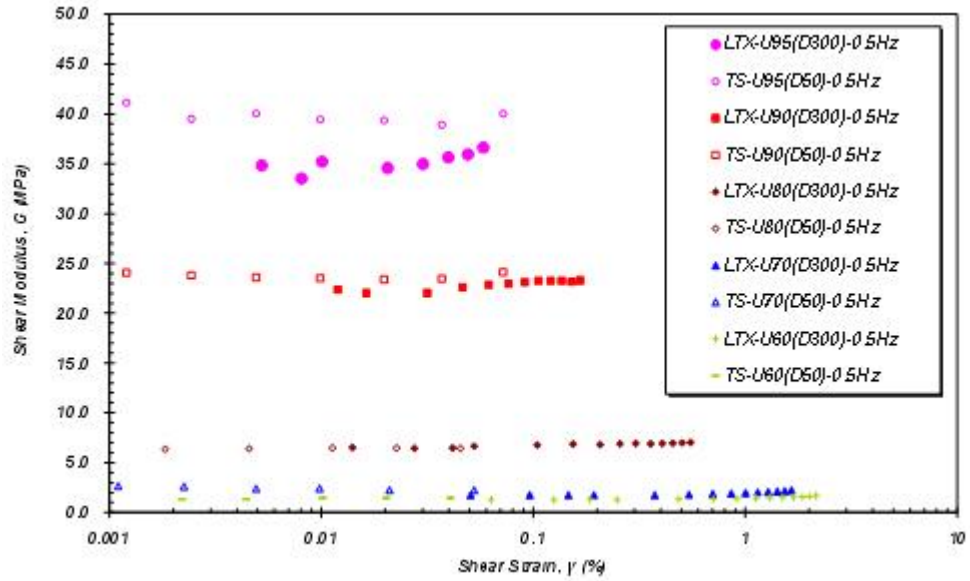
시편 ID		U60	U70	U80	U90	U95
길이,cm		9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
직경,cm		5.03	5.03	5.03	5.03	5.03
무게,g		225.3	224.8	206.3	219.5	219.4
밀도,kg/m^3		1156.94	1154.37	1059.37	1127.15	1126.64
공진 주파수	ROD파,Hz	408	528	792	1648	2032
	S파,Hz	240	312	480	1008	1248
탄성파 속도	ROD파,m/s	79.97	103.49	155.23	323.01	398.27
	S파,m/s	47.04	61.152	94.08	197.57	244.61
	P파,m/s	149.43	176.68	201.86	397.98	480.94
포아송비		0.445	0.432	0.361	0.336	0.326
영탄성계수(E,pa)		7.398E6	1.236E7	2.553E7	1.176E8	1.787E8
전단탄성계수(G,pa)		2.560E6	4.317E6	9.377E6	4.400E7	6.741E7

Note * : Poisson's Ratios are determined by V_S and V_C from resonance measurement

(다) 다른 시험법과의 비교 검증 평가

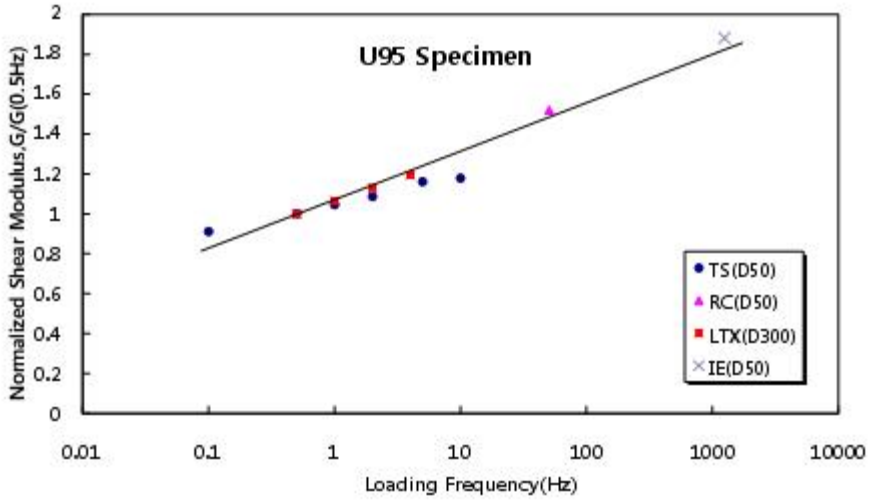
본 검증 시험에는 동일 재질로 만들어진 직경 300mm와 50mm의 한쌍의 우레탄 시편을 5종류로 제작하여 대형삼축압축시험과 소형 공진주시험, 비틂전단시험, 충격반향시험등을 수행하였다. 이 결과를 이용해서 2가지 방법으로 대형삼축압축시험장비 시험 결과를 평가하였다.

앞에서 언급된 바와 같이 우레탄 재료는 구속압에 영향을 받지 않는 대신 하중주파수에는 영향을 받는 재료이다. 이러한 검증시편의 재료특성을 고려해서 동일한 주파수에서 수행된 전단탄성계수를 비교하였다. 즉, 300mm 우레탄시편에 대해 0.5Hz의 주파수로 수행된 대형삼축압축시험 결과와 같은 강성으로 제작된 50mm 우레탄시편에 대해서도 동일한 0.5Hz의 주파수로 수행된 비틂전단시험 결과의 절대값을 5쌍의 우레탄 시편들에 대해 비교하였다[그림 3.2.15]. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 강성으로 제작된 각 우레탄 시편에 대해 대형삼축압축시험(LTX)으로 평가된 전단탄성계수와 비틂전단시험(TS)으로 평가된 전단탄성계수가 시험이 수행된 변형률 수준에 관계없이 거의 동일한 결과를 보여주고 있다.

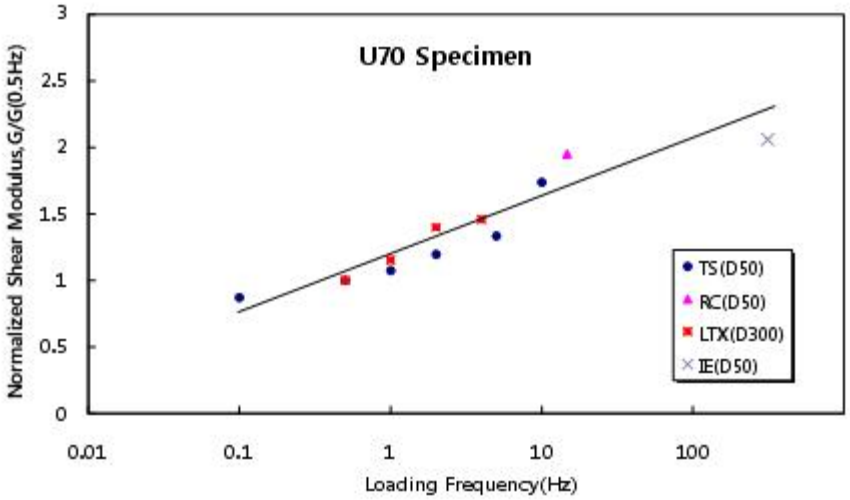


[그림 3.2.15] 대형삼축압축시험과 비틂전단시험 결과 비교

추가적으로 다른 주파수 대역에서 전단탄성계수를 평가한 공진주시험과 충격반향시험 결과를 활용해 장비성능을 평가하였다. 즉, 각 시험 방법별로 수행된 결과를 일관된 기준으로 비교 검증하기 위해서는 각 시험법에서 결정된 탄성계수를 주파수의 영향을 고려하였다. 권기철(1999)의 연구결과에서 우레탄 검증시편은 하중주파수의 대수적 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있음을 검증한 바 있다. 본 연구에서도 이와 같은 우레탄 시편의 특성 반영 여부를 검증하기 위해 수행된 시험들, 비틂전단시험(TS), 공진주시험(RC), 충격반향시험(IE), 대형삼축압축시험(LTX)에서 각 시험이 수행된 하중주파수의 영향정도를 평가하기 위해 각 시험들에서 얻어진 탄성계수를 0.5Hz로 정규화하여 그 값을 비교하였다[그림 3.2.16]. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전단탄성계수가 하중 주파수에 대하여 거의 직선적으로 증가되고 있음을 확인할 수 있었다. 지반재료의 동적물성치 평가를 위해 널리 사용되고 있는 다양한 시험기법으로 도출된 전단탄성계수 절대값 및 하중주파수에 따른 경향성을 비교함으로써, 대형삼축압축시험장비의 신뢰성을 확인할 수 있다고 판단된다.



(a) 하중주파수를 고려한 결과 비교(U95)



(b) 하중주파수를 고려한 결과 비교(U70)

[그림 3.2.16] 시험방법별 다른 주파수 영향을 고려한 결과 비교

다. 시험장비 시스템 검증 소결론

시험장비 구축이후 시험장비의 검증은 향후 수행되는 시험 결과의 신뢰성 확보를 위해서 반드시 필요한 과정이다. 본 연구에서는 시험장비 시스템의 역학적 순응성 검증을 위해 동적물성 결과를 중심으로 검증작업을 수행하였으며, 이를 위하여 고유의 역학적 특성치(탄성계수)가 같은 직경 300mm와 50mm의 검증시편을 5종류로 제작하여 검증시험에 활용하였다. 검증 시험에는 대형삼축압축시험, 소형의 공진주

시험, 비틂전단시험, 충격반향시험 등이 이루어졌으며, 다음과 같은 검증 평가 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구 대상 대형삼축압축시험장비는 우레탄시편들에서 전단변형률에 따른 탄성계수와 감쇠비가 일정한 값을 나타내면서 우레탄 검증시편의 재료특성을 잘 반영하고 있음을 확인하였다.
(2) 같은 강성으로 제작된 소형(직경 50mm) 우레탄시편과 대형(직경 300mm) 우레탄시편에 대해 같은 하중주파수로 수행된 비틂전단시험과 대형삼축압축시험에서 5쌍 검증 시편 모두 절대적인 강성값이 거의 같은 결과를 보여 다른 시험법과의 비교에서도 합리적인 결과를 검증할 수 있었다.
(3) 대형삼축압축시험, 비틂전단시험, 공진주시험, 충격반향시험으로 상호 검증한 결과, 일정 하중주파수(0.5Hz)에서의 탄성계수로 정규화하였을 경우 하중주파수의 대수축에 직선적 증가경향을 보이는 우레탄 검증시편의 특성을 매우 이상적으로 나타내고 있었다.
(4) 이상의 시험 결과들로 대형삼축압축시험장비 전체 시스템의 검증이 이루어져 향후 본 장비로 수행되는 동적물성 시험결과에 대해 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 동적물성 산정을 위한 반복삼축압축시험 조건별 검토

가. 시험 재료 및 시편 조건

본 연구에서는 가능한 다양한 지반구조물의 조립재료 및 시험 조건 등에 따른 동적물성 검토를 위해 다음과 같이 댐, 철도 강화노반, 도로 보조기층, 철도 접속부 자갈재료, 상부노반 재료 등을 대상으로 반복삼축압축시험을 수행하였다.

(1) 댐 성토 재료

본 연구에 사용된 댐체 성토재료는 규장암(석영;30.7%, 사장석;31%, 미사장석;15.5%, 백운모;7.4%, 견운모;12%, 녹니석;3.4%)으로 분류되는 암석이 주로 포함된 재료로서, 구간별로 입도를 분류한 재료는 [그림 3.2.17]과 같으며, 암석의 기본물성*은 [표 3.2.2]와 같다.

* 비중, 흡수율, 공극률, 밀도 : ASTM C97 / C97M - 09 Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone, 탄성파속도 : ASTM D2845-08 Standard Test Method for Laboratory

[표 3.2.2] 재료의 암석 기본 물성

구분	건조밀도 Bulk Density (kN/㎥)	비중 Specific Gravity	공극율 Porosity (%)	흡수율 Absorption (%)	초음파속도 UltrasonicVelocity (m/s)		압축강도 UCS (MPa)	q_u (MPa) Ave.
					P파	S파		
Test 1	27.31	2.79	0.43	0.15	5,563	3,752	175.1	115.2
Test 2	27.46	2.81	0.82	0.29	5,549	3,713	165.1	
Test 3	27.12	2.77	0.53	0.19	4,667	3,039	180.8	
AVE	27.30	2.79	0.59	0.21	5,259	3,501	173.66	

[표 3.2.3] 시험조건

Test ID	Sample	Unit weight kN/m^3	Specimen diameter (mm)	Loading Pattern	Confining Pressure (kPa)	Loading Frequency (Hz)
T-1	YJ-D300-d50	19.5	300	I	100	0.1
T-2	YJ-D300-d50-B	17.0	300	I	100	0.1/0.5/1.0
					150	0.1/0.5/1.0
					200	0.1/0.5/1.0
T-3	YJ-D300-d50-B	17.0	300	I	100	0.1
T-4	YJ-D300 d50-B	17.0	300	II	170 (V*) 100(H*)	0.1/0.5/1.0
T-5	YJ-D300-d50-B	17.0	300	III	100	0.1
T-6	YJ-D300-d20	19.4	300	I	100	0.1
T-7	YJ-D500-d90	19.4	500	I	100	0.1/0.5/1.0
					200	0.1/0.5/1.0
T-8	YJ-D500-d90-B	17.0	500	I	100	0.1/0.5/1.0
					200	0.1/0.5/1.0
T-9	YJ-Rec-d20-PS	19.4	300×171	I	100	0.1

* V = vertical stress, H=horizontal stress

Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, 일축압축강도, 탄성계수 : ASTM D7012-07 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

[표 3.2.4] 시험 시편의 기본 물성

Sample ID		D_{max}* (mm)	D_{10}(mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c
Group I	YJ-D300-d20	20	0.14	0.5	1.2	2.1	15.71	0.81
	YJ-D300-d50	50	0.33	1.2	3.1	5.2	15.76	0.84
	YJ-D500-d90	90	0.61	2.2	5.9	9.5	15.57	0.84
Group II	YJ-D300-d50-B	50	1.25	2.4	4.0	5.2	4.16	0.89
	YJ-D500-d90-B	90	2.5	4.4	7.4	9.5	3.80	0.82

* D_{max} : 최대입경



(a) 90mm-53mm (b) 53mm-19.2mm (c) 19.2mm-9.5mm

(d) 9.5mm-4.75mm (e)4.75mm-2mm (f) 2mm 이하

[그림 3.2.17] 재료 입도별 분류

본 연구에서는 [표 3.2.3]과 같이 시편 및 시험 조건을 구성하여 시험을 수행하였다. 최대입경 90mm의 시편들(YJ-D500-d90 and YJ-D500-d90-B)은 직경 500mm, 시편높이 1000mm로 제작되었고, 최대입경 50mm의 시편들(YJ-D300-d50, YJ-D300-d20, YJ-D300-d50-B)은 직경 300mm, 시편높이 620mm로 조성되었다. 시

편은 건조상태에서 목표 건조단위중량에 도달하도록 10층으로 다짐을 수행하였다.

입경이 큰 조립지반재료의 실내시험 시, 시험장비와 시편크기를 고려하여, 재료의 최대입경을 조정하고 입도를 조정하여 시험하는 것이 일반적이다. 이를 위해 가장 많이 사용되는 방법이 상사입도조정방법에 의한 시편 제작이다.

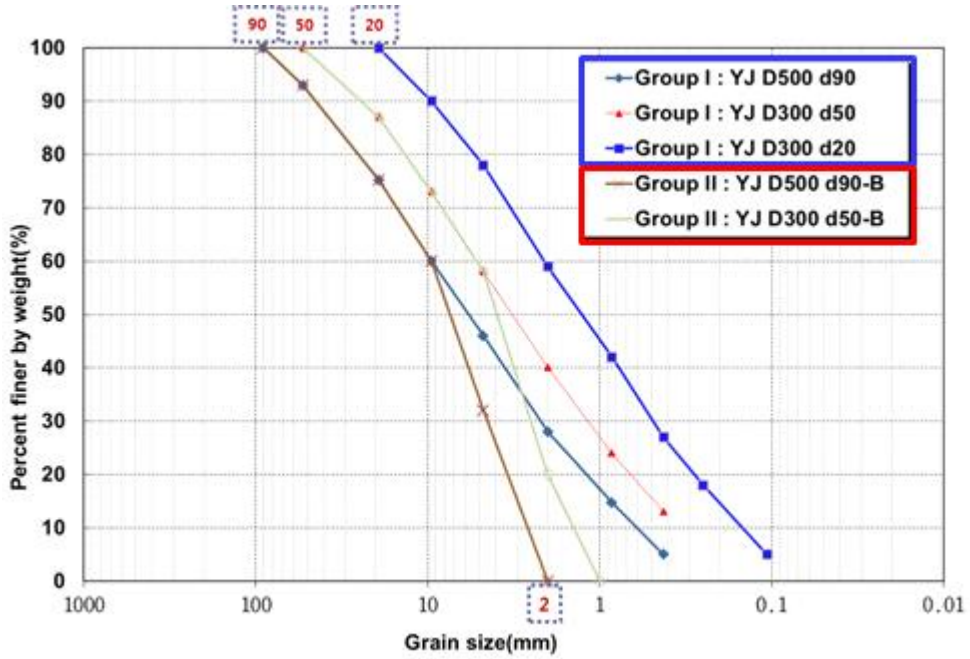
상사입도조정방법은 최대입경 크기에 따라 원입도분포곡선을 평행이동하여 다짐특성에 영향을 미치는 요소인 균등계수를 동일하게 하여 기하학적 입자배열에 큰 차이를 없애는 방법이다. 그러나 입경에 따라 초기밀도나 입자파쇄특성이 달라짐으로 해서 다짐밀도와 전단특성 등에 영향을 미칠 수 있는 가능성이 있다. 또한 입경이 작아지면서 세립분의 함유량이 많아지기 때문에, 시험조건에 따라서는 세립분의 함유량 정도에 따라 역학적 특성에 영향을 미칠 가능성도 있다.

본 연구에서는 먼저 조립지반 재료의 동적물성, 즉 저변형률 수준에서의 탄성계수 산정을 위한 시험법의 검토로 상사입도법에 의한 영향을 비교하였다. 이를 위해 본 연구에서는 총 5가지 입도의 시편에 대한 시험을 수행하였다. 즉 상사입도조정법이 탄성계수에 미치는 영향을 평가하기 위해 2개 Group의 시편 조건을 [표 3.2.4], [그림 3.2.18]과 같이 구성하였다. 시험 Group I은 최대입경 90mm, 50mm, 20mm으로 조성된 시편으로 YJ-D500-d90, YJ-D300-d50, YJ-D300-d20이며, 각각 15.57, 15.76, 15.71로 유사한 균등계수를 가지고 있다. 또한 두 번째 시험 Group II는 최대입경 90mm, 50mm으로 조성된 시편 YJ-D500-d90-B, YJ-D500-d50-B이며, 각각 3.8과 4.16의 유사한 균등계수를 가지고 있다. 이처럼 두 시험 Group 모두 최대입경만 다르게 평행 이동한 상사입도 조건의 재료가 되도록 하였다. 시험 Group II는 시험 Group I에서 2mm이하의 재료를 제거하여 세립분의 포함여부의 경향도 동시에 평가할 수 있었다. 즉 YJ-D300-d50과 YJ-D500-d90는 각각 2mm 이하 함유율은 40%와 30%였으나, YJ-D300-d50-B와 YJ-D500-d90-B의 경우에는 각각 20%와 0%였다.

같은 크기의 정현파를 재하/제하를 하는 경우에도 [그림 3.2.28]에서 볼 수 있는 3가지 패턴의 하중조건으로 제어할 수 있으며, 조립지반재료의 경우 이러한 하중조건, 즉 구속압과 축차응력 수준에 큰 영향을 받는 것으로 인정되고 있다. 따라서 이에 대한 평가를 위해 하중패턴을 다르게 하여 경향을 검토하였다.

이 외에도 시험 결과에 영향을 미칠 수 있는 조건으로 세립분의 영향, 주파수 영향 등을 검토할 수 있도록 시험 조건을 달리하여 시험을 수행하였다. 이 외에도 고려할 영향 인자들이 더 있을 수 있으나, 본 연구에서는 이상의 실내요소시험에서 중요한 시험조건들에 대해 비교함으로써 향후 조립지반재료에 대한 보다 합리적인

동적물성 산정 시험이 이루어질 수 있도록 기본적인 시험법에 대한 검토를 수행하고자 하였다.



[그림 3.2.18] 댐재료 그룹별 상사입도분포

(2) 철도 강화노반 및 도로 보조기층 재료

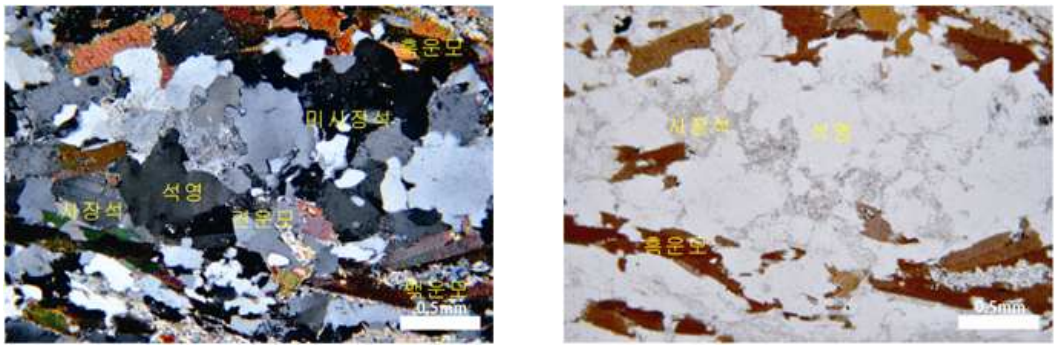
두 번째 재료로 강화노반(reinforced roadbed) 재료(보조도상 ; sub-ballast, 입도조정층 ; graded crushed stone)에 대한 특성을 평가하고자 한다. 이를 위해 다음과 같이 3가지 입도 분포에 대해 시험 재료의 입도를 구성하였다. 철도설계기준 상의 고속철도 보조도상(RBSB) 재료 입도의 하한선과 일반철도 보조도상재료인 M-40 및 M-25 입도분포의 하한선이 거의 일치하고 있다. 그러나 상한선의 경우 M-40과 M-25는 최대입경에서 차이를 보이고 거의 일치하고 있다. 반면 철도설계기준 상의 고속철도 보조도상재료(RBSB)의 상한선과는 차이를 보이고 있다. 따라서 보조도상재료의 시험재료로는 M-40의 상한선, M-40/M-25/RBSB의 하한선, M-40 입도분포의 중간부분(RBSB의 상한선과 유사), M-25의 상한선의 입도로 4가지 입도를 시험재료로 사용하였다. 추가적으로 최대입경 125㎜의 입도조정층 중간 입도분포에 대

해서도 최대입경 100mm로 시험을 수행하였다. 본 재료에서는 입도조정층 재료를 최대입경 100mm의 원입도재료(GCS-1 or M100)로 하여 2가지 입도조정법(상사입도법, 자갈입도보정법)에 의해 최대입경 50mm로 조정된 시편에 대해 실험을 수행하여 그 결과를 비교하고자 하였다. 시험에 사용된 시편 및 시험 조건은 [표 3.2.7], [표 3.2.8], [그림 3.2.20], [그림 3.2.21], [그림 3.2.22]와 같다.

이상과 같은 시험을 위해 본 시험에서는 용인 지역에서 생산되는 골재를 시험에 활용하였다. 시험에 사용된 골재는 박편현미경분석 결과 흑운모호상편마암으로 분류되며 광물의 구성 및 기본물성은 [그림 3.2.19], [표 3.2.5], [표 3.2.6]과 같다.

[표 3.2.5] 시험 골재 광물 구성 분포

Components	석영	사장석	미사장석	흑운모	백운모	견운모	녹염석	녹니석	불투명 광물	Total
vol %	36.3	21.4	7.5	10.7	5.8	8.6	1.3	5.3	3.1	100.0



(a) Photomicrograph, PPL, x40 (b) Photomicrograph, XPL, x40

[그림 3.2.19] 시험 골재 광물 사진

[표 3.2.6] 시험 골재 기본 물성

시편	비중 Specific Gravity	공극률 Porosity (%)	흡수율 Absorption (%)	초음파속도 UltrasonicVelocity (m/s)		압축강도 UCS (MPa)
				P파	S파	
I	2.73	0.60	0.22	3,267	1,897	149.7
II	2.69	0.67	0.25	3,247	1,856	157.2
III	2.64	1.58	0.60	3,579	1,942	117.8

[표 3.2.7]

시편 번호	시험 대상	밀도(kN/m^3)	공시체 직경/최대입경	함수비
SB-1-2	M40-Upper	21	공시체 직경 300mm/입자 최대입경 40mm	OMC(7%)
SB-2-1	M40-Middle	21	공시체 직경 300mm/입자 최대입경 40mm	OMC(7%)
SB-2-3	M40-Middle	21	공시체 직경 300mm/입자 최대입경 40mm	OMC(7%)
SB-2-4	M40-Middle	21	공시체 직경 300mm/입자 최대입경 40mm	Wet Side(9%)
SB-3-1	M40-Under	21	공시체 직경 300mm/입자 최대입경 40mm	OMC(7%)
GCS-1 (M100)	M100-Middle	21	공시체 직경 500mm/입자 최대입경 100mm	3%
M50-P	M100시편 상사입도시편	21	공시체 직경 300mm/입자 최대입경 50mm	7%
M50-S&R	M100시편 자갈입도보정 시편	21	공시체 직경 300mm/입자 최대입경 50mm	7%
SB-4-1	M25-Upper	21	공시체 직경 300mm/입자 최대입경 25mm	OMC(7%)

[표 3.2.8] 시험 시편 입도분포 지수

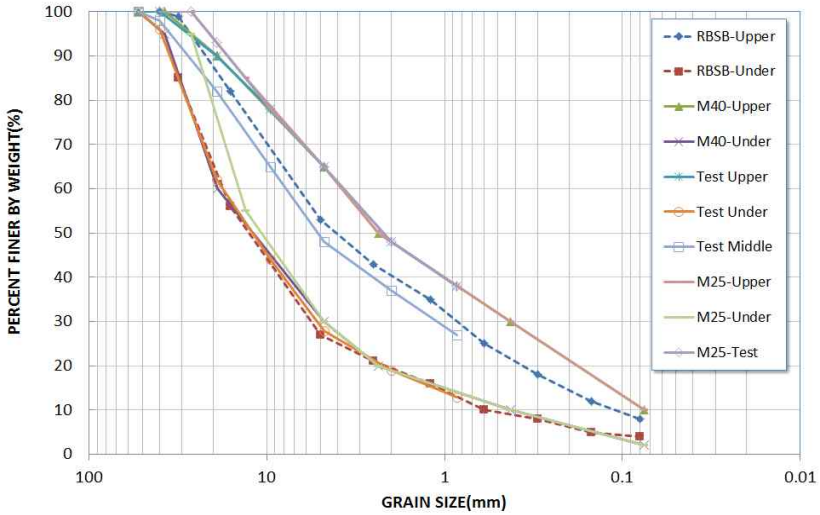
시편 번호	시험 대상	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	C_u	C_c
SB-1-1	M40-Upper	0.074	0.42	2.2	3.7	50	0.64
SB-2-1	M40-Middle	0.11	1.1	5.1	7.7	70	1.43
SB-3-1	M40-Under	0.6	5.2	12	18	30	2.50
GCS-1	M25-Middle	0.6	7.0	30	42	70	1.94
SB-9	M25-Upper	0.074	0.42	2.2	3.7	50	0.64



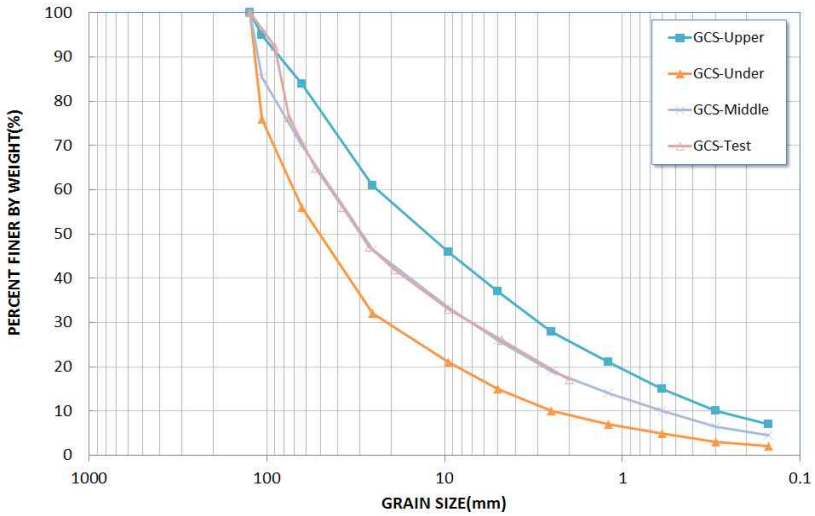
(a) 53mm-40mm (b) 40mm-19.2mm (c) 19.2mm-9.5mm

(d) 9.5mm-4.75mm (e)4.75mm-2mm (f) 2mm 이하

[그림 3.2.20] 재료 입도별 분류

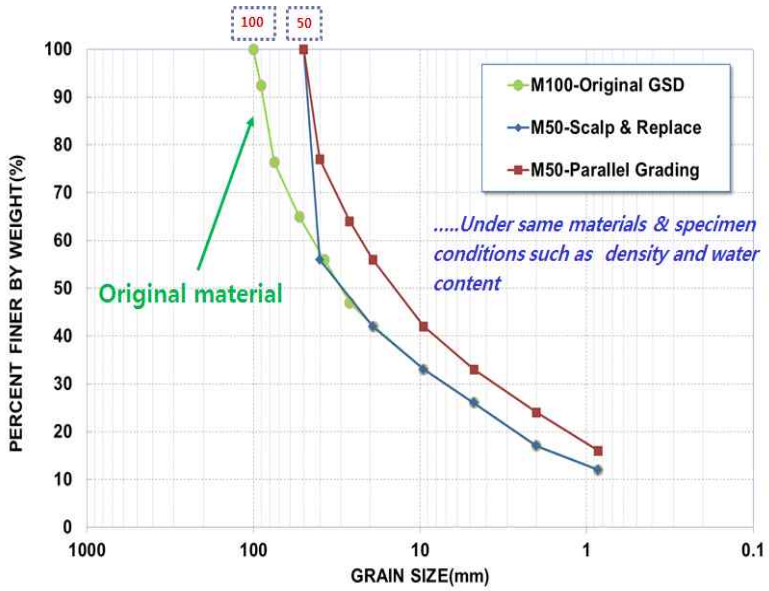


(a) 보조도상 및 M-40 입도분포 및 시험 시편 입도분포



(b) 입도조정층 입도분포 및 시험 시편 입도분포

[그림 3.2.21] 시험 대상 재료의 입도분포



[그림 3.2.22] 상사입도조정 및 자갈입도보정 입도분포

(3) 철도 접속부 성토 자갈 재료

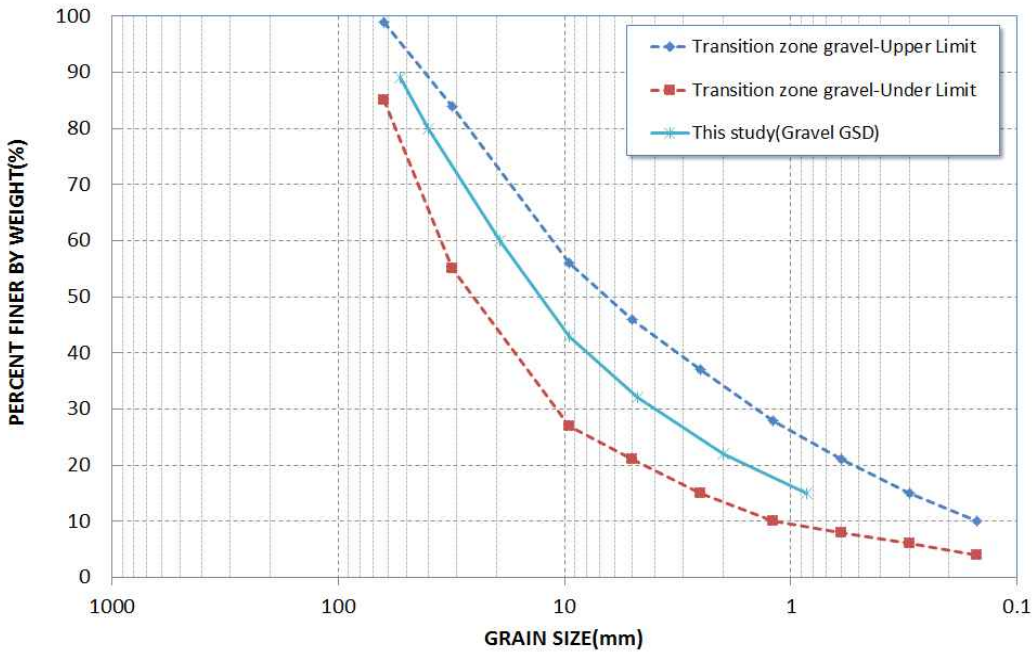
세 번째 재료로 고속철도 노선에서 교대-토공 접속부에 사용되는 일반자갈 및 시멘트처리자갈 재료에 대해 평가하고자 한다. 철도설계기준에 접속부 일반자갈 재료의 입도분포은 [그림 3.2.24]와 같이 범위가 제시되어 있으며, 시멘트차리자갈도 같은 입도에서 시멘트를 3% 추가하여 시편을 조성하도록 되어 있다. 따라서 본 연구에서는 설계기준의 입도범위에서 중간 입도를 대상으로 시험을 수행하였다. 시험재료는 실제 고속철도 건설 현장에서 사용되는 재료를 대상으로 하였으며 [그림 3.2.23], 본 재료는 박편현미경분석 결과 규장질 편마암으로 분류되며 광물의 구성 및 기본물성은 [표 3.2.9]와 같다.



(a) 53mm-40mm (b) 40mm-19.2mm (c) 19.2mm-9.5mm

(d) 9.5mm-4.75mm (e)4.75mm-2mm (f) 2mm 이하

[그림 3.2.23] 재료 입도별 분류



[그림 3.2.24] 접속부 자갈재료 입도분포

[표 3.2.9] 시험 골재 기본 물성

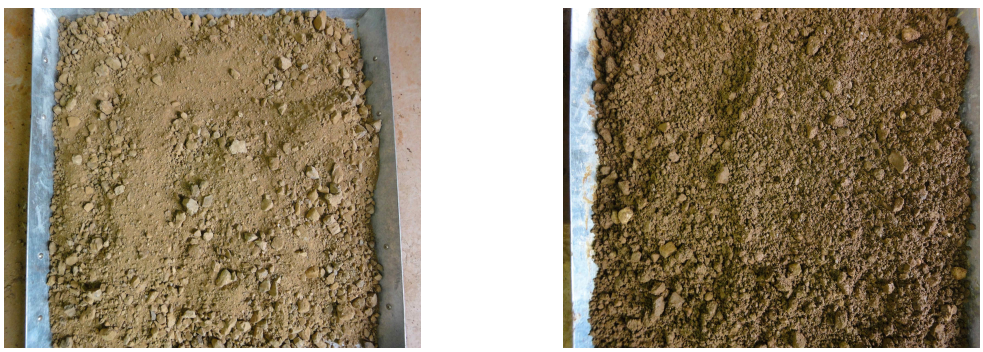
시편	비중 Specific Gravity	공극률 Porosity (%)	흡수율 Absorption (%)	초음파속도 UltrasonicVelocity (m/s)		압축강도 UCS (MPa)
				P파	S파	
I	2.66	0.58	0.22	3,267	1,897	152.7
II	2.55	3.01	1.18	3,247	1,856	176.5

[표 3.2.10] 철도 접속부 자갈재료 시편 및 시험 조건

시편 번호	시험 대상	밀도(kN/m^3)	공시체 직경/최대입경	함수비
Trans C-G	접속부 시멘트처리자갈	20.0	공시체 직경 300mm /입자 최대입경 40mm	5.5%
Trans G	접속부 일반자갈	20.0	공시체 직경 300mm /입자 최대입경 40mm	7%

(4) 철도 상부노반 재료

마지막으로 고속철도 상부노반에 사용되는 조립재료에 대해 동적물성을 평가하였다. 이 재료의 경우 최대입경이 약 26mm로써 시편의 입도와 시험 조건은 [그림 3.2.25], [그림 3.2.26], [그림 3.2.27], [표 3.2.11]과 같다.



(a) 건조상태 혼합재료 (b) 습운상태 혼합재료

[그림 3.2.25] 고속철도 상부노반 재료

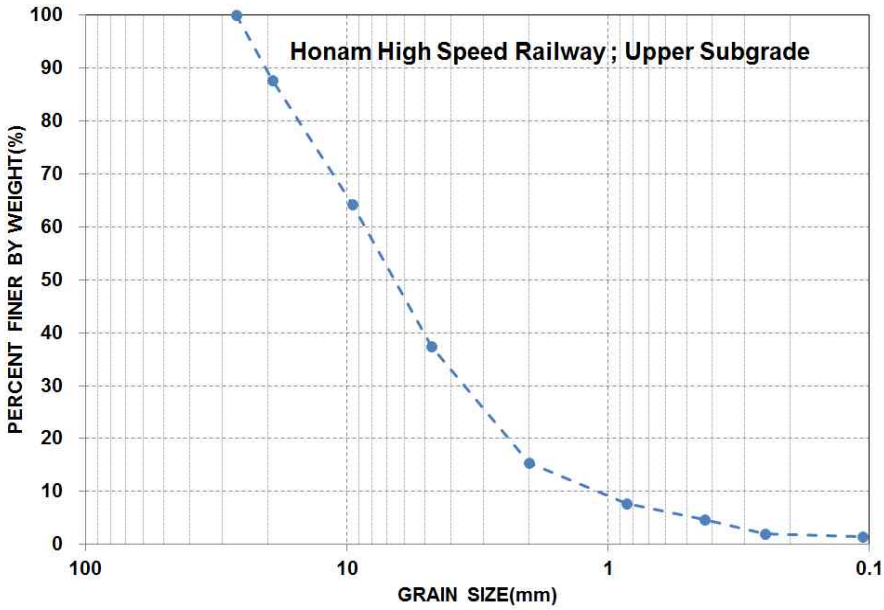
[표 3.2.11] 고속철도 상부노반 재료 시편 및 시험 조건

시편 번호	시험 대상	밀도(kN/m^3)	공시체 직경/최대입경	함수비
HN 2-2 Upper SG	고속철도 상부노반 재료	21.9	공시체 직경 300mm /입자 최대입경 26mm	6%



(a) 삼축압축시편 재료 포설 직후 (b) 삼축압축시편 재료 다짐 후

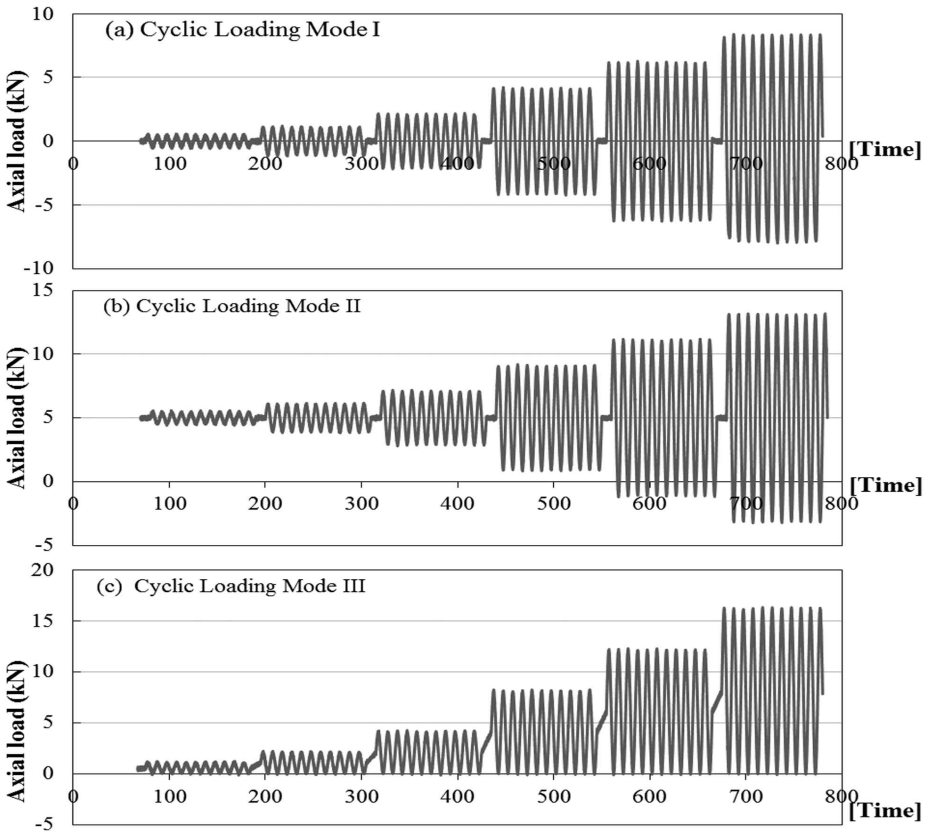
[그림 3.2.26] 삼축압축시편 다짐과정 단계별 표면 상태



[그림 3.2.27] 고속철도 상부노반 시험 재료 입도분포

나. 하중 패턴별 시험법

지반 재료는 구속응력 조건과 축차응력수준에 따라 거동이 다르게 나타날 수 있기 때문에, 이러한 하중조건이 저변형률 영역의 탄성계수에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 [그림 3.2.28]에 보이는 바와 같이 3종류의 하중 패턴으로 같은 시편에 대해 시험을 수행하고 그 영향 정도를 비교하였다.

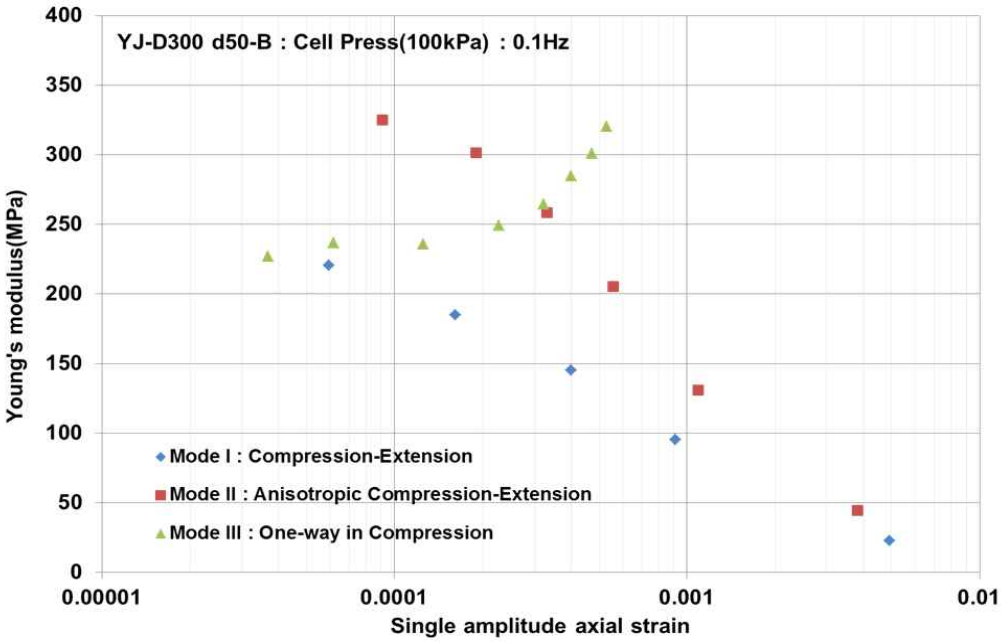


[그림 3.2.28] 하중 패턴

[그림 3.2.28(a)]의 경우 등방압밀조건에서 반복축차응력을 압축과 인장측에 같은 진폭으로 하중을 가하는 방식이다. 이는 전단응력이 0인 상태에서 반복축차응력이 재하되면서 시험이 시작된다. 축응력이 구속응력보다 크기 때문에 최대주응력축과 최소주응력축은 각각 수직과 수평방향이 된다. 축차응력이 최고치에 도달한 후에 다시 0으로 되돌아올 때까지 여전히 최대주응력축은 수직방향이 된다. 그러나 축차응력이 (-)이 되면서 즉각 수평방향으로 회전한다. 재하와 제하를 반복하면서 축차

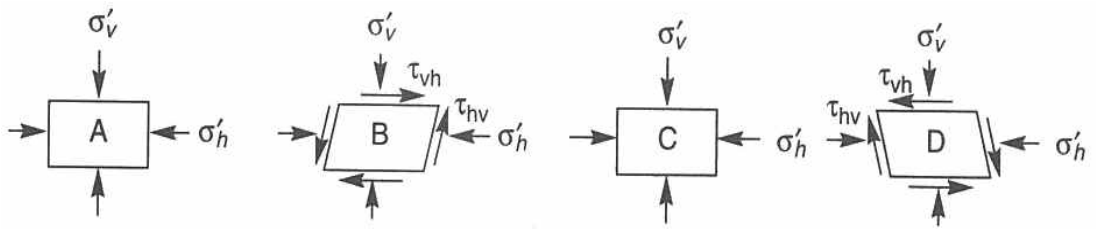
응력이 0을 통과할 때마다 주응력축은 90도 회전하게 된다. [그림 3.2.28(b)]의 경우에는 실제 지반조건과 같이 이방압밀 상태에서 반복축차응력을 가하게 되면서, 반복축차응력 수준이 커질수록 일부 인장에 놓이게 되는 하중 패턴이다. [그림 3.2.28(c)]는 압축상태에서 반복축차응력이 재하되고, 축차응력이 0까지 제하되는 하중패턴으로 철도나 도로와 같이 지표근처의 지반에서 압축의 하중만 반복적으로 받는 경우에 적합한 하중 패턴으로 볼 수 있을 것이다(Kramer, 1996).

시험 결과는 [그림 3.2.29]에서 볼 수 있는 바와 같이, 압축과 인장이 반복되는 하중패턴 I의 경우 반복축차응력이 증가되면서 변형률 수준이 증가할수록 탄성계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이방압밀 조건으로 상재하중이 존재하는 경우를 모사한 하중패턴 II의 경우에는 하중패턴 I에 비해 같은 변형률 수준에서 상대적으로 큰 탄성계수 값을 보이는 것으로 나타났다. 반면, 압축상태에서만 반복축차응력이 재하되는 하중패턴 III의 경우에는 하중수준과 변형률 수준이 커지면서 오히려 탄성계수값이 증가하는 경향을 보였다. 이는 축차응력이 증가하면서 체적응력이 동시에 증가하는 응력조건에서 축차응력 증가에 따라 감소되는 탄성계수의 경향보다 체적응력 증가에 따라 증가되는 탄성계수의 특성이 더 크게 반영된 결과라고 할 수 있을 것이다.

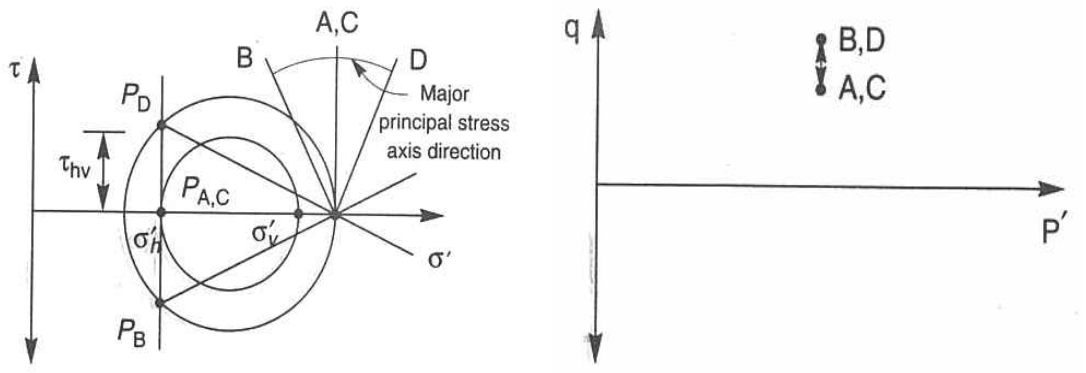


[그림 3.2.29] 하중패턴이 탄성계수 변화곡선에 미치는 영향

하중조건에 따라 다른 거동과 물성의 차이를 보이는 것은 기존 연구에서도 확인된 바 있다. 예를 들어 지표면 하부 지반 요소가 수직으로 전파되는 S파의 영향을 받을 경우 수직수평응력은 일정한 상태로 유지되면서 전단응력이 증가되기 때문에 모어원의 반경은 커지지만 그 중심점은 움직이지 않게 된다. 즉 응력경로가 수직으로 움직이게 되며, 주응력축이 회전하게 됨을 의미한다(Kramer S.L, 1996). 결국 이러한 응력경로는 p'축에 도달하지 않고 등방응력조건이 아님을 의미하며, 주응력축이 연속적으로 회전하게 된다. 주응력축의 회전은 중요한 의미가 있다. 문헌(Wong and Arthur, 1986; Symes et al., 1988; Sayao and Vaid, 1989)에 의하면 주응력축의 회전 자체만으로도 전단변형 및 체적변형을 발생시키는 것으로 보고되고 있다[그림 3.2.30].



(a) 수직방향으로 전달되는 지진파에 의한 지반요소의 응력-변형률 상태



(b) 주응력축의 방향/극점위치/Mohr원 (c) 응력 경로

[그림 3.2.30] 동적하중 하의 응력 변화 상태(Kramer S.L, 1996)

권기철(1999), Kim, D.S. 등(2001)의 연구 결과에서도 하중 조건에 따른 최대입경 38mm의 보조기층(subbase)재료에 대한 회복탄성계수의 특성을 다음과 같이 설명하고 있다. 즉, 동일한 구속응력에서 변형률 크기(또는 축차응력)가 증가하면서 탄성계수가 증가하고 있음을 언급하였다. 이러한 결과는 변형률 크기가 증가함에 따라

탄성계수가 감소한다는 일반적인 사실과 상반된다. 그러나 동일한 구속응력에서 축차응력의 크기가 증가하는 경우에는 체적응력도 함께 증가하게 되므로, 축차응력(변형률)의 증가에 의해 탄성계수가 감소되는 정도보다 평균주응력(또는 체적응력)의 증가에 의해 회복탄성계수가 증가하는 정도가 커서 동일한 구속응력에서 축차응력이 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 것으로 설명하고 있다. 또한 Rhee(1991)의 연구에 의하면 체적응력에 따른 회복탄성계수의 변화에 대해 다음과 같이 설명하고 있다. 즉, 동일한 구속응력에서 반복재하시험이 수행되면 축차응력이 증가함에 따라 회복탄성계수가 초기에는 감소하다가 일정부분에서 증가하고 축차응력이 상당히 크면 다시 감소하게 됨을 보여주고 있다. 이러한 현상은 앞에서 언급된 바와 같이 탄성계수에 영향을 주는 체적응력과 변형율 크기의 영향이 복합적으로 결합되어 나타나는 것이다. 즉 체적응력과 변형율 크기가 동시에 증가하면 탄성계수는 이 두가지 요소의 영향 정도에 따라 증가하거나 감소할 수 있는 것이다. 본 연구에서 수행한 하중패턴의 경우 3번째가 위에서 언급한 회복탄성계수 시험과 유사한 하중패턴을 갖고 있다. 따라서 [그림 3.2.30]의 결과는 이와 같은 현상으로 축차응력이 증가하면서 발생되는 변형률 크기의 증가에 의한 탄성계수 감소효과보다 체적응력이 증가되면서 얻어지는 탄성계수의 증가 효과가 더 크게 발현된 것으로 판단된다. 따라서 내진해석을 위한 탄성계수 산정, 혹은 교통하중 등에 의한 거동 평가를 위한 회복탄성계수 등 적용하고자 하는 대상, 하중(변형)수준 및 하중 조건 등에 적합한 하중형태를 고려한 시험이 이루어지는 것이 합리적일 것이다. 이후 본 연구에서의 시험은 내진해석을 고려하여 주응력 축의 회전과 유사한 하중조건을 반영한 하중 패턴 I으로 수행하여 결과를 검토하였다.

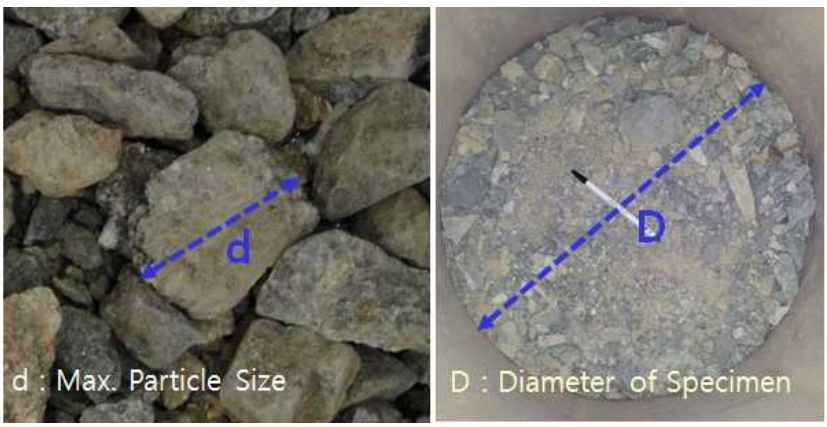
다. 입도조정법 평가

(1) 개요

댐, 항만 구조물, 철도 노반 등과 같은 지반 구조물의 축조에는 입경이 큰 조립재료가 널리 이용된다. 이러한 지반 구조물에 대한 정확한 해석과 안전한 설계를 위해서는 사전에 해당 재료에 대한 강도정수 및 변형계수의 확보가 필수적이다. 그러나 현재까지 국내에서는 시험장비의 제약 등으로 인해 시험을 통해 실제 필요한 값을 직접 얻기 보다는 기존 문헌 등에서 제시된 값들을 이용하여 해석 및 설계에 활용하는 경우가 대부분이었다(서민우 등 2007). 최근 들어 소수의 대형 지반시험장

비가 구축됨에 따라 비교적 입자크기가 큰 조립재료에 대하여 지반시험을 수행하여 강도정수를 산정하는 사례가 증가하고 있으나(유명모 등, 2001; 김범주 등, 2005; 이대수 등, 2005a; 이대수 등, 2005b; 서민우 등, 2006), 대형 지반시험 장비를 이용한다 하더라도 장비에 허용되는 조립재료의 입자크기는 일반적으로 실제 현장에서 시공되는 입자크기에 비해 작은 경우가 많기 때문에 대부분 실제 입자크기를 해당 시험장치 가용 크기까지 축소시켜 시험을 수행하게 된다.

즉 일본의 JGS 0530-2000의 경우에 [그림 3.2.31]에 표시된 바와 같이, 조립재료의 삼축압축시험에서 합리적인 결과를 도출하기 위해서 시편에 포함된 입자 중 최대입경(d)와 공시체 직경(D)와의 비율, d/D는 1/10으로 제안하고 있으며, 균등계수가 5이상일 경우 1/5까지 가능한 것으로 제안하고 있다. 미국의 시험기준인 ASTM D 3999-91에서도 d/D 는 1/6로 제안하고 있다.



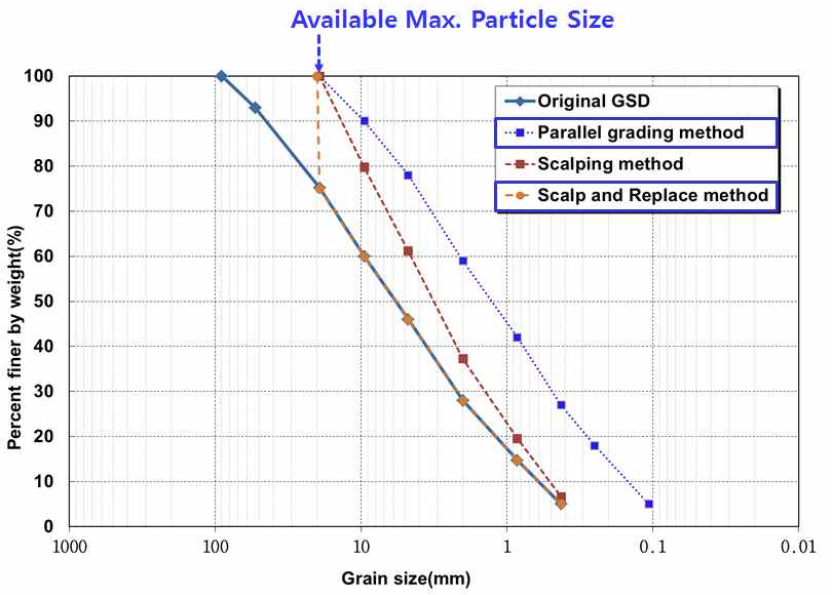
[그림 3.2.31] 입자 입경 및 시편 직경

이처럼 시험장비와 시험재료의 입자크기를 고려하여 입자크기가 축소된 조립재료의 전단거동 특성은 실제 크기의 조립재료와 동일하지 않은 것으로 알려져 왔으나, 그 차이나 영향에 관해서는 아직까지 국내·외 연구자들 사이에서 일관된 결론을 얻지 못하고 있는 실정이다(한국수자원공사, 1999). 특히 국내의 경우 크기별 시험장치 구비의 한계로 인해 이와 관련된 연구 사례는 극히 제한적이었다. 현재로서는 실제 시공되는 재료에 대한 정확한 강도 및 변형특성을 알 수 없기 때문에 상사입도 적용 시 발생할 수 있는 실제 거동과의 차이를 정확하게 판단하기는 불가능하다. 그러나 상사입도를 적용하여 수행된 시험결과를 설계에 활용하기 위해서는 이러한 실제입도 재료와 상사입도 재료사이에 존재할 수 있는 강도 및 변형 특성 차

이를 파악하는 것이 매우 중요하다.

댐 및 항만 구조물과 같은 대형 지반구조물에 사용되는 조립재료의 크기는 수 cm에서 1m 이상이 되므로 실내 전단시험에 사용되는 재료의 입경은 축소 조정하여 사용하는 것이 일반적이다. 원입도를 축소된 시험입도로 조정하는 방법에는 상사입도법, 전두입도법, 자갈입도보정법 등이 있으며, 이 중에서 가장 널리 적용되는 방법은 상사입도법(Parallel grading method)이다. 이 방법은 시험기의 크기에 맞추어 최대입경을 결정한 후, 원재료의 입도곡선을 평행 이동하여 시험입도의 균등계수가 원입도와 같도록 입도를 축소 조정하는 방법이다. 그러나 이 방법을 적용할 때에는 세립분의 함유량이 원입도에 비해 증가할 수 있으며, 이는 지반의 강도, 변형 및 투수 특성에 영향을 미칠 수 있다(Hou 등, 2004). 따라서 상사입도로 시험입도를 구성할 때 세립분의 함량이 재료의 물리적 특성에 큰 영향을 미치지 않도록 주의를 기울여야 한다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 전두입도법(Scalping method)이 이용되기도 하는데, 전두입도법이란 최대입경은 시험기 규모에 맞추어 축소시키되 세립분의 함량이 지나치게 많아지지 않도록 시험입도를 원입도에 비해 경사지게, 즉 균등계수가 작도록 입도를 구성하는 방법을 말한다. 자갈입도보정법(Scalp and Replace method)은 시험시료의 최대입자 크기는 시험장치가 허용하는 최대값으로 조정하고 원입도에서 시험가능최대입자크기 이상의 부분은 시험가능 최대크기의 입자로 치환하는 방법이다. 현재까지는 주로 상사입도로 축소된 시험재료에 대하여 전단특성을 파악하여 이로부터 실제 크기의 지반구조물에 대한 거동특성을 예측하고자 하는 다양한 시도가 이루어져 왔다. 이를 위해서는 입자크기에 따른 전단거동 특성의 변화를 파악하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 특히, 댐 축조재료와 같은 조립재료는 본질적으로는 모래와 유사한 역학적 성질을 갖고 있으나 모래와 달리 입자의 크기가 크고 입자가 파쇄되기 쉬운 특성을 가지고 있어 이들 특성이 밀도, 입자간의 마찰, 다이러턴시, 재배열 및 구속압 등 다른 여러 요인들에 영향을 받을 수 있는 것으로 알려져 있다(한국수자원공사, 1999).

지반구조물에 대한 보다 정확한 거동특성을 예측하기 위해서는 입자크기에 따른 특성변화를 파악하는 것이 필수적이고 이에 대한 연구가 많이 이루어졌으나(서민우, 2007; Leslie, 1963; Marachi 등, 1972; Charles, 1973; Valstad & Storm, 1976) 연구자들간 일관된 결과를 나타내고 있지 않은 실정이다. 즉 구하고자 하는 물성종류나 시험 종류에 따라 그 영향 정도가 다르게 나타난다고 할 수 있다. 따라서 최대 입경크기 등 입도의 영향 뿐 아니라 합리적 시험방법의 확인을 위한 추가적인 연구가 필요한 상황이라 할 수 있다.



[그림 3.2.32] 입도조정법별 입도분포 변화

(2) 국내외 기존 연구 결과

입경이 큰 조립재료에 대한 전단 특성 연구는 다양한 관점에서 최근에도 계속적으로 이루어지고 있지만(Indraratna 등, 1993; Indraratna 등, 1998; Oldecop과 Alonso, 2001; Varadarajan 등, 2003), 거의 모든 경우 시험기 크기 제약으로 인해 상사입도를 적용하여 시험을 수행하고 있으며, 이로부터 실제 입도에서의 전단 특성을 예측하는 일은 여전히 쉽지 않은 주제로 여겨지고 있다.

Varadarajan 등(2003)은 최대 입자크기가 전단강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 동일한 입도분포를 갖는 두 종류 Rockfill 재료를 대상으로 최대 입자크기를 변화(25, 50, 80mm)시키면서 대형삼축압축시험을 실시하였다. 그 결과 재료원의 특성에 따라 상이한 결과를 보였는데, 파쇄되기 쉬운 재료에서는 입자크기가 커질수록 강도가 감소하였고, 상대적으로 파쇄성이 낮은 재료에서는 입자크기가 커질수록 강도가 증가하는 모습을 보였다. Varadarajan 등 (2003)은 파쇄되기 쉬운 재료는 입자크기가 커질수록 파쇄율도 증가하여 궁극적으로 전단강도가 감소하였다고 설명하면서, 입자크기와 전단강도의 관계는 재료특성(파쇄성, 입자 모양 등)에 크게 영향을 받는 다고 제시하였다. 그리고 상대적으로 입자 모양이 모가 난 재료는(angular material) 둥근 입자를 가진 재료(round material)에 비해서 더 큰 부피 팽창을 보인다고 하였는데, 이는 입자 모양이 둥근 재료는 압축이 진행됨에 따라 둥근 입자들

이 미끄러지면서 압축 또는 재배열(rearrangement)을 통해 계속적으로 수축하지만, 상대적으로 모가 난 재료는 전단이 진행됨에 따라 엇물린(interlocking)이 강하게 일어나면서 초기 변형시 부피 팽창(dilation)이 많이 발생하기 때문이라고 하였다. Varadarajan 등(2003)dms 입자크기를 달리한 시험을 통해 얻은 최대 입자크기와 강도와의 관계로부터 실제입도의 강도정수를 예측한 후, 이를 수치해석 및 안전성 평가에 적용하였다. 국내에서도 최근 들어 몇몇 대형 지반시험장비가 구축됨에 따라 비교적 큰 조립재료에 대한 전단시험이 수행되고 있다(서민우 등, 2005; 김범주 등, 2006; 이대수 등, 2006). 김범주 등(2006)은 댐 축조재료를 대상으로 최대입경을 각각 50, 30, 20mm로 달리하면서 상사입도를 구성한 후 대형삼축압축시험을 실시하여, 최대 입자크기에 따른 전단강도 및 변형 특성을 평가하였다. 시험결과, 동일 조건에서 입자크기가 감소할수록 dilation이 점차 증가하고 변형율 연화 현상이 두드러졌으며, 결과적으로 최대 전단강도가 다소 증가하여 전체적으로 조밀한 사질토와 유사한 경향을 보인다고 발표하였다. 이대수 등(2005a, 2006)은 최대 입자크기와 입도분포가 전단특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 대형 직접전단시험을 실시하였는데, 시험결과 최대입경이 커질수록 파쇄율은 더 큰 반면 내부마찰각은 감소하였고, 동일한 최대입도에서 균등계수가 작을 때(빈입도, poorly graded) 약간 큰 마찰각을 보인다고 하였다.

서민우 등(2007)의 연구결과에 따르면, 재료에 따라 전단강도 특성이 다른 결과를 보였다. 이러한 차이는 일부는 재료상의 차이뿐 아니라 동일 재료에서 공시체별 상대밀도 등의 차이, 시험상의 오차 등에 기인한 것으로, 또 한편으로 시험기 크기와 최대입자크기의 변화가 조립재료의 전단강도 특성 변화에 일정한 경향을 나타낼 만큼 큼 영향을 미치지 않았기 때문인 것으로 해석하고 있다. 또한 변형 거동의 특성을 파악하기 위해 각 삼축압축시험 결과로부터 Hyperbolic model parameters를 산정한 결과에서는 탄성계수(특히 할선 탄성계수)의 경우 그 크기는 대체로 대형, 소형, 중형 삼축의 순인 것으로 나타났다. 중형 삼축 시료의 탄성계수가 가장 작은 이유는 입자크기의 영향보다는 상대적으로 낮은 초기밀도의 영향으로 풀이된다. 한편, 체적변화거동을 타나내는 계수인 B(체적변화계수)값은 탄성계수와 마찬가지로 대형, 소형, 중형의 순으로 산정되었으며, 입자크기의 차이에 따라 상대적으로 큰 차이를 나타내어 강도와 비교해 변형특성, 특히 부피 변형특성에는 입자크기의 변화가 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다.

그러나 아직도 국내에 분포하는 조립재료를 대상으로 수행된 대형삼축압축시험을 이용한 저변형률 영역에서의 탄성계수에 미치는 상사입도의 영향에 대한 연구

사례는 없으며, 또한 시험기 규모를 달리하여 입자크기 영향을 파악한 사례는 거의 보고된 바 없다. 따라서 다양한 크기의 공시체를 이용하여 입자크기와 국내 조립재료의 저변형률 영역에서의 탄성계수와의 상관성을 규명하기 위해서는 앞으로도 많은 시험사례가 요구되고 있다.

[표 3.2.12] 내부마찰각에 미치는 입자크기 효과에 대한 연구결과 (한국수자원공사, 1999)

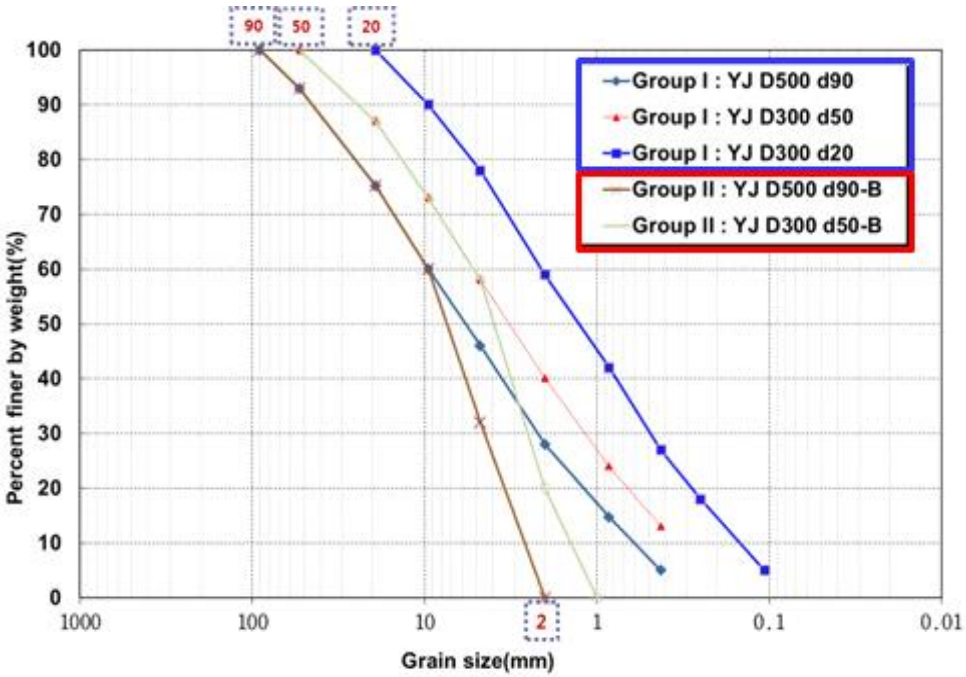
출처	최대입경	입경 크기가 마찰각에 미치는 영향
Leslie(1963)	76mm	마찰각은 최대입경의 영향을 덜 받음
Marachi 등(1972)	152mm	입자의 크기가 작을수록 내부마찰각은 증가
Charles(1973) & Tombs(1969)	76mm	입자의 크기가 커질수록 내부마찰각은 조금씩 증가
Valstad와 Strom(1976)	76mm	입자크기에 따른 내부마찰각의 변화는 뚜렷하지 않음
Donaghe와 Cohen(1978)	51mm	입자크기에 따른 내부마찰각의 변화는 뚜렷하지 않음

이에 본 연구에서는 최대입경 90-100mm의 원입도 재료에 대해 직경 500mm, 높이 1000mm의 공시체에 대한 저변형률영역에서의 탄성계수 산정시험을 수행하고 두가지 입도조정방법(상사입도법, 자갈입도조정법)에 대해 실험을 수행, 그 결과를 비교 검토하고자 한다. 이와 더불어 시험방법 즉 하중주파수, 함수비, 국부변형측정위치 등이 시험 결과에 미치는 영향도 평가하여 향후 동적물성 예측에 포함되어야 할 영향인자를 도출하고자 한다.

(3) 상사입도법 시험 결과

본 연구에서는 먼저 조립지반 재료의 동적물성 즉 미소변형 수준에서의 탄성계수 값을 위한 시험법에 대한 검토를 위해 상사입도법에 의한 영향을 비교하였다. 이를 위해 입도분포표와 시험 시편에 대한 설명에서 볼 수 있듯이, 두 종류의 입도에 대한 시험을 수행하였다. 먼저 [그림 3.2.33]에서 볼 수 있듯이 최대입경 90mm의 원입도 재료에 대해 공시체 직경 500mm으로 시편을 제작하여 시험을 수행하였으며, 최대입경 50mm와 20mm로 같은 균등계수를 갖는 상사입도재료에 대해 직경 300mm 공시체로 시험을 수행하였다(Group I). 두 번째로는 세립분이 적게 포함된 최대입경 90mm의 원입도 재료를 직경 500mm의 공시체로 시편을 제작하여 시험하고, 같은

균등계수를 가진 최대입경 50mm의 입도분포로 입도를 조정하여 직경 300mm의 공시체로 시편을 제작하여 시험을 수행하였다(Group II).

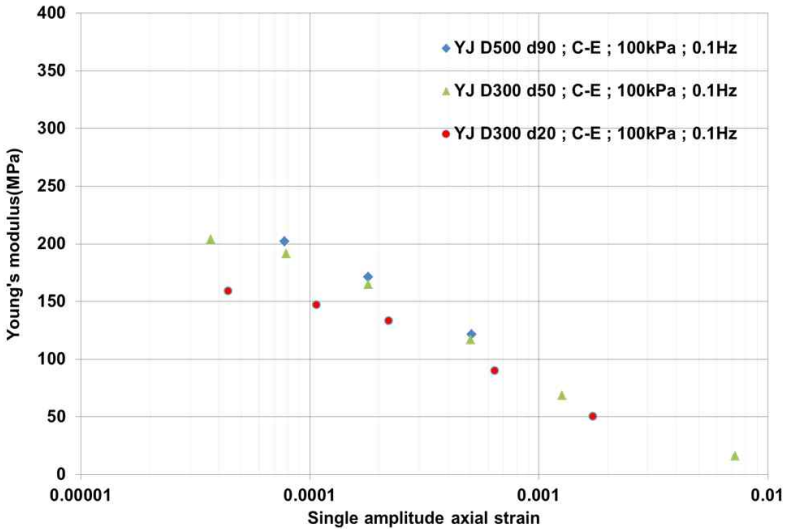


[그림 3.2.33] 그룹별 상사입도분포

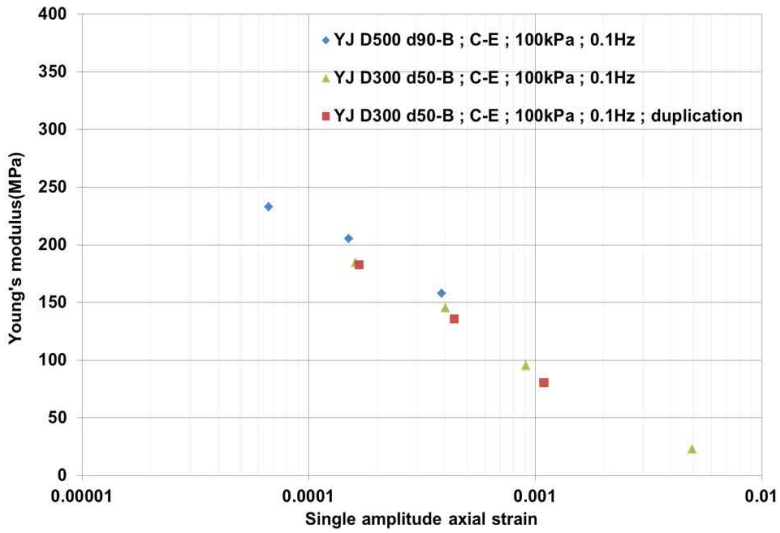
본 시험장비에서는 3종류 직경(500mm, 300mm, 150mm)의 공시체에 대한 시험이 가능하기 때문에, 다양한 최대입경의 입도분포를 가진 재료에 대한 효과적인 시험과 비교가 가능하다. 따라서 하나의 시험장비를 가지고 상사입도조정법과 그에 따른 최대입경 차이가 저변형률 수준에서의 탄성계수에 미치는 영향을 보다 합리적으로 평가할 수 있었다.

[그림 3.2.34]에서 볼 수 있는 바와 같이, 같은 균등계수를 가지고 입도분포를 평행이동시켜 시편을 조성한 상사입도분포의 시험 결과, 최대입경이 큰 시험들에 비해 상대적으로 큰 탄성계수의 경향을 나타냈다. 즉, [그림 3.2.34(a)]의 경우 원입도 최대입경이 90mm, 50mm인 입도분포로 조성된 시험 결과의 탄성계수값이 같은 변형률 수준에서 최대입경 20mm의 입도분포로 조정된 시편의 시험에 비해 상대적으로 큰 값을 나타냈다. [그림 3.2.34(b),(c)]의 경우에도 같은 균등계수를 갖는 입도분포로 시편을 조성하여 시험하였으나, 최대입경이 큰 입도로 조성된 시편의 시험 결과가 더 큰 탄성계수값을 보이고 있다.

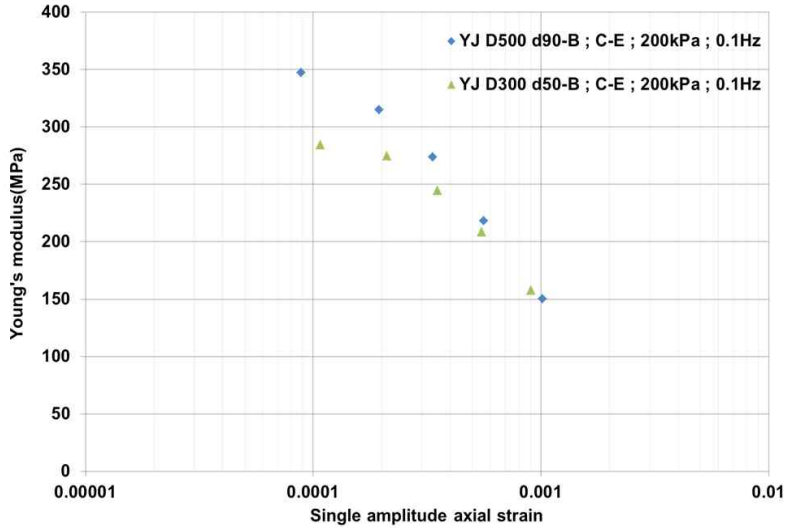
변형률 수준별로도 차이를 볼 수 있었다. 즉, 보다 저변형률 영역인 5×10-5~5×10-4의 변형률 영역에서 상대적으로 큰 차이를 보였으며, 중간변형률 영역(5×10-4~5×10-3) 이상에서는 큰 차이를 보이지 않고 거의 하나의 곡선에 수렴하는 경향을 보였다. 결국 원입도의 재료에 비해 상사입도로 조정된 시편에서 얻어진 시험 결과가 저변형률 영역에서 탄성계수를 과소평가할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 다음과 같이 입자배열 구조에 의한 설명이 합리적인 것으로 판단된다.



(a) 상사입도 시험 결과 I

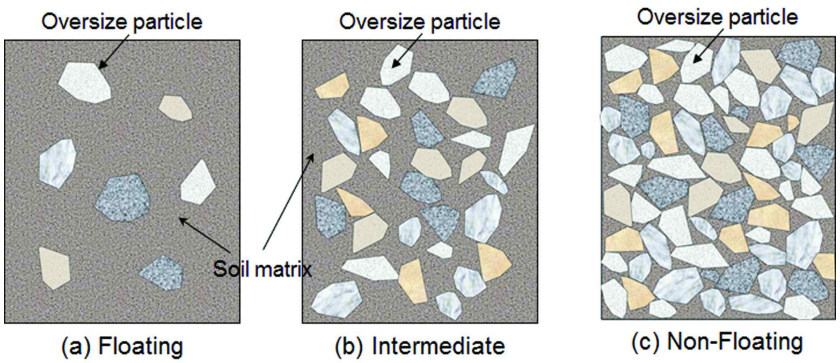


(b) 상사입도 시험 결과 II



(c) 상사입도 시험 결과 III

[그림 3.2.34] 상사입도 조정시편들의 탄성계수 시험 결과



[그림 3.2.35] Oversize 입자 배열 상태(Siddiqi, 1984)

즉, [그림 3.2.35]와 같이 굵은 골재를 포함하는 시편의 경우 굵은 골재의 접촉정도에 따라 3가지로 상태를 분류할 수 있다(Siddiqi, 1984). floating 상태는 굵은 골재와 굵은 골재 사이에 접촉이 전혀 없는 상태이고, non-floating 상태는 굵은 골재와 굵은 골재 사이에 완벽한 접촉이 이루어진 상태이며, intermediate 상태는 일부분의 굵은골재와 굵은 골재가 서로 접촉하고 있는 상태를 나타낸다. floating상태에서는 그림에 나타낸 soil matrix의 특성이 시료 전체의 특성을 좌우하고,

non-floating상태에는 굵은 골재와 굵은 골재 사이의 접촉이 시료 전체의 특성을 좌우하게 된다(Siddiqi, 1984; Thevanagam, 1998). 결국, 최대입경 변화에 따른 탄성계수의 증가 또는 감소 여부는 floating 또는 non-floating상태에 따라, soil matrix의 간극비에 주요하게 영향받는지 아니면 굵은 골재만의 간극비에 주요하게 영향받는지에 따라 결정되게 된다고 말할 수 있을 것이다(권기철, 1999).

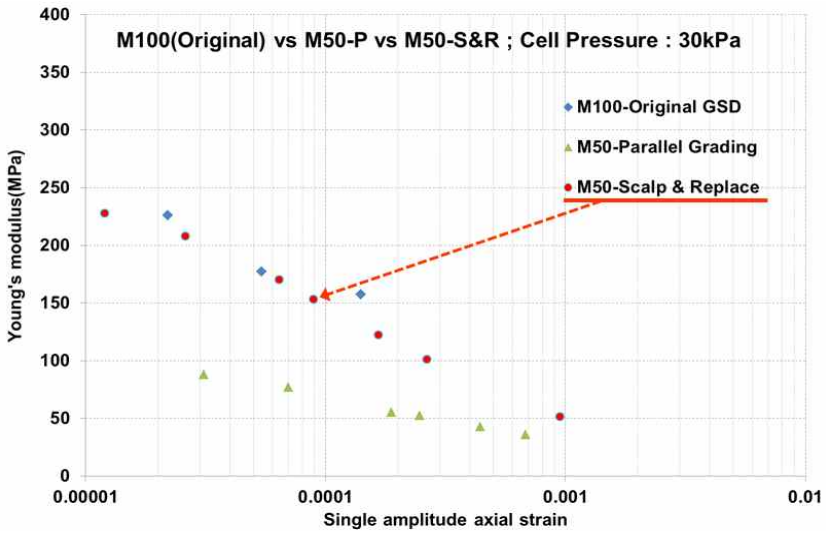
즉 본 연구의 시험 결과와 같이 시료의 최대입경이 증가하고 세립분이 감소할수록 탄성계수가 증가하는 경향을 보이는 것은 이때의 재료가 non-floating상태의 특성을 보이는 것으로 판단할 수 있다. 물론 이러한 결과는 본 연구에서 수행된 재료, 입도, 세립분 조건 등에 의한 결과로 정량적인 일반화는 어려울 수 있다. 그러나 본 연구에서 목적으로 하는 저변형률 영역에서의 탄성계수를 산정하는 시험을 위해서 상사입도방법으로 조성된 시편의 시험 결과를 반영하는 것은 주의가 필요함을 확인할 수는 있었다. 결국 대상재료의 입도분포, 시편제조를 위해 조정된 입도조정 조건 등에 따라 시험 결과에 영향을 받을 수 있으므로, 보다 다양한 조건의 시편에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(4) 상사입도보정법(Parallel grading method) 및 자갈입도보정법(Scalp and Replace method) 시험 결과 비교

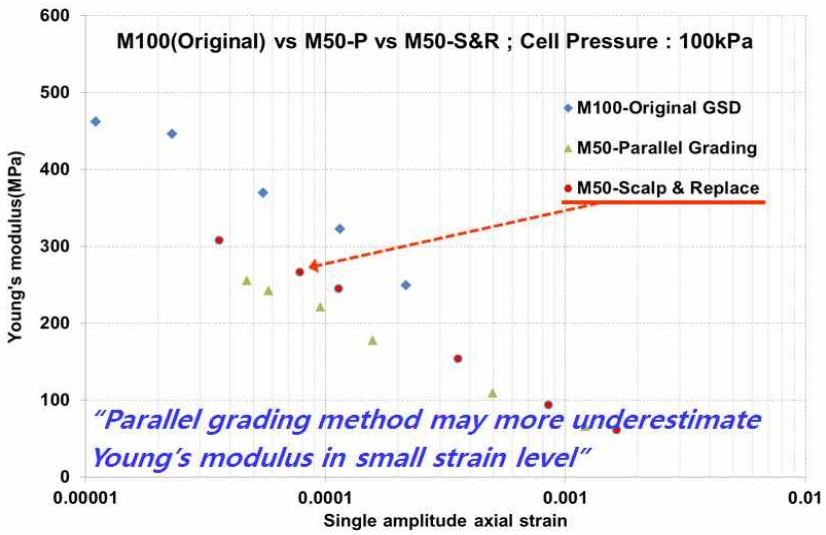
앞서 시험 재료의 강화노반재료 중 입도조정층재료(GCS-1 or M100)을 원입도 시편으로 가정하여 공시체 직경 500mm, 최대입경 100mm로 시험하였으며, 상사입도조정재료(M50-P)와 자갈입도보정재료(M50-S&R)를 최대입경 50mm로 하여 공시체 직경 300mm 시편으로 입도를 보정하여 원입도 시편과 두가지 입도보정방법에 의한 시편의 저변형률 수준에서 동적물성을 비교하였다([그림 3.2.22], [표 3.2.7]).

앞선 실험 결과에서도 상사입도로 입도조정된 시편의 경우 같은 변형률 수준에서 원입도 시편보다 상대적으로 낮은 탄성계수를 보였다. 그러나 자갈입도보정된 시편의 경우에는 낮은 구속압(30kpa)의 경우 상대적으로 원입도 시편의 탄성계수와 거의 유사한 결과를 보였다. 한편 100kPa의 구속압 수준에서 자갈입도보정 시편은 원입도 시편보다 낮은 탄성계수를 보였으나, 상사입도조정 시편보다는 상대적으로 큰 탄성계수값을 나타냈다. 물론 본 연구에서 수행된 재료와 입도분포 특성 등의 조건 하에서의 결과로서 일반화하기에는 어려움이 있지만, 큰 골재들 사이의 직접적인 접촉에 의해 저변형률 수준에서의 탄성거동이 크게 영향을 받을 경우, 큰 입자가 작은 입자들 사이에서 floating될 가능성이 높은 상사입도법보다는 작은 입자들의 비율을 원입도 시편과 동일하게 유지하고 시험체에서 시험이 가능한 최대입경

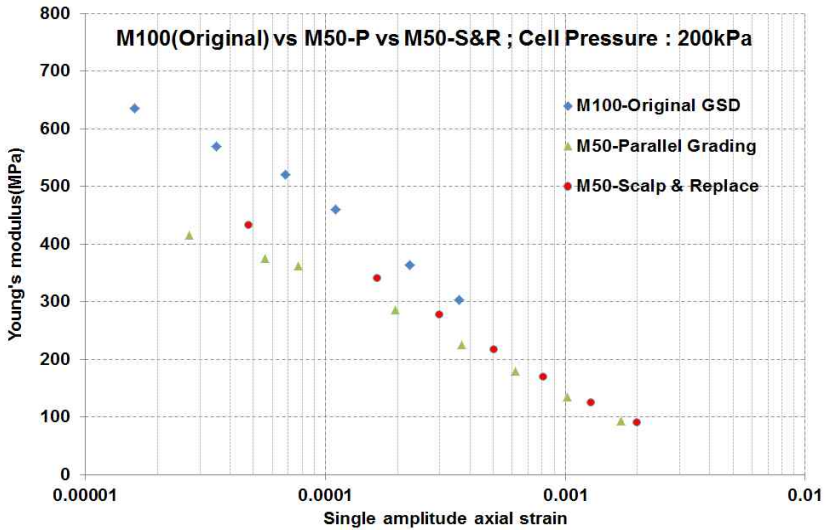
의 입자들로 그 이상의 입자들의 비율만큼 대체한 자갈입도보정방법의 시편이 원입도 시편의 저변형률 수준에서의 탄성계수를 보다 가깝게 재현할 수 있었던 것으로 평가된다.



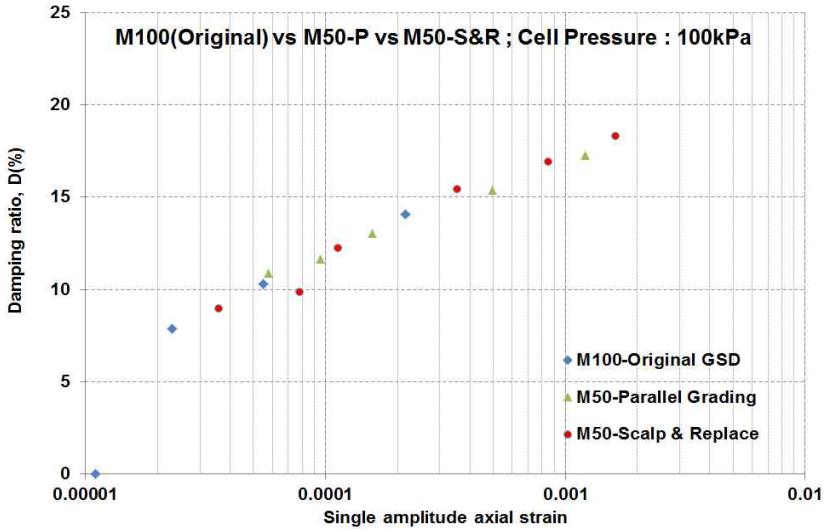
(a) 구속압 30kPa에서 탄성계수



(b) 구속압 100kPa에서 탄성계수



(c) 구속압 200kPa에서 탄성계수



(d) 감쇠비 특성 비교

[그림 3.2.36] 상사입도 및 자갈입도보정 재료 시험 결과 비교

한편 전체 재료 내의 oversize 입자의 함량이 10% 이하이면 oversize 입자를 제거하고 나머지 시료로써 시편을 제작하여 시험을 실시하고, oversize 입자의 함량이 10-30%이면 제거된 oversize 무게만큼을 시험 가능한 최대 크기 입자로 대체하여 시험을 수행하도록 하며, oversize 입자가 30%를 초과하면 사실상 입도조정재료로 원재료의 공학적특성을 파악하는 것은 불가능한 것으로 규정하기도 하는 문헌도 있다(이경하 등, 1997). 이러한 입도조정법 내에서도 적용 기준에 대한 검토와 확인도 필요할 것으로 판단된다. 따라서 보다 다양한 재료, 입도분포, 시험 조건 등에 대해

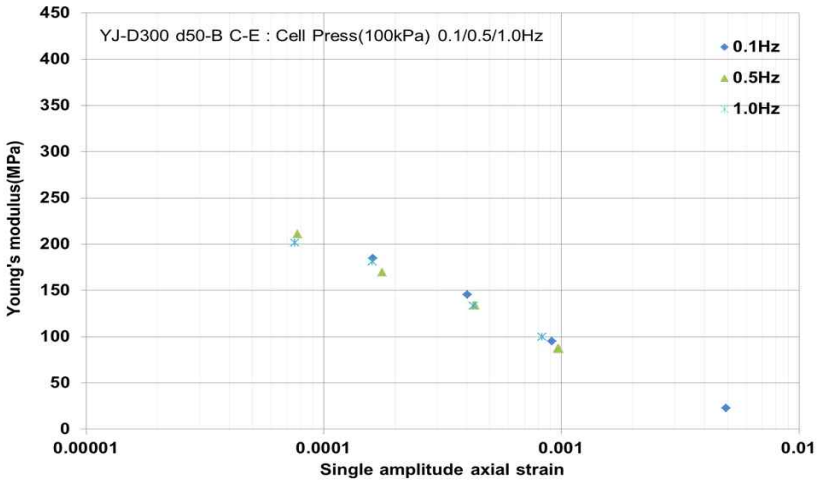
다양한 실험으로 이에 대한 정확한 평가가 필요할 것으로 판단된다.

반면 감쇠비의 경우에는 구속압별로 원입도 시편과 입도조정된 시편 사이에 의미있는 차이는 없는 것으로 판단된다.

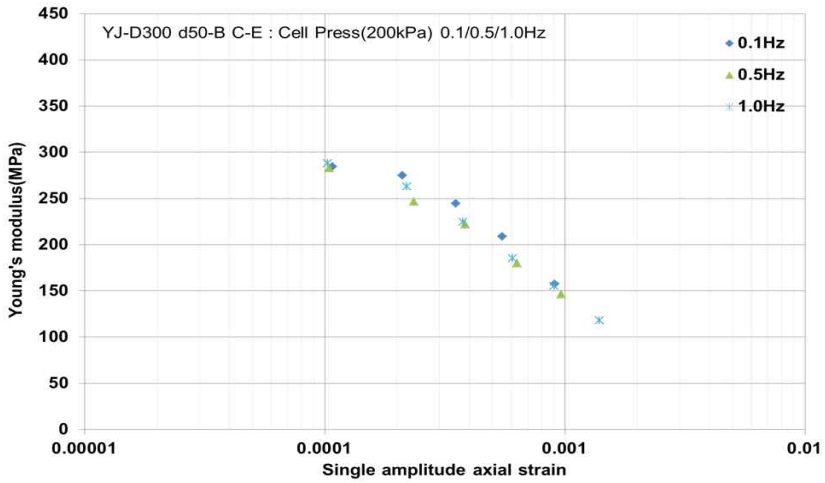
라. 기타 시편 및 시험 조건 영향 평가

(1) 주파수

시험 방법에서도 언급한 바와 같이 저변형률 영역에서의 탄성계수 산정을 위한 시험을 하중 단계별로 11회의 반복하중을 일정 주파수로 재하하고 얻어진 하중-변형률 Loop에서 기울기로 탄성계수값을 산정하는데, 하중재하속도, 즉 하중 재하 주파수에 따라 변형률 수준에 따른 탄성계수 경향이 영향을 받는지 검토하였다. 본 연구에서 0.1Hz, 0.5Hz, 1.0Hz 세 종류의 하중 주파수로 재하하여 그 결과를 비교한 결과 [그림 3.2.37]에서 볼 수 있는 바와 같이, 상대적으로 큰 변형률 수준에서는 주파수가 클 경우, 같은 하중수준에서 발생되는 변형률의 크기가 감소하는 경향을 보였다. 그러나 저변형률-중간변형률 수준에서는 그 차이가 뚜렷하지 않았으며, 전체적인 변형률 수준에 따른 탄성계수 변화 곡선 자체에 영향을 주지는 않는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용되는 조립재료와 같이 입자가 큰 재료의 경우, 하중 주파수가 탄성계수 산정 시험에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.



(a) 주파수 영향 평가 I



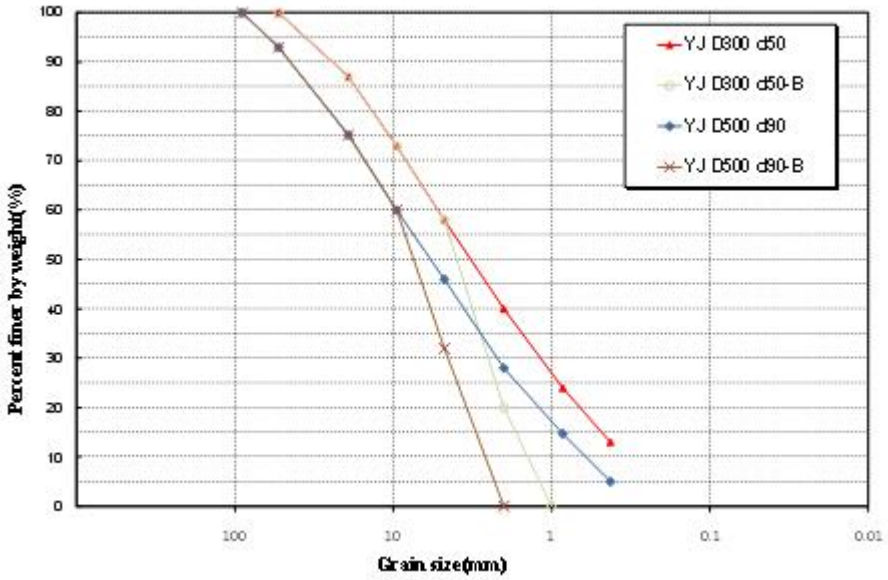
(b) 주파수 영향 평가 II

[그림 3.2.37] 하중주파수영향

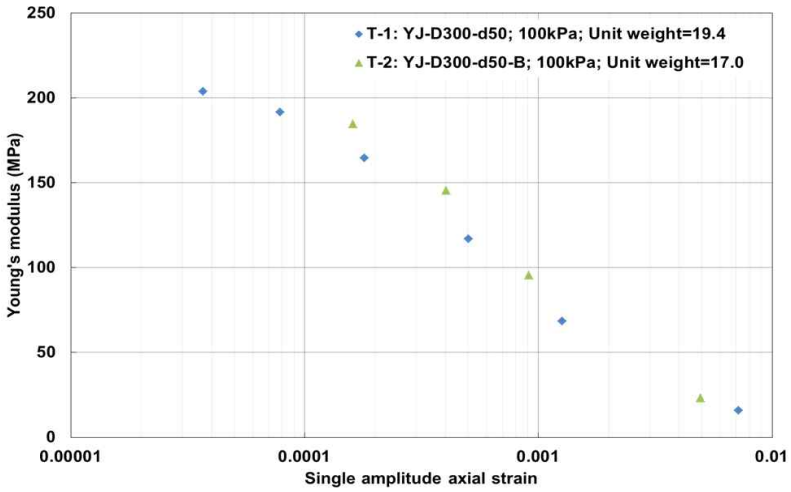
(2) 세립분 함유율

상사입도조정방법으로 시편을 제작할 경우 상대적으로 세립분의 함량이 증가하게 되며, 이는 시험종류에 따라 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 미소변형률 수준에서 탄성계수에 미치는 세립분의 영향을 검토하기 위해 같은 최대입경으로 2mm이하의 함량을 변화시켰을 때의 결과를 검토하였다. 그림 12에서 보는 바와 같이 직경 300mm 공시체로 2mm체 통과량 약 40%인 YJ D300 d50시편과 2mm체 통과량을 약 20%로 감소시킨 YJ D300 d50-B 시편을 비교하였으며, 직경 500mm 공시체에 대해서는 2mm체 통과량이 약 30%정도의 YJ D500 d90의 시편과 여기서 2mm이하 입자를 모두 제거한 YJ D500 d90-B 시편에 대해 시험을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

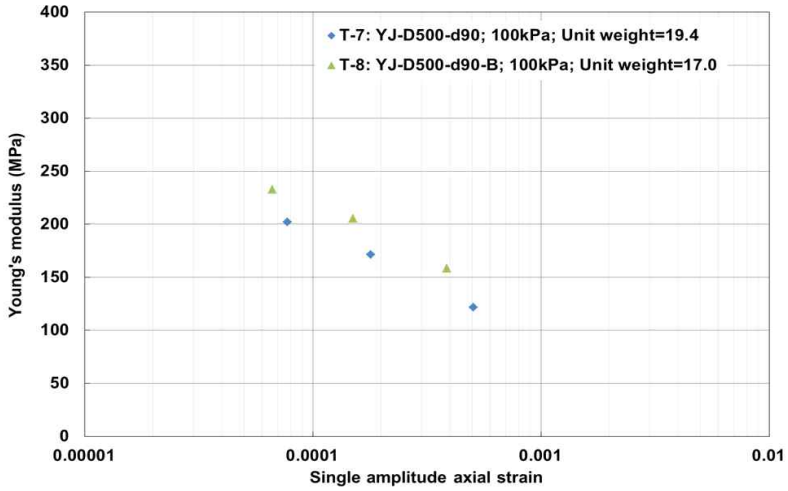
[그림 3.2.39]와 같이 두가지 시편의 각 구속압별 시험결과에서, 세립분 함량을 감소시켰을 경우 같은 다짐 에너지 하에서 다짐밀도가 감소되었으나 오히려 같은 변형률 수준에서의 탄성계수값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과도 앞선 상사입도조정 시편 결과에서와 같이 상대적으로 굵은골재(Over size particle)를 포함하는 시편에서 굵은골재의 접촉정도에 따라 다른 결과를 보이기 때문인 것으로 판단된다.



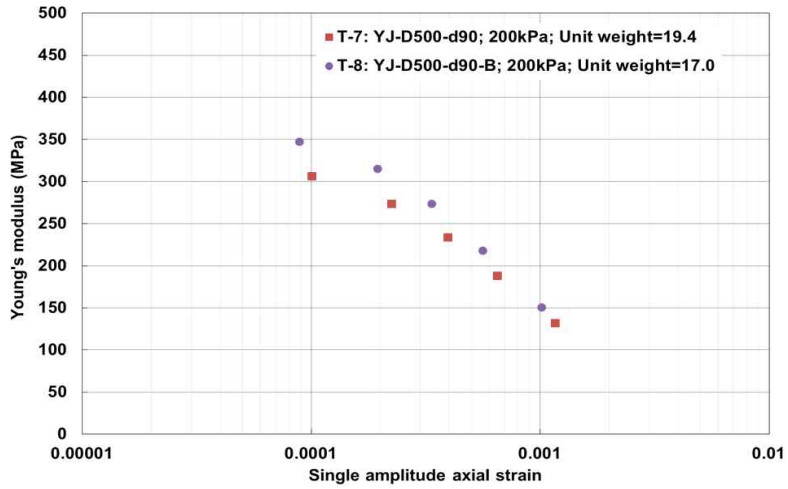
[그림 3.2.38] 세립분 함량 평가를 위한 시편 입도 조건



(a) 직경 300mm 공시체 ; 세립분 함량 변화 결과



(b) 직경 500mm 공시체 ; 세립분 함량 변화 결과 I



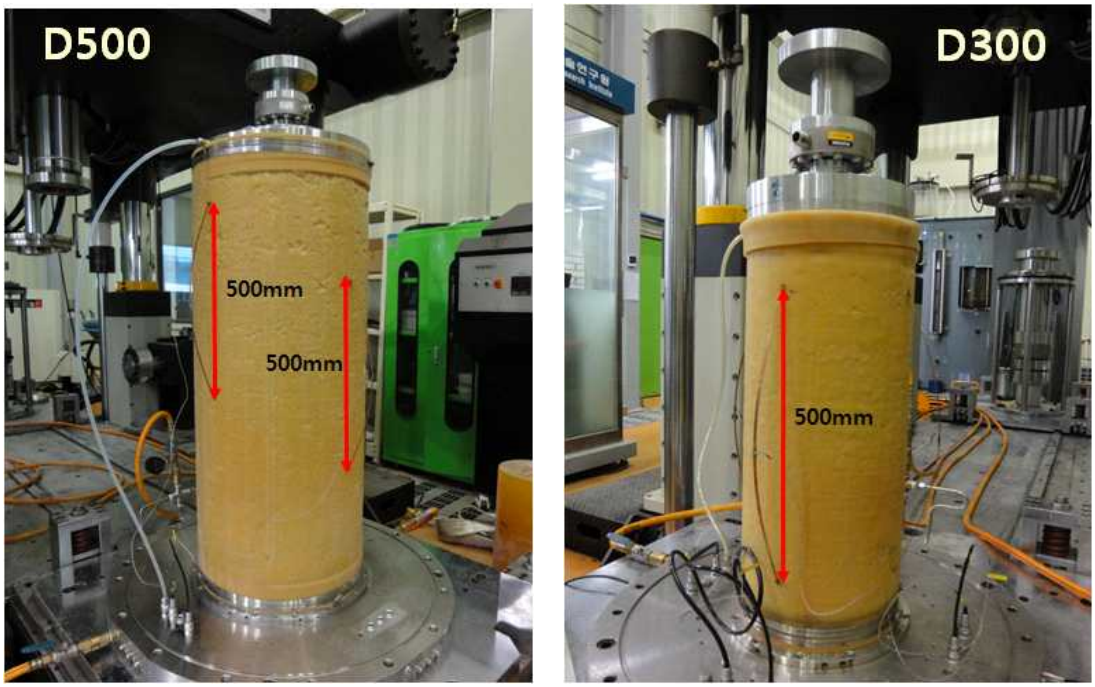
(c) 직경 500mm 공시체 ; 세립분 함량 변화 결과 II

[그림 3.2.39] 세립분함량에 따른 탄성계수 변화 결과

(3) 국부변형 측정 위치

본 연구의 대형삼축압축시험에서는 시편단부의 Bedding error를 제거하기 위해 국부적인 시편의 변형을 측적하기 위해 LDT 시편을 [그림 3.2.40]과 같이 사용하였다. 이와 같이 국부적인 변형측정으로 시편 변형 측정 위치에 따라 발생되는 변형률의 크기를 비교 검토하였다. 본 시험에서는 직경 500mm, 시편 높이 1000mm의 대형삼축압축시편에서 이루어졌으며, 결과는 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 약간의 차이를 보이고는 있으나, 그 차이가 크지 않고, 일관된 경향을 보이지 않는 것을

확인할 수 있었다. 시편의 크기가 최대 1m이상이 되는 대형삼축압축시험에서는 시편의 자중으로 인해 시편 하부에 큰 자중으로 같은 구속압 하에서 보다 작은 유효구속압일 발생될 수 있다. 반면 하중이 시편 상부에서 작용하면서 시편상부에서 보다 큰 변형이 발생될 수 있는 가능성이 있었으나, 이러한 요인들이 시험결과에 큰 영향을 주지는 않는 것으로 판단할 수 있었다.

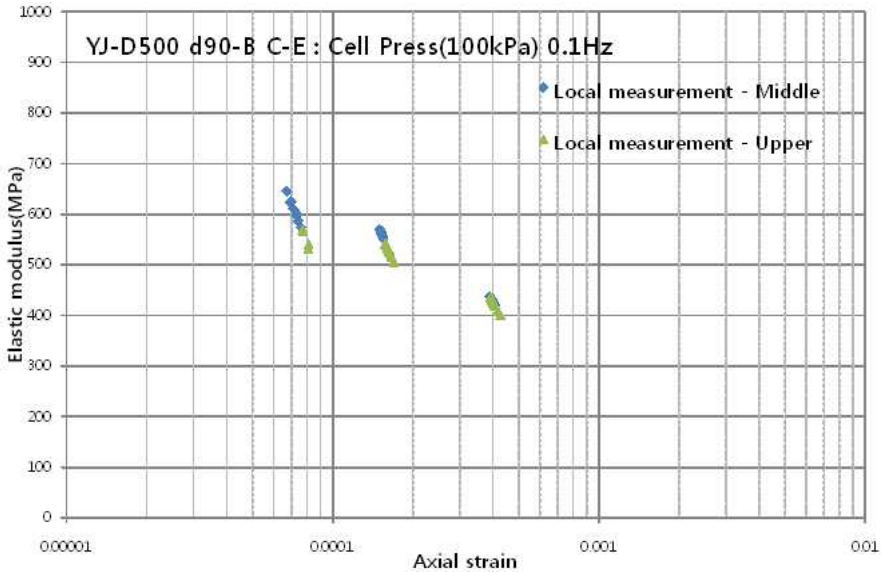


(a) D500/H1000 시편 (b) D300/H600 시편

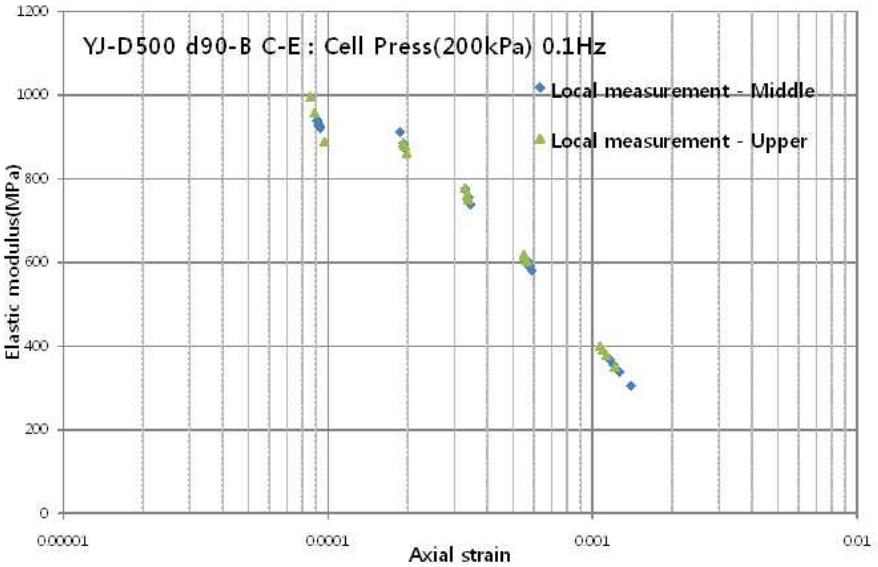
[그림 3.2.40] 국부 변형률 측정 위치

(4) 함수비 영향

시험 재료 및 시험조건의 [표 3.2.7]에서와 같이 본 강화노반재료의 경우 M40-Middle재료의 경우 최적함수비(7%) 조건과 습윤측 함수비(9%) 조건으로 시편의 다짐함수비를 달리하여 다짐함수비가 저변형률 영역에서 시편의 탄성계수에 미치는 영향을 검토하였다. 결과는 [그림 3.2.42]와 같이 같은 밀도로 다져진 시편에서 습윤측 함수비로 다져진 시편의 경우 최적함수비 조건의 시편에 비해 상대적으로 낮은 탄성계수를 나타냈다. 상대적으로 입자 사이의 수분 증가로 미끌림에 의한 입자 이동과 입자간 접촉점의 강성이 약화가 탄성계수의 감소로 이어졌을 것으로 판단된다. 따라서 이러한 다짐함수비 조건에 따른 탄성계수의 영향 정도를 정량



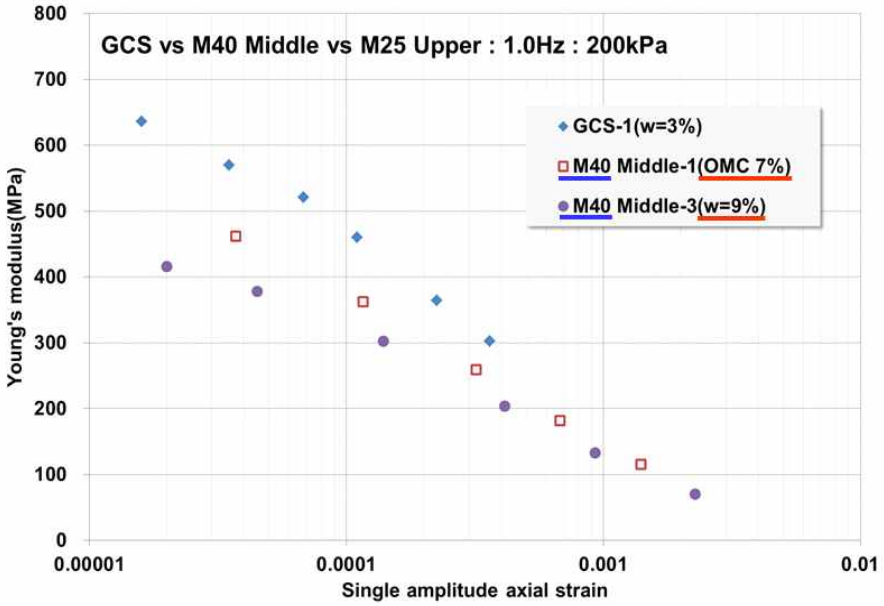
(a) 국부변형측정 위치에 따른 결과 비교 I



(b) 국부변형측정 위치에 따른 결과 비교 II

[그림 3.2.41] 국부변형측정 위치에 따른 시험 결과 비교

적으로 파악하여 현장품질관리 및 물성 예측의 중요한 영향 인자로 고려해야할 것이다.



[그림 3.2.42] 함수비 영향

마. 조립재료의 최대탄성계수 평가

(1) 개요

대형빌딩, 교량 등 대형구조물 하부 기초는 물론 댐, 도로, 철도 성토 등 조립지반재료를 지지층 지반재료로 사용하는 경우가 많다. 따라서 구조물 및 지반구조물의 침하, 지진 시의 거동, 교통하중 등 동적하중에 대한 거동을 해석할 경우 지지지반의 미소한 변형률 영역에서의 변형특성을 파악할 필요가 있다. 결국 조립지반재료에 대한 실내 요소시험인 대형삼축압축시험의 다양한 재료, 시험, 구속압 조건 등에서 공시체의 탄성파 전달속도를 측정해서 최대탄성계수값을 산정하고 앞서 수행된 미소변형률 영역에서의 반복삼축압축시험 결과와 함께 동적물성 적용을 보다 효율적으로 수행하고자 하였다.

이를 위해 본 연구에서는 탄성파속도를 측정하는 장비를 이용한 물성평가기법에 대해 보다 효과적인 시험방법 및 분석방법을 제시하고자 한다.

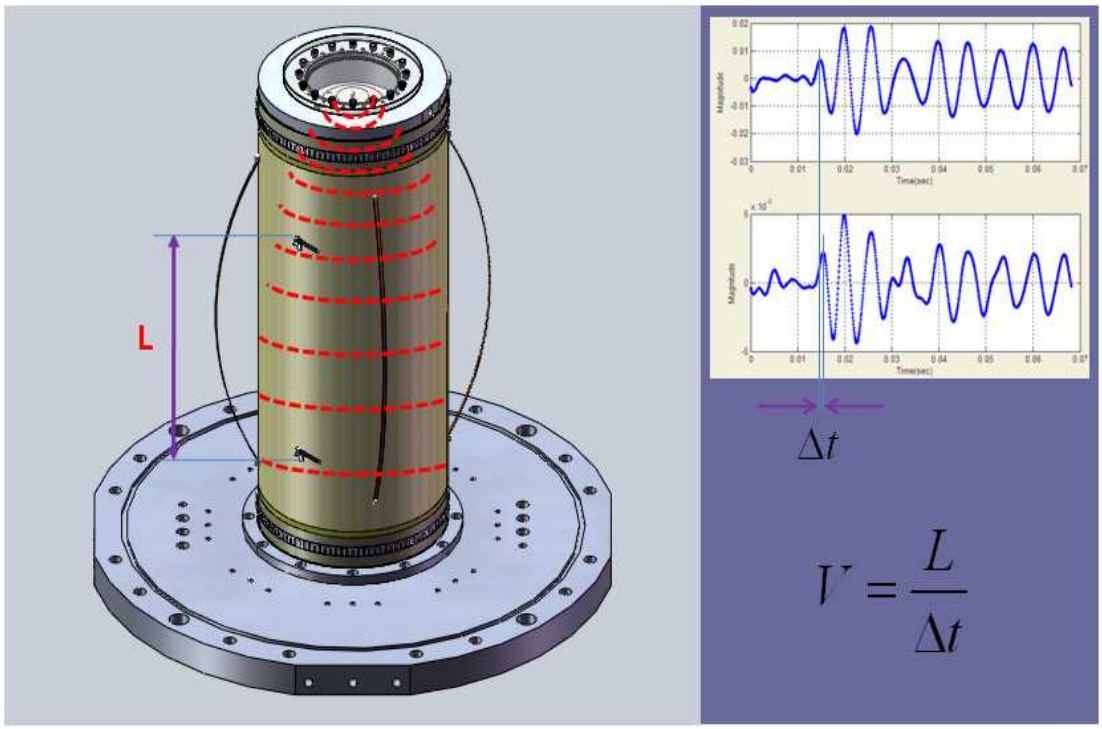
본 연구에서 제안하고자 하는 기술의 기본 원리는 현재 활용되고 있는 크로스홀(Cross-Hole)시험이나 다운홀(Down-Hole)시험 등과 같은 현장시험, 또는 입자가 작은 지반재료에서 적용되고 있는 벤더엘리먼트(Bender-element)시험 등의 원리를 활용한 것이다. 하지만 본 연구에서 대상으로 하는 입자가 큰 조립지반재료에 대해서는 실내 시험 시편에서 파를 발생시키는 방법 시편의 대형화 등과 같은 몇가지

어려움으로 인해 연구가 많이 이루어지지 않고 있다. 그러나 최근에는 이러한 재료에 대해 몇몇 연구자들에 의해 탄성파속도 측정을 활용한 연구가 시작되고 있다(Mondoni, G., et al. 2000; AnhDan, L., et al. 2002)

(2) 시험 방법

(가) Piezoelectric Actuator 활용 가진법

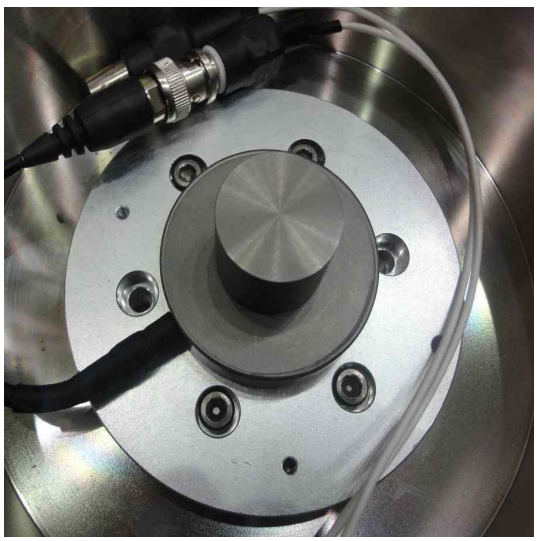
본 연구에 사용될 대형삼축압축시험장비는 앞서 소개된 시험장비를 일부 수정하여 활용하였다[그림 3.2.43]. 대상 시편이 큰 입경의 조립재료가 높은 밀도로 다져져 있기 때문에 시험장치를 설치하고 시편에 동적 탄성파를 발생시키는 것이 매우 어려운 작업이다. 현재까지 입자가 작은 재료에 많이 사용되고 있는 벤더엘리먼트의 경우 입자가 큰 조립지반재료의 시편을 다지는 과정이나 다진 이후에 단부에 삽입하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 파를 발생시키는 가진장치로 PCB사의 Piezoelectric actuator를 사용하였다. 가진장치의 발생 가능 주파수범위는 150-5000Hz이며 상부 캡에 삽입하거나 캡 측면에 고정하여 사용할 수 있도록 하였다. 기본 개념도로서 캡에 가진장치를 삽입한 사진 및 세부 Spec은[그림 3.2.43] 및 [표 3.2.13]과 같다. 시편 상부 캡에서 발생된 탄성파는 시편을 통해 전달되며, 이를 시편 상부와 하부에 각각 부착되어 있는 가속도센서에서 탄성파를 감지하고 도달시간의 차이와 거리를 통해 시편내부에서 전달되는 탄성파 속도를 계산할 수 있게 되며, 이와 시편의 밀도를 이용해 $E=\rho V^2$으로 탄성계수를 얻을 수 있게 된다. 이러한 방식의 장점은 발생 탄성파의 주파수를 제어할 수 있다는 점이다. 이때 보다 정확한 travel time의 측정이 가능할 것이다. 또한 가진장치(trigger)와 수신기(receiver)를 시편 내부에 삽입할 필요가 없으며, 어떤 위치에 장착도 가능하다. 따라서 수직 수평방향의 탄성파속도 측정은 물론 국부적인 탄성파속도 변화도 계측이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 시험방법으로 시편의 구속압 조건 등에 따른 대입경 조립지반재료에 대해서도 최대탄성계수값을 실내시험으로 구할 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 최대탄성계수 측정 방법



(b) 상부 캡 내부



(c) 가진장치-Piezoelectric actuator

[그림 3.2.43] 최대탄성계수 측정방법 및 가진장치

[표 3.2.13] 최대탄성계수 시험용 Piezoelectic actuator

항 목	단 위	범 위	비 고
DYNAMIC PERFORMANCE			
Frequency Range	Hz	150 to 5000	[1]
Broadband Force (minimum)	lb/volt [N/volt]	0.004 [0.018]	[3]
STATIC PERFORMANCE			
Clamped force	lb/volt [N/volt]	0.015[0.067]	[1]
Free Displacement	μ in/volt [μ m/volt]	2.56[0.065]	[1]
ENVIRONMENTAL			
Temperature Range	°F [°C]	-10 to +150[-23 to +66]	
ELECTRICAL			
Capacitance	nF	65	[1]
Resistance (minimum)	ohms	1 x 10^7	
Input voltage (maximum) :			
DC Excitation	volts pk	-125 to 500	
AC Excitation (off resonance)	volts pk	±100	
AC Excitation (on resonance)	volts pk	±80	
MECHANICAL			
Weight	oz [grams]	1.27 [36]	[2]
Size(height x diameter)	in [mm]	0.76 x 2.0[19.3 x 50.8]	[4]
Electrical Connector	type	BNC Plug	
Mounting Thread	type	10-32 Msle	
Housing	material	Titanium	
Sealing	type	Weided Hermetic	

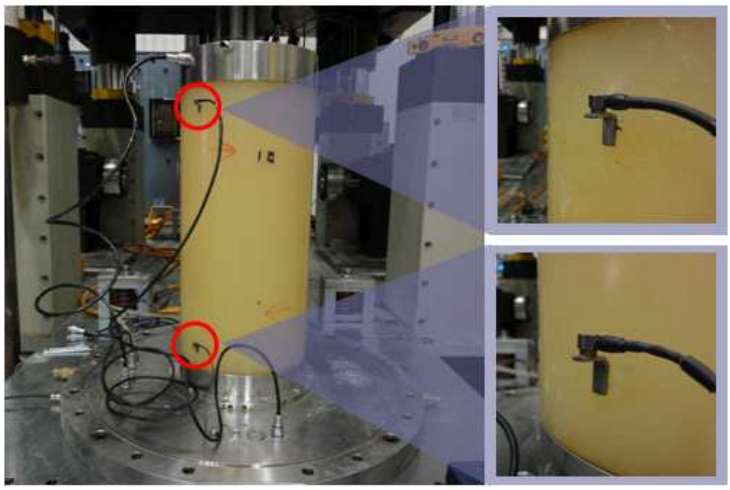
NOTES :

[1] Nominal value.

[2] Measured without cable.

[3] Between 350 and 1000 Hz, 100 gram inertial mass.

[4] 10-32 co dial connector on actuator. Actuator supplied with 10 foot cable attached teminating to BNC plug.



[그림 3.2.44] 최대탄성계수 측정을 위한 탄성파 수신장치(가속도계부착 모습)



(a) 가속도계 Amplifier



(b)Piezoelectric actuator Amplifier

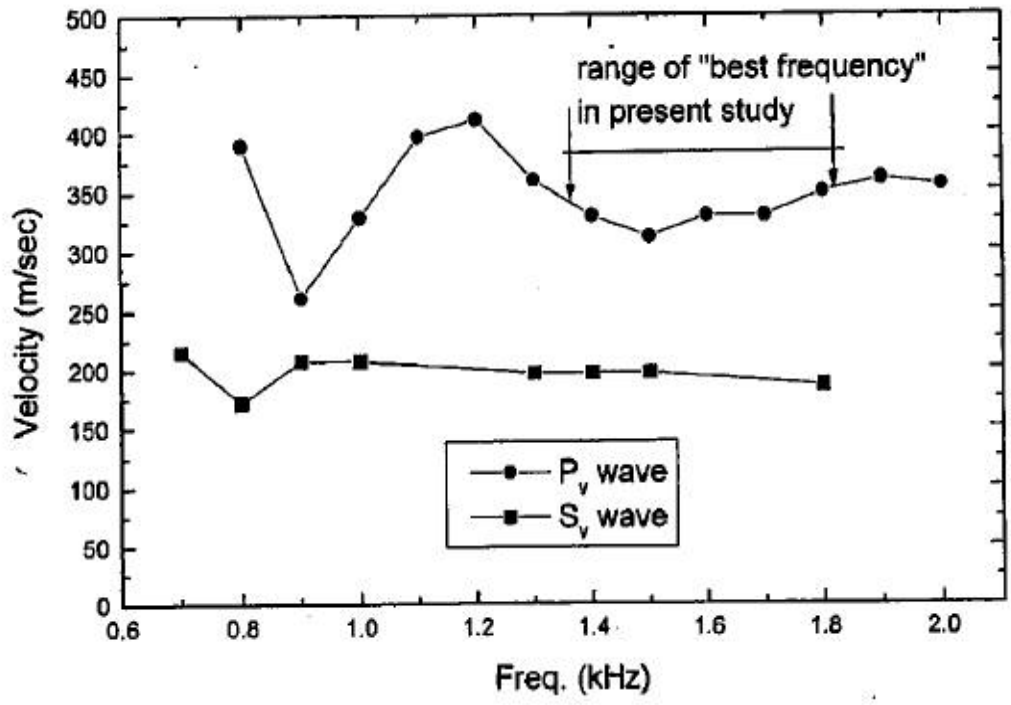


(c) 케이블 연결 Block

[그림 3.2.45] 최대탄성계수 측정을 위한 주변 장치

일정한 주파수를 가진 정현파(Sine파)를 Source로 사용하는 경우, 보다 정확한 신호를 받기 위해서는 재료에 따른 가장 적합한 주파수에서 가진이 이루어져야 한다. 이에 본 연구에서는 기존의 일정 주파수의 Sine파를 이용해서 Try and Error 방식으로 적합한 주파수를 찾는 방식에서 작은 주파수에서 큰 주파수까지 한 번에 발생시킬 수 있는 제어방식을 도입하여 주파수별 도달 신호를 분석하는 프로그램을 개발, 시험에 활용하였다.

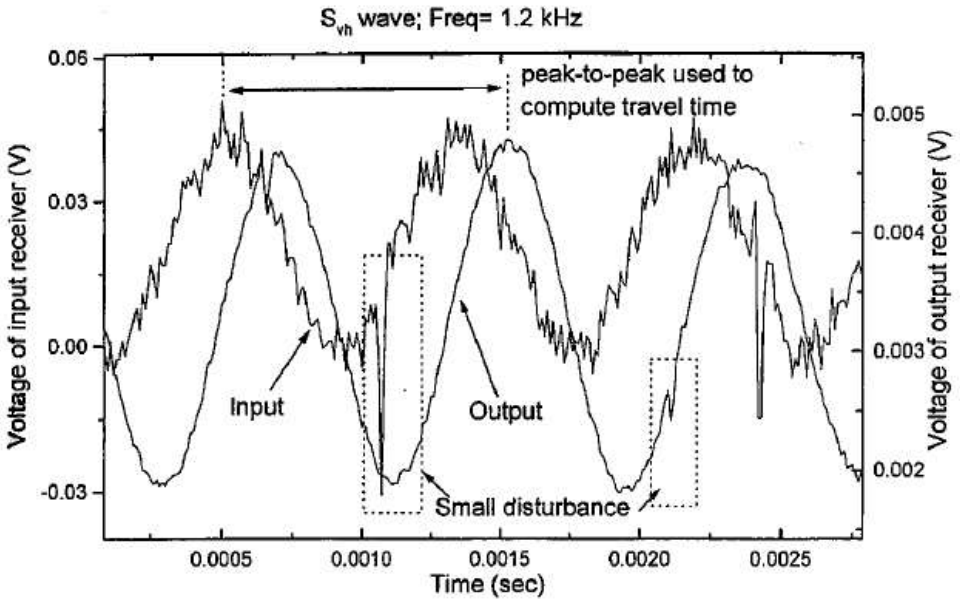
관련 연구 문헌에 언급된 조립지반재료에서 탄성파속도의 주파수 영향에 대한 전형적인 경향은 다음 그림과 같다(AnhDan, L., et al. 2002). 그림에서 볼 수 있듯이, S파의 경우 주파수 범위에 상관없이 보다 안정적인 결과를 보였으나, P파 결과는 상대적으로 낮은 주파수 범위에서 변동성을 보이고 있다. 한편 상대적으로 높은 주파수대역에서 P파 속도의 안정적인 결과를 볼 수 있다. 이러한 주파수 영향을 검토하기 위해서는 많은 횟수의 반복적인 시험이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 한 번에 저주파수에서 고주파수까지 동시에 발생시킬 수 있도록 Source option을 제어하고 Analysis에서 주파수 대역별로 분할해서 주파수별 신호를 분석할 수 있도록 하여파의 도달 시점을 명확히 구분할 수 있도록 하고자 하였다.



[그림 3.2.46] Effects of frequency on wave velocity(AnhDan, 등 2002)

탄성파 도달시간의 결정은 지금까지도 많은 논란이 되는 이슈이다. 실내 및 현장 시험에서 2개의 신호사이의 탄성파 도달시간을 결정하기 위해서 교차상관관계법(Cross-correlation method)이 자주 제안되어 왔다. 그러나 교차상관관계(Cross-correlation)와 상호파워스펙트럼(Cross power spectrum)의 peak은 파형이 변하지 않고 유지되는 경우에만 탄성파 도달시간을 반영하는 것으로 정의할 수 있다. 그러나 이는 회절과 다수의 travel path의 영향 때문에 항상 파형변화가 생기수 있다. Viggiani와 Atkinson(1995)는 탄성파 도달시간의 해석에 주관적 개입을 줄이기 위한 시도로서 입력신호로 하나의 Sine파를 사용하였다. 하나의 주파수로써 출력파는 일반적으로 유사한 형태가 되며, 이는 수치적기법을 적용할 수 있도록 하여 파 도달시간 측정의 불확실성을 약 7% 이내로 감소시킬 수 있었다. 이러한 Sine 입력파에 대해 Sanchez-Salinero 등(1986)은 송신기와 수신기사이의 거리에 대해 파장이 커짐에 따라 근거리장효과(near-field effect ; S파의 도달시점이 보다 빠른 P파에 의해 가려질 수 있는 현상이며, 보다 높은 주파수를 사용함으로써 이 효과를 감소시킬 수 있다)도 커지는 것을 보였다. Mancuso 등(1989)는 진동원으로부터 다른 거리에 있는 두 지점에서 수신된 파를 비교하는 현장 측정법을 개발하였다. 그리고 측정된 파들이 입력파와 유사함을 보였다. Jovicic 등(1996)은 near-field 성분을 제거하거나 공진주파수에서 수신기를 강제진동(forced oscillation)시키기 위해 연속적인 사인파를 입력파로 하여 조율(tuning)하는 방법으로 삼축압축셀에서 벤더엘리먼트를 사용하여 전단파 도달시간을 보다 단순하고 정확하게 얻을 수 있음을 보인 바 있다. 이러한 기술을 바탕으로 복잡한 수치해석적방법을 사용하지 않고 peak-peak 또는 trough-trough 도달시간을 사용할 수 있었다(Viggiani and Atkinson 1997). 이와 유사하게 AnhDan 등(2002)은 가진기와 수신기에 의해 기록된 신호가 같은 주파수를 가진 유사한 파형임을 확인하였으며, 탄성파속도를 평가하기 위해서 peak-peak 도달시간을 평가하는 매우 단순한 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 이와 유사한 방법으로 시편의 Cap에 부착된 가진장치에서 시편의 종방향으로 연속적인 Sine파를 입력파(P파)로 진동을 발생시켜 시편을 매질로 전달된 탄성파가 일정한 거리를 두고 시편에 부착된 가속도계에 도달된 시간을 peak-peak로 평가하는 방법을 적용하고자 하였다.



[그림 3.2.47] Definition of travel time and confinement conditions

전단파탄성계수(G)는 탄성파 속도(V_s)와 밀도(ρ)를 이용해서 탄성 연속체 역학의 개념으로 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$G = \rho V_s^2 \qquad \text{[식 3.2.7]}$$

유사한 식으로 실내시험에서 얻어진 압축파를 이용할 수 있다. 즉, 파의 진행방향에 직각방향으로 변형이 발생시키지 않는 구속압축파(Constrained compression wave) 속도인 V_p는 미소변형률 구속계수 M에 다음 식과 같이 계산에 포함될 수 있다.

$$M = \rho V_p^2 = \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \qquad \text{[식 3.2.8]}$$

한편 비구속압축파(Unconstrained compression wave, rod wave)의 경우에는 그 속도, V_c를 미소변형률 영계수, E계산에 다음 식과 같이 사용할 수 있다.

$$E = \rho V_c^2 \qquad \text{[식 3.2.9]}$$

본 연구에서도 시편의 전체 단면을 접하고 있는 Cap에 가진장치를 부착해서 압축파를 발생시키고, 시편 옆면이 비구속상태인 Free-side boundary 조건이기 때문에 비구속압축파상태가 발생되는 것으로 가정할 수 있으며 식($E=\rho V_c^2$)을 이용해서 수직방향의 탄성계수를 계산할 수 있다. 만약 가진장치가 시편 옆면에 부착면적을 갖고 국부적으로 부착되어 있다면, 구속압축파가 발생되는 것으로 가정할 수 있을 것이다.

탄성파속도를 측정하여 최대탄성계수를 산정하는 동적(dynamic)인 방법과 LDT를 이용한 미소-중간변형률 수준에서의 반복(cyclic)적 시험방법이 하나의 시료에 대해 같은 조건 하에서 이루어질 수 있기 때문에, 간극비, 시간, 온도 등 가능한 영향 인자들에 의한 결과에 미치는 영향은 무시될 수 있을 것이다.

[표 3.2.14] 충격반향시험 결과(직경 50mm 우레탄 검증시편)

시편 ID		U60	U70	U80	U90	U95
길이,cm		9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
직경,cm		5.03	5.03	5.03	5.03	5.03
무게,g		225.3	224.8	206.3	219.5	219.4
밀도,kg/m^3		1156.94	1154.37	1059.37	1127.15	1126.64
공진 주파수	ROD파,Hz	408	528	792	1648	2032
	S파,Hz	240	312	480	1008	1248
탄성파 속도	ROD파,m/s	79.97	103.49	155.23	323.01	398.27
	S파,m/s	47.04	61.152	94.08	197.57	244.61
	P파,m/s	149.43	176.68	201.86	397.98	480.94
포아송비		0.445	0.432	0.361	0.336	0.326
영탄성계수(E,pa)		7.398E6	1.236E7	2.553E7	1.176E8	1.787E8
전단탄성계수(G,pa)		2.560E6	4.317E6	9.377E6	4.400E7	6.741E7

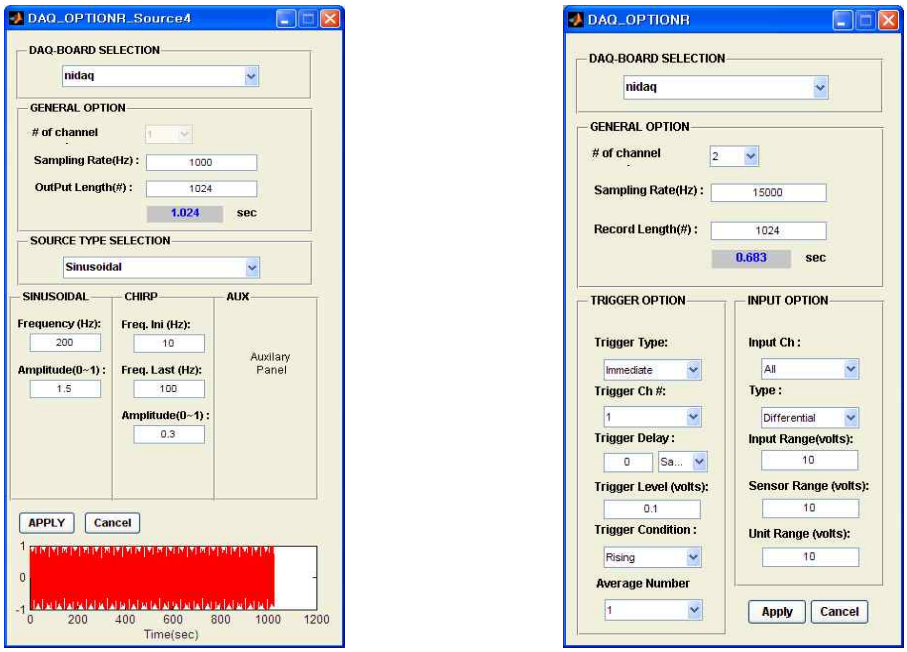
Note * : Poisson's Ratios are determined by V_S and V_C from resonance measurement

이를 위해 본 연구에서는 가진장치인 Piezoelectric actuator의 제어와 가속도계의 수신을 동시에 수행하면서 속도계산에 용이한 프로그램을 개발하였다.

이와 같은 시험장치 및 프로그램을 활용하여 앞서 대형삼축압축시험장비의 시스템 검증에 활용하였던 우레탄시편을 이용해서 본 시험장치의 활용성을 검증하였다. 사용한 시편에 대한 기본 정보와 충격반향시험으로 얻은 시편의 물성 정보는 다음

[표 3.2.14]와 같으며, 본 시험에서는 이중에서 U95시편을 활용하였다.

최대탄성계수 산정 시험을 위해 제작된 제어 및 데이터 처리 프로그램은 Piezoelectric actuator에서 발생시킬 가진 주파수(Frequency)와 가진 크기(Amplitude), 가진 시간 등을 결정하게 되어, 재료 특성상 주파수에 영향을 받을 경우, 다양한 주파수와 가진 크기별로 시험을 수행하여 시험 결과를 가장 잘 얻을 수 있는 시험 조합을 찾을 수 있다. [그림 3.2.48]은 최대탄성계수 시험을 위해 Piezoelectric actuator의 주파수와 진폭 등 가진조건과 Data 획득조건 등을 제어하기 위한 프로그램을 보여주고 있다.

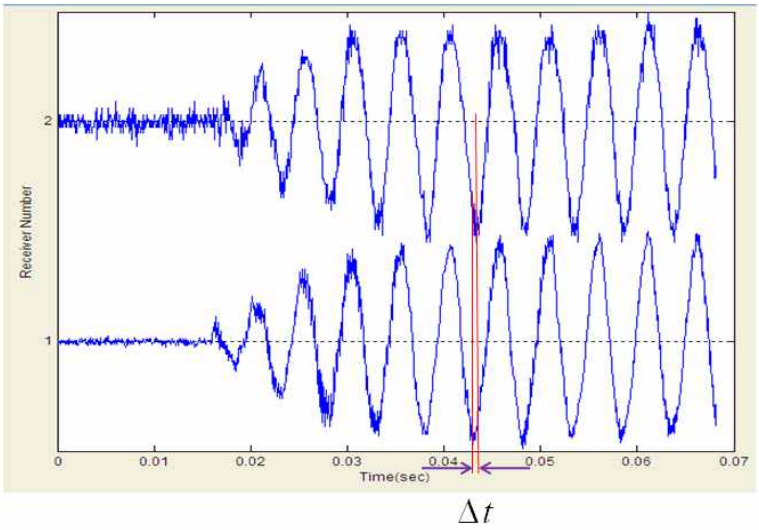


[그림 3.2.48] 최대탄성계수 제어 프로그램

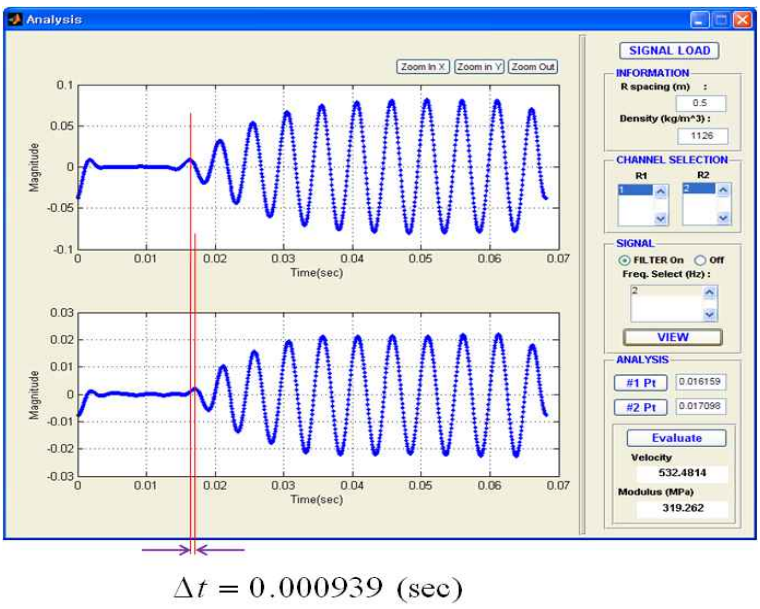
상부 가속도계와 하부 가속도계에 도달한 파의 시간차(Δt)와 가속도계 부착 위치 사이의 거리를 이용해 재료를 통해 전달되는 탄성파속도(v_s)를 계산하고, 재료의 밀도를 이용해서 탄성계수를 계산할 수 있다. 즉, 상부와 하부에서 계측되는 파의 peak-peak 또는 trough-trough점의 time을 읽어야 하지만, [그림 3.2.49]에서 볼 수 있는 바와 같이 계측되는 계측 결과의 다양한 주파수의 Noise 등으로 인해 명확한 peak의 선택이 어려우며, 이로 인해 재료의 탄성계수 계산의 부정확하게 된다.

또한 재료 및 시험 조건의 특성에 따라 적합한 주파수특성이 다를 수 있기 때문에, 시험 결과를 주파수별 탄성파도달 시간을 분석하여 그 결과를 보다 명확히 계산할 수 있도록 시험 제어 및 분석프로그램을 개선하였다[그림 3.2.50].

즉, 탄성파를 주파수별로 분할하여 주에너지를 갖는 주파수 대역의 파형만을 선택, 추출해서 noise를 제거한 깨끗한 파형을 보다 정확한 파전달 시점을 구분할 수 있도록 하였다.



[그림 3.2.49] 최대탄성계수 시간영역-분석 프로그램



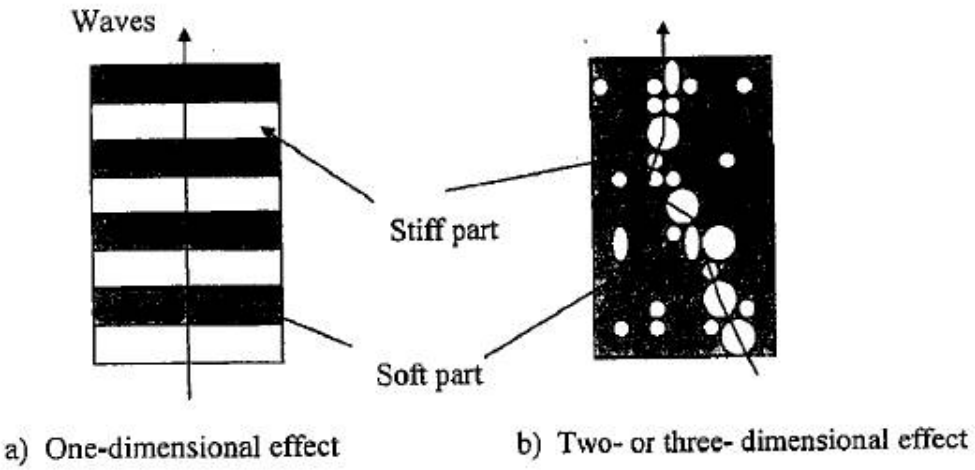
[그림 3.2.50] 주파수 분할 해석 결과

[표 3.2.15] 우레탄시편의 최대탄성계수 시험 결과

시편	Δt(sec)	L(m)	$\rho(kg/m^3)$	$V_p = L/\Delta t$ (m/sec)	$E = \rho V_p^2$ (MPa)	시험주파수 (Hz)
U95	0.000939	0.5	1,126	532.5	319.3	200

Tanaka 등(1994)은 탄성파속도에 의한 탄성계수(E_{wave})와 반복삼축압축시험에 의한 탄성계수(E_{cyc})의 차이가 재료의 최대입경($D_{\max}$)이 증가함에 따라 커지는 경향을 보인 바 있다. 이들 연구에 따르면, $\frac{E_{cyc}}{E_{wave}}$가 $D_{\max}$가 10mm이내일 경우에는 1에 근접하지만 $D_{\max}$가 증가함에 따라 0.6까지 서서히 감소하는 결과를 보인다. 이와 관련해서 탄성파속도에 미치는 시편 구조의 미세 불균질성의 영향이 매우 중요하다(AhnDan 등, 2002). 두 가지 방법으로 얻어진 탄성계수값의 차이는 균등계수나 입도분포와 같은 조립재료의 다른 물리적 특성에 의해 크게 영향을 받는 것으로 판단할 수 있을 것이다. 조립재료의 큰 균등계수와 입경 크기가 시편 내부의 구조적 미세 분균질성을 보다 크게 야기하는 인자가 된다.

조립질 지반재료는 3차원적인 불균질성을 갖고 있기 때문에, 이러한 불균질성의 영향은 1차원적 영향과 2-3차원적 영향으로 구분될 수 있을 것이다.



[그림 3.2.51] 시편 내부 파전달 개념도(Tanaka 등, 1994)

[그림 3.2.51(a)]는 1차원적 불균질성의 영향을 설명하고 있다. 1차원 불균질성 재료의 평균적인 강성은 평균적인 탄성파속도로부터 평가되는 것보다 항상 작게 된

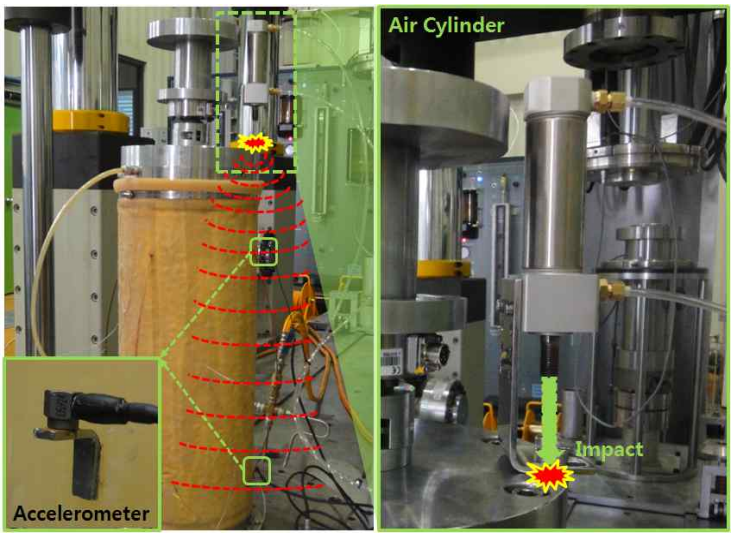
다. 즉, 직접 측정된 탄성파속도(V_{wave})는 반복삼축압축시험에서 얻어진 탄성계수에서 역산으로 계산된 탄성파속도(V_{cyc})에 비해 보다 큰 값을 갖게 될 것이다. [그림 3.2.51(b)]는 시편이 단단한 부분과 연약한 부분이 혼합되어 있는 2-3차원적 불균질성의 영향을 설명하고 있는 그림이다. 이러한 경우 상대적으로 짧은 파장의 탄성파는 시편 내부에서 보다 단단한 부분을 통해서 보다 빠르게 전파되는 경향이 있다. 따라서 2-3차원적 불균질성의 재료의 탄성파 속도(V_{wave})는 반복삼축압축시험에서 얻어진 결과(V_{cyc})보다 큰 값을 갖게 되는 것이다.

그러나 파장이 충분히 크다면 1차원적 불균질성이 없이 2-3차원적 불균질성의 재료에 대해서는 V_{wave}와 V_{cyc}의 값이 서로 일치할 수도 있다. 이것은 Tanaka 등(1995)의 설명과 같이 균질한 세립질 지반의 경우가 될 것이다. <그림 3-6-20(a)>에서 볼 수 있는 바와 같이 수평적인 층이 존재하는 재료에서 수직방향으로 전파되는 파에서 shortcut은 없기 때문에, 2-3차원적 불균질성의 영향과는 달리 1차원적 불균질성의 영향은 파장에 의해 영향을 받지 않을 것이다(Tanaka 등, 1995; AnhDan 등 2002).

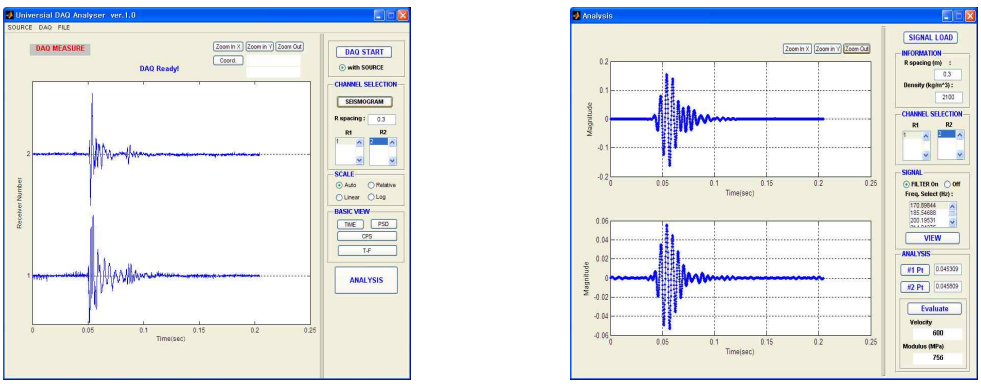
본 연구에서 구축된 장비와 분석 프로그램을 이용해서 최대탄성계수를 산정하는 방법에 대한 확인은 되었으나, 이상과 같은 재료별 특징을 고려해서 실제 조립지반 재료에 적용하기 위해서는 다양한 영향요소에 대한 평가와 시험으로 검증 및 평가가 요구된다.

(나) 에어실린더를 활용한 타격식

앞선 Piezoelectric actuator를 이용한 방법의 경우 하중 주파수를 제어해서 주파수의 영향이 있는 시편의 경우 주파수 특성을 분석할 수 있는 장점이 있으나, 하중 크기가 크지 않아 시편이 커지거나 시편 조건에 따라 탄성파의 전달이 약해 명확한 탄성파 속도의 측정이 어려운 경우가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 추가적인 두 번째 시험법으로 Top cap을 타격하여 시편 내에 큰 에너지의 탄성파를 발생시킬 수 있도록 시험장치를 추가 장착하였다. 타격을 위해서는 공압으로 타격할 수 있는 에어실린더를 활용하였다. 타격으로 발생된 파 전달 속도를 측정하는 방법으로는 앞선 시험법과 동일하게 가속도계(Accelerometer)를 Receiver로 사용하였다[그림 3.2.52]. 분석 방법은 앞선 시험법과 같이 일정 간격으로 부착된 가속도계에 도달되는 탄성파의 시간차로 탄성파 속도를 얻고, 밀도를 고려하여 최대탄성계수를 산정하게 된다.

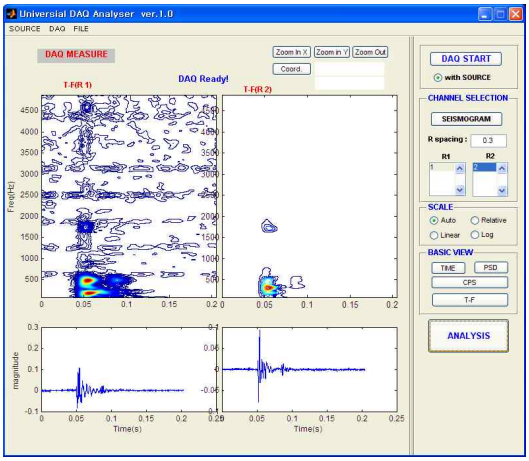


[그림 3.2.52] 타격식 최대탄성계수 산정시험

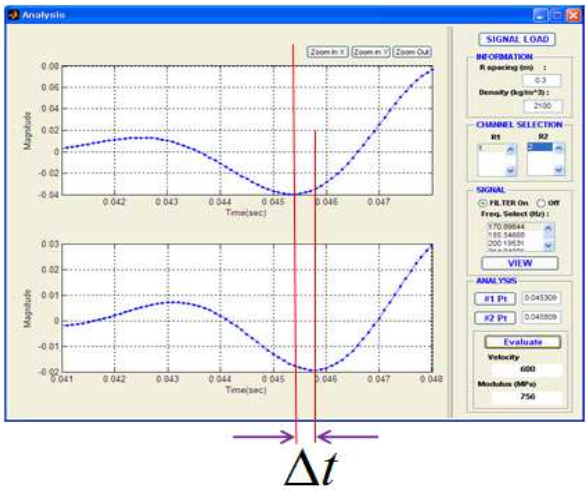


(a) 타격후 상하부 가속도계 입력 신호 (b) 주파수 분할 결과

[그림 3.2.53] 타격식 최대탄성계수 산정 시험 신호의 주파수 분할 전후 비교



[그림 3.2.54] 타격 충격파의 주파수 특성 분석



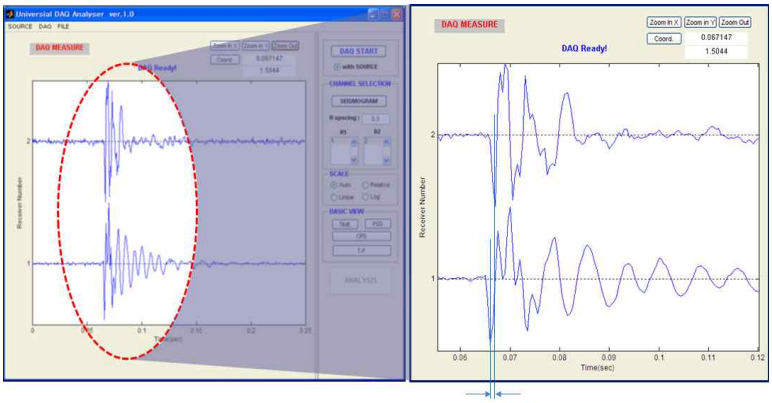
[그림 3.2.55] 탄성파 도달 시간 분석

이상과 같이 현장의 구조물이 없는 설계단계에서 또는 실내시험으로 현장 접근이 어려운 지역이나 구속조건을 가진 구조물의 최대탄성계수를 얻기 위한 시험장비를 구축하고 보다 정확한 탄성파 속도 분석 프로그램을 개발하였다. 다음 시험 결과는 앞서 소개된 고속철도 상부노반시편에서 수행된 결과이다. [그림 3.2.56], v57], [vy 3.2.16]에서 볼 수 있는 바와 같이 반복삼축압축시험에서 산정된 탄성계수에서 수정 Hyperbolic식으로 곡선맞춤(Curve fitting)한 최대탄성계수와 근사한 값을 얻을 수 있었다. 그러나 최대탄성계수 시험에서 탄성파 도달 시간의 미소한 차이에 따라 최대탄성계수값의 차이가 발생하는 문제를 개선해야할 필요가 있으며, 조립지반재료에 대해 다양한 조건에서의 시험 및 반복삼축압축시험 결과와의 상호 분석을 통해 실제 조립지반 재료의 최대탄성계수를 얻기 위한 시험방법으로서 지속적인 안정화 연구가 필요할 것이다.

[표 3.2.16] 고속철도 상부노반 시험조건

고속철도 상부노반(HN 2-2 Upper SG)	구속압 25kPa	구속압 50kPa
타격식 최대탄성계수 실험	162.89(MPa)	244.4(MPa)
반복삼축압축시험(수정 Hyperbolic 곡선맞춤)	169.0(MPa)	210.6(MPa)

①고속철도 상부노반 재료(구속압 25kPa)

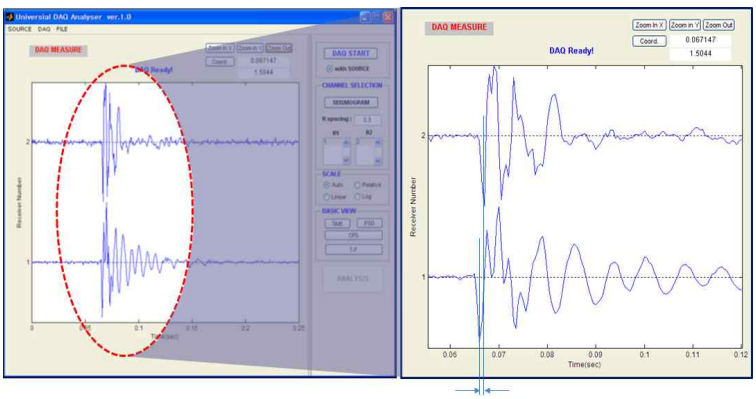


$\Delta t = 0.001008(sec)$

$E_{max} = 162.89(MPa)$

[그림 3.2.56] 고속철도 상부노반재료(구속압 25kPa)

② 고속철도 상부노반 재료 : 구속압 50kPa



$\Delta t = 0.001008(sec)$

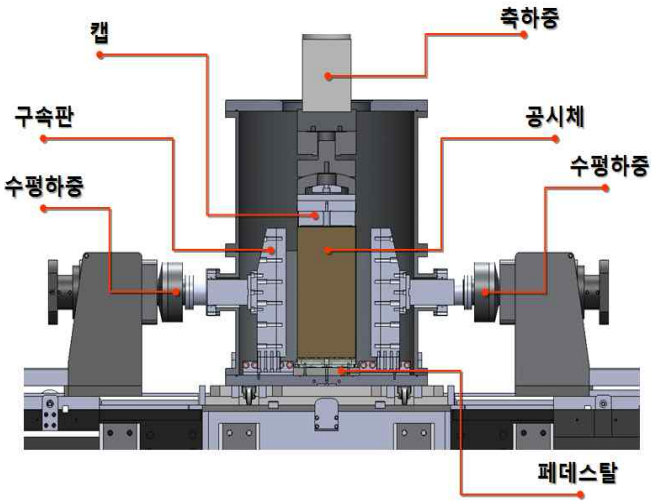
$E_{max} = 162.89(MPa)$

[그림 3.2.57] 고속철도 상부노반재료(구속압 50kPa)

바. 중간주응력 영향 평가

실제 지반은 지중에서 중간주응력(σ_2)이 최소주응력(σ_3)보다 큰 상태로 존재하는 경우가 많다. 따라서 삼축압축셀에서 공시체에 모든 측방에 같은 구속압으로 σ_3을 가하는 것이 일반적인 응력 제어 방법이나, 경우에 따라서는 실제 현장 조건에서 얻고자 하는 물성값과 차이가 큰 강도나 강성 등 재료 물성값을 얻을 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 중간주응력 또는 평면변형률 상태로 경계 조건을 제어하여 실험하고 그 결과를 비교할 수 있도록 하였다.

중간 주응력 제어 시스템은 사각 공시체를 삼축 압축 시험과 동일하게 셀의 압력에 의해 최소 주응력을 가한 상태에서 중간 주응력 방향의 변형을 구속해서 평면변형 압축 시험을 실시하거나 그 방향의 하중을 제어해서 중간 주응력의 영향을 고려할 수 있는 시험에 사용한다.



[그림 3.2.58] 중간주응력 제어 시스템

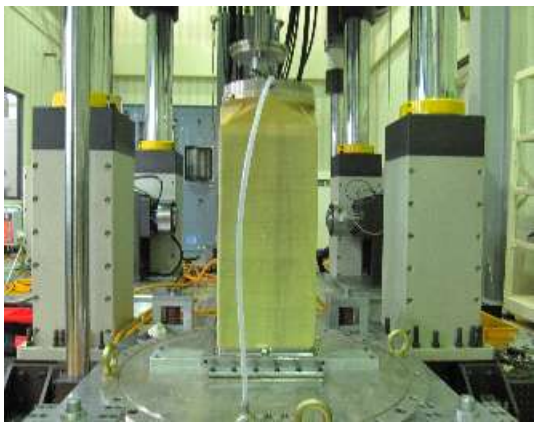
본 시스템은 그림과 같이 멤브레인을 씌운 사각 모양의 공시체와 수평 방향으로 하중을 제어하기 위한 로드셀과 유압 액츄에이터 2세트, 축 방향의 하중을 제어하기 위한 유압 액츄에이터와 로드셀 1세트로 구성된다.

수평 방향의 로드셀에 축 방향의 하중의 영향을 받지 않도록 수평 방향 구속판 하부에는 베어링으로 구성된 대차 모양의 가이드가 설치되어 있고 구속판은 멤브레인과의 마찰을 최소화하기 위해 테프론 재질의 접촉면으로 제작하였다.

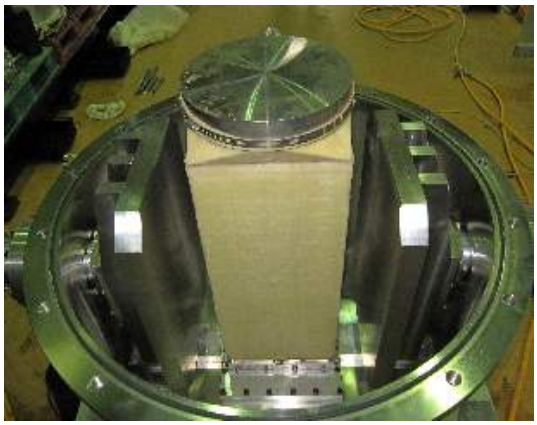
중간주응력을 제어하기 위해 시편은 사각단면(300mm×171mm)으로 중간주응력을 제어할 수 있도록 하였다. 이와 같은 조건 하에서 동적물성에 미치는 영향을 검토하기 위해 T-9(YJ-Rec-d20-PS) 시편으로 중간주응력 조건 중 평면변형률 조건으로 반복삼축압축시험을 수행하여 같은 최대입경 및 밀도를 갖는 시편(T-6)과 비교하였다[표 3.2.3]. 시험 결과 [그림 3.2.60]과 같이 일반적인 측방 구속압(σ_3) 하에서 수행된 시편에 비해 저변형률 수준에서 평면변형률 조건에서의 탄성계수가 상대적으로 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 향후 중간주응력 조건 및 평면변형률 조건 하에서의 시험이 필요한 경우, 이와 같은 장비와 시험 방법으로 보다 정확한 강도 및 강성을 얻을 수 있을 것이다. 그러나 보다 정확한 응력제어를 구현하여 물성을 얻기 위해서는 보다 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.



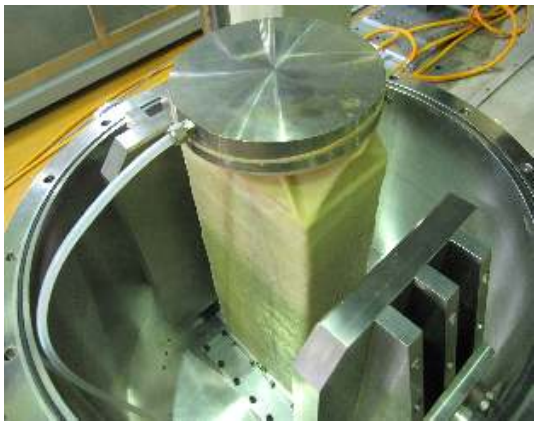
(a) 사각 시편 제작 몰드



(b) 중간주응력 시편



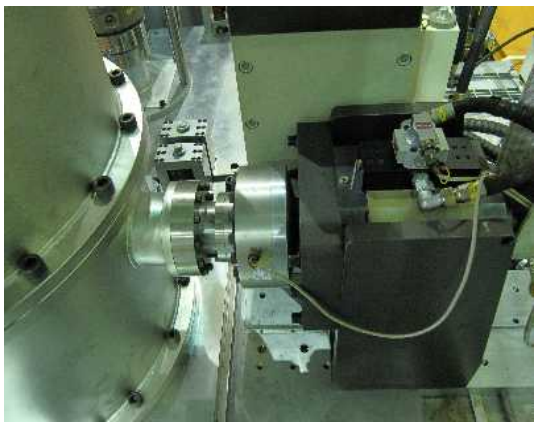
(c) 중간주응력 시편 및 셀 조립 I



(d) 중간주응력 시편 및 셀 조립 II

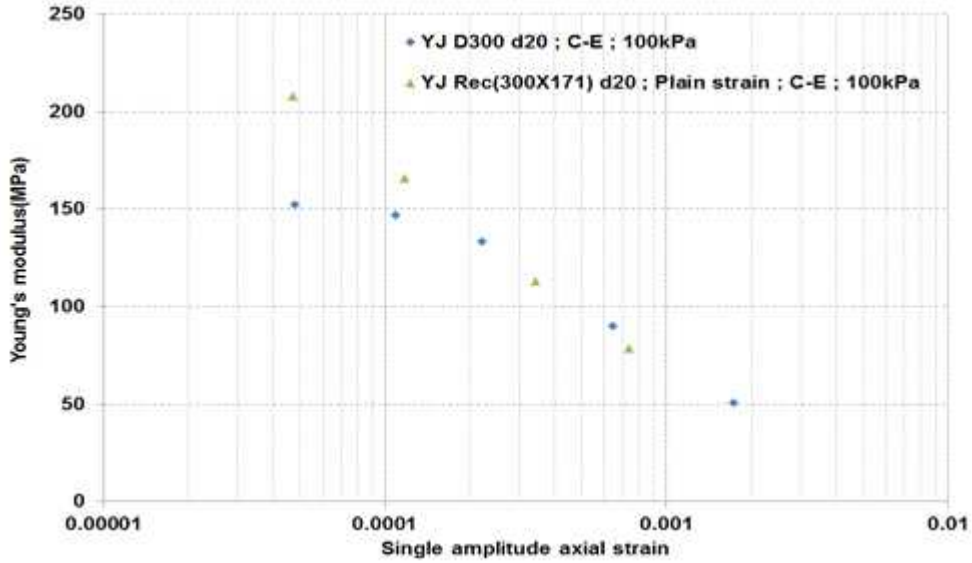


(e) 중간주응력시험 전경



(f) 중간주응력 제어용 액츄에이터

[그림 3.2.59] 중간주응력시험 과정



[그림 3.2.60] 평면변형률 조건 시험 결과 비교

4. 대입경 조립재료의 구조물별 동적물성

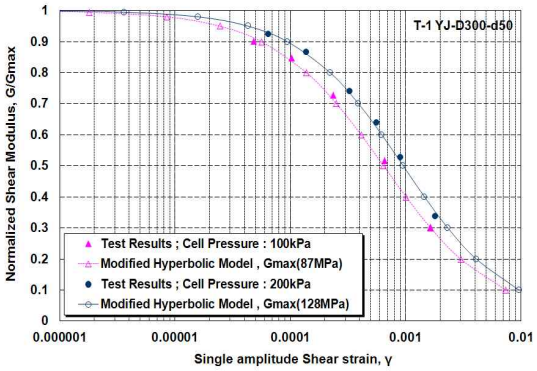
가. 탄성계수

본 연구에서는 앞서 설명된 재료들과 여러 가능한 조건에 따라 반복삼축압축시험을 수행하여 변형률에 따른 탄성계수 변화 그래프를 얻을 수 있었으며, 시험에서 산정된 탄성계수(Young's modulus, E)는 포아송비를 0.3으로 가정하고 전단탄성계수(Shear modulus, G)를 계산하여 G/G_{max} 곡선으로 정규화하여 결과를 정리하였다.

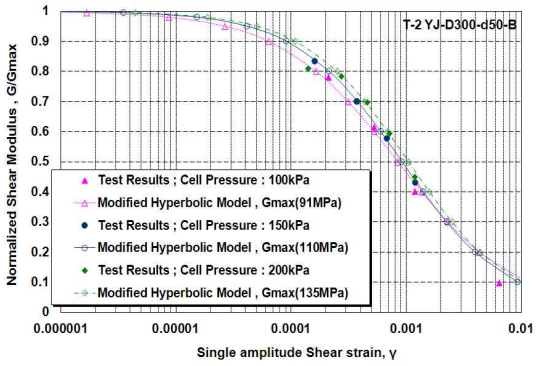
(1) 시험 재료별 정규화 탄성계수

같은 시편에서 다른 구속압에서 수행된 결과를 한 그래프에서 비교했을 때 구속압의 영향을 볼 수 있었다. 예를 들어 Modified Hyperbolic Model로 산정한 Gmax 정규화했을 때의 결과를 한 그래프로 나타냈을 때, 다음 그림들과 같이 구속압이 클 때 같은 변형률 수준에서 보다 높은 탄성계수를 보이는 일반적인 특징을 확인할 수 있었다.

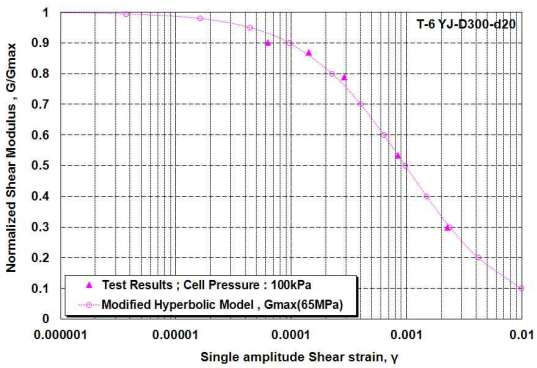
(가)댐 재료



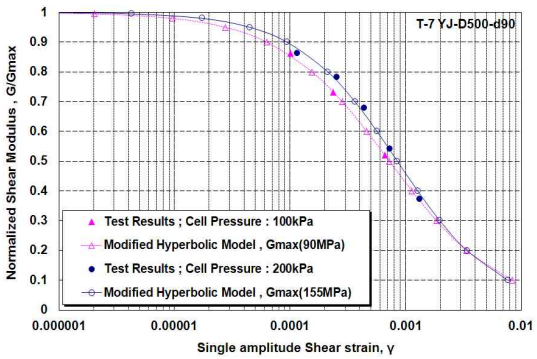
(a) YJ-D300-d50



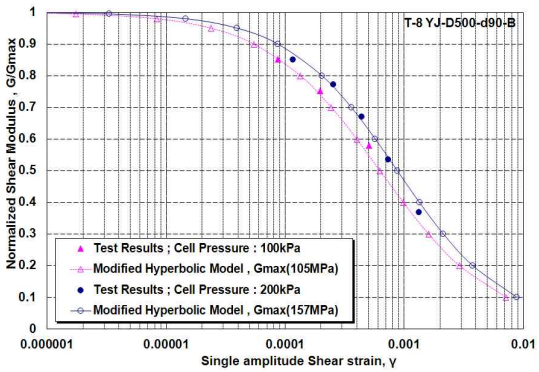
(b) YJ-D300-d50-B



(c) YJ-D300-d20



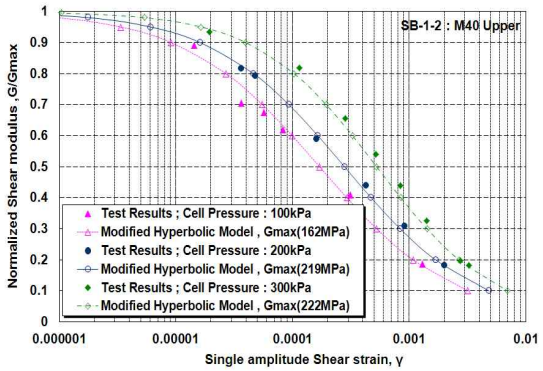
(d) YJ-D500-d90



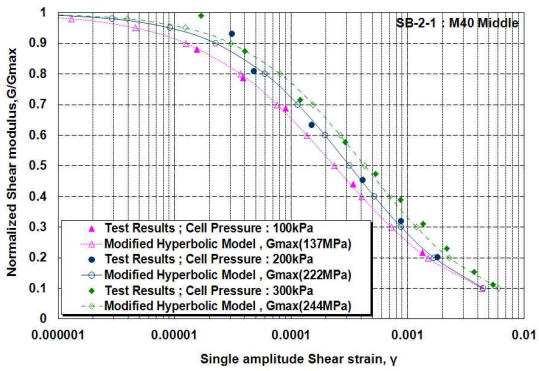
(e) YJ-D500-d90-B

[그림 3.2.61] 댐재료 조건별 정규화 전단탄성계수 곡선

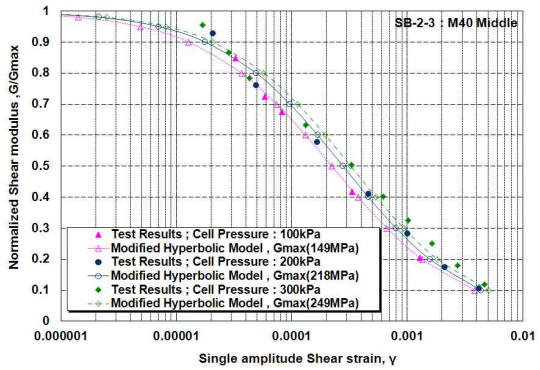
(나) 철도 강화노반 및 도로 보조기층 재료



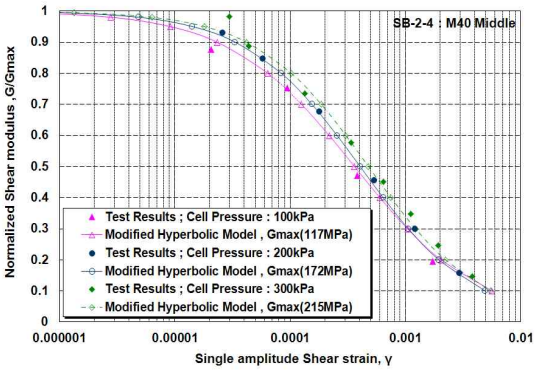
(a) SB-1-2



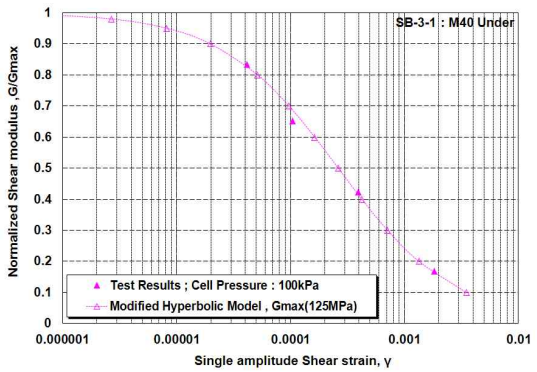
(b) SB-2-1



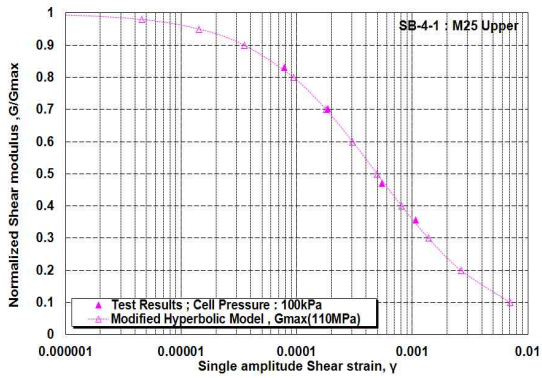
(c) SB-2-3



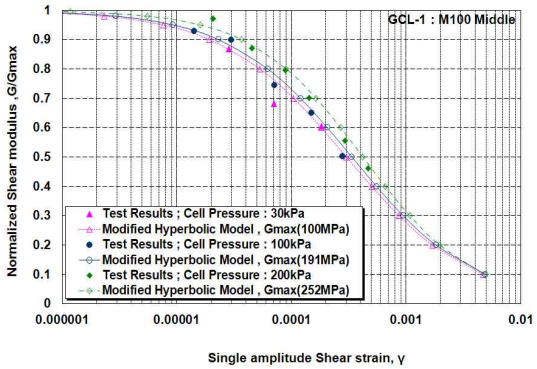
(d) SB-2-4



(e) SB-3-1



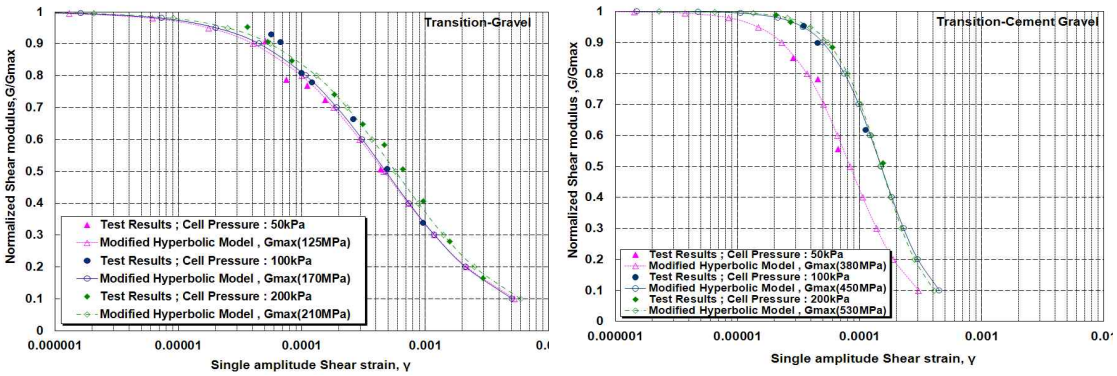
(f) SB-4-1



(g) GCS-1(M100)

[그림 3.2.62] 철도강화노반 및 도로 보조기층재료 조건별 정규화 전단탄성계수 곡선

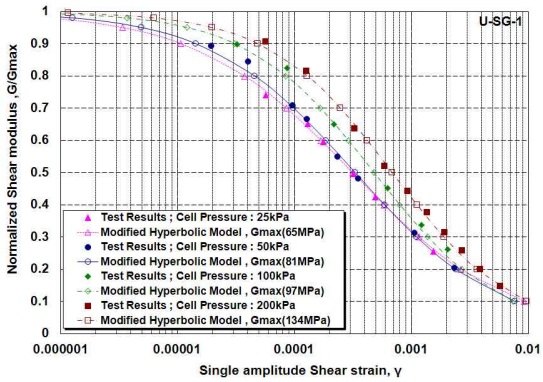
(다) 철도 접속부 성토 자갈 재료



(a) 접속부 일반 자갈 (b) 접속부 시멘트처리 자갈

[그림 3.2.63] 철도 접속부 성토 자갈 재료 조건별 정규화 전단탄성계수 곡선

(라) 고속철도 상부노반 재료



[그림 3.2.64] 고속철도 상부노반 재료 조건별 정규화 전단탄성계수 곡선

(2) 지반구조물별 탄성계수 시험 결과 수식화

(가) 개요

본 절에서는 시험결과를 기존에 제안된 G/G_{max} 수식을 이용해서 최대탄성계수와 수식에 포함된 Parameter를 곡선맞춤으로 평가제시하고자 하였다. 즉, 본 연구결과에서 산정된 탄성계수 결과를 전단탄성계수로 변환하고, Modified Hyperbolic Model(Daredeli,2001)과 Ramberg-Osgood Model에 적용해서 최대탄성계수를 결정하고, 각 수식의 parameter를 도출하여 시험 결과를 정리하였다.

① Modified Hyperbolic Model

Daredeli(1997)은 Hardin과 Drnevich(1972a, 1972b)의 Hyperbolic Model을 다음과 같은 Modified Hyperbolic Model로 수정 제시하였다.

$$G/Gmax = \frac{1}{1+(\frac{\gamma}{\gamma_r})^a} \qquad \text{[식 3.2.10]}$$

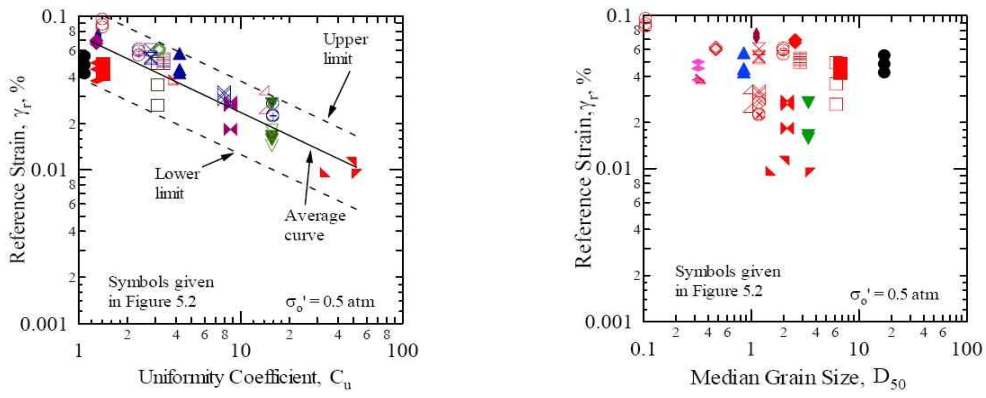
a: Curvature Coefficient

γ_r: Reference Strain(G/G_{max}=0.5일 때 전단변형률 γ)

[표 3.2.17] Hyperbolic model 및 수정 Hyperbolic model 계수 특징 비교

a	특징
Hardin and Drnevich(1972a, 1972b)	토질상수
Daredeli(1997)	곡선의 기울기

㉮ γ_r(Reference Strain)Menq(2003)



(a) Logγ_r-LogCu Relationships (b) Logγ_r-LogD_{50} Relationships

[그림 3.2.65] γ_r와 균등계수 및 입경 관계

γ_r는 균등계수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 설명되고 있다(Menq, 2003). 즉 위의 [그림 3.2.65(a)]와 같이 균등계수값이 커지면 커질수록 γ_r값이 작아짐을 알 수 있다.

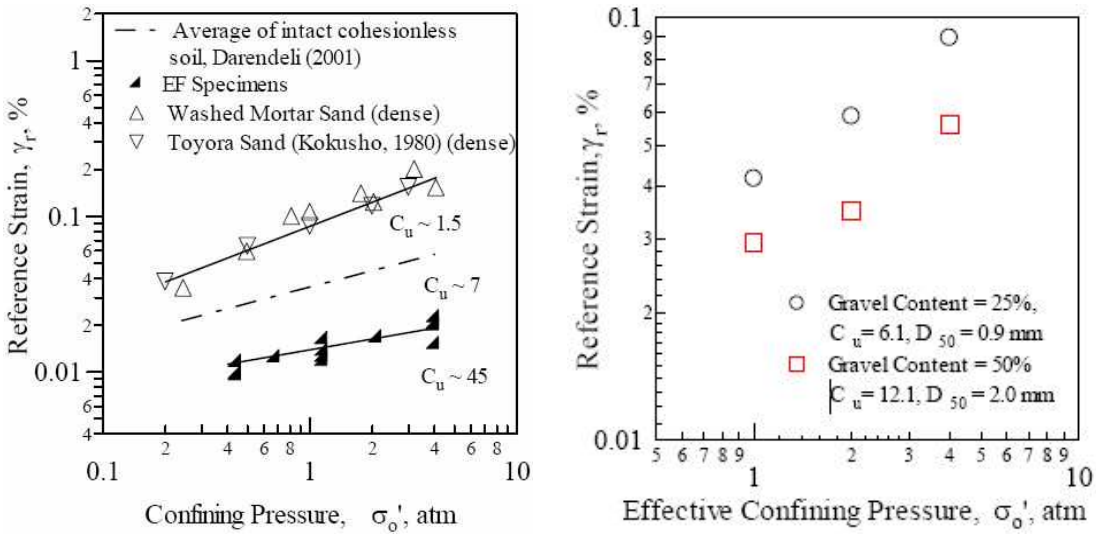
또한 D_{50}은 γ_r은 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그래서 Daredeli(1997)은 균등계수값에 따른 γ_r의 경험식을 제시한 바 있다.

· $\gamma_r = 0.12 \times Cu^{-0.6} \times \left(\frac{\sigma_o'}{Pa}\right)$, $S_{\gamma_r \mid Cu, \sigma_o'} = 0.014\%$(자갈 및 사질토) **[식 3.2.11]**

σ'_o: Mean effective stress

Pa: Atmospheric pressure

또한 구속압에 따른 parameters과의 상관성을 제시하며, 기본적인 물성 및 시험조건에서 G/G_{max}의 대표곡선을 예측할 수 있는 기본 데이터를 제시하기도 하였다.



(a) 모래와 자갈질 재료의 Cu, σ'_o에 따른 γ_r의 경향

(b) 구속압에 따른 γ_r의 경향 (Tanaka et al., 1987)

[그림 3.2.66] 재료상수(γ_r, *a*)들과 구속압 및 균등계수 관계

즉, 관련 연구 결과에서 균등계수값이 커질수록 γ_r값이 작아지고, 구속압이 커질수록 γ_r값은 커지는 경향을 볼 수 있었으며, 반면 균등계수값이 작은 재료에서 γ_r의

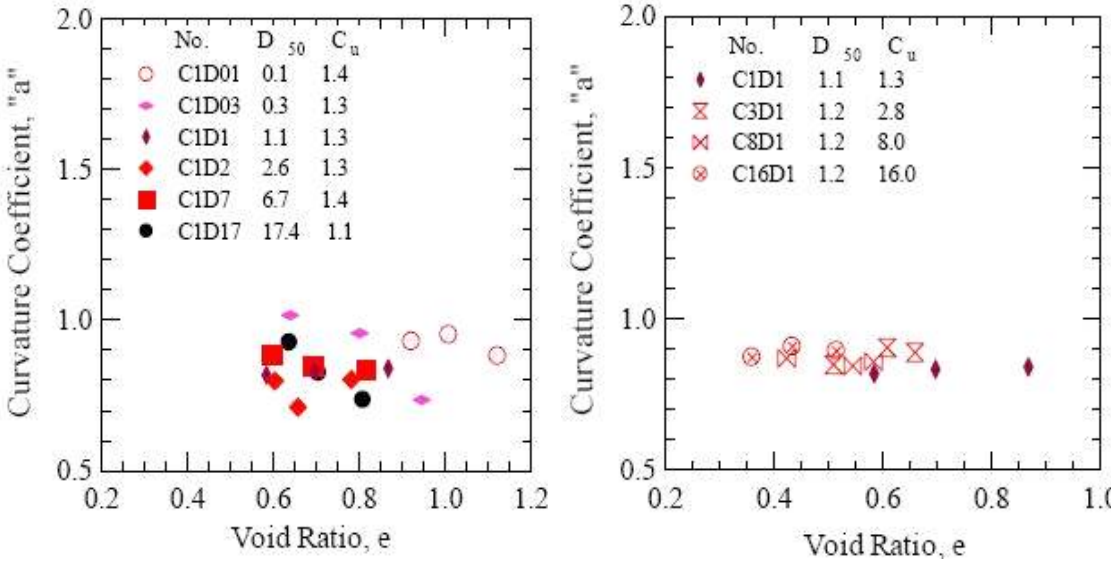
변동 범위가 더 큼을 알 수 있었다. 그러나 Menq과 달리 Tanaka et al., (1987)는 D_{50}이 작을수록 γ_r크다고 나타내기도 하였다.

㉯ a(Curvature Coefficient)

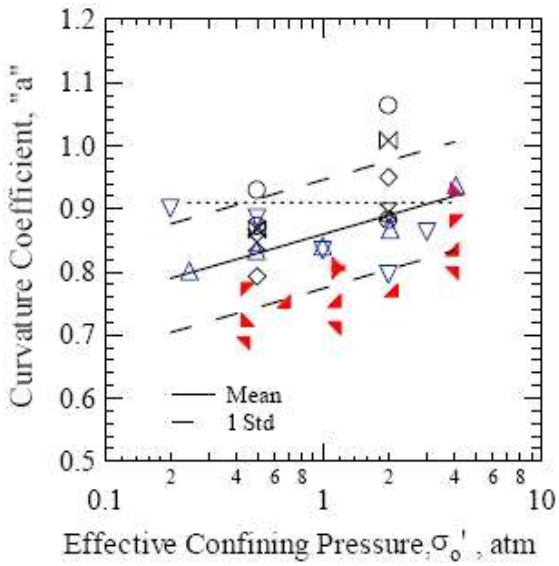
Menq(2003)은 e, Cu값은 곡률계수 "a"에 큰 영향을 미치지 않고 일정하며, 반면 구속압은 커질수록 곡률계수 "a"는 미소하게 증가하는 결과를 제시하였다. 이를 Darendel(2001)는 다음과 같은 경험식으로 나타내기도 하였다. 일반적으로 "a"값은 0.8-1사이의 값을 가지는 것으로 제시되었다.

$$a = 0.86 + 0.1 \times \log(\frac{\sigma_o^{'}}{Pa}), S_{a \mid \sigma_o^{'}} = 0.09 \qquad \text{[식 3.2.12]}$$

σ'_o: Mean effective stress
Pa: Atmospheric pressure
$S_{a \mid \sigma_o^{'}}$: Conditional standard deviation



(a) a-e Relationships (b) a-e Relationships



(c) 구속압에 따른 a의 경향(Menq)

[그림 3.2.67] "*a*"와 간극비 및 구속압과의 관계

② Ramberg-Osgood Model

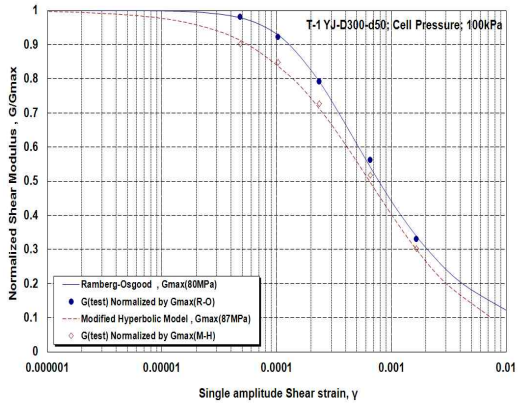
Ramberg-Osgood Model은 간략한 공진주시험 결과를 이용하여 Curve fitting Parameters를 얻을 수 있어서 지반의 변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 획득하는데 주로 이용되며, 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma = G' \cdot \gamma + C(G' \cdot \gamma)^R \qquad \text{[식 3.2.13]}$$
$$\gamma - G' \cdot \gamma = C(G' \cdot \gamma)^R$$
$$\log(\gamma - G') = \log C + R\log(G' \cdot \gamma)$$
$$y = Rx + \log C$$
$$G' = G/G_{max} = \text{Normalized Shear modulus}$$

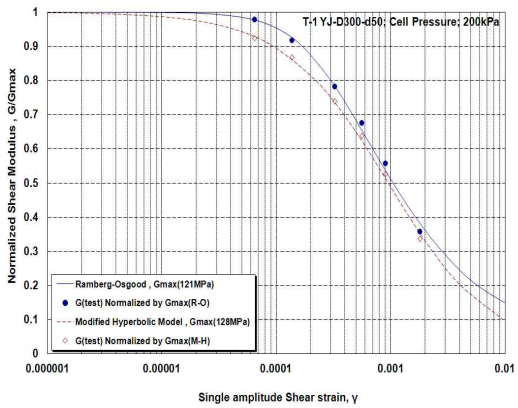
(나) 지반구조물별 탄성계수 수식화 결과

① OO댐 쇄석 재료

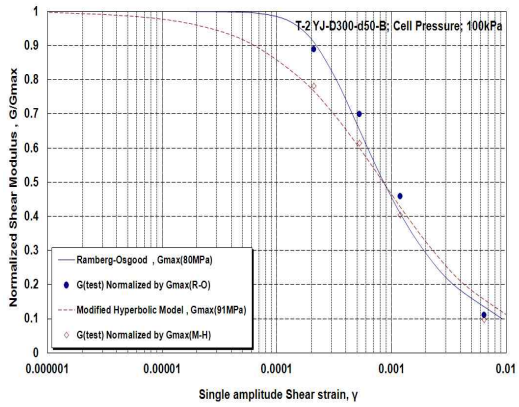
앞서 재료와 시편에 대한 설명에서 언급한 바와 같이 OO댐 재료에 대해서는 5가지 종류의 시편에 대해 실험을 수행하였고 각 시편에서는 2-3개의 구속압에 대해 반복삼축압축시험을 수행하였다. 그 결과 얻어진 축변형률에 대한 탄성계수를 포아송비 0.3을 가정해서 전단탄성계수로 변환하였다. 이 결과를 수정쌍곡선식(Modified Hyperbolic Model)과 Ramberg-Osgood Medel로 곡선맞춤해서 얻은 최대전단탄성계수로 정규화하여 다음 그림 및 표와 같이 정규화 전단탄성계수 모델의 회귀분석 결과를 얻을 수 있었다.

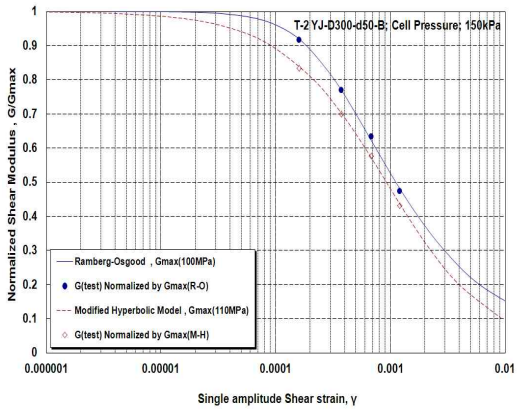


(a)

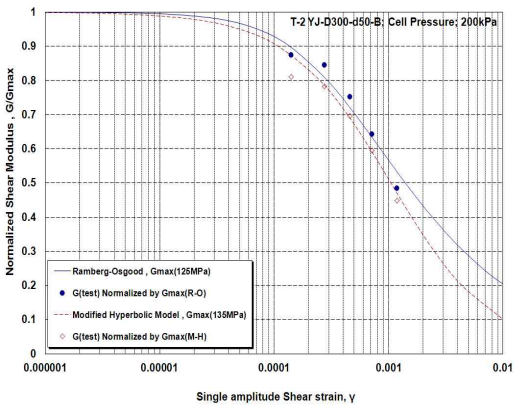


(b)

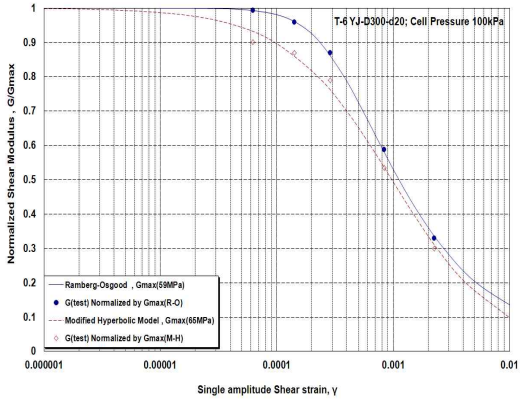




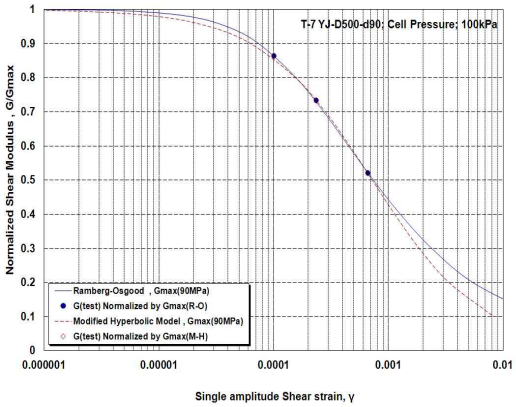
(c)



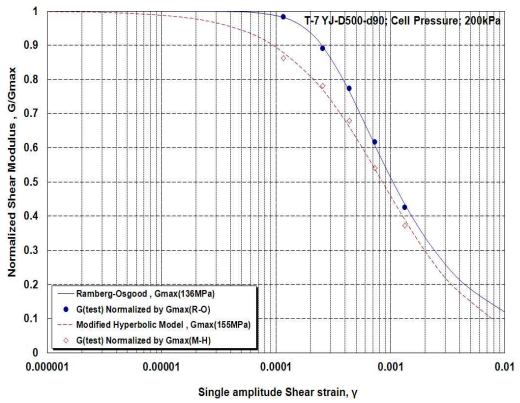
(d)



(e)

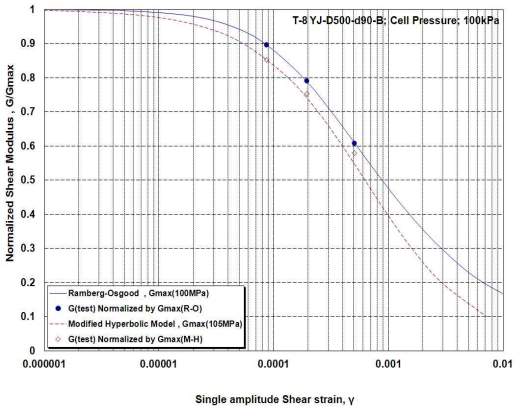


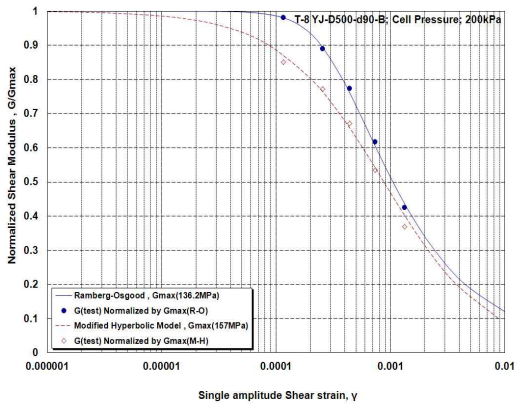
(f)



(g)

(h)





(i)

(j)

[그림 3.2.68] 댐재료 정규화 전단탄성계수 곡선의 회귀분석

[표 3.2.18] 댐재료 Modified Hyperbolic Model 회귀분석 결과

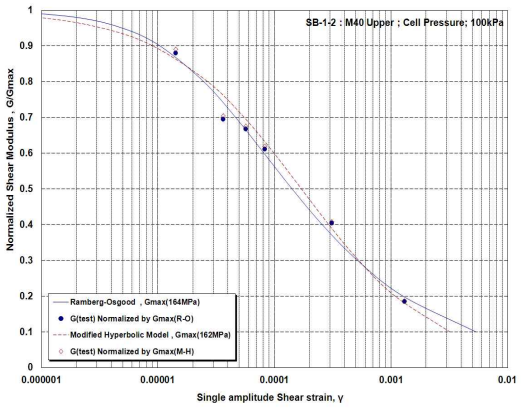
	Cell Pressure (kPa)	a	γ_r	Gmax(MPa)
T-6 YJ-D300-d20	100	0.95	0.000975	65
T-1 YJ-D300-d50	100	0.9	0.000645612	87
	200	0.95	0.000954801	128
T-2 YJ-D300-d50-B	100	0.85	0.00084733	91
	150	0.95	0.00092325	110
	200	0.97	0.00104885	135
T-7 YJ-D500-d90	100	0.9	0.000725	90
	200	1	0.00085	155
T-8 YJ-D300-d90-B	100	0.9	0.000625	105
	200	0.95	0.000875	157

[표 3.2.19] 댐재료 Ramberg Osgood Model 회귀분석 결과

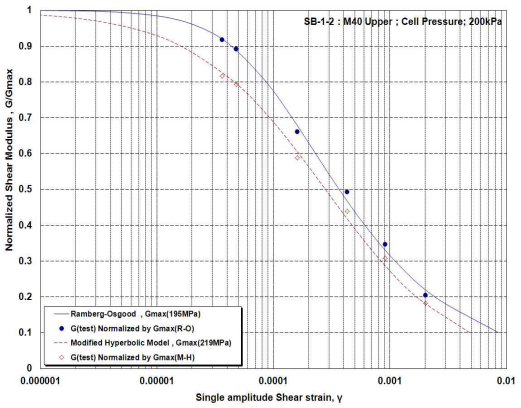
	Cell Pressure (kPa)	C	logC	R	Gmax (MPa)
T-6 YJ-D300-d20	100	22182997.96793	7.346	3.26	59
T-1 YJ-D300-d50	100	1588513.56769	6.201	2.82	80
	200	654754.89384	5.8161	2.77	121
T-2 YJ-D300-d50-B	100	4719242918.44714	9.6739	3.87	80
	150	830383.93847	5.9193	2.82	100
	200	9738.31116	3.9885	2.26	125
T-7 YJ-D500-d90	100	24898.75340	4.3962	2.28	90
	200	372773206.79767	8.5714	3.61	136
T-8 YJ-D300-d90-B	100	15263.19424	4.1836	2.25	100
	200	261906803.08285	8.4181	3.57	136.2

② 철도 강화노반 및 도로 보조기층 재료

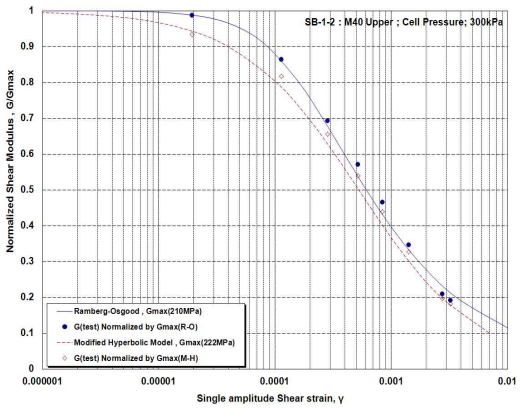
두 번째 재료로 강화노반(reinforced roadbed) 재료(보조도상 ; sub-ballast, 입도조정층 ; graded crushed stone)에 대해서 시험 재료 및 시편 조건에서 소개한 시편 조건과 같이 시험을 수행하였고 각 시편에서는 2-3개의 구속압에 대해 반복삼축압축시험을 수행하였다. 그 결과 얻어진 축변형률에 대한 탄성계수를 포아송비 0.3을 가정해서 전단탄성계수로 변환하였다. 이 결과를 수정쌍곡선식(Modified Hyperbolic Model)과 Ramberg-Osgood Medel로 곡선맞춤해서 얻은 최대전단탄성계수로 정규화하여 다음 그림 및 표와 같이 정규화 전단탄성계수 모델의 회귀분석 결과를 얻을 수 있었다.


SB-1-2 : M40 Upper ; Cell Pressure; 100kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(164MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(162MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

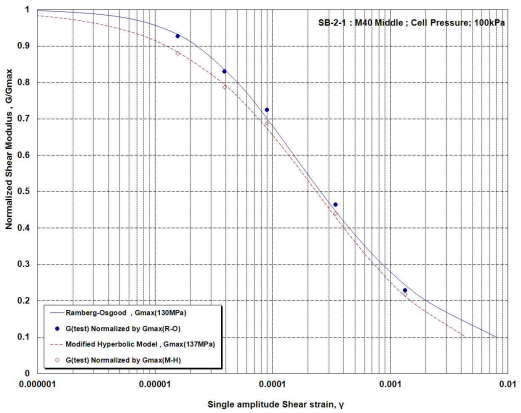
(a)


SB-1-2 : M40 Upper ; Cell Pressure; 200kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(195MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(219MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

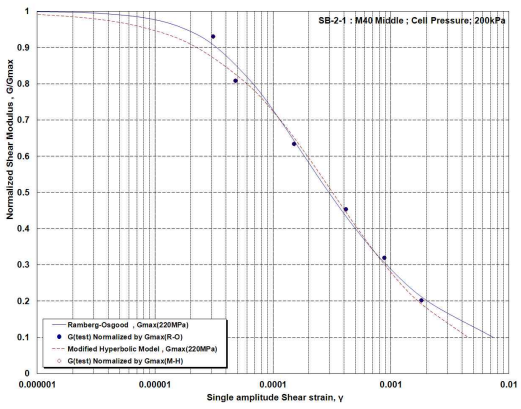
(b)


SB-1-2 : M40 Upper ; Cell Pressure; 300kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(210MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(222MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

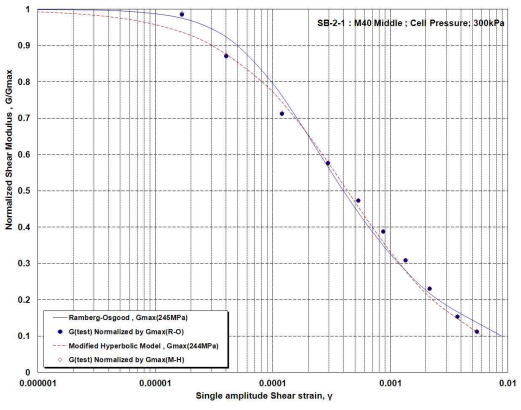
(c)


SB-2-1 : M40 Middle ; Cell Pressure; 100kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(130MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(137MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

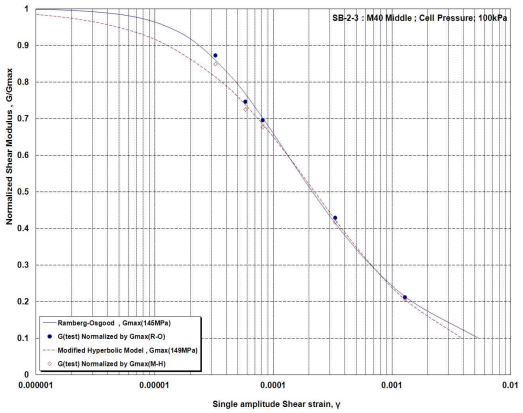
(d)


SB-2-1 : M40 Middle ; Cell Pressure; 200kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(220MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(220MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

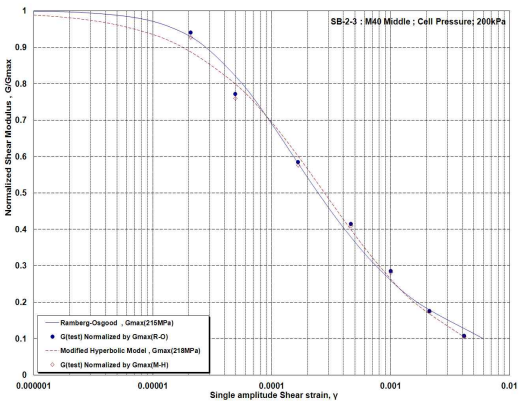
(e)


SB-2-1 : M40 Middle ; Cell Pressure; 300kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(246MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(244MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

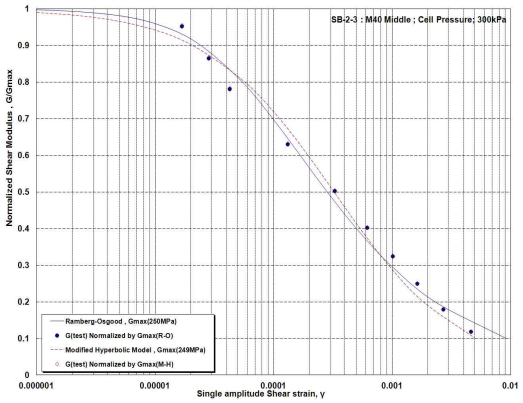
(f)


SB-2-3 : M40 Middle ; Cell Pressure; 100kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(145MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(149MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

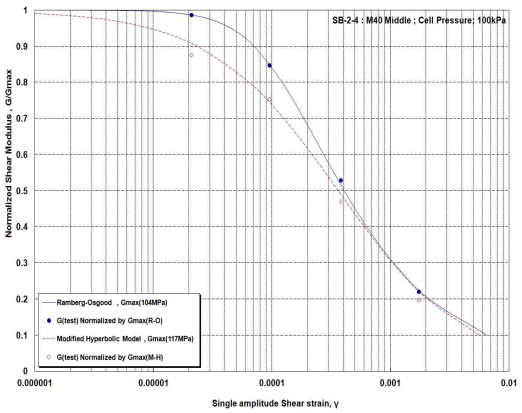
(g)


SB-2-3 : M40 Middle ; Cell Pressure; 200kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(215MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(218MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

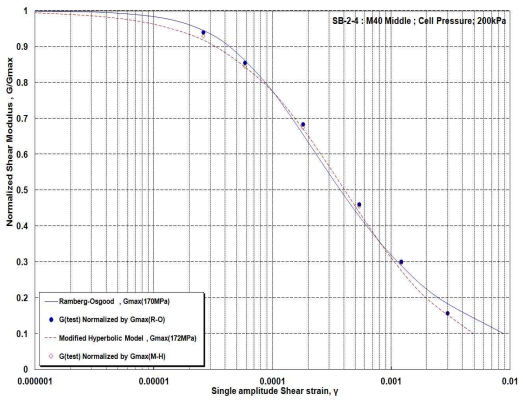
(h)


SB-2-3 : M40 Middle ; Cell Pressure; 300kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(260MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(249MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

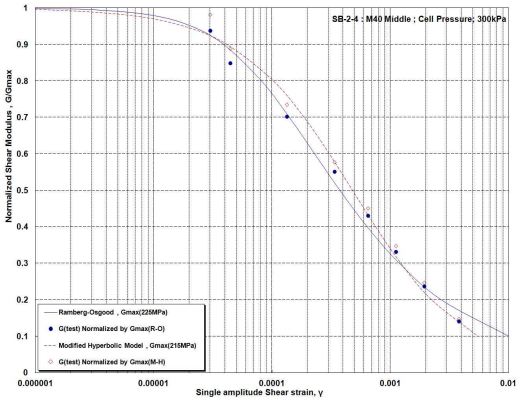
(i)


SB-2-4 : M40 Middle ; Cell Pressure; 100kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(104MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(117MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

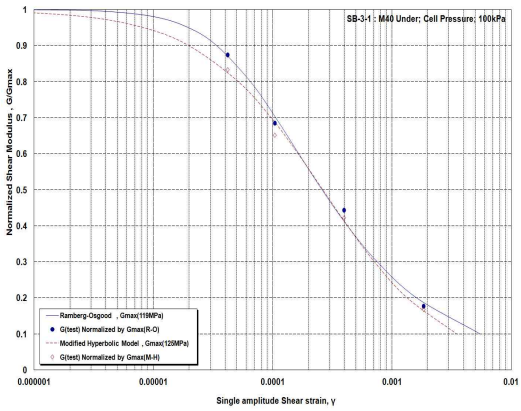
(j)


SB-2-4 : M40 Middle ; Cell Pressure; 200kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(170MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(172MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

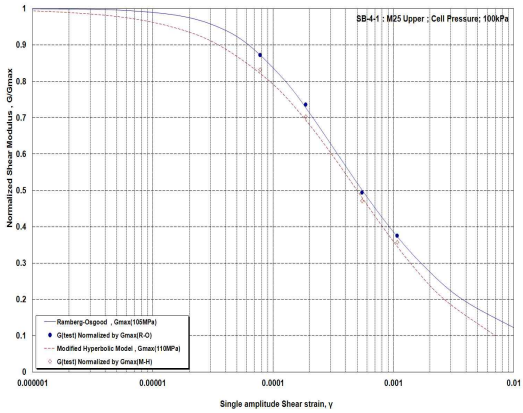
(k)


SB-2-4 : M40 Middle ; Cell Pressure; 300kPa
Normalized Shear Modulus , G/Gmax
Single amplitude Shear strain, γ
Ramberg-Osgood , Gmax(226MPa)
G(test) Normalized by Gmax(R-O)
Modified Hyperbolic Model , Gmax(216MPa)
G(test) Normalized by Gmax(M-H)

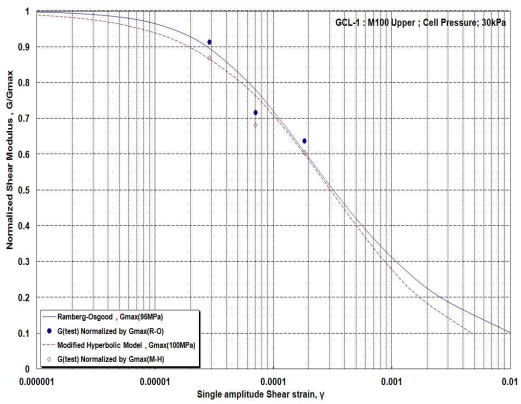
(l)



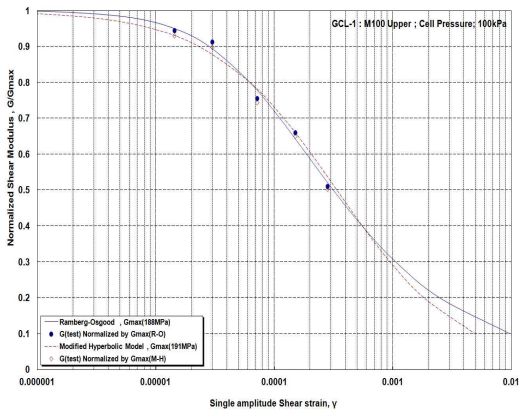
(m)



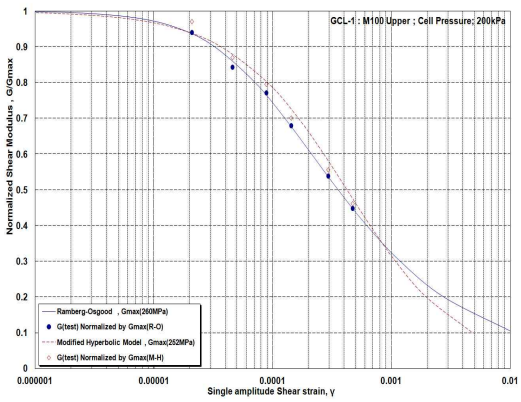
(n)



(o)



(p)



(q)

[그림 3.2.69] 철도 강화노반 및 도로 보조기층재료 정규화 전단탄성계수 곡선의 회귀분석

[표 3.2.20] 고속철도 강화노반 및 도로 보조기층 재료 Modified Hyperbolic Model 회귀분석 겨롸

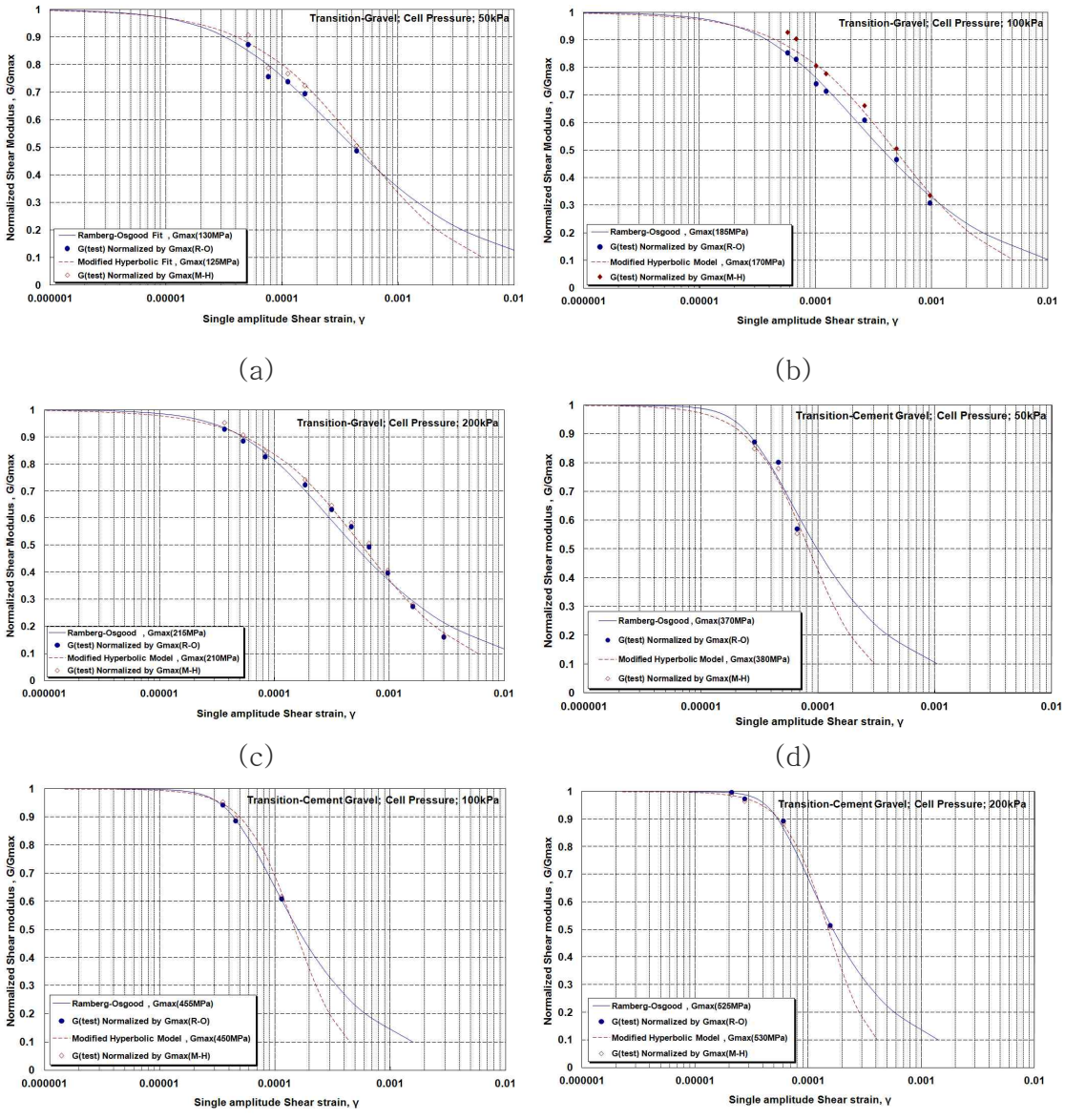
	Cell Pressure (kPa)	a	γ_r	Gmax (MPa)
SB-1-2 : M40 Upper	100	0.75	0.000170615	162
	200	0.77	0.000279319	219
	300	0.85	0.00052621	222
SB-2-1 : M40 Middle	100	0.75	0.000235077	137
	200	0.83	0.000319068	220
	300	0.83	0.00043098	244
SB-2-3 : M40 Middle	100	0.77	0.00022249	149
	200	0.8	0.000277928	218
	300	0.8	0.000324005	249
SB-2-4 : M40 Middle	100	0.8	0.0003625	117
	200	0.88	0.0004056	172
	300	0.9	0.0004789	215
SB-3-1 : M40 Middle	100	0.85	0.000262765	125
SB-4-1 : M25 Middle	100	0.83	0.000497492	110
GCS-1 : M100 Upper	30	0.8	0.00030228	100
	100	0.82	0.00033737	191
	200	0.9	0.00042172	252

[표 3.2.21] 고속철도 강화노반 및 도로 보조기층 재료 Ramberg Osgood Model 회귀분석 결과

	Cell Pressure (kPa)	C	logC	R	Gmax (MPa)
SB-1-2 : M40 Upper	100	32836.46804	4.5164	2.1	164
	200	213181.73440	5.3287	2.42	195
	300	440117.39752	5.6436	2.61	210
SB-2-1 : M40 Middle	100	46493.32769	4.6674	2.2	130
	200	179802.18176	5.2548	2.38	220
	300	288088.17903	5.4595	2.48	244
SB-2-3 : M40 Middle	100	264633.66835	5.4226	2.37	145
	200	261664.38467	5.4177	2.39	215
	300	33510.19655	4.5252	2.18	250
SB-2-4 : M40 Middle	100	9180411.5046	6.9629	2.89	104
	200	180301.71352	5.256	2.41	170
	300	78341.07129	4.894	2.31	225
SB-3-1 : M40 Middle	100	807325.07246	5.907	2.52	119
SB-4-1 : M25 Middle	100	85808.17706	4.9335	2.39	105
GCS-1 : M100 Upper	30	30390.99540	4.4827	2.18	95
	100	35512.32900	4.5856	2.21	188
	200	36751.67766	4.5653	2.22	260

③ 철도 접속부 성토 자갈 재료

본 연구에서 주요 지반구조물로서 고속철도 접속부 자갈재료 및 시멘트처리 자갈재료에 대해서도 반복삼축압축시험을 수행하였다. 본 실험에서도 포아송비 0.3을 가정해서 전단탄성계수로 변환하였여, 이 결과를 수정쌍곡선식(Modified Hyperbolic Model)과 Ramberg-Osgood Medel로 곡선맞춤해서 얻은 최대전단탄성계수로 정규화하여 다음 그림 및 표와 같이 정규화 전단탄성계수 모델의 회귀분석 결과를 얻을 수 있었다.



[그림 3.2.70] 철도 접속부 성토 자갈재료 정규화 전단탄성계수 곡선의 회귀분석

[표 3.2.22] 철도 접속부 자갈재료 Modified Hyperbolic Model 회귀분석 결과

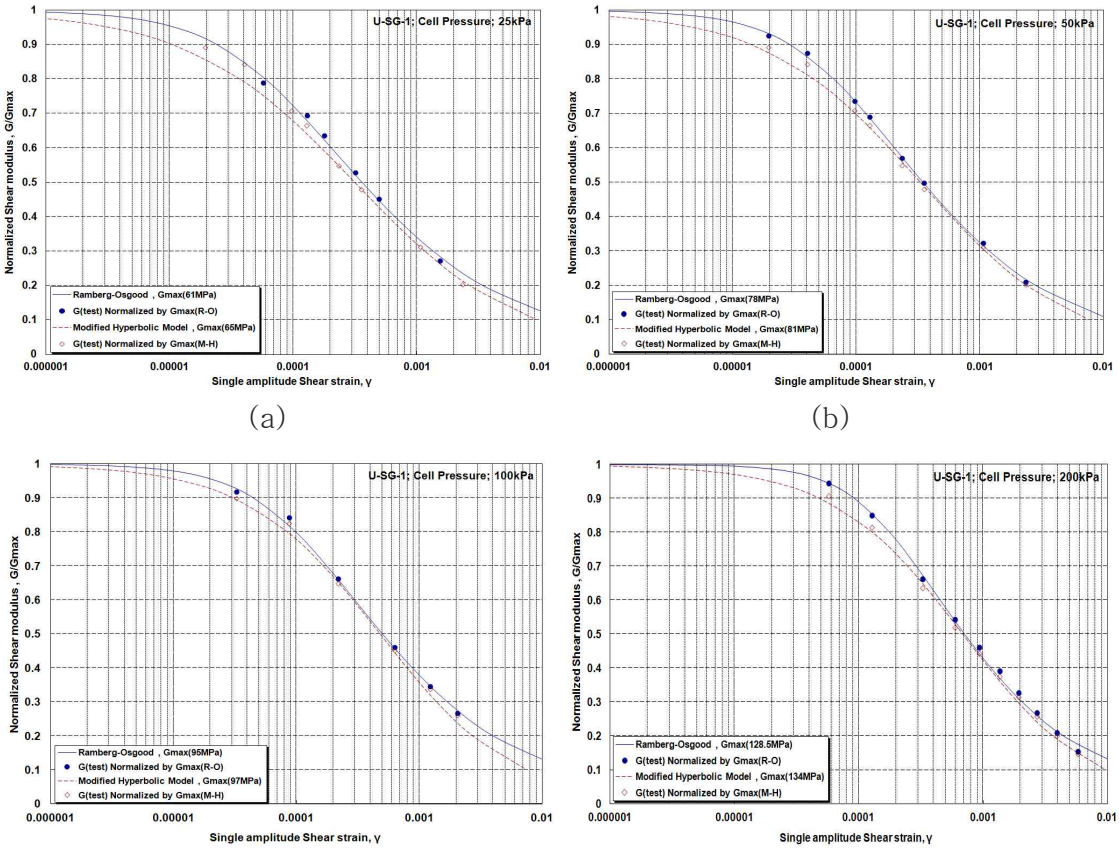
	Cell Pressure (kPa)	a	γ_r	Gmax(MPa)
접속부 자갈	50	0.9	0.000465883	125
	100	0.93	0.000480969	170
	200	0.94	0.000576028	210
접속부 시멘트 처리	50	1.7	0.000084	380
	100	2	0.00015	450
	200	2.2	0.00015	530

[표 3.2.23] 철도 접속부 자갈재료 Ramberg Osgood Model 회귀분석 결과

	Cell Pressure (kPa)	C	logC	R	Gmax (MPa)
접속부 자갈	50	13096	4.117	2.11	130
	100	61869	4.7915	2.28	180
	200	66436.35579	4.8224	2.33	215
접속부 시멘트 처리	50	3150928492752	12.498	3.90	370
	100	9856603556866	12.994	4.16	455
	200	75852334791410300	16.88	5.13	525

④ 고속철도 상부노반 재료

마지막으로 고속철도 토공구간 상부노반에 사용되는 조립재료에 대해 반복삼축압축시험을 수행하였다. 그 결과 얻어진 축변형률에 대한 탄성계수를 포아송비 0.3을 가정해서 전단탄성계수로 변환하였다. 이 결과를 수정쌍곡선식(Modified Hyperbolic Model)과 Ramberg-Osgood Medel로 곡선맞춤해서 얻은 최대전단탄성계수로 정규화하여 다음 그림 및 표와 같이 정규화 전단탄성계수 모델의 회귀분석 결과를 얻을 수 있었다.



[그림 3.2.71] 고속철도 상부노반 재료 정규화 전단탄성계수 곡선의 회귀분석

[표 3.2.24] 고속철도 상부노반 재료 Modified Hyperbolic Model 회귀분석 결과

	Cell Pressure (kPa)	a	γ_r	Gmax(MPa)
OO 고속철도 상부노반	25	0.65	0.000315288	65
	50	0.7	0.000331318	81
	100	0.8	0.000481492	97
	200	0.83	0.000686806	134

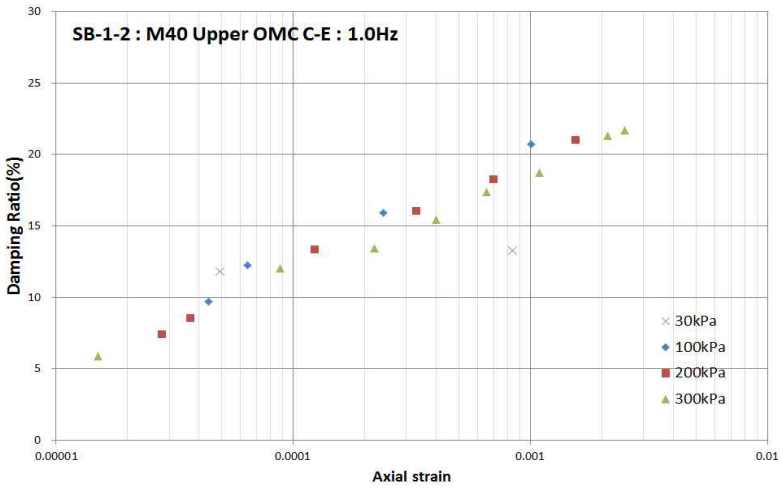
[표 3.2.25] 고속철도 상부노반 재료 Ramberg Osgood Model 회귀분석 결과

	Cell Pressure (kPa)	C	logC	R	Gmax (MPa)
OO 고속철도 상부노반	25	8078.79320	3.9073	2.04	61
	50	24721.00474	4.3931	2.17	78
	100	21423.21414	4.3309	2.2	95
	200	166459.81306	5.2188	2.51	128.5

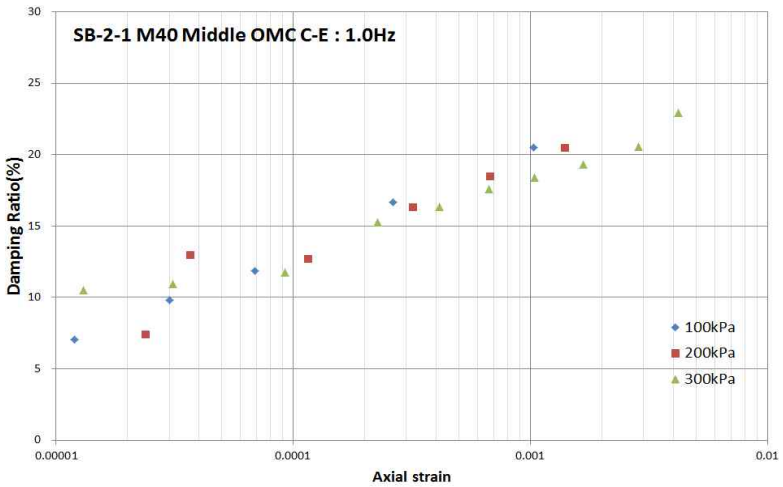
나. 감쇠비

지반재료가 반복하중을 받을 때 반복적인 진동을 통해 에너지가 소산되며, 지반의 동적 거동 시 이러한 에너지 소산을 고려하기 위해 도입된 물성이 감쇠비이다. 이러한 지반 재료의 감쇠비 측정은 공진주시험, 비틂전단시험, 삼축압축시험 등을 통하여 구할 수 있다. 시험 중 하중의 한 사이클에서 소멸된 에너지의 양과 그 싸이클 동안 시편에 저장되는 최대 변형에너지를 이용하여 감쇠비를 계산할 수 있다. 소멸된 에너지는 응력-변형률 이력 곡선의 면적으로부터 구할 수 있으며 이에 대한 설명은 앞에서 소개된 바 있다.

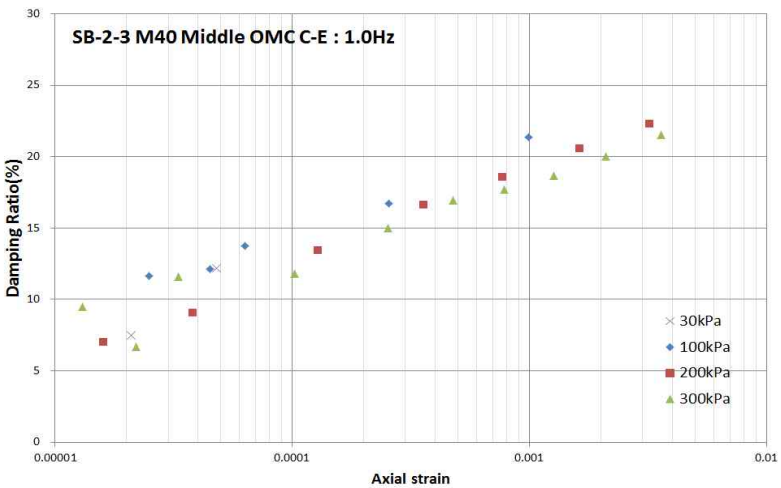
본 연구에서는 대입경 조립지반 재료에 대한 감쇠비를 반복삼축압축시험으로 산정하였으며, 대상 재료는 앞선 사용된 재료 중에 도로 보조기층 및 철도 강화노반 재료, 철도 접속부 일반자갈 재료 및 고속철도 상부노반 재료이다. 시험 결과는 다음 그림과 같다.


SB-1-2 : M40 Upper OMC C-E : 1.0Hz
Damping Ratio(%)
Axial strain
30kPa
100kPa
200kPa
300kPa

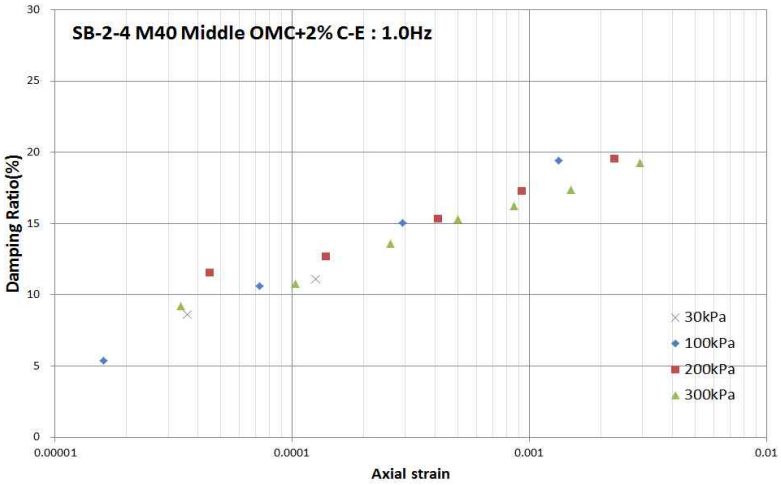
(a)


SB-2-1 M40 Middle OMC C-E : 1.0Hz
Damping Ratio(%)
Axial strain
100kPa
200kPa
300kPa

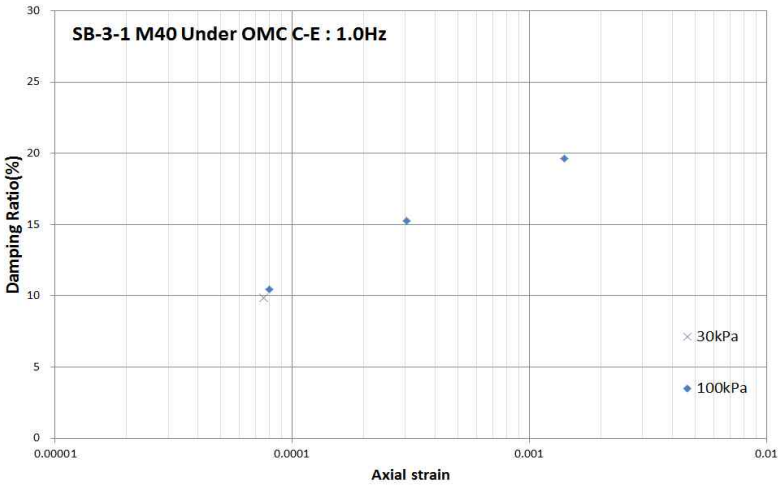
(b)


SB-2-3 M40 Middle OMC C-E : 1.0Hz
Damping Ratio(%)
Axial strain
30kPa
100kPa
200kPa
300kPa

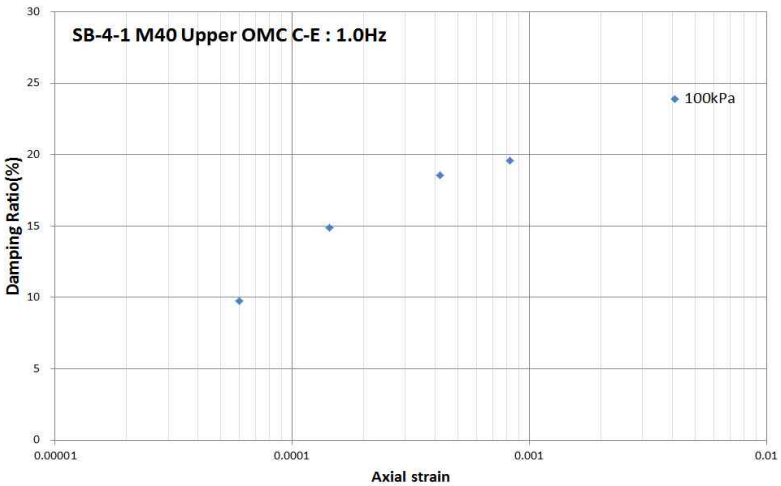
(c)


SB-2-4 M40 Middle OMC+2% C-E : 1.0Hz
Damping Ratio(%)
Axial strain
30kPa
100kPa
200kPa
300kPa

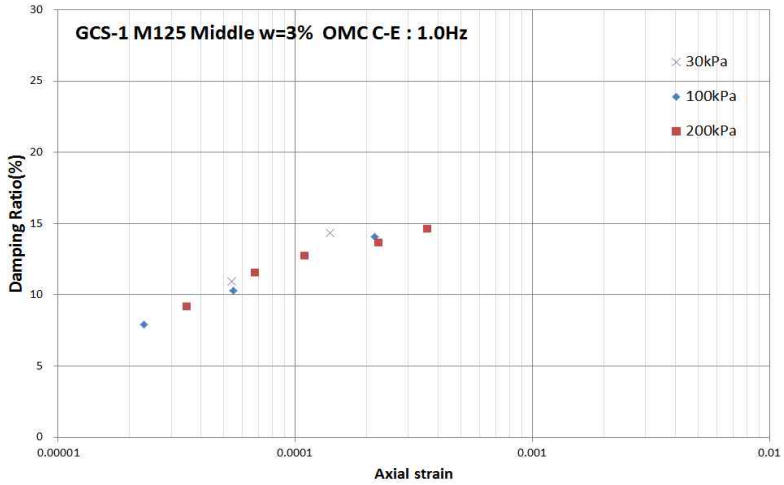
(d)


SB-3-1 M40 Under OMC C-E : 1.0Hz
Damping Ratio(%)
Axial strain
30kPa
100kPa

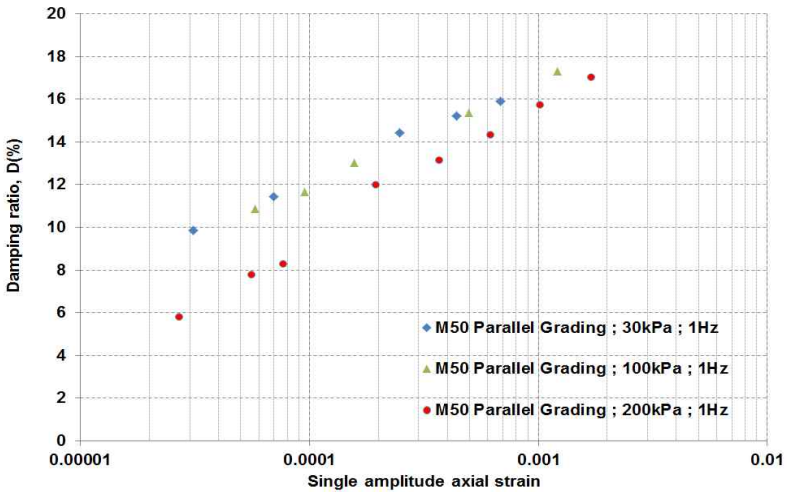
(e)


SB-4-1 M40 Upper OMC C-E : 1.0Hz
Damping Ratio(%)
Axial strain
100kPa

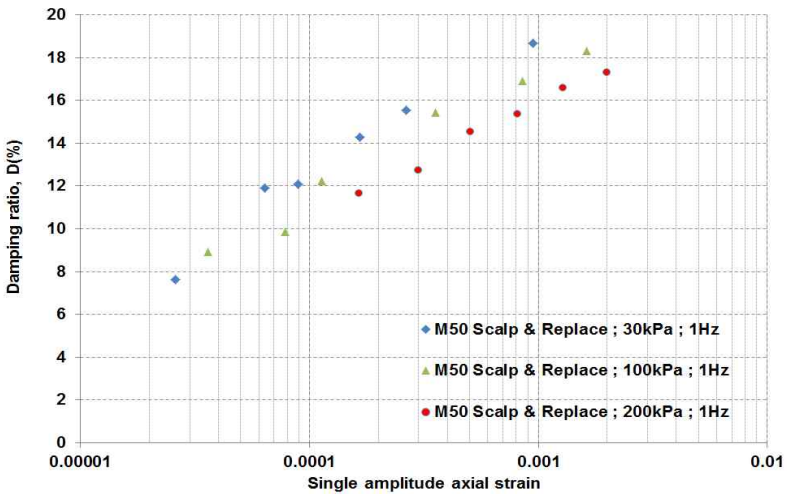
(f)


GCS-1 M125 Middle w=3% OMC C-E : 1.0Hz
30kPa
100kPa
200kPa
Damping Ratio(%)
Axial strain
0
5
10
15
20
25
30
0.00001
0.0001
0.001
0.01

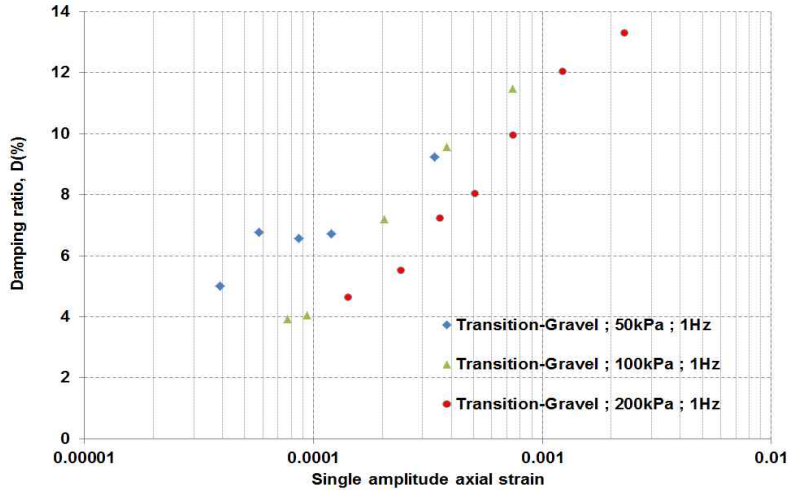
(g)


M50 Parallel Grading ; 30kPa ; 1Hz
M50 Parallel Grading ; 100kPa ; 1Hz
M50 Parallel Grading ; 200kPa ; 1Hz
Damping ratio, D(%)
Single amplitude axial strain
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0.00001
0.0001
0.001
0.01

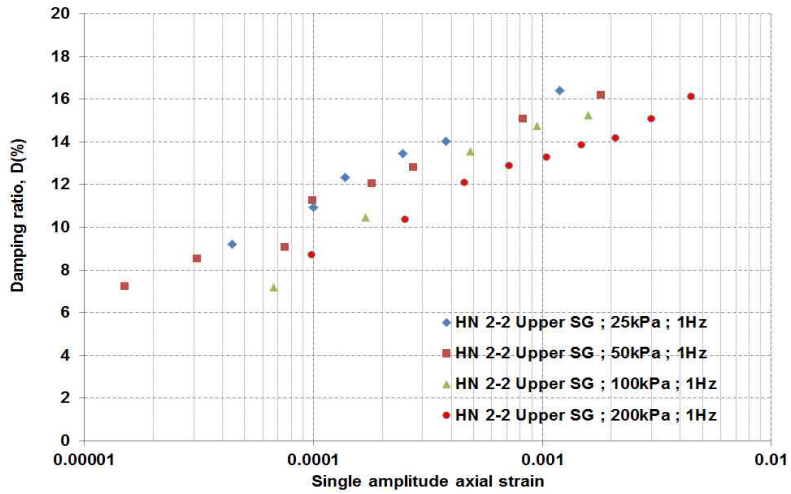
(h)


M50 Scalp & Replace ; 30kPa ; 1Hz
M50 Scalp & Replace ; 100kPa ; 1Hz
M50 Scalp & Replace ; 200kPa ; 1Hz
Damping ratio, D(%)
Single amplitude axial strain
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0.00001
0.0001
0.001
0.01

(i)



(j)



(k)

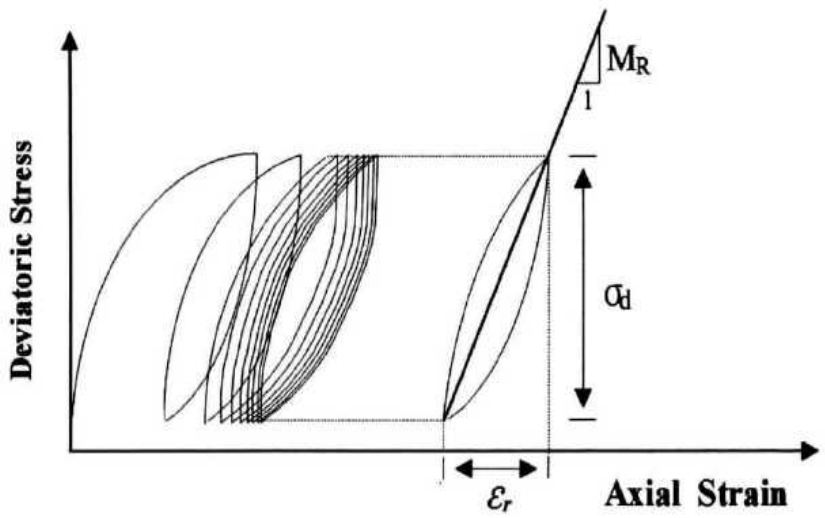
[그림 3.2.72] 재료 및 시험 조건별 감쇠비 시험 결과

다. 회복탄성계수

(1) 개요

노반은 열차주행에 의해 윤하중을 반복적으로 받는 구조로서, 열차의 지속적인 반복하중이 작용하여 노반 내부에 다양한 응력의 변화와 변형이 발생하게 된다. 노반 내부에 이러한 반복하중이 지속적으로 작용하게 되면 탄성변형과 회복변형이 반복되고 반복횟수의 증가에 따라 소성변형도 누적되면서 재료가 안정화되는 변형률 경화가 일어난다. 하중재하 횟수가 충분히 증가하면 [그림 3.2.73]과 같이 소성변형

보다 회복변형이 지배적으로 나타나게 된다. 이때의 응력-변형률 곡선의 기울기를 회복탄성계수(MR)라 정의한다. 회복탄성계수는 철도 및 도로 포장재료의 구조체 해석, 설계뿐 아니라 유지관리에 있어서도 매우 중요한 입력변수이다. 노상토의 회복탄성계수에 대한 영향요소는 크게 재료적 요인(간극비, 함수비, 입도분포 등)과 하중재하 조건(응력상태, 하중주파수, 하중반복회수, 변형률 크기 등)으로 구분할 수 있다(이석근, 1991). 일반적으로 함수비를 제외한 나머지의 재료적 요인은 시공이 완료되면 일정한 상태를 유지하게 되는데 이에 반하여 하중 재하 조건은 노상토 상부의 탄성계수와 층 두께, 그리고 차량 하중의 크기와 속도, 탄성계수를 평가하는 여러 시험 조건 등에 따라 변화하게 된다(권기철, 2000). 하중 재하 조건이 노상토의 탄성계수에 어떤 영향을 주는 가에 대해 많은 연구가 진행되어 노상토의 역학적 특성이 규명되어 가고 있다. 특히 하중재하 조건에 대한 영향요소 중 응력상태에 대한 영향요소에 대한 다양한 구성모델이 제안되고 있다. 현재 AASHTO에서 추천하고 있고 가장 일반적으로 받아들여지고 있는 노상토에 대한 구성모델은 축차응력 모델이다. 축차응력모델은 응력상태, 하중주파수, 하중반복회수 등의 다양한 영향요소들 중에 축차응력의 영향만을 고려하는 모델로서 구속응력 또는 체적응력의 영향은 무시하고 있다(권기철, 2000). 그러나 권기철 등(1999)의 연구에 의하면 국내에 사용되는 노상토는 대부분 비점성의 모래질 재료이고 축차응력과 함께 구속응력의 영향도 대단히 큰 것으로 밝혀지고 있다. 따라서 축차응력 모델을 적용하여 입상재료의 회복탄성계수를 평가하면 상당한 오차를 내포할 가능성이 크다고 설명하고 있다(권기철, 2000).



[그림 3.2.73] 반복하중 하에서의 회복탄성거동

(2) 시험 재료 및 시험 절차

본 연구에서는 도로용 골재 재료로 사용되고 있으며, 철도 강화노반재료와 거의 유사한 입도분포를 갖고 있는 M40재료(KS F 2525, 도로용 부순골재)에 대한 회복탄성계수를 다양한 구속압과 축차응력 조건에서 시험하였다. 특히 M40재료는 보다 일반적인 재료 수급과 입도조정층을 대체하는 역할을 기대하면서 최근 철도 강화노반 재료로 사용하고자 하는 시도가 이루어지고 있는 재료로 도로와 철도 등 교통하중 조건 하에서 회복탄성계수를 실험적으로 평가하고 결과를 제시하고자 한다. 본 시험에서는 M40재료 범위 내에서 중간 입도를 갖도록 입도를 조정하여 [그림 3.2.21]에서 M40-Middle에 해당하는 시편으로 시험하였다. 함수비와 밀도는 앞서 수행되었던 반복삼축압축시험 시편과 같이 각각 OMC(7%), 21(kN/m^3)과 같다.

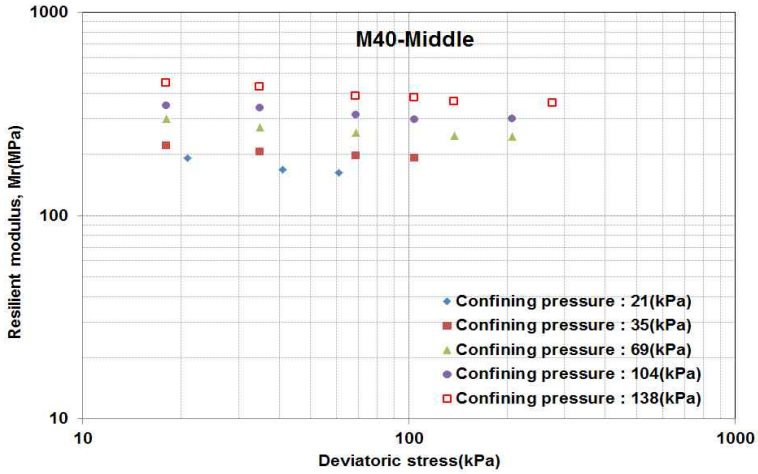
1986년 AASHTO 설계지침의 회복탄성계수(MR) 시험법은 이에 대한 일반적인 사항만을 기술하고 응력조합의 작용순서 및 크기 등을 세부적으로 기술하지 않고 있었다. 따라서 ASTM, SHRP, WS DOT, Florida DOT, Idaho DOT, KICT 등은 각 해당 지역의 교통하중과 포장형식 및 실제 포장체에 작용하는 하중을 모사(simulation)하는 견해에 따라 각각의 시험법을 개발하여 사용하였다(권기철, 2000). 그러나 매우 다양한 시험법으로 회복탄성계수를 결정함에 따라 동일한 시료에 대한 회복탄성계수가 어느 시험법을 적용하느냐에 따라 서로 상이한 값을 얻게 되는 문제점이 발생하였다(이경하 등, 1997; 우제윤 등, 1990). 따라서 1992년 AASHTO에서는 SHRP Protocol P46의 시험법을 근간으로 AASHTO T294-92I 시험법을 제정하여 대부분 이를 적용한 회복탄성계수 시험을 수행하게 되었다(권기철, 2000).

(3) 시험 결과

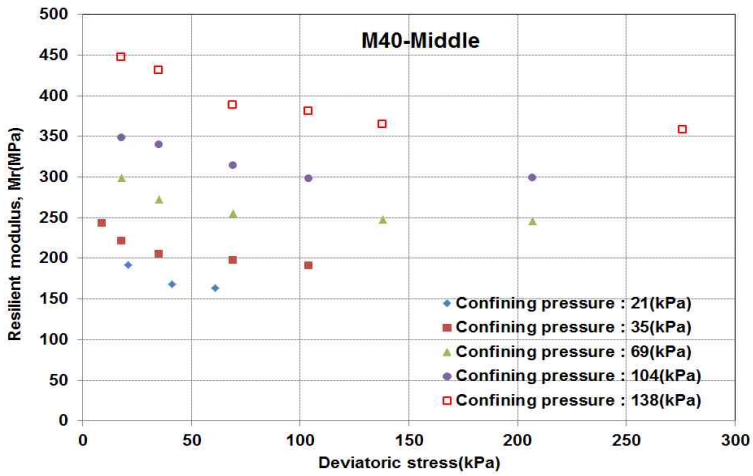
이에 본 연구에서도 기본적으로 AASHTO T294-92I 시험법에 따라 반복재하식 MR시험을 수행하였으나 각각의 구속압 조건에서 유사한 변형률 수준의 회복탄성계수도 비교하기 위해 낮은 축차응력 단계를 추가하여 수행하였다. 시험 순서는 [표 3.2.26]에 나타난 바와 같이 구속압과 축차응력을 제어하면서 각 축차응력단계별로 11회 반복하여 10번째 Cycle에서의 응력-변형률 loop의 기울기로 회복탄성계수를 산정하였다.

[표 3.2.26] M40재료 회복탄성계수 시험 조건 및 결과

구속압(kPa)	축차응력(kPa)	체적응력(kPa)	strain(SA)	M_R(MPa)
21	21	84	0.000053	192.11
	41	104	0.000119	168.49
	61	124	0.000182	163.2
35	9	114	0.000017	243.4696
	18	123	0.000038	221.0158
	35	140	0.000084	205.3025
	69	174	0.000169	197.5615
	104	209	0.000265	191.3712
69	18	225	0.000028	298.9217
	35	242	0.000062	272.259
	69	276	0.000134	255.1816
	138	345	0.000274	247.449
	207	414	0.000403	245.8683
104	18	330	0.000024	348.3913
	35	347	0.000049	339.3828
	69	381	0.000109	313.9757
	104	416	0.000172	297.7003
	207	519	0.000333	298.8969
138	18	432	0.000019	446.8169
	35	449	0.000039	430.7072
	69	483	0.000095	387.8014
	104	518	0.000135	381.0613
	138	552	0.000187	364.8523
	276	690	0.000379	357.9655

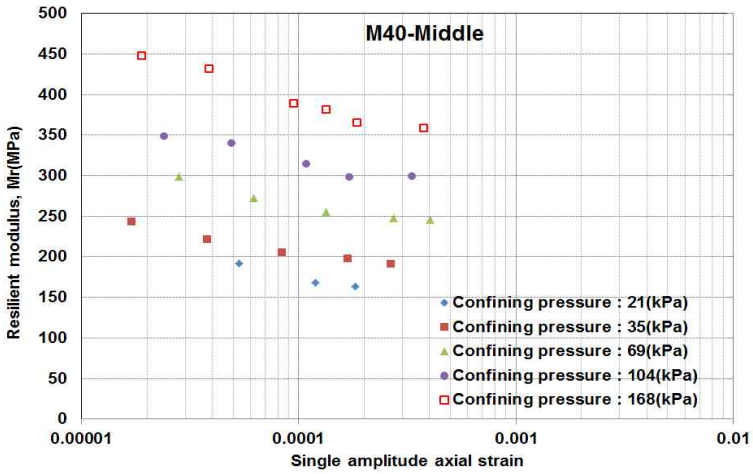


(a) 구속압별 대수축 축차응력에 대한 회복탄성계수 변화

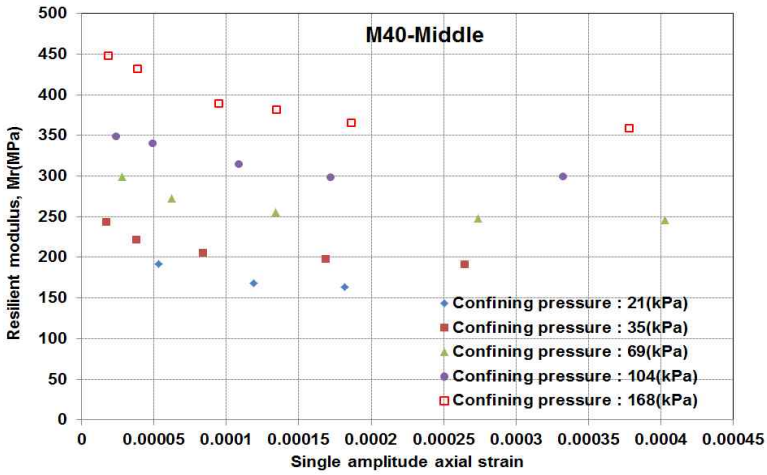


(b) 구속압별 축차응력에 대한 회복탄성계수 변화

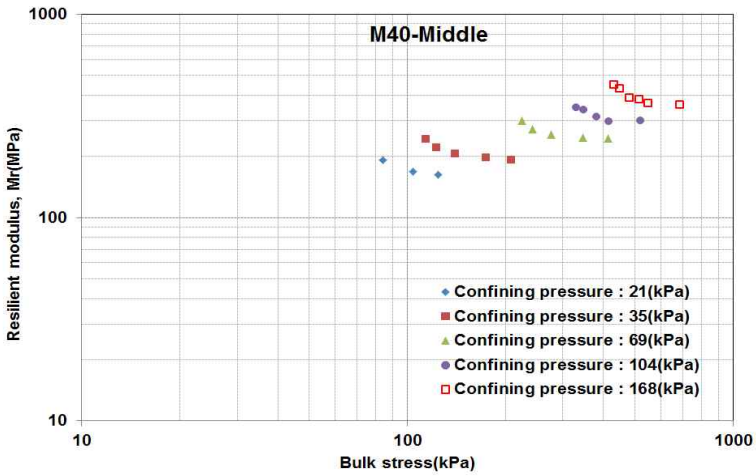
본 시험 결과는 다양한 구속압과 축차응력의 조건을 조합하여 시험을 수행하여 그래프와 표에 나타난 바와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 시험결과에서 볼 수 있는 바와 같이 구속압 수준이 증가함에 따라 전체적으로 높은 회복탄성계수를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 각 구속압별로 수행된 축차응력별 시험 결과에서는 전체적으로 축차응력이 증가함에 따라 매우 낮은 축차응력 수준에서 회복탄성계수가 감소 경향을 보이다가 일정 축차응력 수준에서 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 체적응력에 대해서도 같은 구속응력 조건 하에서는 체적응력이 증가함에 따라 감소하다가 역시 수렴하는 결과를 나타내고 있다.



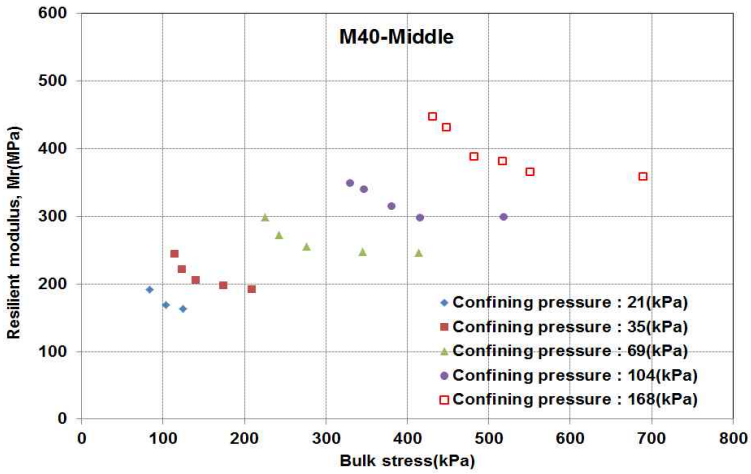
(c) 구속압별 대수축 변형률에 대한 회복탄성계수



(d) 구속압별 변형률에 대한 회복탄성계수



(e) 구속압별 대수축 체적응력에 대한 회복탄성계수



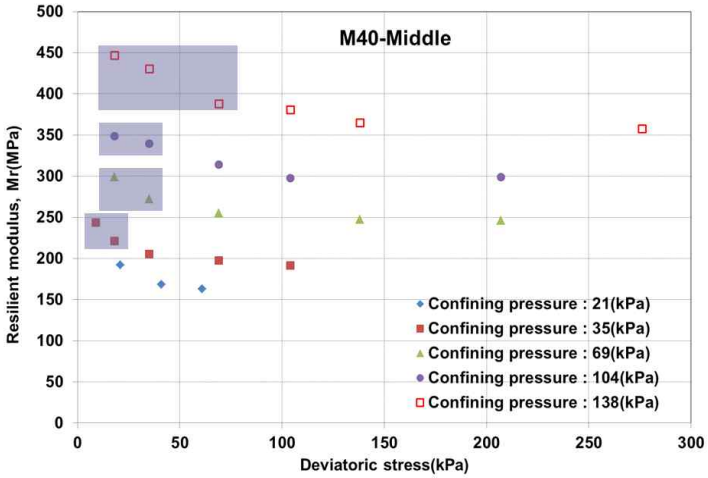
(f) 구속압별 체적응력에 대한 회복탄성계수

[그림 3.2.74] 구속압별 M40 재료의 회복탄성계수 시험 결과

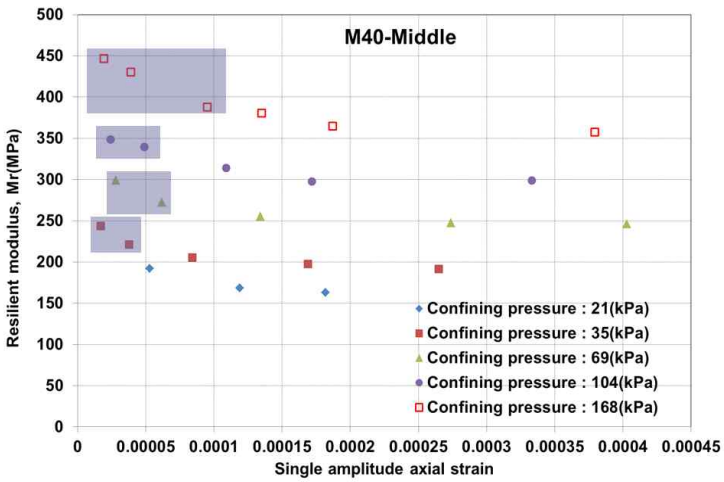
그러나 AASHTO의 시험 기준에 따라 노상토 및 보조기층재료 등에 대한 회복탄성계수에 대한 연구 문헌들에 따르면 상대적으로 입자가 작은 노상토의 경우 일반적으로 회복탄성계수가 축차응력이 증가함에 따라 회복탄성계수가 감소하고, 구속응력의 영향은 작은 반면, 입자가 큰 보조기층재료의 회복탄성계수는 축차응력의 영향은 작고 구속응력 또는 체적응력이 증가함에 따라 회복탄성계수가 증가하는 것으로 밝히고 있다. 또한 AASHTO T294-92I에서도 노상토의 경우 회복탄성계수가 축차응력에만 영향을 받는다고 고려한 축차응력모델을, 보조기층 재료의 경우, 체적응력의 영향만을 고려한 체적응력모델을 적용하고 있다(권기철, 2000).

본 연구 결과에서는 작은 축차응력 수준에서 약간의 차이를 보이고 있는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 AASHTO 시험 기준에서 각 구속압 수준에서 제시된 축차응력보다 작은 축차응력수준 단계를 2-3 단계씩 추가로 시험하여 그 결과를 같이 비교하였기 때문으로 판단된다. 즉 다음 [그림 3.2.75]에서 볼 수 있는 바와 같이 기존의 AASHTO 시험 기준에 따르면 그래프에서 어두운 박스에 포함된 시험 결과들이 제외된 결과를 평가하게 된다. 따라서 보다 작은 수준의 축차응력에서 상대적으로 큰 회복탄성계수를 확인하기 어려울 것으로 사료된다.

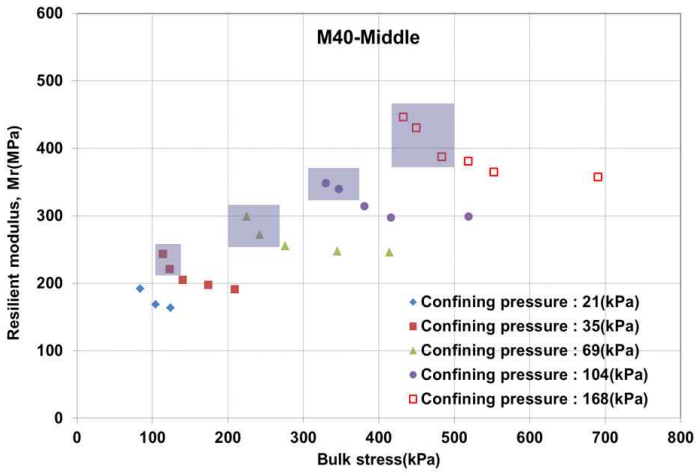
결국 회복탄성계수 모델과 그에 따른 모델 Parameter를 제시하기 위해서는 본 시험 대상 재료와 같이 입경이 큰 조립재료에서도 축차응력과 체적응력(또는 구속응력)을 동시에 고려한 모델이 적용되어야할 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

[그림 3.2.75] AASHTO 시험 절차에 추가된 축차응력 단계

5. 대입경 조립재료의 동적물성 예측

본 연구에서 대상으로 하고 있는 대입경 조립재료의 동적물성 뿐만 아니라, 모든 재료의 물성 산정 시, 시험 대상 재료의 조건, 시험방법 등 시험 결과에 영향을 미칠 수 있는 조건에 따라 그 결과가 달라질 수 있으므로 시험 대상에 대해 입자크기, 구속조건, 경계조건, 입도조건 등 실제 현장과 유사한 조건에서 직접 실험적으로 물성을 산정하는 것이 가장 바람직할 것이다. 그러나 특히 대입경 조립재료의 경우 사용 가능한 시험장비의 부족과 시험의 어려움 등 여러 제약 조건 때문에 시험이 어려울 경우가 많이 있다. 이러한 경우, 시험재료 및 시험 방법/조건 등이 가장 근접한 기존의 시험 결과를 바탕으로 제시된 수식 및 parameter를 사용하여 일차적으로 예측하여 사용해야할 필요가 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 댐, 도로, 철도 등 여러 대형지반구조물에 직접 사용되는 재료를 대상으로 실험한 결과를 일반적인 동적물성 수식에 대입하여 결과를 정리하고 parameter를 제시해줌으로써 향후 유사한 재료의 적용에 기준이 될 수 있도록 근거를 제시하고자 한다.

가. 탄성계수

대입경 조립지반재료의 동적물성 산정을 위해 모든 재료에 대해 실험을 수행하는 것은 어려운 일이기 때문에, 이를 위해 기존 실험 데이터를 기반으로 대표곡선과 관련 계수들을 제시하고 기본 물성 등을 활용해서 탄성계수 곡선을 유추하고자 하는 연구들이 여러 연구자들에 의해 수행되고 다양한 모델들이 제시되어 왔다. 가장 일반적으로 사용되는 방법이 전단탄성계수를 최대전단탄성계수로 정규화한 탄성계수곡선을 수식화하고 최대전단탄성계수를 추정하여 전체 변형률 수준에서 전단탄성계수를 추정하는 방식이다. 가장 대표적으로 사용되는 일반적인 Gmax 예측식은 다음과 같이 구속압과 간극비 등 기본물성을 함수식으로 고려한 방식이다.

$$G_{\max} = A_G \cdot F(e) \cdot (\sigma')^{n_G} \qquad \text{[식 3.2.14]}$$

A_G: 상수

G_{max}, σ': kPa

n_G: Log(G_{max},)와 Logσ'의 기울기를 나타낸다.

위 식에 대해 최대전단탄성계수를 추정하기 위해서 $F(e)$, A_G, n_G을 재료별로 다음 표와 같이 여러 연구자들이 제시한 바 있다.

[표 3.2.27] 최대전단탄성계수 산정 함수식 문헌 자료

	Reference	F(e)	A_G	n_G	Soil description
Sandy Soils	Hardin and Richart(1963)	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	7000	0.5	Round grain Ottawa sand
		$\frac{(2.97-e)^2}{1+e}$	3300	0.5	Angular grained crushed quartz
	Iwasaki et al. (1978)	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	9000	0.38	Eleven kinds of clean sand
	Kokusho (1980)	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	8400	0.5	Toyoura sand
	Yu and Richart(1984)	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	7000	0.5	Three kinds of clean sand
Gravelly Soils	Prange (1981)	$\frac{(2.97-e)^2}{1+e}$	7230	0.38	Ballast ($D_{50}=40mm$, $Cu=3.0$)
	Kokusho and Esashi(1981)	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	13000	0.55	Crushed rock ($D_{50}=30mm$, $Cu=10$)
		$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	8400	0.6	Round Gravel ($D_{50}=10mm$, $Cu=20$)
	Tanaka et al. (1987)	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	3080	0.6	Gravel ($D_{50}=10mm$, $Cu=20$)
	Goto et al. (1987)	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	1200	0.85	Round Gravel ($D_{50}=2mm$, $Cu=10$)

표에서 볼 수 있는 바와 같이 많은 연구자들이 $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$의 $F(e)$값을 많이 사용하였으며, 일반적으로 n_G값은 자갈질 재료가 모래보다는 크며, A_G값 역시 범위가 크고 값도 큰 경향이 있는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 위에 제시된 연구 결과 중 Kokusho & Esashi(1981), Hardin(1978), Menq(2003)의 예측 모델에 국내 각종 지반구조물 재료에 대해 수행된 시험 결과를 적용해서 국재 조립지반재료의 최대전단탄성계수 예측을 위한 계수들을 제시하고자 한다.

향후 다양한 재료 및 조건 등에 대한 연구 결과가 축적되었을 경우, 보다 세분화된 조건으로 분류된 예측식의 제시가 가능하겠지만 본 연구에서 수행된 조건 하에서는 최대입경 크기별로, 즉 최대입경 20-50mm와 90-100mm의 2개의 그룹으로 나누어 제시하고자 한다.

(1) 최대전단탄성계수 예측 모델 개요

(가) Kokusho & Esashi(1981)

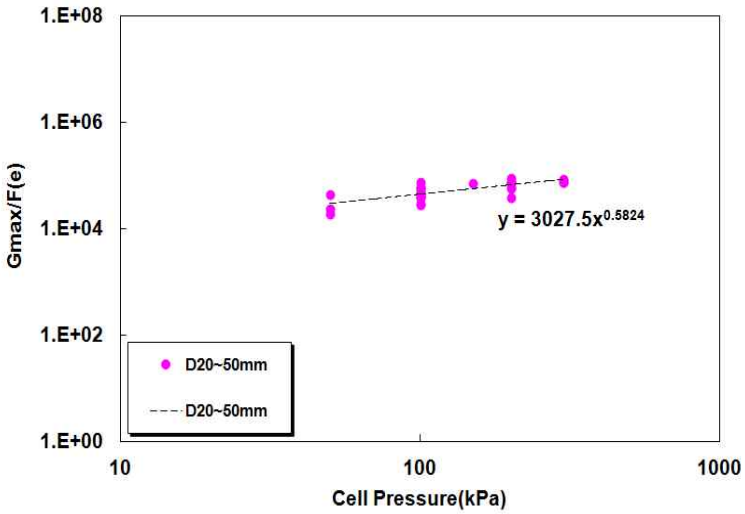
가장 많은 연구자들이 이 식과 같이 간극비를 이용하여 $F(e)$를 계산하여 최대전단탄성계수를 예측하였다.

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \qquad \text{[식 3.2.15]}$$

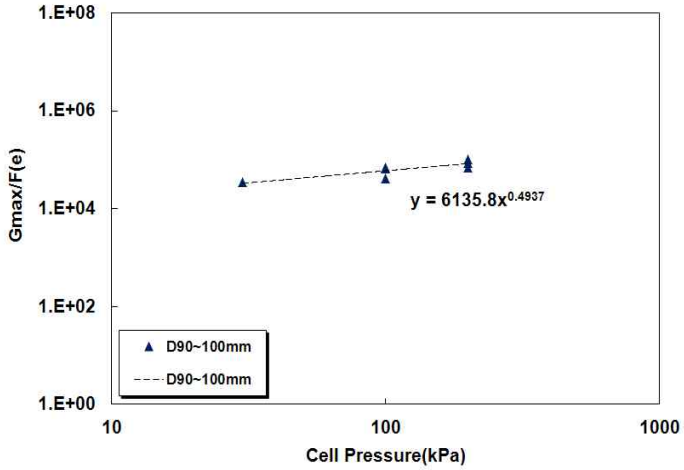
이 식을 적용하여 본 연구에서 수행된 시험 결과를 바탕으로 국내 지반재료에 대한 예측식의 재료 상수를 다음과 같이 그룹별로 제시하였다.

[표 3.2.28] Kokusho & Esashi(1981) 모델 계수

D_{max}(mm)	A	n_G
20~50	3027	0.5824
90~120	6135.8	0.4937



(a) 입자 최대입경 20-50mm



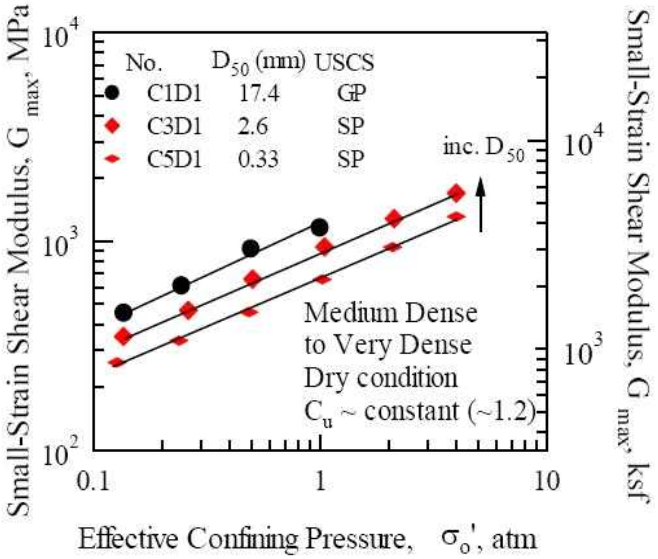
(b) 입자 최대입경 90-100mm

[그림 3.2.76] Kokusho & Esashi(1981) 함수식 활용 G_{max} 회귀분석

(나) Menq(2003)

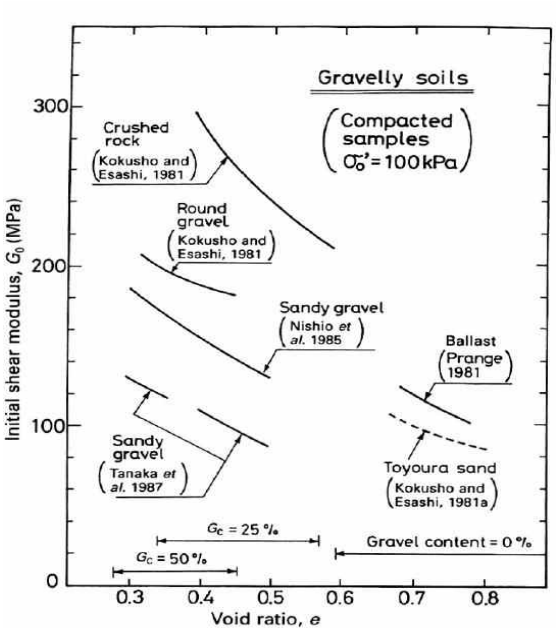
Menq(2003)은 보다 정확한 물성 예측을 위해 보다 많은 기본 물성을 예측식에 포함시키기 위한 노력을 하였다. 이를 위해 입경, 입도분포, 간극비 등이 최대전단탄성계수 미치는 영향에 대해 다음과 같은 연구결과를 제시하였다.

먼저 일정한 균등계수를 가지는 재료의 경우 D_{50}값이 커질수록 최대전단탄성계수 값이 커짐을 알 수 있다. 이것은 결국 예측식의 A값을 높여주는데 기인하는 것으로 설명하고 있다.



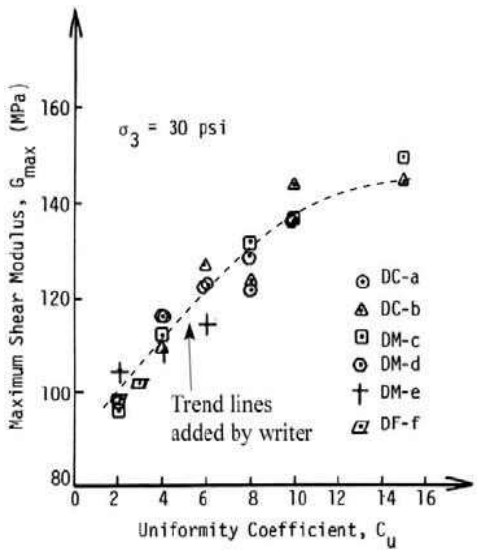
[그림 3.2.77] 일정한 c_u값을 가지는 자갈 및 모래에 유효구속응력 작용시

동일한 재료라 하더라고 간극비에 따른 탄성계수 값이 최대 100Mpa까지 차이가 발생하고 있는 결과를 제시하였다(Crushed Rock). 시험 결과에서 동일한 간극비라도 재료에 따라 약 120Mpa 의 차이가 발생함을 알 수 있다.



[그림 3.2.78] 반복삼축압축실험에 의한 사질토/자갈재료의 탄성계수

마지막으로 균등계수가 증가하면 최대전단탄성계수도 증가하는 것은 재료와 상관없이 동일한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다.



[그림 3.2.79] 200kPa 구속압 작용 시 균등계수에 따른 최대전단탄성계수의 변화(Chang and Ko, 1986)

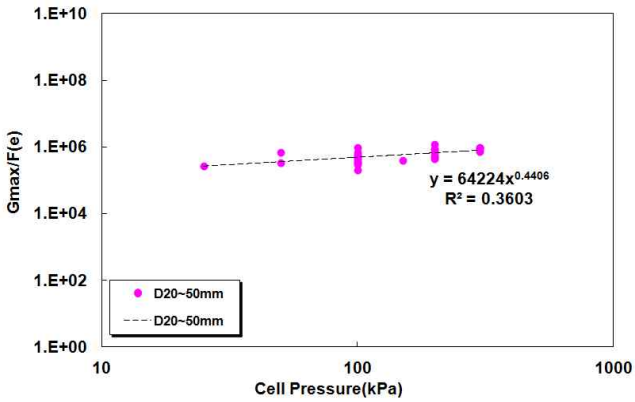
이상과 같은 연구 결과를 바탕으로 최대전단탄성계수에 영향을 주는 요인으로 D_{50}, 간극비, 균등계수 등을 다음 식과 같이 고려하고자 하였다.

$$F(e) = e^{-1-(\frac{D_{50}}{20})^{0.75}} \qquad \text{[식 3.2.16]}$$

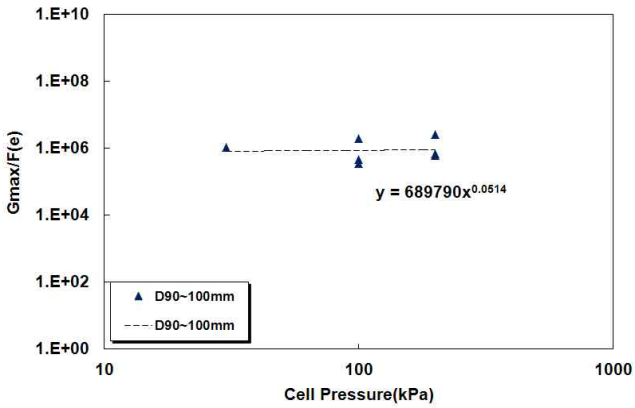
이 식을 적용하여 본 연구에서 수행된 시험 결과를 바탕으로 국내 지반재료에 대한 예측식의 재료 상수를 다음과 같이 그룹별로 제시하였다.

[표 3.2.29] Menq(2003) 모델 계수

D_{max}(mm)	A	n_G
20~50	64224	0.4406
90~120	689790	0.0514



(a) 입자 최대입경 20-50mm

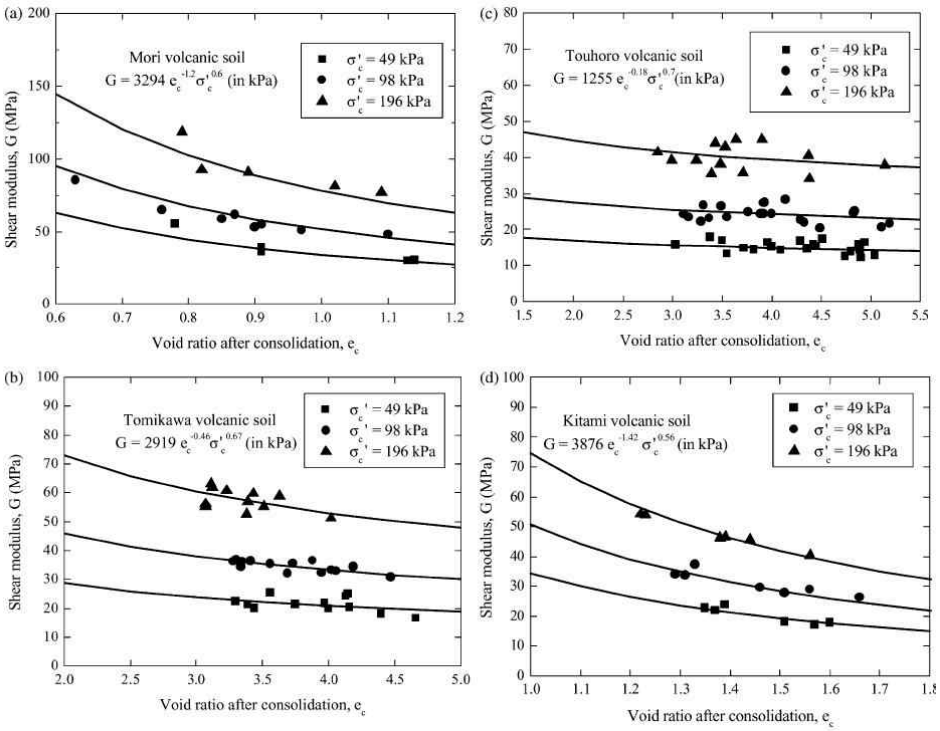


(b) 입자 최대입경 90-100mm

[그림 3.2.80] Menq(2003) 함수식 활용 G_{max} 회귀분석

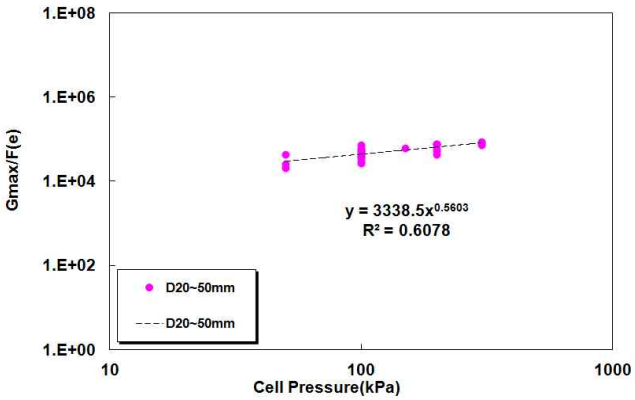
(다) Hardin(1978)

Hardin(1978)등은 최대전단탄성계수를 $G_{\max} = 625F(e)(OCR)^k P_a^{1-n}(\sigma_m')^n$로 제안하고 $F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2}$, n=0.5로 제시하였다. 기본물성을 포함하는 부분은 간극비만을 고려하여 Kokusho & Esashi(1981)이 제안한 $F(e) = \frac{(2.17-e)^2}{1+e}$과 같이 $F(e)$의 함수식과 최대전단탄성계수에 간극비의 영향이 분명한 상관성이 있다는 것을 표현하고 있다. 이에 관해서 T.Sahaphol, S.Miura(2004)는 다음과 같은 결과를 나타내었다. [그림 3.2.81]과 같이 간극비가 1.2 이하인 상태의 재료에서는 간극비가 작아질수록 전단탄성계수 값이 작아짐을 알 수 있다. 하지만 간극비가 1.5 이상인 경우는 이미 재료 내부입자의 공극자체가 이미 높기 때문에 간극비에 따른 탄성계수의 영향이 미비함을 알 수 있다. 그렇기 때문에 간극비가 1.2 이하인 재료의 최대전단탄성계수 값을 추정하는데 Hardin(1978)과 Kokusho & Esashi(1981)이 제안한 F(e) 함수식을 적용하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

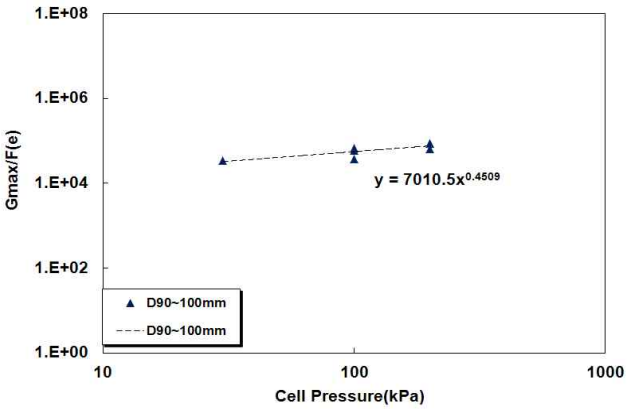


[그림 3.2.81] 간극비에 따른 전단탄성계수값의 변화

이 식을 적용하여 본 연구에서 수행된 시험 결과를 바탕으로 국내 지반재료에 대한 예측식의 재료 상수를 다음과 같이 그룹별로 제시하였다.



(a) 입자 최대입경 20-50mm



(b) 입자 최대입경 90-100mm

[그림 3.2.82] Hardin(1978) 함수식 활용 G_{max} 회귀분석

[표 3.2.30] Hardin(1978) 모델 계수

D_{max}(mm)	A	n_G
20~50	3338.5	0.5603
90~120	7010.5	0.4509

(라) 최대전단탄성계수 예측 모델 적용 소결론

최대전단탄성계수를 예측하기 위한 모델로 대부분의 연구자들이 제안하고 있는 일반적인 수식이 $G_{max}=A_G \cdot F(e) \cdot (\sigma')^{n_G}$과 같다. 식에 포함된 재료 상수($A_G$, n_G)

를 제외하고 기본물성 함수식, $F(e)$는 대표적으로 위의 3가지 형태로 제안되어 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서 수행된 시험 결과를 바탕으로 최대입경에 따라 2그룹으로 나누어 예측모델의 상수와 기본물성 함수식을 산정하여 아래와 같이 정리, 제시하였다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 간극비만을 고려한 Kokusho and Esashi(1981)모델과 Hardin(1978)모델이 입경을 추가로 고려한 Menq(2003) 모델보다 높은 결정계수를 보이며, 본 연구에서 수행된 국내 조립지반재료 시험 결과를 잘 표현하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 앞서 제시된 본 연구의 시험 결과에서 볼 수 있듯이 저변형률 수준에서의 탄성계수는 최대입경과 입도분포의 특성에 따라 크게 달라지고 있는 것을 볼 수 있었다. 따라서 향후 보다 다양한 조건의 시험 결과를 축적해서 Menq(2003)의 모델과 같이 최대입경, 입도분포, 함수비 등을 고려할 수 있는 예측모델에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

[표 3.2.31] 국내 조립지반재료 시험 결과에 대한 각 모델별 회귀분석 결과

	Reference	F(e)	D_{max}(mm)	A_G	n_G	R^2
This study	Kokusho and Esashi(1981)	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	20-50	3027	0.5824	0.5747
			90-100	6135.8	0.4937	0.7307
	Menq(2003)	$F(e)=e^{-1-(\frac{D_{50}}{20})^{0.75}}$	20-50	64224	0.4406	0.3603
			90-100	689790	0.0514	0.0022
	Hardin(1978)	$\frac{1}{0.3+0.7e^2}$	20-50	3338.5	0.5603	0.6078
			90-100	7010.5	0.4509	0.6886

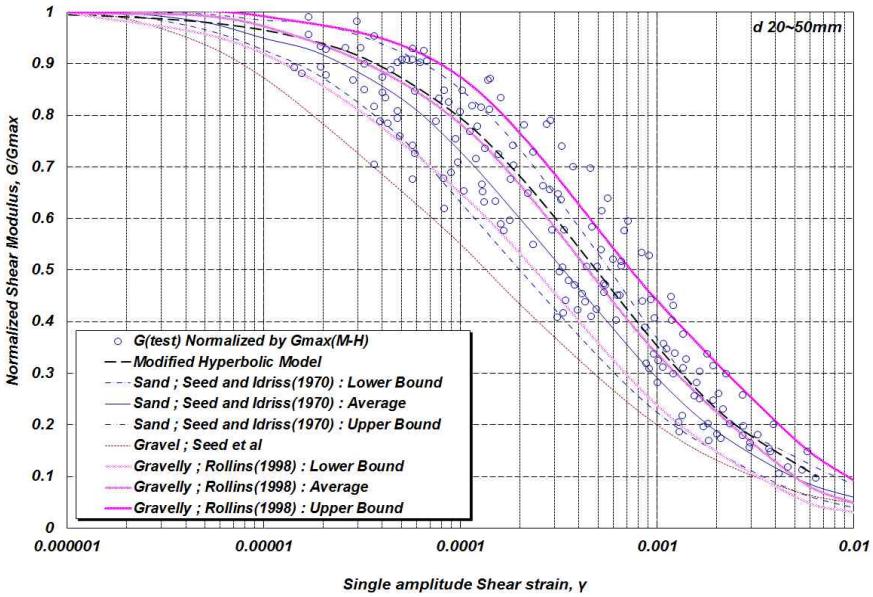
(2) 국내 조립지반재료의 최대입경 크기별 G/G_{max} 대표곡선 제시

지반의 전단탄성계수와 변형률의 관계는 지반의 종류, 함수비, 구속응력, 하중주파수, 교란상태 등 다양한 조건에 따라서 매우 다르게 나타나게 된다. 그러나 전단탄성계수를 최대전단탄성계수(Gmax)로 정규화한 정규화 전단탄성계수(G/Gmax)와 전단변형률의 관계로 나타내면 이러한 영향 요소에 비교적 무관하며, 재료에 따라 비교적 일정한 범위의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Seed 등, 1984; 권기철, 1999).

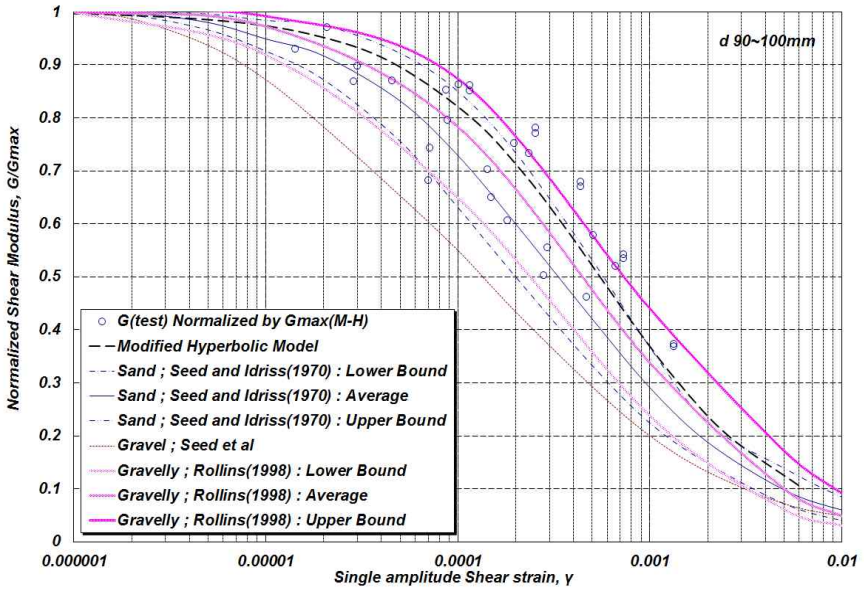
본 연구의 G/G_{max} 결과와 그 대표곡선을 기존의 다른 연구자들이 수행하고 수집했던 자료들과 비교해보았다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Rollins(1998)와 Seed & Idriss(1970)의 범위에 비교했을 때 최대입경 20-50mm 및 90-100mm의 시편 시험 결과에서 모두 매우 유사한 시험 결과의 범위를 보여주고 있다.

본 연구에서는 국내 댐, 철도, 도로 등 주요 대형지반구조물에 사용되고 있는 대입경 조립지반재료에 대해 반복삼축압축시험을 수행하여 그 결과를 정리하였다. 마

지막으로 시험 결과들을 바탕으로 G/G_{max}의 대표곡선식을 Daredeli(2001)가 제시한 Modified Hyperbolic Model의 형태로 제안하고, 최대입경별로 2개 그룹에 대해 식에 포함된 재료 상수를 제시고자 한다.



(a) 입자 최대입경 20-50mm



(b) 입자 최대입경 90-100mm

[그림 3.2.83] 정규화탄성계수 곡선 시험 결과 및 문헌 자료

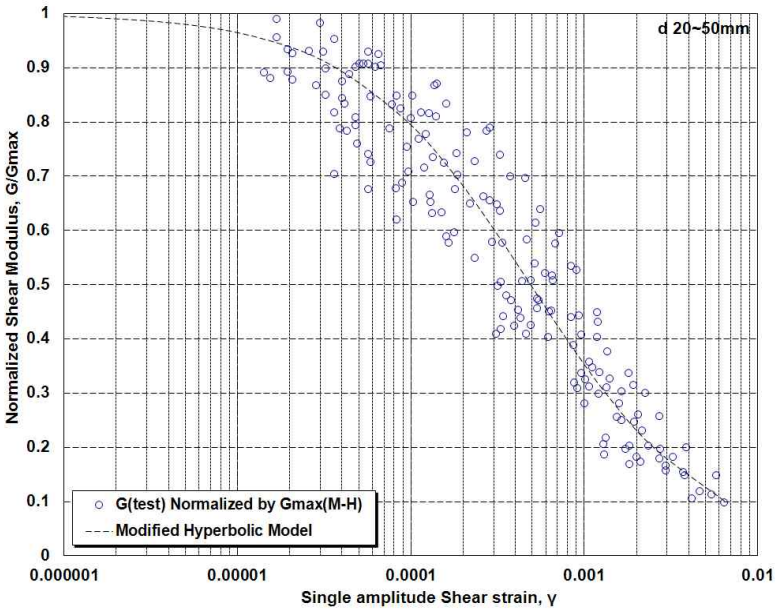
G/G_{max} 대표곡선 모델 : Modified Hyperbolic Model(Darendeli, 2001)

$$G/Gmax = \frac{1}{1+(\frac{\gamma}{\gamma_r})^a} \quad \text{[식 3.2.17]}$$

a : Curvature Coefficient

γ_r : Reference Strain

1) Dmax : 20-50mm 재료

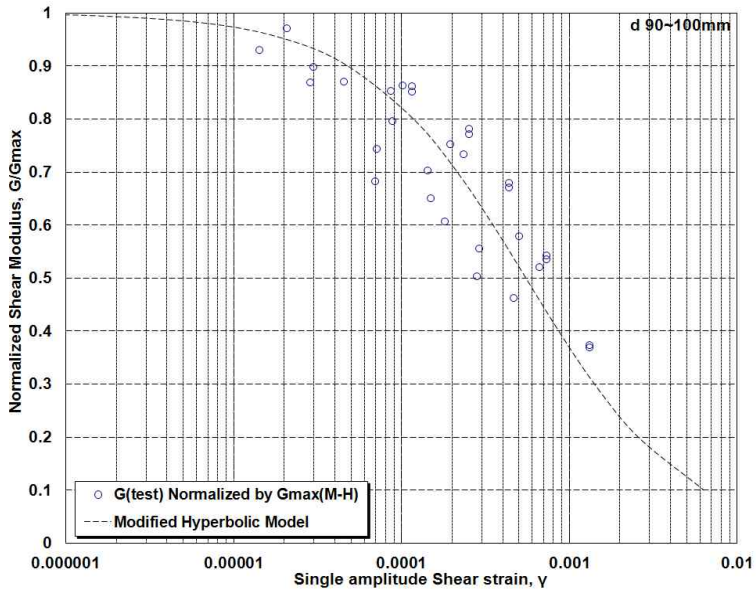


[그림 3.2.84] 입자 최대입경 20-50mm 재료 시험 결과 및 대표곡선

$$G/Gmax = \frac{1}{1+(\frac{\gamma}{0.00049})^{0.85}} \quad \text{[식 3.2.18]}$$

2) Dmax : 90-100mm 재료

$$G/Gmax = \frac{1}{1+(\frac{\gamma}{0.00055})^{0.9}} \quad \text{[식 3.2.19]}$$



[그림 3.2.85] 입자 최대입경 90-100mm 재료 시험 결과 및 대표곡선

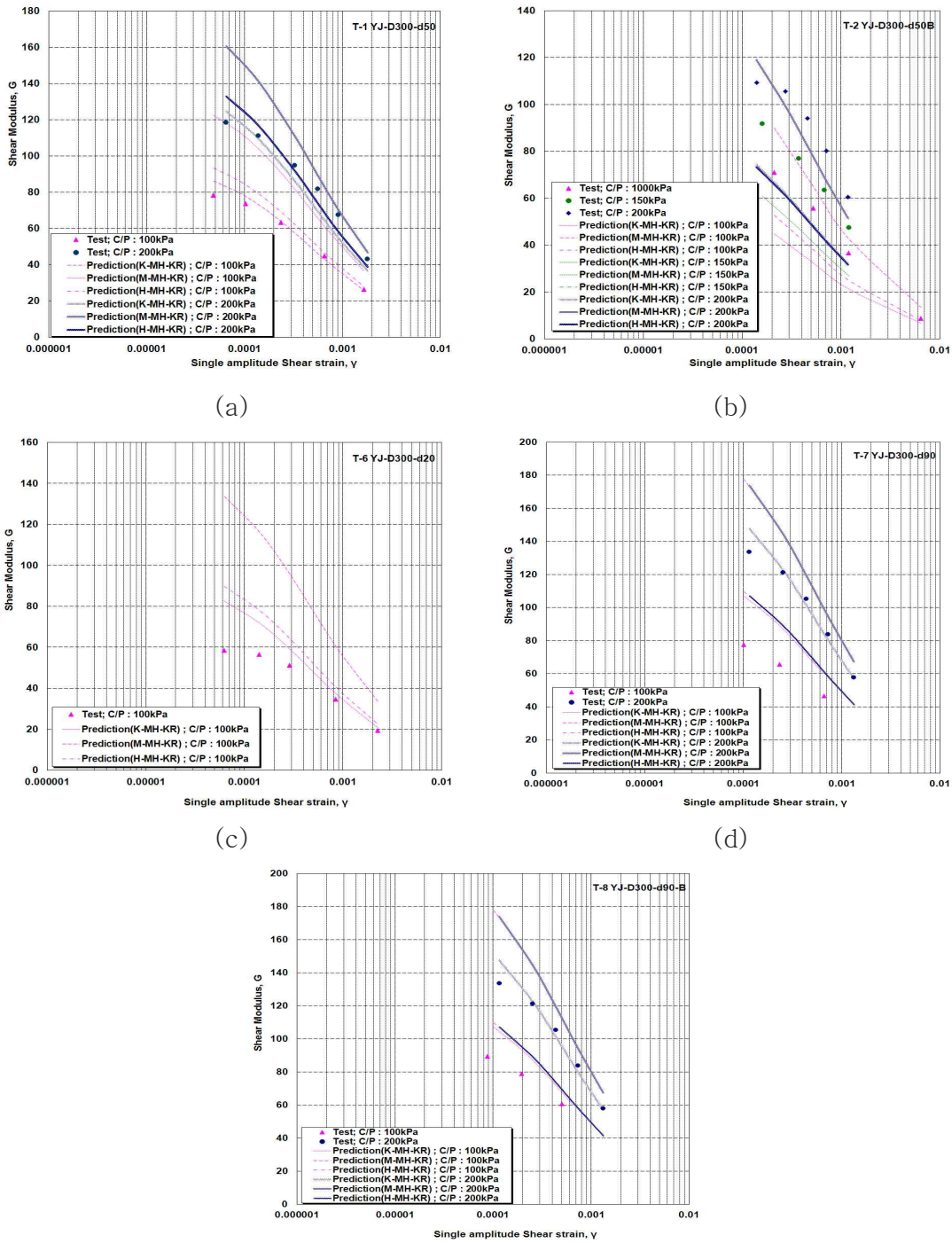
[표 3.2.32] 국내 조립지반재료 시험 결과에 대한 수정 Hyperbolic model 계수

Dmax(mm)	γ_r	a
20-50mm	0.00049	0.85
90-100mm	0.00055	0.9

(3) G/G_{max} 대표곡선과 G_{max} 예측식을 이용한 탄성계수값의 산정 및 검증

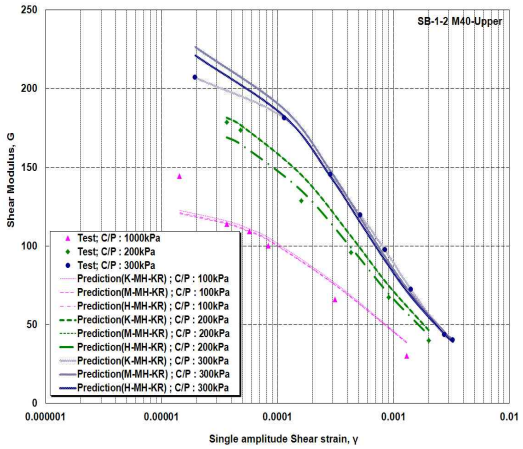
앞서 제시된 G/G_{max} 대표곡선 식과 최대전단탄성계수를 예측하기 위해서 앞서 설명 및 적용했던 3가지 모델을 적용하여 예측한 국내 조립지반재료에 대한 전단탄성계수와 시험결과를 비교 검토하였다.

1) OO 댐 재료

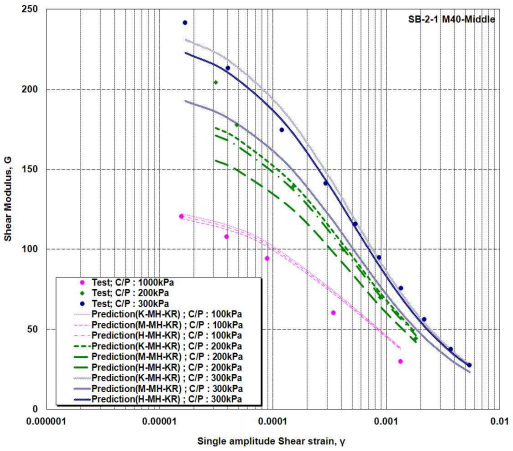


[그림 3.2.86] 댐재료 전단탄성계수 예측 결과

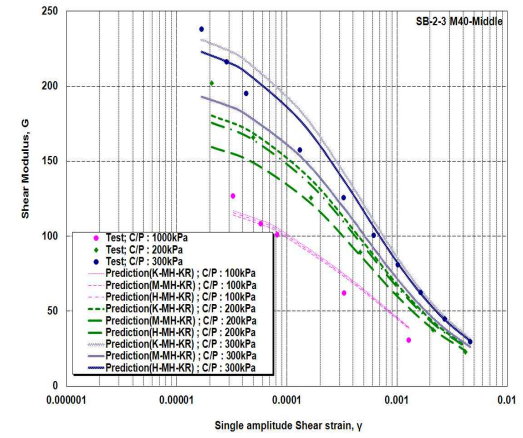
2) 강화노반 재료



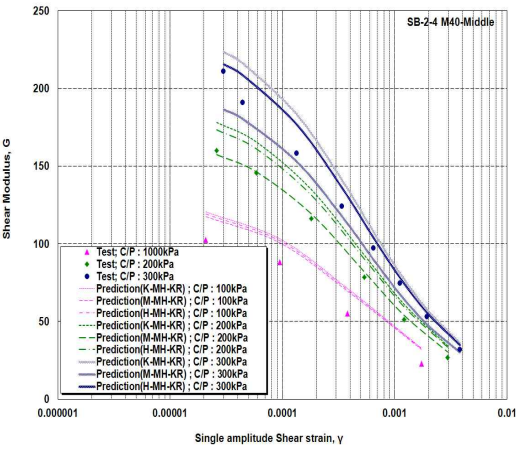
(a)



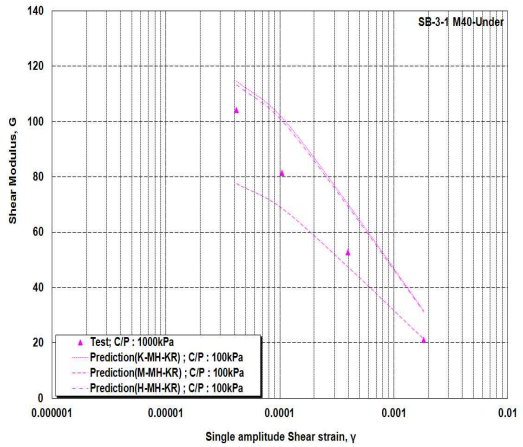
(b)



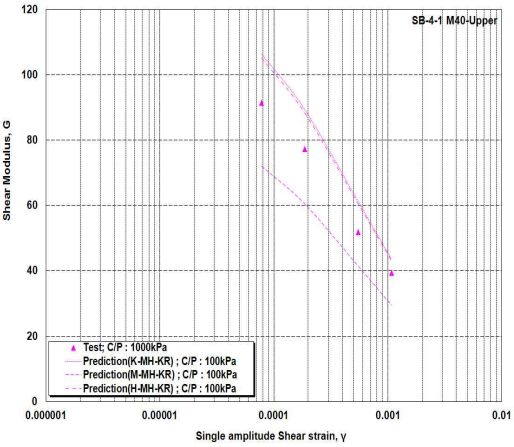
(c)



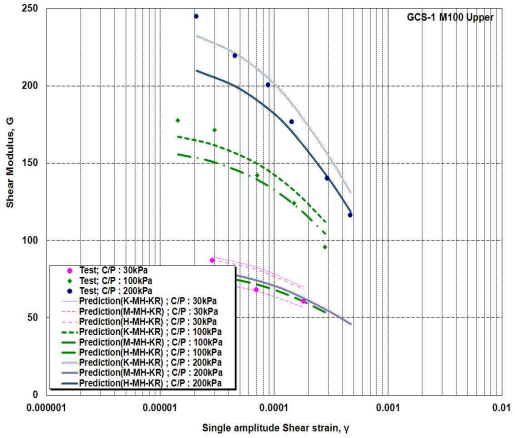
(d)



(e)



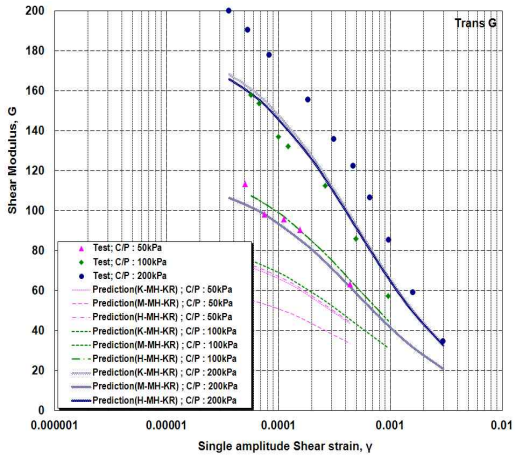
(f)



(g)

[그림 3.2.87] 철도 강화노반 및 도로 보조기층재료 전단탄성계수 예측 결과

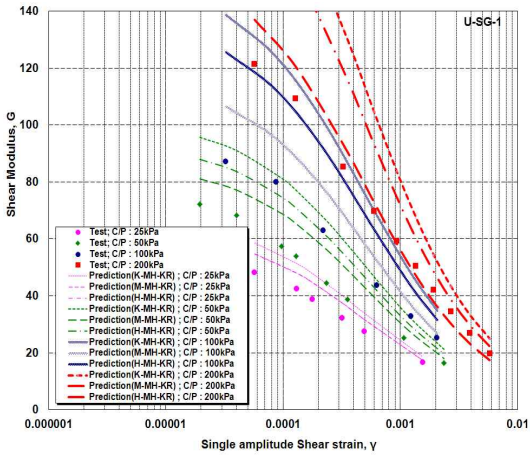
3) 접속부 자갈재료



(a)

[그림 3.2.88] 철도 접속부 자갈재료 전단탄성계수 예측 결과

4) OO 고속철도 노반재료



[그림 3.2.89] 고속철도 상부노반재료 전단탄성계수 예측 결과

Kokusho and Esashi(1981), Menq(2003), Hardin(1978)의 F(e) 함수식과 시편의 간극비를 이용하여 최대전단탄성계수를 추정하고 국내 조립지반재료에 대해 제시한 G/G_{max} 대표곡선에 대입해서 전단탄성계수 곡선을 추정한 결과는 전체적으로 모든 시편에서 정확히 시험 결과를 예측할 수는 없었으나, 상대적으로 Kokusho and Esashi(1981), Hardin(1978)에 의한 함수식을 활용한 경우 비교적 근사하게 추정하고 있음 알 수 있었다. 그러나 앞에서도 언급하였듯이 탄성계수값은 입도와 최대입경에 크게 영향을 받고 있음을 확인하였듯이 전단탄성계수를 추정하기 위해서는 간극비(또는 밀도) 뿐만 아니라 이와 같은 영향인자들을 고려하여 보다 정확히 예측할 수 있도록 개선되어야할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 보다 다양한 재료와 시험 조건에 대해 양질의 시험 결과를 축적하고 이를 바탕으로 예측을 위한 모델 및 재료상수를 제시하는 연구가 지속적으로 추진되어야할 것이다.

나. 감쇠비

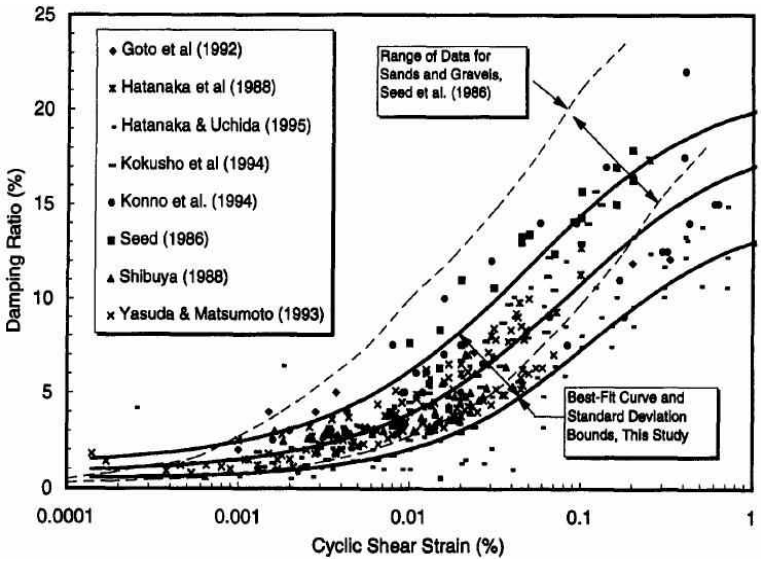
감쇠비는 전단탄성계수와 함께 지반구조물의 설계에서 중요한 설계변수이다. 따라서 앞서 국내외 연구진들에 의해 다양한 재료들에 대해 여러 시험법에 의해 시험이 이루어졌으며, 이를 바탕으로 대표곡선을 제안하고, 이를 수식화하는 노력이 많이 이루어졌다. 그 중에서 Rollins 식, Ramberg-Osgood model, Hyperbolic model, 그리고 Modified Hyperbolic model 등이 대표적이며, 다음과 같이 간략히 정리될 수 있다.

(1) Rollins et al.(1998)

$$D = 0.8 + 18(1 + 0.15\gamma^{-0.9})^{-0.75}$$ [식 3.2.20]

D: Damping ratio in percent

γ: Cyclic shear strain in percent



[그림 3.2.90] 감쇠비 시험 결과에 대한 문헌 자료(Rollins et al, 1998)

(2) Ramberg Osgood Model

$$D = \frac{2(R-1)}{\pi(R+1)}(1 - G')$$ [식 3.2.21]

R: Ramberg Osgood parameters

G': Normalized shear modulus

(3) Hyperbolic Model

- 일반적으로 Ramberg Osgood Mode에 비하여 적용성이 뛰어나다.
- Hardin and Drnevich(1972)는 다음과 같이 Hyperbolic Model을 제시하였다.

$$D = D_{\max}(1 - \frac{G}{G_{\max}}) \text{ 또는}$$

$$G/Gmax = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \text{ 이므로,}$$

$$D = D_{\max}(1 - \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{\frac{\gamma}{\gamma_r}}) \qquad \text{[식 3.2.22]}$$

γ_r: reference strain

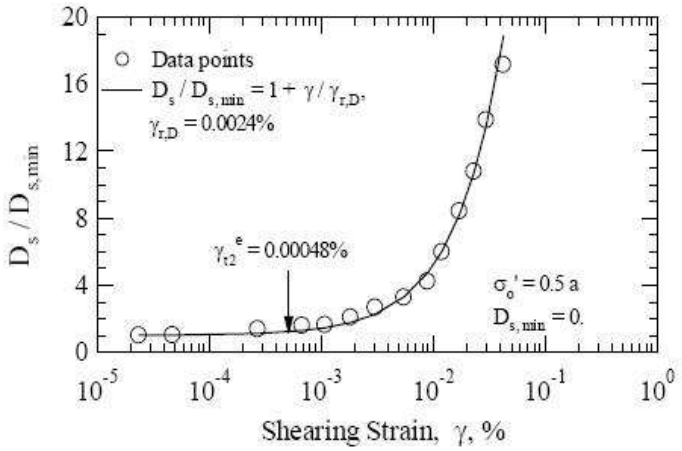
(4) Modified Hyperbolic Model

- Darendeli(1997)은 다음과 같은 식으로 Modified Hyperbolic Model을 제시하였다.

$$\frac{D_s}{D_{s,\min}} = 1 + \frac{\gamma}{\gamma_{r,D}} \qquad \text{[식 3.2.23]}$$

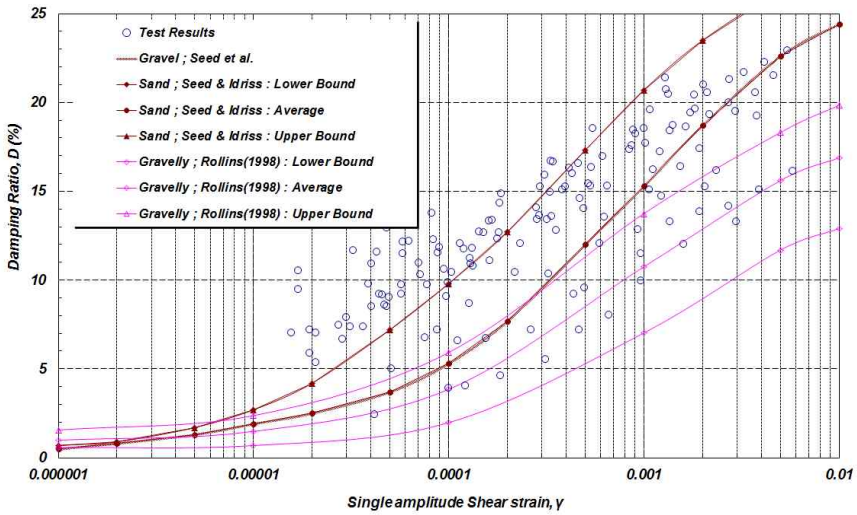
$\gamma_{r,D}$: reference strain with respect to normalized material damping ratio, Ds=2Ds,min 일 때 $\gamma = \gamma_{r,D}$

- $D_{s,\min} = C_{D1} \cdot (\frac{\sigma'_0}{P_a})^{nD}$의 경험식으로 나타내었고, 1% 미안 범위의 값을 가진다고 하였다.



[그림 3.2.91] Shearing strain에 따른 감쇠비 곡선

(5) 국내 재료 대표 곡선 제안

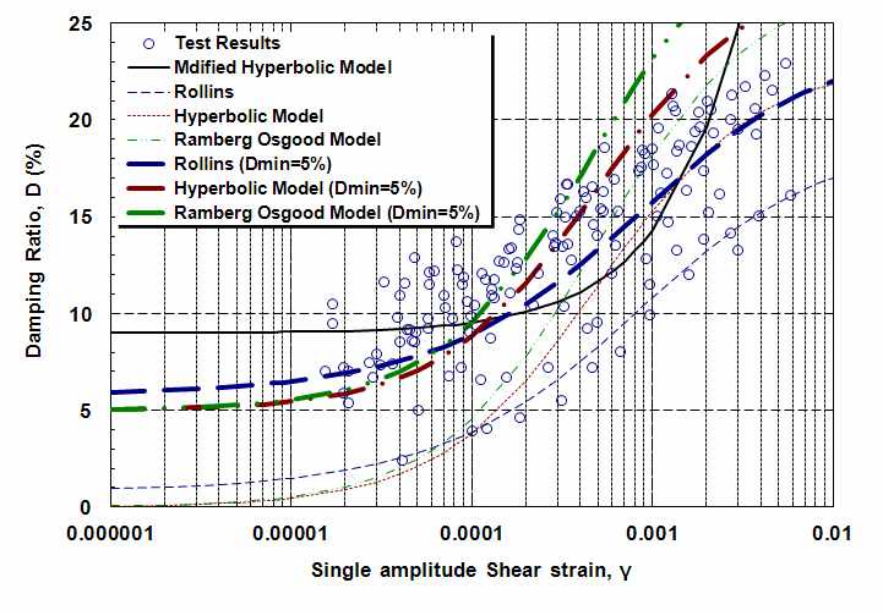


[그림 3.2.92] 국내 재료 시험 결과 및 문헌 결과 비교

본 연구의 감쇠비 결과와 그 대표곡선을 기존의 다른 연구자들이 수행하고 수집했던 자료들과 비교해보았다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Rollins(1998)가 정리하여 제시하였던 Gravelly 재료에 대한 범위와 비교해서 전체적으로 시험 결과가 높은 값을 보이고 있다. 반면 Seed & Idriss(1970)의 Sand에 대한 감쇠비의 범위에 비교했을 때 낮은 변형률 수준에서는 높은 결과를 높은 변형률 수준에서는 약간 낮은 감쇠비 결과를 보여주고 있다.

본 연구에서는 앞서 수행되었던 국내 여러 지반구조물의 조립지반재료에 대한 반복삼축압축시험 결과를 바탕으로 감쇠비를 위에 소개된 4가지 모델로 수식화하여

다음과 같이 제시하고자 한다.



[그림 3.2.93] 국내 조립재료 감쇠비 시험 결과와 대표곡선

위 그림에서 보는 바와 같이 기존의 Rollins식과 Hyperbolic model, 그리고 Ramberg-Osgood model은 낮은 변형률 수준에서 감쇠비를 크게 과소평가하고 있는 것으로 나타났다. 이에 최소 감쇠비(Dmin)를 도입하여 각 모델에 적용하였을 때 보다 실험 결과를 보다 근접하게 예측하는 것으로 평가되었다. 반면 수정

Hyperbolic model은 전체 변형률 구간에서 감쇠비를 적절하게 표현하지 못하는 것으로 나타났다. 결국 최소감쇠비를 5%로 수정한 Rollins 모델로 국내 조립지반재료에 대해 수행된 반복삼축압축시험에서 얻어진 감쇠비를 가장 적절히 표현할 수 있었으며, [식 3.2.24]와 같이 제안할 수 있었다.

$$D = 5.0 + 18(1 + 0.15\gamma^{-0.9})^{-0.75} \qquad \text{[식 3.2.24]}$$

다. 회복탄성계수

회복탄성계수는 이론적으로 가장 이상적이고 노반이 경험하는 응력상태 등이 잘 반영된 탄성계수로 알려져 있다. 이미 도로 포장 분야에서는 미국 도로교통협회(AASHTO)가 경험적 포장설계법을 탈피하고 역학적 포장 설계를 위해 회복탄성계수로 채택한 바 있다. 이에 본 연구에서는 강화노반재료 및 도로 보조기층재료로

사용되는 M40재료에 대해 대형삼축압축시험을 수행하고 그 결과에 대해 앞서 소개하고 설명하였다. 그러나 대입경 조립지반재료에 대한 반복재하식의 대형삼축압축시험은 시험장비가 많지 않고 시험절차가 어려울 뿐 아니라 시험자의 숙련도에 따라 결과의 일관성이 떨어지기 때문에 보편적으로 적용하는데 한계가 있다(우제윤 등, 1993; Drumm et al.,1996; 박철수,2008).

따라서 여러 구속압과 축차응력의 조합 조건에서 수행된 시험 결과를 바탕으로 기존의 축차응력모델, 체적응력모델의 계수를 제시하고 새로운 회복탄성계수 예측 모델을 제안하고자 한다.

먼저 기존에 제안되어 가장 널리 사용되는 기본적인 모델들에 대해 권기철(2000)의 논문을 인용하여 다음과 같이 정리하였다.

축차응력모델은 대수그래프에서 회복탄성계수와 축차응력이 직선의 관계를 갖는 것으로 모델하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2} \qquad \text{[식 3.2.25]}$$

여기서 k_1, k_2는 시험으로 결정되는 재료 상수

현재 가장 널리 사용되는 구성모델은 Biarez(1962)가 제안한 체적응력모델로 AASHTO 포장설계법에서도 이를 적용하고 있다.

$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \qquad \text{[식 3.2.26]}$$

여기서, $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, k_1, k_2는 시험으로 결정되는 재료 상수

체적응력모델은 국내 보조기층재료에도 적절히 적용될 수 있음이 확인된 바 있다(권기철, 1999; 2000).

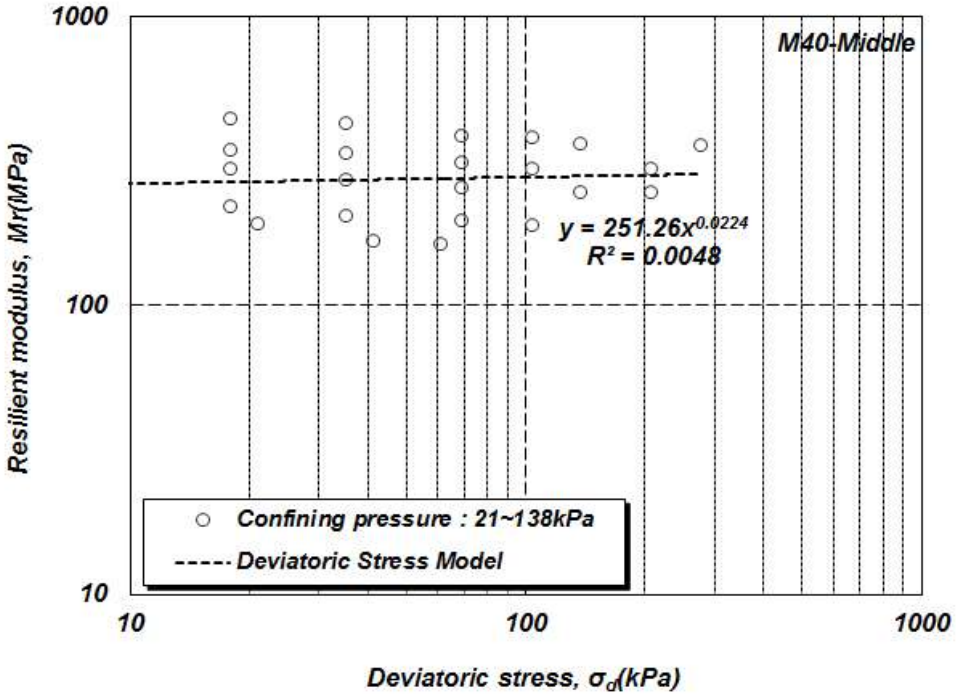
축차응력이나 체적응력 중 하나의 영향만을 고려하는 축차응력 모델과 체적응력 모델 이외에도 두 응력의 영향을 동시에 고려하는 모델, 응력상태와 재료적 요인을 함께 고려하는 모델 등, 매우 다양한 회복탄성계수 모델들이 개발되어 있다(이석근, 1991). Uzan(1985)은 다음 식과 같이 체적응력과 축차응력을 동시에 고려하는 모델을 제시하고 있다.

$$M_R = \beta_0 I_1^{\beta_1} \sigma_d^{\beta_2} \qquad \text{[식 3.2.27]}$$

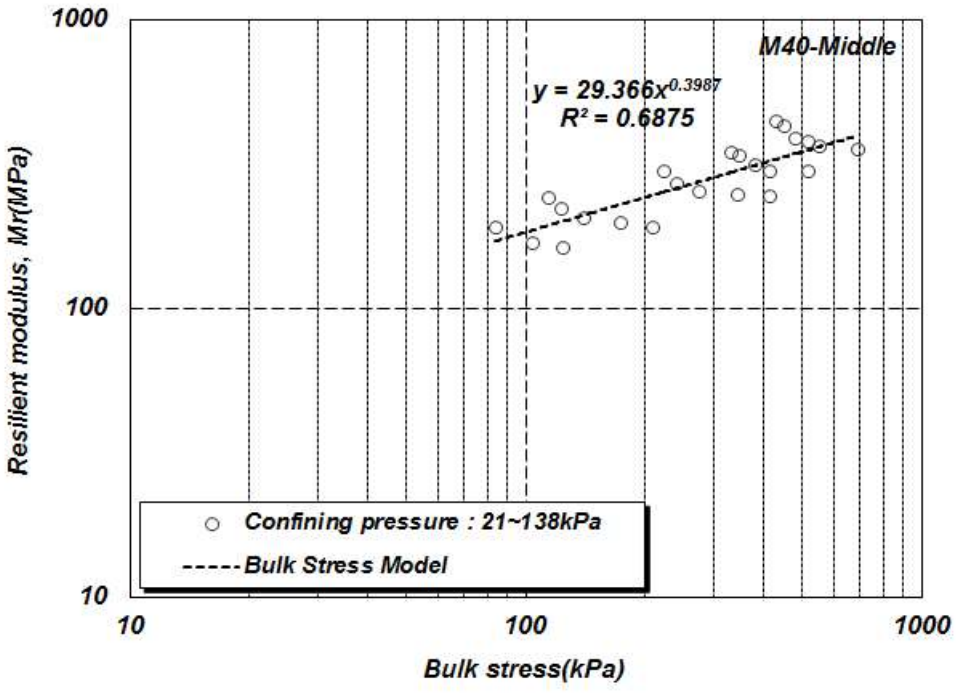
여기서, I_1=평균주응력($I_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, σ_d:축차응력, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$는 시험으로 결정되는 재료상수.

May와 Witezak(1981)은 $M_R = \beta_0 I_1^{\beta_1} f(\epsilon_a)$ 식과 같은 형태의 구성모델을 제안한바 있다. 즉 May와 Witczak모델은 Uzan모델에서 축차응력의 영향을 변형률크기의 영향으로 평가하는 형태이다.

본 연구에서는 M40재료에 한정하여 앞서 제시된 회복탄성계수 시험 결과를 바탕으로 기존의 축차응력모델, 체적응력모델에 적용하여 각 모델에 적합한 재료 상수들을 다음 그림과 같이 회귀분석을 수행하여 [표 3.2.33]에 정리하였다.



(a) 국내 M40재료의 회복탄성계수 시험결과와 축차응력 모델 회귀분석



(b) 국내 M40재료의 회복탄성계수 시험결과와 체적응력 모델 회귀분석

[그림 3.2.94] 국내 M40재료의 회복탄성계수 시험결과와 모델 회귀분석

[표 3.2.33] M40 재료 M_R 시험 결과에 대한 기존 모델별 계수 산정 결과

회복탄성계수 모델	모델 계수	재료 상수
$M_R = k_1\sigma_d^{k_2}$ (축차응력모델)	k_1	251.26
	k_2	0.0224
	R^2	0.0048
$M_R = k_1\theta^{k_2}$ (체적응력모델)	k_1	29.37
	k_2	0.3987
	R^2	0.6875

그러나 앞서 회복탄성계수 결과 부분에서 언급한 바와 같이 회복탄성계수 모델과 그에 따른 모델 계수를 보다 합리적으로 제시하기 위해서는 본 시험 대상 재료와 같이 입경이 큰 조립재료에서도 축차응력과 체적응력(또는 구속응력)을 동시에 고려한 모델이 적용되어야할 것이다. 따라서 본 연구에서 수행된 도로 보조기층 및 철도 강화노반재료로 널리 이용되는 M40재료에 한해서 적용 가능한 구속응력과 축차응력을 고려할 수 있는 회복탄성계수 예측모델을 다음과 같이 제안하고자 한다.

$$M_R(MPa) = M_{CP} + f(\sigma_d, \sigma_3) \quad \text{[식 3.2.28]}$$

$$M_{CP} = 1.63 \bullet \sigma_3 + 131.5 \quad \text{[식 3.2.29]}$$

$$f(\sigma_d, \sigma_3) = 1.5(0.52 \bullet \sigma_3 + 7.16 - \sigma_d) \text{ for } \sigma_d \le 0.52 \bullet \sigma_3 + 7.16 \quad \text{[식 3.2.30]}$$

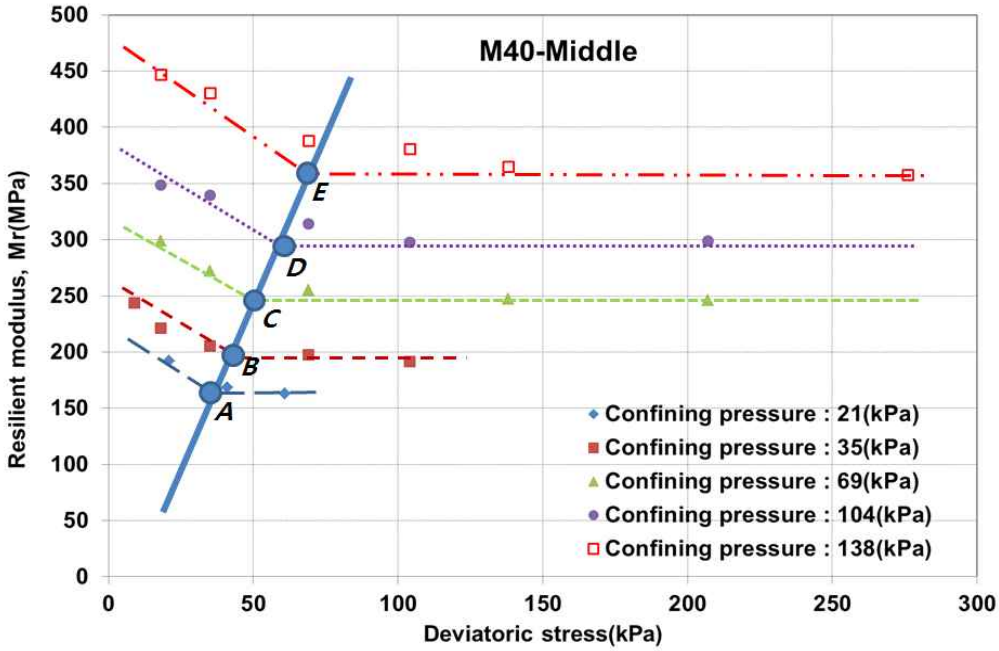
$$f(\sigma_d, \sigma_3) = 0 \text{ for } \sigma_d > 0.52 \bullet \sigma_3 + 7.16 \quad \text{[식 3.2.31]}$$

본 예측모델은 May와 Witezak(1981)의 모델, $M_R = \beta_0 I_1^{\beta_1} f(\epsilon_a)$과 달리 변형률함수 대신에 축차응력과 구속압을 고려한 함수를 이용하였다. 이는 회복탄성계수시험과 탄성계수 산정을 위한 반복삼축압축시험의 하중패턴이 다르고 그에 따라 변형률에 따른 탄성계수 변화 경향도 크게 다른 것을 시험 조건에 따른 시험 결과 분석의 하중패턴의 영향에서 확인한 바 있다. 따라서 탄성계수 변화곡선의 계수를 활용할 경우 상대적으로 큰 변형률 수준(큰 축차응력 수준)에서 회복탄성계수를 과소평가할 수 있는 우려가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 변형률 대신 축차응

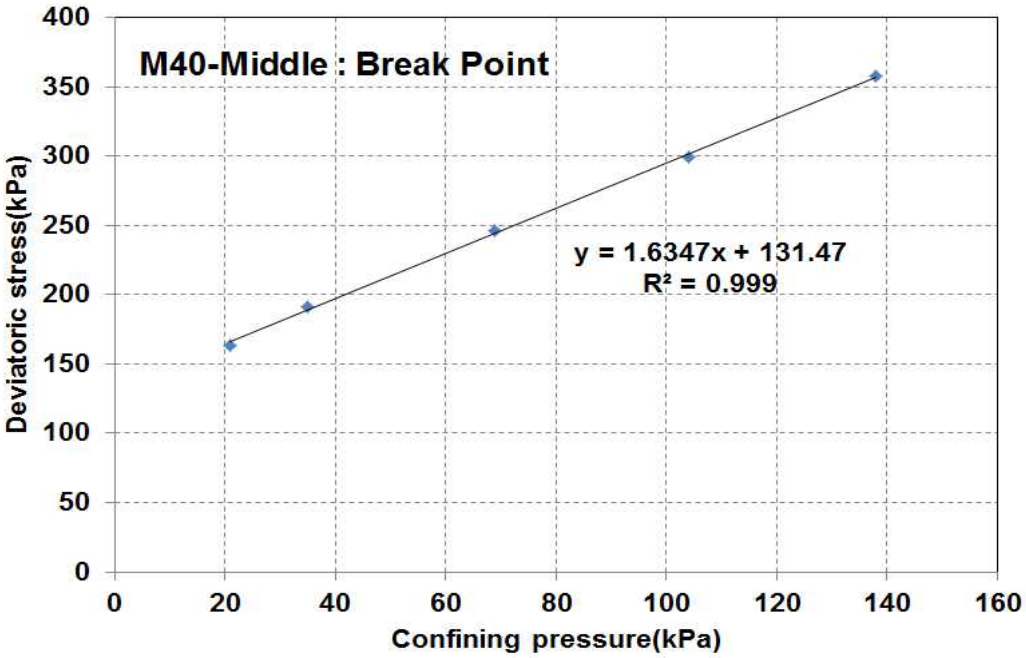
력을 직접 고려하여 회복탄성계수를 예측하고자 하였다.

즉 [그림 3.2.93]과 같이 시험 결과에서 구속압별 시험 결과에서 낮은 축차응력 수준에서 축차응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이다가 일정한 축차응력 값 이상에서는 거의 일정한 패턴을 보이고 있다. 즉 21kPa, 35kPa, 69kPa, 104kPa, 138kPa의 구속압에서 수행된 회복탄성계수 결과는 그림의 임계점(Break point, A, B, C, D, E)까지 감소경향을 보이다가 이후에는 거의 일정한 경향을 확인할 수 있었으며, A, B, C, D, E점의 구속압과 축차응력은 선형적인 특징을 보였다. 또한 임계점 이전의 축차응력 수준에서의 회복탄성계수 감소 경향도 구속압별로 유사한 기울기로 감소하여 이를 예측 모델에 적용하였다. 결과적으로 본 시험결과에서 M40 재료에 대해 제시된 회복탄성계수 모델의 수식과 이를 시험결과와 함께 [그림 3.2.93]에 나타내었다.

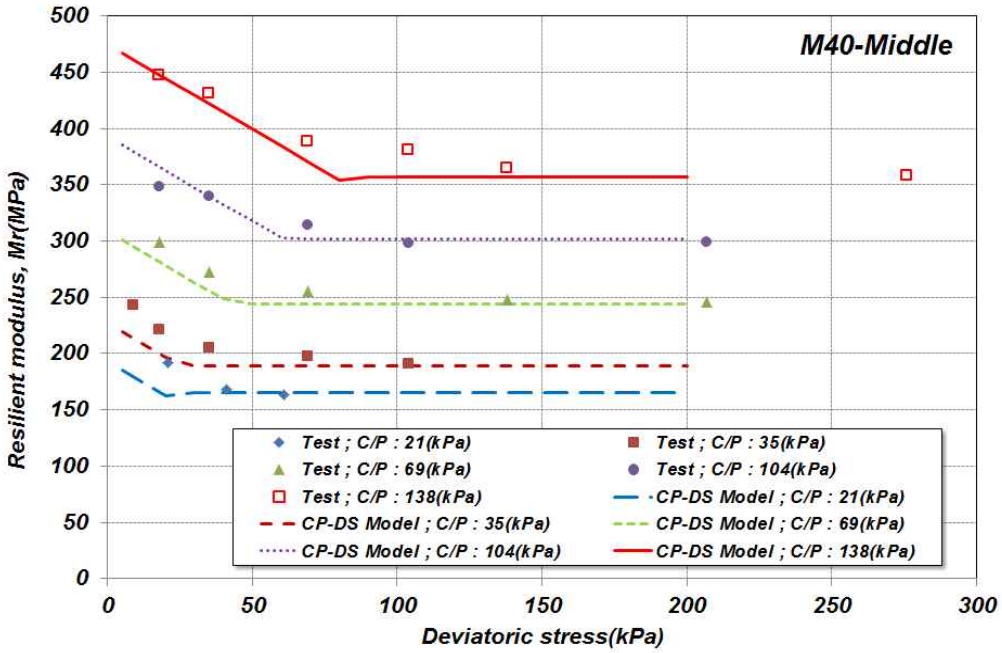
여기서 제시된 회복탄성계수 모델은 본 연구에서 수행된 도로 보조기층 및 철도 강화노반재료로 사용되는 M40재료에 한해서 적용할 수 있는 모델이다. 그러나 다른 예측 모델과 비교해서 대상 재료에 한해서는 비교적 정확하게 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 다른 재료들에 대해서도 양질의 시험 결과를 축적하여 적용하고자 하는 대상별로 보다 정확한 예측 모델을 제시하여 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.



(a) 구속압별 회복탄성계수와 임계점(Break point)



(b) 임계점과 구속압의 상관성



(c) M40재료의 회복탄성계수 수식화 결과

[그림 3.2.93] M40재료의 회복탄성계수 모델

제 3 절 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법의 제안

1. 개요

지반의 하부구조를 비파괴적으로 조사하기 위한 표면파 시험은 기본적으로 무한대의 지표면에서 시험을 수행하는 것을 가정하고 있다. 이는 표면파의 전파모델을 역학적으로 구현하는데 있어서 무한대 지표면의 가정이 필요하기 때문이다. 그런데 대입경 골재를 주로 사용하여 시공하게 되는 지반 구조물은 일반적으로 무한대의 지표면을 가지고 있지 않고, 필히 사면을 포함하게 되며, 표면파 시험도 제한된 면적을 가지고 있는 댐 마루나 사면도로와 같은 경사진 경계면이 존재하는 지표면에서 시험을 수행해야 하는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 경계면이 존재하는 지표면에서 표면파 시험을 수행했을 때, 그 경계면의 영향이 어떠한지를 유한요소해석에 의하여 연구하여 보았다. 본 연구에서 사용한 유한요소 해석 프로그램은 ABAQUS 로서 이미 검정되어 널리 활용되고 있는 상용프로그램이다.

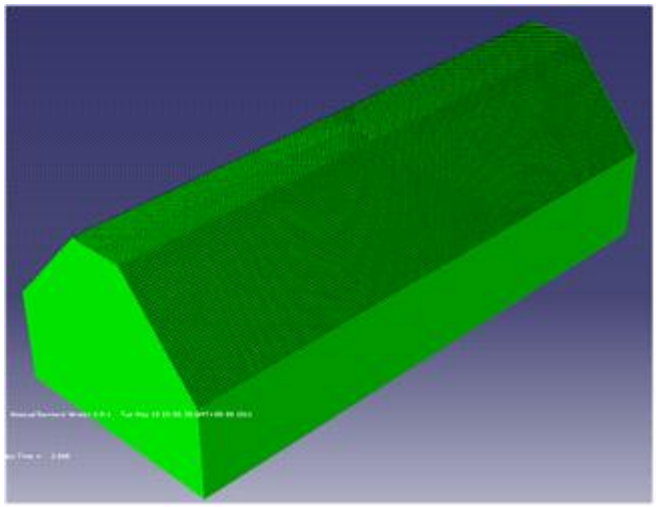
2. 사면경계가 있는 지표면에서의 표면파 전파해석을 위한 유한요소 해석

가. 댐구조물의 유한요소모델

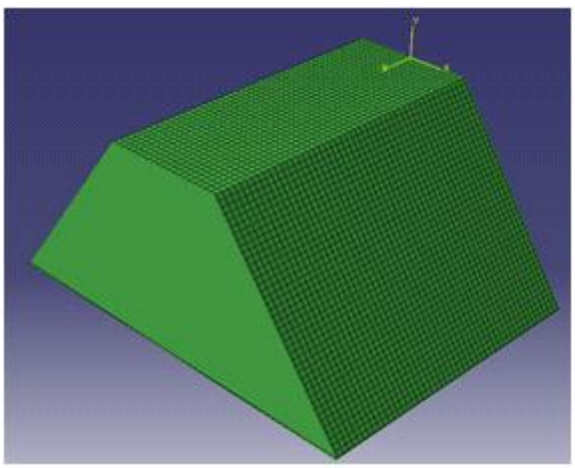
일단 지반구조물로서는 댐, 성토체와 같은 댐 구조물을 선정하였고, 표면파의 전파특성을 반영하기 위해서는 3D Solid 모델을 이용하였다. 본 연구에서 구현한 댐 구조물의 유한요소모델은 [그림 3.3.1]과 같다. 표면파의 파동전파를 구현하는데 가장 우려할 점은 양단 경계면이나 바닥면에서의 반사파이다. 이는 경계면에서 반사된 반사파가 표면파의 파동을 교란하여 표면파의 특성이 왜곡되기 때문이다. 그리하여 이 문제를 해결하기 위하여 [그림 3.1.1]에 도시된 바와 같은 두 가지의 모델을 사용하여 구현하였다. [그림 3.3.1](a)의 경우는 균질한 제체를 모사한 대규모 유한요소모델인데, 표면파의 반사특성을 확인하기 위한 모델이다. 즉 댐의 길이를 매우 길게 하여 반사파가 감진기 위치까지 돌아오는 시간을 오래 걸리도록 하여 실제 감진기 신호에는 반사파가 포함되지 않도록 시도하였다. 그리고 [그림 3.3.1](b)의 경우는 내부에 점토 코아가 존재하는 제체로서 복합재료의 특성을 파악하기 위한 것을 주목적으로 한 소규모 유한요소모델이다. 두 가지 모두 댐의 양단 및 바닥면

을 무한요소로 처리하였는데, 이렇게 무한요소를 사용하는 것의 장점은 모델의 경계면에서 반사파를 최소화하여 댐제체의 부정형으로 인한 반사특성만을 평가하기 위함이다.

[그림 3.3.1](a)의 양단 자유단 모델의 경우는 댐의 제원이 길이 50m, 댐마루 폭 5m, 댐 높이 9m 로서, 요소 하나의 크기는 0.25m를 이용하여 메쉬를 구성하였으며, 전체 유한요소의 개수는 434,200개이다. 한편 [그림 3.3.1](b)의 유한요소 모델은 댐의 길이 20m, 댐마루 폭 5m, 댐 높이 9m 로서, 요소 하나의 크기는 동일하게 0.25m를 이용하여 메쉬를 구성하였다. 전체 유한요소의 개수는 99,850개이다.



(a) 균질한 제체를 모사한 대규모 유한요소모델



(b) 복합 재료를 모사한 소규모 유한요소모델

[그림 3.3.1] 제방구조물에 대한 표면파 시험을 모사하기 위한 유한요소모델

댐제체의 암버럭과 점토코아에 사용된 물성은 다음과 같다.

- 전단파 속도: 150 m/sec
- 포아송비: 0.3333
- 밀도: 1,900 kg/m3

나. 표면파 속도 측면에서 3차원 형상 효과

사면경계가 있는 지표면에서의 표면파 파동의 전파는 무한대 지표면에서의 표면파 파동의 전파와 다를 것이라는 것은 [그림 3.3.2]를 참고하면 쉽게 이해할 수 있다. 즉 [그림 3.3.2]는 반무한체의 지표면에서 표면파 시험을 수행한 것으로 표면파 파동의 에너지가 하부로도 퍼지지만 횡방향으로도 넓게 퍼져 나가는 것을 볼 수 있다. 즉 균질한 반무한체의 경우 표면파 에너지의 영향범위가 깊이방향보다 횡방향으로 약 2~3 배 이상의 범위까지 영향을 미치고 있다. 이러한 사실은 사면경계가 있는 댐 제체에서의 표면파 시험에서도 사면경계로 인하여 표면파 에너지가 퍼지지 못하고 상당한 부분이 반사되어 표면파 파동의 전파를 교란시킬 것이라는 것을 충분히 예측할 수 있다.

그런데 사면경계의 존재가 단지 표면파 파동신호의 교란으로 그칠 것인지, 즉 신호 품질을 떨어 뜨리는 것으로만 끝날 것인지 아니면 표면파 파동속도에도 영향을 미칠 것인지는 매우 흥미로운 주제이다. 그리하여 댐마루에 감진기를 설치하고 표면파 시험을 유한요소 해석에 의해 모사하여 보았다.

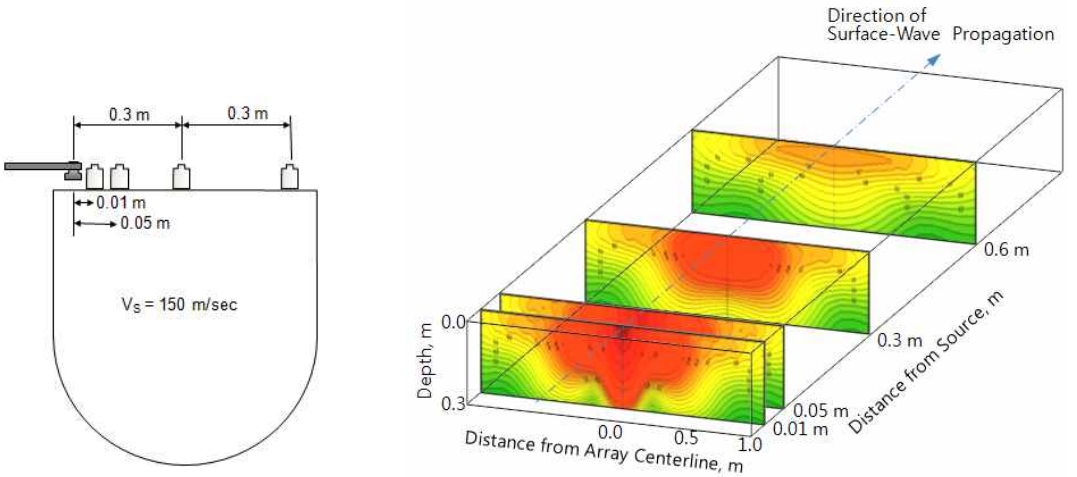
[그림 3.3.3]에는 반무한체 지표면에서 표면파 시험을 수행한 경우의 표면파 속도와 사면경계가 존재하는 [그림 3.3.1]의 유한요소모델을 사용하여 표면파 시험을 수행한 경우에 획득한 표면파 속도를 비교하고 있다. 반무한체 지표면에 대한 표면파 속도는 동강성 행렬법에 근거한 파동해석 프로그램인 Fit7을 사용하여 해석해를 구하였다. 반무한체의 경우 심도 9m에 암반이 존재한다고 하여, [그림 3.3.2](a)와 동일한 물성 조건을 적용하였다. [그림 3.3.3]의 비교에서 볼 수 있듯이, 두 해석 결과에는 현저한 차이를 보이고 있다. 반무한체의 지표면에 대한표면파 속도는 예상했던 바와 같이 약 130~150 m/sec 의 속도를 보이고 있는 반면, 사면경계가 있는 댐마루에서의 실험은 두 개의 파군으로 구별되게 측정되고 있음을 보여주고 있다. 첫 번째 파군은 2~6m 파장으로서 대체적으로 댐마루 폭보다 작은 파장이고, 두 번째 파군은 5~30m 파장으로 댐마루 폭보다 큰 파장이다. 댐마루 폭보다 작은 파장의 표면파는 110~130 m/sec 의 속도를 보이고, 댐마루 폭보다 큰 파장의 표면파는 70

~90 m/sec 의 속도를 보이고 있다. 어느 경우든지 평면인 지표면에서보다 느리게 전파하고 있는 것으로 평가되었고, 댐마루 폭보다 큰 파장의 표면파는 더 느리게 전파되고 있는 것으로 평가되었다.

이러한 전파특성은 [그림 3.3.3](b)와 (c)에서도 확인가능하다. 특히 제체를 횡방향으로 절단해 놓은 절편에서의 에너지 분포를 살펴보면, 사면의 경계면 쪽에서는 표면파 에너지가 체적파보다 느리게 전파되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 사면이라는 경계면이 표면파 전파를 무한평면에서와 다르게 전파되도록 하였다.

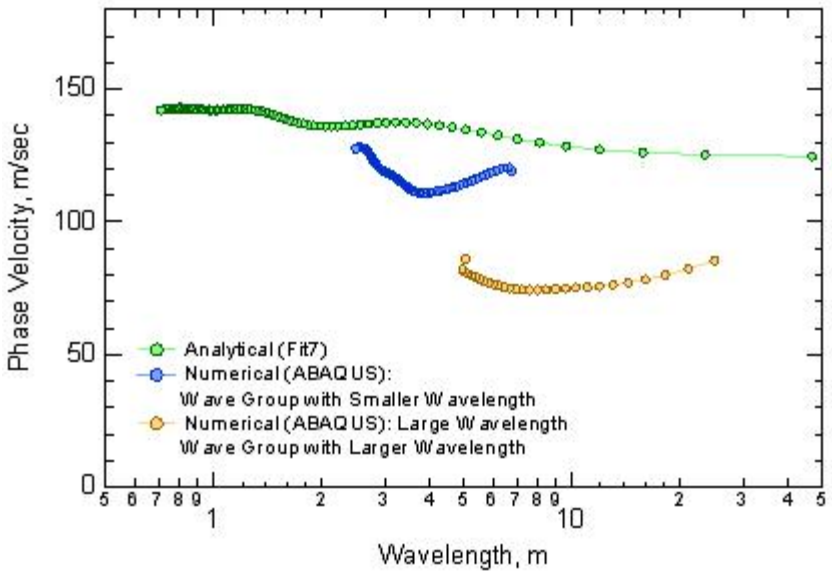
이와 같은 결과는 참으로 우려할 정도의 심각하지 않을 수 없다. 즉 댐 제체의 매질이 균질하더라 하더라도 사면경계가 존재하여 표면파 파동의 전파를 구속하는 조건을 만들어 주면, 표면파 파동의 전파속도가 작게 평가되고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 다음과 같은 매우 중요한 사실을 유추하게 한다.

- 사면경계가 있는 구조물에서의 표면파 속도는 동일 매질의 반무한체 지표면에서 측정한 표면파 속도보다 작게 평가된다.
- 사면경계가 있는 구조물의 경우 표면파 속도에 대하여 매질의 전단파 속도를 구하기 위한 역산해석은 사면경계를 고려할 수 있는 전용 역산해석 알고리듬이 개발되어야 한다.

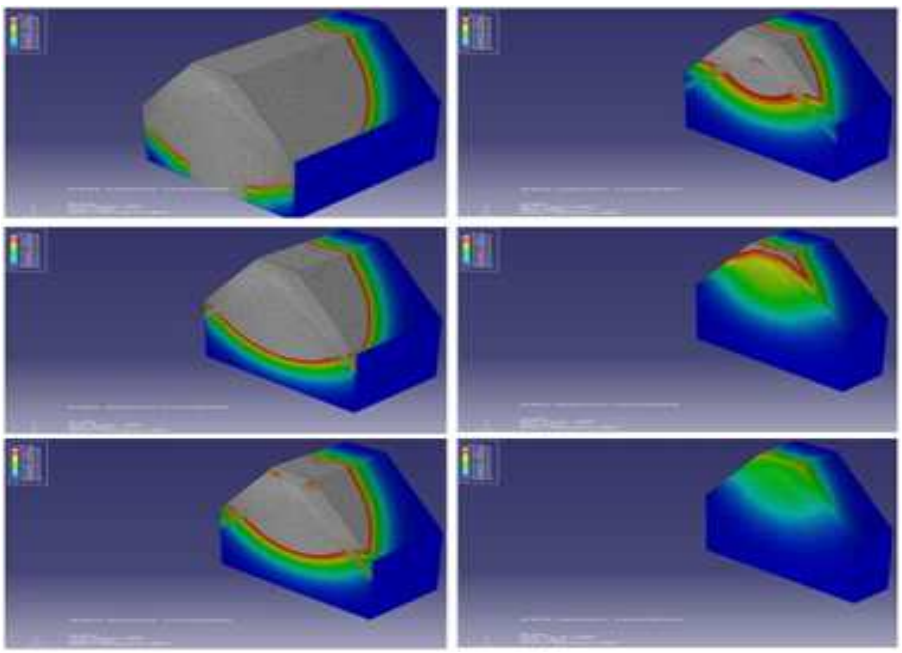


(a) 지층구조 (b) 표면파 전파시 지반매질 수직변위의 횡방향 분포

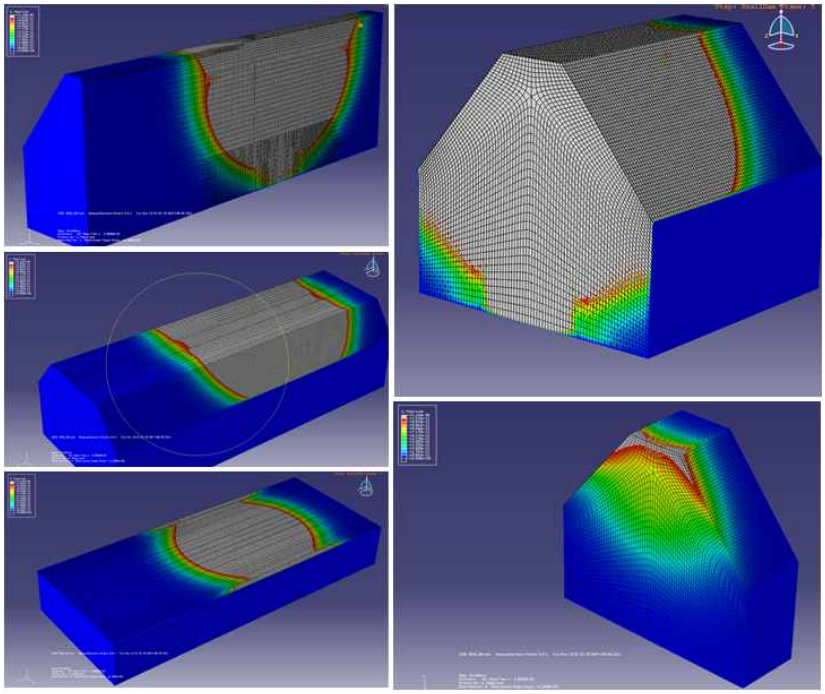
[그림 3.3.2] 표면파 전파시 발생하는 지반매질 수직변위의 횡방향 분포



(a) 표면파의 분산특성



(b) 경사면 경계가 있는 댐 제체에서의 표면파 전파특성



(c) 댐 제체 내에서 전파되는 표면파의 전파특성

[그림 3.3.3] 제방구조물에 대한 3차원 유한요소해석 결과

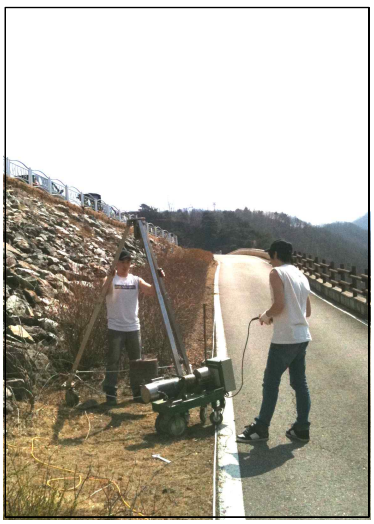
3. 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법의 개발

가. 조립재료 지반에 적합한 최적 발진원 제안

대입경 골재로 조성된 댐 구조물의 경우 대입경 골재라는 특성 때문에 매질의 불연속성이 존재하며 그로 인하여 탄성파 파동 에너지의 감쇠가 급격하게 진행될 것이 예상된다. 또한 대입경 골재는 일반적으로 사력댐 조성에 도입되기 때문에 대체적으로 그 사력댐은 대형 댐일 가능성이 많다. 따라서 이와 같은 이유로 인하여 대입경 골재의 지반구조물에서 표면파 시험을 할 경우 큰 표면파 에너지가 필요하다.

일반적으로 표면파 시험에서 사용되는 표면파 발진원은 작은 손망치, 슬레지 해머, 100-kg 중추, 불도우저, 바이브로 사이즈 등인데, 대형 사력댐의 경우는 안전상 불도우저와 바이브로 사이즈는 허용이 되지 않았다. 따라서 대형 사력댐에서 사용가능한 발진원은 슬레지 해머와 100-kg 중추 뿐이다. 한편으로는 불도우저의 경우 연속적인 운행진동으로 매우 양호한 저주파 에너지를 만들어 낼 수 있기 때문에 일반 지반에 있어서 매우 효율적으로 사용되지만, 심각한 반사파로 인한 표면파의 교

란이 예상되는 댐 구조체에서는 오히려 연속적인 운행진동은 더 심각한 표면파의 교란으로 이어져서 부정적인 효과가 클 것으로 판단되었다. 따라서 최종적으로 대형 사력댐과 같은 대입경 골재로 조성된 지반구조물에서는 100-kg 중추를 사용하는 것으로 결정하였다. 금차년도 연구수행중 도입한 100-kg 중추는 [그림 3.1.4]에 사진으로 제시한 바와 같다.

[그림 3.3.4] 대형 사력댐에서 표면파 시험을 수행하기 위해 사용한 발진원

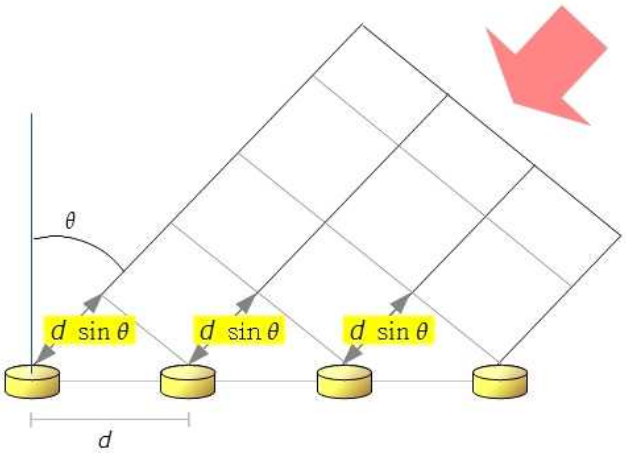
나. 조립재료 지반구조물을 위한 빔형성 기법의 제안

(1) 빔형성 기법의 개요

빔형성(beamforming) 기법은 그 개념이 무선 신호 송수신을 위한 안테나에서 시작되었으며, 시간 및 공간 정보를 동시에 활용하여 특정방향의 원하는 신호를 송수신 할 수 있도록 하며, 그 밖의 다른 방향의 신호는 잡음으로 간주하여 송수신을 억제할 수 있도록 해 주는 기술이다. 빔형성 기법의 개념을 간단하게 [그림 3.3.5]에 모식도로 설명하였다. [그림 3.3.5]에서는 4개의 안테나를 배열로 설치하여 신호를 탐지하는 구성인데, 이를 배열신호 처리라고 한다. 배열 신호처리는 배열 안테나와 같이 특정 패턴으로 배열된 여러 개의 센서를 이용하여 신호를 탐지하는 신호 처리 기법이고, 이는 빔형성기법의 기초가 되는 원리이다.

본 연구에서는 일단 빔형성기법의 원리를 이해하고 빔형성기법의 물리적인 특성을 수치 실험으로 파악하였다. 그리고 본 연구과제의 핵심인 대입경 조립골재 지반구조물에 적합한 Walk-Away Beamforming 기법과 USA (Unbiased-Short-Array)

Beamforming 기법 (또는 UBF 기법)을 제안하게 되었고, 최종적으로는 역산해석관련 이론적 배경을 고려하여 UBF 기법을 최적의 표면파 기법으로 결정하게 되었다.



[그림 3.3.5] 선형 1차원으로 배열된 감진기 배열

(2) 표면파의 배열신호처리

공간 배열을 사용하면 여러 센서들에 대하여 위상 속도를 동시에 추정할 수 있다. 표면파를 평면파라고 가정하고, 표면파에 대하여 빔형성 기법을 적용해 보면 다음과 같다.

- [그림 3.3.1]에서 표면파 신호 h(t)는 감진기 4개에 동일한 파형으로 θ의 경사각을 가지고 입사되고 있다. 이 때 표면파 신호 h(t)는 4번 감진기(가장 우측)에 가장 먼저 도착하고 1번 감진기에 가장 늦게 도착하게 된다. 각 감진기에 도착하는 신호 함수를 수식으로 표현해 보면 [식 3.3.1]과 같다.

$$h_1(t) = h(t - 3\Delta t)$$
$$h_2(t) = h(t - 2\Delta t)$$
$$h_3(t) = h(t - \Delta t)$$
$$h_4(t) = h(t)$$

[식 3.3.1]

여기서 $\Delta t = d\sin\theta / v$ 이고, v는 표면파의 전파속도이다.

- 감진기 1,2,3 번에 도착하는 표면파의 지연시간 $3\Delta t$, $2\Delta t$, Δt 은 표면파 신호 $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$, $h_4(t)$ 간의 상호상관관계 함수(cross-correlation function)를 계산함으로써 구할 수 있다. 즉 1번 감진기와 4번 감진기 간의 신호 지연시간 $3\Delta t$는 $h_1(t)$와 $h_4(t)$간의 상호상관관계 함수를 구하고 그 최대치가 되는 시점이 바로 $3\Delta t$가 되는 것이다. 그런데 이러한 상호상관관계 함수는 시간영역에서의 연산이기 때문에 연산시간이 상당히 소요되는 관계로, 일반적으로 주

파수 영역에서 크로스파워 스펙트럼을 구함으로써 더 짧은 시간에 동일한 결과를 도출하게 된다.

- 모든 감진기 상호간의 크로스파워 스펙트럼 함수 행렬 $R_{ij}(w)$을 계산한다.

$$R_{ij}(w) = S_i(w)S_j^*(w) \quad \text{[식 3.3.2]}$$

여기서 $S_i(w)$는 i번째 감진기의 선형스펙트럼, $S_j^*(w)$는 j번째 감진기의 선형스펙트럼에 대한 공액복소수이다. 각 선형스펙트럼은 주파수영역에서 앙상블 평균을 취하여 측정한 것으로 신호대 잡음비가 향상되어 있는 함수이다.

- 주파수 영역 해석 이론에 의하면, 시간영역에서 신호지연 시간은 주파수영역에서 위상각으로 나타나고, 위상각을 지수로 취한 exponential 함수를 선형스펙트럼에 곱한 결과와 같게 된다. 이 때 [식 3.2.3]과 같은 지수함수를 조타벡터(steering vector)라고 하며, 임의의 신호지연 시간 wt는 $\boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{x_i}$ 로 표현된다. 여기서 $\boldsymbol{k}$는 파수(wavenumber) 벡터, $\boldsymbol{x_i}$는 i번째 감진기 위치벡터이다.

$$\boldsymbol{e}(\boldsymbol{k}) = [\, e^{-j\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{x_1}} \quad e^{-j\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{x_2}} \quad \cdots \quad e^{-j\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{x_S}} \,]^H \quad \text{[식 3.3.3]}$$

- 그리고 일련의 주파수 f와 일정 범위의 파수 $\boldsymbol{k}$에 대하여 모든 감진기 쌍에 대한 상호상관관계 함수의 합계, 즉 각 감진기 쌍에 대한 크로스파워 스펙트럼의 함수 값을 모두 합한 결과를, 즉 [식 3.3.4]로 계산한 결과치인 P_{BF}를 컨투어로 도시한다.

$$P_{BF}(\boldsymbol{k},w) = \boldsymbol{e}^H(\boldsymbol{k})R(w)\boldsymbol{e}(\boldsymbol{k}) \quad \text{[식 3.3.4]}$$

이 때 일정 위상 속도로 특정 방향으로 전파되는 평면파가 존재하는 경우 $f-\boldsymbol{k}$ 스펙트럼 추정치의 첨두치를 찾아볼 수 있다.

- $f-\boldsymbol{k}$ 스펙트럼 추정치의 첨두치인 각 주파수에 대한 최적의 파수는 ridge 분석을 통해서 결정할 수 있고, 이로부터 [식 3.3.5]를 이용하여 분산속도를 구할 수 있다.

$$v_{ph} = \frac{w}{k} \quad \text{[식 3.3.5]}$$

(3) 기존 연구자들에 의한 빔형성기법의 구현

빔형성기법을 구현한 사례는 Zywicki 와 Rix (2005)를 들 수 있다. 이들은 모두 15개의 감진기를 사용하여 표면파의 전파신호를 측정하도록 제안하였다. 감진기간 간격은 균등하지 않으며, 직선으로 배열하도록 하였고, 최소 간격은 1m, 최대 간격은 60m 이었다. 이렇게 비균등 감진기간 간격으로 배열하도록 한 것은 공간영역에서 엘리어싱이 존재할 수 있는 가능성을 배재하고자 하였기 때문이다. 또한 $f-\boldsymbol{k}$ 스펙트럼의 해상도를 좌우하는 것은 최대의 감진기간 간격이 결정하도록 되어 있다.

(4) 본 연구에서 제안하는 빔형성기법의 구현

Zywicki 와 Rix (2005)의 빔형성기법은 실제 현장에 적용하는데 있어서 몇 가지 내재적 한계를 지니고 있다. 그 내재적인 한계는 다음과 같다.

- 1차원 전단파 속도 주상도를 결정하기 위해 필요한 측선 길이가 60m에 이르며, 감진기간 간격도 한쪽으로 치우쳐 있기 때문에, 측선 하부 매질이 균등하지 않은 경우는 측정결과의 대표성이 의문시 될 수 있다.
- 15개의 감진기 신호를 동시에 측정하여야 하는 문제로 인하여 다채널 동적자료 획득 하드웨어가 요구된다.
- 고주파 영역의 신호측정이 용이하지 않아서 천층의 매질을 탐사하는데 신뢰도가 떨어진다.

본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 새로운 측정방법을 제안하였다.

- 감진기는 모두 4개를 설치하는데, 감진기간 간격은 등간격 3 m 로 설정한다.
- 표면파를 발생시키기 위한 발진원의 위치는 감진기간 간격을 d라고 하였을 때, d, $4d$, $7d$, $10d$, $13d$, $16d$, ... 와 같이 $3d$의 증분으로 반복하여 발진원을 설정하여 측정을 수행한다. 이는 물리탐사의 영역에서 walk-away 방법이라고도 하는 것으로, 여러 위치의 발진원에 대하여 실험을 개별적으로 수행한 후 최종적으로 이들 개별 시험결과를 취합하여 하나의 발진원에 대한 등가 측정치로 변환하게 된다. 본 연구에서는 이들 그룹별 신호를 병합하기 위하여 Impulse Response와 주파수 응답을 사용하였다. walk-away 기법에서는 4 개 감진기가 설치된 영역의 매질에 대하여 집중적으로 측정하기 때문에, 횡방향으로 매질이 균질하지 않아도 감진기 하부매질에 대하여 신뢰성있는 측정이 가능하다.
- 빔형성기법으로 측정한 파수가 파수의 [식 3.2.5]의 상한 기준치를 초과하는 경우, $f-\boldsymbol{k}$ 스펙트럼은 접혀서 다시 0의 파수로 복귀하게 되는 엘리어싱 문제가 발생한다. 본 연구에서는 이 엘리어싱된 파수를 복구하는 기법을 개발함으

로써 고주파 대역, 천층의 매질도 측정하고 평가할 수 있게 되었다. 파수의 복원은 [식 3.2.6]에서와 같이 엘리어싱된 파수에다 $2\pi/d$의 배수만큼 증분시키는 것으로 진행된다.

$$\lambda_{max} = \frac{2\pi}{k_{min}} \quad 또는 \quad \lambda_{min} = \frac{2\pi}{k_{max}} \qquad [식\ 3.2.6]$$

$$k_{mod} = k + \frac{2\pi}{d} \cdot n \qquad [식\ 3.2.7]$$

(5) 본 연구에서 제안하는 빔형성기법의 특성에 대한 이해 및 검증

본 연구에서 제안한 빔형성기법을 검증하기 위하여 4 가지 종류의 지반구조를 설정하여 각각 지반에 빔형성기법 시험을 수행하고 이를 분석한 결과를 제시하였다. 본 연구에서 고려한 4가지 지반구조는 다음과 같다.

- 경기도 시화지역에서 SASW 시험으로 측정하여 해석한 1차원 지층구조
- 깊이증가에 따라 강성이 증가하는 구조
- 천층에 암반이 존재하여 연약층-강성층의 급격한 대칭구조를 보여주는 지층
- 중간에 연약층이 협재되어 있는 샌드위치형 구조

각각의 지반구조에 대한 해석결과를 [그림 3.3.2~3.3.3]에 도시하였다. 도시된 결과에는 $f-\boldsymbol{k}$ 컨투어, 주파수-위상속도 컨투어, $f-\boldsymbol{k}$ 스펙트럼, 위상속도 분산곡선 등이 포함되어 있다. 이와 같은 4종의 지반구조에 대하여 해석결과를 분석함으로써 빔형성기법에 관한 특성을 파악하였다.

(가) 비균등 감진기간격 대 균등 감진기간격

Zywicki 와 Rix(2000)가 제안한 빔형성기법의 배열이 등간격 배열에 비하여 어떠한 특징을 가지고 있는지 파악하고자 하였다. 이를 위하여 경기도 시화지역의 지층구조에 대하여 수치해석적으로 일련의 표면파 시계열 데이터를 발생시키고 이를 이용하여 빔형성 기법을 적용하였다. [그림 3.3.2]에는 감진기 15개, 총 60-m 측선을 이용하는 Zywicki 배열에 대한 결과를 제시하였고, [그림 3.3.3]은 감진기 10개, 총 30-m 측선을 이용하는 3-m 등간격 배열에 대한 결과를 제시하였다.

Zywicki와 Rix는 그 논문에서 공간 엘리어싱을 피하기 위하여 비균등 배열을 취하였다고 한 것처럼, [그림 3.3.2]의 f-k 컨투어를 보면 짙은색의 능선이 지배적으로 하나가 나타나고 있어서 엘리어싱의 징후는 보이지 않는다. 반면 [그림 3.3.3]의 등간격 배열에 대한 f-k 컨투어에는 주파수 50~150 Hz 구간에서 별도의 짙은색 능선이 나타나고 있으며, 이 부분이 엘리어싱으로 인한 왜곡된 영역이라고 할 수

있다. 그러나 엘리어싱된 영역은 지배영역이 $2\pi/d$ (=2.094)만큼 좌측으로 이동되어 있는 유형을 보이고 있다. 즉 파수의 엘리어싱 경계치가 되는 $2\pi/d$ (=2.094)를 초과하는 영역은 동일한 파수만큼 좌측으로 평행이동되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 특성을 이용하면 고주파 영역에서 왜곡된 파수를 회복할 수 있게 되고, 이 개념을 본 연구에서 제안한 새로운 빔형성기법에 도입하였다.

이러한 사실을 고려하였을 때, 공간영역에서 엘리어싱을 피하기 위하여 굳이 비균등 감진기 간격을 이용할 필요는 없을 것으로 판단된다. 오히려 비균등 감진기 간격을 사용하였을 때 f-k 컨투어의 능선을 구별해 낼 수 있는 해상도가 현저히 저하하는 문제를 초래하게 된다. [그림 3.3.3]의 f-k 컨투어는 더 작은 수의 감진기와 더 짧은 측선을 이용하고 있음에도 불구하고 더 해상도가 높은 능선을 식별하여 낼 수 있는 장점이 있다.

따라서 결과적으로 본 연구에서 제안하는 빔형성 기법에서는 등간격의 감진기를 사용하여 f-k 컨투어의 해상도를 증진시킴으로써 보다 정확한 표면파 속도를 결정할 수 있도록 하였으며, 또한 공간영역의 엘리어싱 문제는 [식 3.3.6]을 이용하여 해결할 수 있도록 하였다.

(나) 표면파 속도에 대한 감진기간격의 영향

빔형성 기법에서 감진기간격은 두 가지 측면에서 영향을 주게 된다. 첫 번째는 공간 엘리어싱의 상한 기준치와 연관되어 있고, 두 번째는 측정된 f-k 컨투어에서 능선을 식별하는 정확도와도 직접적으로 연관지어진다. 빔형성 기법에서 감진기간격이 등간격으로 유지되었을 때, 감진기 간격은 공간 엘리어싱 상한 기준치와 직접적으로 연관이 있으며, 감진기간격이 d이었을 때, 공간 엘리어싱 상한 기준치는 $2\pi/d$가 된다. 즉 d 가 작을수록 공간 엘리어싱 상한 기준치가 증가하게 된다. 이를테면 감진기 간격이 3 m 일 때는 공간 엘리어싱 상한 기준치가 2.09 rad/m 이고, 감진기 간격이 1 m 일 때는 6.24 rad/m 가 된다. 이렇게 공간 엘리어싱 상한 기준치가 증가한다는 것은 고주파 영역의 자료를 활용할 수 있어서 짧은 파장의 표면파 속도 즉 얕은 층의 표면파 속도를 구할 수 있다는 의미이기도 하다.

(다) 표면파 속도에 대한 측선길이의 영향

빔형성 기법에서 중요한 또 다른 인자는 사용하는 감진기 개수, 또는 첫 번째 감진기와 마지막 감진기 사이의 거리, 즉 측선길이이다. 표면파 속도는 표면파 주파수 또는 파장에 따라 개별적으로 결정되고 있기 때문에, 주어진 감진기 배열에서 측정할 수 있는 최소 주파수 또는 최대 파장이 얼마가 되는지는 매우 중요한 부분이 된

다. 측정가능한 최대 파장의 문제는 시간영역에서 측정가능한 최대 주파수의 개념과 동일하게 접근할 수 있다. 즉, 샘플링 시간이 Δt일 때 측정 가능한 최대 주파수는 $1/(2\Delta T)$ 또는 주기로는 $2\Delta T$가 된다. 이와 마찬가지로 공간 영역에서 감진기 간격이 Δd일 때 측정가능한 최대 파장은 $2\Delta d$ 가 된다. 따라서 측선 길이가 L일 때 측정가능한 최대 파장은 [식 3.3.8]과 같이 정의할 수 있다.

$$\lambda_{max} = 2L \qquad \text{[식 3.3.8]}$$

한편 주어진 배열 조건에서 측정가능한 최대 파장은 근접장 효과에 의해서도 영향을 받게 된다. 이를테면 발진원이 감진원에 너무 가까이 있게 되면 표면파가 제대로 발현되기도 전에 측정이 되기 때문에 실제로 감진기로 측정하는 탄성파는 체적파가 혼재한 표면파일 가능성이 크다. 이와 같은 측면도 최대 파장 결정에 반영되어야 하기 때문에, 실제로 최대파장에 대한 정의는 [식 3.3.9]로 수정되어야 하며, 좀 더 정확한 정의를 위해서는 추후 연구가 더 필요한 상황이다.

$$\lambda_{max} \leqq 2L \qquad \text{[식 3.3.9]}$$

(라) 제안한 빔형성 기법의 검증

본 연구에서 제안한 빔형성 기법은 다른 연구자들의 경우와 달리 새로운 개념을 도입하여 빔형성 기법의 실용성과 신뢰성을 제고하였다. 본 연구에서 도입한 요소기술로는 다음과 같은 항목들이 있다.

- 공간 엘리어싱의 한계를 극복하기 위하여 제안한 파수복원 방법
- 최대 파장을 설정하기 위하여 도입한 상한 경계치
- 단 4개의 감진기를 사용하여 필요한 수의 시계열 데이터를 확보하는 walk-away 방법

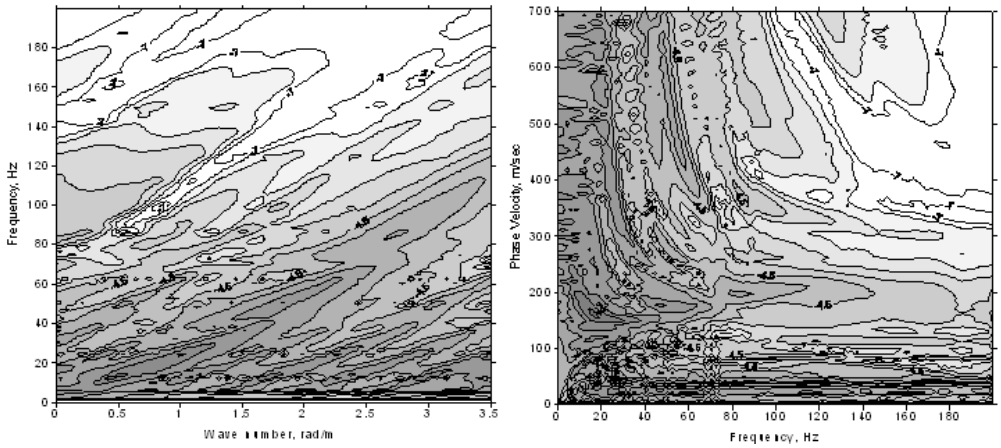
이 중에서 첫 번째와 두 번째 요소기술에 대한 검증을 4종의 지반구조에 대하여 이론적으로 생성해 낸 일련의 시계열 자료를 이용하여 수행하였다. [그림 3.3.6~3.3.17]에는 감진기간격 1m와 3m를 이용하여 빔형성 기법을 수행한 자료를 비교하여 도시하였다. 3m 감진기간격에 대한 자료를 이용하여 파수복원을 시도한 결과가 1m 감진기간격을 이용하여 획득한 파수와 동일한 것이 모든 4종의 지반구조에서 확인되었다. 즉 거의 모든 구조의 지반에서 첫 번째 요소기술인 파수 복원방법이 유효한 것을 확인할 수 있다.

또한 [식 3.3.9]을 이용하여 설정한 최대 파장의 기준은 [그림 3.3.8, 3.3.11, 3.3.14, 3.3.17] 등의 분산곡선에 도입되었다. 즉 빔형성 기법으로 계산한 분산곡선에서 [식

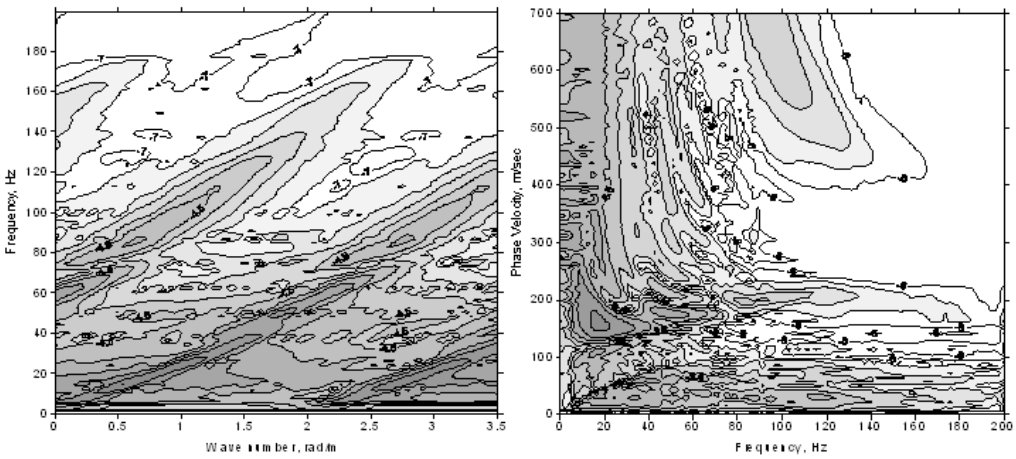
3.3.9]의 최대 파장을 초과하는 위상속도를 제하고 남은 것만 도시한 것이다. 그 결과 빔형성 기법으로 결정한 표면파 속도의 대부분이 SASW 기법으로 결정한 표면파 속도와 거의 유사하게 결정되는 것으로 판단되었다.

따라서 이론 시계열 데이터를 이용하여 확인한 결과 본 연구에서 도입한 빔형성 기법의 요소기술은 대부분의 지반구조에서 유효하며 신뢰성 있는 결과를 제공하는 것으로 검증되었다.

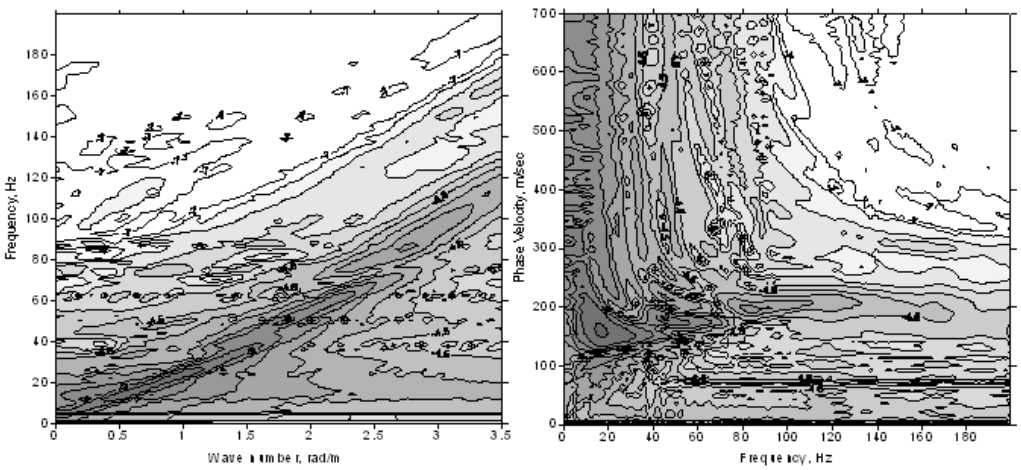
그리고 세 번째 빔형성 기법의 요소기술은 다음 절에서 실제 현장시험을 이용하여 검증하였다.



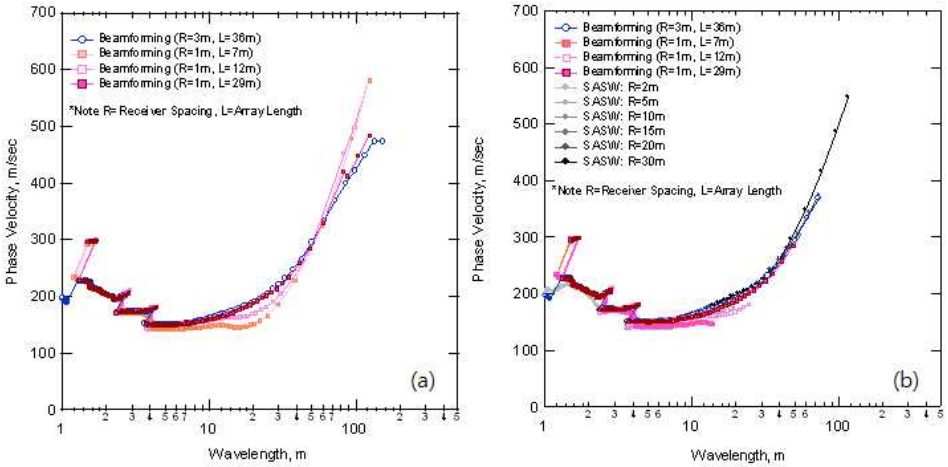
[그림 3.3.6] 빔형성기법으로 결정한 f-k, f-Vph 컨투어: Zywicki 배열 (감진기 15개, 총 60m 측선)



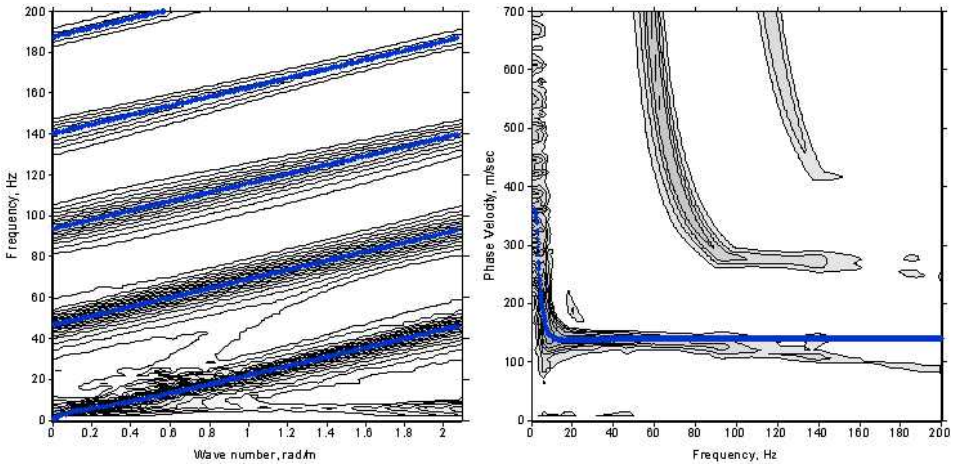
[그림 3.3.7] 빔형성기법으로 결정한 f-k, f-Vph 컨투어: 3-m 등간격 배열 (감진기 10개, 총 30m 측선)



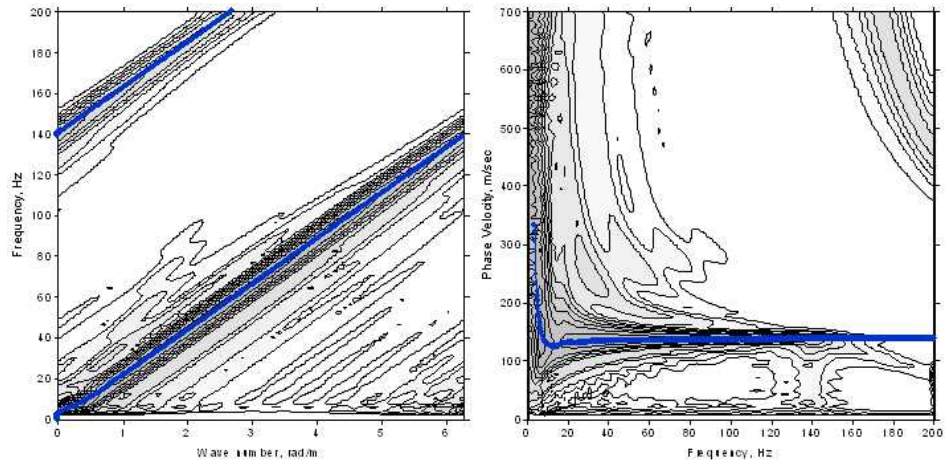
[그림 3.3.8] 빔형성기법으로 결정한 f-k, f-Vph 컨투어: 1-m 등간격 배열 (감진기 30개, 총 30m 측선)



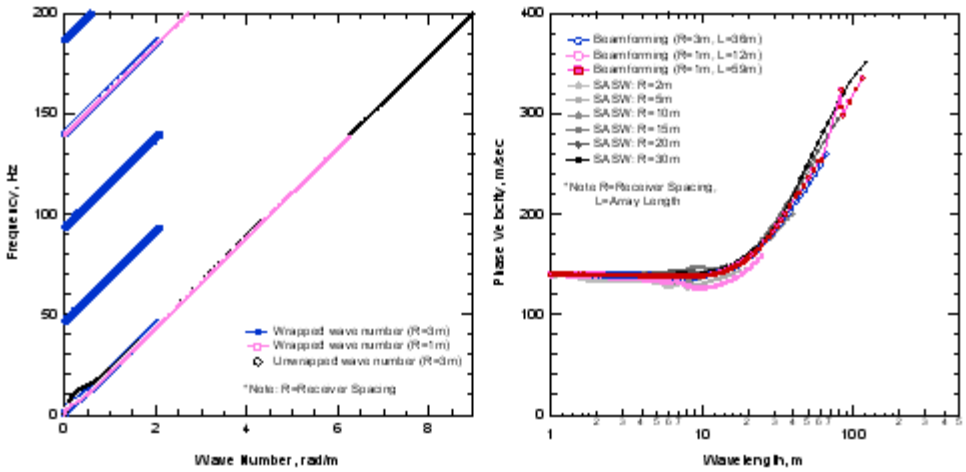
[그림 3.3.9] 빔형성기법에서 측선길이가 표면파 속도에 미치는 영향 : (a) 측선길이에 대한 보정 전, (b) 측선길이에 대한 보정 후.



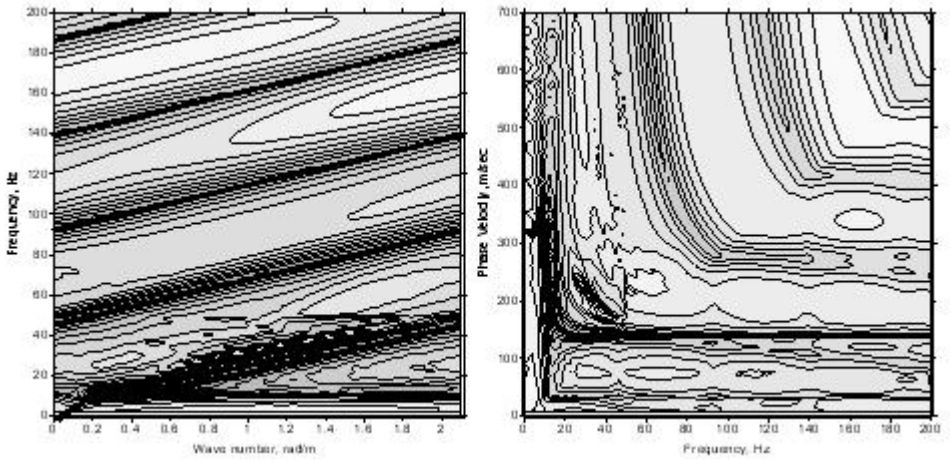
[그림 3.3.10] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: Normally Dispersive Site, 감진기간격=3m



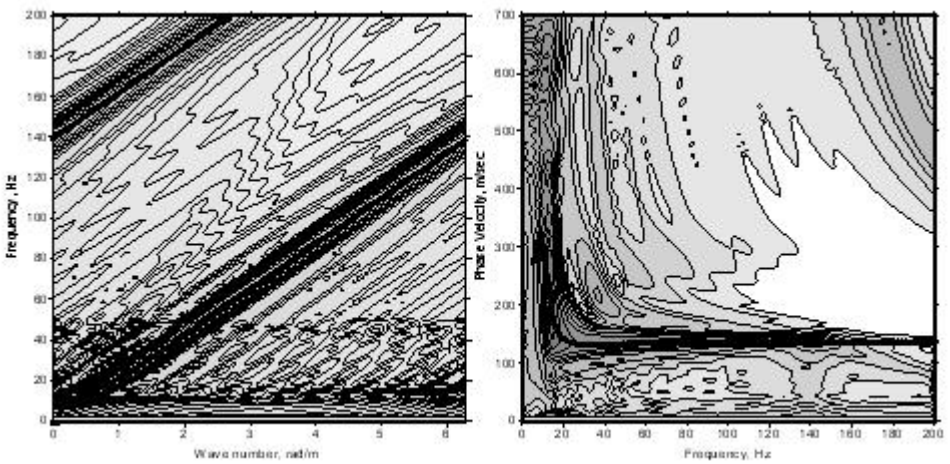
[그림 3.3.11] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: Normally Dispersive Site, 감진기간격=1m



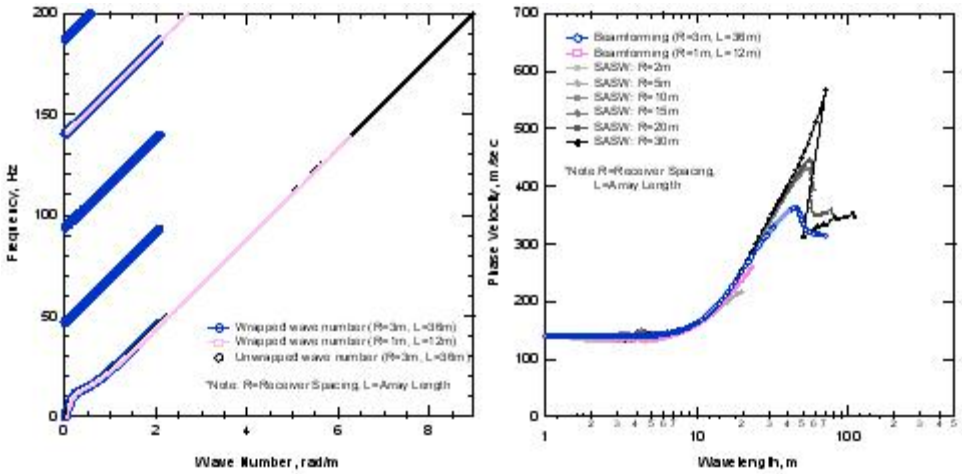
[그림 3.3.12] f-k 스펙트럼, 분산곡선의 비교: Normally Dispersive Site



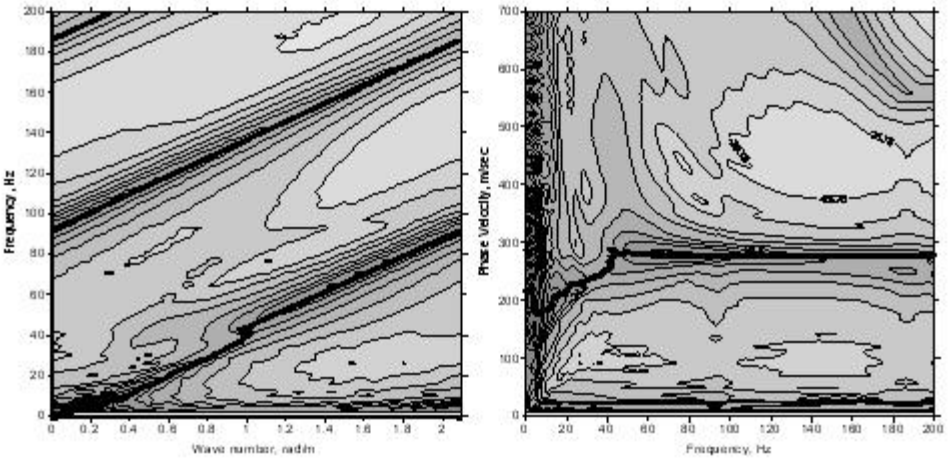
[그림 3.3.13] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: Shallow Bedrock Site, 감진기간격=3m



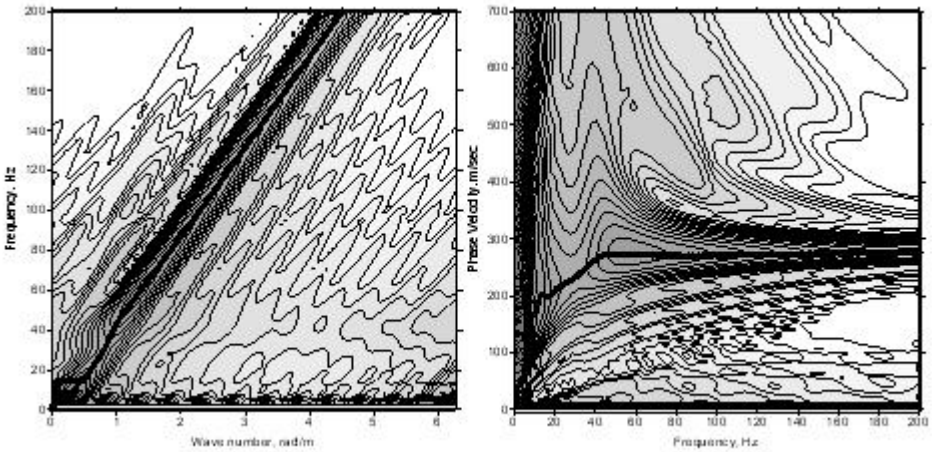
[그림 3.3.14] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: Shallow Bedrock Site, 감진기간격=1m



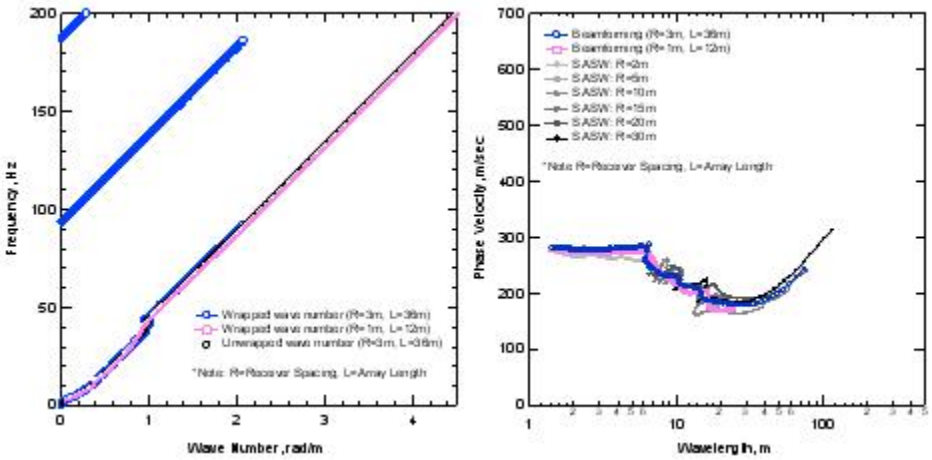
[그림 3.3.15] f-k 스펙트럼, 분산곡선의 비교: Shallow Bedrock Site



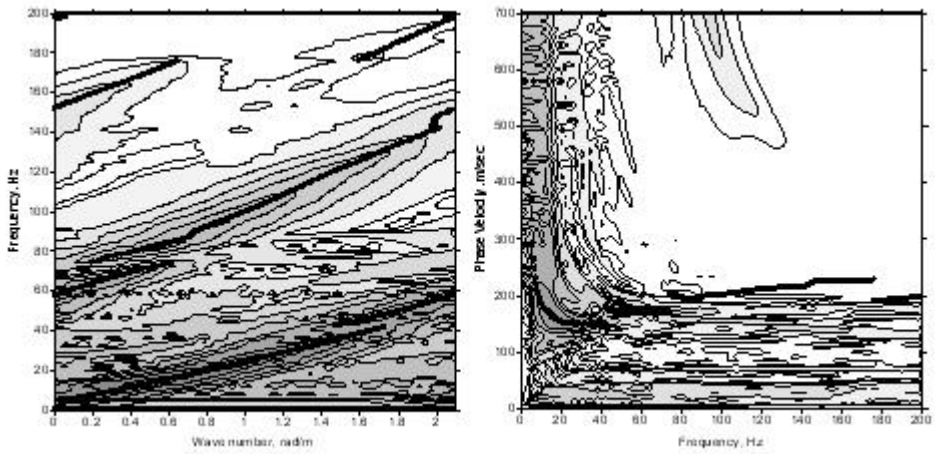
[그림 3.3.16] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: Sandwiched Layer 감진기간격=3m



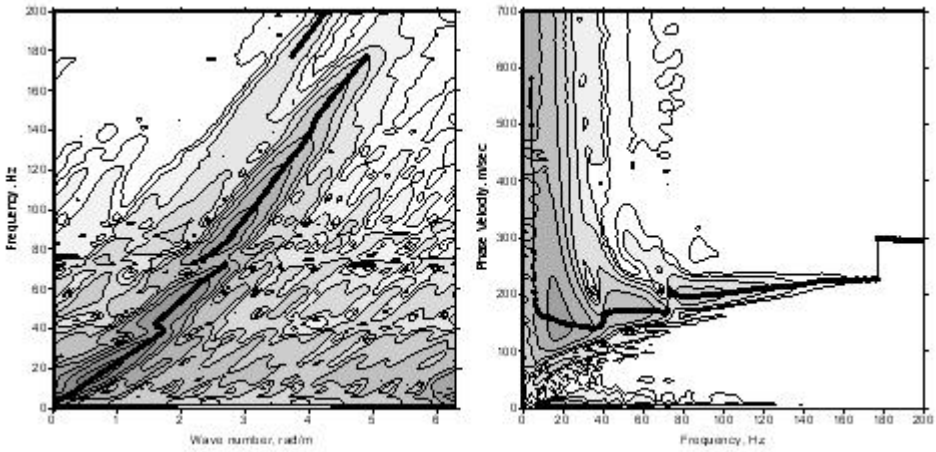
[그림 3.3.17] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: Sandwiched Layer 감진기간격=1m



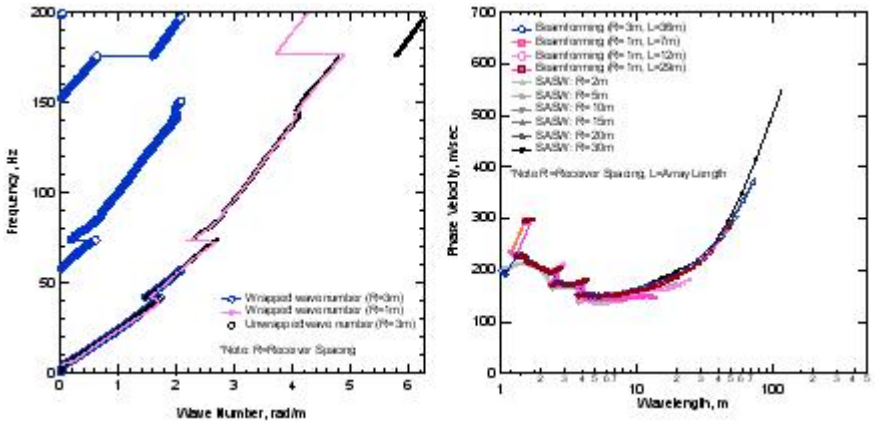
[그림 3.3.18] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼과 분산곡선: Sandwiched Layer



[그림 3.3.19] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: 경기도 시화지구 부지, 감진기간격=3m



[그림 3.3.20] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: 경기도 시화지구 부지, 감진기간격=1m



[그림 3.3.21] 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼과 분산곡선: 경기도 시화지구 부지

다. 대입경 골재로 조성된 사력댐에서의 빔형성 기법의 적용

대입경 골재로 조성된 사력댐의 내진해석을 위한 전단파 속도 평가를 위하여 본 연구에서 제안한 빔형성 기법을 적용하여 보았다. 본 연구에서 개발한 빔형성 기법은 일정 방향으로 전파되는 표면파를 측정함으로써, 대입경 골재에서의 표면파 비산문제, 비평지형 지반에서의 굴절 반사로 인한 표면파의 교란 등의 문제를 해결하고자 하였다.

빔형성 기법을 적용한 사력댐은 밀양댐, 대청댐, 소양강댐과 같은 대형 사력댐이다. 밀양댐의 경우는 상류측이 콘크리트로 표면처리가 되어 있는 CFRD 형식이고, 대청댐과 소양강댐은 내부 중심에 점토코아 영역이 있는 형식이다. 댐제체에 대한 내진해석은 코아 영역 및 암버럭 영역에 대한 전단파 속도를 심도별로 평가하는 것이 필요하기 때문에, 사력댐에서의 표면파 시험도 각 영역에 대하여 별도로 시험을 수행할 필요가 있었다. 그러나 밀양댐을 제외하고는 대청댐, 소양감댐의 댐마루는 보도블록 또는 아스팔트 포장으로 덮혀 있어서 표면파 시험을 위한 감진기 매설이 불가능한 상황이었다. 이러한 상황은 비단 이들 댐의 경우에 국한되는 것이 아니고 거의 모든 댐에서 동일하게 발견되는 특징이기 때문에, 향후 다른 지역의 댐에서도 이와 같은 문제점이 존재한다고 할 수 있다. 그렇다고 해서 기존 댐마루에 설치되어 있는 보도블록이나 아스팔트 포장을 훼손해 가면서 시험을 수행하는 것은 거의 불가능한 실정이기 때문에 이에 대한 대안이 절실히 요구되는 상황이다.

그리하여 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 시험측선을 확보하였다.

- 댐마루나 사면도로에서 감진기를 매설할 수 있는 노출된 지면이 존재하는 곳

으로 측선 연장이 최소한 100여 m 이상 확보가능한 곳

- 댐마루나 사면도로에 노출된 지면이 존재하지 않으면, 댐 상류측이나 하류측의 암버럭 사면 위에 측선을 설치하되, 감진기 매설이 거의 불가능하기 때문에 중력식 커플링 방식으로 감진기를 고정하여 표면파 진동을 측정하도록 한다.

각 댐에서 수행한 현장시험과 관련하여 적용된 공통적인 사항은 다음과 같다.

- 빔형성 시험의 경우는 감진기간 간격을 1m, 3m 두 가지에 대하여 수행하였으며 (대청댐 제외, 대청댐의 경우는 3m 간격만 수행), 각각에 대한 측선연장 길이는 12m, 36m 이었다.
- 빔성형 시험의 경우는 등간격의 감진기 간격을 사용하는 walk-away 시험과 Zywicki 배열을 사용하는 두 가지 종류의 배열을 이용하여 시험을 수행하였다.
- Walk-away 시험의 경우, 감진기 4 개를 등간격으로 설치하여 고정한 후, 발진원을 일정거리 이동하여 시험을 수행하는 방식으로 진행하였다. 발진원의 위치는 감진기간 간격을 d라고 하였을 때, d, $4d$, $7d$, $10d$, $13d$, $16d$ 등으로 이동하였으며, 공간이 허용하는 위치까지만 시험을 수행하였다.
- 등간격의 감진기 간격을 사용하는 walk-away 시험 데이터는 SASW 시험 자료로도 활용하였다. 즉 첫 번째와 네 번째 감진기를 사용하여 CapSASW 기법의 해석을 수행하였다.

(1) 밀양댐에서의 빔형성 기법에 의한 위상속도 분산곡선 평가

밀양댐의 경우는 빔형성 기법을 수행하는 시점 전후로 댐마루 부분에서 공사를 하고 있었기 때문에 댐마루의 하류측 사면경계부의 지면이 노출되어 있어서 댐 마루에 측선을 설치할 수 있었다. 설정한 측선은 댐 하류사면이 시작되는 경계부이어서 사면 측면으로부터 반사되는 체적파의 교란이 심히 우려되는 상황이다. 이러한 경우 빔형성 기법이 어떠한 측정결과를 제시하는지 실제 시험을 통하여 확인하여 보았다. 빔형성 기법으로 획득되는 분산곡선을 표면파의 대명사인 SASW 시험으로 획득한 분산곡선과 비교함으로써 빔형성 기법의 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다. 측정결과는 [그림 3.3.18~3.3.20]에 도시하였다.

- 1m, 3m 감진기 간격을 사용한 빔형성 시험으로 획득한 위상속도와 SASW 시험의 위상속도 사이에는 6m 이상의 파장 영역에서 다소의 차이가 있었다.
- 3m 감진기 간격을 이용한 경우 저주파수 영역에서, 1m 감진기 간격을 이용한 경우 고주파수 영역에서 위상속도를 더 세밀하게 측정 되었다.
- 빔형성 기법으로 측정한 위상속도는 30m 이상의 파장에서 SASW 시험의 위상속도보다 더 크게 측정되었다.

- 빔형성 기법으로 결정한 위상속도 분산곡선은 SASW 시험의 분산곡선보다 기복이 크지 않은 형태로 결정되었다.

(2) 대청댐에서의 빔형성 기법에 의한 위상속도 분산곡선 평가

대청댐의 경우는 댐마루가 완전히 보도블록과 우레탄 포장으로 덮혀 있어서 감진기를 매설할만한 노출된 지면이 존재하지 않았다. 그리하여 댐 하류측 암버럭 사면 위에 중력식 커플링으로 감진기를 고정하여 시험을 수행하는 방식을 취했다. 대청댐에서 수행한 빔성형시험과 SASW 시험의 해석결과를 [그림 3.3.21~3.3.22]에 도시하였고, 시험결과를 분석하여 발견한 사실은 다음과 같다.

- 빔형성 시험은 시험여건이 열악하고 위험하여 3m 감진기 간격만 사용하는 walk-away 시험만 수행하였고, Zywicki 배열을 사용하는 시험은 수행하지 못하였다.
- 빔형성 시험으로 획득한 분산곡선은 SASW 시험으로 측정한 분산곡선과 유사한 경향을 보이고 있으나, 파장 30m 이상의 영역에서는 빔형성 기법의 결과가 더 작은 값으로 측정되었다.
- 대청댐의 경우는 댐마루 자연지반에서의 측선 확보가 어려워서 하류측 암버럭 사면 위에서 직접 수행한 시험이어서 SASW 시험의 경우는 요철이 심하고 곡선의 기복이 비교적 큰 분산곡선이 결정되었으나, 빔형성 시험의 경우는 비교적 완만한 변화를 보이는 부드러운 곡선 형태의 분산곡선이 결정되었다.

(3) 소양강 댐에서의 빔형성 기법에 의한 위상속도 분산곡선 평가

소양강댐의 경우는 댐마루 인근의 사면도로에서 노출된 지면을 찾을 수 있었고 측선길이도 100m 이상 확보가 가능한 곳이어서, 사면 도로를 따라 측선을 설정하였다. 소양강댐에서 수행한 빔성형시험과 SASW 시험의 해석결과를 [그림 3.3.23~3.3.25]에 도시하였고, 시험결과를 분석하여 발견한 사실은 다음과 같다.

- Walk-away 방식의 등간격 빔형성 시험과 Zywicki 배열을 사용하는 빔성형 시험, SASW 시험은 파장영역 20m 이하에서는 거의 동일한 위상속도를 결정하였으나, 20m 이상의 파장영역에서는 현저한 차이를 보이고 있다.
- SASW 시험의 경우, 20m 이상의 파장영역에서 고차모드와 유사한 형태의 불연속 위상속도 분산곡선을 보이고 있다. 즉 분산곡선의 일부가 평행이동 한듯한 모양의 패턴이 3개 반복되고 있다. 이러한 경향은 Walk-away 방식의 등간격 빔형성 시험에서도 동일하게 나타나고 있다. 그러나 Zywicki 배열을 사용하는 빔성형 시험에서는 f-k 컨투어에서 조차도 해상도가 떨어져서 식별이 되지 않고 세 가지 영역을 아우르는 개략적인 곡선만 제시하고 있다.

- 소양강 댐에서와 같이 특이한 형태의 분산곡선, 즉 고차모드와 유사한 형태의 불연속 분산곡선이 나타나는 경우, 정확한 전단파 속도 주상도를 결정하기 위해서는 이에 대한 명확한 이해가 필요하며, 이를 위해서는 추후에 본격적인 심화 연구가 필요하다고 판단된다.

(4) 각 사력댐에서의 전단파 속도 평가

밀양댐, 대청댐, 소양강댐에서 수행한 표면파 시험 중, 빔형성 기법으로 획득한 분산곡선은 SASW 시험으로 획득한 분산곡선과 20~30 m 이상의 파장영역에서 두드러지는 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 여러 가지 요인으로 인한 것이겠지만, 분명한 것은 빔형성 기법으로 획득한 분산곡선을 이용하여 전단파 속도 주상도를 획득하기 위해서는 별도의 전용 역산해석 프로그램이 개발될 필요가 있다는 것이다. 즉, SASW 시험용 역산해석 프로그램을 사용하여 전단파 속도 주상도를 구한다면 그것은 전혀 합리적이지 못한 결과가 도출될 것이라는 것이다.

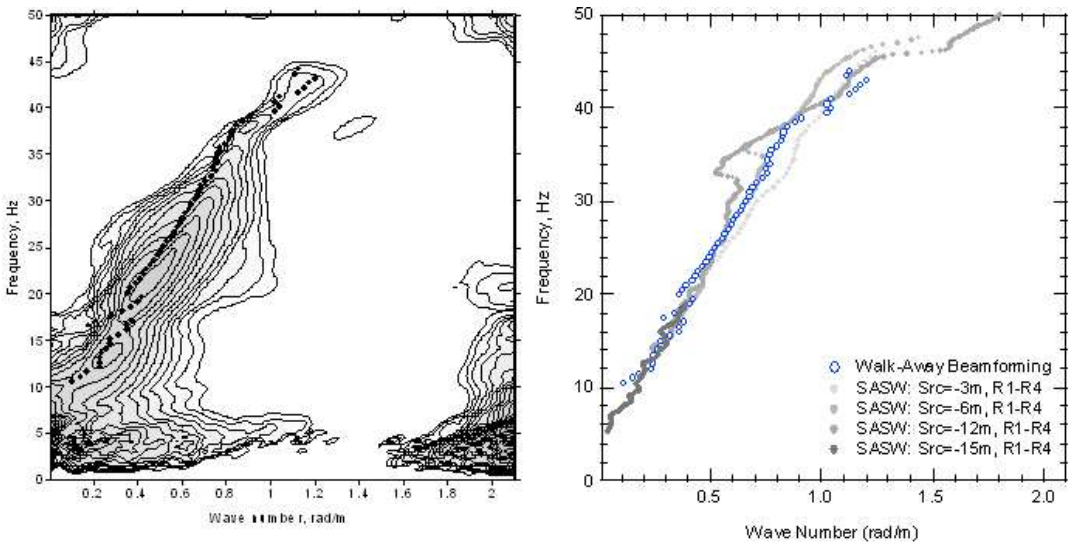
따라서 금차년도 연구에서는 각 사력댐에서의 전단파 속도 도출을 위해서 SASW 시험자료 즉 분산곡선을 사용하여 역산해석을 수행하였고, 그 결과로 획득한 전단파 속도 주상도를 [그림 3.3.26]에 도시하였다. 각각의 전단파 속도 주상도에 대한 분석은 다음과 같이 진행되었다.

- 밀양댐은 CFRD 형식의 사력댐이기 때문에 SASW 시험이 수행된 측선 하부는 모두 암버럭 재료로만 구성되어 있다고 할 수 있다. 이러한 이유에서인지 밀양댐의 전단파 속도 주상도는 약 3m 심도의 국부적인 이상대를 제외하고는 400~1200 m/sec 로 증가하는 속도를 가지는 이상적인 전단파속도 결과를 획득하였다.
- 대청댐과 소양강댐의 경우는 SASW 시험 측선이 모두 하류 사면 상단에 위치하고 있기 때문에 측선 하부 어느 심도에서는 코아영역이 존재하게 된다. 그러한 이유때문인지 대청댐과 소양강댐의 전단파 속도는 불연속 경향을 보이고 있다. 즉 대청댐의 경우는 심도 18m 하부에서 전단파 속도가 300~400 m/sec 로 떨어지고 심도가 깊어질수록 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 경향은 소양강댐에서도 심도 12m 하부에서 동일하게 나타나고 있다. 따라서 대청댐과 소양강댐에서는 얕은 심도에서는 (대청댐: 상부 18m, 소양강댐: 상부 12m) 암버럭의 물성을, 그 하부에서는 코아 영역의 물성을 평가하였다고 판단된다.

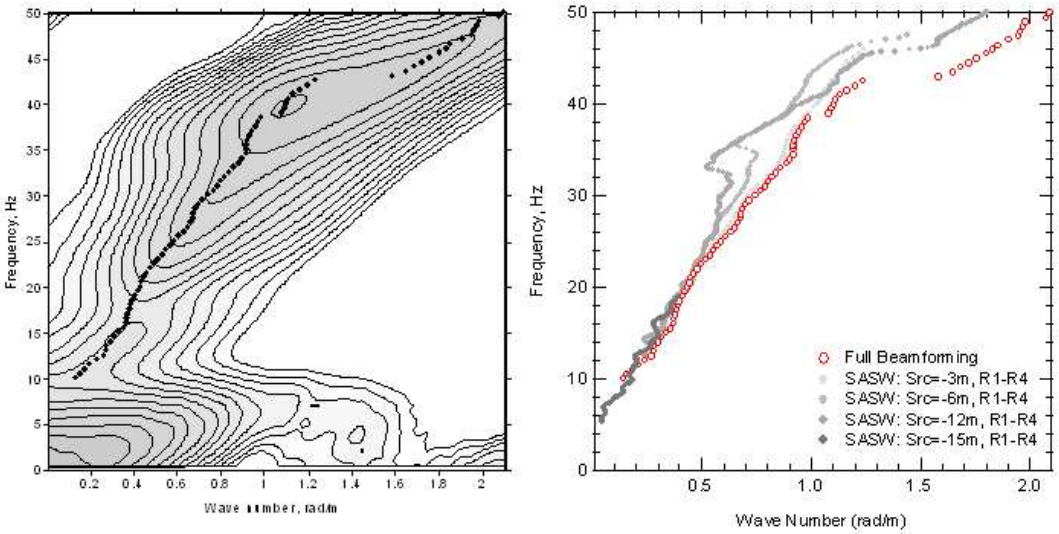
(5) 대형 사력댐 댐마루의 보도블록 위에서의 표면파 시험

밀양댐, 대청댐, 소양강댐 등은 댐 마루에서 표면파 시험을 수행하기 심히 어려운 조건을 가지고 있다. 표면파 시험은 감진기를 지표면에 매설을 하여 확실한 커플링으로 지반의 진동을 감지하여야 하나, 이들 대형 사력댐의 경우는 관광객의 접근을 용이하게 하고 안전을 확보하기 위하여 보도블록 또는 아스팔트 포장으로 마감을 해 놓은 곳이 많았다. 따라서 본 연구에서는 이들 보도불록 위에 감진기를 설치하고 표면파 시험을 수행한 다음, 그 결과를 토사 지표면에서 직접 수행한 경우와 비교해 보고자 하였다.

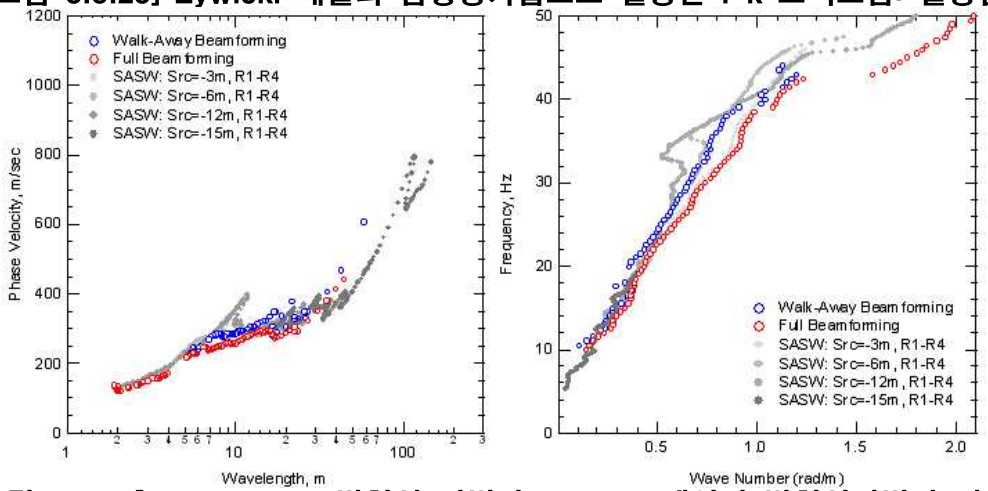
[그림 3.3.27]에는 보도블록 위에 감진기를 설치하고 중추를 이용하여 커플링을 한 감진기의 모습이 제시되어 있다. 또한 감진기 지그 하부에 스파이크를 연결하여 보도블록 사이의 홈사이에 설치하고자 시도 하여 보았으나 보도블록 하부에 대입경 골재사이의 빈 공간이 많아서 스파이크가 고정되지 않는 문제점이 있었다. 그리하여 [그림 3.3.27]과 같이 보도블록 위에 감진기를 올려놓고 추를 이용하여 중력식 커플링을 하도록 유도하였다.



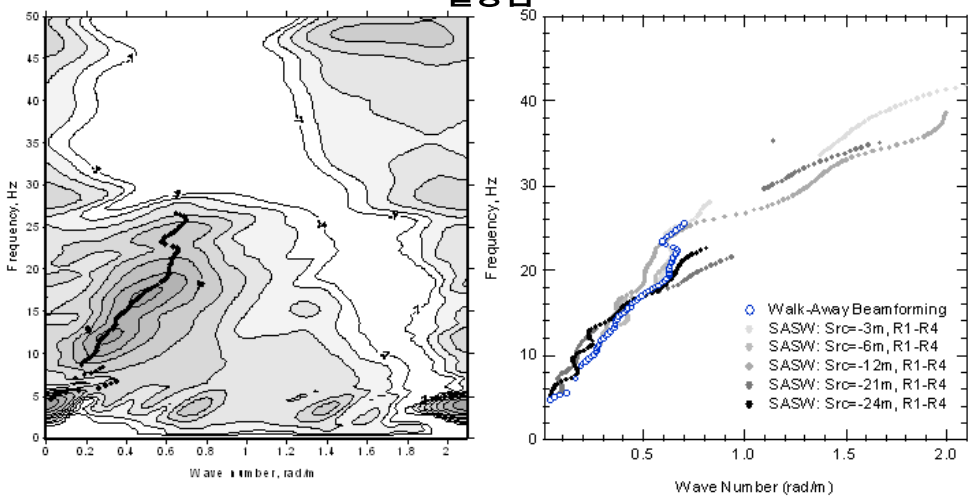
[그림 3.3.22] 본 연구에서 제안한 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: 밀양댐



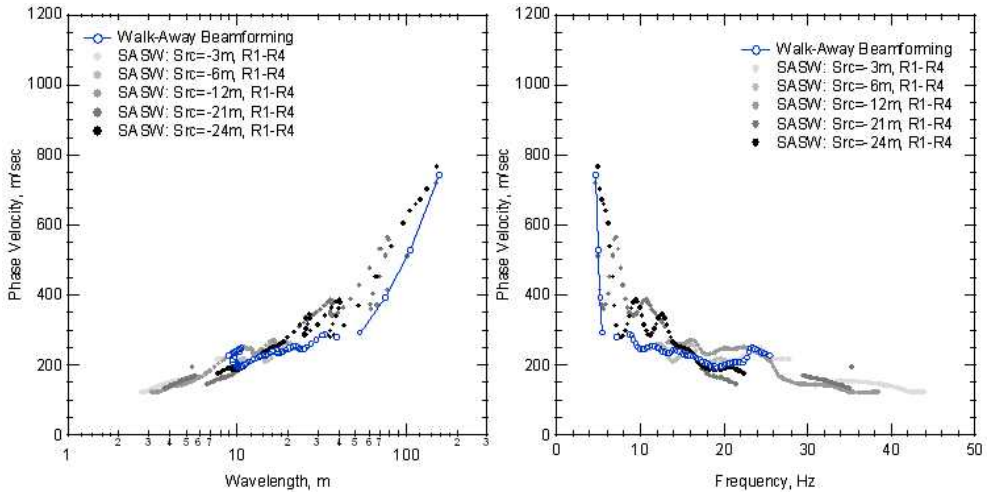
[그림 3.3.23] Zywicki 배열의 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: 밀양댐



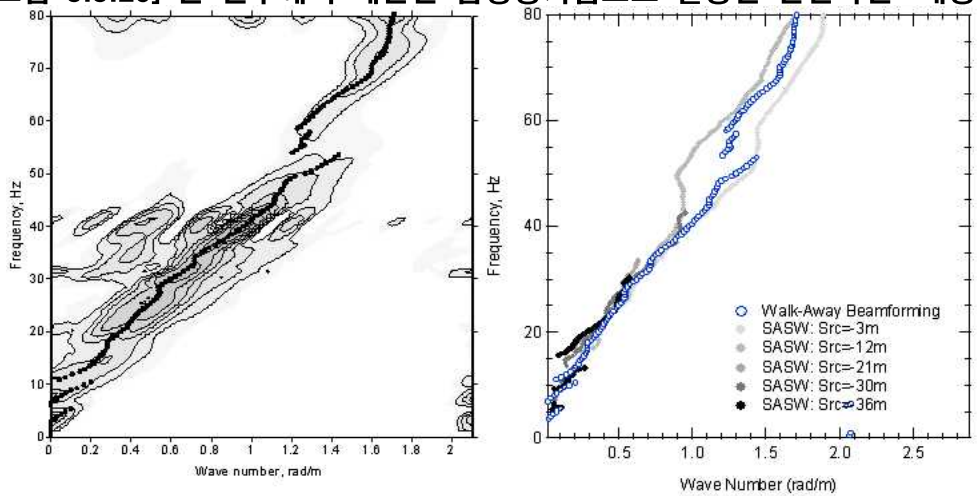
[그림 3.3.24] Walk-Away 빔형성 기법과 Zywicki 배열의 빔형성기법의 비교: 밀양댐



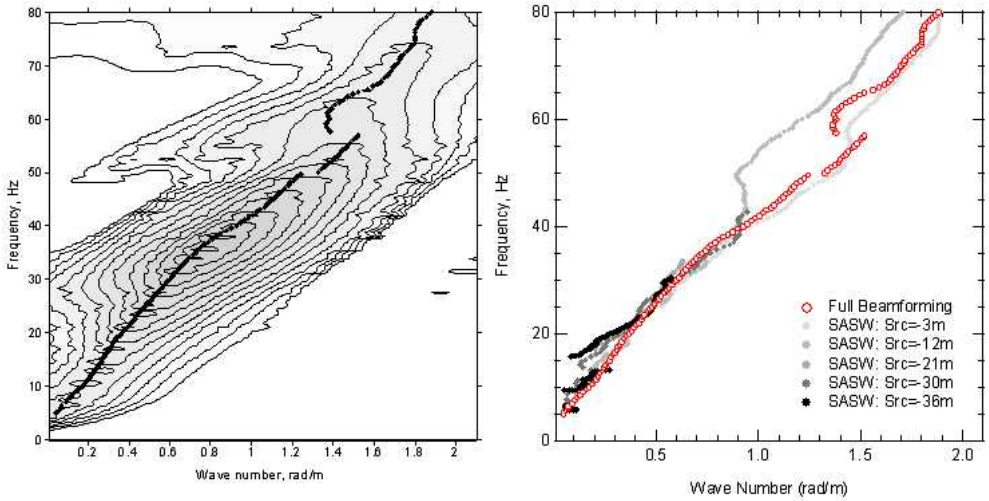
[그림 3.3.25] 본 연구에서 제안한 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: 대청댐



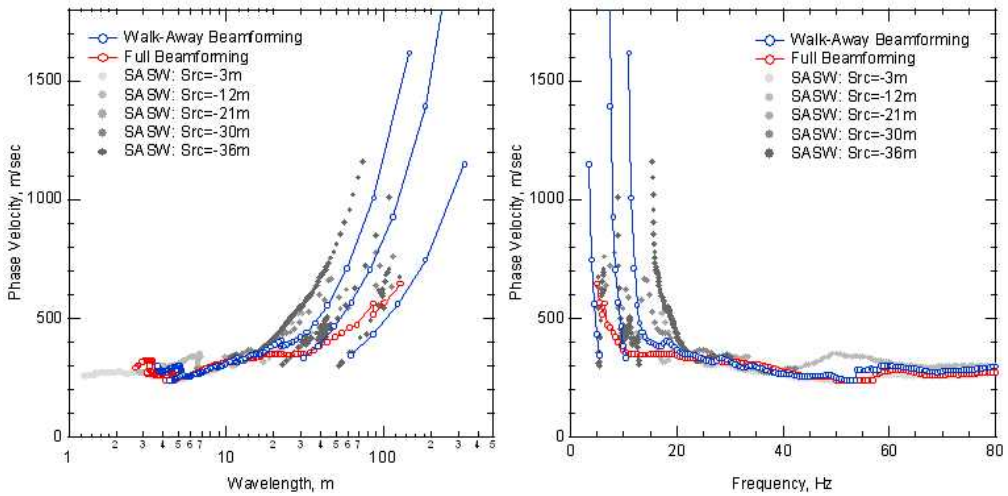
[그림 3.3.26] 본 연구에서 제안한 빔형성기법으로 결정한 분산곡선: 대청댐



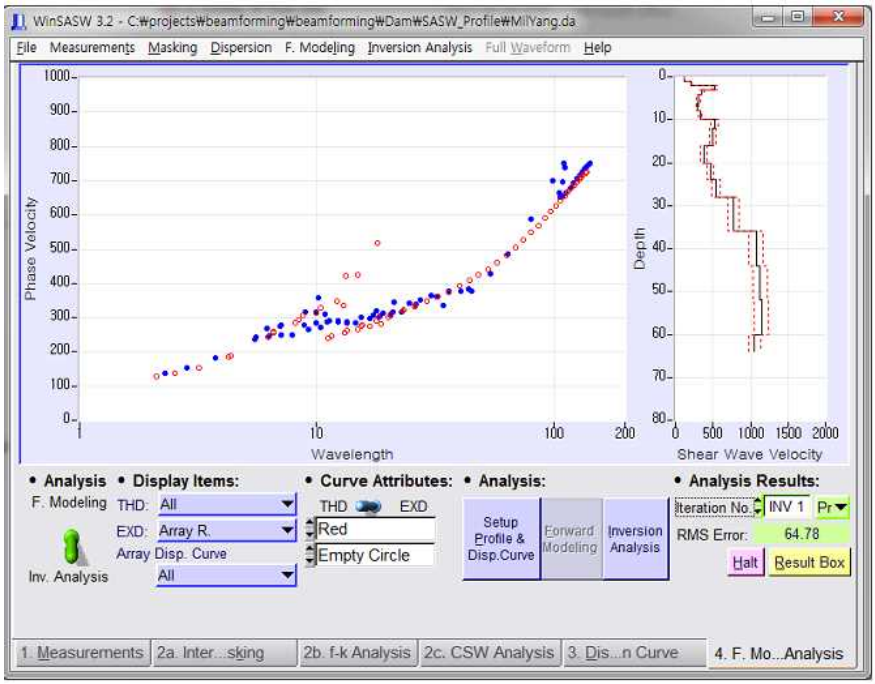
[그림 3.3.27] 본 연구에서 제안한 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: 소양강댐



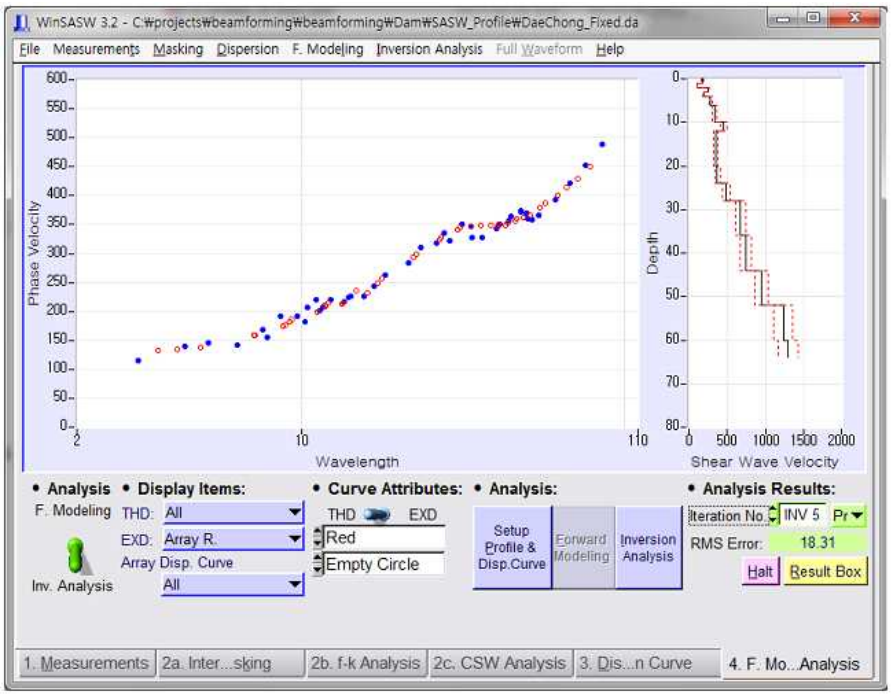
[그림 3.3.28] Zywicki 배열의 빔형성기법으로 결정한 f-k 스펙트럼: 소양강댐



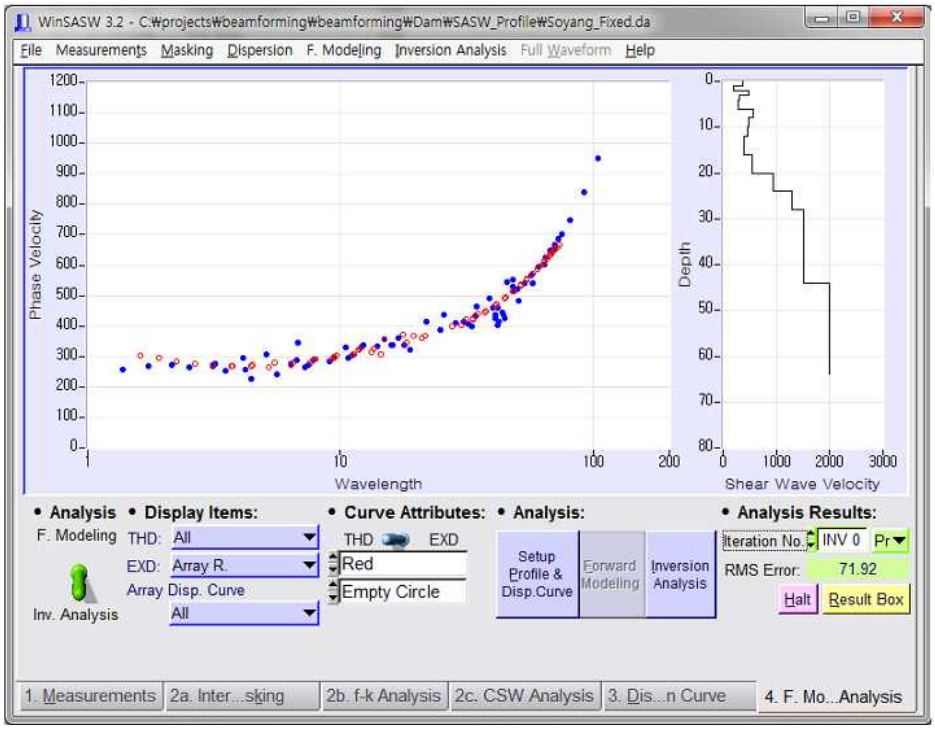
[그림 3.3.29] Walk-Away 빔형성 기법과 Zywicki 배열의 빔형성기법의 비교: 소양강댐



(a) 밀양댐에서 측정한 분산곡선에 대한 역산해석 수행

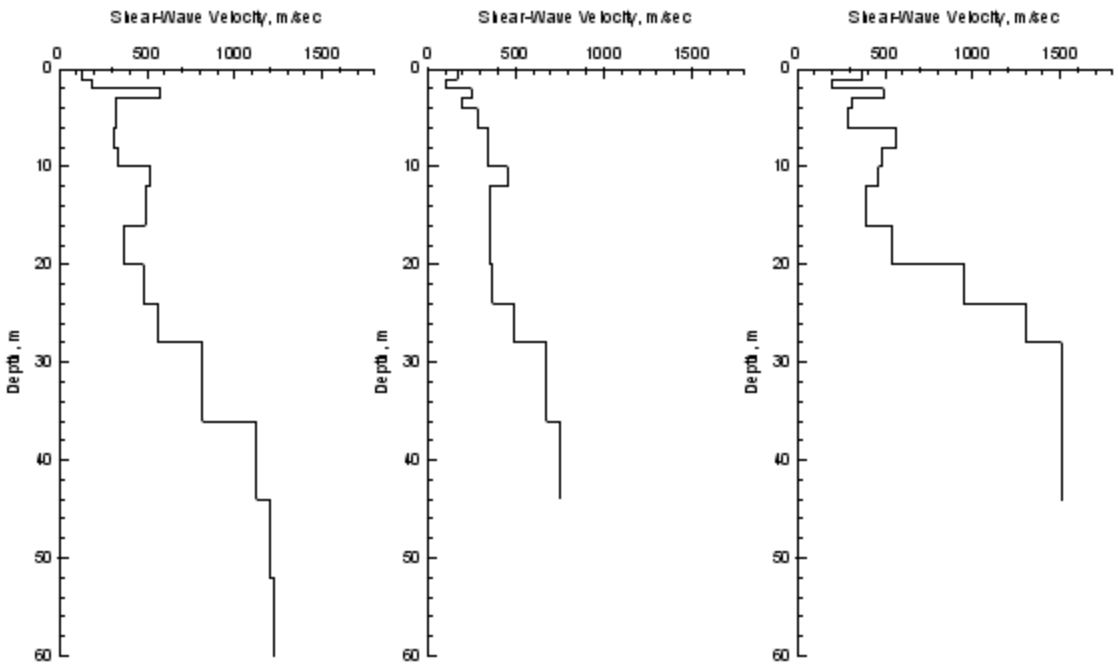


(b) 대청댐에서 측정한 분산곡선에 대한 역산해석 수행



(c) 소양강댐에서 측정한 분산곡선에 대한 역산해석 수행

[그림 3.3.30] CapSASW 시험자료에 대하여 역산해석으로 결정한 전단파 속도

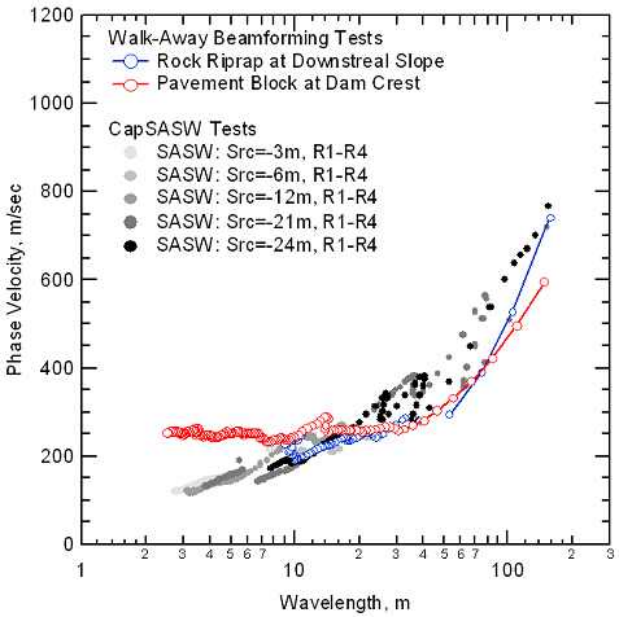


(d) 밀양댐 (e) 대청댐 (f) 소양강 댐

[그림 3.3.31] CapSASW 시험자료에 대하여 역산해석으로 결정한 전단파 속도



(a) 보도블록 위 감진기를 설치함



(b) 보도블록 위의 감진기와 노출 지반위의 감진기로 측정한 표면파 속도의 비교

[그림 3.3.32] 표면파 시험을 위한 보도블록 위의 감진기 커플링

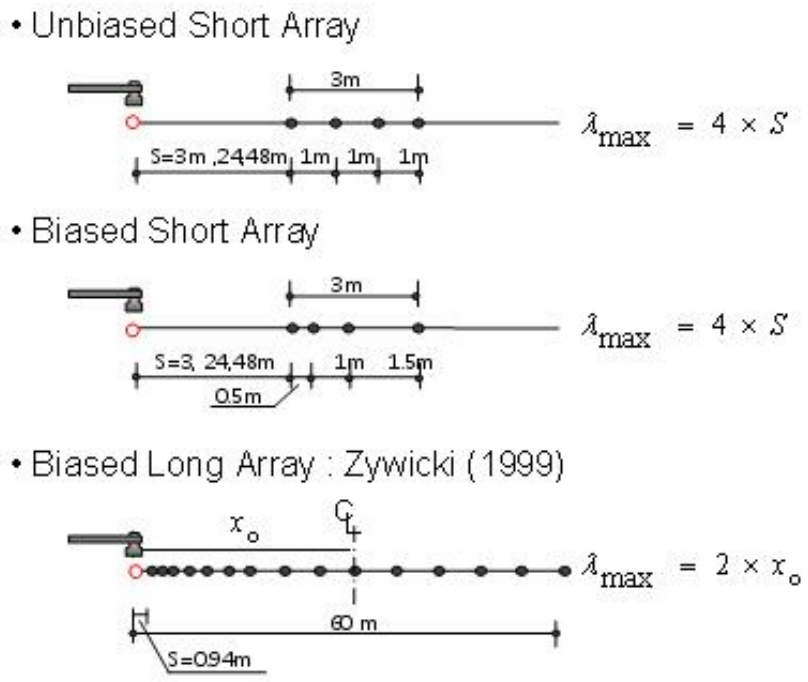
(6) UBF (Unbiased-Short-Array Beamforming) 기법

기존 연구자들은 지반의 전단파속도 주상도를 평가하는데 있어서 빔형성기법의 측선을 60m나 되는 긴 측선을 사용하였다. 이는 깊은 심도까지 조사하기 위해서는 원하는 심도의 두 세배 되는 파장을 측정하여야 하기 때문이었던 것으로 파악된다. 그런데 큰 파장의 표면파를 측정하는데 있어서 유의하여야 할 사항으로 다음과 같은 항목들을 살펴볼 수 있다. 첫 째는 측정하는 하드웨어(감진기, 동적신호분석기)의 해상도 또는 감도가 충분히 높아야 한다는 것이다. 두 번째는 표면파의 근접장 범위를 피해서 측정하는 것이 보다 진정한 표면파의 속도를 측정할 수 있다는 것이다. Zywicki(1999)와 같은 기존 연구자들이 우려했던 것은 바로 첫 번째의 경우에 해당된다. 즉 100m 파장의 표면파를 측정하는데 첫 번째와 마지막 감진기의 간격이 너무 가까우면 100m 파장의 표면파를 제대로 인식하지 못한다는 것이다. 그러나 이 문제는 측정하는 하드웨어 시스템의 해상도와 감도가 우수하다면 충분히 해결할 수 있게 된다. 그런데 중요한 문제는 바로 두 번째 항목이다. 기존 연구자들은 표면파를 발생시키는 발진원을 감진기에 너무 가까이 설치하기 때문에 대부분의 표면파의 파장이 근접장내에 들어가기 때문에, 정모델링으로 근접장내의 표면파 속도를 구하는 정확도가 현저히 떨어지게 되고, 결과적으로 측정치와 해상치를 비교하여 전단파속도를 구하는 역산해석이 정확하지 않게 되는 문제가 발생한다.

따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 일차적으로 Walk-Away Beamforming 기법을 제안하였으나, 보다 효율성을 보완하고 정확한 역산해석을 위해서 Unbiased-Short-Array Beamforming (UBF) 기법을 새로이 제안하게 되었다. UBF 기법에서는 [그림 3.3.33]에 도시한 바와 같이 기존 빔형성 기법의 60m 측선을 6~9m 축소하였고 또한 감진기 개수를 기존 빔형성 기법의 15개를 4개로 축소하였다. 그리고 발진원의 타격위치를 기존 빔형성 기법에서는 1m 이격된 곳 1회에서만 설정하지만, UBF 기법에서는 감지기간 간격이 R일때, 2×R, 4×R, 8×R, 16×R, ... 등으로 타격에너지가 충분히 측정되는 범위까지 복수로 설정하도록 하였다. 이렇게 발진원의 타격위치를 감진기 배열에서 점점 더 멀리 이동시키는 것은 측정하고자 하는 파장의 크기가 커질수록 발진원의 위치를 근접장 밖으로 이동하여야 하기 때문이었다. 그리고 표면파 시험으로 측정할 수 있는 최대 파장의 크기는 첫 번째 감진기에서 발진원까지 거리의 4배에 해당되는 것으로 파악되는데, 이는 이론적으로 모사한 표면파 시험 자료를 이용하여서 확인하였다. 예를 들어, 감진기간 간격이 1m 일 때, 총 측선 거리는 3m가 되고, 10kg 슬레지 해머를 사용하여 발진한다고 하면, 발진원의 위치는 첫 번째 감진기에서 3, 6, 12, 24 m 까지 모

두 네 곳에 해당된다. 즉, 네 곳의 다른 곳에서 발진을 함으로써 모두 4 회의 표면파 시험을 하게 되는 것이다. 이 때 최대 파장은 24m의 네 배가 되는 96 m 까지 최종 분산곡선에 포함할 수 있고 역산해석에 의해 전단파속도를 최대로 평가할 수 있는 심도는 경험적으로 볼 때 약 32~48m 범위가 될 것이다. 따라서 측선길이가 짧다고 해서 평가할 수 있는 심도는 사실 제한되기는 하지만, 국내실정으로 보았을 때 기본적으로 풍화암이 존재하는 곳 까지는 충분히 신뢰성 있게 평가할 수 있다고 판단된다.

따라서 이와 같은 이론적 배경으로 제안된 UBF 기법은 3m 측선을 기본으로 하여 최대 30~50m 까지 심도를 슬레지 해머로 평가할 수 있기 때문에, 여러개의 측선을 연속적으로 평가하였을 때, 이차원의 전단파 속도 주상도를 구하는 것도 가능하게 된다. 결과적으로 본 연구에서 제안하는 UBF 기법은 전단파속도 주상도를 1차원 뿐만 아니라 2차원까지도 평가할 수 있는 기법으로 정립될 수 있으며, 이는 기존의 Beamforming 기법에 비하여 보다 실용적이며 활용도도 다양하다고 판단된다.



[그림 3.3.33] 빔형성기법의 감진기 구성 방안

4. 조립재료지반에 적합한 최적탐사기법을 위한 측정 하드웨어시스템의 제안

가. 제안된 최적 탐사기법을 위한 전용 소프트웨어의 개발

대입경조립골재 지반구조물에서의 표면파 시험기법을 위해 본 연구에서 제안한 UBF 기법의 실용적 적용을 위해 전용 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 프로그램은 Beamforming 이며 다음과 같은 세가지의 모듈을 구현하고 있다.

· UBF 시험을 수행하고 자료를 저장하는 모듈
· 측정된 자료를 해석하는 모듈
  - 측정된 시계열 자료를 이용하여 f-k 관계를 결정하는 기능
  - 주파수·파수 (f-k) 관계곡선을 자동으로 전개(unwrapping)하는 기능
  - f-k 관계곡선의 불필요한 데이터를 삭제하는 기능
· 전개된 f-k 관계곡선을 이용하여 분산곡선을 결정하는 모듈

각 모듈에 대한 구체적인 설명과 실행화면 예를 살펴보면 다음과 같다.

(1) UBF 시험을 수행하고 자료를 저장하는 모듈

본 소프트웨어는 미국의 National Instruments 사의 USB-6289를 기본으로 사용하여 시험을 수행하는 것을 고려하여 구성되어 있다. 기본적으로는 USB-6289에 연결된 4개의 채널에서 신호를 획득하고 이를 파일로 저장할 수 있다. 측정된 결과는 화면에 4개의 그래프로 표시되도록 하였는데, 시계열 신호, 선형 스펙트럼, 전달함수 위상각 스펙트럼, 전달함수 진폭 스펙트럼 등을 선택할 수 있도록 메뉴버튼을 제공하고 있다. 측정된 시계열 신호는 실시간으로 주파수 영역 해석을 통해 화면에 즉시 도시될 수 있도록 하였으며, 이는 시험을 수행하는데 있어서 신호의 품질을 판단하고 양질의 신호만을 획득하고 저장할 수 있도록 하는 기능을 제공하고 있다.

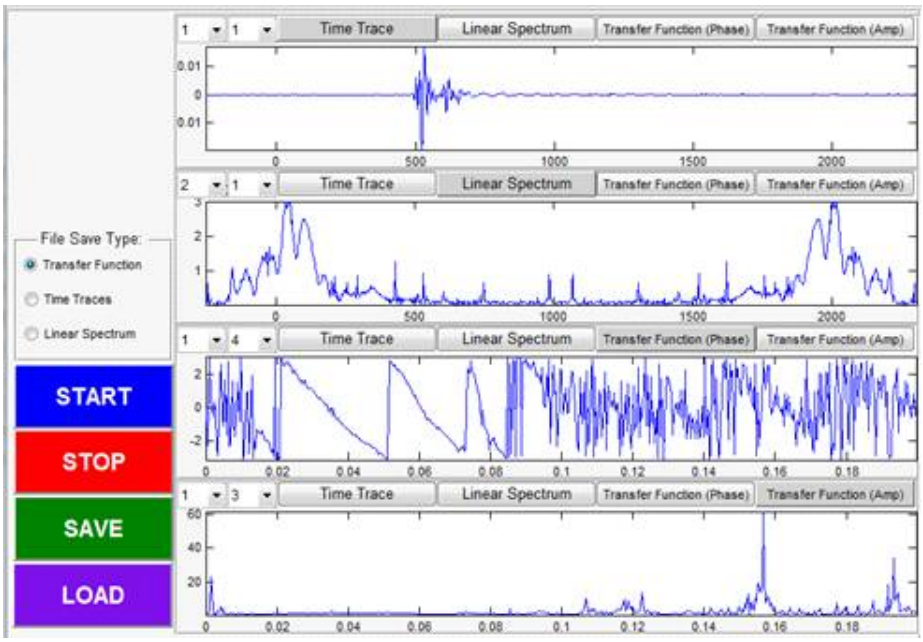
(2) 측정된 자료를 해석하는 모듈

UBF 시험 수행을 위한 소프트웨어 Beamforming는 측정된 자료를 해석하는 기능도 또한 탑재되어 있다. Beamforming 소프트웨어가 수행할 수 있는 자료해석 기능은 다음과 같다.

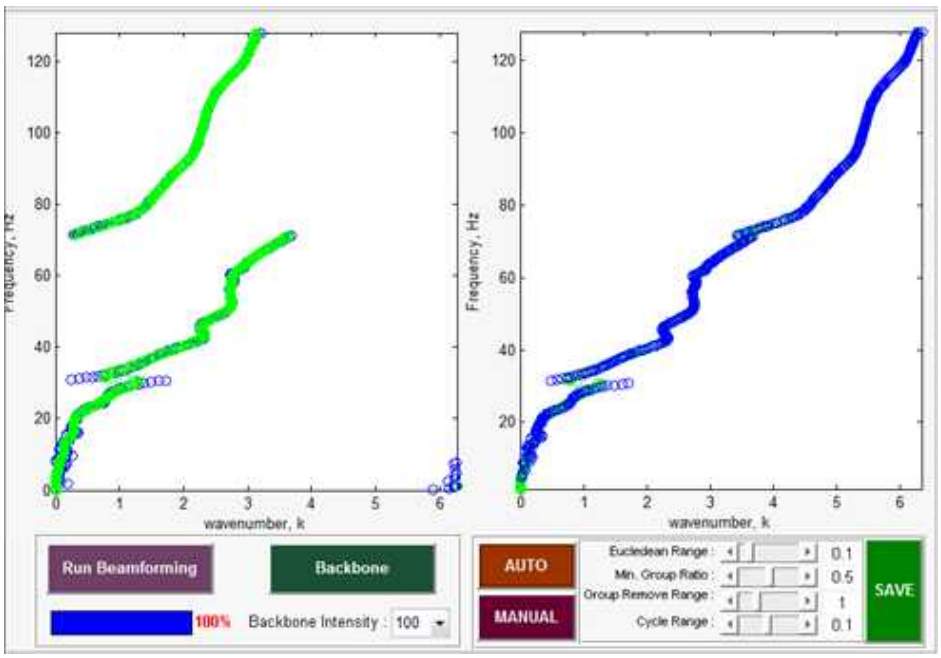
- 측정된 시계열 자료를 이용하여 f-k 관계를 결정하는 기능
- 주파수·파수 (f-k) 관계곡선을 자동으로 전개(unwrapping)하는 기능

- f-k 관계곡선의 불필요한 데이터를 삭제하는 기능

이 중에서 f-k 관계곡선을 자동으로 전개하는 기능의 한 장면을 [그림 3.3.34]에 도시하였다. 좌측의 그래프는 원본 f-k 관계곡선이고, 우측의 그래프는 좌측의 f-k 원본 관계곡선을 자동으로 전개하여 해석한 결과를 도시하고 있다.



[그림 3.3.34] 소프트웨어 Beamforming의 측정수행 화면

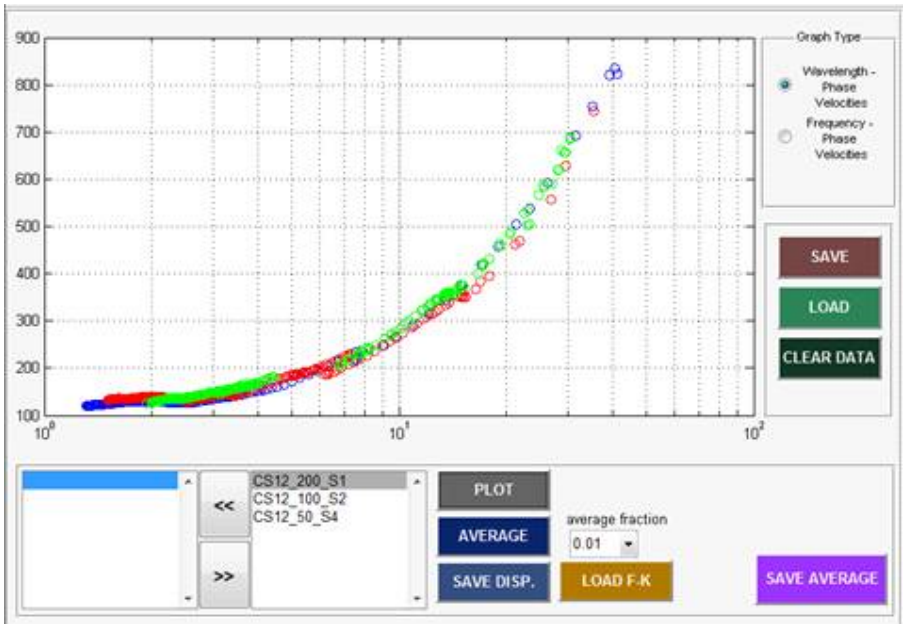


[그림 3.3.35] 소프트웨어 Beamforming의 해석수행 화면

Beamforming 소프트웨어에는 UBF 시험으로 획득한 신호를 이용하여 결정한 f-k 그래프에서 직접 자동으로 전개하는 기능, 또한 수동으로 사용자 임의로 수행할 수 있는 두 가지 기능을 탑재하고 있다. 자동전개의 경우는 버튼 클릭 하나로 모든 일을 자동으로 수행하도록 하였고, 필요에 따라 수동으로 f-k 그래프의 일부 데이터 구간을 전개할 수 있도록 하였다.

(3) 전개된 f-k 관계곡선을 이용하여 분산곡선을 결정하는 모듈

또한 전개된 f-k 관계곡선과 감진기 간격의 정보를 이용하여 분산속도를 계산하고 그 결과를 도시할 수 있도록 하였다. 그림 [3.3.36]에 이렇게 결정한 분산속도를 도시하였다. 그림 [3.3.36]의 경우, 발진원 위치 3 가지 즉, S1, S2, S4에 대해 각각의 분산곡선을 구하고 그 결과를 하나의 그래프에 포함시켜 도시하고 있다.



[그림 3.3.36] 소프트웨어 Beamforming의 분산곡선 결정 화면

나. 제안된 최적 탐사기법을 위한 전용 하드웨어의 제안

UBF 시험을 수행하기 위한 하드웨어 요구조건은 다음과 같다.

- 주파수 대역이 100 Hz 이하까지 설정 가능하여야 한다.
- 앤티 엘리어싱 기능이 있어서 안정적이며 신뢰성 높은 신호를 측정할 수 있어야 한다.

- 최소한 4개의 아날로그 입력채널이 있어야 한다.
- 감진기는 공진주파수가 1Hz 또는 2Hz 정도가 되는 것으로서 예민도가 높은 지오폰이나 가속도계를 사용하여야 한다.

본 연구에서는 이와 같은 하드웨어 요구조건을 만족하는 시스템으로서 고려대상에 포함되었던 시스템은 [표 3.3.1]과 [표 3.3.2]에 정리한 것과 같으며, 각각의 장단점을 비교하여 보았다.

[표 3.3.1] UBF 시험을 위한 동적자료 획득시스템

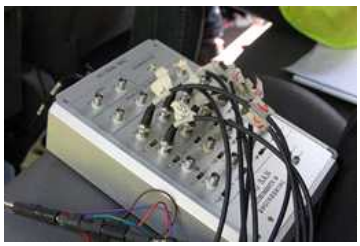
동적자료 획득시스템	장점	단점	선택 여부
Agilent 35670A	고해상도 (16비트) 고성능 (다양한 해상도) 높은 내구성 높은 신뢰성 앤티앨리어싱 필터 장착	고가 (2,500만원 이상) 휴대성 없음	
NI-USB-6289	휴대성 소형 합리적인 성능 (16비트) 저가 (400만원대) 노트북컴퓨터에 연결하여 사용 앤티앨리어싱 필터 저주파수 대역 사용가능	트리거 기능 없음 해상도와 성능이 다소 떨어짐 터미널이 BNC 커넥터가 아님.	○
NI-PCI-4474	고해상도 고성능 (24비트) 저가 (400만원대) 앤티앨리어싱 필터	데스크탑 컴퓨터에 장착해서 사용. 휴대성 없음 저주파수 대역 사용불가	

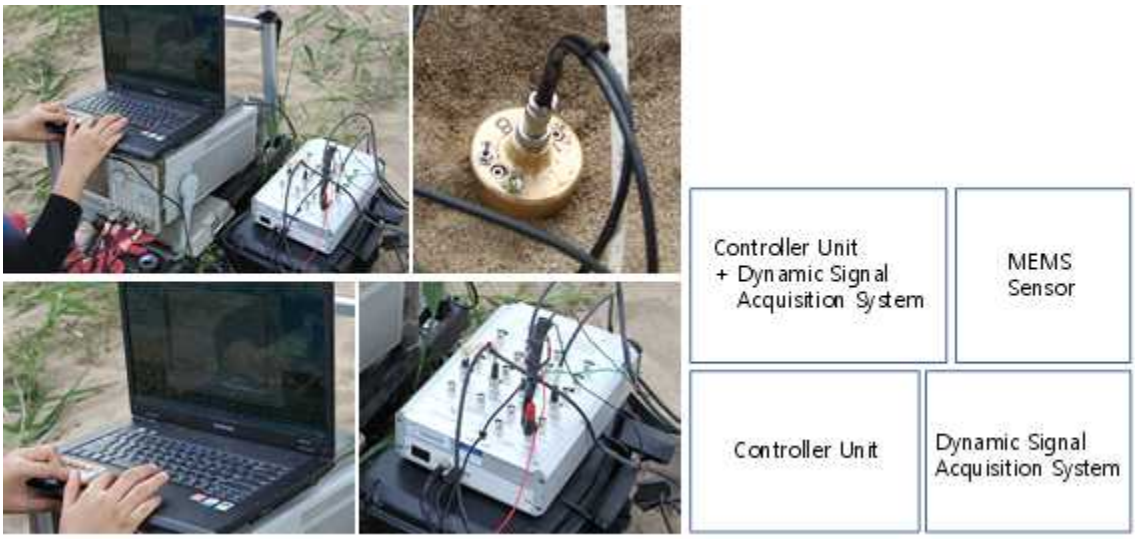
[표 3.3.2] UBF 시험을 위한 감지계

감지계	장점	단점	선택 여부
1-Hz 지오폰	높은 감도	무게. 대형. 충격에 약함 낮은 내구성. 고가 (150만원)	
2-Hz 지오폰	높은 감도. 소형		○
4.5-Hz 지오폰	소형, 높은 휴대성	저성능	
MEMS 가속도계	저가 (25만원). 소형	전자회로와 지그를 직접 제작해야 함.	○

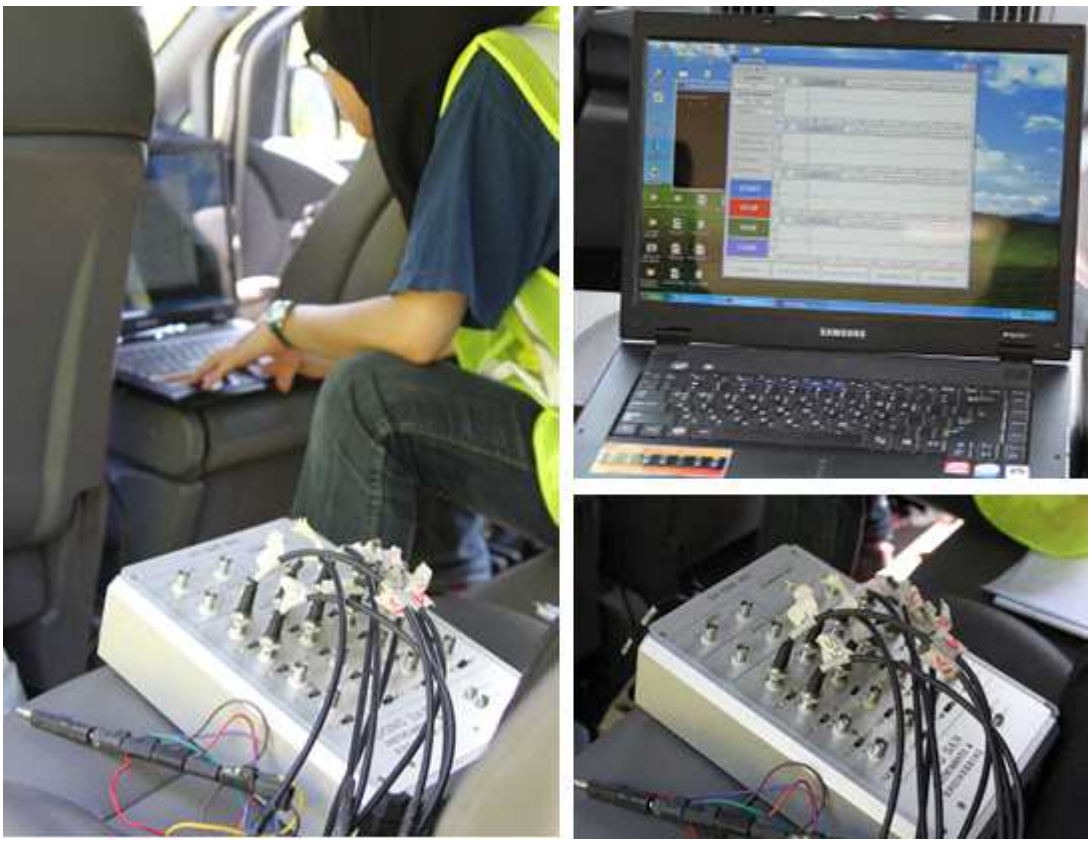
위와 같은 여러 가지 하드웨어에 대하여 직접 UBF 시험에 적용하여 그 성능과 특징을 평가하여 보았고, 그 결과 표 3.3.1과 표 3.3.2에 표시한 바와 같은 최종 결정을 하게 되었다. 그러나 선택한 항목들은 구매하여 직접 사용하기가 불편하고 문제가 있어, 각각에 합당한 추가 작업을 통하여 실제 현장시험에 적합하도록 보완하였다. 표 3.3.3에 그 구체적인 내용을 정리하였다.

[표 3.3.3] UBF 시험을 위해 선택한 하드웨어의 변경과 개선작업

하드웨어	공장출고 형태	변경후 형태
NI-USB-6289	터미널과 신호컨디셔닝 선택이 매우 불편하게 되어 있음. 	BNC 터니멀 장착 신호컨디셔닝: FS/GS 선택버튼 설치 전용컨테이너 제작 
MEMS 가속도계	필터, 증폭회로, 전원 등이 사용자에 의해 제작되어야 함 	필터,증폭회로,전원 등의 회로 제작 MEMS 유니트를 위한 지그제작 



[그림 3.3.37] UBF 시험을 위한 하드웨어 시스템 적용사례 1



[그림 3.3.38] UBF 시험을 위한 하드웨어 시스템 적용사례 2

5. 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법의 정립 및 검증

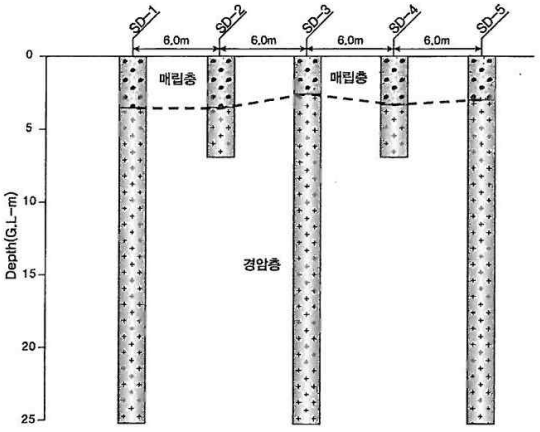
가. 시험시공 지반 또는 모형지반에서 시추공 탐사기법과 비교

본 연구에서 제안한 UBF 기법의 신뢰성을 검증하기 위해 대입경 골재로 조성된 지반구조물 또는 지반을 선정하고 동일 지점에서 시추공 시험을 병행하였다. 시추공 시험으로는 다운홀 시험을 수행하였고 UBF 시험과 더불어 CapSASW 시험을 수행하였다. UBF 기법의 검증을 위한 시험은 모두 세 곳에서 진행되었으며 해당 부지는 다음과 같다.

- 암버럭으로 성토된 성덕댐 진입로.
- 직경 300mm 이상의 대입경 재료로 다짐된 철도 노반.
- 사력댐 하류 제방하단에 자갈 및 사석으로 조성된 비포장 도로.

(1) 성덕댐 진입로: 5~20mm 입도의 골재로 성토한 도로

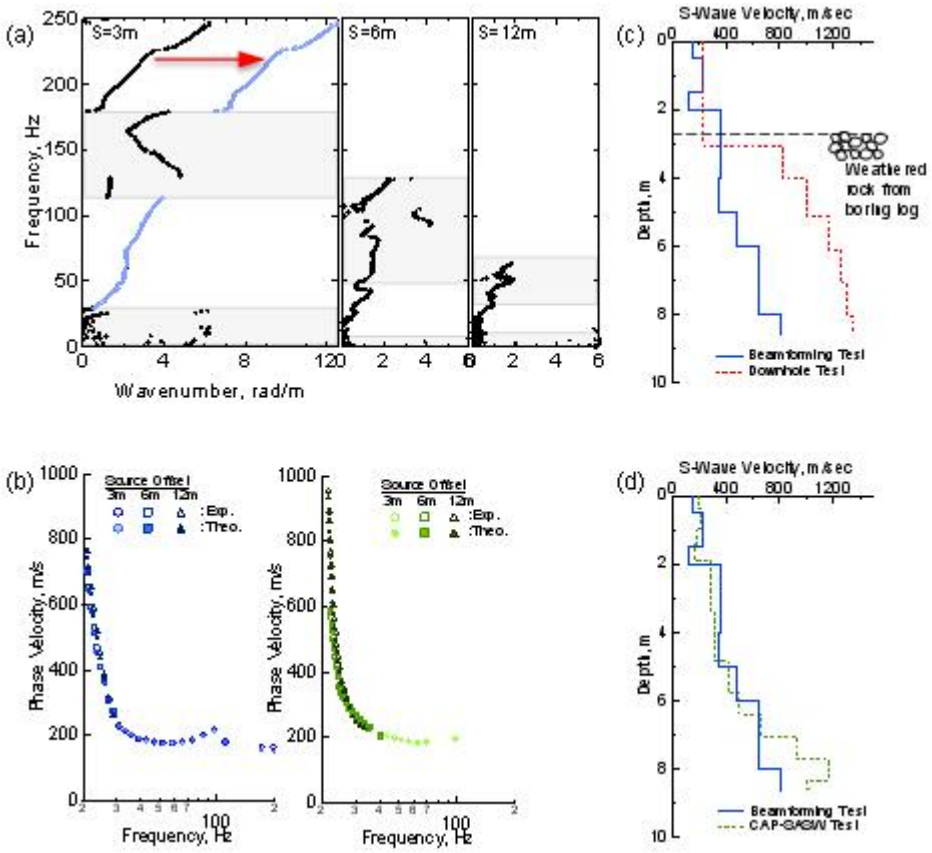
시험 당시 성덕댐은 기존 댐의 용량 문제로 인하여 구댐 인근에 새로이 신댐을 신축하고 있었다. 신댐 하류측 진입로는 신댐 축조과정에서 발생한 사석과 인근 하천에서 채취된 골재를 매립하여 진입로를 조성하였는데, 진입로에 매립된 재료는 5~20mm 입도의 골재가 주로 차지하고 있다. 골재 매립층은 2.6~3.4 m 두께를 이루고 있고 하부에 바로 경암층이 이어지는 층구조를 이루고 있어서, 대표적인 천부 암반층 구조를 보이고 있다.



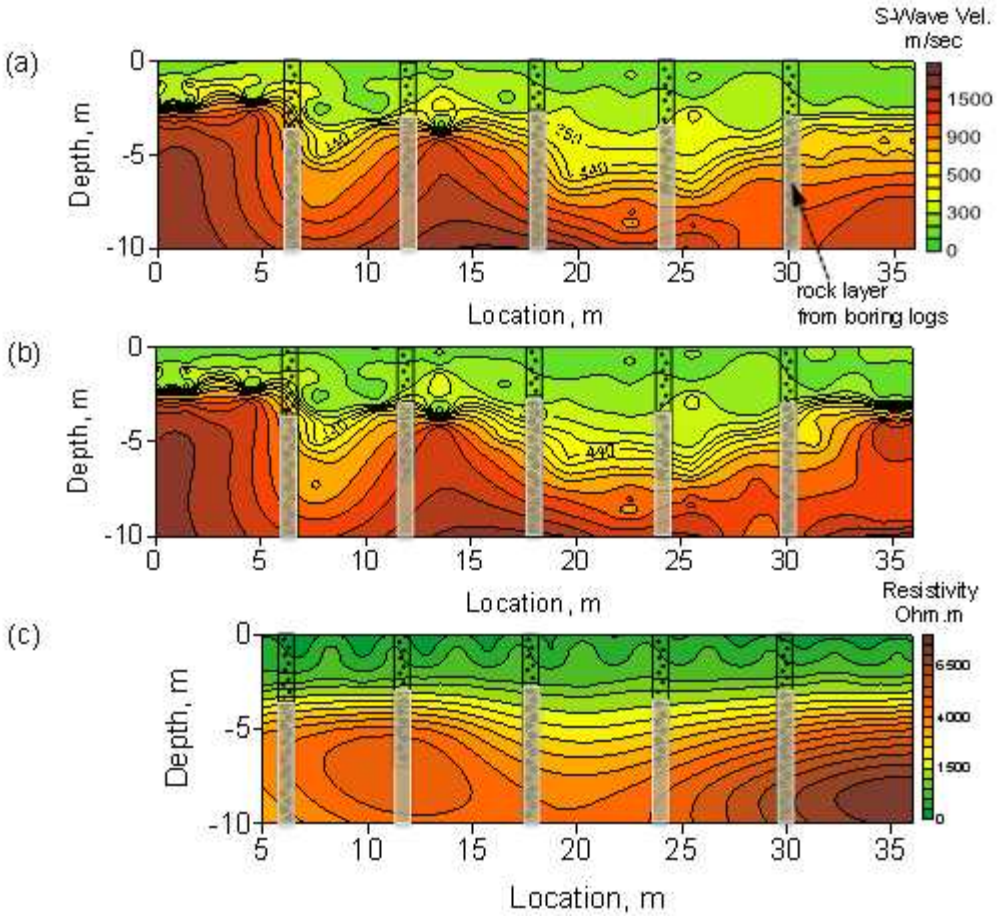
공번	심도(m)	지층	N값(회/cm)
SD-1	1.0	매립층	43/30
	2.0	매립층	50/20
	3.0	매립층	31/30
SD-2	1.0	매립층	31/30
	2.0	매립층	24/30
	3.0	매립층	47/30
SD-3	1.0	매립층	24/30
	2.0	매립층	34/30
SD-4	1.0	매립층	8/30
	2.0	매립층	9/30
	3.0	매립층	50/25
SD-5	1.0	매립층	5/30
	2.0	매립층	19/30

[그림 3.3.39] UBF 시험과 다운홀 시험이 수행된 성덕댐 진입로 부지의 지층구조

UBF 시험은 3-m 길이의 총 12개 소측선을 사용하여 36-m 측선에 대해 수행되었다. UBF 단위시험이 수행된 소측선은 3-m 길이로서 1-m 간격으로 4 개의 감진기를 설치하도록 하였다. 각 UBF 단위시험에서는 모두 3회에 걸쳐 이격거리가 다른 발진원을 사용하여 시험을 수행하였으며, 각 시험에서 획득된 표면파 분산곡선은 최종적으로 병합되어 최종역산해석에 활용되었다. 한편 CapSASW 시험도 비교시험으로 수행되었는데, 별도의 시험을 진행하지 않고 UBF 시험으로 획득된 신호 중에서 첫 번째와 네 번째 감진기로 측정한 신호를 활용하였다. 이는 CapSASW 시험이 UBF 시험과 측선을 공유하기 때문에 별도의 시험이 필요없기도 하고, 또한 동일한 발진원 신호에 대하여 측정된 동일한 신호를 사용하여 비교를 하여야 공정하고 합리적인 비교가 되기 때문이기도 하다. 또한 비교검증을 위해 동일 측선 상에서 다운홀 시험도 수행되었으며 그 결과를 [그림 3.3.40(c)]에 UBF 시험결과와 비교하여 도시하였다.



[그림 3.3.40] 성덕댐 진입로부지에서 수행된 UBF 시험과 CapSASW 시험결과: 1차원 전단파속도 주상도 (a) f-k 그래프, (b) UBF 시험과 CapSASW 시험의 분산곡선 비교, (c) UBF 시험과 다운홀 시험결과의 비교, (d) UBF 시험과 CapSASW 시험의 전단파속도 주상도 비교



[그림 3.3.41] 성덕댐 진입로부지에서 수행된 UBF 시험과 CapSASW 시험결과: 2차원 전단파속도 주상도 (a) UBF 시험으로 구한 결과, (b) CapSASW 시험으로 구한 결과, (c) DC 전기비저항 시험으로 구한 결과

1차원 전단파 주상도 평가에 있어서, UBF 시험과 CapSASW 시험은 토사구간에 대해서는 거의 일치하고 있으며, 풍화암 층에서는 다소 차이를 보이고 있는데, UBF 시험결과가 다소 작게 산정되고 있다. 다운홀 시험의 경우는 역시 토사구간에 대해서는 UBF 시험과 거의 일치하고 있다. 또한 풍화암 암반층 심도의 경우는, UBF 시험은 2m, 다운홀 시험은 3m, CapSASW 시험은 1.9m, 시추공 조사는 2.6m로 확인되어 모두 유사하게 확인되었다. 특히 UBF 시험과 CapSASW 시험은 3m 측선내에서 풍화암 심도의 평균치를 평가한 것이기 때문에 시추공 조사결과와 완벽하게 일치하는 것은 층구조상 가능하지 않으며, 약 60cm의 차이는 매우 양호한 결과를 도출한 것이라고 할 수 있다.

또한 36m 전체 측선에 대해서 풍화암 암선의 분포를 위하여 수행한 2차원 주상도 평가결과는 [그림 3.3.41]에 도시하였다. 2차원 주상도 평가는 UBF 시험,

CapSASW 시험, 전기비저항 시험 등을 수행하였는데, 세 가지 시험 모두 유사한 심도에서 유사한 암선의 형태로 평가되었다. 특히 UBF 시험과 CapSASW 시험결과는 전단파 속도 350~440 m/sec 범위의 등고선을 진하게 표시하였는데, 이는 한국건설표준품샘의 자료를 바탕으로 화강암의 풍화암 속도를 근거로 제시한 풍화암 암선 위치에 해당한다. 이 또한 다섯군데의 시추공 조사로 확인한 풍화암선과 거의 일치하고 있어서 UBF 시험은 1차원 및 2차원 전단파 속도 주상도 평가를 위한 매우 신뢰성 있는 기법이라고 확인할 수 있다.

(2) 호남고속철 상부노반: 직경 300mm 이상의 대입경 재료로 다짐된 철도 노반.

UBF 기법의 검증을 위해 비교시험이 수행된 또 하나의 조립골재 지반구조물 현장은 호남고속철 2-2공구의 성토 지반인데, 현재 완성된 상부노반이었다. 비교시험으로는 CapSASW 시험, 다운홀 시험을 수행하였다. 비교시험이 수행된 지반의 경우 원지반은 원래 논으로 활용되는 연약지반이어서 고속전철 노반을 성토하기 전에 상부 2m 부분을 양질의 토사로 치환한 후 성토를 진행하였다. 성토제방의 재료로는 심도 2~3m 까지 300mm 이하의 암버럭으로 시공하였으며, 성토체 상부 2m 구간은 100mm 이하의 잔골재로 성토하여 마무리 하였다. 고속철 상부노반 표면에서 시추를 하여 확인된 지층구조와 채취된 시료를 [그림 3.3.42]에 도시하였다.

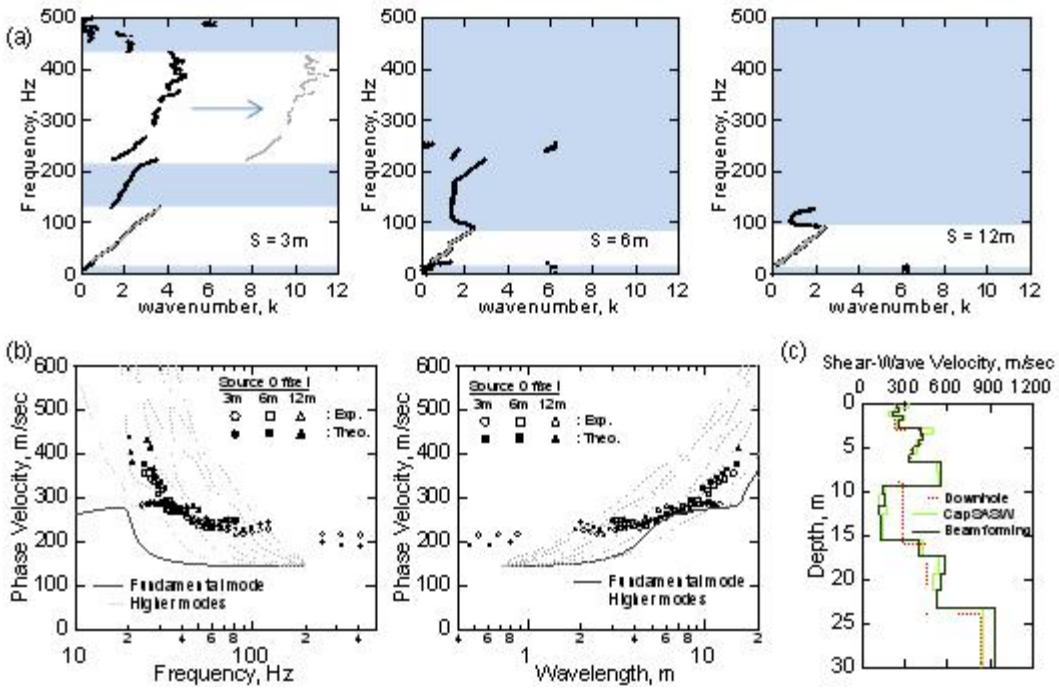


심도, m	층두께, m	지층설명
0.0	9.5	매립층. 입경:5~60mm (GP)
9.5	8.5	풍화토층. 실트질 모래 (SM)
18.0	13.5	풍화암층. 화강암 굴진시 실트질 모래로 분해 코아회수 실패 완전풍화~심한풍화
31.5	-	경암층. 반상 화강암 RQD=36%

*주: 지하수위: -5.8m

[그림 3.3.42] UBF 시험과 다운홀 시험이 수행된 호남고속철 부지의 지층구조

우선 전체적으로 층구조를 살펴보면, 심도 7m 정도까지는 UBF 시험, CapSASW 시험, 다운홀 시험 등이 모두 일치하고 있다. 심도 3m 정도에서 단단한 층이 나오는 것도 300mm 이상의 암버럭으로 제방을 성토한 이력과 일치하고 있다. 그러나 심도 7m 이하에서는 UBF 시험과 CapSASW 시험만 일치하고 있고 다운홀 시험은 다소 다른 경향을 보이고 있다. 그런데 심도 7~9m 사이의 양질토사로 치환한 이력을 염두에 둘 때 UBF 시험, CapSASW 시험결과가 더 합리적인 것으로 판단된다. 한편 CapSASW 시험과 UBF 시험에 의하면, 연약한 토사층이 심도 9.3~15.45m에 분포하다가 15.45m에서 갑자기 단단해 지는 지층이 이어지는데, UBF 시험과 CapSASW 시험의 전단파 속도가 각각 404.6, 430.6m/sec로 평가되어 풍화암의 시작지점으로 판단된다. 그리고 이어서 17.4m에서 각각 588.3, 538.0m/sec 의 속도의 매질이 평가되는 매질이 나타나는데 이는 보다 풍화가 덜 진전된 풍화암이라고 판단된다. 그리고 심도 23.2m에서 경암으로 판단되는 지층이 보이고 있다. 물론 다운홀 시험에서도 24m 심도에서 동일한 지층이 나타나고 있다. 이러한 결과를 시추결과와 비교하여 보면, 시추 주상도에서는 풍화암이 18m에서 나타나서 31.5m 까지 이어지는 것으로 조사되고 있다.

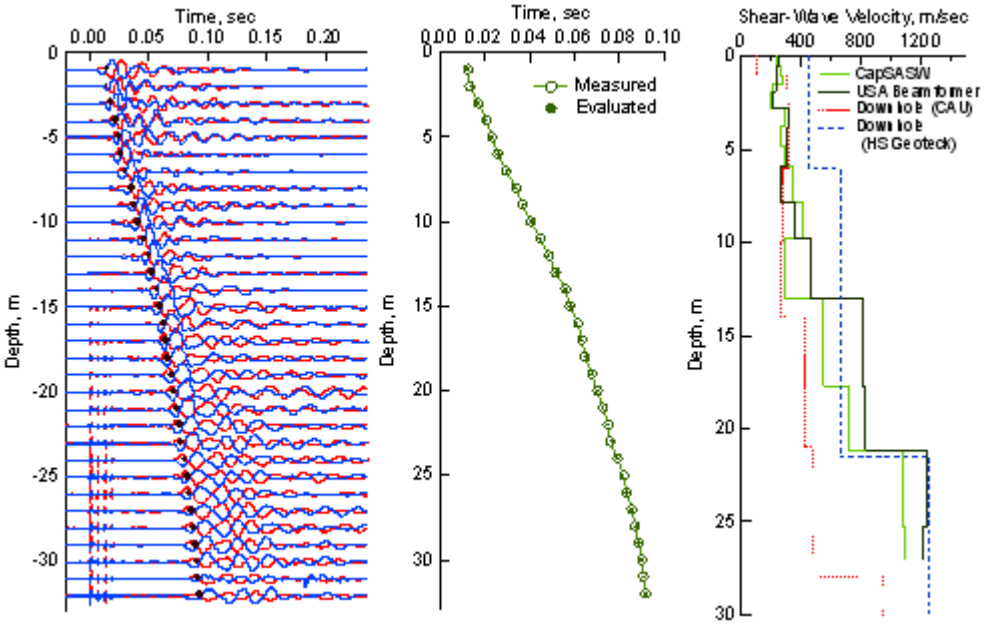


[그림 3.3.43] 호남고속철 부지에서의 UBF 시험, CapSASW 시험, 다운홀 시험의 결과 비교: (a) f-k 그래프, (b) 분산곡선, (c) 전단파속도 주상도

그런데 시추코아 박스를 살펴보면 심도 9.5m 이후 시료가 회수되지 않다가 심도 31.5m에서 일부 풍화암 시료가 회수되는 것을 볼 수 있다. 따라서 풍화암의 시작을 나타내는 심도는 다소 불확실한 판단이라고 할 수 있으며, UBF 시험, CapSASW 시험, 다운홀시험 등이 각각 평가하는 15.45, 15.45, 16m 등이 더 신뢰성이 있다고 판단된다. 결과적으로 시추주상도와 다운홀 시험, CapSASW 시험 등의 결과와 비교하여 보았을 때, UBF 시험은 매우 정확하고 신뢰성 있는 결과를 제시하고 있음을 확인할 수 있다.

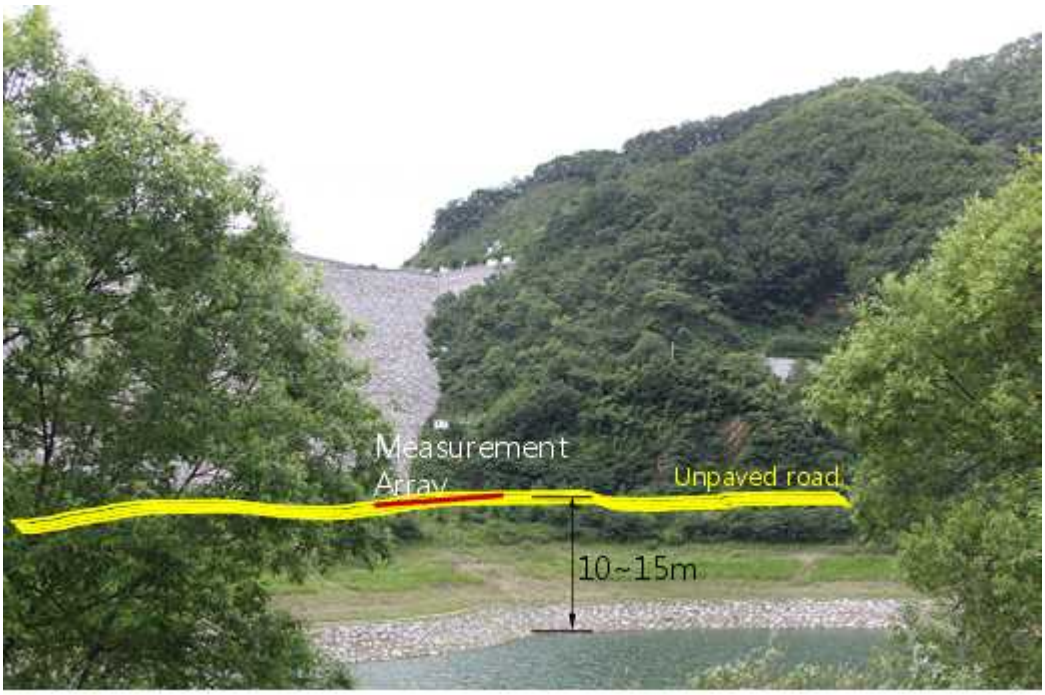
(3) 평화의댐 하류측 비포장 도로: 자갈 및 사석으로 조성된 비포장 도로.

마지막으로 UBF 기법의 신뢰성을 확인하기 위해 비교시험이 수행된 곳은 평화의 댐 하류측 비포장도로이다. 이 부지는 평화의 댐 건설에서 발생한 사석과 인근에 존재하는 골재와 혼재하여 성토되어 있는 곳으로서, 시추조사에 의하면 심도 0~6m 는모래섞인 자갈로 매립되어 있으며, 그 아래 심도 6~21.5m 구간은 평화의 댐 축조재인 자갈과 사석으로 매립되어 있으며 사석의 최대입경은 무려 600mm에 달하고 있다. 또한 그 아래에는 RQD 값이 0~54%인 화강편마암의 연암이 존재하고 있다고 조사되었다.



[그림 3.3.44] 평화의댐 하류측 비포장도로에서의 UBF 시험, CapSASW 시험, 다운홀 시험의 결과 비교: (a) 다운홀시험 시계열자료, (b) 다운홀시험 초동비교, (c) 전단파속도 주상도 비교

평화의 댐 하류측 비포장도로에서 측정한 결과를 살펴보면, 다소 특이한 상황을 살펴볼 수 있다. USA Beamformer 시험, CapSASW 시험, 다운홀 시험 결과는 심도 10m까지는 거의 일치하고 있으나 10m 하부의 매질에서는 측정방법에 따라 상이한 결과를 보여주고 있다. 그런데 그림 3.3.43을 참고하여 인근의 지형을 살펴보면 비포장도로 지표면이 원지반면으로 추정되는 수면에서 약 10~15m 정도 높이에 위치하고 있기 때문에, 그림 3.2.42의 전단파 속도 주상도에서 10~15m 정도 심도에 원지반 전단파속도가 관찰되는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 이러한 측면에서 UBF 시험과 CapSASW 시험 결과만이 전단파속도의 급격한 전단파속도 증가를 보여주고 있다. 또한 풍화암보다 단단한 매질내에서의 다운홀 시험결과는 다소 신뢰성이 저하되기 때문에 심도 13m 하부에서의 다운홀 시험결과가 다른 시험결과와 차이가 나는 것은 당연한 결과라고 판단된다. 이러한 다운홀 시험의 신뢰성 문제는 희송지오텍에서 해석한 다운홀 시험결과를 살펴보아도 알 수 있다. 즉 희송지오텍 결과에 의하면 심도 13m 까지는 다른 시험결과보다 약 두배나 큰 전단파 속도를 보여주고 있으나 심도 15m 이하에 있어서는 UBF, CapSASW 시험과 유사한 결과로 점근하고 있다. 동일한 다운홀 시험 원자료에 대하여 해석한 결과이지만 해석방법(Snell의 법칙에 근거한 역해석법과 직접법)에 따라 다소 차이를 보이고 있는 것이다.



[그림 3.3.45] 평화의댐 하류측 비포장도로에 설정한 시험측선

나. 다양한 조립재료 지반구조물에서의 현장 적용을 통한 실용성, 적용성 검증

본 연구과제에서 제안하는 UBF 기법의 실용성과 적용성을 확인하기 위하여 본 연구에서는 다양한 지반구조물에 대하여 UBF 기법을 적용하여 보았다. 실용성과 적용성에 대한 적합성을 판단하기 위하여 하드웨어,소프트웨어,시험소요시간,해석소요시간 등과 같은 항목으로 분류하여 평가하였고, 그 결과를 [표 3.3.4]에 요약하여 정리하였다.

UBF 기법은 시험수행 측면에서 휴대가 가능한 간단한 하드웨어 시스템과 저가의 비용, 적절한 시험시간 등의 측면에서 효율적이다. 또한 해석면에 있어서도 가장 두드러지는 장점인 분산곡선 결정의 자동화가 이루어져 있기 때문에 많은 경험이 필요없는 실무자들도 용이하게 해석을 수행할 수 있다. 따라서 본 연구과제에서 제안한 UBF 기법은 실용성과 적용성 면에서 충분히 실무자들의 요구조건에 만족할 수 있는 기법이라고 판단된다.

[표 3.3.4] UBF 기법의 실용성, 적용성 (계속이어짐)

평가항목	구성요소	평가내용
하드웨어	·DSA: DS-USB-6289 + 노트북 컴퓨터 ·Sensor: MEMS 또는 2-Hz 지오폰 ·전원: DC 배터리 	자료획득 시스템은 다음과 같은 장점으로 인하여 실용성과 적용성은 합리적인 것으로 판단된다. - 저가: 500만원대 가격 - 고성능: 16개채널 16비트, 앤티앨리어싱 필터, 측정주파수대역 하한치 제한없음, 5개 입력범위설정 가능, BNC 단자 - 휴대성: 28.5x20x7cm 크기로서 휴대용이 - 노트북컴퓨터와 연결: USB 단자로 연결, 측정 및 해석프로그램 등 실행가능 - 노트북 컴퓨터: 일반노트북 컴퓨터 가능 ·Sensor: 자체제작 MEMS 유니트 / 2-Hz 지오폰 ·전원: DC 배터리 (24AH로 5~6시간 사용) ·평가수행한 실험환경: KTX 고압선로변, 평화의 댐, 호남고속철 공사현장, 안성캠퍼스 인근에 위치한 전답 등에서 적용하여 보았으며, 상업적 목적으로도 만족할만한 결과를 획득하였음. ·단점: DS-USB-6289는 트리거 기능이 지원되지 않기 때문에 Free Run을 수행하여야 한다.
소프트웨어	·측정및자료획득 소프트웨어: Beamformer 1.0 ·분산곡선 결정 소프트웨어: Beamformer 1.0 ·역산해석 소프트웨어: WinSASW 	·측정및자료획득 소프트웨어: 현장에서 하나의 노트북 컴퓨터에서 시험을 수행하고 측정된 자료를 바로 하드디스크에 저장할 수 있어서 매우 편리하고 효율적임. 또한 측정자료는 안전을 위해 USB 드라이버로 백업해 두는 것이 가능함. ·분산곡선 결정 소프트웨어: 현장에서 측정한 자료에 대하여 즉시 분산속도와 분산곡선을 결정할 수 있기 때문에 보다 신뢰성 높은 시험수행이 가능함. ·역산해석 소프트웨어: UBF 기법의 경우, 역산해석은 CapSASW 역산해석과 동일하기 때문에 별도의 소프트웨어를 개발할 필요가 없었음. 따라서 기존 소프트웨어인 WinSASW를 사용하여 역산해석을 수행하였음.

[표 3.3.4] UBF 기법의 실용성, 적용성

평가항목	구성요소	평가내용
시험소요 시간	·측선설치 ·하드웨어 준비 및 설정 ·시험수행	·측선설치: 센서를 4개만 사용하기 때문에 센서의 설치와 케이블 연결 등의 작업이 용이함. 약 30분 정도 소요됨. ·하드웨어 준비 및 설정: 배터리와 노트북 컴퓨터, DS-USB-6289 등을 연결하면 되기 때문에 약 15분 정도 소요됨. ·시험수행: 표면파 발생은 해머로 타격함으로 진행되는데 모두 3~5회 정도의 반복 타격이 필요함. 또한 발진원 이격거리 S, 2S, 4S, 8S (여기서 S 측선거리)에 대해서 시험을 수행하는데 총 소요시간은 개략적으로 1시간 정도 소요됨. ※ 시험에 소요되는 총 시간: - 1차원 주상도: 약 1시간 30분 에서 2시간 정도. - 2차원 주상도: 약 4~6시간 정도 소요됨.
해석소요 시간	·분산곡선 결정 ·역산해석	·분산곡선 결정: 측정신호의 품질에 따라 큰 차이가 있는데, 개략적으로 10분 내외가 소요됨. ·역산해석: 분산곡선의 형태에 따라 차이가 있으며 그 난이도에 따라 30분~2시간 정도. ※ 해석에 소요되는 총 시간 - 1차원 주상도: 1시간 내외. - 2차원 주상도: 2~6시간 범위.

다. 조립재료 지반구조물별 동적물성의 데이터 베이스 작성

본 연구에서 제안한 UBF 기법을 이용하여 실제 대입경 조립골재 지반구조물의 전단파 속도 주상도를 평가하여 보았다. 특히 사력댐의 경우, 댐 내진성능평가에 필수적인 입력변수이기 때문에, 본 기법의 우선 적용대상으로 선정하였다. 또한 급경사 사면이 있는 지반구조물의 전단파속도 평가에 있어서 현재 가용한 모든 표면파 기법 중 UBF 기법이 가장 합리적인 표면파 기법이기 때문에 그 평가결과 또한 의미있는 연구성과라고 판단되었다.

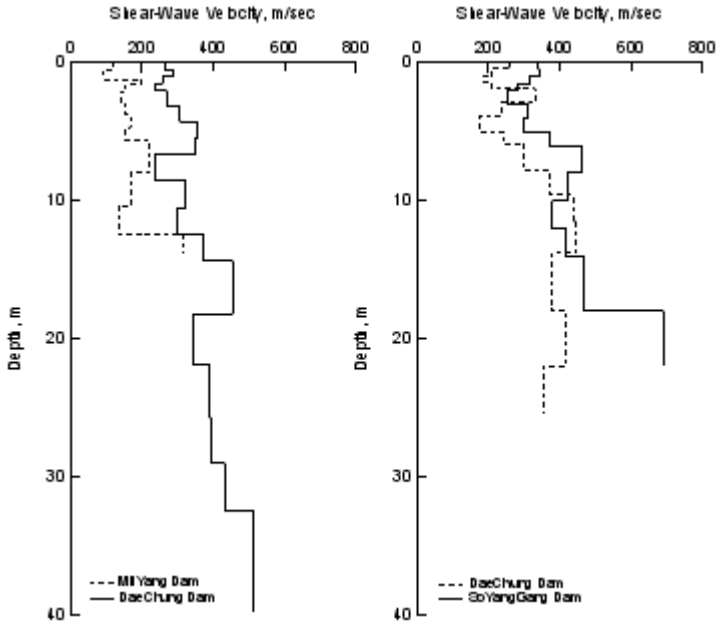
UBF 기법의 우선 적용대상으로 선정한 구조물은 밀양댐, 대청댐, 소양강댐으로 대입경 조립골재로 축조된 대형 사력댐이고, 그 결과는 [표 3.3.5]와 [그림 3.3.46]에 요약하여 정리하였다.

라. 지반구조물별 최적 탄성파 탐사기법의 실무적용을 위한 매뉴얼 작성

본 연구에서 제안한 UBF 시험기법의 현장적용 및 실용화를 위한 매뉴얼을 작성하였다. 본 매뉴얼은 부록으로 정리하여 본 보고서에 포함시켰다.

[표 3.3.5] UBF 기법으로 평가한 대형사력댐의 심도별 전단파속도

밀양댐 코아영역		대청댐 코아영역		대청댐 사석영역		소양강댐 사석영역	
깊이 (m)	평균속도 (m/sec)	깊이 (m)	평균속도 (m/sec)	깊이 (m)	평균속도 (m/sec)	깊이 (m)	평균속도 (m/sec)
0~2	122.4	0~2	259.2	0~2	242.6	0~2	294.0
2~4	138.0	2~4	272.6	2~4	222.1	2~4	289.8
4~6	156.9	4~6	297.1	4~6	239.5	4~6	321.8
6~8	159.4	6~8	281.5	6~8	256.6	6~8	348.7
8~10	159.4	8~10	288.2	8~10	276.6	8~10	358.7
10~12	154.4	10~12	289.5	10~12	293.6	10~12	365.2
12~14	172.0	12~14	298.4	12~14	310.3	12~14	380.2
		14~16	321.4	14~16	310.3	14~16	389.1
		16~18	321.4	16~18	325.4	16~18	408.9
		18~20	325.0	18~20	325.4	18~20	426.2
		20~22	333.2	20~22	329.3	20~22	447.3
		22~24	333.2	22~24	329.3	22~24	466.5
		24~26	339.0				
		26~28	339.0				
		28~30	346.8				
		30~32	346.8				
		32~34	369.2				
		34~36	369.2				
		36~38	369.2				



[그림 3.3.46] UBF 기법으로 평가한 대형사력댐의 전단파속도주상도

제 4 절 물리탐사를 이용한 대입경 조립재료의 동적물성 산정

1. 현장물성 DB화

가. 개요

동적 하중을 받는 토목구조물의 설계를 위한 지반의 동적물성치의 결정은 매우 중요하다. 이 동적물성치는 전단변형계수(shear modulus)와 감쇠비(damping ratio) 곡선으로 이루어져 있으며 이 곡선은 미소변형도의 최대 전단변형계수와 최소 감쇠비, 변형도에 따른 비선형 부분으로 이루어져있다(Stokoe and Woods, 1972; Hoar and Stokoe, 1978; Hoar, 1982; Mok, 1987; 목영진, 1994).

동적물성치를 산정하기 위해서는 지반의 탄성파속도를 측정해야하는데 현장에서 탄성파속도를 측정하는 방법은 다양하며, 현장 상황 및 특성에 따라 적용성이 높고 신뢰할 수 있는 자료를 얻을 수 있는 탐사기법을 선택하여 적용하여야 한다.

지반의 탄성파속도를 측정하는 방법은 송신원과 수신원의 위치에 따라서 지표탐사와 시추공탐사로 대분된다. 지표에서 수행하는 물리탐사 방법으로는 반사법 탄성파탐사, 굴절법 탄성파탐사, 표면파탐사 등이 있다. 이와 같은 지표탐사법 중 지반의 전단파속도(VS) 측정을 위한 탐사방법으로 표면파탐사를 주로 이용하는데, 이러한 표면파탐사 기법에는 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves)기법, MASW(Multi-channel Analysis of Surface Waves)기법, HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves)기법 등이 있다.

시추공을 이용한 전단파속도 측정 방법으로는 크로스홀 기법(Crosshole test), 다운홀 기법(Downhole test), 업홀 기법(Uphole test), 수직탄성파 탐사(Vertical seismic profiling, VSP), 음파검층(Sonic logging) 등이 있다. 시추공을 이용하는 기법은 지표탐사보다 정확하기는 하나 비용이 많이 들고 또한 사석을 사용한 댐 구조물, 항만의 방파제 등의 대입경 조립재료를 이용한 구조물들은 시추작업이 곤란하여 동적물성 및 전단파속도 측정은 표면파 탐사 방법 등에 의존하는 경우가 많다.

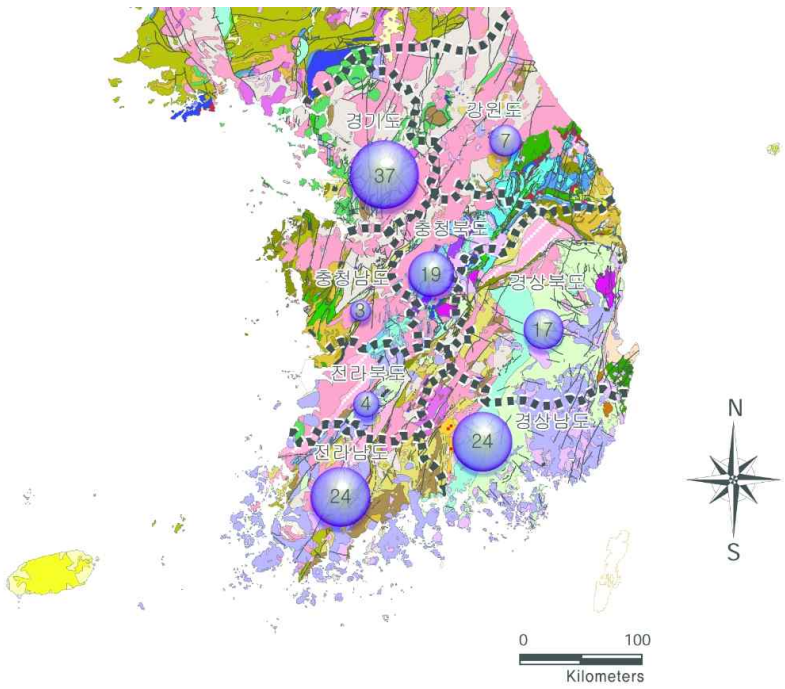
본 연구에서는 대입경 조립재료 동적물성 범위 설정을 위하여 97개의 턴키 프로젝트에서 측정된 탄성파 속도를 암반층과 토사층으로 나누고 이를 각각 공종별, 암종별로 분석하였으며, 국내에 가장 많이 분포하는 화강암과 편마암지역으로 나누어 분석하였다[그림 3.4.1]. 또한 실제 현장에 적용한 물리탐사 및 검층 결과에 대하여

서술하도록 하겠다.

나. 지층별 탄성파 속도분석

(1) 암반층

각각의 프로젝트 특성상 지층 구분에 대해 어느 정도의 차이가 존재하지만 암반층과 토사층의 구분에 있어서는 크게 문제가 되지 않았다. 따라서 지층별 Vp 와 Vs의 상관관계 분석을 위해 암반층은 풍화암층, 연암층, 경암층(보통암 포함)으로 분류하였다. 풍화암층, 연암층, 경암층(보통암 포함)을 포함하는 암반층의 탄성파 속도분포 상관관계식은 Vs = 0.5115Vp - 89.576 (R2 = 0.8929)으로 약 89%의 비교적 높은 상관성을 보인다[그림 3.4.2 (a)]. 암반층에 포함되는 3개 지층의 R2는 풍화암층 71.2%, 연암층 83.3%, 경암층 83.2%으로써 지층에 관계없이 비교적 높은 상관관계를 보이고 있다.

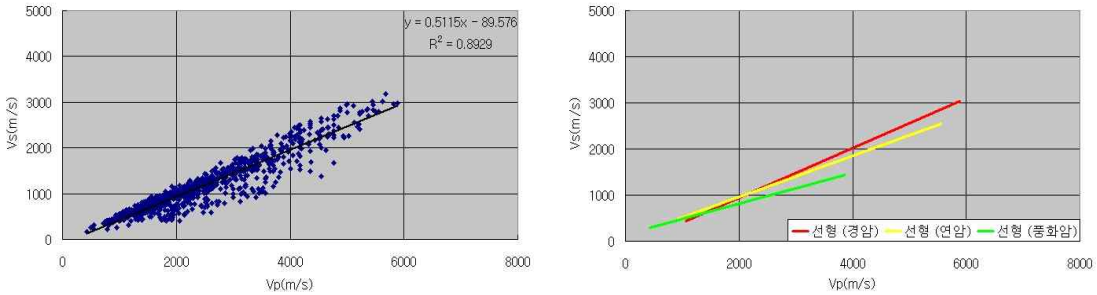


[그림 3.4.1] 현장물성 DB화 연구지역 현황

하지만 이러한 분석 결과는 상관성은 좋으나 지하수, 암종, 공종의 특성을 고려하지 않았으므로 분류가 필요하다. 먼저 암반층의 탄성파 속도 자료를 지층별로 구

분하였으며 다음으로 공종별(Downhole tes, MASW 탐사, S-PS 검층), 암종별(화강암, 편마암)로 구분하여 분석하였다.

경암층에서 풍화암층으로 갈수록 기울기가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 즉 Vp/Vs값이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 Vp/Vs의 증가는 포아송비의 증가를 의미한다. 풍화가 진행됨에 따라 암석의 고결도는 작아지고 절리나 틈의 수, 공극이 많아지면서 Vp/Vs가 증가되기 때문이라고 판단된다[그림 3.4.2 (b)]

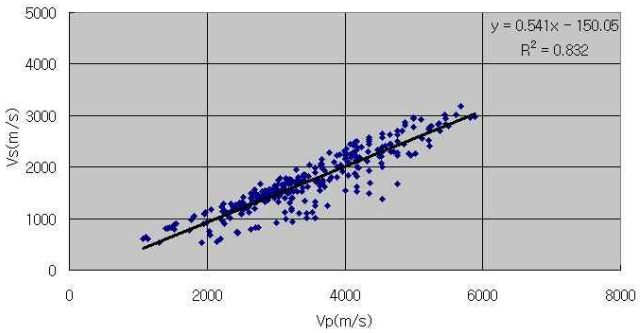


(a) 암반층(전체) (b) 암반층(지층)

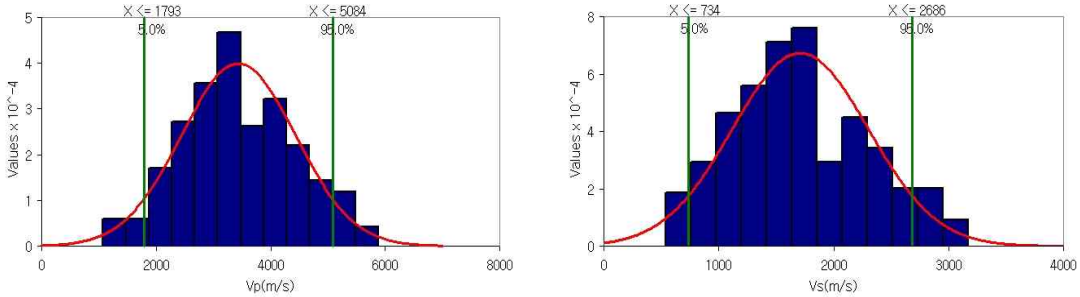
[그림 3.4.2] 암반층의 Vp와 Vs 관계

① 경암층의 탄성파 속도 분포 현황

경암층의 자료는 대부분 지하수위 하부에 위치하며 공종과 암종을 고려하지 않은 분석결과 상관관계식은 Vs = 0.541Vp-150.05 (R2=0.832)이다[그림 3.4.3]. 또한 분산도 그래프를 이용한 탄성파 속도의 유용성 검증에 의하면 Vp = 1,793~5,084m/s, Vs = 734~2,686m/s의 속도 범위를 보이며 Vp/Vs는 1.89~2.44의 범위이다.



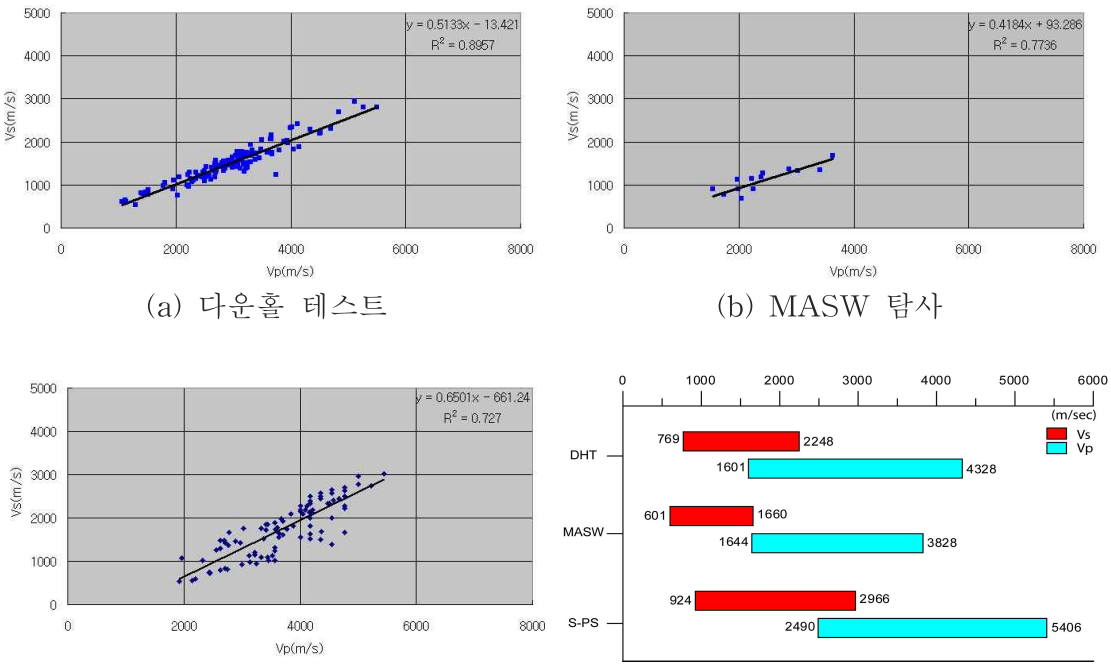
[그림 3.4.3] 경암층의 Vp와 Vs 관계



(a) 경암층의 Vp 분포도 (b) 경암층의 Vs 분포도

[그림 3.4.4] 경암층의 Vp와 Vs분포도

다음은 경암층 자료를 공종에 따라 구분한 결과이다.



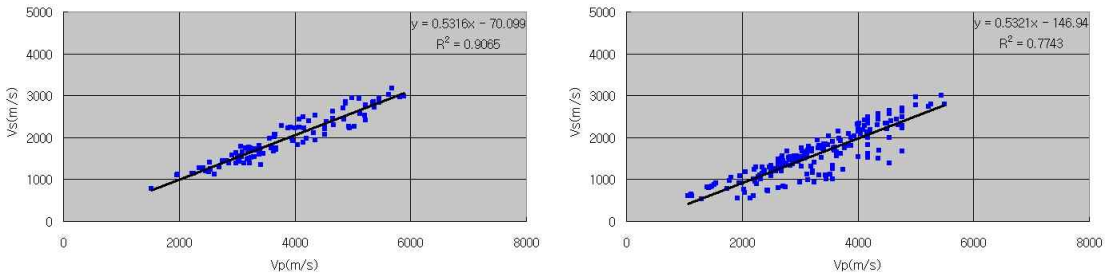
(c) S-PS 검층 (d) 공종별 속도 범위

[그림 3.4.5] 공종별 경암층의 Vp와 Vs 관계 및 속도 범위

다운홀 테스트	Vs = 0.5133Vp - 13.421 (R^2 = 0.8957)
MASW 검층	Vs = 0.4184Vp + 93.286 (R^2 = 0.7736)
S-PS 검층	Vs = 0.6501Vp - 661.24 (R^2 = 0.727)

공종에 따른 분석결과 다운홀 테스트는 Vp = 1,601~4,328m/s, Vs = 769~2,248, MASW 탐사는 Vp = 1,644~3,828m/s, Vs = 601~1,660, S-PS 검층은 Vp = 2,490~5,406m/s, Vs = 924~296 범위이다. 다운홀 테스트가 가장 높은 상관성으로 나타나며 MASW 탐사와 S-PS 검층 결과도 비교적 높은 상관성을 나타낸다. 일반적으로 S-PS 검층은 진원의 주 주파수가 300~1,000Hz로써 다운홀 테스트에 비해 10배 정도 높은 주파수 대역을 가져 Vp, Vs값이 약간 더 높게 나타나는 것으로 알려져 있다. 분석에 사용된 자료에서도S-PS 검층자료가 다른 두 공종보다 높은 속도대에 자료가 집중되어 있는 것을 알 수 있다[그림 3.4.5]. 또한 S-PS 검층의 경우는 자료가 좁은 속도 범위 내에 집중되는 현상을 나타내며 분산도 그래프를 그렸을 때 Test Value 수치가 Critical Value 0.1의 수치보다 높게 나오기 때문에 분산도의 유효성 검증을 성립시키기 위하여 자료의 필터링 후에 나타내었다.

경암층을 암종에 따라 구분하면 [그림 3.4.6]과 같다. 암종 중 화강암의 상관관계식은 Vs = 0.5316Vp-70.099 (R2=0.9065)로 높은 상관성을 보이며 편마암의 상관관계식은 Vs = 0.5321Vp-146.94 (R2=0.7743)로 나타난다. 편마암은 화강암에 비해 약 13% 낮은 상관성을 갖는다. 화강암의 경우 Vp = 2,127~5,410m/s, Vs = 1,133~2,962m/s의 속도 분포를 보이며 편마암의 경우 Vp = 1,679~4,814m/s, Vs = 633~2,529m/s의 속도 분포를 보인다. 즉, 화강암은 편마암 보다 Vp는 1.12~1.26배, Vs는 1.17~1.78배 빠른 속도로 나타난다. 화강암의 Vp/Vs는 약 1.82~1.87로 비교적 좁은 범위로 나타나며 편마암의 Vp/Vs는 1.9~2.65배의 넓은 범위로 나타난다.



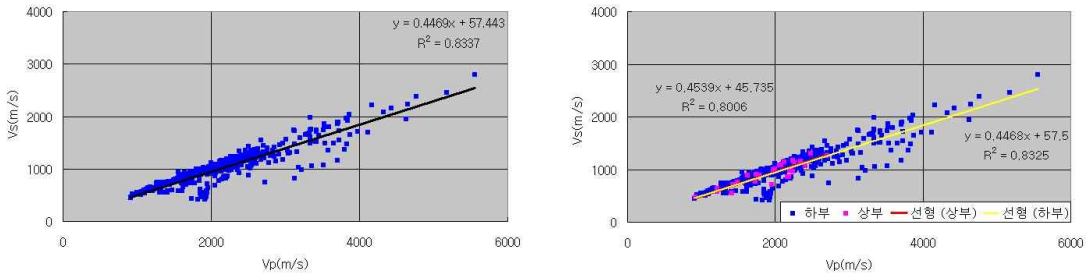
(a) 화강암의 Vp와 Vs 관계 (b) 편마암의 Vp와 Vs 관계

[그림 3.4.6] 암종별 경암층의 Vp와 Vs 관계

② 연암층에서의 탄성파 속도 분포 현황

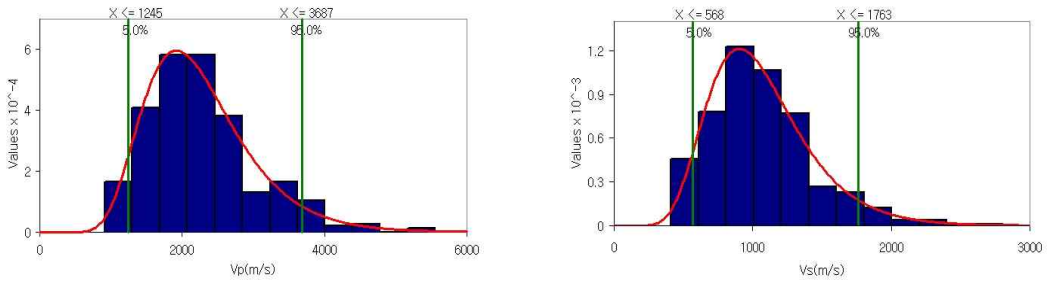
연암층의 탄성파 속도 분석 결과 상관관계식은 Vs = 0.4469Vp+57.443 (R2=0.8337)으로 약 83%의 높은 상관성을 보인다. 연암층의 자료는 대부분이 지하

수위 하부로써 27개의 자료만이 지하수위 상부에 분포한다. 지하수위 상부 자료의 상관관계식은 Vs = 0.4539Vp+45.735 (R2=0.8006)이고 지하수위 하부 자료의 상관관계식은 Vs = 0.4468Vp+57.5 (R2=0.8325)로 상부보다 하부의 상관성이 약 3% 더 좋게 나왔다. 속도 범위는 지하수위 상부가 Vp = 1,216~2,649m/s, Vs = 559~1,286m/s로 나타나고 지하수위 하부는 Vp = 1,252~3,748m/s, Vs = 569~1,790m/s의 범위를 보인다. Vp = 2,649m/s와 Vs = 1,286m/s 이상의 속도에서는 지하수위 상부의 자료가 존재하지 않는다. 전체 자료를 비교하면 지하수위 하부의 속도 범위 안에 지하수위 상부 속도 범위가 포함된다[그림 3.4.7].



(a) 연암층의 Vp와 Vs 관계 (b) 지하수위 상하부 관계

그림 4.3.7 연암층의 Vp와 Vs 관계 및 지하수위 상하부의 관계

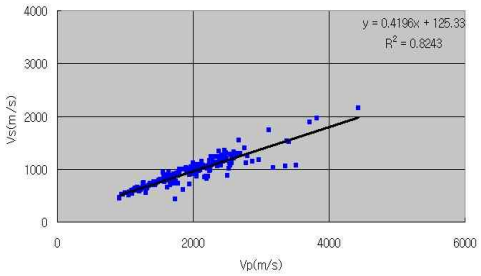


(a) 연암층의 Vp 분포도 (b) 연암층의 Vs 분포도

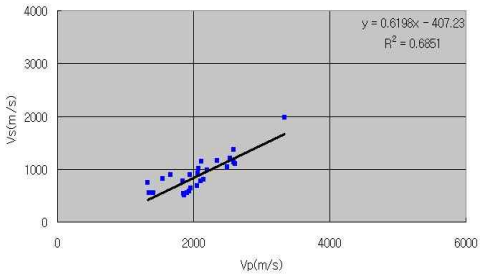
[그림 4.3.8] 연암층의 Vp와 Vs 분포도

연암층의 공종에 따른 속도 분포 현황 및 탄성파 속도 분석 그래프는 [그림 3.4.9], [그림 3.4.10]과 같다. 연암층의 공종별 분석 결과 경암층과는 다르게 S-PS 검층 자료의 상관성이 약 84%로 가장 높게 나타났으며 MASW 탐사 자료의 상관성이 약 69%로 가장 낮게 나왔다. MASW 탐사의 경우는 특정 프로젝트 자료의 편중으로 인하여 상관성이 떨어지는 것으로 보이며 이를 제외하면 77%의 상관성을 보인다.

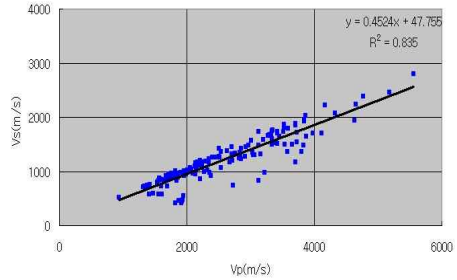
공종에 따른 분석결과 다운홀 테스트는 Vp = 1,059~2,988m/s, Vs = 527~1,426, MASW 탐사는 Vp = 1,476~2,801m/s, Vs = 529~1,570, S-PS 검층은 Vp = 1,448~4,439m/s, Vs = 605~2,108 범위이다. 전체적으로 S-PS 검층이 다른 두 공종보다 속도 범위가 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보이며 지하수위 상·하부로 구분하여 분석한 결과 MASW 탐사와 S-PS 검층의 지하수위 상부는 자료양이 적어 속도 범위로는 나타낼 수 없고 다운홀 테스트 공종만 지하수위 상부와 하부로 분류하여 분석하면 지하수위 하부의 속도 범위는 상부보다 넓은 범위를 가지며 이는 측정심도와 자료양의 차이에 의한 것으로 판단된다.



(a) 다운홀 테스트



(b) MASW 탐사

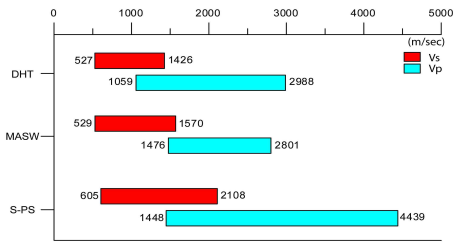


(c) S-PS 검층

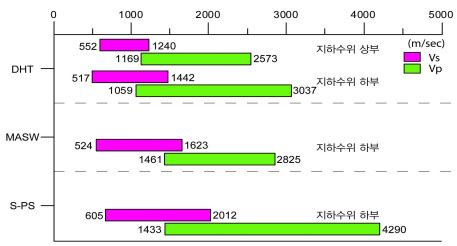
다운홀 테스트	Vs = 0.4196Vp + 125.33 (R^2 = 0.8243)
MASW 탐사	Vs = 0.6198Vp - 407.23 (R^2 = 0.6851)
S-PS 검층	Vs = 0.4524Vp + 47.755 (R^2 = 0.835)

(d) 공종별 속도 범위

[그림 3.4.9] 공종별 연암층의 Vp와 Vs 관계



(a) 공종별 속도 범위

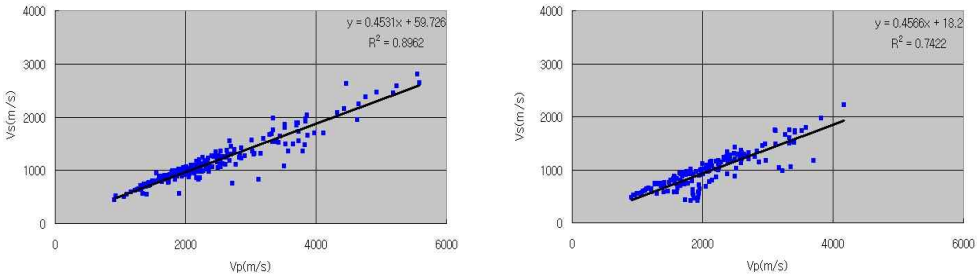


(b) 지하수위 상하부 속도 범위

[그림 3.4..10] 공종별 연암층의 속도범위

다음은 암종별 분석결과이다[그림 3.4..11]. 암종 중 화강암의 상관관계식은 Vs = 0.4531Vp+59.726 (R2=0.8962)로 약 89%의 높은 상관성으로 나타나며 편마암은 Vs

= 0.4566Vp+18.2 (R2=0.7422)로 화강암보다 약 15% 낮은 상관관계를 보여준다. 탄성파 속도 또한 화강암의 Vp는 1,305~4,121m/s, Vs는 635~1,953m/s으로 나타나며 편마암의 Vp는 1,181~3,318m/s, Vs는 510~1,638m/s의 범위이고 화강암보다 Vp는 1.1~1.24배, Vs는 1.19~1.24배 느린 속도범위를 보여주고 있다.

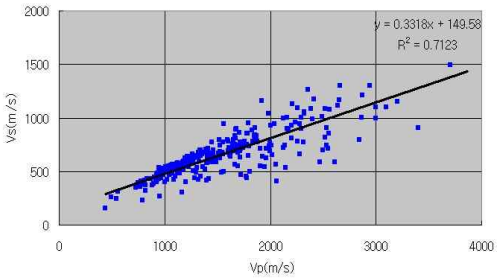


(a) 화강암의 Vp와 Vs 관계 (b) 편마암의 Vp와 Vs 관계

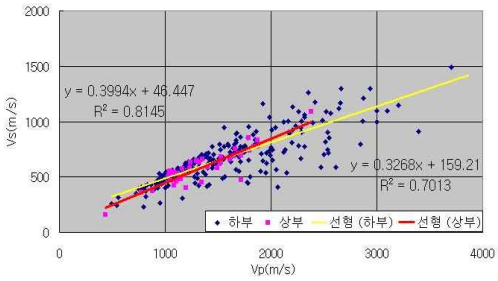
[그림 3.4.11] 암종별 연암층의 Vp와 Vs 관계

③ 풍화암층에서의 탄성파 속도 분포 현황

풍화암층의 구분은 표준관입시험에 의하여 구분(50/10)하였으며 경암층, 연암층에 비교해 속도 기울기가 급격히 떨어지는 것을 [그림 3.4..2 (b)]에서 확인할 수 있었다. 그만큼 다른 암반층보다 풍화 진행이 많이 되었다는 것을 탄성파 속도 그래프를 통해 알 수 있으며 90% 신뢰도의 유용성 검증을 성립하기 위해 필터링을 하여 분석한 결과 [그림 3.4..12]와 같다. 풍화암의 상관관계식은 Vs = 0.3318Vp+149.58 (R2=0.7123) 으로 약 71%의 상관성을 보인다. 다른 암반층과 마찬가지로 지하수위 상부와 하부 속도 분석 결과 지하수위 상부의 자료는 38개로 적은 양의 자료이고 대부분이 지하수위 하부 자료인데 그 상관관계식은 Vs = 0.3268Vp+159.21 (R2=0.7013), 약 70%의 상관성을 보이며 지하수위 상부는 Vs = 0.3994Vp+46.447 (R2=0.8145), 약 81%의 상관성을 보인다. 지하수위 상부의 상관성이 하부보다 약 11% 높게 나왔으며 탄성파 속도는 Vp는 800~2,632m/s Vs는 360~1,122m/s의 속도범위를 보인다.

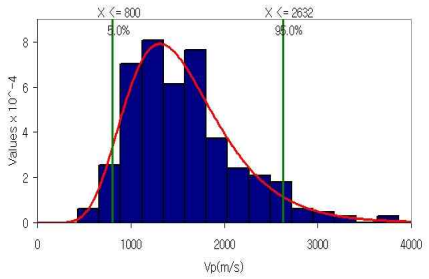


(a) 풍화암층의 Vp와 Vs 관계

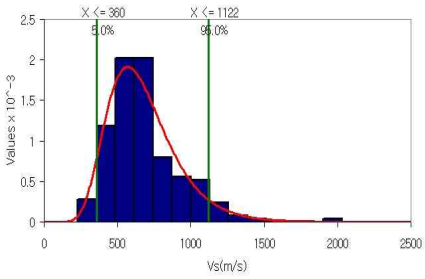


(b) 지하수위 상하부 관계

[그림 3.4..12] 풍화암층의 Vp와 Vs 관계 및 지하수위 상하부의 관계

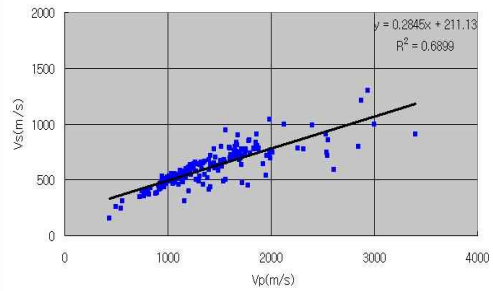


(a) 풍화암층의 Vp 분포도

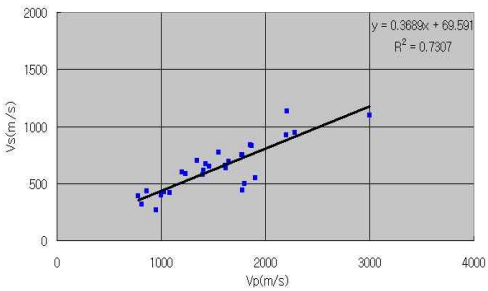


(b) 풍화암층의 Vs 분포도

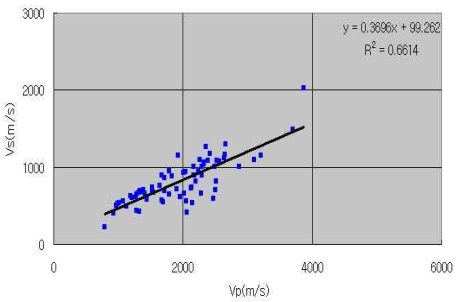
[그림 3.4..13] 풍화암층의 Vp와 Vs 분포도



(a) 다운홀 테스트



(b) MASW 탐사



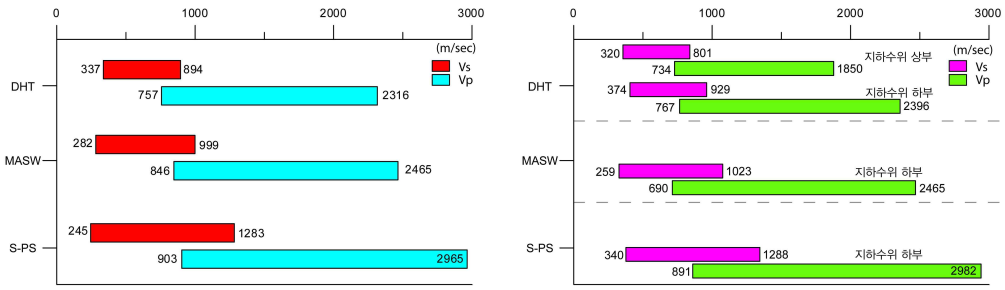
(c) S-PS 검층

다운홀 테스트	Vs = 0.2845Vp + 211.13 (R^2 = 0.6899)
MASW 탐사	Vs = 0.3689Vp + 69.591 (R^2 = 0.7307)
S-PS 검층	Vs = 0.3696Vp + 99.262 (R^2 = 0.6614)

(d) 공종별 속도 범위

[그림 3.4.14] 공종별 풍화암층의 Vp와 Vs 관계

공종별로 구분하면 [그림 3.4.14]와 같다. 풍화암층의 경우 MASW 탐사가 가장 높은 73%의 상관성으로 나타났으며 다운홀 테스트 69%, S-PS 검층이 66%의 상관성으로 나타난다. 또한 다른 암반층과 마찬가지로 풍화암층의 탄성파 속도는 S-PS 검층의 속도가 가장 빠르며 넓은 범위로 나타났다. 지하수위 상부와 하부를 비교해 보면 연암층과 같이 지하수위 상부의 자료는 대부분이 다운홀 테스트의 자료이고 MASW 탐사와 S-PS 검층의 지하수위 상부 자료는 각각 5개, 3개로 양이 적어 도시하지 않았다. 전체적인 속도 범위 패턴은 지하수위를 고려하지 않은 속도 범위와 유사해 보이며 측정 심도 차이로 인한 속도 범위 차이를 보여준다. 공종에 따른 분석결과 다운홀 테스트는 Vp = 757~2,316m/s, Vs = 337~894, MASW 탐사는 Vp = 846~2,465m/s, Vs = 282~999, S-PS 검층은 Vp = 903~2,965m/s, Vs = 245~1,283 범위이다[그림 3.4.15(a)]. 전체적으로 S-PS 검층이 다른 두 공종보다 속도 범위가 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보이며 지하수위 상·하부로 구분하여 분석한 결과 다운홀 테스트는 지하수위 상부의 속도는 Vp = 734~1,850m/s, Vs = 320~801이고 지하수위 하부의 속도는 Vp = 767~2,396m/s, Vs = 374~929 범위이다. 지하수위 하부의 속도 범위는 상부보다 넓은 범위를 갖는다.

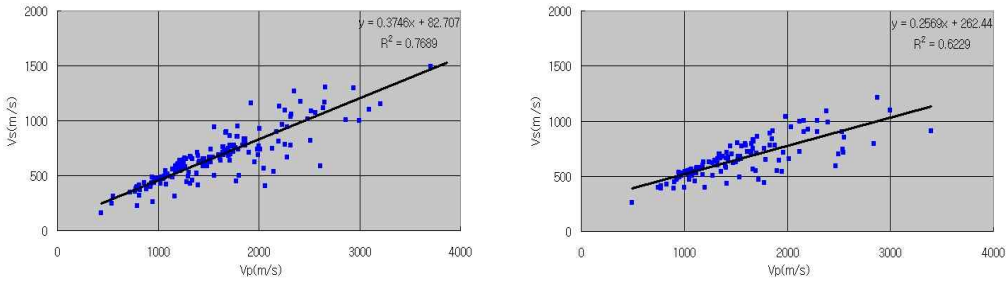


(a) 공종별 속도 범위 (b) 지하수위 상하부 속도 범위

[그림 3.4.15] 공종별 풍화암층의 속도범위

풍화암층의 암종별 분석 시 화강암의 상관관계식은 Vs = 0.3746Vp+82.707 (R2=0.7689)으로 약 77%, 편마암의 상관관계식은 Vs = 0.2569Vp+262.44 (R2=0.6229)으로 약 62%의 상관관계를 보인다[그림 3.4.16]. 화강암의 상관성이 편마암보다 약 15% 높은 것으로 분석되며 속도범위는 화강암 Vp = 788~2,688m/s, Vs = 340~1,131m/s, 편마암의 Vp = 822~2,548m/s, Vs = 407~975m/s의 속도범위로 나타났다. 풍화암층에서의 암종별 분석 결과는 화강암에 비해 편마암이 낮은 기울기로 나타나며 이것은 편마암의 풍화 진행 과정 동안에 편리면의 이완이 급격

하게 진행되고 풍화산물에 의해 편리면과 같은 불연속면의 틈새가 충전되어 Vs에 더 영향을 미친 것으로 판단된다.(이벽규, 이수곤, 2008)



(a) 화강암의 Vp와 Vs 관계 (b) 편마암의 Vp와 Vs 관계

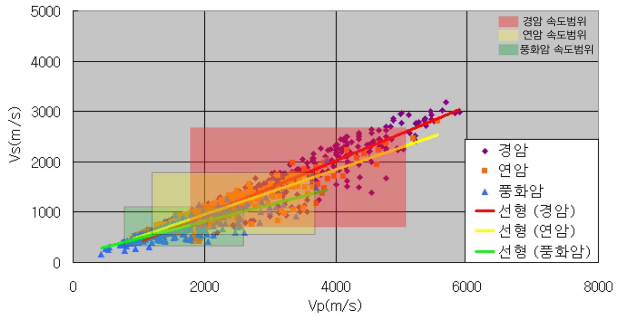
[그림 3.4.16] 암종별 풍화암층의 Vp와 Vs 관계

④ 암반층 속도 분석 결과

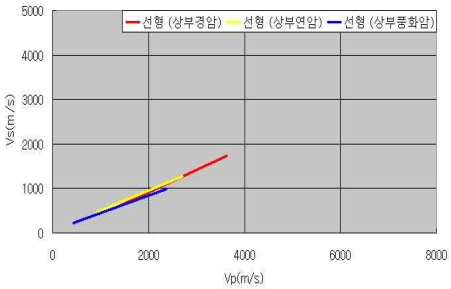
전반적으로 암반층에서의 탄성파 속도 분포 현황을 분석한 결과 다음과 같다. 경암층의 속도는 Vp = 1,793~5,084m/s, Vs = 734~2,686m/s, 연암층의 속도는 Vp = 1,245~3,687m/m/s, Vs = 568~1,763m/s, 풍화암층의 속도는 Vp = 800~2,632m/s Vs = 360~1,122m/s이다. 각 암반층의 속도 분포는 서로 중복되는 영역을 포함한다 [그림 3.4.17].

공종별 분석 중 각 암반층의 MASW 탐사 결과는 대부분 자료의 양이 적어 분석에 어려움이 있으며 S-PS 검층의 탄성파 속도가 다운홀 테스트와 MASW탐사의 탄성파 속도보다 상대적으로 빠르게 나타난다. 암종별 분석 결과는 연암층과 경암층에서 화강암의 상관성은 90% 내외, 편마암의 상관성은 75% 내외로써 화강암의 상관성이 약 15%정도 높게 나오며 풍화암층에서는 두 암종 모두 연암층과 경암층에 비해 상관성이 낮지만 역시 화강암의 상관성이 높게 나타난다.

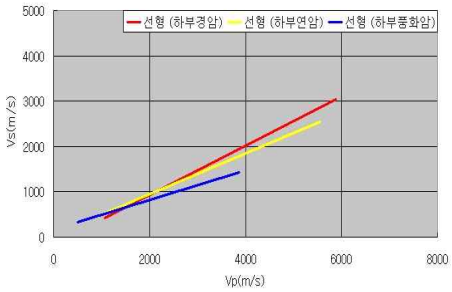
[그림 3.4.18]은 각 지층별 탄성파 속도를 지하수위 상·하부로 구분하여 분석한 결과이다. 지하수위 상부에서는 지층별로 Vp와 Vs의 속도비가 거의 비슷한 양상을 보인다. 하지만 지하수위 하부에서는 지층별로 Vp와 Vs의 속도비가 풍화암층, 연암층, 경암층 순서로 작아진다. 이 결과는 암반층 상부인 풍화암층은 지하수위 위치가 Vs에 미치는 영향이 연암이나 경암에 비해 큰 것으로 파악할 수 있다.



[그림 3.4.17] 각 암반층의 속도 범위



(a) 지하수위 상부 Vp와 Vs 관계



(a) 지하수위 하부 Vp와 Vs 관계

[그림 3.4.18] 암반층의 지하수위 상하부 속도

(2) 토사층

토사층의 분류는 일반적으로 입경에 의한 분류, 삼각좌표에 의한 분류, 공학적 분류 등으로 나뉜다. 본 연구에서는 각 프로젝트의 특성에 따라 통일분류법에 의하여 분류된 붕적토, 매립토, 충적토(자갈, 모래, 점토, 실트), 퇴적토, 풍화토 등의 자료를 바탕으로 DB를 구축하여 탄성파 속도 분석 및 분산도 분석을 하였다. 통일분류법이란 입도에 의하여 조립토, 세립토를 구분하고 조립토는 다시 입도 및 함유 세립토의 함량, 세립토는 소성도, 유기질토는 관찰에 의한 판별로 총 25종으로 분류하는 방법이다[그림 3.4.19]. 각 지층별로 유용성 검증을 통해 분산도를 분석해 본 결과 대부분의 토사층이 유용성 검증에 성립하였으나 특정 지층은 성립하지 못하였다. 이는 암반층과 마찬가지로 각기 다른 프로젝트들의 특성과 지역, 현장조건, 측정심도 등의 현장 조건이 모두 다르기 때문인 것으로 판단되며 토사층의 경우 암반층보다 더욱 많은 영향을 받은 것으로 판단된다. 즉, 토사층의 풍화상태, 포화도, 다짐도, 공극률, 지하수위 등 탄성파 속도에 영향을 줄 수 있는 변수들이 너무 많기 때문이다. 하지만 본 DB는 실제로 댐, 교량 등의 구조물 설계에 사용한 자료이므로 신뢰도가 있다는 가정하에 토사층을 공종으로 구분하고 또한 풍화토층의 기원은 기반암에 의존한다는 가정하에 암종으로 구분하여 분석하였다.

대분류(제1문자)			소분류(토질의 속성, 제2문자)		
조립토	자갈(gravel)	G	조립토	세립이 거의 없고 입도 분포가 좋은 흙 (well-graded)	W
	모래(sand)	S		세립이 거의 없고 입도분포가 나쁜 흙 (poor-graded)	P
세립토	실트(Mo)	M		12% 이상의 실트를 함유하고 있는 실트질의 혼합토 (Mo)	M
	점토(clay)	C		12% 이상의 실트를 함유하고 있는 점토질의 혼합토 (점토결합토, clay-binder)	C
	유기질의 흙 (organic clay)	O	세립토	액성한계가 50이하로 압축성이 낮은 것 (low compressibility)	L
유기질토	이탄(peat)	Pt		액성한계가 50이상으로 압축성이 높은 것 (high compressibility)	H
토질	토질의 속성				제3문자
조립토	(drained) 액성한계 $W_L \le 28$, 소성지수 $I_p \le 6$				D
	(undrained) 액성한계 $W_L > 28$				U

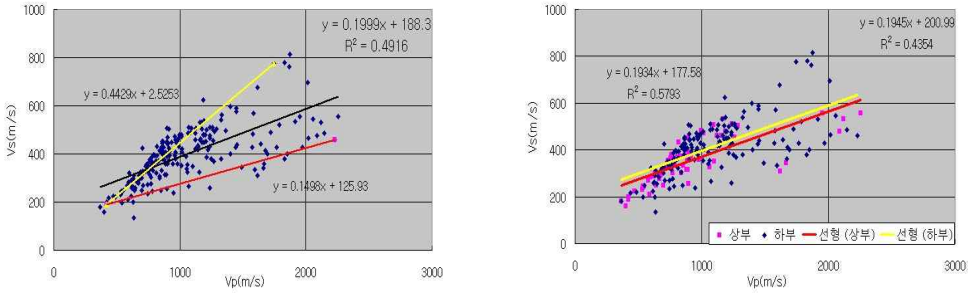
[그림 3.4.19] 공학적 분류(통일분류법)

① 풍화토층에서의 탄성파 속도 분포 현황

풍화토층에서의 탄성파 속도 분포 분석 결과, 상관관계식은 Vs = 0.1999Vp+188.3 (R2=0.4916)으로 약 49%의 낮은 상관성을 보인다. 전반적으로는 상한의 추세선을 따르나 하한의 추세선을 따르는 자료로 인해 전체적인 상관성이 낮게 나왔다. 이는 풍화토층을 구성하고 있는 풍화도, 광물비, 함수비 다짐도, 심도 등에 따라 큰 차이가 나타나는 분석된다. 상관관계식은 상한은 Vs = 0.4429Vp+2.5253, 하한은 Vs = 0.1498Vp+125.93으로 나타났다[그림 3.4.20 (a)].

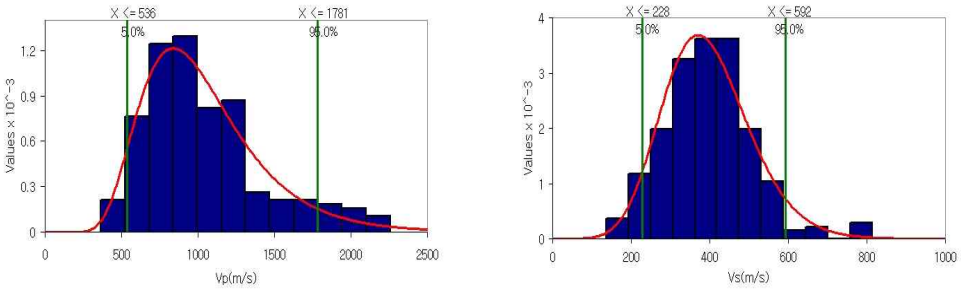
한편 지하수위 상부 자료와 하부 자료를 비교 분석 해 보면 지하수위 상부 자료의 상관관계식은 Vs = 0.1934Vp+177.58 (R2=0.5793), 하부 자료의 상관관계식은 Vs = 0.1945Vp+200.99 (R2=0.4354)로 나타났고 지하수위 상부 속도범위는 Vp = 463~1,648m/s, Vs = 201~532m/s이고 하부는 Vp = 591~1,805m/s, Vs = 246~608m/s의 범위를 보인다. 지하수위 하부의 탄성파 속도가 상부보다 Vp는 1.13배, Vs는 1.16배 빠른 속도범위를 보인다[그림 3.4.20(b)].

분산도 그래프에 의하면 풍화토층의 탄성파 속도 범위는 Vp = 536~1,781m/s, Vs = 228~592m/s로 나타난다[그림 3.4.21].



(a) 풍화토층의 Vp와 Vs 관계 (b) 지하수위 상하부 관계

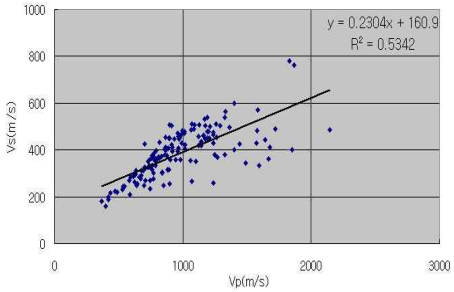
[그림 3.4.20] 풍화토층의 Vp와 Vs 관계 및 지하수위 상하부의 관계



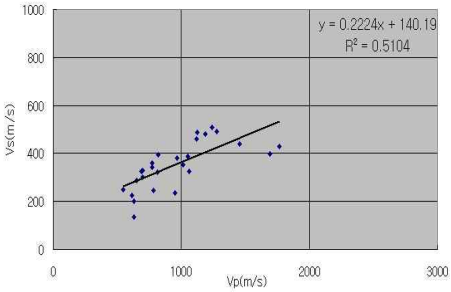
(a) 풍화토층의 Vp 분포도 (b) 풍화토층의 Vs 분포도

[그림 3.4.21] 풍화토층의 Vp와 Vs 분포도

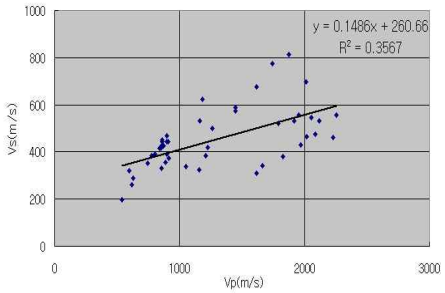
풍화토층을 공종별로 구분하면 [그림 3.4.22]와 같다. 분석 결과 다운홀 테스트와 MASW탐사 결과는 약 51~53%의 비교적 낮은 상관성을 보인다. S-PS 검층 결과는 35%로 매우 낮은 상관성을 보인다.



(a) 다운홀 테스트



(b) MASW 탐사



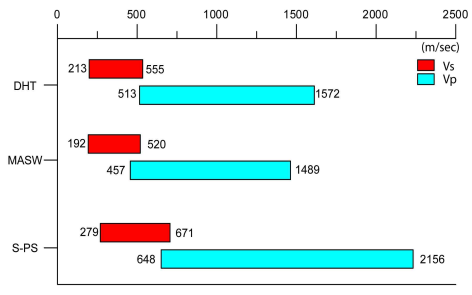
(a) S-PS 검층

다운홀 테스트	Vs = 0.2304Vp + 160.9 (R^2 = 0.5342)
MASW 탐사	Vs = 0.2224Vp + 140.19 (R^2 = 0.5104)
S-PS 검층	Vs = 0.1486Vp + 260.66 (R^2 = 0.3567)

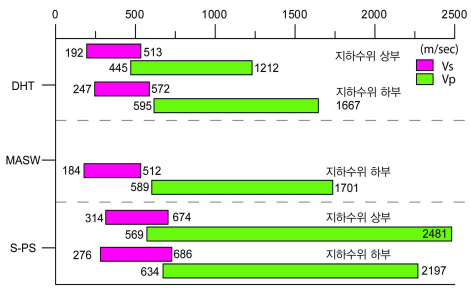
(b) 공종별 속도 범위

[그림 3.4.22] 공종별 풍화토층의 Vp와 Vs 관계

다운홀 테스트는 Vp = 513~1,572m/s, Vs = 213~555, MASW 탐사는 Vp = 457~1,489m/s, Vs = 192~520, S-PS 검층은 Vp = 648~2,156m/s, Vs = 279~671의 범위이다. 탄성파 속도 범위는 암반층과 마찬가지로 S-PS 검층 자료가 다른 두 공종보다 약간 빠르게 나타난다. 지하수위 상하부로 나누어 분석한 결과 중 S-PS 검층의 지하수위 상부 Vp 속도가 하부의 Vp 속도보다 높게 나타난 것은 시추공 케이싱의 영향인 것으로 판단된다.



(a) 공종별 속도 범위



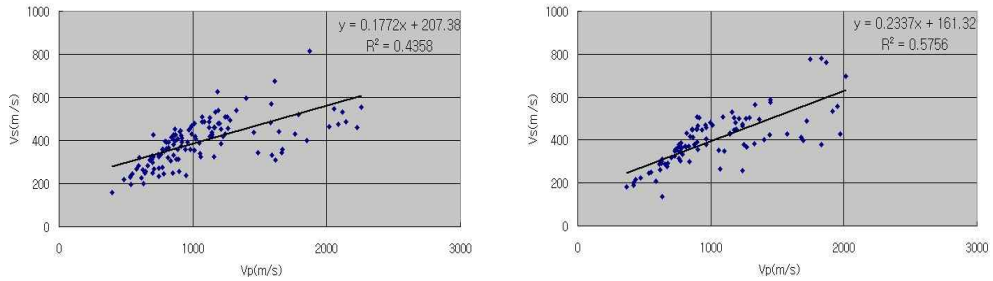
(b) 지하수위 상하부 속도 범위

[그림 3.4.23] 공종별 풍화토층의 속도범위

풍화토층의 암종별 탄성파 속도 분석 결과 화강암의 상관관계식은 Vs = 0.1772Vp+207.38 (R2=0.4358)으로 약 44%의 상관성을 보이며 편마암의 상관관계식

은 Vs = 0.2337Vp+161.32 (R2=0.5756)으로 약 58%의 상관성으로 나타났다. 풍화토층의 경우 암반층의 경우와는 다르게 편마암이 화강암보다 약 14% 높은 상관성을 보여주고 있다[그림 3.4.24].

화강암의 탄성파 속도는 Vp가 579~1,797m/s, Vs는 237~578m/s로 분석되었고 편마암의 탄성파속도로는 Vp가 491~1,766m/s, Vs는 217~611m/s의 탄성파 속도 범위로 자료 분포 양상은 두 암종 모두 비슷한 분포 양상으로 나타났다.

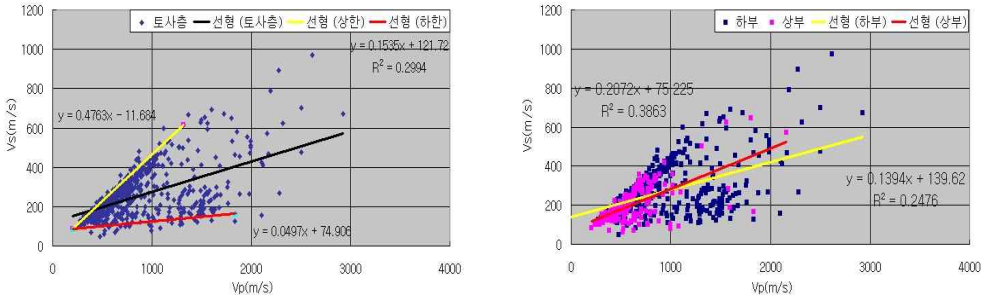


(a) 화강암의 Vp와 Vs 관계 (b) 편마암의 Vp와 Vs 관계

[그림 3.4.24] 암종별 풍화토층의 Vp와 Vs 관계

② 토사층에서의 탄성파 속도 분포 현황

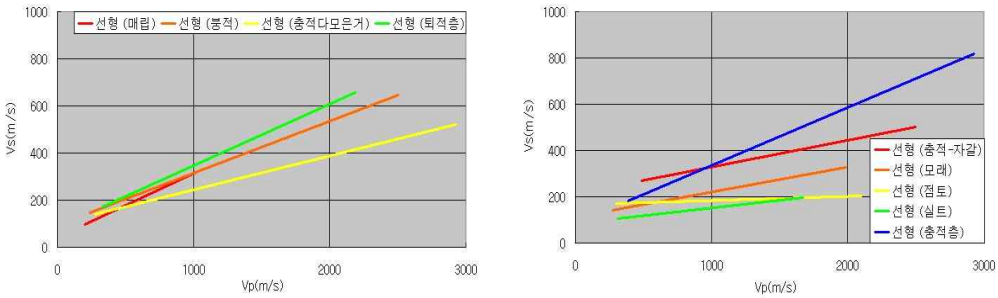
토사층은 풍화토층을 제외한 붕적층, 매립층, 충적층(자갈, 모래, 점토, 실트), 퇴적층의 자료를 모두 포함한다. 토사층을 구성하고 있는 각 지층들의 탄성파 속도 범위는 Vp = 369~1,690m/s, Vs = 111~484m/s이다. 전반적인 토사층의 탄성파 속도 분포 분석 결과는 특정 속도 범위 내에 탄성파 속도 자료가 집중된다. 이는 심도별 탄성파 속도의 측정에서 탄성파 속도차가 크지 않아 특정 범위에 몰려있는 것으로 나타나게 된다. 토사층의 탄성파 속도 분포 상관관계식은 Vs = 0.1535Vp+121.72 (R2=0.2994)으로 약 30%의 낮은 상관성을 보여주고 있다. [그림 3.4.25]에서 토사층의 속도분포는 다양하고 넓은 분포로 나타난다. 이것는 토사층을 구성하고 있는 광물, 함수비, 지반다짐도, 심도, 지하수위에 따라 종파속도가 큰 차이를 보이기 때문이다. 토사층의 속도분포 상관관계식은 상한 Vs = 0.4763Vp-11.684, 하한 Vs = 0.0497Vp+74.906으로 나타난다. 또한 대부분의 자료는 지하수위 하부의 자료로써 다양한 속도 값을 보여준다. 그러나 지하수위 상부 탄성파 속도 Vp는 약 1,000m/s 이내, Vs는 약 400m/s 이내의 한정된 속도범위를 보여준다. 지하수위 상부의 상관관계식은 Vs = 0.2039Vp+79.452 (R2=0.343)이고 하부의 상관관계식은 Vs = 0.1394Vp+139.62 (R2=0.2476)으로써 상부 자료와 하부 자료의 양상은 유사하다.



(a) 토사층의 Vp와 Vs 관계 (b) 지하수위 상하부 관계

[그림 3.4.25] 토사층의 Vp와 Vs 관계 및 지하수위 상하부의 관계

[그림 3.4.26 (a)]는 토사층의 탄성파 속도 분포이고 [그림 3.4.26 (b)]는 토사층 내 충적층의 탄성파 속도 분포이다. 토사층 중에서 퇴적층의 Vp와 Vs 기울기가 가장 높으며 충적층의 Vp와 Vs의 기울기가 가장 낮다. 토사층 내 충적층 중에서는 충적층의 Vp와 Vs 기울기가 가장 높으며 점토 및 실트의 Vp와 Vs 기울기가 가장 낮다. 점토와 실트는 물의 함량이 상대적으로 많아 Vp에 영향을 주었을 것으로 판단된다.



(a) 토사층의 Vp와 Vs 관계 (b) 충적층의 Vp와 Vs 관계

[그림 3.4.26] 토사층과 충적층을 구성하고 있는 지층의 Vp와 Vs 관계

토사층의 상관관계식은 [표 3.4.1]과 같다.

[표 3.1.1] 토사층의 상관관계식

지층		Vp와 Vs의 상관관계식
매립층		Vs = 0.2715Vp + 41.502 (R^2 = 0.4143)
붕적층		Vs = 0.2198Vp + 94.911 (R^2 = 0.489)
충적층	충적층	Vs = 0.2509Vp + 83.352 (R^2 = 0.6094)
	자갈	Vs = 0.1159Vp + 213.56 (R^2 = 0.2477)
	모래	Vs = 0.1092Vp + 110.21 (R^2 = 0.306)
	점토	Vs = 0.0181Vp + 165.62 (R^2 = 0.0169)
	실트	Vs = 0.066Vp + 86.115 (R^2 = 0.1939)
	충적층 전체	Vs = 0.1442Vp + 101.15 (R^2 = 0.2808)
퇴적층		Vs = 0.2631Vp + 82.501 (R^2 = 0.4974)

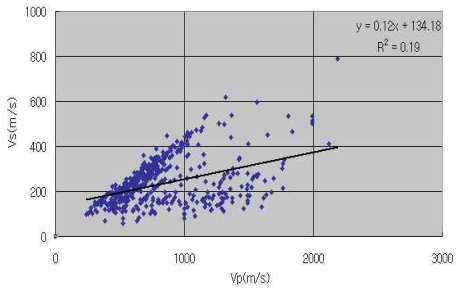
분산도 유용성 검증을 통한 각 지층별 속도 범위는 [표 3.4.2]와 같다.

[표 3.4.2] 토사층의 탄성파 속도

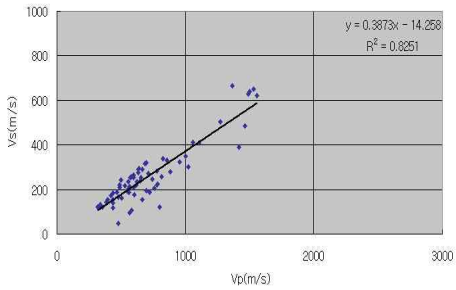
지층		Vp(m/s)	Vs(m/s)
매립층		329~855	87~290
붕적층		326~1351	61~446
충적층	충적층	491~2125	147~670
	자갈	592~2673	202~659
	모래	379~1905	102~371
	점토	298~1714	111~303
	실트	567~1821	83~265
퇴적층		433~1359	155~521

토사층의 공종별 분석 결과에 따르면 MASW 탐사는 82%의 높은 상관성을 나타내지만 다운홀 테스트와 S-PS 검층의 상관성은 각각 19%와 10%로써 상대적으로 낮다. 다운홀 테스트와 S-PS 검층은 2개의 양상이 나타나며 측정지역, 현장조건, 지하수위 등이 Vp에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 공종별 속도 범위 및 지하수위 상,하부의 속도 범위는 [그림 4.3.28]과 같다.

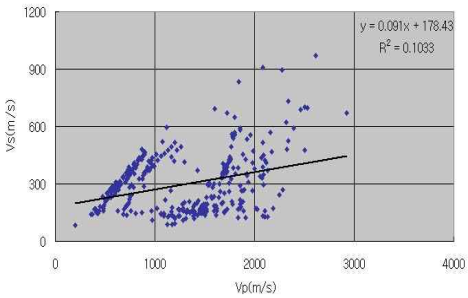
다운홀 테스트는 Vp = 377~1,513m/s, Vs = 111~436, MASW 탐사는 Vp = 368~1,287m/s, Vs = 105~479, S-PS 검층은 Vp = 386~2,557m/s, Vs = 129~678의 범위이다. 탄성파 속도 범위는 암반층과 마찬가지로 S-PS 검층 자료가 다른 두 공종보다 약간 빠르게 나타난다. 지하수위 상하부로 나누어 분석한 결과도 S-PS 검층 결과가 더 빠르게 나타난다.



(a) 다운홀 테스트



(b) MASW 탐사

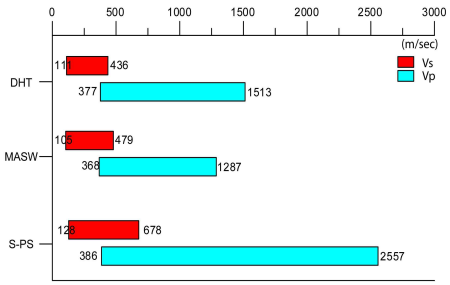


(c) S-PS 검층

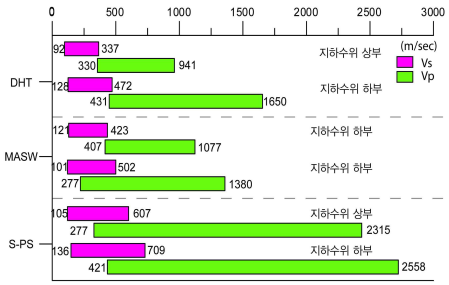
다운홀 테스트	Vs = 0.2304Vp+160.9 (R^2 = 0.5342)
MASW 탐사	Vs = 0.2224Vp+140.19 (R^2 = 0.5104)
S-PS검층	Vs = 0.1486Vp+260.66 (R^2 = 0.3567)

(d)공종별 속도 범위

[그림 3.4.27] 공종별 토사층의 Vp와 Vs 관계



(a) 공종별 속도 범위

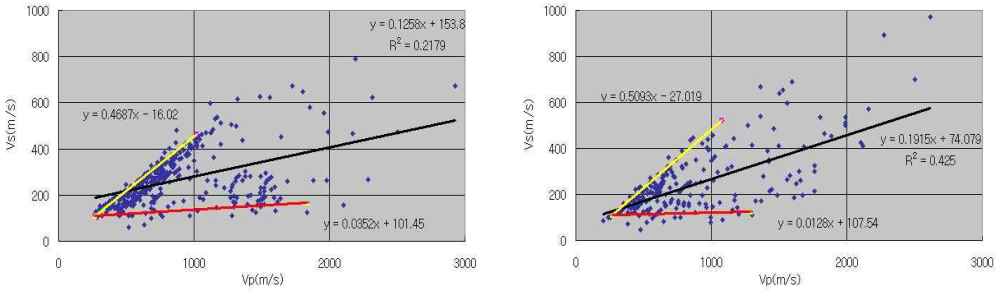


(b) 지하수위 상하부 속도 범위

[그림 3.4.28] 공종별 토사층의 속도범위

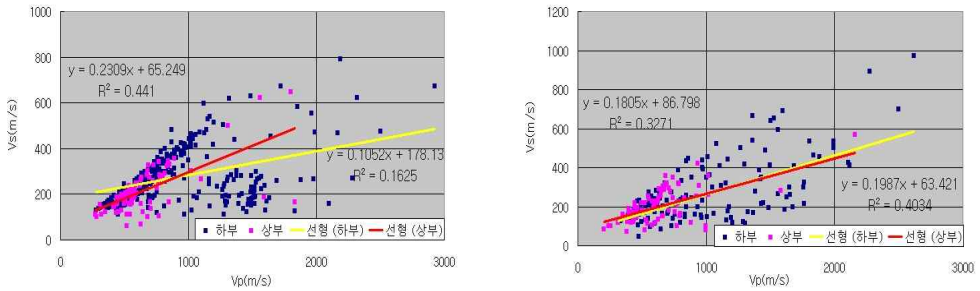
다음은 토사층을 암종 구분하여 탄성파 속도 분포 현황을 분석한 결과이다. 화강암의 상관관계식은 Vs = 0.1258Vp+153.8 (R2=0.2179)이고 상한 Vs = 0.4687Vp -16.02와 하한 Vs = 0.0352Vp+101.45의 상관관계식으로 나타나며, 편마암의 상관관계식은 Vs = 0.1915Vp+74.079(R2= 0.425)으로 상한 Vs = 0.5093Vp-27.019와 하한 Vs = 0.0128Vp+107.54로 나타난다[그림 3.4.29]. 암종별 속도 분포는 화강암이 편마암보다 2배정도 낮은 상관성을 보인다. 토사층 자료의 대부분은 지하수위 하부의 자료로써 전반적으로 다양한 속도 분포를 보여주는 반면 지하수위 상부 자료는 한

정된 특정 범위에 국한되며 두 암종 모두 Vp = 1,000m/s 이내, Vs = 400m/s 이내이다. 지하수위 상부의 자료는 대부분 상한의 패턴이며 지하수위 하부의 자료는 Vp의 속도가 지하수위에 영향을 받아 Vp/Vs의 기울기가 작다[그림 3.4.30].



(a) 화강암의 Vp와 Vs 관계 (b) 편마암의 Vp와 Vs 관계

[그림 3.4.29] 암종별 토사층의 Vp와 Vs 관계



(a) 화강암의 지하수위 상하부 관계 (b) 편마암의 지하수위 상하부 관계

[그림 3.4.30] 암종별 토사층의 지하수위 상하부 Vp와 Vs 관계

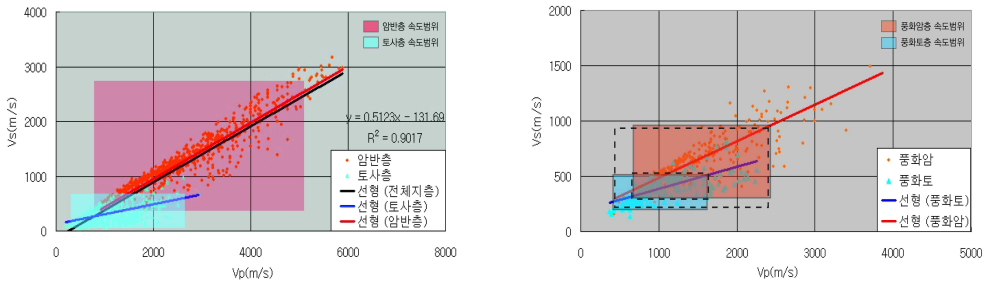
토사층의 탄성파 속도 분포 분석 결과는 다음과 같다. 풍화토층의 속도는 Vp = 536~1,781m/s, Vs = 228~592m/s, 토사층의 속도는 Vp = 369~1,690m/s, Vs = 111~484m/s 이다. 전체 토사층(풍화토층 + 토사층)의 상관관계식은 Vs = 0.1844Vp+124.15 (R2=0.3486) 이다. 토사층의 경우 다짐도나 지하수, 심도, 공극률 등의 영향으로 Vp는 다양한 속도 분포 보이며 현장상황을 반영하여 해석해야 한다.

다. 대입경 조립재료의 탄성파 속도 범위 추정

암반층과 토사층의 탄성파 속도 분포 상관관계식은 Vs = 0.5123Vp - 131.69 (R2=0.9017)이다. 암반층의 Vp = 800~5,087m/s, Vs = 360~2,734m/s이고 토사층의 Vp = 326~2,673m/s, Vs = 61~670m/s의 범위이다[그림 3.4.31 (a)].

본 연구과제인 대입경 조립재료의 입자크기는 자갈층이나 풍화토층의 입자크기

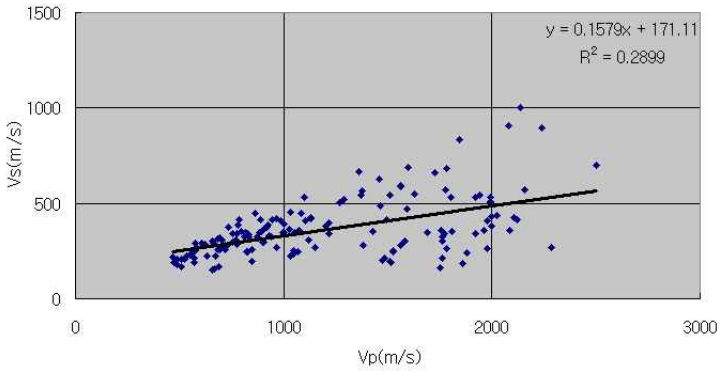
보다는 클 것이고 풍화암층의 입자크기 보단 작을 것이라는 가정 하면 풍화토층과 풍화암층 입자크기의 중간입자크기를 가질 것이다. 즉, 풍화토층의 속도는 Vp = 536~1,781m/s, Vs = 228~592m/s이고 풍화암층의 속도는 Vp = 800~2,632m/s, Vs = 360~1,122m/s이므로 대입경 조립재료의 탄성파 속도는 최소한의 속도 범위 Vp = 800~1,781m/s, Vs = 360~592m/s이고 최대한의 속도범위는 Vp = 536~2,632m/s, Vs = 228~1,122m/s의 속도범위이다[그림 3.4.31 (b)].



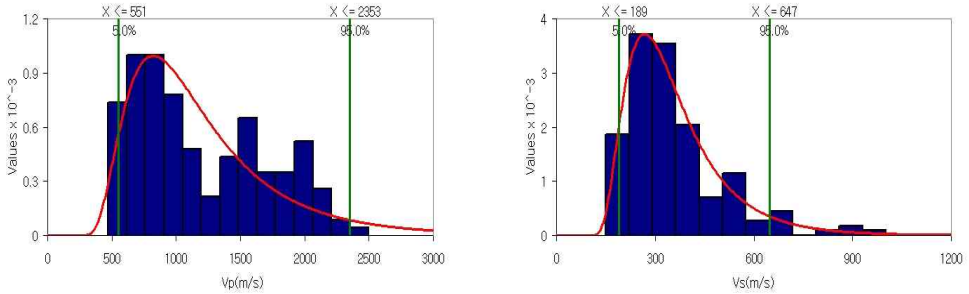
(a) 암반, 토사층의 속도 범위 (b) 대입경 조립재료 속도 범위

[그림 3.4.31] 암반, 토사층, 대입경 조립재료의 속도 범위

이를 검증하기 위해 DB 중 입경크기가 큰 것들에 대한 자료들을 추출하여 조립재료의 탄성파 속도값과 비교하였다. DB의 채분석 결과 중 #4 통과량이 50% 미만인 자료(조립토(자갈)), 지름이 1cm이상인 자료, 자갈층의 총 169개의 자료를 추출하였다. 분석 결과 상관관계식 Vs = 0.1579Vp+171.11 (R2=0.2899)으로 약 29%의 상관성으로 나타났다[그림 3.4.32]. 탄성파 속도 범위는 Vp = 551~2,353m/s, Vs = 189~647m/s의 속도로 나타나며 대입경 조립재료의 탄성파 속도로 규명한 속도범위와 유사하다. 이러한 속도 범위는 풍화토층과 풍화암층 사이에 존재하는 대입경 조립재료 지층의 탄성파 속도 범위에 포함된다.



[그림 3.4.32] 대입경 조립재료 지층의 Vp와 Vs 관계



(a) 대입경 조립재료의 Vp 분포도 (b) 대입경 조립재료의 Vs 분포도

[그림 3.4.33] 대입경 조립재료의 Vp와 Vs 분포도

라. 결 론

본 연구는 우리나라의 대입경 조립재료 지층의 동적물성 산정기법을 규명하고자 국내에서 실시된 130개의 턴키(일괄입찰방식)프로젝트를 분석하여 탄성파 속도, 공종, 암종, 지층, 동적물성치 등으로 분류하였다. 대입경 조립재료의 지층은 입자가 큰 조립토로 구성되어진 지층으로 토사층 중 입자가 가장 크고 암반층 보단 입자가 작을 것이며, 이는 풍화암층과 풍화토층 사이에 해당하는 지층이라 판단된다. 또한 동적물성치를 산출하고자 우리나라 지질의 절반 이상을 차지하고 있는 화강암과 편마암을 대상으로 각각의 지층과 암종을 구분하여 획득한 탄성파 속도를 가지고 90%의 신뢰도를 갖는 통계분석을 실시하였다. 각 층의 탄성파 속도 범위와 양상을 분석하여 대입경 조립재료 지층의 탄성파 속도 범위를 유추하였다.

암반층의 탄성파 속도 분포 상관관계식은 Vs = 0.5115Vp-89.576 (R2=0.8929)이고 토사층의 상관관계식은 Vs = 0.1844Vp+124.15 (R2=0.3486)이다. 각 지층별 탄성

파 속도 범위는 경암층 Vp = 1,793～5,084m/s, Vs = 734～2,686m/s, 연암층 Vp = 1,216～2,649m/s, Vs = 559～1,286m/s, 풍화암층 Vp = 800～2,632m/s, Vs = 360～1,122m/s, 풍화토층 Vp = 536～1,781m/s, Vs = 228～592m/s, 토사층 Vp = 369～1,690m/s, Vs = 111～484m/s이다. 대입경 조립재료 지층으로 추정되는 풍화토층과 풍화암층 사이의 속도 범위는 최소 Vp = 800～1,781m/s, Vs = 360～592m/s이고 최대 Vp = 536～2,632m/s, Vs = 228～1,122m/s이다.

각 지층별 탄성파 속도 범위는 상·하 지층간 특정구간이 겹치는 양상으로 보여주며 한 지층이 다른 한 지층을 완전히 포함하지는 않은 것으로 나타났다. 또한 실제 DB에서 #4 통과율이 50% 미만인 자료, 자갈층의 자료와 지름이 1cm 이상인 자료를 추출하여 속도를 분석한 결과 Vp = 551～2,353m/s, Vs = 189～647m/s의 속도 범위로 나타났고 밀도는 1.673～2.179 tonf/m3로 나타났다. 이는 풍화토층와 풍화암층 사이에 속하는 탄성파 속도와 밀도값에 해당하며, 대입경 조립재료 지층의 속도 범위로 추정한 결과와 유사한 범위로 나타나고 있어 대입경 조립재료의 지층에 해당되는 자료로 판단된다.

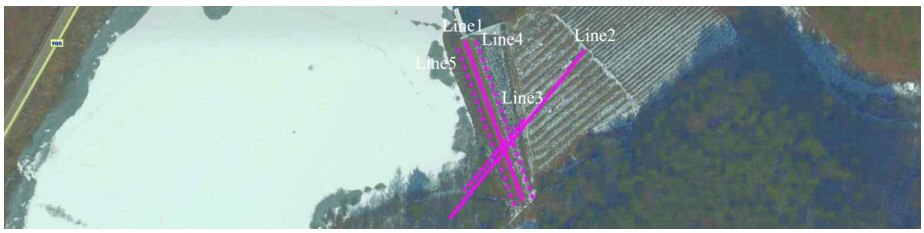
동일 지층에서의 S-PS 검층 속도 분포는 다운홀 테스트와 MASW 탐사 보다 빠르다. 암반층의 화강암 탄성파 속도가 편마암 속도 양상을 보였으나 큰 차이를 보이지는 않는다.

2. 현장 동적물성 기법 비교 검토를 위한 고분해능 반사법 탄성파탐사 자료처리

가. 탐사측선 및 위치도

[표 3.4.3] 탐사측선

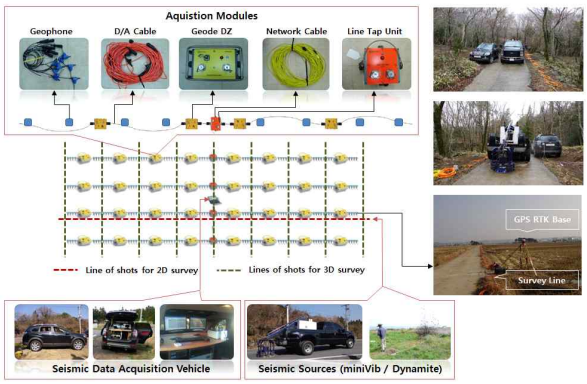
측선	전개길이(m)	방향	수진기간격(m)
Line 1	71.5	종	0.5
Line 2	159	횡	1.0
Line 3	30.2	횡	0.2
Line 4	71	종	0.5~1.0
Line 5	71	종	1.0



[그림 3.4.34] 조사위치도

나. 측정시스템

본 연구에서 사용된 측정시스템은 미국 Geometrics사의 GeodeDZ 3차원 반사법 탐사 시스템이며, 이외에도 수진기, 송신원으로 구분된다[그림 3.4.35].



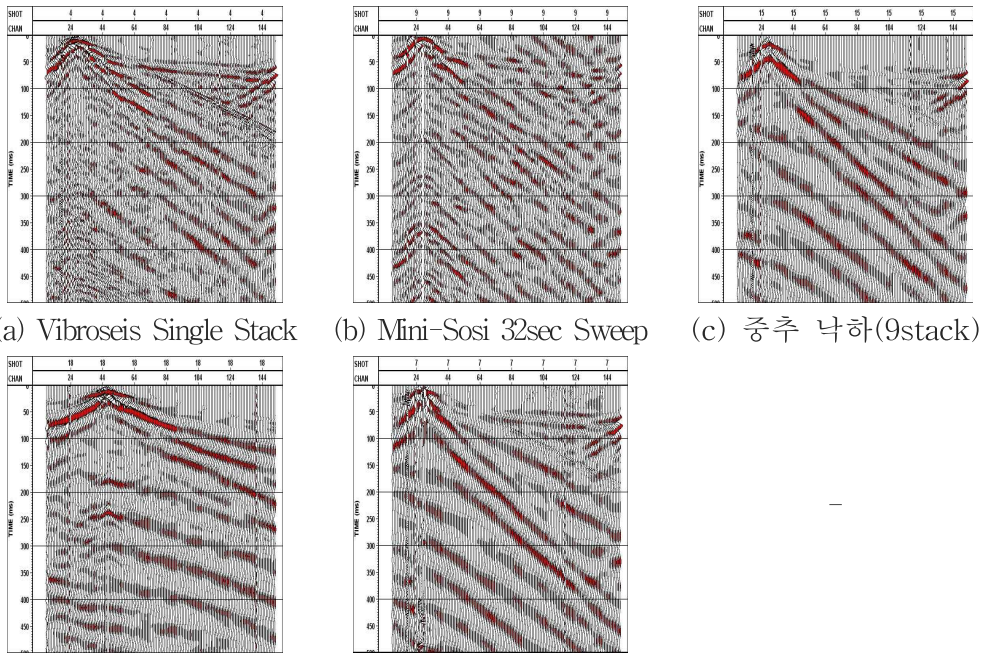
[그림 3.4.35] 현장탐사 모식도

- 탄성파 발생원 - Sweep Source : Minivib T-2500 (미국 IVI사)
- Mini-Sosi, Shot Gun, 중추 낙하, Hammer, 작은 망치
- 수진기 - Vertical Geophone (14 Hz, 70~150 채널 사용)
- 측정자료 제어장치 - GeodeDZ

다. 고분해능 반사법 탄성파탐사 결과 및 고찰

(1) 송신원별 신호원분석

송신원에 따른 파형의 특성을 파악하기 위해 2종류의 진동형(Vibroseis & Mini-Sosi)송신원과 3종류의 타격형 송신원(중추낙하, 햄머, 샷건)에 대해 탐사를 수행하였다. 탐사측선은 댐체의 상단부에(Line 1) 0.5m 간격으로 총 144개의 지오폰을 설치한 후 인접한 수진점에서 송신하여 송신파형을 비교하였다. 신호원 분석 자료는 현장에서 획득된 SEG-2 자료를 Vista Seismic software(GEDCO, Canada)를 이용하여 SEG-Vs 포맷으로 변환한 후 기록장비로 획득한 원시자료(rawdata)에 대해 비교하였으며, 송신원의 위치는 Dist. 62m 이다. 탄성파 특성을 분석하기 위하여 반사파, 굴절파 등의 탄성파 신호와 일관성 잡음(coherent noise) 및 무작위 잡음(random noise) 등이 포함된 자료획득 단면을 [그림 3.4.36]에 도시하였다.



(a) Vibroseis Single Stack (b) Mini-Sosi 32sec Sweep (c) 중추 낙하(9stack)

(d) 햄머 (9stack) (e) Shot Gun

[그림 3.4.36] 송신원별 현장 기록 파형 비교

[그림 3.4.36 (a)]는 진동식 파원인 MiniVib를 이용하여 획득한 원시자료이다. 천부 반사파의 신호는 직접파, 굴절파, 공기파, 레일리파등에 의한 간섭으로 인해 경계면이 뚜렷이 구분되지 않으며, 반사파는 채널 84(Dist. 5m)위치에서 공기파의 속도와 유사한 기울기로 나타나는 것으로 나타났다. 반면에 채널 124 이후구간에서 음(-)의 속도로 나타난 반사파는 월류부 구조물에 의한 반사파이다.

파원에 따른 탄성파 에너지의 변화를 알아보기 위하여 획득자료의 포락선을 구하고 탄성파 영역 별로 포락선 값을 합하여 에너지 값을 구하였다. 탄성파의 영역은 탄성파 구분을 기준을 으로 하여 전체 자료의 값을 이용한 전체 영역, 공기파 영역 직전의 값만을 이용한 반사파와 굴절파 영역, 공기파까지 값만을 이용한 반사파, 굴절파 및 공기파 영역의 세가지로 구분하였으며, 각각의 영역에 대하여 파원별 에너지 변화를 구하였다.

파원에 따른 주파수의 성분 변화는 굴절파와 반사파를 포함하고 있는 자료에 대하여 고찰하였다. 그림은 획득한 자료에서 파원과 전체 수진기 거리의 기록 중 왕복 주시 0.1초 이내의 자료에 대하여 푸리에 변환을 수행한 후, 이를 파원별로 정규화하여 dB 단위로 나타낸 것이다.

- Boomser

최대값을 기준으로 -10dB 이상의 진폭을 갖는 주파수 구간은 10~40 Hz의 범위로 나타나고 있으며, 200Hz까지 -90dB로 감소하다 560Hz까지 -100dB의 분포를 보이고 있다.

- Hammer

최대값을 기준으로 -20dB 이상의 진폭을 갖는 주파수 구간은 30~50 Hz의 범위로 나타나고 있으며, 200Hz까지 -80dB로 감소하다 600Hz까지 -100dB의 분포를 보이고 있다.

- Mini-Sosi

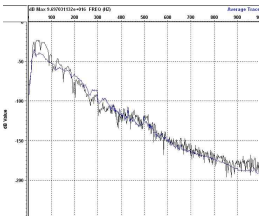
최대값을 기준으로 -20dB 이상의 진폭을 갖는 주파수 구간은 20~30 Hz의 범위로 나타나고 있으며, 400Hz까지 -135dB로 감소하다 800Hz까지 -140dB의 분포를 보이고 있다.

- Shot Gun

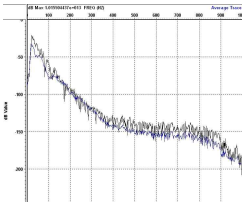
최대값을 기준으로 -20dB 이상의 진폭을 갖는 주파수 구간은 20~40 Hz의 범위로 나타나고 있으며, 200Hz까지 -90dB로 감소하다 750Hz까지 -100dB의 분포를 보이고 있다.

- MiniVib

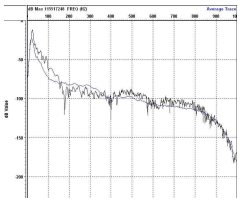
최대값을 기준으로 -20dB 이상의 진폭을 갖는 주파수 구간은 20~80 Hz의 범위로 나타나고 있으며, 300Hz까지 -90dB, 900Hz까지 -170dB로 서서히 감소하는 형태를 보이고 있다. 타 송신원과 비교했을 때, 같은 진폭대비 가장 넓은 대역의 주파수 범위의 신호원 형태가 나타나고 있다.



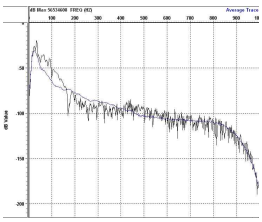
(a) Vibroseis Single Stack



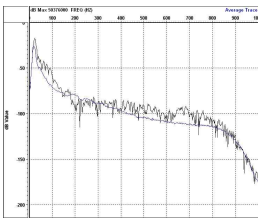
(b) Mini-Sosi 32sec Sweep



(c) 중추 낙하(9stack)



(d) 햄머 (9stack)

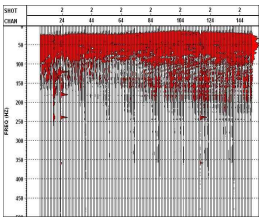


(e) Shot Gun

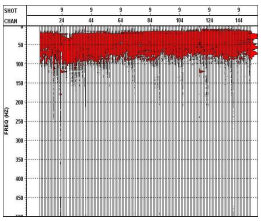
-

-

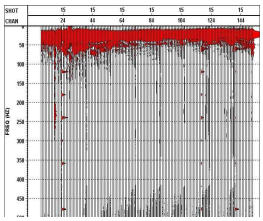
[그림 3.4.37] 송신원별 현장 기록 주파수 성분 비교



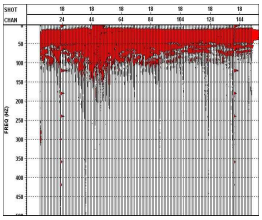
(a) Vibroseis Single Stack



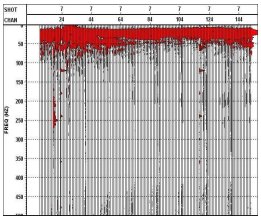
(b) Mini-Sosi 32sec Sweep



(c) 중추 낙하(9stack)



(d) 햄머 (9stack)



(e) Shot Gun

-

-

[그림 3.4.38] 송신원별 진폭 스펙트럼 비교

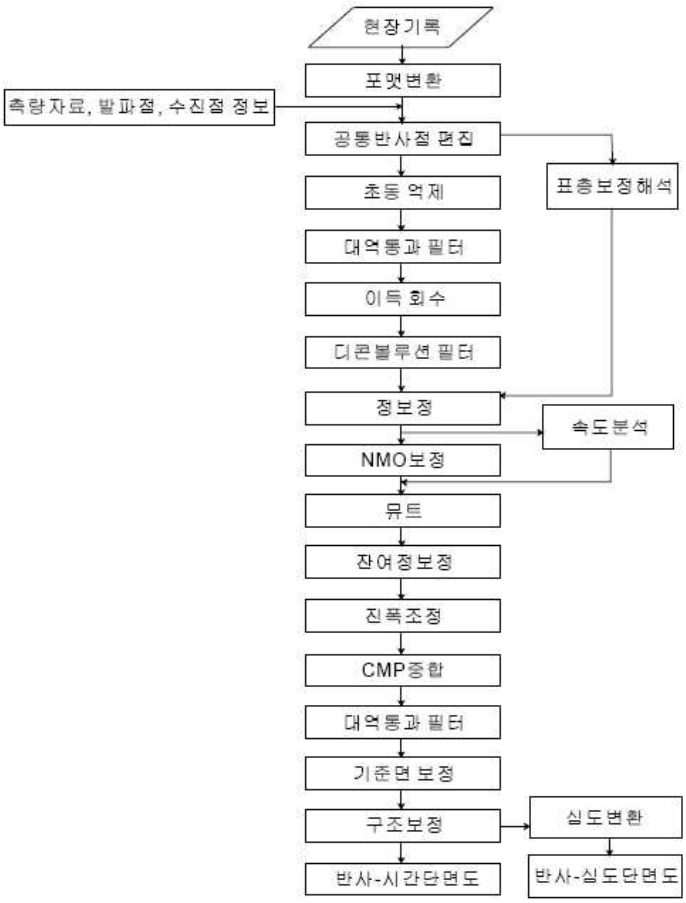
현장 기록 자료의 특징으로는 바이브로사이즈 및 샷건을 이용한 송신원을 제외하고는 굴절파의 존재는 확인되나 다른 송신원의 경우(미니소시, 중추낙하, 햄머)는 초동의 발췌가 매우 어렵다. 이는 송신원의 진원의 강도 및 주파수 성분에 기인할 것으로 판단된다[그림 3.4.37].

현장기록의 선두파 분석을 해보면 1층의 500m/sec 내외, 2층은 3,000m/sec 내외의 속도로 나뉘어져 있으며 교차거리는 12m 정도로 보인다. 이를 토대로 수평층을 가정했을 때, 1층의 대략적인 두께는 약 5.6m 정도로 판단되며, 이는 댐체의 하단부와 기반암의 상부의 경계로 판단된다. 1층 속도와 두께를 통해 1층 반사파의 zero offset 왕복주시를 계산해 보면 약 22.4msec 이다.

이러한 모델에 대하여 이상적인 음향파를 가정할 때, 1층을 분해해 낼 수 있는 파형의 주파수는 22Hz이상을 가져야 한다(수직 분해능의 1/4파장). 이를 기준으로 했을 때, 모든 송신원이 현장에 적합 하지만, 특히 중추낙하 및 샷건을 경우 중심주파수가 25Hz 이내여서 본 현장에 적합하지 못할 것으로 판단된다. 그 이외의 송신원은 이러한 기준을 만족하지만, 현장 기록에서는 1차 반사파의 분리가 어렵다. 이는 현장기록에는 P파뿐 아니라 S파 및 모드변환파 그리고 표면파 기록들이 섞여 있다. 특히 천층 반사의 경우 근거리 옵셋자료에는 이 모든 파형들이 반사파와 혼재되어 있어 분리가 어렵다.

(2) 탐사 측선별 자료처리 분석

측선의 설계는 탐사 조건을 고려하여 4개의 측선에 대해서 수행을 하였으며, 송신파형 및 주파수 특성 그리고 송신원 설치 여건을 고려하여 바이브로 사이즈 및 햄머를 이용한 송신을 이용하였다. 반사법의 자료처리는 크게 3가지 전처리 과정, 속도분석, 속도중합단면의 일련의 과정을 거친다[그림 3.4.39].



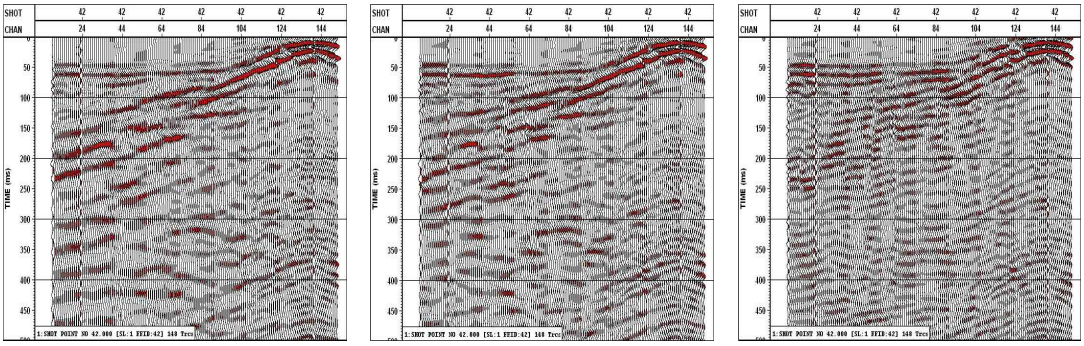
[그림 3.4.39] 탄성파 반사법 자료 처리 흐름도

① 전처리과정

전처리 과정은 크게 원 자료의 변환, 송수신 위치정보 입력과 반사파 S/N비(signal to ratio)를 향상시키는 각종 필터 및 소거 처리 과정 및 공심점 취합으로 나뉜다.

-대역통과 필터(Band Pass Filter)

레일레이파와 같은 표면파와 공기파와 같은 반사법에서는 잡음으로 취급되는 파를 감소시키는 방법으로 본 탐사에서는 여러 대역필터를 적용해 본 결과 30~100Hz 주파수대역의 필터를 결정하였다[그림 3.4.40].

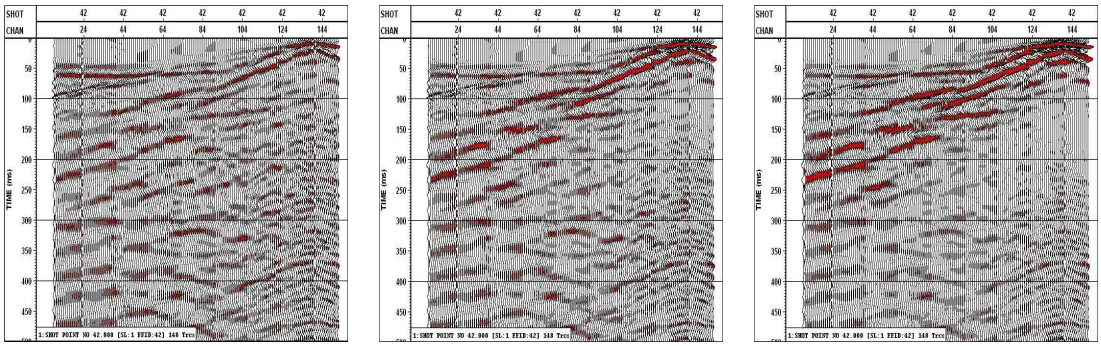


(d) 20-100Hz (e) 30-100Hz (f) 50-100Hz

[그림 3.4.40] 대역통과 필터 적용 비교

-이득보정 (Gain Control)

반사파의 위치가 깊어 질수록 파의 진폭은 감소하게 되는데 이를 원래의 진폭으로 되돌려주는 과정이 이득보정 과정이다. 본 자료처리에서는 자동이득보정(Auto Gain Control)을 적용하였으며, 시간변수 및 예상 반사파의 시간 관계를 고려하였을 때 100msec AGC를 결정 하였다.

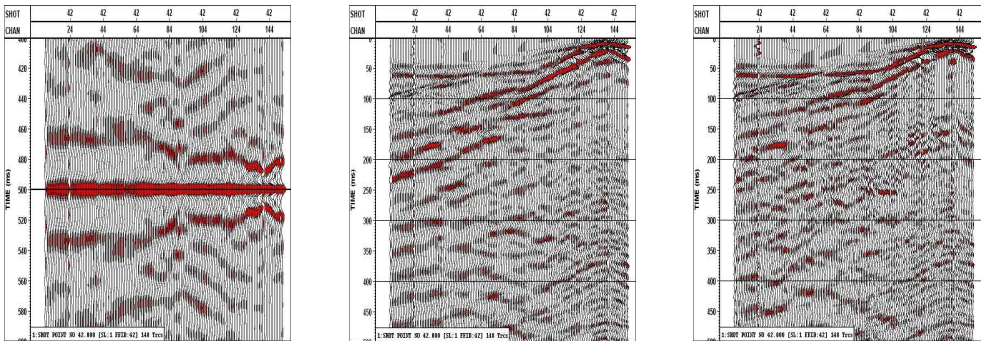


(a) AGC100msec (b) AGC200msec (c) AGC300msec

[그림 3.4.41] 이득보정 결과 비교

-디콘볼류션 (Deconvolution)

다중 반사파에 의한 반사파 신호의 간섭을 제거하고, 파형을 압축시켜 분해능을 향상시키는 방법으로 디콘볼류션의 과정이 필수이다. 앞 절의 현장자료 분석에서 살펴보았듯이 1층 반사파의 왕복주시는 영거리 주시 약 20msec 있다. 이는 각 트레이스의 자기상관(Auto correlation)의 결과 값에서도 나타나듯이 두 번째 영점교차 시간인 20msec 전후에 있음을 알 수 있다.

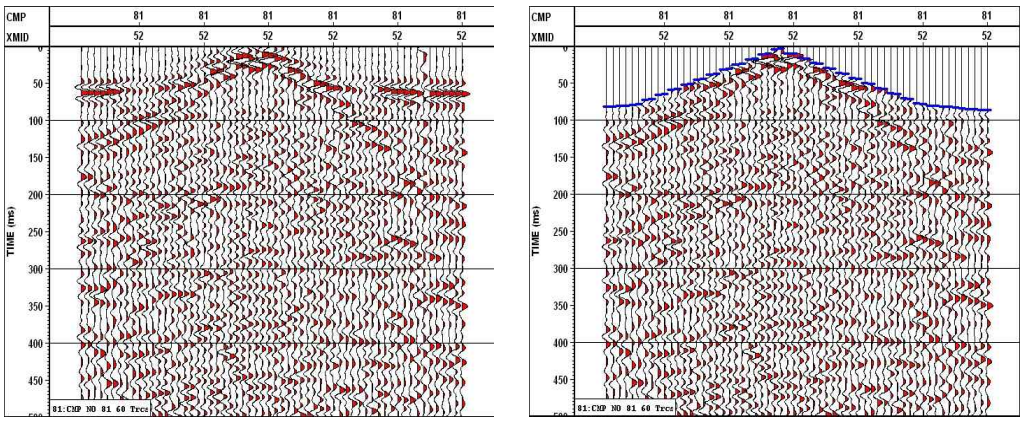


(a) 자기상관도 (b) 원자료 (c) 디콘볼류션 적용

[그림 3.4.42] 디콘볼류션 결과 비교

-공심점 취합(CDP Sort) 및 소거(Mute)

공심점 취합은 NMO 속도분석을 위한 과정으로 송수신 위치 정보를 이용하여 공심점(Common Depth Point)를 결정하고 이 공심점위치로 모든 자료를 다시 배열하는 과정이다. 이번 자료에서는 공심점 취합후 굴절파 부분을 제거하는 소거도 같이 이용하였다.

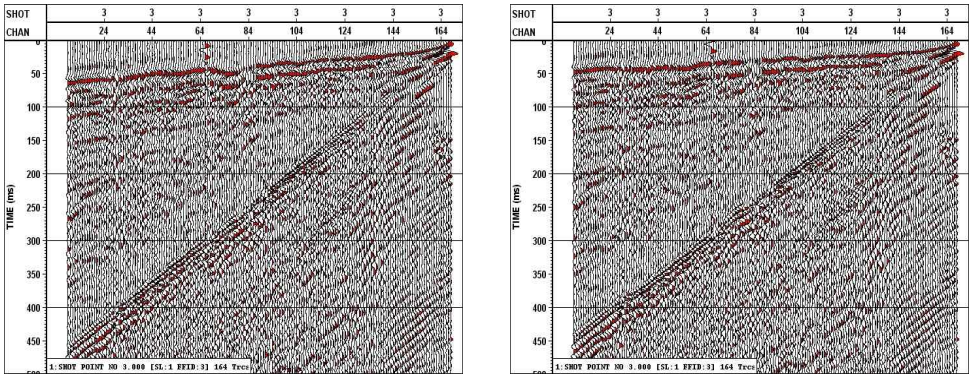


(a) 공심점취합(CDP81) (b) 공심점취합 & 소거(CDP81)

[그림 3.4.43] 공심점 취합 및 소거 후의 결과 비교

-정보정(Static)

정보정은 탐사 자료에 대하여 수진점의 고도 변화와 표층의 불균질한 특성 때문에 생기는 시간차를 보정해 주는 과정이다. 각 측선 자료에 대하여 지형 변화가 측선에 대하여 적용하였다.

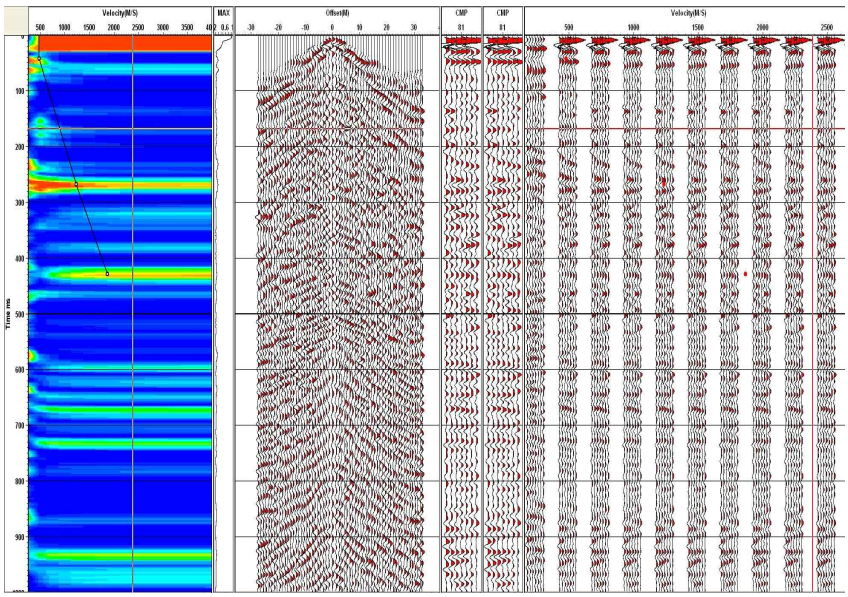


(a) Line2 Static 보정 전 (b) Line2 Static 보정 후

[그림 3.4.44] 정보정 전후의 결과 비교

② 속도 분석

전처리 과정을 완료한 자료를 이용하여 Line1의 CDP 81에서 속도분석을 한 결과는 [그림 3.4.45]와 같다.

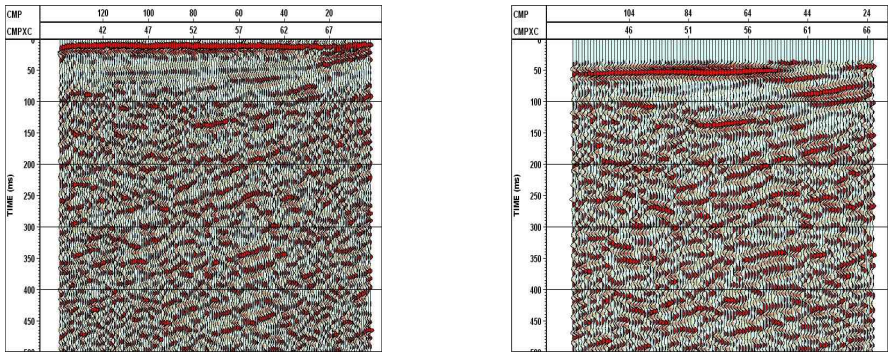


[그림 3.4.45] Line1 CDP81 속도분석 예. 좌로부터 속도 Semblance, NMO 보정, 속도 NMO중합, 속도 NMO중합, 상속도별 NMO중합

왕복주시 20msec 이내에서는 진폭이 큰 직접파에 영향을 받아 모든 속도대에서 큰 Semblance 값을 보인다. 왕복주시 40m 부근에 큰 Semblance 값을 보이는데, 이 영역이 반사파에 의한 영향대로 판단된다. NMO(Normal Moveout) 보정 패널을 살펴볼 때, 절대 옵셋값 10m 이상에서는 수평적으로 잘 나열되어 있어 보인다. 하지만 절대 옵셋값 10m 이내의 근거리는 송신원의 영향으로 NMO 보정의 판단이 어렵다. 또한 10m 이상의 옵셋 거리 자료도 S파의 모드변환 파와 뒤섞여 있을 가능성이 많다.

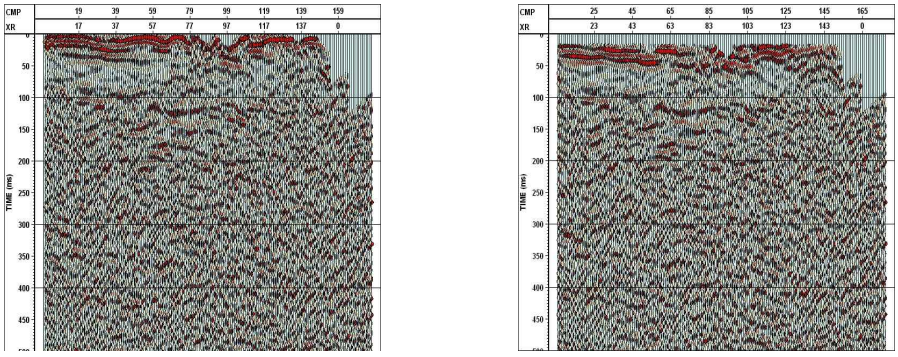
③ 각 측선별 속도 중합 단면

각 측선별로 일련의 반사법 자료 처리 과정을 걸친 후 일정 공심점에서 속도분석을 한 NMO 속도값 이용하여 각 측선의 단면[그림 3.4.46~3.4.49]을 얻었다.



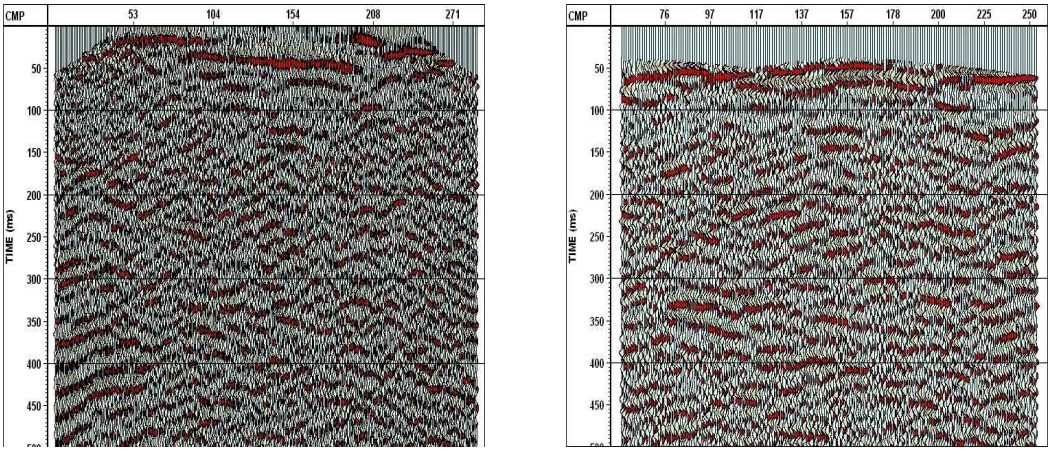
(a) 모든 옵셋 자료 (b) 옵셋거리 10m 이상자료

[그림 3.4.46] Line 1 중합단면 결과



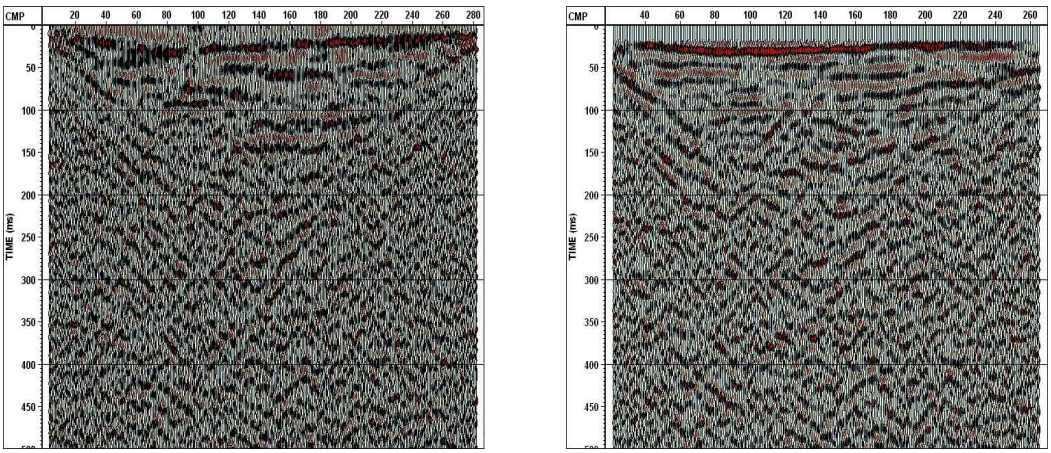
(a) 모든 옵셋 자료 (b) 옵셋거리 10m 이상자료

[그림 3.4.47] Line 2 중합단면 결과



(a) 모든 옵셋 자료 (b) 옵셋거리 10m 이상자료

[그림 3.4.48] Line 3 중합단면 결과

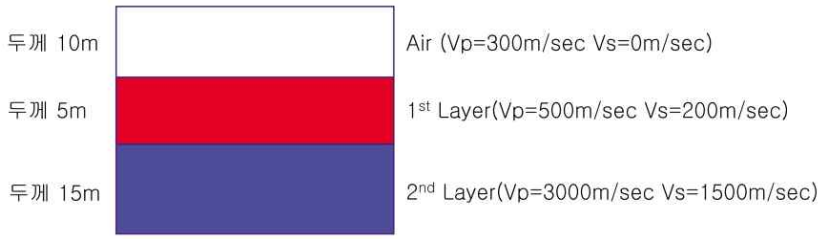


(a) 모든 옵셋 자료 (a) 옵셋거리 10m 이상자료

[그림 3.4.49] Line 4 중합단면 결과

댐체 상단에서 수행한 결과(Line1)과 댐체의 벽체(Line4)에서 수행한 결과를 볼 때, 수평적인 이벤트로 보이는 결과를 얻을 수 있었다. Line1의 경우 진폭의 최대치가 왕복주시 50msec 부근, Line4의 경우 왕복주시 20msec 부근에서 보이는 것으로 보아, Line1의 경우 댐체의 하단부, Line4의 경우 반대편 벽체에서 튀어나온 반사파 이벤트일 가능성이 크다.

모든 속도 단면은 속도 분석상에서 특정 속도를 발췌하기 매우 힘들었으며, 1차 반사면으로 추정되는 시간대는 모드 변화파와 표면파가 혼재되어 있어, 반사 단면으로 단정하기에는 어려움이 있다.



Modeling Parameter	Model size	100m × 30m
	DVp × Dz	0.1m × 0.1m
	송신파형	Ricker wavelet(100hz)
	수신간격	0.25m
Modeling	Sampling recording	0.01msec
Recording	Sampling	0.1msec
	Total recording time	0.5sec

[그림 3.4.50] 신호원 분석을 이용한 지층모델 및 모델 변수

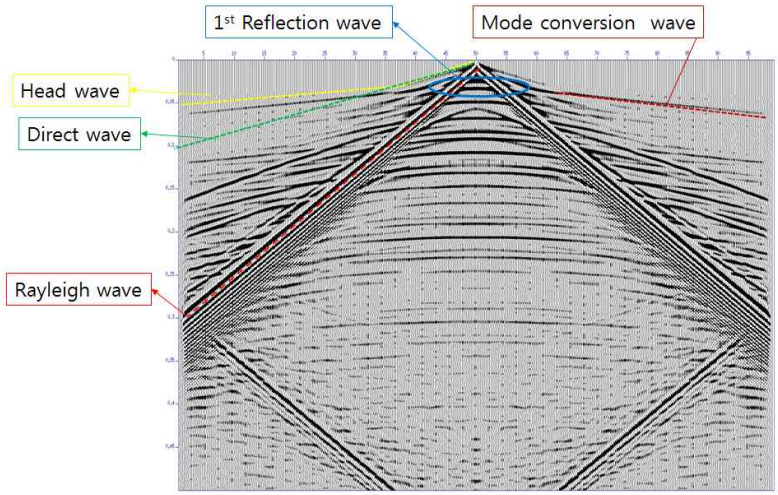


그림 3.4.51 모델링 결과

지층모델은 시추조사결과 및 성덕구댐 단면도를 이용하여 지층모델을 설정하였다. 0.05 ms 이내 구간에 다수의 신호가 중첩되어 반사파 신호의 구분이 용이하지 않다. 조사지역의 댐체와 같이 심도가 얕은 천층 반사법을 적용함에 있어서는 탐사설계에 있어서 더 고주파의 송신원에 대한 고려가 필요하다. 또한 S파 반사법을 이용하여 분해능을 높이는 방법 또한 고려할만 하다. 수진기 부분에서는 배열탐사법(survey using array)을 고려하여, 표면파을 감소시키고 반사파의 신호를 강조할 수 있는 방법이 있다. 표면파는 천층반사파에 큰 잡음의 원인으로 이를 공간적으로 나열한 수진기 배열을 통해 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3. 현장 자료 검증을 위한 현장 시추조사 수행

가. 시추조사

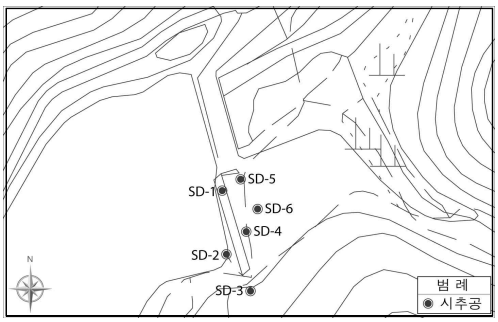
시추장비는 유압식, 회전수세식형을 적용하였으며, 시추구경은 NVp(공경 76mm, 코아직경 54mm)를 사용하였다. 공벽붕괴 방지를 위해 풍화암까지 스틸케이싱을 삽입하고 KS F 2307 규격에 의거하여 1.0m 마다 표준관입시험과 기반암구간에서는 수압시험을 병행실시하며 굴진하였다.

토사시료는 Split Spoon Sampler, 암석시료는 D-3 코아배럴을 사용하여 채취하였다. 토사구간에서는 메탈비트를, 기반암구간에서는 다이아몬드 비트를 사용하였다. 채취된 토사시료는 육안관찰 및 통일분류법에 의거하여 토질분류를 수행하고, 색조, 습윤정도, 연경도나 상대밀도 등을 기재하였으며, 채취된 암석시료는 TCR, RQD 등 암반특성을 평가할 수 있는 자료를 조사하고 절리의 분포상태와 충진물 등을 파악하였다. 이러한 관찰 및 조사사항들은 모두 시추주상도에 기재하였다. 채취된 토사 및 암석시료는 시료상자에 공번, 심도, 지층명, 색상 등을 기록하여 정리 보관한다.



(a) 시추조사 원경 (b) 시추조사 근경

[그림 3.4.52] 조사전경



[그림 3.4.53] 시추위치도

[표 3.4.4] 시추위치 현황

공번	위치		굴진심도(m)
	Vp	Vs	
SD-1	303747.26	196721.07	20.2
SD-2	303701.69	196724.92	20.6
SD-3	303676.32	196745.09	20.5
SD-4	303718.40	196741.24	20.5
SD-5	303755.64	196736.73	20.4
SD-6	303738.48	196762.16	20.5

나. 표준관입시험

(1) 시험목적

N값으로부터 상대밀도 및 연경도를 파악하고 교란시료를 채취하여 육안판별 및 통일분류를 실시하여 토사지층의 분포특성을 규명한다.

(2) 시험방법

중량 63.5kg의 함마를 76cm 높이에서 자유 낙하시켜 split spoon sampler가 45cm 관입하는데 소요되는 횟수를 매 15cm마다 측정하며 처음 15cm관입에 소요되는 타격횟수는 예비타격으로 간주하여 제외하고 나머지 본 타격 30cm관입에 소요되는 타격횟수를 N값으로 측정한다.



(a) 표준관입시험 전경



(b) 교란시료 채취

[그림 3.4.54] 표준관입 시험 전경

다. 시추조사 결과

· 시추공 SD-1

- 매립층

매립층은 G.L(-)0.0~11.8m에 분포하며, 담갈색~황갈색의 암편 및 실트섞인 모래로 구성되었고, 통일분류법의 SM에 해당한다.

- 경암

경암층은 G.L.(-)11.8~20.2m이며, 암회색~담홍색의 응회암으로 구성되어 있다. 코어회수율(TCR)은 100%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 76~100%(평균90%)로 코어상태는 매우 양호하다.

· 시추공 SD-2

- 붕적층

붕적층은 G.L(-)0.0~8.0m에 분포하며, 담갈색~황갈색의 자갈섞인 실트질 모래로 구성되었고, 통일분류법의 SM에 해당한다.

- 경암

경암층은 G.L.(-)8.0~20.6m에 분포한다. 암회색~담홍색의 응회암으로 구성되어 있다. 코어회수율(TCR)은 100%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 73~100%(평균94%)로 코어상태는 매우 양호하다.

· 시추공 SD-3

- 붕적층

붕적층은 G.L(-)0.0~0.4m에 분포하며, 갈색의 점토섞인 실트질 모래로 구성되었고, 통일분류법의 SM에 해당한다.

- 풍화토

풍화토는 G.L(-)0.4~2.5m에 분포하며, 담갈색~황갈색의 실트질 모래로 구성되었고, 통일분류법의 SM에 해당한다.

- 경암

경암층은 G.L.(-)2.5~20.5m에 분포한다. 담회색~암홍색의 응회암으로 구성되어 있다. 코어회수율(TCR)은 100%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 72~97%(평균85%)로 코어상태는 매우 양호하다.

· 시추공 SD-4

- 붕적층

붕적층은 G.L(-)0.0~6.8m에 분포하며, 담갈색~황갈색의 점토섞인 실트질 모래로 구성되었고, 통일분류법의 SM에 해당한다.

- 경암

경암층은 G.L.(-)6.8~20.5m에 분포한다. 암회색~담홍색의 응회암으로 구성되어 있다. 코어회수율(TCR)은 100%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 73~100%(평균90%)로 코어상태는 매우 양호하다.

· 시추공 SD-5

- 붕적층

붕적층은 G.L(-)0.0~4.0m에 분포하며, 담갈색~황갈색의 점토섞인 실트질 모래로 구성되었고, 통일분류법의 SM에 해당한다.

- 연암층

연암층은 G.L(-)4.04~4.4m에 분포하며, 암흑색으로 절리면에 실트질 모래가 충진되어 있다.

- 경암

경암층은 G.L.(-)4.4~20.4m에 분포한다. 암회색~담홍색의 응회암으로 구성되어 있다. 코어회수율(TCR)은 100%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 65~100%(평균88%)로 코어상태는 매우 양호하다.

· 시추공 SD-6

- 붕적층

붕적층은 G.L(-)0.0~4.9m에 분포하며, 황갈색의 점토섞인 실트질 모래로 구성되었고, 통일분류법의 SM에 해당한다.

- 붕적층

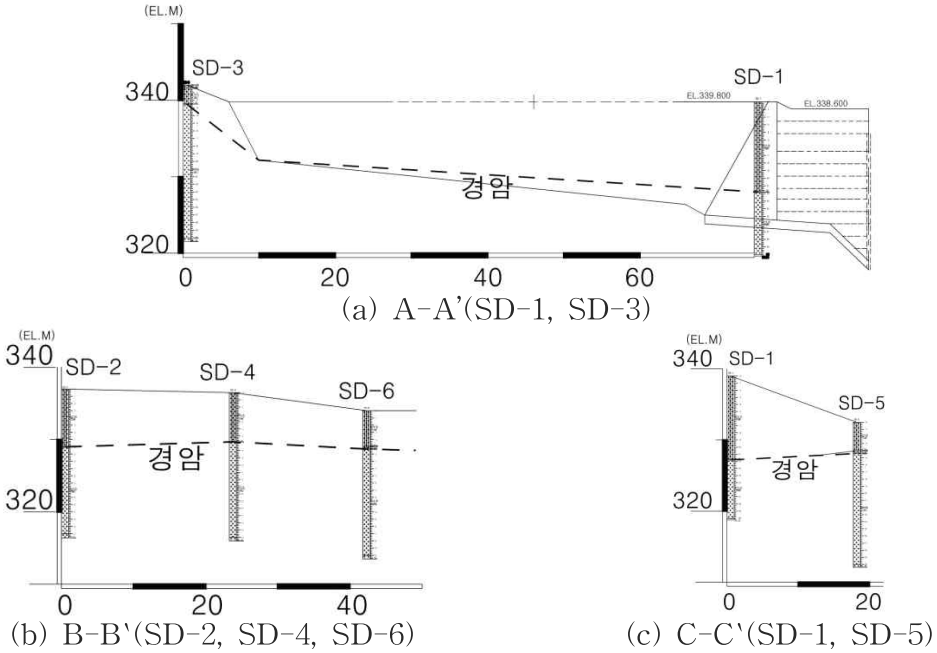
붕적층은 G.L(-)4.9~5.3m에 분포하며, 암회색~담홍색의 점토섞인 실트질 자갈로 구성되었고, 통일분류법의 GM에 해당한다.

- 경암

경암층은 G.L.(-)5.3~20.5m에 분포한다. 암회색~담홍색의 응회암으로 구성되어 있다. 코어회수율(TCR)은 100%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 69~100%(평균87%)로 코어상태는 매우 양호하다.

라. 지층분석특성 요약

시추조사에 의한 6개 시추공의 지층 분포는 상부 매립층, 붕적층, 풍화토층과 하부 경암층으로 구성되어 있다.



[그림 3.4.55] 성덕구댐 지층 단면

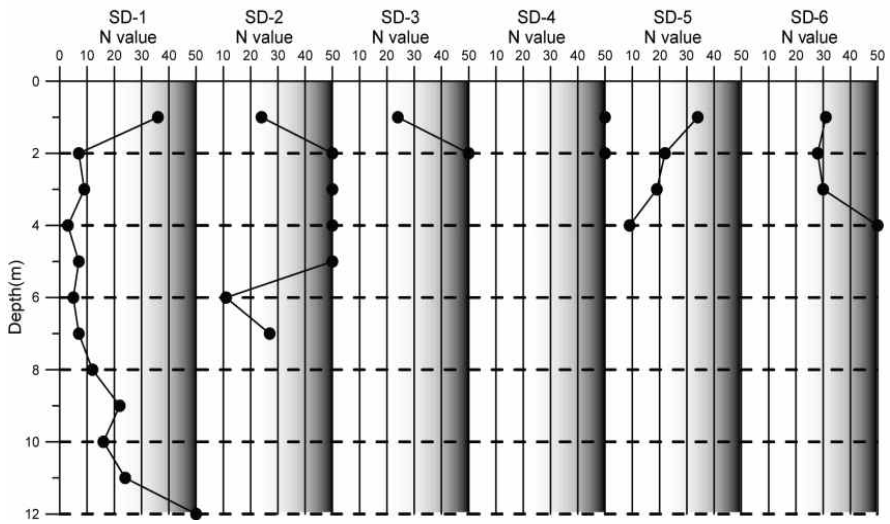
마. 표준관입시험 결과

지층명	층두께(m)	N값(회/cm)		비고
		최소	최대	
매립층	11.8	36/30	50/3	실트섞인 모래
붕적층	0.4~8.0	20/30	50/7	자갈(점토)섞인 실트질 모래
풍화토	2.1	50/27	50/30	실트질 모래

심도(m)	SD-1		심도(m)	SD-2	
	N값	지층		N값	지층
1.0	36/30	매립층	1.0	24/30	붕적층
2.0	7/30	매립층	2.0	50/15	붕적층
3.0	9/30	매립층	3.0	50/9	붕적층
4.0	3/30	매립층	4.0	50/13	붕적층
5.0	7/30	매립층	5.0	50/12	붕적층
6.0	5/30	매립층	6.0	11/30	붕적층
7.0	7/30	매립층	7.0	27/30	붕적층
8.0	12/30	매립층	-	-	-
9.0	22/30	매립층	-	-	-
10.0	16/30	매립층	-	-	-
11.0	24/30	매립층	-	-	-
12.0	50/3	매립층	-	-	-

심도(m)	SD-3		심도(m)	SD-4	
	N값	지층		N값	지층
1.0	50/27	풍화토층	1.0	34/30	붕적층
2.0	50/30	풍화토층	2.0	22/30	붕적층
-	-	-	3.0	19/30	붕적층
-	-	-	4.0	9/30	붕적층
-	-	-	5.0	16/30	붕적층
-	-	-	6.0	30/30	붕적층

심도(m)	SD-5		심도(m)	SD-6	
	N값	지층		N값	지층
1.0	20/30	붕적층	1.0	31/30	붕적층
2.0	17/30	붕적층	2.0	28/30	붕적층
3.0	30/30	붕적층	3.0	30/30	붕적층
4.0	50/7	붕적층	4.0	50/11	붕적층

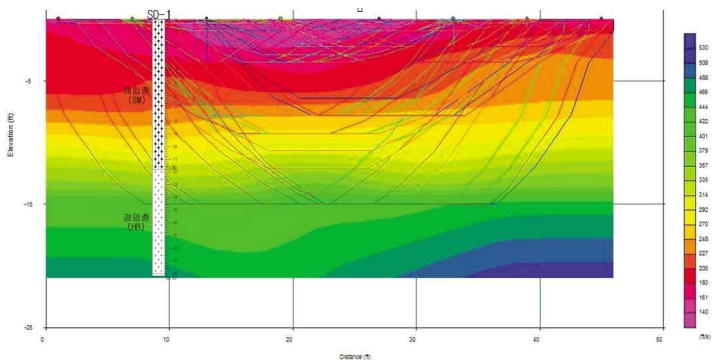


[그림 3.4.56] 심도별 표준관입시험 결과

4. S파 굴절법 탐사

굴절법 탐사는 지표부근에서 충격을 주어 탄성파를 발생시켜 속도가 다른 지층경계면에서 임계굴절되어 지면에 도달하는 굴절파를 기록 분석하여 지하의 속도구조를 알아내는 방법으로서 이것은 지하 매질에 대한 속도와 심도 정보를 제공하고 반사법 탐사에 비해 탐사작업이 비교적 간편하고 경제적이라는 점에서 활발히 적용되고 있다. 탄성파 속도 분포로부터 개략적인 지층의 연속적인 분포상태와 파쇄대와 같은 저속도 이상대 유무를 파악하고 시추조사 결과와 연계하여 미시추구간의 암경계를 추정하며, 가탐심도 문제를 상대적으로 해결할 수 있으며, S파 단면을 획득하여 동적물성치를 산출하는데 활용가능하다. 탄성파 탐사에서 사용되는 파원의 대부분은 종파(P파)인데 이는 해머를 이용 받침판을 상하방향으로 타격함으로서 파동의 전파방향으로 타격함으로서, 파동의 전파 방향으로 매질의 입자가 진동하는 강력한 P파를 쉽게 발생할 수 있기 때문이다. 이에 반해 파동의 진행방향에 직각으로 매질의 입자가 진동하는 전단파(S파)는 지표면에 평행하게 발생시켜야 되기 때문에 강한 파동을 얻기가 P파에 비해 상당히 어렵다. 그러나 표준관입시험에 의한 N치와의 연관성 및 지하수와의 관계에 영향이 없다는 점에서 측정이 가능하다면 직접 지반의 물성치로 사용되는 장점이 있다.

전단파 발생은 타격판을 사용하여 좌우측 진원을 발생시키고 후이 신호를 중첩하여 S파를 산출하였으며, 기록된 자료를 자료변환, 트레이스 정리, 필터링, 자동이득함수 처리과정등을 수행한 후 초동주시를 취합하여 토모그래피 역산법을 이용한 전단파 속도토모그램을 작성하였다. 그림에서 전단파 속도는 15m 심도까지 굴절경로가 나타나며, 최대 480 m/sec의 전단파 속도로 관찰되었다. SD-1의 결과와 비교했을 때, 시추결과에서는 매립층의 경계인 12m 부근에서 굴절이 이루어진 것으로 판단된다.



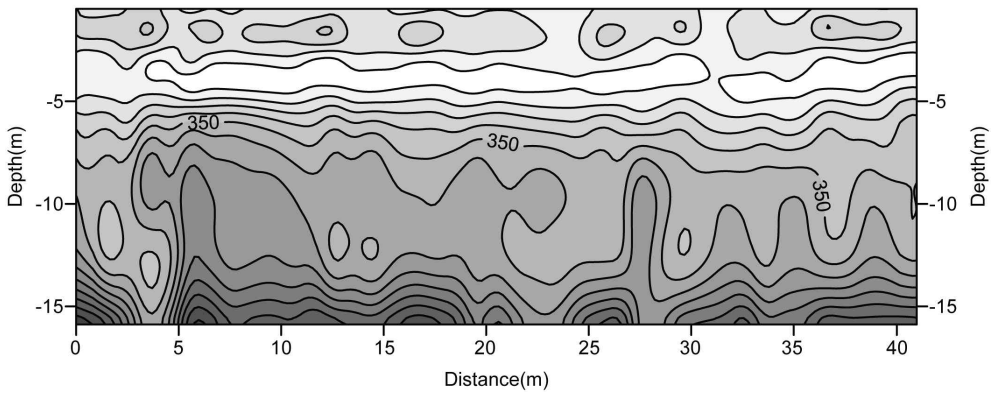
[그림 3.4.57] S파 굴절법 토모그램 결과

5. MASW 탐사

1980년대 초반에 지표 근처의 전단파 속도 단면을 만들기 위한 SASW 분석법(Nazarian et al., 1983)이 처음 소개되었으며, 토목공학 분야에서 종파 속도와 함께 포아송비를 구하는데 사용되어 왔다. Park et al.(1999)은 SASW 방법의 약점을 극복하기 위해 다중채널 방식을 이용한 표면파 분석법(MASW)을 개발하였다. 이 방법은 자료획득 속도가 빠르고 전체적인 자료의 정확성이 높으며, 자료처리과정도 비교적 간단하다. 이 방법은 레일리파의 분산에 있어 다른 고차모드나 실체파들로부터 기본모드를 쉽게 구분할 수 있으며, SASW 방법에서 나타나는 공간적 알리아싱을 피할 수 있다는 장점이 있다(조수제, 김기영, 2004).

성덕구댐 하부사면 아래에서 MASW 탐사를 수행하였다. 수진기 간격은 1m, 송신점 위치는 첫 번째 수진기에서 5m 지점이다. MASW 탐사를 수행한 위치는 SD-5 시추공 주변이다.

MASW 탐사 결과는 다음과 같다[그림 3.4.58]. SD-5 시추공은 0~4m 구간은 붕적층, 4~4.4m 구간은 연암층, 4.4m 이하 구간은 경암층으로 구성되어 있다. MASW 탐사 결과는 약 3.5m 이전 구간과 이후 구간으로 구분할 수 있다. 3.5m 이전 구간은 약 590m/s 의 Vs 속도 분포를 보이며, 이후 구간은 910m/s 전후의 속도 분포를 보인다.



[그림 3.4.58] MASW 탐사 결과(SD-5)

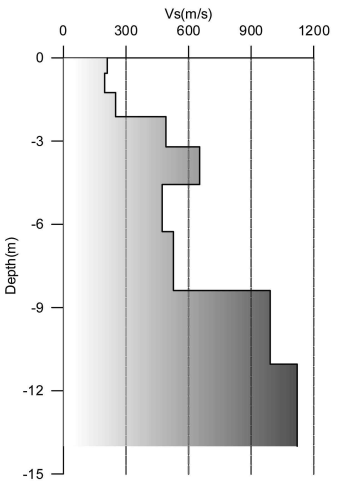
6. 상시미진동탐사

평상시에도 지상의 여러 곳에서 미소한 지반진동(진폭 : 수~수십 μm 정도, 주기 : 0.1~수 초 정도)이 관찰된다. 이 원인은 멀리 떨어진 곳에서 교통 수단, 공장, 공사 등에 의해 발생한 인공 진동과 조석, 화산 활동 등에 의한 자연 진동이 땅 속을 복잡하게 전파하면서 중첩되어 생긴 것으로 일반적으로 이를 미진동이라고 부른다.

상시미진동은 전파되는 과정에서 그 지반 특성을 반영하는 고유의 성질을 갖고 있으므로 지반의 진동 특성을 검토하는 중요한 자료로써 이용되고 있다. 즉 미진동의 우세 주기는 지진동 특성과 조화적이라는 것이 알려져 있어서, 미진동 관측으로 얻어진 관측 파형을 스펙트럼 분석을 통하여 조사 지역의 표층 지반의 우세 주기와 증폭 특성을 추정하는 것이 가능하므로 내진 설계 자료로써 지진공학 분야에 적용되고 있다. 최근에는 표면파적 성질이 명확하게 규명되어 이 표면파에 착안한 배열 탐사 방식으로 지하구조 조사(S파 속도 구조의 추정)가 이루어지고 있다.

본 연구지역은 성덕다목적댐 건설공사가 진행 중인 곳으로써 각종 중장비 및 발파 작업이 계속되고 있어 상시미진동 탐사에 어느 정도 적합하다고 할 수 있다. 이번 측정의 경우에는 시추공 시험발파 작업과 동시에 자료의 측정이 이루어졌다.

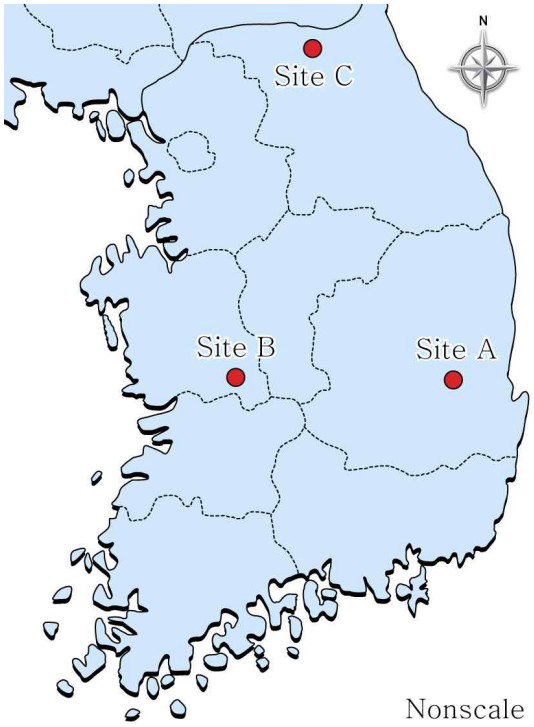
상시미진동탐사 결과 약 9m 전후로 Vs의 변화가 나타난다[그림 3.4.59]. 약 9m 이전 구간은 500m/s 내외의 Vs 속도 분포를 보이며, 이후 구간은 1000m/s 내외의 속도 분포를 보인다. 주변에서 실시한 전단파 속도분포를 참고하면 약 9m 이전 구간은 붕적층, 이후 구간은 경암층이 분포할 것으로 예상된다.



[그림 3.4.59] 상시미진동 탐사 결과

7. 동적물성 산정을 위한 물리탐사 방법의 현장 적용

2012년 3월부터 8월까지 대형 지반구조물 대입경 조립재료의 동적물선 산정 기법 연구의 일환으로 총 3개 지역에서 물리탐사 방법을 적용하여 조사를 수행하였다. 연구지역은 댐 2개소, 고속철도 건설현장 1개소로 구분된다. 각 지역별 조사위치는 [그림 3.4.60]과 같으며, 지역별 조사현황은 [표 3.4.5]와 같이 정리하였다.



[그림 3.4.60] 물리탐사 적용 연구지역

[표 3.4.5] 각 지역별 조사방법

연구지역	소재지	조사 방법
Site A	강원도 화천군 화천읍 동촌리 (평화의댐 현장)	MASW탐사; 반사법 탄성파탐사 시추조사; 다운홀; 밀도검층; OPTV
Site B	충청남도 논산시 광석면 (호남고속철도 건설현장)	S파 반사법 탄성파탐사; 다운홀 시추조사
Site C	경상북도 청송군 안덕면 성재리 (성덕댐 건설현장)	MASW탐사; 반사법 탄성파탐사 시추조사; 다운홀

가. Site A(성덕댐 건설현장)

Site A 지역에서는 2012년 3월 성덕댐 건설현장 상류 및 하류지역, 2개소에서 매립층(대입경 조립재료)의 지층상태 및 전단파속도 파악을 위하여 물리탐사와 시추조사를 병행하여 수행하였다. 성덕댐 건설현장 조사방법에는 MASW탐사 2측선(상류 및 하류지역 각 1개소), 반사법 탄성파탐사(상류 및 하류지역 각 1개소), 시추조사 5공, 다운홀시험 3개소가 있다.

(1) 성덕댐 MASW탐사

연구지역 건설현장 상류 및 하류지역에서 표면파탐사를 수행한 측선은 [그림 3.4.61]과 같이 나타내었다. 조사가 이루어진 지역은 차량의 진입을 수월하게 하기 위하여 매립 및 성토가 이루어진 지역으로 대입경 조립재료의 암편과 자갈이 섞인 재료들로 구성되어 있다. 표면파 탐사를 위한 현장 접근성 및 수진기의 설치, 음원의 송신 등은 용이하였다.

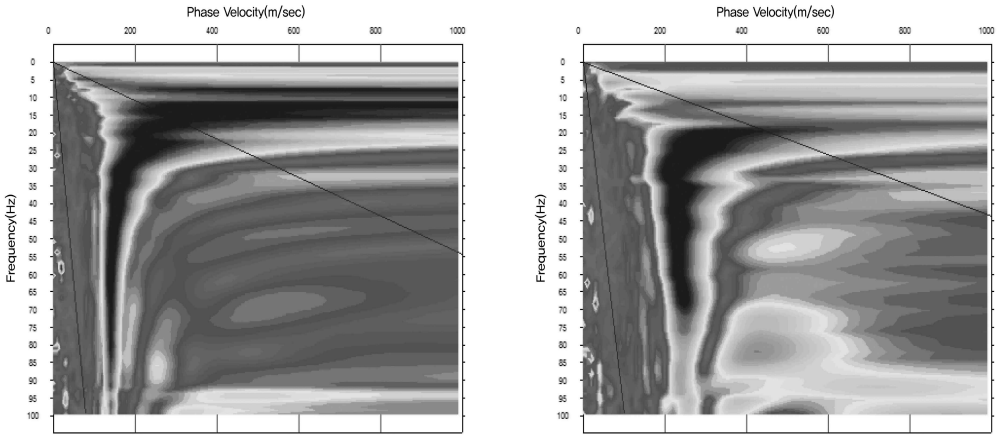


(a) 상류지역 MASW탐사 (b) 하류지역 MASW탐사 및 시추조사

[그림 3.4.61] 물리탐사 적용 연구지역

MASW 기법을 이용한 표면파탐사에서는 분산곡선을 구하기 위해 주파수와 위상속도의 함수로 다중 채널 신호의 에너지 강도(energy intensity)를 계산하여 정해진 주파수에서 최대의 에너지를 갖는 위상속도를 결정한다. 이때 각 주파수에 대하여 일정한 위상속도의 범위를 정하고 각 주파수에 대한 탄성파가 정해진 위상속도로 전파할 때 탄성파 신호와의 상관에 의해 만들어지는 모든 채널의 신호를 합하여 에너지 세기를 구하게 된다. 정해진 범위의 주파수와 위상속도의 모든 값에 대한 에너지를 계산한 다음, 각각의 주파수에 대하여 에너지의 최고치가 나타나는 위상속도를 찾아낸다. 정리하면 각 주파수에 대한 에너지 최고치가 나타나는 위상속도의

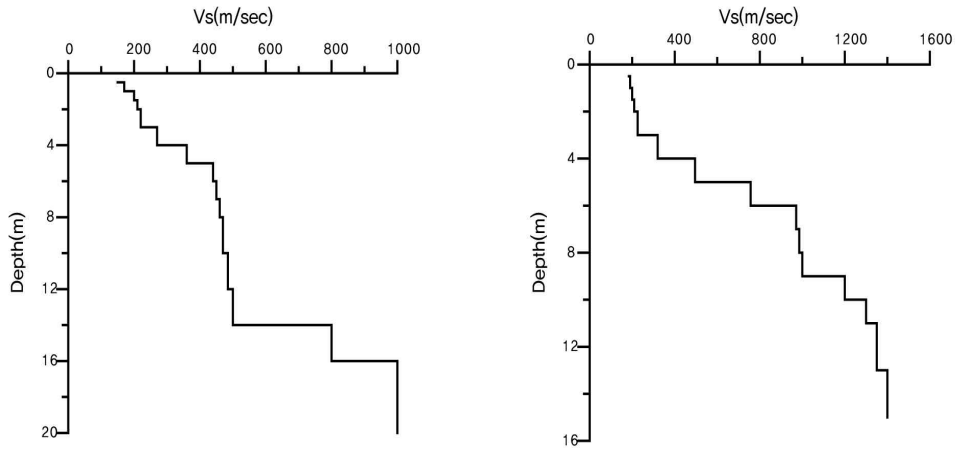
관계가 분산곡선이 된다. 연구지역의 상류 및 하류지역 표면파 탐사로 획득한 자료의 분산곡선은 [그림 3.4.62]과 같이 나타내었다.



(a) 상류지역 표면파탐사 분산곡선 (b) 하류지역 표면파탐사 분산곡선

[그림 3.4.62] 성덕댐 상·하류 지역 MASW탐사 분산곡선

본 연구지역에서 수행된 MASW탐사 결과를 [그림 3.4.63]와 같이 나타내었다. 상부 매립층의 전단파의 속도는 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 양상을 보이고 있으며, 깊이에 따라 150~480m/sec에 해당하는 전단파속도 분포를 보이고 있다.



(a) 상류지역 전단파속도 주상도 (b) 하류지역 전단파속도 주상도

[그림 3.4.63] 성덕댐 상·하류 전단파속도 주상도

(2) 반사법 탄성파탐사

2012년 03월 08일~2012년 03월 09일에 걸쳐 성덕댐 건설현장 상류 및 하류지역, 2개소에서 매립층(대입경 조립재료)과 기반암의 경계를 파악하기 위하여 천부 반사법 탄성파탐사를 수행하였다.

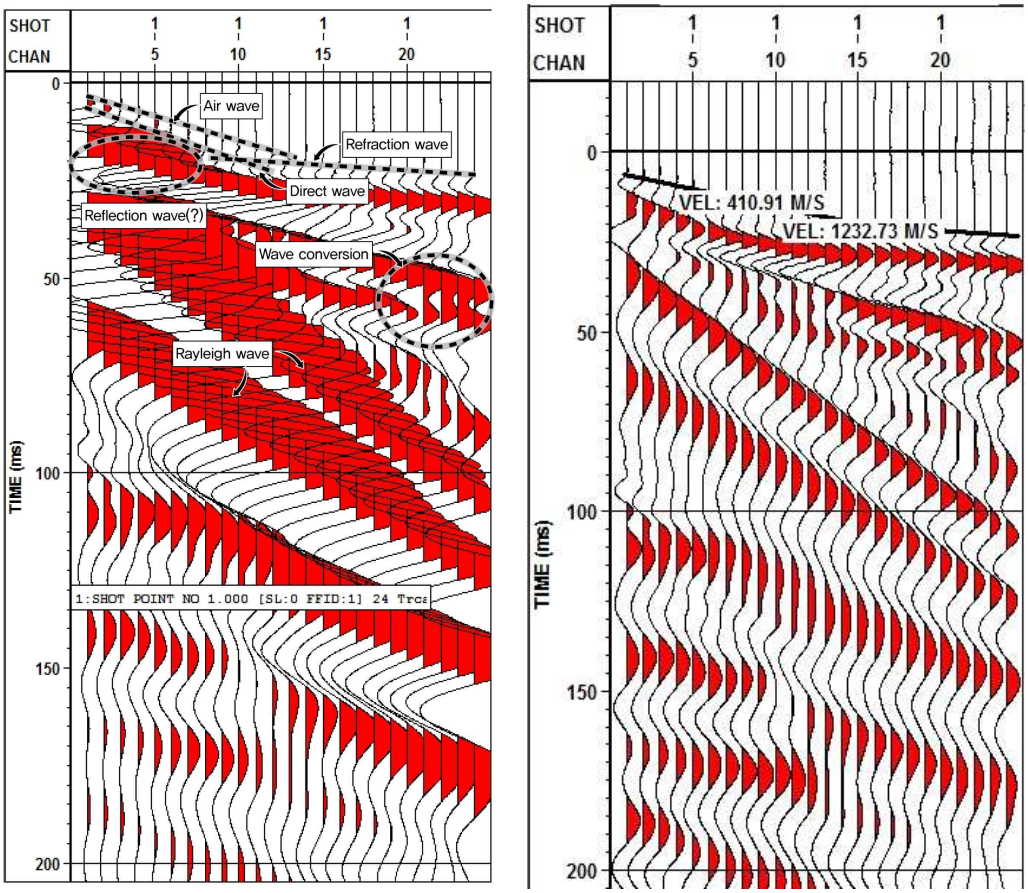
성덕댐 건설현장 상·하류 반사법 탄성파탐사 측선을 [그림 3.4.61]과 같이 나타내었다. 반사법탐사 측선 Line1 및 Line2의 전체 전개 길이는 33.2m이고, 수진기 간격은 0.4m로 설정하여 24채널을 운영하였다. 일반적으로 수진기 간격과 오프셋(offset)은 동일하게 설정하여 탐사설계를 하지만 본 조사에서는 가탐심도를 늘이기 위하여 오프셋을 1.6m로 설정하였다. 송신원으로 5.0kg 슬러지 햄머를 사용하였고, 송신점은 0.4m 간격마다 타격하여 총 61번 이동하였으며, 61번의 송신점 이동으로 총 1,464개에 해당하는 트레이스를 획득하였다. 또한 각 송신점마다 자료의 신호대잡음비를 높이기 위하여 5~10회에 걸쳐 자료를 중첩하였다. 샘플링 간격 0.125ms, 샘플링 개수는 8,096으로 기록시간은 1.024초가 된다. 현장자료취득 변수는 [표 3.4.6]과 같이 정리하였다.

[표 3.4.6] Parameters of field data acquisition

연구지역	성덕댐 상류 및 하류 각 1개소
탐사측선	Line1(상류), Line2(하류)
송신원	5kg 슬러지 햄머
수진기 수, 측선 전개길이	24 channel, 9.2m
수진기 간격, Group interval	0.4m, 0.2m
오프셋(offset), 송신점 이동간격	1.6m, 0.4m
샘플링 간격(sampling interval) 및 개수	0.125ms, 8,096
기록시간(record length)	1.024sec

육상 반사법 탄성파탐사 자료는 송신원에 기인하는 일관성 잡음, 불규칙한 지형 등에 의하여 반사신호 크기는 미약하고 왜곡되는 경우가 대부분이다. 이러한 일반적인 사실과 함께 연구지역에서 획득한 자료를 살펴보면 직접파, 굴절파, 공기파, 레일리파 등에 의한 간섭으로 인해 천부 반사파는 뚜렷한 구분을 가지며 나타나지 않는다. 현장 기록자료의 특징으로는 약 300m/sec 내외의 속도를 갖는 공기파가 뚜렷이 관찰되고 있으며, 100m/sec 내외의 속도 값을 갖는 레일리파가 큰 파장의 형태를 보이며 나타난다[그림 3.4.64]. 기반암의 반사면으로부터 시작되는 굴절파의 존

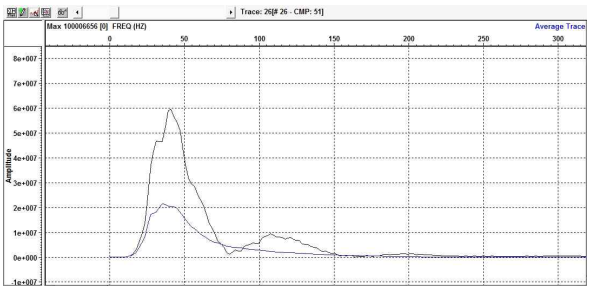
재는 확인되나 그 속도를 놓고 보았을 때 P파가 아닌 S파의 굴절로 판단된다. 확인된 굴절파의 속도를 살펴보면 상부 매립층의 경우 속도는 약 410.9m/sec이며, 그 하부 기반암층의 속도는 약 1232.7m/sec로 나타난다. 교차거리는 약 6.0m인 것을 감안할 때 1층의 대략적인 두께는 약 2.1m로 계산된다.



(a) Line1 : rawdata (b) Line1 : 초동발췌

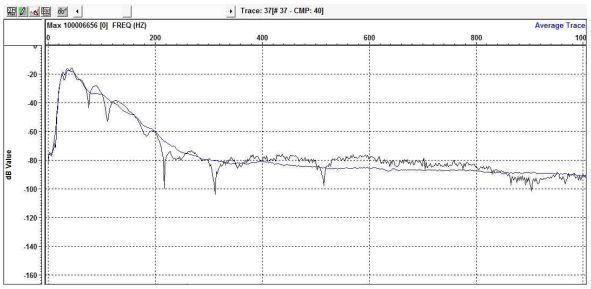
[그림 3.4.64] 현장 취득자료

기록된 자료의 진폭 스펙트럼을 살펴보면 약 35~45Hz 대역에서 중심주파수가 형성되는데, 이는 햄머를 송신원으로 사용하였을 때 확인할 수 있는 전형적인 주파수 대역이다[그림 3.4.65].



[그림 3.4.65] 기록된 자료의 진폭 스펙트럼

파원에 따른 주파수의 성분 변화는 굴절파와 반사파를 포함하고 있는 자료에 대하여 고찰하였다. [그림 3.4.66]은 획득한 자료에서 파원과 전체 수진기 거리의 기록 중 왕복 주시 0.1초 이내의 자료에 대하여 푸리에 변환을 수행한 후 이를 파원별로 정규화하여 dB 단위로 나타낸 것이다. 햄머의 경우 최대값을 기준으로 -20dB 이상의 진폭을 갖는 주파수 구간은 30~50Hz의 범위로 나타나고 있으며, 200Hz까지 -60dB로 감소하다 600Hz까지 -80dB의 분포를 나타낸다.



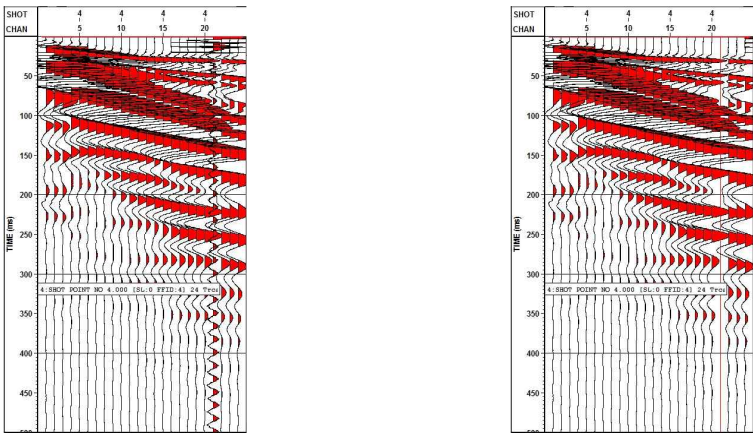
[그림 3.4.66] 기록된 자료의 주파수 성분

반사법 탄성파탐사의 자료처리 및 분석은 공통중간점모음법(common mid point)을 기본으로 하여 반사-시간 단면도를 작성하는데 궁극적인 목적이 있다. 자료처리 과정은 CMP 편집, 자동이득보정(AGC : auto gain control), 각종 필터처리, 수직경로시차(NMO : normal move out) 보정, 속도분석, 뮤트(mute), CMP 중합, 구조보정(migration) 등으로 구성된다. 자료처리 방법은 획일적으로 결정할 수 없고, 일반적으로 각 처리 변수들에 대한 결과 자료들을 비교, 관찰하며 그 중에서 가장 적합한 변수를 선정하여 자료처리를 수행한다. 즉, 각 과정에서 처리 변수들을 바꿔 가면서 그 결과들을 비교해 보고, 그 중에서 가장 뚜렷한 반사신호를 나타내주는 변수들을 선택한다.

전처리과정(preporcessing)은 공통 중간점 중합 전까지의 과정을 말하며, 이 과정

에서는 편집(editing), 자료의 이득회수 조정(gain recovery control)을 실시하고 탄성파 기록상에 잡음이 많은 경우에는 자료의 스펙트럼을 분석하여 필터링을 실시하기도 한다. 탄성파 트레이스들 중에서 일부가 여러 가지 이유로 잡음만을 갖고 있는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 트레이스들은 자료를 띄워 살펴보고 인위적인 선택에 의해 제거되어야 한다. 이를 위해서는 자료를 디스플레이 한 후 일부분을 이동, 확대해 가며 확인된 불량한 트레이스들의 신호 세기를 "0"으로 만들어 준다.

탄성파 자료가 불량한 신호의 형태로 수신되는 경우에는 몇 가지 이유를 들 수 있는데, 수진기 자체의 불량, 케이블의 상태 불량, 탄성파 탐사기(seismograph) 내부적인 문제 등이 제기될 수 있다.

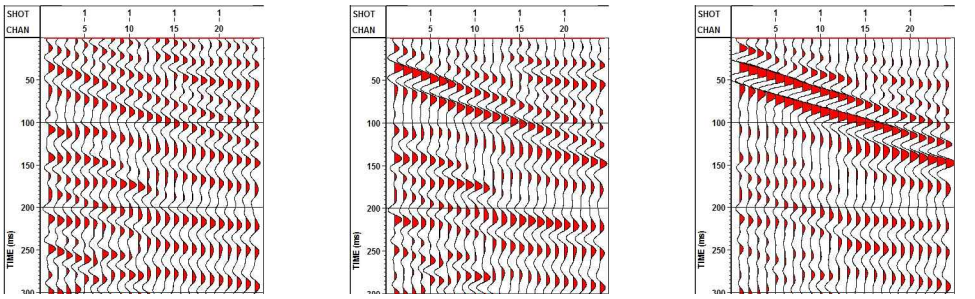


(a) 편집 전 (b) 편집 후

[그림 3.4.67] 트레이스 편집(trace kill)

[그림 3.4.67]는 불량 트레이스의 편집 전과 후의 자료를 비교하여 나타낸 것이다. 해당자료는 성덕댐 상류지역에서 획득한 반사법자료이며, 총 61개의 송신점 자료 중 4째 송신점에 해당한다. 각 송신점당 24개의 트레이스를 얻을 수 있으며, [그림 3.4.67]의 경우 21번 트레이스에 해당하는 자료가 불량한 것으로 확인되었고, 이와 같은 불량 트레이스를 솎아준다.

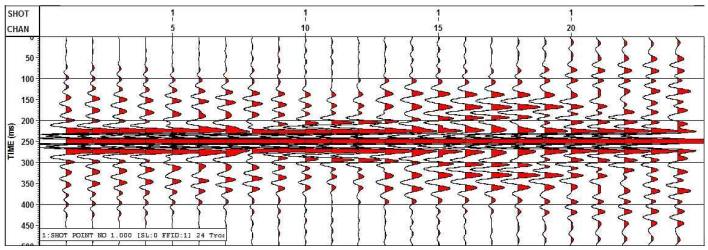
이득보정(Gain control)은 입력 신호의 크기 변화를 보정하기 위해 사용되는 증폭기의 증폭 및 감쇠변화를 조절하는 것을 일컫는다. 어떤 한계 내에서 출력 수준이 유지되도록 하기 위해 출력 수준 자체가 이득을 조절하는 되먹임 루프를 사용하는 자동적인 이득 제어가 많이 사용된다. 반사파와 같은 경우는 심도가 깊어질수록 신호의 감쇠가 심하게 나타나기 때문에 이득보정은 필수적이라고 할 수 있다. 본 조사에서도 자동이득보정을 적용하였으며, 시간변수 및 예상 반사파의 시간 관계를 고려하여 자동이득보정 길이 값을 100ms로 설정하였다[그림 3.4.68].



(a) Window length : 50ms (b) Window length : 100ms (c) Window length : 200ms

[그림 3.4.68] 자동이득보정(AGC)

어떤 함수를 자신에 대하여 상관을 실시하는 경우를 자기상관(auto correlation)이라고 하는데, 자기상관을 계산할 때에는 상호상관의 경우와는 달리 이동 방향에 무관하기 때문에 자기상관 함수는 변위량이 "0"에서 최대치를 갖는다. 만일 어떤 시계열의 자기상관 계수 중 상당한 크기의 값을 나타내는 이차적인 극대치가 존재한다면 이러한 신호가 특정한 시간간격을 두고 되풀이되어 나타남을 의미한다. 따라서 자기상관은 어떤 함수의 주기성을 측정하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 특성은 탄성파 탐사 자료처리에서 다중 반사파의 판별이나 그 주기를 파악하는데 유용하다. 연구지역에서 획득한 자료에 대한 자기상관을 [그림 3.4.69]과 같이 나타내었다.

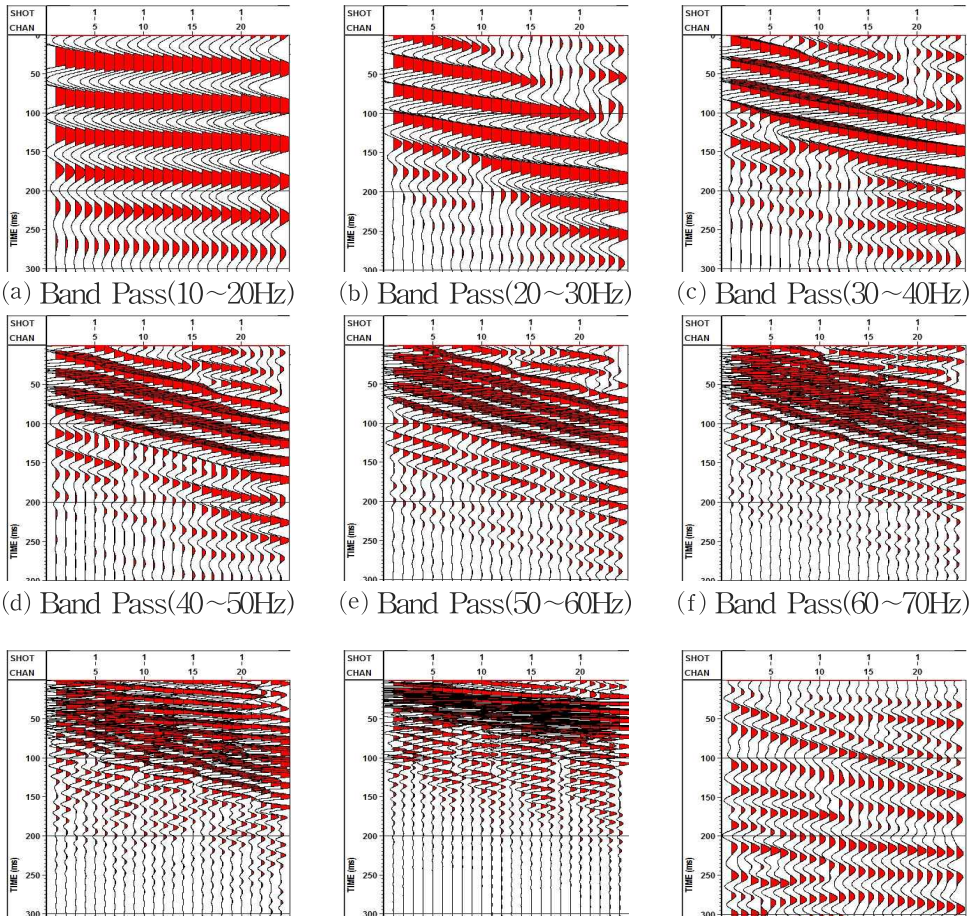


[그림 3.4.69] 자기상관도(auto correlation)

대역통과필터(Band pass filter)는 특정한 두 차단주파수 사이에 있는 주파수 대역의 신호는 감쇠없이 통과하나 그 이외의 모든 주파수에 대해서는 감쇠시키는 필터를 일컫는다. 실제는 절단 효과를 줄이기 위하여 주파수를 서서히 변화시키는 4개의 주파수 f1, f2, f3, f4로 주어지는 사다리꼴 모양으로 설계한다. f1 이하 f4 이상은 차단 시키고 f2와 f3 사이는 감쇠 없이 통과시키며, f1과 f2 사이와 f3과 f4 사이는 선형적으로 변화시킨다. 이러한 사다리꼴의 필터를 옴스비(ormsby) 필터라고 한다.

연구지역에서 획득한 자료에 대하여 주파수 대역별로 필터링을 실시한 결과는 [그림 3.4.70]에 비교하여 나타내었다. 결과 중 (a) Band Pass(10~20Hz)의 경우를

살펴보면 f1=5, f2=10, f3=20, f4=25의 값을 적용하여 필터링을 실시하였다. 10~20Hz 사이의 저주파수 대역은 감쇠 없이 통과시키며, 5~10Hz, 20~25Hz 사이는 선형으로 변환된다. 본 조사에서 대역필터를 적용해 본 결과 15~55Hz에 해당하는 주파수 대역을 최적의 값으로 판단하였으며, 그 결과는 [그림 3.4.70] (i)와 같다.



(a) Band Pass(10~20Hz) (b) Band Pass(20~30Hz) (c) Band Pass(30~40Hz)

(d) Band Pass(40~50Hz) (e) Band Pass(50~60Hz) (f) Band Pass(60~70Hz)

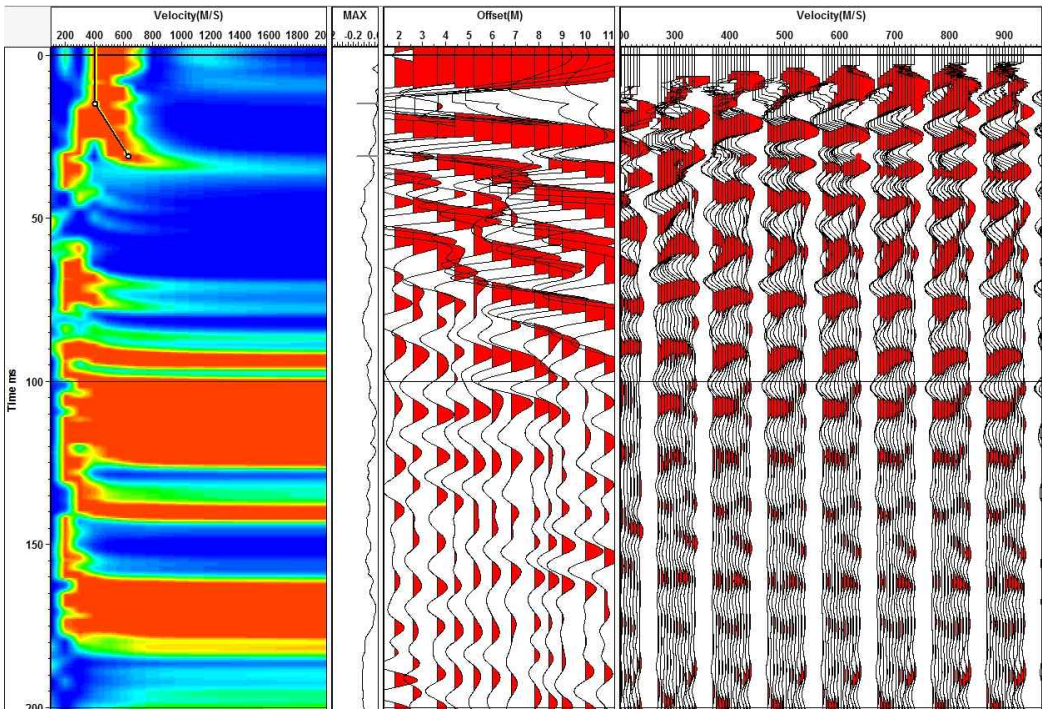
(g) Band Pass(70~80Hz) (h) Band ass(85~200Hz) (i) Band Pass(15~55Hz)

[그림 3.4.70] 주파수 대역별 필터 테스트

탐사자료의 처리과정에서 속도에 대한 정보는 NMO 보정, 중합, 구조보정 등의 작업을 하는데 필수적이다. 속도분석에는 탐사측선 상의 일부 지점의 기록을 표본으로 선택하여 속도분석을 실시하게 되는데 여기서 이용되는 속도는 지층의 실제 속도가 아니고 단지 가장 우수한 중합 결과를 얻게 하는 반사신호의 정렬상태를 나타내는 변수이다.

상속도 중합 방법에는 하나의 상속도를 이용하여 공통 중간점 중합자료 전체에 대한 NMO 보정을 실시하여 반사신호가 가장 수평적으로 정열이 되는지를 검토한다. 이러한 방식으로 일련의 상속도를 적용한 결과를 검토하면 각 반사신호에 대하여 가장 적절한 중합속도를 결정할 수 있다.

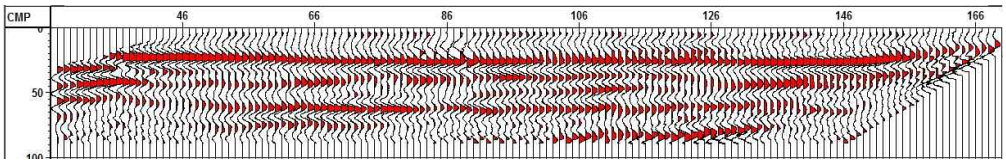
컴퓨터를 이용한 속도분석 방법은 여러 가지가 개발되어 있으나 계산 결과로부터 적절한 속도를 결정하기 위해서는 인위적인 판단이 요구된다. 전처리 과정을 완료한 자료를 이용하여 속도분석을 수행한 결과는 [그림 3.4.71]과 같다.



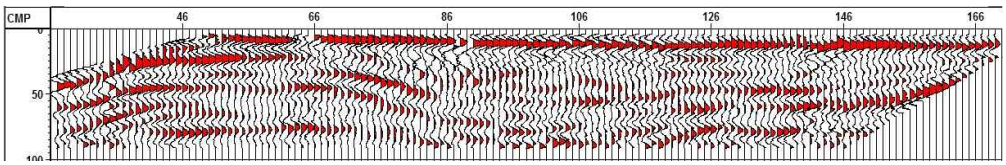
[그림 3.4.71] 자료의 속도분석. 좌로부터 속도 semblance, NMO 보정, 상속도별 NMO 중합

셈블런스(semblance) 분석결과 양방향 시간에 따른 속도 값은 15ms에서 370m/sec, 35ms에서 640m/sec의 상속도 값을 적용하였으며, 35ms 이내에서는 직접파와 진폭이 큰 모드변환 된 전단파의 영향으로 큰 셈블런스 값을 나타내고 있다.

상류 및 하류지역의 측선별 일련의 반사법 자료처리 과정을 거친 후 공통 중간점 모음에 대한 속도분석을 실시하여 NMO 보정을 하였다. NMO 보정 후 공통 중간점 모음(CMP)을 중합(stack)하여 최종적으로 [그림 3.4.72]의 반사단면도을 얻었다.



(a) Line-1 결과단면



(b) Line-2 결과단면

[그림 3.4.72] 측선별 중합단면

획득한 반사 단면도를 살펴보면 수평적인 반사 신호로 나열된 결과를 얻었다. 상류 및 하류지역 자료의 속도분석에서 반사면에 해당하는 속도를 발췌하기가 매우 어려웠는데 첫 번째 반사면, 즉 매립층(대입경 조립재료)과 기반암의 경계로 추정되는 시간대는 모드가 변환된 파와 표면파 및 기타 잡음이 혼재되어 그 경계를 구분하기 어렵다고 판단된다.

본 조사지역과 같이 매립층(대입경 조립재료)의 두께가 5.0m 이내인 경우 천부 반사법탐사의 설계에 있어 좀 더 고주파수의 성질을 갖는 송신원에 대한 고려가 필요할 것으로 판단되며, 천부에서 가장 파장이 크게 나타나는 표면파를 감소시키고 반사파의 신호를 강조시키기 위해서는 공간적으로 나열한 수진기 배열을 이용하거나 고주파수 대역의 수진기를 이용하는 것이 타당하리라 생각된다.

(3) 시추조사

연구지역에 대한 시추조사에서는 유압형 회전수세식 장비를 이용하였으며, 시추구경은 공경 76mm, 코아직경 54mm의 NX 사이즈이다. 공벽붕괴를 방지하기 위하여 기반암 상부 매립 및 성토층까지 케이싱을 삽입하였고, KS F 2307 규격에 의거하여 1.0m마다 표준관입시험을 실시하였다. 토층시료는 Split Spoon Sampler, 암석시료는 D-3 코아배럴을 이용하여 채취하였다. 채취된 토층시료는 육안관찰 및 통일분

류법에 의거하여 색조, 습윤정도, 연경도나 상대밀도 등을 기재하였으며, 암석시료로는 코아회수율, 절리면의 상태, 충진물 등을 파악하여 암반특성을 평가할 수 있는 자료로 활용하였다. 이러한 정보들은 모두 시추주상도에 기재하였으며, 채취된 토사 및 암석시료는 시료상자에 공번, 심도, 지층명 등을 기록하여 보관한다.

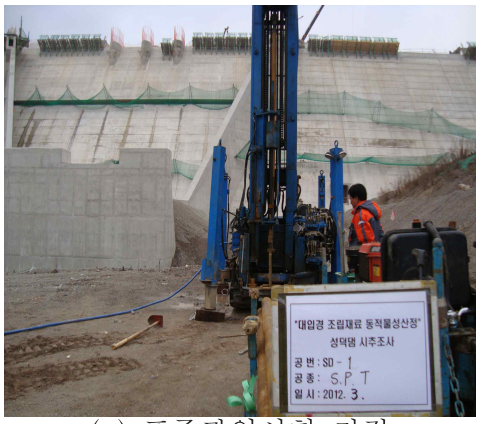
시추조사는 2012년 3월 10일부터 2012년 3월 12일까지 성덕댐 건설현장 하류지역에서 5개 시추공에 걸쳐 조사가 진행되었으며, [그림 3.4.73] 시추조사 위치도의 각 시추공에 대한 거리표시 기준은 반사법 탄성파탐사 측선의 시작점인 0.0m를 기준으로 하였다.



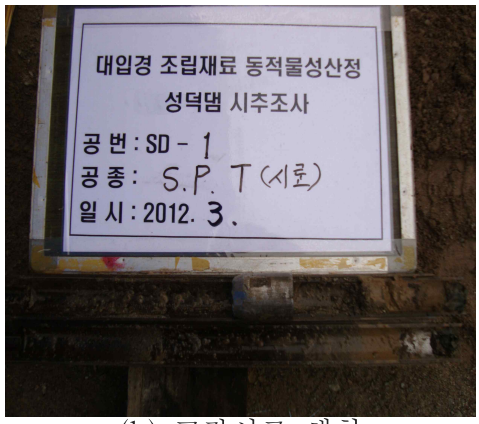
[그림 3.4.73] 성덕댐 시추조사 위치도

[표 3.4.7] 성덕댐 시추조사 현황

구분	조사위치	조사심도(m)	매립층(m)	경암층(m)	조사날짜
SD-1	X : 304628.7661 Y : 196773.3346	25.8	3.6	22.2	2012.03.10
SD-2	X : 304632.8998 Y : 196777.6834	7.0	3.7	3.3	2012.03.10
SD-3	X : 304637.0334 Y : 196782.0323	25.5	2.6	22.9	2012.03.11
SD-4	X : 304641.1671 Y : 196786.3811	7.0	3.4	3.6	2012.03.11
SD-5	X : 304645.3008 Y : 196790.7300	25.3	3.0	22.3	2012.03.12



(a) 표준관입시험 전경



(b) 교란시료 채취

[그림 3.4.74] 성덕댐 표준관입시험 및 시료채취

· 시추공, SD-1

- 매립층

매립층은 G.L(-) 0.0~3.6m에 걸쳐 분포하며, 담갈색의 모래섞인 자갈로 구성되어 있다. 통일분류 상 분급이 좋지 않은 자갈(GP)에 해당하며, 채취된 자갈의 입도는 5~20mm이다.

- 경암층

경암층은 G.L(-) 3.6~25.8m에 분포하며 담갈색의 색조를 띄는 응회암이다. 풍화정도는 약간풍화 내지 신선, 강도는 강하며, 파쇄정도는 보통균열 내지 약간균열이다. 코아회수율(TCR)은 97~100%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 41~98%(평균 83.5%)로 매우 양호한 상태를 보여준다.

· 시추공, SD-2

- 매립층

매립층은 G.L(-) 0.0~3.7m에 걸쳐 분포하며, 담갈색의 모래섞인 자갈로 구성되어 있다. 통일분류 상 분급이 좋지 않은 자갈(GP)에 해당한다. 채취된 자갈의 입도는 2~5mm이다.

- 경암층

경암층은 G.L(-) 3.7~7.0m에 분포하며 담갈색의 색조를 띄는 응회암이다. 풍화정도는 약간풍화, 강도는 강하며, 파쇄정도는 보통균열이다. 코아회수율(TCR)은 95%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 63%로 양호한 상태를 보여준다.

· 시추공, SD-3

- 매립층

매립층은 G.L(-) 0.0~2.6m에 걸쳐 분포하며, 암갈색의 모래섞인 자갈로 구성되어 있다. 통일분류 상 분급이 좋지 않은 자갈(GP)에 해당한다. 채취된 자갈의 입도는 2~5mm이다.

- 경암층

경암층은 G.L(-) 2.6~25.5m에 분포하며 담갈색의 색조를 띄는 응회암이다. 풍화정도는 보통풍화 내지 신선, 강도는 강하며, 파쇄정도는 매우심한균열 내지 약간균열이다. 코아회수율(TCR)은 67~100%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 55~96%(평균 85.3%)로 양호한 상태를 보여준다.

· 시추공, SD-4

- 매립층

매립층은 G.L(-) 0.0~3.4m에 걸쳐 분포하며, 암회색 내지 암갈색의 모래섞인 자갈로 구성되어 있다. 통일분류 상 분급이 좋지 않은 자갈(GP)에 해당한다. 채취된 자갈의 입도는 3~6mm이다.

- 경암층

경암층은 G.L(-) 3.4~7.0m에 분포하며 암갈색의 색조를 띄는 응회암이다. 풍화정도는 보통풍화 내지 약간풍화, 강도는 보통강함 내지 강함, 파쇄정도는 매우심한균열 내지 약간균열이다. 코아회수율(TCR)은 100%로 매우 우수하며, 암질지수(RQD)는 88.0%로 양호한 상태를 보여준다.

· 시추공, SD-5

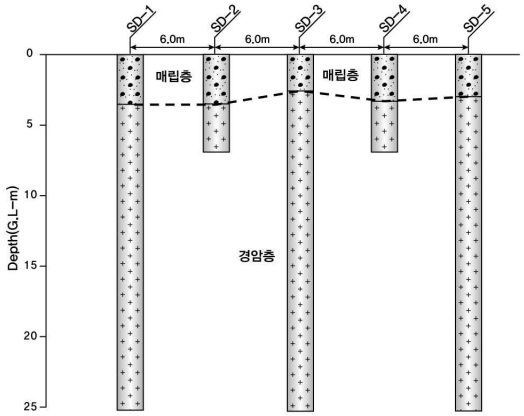
- 매립층

매립층은 G.L(-) 0.0~3.0m에 걸쳐 분포하며, 암갈색의 모래섞인 자갈로 구성되어 있다. 통일분류 상 분급이 좋지 않은 자갈(GP)에 해당한다. 채취된 자갈의 입도는 2~8mm이다.

- 경암층

경암층은 G.L(-) 3.0~25.3m에 분포하며 암갈색의 색조를 띄는 응회암이다. 풍화정도는 보통풍화 내지 약간풍화, 강도는 강함, 파쇄정도는 보통균열 내지 약간균열이다. 코아회수율(TCR)은 81~100%로 매우 우수하며, 암질지수

(RQD)는 75~96%(평균 85.3%)로 양호한 상태를 보여준다.

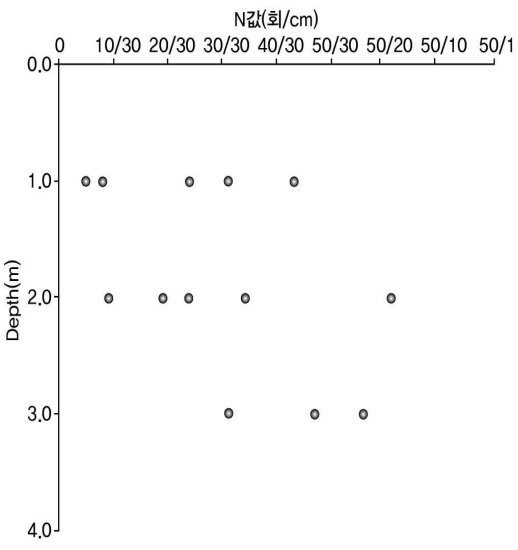


[그림 3.4.75] 시추조사 지층단면도

표준관입시험 결과 매립층(대입경 조립재료)의 심도별 N값은 [표 3.4.8]과 같이 정리하였다. 측정된 N값을 살펴보면 최소 6/30(회/cm), 최대 50/25(회/cm)이며, 평균 N값은 30/30(회/cm)이다.

[표 3.4.8] 시추공별 표준관입시험 정리

공번	심도(m)	지층	N값(회/cm)
SD-1	1.0	매립층	43/30
	2.0	매립층	50/20
	3.0	매립층	31/30
SD-2	1.0	매립층	31/30
	2.0	매립층	24/30
	3.0	매립층	47/30
SD-3	1.0	매립층	24/30
	2.0	매립층	34/30
SD-4	1.0	매립층	8/30
	2.0	매립층	9/30
	3.0	매립층	50/25
SD-5	1.0	매립층	5/30
	2.0	매립층	19/30

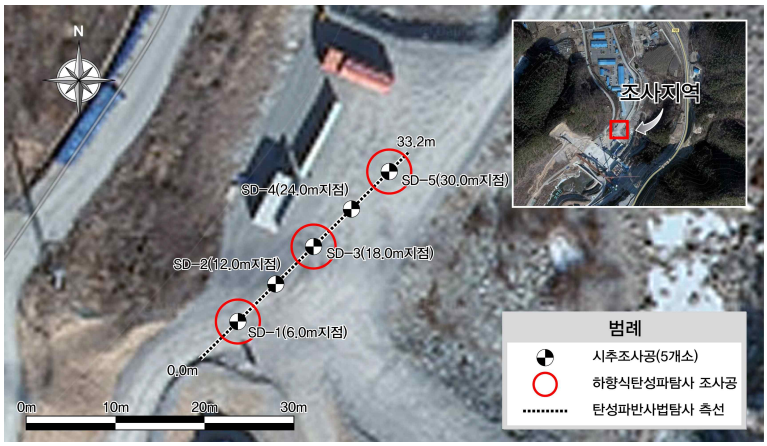


[그림 3.4.76] 심도별 N값 분포

(4) 다운홀시험

지반의 동탄성계수(dynamic elastic modulus)는 원위치 시험을 통해 측정된 탄성파속도(Vp, Vs) 및 지층의 단위중량을 이용하여 구할 수 있다. 지반의 탄성파 속도를 측정하기 위하여 가장 일반적으로 이용되는 방법 가운데 하나가 시추공을 이용한 다운홀시험 기법이다. 이 방법은 단일 시추공을 사용할 뿐만 아니라 탄성파 발생원이 지표에 위치함으로 인해 그 장비 및 탐사방법이 비교적 간단하고 시추공 간 탄성파탐사에서는 필수적으로 수행해야할 시추공의 편향도를 측정하는 공곡측정을 필요로 하지 않는다는 장점이 있어 지반공학 분야에서 많이 사용되고 있다. 다운홀시험을 통해 연구지역 지반의 탄성파 속도를 파악하고, 대입경 조립재료의 동적 거동 해석에 필수적인 물성치를 산정하게 된다.

2012년 03월 12일 성덕댐 건설현장 하류지역에 위치하는 시추공 3개소에서 다운홀시험을 수행하였으며, 탄성파반사법탐사 측선의 0.0m를 기준으로 조사지점을 표시하였다[그림 3.4.77].



[그림 3.4.77] 다운홀시험 조사위치도

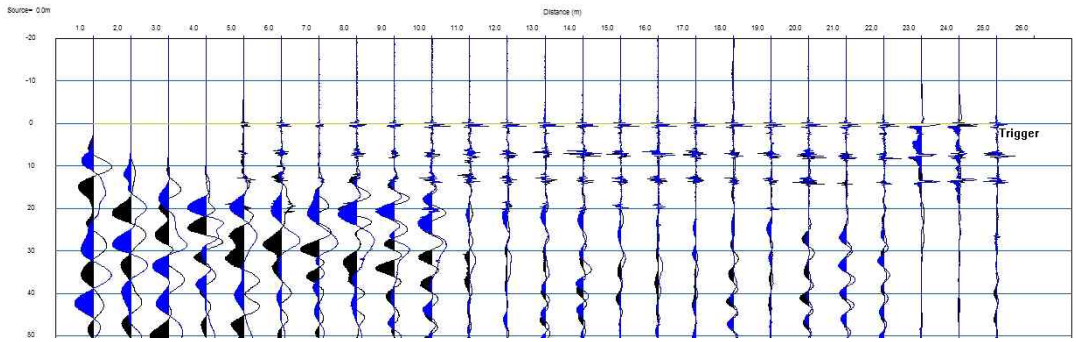
연구지역에서 사용된 수진기는 Geostuff사의 3성분 시추공 수진기(borehole geophone)를 사용하였고, 신호 획득 장비는 Geometrics사의 StrataVisorNZ로 아날로그 입력 해상도가 24bit이며, 자료의 중첩기능을 통해 양호한 신호를 획득할 수 있다.

다운홀시험의 가장 중요한 목적은 지반의 S파 속도를 도출하는 것이다. S파의 특성상 주로 낮은 주파수로 발생되고 음원에서 발생되는 주파수는 음원의 면적에 반

비례한다. S파의 발생은 1m×1m×25cm의 넓은 각목을 타격판으로 사용하였으며, 약 30Hz의 중심 주파수를 갖는 S파를 발생시켰다. 3성분 지오폰은 X, Y, Z 3방향의 진동을 동시에 측정할 수 있는 장비로 시험심도에 삽입 후 탄성파 진동방향과 지오폰의 X축 또는 Y축 방향을 일치시키고 클램프를 이용하여 공벽에 밀착시켰다. 심도가 깊어질수록 지표에서 발생된 파의 감쇠가 심해지기 때문에 최소 10회 이상의 타격으로 신호를 중첩하여 신호의 세기를 강화하였다.

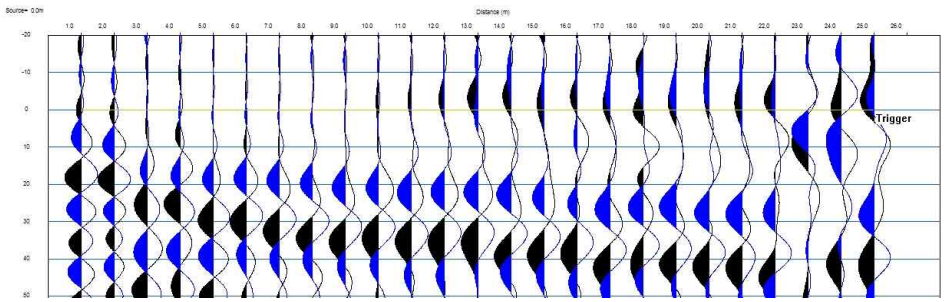
연구지역에서 획득한 자료는 다운홀시험 기법의 특성 상 획득신호가 [그림 3.4.78]에 나타난 것과 같이 불량하게 나타나기도 하는데, 이와 같은 자료로 초동정보를 산출할 경우 왜곡된 결과의 도출은 피할 수 없을 것이다. 측정 심도가 깊지 않을 경우 송신원에서 수진기까지의 거리가 가까우므로 근접장 효과(near field effect)에 의한 영향으로 탄성파의 도달시점이 왜곡된다. 또한 측정 심도가 깊어질수록 중심 주파수대역은 낮아지게 되고 신호대잡음비가 낮아지므로 초동 추정은 더욱 어려워지게 된다.

[그림 3.4.78]은 S파 송신을 통해 기록된 원시자료(rawdata)로서 고주파수의 성격을 띄는 전기적인 잡음이 뚜렷이 관찰되고 있으며, 송신원으로부터 멀어질수록 신호의 세기가 감소되는 것을 볼 수 있다.



[그림 3.4.78] 기록된 원시자료(rawdata)

원시자료(rawdata)의 스펙트럼 분석결과 S파의 중심 주파수 대역은 20~60Hz 사이에서 나타났으며, 대역통과필터(band pass filter)를 적용하여 잡음을 제거하였고, 신호의 정규화(normalizing) 과정을 거쳐 각 신호의 세기를 일정한 크기로 일치시키는 작업을 실시하였다. [그림 3.4.79]은 일련의 과정을 거친 자료이며, [그림 3.4.78]의 원시자료와 비교하였을 때 보다 수월한 초동의 발췌가 이루어질 수 있다.



[그림 3.4.79] 필터링 후 자료

S파 도달주시의 발췌 작업은 S파의 속도가 P파 속도의 70%를 넘을 수 없다는 이론적인 사실과 파의 위상변화, 진폭, 주파수성분 등을 고려하여 신중하게 이루어져야 한다. P파 및 S파 도달시간의 판독이후의 자료처리 과정은 매우 간편하게 이루어지는 바, 각 심도에서 측정된 도달시간 및 주행거리를 이용하여, 측정심도 간의 구간속도를 결정하게 된다. 최종적으로 산출되는 동적 물성치(동전단계수, 동탄성계수, 동체적계수)는 각 지층의 밀도 값과 다운홀시험에서 측정한 P파 및 S파 속도를 이용하여 다음 식에 의해 계산된다.

· 동전단계수 ; $Gd = \rho \cdot V_s^2$

· 동탄성계수 ; $Ed = 2Gd \cdot (1 + \nu)$

· 동체적계수 ; $Kd = Ed / 3(1 - 2\nu)$

여기서, 산정식을 적용하기 위해서는 지층에 대한 P파 속도(Vp) 및 S파 속도(Vs)와 함께 기본 물성치로 지층의 밀도 값에 해당하는 단위중량(γ)이 필요하게 된다. 본 조사에서는 지층의 밀도를 파악할 수 있는 실험을 실시하지 못하여 문헌에 제시된 일반적인 지층의 밀도 값을 적용하였으며, 문헌에 제시된 값은 [표 3.4.9]와 같다.

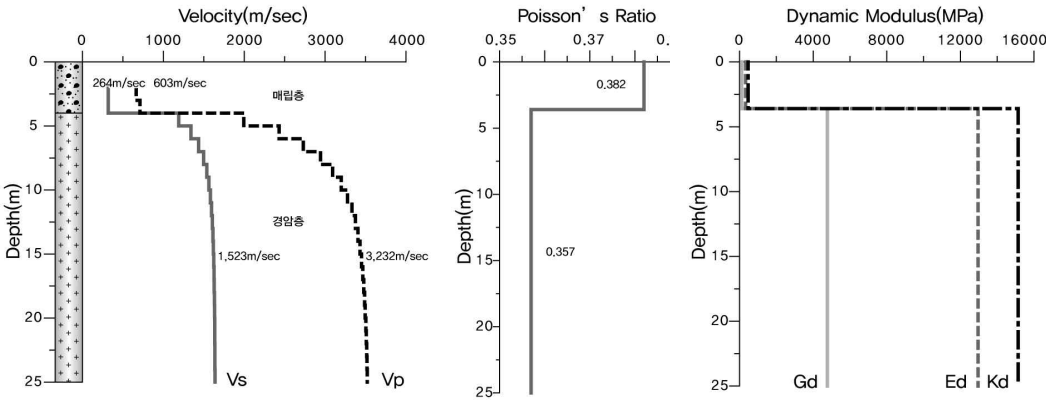
[표 3.4.9] 암석 및 토양의 일반적인 밀도

암 석		토 양		
종 류	단위중량(tf/㎥)	종류	상 태	단위중량(tf/㎥)
화강암	2.63~2.67	자갈	밀실한 것, 입도가 좋은 것	2.0
섬록암	3.02~3.03		밀실치 않은 것, 입도가 나쁜 것	1.8
반려암	3.02~3.05	모래 섞인 자갈	밀실한 것	2.1
휘록암	2.99~3.04		밀실치 않은 것	1.9
안산암	2.37	모래	밀실한 것 입도가 좋은 것	2.0
현무암	2.82		밀실치 않은 것, 입도가 나쁜 것	1.8
편 암	2.68~2.7	사질토	밀실한 것	1.9
사 암	2.28~2.66		밀실치 않은 것	1.7
혈 암	2.63~2.67	점성토	굳은 것(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감)	1.8
응회암	1.6~2.76		약간 무른 것	1.7
석회암	2.48~2.71		무른 것(손가락으로 눌러 쉽게 들어감)	1.7
대리석	2.71~2.76	점토 및 실트	굳은 것(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감)	1.7
백악암	2.83~2.87		약간 무른 것	1.6
Birch, 1966 (미국, 캐나다)			무른 것(손가락으로 눌러 쉽게 들어감)	1.4
		한국도로공사, 1992, “도로설계요령 제2권 토공 및 배수”		

토층에 있어서의 P파 속도는 함수상태가 가장 큰 변화의 요인이 된다. 예를 들어 P파의 파장이 토립자와 같은 정도의 크기를 가지는 경우에는 인접하는 토립자 사이에 서로 다른 움직임을 나타내며 물 또한 그 간섭을 받아 진동하게 되고 간극수가 토립자에 대해 상대적으로 다른 운동을 일으키는 작용을 한다. 그렇지 않은 경우는 토립자와 간극수가 동시에 운동하기 때문에 양자의 상대변위는 일어나지 않는다. 다시 말하면 비배수상태에서 변형이 일어나는 것이 되어 토립자의 변형에 큰 제약이 가해지는 것이 된다. 이것은 물의 압축성이 흙의 압축성에 작기 때문에 나타나는 현상이다. 간극이 물로 포화된 토층에서의 P파 속도는 실제의 속도보다 큰 물의 속도에 근접하여 나타나게 된다. 한편 S파 속도는 함수상태에 의해 증감의 영향을

받지 않으므로 지반의 특성을 좀더 정확하게 나타낸다고 알려져 있다. 지층의 전단파속도는 일반적으로 지반을 구성하는 입자의 크기에 따라 영향을 받으므로 자갈층이 가장 큰 값을 가지며, 지반상태가 조밀할수록 큰 값을 보인다. 이처럼 P파 속도는 함수량에 지배되므로 지반의 강도를 명확히 표현하지 못하는 경우가 많으나 이에 비해 S파 속도는 지반의 강도를 잘 반영한다고 볼 수 있다.

연구지역 시추공 3개소(SD-1, SD-3, SD-5)에서 수행한 다운홀시험결과 [그림 3.4.80]에서 [그림 3.4.82]에 걸쳐 나타내었다. 먼저 시추조사결과 SD-1 시추공은 매립층(대입경 조립재료)이 3.6m까지 분포하고 있으며, 그 하부는 응회암의 기반암으로 경암층에 해당한다. 매립층의 평균 전단파속도는 264m/sec이며, 평균 압축파 속도는 603m/sec이다. 매립층 하부 경암층의 평균 전단파속도는 1,523m/sec이며, 평균 압축파 속도는 3,232m/sec로 나타났다.



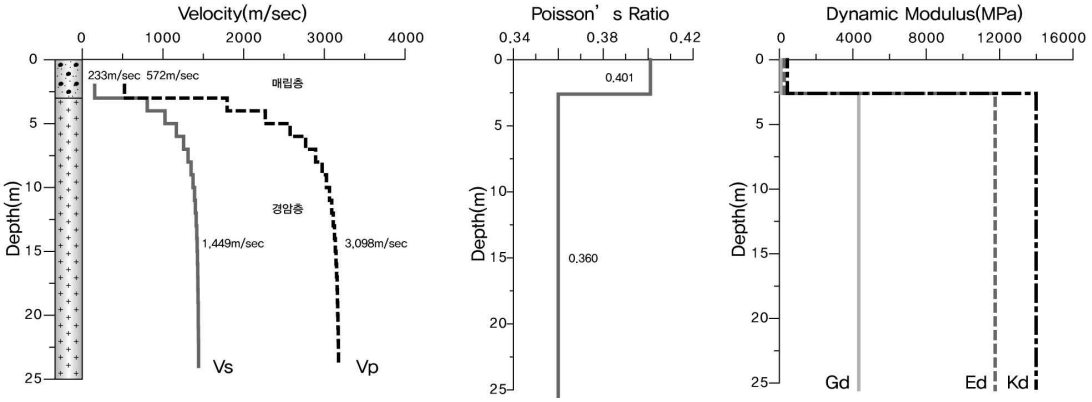
(a) 탄성파 속도(m/sec) (b) 포아송비 (c) 동적물성치(MPa)

[그림 3.4.80] SD-1, 다운홀시험 결과

[표 3.4.10] SD-1, 다운홀시험 결과

지층	심도 (m)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	포아송비	전단계수 (MPa)	영률 (MPa)	체적탄성률 (MPa)
매립층	0.0~3.6	603	264	0.382	120	331	467
경암층	3.6~25.8	3,232	1,523	0.357	4,774	12,959	15,140

SD-2 시추공은 매립층(대입경 조립재료)이 2.6m까지 분포하고 있으며, 그 하부는 응회암의 기반암으로 경암층에 해당한다. 매립층의 평균 전단파속도는 233m/sec이며, 평균 압축파 속도는 572m/sec이다. 매립층 하부 경암층의 평균 전단파속도는 1,449m/sec, 평균 압축파 속도는 3,098m/sec이다.



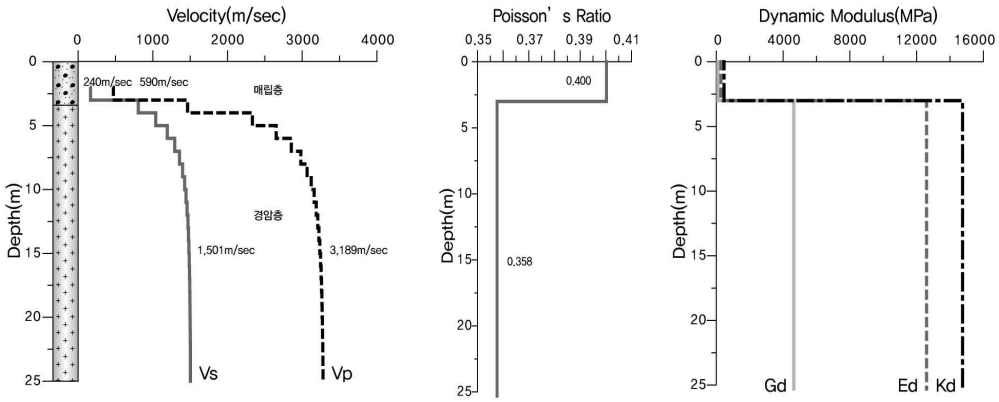
(a) 탄성파 속도(m/sec) (b) 포아송비 (c) 동적물성치(MPa)

[그림 3.4.81] SD-3, 다운홀시험 결과

[표 3.4.11] SD-3 다운홀시험 결과

지층	심도 (m)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	포아송비	전단계수 (MPa)	영률 (MPa)	체적탄성률 (MPa)
매립층	0.0~2.6	572	233	0.401	93	262	439
경암층	2.6~25.5	3,098	1,449	0.360	4,323	11,759	13,993

SD-3 시추공은 매립층(대입경 조립재료)이 3.0m까지 분포하고 있으며, 그 하부는 응회암의 기반암으로 경암층에 해당한다. 매립층의 평균 전단파속도는 240m/sec이며, 평균 압축파 속도는 590m/sec이다. 매립층 하부 경암층의 평균 전단파속도는 1,501m/sec이며, 평균 압축파 속도는 3,189m/sec이다.



(a) 탄성파 속도(m/sec) (b) 포아송비 (c) 동적물성치(MPa)

[그림 3.4.82] SD-5, 다운홀시험 결과

[표 3.4.12] SD-5, 다운홀시험 결과

지층	심도 (m)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	포아송비	전단계수 (MPa)	영률 (MPa)	체적탄성률 (MPa)
매립층	0.0~3.0	590	240	0.400	99	279	466
경암층	3.0~25.3	3,189	1,501	0.358	4,640	12,600	14,755

성덕댐 건설현장 하류지역에서 이루어진 다운홀시험 결과 해당지역 매립층(대입경 조립재료)의 전단파속도는 232~287m/sec로 분포한다. 각 시추공 다운홀시험 결과 전단파의 속도가 차이나는 것은 육안 인식을 통한 초동 추정을 이용하였기 때문인데 육안 인식 방법은 압축파의 영향 및 근접장 효과로 인하여 정확한 추정이 어렵고 그 기준이 모호하므로 해석자의 주관적 판단에 따라 결과가 달라지며 이로 인해 전단파의 속도가 차이를 보이는 것으로 판단된다. 또한 초동의 발췌에 있어 초동신호의 극대점 또는 교차점을 이용하게 되는데 파형이 왜곡된 어느 특정 심도에서 큰 오차를 유발할 수 있다. 특히 교차점을 이용한 초동 발췌 방법은 측정 심도가 깊어질수록 획득 파형의 주파수 대역이 저주파로 이동하므로 도달시간 정보가 실제보다 과대평가되기도 한다.

나. Site B(호남고속철도 건설현장)

Site B 지역은 2012년 8월 호남고속철도 건설현장 00공구이며, 해당 연구지역은 원지반 상부 고속철도 노선에 대입경 조립재료를 이용하여 성토를 한 지역이다. 본 현장에서 원지반 및 대입경 조립재료를 이용한 성토층의 지층상태 및 전단파속도 파악하기 위하여 물리탐사 및 시추조사를 수행하였다. 호남고속철도 건설현장에서 적용된 조사방법으로는 S파 수진기를 이용한 S파 반사법 탄성파탐사 1측선, 시추조사 1공, 다운홀시험 1회를 수행하였다.

(1) S파 반사법 탄성파탐사

2012년 8월 호남고속철도 건설현장에서 성토층(대입경 조립재료)과 연구지역 원지반의 경계를 파악하기 위하여 S파 반사법 탄성파탐사를 수행하였으며, 탐사측선은 [그림 3.4.83]과 같이 나타내었다.



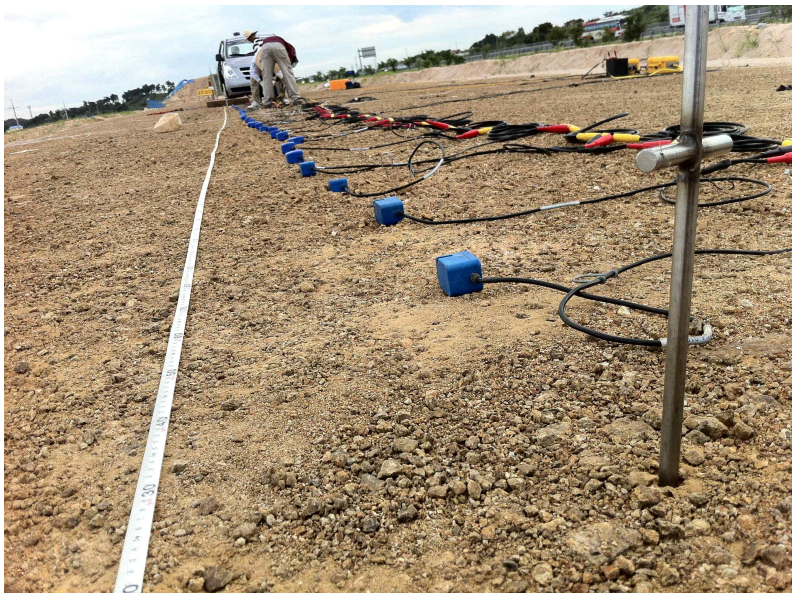
[그림 3.4.83] 호남고속철도 건설현장 물리탐사 및 시추조사

반사법탐사 측선의 전체 전개 길이는 14.6m이고, 수진기 간격은 0.4m로 설정하여 48채널을 운영하였다. 일반적으로 수진기 간격과 오프셋(offset)은 동일하게 설정하여 탐사설계를 하지만 본 조사에서는 가탐심도를 늘이기 위하여 오프셋을 0.8m로 설정하였다. 송신원으로 5.0kg 슬러지 햄머를 사용하였고, 송신점은 0.4m 간격마다 타격하여 총 61번 이동하였으며, 25번의 송신점 이동으로 총 1,200개에 해당하는 트레이스를 획득하였다. 또한 각 송신점마다 자료의 신호대잡음비를 높이기 위하여 5~10회에 걸쳐 자료를 중첩하였다. 샘플링 간격 0.125ms, 샘플링 개수는 4,096으로

기록시간은 0.512초가 된다. 현장자료취득 변수는 [표 3.4.13]과 같이 정리하였다
.

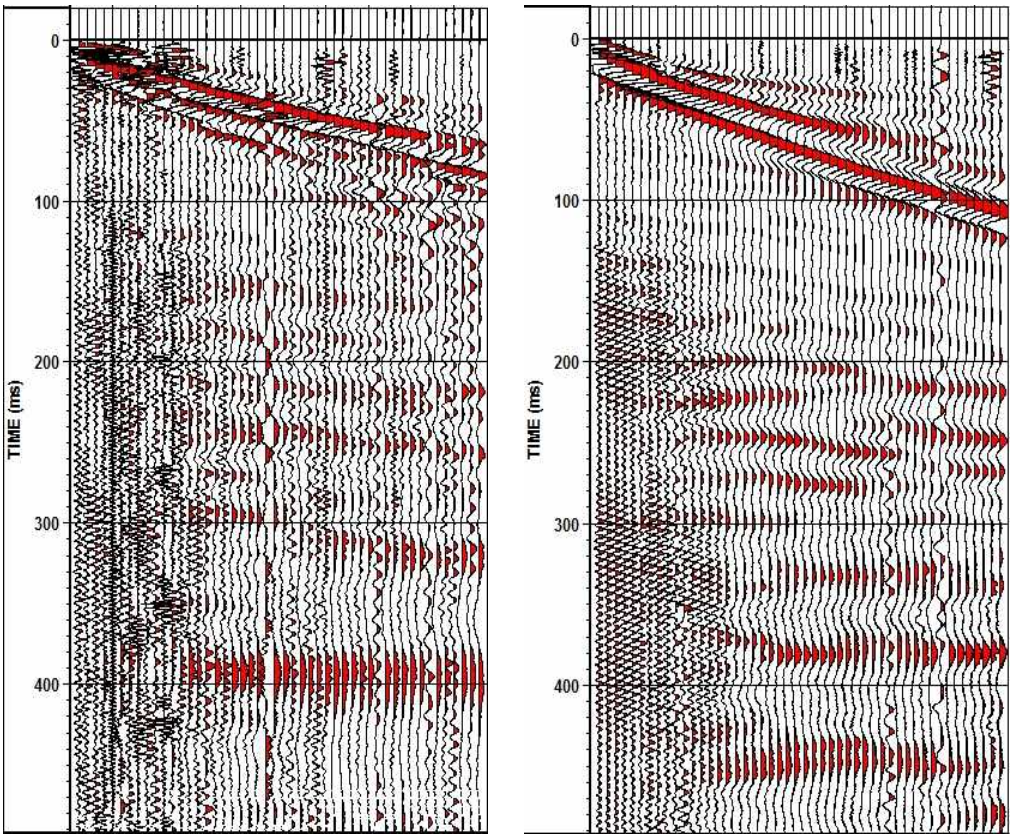
[표 3.4.13] Parameters of field data acquisition

연구지역	호남고속철도 성토지반
탐사측선	Line1
송신원	5kg 슬러지 햄머
수진기 수, 측선 전개길이	48 channel, 19.2m
수진기 간격, Group interval	0.4m, 0.2m
오프셋(offset), 송신점 이동간격	0.8m, 0.4m
샘플링 간격(sampling interval) 및 개수	0.125ms, 4,096
기록시간(record length)	0.512sec



[그림 3.4.84] S파 수진기를 이용한 측선 전개

본 연구지역에서 사용된 4.5Hz S파 수진기를 사용하여 송신 파형을 비교하여 보았다. 비교 방법은 타격판을 수직으로 타격하여 발생시킨 P파와 타격판의 측면을 타격하여 발생시킨 S파가 수진기를 통해 기록되는 파형을 비교하는 것이다. 타격방법에 따라 기록된 파형은 [그림 3.4.85]와 같이 나타내었다.

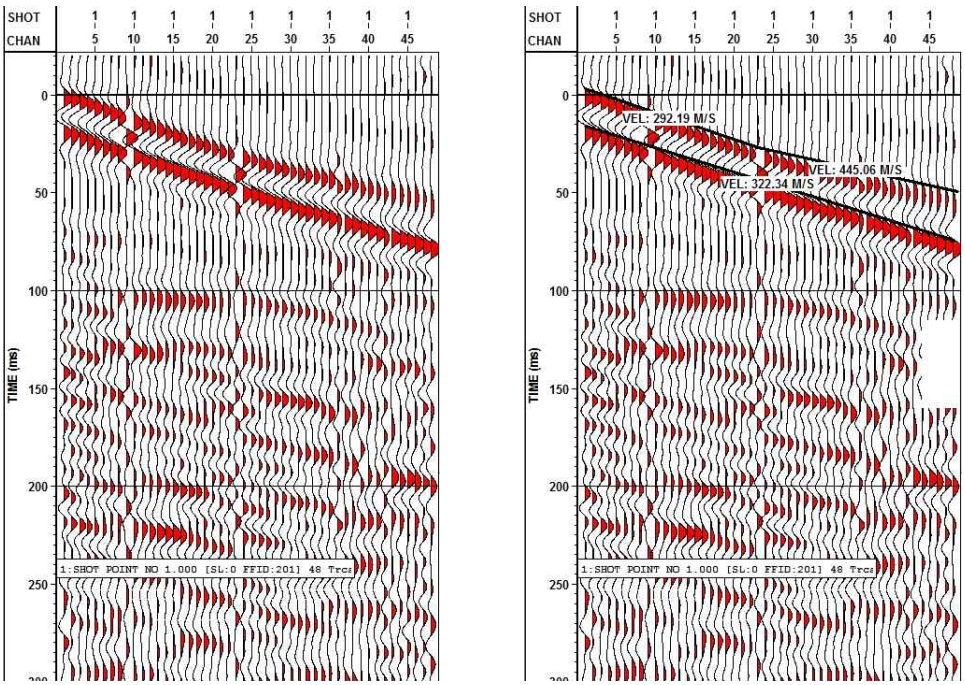


(a) 수직타격에 의한 P파 발생 (b) 측면타격에 의한 S파 발생

[그림 3.4.85] 송신원의 타격 방법에 따른 기록 파형비교

타격 방법에 따라 기록된 자료를 살펴보면 P파를 발생했을 경우보다 S파를 발생했을 때의 자료가 훨씬 양호한 것을 볼 수 있을 것이다. 반면에 P파를 발생시켰을 경우 또한 탄성파의 신호가 기록되고 있지만 주변 잡음이 많이 포함된 것을 확인할 수 있다.

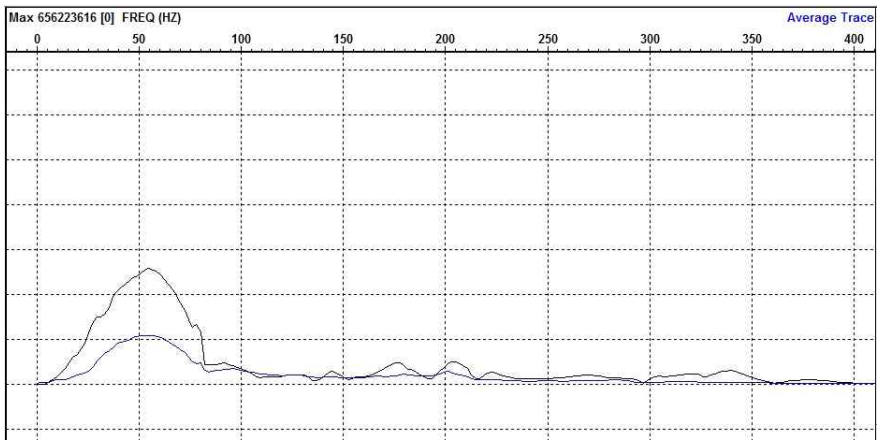
Site B 연구지역에서 획득한 자료를 살펴보면 직접파와 공기파, 레일리파 및 굴절파를 관찰할 수 있으나 천부 반사파는 뚜렷한 구분을 가지며 나타나지 않는 것으로 보인다. 현장 기록자료는 약 320m/sec 내외의 속도를 갖는 공기파가 뚜렷이 관찰되고 있다[그림 3.4.86]. 기반암의 반사면으로부터 시작되는 굴절파의 존재는 확인되나 반사면의 존재는 두드러지지 않는다. 확인된 굴절파의 속도를 살펴보면 상부 매립층의 경우 속도는 약 292.2m/sec이며, 그 하부층의 속도는 약 445.1m/sec로 나타난다. 교차거리는 약 9.2m인 것을 감안할 때 1층의 대략적인 두께는 약 2.1m로 계산된다.



(a) rawdata (b) 초동발췌

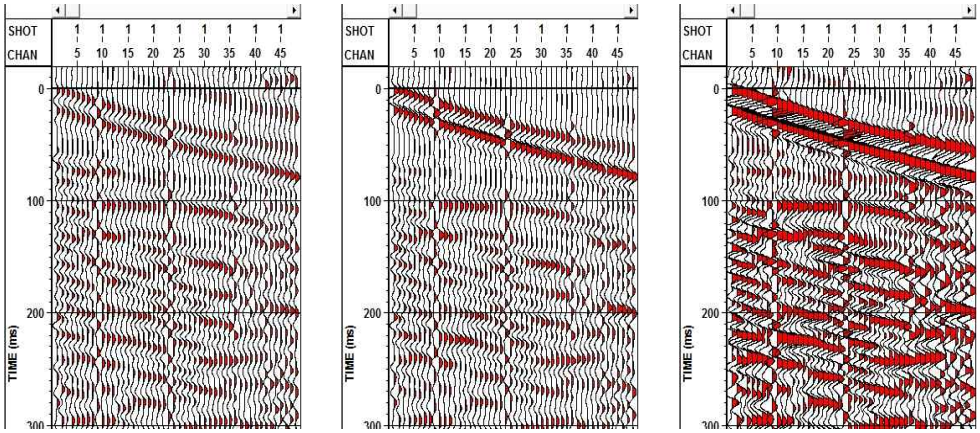
[그림 3.4.86] 현장 취득자료

기록된 자료의 진폭 스펙트럼을 살펴보면 약 50Hz 대역에서 중심주파수가 형성되는데, 이는 햄머를 송신원으로 사용하였을 때 확인할 수 있는 전형적인 주파수 대역이다[그림 3.4.87].



[그림 3.4.87] 기록된 자료의 진폭 스펙트럼

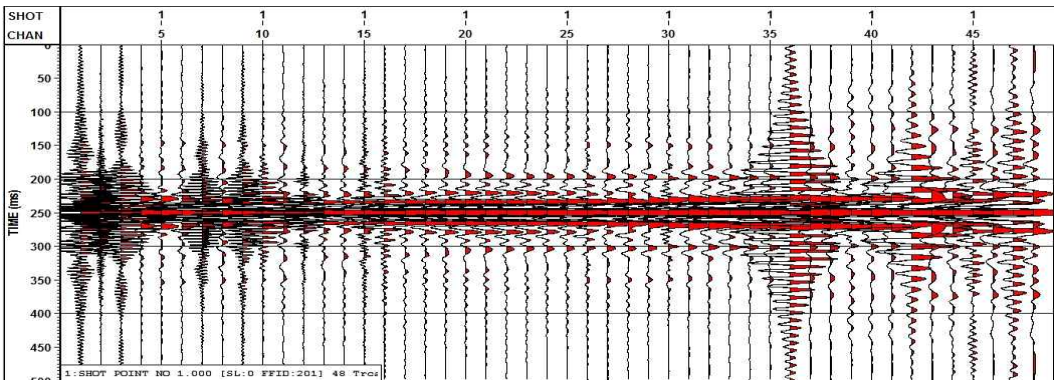
반사법 탄성파탐사 자료처리에 관한 기술은 이미 설명되었기에 생략하기로 하겠다. 본 연구지역 획득자료에 대하여 자동이득보정을 적용하였으며, 시간변수 및 예상 반사파의 시간 관계를 고려하여 자동이득보정 길이 값을 100ms로 설정하였다 [그림 3.4.88].



(a) Window length : 50ms (b) Window length : 100ms (c) Window length : 150ms

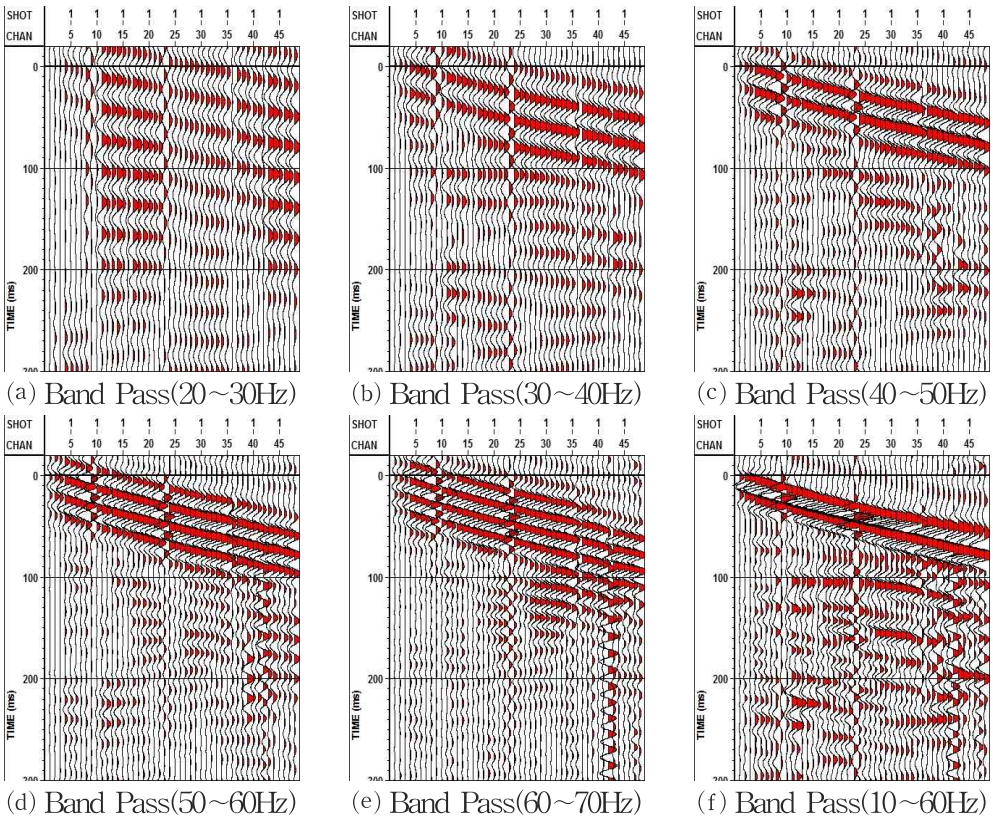
[그림 3.4.88] 자동이득보정(AGC)

어떤 함수를 자신에 대하여 상관을 실시하는 경우를 자기상관(auto correlation)이라고 하는데, 자기상관을 계산할 때에는 상호상관의 경우와는 달리 이동 방향에 무관하기 때문에 자기상관 함수는 변위량이 “0”에서 최대치를 갖는다. 자기상관 특성은 탄성파 탐사 자료처리에서 다중 반사파의 판별이나 그 주기를 파악하는데 유용하다. 연구지역에서 획득한 자료에 대한 자기상관을 [그림 3.4.89]과 같이 나타내었다.



[그림 3.4.89] Site B 현장 자료의 자기상관도(auto correlation)

연구지역에서 획득한 자료에 대하여 주파수 대역별로 필터링을 실시한 결과는 [그림 3.4.90]에 비교하여 나타내었다. 결과 중 (a) Band Pass(20~30Hz)의 경우를 살펴보면 f1=15, f2=20, f3=30, f4=35의 값을 적용하여 필터링을 실시하였다. 20~30Hz 사이의 저주파수 대역은 감쇠 없이 통과시키며, 15~20Hz, 30~35Hz 사이는 선형으로 변환된다. 본 조사에서 대역필터를 적용해 본 결과 10~60Hz에 해당하는 주파수 대역을 최적의 값으로 판단하였으며, 그 결과는 [그림 3.4.90] (f)와 같다.

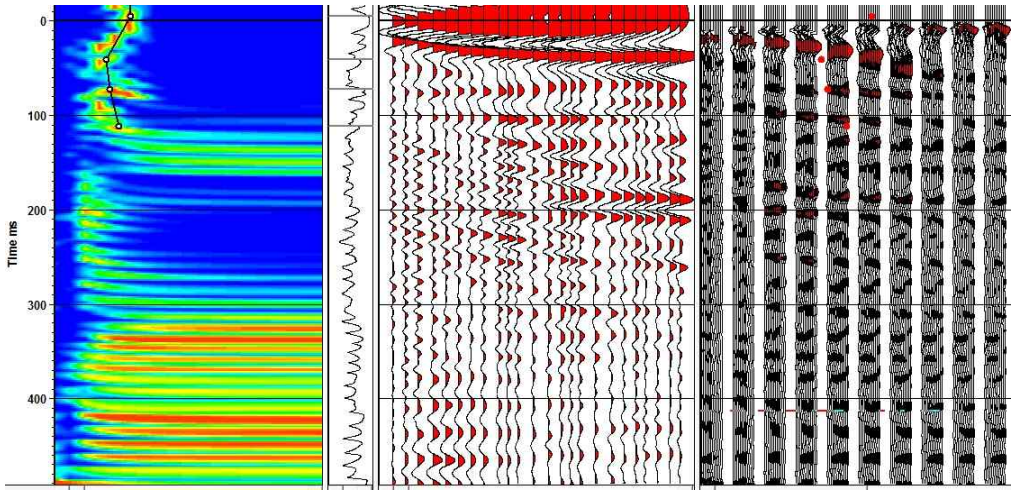


(a) Band Pass(20~30Hz) (b) Band Pass(30~40Hz) (c) Band Pass(40~50Hz)

(d) Band Pass(50~60Hz) (e) Band Pass(60~70Hz) (f) Band Pass(10~60Hz)

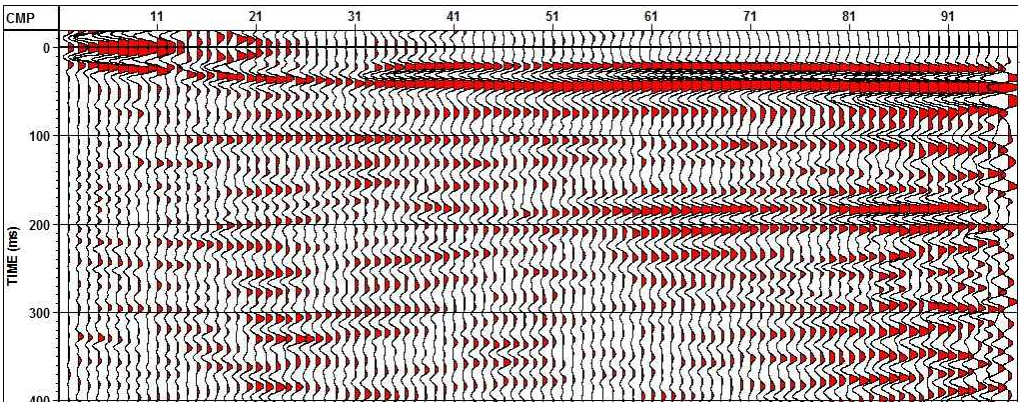
[그림 3.4.90] 주파수 대역별 필터 테스트

컴퓨터를 이용한 속도분석 방법은 여러 가지가 개발되어 있으나 계산 결과로부터 적절한 속도를 결정하기 위해서는 인위적인 판단이 요구된다. 전처리 과정을 완료한 자료를 이용하여 속도분석을 수행한 결과는 [그림 3.4.91]과 같다.



[그림 3.4.91] 자료의 속도분석. 좌로부터 속도 semblance, NMO 보정, 상속도별 NMO 중합

일련의 반사법 자료처리 과정을 거친 후 공통 중간점 모음에 대한 속도분석을 실시하여 NMO 보정을 하였다. NMO 보정 후 공통 중간점 모음(CMP)을 중합(stack)하여 최종적으로 [그림 3.4.92]의 중합단면을 얻었다.



[그림 3.4.92] 호남고속철도 현장 S파 반사법 중합단면

해당 연구지역 자료의 속도분석에서 반사면에 해당하는 속도를 발췌하기가 매우 어려웠는데 첫 번째 반사면의 경계를 구분하기 어렵다. 본 조사지역에서 S파 반사법을 시도하였으나 성토층과 원지반과의 경계 구분은 힘들었다. 이는 성토 재료의 입경의 크기가 조밀하며 작고, 원지반과의 임피던스(밀도×속도) 차이가 그리 많지 않은 것에서 기인한 것으로 판단된다.

(2) 시추조사

· 시추공, NS-1

- 매립층

매립층은 G.L(-) 0.0~9.5m에 걸쳐 분포하며, 담황색 내지 담회색의 모래섞인 자갈로 구성되어 있다. 통일분류 상 분급이 좋지 않은 자갈(GP)에 해당하며, 채취된 자갈의 입도는 5~60mm이다.

- 풍화토층

풍화토층은 G.L(-) 9.5~18.0m에 분포하며 황갈색의 실트질 모래이다. 함수비는 습윤하며 매우조밀한 입도 분포를 보이고 있다.

- 풍화암층

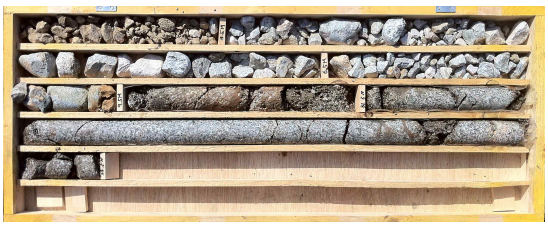
풍화암층은 G.L(-) 18.0~31.5m에 분포하며 암회색의 색조를 띄는 화강암의 풍화암이다. 풍화정도는 완전 풍화내지 심한 풍화이며, 굴진시 실트질 모래로 분해된다. 심도 31.1~31.5m 구간에서 코아 형태의 시료가 회수되었다.

- 경암층

경암층은 G.L(-) 31.5~33.5m에 분포하며 담회색의 색조를 띄는 반상화강암이다. 풍화정도는 약간 풍화이고 강도는 보통강함, 보통균열의 형태를 보이고 있다. 회수된 코아의 TCR(%)은 73, RQD(%) 36으로 비교적 양호한 암반으로 판단된다.



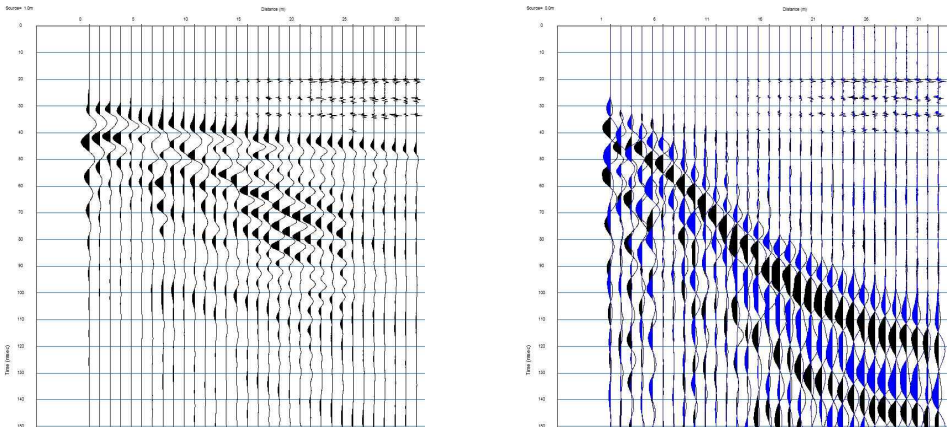
(a) 작업전경



(b) 회수된 시추코아(NS-1)

[그림 3.4.93] 시추조사

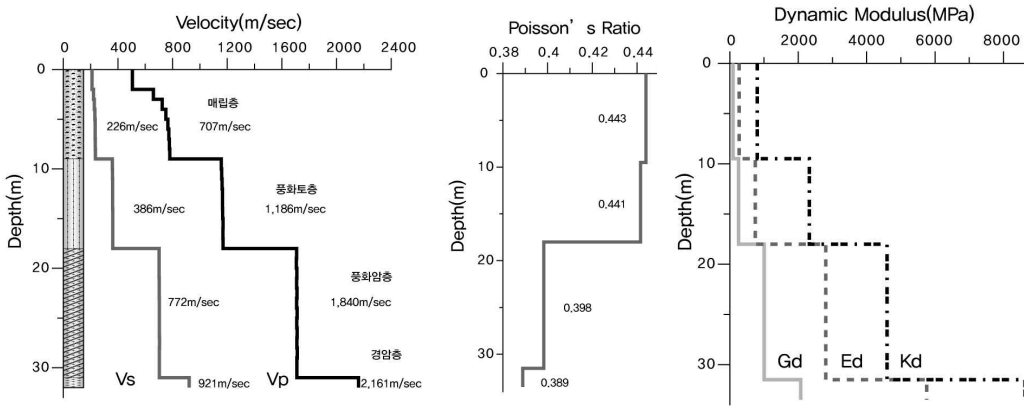
(3) 다운홀시험



(a) P-wave (b) S-wave(S_H 및 S_V 성분 중첩)

[그림 3.4.94] 호남고속철도 다운홀시험 기록파형

연구지역 시추공에서 수행한 다운홀시험 결과를 [그림 3.4.95]에 나타내었으며, 지층별 산출된 동적물성치는 [표 3.4.14]에 정리하였다.



(a) 탄성파 속도(m/sec) (b) 포아송비 (c) 동적물성치(MPa)

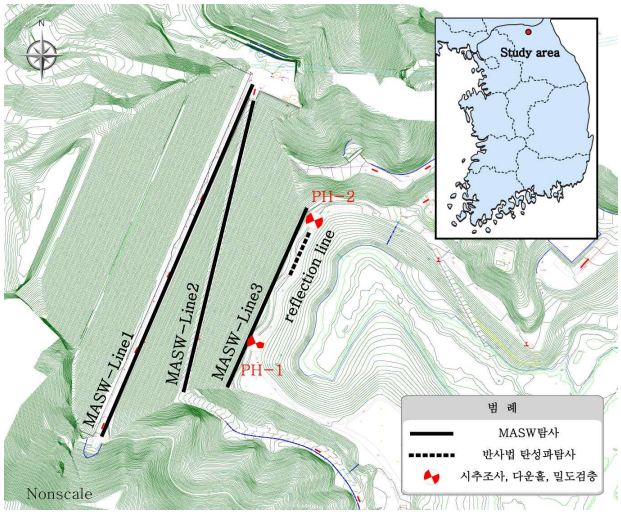
[그림 3.4.95] NS-1, 다운홀시험 결과

[표 3.4.14] NS-1, 다운홀시험 결과

지층	심도 (m)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	포아송비	전단계수 (MPa)	영률 (MPa)	체적탄성률 (MPa)
매립층	0.0~9.5	707	226	0.443	91	262	767
풍화토	9.5~18.0	1,186	386	0.441	294	846	2,374
풍화암	18.0~31.5	1,840	772	0.393	1,211,	3,374	5,257
경암	31.5~33.5	2,161	921	0.389	2,072	5,755	8,633

다. Site C(평화의댐 현장)

2012년 7월 강원도 화천군 화천읍 동촌리 일대 평화의댐 현장에서 제체 및 매립층(대입경 조립재료)의 지층상태 및 전단파속도 파악을 위하여 MASW탐사 3측선, 반사법 탄성파탐사 1측선, 시추조사, 다운홀 및 밀도검층 각 3개소에서 조사를 수행하였다. 조사위치는 [그림 3.4.96]과 같다.



[그림 3.4.96] Site C, 평화의댐 현장 조사위치도

Site C(평화의댐)에서 이루어진 조사 항목은 [표 3.4.15]와 같이 정리하였다.

[표 3.4.15] Site C지역(평화의댐) 물리탐사 및 시추조사 조사현황

구분	측선명	측선연장(m)	수진기간격(m)	탐사수행위치
MASW탐사	MASW-Line1	510.0	1.0	댐마루
	MASW-Line2	420.0	1.0	댐비탈면 도로
	MASW-Line3	300.0	1.0	댐하단
반사법탄성파탐사	reflection line	15.0	1.0	댐하단

구분	시추공번	다운홀시험 측정심도(m)	밀도검층 측정심도(m)
시추조사 및 물리검층	PH-1(시추심도 49.5m)	1.0~49.0	2.75~47.7
	PH-2(시추심도 32.0m)	1.0~32.0	2.75~29.9

(1) MASW탐사

표면파의 전파특성을 이용하여 지표에서 측정된 표면파로부터 지반의 전단파속도를 도출하게 되는데 평화의댐 연구지역 Site C에서 수행한 MASW탐사는 본댐마루 아스팔트 도로상에서 1측선, 댐비탈면 경사도로를 따라 1측선, 댐하류 하단 대입경 조립재료를 이용한 성토지역에서 1측선, 총 3측선의 MASW탐사를 수행하였다.

먼저 연구지역 평화의댐 댐마루 지역에서 수행한 결과를 살펴보겠다. 댐마루 지역에서 수행한 MASW-Line1은 수진기간격 1.0m, offset 3.0m, sampling No. 4,096개, sampling interval 0.125ms로 설정하였으며 자료기록 시간은 0.512sec이다. 송신원으로는 5.0km 슬러지햄머를 사용하였고, 한 번의 자료측정 후 측점 간격을 30.0m 씩 이동하여 조사를 수행하였다. MASW-Line1 측선전개는 [그림 3.4.97]과 같다.

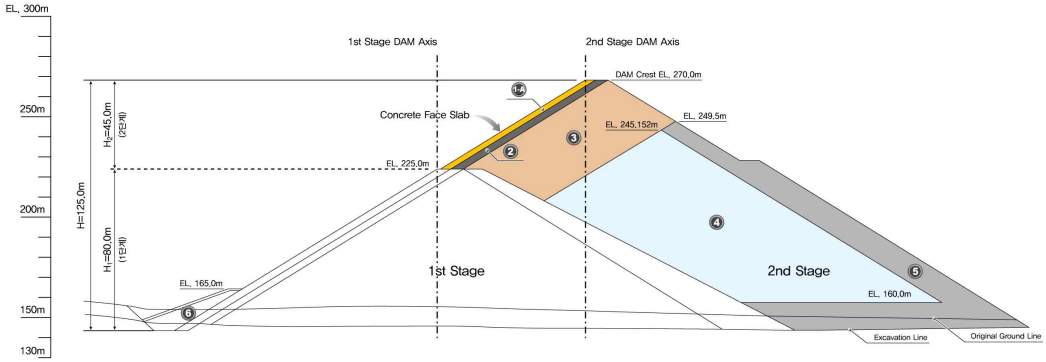


[그림 3.4.97] 평화의댐 댐마루 MASW-Line1 측선전개

측정된 자료를 이용하여 각 측점별 분산곡선을 작성하였으며, 작성된 분산곡선을 이용해 심도별 전단파속도를 획득하였다.

평화의댐은 사력댐으로 [그림 3.4.98]과 같이 구열별로 나뉜다. 평화의댐 제체단면도를 살펴보면 본댐은 2단계(1st stage, 2nd stage)에 걸쳐 시공되었으며, 각 구역은 25~1,800mm에 해당하는 쇄석재 및 굴착토사, 풍화토재로 구성되어 있다. 평화의댐

각 구역별 구성 물질에 대한 정리는 [표 3.4.16]과 같이 정리하였다.

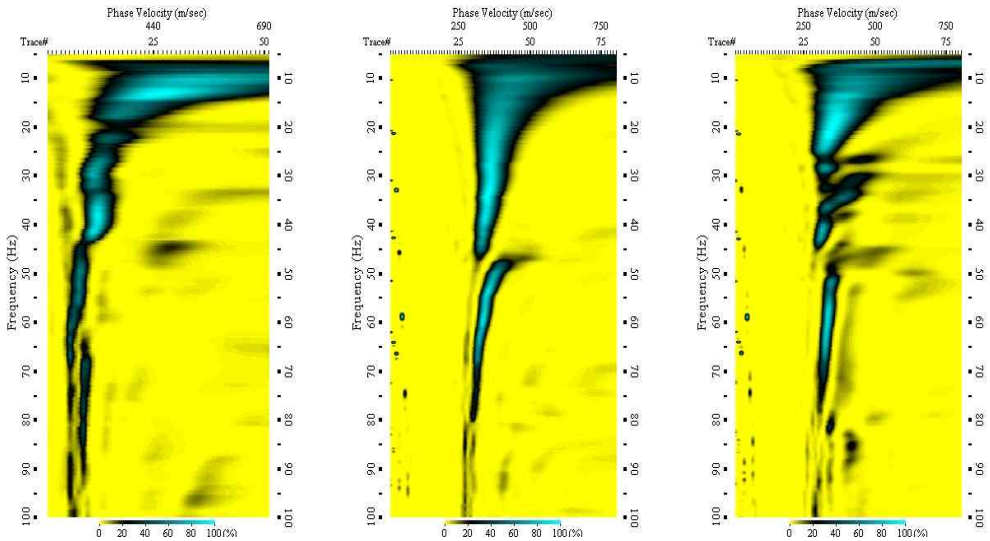


[그림 3.4.98] 평화의댐 제체단면도

[표 3.4.16] 평화의댐 제체 구역별 구성재료의 특성

구 분		성토재 및 골재 최대크기	포설방법	
			1단계 시공	2단계 시공
			두께(m)	두께(m)
Zone 1-A	Face slab bedding	75mm, 쇄석재	0.3	0.4
Zone 2	Transition/Filter	150mm, 쇄석재	0.4	0.4
Zone 3	Graded Rockfill	800mm(20~50%), 25mm	0.8	1.0
Zone 4	Rockfill	1,500mm(50%), 25mm	1.6	1.6
Zone 5	Oversize rockfill	1,800mm, 쇄석재	2.0	2.0
Zone 6	Upstream blanket	굴착토사 풍화토재	-	0.3

평화의댐 댐마루에서 이루어진 MASW탐사를 통해 얻은 분산곡선을 [그림 3.4.99]과 같이 나타내었다. 측점 0.0m의 분산곡선을 살펴보면 70~90Hz, 측점 150.0m의 경우는 50~80Hz 주파수 대역에서 higher mode가 발생하고 있으며, 측점 510.0m의 경우 1차 higher mode는 50~80Hz, 2차 higher mode는 25~45Hz 주파수대역에서 발생하고 있다.

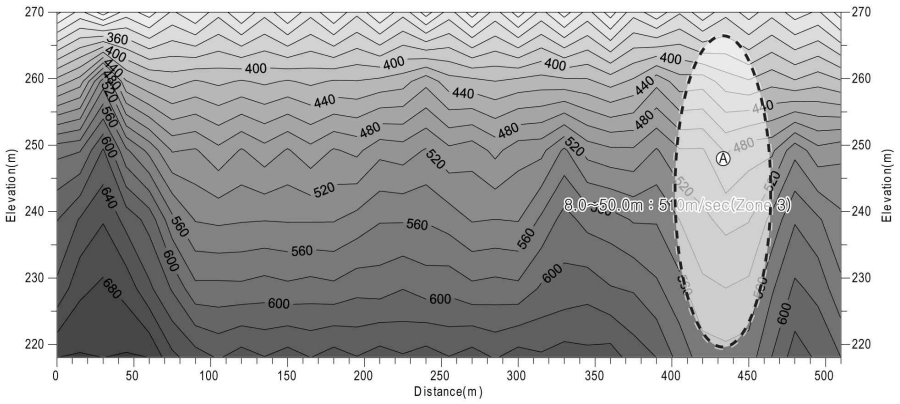


(a) 측점 0.0m (b) 측점 150.0m (c) 측점 510.0m

[그림 3.4.99] 평화의댐 댐마루 MASW-Line1 위상속도 분산곡선

각 측점별 간격은 30.0m로 0.0~510.0m에 해당하는 구간에서 MASW탐사가 이루어졌다. 측점별 획득한 1차원 전단파속도 주상도를 바탕으로 [그림 3.4.100]과 같이 2차원 전단파속도 주상도를 작성하였다. 전단파속도는 측선 하부 50.0m까지 획득하였고 결과단면 상부 심도 약 1.5m까지 평균 305m/sec의 전단파속도를 보이고 있다.

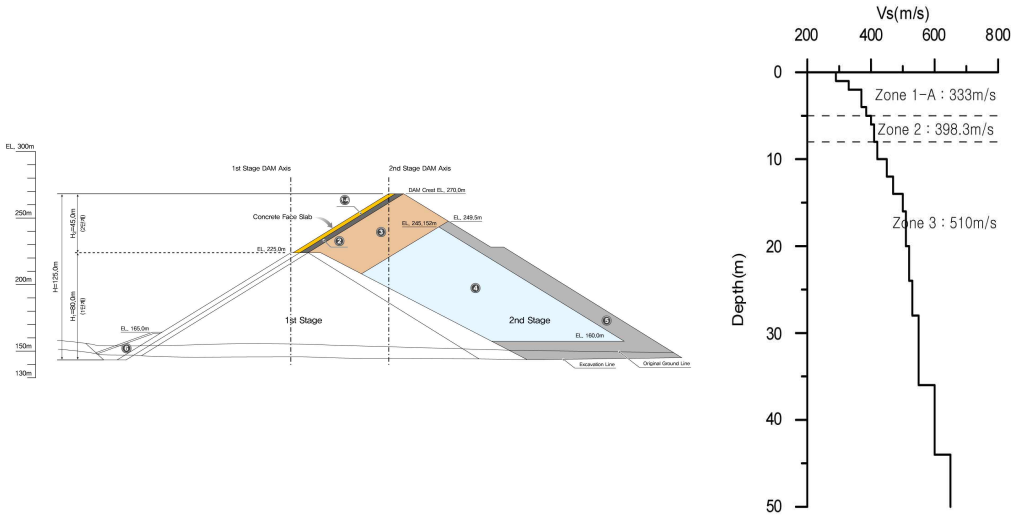
SW방향 NE방향



[그림 3.4.100] MASW-Line1 2차원 전단파속도 단면도

댐마루 지역 전단파속도 결과단면 남서쪽으로 갈수록 전단파속도가 증가하는 것으로 보아 rock zone의 깊이가 얕아지고 기반암이 얕은 심도에 존재할 것으로 예상된다. 또한 단면상 A영역(Dist. 400~470m 구간) 하부에서 속도 이상대가 관찰되는 것이 특징이다.

댐마루 MASW탐사 측선 중앙지점의 속도주상도를 [그림 3.4.101] (b)와 같이 나타내었다. 심도 0.0~5.0m까지는 제체 단면도상 zone 1-A, zone2, zone 3에 해당한다. zone 1-A 구간의 평균 전단파속도는 333m/sec이다. zone 2에 해당하는 구간은 심도 5.0~8.0m 구간이며 zone 2 영역의 전단파속도는 398.4m/sec이며, zone 3은 심도 8.0~50.0m 구간으로 해당 구역의 전단파속도는 510m/sec를 보이고 있다.



(a) 평화의댐 단면도 (b) 속도주상도

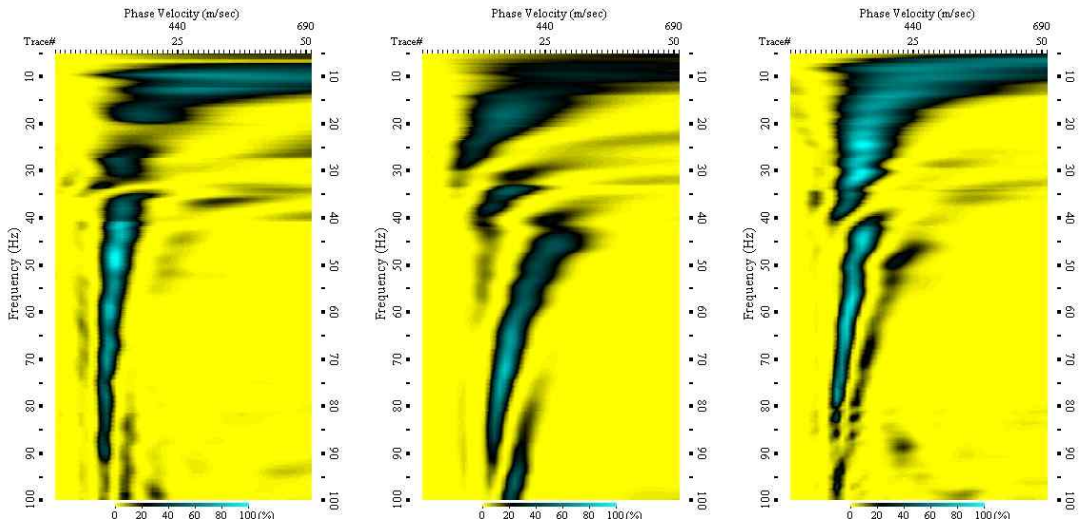
[그림 3.4.101] MASW-Line1 측선 중앙 제체 구역별 전단파속도 분포

다음으로 평화의댐 아스팔트 포장도로에서 수행한 MASW-Line2를 살펴보겠다. 수진기간격 1.0m, offset 3.0m, sampling No. 4,096개, sampling interval 0.125ms로 설정하였으며 자료기록 시간은 0.512sec로 MASW-Line1 측선과 동일하다. 송신원으로는 5.0km 슬러지햄머를 사용하였고, 한 번의 자료측정 후 측점 간격을 30.0m씩 이동하여 0~420m 구간에 걸쳐 조사를 수행하였다. 측정된 자료를 이용하여 각 측점별 분산곡선을 작성하였으며, 작성된 분산곡선을 이용해 심도별 전단파속도를 획득하였다. MASW-Line2 측선은 제체단면도에서 zone 4, zone 5에 해당하며, 측선 전개 및 탐사전경은 [그림 3.4.102]와 같다.



[그림 3.4.102] 평화의댐 댐마루 MASW-Line2 측선전개

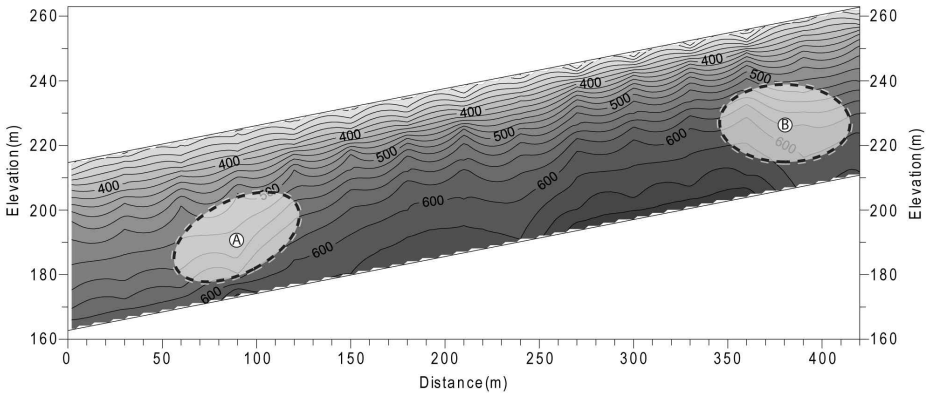
평화의댐 비탈면에서 이루어진 MASW-Line2 측선 수행결과 획득한 분산곡선을 [그림 3.4.103]과 같이 나타내었다. 측점 210.0m의 경우는 30~60Hz, 40~90Hz, 90~100Hz 대역에서 higher mode가 발생하고 있다. 측점 420.0m의 경우 40~85Hz 대역과 45~100Hz 대역에서 고차모드가 발생하고 있다.



(a) 측점 0.0m (b) 측점 210.0m (c) 측점 420.0m

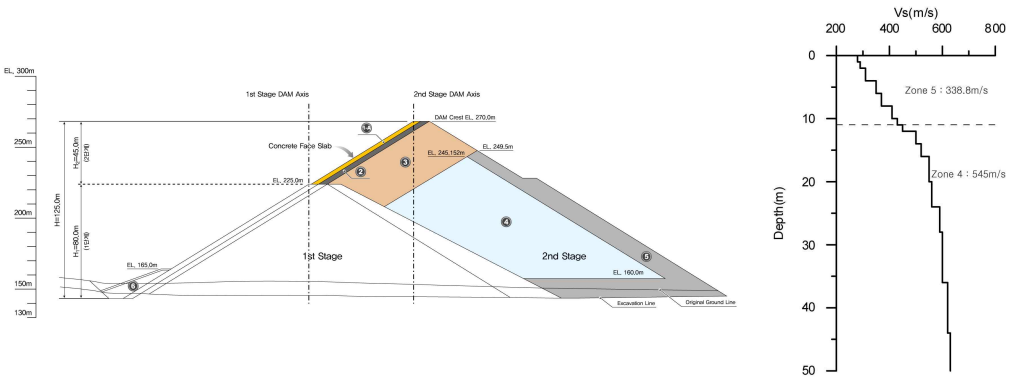
[그림 3.4.103] 평화의댐 댐비탈면 MASW-Line2 위상속도 분산곡선

각 측점별 간격은 30.0m로 0.0~420.0m에 해당하는 구간에서 MASW탐사가 이루어졌다. 측점별 획득한 1차원 전단파속도 주상도를 바탕으로 [그림 3.4.104]와 같이 2차원 전단파속도 주상도를 작성하였다. 전단파속도는 측선 하부 50.0m까지 획득하였고 결과단면 상부 심도 약 1.5m까지 평균 290m/sec의 전단파속도를 보이고 있다. 심도 약 40.0m까지 수평층서적인 속도구조를 나타내며, A영역(Dist. 60~120m 구간)과 B영역(Dist. 350~410m 구간)에서 속도이상대가 관찰되고 있다.



[그림 3.4.104] MASW-Line2 2차원 전단파속도 단면도

댐비탈면 MASW탐사 측선 중앙지점의 속도주상도를 [그림 3.4.105] (b)와 같이 나타내었다. 심도 0.0~5.0m까지는 제체 단면도상 zone 4, zone 5에 해당한다. zone 4에 해당하는 구간은 단면상 심도 0.0~11.0m 이며, 평균 전단파속도는 338.8m/sec 이다. zone 5에 해당하는 영역은 심도 11.0~5.0m 구간이며 zone 5 영역의 전단파속도는 545m/sec를 보이고 있다.



(a) 평화의댐 단면도 (b) 속도주상도

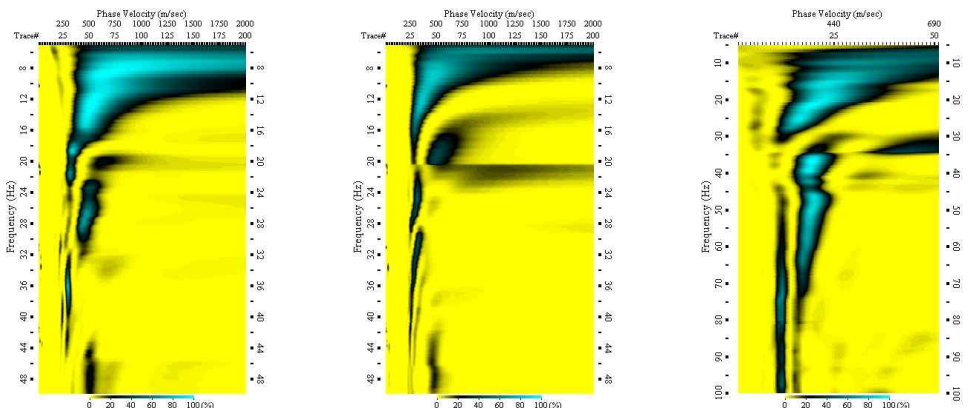
[그림 3.4.105] MASW-Line2 측선 중앙 제체 구역별 전단파속도 분포

평화의댐 하단부 비포장 도로에서 수행한 MASW-Line3를 살펴보겠다. 탐사 변수 및 조사 방법은 MASW-Line1, Line2와 동일하며 조사가 이루어진 지역은 대입경 조립재료를 이용하여 매립 및 성토가 이루어진 지역이다. 측정된 자료를 이용하여 각 측점별 분산곡선을 작성하였으며, 작성된 분산곡선을 이용해 심도별 전단파속도를 획득하였다. MASW-Line3 측선은 제체단면도에서 zone 5에 해당하며, 측선 전개 및 탐사전경은 [그림 3.4.106]과 같다.



[그림 3.4.106] 평화의댐 댐하단 MASW-Line3 측선전개

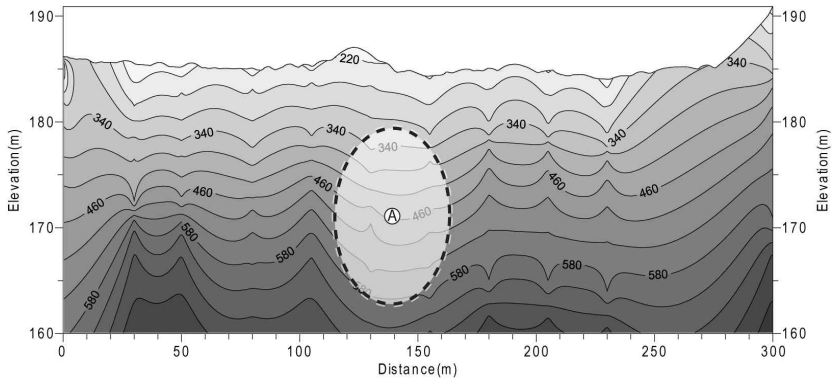
평화의댐 하단부에서 이루어진 MASW-Line3 측선 수행결과 획득한 분산곡선을 [그림 3.4.107]과 같이 나타내었다. 측점 0.0m의 경우는 20~30Hz, 44~48Hz 대역에서 고차모드가 발생하고 있으며, 측점 280.0m의 경우 30~90Hz 대역에서 강한 고차모드가 발생하고 있다.



(a) 측점 0.0m (b) 측점 130.0m (c) 측점 280.0m

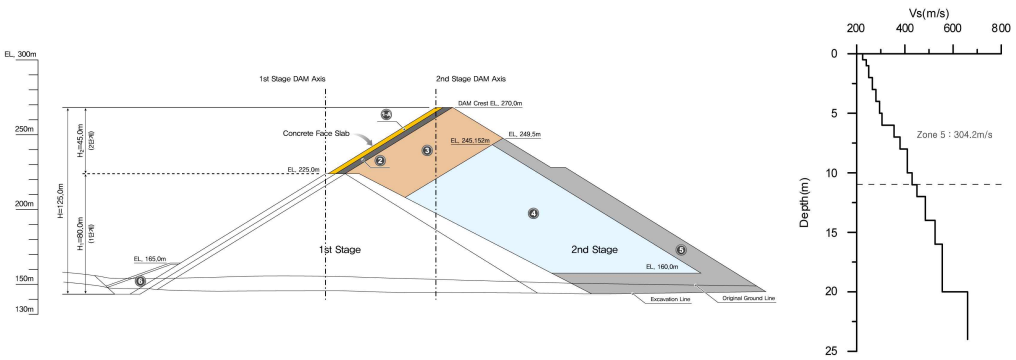
[그림 3.4.107] 평화의댐 하단부 MASW-Line3 위상속도 분산곡선

각 측점별 간격은 30.0~50.0m로 0.0~300.0m에 해당하는 구간에서 MASW탐사가 이루어졌다. 측점별 획득한 1차원 전단파속도 주상도를 바탕으로 [그림 3.4.108]과 같이 2차원 전단파속도 주상도를 작성하였다. 전단파속도는 220~700m/sec의 분포를 보이고 있다. 기반암의 예상 출현심도(전단파속도 약 400m/sec 이상)는 10.0m 전후로 예상되나 본댐 사력부의 영향으로 속도 증대의 가능성이 있는 것으로 판단된다. 결과 단면상 A영역(Dist. 120~160m 구간)에서 속도이상대가 관찰된다.



[그림 3.4.108] MASW-Line3 2차원 전단파속도 단면도

댐하부 MASW탐사 측선 중앙지점의 속도주상도를 [그림 3.4.109] (b)와 같이 나타내었다. 심도 0.0~11.0m까지는 제체 단면도상 zone 5에 해당한다. zone 5 영역의 평균 전단파속도는 304.2m/sec를 나타내고 있다.



(a) 평화의댐 단면도 (b) 속도주상도

[그림 3.4.109] MASW-Line3 측선 중앙 제체 구역별 전단파속도 분포

기존 국내 댐의 내진성능평가를 수행할 경우, 합리적이고 경제적인 물성치 산정에 있어 많은 어려움이 있었다. 특히 댐체의 경우 지반조건 및 제체의 안정성을 위하

여 시추를 수행할 수 없는 경우가 많다. 그러므로 시추공을 이용하는 기존 현장 탄성파 시험 수행 및 현장 시료채취의 한계성으로 인한 실내시험의 수행이 쉽지 않아 동적물성을 가정하거나 외국문헌 등을 이용하여 해석하는 경우가 많고, 재료의 이질성, 거동특성의 비선형성 등으로 신뢰성이 높은 내진성능 평가 결과를 얻지 못하고 있는 실정이다. Sawada와 Takahashi(1975)는 일본에 위치한 3개댐에 대해 시추공을 이용하여 측정한 탄성파 속도와 댐 코어죤 중심에 깊이에 따라 설치된 지진계 관측기록을 분석하여 심벽부의 전단파속도를 제안하였으며, 5개 댐에 대해 탄성파 속도를 측정하여 사력재료의 전단파 속도를 제안하였다[표 3.4.17]. 현재 국내에서는 많은 경우 사력댐의 동적물성치를 획득하기 위하여 Sawada의 경험식을 이용하고 있다. 그러나 이 제안식은 일본에 위치한 95m 이상의 매우 높은 댐을 대상으로 시험하였으며 지진계를 이용하여 획득한 중간변형률 영역의 결과가 포함되어 있고, 상·하한 값이나 사력재의 포화정도에 따라 차이가 크므로 해석시 주관적인 판단이 들어 갈 수 있다. 따라서 신뢰성 있는 내진 성능평가를 위해서는 현장 탄성파시험을 통해서 각 부분의 정확한 전단파속도를 획득해야 하며, 동반논문에서 나타낸 바와 같이 댐의 심벽부 및 사력부 구성 재료에 대한 정규화 전단탄성계수 감소곡선(G/Gmax-logy) 및 감쇠비 및 감쇠비 곡선(D-logy) 등의 비선형 동적물성치를 경제적이고 합리적으로 평가해야 한다(김종태 외, 2009).

Sawada와 Takahashi(1975)는 시추공 탄성파탐사를 수행하여 측정한 전단파속도와 심도를 이용하여 다음과 같은 관계식을 제안했는데 제시한 경험식은 다음과 같다. 여기서 a는 해당지역 전단파속도의 최소값, b는 포아송비를 의미한다.

$$V_S = aZ^b \qquad \text{[식 3.4.1]}$$

[표 3.4.17] 사력댐에서의 전단파속도 제안식(Sawada와 Takahashi, 1975)

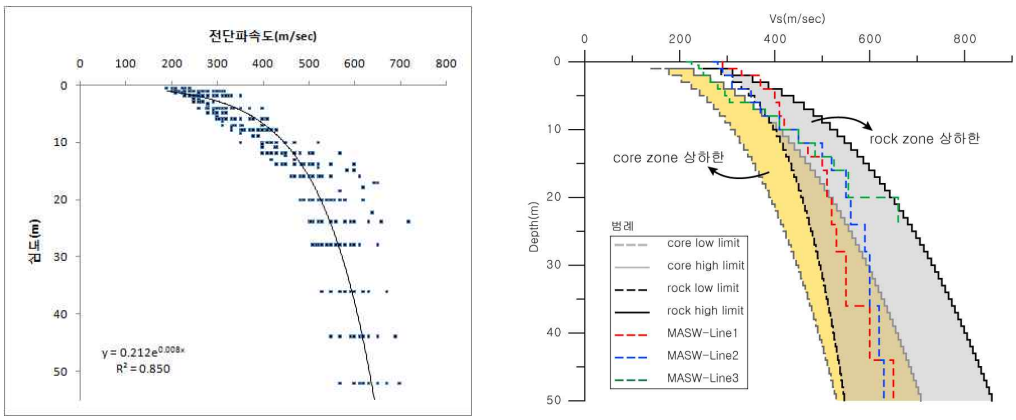
위치(zone) / 심도(m)	rock		core	
	불포화(unsaturated)	포화(saturated)	상한	하한
0~5	Vs=245 m/sec		Vs=210 m/sec	
5~30	$Vs=250Z^{0.2}$	$Vs=250Z^{0.2}$	$Vs=180Z^{0.35}$	$Vs=140Z^{0.34}$
30 이상	$Vs=200Z^{0.315}$			
포아송비(ν)	$\nu=0.375-0.006Z^{0.58}$	$\nu=0.49-0.001Z^{0.95}$	$\nu=0.45-0.006Z^{0.6}$	

또한 국내 7개 사력댐에 대한 동적물성 추정에 관한 있었는데 국내 7개 댐에 적용된 경험식의 상수 값 분포는 [표 3.4.18]과 같다. 국내 7개 지역 경험식의 평균 상수 값은 a는 209.2이며, b는 0.222이다.

[표 3.4.18] 국내 7개 사력댐에 적용된 경험식의 상수 값 분포(이종욱 외, 2008)

구 분	a, 각 지역 전단파속도 최소값	b, 포아송비	상관계수(r^2)
임하댐	236.47	0.2103	0.6213
주암댐	177.74	0.2785	0.7661
주암조절지댐	180.6	0.2354	0.6206
대청댐	199.07	0.2518	0.7709
사연댐	237.49	0.1918	0.4650
영천댐	198.76	0.2084	0.7715
수어댐	234.42	0.175	0.4807

평화의댐 현장의 경우 심도에 따른 전단파속도 분포는 [그림 3.4.110]과 같이 나타나며, 해당지역의 경험식에 적용할 상수값 a는 212, b는 0.008이며, 상관정도는 0.85로 나타나고 있다. 연구지역의 전단파속도는 최소 180m/sec에서 최대 720m/sec의 분포를 보인다.



(a) 심도별 전단파속도 상관성 분석 (b) 심도별 전단파 속도 분포

[그림 3.4.110] 평화의댐 연구지역 심도별 전단파속도 분포

(2) 반사법 탄성파탐사

2012년 7월 평화의댐 하단부에서 매립층(대입경 조립재료)과 연구지역 원지반의 경계를 파악하기 위하여 반사법 탄성파탐사를 수행하였으며, 반사법탐사 측선의 전체 전개 길이는 22.0m이고, 수진기 간격은 1.0m로 설정하여 24채널을 운영하였다. 일반적으로 수진기 간격과 오프셋(offset)은 동일하게 설정하여 탐사설계를 하지만 본 조사에서는 가탐심도를 늘이기 위하여 오프셋을 3.0m로 설정하였다. 송신원으로 5.0kg 슬러지 햄머를 사용하였고, 송신점은 1.0m 간격마다 타격하여 총 23번 이동하였으며, 평화의댐 현장 반사법 탄성파탐사 자료취득 및 탐사전경은 [그림 3.4.111]과 같다.



(a) 현장 자료취득 (b) 햄머 타격에 의한 송신

[그림 3.4.111] 평화의댐 반사법탄성파탐사 자료취득 및 탐사전경

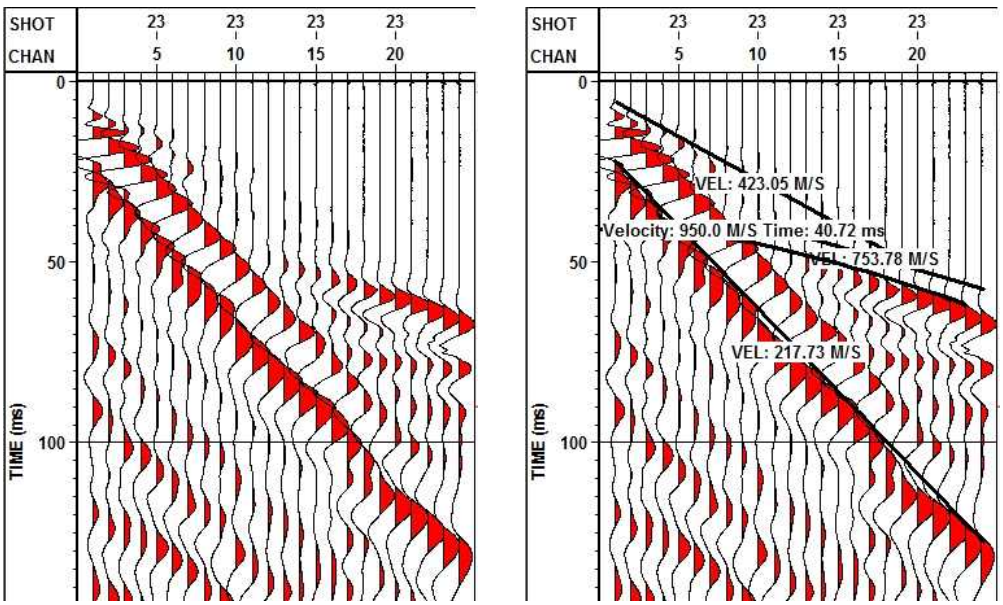
평화의댐 반사법 탄성파탐사는 23번의 송신점 이동으로 총 552개에 해당하는 트레이스를 획득하였다. 각 송신점마다 자료의 신호대잡음비를 높이기 위하여 5~10회에 걸쳐 자료를 중첩하였다. 샘플링 간격 0.125ms, 샘플링 개수는 4,096으로 기록시간은 0.512초가 된다. 자료취득변수는 [표 3.4.19]와 같이 정리하였다.

육상 반사법 탄성파탐사는 송신원에 기인하는 일관성 잡음, 불규칙한 지형 등에 의하여 신호 크기는 미약하고 왜곡되는 경우가 대부분이다. 이러한 일반적인 사실과 함께 연구지역에서 획득한 자료를 살펴보면 직접파, 굴절파, 공기파, 레일리파 등에 의한 간섭으로 인해 천부 반사파는 뚜렷한 구분을 가지며 나타나지 않는다.

[표 3.4.19] Parameters of field data acquisition

연구지역	호남고속철도 성토지반
탐사측선	reflection line
송신원	5kg 슬러지 햄머
수진기 수, 측선 전개길이	24 channel, 22.0m
수진기 간격, Group interval	1.0m, 0.5m
오프셋(offset), 송신점 이동간격	3.0m, 1.0m
샘플링 간격(sampling interval) 및 개수	0.125ms, 4,096
기록시간(record length)	0.512sec

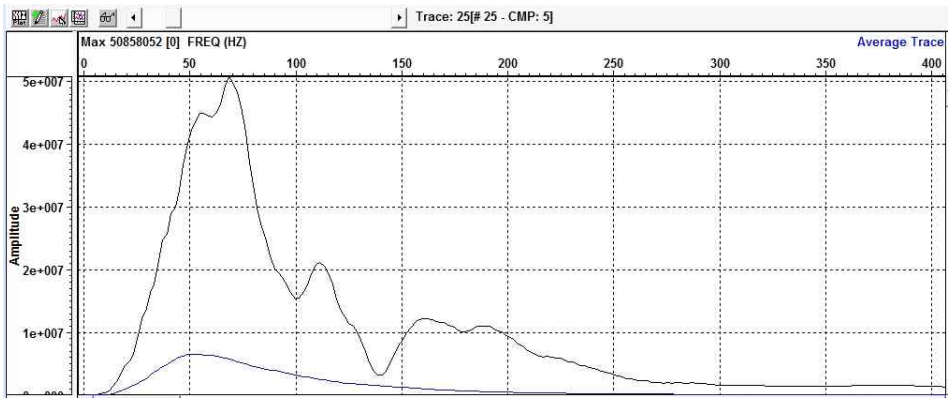
현장 기록자료의 특징으로는 약 220m/sec 내외의 속도를 갖는 레일리파가 가장 큰 파장을 가지고 관찰되고 있다[그림 3.4.112]. 기반암의 반사면으로부터 시작되는 굴절파의 존재는 확인되나 설치된 측선의 길이가 짧아 뚜렷하지는 않는다. 확인된 굴절파의 속도를 살펴보면 상부 매립층의 경우 속도는 약 423m/sec이며, 그 하부는 약 753.8m/sec로 나타난다. 기록된 자료의 40.7ms 부근에서 경계면의 반사파로 보이는 신호를 관찰할 수 있는데 반사면의 속도는 950m/sec로 나타난다.



(a) rawdata (b) 초동발췌

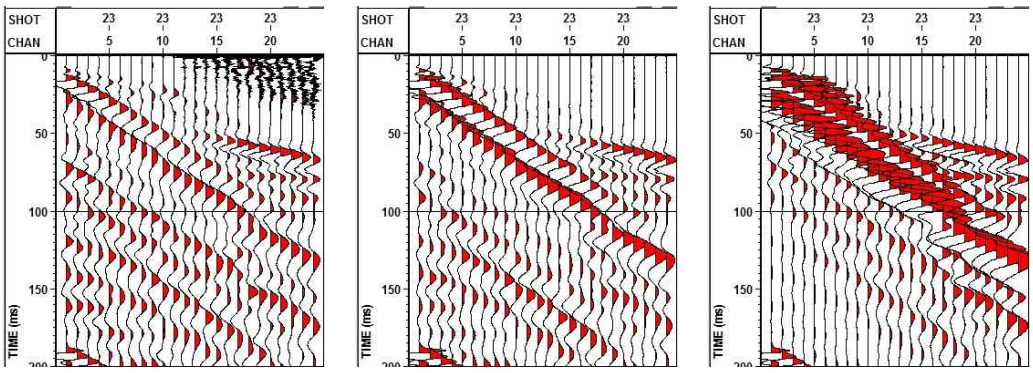
[그림 3.4.112] 평화의댐 현장 취득자료

기록된 자료의 진폭 스펙트럼을 살펴보면 약 50~60Hz 대역에서 중심주파수가 형성되고 있으며, 기록된 자료의 진폭 스펙트럼은 [그림 3.4.113]과 같다.



[그림 3.4.113] 기록된 자료의 진폭 스펙트럼

반사파와 같은 경우는 심도가 깊어질수록 신호의 감쇠가 심하게 나타나기 때문에 이득보정은 필수적이라고 할 수 있다. 본 조사에서도 자동이득보정을 적용하였으며, 시간변수 및 예상 반사파의 시간 관계를 고려하여 자동이득보정 길이 값을 100ms로 설정하였다[그림 3.4.114].

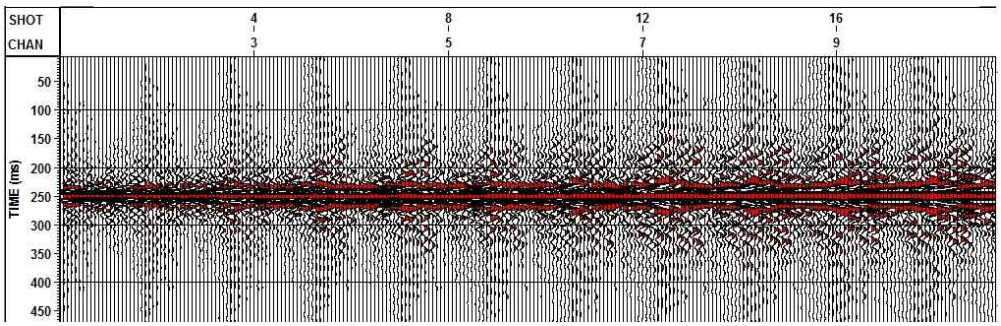


(a) Window length : 50ms (b) Window length : 100ms (c) Window length : 300ms

[그림 3.4.114] 자동이득보정(AGC)

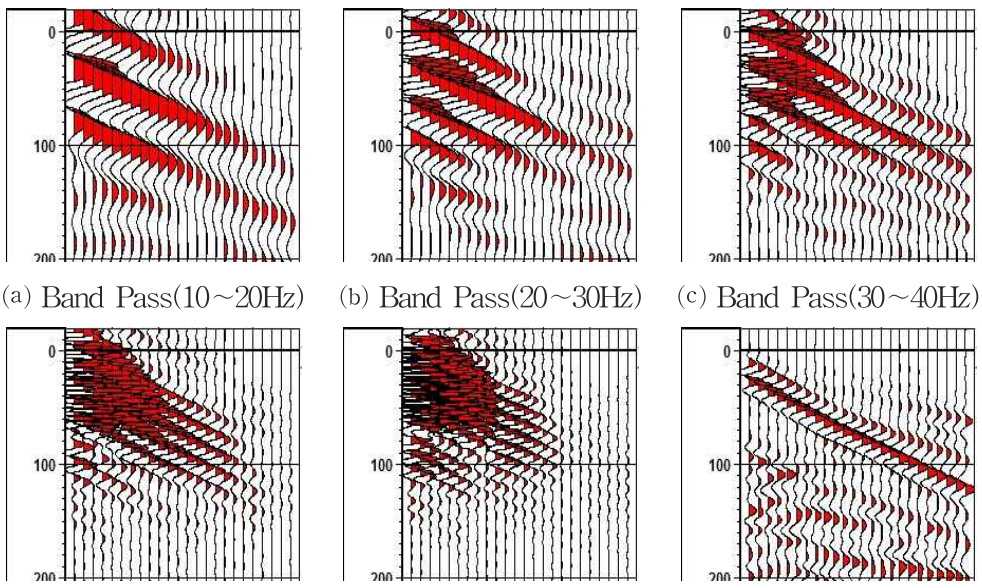
어떤 함수를 자신에 대하여 상관을 실시하는 경우를 자기상관(auto correlation)이라고 하는데, 자기상관을 계산할 때에는 상호상관의 경우와는 달리 이동 방향에 무관하기 때문에 자기상관 함수는 변위량이 “0”에서 최대치를 갖는다. 만일 어떤 시계열의 자기상관 계수 중 상당한 크기의 값을 나타내는 이차적인 극대치가 존재한다

면 이러한 신호가 특정한 시간간격을 두고 되풀이되어 나타남을 의미한다. 따라서 자기상관은 어떤 함수의 주기성을 측정하는 것으로 생각할 수 있다. 이런 특성은 탄성파 탐사 자료처리에서 다중 반사파의 판별이나 그 주기를 파악하는데 유용하다. 연구지역 획득한 자료에 대한 자기상관을 [그림 3.4.115]와 같이 나타내었다.



[그림 3.4.115] 자기상관도(auto correlation)

본 조사에서 대역필터를 적용해 본 결과 15~60Hz에 해당하는 주파수 대역을 최적의 값으로 판단하였으며, 그 결과는 [그림 3.4.116] (f)와 같다.



(a) Band Pass(10~20Hz) (b) Band Pass(20~30Hz) (c) Band Pass(30~40Hz)

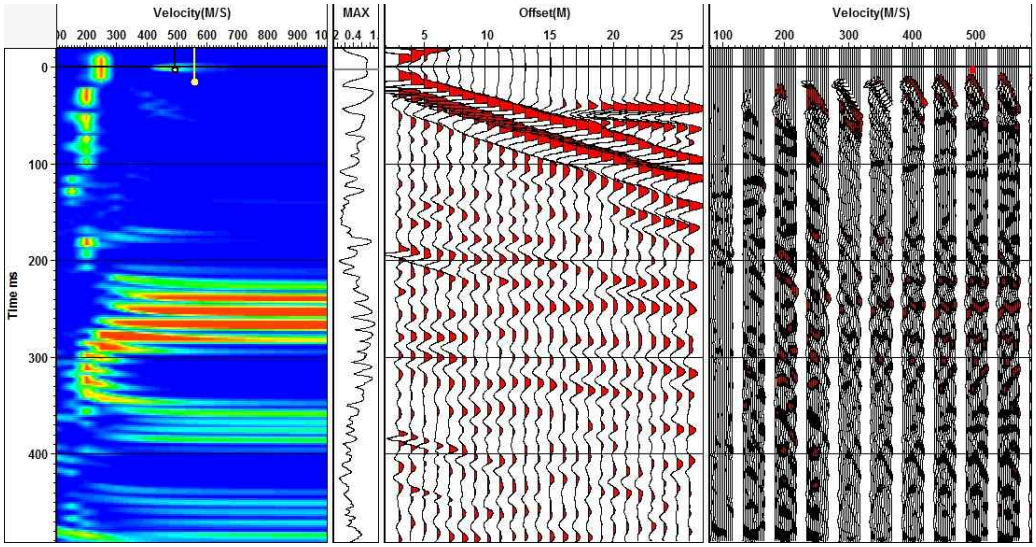
(d) Band Pass(60~70Hz) (e) Band Pass(80~90Hz) (f) Band Pass(15~60Hz)

[그림 3.4.116] 주파수 대역별 필터 테스트

탐사자료의 처리과정에서 속도에 대한 정보는 NMO 보정, 중합, 구조보정 등의 작업을 하는데 필수적이다. 속도분석에는 탐사측선 상의 일부 지점의 기록을 표본으로 선택하여 속도분석을 실시하게 되는데 여기서 이용되는 속도는 지층의 실제 속도가 아니고 단지 가장 우수한 중합 결과를 얻게 하는 반사신호의 정렬상태를 나타내는 변수이다.

상속도 중합 방법에는 하나의 상속도를 이용하여 공통 중간점 중합자료 전체에 대한 NMO 보정을 실시하여 반사신호가 가장 수평적으로 정열이 되는지를 검토한다. 이러한 방식으로 일련의 상속도를 적용한 결과를 검토하면 각 반사신호에 대하여 가장 적절한 중합속도를 결정할 수 있다.

컴퓨터를 이용한 속도분석 방법은 여러 가지가 개발되어 있으나 계산 결과로부터 적절한 속도를 결정하기 위해서는 인위적인 판단이 요구된다. 전처리 과정을 완료한 자료를 이용하여 속도분석을 수행한 결과는 [그림 3.4.117]과 같다.

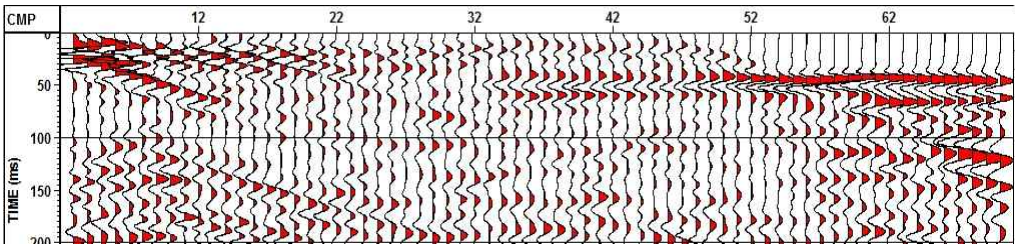


[그림 3.4.117] 자료의 속도분석. 좌로부터 속도 semblance, NMO 보정, 상속도별 NMO 중합

셈블런스(semblance) 분석결과 양방향 시간에 따른 속도 값은 3ms에서 495m/sec, 15ms에서 560m/sec, 27ms에서 650m/sec의 상속도 값을 적용하였으며, 속도분석에 적용된 상속도 값은 해당 시간에 대한 신호를 펴기 위한 속도 값이므로 이 속도 값을 해당 지층의 속도 값으로 오인해서는 안된다.

평화의댐에서 실시한 반사법탐사 자료를 일련의 반사법 자료처리 과정을 거친 후

공통 중간점 모음에 대한 속도분석을 실시하여 NMO 보정을 하였다. NMO 보정 후 공통 중간점 모음(CMP)을 중합(stack)하여 최종적으로 [그림 3.4.118]의 반사단면도을 얻었다.



[그림 3.4.118] 측선별 중합단면

획득한 반사 단면도를 살펴보면 수평적인 반사 신호로 나열된 결과이다. CDP 1에서 32번까지 상부 1층으로 보이는 반사면은 뚜렷하지 않으나 CDP 33번 이후부터 반사면으로 보이는 일련의 신호를 관찰할 수 있다. 그 시간대는 대략 47ms로 [그림 3.4.112]에서 반사파로 볼 수 있는 신호대의 속도가 950m/sec인 것을 감안하면 산술적으로 상부 1층의 두께를 22.3m로 계산할 수 있다. 평화의댐에서 반사법 탄성파탐사가 이루어진 측선에서 가장 가까운 시추공 PH-2번 조사결과 상부 제1층에 해당하는 매립층의 두께는 21.5m로 확인된다. 반사법 탄성파탐사의 계산된 두께와는 0.6m의 차이를 보인다.

(3) 시추조사 및 시추공영상촬영

· 시추공, PH-1

- 매립층

매립층은 G.L(-) 0.0~36.3m에 걸쳐 분포하며, 암갈색 내지 암회색의 모래섞인 자갈, 사석, 자갈섞인 실트질 모래로 구성되어 있다. 자갈층은 통일분류 상 분급이 좋지 않은 자갈(GP)에 해당한다. 채취된 자갈의 입도는 3~7mm 정도이며, 해당 시추공 심도 8.5~36.3m 구간 댐체 사석층이 경암 강도 수준의 코아형태로 채취되었다. 댐체 사석층의 입경은 100~1170mm로 분포하고 있다.

- 연암층

연암층은 G.L(-) 36.3~49.5m에 분포하며 암회색의 색조를 띄는 석류석 화강편마암이다. 풍화정도는 완전풍화 내지 약간풍화, 강도는 매우약함 내지 강함, 파쇄정도는 매우심한균열 내지 보통균열이다. 코아회수율(TCR)은 68~100%로 우수하며, 암

질지수(RQD)는 0~12%로 균열이 많은 상태를 보여준다.

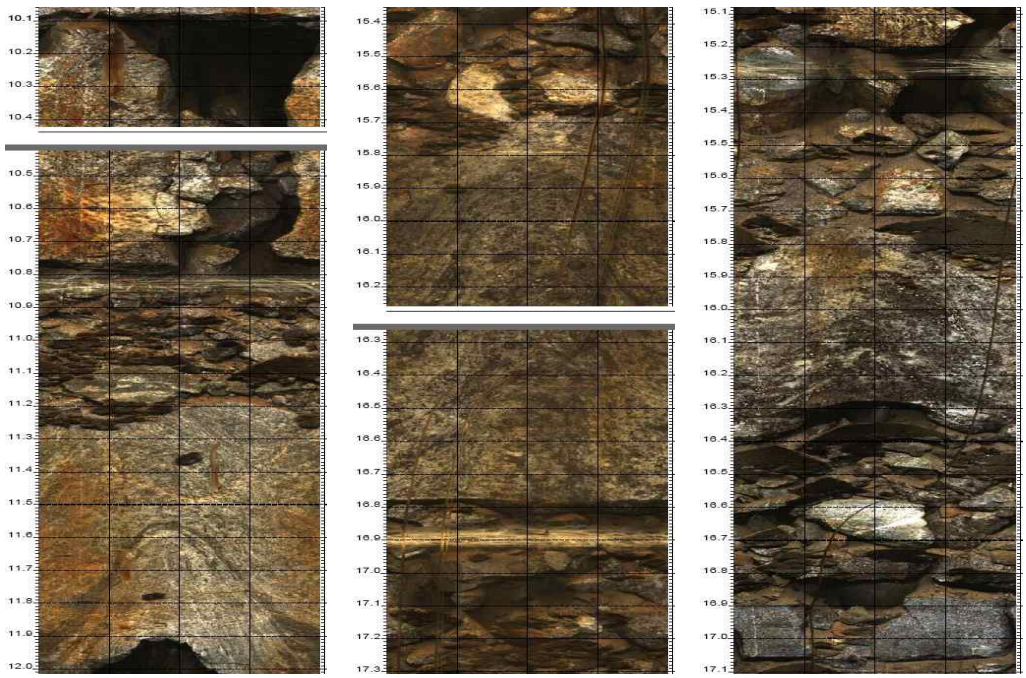
· 시추공, PH-2

- 매립층

매립층은 G.L(-) 0.0~21.5m에 걸쳐 분포하며, 암갈색 내지 암회색의 모래섞인 자갈 및 사석으로 구성되어 있다. 자갈층은 통일분류 상 분급이 좋지 않은 자갈(GP)에 해당한다. 채취된 자갈의 입도는 5mm 정도이며, 타 지역 기반암 기원의 사석으로 입경이 600mm이하인 샘플이 심도 15.8~16.4m 구간에서 코아형태로 채취되었다. 해당 시추공 심도 8.5~36.3m 구간 댐체 사석층이 경암 강도 수준의 코아형태로 채취되었다.

- 연암층

연암층은 G.L(-) 21.5~32.0m에 분포하며 담회색 내지 암회색의 색조를 띄는 석류석 화강편마암이다. 풍화정도는 매우심한풍화 내지 보통풍화, 강도는 매우약함 내지 보통강함, 파쇄정도는 매우심한균열 내지 보통균열이다. 코아회수율(TCR)은 93~100%이하며, 암질지수(RQD)는 0~54%로 다소 균열이 많은 구간이 존재한다. PH-1, PH-2 시추조사 및 시추공영상촬영 결과 심도 약 15.7m에서 가장 큰 입경의 조립재료를 확인할 수 있으며, 시추공영상촬영 결과는 [그림 3.4.119]과 같다.

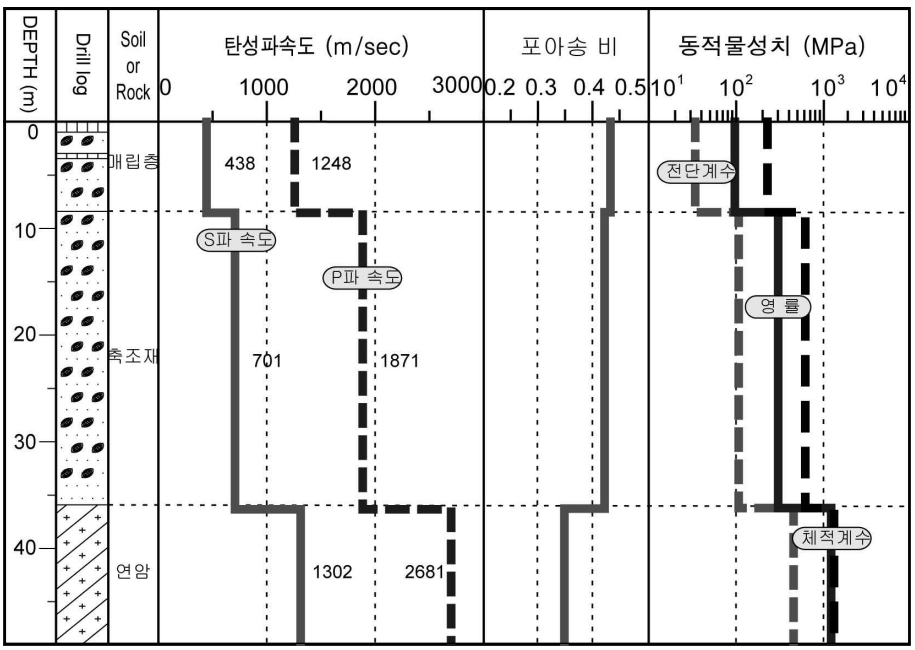


(a) PH-1(10.1~12.0m) (b) PH-1(15.4~17.3m) (c) PH-2(15.1~17.1m)

[그림 3.4.119] 시추공영상촬영을 통한 대입경 조립재료의 확인

(4) 다운홀시험

연구지역 시추공 2개소(PH-1, PH-2)에서 수행한 다운홀시험결과 [그림 3.4.120]에서 [그림 3.4.121]에 걸쳐 나타내었다. 먼저 시추조사결과 PH-1 시추공은 매립층이 36.3m까지 분포하고 있으며, 그 하부는 석류석 화강편마암의 기반암으로 연암층에 해당한다. 매립층은 다시 심도 0.0~8.5 구간 상부 매립층과, 8.5~36.3m 구간 축조재 매립구간으로 나뉜다. 상부 매립층의 평균 전단파속도는 438m/sec이며, 축조재 매립구간은 701m/sec의 속도값을 보인다. 해당 시추공 연암층 구간 평균 전단포속도는 1,302m/sec 이상으로 나타나고 있다. PH-1 시추공 다운홀 시험결과는 [표 3.4.20]과 같이 정리하였다.

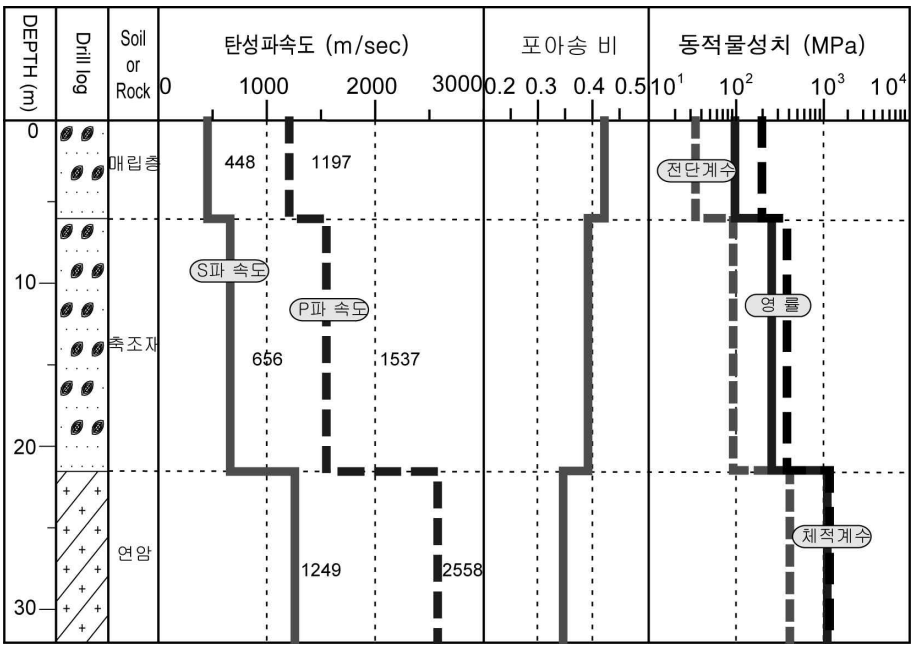


[그림 3.4.120] PH-1, 다운홀시험 결과

[표 3.4.20] PH-1, 다운홀시험 결과

지층	심도 (m)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	포아송비	전단계수 (MPa)	영률 (MPa)	체적탄성률 (MPa)
매립층	8.5	1,248	438	0.430	341	974	2,307
축조재	36.3	1,871	701	0.418	1,079	3,061	6,259
연암	49.0	2,681	1,302	0.346	4,618	12,428	13,425

PH-2 시추공은 매립층이 21.5m까지 분포하고 있으며, 그 하부는 석류석 화강편마암의 기반암으로 연암층에 해당한다. 매립층은 다시 심도 0.0~6.0 구간 상부 매립층과, 6.0~21.5m 구간 축조재 매립구간으로 나뉜다. 상부 매립층의 평균 전단파속도는 448m/sec이며, 축조재 매립구간은 656m/sec의 속도값을 보인다. 해당 시추공 연암층 구간 평균 전단포속도는 1,249m/sec 이상으로 나타나고 있다. PH-2 시추공 다운홀 시험결과는 [표 3.4.21]과 같이 정리하였다.



[그림 3.4.121] PH-2, 다운홀시험 결과

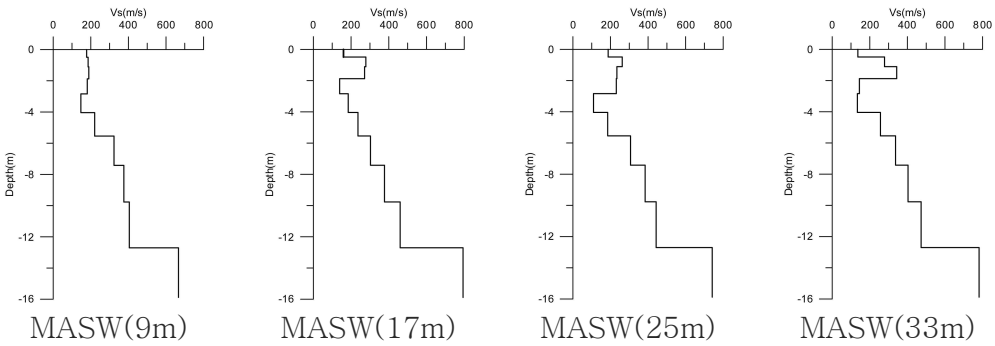
[표 3.4.21] PH-2, 다운홀시험 결과

지층	심도 (m)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	포아송비	전단계수 (MPa)	영률 (MPa)	체적탄성률 (MPa)
매립층	6.0	1,197	448	0.418	344	977	1,995
축조재	21.5	1,537	656	0.389	930	2,584	3,871
연암	32.0	2,558	1,249	0.343	4,180	11,230	11,952

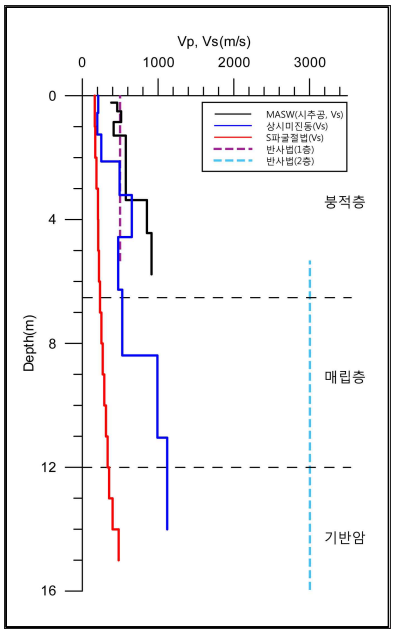
8. 대입경 조립재료의 크기에 따른 전단파속도 분포

가. 성덕구댐 전단파 속도 분포

성덕구댐은 P-반사법 탄성파 탐사, MASW, 상시미진동탐사, S-굴절법탐사 등 총 4개의 현장탐사를 수행하였다. [그림 3.4.122]는 위치별 심도에 따른 전단파 속도분포 결과이며, [그림 3.4.123]은 4가지 현장탐사에서 획득한 심도별 탄성파 속도분포 결과이다.



[그림 3.4.122] 성덕구댐 MASW탐사의 위치별 전단파 속도분포

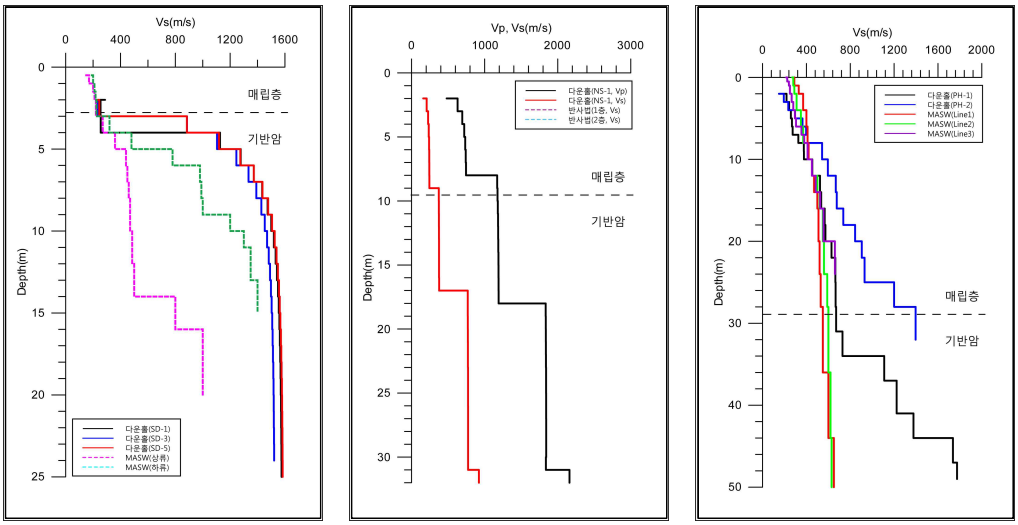


[그림 3.4.123] 성덕구댐 현장탄성파 탐사의 위치별 전단파 속도분포

전반적으로 S-굴절법 탄성파 탐사에서 가장 낮은 탄성파 속도 분포를 보이며, 반사법 탄성파 탐사는 타 공종의 탐사법보다 높은 탄성파 속도 분포를 나타냈다. 반사법 탄성파 탐사의 경우 지층경계면에서의 반사파는 시추조사에 의한 지층의 심도와는 차이가 있어 평균 지층속도에 가깝게 수렴한 이유로 판단된다.

나. 3개 지역 전단파 속도 분포

대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기법 연구 3차년도 연구지역 3개소(성덕댐, 호남고속철도, 평화의댐 현장)에서 수행한 물리탐사 및 검층 자료를 토대로 탄성파의 속도관계를 비교하며, 아울러 대입경 조립재료의 크기에 따른 전단파속도 분포를 분석하였다.



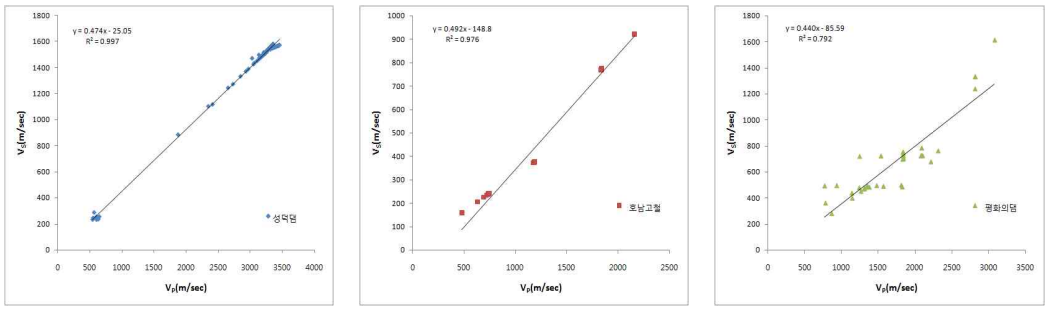
(a) 성덕댐 건설현장 (b) 호남고속철도 현장 (c) 평화의댐 현장

[그림 3.4.124] 3개지역 현장탄성파 탐사의 심도별 전단파 속도분포

[그림 3.4.124]는 현장탄성파 탐사에 의한 심도별 전단파 속도 결과이다. 반사법 탄성파 탐사의 경우 [그림 3.4.123]의 결과와 유사하게 지층경계면의 탄성파 속도와 시추조사에 의한 속도검증결과와는 다소 차이를 보였다. 앞 절의 DB 분석결과에 따른 관계식을 이용하여 탄성파 속도를 산출하여 비교 분석하였다.

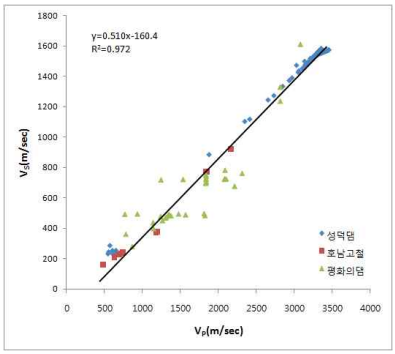
연구지역 3개소의 탄성파 분포는 압축파의 경우 최소 480.1m/sec, 최대 3432m/sec이며, 전단파속도는 최소 159.7m/sec, 최대 1,611m/sec의 분포를 보인다. 연구지역별 속도 상관관계를 살펴보면 성덕댐 현장의 경우 VS=0.474VP-25.05, 상관지수(R2)는 0.997이며, 호남고속철도 현장의 경우 VS=0.492VP-148.8, 상관지수(R2)는 0.976으로 높은 상관성을 보인다. 평화의댐 현장 VS=0.440VP-85.59, 상관지

수(R2)는 0.792로 연구지역 3개소 중 가장 낮은 상관성을 보이고 있다[그림 3.4.125].



(a) 성덕댐 현장 (b) 호남고속철도 현장 (c) 평화의댐 현장

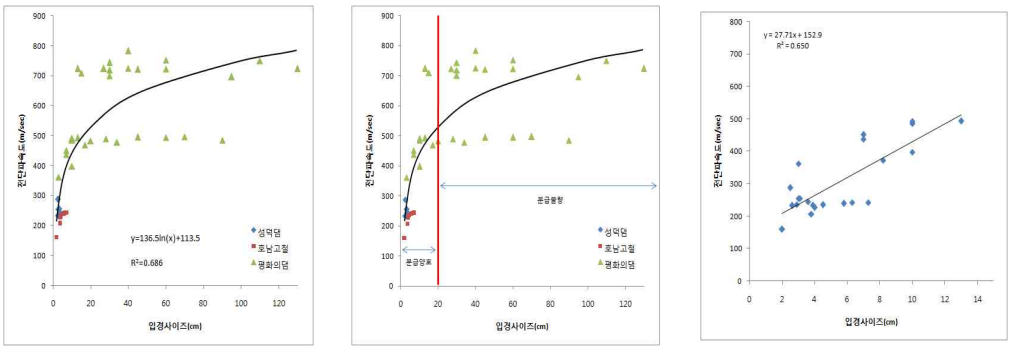
[그림 3.4.125] 각 연구지역별 탄성파속도(VP, VS) 관계



[그림 3.4.126] 연구지역 3개소 전체 탄성파속도(VP, VS) 관계

각 연구지역의 전체 탄성파속도 상관관계를 살펴보면 VS=0.510VP-160.4이며, 상관지수(R2)는 0.972로 높은 상관성을 보인다[그림 3.4.126].

각 연구지역 상부 제1층은 대입경 조립재료를 이용한 매립 및 성토층이며, 지역별 조립재료 크기 분포는 시추조사결과 성덕댐 현장은 25~102mm, 호남고속철도 현장은 20~82mm, 평화의댐 현장은 20~1,300mm로 나타났다. 한편 조사지역의 입경 크기에 따른 전단파속도는 [그림 3.4.127] (a)와 같이 로그함수의 추세선을 이용하여 도시하였으며, 대입경 조립재료의 입경 크기 200mm를 기준으로 분급의 불량 및 양호 구간을 [그림 3.4.127] (b)와 같이 도시하였다. 입경의 크기 200mm를 기준으로 구분한 이유는 시추조사결과 및 시추공영상촬영 결과에서 200mm 이하의 조립재료가 확률적으로 분급이 양호하기 때문이다. 조립재료 입경의 분급이 양호한 구간을 발췌하여 표현하면 [그림 3.4.127] (c)와 같이 나타낼 수 있으며 분석결과 과거문헌에서 알려진 조립재료의 입경과 전단파속도가 선형적 관계라는 것을 확인할 수 있다(Castagna et al.. 1985).

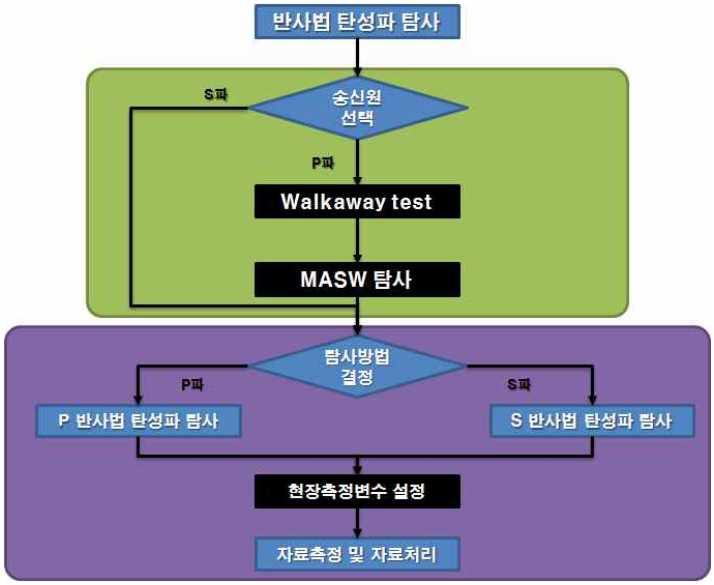


(a) 전단파속도 분포 (b) 분급구분 (c) 분급 양호한 구간 속도분포

[그림 3.4.127] 대입경 조립재료 크기에 따른 전단파속도 분포

20~80mm 입경 크기에서는 159.7~250m/sec의 전단파속도를 보이는데 이 속도 값은 앞절의 D/B 분석결과에서 예측한 붕적층 및 자갈층의 속도 값과 유사한 속도 범위를 나타내고 있다. 조립재료 입경의 크기 80~150mm 구간의 전단파속도 값은 372~493m/sec의 분포를 보이고 있으며 조립재료의 입경 크기가 200mm를 초과하는 경우 전단파속도 값은 기반암의 속도에 근접 또는 그 이상의 값(500~700m/sec)을 보이는 것으로 나타난다. 입경의 크기가 클수록 전단파속도의 분산도가 커지는 이유는 조립재료의 분급률과 특성이 복합적으로 나타나기 때문이며, 큰 입경의 조립재료일수록 전단파속도 해석 시 주의를 요하는 바이다.

반사법 탄성파 탐사 결과에 의한 동적물성 산정방법은 현장조건에 따라 많은 제약조건이 발생하게 된다. [그림 3.4.128]은 반사법 탄성파탐사의 현장작업 흐름이다. 동적물성산정을 위해 대상구조물의 규모에 따라 고분해능 수신기와 송신원을 고려해야한다. 반사법 탄성파 탐사에 의한 개략적인 현장동적물성을 범위를 산정하기 위해서는 반드시 walkaway 방법에 의한 masw탐사 법을 수행하여 반사법 탐사 결과와 병행 해석하는 것이 훌륭한 대안임을 알 수 있다.



[그림 3.4.128] 반사법 탄성파 탐사의 자료획득 및 자료처리 흐름

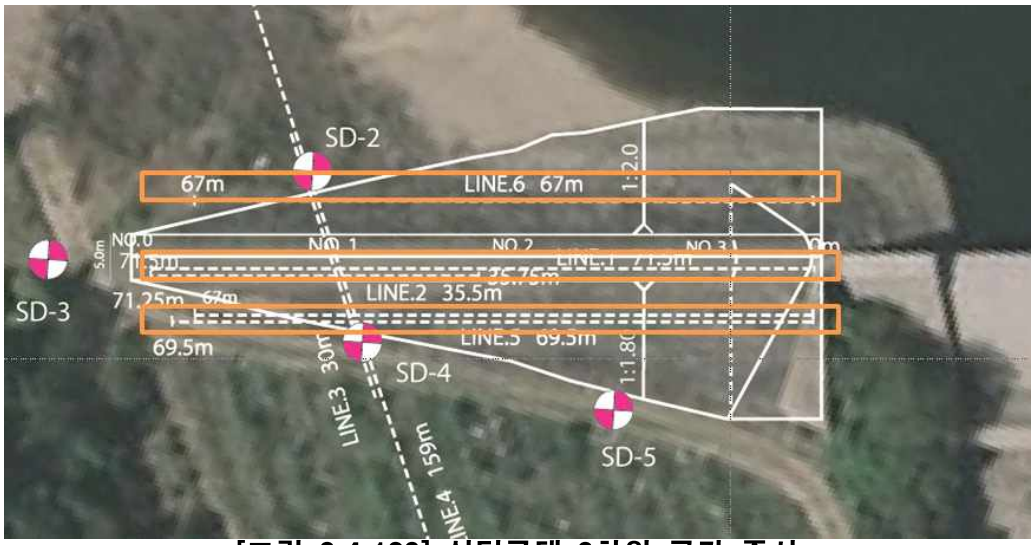
9. 3차원 측선을 활용한 공간 초동 주시 산출 기법

지표 반사법 탄성파 탐사의 근본원리는 지표에서 발생원-수진기 배열이 탐사측선을 따라 일정간격으로 이동하면서 측정이 반복됨에 따라 지하 각 경계면의 수직 및 수평적인 변화를 재현하는데 있다. 즉 결과는 측선 하부 수직 단면에 대한 지층 혹은 암층 구조 단면도로 표현된다. 최근의 연구동향은 다채널 수신시스템을 이용하여 고분해능 데이터가 취득되고 동시에 세심한 전산처리 과정으로 정밀 영상을 제공하는 3D탐사로 발전하고 있다.

2차원 반사법 탄성파 탐사는 측선 하부 수직단면에서의 경계면의 규명에 초점을 두고 있게 때문에 측선 이외의 방향에서 경계면의 변화가 있게 되면 그만큼 탐사결과에 대한 해석에 오류가 발생할 수 있어 복잡한 지질구조에서는 3차원 반사법 탐사가 널리 활용된다. 그러나 자료취득 및 해석 과정이 쉽지 않으며, 2D 탐사에 비해 훨씬 많은 양의 탐사장비가 필요하다는 점에서 많은 어려움이 따른다.

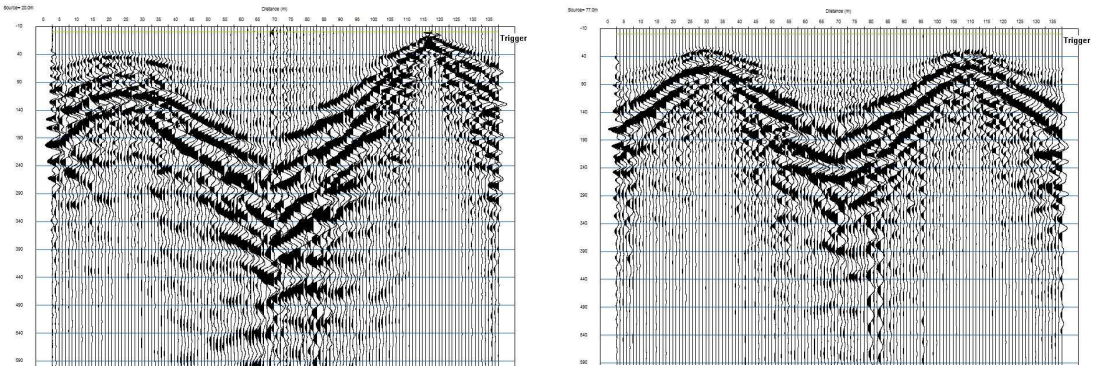
한편, 굴절법 탄성파 탐사는 개략조사에 널리 활용되는 탐사 기법으로 최근에는 3차원 토모그래피 해석 알고리듬이 개발되어 반사법 탐사 해석보다 신속하게 해석할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법을 사용하면 2차원 굴절법 탐사와 동일하게 심도별 탄성파 속도를 직접 획득할 수 있으나 기존의 2차원 탐사와는 다른 추가 자료처리 기법이 필요하다.

가. 3차원 초동 주시 산출 기법 제안



[그림 3.4.129] 성덕구댐 3차원 공간 주시

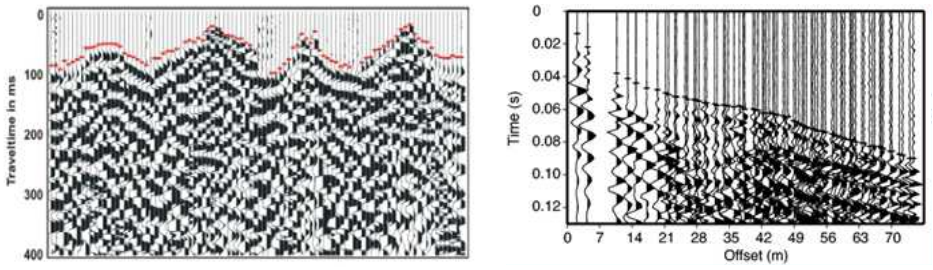
성덕구댐 현장은 다양한 측선배열을 통해 3차원 분석이 가능토록 탐사측선이 설계되었다(그림 3.4.129). Line 4 및 5측선은 댐사면 상하단에 위치하고 있으며, 댐마루에서 송신하고 댐마루 및 Line 4, 5측선에서 수신하였다[그림 3.4.130].



(a) (b)

[그림 3.4.130] 성덕댐 3차원 자료 송수신 트레이스, (a) 하류사면 송신-상·하류사면 수신, (b) 댐마송신, 상·하류사면 수신

[그림 3.4.130]의 자료와 같이 3차원 송수신 신호의 자료처리를 위해서 각 송수신점의 공간좌표를 설정하고 송수신점에 따른 거리함수로 변환하여 초동 주시를 결정하는 방법이 주로 활용된다. 그러나 3차원 공간 데이터 분석을 위해서는 많은 양의 주시를 계산해야하므로 많은 해석시간을 필요하게 된다.



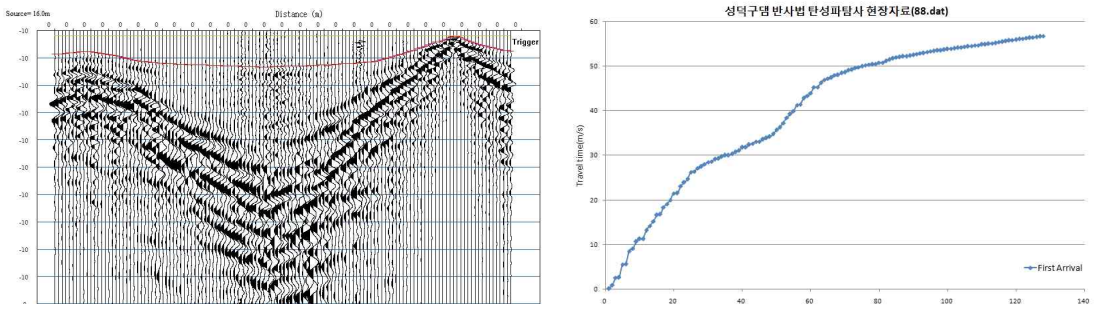
(a) (b)

[그림 3.4.131] 3차원 송수신 위치에 따른 트레이스 신호를 거리의 함수로 변환 예 (a) 3차원 수신 트레이스, (b) 3차원 송수신 데이터를 거리의 함수로 변환

따라서, 3차원 공간 데이터 자료를 모두 사용하는 것이 아니라 굴절법 탄성파 탐사와 같이 일정 격자간격으로 나누어 격자간격에 해당하는 자료를 설정하고 크리깅 기법을 활용한 초동 주시맵을 작성하면 공간데이타를 효과적으로 추정하고 해석할 수 있게 되는 원리이다. 이를 3차원 토모그래피 탐사법이나 GRM 해석법을 사용함으로써 자료처리 시간을 효과적으로 줄일 수 있으며, 2차원 굴절법 탐사에서 획득하는 지반정보를 3차원 공간데이타 정보로 활용할 수 있게 된다.

나. 3차원 초동 주시 산출 기법 구현

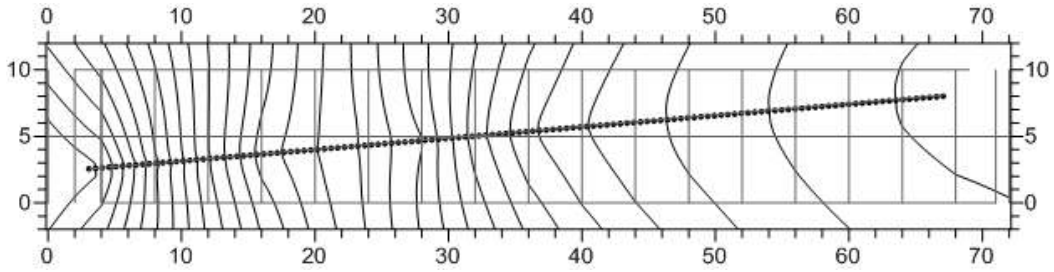
① 3차원 공간 데이터 자료를 구현하기 위해서는 모든 주시자료를 사용하는 것이 아니라 임의의 위치에서 송수신 거리에 따른 시간의 함수로 변환하여 설정한다.



(a) (b)

[그림 3.4.132] 성덕구댐 현장 자료를 이용하여 송수신 거리의 함수로 변환한 초동주시

② 획득된 주시정보를 다시 송수신 3차원 공간데이터로 변환하여 3차원 공간내삽법을 적용하며, 역주시 모델도 계산한다.(3D 주시맵 작성)



[그림 3.4.133] 성덕구댐 현장 자료를 이용하여 송수신 거리의 함수로 변환한 초동주시

③ 임의 방향으로 주시곡선을 ②와 같이 계산하여 산출하고 토모그래피 해석법이나 generalized reciprocal method를 사용하여 지반정보를 해석한다.

- 3차원 초동 주시 산출방법을 이용하여 분석한 결과 초동에 따른 1층속도는 405m/sec 정도의 속도범위를 보이며, 반사법 탐사에 의한 1층 속도와 매우 유사하게 나타났다. 따라서 본연구에서 제안한 3차원 초동 주시 산출 기법은 임의의 방향 탄성파 속도 추정에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

제 5 절 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발

1. 댐 사력죤 수치해석에 의한 역산사례 및 분석

가. 역산사례

1981년 Vrymoed는 Oroville Dam에 대한 유한요소 수치모델을 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 계측자료로부터 산정한 댐의 고유진동수와 등가선형방법을 사용하는 방법에 의해, 계측자료를 활용한 사력죤의 동적물성을 산정하였다.

(1) Oroville Dam 정보

Oroville 댐과 댐 저수지는 Sierra Nevada의 서쪽에 위치하고 있다. 댐 부지는 Oroville 시의 동쪽 5 마일정도에 떨어져 위치하고 있고, Sacramento 북쪽으로는 약 85 마일정도에 떨어져 위치하고 있다. 대상댐은 미국에서 가장 높은 댐으로서 높이는 770ft, 댐길이는 5,600ft에 달한다. 댐은 코어죤, 사력죤, 천이죤으로 구분되어 있다.

(2) 동적 지진해석을 위한 물성산정

최대단면에서 코어죤은 전체 단면의 10%만을 차지하고 있어, 전체 지진응답거동에 미치는 영향은 미미한 것으로 간주하여, 비배수강도와 전단탄성계수 관계 경험식(Seed and Idriss, 1970)을 이용하여 결정하였다.

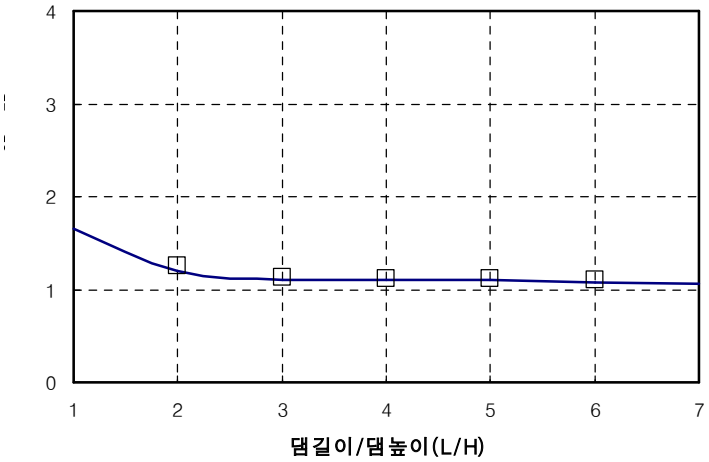
사력죤의 전단탄성계수는 아래 식과 같이 산정하였다.

$$G_{\max} = K_{2,\max} 1000 \, (\sigma_m^{'})^{1/2} \qquad \text{[식 3.5.1]}$$

여기서, $G_{\max}$는 미소변형율(10-4%이하)에서 전단탄성계수(lb/ft2), $K_{2,\max}$는 저변형율에서 전단탄성계수 상수, $\sigma_m^{'}$은 평균유효구속압(lb/ft2)이다. 평균유효구속압은 정적인 유한요소해석의 결과로부터 계산되었다. 평균 $K_2/K_{2,\max}$ 감소(reduction) 곡선은 경험식(Seed and Idriss, 1970) 중 점착력이 없는 흙에 대신 결과를 이용하였고, 상수인 $K_{2,\max}$값은 반복적인 해석에 의해 산정되었다.

8월 1일 USGS 댐정상부 변위 시간이력으로부터 얻어진 수평방향 최대변위는

0.6in(15mm)이다. 댐 최대단면에서의 높이가 230m인 점을 감안하여, 최대 전단변형율은 6.7×10^{-3}%로 계산되었다. 여기에 평균상수 (averaging factor)로 0.65값을 곱하여, 유효전단변형율은 4.3×10^{-3}%로 계산되었다. 이 값은 동적 유한요소해석에 의해 산정될 수 있는 유효전단변형율로 가정하여, 평균감소곡선으로부터 $K_2/K_{2,\max}$은 0.8로 산정되었다. 이 값을 이용하고 $K_{2,\max}$이 320일 때, 0.8sec의 고유주기에 해당됨을 확인하였다. 3차원 효과[그림 3.5.1]를 고려하면 고유주기는 1.0으로 산정되기 때문에, $K_{2,\max}$는 205로 산정되었다. 이 값이 바로 Oroville dam 사력쵠 재료의 대표값이라고 할 수 있다.



[그림 3.5.1] 2차원과 3차원 모델 해석 결과에 의한 댐 고유진동수 비교

그러나 이렇게 산정된 두 값($K_{2,\max}$는 320 or 205)은 사용상의 한계을 반드시 확인할 필요가 있다. 즉, $K_{2,\max}$ 205값이 Oroville dam 사력재료의 대푯값이고, $K_{2,\max}$ 320값은 단지 댐의 3차원 실제거동을 모사하기 위한 2차원적 기법의 Oroville dam의 최대단면 해석에만 사용될 수 있는 값이다. 다시 말해서, 2차원 해석에서 $K_{2,\max}$ 320값 사용은 인위적으로 재료의 강성을 증가시키는 것으로서 3차원적 가속도와 변위를 모사할 수 있다. 이러한 재료의 강성증가는 응력에 있어서는 너무 큰 값을 보일 수 있게 한다. 왜냐하면, 3차원의 강성증가 효과는 해석에서는 모델링되지 않기 때문에 응력해석에 있어서는 $K_{2,\max}$ 205를 사용하는 것이 적절하다.

나. 사례분석

1) 국내 경우는, 본 사례(지진다발지역인 미국 서부지역에서의 사례)와는 다르게 중약진(moderate seismicity) 지역에 해당되므로 본 사례를 그대로 적용할 만한 충분히 큰 지진이 발생할 수 없고(댐 정상부에서 인지할 수 있을 만한 변위값의 관측사례는 얻기 어렵다), 오히려 미소 지진기록을 이용하는 것이 바람직하다.

2) 미소지진기록을 이용하는 경우에는, 지진에 의해 발생되는 최대변형율을 미소변형에 의한 탄성영역에 해당되므로, $K_{2,\max}$의 산정에 있어 변형율에 따른 $K_2/K_{2,\max}$의 감소곡선을 별도로 차용하거나 산정할 필요는 없다.

3) '08년까지 국내 주요 대댐인 다목적댐과 용수전용댐에는 표와 같이 102개의 지진계가 설치되어 있고, 현재 실시간으로 미소지진기록까지로 계측할 수 있으며, 그 자료를 활용할 수 있기 때문에 계측자료는 충분한 것으로 판단된다. 따라서, 향후 이러한 미소지진기록을 이용한 댐 사력죤의 물성산정은 직접탐사가 불가한 경우나 예비조사 차원에서는 매우 유용할 것으로 판단된다.

[표 3.5.1] 국내 다목적댐 및 용수전용댐 지진계 설치현황(한국수자원공사 자료)

댐 명		지역	댐형식	가속도계 설치수량	설치일자 (재설치)	운영상태
1	횡성댐	강원 횡성	ECRD	3	2000.6	실시간 통합감시
2	밀양댐	경남 밀양	CFRD	3	2001	“
3	용담댐	전북 진안	CFRD	5	2001	“
4	대곡댐	울산	CFRD	3	2004	“
5	장흥댐	전남 장흥	CFRD	3	2005.10	“
6	대청댐	충북 청원	CGD & ECRD	6	2006.6	“
7	평화의댐	강원 화천	CFRD	3	2006.5	“
8	감포댐	경북 경주	ECRD	2	2006.6	“
9	남강댐	경남 진주	CFRD	3	1998(2006.10)	“
10	충주댐	충북 충주	CGD	3	2007. 4	“
11	안동댐	경북 안동	ECRD	3	2007. 4	“
12	소양강댐	강원 춘천	ECRD	3	2007. 4	“
12	임하댐	경북 안동	ECRD	3	2007. 4	“
14	합천댐	경남 합천	CGD	3	2007. 4	“
15	주암댐(본)	전남 순천	ECRD	3	2007. 4	“
	주암댐(조)	전남 순천	ECRD	3	2007. 4	“
16	부안댐	전북 부안	CFRD	3	2007. 4	“
17	보령댐	충남 보령	ECRD	3	2007. 4	“
18	섬진강댐	전북 임실	CGD	3	2007. 4	“
19	운문댐	경북 청도	ECRD	3	2007. 4	“
20	영천댐	경북 영천	ECRD	3	2007.12	“
21	구천댐	경남 거제	ECRD	3	2007.12	“
22	평림댐	전남 장수	ECRD	3	2007.12	“
23	사연댐	울산	ECRD	3	2008.12	“
24	대암댐	울산	ECRD	3	2008.12	“
25	선암댐	울산	EF	3	2008.12	“
26	안계댐	경북 경주	EF	3	2008.12	“
27	수어댐	전남 광양	ECRD	3	2008.12	“
28	연초댐	경남 거제	ECRD	3	2008.12	“
29	광동댐	강원 삼척	ECRD	3	2008.12	“
30	달방댐	강원 동해	ECRD	3	2008.12	“
31	낙동강하구둑	부산	ECRD&CG	5	2008.12	“
	계			102		

2. 댐 실지진계측자료 수집 및 분석

동적해석으로부터 사력댐의 거동을 신뢰성 있게 파악하기 위하여 선행되어야 할 작업은 합리적인 대입경 축조재료의 입력물성을 산정하는 것이다. 사력댐의 경우, 댐 체적의 90% 이상을 사력재료가 차지하고 있기 때문에 특히 사력재료의 입력물성이 매우 중요하다. 동적변형해석을 위한 주요 입력물성은 사력죤의 전단탄성계수와 감쇠비이다. 이 중, 변형과 가장 밀접한 관련이 있는 물성은 전단탄성계수이며, 특히 동적해석의 경우에는 저변형율(보통 10^{-3}% 이하)에서의 전단탄성계수 즉 최대전단탄성계수이다. 최대전단탄성계수, $G_{\max}$는 지반의 전단파속도, v_s를 산정하게 되면, 재료의 밀도, ρ를 이용하여 [식 3.5.2]와 같이 산정할 수 있다.

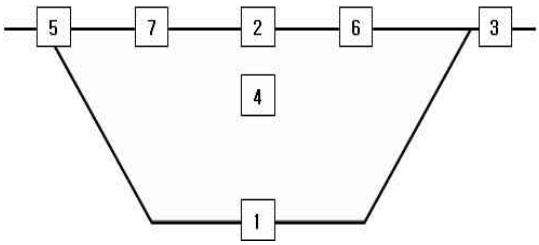
$$G_{\max} = \rho\, v_s^2 \qquad \text{[식 3.5.2]}$$

본 연구는 실제 계측된 미소지진기록으로부터 운영중인 댐의 고유진동수를 산정하고, 계측기록으로부터 산정된 고유진동수와 일치하도록 계측지진기록을 입력물성으로 하고 사력댐 사력죤의 입력물성을 변화시킨 반복적 동적수치해석을 수행하여 사력죤의 깊이별 전단파속도를 역산하는 것이다.

가. 댐 실지진계측자료 개요

댐의 지진계 설치는 일반적으로 지진 시 댐의 응답특성을 분석하여 내진설계시 반영하고, 댐 지역의 지진동 특성 예측 등 지진에 대한 댐 안전관리를 위하여 행해지고 있다. 다른 구조물에 비해 그동안 댐에 대한 지진계 설치는 활발히 이루어지지 않아 댐 부지의 지진 계측기록을 활용할 수 없었으나, 최근 지진발생 증가와 대형구조물에 대한 지진응답특성 파악에 대한 요구로부터 그 필요성이 증대되고 있다.

댐의 지진계 설치는 댐설계기준(2003)에 반영되어 있고, 내진특등급으로 분류된 댐의 경우는 지진계 설치가 의무화되어 있다. [그림 3.5.2]처럼 댐의 지진계 설치 위치는 총 7개소로 구분할 수 있으나, 필요에 따라 2개소 이상 설치하는 것을 기본으로 하고 있다. 또한 지진계 설치방법은 댐의 형식에 따라 다양하기 때문에 대상 댐에 대한 정밀조사를 실시한 후 설치해야 한다.



[그림 3.5.2] 댐 지진계 설치 위치

일반적으로 댐에서 동적해석법이란 시간이력에 대한 지진응답해석을 실시하는 것으로 댐에 대한 내진성능평가 방법 중의 하나이다. 지진응답해석을 위해서는 외부하중으로 지진파를 댐체 기초에 직접 입력하게 되는데, 이 때 사용되는 지진파는 실지진파와 인공지진파를 사용하게 된다. 해석결과로 댐 높이별 입력지진파 증폭특성과 댐 정상부의 수평·수직방향 변위값을 주로 얻게 되며, 안정성의 평가는 댐 정상부의 침하량이 댐 높이의 1%이하이면 안전한 것으로 일반적으로 판단한다(기존댐의 내진성능평가 및 향상요령, 2004).

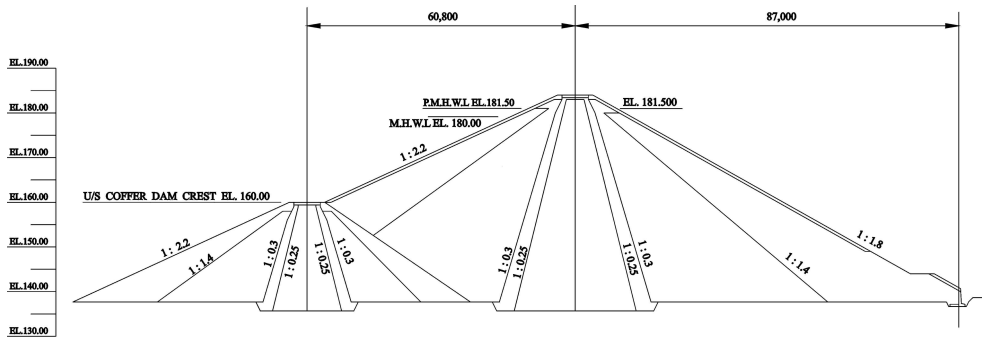
계측지진 기록은 동적해석 절차 중 외부하중을 입력하는 경우에 사용될 수 있으며, 동적해석을 수행하는 대부분의 상용 프로그램의 경우 해석 시 해석시스템(댐과 기초지반)의 고유진동수를 입력값으로 요구하는 경우가 많다. 계측지진 기록, 특히 정상부의 가속도 기록을 주파수 분석하는 방법에 의해 실지진기록으로 시스템의 고유진동수를 손쉽게 산정할 수 있다. 실지진기록으로 산정된 고유진동수는 동적해석법의 적정성을 판단하는 데에도 이용될 수 있는데, 수치해석으로 산정된 시스템 고유진동수와 실지진기록으로 산정된 고유진동수를 상호 비교해 봄으로써 시스템의 입력물성의 적정성 등을 파악할 수 있다. 이 밖에 댐체를 통한 지진파의 증폭특성과 같은 댐체 동적거동 특성 파악에 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 2006년 1월 19일에 강원도 영월지역에 발생한 규모 3.2의 영월지진과 2007년 1월 20일에 오대산(월정사) 지역에서 발생한 규모 4.8의 오대산지진시, 강원도 횡성에 위치한 H다목적댐 부지에서 계측된 지진기록을 분석하였다.

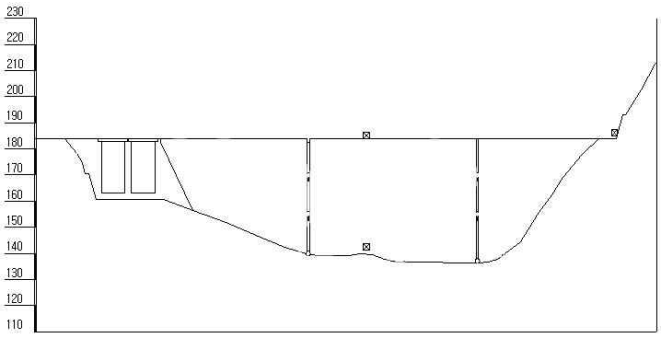
(1) 지진자료 획득 댐 정보

지진기록이 계측된 H댐은 강원도 횡성에 위치한 다목적댐이다. H댐의 제원은

높이 48.5m, 총저수용량은 86백만㎥으로서 댐설계기준(2003)에 의해 내진특등급으로 분류되며, 설계진도는 0.154g이다. [그림 3.5.3]은 H댐의 대표단면 및 재료구분을 나타낸 것이다. H댐에는 댐 정상부, 댐 하류사면 하단, 양안부에 각각 1개씩 총 3개의 지진계가 설치되어 있다[그림 3.5.4].



[그림 3.5.3] H댐 대표단면 및 재료구분



[그림 3.5.4] H댐 지진계 설치 위치

H댐에 지진계가 설치된 이후 총 2번의 지진기록이 확보되었다. 1차 지진은 2006년 1월 19일에 강원도 영월지역에 발생한 규모 3.2의 영월지진이며, 2차 지진은 2007년 1월 20일에 오대산(월정사) 지역에서 발생한 규모 4.8의 오대산지진이다.

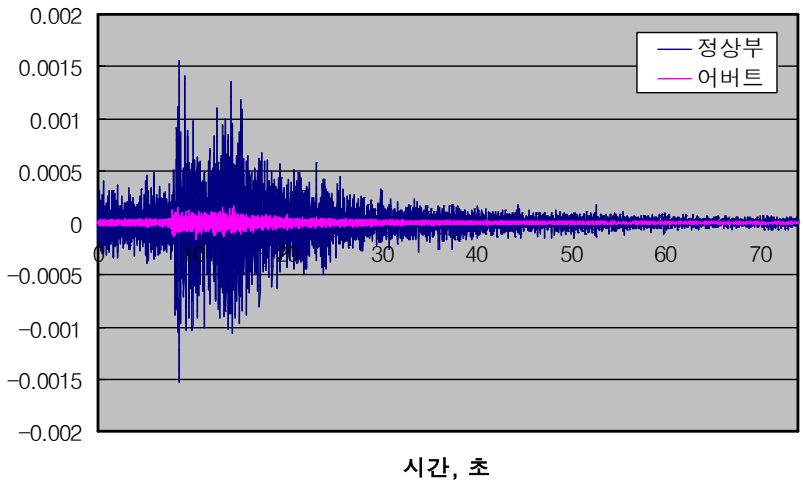
두 지진기록이 관측되었던 H댐의 진앙거리는 1차지진 진앙과 2차지진 진앙에서 각각 77.4km, 62.3km 이다[그림 3.5.5]. 또한, 1차 지진관측 시기와 2차 지진관측 시기는 정확히 1년의 시간차를 보이는데, 이는 거의 같은 계절에 지진이 발생하여 대상댐이 관측 당시 거의 같은 저수위를 유지하고 있어, 2가지 지진에 의한 댐 거동특성을 파악하는데 유용한 자료로 활용되었다.



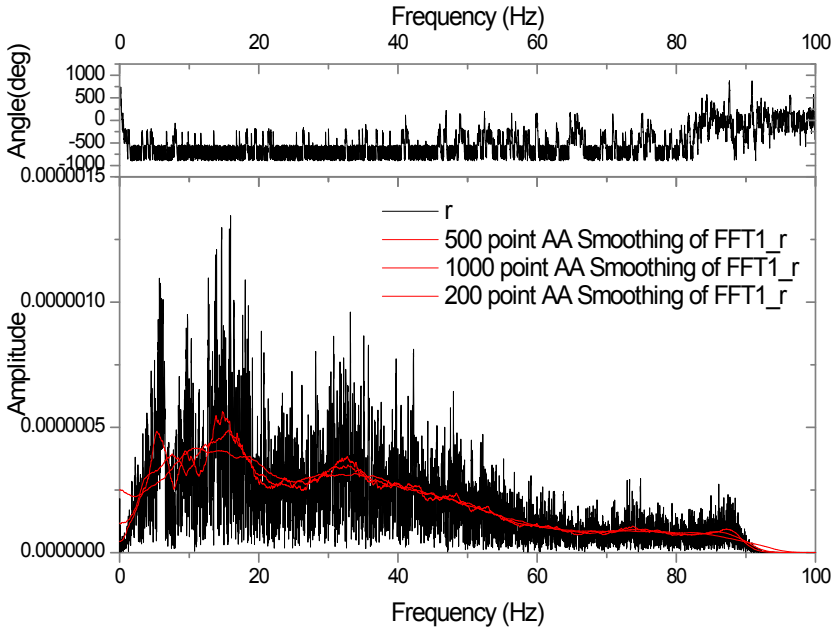
[그림 3.5.5] 발생 지진 및 H댐 위치

(2) H다목적댐 1차 계측자료

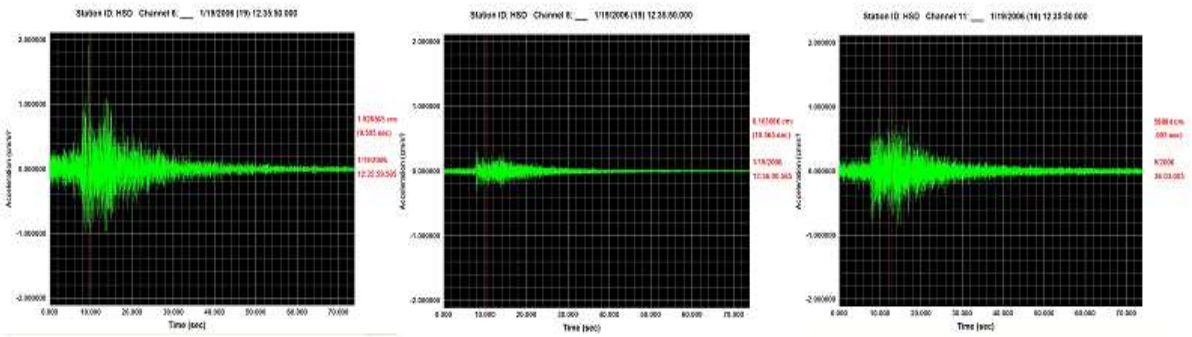
지진계측기록은 2006년 1월 19일 강원도 영월군 동쪽 20km 지점에서 발생한 규모 3.2(진동Ⅱ,Ⅲ)의 지진으로 지진계에 감지된 기록을 이용하였다.



[그림 3.5.6] 횡성댐 1차 지진기록(상하류방향)

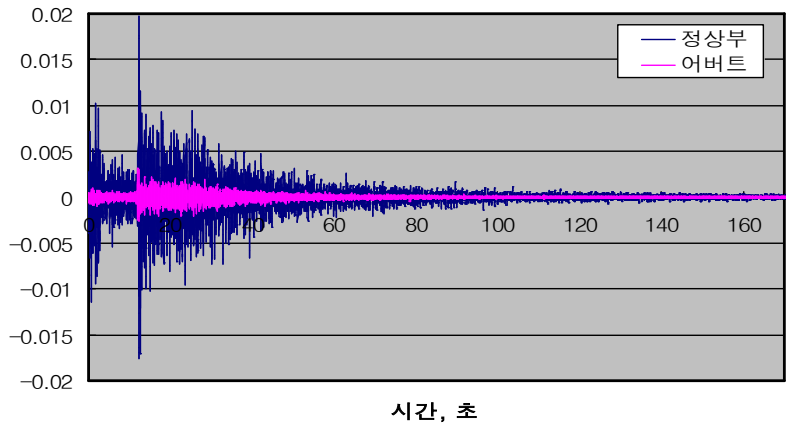


[그림 3.5.7] 횡성댐 1차 어버트먼트 지진기록 퓨리에 스펙트럼

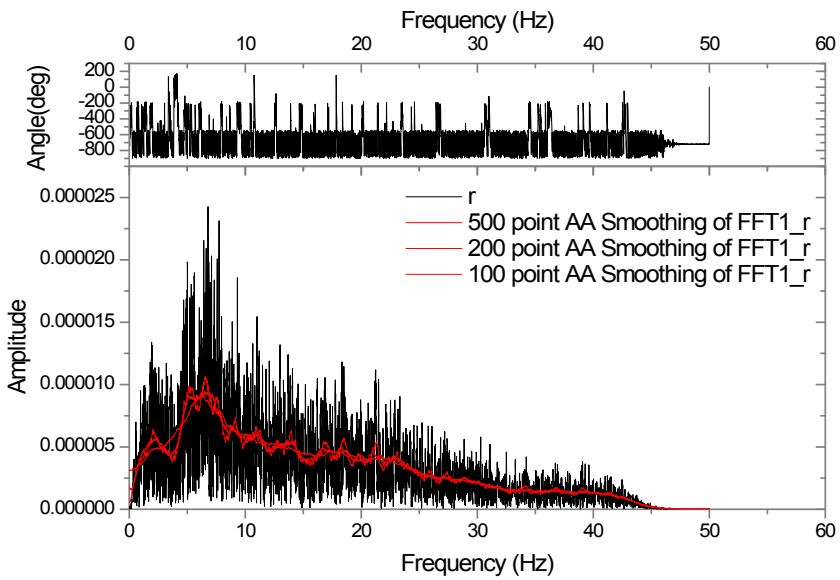


[그림 3.5.8] H댐 계측된 지진기록(댐마루/암반노두/댐하류)

(3) H다목적댐 2차 계측자료



[그림 3.5.9] 횡성댐 2차 지진기록(상하류방향)



[그림 3.5.10] 횡성댐 2차 어버트먼트 지진기록 퓨리에 스펙트럼

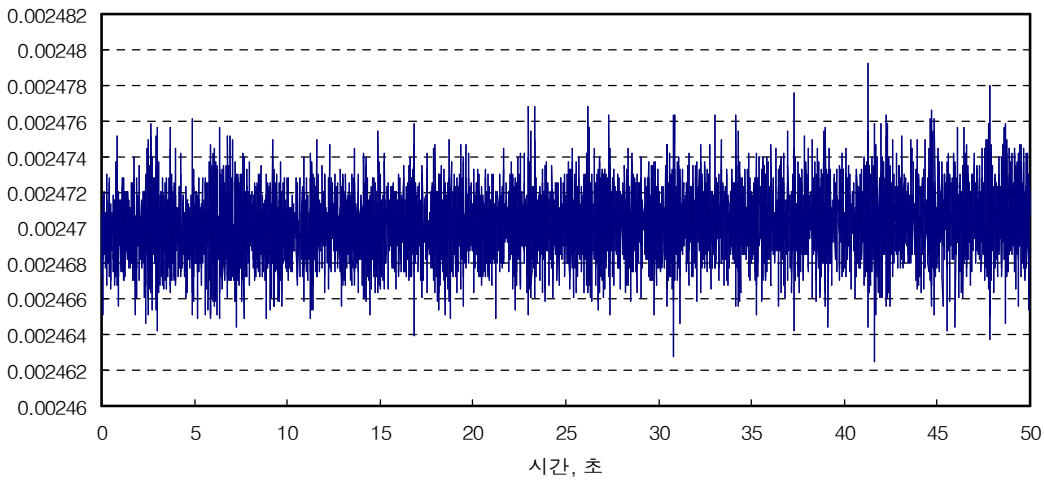
그림에서 볼 수 있듯이, 1차 지진(영월지진)에 비해 2차 지진(오대산지진)의 최대가속도는 약 20배 정도 큰 가속도를 보였다. 또한, 상대적으로 미소한 지진인 1차 지진의 주파수 특성이 저주파와 고주파가 고르게 분포한 것에 반해, 상대적으로 큰 최대가속도를 나타낸 2차 지진의 경우에는 10Hz 미만의 저주파가 상대적으로 탁월한 지진파 특성을 보였다.

오대산지진의 경우에는 양안부에서 최대가속도 0.0032g는 정상부에서 0.0198g로 6.4배로 증폭되었다.

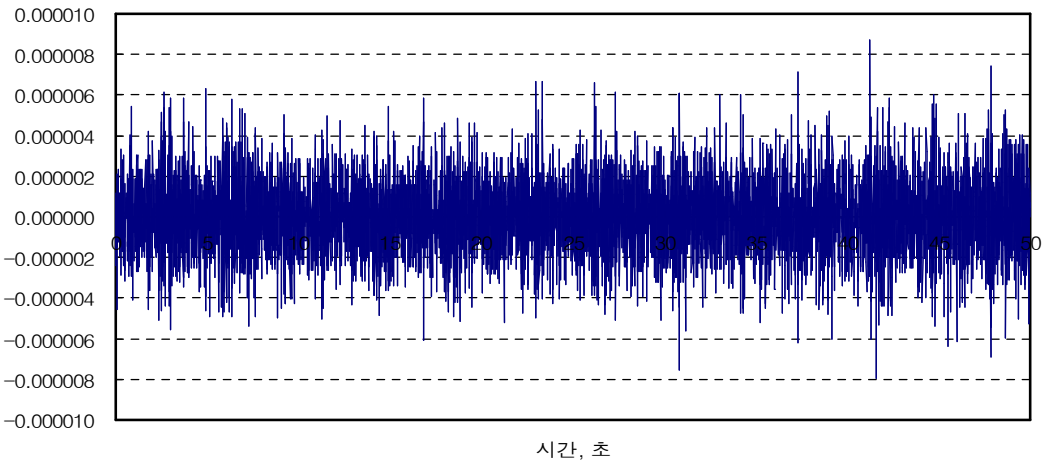
나. 계측지진기록 신호처리 및 분석

(1) 계측자료 base line correction

계측 원시자료의 경우, [그림3.5.11]에서 볼 수 있듯이, 대부분의 자료는 계측단위의 원점에 맞춰지지 않고 있으며, 전체 자료의 양상은 왜곡된 형태를 가지게 된다. 따라서, 이러한 계측자료를 자료의 중심축을 원점으로 조정하고, 왜곡된 전체 양상의 자료를 바로 잡는 과정을 base line correction 이라고 한다. 본 연구에서는 모든 계측자료는 분석 전에 모두 이러한 절차를 거쳐 자료가 보정된 후 분석에 이용되었다. [그림 3.5.12]은 보정전의 자료[그림 3.5.11]를 base line correction 과정을 거쳐 보정된 후 정상부에서의 상시자료를 나타낸 것이다. 본 연구에 이용된 모든 계측자료는 그림에서 보는 바와 같이 원점 조정과 선형조정에 의한 base line correction 작업이 수행되었다.



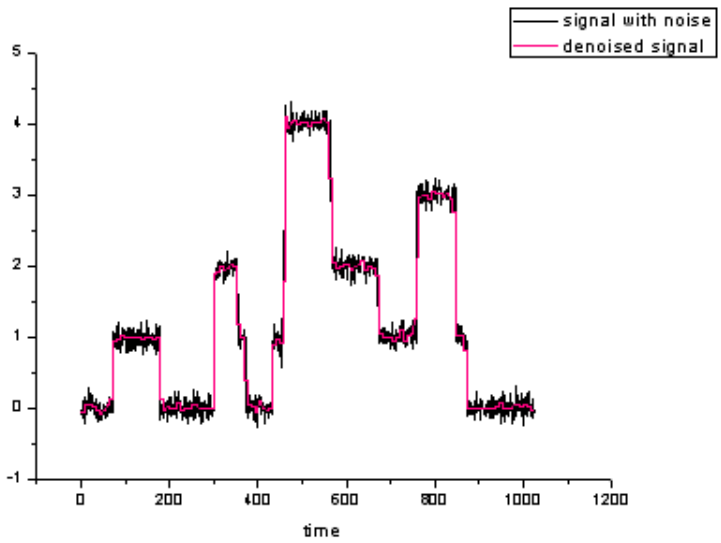
[그림 3.5.11] base line correction 전 정상부 상하류방향 상시 계측자료



[그림 3.5.12] base line correction 후 정상부 상하류방향 상시 계측자료

(2) 계측자료 잡음제거(Denoise) 방법 및 절차

신호(signal)의 잡음은 분석하고자 하는 신호외에 간섭을 일으킨 성분을 의미하며, 거의 대부분의 신호가 잡음에 의한 영향을 받는다. 장비에 의한 잡음, 데이터 인터페이싱(interfacing) 과정에서 발생하는 잡음, 자연적인 현상에 의한 잡음 등이 대표적인 잡음이다. 잡음 처리는 다양한 원인에 의해 발생하는 잡음을 효과적으로 처리하여 원래의 신호를 재생, 분석하기 위한 전처리(pre-processing)이며 필터, 단순 임계처리방법(simple thresholding), level sets, total variational method 등 다양한 잡음처리 방법이 이용되고 있다.



[그림 3.5.13] 웨이브렛변환을 이용한 잡음제거 예

지진계측기록, 특히 미소지진계측기록의 경우에는 획득된 자료를 유효하게 이용하기 위해서는 이러한 잡음 제거 과정이 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 계측된 미소지진기록을 웨이브렛변환(wavelet transfrom)을 통해서 잡음을 제거하였다. 먼저, 잡음신호는 다해상도 웨이브렛 분해(multi-level wavelet decomposition)을 이용하여 분해된다. 이러한 과정으로부터, 몇몇 상세계수(detail coefficient)들은 임계값에 의해 처리된다. 최종적으로 근사계수(approximation coefficient)와 변경된 상세계수들은 신호를 재구성하는데 이용된다. 임계값을 결정하는 대표적인 방법에는 MSE(Mean square error) 추정 방법, Universal 추정 방법, minimax 추정 방법, SURE 추정 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Univeral 추정 방법을 사용하였으며, Universal 임계치는 다음과 같이 정의된다.

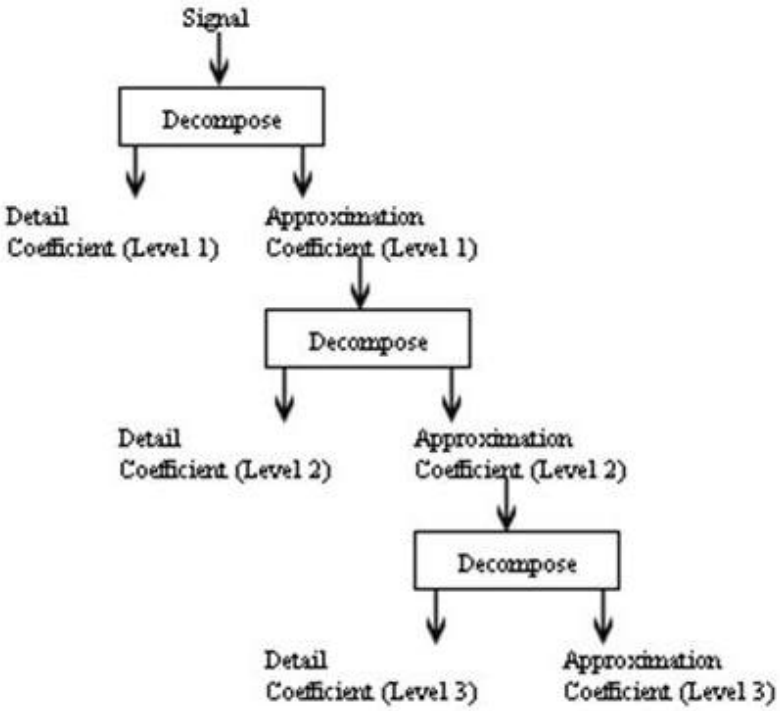
$$\delta = \sqrt{2\log(N_{cd})} \qquad \text{[식 3.5.3]}$$

잡음신호(noisy signal)는 다수준 일차원 웨이브렛 분해 방법(multi-level 1-D wavelet decomposition)에 의해 여러 그룹(sets)의 근사계수와 상세계수로 분해된다. 절대값이 임계값(threshold) 이하인 상세계수들은 버려지고, 근사계수와 조정된 상세계수들이 잡음이 제거된 신호를 재구성하는 데 이용된다. 다수준 일차원 웨이브렛 분해방법은 일종의 근사계수들을 연속적으로 분해해 내는 과정이라 할 수 있다. nLevel을 분해를 수행된 횟수라고 정의하면, nLevel은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$nLevel = \min(7, \log_2{}^N) \qquad \text{[식 3.5.4]}$$

여기서, N은 입력신호의 길이이다.

임계값의 결정 방법이 Universal 추정 방법에 의해 추정되었을 때, 임계값은 위의 [식 3.5.4]와 같이 계산되며, 여기서 N_{cd}는 최종 1 수준의 상세계수에 해당되는 수이다.



[그림3.5.14] 다수준 일차원 웨이브렛 분해 절차

정규 직교 기저를 지진 스케일 함수 및 웨이브렛은 시간대에서 유한 길이를 지진 Harr 시스템과 Daubechies 시스템(유한 임펄스 시스템-Finite Impulse Response)이 있으며, 초기의 스케일 함수 및 웨이브렛의 경우에는 Meyer 및 Battle-Lemaries 웨이브렛과 같이 시간 영역 전체에 형성되며(무한 임펄스 시스템-Infinite Impulse Response), 따라서 주파수 상에는 대역이 제한된(Band-limit) 형태가 있다.

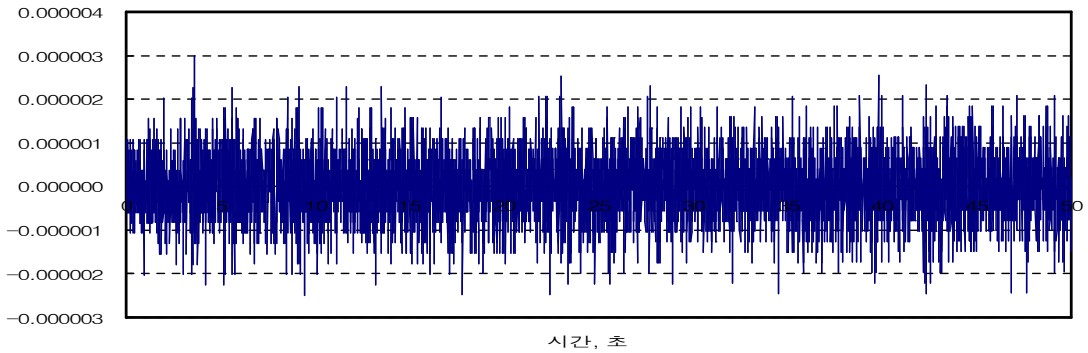
다해상도 분석 방법에서는 유한 영역에서 정의되는 웨이브렛(compactly supported wavelet)을 이용한다. 정규 직교 성을 지니면서 유한 길이를 지진 웨이브렛은 Harr 시스템이 유일하였지만 Daubechies에 의해 Harr함수에 비해 시간상에서 좀 더 부드러우면서 유한 길이를 지진 정규직교 웨이브렛(Daubechies compactly supported wavelet)이 제안되었다. 다해상도 분석 방법을 이용한 잡음처리 등 주파수 분해의 정확도가 필요한 경우에는 차수가 낮은 웨이브렛을 사용할 수 없다. 본 연구에서는 일반적인 잡음제거 방법에 Daubechies 웨이브렛 차수 8차(DB8)를 적용하였다.

(3) H댐 상시 계측기록 특성 분석

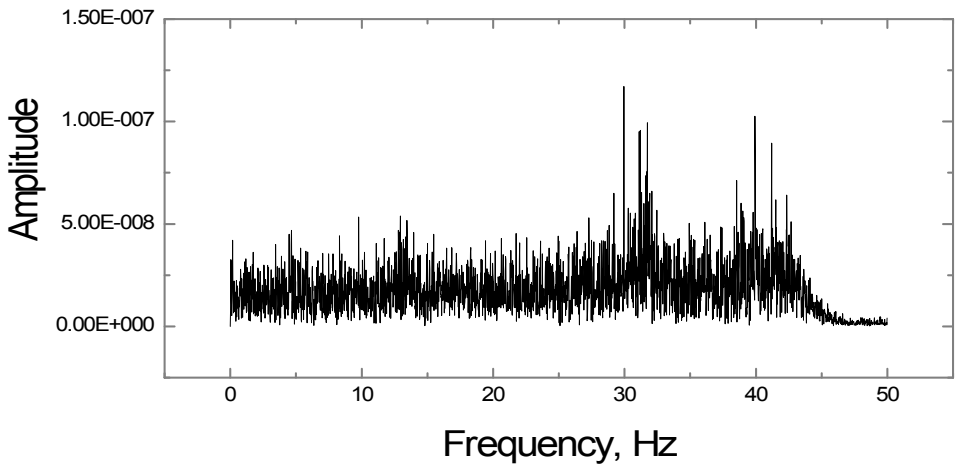
실지진계측기록의 분석을 위한 잡음제거 작업을 수행하기 위해서는, 우선적으로 실계측기록에 상시 포함될 수 있는 상시의 계측기록 특성을 우선적으로 분석하여야 한다.

(가) 댐 기초부 상시기록 특성

댐 기초부에서의 base line correction 계측기록은 [그림 3.5.15]와 같다. 주파수 특성을 분석하기 위해서 FFT 분석을 수행하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 기초부 상시기록은 백색잡음(White noise)의 형태로 신호분포가 전 주파수대역에 나타나는 것을 볼 수 있고, 특히 30Hz와 40Hz 근처에서 진폭이 큰 잡음이 분포하는 것으로 나타났다.



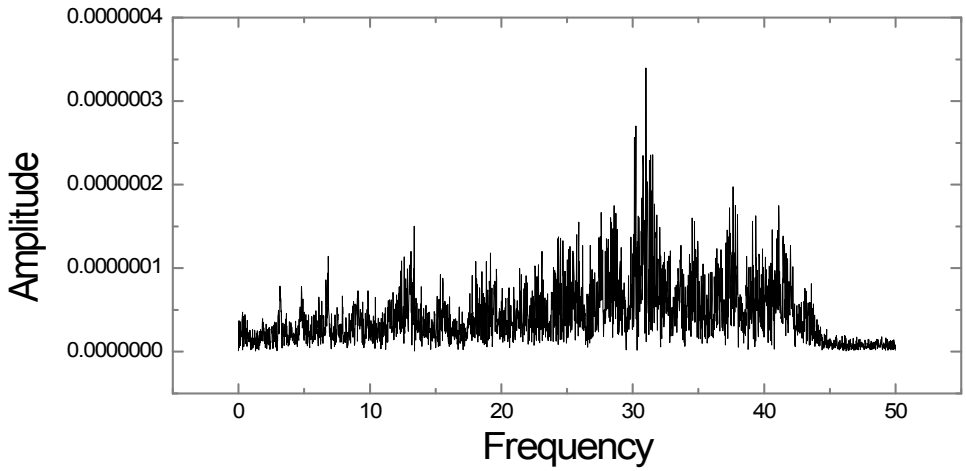
[그림 3.5.15] 댐 기초부 상하류방향 상시 계측자료



[그림 3.5.16] 기초부 상시 계측기록 주파수 특성

(나) 댐 정상부 상시기록 특성

댐 정상부에서의 주파수 특성을 분석하기 위해서 FFT 분석을 수행하였다. 정상부 상시기록은 백색잡음(White noise)의 형태로 신호분포가 전 주파수대역에 나타나는 것을 볼 수 있고, 기초부에 비해 특히 30Hz와 40Hz 근처에서 진폭이 큰 잡음이 분포하는 것으로 나타났다.

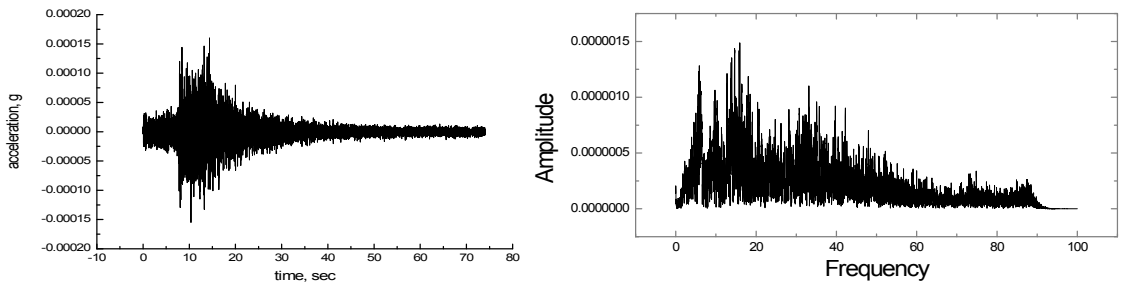


[그림 3.5.17] 정상부 상시 계측기록 주파수 특성

(4) 계측자료 잡음제거(Denoise)

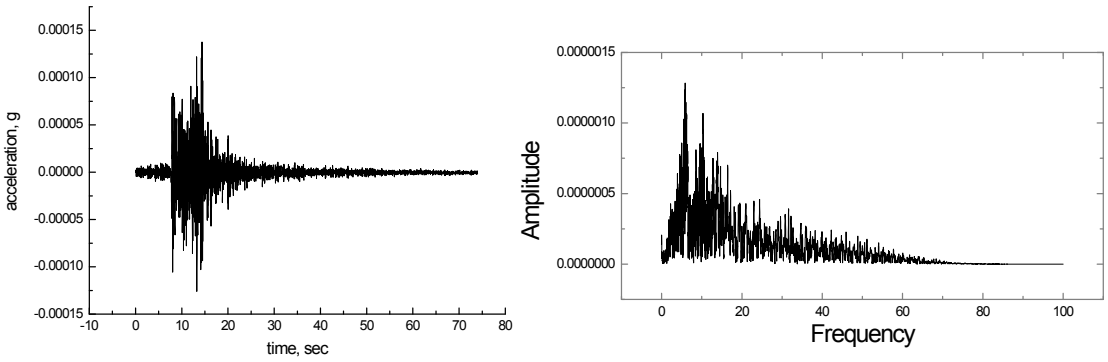
Daubechies의 정규직교 웨이브렛을 사용하여 level 3까지 상세계수와 근사계수를 분리하고 임계값(threshold)은 50을 적용한다. 즉, 각 Level에서의 상계계수에 의한 시간이력 중에 스케일이 50% 미만인 값은 전부 '0'으로 처리한다.

(가) 횡성 1차 기초부 지진기록 잡음제거



(a) 시간이력 (b) 주파수특성

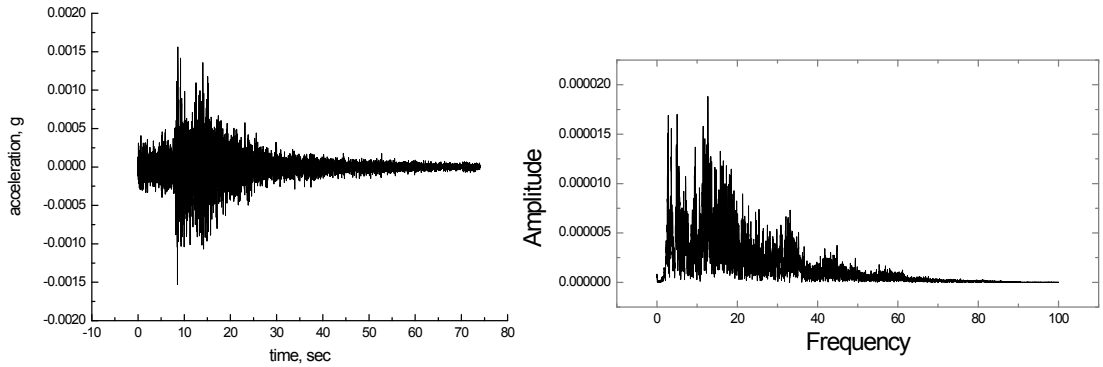
[그림 3.5.18] 기초부 계측지진 자료(잡음제거 전)



(a) 시간이력 (b) 주파수특성

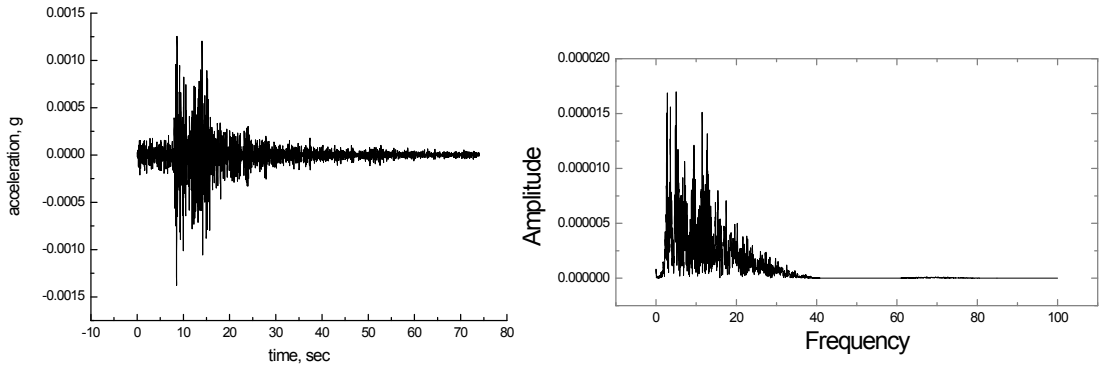
[그림 3.5.19] 횡성 1차 기초부 계측지진 자료(잡음제거 후)

(나) 횡성 1차 정상부 지진기록 잡음제거



(a) 시간이력 (b) 주파수특성

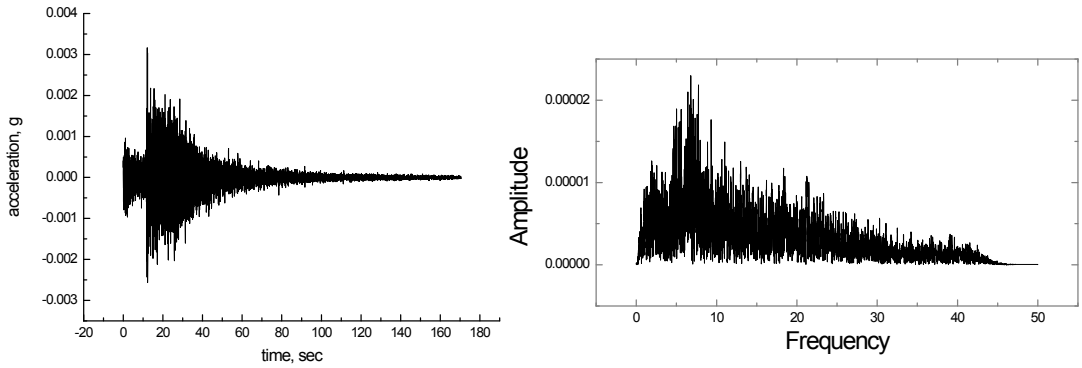
[그림 3.5.20] 횡성 1차 정상부 계측지진 자료(잡음제거 전)



(a) 시간이력 (b) 주파수특성

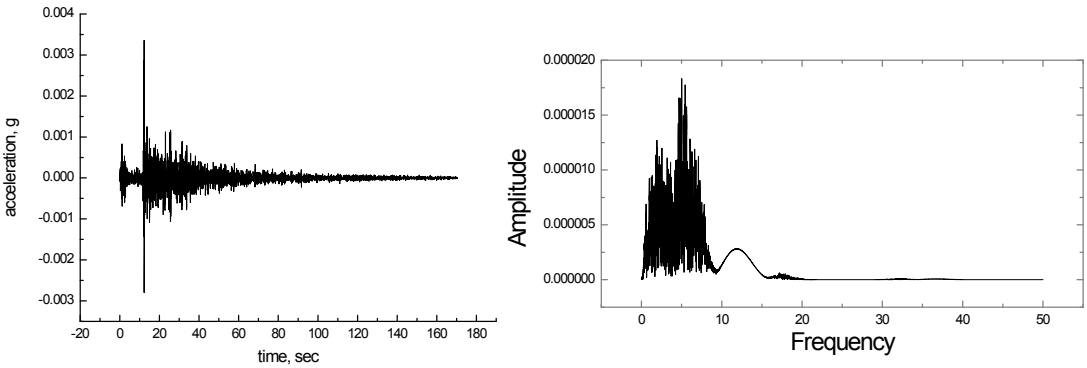
[그림 3.5.21] 횡성 1차 정상부 계측지진 자료(잡음제거 후)

(다) 횡성 2차 기초부 지진기록 잡음제거



(a) 시간이력 (b) 주파수특성

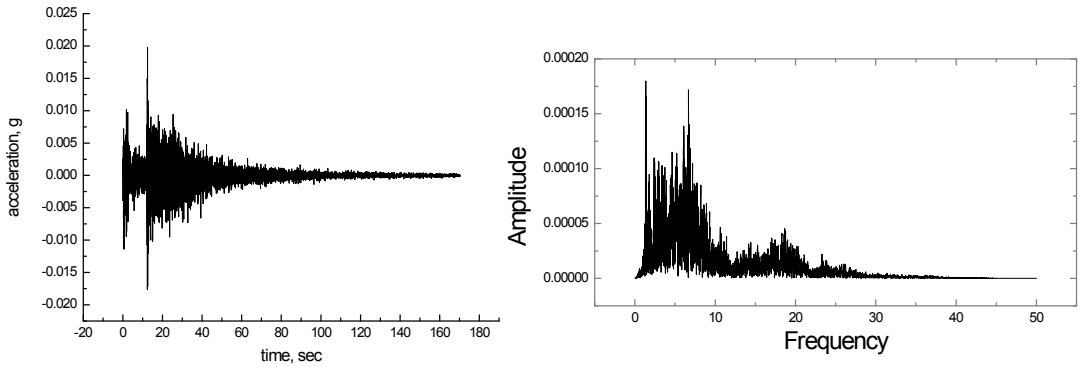
[그림 3.5.22] 횡성 2차 기초부 계측지진 자료(잡음제거 전)



(a) 시간이력 (b) 주파수특성

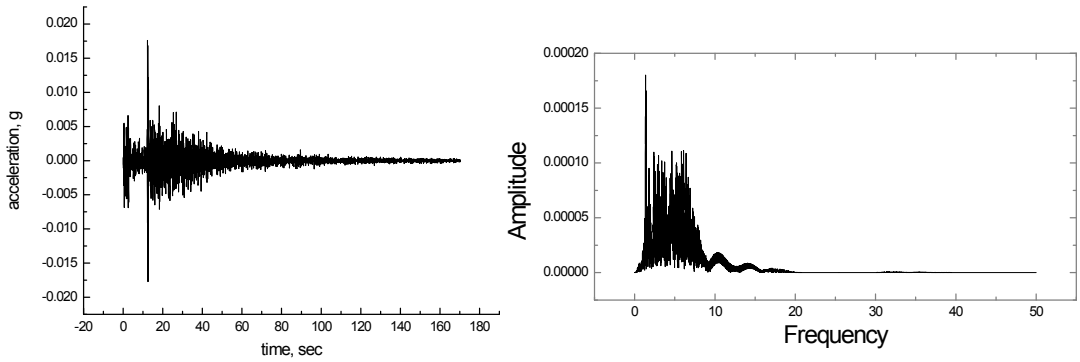
[그림 3.5.23] 횡성 2차 기초부 계측지진 자료(잡음제거 후)

(라) 횡성 2차 정상부 지진기록 잡음제거



(a) 시간이력 (b) 주파수특성

[그림 3.5.24] 횡성 2차 정상부 계측지진 자료(잡음제거 전)



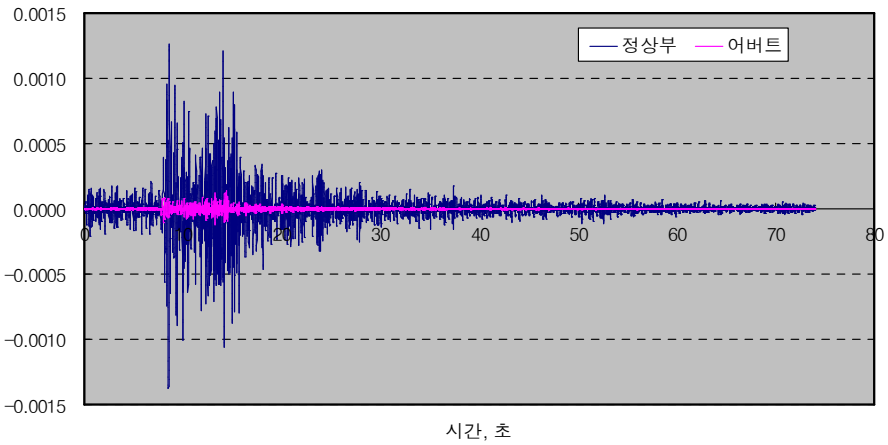
(a) 시간이력 (b) 주파수특성

[그림 3.5.25] 횡성 2차 정상부 계측지진 자료(잡음제거 후)

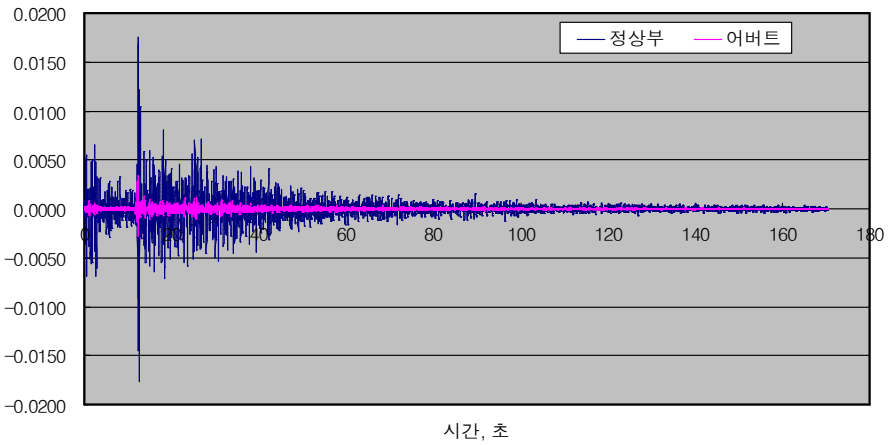
(5) 계측자료 특성 분석

(가) 가속도 증폭특성

[그림 3.5.26]과 [그림 3.5.27]은 잡음제거 후 댐 상하류방향 댐기초부와 댐정상부에서 계측된 지진기록을 나타낸 것이다. 횡성댐 1차 지진의 경우 계측된 가속도 최대 크기는 양안부에서 0.000138g, 댐 정상부에서 0.00138g로 약 10배의 가속도 크기가 증폭되었다. 횡성댐 2차 지진의 경우에는, 계측된 가속도 최대 크기는 양안부에서 0.00117g, 댐 정상부에서 0.0071g로 약 6배의 가속도 크기가 증폭되었다.



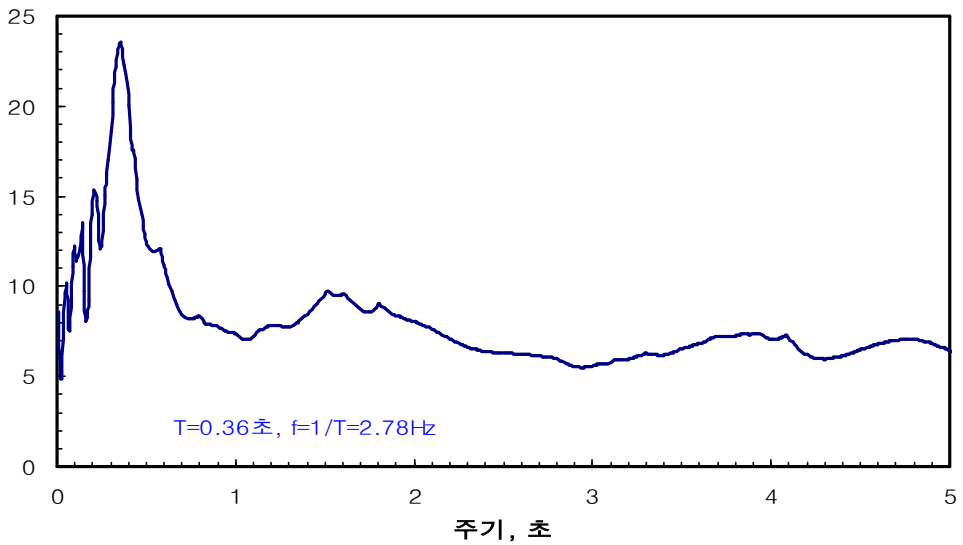
[그림 3.5.26] 횡성 1차 상하류방향 지진계측 자료(잡음제거 후)



[그림 3.5.27] 횡성 2차 상하류방향 지진계측 자료(잡음제거 후)

(나) 댐 고유진동수 산정

댐의 고유진동수(fundamental frequency) 산정은 지진발생시 댐의 거동을 근사적으로 예측할 수 있는 기초자료를 제공할 뿐만 아니라, 수치해석을 이용하여 지진발생시 댐의 거동을 평가하고자 할 때, 입력물성 및 해석결과의 적정성을 평가할 수 있는 유용한 참고자료로 활용될 수 있다. 일정 감쇠비에 대한 댐 저부와 정상부에서의 가속도 계측기록의 응답스펙트럼을 각각 구한 후, 댐 정상부 응답스펙트럼을 댐 저부 응답스펙트럼으로 나눈 응답스펙트럼비를 산정하고, 산정된 응답스펙트럼비에서 첨두값을 보이는 주기를 산정하고 산정된 주기값으로부터 고유진동수를 산정할 수 있다(하익수 등, 2008).

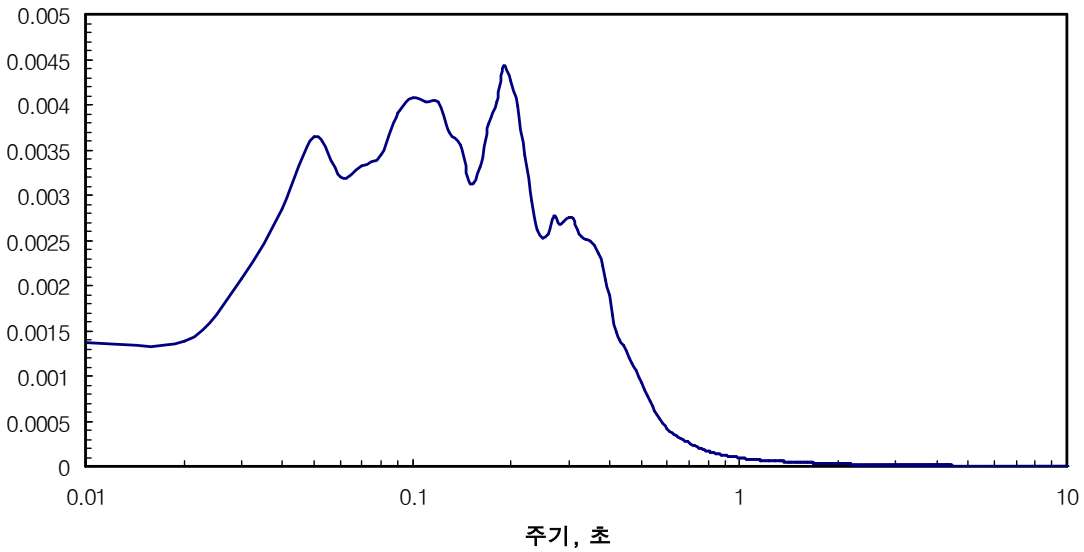


[그림 3.5.28] 미소지진계측기록에 의한 H댐의 고유진동수 산정(횡성 1차지진기록 이용)

본 연구에서는 횡성 1차 지진관측기록으로부터 H댐의 고유진동수를 산정해 보았다. [그림3.5.28]은 산정결과를 나타낸 것으로 미소지진계측기록에 의해 산정된 H댐의 고유주기는 0.36초, 고유진동수는 2.78Hz 인 것으로 산정되었다.

(다) 주파수 특성

횡성 1차 지진기록의 정상부 주파수특성을 분석하였다. 분석된 결과는 향후 물성역산시 수치해석으로 모사된 결과와의 비교에 이용된다.



[그림 3.5.29] 횡성 1차 정상부 가속도 계측기록 주파수 특성

다. 물성역산을 위한 계측지진기록 확정

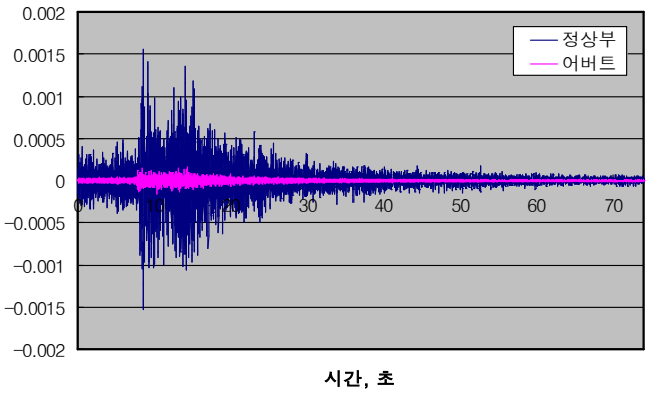
앞서 분석한 결과를 바탕으로 물성역산을 위한 미소지진계측기록은 횡성 1차지진기록을 이용하도록 선정하였으며, 역산을 위한 대상댐은 H댐으로 하였다. H댐에 대한 물리탐사(HWAW)가 기 수행(2009년) 되어, 결과를 상호비교할 수 있을 것으로 판단하였다.

3. 국내 2개댐 지진계측기록 확보 및 분석

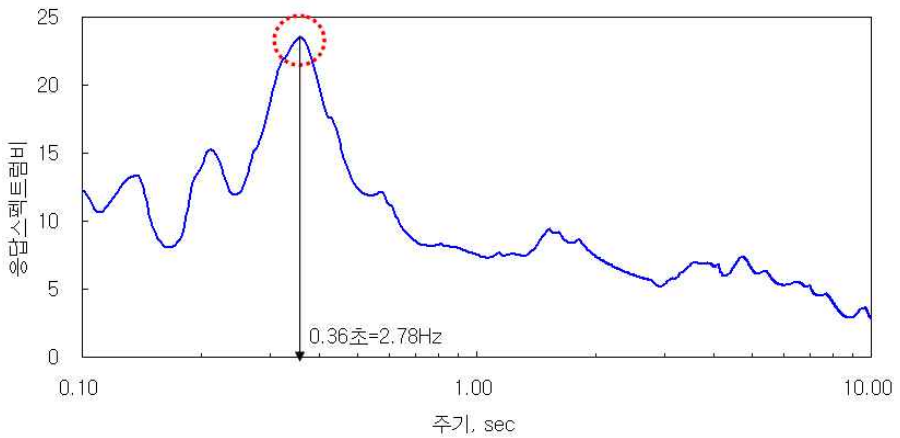
가. 지진계측기록 I (H댐)

2006년 1월 19일 강원도 영월군 동쪽 20km 지점에서 발생한 규모 3.2의 지진에

대하여 강원도 횡성에 위치한 H다목적댐 부지에서 관측된 지진은 [그림 3.5.30]과 같다. 응답스펙트럼비 방법을 이용하여 산정된 H댐의 고유진동수는 2.78Hz이다.



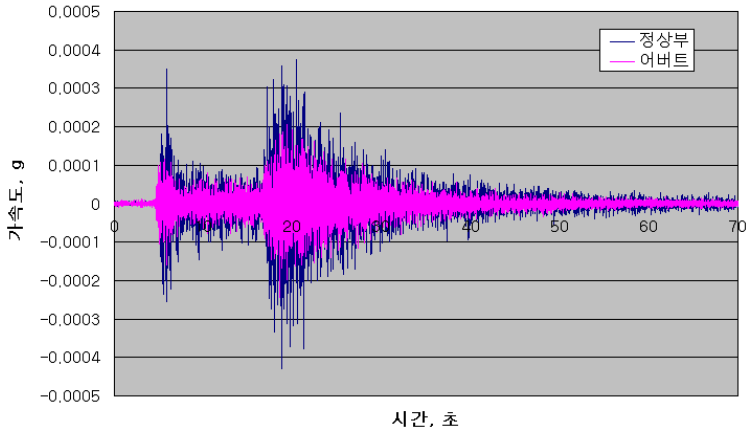
[그림 3.5.30] 횡성댐 지진관측 가속도 시간이력



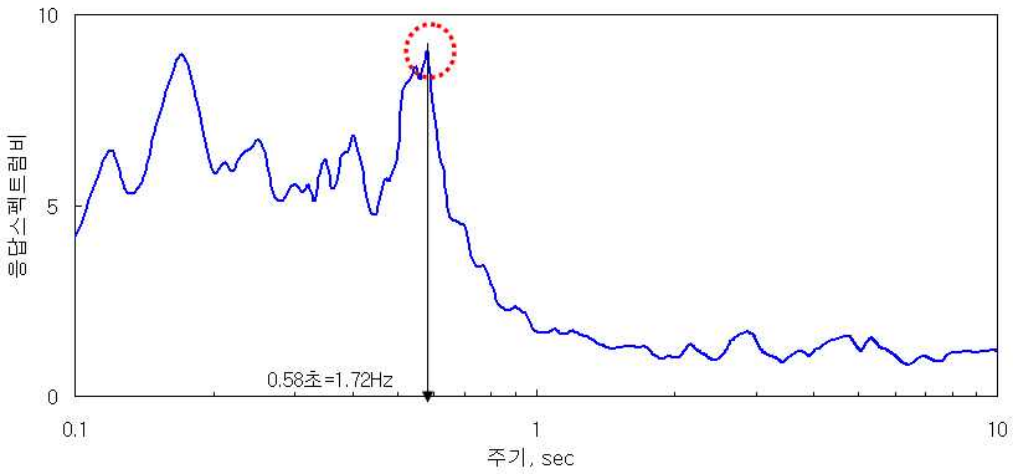
[그림 3.5.31] 계측지진기록의 응답스펙트럼비에 의한 횡성댐 고유진동수 산정

나. 지진계측기록 II (S댐)

2010년 2월 9일 경기도 시흥시 북쪽 8km 지역에서 발생한 규모 3.0의 지진에 대하여 강원도 춘천에 위치한 S다목적댐 부지에서 관측된 지진은 [그림 3.5.32와 같다. 응답스펙트럼비 방법을 이용하여 산정된 소양강댐의 고유진동수는 1.72Hz이다.



[그림 3.5.32] 소양강댐 지진관측 가속도 시간이력



[그림 3.5.33] 계측지진기록의 응답스펙트럼비에 의한 소양강댐 고유진동수 산정

4. 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석에 의한 사력댐 동적물성 산정기법 제시

가. 실지진 계측기록을 활용한 사력댐의 고유주기 산정방법 제안

(1) 개요

댐의 고유주기를 산정하는 것은 지진발생시 댐의 거동을 근사적으로 예측할 수 있는 기초자료를 제공받을 뿐만 아니라, 수치해석을 이용하여 지진발생시 댐의 거동을 평가하고자 할 때, 입력물성 및 해석결과의 적정성을 평가할 수 있는

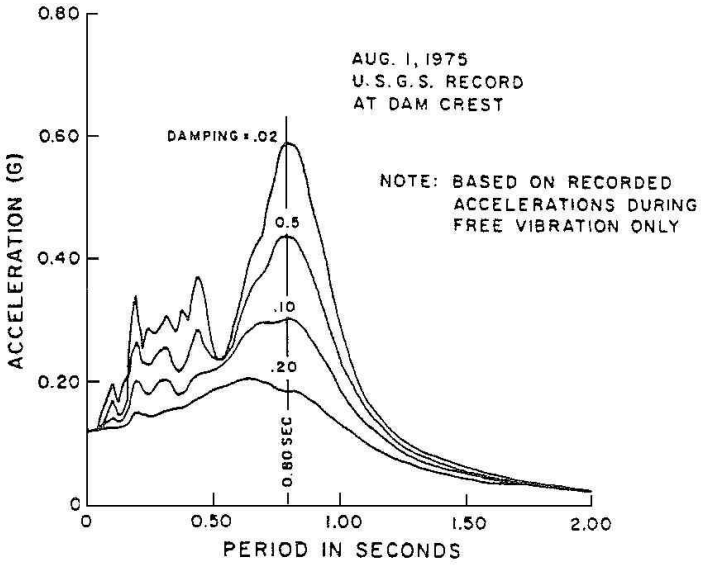
유용한 기준자료로 활용될 수 있다.

고유주기를 산정하는 방법상의 차이는 있으나, 기존의 연구결과에 의하면 높이가 30m~130m 범위의 필댐(사력댐, 콘크리트표면차수벽형석괴댐, 흙댐을 통칭)의 고유주기는 0.2초~0.8초 범위의 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Abdel-Ghaffar 등, 1979: Makdisi 등, 1979; Mejia 등, 1982; Okamoto, 1984; Uddin 등, 1995).

사력댐의 고유주기를 산정하는 방법에는, 지진 계측자료 분석에 의한 방법, 강제 진동 실험(forced vibration experiments)에 의한 방법, 미진동 측정장치(microtremor measurements)에 의한 방법 등이 있다(Ohmachi 등, 1994). 이러한 방법 중에 현재까지는 지진 계측자료를 분석하여 고유주기를 산정하는 방법이 가장 합리적인 방법으로 여겨지고 있다. 국내의 경우, 최근까지 댐에서의 지진 계측이 체계적으로 이루어지지 않아서, 계측기록을 활용하기가 불가한 실정이었다. 그러나 국내에서도 '08년 말까지 주요 대댐인 다목적댐과 용수전용댐에 지진 계측기 설치 및 실시간 자료획득 시스템이 구축 완료되어, '09년 1월부터 다목적댐과 용수전용댐에서 지진자료를 확보할 수 있는 여건이 조성되었다(하익수 등, 2008).

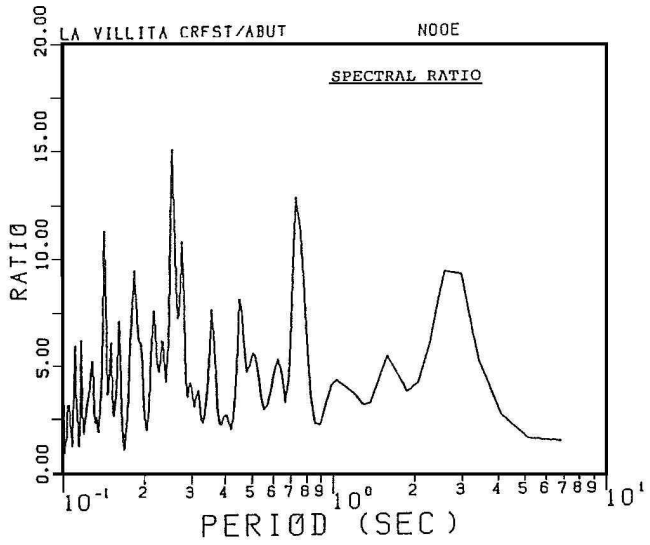
지진 계측자료를 분석하여 기존 사력댐의 고유주기를 산정하는 방법에는 댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법, 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비에 의한 방법 등이 있다.

댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법이란, 댐 정상부에서 관측된 지진기록 중 주진동(main event) 후 자유진동에 의한 파형부분을 발췌하여 일정감쇠비에 대한 가속도 응답스펙트럼 곡선을 작성하고, 작성된 응답스펙트럼 곡선에서 첨두값(peak)을 보이는 주기를 고유주기로 간주하는 방법이다(Mejia 등, 1982) ([그림 3.5.5] 참조).



[그림 3.5.34] 주진동 이후 댐 정상에서 계측된 자유진동 기록에 대한 가속도 응답스펙트럼(Mejia 등, 1982)

댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법이란, 주파수대역에서 댐 기초부 및 양안부(abutment)에서 가속도 크기와 댐 정상부에서의 가속도 크기의 비를 스펙트럼비(spectral ratio)로 정의하고, 이러한 가속도 스펙트럼비 곡선의 첨두값(peak)을 나타내는 주기를 고유주기로 간주하는 방법이다(Okamoto, 1984; Ohmachi 등, 1994)([그림 3.5.6] 참조).



[그림 3.5.35] La Villita 댐의 퓨리에 스펙트럼비(Ohmachi 등, 1994)

댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 고유주기 산정방법은 먼저 댐 저부(기초부 또는 양안)와 댐 정상부에서 각각 계측된 가속도 시간이력에 대한 응답스펙트럼을 구하고, 다음으로 댐 정상부의 가속도 응답스펙트럼을 댐 저부의 가속도 응답스펙트럼으로 나누어 응답스펙트럼비 곡선을 작성한다. 이 결과를 토대로 작성된 응답스펙트럼비 곡선의 첨두값으로 결정하는 방법이다(Makdisi 등, 1979).

상기의 방법들 중, 댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법은 주진동 이후 자유진동에 의한 계측가속도 파형이 확연히 구분될 수 있을 만큼 충분히 큰 지진기록을 분석하는 경우에 유용하며, 국내 사력댐에서와 같이 미소지진기록을 계측하여 분석하는 경우에는 자유진동기록 발췌 자체가 용이하지 않으며, 발췌한다고 할지라도 분석자마다 발췌구간에 대한 자의적인 해석이 있을 수 있어서 결과의 신뢰성을 저하시킬 수 있다(하익수 등, 2008). 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법 또한 댐 정상부에서 계측된 가속도의 최대크기가 0.02g 이상의 지진기록에 대해 적용된 방법이다(Okamoto, 1984). 그리고 이 방법은 퓨리에 스펙트럼비 곡선의 첨두값이 1초 이상의 장주기 영역에서도 크게 나타나, 공학적 판단 없이는 구분하기가 용이하지 않다. 특히 국내와 같이 미소지진 계측기록을 활용하는 경우에는 적절한 자료의 평활화(smoothing) 작업이 없이는 첨두값을 구분하기가 용이하지 않을 것으로 예상할 수 있다. 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 고유주기 산정방법은 미소지진 기록에 직접적으로 적용한 사례가 없다. 이러한 산정방법들의 적용상 한계로 인해, 미소지진 계측기록(계측 최대가속도 0.001g 이하)을 활용하여 국내 사력댐의 고유주기를 신뢰성 있게 산정할 수 있는 방법을 선정・제시할 필요가 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 댐 저부와 댐 정상부에서 계측된 미소지진 기록을 활용하여, 국내 사력댐의 고유주기를 일관성 있게 산정할 수 있는 방법을 선정・제시하는 데 있다. 이를 위하여, 본 연구에서는 '09년 1월에서 '10년 5월 사이에 국내에서 발생한 6회의 지진에 대해 7개의 사력댐에서 계측된 총 20개의 댐 미소지진 계측기록을 분석하였다. 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 방법과 댐 저부와 정상부 가속도 응답스펙트럼비에 의한 방법으로 사력댐의 고유주기를 산정하고, 그 결과로부터 각각의 방법의 적용성을 검토해 보았다. 또한, 선정・제시한 방법으로 산정한 사력댐 고유주기 결과를 일본 댐에 대해 기존 방법으로 제시한 결과와 비교하여 산정방법의 실효성을 확인해 보았다. 댐 정상부 자유진동 기록 분석에 의한 방법은 상기에 제시한 문제점으로 인하여 금번 연구에서 제외하였다.

(2) 미소지진 계측

본 연구에서는 '09년 1월부터 '10년 5월 사이에 한반도 일대에서 발생하여, 연구대상댐에 유효하게 계측된 기록을 남긴 지진만을 대상 지진으로 하였다. 대상 지진의 규모는 M 2.1~M 3.2 범위였고, 대상 지진에 의해 대상 댐들의 정상부에서 계측된 상하류방향 지진가속도의 최대크기 범위는 0.00005g~0.001g 정도 수준이었다.

[표 3.5.1]에 나타난 계측지진에 대해 유효한 계측기록을 얻은 사력댐은 [표 3.5.2]와 같이 7개 댐이었다. [표 3.5.2]는 이러한 지진이 계측된 연구 대상댐의 댐 제원, 미소지진 계측기록, 지진가속도계 설치현황을 나타낸 것이다.

[표 3.5.2] 계측지진 요약

지진 구분	진원시	규모	진앙지	상세 진앙위치	
				위도	경도
A	2010-05-15 14:44	2.2	전북 무주군 동쪽 16km 지역	36.00 N	127.84 E
B	2010-02-21 21:17	2.3	충남 천안시 남서쪽 8km 지역	36.75 N	127.10 E
C	2010-02-16 18:53	3.2	울산 동구 동북동쪽 64km 해역	35.65 N	130.10 E
D	2010-02-09 18:08	3.0	경기 시흥시 북쪽 8km 지역	37.45 N	126.80 E
E	2010-01-23 17:54	2.1	경북 상주시 북쪽 20km 지역	36.59 N	128.17 E
F	2009-01-01 06:45	2.1	경북 구미시 북쪽 22km 지역	36.31 N	128.35 E

[표 3.5.3] 지진계측 사력댐 제원, 미소지진 계측 기록, 지진계 설치 현황

댐명	댐높이 (m)	댐길이 (m)	관측 구분 지진 (댐마루 관측최대가속도, g)	지진계 설치 위치(개소)
D댐	27	318	A*, C (0.00007, 0.001)	댐마루/하류사면선단/ 좌안암반 (3)
Y댐	42	300	A, D, E, F (0.0001, 0.0001, 0.0001, 0.0004)	댐마루/사면선단/ 하류좌안암반 (3)
H댐	48.5	205	D, E (0.0002, 0.00003)	댐마루/댐사면/ 우안암반 (3)
W댐	55	407	A, D, E, F (0.00015, 0.0001, 0.00008, 0.00006)	댐마루/하류선단/ 우안하류암반 (3)
J댐	58	330	A, B, D (0.00005, 0.00005, 0.0001)	댐마루/하류중간/ 좌안암반 (3)
I댐	73	515	C, D, F (0.00036, 0.0001, 0.0005)	댐마루/하류사면/ 우안하류암반 (3)
S댐	123	530	B, D (0.0001, 0.0004)	댐마루/하류사면/ 우안하류암반 (3)

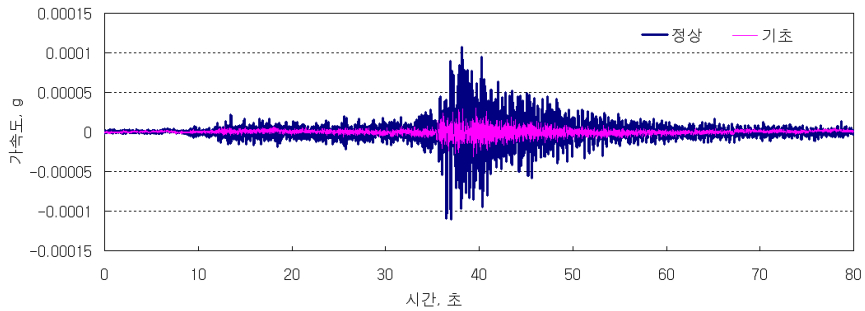
* : A~G는 표 1에서 구분 제시한 지진을 의미함

(3) 국내 사력댐 고유주기 산정

(가) 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비를 이용한 고유주기 산정

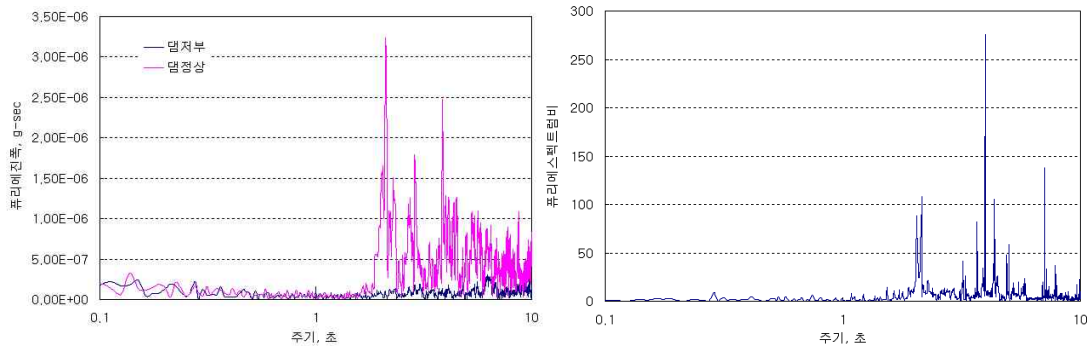
댐 저부와 정상부 가속도 증폭비를 이용한 고유주기 산정방법의 국내와 같은 미소지진 계측기록을 이용하는 경우에 대한 적용성을 확인하기 위하여, 전술한 계측지진 기록에 적용하여 사력댐의 고유주기를 산정해 보았다.

[그림 3.5.36]은 D지진([표 3.5.1] 참조) 발생으로 인해, I댐 양안부(abutment)와 댐 정상부에서 계측된 미소지진 가속도 시간이력을 나타낸 것이다.



[그림 3.5.36] D지진시 I댐 정상부와 어버트에 계측된 가속도 시간이력

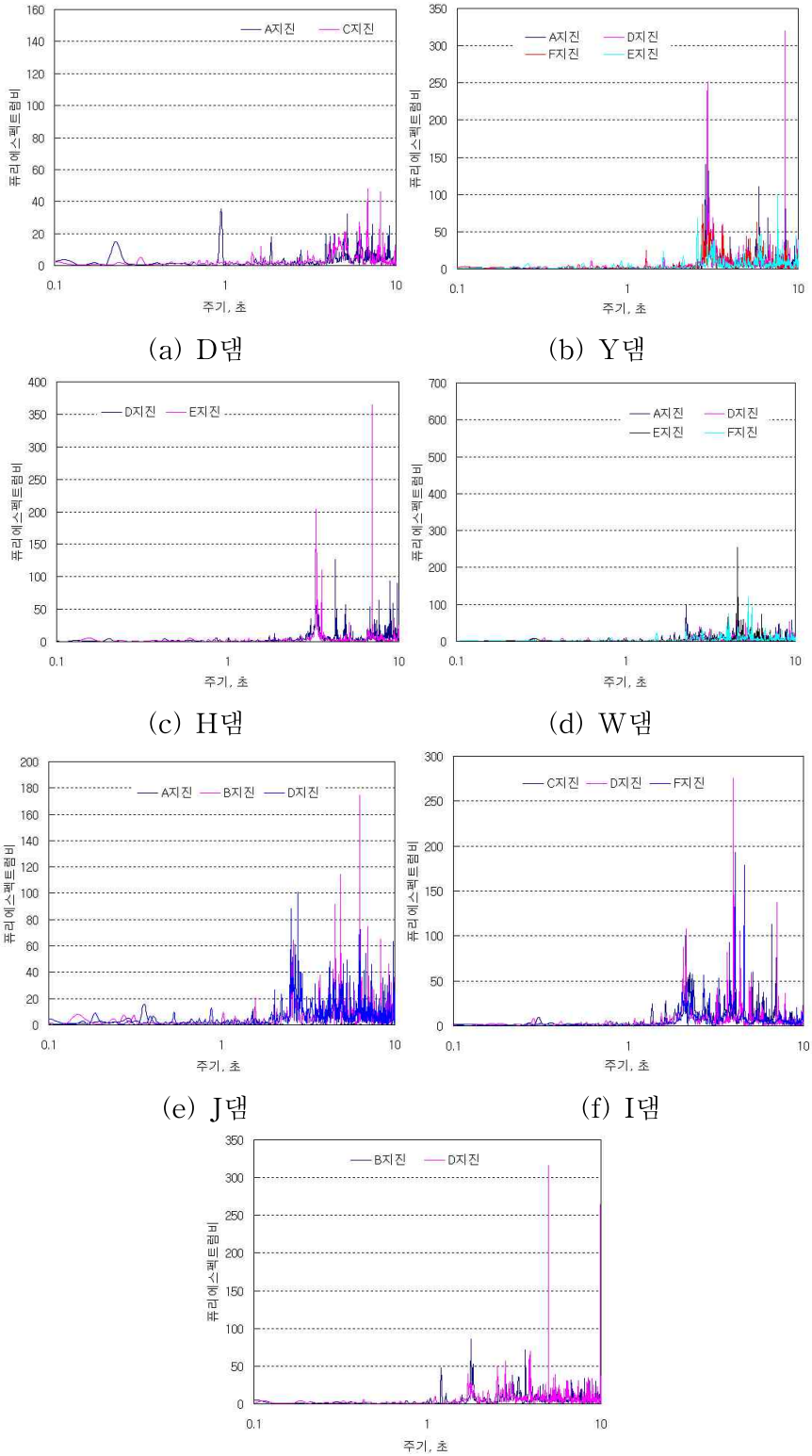
[그림 3.5.37]은 D지진에 의해 I댐에서 계측된 미소지진기록을 이용하여 댐의 고유주기를 산정하는 절차를 예로써 나타낸 것이다. [그림 3.5.37]의 (b)는 [그림 3.5.37]의 (a)에 나타난 댐 정상부의 퓨리에진폭(Fourier amplitude)을 댐저부의 퓨리에진폭으로 나눈 가속도 증폭비를 나타낸 것이다. [그림 3.5.37]의 (b)에서 기존의 연구결과에 의해 필댐에서 의미있는 주기 범위(약 0.2~0.8초)내의 첨두값을 찾아 고유주기를 산정하여야 하나, 그림에서 볼 수 있듯이 이러한 범위내에서 의미있는 첨두값을 찾기는 불가능함을 확인할 수 있다.



(a) 댐 저부 및 정상부 가속도 퓨리에진폭 (b) 퓨리에 스펙트럼비

[그림 3.5.37] D지진시 I댐 미소지진계측기록을 활용한 댐 고유주기 산정 예시 (댐저부와 정상부 가속도증폭비 이용)

[그림 3.5.38]는 이러한 산정방법의 절차로서, 각 댐별 퓨리에 스펙트럼비 곡선을 나타낸 것이다. [그림 3.5.38]의 결과는, [그림 3.5.37]에서 보여지는 것과 유사하게 기존의 필댐 고유주기 산정사례(약 0.2~0.8초)에 비추어 결코 나타날 수 없는 1.0초 이상(고유진동수 1Hz 이하)의 주기에서 첨두값이 두드러지며, 특히 미소지진 기록인 경우에는 주기 1.0초 이하 범위에서 첨두값은 거의 두드러지지 않거나, 두드러지더라도 상이한 지진에 대해서는 거의 일관성 있는 결과를 주지 않음을 확인할 수 있다. 따라서, Okamoto(1984)가 제시했던 이러한 분석방법은 일정크기이상의 가속도(댐정상에서 0.02g)를 계측한 경우에는 적용이 가능하나, 국내에서와 같이 지진가속도의 크기가 매우 작은 미소지진기록(댐정상에서 0.001g 이하)에 적용하는 데에는 한계가 있음을 확인할 수 있었다.



(a) D댐 (b) Y댐

(c) H댐 (d) W댐

(e) J댐 (f) I댐

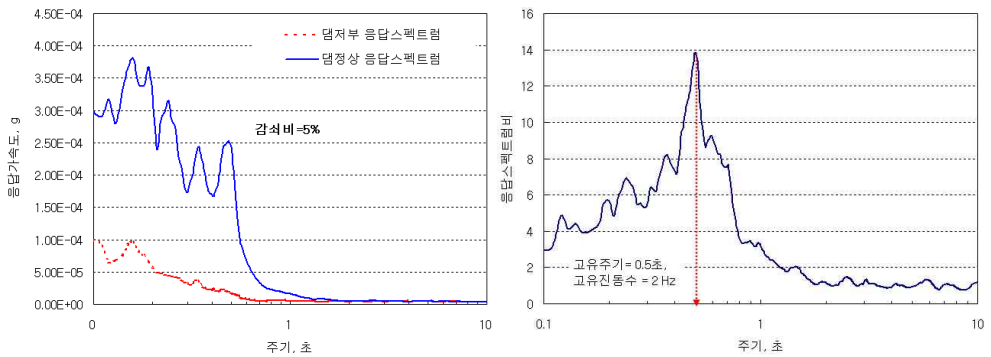
(g) S댐

[그림 3.5.38] 댐 저부와 정상부 계측가속도의 퓨리에 스펙트럼비

(나) 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 고유주기 산정

앞서 제시한 것과 마찬가지로 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 고유주기 산정방법의 국내와 같은 미소지진 계측기록을 이용하는 경우에 대한 적용성을 확인하기 위하여, 전술한 계측지진 기록에 적용하여 사력댐의 고유주기를 산정해 보았다. 다만, 고유주기를 산정함에 있어, 기존의 연구결과에 의해 필댐에서 의미있는 주기 범위(약 0.2~0.8초)내에서 응답스펙트럼비 곡선의 첨두값을 이용하였다.

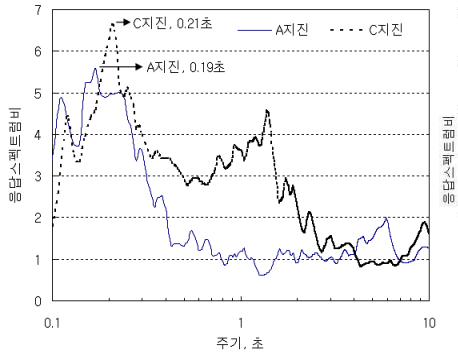
[그림 3.5.39]는 D지진에 의해 I댐에서 계측된 미소지진기록을 이용하여 댐의 고유주기를 산정하는 절차를 예로써 나타낸 것이다. [그림 3.5.39]로부터 I댐의 D지진 계측기록에 의한 고유주기는 0.5초(고유진동수는 2Hz)로 산정될 수 있다.



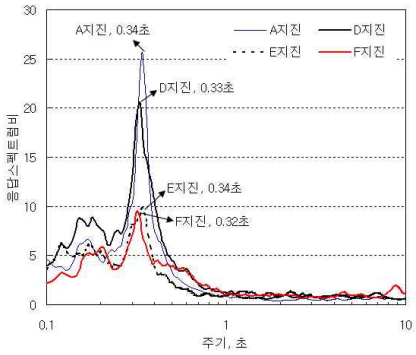
(a) 댐 저부 및 정상부 응답스펙트럼 (b) 응답스펙트럼비에 의한 고유주기 산정

[그림 3.5.39] D지진시 I댐 미소지진계측기록을 활용한 댐 고유주기 산정 예시(댐 저부와 정상부 응답스펙트럼비 이용)

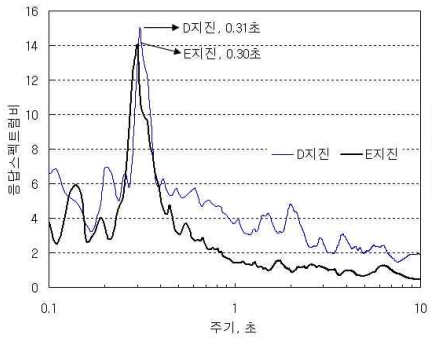
[그림 3.5.40]은 이러한 방법에 따라 고유주기 산정을 위해 작성한, 각 지진에 대한 각 사력댐의 응답스펙트럼비 곡선을 나타낸 것이며, 곡선에서 첨두값을 나타내는 주기로부터 고유주기를 산정한 결과를 [표 3.5.4]에 나타내었다. 다만, [그림 3.5.40]에서 J댐과 S댐의 경우에는 각각 D지진시와 B지진시에 크기가 비슷한 2개의 첨두값을 나타내어 구분이 다소 어려운 점이 있었는데, 타 지진시(J댐의 경우에는 A와 B지진, S댐의 경우에는 D지진)의 응답스펙트럼비 곡선의 첨두값 위치를 참고하여 첨두값을 나타내는 주기를 결정하였다.



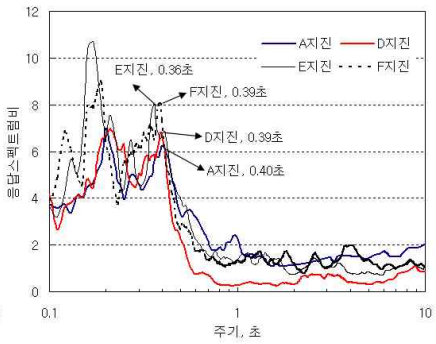
(a) D댐



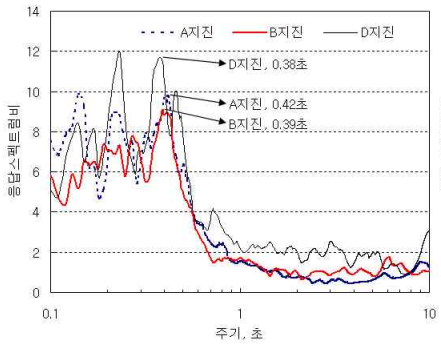
(b) Y댐



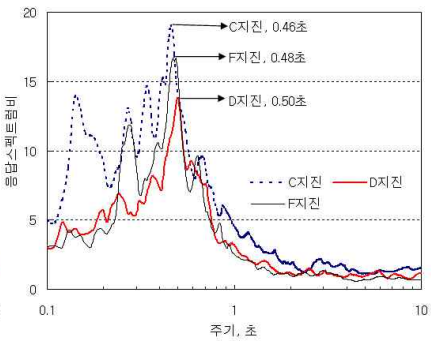
(c) H댐



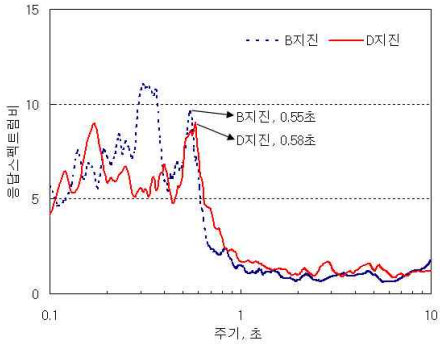
(d) W댐



(e) J댐



(f) I댐



(g) S댐

[그림 3.5.40] 댐 저부와 댐 정상부 계측 가속도의 응답스펙트럼비

[표 3.5.4] 국내 7개 사력댐 고유주기 산정 결과

번호	댐명	댐높이(m)	댐길이(m)	지진구분	고유주기(초)
1	D댐	27.0	318	A*	0.19
2				C	0.21
3	Y댐	42.0	300	A	0.34
4				D	0.33
5				E	0.34
6				F	0.32
7	H댐	48.5	205	D	0.31
8				E	0.30
9	W댐	55.0	407	A	0.40
10				D	0.39
11				E	0.36
12				F	0.39
13	J댐	58.0	330	A	0.42
14				B	0.39
15				D	0.38
16	I댐	73.0	515	C	0.46
17				D	0.50
18				F	0.48
19	S댐	123.0	530	B	0.55
20				D	0.58

* : A~G는 표 1에서 구분 제시한 지진을 의미함

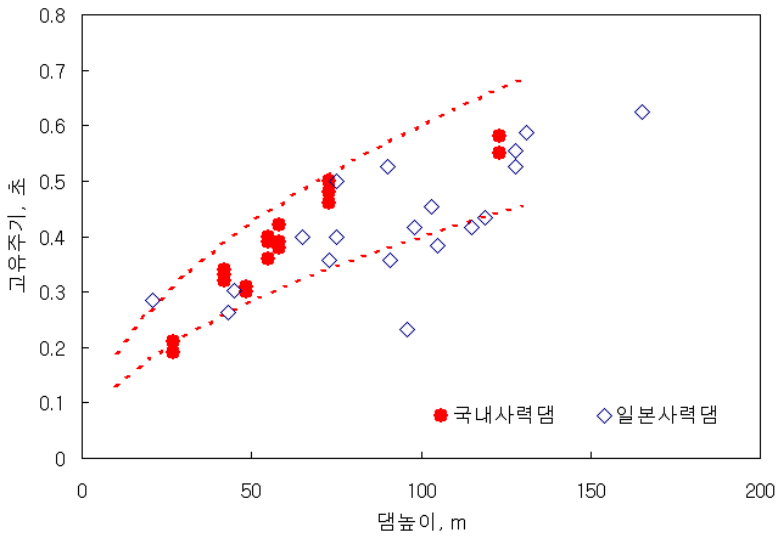
[그림 3.5.40]과 [표 3.5.4]의 결과를 통해, 본 연구에서 제시한 방법을 적용하면 고유주기 산정을 위한 스펙트럼비 곡선의 첨두값(peak)을 구분하기 용이하며, J댐과 S댐에서 일부 지진시 첨두값 구분이 다소 어려운 점을 제외하고는 고유주기 역시 각기 다른 지진에 대해서 산정된다고 할지라도 거의 일관성 있는 결과를 도출함을 확인할 수 있다.

응답스펙트럼 곡선은 가속도 응답스펙트럼이 단자유도계에서 발생하는 각 주기에서 최대 응답가속도만을 산출하기 때문에 자연스럽게 평활화(smoothing) 된다. 이로 인하여, 가속도 응답스펙트럼비 곡선은 퓨리에변환 결과와는 상이하게 스파이크(spike)가 자연스럽게 제거되고, noise에 대한 응답이 최소화되어 요동이 없는 곡선의 형태를 가지게 되어, 고유주기 산정을 위한 첨두값의 구분을 용이하게 한다.

[그림 3.5.41]은 이러한 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비에 의한 산정방법의 실효성을 확인하기 위하여, 1984년 Okamoto가 일본내 16개 사력댐에서 댐마루에서의 계측가속도 수준이 0.02g 이상인 20개의 지진계측 자료를 댐 저부와 정상부의 가속도 증폭비로 산정한 고유주기값을 댐 높이에 대해 나타낸 것이

며(1984), 여기에 상기의 방법으로 국내 사력댐에 대해서 구한 고유주기값을 함께 나타낸 것이다. [그림3.5.41]에서 알 수 있듯이 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비에 의한 산정방법으로 산정한 결과는 Okamoto가 제시한 결과와 비교하여, 고유주기값 자체나 고유주기의 댐 높이에 따른 경향이 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 국내 사력댐에 대한 고유주기 산정 결과가 일본 사력댐에 대한 고유주기 산정 결과에 비하여 댐 높이에 대한 분산도가 오히려 작음을 확인할 수 있다.

결론적으로, 국내와 같이 미소지진 계측기록을 활용하여 사력댐의 고유주기를 산정하고자 하는 경우에는, 댐 저부와 정상부 가속도의 응답스펙트럼비를 이용한 방법이 가장 합리적인 방법인 것으로 판단되었다.



[그림 3.5.41] 일본 사력댐과 국내 사력댐 고유주기 산정결과 비교

(4) 분석결과 및 의견

국내 사력댐에서 계측된 미소지진 기록(댐정상부 계측 최대가속도 0.001g 이하)을 활용하여 사력댐의 고유주기를 일관성 있게 산정할 수 있는 방법을 선정·제시하였다. 제시된 방법은 댐 정상부에서 계측된 가속도 시간이력의 일정감쇠비(본 연구 5%)에 대한 응답스펙트럼과 댐 저부(기초부 또는 양안)에서 계측된 가속도 시간이력의 일정감쇠비에 대한 응답스펙트럼의 비(ratio)를 나타내는 곡선에서, 첨두값을 보이는 주기를 사력댐의 고유주기로 간주하는 방법이다.

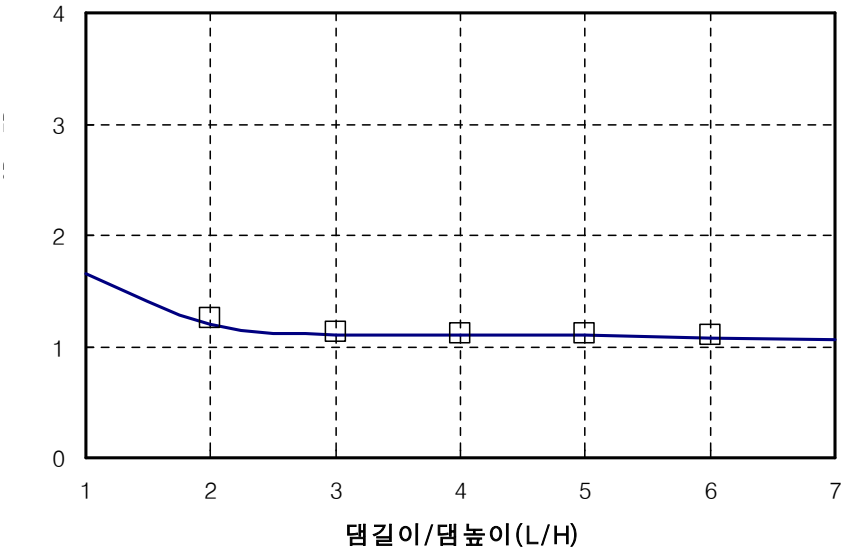
제시된 방법으로 '09년 1월부터 '10년 5월 사이에 국내에서 발생한 6회의 지진에 대해 7개의 사력댐에서 계측된 총 20개의 미소지진 계측기록을 분석하여 사력댐의 고유주기를 산정해 본 결과, 고유주기를 일관성 있게 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 산정된 결과는 기존의 일본 댐에서 계측된 결과로 제시된 기존 연구결과와 비교하여 그 실효성이 입증되었다. 아울러 댐 저부와 정상부 가속도 증폭비에 의한 산정방법은 미소지진기록이 아닌 일정 크기(댐정상부 계측 최대가속도 0.02g) 이상의 계측기록을 활용하는 경우에 적용될 수 있는 방법인 것으로 판단되었고, 본 연구에서 대상으로 하는 미소지진기록을 이용하는 경우에는 그 적용에 한계가 있음을 확인하였다.

본 연구로부터 산정된 각 사력댐에서의 고유주기는 지진발생시 댐의 거동을 근사적으로 예측할 수 있는 기초자료를 제공할 뿐만 아니라, 수치해석을 이용하여 지진발생시 사력댐의 거동을 평가하고자 할 때, 입력물성 및 해석결과의 적정성을 평가할 수 있는 유용한 기준자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후, 본 연구대상 사력댐외에 더 많은 수의 사력댐에 대해서도 지속적인 지진계측 기록을 확보하고 분석하여 제시된 방법의 추가 검증이 필요할 것으로 여겨지며, 상대적으로 더 큰 지진기록이 계측되는 경우, 계측지진 가속도의 크기에 따른 사력댐의 고유주기 변화에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

나. 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석에 의한 사력죤 동적물성 산정기법 제안

(1) 3차원 계곡효과(canyon effect)와 댐 고유진동수(Hatanaka, 1955; Ambraseys, 1960; Makdisi, 1976)

댐의 동적응답에 대한 댐 경계의 계곡효과 중 하나는 시스템의 강성을 증가시키는 것이다. 즉, 2차원 조건의 댐에 비해 계곡에 위치한 3차원 형상 댐에서의 고유진동수가 더 크게 나타남을 반영한다. 따라서, 댐길이/댐높이 비가 3이상인 경우, 2차원 모델 해석결과에 비해 3차원 모델에 의한 결과가 약 10~20% 정도 고유진동수를 더 크게 산정한다([그림 3.5.42] 참조).



[그림 3.5.42] 2차원과 3차원 모델 해석 결과에 의한 댐 고유진동수 비교

(2) 사력죤 동적물성 역산 방법 및 절차

(가) 사력죤의 최대전단탄성계수는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$G_{\max} = k_{2,\max} \cdot 1000 \cdot \sqrt{\sigma_m{}'}$$

여기에서, σ_m'은 평균유효구속응력이며, 단위는 Pa이다.

(나) 상기의 식에서 $k_{2,\max}$를 여러 가지 값으로 변화시켜 사력쵼의 최대전단탄성계수를 변화시키는 반복적인 2차원 동적수치해석을 수행한다.

(다) 실계측 지진기록을 이용하여 대상댐의 고유진동수를 산정한다(가. 절 참조, 3차원 고유진동수). 산정된 값보다 10~20% 작은 고유진동수를 산정하게 되는 $k_{2,\max}$를 결정한다.

(라) 이 때의 댐 해석요소망에서 각 요소별(element) 입력된 최대전단탄성계수를 읽어서, 심도별 최대전단탄성계수를 결정한다.

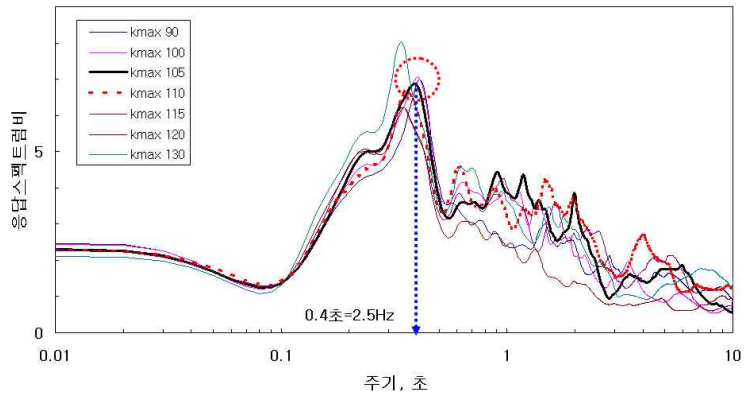
(마) 심도별 최대전단탄성계수를 아래의 식에 대입하여 사력쵼의 깊이별 전단파속도 프로파일을 작성 완료 한다.

$$v_s = \sqrt{G_{\max}/\rho}$$

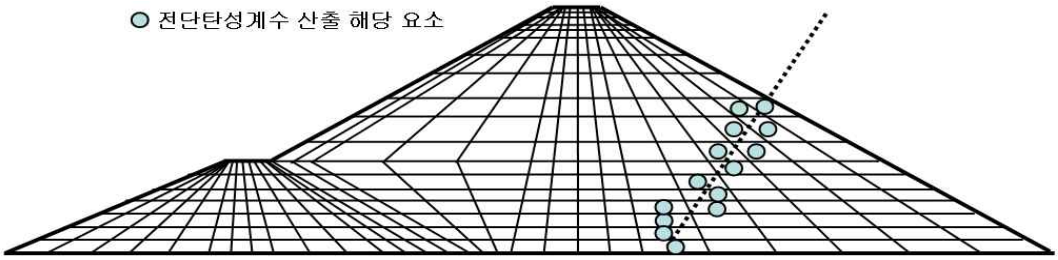
(3) 동적물성 역산법 적용(H댐)

동적물성 역산법을 적용하기 위하여 $k_{2,\max}$를 90, 100, 105, 110, 115, 120, 130으로 변화시킨 반복적 2차원 동적수치해석을 수행하였다. 해석결과로부터 산정된 고유진동수 산정결과는 [그림 3.5.43]과 같다. 그림에서 $k_{2,\max}$=105일 때 고유진동수는 2.5Hz로서 실계측지진기록으로부터 산정된 고유진동수 2.78Hz의 11% 작은 값으로 그 조건을 만족함을 확인하였다.

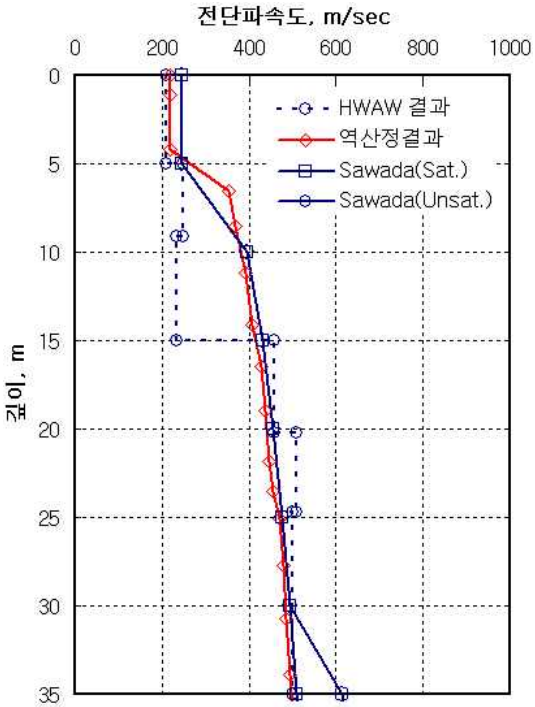
$k_{2,\max}$=105인 경우, 심도별 사력쵼 전단탄성계수를 [그림 3.5.44]와 같이 산출하여 깊이별 전단파속도로 환산하였다. [그림 3.5.45]는 역산한 결과를 기존의 경험식과 현장에서 수행된 탄성파탐사의 일종인 HWAW탐사결과와 함께 도시한 것이다. 그림으로부터 역산결과의 신뢰성을 확인할 수 있다.



[그림 3.5.43] 사력존 강성 변화에 따른 H댐 응답스펙트럼비 산정 결과



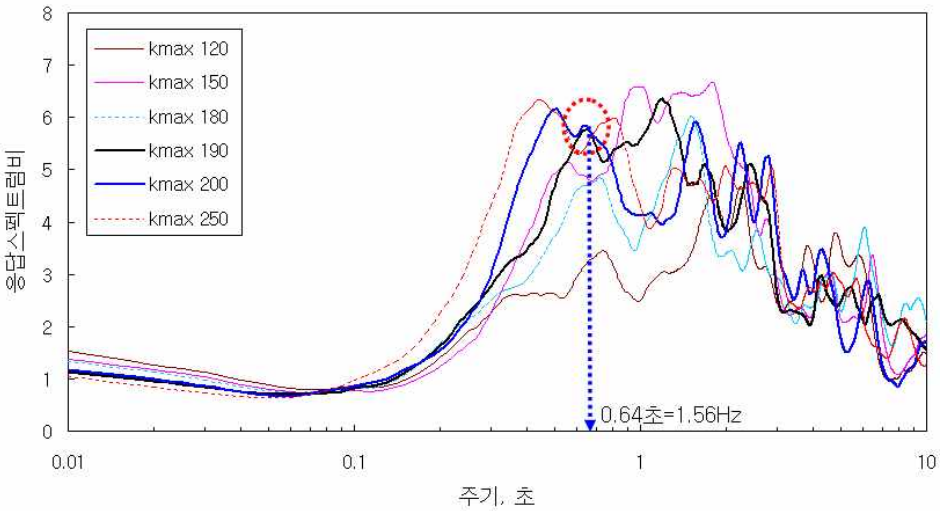
[그림 3.5.44] H댐 심도별 사력존 전단탄성계수 산출 위치



[그림 3.5.45] 역산결과의 현장시험결과와 기존경험식과의 비교(H댐)

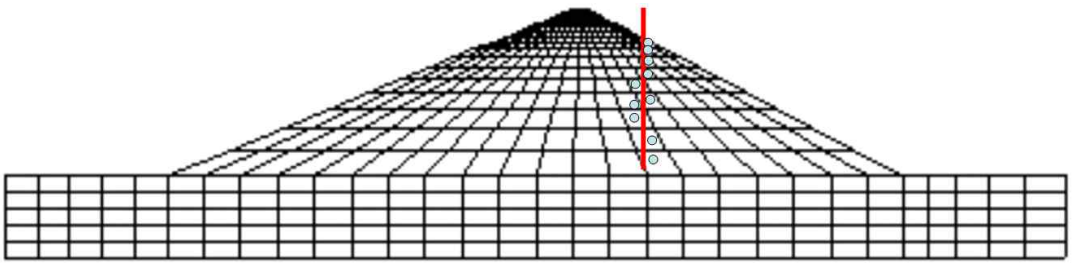
(4) 동적물성 역산법 적용(S댐)

동적물성 역산법을 적용하기 위하여 $k_{2,\max}$를 120, 150, 180, 190, 200, 250으로 변화시킨 반복적 2차원 동적수치해석을 수행하였다. 해석결과로부터 산정된 고유진동수 산정결과는 [그림 3.5.46]과 같다. 그림에서 $k_{2,\max}$=190일 때 고유진동수는 1.56Hz로서 실계측지진기록으로부터 산정된 고유진동수 1.72Hz의 약 10% 작은 값으로 그 조건을 만족함을 확인하였다.

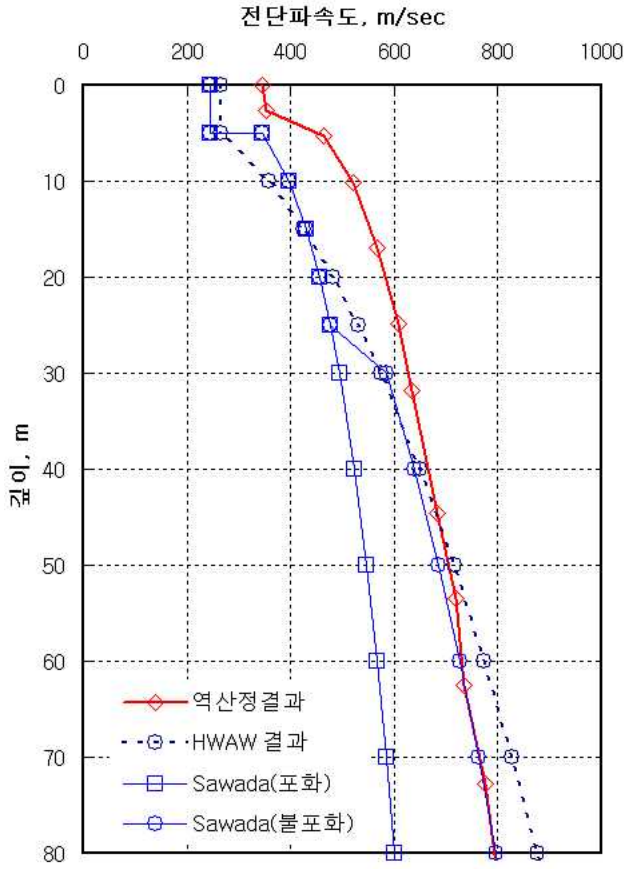


[그림 3.5.46] 사력존 강성 변화에 따른 S댐 응답스펙트럼비 산정 결과

$k_{2,\max}$=190인 경우, 심도별 사력존 전단탄성계수를 [그림 3.5.47]과 같이 산출하여 깊이별 전단파속도로 환산하였다. [그림 3.5.48]은 역산한 결과를 기존의 경험식과 현장에서 수행된 탄성파탐사의 일종인 HWAW탐사결과와 함께 도시한 것이다. 그림으로부터 역산결과의 신뢰성을 확인할 수 있다.



[그림 3.5.47] S댐 심도별 사력존 전단탄성계수 산출 위치

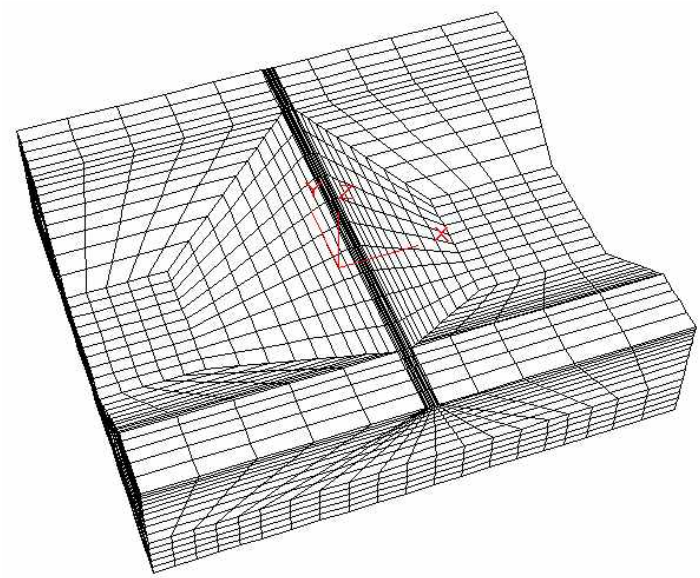


[그림 3.5.48] 역산결과의 현장시험결과와 기존경험식과의 비교(S댐)

5. 3차원 지진응답해석에 대한 확장성 평가

가. 3차원 지진응답해석에 의한 사력존 전단파속도 역산

[그림 3.5.49]는 정적해석과 동적해석을 위한 H댐의 해석요소망을 나타낸 것이며 해석 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 정적해석을 위한 입력물성은 H다목적댐공사지(한국수자원공사, 2002)에 작성된 설계입력값을 이용하였다. 정적해석 수행 후에 각 절점의 변위와 속도를 초기화한 후 해석영역 바닥면에 H댐 양안부에서 계측된 가속도시간이력을 입력하중으로 3차원 동적해석을 수행하였다.



[그림 3.5.49] H댐 3차원 지진응답해석 요소망

동적해석을 위한 입력물성으로는 기초암반의 경우에는 [표 3.5.5]의 정적해석 입력물성을, 코어존의 경우 전체 댐 부피의 약 8%내로서 전단탄성계수는 Sawada와 Takahashi(1975)의 코어존의 깊이별 전단파속도 중 하한값에 밀도값을 곱하여 최대전단탄성계수를 정하고 포아송비는 0.3을 적용하여 체적탄성계수를 산정하여 일정값으로 입력하였다. 사력존의 경우, 최대전단탄성계수는 Vrymoed식을 이용하여 $k_{2,\max}$를 여러 가지로 변화시킨 값을 사용하였으며, 체적탄성계수는 산정된 전단탄성계수에 포아송비 0.3을 적용하여 산정하였다.

[표 3.5.5] 정적해석 입력물성(한국수자원공사, 2002)

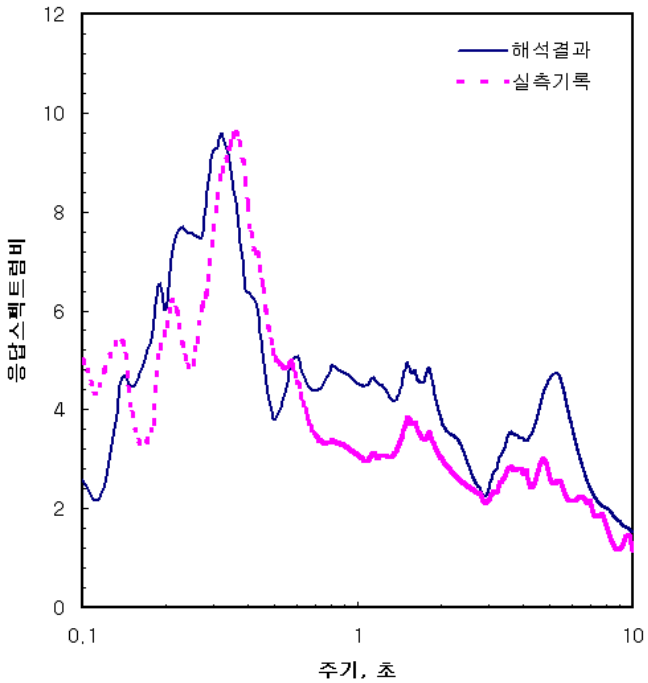
재료구분	단위중량, γ (kN/m³)	체적탄성계수 (kN/m²)	전단탄성계수 (kN/m²)	내부마찰각 (°)	점착력 (kN/m²)
사력존	20	6.46E4	2.98E4	41	0
코어존	20	3.78E4	1.75E4	20	27
기초암반	26	1.67E7	1.25E7	45	2000

사력존의 깊이별 전단파속도를 역산정하기 위하여 $k_{2,\max}$를 여러 가지 값(90, 100, 120, 130)으로 변화시킨 반복적인 3차원 동적수치해석을 수행하였다. 실제 댐

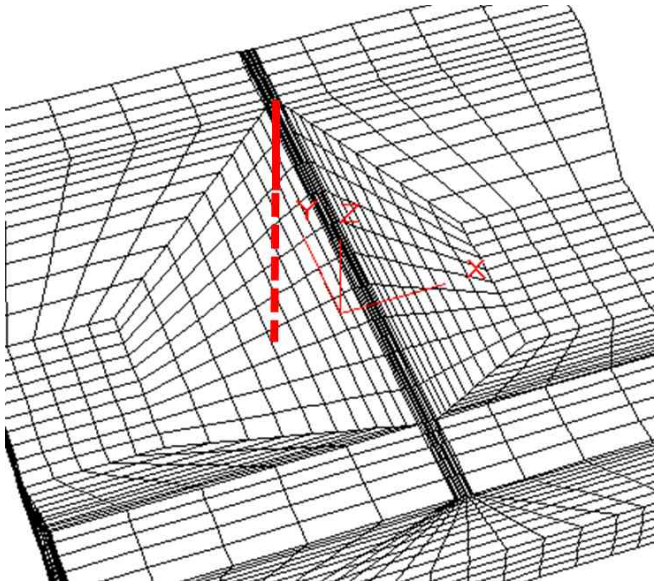
에서의 계측기록으로 산정된 H댐의 고유진동수는 2.78Hz이므로, 3차원 해석은 이러한 실제 댐의 3차원 기하학적 형상을 반영한 결과이므로 해석 결과로 구한 고유진동수도 2.78Hz로 일치하여야 한다. 해석 소요시간 상의 문제점(3차원해석의 경우, 반복계산시 1회 해석에 소요되는 시간이 본 연구의 경우 72시간 이상이 소요됨)을 고려하여 본 연구에서는 이 값의 ±5%이내의 오차를 갖는 고유진동수를 가지게 될 때의 최대전단탄성계수, $G_{\max}$를 선정하였다.

해석결과, $k_{2,\max}$를 130으로 입력한 경우에 3차원 동적해석에 의한 고유진동수가 2.9Hz로서 실측치에 의한 2.78Hz과 비교해 거의 유사한 값(약 5% 이내로 큼)으로 나타났다[그림 3.5.50]. 수치해석 결과를 도출한 사력존의 깊이별 최대전단탄성계수를 발췌하고 최대전단탄성계수는 깊이별 전단파속도로 환산하였다.

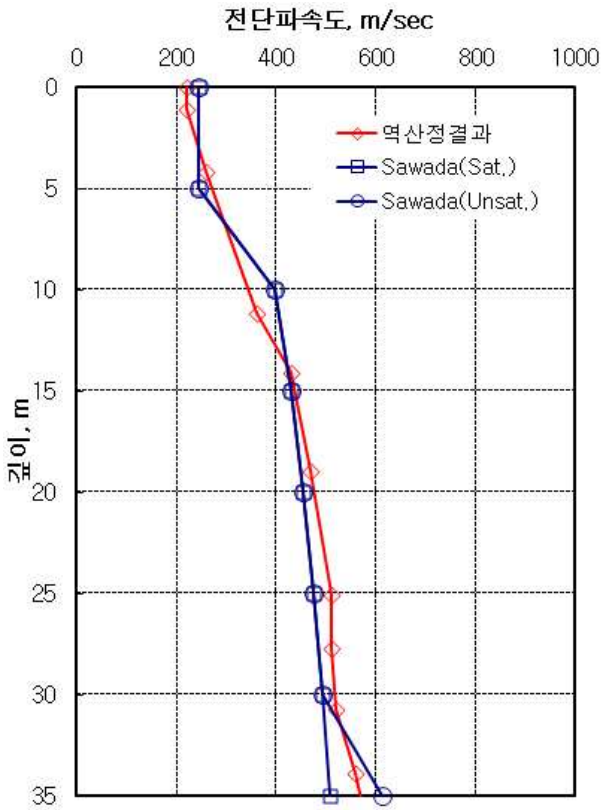
[그림 3.5.51]은 위와 같은 절차에 의해 산정된 H댐 사력존 깊이별 전단파속도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 산정결과의 유효성을 확인하기 위하여 기존 경험식에 의한 방법(Sawada와 Takahashi, 1975) 결과를 함께 도시하였다.



[그림 3.5.50] 3차원 해석결과와 실측결과 응답함수 비교



[그림 3.5.51] H댐 심도별 사력존 전단탄성계수 산출 위치

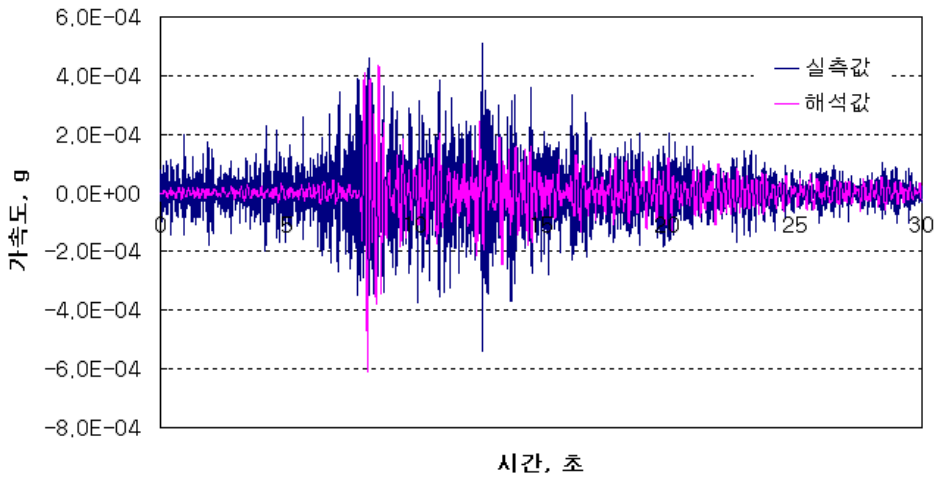


[그림 3.5.52] H댐 3차원 수치해석에 의한 전단파속도 역산 결과

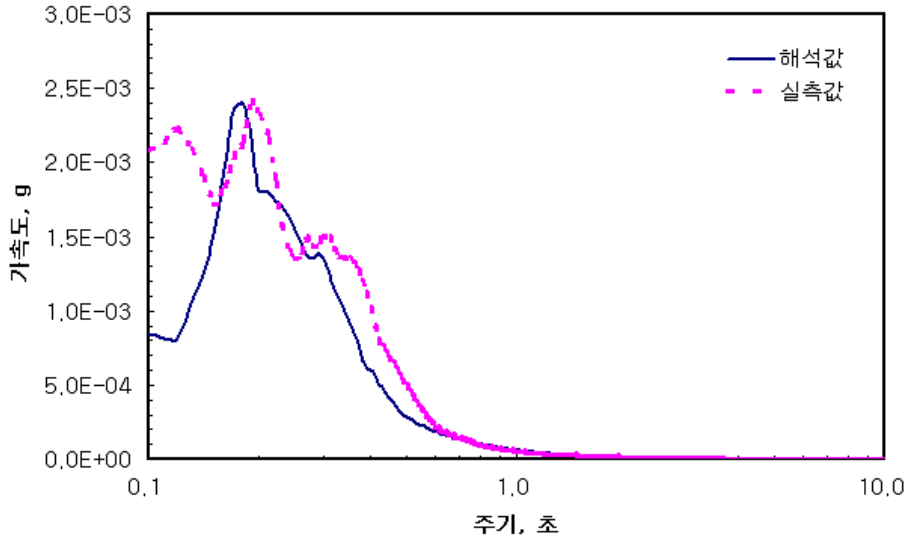
나. 3차원 해석에 의한 물성 평가 결과의 검증

물성산정 결과는 산정물성을 입력값으로 한 3차원 동적해석을 수행하고 해석결과로 얻어진 횡성댐 댐 정상부에서의 가속도 응답거동을 실제 계측된 지진기록으로부터 얻어진 결과와 비교해 봄으로써 그 결과를 검증해 보았다.

[그림 3.5.52]는 3차원 지진응답해석 결과 나타난 댐 정상부에서의 가속도 시간이력을 실제 계측된 가속도 시간이력과 비교하여 나타낸 것이다. 역산된 물성을 사용하여 수행된 3차원 지진응답해석 결과에 의한 댐 정상부에서의 가속도 시간이력은 실제 계측된 가속도 시간이력과 최대 진폭은 물론, 그 파형이 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. [그림 3.5.53]은 정상부에서 가속도 시간이력의 주파수 특성을 파악하기 위해 일정 감쇠비(본 연구 5%)에 대한 응답스펙트럼을 실측치와 해석치를 비교하여 나타낸 것이다. 주기 0.15초 이하(주파수로는 1/15≒7Hz 이상)에서 큰 차이를 보이는데, 이는 실제 댐의 응답을 표현할 수 있는 의미있는 주기 이하이며, 이는 실계측 자료에 포함될 수 있었던 주변 잡음 내지는 계측기 자체의 기계적 잡음에 기인된 것으로 판단된다. 이러한 의미에서 실제 큰 의미를 가지는 7Hz 이하 즉, 주기로는 0.15초 이상에서의 주파수 특성만을 살펴보았을 때에는 그 주파수 특성은 거의 유사함을 확인할 수 있다.



[그림 3.5.52] 3차원 지진응답해석 결과와 실측 정상부 응답가속도 시간이력 비교



[그림 3.5.53] 해석과 실측에 의한 정상부 가속도 주파수 특성 비교

다. 분석결과 및 제언

댐에서 계측된 미소지진기록을 이용한 3차원 지진응답해석 적용 댐 동적물성 역산법을 적용하여, 운영 중인 H댐 사력죤 동적물성(최대전단탄성계수 또는 전단파속도 분포)을 역산하였고, 역산된 물성을 이용한 3차원 지진응답해석 결과와 실제 댐에서 계측된 결과를 비교하는 방법에 의해 3차원 물성역산법의 확장성을 검토해 보았다. 역산된 물성은 기존의 경험식으로 산정된 결과와 유사한 결과를 보였고, 역산된 물성을 사용하여 수행된 3차원 지진응답해석 결과에 의한 댐 정상부에서의 가속도 시간이력은 실제 계측된 가속도 시간이력과 최대 진폭은 물론, 그 파형, 주파수 특성 또한 거의 유사하게 나타났다.

이러한 사실에 근거하여 2차원 동적수치해석에 의한 역산법은 물론, 본 연구에서 검토한 3차원 지진응답해석에 의한 실계측지진기록을 이용한 댐 사력존 동적물성 역산법은 실효성 있게 적용될 수 있는 것으로 판단되었다.

다만, 현실적인 측면에서 반복적인 수치해석의 회수는 제한적일 수 있다. 즉, 2차원 동적해석보다 상대적으로 3차원 동적해석의 경우에는 해석시간이 많이 소요되기 때문에 반복적인 해석을 수행함에 있어서 그 효율이 현저히 떨어질 수 있다. 또한, 2차원과 3차원 방법의 역산법에 의한 결과의 그 차이가 거의 없는 것으로 나타나, 3차원 역산법의 확장성은 확인되었지만, 물성역산정의 경우, 2차원 지진응답해석을 이용하는 것이 보다 효율적인 것으로 제언한다.

제 6 절 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증

1. 지반구조물 실대규모 진동실험 사례조사

실대규모 발파진동 실험의 목적은 기존 구조물의 내진설계 및 내진성능 평가결과의 검증과 동적해석 및 내진설계기법을 개선하기 위한 기초자료를 제공하는데 있다. 1933년 미국 캘리포니아의 롱비치 지진 이후 전세계적으로 건축물, 교량 및 댐 등의 구조물에 설치된 지진계를 통해 실측 지진 데이터를 얻을 수 있었고 이를 분석하여 지진시 구조물의 실제 거동을 파악할 수 있었다. 그러나 지진의 발생시각과 위치를 예측하는 것은 불가능하며 지진계가 설치된 구조물도 제한적이기 때문에 미소진 및 미소진동, 여진(Aftershock), 발파진동의 진동원을 이용하여 실대규모 진동실험을 실시한다. 다음에는 이러한 진동원을 이용한 실대규모 진동실험 사례를 분석하였다.

가. 미소지진 및 미소진동

구조물 및 지반에 대한 실대규모 실험에는 강진에 의한 진동 이외의 진동원을 사용할 수 있다. 실험 대상 구조물의 거동이 선형거동으로 예측되고 입사파의 특성이 유사하다면 작은 규모의 지진동에 의한 측정결과를 이용하여 더 큰 규모의 강진동의 특성을 예측할 수 있다. 이런 작은 규모의 진동원으로는 파도에 의해 발생되는 미소진동을 예를 들 수 있다. 미소진동의 스펙트럼을 분석해보면 0.14와 0.07Hz 인근의 2개의 피크값을 나타내는데 0.07Hz 근처의 피크값은 대부분 바다의 파도에 의한 진동과 관련된다. 0.14Hz 근처의 피크값은 해안선 근처에서의 선두파(Standing wave)에 의해 발생하는 것이다. 미소진동과 미소지진은 강진시 지진동의 증폭 예측(Kanai 1983, Nakamura 1989, Ohta 등 1978, Udwadia와 Trifunac 1973) 및 구조적 특성의 파악(Trifunac 1972, Ivanovic와 Trifunac 1975)을 목적으로 지층 및 지반을 대상으로 한 연구에 주로 이용되어왔다. Trifunac과 Todorovska(1998)의 연구에 의하면 지반진동의 속도가 10~20 ㎝/sec를 초과하고 지반의 평균 전단파 속도가 300m/sec 이하일 때 지반은 비선형 특성을 나타내어 선형 증폭이론에 기초한 거동의 예측은 실제와 차이가 발생함을 보였다.

나. 여진

Field와 Hough(1997), Gao 등(1996) 및 Hartzell 등(1996)은 강진 후 여진의 기록을 지질 및 지반조건에 대한 지반진동 증폭의 예측에 이용하였다. 여진에 의한 지반진동은 강진에 의한 지진동 보다는 고 진동수 영역이고, 강진에 의한 진폭 보다는 1~2 오더정도 작은 규모를 나타낸다.

장주기 강진에 의한 지진동은 진원, 전파경로 및 국부적인 지질조건을 모델링하는 수치해석법으로 시뮬레이션 할 수 있지만 약 1~2초 보다 긴 주기에 대해서만 강진에 의한 지진동 진폭을 분석할 수 있었다.

다. 발파

가장 확실하고 유용한 실대규모 실험방법은 발파를 이용하여 강진동을 시뮬레이션하는 것이다. Rogers 등(1979, 1984) 및 Borcherdt와 Gibs(1976)는 입사 지진동의 국부적인 증폭을 연구하기 위해 핵폭발을 이용하였다. 핵폭발로 방출되는 에너지는 1022~1024 erg이며 핵폭발의 파괴적인 힘에 대해서 ASCE(1975)와 Blume과 Skjei(1973)에 의해 일부 연구가 수행되었지만 핵실험의 반대로 향후 이러한 연구는 더 이상 수행할 수 없었다. 채석장, 터널공사, 암석파쇄, 도로공사 및 깊은 암반기초의 굴착시 등의 인공 발파와 충격 및 발파해체는 지진 또는 핵폭발보다 작은 에너지 규모를 나타낸다(Henrych 1979).

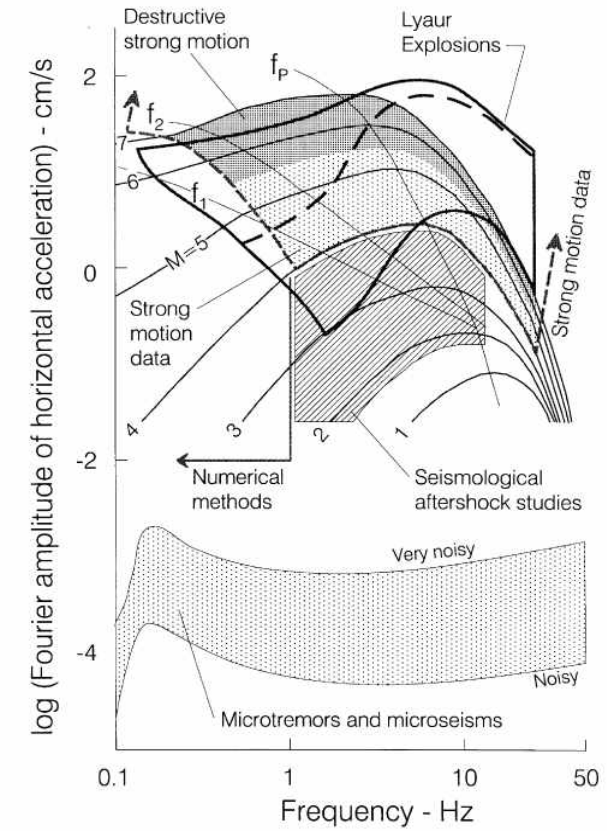
발파는 지진보다 에너지 방출이 매우 빠르며 작은 폭원지역에서 높은 응력변화가 나타난다. 최대 압력은 10~150 kbar이고 2,000~9,000 m/s의 충격파로 전파된다. 일반적으로 단일 발파는 길이 100m, 깊이 500m를 초과하는 경우는 드물고 지속시간은 1초의 몇 분의 1정도로 순간적으로 발생한다.

이러한 특성의 결과로 대부분의 발파진동 에너지가 방출되는 주된 주파수는 자연지진보다는 높다. 발파진동의 지속시간과 유효 크기는 주변지반(암반 또는 토층)과 폭원 주변의 파쇄대 크기에 관련된 발파의 임피던스에 의해 결정된다. 일반적으로 지진파의 형태로 방출되는 에너지는 총발파에너지의 1% 이하이다(Negmatullaev 등 1999).

구조물의 실대규모 발파진동 실험에서 발파를 통해 자연지진을 모사하는 방법을 개발하기 위해서는 사전에 발파실험을 통해 대상지반에 대한 발파진동 추정식을 파악하여야 한다. 발파진동의 세기는 폭원의 깊이, 폭원으로부터의 거리의 함수로 나타낼 수 있다.

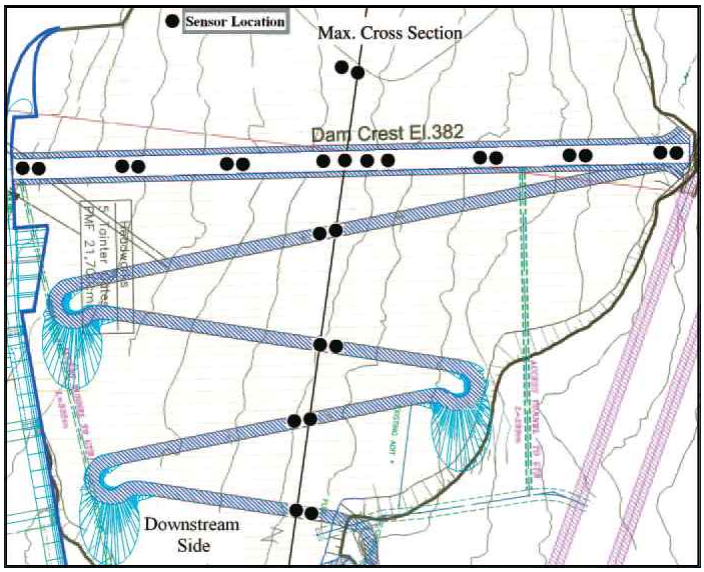
Mills(1972)와 Chrostowski(1979)는 구조물의 실대규모 발파진동 실험을 위해 지연뇌관을 사용한 다단발파기법을 이용하였다. Bruce 등(1979)과 Higgins와 Triandafilidis(1977)는 광대역 지진 스펙트럼을 모사하고 가속도 기록의 지속시간을 연장하기 위해 다중발파(Multiple explosion)와 관련된 여러 가지 방법들을 이용하였다. 이 방법들은 2차원 배열에서 다단(Multiple) 및 디커플링(Decoupling) 발파와 순차적인 장약 점화방법을 적용하였다.

Negmatullaev 등(1999)은 타지키스탄의 Lyaur 시험지구에서 1977년 실시된 10회의 시험발파시 SMA-1 지진계로 측정된 가속도 기록들을 분석하였다. 시험발파는 지연뇌관을 사용한 다중발파로 실시되었다. 총 장약량은 85~10,830kg이었고 시추공의 깊이는 6~10m 깊이로 시험발파를 실시하였다. 측정된 지반 가속도는 최대 1.6g를 나타내었다. 발파진동에 의한 가속도 기록의 진폭과 스펙트럼 특성은 강진시의 지진기록들과 비교한 결과 단일 발파에 의한 푸리에 진폭은 대지진 보다 3-4배 높은 진동수에서 최대값을 나타내었으며 장주기에서 진폭이 작은 것을 확인할 수 있었다.



[그림3.6.1] 발파진동과 강진기록의 푸리에 진폭 스펙트럼 비교
(Negmatulaev 등, 1999)

Jafari와 Davoodi(2006)는 이란 서부의 카룬강에 위치하는 높이 177m의 중심코어형 사력댐인 Masjed Soleiman댐을 대상으로 기계진동(Forced vibration), 미소진동(Ambient vibration) 및 발파진동 실험을 실시하여 댐체의 응답을 측정하였다. 발파진동 실험에는 2가지 형태의 실험을 실시하였다. 첫 번째 실험에서는 댐체로부터 약 300m 우안측에 지하발전소 굴착시의 발파진동을 측정하였고, 두 번째 실험에서는 댐체로부터 1~2㎞ 떨어진 채석장에서의 발파에 의한 진동을 측정하였다. 발파로 인한 댐체의 진동은 단주기(Short-period) 속도계와 가속도계를 [그림 3.6.2]와 같이 댐마루와 상·하류사면의 표면에 설치하여 측정하였다. 현장실험 및 3차원 유한요소해석 결과는 차이가 있었는데 이것의 원인으로는 본 연구에 적용된 신호처리(Signal processing) 방법이 적합하지 않았고 측정에 사용된 센서들의 민감도가 낮고, 댐체의 유한 요소해석의 계산 오차에 기인하는 것으로 추정되었다.



[그림 3.6.2] 이란 Masjed Soleiman댐의 발파진동 실험시 진동측정 위치도(Jafari와 Davoodi, 2006)

국내에는 기존 구조물의 진동특성을 파악하기 위한 발파진동 실험보다는 주로 신규 건설공사시 수행되는 발파공사로 인해 주변지역의 기존 구조물의 피해 가능성을 평가하는 사례들이 많다.

양현식(1992)은 3개의 광산과 5개 건설부지의 지표발파에 의한 진동을 측정하여 지표발표의 진동특성을 분석한 결과 동시발파보다는 지발이, 근거리 보다는 원거리의 경우가 발파진동 지속시간이 긴 것으로 나타났고 지발발파는 동시발파보다 파형

이 복잡하고 우세 진동수도 다양한 것으로 나타났다.

고영선과 김종우(1999)는 장약량, 측정거리 등과 같은 발파조건들이 지반진동에 미치는 영향을 조사하기 위해 골프장 조성공사를 위한 지표발파와 고속도로 건설공사를 위한 터널발파에서 지반진동을 측정하였다.

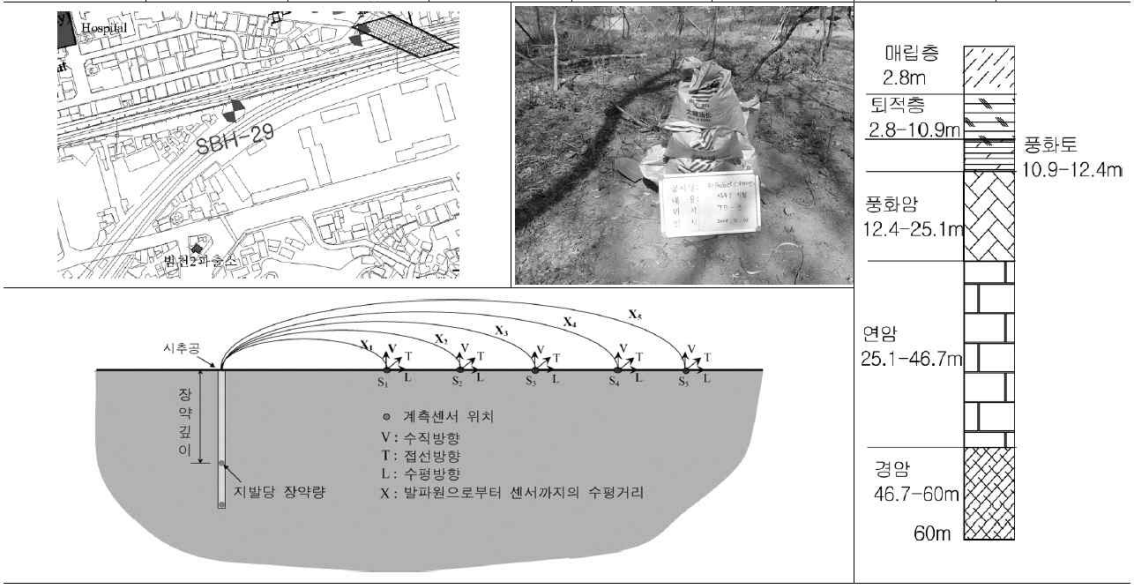
연관희와 이종림(1999)은 운영중인 영광원자력 4호기 터빈발전기 및 격납건물의 진동수준을 규제하기 위해 터빈발전기 기초로부터 약 310m 떨어진 비상원수조 축조 공사장 내에서 6회의 벤치컷(Bench-cut)형 시험발파를 실시하여 발파진동 허용수준을 제시하였다. 이때 사용된 진동센서는 측정 주파수 범위가 0~200Hz 범위인 서보형 가속도계를 사용하였고 계측된 가속도는 최대지반속도를 파악하기 위해 수치적으로 적분하여 속도로 환산되었다.

[표3.6.1] 시험발파 개요(연관희와 이종림, 1999)

시험발파 차수	지발당 최대 장약량(kg)	폭원으로부터의 거리(m)
1	0.8	41
2	1.6	41
3	0.8	41
4	1.6	41
5	1.25	30
3	0.8	65
4	1.6	65
5	1.25	54
1	0.8	114
2	1.6	114
3	0.8	114
4	1.6	114
5	1.25	103

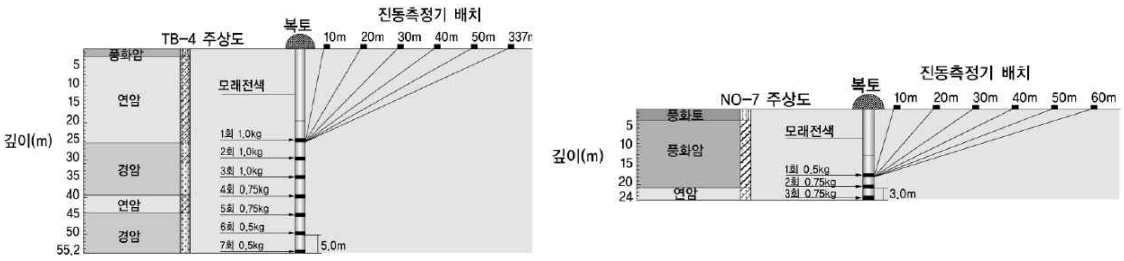
최준성 등(2006)은 실제의 발파현상 및 지반진동을 더욱 정확히 반영할 수 있도록 시험발파에 의한 계측자료와 역해석기법을 사용하여 발파하중을 산정하였고 이를 이용한 수치해석을 통해 구조물의 진동영향을 평가한 결과 타당한 결과를 얻었다.

발파회수	장약 깊이	지발당 장약량	계측위치				
			X1	X2	X3	X4	X5
1	60m	640g	7m	14m	21m	31m	40m
2	43m	480g	7m	14m	21m	31m	40m



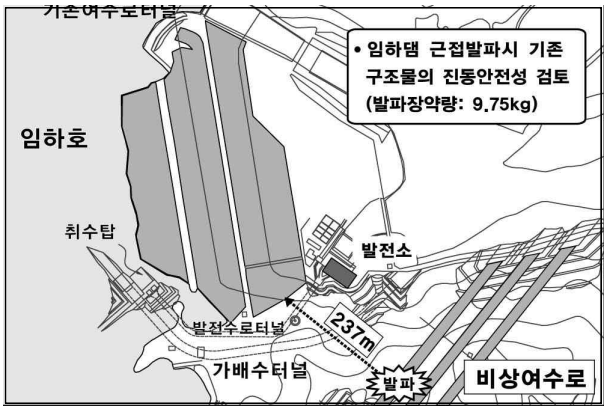
[그림3.6.3] 시추공 발파 및 진동계측(최준성, 2006)

백승규 등(2006)은 임하댐 비상여수로 터널건설을 위한 발파 설계시 시험발파 결과를 이용하여 최대 허용 지발당 장약량을 구하고 3차원 수치해석으로 진동식과 최대 허용 지발당 장약량을 산정하였다. 최대 허용 지발당 장약량은 시험발파의 경우 24kg이었고 수치해석의 경우 13kg으로 계산되었다. 터널 주변 주요 구조물들의 안전을 위해 최대 허용 지발당 장약량은 13kg으로 적용하여 최종 발파설계는 이것의 75% 수준인 9.75kg을 적용하였다. 수치해석결과 9.75kg의 지발당 장약량을 사용할 경우 임하댐 발전소, 가배수 및 발전수로터널, 임하댐 및 기존 여수로의 발파진동 영향은 모두 허용 진동기준치인 1㎝/sec를 만족하는 것으로 나타났다.

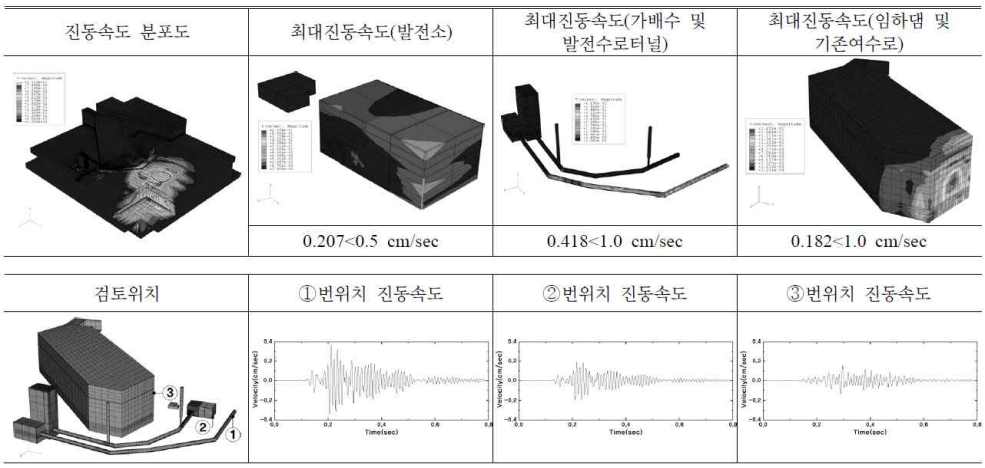


(a) TB-4 발파공 주상도 및 시험발파 개요 (b) NO-7 발파공 주상도 및 시험발파 개요

[그림3.6.4] 시추공 시험발파 개요 및 계측기 배치도(백승규 등, 2006)



[그림3.6.5] 임하댐 근접발파시 해석 개요도(백승규 등, 2006)



[그림3.6.6] 발파진동 영향 해석결과(백승규 등, 2006)

2. 발파진동의 특성

폭약이 장약공 내에서 폭발하면 강력한 충격압과 가스압 및 고온이 발생되는데 충격압과 고온에 의해 암반이 녹거나 파쇄되고 특히, 충격압에 의한 충격파(Shock wave)의 전달로 파쇄대 이후 균열대를 형성하여 암반의 파괴영역이 확대된다.

이와 같이 3차원으로 전달되는 충격파(Shock wave)는 발생되는 총 에너지 중에서 0.5~20% 정도가 탄성파로 변화되어 암반 중을 전파하면서 진폭과 주기를 갖는 지반진동을 일으키는데 이 때 생성된 탄성파는 지반 위의 주변 보안물건 및 시설물 등에 피해를 동반하다.

발파로 인한 지반진동은 일반적으로 변위(Particle displacement), 진동속도(Particle velocity), 진동가속도(Particle acceleration)의 3가지 형태와 진동주파수

(Frequency wave)로 표시되며, 전형적인 발파진동의 형태를 일정한 주기의 단순 정현 진동(단순 조화진동・Simple harmonic motion)으로 가정 할 경우 최대 진폭에서의 변위, 진동속도, 진동가속도 사이에는 [식 3.6.1]~[식 3.6.4]의 관계가 성립한다.

$$\mu = \mu_0 \sin(wt+\theta); \mu = \int \dot{u} dx \qquad \text{[식 3.6.1]}$$

$$\dot{u} = \frac{d\mu}{dt} = w_0 \sin\left(wt+\theta+\frac{\pi}{2}\right); \dot{u} = \int \ddot{u} dx \qquad \text{[식 3.6.2]}$$

$$\ddot{u} = \dot{d}\frac{\mu}{dt} = d^2\frac{\mu}{dt^2} = w^2\mu_0 \sin(wt+\theta+\pi) \qquad \text{[식 3.6.3]}$$

$$w = 2\pi f = 2\pi\left(\frac{1}{T}\right) \qquad \text{[식 3.6.4]}$$

여기서, μ, μ_0, θ:변위 및 최대변위(㎜), 위상각(rad)

$\dot{\mu}$, $\ddot{\mu}$: 입자속도(㎜/sec・cm/sec) 및 가속도(gal・cm/sec^2)

t, w : 시간(sec) 및 원진동수 각속도・Angular velocity ・rad/sec)

f, T : 주파수(진동수, Frequency, Hz, cycle/sec) 및 주기(sec)

발파진동의 특성과 관련된 대부분 상황에서 최대 입자운동의 절대치가 중요하므로 μmax=μ_0, $\dot{\mu}$max=v, $\ddot{\mu}$max= a 일 때 [식 3.6.5], [식 3.6.6]와 같이 절대치로 나타낼 수 있으며, 이들 상호 간에는 함수관계가 있어 진동주파수(Frequency wave)를 알고 SINE파 근사치의 단순 정현 진동이면 최대 입자 속도의 변수를 쉽게 구할 수 있다.

$$V = w\mu_0 = 2\pi f\mu_0; \mu_0 = \frac{V}{2\pi f} \qquad \text{[식 3.6.5]}$$

$$a = w^2\mu_0 = (2\pi f)^2\mu_0 = 2\pi f V \ ; \ V = \frac{a}{2\pi f} \qquad \text{[식 3.6.6]}$$

파장 λ, 탄성파 전파속도(km/sec・m/sec), c와 주기 T의 관계는 [식 3.6.7]과 같다.

$$\lambda = cT = c\left(\frac{1}{f}\right) \qquad \text{[식 3.6.7]}$$

가. 지반진동 성분

발파로 인한 지반진동의 측정은 [그림 3.6.6]과 같이 방향에 따라 폭원으로부터 측

점을 향하는 평면파의 진행방향 성분(Longitudinal or radial component), 진행방향에 직교하는 수직방향 성분(Vertical component), 이들 두 방향과 직각을 이루는 접선방향 성분(Transverse component)으로 이루어지며, 이들 3 성분의 상대적 크기는 대상 암반이나 지형 및 발파에 의해 생성된 탄성파 즉, P파(압축파・종파・Primary wave), S파(전단파・횡파・Secondary wave)및 표면파인 Rayleigh wave 등의 상호 간섭에 따라 변하고 진동주파수는 각각 다르게 나타난다. 따라서, 3성분 중 각각 단일성분에 대한 크기와 우월성분의 최대치가 원하는 계측위치에서 측정될 수 있어야 한다. 이러한 탄성파의 파형(Waveforms)은 매우 복잡하여 폭원으로부터 근거리에서는 육안으로 구분되지 않고 복합파의 형태로 나타나며, 비교적 원거리에서는 전파속도가 느린 표면파가 지배적인 것으로 알려져 있다.

나. 지반진동의 크기

지반진동의 크기를 표시하거나 허용수준을 설정하려면 지반진동 크기를 비교할 수 있는 척도가 필요하며, 그 크기정도를 변위, 진동속도, 진동가속도의 3가지 형태로 표시할 수 있는데 Duvall & Fogelson(1962)은 이의 3가지 척도 중 구조물 피해정도를 평가하는데 진동속도가 가장 상관관계가 있음을 결론지었고 [식 3.6.5], [식 3.6.6]의 성립관계를 입증하였다.

미광무국(US Bureau of mine, 1971)과 유럽, 캐나다 등에서도 구조물의 피해정도가 진동속도에 비례한다고 보고한 바 있어 발파진동의 규제기준을 진동속도로 나타내는 것이 일반적인 견해이다.

발파진동과 자연 지진진동의 특성을 [표 3.6.2]와 같이 비교해 보면 자연지진의 경우는 1 Hz 정도 또는 그 이하의 저주파수의 파형을 보이는 반면 발파진동은 지진동에 비해 지속시간이 비교적 짧고 주파수 범위가 수십에서 수백 Hz의 고주파인 관계로 감쇠가 쉽게 일어나는데 자연지진에서는 피해 척도를 가속도 기준으로 평가하고 있으며, 동일한 가속도에서 주파수(Hz)의 크기에 따라 [식 3.6.6]의 관계가 성립할 경우 구조물 평가기준인 진동속도의 크기는 크게 달라질 수 있다. 발파진동에 의해 영향을 받을 수 있는 구조물의 피해수준은 대상구조물과 지반조건에 따라 다양하게 나타나며, 여러 학자 및 나라에 따라 각각 다르므로 일률적으로 적용하기는 곤란하다.

[표 3.6.2] 발파진동과 지진진동의 비교

구 분	발파진동	자연지진
진원의 깊이	지표 또는 지표가까운 내부	지하 10 Km 이상
진동 주파수	수 10Hz ~ 수 100 Hz	1 Hz 정도 또는 그 이하
진동 지속시간	0.1 sec 정도 이내	10 sec 이상
진동의 파형	비교적 단순	복 잡

다. 지반진동속도 예측

발파진동의 크기를 결정하는 요소로는 입지조건과 발파조건으로 구분할 수 있는데 전자는 발파지점과 주변 구조물의 기하학적인 형태와 해당지역의 지질 및 암반상태, 지형 등에 의해 결정되는 변수이며, 후자는 지발당 장약량과 폭원으로부터 거리를 들 수 있는데 이들은 깊은 함수관계가 성립한다.

이와 같이 여러 학자들에 의해 발파진동의 이론적인 특성을 관련된 변수의 차원해석으로 여러 가지 경험식을 제안하였는데 가장 많이 적용되는 이론식(Devine 1966)은 [식 3.6.8]과 같다.

$$V = K\left(\frac{D}{W^b}\right)^{-1} \qquad \text{[식 3.6.8]}$$

여기서, V : 지반진동 속도(㎜/sec · cm/sec)　　D : 폭원과 측점간 거리(m)
K, -n : 지반 조건에 의해 결정되는 입지상수　W : 장약량(kg/delays)
b : 장약지수(1/2 or 1/3 · Square or Cube root scaled)

폭원으로부터 거리(D)와 지발당 장약량(W)의 관계는 환산거리(Scaled distance · SD)함수로 나타낼 수 있으며, 장약지수(b)가 실험적으로 1/2 일 때 평방근 환산거리(Square root scaled distance), 1/3일 때 입방근 환산거리(Cube root scaled distance)라 하여 이들은 차원해석(Dimension analysis)의 이론을 근거로 하고 있다. 지반 진동 속도와 환산거리는 [식 3.6.8]와 같이 비선형(non-Linear) 관계이므로 양변을 log를 취하여 기울기(n)와 절편(log K)으로부터 [식 3.6.9]의 선형(Linear)관계로 유도할 수 있다.

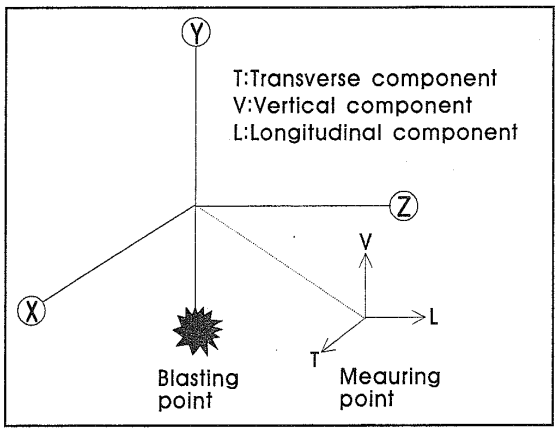
$$\log v = \log K - n\log\left(\frac{D}{W^b}\right) \qquad \text{[식 3.6.9]}$$

라. 주파수 대역

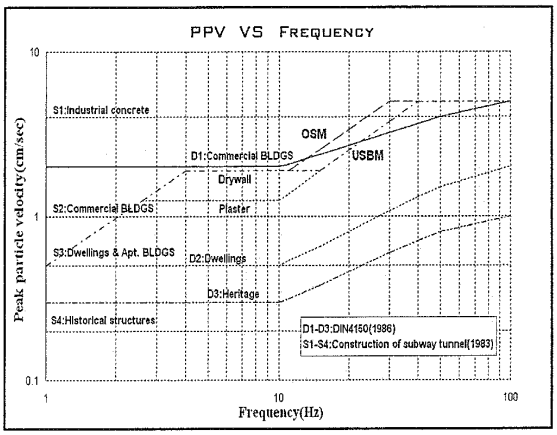
지금까지 구조물에 미치는 영향을 진동속도 크기만을 대상으로 하였으나 주파수 대역도 고려되어야 한다. Crenwelge(1988)의 연구결과에 의하면 주파수는 0.5~200 Hz의 범위 내에 존재하며, 주 주파수(또는 탁월주파수)를 최대진동속도(Peak particle velocity)가 나타날 때 진동주파수라고 정의하면 주 주파수대역은 사용 화약량 및 폭원으로부터 측정거리와 밀접한 관계가 있으며, 발파지역의 지형 및 지질조건 및 암반 내 불연속면 등에도 크게 영향을 받는다.

주 주파수 대역은 최대진동속도가 나타나는 부분의 주파수를 직접 계산하거나 진동속도와 주파수의 변화를 상대진동속도와 주파수 그래프로 도시하는 푸리에 주파수 스펙트럼(Fast fourier spectrum)을 작성하여 가장 큰 진동속도대의 주 주파수 대역을 분석할 수 있으며, 발파진동 측정을 전용으로 하는 계측기기는 측정기기내에 주파수 스펙트럼 분석 모듈이 내장되어 있어 짧은 시간 내에 자동으로 산정 할 수 있다.

미광무국은 진동 허용기준치를 5.0 cm/sec로 추천하였으나 Siskind(1980)가 이를 진동주파수에 따라 검토한 결과 40 Hz이하 저주파수대는 1.2 cm/sec 수준에서 구조물의 손상(Damage)을 가져올 수 있다고 하였으며, 미국의 노천채광청(U.S Office of Surface Mining)에서는 [그림 3.6.8]와 같이 피해한계를 30 Hz의 주파수 경계로 하였고 독일의 국가표준서(DIN4150, 1986)는 피해수준을 10 Hz이하, 10~50 Hz, 50~100 Hz의 주파수 경계로 하였다.



[그림3.6.7] 지반진동의 3성분



[그림 3.6.8] 진동속도와 주파수 관계

마. 발파진동이 구조물에 미치는 영향과 각국의 진동허용기준

일반적으로 지반진동은 가속도, 속도 및 변위로 나타낼 수 있는데, 인체가 감응하는 정도는 가속도 성분과 밀접한 관계가 있으며, 지상이나 구조물들이 받는 피해의 정도는 속도 성분과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

스웨덴의 Langefors(1958)등은 암반위에 세워진 스톡홀름의 빌딩 철거작업과정에서 수많은 시험발파를 실시하여 지반진동이 빌딩에 미치는 피해영향을 연구하였다. 그 연구 결과에 의하면 주파수 범위 50~500 cps에서의 변위(수직성분)에 대한 분석에서 7.1cm/sec 이하에서는 건물에 아무런 피해가 나타나지 않은 것으로 보고하였다.

캐나다의 Edwards와 Northwood(1950)는 St. Lawrence Power의 빌딩 철거시 실시한 시험발파결과를 분석한 결과 피해정도는 진동의 가속도나 변위보다 속도에 연관이 깊고, 피해가 진동속도 10~12.7cm/sec에서부터 발생하였기 때문에 안전율을 고려하여 진동속도 허용한계로 5cm/sec가 적당하다고 보고한바 있다.

1971년 미광무국의 Nicholls등은 자체 연구결과 및 타 연구자들의 연구결과를 통계적인 방법으로 분석한 결과 안전발파의 한계치는 지반진동 속도로 5cm/sec라는 결론을 제시한바 있다.

Esteves(1978)등은 지반조건에 주목하여 지반조건에 따른 진동의 허용한계를 [표 3.6.3]과 같이 제안하였는데, 지반조건이 아주 좋지 못한 경우에는 최소 0.25cm/sec까지, 내진구조물의 경우에는 최대 6cm/sec의 수준까지 허용치로 제시하였다. 또한 지반의 상태에 따라 진동의 정도가 다르다는 것을 인식하고 1978년 Langefors & Kinlstrom은 [표 3.6.4]와 같이 제안하였다.

[표 3.6.3] 구조물의 허용발파진동치(제안자 : Esteves)

지반조건 / 건축물종류	발파진동값(Vector sum of peak particle velocity, cm/sec)		
	점착력이 없는 흙, 흙 및 자갈의 혼합	어느정도 점착력이 있는 흙, 균일하고 높은 등급의 모래	점착력이 있는 흙, 암석
	C 〈1,000cm/sec	1,000 〈C 〈2,000cm/sec	C〉 2,000cm/sec
유적, 병원, 매우 높은 빌딩	0.25	0.5	1.0
통상적인 건물	0.5	1.0	2.0
철근콘크리트건물, 내진구조물	1.5	3.0	6.0

[표 3.6.4] 발파진동에 의한 피해수준 (제안자 : Langefors & Kihlstrom)

지반조건 / 피해정도	발파진동값(Vector sum of peak particle velocity, cm/sec)		
	모래, 자갈, 지하수위 아래의 점토	빙퇴석(moraine), 점판암(slate), 연한 석회석	화강암, 편마암, 강한 석회암, 규암, 사암
	C 〈1,000~1,500cm/sec	C=2,000~3,000cm/sec	C〉 4,500~6,000cm/sec
가시적인 균열발생 없음	1.8	3.5	7.0
미세균열 발생	3.0	5.5	10.0
가시적 균열발생	4.0	8.0	15.0
심한균열	6.0	11.5	22.5

이와 같이 많은 나라와 연구자들이 발표한 발파진동의 피해영향 기준은 진동속도로 삼고 있으며, 이들이 제안한 발파진동에 의한 피해범위 수준은 [표 3.6.5]과 같이 제안하고 있다.

그리고 [표 3.6.6]는 국내의 공공기관에서 적용하고 있는 발파진동의 허용수준이다.

[표 3.6.5] 각 국의 발파진동에 의한 피해수준

<table>
<tr><th colspan="3">연구자
진동치</th><th>Langefors
(Sweden)</th><th>Edwards
(Canada)</th><th>USBM*
(U.S.A)</th><th>E.Banik
(Germany)</th><th>ASCE**</th></tr>
<tr><td rowspan="11">변
위
속
도
(cm
/sec)</td><td rowspan="11">50
10
5
1
0.5
0.1
0.05
0.01
0.005</td><td rowspan="11"></td><td>큰 균열이 발생</td><td rowspan="3">피해발생</td><td rowspan="2">큰피해의 균열이 발생 벽체의 흙이 떨어짐</td><td rowspan="3">큰 피해</td><td rowspan="3">구조물이 위험</td></tr>
<tr><td>균열이 발생</td></tr>
<tr><td>미세한 균열</td><td>가벼운 피해</td></tr>
<tr><td>요주의</td><td rowspan="2">요주의</td><td>요주의</td><td>피해발생</td><td rowspan="4">10Hz, 35Hz 구조물 주의
10Hz, 35Hz 기계의 안전한계</td></tr>
<tr><td rowspan="3">눈에 보이는 피해는 없다</td><td rowspan="2">안전</td><td rowspan="2">안전</td><td>극히가벼운 피해</td></tr>
<tr><td>요주의</td></tr>
<tr><td colspan="5">인체에는 잘 느껴지나 구조물에 피해는 없다.</td></tr>
<tr><td colspan="5">일반적으로 많은 사람들이 진동을 느낀다.</td></tr>
<tr><td colspan="5">대단히 민감한 사람만이 진동을 느낀다.</td></tr>
<tr><td colspan="5">인체에 감각이 없다.</td></tr>
</table>

* USBM : United States Bureau of Mines(美鑛務國)

** ASCE : American Society of Civil Engineers(美國土木大學會)

[표 3.6.6] 국내 공공기관의 발파진동 허용기준(단위: cm/sec)

구 분	진동속도에 따른 규제 기준		
건교부 구조물 손상기준 발파진동 허용기준 (터널 표준시방서) 42000-58823-67-9813	건 물 종 류		허용 진동치
	진동 예민 구조물	문화재 등	0.3
	조적식(벽돌,석재등)벽체와 목재로 된 천장을 가진구조물	재래가옥, 저층일반가옥 등	1.0
	지하기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물	저층양옥, 연립주택 등	2.0
	철근콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 조적식 건물	중·저층 아파트, 중·소 상가 및 공장	3.0
	철근콘크리트 또는 철골골조 및 슬래브를 갖는 대형 건축물	내진구조물(고층아파트 대형건물 등)	5.0
서울시 지하철 시방기준	문화재, 정밀기기 설치건물		0.2
	주택, 아파트		0.5
	상가, 사무실, 공공건물		1.0
	RC, 철골조 공장		4.0
노 동 부 (노동부고시 94~26호)	문화재, 컴퓨터 등 정밀기기		0.2
	결함 또는 균열이 있는 건물		0.5
	균열이 있고 결함 없는 빌딩		1.0
	회벽이 없는 공업용 콘크리트 구조물		1.0~4.0

3. 실대규모 발파진동 실험 현장조사

가. 대상 구조물 개요

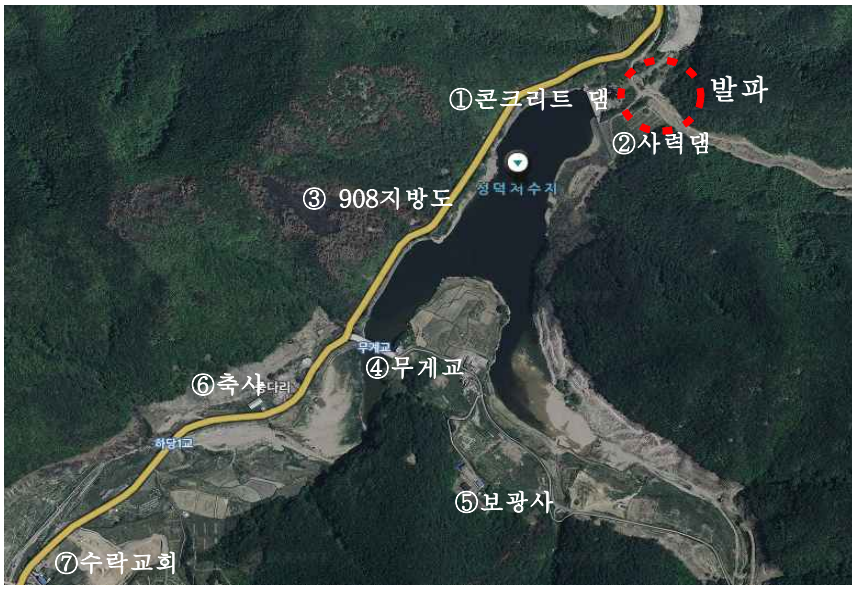
본 과제에서는 발파진동실험 대상으로 조사된 S저수지는 경상북도 청송군 안덕면 현수리에 위치하며 제체의 높이가 15m인 사력댐으로 횡단면의 상단은 5m, 하부는 40m의 폭을 가지고 있으며 콘크리트 구조물의 월류부가 있다.



[그림3.6.9] S구댐 전경

나. 발파예정지 위치

현장답사 결과 발파예정지 주변현황은 [그림 3.6.10]과 같이 발파예정지 상부에는 S저수지제방(①, ②)이 위치하며 상류를 따라 908지방도, 무게교, 보광사, 축사, 수락교회 등이 위치하나 이중, 축사는 비어있는 상태이다.



[그림 3.6.10] 발파예정지 주변현황

다. 발파예정지 주변현황

발파예정지 주변에 위치한 보안물건의 축조형태와 이격거리 등은 [표 3.6.7]과 같다.

[표 3.6.7] 주변보안물건 현황(축조형태, 발파원과의 이격거리)

(1)콘크리트 제방	(2)사력 제방	(3)908 지방도로
• 콘크리트 제방/30m	• 사력제방/35m	• 908지방도/60m
		

(4)무게교	(5)보광사	(6)축사
• 무게교/콘크리조/650m	• 보광사/목조기와조/750m	• 축사/900m
		

(7)수락교회	발파예정지
• 수락교회/벽돌조/1300m	
	

라. 발파 예정지 현장조사 결과

발파예정지역(동경 128도 57.898분, 북위 36도 14.1분)은 S저수지 하류에 위치한다. 발파조건상, S저수지 제방과 908 지방도를 제외하면 보안물건(교회, 절 등)은 비교적 원거리에 위치하여 발파작업에 따른 공해(진동, 소음, 비산 등)의 피해 영향은 없을 것으로 판단되며 현황조사 결과는 다음과 같다.

(1) 발파예정지 위도

동경 128도 57.898분, 북위 36도 14.1분

(2) 행정구역

경상북도 청송군 안덕면 현수리

(3) 소유자 ; 한국농촌공사

(4) 발파예정지 지반특성

발파예정지의 지반은 [그림 3.6.11]와 같이 S저수지 하류로서 상부는 매립토사와 전석층으로 구성되며 기반암(풍화암 이상)은 GL -5.0m 이상에 분포될 것으로 예측된다.

따라서 발파작업을 위한 천공작업은 천공심도에 따라 차이는 있을 것으로 판단되나 매립토사와 전석층 부분은 천공홀 보호를 위해 케이싱 설치가 요구된다.



[그림 3.6.11] 발파예정지

(5) 장비진입 및 작업공간

발파예정지 발파작업을 위한 천공장비 진입로는 S저수지 제방과 연결되는 소로를 이용하면 무난할 것으로 판단되며, 천공을 위한 작업공간은 저수지 하부 나대지를 이용하면 가능할 것으로 판단된다.

4. 발파설계 및 계측계획

가. 진동 및 소음 허용수준 설정

대상구간 발파예정지에 가장 근접된 보안물건은 S저수지 제방이며 그 외 교량, 교회와 사찰, 마을 등은 비교적 원거리에 위치한다.

이와 같은 조건에서 발파진동에 대한 허용수준 설정은 S저수지 제방(콘크리트댐,

사력댐)은 1971년 미광무국에서 자체의 연구결과 재래식 지상구조물에 대하여 안전한계(5.0cm/sec) 수준, 그리고 국내교량(한남, 연흥 등)시공에 적용하였던 허용수준(4.0~5.0cm/sec) 등을 인용하여 5.0cm/sec로 설정한다.

그 외 원거리에 위치한 사찰과 교회 등은 종교시설 임을 감안하여 0.2cm/sec로 설정하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

[표 3.6.9] 발파진동 및 소음에 대한 허용수준 설정

구 분	콘크리트 제방	사력 제방	교량	교회	사절	비 고
발파진동	5.0cm/sec	5.0cm/sec	1.0cm/sec	0.2cm/sec	0.2cm/sec	국내외 규제기준 적용
발파소음	-	-	-	70	70	"

나. 적용 발파진동추정식의 선정

발파진동 추정식은 시험발파 등을 통하여 결정되는 것이나 검토단계에서는 시험발파를 할 수 있는 대상구역의 작업장소, 관련허가 등이 확보되지 않기 때문에 시험발파에 의한 발파진동추정식의 적용은 곤란하다.

이에 환경영향평가를 위한 검토단계에서의 효율적인 진동예측은 보편적으로 적용할 수 있는 국내외 연구문헌 및 보고서에 의한 발파진동 추정식을 적용하고 있다.

따라서 본 연구는 환경영향평가를 위한 예비 검토단계에서의 발파진동 추정식의 적용은 본 연구와 유사하고 국내 다수의 시추공 발파를 통하여 획득한 발파진동추정식을 적용하고자 한다.

시추공발파에 의한 발파진동추정식은 국내 대부분의 발파공사의 설계단계에서 적용되고 있으며, 이 식의 도출은 발파예정지 노선의 지질조사용 시추공에 폭약을 장전·기폭하고 발생된 진동을 거리별로 실측하여 계측자료의 회귀분석에 의해 발파진동추정식을 구하는 방법이다.

본 연구에 적용된 시추공발파에 의한 발파진동추정식은 [표 3.6.10]의 시추공발파 계측자료와 회귀분석에 의해 [표 3.6.11]과 같이 나타낼 수 있다.

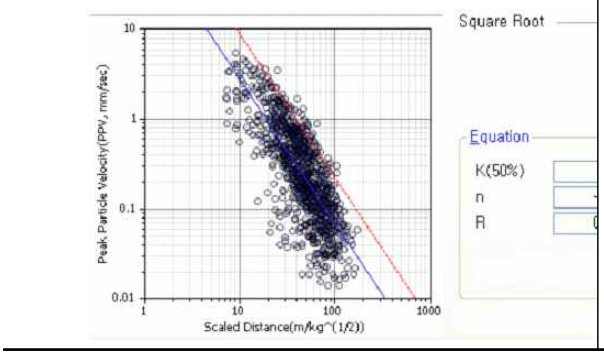
[표 3.6.10] 시추공발파 계측자료

공사명	시추공깊이	위치	DATA수
강남전력구 건설공사	70m,60m	서울강남	63개
대전유성간 도로 확포장공사	60m, 30m	대전유성	73개
서울지하철301공구 확장공사	40m	서울강남	85개
경전선(삼랑진~진주)복선전철공사	50m	경남진주	57개
경전선(진주~함양)복선전철공사	50m,30m	경남함양	80개
성남장호원간도로개설공사	46m	경기성남	34개
광양향서측진입도로 개설공사	19m,22m,42m	전남광양	97개
부항댐건설공사	20m,32m,50m,54m	경북김천	237개
전라선복선전철공사	11m,16m,26m	전북전주	107개
정관산업단지 진입도로공사	70m	부산기장	50개
태백시우회도로공사	70m	강원태백	34개
합계			917개

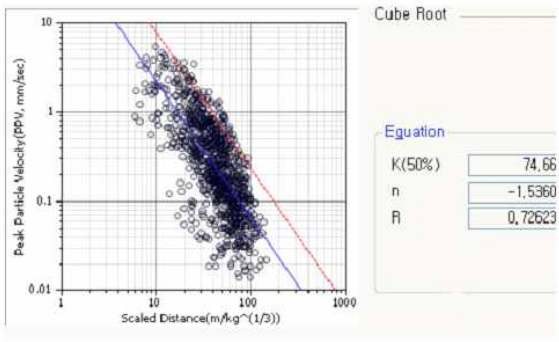
[표 3.6.11] 시추공발파 회귀분석에 의한 발파진동추정식

시추공발파 회귀분석결과	$V = 107.904\left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.6}$	K=107.904 n=-1.6	자승근
	$V = 74.668\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.54}$	K=74.668 n=-1.54	삼승근

자승근 회귀분석



삼승근 회귀분석



[그림 3.6.12] 1 회귀분석에 의한 발파진동추정식

다. 선정 발파진동추정식에 의한 발파규모 선정

(1) 선정 발파진동추정식

[표 3.6.12] 선정 발파진동추정식

구 분	발파 진동식	비 고
적용식	$V = 107.904(\frac{D}{W^{1/2}})^{-1.6}$	1.시추공발파 측정자료에 의한 발파진동추정식 2.대상구간은 자승근식 적용
물리적 의미	·v; 지반진동 속도(cm/sec) ·D ; 폭원으로부터 측점 대상물과의 거리(m) ·w ; 지발당장약량(Kg/Delays) ·K,-n ; 지반 조건에 의해 결정되는 입지상수	

(2) 발파진동추정식 배경

이 식은 국내 대부분의 발파설계단계에서 가장 많이 적용되고 있는 발파진동추정식으로 다음과 같다.

$$v = K(\frac{\mathrm{D}}{\sqrt{\mathrm{W}}})^{-\mathrm{n}} \qquad \text{[식 3.6.9]}$$

이 발파진동추정식은 미광무국의 환산거리 진동 추정식 형태이며 여러 가지 추정식 중에서도 적합도가 높고 장약량 설계가 편리하여 일반적으로 사용되고 있다. 진동속도는 PPV(peak particle velocity) 성분으로서 단위는 cm/s이다. 이격거리는 폭원과 수진점의 거리를 의미하며 지층 내의 다양한 경로를 통해 파가 전파되므로 추정식에서는 폭원과 수진점을 잇는 최단거리를 의미한다. 지발당 최대장약량은 여러 가지 지발뇌관을 혼용하여 쓸 때 가장 많은 량의 폭약을 기폭하는 지발에서의 장약량을 의미한다. 순발뇌관 일 때는 같이 폭발되는 장약량 전체를 의미한다.

그러나 진동의 크기를 특징짓는 것은 약량과 거리 외에도 기반암의 심도나 방향성, 강도와 탄성파 전달속도 등의 지반 조건과 발파 현장과 보안물건의 고도차나 단층이나 계곡구조 등 진동을 차단할 수 있는 자연적인 지형 조건 그리고 폭약의 종류, 기폭시스템의 종류, 발파 천공의 패턴, 전색의 종류와 정도 등 발파 설계와 관련된 조건 등 많은 요소가 함께 작용하는 것이므로 실제 발생하는 진동의 크기는 예측된 것과 다를 수도 있다.

(3) 진동수준에 따른 이격거리별 지발당장약량 산출

대상구간 진동허용수준에 따른 이격거리별 지발당장약량 산출결과, [표 3.6.13]과 같이 최근접 보안물건인 S저수지 제방과의 근접거리(약 30m)에서 진동허용수준(5.0cm/sec)을 기준하여 사용할 수 있는 장약량은 약 19kg이며 그 외 무게교, 보광사 등은 원거리에 위치하여 19kg 이상의 장약량을 사용할 수 있는 것으로 나타내었다.

[표 3.6.13] 진동수준에 따른 이격거리별 지발당장약량

구 분		허용기준치별 이격거리별 장약량			
		0.2cm/sec	1.0cm/sec	5.0cm/sec	비고
이격거리(m)	30	0.346	2.588	19.349	S저수지 제방과의 최근접거리
	40	0.615	4.601	34.398	
	50	0.961	7.189	53.747	
	60	1.385	10.352	77.396	
	80	1.884	14.090	105.344	
	100	2.461	18.403	137.593	
	200	3.115	23.291	174.141	
	300	3.846	28.754	214.989	
	400	15.383	115.017	859.955	
	500	34.613	258.789	1934.898	
	600	61.533	460.069	3439.819	교량(무게교)과의 최근접거리(650m)
	700	96.146	718.858	5374.717	보광사와의 최근접거리(750m)
	800	138.450	1035.155	7739.592	
	900	188.446	1408.962	10534.445	
	1000	246.133	1840.276	13759.275	교회와의 최근접거리(1300m)

(4) 발파규모 선정

발파규모(제원)는 대상 보안물건에 대한 진동허용수준과 이격거리에 의해 장약량을 결정할 수 있다. 따라서 발파예정 위치 30m 이격거리에 위치한 성덕저수지 제방을 기준한 발파규모는 장약량 19kg/delay 이내이다.

라. 발파설계

발파설계는 발파환경영향평가에 의해 선정된 장약량으로 목적상 인공지진을 발생시켜 얻고자 하는 진동의 크기, 진동발생위치(심도) 그리고 진동발생 횟수가 고려되어야 한다. 따라서 이와같은 조건을 감안한 개략적 발파설계 내용은 다음과 같다.

(1) 실험목적상 인공지진 획득방법

(가) 화약량 변화에 따른 진동 크기 획득

발파에서 진동에 가장 크게 영향을 줄 수 요인은 장약량과 이격거리이이다. 이중 장약량변화에 의한 진동크기를 얻기 위해서는 장약량을 달리 적용하여야 한다.

따라서 진동허용수준(제방기준 5.0cm/sec)과 이격거리(30m)를 기준하여 선정된 장약량은 19kg이므로 장약량은 5kg, 10kg, 15kg, 19kg으로 달리 적용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

(나) 진동발생위치(심도)에 따른 진동크기

발파에서 발생된 진동은 탄성파 형태로 지반매체를 타고 전달되며, 동일 장약량 상태에서도 발생 위치에 따라 진동은 크기, 주파수의 형태, 감쇄도 등이 다르게 나타난다. 따라서 천공심도를 발파제원이 적용되는 한도에서 10m, 30m, 50m 등으로 변화시키는 것이 적합할 것으로 판단된다.

(다) 계측자료의 확보

① 진동속도의 측정

발파설계시에 추정된 발파진동 추정식의 검증을 위해 폭원으로부터 거리별로 진동속도를 측정한다. 통계학적인 의미에서 신뢰도, 분포도 등을 감안한 회귀분석을 위해서는 20~30 이상의 계측자료가 확보되어야 한다. 따라서, 화약량 변화와 발생위치에 따른 진동크기를 얻기 위해서는 이들 조건에 의한 진동속도를 측정한다.

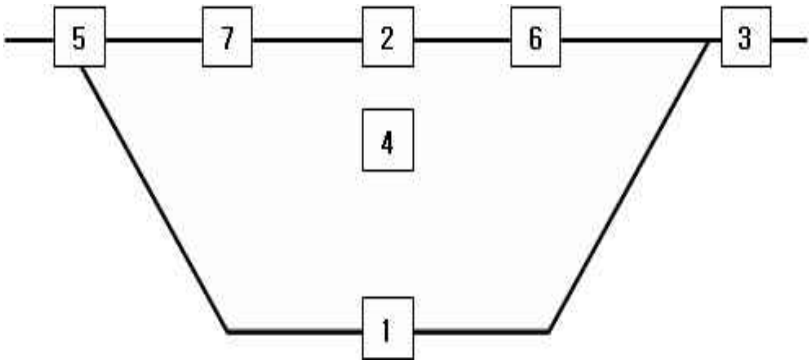
② 가속도의 측정

댐의 지진계 설치는 일반적으로 지진시 댐의 응답특성을 분석하여 내진설계에 반영하고, 댐 지역의 지진동 특성 예측 등 지진에 대한 댐 안전관리를 위하여 행해지고 있다. 다른 구조물에 비해 그동안 댐에 대한 지진계 설치는 활발히 이루어지지 않아 댐 부지의 지진 계측기록을 활용할 수 없었으나, 최근 지진발생 증가와 대형 구조물에 대한 지진응답특성 파악에 대한 요구로부터 그 필요성이 증대되고 있다.

댐의 지진계 설치는 댐설계기준(2005)에 반영되어 있고, 내진특등급으로 분류된 댐의 경우는 지진계 설치가 의무화되어 있다. [그림 3.6.13]처럼 댐의 지진계 설치위치는 총 7개소로 구분할 수 있으나, 필요에 따라 2개소 이상 설치하는 것을 기본으로 하고 있다. 또한 지진계 설치방법은 댐의 형식에 따라 다양하기 때문에 대상 댐에 대한 정밀조사를 실시한 후 설치해야 한다.

본 연구에서는 발파진동에 의한 진동특성을 파악하기 위해 댐 좌안의 노출암반과 사력부 하류사면 소단의 기초부 및 댐 정상부에 가속도계를 설치하여 가속도를 측정한다. 가속도 측정에 사용할 센서는 가속도를 사용하며 어스앵커 등을 이용하여

가속도 센서를 지층에 확실히 고정시켜야 한다. 가속도 측정시 최대 측정 주파수는 100Hz로 계획하였다.



[그림 3.6.13] 댐 지진계설치위치



(a) 댐 좌안암반 (b) 사력부 하류사면 소단 기초부

[그림3.6.14] 발파진동에 의한 댐체 응답 가속도 측정계획



(c) 사력부 댐 정상부

[그림3.6.14] 발파진동에 의한 댐체 응답 가속도 측정계획


(a) 댐 정상부 가속도계 설치


(b) 댐체 응답 가속도 측정

[그림 3.6.15] 발파진동에 의한 댐체 응답 가속도 측정사례

(2) 화약류의 선정

폭약은 수압 및 내압의 영향으로 사압이나 고화현상이 발생되지 않고 폭약의 폭발력이 순간적으로 지반 내에 전달될 수 있도록 하여야 한다. 폭약은 폭속 6,000m/sec 이상의 고성능 폭약(NG 계열)을 적용하며, 뇌관은 우선적으로 내수성·내압성이 양호하고 실험목적상 시차 부여를 위해 지발뇌관을 사용한다.

사용화약류의 규격 : ϕ50mm×400mm× 1.0kg

(3) 장약방법 및 기폭시스템

장약은 천공된 공내에 폭약이 밀장진 되어 폭발력이 지반 내에 직접 전달될 수 있도록 하며, 수압의 영향과 폭약의 중량을 고려한다. 기폭시스템은 내수, 내압(50m), 침수시간 등을 고려하여 방수와 수압의 영향을 최소화 할 수 있는 기폭시스템 적용한다. 기폭은 10m 이상 길게 장약된 폭약이 동시에 점폭 될 수 있도록 도폭선과 정밀한 시차의 뇌관을 사용한다.

(4) 전색(Tamping)

전색은 과업의 발파조건(대심도, 다량의 폭약, 수압상태 등)에서 폭약의 폭발력이 외부로 방출되지 않고 지지되어야 한다. 발파조건에 적합한 전색물로서 수압상태에서 전색물 자체가 중량에 의해 가라앉고 마찰력 향상을 위해 다공성인 재질의 전색재로서 쇄석 혼합골재(13~20mm 이내)를 적용한다. 그리고 폭발력과 수공상태에서의 전색의 밀폐력을 증대시키기 위해 전색 중간(2개소)에 쐐기형태 구조의 플라그를 적용한다.

(5) 발파설계

(가) 발파제원

발파환경영향평가에 의한 발파규모별 발파제원과 사용화약량은 [표 3.6.14], [표 3.6.15]와 같다.

[표 3.6.14] 발파제원

Item	Condition				
Pattern	Type- I	Type-II	Type-III	Type-IV	Type-V
Drill Hole Diameter	Ø75	Ø75	Ø75mm	Ø75mm	Ø75mm
Hole Depth	6.0m	12.0m	18.0m	25.0m	25.0m
Burden	2.0m	4.0m	7.0m	10m	10m
Hole Space	3.0m	5.0m	8.0m	10m	10m
Charge per Delay	5.0kg/delay	10kg/delay	15kg/delay	19kg/delay	5.0kg/delay
Explosives	Dynamite ϕ50mm×400mm× 1.0kg	Dynamite ϕ50mm×400mm× 1.0kg	Dynamite ϕ50mm×400mm× 1.0kg	Dynamite ϕ50mm×400mm× 1.0kg	Dynamite ϕ50mm×400mm× 1.0kg
Detonator	ED(순발뇌관)	ED(순발뇌관)	ED(순발뇌관)	ED(순발뇌관)	전기식 MS
Stemming	세석골재	세석골재	세석골재	세석골재	세석골재

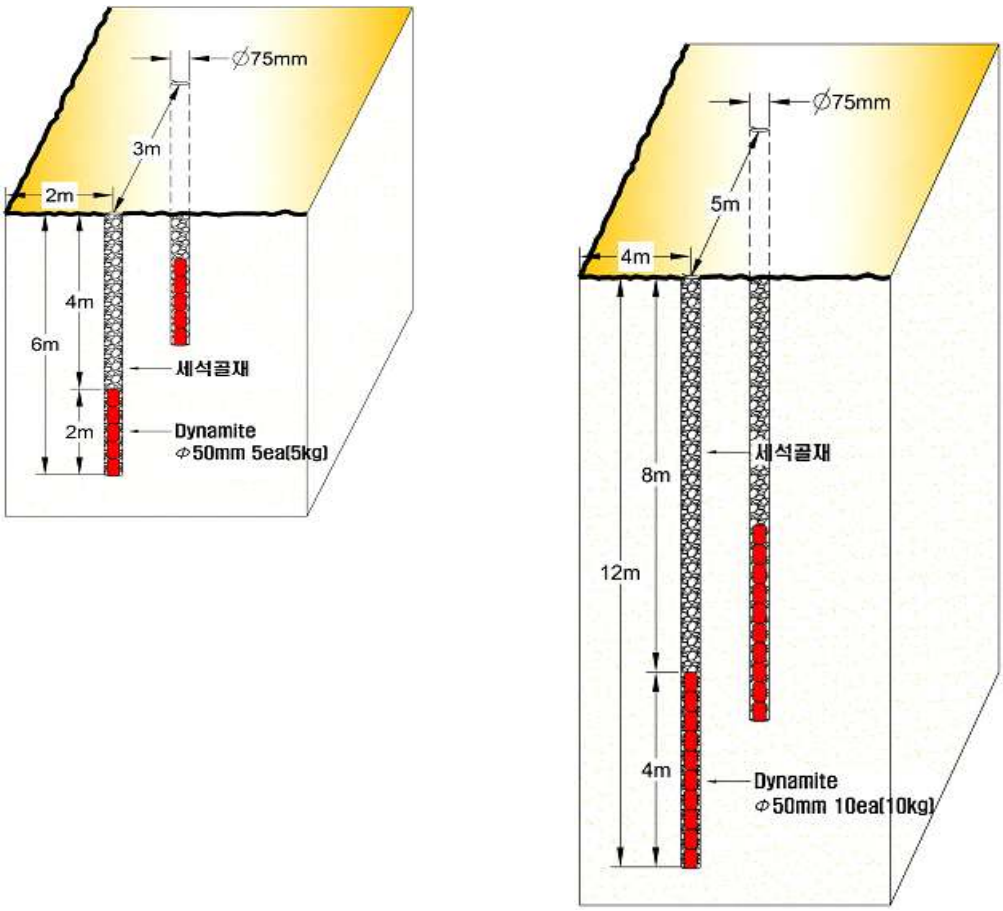
[표 3.6.15] 발파횟수 및 화약사용량

구 분	발파 회수	공 수	공당장약량 (kg/hole)	지발당장약량 (kg/delay)	총장약량 (kg)	사용뇌관
Type- I	2	2	5	5	10	ED
Type-II	2	2	10	10	20	ED
Type-III	2	2	15	15	30	ED
Type-IV	2	2	19	19	38	ED
Type-V	2	2	deck charge 5×4	5	40	MS 지발
Total		10			138	

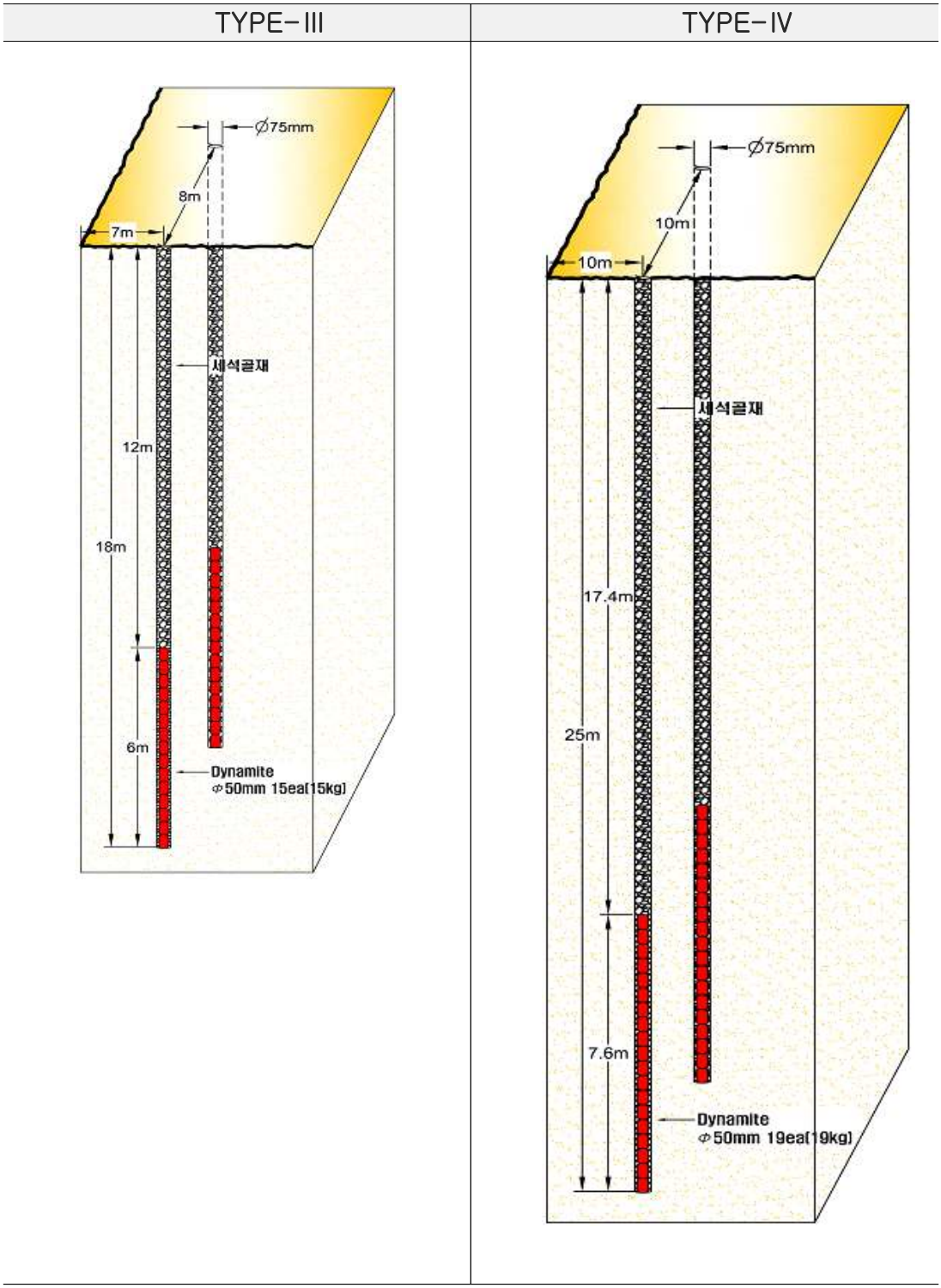
(나) 발파패턴

발파규모별 발파패턴은 [그림 3.6.16, 17, 18]과 같다.

TYPE-Ⅰ	TYPE-Ⅱ

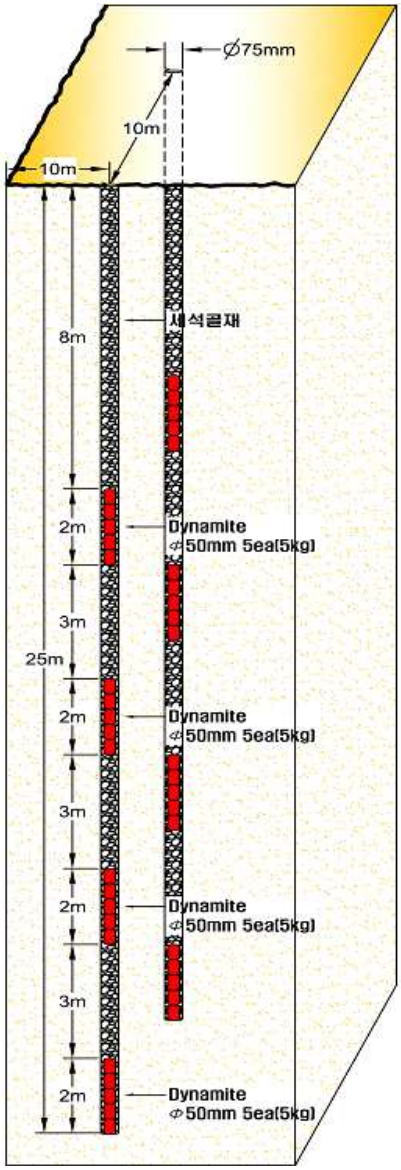


[그림 3.6.16] 1 발파패턴(TYPE-1, TYPE-2)



[그림 3.6.17] 2 발파패턴(TYPE-3, TYPE-4)

TYPE-V



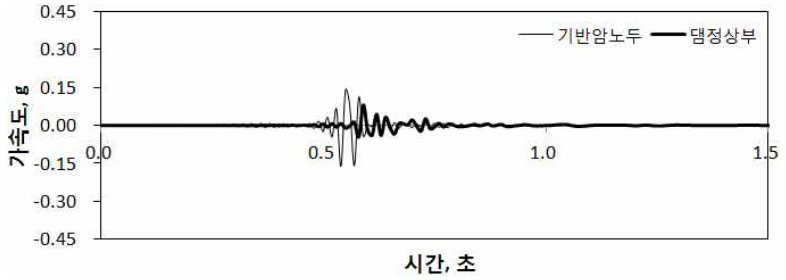
[그림 3.6.18] 3 발파패턴(TYPE-5)

5. 발파진동실험 결과 및 분석

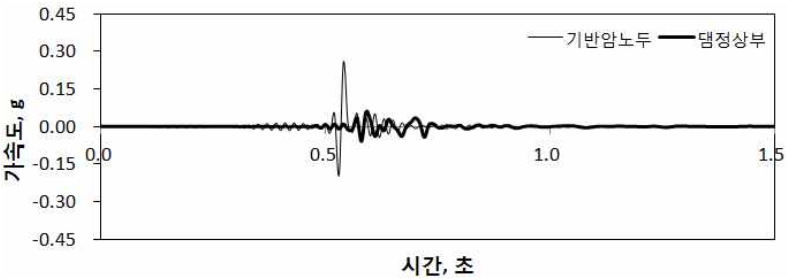
가. 발파진동실험 계측 결과

[그림 3.6.19]는 각각의 발파유형에 따른 실험으로부터 기반암노두와 댐 정상부에서 계측된 진동의 가속도 시간이력을 나타낸 것이다. 기반암노두와 댐 정상부에서 계측된 가속도의 최대값은 각각 0.10g~0.44g, 0.06g~0.08g 범위를 나타냈으며, 발파유형별로 다양한 값을 보였다.

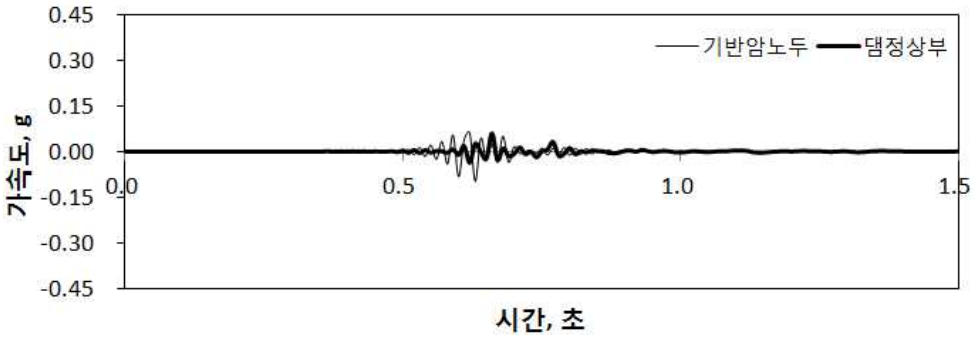
[그림 3.6.20]은 발파유형별 기반암노두에 설치된 가속도계로 계측한 가속도 시간이력의 주파수특성을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 발파진동의 지배주파수는 거의 모든 유형에서 약 46Hz로 거의 같고 전반적인 퓨리에진폭 곡선의 형태는 유사하게 나타났다. 다만, Type-II의 발파진동 가속도는 상대적으로 저주파에서 고주파까지 고른 주파수 분포를 나타내고 있다. 퓨리에진폭 곡선의 형태가 상호간에 유사한 것은, 발파공이 위치한 지반의 층후가 지표부터 시추공 바닥까지 거의 일정하게 경암의 분포 특성을 나타내고 암반의 상태 또한 매우 양호한 상태이므로, 심도 및 장약량에 의한 발파유형 변화가 정상부 가속도에 대하여 진폭에만 영향을 크게 미쳤기 때문인 것으로 판단된다.



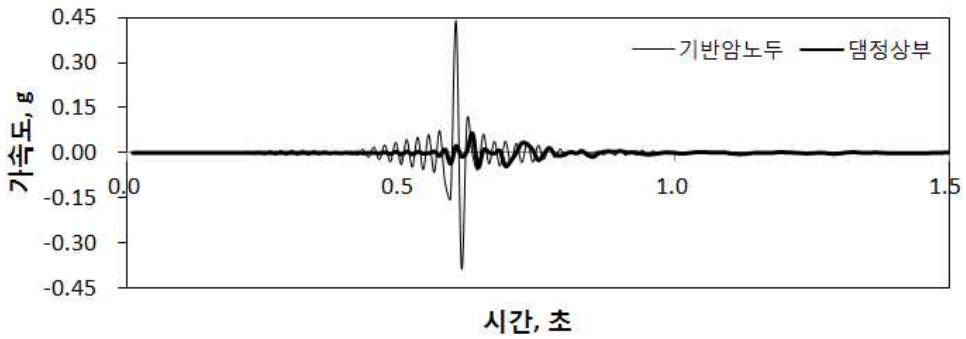
(a) Type-I



(b) Type-II

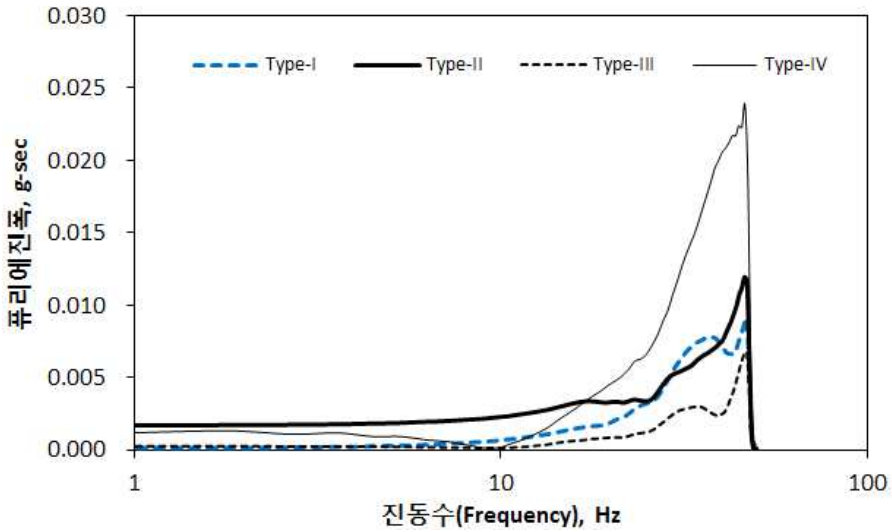


(c) Type-III



(d) Type-IV

[그림 3.6.19] 발파유형별 기반암노두와 댐 정상부에서 계측된 가속도 시간이력



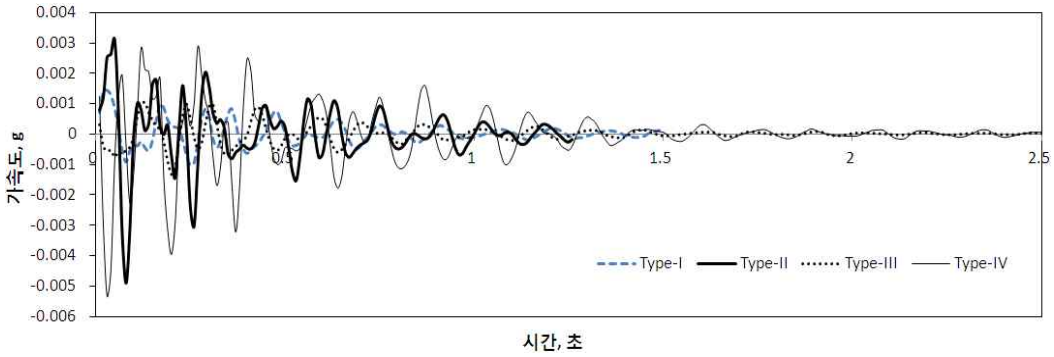
[그림 3.6.20] 각 발파유형별 기반암노두 가속도의 주파수 특성

나. 계측기록을 이용한 댐 고유진동수 산정

본 연구에서 발파 위치는 댐 정상부에 전달되는 가속도의 진폭을 최대화함으로써 댐의 응답 산정을 용이하게 하기 위하여, 댐으로부터 불과 60m 이격된 근거리 지점으로 선정, 실험을 수행하였다. 그러나 근거리 발파로부터 소정 진폭의 가속도 기록을 얻을 수 있다 하더라도, 계측된 전체 기록은 지진동의 주파수 특성과는 상이한 고주파수대역의 에너지를 포함하는 발파진동 특유의 주파수특성을 나타내므로 전체 기록을 분석할 경우 댐 고유의 진동응답 특성을 명확히 구분하여 파악하기는 어렵다. 단, 인위적으로 유발시킨 진동원으로서의 발파진동은 댐의 동적 응답 거동을 야기하기 위한 충분히 큰 에너지를 제공하므로, 계측 데이터에서 발파진동 자체특성을 배제할 경우 댐의 고유응답특성 평가에 필요한 신호만을 선별적으로 분석할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 댐에서 계측된 전체 기록 중 주 진동, 즉 발파진동특성에 의한 최대 진폭 신호 이후에 계측되는 자유진동 감쇠부분의 기록만을 분석하는 방법을 적용함으로써 댐의 진동특성과 상이한 발파진동의 주파수특성영향을 줄이고자 하였다. 즉, 발파진동실험으로 계측된 댐 정상부의 가속도 기록 중, 발파진동 자체특성이 지배적으로 나타나는 초기 주 진동 이후 댐의 동적응답특성이 지배적으로 나타나는 후반부 자유진동감쇠 가속도 시간이력만을 대상으로 주파수분석을 수행함으로써, 대상댐의 고유진동수를 산정하였다.

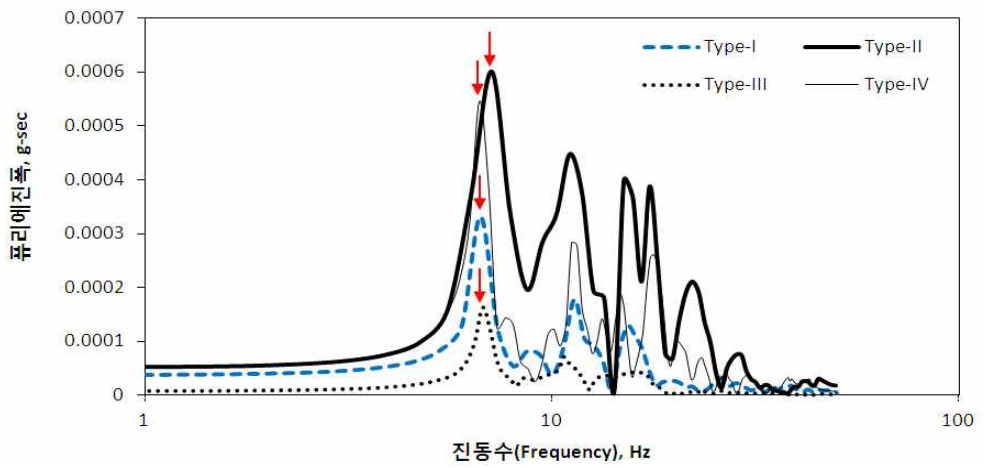
자유진동감쇠 가속도 시간이력 구간에 대한 주파수 분석을 이용한 고유진동수 산정방법을 댐 정상부에서의 응답가속도의 진폭이 작은 미소지진을 이용하여 적용하는 경우에는, 주진동의 진폭과 자유진동의 진폭크기 차가 거의 없어서 자유진동감쇠구간을 객관적이고 정량적인 기준으로 발췌하는 것이 어렵다. 그러므로 이러한 자유진동 감쇠곡선을 이용하는 방법은 계측되는 지진가속도의 진폭이 충분히 커서 주진동과 자유진동부분을 잡음을 감안하더라도 확연히 구분할 수 있는 경우에 적용이 가능하다(김남룡과 하익수, 2012).

[그림 3.6.21]은 댐 정상부에서 계측된 발파유형별 가속도 계측기록 중 자유진동감쇠를 나타내는 후반부 가속도 시간이력만을 발췌하여 나타낸 것이다. 본 연구에서는 발췌된 가속도기록의 자유진동 감쇠 부분만을 이용한 데이터에 대하여 퓨리에 변환을 수행함으로써 발파유형별 고유진동수를 산정하였다.



[그림 3.6.21] 각 발파유형별 정상부 가속도 계측기록 중 자유진동감쇠 부분 시간이력 곡선

[그림 3.6.22]는 자유진동 감쇠 가속도 시간이력에 대한 퓨리에변환으로부터 대상댐의 고유진동수를 산정한 결과를 나타낸 것으로 발파 유형별(Type-I, Type-II, Type-III, Type-IV)에 따른 각각의 고유진동수는 6.67Hz, 7.00Hz, 6.74Hz, 6.64Hz로 나타났다. 즉, 각 계측기록에 대하여 자유진동감쇠부분을 발췌하여 고유진동수를 산정하는 방법으로 구한 대상댐의 고유주기는 발파유형에 크게 영향을 받지 않으며, 약 6.67Hz의 일정한 진동수로 산정될 수 있었다.



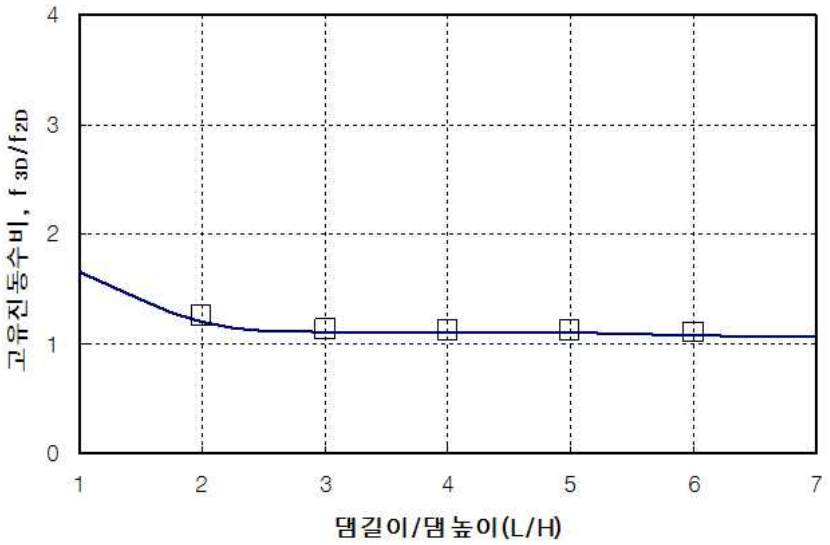
[그림 3.6.22] 발파유형에 따른 계측기록을 활용한 대상댐 고유진동수 산정

6. 댐 축조재료의 심도별 전단파속도 역산

가. 계곡효과(canyon effect)와 댐 고유진동수

기존의 연구결과(Hatanaka, 1955; Ambraseys, 1960; Makdisi, 1976)에 의하면 댐의 동적응답에 대한 경계조건이 미치는 주요 사항은 양안 경계의 계곡효과이며, 이는 댐의 동적응답에 대한 구조적 강성을 증가시킨다. 이러한 효과는 평면변형율 조건하의 댐에 비해 계곡에 위치한 댐에서의 고유진동수가 더 크게 나타나는 것으로 반영될 수 있다.

[그림 3.6.23]은 Ambraseys(1960)의 연구결과 이후, Mejia & Seed(1983)의 연구결과에서 수치적 해석 결과를 바탕으로 정리, 제시한 사항으로 사다리꼴 형태(trapezoidal type)의 댐인 경우 댐의 높이에 대한 길이 비에 따라 댐의 3차원 모델과 2차원 모델의 해석결과가 나타내는 고유진동수 비를 비교하여 나타낸 것이다. 3차원 모델 해석에 의해 산정된 고유진동수는 2차원 모델 해석으로 산정한 고유진동수에 비해 크며, 댐의 길이/높이 비가 3 보다 큰 경우에는 2차원 모델 해석결과에 비해 약 10% 정도 더 크게 평가되었음을 알 수 있다. 이러한 효과는 앞에서 제시한 계곡효과에 의한 영향이라고 할 수 있다(하익수와 오병현, 2008). 참고로 본 연구의 대상댐인 S댐의 최대높이는 19m이고, 월류부를 제외한 사력부의 댐 길이가 72m로 길이/높이 비는 3을 초과한다.

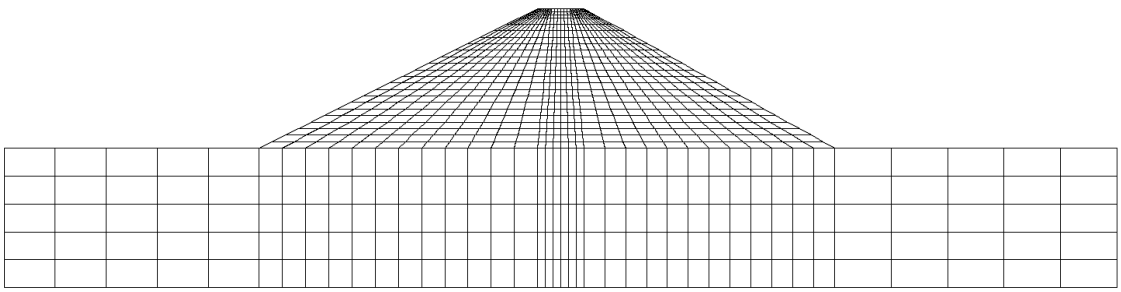


[그림 3.6.23] 2차원과 3차원 모델 해석 결과에 의한 댐 고유진동수 비교

나. 댐 2차원 지진응답해석 개요

[그림 3.6.24]는 정적해석과 동적해석을 위한 S댐의 해석요소망을 나타낸 것이다. 지반해석 모델은 Mohr-Coulomb 모델(linear elastic-perfectly plastic model)을 사용하였다. Mohr-Coulomb 지반모델을 사용한 이유는 반복적인 수치해석에 의한 최대전단탄성계수의 역산의 용이성과 함께 실제 댐체에 발생할 수 있는 전단변형율의 수준이 탄성범위내의 값일 것으로 예상하였기 때문이다.

발파진동 각 유형별 나타난 댐 정상부에서의 가속도 계측기록을 적분하여 계략적으로 산정한 정상부에서의 최대변위는 0.003cm이고, 이는 댐 높이가 19m이므로 전단변형율은 1.58×10-4%(0.00003/19=1.58×10-6)로 미소하며, 발파하중의 지속시간이 통상적인 지진파와 달리 매우 짧기 때문에 하중 지속시간동안 댐체의 거동은 탄성거동을 가정하였다.



[그림 3.6.24] S댐 2차원 지진응답해석 해석요소망

정적해석을 위한 입력물성 중 코어재료와 성토재료의 내부마찰각, 점착력, 단위중량은 축조재료에 대한 시험 성과자료(한국농어촌공사, 1983)를 이용하였다. 코어재료와 성토재료의 전단탄성계수와 체적탄성계수는 현장에서 시행된 표준관입시험결과로 얻어진 평균 N값에 대하여 문헌에 의한 경험식(Das, 1995)을 적용함으로써 탄성계수 E를 산정하였고, 포아송비는 0.3을 가정하여 해석을 수행하였다.

기반암에 대한 정적물성은 주로 지반조사 결과를 바탕으로 경험식에 의한 산정방법으로 결정하였다. 단위중량의 경우, 지반조사 결과 경암층이며 응회암으로 구성되어 있고, 암질지수(RQD)는 90%로서, 암질상태가 양호하여 응회암의 일반적인 단위중량을 적용하였다(윤지선과 박종관, 2008). 마찬가지로 점착력과 마찰각도 RMR(Rock Mass Rating)분류법에 의해 양호이상 등급의 암반으로 판단되어 이에 해당하는 문헌값을 적용하였다(윤지선과 박종관, 2008). 기반암의 전단탄성계수와

체적탄성계수의 경우 경암의 전단파속도가 일반적으로 1,500m/sec를 초과하므로(한국지반공학회, 2006), 전단파속도를 1,500m/sec로 정하고, 여기에 밀도값을 이용한 [식 3.6.9]을 적용하여 최대전단탄성계수로 가정하였으며, 포아송비는 0.2를 가정하여 체적탄성계수를 결정하였다.

[표 3.6.16]은 이러한 절차에 의해 선정된 S댐의 각 존별 정적입력 물성을 나타낸 것이다.

[표 3.6.16] S댐 각 존별 정적해석 입력물성

재료구분	단위중량, γ (kN/㎥)	체적탄성계수 (MN/㎡)	전단탄성계수 (MN/㎡)	마찰각 (°)	점착력 (MN/㎡)
코어(점토)	19.41	61.75	28.50	9	0.1
성토존	19.85	64.60	29.83	17	0.06
기반암	22.00	6728	5046	40	3.5

동적해석을 위한 입력물성으로는 기반암의 경우 [표 3.6.16]의 정적해석 입력물성을, 코어의 경우 댐 부피의 7% 이내로서 전단탄성계수는 경험식인 Sawada & Takahashi(1975)의 코어존의 깊이별 전단파속도 분포식의 댐 높이 평균값에 코어존의 밀도를 곱하여 최대전단탄성계수를 정하고 포아송비는 0.3을 적용하여 체적탄성계수를 일정값으로 입력하였다. 역산을 하게 될 성토존의 경우 최대전단탄성계수는 본 연구에서는 $k_{2,max}$를 여러 가지로 변화시킨 값(40, 80, 100, 105, 130)을 사용하였으며, 체적탄성계수는 산정된 전단탄성계수에 포아송비 0.3을 적용하여 산정하였다.

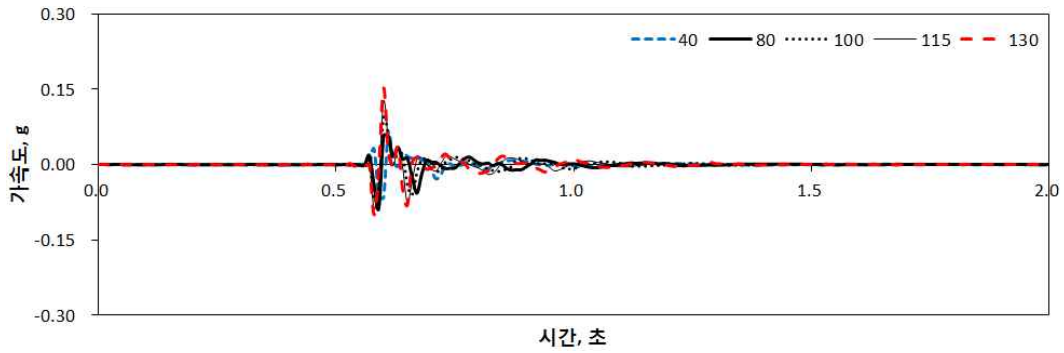
다. 댐 2차원 지진응답해석 결과 및 성토존 전단파속도 역산

S댐의 고유진동수는 6.67Hz이고, 각 발파유형에 따른 기반암노두에서 계측된 가속도 시간이력을 입력하중으로 하고, 각 발파유형에 대하여 $k_{2,max}$를 40, 80, 100, 115, 130으로 변화시킨 반복적 2차원 동적 수치해석을 수행하였다.

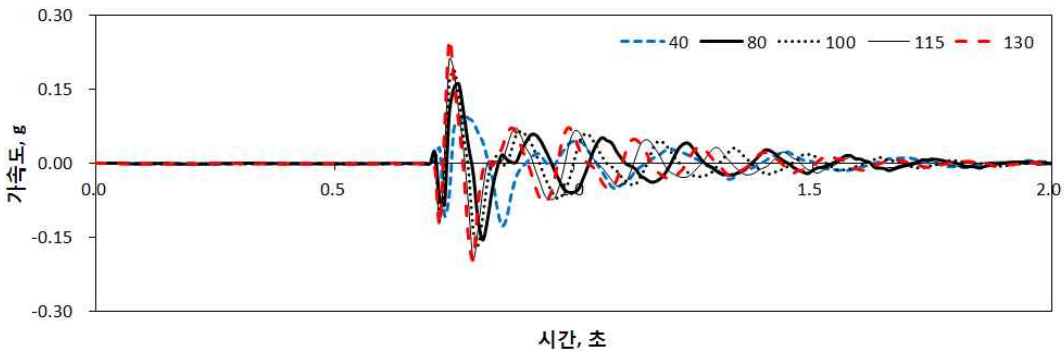
[그림 3.6.25]는 해석결과로부터 계산된 각 발파유형별 성토재료 강성에 따른 댐 정상부 응답 가속도 시간이력을 나타낸 것이다. 전반적으로 모든 발파유형에서 $k_{2,max}$가 커질수록 정상부에서의 최대가속도는 증가하며, 이러한 증가 경향은 폭원 근접 위치(기반암노두)에서의 입력파의 진폭이 커질수록 감소하는 것으로 나타났다.

[그림 3.6.26]은 해석결과로부터 계산된 각 발파유형별 댐 정상부 응답가속도 기록 중 자유진동 감쇠를 나타내는 후반부 가속도 시간이력만을 발췌하여 나타낸 것이다. 발췌된 가속도기록의 자유진동 감쇠 부분에 대한 퓨리에변환으로부터 유형별 상이한 성토재료 강성에 따른 고유진동수를 각각 구하였다.

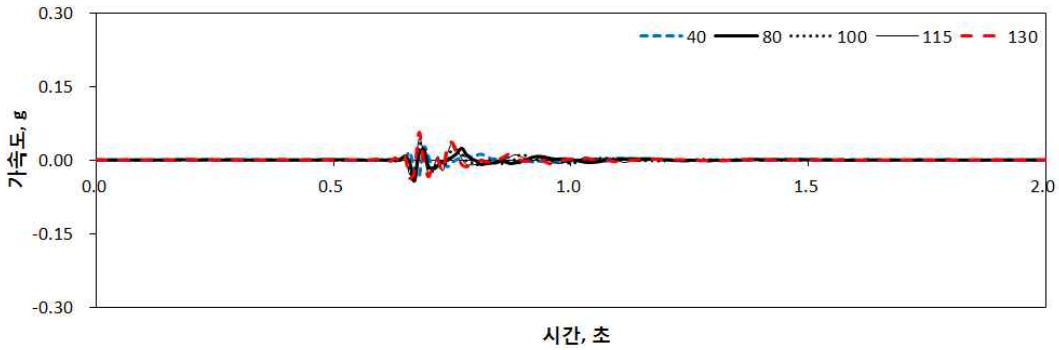
[그림 3.6.27]은 이러한 절차로부터 고유진동수를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 대상댐에서 계측기록으로 산정된 S댐의 고유진동수는 6.67Hz이고, 이 값은 앞서 설명한 3차원 계곡효과가 고려된 실제 댐에서의 고유진동수이므로 2차원 동적해석의 경우에는 이 값보다 약 10% 작은 값을 나타내는 고유진동수를 가지게 될 때의 전단탄성계수 G_{max}를 선정하여야 한다(Vrymoed, 1981).



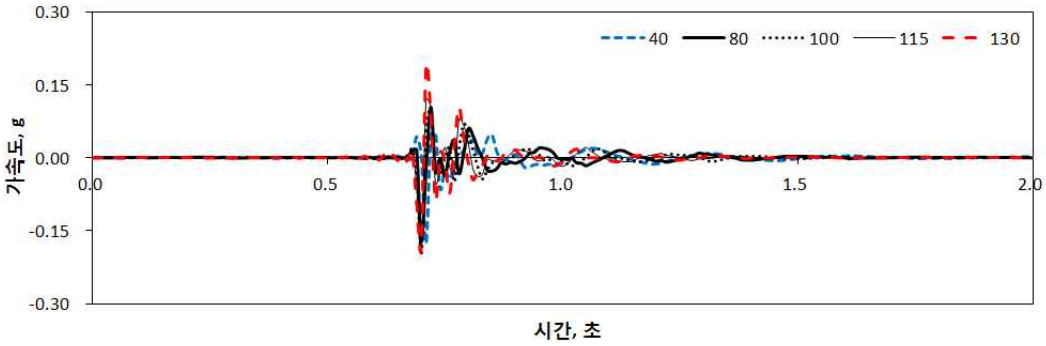
(a) Type-I



(b) Type-II

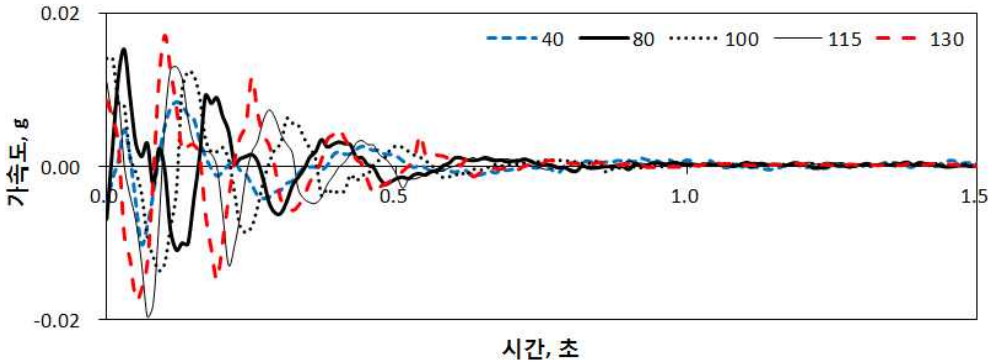


(c) Type-III

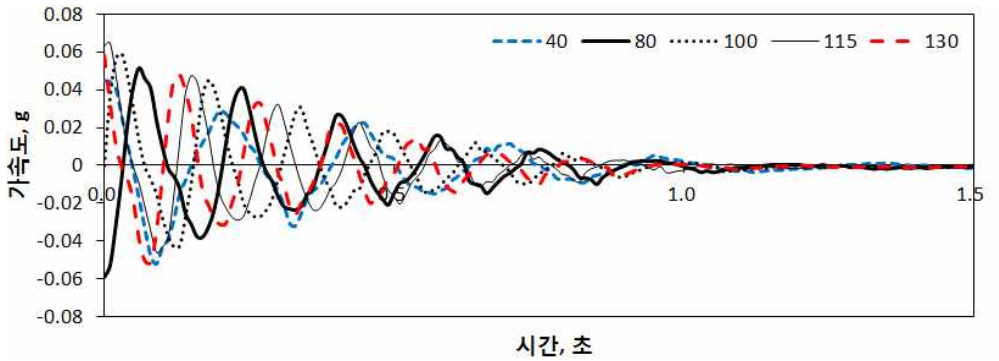


(d) Type-IV

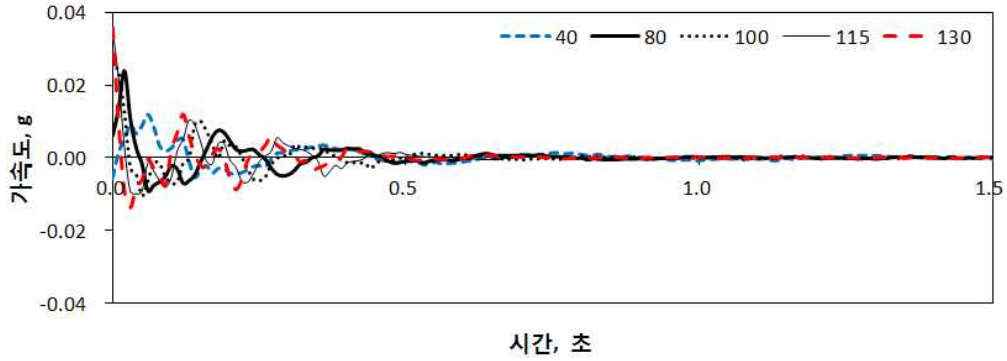
[그림 3.6.25] 해석결과 각 발파유형별 축조재료 강성에 따른 댐 정상부 응답가속도 시간이력



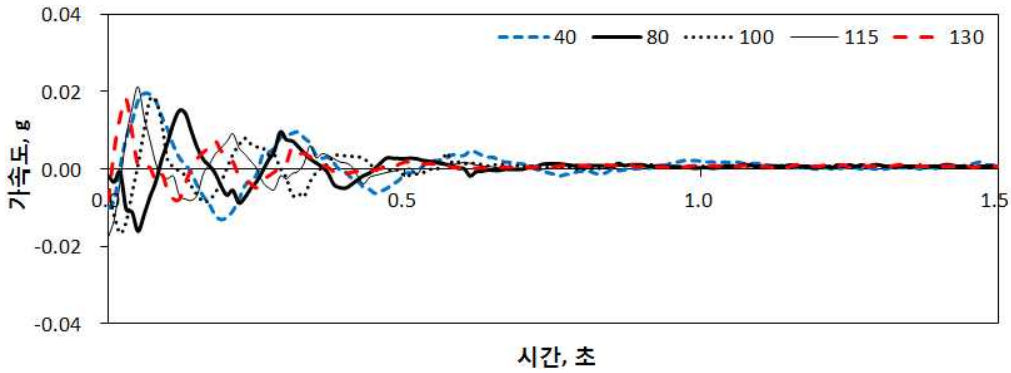
(a) Type-I



(b) Type-II

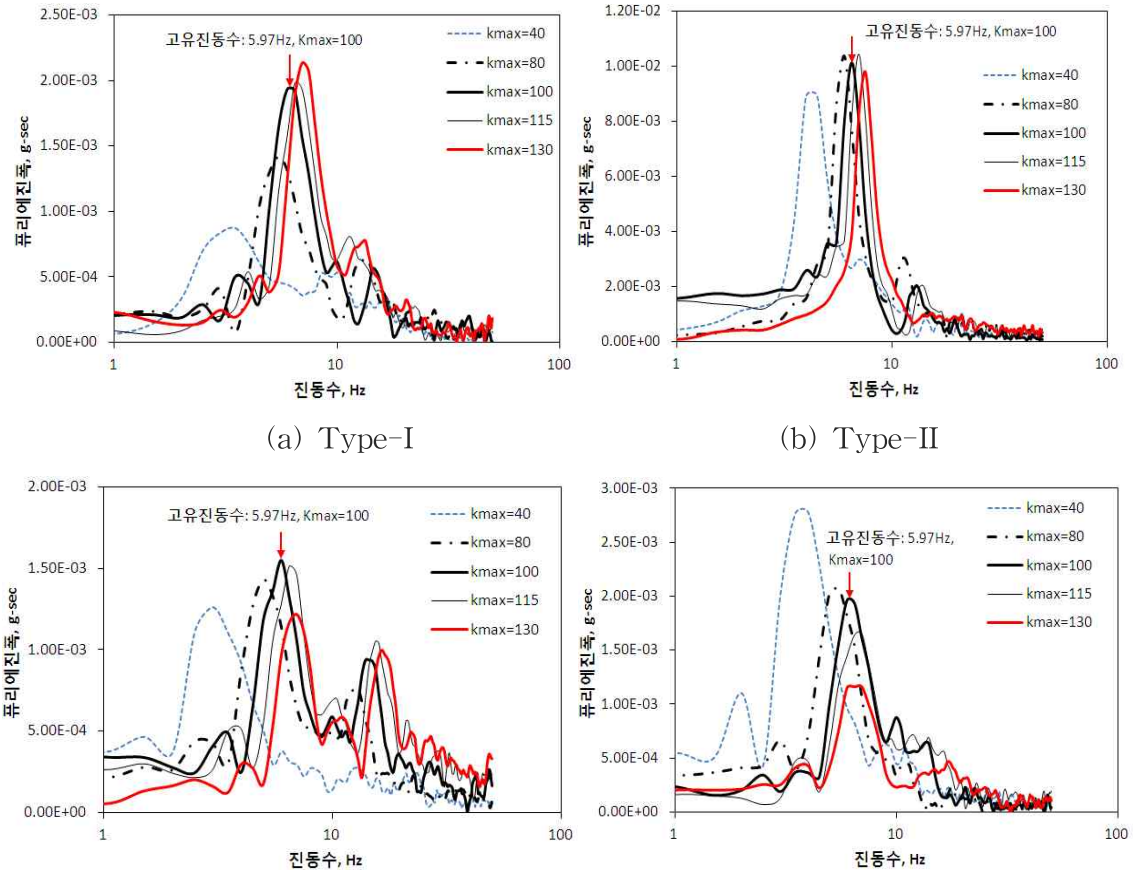


(c) Type-III



(d) Type-IV

[그림 3.6.26] 해석결과 각 발파유형별 축조재료 강성에 따른 댐 정상부 응답가속도 자유진동감쇠 시간이력



[그림 3.6.27] 발파유형별 강성변화에 따른 S댐 정상부 가속도 자유진동감쇠 이력의 퓨리에진폭 곡선

[그림 3.6.27]의 해석 결과에서 알 수 있듯이, 모든 발파유형에 대하여 $k_{2,max}$=100일 때 고유진동수는 5.97Hz로서 계측된 발파진동기록 분석으로부터 산정된 고유진동수 6.67Hz의 약 10% 작은 값에 해당되는 것으로 나타났다. 즉, 다양한 발파진동에 대하여도 성토재료의 강성을 나타내는 $k_{2,max}$=100인 경우가 일관성 있게 3차원 계곡효과를 반영한 댐의 고유진동수와 2차원 동적해석에 의한 고유진동수와의 적합성을 만족시킴을 확인할 수 있었다. 그러므로 $k_{2,max}$=100인 경우가 S댐 성토재료의 동적물성을 대표하는 값이라 판단할 수 있다.

동적해석결과를 통해 성토존의 깊이별 최대전단탄성계수를 산정하고 산정된 최대전단탄성계수는 다음의 식을 이용하여 깊이별 전단파속도로 환산하였다. 여기서, ρ는 밀도(=γ/g, γ는 단위중량, g는 중력가속도)이다

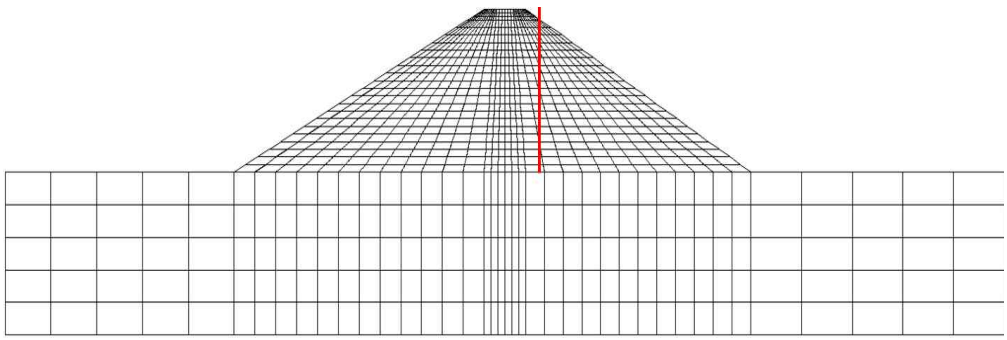
$$v_s = \sqrt{G_{\max}/\rho} \qquad \text{[식 3.6.10]}$$

$k_{2,\max}$=100인 경우, 심도별 성토재료 전단탄성계수를 [그림 3.6.28]과 같이 추출하여 깊이별 전단파속도로 환산하였다. [그림 3.6.28]과 같이 물성추출 방향(댐 사면에서 연직하향 방향)을 정한 이유는 기존의 경험식(Sawada & Takahashi)과 비교하기 위하여 경험식에서 물성을 추출한 방향과 일치시키기 위한 것이다.

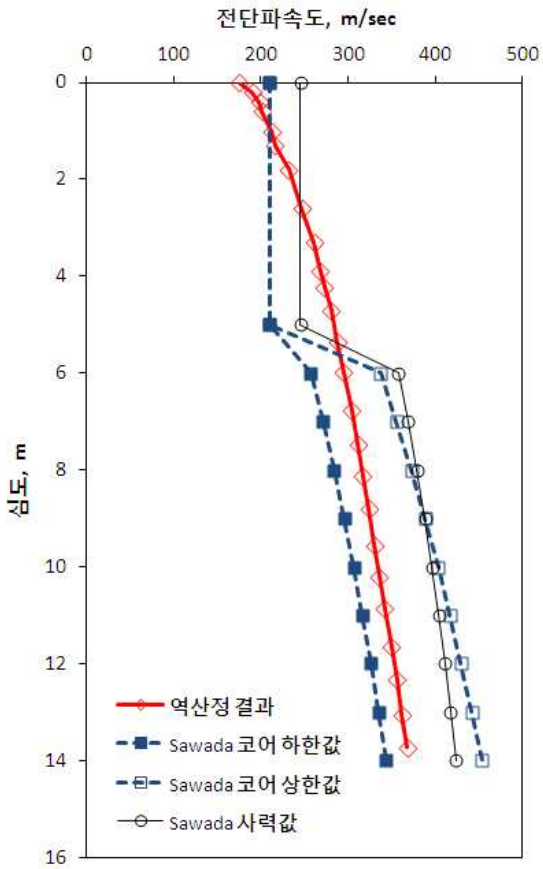
[그림 3.6.28]은 역산한 결과를 기존의 Sawada & Takahashi의 경험식에 의해 산정된 결과와 함께 도시한 것이다. 비교 결과, 역산된 성토존의 깊이별 전단파속도 분포는 Sawada & Takahashi가 제안한 코어존의 상한값과 하한값의 평균값 정도를 나타내었다. 시굴(test pit)로부터 채취한 성토재료에 대한 입도분포시험 결과, 성토재료는 200번 체 통과율이 2.15%로 50%이하이며, 모래의 백분율(직경 4.75mm~0.075mm)은 69%, 균등계수와 곡률계수는 각각 6.2와 1.25로써, 통일분류법에 의하여 SW(Well-graded Sand)로 분류되었다.

그러므로 성토존의 심도별 전단파속도 결과는 기존 경험식에서 제시된 큰 입자를 포함하거나, 대부분의 입자 크기가 큰 사력존보다는 코어존의 전단파속도 특성을 보임이 타당한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 역산결과의 실효성을 보여주는 것뿐만 아니라, 역산방법이 흙댐의 성토재료와 같이 대상 축조재료를 코어재료나 사력재료로 명확히 구분하기 어려운 경우, 기존 경험적 방법의 적용상의 한계성을 극복할 수 있는 대안으로 제시될 수 있음을 보여준다.

이상의 결과로부터 지진계가 설치되지 않아 실지진 계측기록을 이용할 수 없는 중소규모 흙댐의 경우, 인접발파에 따른 발파진동계측기록에 대한 분석으로도 댐 축조재료의 전단파속도를 실효성 있게 산정할 수 있음을 확인할 수 있었다.



[그림 3.6.28] S댐 심도별 성토존 전단탄성계수 추출 위치
($k_{2,\max}$=100인 경우, 해당요소에서의 전단탄성계수 읽음)



[그림 3.6.29] 성덕댐 성토존의 심도별 전단파속도 역산 결과

7. 결론

본 연구에서는 지진계측기가 설치되어 있지 않은 중소규모 댐 축조재료의 전단파속도를 실효성 있게 산정할 수 있는 대안으로, 인접발파에 따른 발파진동계측기록을 적극 활용하는 방법을 모색하였다. 이를 위하여 국내 최초로 실제 운영 중인 흙댐에 대한 실대규모 근접 발파진동실험을 수행하고, 발파실험 동안 폭원에 인접한 기반암노두와 댐 정상부에서 계측한 응답가속도 기록을 분석하여 흙댐 축조재료의 심도별 전단파속도를 추정하였다.

다양한 발파진동 특성에 따른 축조재료에 대한 물성산정 결과의 일관성을 확인하기 위하여, 발파심도와 장약량을 변화시킨 4가지 발파유형의 인공 발파진동실험을 수행하였다. 발파진동실험으로부터 얻어진 계측기록을 분석하여 흙댐의 고유진동수를 산정하고, 계측된 가속도기록으로 산정한 고유진동수와 기반암노두에서 계측된 발파파 가속도를 입력하중으로 한 반복적인 수치해석을 수행하여 계산한 고유

진동수를 일치시키는 방법으로, 댐 축조재료의 심도별 전단파속도를 추정하는 방법을 적용하였다. 이러한 방법으로 산정한 대상댐 성토재료의 전단파속도는 발파유형에 크게 영향을 받지 않고 일관성 있는 값을 산정하는 것으로 나타나, 발파진동실험에 의한 흙댐 축조재료의 전단파속도 산정방법이 일관된 결과를 줄 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 산정한 대상댐 성토재료 전단파속도 산정결과를 국내에서 가장 널리 사용하고 있는 Sawada & Takahashi의 경험식에 의해 산정된 결과와 비교한 결과, 산정된 성토존의 전단파속도는 경험식에서 제안한 코어존의 상한값과 하한값의 평균값 정도를 나타내어 그 실효성을 확인할 수 있었다. 아울러 이러한 결과는 역산방법이 흙댐의 성토재료와 같이 대상 축조재료를 코어재료나 사력재료로 명확히 구분하기 어려운 경우, 기존 경험적 방법의 적용상의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 제시될 수 있음을 보여주었다.

이상의 결과로부터 지진계가 설치되지 않아 실지진 계측기록을 이용할 수 없는 중소규모 흙댐의 경우, 인접발파에 따른 발파진동계측기록에 대한 분석으로도 댐 축조재료의 전단파속도를 실효성 있게 산정할 수 있음을 확인하였다.

본 연구결과는 실지진 계측기록을 확보할 수 없거나 현장탐사를 수행하지 않은 중소규모 흙댐의 전단파속도를 산정하기 위하여, 인위적으로 발파진동실험을 수행해야 함을 제안하는 것이 아니라, 댐 주변에 인접발파 공정이나 계획이 있을 경우, 발생되는 인공진동을 효과적으로 활용할 수 있다면 실효성 있게 대상댐 축조재료의 전단파속도를 산정할 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

제 7 절 개별요소법 기반의 수치시험 모델링 기법 개발

1. 개별요소법 (distinct element method)

가. 개별요소법의 활용

지반공학에서 다루고 있는 많은 현상들은 각각의 입자 혹은 입자들로 구성된 복합체의 상호작용 및 거동 등으로 표현된다. 이러한 관점에서 많은 물리적 현상들이 연속체 거동이 아닌 불연속체 거동의 개념으로 설명되고 있으며(Owen 등, 2003), 최근들어 조립재료 및 절리암반등의 역학적 특성치 산정과 전체적인 거동예측에 개별요소법(distinct element method)에 의한 수치해석적 접근이 진행되고 있다(Cundall and Strack, 1979; Cundall, 2001; Achmus 등 2002; Hainbüchner 등, 2002; Cho and Martin, 2004).

최근 역학적 실내시험 결과를 검증하고 다양한 역학조건하의 재료 특성치 도출을 위하여, 개별요소법에 의한 수치해석적 접근이 시도되고 있다. 국내에서도 암반 및 발파진동 분야의 연구를 중심으로 개별요소법이 적용되고 있는데, 암반의 미시적 거동분석을 통한 파괴 메카니즘 연구(Owen et al., 2002) 및 암석과 절리암반의 강도, 변형특성 연구(Cho et al., 2004), 수치실험실로서의 활용연구(Li et al., 2002) 등 다양한 분야의 연구가 진행되어 왔다.

박의섭 등(2005)은 기존 연속체 해석 및 시험으로 평가하기 어려운 절리암반에서의 역학적 물성치 산정에 개별요소법을 이용하였으며, 신중호 등(2000)은 Brazilian 파괴인성 시험에 대한 불연속체 수치해석을 실시하고, 이를 통해 시험에 대한 영향변수 분석 및 적정 기준설정에 관한 연구를 수행하였다.

개별요소법(DEM)은 조립재료 및 락필재료를 대상으로한 지반공학적 분야에 그 활용성이 증가되고 있는데, 지반공학분야에의 응용방안 제시(Cundall, 1979, 2001)를 시작으로 조립재료의 미시적 강도특성(Ting et al., 1988, 1989), 조립재료의 형상 모델링 기법(Thomas et al., 1999), 실내시험 모델링을 통한 기초 지지력 연구(Hainbüchner et al., 2002) 등 많은 분야에 그 적용이 증가되고 있다.

지반공학분야에 있어 입자유동개념의 개별요소법은 기존 연속체 수치해석의 한계를 극복할 수 있는 대안으로서, 그 필요성 및 효과에 대한 기본검증과 선행연구가 마무리 되었으며, 각종 연구 및 설계에 그 사용이 시도되고 있지만, 수치실험실로의 응용 및 확장에 관한 추가 실용화 연구가 절실히 요구되는 것이 현실이다.

과거 조립재료의 강도와 변형관련 특성치 산정은 경험적방법과 현장시험 혹은 실내시험 등을 통해 수행되었다. 그러나, 대입경 조립재료의 경우, 각종 시험시 시험장비의 규모한계와 원재료 크기에 비해 대규모로 축소된 재료를 적용하는 스케일 효과등에 의해 그 특성치 산정에 많은 현실적 어려움이 있는 것이 사실이다.

이러한 이유로, 기존의 경험적 방법에 의한 개략적 유추 및 단순화된 실내시험 결과를 통해 조립재료의 역학적 특성치를 산정한 후, 이를 연속체 개념의 수치해석등에 적용하여 전반적인 거동예측을 수행하고 있다.

특히, 조립재료의 현장입도 규모 및 조건을 고려할 때, 역학특성 파악을 위해서는 대형시험장치의 이용이 필수적이지만, 시료조성 및 각 시험경우별 동일 초기조건 구현이 어려운 사항들로 인해 매우 제한적으로 이용되고 있다. 또한 조립재료로 구성된 대상지반 및 구조체의 실제 입도형태와 입자형상 등을 실내시험상에 그대로 반영하는것은 현실적으로 불가능하다. 이러한 이유에서 최근들어 조립재료 및 절리암반등의 역학적 특성치 산정과 전체적인 거동예측에 개별요소법에 의한 수치해석적 접근이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 개별요소법을 이용하여 대입경 조립재료를 대상으로 한 실내 대형삼축압축시험의 수치모델링을 수행하였으며, 실내시험 결과와의 비교, 분석을 통해 개별요소법의 적용기법 및 응용에 관한 연구를 수행하였다.

나. 2차원 및 3차원 PFC (Particle Flow Code)

지반공학에서 다루고 있는 많은 현상들은 각각의 입자 혹은 입자들로 구성된 복합체의 상호작용 및 거동 등으로 표현된다.

1990년대 이후로 연속체 역학을 근거로 한 해석법들의 한계점을 극복하는 한 방편으로 개별요소법(DEM)을 이용한 해석법들이 각광을 받기 시작했다. 이러한 프로그램들중 두드러진 것중의 하나가 1995년 ITASCA Consulting Group에서 개발한 개별요소법 기반의 해석 프로그램 PFC(Particle Flow Code) 이며, 본 연구에서도 2차원 개별요소 해석 프로그램인 PFC2D 및 3차원 개별요소 해석 프로그램인 PFC3D를 이용하여 대입경 조립재료에 대한 수치모델링을 수행하였다.

PFC2D에서는 각 개별요소를 일정 두께를 갖는 원통형 디스크(disk)로 생성하는 반면, PFC3D에서는 각 개별요소를 일정 체적을 갖는 구(sphere)로서 생성한다. 본 프로그램은 각각의 독립적인 입자(particle)들로 전체 모델을 생성하게 되며, 각 입자간 접촉면에서의 하중(contact force)-변위(displacement)관계로 표현되는 접촉면

구성모델에 의해 입자 개개의 미시적 거동(micro behavior) 및 전체적 거동(macro behavior) 해석을 수행하게 된다.

연속체 역학에 근거한 유한요소법에서는 해석대상에 대한 해석요소망을 구성하는 반면, 개별요소법(Distinct Element method) 기반의 PFC는 특별한 해석요소망의 생성없이 일정한 크기의 경계면 요소로 구속된 경계내에 원통형 혹은 구형의 개개 입자요소를 생성하여 그들의 상호작용 및 거동을 모델링하는 방식으로 해석을 수행하고 있다.

본 기법을 이용하면 비균질 크기의 원통형 강체입자로 이루어진 재료의 기계적인 거동을 모사하는 것이 가능하다. 이들 강체 입자들은 각각의 접점에서 상호작용을 하며, 이 접점에서는 입자들간의 연직강성(normal stiffness) 및 전단강성(shear stiffness)이 존재한다.

암석과 같은 강한 접착재료의 모델링시에는 이들 접점에 접착강도(bonding strength)를 부여함으로서 모델링을 할 수 있으며, 이러한 암석 모델링시 접점에 가해시는 국부응력이 점착강도를 넘어설시 입자간의 접착성은 파괴되는 것으로 간주되며, 이러한 미세입자 거동은 실제 암석에서 일어나는 미세균열현상과 유사한 모델링 효과를 가져와 전체 암석의 감도 및 강성에 영향을 미치게 된다.

반면 사질토나 자갈, 쇄석등, 비 점착성 재료의 모델은 이러한 점착강도가 요구되지는 않으며 다만, 전체 재료의 거동은 입자간 접촉점에서의 강성, 마찰계수 등에 주로 영향을 받게 된다. 그러나 대부분 이러한 재료들의 모델링시, 연속체 역학과 비교하여 무엇보다 가장 두드러진 점은 PFC를 이용한 모델기법은 입자간의 미세거동에 근거하기 때문에 재료의 항복이나 항복 후 거동에 대한 특정 항복기준이나 유동법칙(flow rule)이 필요하지 않다는데 있다.

단지 뉴튼의 운동방정식만이 입자간의 움직임과 입자간에 발생하는 힘 및 모멘트 그리고 그에 상응하는 변위를 표현하게 된다. 강체입자에 대한 가정은 접촉면을 따라 움직이는 지반공학적 재료들의 실제 변형을 설명하는데 적용될 수 있다.

지반공학에서의 변형, 특히 모래나 자갈, 암성토재와 같은 조립재료의 변형은 지반을 구성하는 개개 입자들의 자체변형으로부터 발생되는 것이 아니라, 강체입자들의 회전과 미끄러짐 등 상호작용에 의해 발생하는 현상이므로, PFC에서 가정하는 강체입자에 대한 거동 표현 방식은 실제 조건의 거동을 표현하는데 적합하다고 할 수 있다.

그러나 지반재료 모델시 원형 혹은 구형형상에 대한 입자의 가정은 때로 실제 결과랑 잘 부합되지 않는 결과를 가져올 수도 있다. 암석, 암반, 조립토를 구성하는

입자들은 대부분 원형 혹은 구형이 아닌 부정형에 가깝다. 그러나 이런 부정형의 입자형상을 원형이나 구형으로 단순화한 모델은 입자들간의 과도한 회전으로 실제 강도를 과소평가하게 되거나, 항복시 낮은 체적변화율을 나타낼 수 있다.

다. 개별요소 해석 방법

PFC는 특정하중에 가해진 강체입자들의 거동 및 상호작용을 개별요소법(이하 DEM, Distinct Element Method)을 이용하여 모사한다. 각 계산과정중 개별 입자요소들의 회전 및 변위, 새로운 접점(contact)의 생성과 분리 등을 자동적으로 감지하도록 되어 있으며, 외력에 의해 개별 입자요소들에 발생하는 불평형력(unbalanced forces)을 반복적으로 수렴시켜가는 방식의 동적해석을 수행하게 된다. 동적해석은 각 해석스텝에서 일정한 속도 및 가속도를 가정하는 알고리즘을 이용하게 된다.

이러한 해석법은 연속체 역학에서 적용되어온 외삽 유한차분법(explicit finite diffrence method)과 유사하다. 이러한 수치해석법은 과도한 컴퓨터 메모리의 사용을 필요로 하지 않으므로, 많은 연산량을 필요하는 수치해석에 적합한 특성이 있으나, 상대적으로 전체 해석에 많은 시간이 소요되는 단점도 있다.

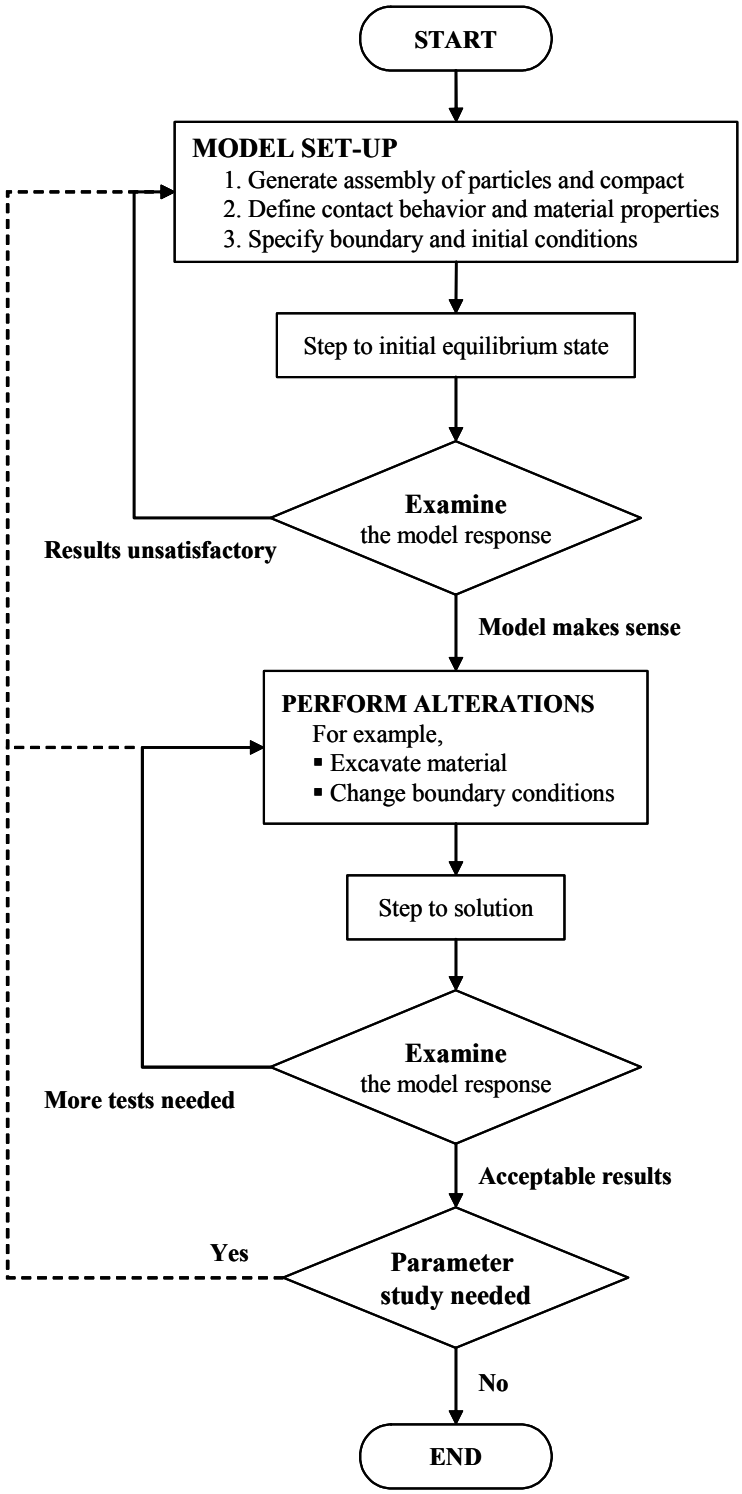
뉴튼의 제2법칙은 접점에서 발생하는 각 입자들의 움직임과 거기에 작용하는 강체력(body force)을 규정하는데 이용되는 반면, 하중-변위 관계는 개별 입자요소들간 또는 입자요소와 경계면 요소간의 접점간 거동을 규정하는데 이용된다. 그러나 경계면 요소의 움직임은 사용자에 의해서 지정되므로, 뉴튼의 제2법칙은 경계면 요소에는 적용되지 않는다.

PFC의 일반적인 계산과정은 아래 식과 같은 각 입자에 대한 운동방정식(Newton's law)과 각 접점에 대한 하중-변위 관계 그리고 경계면 요소의 위치를 지속적으로 갱신해주는 과정을 반복하는 일련의 알고리즘으로 구성되어 있다.

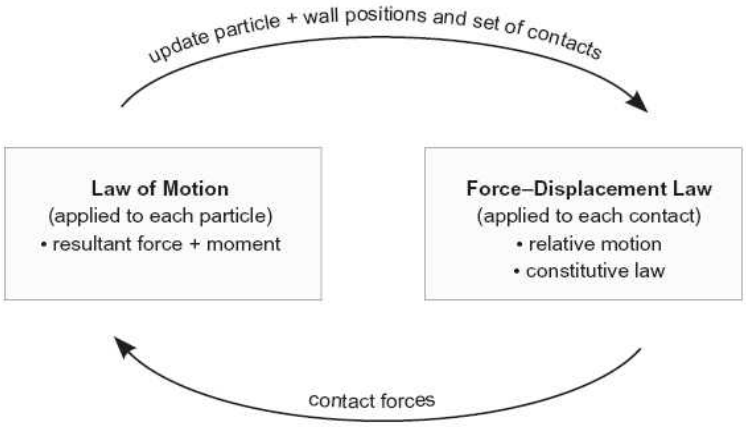
개별 입자요소들 또는 경계면 요소사이에 존재하는 접점들은 해석과정중 자동적으로 생성, 소멸되며, 이러한 일련의 해석과정을 나타내면 [그림 3.7.1]과 같다.

$$F_i = m\ddot{x}_i \qquad \text{[식. 3.7.1]}$$

여기서 F_i는 합력, m은 입자의 질량, $\ddot{x}_i$는 가속도를 나타낸다.



[그림 3.7.1] PFC 해석절차(Itasca, 2004)



[그림 3.7.2] PFC 연산과정(Itasca, 2004)

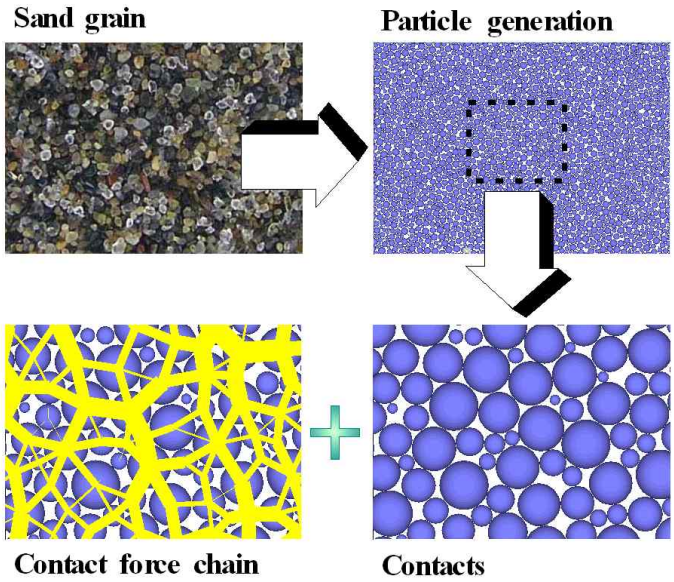
2. 개별요소법에 의한 실내시험 수치모델링

가. 개별요소 생성

지반공학에서 다루고 있는 조립재료는 세부 입자들의 형상, 거칠기, 배열상태 등과 관련된 입자간의 엇물림 및 회전현상 등에 의해 그 강도와 변형특성이 크게 좌우된다. 이는 개별요소해석에서도 동일한 현상으로서, 해석시의 개별요소들은 특정 두께를 갖는 원통형 디스크(disk) 혹은 구(sphere) 형태로 생성될 수 있으며, 더욱 복잡한 형태의 요소는 클러스터(cluster) 혹은 클럼프(clump) 로직을 통해 생성이 가능하다.

해석대상의 초기 간극률 및 소요 입도분포 모델링을 위하여, 개별요소들은 특정 반경범위에 대한 균등분포(uniform distribution) 또는 정규분포(gaussian distribution) 형태로 생성될 수 있으며, 그 요소개수 및 입경의 조정 등이 필요하게 된다. 아래 그림은 실제 조립재료에 대한 개별요소 생성개념을 표현한 것으로서, 조립재료의 입도분포, 간극률 등을 고려한 개별요소의 크기와 개수 등을 결정한 후, 접촉면 응력상태 확인을 통하여 초기응력조건 및 요소배열상태 등을 만족시켜야 한다.

일정 영역안에 원하는 초기 간극률 상태로 개별요소를 생성시키기 위한 방법은 다음과 같은 방법이 있을 수 있다.



[그림 3.7.3] 초기 개별요소생성

① 원하는 영역에 대한 경계면 요소를 생성한 후, 특정 반경범위를 갖는 개별요소들을 그 경계면안에 생성하고, 원하는 초기 간극률이 얻어질 때까지 경계면 요소를 이동시켜 가는 방법이 있으나, 이 방법은 아래와 같은 문제점을 수반할 수 있다.

- 간극률 만족을 위한 경계면 이동에 의해 초기 해석영역이 달라질 수 있음
- 전체 개별요소들의 불평형력 증대로 인해 평형상태로의 수렴속도가 매우 늦어짐 (연산시간 증가)
- 해석영역내에서 국부적으로 상이한 입도분포 생성 (영역별로 다른 간극률 조건)

② 원통형 디스크 형태의 2차원 개별요소의 경우, 특정 반경범위($R_{\min}$~$R_{\max}$)에 대한 개별요소들을 정규분포 형태로 해석영역내 임의 위치에 생성한 후, 원하는 간극률 조건을 만족시킬 때까지 초기 생성된 개별요소들의 크기를 확대(확대계수 : m)하는 방식으로 최종조건을 만족시키는 개별요소들을 생성하게 된다.

$$R = mR_0 \qquad \text{[식 3.7.2]}$$

여기서, R : 최종 생성된 개별요소 반경

R_0 : 초기에 생성된 개별요소 반경
m : 반경 확대계수경

$$\overline{R} = \sqrt{\frac{A}{N\pi}(1-n_0)} \qquad \text{[식 3.7.3]}$$

여기서, $\overline{R}$: 2차원 개별요소들의 평균 반경
A : 개별요소가 생성되는 전체 해석영역 면적
N : 생성될 개별요소 수
n_0 : 최종 간극률 생성을 위한 초기 간극률

$$R_{\max} = r\,R_{\min} \qquad \text{[식 3.7.4]}$$

여기서, $R_{\max}$: 생성된 개별요소의 최대 반경
$R_{\min}$: 생성된 개별요소의 최소 반경
r : 개별요소에 대한 최대 및 최소 반경 비

$$R_{\min} = \frac{2\overline{R}}{(1+r)} \qquad \text{[식 3.7.5]}$$

③ 구형태의 3차원 개별요소의 경우, 기본적으로는 2차원 경우와 동일한 방식으로 개별요소들을 생성하게 되지만, 구에 대한 개별요소의 3차원적 면적 및 3차원 간극률 산정방식의 차이로 인해 특정 간극률 조건을 만족시키기 위한 개별요소들의 평균 반경은 아래와 같이 2차원 경우와 다르게 표현된다. 특정 반경범위에 대한 개별요소들을 정규분포 형태로 생성하거나, 원하는 간극률 조건을 만족시킬 때가지 초기 생성된 개별요소들의 크기를 확대(확대계수 : m)하는 방식은 2차원의 경우와 동일하다.

$$\overline{R} = \left\{\frac{3V}{N4\pi}(1-n_0)\right\}^{\frac{1}{3}} \qquad \text{[식 3.7.6]}$$

여기서, $\overline{R}$: 3차원 개별요소들의 평균 반경
V : 3차원 개별요소가 생성되는 전체 해석영역 체적

N : 생성될 개별요소 수
n_0 : 최종 간극률 생성을 위한 초기 간극률

나. 개별입자간 접촉모델 (contact models)

개별요소법에서의 거동은 최소 1개 이상의 접촉점을 갖는 개별요소간 또는 개별요소-경계면간의 상호작용을 통해 발생한다.

일반 연속체 역학에서는 각 해석요소에서의 비선형적 응력-변형 거동을 산정하는데 있어 매우 복잡한 구성방정식(constitutive law)의 도입이 필수적이다.

개별요소법에서는 이러한 복잡한 비선형적 구성거동(constitutive behavior)이 간단한 몇 가지의 접촉모델(contact model)로 표현된다. 접촉모델이란 개별요소들간 접촉점 및 개별요소와 경계면간 접촉점에서의 물리적 거동을 나타내는 구성 모델이라 할 수 있다. 접촉모델은 크게 ① 강성모델(stiffness model), ② 마찰모델(slip model), ③ 접착모델(bonding model)로 구분된다.

(1) 강성모델(stiffness model)

강성모델은 개별요소들 또는 개별요소-경계면 접촉점에서의 접점력과 상대 변위간의 탄성적 상관관계를 제공한다. 연직강성(normal stiffness)과 전단강성(shear stiffness)은 각각 연직성분과 전단성분에 대한 하중-상대변위 거동에 관계된다. PFC2D 및 PFC3D에서 제공되는 강성모델에는 선형모델과 Hertz-Mindlin 모델이 있다.

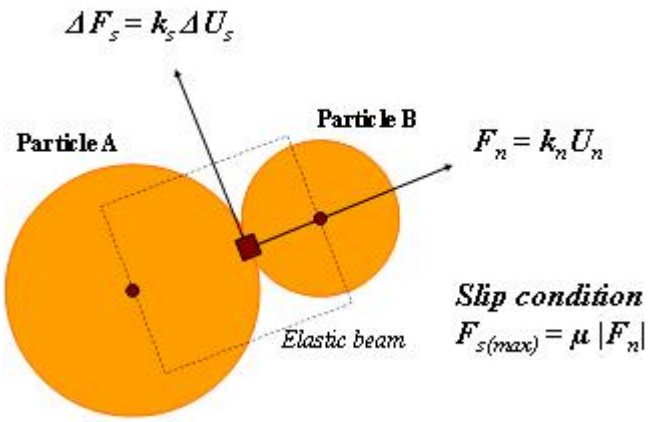
(가) 선형모델(linear model)

선형모델에서는 접촉점에서의 하중-상대변위 거동은 일정한 접촉강성(contact stiffness)일 이용하여 선형적 관계로 표현된다.

선형모델의 경우, 두 개별요소간 접촉점에서의 연직강성과 전단강성은 다음과 같이 적용된다. 여기서, $[A]$와 $[B]$는 점접에서의 두 요소를 나타낸다.

$$k^n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \qquad \text{[식 3.7.7]}$$

$$k^s = \frac{k_s^{[A]} k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \qquad \text{[식 3.7.8]}$$



[그림 3.7.4] 접촉점에서의 강성 및 마찰 모델

(나) Hertz-Mindlin 모델

Hertz-Mindlin 모델은 Mindlin & Deresiewicz(1953) 및 Cundall(1988)이 제시한 근사해에 근거한 비선형 모델로서, Hertz-Mindlin 모델에서의 하중-상대변위 거동은 비선형적 접촉강성에 의해 비선형적 관계로 표현된다.

Hertz-Mindlin 모델에서의 접촉강성은 개별요소의 형상 및 물성치, 연직하중 등에 따라 비선형적으로 달라지게 된다. 이 모델에서는 연직강성, 전단강성 대신 전단계수(G) 및 포아송비(ν)가 적용되며, 이들을 이용한 연직강성 및 전단강성은 다음과 같으며, Hertz-Mindlin 모델은 두 개별요소가 접착 본딩으로 연결된 경우에는 적용할 수 없다.

개별요소간 접촉점에서의 상호거동 계산시 탄성물성은 두 개별요소의 평균값으로 적용되며, 개별요소와 경계면 접촉점에서의 상호거동시 경계면은 강체로 고려되고, 이경우의 탄성물성은 개별요소의 탄성물성값이 그대로 적용된다.

$$K^n = \left(\frac{2\,[G]\,\sqrt{2\widetilde{R}}}{3\,(1-[\nu])} \right) \sqrt{U^n} \qquad \text{[식 3.7.9]}$$

$$k^s = \left(\frac{2\left([G]^2 3\left(1-[\nu]\right)\widetilde{R}\right)^{1/3}}{2-[\nu]} \right) 걷 F_i^n 걷^{1/3} \qquad [식\ 3.7.10]$$

$$\widetilde{R} = \frac{2\,R^{[A]}\,R^{[B]}}{R^{[A]} + R^{[B]}} \qquad [식\ 3.7.11]$$

$$[G] = \frac{1}{2}\left(G^{[A]} + G^{[B]} \right) \qquad [식\ 3.7.12]$$

$$[\nu] = \frac{1}{2}\left(\nu^{[A]} + \nu^{[B]} \right) \qquad [식\ 3.7.13]$$

개별요소와 경계면 접촉면에서는 아래와 같은 물성이 적용된다.

$$\widetilde{R} = R^{[wall]} \qquad [식\ 3.7.14]$$

$$[G] = G^{[ball]} \qquad [식\ 3.7.15]$$

$$[\nu] = \nu^{[ball]} \qquad [식\ 3.7.16]$$

(2). 마찰모델(slip model)

마찰모델은 개별요소들 또는 개별요소-경계면 접촉점에서의 두 요소간 미끄러짐(sliding)을 규정하는 모델이며, 접촉면에 별도의 접착(bonding) 조건이 부여되지 않은 상태에서 인장력이 발생할 경우, 두 요소는 분리되게 된다.

두 요소간 미끄러짐은 접점력의 전단성분(F_i^s)이 접촉면의 허용 전단력($F_{\max}^s$)을 상회할 때 발생하게 되는데, 접촉점의 허용 전단력은 접촉점에서의 수직 점접력에 마찰계수를 곱한 값($\mu|F_i^n|$)으로 정의된다.

$$F_{\max}^s = \mu|F_i^n| \qquad [식\ 3.7.17]$$

$$|F_i^s| > F_{\max}^s \text{ (미끄러짐 발생조건)} \qquad \text{[식 3.7.18]}$$

만약, $|F_i^s| > F_{\max}^s$라면 미끄러짐이 발생하고, 다음 계산 싸이클에서 F_i^s의 크기를 다음과 같이 $F_{\max}^s$와 같도록 수정하게 된다.

$$F_i^s \leftarrow F_i^s \left(F_{\max}^s \; / \; 큰 F_i^s 큰\right) \qquad \text{[식 3.7.19]}$$

(3) 접착모델(bonding model)

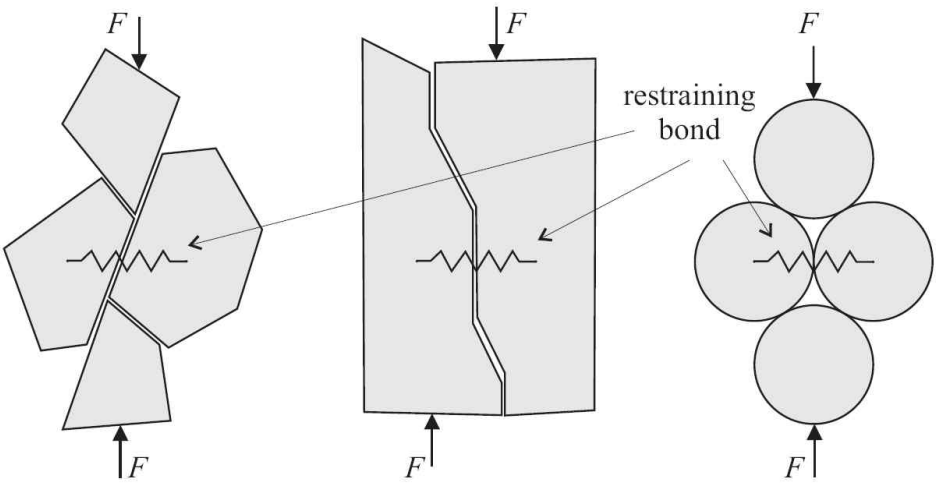
접착모델(bonding model)은 입자의 접점에 작용하는 인장, 압축 전단응력 및 모멘트에 대한 저항강도를 제공한다.

이런 접착모델은 재료의 강도가 재료내부의 국부 응력집중에 의한 개별요소 주변의 점착강도에 지배되는 암석과 같은 취성재료의 모델링에 적합하다.

반면 조립토나 쇄석등의 비점착성 재료는 일반적으로 응력변형거동이 대부분 응력 경화현상을 보이고, 이러한 재료의 거동모델은 단순히 접점에서의 강성 및 마찰에 좌우되므로 강성모델과 마찰모델이 주로 쓰인다.

그러나 이러한 접점에서 작용하는 모델들은 상호 독립적으로 사용되는 것이 아니라 동시에 같이 쓸 수도 있다.

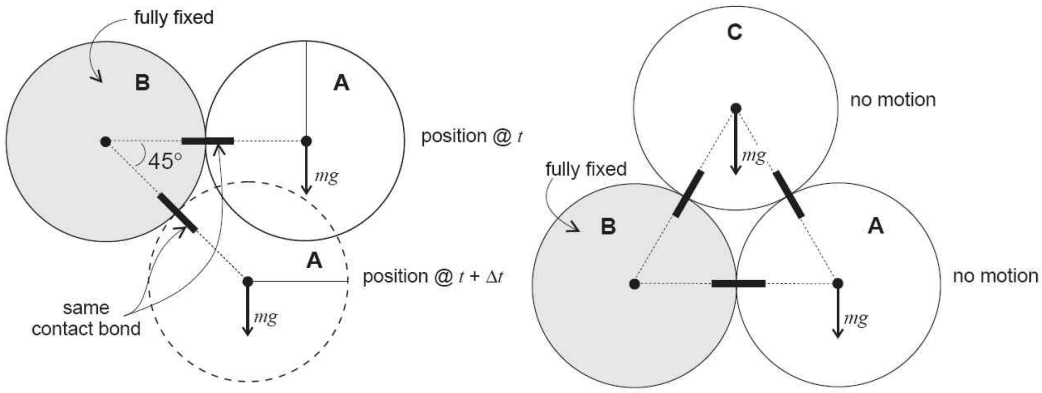
예를 들어 암석모델의 경우, 강성모델과 마찰모델, 접착모델 등은 한 접점에서 모두 같이 이용될 수 있으며, 이들 모델을 동시에 사용할 경우 각각의 모델에 대한 특정 입력치을 적용시켜야 한다.



[그림 3.7.5] 물리현상에 대한 개별요소간 접촉 모델링

(가) Contact bond 모델

Contact bond 모델은 접촉면적을 무시할 있는 두 요소간 한 접촉점에서의 수직 및 전단방향에 대한 인장강도를 부여하는데, 작용력의 수직 및 전단성분이 소정의 성분별 강도를 넘어서게 되면 두 요소간 접착(bonding)은 파괴된다.



[그림 3.7.6] Contact bond 모델

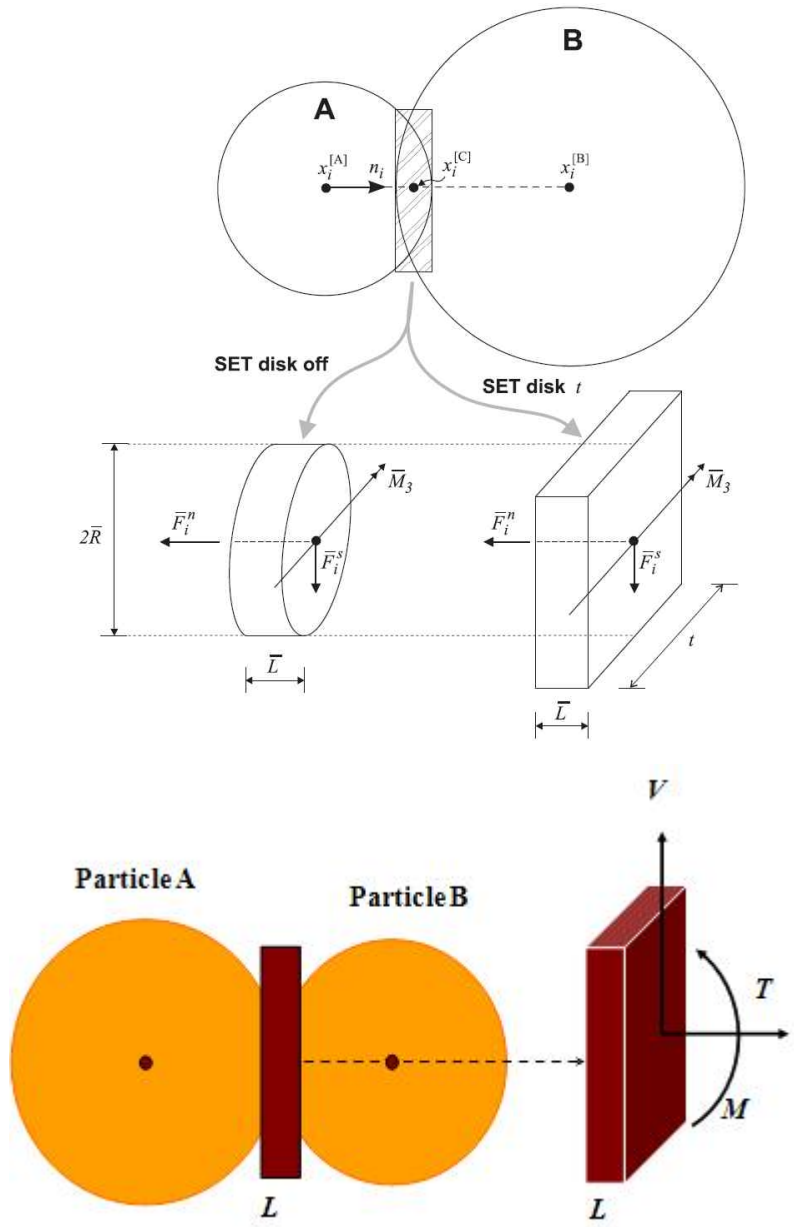
두 요소간 접착이 유지되는 동안은 두 요소의 미끄러짐이 구속되지만, 두 요소의 회전(rolling)에 대한 저항력은 없도록 고려된다.

그러나, 만약 개별요소가 단 한점에서만 접촉되어 있는 조건이라면, 미끄러짐이 발생하지 않는 상태에서 개별요소의 회전은 허용된다.

Contact bond 모델은 인장력에 대한 수직 및 전단 저항의 한계를 규정함으로서 특정 조건에서 개별요소들간의 분리를 방지하기 위해 사용되는 경우가 많다.

(나) Parallel bond 모델

Parallel bond 모델은 개별요소간 접촉점에 접착이 부여된 후, 접촉점에서의 하중 및 모멘트에 대한 저항력을 제공한다. 이 모델은 일정 접촉면적을 가지는 개별요소간의 접촉점 거동을 규정하는 것으로서, 접촉점에서의 미끄러짐 없이 개별요소가 회전하는 현상을 방지하고, 개별요소들간의 cementation 효과를 표현하기 위해 사용될 수 있다.



[그림 3.7.7] Parallel bond 모델

다. 미시 물성치(micro parameter)

연속체개념의 수치해석에 필요한 입력값은 실내 또는 현장시험통해 직접적으로 결정될 수 있으며, 유사 지반조건에 대한 기존 경험값이 이용되기도 한다. 즉, 특정 연속체 모델을 위한 입력값들은 해석결과 또는 현장거동 등으로 표현되는 전체적

물리적 현상과 어느 범위에서 상관관계를 갖는다고 할 수 있다.

그러나 개별요소법의 경우, 개별 입자들의 상호거동을 규정하기 위한 미시 물성치(micro parameters)들은 전체적인 물리적 현상과 직접적인 상관관계를 갖지 못한다.

(1) 미시 물성치 산정과정(calibration process)

개별 입자들의 상호거동을 규정하기 위한 미시 물성치(micro parameters)의 산정은 연속체 모델과 같이 특정 실내 또는 현장시험을 통해 직접적으로 산정될 수 없다. 즉, 동일 미시 입력값을 적용한다 해도 전체적인 거동양상은 다른 조건에 따라 큰 차이를 보일수 있는데, 이는 PFC와 같은 개별요소 모델의 거동이 초기 입자의 크기 및 분포, 그 배열형태 등에 따라 큰 영향을 받기 때문이다.

PFC 모델과 같은 개별요소법에서는 실내 혹은 현장시험 등의 거동현상과 임의 미시 물성치에 대한 해석결과를 비교하고 다른 미시 물성치에 대한 동일과정을 반복하여, 물리적 거동현상을 가장 잘 표현할수 있는 적정 미시 물성치을 산정해 가는 일련의 과정(calibration process)이 필요하다.

즉, 초기의 특정 입도와 배열형태를 갖는 개별요소들을 생성하고, 이들에 적용된 임의 미시 물성치하에서 전체적 거동이 실내시험 등과 유사하게 나타난다면, 이렇게 산정된 미시 물성치는 동일 초기조건을 갖는 재료의 물리적 특성을 타당하게 표현할 수 있는 물성치라고 할 수 있다.

이러한 미시 물성치를 이용하여 다양한 하중조건 및 변형조건 등에 대한 개별요소해석을 수행할 수 있고, 이 결과는 해석대상의 전체적 물리 거동예측으로 인정될 수 있다(Potyondy, 1996, 1997; Hazzard, 1998; Potyondy and Cundall, 1999).

결론적으로, PFC 모델에 적용되는 미시 물성치는 구성재료의 고유 물성치가 아니며, 구성재료가 특정 시험조건에서 보여주는 전체적 거동을 표현할 있는 개별요소의 임의 물성치라고 할 수 있다.

(2) 비접착 재료(unbonded material)에 대한 미시 물성치

PFC 모델을 통한 해석결과는 해석대상을 구성하는 개별요소의 밀도, 형상, 입도분포, 입자강성 및 입자의 접착 특성 등에 따라 달라진다. 이들을 규정하는 미시 물성치들은 해석대상의 미시적 거동 및 전체 거동 모두에 영향을 미치게 된다.

개별요소의 밀도(ρ, $density$)는 중력의 영향이 해석에 큰 영향요소가 되는 경우

에는 입자의 body force로 작용되게 되나, 일반적으로 입자의 밀도는 재료의 거동에 큰 영향을 주지 않은체, 기본 물성치로서만 의미를 갖게 된다.

입자의 형상은 미시 및 전체 거동에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 기본적으로 PFC의 경우, 입자는 유한한 크기의 원통형이나 단일층의 구형으로 모델링 된다.

이러한 원형 입자형상은 계산시간의 단축면에서 상당히 큰 효과가 있을 수 있으나, 입자의 형상이 해석에 지대한 영향을 미치는 특별한 경우의 모델에는 그 적용도가 떨어질 수 있다는 단점이 있다. 이러한 원형입자들은 입자들간의 회전(rolling)을 유도함으로서 실제모델과는 상이한 해석 결과를 나타낼 수 있는 것이다.

이러한 단점을 보완하고자, PFC에서는 cluster 와 clump 개념을 도입하여 불규칙한 형상의 입자 모델링을 가능하게 하고 있다.

조립재료나 쇄석 등과 같은 비점착성 재료의 미시적 거동은 접촉점에서의 강성 및 마찰에 좌우되므로 접착 모델이 아닌 비접착 모델(unbonded model)이 적정하다. 비접착 모델에 적용되는 미시 물성치는 다음과 같다.

① Contact stiffness model

- n : 개별요소들의 초기 간극률(porosity)
- E_c : 각 개별요소간 접촉점에서의 탄성계수
- k_n / k_s : 각 개별요소의 연직 및 전단방향 강성비
- μ : 개별요소의 마찰계수 (≠ 재료의 전단강도를 나타내는 내부마찰각)

② Hertz-Mindlin model

- G : 각 개별요소간 접촉점에서의 전단탄성계수
- ν : 각 개별요소간 접촉점에서의 포아송비

개별요소간 접촉점 거동을 순수 축하중 및 전단력을 받는 탄성빔으로 표현한다면, 탄성빔의 면적과 단면2차모멘를 이용하여 접촉점에서의 탄성계수를 아래와 같이 연직강성으로부터 산정할 수 있다.

$$E_c = \frac{k_n}{2t} \quad \text{(in PFC2D, t : 탄성빔의 두께)} \qquad \text{[식 3.7.20]}$$

Hertz-Mindlin 모델의 경우, 연직강성(normal stiffness)과 전단강성(shear stiffness)이 미리 정의되어 있다고 하더라도 모두 무시되며, 입자들의 접점 강성은 입자의 전단탄성계수(shear modulus, G)와 포아송비(poisson's ratio, ν)에 의해 지배된다.

3. 2차원 개별요소 수치모델링 기법

가. 연구내용 및 방법

본 연구는 대입경 조립재료에 대한 동적물성 산정시 적용될 수 있는 개별요소법 기반의 수치시험 모델링 기법 개발에 관한 내용으로서, 조립재료를 이용한 실내시험 결과를 활용, 이에 대한 개별요소 수치 모델링을 수행하였다.

- ☐ 기 수행된 소형 삼축압축(정적) 및 대형 삼축압축(정적 및 동적) 시험결과 분석
- ☐ 대입경 조립재료에 대한 입도분포 모델링 기법 개발 (clump 기법 등)
- ☐ 실내 삼축압축시험에 대한 응력조건 구현기법 정립 (servo-mechanism 등)
- ☐ 정적 소형삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링 수행 (PFC2D)
- ☐ 정정 및 동적 대형 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링 수행 (PFC2D)

모든 개별요소 수치 모델링에 있어, 각 실내시험중 특정 구속압 조건에 대한 시험결과를 바탕으로 개별요소들의 미시 물성치 산정과정(calibration process)을 수행하였다. 이렇게 산정된 최종 미시 물성치를 이용하여 다른 응력조건에 대한 개별요소 해석을 수행하였으며, 그 결과를 다시 실내시험 결과와 비교함으로서 최종 수치 모델링의 적정성을 검증하였다.

나. 2차원 개별요소에 대한 입도분포 모델링

(1) Clump & Cluster

댐 및 제방 축조등에 사용되는 대입경 조립재료는 입경의 범위가 대략 0.1mm ~ 50mm 까지 매우 넓게 존재하며, 입자형상도 개별요소 해석시의 요소형상과 같은 원형이 아님을 알 수 있다.

대형삼축압축시험에 이용된 시료의 크기를 고려할 때, 실제 입도분포곡선에 해

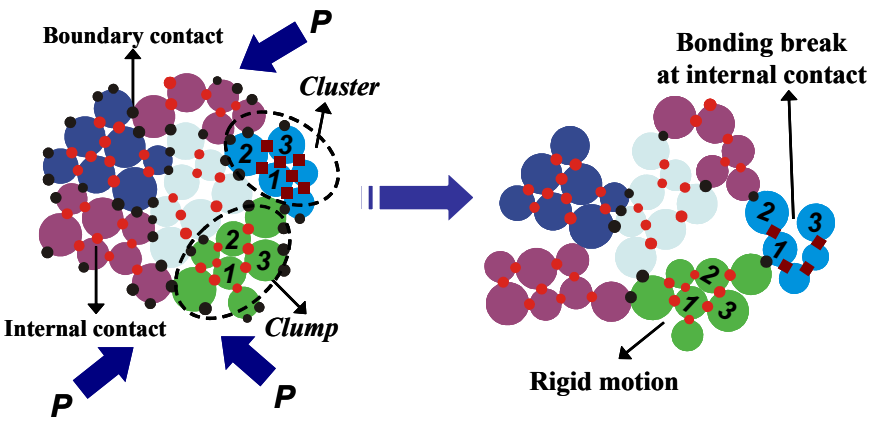
당하는 모든 입경의 입자들을 개별요소로 생성하는 것은 수치연산시간 및 계산시의 오차누적 등에 있어 바람직하지 않다.

Ting and Corkum(1988), Thomas and Bray(1999) 등의 연구결과에 의하면, 입자형상은 입자간의 억물림 효과(interlocking effect) 및 회전저항(rolling resistance)등과 관련하여 최종적인 강도와 체적팽창에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그러므로, 작은 입경범위에 대해 생성된 원형의 개별요소들을 바탕으로, 실제 입도분포 및 입자형상을 표현하는 과정이 필요하다. Li 등(2003), Thomas and Bray 등(1999)은 원형입자들의 과도한 회전현상 방지 및 연산시간 단축을 위하여, 임의 영역안의 개별요소들을 하나의 강체처럼 고려해주는 방법으로 불규칙한 입자형상을 표현하였다.

PFC에서 이러한 불규칙한 입자형상의 표현은 clump 혹은 cluster logic을 통해 가능하다. 두 방법 모두 임의 입자형상을 갖도록 원형 개별요소들을 하나의 단위로 packing시키는 것은 동일하지만, 아래 그림에서 보듯이, clump logic에 있어서는 영역안의 개별요소들이 작용 하중에 관계없이 일체로 거동하는데 반해, cluster logic에서는 영역안의 개별요소들도 서로간에 상호작용을 하며 때론 서로간의 bonding이 파괴되면서 다른 입자로 거동하기도 한다(Itasca, 2004).

본 연구에서와 같이, 불규칙한 입자형상은 고려하되 입자간의 파쇄효과를 고려하지 않는 경우는 clump logic을 이용하는 것이 연산시간의 단축면에서 매우 유용하다.



[그림 3.7.8] Clump 및 cluster 거동

(2) 2차원 개별요소에 대한 입도분포 모델링 기법

본 연구에서는 다양한 크기의 입자들로 구성된 조립재료의 실제 입도분포 및 불규칙한 입자형상을 모델링하는데 있어 clump 기법을 이용하였다.

단, 불규칙한 입자형상을 표현하는데 있어, 임의 형태의 입자형상이 아닌 기본적으로는 원형의 입자형상을 가정하되, 입자표면의 굴곡을 통해 거칠기를 표현하는 방식으로 개별요소를 생성하였다.

일단 난수발생기법에 의해 시료내 임의 위치을 선정한 후, 가장 큰 입경에 해당하는 크기의 clump를 생성하였다. 이어서 동일 입경을 가지는 clump를 다시 임의 위치에 생성하되, 기존에 생성된 clump와 신규로 생성되는 clump의 인접을 방지하기 위하여 아래 식과 같이 각 clump간의 거리계수를 적용하였다.

이는 특정 입경의 조립재가 일정 부분에 집중적으로 생성되는 것을 방지하기 위한 것으로서, 실제 현장적용 조립재료의 입도분포 및 공간적 분포조건을 적정하게 모델링하기 위한 것이다.

$$d(clp_n, clp_o) \geq c_\alpha [R_{clp-n} + R_{clp-o}] \qquad \text{[식 3.7.21]}$$

여기서, $d(clp_n, clp_o)$: 신규 clump와 기존 clump의 중심간 거리

c_α : clump간 거리계수

R_{clp-n}, R_{clp-o} : 신규 및 기존 clump 반경

특정 크기의 개별요소에 대한 통과중량 백분율 및 특정 clump의 무게는 다음과 같이 표현될 수 있으며, 이들을 통해 현재까지 생성된 clump를 포함하는 특정 입경에 대한 통과중량 백분율을 계산할 수 있다.

$$Percent\ \ finer \ = \left(1 - \frac{\sum_{1}^{n_{lp}} W_{lp}}{W_t} \right) \times 100\,(\%) \qquad \text{[식 3.7.21]}$$

여기서, n_{lp} : 특정 입경보다 큰 개별요소수

W_{lp} : 특정 입경보다 큰 개별요소들 각각의 무게

W_t : 전체 개별요소들에 대한 총 무게

$$W_{clp} = \sum_{1}^{n_{clp}} (\pi R_{cp}^2)\gamma_{cp}\, t \qquad \text{[식 3.7.22]}$$

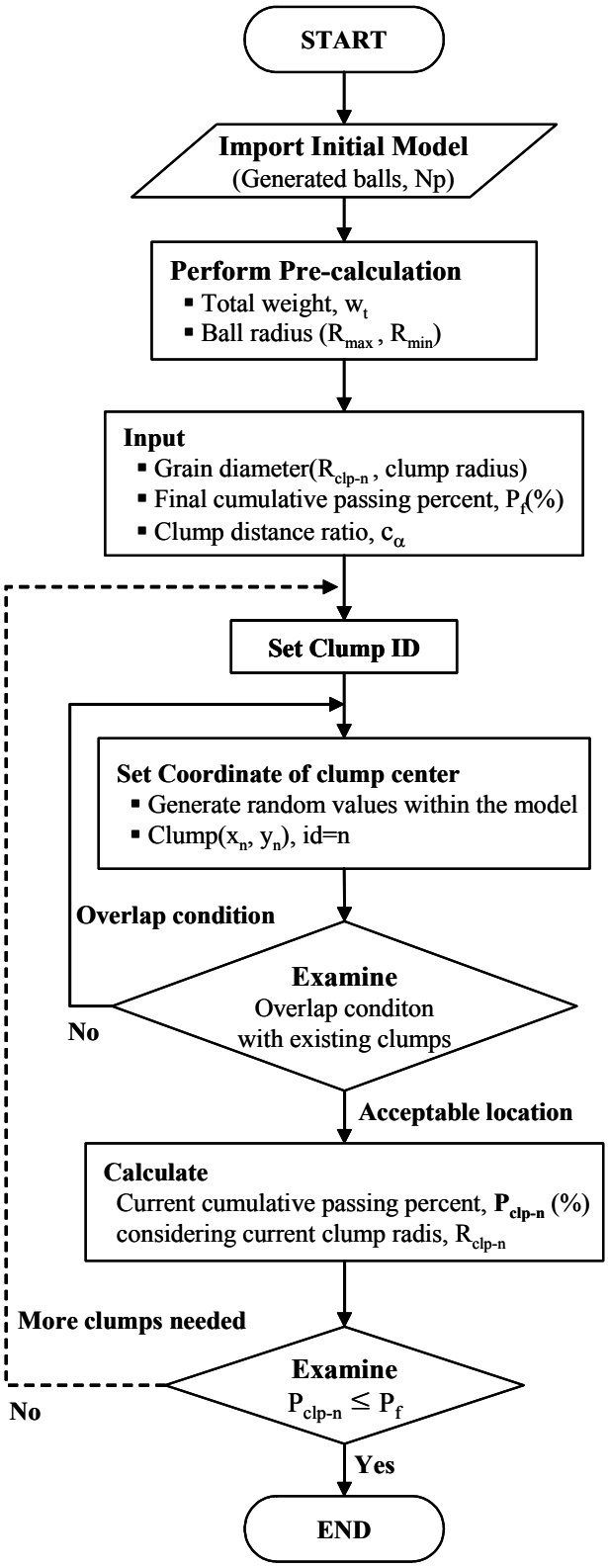
여기서, n_{clp} : 특정 clump에 속한 개별요소수
W_{clp} : 특정 입경의 clump에 포함된 개별요소들의 총 무게
R_{cp} : clump에 포함된 특정 크기의 개별요소 반경
γ_{cp} : clump에 포함된 특정 개별요소의 단위중량
t : 개별요소의 두께 (본 연구시는 1을 적용)

$$Percent\ finer\ (clp) = \left(1 - \frac{\sum_{1}^{n_{lp}} W_{clp}}{A_s(1-n)\gamma_{cp}\, t} \right) \times 100\,(\%) \qquad \text{[식 3.7.23]}$$

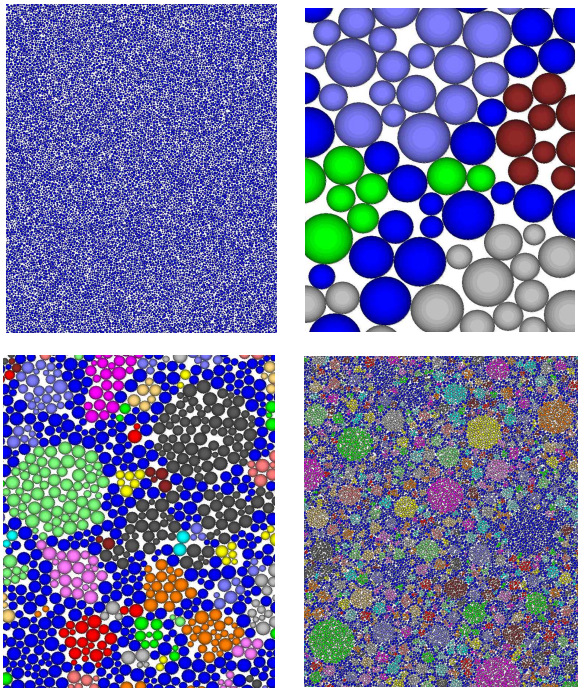
여기서, n_{lp} : 특정 입경보다 큰 clump 수 (개별요소 포함)
W_{clp} : 특정 clump의 총 무게
A_s : 전체 해석영역의 면적

각 clump 생성 후에는 전체 해석영역에 포함된 기 생성 clump 및 개별요소들을 대상으로 해당입경에 대한 통과중량 백분율(p_{dp-n})을 계산하였다.

이렇게 산정된 통과중량 백분율(p_{dp-n})과 최종적으로 목표하는 통과중량 백분율(p_f)을 매 clump 생성시마다 비교하였으며, 두 값이 비슷해질때가지 신규 clump를 지속적으로 생성하도록 하였다. 즉, 생성된 clump의 수가 증가할수록 통과중량 백분율(p_{dp-n})은 서서히 감소하게 되며, 어느 순간 목표하는 값에 도달하게 되면 이 입경에 해당하는 clump 생성을 중지하게 된다.



[그림 3.7.9] 입도분포 모델링 과정(2차원 개별요소생성)



[그림 3.7.10] Clump 기법에 의한 2차원 개별요소 입도분포 모델링 결과

큰 입경의 clump로부터 작은 입경의 clump까지 이러한 과정을 반복함으로서, 원하는 입도분포에 해당하는 개별요소를 생성하도록 하였으며 이에 대한 전체적 입도분포 모델링 과정은 위 순서도와 같다.

가장 초기에 수행되는 기본 개별요소 생성 결과 및 특정 입도분포를 만족시키기 위한 최종 입도분포 모델링 결과는 아래 그림과 같으며, 육안 판별이 가능하도록 전체 해석영역에 대하여 임의 배율로 개별요소 생성결과를 확대하여 나타내었다.

한편, 해석대상의 실제 조립재료는 3차원 배열형태인데 반해, PFC2D에서의 개별요소 모델링은 2차원 조건이다. 일반적으로 2차원에 비해 3차원 조건에서 간극(void space)은 더욱 크게 나타난다. 동일 크기의 원형요소를 이용하여 가장 밀실한 상태로 배열한 경우, 3차원에서의 간극률은 25.95% 인데 반해, 2차원 조건에서의 간극률은 9.31%로 나타난다(Deresiewicz, 1958).

Hainbüchner 등(2002)은 아래 식과 같이 상대다짐도를 이용하여 3차원 조건에 대한 2차원 조건에서의 간극률(n_{2D})을 산정하였으며, 본 연구에서도 이러한 방법에 의한 간극률 산정 및 개별요소 해석을 실시하였다.

$$n_{2D} = n_{2D,\max} - D(n_{2D,\max} - n_{2D,\min}) \quad \text{[식 3.7.24]}$$

여기서, D : 상대다짐도

$n_{2D,\max}$: 2차원조건에서 이론적으로 가능한 최대 간극율(=21.46%)

$n_{2D,\min}$: 2차원조건에서 이론적으로 가능한 최소 간극율(=9.31%)

다. 응력조건 구현

초기조건에 대한 개별요소 생성 및 그에 대한 평형조건이 만족된 후에는 삼축압축시험 해석과정에서의 일정 구속압 조건을 만족시키기 위한 경계면 응력조건 구현이 필요하다.

PFC2D에서는 경계면에 대한 직접 원하는 크기의 하중을 재하하는 것이 불가능하다. PFC2D에서의 구속압 재하 모델링은 4개 외측 경계면에 인접한 개별요소들에 특정 응력을 재하하는 응력 제어방법과 4개 경계면(wall)을 특정 속도로 이동시켜가며 특정 응력조건에 대한 만족여부를 확인하는 변위 제어방법의 두 가지로 이루어질 수 있다.

Cundall 등(1982)의 연구결과에 의하면, 응력 제어방법은 해석상 구현에 있어 손쉬운 것이 사실이지만, 해석과정중 일관된 구속압 재하가 불가능하고 해석중의 개별요소 이동 및 초기모델 영역 밖으로의 이탈현상 등으로 인하여 그 결과의 신뢰성 확보가 어려운 것이 사실이다.

본 연구에서는 변위 제어방법을 통해 소정의 구속압 조건을 구현하였다. 일단 4개 경계면중 수평방향 경계면 2개와 수직방향 경계면 2개를 특정 속도로 이동시킨 후 그 시점에서 각 경계면에 작용하는 수직 및 수평방향 응력을 산정하였다.

개별요소들로 구성된 해석대상에 특정 속도를 가하는 방법은 갑작스런 속도재하에 따른 관성력 생성 및 이로 인한 해석영향을 최소화하기 위해 여러 단계로 나누어 점진적으로 최종 속도를 재하하는 형식으로 적용하였다.

본 연구에 사용된 PFC2D에서는 경계면에 작용하는 응력을 직접적으로 측정할 수 없다.특정 속도에 의한 각 경계면의 이동 단계별로 경계면과 접촉되어 있는 개별요소들을 찾아낸 후, 이들과 경계면 접촉면에 작용하는 하중을 모두 구하고 이들의 총합을 경계면 길이로 나누어 최종적인 경계면 작용 응력을 산정하였다.

이렇게 산정된 방향별 경계면 응력과 재하하고자 하는 방향별 구속압의 크기를

비교하여 그 차이가 소정의 허용범위(α)를 만족하지 않으면 다시 경계면의 속도를 아래 식들에 의해 산정하고 동일한 계산과정을 반복하였다.

이러한 일련의 과정은 전 해서과정에서의 구속압 응력조건 구현을 위한 서보-제어 방식(servo-mechanism)으로 수행되었다.

$$G = \frac{\alpha A}{k_n^{(w)} N_c \Delta t} \qquad \text{[식 3.7.25]}$$

여기서, α : 측정응력 및 구현응력에 대한 허용범위

A : 경계면 면적

N_c : 경계면과 개별요소의 접촉점 수

$k_n^{(w)}$: 접촉면에서 경계면과 개별요소의 평균 강성

Δt : 한단계 해석단계 시간

$$\dot{u_w} = G(\sigma_m - \sigma_r) = G\Delta\sigma \qquad \text{[식 3.7.26]}$$

여기서, $\dot{u_w}$: 경계면의 이동속도

σ_m : 경계면 이동후 경계면에 작용하는 측정 응력

σ_r : 재하하고자 하는 구속응력

아래 그림들은 $\sigma_{xx} = 0.1\,MPa$, $\sigma_{yy} = 0.1\,MPa$의 구속압 조건을 구현하기 위한 반복 서보-제어 과정에서의 경계면 변형률 및 응력값을 나타낸 것이다.

그림에서의 변형률은 아래의 변형률 산정식에 의해 산정되었으며, 결과에서 알 수 있듯이, 초기 해석단계에서는 별도의 경계면 응력상태가 발현되지 않았으므로 초기 경계면의 이동이 큰 폭으로 진행되었으며, 방향별 경계면 이동은 증가와 감소를 반복하고 이러한 반복과정을 통해 경계면 응력은 일정한 값에 수렴하고 있다.

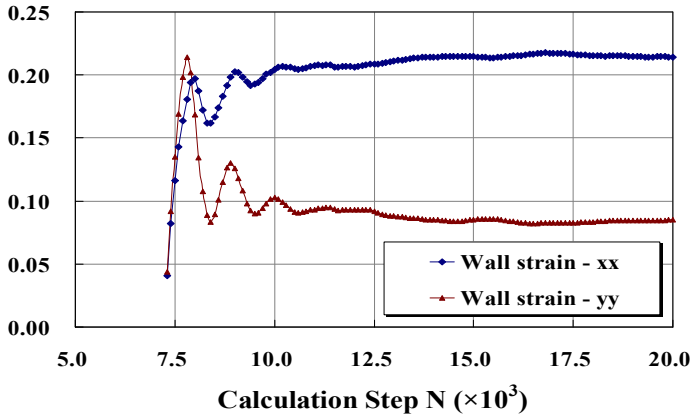
$$\text{경} = \frac{l - l_o}{0.5(l_o + l)} \qquad \text{[식 3.7.27]}$$

여기서, l_o : 각 방향별 초기 모델의 길이

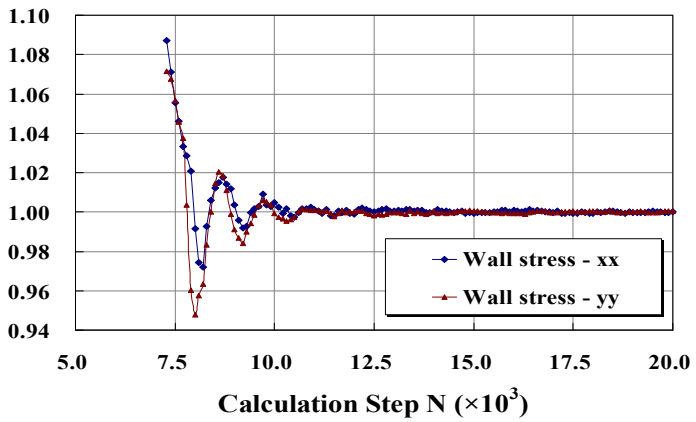
l : 서보-제어과정에 따른 현재의 각 방향별 모델 길이

서보-제어 과정에서 측정된 경계면 응력값을 살펴보면, 초기의 경계면 응력값은 큰 폭으로 증가와 감소를 반복하고 있으나, 위에서의 서버-제어 과정을 통해 그 폭은 점차 감소하게 되며, 최종적으로는 구현하고자 하는 방향별 구속압 $0.1\,MPa$을 만족하게 된다. 이러한 경계면 응력조건의 구현과정은 전체 해석시 모든 과정에서도 동일하게 수행되어 항상 일정한 구속압 조건을 유지시키게 된다.

이러한 구속압 재하 방식은 정적 및 동적 삼축압축시험시의 특정 축자응력 구현에도 동일하게 적용되었다.



[그림 3.7.11] 구속압 구현시 서보-제어 방식에 의한 경계면 변형률 변화.



[그림 3.7.12] 구속압 구현시 서보-제어 방식에 의한 경계면 응력 변화

4. 3차원 개별요소 수치모델링 기법

가. 연구내용 및 방법

2차원 개별요소해석의 한계점을 극복하고자, 정적 삼축압축시험에 대한 3차원 개별요소 수치모델링 기법을 개발하였다. 기존 국외 연구자료 수집과 3차원 모델링 이론에 대한 기초연구를 진행한 후, PFC3D를 이용하여 3차원 개별요소 생성 및 미시물성치 산정, 입도분포 생성 알고리즘 등의 최종 동적시험 모델링에 대한 선행요소기술 개발을 완료하고, 이를 바탕으로 정적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소해석 알고리즘 개발 및 정적 대형삼축시험 사례에 대한 3차원 개별요소 수치모델링을 수행하였다. 한편, 효율적 3차원 개별요소 수치모델링을 위한 초기 해석모델과 개별요소 대상의 스케일 영향을 분석하였다.

나. 3차원 개별요소에 대한 입도분포 모델링

기존 2차원 개별요소 수치모델링시의 입도분포 모델링은 매우 작은 크기의 균일 입자를 생성한 후, clump 기법을 이용하여 그 들을 원하는 입도에 맞도록 재구성하는 방식으로 수행되었다. 이를 위해서는 특정 해석영역 안에 매우 많은 수의 개별요소를 생성해야 하며, 이는 컴퓨터의 과다한 메모리 소요를 수반하는 바, 실제 수치모델링시의 연산시간을 대폭 증가시키는 원인이 된다.

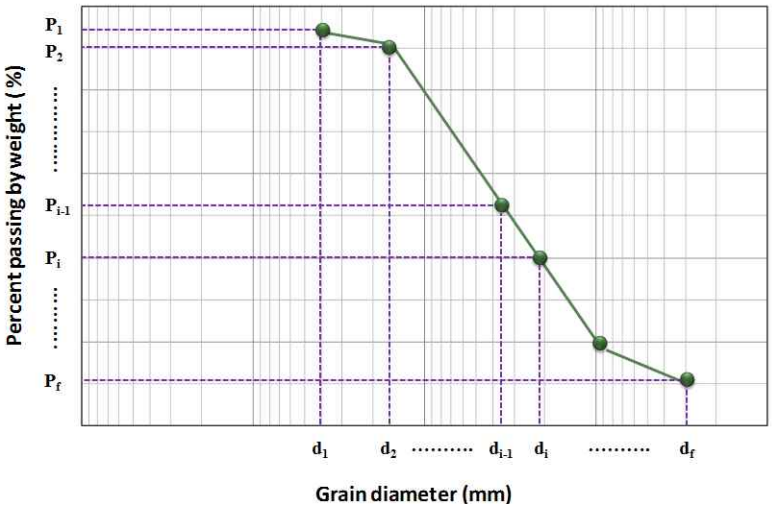
3차원 개별요소 수치모델링의 경우에도 특정 입도분포를 모델링하는데 있어, 기존 2차원의 경우와 동일한 clump 기법을 적용할 수 있다.

그러나, 특정 3차원 해석영역안에 이러한 방식으로 개별요소를 생성하기 위해서는는 엄청난 수의 개별요소 생성이 요구되며, 미시물성치 산정 등을 위한 많은 반복연산이 요구되는 개별요소 수치모델링 특성상, 이러한 조건에서는 현실적으로 개별요소 수치모델링이 불가능하게 된다.

금회 2차년도 연구에서는 3차원 개별요소들에 대한 대입경 조립재료의 특정 입도분포 조건을 모델링하는데 있어, 2차원 수치모델링 방식에서와 같은 clump 기법을 사용하지 않고 직접 소요 간극율 조건에 대한 각 입경별 개별요소 생성 알고리즘을 개발하여 최종적인 입도분포 수치모델링을 수행하였다.

기본적으로 아래 그림과 같은 특정 입도분포 조건에 대하여, 입자크기가 큰 개별요소부터 해당입경에 대한 가적통과율을 만족시킬수 있는 개별요소수를 구하고, 3차원 해석영역 내에서 공간적 난수를 발생시켜 임의 위치에 특정 크기의 개별요소

를 소요수만큼 반복 생성하도록 하였다.



[그림 3.7.13] 입도분포 형태 및 변수

$$n_{tg} = \frac{V_V}{V} = \frac{V_{tot} - V_{pt}}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_{pt}}{V_{tot}} \qquad \text{[식 3.7.28]}$$

$$\therefore \; V_{pt} = (1 - n_{tg}) V_{tot} \qquad \text{[식 3.7.29]}$$

여기서, n_{tg} : 구현하고자 하는 시료의 초기 간극률

V_{tot} : 시료의 총 부피

V_{pt} : 시료내 개별요소들의 총 부피

$$1 - P_1 = \frac{\sum V_{p1}}{V_{pt}} = \frac{\frac{\pi}{6}(d_1)^3 N_{b(1)}}{V_{pt}} \qquad \text{[식 3.7.30]}$$

$$\therefore \; N_{b(1)} = 1.91(1 - P_1)\frac{V_{pt}}{(d_1)^3} \qquad \text{[식 3.7.31]}$$

여기서, d_1 : 입도분포곡을 표현하는 첫 번째 점의 해당입경

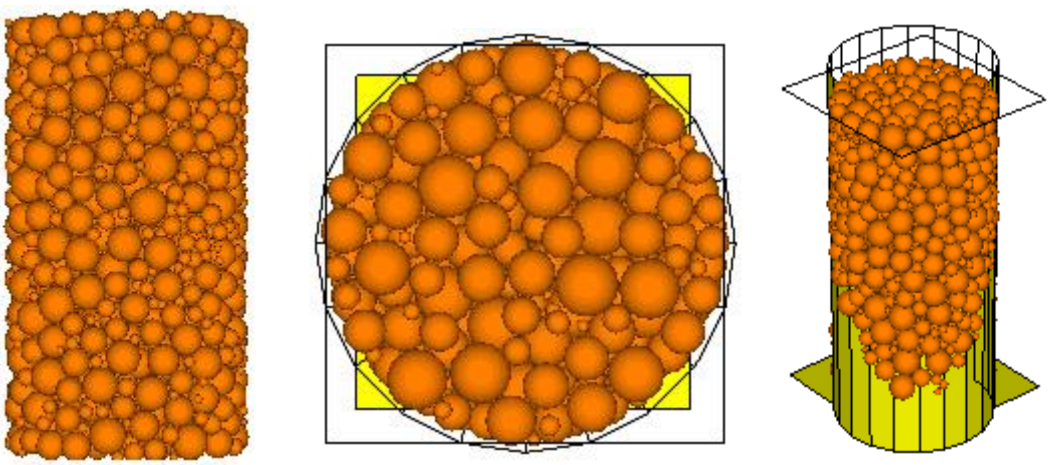
P_1 : 입경 d_1에 해당하는 가적통과율(%)

$N_{b(1)}$: 가적통과율 P_1 만족을 위해 필요한 개별요소의 총 갯수(입경 d_1)

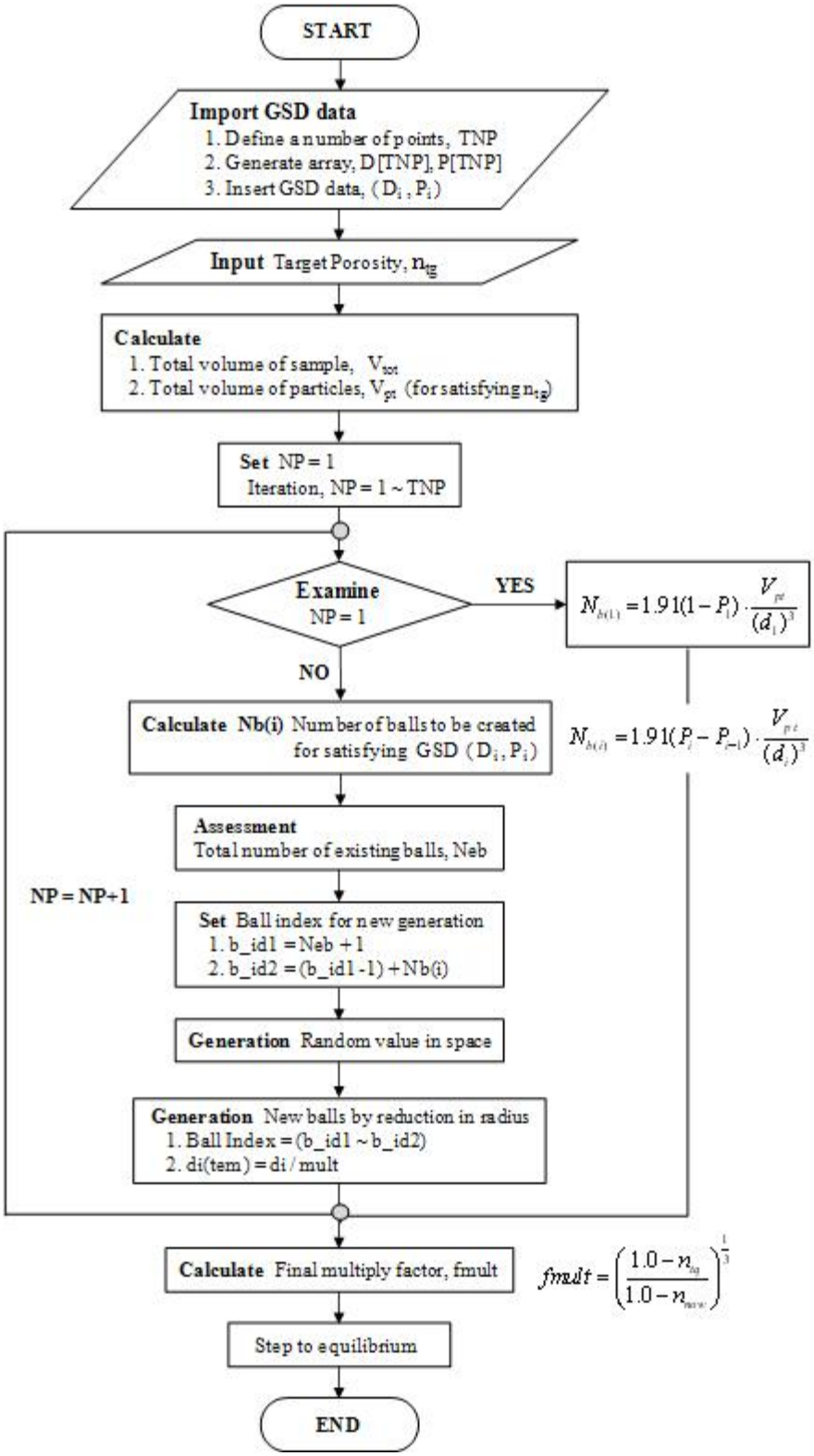
$$(1-P_2)=(1-P_1)+\frac{\sum V_{p2}}{V_{pt}}=(1-P_1)+\frac{\frac{\pi}{6}(d_2)^3 N_{b(2)}}{V_{pt}} \quad \text{[식 3.7.32]}$$

$$\therefore\ N_{b(2)}=1.91(P_1-P_2)\frac{V_{pt}}{(d_2)^3} \quad \text{[식 3.7.33]}$$

$$\therefore\ N_{b(i)}=1.91(P_i-P_{i-1})\frac{V_{pt}}{(d_i)^3} \quad \text{[식 3.7.34]}$$



[그림 3.7.14] 입도분포를 고려한 3차원 개별요소 생성 및 해석경계면



[그림 3.7.15] 3차원 개별요소에 대한 입도분포 모델링 과정

다. 초기조건 및 응력조건 구현

기존 2차원 개별요소 해석에서는 상대 다짐도를 이용하여 3차원 조건에 대한 2차원 조건에서의 등가 간극률(n_{2D})을 경험적으로 환산하였으나(Hainbüchner 등, 2002), 실제 3차원 및 2차원 조건에 대한 정량적 간극비 관계는 정확히 규정될 수 없는 한계가 있다. 이는 기존 2차원 개별요소 해석상의 큰 문제점으로 인식되고 있으나, 금회 3차원 개별요소 해석에서는 이러한 환산과정 없이 실제의 시료 간극비 조건에 맞는 개별요소 생성이 가능하였다.

3차원 개별요소 수치모델링에 있어서도 그 대상이 조립재료이므로 개별요소 접촉모델은 강성모델(stiffness model), 마찰모델(slip model)을 적용하였으며, 정 구속압 조건에서의 응력-변형 곡선에 대한 보정과정을 통해 시험재료의 최적 미시물성치를 산정하였고, 각 시험과정상에의 응력조건 구현은 경계면에 작용하는 응력을 자동으로 측정하여 경계면에 대한 재하속도 부여 및 저감 등을 조절하는 서보-제어 방식(servo-mechanism)을 2차원 수치모델링과 동일하게 적용하였다.

구 형태의 3차원 개별요소들이 생성되는 공간은 해석 모델의 외곽 경계면 형태에 따라 바뀌게 되는데, 본 연구에서는 실제 삼축압축 시험상의 시료 형태와 동일하게 2개의 상하부 사각형 판 경계면 및 1개의 원통 실린더형 경계면을 이용하여 전체 해석 영역을 설정하였다. 단 하중재하에 따른 경계면 변위를 고려하여, 실제 해석시료 보다 약간 큰 경계면을 생성하여 해석을 수행하였다.

5. 2차원 개별요소 수치모델링 적용

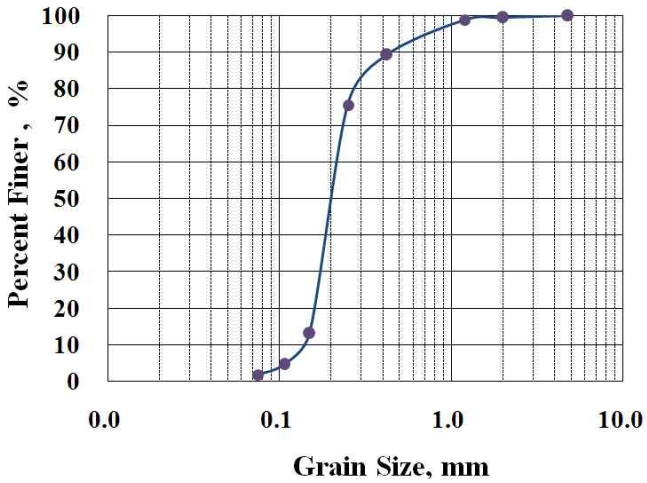
가. 소형 삼축압축시험

(1). 실내시험 결과

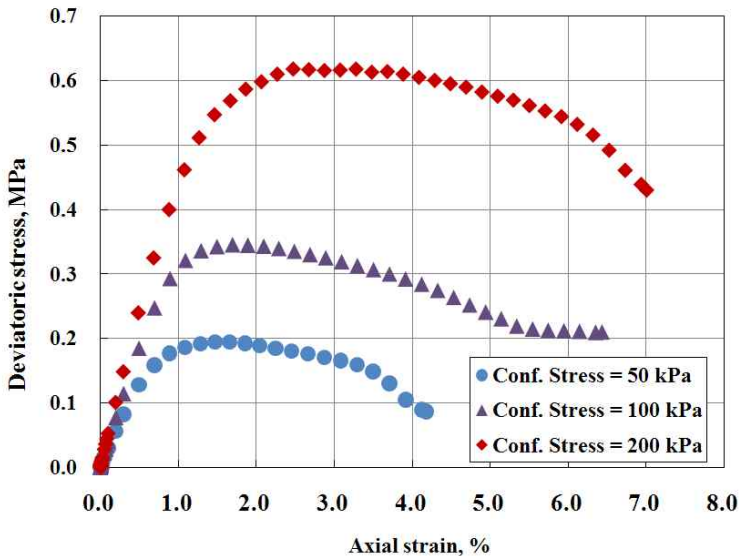
실내 삼축압축시험에 대한 개별요소법 기반의 수치 모델링을 위하여, 기 수행된 소형 삼축압축시험에 대한 시험결과 및 수치 모델링 적용을 위한 해석조건을 분석하였다.

[표 3.7.1] 모래재료의 물성치

항 목	특성값
비 중, G_s	2.67
단위중량(tf/m^3)	1.95
D_{10} (mm)	0.15
D_{50} (mm)	0.20
균등계수, C_u	1.5
곡률계수, C_g	1.1
USCS	SP



[그림 3.7.16] 모래재료의 입도분포 특성



[그림 3.7.17] OO지역 모래에 대한 삼축압축시험 결과

수치 모델링에 이용된 소형 삼축압축시험은 조립재료중 통일분류상 SP로 분류되는 OO지역 모래를 이용하여 수행되었다. 시험에 사용된 재료의 입도분포 및 세부 물리적특성은 위 표와 같으며, 최대간극비(e_{max}) 및 최소간극비(e_{min})는 각각 0.89, 0.56로 나타났고, 상대다짐도 72~75% 조건에서 시험을 수행하였다.

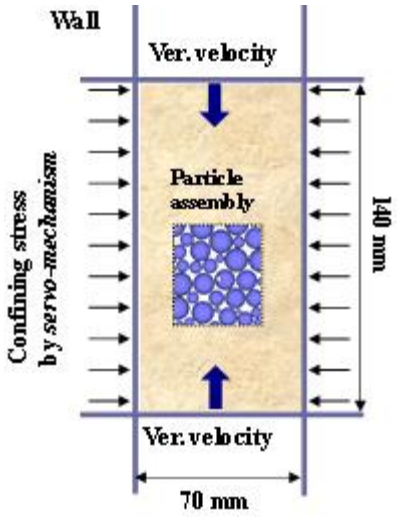
시료의 크기는 폭 70mm, 높이 140mm 이며, 전단시험은 0.05MPa, 0.1MPa, 0.2MPa 구속압 조건에 대한 압밀배수조건하에서 수행하였다.

구속압 조건별 응력-변형에 관한 시험결과를 살펴보면, 전단시의 최대강도는 축

변형률 3% 미만에서 발생했으며, 최대 축차응력 도달 후 약간의 응력연화현상을 보이고 있다.

(2). 개별요소법 기반의 수치 모델링

소형 삼축압축시험에 대한 개별요소법 기반의 수치 모델링을 위하여, 직경 7cm, 높이 14cm의 직사각형 공간에 원형 디스크 형상의 개별요소들을 생성하였고, 그들은 상하 및 좌우측면에 총 4개 경계면에 의해 구속되도록 하였다.



[그림 3.7.18] 소형 삼축압축시험 모델링

[표 3.7.2] 미시 물성치(소형 삼축압축시험)

Micro-parameters	Value
Density, $\rho(kg/m^3)$	1,956
Contact modulus, $E_c(Pa)$	7.5×10^7
Normal stiffness, $k_n(N/m)$	1.5×10^8
Shear stiffness, $k_s(N/m)$	1.5×10^8
Friction coefficient, μ	1.3
Stiffness reduction factor	1.0

개별요소의 최소반경($R_{\min}$)은 0.2mm, 최대반경($R_{\max}$)은 0.6mm, 간극률 0.14 조건을 만족시키도록 초기 개별요소를 생성하였다. 한편, 3차원 배열형태의 실제 입도조건을 2차원 배형형태의 해석조건으로 변화시키기 위해, 상대다짐도를 이용하여 3차원 조건에 대한 2차원 조건에서의 간극률(n_{2D})을 산정하였다(Hainbüchner 등, 2002).

[그림 3.7.18]에서 보듯이, 초기 시료는 4개의 경계면(wall)안에 위치하게 되며, 각각의 경계면은 임의의 응력조건 모델링에 이용되는데, 상부 및 하부 경계면은 축하중을 재하하는 가압판으로 사용되었다.

개별요소에 대한 미시 물성치 산정은 구속압 0.1MPa 조건에 대한 실내시험 결

과를 바탕으로 산정하였다. 즉 간극률 조건을 만족시키되, E_c, k_n / k_s, μ 를 변화시켜가며 반복적인 개별요소해석을 수행하고, 이 결과가 실내시험 결과상의 응력-변형률 관계와 가장 잘 일치하는 조건을 찾은 후, 이 값을 본 해석시의 최종 미시 물성치로 선정하였다. 세부적인 항목별 미시 물성치값은 [표 3.7.2]와 같다.

해석시의 응력조건 구현에 대한 언급에서와 같이, PFC에서는 경계면을 통한 직접적인 응력재하가 불가능하기 때문에 경계면을 특정 속도로 이동시키며 그 과정에서 경계면에 작용하는 반력을 측정하는 방식으로 축하중 재하를 실시하였다.

또한 해석과정중 일정한 구속압 조건을 유지시키기 위하여, 측부 경계면은 반력과 경계면 속도(wall velocity)의 자동조절을 반복해가는 서보-제어 방식(servo-mechanism)을 적용하였으며, 구속압 조건은 실내시험시와 동일하게 적용하였다.

아래 [그림 3.7.19]는 각 구속압 조건에 대한 실내시험 결과와 PFC2D 해석결과를 비교한 것으로서, 미시 물성치 산정과정(calibration process)에 적용된 구속압 0.1MPa 조건에서의 결과 및 동일 미시물성치를 이용하되 구속압 조건을 달리한 해석결과를 나타내고 있다.

결과에서 알 수 있듯이, 특정 구속압 조건에 대한 미시 물성치를 적용한 타 해석결과가 실내시험 결과와 유사하게 나타남을 알 수 있으며, 특히 초기 탄성영역에서의 거동은 PFC가 실제 거동과 매우 유사한 예측결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

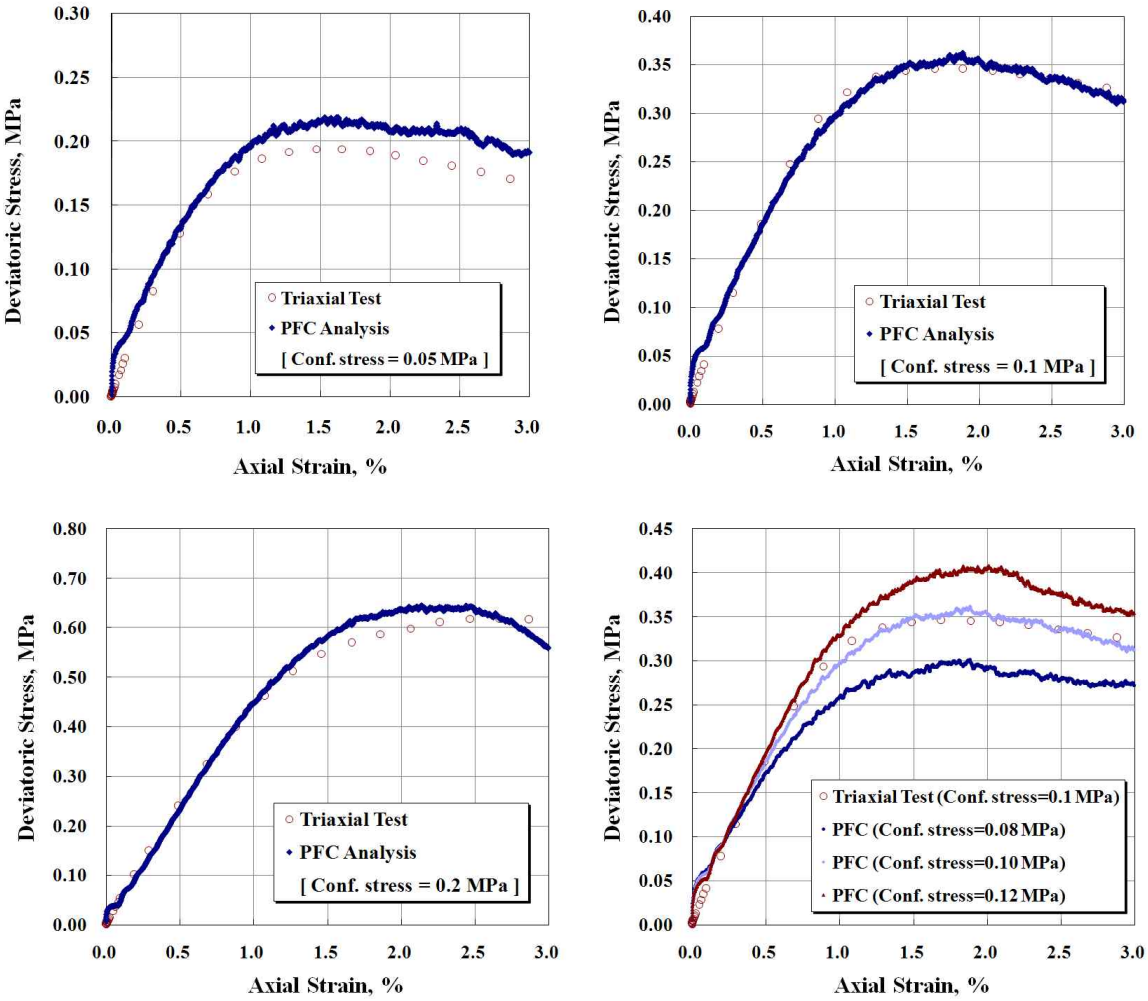
실내시험 결과와의 비교를 통해 산정된 미시 물성치는 구성재료와 간극률, 입도 등의 초기조건만 동일하다면 다양한 응력조건 및 경계조건에 대한 개별요소해석에 적용될 수 있으며, 이는 유한요소 및 유한차분방법과 같은 기존 연속체 해석으로 표현하기 힘든 지반공학적 예측이 개별요소해석을 통해 가능하다는 것을 의미한다.

그러나, 구속압이 커짐에 따라 최대축차응력 도달후의 응력연화현상이 시험결과에 비해 해석결과상에서 크게 나타남을 알 수 있으며, 구속압 0.2MPa 조건에서는 그 차이가 더욱 커짐을 알 수 있다.

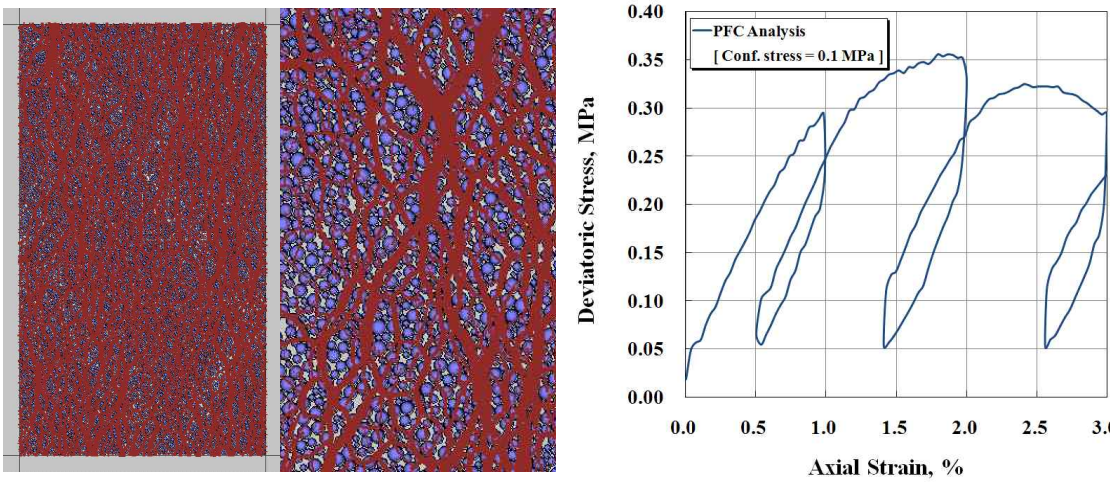
구속압이 커짐에 따라 응력경화현상이 큰 변형률 범위에 걸쳐 완만하게 발생하는 현상을 미시 물성치 및 초기 간극률 조정만으로 PFC2D에서 표현하는 것은 한계가 있다고 판단된다. 즉, 이는 2차원 개별요소해석의 한계라고 판단되는데, 실제의 지반조건과 같은 3차원적 입자배열 상태에서는 하중재하에 따라 입자간 3차원 간극을 통해 점진적인 입자유동 및 재배치가 발생하는데 반해, 본 1차년도 연구에

서 적용된 2차원 개별요소 해석에서는 입자간 간극이 2차원의 평면적 형태를 띠고 있으며 이로 인해 하중재하에 따른 입자유동도 실제에 비해 작은 변형률 범위에서 급격히 발생하였다고 판단된다.

한편, 수직 재하속도 방향 및 축변형율을 원하는 시점까지 변화시켜가는 방식으로 반복재하에 대한 개별요소 모델링을 수행하였는데, 이러한 모델링 기법은 동적 삼축압축시험 모델링에 있어서도 유사하게 적용되었다.



[그림 3.7.19] 소형 삼축압축시험에 대한 PFC2D 해석결과 및 contact force 분포(계속)



[그림 3.7.19] 소형 삼축압축시험에 대한 PFC2D 해석결과 및 contact force 분포

나. 대형 삼축압축시험

(1). 실내시험 결과

모래 성분의 조립재료에 대한 실내시험 PFC 모델링에 이어 대입경 조립재료에 대한 정적 및 동적 대형 삼축압축시험의 수치 모델링을 수행하였다.

대형 삼축압축시험에 이용된 재료는 댐 축조용 락필재료(rockfill material)로서, 세부 물리적 특성 및 시험시의 입도분포는 아래와 같다.

실내시험시의 입도분포는 현장 입도를 그대로 반영할 수 없으므로, 적당한 비율로 스케일을 조정한 상사입도이며, PFC 해석에서는 실내시험과 동일한 입도를 모델링하여 해석에 적용하였다.

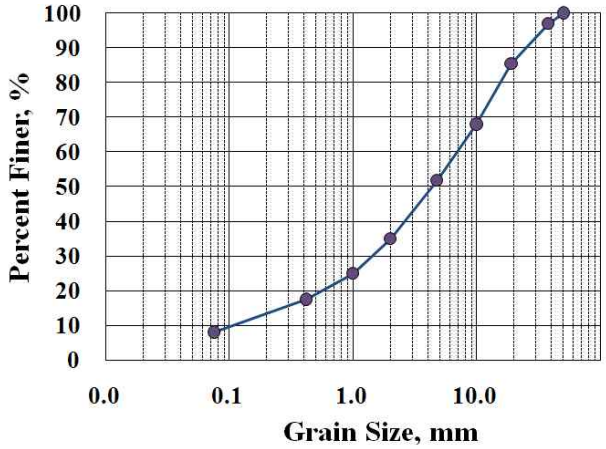
대형 삼축압축시험에 대한 시험방법을 살펴보면, 공시체는 1개당 대략 100kg의 시료를 준비하여, 대형 다짐장치와 직경 30cm, 높이 60cm의 특수제작 몰드를 이용, 공기건조된 시료에 대한 충격 다짐방식으로 제작하였다.

시료의 하부에서 상부로 약 1.6m의 수두차를 이용하여 탈기수를 최소 48시간 이상 통수시켜 시료를 포화시켰다. 전단시험은 대형 삼축압축시험기에 의해 수행되었으며, 전단속도는 3mm/min 이고 0.196MPa, 0.392MPa, 0.588MPa의 구속압 및 압밀배수 조건으로 수행하였다.

정적 시험에 대한 구속압 조건별 응력-변형 관계를 살펴보면, 고밀도 조건의 시료조건에도 불구하고 재성형 시료에서 일반적으로 나타나는 응력경화현상만 보일 뿐, 최대강도 이후의 응력연화현상은 보이지 않음을 알 수 있다.

[표 3.7.3] 락필재료의 물성치

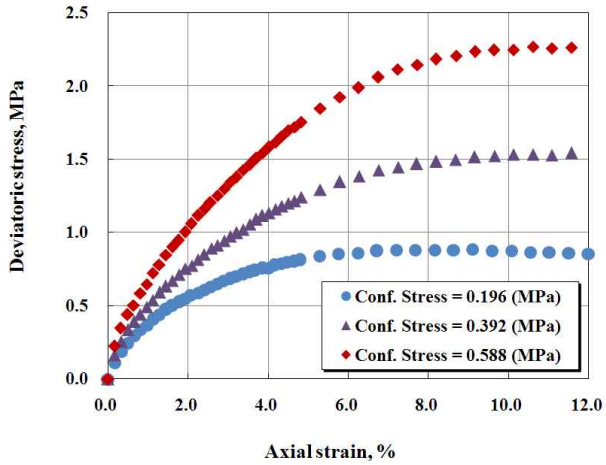
항 목	특성값
비 중, G_s	2.68
건조단위중량(tf/m^3)	2.15
흡수율 (%)	0.66
마모율 (%)	16.3
균등계수, C_u	32.2
곡률계수, C_g	0.96
※ 암 종 : 화강편마암	



[그림 3.7.20] 대입경 락필재료의 입도분포 특성



[그림 3.7.21] 대형삼축압축시험기



[그림 3.7.22] 락필재료에 대한 대형삼축압축시험 결과

본 연구에서는 동적 삼축압축시험에 대한 개별요소법 기반의 수치 모델링을 위해 기 수행된 대형 반복재하 삼축압축시험 결과를 이용하였다. 시험에 이용된 재료는 정적 삼축압축시험시와 동일한 댐 축조용 락필재료이며, 반복재하 삼축압축시험은 ASTM D3991-91(1996) 및 JGS 0542-2000에 의거하여 수행되었다.

반복재하방법은 하중제어(load control)방법을 적용하였으며, 3개의 구속압력 0.196MPa, 0.392MPa, 0.588MPa)에 대하여 시험하는 것으로 하였다.

반복하중을 가하는 동안에는 배수밸브를 닫아 비배수 조건으로 시험하였으며,

반복재하 중 공시체에 발생하는 변위는 공시체의 Cap에 LVDT를 설치하여 측정하였으며, 10-5~10-1 order까지 전단변형율이 발생하도록 재하중의 크기 및 단계를 조절하였다. 반복재하 삼축압축시험은 정적시험에서와 같은 방법으로 공시체를 제작하여 대형진동삼축시험기의 본체에 공시체 및 삼축실 등의 조립을 완료한 후, 미리 결정된 구속압 하에서 공시체를 포화 및 압밀하였다.

압밀이 완료된 시료에 대하여 소정의 구속압 하에서 아래 식에 의해 산정된 반복축차응력의 편진폭 σ_d 를 0.2Hz의 정현파형(sine wave)으로 총11회 반복재하하였다.

$$\sigma_d = \frac{P_C + P_E}{2A_i} \quad (\text{kgf/cm2}) \qquad \text{[식 3.7.35]}$$

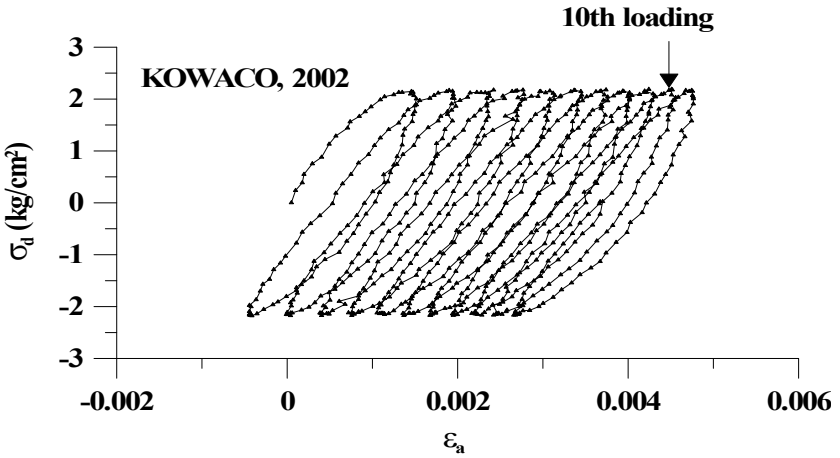
여기서, P_C 및 P_E : 반복 싸이클의 압축 및 인장측 반복축하중

A_i : 그 반복재하단계 개시시의 공시체의 단면적

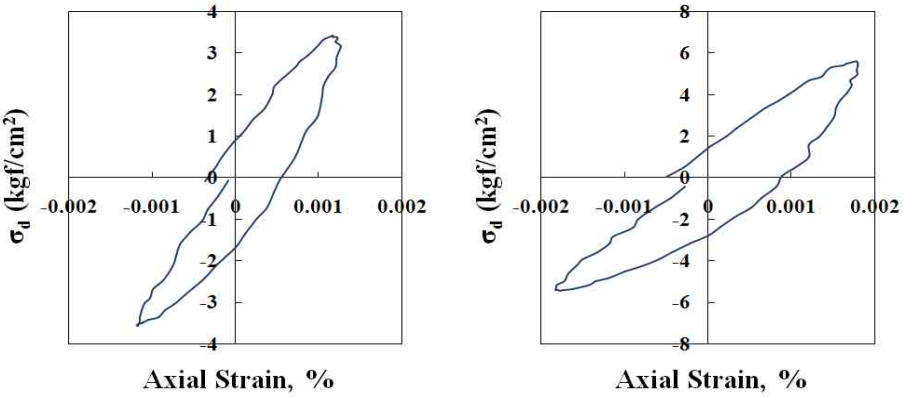
1개의 구속압에 대하여 반복축차응력의 편진폭을 15~18단계로 구분하여 시험하였으며, 이때 반복축하중의 크기는 고정밀도의 하중계(load cell)를 사용하여 측정하였고 축변위는 Proximeter와 LVDT를 사용하여 측정하였다. 구체적인 시험조건 및 시험결과는 다음과 같다.

[표 3.7.4] 대형 반복재하 삼축압축시험 조건

다짐조건	낙하고=50cm, 다짐회수=N회, 다짐층수=4~5층
공시체 크기	직경300mm×높이600mm
최대입경	50.8mm
측압	0.196MPa, 0.392MPa, 0.588MPa
포화/불포화	포 화
재하파형	sine파
재하 주파수	0.2Hz
재하파수	11회
샘플링 주파수	30Hz (150 points/cycle)
배수조건	비배수
축변위측정	캡상부-Gap Sensor 2개, 공시체 측면(상, 하부)-LVDT 2개



[그림 3.7.23] 대형 반복재하 삼축압축시험 결과 예



(a) 10 단계 (a) 15 단계

[그림 3.7.24] 반복재하 삼축압축시험에 의한 이력곡선 예

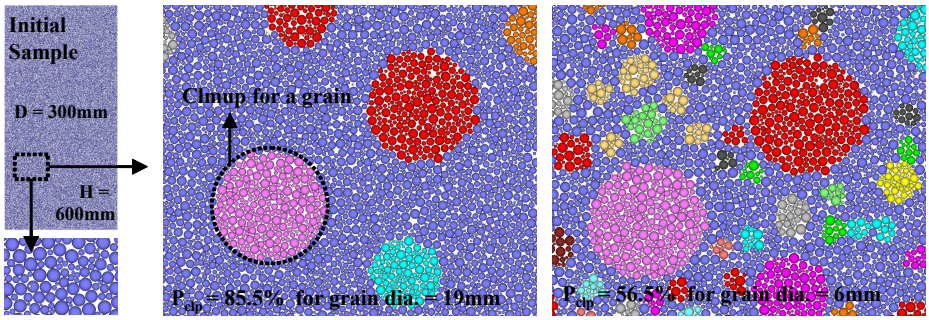
(2). 개별요소법 기반의 수치 모델링

(가) 입도분포 모델링

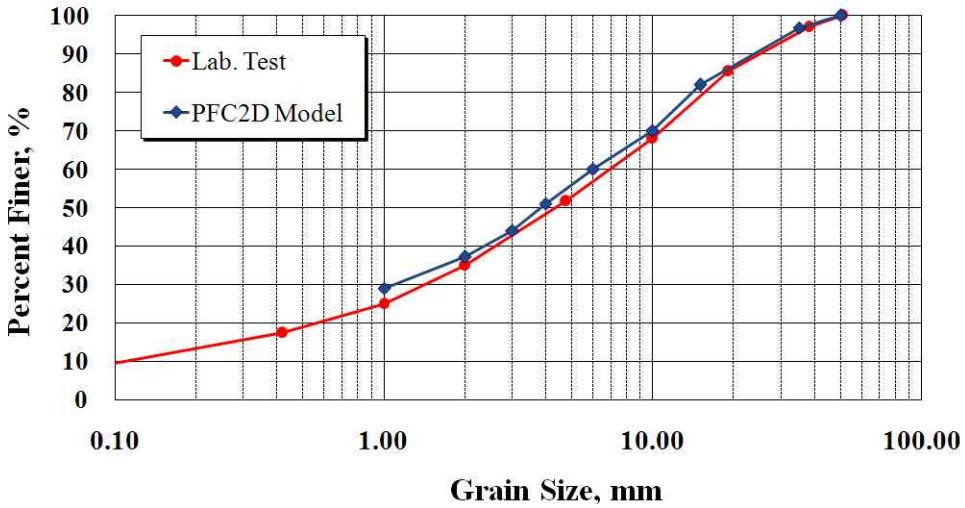
대입경 락필재료에 대한 실내시험 입도 및 불규칙한 입자형상을 개별요소 생성시 반영하기 위하여, 앞서 언급한 clump 기법을 이용하였다.

해석영역(직경 300mm, 높이 600mm)내 임의 위치를 난수발생기법으로 선정한 후, 가장 큰 입경에 해당하는 clump를 생성하고, 순차적으로 clump의 크기를 줄여가며 원하는 입도분포 조건을 생성하였다. 모든 clump 생성시, 기존 clump와 신규 clump의 인접을 방지하기 위하여 각 clump간의 거리계수를 적용하였으

며, 이를 통해 특정 입경의 조립재가 일정 부분에 집중적으로 생성되는 것을 방지하도록 하였다. 아래 그림은 대형삼축압축시험시 이용된 대입경 조립재료의 입도분포 모델링 과정중의 clump 생성결과를 타나낸 것으로서, 특정 입경에 대한 통과중량 백분율 산정결과를 보여주고 있다.



[그림 3.7.25] 대입경 락필재료에 대한 입도분포 모델링 과정



[그림 3.7.26] 대입경 락필재료에 입도분포 모델링 결과

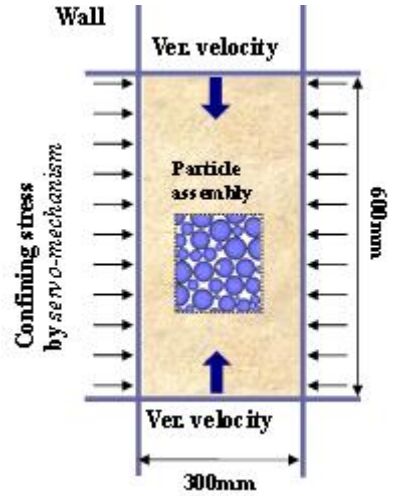
대입경 락필재료의 입도분포 모델링을 위한 세부 개별요소와 clump 생성 결과 및 최종적인 실내시험 입도와 PFC2D 적용을 위한 입도분포 모델링 결과는 다음과 같다.

- 초기 개별요소 크기 : R_{min}=0.56mm, R_{max}=2.08mm
- 총 생성 개별요소수 : 60,125
- 총 clump 생성수 : 4,972

- clump간 거리계수 : c_α = 1.3
- 해석영역 크기 : D=300mm, H=600mm

(나) 대형 삼축압축시험에 대한 개별요소 해석

대형 삼축압축시험에 대한 개별요소법 기반의 수치 모델링을 위하여, 직경 30cm, 높이 60cm의 직사각형 공간에 원형 디스크 형상의 개별요소들을 생성하였고, 그들은 상하 및 좌우측면에 총 4개 경계면에 의해 구속되도록 하였다.



[그림 3.7.27] 대형 삼축압축시험 모델링

[표 3.7.5] 미시 물성치(대형 삼축압축시험)

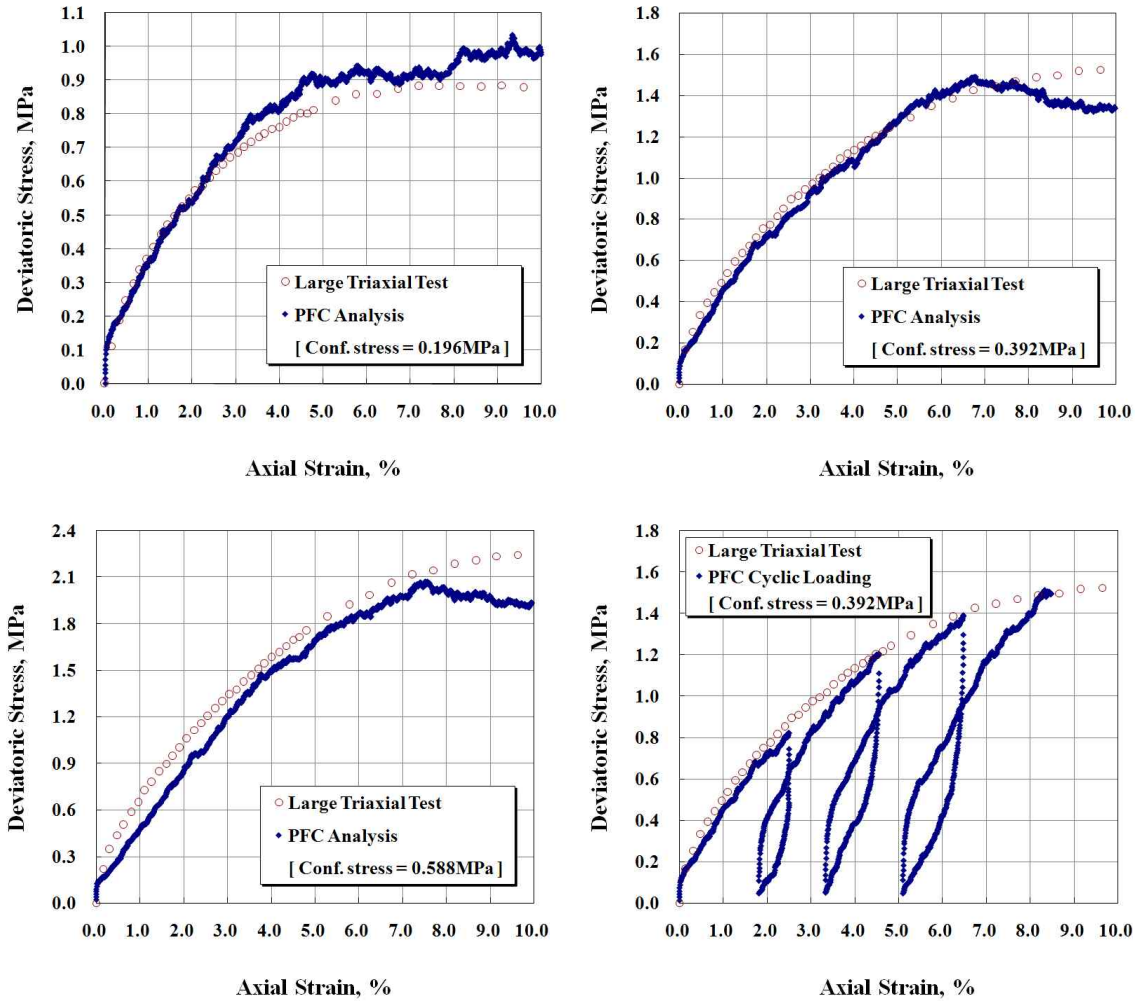
Micro-parameters	Value
Density, $\rho(kg/m^3)$	2,150
Contact modulus, $E_c(Pa)$	9.0×10^7
Normal stiffness, $k_n(N/m)$	1.8×10^8
Shear stiffness, $k_s(N/m)$	1.8×10^8
Friction coefficient, μ	10.0
Stiffness reduction factor	1.0

개별요소의 최소반경($R_{\min}$)은 0.56mm, 최대반경($R_{\max}$)은 2.08mm, 간극률 0.16 조건을 만족시키도록 초기 개별요소를 생성하였다. 소형 삼축압축시험 모델링시와 동일하게, 초기 시료는 4개의 경계면(wall)안에 위치하게 되며, 각각의 경계면은 임의의 응력조건 모델링에 이용되는데, 상부 및 하부 경계면은 축하중을 재하하는 가압판으로 사용되었다.

개별요소에 대한 미시 물성치 산정은 구속압 0.392MPa 조건에 대한 실내시험 결과를 바탕으로 산정하였다. 즉 간극률 조건을 만족시키되, E_c, k_n/k_s, μ 를 변화시켜가며 반복적인 개별요소해석을 수행하고, 이 결과가 실내시험 결과상의 응력-변형률 관계와 가장 잘 일치하는 조건을 찾은 후, 이 값을 본 해석시의 최종 미시 물성치로 선정하였다. 세부적인 항목별 미시 물성치값은 위 표와 같다.

해석시의 구속응력 및 축하중 구현기법은 소형 삼축압축시험시와 동일한 서보-제어 방식(servo-mechanism)을 적용하였는데, 구속압 조건은 실내시험시와 동일하게 0.196MPa, 0.392MPa, 0.588MPa 을 적용하였고, 축변형률이 10%에 도달할 때까지 해석을 수행하였다.

아래 [그림 3.7.28]은 각 구속압 조건에 대한 실내시험 결과와 PFC2D 해석결과를 비교한 것으로서, 미시 물성치 산정과정(calibration process)에 적용된 구속압 0.392MPa 조건에서의 결과 및 동일 미시물성치를 이용하되 구속압 조건을 달리한 해석결과를 나타내고 있다.



[그림 3.7.28] 대형 삼축압축시험에 대한 PFC2D 해석결과

결과에서 알 수 있듯이, 특정 구속압 조건에 대한 미시 물성치를 적용한 타 해석결과가 실내시험 결과와 유사하게 나타남을 알 수 있으며, 특히 초기 탄성영역

에서의 거동은 PFC가 실제 거동과 매우 유사한 예측결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

그러나, 소형 삼축압축시험에 대한 해석결과와 유사하게 일정 변형률 이상의 범위에서는 실내시험 결과와 PFC2D 해석결과간 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

본 해석의 경우, 대략 축변형률 7% 이상에서 실내시험의경우는 확연한 응력연화현상이 보이지 않는 반면, PFC2D 해석결과에서는 응력연화현상이 발생함을 확인할 수 있다.

개별요소생성시의 초기 간극률을 충분히 크게 함으로서 초기 입자배열상태를 느슨하게 조정할 있고, 이를 통해 최종적인 응력-변형 거동을 유사하게 모델링할 수는 있으나, 이는 실제 시험시료의 조건에 부합하는 않는 해석적 고려라 판단된다.

결국 PFC2D를 통해 큰 변형률 범위에서의 작은 응력연화 현상을 표현하기 위해서는 소형 삼축압축시험 해석결과에서 언급되었듯이, 3차원 개별요소 생성 및 해석을 통해 점진적 입자유동과 재배치 발생을 유도하는 해석적 접근이 필요하다고 판단된다.

그러나, 변형률 7% 이하의 거동에 있어서는 실내시험 결과와 매우 유사한 예측이 PFC2D를 통해 가능함을 확인할 수 있으며, 설계와 시공 등에서 공학적으로 고려하는 지반의 변형률 범위를 고려한다면, PFC2D를 이용한 개별요소해석은 실제 지반의 거동을 예측하는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

반복재하 삼축압축시험에 대한 개별요소해석은 특정 축변형률까지 상하부 경계면 요소를 일정 속도하에 하중재하 방향으로 이동시킨 후, 원하는 축변형률에 도달하면 다시 반대방향으로 경계면 요소를 이동시키는 방식으로 고려하였다.

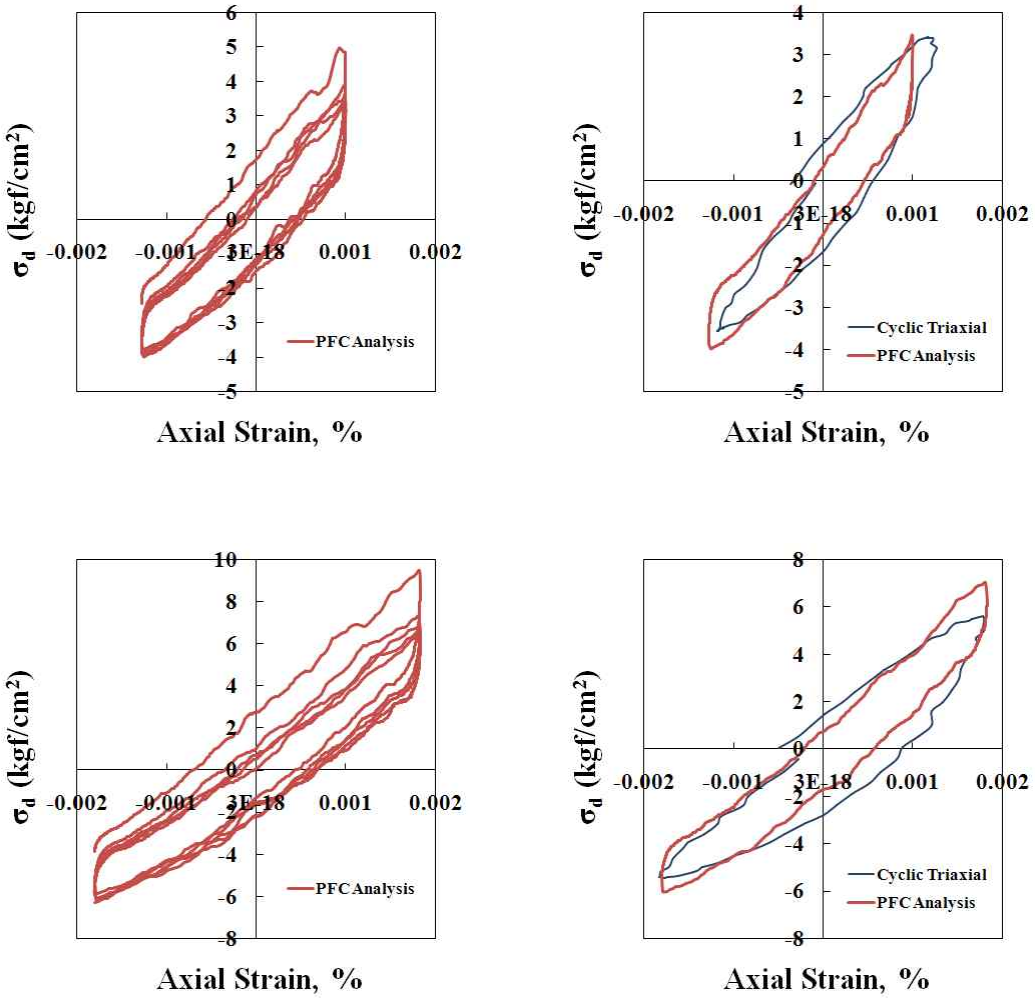
미소변형 조건에서의 해석시 경계면 이동에 따른 해석영향을 최소화하고자 정적 삼축압축시험에 비해 10배정도의 느린 경계면 이동 속도를 부여하였다.

모든 해석단계별로 경계면과 접촉되어 있는 개별요소들을 찾아낸 후, 이들과 경계면 접촉면에 작용하는 하중을 모두 구하고 이들의 총합을 경계면 길이로 나누어 최종적인 경계면 작용 응력을 산정하였으며, 이러한 일련의 과정은 정적 해석에서와 마찬가지로 서보-제어 방식(servo-mechanism)에 의해 수행되었다.

특정 구속압하 및 일정 편직폭 응력하에서 반복재하를 5회 수행한 후, 그 중 중간단계의 결과를 선별하여 실내시험 결과와 비교하였다.

초기 반복재하 과정에서는 순간적인 입자 재배열 및 초기 해석영향으로 인해

다소 큰 루프를 보이지만, 2회부터 5회까지의 과정에서는 일정한 형태의 루프를 나타내었으며, 실내시험중 5단계와 10단계에서의 편진폭 응력에 대한 축변형률을 개별요소 해석결과와 비교하면 아래 그림과 같다.



[그림 3.7.29] 대형 삼축압축시험에 대한 반복재하 PFC2D 해석결과

6. 3차원 개별요소 수치모델링 적용

가. 소형 정적 삼축압축시험

(1) 실내시험 결과

본 연구에서는 실내시험에 대한 3차원 개별요소 수치모델링을 수행하였으며, 수치모델링 대상의 실내시험은 2차원 개별요소 수치모델링에 적용되었던 실내시험 결과를 이용하였다. 수치 모델링에 이용된 삼축압축시험은 조립재료중 통일분류상 SP로 분류되는 OO지역 모래를 이용하여 수행되었으며, 입도분포를 살펴보면, 0.25mm에 대한 가적통과율이 75%, 0.15mm에 대한 가적통과율이 13%로서, 대부분 0.2~0.35mm 근방의 균일입경을 보이고 있다. 최대간극비($e_{\max}$)와 최소간극비($e_{\min}$)는 각각 0.89, 0.56 으로 나타났고, 상대다짐도 72~75% 조건에서 시험을 수행하였으며, 초기 상태에서의 간극률(n)은 0.38 이었다.

삼축압축시험을 위한 시료 크기는 폭 70mm, 높이 140mm 이며, 전단시험은 0.05MPa, 0.1MPa, 0.2MPa 구속압 조건에 대한 압밀배수 조건하에서 수행되었다. 각 구속압별 응력-변형 곡선은 그림 2와 같으며, 이를 이용한 강도 특성치는 $c = 12.0 kPa$, $\phi = 36.8^\circ$ 로 나타났다. 구속압 조건별 응력-변형에 관한 시험결과를 살펴보면, 전단시의 최대강도는 축변형률 3% 미만에서 발생했으며, 최대 축차응력 도달 후 약간의 응력연화 현상을 보이고 있다.

(2) 초기 3차원 개별요소 생성

본 연구에서의 3차원 개별요소 수치 모델링에 이용된 프로그램은 PFC3D(Itasca, 2008)로서, 기존 2차원 프로그램과 그 기본개념 및 모델링 방법은 유사하나, 2차원 개별요소가 디스크 형태인데 반해, 3차원 개별요소는 구(sphere)의 형태를 띠고 있다.

해석대상 시료는 0.2~0.35mm 크기범위의 균일입경 형태를 보이므로, 본 해석에서는 $D_{\min} = 0.2mm$, $D_{\max} = 0.35mm$의 입경 분포구간에 대하여 균일분포 형태로 개별요소를 생성하였다.

개별요소해석에 있어 초기 개별요소의 입도분포 및 공간적 배치형태, 간극율 조건 등은 최종 해석결과에 큰 영향을 미치게 된다.

기존 2차원 개별요소 해석에서는 상대 다짐도를 이용하여 3차원 조건에 대한 2차원 조건에서의 등가 간극률(n_{2D})을 경험적으로 환산하였으나(Hainbüchner 등, 2002), 실제 3차원 및 2차원 조건에 대한 정량적 간극비 관계는 정확히 규정될 수 없는 한계가 있다.

이는 기존 2차원 개별요소 해석상의 큰 문제점으로 인식되고 있으나, 금회 3차원 개별요소 해석에서는 이러한 환산과정 없이 실제의 시료 간극비 조건에 맞는 개별요소 생성이 가능하였다.

구 형태의 3차원 개별요소들이 생성되는 공간은 해석 모델의 외곽 경계면 형태에 따라 바뀌게 되는데, 본 연구에서는 실제 삼축압축 시험상의 시료 형태와 동일하게 2개의 상하부 사각형 판 경계면 및 1개의 원통 실린더형 경계면을 이용하여 전체 해석 영역을 설정하였다. 단 하중재하에 따른 경계면 변위를 고려하여, 실제 해석시료 보다 약간 큰 경계면을 생성하여 해석을 수행하였다.

(3) 3차원 개별요소 수치모델링 방법

간극률 조건 및 입도분포를 고려한 개별요소 생성결과를 이용, 조립재료에 대한 삼축압축시험 과정을 모델링하였다. 삼축압축시험 과정에 대한 기본적 모델링 방법은 기존의 2차원 모델링 방법과 동일하다.

실내 삼축압축 시험시의 시료크기는 70㎜×140㎜ 이지만, 3차원 개별요소 입경별 생성되는 개별 요소수를 고려할 때, 실제 시료크기를 일정비율로 축소한 상사해석 모델의 적용이 필요하다. 개별 요소의 입경이 실제 입경과 동일하고 해석 모델의 크기가 실제 시료크기의 1/5인 경우, 시험시의 초기 간극률 조건을 만족시키기 위해 필요한 개별요소 수는 245,413개로서, 이러한 조건에서는 방대한 연산시간과 컴퓨터 메모리 문제로 인해 현실적 수치 모델링이 불가능하게 된다.

본 해석에서는 3.5㎜×7.0㎜ 크기의 최종 해석모델을 적용하였으며, 실제 시료크기 대비 본 축소조건에 대한 적정성은 별도의 수치모델 스케일 영향검토를 통해 분석하였다.

개별요소들은 2개의 상하부 경계면 및 1개의 원통 실린더형 경계면 내에 놓이게 되며, 상부 및 하부 경계면은 축하중을 재하하는 가압판으로 사용되었다.

PFC에서는 경계면을 통한 직접적인 응력재하가 불가능하기 때문에 경계면을 특정 속도로 이동시키며 그 과정에서 경계면에 작용하는 반력을 측정하는 방식으로 축하중 재하를 실시하였다. 또한 해석과정중 일정한 구속압 조건을 유지시키기

위하여, 측부 경계면은 반력과 경계면 속도(wall velocity)의 자동조절을 반복해가는 서보제어 방식을 적용하였으며, 구속압 조건은 실내시험시와 동일하게 적용하였다.

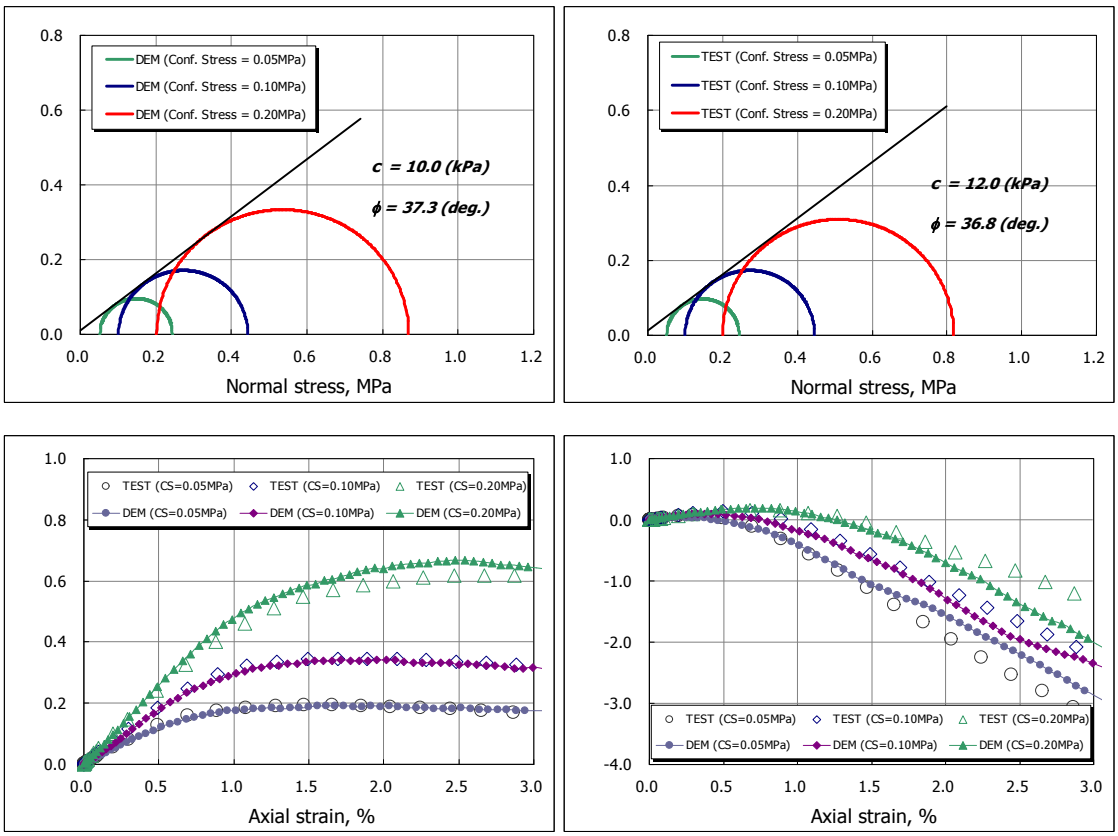
구속압 0.1㎫에 대한 실내시험상의 응력-변형 곡선을 모사하는 개별요소 해석을 수행하였으며, 반복 시행착오 과정을 통해 최종 미시 물성치를 산정하였다. 미시 물성치를 포함한 모든 해석조건을 동일하게 하되, 구속압 조건을 0.05㎫, 0.2㎫로 달리한 개별요소 해석을 추가적으로 수행하였으며, 이 결과를 각 구속압 조건에 대한 실내시험상의 응력-변형 곡선과 다시 비교하였다.

(4) 수치모델링 결과

아래의 [그림 3.7.30]은 각 구속압 조건별 실내시험 및 3차원 개별요소 수치모델링 결과를 나타낸 것으로서, 특정 구속압조건의 미시 물성치를 이용한 타 응력조건의 개별요소해석 결과는 응력-변형 곡선 및 체적 변화량에 있어 실내시험과 매우 유사함을 알 수 있다. 기존 2차원 개별요소 수치 모델링의 경우, 체적 변화량을 적절하게 예측하는 것은 2차원 개별요소 모델링의 기하조건으로 인해 매우 어려운 과정이었으나, 본 연구에서 보듯이 3차원 수치 모델링에서는 실제 시험결과와 매우 유사한 예측이 가능함을 알 수 있다.

구속압이 커지는 경우에 있어서는 초기 탄성계수가 실제보다 다소 크게 예측되었으며, 이로 인해 최대 축차응력과 체적감소량이 소폭 증가하는 결과를 확인할 수 있었으나, 실내시험에 대한 오차 등을 고려할 때, 전체적인 예측 정확도는 매우 높은 것을 알 수 있다.

각 구속압별 응력-변형 결과를 이용한 강도 특성치 산정결과를 비교할 때, 실제 시험시의 $c = 12.0 kPa$, $\phi = 36.8^\circ$에 대해, 개별요소 수치 모델링을 통한 강도 특성치는 $c = 10.0 kPa$, $\phi = 37.3^\circ$로서 실내시험 결과와 매우 유사함을 알 수 있다.



[그림 3.7.30] 개별요소 해석을 통한 응력-변형 거동 및 강도 특성치

나. 대형 정적 삼축압축시험-1

(1) 실내시험 결과

본 연구에서는 대형 정적 삼축압축시험에 대한 3차원 입도분포를 고려한 개별요소 수치모델링을 수행하였으며, 수치모델링 대상의 실내시험은 2차원 개별요소 수치모델링에 적용되었던 대형 정적 삼축압축시험 결과를 동일하게 적용하였다.

대형 삼축압축시험에 이용된 재료는 평화의 댐 건설에 사용된 락필재료(rockfill material)로서, 세부 물리적 특성 및 시험시의 입도분포는 [표 3.7.3]과 [그림 3.7.20]과 같으며, 실내시험 시의 입도분포는 현장 입도를 그대로 반영할 수 없으므로, 적당한 비율로 스케일을 조정한 상사입도를 적용하였다.

대형 삼축압축시험에 사용된 공시체는 대형 다짐 장치와 직경 30cm, 높이 60cm의 특수제작 몰드를 이용하여 공기 건조된 시료에 대한 충격 다짐방식으로 제작하였다. 또한 시료의 하부에서 상부로 약 1.6m의 수두차를 이용하여 탈기수

를 최소 48시간 이상 통수시켜 시료를 포화시켰다. 전단 시, 전단속도는 3mm/min 이고 196kPa, 392kPa, 588kPa의 구속압 조건에 대해 압밀배수 조건으로 전단시험을 수행하였다.

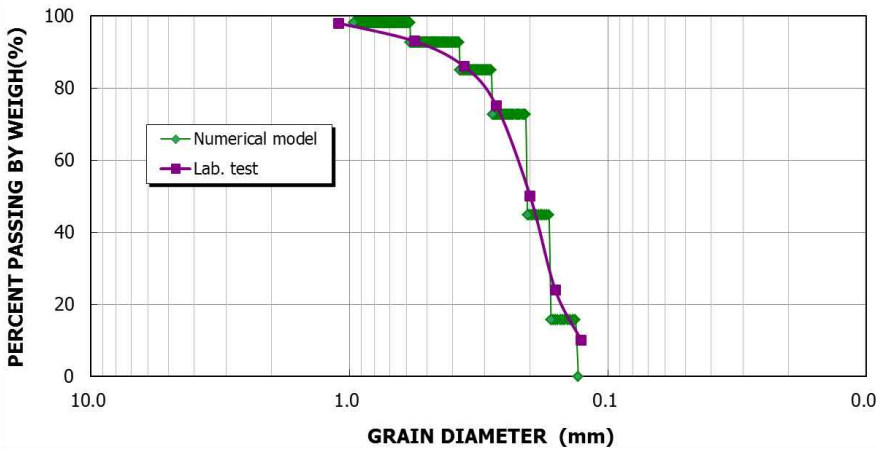
[그림 3.7.22]와 같이 정적 시험에 대한 구속압 조건별 응력-변형 관계를 살펴보면, 고밀도 조건의 시료조건에도 불구하고 재성형 시료에서 일반적으로 나타나는 응력경화 현상만 보일뿐, 최대강도 이후의 응력연화 현상은 보이지 않음을 알 수 있다.

(2) 초기 3차원 개별요소 생성 및 수치모델링

(가) 3차원 입도분포 모델링

락필 재료와 같은 대입경 조립재료의 입도분포는 실내시험뿐만 아니라 수치모델링에 있어서도 강도 및 변형 특성에 미치는 영향이 크다. 입도분포를 고려한 수치모델링을 위해 기존의 2차원 수치해석에서 사용된 clump logic을 3차원 입도분포 모델링에 적용할 경우 실제 해석 수행시간을 크게 증가시키게 된다. 따라서 본 연구에서 개발한 3차원 입도분포 모델링 기법을 이용하여 [식 3.7.31]과 [식 3.7.34]로부터 입도분포곡선 상의 특정 입경에 해당하는 각각의 개별입자의 개수를 구하고, 계산된 개수만큼 지정된 시료의 공간 내에 개별입자들을 생성한다. [그림 3.7.33]은 이러한 과정으로 생성된 입도분포를 고려한 3차원 개별요소를 나타내며, 이러한 방법을 통해 기존의 2차원 해석에서 주로 사용된 clump logic을 사용하지 않고 각 입자들의 입경을 직접 조정하여 초기 개별입자들을 생성할 수 있다.

단, 입자를 생성하는 과정에서 d_i 입경에 해당하는 입자만 생성하게 되면 [그림 3.7.31]과 같은 결손 입도(Gap graded distribution)를 형성하는 오류가 발생하므로 d_i 입경과 d_{i-1} 입경 사이에서 난수발생기법을 통해 입자를 생성해야 한다. 또한 주어진 입도분포곡선을 보다 세분화하여 모델링 할수록 더욱 정확한 입도분포를 형성할 수 있다. 즉, 실내시험을 통해 획득한 입도분포곡선 상의 입경 사이사이에 새로운 입경에 해당하는 점을 곡선 상에 추가로 생성하여 이를 모델링 한다면 실제 시료의 입도분포 및 간극률 조건을 보다 정확히 구현한 개별요소해석을 수행할 수 있다.

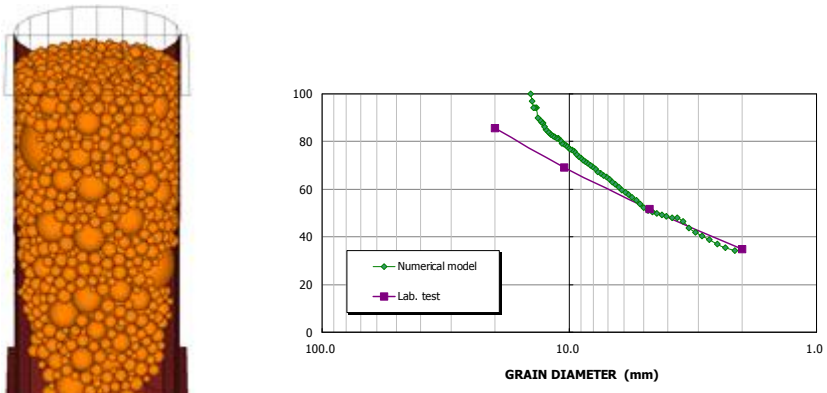


[그림 3.7.31] Gap-graded distribution

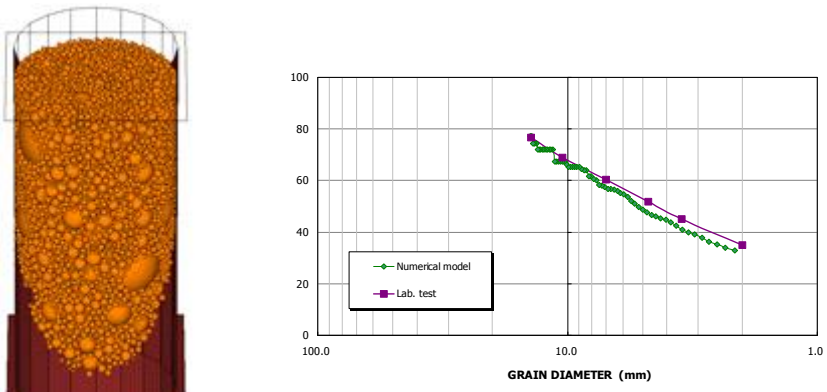
[그림 3.7.32] (a)는 입도분포 곡선 상 해당 입경의 개수를 4개만 적용하여 모델링 한 결과이고, [그림 3.7.32] (b)는 해당 입경의 개수 6개를 적용하여 모델링 한 결과를 비교하여 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이 원본 입경의 사이사이에 임의의 새로운 입경을 추가함으로써 보다 실제 입도분포 곡선에 근접한 결과를 획득 할 수 있다.

대형 정적 삼축압축시험에 사용된 락필 재료의 입도분포곡선을 바탕으로 본 연구에서 개발한 3차원 입도분포 모델링 기법을 통해 초기 개별요소 생성과정에서 3차원 입도분포를 모델링 하였다. 전술하였듯이 보다 정확한 모델링을 위해 대상 시료의 주어진 입도분포곡선 원본 데이터 사이사이에 임의의 추가 데이터를 생성하여 세분화하고 이를 모델링 하였다.

3차원 입도분포 모델링 기법을 통한 수치모델링 결과와 대형삼축압축시험에서 사용된 재료의 입도분포를 [그림 3.7.33]에 비교하여 나타내었다. [그림 3.7.33]에서와 같이 시험 재료의 입도분포곡선에서 시험결과 데이터 사이사이에 임의의 입도에 해당하는 가적통과율을 추가적으로 삽입하여 해석 할수록 실제 입도분포와 보다 일치하는 결과를 획득할 수 있다.



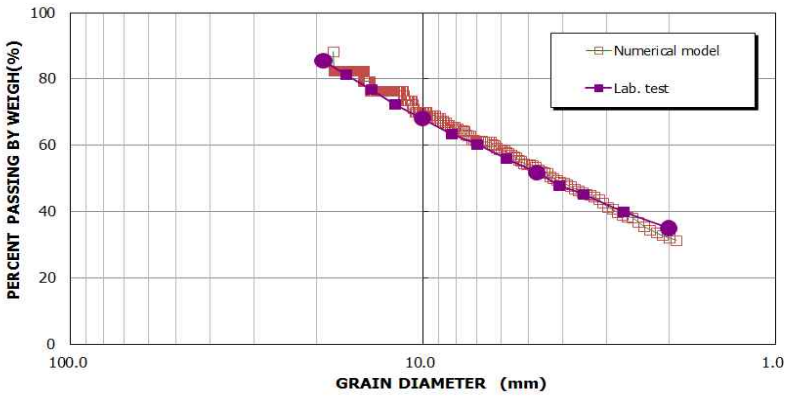
(a) N_D= 4



(b) N_D = 6

[그림 3.7.32] 입도 세분화에 따른 3차원 입도분포 모델링 결과

[그림 3.7.33] 결과에서 알 수 있듯이 기존의 clump logic을 사용하지 않고 본 연구에서 개발한 방법에 의해 3차원적으로 특정 입도분포를 모델링함으로써 해석시간을 크게 단축하며, 실내시험에 사용된 시료의 입도분포와 매우 흡사한 해석 결과를 획득할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 PFC3D를 통한 특정 입도분포의 모델링을 통해 실제 시료의 입도 및 간극률을 수치모델링에 그대로 반영하여 전체적인 거동 해석을 수행할 수 있다.



(Lab. Test data : ● → Original data, ■ → additional data)

[그림 3.7.33] 3차원 입도분포 모델링 결과(평화의 댐)

(나) 초기 개별요소 생섭 기법

PFC3D 프로그램을 통한 개별입자의 생성은 정해진 영역 내에 생성하고자 하는 입자의 중심점을 임의의 좌표상에 생성하기 때문에 기 생성된 입자 또는 경계면과 새롭게 생성될 입자들이 중첩될 경우 입자가 생성되지 않는 문제가 발생한다.

이를 방지하기 위해 초기의 개별입자 생성 시, 전체 입자들의 반경을 동일한 비율로 줄여서 입자를 작게 생성하고 그 때의 간극률과 구현하고자 하는 목표 간극률 사이의 관계식 [식 3.7.36]으로부터 요소확장계수(m)를 구하여 입자의 크기를 확장시키는 방법을 사용하고 있다(Itasca, 2004).

$$m^3 = \frac{1-n}{1-n_o} \qquad \text{[식 3.7.36]}$$

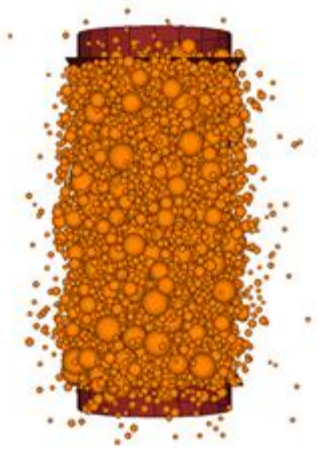
여기서, n : 목표 간극률

n_o : 초기 요소생성 상태의 간극률

이러한 방법으로 생성된 입자간의 이동은 입자와 입자 또는 입자와 경계면의 접촉이나 중첩 영역에서의 힘과 변위와의 관계로부터 발생된 접촉 힘 벡터와 속도 벡터에 의해 지배된다. 그러나 난수발생기법과 요소확장계수를 이용한 초기

개별요소의 생성과정에서 임의의 위치에 생성된 두 입자간의 중첩 범위가 입자의 반경보다 커질 경우, 동적 에너지의 증가로 인해 입자의 초기 속도 벡터가 급격히 커지는 현상이 발생하고, 초기 속도 벡터의 급격한 증가는 입자들이 구속 경계면을 이탈하는 현상을 발생시킨다. 이러한 입자들의 경계면 이탈 현상은 균등한 입자들을 생성하는 과정에서는 발생되지 않으나 특정 범위의 입도분포를 갖는 초기 개별요소 생성 시, 최대입경($d_{\max}$)과 최소입경($d_{\min}$)의 차이가 크면 클수록 더욱 명확하게 발생된다.

본 연구에서도 35mm × 70mm 크기의 경계면 내에 최대입경 2mm와, 최소입경 0.2mm 사이의 범위를 갖는 개별입자들을 간극률 0.23을 만족하도록 생성하기 위해 요소확장계수를 적용한 후 개별 입자들 사이의 unbalanced force를 수렴시키는 과정에서 [그림 3.7.34]와 같이 입자들의 경계면 이탈 현상이 발생함을 알 수 있다. 즉, 본 연구와 같이 특정 입도 조건에서 입자간 과도한 중첩의 발생은 개별 요소간의 급격한 변형에너지 축적과 요소간의 큰 상대변위를 발생시킨다.



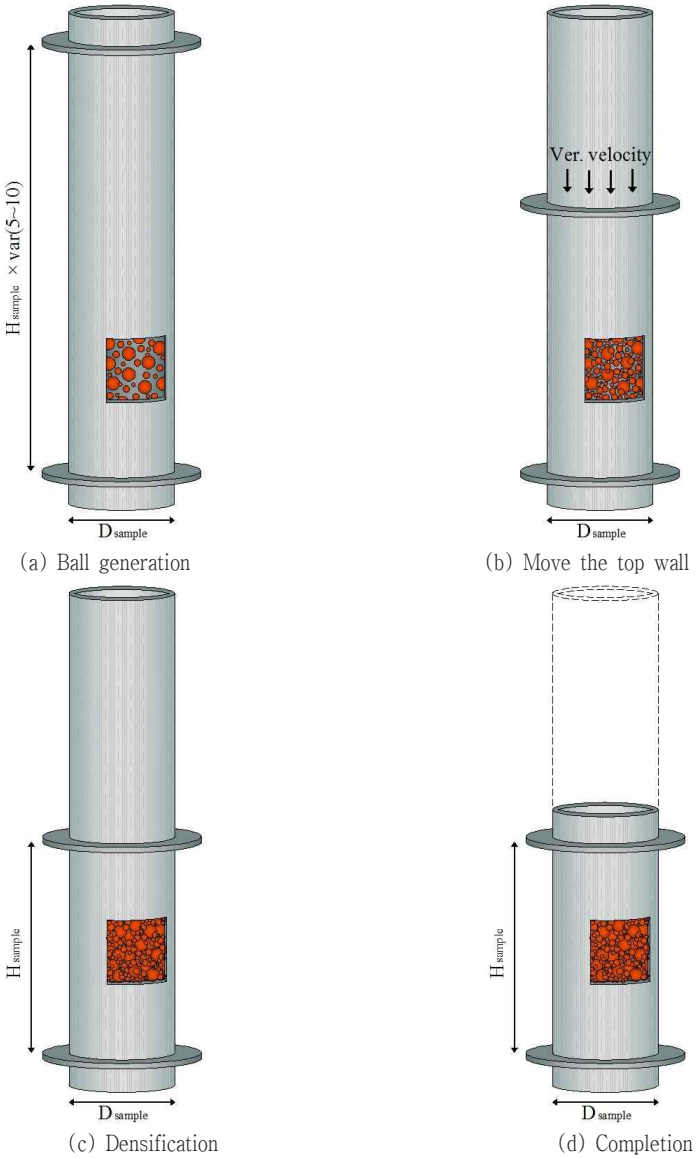
[그림 3.7.34] 개별요소의 경계면 이탈 현상

따라서 본 연구에서는 특정 입도분포를 만족하도록 다양한 직경의 입자들로 구성된 초기 개별요소 생성 시, 입자간의 과도한 중첩과 그로 인한 입자들의 경계면 이탈을 방지하기 위해 [그림 3.7.35]와 같은 모델링 과정을 적용하였다.

초기 입자 생성 시, 정해진 공간 내에서 임의의 위치에 생성되는 입자들의 과도한 중첩을 최소화 할 수 있도록 충분한 공간을 확보해야 한다. 이를 위해, [그림 3.7.35] (a)와 같이 해석대상 시료의 직경은 동일하되, 높이의 5배에 해당하는

측벽 경계면(Cylindrical wall)을 생성하여 본 연구를 통해 개발한 3차원 입도분포 모델링 알고리즘 과정을 통해 최종 간극률을 만족하도록 계산된 각 직경에 해당하는 입자들을 확장 공간 내에 생성하였다. 프로그램의 특성 상, 측벽 경계면(Cylindrical wall)은 Radial 방향으로 확대, 축소가 불가능하므로 해석대상 시료의 직경은 그대로 적용하고 경계면의 높이 증가만으로 초기 경계면을 생성하였다.

이러한 과정을 통해 확장된 경계면 내에 개별입자들의 생성이 완료되면 상부 경계면(Top wall)을 하강시키기 전에 중력에 의해 입자들을 자유낙하를 시킨다. 이는 경계면 하강으로 인한 개별 입자간의 불평형력이 급격히 증가되는 것을 방지하기 위함으로써, 이 때 중력의 크기는 해석 시간의 단축을 위해 다소 큰 값을 적용하여 자유 낙하시키도록 한다. 그 다음 [그림 3.7.35] (b)와 같이 상부 경계면을 해석대상 시료의 높이에 도달할 때까지 하강시킨다. 본 연구에서는 시료 높이의 5배에 해당하는 초기 경계면을 생성하였으므로 상부 경계면이 초기 경계면 높이의 20%인 지점까지 하강하였을 때 경계면 이동을 멈추도록 모델링하였다. 또한 상부 경계면의 하강이 끝나고 나면 servo-mechanism을 이용한 측벽 경계면에 작용하는 구속압의 정확도를 위해 [그림 3.7.35] (c)의 H_{sample} 상부에 남아있는 측면 경계면을 제거하도록 하였다. 이러한 과정을 통해 최종적으로 시험 대상시료와 동일한 정해진 영역 내에 개별입자들이 경계면 이탈 없이 특정 간극률과 입도분포 조건을 만족하는 초기 개별요소를 생성할 수 있었다.



(a) Ball generation (b) Move the top wall

(c) Densification (d) Completion

[그림 3.7.35] 초기 개별 요소 생성기법

(다) 대형삼축압축시험 모델링

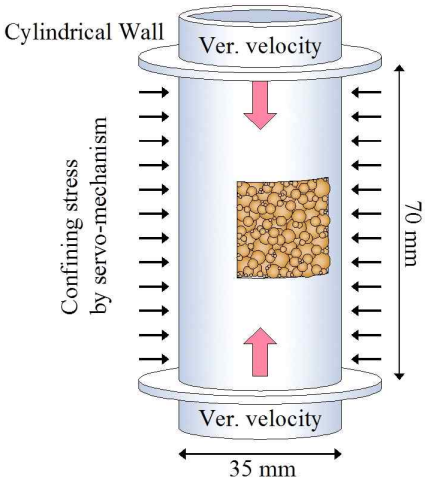
락필 재료와 같은 대입경 조립재료를 대상으로 하는 대형 삼축압축시험을 실제 3차원 간극률 및 입도분포를 고려한 개별요소 수치모델링을 수행하였다. [그림 3.7.36]에서 보듯이, 해석 대상의 경계면은 해석 시간의 단축을 위해 실내시험에 사용한 시료 크기의 약 10%인 35mm × 70mm 크기로 축소하여 생성하였으며, 일반적인 삼축압축시험과 같이 등방구속응력을 적용하기 위한 실린더형 경계

면과 축하중을 재하하기 위한 상·하부의 경계면으로 구성하였다.

실내시험 결과를 근거로 본 해석에 적용한 최종 개별입자들의 생성 개수 및 최대·최소 반경, 간극률, 단계별 구속응력 등의 해석 조건들은 [표 3.7.6]과 같다.

[표 3.7.6] 초기 개별요소의 개수 및 구속응력 조건

Number of particles	Ball radius		Porosity, n
	Rmin	Rmax	
10,988	1.0 mm	19.1 mm	0.23
Confining stress by Servo-Mechanism			
196 kPa , 392 kPa , 588 kPa			



[그림 3.7.36] 대형 정적 삼축압축시험 수치모델링

입자와 경계면을 생성한 뒤, 해석 과정 중 현장 응력상태를 고려한 임의의 구속압을 일정하게 유지시키기 위해 경계면의 속도와 시료내부의 반력을 자동 조절하는 servo-mechanism을 적용하였다. 또한 PFC 프로그램에서는 직접적인 하중 재하가 불가능하므로 상부의 경계면을 임의의 속도로 이동시켜 경계면과 접촉하고 있는 개별입자들의 반력을 측정하는 방식으로 축하중을 재하 하였다.

개별요소법을 이용한 해석에서 해석 대상의 전체적인 거동을 적정하게 표현할 수 있는 미시 물성치의 산정은 매우 중요한 과정이다. 본 연구에서도 기 수행된 대형 삼축압축시험으로부터 특정 구속압 조건에 대한 임의의 미시 물성치들을

적용한 해석 결과와 실내시험 결과가 유사한 경향을 나타낼 때까지 미시 물성치들을 변화시켜가며 해석을 반복하였다.

일반적으로 응력-변형 거동에 가장 큰 영향을 주는 미시 물성치는 전단강성과 법선강성의 비와 마찰계수이다(Cundall, 1979). 수차례의 trial and error를 통해 분석한 결과, 전단강성과 법선강성의 비인 k_s/k_n은 탄성계수의 크기에 영향을 주고, 마찰계수 μ는 응력-변형율 곡선의 첨두강도 크기에 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

이러한 과정을 통해 최종적으로 산정된 unbonded model의 적정 미시 물성치는 다음의 [표 3.7.7]과 같다. [표 3.7.7]의 미시 물성치들을 이용하여 모든 조건은 동일하게 적용하되, 구속압을 달리하여 해석을 수행하고, 그 결과를 실내시험의 결과와 비교, 분석하였다.

[표 3.7.7] Unbonded model에 대한 미시물성치(평화의 댐)

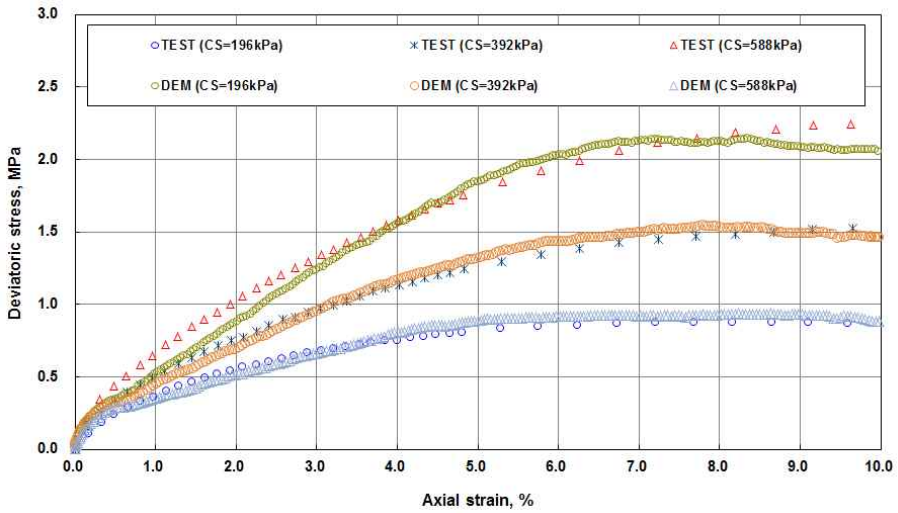
Micro parameter	Value
Density, $\rho(kg/m^3)$	2,150
Normal stiffness, $k_n(N/m)$	7.0×10^5
Shear stiffness, $k_s(N/m)$	2.4×10^5
Friction coefficient, μ	5.0
Damping coefficient	0.941
Wall stiffness, $k_w(N/m)$	9.8×10^4

(3) 수치모델링 결과

[그림 3.7.37]은 3차원 특정 입도분포를 고려하여 대형 삼축압축시험의 응력-변형율 관계를 모델링한 결과와 실내시험 결과를 비교한 것이다. 미시 물성치 산정은 3가지 구속압 조건인 196kPa, 392kPa, 588kPa 중, 392kPa 조건에 대한 실내시험 결과와의 비교를 통해 가장 유사한 경향을 보이는 값을 선택하였고, 결정된 미시 물성치를 적용하여 나머지 구속압 조건에 대해 개별요소해석을 수행하여 그 결과를 각각의 실내시험 결과와 비교하였다.

수치 모델링 결과에서 구속압이 증가함에 따라 약 6~7% 변형율 이후부터 약

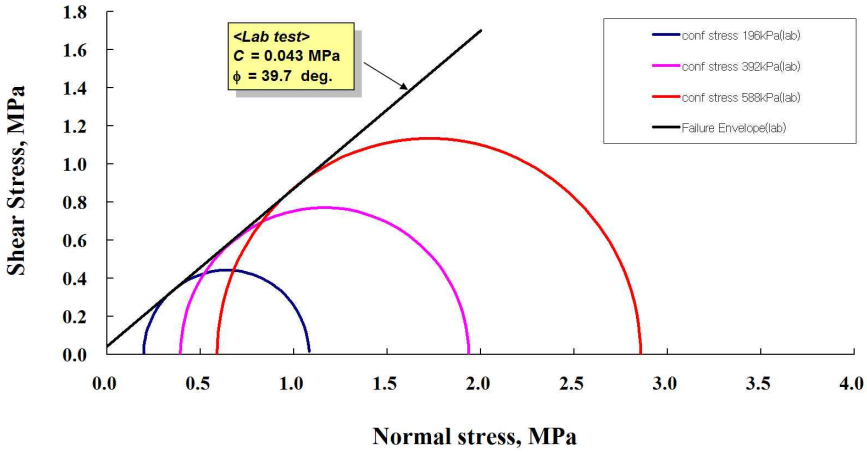
간의 응력연화 현상이 보이기는 하지만 전체적으로 봤을 때, 축변형율 10%까지의 실내시험 결과와 개별요소법을 이용한 결과를 비교해 본 결과, 초기 탄성계수 및 최대 축차응력을 비롯해 각각의 구속압 조건하에서 PFC3D를 이용한 개별요소해석 결과는 실내 대형삼축압축시험 결과의 전체적인 응력-변형율 거동과 매우 유사한 예측 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.



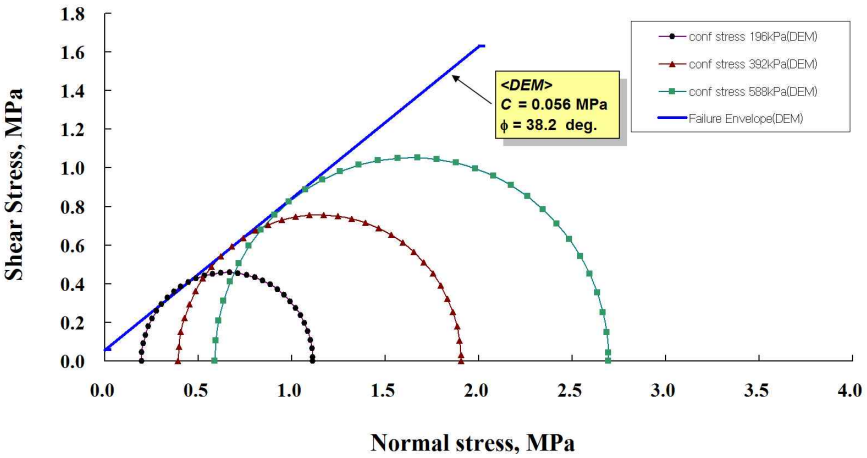
[그림 3.7.37] 대형 정적 삼축압축시험의 3차원 개별요소 수치모델링 결과

따라서 이러한 결과는 특정 구속압에 대한 실내시험 결과와의 비교를 통해 산정된 적정 미시 물성치를 적용하고, 대상 재료의 간극률, 입도 등의 초기 조건만 동일하다면 특정 입도분포를 고려한 개별요소해석을 통해 다양한 구속응력 조건 및 경계 조건에 대한 전체적인 거동 예측이 가능하다는 것을 의미한다.

또한 [그림 3.7.38], [그림 3.7.39]는 응력-변형율 곡선으로부터 각 구속압에 대한 첨두 강도를 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴포락선 작성한 것이다. [그림 3.7.38]의 실내시험을 통해 구한 점착력 0.043MPa, 내부마찰각 39.7°와 [그림 3.7.39]의 수치모델링을 통해 산정한 점착력 0.056MPa, 내부마찰각 38.2°의 강도정수를 비교해 볼 때 상당히 유사한 결과를 나타내었다.



[그림 3.7.38] 실내시험에 대한 Mohr circle



[그림 3.7.39] PFC3D 해석을 통한 Mohr circle

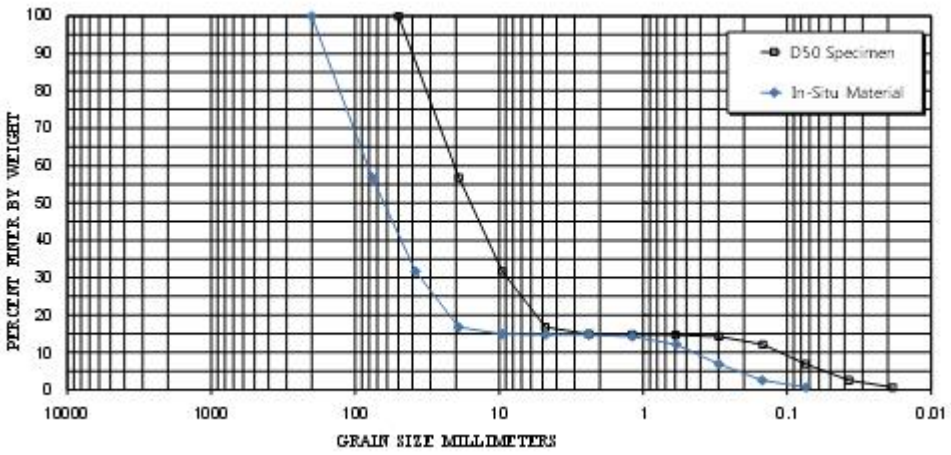
다. 대형 정적 삼축압축시험-2

(1) 실내시험 결과

3차원 개별요소법을 이용한 실내시험의 수치 모델링을 위해 평화의 댐 건설용 락필 재료와 입도분포가 다소 다른 재료에 대한 대형 삼축압축시험을 수행하였다. 시험에 사용된 재료는 단양수중보 건설현장의 하상 지반재료로서 주로 하상 자갈 및 모래질로 구성된 재료이며, 재료와 입도분포는 [그림 3.7.40]과 같다. 실제 시험에 사용된 입도분포는 현장시료 원입도분포의 재료에 대해 최대 입경 50mm의 상사입도로 시편을 제작하여 시험을 수행하였으며, 공시체는 건조단위중량 17 kN/m^3로 제작되었다.

대형삼축시험기 본체에 공시체의 세팅을 완료한 후에 삼축셀에 물을 공급하여 밀폐한 후 약 40kPa의 저압 하에서 충분히 시편 내부에 물이 찰 수 있도록 통수시켜 포화하였으며, B계수가 95%이상일 때 완전 포화된 것으로 간주하였다.

시험은 3개의 대형 원주형 공시체(직경 300mm ×높이 620mm)를 75kPa, 150kPa, 300kPa의 3가지 구속압 하에서 3mm/min(약 0.48%/min)의 속도로 배수전단시험(CD)을 실시하였다. 대형삼축시험의 경우 전단속도는 일반적으로 0.1~1.0% 정도로 하고 있으며, 전단 시 과잉간극수압이 발생할 우려가 있는 경우에는 0.1%/min의 속도를 채택하고 있다(일본 토질공학회, 1992).



[그림 3.7.40] 단양수중보 하상지반재료 입도분포 및 시편제작 입도분포



(a) 단양수중보 재료 Ⅰ　　(b) 단양수중보 재료 Ⅱ

[그림 3.7.41] 단양수중보 지반재료 사진

단양 수중보 하상 자갈 및 지반재료에 대하여 대형 삼축압축시험을 실시하고 시험 결과를 바탕으로 개별요소 수치모델링을 수행하였다. 응력-변형율 곡선 및 강도정수 산정을 위한 Mohr-circle에 대한 수치모델링 결과를 다음장에 실내시험 결과와 비교하여 나타내었다.

(2) 초기 3차원 개별요소 생성 및 수치모델링

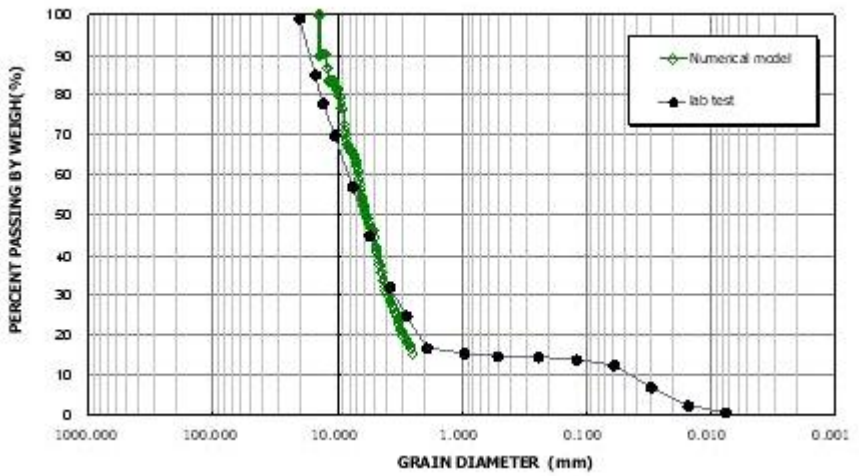
단양 수중보 건설재료에 대한 대형 삼축압축시험의 3차원 개별요소 수치 모델링 과정은 앞서 수행한 평화의 댐 건설에 사용된 락필 재료에 대한 수치 모델링 과정과 동일하다.

해석 대상의 경계면은 해석 시간의 단축을 위해 실내시험에 사용한 시료 크기의 약 10%인 30mm × 62mm 크기로 축소하여 생성하였으며, 일반적인 삼축압축시험과 같이 등방구속응력을 적용하기 위한 실린더형 경계면과 축하중을 재하하기 위한 상·하부의 경계면으로 구성하였다.

락필 재료뿐만 아니라 대입경 조립재료의 입도분포는 개별요소 수치모델링에 있어서 강도 및 변형 특성 파악에 매우 중요한 조건이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 3차원 입도분포 모델링 기법을 이용하여 입도분포곡선 상의 특정 입경에 해당하는 각각의 개별입자의 개수를 구하고, 계산된 개수만큼 지정된 시료의 공간 내에 개별입자들을 생성하여 각 입자들의 입경을 직접 조정하는 방식을 통해 초기 개별입자들을 생성하였다.

또한 마찬가지로 입자를 생성하는 과정에서 d_i 입경과 d_{i-1} 입경 사이에서 난수 발생기법을 통해 입자를 생성하고, 주어진 입도분포곡선을 보다 세분화하여 모델링하여 더욱 정확한 입도분포를 형성할 수 있었다.

3차원 입도분포 모델링 기법을 통한 수치모델링 결과와 대형 삼축압축시험에서 사용된 재료의 입도분포를 [그림 3.7.42]에 비교하여 나타내었다. PFC3D를 통한 특정 입도분포의 모델링을 통해 실제 시료의 입도 및 간극률을 수치모델링에 그대로 반영하여 전체적인 거동 해석이 가능함을 알 수 있다.



[그림 3.7.42] 3차원 입도분포 모델링 결과(단양 수중보)

본 연구에서는 특정 입도분포를 만족하도록 다양한 직경의 입자들로 구성된 초기 개별요소 생성 시, 입자간의 과도한 중첩과 그로 인한 입자들의 경계면 이탈을 방지하기 위해 경계면 확장 및 이동에 의한 초기 개별요소를 생성하였다.

입자와 경계면을 생성한 뒤, 해석 과정 중 현장 응력상태를 고려한 임의의 구속압을 일정하게 유지시키기 위해 경계면의 속도와 시료내부의 반력을 자동 조절하는 servo-mechanism을 적용하였다. 또한 PFC 프로그램에서는 직접적인 하중 재하가 불가능하므로 상부의 경계면을 임의의 속도로 이동시켜 경계면과 접촉하고 있는 개별입자들의 반력을 측정하는 방식으로 축하중을 재하 하였다.

최종적으로 산정된 unbonded model의 적정 미시 물성치는 다음의 [표 3.7.8]와 같다. [표 3.7.9]의 미시 물성치들을 이용하여 모든 조건은 동일하게 적용하되, 구속압을 달리하여 해석을 수행하고, 그 결과를 실내시험의 결과와 비교, 분석하였다.

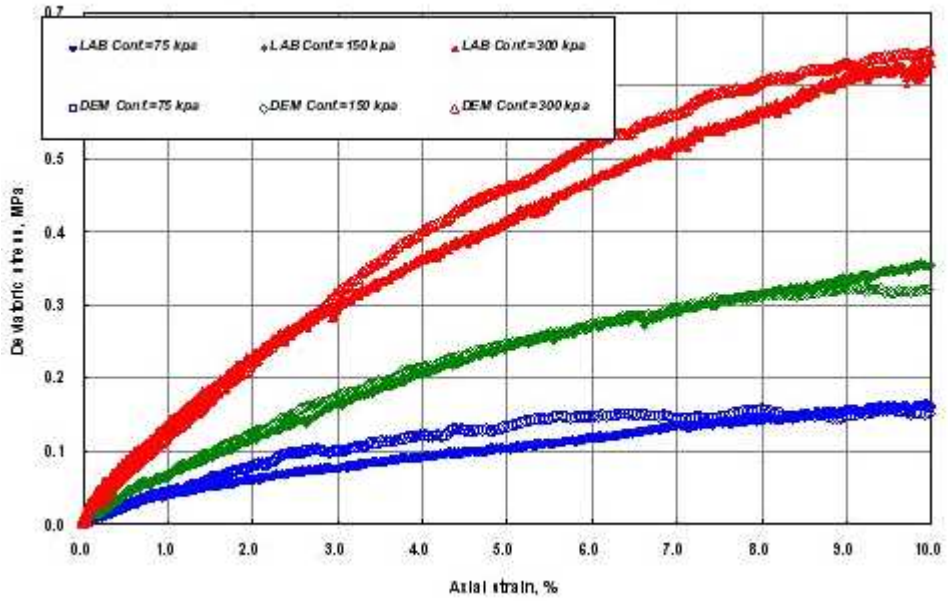
[표 3.7.8] Unbonded model에 대한 미시물성치(단양 수중보)

Micro parameter	Value
Density, $\rho(kg/m^3)$	2,150
Normal stiffness, $k_n(N/m)$	3.0×10^5
Shear stiffness, $k_s(N/m)$	1.5×10^4
Friction coefficient, μ	3.0
Damping coefficient	0.961
Wall stiffness, $k_w(N/m)$	9.0×10^4

(3) 수치모델링 결과

[그림 3.7.43]은 3차원 특정 입도분포를 고려하여 대형 삼축압축시험의 응력-변형율 관계를 모델링한 결과와 실내시험 결과를 비교한 것이다. 미시 물성치 산정은 3가지 구속압 조건인 75kPa, 150kPa, 300kPa 중, 150kPa 조건에 대한 실내시험 결과와의 비교를 통해 가장 유사한 경향을 보이는 값을 선택하였고, 결정된 미시 물성치를 적용하여 나머지 구속압 조건에 대해 개별요소해석을 수행하여 그 결과를 각각의 실내시험 결과와 비교하였다.

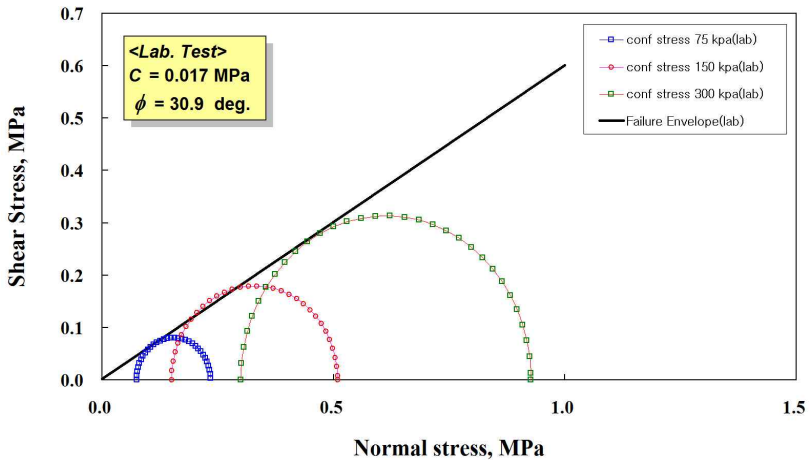
수치 모델링 결과에서 각각의 구속압 조건에서 10% 변형율까지 증감함에도 응력 연화 현상이 거의 나타나지 않았다. 축변형율 10%까지의 실내시험 결과와 개별요소법을 이용한 결과를 비교해 본 결과, 초기 탄성계수 및 최대 축차응력을 비롯해 각각의 구속압 조건하에서 PFC3D를 이용한 개별요소해석 결과는 실내 대형 삼축압축시험 결과의 전체적인 응력-변형율 거동과 비교적 유사한 예측 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.



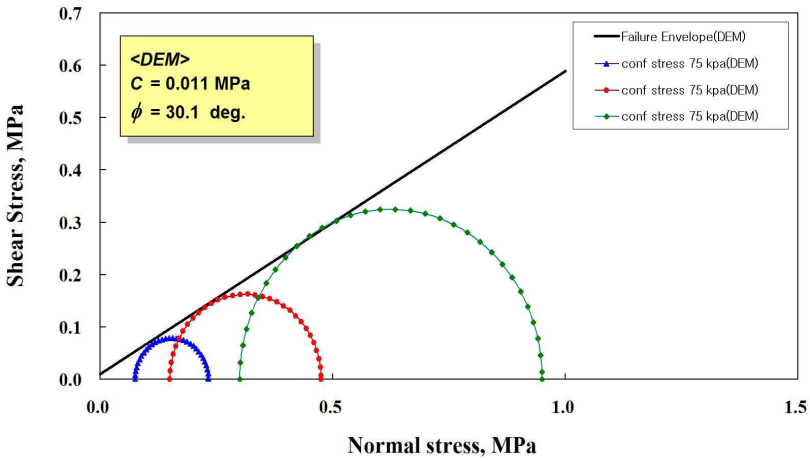
[그림 3.7.43] 대형 정적 삼축압축시험의 3차원 개별요소 수치모델링 결과

따라서 이러한 결과는 특정 구속압에 대한 실내시험 결과와의 비교를 통해 산정된 적정 미시 물성치를 적용하고, 대상 재료의 간극률, 입도 등의 초기 조건만 동일하다면 특정 입도분포를 고려한 개별요소해석을 통해 다양한 구속응력 조건 및 경계 조건에 대한 전체적인 거동 예측이 가능하다는 것을 의미한다.

또한 [그림 3.7.44], [그림 3.7.45]는 응력-변형율 곡선으로부터 각 구속압에 대한 첨두 강도를 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴포락선 작성한 것이다. [그림 3.7.44]의 실내시험을 통해 구한 점착력 0.017MPa, 내부마찰각 30.9°와 [그림 3.7.45]의 수치모델링을 통해 산정한 점착력 0.011MPa, 내부마찰각 30.1°의 강도정수를 비교해 볼 때 상당히 유사한 결과를 나타내었다.



[그림 3.7.44] 실내시험에 대한 Mohr circle



[그림 3.7.45] PFC3D 해석을 통한 Mohr circle

라. 대형 동적 삼축압축시험-1

(1) 실내시험 결과

반복재하 삼축압축시험 방법은 국내의 관련기준이 없는 관계로 ASTM D3991-91(1996) 및 JGS 0542-2000을 참고하여 실험하였다. 반복하중의 재하방법은 하중제어 방법을 적용하였으며, 정적 압밀배수시험과 마찬가지로 3개의 구속압력 196, 392, 588 kpa에 대하여 각각 별개의 공시체를 작성하여 시험 하였다. 반복하중을 가하는 동안에는 배수밸브를 닫아 비배수 조건으로 시험하였고, 반복재

하 중 공시체에 발생하는 변위는 공시체의 Cap에 LVDT를 설치하여 측정하였으며, 10-6~10-2%까지 전단변형율이 발생하도록 재하중의 크기 및 단계를 조절하였다. 다음의 [표 3.7.9]에서 본 연구에서 적용한 반복삼축압축시험의 조건을 나타내었다.

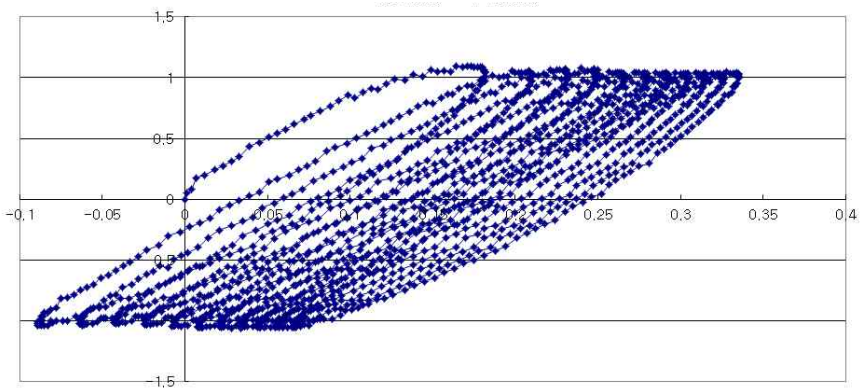
[표 3.7.9] 대형 반복삼축압축시험 조건

시료	공시체크기	최대입경	구속압	밀도
화강암	300mm×620mm	50.8mm	196, 392, 588kpa	2.152t/m^3
초기 간극비	재하파형	재하 주파수	샘플링 주파수	배수조건
0.246	sine파	0.2Hz	30Hz(150point/cycle)	배수

실내 반복재하시험의 결과는 [그림 3.7.46]과 같이 각각의 구속압에 대한 재하단계별 편진폭 축변형율(ϵ) - 편진폭 축응력(σ_d) 이력곡선을 작성하고 이력곡선의 기울기인 등가탄성계수와 에너지 소산정도에 따른 감쇠정수를 산정한다. [그림 3.7.46]은 대표적으로 구속압 392kPa, 재하단계 10단계의 하중에 대한 이력곡선을 나타낸 것으로 총 18단계의 하중에 해당하는 각각의 이력곡선을 얻을 수 있다.

196, 392, 588kPa의 각 구속압에 대한 재하단계 별 이력곡선들로부터 산정된 등가탄성계수를 프아송비 0.33을 적용하여 등가전단탄성계수를 구하고, 편진폭 축변형율로부터 전단변형율을 산정하여 전단변형율 - 전단탄성계수 관계 그래프를 작성하였다.

실내시험 결과를 바탕으로 [그림 3.7.46]의 그래프와 같이 구속압 392kPa, 재하단계 10단계의 이력곡선 결과를 기준으로 미시물성치를 결정한 후, 나머지 재하단계 및 구속압에 대한 반복삼축시험의 수치모델링을 하였다.

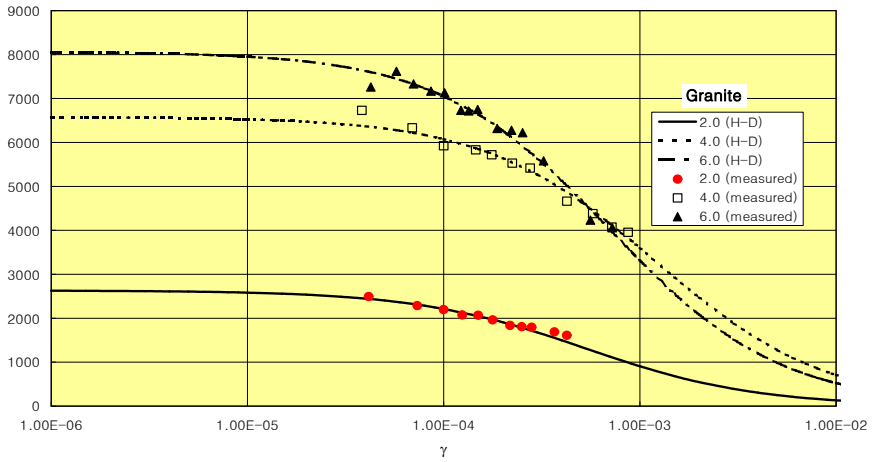


[그림 3.7.46] 구속압 392kPa에 대한 이력곡선

구속압 196, 392 및 588 kPa에 대하여 18단계의 반복재하시험 결과, 화강암 시료는 [그림 3.7.47]과 [표 3.7.10]에 나타낸 바와 같이 전단변형율 γ=3.8×10-5 ~ 4.3×10-5의 범위에서 최대전단탄성계수 G_{max}는 2631.6 ~ 8064.5 kg/cm2, 최대감쇠정수 h_{max}는 18.0 ~ 24.3%의 범위로 나타났으며, 구속압이 증가할수록 전단탄성계수는 증가하는 것으로 나타났다. 최대전단탄성계수 산정 시 Poisson비는 0.3을 적용하였다.

[표 3.7.10] 반복 삼축압축시험을 통한 동적물성치 결과

구속압	전단변형율의 범위	최대전단탄성계수 G_{max} (kg/cm^2)	최대감쇠정수 h_{max} (%)
196 kPa	$4.1\times10^{-5}\sim4.2\times10^{-3}$	2631.6	21.6
392 kPa	$3.8\times10^{-5}\sim8.7\times10^{-3}$	6578.9	30.8
588 kPa	$4.3\times10^{-5}\sim7.2\times10^{-3}$	8064.5	27.4



[그림 3.7.47] 화강암에 대한 G vs logγ

(2) 초기 3차원 개별요소 생성 및 수치모델링

대입경 조립재료의 동적물성치 산정을 위한 대형반복삼축압축 시험 결과를 바탕으로 개별요소 기반의 PFC3D을 이용하여 반복삼축시험의 수치모델링 기법을 개발하였다.

정적 대형삼축압축시험을 수치모델링하는 과정에서 적용한 3차원 입도분포 생성 기법과 초기 요소생성 기법 등은 반복삼축시험의 수치모델링에도 그대로 적용하였으며 각각의 구속압을 가하기 위해 servo-mechanism을 적용하였다.

단, 대형 반복삼축압축시험은 정적 삼축압축시험과 달리 미소변형율 시험이기 때문에 응력 - 변형율 관계가 비선형을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 입자와 입자, 입자와 경계면 사이에 적용되는 구성 모델을 선형탄성 모델보다는 미소변형율 시험을 해석하는데 보다 적합한 비선형 Hertz-Mindlin 모델을 적용하여 반복삼축시험을 수치 모델링하였다.

Hertz-Mindlin 모델은 비접착 재료의 해석에서만 적용이 가능하므로 시험 시료를 비접착 재료로 가정하고 calibration 과정을 통해 적정 미시 물성치를 결정하였다. 구성모델만 바뀌었을 뿐 나머지 해석 과정은 정적 삼축압축시험과 동일하며 단지 재하의 형태만 반복재하의 형태로 모델링 하였다.

(가) Hertz-Mindlin Model 적용 및 미시물성치 산정

일반적으로 지반구조물 시공 시 실제 지반이 거동하는 변형율은 0.1%~1% 이하임이 보고되고 있다. 이러한 중간변형율 이하에서는 변형율이 증가함에 따라 탄성계수는 감소하고 감쇠정수는 증가하는 비선형 거동을 나타내므로 지반과 토류구조물의 보다 신뢰성 있는 응력-변형 해석을 위해서는 이러한 지반의 비선형적인 변형특성을 고려해야 한다.

Hertz-Mindlin 모델 이론에 의한 비선형 접촉 방정식은 주로 동적 거동을 수치적으로 표현하기 위해 미소 변형율 시험에 주로 사용되었다. 전술한 바와 같이 대형 반복삼축압축시험은 변형율의 범위가 10-3~10-1%의 범위를 갖는 미소변위 삼축시험으로써 이러한 미소 변형율 범위에서는 응력-변형 관계가 비선형적인 관계를 나타낸다. 따라서 이러한 미소 변위의 반복삼축압축시험을 수치모델링함에 있어 선형탄성 모델보다 Hertz-Mindlin 모델이 보다 합리적이라고 판단되어 이 구성모델을 적용하고 PFC3D로 모델링하였다.

두 입자 사이의 접촉점에서의 법선 방향의 힘, F_i^n은 [식 3.7.37]과 같이 법선 방향의 상대적인 변위, u_n으로부터 직접적으로 구할 수 있다. [식 3.7.37]의 K^n은 [식 3.7.9]으로부터 계산되며, 선형탄성 모델과 달리 전단탄성계수, G와 프아송비, ν이 미시 물성치로 적용된다.

$$F_i^n = K^n \cdot (u_n)^{3/2} \qquad \text{[식 3.7.37]}$$

여기서, 두 입자 사이의 상대적인 변위로 표현되는 u_n은 접촉하고 있는 두 입자의 반경을 더하고, 두 입자의 중심간 거리를 뺀 값으로 법선방향의 중첩된 거리를 나타낸다. 또한 접촉하고 있는 두 입자를 대표하는 입자 반경 $\tilde{R}$은 [식 3.7.11]과 같이 나타낼 수 있다.

접촉점에서의 전단력은 법선 방향의 힘보다 계산 과정이 다소 복잡하다. 계산과정은 [식 3.7.10]과 같이 법선방향의 힘에 따른 전단강성, k_s를 구하고 전단변위, Δu_s와의 관계식인 [식 3.7.38]로부터 나타낼 수 있다.

$$\Delta F_s = k_s \cdot \Delta u_s \qquad \text{[식 3.7.38]}$$

이러한 비선형 Hertz-Mindlin 모델을 적용하여 정적 삼축압축시험에서 수행한 방법과 동일한 방법으로 적정 미시 물성치를 산정하였다. Hertz-Mindlin 모델의 미시 물성치는 선형탄성 모델에서 적용되지 않았던 전단탄성계수와 프아송비가 미시 물성치로 적용되며 이 두 가지의 물성치를 통해 입자와 입자, 입자와 경계면 사이의 상호거동을 모델링 할 수 있다.

반복 재하를 모델링하는 과정에서 또 하나의 중요한 변수는 재하속도이다. 개별요소법의 특성 상, 경계면에 작용하는 축차응력은 경계요소와 접촉하고 있는 개별입자들과의 접촉 합력으로 산정되기 때문에 압축력 재하 시에는 큰 영향이 없지만, 인장력 재하 시 재하속도를 빨리하면 경계면과 입자들과의 접촉점의 개수가 급격히 줄어들어 경계면에 작용하는 축차응력 또한 급격히 감소하는 현상이 발생한다. 따라서 급격한 응력 감소 현상을 방지하기 위해 정적 삼축시험 시 적용한 재하속도의 10%에 해당하는 재하속도를 적용하여 적정 미시 물성치를 산정하는 것이 보다 효과적이다.

본 연구에서는 대표 구속압 392kPa에 대하여 10회의 반복하중을 가하여 각각의 축차응력에 해당하는 Hysteresis loop curve를 기준으로 [표 3.7.11]과 같은 적정 미시 물성치를 산정하였고, 나머지 구속압에 대하여 각각의 이력 곡선을 수치적으로 모델링 하였다.

[표 3.7.11] Micro parameters for Hertz-Mindlin model

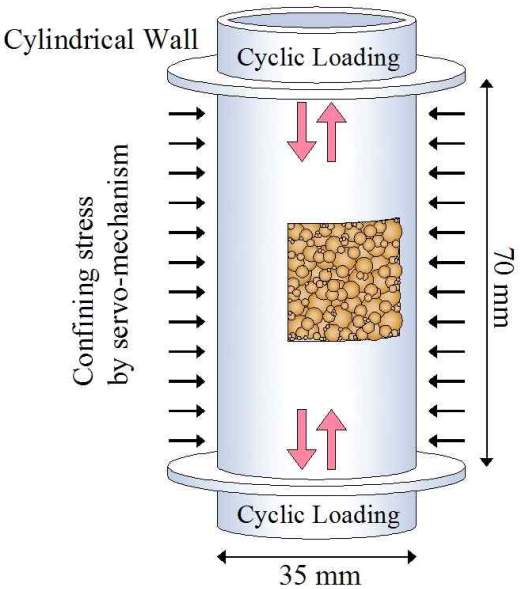
Micro parameter	Value
Density, $\rho(kg/m^3)$	1850
Shear modulus, $G\ (N/m^{2)}$	9.0×10^7
Poisson ratio, ν	0.25
Damping coefficient	0.985

(나) 반복재하시험 모델링

정적 삼축시험과 달리 반복 삼축시험은 대상 시료에 축방향 재하와 제하를 반복적으로 수행함으로써 축방향 압축변형과 축방향 인장변형이 반복적으로 발생한다. 이러한 반복 과정을 통해 응력과 변형율의 관계를 Hysteresis loop 형태로 나타낼 수 있으며, 곡선이 만들어내는 기하학적인 형상을 통해 등가탄성계수 및 전단탄성계수, 감쇠정수 등의 동적 물성치를 산정 할 수 있다.

따라서 재하단계를 수치적으로 모델링하기 위해서는 우선 정적 시험과 같은 방법으로 servo-mechanism을 적용하여 구속압을 유지시킨 상태에서 상, 하부의 경계요소를 축방향 압축 및 인장 방향으로 일정 속도로 반복 이동시켜야 한다. 재하응력은 상, 하부의 경계면을 특정 속도로 이동시켜 경계요소와 접촉하고 있는 입자들의 응력을 check하고 접촉 응력이 목표하는 축차응력에 도달하면 압축에서는 인장으로 또는 인장에서는 압축으로 하중을 전환하는 과정을 10회 반복하도록 하였다.

[그림 3.7.48]은 본 연구에서 모델링 한 대형 반복삼축압축시험의 공시체를 보여주고 있으며, 정적시험과 마찬가지로 실제 공시체 크기의 약 10% 크기로 모델링하였다. 모든 응력 조건과 공시체의 크기 및 경계면의 위치는 정적시험과 동일하며 상, 하부의 경계면이 압축력과 인장력을 반복적으로 제어 가능하도록 모델링 한 것이 가장 큰 특징이다.



[그림 3.7.48] 3차원 대형 반복삼축압축시험의 모델링

(3) 수치모델링 결과

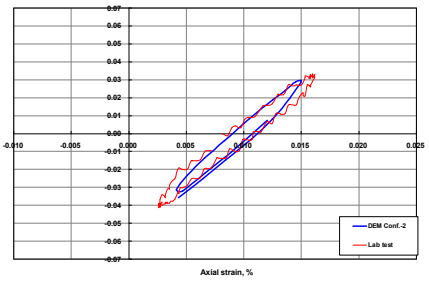
반복 삼축시험은 정적 시험과 달리 특정 구속압에 대한 여러 단계의 축차응력을 반복적으로 재하한다. 첫 번째 단계의 축차응력을 10회 반복재하하고 연속적으

로 다음 단계의 축차응력을 반복재하하는 과정으로 시험이 진행된다. 따라서 각 단계 별 축차응력에 대한 Hysteresis loop를 나타낼 수 있으며, loop의 형상을 통해 동적 물성치를 산정한다.

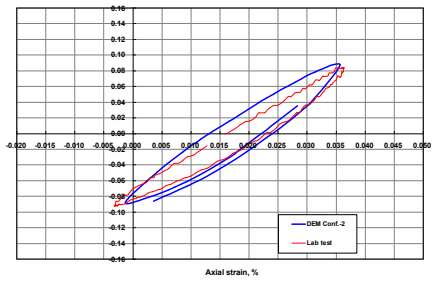
[그림 3.7.49] ~ [그림 3.7.51]은 본 연구에서 수행한 미소변위에 대한 반복삼축압축시험의 수치 모델링 결과를 실내 반복삼축시험의 결과 그래프와 비교하여 나타낸 것이다. 즉, 실내시험에서 구속압 196kPa, 392kPa, 588kPa 각각에 대하여 14단계에 해당하는 축차응력을 10회씩 반복재하 한 시험결과와 동일한 응력 조건에서 수치 모델링 한 해석결과의 마지막 loop를 비교한 것으로써 대표적인 4단계의 축차응력에 대한 그래프를 제시하였다. 앞서 서술한 바와 같이 축응력-축변형율 관계로부터 전단탄성계수 및 감쇠정수 등의 동적 물성치를 산정은 각 반복하중단계의 응력-변형율 그래프가 형성하는 loop의 기하학적인 형상을 이용하여 산정되기 때문이다.

특정 응력 조건하에서 실내 반복재하시험 결과의 마지막 loop와 개별요소법을 이용한 수치 모델링 결과의 마지막 loop가 동일한 변형율 범위 내에서 동일한 형상을 나타낸다면 이를 통해 실제 지반의 심도에 따른 동적 물성치를 예측 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실내 반복재하시험의 축응력-축변형율 곡선의 최종 loop와 수치 모델링 결과의 마지막 loop를 비교함으로써 개별요소법을 이용한 동적 물성치 산정의 적용성에 대하여 고찰하였다.

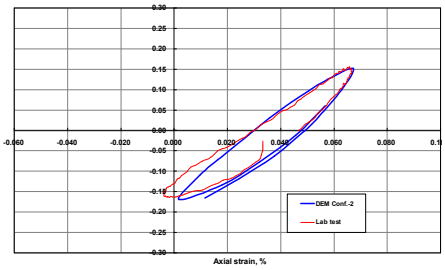
[그림 3.7.49] ~ [그림 3.7.51] 및 실내시험 결과로부터 알 수 있듯이 최소 0.001%에서 최대 0.2% 변형율의 미소 변형율 범위에서 시험이 진행되므로 이를 수치 모델링하는 과정에서 재하속도나 전단탄성계수, 프아송비, 감쇠계수 등의 미시 물성치에 따른 결과 값이 매우 예민하게 반응하였다. 또한 실내시험에서는 초기 매우 작은 축차응력에서부터 단계적으로 시험이 시작되었지만, 초기 단계의 시험결과에서 축응력과 축변형율이 너무 작은 관계로 특정 loop가 형성되지 않아 수치 모델링 대상에서 제외하였다.



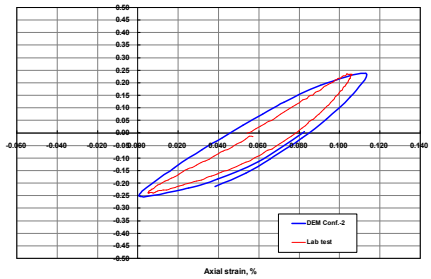
(a) Deviatoric stress = 35kPa



(b) Deviatoric stress = 85kPa

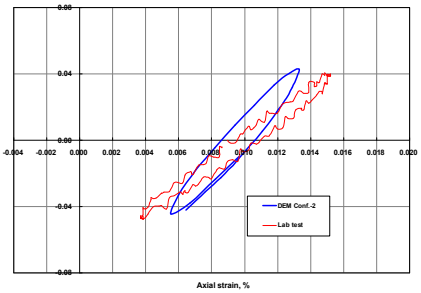


(c) Deviatoric stress = 160kPa

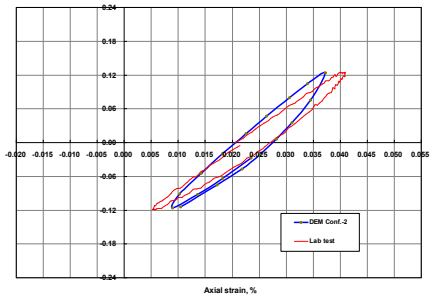


(d) Deviatoric stress = 240kPa

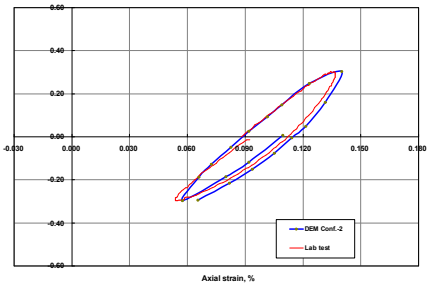
[그림 3.7.49] 구속압 196kPa에 대한 실내시험과 수치해석 결과 비교



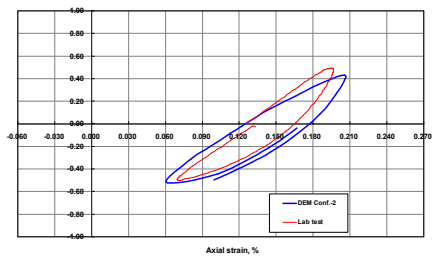
(a) Deviatoric stress = 45kPa



(b) Deviatoric stress = 125kPa

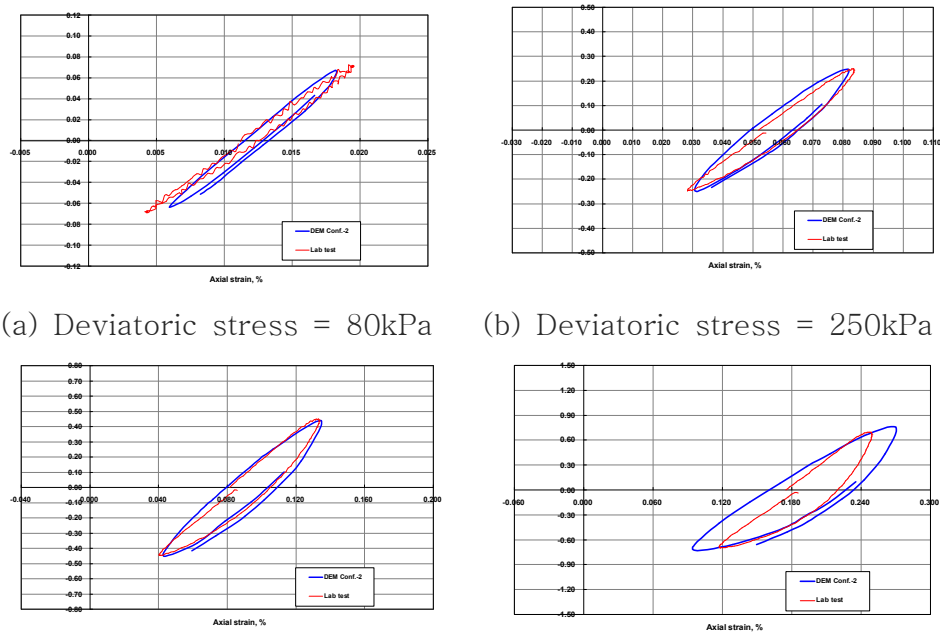


(c) Deviatoric stress = 300kPa



(d) Deviatoric stress = 490kPa

[그림 3.7.50] 구속압 392kPa에 대한 실내시험과 수치해석 결과 비교



(a) Deviatoric stress = 80kPa (b) Deviatoric stress = 250kPa

(c) Deviatoric stress = 450kPa (d) Deviatoric stress = 650kPa

[그림 3.7.51] 구속압 588kPa에 대한 실내시험과 수치해석 결과 비교

미소변위 반복삼축시험을 위한 보다 합리적인 구성모델을 선정하기 위해 적정 미시 물성치 산정을 위한 calibration 과정에서 선형탄성 강성모델과 비선형 모델인 Hertz-Mindlin 모델을 적용하여 선행 연구를 수행하였다. 그 결과, 선형모델을 적용할 경우 미소변위 범위의 비선형성을 모델링하기에는 한계가 있음을 확일 할 수 있었고, 따라서 앞선 구속압 및 축차응력에 대한 결과 그래프들은 Hertz-Mindlin 모델을 적용하여 반복삼축시험을 수치 모델링함으로써 보다 정확한 거동 예측이 가능함을 알 수 있었다.

각각의 Hysteresis loop에서 공통적으로 낮은 축차응력 단계의 초기 반복재하 과정에서는 순간적인 입자 재배열 및 초기 해석영향으로 인해 다소 큰 루프를 보이지만, 2회 반복부터는 일정한 형태의 루프를 나타내었다. 동적 물성치를 산정함에 있어 마지막 loop의 변형율 범위와 형상이 가장 중요한 정보가 되고, 해석 결과의 가시성을 위해서 수치모델링 결과는 마지막 loop만 도시하였다.

미시 물성치 산정을 위한 기준 축차응력인 160kPa (σ_3=196kPa), 300kPa (σ_3=392kPa), 450kPa (σ_3=588kPa)에서는 실내시험의 마지막 loop와 수치모델링 결과의 마지막 loop가 상당히 유사한 결과를 나타내었지만, 그 이외의 축차응력 조건

에 대한 해석에서는 loop의 형태가 다소 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다.

일반적으로 지반은 변형율이 증가함에 따라 탄성계수는 감소하고, 감쇠정수는 증가하는 비선형적인 거동을 나타낸다. 본 연구 결과에서도 알 수 있듯이 각각의 loop의 형태는 다소 차이가 나지만 점진적으로 축차응력을 증가시켜 변형율이 증가함에 따라 축응력-축변형율의 기울기인 등가탄성계수는 줄어드는 것을 알 수 있었다. 즉, 이는 Hertz-Mindlin 비선형 모델이 지반의 비선형적인 거동을 예측하는데 매우 합리적인 모델이라고 사료된다.

본 연구 결과는 정적삼축시험의 수치 모델링과 같은 방법으로 특정 구속압 조건에 대한 적정 미시 물성치를 결정하고, 대상 재료의 간극률, 입도 등의 초기 조건만 동일하다면 3차원 입도분포를 고려한 개별요소해석을 통해 다양한 구속압 조건 및 경계 조건에 대한 지반의 비선형적인 거동 예측이 가능하다는 것을 의미하고, 이를 통해 개별요소법을 이용한 PFC3D 수치모델링은 지반의 액상화 판정을 위한 상세 예측에 필요한 동적 물성치 산정에 적용 가능할 것으로 본다.

마. 대형 동적 삼축압축시험-2

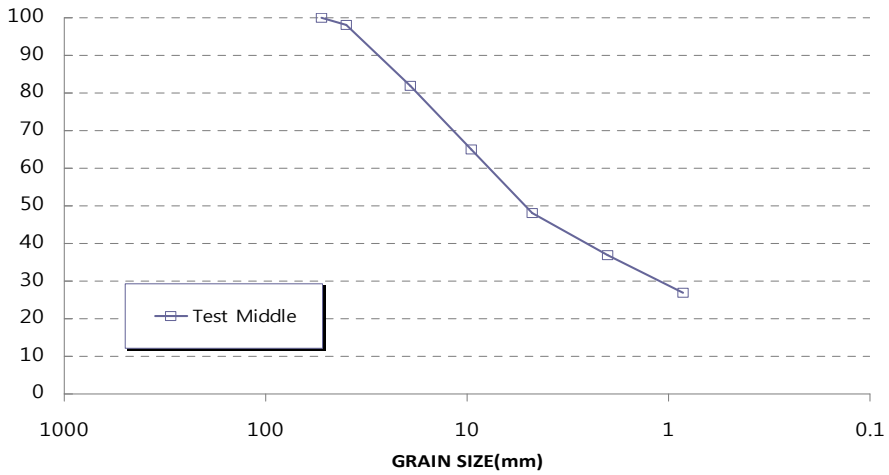
(1) 실내시험 조건

본 연구의 사용된 시험 재료는 철도 강화노반(reinforced roadbed)에 적용된 재료로써 이에 대한 동적 특성을 파악하기 위해 미소변위 반복삼축압축시험을 수행하였다.

연구에 사용된 재료의 입도는 [그림 3.7.52]와 같으며 시험 조건은 [표 3.7.12]와 같다. 시험 함수비는 다짐 시험을 통해 산정한 최적함수비로 시편을 제작하였으며, 밀도는 $21kN/m^3$으로 다짐하였다.

[표 3.7.12] 시험 조건

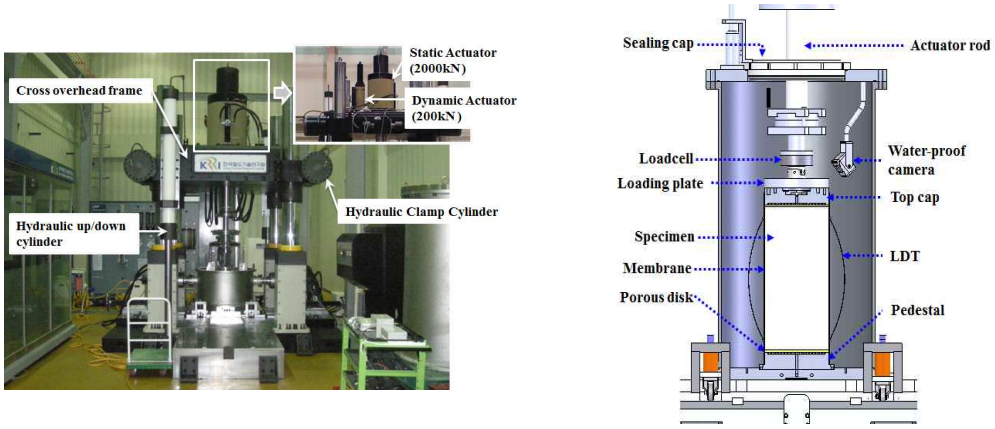
시편 번호	비중	Porosity(%)	밀도(kN/m^3)	공시체 직경/최대입경			함수비
	2.73	0.6	21	공시체 직경 300mm /입자 최대입경 40mm			OMC(7%)
SB-2-1	시험 대상	D10	D30	D50	D60	Cu	Cc
	M40-Middle	0.11	1.1	5.1	7.7	70	1.43



[그림 3.7.52] 시험 재료의 입도분포

시험은 일본 지반공학회 기준(JGS 0542-2000)을 기본으로 수행하였으며, JGS에서 제안하는 실험조건 및 순서는 다음과 같다. 먼저 대상지반의 구속, 배수조건을 최대한 반영하여 재현하고, 등방압밀 또는 이방압밀 중 시험 조건과 목적에 맞는 구속압, 배압, 축방향 압력 등을 제어한다.

등방압밀과정에서는 대상 등방압력을 작용시켜 압밀하고 1차 압밀이 종료될 때까지 압밀을 계속한다. 축방향 변형률의 축방향 응력 재하 단계별로 변화율이 0.1%/min 이하가 되는 것을 확인하며 다음 축방향 응력을 추가로 재하하며 최종 목표의 유효축방향 및 측방향 응력 조건이 만족되도록 응력 조건을 제어한다. 시험 조건을 만족하는 등방압밀 상태를 확인한 후 반복 축하중을 가한다. 하중은 변형률이 0.0001% 수준에서 0.1% 수준까지 발생할 수 있도록 하중을 단계적으로 증가시켜서 시험을 수행한다. 각 하중단계에서는 일정 진폭의 연속적인 반복축하중을 정현파로 재하하여 하중과 변위를 측정한다. 이때 주파수는 0.05~1.0Hz를 표준으로 하며 이때 각 하중단계에서는 11번의 정현파를 가한다. 각 하중단계별로 5회째와 10회째의 정현파에서 측정된 하중과 변위로 축차응력의 편진폭, 축변형률의 편진폭, 등가탄성계수(Equivalent elastic modulus), 감쇠비(Damping ratio)를 산정한다.



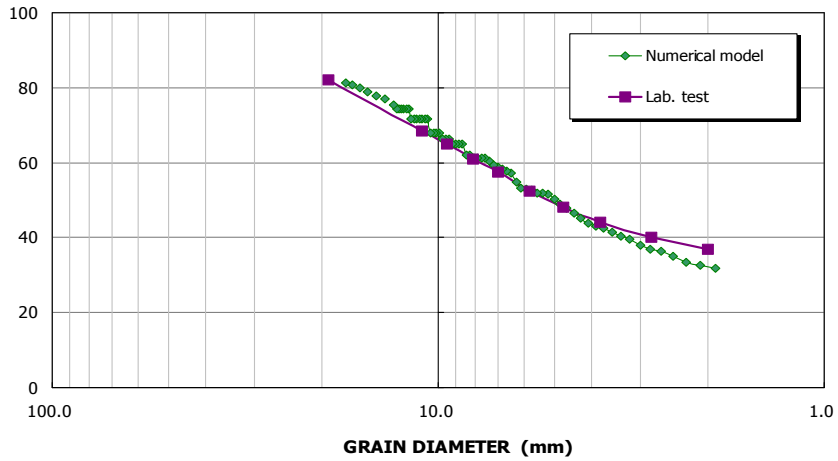
[그림 3.7.53] 대형 반복삼축압축시험 장비

(2) 초기 3차원 개별요소 생성 및 수치모델링

대입경 조립재료의 동적물성치 산정을 위한 대형반복삼축압축 시험 결과를 바탕으로 개별요소 기반의 PFC3D을 이용하여 반복삼축시험의 수치모델링 기법을 개발하였다.

정적 대형삼축압축시험을 수치모델링하는 과정에서 적용한 3차원 입도분포 생성 기법과 초기 요소생성 기법 등은 반복삼축시험의 수치모델링에도 그대로 적용하였으며 각각의 구속압을 가하기 위해 servo-mechanism을 적용하였다.

[그림 3.7.54]는 실내시험에 사용된 재료의 입도분포의 3차원 입도분포를 수치모델링 한 결과를 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 개발한 3차원 입도분포 모델링 기법을 통해 시험 재료의 입도분포와 상당히 유사한 모델링이 가능하여 연속체 해석에서 불가능한 현장 입도를 반영한 수치 모델링이 가능하다.



[그림 3.7.54] 3차원 입도분포 수치모델링 결과

단, 대형 반복삼축압축시험은 정적 삼축압축시험과 달리 미소변형율 시험이기 때문에 응력 - 변형율 관계가 비선형을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 입자와 입자, 입자와 경계면 사이에 적용되는 구성 모델을 선형탄성 모델보다는 미소변형율 시험을 해석하는데 보다 적합한 비선형 Hertz-Mindlin 모델을 적용하여 반복삼축시험을 수치 모델링하였다.

Hertz-Mindlin 모델은 비접착 재료의 해석에서만 적용이 가능하므로 시험 시료를 비접착 재료로 가정하고 calibration 과정을 통해 적정 미시 물성치를 결정하였다. 구성모델만 바뀌었을 뿐 나머지 해석 과정은 정적 삼축압축시험과 동일하며 단지 재하의 형태만 반복재하의 형태로 모델링 하였다.

본 연구에서는 대표 구속압 200kPa의 축차응력 170kPa에 해당하는 Hysteresis loop curve를 기준으로 [표 3.7.13]과 같은 적정 미시 물성치를 산정하였고, 나머지 응력 조건에 대하여 각각의 이력 곡선을 수치적으로 모델링 하였다.

[표 3.7.13] Micro parameters for Hertz-Mindlin model

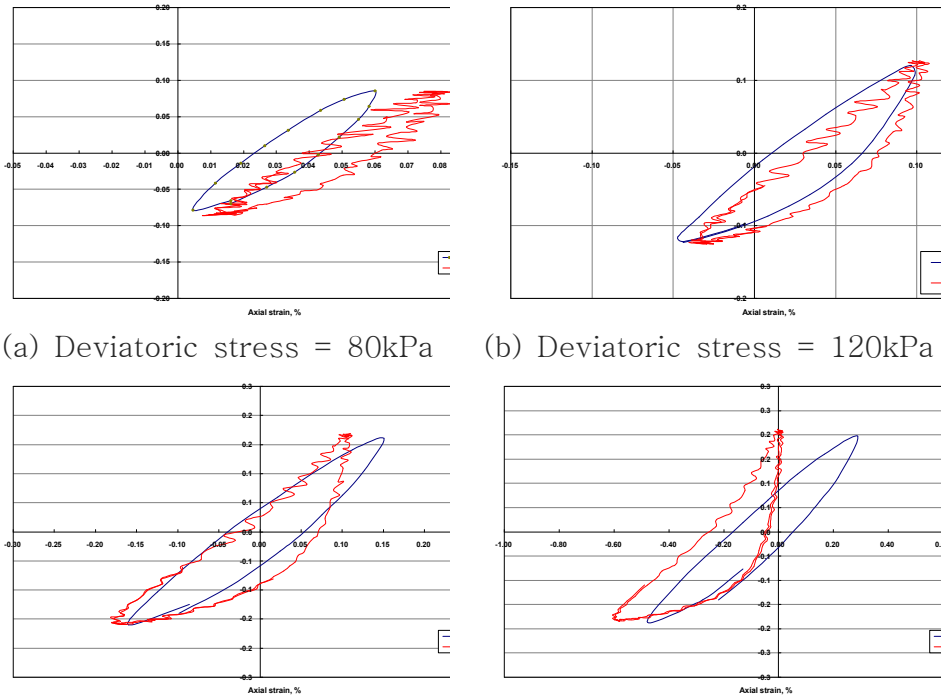
Micro parameter	Value
Density, $\rho(kg/m^3)$	1850
Shear modulus, $G\ (N/m^{2)}$	2.0×10^7
Poisson ratio, ν	0.28
Damping coefficient	0.985

(3) 수치 모델링 결과

반복 삼축시험은 정적 시험과 달리 특정 구속압에 대한 여러 단계의 축차응력을 반복적으로 재하한다. 첫 번째 단계의 축차응력을 10회 반복재하하고 연속적으로 다음 단계의 축차응력을 반복재하하는 과정으로 시험이 진행된다. 따라서 각 단계 별 축차응력에 대한 Hysteresis loop를 나타낼 수 있으며, loop의 형상을 통해 동적 물성치를 산정한다.

[그림 3.7.55]는 본 연구에서 수행한 미소변위에 대한 반복삼축압축시험의 수치모델링 결과를 실내 반복삼축시험의 결과 그래프와 비교하여 나타낸 것이다. 즉, 실내시험에서 구속압 200kPa에 대하여 단계별 축차응력을 10회씩 반복재하 한 시험결과와 동일한 응력 조건에서 수치 모델링 한 해석결과의 마지막 loop를 비교한 것으로써 대표적인 4단계의 축차응력에 대한 그래프를 제시하였다. 앞서 서술한 바와 같이 축응력-축변형율 관계로부터 전단탄성계수 및 감쇠정수 등의 동적 물성치를 산정은 각 반복하중단계의 응력-변형율 그래프가 형성하는 loop의 기하학적인 형상을 이용하여 산정되기 때문이다.

실내시험에서는 초기 매우 작은 축차응력에서부터 단계적으로 시험이 시작되었지만, 초기 단계의 시험결과에서 축응력과 축변형율이 너무 작은 관계로 특정 loop가 형성되지 않아 수치 모델링 대상에서 제외하였다.



(a) Deviatoric stress = 80kPa (b) Deviatoric stress = 120kPa

(c) Deviatoric stress = 170kPa (d) Deviatoric stress = 200kPa

[그림 3.7.55] 구속압 200kPa에 대한 실내시험과 수치해석 결과 비교

동적 물성치를 산정함에 있어 마지막 loop의 변형율 범위와 형상이 가장 중요한 정보가 되고, 해석 결과의 가시성을 위해서 수치모델링 결과는 마지막 loop만 도시하였다. 미시 물성치 산정을 위한 기준 축차응력인 170kPa (σ_3=200kPa)에서는 실내시험의 마지막 loop와 수치모델링 결과의 마지막 loop가 상당히 유사한 결과를 나타내었지만, 그 이외의 축차응력 조건에 대한 해석에서는 loop의 형태가 다소 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다.

그러나 본 연구 결과에서도 알 수 있듯이 각각의 loop의 형태는 다소 차이가 나지만 점진적으로 축차응력을 증가시켜 변형율이 증가함에 따라 축응력-축변형율의 기울기인 등가탄성계수는 줄어드는 것을 알 수 있었다.

본 연구 결과는 정적삼축시험의 수치 모델링과 같은 방법으로 특정 구속압 조건에 대한 적정 미시 물성치를 결정하고, 대상 재료의 간극률, 입도 등의 초기 조건만 동일하다면 3차원 입도분포를 고려한 개별요소해석을 통해 다양한 구속압 조건 및 경계 조건에 대한 지반의 비선형적인 거동 예측이 가능하다는 것을 의미한다.

7. 3차원 개별요소 수치모델의 스케일 영향

가. 해석모델 및 개별요소에 대한 스케일 적용

3차원 개별요소 해석의 경우, 해석요소 입경 대비 해석모델의 크기가 커짐에 따라 생성되는 개별요소수가 급격히 증가하게 되며 이는 해석 소요시간의 급격한 증가를 수반하게 된다. 그러므로 수치모델 크기 및 개별요소 입경 등을 실제에 비해 적정 비율로 축소 또는 확대시키는 것이 수치모델링의 효율성 확보차원에서 필요하게 되며, 대부분의 모델링시 이러한 방법이 사용된다.

Hainbüchner 등(2002)은 직접전단시험에 대한 2차원 개별요소 수치 모델링을 수행하는데 있어, 개별요소 직경을 실제 흙입자 직경 대비 20~40배 확대시킨 후 적용하였다. 이완호 등(2007)은 댐 코어재료의 침투그라우팅 효과를 분석하는데 있어, 흙입자와 그라우팅 입자의 직경비를 0.05~0.25로 모델링하기 위하여, 흙입자의 평균 직경을 2.46cm로 확대하였으며, 직경 30cm, 높이 60cm의 원통형 해석 경계면 내에 총 229개의 개별요소를 생성하여 수치 모델링을 수행하였다. 조남각 등(2008)은 0.5m(L)×0.25m(H)×0.5m(W) 크기의 대형 직접전단시험을 모델링하는데 있어, 해석 효율성을 위해 모델 크기를 절반으로 줄인 상태에서 2차원 해석을 수행하였다.

이렇듯 기존의 2차원 개별요소 수치 모델링에 있어서도 컴퓨터 메모리 한계 및 해석 효율성 측면에서 개별요소와 해석영역에 대한 스케일을 변화시켜가며 수치 모델링을 수행하고 있으며, 본 연구에서와 같은 3차원 개별요소 수치 모델링에서는 동일 해석영역에 생성되는 개별요소의 수가 2차원에 비해 월등히 많은 관계로 이러한 스케일 변화방법은 반드시 필요하게 된다.

본 연구에서는 가장 일반적인 수치모델 스케일 변화방법에 대하여, 각 조건별 수치 모델링을 수행하여 각 경우에 대한 응력-변형 거동 및 강도/변형 특성치 산정결과를 분석하였으며, 최종적으로 이러한 스케일 변화가 최종 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 스케일 변화는 실제 시료와 해석모델의 비율 변화, 실제 시료와 해석모델간 동일 비율 조건에서의 개별요소 입경 변화, 이 두 가지의 동시 변화 조건 등을 적용하였다.

나. 해석모델 스케일 변화

(1). 스케일 조건

실제 실내시험시의 시료크기(70㎜×140㎜)에 대하여 개별요소 수치모델의 크기를 변화시켜가며 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링을 각 구속압 조건별로 수행하였다.

실제 시료와 수치모델의 직경비($RD_{spe/mod}$)를 5.0~40.0까지 변화시키되, 개별요소는 모든 경우에 있어 최대입경 $D_{gmax}=0.35mm$, 최소입경 $D_{gmin}=0.2mm$의 동일 크기로 생성하였으며, 수치모델의 높이는 직경의 2배로 하였다. 즉, 동일한 입경조건에 대해 해석모델의 크기를 축소시켜가며 수치 모델링을 수행하였으며, 구체적 해석조건은 [표 3.7.14]와 같다.

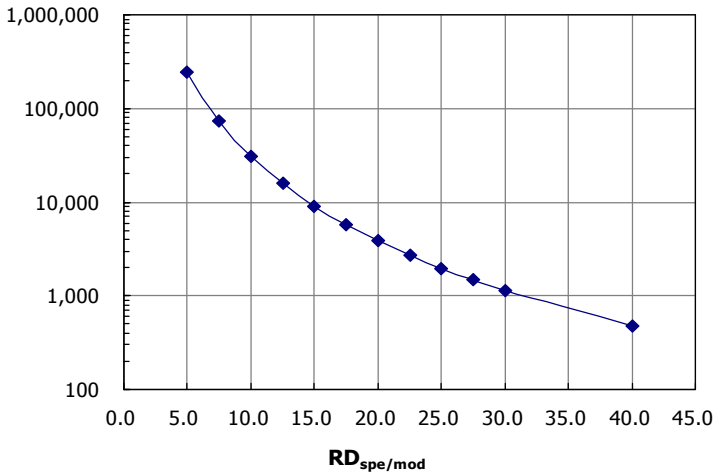
[표 3.7.14] 수치모델 스케일 변화에 대한 해석조건

Run Name	RD	Numerical model (mm)		Particle generation		D_{mod} / D_{gmax}
	spe/mod	(D)	(H)	D_{gmin} (mm)	D_{gmax} (mm)	
cn-sc-1	5.0	14.0	28.00	0.20	0.35	40.000
cn-sc-2	7.5	9.33	18.67	0.20	0.35	26.667
cn-sc-3	10.0	7.00	14.00	0.20	0.35	20.000
cn-sc-4	12.5	5.60	11.20	0.20	0.35	16.000
cn-sc-5	15.0	4.67	9.33	0.20	0.35	13.333
cn-sc-6	17.5	4.00	8.00	0.20	0.35	11.429
cn-sc-7	20.0	3.50	7.00	0.20	0.35	10.000
cn-sc-8	22.5	3.11	6.22	0.20	0.35	8.889
cn-sc-9	25.0	2.80	5.60	0.20	0.35	8.000
cn-sc-10	27.5	2.55	5.09	0.20	0.35	7.273
cn-sc-11	30.0	2.33	4.67	0.20	0.35	6.667
cn-sc-12	40.0	1.75	3.50	0.20	0.35	5.000

(2). 영향검토 결과

$RD_{spe/mod}$=5.0 일 때, 개별요소의 최대 입경은 해석모델 직경의 1/40 (D_{mod}/D_{gmax}= 40) 이었으나, 해석모델의 크기를 $RD_{spe/mod}$ = 40.0로 감소시킴에 따라 그 직경비는 1/5 (D_{mod}/D_{gmax}= 5)로 변화하게 된다. ASTM에서는 실내 삼축압축시험시 시료의 최대 입경을 공시체의 1/6 이하로 규정하고 있으며, JGS에서는 1/10 이하를 표준으로 하고 있다.

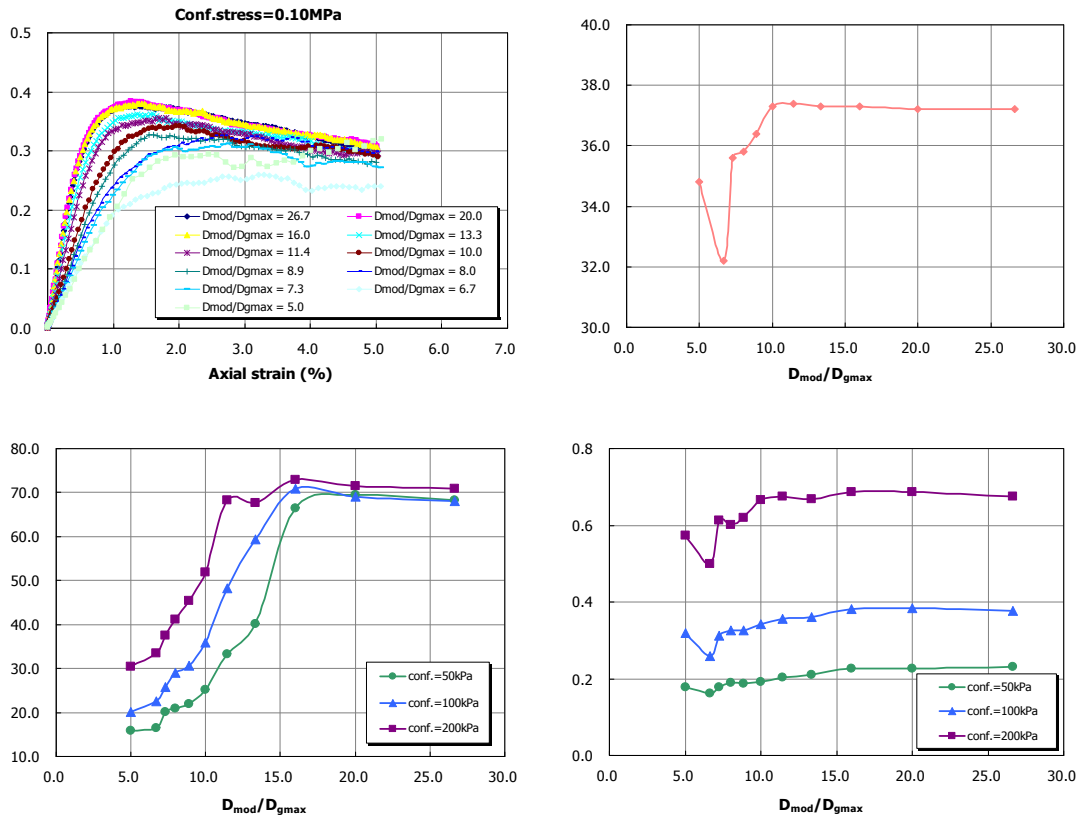
해석모델의 크기가 증가함에 따라 동일 초기 간극률 조건 n=0.38을 만족시키기 위한 개별요소수는 급격하게 증가하게 된다. [그림 3.7.56]은 해석모델의 크기에 따른 소요 개별요소수를 나타낸 것으로서, $RD_{spe/mod}$=40 조건에서 요구되는 개별요소수는 400개 이며 $RD_{spe/mod}$ = 15 부근에서 9,108개 까지 증가한다. $RD_{spe/mod}$ = 5.0에서는 245,413개의 개별요소수가 필요하게 되는데 이러한 경우는 현실적으로 수치 모델링이 불가능하게 되며, $RD_{spe/mod}$ < 10에서는 급격한 개별요소수의 증가를 확인할 수 있는 바, 적정 해석모델의 크기 설정은 해석 효율성 확보차원에서 매우 중요함을 알 수 있다.



[그림 3.7.56] 해석모델 크기에 따른 소요 개별요소수

해석모델의 크기를 변화시켜감에 따라 $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$ 값이 변화하게 된다. [그림 3.7.57]은 각 해석모델의 스케일 조건에 대하여, 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링 결과를 나타낸 것으로서, 해석모델 직경과 개별요소의 최대 입경 비율($D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$)을 기준으로 응력-변형 곡선 및 탄성계수, 최대 축차응력, 최종 강도정수 등을 비교하였다. $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$ 값에 따른 응력-변형 곡선을 살펴보면, $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$이 증가할수록 탄성계수가 증가하는 것을 알 수 있으나, $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$ > 15 에서는 일정한 탄성계수 결과를 보이고 있으며, 각 구속압 조건에서의 최대 축차응력 값도 $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$ > 10 에서는 모두 일정한 경향을 나타내고 있다. 수치시험실로서의 개별요소 방법을 활용하는데 있어 가장 중요한 최종 강도정수 결과

를 살펴보면, $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax} > 10$ 조건에서는 내부마찰각과 점착력 등이 모두 일정한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 결론적으로, 개별요소 입경의 크기를 동일하게 유지한 체, 해석모델의 크기를 줄여가게 되면 소요 개별요소수가 급격히 감소하므로 수치 모델링상의 연산량은 크게 감소하게 된다. 그러나, 이런 경우 해석모델 직경과 개별요소의 최대 입경에 대한 크기비가 점차 감소하게 되며, $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax} < 15$ 조건에서는 탄성계수에 대한 예측오차가 발생할 수 있고, $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax} < 10$ 조건에서는 점착력 및 내부마찰각의 강도정수 예측오차가 발생할 수 있는 것으로 나타났다.



[그림 3.7.56] 해석모델 스케일 조건별 개별요소 수치 모델링 결과

다. 개별요소 스케일 변화

(1). 스케일 조건

직경 3.5mm, 높이 7.0mm 크기의 수치모델을 대상으로 실제 시료와 수치모델의 직경비 $RD_{spe/mod}$ = 20을 동일하게 적용하되, 개별요소의 최대입경(D_{gmax}) 및 최소입경(D_{gmin})의 범위를 변화시켜가며 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링을 각 구속압별로 수행하였다. 모든 경우에 있어, 개별요소의 평균입경은 $D_{avg.}$= 0.275mm로 동일하지만, [표 3.7.15]에서 보는 바와 같이 최대 및 최소 입경의 비는 1.0~6.33으로 변화시켜가며 수치 모델링을 수행하였으며, 이때 수치모델 직경과 개별요소 최대 입경의 비는 12.73에서 7.37까지 변화하였다.

[표 3.7.15] 개별요소 스케일 변화에 대한 수치모델 조건

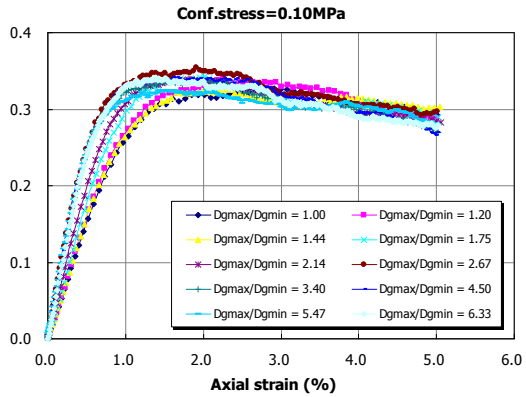
Case	RD	Particle generation in PFC				D_{mod} / D_{gmax}
	spe/mod	D_{gmin} (mm)	D_{gmax} (mm)	$D_{avg.}$ (mm)	D_{gmax} / D_{gmin}	
cn-gd-1	20.0	0.275	0.275	0.2750	1.000	12.727
cn-gd-2	20.0	0.250	0.300	0.2750	1.200	11.667
cn-gd-3	20.0	0.225	0.325	0.2750	1.444	10.769
cn-gd-4	20.0	0.200	0.350	0.2750	1.750	10.000
cn-gd-5	20.0	0.175	0.375	0.2750	2.143	9.333
cn-gd-6	20.0	0.150	0.400	0.2750	2.667	8.750
cn-gd-7	20.0	0.125	0.425	0.2750	3.400	8.235
cn-gd-8	20.0	0.100	0.450	0.2750	4.500	7.778
cn-gd-9	20.0	0.085	0.465	0.2750	5.471	7.527
cn-gd-10	20.0	0.075	0.475	0.2750	6.333	7.368

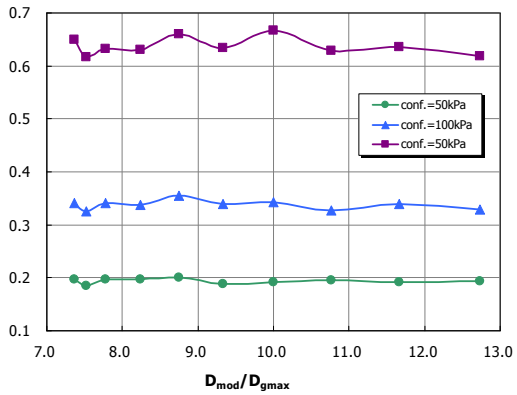
(2). 영향검토 결과

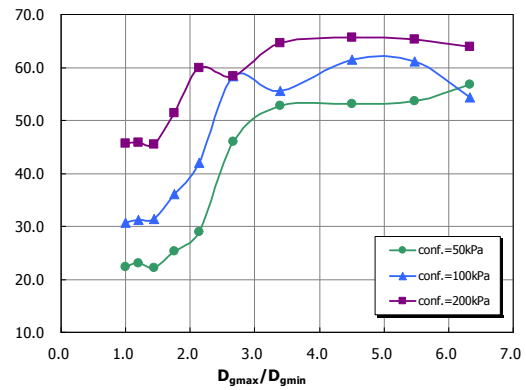
[그림 3.7.57]은 각 해석모델의 스케일 조건에 대하여, 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링 결과를 나타낸 것으로서, 수치모델 스케일 변화 분석시와 동일하게 해석모델 직경과 개별요소의 최대 입경 비율(D_{mod}/D_{gmax})을 기준으로 응력-변형 곡선 및 탄성계수, 최대 축차응력, 최종 강도정수 등을 비교하였다. D_{gmax}/D_{gmin} 값에 따른 응력-변형 곡선을 살펴보면, 개별요소의 최대 및 최소 입

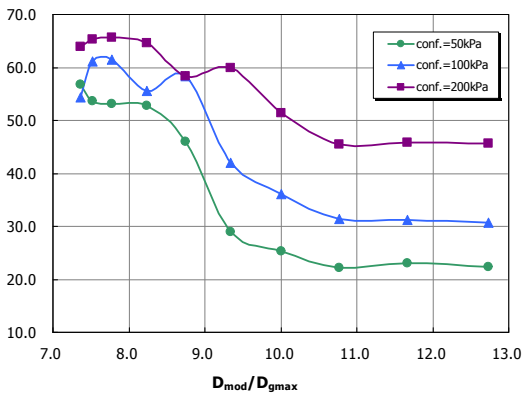
경비가 커질수록 탄성계수는 증가하는 경향을 나타내고 있으나, D_{gmax}/D_{gmin}= 1.5 ~2.5 범위를 중심으로 소폭 감소 또는 증가 경향을 나타내고 있으며, 그 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 또한 $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$의 변화에 따른 탄성계수 값을 살펴보면, $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$ > 10 조건에서는 탄성계수가 거의 유사한 경향을 나타내고 있으며, 이는 수치모델 스케일 변화조건에서의 분석 결과와 일치함을 알 수 있다.

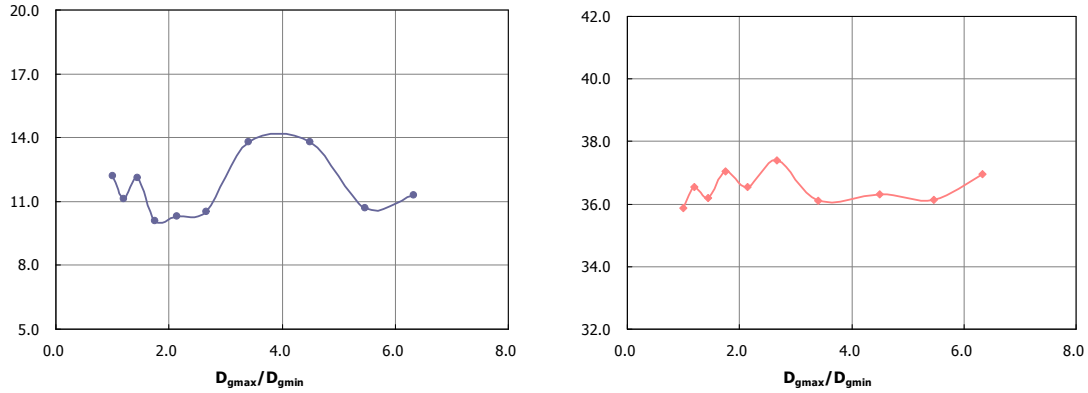
각 조건별 응력-변형 곡선상의 최대 축자응력 및 점착력, 내부마찰각 등의 강도정수 값은 $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$ 및 D_{gmax}/D_{gmin} 의 변화에 관계없이 거의 일정한 경향을 보이고 있다. 결론적으로, 실제 시료와 수치모델의 직경비($RD_{spe/mod}$)가 일정 값 이상을 만족하는 조건 하에서, 개별요소의 최대/최소 입경비가 1.5 이상이 된다면, 전체적인 응력-변형 거동 예측결과는 유사하게 나타나며, 최대 축자응력 및 점착력, 내부마찰각 등의 강도정수 값은 개별요소의 최대/최소 입경비에 관계없이 유사하게 나타남을 알 수 있다.











[그림 3.7.57] 개별요소 스케일 조건별 수치 모델링 결과

라. 해석모델 및 개별요소 동시 스케일 변화

(1). 스케일 조건

해석모델 스케일 변화에 대한 수치 모델링에서는 실제 시료와 수치모델의 직경비($RD_{spe/mod}$)를 변화시키되, 개별요소는 모든 경우에 있어 최대입경 $D_{gmax}=0.35mm$, 최소입경 $D_{gmin}=0.2mm$의 동일 크기로 생성하였다. 즉, 개별요소의 입경 조건은 동일한 반면, 수치 모델의 크기를 변화시킨 모델링 조건이었다.

이와 유사하게 실제 시료와 수치모델의 직경비($RD_{spe/mod}$)를 20부터 3까지 감소시켜 가되, 수치 모델의 크기가 커지는 비율만큼 개별요소의 입경을 확대한 조건에서 수치 모델링을 수행하였다. 즉, $RD_{spe/mod}$ = 20에서 $RD_{spe/mod}$ = 3 까지 수치 모델의 크기를 증가시키되, $RD_{spe/mod}$ = 20 조건 대비 수치 모델의 크기가 증가된 비율만큼 개별요소의 최소 및 최대 입경 크기를 증가시켰다. 그러므로, 모든 수치 모델링 조건에서 $D_{\mathrm{mod}}/D_{gmax}$ = 10.0, D_{gmax}/D_{gmin} = 1.75 은 동일하게 적용되었으며, 생성된 개별요소수도 3,822 ~ 3,859 개로 모든 조건에서 유사하다. 이는 개별요소법 적용방법 중, 실제 해석대상과 재료조건을 동일 비율로 축소시켜 수치 모델링을 수행하는 기법에 해당한다.

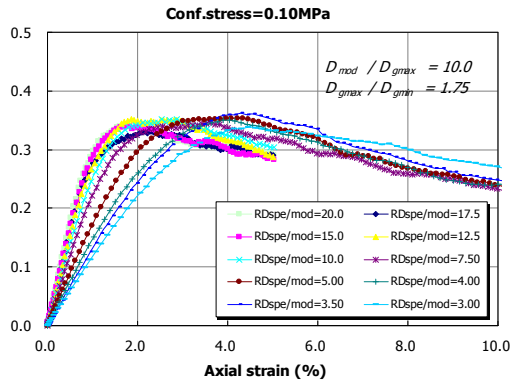
(2). 영향검토 결과

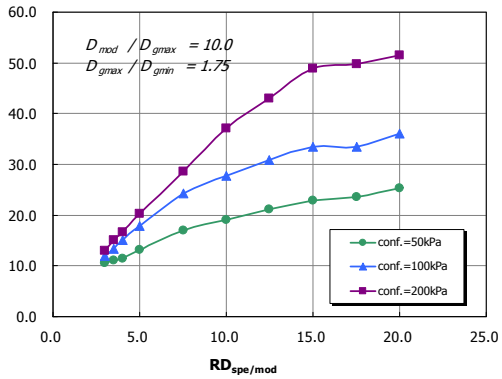
[그림 3.7.58]은 각 조건별 실내 삼축압축시험에 대한 개별요소 수치 모델링 결과를 나타낸 것으로서, 실제 시료 및 해석모델의 직경비($RD_{spe/mod}$)를 기준으로

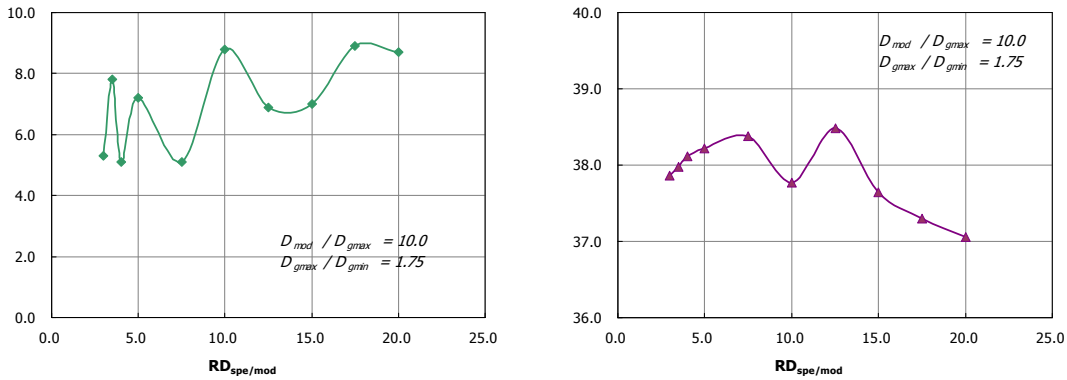
응력-변형 곡선 및 탄성계수, 최대 축차응력, 최종 강도정수 등을 비교하였다.

$RD_{spe/mod}$ = 20에서 10까지 작아지는 경우, 즉 수치모델의 크기가 제일 작은 경우에서 $RD_{spe/mod}$ = 10 정도 크기까지 커짐에 따른 응력-변형 곡선을 살펴보면, $RD_{spe/mod}$ 값에 관계없이 유사한 모두 응력-변형 곡선을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 유사한 탄성계수와 최대 축차응력 및 응력연화 구간의 거동도 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나, 수치모델과 개별요소의 크기가 그 이상 커짐에 따른 응력-변형 곡선을 살펴보면, $RD_{spe/mod}$ 값이 감소함에 따라 탄성계수는 소폭 감소하였지만, 최대 축차응력은 유사한 경향을 나타내었고 최대 축차응력이 발생하는 변형률은 증가하였다.

즉, 수치모델과 개별요소를 동시에 동일 비율로 확대 혹은 축소시킴에 따라 최종적으로는 약간 상이한 응력-변형 거동 결과가 나타났다. PFC에서는 개별요소 각각에 원하는 응력을 직접 재하할 수 없으며, 구속압 및 축응력 등은 각 측면의 경계면을 일정 속도로 이동시킨 후, 그 과정에서 각 개별요소가 경계면에 가하는 응력을 구하고 이들을 전부 합하여 산정한 총 하중값을 다시 경계면 면적으로 나누어 주는 과정을 통해 최종적인 재하단계별 응력을 구하게 된다.







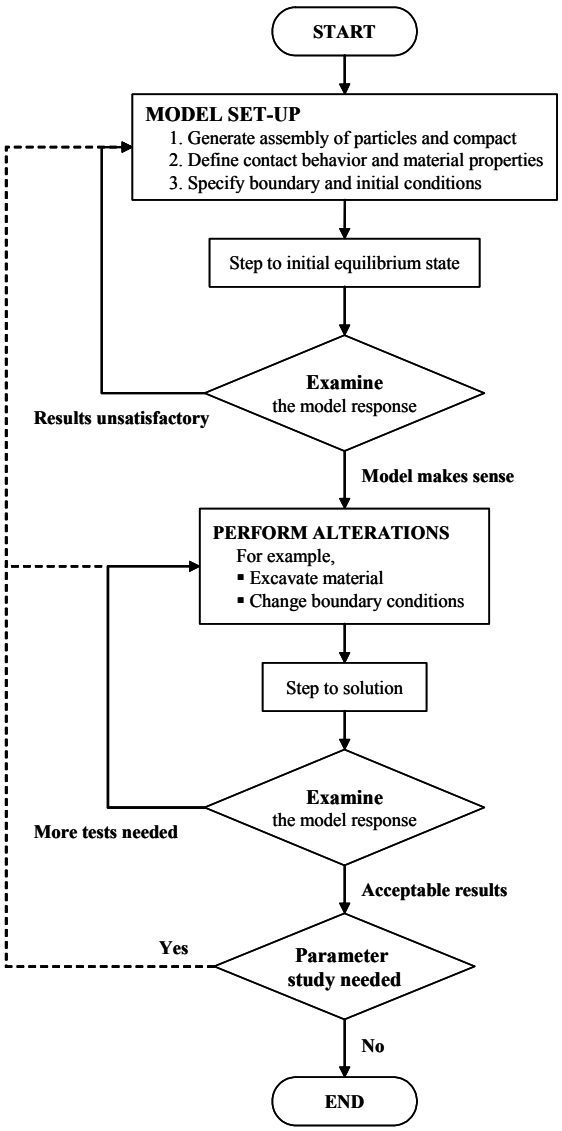
[그림 3.7.59] 해석모델 및 개별요소의 동일 스케일 조건별 수치 모델링 결과

수치 모델과 개별요소의 크기가 동일 비율로 증가된 경우, 경계면을 통해 산정한 응력값이 유사하더라도 경계면과 특정 개별요소간의 접촉응력은 증가하게 되며, 각 개별요소간 접촉응력도 증가하게 된다. 이로 인해 동일 경계면 응력 조건하에서도 $RD_{spe/mod}$ 값이 감소함에 따라 실제 개별요소간 접촉응력은 증가하게 되고, 이로 인해 더 큰 변형을 수반하게 되며, 최대 축차응력이 발생하는 변형률도 증가하는 것으로 판단된다. 그러나, 각 조건별 수치 모델링 결과를 통해 산정된 점착력, 내부마찰각 등의 강도정수 값은 $RD_{spe/mod}$ 값에 관계없이 유사한 결과를 보이고 있으며, 이는 해석모델과 개별요소의 크기를 동일 비율로 변화시키는 개별요소방법이 수치시험실 기법을 이용한 강도정수 산정에 효과적으로 적용될 수 있음을 의미한다.

8. 개별요소 기법의 적용 및 수치시험실 활용 방안

가. 개별요소 수치모델링 과정 및 방법

개별요소 해석은 연속체 해석과 달리 특정 해석 영역 내에 개별 입자들을 생성하고 입자와 입자, 입자와 경계면 사이에 구성 모델에 따른 미시물성치를 적용하여 입자들의 상대적인 변위를 통해 전체 해석 대상의 거시적 거동을 파악하는 해석 방법이다. 이러한 개별요소 수치모델링 해석의 일반적인 절차는 [그림 3.7.60]의 순서도와 같다.



[그림 3.7.60] PFC 해석 절차(Itasca, 2004)

특히, 개별요소법을 이용한 지반구조물 관련 해석의 일반적인 절차는 다음의 해석 단계에 따라 순차적으로 진행하며, 각 단계별 세부 사항들은 각 단계에서 다루도록 한다. 또한 마지막으로 삼축압축시험을 수치 모델링하는 예제를 통해 자세한 세부 사항을 설명하도록 한다.

□ Step.1 : 해석 스케일 결정 및 경계면 생성

□ Step.2 : 초기 개별입자의 생성 (특정 입도분포의 모델링)

□ Step.3 : 접촉 모델 및 재료 물성치 적용

□ Step.4 : Calibration process

□ Step.5 : 하중-변위 해석

◈ EXAMPLE : Simulation of Triaxial Compression Test

(1) 해석 스케일 결정 및 경계면 생성

개별요소 수치모델링을 위한 해석 영역 설정 시, 개별요소의 입경 대비 해석모델의 크기가 상대적으로 과하게 큰 경우, 생성되는 개별요소 개수는 증가하게 되며, 이로 인한 해석 소요시간의 급격한 증가를 수반하게 된다. 따라서 해석모델의 크기 및 개별요소의 입경 등을 실제 크기에 적정 비율로 축소 또는 확대시키는 것이 수치모델링의 효율성 확보 차원에서 필요하다.

이러한 스케일 조정에 의해 해석 모델의 크기가 결정되면 해석 경계면을 생성한다. 3차원 해석의 경우 일반적인 cube shape 이외에도 ring shape, cylindrical shape, sphere shape, spiral shape 등의 다양한 형태로 생성이 가능하며 x, y, z의 좌표 및 r(radius)을 지정하여 경계면을 각각 생성하고 이 때, 경계면의 ID 번호를 지정하고 경계면의 강성(k_w)을 부여한다.

《WALL command》

; *wall id=n type* k_n (x_1, y_1, z_1) (x_2, y_1, z_2) …… *rad*

생성된 경계면은 해석 과정에서 이동 및 삭제가 가능하며 하중을 재하하는데

사용된다. 개별요소법의 특성 상, 특정 하중을 경계면에 직접 가할 수 없으므로 생성된 경계면을 임의 속도로 이동시켜 경계면과 접촉하고 있는 입자들의 평균 응력을 측정하여 원하는 특정 하중을 가할 수 있다.

(2) 초기 개별입자의 생성 (입도분포 모델링)

개별요소 해석에서 초기 생성되는 기본적인 입자의 형태는 원형으로써 BALL command나 GENERATION command를 사용하여 2차원 해석 또는 3차원 해석에 따라 디스크(disk, 2차원) 형태와 구(sphere, 3차원) 형태로 생성 가능하다.

BALL command는 single particle을 특정 위치에 생성하는 명령어로써 기 생성된 입자와 독립적으로 생성되며, GENERATION command는 특정 영역 내에 특정 개수의 입자를 임의의 위치에 생성한다.

또한 각각의 개별입자는 특정 입경에 해당하는 동일한 크기(Uniform)의 입자들로 생성하거나, 초기 간극률 및 소요 입도분포 모델링을 위해 특정 입경 범위 내에서 난수발생기법에 의해 입자를 생성 할 수도 있으며 입자들을 packing 함으로써 불규칙한 입자의 형태를 모델링 할 수도 있다.

《BALL command》

ball id=n $x = x_1$ $y = y_1$ $z = z_1$ *rad*

《GENERATION command》

generation id=n, m $x = x_1,\ x_2$ $y = y_1,\ y_2$ $z = z_1,\ z_2$ *rad=rad*$_1$, *rad*$_2$

특정 영역 내에 원하는 초기 간극률 상태로 개별요소를 생성시키기 위한 방법으로 원통형 디스크 형태의 2차원 개별요소의 경우, 특정 반경범위($R_{\min}$~$R_{\max}$)에 대한 개별요소들을 정규분포 형태로 해석 영역 내 임의 위치에 생성한 후, 원하는 간극률 조건을 만족시킬 때까지 초기 생성된 개별요소들의 크기를 확대(확대계수 : m)하는 방식으로 최종조건을 만족시키는 개별요소들을 생성하게 된다.

$$R = mR_0 \qquad \text{[식 3.7.39]}$$

여기서, R : 최종 생성된 개별요소 반경

R_0 : 초기에 생성된 개별요소 반경

m : 반경 확대계수

$$m = \left(\frac{1-n}{1-n_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{[식 3.7.40]}$$

여기서, n : 최종 간극률

n_0 : 최종 간극률 생성을 위한 초기 간극률

구(球)형태의 3차원 개별요소의 경우, 기본적으로는 2차원 경우와 동일한 방식으로 개별요소들을 생성하게 되지만, 구에 대한 개별요소의 3차원적 면적 및 3차원 간극률 산정방식의 차이로 인해 특정 간극률 조건을 만족시키기 위한 개별요소들의 평균 반경은 아래와 같이 2차원 경우와 다르게 표현된다. 특정 반경범위에 대한 개별요소들을 정규분포 형태로 생성하거나, 원하는 간극률 조건을 만족시킬 때가지 초기 생성된 개별요소들의 크기를 확대(확대계수 : m)하는 방식은 2차원의 경우와 동일하다.

$$\overline{R} = \left\{ \frac{3V}{N4\pi}(1-n_0) \right\}^{\frac{1}{3}} \quad \text{[식 3.7.41]}$$

여기서, $\overline{R}$: 3차원 개별요소들의 평균 반경

V : 3차원 개별요소가 생성되는 전체 해석영역 체적

N : 생성될 개별요소 수

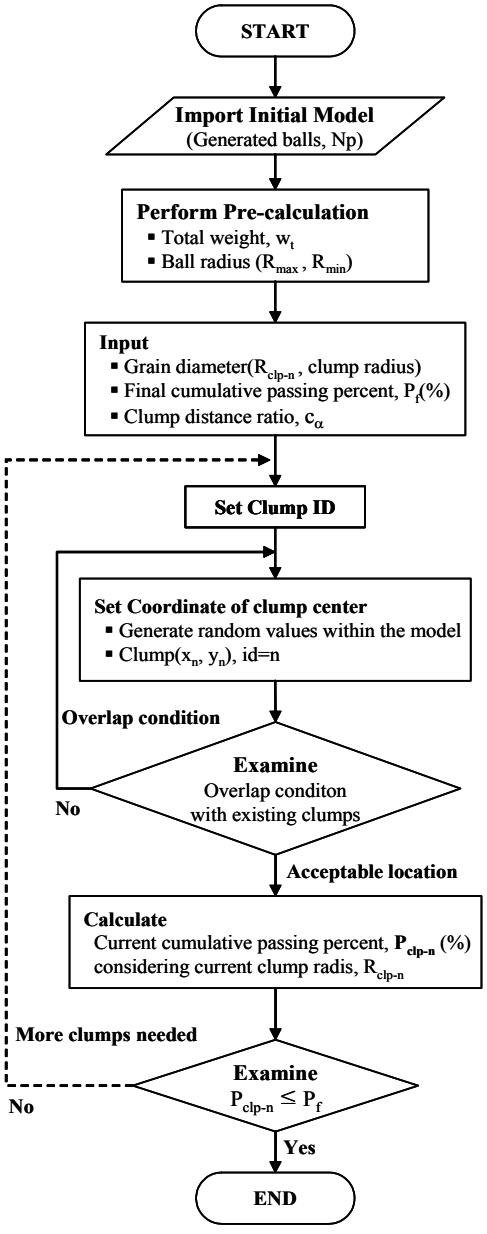
n_0 : 최종 간극률 생성을 위한 초기 간극률

(가) 2차원 입도분포 모델링

동일한 입자들을 생성하여 해석을 수행하면 해석이 간편하고, 해서 시간도 단축되는 장점이 있지만, 조립 재료로 구성된 지반구조물 해석의 경우, 지반을 구성하고 있는 입자들의 간극률과 입도 분포, 입자의 형상이 강도 및 변형 특성에

매우 큰 영향을 미치므로 이를 수치 해석 시 반드시 반영해야 한다.

Clump logic을 이용한 2차원 입도분포 모델링 전반적인 과정은 [그림 3.7.61]의 순서도와 같다.



[그림 3.7.61] 2-D 입도분포 모델링 과정

일단 난수발생기법에 의해 시료 내 임의 위치을 선정한 후, 가장 큰 입경에 해

당하는 크기의 clump를 생성하고, 동일 입경을 가지는 clump를 다시 임의 위치에 생성하되, 기존에 생성된 clump와 신규로 생성되는 clump의 인접을 방지하기 위하여 각 clump간의 거리계수(c_α)를 적용한다.

$$d(clp_n, clp_o) \geq c_\alpha[R_{clp-n} + R_{clp-o}] \qquad \text{[식 3.7.42]}$$

여기서, $d(clp_n, clp_o)$: 신규 clump와 기존 clump의 중심간 거리
c_α : clump 간 거리계수
R_{clp-n}, R_{clp-o} : 신규 및 기존 clump 반경

특정 크기의 개별요소에 대한 통과중량 백분율 및 특정 clump의 무게는 다음과 같이 표현될 수 있으며, 이들을 통해 현재까지 생성된 clump를 포함하는 특정 입경에 대한 통과중량 백분율을 계산할 수 있다.

$$Percent\ finer = \left(1 - \frac{\sum_{1}^{n_{lp}} W_{lp}}{W_t}\right) \times 100\,(\%) \qquad \text{[식 3.7.43]}$$

여기서, n_{lp} : 특정 입경보다 큰 개별요소수
W_{lp} : 특정 입경보다 큰 개별요소들 각각의 무게
W_t : 전체 개별요소들에 대한 총 무게

$$W_{clp} = \sum_{1}^{n_{clp}} (\pi R_{cp}^2)\gamma_{cp}\, t \qquad \text{[식 3.7.44]}$$

여기서, n_{clp} : 특정 clump에 속한 개별요소 수
W_{clp} : 특정 입경의 clump에 포함된 개별요소들의 총 무게
R_{cp} : clump에 포함된 특정 크기의 개별요소 반경
γ_{cp} : clump에 포함된 특정 개별요소의 단위중량
t : 개별요소의 두께

$$Percent\ \ finer\ (clp) = \left(1 - \frac{\sum_{1}^{n_{clp}} W_{clp}}{A_s (1-n) \gamma_{cp}\, t} \right) \times 100\ (\%) \qquad \text{[식 3.7.45]}$$

여기서, n_{clp} : 특정 입경보다 큰 clump 수

W_{clp} : 특정 clump의 총 무게

A_s : 전체 해석 영역의 면적

각 clump 생성 후에는 전체 해석 영역에 포함된 기 생성 clump 및 개별요소들을 대상으로 해당입경에 대한 통과중량 백분율(p_{clp-n})을 계산한다.

이렇게 산정된 통과중량 백분율(p_{clp-n})과 최종적으로 목표하는 통과중량 백분율(p_f)을 매 clump 생성시마다 비교하였으며, 두 값이 비슷해질 때까지 신규 clump를 지속적으로 생성하도록 한다. 즉, 생성된 clump의 수가 증가할수록 통과중량 백분율(p_{clp-n})은 서서히 감소하게 되며, 어느 순간 목표하는 값에 도달하게 되면 이 입경에 해당하는 clump 생성을 중지하게 된다.

(나) 3차원 입도분포 모델링

3차원 입도분포 모델링은 특정 입도분포 조건에 대하여, 입자크기가 큰 개별요소부터 해당입경에 대한 가적통과율을 만족시킬 수 있는 개별요소수를 구하고, 3차원 해석영역 내에서 공간적 난수를 발생시켜 임의 위치에 특정 크기의 개별요소를 소요 수만큼 반복 생성하는 방식이다. 3차원 입도분포 모델링의 전반적인 과정은 [그림 3.7.62]와 같다.

구현하고자 하는 시료의 간극률로부터 입자들만의 전체 부피는 흙의 삼상 관계로부터 [식 3.7.47]과 같이 표현할 수 있다.

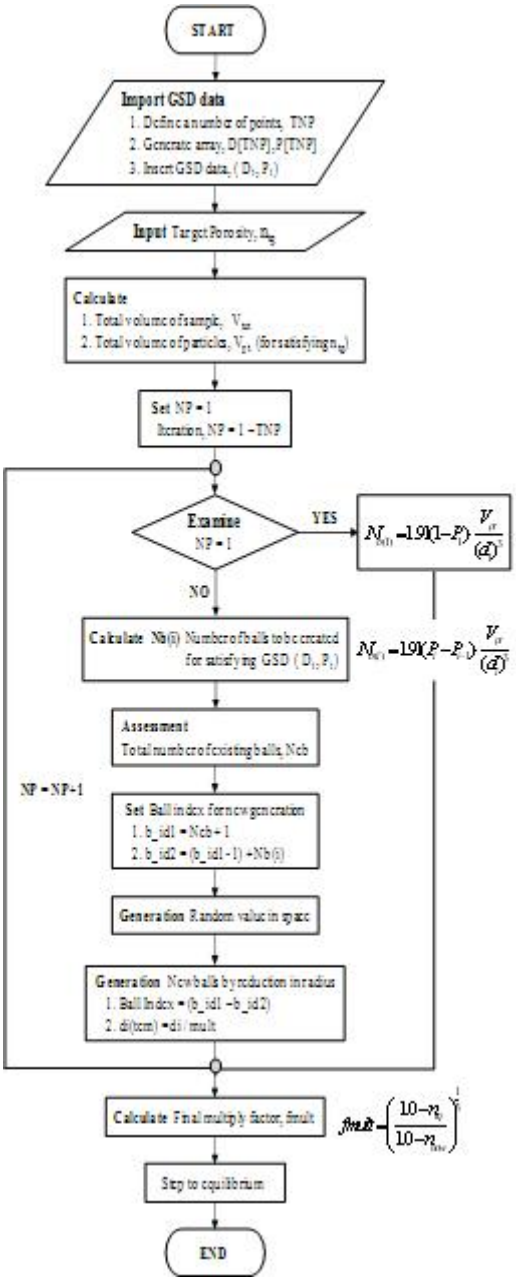
$$n_{tg} = \frac{V_V}{V} = \frac{V_{tot} - V_{pt}}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_{pt}}{V_{tot}} \qquad \text{[식 3.7.46]}$$

$$\therefore\ \ V_{pt} = (1 - n_{tg})\, V_{tot} \qquad \text{[식 3.7.47]}$$

여기서, n_{tg} : 구현하고자 하는 시료의 초기 간극률

V_{tot} : 시료의 총 부피

V_{pt} : 시료 내 개별요소들의 총 부피



[그림 3.7.62] 3차원 개별요소에 대한 입도분포 모델링 과정

[식 3.7.47]을 통해 시료 내 개별입자들의 전체 부피가 계산되면, 다음의 [식

3.7.49]로부터 입도분포곡선 상의 가적통과율 P_1을 만족시키기 위해 필요한 첫 번째 입경 d_1을 갖는 입자의 총 개수를 구할 수 있다.

$$1-P_1=\frac{\sum V_{p1}}{V_{pt}}=\frac{\frac{\pi}{6}(d_1)^3 N_{b(d1)}}{V_{pt}} \qquad \text{[식 3.7.48]}$$

$$\therefore\ N_{b(d1)}=1.91(1-P_1)\frac{V_{pt}}{(d_1)^3} \qquad \text{[식 3.7.49]}$$

여기서, d_1 : 입도분포곡선을 표현하는 첫 번째 점의 해당입경

P_1 : 입경 d_1에 해당하는 가적통과율(%)

$N_{b(d1)}$: 가적통과율 P_1 만족을 위해 필요한 개별요소의 총 개수(입경 d_1)

그리고 첫 번째 가적통과율 P_1을 제외한 나머지 가적통과율 P_i에 해당하는 개별입자들의 각각의 총 개수는 다음 [식 3.7.51]로부터 구할 수 있다.

$$(1-P_2)=(1-P_1)+\frac{\sum V_{d2}}{V_{pt}}=(1-P_1)+\frac{\frac{\pi}{6}(d_2)^3 N_{b(d2)}}{V_{pt}} \qquad \text{[식 3.7.50]}$$

$$\therefore\ N_{b(d2)}=1.91(P_1-P_2)\frac{V_{pt}}{(d_2)^3} \qquad \text{[식 3.7.51]}$$

[식 3.7.51]을 일반식으로 나타내면 [식 3.7.52]와 같이 나타낼 수 있다.

$$\therefore\ N_{b(di)}=1.91(P_i-P_{i-1})\frac{V_{pt}}{(d_i)^3} \qquad \text{[식 3.7.52]}$$

특정 간극률에 대한 시료 내 개별입자들의 전체 부피가 계산되면, [식 3.7.49]

로부터 입도분포곡선 상의 가적통과율 P_1을 만족시키기 위해 필요한 첫 번째 입경 d_1을 갖는 입자의 총 개수를 구할 수 있다.

그리고 첫 번째 가적통과율 P_1을 제외한 나머지 가적통과율 P_i에 해당하는 개별입자들의 각각의 총 개수는 [식 3.7.52]로부터 구할 수 있다.

[식 3.7.49]와 [식 3.7.52]로부터 입도분포곡선 상의 특정 입경에 해당하는 각각의 개별입자의 개수를 구하고, 계산된 개수만큼 지정된 시료의 공간 내에 개별입자들을 생성하게 된다. 이러한 방법을 통해 기존의 2차원 해석에서 주로 사용된 clump logic을 사용하지 않고 각 입자들의 입경을 직접 조정하여 초기 개별입자들을 생성할 수 있다.

단, 입자를 생성하는 과정에서 d_i 입경에 해당하는 입자만 생성하게 되면 결손입도를 형성하게 되므로 d_i 입경과 d_{i-1} 입경 사이에서 난수발생기법을 통해 입자를 생성해야 한다. 또한 주어진 입도분포곡선을 보다 세분화하여 모델링 할수록 더욱 정확한 입도분포를 형성할 수 있다.

(3) 접촉 모델 및 재료 물성치 적용

특정 입도분포를 고려한 개별 입자의 생성 후, 입자와 입자, 입자와 경계면 사이의 상호작용을 위해 구성모델인 접촉모델을 적용한다. 접촉모델의 종류에는 강성모델(Stiffness model), 마찰모델(Slip model), 접착모델(Bonding model)로 구분되며, 접촉모델에 따라 부여되는 재료의 물성치 또한 다르게 적용된다.

▶ 강성모델

강성모델은 Linear model과 Hertz-Mindlin model이 있으며 Hertz-Mindlin model은 비선형 모델로서 미소 변위 범위에서의 해석에 적합한 접촉모델이다.

Linear model의 접촉점에서 하중-변위 거동은 일정한 접촉강성을 이용하여 선형적 관계로 표현된다. 즉, 선형모델의 경우 두 개별요소 간 접촉점에서의 연직강성과 전단강성은 다음 [식 3.7.53]과 [식 3.7.54]과 같이 적용된다.

$$k^n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \qquad \text{[식 3.7.53]}$$

$$k^s = \frac{k_s^{[A]} k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \qquad \text{[식 3.7.54]}$$

또한 Hertz-Mindlin 모델에서의 하중-상대변위 거동은 비선형적 접촉강성에 의해 비선형적 관계로 표현된다.

Hertz-Mindlin 모델에서의 접촉강성은 개별요소의 형상 및 물성치, 연직하중 등에 따라 비선형적으로 달라지게 된다. 이 모델에서는 연직강성, 전단강성 대신 전단탄성계수 및 포아송비가 적용되며, 이들을 이용한 연직강성 및 전단강성은 다음 [식 3.7.55]와 [식 3.7.56]과 같으며 Hertz-Mindlin 모델은 두 개별요소가 접착 본딩으로 연결된 경우에는 적용할 수 없다.

개별요소간 접촉점에서의 상호거동 계산 시, 탄성물성은 두 개별요소의 평균값으로 적용되며, 개별요소와 경계면 접촉점에서의 상호거동 계산 시, 경계면은 강체로 고려되고 이 경우의 탄성물성은 개별요소의 탄성물성 값이 그대로 적용된다.

$$K^n = \left(\frac{2\,[G]\,\sqrt{2\widetilde{R}}}{3\,(1-[\nu])} \right) \sqrt{U^n} \qquad \text{[식 3.7.55]}$$

$$k^s = \left(\frac{2\,([G]^2\,3\,(1-[\nu])\,\widetilde{R})^{1/3}}{2-[\nu]} \right) 걷 F_i^n 걷^{1/3} \qquad \text{[식 3.7.56]}$$

두 입자 사이의 접촉점에서의 법선 방향의 힘, F_i^n은 [식 3.7.57]과 같이 법선 방향의 상대적인 변위, u_n으로부터 직접적으로 구할 수 있다. [식 3.7.57]의 K^n은 [식 3.7.55]으로부터 계산되며, 선형탄성 모델과 달리 전단탄성계수, G와 프아송비, ν이 미시 물성치로 적용된다.

$$F_i^n = K^n □ (u_n)^{3/2} \qquad \text{[식 3.7.57]}$$

여기서, 두 입자 사이의 상대적인 변위로 표현되는 u_n은 접촉하고 있는 두 입자의 반경을 더하고, 두 입자의 중심간 거리를 뺀 값으로 법선방향의 중첩된 거리를 나타낸다.

접촉점에서의 전단력은 법선 방향의 힘보다 계산 과정이 다소 복잡하다. 계산

과정은 [식 3.7.56]과 같이 법선방향의 힘에 따른 전단강성, k_s를 구하고 전단변위, Δu_s와의 관계식인 [식 3.7.58]로부터 나타낼 수 있다.

$$\Delta F_s = k_s \cdot \Delta u_s \qquad \text{[식 3.7.58]}$$

강성모델에 적용되는 대표적인 물성치는 다음과 같으며, 개별입자 또는 경계면 생성 시, 입력 물성치로 부여한다.

[표 3.7.16] Micro-parameters for unbonded model

symbol	Micro-parameters for unbonded model
k_n	Normal stiffness
k_s	Shear stiffness
k_w	Stiffness of wall
μ	Friction coefficient ($\neq$ Internal friction angle of material)
G	Shear modulus
ν	Poisson's ratio

▶ 마찰모델

마찰모델은 개별요소들 또는 개별요소-경계면 접촉점에서의 두 요소 간의 미끄러짐을 규정하는 모델이며, 접촉면에 별도의 접착 조건이 부여되지 않은 상태에서 인장력이 발생할 경우, 두 요소는 분리되게 된다.

두 요소 간의 미끄러짐은 접점력의 전단성분(F_i^s)이 접촉면의 허용 전단력($F_{\max}^s$)을 상회할 때 발생하게 되는데, 접촉점의 허용 전단력은 접촉점에서의 수직 점접력에 마찰계수를 곱한 값으로 정의된다.

$$F_{\max}^s = \mu |F_i^n| \qquad \text{[식 3.7.59]}$$

· 미끄러짐 발생조건

$$|F_i^s| > F_{\max}^s \qquad \text{[식 3.7.60]}$$

만약, $|F_i^s| > F_{\max}^s$라면 미끄러짐이 발생하고, 다음 계산 싸이클에서 F_i^s의 크기를 다음과 같이 $F_{\max}^s$와 같도록 수정하게 된다.

$$F_i^s \leftarrow F_i^s \left(F_{\max}^s \; / \; 걷 F_i^s 걷 \right) \qquad \text{[식 3.7.61]}$$

▶ 접착모델

접착모델은 입자의 접점에 작용하는 인장, 압축 전단응력 및 모멘트에 대한 저항강도를 제공한다. 이런 접착모델은 재료의 강도가 재료내부의 국부 응력집중에 의한 개별요소 주변의 점착강도에 지배되는 암석과 같은 취성재료의 모델링에 적합하다.

Contact bonding model은 접촉면적을 무시할 있는 두 요소간 한 접촉점에서의 수직 및 전단방향에 대한 인장강도를 부여하는데, 작용력의 수직 및 전단성분이 소정의 성분별 강도를 넘어서게 되면 두 요소간 접착은 파괴된다.

Parallel bonding model은 개별요소간 접촉점에 접착이 부여된 후, 접촉점에서의 하중 및 모멘트에 대한 저항력을 제공한다. 이 모델은 일정 접촉면적을 가지는 개별요소간의 접촉점 거동을 규정하는 것으로서 접촉점에서의 미끄러짐 없이 개별요소가 회전하는 현상을 방지하고, 개별요소들간의 Cementation 효과를 표현하기 위해 사용될 수 있다.

아래의 물성치들은 접착모델에 적용되는 미시 물성치들로써 이 또한 개별입자 또는 경계면 생성 시, 입력 물성치로 부여한다.

[표 3.7.16] Micro-parameters for bonding model

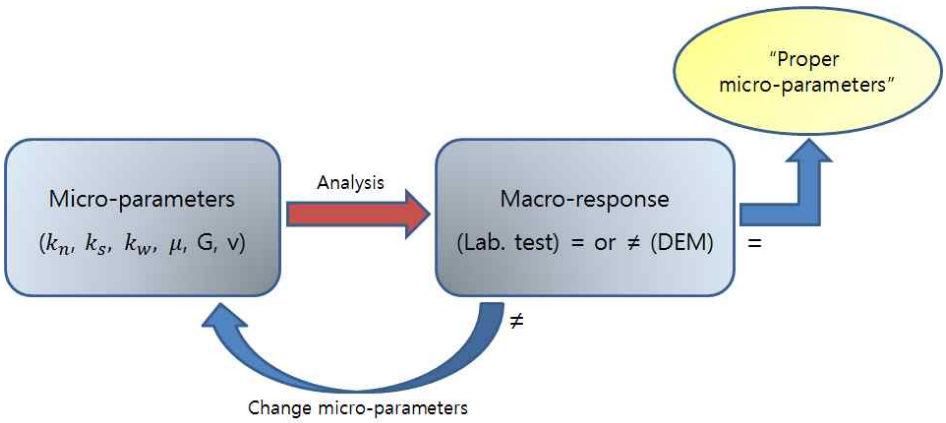
symbol	Micro-parameters for bonding model
F_c^n	Normal contact bond strength
F_c^s	Shear contact bond strength
$\overline{k^n}$	Normal stiffness
$\overline{k^s}$	Shear stiffness
$\overline{\sigma_c}$	Normal strength
$\overline{\tau_c}$	Shear strength
R	Bond disk radius

(4) Calibration process

개별요소법의 경우, 개별 입자들의 상호거동을 규정하기 위한 미시 물성치들은 전체적인 물리적 현상과 직접적인 상관관계를 갖지 못한다. 따라서 개별요소법에서는 실내 혹은 현장시험 등의 거동현상과 임의 미시 물성치에 대한 해석결과를 비교하고 다른 미시 물성치에 대한 동일과정을 반복하여, 물리적 거동현상을 가장 잘 표현할 수 있는 적정 미시 물성치을 산정해가는 일련의 과정(Calibration process)이 필요하다.

즉, 초기의 특정 입도와 배열형태를 갖는 개별요소들을 생성하고 이들에 적용된 임의 미시 물성치하에서 전체적 거동이 실내시험 등과 유사하게 나타난다면 이렇게 산정된 미시 물성치는 동일 초기조건을 갖는 재료의 물리적 특성을 타당하게 표현할 수 있는 물성치라고 할 수 있다.

예를 들어 삼축압축시험을 수치 모델링한다고 가정했을 때, 일반적으로 3 종류의 구속압 중 중간 구속압에 대하여 임의의 미시 물성치를 적용한 응력-변형율 곡선 결과와 실내시험 결과를 비교하여 유사한 거동을 나타낼 때까지 미시 물성치를 바꿔가며 반복 수행한다.



[그림 3.7.63] Calibration process

실내 시험의 개별요소 수치 모델링을 위한 Calibration process에서 일반적으로 재료의 초기 탄성계수는 접촉 강성(k_n, k_s)의 값에 따라 선형적적으로 변하며, Poisson's ratio는 전단 접촉강성과 법선 접촉강성의 비(k_s/k_n)에 영향을 받는다. 또한 재료의 최대 강도는 friction coefficient의 영향을 받는다. 즉, friction

coefficient의 증가는 재료의 최대 강도를 증가시키지만, 과도한 값의 증가는 변형율 연화 현상을 발생시킨다. 단, 이러한 미시 물성치의 증감에 따른 해석 결과는 절대적인 것이 아니며, 각각 미시 물성치들의 복합적인 영향을 받으므로 반복 수행을 통해 적정 미시 물성치를 산정해야 한다.

(5) 하중-변위 해석

하중-변위 해석을 수행하기 전, 초기조건에 대한 개별요소 생성 및 그에 대한 평형조건이 만족된 후에는 해석과정에서의 특정 초기 응력 조건을 만족시키기 위한 경계면 응력조건 구현이 필요하다.

개별요소해석에서는 경계면에 대한 직접 원하는 크기의 하중을 재하하는 것이 불가능하다. 구속압 재하 모델링은 해석 대상의 경계면에 인접한 개별요소들에 특정 응력을 재하하는 응력 제어방법과 경계면(wall)을 특정 속도로 이동시켜가며 특정 응력조건에 대한 만족여부를 확인하는 변위 제어방법의 두 가지로 이루어질 수 있다.

응력 제어방법은 해석상 구현에 있어 손쉬운 것이 사실이지만, 해석과정중 일관된 구속압 재하가 불가능하고 해석중의 개별요소 이동 및 초기모델 영역 밖으로의 이탈현상 등으로 인하여 그 결과의 신뢰성 확보가 어렵다.

개별요소들로 구성된 해석대상에 특정 속도를 가하는 방법은 갑작스런 속도재하에 따른 관성력 생성 및 이로 인한 해석영향을 최소화하기 위해 여러 단계로 나누어 점진적으로 최종 속도를 재하하는 형식으로 적용한다.

특정 속도에 의한 각 경계면의 이동 단계별로 경계면과 접촉되어 있는 개별요소들을 찾아낸 후, 이들과 경계면 접촉면에 작용하는 하중을 모두 구하고 이들의 총합을 경계면 길이로 나누어 최종적인 경계면 작용 응력을 산정한다.

이렇게 산정된 방향별 경계면 응력과 재하하고자 하는 방향별 구속압의 크기를 비교하여 그 차이가 소정의 허용범위(α)를 만족하지 않으면 다시 경계면의 속도를 아래 식들에 의해 산정하고 동일한 계산과정을 반복한다.

이러한 일련의 과정은 전 해석 과정에서의 구속압 응력조건 구현을 위한 서보-제어 방식(servo-mechanism)으로 수행된다.

$$G = \frac{\alpha A}{k_n^{(w)} N_c \Delta t} \qquad \text{[식 3.7.62]}$$

여기서, α : 측정응력 및 구현응력에 대한 허용범위

A : 경계면 면적

N_c : 경계면과 개별요소의 접촉점 수

$k_n^{(w)}$: 접촉면에서 경계면과 개별요소의 평균 강성

Δt : 한단계 해석단계 시간

$$\dot{u_w} = G(\sigma_m - \sigma_r) = G\Delta\sigma \qquad \text{[식 3.7.63]}$$

여기서, $\dot{u_w}$: 경계면의 이동속도

σ_m : 경계면 이동후 경계면에 작용하는 측정 응력

σ_r : 재하하고자 하는 구속응력

서보-제어 과정에서 측정된 경계면 응력값을 살펴보면, 초기의 경계면 응력값은 큰 폭으로 증가와 감소를 반복하나, 위에서의 서버-제어 과정을 통해 그 폭은 점차 감소하게 되며, 최종적으로는 구현하고자 하는 방향별 구속압을 만족하게 된다. 이러한 경계면 응력조건의 구현과정은 전체 해석 시 모든 과정에서도 동일하게 수행되어 항상 일정한 구속압 조건을 유지시키게 된다.

동시에 재하 하중은 구속압 응력조건 구현 방식과 동일하게 하중재하 면을 임의 속도로 이동시켜 경계면과 접촉하고 있는 입자들의 평균 응력을 체크한다. 이 또한 갑작스런 재하 속도에 따른 해석 영향을 최소화하기 위해 점진적으로 속도를 증가시켜 최종적으로 목표하는 속도로 재하하는 방식을 사용한다. 물론 동일한 방법으로 제하 과정을 통해 반복하중을 모델링 할 수 있다.

◈ EXAMPLE : Simulation of Triaxial Compression Test

- 상, 하부 경계면은 하중을 재하하는 가압판, 측면 원통형 경계면은 시료에 가해지는 구속압을 재하하는 경계면
- 상, 하부 경계면이 가압판이 되어 속도를 조절하는 변형제어 방식으로 시료에 하중이 재하.
- 원통형 경계면의 속도는 일정한 구속응력을 유지하는 서보-메카니즘을 통해 자동으로 제어.
- 입자 생성 시, 특정 간극률을 만족하는 3차원 입도분포 모델링 기법 적용
- 초기 입자 생성 시, 입자들의 과도한 중첩으로 인한 경계면 이탈 현상을 방지하기 위해 경계면 이동에 의한 packing 기법 적용
- 시료가 받는 응력은 벽에 작용하는 힘들을 합하는 방식, 변형은 경계면 사이의 상대거리를 측정하는 방식으로 측정.
- 입자의 반응은 HISTORY logic을 이용하여 다양한 응력과 변형율 양 측정을 통해 계산.

1. 시료 준비

- 입자확대 생성법 (입자크기 범위 rlo~rhi , 간극비 porosity, 시료 크기 height, width를 설정하여 입자를 생성하는 방법)을 통해 입자를 생성하여 시료를 제작. 다음의 예시에서는 위 설정 사항들을 만족시키는 입자들의 수를 결정하는 3차원 입도분포 생성 기법을 사용.
- 보통 시료의 경계면들은 시험 중 발생하는 큰 변형을 허용하는 필요량보다 길게 생성. (경계면들이 입자들과만 반응하고, 경계면끼리는 반응하지 않기 때문에 경계면이 겹쳐도 영향을 미치지 않음)
- 초기 입자 생성 후 원통 경계면은 입자 강성의 1/10의 강성을 갖는다 (membrain effect).
- h : d = 2 : 1(높이 70mm, 직경 35mm), 직경범위 1mm~19.1mm인 10988개의 입자로 구성된 시료로 생성하였고, 힘, 길이, 시간의 단위는 각각 뉴튼, 미터, 초를 사용하였다.

```
; ================================================================
```

```
; Creation and packing of particles - triaxial sample
; ===================================================================
new
SET random
; -------------------------------------------------------------------
def make_walls
  extend = 0.1
  rad_cwall = diamet_sample / 2
  w_stiff = wall_stiff
  _z0 = -5*height_sample*extend
  _z1 =  5*height_sample*(1.0 + extend)
; -------------------------------------------------------------------
def assemble_GSD
  sstiff = shear_stiff
  nstiff = normal_stiff
  bfric  = ball_fric
  bdens  = ball_dens
  vol_tot = height_sample * ((pi * diamet_sample^2.0)/4)
  vol_bt  = (1.0 - porosity) * vol_tot
  w_rad1 = -1.0*diamet_sample / 2
  w_rad2 =      diamet_sample / 2
  h_sample = 5*height_sample
  b_tries = b_gen_tries
  loop i(1,npoint_gsd)
                if i = 1 then
                        bnum(i) = 1.91 * (1.0-CumPassP(i)/100.0) * vol_bt /
    (Diameter(i)^3)
                end_if
                if i > 1 then
                        bnum(i) = 1.91 * (CumPassP(i-1)/100 -
    CumPassP(i)/100) * vol_bt / (Diameter(i)^3)
                end_if
      b_id1 = get_ballnumber + 1
      b_id2 = (b_id1 - 1) + int(bnum(i))
          if i = 1 then
                        brad1 = 0.5 * Diameter(i)/mult
                        brad2 = brad1
                end_if
                if i > 1 then
```

```
                brad1 = 0.5 * Diameter(i)/mult
                brad2 = 0.5 * Diameter(i-1)/mult
            end_if
        command
            gen id=b_id1,b_id2  rad=brad1,brad2  x=w_rad1,w_rad2
                                                  y=w_rad1,w_rad2 &
                                                    z=0.0,h_sample &
                                                  filter ff_cylinder &
                                                  tries=b_tries
            prop dens=bdens  ks=sstiff  kn=nstiff  fric=bfric
        end_command
  end_loop
  sum = 0.0 ; get actual porosity
  bp  = ball_head
  loop while bp # null
    sum = sum + 4.0 / 3.0 * pi * b_rad(bp)^3
    bp  = b_next(bp)
  end_loop
  pmeas = 1.0 - sum / vol_tot
  fmult = (((1.0 - porosity) / (1.0 - pmeas))^(1.0/3.0))
  command
    ini rad mul fmult
    solve
  end_command
end
; ---------------------------------------------------------------
def GetWallStrain
  zdif  = w_z(wadd6) - w_z(wadd5)
  DoubleHeight_sample=5*height_sample
  wezz  = zdif / DoubleHeight_sample
end
; ---------------------------------------------------------------
def Densification
     command
       wall id 6 zvel     = _mvel
       cycle _niter
     end_command
  end_loop
```

```
  loop while 1 # 0
    GetWallStrain
    command
      cycle 100
    end_command
    if -axia_e > AxialStrainLimit then
        w_zvel(wadd6) = 0
        exit
    end_if
  end_loop
            command
            solve
            end_command
end
; ------------------------------------------------------------------
def make_assemble

    if GSD_accept = 0 then
        input_GrainSizeDist
        assemble_GSD
    end_if
    if GSD_accept = 1 then
        assemble_uniform
    end_if
end
;====================================================================
; [ Main Input ]
;====================================================================
SET diamet_sample = 35.0e-3  ; mm
SET height_sample = 70.0e-3  ; mm
SET GSD_accept = 0
SET mult         = 1.2
SET porosity = 0.23
SET ball_dens     = 1950.0
SET b_gen_tries  = 100000
SET normal_stiff = 7.0e4
SET shear_stiff  = 7.0e4
SET ball_fric     = 0.1
SET wall_stiff    = 7.0e8
```

```
make_walls
make_assemble
SET grav 0 0 -500.0
step 50000
GetWallAddress
GetIniStrains
CreatePlotTriax
set _vfinal  = 10.0
set AxialStrainLimit = 8.0e-1
Densification
solve
save Basic_Assemble.sav
return
;=====================================================================
```

2. 초기 개별요소의 생성 (경계면 이동)

- 간극률 상대적으로 낮은 조립재료의 경우 초기 개별입자 생성 과정에서 입자의 과도한 중첩으로 인해 입자들의 경계면 요소 이탈현상 발생
- 초기 경계면 생성 시, 충분한 공간을 확보한 후, 입자 생성 후 경계면을 이동하여 원하는 크기의 시료를 생성함.
- 본 예제는 모델링하고자 하는 시료 높이의 5배를 증가시켜 공간을 확보한 후, 상부 경계면을 하강하는 방법을 적용.
- 이 때, 해석 시간의 단축을 위해 초기 입자 생성 후, 자유 낙하에 의해 입자를 하강시킨 후, 상부 경계면을 이동 시킴.
- 이러한 경계면 이동에 의한 모델을 생성한 후, 최종적으로 미시 물성치를 적용함.

```
; =====================================================================
; Moving Top plate (Densification) & micro-parameters
; =====================================================================
new
; ---------------------------------------------------------------------
res Basic_Assemble.sav
; ---------------------------------------------------------------------
def Change_wall_size
  extend = 0.1
  rad_cwall = diamet_sample / 2
```

```
  w_stiff = wall_stiff
  _z0 = -height_sample*extend
  _z1 =  height_sample*(1.0 + extend)
   command
     delete wall 1
     delete wall 5
     delete wall 6
   end_command
   command
     wall type cylinder id=1 kn=w_stiff end1 0.0 0.0 _z0 end2 0.0 0.0 _z1 &
                                          rad rad_cwall rad_cwall
   end_command
  command  ; Bottom wall
     wall id=5 kn=w_stiff face (_x0,_y0,_z0) (_x1,_y1,_z1) (_x2,_y2,_z2) &
                                                          (_x3,_y3,_z3)
   end_command
  command  ; Top wall

     wall id=6 kn=w_stiff face (_x0,_y0,_z0) (_x1,_y1,_z1) (_x2,_y2,_z2) &
                                                          (_x3,_y3,_z3)
  end_command
  command
    solve
  end_command
end
; ---------------------------------------------------------------
def Change_Properties
   w_stiff = wall_stiff
   sstiff = shear_stiff
   nstiff = normal_stiff
   bfric  = ball_fric
   bdens  = ball_dens
    command
        wall                id=5 kn=w_stiff
        wall                id=6 kn=w_stiff
          prop dens=bdens  ks=sstiff  kn=nstiff  fric=bfric damping=0.941
          solve
    end_command
end
```

```
;=====================================================================
; [ Main Input ]
;=====================================================================
Change_wall_size
SET normal_stiff = 7.0e5    ; normal stiffness of balls
SET shear_stiff  = 2.4e5    ; shear  stiffness of balls
SET ball_fric     = 5.0
SET ball_dens     = 2150.0
SET wall_stiff    = 9.8e4   ; make lateral wall stiffness=1/10 of ball stiffness
SET grav 0 0 0
Change_Properties
ini xvel=0 yvel=0 zvel=0 xspin=0 yspin=0 zspin=0
save Triaxf_assemble.sav
return
;=====================================================================
```

3. 응력상태의 계산 및 제어, Loading

- 시료는 상, 하부 경계면의 특정속도로 이동시켜 하중을 재하함.
- get_ss FISH function을 사용하여 시료의 응력과 변형 상태를 결정.
  ⇒ 응력은 경계면에 작용하는 평균 힘을 구해 계산.
- 하중재하 전과정에 걸쳐 servo FISH function과 get_gain FISH function에 의해 실행되는 servomechanism을 사용해 측면 경계면을 조절하여 구속응력을 일정하게 유지.
- servo function은 한 주기에 한 번씩 사용되고, 응력을 정하거나, 측정되는 응력과 요구되는 응력의 차이를 줄이는 방법으로 경계면 속도를 조절하는 servo-control을 사용하기 위해 get_ss function을 사용함.
- 변수 z_servo는 스위치처럼 작동하는데, 이 변수가 1이면 servo control은 상, 하 경계면을 작동시킨다.
- 본 예제의 구속 응력은 196kPa 이고, servo 스위치 z_servo는 1 이다.
- iterate function은 주어진 허용 오차 내에서 요구되는 응력이 얻어질 때까지 100 cycle 씩 반복함.
- 재하 속도는 0.2, 최대 변형율은 10%

```
; =====================================================================
; 1) Apply initial confining stress (servo-control) and
; 2) Axial loading - shearing for triaxial sample
```

```
; ================================================================
new
res Triaxf_assemble.sav
; ----------------------------------------------------------------
def GetWallStressStrain
  new_rad = w_radend1(wadd1)
  rdif  = new_rad - rad_cwall
  zdif  = w_z(wadd6) - w_z(wadd5)   ; check !
  new_height = height_sample + zdif
  wsrr  = -w_radfob(wadd1) / (new_height * 2.0 * pi * new_rad)
  wszz  = 0.5*(w_zfob(wadd5) - w_zfob(wadd6)) / (pi * new_rad^2.0)
  werr  = 2.0 * rdif / (rad_cwall + new_rad)
  wezz  = 2.0 * zdif / (height_sample + new_height)
  wevol = wezz + 2.0 * werr
end
; ----------------------------------------------------------------
def GetServoParameter
  alpha = 0.5
  count = 0
  avg_stiff = 0
  cp    = contact_head
  loop while cp # null
    if c_gobj2(cp) = wadd1
      count = count + 1
      avg_stiff = avg_stiff + c_kn(cp)
    end_if
    cp = c_next(cp)
  end_loop
  avg_stiff = avg_stiff / count
  gr = alpha * height_sample * pi * rad_cwall * 2.0 / (avg_stiff * count * tdel)
  count = 0
  avg_stiff = 0
  cp = contact_head
  loop while cp # null
    if c_gobj2(cp) = wadd5
      count = count + 1
      avg_stiff = avg_stiff + c_kn(cp)
    end_if
    if c_gobj2(cp) = wadd6
```

```
        count = count + 1
        avg_stiff = avg_stiff + c_kn(cp)
      end_if
      cp = c_next(cp)
    end_loop
    ncount = count / 2.0
    avg_stiff = avg_stiff / count
    gz = alpha * pi * rad_cwall^2.0/ (avg_stiff * ncount * tdel)
end
; ---------------------------------------------------------------------
def ServoWallMoving
    while_stepping
    GetWallStressStrain
    udr = gr * (wsrr - srrreq)
    w_radvel(wadd1) = -udr
    if z_servo = 1
      udz = gz  * (wszz - szzreq)
      w_zvel(wadd5) = udz
      w_zvel(wadd6) = -udz
    end_if
end
; ---------------------------------------------------------------------
def Iterate
    loop while 1 # 0
      oo = out('srrreq = ' + string(srrreq))
      oo = out('szzreq = ' + string(szzreq))
        if abs((wsrr - srrreq)/srrreq) < sig_tol then
        if abs((wszz - szzreq)/szzreq) < sig_tol then
        end_if
      end_if
      GetServoParameter
      command
        cycle 150
      end_command
    end_loop
end
; ---------------------------------------------------------------------
def CalVarValueByWall              ; variables for histories
    devi_s = wszz - wsrr           ; deviatoric stress
```

```
  axia_e = wezz - wezz_0          ; axial strain
  radi_e = werr - werr_0          ; radial strain
  volu_e = wevol - wevol_0        ; volumetric strain
  conf_s = wsrr                   ; confining stress
end
; ---------------------------------------------------------------------
; Accelerates the platens to achieve final velocity
def AccelPlatens
  _niter = _nsteps / _nchunks
  loop _chnk (1,_nchunks)
    if _close = 1 then
      _vel = _chnk*(_vfinal/_nchunks)
    else
      _vel = -_chnk*(_vfinal/_nchunks)
    end_if
    _mvel = -_vel
    command
      wall id 5 zvel= _vel
      wall id 6 zvel= _mvel
      cycle _niter
    end_command
  end_loop
end
; ---------------------------------------------------------------------
def TriaxialLoading
  loop while 1 # 0
    command
      cycle 100
    end_command
    if -axia_e > AxialStrainLimit then
      exit
    end_if
  end_loop
end
;=====================================================================
; [ Main Input ]
;=====================================================================
GetWallAddress
ini xvel=0 yvel=0 zvel=0 xspin=0 yspin=0 zspin=0
```

```
SET srrreq=-196.0e3 szzreq=-196.0e3 sig_tol=0.005 z_servo=1
Iterate
GetIniStrains
ini xvel=0 yvel=0 zvel=0 xspin=0 yspin=0 zspin=0
set z_servo  = 0 ; switch axial stress servo on or off (1:on, 0:off)
set _vfinal  = 0.2
set _nsteps  = 2000
set _nchunks = 80
set _close   = 1  ; axial loading for shearing
set AxialStrainLimit = 10.0e-2
AccelPlatens
TriaxialLoading
TriaxOutHisSave
return
; ====================================================================
```

나. 수치시험실 활용 방안

개별요소법(DEM)은 조립재료 및 락필재료, 암반을 대상으로한 지반공학 및 지질, 암반등 다양한 분야에 그 활용성이 증가되고 있는데, 지반공학분야에 있어 입자유동개념의 개별요소법은 기존 연속체 수치해석의 한계를 극복할 수 있는 대안으로서, 그 필요성 및 효과에 대한 기본검증과 선행연구가 마무리 되었으며, 각종 연구 및 설계에 그 적용이 시도되고 있다.

개별요소법을 활용한 기존의 주요 연구분야는 다음과 같으며, 이는 향후 지반공학 및 기타 분야에서의 개별요소법 활용 여부를 판단하는데 중요한 지표가 될 것으로 판단된다. 이러한 각 주요 적용 분야별 적용 내용과 방법은 아래 표와 같다.

< 개별요소법 활용의 기존 주요 연구내용 >

- ☐ 조립재료의 물성치 평가 및 검증
- ☐ 대입경 조립재료의 파쇄 및 물성치 변화 예측
- ☐ 조립재료의 입자형상에 따른 물성치 변화 예측
- ☐ 암반의 물성치 평가 및 검증 (신선암)
- ☐ 절리암반의 물성치 평가
- ☐ 기존 지반공학분야 연구에 대한 응용
- ☐ 지반공학분야 대변형 조건에 대한 수치모델링

[표 3.7.8] 개별요소기법의 분야별 적용 내용 및 방법

적용 분야	적용 내용 및 방법
조립재료의 물성치 평가 및 검증	• 실내시험 결과를 이용한 미시물성치 산정 (특정 하중조건의 삼축압축시험 및 직접전단시험 등) • 타 하중조건의 개별요소 수치모델링을 통한 강도 및 변형 물성치 예측 • 타 하중조건 시험결과와의 비교를 통한 실내시험 검증
대입경 조립재료의	• 대입경 조립재료 실내시험 결과를 이용한 미시물성치

파쇄 및 물성치 변화 예측	산정 (특정 입자간 본딩효과 물성치 적용) • 본딩효과 제거에 의한 입자파쇄 수치모델링 • 입자파쇄후의 강도 및 변형 물성치 예측
조립재료의 입자형상에 따른 물성치 변화 예측	• 조립재료 실내시험 결과를 이용한 미시물성치 산정 • 클러스터 기법을 활용한 다양한 형태의 입자형상 모델링 • 조건별 수치모델링을 통한 물성치 변화 예측
암반의 물성치 평가 및 검증 (신선암)	• 실내시험 결과를 이용한 미시물성치 산정 (특정 하중조건의 점하중강도시험 및 일축압축시험, 삼축압축시험 등) • 타 하중조건의 개별요소 수치모델링을 통한 강도 및 변형 물성치 예측 • 타 하중조건 시험결과와의 비교를 통한 실내시험 검증
절리암반의 물성치 평가	• 신선암 대상 실내시험 결과에 의한 미시물성치 산정 • 암반내 임의 조건별 불연속면 생성 모델링 • 동일 하중조건의 역학시험 모델링 • 각 조건별 강도 및 변형관련 물성치 예측
기존 지반공학분야 연구에 대한 응용	• 조립재료 및 암반내 기초 지지력 예측 (얕은기초) • 암반에 대한 발파 거동 예측 • 지반내 그라우팅 효과 및 그라우팅시 물성치 예측 • 말뚝기초에 대한 지지력 발현 및 수평방향 거동 예측 • 지반-보강재의 상호거동 분석 • 다양한 조건의 토압분포 예측 • 수리연동해석을 통한 지반내 입자유동 및 공동생성 분석 • 수리연동해석을 통한 제방 및 댐의 월류시 거동 예측
지반공학분야 대변형 조건에 대한 수치모델링	• 콘관입시의 대변형 조건 수치모델링 • 동다짐공법시의 대변형 수치모델링 및 다짐효과 예측 • 지반내 보강재의 거동 및 효과 예측 (인발효과 등) • 각종 지반구조물의 전단키 효과 예측

제 8 절 결 론

본 연구에서는 대형실내시험, 현장탄성파시험, 진동계측결과를 이용한 수치해석에 의한 역산법으로부터, 대입경 조립재료의 동적물성을 산정하는 기법을 개발·제시하고, 제시된 기법으로부터 각 대형 지반구조물을 이루는 대입경 조립재료의 동적물성 범위를 제시함으로써, 대형 지반구조물의 지진 및 진동하중 작용시 응답 거동을 정확히 파악하는데 필요한 기초 물성을 제공함에 그 목적을 두었다.

이를 위하여 대형 공진주시험시스템의 신규 구축 및 활용, 대형 반복삼축압축시험에 의한 대입경 조립재료의 동적변형특성 평가 등 실내시험기법에 의한 조립질 지반재료의 비선형 변형특성, 즉 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 특성을 산정하고 그 물성 범위를 제시하였다. 대형 공진주시험과 반복삼축압축시험을 동일한 재료에 대하여 수행한 결과 시험기법의 특성에 따라 미소변형율에서의 동적물성에 다소 차이가 나타나지만 매우 유사한 재료의 비선형 변형특성을 획득할 수 있었으며, 이를 바탕으로 상호 시험기법 간의 검증을 실시하고, 대입경 조립재료의 대표적 비선형 변형곡선을 제시할 수 있었다. 이러한 실험절차 및 동적물성 데이터는 향후 대입경 조립재료의 동적변형특성관련 연구 또는 건설 실무에서 구조물의 동적응답평가에 필요한 중요 물성치 제공을 위하여 활용될 수 있다.

실제 구조물 축조재료로 사용되는 대입경 조립재료 지반 조성 시 현장 조건에서의 물성 특성은 전단파속도 또는 최대전단탄성계수 등으로 표현할 수 있으며, 본 연구에서는 조립재료의 특성과 구조물의 부정형 기하학적 특성을 고려하여 최적의 시험기법을 제시하고 그 적용성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 제시된 UBF 표면파기법은 대입경 조립재료로 축조된 부정형 구조물에 대하여 우수한 적용성을 나타내었으며, 이러한 결과는 기존의 다양한 탄성파 탐사 기법과의 비교 검증을 통하여 그 실효성을 확인하였다. 또한 국내 다양한 건설 프로젝트 현장에서 수집한 4000개 이상의 탄성파 탐사 데이터를 종합함으로써, 건설 현장의 기본적 지반물성 조사 등에 의하여 전단파 속도 등을 간략히 유추할 수 있는 기반을 제공할 수 있었다.

이와 같이 실내시험에 의한 재료의 비선형 변형특성과 현장에서 획득 가능한 전단파속도(최대전단탄성계수)는 지반구조물의 동적응답해석을 위한 필수 지반정수이며, 본 연구에서 제시된 실내 및 현장시험 방법, 데이터베이스를 활용하여 보다 개선된 지반구조물 설계 및 해석이 가능할 것으로 기대된다.

대표적인 대입경 조립재료로 축조된 사력댐의 경우 시료 채취에 의한 실내시험

또는 현장에서의 전단파속도 주상도의 획득이 매우 제한적이다. 본 연구에서는 이에 대한 대안으로 실지진계측데이터를 이용하여 댐의 고유응답주기를 산정하고, 입력물성(강성) 변화에 따른 반복적 수치해석 결과를 계측 고유주기에 맞추는 역해석 기법을 도입하여 댐 축조용 사력재료의 동적 변형특성을 유추하는 방법을 제안하였다. 이러한 기법을 대형 사력댐에 적용한 결과 기존의 제안식 또는 현장시험 결과와 유사한 특성을 확인하였으며, 또한 해체 예정 댐에 대한 발파진동시험 결과를 분석한 결과 그 실효성을 입증하였다. 이러한 사례는 향후 상시진동모니터링, 발파진동에 의한 대형 지반구조물 거동특성평가 등을 수행할 때 구조물 축조용 지반재료의 동적변형특성 추정 또는 정상거동상태 평가 등에 이용될 수 있다.

본 연구에서는 대입경 조립재료 동적물성 평가를 위한 수치해석 기반의 가상 실험 조건을 구성하기 위한 방안으로 대입경 조립재료의 입도분포와 초기조건을 반영한 정적 및 동적 실내 삼축압축시험의 개별요소 수치모델링을 수행하였다. 대입경 재료에 요구되는 대형 삼축압축시험은 시료조성의 어려움 및 하중재하 규모 등으로 인해 많은 비용과 노력이 요구되는 실내시험이며, 이로 인해 다양한 조건에서 많은 빈도의 실내시험 수행이 불가능하고 해당 시험결과에 대한 별도의 검증수단이 미비한 실정이다. 개별요소법 기반의 수치해석 기법에서는 대입경 조립재료의 일부 정적 및 동적 실내시험 결과를 이용하여 수치모델링에 필요한 미시 물성치를 산정하고, 이 파라미터를 기반으로 기타 다양한 응력조건에 대한 삼축압축시험 결과를 예측할 수 있다. 이를 통해 실내 대형 삼축압축시험에 대한 결과검증 및 소수 실내시험 결과로부터 다양한 조건의 강도 및 변형특성의 예측이 가능하다. 이러한 기술은 향후 대입경 조립재료에 대한 물성 취득의 신뢰성을 높이는 원천기술로 큰 활용성을 갖게 될 것이며, 일반 조립재료의 물성산정시 시험회수와 경우의 수를 최소화할 수 있게 하는 경제적 실용화 기술로 발전할 수 있을 것이다.

이상의 결과를 바탕으로 다양한 대형 지반구조물에 널리 사용되는 대입경 조립재료의 동적 물성을 엄밀히 평가하고 구조물의 설계·해석의 정밀도 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다. 또한 신규 구축된 대형 공진주시험기, 신규 개발된 UBF 표면파탐사기법 및 탐사장비 등은 건설 실무에 다양하게 적용될 수 있으며, 이를 바탕으로 국내의 대형 지반구조물 관련 기술 수준의 향상을 가져올 것으로 기대된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구목표의 달성도

1. 연구개발 수행 진도율(당해연도 연구기간 12개월 환산)

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	진도(%)
대형공진주시험 수행 및 기법 제시																	100
상이 구조물 시료 동적물성 범위 제시																	100
대형 공진주 기본물성과 동적물성 상관관계 도출																	100
보고서 작성																	100
대형삼축구속압별 최대전단탄성계수 평가																	100
조립재료 지반 기존 지표면 탐사기법 특성 평가																	100
조립재료 지반 표면파탐사 다양한 발진원 영향 평가																	100
탄성파탐사 하드웨어 특성평가																	100
조립재료 지반에 적합한 최적 탄성파 해석기법 제안*																	20*
현장탐사 기법별/재료별 동적물성 자료 D/B분석																	100
고분해능반사법 탐사 자료처리 및 분석																	100
시추조사 및 현장탐사 및 자료분석																	100

3차원 수치해석에 의한 역산법 확장 가능성 평가																100
실측 data로부터 역산기법 적용 댐 동적물성 산정																100
실대규모 발파후 실내시험																100

주 *: 2차년도 연구항목이지만, 그 일부를 1차년도에 선행 연구수행함.

· · · · · · · · · · 당초계획

———————— 실 적

2. 연구개발 목표의 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
• 대형공진주시험 수행 및 동적물성 산정기법 제시	100	• 총 10개 조립재료에 대한 대형 공진주시험 수행 완료 • 대형 공진주시험 수행 매뉴얼 작성 • 대입경 조립재료 공진주시험 결과 비교 검증 • 공진주시험기 규모에 따른 동적물성 산정 결과 특성 검증
• 상이 구조물 시료 동적물성 범위 제시	100	• 댐 사력재료, 현장 채움용 자갈재료, 고속철도 강화노반 성토재료 (2) 등 총 4 종류 시험시료에 대한 대형공진주시험 수행 • 재료 특성에 따른 최대전단탄성계수, 비선형 변형특성 상관관계 평가 • 동적 변형특성 모델링 계수 산출
• 대형 공진주 기본물성과 동적물성 상관관계 도출	100	• 댐 사력재료 기준 조립재료 최대입경, 입도분포 특성, 밀도 등의 변화에 따른 최대전단탄성계수, 비선형 변형특성, 감쇠비 등의 변화 양상 파악 • 대표적 현장 사용 재료의 입도분포에 따른 영향인자 확인 분석

• 대형삼축압축시험 이용 대입경 동적물성 산정 기법 연구	100	• 대형삼축압축시험장비 검증 • 상사입도조정법/자갈입도보정법 등 입도조정방법에 대한 평가 • 하중패턴, 최대입경, 세립분함유율, 함수비 등 시편 및 시험 조건 영향 평가 • 조립재료 최대탄성계수시험법/중간주응력이 강성에 미치는 시험법 개발 및 평가 • 댐, 철도, 도로 등 주요 지반구조물 조립재료의 동적물성(탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수) 산정 및 가이드라인 제시 • 기본 물성과 재료특성을 반영한 국내 조립지반재료의 동적물성 예측 모델 및 모델 재료 상수 제시
• 조립재료 지반에 적합한 최적 탐사기법을 위한 측정 하드웨어 시스템의 제안	100	• USA Beamformer기법 위한 전용 소프트웨어 개발: • Beamforming 1.0 • USA Beamformer기법 위한 전용 하드웨어 제안: • DS-USB-6289 시스템, MEMS 가속도계 유니트.
• 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 정립 및 검증	100	• 대입경 조립골재 지반(구조물)에서 시추공 탐사기법과 비교: 대형 사력댐, 사력댐 진입로, 암버럭 성토 호남고속철 노반, 평화의댐 사석 성토구간. • 다양한 조립재료 지반구조물에서의 현장적용을 통한 실용성, 적용성 검증: 철도노반, 사력댐, 암버럭성토 비포장도로, 일반 자연지반 등 • 조립재료 지반구조물별 동적물성의 데이터베이스 작성: • 사력댐의 코아영역, 사석 영역의 대표 전단파속도
• 지반구조물별 최적 탄성파 탐사기법의 실무적용을 위한 매뉴얼 작성	100	• USA Beamforming기법을 위한 시험매뉴얼 작성 • 개발된 소프트웨어 Beamforming 1.0을 위한 사용자 매뉴얼 작성
• 현장동적물성 D/B 분석, 자료분석	100	• 1차년 및 2차년 합계 총 97개 지역4,548개의 현장동적물성 지층별 종파 및 전단파 속도 및 정규분포 곡선을 활용한 신뢰도 평가 • 1차년 수행한 고분해능 반사법 탐사의 측선별 자료처리 및 분석, 신호원 분석
• 현장적용	100	• 현장탐사자료의 검증을 위한 무수보링 시추조사 • S파 굴절법탐사, 실대규모 발파시험시 상시미진동 탐사등

• 동적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소해석 알고리즘 개발	100	• 3차원 초기 개별요소 생성기법 개발 (경계면 이탈 등의 보안책 도출) • 동적 삼축시험자료에 대한 개별요소 수치모델링 수행
• 개별요소법 기반 물성평가 기법 및 수치시험실 활용방안 도출	100	• 개별요소 수치모델링 기법의 적용과정 및 과정별 방법 정리 • 지반공학분야의 수치시험실 활용내용 정리
• 3차원 수치해석에 의한 역산법 확장 가능성 평가	100	• H댐 3차원 동적 수치해석 수행 (FLAC3D) • 최대전단탄성계수의 강성계수 변화에 따른 4개 단면 해석 수행 • 고유주기 특성 비교에 따른 현장 동적물성 추정 • 기존 주기평가 및 경험식 비교 검증 완료
• 실측 data로부터 역산기법 적용 댐 동적물성 산정	100	• 댐 발파진동 4개 패턴별 가속도 계측자료 분석 완료 • 발파진동에의한 댐 고유주기 산정기법 제안 • 고유주기 산정 결과 적정성 확인 • 반복적 수치해석에 의한 댐 축조재료 동적물성 평가
• 대형 공진주 기본물성과 동적물성 상관관계 도출	100	• 댐 축조재료에 대한 소형·대형 공진주시험 완료 • 발파진동 해석 결과 비교 분석

제 2 절 관련분야에의 기여도

1. 대형공진주시험시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

대입경 조립재료로 축조된 지반구조물의 동적 변형특성 평가는 댐, 도로, 철도, 항만 등 다양한 토목구조물 관련 업무에 필수적인 사항으로 설계정수 평가, 시공품질 평가, 구조적 안정성 평가 등 계획, 설계 시공 등 다양한 분야에 활용될 수 있다. 특히 내진성능평가와 같은 동적 해석을 수행하는 경우 실내시험을 바탕으로 한 정규화 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 특성은 지반재료의 변형 특성 구성모델 적용 시 필수 사항으로 요구된다. 본 연구를 통하여 구축된 국내 최대 규모의 대형 공진주시험시스템은 실제 현장재료 특성을 나타내는 대입경 조립재료의 동적 변형특성을 직접적으로 평가할 수 있으므로, 그 활용성이 높다. 또한 다양한 실험 결과

로부터 도출된 성과는 재료의 비선형 변형특성의 직·간접적 도출에 필수적인 정보를 제공하므로 지반공학 실무에 대한 높은 학술적 기여도가 예상된다. 최종적으로 실제 지반구조물 축조 현장의 재료특성 평가, 설계입력변수 제공 등 실무와 밀접한 연계 활용이 가능하다. 본 연구성과의 기여도는 다음과 같이 정리할 수 있다.

[표 4.2.1] 관련분야에의 기여도

연구내용	관련분야 기여도
대형 공진주시험시스템 사양 결정	• 국내외 대형 공진주시험기 관련 기술수준 및 활용현황 조사를 바탕으로 현업의 대형시험 및 조립재료 동적 변형특성 평가 중요성 인식 제고 • 공진주시험 관련 국제기준 등 필수 학술적·실무적 자료 정리 제공
대형 공진주시험시스템 제작	• 국내 최초의 대형 공진주시험시스템 개발·구축 • 국내 대입경 조립재료 동적 변형특성 평가 관련 핵심 인프라 보유 및 활용기반 마련 • 대입경 조립재료의 동적 변형특성 연구·실무 활용성 제고
공진주시험시스템 검증	• 대형 시험시스템 검·교정 절차 제시 및 시험기 측정 정밀도 향상 • 대형 공진주시험시스템 이용 시 공시체 크기에 의한 효과(size effect) 확인 및 이를 고려한 결과분석 가이드라인 제공
동적물성 산정 및 산정기법 제시	• 대형 공진주시험 수행방법, 평가 방안 절차 제시를 바탕으로 연구성과 활용·확산 토대 마련 • 대입경 조립재료에 대한 시험시스템 적용성 및 실효성 검증
기본물성과 동적물성간 상관관계 고찰	• 대표적 대입경 조립재료 유형별 동적 변형특성 산정을 바탕으로 구조물 설계·시공·평가 관련 기본 물성정보 가이드라인 제공 • 재료의 입도분포 등 기본 물성에 따른 재료 비선형 변형특성 범위 추정 가이드라인 제시

2. 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

본 연구 분야의 내용은 대형삼축압축시험장비 검증, 상사입도조정법/자갈입도보정법 등 입도조정방법에 대한 평가, 하중패턴, 최대입경, 세립분함유율, 함수비 등 시편 및 시험 조건 영향 평가, 조립재료 최대탄성계수시험법/중간주응력이 강성에 미치는 시험법 개발 및 평가, 댐, 철도, 도로 등 주요 지반구조물 조립재료의 동적물성(탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수) 산정 및 가이드라인 제시, 기본 물성과 재료특성을 반영한 국내 조립지반재료의 동

적물성 예측 모델 및 모델 재료 상수 제시이며 이들 연구내용들에 대한 관련 분야 기여도는 다음 표와 같이 정리될 수 있다.

[표 4.2.2] 관련분야에의 기여도

연구내용	관련분야 기여도
• 대형삼축압축시험장비 검증	• 입경이 큰 조립지반재료에 대한 요소시험장비의 부족으로 이에 대한 실험적 연구와 적용이 어려웠으며, 제한적이었다. 특히 조립지반재료에 대한 동적물성의 적용은 경험적 이용이나 외국자료의 준용에 그쳤다. 그러나 본 장비의 구축과 함께 향후 이에 대한 실험적 연구와 적용이 경제적/안정적 설계와 시공에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 위해서는 반드시 시험결과에 대한 신뢰가 기반이 되어야 한다. 따라서 본 연구에서 수행된 장비와 시험법에 대한 검증은 향후 수행되어 얻게될 시험 결과에 대한 신뢰도 확보와 보다 적극적 활용에 크게 기여할 수 있을 것이다
• 상사입도조정법/자갈입도보정법 등 입도조정방법에 대한 평가	• 실제 현장에서 사용되는 조립지반재료는 대형요소시험장비에서도 직접 시험이 불가능할 정도로 큰 경우가 많이 있다. 따라서 이러한 경우 입도를 조정해서 현장 물성을 평가하는 것이 불가피하다. 그러나 이러한 입도조정방법들에 대한 평가가 없기 때문에, 시험 후에도 합리적인 적용이 어려웠다. 따라서 본 연구에서 조립지반재료의 시험에 가장 널리 활용되는 상사입도조정방법과 자갈입도조정법으로 조성된 시편에서 미소변형 수준에서의 탄성계수 시험 결과에 미치는 영향을 평가하였다.
• 하중패턴, 최대입경, 세립분함유율, 함수비 등 시편 및 시험 조건 영향 평가	• 시험법의 확립과 함께 다양한 지반구조물의 지반재료 및 조건에 대해 시험이 수행되어 그 결과에 대한 평가가 가능하게 되었다. 따라서 이러한 시험법에 따라 일관된 시험을 수행하여 재료입도를 포함한 시편에 대한 조건과 하중모드, 주파수 등의 시험 조건의 인자들이 미치는 영향을 평가하여 조립재료의 합리적 대형삼축압축시험 결과의 적용에 기여할 수 있을 것이며, 향후 많은 시험 결과의 축적에 따라 설계 기준 상의 재료 조건 및 품질관리 조건에의 반영과 성능설계를 위한 시험법의 확립에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.
• 조립재료 최대탄성계수시험법/중간주응력이 강성에 미치는 시험법 개발 및 평가	• 철도, 도로 등 평면변형률 조건이나 중간주응력 조건을 받는 지반구조물에 대한 현장 응력 조건을 보다 합리적으로 모사할 수 있는 시험방법에 대한 평가가 가능하게 되었음 • 미소변형 수준에서 반복삼축압축시험이 수행된다 하더라도 최대탄성계수값을 가정하는 한계를 가진 실내시험에서 현장시험 결과나 가정없이 전체 변형률 구간에서 탄성계수 변화 곡선을 도출할 수 있는 기반을 확보하였음

• 댐, 철도, 도로 등 주요 지반구조물 조립재료의 동적물성(탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수) 산정 및 가이드라인 제시	• 댐, 철도, 도로 등 국내 대형지반구조물의 주요한 성토재료인 대입경 조립지반재료들에 대해 여러 조건에서의 동적물성산정시험을 수행하여 탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수 등의 시험 결과를 확보하여 본 시험 조건과 유사한 재료에 대한 적용이 가능하도록 시험 결과를 정리 및 물성 모델의 대표적 재료 상수를 제시하여 일반 설계에 적용이 용이하도록 하였다.
• 기본 물성과 재료특성을 반영한 국내 조립지반재료의 동적물성 예측 모델 및 모델 재료 상수 제시	• 가장 합리적인 동적물성 산정과 적용은 실제 적용되는 현장 조건과 재료에 맞는 시험을 수행하여 물성을 산정하는 것이다. 그러나 대입경의 조립재료에 대해 모든 경우에 시험을 수행하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 설계 초기나 해석 등에 물성을 예측하여 사용하는 것도 필요하다. 따라서 이에 대한 다양한 모델들이 제안되어 왔는데 이 중에서 국내 조립지반재료와 적용 대상 조건에 적합한 모델과 모델 상수들을 산정 제시하고, 필요한 경우 새로운 모델을 제시하여 대입경 조립지반재료의 동적물성을 합리적으로 사용할 수 있도록 하였다.

3. 표면파 현장탐사를 통한 대입경 조립지반 동적물성 산정

본 연구의 최종목표는 대입경 조립재로 시공된 지반구조물의 전단파 속도 주상도를 평가하기 위한 최적의 표면파 기법을 개발하는 것으로서, 측정하는 전단파 속도는 지반구조물의 내진해석에 활용될 목적으로 측정되는 것이다. 동적물성을 산정하는 표면파 현장탐사 관점에서 대입경 조립재료 구조물은 다음과 같은 세 가지 특징을 가지고 있다. 첫 째, 세립집이나 작은 세립집 지반보다 매질의 연속성이 낮아서 측정신호의 품질이 좋지 않다. 둘 때, 대입경 조립골재로 시공된 지반구조물은 반무한 평면체가 아니라 측면에 사면이 조성된 경우가 일반적이다. 세 째, 대입경 조립골재로 매립된 지반은 횡방향, 깊이방향 모두에서 재료의 불균질과 비등방성 특징이 있다. 따라서 본 연구에서는 상기와 같은 특징에 부합하는 표면파 기법으로 USA Beamforming 기법을 제안하였고, 이 기법의 관련분야의 기여도는 다음과 같이 정리할 수 있다.

[표 4.2.3] 관련분야에의 기여도

연구내용	관련분야 기여도
• 조립재료 지반에서 기존 지표면 탐사 기법의 특성 평가	• 조립재료의 불균질성을 최소화시킬 수 있는 기법 선정의 가이드라인은 횡방향 변이성이 큰 지반에 대해서도 동일하게 활용가능. 또한, 횡방향 변이성이 큰 지반에 있어서, 동일 지반에 대한 복수의 표면파 기법 적용으로 표면파 측정의 신뢰도 향상
• 조립재료 지반에 대한 표면파 시험에서 다양한 발진원의 영향 평가	• 안벽구조물 배면매립지, 철도노반 성토체 등 대입경 조립재료를 활용하는 지반구조물의 내진해석용 동적물성 평가에 있어서 본 연구에서 제안하는 영향인자 연구결과를 참고하여 적합한 해석기준 정립 가능함
• 탄성파 탐사의 하드웨어 특성 평가	• 일반적으로 탄성파 탐사에는 고가의 하드웨어 사용이 필수적이나, 본 연구에서 제시하는 각 하드웨어의 특성을 기준으로 목적에 부합하는 최적의 솔루션, 즉 경제성, 효율성, 신뢰성 등을 고려한 최적의 하드웨어 선택이 가능함.
• 표면파 속도측면 3차원 형상 효과의 정성적, 정량적 평가	• 표면파의 반사 및 굴절 관련연구는 현재 거의 진행된 바가 없는데, 본 연구에서 수행한 절차와 방법 (파군의 인식과 특정 파군의 분리)은 다른 형태의 부정형 구조물에 대한 표면파 분산특성을 이해하는데 가이드라인이 될 것으로 판단된다.
• 조립재료 지반에 적합한 최적 발진원 제안	• 본 연구에서 결정한 100-kg 중추 발진원은 대입경 조립재로 구성된 지반구조물 뿐만 아니라 표면파 시험에 있어서 큰 에너지의 발생을 요구하는 지반구조물 (도로포장, 암버럭성토 철도노반 등)에 적합한 발진원 기초가 될 것으로 판단된다.
• 조립재료 지반에 적합한 최적 탄성파 해석기법 제안	• 본 연구에서 제안한 USA Beamforming 기법은 일반화된 기법으로 댐구조물이 아닌 다른 구조물에도 적용될 수 있다. 따라서 향후 표면파 기법의 범용화에 큰 기여를 할 것으로 판단된다.
• 조립재료 지반에 적합한 최적 탐사기법을 위한 측정 하드웨어 시스템의 제안	• 본 연구에서 제안된 하드웨어 시스템은 500만원 이하의 저가이면서 16비트 해상도, 앤티앨리어싱 필터, 16채널, 노트북컴퓨터와의 연계성, 저전력, 휴대성, BNC 터미널 등의 다양한 장점을 지니고 있다. 이러한 스펙은 대부분의 탄성파 시험에 사용할 수 있는 성능으로, 본 연구과제 성과물의 실용성을 더욱 배가하고 있다.
• 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 정립 및 검증	• 본 연구에서 제안한 USA Beamforming 기법은 대입경 조립골재 지반구조물에 대한 적용을 위하여 개발되었지만, 측정자료의 해석을 자동화하였기 때문에 일반적인 콘크리트 구조물 비파괴 평가, 자연지반 지반조사 등에 보편적으로 활용될 수 있는 가능성을 가지고 있다.

4. 반사법탄성파탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정

연구내용	관련분야 기여도
• 현장동적물성 D/B 분석	• 다양한 지반조건에서의 공종별/지층별 종파 및 전단파 속도와의 상관분석 • 현장비용절감효과, 지층별/재료별 상관분석을 통해 대입경조립재료의 동적물성 산정에 기초자료 제공
• 조립재료 지반에 대한 고분해능 반사법 탄성파탐사 자료분석	• 측정가능한 다양한 측선배열 및 송신원을 비교함으로써 신호원/측선배열 선택시 주의사항이나 효율성, 신뢰성등을 고려한 최적의 측정변수의 결정이 가능함
• 시추조사 및 다양한 현장시험	• 최종 연구개발목표의 자료검증

5. 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법개발

본 연구의 최종 목표는 대입경 조립재료인 사력재료로 축조된 필댐 사력죤의 전단파속도 주상도 및 깊이별 최대전단탄성계수 산정을 위하여, 기 관측된 미소지진 기록을 활용하여 댐의 고유주기를 산정하고 반복적 수치해석을 바탕으로 재료의 강성을 평가하는 것에 있다. 이를 위하여 댐 지진계측자료 분석, 이를 이용한 댐의 고유주기 평가, 반복적 동적 수치해석을 이용한 댐 고유주기 산정 및 계측 결과와의 비교, 3차원 수치해석의 확장성 평가 등 일련의 연구를 수행하였다. 해당 연구개발 내용의 관련 분야 기여도는 다음 표와 같다.

[표 4.2.4] 관련분야에의 기여도

연구내용	관련분야 기여도
• 댐 지진자료 획득 및 분석	• 계측된 미소지진가속도 자료의 pre-processing 기법 제안 및 향후 원시데이터 가공을 통한 실무 적용성 증진 • 다양한 구조물 동적 해석 및 분석 시 입력지진파 또는 검증용 지진파 제공
• 동적물성 역산사례 조사	• 사례조사 결과로부터 향후 다양한 활용 방안 제시 및 본 연구의 역산 사례 절차 정립에 기여
• 국내 2개 댐 지진계측기록 확보 및 분석	• 해당 자료 활용 댐 고유주기평가방법 제안 • 댐 고유주기 이용 축조재료 동적물성 평가절차 제시
• 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석	• 국내 실정에 맞는 사력댐의 고유주기 산정 방법 제시 • 수치해석 등을 이용하여 댐 지진시 거동 분석 시 해석기법 및 입력물성의 타당성을 사전에 검토할 수 있는 실무적 체계 제공
• 3차원 수치해석에 의한 역산법 확장 가능성 평가	• 계곡 효과 등을 고려한 3차원 해석 절차 마련 • 2차원 / 3차원 해석 결과 비교 • 제안된 동적물성 추정 기법의 적정성 검증

6. 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증

본 연구는 5절에서 제안한 댐 고유주기와 반복적 수치해석을 이용한 축조 사력재료의 동적물성 추정기법의 타당성을 실험적으로 검증하는 것이다. 이를 위하여 해체 예정인 성덕댐을 인공적인 발파진동시험 부지로 선정하여 시험을 수행하였다. 발파진동시험 수행 시 안전기준, 환경기준 등을 시험 절차를 제시하였으며, 이에 따른 발파시험 및 계측을 실시하였다. 다양한 유형의 발파 패턴에 대하여 댐 정상부 가속도 계측 데이터를 분석하여 대상 댐의 고유주기를 신뢰성있게 평가하였으며, 해당 결과를 반복적 2차원 동적 수치해석을 수행함으로써 최종적으로 제안된 기법의 검증을 완료하였다. 본 연구내용 및 성과에 대한 관련분야 기여도는 다음 표와 같이 제시하였다.

[표 4.2.5] 관련분야에의 기여도

연구내용	관련분야 기여도
• 국내외 발파진동 실험 사례 조사	• 발파진동시험 수행 사례조사 공유를 통하여 향후 유사 시험 시 주요 관련정보 제공 • 장약량, 시험조건, 규제정보 등 발파진동실험 설계 필수사항 정리
• 진동실험 부지발굴 및 실험 수행	• 발파시험 적정성 검토 사항 정리 및 시험절차 제시
• 실측 data로부터 역산기법 적용 댐 동적물성 산정	• 발파진동특성 규명 - 발파진동 및 댐 동적거동이 계측 진동에 미치는 영향 평가 • 발파진동이용 시 댐 고유주기 산정 절차 및 기법 제시 • 반복수치해석 및 고유주기산정에 의한 축조재료 동적물성 산정 기법의 적정성 검증을 통한 해당 기법의 공학적 근거 제공
• 대형 공진주 기본물성과 동적물성 상관관계 도출	• 제안 기법의 타당성 최종 검증

7. 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험모델링 기법 개발

기존의 국내외 연구결과를 볼 때, 개별요소법은 지반공학적 측면에서 조립재료의 미시적 거동(micro behavior) 및 전체적 거동(macro behavior)의 예측뿐 아니라, 하중조건 및 재료 스케일 측면에서 실내 및 현장시험이 어려운 경우의 수치시험실(numerical laboratory)로서 그 활용성 인정되고 있다.

본 연구를 통해 대입경 조립재료 물성산정에 대한 개별요소법의 실용화 및 응용 기술을 개발한다면, 개별요소생성, 미시물성치 산정, 입도분포 모델링, 응력상태 구현 등의 기술은 불연속체 거동을 보이는 지반공학 대상의 특수성을 고려할 때 암반 및 기초, 사면, 터널 등 다양한 분야에 수치시험실로서의 개별요소법을 적용하는 주요 기술이 될 것이다.

본 연구의 최종성과는 대입경 조립재료 물성치 산정 및 그 결과 검증 수단으로 사용될 수 있는 개별요소법 기반의 수치모델링 기법 제시이다. 이러한 기법은 기존 2차원 모델링기법을 3차원으로 확장하는 것을 주 내용으로 하고 있으며, 각 단계별 응용해석 기법의 실용화 및 범용화를 포함하고 있다. 개별요소 모델링에 사용되는 프로그램은

PFC2D, PFC3D(Itasca)로서, 국외에서 가장 신뢰성을 인정받고 있으며, 많은 연구에 활용되는 프로그램이라 할 수 있다.

그러나, PFC(Particle Flow Code)는 사용자 매뉴얼을 통해 그 적용방법을 정형화한 기존 범용 프로그램과 달리, 개별요소생성 및 입도분포 모델링, 응력조건 구현, 응력 및 변형 제어 등 대부분의 모델링 과정을 사용자가 직접 프로그래밍해야 하는 코딩형식의 프로그램이다. 특히 국내 지반공학분야에서는 3차원 PFC에 대한 연구내용이 미비한 관계로, 이를 이용한 수치모델링 기법 개발은 본 연구의 최종 목적 및 타 연구분야의 활용과 응용 측면에서 매우 유용할 것으로 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구개발 결과의 활용계획

1. 대형공진주시험을 통한 대입경 조립재료 동적물성 산정

본 연구를 통하여 구축된 대형 공진주시험시스템은 대입경 조립재료를 이용하는 다양한 대형 지반구조물의 내진설계, 동적해석 또는 내진성능평가에 필수적인 재료의 동적변형특성 평가에 적극적으로 활용될 수 있다. 또한 다수의 시험 결과를 바탕으로 획득한 조립재료의 입도분포특성과 같은 기본 물성으로부터, 재료의 비선형 변형 특성을 유추함으로써 동적 해석에 요구되는 대표적 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비 특성을 손쉽게 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 신규 구축된 장비를 이용, 다양한 조립질 재료에 대한 실험적 연구가 가능하므로 이와 관련하여 향후 다양한 연구 성과가 도출될 것으로 기대된다. 본 연구의 성과별 활용 계획은 다음과 같다.

- 대형 공진주시험시스템의 개발 및 활용
  대입경 조립재료를 이용하는 다양한 건설현장에서 지반재료의 동적변형특성을 실험적으로 직접 평가함으로써 설계·해석의 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 시험기는 최대 33mm 이상 입경을 갖는 조립재료에 대하여 직접적인 실험이 가능하고, 향후 확장을 통하여 최대 50mm 입경 재료에 까지 이용이 가능하므로 그 활용성이 높다. 또한 해당 시험기는 조립재료의 동적 변형특성 연구 분야에 활발히 이용될 수 있으며, 건설 실무의 설계·해석에 필요한 재료의 동적물성 평가에 적극 활용할 예정이다. 이를 위하여 국내 관련분야 연구 또는 건설 실무에 활용이 요구되는 경우 주관연구기관의 업무 절차에 따라 적극 활용될 수 있도록 협조할 계획이다.

- 공진주시험을 이용한 대입경 조립재료의 동적 변형특성 평가지반구조물의 동적해석에 필요한 재료의 동적 변형특성은 일반적으로 현장에서 계측한 미소변형 최대전단탄성계수 또는 전단파속도와 공진주시험 등으로 획득한 정규화 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비 특성을 혼합하여 활용한다. 지반재료의 비선형 변형 특성인 정규화 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 등은 재료의 교란, 재성형 등에 큰 영향을 받지 않으므로 실내시험을 이용한 평가가 용이하다. 본 연구 성과를 바탕으로 재료의 비선형 변형 특성의 직접 측정이 가능하므로 다양한 분야에 폭넓게 활용될 수 있다.

- 대입경 조립재료의 동적 변형특성
  본 연구에서는 지반재료의 밀도, 최대입경, 입도분포 등이 재료의 동적 변형특성에 미치는 영향 등을 평가하였으며, 댐 축조, 철도노반 등 구조물 시공에 이용되는 재료의 대표적 비선형 변형 특성을 제시하였다. 이를 바탕으로 각 구조물의 설계·해석 시 간편하게 사용할 수 있는 입력 물성을 제공할 수 있다.

2. 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정

본 연구과제에서는 대형삼축압축시험장비 검증, 상사입도조정법/자갈입도보정법 등 입도조정방법에 대한 평가, 하중패턴, 최대입경, 세립분함유율, 함수비 등 시편 및 시험 조건 영향 평가, 조립재료 최대탄성계수시험법/중간주응력이 강성에 미치는 시험법 개발 및 평가, 댐, 철도, 도로 등 주요 지반구조물 조립재료의 동적물성(탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수) 산정 및 가이드라인 제시, 기본 물성과 재료특성을 반영한 국내 조립지반재료의 동적물성 예측 모델 및 모델 재료 상수 제시 등에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구 과정에서 얻은 연구 결과들은 다음과 같은 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

- 조립지반재료에 대한 동적물성의 적용은 경험적 이용이나 외국자료를 적용하는 수준에 그쳤었다. 그러나 본 장비의 구축과 함께 본 연구에서 수행된 장비와 시험법에 대한 검증은 향후 수행되어 얻게 될 시험 결과에 대한 신뢰도 확보가 가능하게 되어 보다 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.
- 실제 현장에서 사용되는 조립지반재료는 대형요소시험장비에서도 직접 시험이 불가능할 정도로 큰 경우가 많이 있다. 따라서 이러한 경우 입도를 조정해서 현장 물성을 평가하는 것이 불가피하다. 그러나 이러한 입도조정방법들에 대한 평가가 없기 때문에, 시험 후에도 합리적인 적용이 어려웠다. 따라서 본 연구에서 조립지반재료의 시험에 가장 널리 활용되는 상사입도조정방법과 자갈입도조정법으로 조성된 시편에서 미소변형 수준에서의 탄성계수 시험 결과에 미치는 영향을 평가하여 그 특성을 파악할 수 있었으므로, 추가적인 연구를 통해 그 경향을 보다 구체적으로 확인하여 정량화할 수 있다면, 입도조정시험 재료에 대한 시험과 합리적 적용이 가능할 것으로 판단된다.
- 시험법의 확립과 함께 다양한 지반구조물의 지반재료 및 조건에 대해 시험이 수행되어 그 결과에 대한 평가가 가능하게 되었다. 따라서 이러한 시험법에 따라 일관된 시험을 수행하여 재료입도를 포함한 시편에 대한 조건과 하중모드, 주파수 등의 시험 조건의 인자들이 미치는 영향을 평가하여 조립재료의 합리적 대형

삼축압축시험 결과의 적용에 기여할 수 있을 것이며, 향후 많은 시험 결과의 축적에 따라 설계 기준 상의 재료 조건 및 품질관리 조건에의 반영과 성능설계를 위한 시험법의 확립에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

- 철도, 도로 등 평면변형률 조건이나 중간주응력 조건을 받는 지반구조물에 대한 현장 응력 조건을 보다 합리적으로 모사할 수 있는 시험방법에 대한 장비구축과 이에 대한 기초적 연구를 수행하였으므로 본 시험법에 대한 실질적인 연구의 기반을 마련했다고 평가할 수 있을 것이다.
- 미소변형 수준에서 반복삼축압축시험이 수행된다 하더라도 최대탄성계수값을 가정하는 한계를 가진 실내시험에서 현장시험 결과나 가정없이 전체 변형률 구간에서 탄성계수 변화 곡선을 도출할 수 있는 기반을 확보하였다. 본 연구에서 수행된 반복삼축압축시험 결과와 비교 검토를 통해 합리적인 시험 결과 분석 기법의 확립과 적용 방안에 대한 연구의 기반이 조성되었다고 평가할 수 있을 것이다.
- 댐, 철도, 도로 등 국내 대형지반구조물의 주요한 성토재료인 대입경 조립지반재료들에 대해 여러 조건에서의 동적물성산정시험을 수행하여 탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수 등의 시험 결과를 확보하여 본 시험 결과와 유사한 재료에 대한 적용이 가능하도록 시험 결과를 정리 및 물성 모델의 대표적 재료 상수를 제시하여 설계 초기나 해석 등에 물성을 예측하여 대입경 조립지반재료의 동적물성을 합리적으로 사용할 수 있도록 하였다.

3. 표면파 현장탐사를 통한 대입경 조립지반 동적물성 산정

본 연구과제에서 현재까지의 연구개발로 획득한 연구성과 중 가장 중요한 핵심이 되는 것은 대입경 조립재로 구성된 지반구조물의 평가를 위한 새로운 표면파 기법이다. 이를 위해서 유한요소해석을 비롯한 표면파 특성평가를 위한 수치해석, 실제 국내 대형 사력댐에서의 표면파 현장 실험(CapSASW, Walk-Away Beamforming, Zywicki 의 Beamforming) 등을 수행하였고, 이를 바탕으로 UBF (Unbiased-Short-Array Beamforming) 기법이라는 새로운 표면파 기법을 제안하게 되었다. UBF 기법은 다양한 활용 가능성을 가지고 있는데 구체적인 향후 계획을 정리하면 다음과 같다.

- 대입경 조립재로 시공된 지반구조물의 내진해석을 위한 동적물성 평가:
  대부분의 대입경 조립재 지반구조물은 지표면이 넓은 수평면이 아니고, 상류사

면. 하류사면 등과 같이 사면이 존재하는 부정형의 구조를 갖게 된다. 이러한 경우 표면파 전파 특성이 전체적으로 수평면에 대한 표면파 시험에 대한 전파특성과 다르게 된다. 따라서 이와 같은 경우 UBF 기법의 고유특징인 “특정방향으로 전파되는 표면파 측정” 이라는 장점을 활용하여 부정형 구조물의 표면파속도를 신뢰성 있게 평가할 수 있다.

- 대입경 조립재 지반구조물에 대한 최적의 표면파 탐사기법으로 활용:
  대입경 조립재료는 기본적으로 지반매질의 불연속성, 이로 인한 횡방향 및 깊이 방향으로의 불균질과 비등방성 문제를 초래한다. 그런데 UBF 기법은 측선하부매질의 평균물성 평가, 특정방향으로 전파되는 표면파 측정 등의 고유특징으로 인하여 조립골재 지반매질의 불균질, 비등방성 문제를 완화하는데 활용할 수 있다.

- 다양한 적용영역을 위한 맞춤형 UBF 기법의 시험매뉴얼 개발:
  현재 표면파 시험 중 가장 정확한 기법은 SASW 기법이지만, 해석의 난해함과 소요되는 시간 문제로 일반 현업에서는 SASW 기법의 사용을 기피하고 있다. 그런데 본 연구에서 제안한 UBF 기법은 그 정확도가 SASW 기법와 동일하면서도 해석의 자동화가 가능한 특징이 있기 때문에, 향후 자동화를 위한 추후 연구를 수행하면 보다 많은 영역에 표면파 기법의 확대가 가능할 것으로 사료된다.

- 도로 노상 및 철도 노반 다짐상태의 자동화 평가:
  도로나 철도의 시공에서 그 내구성을 답보하는 가장 중요한 시공과정이 도로 노상 및 철도 노반의 다짐이다. 현제 노상 및 노반의 다짐 시공후 그 품질을 확인하는 것은 들밀도 시험, PBT 또는 LBT 시험 등인데 이들 시험은 현재 시험결과에 대한 신뢰도가 낮은 편으로서, 현장 실무자들의 전문가적 경험이 매우 중요한 역할을 하게 된다. 그런데 자동화 해석에 기반을 둔 UBF 기법을 사용하면, 그 다짐상태를 평가할 때 높은 실용성과 신뢰도로 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

- 터널, 교량상판, 교대 등 콘크리트 구조물 비파괴 건전도 평가:
  콘크리트 구조물의 내구성은 시간경과에 따라 노후화되는데, 콘크리트 구조물의 노후화는 강도저하, 내부균열 발생, 박리 및 박탈 등으로 인한 재료품질의 저하 등 다양한 원인으로 진행된다. 이들 콘크리트 구조물의 결함은 UBF 기법으로 용이하게 평가할 수 있으며, 이 기법으로 평가한 구조물의 표면파 속도 또는 전

단파 속도는 구조물의 건전도 상태를 평가할 수 있는 척도로 활용될 수 있다.

- 아스팔트 및 콘크리트 도로포장의 두께, 강도 및 박리 등의 비파괴 평가:
  도로포장의 경우는 연성포장이든 강성포장이든 어느 일정한 시간이 지나면 재료 품질의 저하로 인하여 포장층 박리, Pot Hole 발생, 표층 재료의 박탈 등의 문제가 발생하는데, UBF 기법은 이러한 품질저하가 심각하게 진행되기 전에 사전에 파악하여 적절한 보수보강을 가능하게 해 줄 것이다.

4. 반사법탄성파탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정

본 연구과제에서 획득한 연구성과는 대입경 조립재료로 구성된 구조물에서의 동적물성을 산정하는데 기초자료로 사용하고자 다양한 현장에서 수행한 동적물성 D/B를 구축하고, 반사법 탄성파 탐사 및 다양한 현장시험에서 획득한 동적물성결과와의 관계를 이용하여 대입경 조립지반에서의 동적물성을 산정하는 것이다. 당해연도의 연구는 최종목표를 달성을 위해 기본자료로 활용되므로 중요하며, 현재까지의 연구성과에 대한 활용계획을 보다 자세하게 정리하면 다음과 같다.

가. 현장동적물성 DB화

내진설계를 위해 필수적으로 수행되는 다양한 현장시험 결과를 97개 지역 4,548개의 시추공 결과를 이용하여 암종별, 지층별, 공종별에 따라 심도, 지하수위, 입경등의 D/B를 구축하였다.

다양한 D/B를 바탕으로 연구개발 목표인 대입경 조립재료의 동적물성 범위산정에 활용될 수 있으며, 목표달성을 위해 입경크기가 10mm 이상인 조립재료 지층에 대하여 일차적으로 관계를 도출한 결과 Vs = 0.1579Vp + 171.11으로 나타났다. 한편, 탄성파 속도 범위는 Vp = 551~2,353m/s, Vs = 189~647m/s의 속도로 나타나며 대입경 조립재료의 탄성파 속도로 규명한 속도범위와 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 3차년도 시추공 탐사 결과와 비교하여 분석자료의 신뢰성을 증대 시키고 자료 검증에 대규모 댐 1개소 및 성토지반 2개소에 대하여 적용하여 분석하였다.

나. 반사법 탄성파 탐사 및수행

대입경 조립재료 지반구조물의 특성상 3차원 지형특성을 갖는 지반구조물이며, 구조물 구조에 따라 다양한 물성특성을 보이므로, 분해능이 높은 탐사기법이 요구된다. 한편, 구조물의 특성상 다양한 방법의 측선배열을 계획할 수 있다. 따라서 고분해능 반사법 탄성파 탐사를 다양한 측선배열, 다양한 송신원에 대한 신호원을 비교분석하여 최적의 시험조건을 찾는데 활용될 수 있도록 현장시험을 수행하였다. 결과에 대해 신호원 분석을 수행한결과 신호 주파수원의 차이점을 파악할 수 있었으며, 각 측선의 반사법 결과에서 새로운 방법의 접근방법이 제시되었다. 또한 종래의 P파 반사법 탄성파 탐사뿐만 아니라 S파 반사법 탄성파 탐사를 병행하여 수행함으로써 현장탐사의 신뢰도를 높이고 현장조사의 대안방향을 제시하였다.

다. 시추조사 및 다양한 현장탐사

다양한 현장탐사의 검증을 위한 시추조사, 댐하단부의 MASW, 실대규모 시험발파를 이용한 상시미진동 탐사, S-WAVE 굴절법 탐사등을 수행하고 그 결과를 시추조사 결과와 비교분석 하였으며, 다양한 현장시험으로 현장 탐사법에 의한 대입경 조립재료를 이용한 지반의 동적물성 산정 방법의 검증에 활용하였다.

5. 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발

실지진계측 자료 활용, 댐 축조재료의 동적물성 평가기법 연구 성과로 크게, 댐의 고유주기 평가와 동적 수치해석 기법을 병행하는 댐 축조재료의 동적물성 추정 방법 등 두 가지 기법을 제안하였다. 국내 주요 대형 댐 구조물에 설치된 지진계측시스템을 바탕으로 계측된 다수의 미소지진 데이터 분석을 바탕으로 댐의 동적거동상태를 신뢰성있게 평가할 수 있었으며, 해당 결과를 댐 사력재료의 동적물성을 변화하여 반복적으로 수행한 수치해석 결과와 비교하고, 기존의 데이터 또는 현장시험 결과와 비교함으로써 댐 사력쥰 축조재료의 동적물성을 평가할 수 있었다. 이러한 연구 절차 및 성과는 다음과 같이 활용될 수 있다.

- 미소지진계측데이터를 이용한 댐의 고유주기 산정

국내 주요 대형 댐에 설치된 지진계측시스템을 통하여 축적된 데이터를 본 연구 성과를 활용하여 분석함으로써 댐의 고유주기를 산정하고, 시간에 따른 주기 특성을 모니터링함으로써 장기적 거동상태를 평가할 수 있다. 특히 시설관리주체에서

운영 중인 지진감시시스템 등에 해당 프로세스 모듈을 탑재함으로써 지진 발생 시 댐 고유주기를 이용하는 비파괴적 거동상태 평가가 실시간으로 가능하도록 향후 후속 연구를 진행할 예정이다.

- 반복적 수치해석에 의한 동적물성 추정기법 연구

본 연구 성과는 댐이라는 특정 구조물에 대하여 기법을 제안한 상황이나, 일반적인 지반구조물로 확장할 경우 구조물의 동적응답평가를 위한 deconvolution 기법으로서의 활용 가치가 높을 것으로 예상된다. 이를 바탕으로 추정된 대입경 조립재료의 동적 물성은 구조물의 시공품질 조사, 거동상태 평가, 현장시험 결과의 타당성 평가 등에 다양하게 활용될 수 있다.

6. 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증

본 연구에서는 지진계측기가 설치되어 있지 않은 중소규모 댐 축조재료의 전단파속도를 실효성 있게 산정할 수 있는 대안으로, 인접발파에 따른 발파진동계측기록을 적극 활용하는 방법을 모색하였다. 이를 위하여 국내 최초로 실제 운영 중인 흙댐에 대한 실대규모 근접 발파진동실험을 수행하고, 발파실험 동안 폭원에 인접한 기반암노두와 댐 정상부에서 계측한 응답가속도 기록을 분석하여 흙댐 축조재료의 심도별 전단파속도를 추정하였다. 결과적으로 발파진동실험에 의한 흙댐 축조재료의 전단파속도 산정방법이 일관된 결과를 줄 수 있음을 확인함으로써, 앞 절에서 제안된 기법의 타당성 및 적용성을 검증할 수 있었다.

본 연구결과를 참고하여 댐 주변에 인접발파 공정이나 계획이 있을 경우, 발생되는 인공진동을 효과적으로 활용할 수 있다면 실효성 있게 대상댐 축조재료의 전단파속도를 산정할 수 있음을 시사한다. 따라서 향후 유사 사례 시 해당 기법 및 분석 절차를 적극 활용하고, 또한 기타 유형의 구조물의 경우에도 지진계측시스템이 설치된 경우 구조물의 상태평가, 재료의 물성평가 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

더불어 실내시험, 현장시험을 이용한 재료의 동적물성 평가 결과의 타당성을 확인하는 기준 데이터로서의 활용 또한 가능할 것으로 예상된다.

7. 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험모델링 기법 개발

1차년도 연구에서는 개별요소법의 지반공학 적용과 관련된 기존 연구자료 수집과 모델링 이론에 대한 기초연구를 진행한 후, PFC2D를 이용한 개별요소생성 및 입도분포 구현, 응력조건 구현, 응력 및 변형 제어 등의 모델링 기법을 개발하였다. 또한 이들을 이용하여 대형 동적시험에 대한 2차원 개별요소해석 알고리즘을 개발하였으며, 실제 실내시험 사례에 대한 수치해석 및 이에 요구되는 동적물성 산정 알고리즘 등의 요소기술을 개발하였다.

2차년도 연구에서는 2차원 개별요소해석의 한계점을 극복하고자, 정적 삼축압축시험에 대한 3차원 개별요소 수치모델링 기법을 개발하였다. 기존 국외 연구자료 수집과 3차원 모델링 이론에 대한 기초연구를 진행한 후, PFC3D를 이용하여 3차원 개별요소 생성 및 미시물성치 산정, 입도분포 생성 알고리즘 등의 최종 동적시험 모델링에 대한 선행 요소기술 개발을 완료하고, 이를 바탕으로 정적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소해석 알고리즘 개발 및 정적 대형삼축시험 사례에 대한 3차원 개별요소 수치모델링을 수행하였다. 한편, 효율적 3차원 개별요소 수치모델링을 위한 초기 해석모델과 개별요소 대상의 스케일 영향을 분석하였다.

3차년도 연구에서는 동적 삼축압축시험에 대한 3차원 개별요소 수치모델링 기법을 개발하였다. 3차원 초기 입도분포 생성 알고리즘을 적용하였으며, 반복재하 과정에 대한 모델링을 통해 동적 실내시험에 대한 평가와 검증을 수행하였다. 특히, 초기 요소를 생성하는데 있어 경계면 이탈 등을 방지할 수 있는 보완방법을 도출하였다. 여기에 최종적인 개별요소 수치모델링 적용방법에 대한 전체적 정리와 수치시험실로의 활용 내용등을 정리하였다.

결론적으로, 본 연구에서는 대입경 조립재료를 대상으로 정적 및 동적물성 산정을 위한 다양한 조건의 개별요소 수치모델링 기법을 개발하였다. 이러한 연구결과는, 단순 실내시험 결과만에 의존했던 기존의 물성 산정방식이 아닌, 개별요소법 기반의 수치모델링 기술을 조립재료 물성 산정에 활용할 수 있는 수치 시험실 활용기술로의 기술진보를 도모할 것이다. 이러한 기술은 향후 대입경 조립재료에 대한 물성 취득의 신뢰성을 높이는 원천기술로 큰 활용성을 갖게 될 것이며, 일반 조립재료의 물성산정시 시험회수와 경우의 수를 최소화 할 수 있게 하는 경제적 실용화 기술로 발전할 수 있을 것이다.

8. 연구 결과 활용 계획

본 연구에서는 대입경 조립재료의 내진 해석 등을 위한 동적물성을 보다 합리적으로 산정하고, 주요 지반구조물의 조립재료에 대해 적용 가능한 물성 범위를 제시하는 것을 주목적으로 연구를 수행하고 결과를 도출하였다.

먼저 동적해석을 위해 필요한 변형률 수준에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 변화곡선을 실내시험(대형공진주시험, 대형삼축압축시험)으로 구하여 활용할 수 있도록 시험장비와 시험방법 등에 대한 검증을 수행하여 신뢰성 있는 조립재료의 동적물성 산정이 가능하도록 하였다. 대형공진주시험에 비하여 대형삼축압축시험은 댐재료를 제외한 대부분 지반구조물의 원지반재료의 입도를 조정하지 않고 시험이 가능한 장점이 있고, 상대적으로 보다 큰 변형률 수준까지 시험이 가능하기 때문에 이를 고려하여 필요한 시험방법과 적용방법을 선택할 수 있을 것이다. 반면에 대형삼축압축시험에서는 최대전단탄성계수를 추정하기에는 측정되는 변형률 수준이 대형공진주시험에 비교해서 상대적으로 크기 때문에 이를 위해서는 대형공진주시험과 현장시험 결과를 활용이 가능하다.

본 연구에서는 철도 강화노반, 도로 보조기층재료, 철도 접속부 성토 자갈재료 등에 대한 동적물성시험으로 시험 결과를 제시하였다. 이상의 구조물들은 모두 각 설계기준에서 재료의 입도, 밀도 등을 기준으로 제시하고 있어 현장에서도 거의 유사한 형태로 시공 관리되고 있기 때문에, 본 연구에서 제시한 시험 결과들을 추가시험 없이 효과적으로 활용하는 것도 가능할 것으로 판단된다.

제 6 장 참 고 문 헌

참 고 문 헌

1. 고광범, 이두성, 2003, 지반교란 영역 규명을 위한 고분해능 천부 탄성파 반사법 탐사, 물리탐사, vol. 6, No. 1, p. 28-34. The Journal of Engineering Geology, Vol.16, No.2, pp. 161-169
2. 고영선, 김종우(1999), “발파조건이 지반진도에 미치는 영향에 관한 사례 연구”, 한국암반공학회, 터널과 지하공간, Vol.9, pp.12-19.
3. 국토해양부(2011) 댐설계기준, 국토해양부, pp. 223-224.
4. 국토해양부, 2006 도로공사 노천발파 설계시공 지침. PP.5~7.
5. 권기철 (2000) “국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델,” 대한토목학회 논문집 제20권 제3-D호, 301-310.
6. 권기철(1999) “변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 MR실험법” 한국과학기술원 토목공학과 박사학위논문
7. 김광일, 신동훈, 임은상, 김기영 (2009) 대형삼축시험에 의한 상사입도 조립재료의 변형 및 전단강도 특성, 한국지반공학회논문집, 제25권, 제12호, pp. 57-67.
8. 김남룡, 하익수(2012) 발파진동실험을 이용한 사력댐의 고유주기 산정, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제32권, 제5C호, 게재승인.
9. 김대호, 이정모, 최광선, 2002, 반사법 탐사를 이용한 영해분지 지역의 천부 지하구조, 지질학회지, 38권 2호, p. 251-266.
10. 김동수(1995), “공진주/비틂전단시험을 이용한 건조사질토의 변형특성,” 한국지반공학회논문집, 제 11권 제1호, pp.101-112.
11. 김범주, 임정열, 오석훈, 서민우(2005) "댐 축조용 조립재료의 입자크기가 압축성에 미치는 영향". 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp.5385-5388
12. 김범주, 조성은, 임은상, 김기영(2006) "Rockfill 재료의 입자크기가 전단강도에 미치는 영향". 대한토목학회 정기학술대회 발표 논문집, 대한토목학회, PP.1276-1279
13. 김재극 저, 1992 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부 pp.380.
14. 김중열, 2002, 해안 매립지 탄성파 탐사, 한국지구물리학회 4회 특별심포지움, pp. 85-100.
15. 김중열, 현혜자, 김유성, 1997, 탄성파 전달을 저해하는 지층구조 연구:축소모형실험을 중심으로, 한국자원연구소, KR-97(C)-18.
16. 박인범(2010), 암버력-토사의 회복탄성계수 예측 모델 결정 방법에 관한 연구, 경희대학교 대학원 석사학위논문.
17. 박철수 (2008) 동적물성치를 이용한 철도노반의 회복탄성계수 산정과 품질관리 방안, 박

사학위논문, 경희대학교.
18. 박철수, 정재우, 오상훈, 김은정, 목영진 (2008) “회복탄성계수 예측모델을 이용한 철도 노반의 거동 분석,” 한국철도학회 학술발표대회논문집 , 2008.6, 1699-1710
19. 백승규, 추석연, 윤종오, 백운일, 박형섭(2006), “터널 굴착 시 주변 구조물에 미치는 영향을 고려한 발파 설계 사례”, 한국암반공학회, 터널과 지하공간, 제16권, 제5호, pp.377-386
20. 서민우, 신동훈, 하익수, 박한규(2006) 대형삼축압축시험을 통한 석산재와 사력재의 거동 특성 평가. 한국지반공학회 가을학술 발표회 논문집, 한국지반공학회. pp.844-853
21. 서민우, 하익수, 김범주 (2007), "시료 입자 크기와 시험 장치가 조립 재료의 거동 특성에 미치는 영향", 대한토목학회논문집, 제27권, 제6C호, pp. 393-400.
22. 서민우, 하익수, 김용성, 박동순(2005) 대형 지반시험장비의 개발 및 구축. 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 1233-1240.
23. 선창국, 정충기, 김동수, 2007, 얕은 심도 전단파속도 분포를 이용한 30m 심도 평균전단파속도의 결정, 한국지진공학회 논문집, 11권 1호, pp. 45~57.
24. 송무영외, 2002, 시추공 물리탐사를 통한 지반물성과 암상과의 상관성 분석, 대학지질공학회지, 12(2), 127-135.
25. 신동훈 (2001) 대형삼축압축시험기를 이용한 댐재료의 전단강도특성 연구, 한국수자원공사 연구보고서, WRRI-GT-01-2.
26. 신동훈등(1999) “댐축조용 조립재료의 대형전단실험 표준화방안 연구”, 한국수자원공사
27. 양현식(1992), “지표발파의 진동특성에 관한 기초연구”, 한국암반역학회, 터널과 지하공간, Vo.2, pp.199-211.
28. 연관희, 이종림(1999), “원자력발전소 OBE 초과기준 변경에 따른 새로운 발파진동 허용수준 제시”, 한국암반공학회 발파기술 세미나 논문집, pp.109-117.
29. 우제윤, 조천환, 문홍득, 김동수 (1993) “표준 삼축압축 시험기를 이용한 노상토의 회복탄성계수 시험법,” 대한토목학회논문집, 대한토목학회 13(4), 1993.9, 239-250
30. 우제윤, 조천환, 문홍득, 홍성완 (1990) “동탄성계수(MR)를 이용한 노상토의 지지력 평가,” 건기연 90-GE-114, 한국건설기술연구원
31. 유병모, 김양윤, 서성호, 이상덕(2001) 굵은 골재 함유율에 따른 직접전단거동 특성. 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 2641-2644.
32. 윤지선, 박종관(2008) 토목기술자를 위한 암반공학, 구미서관, pp. 70.
33. 이경하, 이광호, 유충식 (1997) “보조기층 재료의 회복탄성계수 특성분석,” 대한토목학회 논문집 제17권 제Ⅲ-3호 217-227
34. 이대수, 김경열, 오기대, 조화경(2005a) 입경의 크기에 따른 조립재료의 마찰계수 산정. 대한토목학회 정기학술대회 발표논문집, 대한토목학회, pp.5439-5442.

35. 이대수, 김경열, 홍성연, 조화경, 황성춘(2005b) 대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(I). 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제21권, 제6호, pp. 81-91.
36. 이대수, 김경열, 홍성연, 황성춘(2006) 대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성. 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제22권, 제4호, pp.51-59.
37. 이벽규, 2004, 암반분류별 동탄성계수 특성 연구, 공학석사학위논문, 서울시립대학교.
38. 이성진 (2010) 다목적 대형삼축압축시험장비의 구축과 적용, 한국도로학회 학술대회논문집, pp. 27-32.
39. 이세현, 김동수, 추연욱, 권혁기(2009), “필댐 제체 재료의 동적물성치 평가 : II.비선형 동적 변형특성”, 한국지반공학회논문집, 제25권, 제12호, pp.87-105
40. 이승훈, 윤동환 (2004) 웨이브렛 변환 및 적용, 보성각.
41. 조성호, 장대우, 강태호, 이일화, CapSASW 기법에 의한 지반단면의 전단강성구조 평가, 한국지반공학회 논문집, 제 21권 4호, pp.71-81, 2005.
42. 조영곤, 원연호, 박근순, 2010, 地震 振動源提供 大發破, 2010 발파기술공동심포지엄 논문, 대한화약발파공학회, (주)한화; pp.67～73.
43. 최병희, 유창하, 이경진, 양형식, 2008, PPV, PVS에 의한 지반진동 허용기준의 설정에 관한 고찰, 추계학술발표회 논문, 대한화약발파공학회, pp 31~38
44. 최성웅, 김재동, 선우춘, 2008, 현장계측 진동파형을 이용한 발파 동해석에 관한 연구, 추계학술발표회 논문, 대한화약발파공학회 pp.47～53.
45. 최준성, 이진무, 조만섭(2006), “역해석기법을 통한 발파하중 산정 및 수치해석을 이용한 구조물의 진동영향평가”, 한국암반공학회, 터널과 지하공간, 제16권, 제3호, pp.232-240
46. 최형빈, 원연호, 2010. 12, 전자뇌관과 전기뇌관을 사용한 시추공 발파 시험에서의 지반진동 특성에 관한 비교 연구, 학회지 제28권 제2호 논문, 대한화약발파공학회, pp.37～49.
47. 하익수(2011), “미소지진 계측기록을 활용한 국내 사력댐 고유주기 산정방법”, 한국지반환경공학회논문집, 제12권, 제6호, pp.53~60.
48. 하익수, 오병현, “미소지진 계측기록을 활용한 사력댐 사력쵼 전단파속도 역산”, 2008 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.3051-3054, 2008.
49. 하익수, 이종욱, 오병현, “미소지진 계측기록을 이용한 사력댐 고유진동수 산정”, 2008 한국지반공학회 봄학술발표회논문집, pp.1438-1455, 2008.
50. 하익수, 이종욱, 조성은, 오병현, “지진대비 댐안전관리를 위한 지진감시시스템 구축 및 계측기록 활용”, 2008 한국지반공학회 가을학술발표회논문집, pp.1389-1396, 2008.
51. 한국농어촌공사(1983) 성덕지구 농업용수개발사업 설계도, 한국농어촌공사 청송영양지사, 흙댐 전산처리 입력도.
52. 한국수자원공사(1999) 댐축조용 조립재료의 대형전단시험 표준화 방안 연구. 한국수자원

공사 연구보고서, WRRI-GT-99-3, pp. 16-18.
53. 한국수자원공사(2001) 대형삼축압축시험기를 이용한 댐재료의 전단강도특성 연구. 한국수자원공사 연구보고서, WRRI-GT-01-2.
54. 한국수자원공사(2002) 반복재하 삼축시험에 의한 조립재료의 동적특성 연구, 한국수자원공사 연구보고서, WRRI-GS-02-4
55. 한국수자원공사(2002), 횡성다목적댐 공사지
56. 한국수자원공사, 2006, 댐체 물성조사를 위한 탄성파 탐사 용역보고서
57. 한국수자원학회(2003) 건설교통부승인 댐설계기준, pp.217-219.
58. 한국지반공학회(2006) 지반구조물의 내진설계, 지반공학 시리즈 8, 구미서관, pp. 51-197.
59. 홍종국, 김기영, 김한준, 1999, 조간대 지역에서의 고해상도 탄성파 탐사를 위한 파원 특성 분석, 지구물리 2권 2호, p.100-110.
60. A Primer on Digital BeamformingbyTobyHaynes,March26,1998
61. “Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering” by B. D. Van Veen and K. M. Buckley, IEEE ASSP Magazine, Apr 1988
62. “Mitigation of Near-Field Effects for Seismic Surface Wave Velocity Estimation with Cylindrical Beamformers”, D. J. Zywicki and G. J. Rix, ASCE, 2005
63. Abdel'Ghaffar, A. M. and Scott, R. F.(1979), "Analysis of earth dam response to earthquake", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.105, No. GT 12, pp.1379~1404.
64. AnhDan, L., Koseki, J., and Sato, T. (2002) “Comparison of Young's Moduli of Dense Sand and Gravel Measured by Dynamic and Static Methods,” Geotechnical Testing Journal, Vol.25, No.4, pp.349-358.
65. Array Signal Processing, by Jeremy Bass et. al, http://cnx.org/content/col10255/1.4/
66. ASTM(2003), "Standard test methods for modulus and damping of soils by resonant-column method," ASTM D4015, 2003, Philadelphia.
67. Avramidis, Anestis S. and Saxena, Surendra K.(1990), "The modified "Stiffened" Drnevich resonant column apparatus," Soils and Foundations, Vol.30, No.3, pp.53-68.
68. Bardet, J.P. and Tobita, T.(2001), "NERA : A Computer program for nonlinear earthquake site response analysis of layered soil deposits", UniversityofSouthernCalifornia.
69. Biarez, J. (1962) “Contribution a I'Etude des Properties Mecaniques des Sols et des maeriau Pulverulents,” D.Sc. Thesis, UniversityofGrenoble.
70. Blume JA, Skjei RE(1973), "Structural response to seismic motions generated by underground nuclear explosions", The Military Engineer, Vo.65, No.423, pp.30-32.

71. Brian H. Russell, Laurence R. Lines and Daniel P. Hampson, 2004, A case study in the local estimation of shear-wave logs, CREWES Research Report, Volume 16.
72. Bruce JR, Lindberg HE, Abrahamson GR(1979), "Simulation of strong earthquake motion with contained explosive line source arrays", Proc. US. National Conf. Earthquake Eng.pp.1134-1143.
73. Burland, J.B.,(1989), "Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture: Small is Beautiful-the Stiffness of Soils at Small Strains" Canadian Geotech. Journal, 26, pp.499-516
74. Casagrande, A., Corso, J.M. and Wilson, S.D.(1950), Report to Waterways Experimental Station on the 1949-1950 Program, Investigation of Effect of Long-time Loading on the Strength of Clay and Shales at Constant Water content, Contract Report No.3-3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss., Prepared by Havard University, Cambridge, Mass.
75. Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Eastwood, R. L., 1985, Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks: Geophysics, 50, 571-581.
76. Charles, J, A. (1973) Correlation between Labotatory Behavior of rockfill and field performance with particular reference to scammonden Dam. Ph.D Thesis, Univ.ofLondon,U.K.
77. Chrostowski I.(1979), "Simulating strong motion earthquake effects on nuclear power plants using explosive blasts", Report No. UCLAEng-7119, Nuclear Energy Lab. Univ. of California,LosAngeles,CA.
78. Clayton, C.R.I., Priest, M.B., Zervos, A. and Kim, S.G.(2009), "The Stokoe resonant column apparatus: effects of stiffness, mass and specimen fixity" Geotechnique 59, No.5, pp.429-437.
79. DIN 4150 Teil 3, 1986, Erch terungen im Bauwessen; Einwirkungen auf; bauliche Anlagen.
80. Donaghe, R. T. and Cohen, M. W. (1978) Strength and deformation properties of rockfill. U.S. Army Waterway experimental Station. Technical Report No. S-78-1, Vicksburg,U.S.A.
81. d'Onofrio, A. Silvestri, F. and Vinale, F.(1999), "A new torsional shear device", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.22, No.2, pp.101-111.
82. Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970) Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Jour. of Soil Mechanics and Foundations division, ASCEM Vol. 96, No. SM5, pp. 1629-1653.

83. Duncan, J. M. Byrne, P., Wong, K. S. and Marbry, P. (1980) Strength, Stress-strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses. Report, Department of civil engineering, UC Berkeley, Report No. UCB/GT/80-01..
84. E. Kausel and R. Peek, "Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution," Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 72, pp.1459-1508, 1982.
85. Field EH, Hough SH.(1997), "The variability of PSV response spectra across a dense array deployed during the Northridge aftershock sequence", Earthquake Spectra Vol.13, No.2, pp.243-257.
86. Gao S, Liu H, Davis PM, Knopoff L.(1996), "Localized amplification of seismic waves and correlation with damage due to the Northridge earthquake: evidence for focusing in SantaMonica",Bull.Seism.Soc.Amer.,Vol.86,No.1B,pp.S209-S230.
87. Hardin, B. O. (1978) “The Nature of Stress-Strain Behavior for Soils,” Proc. Geotech. Div. Specialty Conf. On Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena,CA,Vol.1,pp.3-90.
88. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972a) “Shear modulus and damping in soils : Measurement and parameter effects,” J. SMFD, Proc., ASCE, Vol. 98, No. SM6, pp.603-624.
89. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972b) “Shear modulus and damping in soils : Design equations and curves,” J. SMFD, Proc., ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp.667-692.
90. Hardin, B.O. and Kalinski,M.E.,"Estimatingtheshearmodulusofgravellysoils,"JournalofGeotechnicalandGeoenvironmentalEngineering,ASCE,Vol.131,No.7,2005.pp.867-875.
91. Hartzell S, Leeds A, Frankel A, Michael J.(1996), "Site response for urban Los Angeles using aftershocks of the Northridge earthquake", Bull. Seism. Soc. Amer., Vol.86, No.1B, pp.S168-S192.
92. Henrych J.(1979) "The dynamics of explosion and its use. Amsterdam",Elsevier.
93. Higgins CJ, Triandafilidis GE.(1977), "The simulation of earthquake ground motions with high explosives", Proc Sixth World Conf. Earthquake Eng.NewDelhi,India,Vol.2,pp.155-160.
94. Hou, Y. J., Xu, Z. P. and Liang, J. H. (2004) Centrifuge modeling of cutoff wall for CFRD built in deep overburden. Proc. of Int. Conf. of Hydropower, Yichan,China,pp.86-92.
95. I.S, Ha and B.H., Oh(2009), Inverse calculation of shear wave velocity of rockfill zone

using microearthquake records. Proc. 29th USSD annual conference and workshop, TN., Nashville,465-472.

96. Iida, K.(1938), "Relation between the normal-tangential viscocity ratio and Poisson's elasticity ratio in certain soils," Bulletin of Earthquake research Institute, TokyoImperialUniversity,Vol.16,pp.391-406.
97. Indraratna, B., lonescu, D. and Christie, H. D. (1998) Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests. Jour. of Goetechnical and Geoenvironmental Eng.,ASCE,Vol.124,No.5.pp.439-449.
98. Indraratna, B., Wijewardena, L. Sl. Sl, and Balasubramaniam, A. S. (1993) "Large-Scale triaxial testing of greywacke rockfill" Geotechnique, London,U.K.,43(1),pp.37-51
99. Ishimoto, M. and Iida, K.(1936), "Determination of elastic constanta by means of vibration methods, Part 1, Young's modulus," Bulletin of Earthquake research Institute, Tokyo Imperial University, Vol. 14, pp.632-657.
100. Ishimoto, M. and Iida, K.(1937), "Determination of elastic constanta by means of vibration methods, Part 2, Modulus of rigidity and Poisson's ration," Bulletin of Earthquake research Institute, Tokyo Imperial University, Vol. 15, pp.67-88.
101. Ivanovic SS, Trifunac MD.(1975), "Ambient vibration survey of full scale structures using personal computers", Rep. 95-05, Dept. Civil Eng. Univ. of Southern California, LosAngeles,CA.
102. Iwasaki, T. and Tatsuoka, F. and Takagi, Y. (1978) "Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading," Soils and Foundations, Vol. 18, No. 1, Mar., pp.39-56.
103. Jefferson, R.D., Steeples, D.W., Black R.A. and Carr, T., 1998,Effercts of soil-moisture content on shallow seismic data. Geophysics, 63, 1357-1362.
104. Jeremy Bass, Array Signal Processing, http://cnx.org/content/col10255/1.4/
105. Jovicic, V., Coop, M. R., and Simic, M. (1996) "Objective Criteria for Determining Gmax from Bender Element Tests," Geotechnique, Vol.46, No.2, pp.357-362.
106. Kanai K.(1983), Engineering seismology. Tokyo:Univ.ofTokyoPress.
107. Kim, D.S., and Kweon, G.C. (2001) "Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Subbase Soils Using a Static Triaxial Test," Canadian Geotechnical Journal, Vol.38, No.1, pp.117-124.
108. Knapp, R.W. and Steeples, D.W., 1986a, High-resolution common-depth-point seismic reflection profiiling: Instrumentaion. Geophysics, 51, 1381-1385.
109. Kokusho, T. and Esashi, Y. (1981) "Cyclic triaxial tests on sands and coarse materials," Proc. 10th international Conference on Soil Mechanics and Foundation

Engineering, Stockholm,1,673-676.

110. Kramer S. L.(1996) Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall.
111. Leslie DD. (1963) “Large-scale triaxial tests on gravelly soils,” In proceeding of the 2nd Panam. Conference on Soil Mech. And Found. Engrg., Vol. 1, Brazil,1963,181-202.
112. M.K. Jafari and M. Davoodi(2006), "Dynamic characteristics evaluation of Masjed Soleiman Dam using in situ dynamic tests", Canadian Geotechnical Journal Vol.43, pp.997-1014.
113. Makdisi, F. I. and Seed, H. B.(1979), "Simplified procedure for evaluating embankment response", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 105, No. GT 12, pp.1427~1434.
114. Mancuso, C., Simonelli, A. L., and Vinale, Fl, (1989) "Numerical Analysis of In-Situ S-wave Measurement," Proceedings, 12th ICSMFE, RiodeJaneiro,Vol.3,pp.277-280.
115. Marachi, N.D., Chan, C.K., and Seed, H.B. (1972) “Evaluation of Properties of Rockfill Materials,” Journal of Soil Mechanics and Foundations Engineering, ASCE, Vol.98, No.SM1, pp.95-114.
116. May, R.W. and Witczak, M.W. (1981) “Effective Granular Modulus to Model Pavement Responses,” Layered Pavement Systems, Transportation Research Record No. 810, pp.1-9.
117. Mejia, L.H., Seed, H.B., "Three Dimensional Dynamic Response Analysis of Earth Eams", Report No. UCB/EERC-81/15, UC Berkeley,California,1981.
118. Mejia, L.H., Seed, H.B., and Lysmer, J.(1982) "Dynamic Analysis of earth dams in three dimensions", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 108, No. GT 12, pp.1586~1604.
119. Menq, F.Y. (2003) “Dynamic properties of sandy and gravely soils,” The universityofTexasatAustin,Ph.D.dissertation.
120. Mills PH(1972), "Blast dynamics of a model structure. Master Thesis", School of Engineering and Applied Science, Univ.ofCalifornia,LosAngeles,CA.
121. Mondoni, G., Flora, A., Mancuso, Cl, Viggiani, C., and Tatsuoka, F., (2000) "Evaluation of Gravel Stiffness by Pulse Wave Transmission Tests" Geotechnical Testing Journal, Vol.23, No.4, pp.506-521.
122. Nakamura Y.(1989), "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", QR Railway Tech Res Inst, Vol.30, No.1, pp.25-33.

123. Ohmachi, T. and Kuwano, J.(1994), "Dynamic safety of earth and rockfill dams", A.A. BALKEMA/ROTTERDAM, pp.32~49.
124. Ohta Y, Kagami H, Goto N, Kudo K.(1978), "Observation of 1- to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. Part I: Comparison with long period accelerations at the Tokachi-Oki earthquake of 1968", Bull Seism Soc Amer. Vol.68, pp.767-779.
125. Okamoto, S.(1984), "Introduction to earthquake engineering", 2nd Edition, UniversityofTokyoPress,pp.466~477.
126. Oldecop, L. A. and Alonso, E, E, (2001) A model for rockfill compressibility. Geotechnique, Vol. 51. No. 2, pp. 127-139.
127. Rhee, S. K. (1991) "A Study of Resilient Behavior and Constitutive Modeling of Thick Granular Layers for Heavily Loaded Asphalt pavement," Ph.D Dissertation, TexaxA&MUniversity.
128. Rogers AM, Borcherdt RD, Covington PA, Perkins DM.(1984), "A comparative ground motion study near Los Angeles using recordings of Nevada nuclear tests and the 1971 San Fernando earthquake", Bull. Seism. Soc. Amer. Vol.74, No.5, pp.1925-1949.
129. Rogers AM, Tinsley JC, Hays WW, King KW.(1979), "Evaluation of the relation between near-surface geological units and ground response in the vicinity of Long Beach, California", Bull. Seism. Soc. Amer. Vol.69, pp.1603-1622.
130. Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B. and Daily, W.D. (1998) "Shear modulus and damping relationships for gravels," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.124, No.5, pp.396-405.
131. S.-H. Joh, Advances in interpretation and analysis techniques for spectral-analysis-of-surface -waves (SASW) measurements, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin,p.240,1996.
132. S.K. Negmatullaev, M.I. Todorovska, M.D. Trifunac(1999), "Simulation of Strong Earthquake Motion by Explosions - Experiments at the LyaurTestingRangeinTajikistan",SoilDynamicsandEarthquakeEngineering,Vol.18,pp.189-207.
133. Sanchez-Salinero, I., Roesset, J. M., and Stokoe, K, H, II, (1986) "Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation" Report GR 86-15, UniversityofTexasatAustin.
134. Sayao, A.S.F. and Vaid, Y.P. (1989) "Deformations due to principal stress rotation,"

Proceedings, 12th International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, Vol.1, pp.107-110.

135. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972) "SHAKE : A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Report EERC 72-12, EarthquakeEngineeringResearchCenter,UniversityofCalifornia,Berkeley,California.
136. Seed, H.B., Robert, T.W., Idriss, I.H., and Tokimatsu, K. (1970) “Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soils,” Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No.11, pp.1016-1032.
137. Seed, H.B., Wang, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu (1984) “Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils,” EarthquakeEngineeringResearchCenter,ReportNo.UCB/EERC-84/14,UniversityofCalifornia,Berkely.
138. Siddiqi, F.H. (1984) “Strength Evaluation of Cohesionless Soils with Oversize Particles,” Ph.D Dissertation, The UniversityofCalifornia,Davis.
139. Stokoe II, K. H., Kim, D. S., and Andrus, R.(1990) "Development of Sythetic Specimens for Calibration and Evaluation of MR Equipment" In Transportation Research Record 1278, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.63-71.
140. Stokoe II, K. H., Kim, D. S., and Andrus, R.(1990), "Development of Sythetic Specimens for Calibration and Evaluation of MR Equipment" In Transportation Research Record 1278, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.63-71.
141. Subrahmanya Sastry Malla야 (2007), “Modeling and Algorithm Performance for Seismic Surface Wave Velocity Estimation". M.S. Thesis, UniversityofAkron.
142. Symes, M.J., Gens, Al, and Hight, D.W. (1988) Drained principal stress rotation in saturated sand, Geotechnique, Vol.38, No.1, pp.59-81.
143. T. Sahaphol, S. Miura (2004) “Shear moduli of volcanic soils” Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 157-165
144. Tanaka, Y., Kokusho, T., Okamoto, T., and Kudo, K. (1995) "Evaluation of Initial Shear Modulus of Gravelly Soil by Laboratory Tests and PS-Logging" Proceedings, International Workshop on Rock Foundation of Large-Scaled Stuctures, Vol.1, pp.101-106.
145. Tanaka, Y., Kudo, K., Nishi, K., and Okamoto, T. (1994) "Shear Modulus and Damping Ratio of Gravelly Soils Measured by Several Methods," Pre-failure Deformation of Geomaterials, Balkema, Vol.1, pp.47-53.
146. Tatsuoka, F. and Shibuya, D.S. (1991) “Deformation Characteristics of Soils and

Rocks from Field and Laboratory Tests," Key Note Lecture for Session No.1, The 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok,December.

147. Thevanagam, S. and Mohan, S. (1998) “Intergranular Void ratio-Steady state strength relations for sands,” Geotechnical special publication No.75, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE, Vol.1, pp.349-360
148. Toby Haynes (1998), "A Primer on Digital beamforming".
149. Trifunac MD, Todorovska MI.(1998), "Amplification of strong ground motion and damage patterns during the 1994 Northridge, California, earthquake", Proc. ASCE Specialty Conf. on Geotechnical Earthquake Eng. and Soil Dynamics, Seattle, WA, Vol. 1, pp.714-725.
150. Trifunac MD.(1972), "Comparison between ambient and forced vibration experiments", Earthquake Eng. and Struct. Dynam., Vol.1, pp.133-150.
151. Uddin, N. and Gazetas, G.(1995), "Dynamic response of concrete-faced rockfill dams to strong seismic excitation", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 121, No. 2, pp.185~197.
152. Udwadia FE, Trifunac MD.(1973), :Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California. Bull", Seism. Soc. Amer. Vol.63, No.4, pp.1227-1253.
153. Uzan, J. (1985) “Characterization of Granular Material, Analysis and Testing of Granular Base and Subbases,” Transportation Research Record No. 1022, pp.1-9.
154. V. M. Malhotra and N. J. Carino, Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, p.384, 2004.
155. Valstad, T., Storm, E. (1976) “Investigation of the Mechanical Properties of Rockfill for the Svartevann Dam (Norway) using Triaxial,” Oedometer and Plate Bearing Tests, N. G. I. Pull. No. 110, Olso, Norway, pp.3-8.
156. Van Veen and K. M. Buckley (1988), "Mitigation of Near-Field Effects for Seismic Surface Wave Velocity Estimation with Cylindrical Beamformers", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.
157. Varadarajan, A., Sharma, K. G, Venkantachalam, K, and Gupta, A. K. (2003) “Testing and modeling two rockfill materials,” Jour. of Geotechnacal and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol. 129, No.3, pp. 206-218.
158. Viggiani, G. and Atkinson, J.H. (1995) "Stiffness of Fine-Grained Soil at Very Small Strains," Geotechnique, Vol.45, No.2, pp.249-265.

159. Viggiani, G. and Atkinson, J.H. (1997) "Closure : Stiffness of Fine-Grained Soil at Very Small Strains," Geotechnique, Vol.47, No.4, pp.873-877.
160. Vrymoed, J.(1981), Dynamic FEM model of Oroville dam. Journal of Geotechnical Engineering. Vol.107, No.8, 1057-1077.
161. Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T.(2009), "Influence of the grain-size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus
162. Wong, R.K.S. and Arthur, J.R.F. (1986) “Sand shear by stresses with cyclic variations in direction,” Geotechnique, Vol.36, No.2, pp.215-226.
163. Y. Parish, and F. Najaei Abadi, 2009, Dynamic Behaviour of Earth Dams for Variation of Earth Material Stiffness, International Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 5, 4, pp. 253-258.
164. Yoshida, N. and Towhata, I.(1997), "YUSAYUSA, Theory and Practice".
165. Yoshikazu, K. et al., 1997, Correlation between the results of geophysical prospecting and geotechnical properties, soil and foundations, The japanese geotechnical society, 45(9), Ser. No. 476, 11-14.
166. Yu, R., Richart Jr., F.E. (1984) “Stress ratio effects on shear modulus of dry sands,” J. Geotech. Engrg., 110(3), 331-345.
167. Rhee, S. K. (1991) “A Study of Resilient Behavior and Constitutive Modeling of Thick Granular Layers for Heavily Loaded Asphalt pavement,” Ph.D Dissertation, Texax A&M University.
168. Rogers AM, Borcherdt RD, Covington PA, Perkins DM.(1984), "A comparative ground motion study near Los Angeles using recordings of Nevada nuclear tests and the 1971 San Fernando earthquake", Bull. Seism. Soc. Amer. Vol.74, No.5, pp.1925-1949.
169. Rogers AM, Tinsley JC, Hays WW, King KW.(1979), "Evaluation of the relation between near-surface geological units and ground response in the vicinity of Long Beach, California", Bull. Seism. Soc. Amer. Vol.69, pp.1603-1622.
170. Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B. and Daily, W.D. (1998) “Shear modulus and damping relationships for gravels,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.124, No.5, pp.396-405.
171. S.-H. Joh, Advances in interpretation and analysis techniques for spectral-analysis-of-surface -waves (SASW) measurements, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, p.240, 1996.
172. S.K. Negmatullaev, M.I. Todorovska, M.D. Trifunac(1999), "Simulation of Strong

Earthquake Motion by Explosions - Experiments at the Lyaur Testing Range in Tajikistan", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.18, pp.189-207.

173. Sanchez-Salinero, I., Roesset, J. M., and Stokoe, K, H, II, (1986) "Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation" Report GR 86-15, University of Texas at Austin.
174. Sayao, A.S.F. and Vaid, Y.P. (1989) “Deformations due to principal stress rotation,” Proceedings, 12th International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, Vol.1, pp.107-110.
175. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972) "SHAKE : A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
176. Seed, H.B., Robert, T.W., Idriss, I.H., and Tokimatsu, K. (1970) “Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soils,” Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No.11, pp.1016-1032.
177. Seed, H.B., Wang, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu (1984) “Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils,” Earthquake Engineering Research Center, Report No.UCB/EERC-84/14, University of California, Berkely.
178. Siddiqi, F.H. (1984) “Strength Evaluation of Cohesionless Soils with Oversize Particles,” Ph.D Dissertation, The University of California, Davis.
179. Stokoe II, K. H., Kim, D. S., and Andrus, R.(1990) "Development of Sythetic Specimens for Calibration and Evaluation of MR Equipment" In Transportation Research Record 1278, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.63-71.
180. Stokoe II, K. H., Kim, D. S., and Andrus, R.(1990), "Development of Sythetic Specimens for Calibration and Evaluation of MR Equipment" In Transportation Research Record 1278, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.63-71.
181. Subrahmanya Sastry Malla야 (2007), “Modeling and Algorithm Performance for Seismic Surface Wave Velocity Estimation". M.S. Thesis, University of Akron.
182. Symes, M.J., Gens, Al, and Hight, D.W. (1988) Drained principal stress rotation in saturated sand, Geotechnique, Vol.38, No.1, pp.59-81.
183. T. Sahaphol, S. Miura (2004) “Shear moduli of volcanic soils” Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 157-165
184. Tanaka, Y., Kokusho, T., Okamoto, T., and Kudo, K. (1995) "Evaluation of Initial Shear Modulus of Gravelly Soil by Laboratory Tests and PS-Logging" Proceedings,

International Workshop on Rock Foundation of Large-Scaled Stuctures, Vol.1, pp.101-106.

185. Tanaka, Y., Kudo, K., Nishi, K., and Okamoto, T. (1994) "Shear Modulus and Damping Ratio of Gravelly Soils Measured by Several Methods," Pre-failure Deformation of Geomaterials, Balkema, Vol.1, pp.47-53.
186. Tatsuoka, F. and Shibuya, D.S. (1991) “Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests," Key Note Lecture for Session No.1, The 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, December.
187. Thevanagam, S. and Mohan, S. (1998) “Intergranular Void ratio-Steady state strength relations for sands,” Geotechnical special publication No.75, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE, Vol.1, pp.349-360
188. Toby Haynes (1998), "A Primer on Digital beamforming".
189. Trifunac MD, Todorovska MI.(1998), "Amplification of strong ground motion and damage patterns during the 1994 Northridge, California, earthquake", Proc. ASCE Specialty Conf. on Geotechnical Earthquake Eng. and Soil Dynamics, Seattle, WA, Vol. 1, pp.714-725.
190. Trifunac MD.(1972), "Comparison between ambient and forced vibration experiments", Earthquake Eng. and Struct. Dynam., Vol.1, pp.133-150.
191. Uddin, N. and Gazetas, G.(1995), "Dynamic response of concrete-faced rockfill dams to strong seismic excitation", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 121, No. 2, pp.185~197.
192. Udwadia FE, Trifunac MD.(1973), :Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California. Bull", Seism. Soc. Amer. Vol.63, No.4, pp.1227-1253.
193. Uzan, J. (1985) “Characterization of Granular Material, Analysis and Testing of Granular Base and Subbases,” Transportation Research Record No. 1022, pp.1-9.
194. V. M. Malhotra and N. J. Carino, Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, p.384, 2004.
195. Valstad, T., Storm, E. (1976) “Investigation of the Mechanical Properties of Rockfill for the Svartevann Dam (Norway) using Triaxial,” Oedometer and Plate Bearing Tests, N. G. I. Pull. No. 110, Olso, Norway, pp.3-8.
196. Van Veen and K. M. Buckley (1988), "Mitigation of Near-Field Effects for Seismic Surface Wave Velocity Estimation with Cylindrical Beamformers", Journal of

Geotechnical Engineering, ASCE.

197. Varadarajan, A., Sharma, K. G, Venkantachalam, K, and Gupta, A. K. (2003) “Testing and modeling two rockfill materials,” Jour. of Geotechnacal and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol. 129, No.3, pp. 206-218.
198. Viggiani, G. and Atkinson, J.H. (1995) "Stiffness of Fine-Grained Soil at Very Small Strains," Geotechnique, Vol.45, No.2, pp.249-265.
199. Viggiani, G. and Atkinson, J.H. (1997) "Closure : Stiffness of Fine-Grained Soil at Very Small Strains," Geotechnique, Vol.47, No.4, pp.873-877.
200. Vrymoed, J.(1981), Dynamic FEM model of Oroville dam. Journal of Geotechnical Engineering. Vol.107, No.8, 1057-1077.
201. Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T.(2009), "Influence of the grain-size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus
202. Wong, R.K.S. and Arthur, J.R.F. (1986) “Sand shear by stresses with cyclic variations in direction,” Geotechnique, Vol.36, No.2, pp.215-226.
203. Y. Parish, and F. Najaei Abadi, 2009, Dynamic Behaviour of Earth Dams for Variation of Earth Material Stiffness, International Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 5, 4, pp. 253-258.
204. Yoshida, N. and Towhata, I.(1997), "YUSAYUSA, Theory and Practice".
205. Yoshikazu, K. et al., 1997, Correlation between the results of geophysical prospecting and geotechnical properties, soil and foundations, The japanese geotechnical society, 45(9), Ser. No. 476, 11-14.
206. Yu, R., Richart Jr., F.E. (1984) “Stress ratio effects on shear modulus of dry sands,” J. Geotech. Engrg., 110(3), 331-345.

부 록

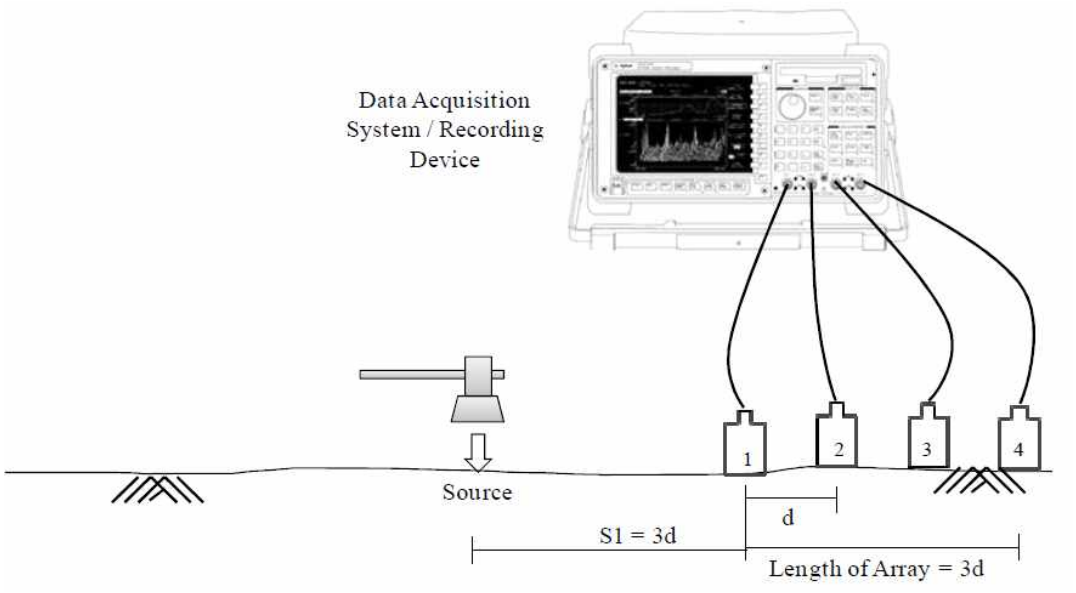
부록 A. UBF 기법의 현장시험 매뉴얼

UBF (Unbiased-Short-Array Beamforming) 기법은 대입경 조립골재 지반구조물에서의 전단파속도 주상도를 평가하기 위하여 개발된 표면파 기법이다. 본 장에서는 현장시험 실무자들로 하여금 UBF 시험을 신뢰성 있게 수행할 수 있도록 시험절차와 시험에 요구되는 하드웨어 사용법 등을 정리하였다.

가. UBF 시험에 필요한 하드웨어

UBF 시험의 기본적으로 [그림 A.1.1]에 도시한 바와 같은 하드웨어로 수행되는데, 시험에 요구되는 하드웨어는 크게 다음과 같은 세 가지 항목으로 정리된다.

- 동적신호 측정 및 저장장치
- 지반진동 감진기
- 표면파 발생을 위한 발진원



[그림 A.1.1] UBF 시험의 기본구성과 시험에 요구되는 하드웨어

(1) 동적신호 측정 및 저장장치

동적신호 측정 및 저장장치는 UBF 시험에서 가장 중요한 하드웨어로서 다음과 같은 기본적인 요구조건을 만족하여야 효과적으로 그리고 신뢰성 있게 UBF 시험을 할 수 있다.

- 최소 4개의 입력채널
- 실시간 주파수 영역 해석:
  FFT 해석을 실시간으로 수행하여 현장에서 시험수행과 동시에 자료의 품질을 판달할 수 있어야 한다.
- 변동적으로 설정가능한 주파수대역, 샘플링 주파수 또는 샘플링 시간:
  FFT 발진원 위치에 따라 변동적으로 설정이 가능하여야 한다. 따라서 일반적인 탄성파 탐사에서 사용하는 하드웨어의 경우에서와 같이 0.02초와 같은 고정 샘플링 시간을 사용하는 하드웨어는 적합하지 않다. 참고로, UBF 시험에서 요구되는 설정 범위는 다음과 같으며, 이러한 변동 범위의 값으로 설정가능한 하드웨어를 사용하여야 한다.
  - 주파수대역: 50~800 Hz,
  - 샘플링 주파수: 100~1,600 Hz 또는
  - 샘플링시간: 0.000625~0.01 Sec.
- 앤티앨리어싱(antialiasing) 필터:
  현장시험이 수행되는 지역은 여러 가지 형태의 전자파 신호가 존재할 수 있다. 감진기에서 발생되는 주파수의 크기보다 훨씬 큰 신호의 가능성이 있기 때문에, 감진기 신호이외의 전기신호들은 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 전에 아날로그 필터로 걸러내야 한다. 이러한 기능은 측정 신호의 품질을 현저하게 향상시키는 효과를 만들어 내기 때문에, 앤티앨리어싱 필터는 절대적으로 요구되는 중요한 기능이다.
- 디지털변환시의 해상도:
  감진기로 측정한 아날로그 신호는 디지털 신호로 변환되어야 하는데, 신뢰성있는 UBF 시험을 위해서는 최소한 16비트 해상도가 필요하다.
- 동적범위 (Dynamic Range):
  신호대 잡음비를 결정하는 중요한 스펙으로서 최소한 110dB 이상의 것을 선호한다.

이와 같은 사양을 모두 만족하는 하드웨어로서 다음과 같은 두 가지 제품을 추천할 수 있다.

- Agilent 사의 35670A :
  2,500만원 이상의 고가제품으로 매우 성능이 뛰어나며 모든 열악한 현장에서 훌륭하게 그 기능을 수행할 수 있는 전천후 시스템이다. 채널은 모두 4개를 가지고 있으며, AC 또는 DC 전원을 사용할 수 있으며, 자료 저장은 플로피 디스크나 HPIB 프로토콜을 사용하여 노트북 컴퓨터로 전송받을 수 있다.
- 본 연구에서 개발한 DS-USB-6289 :
  이 제품은 National Instruments 사의 NI-USB6289를 기반으로 한 것으로 BNC 터미널, FS/GS 등을 편리하게 사용할 수 있도록 외장장치를 한 것으로서 모두 16개의 입력채널, 16비트 해상도, 5개의 입력전압 범위 등의 사양을 가지고 있다. 이 제품은 Agilent 사의 제품과는 달리 노트북 컴퓨터와 USB로 연결하여 본 연구에서 제작한 소프트웨어 Beamforming이나 WinSASW 등의 별도의 소프트웨어로 구동하고 자료를 저장하여야 한다. 부피나 무게가 매우 가벼워서 휴대성이 뛰어나다.



[그림 A.1.2] UBF 시험의 동적신호 측정과 저장을 위한 동적신호분석기

(2) 지반진동을 측정하는 감진기

UBF 시험에서는 사람이 느낄 수 없을 정도의 미세한 지반진동을 발생시키고 측정하기 때문에 매우 높은 감도를 가지고 있는 감진기를 사용하여야 한다. UBF 시험에 사용하는 감진기는 지오폰과 가속도계를 사용할 수 있는데, UBF 시험에 요구되는 구체적인 사양은 다음과 같다.

- 지오폰:
  - 공진주파수: 4.5, 2.0, 또는 1.0 Hz
  - 감도: 0.32 V/cm/sec 이상
- 가속도계:
  - 감도: 0.1 V/cm/sec^2 이상
  - 사용주파수대역: 1~400 Hz

이와 같은 사양을 모두 만족하는 하드웨어로서 다음과 같은 제품을 추천할 수 있다.

종류	지오폰 1 Hz	지오폰 2 Hz	MEMS	가속도계 B
예민도	3.82 V/cm/sec	0.32 V/cm/sec	0.1V/m/sec^2	1.02V/m/sec^2
고유 (사용) 주파수	고유주파수 1.0 Hz ± 10%	고유주파수 4.5 ± .75 Hz	사용주파수 대역: 0.5 to 400 Hz	사용주파수 대역: 0.1~200 Hz
크기와 무게	높이: 16.4 cm 직경: 7.62 cm 무게: 1963 g	높이: 3.35 cm 직경: 3.18 cm 무게: 111 g	-	높이: 7.11 cm 직경: 5.72 cm 무게: 635 g
사용 환경	온도:-40°~100° C 충격: 50g	-	-	온도:-18~65 °C 충격: 40g
외형				
가격	약 1,200,000원	약 75,000원	약 300,000원	약1,000,000원
비고	GeoSpace 사	GeoSpace 사	동산 I&E	PCB 사

(3) 표면파를 발생시키는 발진원

UBF 시험에서는 일반적인 표면파 시험과 같이 표면파를 발생시키는 발진원이 필요하다. 측정하고자 하는 표면파 파장의 크기에 따라 달라지는데, 대입경 조립골재 지반구조물에서 사용한 발진원은 그림 A.1.3과 같다. 해머의 무게가 클수록 더 큰 표면파 에너지를 발생시킬 수 있으며 100-kg 중추낙하 장치가 가장 큰 에너지를 발생시키는 것으로 암반의 물성까지도 평가가능하다. 그리고 본 연구에서는 시도가 불가능했지만 더 효과적인 큰 발진원은 불도저의 운행중 진동이다. 대입경 조립골재 지반구조물의 대표적 유형인 사력댐의 경우 불도저의 진입을 금지하였기에 본 연구에서는 발진원의 대상에서 제외하였다.



[그림 A.1.3] UBF 시험에 사용된 발진원의 종류

나. UBF 시험의 현장시험 절차

[그림 A.1.1]에 도시한 바와 같은 UBF 시험은 기본적으로 CapSASW 시험과 동일하며, 다음과 같은 기본적인 절차를 따라 진행된다.

1. 시험측선의 설치
2. 감진기의 설치
3. 동적신호분석기의 매개변수 설정
4. 발진원에 의한 표면파 발생과 측정신호의 품질확인 및 저장
5. 필요에 따라 단계2~단계4의 반복

UBF 시험의 절차에 대한 구체적인 설명을 제시하면, 다음과 같다.

(1) 시험측선의 설치

UBF 시험의 가장 첫 번째 단계인 시험측선의 설치는 직선이 되도록 하여야 하며, 다음과 같은 기준을 참고하여 진행한다.

- 측정심도에 따라 감진기간 간격을 결정:
  - 측정심도가 약 30 m 이하: 감진기간 간격=1m
  - 측정심도가 약 30~50 m 일 때: 감진기간 간격=2m
- 총 측선길이의 계산: 감진기간 간격 × 3.
  - 측정심도가 약 30 m 이하: 총측선길이=3m
  - 측정심도가 약 30~50 m 일 때: 총측선길이=6m
- 발진원 위치: 첫 번째 감진기에서부터 이격거리.
  - 측정심도가 약 30 m 이하: 3, 6, 12, 28 m
  - 측정심도가 약 30~50 m 일 때: 6, 12, 24, 48 m

(2) 감진기의 설치

본 연구에서 제안한 UBF 시험은 기본적으로 4 개의 감진기를 사용하는 것으로 정립되었기 때문에, 단계 (1)에서 설정한 측선에서 등간격으로 감진기를 설치한다. 구체적으로 감진기 위치는 다음과 같다.

- 시험측선에 감진기를 등간격으로 매설:
  - 측정심도가 약 30 m 이하: 감진기 위치=0, 1, 2, 3 m
  - 측정심도가 약 30~50 m 일 때: 감진기 위치=0, 3, 6, 9 m
- 감진기 매설 방법:

- 감진기는 지반과 완전한 커플링이 이루어져 지반의 진동을 제대로 측정할 수 있기 때문에, 감진기 하부에 장착되어지는 스파이크를 이용하기 보다는 감진기를 지반 속에 약 1/3 정도 매설하여 완전히 고정되도록 하여야 한다.
- 또한 감진기는 수직방향의 지반진동을 측정하기 때문에 가능한한 수직을 유지하도록 하여야 한다.
- 감진기의 설치가 제대로 되었는지를 확인하기 위해서는 두 손가락으로 감진기를 살짝 잡은 후에 흔들어 보았을 때 움직임이 없도록 하여야 한다.

(3) 동적신호분석기의 매개변수 설정

UBF 시험시 지반진동을 합리적으로 측정하기 위해서는 다음과 같은 동적신호분석기의 매개변수 설정을 신중하게 진행하여야 한다.

- 입력채널의 측정범위 (볼트): 최대 신호크기의 약 2~3 배 정도.
  - 연약한 토사지반의 경우: 1 Volt
  - 일반적인 토사지반의 경우: 5 Volt
  - 단단한 토사지반의 경우: 10 Volt
  - 실제 측정한 신호를 보고 경우에 맞게 별도로 조정하여야 한다.
  - 발진원 거리가 멀어질수록 입력신호 범위도 그에 따라 반감하도록 한다.
- 입력채널의 주파수대역:
  - 표층이 단단한 토사의 경우는 400 Hz
  - 표층이 일반적인 토사의 경우는 200 Hz
  - 발진원 거리가 멀어질수록 주파수대역도 그에 따라 반감하도록 한다.

(4) 발진원에 의한 표면파 발생과 측정신호의 품질확인 및 저장

- 발진원에 의한 표면파 발생:
  - 해머 타격으로 표면파를 발생시키지만, 측정 시간대역내에서 가급적이면 중복타격이 되지 않도록 한다.
  - 해머 타격은 가급적이면 단호하게 가격하도록 한다.
- 측정신호의 품질확인 및 저장
  - 측정신호의 품질을 해머타격후 바로 확인하여 재타격 여부를 결정하여야 한다.
  - 측정신호의 품질이 양질인지를 판단하기 위해서는 측정신호의 주파수 영역 해석을 실시간으로 실시하여 전달함수의 위상각

스펙트럼을 보아야 한다. 깨끗하고 분명한 톱니바퀴 모양이 3~5 정도 반복되는 것이 가장 이상적이라고 할 수 있다.

- 또한 측정신호의 품질을 향상하기 위해서는 앙상블 평균을 수행할 필요가 있는데, 3~5회 정도 평균을 수행한다.

(5) 필요에 따라 단계2~단계4의 반복

- 측정심도에 따라 발진원을 이격해 가면서 단계2~단계4를 반복하여 수행한다. 즉, 측정심도가 30m 이하일 경우, 발진원은 모두 4 개소, 즉 첫 번째 감진기에서 3, 6, 12, 24 m 지점에서 타격을 하여야 하며, 그 때마다의 신호는 개별적으로 저장하여야 한다.

라. UBF 기법의 현장시험 예제

본 절에서는 현장 실무자들이 UBF 기법을 이용한 원활한 현장실험을 수행할 수 있도록 하기 위하여 경기도 안성시 대덕면 중앙대학교 캠퍼스내의 실험장에서 실시한 실험데이터를 이용하여 예제를 만들었다.

(1) 현장 실험을 위한 장비 셋팅

(가) 감진기의 배열

현장 실험을 수행하기 위하여, 실험을 수행할 측선을 정한다. 측선을 정한 후에는 그림 1, 2와 같이 감진기를 설치한다. 감진기는 총 4개를 이용하며 같은 간격으로 배열한다. 이 예제에서는 감진기의 간격이 1m 간격으로 배열되어 있지만, 실험의 특성에 따라 실무자들은 감진기의 간격을 조정할 수 있다.



그림 1 감진기의 커플링 상태



그림 2 측선을 따라 설치된 4개의 감진기

(나) 자료 습득장치의 셋팅

실험 자료습득 장치는 HP Analyzer 또는 노트북와 네셔널 인스트루먼트 USB 6289를 이용할 수 있다. 본 프로젝트에서는 HP Analyzer를 사용하지 않고, beamforming 프로그램을 사용하여 실험을 수행하기 위함이므로, 노트북과 네셔널 인스트루먼트 USB 6289를 자료 습득장치로 사용하였다.

BNC 케이블을 이용하여, 네 개의 감진기는 네셔널 인스트루먼트 USB 6289에 채널1에서 4번까지 연결되었다. 노트북과 네셔널

인스트루먼트 USB 6289의 연결은 USB포트를 이용하여 연결하여, 노트북에는 반드시 measurement & automation 소프트웨어가 설치되어 있어야 노트북과 네셔널 인스트루먼트 USB 6289의 연결이 가능하다. 또한 실험을 수행하기 위하여 노트북에는 beamforming 프로그램을 설치한다.

※ measurement & automation 소프트웨어는 네셔널 인스트루먼트 웹사이트(www.ni.com)에서 무료로 다운로드할 수 있다.



그림 3 데이터 습득장치 셋팅

(2) 현장 실험 수행



그림 4 감진기의 배열과 발진원의 위치

(가) 감진기의 이동

그림 4와 같이 측선을 따라 네 개의 감진기를 설치하였다. 네 개의 감진기는 실험이 진행되면서 측선을 따라 이동한다. 그림 4에서 네 번째 감진기의 위치가 0m라고 하고 첫 번째 감진기의 위치는 3m이라고 한다면, 그 다음 실험은 네 번째 감진기의 위치가 3m이고 첫 번째 감진기의 위치가 6m의 위치에서 수행한다.

(나) 발진원의 이동

발진원의 위치는 첫 번째 감진기와 네 번째 감진기의 거리의 1배, 2배, 4배 그리고 8배 만큼 첫 번째 감진기로부터 떨어져서 실험을 수행한다.

(3) 자료 분석

이 프로그램은 32-비트 시스템에서 matlabⓒ GUI application을 사용하여 개발된 것으로 매틀랩이 없이도 독자적으로 실행될 수 있도록 제작되었다.

(가) 실험을 위한 beamforming 프로그램 셋팅

먼저, beamforming.exe파일을 클릭하여 프로그램을 연다. Configuration탭 - Source Configuration에서 Test ID는 1을 입력하고 Test Name에 파일의 이름 AnSeoung_S1이라고 입력한다.. 그리고 no. of receiver 란에 감진기의 개수 4을 입력한다. 이 프로그램에서는 첫 번째 감진기의 위치를 항상 0m로 한다. 그리고 실험에 앞서 실무자가 정한 감진기의 간격에 따라 Second Receiver는 1을 Last Receiver란에 3을 입력한다. 본 예제에서는 감진기의 간격을 1m로 정하였기 때문에 Second Receiver란에는 1m Last Receiver란에는 3m라고 입력하였다. Source Location란은 항상 마이너스 값으로 본 예제에서, 발진원의 위치는 첫 번째 감진기와 네 번째 감진기의 거리의 1배, 2배, 4배 그리고 8배 만큼 첫 번째 감진기로부터 떨어져서 실험을 수행하였으므로 각각 3, 6, 12, 24를 실험 순서에 따라 입력해준다. Source Configuration이 끝났으면 아래의 Save Configuration 버튼을 클릭한다.

Device Configuration에서 Load Device를 클릭하여 네셔널 인스투르먼 USB 6289을 더블클릭하여 연결을 확인한다. 그리고 Input Range(V)를 결정해야 한다. Input Range(V)의 결정은 사전

실험을 통하여 확인한다. 본 예제에서는 5를 입력하였다.(Input Range는 발진원과 첫 번째 감진기와의 거리 그리고 발진원의 크기와 관계가 있다.) Trigger Range(V)는 Input Range(V)의 10%를 입력하여 하므로 0.5를 입력한다. 실험 중에 프로그램이 발진원의 충격을 인식하지 못한다면 Trigger Range(V)의 크기를 감소시킨다. Frequency Range(Hz)는 2의 거듭제곱수로 입력해 준다. 예를 들어, 1000Hz까지의 범위를 입력하고 싶을때에는 2의 10승인 1024를 입력한다.(Frequecny Range(Hz)또한 발진원과 첫 번째 감진기가 멀어질수록 이 값은 감소해야 한다.) Number of data는 자료의 길이를 결정한다. 그리고 Trigger Channel에서는 항상 첫 번째 감진기를 선택한다. 최종적으로 Update Device버튼을 클릭하면 Trigger Delay가 정해진다. 그리고 아래의 Run/ Data Traces 탭을 클릭한다.

※ Load Internal Files에서는 Transfer Function파일이나 Time Traces파일을 이 프로그램으로 불러들이고 싶을 때 사용한다. Browse를 클릭하여 파일을 불러들인 다음에 Load all files을 클릭한다.

(나) 데이터 습득

Run/ Data Traces에는 네 개의 그래프란이 있다. 그래프마다 보기를 원하는 Time Trace, Linear Spectrum, Transfer Function(Phase), Transfer Function(Amp) 중 하나를 선택한다. 그리고 각 그래프마다 채널의 번호를 선택한다. 본 예제에서는 Transfer Function(Phase)를 확인해야 하므로, 첫 번째 그래프는 1-2, 두 번째 그래프는 1-3, 세 번째 그래프는 1-3를 입력한다. 그리고 START 버튼을 클릭하고 발진원을 이용하여 충격을 발생시킨다. 실험이 종료되면 STOP을 클릭한다. 실험이 종료되면 SAVE를 클릭하여 저장한다. LOAD 버튼은 Configuration탭에서 불러들인 파일을 불러들이기 위한 버튼이다.

(다) 데이터 분석

Beamforming Analysis탭으로 가서 Run Beamforming을 클릭한다. 왼쪽 상단에 wavenumber-frequency 그래프에 데이터가 나타난다. 그리고 Backbone 버튼을 클릭한다. Backbone 버튼은 일종의 데이터의 filter역할을 한다. 그리고 오른쪽에 AUTO 버튼을 클릭하여

unwrapping을 한다. 그러면 오른쪽 상단에 unwrapping된 새로운 wavenumber-frequency 그래프가 그려진다. 데이터의 일부를 제거하고 싶을때에는 MANUAL 버튼을 클릭한 후 REMOVE 버튼을 클릭한다. 그러면 데이터의 색깔이 붉은색으로 바뀌고 마우스를 이용하여 제거하고 싶은 데이터의 영역을 지정하여 제거한다. 그리고 모든 것이 완료되면 SAVE 버튼을 클릭하여 저장한다.

(라) 분산 곡선

Dispersion Curve탭을 클릭한다. 왼쪽 두 번째 란에 분석한 파일이름을 클릭하고 PLOT 버튼을 클릭하면 상단에 분산 곡선이 나타난다. Graph Type을 이용하여 그래프 타입을 변경할 수 있다. AVERAGE 버튼을 클릭하면 실험데이터와 이론데이터의 평균을 내어 검정색깔의 평균 데이터를 얻을 수 있다. SAVE DISP. 버튼을 클릭하여 데이터를 저장한다. SAVE AVERAGE 버튼을 클릭하여 평균 데이터도 저장한다.

(마) 컨투어 그리기

Plot Contour탭으로 가서 Load Data 버튼을 클릭하면 분석한 측정한 데이터의 측선길이가 나온다. 그리고 PLOT CONTOUR 버튼을 클릭하여 컨투어를 확인한다. 이렇게 발진원의 위치별로 데이터를 합치고 감진기의 위치도 변경시켜 반복 수행하면, 전체 측선의 컨투어를 얻을 수 있다

부록 B. 소프트웨어 Beamforming 1.0의 사용설명서

이 프로그램은 32-비트 시스템에서 matlabⓒ GUI application을 사용하여 개발된 것으로 매트랩이 없이도 독자적으로 실행될 수 있도록 제작되었다.

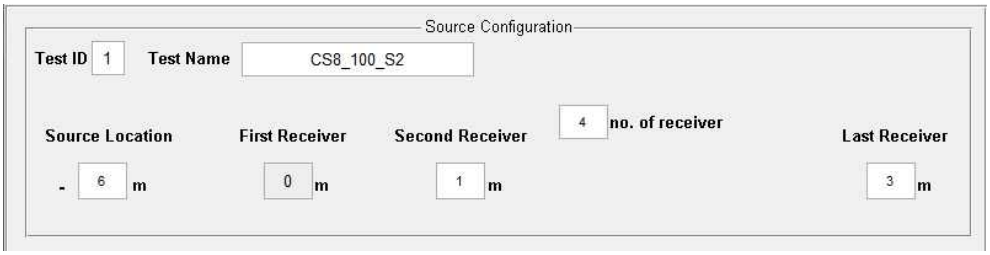
가. 프로그램 기능

이 프로그램은 표면파 분석 기법 중의 하나인 빔형성 기법을 수행하기 위해 개발되었다. 본 포로그램은 현장실험 데이터 습득, 현장에서 습득한 데이터 혹은 다른 프로그램으로부터 읽어들인 데이터를 이용하여 빔형성 분석을 위하여 사용된다.

나. 소프트웨어 사용설명서

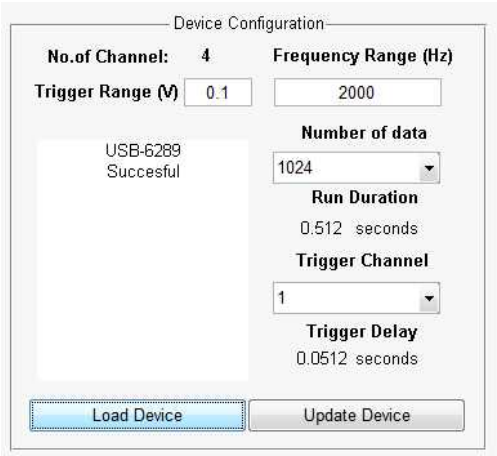
(1) 발진원 위치 지정

Configuration 버튼을 클릭한다. Source Configuration 패널은 패널의 맨 위에 위치해 있다. 빈 칸에 정확한 정보를 채워 넣는다.



- Test ID: 실험 식별 번호. 컨투어를 그리기 위해 중요한 번호이다.
- Test Name : 측선 이름
- Source Location : 첫 번째 감진기로부터 발진기의 거리
- First Receiver : 첫 번째 감진기 위치(일반적으로 0m로 셋팅하는 것을 추천)
- Second Receiver : 균등한 선형 감진기 배열길이에 대한 감진기 간격
- No. of receiver : 사용된 감진기 수
- Last Receiver : 마지막 감진기 위치(자동적으로 계산됨)

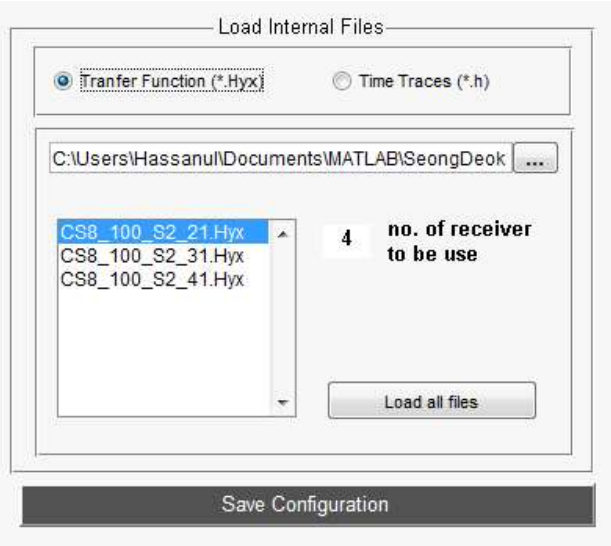
(2) 동적신호장치 매개변수 설정



현장에서 데이터 습득을 하기위해서는, 장비가 셋업이 되어야한다. 적절한 Trigger Range(V), 주파수 범위(Hz) 설정하고 그리고 데이터와 Trigger 채널의 개수를 선택한다. 그리고 Update Device 버튼을 클릭한다. 그러면 작동 시간과 trigger delay가 업데이트 될 것이다. Load Device 버튼을 클릭하면 white panel에 컴퓨터와 연결된 NI device 장비를 확인할 수 있다. 모든 과정이 성공적이라면, 모든 연결이 양호하며 실험을 수행할 수 있다.

(3) 저장된 파일 불러오기

Load Internal Files은 현재 컴퓨터 내에 존재하는 어떤 데이터를 사용하여 분석할 수 있는 기능이다. transfer function(*Hyx) 혹은 time traces(*H)파일을 불러들일 수 있다. 파일을 불러오기 위하여 browse 탭을 열고 Load all files를 클릭한다. 선택된 모든 파일이 불러들여질 것이다. 그리고 Save Configuration 버튼을 클릭한다.



(4) 저장된 파일 불러오기

Load Internal Files은 현재 컴퓨터 내에 존재하는 어떤 데이터를 사용하여 분석할 수 있는 기능이다. transfer function(*Hyx) 혹은 time traces(*H)파일을 불러들일 수 있다. 파일을 불러오기 위하여 browse 탭을 열고 Load all files를 클릭한다. 선택된 모든 파일이 불러들여질 것이다. 그리고 Save Configuration 버튼을 클릭한다.

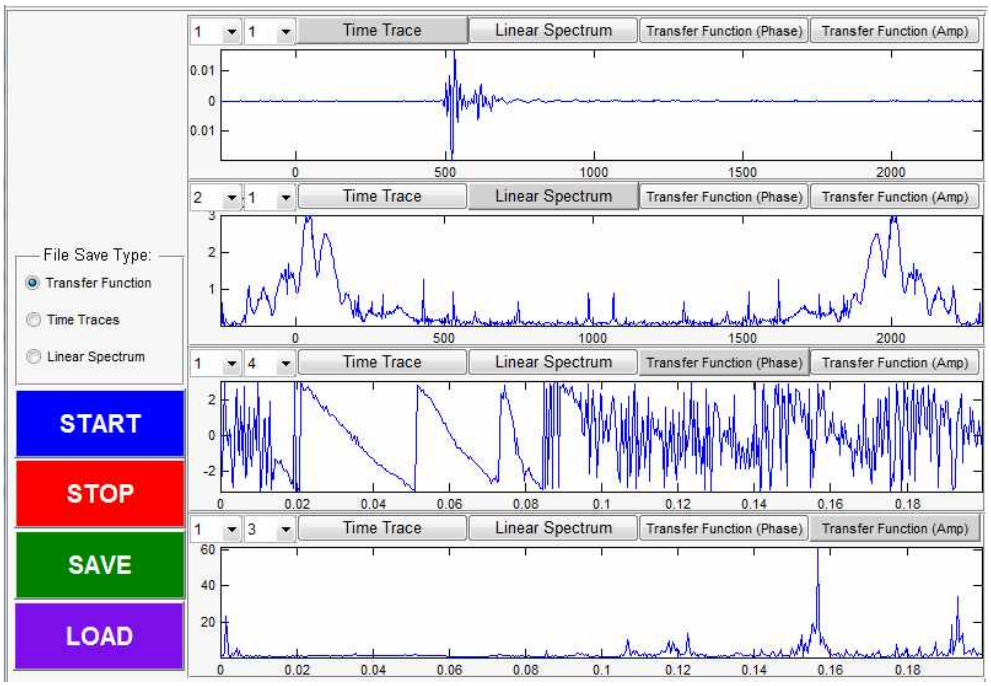
(5) “Data Traces” 탭

(가) 데이터를 습득하기 위해 Start 버튼을 클릭.

(나) 습득한 데이터를 저장하기 위해 Save 버튼 클릭, 파일 타입은 File Save Type panel에서 선택할 수 있다.

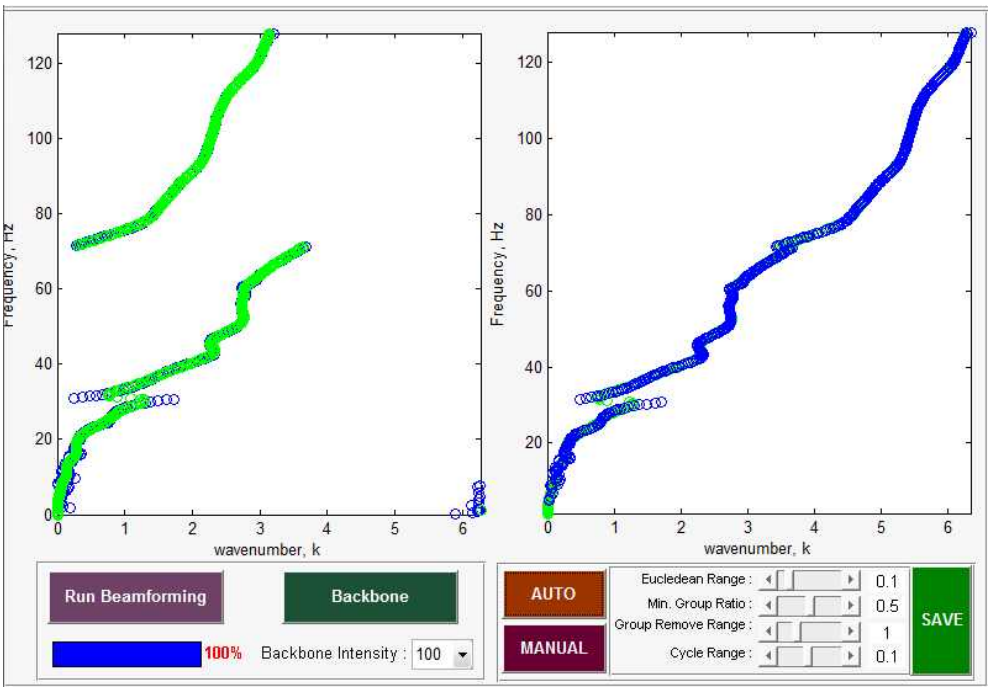
(다) 존재하는 파일을 불러들이기 위해 Load 버튼 클릭.

(라) 사용자는 traces 종류를 선택할 수 있다. 채널의 개수를 선택하고 traces 타입을 결정한다. (Time Traces, Linear Spectrum, Transfer Function in phase for amplitude).


File Save Type:
Transfer Function
Time Traces
Linear Spectrum
START
STOP
SAVE
LOAD
Time Trace
Linear Spectrum
Transfer Function (Phase)
Transfer Function (Amp)

(6) 빔형성 분석

빔형성 분석을 시작하기 위해 Run Beamforming 버튼을 클릭한다. 빔형성 분석이 완료되면 버튼 아래의 파란색 완료 표시가 100%를 나타낼 것이다. 파란 원형 마커로 표시된 f-k 그래프는 원래의 f-k 그래프이다. 분석 후 f-k 그래프를 얻은 후 Backbone 버튼을 클릭한다. 사용자는 backbone의 강도를 선택할 수 있다. backbone 그래프는 녹색 마커로 표시된다.



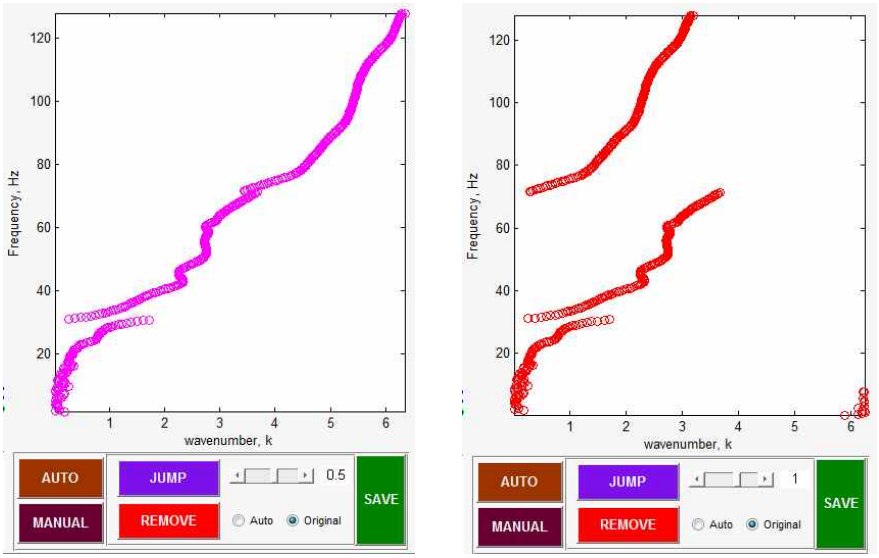
·사용자는 자동화된 f-k unwrapped을 위해 Auto를 선택할 수 있다. 선택가능한 기준 값은 적절한 unwrapping f-k 그래프를 얻기 위해 조정될 수 있다. Manual 버튼을 클릭하면 수동적으로 unwrapping을 할수 있다.

·Auto 혹은 Original 버튼을 선택하고 수동적으로 unwrapping 옵션을 위해 사용된 초기 그래프 종류를 선택하기 위해서 Manual 버튼을 클릭한다.

·그래프에서 원하지 않는 plot을 제거하기 위해 Remove 버튼을 누르고 제거하고 싶은 plot 그룹을 선택한다. 그러면 그래프 색깔은 빨간색 마커로 바뀐다.

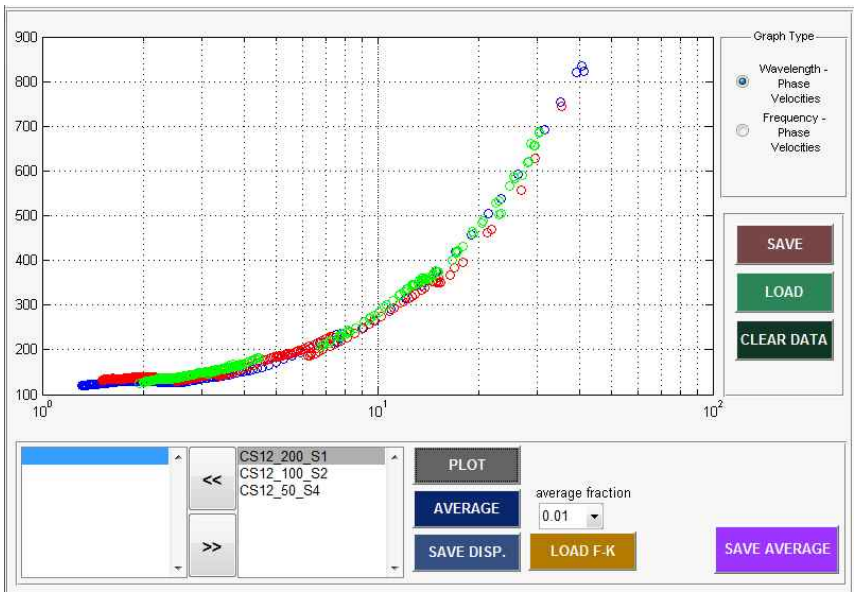
·f-k그룹 데이터에서 사이클 수를 변화시키기 위하여 Jump 버튼을 클릭해서 jump number를 바꿔준다. 그리고 plot 영역을 옮기기 위하여 데이터를 선택한다. plot은 핑크색 원형 마커로 변화할 것이다.

·분석을 계속하기 위해 Save버튼을 클릭한다.



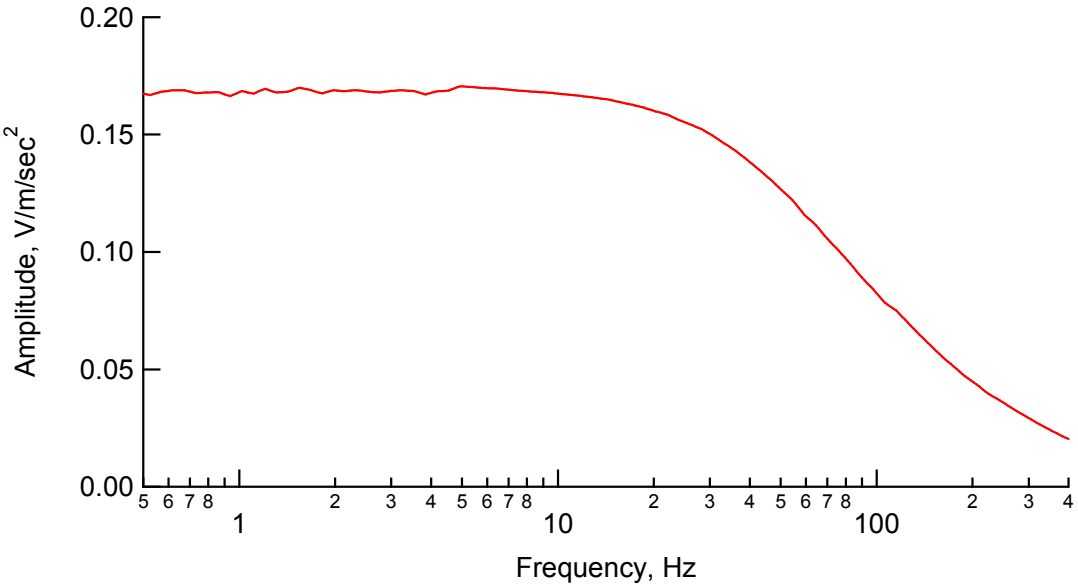
(6) “Dispersion Curve” 탭

·데이터를 그래프로 그리기 위하여 Plot 버튼을 클릭한다.
·바라지 않는 데이터를 임시적으로 저장할 수 있다.
·사용자는 Graph Type panel에서 그래프 종류를 선택할 수 있다.
·분산곡선 데이터를 저장하기 위해 Save Disp 버튼을 클릭한다.
·사용자는 Save 버튼으로 분산곡선 그래프를 저장할 수 있고, Load 버튼으로 다시 불러들일 수 있다.
·Clear Data 버튼은 보여지는 모든 분산곡선을 제거하기위해 사용된다.

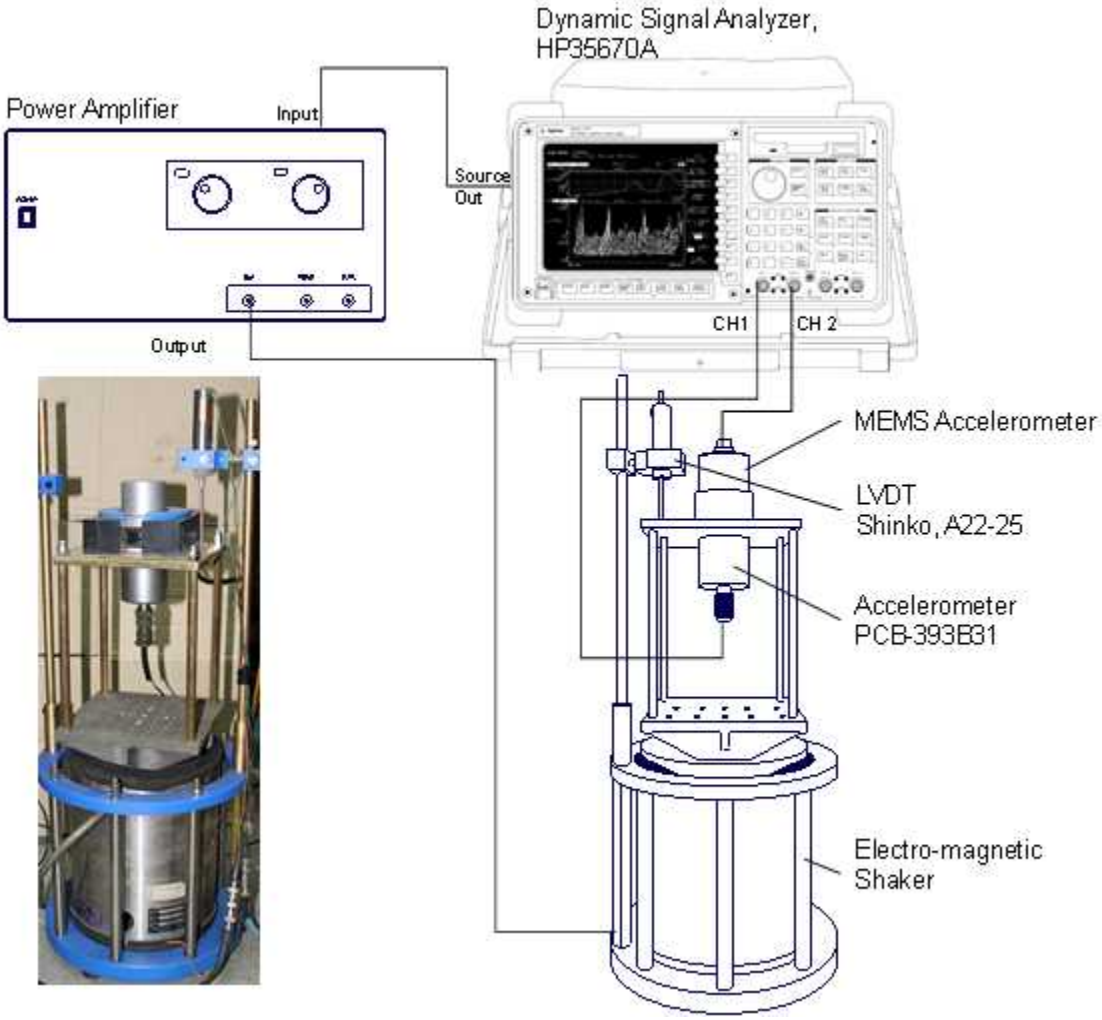


부록 C. MEMS 가속도에의 Calibration Chart

본 연구과제에서 개발된 MEMS 가속도계의 검증기록은 [그림 C.1.1]과 같다. MEMS 가속도계의 검증은 PCB 가속도계 (감도: 1.02 V/m/sec^2)을 이용하여 수해하였으며, 검증에 사용된 장비는 [그림 C.1.2]와 같다. [그림 C.1.1]를 참고해 보면 주파수 대역 10 Hz 까지는 거의 일정한 반응을 보여주고 있다가, 400 Hz 대역까지는 그 반응이 감소하고 있다. 따라서 UBF 시험에 본 연구개발 MEMS 가속도계를 사용하기 위해서는 [C.1.1.]의 검증기록을 사용하여 측정된 신호를 교정한 후에 자료해석을 수행하도록 하여야 한다.



[그림 C.1.1] 본 연구에서 개발한 MEMS 가속도계 검증기록



[그림 C.1.1] MEMS 가속도계를 검증하기 위한 하드웨어 시스템

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)389-6472
한국수자원공사 TEL 042)870-7603
한국철도기술연구원 TEL 031)460-5072
중앙대학교 TEL 031)460-5072
(주)희송지오텍 TEL 02)576-3801

R&D / 09기술혁신F05

대형지반구조물 대입경(大粒徑) 조립재료 동적물성 산정 기법 연구

■ 발 행 일 / 2012. 10. 25.

■ 발 행 처 / 한국수자원공사
대전시 대덕구 연축동 산6-2
Tel : 042-629-7632

주 의 사 항

1. 본 보고서는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행 한 건설기술연구개발사업의 3차년도 최종 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니됩니다.

붙임2

연구과제 설명자료

- 대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기법 연구 -

2012. 12.

주관연구기관	한국수자원공사
연구책임자	김 남 룡

목 차

Ⅰ. 과제 개요 ····· 1

Ⅱ. 연구개발 결과 ····· 10

Ⅲ. 연구성과 활용방안 ····· 27

Ⅳ. 기대효과 ····· 30

첨부1. 지식재산권 실적 ····· 33

2. 논문 실적 ····· 34

3. 연구비 세부 현황 ····· 37

Ⅰ 과제 개요

□ 개 요

○ 과 제 명 : 대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기법 연구

○ 연구기관 : 한국수자원공사

○ 연구기간 : '09.10.26～'12.10.25(3년)

○ 연 구 비 : 총 1,689백만원(정부 830백만원, 기업 859백만원)

(단위 : 백만원)

구분	'09	'10	'11	계
정부	100	420	310	830
기업	125	420	314	859
계	225	840	624	1,689

○ 과제수행체계

구분	연구과제명	총연구기간	연구기관	연구책임자
주관	대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기법 연구	'09.10～'12.10	한국수자원공사	김남룡
공동	대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기법 연구	'09.10～'12.10	한국철도기술연구원	이성진
공동	대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기법 연구	'09.10～'12.10	중앙대학교	조성호
공동	대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기법 연구	'09.10～'12.10	㈜희송지오텍	김기석
위탁	대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정 기법 연구	'09.10～'12.10	인덕대학교	전제성

□ 개발 배경

○ 최근 지반구조물의 대형화 추세에 따라 대입경 조립재료는 대형 필댐, 저수지 제방, 항만 방조제 및 방파제, 철도 노반 및 암성토, 교대 및 지하철 박스 뒷채움 등 그 활용 범위가 증가하고 있으며, 이러한 대형 구조물이 경제적·사회적으로 국가 중요 기반시설임을 고려할 때 재료의 특성 평가는 중요

한 과제임.

- ○ 그러나 대입경 조립재료는 큰 입경으로 인하여 시료에 대한 직접적인 실내시험이 어렵고, 시추공을 이용한 현장시험 또한 시추공 형성이 어려워 시험이 거의 불가능함. 비파괴 탄성파 탐사의 경우에도 재료의 불연속성으로 인한 측정 신호의 품질 저하와 대상 구조물의 유한한 기하학적 형상형상으로 인하여 적용이 어려움.
- ○ 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물의 내진설계 및 내진안정성 평가, 건설 및 운영 중 진동요인에 따른 동적하중에 대한 안정성 평가 및 설계, 내부 공동, 잠재적 결함 등과 같은 지반구조물의 건전성 평가 등을 위해서는 신뢰성 있는 동적물성 산정을 위한 현장시험 기법의 개발이 절대적으로 요구됨.
- ○ 따라서 실내시험, 현장시험, 진동계측데이터 분석 등 다양한 방법에 의한 대입경 조립재료의 동적 변형특성을 종합적으로 평가하고, 그 적정성을 분석함으로써, 국내 주요 대형 기간시설의 동적성능평가에 활용하기 위한 기초 자료를 제공하고, 건설교통기술의 국가 경쟁력 확보에도 이바지하고자 함.

□ 기술 동향

○ 실내시험에 의한 대입경 조립재료의 동적물성 평가

- 유럽, 일본 등에서는 대입경 조립지반재료에 대한 대형삼축압축시험, 대형공진주시험 등으로 시험적 연구가 오래전부터 진행되어 오고 있으며, 이에 대한 예측모델에 대한 연구 결과도 다수 발표되고 있다. 또한 여러 문헌의 자료를 바탕으로 Seed 등(1986)과 Rollins 등(1998)은 모래와 자갈 등 조립재료에 대한 대표 비선형 동적 변형특성을 제안한 바 있다. 국내에서도 2000년대 들어 대형진동삼축압축시험기를 개발, 댐 축조재료와 같은 대입경 조립재료의 동적물성을 평가한 바 있다.

○ 현장시험에 의한 대입경 조립재료의 동적물성 평가

- 최근 국내 연구진에 의하여 표면파를 이용하는 CapSASW, HWAW 등의 기법이 개발되어 활용되고 있으며, MASW, ReMi 기법 등을 이용한 전단파속도 주상도 평가가 이루어지고 있다. 그러나 대입경 조립재료 지반에 대한 적용성의 검증은 부족한 현실이다.

□ 시장 및 정책 동향

○ **시장 동향**

- 대입경 조립재료가 사용되는 분야는 댐, 제방, 도로, 철도, 공항 활주로, 항만 방파제, 해안제방 및 지하철 공사 등과 같은 사회기반시설 공사이다. 2009년 6월 초에 발표된 정부의 4대강 살리기 프로젝트(2009-2012)의 경우 총사업비가 약 22조원으로서 하천제방의 보강, 신규댐의 건설, 농업용댐의 증고 등 대입경 조립재료를 이용하는 공사가 전체 사업의 많

은 부분을 차지하고 있어 대규모 성토공사시 조립재료에 대한 강도와 변형특성에 대한 조사와 시험에 대한 수요가 급증할 것으로 예상된다. 또한, 한국수자원공사의 경우 관리중인 댐 27개 댐 중에서 필댐은 24개(용수전용댐 포함)이며, 현재 건설중인 댐을 포함하면 약 30개에 이르고 있고, 국가기반시설인 이들 댐들에 대한 정확한 안정성 평가와 거동의 분석은 필수적이다. 필댐의 거동을 정확하게 분석하기 위해서는 축조에 사용된 재료의 전단강도, 응력-변형율 관계, 전단변형율-전단탄성계수-감쇠비 관계 등에 대하여 현장 및 실내 시험결과가 필요하다. 이 밖에도 도로, 항만 및 철도 시설물 공사에 포함된 성토구조물 공사 등에도 대입경 조립재료가 많이 사용될 것으로 예상되고 있다.

○ **정책 동향**

- 최근 대형 국책사업의 증가와 함께 대형지반구조물의 대형화 및 대입경 조립지반재료의 사용이 증가되고 있다. 또한 국내외적으로 내진설계 등 사회기반시설의 안전성 확보에 대한 국민적 관심이 커지면서 이에 관련된 법규 및 제도 등이 강화되고 있다. 따라서 이에 필요한 구성 재료의 동적물성 산정 시험기법의 확보가 더욱 요구되고 있다.

□ 연구 목적

○ 본 연구의 최종 목표는 대형실내시험, 현장탄성파시험, 진동계측결과의 활용 등의 방법으로부터 대입경 조립재료의 동적물성을 산정하는 기법을 개발·제시하고, 각 기법으로부터 주요 대형 지반구조물을 이루는 대입경 조립재료의 동적물성 범위를 제시함으로써, 대형 지반구조물의 지진 및 진동하중 작용시 응답 거동을 정확히 파악하는데 필요한 기초 물성을 제공함에 있다. 이를 위한 세부 사항은 다음과 같다.

- 대형 공진주시험시스템 개발 및 조립재료의 동적물성 산정
- 대형진동삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정
- 대입경 조립재료의 동적물성 평가를 위한 최적의 표면파 현장탐사기법 개발 및 시스템 구성
- 반사법탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시
- 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 추정기법 개발
- 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 평가 및 제안기법 검증
- 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험 모델링 기법 및 활용기술 개발

□ 주요 연구내용

○ 대형 공진주시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정기법 및 물성범위 제시

- 대형 공진주시험기 개발 기초자료 조사·분석 및 설계개념 도출
- 조립재료 동적변형특성 평가에 적합한 최적의 대형 공진주시험기 설계 및 제작
- 대형 공진주시험시스템의 동적응답특성 교정 및 다양한 검증시편, 지반재료를 이용한 적합성 검증
- 대입경 조립재료의 최대입경, 입도분포특성 등에 따른 동적변형특성(미소변형 최대전단탄성계수, 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비) 평가
- 댐 축조용 사력재, 고속철도 강화노반, 공사용 가설재료 등 조립재료 사용 유형에 따른 동적변형특성 평가 및 물성범위 제시

○ 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

- 대형삼축압축시험장비 검증
- 상사입도조정법/자갈입도보정법 등 입도조정방법에 대한 평가
- 하중패턴, 최대입경, 세립분함유율, 함수비 등 시편 및 시험 조건 영향 평가
- 조립재료 최대탄성계수시험법/중간주응력이 강성에 미치는 시험법 개발 및 평가
- 댐, 철도, 도로 등 주요 지반구조물 조립재료의 동적물성(탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수) 산정 및 가이드라인 제시
- 기본 물성과 재료특성을 반영한 국내 조립지반재료의 동적물성 예측 모델 및 모델 재료 상수 제시

○ 대입경 조립재료 동적물성 산정을 위한 현장시험 기법 개발
- 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법 개발을 위한 기초연구
- 댐, 성토노반 등 비반무한체에서의 표면파 전파특성 연구
- 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 제안
- 조립재료 지반에 적합한 최적 탐사기법을 위한 측정 하드웨어 시스템의 제안
- 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 정립 및 검증
- 지반구조물별 최적 탄성파 탐사기법의 실무적용을 위한 매뉴얼 작성

○ 반사법 탄성파 탐사에 의한 조립재료 지반 동적물성 산정
- 반사법 탄성파 탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성범위 제시 : 4개소의 대입경 조립지반에 대한 반사법 탐사 및 다양한 현장탐사 동적물성 범위 분석
- 국내지반의 현장동적물성 산정기법의 데이터베이스 구축 : 지층별, 재료별, 공종별 현장 동적물성 데이터베이스 구축, 탄성파 속도 범위 및 현장 동적물성 범위 산정

○ 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산기법 개발
- 댐 사력죤 수치해석에 의한 역산사례와 댐 실지진계측자료 수집 및 분석 : 미소지진 계측기록 활용을 위한 전처리 기법 제안
- 국내 주요 댐 지진계측기록 확보 및 특성 분석
- 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석에 의한 사력죤 동적물성 추정기법 제시 : 강성 변화에 따른 반복적 수치해석 결과와 계측 데이터에 의한 댐 고유주기 비교 분석을 통한 사

력재료 전단탄성계수 산정
- 3차원 수치모형을 이용한 지진응답해석에 대한 제안 기법의 확장성 평가

○ 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증
- 지반구조물 실대규모 진동실험 사례조사 및 발파진동실험 준비를 위한 주요 설계인자 분석
- 실대규모 발파진동 실험 수행을 위한 현장조사 및 발파진동 실험 설계
- 발파진동실험 계측 데이터 분석 : 댐 인접 발파에 의한 정상부 가속도 응답특성 분석 및 효과적인 댐 고유주기 산정기법 제시
- 제안 기법을 활용한 댐 축조재료의 심도별 전단파속도 추정 : 반복적 수치해석 분석 기법의 적정성 검증

○ 개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험 모델링 기법 개발
- 2차원 개별요소법 기반 대형 동적시험 수치모델링 기술 개발
- 정적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소법 기반 수치모델링 기술 개발
- 동적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소법 기반 수치모델링 기술 개발

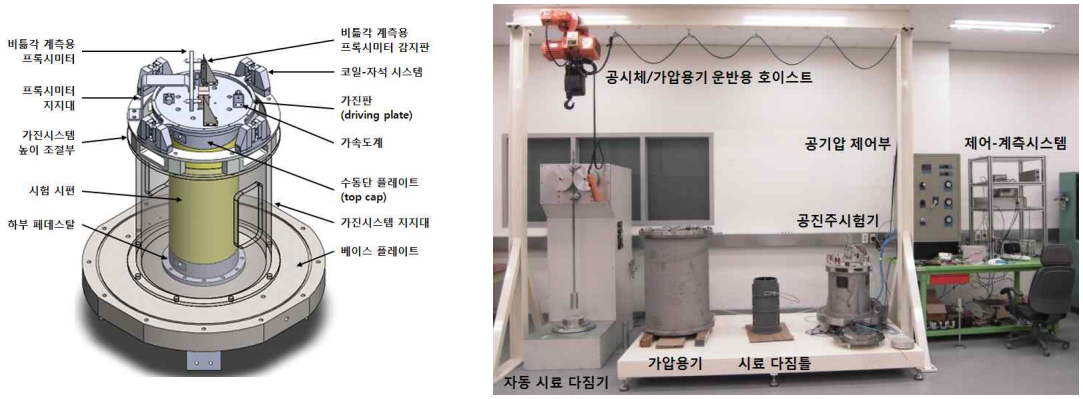
□ 연차별 주요 연구내용

연차	주요 연구내용	연구수행기관
1차년도 ('09.10.26 ~'10.06.25)	✓ 대형공진주시험시스템 사양 결정	한국수자원공사
	✓ 대형삼축압축시험장비 검증 ✓ 대형삼축압축시험으로 상사입도조정법 등 입도조정방법에 대한 평가	한국철도기술연구원
	✓ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험기법 개발을 위한 기초연구 수행	중앙대학교
	✓ 진동형 송신원을 이용한 고분해능 반사법 탄성파탐사 수행 ✓ 반사법 탐사의 합리적 분석을 위한 신호원 특성별 비교 분석 ✓ 국내 지반의 현장동적물성 산정기법에 의한 데이터베이스 구축	㈜희송지오텍
	✓ 댐 지진계측자료 획득 및 역산사례 문헌조사 ✓ 해체 예정 댐 실대규모 발파진동실험 설계	한국수자원공사
	✓ 2차원 개별요소법 기반 대형 동적시험 수치모델링 기술 개발	인덕대학교
2차년도 ('10.06.26 ~'11.06.25)	✓ 대형공진주시험시스템 제작 완료 및 검증	한국수자원공사
	✓ 대형삼축압축시험 이용 하중패턴, 최대입경 등 시편 및 시험조건 영향 평가 ✓ 조립재료 최대탄성계수/중간주응력 시험법 개발 및 평가	한국철도기술연구원
	✓ 댐, 성토노반 등 비 반무한체에서의 표면파 전파특성 연구	중앙대학교
	✓ 1차년도 반사법 탄성파 탐사 자료처리 ✓ 1차년도 현장조사 지역 시추조사 및 현장시험 수행 ✓ 국내 지반의 현장동적물성 산정기법에 의한 데이터베이스 업데이트	㈜희송지오텍
	✓ 미소지진계측기록 활용 2차원 동적해석에 의한 댐 사력죤 동적물성 추정 ✓ 실대규모 발파진동시험 수행	한국수자원공사
	✓ 정적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소법 기반 수치모델링 기술 개발	인덕대학교
3차년도 ('11.06.26 ~'12.10.25)	✓ 대형공진주시험시스템 이용 동적물성 산정 및 산정기법 제시 ✓ 대입경 조립재료 기본물성 - 동적물성 간 상관관계 고찰	한국수자원공사
	✓ 대형삼축압축시험 이용 상사입도조정법 및 자갈입도보정법 평가 ✓ 댐, 철도, 도로 등 주요 지반구조물 조립재료 동적물성 산정 시험 및 예측 모델 제시	한국철도기술연구원
	✓ 조립재료 지반에 적합한 최적 탐사기법을 위한 측정 하드웨어 시스템의 제안 ✓ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험기법의 정립 및 검증 ✓ 지반구조물별 최적 탄성파 시험기법의 실무 적용을 위한 매뉴얼 작성	중앙대학교
	✓ 3개지역 고분해능 반사법 탐사 수행 및 자료처리 ✓ 현장시험에 의한 대입경 조립지반 동적물성 범위 제시 ✓ 국내 지반의 현장동적물성 산정기법에 의한 데이터베이스 업데이트	㈜희송지오텍
	✓ 3차원 수치해석에 의한 역산법 확장 가능성 평가 ✓ 발파진동실험 계측 데이터를 이용한 역산기법 적용 동적물성 산정 ✓ 현장 시험결과 및 실내시험 물성탐사기법 상호 검증	한국수자원공사
	✓ 동적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소법 기반 수치모델링 기술 개발	인덕대학교

Ⅱ 연구개발 결과

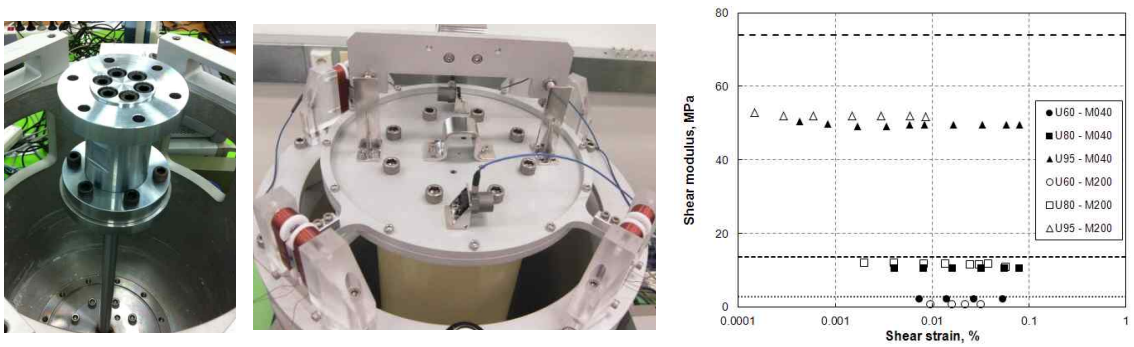
□ 대형 공진주시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정

○ 대형 공진주시험기 개발 기초자료 조사·분석을 통하여 총 14개 기본 원칙을 바탕으로 하는 설계개념 최종 도출 - 조립재료 동적변형특성 평가에 적합한 최적의 대형 공진주시험기 설계 및 제작



[대형 공진주시험시스템 신규 구축 현황]

○ 대형 공진주시험시스템의 동적응답특성 평가를 위한 3개 금속검증시편을 이용한 교정 시험 수행

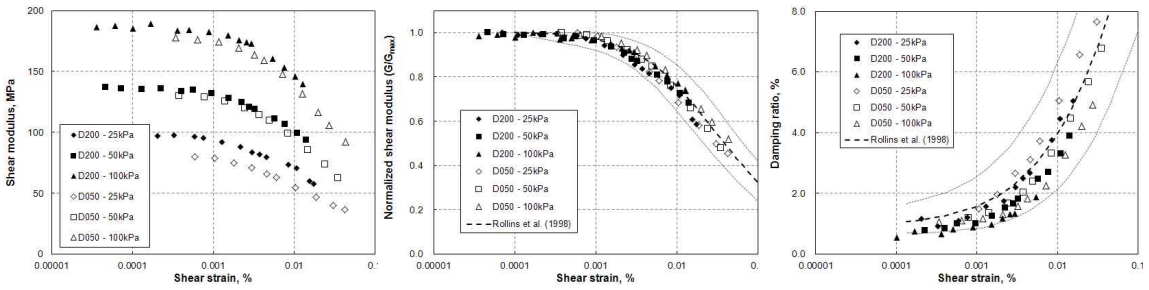


[금속시편에 의한 시험기의 교정 및 폴리우레탄 시편을 이용한 시스템 검증]

○ 신규 시험시스템의 성능 평가를 위한 3개 다른 강성의 폴리우

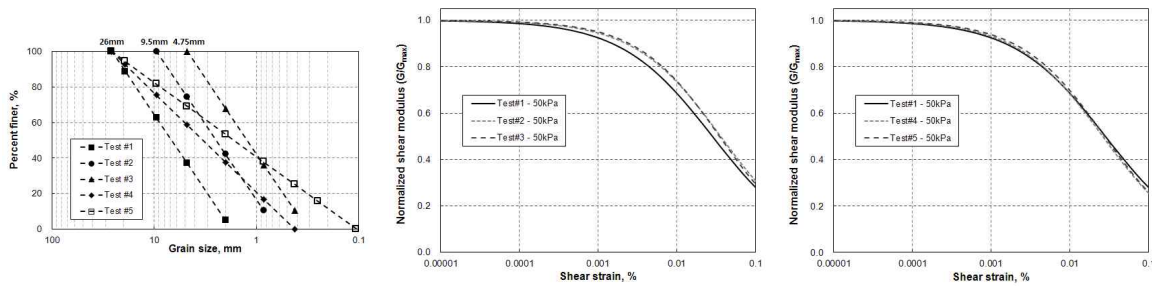
레탄 검증시편을 이용하여 대형 공진주시험, 소형 공진주시험, 전단파 양단자유 공진주시험 결과를 비교한 결과, 신규 대형 장비의 적합성을 검증

○ 지반재료에 대한 적용성 평가를 위하여 자갈질 입자를 포함하는 동일한 지반재료를 대형·소형 공진주시험기에 대하여 병행 시험 수행 : 시험기 크기에 관계없이 동등한 결과를 나타내나, 작은 구속압 단계에서 공시체 크기 효과에 의한 일부 차이 확인



[자갈질 지반재료에 대한 대형·소형 공진주시험기 비교 시험 결과]

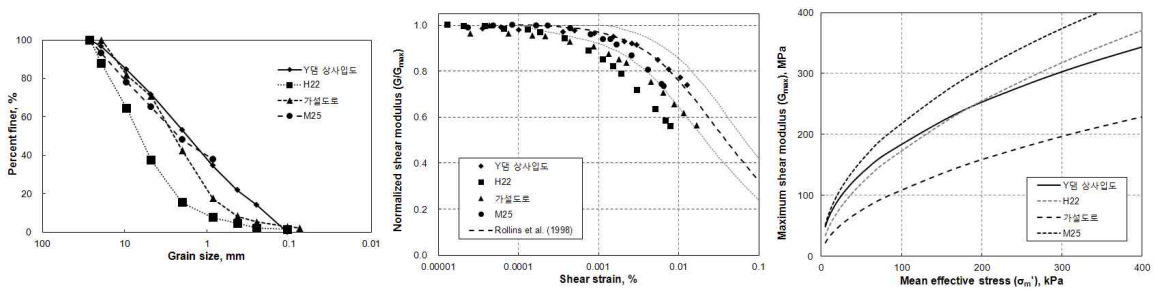
○ 대입경 조립재료의 최대입경, 입도분포특성 등에 따른 동적변형특성(미소변형 최대전단탄성계수, 전단탄성계수 감소곡선, 감쇠비) 평가 : 재료의 최대입경 증가에 따라 재료 변형의 비선형성이 커지며, 균등계수가 증가할수록 비선형성이 작아지는 양상을 보임



[조립재료 입도분포특성에 따른 비선형 변형특성 평가]

○ 댐 축조용 사력재, 고속철도 강화노반, 공사용 가설재료 등 조

립재료 사용 유형에 따른 동적변형특성 평가 및 물성범위 제시 : 다양한 재료에 대한 시험 결과 재료 변형의 비선형성은 조립재료의 입도분포특성에 크게 영향을 받으며, 최대전단탄성계수는 재료 자체 특성이 지배적으로 영향을 나타냄

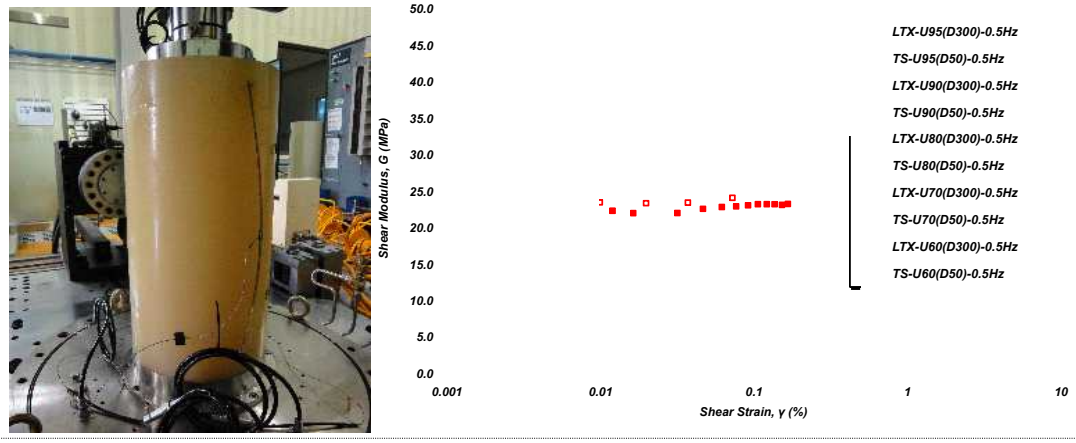


[구조물별 사용 재료에 따른 동적변형계수]

○ 전체 연구결과를 종합하여, 대입경 조립재료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 모델 파라미터의 계수 범위 등을 제시

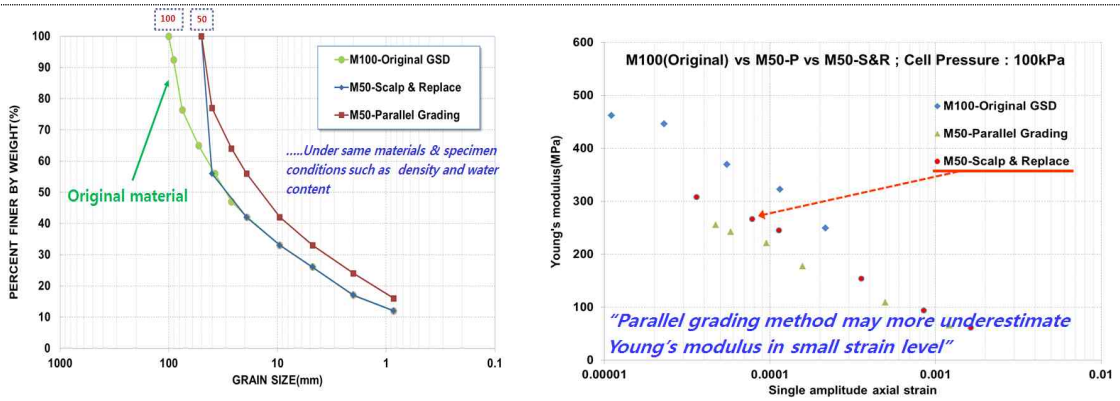
□ 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시 연구

○ 우레탄 시편과 검증된 다른 시험법(공진주시험, 비틂전단시험, 충격반향시험 등)을 활용한 장비 및 시험 결과 검증



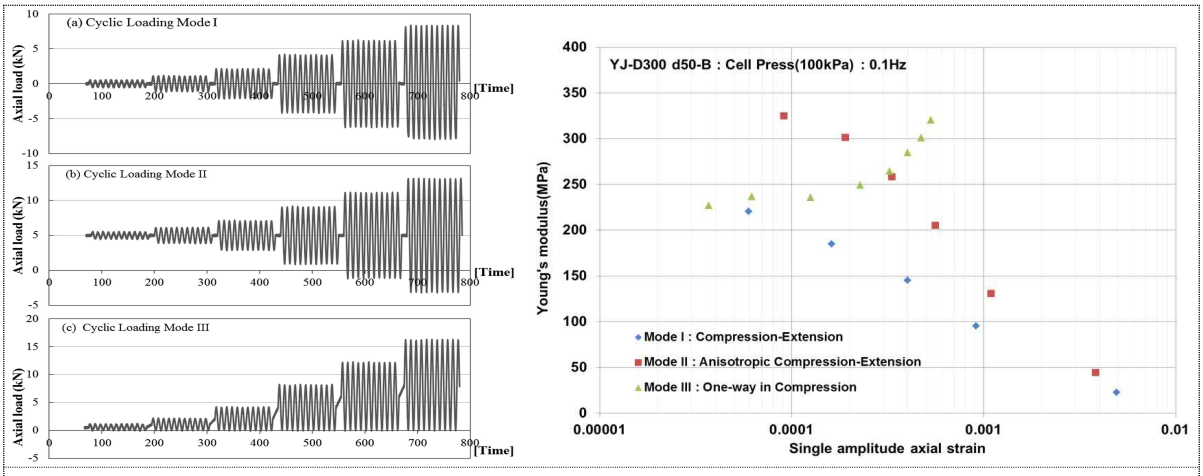
[우레탄 검증 시편 및 대형삼축압축시험과 비틂전단시험 결과 비교]

○ 실제 현장에서 사용되는 대입경 조립재료는 실내 시험장비에서 시험이 가능한 입경을 넘어서는 경우가 많이 있다. 이러한 경우 시험이 가능한 입도로 조정하여 시험하는 것이 불가피하고, 이때 가장 널리 활용되는 방법이 상사입도조정방법인데 이와 함께 자갈입도조정법으로 조성된 시편과 원재료 입도의 시편에 대한 시험을 수행하여 미소변형 수준에서의 탄성계수 시험 결과에 미치는 입도조정방법의 영향을 평가하였음



[상사입도조정 및 자갈입도보정 입도분포]

○ 시험법에 따라 일관된 시험을 수행하여 재료입도를 포함한 시편에 대한 조건과 하중모드, 주파수 등의 시험 조건의 인자들이 저변형률 수준의 동적물성에 미치는 영향을 평가하여 조립재료의 합리적 대형삼축압축시험 결과의 적용과 향후 예측모델 고려 인자 선정에 활용할 수 있는 기초 자료 제공 정리



[하중패턴 및 하중재하조건별 반복삼축압축시험 결과 비교]

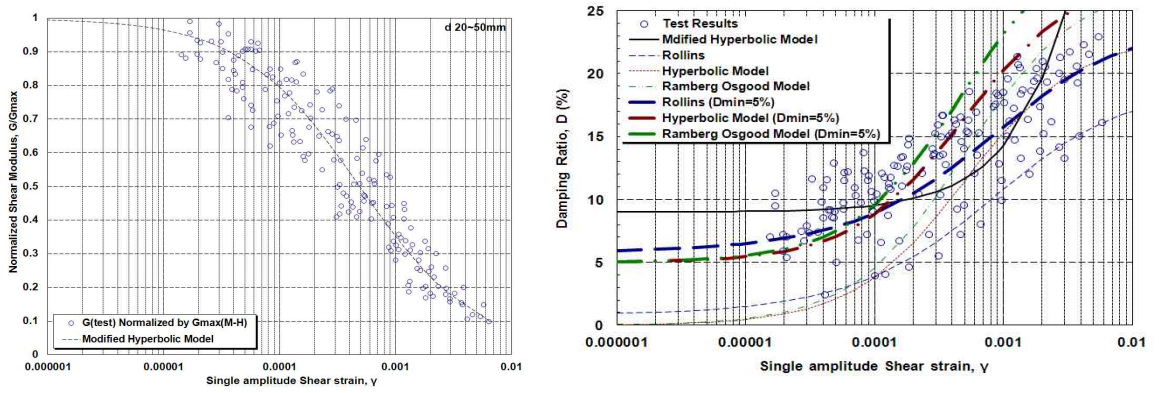
○ 주파수 및 진폭 제어 가능한 Piezoelectric actuator와 타격식 에어실린더를 활용한 최대탄성계수 시험장치와 계측 신호 분석 프로그램 구축 및 중간주응력 제어 시험장비 구축/시험



[최대전단탄성계수 시험(가진식/타격식 및 중간주응력제어 시험)]

○ 댐, 철도, 도로 등 국내 대형지반구조물의 주요한 성토재료인

대입경 조립지반재료들에 대해 여러 조건에서의 동적물성산정 시험을 수행하여 탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수 등의 시험 결과를 확보하고 본 시험 조건과 유사한 재료에 대한 적용이 가능하도록 시험 결과를 정리 및 물성 모델의 대표적 재료 상수를 제시하였다. 즉, 설계 초기나 해석 등에 물성을 예측하여 사용하기 위해 다양한 모델들이 제안되어 왔는데 이 중에서 국내 조립지반재료와 적용 대상 조건에 적합한 모델과 모델 상수들을 산정 제시하고, 필요한 경우 새로운 모델을 제시하여 대입경 조립지반재료의 동적물성을 합리적으로 사용할 수 있도록 하였다.



[국내 조립지반재료 정규화전단탄성계수/감쇠비 시험 결과 및 대표 곡선 제안]

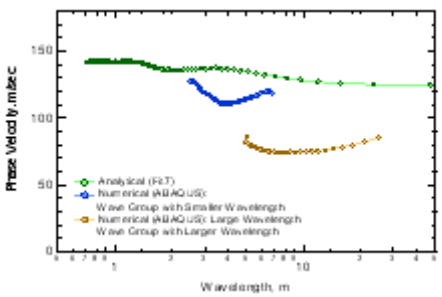
□ 대입경 조립재료 동적물성 산정을 위한 현장시험 기법 개발

○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법 개발을 위한 기초연구

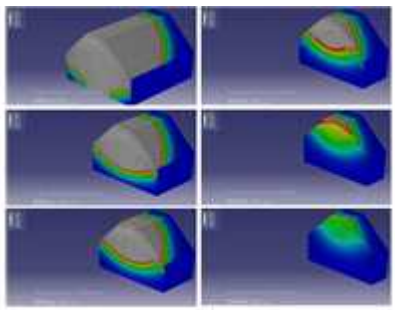
- 기존의 조립재료 지반구조물에서 현장시험수행
- 기존의 조립재료 지반구조물에서 다양한 발진원을 사용하여 현장시험 수행
- 탄성파 탐사에 사용되는 하드웨어의 특성 비교 평가

○ 댐, 성토노반 등 비반무한체에서의 표면파 전파특성 연구

- 유한요소해석에 의한 사면 구조물에서의 표면파 전파특성 평가



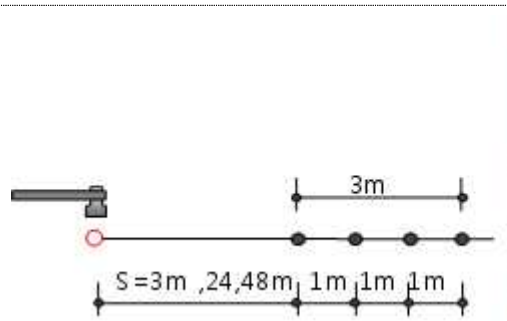
[경계조건에 따른 표면파 전파속도 비교]



[유한요소모델링에 의한 표면파모델링]

○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 제안

- 조립재료 지반에 적합한 최적 표면파기법, UBF 기법 제안





[UBF 기법 시험구성 및 대청댐 현장에서의 시험 사례 전경]

○ 조립재료 지반에 적합한 최적 탐사기법을 위한 측정 하드웨어

시스템의 제안

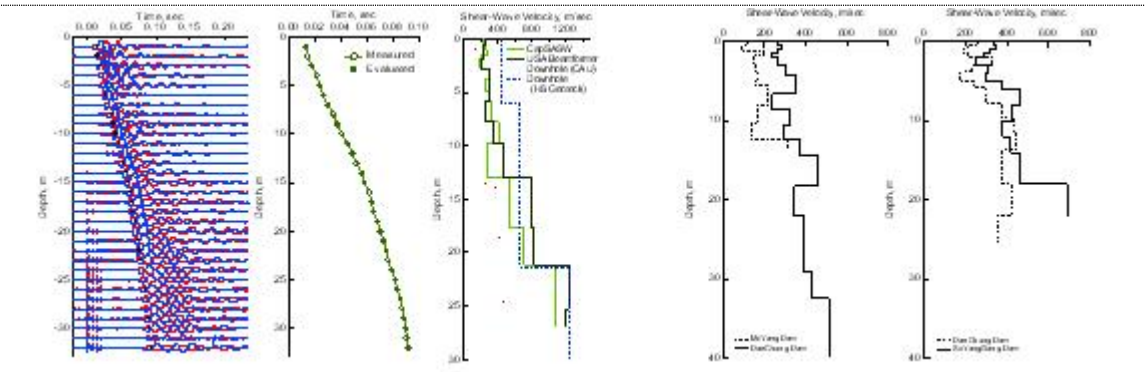
- UBF기법 위한 전용소프트웨어 개발: Beamforming 1.0
- UBF기법 위한 전용하드웨어 제안: DS-USB-6289 시스템, MEMS 가속도계 유니트



[UBF 기법 시험시스템 - 계측·분석 소프트웨어, 전용 하드웨어, MEMS 가속도계]

○ 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 정립 및 검증

- 대입경 조립골재 지반(구조물)에서 시추공 탐사기법과 비교: 대형 사력댐, 사력댐 진입로, 암버럭 성토 호남고속철 노반, 평화의댐 사석 성토구간.
- 다양한 조립재료 지반구조물에서의 현장적용을 통한 실용성, 적용성 검증: 철도노반, 사력댐, 암버럭성토 비포장도로, 일반 자연지반 등
- 조립재료 지반구조물별 동적물성의 데이터베이스 작성:사력댐의 코아영역, 사석 영역의 대표 전단파속도

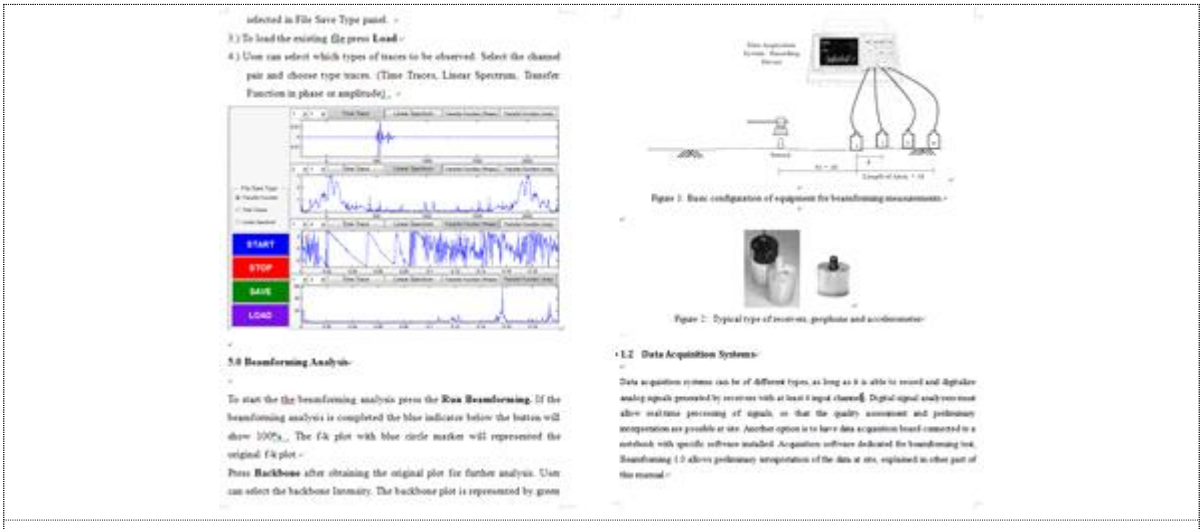


[UBF 기법의 검증 비교실험 및 사력댐 적용 결과]

○ 지반구조물별 최적 탄성파 탐사기법의 실무적용을 위한 매뉴

얼 작성

- UBF 기법을 위한 현장시험 매뉴얼 작성
- 개발된 소프트웨어 Beamforming 1.0을 위한 사용자 매뉴얼 작성

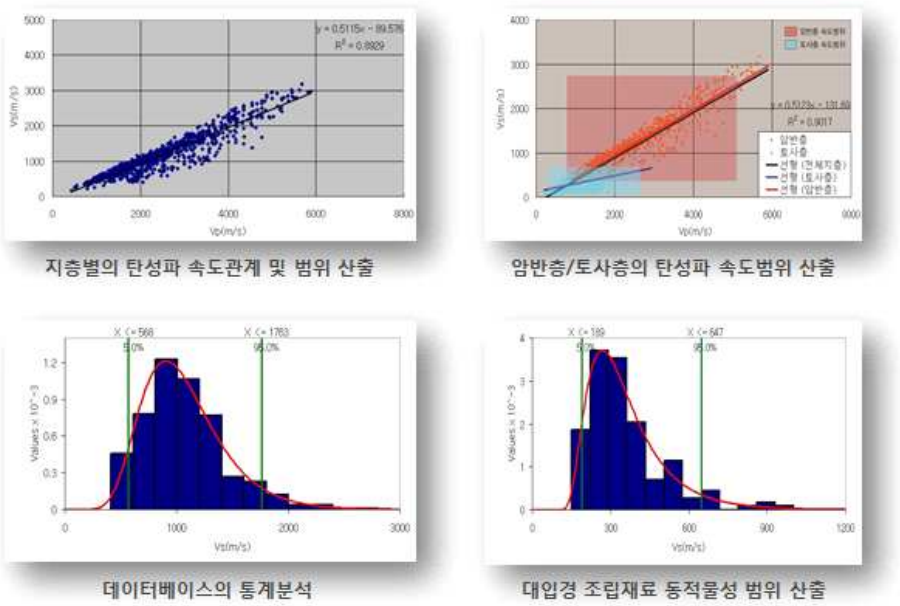


[Beamforming Software 및 UBF 기법의 현장시험 매뉴얼]

□ 반사법 탄성파 탐사에 의한 조립재료 지반 동적물성 산정

○ 국내지반의 현장동적물성 산정 기법의 데이터베이스 구축

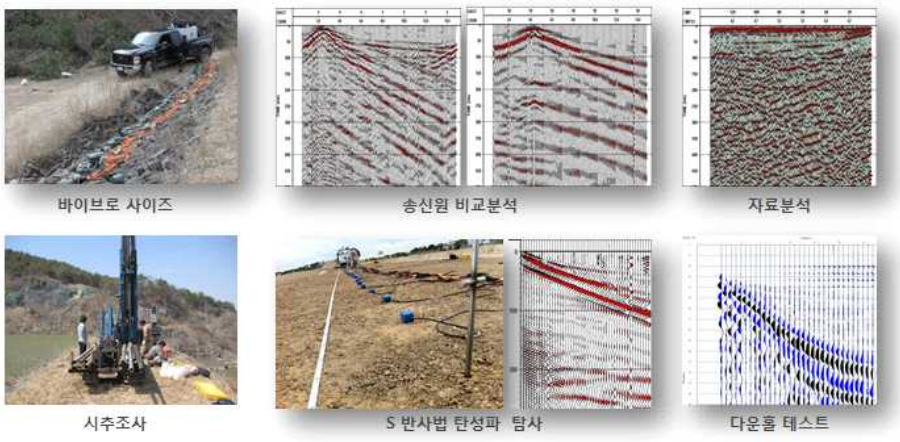
- 국내 97개 지역 암종별, 지층별, 기법별 탄성파 속도 데이터베이스 구축 : 신뢰성 검증을 위한 통계분석 기법을 활용하여 탄성파 속도범위 산출



데이터베이스에 의한 탄성파 속도 범위 산출

○ 고분해능 반사법 탐사에 의한 동적물성 범위 제시

- 합리적 자료분석을 위한 진동형/임펄스형 송신원의 특성 비교
- 고분해능 P-반사법 및 S-반사법 탐사 수행
- 탐사자료의 신뢰성 검증을 위한 시추조사 및 다양한 현장시험 비교분석

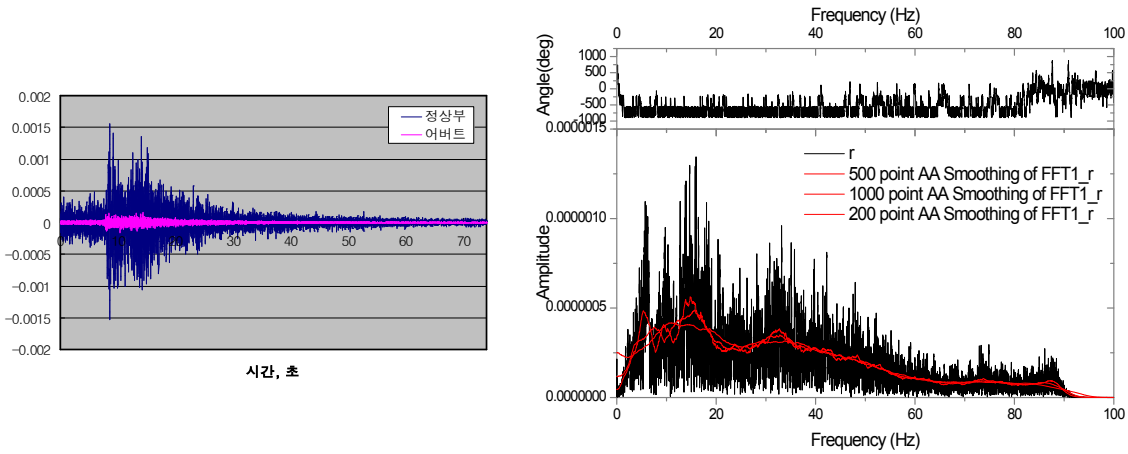


반사법 탄성파 탐사 및 다양한 현장 탐사에 의한 탄성파 속도범위 산출

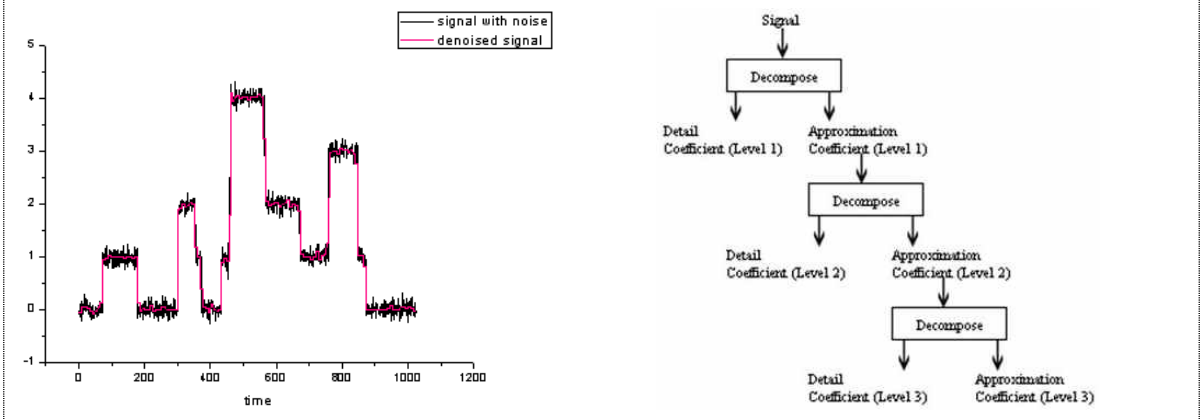
□ 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산 기법 개발

○ 댐 사력존 수치해석에 의한 역산사례와 댐 실지진계측자료 수집 및 분석 - 미소지진 계측기록 활용을 위한 전처리 기법 제안

○ 국내 주요 댐 지진계측기록 확보 및 특성 분석

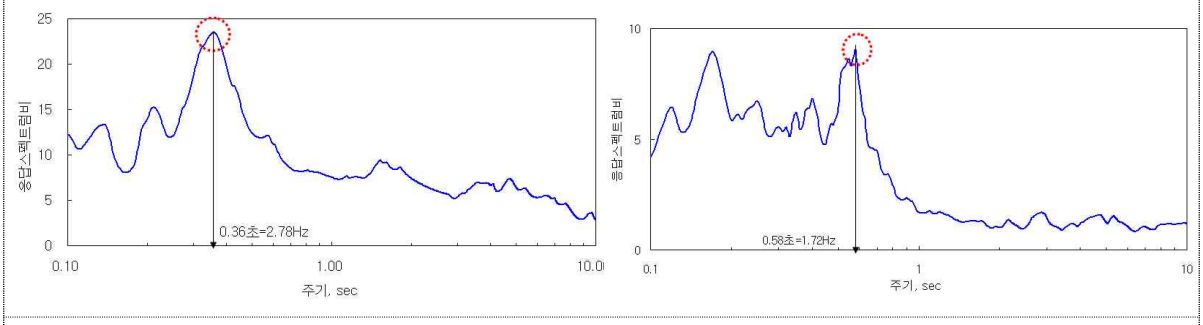


[주요 댐 지진계측데이터 수집 및 특성 분석]



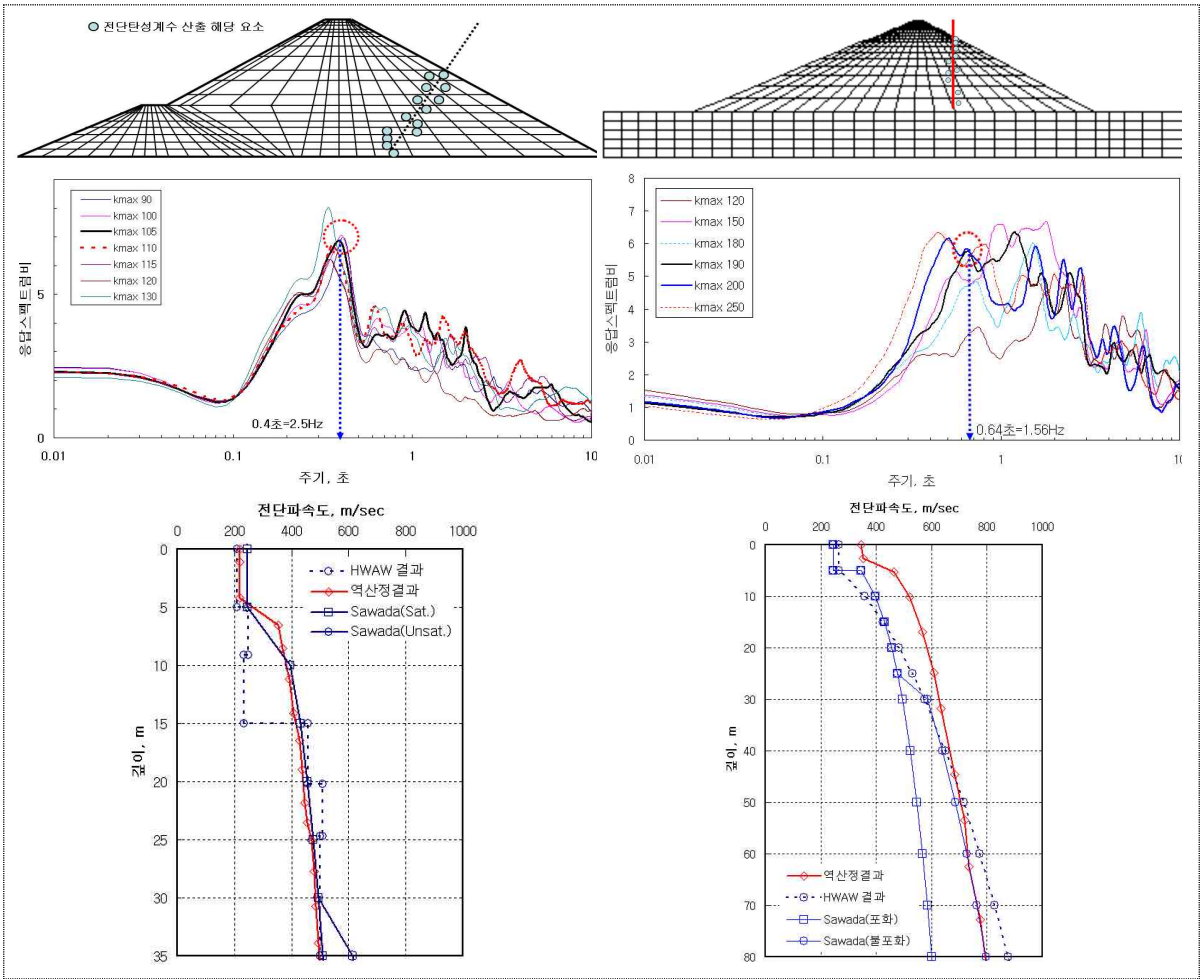
[지진계측자료 잡음특성 분석 및 활용성 확대를 위한 전처리 기법 제시]

○ 국내 2개 댐 지진계측기록을 이용, 응답스펙트럼비에 의한 고유진동수 산정기법 제시 및 국내 7개 댐의 지진계측기록을 활용한 제안기법 검증



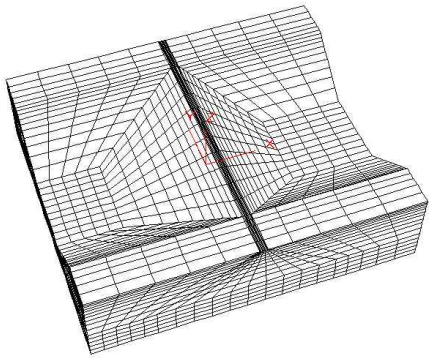
[응답스펙트럼비에 의한 횡성댐, 소양강댐의 고유진동수 산정]

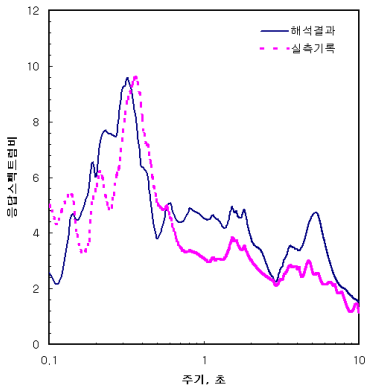
○ 지진계측기록 활용 2차원 동적수치해석에 의한 사력죤 동적물성 추정기법 제시 - 강성 변화에 따른 반복적 수치해석 결과와 계측 데이터에 의한 댐 고유주기 비교 분석을 통한 사력재료 전단탄성계수 산정

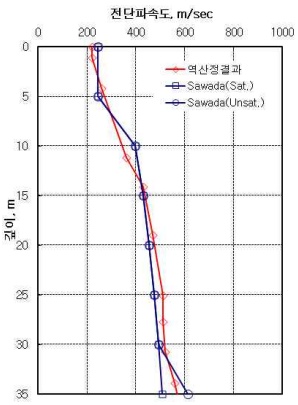


[국내 2개 댐의 반복적 수치해석과 고유주기 비교에 의한 사력재료 강성 추정 결과]

○3차원 수치모형을 이용한 지진응답해석에 대한 제안 기법의 확장성 평가





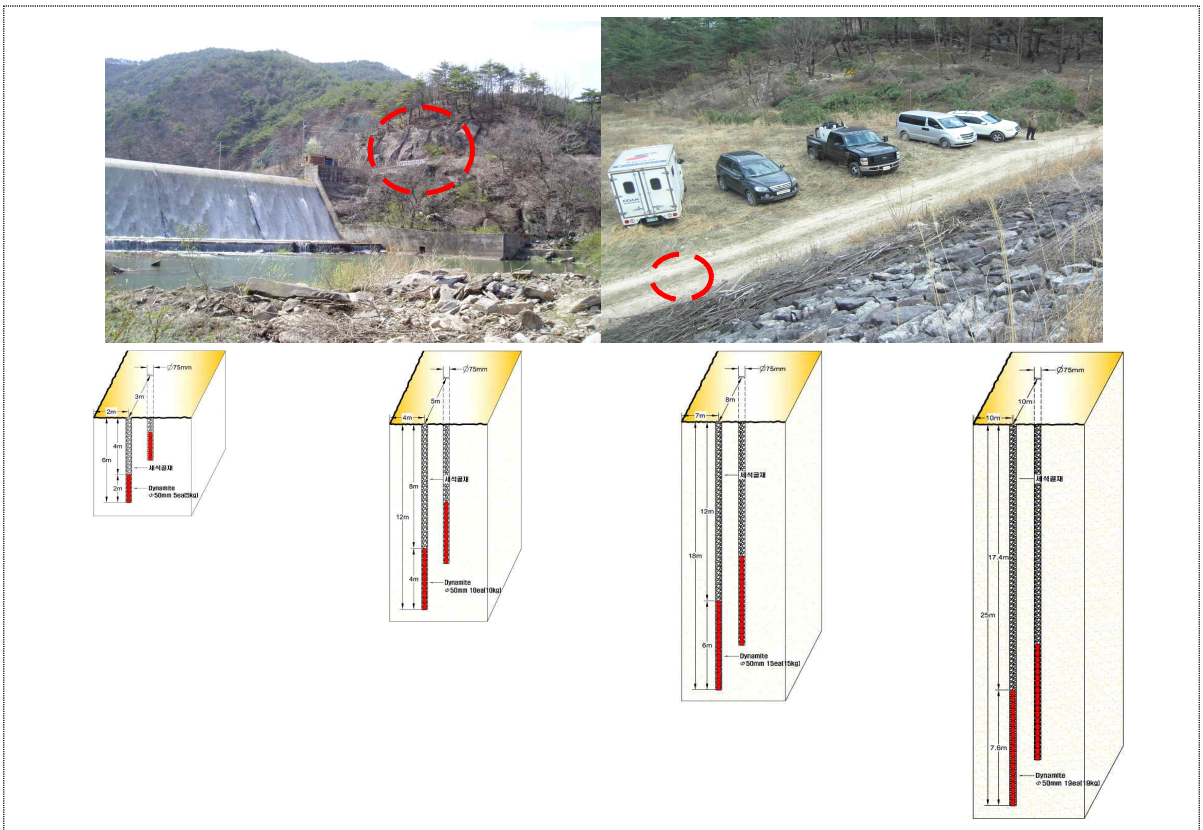


[횡성댐 3차원 해석에 의한 제안기법 적용성 검증]

□ 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증

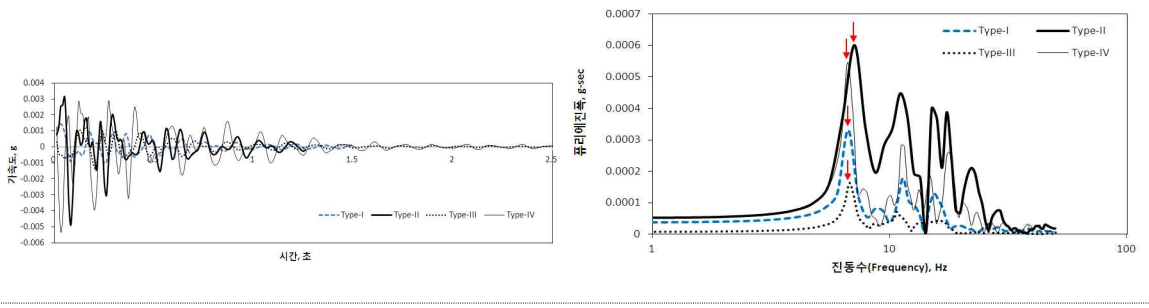
○ 지반구조물 실대규모 진동실험 사례조사 및 발파진동실험 준비를 위한 주요 설계인자 분석

○ 실대규모 발파진동 실험 수행을 위한 현장조사 및 발파진동실험 설계



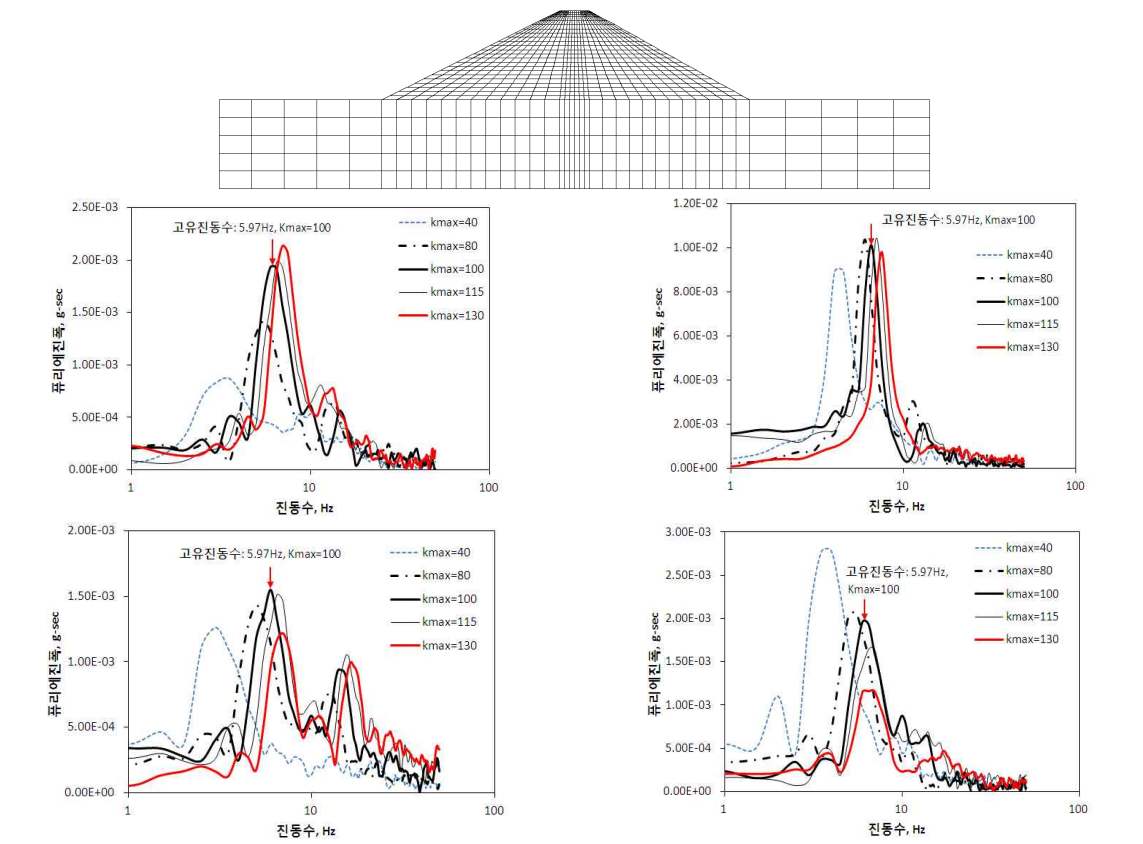
[성덕댐 발파진동시험 수행을 위한 계측기 설치 및 시추공 발파 계획]

○ 발파진동실험 계측 데이터 분석 - 댐 인접 발파에 의한 정상부 가속도 응답특성 분석 및 효과적인 댐 고유주기 산정기법 제시



[발파 특성에 따른 댐 정상부 자유진동감소곡선 주파수 특성]

○ 제안 기법을 활용한 댐 축조재료의 심도별 전단파속도 추정 - 반복적 수치해석 분석 기법의 적정성 검증



[발파원 특성에 따른 2차원 댐 동적응답특성 축조재 강성별 고유주기 평가]

○ 발파진동이용 고유주기 산정과 반복적 2차원 수치해석 기법을 병행한 결과 제체 심도별 전단타속도를 신뢰성있는 범위에서 추정 가능 - 제안 기법의 검증 완료

□ 개별요소법 기반 대입경 조립재료의 수치시험 모델링 기법 개발

○ 2차원 개별요소법 기반 대형 동적시험 수치모델링 기술 개발

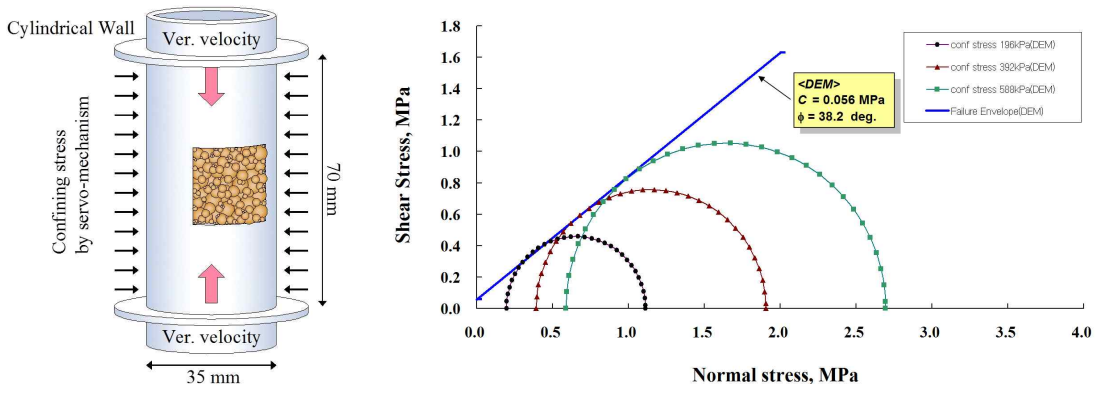
-2차원 개별요소해석 알고리즘 개발 및 실내시험 사례 해석
-요소생성, 미시물성치 산정, 입도분포 모델링(2D), 응력상태 구현

○ 정적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소 수치모델링 기술 개발

-3차원 개별요소생성 및 입도분포 생성 알고리즘 개발
-3차원 개별요소해석 알고리즘 개발 및 실내시험 사례 해석
-3차원 개별요소해석시의 스케일영향 분석

○ 동적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소 수치모델링 기술 개발

-동적 대형삼축시험에 대한 3차원 개별요소해석 알고리즘 개발 및 실내시험 사례 해석
-개별요소법 기반의 수치시험실 활용방안 도출



< 3차원 개별요소법 기반의 수치모델링 및 물성치 평가 >

Ⅲ 연구성과 활용방안

□ 대형 공진주시스템 개발 및 시험을 이용한 동적물성 산정

○ 대입경 조립재료를 이용하는 다양한 건설 실무에 대하여 신규 구축된 대형 공진주시험시스템을 활용, 재료의 동적변형특성을 평가함으로써 동적 하중에 대한 설계·해석의 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 또한 향후 장비의 확장을 통하여 최대입경 50mm 이상의 조립재료의 변형특성 평가에도 이용

○ 본 연구를 통하여 평가한 국내 다양한 조립재료의 대표적 동적변형특성, 특히 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 재료의 입도분포 등을 고려할 때 신뢰성있는 대표 곡선의 추정 및 제시가 가능하므로, 설계·해석을 위한 기본 정보로 활용 가능

□ 대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시 연구

○ 현실적으로 조립재료의 시험이 어려울 경우 본 연구에서 수행된 재료와 시험조건 등이 유사할 경우, 동적물성 예측이 가능한 대표 예측 모델과 그에 따른 모델 상수 등을 제시하여 보다 합리적이고 효율적인 대형지반구조물의 동적 거동 예측 가능

○ 지진, 교통하중 등의 동적 하중에 대한 조립지반을 활용하는 지반구조물(철도, 도로, 댐 등)의 거동을 보다 정확하게 평가할 수 있도록 합리적인 동적물성을 산정하여 안정적, 경제적 설계, 시공에 활용

○ 기존에 외국사례나 경험적 자료에 의존하여 신뢰수준이 저하되어 과다하거나 안정성을 확보하지 못하는 설계 수준에서 벗어나 국내 조립지반 재료에 대한 정확한 설계 물성치를 얻을

수 있는 기술력을 확보하여 합리적이고 일관된 시험적 연구를 통해 유용한 데이터베이스를 구축

□ 반사법 탄성파 탐사에 의한 조립재료 지반 동적물성 산정

○ 국내지반의 현장동적물성 산정 기법의 데이터베이스 구축
- 대입경 조립지반의 내진설계를 위한 기준자료 제시 : 국내지반의 부지증폭 특성에 대한 기초자료 제공

○ 고분해능 반사법 탐사에 의한 동적물성 범위 제시
- 시추조사나 현장시험이 어려운 조립재료 지반에서의 동적물성 범위에 대한 가이드라인 제시 : 대입경 조립지반의 내진설계를 위한 기초자료 제공

□ 실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 역산 기법 개발

○ 국내 주요 대형 댐에 설치된 지진계측시스템을 이용, 축적된 데이터를 본 연구성과를 바탕으로 분석함으로써 댐의 고유주기를 산정하고, 주기특성 변화 양상을 모니터링함으로써 유지관리 차원의 장기적 안정성 검토·확인 방법으로 활용

○ 댐에 대한 반복수치해석에 의한 역해석 기법을 일반 대형 지반구조물에 대하여 확장하여, 진동·지진 모니터링 데이터에 대한 deconvolution 기법을 적용함으로써 축조재료의 강성 등을 평가하고, 지반재료의 시공품질조사, 현장시험결과의 타당성 평가 등에 다양하게 활용

□ 실대규모 발파진동실험을 통한 지반구조물 진동특성 파악 및 제안기법 검증

○ 대형 지반구조물 인접지역의 발파와 같은 큰 진동하중이 발생하는 경우 본 연구성과를 참고하여 진동계측 데이터를 이용,

구조물의 거동 상태를 평가하고, 축조 지반재료의 동적변형특성 유추에 활용할 수 있음

○ 또한 다양한 현장물성평가에 있어, 간접적 방법에 의한 기준물성으로 참고 가능

□ 개별요소법 기반 대입경 조립재료의 수치시험 모델링 기법 개발

○ 향후 대입경 조립재료에 대한 물성 취득의 신뢰성을 높이는 원천기술로 활용

○ 일반 조립재료의 물성산정시 시험횟수와 경우의 수를 최소화할 수 있게 하는 경제적 실용화 기술로 발전

Ⅳ 기대효과

□ 기술적 기대효과

○ 국내 최초의 대입경 조립재료 동적물성 평가를 위한 실내 및 현장 시험기법을 체계화함으로써 향후 관련 연구를 위한 필수 연구환경 구축하였으며, 향후 유사 연구 수행 시 활용이 가능한 다량의 reference 데이터 제공

○ 대입경 조립재료의 동적물성산정에 필수적인 실내·현장 시험 시스템 및 관련 시험기법 개발을 통하여 국내 건설산업의 설계·해석에 적극 활용이 가능하며, 건설 실무에 필수적인 조립재료의 동적 변형특성 데이터를 제공할 수 있음.

○ 대표적 대입경 조립재료 유형별 동적 변형특성 산정을 바탕으로 구조물 설계·시공·평가 관련 기본 물성정보 가이드라인 제공

○ 최근까지 국내에서 조립지반재료의 동적물성 산정에 대한 시험적 연구는 거의 이루어지지 않았으나, 본 연구를 통해 시험장비, 센서, 시편, 시험 방법 등의 검증과 평가가 이루어져 향후 수행될 반복삼축압축시험을 통한 조립재료의 동적물성의 신뢰도 제고 및 시험 결과의 판단기준 등에 대한 기술적 근거를 확보함.

○ 반복삼축압축시험에서 입도조정방법, 최대입경, 하중패턴, 세립분함량, 함수비 등에 따른 조립재료의 동적물성에 미치는 영향을 시험적으로 비교, 분석하여 이들 영향인자들에 따른 물성의 적용성을 판단할 수 있는 학술적 근거를 확보하였다. 또한 추후 국내 조립지반재료에 대한 물성 예측 및 거동 모델 개발을 위한 기초적 연구 자료 제시

○ 국내 조립지반 재료에 대한 데이터베이스 확보와 조립지반

재료의 변형특성 규명으로 역학적 설계 입력 물성치로서 합리적 시공다짐관리기준 및 재료 품질기준을 정립할 수 있는 기초 연구자료 확보

- ○ 대입경 골재로 축조된 지반구조물, 고성토 제방, 대형 사력댐 등과 같이 사면이 존재하는 지반구조물의 전단파 속도 주상도를 신뢰성 있게 측정할 수 있는 UBF 기법 제안함.
- ○ 표면파 시험을 저가이지만 고품질로 수행할 수 있는 하드웨어 시스템 개발
- ○ Beamforming기법으로 2차원 전단파속도 주상도(컨투어)를 구할 수 있는 기술개발

□ 경제적 기대효과

- ○ 현실적으로 조립재료의 시험이 어려울 경우 본 연구에서 수행된 재료와 시험조건 등이 유사할 때, 직접적인 시험 없이 본 연구에서 제시된 동적물성 예측 모델과 그에 따른 재료 및 모델 상수 등을 적용하여 보다 합리적이고 효율적인 동적물성의 적용이 가능할 것으로 기대됨
- ○ 대형 필댐 및 저수지, 항만 방파제 제체 및 사석 치환, 케이슨식 안벽구조물의 기초, 철도 및 고속철 노반, 지하철 박스구조물 뒷채움 등의 효율적인 내진설계 및 안정성 평가를 위해 가장 필수적으로 요구되는 지반재료의 동적물성을 합리적으로 시험 평가, 적용하여 안정적, 경제적 설계 및 시공의 기초 연구자료로 활용 기대
- ○ 자동화된 현장시험기법 및 장비 개발로 표면파시험의 보편화에 기여함으로써 지반조사, 구조물 비파괴 건전도 평가 등의 영역이 활성화되는 기틀을 마련하고, 고품질의 결과를 저가로 획득할 수 있는 가격 경쟁력을 확보함.
- ○ 표면파 시험을 수행할 수 있는 저가의 하드웨어 시스템을 구

축함으로써 (약 3,000만원대의 하드웨어에서 500만원대의 하드웨어로) 관련업체의 하드웨어 투자비용 축소를 가능하게 함.

○ 미시추구간 및 현장탐사 수행이 어려운 구조물에의 내진특성 평가가 가능하여 신속한 내진설계에 반영가능

□ 사회적 기대효과

○ 현재 사양적 설계 기준에 머물러 있는 국내 각종 지반구조물의 설계기준이 성능중심의 설계기준으로 발전하기 위해서는 지반재료 및 구조물의 성능 기준 판단을 위한 합리적이고 체계적인 시험방법이 필수적이다. 또한 지반구조물의 성능 기준 및 현장 품질 관리 기준으로 탄성계수가 가장 합리적인 물성으로 평가되고 있다. 따라서 본 연구를 통해 확보된 조립지반재료에 대한 동적물성(탄성계수, 감쇠비 등)시험 기술은 향후 성능설계기준으로의 발전에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대됨

○ 향후 국내는 물론 해외의 대규모 성토구조 기반시설(철도, 도로, 댐 등)의 건설분야의 설계, 시공 및 감리 등에서 비교우위의 기술력을 확보할 수 있다.

첨부1 지식재산권 실적

□ 특허 출원 및 등록

순번	특허명	출원번호 (등록번호)	출원일 (등록일)
1	서포트 플레이트의 높이를 조절할 수 있는 공진주 시험기	제20-2011-0006568	2011. 07. 20
2	공시체 영상 판독식 공진주 시험기	제10-2011-0071864	2011. 07. 20
3	가진을 통한 탄성파 속도 계측에 의한 최대탄성계수 측정이 가능한 삼축압축시험용 시편 조립체 및 이를 이용한 삼축압축시험방법	제2011-47653호	2011. 06. 20
4	짧은 측선과 소수의 감진기를 이용하여 표면파속도를 측정하는 빔형성 기법(SBF기법)	제10-2012-0133849	2012. 11. 23

□ 실용신안 출원 및 등록

순번	실용신안명	출원번호 (등록번호)	출원일 (등록일)
1			
2			
…			

□ 소프트웨어(S/W) 등록

순번	소프트웨어명	등록번호	등록일
1	Beamforming(빔형성 기법)	제 C-2012-011283 호	2012. 06. 07
2			
…			

첨부2 논문 실적

□ 학술지 게재

순번	학술지명	논문명	게재일	비고
1	대한토목학회논문집	대형 공진주시험시스템의 개발 및 검증	2012/11/01	학진등재
2	대한토목학회논문집	짧은 측선과 소수의 감진기를 이용하여 표면파속도를 측정하는 빔형성 기법(SBF기법)	2012/12/31	학진등재
3	한국지반공학회논문집	조립재료의 입도특성에 따른 동적 변형특성 평가	최종심사 진행중	학진등재
4	대한토목학회논문집	대형 공진주시험을 이용한 조립질 지반재료의 동적 변형특성 평가	제출중	학진등재
5	대한토목학회논문집	인공발파진동실험을 이용한 흙댐 축조재료의 전단파속도 산정	게재 승인	학진등재
6	Geotechnical Testing Journal	Young's modulus of coarse granular materials depending on parallel grading, grain size and loading pattern via cyclic large triaxial tests	최종심사 진행중	SCI
7	Sains Malaysiana	Beamforming Technique for Investigation of Lateral Variability at Geotechnical Sites,	2012/12	SCIE
8	한국철도학회 논문집	하부노반의 다짐성능 평가를 위한 UBF 기법	제출중	학진등재
9	한국지반공학회논문집	3차원 입도분포를 고려한 락필재료의 대형삼축압축시험 수치모델링	2012/10 제13권 제10호	학진등재
10	한국지반환경공학회 논문집	미소지진 계측기록을 활용한 국내 사력댐 고유주기 산정방법	2011/06 제12권 제6호	학진등재
11	대한토목학회논문집	발파진동실험을 이용한 사력댐의 고유주기 산정	2012/09 제32권 제5C호	학진등재
12	대한토목학회논문집	대형삼축압축시험을 이용한 상사입도조정재료의 탄성계수 산정시험	2012/09 제32권 제5C호	학진등재
13	대한토목학회논문집	대형 사력댐에서의 전단파속도 평가를 위한 표면파 기법	2012/01	학진등재
14	한국지반환경공학회 논문집	3차원 개별요소해석 시의 초기 모델 및 재료 스케일 영향	2011/07	학진등재
15	한국철도학회 논문집	침하가능성 확인을 위한 자갈도상 철도노반의 탄성계수 단층영상화	2011/06 제14권 제3호	학진등재

순번	학술지명	논문명	게재일	비고
16	한국지반공학회논문집	조립재료 동적물성 산정을 위한 대형삼축압축시험장비 구축 및 검증	2010/12 제26권, 제12호	학진등재
17	한국철도학회논문집	대형삼축압축시험장비 구축과 도상자갈의 정적압축시험 평가	2010/01 제13권, 제1호	학진등재

□ 학술회의 발표

순번	학술지명	논문명	발표일	비고
1	한국지반공학회	국내 지반의 현장탄성파 탐사에 의한 탄성파 속도에 관한 연구	2012/10	국내
2	Proceedings of 2nd International Conference on Transportaion Geotechnics, IS-Hokkaido	A Study on cyclic triaxial test method for coarse granular materials	2012/09	국외 (Japan)
3	ITC2012	Stiffness profiling of geotechnical sites with a soft entrapped layer by beamforming technique	2012/10	국외 (Malaysian a)
4	32nd Annual USSD Conference	A Large scale resonant column testing system for evaluating dynamic properties of gravelly fill materials of dams	2012/04	국외 (USA)
5	32nd Annual USSD Conference	Evaluation for fundamental periods of korean rockfill dams with micro-earthquake records	2012/04	국외 (USA)
6	한국철도학회 2012년 봄학술대회	Utiliaztion of love Love Waves and Rayleigh waves for Beamforming technique to evaluate trackbed stiffness	2012/04	국내
7	2012 한국지반공학회 봄학술발표회	발파진동시험에 의한 사력댐 고유주기 산정	2012/03	국내
8	2012 한국지반공학회 봄학술발표회	대형 지반구조물 대입경 조립재료의 동적물성 산정 기법 연구	2012/03	국내
9	TRB	Refined Beamformer for directional surface-wave measurements at geotechnical structures	2012/01	국외 (USA)
10	2012년도 한국지반공학회 봄학술발표회-1	3차원 입도분포를 고려한 락필 재료의 대형 삼축압축시험 수치모델링	2012/03	국내
11	2012년도 한국지반공학회 봄학술발표회-2	대형 지반구조물 대입경 조립재료의 동적물성 산정 기법 연구	2012/03	국내
12	31nd Annual USSD Conference	Earthquake response of rockfill dam with asymmetric plan geometry of upstream and downstream slope with respect to dam axis	2011/04	국외 (USA)
13	2011년도 한국지반공학회 봄학술발표회	조립재료에 대한 3차원 개별요소 수치모델링	2011/03	국내

순번	학술지명	논문명	발표일	비고
14	2011년도 한국지반공학회 봄학술발표회	시추공 발파에 의한 기존댐 응답가속도 특성분석	2011/03	국내
15	2011년도 한국지반공학회 봄학술발표회	국내 사력댐 고유주기 산정 사례 연구	2011/03	국내
16	TRB	Real-time spatial profilling of subgrade stiffness for quality assurance of field compaction	2011/01	국외 (USA)
17	2010년도 대한토목학회 가을학술발표회	국내 2차원 동적변형 해석에 의한 필댐 내진성능평가 고찰	2010/10	국내
18	2010년도 대한토목학회 가을학술발표회	Real-Time Stiffness Evaluation of Railway Trackbed under Ballast	2010/10	국내
19	2010년도한국철도학회 가을 학술발표회	다중 반사 및 굴절의 개연성이 있는 고성토 제방에서의 전단강성 평가	2010/10	국내
20	2010한국도로학회 가을학술대회	다목적 대형삼축압축시험장비의 구축과 적용	2010/10	국내
21	IAEG2010	Compression settlement in embankment constructed with large grain fill materials	2010/09	국외 (New Zealand))
22	한국철도학회 2010년 봄학술대회	대형삼축압축시험을 이용한 동적물성 산정 : 장비구축 및 검증	2010/05	국내
23	2010년 한국구조물진단유지관리 공학회 봄학술발표회	시료 입자크기가 공진주시험결과에 미치는 영향 검토	2010.05	국내
24	2010년 한국구조물진단유지관리 공학회 봄학술발표회	기존댐 발파진동 현장실험을 위한 기초연구	2010/05	국내
25	2010년도 한국지반공학회 봄학술발표회	대입경 락필재료에 대한 수치시험실 활용해석	2010/03	국내
26	2010년도 한국지반공학회 봄학술발표회	댐 계측지진 활용 사력존 물성 역산법 검증 사례 연구	2010/03	국내

첨부3 **연구비 세부 현황**

□ 연구기관별/연차별 연구비

(단위 : 천원)

구분		연구과제명	연구기관	연구책임자	'09		'10		'11		계	
					정부	기업	정부	기업	정부	기업	정부	기업
총괄	주관	대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 연구	한국수자원공사	김남룡	5,000	75,000	210,000	560,000	58,000	214,000	214,000	609,000
	공동	대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시	한국철도기술연구원	이성진	30,000		95,000		125,000		250,000	
	공동	대입경 조립재료 동적물성 산정을 위한 표면파 기법 개발	중앙대학교	조성호	25,000		70,000		82,000		177,000	
	공동	반사법 탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정	(주)희송지오텍	김기석	10,000	50,000	15,000	115,000	15,000	115,000	40,000	250,000
	위탁	개별요소법을 이용한 대형실내시험 해석 및 분석 기술 개발	인덕대학교	전제성	30,000		30,000		30,000		90,000	
	계				100,000	125,000	420,000	420,000	310,000	314,000	830,000	859,000

대형 지반구조물

대입경 조립재료 동적물성 산정기법 연구

2012. 12.

주관연구기관 : K water 한국수자원공사

공동연구기관 : KRRI 한국철도기술연구원

CAU 중앙대학교 ㈜희송지오텍

위탁연구기관 : 인덕대학

참여기업 : ㈜네스지오, 삼우공간건축사사무소

대형 공진주시험시스템 개발 및 동적물성 평가

□ 연구배경 및 필요성

- 대형 지반구조물에 대한 대입경 조립재료의 활용도 증가에 따라 지반구조물의 동적 해석을 위한 주요 변형특성의 정량적 평가가 필수적으로 요구됨
- 조립재료에 대한 적용이 가능한 대형 공진주시험기를 개발하여 최대전단탄성계수, 비선형 변형특성, 감쇠비 등 주요 동적 변형특성을 직접 측정할 수 있는 기반 마련, 재료물성 평가에 활용하고자 함

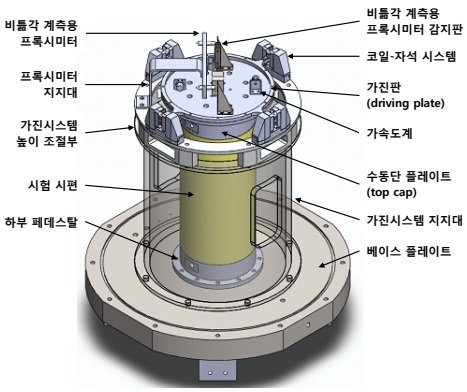
□ 연구 목표 및 내용

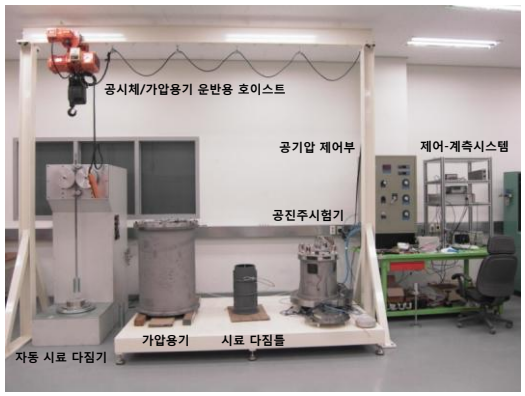
- 대형 공진주시험시스템의 개발 및 사용성 검증
  - 국내외 대형 공진주시험기의 구축 및 활용 현황을 바탕으로 설계 개념 도출
  - 신규 시험기 제작, 교정 및 지반재료 동적변형특성 평가 적용성 검증
- 대입경 조립재료의 동적변형특성 평가
  - 조립재료 입도분포특성에 따른 최대전단탄성계수, 비선형 특성, 감쇠비 평가
  - 구조물 유형에 따른 조립재료의 동적변형특성 평가

□ 연구 성과

▷ 연구추진 내용 및 주요 성과

- 국내 최대 규모의 대형 공진주시험시스템 개발 구축

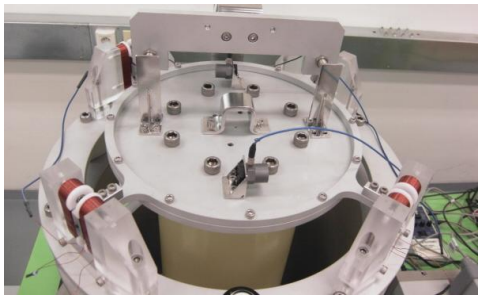


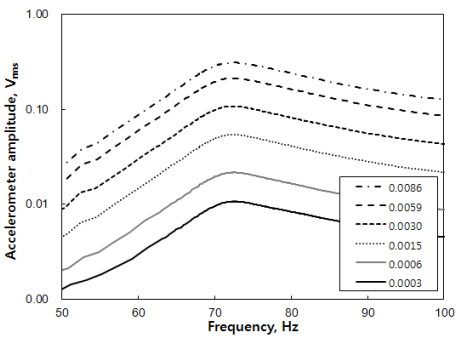


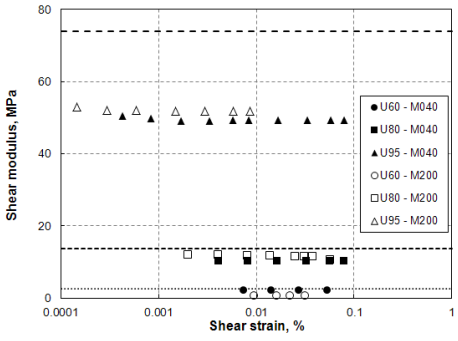
구분	제원
시편 크기	200 mm(D) × 400 mm(H)
재료 최대 입경	33.3 mm 이하
가진 시스템	대형 코일-자석 제어 (Stokoe 식)
전단변형율	10^{-5} % – 10^{-1} %
용기 내압 능력	2,000 kPa
제어 시스템	Agilent 33220A 임의파형발생기
계측 시스템	NI USB-6251 다기능 DAQ
전류증폭기	Eliezer 161AR current amplifier

대형 공진주시험시스템 구축 현황

- 신규 시험시스템의 동적응답특성 교정 및 검증시편을 이용한 실험을 수행하여 적용성 검증 완료

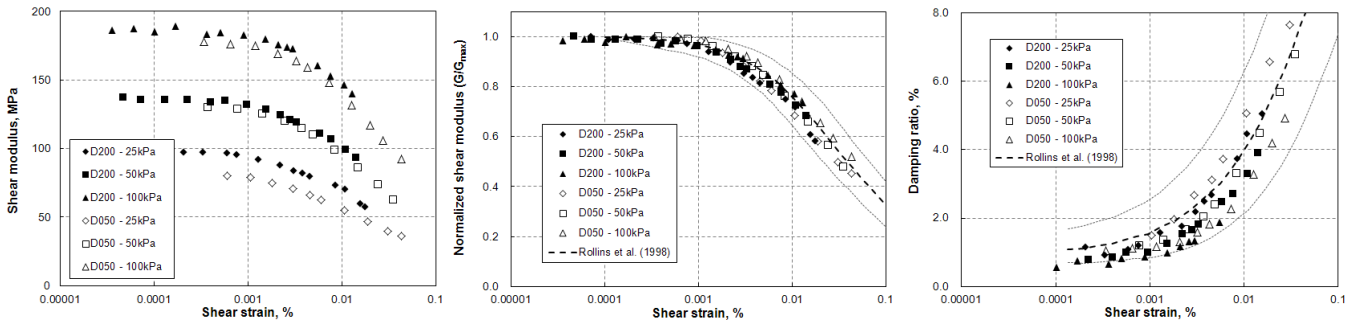






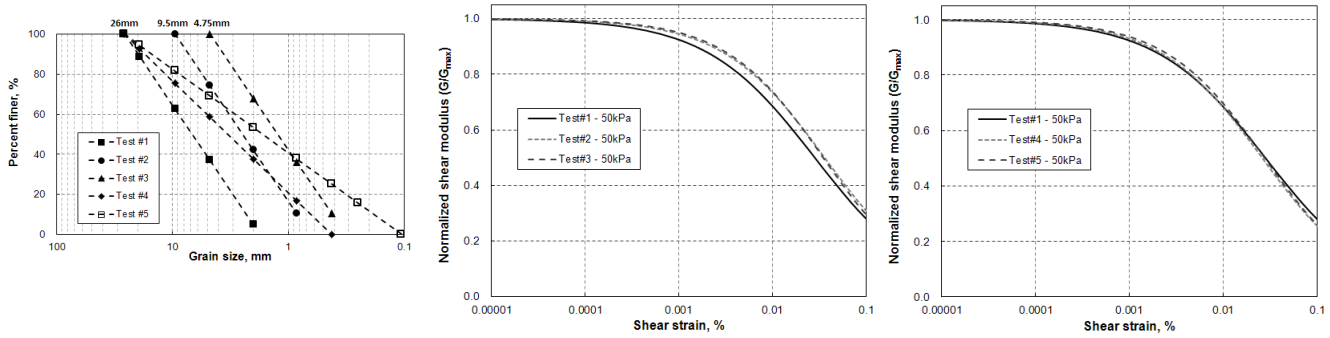
가진시스템 동적응답특성 교정 및 검증시편을 이용한 성능 평가

- 대형 공진주시험시스템 적용성 검증 : 자갈질 지반재료에 대한 기존 시험기와의 비교 시험 수행
  - 대형 공시체 이용에 따른 낮은 구속압 상태에서의 크기 효과 (scale effect) 평가



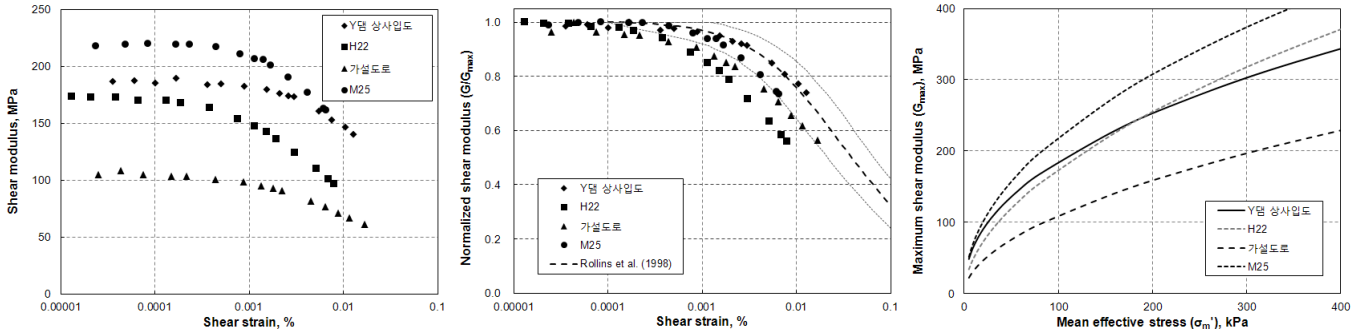
동일 지반재료에 대한 대형-소형 공진주시험 결과 비교: 결과의 일관성 검증

- 조립재료의 입도분포특성이 동적변형특성에 미치는 영향 평가
  - 재료의 최대입경, 균등계수에 따라 미소변형 최대전단탄성계수, 비선형 특성의 차이 확인



조립재료의 최대입경 및 균등계수에 따른 재료의 비선형 변형특성 비교

- 다양한 건설현장의 조립재료에 대한 공진주시험 수행 및 동적변형특성 범위 산정
  - 댐, 도로, 철도 등 구조물 유형별 조립재료 시험 수행, 동적변형특성 평가



▷ 정량적 성과

- 국내학술지 2건(게재 1, 심사중 1), 국외학술발표 1건, 국내학술발표 1건, 기술기사 2건, 홍보 2건
- 특허출원 2건, 대형 공진주시험기 제작도면 개발 1건

□ 기대효과 및 활용 계획

- 기대효과 신뢰성있는 데이터 제공을 통한 대형 지반구조물 내진설계 및 동적해석 시 신뢰도 향상
  대형 공진주시험기를 활용한 대입경 조립재료 동적변형특성 관련 D/B 구축

- 활용방안 대형 지반구조물 축조재료의 동적변형특성 평가 관련 연구 활용
  대입경 조립재료의 동적해석에 필요한 재료 변형특성 관련 데이터 활용
  설계, 분석, 성능평가 등 건설공학 실무 활용

대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

□ 연구배경 및 필요성

- 지반구조물이 더욱 대형화되어 가는 추세에서 대입경 조립재료는 대형 필댐, 저수지 제방, 항만, 철도 노반, 암성토 등 다양한 구조물에 활용도는 증가되고 있다. 그러나 이에 대한 내진해석 및 각종 동적하중에 대한 거동 평가를 위한 동적물성산정 관련 연구는 대형요소시험장비의 구축과 운영의 어려움 등으로 국내에서는 거의 이루어지지 않고 있다. 이에 조립지반재료의 동적물성산정을 위한 시험조건 별 영향 검토를 통한 시험방법의 평가와 재료별 물성 범위의 제시가 요구되고 있음

□ 연구 목표 및 내용

- 대형삼축압축시험장비 검증
- 상사입도조정법/자갈입도보정법 등 입도조정방법에 대한 평가
- 하중패턴, 최대입경, 세립분 함유율, 함수비 등 시편 및 시험 조건 영향 평가
- 조립재료 최대탄성계수시험법/중간주응력이 강성에 미치는 시험법 개발 및 평가
- 댐, 철도, 도로 등 주요 지반구조물 조립재료의 동적물성(탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수) 산정 및 가이드라인 제시
- 기본 물성과 재료특성을 반영한 국내 조립지반재료의 동적물성 예측 모델 및 모델 재료 상수 제시

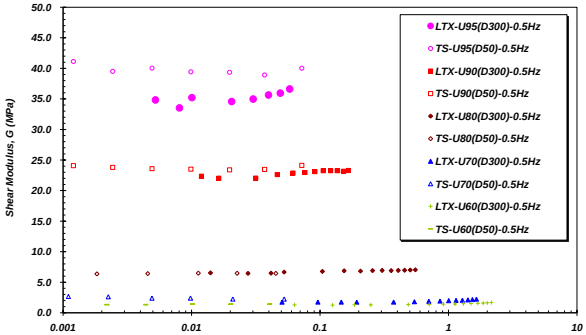
□ 연구 성과

▷ 연구추진 내용 및 주요 성과

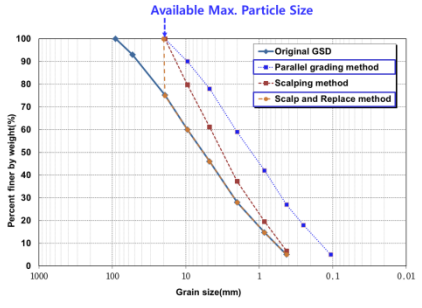
- 우레탄 시편과 검증된 다른 시험법(공진주시험, 비틂전단시험, 충격반향시험 등)을 활용한 장비 및 시험 결과 검증

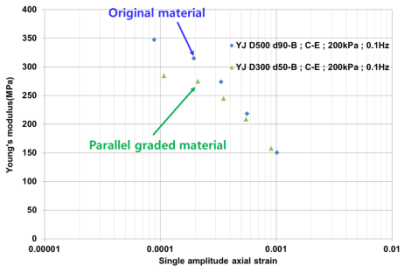


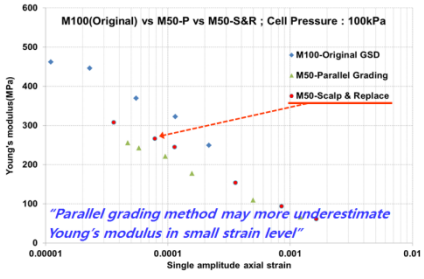




- 실제 현장에서 사용되는 대입경 조립재료는 실내 시험장비에서 시험이 가능한 입경을 넘어서는 경우가 많이 있다. 이러한 경우 시험이 가능한 입도로 조정하여 시험하는 것이 불가피하고, 이때 가장 널리 활용되는 방법이 상사입도조정방법인데 이와 함께 자갈입도조정법으로 조성된 시편과 원재료 입도의 시편에 대한 시험을 수행하여 미소변형 수준에서의 탄성계수 시험 결과에 미치는 입도조정방법의 영향을 평가하였음

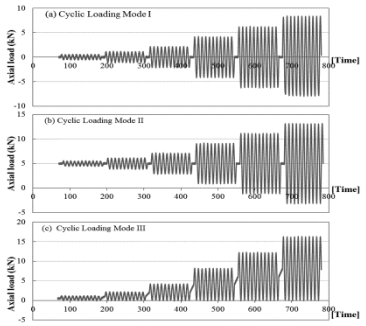


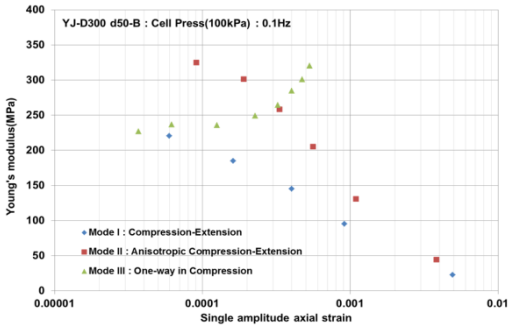


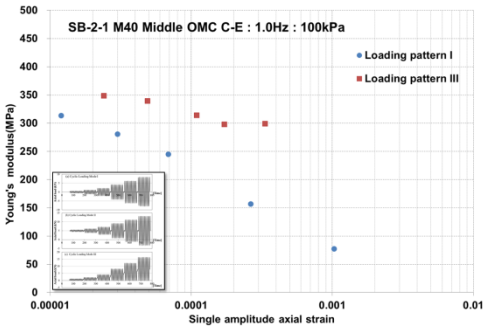


대형반복삼축압축시험을 이용한 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 및 물성 범위 제시

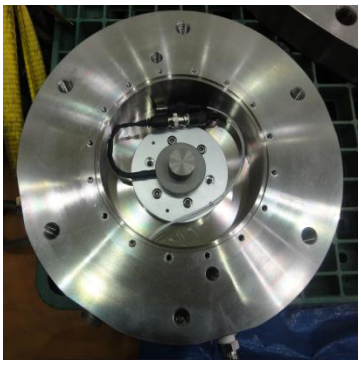
- 시험법에 따라 일관된 시험을 수행하여 재료입도를 포함한 시편에 대한 조건과 하중모드, 주파수 등의 시험 조건의 인자들이 저변형률 수준의 동적물성에 미치는 영향을 평가하여 조립재료의 합리적 대형 삼축압축시험 결과의 적용과 향후 예측모델 고려 인자 선정에 활용할 수 있는 기초 자료 제공 정리

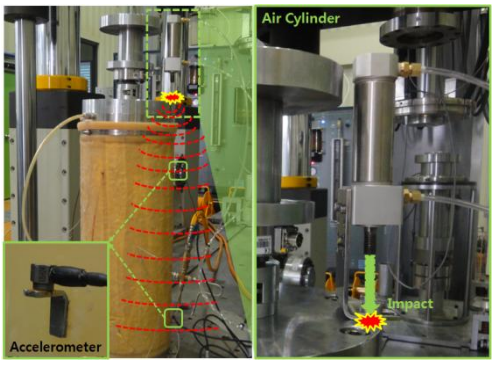






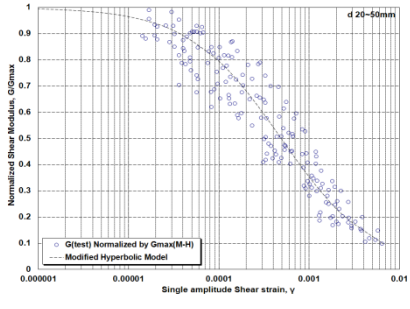
- 주파수 및 진폭 제어 가능한 Piezoelectric actuator와 타격식 에어실린더를 활용한 최대탄성계수 시험장치와 계측 신호 분석 프로그램 구축 및 중간주응력 제어 시험장비 구축/시험

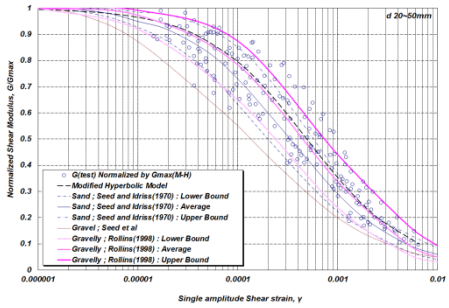


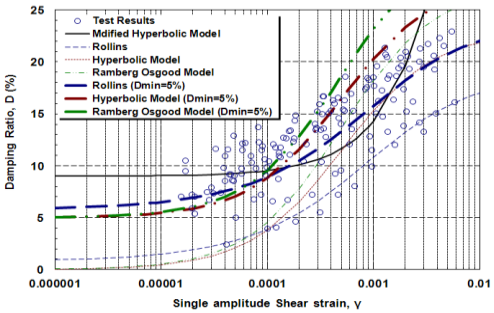




- 댐, 철도, 도로 등 국내 대형지반구조물의 주요한 성토재료인 조립지반재료들에 대해 동적물성산정시험을 수행하여 탄성계수, 감쇠비, 회복탄성계수 등의 시험 결과를 확보하고 본 시험 조건과 유사한 재료에 대한 적용이 가능하도록 시험 결과를 정리 및 물성 모델의 대표적 재료 상수를 제시







▷ 정량적 성과

- **국외 SCI 학술지 1건(최종심사중), 국내학술지게재 3건, 국외학술발표 2건, 국내학술발표 2건**
- **특허출원 1건**

□ 기대효과 및 활용 계획

- **기대효과** 대형 필댐 및 저수지, 항만 방파제 제체 및 사석 치환, 케이슨식 안벽구조물의 기초, 철도 및 고속철도 노반, 지하철 박스구조물 뒷채움 등의 효율적인 내진설계 및 안정성 평가를 위해 가장 필수적으로 요구되는 지반재료의 동적물성을 합리적으로 산정, 적용할 수 있는 대형 삼축압축시험 평가 기술 확보
- **활용방안** 조립지반을 활용하는 지반구조물(철도, 도로, 댐 등)의 지진, 교통하중 등 동적 하중에 대한 합리적 물성 산정, 적용으로 안정적, 경제적 설계 및 시공에 활용

대입경 조립재료 동적물성 산정 표면파기법 개발

☐ 연구배경 및 필요성

- 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물의 내진설계 및 내진안정성 평가, 건설 및 운영 중 진동요인에 따른 동적하중에 대한 안정성 평가 및 설계, 내부 공동, 잠재적 결함 등과 같은 지반구조물의 건전성 평가 등을 위해서는 신뢰성 있는 동적물성 산정을 위한 현장시험 기법의 개발이 절대적으로 요구됨.
- 기존 표면파탐사의 기본 가정조건을 극복할 수 있는, 부정형 지반구조물에 적합한 맞춤형 현장 표면파 탐사기술의 개발이 요구됨.

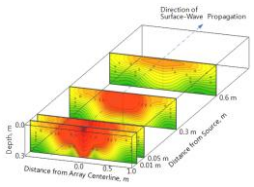
☐ 연구 목표 및 내용

- 대입경 조립재료로 축조된 지반구조물의 동적 물성을 산정하는 최적의 현장시험 기법 개발
- 개발된 현장시험기법을 위한 하드웨어 시스템과 소프트웨어 개발
- 제안된 기법의 현장적용 및 실용화를 위한 매뉴얼 작성

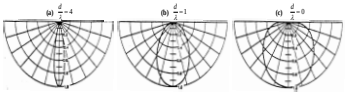
☐ 연구 성과

▷ 연구추진 내용 및 주요 성과

- 대입경 조립재료 지반에 대한 현장시험 기법 개발을 위한 기초연구
  - 기존의 조립재료 지반구조물에서 현장시험수행
  - 기존의 조립재료 지반구조물에서 다양한 발진원을 사용하여 현장시험 수행
  - 탄성파 탐사에 사용되는 하드웨어의 특성 비교 평가



Propagation of Surface Waves



Effect of Seismic Sources

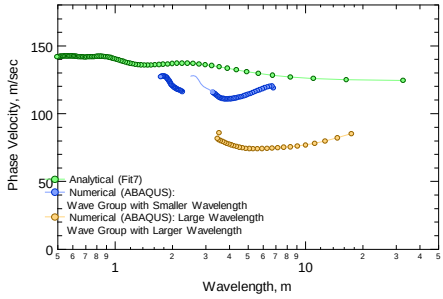


Different Source Types

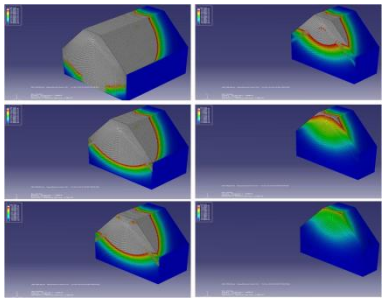


Surface-Wave Tests at Rock-fill Dam

- 댐, 성토노반 등 비반무한체에서의 표면파 전파특성 연구
  - 유한요소해석에 의한 사면 구조물에서의 표면파 전파특성 평가

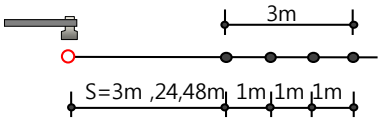


[경계조건에 따른 표면파 전파속도 비교]



[유한요소모델링에 의한 표면파모델링]

- 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 시험기법의 제안
  - 조립재료 지반에 적합한 최적 표면파기법, UBF 기법 제안

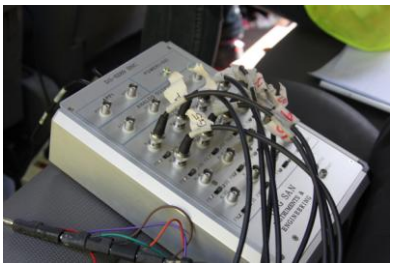




[UBF 기법 시험구성] [대청댐에서의 시험전경]

- 조립재료 지반에 적합한 최적 탐사기법을 위한 측정 하드웨어 시스템의 제안
  - UBF기법 위한 전용소프트웨어 개발: Beamforming 1.0
  - UBF기법 위한 전용하드웨어 제안: DS-USB-6289 시스템, MEMS 가속도계 유니트







[Beamforming 1.0] [DS-USB-6289] [MEMS 가속도계]

▷ 정량적 성과

- 국외학술지(SCI-E)게재 1건, 국내학술지게재 1건 국외학술발표 2건, 국내학술발표 2건
- 특허출원 1건

□ 기대효과 및 활용 계획

- 기대효과
  - 다양한 적용대상에 대한 UBF 기법의 맞춤형 실용화, 상용화는 대상구조물의 안정성, 내구성 제고로 이어져서 궁극적으로는 대상구조물의 경제성 증대로 이익창출.
  - 자동화된 UBF 기법의 도입으로 인하여 인프라구조에 대한 시공품질관리, 유지보수 등의 영역이 보다 신뢰성이 높아지고 정확도가 향상되는 결과를 도출할 것임.

- 활용방안
  - 대입경 조립재로 시공된 지반구조물(특히 대형 사력댐)의 내진해석을 위한 동적물성 평가: 전국에 분포된 대형 사력댐의 1차원 전단파속도 주상도 평가(2013년도 계획 중)
  - 다양한 적용영역을 위한 맞춤형 UBF 기법의 시험매뉴얼 개발
  - 대입경 조립재 지반구조물에 대한 최적의 표면파 탐사기법으로 활용
  - 도로 노상 및 철도 노반 다짐상태의 자동화 평가
  - 터널, 교량상판, 교대 등 콘크리트 구조물 비파괴 건전도 평가
  - 아스팔트 및 콘크리트 도로포장의 두께, 강도 및 박리 등의 비파괴 평가

반사법 탄성파 탐사에 의한 조립재료 지반 동적물성 산정

□ 연구배경 및 필요성

- 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물의 내진설계 및 내진 안정성 평가 등을 위해 다양한 현장탐사법이 있으며, 비파괴 검사의 일환으로 반사법 탄성파 탐사에 의한 조립재료 지반 동적물성 산정 기술 개발

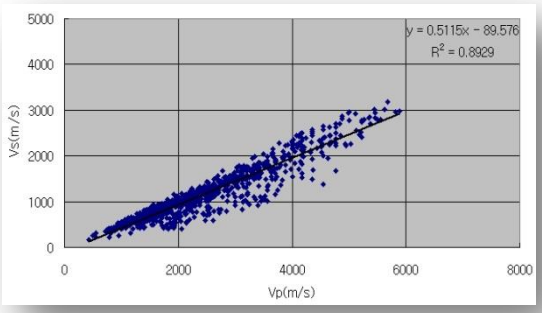
□ 연구 목표 및 내용

- 반사법 탄성파 탐사에 의한 대입경 조립지반 동적물성 산정기법 및 물성범위 제시
  - 4개소의 대입경 조립지반에 대한 반사법 탄성파 탐사 및 다양한 현장탐사 동적물성 범위 분석
- 국내 지반의 현장동적물성 산정 기법의 데이터베이스 구축
  - 지층별, 재료별 현장 동적물성 데이터베이스 구축, 탄성파 속도 범위 산출

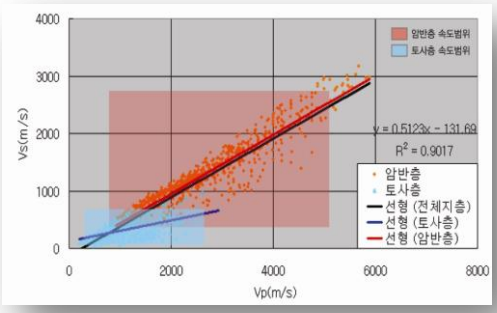
□ 연구 성과

▷ 연구추진 내용 및 주요 성과

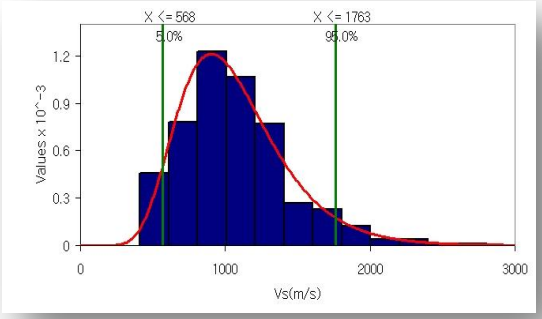
- 현장동적물성 산정 기법의 데이터베이스 구축
  - 국내 97개 지역 암종별, 지층별, 기법별 탄성파 속도 데이터베이스 구축
  - 데이터베이스의 신뢰성 검증을 위해 통계분석기법을 활용



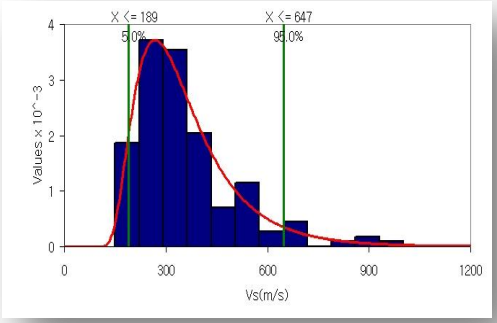
지층별의 탄성파 속도관계 및 범위 산출



암반층/토사층의 탄성파 속도범위 산출

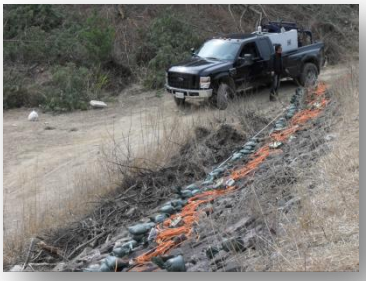


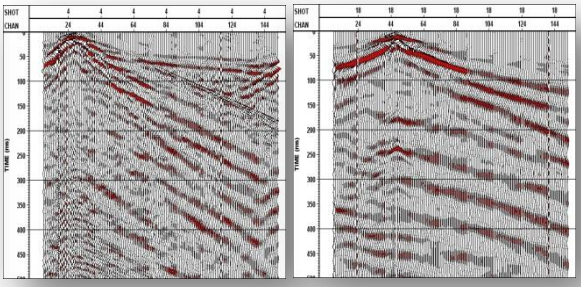
데이터베이스의 통계분석

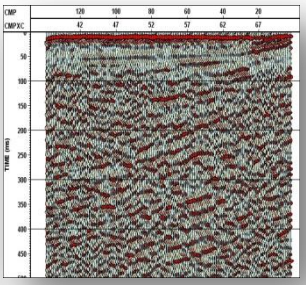


대입경 조립재료 동적물성 범위 산출

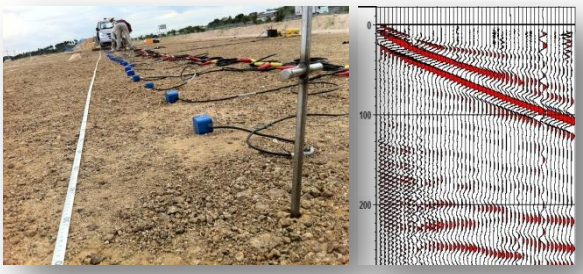
- 댐, 성토노반 등의 고분해능 반사법 탄성파 탐사 및 다양한 현장탐사 수행
  - 진동형/임펄스형 송신원의 신호특성 별 비교분석
  - 대입경 조립지반에서의 고분해능 P-반사법탐사 및 S-반사법탐사 수행 및 분석
  - 탐사자료의 신뢰성 검증을 위한 시추조사 및 다운홀, S-굴절법탐사, MASW 수행하여 비교분석

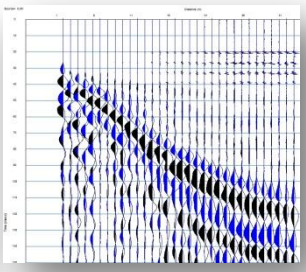

바이브로 사이즈


송신원 비교분석

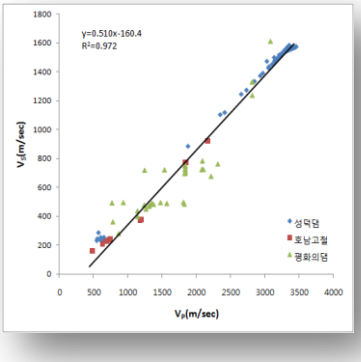

자료분석


시추조사

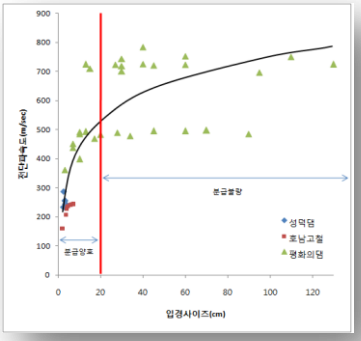

S 반사법 탄성파 탐사


다운홀 테스트

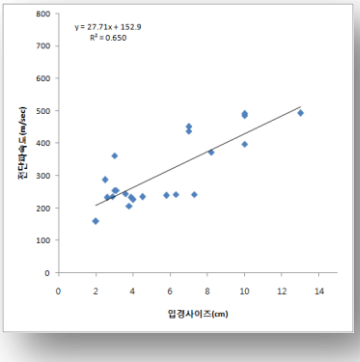
- 대입경 조립재료 지반에 대한 현장 동적물성 범위 및 기법 산출
  - 입경사이즈별 탄성파 속도 범위 및 현장 동적물성 범위 제안
  - 조립재료 지반 구조물별 동적물성의 데이터베이스 작성



연구지역 탄성파 속도 관계



분급에 따른 탄성파 속도 분석



대입경 조립재료의 전단파 속도 범위

▷ 정량적 성과 • 국내학술발표 1건

□ 기대효과 및 활용 계획

- 기대효과 대입경 조립지반에 대하여 시추조사나 현장시험이 어려울 경우 reference 데이터 제공
  제시된 동적물성의 범위를 이용하여 합리적인 물성범위 적용 가능
- 활용방안 국내 지반의 데이터베이스를 업데이트하여 지반증폭특성의 규명자료의 기초자료 제공

실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 추정

□ 연구배경 및 필요성

- 최근 한반도 지진관측 빈도 증가에 따라 중요 대형 사회기반시설에 지진계 설치가 확대되고 있으며, 이에 따른 계측 데이터의 확보는 구조물 동적 거동성능 평가에 중요 정보로 활용 가능
- 국내 주요 댐으로부터 계측된 미소지진기록을 활용, 댐 축조에 이용된 대입경 조립재료의 동적변형계수를 간접적으로 추정하여 현장에서의 직접 조사가 어려운 경우 대안적 지반정수 제공 필요

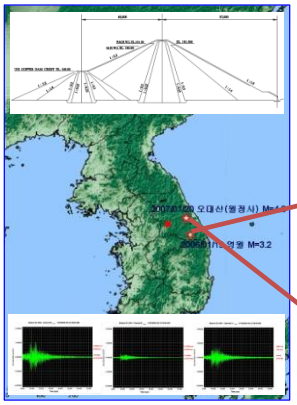
□ 연구 목표 및 내용

- 미소지진 계측기록을 이용한 댐 고유주기 산정기법 제시
  - 국내 댐에서 계측된 미소지진계측기록 활용을 위한 신호처리 및 분석절차 제안
  - 미소지진계측기록 이용 댐 고유주기 평가절차 제시 및 실효성 검증
- 반복적 수치해석과 고유주기 비교분석에 기반한 댐 동적물성 추정기법 제시
  - 계측기록 기반 고유주기와 반복적 수치해석 결과 비교를 통한 동적물성 추정절차 제안 및 검증
  - 2차원/3차원 수치해석기법을 이용한 제안 기법의 적용성 검증

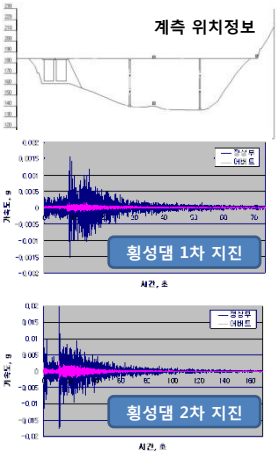
□ 연구 성과

▷ 연구추진 내용 및 주요 성과

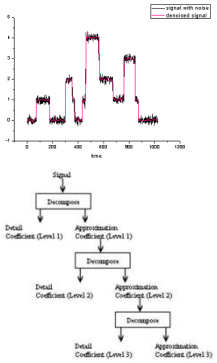
- 댐 지진계측자료 수집 및 분석 – 고유주기 평가를 위한 신호처리 절차 제시



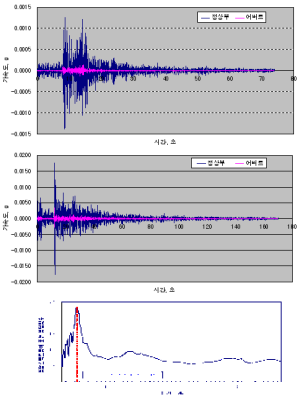
지진 계측자료 수집



신호 고유특성 평가



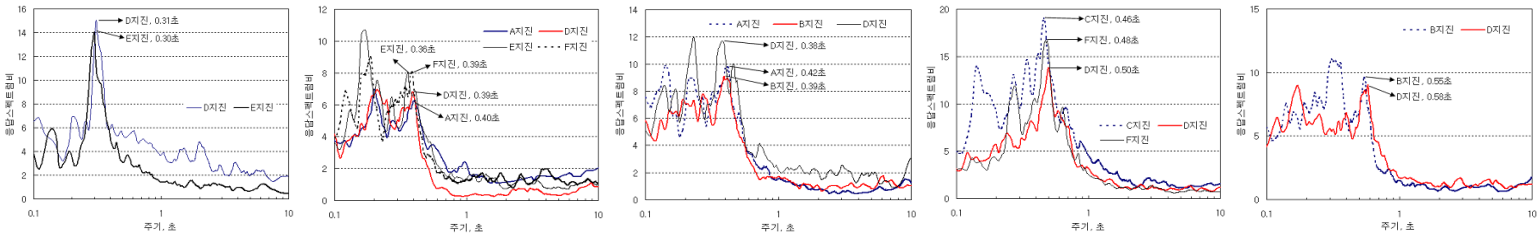
전처리과정
(상시진동 잡음제거)



분석용 지진기록 확정
(댐 고유진동수 산정)

댐 지진계측자료 처리 및 고유주기 산정을 위한 해석 절차

- 국내 7개 사력댐의 20개 미소지진 계측기록 분석에 의한 고유주기 산정기법 제안



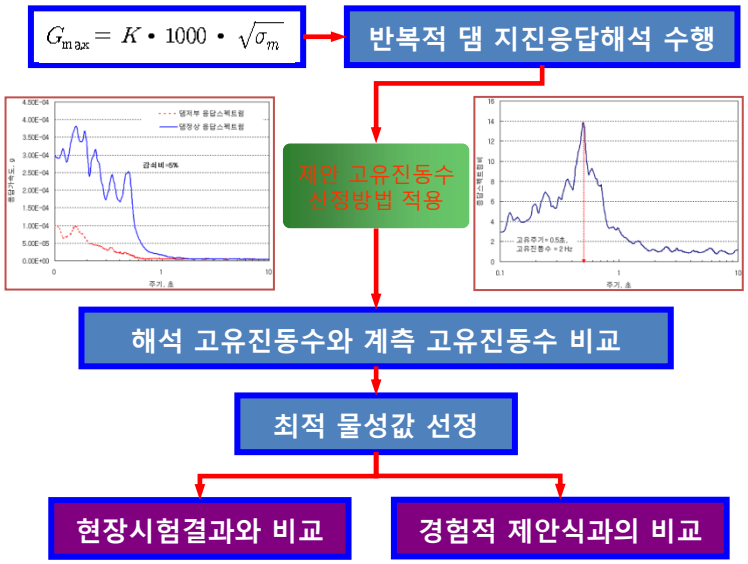
횡성댐 운문댐 주암댐 임하댐 소양강댐

국내 미소지진 계측기록 특성을 고려한 기반암-정상부 응답스펙트럼비 기반 고유주기 산정 결과

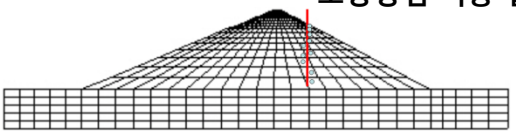
실지진계측 자료 활용 수치해석에 의한 댐 동적물성 추정

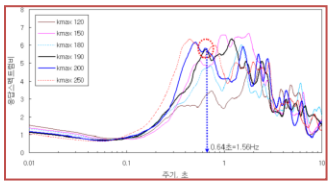
- 지진계측기록 활용 2차원 동적 수치해석에 의한 사력댐 동적물성 추정기법 제시
  - 댐 정상부/암반부 지진계측데이터 이용 고유주기 산정
  - 동적수치해석 시 계측 고유주기와 동일한 결과를 나타내는 사력재료 변형계수 확정

댐 사력댐 동적물성 추정절차 (반복수치해석)

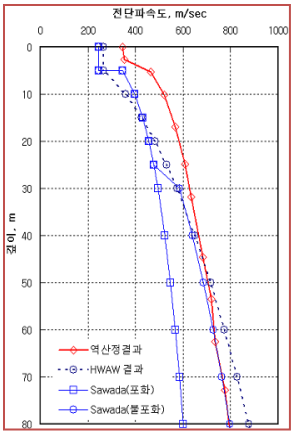


소양강댐 적용 결과





고유주기 비교에 의한 최적의 변형계수 산출

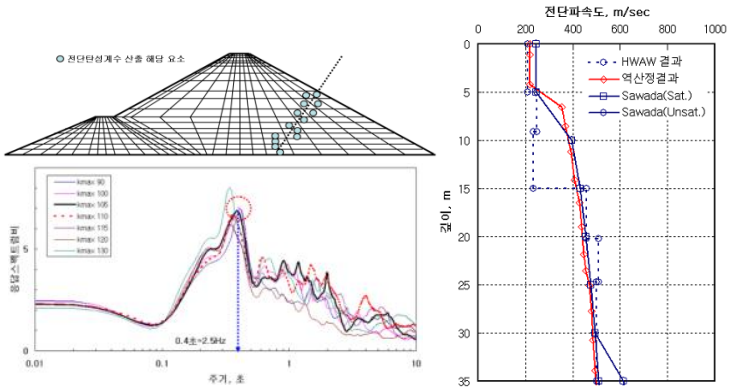


깊이별 전단파속도 (경험식, 측정치와 비교)

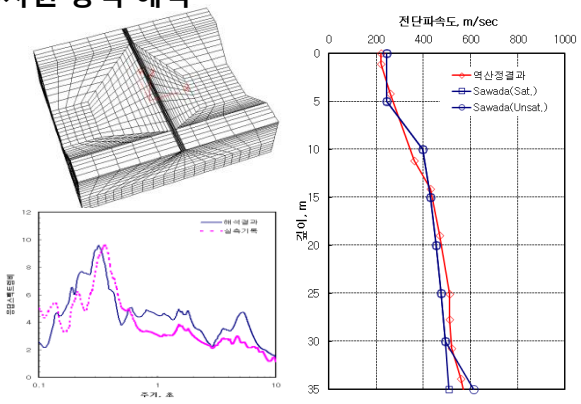
실지진 계측자료 활용 댐 사력댐 동적물성 추정 절차 및 해석 결과

- 2차원/3차원 수치해석기법에 의한 제안기법 적용성 검증

2차원 동적 해석



3차원 동적 해석



반복 수치해석에 의한 댐 사력댐 동적물성 추정 결과 및 기존 경험식과의 비교

▷ 정량적 성과

- 국내학술지게재 1건, 국외학술발표 1건, 국내학술발표 2건

□ 기대효과 및 활용 계획

- 기대효과 대형 댐의 지진계측시스템을 바탕으로 축조재료의 동적물성 평가 가능
  지진계측데이터 활용 댐의 장기적 거동상태 평가를 위한 기반기술 확보

- 활용방안 댐 지진감시시스템 이용 지진발생 시 고유주기산정을 통한 건전도 모니터링 시스템 개발
  중요 기반시설물의 지진모니터링 자료 활용 지반거동상태 평가기술로 활용

실대규모 발파진동실험을 통한 동적물성 추정기법 검증

□ 연구배경 및 필요성

- 본 연구에서 제안한 댐의 고유주기와 반복적 동적수치해석을 이용한 축조재료 동적물성 평가 방법에 대하여 실대형 실험 결과를 이용한 적용성 검증 필요
- 신규 다목적댐 건설 후 수몰 예정인 성덕댐 현장이 확보됨에 따라 실대형 발파진동시험을 수행, 댐의 동적거동특성을 계측·분석하고, 앞서 제안된 기법의 적용성을 검증하고자 함

□ 연구 목표 및 내용

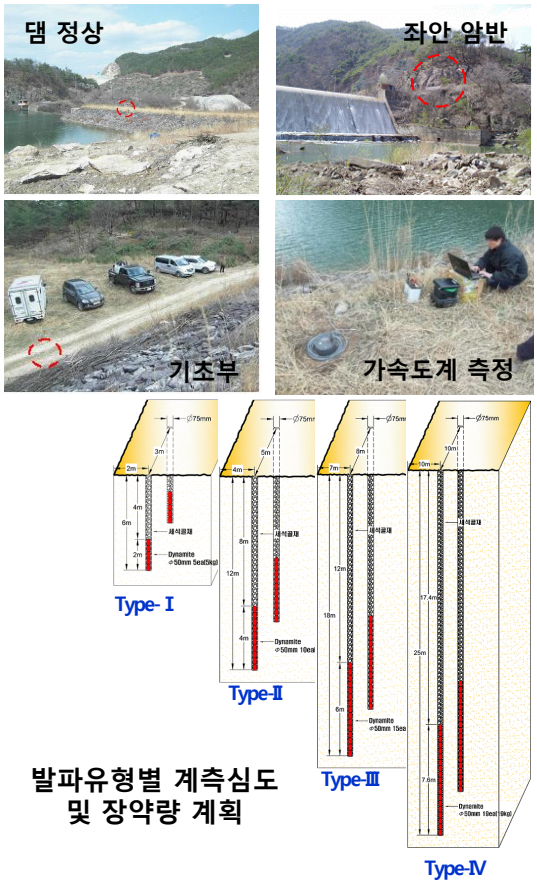
- 해체 예정 댐에 대한 실대규모 발파진동시험 수행
  - 지반구조물 실대규모 발파진동실험 사례조사 및 시험 수행을 위한 주요 설계인자 분석
  - 실대규모 발파진동실험 수행을 위한 현장조사 및 발파진동실험 설계
- 발파진동 시험 결과를 이용한 댐 고유주기 및 축조재료 동적물성 평가
  - 발파진동시험 계측데이터 분석 및 효과적인 댐 고유주기 산정기법 제시
  - 고유주기 + 반복 수치해석 제안기법을 이용한 축조재료 동적물성 평가방법 적용성 검증

□ 연구 성과

▷ 연구추진 내용 및 주요 성과

- 댐 발파진동시험 수행 – 허용 진동기준에 따른 실험 설계, 목표진동 수준을 고려한 심도 및 장약량 계획

성덕댐 발파진동계측 계획



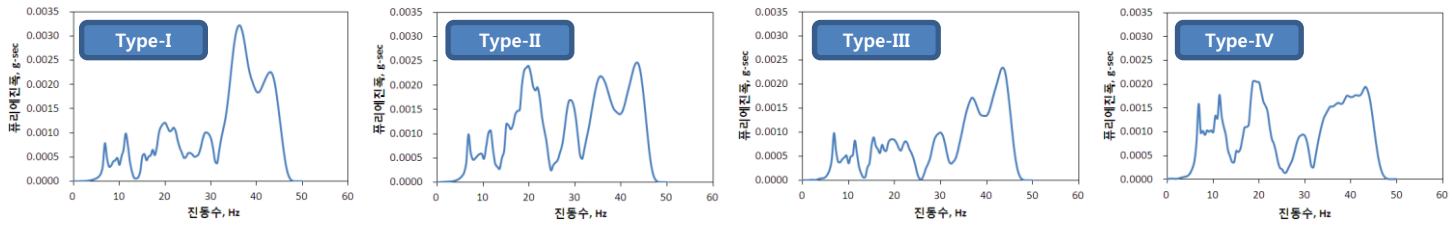
발파유형별 계측심도 및 장약량 계획

발파진동시험 수행 절차

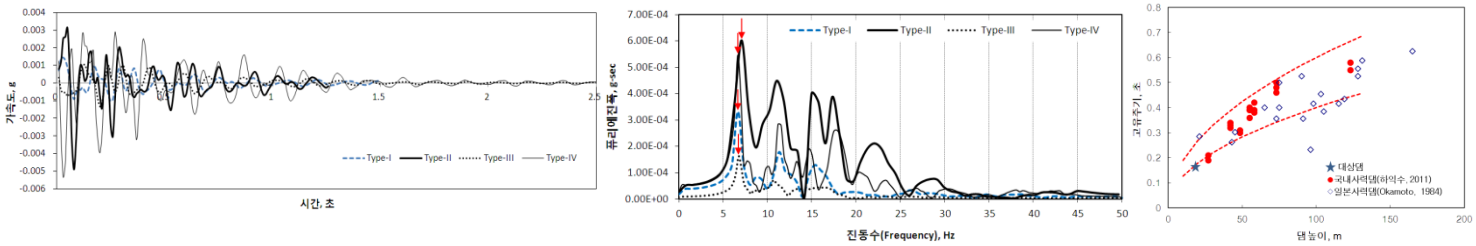


실대규모 발파진동실험을 통한 동적물성 추정기법 검증

- 성덕댐 발파진동시험 계측데이터 분석 및 고유진동수 산정
  - 장약량, 발파심도가 다른 4개 발파유형별 진동계측자료 분석 및 주파수특성 평가
  - 댐의 구조적 자유진동 데이터를 선별적으로 활용하여 일관성있는 댐 고유주기 추정 가능



발파유형에 따른 댐 정상부 계측진동 주파수 특성 – 발파진동특성이 크게 나타남

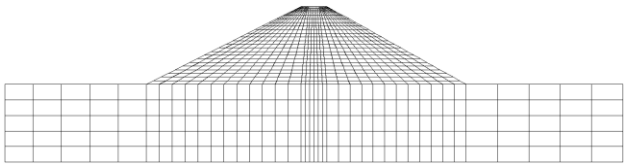


댐 정상부 자유진동감소곡선의 주파수 특성에 의한 댐 고유주기 산정 및 기존 경험관계와 비교

- 반복적 수치해석에 의한 댐 축조재료 동적물성 결정 : 지진데이터 이용 시 제시된 기법의 적용성 검증

4개 발파유형별 진동계측데이터 이용, 수치해석에 의한 정상부 응답기록 도출

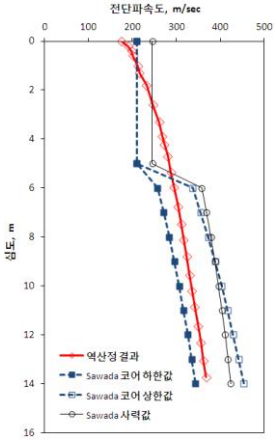
댐 축조재 강성 변화에 따른 고유주기의 민감도 분석 – 현장물성 추정

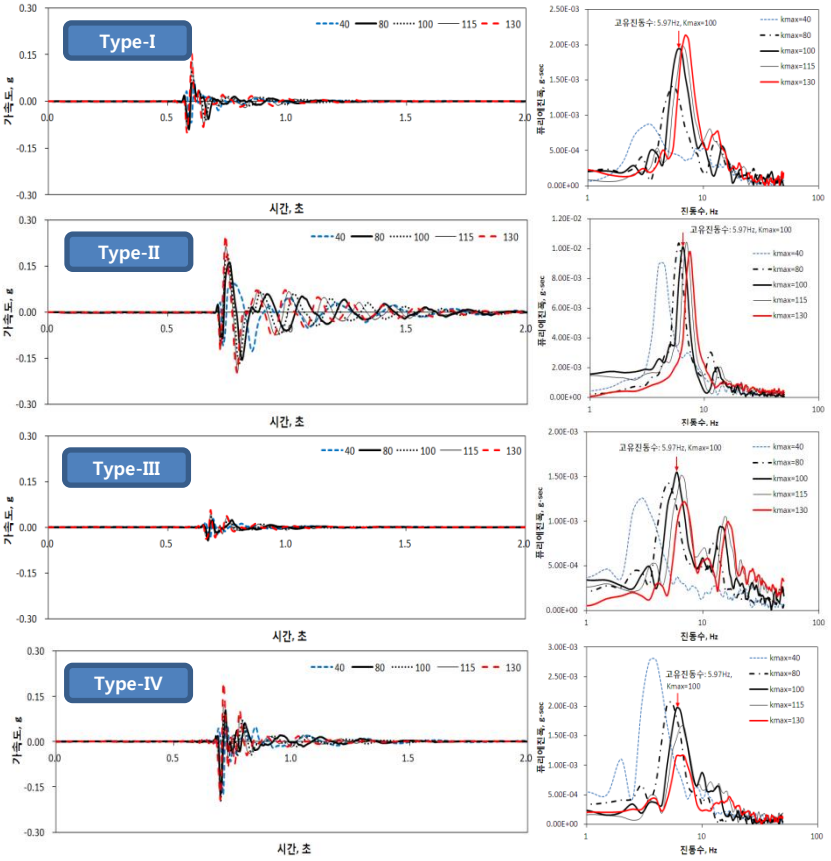


성덕댐 수치해석 모형

수치해석에 의하여 추정된 동적물성과 경험식 비교

제안 기법의 적용성 검증 완료





▷ 정량적 성과

- 국내학술지게재 2건, 국내학술발표 3건, 기술기사 2건

□ 기대효과 및 활용 계획

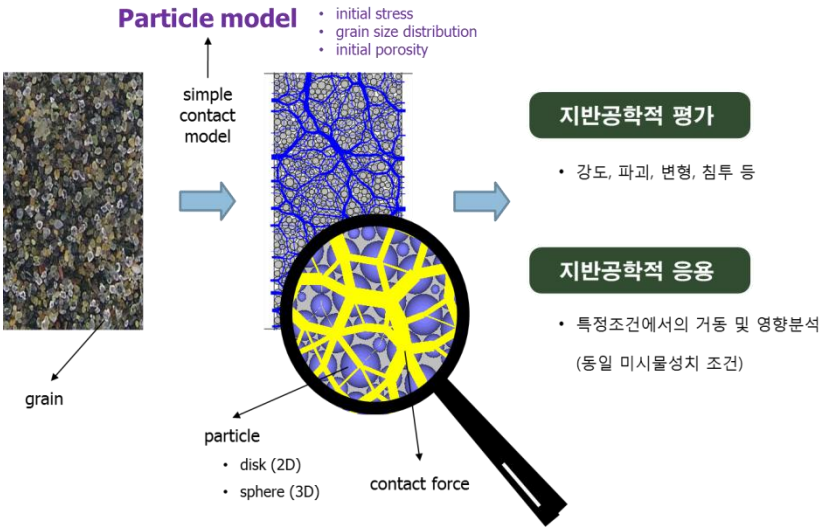
- 기대효과 지반구조물의 재료적 특성, 구조적 거동 등을 평가하기 위한 발파진동시험 실효성 검증
  향후 유사 사례에 대한 발파진동시험 수행·해석 가이드라인 제시

- 활용방안 인공 진동 계측을 이용한 지반구조물 축조재료 동적변형특성 산출에 활용
  진동하중에 대한 고유주기 평가를 이용, 구조물 거동상태 평가에 활용

개별요소법 기반 대입경 조립재료 수치시험 모델링 기법 개발

☐ 연구배경 및 필요성

- 대입경 조립재료의 경우, 시험장비의 규모한계 및 적용 재료의 스케일 효과등에 의해 그 특성치 산정에 많은 어려움이 있음
- **최근 연속체 해석기법에 대한 화용성 증대**
- **개별요소법을 통해 조립재료 대상의 수치시험실 구현 및 이를 통한 물성치 평가기법 필요**



☐ 연구 목표 및 내용

- **DEM 수치모델링을 위한 요소기술 개발 (입자생성, 입도분포, 초기조건 구현 등)**
- **대형 실내시험에 대한 수치모델링 (2차원 및 3차원, 정적 및 동적 시험)**
- **DEM 기반 수치모델링 활용방안 정립**

☐ 연구 성과

▷ 연구추진 내용 및 주요 성과

2차원 입도분포 모델링

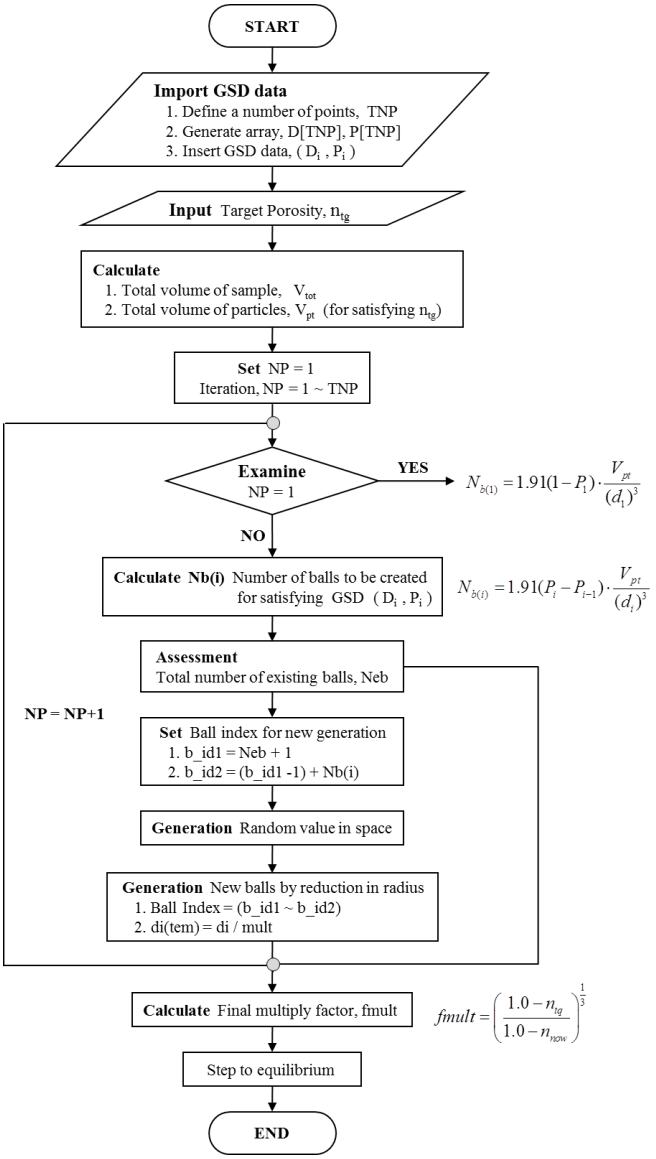
- 원하는 입도분포 입력 (특정 입경 – 통과백분율)
- 임의 위치에 특정 입경의 clump를 반복 생성 (난수발생)

$$Percent\ finer\ (clp) = \left(1 - \frac{\sum_{1}^{n_{clp}} W_{clp}}{A_s (1-n)\gamma_{cp} t}\right) \times 100\,(\%)$$

3차원 입도분포 모델링

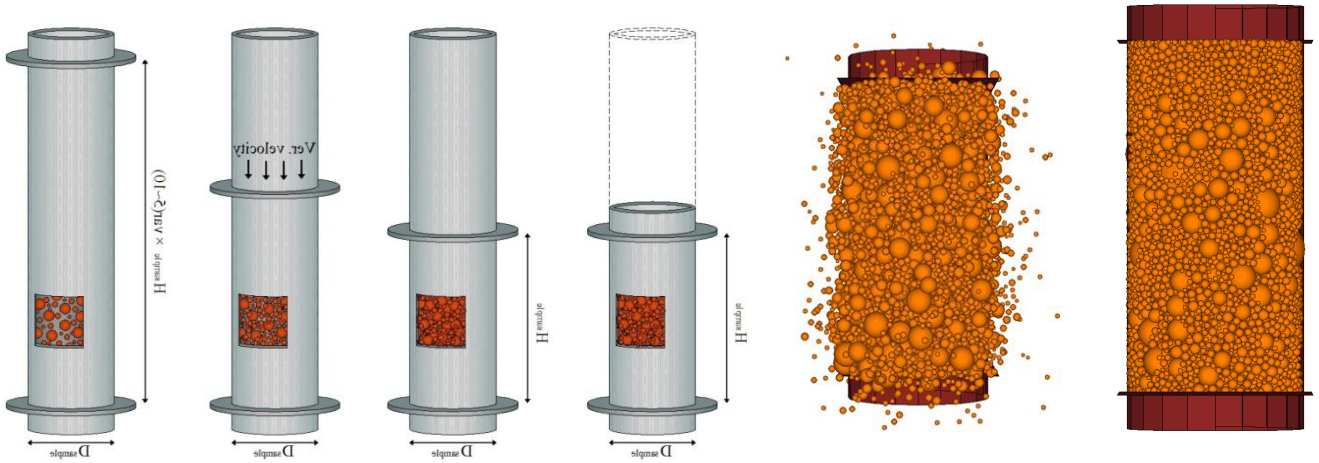
$$V_{pt} = (1-n_{tg})V_{tot} \qquad (1-P_2) = (1-P_1) + \frac{\sum V_{p2}}{V_{pt}}$$

$$N_{b(i)} = 1.91(P_i - P_{i-1})\frac{V_{pt}}{(d_i)^3} \qquad = (1-P_1) + \frac{\frac{\pi}{6}(d_2)^3 N_{b(2)}}{V_{pt}}$$

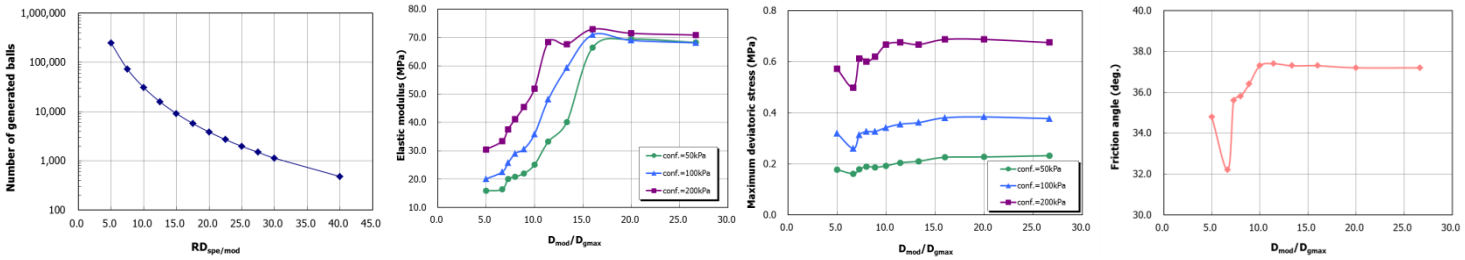


초기조건 구현 (경계면 이탈 방지)

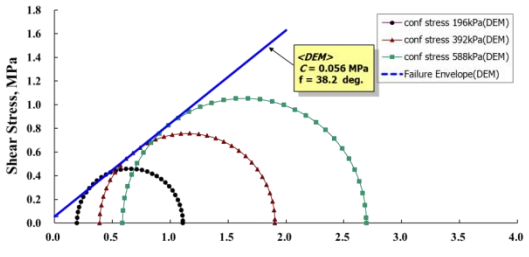
- 넓은 범위의 입도분포하에서 입자생성시 입자간 중첩현상 발생 (사례해석 수행)
- 중첩시 순간적 개별요소들의 과도한 경계면 이탈현상 발생
- 초기 경계면 확장 → 개별요소 생성(입도분포) → 경계면 하강 → 초기조건 확인

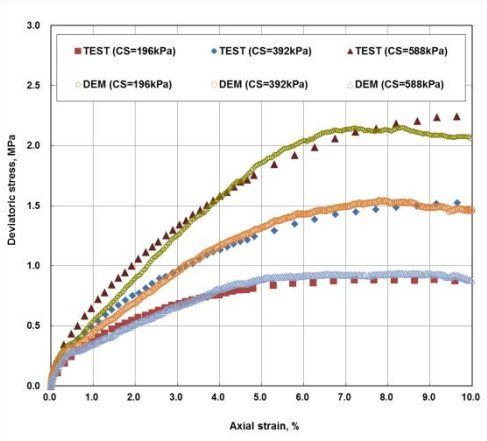


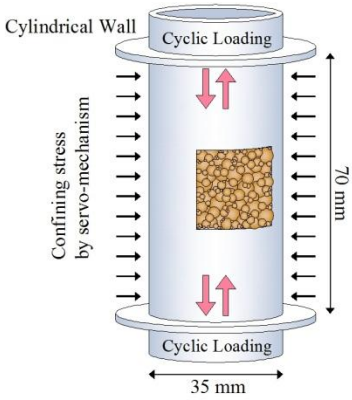
해석모델 및 개별요소 스케일 영향 분석



실내시험 수치 모델링 (정적 및 반복재하)







▷ 정량적 성과

- **국내학술지게재 2건, 국내학술발표 3건**

□ 기대효과 및 활용 계획

- 실내시험 결과만에 의존했던 기존의 물성 산정방식이 아닌, 개별요소법 기반의 수치모델링 기술을 조립재료 물성 산정에 활용할 수 있는 수치 시험실 활용기술로의 기술진보를 도모
- 대입경 조립재료에 대한 물성 취득의 신뢰성을 높이는 원천기술로 활용

대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정을 위한

대형 공진주시험시스템

사용자 매뉴얼

K-water연구원

2012.

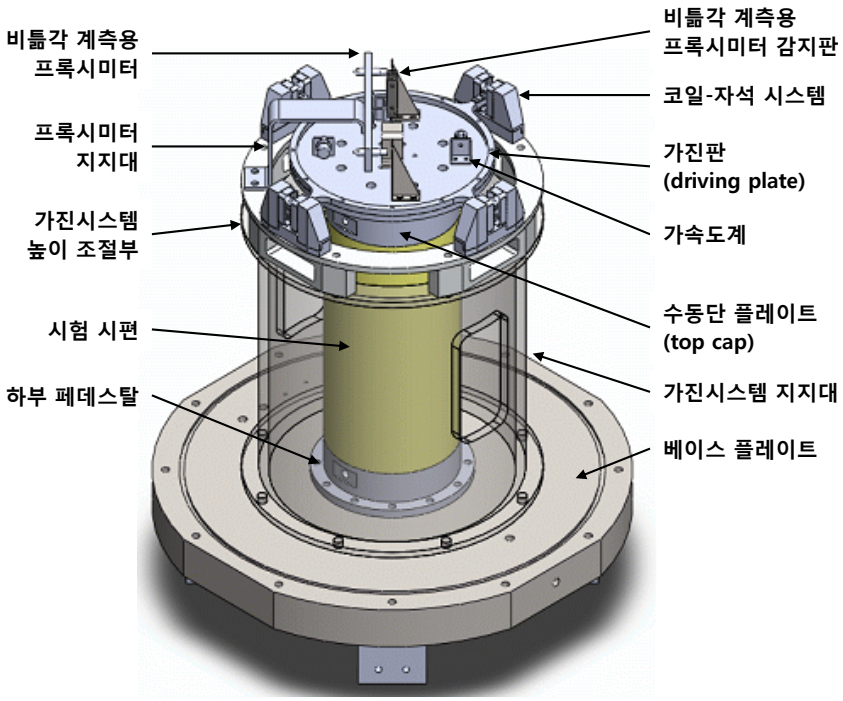
1. 개요

[대형 공진주시험시스템 사용자 매뉴얼]은 '대형 지반구조물 대입경 조립재료동적물성 산정 기법 연구' (국토해양부 국토해양기술연구개발사업 09기술혁신 F05)에 의하여 구축된 대형 공진주시험시스템의 사용 방법을 명시한다. 본 매뉴얼은 시료의 성형, 시험의 수행, 제어 및 계측시스템의 조작 등을 서술하였으며, 사용자의 시험 수행에 필수적인 정보를 제공함에 목적이 있다.

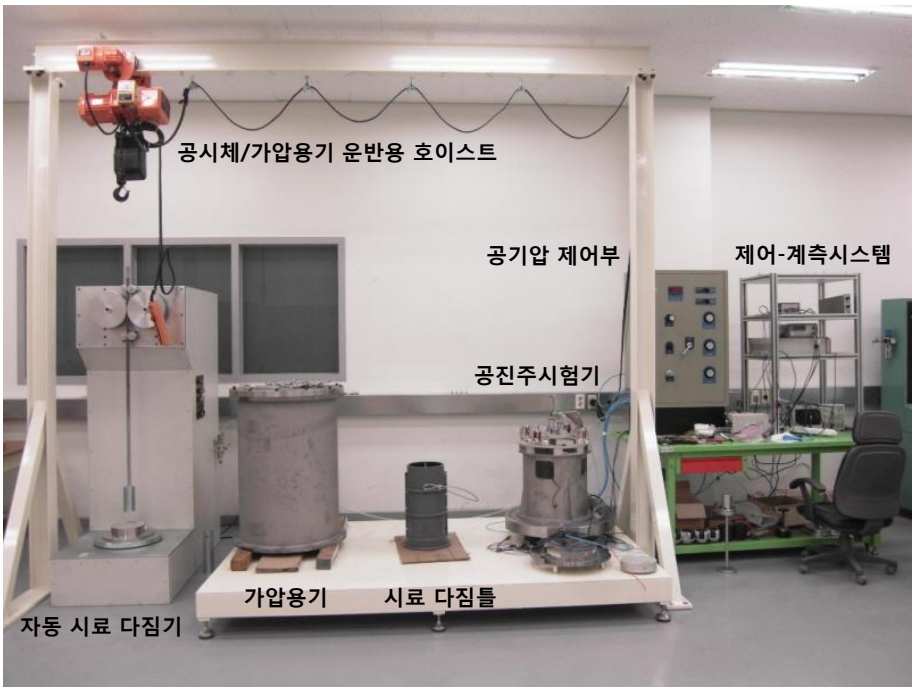
2. 대형 공진주시험시스템의 개요

[그림 2.1]은 대입경 조립재료의 동적 변형특성을 평가하기 위하여 개발한 대형 공진주시험시스템의 상세 사항을 나타낸다. 해당 시험기는 최대입경 30 mm 이상의 조립재료에 대한 시험이 가능하도록 ASTM D4015 기준에 따라 시험용 공시체의 지름이 시료의 최대입경의 6배 이상인 200 mm에 맞추어 설계·제작되었으며 공시체의 높이는 시료 지름의 2배인 400 mm를 만족하도록 구성되었다.

본 시험기는 하부 고정, 상부는 가진시스템을 포함한 자유단 조건으로 구성된 전형적인 Stokoe 식 공진주시험기이다. 가진 시스템은 상부 가진판에 대칭이 되는 4개 지점에 각각 고자성의 자석과 한 쌍의 코일을 설치하고 대용량 증폭기에 의하여 코일에 흐르는 전류를 제어함으로써 일반적인 공용하중 범위에 해당하는 비틂력이 시편에 작용될 수 있도록 구성하였다. 전단변형율 측정을 위하여 가진판 상부에 한 쌍의 가속도계(PCB 353B15)가 설치되었다. 해당 시험기는 [그림 2.2]와 같이 설치되어 있으며 상세 사양은 [표 2.1]과 같다.



[그림 2.1] K-water 대형 공진주시험시스템의 개요도

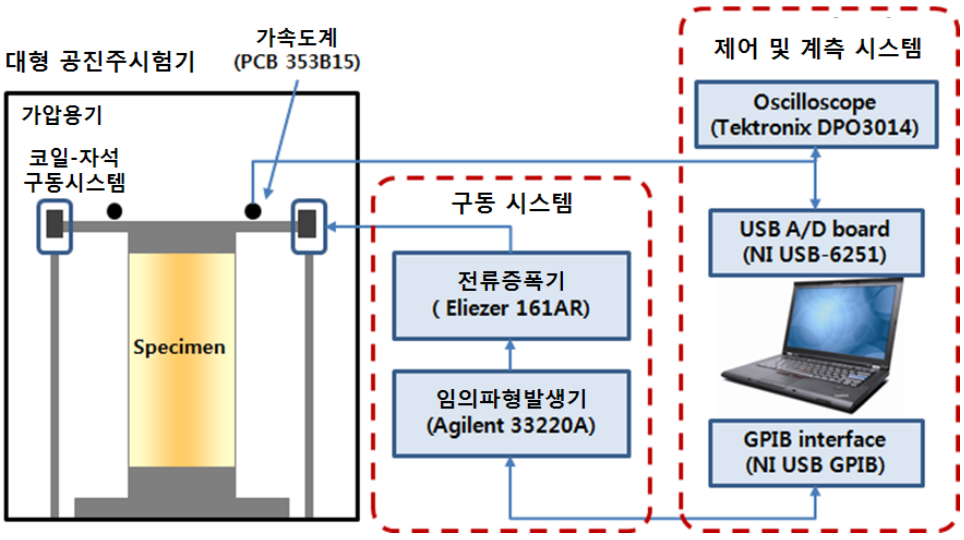


[그림 2.2] K-water 대형 공진주시험시스템의 설치 현황

[표 2.1] 대형 공진주시험기의 주요 사양

구분	제원
시편 크기	일반: 200 mm(D) × 400 mm(H) 확장: 300 mm(D) × 600 mm(H)
시험재료 최대 입경	33.3 mm 이하
가진 시스템	대형 코일-자석 제어 (Stokoe 식)
가용 전단변형율	10^{-5} % – 10^{-1} %
최대 비틂력	500 N·m
가진 하중주파수	0.1 Hz – 20,000 Hz
가압용기 내압 능력	2,000 kPa
제어 시스템	Agilent 33220A 임의파형발생기
계측 시스템	NI USB-6251 다기능 DAQ
전류증폭기	Eliezer 161AR current amplifier
변형계측기	가속도계 (PCB 353B15)

[그림 2.3]은 대형 공진주시험시스템의 제어 및 계측 시스템의 개요를 나타낸다. 시험시편의 주파수응답특성을 평가하기 위하여 적용하는 정현파의 반복하중은 기본적으로 고정밀의 임의파형발생기(Agilent 33220A)를 이용함으로써 주파수와 하중 수준을 제어하며, 재료의 비선형성이 나타나는 변형율 대역 또는 큰 구속압 상태에서 강성 증가에 따라 요구되는 하중의 경우 대용량의 전류제어형 증폭기를 이용함으로써 시험을 수행할 수 있다. 이러한 제어시스템은 LabVIEW를 기반으로 작성된 전자동 공진주-비틂전단시험용 소프트웨어의 그래픽 유저 인터페이스(GUI)를 바탕으로 노트북 컴퓨터에 설치된 범용 인터페이스 버스 (General Purpose Interface Bus, GPIB) 또는 다기능 데이터수집장치(NI USB-6251)의 출력을 통하여 구동된다. 다기능 데이터수집장치는 시스템의 제어뿐만 아니라 시험신호의 계측에도 이용되는데, 가진판에 설치된 가속도계와 중앙의 비접촉식 변위계의 전압 신호를 기록함으로써 공진주시험 시 하중 특성에 따른 시험시편의 응답을 평가하게 된다. 이러한 시스템을 바탕으로 구동 전압 수준에 따라 주파수응답곡선, 변형율 및 감쇠비 특성을 산정할 수 있으며, 반복적인 시험을 통하여 재료의 비선형특성까지 자동으로 도출할 수 있다.



[그림 2.3] K-water 대형 공진주시험시스템 제어·계측 시스템 개요도

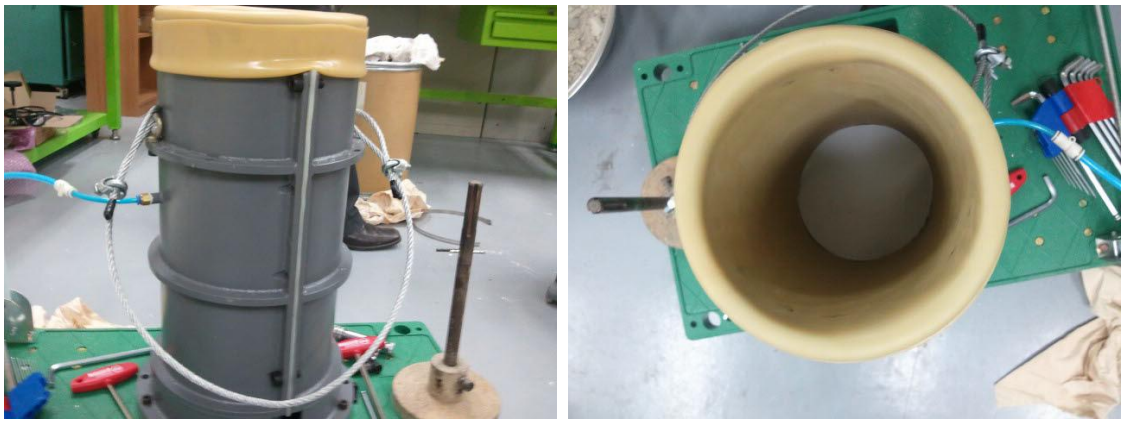
3. 시험시편의 준비

3.1 기본 준비사항

공진주시험의 수행 및 분석을 위해서는 시료의 기본 정보가 필수적으로 요구된다. 공진주시험은 시험시편의 기하학적 형상과 단부조건에 따라 표현되는 지배방정식으로부터 공진주파수와 재료의 전단파속도(shear wave velocity, V_S)의 상관관계를 획득하므로, 이를 바탕으로 전단탄성계수(shear modulus)를 산정하기 위해서는 시료의 단위중량이 필수적이다. 또한 보다 고차원적 분석을 위해서는 재료의 비중, 간극비, 함수비 등 일반적인 시료 정보가 필요하다. 이러한 정보는 일반적인 토질시험방법에 의하여 획득할 수 있다.

3.2 시험 시편의 제작

시험 시편은 원주형 다짐틀을 이용하여 제작할 수 있다. [그림 3.1]은 K-water 대형 공진주시험시스템을 위하여 제작된 다짐틀에 멤브레인을 설치한 현황을 나타낸다. 다짐틀의 준비는 시험기 본체로부터 분리 가능한 강성 페데스탈 상부에 멤브레인 끝부분을 둘러싸 밴드형 호스클램프로 고정시킴으로써 공기 유출을 방지하고, 겉면에 양쪽으로 분리되는 다짐틀을 거치, 나사를 조임으로써 조립할 수 있다.



[그림 3.1] 대형 공진주시험용 다짐틀 및 멤브레인 설치 현황

다짐틀의 설치 후 상부에 돌출되는 멤브레인은 겉면으로 둘러 감아 시료의 성형을 용이하게 하고, 다짐틀과 멤브레인 사이에 포획된 공기는 다짐틀 한 면에 설치된 커넥터에 진공압을 가함으로써 제거, 시험용 공시체의 원주형상을 유지할 수 있다.

3.3 시료의 다짐

조립재료를 이용한 지반시료의 다짐은 대형 공진주시험시스템과 함께 구축된 자동 다짐장치를 이용하여 수행할 수 있으며, 해당 장비의 사용 현황은 [그림 3.2]와 같다. 재료의 다짐 시 공시체 전반에 동일한 밀도조건을 구현하기 위하여 과소다짐법(under compaction method)를 적용한다. 본 시험 시 대입경 조립재료라는 특수한 조건을 고려하여 총 5층의 과소다짐법을 기본적으로 이용하며, 하부층의 경우 목표 단위중량보다 작게 조성하여, 총 5층의 다짐이 완료되었을 경우 최종적으로 목표하

는 단위중량에 달하도록 다짐을 수행한다.

다짐기의 다짐 순서는 1 cycle에 대하여 총 7번의 램머 낙하를 구현하게 되는데, 다짐틀이 놓이는 턴테이블은 램머의 낙하 주기에 맞추어 회전 이동하게 된다. 6번의 낙하는 다짐틀 주변에 근접하여 순차적으로 회전하며 다짐을 수행하며, 7번째 낙하는 다짐틀 정 중앙에 이루어진다. 다짐 조건에 따라 순환 cycle 수를 제어할 수 있다. [그림 3.3]은 다짐이 완료된 최종적인 재료 상태 예를 나타낸다.



[그림 3.2] 자동다짐장치를 이용한 시료의 다짐

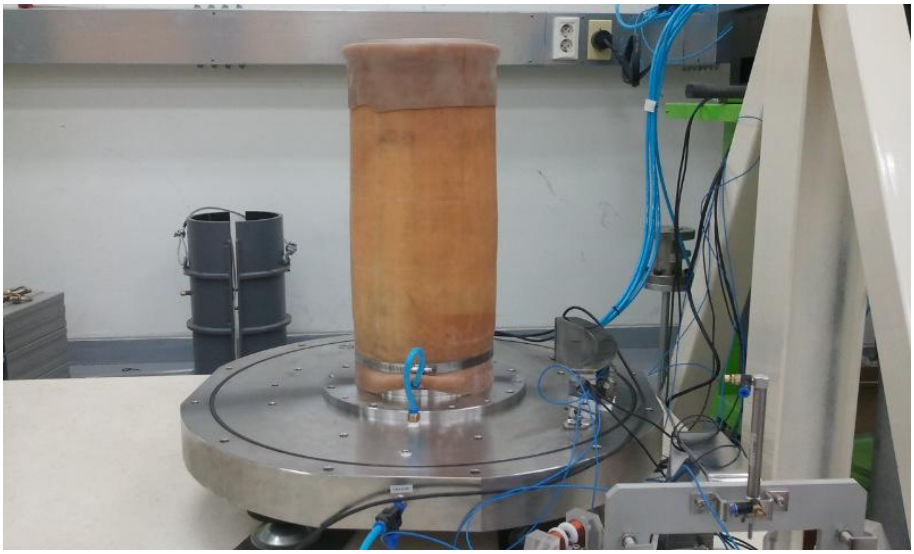


[그림 3.3] 자동다짐장치를 이용한 시료의 다짐

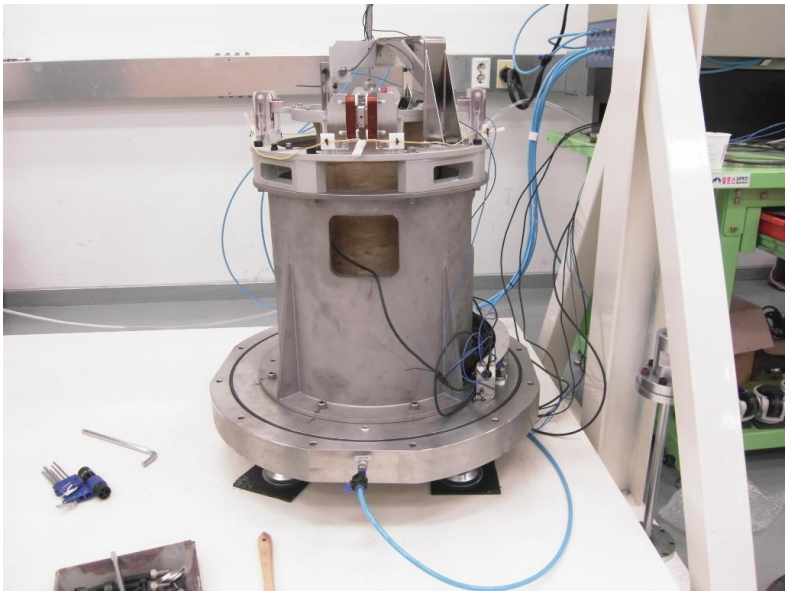
4. 시험시편 및 시험시스템의 설치

4.1 시험시편의 설치

다짐이 완료된 시험시편은 다짐틀 측면에 설치된 운반용 와이어를 이용하여 운반할 수 있다. [그림 2.2]에 나타난 바와 같이 시험시스템 전체 상부에는 중량물의 운반을 위한 호이스트가 설치되어 있으므로, 이를 이용하여 다짐틀 및 공시체 전체를 운반한다. 다짐틀을 페데스탈의 고정용 볼트 구멍 위치를 조절하여 시험기 바닥판에 거치한 후 가진시스템과 공시체 연결을 위한 탑캡을 설치한다. 탑캡의 상부에는 밴드형 호스클램프를 이용, 멤브레인을 고정하여 공압의 시편 내 유입을 방지한다. 이때 탑캡은 시험기 상부의 가진판과의 체결을 고려하여 방향성을 맞추어 설치한다. 시험시편 하부 페데스탈의 고정이 완료되고 나면, 바닥판 하부의 포트를 통하여 시편 내부에 진공압을 작용하여 시편의 자립이 가능하도록 조치한다. 이러한 작업이 끝난 후 다짐틀을 제거하며, 최종적으로 시편의 설치가 완료된 현황은 [그림 4.1]과 같이 나타내었다.



[그림 4.1] 시험시편 공시체의 거치



[그림 4.2] 가진시스템 및 거치대의 체결

4.2 가진시스템 설치

공시체의 설치 완료 후 상부 가진시스템의 설치를 위하여 우선 가진시스템 지지대를 바닥판에 고정한다. 중량의 지지대는 호이스트를 이용하여 이동하고, 적절한 위치에 내려놓아 하부에 볼트를 체결하여 단단히 고정한다. 지지대의 이동 중 공시체

와의 충돌로 인한 손상이 발생하지 않도록 주의해야 한다.

지지대 설치 후 상부에는 최종적으로 가진시스템을 설치한다. 가진시스템과 지지대 중간에는 공시체 높이에 따라 가진시스템의 위치를 조절할 수 있는 레벨 블록(leveling block)이 놓이며, 블록을 변경하거나 얇은 판상의 부품을 추가 삽입하여 조절할 수 있다. 가진시스템을 지지대와 공시체 상부에 올려 놓은 상태에서는 가진판 중앙부와 탑캡을 볼트로 단단히 체결해야 하며, 이후 코일 지지용 프레임을 하부 지지대에 고정한다. 이 때, 코일 지지대의 위치와 높이를 미세 조정하여 가진용 4개 자석이 각각의 위치에 놓인 코일의 정 중앙에 위치하도록 해야한다.

물리적 체결이 완료된 후, 코일에 전류를 공급하는 전선 커넥터를 체결한다.

4.3 내압용기 설치

공시체와 가진시스템의 설치가 완료된 후, 최종적으로 내압용기를 설치한다. 이 때 중량의 내압용기가 전선, 공압 튜브 등의 손상을 유발하지 않도록 주의가 필요하다. 공압용기의 체결 시 안전을 위하여 고정용 볼트는 최소 50N-m 이상의 토크로 조여야 한다.

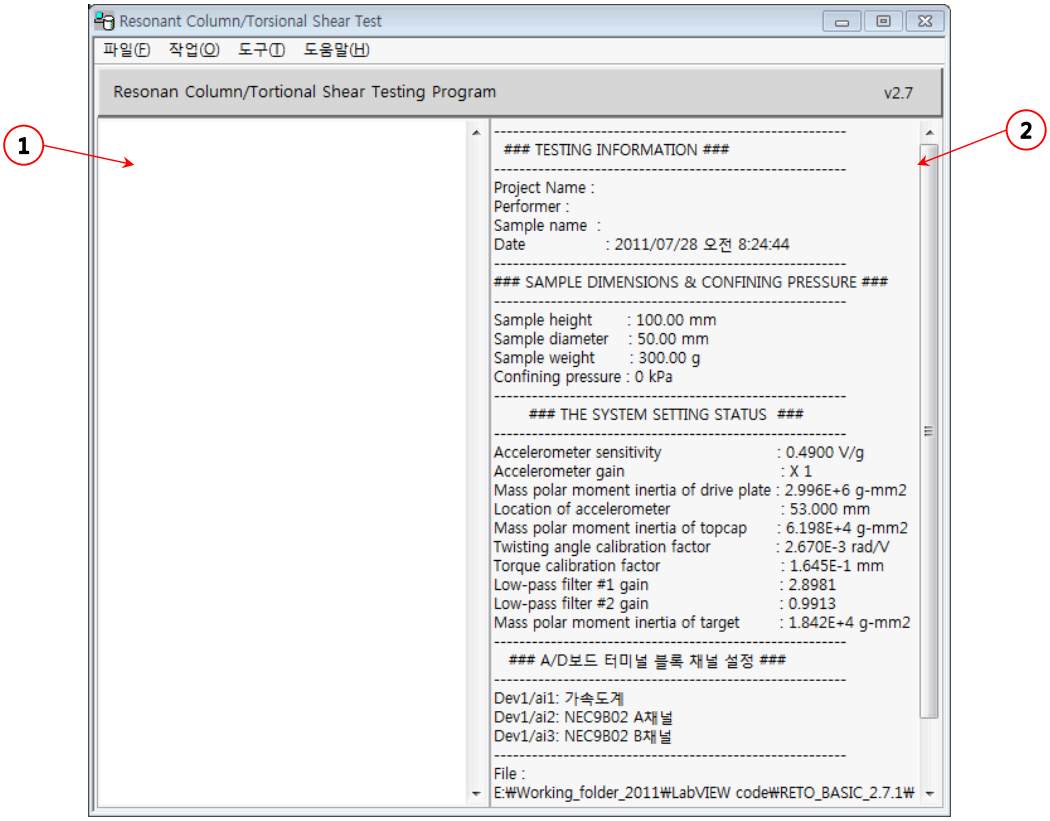
5. 공진주시험의 진행 – 소프트웨어 사용 매뉴얼

대형 공진주시험 제어 계측용 소프트웨어를 사용하기 위해서는 PC에 DAQmx 최신 버전, LabVIEW runtime 2010이 설치되어 있어야 하며, 최소 1개의 DAQ보드가 인식되어 있어야 하며, 함수발생기(Agilent 33220a)의 사용을 위해서는, GPIB가 미리 설치되어 있어야 한다.

5.1 기본 사용설명서

5.1.1 기본화면 및 프로그램의 시작

1. ReTo BASIC의 시작은 '내문서₩Reto_BASIC_2.7.1₩Builds2₩ReTo BASIC.exe' 또는 ReTo BASIC.exe 실행파일이 설치되어 있는 폴더에서 찾아 실행한다.
2. 프로그램의 실행과 함께 그림 2와 그림 3의 설정 창이 연속적으로 나타나고, 설정을 완료한 후에는 그림 1의 기본창이 나타나고, 공진주/비틂전단시험을 수행할 준비가 완료된다.



[그림 5.1] 기본창

[표 5.1] 기본창 아이템 설명

번호	이름	설명
1	작업 표시 창	수행된 작업 및 상태를 순서적으로 보여준다.
2	설정 표시 창	프로그램 실행후, 설정된 장비 및 실험조건에 대한 정보가 표시된다.

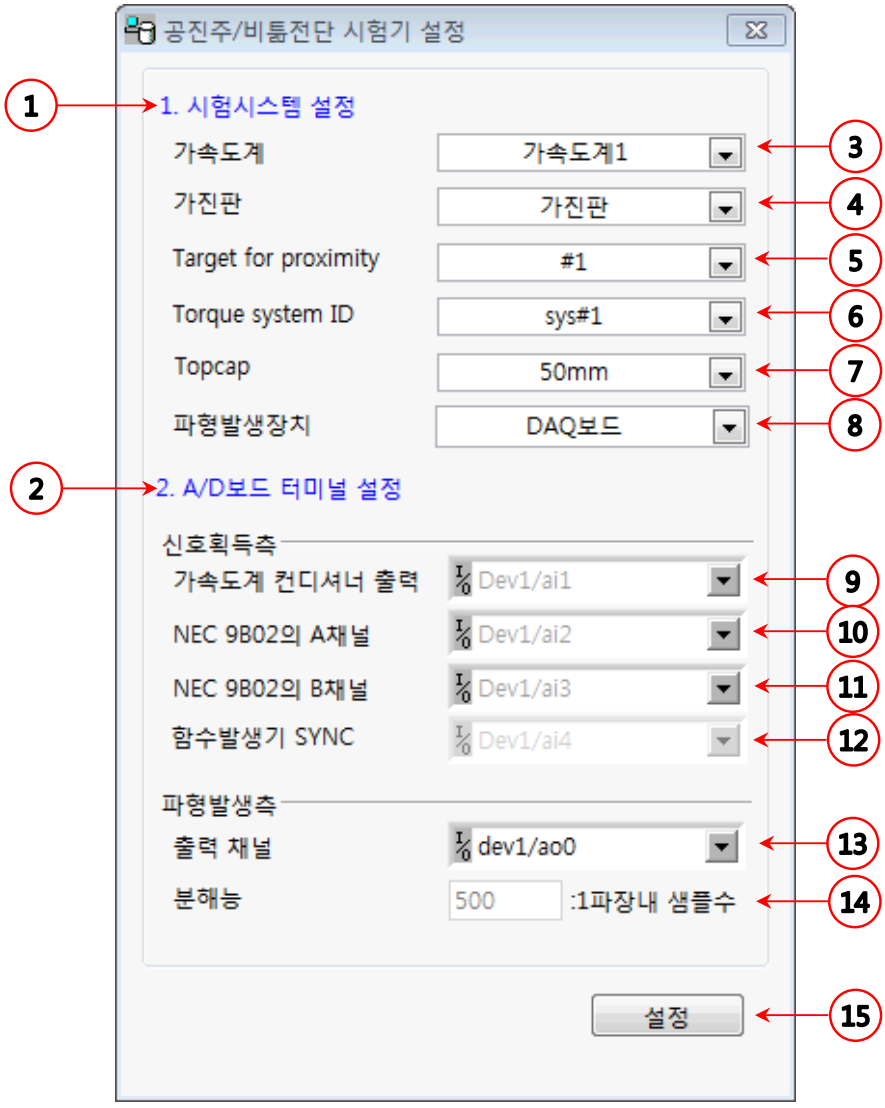
5.2 시험기 및 실험 조건 설정

1. 프로그램의 시작과 함께, [그림 5.2]와 [그림 5.3]과 같은 설정이 차례로 나타나고, 시험기에 관련한 설정과 시험 조건에 관련한 설정을 수행한다.

2. 설정을 완료한 후, 기본창으로 돌아간다.

3. 새로운 실험을 시작하거나, 장비설정이 바뀐 경우에는, 장비 및 시험조건을 재설정해야 하고, 이는 [파일]->[새 프로젝트]를 실행하여 새로 시작할 수 있다.

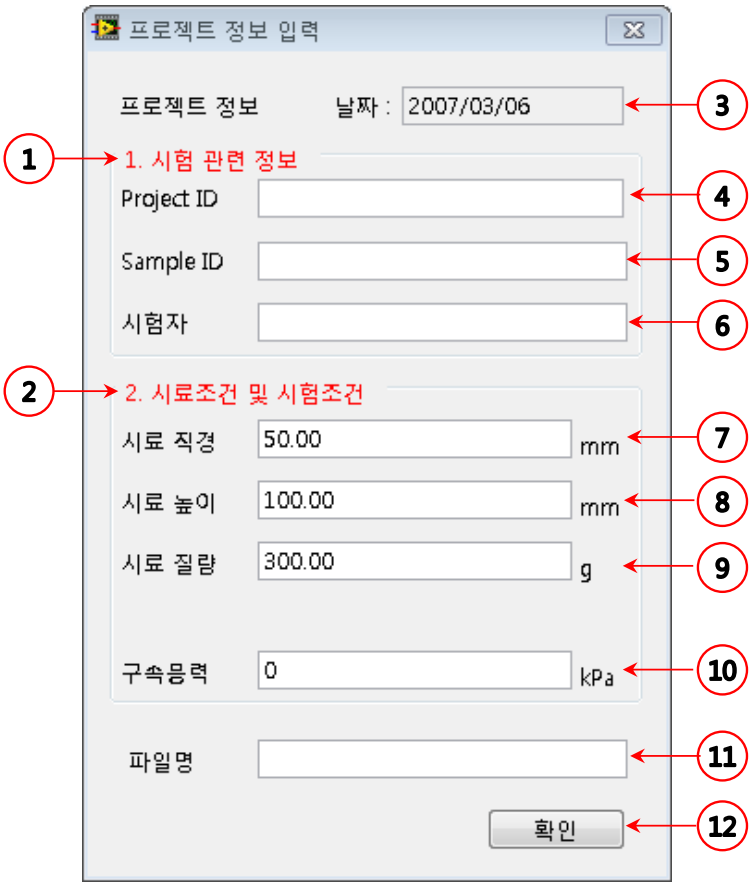
5.2.1 시험기 설정창 인터페이스



[그림 5.2] 시험기 설정창

번호	이름	설명
1	공진주/비틂전단시험 시험장비 설정항	수행된 작업 및 상태를 순서적으로 보여준다.
2	DAQ 시스템 설정 항	프로그램 실행후, 설정된 장비 및 실험조건에 대한 정보가 표시된다.
3	가속도계ID	[도구]->[옵션]에서 설정된 가속도계 중, 하나를 선택하게 되며 관련 센서 정보(예: sensitivity)를 불러온다.
4	가진판ID	[도구]->[옵션]에서 설정된 가진판 중, 하나를 선택하게 되며, 관련된 가진판 정보(예: I0)를 불러온다.
5	프록시미터 타겟ID	[도구]->[옵션]에서 설정된 프록시미터 타겟의 I정보를 불러온다. 착탈식 프록시미터 타겟을 사용한 공진주/비틂전단시험기의 경우에 사용하게 되며, 공진주시험 작업시작에서 사용여부를 결정하게 된다. 고정식 타겟을 사용하는 경우는 필요하지 않은 옵션으로 디폴트로 나둔다.
6	Torque 시스템 ID	[도구]->[옵션]에서 설정되어 있는 가진시스템을 선택하고, 관련된 보정계수를 불러온다.
7	Topcap ID	[도구]->[옵션]에서 설정되어 있는 Topcap중, 하나를 선택하고, 관련된 I0를 불러온다.
8	파형발생장치	가진시스템으로 입력되는 입력 파형을 만들어내는 장비를 선택하는 설정으로, [DAQ보드]와 [Agilent]가 선택이 가능하고, 사용하고자 하는 장비를 선택한다.
9	가속도계 컨디셔너 출력	NI-MAX상에서 인식된 NI사 DAQ보드중, 공진주/비틂전단시험기의 가속도계의 컨디셔닝된 신호를 측정하는 DAQ보드의 연결 채널을 지정한다. 가속도계의 컨디셔너의 출력신호가 DAQ 보드 터미널블록상의 연결 채널을 지정한다. : Dev1/ai2 -> Dev1은 NI-MAX상에서 인식된 DAQ보드의 이름이고, ai2는 Dev1보드의 analog input 2 채널을 의미한다.
10	NEC필터 A채널	NI-MAX상에서 인식된 NI사 DAQ보드중, 공진주/비틂전단시험기의 부속장비인 low-pass filter의 A채널 출력 (A output)과 연결되는 DAQ보드의 연결 채널을 지정한다. A채널의 입력에는 프록시미터의 차동신호가 연결되어있어 하며, A채널의 출력단자가 DAQ 보드 터미널 블록으로 연결된다.
11	NEC필터 B채널	NI-MAX상에서 인식된 NI사 DAQ보드중, 공진주/비틂전단시험기의 부속장비인 low-pass filter의 B채널 출력 (B output)과 연결되는 DAQ보드의 연결 채널을 지정한다. B채널의 입력에는 함수발생기의 출력신호가 연결되어있어 하며, B채널의 출력단자가 DAQ 보드 터미널 블록으로 연결된다.
12	함수발생기 SYNC	파형발생장치로 [Agilent]를 사용하는 경우에 필요한 설정으로, 함수발생기의 'SYNC' 단자를 연결하는 DAQ보드의 채널을 지정한다.
13	가진시스템 입력발생 채널	가진시스템 입력신호를 발생시키는 장비를 DAQ보드로 공유하는 경우, 출력신호가 나오는 채널을 지정한다.
14	분해능	출력신호의 만들어내는 과정에서, DAQ보드의 디지털-아날로그 변환과정으로 발생시키는데, 한 파장당 몇개의 점으로 구성할지를 지정한다. 기본값은 500으로 한파장당 500개의 점으로 구성됨을 의미한다.
15	설정	설정을 완료하고 다음단계로 넘어간다.

5.2.2 시험 프로젝트 정보 입력창 인터페이스



[그림 5.3] 프로젝트 정보 입력

번호	이름	설명
1	시험 관련 정보 항목	수행된 작업 및 상태를 순서적으로 보여준다.
2	시료조건 및 시험조건 항목	프로그램 실행후, 설정된 장비 및 실험조건에 대한 정보가 표시된다.
3	시험 날짜	[새 프로젝트]를 실행한 시점의 제어컴퓨터의 시간을 기준으로, 자동으로 생성되는 값으로 파일명 생성에 사용된다.
4	Project ID	실험과 관련 추가정보를 기록하기 위한 항목으로, 수행하고자 하는 시험과 관련한 프로젝트 명을 사용자의 선택에 따라 지정한다.
5	Sample ID	실험하고자 하는 공시체의 이름을 지정하여 구별하고자 하는 항목으로, 사용자의 선택에 따라 지정한다.
6	시험자	시험자의 정보를 기록한다.
7	시료 직경	공시체 직경를 입력하는 항목으로, 결과 분석에 사용된다.
8	시료 높이	공시체 높이를 입력하는 항목으로, 결과 분석에 사용된다.
9	시료 질량	공시체 무게를 입력하는 항목으로, 결과 분석에 사용된다.
10	구속응력	실험 결과 분석에 사용되는 값은 아니나, 결과 데이터의 관리를 위하여, 입력하는 항목으로 현재 시험중인 구속응력 단계를 지정한다.
11	파일명	현재 시작된 프로젝트에 대하여 수행되는 모든 시험 결과들이 저장되는 파일의 이름을 지정하며, [파일]->[새 프로젝트]를 실행하기 전까지 한쌍의 파일에 모든 실험결과들이 저장된다. 파일명은 날짜정보를 포함하여 기본적으로 생성되어, 컨트롤창에 만들어지고, 사용자의 선택에 따라 다른 이름을 지정할 수 있다. 한 프로젝트에 대하여 기본적으로 두 개의 파일이 한 쌍으로 생성되어, 모든 결과가 저장된다. [파일명]에서 지정하는 문자열에 '.out'과 '.raw' 확장자가 붙여져서 파일명이 지정되며, '파일명.out'은 공진주/비틂전단시험을 통해서 획득되는, 전단탄성계수, 감쇠비, 시험전단변형률 등, 분석이 완료된 변형계수값이 저장된다. '파일명.raw'는 '파일명.out'의 분석에 사용된 실제 계측된 동적 신호들이 기록되며, 공진주시험의 경우, 하중-주파수 곡선 데이터, 자유감쇠기록이 기록되며, 비틂전단시험의 경우, 응력-변형율 이력곡선 구성에 사용된, 실제 계측된 프록시미터 신호, 가진신호, 변환된 전단응력 신호, 변환된 전단변형률 신호가 기록된다. 생성되는 저장 파일은 'ReTo BASIC.exe'가 설치되어 있는 폴더에 있는 ₩savefile 아래에 저장되며, 저장 경로는 설정 이후에, 기본창의 설정표시창에 표시된다.
12	확인	설정을 완료하고 ReTo BASIC의 기본창으로 돌아가며, 공진주/비틂전단시험을 수행할 준비상태가 완료된다.

5.3 시험 수행

1. 장비 설정 및 시험조건 입력을 완료한 후, 기본창에서 시작하게 되며, 이 때 기본창 오른쪽 [설정 표시]창에 시험조건 및 설정된 장비의 parameter들이 표시된다. [설정 표시]창에 parameter들이 표시된 상태에서 실험 작업을 시작할 수 있게 된다.

2. 수행하고자 하는 시험에 따라 [작업]메뉴에서 원하는 시험을 선택하면, 선택한 시험을 수해하기 위한 관련된 팝업창이 연속적으로 나타나게 되며, 화면 지시에 따라 시험을 수행한다.

5.3.1 일단계 공진주 시험

가진시스템으로 입력되는 가진 전압이 하나의 진폭으로 고정되어 수행되는 일련의 시험으로, 하나의 정해진 변형률 크기에서 측정되는 전단탄성계수와 감쇠비를 획득하는 시험이 된다. 본 시험 모드에서는, 입력 전압의 진폭을 조절할 수 있으며, 변형률 크기를 조절하여 하나의 변형률 크기에 대한 전단탄성계수와 감쇠비 세트를 획득하는 시험이다.

일단계 공진주 시험은 먼저 공진주파수를 결정하는 단계와 결정된 공진주파수를 다시 재하하다가 중단시켜서 만들어지는 자유감쇠운동을 측정하는 단계가 자동으로 연속되어 수행되어, 전자로부터 주파수 응답 곡선과 후자로부터 자유감쇠곡선을 획득하게 된다.

수행 절차 및 관련된 팝업창에 대한 설명은 다음과 같고, 모든 작업이 완료되면, 자동적으로 기본창으로 돌아가게 된다.

1. [작업]->[공진주 일회 시험]을 실행한다.

2. [그림 5.4]의 공진주 시험 명령 입력창이 나타나고, 시험 조건을 설정한다. 인터페이스에 대한 설명은 5.3.1.1에 나타내었다.

3. 입력창 입력이 완료되면, 자동적으로 [Sweeping manager]가 실행되며,

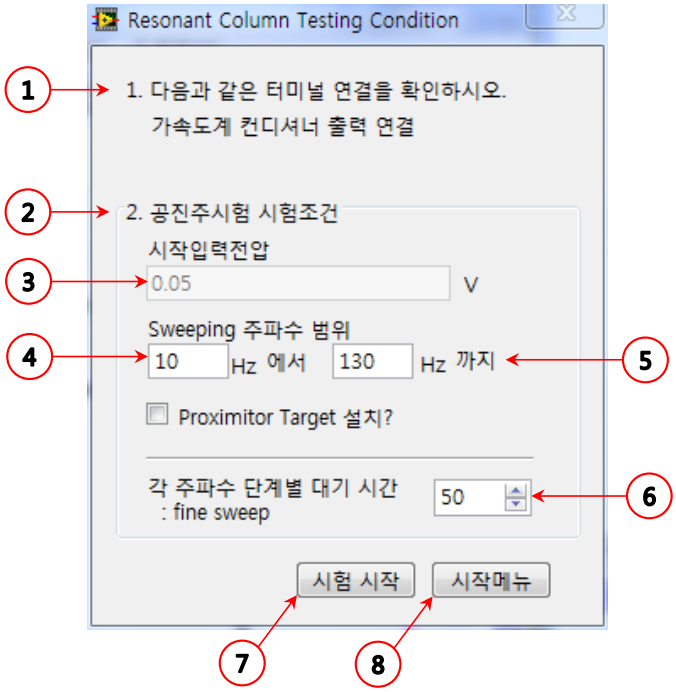
Sweeping작업을 시작하고, 주파수 응답 곡선을 구성하는 작업을 수행한다. Sweeping 작업은 rough sweeping과 fine sweeping의 과정으로 동일한 sweeping manager가 두 번 연속적으로 실행되며, 이때에는 sweeping을 수행하는 구간과 주파수를 변화시키는 간격이 바뀌어서 수행된다. Rough sweeping은 입력창에서 입력된 주파수대역내에서 대략적인 공진주파수의 위치를 선정하고, 측정하는 주파수의 간격이 넓고 측정시간도 짧다. 반면, Fine sweeping에서는 rough sweeping에서 찾아진 공진주파수를 중심으로 좁은 주파수대역을 재설정하여 sweeping을 다시 수행하면서 주파수 변화 간격을 촘촘히 하고 가속도계 출력 신호를 측정하는 시간도 길게하여 출력 신호 측정의 정밀도를 높여서 측정한다. [Sweeping manager]의 인터페이스에 대한 설명은 5.3.1.2에 나타내었다.

4. 두 종류의 Sweeping작업이 완료되면, 자유감소곡선을 획득하는 [FVD manager]가 실행되며, 인터페이스에 대한 설명은 5.3.1.3과 같다. [sweeping manager]으로 부터 측정된 주파수응답곡선으로부터 공진주파수를 자동적으로 결정하여, 공진주파수의 비틂진동을 공시체에 재하하기 시작하다가 스스로 중지하여 자유감쇠운동을 공시체에 유발시키고 이때의 감쇠운동을 가속도계를 통해서 측정한다. 측정된 결과는 [FVD manager]에 나타나게 되며, 자유운동감쇠곡선과 감쇠곡선으로부터 감쇠비를 자동연산한 결과를 보여준다.

5. [FVD manager]의 실행이 완료되어, 감소곡선결과가 나타나게 되면, 완료를 기다리는 대기상태가 된다. 자유감쇠감소곡선이 만족스럽지 않은 경우, 재시험이 가능하다. 대기상태에서 재시험을 하거나, 시험을 완료할 수 있다.

6. 시험 완료 버튼을 클릭하면, 일단계 공지주 시험을 완료하고, 기본창으로 돌아온다. 시험을 완료하면서, 시험결과가 기설정되어 있는 한쌍의 파일에 저장이 된다.

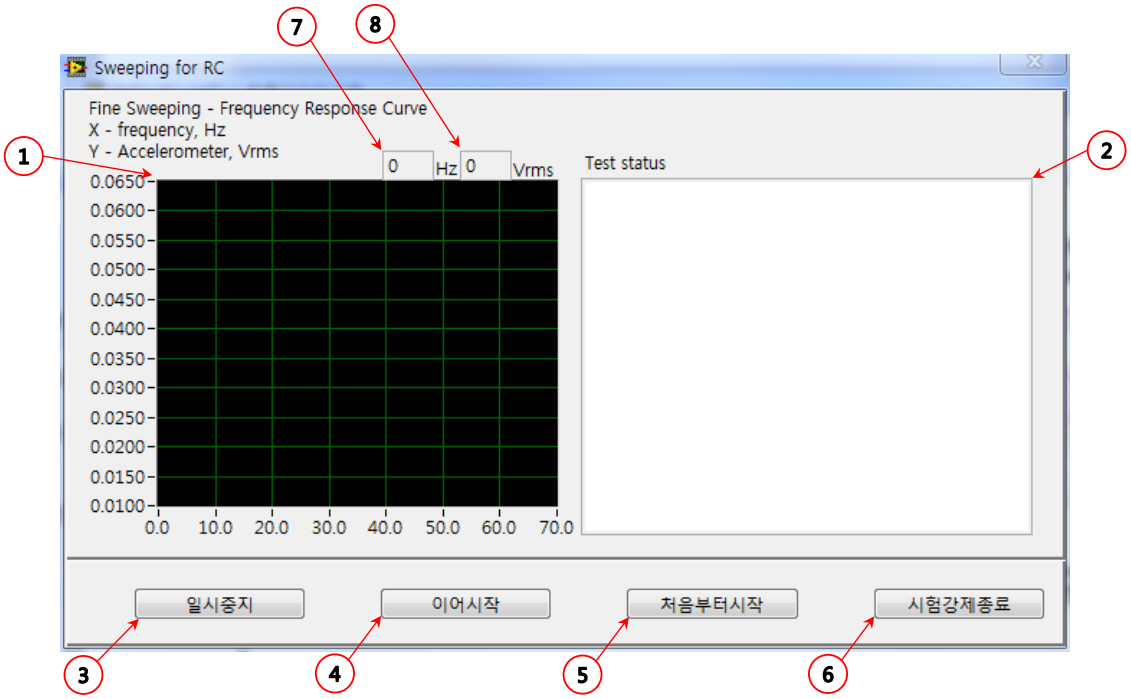
5.3.1.1 공진주 시험 설정 창 인터페이스



[그림 5.4] 공진주 시험 설정 창

번호	이름	설명
1	연결 검토 지시 사항	가속도계 컨디셔너 출력 신호 연결을 확인한다.
2	공진주 시험 조건 항목	공진주 시험을 위한 설정 항목
3	시작입력전압	[공진주 일회 시험]의 경우, 하나의 입력전압에 대해서 만 일련의 공진주 시험을 완료하는 작업으로, 본 항목을 가진전압의 진폭으로 설정하여 공진주시험을 수행한다.
4	Sweeping 주파수 범위 – 하한계	Rough sweeping을 수행하는 주파수 대역을 설정하는 항목으로, 대역중 하한 주파수를 설정한다.
5	Sweeping 주파수 범위 - 상한	Rough sweeping을 수행하는 주파수 대역을 설정하는 항목으로, 대역중 상한 주파수를 설정한다.
6	프록시미터 타겟 설치 여부	착탈식 프록시미터 타겟의 경우, 가진판(drive plate)의 I0에 포함되어 캘리브레이션이 진행되지 않은 경우, 별도로 사용여부에 따라 적용하는 항목이다. 고정식 타겟으로 가진판의 I0에 이미 포함된 경우에는 선택을 하지 않는다. *tip: 착탈식 부착물이 올라가는경우, 본 옵션을 활용하여 I0의 값을 변화시키는 옵션으로 활용이 가능하다.
7	각 주파수 단계 대기 시간	Fine sweeping을 위한 항목으로, Fine sweeping시 각 주파수 단계에서 지정된 주파수 가진을 지속하는 시간을 지정하며, 측정을 위해 유지되는 가진 전압의 총 파장수를 지정한다. 단위는 총 파장수 (number of cycles)이다.
8	시험시작	공진주 시험을 설정된 조건에 따라 시작한다.
9	시작메뉴	공진주 시험을 시작하지 않고 기본창으로 돌아간다.

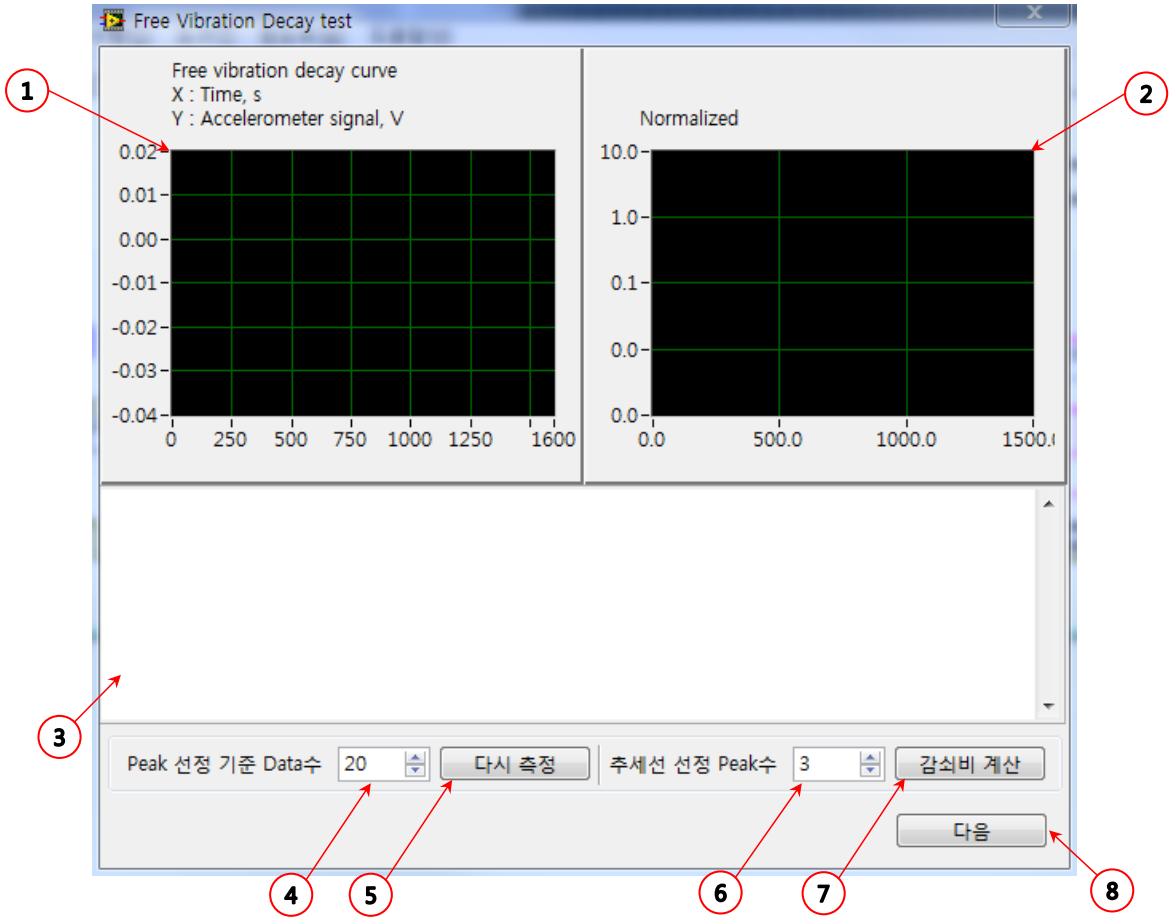
5.3.1.2 Sweeping Manager 인터페이스



[그림 5.5] Sweeping manager

번호	이름	설명
1	주파수응답곡선	Sweeping 작업을 수행하면서 측정되는 결과를 연속적으로 업데이트하여 그래프로 보여주는 창으로, X축은 현재까지 입력된 입력전압의 가진주파수를 나타내며, Y축은 해당 가진주파수 입력전압에 의해 유발된 비틂진동에 대한 가속도계의 출력 RMS값을 나타낸다. 적절한 시험의 수행되고 있는 경우, 종모양의 곡선이 나타나게 된다.
2	시험 정보 표시	현재 시험 조건에 대한 정보와 Fine sweeping단계이거나, [공진주 다단계 시험]을 실행중인 경우, 이전단계에서 측정된 공진주파수와 전단변형률의 정보를 표시하게 된다.
3	일시중지	잠시 실험을 멈추었다가 가야하는 경우 사용하게 되며, 4번[이어시작] 버튼에 의해 재개된다.
4	이어시작	3번 [일시중지]버튼에 의해 중지 되었던, 시험을 재개할 때, 사용하는 버튼으로, 예정되어 있는 Sweeping작업을 마저 완료하게 된다.
5	처음부터 시작	Sweeping 중간에 우발적인 상황으로 기계적인 잡음이 침입했거나, 현 입력전압단계에서 Sweeping을 다시 시작해야 하는경우 사용하게 된다.
6	시험강제종료	현재 진행중인 공진주 시험에 문제가 발생하였다고 판단되거나, 실험을 종료해야 한다고 판단되는 경우 사용해야하며, 이 버튼에 의해 현재 예약되어 있는 모든 공진주 시험 작업은 종료가 되며, 기본창으로 돌아가게 된다.
7	가진주파수	현재 입력 가진 주파수
8	가속도계 측정	현재 입력 단계에서 측정된 가속도계 측정 출력 RMS 측정값

5.3.1.3 FVD manager 인터페이스



[그림 5.6] FVD manager

번호	이름	설명
1	자유감쇠곡선 표시	자유감쇠운동을 측정한 가속도계의 출력신호를 나타낸다.
2	자유감쇠 피크점 표시	가속도계 출력신호로 부터, 자유감쇠법을 적용하기 위해, 자동선정된 Peak 점을 나타낸다.
3	연산 결과 표시	측정된 신호로부터, 자유감쇠법을 적용하여 연산한 결과를 나타낸다.
4	Peak 선정 기준 Data수	Peak점을 자동 선정하게 되는데, 이때 판단 알고리즘에 적용하게 되는 data의 수를 지정한다.
5	다시 측정	자유감쇠운동이 적절하게 측정되지 않은 경우, 다시 측정하기 위한 버튼이다.
6	추세선 사용 Peak수	자유감쇠법을 적용하여 감쇠비 연산에 적용되는 Peak점 수를 지정하게 되며, 디폴트는 3이다.
7	다음	[공진주 일회 시험]의 경우에만 사용할 수 있으며, 자유감쇠운동 측정이 적절히 완료된 경우, 다음단계로 넘어가기 위해 사용하고, 기본창으로 돌아간다. [공진주 다단계 시험]의 경우, 자동으로 다음이 적용되어 다음 단계로 넘어가게 된다.

5.3.2 공진주 다단계 연속 시험

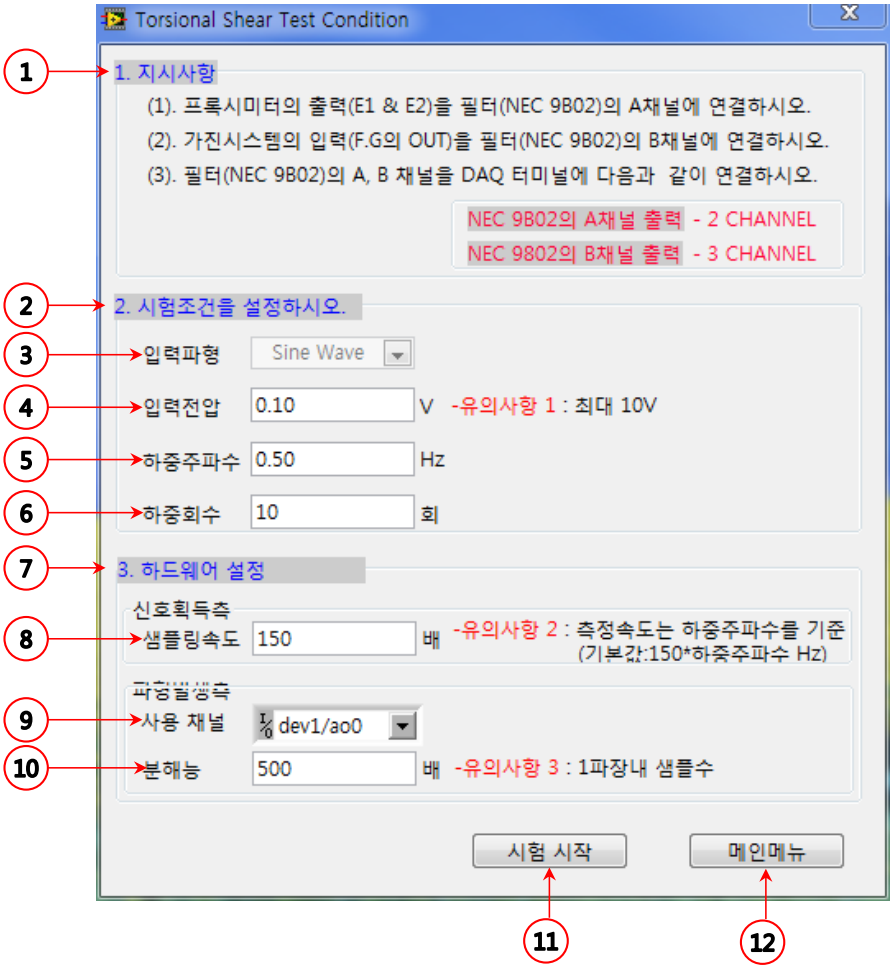
변형률 크기에 변화를 주어가면서 일련의 공진주 시험을 연속적으로 수행할 수 있도록, 편의를 도모한 작업으로, [공진주 일회 시험]모듈을 연속적으로 실행하게 되며, 이때 입력되는 가진전압의 진폭이 입력된 최소값으로 부터, 일정배율로 자동 입력되어 [공진주 일회 시험]이 자동 실행되어 작업이 수행되고, 0.1% 전단변형률 크기에 근처에 도달하면 자동으로 작업을 종료하도록 되어 있다.

1. [작업]->[공진주 다단계 연속 시험]을 실행한다.
2. 그림 4와 같은 공진주시험 설정창이 [공진주 일회 시험]과 동일하게 나타나고, [공진주 다단계 연속 시험]을 실행한 초기에만 나타난다. 입력창의 항목3 '시작입력전압'에 지정되어 있는 디폴트 값 0.05Vpp으로 부터 시작된다.
3. 자동적으로 [Sweeping manager]와 [FVD manager]가 연속적으로 나타나게 되며, 하나의 입력전압 단계에서 각 매니져가 수행이 완료되면, 자동적으로 다음 입력전압이 입력이 되어 [Sweeping manager]와 [FVD manager]을 이어서 실행한다.
4. [Sweeping manager]가 실행되는 단계에서, 일정 상황이 발생하여 [공진주 다단계 연속]시험을 [시험 중단] 버튼과 함께 시험을 중단할 수 있다. 이전 단계의 전단변형률 시험되었던 전단변형률 크기에 따라 사용자가 더이상의 높은 변형율 크기에서 실험을 원하지 않는 경우, 중단이 가능하다.
5. 실행이 완료 되면, 자동적으로 기본창으로 돌아가게 되며, 얻어진 계측데이타와 연산결과는 전술된 한쌍의 out파일과 raw파일에 저장된다.

5.3.3 비틂전단시험

1. [작업]->[비틂 전단 시험]을 실행한다.
2. 비틂전단시험을 위한 설정창(그림 8)이 나타난다. 비틂전단시험 설정창의 인터페이스는 2.3.3.1과 같다.
3. 설정을 완료하고 [시험 시작]버튼을 누름과 함께 시험은 시작되고, 그림 9와 같은 상태표시창이 나타나며, 비틂전단시험의 가진과 신호획득이 이루어진다. 비틂전단시험은 공진주시험과 다르게, 가진 주파수가 느리기 때문에, 연속된 정현파 재하시간이 길기 때문에, 2번 항에서 설정한 입력파형의 길이에 비례하여 대기시간이 길어진다. 측정이 완료되면 자동적으로 다음 설정으로 넘어간다.
4. 그림 10의 [비틂 전단 시험 결과 표시]창이 나타나고, 비틂전단시험을 수행하고 얻어지는 응력-이력곡선, 전단응력 신호, 전단변형률 신호, 계산된 시험값들이 표시된다.

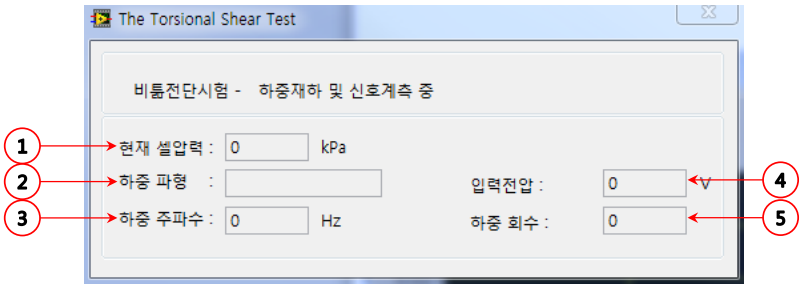
5.3.3.1 비틂전단시험 설정



[그림 5.8] 비틂전단시험 설정창

번호	이름	설명
1	지시사	비틂전단시험에 사용되는 입력 신호의 연결을 확인하는 절차를 설명한다. 필터의 출력신호가 연결되는 설정이 [장비 설정](그림 2)에서 디폴트가 아닌 채널을 설정한 경우에는 장비설정값에 준하여 연결되었는지 확인한다.
2	시험조건 설정 항목	
3	입력파형	측정된 신호로부터, 자유감쇠법을 적용하여 연산한 결과를 나타낸다.
4	입력전압	Peak점을 자동 선정하게 되는데, 이때 판단 알고리즘에 적용하게 되는 data의 수를 지정한다.
5	하중주파수	자유감쇠운동이 적절하게 측정되지 않은 경우, 다시 측정하기 위한 버튼이다.
6	하중회	자유감쇠법을 적용하여 감쇠비 연산에 적용되는 Peak점 수를 지정하게 되며, 디폴트는 3이다.
7	하드웨어 설정 항	[공진주 일회 시험]의 경우에만 사용할 수 있으며, 자유감쇠운동 측정이 적절히 완료된 경우, 다음단계로 넘어가기 위해 사용하고, 기본창으로 돌아간다. [공진주 다단계 시험]의 경우, 자동으로 다음이 적용되어 다음 단계로 넘어가게 된다.
8	신호 측정 보드 설정	가진신호 출력 및 입력신호 계측을 위한 DAQ 보드를 설정하는 항목
9	샘플링속도	프록시미터신호 및 가진신호 측정을 위한 샘플링속도를 지정한다. 가진주파수의 배수를 의미하므로, 한 파장에서 측정점의 수를 지정한다.
10	사용채널	가진신호를 만들어서 보내는 DAQ보드의 채널을 지정한다.
11	분해능	가진신호를 구성하는 한 파장당 송출점의 수를 지정한다. 한 파장을 만들어 낼 때, 몇번의 다른값을 연속적으로 업데이트하는 지를 지정하는 항목으로, 커지면 커질수록 부드러운 곡선에 가까워지나, 장비의 효율성이 떨어지게된다.

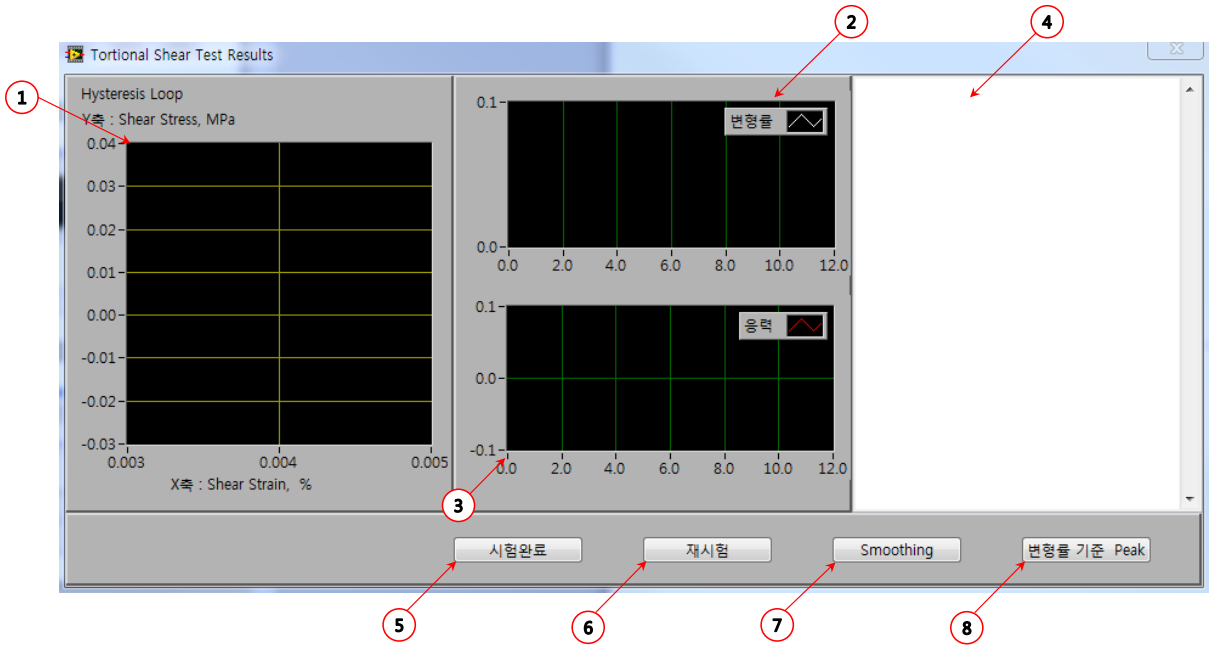
5.3.3.2 비틂전단시험 실행



[그림 5.9] 비틂전단시험 시험 표시창

번호	이름	설명
1	현재 셀압력	[시험 조건 설정]창에서 설정한 값이 나타난다.
2	하중파형	사용하고 있는 입력신호의 나타낸다. Sine이 표시된다.
3	하중주파수	입력되고 있는 가진신호의 주파수를 나타낸다.
4	입력전압	입력되고 있는 가진신호의 전압진폭을 나타낸다.
5	하중회수	입력되고 있는 가진신호의 파장회수를 나타낸다.

5.3.3.3 비틂전단시험 결과 표시



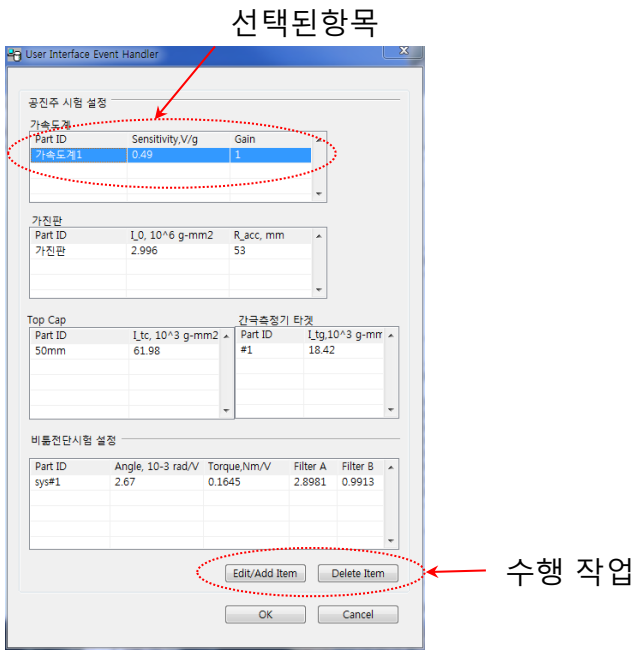
[그림 5.10] 비틂전단시험 결과 표시

번호	이름	설명
1	응력-변형률 이력곡선	측정된 신호를 응력과 변형률로 변환된 신호를 이용하여 구성한 이력곡선을 나타낸다.
2	전단변형률	프록시미터 신호로 부터 변환된 전단변형률 신호를 보여준다. 신호의 상태를 파악할 수 있으며, 재시험 여부를 판단할 수 있다.
3	전단응력	가진신호로 부터 변환된 전단응력 신호를 보여준다.
4	결과표시창	이력곡선으로부터 자동으로 연산된 물성들을 나타낸다.
5	시험완료	시험을 완료하고 다음 단계로 넘어간다.
6	재시험	비틂전단시험을 동일 조건에서 다시 수행한다.
7	Smoothing	신호의 노이즈를 제거하기 위하여 smoothing을 적용하는 post-process기능이다.
8	변형률 기준 Peak	프로그램의 G, D을 계산하기 위하여 적용하는 자동연산 과정에서, Peak를 산정하는 신호를 상대적으로 안정된 신호인 응력신호로 부터 산정하고 있고, 이를 변형률을 기준으로 변경해서 연산하고자 하는 경우 기능이다.

5.4 [옵션] 메뉴

공진주/비틂전단 시험기의 장비와 관련한 설정값을 바꾸는 도구이다. 기본적으로는 장비 설정값을 저장하는 시스템파일인 '₩system₩RCTS.set'을 수정하는 모듈로서, 일반적인 텍스트 에디터로도 수정이 가능하다. 인터페이스에 대한 설명은 2.4.1과 같고, 모든 항목은 리스트박스로 구성되어 있고, 아이템의 수정 및 추가는 다음 절차에 따른다.

1. 수정하고 하는 항목(예: 가속도계 그림 또는 가진판)을 마우스 왼쪽 클릭을 통하여 선택한다.



[그림 5.11]

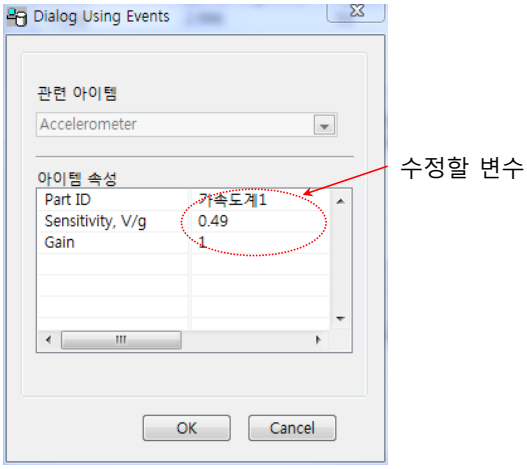
2. 수정하고자 하는 항목을 선택하면 [그림 5.11]과 같이 항목이 활성화 된다.

3. 항목을 선택한 후, 항목의 변수를 수정하고자 하면 [Edit/Add Item]을 '왼쪽클릭' 하고, 항목을 삭제하기를 원하면 [Delete Item]을 '왼쪽클릭'한다.

4. [Edit/Add Item]을 '왼쪽클릭'하면, [그림 5.12]의 항목을 수정하는 팝업창이 나타나고, 수정을 원하는 변수에 '왼쪽클릭'하면 커서가 나타나고, 수정을 한다.

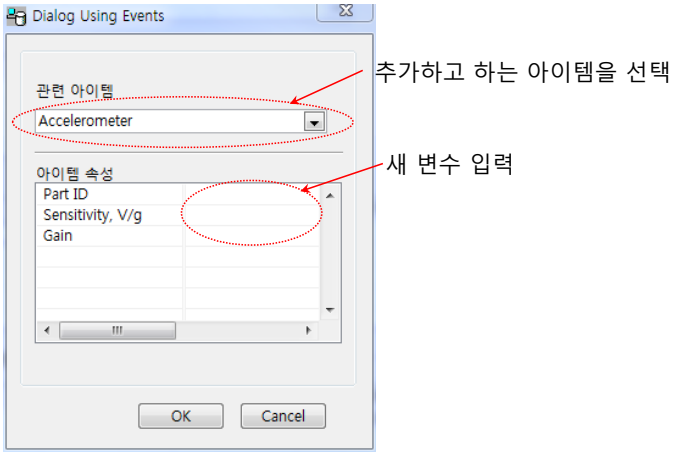
5. [Delete Item]을 '왼쪽클릭'하면 해당항목이 삭제된다.

6. 새로운 항목을 추가를 원하면 아무 리스트박스의 제목부위를 클릭하여 항목을 비활성화하여, 선택된 항목이 없도록 만든 후, [Edit/Add Item]을 '왼쪽클릭'하면, [그림 5.13]이 팝업된다.



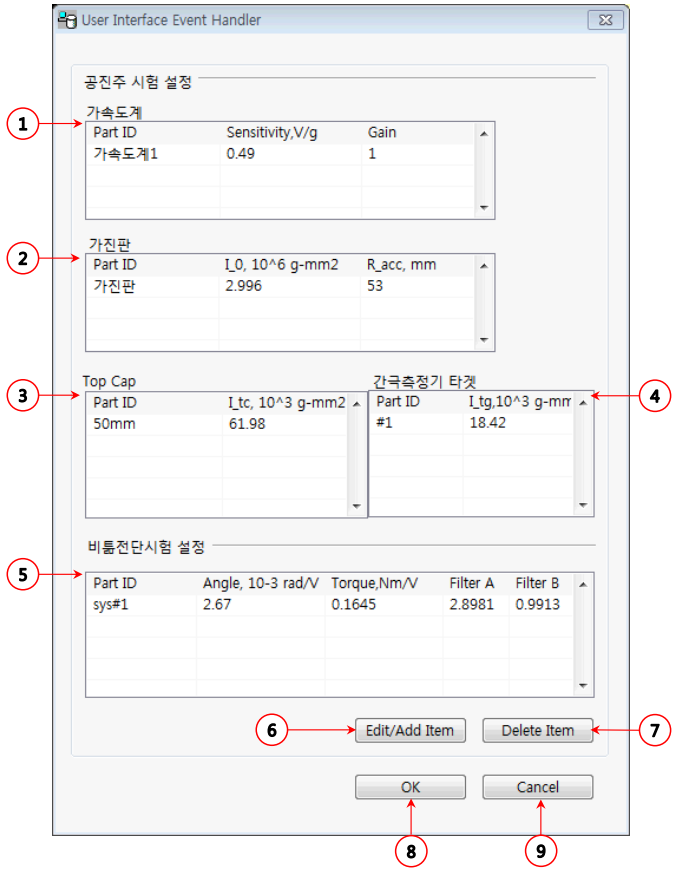
[그림 5.12]

7. [그림 5.13]을 이용하여 원하는 아이템을 선택한 후, 새 변수를 빈 칸에 입력하고, 'OK'를 클릭하여 입력을 완료하면, [그림 5.11]의 옵션창으로 돌아가게 되며 항목이 추가된다.



[그림 5.13]

5.4.1 [옵션]창 인터페이스



번호	이름	설명
1	가속도계	가속도계 관련된 변수를 입력한다.
2	가진판	가진판과 관련된 변수를 입력한다.
3	Topcap	탑캡의 I0를 지정해야 하는 경우 입력한다.
4	간극측정기 타겟	착탈식 프록시미터 타겟의 I0를 입력한다. 착탈식 기타 장비가 있는 경우 대체 사용가능하다.
5	비틂전단시험 설정	비틂전단시험을 위한 장비의 변수를 입력한다.
6	Edit/Add Item	선택된 항목이 있는 경우, 선택된 항목을 수정한다. 선택된 항목이 없는 경우, 새로운 항목을 추가한다.
7	Delete Item	선택된 항목을 삭제한다.
8	OK	수행된 작업을 적용하고 기본창으로 돌아간다.
9	Cancel	수행된 작업를 취소하고 기본창으로 돌아간다.

6. 공진주시험 결과보고 양식

대형 공진주시험에 대한 결과보고는 스프레드시트에 작성하며, 실험 결과 입력 시 보고에 필수적인 파라미터와 그래프를 자동으로 도시하게 설정되어 있다. 각각의 입력 항목은 다음과 같다.

1. 기본정보 : 시험 수행일, 시험시편 명칭
2. 시료정보 : 높이, 지름, 총 무게, 시료 비중
3. 시험 결과 정리
   A. 각 구속압 단계별로 스프레드시트에 입력하며, 구속압 단계는 각 위치 상부에 정수 형태로 입력한다.
   B. 공진주시험 결과는 ASCII 포맷의 텍스트 형태의 파일로 저장되며, 해당 결과를 복사하여 스프레드시트에 입력한다.
   C. 결과 상에는 순서대로 전단변형율(%), 공진주파수(Hz), 전단탄성계수(MPa), 전단파속도(m/s), half-power 방법에 의한 감쇠비(%), 자유진동감쇠비에 의한 감쇠비(%)로 나타나며, 해당 부분을 복사하여 스프레드시트에 바로 붙여넣을 수 있다.
   D. G/Gmax 값은 스프레드시트에 자동으로 계산된다.
   E. 동일한 시트 우측에는 구속압별 전단탄성계수곡선, 정규화곡선, 두 가지 방법에 의한 감쇠비 특성이 표시되며, 대표적인 자갈질 재료의 곡선과 비교가 가능하다.
   F. 각 구속압별 데이터 우측에는 P 파 속도 측정 및 포아송비 계산용 항목이 있으며, 타격시험 시 파 도달시간을 입력하여 P 파속도와 포아송비를 확인할 수 있다.

Resonant Column Test Report	
Date :	2012/03/14
Test ID :	Gravel - YJ Dam #04-2

Height :	400	mm
Diameter :	200	mm
Weight :	25,000	g
G_S :	2.79	

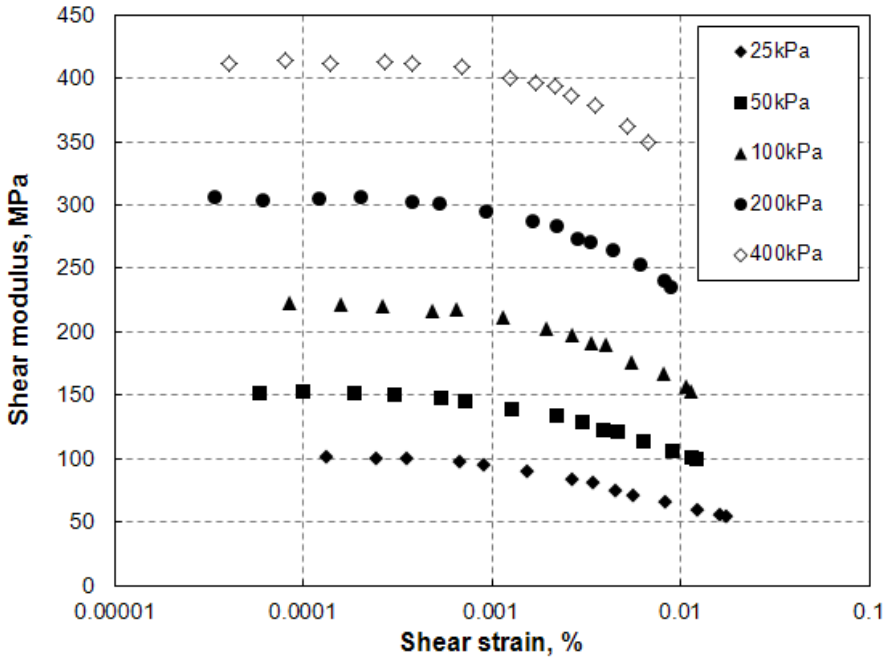
Confine (kPa)	25	50	100	200	400	800	1600
G_{max} (MPa)	100.7	151.4	222.3	305.2	414.1	0.0	0.0
D_{min} (%) HPB	1.630	1.209	0.613	0.890	1.059	0.000	0.000
D_{min} (%) FVD	1.119	0.826	0.660	0.579	0.706	0.000	0.000

Confining Pressure (σ_m, kPa)	25	25kPa	1.6301	1.1186		
Strain (γ, %)	Freq (Hz)	G (MPa)	V_S (m/s)	D_{half} (%)	D_{fvd} (%)	G/G_{max}	P-wave
1.329.E-04	92.4	100.7	224.94	1.71	1.85	1.000	Δt (μs)
2.450.E-04	92.0	99.8	223.97	1.63	1.58	0.991	889
3.601.E-04	92.2	100.2	224.45	2.07	1.12	0.996	
6.762.E-04	90.6	96.8	220.56	2.21	1.46	0.961	V_P (m/s)
9.065.E-04	89.6	94.7	218.12	2.34	1.69	0.940	470.04
1.558.E-03	87.1	89.4	212.04	3.14	1.98	0.889	
2.663.E-03	84.2	83.6	204.98	3.85	2.61	0.830	V_P/V_S
3.476.E-03	82.9	81.0	201.81	4.49	2.92	0.805	2.0896
4.565.E-03	79.6	74.7	193.78	5.03	3.52	0.742	
5.630.E-03	77.6	71.0	188.91	5.36	3.64	0.705	Poisson's ratio
8.425.E-03	74.3	65.1	180.88	6.80	4.05	0.647	0.3515
1.240.E-02	71.1	59.6	173.09	7.96	4.69	0.592	
1.647.E-02	68.4	55.2	166.51	8.82	5.35	0.548	displacement
1.769.E-02	67.7	54.0	164.81	6.27	5.25	0.537	0.195
1.805.E-02	67.6	53.9	164.57	5.92	5.23	0.535	0.269

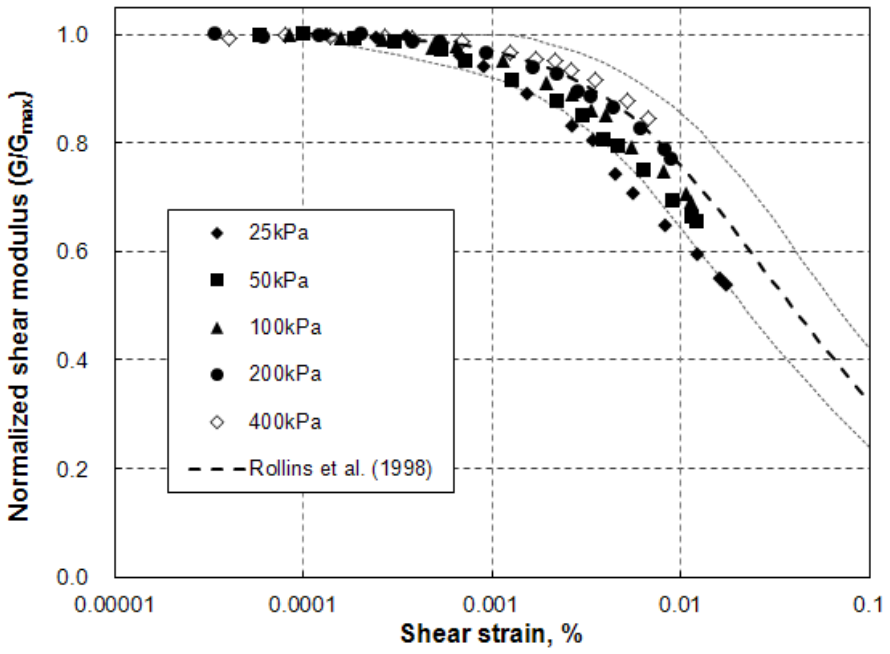
Confining Pressure (σ_m, kPa)	50	50kPa	1.2092	0.8256		
Strain (γ, %)	Freq (Hz)	G (MPa)	V_S (m/s)	D_{half} (%)	D_{fvd} (%)	G/G_{max}	P-wave
6.031.E-05	113.0	150.6	275.09	1.71	NaN	0.995	Δt (μs)
1.018.E-04	113.3	151.4	275.82	1.32	1.30	1.000	883
1.901.E-04	112.8	150.0	274.60	1.21	0.83	0.991	
3.088.E-04	112.4	149.0	273.63	1.25	0.94	0.984	V_P (m/s)
5.511.E-04	111.5	146.6	271.44	1.64	1.16	0.968	473.37
7.430.E-04	110.4	143.7	268.76	1.68	1.29	0.949	
1.302.E-03	108.3	138.3	263.65	2.31	1.49	0.914	V_P/V_S
2.256.E-03	105.9	132.2	257.80	2.98	1.93	0.874	1.7162
3.055.E-03	104.3	128.3	253.91	3.41	2.01	0.847	
3.984.E-03	101.5	121.5	247.09	3.53	2.39	0.803	Poisson's ratio
4.756.E-03	100.8	119.8	245.39	3.61	2.41	0.791	0.2430
6.520.E-03	97.9	113.0	238.33	4.26	3.03	0.747	
9.332.E-03	94.2	104.6	229.32	5.62	3.54	0.691	displacement
1.172.E-02	92.2	100.2	224.45	7.06	4.02	0.662	0.258
1.235.E-02	91.6	98.9	222.99	6.11	4.98	0.654	0.314

Confining Pressure (σ_m, kPa)	100	100kPa	0.6125	0.6599		
Strain (γ, %)	Freq (Hz)	G (MPa)	V_S (m/s)	D_{half} (%)	D_{fvd} (%)	G/G_{max}	P-wave
8.479.E-05	137.3	222.3	334.24	0.61	0.86	1.000	Δt (μs)
1.600.E-04	136.9	221.0	333.27	0.82	0.66	0.994	830
2.668.E-04	136.5	219.7	332.30	0.90	0.91	0.988	
4.896.E-04	135.5	216.5	329.86	0.91	0.85	0.974	V_P (m/s)
6.525.E-04	135.7	217.1	330.35	1.63	0.86	0.977	505.05
1.154.E-03	133.9	211.4	325.97	1.68	1.06	0.951	
1.984.E-03	131.0	202.3	318.91	2.16	1.40	0.910	V_P/V_S
2.713.E-03	129.4	197.4	315.01	2.47	1.43	0.888	1.5110
3.401.E-03	127.2	190.8	309.66	2.76	1.77	0.858	
4.032.E-03	126.7	189.3	308.44	2.58	1.73	0.852	Poisson's ratio
5.567.E-03	122.2	176.1	297.48	3.61	2.20	0.792	0.1104
8.256.E-03	118.8	166.4	289.21	4.24	2.53	0.749	
1.082.E-02	115.4	157.0	280.93	4.57	2.83	0.706	displacement
1.155.E-02	114.1	153.5	277.77	3.94	3.58	0.691	0.208
1.172.E-02	114.1	153.5	277.77	3.48	3.75	0.691	0.182

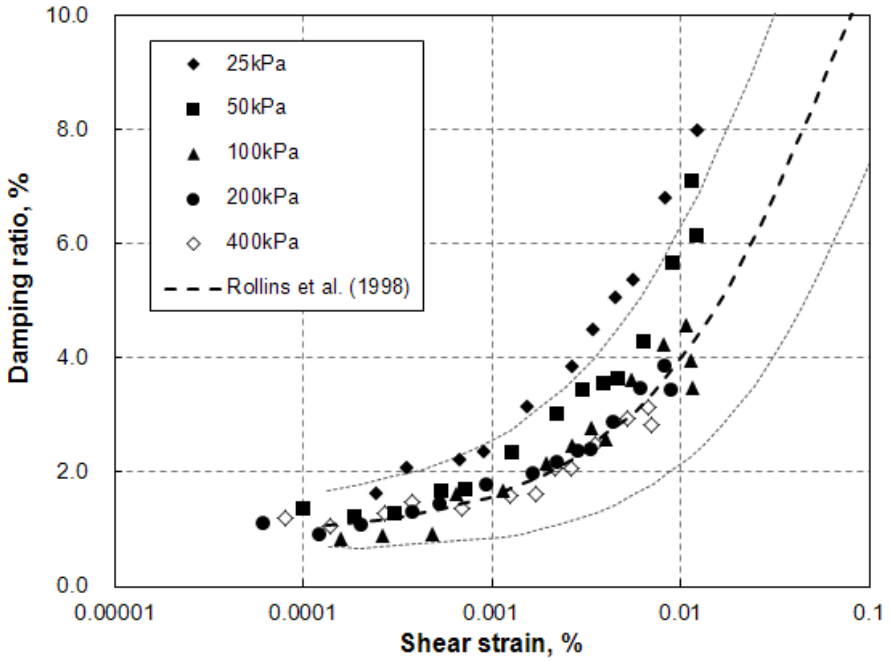
시험결과 입력용 스프레드시트



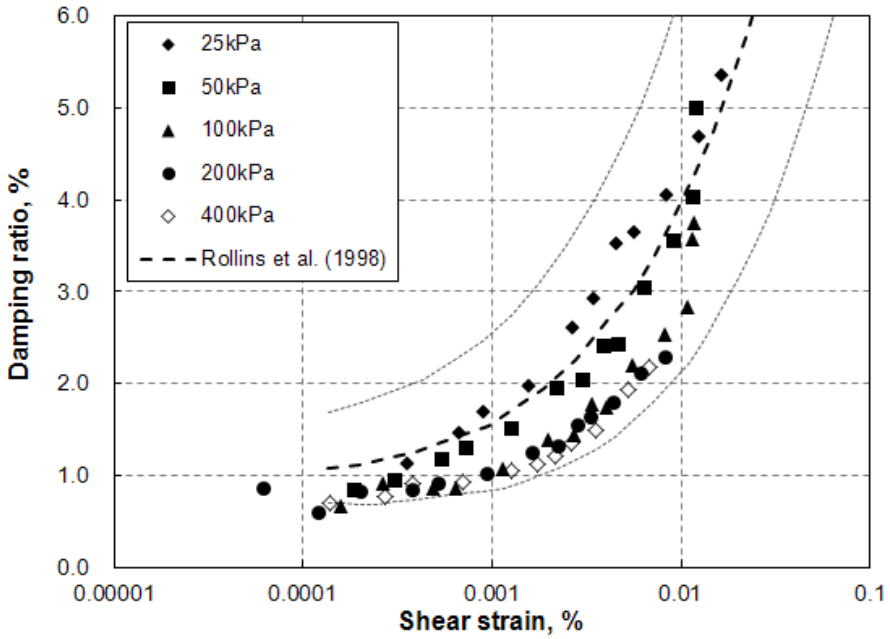
구속압별 전단탄성계수 특성



정규화 전단탄성계수 감소곡선 (Rollins 곡선과 비교)



Half power 방법에 의한 감쇠비 특성 (Rollins 곡선과 비교)



자유진동감소법에 의한 감쇠비 특성 (Rollins 곡선과 비교)

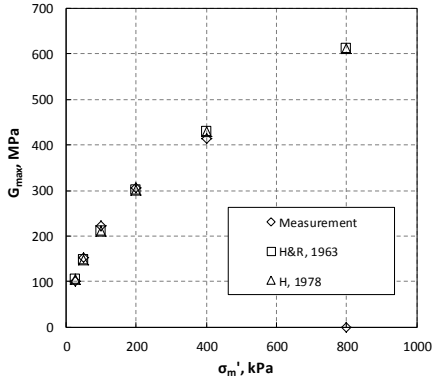
Height :	400	mm
Diameter :	200	mm
Weight :	25,000	g
GS :	2.79	
ρ :	1.99	t/m³
e :	0.400	
	19.56	
Friction, φ	40	deg

P_a(kPa) 101.3

σ_m'(kPa)	G_{max}(MPa)	e	F(e)-H&R	$G_{max}/F(e)$	$G_{max}/F(e)/P_a$	σ_m'/P_a	$\log(G_{max}/F(e)/P_a)$	$\log(\sigma_m'/P_a)$	n	$A=S_m$
25	100.66	0.400	2.23942	44.94909	443.72250	0.24679	2.64711	-0.60767		
50	151.35	0.400	2.23942	67.58439	667.17068	0.49358	2.82424	-0.30664	0.5093	940.56
100	222.26	0.400	2.23942	99.24880	979.75128	0.98717	2.99112	-0.00561		
200	305.23	0.400	2.23942	136.29854	1345.49394	1.97433	3.12888	0.29542		2.97339
400	414.05	0.400	2.23942	184.89142	1825.18680	3.94867	3.26131	0.59645		
800	0	0.400	2.23942	0.00000	0.00000	7.89733	#NUM!	0.89748		
800	0	0.400	2.23942	0.00000	0.00000	7.89733	#NUM!	0.89748		
0	0	0.400	2.23942	0.00000	0.00000	0.00000	#NUM!	#NUM!		

σ_m'(kPa)	G_{max}(MPa)	e	F(e)-H	$G_{max}/F(e)$	$G_{max}/F(e)/P_a$	σ_m'/P_a	$\log(G_{max}/F(e)/P_a)$	$\log(\sigma_m'/P_a)$	n	$A=S_m$
25	100.66	0.400	2.42849	41.44958	409.17654	0.24679	2.61191	-0.60767		
50	151.35	0.400	2.42849	62.32262	615.22818	0.49358	2.78904	-0.30664	0.5093	867.33
100	222.26	0.400	2.42849	91.52180	903.47285	0.98717	2.95592	-0.00561		
200	305.23	0.400	2.42849	125.68703	1240.74066	1.97433	3.09368	0.29542		2.93819
400	414.05	0.400	2.42849	170.49672	1683.08708	3.94867	3.22611	0.59645		
800	0	0.400	2.42849	0.00000	0.00000	7.89733	#NUM!	0.89748		
800	0	0.400	2.42849	0.00000	0.00000	7.89733	#NUM!	0.89748		
0	0	0.400	2.42849	0.00000	0.00000	0.00000	#NUM!	#NUM!		

$F(e)=(2.17-e)^2/(1+e)$; Hardin et al. (H&R) (1963)
$F(e)=1/(0.3+0.7e^2)$; Hardin (H) 1978



Analysis 탭에 나타난 결과 정리 – 구속압영향계수, 강성계수 산출

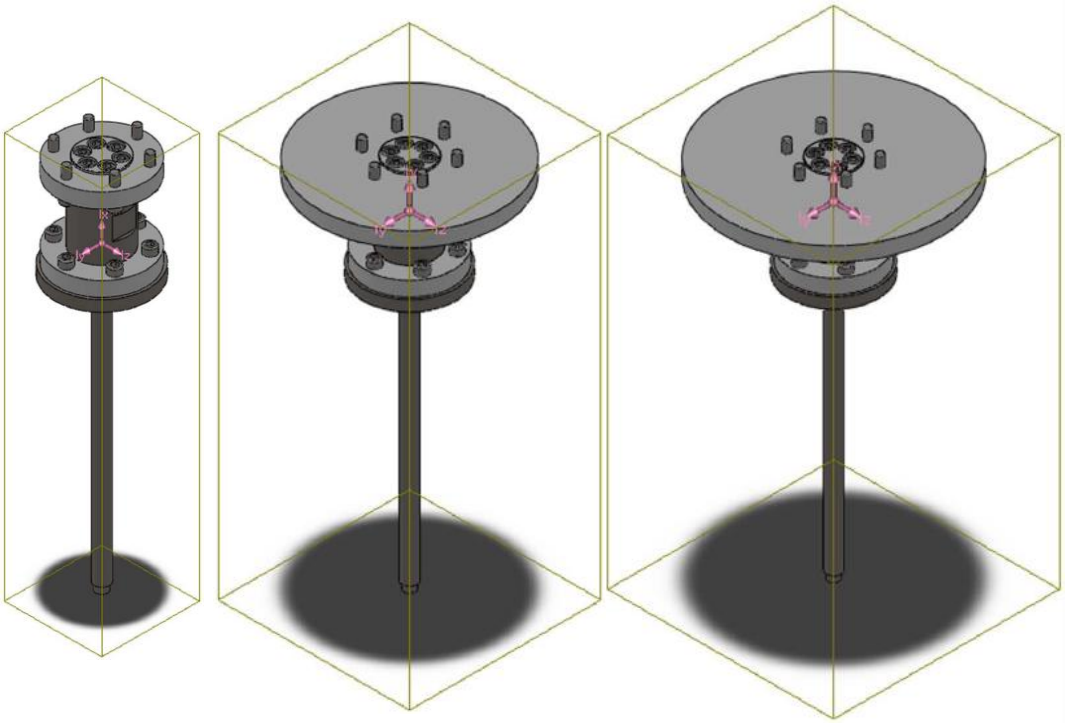
부록 1. 대형 공진주시험시스템 상단 가진부 교정 방법 (질량관성모멘트 측정)

공진주시험을 바탕으로 시료의 전단탄성계수를 산정하는 경우 자유단-고정단 조건인 공진주의 재료 특성은 다음과 같은 지배방정식이 이용된다.

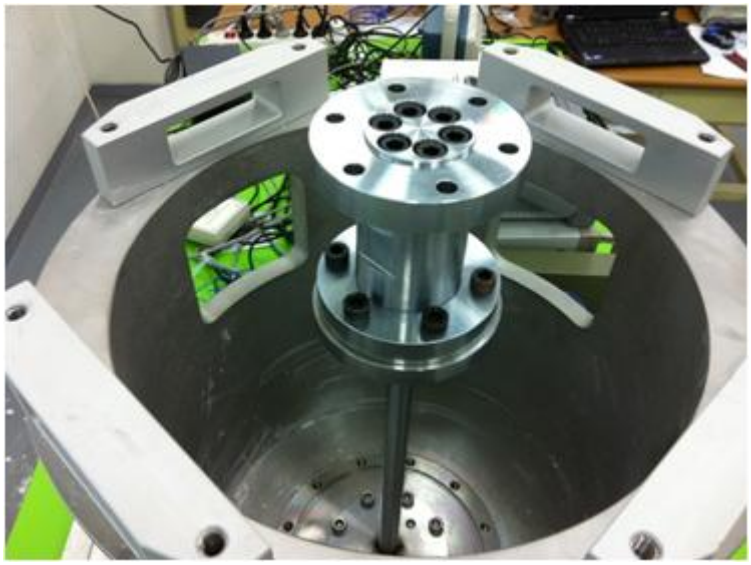
$$\frac{I_0}{I} = \frac{\omega_n l}{V_S} \tan \frac{\omega_n l}{V_S} \qquad \text{[식 1]}$$

그러나 상기 지배방정식을 바탕으로 V_S 또는 G를 획득하기 위해서는 시편 상부에 부착되는 탑캡과 가진판의 질량 관성모멘트 I_0를 정확히 알아야 한다. 이론적으로 가진판의 기하학적 형상에 의하여 I_0를 계산할 수 있으나 실제 가진판의 구성이 매우 복잡하기 때문에 계산을 통하여 정확히 측정하기에는 한계가 따른다. 따라서 기하학적, 물리적 특성이 명확한 검증 시편을 이용하여 공진주파수를 측정함으로써 가진판의 I_0 값을 계산하는 것이 일반적이다.

본 시험시스템에서는 [그림 1]과 같은 알루미늄 합금 재질의 금속 검증시편을 이용하여 가진판의 질량 관성모멘트를 실험적으로 측정할 수 있다. 본 검증시편은 하나의 가는 금속 봉 상부에 원형 금속체를 부착하고, 최상단 가진판 접촉부에 일련의 다른 직경을 갖는 금속 디스크를 변경하여 부착할 수 있도록 구성하였다. 이러한 구성에서 금속 봉 상부의 모든 부품을 강체로 가정함으로써 세 가지 상부판에 대하여 비틂강성을 동일하게 가정할 수 있다. [그림 2]와 같이 금속 검증시편을 공진주시험기에 설치했을 때, 이는 하단고정-상단자유인 막대에 미지의 질량 관성모멘트를 가진 물체가 부착된 단자유도 시스템으로 간주할 수 있다. 이 단자유도 시스템의 비틂에 대한 공진 특성은 [식 2]와 같이 표현할 수 있다.



[그림 1] 공진주시험기의 질량 관성모멘트 측정용 금속 검증시편



[그림 2] 공진주시험기 내 관성모멘트 측정용 금속 검증시편의 설치

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{I}} \qquad \text{[식 2]}$$

여기서 K는 검증시편의 비틂 강성으로 [그림 1]의 세 가지 시편의 경우 금속 봉 상부 질량은 강체로 가정하므로 모든 경우 동일하게 가정할 수 있으며, I는 시편과 가진판의 관성모멘트 합을 나타낸다. 이를 바탕으로 검증시편에 대한 공진주시험 수행 시 획득되는 공진주파수를 바탕으로 [식 3]과 같이 질량 관성모멘트를 계산할 수 있다.

$$I = \frac{k}{\omega_n^2} \qquad \text{[식 3]}$$

이러한 관계를 바탕으로 검증용 금속 봉 상부 질량을 변경함으로써 가진판의 질량 관성모멘트를 획득할 수 있다. I_0를 가진판의 질량관성모멘트, I_1, I_2를 각각 [그림 1]에 나타난 검증시편 1, 2의 질량관성모멘트라 할 때 공진주파수 ω_{n1}, ω_{n2} 는 각각 [식 4]와 [식 5]와 같은 관계로 표현된다.

$$I_0 + I_1 = \frac{k}{\omega_{n1}^2} \qquad \text{[식 4]}$$

$$I_0 + I_2 = \frac{k}{\omega_{n2}^2} \qquad \text{[식 5]}$$

두 경우에 대하여 금속 봉 시편의 비틂 강성 k는 동일하므로, 위의 두 식을 연립하면 [6]과 같이 비틂 강성을 획득할 수 있으며, 이를 위 식에 대입함으로써 최종적으로 I_0 값을 획득할 수 있다.

$$k = \frac{I_2 \quad I_1}{\frac{1}{\omega_{n2}^2} \quad \frac{1}{\omega_{n1}^2}} \qquad \text{[식 6]}$$

위 방법에 의하여 획득한 가진시스템의 I0 값은 표 2에 나타내었다..

[표 1] 금속 검증시편의 질량 관성모멘트 및 비틂 공진 주파수

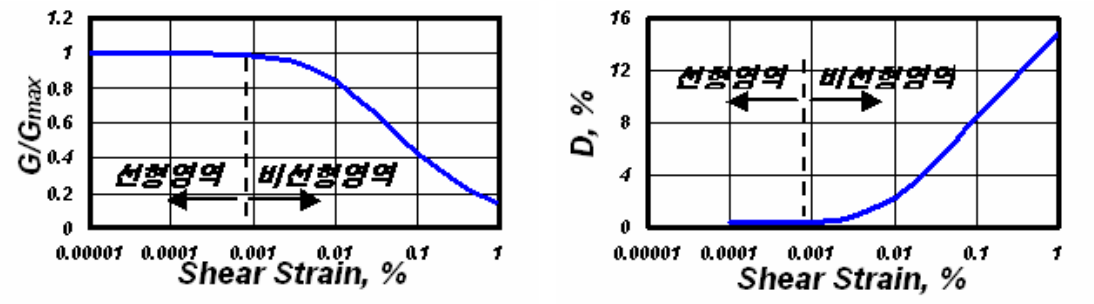
시험 시편	질량 관성모멘트 ($kg.mm^2$)	공진주파수 (Hz)
#1	10,683.74	37.7
#2	65,303.82	27.7
#3	132,316.39	22.1

[표 2] 가진판의 질량 관성모멘트

비교 시편	비틂 강성 (N.m)	가진판 질량 관성모멘트 ($kg.mm^2$)	평균 I_0 ($kg.mm^2$)
#1 - #2	3,595.6	53,398	**52,817**
#2 - #3	3,555.0	52,057	
#3 - #1	3,573.2	52,997	

부록 2. 공진주/비틂전단시험의 개요

공진주/비틂전단(Resonant Column & Torsional Shear, RC/TS)시험은 저변형률(0.0001% < γ < 0.001 %) 및 중간변형률 (0.001%<γ<0.5%)에서 전단탄성계수(G) 및 감쇠비(D)와 같은 지반의 비선형 동적변형특성을 가장 신뢰성 있게 평가할 수 있는 시험 기법으로 현재까지 널리 사용되고 있다.



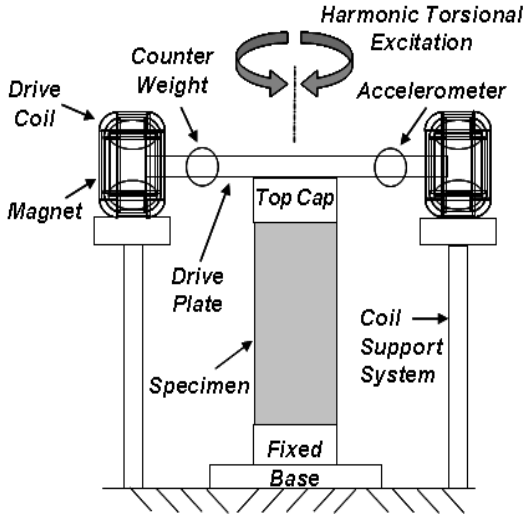
[그림 1] 지반의 비선형 동적변형특성

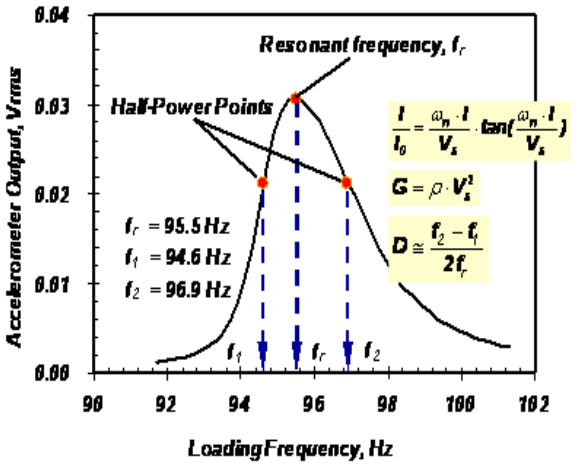
Stokeo type RC/TS 시험 시스템은 동일한 시편에서 동적시험인 공진주시험과 반복시험인 비틂전단시험을 수행하므로 두 시험 결과를 효과적으로 비교할 수 있는 장점과 더불어, 코일-자석 시스템을 이용하여 시료에 비틂력을 가함으로서 유압식이나 기계식으로 작동하는 대부분의 반복시험기와는 달리 시험 시스템의 순응도 문제없이 저변형률 영역에서 비틂전단시험을 수행할 수 있다. 또한 비틂전단시험에서 하중반복횟수와 하중주파수(0.01Hz ~ 10Hz)를 자유롭게 조절이 가능하여 변형특성에 대한 하중반복회수, 하중주파수의 영향을 효과적으로 평가할 수 있고, 컴퓨터와 계측기의 상호호환을 이루어서 실험수행, 결과획득 및 분석까지 시험 방식의 효율성을 높였다.

1. 공진주시험

공진주 시험 시스템의 개략적인 형상은 [그림 1.1]과 같다. 공진주 시험은 시편의 바닥을 고정시키고 정현파 비틂력을 주파수를 변화시켜가며 시료의 윗단부에 작용시키고 주파수에 따른 시료의 변위를 가속도계(Accelerometer)를 통해 측정하여 [그림 1.2]와 같은 주

파수 응답곡선을 획득하게 된다. 원통형 시료가 공진으로 인해 발생하는 1차모드를 탄성파 전달 이론을 바탕으로 하여 시료의 전단변형률에 따른 전단파속도, 전단탄성계수 및 감쇠비와 같은 동적물성치를 결정하게 된다.





[그림 1.1] 공진주 시험 시스템의 개략도 [그림 1.2] 전형적인 주파수 응답곡선

공진주 시험에서 전단탄성계수는 탄성파 전달 이론으로부터 유도된 1차원 파동방정식에 근거하여 계산되며, 공진주파수의 지배방정식은 [식 1.1]과 같다(Richart et al., 1970).

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega_n l}{V_S} \cdot \tan\left(\frac{\omega_n l}{V_S}\right) \quad \text{[식 1.1]}$$

여기서, I = 시료의 질량 관성모멘트, I_0 = 가진시스템의 질량 관성모멘트, l = 시료의 길이, V_S = 시료의 전단파 속도, ω_n = 고유 주파수(natural frequency)이다.

실제 시험에서는 고유주파수(ω_n) 대신 공진주파수(ω_r)가 측정되므로 본 연구에서는 지배방정식을 통한 전단파 속도의 계산에 고유주파수 대신 공진주파수를 사용하였다. 시스템 감쇠비(D_{eq})가 없다고 가정할 때, 고유주파수와 공진주파수의 관계는 다음과 같다.

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2D^2} \quad \text{[식 1.2]}$$

일반적으로 재료 감쇠비는 20% 미만이므로, 고유주파수와 공진주파수는 5%미만의 차이를 갖게 된다. 따라서 고유주파수 대신 공진주파수를 사용하여도 큰 오차는 주지 않음을 알 수 있다.

[식 1.1]을 통해 계산된 전단파 속도로부터 [식 1.3]을 이용하여 전단탄성계수를 구할 수 있다.

$$G = \rho V_s^2 \qquad \text{[식 1.3]}$$

여기서 ρ는 시료의 단위중량을 나타낸다.

전단변형률은 시료내부에서 중심축으로부터의 거리에 따라 변하게 되기 때문에, 등가반경을 이용하여 시료의 전단변형률을 대표하는 대표 전단 변형률을 이용한다. 이는 ASTM의 규정에 의거하여 시료 반경의 0.8배를 사용할 수 있다. (ASTM D4015-92).

이와 같은 대표 전단변형률은 가속도계의 출력으로부터 결정되는 시편의 변위와 높이, 시편중심으로부터 가속도계가 설치된 곳까지의 거리에 관계되고, [식 1.4]를 이용하여 계산된다.

$$\gamma = r_{eq} \frac{A_c}{4\pi^2} \frac{T_r^2}{CF} \frac{1}{D_{ac}} \frac{1}{l} \qquad \text{[식 1.4]}$$

여기서, r_{eq} = 등가 반경, T_r = 공진 주기, A_C = 가속도계의 출력 전압, CF = 가속도–가속도계 출력전압 상관계수(calibration factor), D_{ac} = 시편중심으로부터 가속도계가 설치된 곳까지의 거리, l = 시편의 높이를 의미한다.

공진주 시험에서 감쇠비는 Half-power bandwidth법 또는 자유진동 감쇠법의 두가지 방법을 통해 계산될 수 있다. Half-power bandwidth법은 [그림 1.2]에 나타낸 바와 같이 공진주파수 근처에서의 주파수 응답곡선의 폭을 통해 감쇠비를 결정하는 방법이다. [식 1.5]를 이용하여 주파수 응답곡선에서의 로그편차를 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{\pi}{2}\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_r^2}\sqrt{\frac{A^2}{A_{\max}^2 - A^2}}\frac{\sqrt{1-2D^2}}{1-D^2} \quad \text{[식 1.5]}$$

여기서, f_1 = 가속도계 출력값이 A인 공진 전의 주파수, f_2 = 가속도계 출력값이 A인 공진 후의 주파수, f_r = 공진주파수를 의미한다.

A가 $0.707A_{max}$ (그림 1.2의 half-power point)와 같고 감쇠비가 충분히 작다면 [식 1.5]는 동역학 이론에 의해 [식 1.6]과 같이 간략히 표현될 수 있다(Richart et al., 1970).

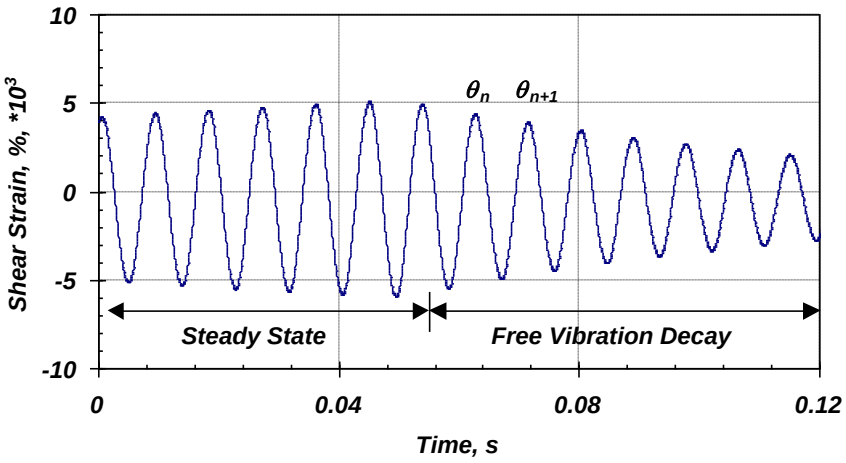
$$D = \frac{f_2 - f_1}{2f_r} \quad \text{[식 1.6]}$$

자유진동 감쇠법은 시료에 공진 주파수로 가진력을 재하하다 차단하여, [그림 1.3]과 같은 자유진동 감쇠곡선을 획득하여, 연속되는 두 개의 진폭의 자연로그비를 이용하여 감쇠비를 구하는 방법이다(식 2.7, 식 2.8 ; Richart et al., 1970).

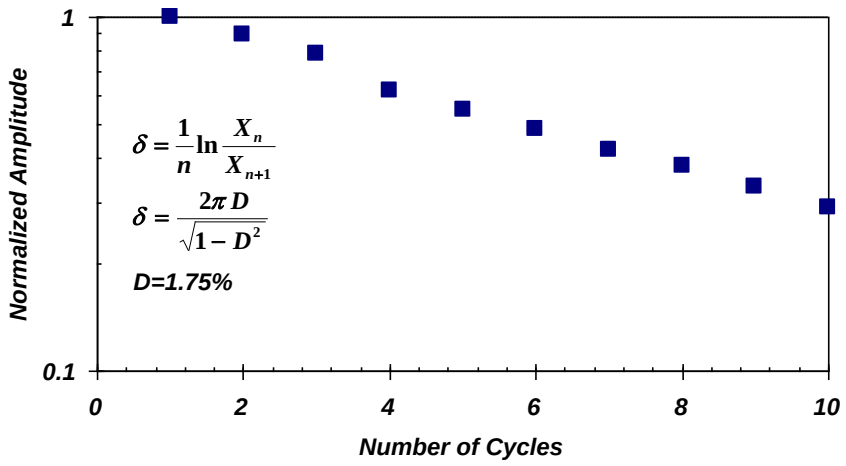
$$\delta = \ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right) = \frac{2\pi D}{\sqrt{1 - D^2}} \quad \text{[식 1.7]}$$

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad \text{[식 1.8]}$$

여기서, θ_1, θ_2 = 두개의 잇따른 변형률의 진폭, D = 감쇠비를 의미한다.



(a) 자유진동감쇠곡선

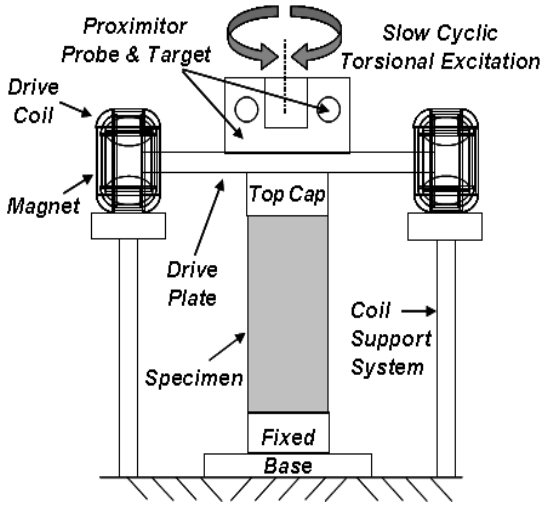


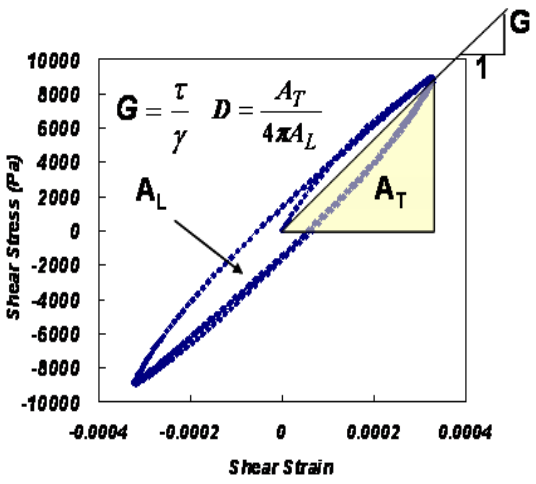
(b) 자유진동감쇠곡선의 해석

[그림 1.3] 자유진동감쇠곡선을 이용한 감쇠비 결정법

2. 비틂전단시험

비틂전단 시험은 공진주 시험과 동일한 시험 시스템을 사용하여, 다른 시험방법에 의해 전단탄성계수 및 감쇠비를 결정하게 된다. 비틂전단 시험의 개략적인 현상은 그림 2.5와 같다. 10Hz 이하의 고정된 주파수의 반복 비틂력을 시료의 윗단부에 재하하며 간격측정기(Proximitor)를 이용하여 시료의 비틂각을 측정하고, 코일에 가해지는 전압으로부터 비틂력 환산계수를 적용하여 비틂력을 결정하여 [그림 2.2]와 같은 응력-변형률 이력곡선을 구성한다. 가진 전압의 크기를 바꾸어 가며 각 전단변형률에서의 응력-변형률 이력곡선의 기울기로부터 전단탄성계수를 결정하게 되고, 또한 응력-변형률 이력곡선의 면적으로부터 감쇠비를 결정하게 된다. 그리고 동일한 가진 전압을 사용하며 하중주파수를 변화시키며 비틂전단 시험을 수행하여 하중주파수에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 변화를 검토할 수 있다.





[그림 2.1] 비틂전단 시험 시스템의 개략도 [그림 2.2] 전형적인 응력-변형률 이력곡선

비틂전단 시험의 전단응력과 전단변형률은 탄성이론을 바탕으로 정의된다. 전단응력이 반지름을 따라 선형으로 증가한다고 가정하면, 원통형 시료가 받는 순수 비틂력과 전단응력과의 관계는 식 2.1과 같다.

$$T = \int_{r_i}^{r_o} \tau_r (2\pi r) r dr = \frac{\tau_m}{r_0} \frac{\pi}{2} (r_0^4 - r_i^4) = \frac{\tau_m J_p}{r_0} \quad \text{[식 2.1]}$$

여기서, r은 시료의 중심으로부터의 거리 r에서의 전단응력, τ_m은 시료 표면의 최대 전단응력, J_P는 관성모멘트, r_0와 r_i는 각각 시료의 외경과 내경을 나타낸다.

전단응력은 반지름 방향으로 선형적으로 변화하므로 대표 비틂전단응력(τ_{eq})은 [식 2.2]와 같이 정의된다.

$$\tau_{eq} = r_{eq}\frac{T}{J_p} \quad \text{[식 2.2]}$$

공진주 시험에서와 같은 등가반경(r_{eq})을 적용하고, 비틂력을 가진시스템에 가해진 입력전압(V_T, V)과 비틂력 환산계수(K_T, Nm/V)의 곱으로 나타내면 시료의 전단응력은 [식 2.3]과 같이 표시된다.

$$\tau_{eq} = \frac{r_{eq} \cdot K_T \cdot V_T}{J_p} \quad \text{[식 2.3]}$$

전단변형률은 간격측정기를 이용한 변위 측정시스템을 통하여 측정되는 비틂각으로부터 환산된다. 전단변형률은 간격측정기의 출력전압(V_P, V), 비틂각 환산계수(K_P, rad/V)로부터 비틂각을 환산하여 [식 2.4]와 같이 계산 된다.

$$\gamma = \frac{r_{eq} \cdot K_p \cdot V_p}{l} \quad \text{[식 2.4]}$$

이와 같이 응력-변형률 이력곡선을 획득하면, 전단탄성계수는 [그림 2.2]와 같이 이력곡선의 양 끝점을 연결한 선의 기울기로부터 계산된다(식 2.5; Ishihara, 1996).

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{[식 2.5]}$$

비틂전단 시험에서의 감쇠비는 한 응력이력 단계에서 흡수된 에너지와 같은 단계에서 시료가 받는 최대 변형률 에너지로부터 결정할 수 있다. 그림 3.6에 나타낸 바와 같이 흡수된 에너지는 응력-변형 이력곡선의 면적(A_L)과 같으며 최대 변형률 에너지는 0부터 최대 변형률 사이에서 응력-변형 이력 곡선의 양 끝점을 연결한 직선 아래 부분의 면적(A_T)과 같다. 이와 같은 관계를 적용하여 감쇠비를 [식 2.6]과 같이 획득할 수 있다.

$$D \cong \frac{A_L}{4\pi \cdot A_T} \quad \text{[식 2.6]}$$

대형 지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정을 위한

UBF 기법의 현장시험 매뉴얼 및 소프트웨어 Beamforming 1.0의 사용설명서

중앙대학교

2012.10.

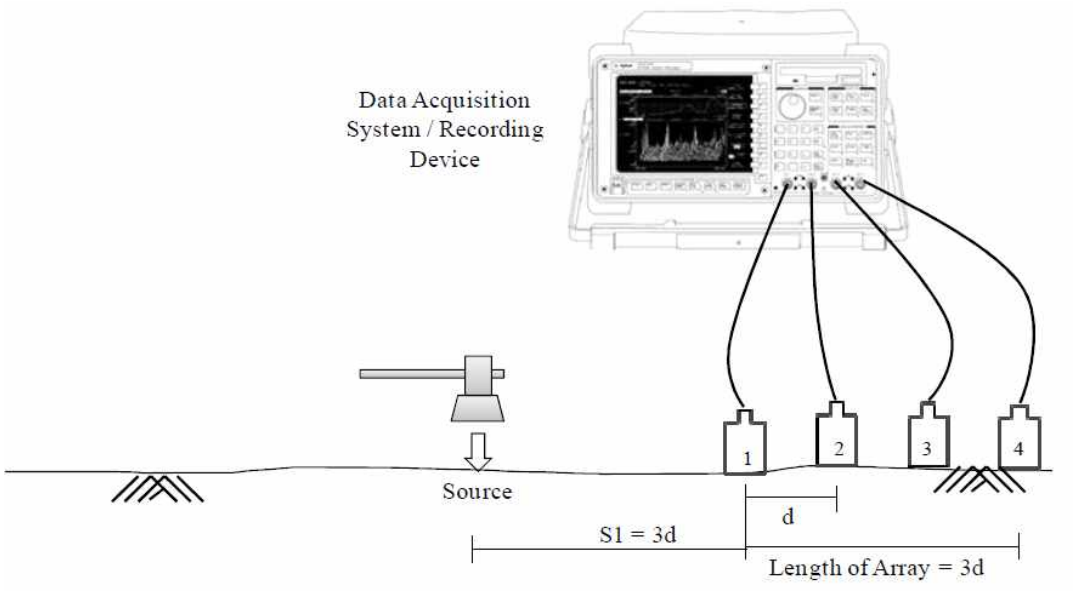
UBF 기법의 현장시험 매뉴얼

UBF (Unbiased-Short-Array Beamforming) 기법은 대입경 조립골재 지반구조물에서의 전단파속도 주상도를 평가하기 위하여 개발된 표면파 기법이다. 본 장에서는 현장시험 실무자들로 하여금 UBF 시험을 신뢰성 있게 수행할 수 있도록 시험절차와 시험에 요구되는 하드웨어 사용법 등을 정리하였다.

가. UBF 시험에 필요한 하드웨어

UBF 시험의 기본적으로 [그림 A.1.1]에 도시한 바와 같은 하드웨어로 수행되는데, 시험에 요구되는 하드웨어는 크게 다음과 같은 세 가지 항목으로 정리된다.

- 동적신호 측정 및 저장장치
- 지반진동 감진기
- 표면파 발생을 위한 발진원



[그림 A.1.1] UBF 시험의 기본구성과 시험에 요구되는 하드웨어

(1) 동적신호 측정 및 저장장치

동적신호 측정 및 저장장치는 UBF 시험에서 가장 중요한 하드웨어로서 다음과 같은 기본적인 요구조건을 만족하여야 효과적으로 그리고 신뢰성 있게 UBF 시험을 할 수 있다.

- 최소 4개의 입력채널
- 실시간 주파수 영역 해석:
  FFT 해석을 실시간으로 수행하여 현장에서 시험수행과 동시에 자료의 품질을 판달할 수 있어야 한다.
- 변동적으로 설정가능한 주파수대역, 샘플링 주파수 또는 샘플링 시간:
  FFT 발진원 위치에 따라 변동적으로 설정이 가능하여야 한다. 따라서 일반적인 탄성파 탐사에서 사용하는 하드웨어의 경우에서와 같이 0.02초와 같은 고정 샘플링 시간을 사용하는 하드웨어는 적합하지 않다. 참고로, UBF 시험에서 요구되는 설정 범위는 다음과 같으며, 이러한 변동 범위의 값으로 설정가능한 하드웨어를 사용하여야 한다.
  - 주파수대역: 50~800 Hz,
  - 샘플링 주파수: 100~1,600 Hz 또는
  - 샘플링시간: 0.000625~0.01 Sec.
- 앤티앨리어싱(antialiasing) 필터:
  현장시험이 수행되는 지역은 여러 가지 형태의 전자파 신호가 존재할 수 있다. 감진기에서 발생되는 주파수의 크기보다 훨씬 큰 신호의 가능성이 있기 때문에, 감진기 신호이외의 전기신호들은 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 전에 아날로그 필터로 걸러내야 한다. 이러한 기능은 측정 신호의 품질을 현저하게 향상시키는 효과를 만들어 내기 때문에, 앤티앨리어싱 필터는 절대적으로 요구되는 중요한 기능이다.
- 디지털변환시의 해상도:
  감진기로 측정한 아날로그 신호는 디지털 신호로 변환되어야 하는데, 신뢰성있는 UBF 시험을 위해서는 최소한 16비트 해상도가 필요하다.
- 동적범위 (Dynamic Range):
  신호대 잡음비를 결정하는 중요한 스펙으로서 최소한 110dB 이상의 것을 선호한다.

이와 같은 사양을 모두 만족하는 하드웨어로서 다음과 같은 두 가지 제품을 추천할 수 있다.

- Agilent 사의 35670A :

2,500만원 이상의 고가제품으로 매우 성능이 뛰어나며 모든 열악한 현장에서 훌륭하게 그 기능을 수행할 수 있는 전천후 시스템이다. 채널은 모두 4개를 가지고 있으며, AC 또는 DC 전원을 사용할 수 있으며, 자료 저장은 플로피 디스크나 HPIB 프로토콜을 사용하여 노트북 컴퓨터로 전송받을 수 있다.

- 본 연구에서 개발한 DS-USB-6289 :
  이 제품은 National Instruments 사의 NI-USB6289를 기반으로 한 것으로 BNC 터미널, FS/GS 등을 편리하게 사용할 수 있도록 외장장치를 한 것으로서 모두 16개의 입력채널, 16비트 해상도, 5개의 입력전압 범위 등의 사양을 가지고 있다. 이 제품은 Agilent 사의 제품과는 달리 노트북 컴퓨터와 USB로 연결하여 본 연구에서 제작한 소프트웨어 Beamforming이나 WinSASW 등의 별도의 소프트웨어로 구동하고 자료를 저장하여야 한다. 부피나 무게가 매우 가벼워서 휴대성이 뛰어나다.



[그림 A.1.2] UBF 시험의 동적신호 측정과 저장을 위한 동적신호분석기

(2) 지반진동을 측정하는 감진기

UBF 시험에서는 사람이 느낄 수 없을 정도의 미세한 지반진동을 발생시키고 측정하기 때문에 매우 높은 감도를 가지고 있는 감진기를 사용하여야 한다. UBF 시험에 사용하는 감진기는 지오폰과 가속도계를 사용할 수 있는데, UBF 시험에 요구되는 구체적인 사양은 다음과 같다.

- 지오폰:
  - 공진주파수: 4.5, 2.0, 또는 1.0 Hz
  - 감도: 0.32 V/cm/sec 이상
- 가속도계:
  - 감도: 0.1 V/cm/sec^2 이상
  - 사용주파수대역: 1~400 Hz

이와 같은 사양을 모두 만족하는 하드웨어로서 다음과 같은 제품을 추천할 수 있다.

종류	지오폰 1 Hz	지오폰 2 Hz	MEMS	가속도계 B
예민도	3.82 V/cm/sec	0.32 V/cm/sec	0.1V/m/sec^2	1.02V/m/sec^2
고유 (사용) 주파수	고유주파수 1.0 Hz ± 10%	고유주파수 4.5 ± .75 Hz	사용주파수 대역: 0.5 to 400 Hz	사용주파수 대역: 0.1~200 Hz
크기와 무게	높이: 16.4 cm 직경: 7.62 cm 무게: 1963 g	높이: 3.35 cm 직경: 3.18 cm 무게: 111 g	-	높이: 7.11 cm 직경: 5.72 cm 무게: 635 g
사용 환경	온도:-40°~100° C 충격: 50g	-	-	온도:-18~65 °C 충격: 40g
외형				
가격	약 1,200,000원	약 75,000원	약 300,000원	약1,000,000원
비고	GeoSpace 사	GeoSpace 사	동산 I&E	PCB 사

(3) 표면파를 발생시키는 발진원

UBF 시험에서는 일반적인 표면파 시험과 같이 표면파를 발생시키는 발진원이 필요하다. 측정하고자 하는 표면파 파장의 크기에 따라 달라지는데, 대입경 조립골재 지반구조물에서 사용한 발진원은 그림 A.1.3과 같다. 해머의 무게가 클수록 더 큰 표면파 에너지를 발생시킬 수 있으며 100-kg 중추낙하 장치가 가장 큰 에너지를 발생시키는 것으로 암반의 물성까지도 평가가능하다. 그리고 본 연구에서는 시도가 불가능했지만 더 효과적인 큰 발진원은 불도저의 운행중 진동이다. 대입경 조립골재 지반구조물의 대표적 유형인 사력댐의 경우 불도저의 진입을 금지하였기에 본 연구에서는 발진원의 대상에서 제외하였다.



[그림 A.1.3] UBF 시험에 사용된 발진원의 종류

나. UBF 시험의 현장시험 절차

[그림 A.1.1]에 도시한 바와 같은 UBF 시험은 기본적으로 CapSASW 시험과 동일하며, 다음과 같은 기본적인 절차를 따라 진행된다.

1. 시험측선의 설치
2. 감진기의 설치
3. 동적신호분석기의 매개변수 설정
4. 발진원에 의한 표면파 발생과 측정신호의 품질확인 및 저장
5. 필요에 따라 단계2～단계4의 반복

UBF 시험의 절차에 대한 구체적인 설명을 제시하면, 다음과 같다.

(1) 시험측선의 설치

UBF 시험의 가장 첫 번째 단계인 시험측선의 설치는 직선이 되도록 하여야 하며, 다음과 같은 기준을 참고하여 진행한다.

- 측정심도에 따라 감진기간 간격을 결정:
  - 측정심도가 약 30 m 이하: 감진기간 간격=1m
  - 측정심도가 약 30～50 m 일 때: 감진기간 간격=2m
- 총 측선길이의 계산: 감진기간 간격 × 3.
  - 측정심도가 약 30 m 이하: 총측선길이=3m
  - 측정심도가 약 30～50 m 일 때: 총측선길이=6m
- 발진원 위치: 첫 번째 감진기에서부터 이격거리.
  - 측정심도가 약 30 m 이하: 3, 6, 12, 28 m
  - 측정심도가 약 30～50 m 일 때: 6, 12, 24, 48 m

(2) 감진기의 설치

본 연구에서 제안한 UBF 시험은 기본적으로 4 개의 감진기를 사용하는 것으로 정립되었기 때문에, 단계 (1)에서 설정한 측선에서 등간격으로 감진기를 설치한다. 구체적으로 감진기 위치는 다음과 같다.

- 시험측선에 감진기를 등간격으로 매설:
  - 측정심도가 약 30 m 이하: 감진기 위치=0, 1, 2, 3 m
  - 측정심도가 약 30～50 m 일 때: 감진기 위치=0, 3, 6, 9 m
- 감진기 매설 방법:
  - 감진기는 지반과 완전한 커플링이 이루어져 지반의 진동을 제대로 측정할 수 있기 때문에, 감진기 하부에 장착되어지는 스파이크를

이용하기 보다는 감진기를 지반 속에 약 1/3 정도 매설하여 완전히 고정되도록 하여야 한다.

- 또한 감진기는 수직방향의 지반진동을 측정하기 때문에 가능한한 수직을 유지하도록 하여야 한다.
- 감진기의 설치가 제대로 되었는지를 확인하기 위해서는 두 손가락으로 감진기를 살짝 잡은 후에 흔들어 보았을 때 움직임이 없도록 하여야 한다.

(3) 동적신호분석기의 매개변수 설정

UBF 시험시 지반진동을 합리적으로 측정하기 위해서는 다음과 같은 동적신호분석기의 매개변수 설정을 신중하게 진행하여야 한다.

- 입력채널의 측정범위 (볼트): 최대 신호크기의 약 2~3 배 정도.
  - 연약한 토사지반의 경우: 1 Volt
  - 일반적인 토사지반의 경우: 5 Volt
  - 단단한 토사지반의 경우: 10 Volt
  - 실제 측정한 신호를 보고 경우에 맞게 별도로 조정하여야 한다.
  - 발진원 거리가 멀어질수록 입력신호 범위도 그에 따라 반감하도록 한다.
- 입력채널의 주파수대역:
  - 표층이 단단한 토사의 경우는 400 Hz
  - 표층이 일반적인 토사의 경우는 200 Hz
  - 발진원 거리가 멀어질수록 주파수대역도 그에 따라 반감하도록 한다.

(4) 발진원에 의한 표면파 발생과 측정신호의 품질확인 및 저장

- 발진원에 의한 표면파 발생:
  - 해머 타격으로 표면파를 발생시키지만, 측정 시간대역내에서 가급적이면 중복타격이 되지 않도록 한다.
  - 해머 타격은 가급적이면 단호하게 가격하도록 한다.
- 측정신호의 품질확인 및 저장
  - 측정신호의 품질을 해머타격후 바로 확인하여 재타격 여부를 결정하여야 한다.
  - 측정신호의 품질이 양질인지를 판단하기 위해서는 측정신호의 주파수 영역 해석을 실시간으로 실시하여 전달함수의 위상각 스펙트럼을 보아야 한다. 깨끗하고 분명한 톱니바퀴 모양이 3~5 정도 반복되는 것이 가장 이상적이라고 할 수 있다.

- 또한 측정신호의 품질을 향상하기 위해서는 앙상블 평균을 수행할 필요가 있는데, 3~5회 정도 평균을 수행한다.

(5) 필요에 따라 단계2~단계4의 반복

- 측정심도에 따라 발진원을 이격해 가면서 단계2~단계4를 반복하여 수행한다. 즉, 측정심도가 30m 이하일 경우, 발진원은 모두 4 개소, 즉 첫 번째 감진기에서 3, 6, 12, 24 m 지점에서 타격을 하여야 하며, 그 때마다의 신호는 개별적으로 저장하여야 한다.

라. UBF 기법의 현장시험 예제

본 절에서는 현장 실무자들이 UBF 기법을 이용한 원활한 현장실험을 수행할 수 있도록 하기 위하여 경기도 안성시 대덕면 중앙대학교 캠퍼스내의 실험장에서 실시한 실험데이터를 이용하여 예제를 만들었다.

(1) 현장 실험을 위한 장비 셋팅

(가) 감진기의 배열

현장 실험을 수행하기 위하여, 실험을 수행할 측선을 정한다. 측선을 정한 후에는 그림 1, 2와 같이 감진기를 설치한다. 감진기는 총 4개를 이용하며 같은 간격으로 배열한다. 이 예제에서는 감진기의 간격이 1m 간격으로 배열되어 있지만, 실험의 특성에 따라 실무자들은 감진기의 간격을 조정할 수 있다.



그림 1 감진기의 커플링 상태



그림 2 측선을 따라 설치된 4개의 감진기

(나) 자료 습득장치의 셋팅

실험 자료습득 장치는 HP Analyzer 또는 노트북와 네셔널 인스트루먼트 USB 6289를 이용할 수 있다. 본 프로젝트에서는 HP Analyzer를 사용하지 않고, beamforming 프로그램을 사용하여 실험을 수행하기 위함이므로, 노트북과 네셔널 인스트루먼트 USB 6289를 자료 습득장치로 사용하였다.

BNC 케이블을 이용하여, 네 개의 감진기는 네셔널 인스트루먼트 USB 6289에 채널1에서 4번까지 연결되었다. 노트북과 네셔널 인스트루먼트 USB 6289의 연결은 USB포트를 이용하여 연결하여, 노트북에는 반드시 measurement & automation 소프트웨어가

설치되어 있어야 노트북과 네셔널 인스트루먼트 USB 6289의 연결이 가능하다. 또한 실험을 수행하기 위하여 노트북에는 beamforming 프로그램을 설치한다.

※ measurement & automation 소프트웨어는 네셔널 인스트루먼트 웹사이트(www.ni.com)에서 무료로 다운로드할 수 있다.



그림 3 데이터 습득장치 셋팅

(2) 현장 실험 수행



그림 4 감진기의 배열과 발진원의 위치

(가) 감진기의 이동

그림 4와 같이 측선을 따라 네 개의 감진기를 설치하였다. 네 개의 감진기는 실험이 진행되면서 측선을 따라 이동한다. 그림 4에서 네 번째 감진기의 위치가 0m라고 하고 첫 번째 감진기의 위치는

3m이라고 한다면, 그 다음 실험은 네 번째 감진기의 위치가 3m이고 첫 번째 감진기의 위치가 6m의 위치에서 수행한다.

(나) 발진원의 이동

발진원의 위치는 첫 번째 감진기와 네 번째 감진기의 거리의 1배, 2배, 4배 그리고 8배 만큼 첫 번째 감진기로부터 떨어져서 실험을 수행한다.

(3) 자료 분석

이 프로그램은 32-비트 시스템에서 matlabⓒ GUI application을 사용하여 개발된 것으로 매틀랩이 없이도 독자적으로 실행될 수 있도록 제작되었다.

(가) 실험을 위한 beamforming 프로그램 셋팅

먼저, beamforming.exe파일을 클릭하여 프로그램을 연다. Configuration탭 - Source Configuration에서 Test ID는 1을 입력하고 Test Name에 파일의 이름 AnSeoung_S1이라고 입력한다.. 그리고 no. of receiver 란에 감진기의 개수 4을 입력한다. 이 프로그램에서는 첫 번째 감진기의 위치를 항상 0m로 한다. 그리고 실험에 앞서 실무자가 정한 감진기의 간격에 따라 Second Receiver는 1을 Last Receiver란에 3을 입력한다. 본 예제에서는 감진기의 간격을 1m로 정하였기 때문에 Second Receiver란에는 1m Last Receiver란에는 3m라고 입력하였다. Source Location란은 항상 마이너스 값으로 본 예제에서, 발진원의 위치는 첫 번째 감진기와 네 번째 감진기의 거리의 1배, 2배, 4배 그리고 8배 만큼 첫 번째 감진기로부터 떨어져서 실험을 수행하였으므로 각각 3, 6, 12, 24를 실험 순서에 따라 입력해준다. Source Configuration이 끝났으면 아래의 Save Configuration 버튼을 클릭한다.

Device Configuration에서 Load Device를 클릭하여 네셔널 인스투르먼 USB 6289을 더블클릭하여 연결을 확인한다. 그리고 Input Range(V)를 결정해야 한다. Input Range(V)의 결정은 사전 실험을 통하여 확인한다. 본 예제에서는 5를 입력하였다.(Input Range는 발진원과 첫 번째 감진기와의 거리 그리고 발진원의 크기와 관계가 있다.) Trigger Range(V)는 Input Range(V)의 10%를 입력하여 하므로 0.5를 입력한다. 실험 중에 프로그램이 발진원의 충격을 인식하지 못한다면 Trigger Range(V)의 크기를 감소시킨다.

Frequency Range(Hz)는 2의 거듭제곱수로 입력해 준다. 예를 들어, 1000Hz까지의 범위를 입력하고 싶을때에는 2의 10승인 1024를 입력한다.(Frequecny Range(Hz)또한 발진원과 첫 번째 감진기가 멀어질수록 이 값은 감소해야 한다.) Number of data는 자료의 길이를 결정한다. 그리고 Trigger Channel에서는 항상 첫 번째 감진기를 선택한다. 최종적으로 Update Device버튼을 클릭하면 Trigger Delay가 정해진다. 그리고 아래의 Run/ Data Traces 탭을 클릭한다.

※ Load Internal Files에서는 Transfer Function파일이나 Time Traces파일을 이 프로그램으로 불러들이고 싶을 때 사용한다. Browse를 클릭하여 파일을 불러들인 다음에 Load all files을 클릭한다.

(나) 데이터 습득

Run/ Data Traces에는 네 개의 그래프란이 있다. 그래프마다 보기를 원하는 Time Trace, Linear Spectrum, Transfer Function(Phase), Transfer Function(Amp) 중 하나를 선택한다. 그리고 각 그래프마다 채널의 번호를 선택한다. 본 예제에서는 Transfer Function(Phase)를 확인해야 하므로, 첫 번째 그래프는 1-2, 두 번째 그래프는 1-3, 세 번째 그래프는 1-3를 입력한다. 그리고 START 버튼을 클릭하고 발진원을 이용하여 충격을 발생시킨다. 실험이 종료되면 STOP을 클릭한다. 실험이 종료되면 SAVE를 클릭하여 저장한다. LOAD 버튼은 Configuration탭에서 불러들인 파일을 불러들이기 위한 버튼이다.

(다) 데이터 분석

Beamforming Analysis탭으로 가서 Run Beamforming을 클릭한다. 왼쪽 상단에 wavenumber-frequency 그래프에 데이터가 나타난다. 그리고 Backbone 버튼을 클릭한다. Backbone 버튼은 일종의 데이터의 filter역할을 한다. 그리고 오른쪽에 AUTO 버튼을 클릭하여 unwrapping을 한다. 그러면 오른쪽 상단에 unwrapping된 새로운 wavenumber-frequency 그래프가 그려진다. 데이터의 일부를 제거하고 싶을때에는 MANUAL 버튼을 클릭한 후 REMOVE 버튼을 클릭한다. 그러면 데이터의 색깔이 붉은색으로 바뀌고 마우스를 이용하여 제거하고 싶은 데이터의 영역을 지정하여 제거한다. 그리고 모든 것이 완료되면 SAVE 버튼을 클릭하여 저장한다.

(라) 분산 곡선

Dispersion Curve탭을 클릭한다. 왼쪽 두 번째 란에 분석한 파일이름을 클릭하고 PLOT 버튼을 클릭하면 상단에 분산 곡선이 나타난다. Graph Type을 이용하여 그래프 타입을 변경할 수 있다. AVERAGE 버튼을 클릭하면 실험데이터와 이론데이터의 평균을 내어 검정색깔의 평균 데이터를 얻을 수 있다. SAVE DISP. 버튼을 클릭하여 데이터를 저장한다. SAVE AVERAGE 버튼을 클릭하여 평균 데이터도 저장한다.

(마) 컨투어 그리기

Plot Contour탭으로 가서 Load Data 버튼을 클릭하면 분석한 측정한 데이터의 측선길이가 나온다. 그리고 PLOT CONTOUR 버튼을 클릭하여 컨투어를 확인한다. 이렇게 발진원의 위치별로 데이터를 합치고 감진기의 위치도 변경시켜 반복 수행하면, 전체 측선의 컨투어를 얻을 수 있다

소프트웨어 Beamforming 1.0의 사용설명서

이 프로그램은 32-비트 시스템에서 matlabⓒ GUI application을 사용하여 개발된 것으로 매트랩이 없이도 독자적으로 실행될 수 있도록 제작되었다.

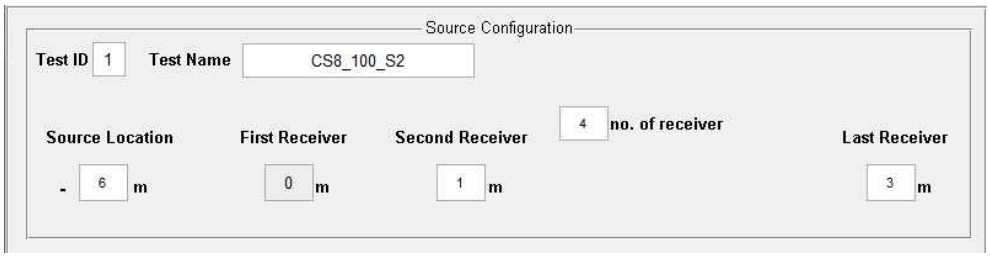
가. 프로그램 기능

이 프로그램은 표면파 분석 기법 중의 하나인 빔형성 기법을 수행하기 위해 개발되었다. 본 포로그램은 현장실험 데이터 습득, 현장에서 습득한 데이터 혹은 다른 프로그램으로부터 읽어들인 데이터를 이용하여 빔형성 분석을 위하여 사용된다.

나. 소프트웨어 사용설명서

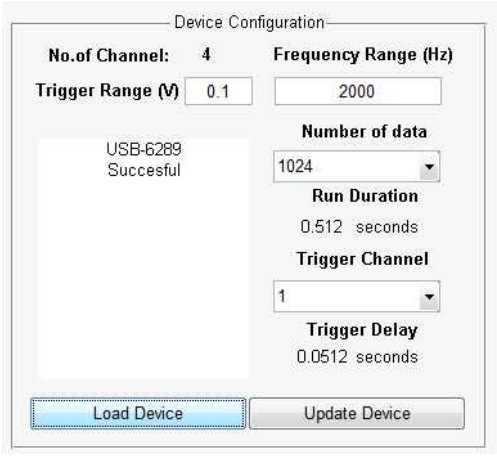
(1) 발진원 위치 지정

Configuration 버튼을 클릭한다. Source Configuration 패널은 패널의 맨 위에 위치해 있다. 빈 칸에 정확한 정보를 채워 넣는다.



- Test ID: 실험 식별 번호. 컨투어를 그리기 위해 중요한 번호이다.
- Test Name : 측선 이름
- Source Location : 첫 번째 감진기로부터 발진기의 거리
- First Receiver : 첫 번째 감진기 위치(일반적으로 0m로 셋팅하는 것을 추천)
- Second Receiver : 균등한 선형 감진기 배열길이에 대한 감진기 간격
- No. of receiver : 사용된 감진기 수
- Last Receiver : 마지막 감진기 위치(자동적으로 계산됨)

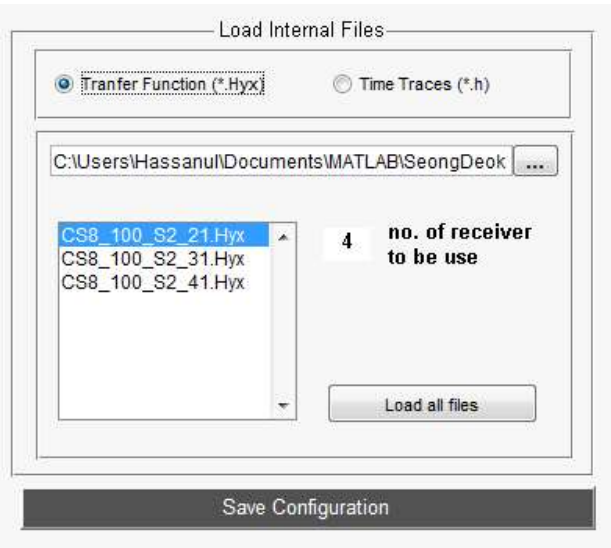
(2) 동적신호장치 매개변수 설정



현장에서 데이터 습득을 하기위해서는, 장비가 셋업이 되어야한다. 적절한 Trigger Range(V), 주파수 범위(Hz) 설정하고 그리고 데이터와 Trigger 채널의 개수를 선택한다. 그리고 Update Device 버튼을 클릭한다. 그러면 작동 시간과 trigger delay가 업데이트 될 것이다. Load Device 버튼을 클릭하면 white panel에 컴퓨터와 연결된 NI device 장비를 확인할 수 있다. 모든 과정이 성공적이라면, 모든 연결이 양호하며 실험을 수행할 수 있다.

(3) 저장된 파일 불러오기

Load Internal Files은 현재 컴퓨터 내에 존재하는 어떤 데이터를 사용하여 분석할 수 있는 기능이다. transfer function(*Hyx) 혹은 time traces(*H)파일을 불러들일 수 있다. 파일을 불러오기 위하여 browse 탭을 열고 Load all files를 클릭한다. 선택된 모든 파일이 불러들여질 것이다. 그리고 Save Configuration 버튼을 클릭한다.

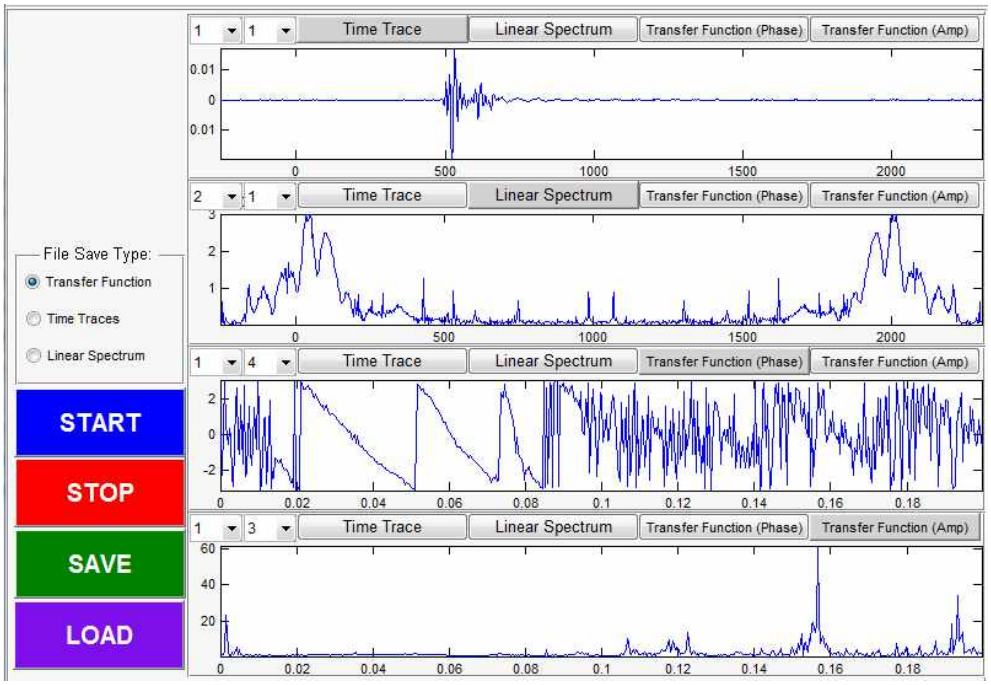


(4) 저장된 파일 불러오기

Load Internal Files은 현재 컴퓨터 내에 존재하는 어떤 데이터를 사용하여 분석할 수 있는 기능이다. transfer function(*Hyx) 혹은 time traces(*H)파일을 불러들일 수 있다. 파일을 불러오기 위하여 browse 탭을 열고 Load all files를 클릭한다. 선택된 모든 파일이 불러들여질 것이다. 그리고 Save Configuration 버튼을 클릭한다.

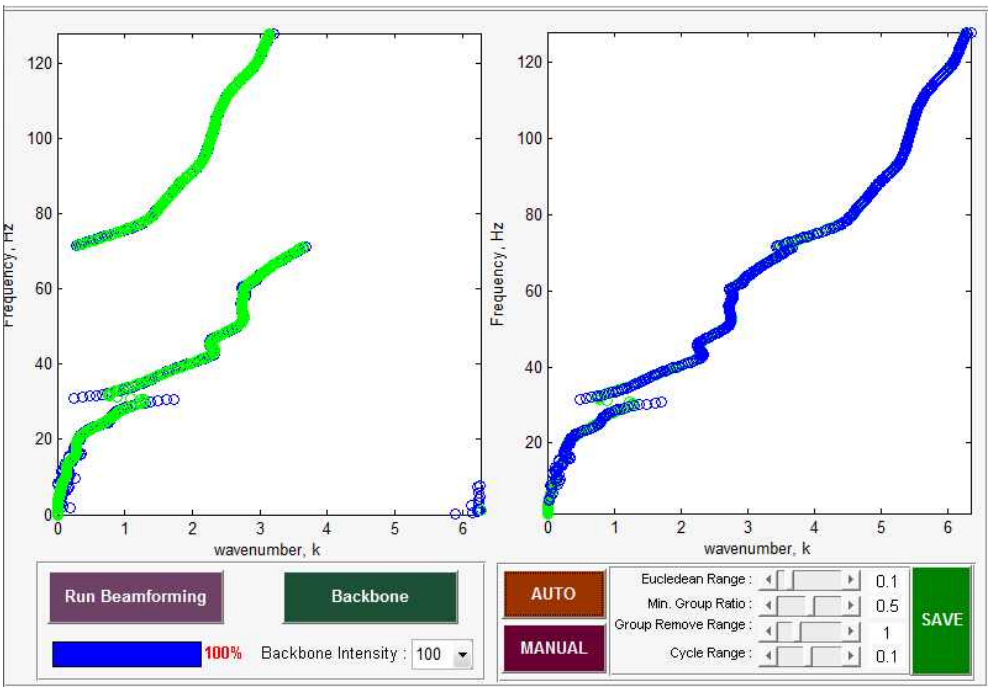
(5) “Data Traces” 탭

(가) 데이터를 습득하기 위해 Start 버튼을 클릭.
(나) 습득한 데이터를 저장하기 위해 Save 버튼 클릭, 파일 타입은 File Save Type panel에서 선택할 수 있다.
(다) 존재하는 파일을 불러들이기 위해 Load 버튼 클릭.
(라) 사용자는 traces 종류를 선택할 수 있다. 채널의 개수를 선택하고 traces 타입을 결정한다. (Time Traces, Linear Spectrum, Transfer Function in phase for amplitude).

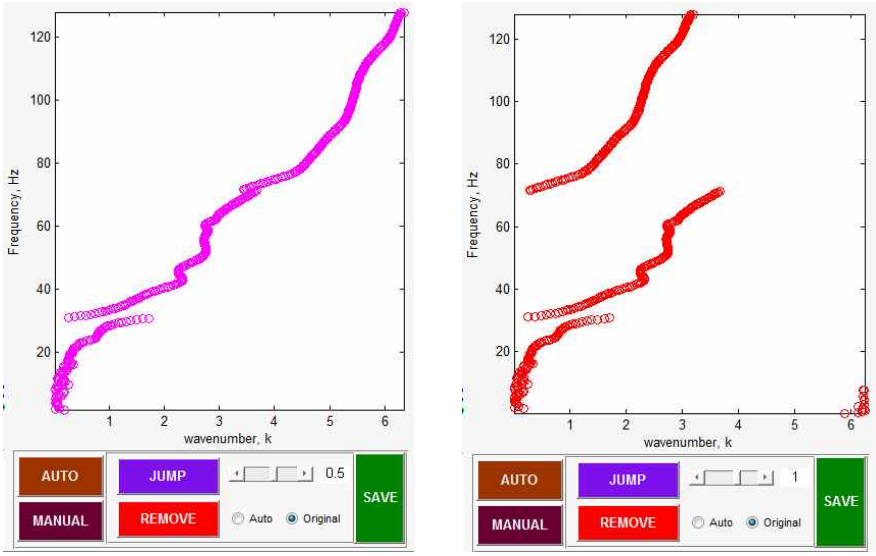


(6) 빔형성 분석

빔형성 분석을 시작하기 위해 Run Beamforming 버튼을 클릭한다. 빔형성 분석이 완료되면 버튼 아래의 파란색 완료 표시가 100%를 나타낼 것이다. 파란 원형 마커로 표시된 f-k 그래프는 원래의 f-k 그래프이다. 분석 후 f-k 그래프를 얻은 후 Backbone 버튼을 클릭한다. 사용자는 backbone의 강도를 선택할 수 있다. backbone 그래프는 녹색 마커로 표시된다.

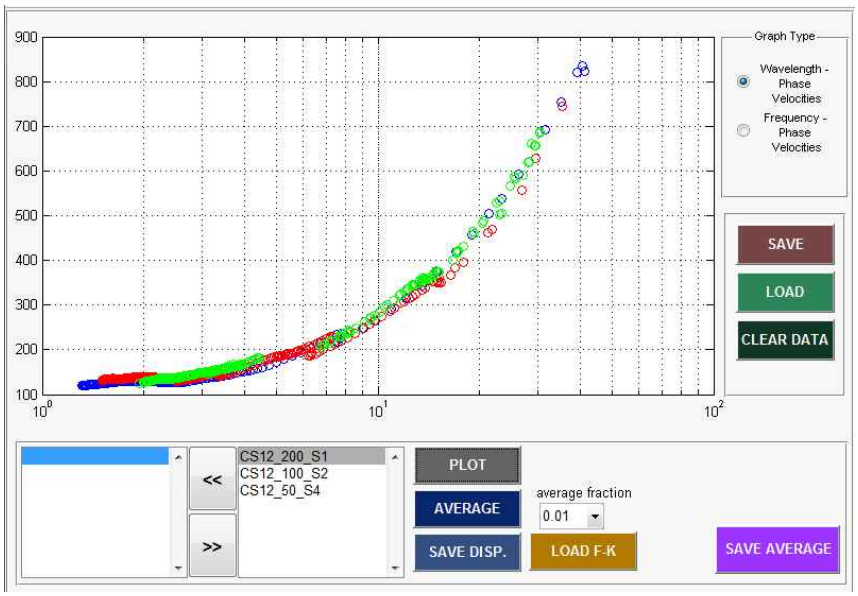


- 사용자는 자동화된 f-k unwrapped을 위해 Auto를 선택할 수 있다. 선택가능한 기준값은 적절한 unwrapping f-k 그래프를 얻기 위해 조정될 수 있다. Manual 버튼을 클릭하면 수동적으로 unwrapping을 할수 있다.
- Auto 혹은 Original 버튼을 선택하고 수동적으로 unwrapping 옵션을 위해 사용된 초기 그래프 종류를 선택하기 위해서 Manual 버튼을 클릭한다.
- 그래프에서 원하지 않는 plot을 제거하기 위해 Remove 버튼을 누르고 제거하고 싶은 plot 그룹을 선택한다. 그러면 그래프 색깔은 빨간색 마커로 바뀐다.
- f-k그룹 데이터에서 사이클 수를 변화시키기 위하여 Jump 버튼을 클릭해서 jump number를 바꿔준다. 그리고 plot 영역을 옮기기 위하여 데이터를 선택한다. plot은 핑크색 원형 마커로 변화할 것이다.
- 분석을 계속하기 위해 Save버튼을 클릭한다.



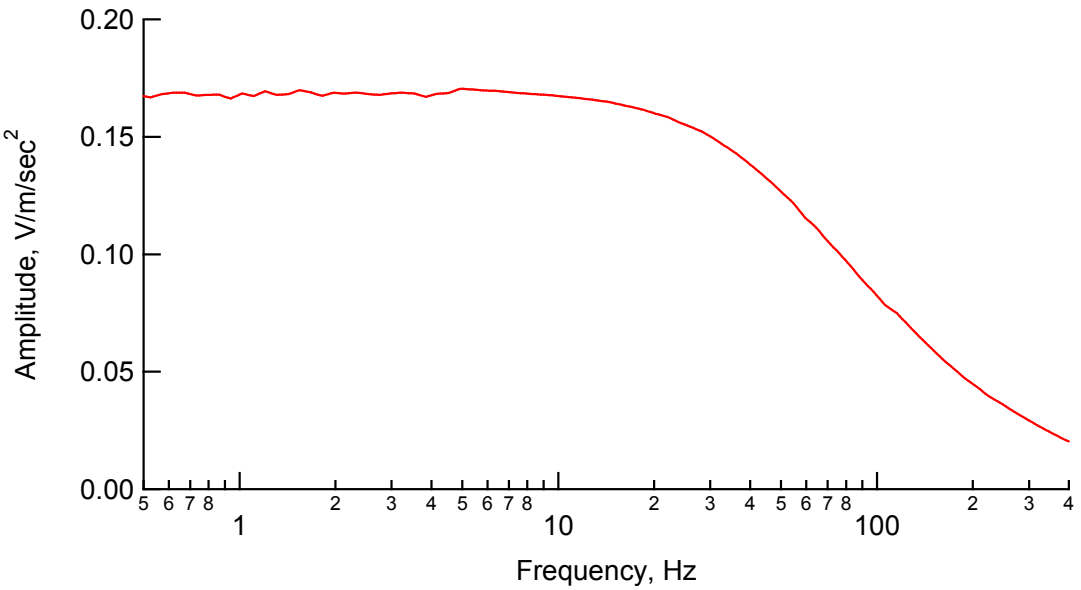
(6) “Dispersion Curve” 탭

- 데이터를 그래프로 그리기 위하여 Plot 버튼을 클릭한다.
- 바라지 않는 데이터를 임시적으로 저장할 수 있다.
- 사용자는 Graph Type panel에서 그래프 종류를 선택할 수 있다.
- 분산곡선 데이터를 저장하기 위해 Save Disp 버튼을 클릭한다.
- 사용자는 Save 버튼으로 분산곡선 그래프를 저장할 수 있고, Load 버튼으로 다시 불러들일 수 있다.
- Clear Data 버튼은 보여지는 모든 분산곡선을 제거하기위해 사용된다.

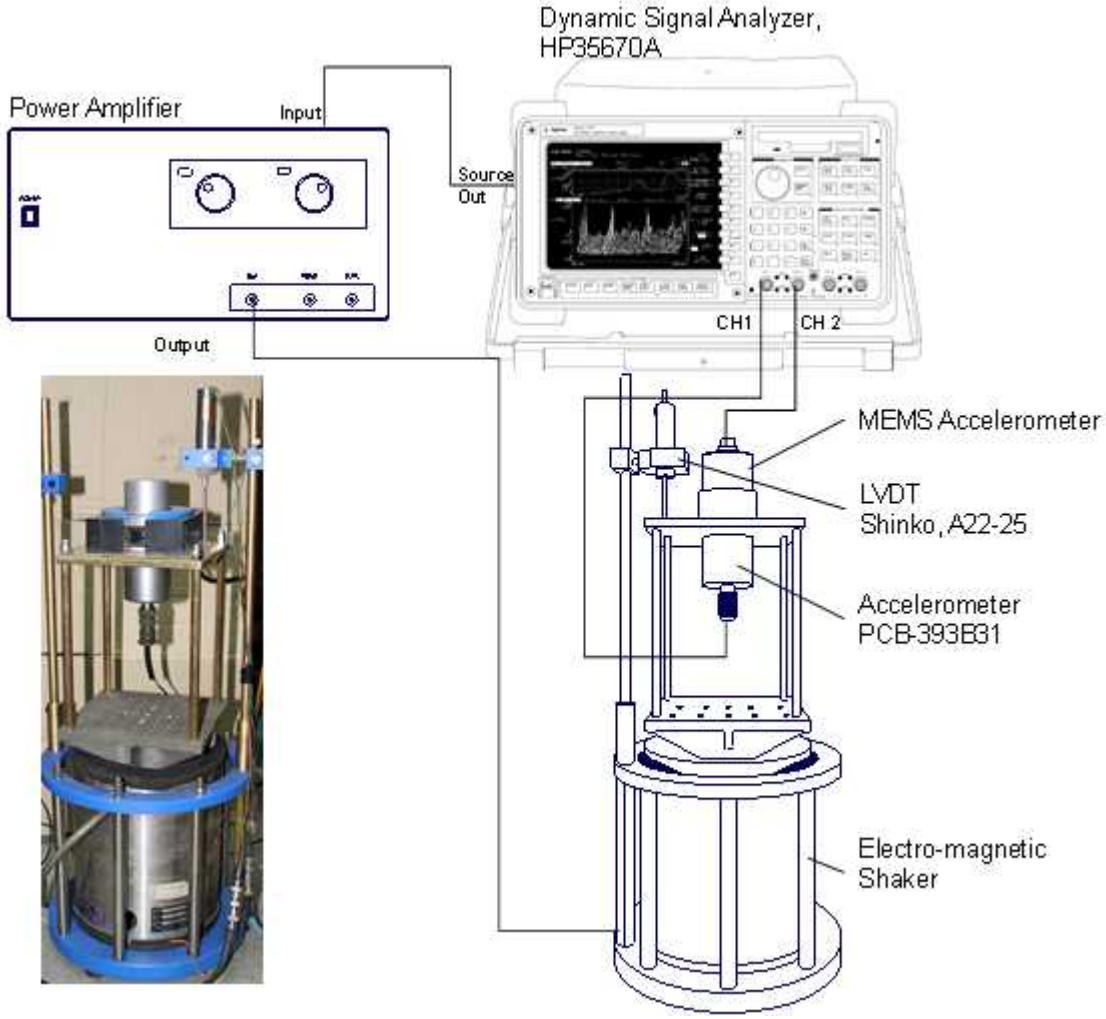


MEMS 가속도에의 Calibration Chart

본 연구과제에서 개발된 MEMS 가속도계의 검증기록은 [그림 C.1.1]과 같다. MEMS 가속도계의 검증은 PCB 가속도계 (감도: 1.02 V/m/sec^2)을 이용하여 수해하였으며, 검증에 사용된 장비는 [그림 C.1.2]와 같다. [그림 C.1.1]를 참고해 보면 주파수 대역 10 Hz 까지는 거의 일정한 반응을 보여주고 있다가, 400 Hz 대역까지는 그 반응이 감소하고 있다. 따라서 UBF 시험에 본 연구개발 MEMS 가속도계를 사용하기 위해서는 [C.1.1.]의 검증기록을 사용하여 측정된 신호를 교정한 후에 자료해석을 수행하도록 하여야 한다.



[그림 C.1.1] 본 연구에서 개발한 MEMS 가속도계 검증기록



[그림 C.1.1] MEMS 가속도계를 검증하기 위한 하드웨어 시스템