

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘극한 수재해 대응 노후 필댐 스마트 그라우팅 보강 및 검증 시스템 기술 개발’(연구개발 기간 : 2015. 09. ~ 2018. 06.) 과제의 최종보고서 15부를 제출합니다.

2018. 06. .

주관연구기관명	: (주)한세지반엔지니어링	(대표자) 임국묵	(인)
공동1연구기관명	: 지오텍컨설팅(주)	(대표자) 원경식	(인)
공동2연구기관명	: K-water	(대표자) 이학수	(인)
참여기관명	: 주식회사 지에스이	(대표자) 백광현	(인)

주관연구기관책임자: 임국묵
공동1연구기관책임자: 이영동
공동2연구기관책임자: 김남룡
참여기관책임자: 백봉현

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15AWMP-C104626	해당 단계 연구 기간	2017.06.15. ~ 2018.06.14	단계구분	3단계/3단계
연구사업명	중사업명	물관리연구사업			
	세부사업명	극한 수재해 대응 노후 수리시설물 성능개선기술			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	극한 수재해 대응 노후 필댐 스마트 그라우팅 보강 및 검증 시스템 기술 개발			
연구책임자	임국묵	해당단계 참여 연구원 수	총 : 30명 내부 : 30명 외부 : 0명	해당단계 연구개발비	정부:243,000천원 기업:133,521천원 정부 외: 천원 계:376,521천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총 : 86명 내부 : 86명 외부 : 0명	총 연구개발비	정부:751,000천원 기업:388,189천원 정부 외: 천원 계:1,139,189천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)한세지반엔지니어링			참여기업명 공동1 : 지오텍컨설팅(주) 공동2 : K-water 단순참여:주식회사 지에스이	
국제공동연구	상대국명:-			상대국 연구기관명:-	
위탁연구	연구기관명:-			연구책임자:-	

1. 목표

- 노후 저수지와 필댐을 대상으로 한 그라우팅 기술 개발과
검증 시스템 기술 개발로 극한 수재해 대응 노후 수리시설
물의 성능개선을 위한 전주기 시스템 개

2. 연구개발성과

- 사업화 근거 확보를 위한 지식재산권 획득
 - 특허출원 5건, 특허등록 5건, 상표등록 2건, 해외PCT출원1건
 - S/W 6건
- 개발기술의 제품구현 가능성 판단 근거
 - 시제품 5건
- 기술의 진보성에 대한 학계로부터의 객관적 인정
 - 학술발표 16건(국내14건, 국외2건)
 - 국내게재논문 5건(비SCI4건, SCI1건)
- 사업화를 위한 기술이전협약
 - 기술사용 계약 5건

보고서 면수

<국문 요약문>

연구의 목적 및 내용	◦ 극한 수재해 대응 필댐 스마트 그라우팅 보강 및 검증 시스템 기술 개발 - 초정밀 주입압 능동제어형 스마트그라우팅 기술개발 - ICT기반 상시 표면파 모니터링 시스템개발 - 보강효과 검증 물리·수치모델링 기법정립				
연구개발성과	◦ 스마트 센싱기술을 활용한 노후필댐 gf/cm^2 단위 초정밀 그라우팅 주입압 제어 기술 개발, 코어층 위해성 저감 및 차수성 극대화를 통한 안전 시공 및 효율성 개선 ◦ 노후 필댐 상시 표면파탐사 모니터링 시스템 개발로 체체의 정량적 강성변화 및 보강효과 판정 ◦ 보강효과 검증을 위한 첨단 원심모형실험 기술 및 수치모델링 기술 개발·정립				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	◦ 최종 기술개발 성과는 K-water의 사업 시행 시 주관 및 공동연구기관과 협의하여 연구개발기술의 일부 소유기관으로서 기술실시협약을 체결, 사업에 적용할 계획임 ◦ 초저압 능동제어형 스마트 그라우팅 시스템, 상시 표면파 모니터링 시스템, 원심모형기를 포함한 물리모델링 기술과 같은 주요 연구성과들은 향후 노후 저수지 성능개선 사업에 기술 실용화를 통해 선도기술로 진입할 수 있음				
핵심어 (5개 이내)	필댐	그라우팅	표면파	강성	물리모델링

< SUMMARY >

Purpose & Contents	◦ Development of initiative technologies for remediation of deteriorated fill-dam using smart grouting and effectiveness verification system - Development of a smart grouting system using active-controlled injection - Development of a ICT-based surface wave monitoring system - Physical and numerical modeling techniques for the remediation of deteriorated fill-dam				
Results	◦ Development of high-precision control method for a deteriorated fill-dam grouting injection using smart sensing technology to ensure the safety of core and improvement of efficiency in grouting works ◦ Quantitative determination of the effect of fill-dam remediation work using innovative surface wave monitoring ◦ Technical development of physical (centrifuge) and numerical modeling to study the effectiveness of dam remediation grouting				
Expected Contribution	◦ New intellectual properties as a research outcome are expected to be contributable to the practical application in the market of aging dam remediation projects. ◦ Major Research achievements (such development of a smart grouting system using active-controlled injection, development of a ICT-based surface wave monitoring system, and physical/numerical modeling techniques) are expected to generate leading technologies for future dam remediation projec.				
Keywords	Fill-Dam	Grouting	Surface wave	Stiffness	Physical Modeling

< Contents >

1. Overview	1
2. Domestic and international technology developments	4
3. Research contents and results	8
4. Goal achievement and contributions related field	64
5. Future plan of R&D results	69
6. Science and technology information surveyed from overseas	70
7. Main result	73
8. Reference	74

< 목 차 >

제1장. 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발 목적	1
2. 연구개발 목표	1
3. 연구개발의 필요성	1
4. 연구개발 범위	3
제2장. 국내외 기술 개발 현황	4
1. 국내·외 기술·특허 동향	4
2. 국가 연구개발사업 유사연구 검토	6
제3장. 연구 수행 내용 및 성과	8
1. 연구개발 목표	8
2. 연구 목표 및 주요 연구 내용	9
3. 초정밀 주입압 능동제어형 스마트 그라우팅 기술 개발-(주)한세지반엔지니어링	11
5. ICT기반 상시표면파 모니터링 시스템 개발-지오텍컨설턴트(주)	30
5. 보강효과 검증을 위한 첨단 원심모형실험 기술 및 수치모델링 기술 개발·정립-K-water	54
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	64
1. 목표 달성도	64
2. 관련 분야 기여도	67
제5장. 연구개발성과의 활용 계획	69
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	70
제7장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	73
제8장. 참고 문헌	74

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 노후 저수지와 필댐을 대상으로 한 그라우팅 기술 개발과 검증 시스템 기술 개발로 극한 수재해 대응 노후 수리시설물의 성능개선을 위한 전주기 시스템 개발

2. 연구개발 목표

- 초정밀 주입압(gf/cm^2 단위) 능동제어 스마트 그라우팅 기술 개발
- ICT기반 상시 표면파모니터링 시스템 구축 및 정량적 보강효과 판정을 위한 기법 연구
- 그라우팅 보강 검증용 세계 최대급 대형 원심모형실험 및 수치모델링 기법 개발



<그림 1.1> 연구개발과제의 최종 목표

3. 연구개발의 필요성

기존 필댐 및 저수지(제방)의 노후화(aging)와 극한 수재해(홍수 등) 발생 시 그에 따른 안전 문제와 보수 보강 현안은 국제적인 화두가 되고 있다. 해외에서도 국제 대담회(ICOLD)제 85차 연차회의 및 25차 Congress(2015.06)에서 중요한 현안으로서 노후 댐의 안전관리 및 성능개선을 집중 조명된 바 있으며 제34회 미국 대담회(USSD) 컨퍼런스(2014.04)에서는 “댐과 극한 이벤트 · 극한 하중 조건에서 노후댐 시설물의 위험도 저감”을 주제로 채택한 바 있다.

미국의 경우 약 8만여 댐이 현재 노후화가 진행 중이며, 이 중 75% 이상이 준공 후 50년 이상 경과된 노후 댐이며, 일본의 경우에도 3,076개 대담 중 1,768개 댐이 1960년 이전 준공되어 급격한 노후화 추세로 최근 신규 댐의 건설보다는 기존 노후댐의 수명 연장을 위한 성능개선 및 보수보강 기술개발에 집중하는 정책으로 선회하고 있다.

국내의 경우 준공 후 50년 이상 경과된 노후저수지는 현재 70%에 달하며, 준공 후 30년 이상 저수지는 전체의 95%에 해당한다. 노후 저수지·필댐의 정비부실과 최근 기후변화에 따른 이상기후 현상으로 일최다 강우량이 400mm를 초과하는 집중호우가 빈번하게 발생하여 저수지·댐의 붕괴사고가 증가하는 추세이다.



<그림 1.2> 2013년 노후 댐 및 저수지 피해 전경

<표 1.1> 저수지 피해 현황

명칭(준공)	관리자	피해일시	원인	내용
장현(1947)	농어촌공사 (강릉시)	2002.08	태풍루사	제방유실-주택13가구 유실, 농경지 침수
동막(1940)		2002.08	태풍루사	제방유실-주택·농경지 침수, 교량파괴
송호(1947)	원주시	2006.01	누수	제방유실-주택2동, 농경지 침수
사곡(1945)	청도군	2007.07	누수	제방유실-주택2동, 둔사 파손
춘정(1964)	보성군	2007.09	집중호우	제방유실-농경지 유실
대사(1945)	농어촌공사 (고흥군)	2007.09	집중호우	제방유실-농경지 매몰
양곡(1945)	익산시	2010.07	집중호우	제방유실-농경지 침수 및 유실
명곡(1945)	완주시	2010.07	집중호우	제방유실-농경지 침수 및 유실
척곡(1967)	정읍시	2011.08	집중호우	제방유실-면소재지 침수 및 농경지 유실
두야(1966)	태안군	2012.08	집중호우	제방유실-농경지 침수
어은(1945)	남원시	2012.08	집중호우	제방유실-도로, 농경지 침수
죽림(1945)	고창군	2012.08	태풍 불라벤	제방유실-여수토 유실, 농경지 침수
관춘(1945)	해남군	2012.08	태풍 불라벤	제방유실-농경지 침수
산대(1964)	농어촌공사 (경북지역본부)	2013.4.12	제체 노후	주택1동, 상가5동 침수 및 농경지 침수
조산(1956)	농어촌공사 (고창시)	2013.7. 5	집중호우	약 1억5600만원의 시설피해
옥촌(1945)	여주시	2013.7.22	집중호우	비닐하우스 30개동, 주택2동 침수
괴연(1945)	영천시	2014.8.21	집중호우	농경지 매몰 및 유실, 주택 침수 및 파손, 농작물 침수
내덕(1945)	기장군청	2014.8.25	집중호우	주택 및 상가 130동 침수

저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률(2017.01.17.공포)에 따르면, 구체적인 재해 위험 저수지·댐의 지정 및 정비를 수행해야 하며, 정부에서는 현재 약 181개소에 대해 위험 저수지로 고시하고 있다. 그러나 관리주체의 분산, 보수보강 사업 예산 부족, 국내에는 체계적이고 혁신적인 그라우팅 보강 기술과 그라우팅 효과를 기술적으로 모니터링하고 검증할 수 있는 도구 또는 모델링 기법이 미약하여 반복적 보수보강 시행으로 예산이 낭비되고 있는 실정이다.

국내 대부분의 노후 제체는 코어형 형식의 필댐 구조를 취하며, 이러한 코어형 필댐에서 코어존의 노후화는 댐의 안전성 문제와 직접적인 관련이 있으므로 필댐 안전관리에 있어서 가장 중요한 부분이다. 코어존은 저수위 변화, 강우사상 등의 영향으로 제체 내부에서 침투수 흐름의 지속적인 변화가 발생할 수 있으며 연약한 지층 취약부를 따라 누수경로 발달 시 내적침식(internal erosion) 및 파이프링(piping)의 위험성을 초래하기도 한다. 따라서 열화된 코어재의 차수성능 개선 기술 개발 및 노후 필댐 보강효과 검증에 대한 연구를 위해 우선적으로 노후화된 코어재에 대한 연구가 필요하나, 댐 축조 후 시간경과에 따른 코어재의 물성 변화에 대

한 연구는 현재까지 매우 드물고, 연구 방법 또한 표준화된 절차가 없는 실정이다.

현재 국내 노후화된 저수지·필댐의 성능개선을 유도하기 위하여 대표적으로 중심코어층에 침투 그라우팅 공법을 적용한다. 그러나 보강재의 주입압 조절 실패로 코어부·심벽부에 수압할렬(쪼개짐, hydraulic fracturing)이 다수 발생되어 보강효과를 반감시키고 반복적 시공에 따른 경제적 비효율성을 보이는 실정이며, 또한 노후화된 필댐은 내부강성이 약화되어 있거나 일부 코어부의 부재 등으로 쉽게 할렬이 발생하므로 노후제체를 위한 그라우팅 보강기법은 극저압 주입 및 능동적 주입압 제어 기술이 필요하다.

국내에는 노후화된 저수지·필댐의 보강효과를 검증하는 방법으로 페놀프탈레인 용액주입, 내삽법적용의 그라우트재 주입량 비교, 보강 전·후 투수계수 비교 등 다양한 방법을 활용하고 있으나, 이러한 방법들은 보강재가 제대로 주입이 되었는지를 확인하는 정성적 평가로 보다 정확하고 신뢰성있는 보강효과검증을 위해서 수치모델링 기법을 활용한 검증기법의 정립이 필요하다.

현재 저수지의 제체 안정성을 파악하기 위해 주로 사용되고 있는 물리탐사법으로는 전류를 발생시키고 그로부터 발생하는 전위차를 측정하여 전기비저항 값을 산출하는 전기비저항탐사가 있다. 전기비저항탐사는 지하 매질의 함수비 등에 따라 비저항 값이 달라지며, 기후, 계절, 환경여건에 따라 결과가 달라지기 때문에 이를 보정하기 위한 후처리과정이 반드시 필요하다. 또한, 이렇게 획득되는 결과는 정성적인 결과로서 댐체의 안정성과 직결되는 강성(stiffness)을 파악하는데 한계가 있으며, 제체 보강 및 설계를 위한 정량적 값을 도출하는데도 문제가 있다. 이와 같이 기존 탐사방법의 문제점을 보완하고 현재 대부분의 지자체 및 탐사업체가 제체 안정성 파악을 위해 단일탐사에 의존하는 것에 대해 다양성을 유도하고, 또한 향후 제체 안정성 확보를 통한 피해절감/재해예방을 위해서 추가적인 기술의 적용 및 보완이 필요하다.

4. 연구개발 범위

본 연구에서는 대형원심모형기 및 수치·물리모델링을 통해 노후제체의 파괴거동 및 그라우팅재의 차수효과를 검증하고 댐체의 건전도 모니터링 및 보수/보강의 정량적 효과판정 사용될 상시 표면파 모니터링 시스템을 개발하는데 있다. 또한 초저압 능동주입을 위한 선단주입부 장치와 통합제어시스템 및 지중 선단 주입압 측정을 통해 보강재의 누출을 제어할 수 있는 옴저버기술을 개발하여 극한 수재해 대응 노후 저수지·필댐의 성능개선을 위한 전주기 시스템을 개발하고자 한다.

<표 1.2> 연구범위 및 수행방법

연구범위	연구 수행방법
초정밀 압력제어형 스마트 그라우팅 기술 개발	- 국내외 관련논문 및 특허기술 자료를 검토하여 노후 저수지·필댐의 특성을 고려한 연구 목표설정 - 선단부 압력감지 장치, 능동제어 시스템, 보강재 누출 감시 시스템 개발 - 실제 노후 제체 환경인 Testbed에서 장비/장치 또는 시제품의 성능을 시험 - 시제품의 신뢰성평가 및 정량화·계량화
노후 필댐 성능평가를 위한 ICT기반 상시관측 시스템	- 국내외 관련논문 및 특허기술 자료를 검토하여 표면파탐사 적용 목표 설정 - 가탐심도 및 해상도 향상을 위한 Active/Passive 동시역산 알고리즘 연구 - 표면파 모니터링 시스템 개발 및 외산장비 비교를 통한 신뢰성 평가 - 상기 현장 노후제체에서 그라우팅 전·후 비교 및 그라우팅 보강판정 정량화 연구
보강효과 검증 물리·수치모델링 기법 정립	- 국내 필댐 코어재 물성 취득 및 통계학적 분석 수행 - 그라우팅 복합체물성 취득 및 분석 - 실규모 댐을 대상으로 누수시험이 불가능하므로 대형 원심모형시험기를 통해 실제 현장의 댐체의 성능을 구현하고 FEM 수치모델링과 비교하여 실제 보강효과 검증 기법 정립

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 기술·특허 동향

일반적으로 코어형 필댐의 안전성 해석을 위해 적용 가능한 코어재 물성에 관한 선행연구와 문헌은 상당히 적으며, 기존댐 또는 노후화 되어가는 댐의 물성 파악이 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다. 하지만 댐의 코어존에 대한 직접적인 연구는 댐 손상을 초래할 수 있어 간접적인 탐사 기법과 재료원에 대한 연구가 주로 수행되어왔다.

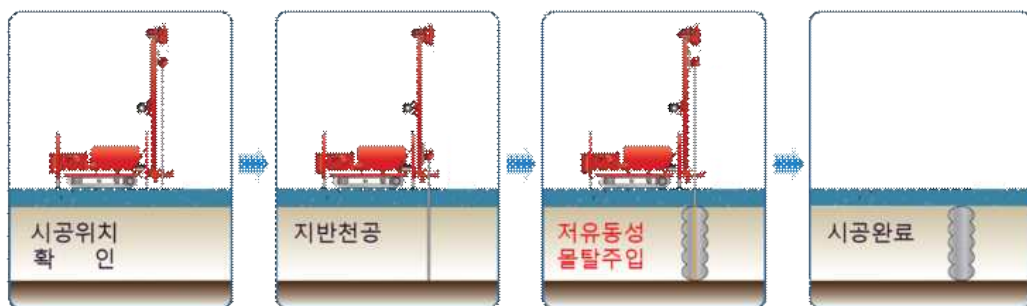
특히 댐체에 물리탐사 기법을 적용하여 댐의 취약성과 위해성을 판단하는 간접적인 연구가 많이 진행되었는데, Won and Song (1999)는 전기비저항 탐사를 통해 댐 누수구간을 탐지하였으며, Lim (2003)과 Kim (2004)은 전기비저항 탐사를 활용하여 취약대가 존재하는 댐의 누수탐지에 관한 연구를 수행하였다. 물리탐사 이외에 Shin et al. (2002), Seo et al. (2008), Lee et al. (2012)은 대형삼축압축시험과 대형전단시험을 통한 조립재료 및 사석재료에 대한 강도평가를 하였으며, Park et al. (2004)은 흙댐의 장기 침투영향에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. Lee and Lim (2010)은 중심코어형 사력댐에 대하여 코어존의 침투량 예측기법 연구를 수행한 바 있다.

최근에는 기존댐의 해체와 무수보링 시추조사에 따른 코어존의 직접적인 연구가 일부 진행되었다. Kim et al. (2011)은 기존 필댐의 해체에 따른 댐 코어재의 정적, 동적 물성에 관한 연구를 수행한 바 있다. Lee et al. (2015)은 국내 3개 필댐을 대상으로 코어존에 대한 전기비저항 탐사와 무수보링을 이용한 건전성 평가를 수행하였다.

국내·외에서 댐 및 저수지 침투효율성의 증가, 점착력의 증진 등 효과적인 그라우팅을 위한 여러 공법들이 계속적으로 개발되고 있는 중이며, 침투력 향상 및 내구성을 위한 폴리머, 마이크로 시멘트 등의 그라우트제의 개발이 계속 진행 중에 있다.

◦ CGS(Compaction grouting system)공법

슬럼프가 5cm이하의 저유동성 몰탈 주입재를 지중에 비배출형으로 압밀주입하여 느슨한 흙을 사방으로 밀어내어 주위 지반의 밀도를 증가시킴과 동시에 원기둥에 가까운 Con'c 개량체를 형성하여 구조물을 지지하거나 보강하는 주입공법



<그림 2.1> CGS공법 시공방법

◦ H.M.G공법 (Hardening Micro Material Grouting)

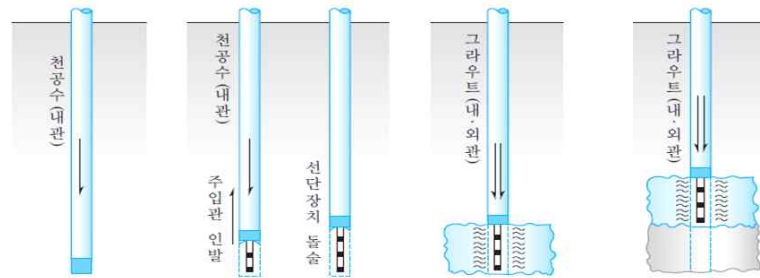
지반내 공극에 급결재, 무기질속경혼합재를 포함하는 주입재를 침투·고결시켜 원지반토의 점착력을 증진하고 지반을 치밀하게 하는 1.5Shot(2액형)/1.0Shot(1액형)복합방식의 저압침투 주입공법

◦ PPG공법 (Pneumatic Permeation Grouting Method)

지반내의 공극에 저압의 압축공기를 주입하여 공극과 틈새를 확장시킴과 동시에 경화속도 조절이 가능한 1액형 주입재를 사용하는 주입공법(한국농어촌공사 특허)

◦ SGR(Space Grouting Rocket)공법

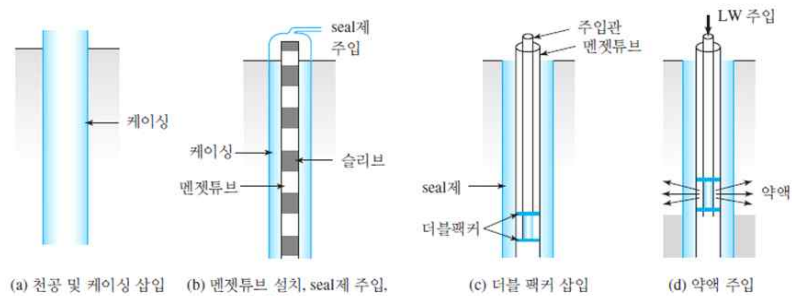
이중관 로드와 특수 선단 장치와 3조식 교반장치를 갖추고 지반 내에 유공관을 형성하여 급결성과 완결성의 주입재를 저압에 의해 복합 주입하여 지반을 그라우팅하는 공법



<그림 2.2> SGR공법 시공방법

◦ LW(Laviless Wasser glass)공법

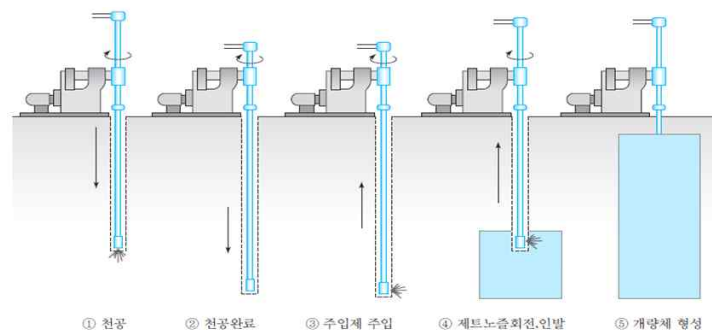
그라우팅재로서 주재료는 물유리 용액을 사용하고 경화재로는 시멘트 현탁액과 벤토나이트를 사용하여 지반 속에 침투시켜 지반을 강화시키는 공법



<그림 2.3> LW공법 시공방법

◦ JSP(Jumbo Special Pattern)와 SIG(Super Injection Pile)공법

고압으로 경화재를 에어제트와 함께 복수의 노즐로 분사시켜 지반의 토립자와 교반하여 그라우팅체를 형성하는 공법으로 지반보강과 차수벽 공사, 기초 등에 이용하는 저진동, 저소음 공법



<그림 2.4> JSP공법 시공방법

◦ 가압식 초음파 진동체를 이용한 터널 다단 보강그라우팅공법 및 그 장치

가압식 초음파 진동체를 이용하여 주입액이 지반 침투 효율성을 증가시키어 미세한 균열 및 크랙 부분까지 주입재의 침투가 이어지도록 함과 동시에 강관 또는 폴리머 콘트리트관을 사용하여 터널 보강이 이루어지도록 하는 공법(출원번호 10-2005-0083479)

◦ 제방과 댐의 파이핑 누수지역에서 폴리머를 이용한 누수차단 공법.

“Directional fracture grouting method with polymer for seepage control of dikes and dams”

(미국 출원번호 12721395)

“Polymer injection method for blocking piping in dikes and dams”(미국 출원번호 12721342)

2. 국가 연구개발사업 유사연구 검토

<표 2.2> 국가 연구개발사업 유사연구

사업명	과제명	예산	부처명
재개발 저수지의 안정성 평가 및 차수보강공법 개발	자동화 그라우팅 시스템을 적용한 재개발 저수지의 차수보강공법 개발	4.3억원	국민안전처
건설기술연구사업	대형 지반구조물 대입경(大粒徑) 조립재료 동적물성 산정 기법 연구	6.5억원	국토교통부
건설기술연구사업	저투수성 지반에서의 환경친화적 그라우팅 기술 및 실시간 모니터링 기술 개발	2.81억원	국토교통부
국토교통기술사업화지원	사물인터넷 기반 댐,저수지의 실시간 구조상태평가 및 재해 예측 시스템 개발	1차년도 3.54억원	국토교통부

◦ 자동화 그라우팅 시스템을 적용한 재개발 저수지의 차수보강공법 개발

본 연구는 AGS기술로 알려졌으며 현재 국토부 신기술 644호로 지정되어 있다. 위 연구과제는 재개발 저수지의 안정성 평가 및 차수보강공법 개발 연구의 일부분으로, 주입중단 자동관리, 한계주입압(Pmax) 자동관리 및 주입량 정산 근거를 자동으로 확보할 수 있는 통합 관리형 그라우팅 자동주입관리공법이다.

◦ 대형 지반구조물 대입경(大粒徑) 조립재료 동적물성 산정 기법 연구

2011년 국토해양부 건설기술혁신사업 수행된 본 연구는 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 파악하는 방법으로, 인공 발파진동실험을 이용하여 흙댐 축조재료의 진단파 속도를 추정하는 연구이다.

◦ 저투수성 지반에서의 환경친화적 그라우팅 기술 및 실시간 모니터링 기술 개발

주입재/주입제의 전기 화학적인 특성에 따른 주입특성, 개량효과 그리고 개량효과 증진을 위한 최적의 주입재/제, 주입농도, 적용기간, 전극배치, 전극교환, 주입속도 등을 실내 컬럼 및 파일럿 실험을 통해 검증하고 주입재의 이동특성 및 오염원의 이동 특성을 현장에서 직접 확인할 수 있는 실시간 모니터링 시스템을 접목시킨 EK-Grouting기술 개발을 목표로 한다.

◦ 사물인터넷 기반 댐.저수지의 실시간 구조상태평가 및 재해 예측 시스템 개발

단순 계측결과에 의해 시설물의 위험성을 평가하는 현행기술을 탈피하고 강우, 수위 등 실시간 기상정보와 센서에서 계측되는 결과를 상호 분석하여 회귀분석 함으로써 재난 재해의 진행여부 그리고 재해 발생 시간을 예측할 수 있는 재난 재해 예방기술을 상용화하고 전문가 시설관리자도 효율적인 시설물 관리 및 재해 예방이 가능한 융합기술 상용화를 목표로 한다.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과(최초연도~당해연도)

1. 연구개발 목표

가. 최종성과 목표 및 성과지표

<표 3.1> 최종성과 목표 및 성과지표(총괄 2015~2017년)

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준			양적 성과 목표
					질적 성과지표		목표치	
주관	1	초저압 능동제어 스마트 그라우팅 기술 (한세지반)	1-1	선단부 압력감지 장치 시스템	①	압력 단위	gram단위 측정	특허출원: <u>2 건</u> 특허등록: <u>1 건</u> 논문: <u>2 건</u> 현장적용: <u>2 건</u> 기술이전: <u>1 건</u> 제품화: <u>2 건</u> SW: <u>2 건</u>
			1-2	오퍼버 기술	②	다채널	지중동시 측정	
			1-3	능동제어 시스템	③	송수신방법	무선 타블렛 제어	
공동	2	ICT기반 표면과 모니터링 시스템 (지오택컨설팅)	2-1	상시 표면과 모니터링 시스템 개발	①	알고리즘	Active/Passive동 시역산	특허출원: <u>1 건</u> 특허등록: <u>1 건</u> 논문: <u>1 건</u> 현장적용: <u>1 건</u> SW: <u>1 건</u> 제품화: <u>1 건</u>
					②	물성	기초자료획득	
			2-2	보강효과 정량화	③	그라우팅 보강효과 정량화	보강효과 수치 정량화	
공동	3	수치/물리모델링 검증시스템 (K-water)	3-1	노후필댐 물성DB구축	①	D/B작성여부	통계분석	절차서: <u>1 건</u> 논문: <u>3 건</u>
			3-2	FEM 수치모델 절차서 작성	②	수치모델링 기법	T/B 2개소 모델링	
			3-3	원심모형기 실험	③	원심모형기법	절차서작성	
계								특허출원: <u>3 건</u> 특허등록: <u>2 건</u> 논문: <u>6 건</u> SW: <u>3 건</u> 현장적용: <u>3 건</u> 제품화: <u>3 건</u> 기술이전: <u>1 건</u> 절차서: <u>1 건</u>

2. 연구 목표 및 주요 연구 내용

<표 3.2> 연구 목표 및 주요 연구 내용

구분 (연도)	세부과제명	세부연구 목표	연구개발 수행 내용	연구결과
1차 연도 (2015)	초정밀 주입압 능동제어형 스마트그라우 팅 기술개발	선행연구 사례조사	- 국·내외 관련논문 및 특허기술 자료 검토	- 국내의 특허 및 연구는 시멘트 및 약액 개발과 차수공법연구가 활발히 진행 - 노후저수지 보수보강을 위한 초저압 지중 능동제어 기술 사항은 없음 - 수압파쇄 및 심벽부 손상을 최소화하는 능동제어 기술은 국내외 선도적 연구목표
		목표 성능 설정	- g단위 측정기술 목표설정 - 노트북 타블렛을 통한 통신	- 노후 저수지의 특성을 고려한 연구 목표를 설정하였으며 각각의 목표 성능치를 제시함
		시제품 제작	- g단위 지중 초저압 측정을 위한 선단장치 제작 - 다채널 무선통신을 통한 오피저버 시스템 자료 전송 - 지상 능동제어 시스템 및 제어 프로그램 개발	- 3개 세부 Prototype 시제품을 개발하였으며 이에 따라 특허출원 및 소프트웨어 등록을 필함 - 초저압 선단장치의 야외 간이 실험을 실시하여 지중압과 지상압의 차이를 국내외 처음으로 측정함 - T/B의 지반물성 기초자료 및 시추조사를 협동기관에게 제시 향후 연구 시 활용토록 함
	ICT기반 상시 표면파 모니터링 시스템 개발	노후필댐 보수보강 기존 문헌 연구	- 국·내외 관련논문 및 특허기술 자료 검토	- 국내 댐 안정성 파악을 위한 표면파탐사 연구 사례 미흡 - 표면파탐사 적용 특허기술 없음 - 그라우팅 보강효과 검증에 위한 - 정량적 평가기술 확보 필요
		표면파 Active/Passive 동시역산 알고리즘	- 가탐심도 및 해상도 향상을 위한 active/ passive 자료의 중합 및 동시역산 알고리즘 연구	- Active/Passive 동시역산 알고리즘 및 이론적 해석단면 제시
		기초자료 획득	- T/B 내 물리탐사 수행을 통한 Reference data 획득	- TB 지층상태 규명 및 차년도 그라우팅 보강위치 및 심도 검토 - Reference data 확보
	보강효과검증 물리·수치 모델링 기법 정립	노후필댐 물성 연구	- 노후필댐 보강 사례조사 - 노후 필댐 물성 DB분석	- 국토교통부 소관 필댐 보강 사례 조사 및 정리 - 국내 13개 필댐 코어재 물성 취득 및 통계학적 분석 수행 - 통계학적 분석을 통한 필댐 코어재의 DB구축 - 노후 필댐에 대한 저압침투그라우팅 적용 보강사례분석
		보강 전 수치모델 링 및 원심모형 시험 연구	- 노후필댐체 보강 전 FEM 모델링 기법 연구 - 노후 필댐 보강 전 정상침투 모의 대형 원심모형시험 문헌 연구	- 기존 필댐을 대상으로 유한요소(GeoStudio) 수치모델링 연구 - 댐 코어층 노후조건을 반영한 2개 필댐 침투류해석 수치모델링 분석연구 수행 - 필댐의 정상침투 원심모형시험 절차 문헌연구 완료

<표 3.2> 연구 목표 및 주요 연구 내용(계속)

구분 (연도)	세부과제명	세부연구 목표	연구개발 수행 내용	연구결과
2차 연도 (2016)	초정밀 주입압 능동제어형 스마트그라우 팅 기술개발	초정밀 압력제어 형 통합 시스템 개발 및 안정화	- 통합제어형 소프트웨어를 확대/ 개발, 기존 표준p-q-t차트 T/B검증	- 1차년도에 개발된 Prototype 시스템을 통합
			- 할렬시 p-q-t 검증 및 자료취득	- 대청3부댐(T/B) 현장 실증을 통하여 p-q-t차트 획득
			- 다중그라우팅 제어가 가능한 통합제어형 시스템(키호스트 제어실)형태의 유량계로 확장, 보강재 누출감시 읍저버기술 확보	- 측정정보 및 센서별 데이터를 엑셀파일(.CSV)형식으로 저장
			- T/B에서 다양한 실증실험을 통한 시제품의 안정화 및 성능개선	- 엑셀파일(.xlsx)형식의 주입보고서 저장 가능
	ICT기반 상시 표면과 모니터링 시스템 개발	동시 역산을 통한 가탐심도 증대	- Active/passive 동시역산 알고리즘 검증 - 현장 Data 획득 후 동시역산을 통해 가탐심도 및 해상도 증대 검증	- Prototype 시제품을 현장 test후 성능 개선 및 안정화
		Prototype 의 표면파모 니터링 시스템 개발	- 8ch 표면파모니터링 시스템 개발 - 현장 적용성 검증(데이터 취득 및 파형 분석)	- Active/passive 동시역산 알고리즘을 통한 이론 및 현장 검증 수행, 소프트웨어 개발 완료
		Grouting 보강효과 검증	- T/B내 그라우팅 전·후 모강효과 정량화 연구	- 현장시험 결과로 부터 동시역산을 통한 약 20% 이상 가탐심도 확보 및 해상도 증대 검증
	보강효과검증 물리·수치 모델링 기법 정립	그라우팅 복합체 물성 연구	- T/B 2개소 지반조사 수행 - T/B 그라우팅 복합체 물성 분석 - 그라우팅 전·후 코어 물성 비교	- 8ch 표면과 모니터링 시스템 시험품 제작 및 현장 검증 - 8ch 데이터 취득 및 기존 시판 장비 결과와 비교분석, 유사 결과 확인
		보강후 FEM수치 모델링 연구	- 물성 연구성과 활용 FEM을 통한 보강효과 수치모델링 - 수치모델링 기법 정립	- 그라우팅 보강 전 필댐 잠재위해성 분석 - Testbed 2개소(대청3부댐, 공주저수지) 보강 전·후 광범위한 지반조사 수행(코어재의 물성 확보 및 역학적 특성 파악, 그라우팅 복합체의 정적 및 동적 물성 취득) - Testbed 그라우팅 전·후 코어재 물성과 노후 필댐 물성DB와의 연계 분석
		원심모형 시험 성능검증	- 대형원심모형시험을 통한 그라우팅 보강효과 연구	- Testbed를 대상으로 유한요소(GeoStudio) 수치모델링 연구 - 코어재의 불포화 함수특성곡선 추정 - 대청3부댐, 공주저수지 등 Testbed 물성연구 성과 적용 수치해석 수행 - Testbed 보강 전·후 침투해석을 통한 정량적 보강효과 검증

<표 3.2> 연구목표 및 주요 연구 내용(계속)

구분 (연도)	세부과제명	세부연구 목표	연구개발 수행 내용	연구결과
3차 연도 (2017)	조정밀 주입압 능동제어형 스마트그라우팅 기술개발	조정밀 압력제어 형 통합 시스템 개발 및 안정화	- 선단부 압력감지 장치 시스템 제품화, 현업화	- 2개소의 T/B 현장 적용 완료 - 개발된 장치/장비로 가능한 그라우팅 공법 제시 및 특허등록 - 기술이전으로 사업화 예정
			- 옹저버 기술 제품화, 현업화	
			- 능동제어 시스템 현장적용	
	ICT기반 상시 표면과 모니터링 시스템 개발	상시 표면과 모니터링 시스템 개발	- 상시 표면과 모니터링 시스템의 - 보완 및 검증	- 8ch에서 최대 32ch로 채널 확장 및 ADC 해상도 증대 - Trigger/Schedule/Event 모드를 구현하여 상시 모니터링 방법 검증 및 운영 Software 개발 - 현장시험을 통해 3가지 모드 및 ICT 기반 원격제어 작동 검증
		보강효과 정량화	- 보강효과 정량화 연구	- 그라우팅 시공 전·후 위상속도차이 분석을 통해 보강효과 정량화
	보강효과검증 물리·수치 모델링 기법 정립	그라우팅 보강 효과 검증	- 물성 연구성과를 활용한 보강효과 검증	- T/B 그라우팅 보강 전·후 물성 DB구축 - 물성 연구성과의 비교·분석을 통하여 정량적인 그라우팅 보강효과 검증 수행
		수치모델 링 기법 정립	- 매개변수 연구 - FEM 침투해석 기법 제시	- 물성 연구성과를 적용, 열화현상 및 그라우팅 보강 모사 수치모델링 매개변수(투수계수 등) 연구 - Geostudio를 활용한 노후 필댐 정상침투거동 평가 및 침투해석 기법 제시

3. 조정밀 주입압 능동제어형 스마트그라우팅 기술 개발

-(주)한세지반엔지니어링

가. 이론적 접근방법

국내에 개발된 주입압 조절 그라우팅 기법들은 대부분 지상에서 주입압을 수동·반자동으로 조절함으로 실제 지하 주입선단부의 압력을 반영하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 노후제체 보강의 관건으로 알려져 있는 주입압 정밀제어를 통해 주입재 주입압 실패로 인한 할렬을 방지하고자 지하 주입부의 압력을 측정하고 보강재를 gf/cm^2 단위 주입하는 기술개발과 더불어 제체 외 저수지 내측 및 농경지 등으로 유출되는 그라우트재를 사전 감지할 수 있는 다채널 스마트센싱 기술 개발을 목표로 하고 있다.

이를 위해 주입부 선단과 지상의 압력차 및 주입압 시간차를 극복하고자 선단부 압력측정시스템과 이를 지상에서 제어하는 능동형 제어장치 그리고 주변부 옹저버 케이싱의 센싱을 통한 외부 누출 알림 시스템을 통합적으로 운용할 수 있는 시스템을 개발하여 극한 수재해 대응 노후 저수지의 성능개선에 이바지 하고자 한다.

나. 연차별 연구수행 내용

1차 년도 수행목표 시제품제작 단계 및 Test Bed(T/B) 준비단계로 이루어져 있다. 기존 특허 및 문헌조사를 통해 시제품제작의 구성 및 성능목표, 기존 시스템과의 차별성을 중점으로 조사하였다. 시제품단계는 지중압력 측정용 선단 장치와 능동제어 시스템의 Prototype을 개발하였으며 이를 통해 현장 간이테스트(홍성 AB방조제)를 수행하였다. T/B 조성을 위해 중소규모 노후 필댐을 국토교통부 산하 국가 주요 댐 관리주체인 K-water 사업부와 협의하여 1차년 연구기간 내 T/B를 선정하였으며 대청댐 주변의 3부댐으로 설정하였다. 이 T/B에서 기초적인 자료를 획득하기 위해 시추조사를 실시(한세지반엔지니어링)하였으며 이를 통해

대상 제체에 대한 물리탐사(지오테크컨설파트)와 물성시험 및 일부검층(K-Water)자료를 제공할 수 있었다.

2차 년도에는 Prototype의 초정밀 압력제어형 통합 시스템과 선단부 압력감지 장치를 최종적으로 개발을 완료하고 성능을 안정화 시키는 단계이다. T/B인 대청3부담에서 성능시험을 수행하였다.

3차 년도는 실증 및 성과 정량화 연구목표를 주제로 시스템의 초도 상용제품을 개발하고 인증 및 제품화와 더불어 1, 2연차의 특허 등 지적재산권을 완성하였으며 추가 2개소의 T/B(공주 홍두깨저수지, 금산 미삭소류지)에서 안정화 단계 시험시공을 수행하였다.

다. 연구성과

(1) 정량적 성과

- 본 연구과제 수행을 통해 Software 개발에 대한 등록 4건, 제품개발 4건, 특허 출원 및 등록 각 4건의 정량적 성과를 달성하였으며, 연구 계획 대비 Software 2건, 제품개발 3건, 특허 출원 및 등록 3건을 초과달성 하였다. 그 내용은 아래와 같다.

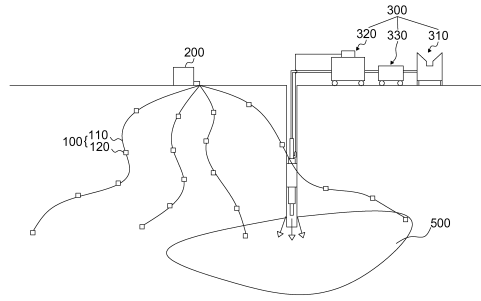
<표 3.3> 정량적 성과 달성 현황

정량적 성과			개발 및 등록	등록일
구 분	계획	실적		
특허 출원/등록	2/1건	3/4건	- 능동제어 그라우팅 무선 오퍼버링 시스템	2017.08
			- 그라우팅 지중 주입압 통합제어장치	2018.02
			- 지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법(국내/해외)	2018.02
			- 지중 주입압 능동 제어를 위한 그라우팅 패커장치	2018.02
Software	2건	4건	- SmartGroutingSys Ver1.0 (지중주입압 능동제어형 그라우팅 시스템 소프트웨어)	2016.05
			- Heat Flow GWSys Ver1.0 (다채널 그라우트재 유동모니터링 및 로깅 시스템)	2016.05
			- HSG GROUTING SYSTEM TOUCH MODULE(HSG 그라우팅 PLC ¹⁾ 터치 모듈 Ver1.0)	2017.04
			- HSG GROUTING SYSTEM CONTROL PROGRAM (HSG 그라우팅 PLC 제어 프로그램 Ver1.5)	2017.05
제품개발	2건	4건	- 능동제어 그라우팅 무선 오퍼버링 시스템	2017.12
			- HSG GROUTING SYSTEM	2016.11
			- 그라우팅 지중 주입압력 통합제어장치 키호스트	2017.12
			- HSG GROUTING PACKER	2016.07

- 능동제어 그라우팅 무선 오퍼버링 시스템
(Active controlgrouting wireliss observer system)
(출원번호 10-2017-0052866호, 특허 제10-1769314호)

본 발명은 오퍼버 센서와 압력감지 센서를 포함하는 모듈을 지중에 매립/설치하여 보강재의 유동현황을 감시하고 보강재 유출시 감지된 정보를 원격으로 그라우팅 지중 주입압 통합제어장치에 전송하여 자동 밸브를 조절함으로써 그라우트재의 제체 외 누출을 방지할 수 있는 기술이다.

1) PLC(Power line communication, 전력통신선) : 일반가정이나 사무실에 전기를 공급하는 전력선을 이용해서 음성과 문자데이터, 영상 등을 전송하는 기술



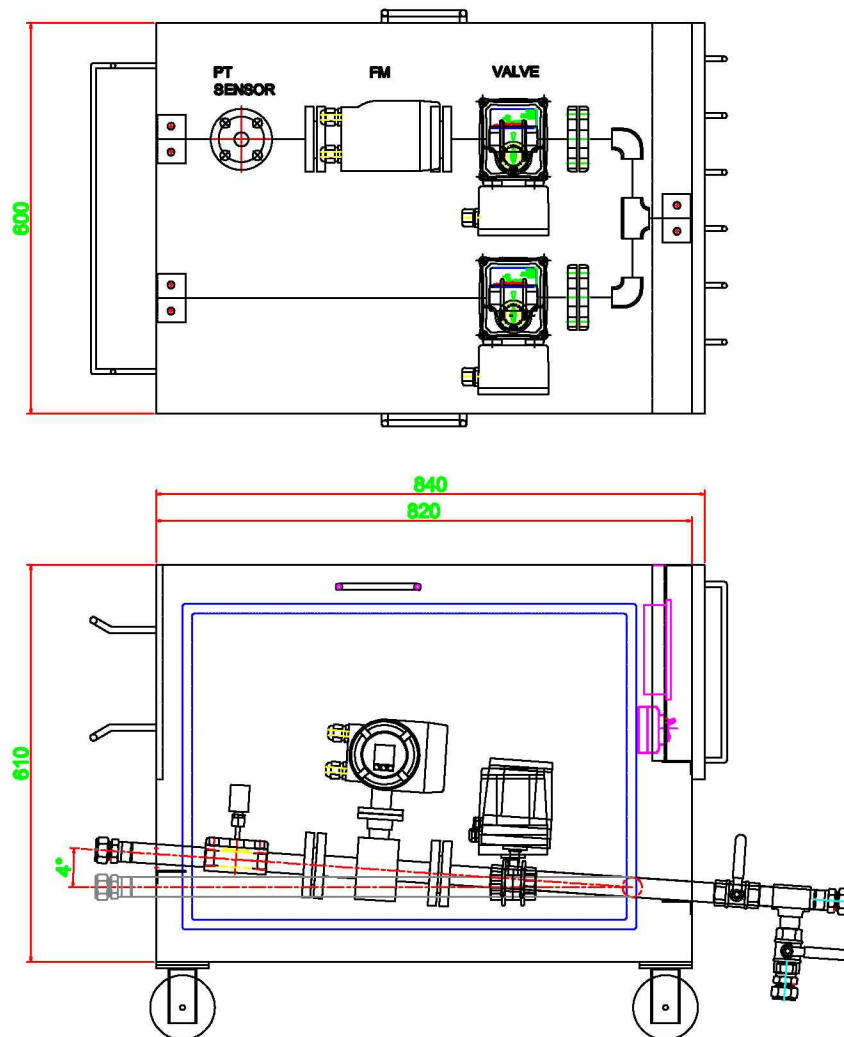
<그림 3.1> 능동제어 그라우팅 무선 읍저버링 시스템 모식도

- 그라우팅 지중 주입압 통합제어장치

(Grouting injection pressure control device)

(출원번호 10-2017-0085775호, 특허 제10-1831688호)

본 발명은 지중 주입압 능동 제어를 위한 그라우팅 팩커와 연결하여 지중에 토출되는 그라우트재의 토출 압력과 지상에서 그라우트가 주입되는 주입압력을 동시에 측정하고 토출압력의 변화에 따라 그라우트의 주입압력을 정밀하게 제어하는 기술이다. 또한, 읍저버 시스템을 사용하여 그라우트 시공 시 팩커 주변에 설치된 센서 모듈을 이용하여 그라우트가 시공범위 밖으로 유출될 시 원격으로 신호를 전송하여 지상 그라우팅 시스템에 위치한 자동 밸브 압력을 조절할 수 있는 기술이다.



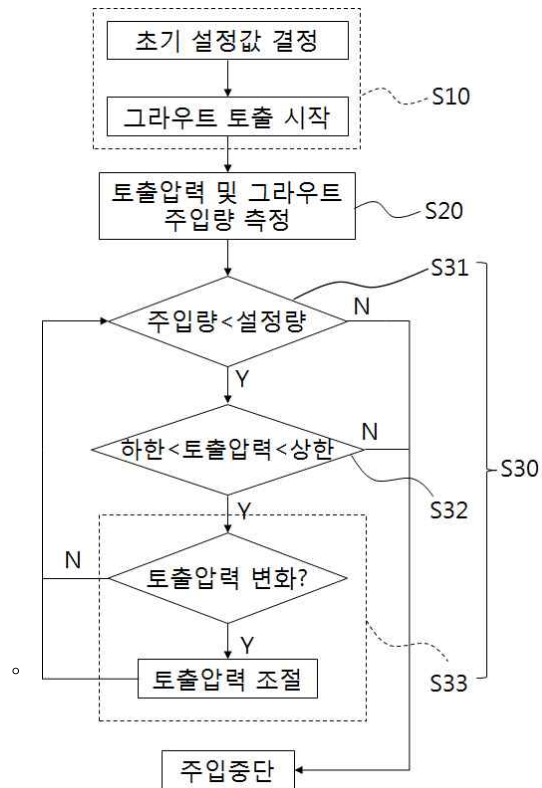
<그림 3.2> 그라우팅 지중 주입압 통합제어장치의 제어부

◦ 지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법

(Underground injection pressure control type grouting method)

(출원번호 10-2017-0110652호, 특허 제10-1831690호, 해외출원번호 PCT/KR2018/004416)

본 발명은 초기 설정된 주입압력을 기준으로 지중에서 그라우트의 토출압력을 측정하는것으로 보다 정밀하고 능동적이 그라우트의 주입이 가능하게 하는 공법이다. 또한 시공범위 밖으로 그라우트가 유출되는 것을 방지하고, 돌발 상황 발생 시 신속하게대처 가능하게 한다.



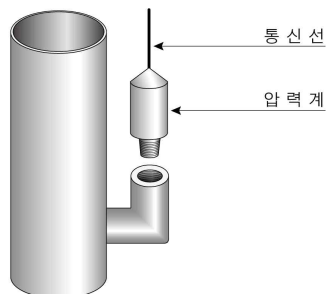
<그림 3.3> 지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법 개요도

◦ 지중 주입압 능동 제어를 위한 그라우팅 패커장치

(Grouting packer device for a active controlling of underground injection pressure)

(출원번호 10-2017-0085774호, 특허 제10-1831683호)

본 발명은 그라우트가 실제 주입되고 있는 선단부, 즉 필렘 내부에서의 주입압력을 정확하게 측정하여 지상의 제어부로 정보를 전달함으로써 정교한 압력제어가 가능한 패커 장치이다.



<그림 3.4> 지중 주입압 능동 제어를 위한 그라우팅 패커장치 압력센서부

- SmartGroutingSys Ver1.0(지중주입압 능동제어형 그라우팅 시스템 소프트웨어)
(등록번호 C-2016-011310호)
기존 지상부 시멘트 그라우팅 주입압과 지중 주입압을 동시에 측정하여 지중 주입압에 따라 사용자가 설정한 압력범위에서 주입량 및 압력을 능동제어 시 사용되는 S/W를 개발하였다.
- Heat Flow GWSys Ver1.0(다채널 그라우트재 유동모니터링 및 로깅 시스템)
(등록번호 C-2016-011311호)
그라우팅 주입공 주변에 관측공을 굴착한 수 관측공 내에 다중, 다채널의 센서를 장착하여 수압파쇄 영향 관측, 압력 및 시멘트 고화온도를 모니터링 할 수 있는 소프트웨어적 시스템이 필요하며 이는 다채널 유, 무선 통신프로그램으로 센서값의 기록 및 차트 기능으로 구성된다.
- HSG GROUTING SYSTEM TOUCH MODULE(HSG 그라우팅 PLC 터치 모듈 Ver1.0)
(등록번호 C-2017-010138호)
그라우팅 지중 주입압 통합제어장치에 설치될 PLC 터치 프로그램 중 터치 모듈의 배치를 작성한 프로그램이다.
- HSG GROUTING SYSTEM CONTROL PROGRAM(HSG 그라우팅 PLC 제어 프로그램 Ver1.5)
(등록번호 C-2017-010139호)
노후 댐체 보강용 그라우팅 공사 시 주입재가 주입되는 시간동안 그라우팅 지중 주입압 통합제어장치 내의 본 프로그램을 통하여 그라우팅 팩커 장치 선단에 설치한 압력제어 작동유무를 확인 및 능동제어를 가능하게 하는 PLC 프로그램으로 구성됨.
- (제품개발)능동제어 그라우팅 무선 오퍼버링 시스템
특허번호 제10-1769314호에 해당되는 능동제어 그라우팅 무선 오퍼버링 시스템의 센서박스에 대한 시제품이다. 그라우트 시공 시 팩커 주변에서 시공범위 밖으로 그라우트가 유출 될 때 팩커 주변에 설치된 오퍼버 센서와 압력감지센서에서 감지된 신호를 수신하고, 원격으로 능동제어 시스템에 원격으로 신호를 전송하는 역할을 한다.

센서박스는 오퍼버 센서에서 감지된 정보에 의해 그라우트의 유동현황을 감지하고, 측정된 압력 정보를 능동제어 시스템에 무선으로 제공할 수 있다. 최대 36채널로 설정 할 수 있으며, 주파수 범위는 447Mhz, 전파파워는 약10dBm으로 채널 간격은 12.5Khz이다.



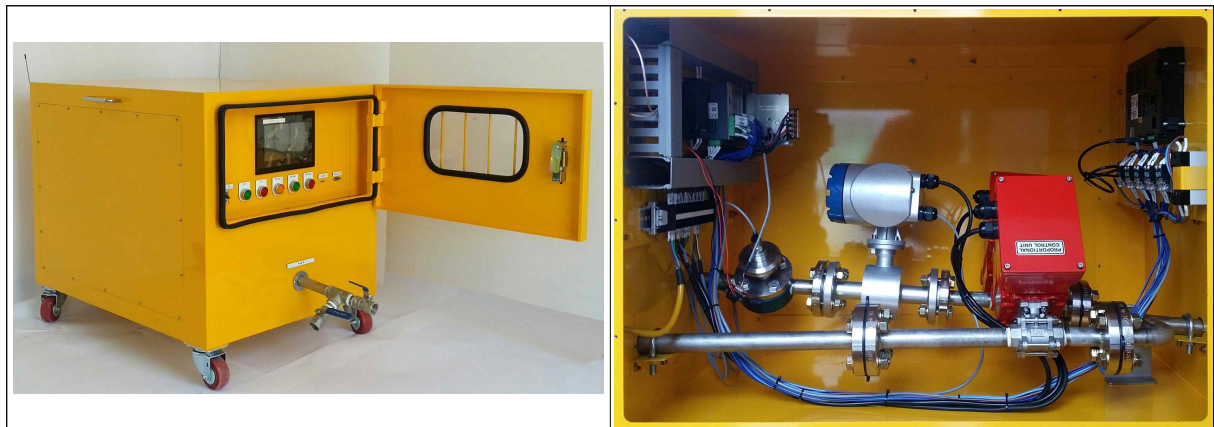
<그림 3.5> 오퍼버링 시스템 센서박스과 센서부

- (제품개발)HSG GROUTING SYSTEM
HSG GROUTING PACKER와 연결하여 지중에 토출되는 그라우트의 토출압력과 지상에서 그라우트가 주

입되는 주입압력을 동시에 측정하고 토출압력의 변화에 따라 그라우트의 주입압력을 정밀하게 제어하는 전자유량계이다. 또한, 오퍼버 시스템을 사용하여 그라우트 시공 시 패커 주변에 설치된 센서 모듈을 이용하여 그라우트가 시공범위 밖으로 유출될 시 원격으로 신호를 전송하여 지상 그라우팅 시스템에 위치한 자동 밸브 압력을 조절할 수 있는 기능을 넣었다. 측정되는 데이터(지중 주입압, 지상 주입압, 유량, 적산유량)은 PCL모니터와 태블릿 앱을 통하여 모니터링 가능하고, 시공 완료 후 데이터는 노트북 또는 USB에 엑셀(CSV) 형식의 파일로 저장이 가능하다.



<그림 3.6> HSG GROUTING SYSTEM 제어 흐름도

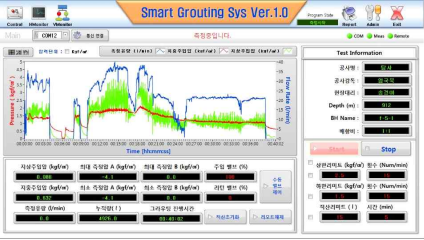
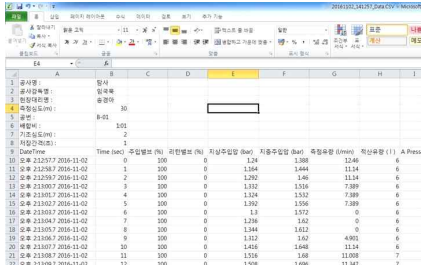
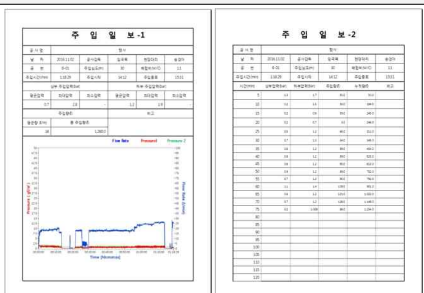


<그림 3.7> HSG GROUTING SYSTEM 외관 및 내부



<그림 3.8> 현장data USB저장 및 태블릿을 이용한 그라우팅 실시간 확인

<표 3.4> HSG GROUTING SYSTEM 내장 프로그램 및 주요기능

메인화면 	주요기능 - 측정시작/정지, 그라우팅 자동 제어 조건 설정 - 측정 정보 입력 - 통신 설정 및 상태정보 표시 - 지상/지중 주입압, 측정유량/주입량 상시 모니터링 및 그래프 표시 - 적산 초기화 및 제어원한 설정 - 그라우팅 수동 제어
시간에 따른 압력 모니터링 	주요기능 - 주입공 및 주변 압력 모니터링 - 주입량, 최대/최소 주입압 표시 - 시간에 따른 압력변화 그래프 표시 - 압력모니터링 최대 32채널 지원
심도에 따른 압력 모니터링 	주요기능 - 주입공 및 주변 압력 모니터링 - 주입량, 최대/최소 주입압 표시 - 심도에 따른 압력변화 그래프 표시 - 주입공당 최대 32채널 지원 - 주입공의 개수 증설가능
측정데이터 	주요기능 - 측정정보 및 센서별 데이터 저장 - 엑셀파일(CSV)형식
보고서 저장 파일 	주요기능 - 주입일보 보고서 저장 - 엑셀파일(xlsx)형식

○ (제품개발)그라우팅 지중 주입압력 통합제어장치 키호스트

그라우팅 시공 시 패커 주변에 설치된 오퍼버 센서와 압력감지센서를 포함하는 센서모듈을 이용하여 그라우트가 시공범위 밖으로 유출될 시 원격으로 신호를 수신하여 여러 대의 그라우팅 지중 주입압력 통합제어장치를 제어하고 각 주입공마다 주입밸브의 압력을 조절할 수 있는 시스템을 제공하는 것을 목적으로 한다.



<그림 3.9> 그라우팅 지중 주입압력 통합제어장치 키호스트

◦ (제품개발)HSG GROUTING PACKER

특히 제10-1831683호에 대한 시제품으로 초정밀 지중압력을 그라우트재의 선단부에서 측정하기 위해 선단부 압력감지 장치이다. 팩커장치의 상단에는 그라우트의 지중 주입압력(토출압력)을 정확하게 측정하는 압력 센서부가 설치되며, 압력센서부는 연결관, 압력센서 및 통신선으로 구성된다. 압력센서부는 그라우팅 팩커장치의 외경보다 내측에 설치되어 시공 중에 마모되거나 파손되는 것을 방지하도록 제작하였다.



<그림 3.10> HSG GROUTING PACKER

(2) 질적 성과

1차 년도에 선정된 T/B(대청3부댐)을 대상으로 Prototype의 시제품을 다양한 실증실험을 통해 시제품의 성능개선과 신뢰성을 검토하고 안정화 작업을 수행하였다. 2차년도 부터는 그라우팅 전문 (주)지에스이가 참여기업을 지원하여 실질적인 그라우팅관련 시제품에 대한 기술적자문과 현장 실증 기술 지원을 받게 되었다.

2차년도와 3차년도는 지자체 저수지를 대상으로 현장실증을 수행한 결과 선단부 압력감지 장치(지중 주입 압 능동제어를 위한 그라우팅 팩커, HSG GROUTING PACKER)에서 gf/cm^2 단위의 지중 주입압을 확인하였으며, 지상에 설치된 능동제어 시스템(그라우팅 지중 주입압 통합제어장치, HSG GROUTING SYSTEM)에서 측정되는 주입압과 유량, 지중 주입압을 실시간 초단위로 현장 data가 입력됨을 확인하였다. 또한 지상에서 측정되는 주입압보다 지중에서 측정되는 주입압이 더 큰 값을 나타내며, 펌프 등에 의한 맥동은 지상의

압력계보다 지중의 압력계에서 더 작게 측정됨을 확인하였다.

미리 입력한 최대 한계 주입압, 최소 한계 주입압, 시간당 유량에 따라 지상에 설치된 능동제어 시스템(그라우팅 지중 주입압 통합제어장치)에서 자동으로 밸브를 조절하여 유량과 주입압을 조절하며 그라우팅 공사를 진행함을 확인하였다.

(가) 그라우트재의 일반적인 주입상황 해석

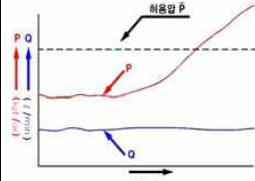
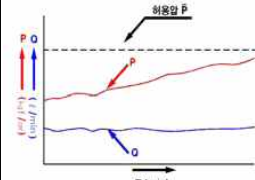
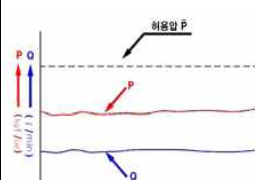
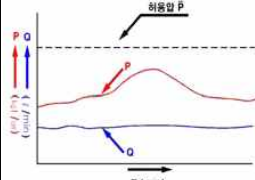
- 초정밀 지중압력 압력-유량 차트 활용

지금까지 주입 중에 반드시 기록되는 주입압의 데이터인 P~T chart(주입압의 시간경과 변화)가 효율적으로 이용되지 않았다. 이것은 지반 및 주입조건의 차이에 의해서 P~T chart가 어떻게 변화하는가에 대하여 정립된 기술적 판단이 요구되지 않았기 때문이다. 또한 주입심도나 상재하중에 의해 P~T chart 및 고결체가 어떻게 변화하는 가에 대해서도 규명되어 있지 않다. 이러한 관점에서 각 주입패턴에 대한 해석을 통한 시간에 따르는 고결체의 거동과 지반주입상황을 예측할 수 있다면 주입시공에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

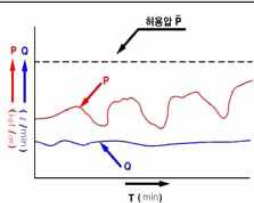
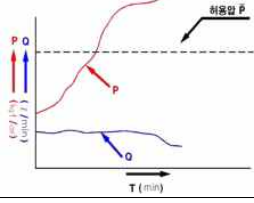
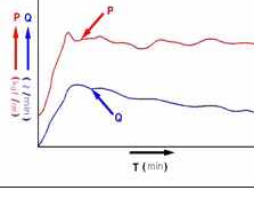
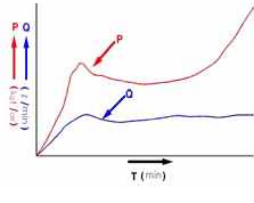
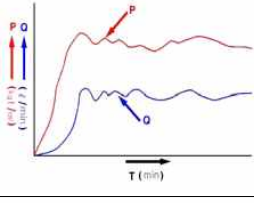
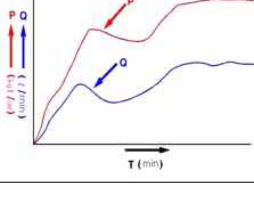
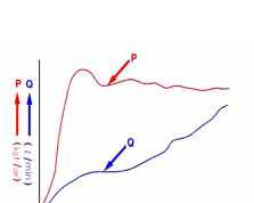
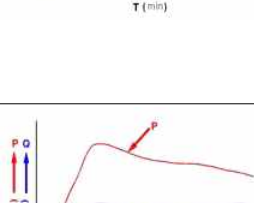
주입대상 지반의 주입특성을 간접적으로 판정할 수 있는 P~Q~T chart (pressure-quantity-time)가 선행연구자들에 의해서 <표 3.4> 과 같이 토사층과 암반층으로 구분하여 표준적인 패턴이 제안되었다.

<표 3.4> 에서 알 수 있듯이 대상지반에 대한 P~Q~T chart 변화를 감지하여 주입유형을 판정하고 그에 대한 조치방안을 시행함으로써 주입공사의 효과 및 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

<표3.5> 주입유형판정 및 조치사항

p~q~t chart	유형판정 및 조치방안
	A형 : 주입개시후 적당한 시간(t)에 주입압(p)가 반응을 보여 급상승함
	①사질토에서 이상적인 침투주입 경우
	B형 : 주입압력이 상승하지만 구배가 비교적 완만하고 쉽게 목표 주입압에 도달하지 않음
	①점성토의 양호한 맥상주입 경우 ②사질토에서 침투주입을 목표로 하지만 일부 맥상주입이 나타나고 토질이 예상보다 느슨한 경우 ③침투주입은 이루어지고 있으나 주입재의 농도가 낮고 겔타임이 긴 경우 ④약액의 일부가 대상지층 밖으로(상부 점성토 혹은 경계면 등) 유출되고 있는 경우
	C형 : 압력이 전혀 상승하지 않거나 오히려 하강함
	①점성토에서 맥상으로 주입되면서 주입재가 광범위하게 유출되고 있는 경우 ②주입재가 지표로 유출되는 경우 ③지표근처의 공극으로 유출되는 경우 ④지하매설물 내로 유출되는 경우 ⑤회석이나 그 밖의 원인으로 주입재가 충분히 겔화되지 않고 넓게 확산되는 경우
	D형 : 상승된 주입압이 어떤 시점에서 돌연 강하하고 그 후 회복되지 않음
	①주입관 주변 packing이 파괴되고 주입재가 유출되는 경우 ②주입속도가 너무 빨라 지반을 교란하면서 유출되는 경우 ③지반의 공극이나 약한 부분을 만나 맥상주입으로 전환되어 주입되는 경우

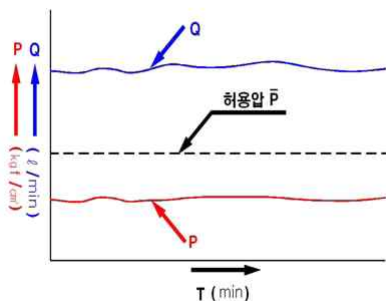
<표3.5> 주입유형판정 및 조치사항(계속)

p~q~t chart	유형판정 및 조치방안
	E형 : D형 상승하강 패턴을 반복하며 주입압력이 상승해 감 ① 주입시간에 비해 켈타임이 짧은 경우 ② 먼저 주입되어 켈화한 주입재가 후에 주입된 주입재에 의해 순차적으로 할렬과 괴되면서 침투하는 경우로 적절한 주입이 이루어지고 있다고 볼 수 있는 경우
	F형 : 주입개시 직후에 주입압이 급상승하여 허용압력을 넘어 버림 ① 토층이 조밀한 경우 ② 켈타임이 너무 짧은 경우 ③ 주입관이 막히는 경우
	A ₁ 형 : 최고압력에 도달한 후 압력은 균일하게 유지되면서 주입율은 감소함 ① 균열이 주입재로 채워지면서 최고의 압력에 도달한 후에도 수개의 미세한 균열이 발생되고 다시 이들 틈새가 채워지는 경우 ② 가장 이상적인 암반 주입형태로 거부반응(refusal)이 일어날 때까지 정압주입을 계속해야 함
	A ₂ 형 : 최고압력에 달한 후에도 압력은 계속 상승하며, 주입율은 일정함 ① 최고압력에 도달한 후 균열의 열림(opening)현상으로 일시적인 압력저하 후 주입재가 채워지면서 압력이 다시 상승 ② 이때는 주입량이 허용량 이내이더라도 주입을 중단해야함 ③ 최종압력이 시방서 압력보다 높더라도 적당히 펌프속도를 낮춰서 재 주입하되 시방압력에서 거부반응이 일어날 때까지 계속함
	B ₁ 형 : 최고압력에 달한 후에도 압력과 주입율이 일정하게 유지됨 ① 최고압력상태에서 확인되지 않은 균열로 들어가는 경우 ② 커튼지수벽 범위를 벗어나는 경우 ③ m당 50~75kg의 시멘트 주입후 균열이 부분적으로 고결된 주입재로 막힘(sealing)이 발생되고 48시간 경과 후 재천공, 재주입을 실시함
	B ₂ 형 : 주입압력과 주입율이 어느 정도 올라갔다가 급격히 떨어짐 ① 최고압력에서 다른 균열(new cracks)이 열리는 경우 ② 이 균열을 채우기 위해 압력과 주입율을 일정하게 유지하면 압력이 서서히 상승함 ③ 만일 2차 최고압력에 도달하였는데도 압력과 주입율이 변하지 않고 계속되면 B ₁ 곡선 처리 경우처럼 48시간 경과 후 재천공, 재주입을 실시함
	C ₁ 형 : 압력이 어느 정도 올라간 후에 변함없이 일정수준을 유지하지만 주입율은 계속 상승함 ① 구조대 층리를 따라 누출, 주입공간 상부 또는 연결공간의 누출, 지층압피가 용기되는 등의 경우 ② 누출이 확인되거나 주입구간(stage)m당 75kg이상 주입되면 주입을 중단하고 48시간 지난후 재천공, 재주입 ③ 누출공은 썬치 등을 박아 탈출을 방지하고 누출공 인접 미주입공은 즉시 공내 세척을 실시하여 본 주입 이전에 폐색되는 것을 방지해야함 ④ 지반용기 현상이 발견되면 주입을 즉시 중단함
	C ₂ 형 : 압력이 어느 정도 상승하였다가 갑자기 떨어지지만 주입율은 변함없이 일정함 ① C ₁ 형과 마찬가지로 구조대를 통한 누출, 주입공간의 연결누출, 지반의 용기에 의해 나타나는 경우로 C ₁ 형과 같은 방법을 조치함

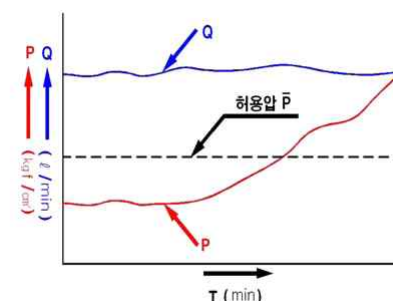
- 주입압 관리기준

국내·외적으로 주입공사 시방에서 규정하는 주입압 관리기준은 일반적으로 다음과 같다.

- 1) 주입압은 주입재가 대상 지반에 양호하게 주입될 수 있도록 하여야 할 뿐만 아니라 주입에 의하여 지반이 할렬(hydraulic fracturing) 되거나 용기되는 것을 방지할 수 있도록 결정한다.
- 2) 주입관, 주입호수, 주입펌프의 부하, 인접 구조물이나 지장물에 대한 영향을 고려하여 최소 주입압은 $3P'$ (P' =간극수압)로 하고 최대한계 주입압은 $5P'$ 로 설정한다.
- 3) 정량주입으로 주입하면서 계획된 주입량이 허용압 이하에서 압력의 상승이 없을 경우에는 주입작업을 계속하고, 한계압력의 범위 내에서 이상적인 상승압력의 곡선을 나타낼 경우에는 주입작업을 종료하게 된다.
- 4) 계획된 주입량이 설계량에 도달되지 않은 상태에서도 주입압력 곡선의 급격한 변화가 발생할 경우에 완전한 충전으로 추정하여 주입작업을 종료하게 된다. 단, 저속·저압 주입인 경우 주입압력이 $1\sim2 \text{ kgf/cm}^2$ 정도만 상승하여도 주입이 완료된 것으로 판단할 수 있다.

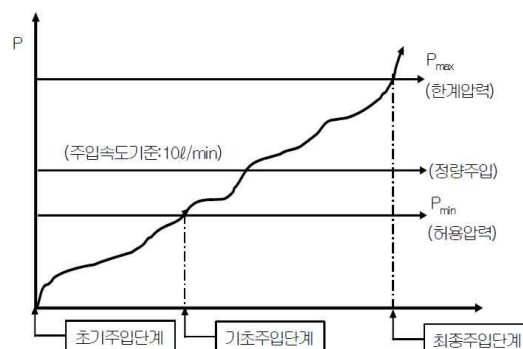


<그림 3.11> 변화 없는 주입형태



<그림 3.12> 급격한 변화 주입형태

- 5) 주입압은 저압주입으로 통상 $3\sim7 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 하며 지하수위 하부 지반에 대해서는 간극수압보다 커야 하고 간극수압의 $3\sim5$ 배 이내로 조절해야 한다. 단, 암반에서의 주입압은 전상재압(total stress)의 4배까지 가능하다. 현장 조건에 따라서는 주입속도와 주입압의 검토를 통하여 최대 주입압 범위 내에서 결정 할 수 있다.
- 6) 주입관리는 예상 주입량을 기준으로 하여 주입압에 의해 그림과 같이 3단계로 관리한다.



<그림 3.13> 주입압 관리 단계도

그라우팅의 성공은 정해진 압력에서 암반이나 토사층의 현장조건에 손상을 주지 않는 범위 내에서 절리나 공극에 들어가는 주입량에 의해 좌우된다. 따라서 보이지 않는 지하에서는 어떻게 주입이 되고 있는지를 알기 위해서 $P\sim Q\sim T$ (pressure-quantity-time) 관리가 필수적이며 $p\sim q\sim t$ 곡선의 몇 가지 주요 패턴과 해석

에 따라서 적절한 주입압, 주입속도 및 주입재 농도(물/시멘트 비)를 조절하거나 주입계속, 주입중단여부 등을 판단 할 수 있다.

(나) 홍성 AB방조제 소규모 시험

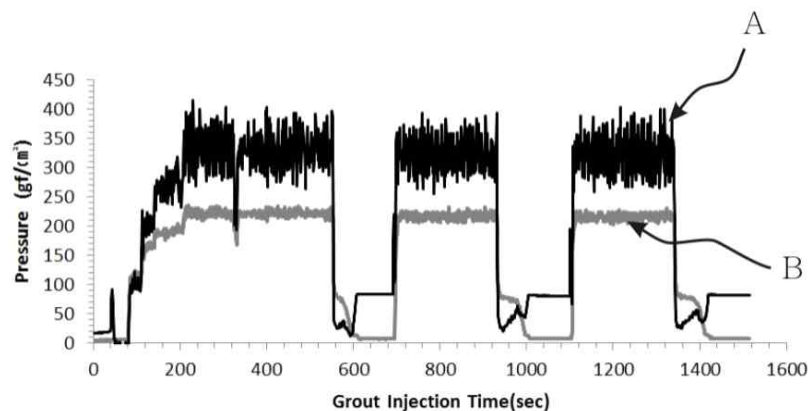
지중 주입압 능동제어를 위한 그라우팅 팩커 장치(HSG GROUTING PACKER)를 이용해 홍성AB방조제에서 실험을 통해 자료를 획득하였다.



<그림 3.14> 현장시험

<그림 3.14>은 측정한 자료(A)와 기존 방식대로 측정한 지중 주입압(B)을 주입시간으로 나열한 그래프이다. 이때 현장조건은 저수지 제체에서 주입압 실패로 인한 수압할렬이 발생하여 그라우트재가 지하로 무한정 흘러가는 상황으로 본 발명의 장치로 측정한 지중압 자료(B)와 기존방식으로 측정한 지상압력 자료(A) 사이에 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이때, 지상압(A)은 펌프에 의한 맥동현상이 관찰되어 압력의 분산이 크게 나타나며 실제 지하 주입부 압력은 이보다 작은 분산으로 주입되어 보다 실제 주입부 상황을 충실히 반영한다. 또한 지중에서 그라우트재가 무한정 누출시 팩커의 고무 팽창부에 의해 구분되어진 주입부 압력(B)은 지상부 압력(A)보다 낮은 것으로 나타난다. 이러한 발명에 따른 현장자료로부터 실제 지중 주입압 측정과 지상압은 차이가 있음을 알 수 있고 주입압 제어를 위해 지중 주입압 측정이 중요함을 파악할 수 있다. 또한 측정된 압력을 지상부 통신제어장치에서 실시간 측정하고 다시 전자유량계를 통해 능동제어가 가능하다. 본 발명을 통해 느슨한 지반상태를 보이는 노후 제체에 비교적 간단한 방식으로 기존 지상방식보다 정확한 주입압을 결정할 수 있을 것으로 해석된다.

또한 연구목표인 그래프(g)단위 측정이 가능한 것을 그림을 통해 확인 가능하다. 기존 일반적인 노후제체의 압력측정은 작업자가 Kg단위 아날로그 기록계를 통한 수동레버로 유량 및 압력을 조정하는 방식으로 정밀한 압력제어가 불가능하며 심부 주입압과의 차이로 인한 심벽부 손상, 주입재 누출과 같은 보장성능 저하요인이 발생하였다.



<그림 3.15> 홍성 AB방조제 HSG GROUTING PACKER 시험결과

(다) 대청3부댐 T/B 실증(질적성과 pH-2-22~40)

- 사업구역 : 대전 대덕구 미호동 일대(대청3부댐)
- 주요공사 : 제 당 그라우팅 공사(No.04+05 ~ No.04+10, L=10m)
- 사전 시추조사 : 2016년 3월 30일 ~ 2016년 4월 1일
- 그라우팅 시공기간 : 2016년 11월 25일 ~ 2016년 12월 1일
- 확인 시추조사 : 2016년 12월 16일 ~ 2016년 12월 17일
- 그라우팅 시공구간 : 제당(L=135.0m)중 10m구간
- 시공회사 : (주)한세지반엔지니어링, (주)GSE



<그림 3.16> 조사위치



<그림 3.17> 대청3부댐 전경

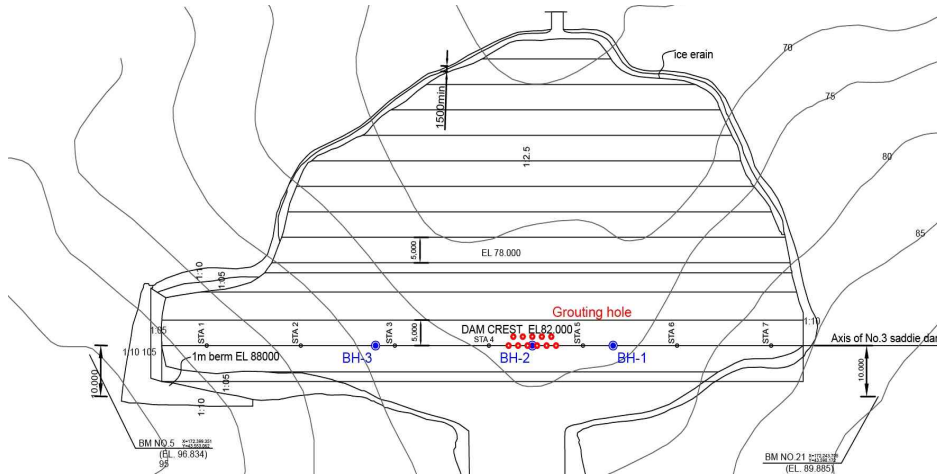


<그림 3.18> 대청3부댐 현장사진

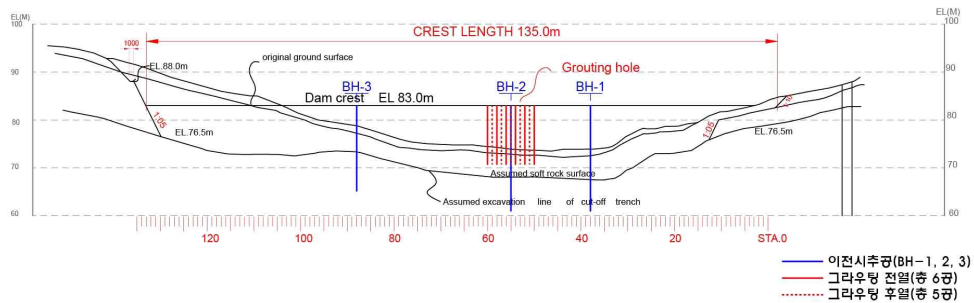
<표 3.6> 대청3부댐 제원

댐	높이(m)	길이(m)	댐마루	
			표고(EL. m)	폭(m)
대청3부댐	14.7	135.0	83.0	6.0

사전 시추조사공인 BH-2번공을 중심으로 양 옆으로 BX규격으로 5m씩 총 10m구간에 대하여 그라우팅 시공하였으며, 전·후열 1m간격, 공간격 2m 구간(총 11공, 공당 12m, 총 132m 시공)에 그라우팅 반응액을 주입하였다.



<그림 3.19> 대청3부댐 시공위치 평면도

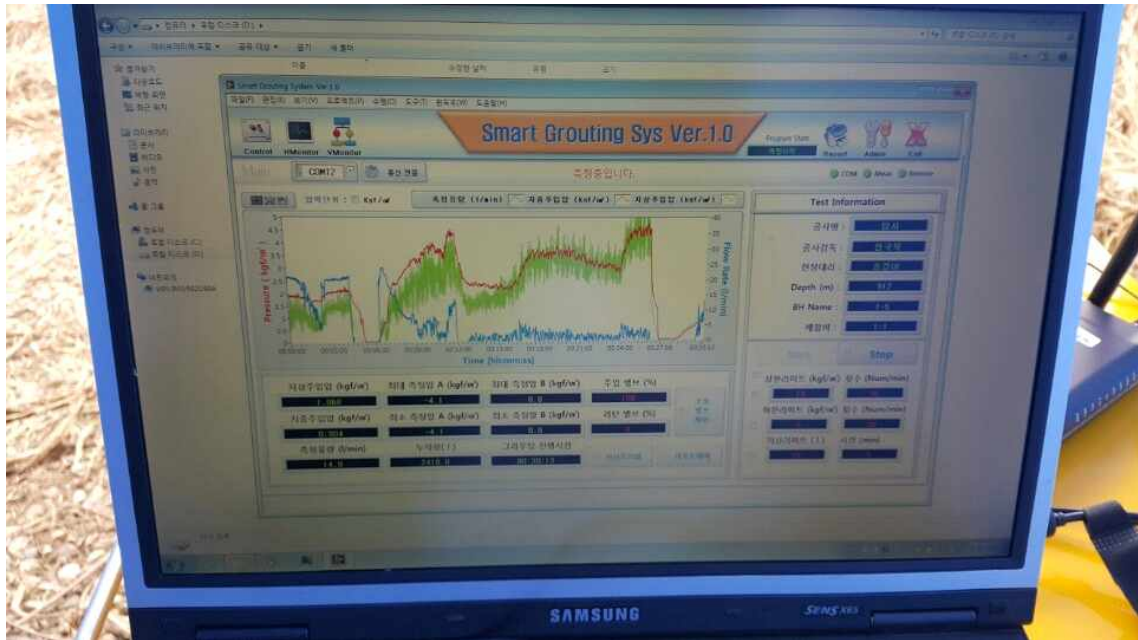


<그림 3.20> 대청3부댐 시공위치 단면도



<그림 3.21> 시공 Flow chart

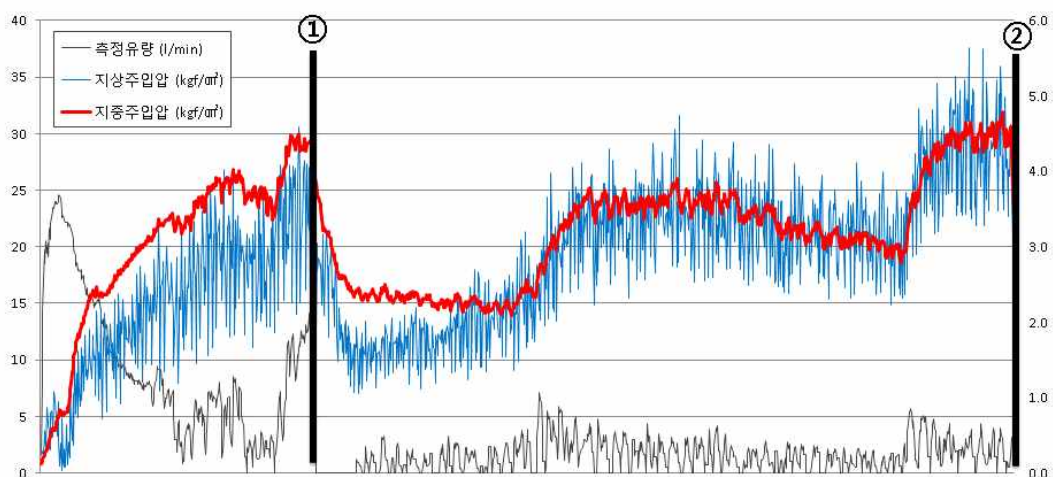
- 지중 주입압 능동제어를 위한 그라우팅 팩커(HSG GROUTING PACKER) 장치의 선단부 압력측정 그라우트제가 주입되는 시간동안 그라우팅 지중 주입압 통합제어장치를 통하여 그라우팅 팩커 장치 선단에 설치한 압력센서 작동유무를 확인하였다. 기존 그라우팅에서 측정되는 지상 유량계의 압력과 본 연구에서 특허 출원된 지중주입압 측정 팩커에서의 측정된 압력과의 비교결과, 지중 주입압 측정이 압력의 변동 폭이 작고, 심도에 따른 정확한 압력 값을 나타내며, 안정적이고 정확한 압력 값 측정을 하는 것으로 확인되었다.



<그림 3.22> 현장 PC 실시간 확인

- 주입압 자동 조절 유무

<그림 3.23>의 주입심도는 상한 9.0m, 하한 12.0m로 배합비(W/C)는 1:1이다. ①구간에서 시공전 설정해둔 상한에 해당하는 지중주입압력이 발생하였으며, 즉시 통합제어장치의 제어로 지상 주입압을 낮추었으며, 동시에 지중 주입압 또한 낮아졌음을 확인 할 수 있다. ①구간에서 압력제어를 수행 한 후 다시 지중 주입압이 상승하여 ②구간에서는 할렬이 우려되어 주입이 자동으로 중단되었음을 그래프로 확인 할 수 있다.



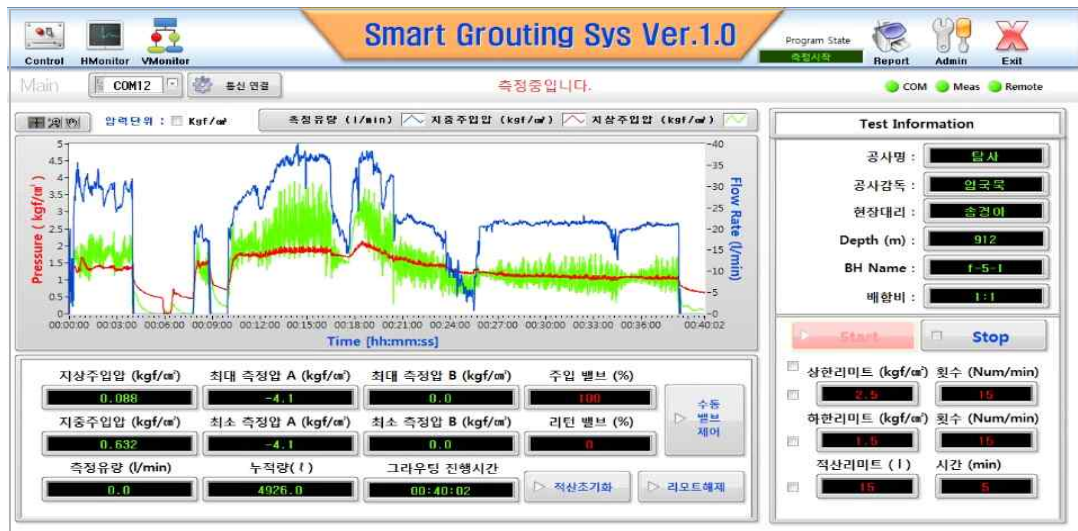
<그림 3.23> F-1(9.0~12.0) P~Q 그래프

- 그라우팅 시스템 소프트웨어 및 다채널 무선 송신모듈(Tx) 작동

그라우팅 지중 주입압 통합제어장치에서 START버튼을 누름과 동시에 시스템이 작동되며, 주입압, 주입

시간, 주입량이 측정되며, 통합제어장치의 디스플레이를 통해 확인이 가능하며, USB에 data형식으로 저장된다.

Wifi를 이용하여 시공현장 인근에서 태블릿 PC 및 휴대폰을 이용하여 제어 및 시공상황을 실시간으로 확인하여 다채널 무선 송신모듈(Tx)의 작동여부도 확인하였다.<그림 3-21>



<그림 3.24> 주입압, 주입량, 주입시간을 디지털 측정 가능



<그림 3.25> USB data 저장



<그림 3.26> 태블릿을 이용한 실시간 확인

(라) 공주 홍두깨저수지 실증(질적성과 p.H-3-25~33)

- 사업구역 : 충남 공주시 계룡면 하대리 일대
- 사전 시추조사 : 2017년 10월 27일
- 그라우팅 시공기간 : 2017년 11월 22일
- 확인 시추조사 : 2018년 1월 31일

<표 3.7> 홍두깨저수지 제원

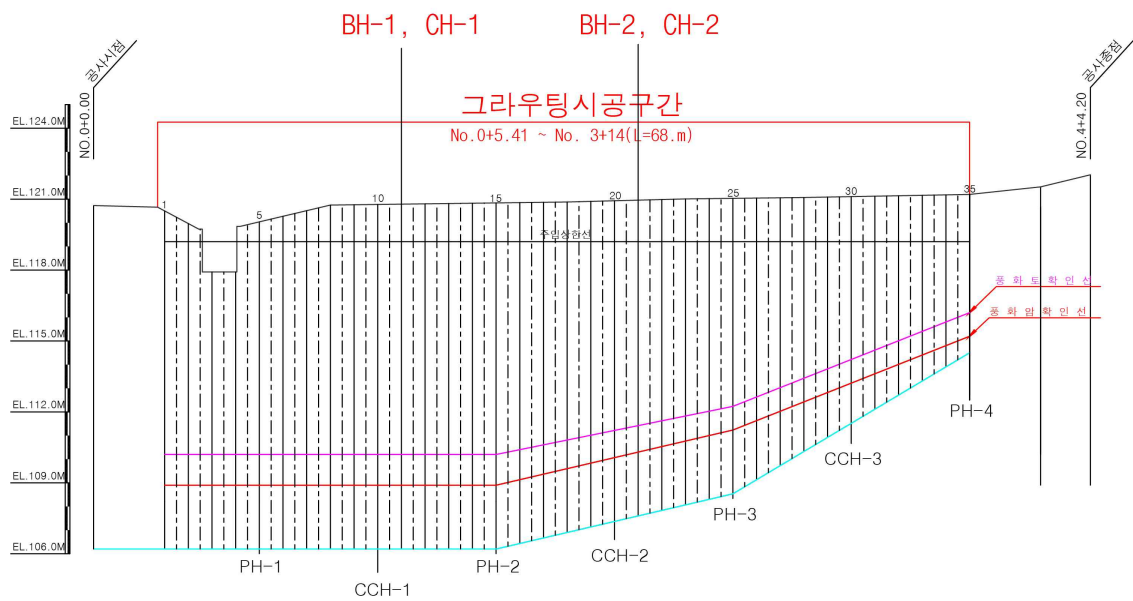
댐	높이(m)	길이(m)	댐마루	
			표고(EL.-m)	폭(m)
홍두깨	12.0	68.0	121.0	3.2



<그림3.27> 공주 홍두개 저수지



<그림3.28> 공주 홍두개저수지 현장사진



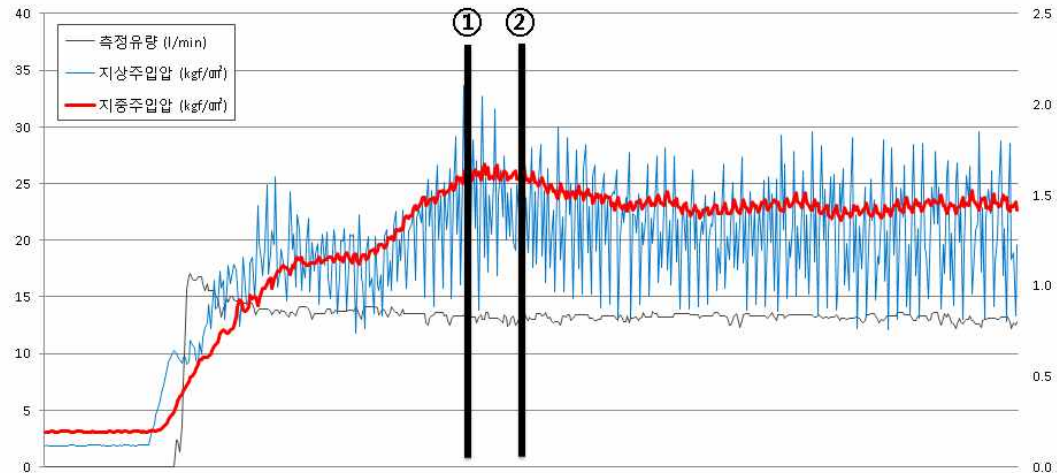
<그림 3.29> 시추조사 및 그라우팅 시공 위치도

<표 3.8> 시추조사 위치 선정 결과

구 분	공 번	위 치 (우안기준)	굴진심도 (GL.(-)m)	규 격	비 고
수직시추	BH-1	Dist. 14.0m	13.0	NX	무수보링
	BH-2	Dist. 34.0m	13.0	NX	무수보링

- 적용평가

<그림 3.30>의 주입심도는 상한12.0m, 하한 15.0m로 배합비(W/C)는 1:1이다. ①구간에서 시공 전 설정해 둔 상한에 해당하는 지중주입압력이 발생했고, 그 이후 일정 횟수만큼 상한 지중 주입압력에 도달하여, ①구간에서 즉시 통합제어장치의 제어로 리턴밸브가 일부 열리면서 지상 주입압을 낮추었으며, 동시에 지중 주입 압 또한 낮아졌음을 확인 할 수 있다.



<그림 3.30> 주입공 P~Q 그래프

(마) 금산 미삭소류지 실증(질적성과 pH-3~34~35)

- 사업구역 : 충남 금산군 추부면 마전리 일대
- 그라우팅 시공기간 : 2018년 5월 29일 ~ 2018년 6월 1일



<그림 3.31> 미삭소류지 전경



<그림 3.32> 미삭소류지 현장적용

<표 3.9> 미삭소류지 제원

댐	높이(m)	길이(m)	댐마루	
			표고(EL.-m)	폭(m)
미삭	14.0	100.5	-	3.5

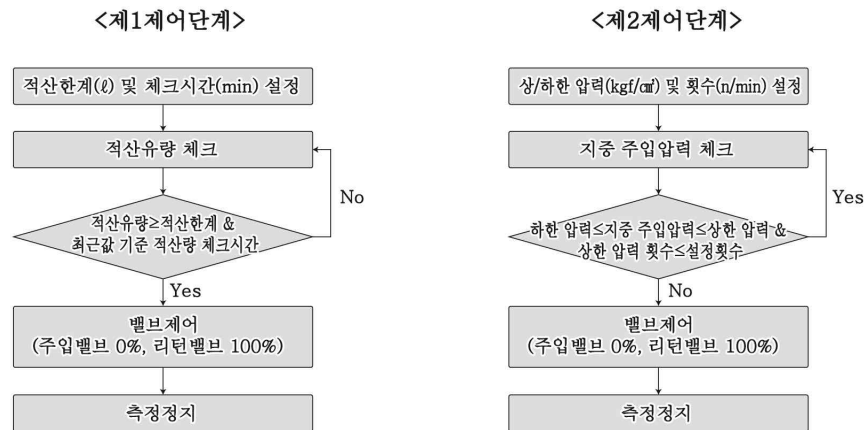
다. 경제성 검토

(1) 지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법 개요

그라우팅의 사전적 개념은 그라우트를 사용하여 지반개량작업을 시행하는 것을 뜻한다. 그라우트는 지반 개량을 목적으로 사용되는 재료를 뜻하며 보통은 시멘트계를 사용한다.

지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법은 준비단계, 주입-토출단계, 측정-전송단계, 제어단계, 출력단계로 구

성된다. 일반적인 그라우팅 공법과의 차이점은 측정-전송단계와 제어단계에 있다. 측정-전송단계는 전용 패커장치에서 측정되는 지중 주입압력(토출압력)과 지상에서 주입압력, 주입량에 대한 정보를 측정하고 통합제어장치 내 제어부에 실시간으로 정보를 전송하는 단계이이고, 제어단계는 제어부에 수신된 그라우팅 패커에서의 토출압력 정보의 변화에 따라 지상의 통합제어장치에서 그라우트 주입량을 조절하여 지중 주입압력(토출압력)을 제어하는 단계이다.

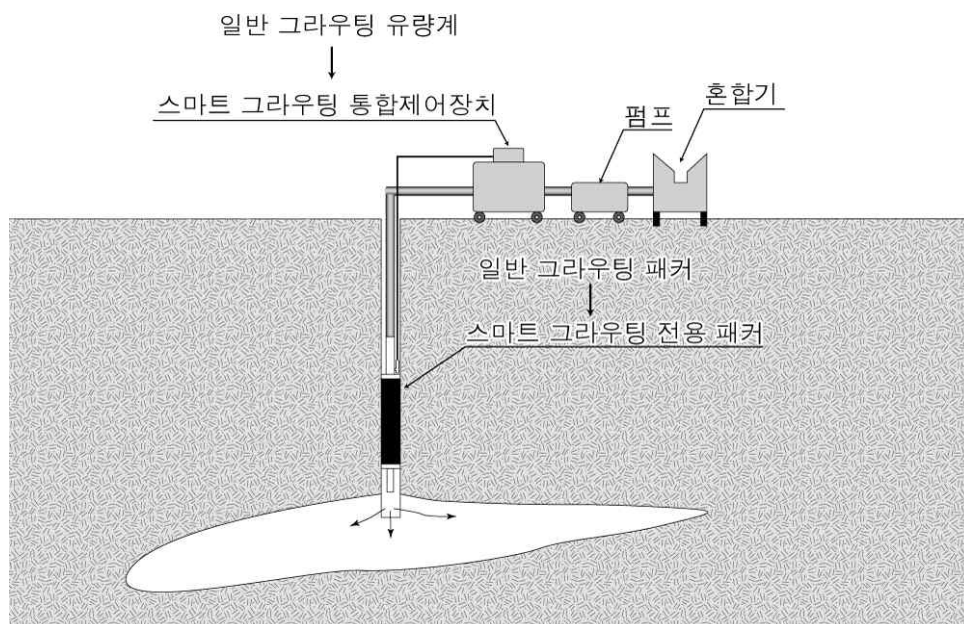


<그림 3.33> 지중 주입압력제어형 그라우팅 공법의 제어 흐름도

(2) 시공기계 설비의 구성·배치

그라우팅 공사의 시공기계 설비는 천공기계(롯데 설치기), 용수펌프, 천공기기(롯데, 비트, 케이싱 등), 믹서, 그라우트 펌프, 기타 제설비로 구성된다. 플랜트는 일반적으로 시공개소 부근에 설치하며, 전자 유량압력계, 펌프·믹서류, 계량 배합장치, 배수처리 설비, 물·전기설비 및 관리 제설비 등으로 구성된다.

지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법은 전자유량계를 통합제어장치로, 패커를 지중 압력을 측정하는 전용 패커장치로 설치하여 사용한다.(그림 3.28)



<그림 3.34> 그라우팅 공사 플랜트 구성 및 배치

(3) 일반 그라우팅과 지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법의 공사비 비교

일반 그라우팅과 스마트 그라우팅의 공사비를 비교·검토하였다. 천공 및 주입작업의 직접공사비를 기준으로 코어천공(BX, 20m 이하)으로 검토하였으며, 주입재료비는 미포함하였다. 그 결과 일반 그라우팅에서는 140,000원/m, 스마트 그라우팅은 137,000원/m로 약 2.1%의 공사비 절감 효과를 나타내는 것으로 검토되었다.

<표 3.10> 일반그라우팅 공사비와 지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법 공사비 비교

구 분	일반 그라우팅	지중 주입압력 제어형 그라우팅	비 고
개략공사비	140,000원/m	137,000원/m	2.1%절감

※ 천공 및 주입작업의 직접공사비 기준

※ 주입재료비 미포함

※ 코어천공(BX, 20m 이하)기준

2. ICT기반 상시 표면파 모니터링 시스템 개발

-지오테크컨설파트(주)

가. 이론적 접근방법

노후화 된 댐 및 저수지 등의 안정성 확보를 위해 그라우팅을 통한 보강이 수행되고 있으며, 그라우팅 전·후 보강 효과를 평가하기 위해 대부분 전기비저항 탐사를 수행하고 있다. 또는 그라우팅만 수행하고 그에 따른 안정성이 얼마나 확보가 되었는지 규명하지 않는 일도 빈번하다. 위에서 언급한 것과 같이 전기비저항 탐사는 함수비, 그라우트재의 화학적 특성, 기후 등 환경적 요인들에 의해 값이 달라지므로 정성적 평가라는 한계성을 갖는다. 그러므로, 이를 보완하여 정량적으로 보강효율을 평가하고, 그 결과에 따라 추가 보강 및 안정성을 파악 할 수 있는 기술을 확보는 것이 필요하다.

본 연구에서 이용하는 표면파탐사는 실체파(P파, S파)와 표면파(러브파, 레일리파)로 구성되는 탄성파에서 레일리파를 이용하는 탐사방법이다. 탄성파에너지 중 80% 이상의 높은 비율을 차지하는 표면파로부터 전단 파속도를 측정하는 방법으로서 교량, 댐, 비축기지, 방사능폐기물 처리시설 등과 같은 내진특성(전단파속도, 탄성계수 등) 파악이 필수적인 구조물의 설계 및 시공에 많이 활용되고 있는 방법이다. 일반적으로 현업에서 많이 사용하고 있는 탄성파탐사는 P파를 주로 이용하고 있으며, 탐사방법은 거의 유사하다. 단, 표면파가 실체파와 비교하여 저주파수이므로 발진방식과 수신기에서 차이가 있다.

이러한 표면파탐사는 발생 주파수 대역(저주파수 일수록 탐사심도 증대) 및 지하 매질의 특성에 따라 탐사가능심도가 결정된다. 여기서, 탐사시 고려할 수 있는 부분은 발진원의 종류를 다양하게 적용하여 저~고 Hz 영역까지 획득되는 데이터의 주파수 대역을 확장하는 것이다. 그러나, 최근까지 일반적 탐사방법인 인공 발진원(햄머, 웨이트 드롭, 바이브레이터 등)을 이용하는 경우 대부분 10~수백Hz 정도가 한계이며, 탐사가능 심도는 해상도를 고려할 때 약 20~30m 이내이다. 그러므로, 다양한 크기의 제체에 대해 탐사가능심도 및 해상도를 만족하기 어렵다는 문제점이 있다.

따라서, 본 연구는 기존 탐사의 단점을 극복하고 제체의 안정성과 직결되는 강성변화를 모니터링 할 수 있는 상시 표면파 모니터링 시스템 구축과 보강효과 검증에 위한 수치 정량화 방안을 연구하는데 그 목적이 있다.

나. 연차별 연구수행 내용

1차년도 연구 목표는 1) 기존 문헌 연구 2) Active 및 Passive 동시역산 알고리즘 3) 기초 자료 획득 등으로 시스템 개발을 위한 이론적 연구 및 배경 자료 획득을 목적으로 연구가 수행되었다.

2차년의 주요 연구 목표는 1) 동시 역산을 통한 가탐심도 증대(SW 개발) 2) Prototype의 표면파모니터링 시스템 개발 3) 표면파탐사를 이용한 보강 정량화 연구 등으로 실질적인 Software 및 Hardware의 개발 및 연구가 이루어졌다. 1차년도 연구성과를 바탕으로 동시 역산 알고리즘에 기반한 소프트웨어 개발(MSCM 분석 S/W)을 수행하였으며, 연구 최종성과인 상시 표면파 모니터링 시스템 개발을 위한 Prototype의 장비개발 및 연구가 본 차년에 진행되었다. 그리고, 공동연구기관과 협동연구를 통해 표면파탐사를 이용한 그라우팅 보강효과 정량화 연구를 시작하였다.

3차년도 연구목표는 앞선 연구의 Prototype 시스템을 보완, 업그레이드하여 상시 표면파 모니터링 시스템 개발을 완료함과 동시에 본 개발 장비를 이용하여 노후 저수지 그라우팅 시공에 따른 정량적 평가를 수행함으로써 개발 장비의 검증 및 그라우팅 시공에 따른 보강효과 정량화 연구를 확립하는 것으로, 상시 표면파 모니터링 시스템의 운영 Software 개발, Hardware 보완 및 업그레이드를 진행하였으며, 제2 Test bed를 통해 개발 장비의 검증 및 보강효과 정량화 연구를 수행하였다.

다. 연구성과

(1) 정량적 성과

본 연구과제 수행을 통해 Software 개발에 대한 등록 2건, 제품개발 1건, 특허 출원 및 등록 각 1건, 국내논문 1건의 정량적 성과를 달성하였으며, 연구 계획 대비 Software 1건을 초과달성 하였다. 그 내용은 아래와 같다.

<표 3.11> 정량적 성과 달성 현황

정량적 성과			개발 및 등록	등록일
구 분	계획	실적		
특허 출원/등록	1건	1건	- 복합 표면파 탐사형 상시 모니터링 방법	2017.07
Software	1건	2건	- 표면파 모니터링 및 분석 소프트웨어 (MSCM System)	2017.05
			- 표면파 모니터링 시스템 운영 소프트웨어 (MSCM Operating Program)	2018.06
제품개발	1건	1건	MSCM(Monitoring Stiffness Change by MASW survey) System	2018.04
논문	1건	1건	- 표면파탐사를 이용한 저수지 제체 그라우팅 보강효과 검증 사례 연구	2018.05 6

(가) 특허 출원/등록

◦ 복합 표면파 탐사형 상시 모니터링 방법

(Composition surface wave exploration style ordinary times monitoring method)

(출원번호 10-2016-0023223호, 특허 제10-1762364호)

본 발명은 복합 표면파 탐사형 상시 모니터링 방법을 개시한 것으로, 이러한 본 발명은 능동형(active) 및 수동형(passive)의 표면파 탐사를 함께 이용하는 복합 탐사를 통해 감시대상물(levee body)에 대한 탐사 심도를 증대시키면서 감시대상물의 강성 변화를 상시 또는 주기적으로 모니터링하는 시스템이며, 이에 따라 댐 및 저수지 등의 제체(levee body)와 같은 감시대상물의 안정성 위험도를 용이하게 파악할 수 있도록 하고, 감시대상물의 노후화 및 지진이나 집중호우 등과 같은 자연 재해로 인해 누수 또는 붕괴사고 등의 문제를 사전에 예방하면서, 탐사 진행시의 인적, 경제적 효율성을 높인 것이다.(양적성과 p.173 p.213)

◦ 표면파 모니터링 및 분석 소프트웨어(MSCM System)

(등록번호C-2017-011940호)

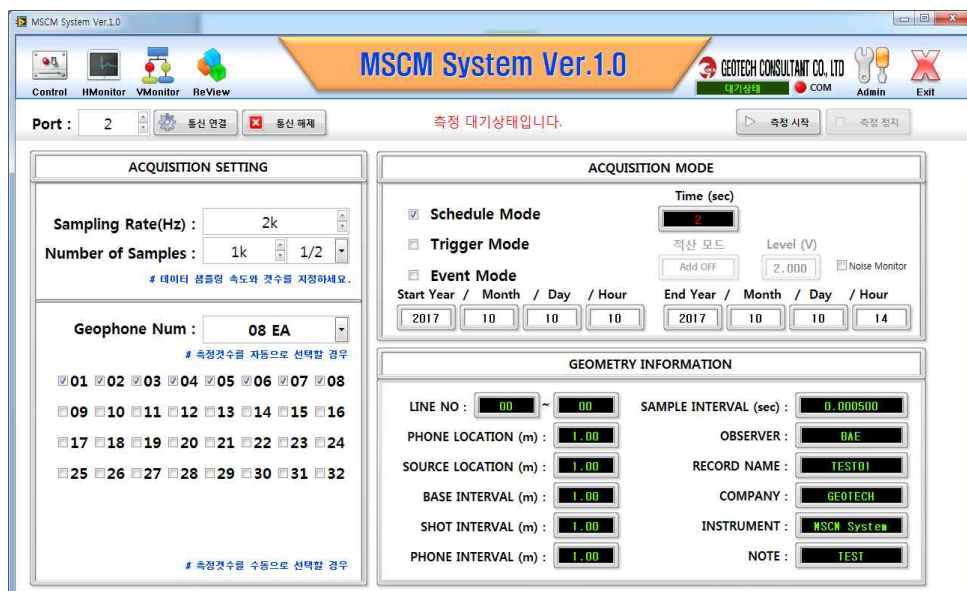
제체 및 지반에 대한 횡파속도 분포를 수직·수평단면으로 분석, 표면파의 특성을 자동으로 파악하여, 비전문가도 쉽게 사용가능, 최신 기술을 적용하여 정확하고, 신속한 결과 도출 가능하다. 프로그램에는 Source/receiver setup, Filtering, 파형 중합(stack), 자동 Dispersion image 구현, Dispersion curve fitting, Active 및 passive 동시 역산 해석 등의 내용을 담고 있다.(양적성과 p.225)



<그림 3.35> MSCM 해석 프로그램 초기화면

- 표면파 모니터링 시스템 운영 소프트웨어(MSCM Operating Program)

본 프로그램은 MSCM System 작동을 위한 운영 S/W로 USB를 통해 개발 장비와 연동되며, 장비제어(원격 포함), 자료취득, 저장, 자료변환(Seg-2 format), 측정모드(Trigger/Event/Schedule) 설정, 탐사방법 설정, 주파수 분석, Noise 모니터링, 네트워크 등을 수행한다. S/W는 최대 32채널까지 데이터를 측정할 수 있도록 구성하였으며, Trigger/Event /Schedule 3가지 mode를 통해 직접탐사 및 상시 모니터링 수행이 가능토록 하였다. 각 mode에 따라 표면파데이터 획득 시 채널 수, 채널 선택, Trigger level, 측정시간, 기타 탐사정보 등의 설정을 변경할 수 있도록 하였다. (양적성과 p.226)



<그림 3.36> MSCM System control 구성 화면

(나) 제품개발

- MSCM(Monitoring Stiffness Change by MASW survey) System

본 연구에서 개발한 상시 표면파 모니터링 시스템(MSCM System)은 크게 측정 장비와 운영 Software로 구성되며, 정기적인 정밀 표면파탐사 수행과 함께 상시 인공발진 또는 주변에서 발생하는 Event를 통해 강성

변화를 파악하여, 제체의 안정성을 모니터링 할 수 있는 시스템이다.

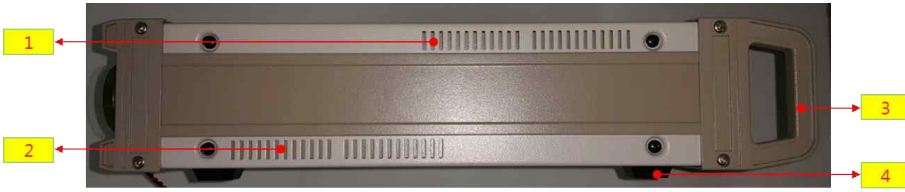
본 연구개발에서 가장 크게 주안점을 둔 부분은 상시 표면파 모니터링 방법이다. 일반적인 표면파탐사를 포함한 탄성파탐사는 대부분 직접 탐사에 최적화되어 있음에 따라 상대적 높은 해상도를 유지하나 상시적 데이터 획득이 어렵다. 이에 본 개발에서는 직접탐사를 통해 주기적으로 정밀 탐사를 수행하고, 평상시에는 주변에서 발생하는 Event 또는 집중호우, 지진(본진 발생 후 여진) 등으로부터 발생하는 탄성파에너지를 통해 개략적인 탐사를 수행하여 제체의 강성변화 모니터링을 수행 할 수 있도록 하는데 목적을 두었다.

이를 위해 본 연구에서는 아래와 같이 3가지 mode를 구현하였다.

- Trigger mode: 기존 탄성파탐사와 동일 방법으로 주기적인 정밀 탐사 수행시 활용
- Event mode: 주변에서 발생하는 noise 중 일정 수준이상의 에너지를 갖는 탄성파에너지가 발생했을 때, 이를 신호로 인식하여 탄성과 탐사 수행
- Schedule mode: 집중 호우기간, 지진발생 후 여진 이용, 주변 토목공사 등 예측이 가능한 발진원을 통해 연속적 데이터 획득 수행

위의 3가지 방법 중 Event 및 schedule mode는 passive source를 이용하는 방법으로 직접탐사에 비해 해상도가 떨어지는 반면 입력투입 없이 자동으로 데이터를 취득할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 표면파 모니터링은 주기적인 상세 탐사와 해상도는 다소 떨어지나 passive source를 통한 평균적인 제체의 강성률 변화 모니터링을 함께 병행하는 것으로 경제성 및 제체 안정성을 평가하는데 그 효용성이 높을 것으로 판단된다.

<표 3.12> MSCM System exterior

구 분	장비 외관
전면부	 ①, ② 장비명, ③ 손잡이 ④ 회사명
후면부	 ① 전원 스위치 ② 전원입력부 ③ 전원 ON/OFF LED ④ USB 통신 port ⑤ 수신케이블 연결부 ⑥ Trigger 연결부
측면부	 ①, ② 상·하부 통풍구 ③ 손잡이 ④ 완충 고무판

- 제품 소개: 본 제품은 MSCM System 중 장치 부분으로 지오폰 연결을 통해 데이터 취득 및 변환(ADC)을 수행한다.
- 장비 Size: 88.1mm(H)×330mm(W)×360mm(D)
- 개발 시스템에 대한 전원 공급은 배터리(12V)와 220V 전원을 동시 지원하는 형태로 상시전원 공급이 어려운 지역에 대해서도 본 시스템을 적용한 탐사 및 모니터링이 가능하다.
- Trigger 및 케이블 연결부는 탄성과탐사 분야에서 일반적으로 가장 많이 사용되는 케이블을 연결할 수 있도록 디자인 하였다.
- ADC resolution: 16bit, 가용채널: 32ch(트리거 채널 미포함), 최대 전압범위: -10~10V, Accuracy: 0.088mV~2.69mV, Sensitivity: 0.0916mV

(1) 질적성과

(가) 기존 문헌 자료검토

댐 및 저수지 등에 MASW 탐사기법의 적용 및 현재 적용 기술 등을 파악하고, 이와 동시에 선진기술 검토를 위해 국내 자료 26편, 국외 자료 62편을 아래와 같이 검토하였다.

국내의 경우 댐 및 저수지와 같은 구조물의 누수 및 안정성 파악을 위해 전기비저항 탐사가 주를 이루고 있으며, 복합적으로 MASW 및 기타 탐사를 함께 이용하는 자료가 대부분을 이루며, MASW의 단일 탐사를 통한 연구는 부족한 편이다. 특히, Grouting 보강 효율을 평가하는데 있어 대부분의 자료가 전기비저항 탐사를 활용하고 있으며, 그에 따른 정량적 평가는 어려운 것으로 보고되고 있다.

국외의 경우 MASW를 이용한 많은 복합탐사 및 연구가 진행되어지는 것으로 파악되고 있으며, 특히, 3차원 구조모델을 통해 MASW 적용성 등에 대한 연구가 활발한 것으로 파악된다. 그러나, 상시 모니터링 및 그라우팅 보강 효율과 관련해서는 자료가 많지 않으며, 특히 MASW를 통한 그라우팅 보강 평가와 관련해서는 최근에서야 연구가 이루어지고 있다.

본 연구의 기술적 위치 및 국내·외 기술력 선점효과를 확보하기위해, MASW 탐사와 관련한 국내·외 특허 기술을 검토결과 현재까지 MASW를 통한 특허 및 연구가 부족한 상태로 지속적인 연구를 통해 국내뿐만 아니라 해외에서도 기술을 선점할 수 있을 것으로 파악된다.

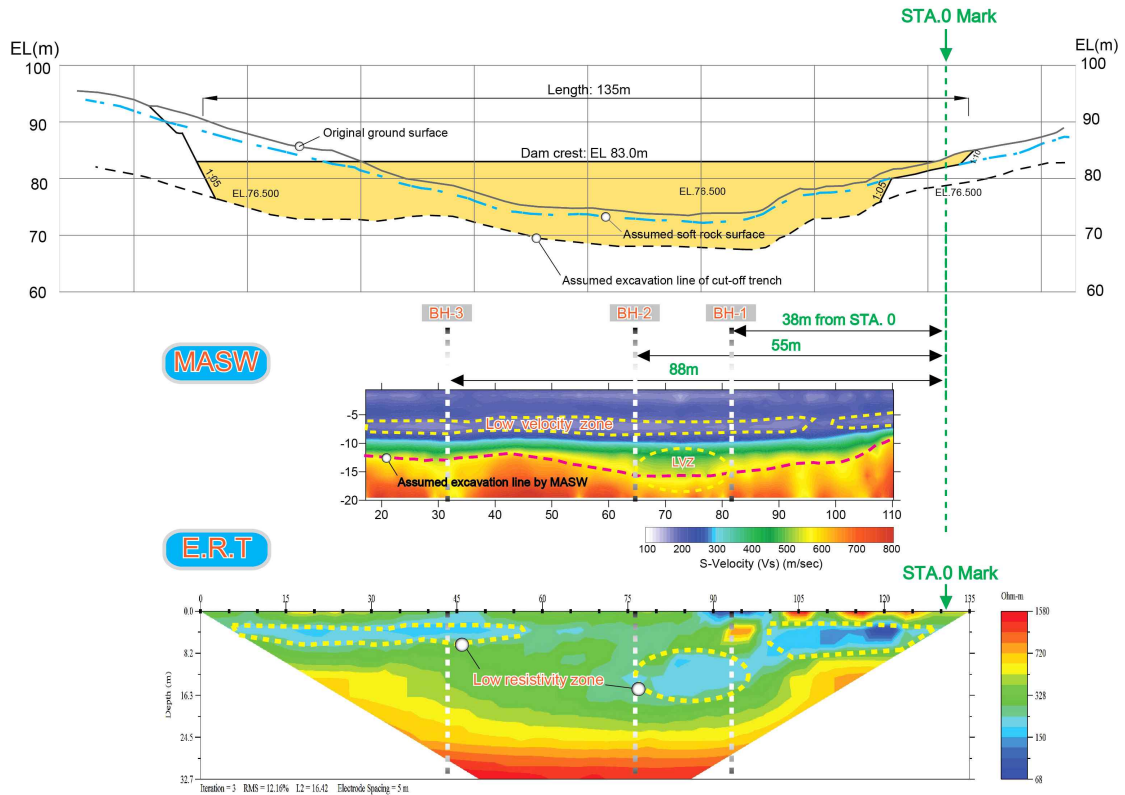
(나) Reference data 획득

K-water의 도움을 받아 대청 3부댐을 T/B로 선정하였으며, 물리적 특성 및 향후 기초자료 활용을 위해 MASW 탐사를 수행하였으며, 추가적으로 전기비저항 탐사를 함께 수행하여, 이상대 분석 및 분석 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

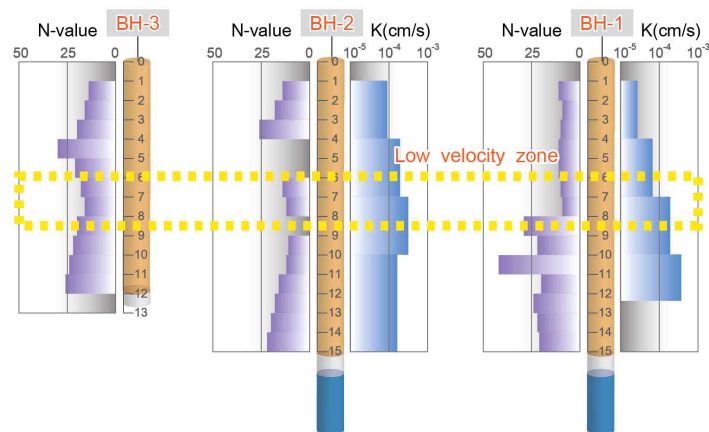
<표 3.13> 탐사 수행 현황

탐사방법	측선연장 (m)	Geophone간격 (m)	Source Interval (m)	First source offset (m)	Channel	탐사방법
MASW	129.0	1.5	1.5	9.0	24	Active Roll-along
탐사방법	측선연장 (m)	전극간격 (m)	측정방법	결과해석		
ERT	135	5	Dipole-dipole, Schlumberger	Dipole-dipole		

① 탐사결과



<그림 3.37> MASW 및 전기비저항 탐사 결과



<그림 3.38> MASW 탐사결과와 현장조사 자료의 비교 검토

- MASW 탐사결과 기존 자료와 비교하여 전반적으로 지층분포특성에 따른 속도 분포 변화를 보이는 것으로 분석되며, 지표하 GL.-6~8m 구간 및 시점으로부터 65~85m (GL.-12m 하부) 구간에서는 저속도대(Low velocity zone)를 나타냈다. 일반적으로 균질형 토언제 형식의 댐인 경우 하부로 갈수록 Compaction에 의해 속도가 증가 될 것으로 고려됨에 따라 위와 같은 저속도대는 지층의 불균질성에 기인한 결과로 파악된다. 축선 중앙부에 위치하는 약 20m 폭의 저속도대는 지형적 요인과 하부 지층의 상태가 파쇄 및 풍화 발달에 따른 다소 불량한 암반상태가 원인인 것으로 해석된다. 이 구간 외 약 GL.-12m 하부에서 국부적으로 나타나는 저속도대는 상기 원인과 같이 파쇄 및 풍화 발달에 따른 영향으로 고려된다.
- 전기비저항탐사 결과 MASW 탐사결과와 유사한 양상을 나타냈다. 지표하 GL.-3~8m 구간에서 전반적으로 저비저항 분포를 보이며, 시점으로부터 80~95m 구간 하부에서도 MASW 결과와 유사하

게 저비저항대를 나타냈다. 그러나, 심도에 따른 지층특성 및 이상대 규모 파악에 있어서는 MASW와 비교하여 다소 resolution이 떨어지는 것으로 고려된다.

- 지반조사결과와 MASW 탐사 결과를 비교한 결과 저속도대가 분포하는 약 GL.-6~8m 구간에서 표준관입시험 결과는 대체로 낮은 N값을 나타내거나 또는 불균질한 지층에 의한 N값 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 투수시험 결과에서도 상대적으로 높은 투수성을 보이는 것으로 나타났다. 특히 표준관입시험 결과는 전 공 모두 GL.-5m 까지 N값이 증가하는 추세를 보이다가, 저속도대에서 감소하는 경향을 보인 후 GL.-8~9m부터 다시 증가하는 양상을 보인다. BH-1의 경우 GL.-8m 하부에서 입도가 불량해지며, N값 변화가 큰 것으로 나타났다.

(다) Active/Passive 동시 역산 수행을 통한 가탐심도 증대

① Active and Passive survey

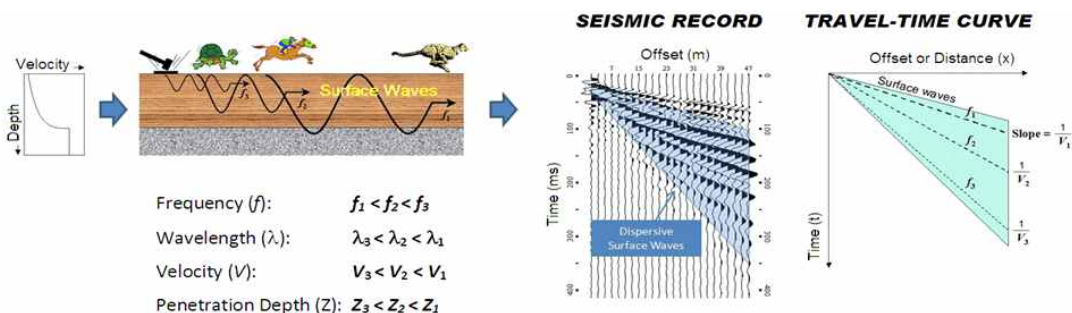
◦ 기본 개념

일반적으로 물리탐사는 자연적 또는 인위적으로 발생하는 전기, 전자기장, 탄성에너지 등이 탐사대상에 따라 나타나는 이상성을 찾는 것이라 할 수 있다. 이러한 물리탐사는 각 물리적 특성을 이용함에 있어 발진원의 기원에 따라 능동형(active) 방식과 수동형(passive) 방식으로 대별되며, 현업에서 사용하는 일반적인 물리탐사방법은 인공 발진원을 사용하는 능동형(Active) 방식으로서 전기비저항탐사, 전자탐사, GPR, 굴절법/반사법/표면파탄성파탐사 등이 대표적이다.

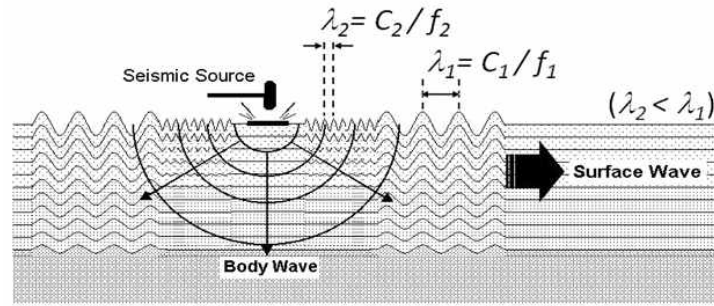
본 연구에서 적용하고자 하는 탐사방법은 다채널 표면파 탐사방법(MASW)으로 댐과 같은 구조물의 내진 설계 및 안정성과 관련된 강성을 파악하기 위해 가장 직접적인 탐사기법이라 할 수 있다. MASW는 표면파 중 Rayleigh wave의 속도를 측정하여 Shear wave 속도를 계산하는 방식으로, 획득되는 주파수 대역 및 해당 매질특성에 따라서 가탐심도가 달라진다. 일반적으로 Active 탐사를 적용시 획득가능한 주파수 대역 및 가탐심도는 10~수 백 Hz, 30m 이내로 알려져 있으며, 통상 가탐심도는 획득 주파수 및 측선 길이에 따라 주파수가 저주파일수록, 측선의 길이를 연장 할수록 탐사심도가 깊어지는 특성을 갖는다. 아래 표와 그림은 상기 측선설정에 따른 가탐심도 변화와 주파수 대역에 따른 파 진행 특성을 보여준다.

<표 3.14> 수진기 간격 및 측선길이에 따른 개략 가탐심도 변화

가탐심도 (m)	측선연장 (m)	수진기 간격(m)		Source offset (m)	
		24 채널	48 채널	24 채널	48 채널
5	10	0.5	0.3	3.0	3.6
10	20	1.0	0.5	6.0	6.0
15	30	1.5	1.0	9.0	12.0
20	40	2.0	1.5	12.0	18.0
25	50	2.0	1.5	12.0	18.0
30	60	2.5	2.0	15.0	24.0



<그림 3.39> Phase Velocity (V_p) = Frequency (f) × Wavelength (λ)



<그림 3.40> 주파수에 따른 파 진행(wave propagation) 모식도

위와 같이 탐사방법에 따른 가탐심도 차이는 다양한 크기의 댐 및 저수지에 MASW를 적용하기 위해 제한 요소로서 작용할 수 있으므로, 이를 파악하고 해결해야 할 필요가 있다.

기존 탐사기법은 Active 탐사로써, 즉 sledge hammer, weight drop 등의 인공 Source를 이용하여 탄성파를 발진시키는 형태의 탐사이다. 기 탐사기법은 시간과 경제적인 면에서 높은 활용도를 보이나, 가탐심도가 약 30m 이내로 그 이상의 탐사심도가 요구되는 댐 및 저수지에 본 기법을 적용하기에는 다소 어려움이 있다.

이러한 문제를 해결하는 데는 크게 2가지 방법이 고려 될 수 있다. 첫 번째는 탐사측선을 길게 하고, 보다 강력한 source(accelerated weight drop 등)를 이용하여 높은 저주파 에너지를 발생시키는 것이다. 두 번째는 자연적(예: tidal motion) 또는 인간활동(Human activities or cultural sources: traffic, construction, ambient vibration) 등의 형태에서 발생하는 Passive 형태의 source를 활용하는 것이다. 이러한 source는 대체로 에너지가 크고 1~수 십 Hz의 주파수 범위를 갖는다.

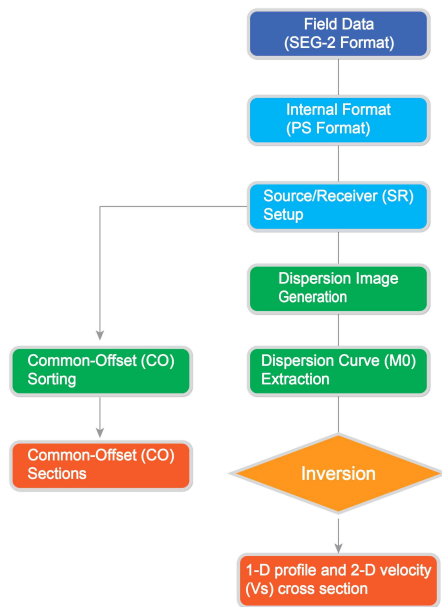
위의 방법 중 첫 번째 방법의 경우 현장 여건을 고려한 측선 연장 및 고가의 Source 구입 및 이용에 따른 고려가 필요한 반면, 두 번째 방법은 Active 방법 대비 같은 측선 길이에서 탐사심도 증대가 가능하다. 단, Passive source가 너무 원거리에 있거나 발생빈도가 낮을 경우에는 이를 적용하기 어려운 단점이 있다.

그러므로, 본 연구과제의 목표 중 하나인 상시 모니터링 시스템 구축을 위해서는 기본적으로 Active type의 탐사를 기준으로 하며, 모니터링 하고자 하는 체제의 크기, 측선 설치의 연장성, Passive source의 활용여부(거리, 에너지 크기, S/N ratio 등), 경제성 등에 따라 유동성을 갖고 접근해야 한다. 보다 상세한 연구를 위해서는 상시 모니터링 시스템 구축 후 지속적인 시험 및 다양한 Test bed의 적용이 필요하다.

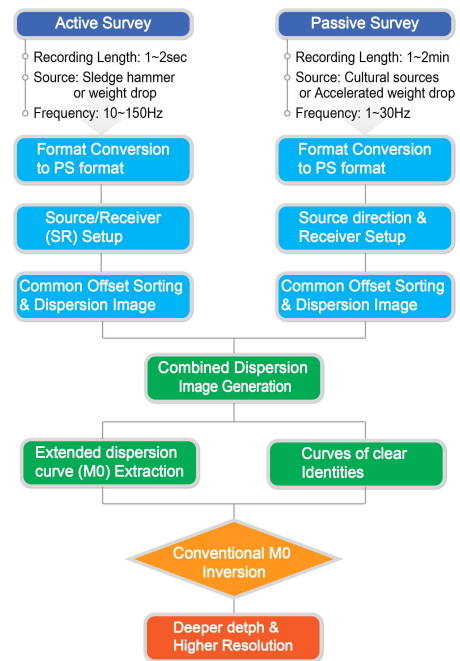
◦ Active and passive inversion algorithm simultaneously

국내의 경우 본 과제에서 연구하는 Active+Passive의 동시 역산 연구는 거의 없는 실정이며, 국외의 경우에도 댐, 도로, 구조물 등의 현업에 적용하기 보다는 연구를 목적으로 Active+Passive 탐사를 적용하는데 그치고 있다. 특히, 본 연구와 같이 댐 안정성 파악을 위한 상시 모니터링 시스템에는 현재까지 그 적용 예가 없다.

Active와 Passive 탐사를 고려함에 있어 결과 분석은 아래 그림과(그림 3.32) 같이 거의 동일한 분석 흐름을 따른다. Active와 Passive 탐사 모두 지하 매질에 따라 파형이 분산되는 성질을 이용하여 분산 이미지를 만들고 그에 따른 1-D 모델을 구축하여 하부 속도를 계산하는 것으로 대부분 동일하다. 단지, source의 기원과 그에 따른 주파수 대역의 차이에서 구분이 된다. 또한, 파형을 기록하는 단계에서 Active 탐사는 약 1~2sec의 기록 시간을 가지면 충분하나, Passive 탐사의 경우 수 십초 이상의 파형 기록이 필요하다. 이는 앞서 언급한 것처럼 보다 낮은 주파수 대역의 신호를 받아들이기 위함이다.



<그림 3.41> General process for the MASW analysis

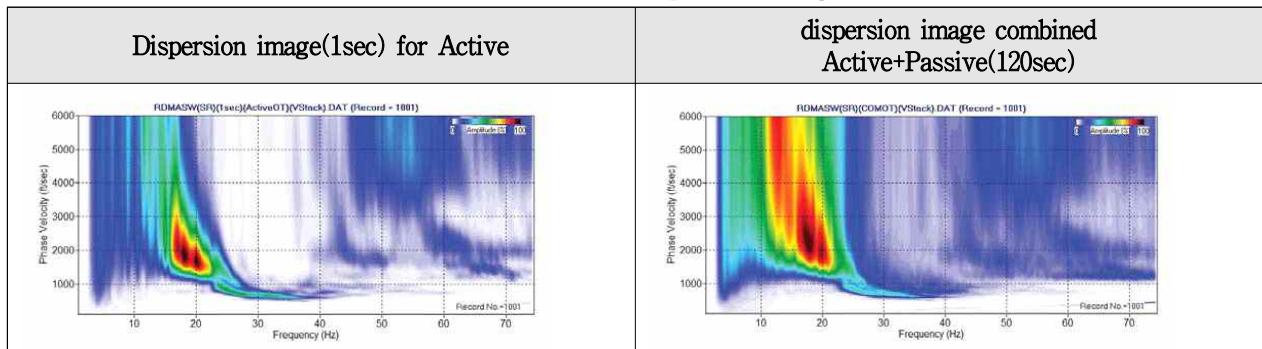


<그림 3.42> Active and Passive Inversion Algorithm simultaneously

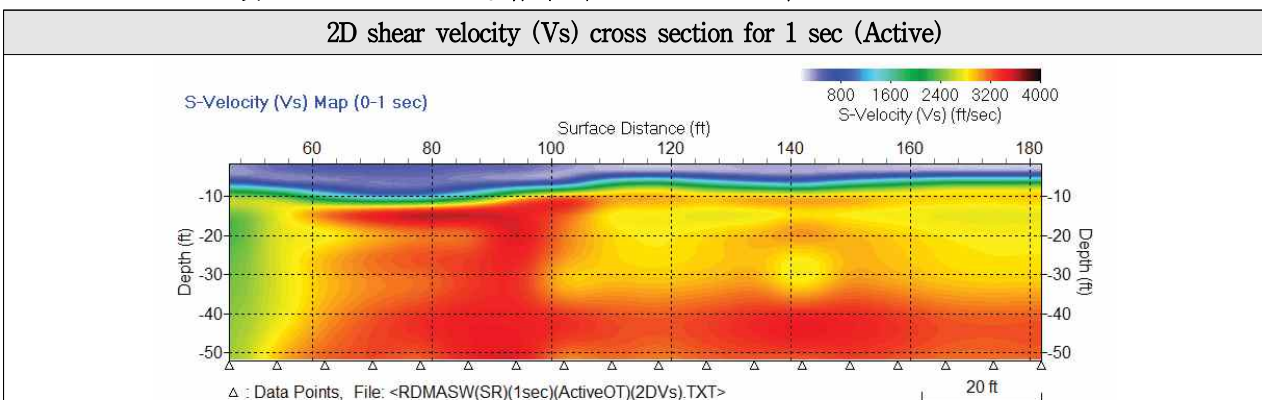
본 연구에서 제시하는 Active+Passive algorithm(그림 3.33)은 아래와 같으며, 두 가지 목적의 향상을 고려하였다. 첫 번째 목적은 앞에서 언급한 저주파수의 확장을 통한 가탐심도의 증대이며, 두 번째는 dispersion image로부터 dispersion curve를 결정할 때 신뢰성을 향상시키기 위함이다.

아래 <표 3.13>의 그림은 Active와 Passive 탐사로부터 획득된 Dispersion image를 staking(중합) 기법을 통해 통합 combined dispersion image를 구현하는 것을 보여주며, 해상도의 증대를 나타내고 있다.

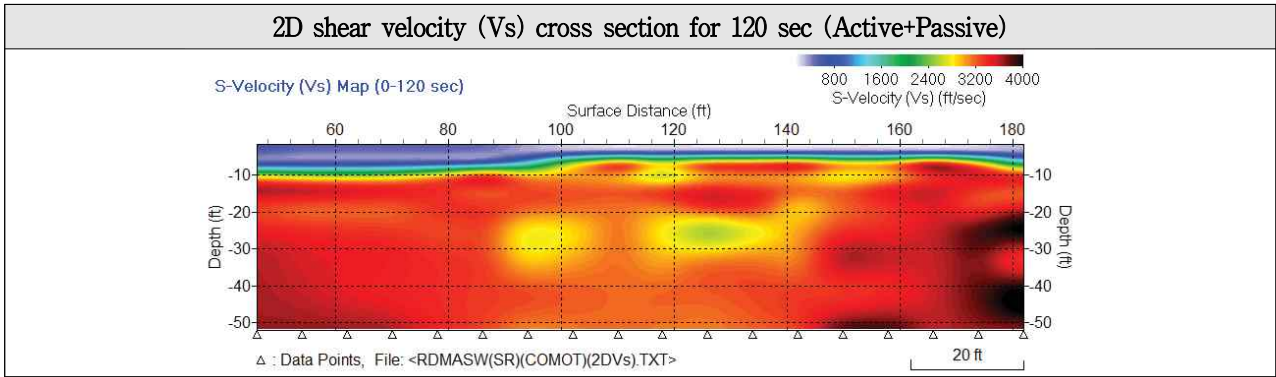
<표 3.15> Active 및 Active+Passive 중합에 따른 dispersion image 변화



<표 3.16> Active 및 Active+Passive 중합에 따른 Vs 단면 변화



<표 3.16> Active 및 Active+Passive 중합에 따른 Vs 단면 변화(계속)



Algorithm을 포함한 해석 Software 개발은 본 연구과제의 자문으로 활동하고 있는 박준병 박사 (Parkseismic LLC, USA)와 공동으로 수행하였으며, 본 과제 2년차에 국내 Software 등록이 완료되었다.

② 동시 역산 수행을 통한 가탐심도 증대

Active+Passive 동시 역산 수행을 통한 가탐심도 증대 효과를 검증하기 위하여 TB(대청3부댐)에서 Active 및 Active+Passive 탐사를 수행하고 분석을 수행하였다.

<표 3.17> Active 및 active+passive 탐사 수행 방법

탐사방법	Sampling rate (msec)	Recording time (sec)	Geophone 간격 (m)	Source Interval (m)	First source offset (m)	Passive Source	Array
Active	0.5	2	1.0	1.5	6.0	Hammer	roll-along
Active+Passive	0.5	20	1.0	1.5	6.0 -	Hammer Backhoe	roll-along

Active+Passive 탐사 수행시 측정시간을 20sec(일반적인 Active형 표면파탐사시 측정시간 0.5~2sec)로 하여 Hammer를 통해 Active source를 발진하고 약 80m 이상 거리에서 Backhoe를 이용하여 무작위의 Passive source를 발진토록 하였다.

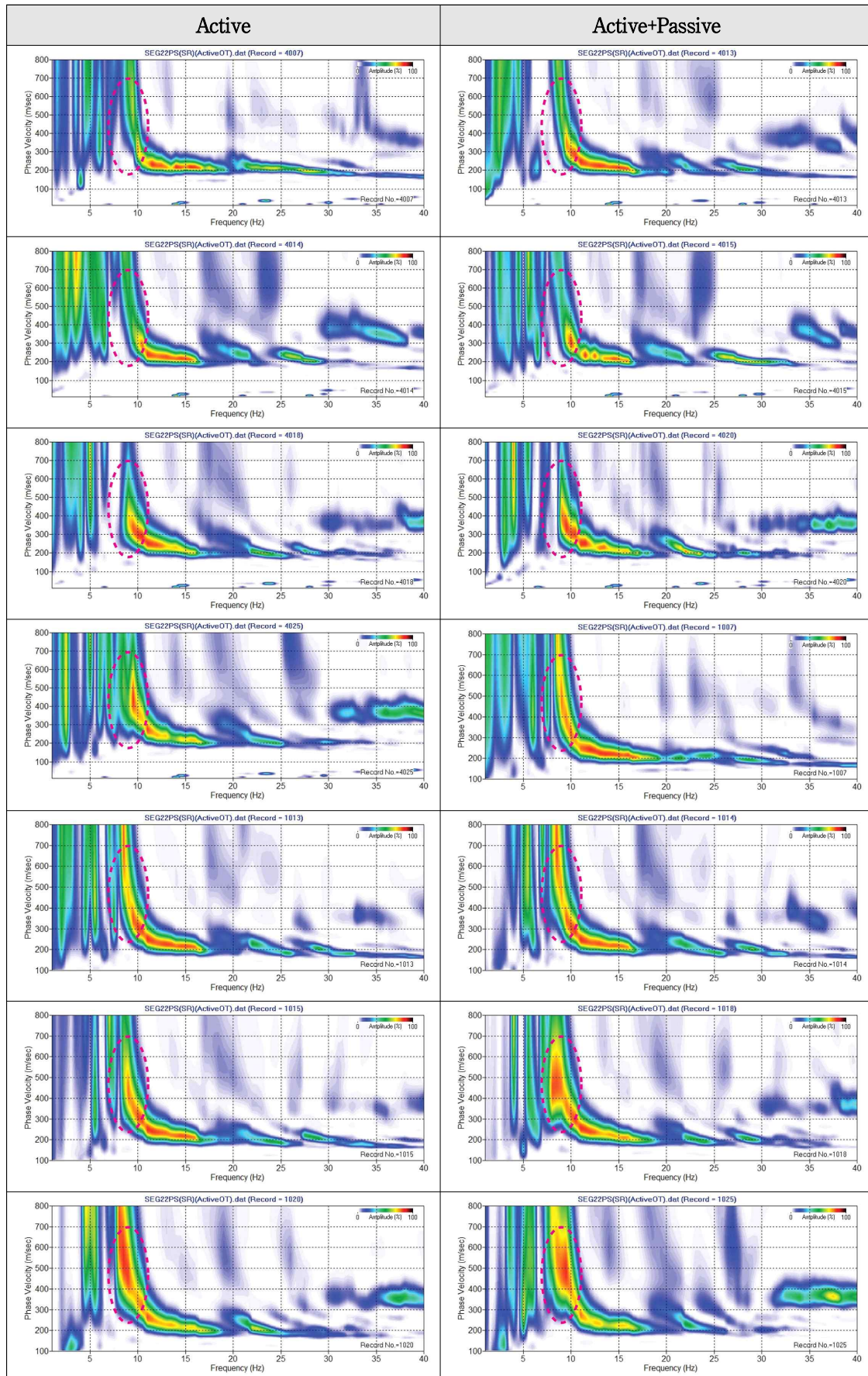
측정장비는 Geometric 사의 Strataview48을 이용하였으며, Geophone은 4.5Hz, 채널수는 24ch로 roll-along 방식을 통해 탐사를 수행하였다.

<표 3.18> Active 및 Passive 탐사 전경

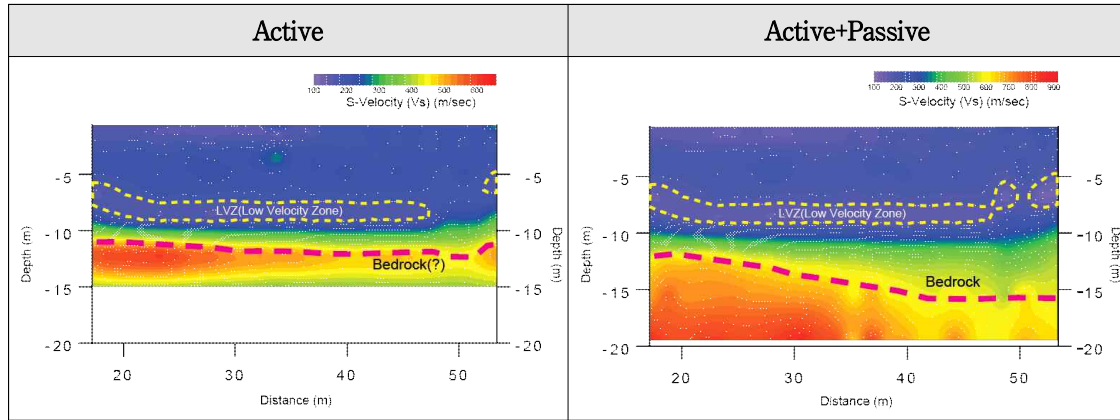
Data Acquisition (Strataview)	Active source
Passive source(1)	Passive source(2)

◦ 탐사결과

<표 3.19> Active 및 Active+Passive 탐사를 통한 Dispersion Image 비교



<표 3.20> Active 및 Active+Passive 탐사를 통한 역산 해석 결과



상기 Dispersion image로부터, Active 탐사 대비 Active+Passive 탐사 결과에서 5~10Hz 대역의 주파수 density가 보다 뚜렷해지는 것을 알 수 있다. 표면파 탐사는 지층 변화(밀도 변화)에 따라 발생하는 dispersion 특성을 통해 속도 단면을 도출하는 탐사방법으로 저주파일수록 탐사심도가 증가하며, 이에 따라 Passive 탐사를 통해 저주파수 대역을 보완함으로써 가탐심도 및 해석능력의 증대를 야기 할 수 있다.

역산 해석 결과에서 상부 구간의 결과는 매우 유사하게 나타나나, 12m를 경계로 차이가 발생하였다. 기존 자료로부터 본 TB 지역의 암반은 약 12~15m 부근에 분포하는 것으로 나타났으며, 그 결과를 반영 할 때 Active+Passive 탐사 결과는 비슷한 지층분포 양상을 보이는 반면 Active 탐사결과는 12~13m 하부로 기반암 분포심도의 확인 및 전단파속도 도출이 되지 않았다. 이러한 차이는 Active 탐사의 dispersion image로부터 저주파수 대역의 density가 확보되지 않아 dispersion curve fitting에 한계가 있기 때문이다.

본 연구로부터 Passive source를 적절하게 이용할 시 저주파수 대역의 보완을 통해 가탐심도 및 하부구간의 해석능력 증대를 기대 할 수 있는 것으로 파악되었다. 본 탐사결과를 통해서서는 약 20% 이상의 증대효과가 있는 것으로 나타났으나, 제체마다 지형 및 기타 환경적 여건이 크게 다르므로 증대효과를 정량화 하기는 어렵다.

일반적인 표면파탐사에서 가탐심도를 증대시키는 방법은 Source와 receiver 간격조정, 측선연장, 저주파발진기 등 다양한 방법을 적용 할 수 있다. 그러나, 제체의 경우 그 크기가 매우 다양하고 측선설치가 제한적이므로 상기 방법들을 적용하는데 문제점을 갖는다. 그러므로, 감시코자 하는 제체에 적합한 최적 측선을 설계하여 Active 탐사를 기본으로 수행하고 Passive 탐사를 적절하게 적용한다면 제체 안정성 모니터링에 활용성이 높을 것으로 기대된다.

(라) 그라우팅 보강효과 정량화 연구

노후화 된 댐 및 저수지 등의 제체 안정성 확보를 위해 그라우팅을 통한 보강이 수행되고 있으며, 그라우팅 전·후 보강 효과를 평가하기위해 지자체 및 관련 업체 대부분이 전기비저항 탐사를 수행하고 있다.

전기비저항 탐사는 함수비, 그라우트재의 화학적 특성, 기후 등 환경적 요인들에 의해 값이 달라지므로 정성적 평가라는 한계성을 갖는다. 그러므로, 이를 보완하여 정량적으로 보강효율을 평가하고, 그 결과에 따라 추가 보강 및 안정성을 파악 할 수 있는 기술을 확보는 것이 필요하다.

이에 표면파 탐사를 통해 그라우팅 전·후 댐체의 강성(stiffness) 변화를 측정하여 정량적으로 보강효과를 판정할 수 있는 연구를 수행하였다.

본 연구는 2개소의 TB(대청3부댐, 홍두깨저수지)를 대상으로 수행되었다.

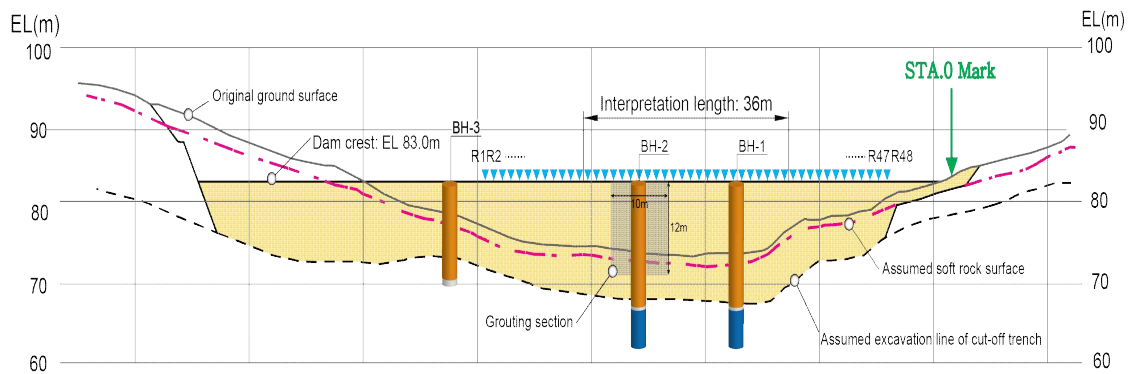
① 대청3부댐 연구결과

그라우팅 보강효과를 검증하기 위해 시공 전·후 표면파탐사를 수행하였으며, 그 현황은 아래와 같다.

<표 3.21> 대청3부댐 그라우팅 시공 및 탐사 수행 현황

날 짜	수행 내용
2016. 11. 08	• 그라우팅 전 MASW 탐사 수행
2016. 11. 25~2016. 12. 01	• 그라우팅 시공(수행 업체: 한세지반엔지니어링, GSE)
2016. 12. 05	• 그라우팅 4일 후 MASW 탐사 수행
2017. 02. 02.	• 그라우팅 약 2개월 후 MASW 탐사 수행

그라우팅 시공구간을 축선 중앙부에 위치하도록 축선을 설계하였으며, 탐사 제원 및 위치는 다음과 같다.



<그림 3.43> 대청3부댐 탐사 위치도

<표 3.22> 대청3부댐 그라우팅 시공 전·후 탐사 수행 방법

탐사방법	Sampling rate (msec)	Recording time(sec)	Geophone 간격 (m)	Source Interval (m)	First source offset (m)	채널 수	Array
Active	0.5	2	1.5	1.5	9.0	24	roll-along

T/B 중앙부에 총 11개 공에 대하여 그라우팅 시공을 진행하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

<표 3.23> 대청3부댐 내 그라우팅 시공 현황

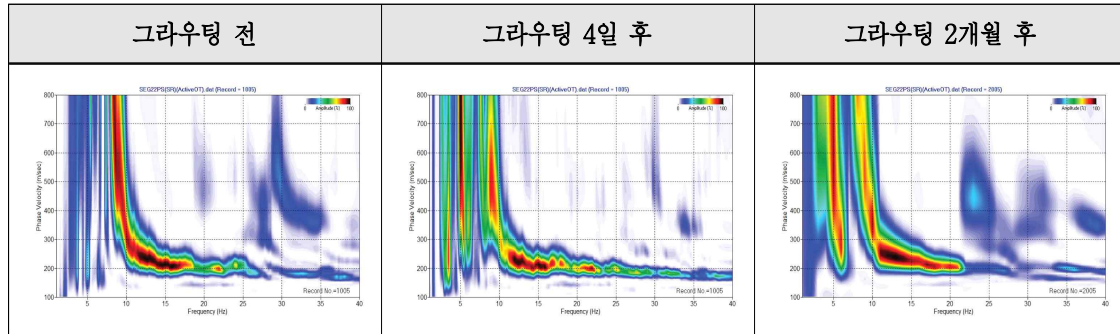
주입구간 (m)	주입시간 (분)	주입량		비고 (F: 전열, R: 후열)
		그라우트(L)	시멘트(kg)	
3.0~6.0	30	366	278.4	• 전공 주입중 누수 발생
6.0~9.0	105	1,937	1,470.7	• 전공 주입중 누수 발생
9.0~12.0	261	3,702	2,540.7	• 압력상승: F-1, 4, R-1, 2 • 누수: F-2, 3, 5, R-3~6

전열 주입량이 1,915(L), 후열 주입량이 4,090(L)로, 전열보다 후열에서 더 많은 주입이 이루어졌다. 전반적으로 전 심도에서 주입 중 인접공으로 그라우트 재의 누수가 발생하였으며, 일부 공에서만 압력증가가 기록되었다.

◦ 그라우팅 보강효과 검증 및 정량화

그라우팅 보강효과를 파악하기위해 시공 전·후 표면과 탐사를 수행하였다. 표면과 탐사는 시공 4일 후, 2개월 후 총 2회 실시하였으며, 양생 중 및 충분한 양생 후의 차이를 보고자 하였다.

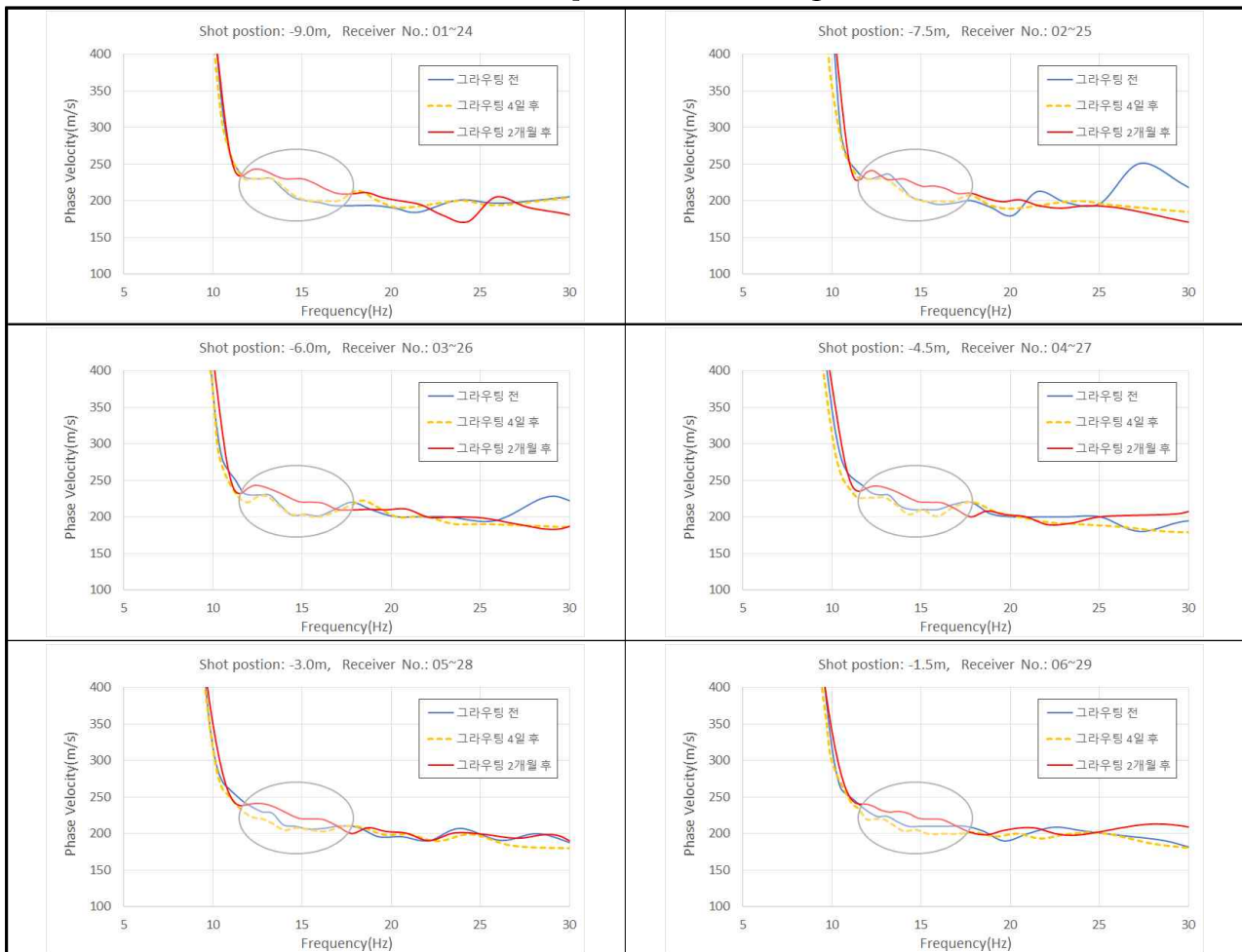
<표 3.24> 대청3부댐 그라우팅 시공 전·후 dispersion image



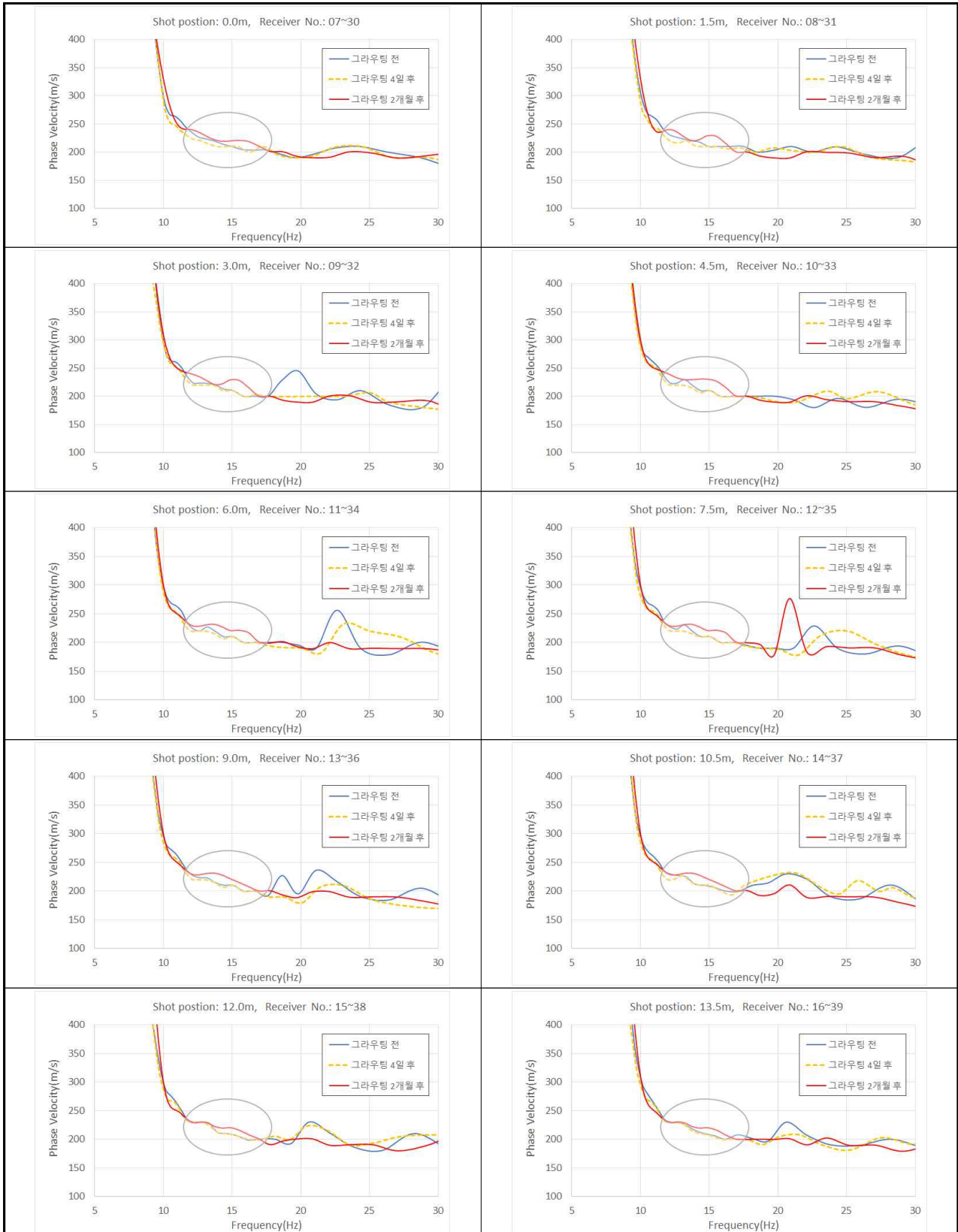
- 탐사당시 주변잡음과 햄머 타격 시 에너지 크기 및 타점 차이 및 그라우팅 시공에 따른 영향으로 10Hz 미만, 20Hz 구간에서 다소 차이를 나타냈다.

- 육안 상 phase velocity의 뚜렷한 차이를 구분하기는 어려우나, 10~20Hz 대역(주요 해석구간)에서 그라우팅 시공 후 2개월의 결과가 다소 높은 속도대를 나타내는 것으로 확인된다.

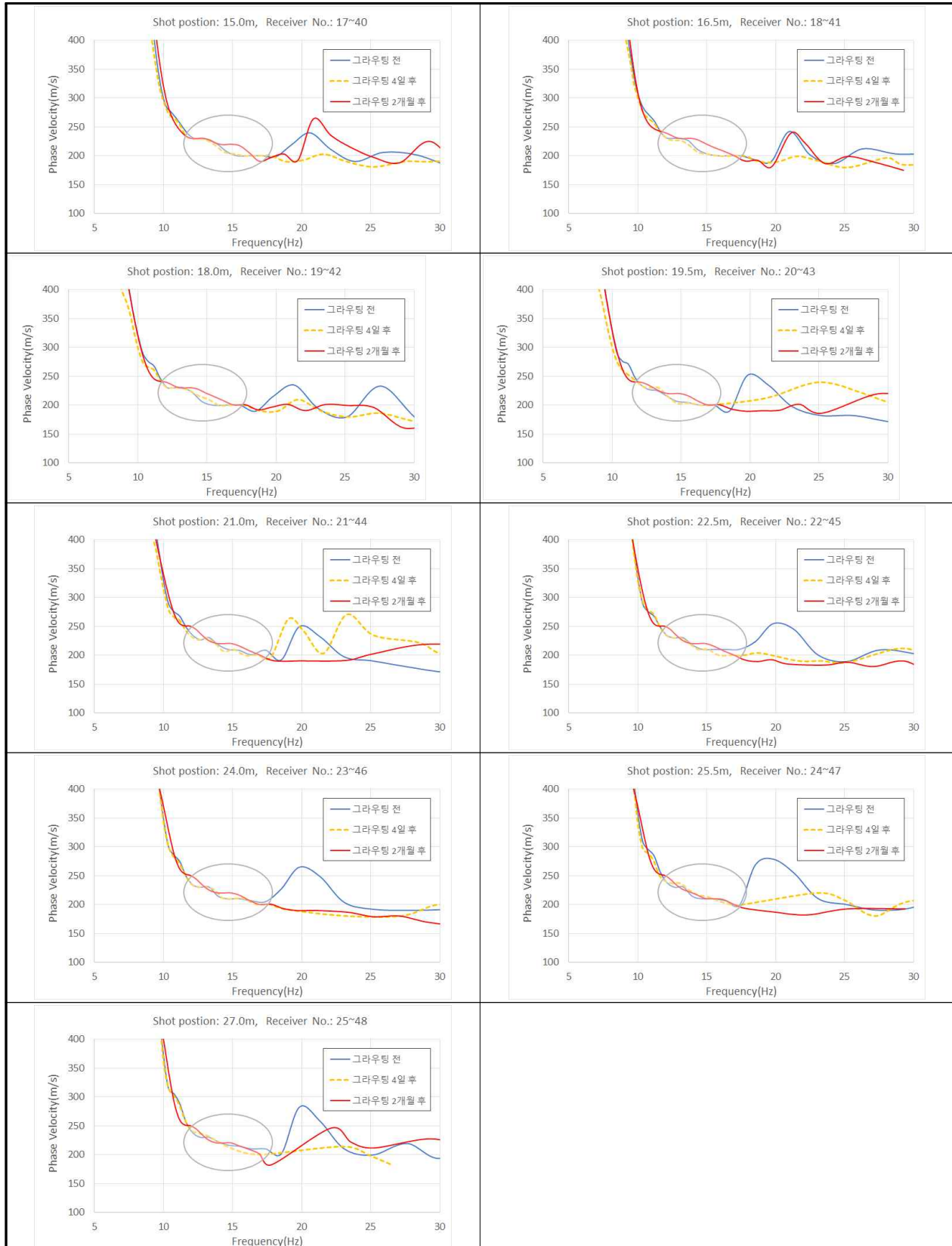
<표 3.25> 대청3부댐 그라우팅 시공 전·후 dispersion curve fitting 비교



<표 3.25> 대청3부댐 그라우팅 시공 전·후 dispersion curve fitting 비교(계속)



<표 3.25> 대청3부댐 그라우팅 시공 전·후 dispersion curve fitting 비교(계속)



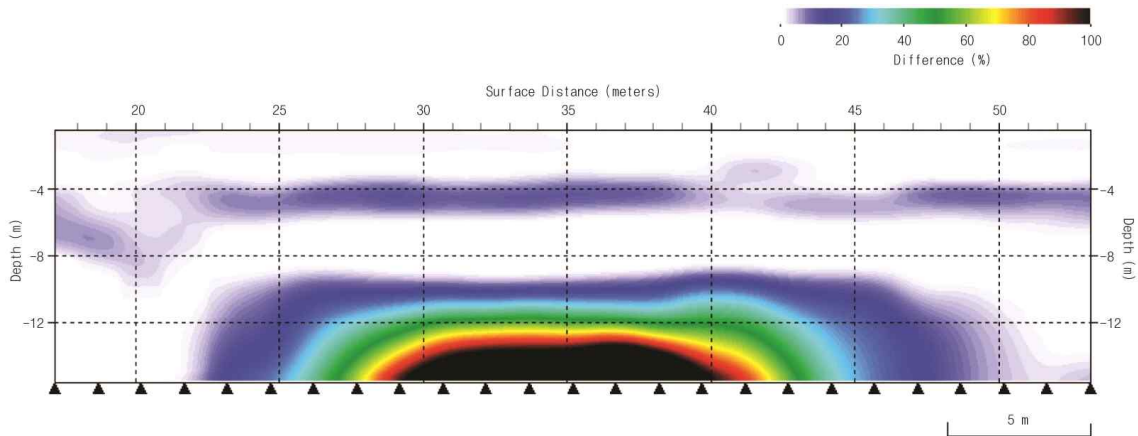
- 위의 Dispersion curve 자료로부터 그라우팅 전 및 4일 후의 결과는 유사한 양상을 보이며, 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 반면 2개월 양생 후의 dispersion curve는 뚜렷하게 약 5~10%의 속도(phase velocity) 증가 양상을 보인다.

- 위의 탐사위치도(그림 3.33)의 해석구간의 시점부터 그라우팅에 의한 속도 증가가 나타나다 14번째 측정

부터 후반부로 갈수록 증가양상이 낮아지는 결과를 나타냈다. 그라우팅 구간 이후의 중반부에선 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

- 상대적 고주파수(18~30Hz) 대역은 지표면에 가까운 천부심도에 대한 결과로서 Auto picking에 의해 fundamental mode(M0)가 아닌 higher mode(M1, M2, M3...) 및 ambient noise에 fitting되어 나타난 결과로 판단된다. 이는 Manual picking 및 filter를 통해 보정이 가능하다.

◦ 역산분석을 통한 그라우팅 전 자료 대비 2개월 양생 후 속도 차이 값 분석



<그림 3.33> 그라우팅 시공 전·후 역산분석을 통한 shear velocity 차이 값(%)

- Ambient noise, small-scale velocity variations, 주관적 fitting 영향 등을 고려하여 역산분석을 통해 그라우팅 전 및 2개월 양생 후 속도 차이(%) 단면을 도출하였다.

- 그 결과 그라우팅 시공구간(심도: 3.0~12.0m) 중 약 4~5m, 9~12m 구간에서 10~30%의 보강효과가 나타났다. 3~9m 구간에 보강효과가 나타나지 않거나 크지 않은 것($\leq 10\%$)은 해당구간 그라우팅 시공 중 지속적으로 지표 누수가 발생한 것과 관계가 있을 것으로 판단된다.

- 전체적으로 역산 수행 후 수평적인 연속성 및 하부로까지 연장되어 나타나는 것은 표면파탐사의 lateral smearing effect 및 역산과정에서 나타나는 문제(over-estimated)에 기인한 것으로 파악된다.

TB 내 그라우팅 시공 전·후 보강효과 판정 결과 약 10~20%의 속도증가를 나타냈다. 이는 전단파속도가 아닌 phase velocity로 서로 간에는 아래 식과 같이 다소 차이가 있다.

$$\text{Phase velocity}(V_{\text{phs}}) = \text{Frequency}(f) \cdot \text{wave length}(\lambda)$$

$$V_{\text{phs}} = (0.92 \sim 0.93) \cdot V_s(\text{shear velocity})$$

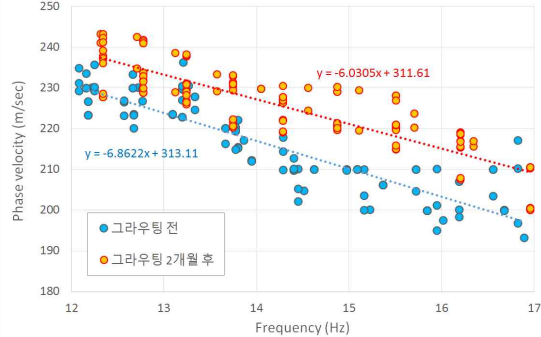
본 연구에서 보강효과에 대한 판단은 제체의 안정성과 밀접하게 연관되어 있는 강성률의 변화를 정량적으로 파악할 수 있는가에 달려있으며, 강성률은 전단파속도와 매우 높은 상관성을 보이고, 전단파속도는 phase velocity로부터 추정 될 수 있다.

$$\text{Shear modulus}(\mu, \text{stiffness}) = \rho \cdot V_s^2$$

표면파탐사를 통한 그라우팅 보강효율을 정량적으로 평가하는 데는 현장에서 측정한 raw data를 통해 분산이미지 작성 및 분산곡선 결정 후 위상속도차이 분석을 통해 평가하는 방법과 역산분석을 수행하여 분석하는 방법이 고려되었다. 위상속도차이 분석을 통해서 해석된 보강효율은 약 10%를 보이는 반면, 역산 해석 기법은 10~20% 이상을 나타냈다. 역산을 수행함에 있어 나타나는 수평, 수직적인 확장 및 over-estimation을 고려한다면, 위상속도차이 분석을 통해 정량적으로 수치화하는 것이 더 적정할 것으로 판단된다.

상기 연구를 통해 T/B 내 그라우팅 시공 후 보강효과는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

<표 3.26> 위상속도차이 분석을 통한 강성률 변화 분석

Analysis of phase velocity difference for the grouting before and after	Shear velocity estimated approximately. (m/sec)	Shear modulus(μ , MPa), $\rho=19.2\text{kN/m}^3$
 • About 5~10% increased	Before: 213~250 After: 227~260	Before: 89~123 After: 101~132 ※ reinforcement efficiency: 7~14% increased

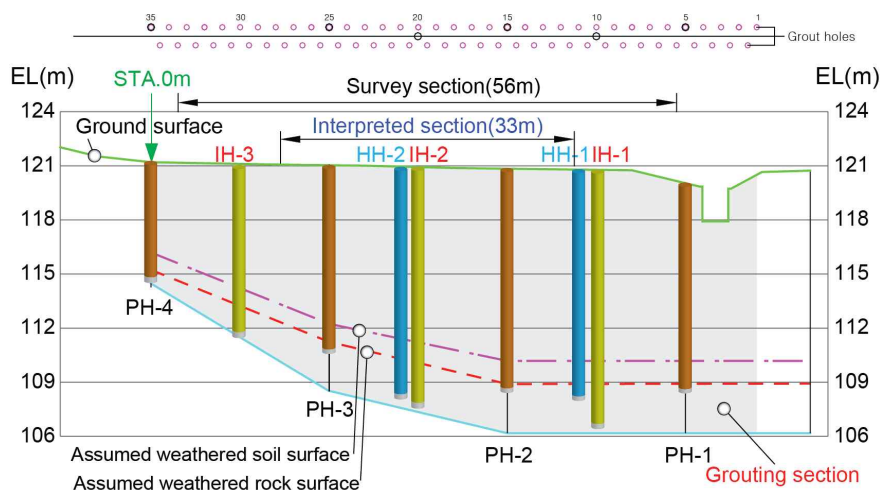
T/B 내 그라우팅은 주관기관 한세지반엔지니어링에서 개발 중인 “지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법”의 테스트 일환으로 진행됨에 따라 댐체 보강을 판단하기에는 다소 무리가 있으나, 그라우트재 주입에 따른 시공효과는 시공 전·후 뚜렷하게 차이를 보이는 것으로 나타났다.

② 공주 홍두깨저수지 연구결과

그라우팅 보강효과를 검증하기 위해 시공 전·후 표면파탐사를 수행하였으며, 그 현황은 아래와 같다. 표면파탐사는 본 연구에서 개발된 MSCM System을 이용하여 수행되었다.

<표 3.27> 공주 홍두깨저수지 그라우팅 시공 및 탐사 수행 현황

날 짜	수행 내용
2017. 10. 10	• 그라우팅 전 MASW 탐사 수행
2017. 10. 22~2017. 12. 04	• 그라우팅 시공(수행 업체: 한세지반엔지니어링, GSE)
2018. 01. 23.	• 그라우팅 약 2개월 후 MASW 탐사 수행



<그림 3.44> 공주 홍두깨저수지 그라우팅 시공 위치 및 탐사위치도

- 그라우팅 시공구간: 제당(L=68m) 전 구간
- 표면파탐사는 그라우팅 전 구간에 대해 수행하였으며, 해석구간은 위의 그림과 같다.

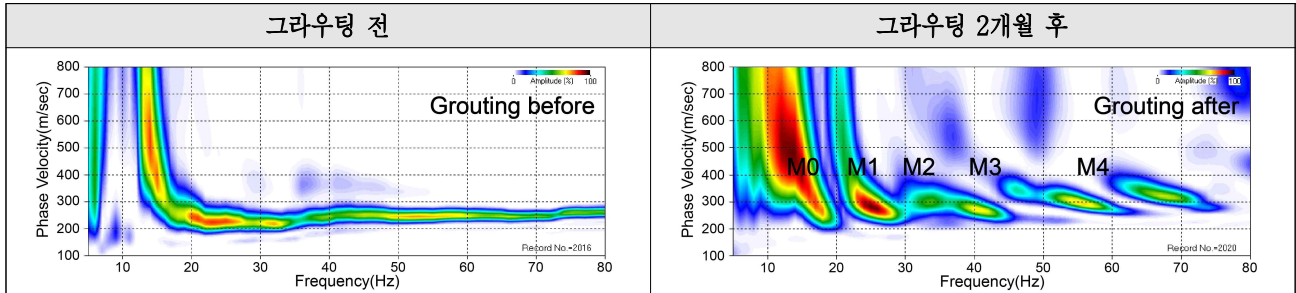
<표 3.28> 공주 홍두깨저수지 그라우팅 시공 전·후 탐사 수행 방법

탐사방법	Sampling rate (msec)	Recording time(sec)	Geophone간격 (m)	Source Interval (m)	First source offset (m)	채널 수	Array
Active	0.5	2	1.0	1.0	6.0	24	roll-along

◦ 그라우팅 보강효과 검증 및 정량화

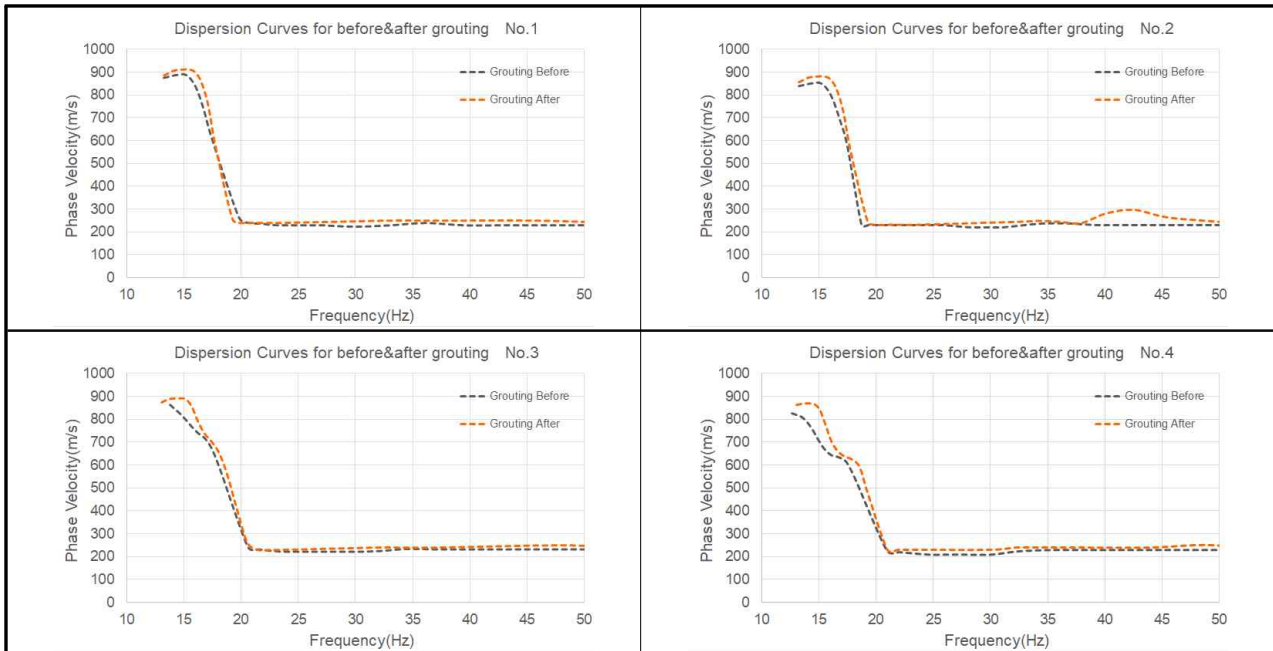
그라우팅 보강효과를 파악하기위해 시공 전과 충분한 양생시간을 고려하여 시공 완료 약 2개월 후 표면파 탐사를 수행하였다.

<표 3.29> 공주 홍두깨저수지 그라우팅 시공 전·후 dispersion image

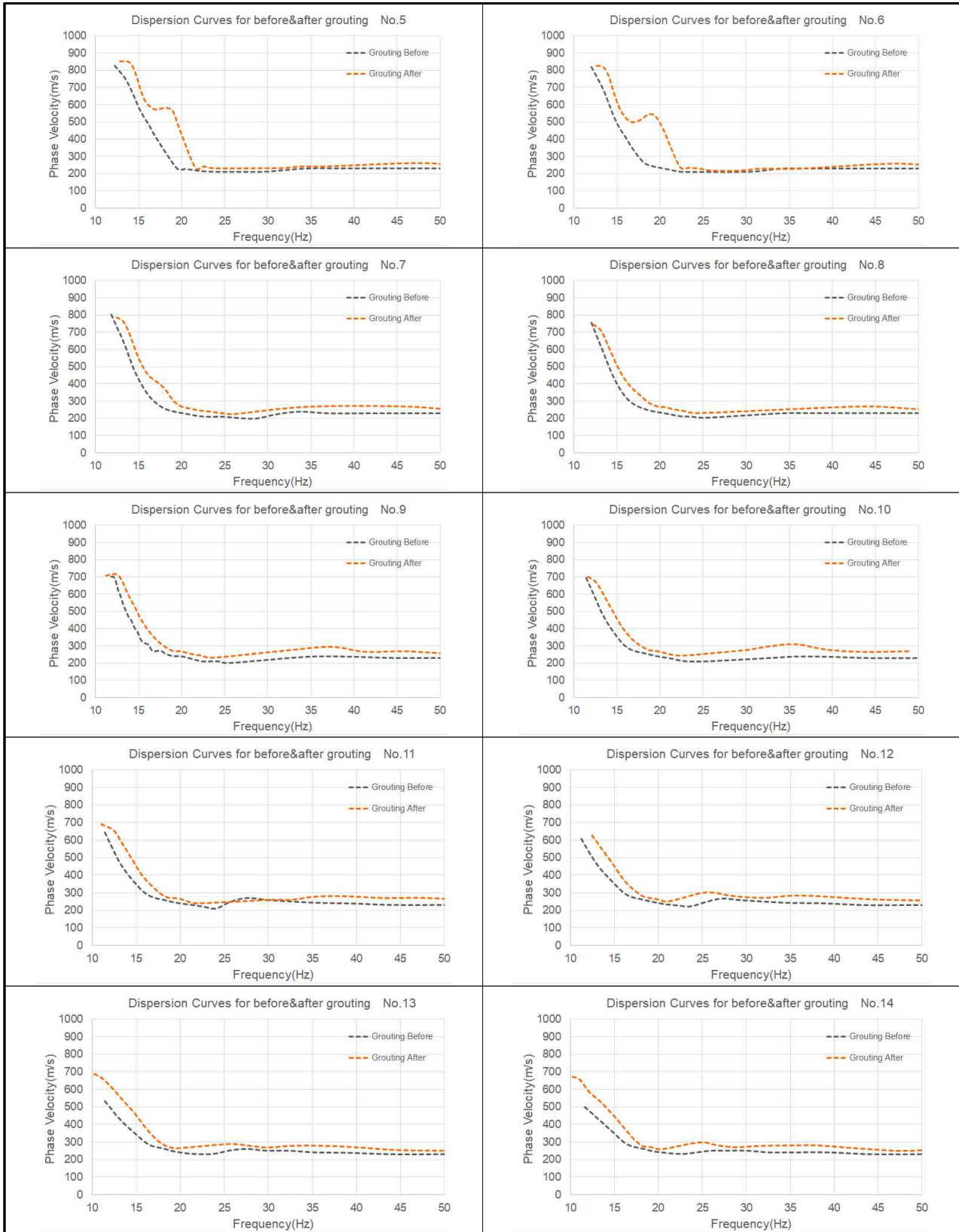


Dispersion Image 비교결과, 그라우팅 전·후에 따른 변화를 뚜렷하게 보여주고 있다. 시공 전의 분산이미지는 상부 지층(18Hz 이상)에서 균질한 상태를 보이다 하부 지층에서 변곡이 발생하여 속도가 증가하는 양상을 보이는 반면, 시공 후의 분산이미지는 그라우트 주입 영향에 따른 고차 모드(higher mode)가 다중으로 발생하는 양상을 보인다. 그라우팅 시공은 균열 및 매질을 따라 그라우트 재가 침투하고, 국부적인 Spot상의 압밀 상태를 형성함으로써 지층 불균질성을 가져오며, 이는 심도에 따라 속도 이상(velocity abnormality)을 야기하고 이러한 양상은 고주파 대역에서 다중 고차모드(multi-higher mode)의 원인이 된다. 즉, 그라우팅 후의 다중 고차모드 발생은 지층 내 그라우트 재의 침투가 원활하게 이루어졌음을 반증하는 것이며, 불균질한 매질의 분산특성을 보여주는 것으로 해석된다.

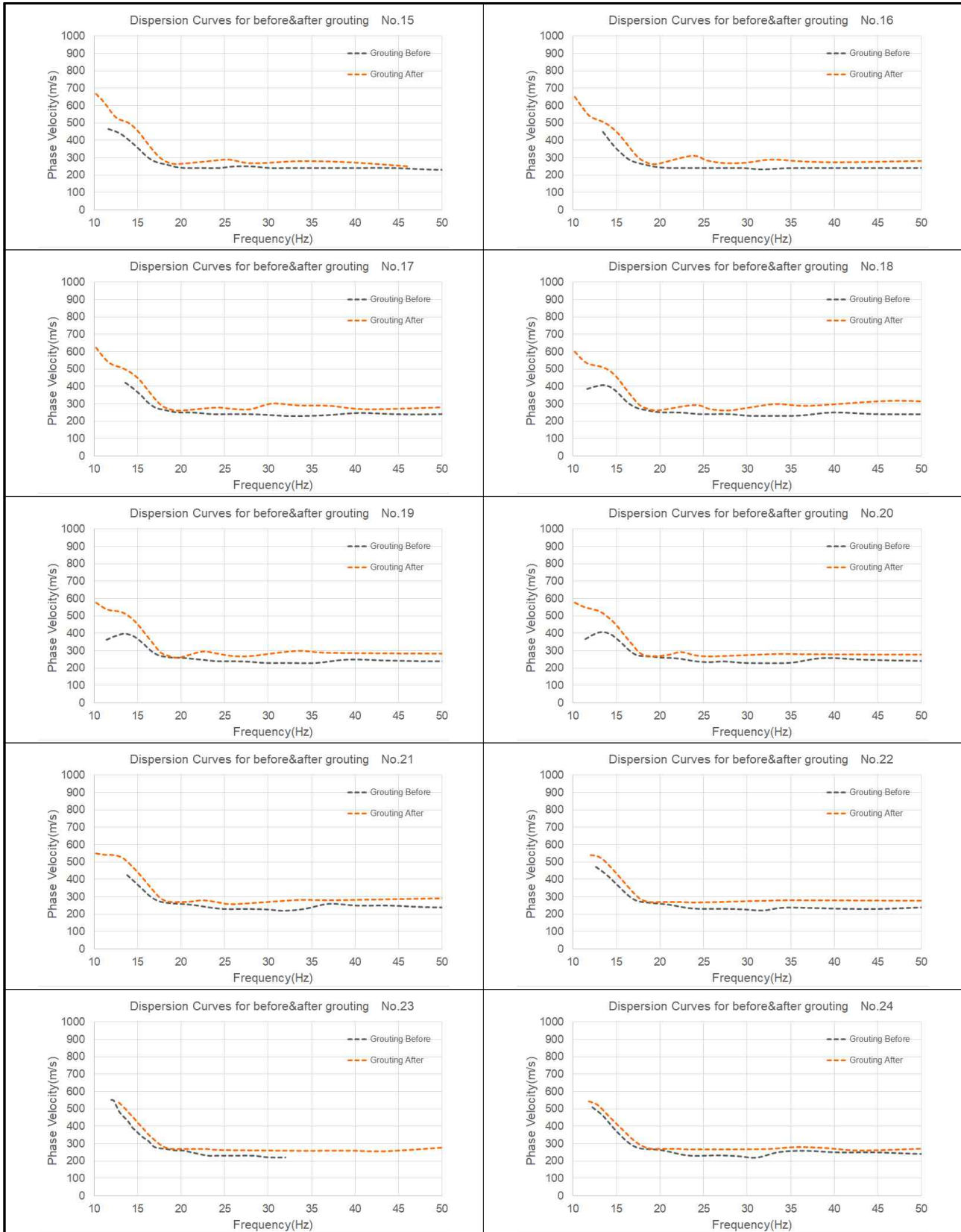
<표 3.30> 공주 홍두깨저수지 그라우팅 시공 전·후 dispersion curve fitting 비교



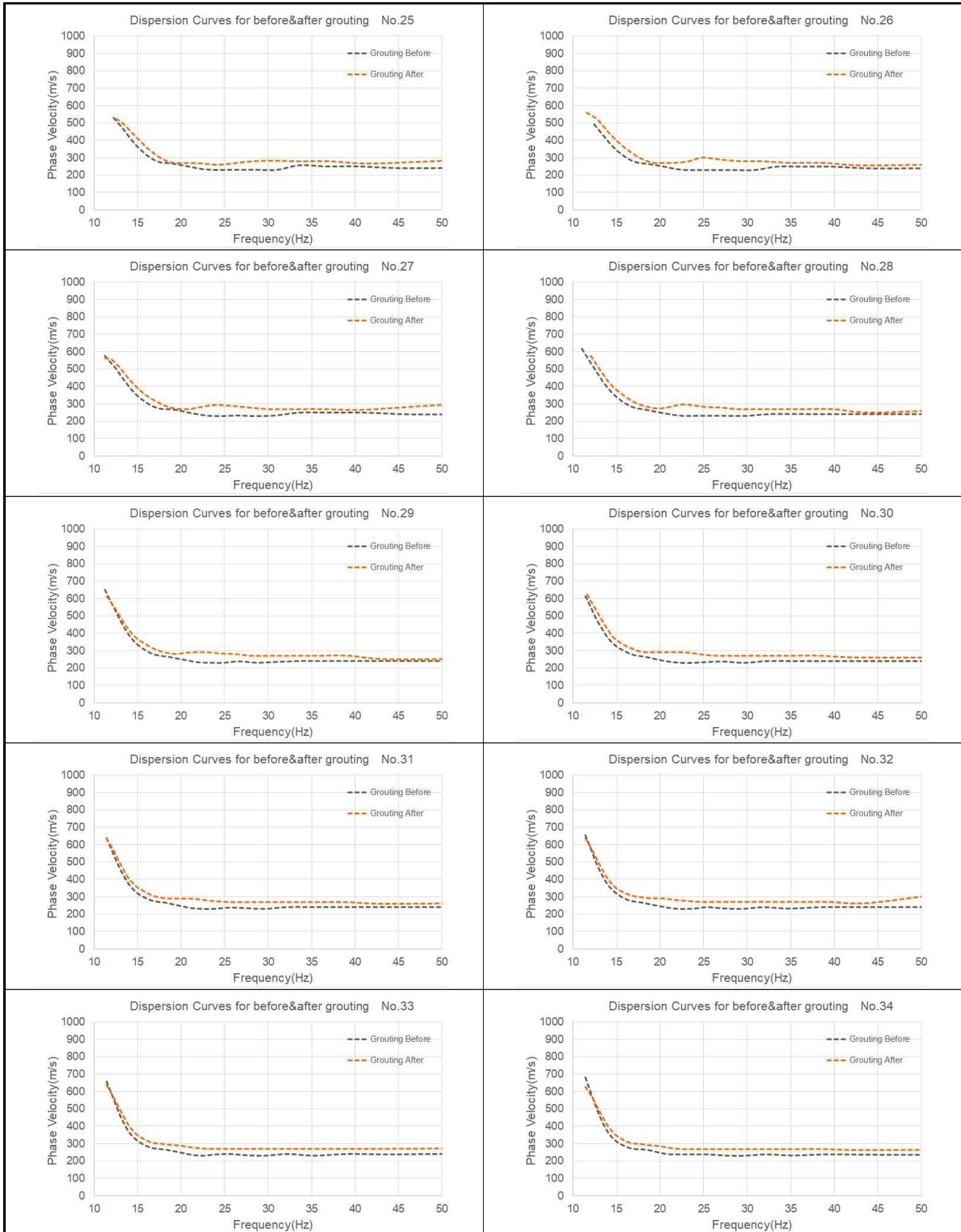
<표 3.30> 공주 홍두깨저수지 그라우팅 시공 전 · 후 dispersion curve fitting 비교(계속)



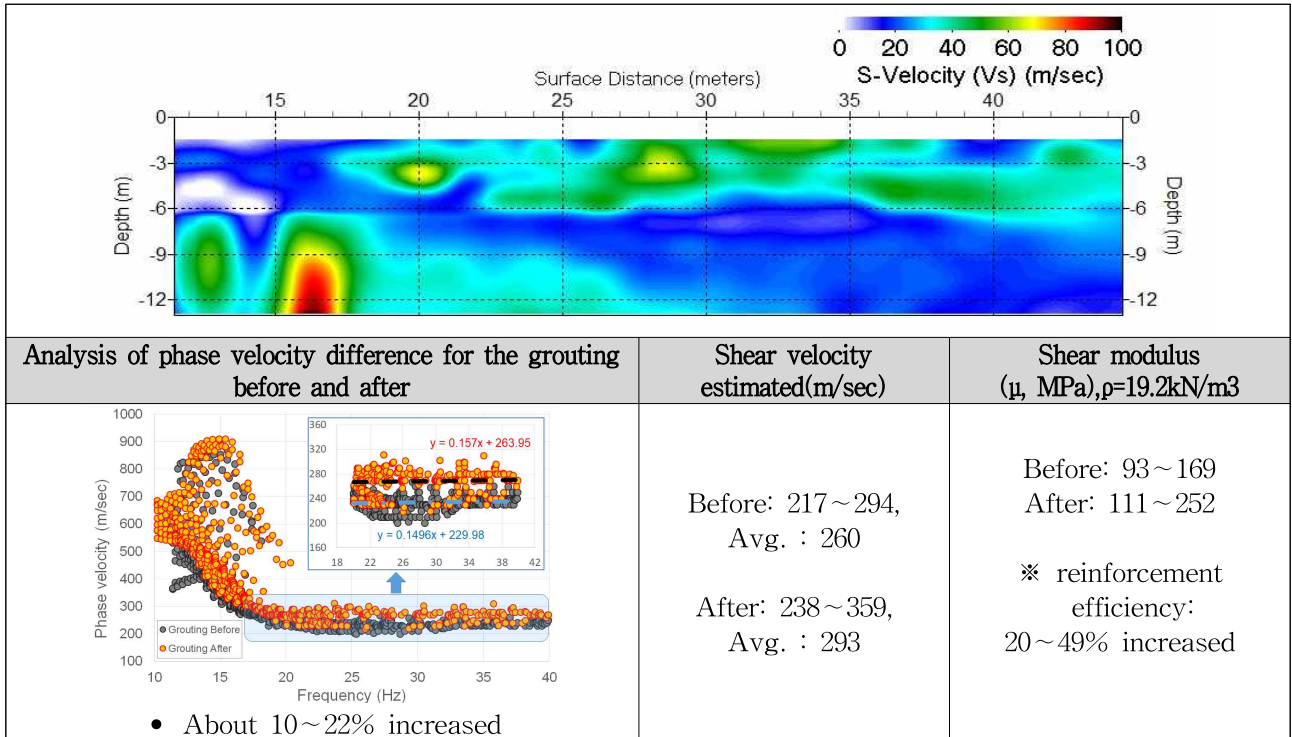
<표 3.30> 공주 홍두깨저수지 그라우팅 시공 전·후 dispersion curve fitting 비교(계속)



<표 3.30> 공주 홍두깨저수지 그라우팅 시공 전·후 dispersion curve fitting 비교(계속)

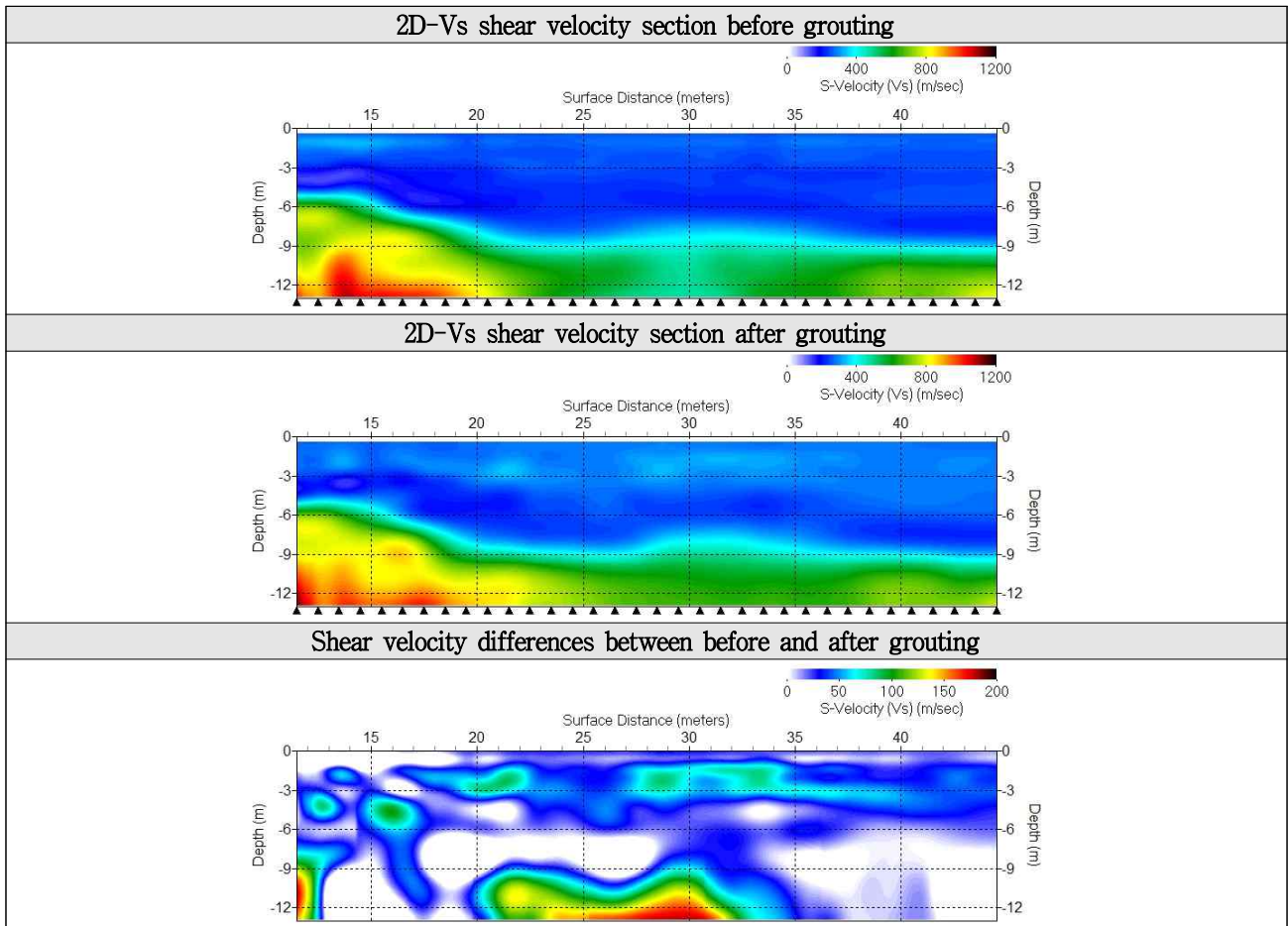


<표 3.31> 공주 홍두깨저수지 그라우팅 시공 전·후 위상속도차이 분석 결과



- 위상속도차이 분석결과 약 10~22%의 속도 증가가 확인되었으며, 지반의 강성변화는 약 20~49%가 증가한 것으로 나타났다. 전 구간에 대해 그라우팅 시공이 수행됨에 따라 전 구간에 걸쳐 속도 증가가 나타나는 것으로 고려되며, 시점부의 지표하 6m 하부의 고속도 이상대는 지형적 영향에 따른 결과로 판단된다.

<표 3.32> 역산해석을 통한 그라우팅 전 자료 대비 2개월 양생 후 속도 차이 값 분석



- 분석결과 지표하 6 m 심도까지 1~101.1(평균: 35.9) m/sec의 속도 증가가 발생하였으며, 그 하부로는 20~35 m 구간에서 고속도 이상대가 분포하는 것으로 나타났다. 여기서 나타나는 고속도 이상대는 위상속도차이 분석 결과와 비교해 볼 때 주입된 그라우트 재의 영향과 그라우팅 전·후 분산곡선 fitting 차이에 따른 과해석(over-estimated) 결과가 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 판단된다.

위상속도차이 분석 및 역산해석 결과 지표하 0~10m 구간에서는 약 10~20%의 전단파속도 증대를 보여주는 유사한 경향의 결과를 나타냈다. 역산해석의 경우에는 탐사조건, 해상도가 낮은 저주파수 대역의 분산곡선 fitting 차이 등으로 인해 깊은 심도에서 과해석되는 경향을 보인다.

③ 결론

노후화 제체의 안정성 평가 및 유지관리 방법의 일환으로 지반의 강성과 밀접한 관계에 있는 전단파속도 측정을 통해 제체의 보강효과 검증 및 정량적 평가 연구를 수행하였다. 표면파탐사결과는 위상속도차이 분석과 역산해석으로 구분하여 분석을 수행함으로써 역산해석이 갖는 과해석(overestimation) 문제를 인지하고 자료 해석 및 해상도의 신뢰성을 평가하고자 하였다.

대청3부댐의 경우 약 5~10%의 전단파속도 증가가 확인되었으며, 강성변화(Gd)는 7~14%로 나타났다. 전반적으로 그라우팅 시공에 따른 보강효과는 일부 구간에서 나타나며 전 구간에 대해서는 그 영향이 크지 않은 것으로 파악된다. 이는 그라우팅 시공 중 누수발생, 충분한 그라우팅 주입 및 구간이 확보되지 않아 나타난 결과로 고려된다.

공주 홍두깨저수지는 전 구간에 걸쳐 약 10~20% 이상의 전단파속도 증가가 나타났으며, 강성변화(Gd)는 약 20~49%의 증가가 확인되었다. 시공 중 그라우트 재의 누수와 같은 특이사항이 발생하지 않음에 따라 양호한 시공에 의한 영향을 잘 보여주는 것으로 판단된다. 특히, 분산이미지로부터 강하게 나타나는 다중 고차 모드(multi-higher mode)의 발생은 제1TB 결과와 비교하여 시공 상태에 따른 분산특성을 명확하게 보여주는 것으로 해석된다.

본 연구로부터 표면파탐사를 이용한 제체 그라우팅 보강효과 판정을 위한 적용성은 다음과 같은 한계를 갖는 것으로 고려된다.

- 첫 번째, 신호개선을 위한 CMP(Common Midpoint) 방식을 적용함으로써 lateral smearing effect가 발생하여 미시공 구간까지 보강영역이 확대되는 오류를 가질 수 있다.
- 두 번째, 본 연구 중 2개 제체 모두 역산해석결과에서 과해석(overestimation) 되는 부분이 나타나며, 대체로 해석영역의 하부구간에서 발생하였다. 분산 및 역산해석 결과 해석단면의 중앙부에서는 유사한 값을 보이는 반면, 하부심도에서 고속도 이상대를 보이는 것은 저주파수 대역의 낮은 해상도로 인해 분산곡선 결정시 오차가 발생하고 계산과정에서 발산(divergence)에 의한 영향으로 판단된다. 이러한 문제점을 최소화하기 위해서는 각 제체의 특성 및 시공구간을 고려한 탐사설계(여러 채널간격 적용, 측선연장(채널 수), 주변 noise를 고려한 발진원 등)가 이루어져야하며, 특히 충분한 가탐심도의 확보가 중요할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서처럼 탐사에서 도출된 자료(raw data)를 통한 위상속도차이 분석을 수행할 경우 과해석 구간을 판단하는데 도움이 될 수 있을 것으로 사료되며, 밀도검층, 실내시험 등의 현장시험 값 적용을 통해 초기 모델을 구성하는 방법도 분석결과와 신뢰성을 제고하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

연구결과 표면파탐사를 이용한 보강효과 판정 기법은 시공 상태에 따른 강성변화를 정량적으로 평가할 수 있는 기법으로 판단된다. 제체 유지관리에 있어서도 보강 후 전단파속도 변화 모니터링을 통해 정량적 지표를 확보함으로써 지속적인 관리를 수행하는데 크게 도움이 될 것으로 고려된다.

3. 보강효과 검증을 위한 첨단 원심모형실험 기술 및 수치모델링 기술 개발·정립 (K-water)

가. 이론적 접근방법

국내 대부분의 노후 제체는 코어형 형식의 필댐 구조를 취하며, 이러한 코어형 필댐에서 코어존의 노후화는 댐의 안전성 문제와 직접적인 관련이 있으므로 필댐 안전관리에 있어서 가장 중요한 부분이다. 코어존은 저수위 변화, 강우사상 등의 영향으로 제체 내부에서 침투수 흐름의 지속적인 변화가 발생할 수 있으며 연약한 지중 취약부를 따라 누수경로 발달 시 내적침식(internal erosion) 및 파이프링(piping)의 위험성을 초래하기도 한다. 따라서 열화된 코어재의 차수성능 개선 기술 개발 및 노후 필댐 보강효과 검증에 대한 연구를 위해 우선적으로 노후화된 코어재에 대한 연구가 필요하나, 댐 축조 후 시간경과에 따른 코어재의 물성 변화에 대한 연구는 현재까지 매우 드물고, 연구 방법 또한 표준화된 절차가 없는 실정이다.

반적으로 코어형 필댐의 코어재 물성에 관한 선행연구와 문헌은 상당히 적은 실정으로 기존댐 또는 노후화 되어가는 댐의 물성이 제대로 파악되지 않고 있는 것이 현실이다. 이는 코어층에 직접 시추조사를 통한 코어재 물성 파악은 댐 안전상 위험하다는 인식 때문에 코어재에 대한 연구가 보편화 되지 못하였다.

노후화된 수리시설물(댐, 저수지 등)의 성능개선을 유도하기 위하여 대표적으로 중심 코어층에 침투그라우팅 공법을 적용한다. 침투 그라우팅 공법을 적용하여 노후화된 제체를 보강하고 성능개선을 유도하는 것이 가능하나, 보강효과/성능개선 정도를 검증하는 기술은 정립되어있지 않다. 현재 대표적으로 보강효과를 검증하는 방법은 페놀프탈레인 용액주입, 내삽법적용의 그라우트재 주입량 비교, 보강 전·후 투수계수 비교 등 다양한 방법을 활용하고 있으나, 이러한 방법들은 그라우팅의 보강효과를 정량적으로 검증한다기보다는 그라우트재가 제대로 주입이 되었는지 확인하는 정성적인 평가이다.

이렇듯 그라우팅 보강에 의한 효과검증을 위한 기술은 현재 단순 주입량 비교분석에 의한 정성적인 분석으로 결정하는 실정으로, 보다 정확하고 신뢰성있는 보강효과검증을 위해서 수치모델링 기법을 활용한 검증 기법의 정립이 필요하다. 따라서 본 연구과제를 통해서 개발한 침투 그라우팅 신기술 공법을 적용하여 노후화된 수리시설물의 성능개선을 유도하고 나아가 보다 신뢰성있는 보강효과검증 기술을 마련하기 위하여 수치·물리모델링 기법을 적용하여 보강효과/성능개선을 검증하고자 한다.

나. 연차별 연구수행 내용

본 연구는 노후 수리시설물(댐, 저수지 등)의 보수보강에 따른 보강효과 검증을 위한 수치·물리 모델링 기법을 정립하는 것을 최종목표로하며 연차 세부 연구수행은 다음과 같다.

1차 년도는 1)기존 필댐 노후화 및 보강문헌 연구 2) 필댐 물성 통계모델 분석 3)정상침투 모사 국내 필댐 수치모델링(침투류해석) 연구 등으로 수치모델링 기법정립을 위한 기초연구수행과 노후 필댐 통계 물성DB를 제안하였다.

2차 년도는 1)대청 3부댐 보강 전·후 지반조사 2)그라우팅 보강 전·후 물성 비교 3)노후 필댐 보강 수치모델링 기법 연구 등으로 Testbed를 대상으로 수행한 그라우팅 보강 전·후 수행한 광범위한 지반조사 결과를 분석하여 물성DB를 확보하였고, 나아가 대표물성(함수비, 투수계수, 강도정수 등)을 비교 분석하여 그라우팅 보강으로 인한 보강효과/성능개선 평가를 정량적으로 수행하였다. 또한 수치모델링의 기법 정립을 위한 필댐에 최적화된 매개변수(불포화함수특성곡선, 함수비체적곡선 등)를 선정하여 제안하였다.

3차 년도는 1)공주 홍두개살 저수지 보강 전·후 지반조사 2)수치모델링을 활용한 보강효과 검증 기법 3)노후 필댐 안정성 평가 원심모형시험 매뉴얼 등으로 2차 Testbed인 공주 홍두개 살 저수지를 대상으로 수행한 그라우팅 보강 전·후 지반조사 결과를 토대로 물성DB를 확보하고, 나아가 정량적 보강효과검증을 수행하였다. 그리고 최종목표인 보강효과/성능개선 효과 검증 평가를 위한 수치·물리 모델링 기법을 정립하여 노후 필댐에 최적화된 수치모델링 및 원심모형시험 매뉴얼을 제시하였다.

다. 연구성과

(1) 양적 성과

본 연구과제를 통해 국내논문 4건, SCI 1건, 학술발표 10건(국내 8건, 국외 2건)의 정량적인 성과를 계획대비 초과 달성하였으며, 그 상세내용은 다음과 같다.

<표 3.33> 정량적 성과 달성 현황

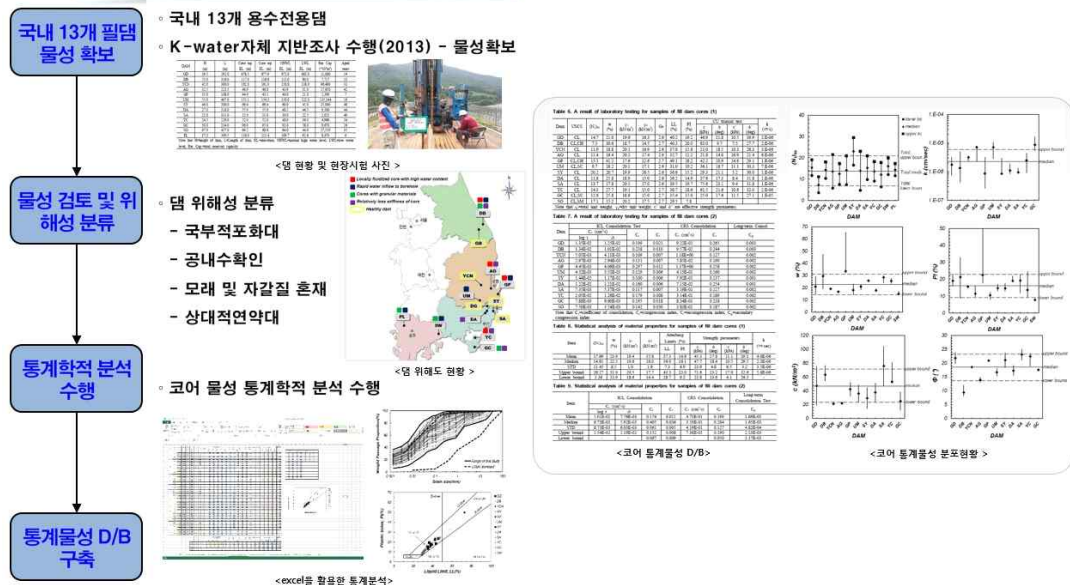
정량적 성과			논 문 명	학술지명	국내/ 국외
구 분	계 획	실 적			
국내 논문	4건	4건	중심코어형 땜댐의 코어재 현장 물성에 대한 통계학적 분석	한국방재학회	국내
			노후 코어형 땜댐의 잠재 위해성 유형 분류	대한지질공학회	국내
			Seismic Evaluation of Existing Earth-Cored Fill Dams based on Pseudostatic and FE-Newmark Approaches	한국방재학회	국내
			저압 침투그라우팅에 의한 땜댐 체체의 안정화	한국방재학회	국내
SCI	1건	1건	Permeation grouting for remediation of dam cores	Engineering Geology	국외
학술 발표	-	10건	코어형 땜댐의 노후화와 잠재적 위해도 유형 분류	2016한국방재학회 학술발표대회	국내
			Updated Shear Wave Velocity Profiles for Fill Dam Core Zone	2016한국지진공학회 학술발표회	국내
			코어형 땜댐 코어재의 정적물성에 관한 통계학적 연구	2016대한지질공학회 춘계학술대회	국내
			노후댐 물성 통계모델	84th ICOLD Annual Meeting	국외
			땜댐 코어재의 시간경과에 따른 물성변화 연구	2016대한토목학회 학술대회	국내
			땜댐 코어층의 침투 그라우팅 공법 적용 사례 분석	2017한국방재학회 학술발표대회	국내
			그라우팅 보강 전후 코어 물성 비교	2017대한지질공학회 춘계학술대회	국내
			FEM에 의한 노후 땜댐의 침투 거동 평가	2017대한지질공학회 추계학술대회	국내
			신기술 그라우팅 공법을 적용한 땜댐 보강 시공 사례	2018대한지질공학회 춘계학술대회	국내
			Recent earthquakes in Korea and their effects on large embankment dams	댐 내진안전 국제 심포지움 및 제 4회 대륙지진 국제컨퍼런스 참석	국외

(2) 질적 성과

(가) 노후 땜댐 물성 DB 구축

① 노후 땜댐 물성 연구

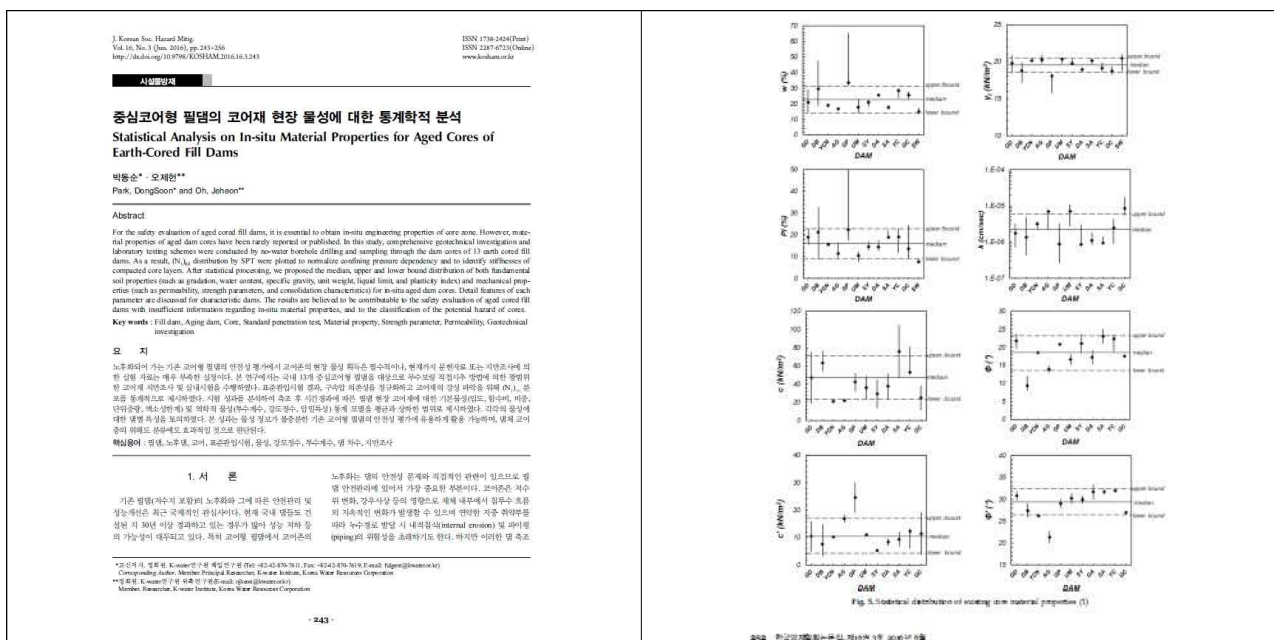
- (연구개발 수행내용) 노후 땜댐 보강 사례 조사, 노후 땜댐 물성 DB분석
- (연구결과) 국토교통부 소관 땜댐 보강 사례 조사 및 정리, 국내 13개 땜댐 코어재 물성 취득 및 통계학적 분석 수행, 통계학적 분석을 통한 땜댐 코어재의 DB구축, 노후 땜댐에 대한 저압침투그라우팅 적용 보강사례분석



<그림 3.45> 노후 필댐 통계물성 DB 구축

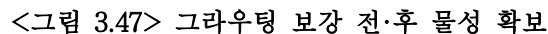
노후화가 진행 중인 13개 기존 코어형 필댐에 대해(준공 후 경과년수 9 - 52년, 댐 높이 22 - 67 m), 무수보링에 의한 코어층 시추 지반조사와 표준관입시험, 2D 및 3D 전기비저항탐사, 물성·역학시험을 수행하여 공학적 기반의 잠재적 위험성 유형을 국내 최초로 분류, 제시하였다. 중심코어층에 대한 무수보링 시추 지반조사 결과, 코어재 잠재 위험성 유형을 국부적 포화대, 신속한 공내수 유입, 조립질 혼재 코어재, 상대적 저 강성의 네 종류로 분류하였다.

국내 13개 중심코어형 필댐을 대상으로 무수보링 직접시추 방법에 의한 광범위한 코어재 지반조사 및 실내시험을 수행하였다. 표준관입시험 결과, 구속압 의존성을 정규화하고 코어재의 강성 파악을 위해 (N1)/60 분포를 통계적으로 제시하였다. 시험 성과를 분석하여 축조 후 시간경과에 따른 필댐 현장 코어재에 대한 기본물성(입도, 함수비, 비중, 단위중량, 액소성한계) 및 역학적 물성(투수계수, 강도정수, 압밀특성) 통계 모델을 평균과 상하한 범위로 제시하였다. 각각의 물성에 대한 댐별 특성을 토의하였다. 본 성과는 물성 정보가 불충분한 기존 코어형 필댐의 안전성 평가에 유용하게 활용 가능하며, 댐체 코어층의 위험도 분류에도 효과적일 것으로 판단된다.

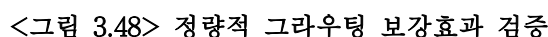


<그림 3.46> 노후 필댐 통계물성 DB 논문 성과

- (연구개발 수행내용) Testbed 2개소 지반조사 수행, Testbed 그라우팅 복합체 물성 분석, 그라우팅 전·후 코어 물성 비교
- (연구결과) 그라우팅 보강 전 필댐 잠재위해성 분석, Testbed 2개소(대청3부댐, 공주저수지) 보강 전·후 광범위한 지반조사 수행(코어재의 물성 확보 및 역학적 특성 파악, 그라우팅 복합체의 정적 및 동적 물성 취득), Testbed 그라우팅 전·후 코어재 물성과 노후필댐 물성DB와의 연계 분석



- (연구개발 수행내용) 물성 연구 성과를 활용한 보강효과 검증
- (연구결과) Testbed 그라우팅 보강 전·후 물성 DB구축, 물성 연구성과의 비교·분석을 통하여 정량적인 그라우팅 보강효과 검증 수행



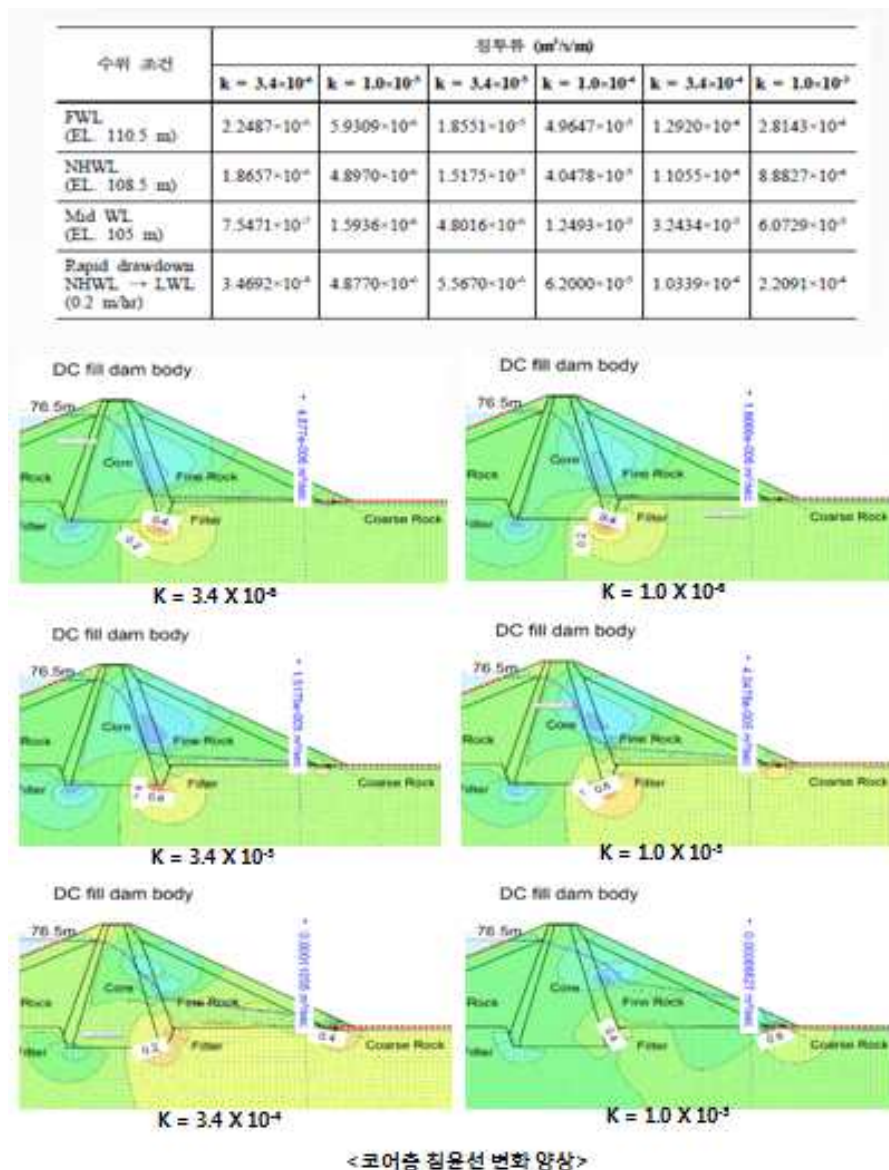
– 57 –

적인 보강효과 검증이 가능할 것으로 판단되며, 수리시설물(댐, 저수지 등) 코어재의 안정성을 판단함에 있어서 중요하다고 판단되는 물성들을 토대로 정량적인 보강효과 검증을 수행하였다. 시설물의 투수성 즉, 차수능력을 평가하는 투수계수와 내적 침식, 유로 형성 등을 유발할 수 있는 성질을 결정하는 기본물성(함수비, 소성지수), 침하, 사면붕괴 등의 위험성을 판단할 수 있는 강도정수(점착력, 내부마찰각)에 대하여 정량적 비교를 수행하였다.

(나) 노후 필댐 보강 모사 수치 모델링 기법 정립

① 보강 전 수치모델링 연구

- (연구개발 수행내용) 노후 필댐체 보강 전 FEM/FDM 모델링 기법 연구
- (연구결과) 기존 필댐을 대상으로 유한요소(GeoStudio) 수치모델링 연구, 댐 코어층 노후조건을 반영한 2개 필댐 침투류해석 수치모델링 분석연구 수행

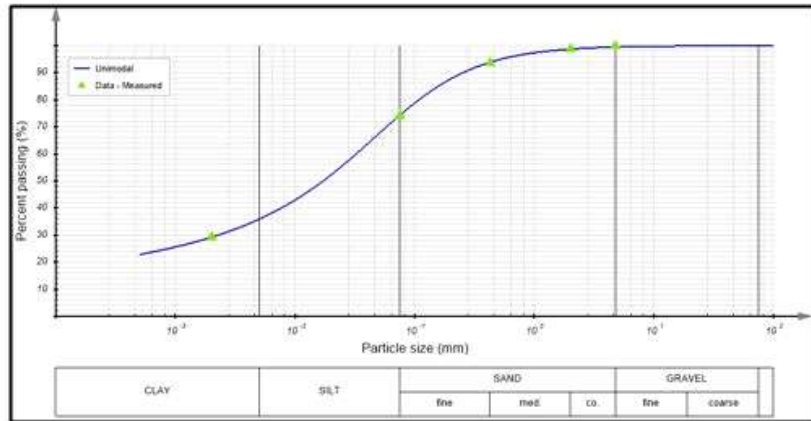


<그림 3.49> 노후모사 침투해석 수행

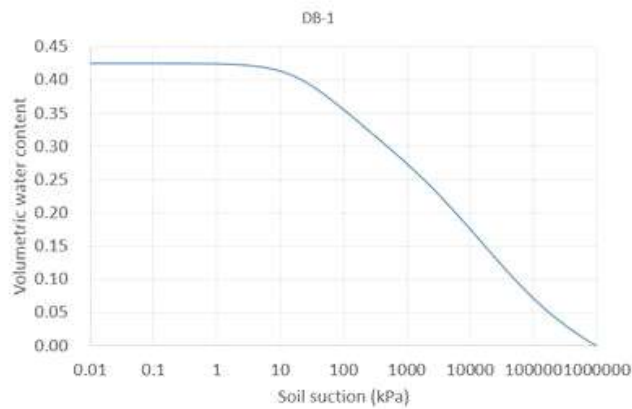
노후화된 코어재 물성 통계분석을 토대로 코어층에 노후 코어재 물성을 반영한 수치모델링 연구를 수행하기 위하여 코어재 투수계수 조건을 상승시켜가면서 침투류 해석을 수행하였다. 투수계수 조건은 본 대청댐 투수계수를 기준으로 점진적으로 증가시켰으며 극한의 노후 조건을 반영하기 위하여 최종적으로 필터의 투수계수 물성치와 동일한 조건으로 침투류 해석을 수행하였다.

② 보강 후 FEM 수치모델링 연구

- (연구개발 수행내용) 물성 연구성과 활용 FEM을 통한 보강효과 수치모델링
- (연구결과) Testbed를 대상으로 유한요소(GeoStudio) 수치모델링 연구, 코어재의 불포화 함수특성 곡선 추정, 대청3부댐, 공주저수지 등 Testbed 물성연구 성과 적용 수치해석 수행, Testbed 보강 전·후 침투 해석을 통한 정량적 보강효과 검증

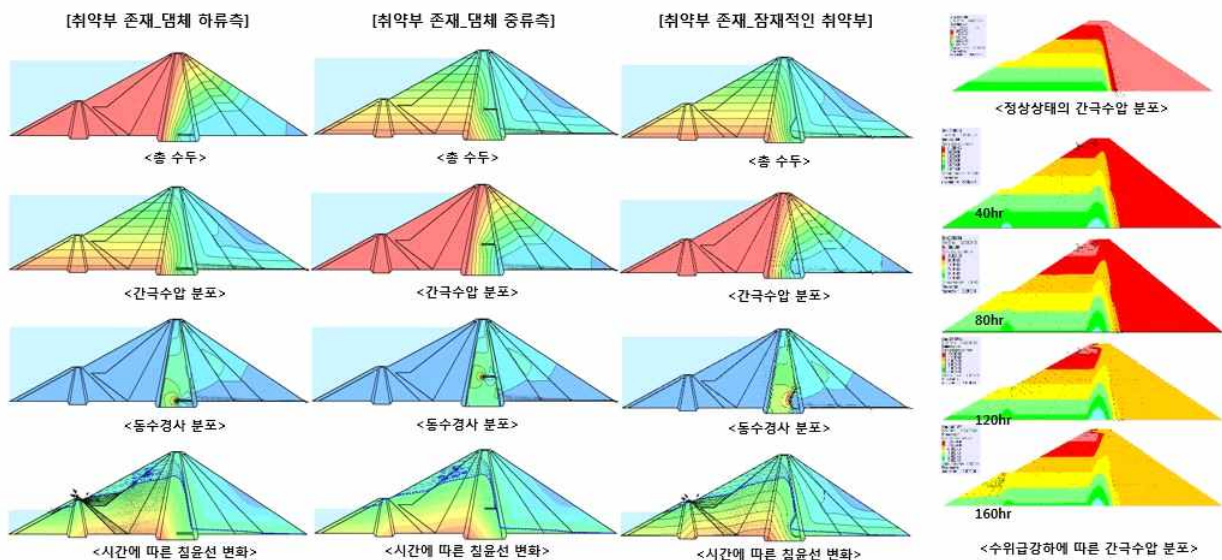


입도분포곡선 (13DB-1)



함수특성곡선(D8-1)

<그림 3.50> 댐에 최적화된 함수특성곡선제안

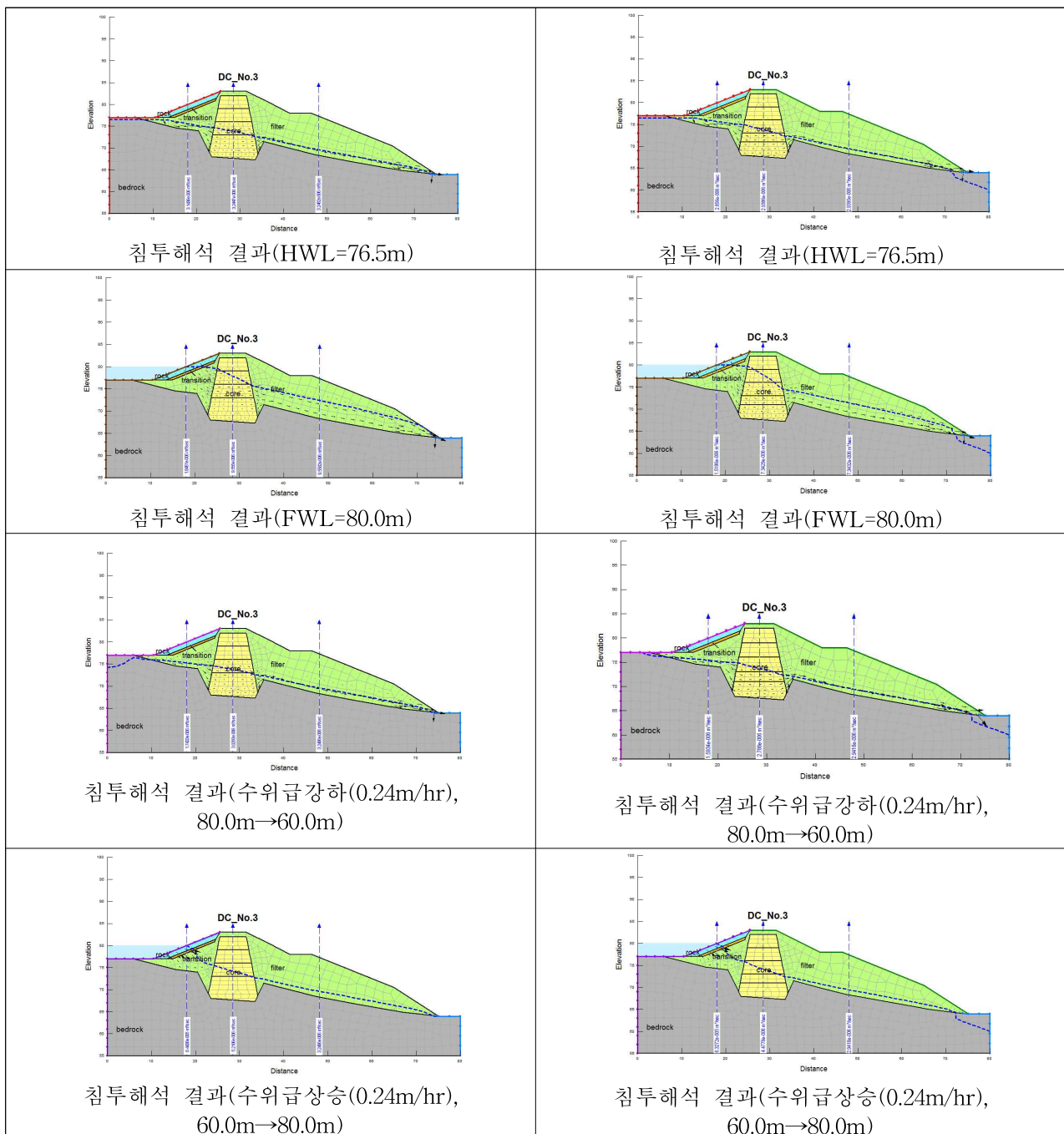


<그림 3.51> FEM/FDM에 의한 노후 필댐 정상침투 및 transient 침투해석

본 해석에서는 유한요소법을 이용하여 포화-불포화 영역의 흐름을 해석할 수 있는 침투해석 프로그램인 SEEP/W을 활용하여 침투해석을 수행하였으며, 정량적인 보강효과 검증 평가를 위하여 코어부, 댐 상류부, 댐 하류부 3개 지점에서 침투류를 측정하였고, 나아가 코어부 하부층에 동수경사를 측정하여 침투류에 의한 안정성을 평가하였다.

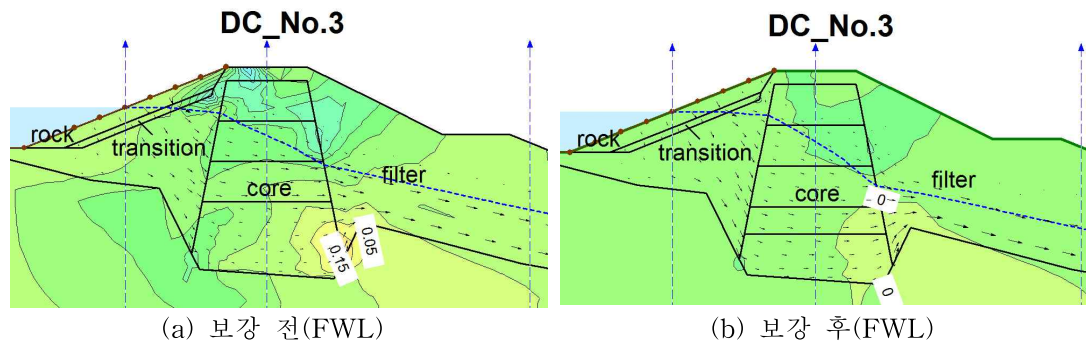
transient 해석의 경우, 수위급강하 조건과 수위급상승 조건을 고려하였다. 일반 댐의 경우 급격한 방류로 인한 댐의 안정성에 대한 분석이 중요한 부분으로 작용하나, 저수지의 경우 수위 급강하의 조건 이외에도 수위급상승의 조건도 중요하다. 소규모의 저수지의 경우 폭우 등과 같은 극한 수재해로 인하여 저수량이 급격히 증가하여 저수지의 안전에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 수위급상승 조건도 고려하여 transient 침투해석을 수행하였다.

그라우팅 보강에 따른 보강효과/성능개선 검증 평가를 위해 Testbed 2개소에 대하여 보강 전·후 수치해석을 수행하였으며, 침투류해석과 동수경사 분포 결과를 통해 정량적인 보강효과 검증을 수행하였다.



<그림 3.52> 보강효과 검증 수치모델링 분석(대청3부댐)

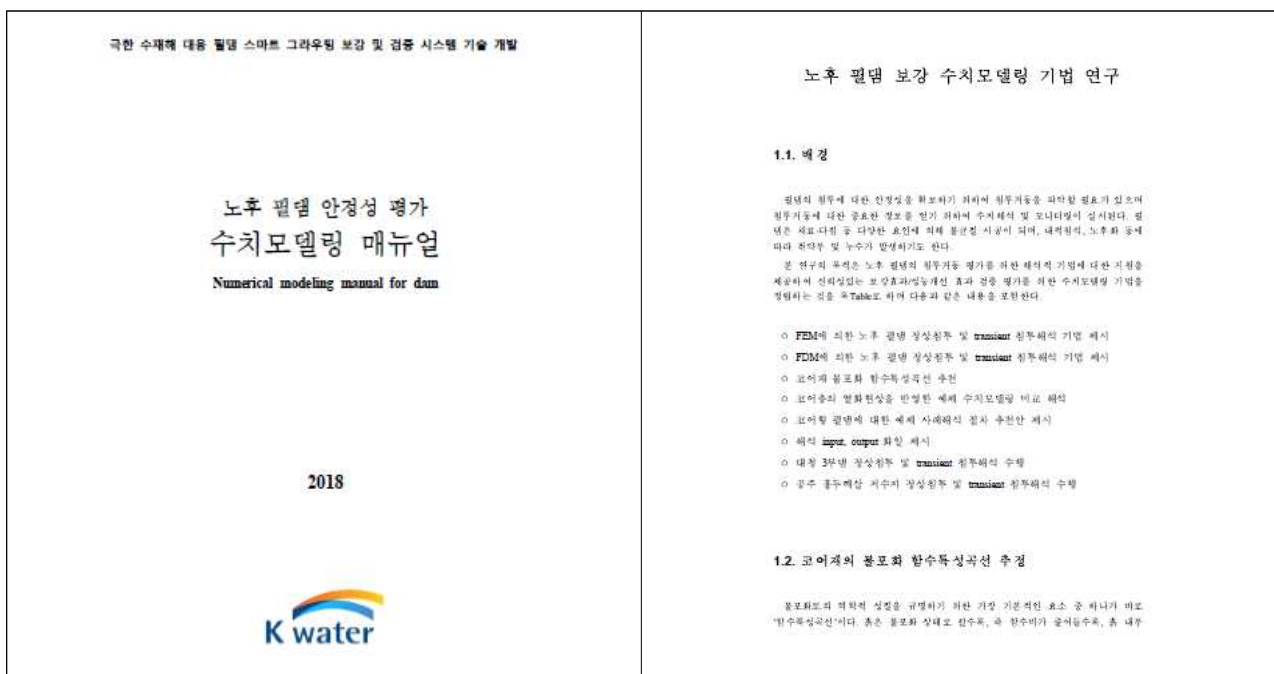
침투류해석 결과를 토대로 보강효과에 대한 정량적인 평가 가능하였으며, 2개소(대청 3부댐, 공주 홍두깨 저수지)는 그라우팅에 의한 보강효과로 인하여 침투류가 감소하는 경향을 보였다. 이는 그라우팅 보강으로 인하여 Testbed 2개소 중심 코어층의 투수계수가 향상되었고, 이로 인하여 침투류해석에 영향을 미친 것으로 판단된다.



<그림 3.53> 대청 3부댐 동수경사 분포 비교

③ 수치모델링 기법 정립

- (연구개발 수행내용) 매개변수 연구, FEM 침투해석 기법 제시
- (연구결과) 물성 연구성과를 적용, 열화현상 및 그라우팅 보강 모사 수치모델링 매개변수(투수계수 등) 연구, Geostudio를 활용한 노후 필댐 정상침투거동 평가 및 침투해석 기법 제시
 - FEM에 의한 노후 필댐 정상침투 및 transient 침투해석 기법 제시
 - FDM에 의한 노후 필댐 정상침투 및 transient 침투해석 기법 제시
 - 코어재 불포화 함수특성곡선 추천
 - 코어층의 열화현상을 반영한 예제 수치모델링 비교 해석
 - 코어형 필댐에 대한 예제 사례해석 절차 추천안 제시
 - 해석 input, output 화일 제시
 - 대청 3부댐 정상침투 및 transient 침투해석 수행
 - 공주 홍두깨살 저수지 정상침투 및 transient 침투해석 수행



<그림 3.54> 노후 필댐 안정성평가 수치모델링 매뉴얼

(다) 노후 필댐 보강 모사 물리 모델링 기법 정립

① 보강 전 원심모형시험 연구

- (연구개발 수행내용) 노후 필댐 보강 전 정상침투 모의 대형 원심모형시험 문헌 연구
- (연구결과) 필댐의 정상침투 원심모형시험 절차 문헌연구 완료

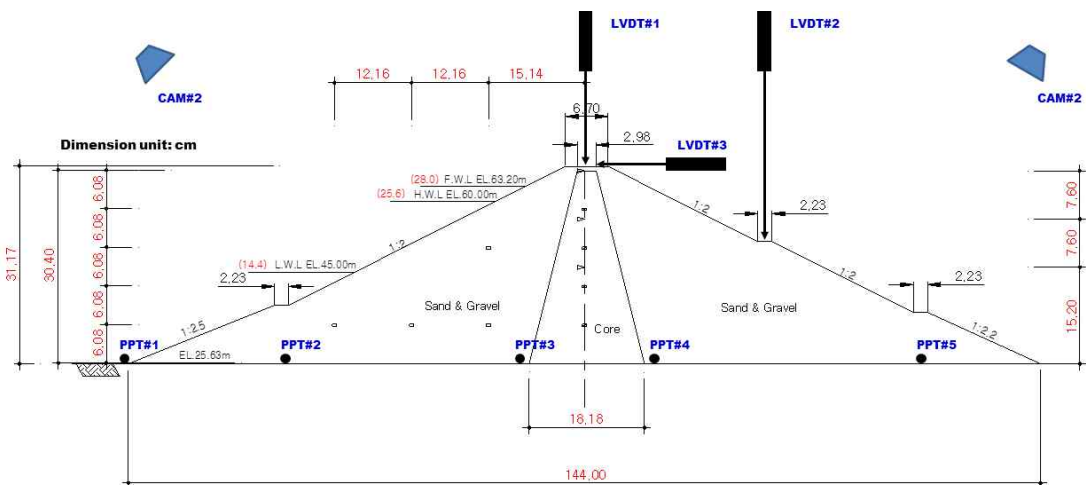


(a) 중심코어형 사력댐 침투취약성 평가 원심모형실험



(b) 불균등 기반암 깊이에 따른 댐 저면 침투취약성 평가

<그림 3.55> 원심모형시험 필댐 적용 사례분석



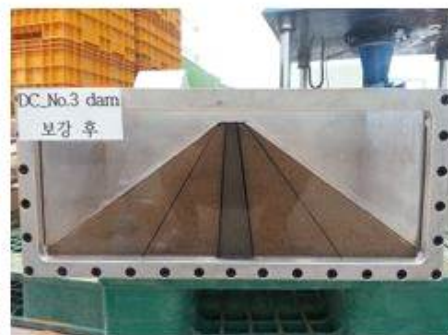
<그림 3.56> S댐의 원심모형시험 단면도 (1:135 축척)

② 원심모형시험 가이드라인 제시

- (연구개발 수행내용) 대형원심모형시험을 통한 그라우팅 보강효과 연구
- (연구결과) 대청 3부댐 원심모형 설계, 노후 필댐 안정성평가 최적화된 원심모형시험 가이드라인 제시



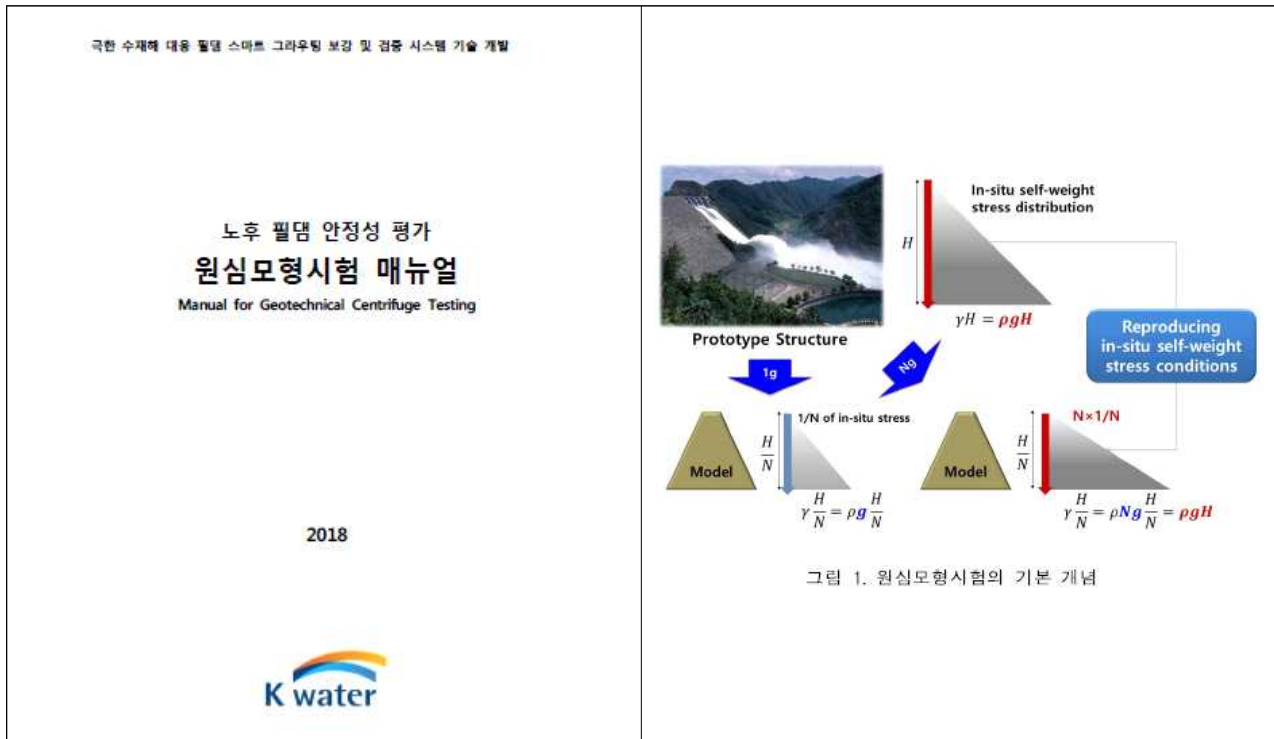
<코어재 열화상태 모사>



<그라우팅 보강 코어재 물성 반영>

<그림 3.57> 대청3부댐 원심모형 설계

노후 제체의 침투거동과 중앙 심벽부에 그라우팅을 주입했을 때의 침투거동특성 비교를 위하여 노후 제체의 경우 현장에서 채취한 재료를 이용, 현장시험에 의하여 평가된 밀도 및 침투특성을 동일하게 모사하였다. 그라우팅 보강의 경우 이론적으로는 현장과 동일하게 시공하여 평가하여야 하지만 현장에서의 응력조건을 재현한 상태에서 완벽히 동일한 시공방법, 시공 결과를 모사하는 것은 불가능하다. 따라서 해당 모형에서는 제체에 그라우팅재료를 주입하였을 때 평균적으로 나타나는 투수계수와 강도특성을 유사하게 모사할 수 있도록 그라우트재료의 혼합량을 결정하여 균질한 시멘트-흙 복합재료를 이용하였다.



<그림 3.58> 노후 댐 안정성평가 원심모형시험 매뉴얼

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

<표 4.1> 최종성과 목표 및 성과(총괄 2015~2017년)

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준			양적 성과 목표	양적 성과 목표 달성치	목표 달성율
					질적 성과지표		목표치			
주관	1	초저압 능동 제어 스마트 그라우팅 기술 (한세지반)	1-1	선단부 압력감지 장치 시스템	①	압력단위	gram단위 측정	특허출원: <u>2 건</u> 특허등록: <u>1 건</u> 논문: <u>2 건</u> 현장적용: <u>2 건</u> 기술이전: <u>1 건</u> 제품화: <u>2 건</u> S/W: <u>2 건</u>	특허출원: <u>4 건</u> 특허등록: <u>4 건</u> 논문: <u>0 건</u> 현장적용: <u>3 건</u> 기술이전: <u>5 건</u> 제품화: <u>4 건</u> S/W: <u>4 건</u>	200% 초과달성
			1-2	오피저버 기술	②	다채널	지중동시 측정			
			1-3	능동제어 시스템	③	송수신방법	무선 타블렛 제어			
공동	2	ICT기반 표면파 모니터링 시스템 (지오텍 컨설팅)	2-1	상시 표면파 모니터링 시스템 개발	①	알고리즘	Active/Pass ive동시역산	특허출원: <u>1 건</u> 특허등록: <u>1 건</u> 논문: <u>1 건</u> 현장적용: <u>1 건</u> S/W: <u>1 건</u> 제품화: <u>1 건</u>	특허출원: <u>1 건</u> 특허등록: <u>1 건</u> 논문: <u>0 건</u> 현장적용: <u>2 건</u> S/W: <u>2 건</u> 제품화: <u>1 건</u>	160% 초과달성
					②	물성	기초자료획득			
			2-2	보강효과 정량화	③	그라우팅 보강효과 정량화	보강효과 수치 정량화			
공동	3	수치/물리모 델링 검증시스템 (K-water)	3-1	노후필댐 물성DB구축	①	D/B작성여 부	통계분석	절차서: <u>1 건</u> 논문: <u>3 건</u>	절차서: <u>1 건</u> 논문: <u>10 건</u>	350%초과 달성
			3-2	FEM 수치모델 절차서 작성	②	수치모델링 기법	T/B 2개소 모델링			
			3-3	원심모형기 실험	③	원심모형기 법	절차서작성			
계							특허출원: <u>3 건</u> 특허등록: <u>2 건</u> 논문: <u>6 건</u> S/W: <u>3 건</u> 현장적용: <u>3 건</u> 제품화: <u>3 건</u> 기술이전: <u>1 건</u> 절차서: <u>1 건</u>	특허출원: <u>5 건</u> 특허등록: <u>5 건</u> 논문: <u>10 건</u> S/W: <u>6 건</u> 현장적용: <u>3 건</u> 제품화: <u>5 건</u> 기술이전: <u>5 건</u> 절차서: <u>1 건</u>	200% 초과달성	

가. 초정밀 주입압 능동제어형 스마트 그라우팅 기술 개발

노후 저수지·댐의 그라우팅 공사시 주입압 조절 실패로 인한 수압하탈과 보강 범위 밖으로 보강재가 누출되는 것을 방지할 목적으로 초정밀 주입압 능동제어형 스마트 그라우팅 기술 개발 연구를 수행하였다. 본 연구는 선단부 압력감지 장치 시스템과 gram 단위의 초저압/초정밀 주입압 능동제어 시스템, 옹저버 기술 개발로 구분되고 각각 지중 주입압 능동 제어를 위한 그라우팅 패커, 그라우팅 지중 주입압 통합제어 장치, 능동제어 그라우팅 무선 옹저버링 시스템을 개발하였고, 이 모든 기술을 집약하여 지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법을 개발하였다.

<표 4.2> 초정밀 주입압 능동제어형 스마트 그라우팅 기술 개발 목표 및 달성도

연구개발 목표	세부 연구개발 내용	달성도(%)
선단부 압력감지 장치 시스템	- 일반적인 그라우팅 패커 선단부에 압력계를 부착하여 지상의 컨트롤러에서 사용자가 지중 주입압을 실시간으로 확인가능 - 패커장치의 상단에 그라우트의 지중 주입압력(토출압력)을 정확하게 측정하는 압력센서부가 설치되며, 압력센서부는 연결관, 압력센서 및 통신선으로 구성 - 압력센서부는 그라우팅 패커장치의 외정보다 내측에 설치되어 시공 중에 마모되거나 파손되는 것을 방지하도록 제작함 - Testbed를 선정하여 그라우트 주입시 지상 주입압과 지중 주입압의 차이 국내 최초 측정 - 특허 출원 및 등록	100
gram단위의 초저압/초정밀 주입압 능동제어 시스템	- 선단부 압력감지 장치와의 연결확인, 실시간(sec) 제어 및 무선제어 가능 여부 확인 - 선단부 압력감지 장치와의 연결을 확인하여 지중에 토출되는 그라우트의 토출압력과 지상에서 그라우트가 주입되는 주입압력을 동시에 측정하고 실시간(sec) 모니터링 - 미리 설정한 조건(기준 압력, 기준 유량)을 기준으로 토출압력과 유량이 기준 이상/이하로 변할 경우 그라우트의 주입압력을 정밀하게 자동 제어 및 주입 중단 - 옹저버 시스템을 사용하여 그라우트 시공 시 패커 주변에 설치된 센서 모듈을 이용하여 그라우트가 시공범위 밖으로 유출될 시 원격으로 신호를 전송하여 지상 그라우팅 시스템에 위치한 자동 밸브를 조절하여 주입압 조절 - 능동제어 시스템을 통하여 gram단위의 압력 측정 여부 확인, 현장 디지털 데이터(엑셀형식)와 주입보고서 USG 저장 - Wifi를 이용한 노트북, 태블릿 모니터링 - 특허 출원 및 등록, S/W 등록 수행	100
옹저버 기술	- 옹저버 센서와 압력감지센서를 포함하는 센서모듈을 이용하여 보강재가 시공범위 밖으로 유출될 시 원격으로 신호를 전송하여 지상 그라우팅 시스템에 위치한 자동밸브 압력을 조절 - 통합제어시스템을 통하여 센서별 데이터를 다채널 방식으로 취득이 가능한지 확인 - 최대 36채널로 설정될 수 있으며, 36채널로 설계된 옹저버링 시스템에서 주파수 범위는 447Mhz로 이루어지며 전파파워는 약 10dBm으로, 채널간격은 12.5Khz로 설정 - 특허 및 S/W 등록 수행	100

나. ICT기반 상시 표면과 검증 시스템

노후화 댐 및 제체의 안정성 파악 및 모니터링 기술 개발을 목적으로 상시 표면과 모니터링 시스템 개발 연구를 수행하였다. 본 연구는 다양한 크기의 제체에서 가탐심도 및 해상도 증대, 모니터링 기법과 관련한 Active/ Passive 동시역산 기술, 현장조사 및 모니터링 수행을 위한 시스템 개발, 그라우팅 보강효과 정량화 기법 연구로 구분된다.

<표 4.32> ICT 기반 상시 표면과 검증 시스템 기술 개발 목표 및 달성도

연구개발 목표	세부 연구개발 내용	달성도(%)
국·내외 관련논문 및 특허기술 자료 검토	- 비파괴 물리탐사를 이용한 모니터링 방식 연구 - 표면과 탐사를 이용한 선진 기술 파악 - 기존 제체 그라우팅 보강효과 평가를 위한 물리탐사의 한계성 파악	100
T/B 내 물리탐사 수행을 통한 Reference data 획득	- 제1, 2TB 내 전기탐사, 표면과 탐사 수행 - 그라우팅 시공 위치 선정조사 활용 - 그라우팅 보강효과 판정을 위한 기초자료 제공 및 활용 (지오텍 및 K-water) - 장비개발을 위한 기초 및 대비자료로 활용 - 현장조사결과(시추조사, DHT, SPT, 투수시험 등)와 비교분석 수행	100
Active/Passive 동시역산 알고리즘 연구	- 주파수 대역 확장을 통한 가탐심도 증대 확인 - Active 및 Passive 개별 분석 Process - Dispersion image 조합을 통한 동시역산 알고리즘 기술 개발	100
동시역산 알고리즘을 통한 가탐심도 증대(20% 이상) 검증	- Test Bed에서 Active/Passive 개별탐사 및 동시탐사 수행 - 개발 알고리즘을 통해 가탐심도 증대 연구 수행(20% 이상 증대 검증), 해상도 증대 확인 - 개발 알고리즘을 토대로 SW 개발 및 등록	100
상시 표면과 모니터링 시스템 개발	- 상시 표면과 모니터링 기법 개발 (Trigger/Event/Schedule mode 구현) - 획득 파형 및 주파수 연구 - Trigger 방식 및 자체 Noise 필터링 연구 - 모니터링 장비 및 운영 프로그램 개발 - 현장시험을 통해 3가지 모드 및 ICT 기반 원격제어 작동 검증 연구 - 특허 및 개발 SW 등록 수행	100
그라우팅 보강효과 정량화 기법 연구	- 2개 Test Bed에서 그라우팅 전·후 탐사수행 - 그라우팅에 따른 전단파속도 변화 연구 - 보강효과 수치 정량화 기법 연구 수행	100

다. 보강효과검증 물리·수치 모델링 기법 정립

그라우팅의 보강효과 검증 및 매커니즘을 정립하는 연구를 수행하기 위한 목적으로 본 연구를 수행하였다. 그라우팅 복합체 물성연구와 보강 후 FEM 수치모델링 연구, 원심모형시험 성능검증으로 구분하여 연구를 진행하였다.

<표 4.4> 보강효과검증 물리·수치 모델링 기법 정립 목표 및 달성도

연구개발 목표	세부 연구개발 내용	달성도(%)
그라우팅 복합체 물성 연구	- 국토부 소관 필댐의 저압침투그라우팅 보강 사례연구 - 국내 노후 필댐 코어재에 대한 물성 구축 및 통계 모델 제시(13개 댐 지반조사 자료를 통계학적 분석 기법을 활용한 코어재 물성 분석 및 DB 구축) - 그라우팅 전·후 코어재 물성 비교분석 - 코어재 노후 통계물성 적용 및 가상 노후조건을 반영한 수치모델링 연구수행	100
보강후 FEM 수치 모델링 연구	- Testbed를 대상으로 GeoStudio 소프트웨어 수치모델링 적용한 침투류해석 및 사면안정해석 연구 수행 - FEM에 의한 노후 필댐 침투거동 평가 및 transient 침투해석 기법 제시 - 코어재 불포화 함수특성 곡선 제시 - 코어층의 열화현상을 반영한 수치모델링 비교 해석 수행	100
원심모형시험 성능검증	- Testbed 그라우팅 보강 효과 비교분석용 원심모형실험	100

2. 관련 분야 기여도

정부는 국민안전을 국가 전략사업으로 선정한 바 있고, 국민 또한 생활수준 향상에 따라 안전에 대한 관심과 요구가 지속적으로 증가하는 추세로 본 연구 결과는 이러한 정부의 정책과 국민적 요구를 충족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

가. 초정밀 주입압 능동제어형 스마트 그라우팅 기술 개발

(1) 국내 그라우팅 기술 개발 현황

국내 그라우팅 기술 대부분은 그라우팅 약제 및 주입진동(CGVM공법* 등) 연구로초정밀 스마트 센서를 통한 접근은 국내외에서 연구과제로 시도되었거나 진행 중인 과제는 없는 것으로 조사되었다.

AGS(Automatic Grouting System) 기술은 그라우팅 주입 자동중단을 포함한 전 과정의 모니터링 및 객관적 시공관리 기술이나, 본 과제에서 다루는 노후 필댐의 성능개선을 위한 전주기 시스템과 차이점이 있다.

<표 4.5> 기존 그라우팅과 지중 주입압력 제어형 그라우팅 비교

기존 그라우팅	지중 주입압력 제어형 그라우팅
- 지상 주입압은 발전기, 펌프의 맥동 등에 의하여 변동 폭이 큼	- 패커 선단에 압력센서를 부착하여 지중 주입압을 측정
- 주입압 조절 실패로 인한 할렬발생	- 지중 주입압을 측정하고 모니터링하여 이벤트 발생 즉시 주입압 조절하여 할렬 방지
- 할렬로 인한 그라우트재 누출발생시 작업자의 육안으로만 확인 가능	- 옹저버 시스템을 이용한 그라우트재 이동경로 감시 및 누출 발생 즉시 그라우트 주입 중단
- 작업자의 주관적 판단에 따라 수동 압력제어	- 미리 설정된 조건에 따라 자동 압력제어 및 무선통신을 이용한 모니터링 및 압력제어

(2) 관련 분야 기여도

스마트 그라우팅은 노후화가 진행되어 자체강도가 낮거나 이완된 저수지 체체뿐만 아니라 단층대와 파쇄대 지반 또는 풍화가 심한 지반, 점착력이 거의 없는 사질토지반이나 붕괴토 지반 및 정확한 지중 주입압 측정이 필요한 지반보강 현장에서 적용 가능 할 것으로 예상된다.

코어형 필름 또는 체체의 보수보강을 위해서는 취약한 코어재의 활렬을 방지하면서 동시에 차수성능을 극대화해야 하는 상반된 그라우팅 시공 기술을 요하며, 미래에 궁극적 기술은 코어재의 입경과 투수성, 취약부의 국부성 등 체체의 상태에 따라 자동으로 주입압과 주입율, 주입 지속시간, 배합비율 등을 제어할 수 있는 시공공정 개발이 필요할 것으로 판단되며, 이러한 궁극적 연구에 있어서 핵심적인 정밀 스마트 센싱과 모니터링 기술, 그리고 학문적 근간을 구성하는 원천기술 확보에 기여하였다고 판단된다.

나. ICT기반 상시 표면과 검증 시스템

(1) Active/Passive 동시역산 기술

주파수 대역 확장을 통해 가탐심도 및 해상도를 증대시키는 기술로써 다양한 크기의 체체 및 구조물에 그 적용성 높으며, 표면파탐사는 전단파속도 측정을 통해 지반의 내진특성을 파악하는 대표적 비파괴 탐사방법으로 본 기술과 결합을 통해 내진특성 평가가 필요한 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 판단되며, 이를 통해 시추조사, 내진특성 관련 시험의 비중을 줄여 경제적 효과가 기대된다.

(2) 상시 표면과 모니터링 시스템

표면파 기법의 능동-수동 측정 방식 및 실시간 해석을 위한 알고리즘 연구를 위해 미국 MASW기법 연구의 대가인 박춘병박사(Park Seismic LLC, 대표)와 연계하여 노후 댐체를 위한 실시간 맵핑기술을 협력하여 세계 선도 기술 발전 가능하다.

체체 안정성을 정량적으로 파악하고 모니터링하는 기술로써 국내외 연구(국외의 경우 단일 채널의 Passive 모니터링 방식)가 수행된 바 없는 최신의 기술로 사면, 도로 등 구조물 안정성과 연관되는 분야에 적용이 가능하며, 특히 서남아시아 지역과 같이 수력발전에 의존성이 높으나 유지관리가 취약한 국가에 기술이전 및 수출이 가능 할 것으로 판단된다.

(3) 국내 노후 저수지 체체 보수 보강 현황

농어촌공사 및 지자체 관리하에 노후화 저수지 체체를 대상으로 5년 주기로 그라우팅 시공을 시행하고 있으며, 그에 따라 지속적인 유지관리를 위한 신뢰성 있는 보강효과 평가기술 마련이 필요한 실정이다.

그라우팅 보강효과 정량화 기법 및 상시 표면파 모니터링 시스템은 기존 정성적 평가에 머물러 있던 보강효과 평가를 전단파속도, 동전단계수 등 토질/토목분야에서 널리 쓰이는 공학적 지표를 이용하여 보강효과를 정량적으로 평가함으로써 지속적인 유지관리 및 시공의 신뢰성을 판정하는데 기여할 것으로 판단된다.

그라우팅 시공 후 정량적 강성변화 모니터링을 통해 향후 주기적으로 발생할 수 있는 불필요한 체체 보강 비용을 줄이는데 기여할 것으로 판단된다.

다. 보강효과검증 물리·수치 모델링 기법 정립

대형 원심모형실험 기술 분야는 현장 토목구조물의 응력수준을 구현하고 안정성을 평가할 수 있는 실증적 물리모형실험으로서 기능하기 때문에, 노후 저수지·댐 실험 외에도 토목 분야 다양한 주제에 적용 가능할 것으로 사료된다.

국외의 경우 원심모형실험을 통한 실증적 안전관리 및 평가 기술은 미국, 영국, 프랑스, 일본 등에서 활발하며, 각 시험기의 성능 및 주력 시험기술 분야가 다르기 때문에 국제협력 연구의 가능성 또한 높은 편으로 판단된다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

가. 연구 성과 기술관련 실용화 및 기술이전

‘지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법’은 국내 주요 대담 관리주체인 K-water와 그라우팅 전문 업체인 (주)지에스이와 공동으로 개발하여 연구 종료 후 실용화/사업화에 접근하기 용이하도록 하였다.

K-water는 준공 후 경과년수 증가에 따른 용수댐 성능개선 기본계획(2014)을 수립한 바 있으며, 다목적댐에 대해서도 성능개선 사업을 시행할 예정이며, 지자체가 관리하는 열악한 노후저수지에 대한 안정화 사업을 신규로 2015년부터 추진하고 있으므로, 향후 위험저수지 또는 성능개선이 필요한 제체에 대한 코어재 그라우팅 보수보강 사업 시장성이 급격히 증가할 것으로 판단되며, 최종 기술개발 성과는 K-water의 사업 시행 시 주관 및 공동연구기관과 협의하여 연구개발기술의 일부 소유기관으로서 ‘지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법’에 대한 기술실시협약 체결을 완료하였으며, 사업에 적용할 계획이다.

‘지중 주입압 능동제어를 위한 그라우팅 패커장치’, ‘그라우팅 지중 주입압 통합제어장치’에 대한 기술에 대하여 (주)충한이앤씨, (주)태인이앤지과 기술이전협약 체결을 완료하였다.

나. 상시 표면과 모니터링 시스템(MSCM System)

상시적으로 지반 강성변화를 파악하여 이상징후 감지 및 선제적 대응을 위한 기술로써 수리시설물 뿐만 아니라 사면붕괴, 지반침하 등 지반의 강성분포 파악이 중요한 분야에 활용성이 높을 것으로 기대된다.

상시 표면과모니터링 시스템은 기존 Seismograph와 기본적인 하드웨어 유사성이 높으므로 응용 개발을 통해 해외 수입장비의 국산화에 기여할 것으로 예상된다.

다. 그라우팅 보강효과 정량화 기법 연구

국내외 수리시설물 관련 엔지니어링 실무에서 그라우팅 보강효과를 판단하고, 성능개선 평가를 위한 기초 자료로 활용될 것으로 판단됨

라. Active/Passive 동시 역산 기술

모니터링 중 주변 잡음 또는 자연적으로 발생하는 에너지를 이용하여 모니터링 하는 기술로써, 자연적 Noise가 강해 일반적인 탄성과탐사수행이 어려운 지역에서 유효하며, Active+Active 형태로의 변화가 가능하여 다중 Source를 통한 탐사 등 다양한 형태로 탐사를 계획하는데 그 응용성이 클 것으로 예상된다.

마. 노후 필댐 물성 D/B 구축

노후 필댐 코어 물성 연구성과를 활용하여 기존 코어 물성을 고려한 노후 수리시설물의 취약성·안정성 평가, 노후 수리시설물(댐, 저수지 등)의 장기적인 잠재적 위해성 분석을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

바. 노후 필댐 보강 모사 수치 모델링 기법 정립

안정성 제고를 위한 그라우팅 보강 시 수치모델링 해석을 통한 성능개선효과의 정량적 평가에 활용되고, 댐에 최적화된 수치모델링 침투해석 기법을 적용하여 국내 노후 수리시설물의 침투해석 및 안정성 평가에 활용될 것으로 사료된다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

<표 6.1> 국외논문 및 보고서

No.	Title	Author	Published	Type
1	Accuracy and resolution of surface wave inversion	Rix G.J. and Leipski E.A.	1991	논문
2	Finite element computation of dispersion properties of thin-walled wave guides	Gavric L.	1992	논문
3	High Resolution Seismic Reflection Survey near SPR Surface Collapse Feature at Weeks Island, Louisiana	Richard D. Miller and et al.	1994	논문
4	High Resolution Seismic Reflection Profiling at Aberdeen Proving Grounds, Maryland	Richard D. Miller and et al.	1995	논문
5	Swept impact seismic technique (SIST)	Choon B. Park and et al.	1996	논문
6	Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements	Johansson S. and Dahlin T.	1996	논문
7	Theory of Seismic Imaging	John A. Scales	1997	보고서
8	Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization	Carlo G. Lai GlennJ.Rix	1998	논문
9	Rayleigh wave scattering by two adhering elastic wedges	Budaev B.V and Bogy D.B.	1998	논문
10	Monitorting water infiltration under an earth-fill levee with grophysical techniques (557-561)	Geotechnical Site Characterization (Vol. 1).	1998	논문
11	Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record	Park C.B., et al.	1998	논문
12	ASSESSMENT OF GROUND IMPROVEMENT USING THE CONTINUOUS SURFACE WAVE METHOD	J.A. Sutton K.Snelling.	1998	보고서
13	A Liquefaction Evaluation Procedure Based on Shear Wave Velocity	Ronald D. Andrus KennethH.Stokoe	1999	논문
14	DC RESISTIVITY AND SASW FOR VALIDATION OF EFFICIENCY IN SOIL STABILISATION PRIOR TO ROAN CONSTRUCTION	T. Dahlin and et al.	1999	논문
15	Estimating Shear-wave velocities from P-wave and converted-wave data	Franklyn K. Levin	1999	논문
16	Seismic Surveys at Alabama Electric Cooperative's Proposed Damascus, Alabama Site	Richard D. Miller JianghaiXia	1999	논문
17	Using MASW to Map Bedrock in Olathe, Kansas	Richard D. Miller JianghaiXia	1999	논문
18	Multichannel analysis of surface waves	Choon B. Park and et al.	1999	논문
19	Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves	Jianghai Xia et al.	1999	논문
20	FREQUENCY-WAVENUMBER ANALYSIS OF PASSIVE SURFACE WAVES	Daren J. Zywicki GlennJ.Rix	1999	논문
21	Multichannel analysis of surface waves	Park C.B., et al.	1999	논문
22	Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves	Xia J., et al.	1999	논문
23	Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies	M. H. Loke	1999	논문
24	MASW to Investigate Subsidence in the Tampa, Florida Area	Richard D. Miller and et al.	1999	보고서
25	Multichannel analysis of surface waves to map bedrock	Richard D. Miller and et al.	1999	보고서
26	Multichannel analysis of underwater surface waves near Vancouver, B.C., Canada	Choon B. Park and et al.	1999	보고서
27	ADVANCED SIGNAL PROCESSING METHODS APPLIED TO ENGINEERING ANALYSIS OF SEISMIC SURFACE WAVES	Daren J. Zywicki	1999	보고서
28	Multi-station Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves	Sebastiano Foti	2000	논문
29	Shear wave velocity and density estimation from PS-wave AVO analysis: Application to an OBC dataset from the North Sea	Side jin and et al.	2000	논문
30	DTERMINATION OF DYNAMIC SOIL PROPERTIES USING GEOPHYSICAL METHODS	Ronaldo Luna HoudaJadi	2000	논문
31	Geophysical investigations of river dykes in Vietnam	Tuyen D.V., et al.	2000	논문
32	MASW to Investigate Anomalous Near-Surface Materials at the Indian Refinery in Lawrenceville, Illinois	Richard D. Miller and et al.	2000	보고서
33	Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes	Jianghai Xia et al.	2000	보고서
34	Optimum Field Parameters of an MASW Survey	Choon B. Park and et al.	2002	논문
35	Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams	Karastathis V.K.	2002	논문

<표 6.1> 국외 논문 및 보고서(계속)

No.	Title	Author	Published	Type
36	Optimum Field Parameters of an MASW Survey	Park C.B., et al.	2002	논문
37	EFFECT OF SOURCES AND GEOPHONE COUPLING ON MASW SURVEYS	Mario Carnevale JuttaHager	2006	논문
38	2.5D resistivity modeling of embankment dams to assess influence from geometry and material properties	Sjodahl P., et al.	2006	논문
39	Assessment of railway embankment stiffness using continuous surface waves	Gunn D.A., et al.	2006	논문
40	The effect of dyke geometry on different resistivity configurations	Henning T., et al.	2006	논문
41	The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations	Lombaert G., et al.	2006	논문
42	Feasibility of the surface-wave method for the assessment of physical properties of a dam using numerical analysis	Min D.J. and Kim H.S.	2006	논문
43	Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam	In-Ky Cho Ji-YeonYeom	2007	논문
44	TEST FOR DETECTING AN IMPERMEABLE WATER BARRIER IN AN EARTH-FILL DAM IN AUSTRIA USING MASW METHOD	Hock S., et al.	2007	논문
45	Application of geophysical methods to the safety analysis of an earth dam	160216-Kim J., et al.	2007	논문
46	Resistivity Monitoring for Assessing Cement Grouting Effect	Kim J. H., et al.	2007	보고서
47	Performance evaluation of ground improvement by electrical resistivity tomography	Suzuki K., et al.	2008	논문
48	LEVEE EVALUATION USING MASW: PRELIMINARY FINDINGS FROM THE CITRUS LAKEFRONT LEVEE, NEW ORLEANS, LOUISIANA	Lane J. W. Jr., et al.	2008	논문
49	Lateral resolution and lithological interpretation of surface wave profiling	O'Neill A., et al.	2008	논문
50	Combined Ground Penetrating Radar And Masw Surveys To Locate Dam Seeps	Carnevale M. and Hager J.	2008	논문
51	Application of Surface Wave Method to Confirm Compaction of Refurbished Embankment	W. Chwatal and et al.	2010	논문
52	Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Røssvatn embankment dam test facility in Norway	Sjodahl P., et al.	2010	논문
53	Monitoring of grout material injected under a reservoir using electrical and electromagnetic surveys	Suzuki K., et al.	2010	논문
54	A 2.5D coupled FE?BE methodology for the dynamic interaction between longitudinally invariant structures and a layered halfspace	Francois S., et al.	2010	논문
55	Evaluation of the applicability of the surface wave method to rock fill dams	Kim J.T., et al	2010	논문
56	Geotechnical characterization of a river dyke by surface waves	Lutz Karl and et al.	2011	논문
57	Wavefield Analysis of Rayleigh Waves for Near-Surface Shear-Wave Velocity	Chong Zeng	2011	논문
58	Masw versus Refraction Seismic Method in terms of acquisition and processing of data and the accuracy of estimation of velocity profiles	Aayush Kesarwani and et al.	2012	논문
59	Use of surface waves for geotechnical engineering applications in Western Sydney	K. Tokeshi and et al.	2013	논문
60	INVESTIGATION OF ABNORMAL SEEPAGES IN AN EARTH DAM USING RESISTIVITY TOMOGRAPHY	Chin-Ping Lin., et al.	2013	논문

<표 6.1> 국외 논문 및 보고서(계속)

No.	Title	Author	Published	Type
61	Time-Lapse Electrical Resistivity Investigations for Imaging the Grouting Injection in Shallow Subsurface Cavities	Farooq M., et al.	2014	보고서
62	Estimation of Jet Grout Column Geometry using a DC Electrical Resistivity Push Probe	Bearce R.G., et al.	2015	논문
63	그라우트 작업시의 주입압력 측정장치(일본특허)	등록번호 02879815(1999.01.29.)	1999	특허
64	Directional fracture grouting method with polymer for seepage control of dikes and dams(미국 특허)	출원번호 12721395		특허
65	Polymer injection method for blocking piping in dikes and dams(미국 특허)	출원번호 12721342)		특허
66	An Analysis of Consolidation Grouting Effect of Bedrock Based on its Acoustic Velocity Increase	Ming Chen etc	2015	논문

제7장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	복합 표면과 탐사형 상시 모니터링 방법	지오텍 컨설팅(주)		대한민국	100	2017.07.21	서지사항에 과제정보 기입	제10-1762 364호
2	특허	능동제어 그라우팅 무선 오퍼버링 시스템	(주)한세지반 엔지니어링		대한민국	100	2017.08.11		제10-1769 314호
3	특허	지중 주입압력 제어형 그라우팅 공법	(주)한세지반 엔지니어링, K-water, (주)GSE		대한민국	기관별 33.3	2018.02.19		제10-1831 690호
4	특허	그라우팅 지중 주입압 통합제어장치	(주)한세지반 엔지니어링		대한민국	100	2018.02.19		제10-1831 688호
5	특허	지중 주입압 능동 제어를 위한 그라우팅 패커장치	(주)한세지반 엔지니어링		대한민국	100	2018.02.19		제10-1831 683호

제8장. 참고 문헌

- Cho, I. K., Kang, H. J. and Kim, K. J., 2006, Distortion of resistivity data due to the 3D geometry of embankment dams, geophysics and geophysical exploration, 9(4), 291-298.
- Kim, J. H., Song, Y. H. and Jung, S. H., 2000, Imaging techniques of substructures using electric and electromagnetic exploration, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists and Korean Geotechnical Society Geological investigation committee ,121-154.
- Kim, K. B., Park, S. Y., Jang, J. H. and Kim, J. H., 2015, Analysis of Dam Leak Environment and Grout Reinforcement Effect of Reservoir using the Electrical Resistivity Method, 2015 Korean Geo-Environmental Society Conference(15th Anniversary), 215-218.
- Korean Geotechnical Society, 1998, Manual for zonation on seismic geotechnical hazards, 28.
- Korean Geotechnical Society, 1998, N-Value and C, ϕ method of application, 102.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA), 2014, Agriculture, Food And Rural Affairs Major Statistics Data.
- Oh, S. H. and Suh, B. S., 2008, Safety assessment of embankment by analysis of electrical properties, the journal of engineering geology, 18(3), 245-255.
- Oh, S. H. and Sun, C. G., 2004, Analysis of geophysical and geotechnical SPT data for the safety evaluation of fill dam, Journal of the Korean Geophysical Society, 7(3), 171-183.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. and Ivanov, J., 2007, Multichannel analysis of surface waves (MASW)-active and passive methods, The Leading Edge, 26(1), 60-65.
- Park, S. G., Song, S. H., Choi, J. H., Choi, B. G. and Lee, B. H., 2002, Applicability of geophysical prospecting for water leakage detection in water utilization facilities, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists Special symposium(4th), 179-195.
- Song, S. H., Yong, H. H., Lee, G. S. and Woo, M. H., 2006, Verification of Reinforcement with Grouting Materials in Reservoir Dike using Electrical Resistivity Tomography, Annual Conference of the Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 73-78.
- Xia, J., Park, C. B. and Miller, R. D., 1999, Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, 64(3), 800-808.
-

주 의

1. 이 최종보고서는 00000부에서 시행한 00000사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 00000부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.