

2006. 8. 29.

총괄연구기관 / 한국건설기술연구원
주관연구기관 / 한국건설기술연구원
(주) 넥 스 지 오
한국시설안전기술공단
한국지질자원연구원
협동연구기관 / 서 울 대 학 교
경 북 대 학 교
충 북 대 학 교
코 오 통 건 설 (주)
(주)지오제니컨설턴트
(주)실크로드시앤티
위탁연구기관 / 전 남 대 학 교
경 상 대 학 교
건 국 대 학 교
참 여 기 업 / (주)하경엔지니어링
대 원 토 질 (주)
(주)아주엔지니어링
청 한 지 오 텍 (주)
천 원 공 업 (주)

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발

2006. 8. 29.

총괄연구기관 / 한국건설기술연구원
주관연구기관 / 한국건설기술연구원
(주)넥스지오
한국시설안전기술공단
한국지질자원연구원
협동연구기관 / 서울대학교
경북대학교
충북대학교
코오롱건설(주)
(주)지오제니컨설턴트
(주)실크로드시앤티
위탁연구기관 / 전남대학교
경상대학교
건국대학교
참여기업 / (주)하경엔지니어링
대원토질(주)
(주)아주엔지니어링
청한지오텍(주)
KICTEP 천원공업(주)



RPOO154

건설교통부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발”의 1차년도 최종(중간)보고서로 제출합니다.

2006. 8. 29.

주관연구기관 : 한국건설기술연구원
원 장 : 정 낙 형

협동연구기관 : (주)넥스지오
대 표 이 사 : 윤 운 상

협동연구기관 : 한국시설안전기술공단
이 사 장 : 송 금 실

협동연구기관 : 한국지질자원연구원
원 장 : 이 태 섭

■ 총괄연구책임자 /

연구위원 배규진

담당업무
연구단 총괄관리

■ 주관연구기관 참여연구원 / 수석연구원 김창용 외 13인 지보재 및 지반정보

■ 협동연구기관 참여연구원 / 대표이사 윤운상 외 113인

((주)넥스지오, 한국시설안전기술공단, 한국지질자원연구원,
서울대학교, 경북대학교, 대전대학교, 충북대학교,
코오롱건설(주), (주)지오제니컨설팅, (주)실크로드시엔티,
전남대학교, 건국대학교, 경상대학교,
하경엔지니어링, (주)아주엔지니어링, (주)대원토질,
청한지오텍(주), 천원공업(주))

요 약 문

I. 연구제목

IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

우리나라는 국토 면적의 70% 이상이 산지를 이루고 있고, 암반 조건도 비교적 양호하여 터널 굴착이 유리한 암반으로 구성되어 있어서, 환경 훼손이 상대적으로 적은 터널공법이 우세하게 적용되고 있다. 특히, 최근의 기존 철도 터널의 복선화/고속화, 국가 균형발전을 위한 동서/남북 축의 고속도로 및 고속국도 등의 신설 계획 등이 발표되면서 향후 약 10년 이상 터널건설이 꾸준히 이루어 질 것으로 예상되고 있다. 특히, 최근 건설되고 있는 터널은 5km이상의 초장대 터널들이 급격히 증가하고 있으며, 대부분 심도가 깊어지고 있고, 난공사 구간이 점점 더 증가하고 있어서 무엇보다도 터널 건설 기술 개발이 시급한 실정이다.

아울러 국내 SOC 건설 시장이 어느 정도 포화 가능성이 대두되고 있는 시점에서 현재 및 근 미래에 SOC 개발이 급격히 이루어질 것으로 예상되는 동남아시아의 개발도상국들의 건설 시장에서 터널 부문에 관한 선진 기술 보유국들과의 경쟁에서 앞서기 위해서는 경쟁력을 갖춘 특화된 순수 국내 터널 기술 개발이 무엇보다도 필요할 것으로 판단된다. 현재까지 국내 터널 설계/시공 경험은 양적으로는 세계적으로 내세울 만한 실적을 보유하고 있으나, 실제로 유럽/일본 등과 같은 특화된 기술을 보유한 국가들과의 경쟁에서 이길 수 있는 경쟁력 있는 기술이 부족한 실정이다. 일례로 일본의 실드 터널 기술은 이미 세계적으로 인정을 받고 있고, 세계적인 기술로 자리 잡고 있다.

국내 터널 기술이 해외에서 인정을 받는 부분은 주로 시공 능력, 즉 안정하고

빠르게 터널을 건설할 수 있다는 인식이 지배적이며, 이를 국내 기술력화하기 위해서는 소위 급속 굴진의 대명사인 기계식 굴착 방법 외에 Conventional Tunnelling 공법에서의 급속 시공 측면을 우리의 강점으로 인식해야 할 필요성이 있다.

급속 시공은 실제로 공사비와도 직접적인 상관성이 있으며, 노르웨이의 라에르달 터널과 국내 경암반 터널에서의 평균 공사비 및 시공 속도를 비교해 보면, 공사비는 약 3배정도 비싸고, 시공 속도는 약 5배 정도 느린 것으로 보고되고 있다. 특히, 굴착과 라이닝 타설 기간이 현재 전체 공종의 약 7:3 정도가 되는 현실을 감안해 볼 때, 라이닝 타설 시간을 줄이는 것이 실제로 급속 시공을 이루기 위해서 매우 중요할 것으로 판단된다.

최근 몇몇 터널 현장에서 완료된 “터널 굴착 및 라이닝 병행시공”은 그 하나의 대안일 수 있으며, 국내기술로서 자립화를 이뤄낼 수 있는 가능성은 제시하였으나, 아직까지 현장의 기술로서 체계화되지 않은 측면이 있지만 국내기술로서 R&D투자를 통해서 기술개발이 이루어진다면 향후 국내 터널 건설뿐만 아니라 해외 터널 건설 시공에 기술 수출을 통해서 세계와 어깨를 나란히 할 수 있는 기술로서 자리 잡을 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같은 배경에 근거하여, 본 연구과제는 국내 지반특성에 적합한 NATM 터널공법을 대상으로 세계적으로 기술력을 인정받고 있는 IT기반 인프라와 신소재를 활용함으로써 기존 터널 기술들을 개선/개량하여 터널 시공속도를 약 20% 이상 단축시키며 100년 이상으로 지보재 내구연한을 장수명화할 수 있는 급속 안정화/급속 시공 터널 기술(Rapid Excavation and Safe Tunnel, R.E.S.T)개발에 초점을 맞춘 실용화/사업화를 위주로 하는 핵심기술개발 사업이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구사업은 “IT 및 신소재를 이용한 급속안정화 터널 시공기술 개발”이라는 목표를 달성하기 위하여 다음과 같은 4가지 핵심 기술들을 설정하였다.

1) IT 접목형 지반 특성 조사/분석 기술 ; 본 기술은 터널 급속시공에 매우 중

요한 막장 전방 지질/지반 특성변화를 신속히 파악하기 위해서 설계 단계에서 얻어진 지질/지반특성과 시공 중 막장 특성을 정확하게 비교/분석하여 지반의 불확실성을 해소하며, 시공 중 지반정보의 효율적인 관리 및 활용을 통하여 신속한 의사결정을 구현할 수 있도록 하는 Mobile 입·출력 기술, 미시추 구간 및 막장 전방 특성 예측 기술, 설계 지반정보 및 시공 중 지반정보 가시화 시스템 개발 등 첨단 IT기술을 접목한 기반기술임

2) 시공현장 지원을 위한 굴착 터널 안정성 평가기술 ; 본 기술은 터널 급속안정화를 위해서 터널 시공 중 지보재/보강재의 성능평가를 원활하고 신속히 수행할 수 있도록 하는 기술개발에 초점을 맞추고 있음. 시공 중 현장계측 결과를 활용하여, 굴착이 진행되고 있는 시공현장에서 굴착 중 지반의 물성평가, 터널 지보재의 성능평가, 막장 전방 보강재의 성능평가 등 현재 국내 NATM 터널에서 간과하고 있는 시공 중 안정성 평가를 정량적으로 수행하여 신속하게 이 결과를 다음 굴착 단계에 반영(Feedback)토록 함으로써 NATM공법의 원래 기능을 극대화하여 공기/공비를 단축할 수 있는 기술임.

3) 고효율의 급속시공을 위한 신개념 굴착공법 ; 본 공법은 발파 굴착이 시행되는 터널에서 발파 작업과 라이닝 타설을 병행하여 터널 시공 기간을 단축시킬 수 있도록 하기 위해서, 발파교란대를 정밀 평가하며, 그 영향을 최소화할 수 있는 제어기법 및 지질기반 정보에 기초하여 Web 환경 하에서 발파패턴 설계 및 관리용 통합솔루션을 개발함. 아울러 국내의 복잡한 암질조건에서 고속굴진을 달성할 수 있는 새로운 발파공법을 개발하고, 암반조건에 부합되는 발파패턴을 표준화하며, 콘크리트 라이닝고법 자체를 병행시공에 적합하도록 개선하여 발파굴착-라이닝의 병행시공법을 확립하여 공기 단축 및 공비 절감을 이뤄낼 수 있는 핵심기술임

4) 급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발 ; 본 기술은 신소재를 활용하여 터널 급속 안정화/급속 시공의 핵심이 되는 슛크리트, 록볼트, 강지보재 등의 지보재 성능을 개선/극대화하여, 터널 안정성을 조기에 확보하고 시공성을 향상시켜 급속 시공에 기여할 수 있는 첨단 신소재 융합기술임. 특히 국산 미분말 혼화재/고성능 감수제 병용사용에 의한 슛크리트의 고강도/고내구성화, 완전충진/흘러내림 방지를 위한 고성능 록볼트 개발 그리고 위상최적화를 통한 강지보재 성능 개선 등 국내 자립 기술로서 근미래 해외 수출이 기대되는 경쟁력 있는

핵심기술임

이상과 같은 4개의 세부주제들은 발파굴착에 의한 NATM 터널의 급속안정화/급속시공 신기술을 개발하기 위한 핵심기술들로 구성되어 있다. 그러나 각 세부주제들로부터 얻어질 핵심기술들은 발파굴착에 의한 NATM터널뿐만 아니라 각종 도심지터널에서도 효과적으로 적용될 수 있다.

IV. 연구개발결과

연차	연구목표	주요 연구수행 내용
1차년도 (2005. 6 ~ 2006. 8)	급속안정화 터널 지반 정보 표준모델 개발 (제1세부)	수립된 정보화 전략 계획 근거하여 다양한 지반 및 터널정보의 DB 설계를 위한 통합 표준모델 제시
	급속안정화 터널 지반 정보화 전략 (ISP) 작성 (제1세부)	기술동향, 정보환경 및 업무프로세스 분석을 통해 요구사항 및 개선문제점 도출하고, 이를 반영한 정보화 전략 계획수립
	- 급속 안정화 터널 시공 현장 지반조사 자료의 상호 연관성 분석 (제1세부) - 급속 안정화 터널 시공 현장의 공정 진행에 따른 지반 정보 요소 분석 - 시추조사, 물리탐사, 지표지질조사, 막장 단면 이미지 등 다양한 지반조사 결과의 상호 연관성 분석	- 문헌 조사를 통해 급속 안정화 터널 시공 현장의 공정 진행에 따른 지반 정보 요소를 분석 - 시추조사, 물리탐사, 지표지질조사, 막장 단면 이미지 등 급속 시공중 획득 가능한 다양한 지반정보들의 상호 연관성을 분석하였다. 조사목적에 따른 중요도 및 자료구조를 중심으로 상호 연관성을 비교 분석하였으며, 이를 매트릭스 형태로 나타냄 - 설계 지반정보와 시공 지반정보를 결합한 동적 지오 모델링의 개념을 정립하였고, 이를 이용한 유사 실시간 공정 위험요소 분석 시스템의 전략을 개발함

○ 굴착지반에 대한 지반해석 모델 개발 (제2세부)	■ 현장계측 데이터의 활용성 및 지반 해석 기법 개발
○ 굴착지반의 물성 선정 및 평가 기술 (제2세부)	■ 실내물성 실험 실시 및 평가 연구 ■ 다양한 지반조건과 지보조건에 따른 원지반 설계 물성치의 데이터베이스 구축 연구 ■ 인공신경망 모델의 프로그램 연구
○ 지보/보강재의 성능평가기법 개발 (제2세부)	■ 지보재 및 보강재의 성능평가 기법의 연계성 연구 ■ 주지보재 타설에 따른 지반 보강 메커니즘 연구 ■ 막장전방 보강재의 지반보강 메커니즘 연구 ● 급속 라이닝 병행시공을 위한 지반변위 수렴성 조기에측기술 개발
○ 지보/보강재의 현장계측실시 및 계측기기/기법 개발 (제2세부)	■ 내공변위 계측 결과의 활용성 및 평가 기법 연구 ■ 내공변위 현장계측 실시 ■ 주지보재의 현장계측 계획 수립 및 현장실험 실시 ● 지반특성별 절대변위 산정기술 개발 ● 막장전방 선행변위계측 기술 개발
○ 동적실험 개념정립 및 시스템 설계 (제3세부) ○ 수치해석적 파괴모델링 기법개발 (제3세부)	● 동적실험시스템 설계요소의 정립 ● 홉킨슨 효과를 이용한 암석 중에서의 응력파의 전파모델링
○ 발파진동의 영향 현장평가 (제3세부) ○ 시공중 터널 내부 오염농도 평가 및 저감방안 도출 (제3세부)	● 계통터널 안전이격거리 도출 ● 환기방법별 터널내 오염농도 측정 ● 복합 환기시스템 도출
○ Web 기반 발파설계 기법 개발 (제3세부)	● Web기반 발파설계프로그램의 프로토타입 구현 완료 - Web에서 구동되는 프로토타입 구현 완료 - 사용자 입력에 따라 기본적인 발파설계패턴을 설계하고, 기본 설계정보를 확인할 수 있음
○ 파괴역학 개념 이론적 고찰 및 문헌 연구 (제3세부) ○ 파괴인성실험 고찰 (제3세부) ○ 수치해석을 이용한 검증 (제3세부)	● 수치해석을 이용한 교란대 평가방법 고찰 ● 파괴인성 모드실험과 수치해석 비교 검증
○ 현행 숏크리트 재료 및 숏크리트 성능 개선용 한국형 숏크리트 신재료	● 현행 숏크리트 혼입재료 및 제반 문제점 분석 ● 숏크리트의 고성능화를 위한 국내외 신재료 검토·분석

검토 (제4세부)	
○ 미분말 혼화재와 고성능 감수제의 병용혼입시의 쏫크리트 기본 배합설계(안) 제시 (제4세부)	• 쏫크리트의 고성능화에 대한 필요성 정리 • 쏫크리트 목표 설계강도 결정 • 목표 설계강도를 달성하기 위한 taylor-made 급결제 제작 및 급결제 사용량 결정 • 목표 슬럼프 및 공기량 달성을 위한 폴리카르본산계 고성능 감수제 및 AE 사용량 결정 • 메타카올린을 사용한 고성능 쏫크리트의 배합설계 • 배합설계에 따른 고성능 쏫크리트의 성능평가 수행
○ 고성능 록볼트시스템을 위한 신재료 분석 (제4세부)	• 국내외 록볼트 정착재 조사 • 현행 록볼트 정착재의 성능평가를 통한 문제점 분석 • 현행 록볼트 정착재의 재료성분 분석 • 록볼트 정착재 신재료의 개발방향 수립 - 가소성 시멘트 조성물 - 시멘트 그라우트 재료의 응용 - 폴리머 시멘트의 응용 • 팽창성 수지를 사용한 정착재 홀러내림 방지기구 개발방향 수립
○ 최적 구조체 결정을 위한 위상 최적화 기법 연구 및 최적 연결구조 형상 제시 (제4세부)	• 위상최적화 알고리즘 제시 - 연결고리의 응력 및 진동특성을 고려동시 • 위상최적화 모델 선정 및 최적화수행.
○ 급속시공 및 급속 안정화를 위한 최적 강지보재의 개념 제시 (제4세부)	• 국내외 터널 지보패턴 기준 조사 및 분석 • 국내 터널(도로, 지하철, 철도) 지보 패턴 설계도 분석
○ 강지보재용 재료의 조사 및 경제성 분석 (제4세부)	• 기존 강지보재 거동분석을 위한 실내실험(휨모멘트 및 인장 실험) 수행
○ 실내 쏫크리트 타설시스템의 설계 및 prototype제작 (제4세부)	• 국외의 정밀 제어 쏫크리트 타설시스템 및 국내 자체 제작 검토 (성능과 경제성 검토) • 급결제 사용량과 콘크리트 토출량을 자동적으로 제어할 수 있는 MEYCO사의 SUPREMA를 선정·발주 (향후 robotics화 가능) • 2차년도부터의 SUPREMA 최적 활용방안 수립

V. 연구개발결과의 활용계획

- 이상대 분포구간에서의 막장관찰, 탐사, 선진시추 등의 지반조사 기법을 통한 자료를 신속히 정보화 하고 이를 공유하여 의사결정자료로 제시
- 터널 시공 현장에서 조사자가 시공 중 획득된 각종 정보를 실시간 현장에서 직접 입력을 통한 업무 처리
- 터널 시공 현장에서 조사자가 시공 중 획득된 각종 정보를 실시간 현장에서 직접 입력을 통한 업무 처리
- 단위 지역에 대한 시공 전 설계자료를 기반으로 지보 변경 요인에 대해 자료 비교 및 분석이 실시간 자동적으로 진행
- 터널 시공 중 자료가 입력됨과 동시에 3차원으로 가시화되어 현장과 중앙의 시공간적 제약이 해소
- 디지털방식으로 자료처리가 자동화되어 자료입력의 중복과 손실을 방지
- 기존 자료가 보존되어 시간적 경과에 따른 터널 구조물의 변화를 추적할 수 있어 4차원 터널 모델링 관리가 가능
- 시공 전 설계자료와 시공 중 설계자료가 전산으로 관리되어 자료 출력 및 관리를 위한 비용을 획기적으로 절감.
- 업무 자동화로 터널 조사자가 공학적 활동에 집중할 수 있는 여건 확보
- 현장 모바일 기기와 자료분석 및 처리를 위한 서버 시스템의 효율적인 운용으로 건설 관련 통합 시스템 구축과 건설 CALS 실현에 기여
- 조사자료의 실시간 통계적 분석처리와 단면도 작성 틀을 사용할 수 있어 조사작업의 효율성을 향상하며, 건설 관리 기능을 극대화
- 부분적인 요소기술보다 통합화되는 추세에 맞게 자료의 입력-처리-분석-안정성 해석 등의 일련의 과정을 원스톱으로 자동화하는 모듈 개발
- 터널 급속 시공을 위한 시공현장 지원용 지반 안전성 평가 기술 개발
- 터널 지보재 및 보강재(막장전방 장척 보강재)의 성능평가에 대한 연구를 실시하여 지보효과의 정량화를 유도하고 최적 지보에 의한 경제성 확보
- 시공현장에서 실시한 계측 결과의 정보화 처리 및 다음 굴착을 위한 신속한 반영(Feedback) 시스템 개발(IT 기술의 시공현장 기술력 확보)

- 굴착에 의한 지반이완 영향을 고려한 지반물성 평가 시스템을 개발하여 시공 현장의 지반 거동 평가의 신뢰성 확보
- 지보재 및 보강재의 현장 계측기법에 의해 계측 결과의 신뢰성 향상 및 지보 성능평가 기술개발
- 터널의 토목 구조물 시공시 계측 기술의 신뢰성 확보
- 급속시공으로 공사비 절감효과를 창출하기 위한 시공 중 현장에 대해 지반 안전성의 신속한 판단 기준으로 활용
- 현장에서 설치한 계측기기의 성능 평가 기술로 인해 지보 효과의 정량적 판단에 활용
- 터널을 포함한 다양한 지하공간개발을 위한 굴착 시에 안정성 증대, 시공비 절감, 설계/시공의 체계화를 위한 활용
- 국내 지질 및 암반조건에 적합한 굴착능률 평가지수의 개발로 산업발파 현장에서의 설계지침으로 활용
- 도로, 철도 등의 장대터널 굴착시 발파굴착/라이닝구조물 병행시공법을 설계에 반영함으로써 획기적인 공기단축에 활용
- 길이가 긴 철도터널의 공기 및 공사비 절감, 간편한 유지보수가 가능한 슛크리트 라이닝공법 및 강지보 시스템을 개발함으로써 국내 다양한 터널건설 현장에서의 설계 및 시공에 활용
- 핵폐기물 지하처분장, 에너지 지하저장시설의 건설에서 핵종이동 및 저장물누출 경로의 차단을 위한 암반주벽의 교란대 평가 및 제어 기술로 활용
- 개발된 정보기반 자료관리 및 분석 소프트웨어의 제작 및 보급
- 향후 국내에서 건설될 것으로 예상되는 지하대피소, 지하스포츠시설, 지하주차장 등 다양한 지하생활공간 개발에 활용
- 국내,외 학술지 및 학술회의에 활발한 발표를 통한 학계, 산업계 등에서의 연구결과의 공유
- 신기술을 활용한 솔루션 개발로 지반정보 전반에 걸친 통합관리의 모델을 제공
- 모바일, 천공장비 등 여러 매체와의 네트워크화 활용 가능
- 국내 설계·시공업체에 대한 기술교육, 홍보 등을 통해 한국형 신지보재 기술을 실무에 활용할 수 있도록 적극 유도

- 적극적인 활용을 도모하기 위하여 정기적인 기술강좌를 개설함은 물론, 시험
시공을 설계·시공업체와 협동으로 추진하여 자연스러운 실무활용을 유도함
- 관련 설계·시공업체에 적극적인 한국형 신지보재의 기술이전 도모

- 목 차 -

제1장 서론	1
1. 핵심기술 또는 기반기술의 정의	1
1.1 정의	1
1.2 핵심기술 또는 기반기술의 범위	2
2. 연구의 비전	4
2.1 비전	4
2.2 발전방향	5
2.3 세부핵심기술 또는 기반기술	7
2.3.1 세부핵심기술 또는 세부기반기술의 상관관계	7
2.3.2 세부핵심기술 또는 세부기반기술의 비전	8
제2장 국내외 기술개발 현황	12
1. 국내기술동향	12
2. 국외기술동향	15
3. 기술동향 분석 결론	16
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	19
[제1세부과제: 급속안정화 터널시공을 위한 IT 접목형 지반특성조사/분석 기술 개발]	19
<Part I> 정보화 전략(ISP) 수립	19
1. 정보화 전략의 필요성	19
1.1 급속안정화 터널시공을 위한 지반정보 활용 프로세스의 혁신	19
1.1.1 터널 시공 중 잦은 설계 변경 발생	19
1.1.2 시공중 지반 상태의 예측 및 평가 실패로 인한 빈번한 시공지연 발생	19
1.2 급속안정화 터널시공을 위한 신속 의사결정 지원시스템 구축	19
2. 정보화 전략 수립 방법	23
3. 지반정보 및 상호 연관성 분석	24
3.1 개요	24
3.2 터널 시공관련 지반정보 요소분석	24

3.3 데이터 퓨전(Fusion) 기법의 도입 방안	25
3.4 터널 지반정보의 상호 연관성 분석	26
3.4.1 공정별 조사 목적에 따른 상호 연관성 분석	26
3.4.2 데이터 구조에 따른 지반정보의 상호 연관성 분석	28
4. 지반정보화 활용 전략	29
4.1 개요	29
4.2 급속 안정화 터널 시공을 위한 지반 정보시스템 모델 수립	29
4.3 각종 지반 정보 유형 및 기능 분류	30
4.4 정보활용 시나리오 작성	32
4.5 터널 지반정보활용 시스템 구성(통합안) 및 연계방안	34
5. 개별 지반 정보 활용 시스템의 구성	35
5.1 Mobile 장비를 활용한 의사결정지원 시스템	35
5.2 Tunnel Laser Scanning System	36
5.2.1 레이저 스캐너 시스템의 장점	36
5.2.2 시스템 적용 및 결과활용	36
5.3 신속-정량화 평가에 근거한 지반 평가 시스템	37
5.3.1 신속-정량화 지반평가 시스템을 통한 지반거동 분석	37
5.3.2 신속-정량화 지반평가 시스템 구축을 통한 지반정보화 활용전략	37
5.4 3D 지오 모델링 기법을 활용한 통합 정보 시스템	38
5.4.1 급속 시공중 유사 실시간 공정 위해요소 분석 시스템 전략 개발	39
〈Part II〉 표준자료모델 수립	41
1. 터널 설계 및 시공자료의 분류	41
2. 데이터 모델	42
 [제2세부과제: 시공현장 지원을 위한 굴착터널 안정성 평가기술 개발]	45
1. 서론	45
2. 굴착터널의 안정성 평가 기술개발	47
2.1 현행 터널구조물의 시공관리 및 안정성 평가기법 활용 현황	47
2.2 굴착터널 안정성 평가에 대한 현황 조사	48
2.3 현장계측 기법의 문제점	50
2.3.1 국내 지보재 계측의 문제점	50
2.3.2 선행변위 계측의 문제점	51
2.4 한계변형률 개념과 현장 적용성	54

2.4.1 한계변형률 개념	54
2.4.2 한계변형률 개념의 현장 적용성	54
2.5 한계변형률 개념을 활용한 굴착터널안정성 평가기술 구상도	57
3. 굴착터널의 안정성 평가의 핵심 요소기술 연구	58
3.1 변형률 개념을 터널시공현장에 대응시키는 방법 연구	58
3.2 변형률 개념을 활용한 기존 연구사례 연구	59
3.3 Rock Mass에서 한계변형률의 산정 방법 연구	60
3.4 실내의 일축압축실험 응력조건과 현장의 삼축응력상태	63
3.5 상대변위, 절대변위, 계측변위 및 그 활용성 연구	64
3.6 계측변위의 활용방법 및 안정성 평가 기법의 제안	68
3.7 한계변형률 개념의 암반지반으로의 활용방안 연구	70
3.8 계측변위(변형률)가 한계변위(변형률)를 초과하는 경우의 대처방안	70
3.9 굴착터널 안정성 평가 기술개발을 위한 연구진행 방향	71
 [제3세부과제: 고효율의 급속시공을 위한 신개념 굴착공법 개발]	72
1. 개요	73
2. 1차년도 주요 연구수행 내용	74
3. 터널 발파 설계와 영향인자 분석	75
4. 여굴 발생과 조절기법	76
5. 터널주벽 발파교란대 평가 및 최소화 기술 개발	77
6. 동적거동 실험개념정립 및 수치해석 기법 개발	78
6.1 새로운 폭원모델링 기법	79
6.2 동적실험의 수치해석모델의 구성 및 입력물성의 결정	80
6.3 해석결과 및 검토	80
6.3.1 암석시료 중에서의 응력파의 전파양상	81
7. 발파-라이닝 병행시공의 발파진동 영향평가 및 허용수준 분석	82
7.1 구조물에 대한 발파진동 영향평가	82
7.2 양생콘크리트에 대한 허용 수준	83
7.3 적용기준 설정	83
8. 발파-라이닝 병행시공 현장적용시험	84
8.1 현장계측	85
8.2 시험결과 및 영향권 분석	86
8.3 양생콘크리트 검증 실험	87

8.4 현장실험 결과 요약	89
9. 발파-라이닝 병행시공중 환기시스템 평가 및 개선	89
9.1 대상 터널의 환기방식	89
9.2 터널내 오염농도 측정	89
10. 정보기반 발파설계 프로그램 개발	93
10.1 연구 수행 내용	93
10.2 발파설계 프로그램의 프로토타입 개발	93
10.3 데이터베이스를 위한 정보 분류	95
10.4 1차년도 결론 및 향후 추진 계획	97
 [제4세부과제: 급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발]	98
〈Part I〉 고성능 숏크리트	98
1. 개요	98
2. 고성능 숏크리트의 필요성 정리	98
3. 고성능 숏크리트의 설계강도 결정	100
4. 고성능 숏크리트의 기본 배합설계	103
4.1 사용재료	104
4.1.1 시멘트 및 골재	104
4.1.2 메타카울린	105
4.1.3 급결제	107
4.2 적정 급결제 사용량 결정을 위한 공기압식 Pin 관입시험	108
4.2.1 개요	108
4.2.2 실험계획	108
4.2.3 공기압식 Pin 관입시험 장비	109
4.2.4 공기압식 Pin 관입시험 방법	109
4.2.5 공기압식 Pin 관입시험 결과	111
4.3 목표 슬럼프 및 공기량을 위한 폴리카르본산계 유동화제량 및 AE계량 결정	108
4.4 메타카울린을 사용한 고성능 숏크리트의 배합설계	114
4.5 숏크리트의 고성능화를 위한 기본 배합실험	115
4.5.1 콘크리트 혼합	115
4.5.2 압축강도 및 휨강도 시험방법	115
4.5.4 실험결과	116

5. 정밀 쏜크리트 타설장비의 도입	117
〈Part II〉 고성능 록볼트	119
1. 개요	119
2. 고성능 록볼트의 필요성 정리	119
3. 현행 록볼트 정착재의 성능평가와 문제점 분석	120
3.1 현행 시멘트 모르타르계 및 레진계의 성능 평가	120
3.1.1 실험실 시험	120
3.1.2 현장 시험	127
3.2 모르타르 캡슐형 정착재의 성능평가	130
3.3 가소성 재료 검토	131
3.4 종합 분석	132
4. 록볼트 정착재의 재료 분석	133
4.1 국내·외 록볼트 정착재 조사 및 선행 특허 분석	133
4.1.1 시멘트 모르타르계	133
4.1.2 레진계	135
4.2 현행 록볼트 정착재 재료성분 분석	140
4.2.1 시멘트 모르타르형	140
4.2.2 레진계	141
5. 록볼트 정착재의 개발방향 수립	143
5.1 가소성이 있는 시멘트 조성물	144
5.2 시멘트 그라우트 재료의 응용	145
5.3 폴리머 시멘트의 응용	146
5.4 수지계 흘러내림 방지용 패커	146
〈Part III〉 최적 강지보재	148
1. 개요	148
2. 최적 강지보재의 필요성 정리	148
3. 강지보재의 현황	150
3.1 강지보재의 개념	150
3.2 강지보재의 종류	151
3.3 강지보재 지보패턴	153
3.3.1 RMR분류법	154
3.3.2 Q-system(NGI)	155

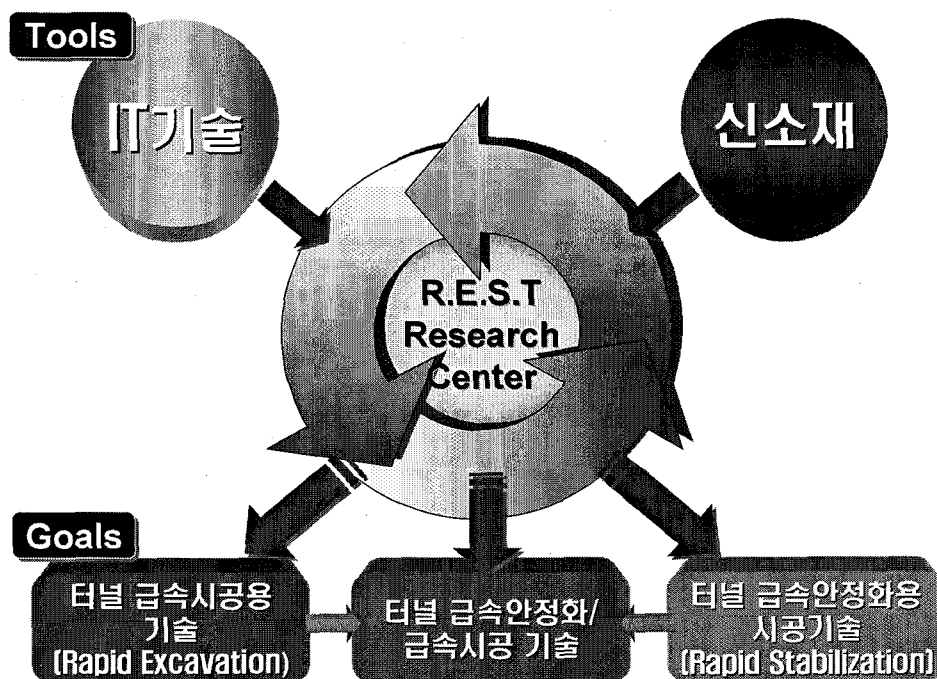
3.3.3 RSR(Rock Structure Rating)분류법	156
3.3.4 한국도로공사	156
3.3.5 서울시 지하철 건설본부	157
3.3.6 한국철도시설공단	159
3.3.7 미 육군공병단	160
3.3.8 일본도로공단	161
3.3.9 일본철도공단	162
3.3.10 일본토목학회	164
3.3.11 영국터널학회	164
3.4 기본 강지보재의 거동분석	164
4. 최적 강지보재의 개발을 위한 위상최적화 연구	166
4.1 구조물의 반응해석	166
4.2 다공성물질	167
4.3 위상최적화 알고리즘 제시	169
4.4 위상최적화 모델 선정 및 최적화수행	171
 제4장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도	173
1. 연구개발목표의 달성도	173
2. 연구개발 수행 진도율	176
3. 관련 분야에의 기여	177
3.1 기술적 측면	177
3.2 경제·산업적 측면	181
 제5장 연구개발결과의 활용계획	184
 제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	187
 제7장 참고문헌	188
 별 첨 자체평가의견서	197

제 1 장 서 론

1. 핵심기술 또는 기반기술의 정의

1.1 정의

❁ 본 연구과제는 국내 지반특성에 적합한 NATM 터널공법을 대상으로, 세계적으로 기술력을 인정받고 있는 IT기반 인프라와 신소재를 활용함으로써 기존 터널 기술들을 개선/개량하여 터널 시공속도를 약 20% 이상 단축시키며 100년 이상으로 지보재 내구연한을 장수명화할 수 있는 급속 안정화/급속 시공 터널 기술(Rapid Excavation and Safe Tunnel, R.E.S.T)개발에 초점을 맞춘 실용화/사업화를 위주로 하는 핵심기술개발 사업임.

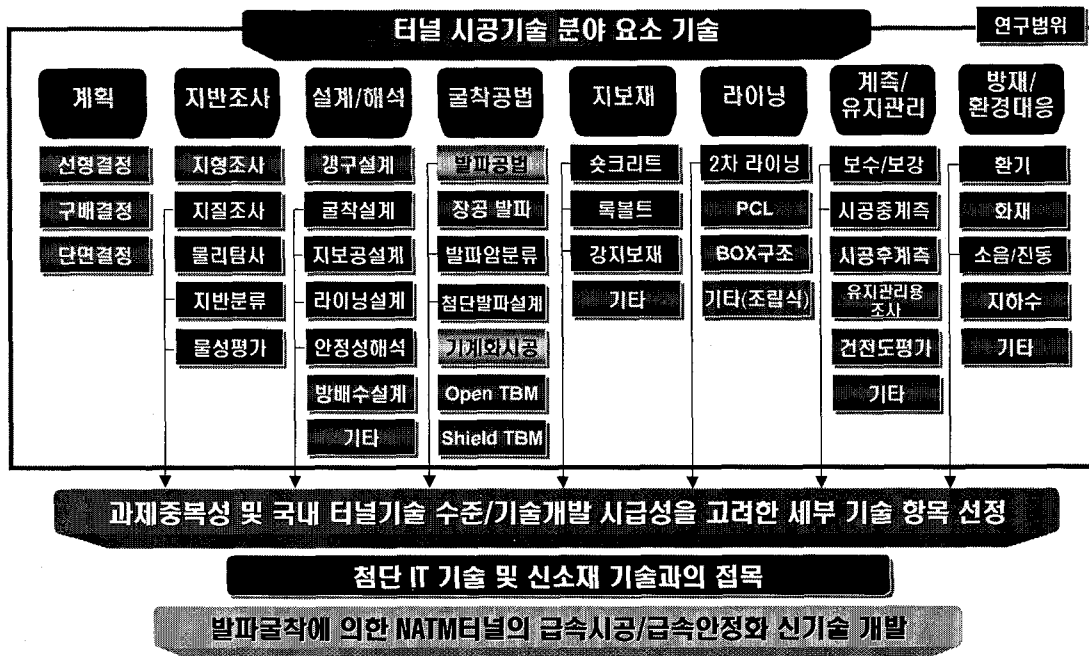


<연구개발의 목표와 정의>

1.2 핵심기술 또는 기반기술의 범위

- 본 연구단은 건설핵심기술연구개발사업의 CTRM연구과제로서 “IT 및 신소재를 이용한 급속안정화 터널 시공기술 개발”이라는 목표를 달성하기 위하여 다음과 같은 4가지 핵심 기술들을 설정함
- IT 접목형 지반 특성 조사/분석 기술 ; 본 기술은 터널 급속시공에 매우 중요한 막장 전방 지질/지반 특성변화를 신속히 파악하기 위해서 설계 단계에서 얻어진 지질/지반특성과 시공 중 막장 특성을 정확하게 비교/분석하여 지반의 불확실성을 해소하며, 시공 중 지반정보의 효율적인 관리 및 활용을 통하여 신속한 의사결정을 구현할 수 있도록 하는 Mobile 입·출력 기술, 미시추 구간 및 막장 전방 특성 예측 기술, 설계 지반정보 및 시공 중 지반정보 가시화 시스템 개발 등 첨단 IT기술을 접목한 기반기술임
- 시공현장 지원을 위한 굴착 터널 안정성 평가기술 ; 본 기술은 터널 급속안정화를 위해서 터널 시공 중 지보재/보강재의 성능평가를 원활하고 신속히 수행할 수 있도록 하는 기술개발에 초점을 맞추고 있음. 시공 중 현장계측 결과를 활용하여, 굴착이 진행되고 있는 시공현장에서 굴착 중 지반의 물성평가, 터널 지보재의 성능평가, 막장 전방 보강재의 성능평가 등 현재 국내 NATM 터널에서 간과하고 있는 시공 중 안정성 평가를 정량적으로 수행하여 신속하게 이 결과를 다음 굴착 단계에 반영(Feedback)토록 함으로써 NATM공법의 원래 기능을 극대화하여 공기/공비를 단축할 수 있는 기술임.
- 고효율의 급속시공을 위한 신개념 굴착공법 ; 본 공법은 발파 굴착이 시행되는 터널에서 발파 작업과 라이닝 타설을 병행하여 터널 시공 기간을 단축시킬 수 있도록 하기 위해서, 발파교란대를 정밀 평가하며, 그 영향을 최소화할 수 있는 제어기법 및 지질기반 정보에 기초하여 Web 환경 하에서 발파패턴 설계 및 관리용 통합솔루션을 개발함. 아울러 국내의 복잡한 암질조건에서 고속굴진을 달성할 수 있는 새로운 발파공법을 개발하고, 암반조건에 부합되는 발파패턴을 표준화하며, 콘크리트 라이닝고법 자체를 병행시공에 적합하도록 개선하여 발파굴착-라이닝의 병행시공법을 확립하여 공기 단축 및 공비 절감을 이뤄낼 수 있는 핵심기술임.

- 급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발 ; 본 기술은 신소재를 활용하여 터널 급속 안정화/급속 시공의 핵심이 되는 숏크리트, 록볼트, 강지보재 등의 지보재 성능을 개선/극대화하여, 터널 안정성을 조기에 확보하고 시공성을 향상시켜 급속 시공에 기여할 수 있는 첨단 신소재 융합기술임. 특히 국산 미분말 혼화재/고성능 감수제 병용사용에 의한 숏크리트의 고강도/고내구성화, 완전충진/홀러내림 방지를 위한 고성능 록볼트 개발 그리고 위상최적화를 통한 강지보재 성능 개선 등 국내 자립 기술로서 근미래 해외 수출이 기대되는 경쟁력 있는 핵심기술임
- 4개의 세부주제들은 발파굴착에 의한 NATM 터널의 급속안정화/급속시공 신기술을 개발하기 위한 핵심기술들로 구성되어 있음. 그러나 각 세부주제들로부터 얻어질 핵심기술들은 발파굴착에 의한 NATM터널뿐만 아니라 각종 도심지터널에서도 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단됨
- 본 연구단에서 다루고 있는 요소 기술들의 범위는 다음의 도표와 같이 정리할 수 있음



<연구개발분야의 요소기술 범위>

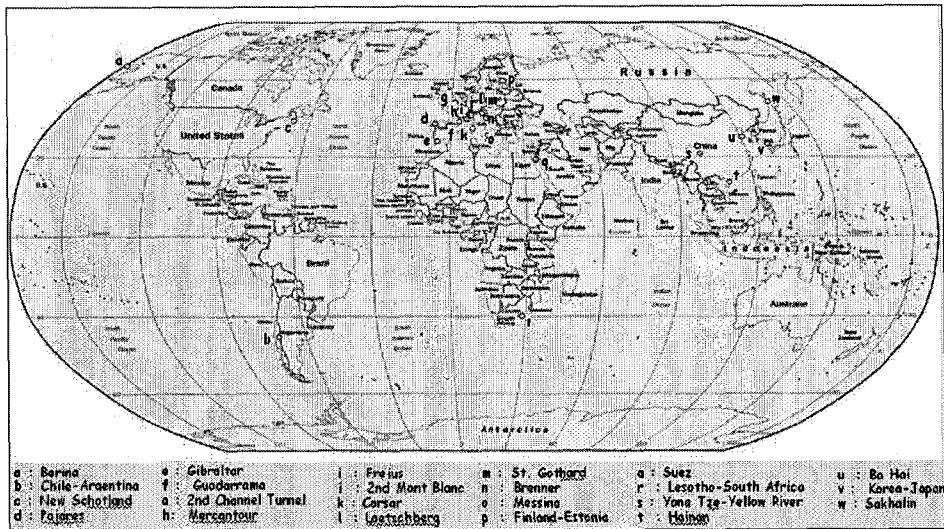
2. 연구의 비전

2.1 비전

비전 (Vision)	근 미래 수출 가능한 세계 경쟁력을 갖춘 한국형 IT 및 신소재 융합형 터널 급속 시공 기술 확보
비전의 개요	▶ 터널의 급속안정화/급속시공으로 인한 20% 공기 단축 (IT기반 기술: 5%, 발파-라이닝 병행시공: 15%) ▶ 고성능 지보재 개발로 지보비용 20% 절감 ▶ 터널 지보재의 장수명화 (내구연한 100년)
목표 (Goal)	1. IT기술이 접목된 지반 특성의 정밀 예측기술 및 신속한 현장 의사결정 지원기술의 개발로 설계변경 최소화 및 downtime 최소화 기술 확보: 5% 공기 단축 목표 2. 시공 중 불안전 요인의 급속 인지 및 대처기술 개발에 의해 터널 재해 최소화 기술 확보: 급속시공에 따른 인명피해 및 시공 위험을 최소화 3. 정보화 기술기반 최적 발파 제어기술 및 굴착-라이닝 병행 시공기술 개발로 15% 공기 단축 목표: 총 공기 30%에 달하는 라이닝 타설기간을 1/2까지 단축 목표 4. 한국형 고성능 지보재 개발로 30년인 지보재 내구연한을 100년 이상으로 장수명화하고 슝크리트 타설량 평균 20% 절감 목표

2.2 발전방향

- ❁ 터널 시공 효율 및 성능 개선을 위한 기존 접근 방식의 연구개발에 한계 직면
- ❁ 첨단 On-line 인프라와 신소재 발전에 부응한 신개념의 터널기술 개발 방향 선회 필요
- ❁ 세계적인 추세에 맞추어 최첨단 IT 기술 및 신소재를 활용한 터널 기술품 및 재료의 첨단화 필요
- ❁ 국가간/대륙간 10Km 이상 메가 터널 프로젝트의 급격한 증가(아래 그림 참조)로 인해 기술 선진국만이 국제 경쟁에서 우위를 선점할 것임



<전세계 메가터널 프로젝트>

- ❁ 국내 IT 인프라는 가히 세계에서 손꼽힐 수 있는 수준에 이미 도달하였고, 각 산업분야에서 이러한 국내 IT인프라를 기반으로 기술경쟁력을 극대화하고 있는 추세임
- ❁ 건설시장에서도 이미 상당부분 IT기술 접목을 통한 공사효율의 극대화, 첨단화를 이루고 있으며, 타 건설 분야에 비해서 불확실한 요인이 가장 많은 터널 분야에 IT기술 접목은 기술 개선 효과가 매우 커짐을 의미함
- ❁ 국내 터널 기술 발전을 위한 신소재 접목 기술 개발은 국산재료를 이용해서 외국기술은 국내개량 혹은 국내소화 기술로 발전시키는 방향을 대부분 취하

고 있으나, 원천기술을 국내에서 개발하여 해외에 수출할 수 있는 방향으로의 기술 개발 방향 전환이 시급함

- 현재까지 국내 터널 설계/시공 경험은 양적으로는 세계적으로 내세울만한 실적을 보유하고 있으나, 실제로 유럽/일본 등과 같은 특화된 기술을 보유한 국가들과의 경쟁에서 이길 수 있는 경쟁력 있는 기술이 부족한 실정임. 일례로 일본의 쉘드 터널 기술은 이미 세계적으로 인정을 받고 있고, 세계적인 기술로 자리 잡고 있음

- 국내 터널 기술이 해외에서 인정을 받는 부분은 주로 시공 능력, 즉 안정하고 빠르게 터널을 건설할 수 있다는 인식이 지배적이며, 이를 국내 기술력화하기 위해서는 이른바 급속 굴진의 대명사인 기계식 굴착방법 외에 Conventional Tunnelling 공법에서의 급속 시공 측면을 우리의 강점으로 인식해야 할 필요성이 있음

- 급속 시공/급속 안정화는 실제로 공사비와 직접적인 상관성이 있으며, 노르웨이의 라에르달 터널과 국내 경암반 터널에서의 평균 공사비 및 시공 속도를 비교해보면, 공사비는 약 3배 정도 비싸고, 시공속도는 약 5배 정도 느린 것으로 나타남. 특히 굴착과 라이닝 타설 기간이 현재 전체 공종의 약 7:3 정도가 되는 현실을 고려하면, 굴착시간 뿐만 아니라 라이닝 타설 시간과 지보재 설치 시간을 줄이는 것이 실제로 급속 시공을 이루기 위해서 매우 중요한 사항임

- 최근 몇 개 터널 현장에서 완료된 “터널 굴착 및 라이닝 병행시공”은 하나의 대안이 될 수 있음. 국내기술로서 자립화를 이루어낼 수 있는 가능성은 제시하였으나, 아직까지 현장의 기술로서 체계화되지 않은 측면이 있음. 따라서 R&D를 통해서 기술개발이 이루어진다면 향후 국내 터널 건설뿐만 아니라 해외 터널 건설 시공에 기술 수출을 통해서 세계와 어깨를 나란히 할 수 있는 기술로서 자리 잡을 수 있을 것으로 판단됨

- 결과적으로 국내 자립형 터널 기술 개발로 근 미래에 SOC 건설이 매우 활발히 이루어지고 있는 동남아시아/중동/지중해 연안국에 우리기술을 수출할 수 있는 기반 조성이 이루어 질 것으로 판단되며, 이를 위해서는 세계 최고의 IT 기술과 신소재 접목형 급속 안정화 터널 시공기술이 세계적인 경쟁력을 갖게 될 것임

2.3 세부핵심기술 또는 기반기술

2.3.1 세부핵심기술 또는 세부기반기술의 상관관계

- 본 연구에서는 최종 목적을 달성하기 위하여, 터널의 설계/시공에서 주된 분야를 차지하는 다음의 4가지 세부핵심기술을 선정함
 - ① 제1세부핵심기술: IT접목형 지반정보 조사/분석 기술
 - ② 제2세부핵심기술: 시공중 터널의 안정성 평가기술
 - ③ 제3세부핵심기술: 고효율 급속시공을 위한 신개념 굴착공법
 - ④ 제4세부핵심기술: 신소재를 활용한 한국형 신 지보시스템
- 각 세부핵심기술은 터널에서 가장 큰 기술적인 비중을 차지하고 있는 지반조사, 안정성평가/계측, 발파 및 라이닝 시공 그리고 지보재 기술 분야로 분류되며, 연구목표의 달성을 위하여 IT기반 기술과 신소재 기술을 활용하는 세부목표를 설정
- 총 4개의 각 세부핵심기술들은 독립적으로도 활용될 수 있으며, 동시에 하나의 최종 목표인 “Rapid Excavation and Safe Tunnel (R.E.S.T)”를 달성할 수 있도록 세부기술들이 상호 연계성을 갖는 기술 개발에 목표를 둠
- 본 연구에서 최종 목적을 달성하기 위한 세부기술들의 상관관계를 도식적으로 나타내면 다음과 같음



<R.E.S.T 달성을 위한 세부기술별 상관관계>

2.3.2 세부핵심기술 또는 세부기반기술의 비전

제1세부핵심기술

비전 (Vision)	급속안정화/급속시공을 위한 IT접목형 지반특성 조사/분석 기술 개발		
비전의 설정근거	▶ 설계변경 최소화를 위한 정밀 지반조사 및 평가기술 필요 ▶ 지반거동 특성(Behavior Type)을 이용한 지반등급 평가 및 제 분류 기술 개발 필요 ▶ 시공중 지반등급 변화에 따른 급속 현장평가 및 온라인 정보 공유형 첨단 정보화 기술 필요		
목표 (Goal)	시공중 지반정보의 정보화	설계 지반정보 및 시공 중 지반정보의 가시화	IT기반 시공 정보분석 시스템
임무 (Mission)	▷ 시공 중 막장상태, 지반조건 등의 전산자료화 기술 개발 ▷ 시공 중 지반정보의 Mobile 입/출력 시스템 개발	▷ 지반정보의 디지털 이미지 획득 및 분석기술 개발 ▷ 설계 지반정보 및 시공 중 지반정보의 가시화 시스템 개발	▷ 현장 지반조사 결과의 상호연관성 분석 시스템 개발 ▷ 미시추 구간 및 막장 전방 지반정보 예측기술 개발
기대효과	· 시공 중 지반정보의 전산화로 시간적/공간적 제약 없는 자료열람 가능 · 최신 Mobile 전송기술을 이용하여 시공 중 자료의 신속한 전달	· 지반정보의 디지털 이미지를 이용하여 현장과 같은 지반 정보 획득 · 설계 지반정보와 시공중 지반정보의 비교/분석을 통한 안정적 판단	· 다양한 지반조사 결과의 종합 판단을 자동화 하여 신속한 의사결정 가능 · 불확실한 구간의 지반 상태를 신속하게 예측하여 급속 시공 가능

비전 (Vision)	시공중 터널의 안정성 평가기술 개발		
비전의 설정근거	▶ 시공조건을 고려한 터널 지보재 거동 평가기술 필요 ▶ 시공중 터널 지보재의 실시간 성능평가 기법 필요 ▶ 지보재 보강효과의 안정도 정량화 기술 필요 ▶ 첨단 IT기술을 활용한 현장 계측기법 및 기기 개발 요구		
목표 (Goal)	시공중 굴착 지반의 물성 평가기법	터널 지보재의 성능평가 기법	막장 전방 보강재의 성능평가 기법
임무 (Mission)	▷ 시공중 지반물성 측정기법의 개발 ▷ 현장 측정데이터 처리용 D/B시스템 개발 ▷ 굴착지반 거동 평가/예측 기법 개발	▷ 지보재의 지반보강 메커니즘 규명 ▷ 지보재의 지보효과 평가기법 개발 ▷ 평가를 위한 계측기법/기기 개발	▷ 보강재의 막장보강 메커니즘 규명 ▷ 보강재의 막장 보강효과 평가기법 개발 ▷ 평가를 위한 계측기법/기기 개발
기대효과	· 굴착중 지반 거동을 정량적으로 평가/예측 가능 · 급속시공을 위한 적절한 지보재/보강재의 선정 가능	· 굴착중 지보재의 성능에 대한 정량적 평가 가능 · 터널의 안정성 및 급속시공의 효율성 확보	· 굴착중 막장보강재의 성능에 대한 정량적 평가 가능 · 평가에 의한 최적 굴착 시점 결정 가능

비전 (Vision)	고효율 급속시공을 위한 신개념 굴착-라이닝 병행공법 개발		
비전의 설정근거	▶ 정보화 기술 기반 정밀 발파 제어기술 및 성능평가 기술 개발 필요 ▶ 급속시공을 위한 발파굴착-라이닝 병행 시공법 개발 필요 ▶ 시공중 실시간 터널 주변 교란대 평가 및 최소화 기술 개발 필요		
목표 (Goal)	친환경적 급속 발파공법	굴착-라이닝 병행공법	유비쿼터스 발파패턴 설계기술
임무 (Mission)	▷ 발파난이도/천공능를 평가기술 개발 ▷ 환경영향/굴진평가지수에 근거한 급속굴진용 발파공법 표준화 ▷ 터널 주변 발파교란대 평가/최소화 기술 개발	▷ 시공중 환기기법 개발 ▷ 설비 일체화 라이닝 form, 최적 공정기법 등 개발 ▷ 설비 일체화 라이닝 공법 개발 (전기/방재 등 제반설비) ▷ 병행 시공지침 제시	▷ Web기반 발파패턴 자동설계 통합 solution 개발 (XML, .NET기술 등 최신 IT기술 활용)
기대효과	· 최적 발파패턴에 의한 급속굴진 가능 · 발파 교란대 최소화에 의한 터널의 급속 안정화	· 발파굴착과 라이닝 타설의 병행시공에 의한 공기/공비 절감 극대화	· 발파 설계 자료의 D/B화 · D/B자료의 피드백에 의한 발파설계 과정의 최적화 · Web기반 기술에 의한 원격 설계 및 기술 검토 가능

비전 (Vision)	급속안정화 터널시공을 위한 한국형 신 지보시스템 개발
비전의 설정근거	▶ 신소재를 활용한 한국형 고성능 슛크리트 개발의 필요성 대두 ▶ 신소재를 활용한 신개념 록볼트 기구 및 충진재에 대한 미래 수요 증대 예상 ▶ 급속시공을 위한 고효율 강지보 시스템의 개선에 대한 요구

목표 (Goal)	한국형 신재료에 의한 고성능 슛크리트	고성능 록볼트 시스템	고효율 신개념 강지보재
--------------	-------------------------	----------------	-----------------

임무 (Mission)	기술개발사업	기술개발사업
▷ 국산 미분말 혼화재에 의한 숏크리트의 고강도/고내구성화 기술 확보 ▷ 고성능 감수제에 의한 숏크리트 W/C 저감 및 장대터널에서 유동성 확보 기술 개발 ▷ 미분말 혼화재와 고성능 감수제의 병용 사용에 의한 숏크리트 고성능화 기술 개발	▷ 완전충진/흘러내림 방지를 위한 록볼트 기구 및 충전용 신재료 개발 ▷ 급속안정화를 위한 록볼트 선단 정착기구의 개발 ▷ 용수 과다 유출구에서의 고효율 록볼트 충전재 개발	▷ 경제성 확보를 위한 최적 구조형상 구현용 위상 최적화기법 연구 ▷ 급속 터널 안정화를 위한 지반-숏크리트-록볼트-강지보 일체형 시스템 구축

기대효과	· 슛크리트 타설두께/리바운드 저감으로 인한 급속시공과 급속안정화 가능 · 슛크리트 강도와 내구성 향상으로 인한 터널의 내구년한 증대	· 록볼트의 성능향상으로 인한 급속시공 도모 · 흘러내림 방지를 통한 록볼트 시공성 향상	· 값싼 대체 소재를 활용하여 재료비 절감 · 시공중 불안정 요소 제거 및 지보효과 극대화
------	---	--	---

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

1. 국내기술동향

- ❁ 건설교통부와 기존의 터널공사비를 기준으로 준공연도별로 터널연장을 기준으로 연장 1m당 터널 전체 시공비의 평균은 1억으로 산정하였으며 전체 시공비의 10%를 설계비로, 그리고 나머지 90%를 시공비로 계상함. 시공비에서 굴착에 소요되는 공사비는 총 시공비의 74% 지보재의 재료 및 공사비는 총 시공비의 7%, 2차 콘크리트 라이닝을 위한 공사비는 총 시공비의 17%, 지반보강을 위한 보강재의 재료 및 공사비는 1%로 계상함.
- ❁ 2001년부터 2004년까지 준공된 고속도로터널 및 철도터널의 연장은 2001년에 약15km(고속도로터널 약5km+철도터널 약10km), 2002년에 약28km(고속도로터널 약18km+철도터널 약10km), 2003년에 170km(고속도로터널 약70km+철도터널 약100km), 2004년에 100km(고속도로터널 약40km+철도터널 약60km) 정도임
- ❁ 2005년 및 2006년도에 건설될 고속도로터널 및 철도터널의 총연장은 2005년에는 약 90km(고속도로터널 약30km+철도터널 약60km), 2006년에는 약75km(고속도로터널 약25km+철도터널 약70km)정도로 예상됨. 터널공사로 소요될 공사비는 2005년에 90,000억원, 2006년에 75,000억원정도로 추정됨
- ❁ 국도터널, 수로터널, 공동구터널 등을 고려한다면 터널공사에 소요되는 총 공사비는 더욱 증가할 것임
- ❁ 본 연구에서는 터널 굴착시 타설되는 지보재에 대한 지보효과를 평가할 수 있는 기술개발을 실시하여 현재 NATM으로 시공되고 있는 지보재에 대한 현장실무 활용기술을 개발하고 향후 다양한 지보시스템에 대해서도 적절한 지보효과를 판단할 수 있는 기술력을 확보할 것으로 기대됨.
- ❁ 굴착지반에 대한 이완특성을 반영할 수 있는 해석기법을 개발함으로써 설계 및 굴착시의 거동에 대한 차이점을 극복하고 보다 신뢰성 있는 지반거동을 예측할 수 있게 함으로서 지반의 안정성 확보 및 지반거동의 사전 예측이 가능할 것으로 기대됨.

- 현장 타설 지보재에 대한 현장 계측에 관한 연구를 수행하여 현장 계측기기 및 계측 장비의 기술향상을 유도하여 토목시공현장의 계측 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 기대됨.
- 지반 및 지보재의 종류별로 동일한 단면에 대하여 지보재에 대한 다양한 계측 방법들을 동시에 적용하고 이들 결과들을 상호·비교함에 의하여 가장 신뢰성 있는 지보재 계측방법 및 계측기기를 개발할 예정이며 개발된 계측방법과 기기에 대한 보급 및 실용화를 이룰 수 있을 것으로 기대됨.
- 지보재 계측 결과를 바탕으로 지보재의 성능 평가를 수행하여 시공중인 지보재의 지보효과 평가 및 터널의 안정성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대됨.
- 첨단 IT 정보화 기술을 활용하여 굴착중인 지반에서 현장 계측 데이터를 활용하여 시공현장에서 신속하게 지반의 거동 특성을 평가하고 지반의 안전성을 현장에서 파악할 수 있게 함으로써 시공현장의 안전성 확보는 물론 구조물 붕괴를 사전에 예방함으로써 시공 공사비 절감 효과는 물론 터널 굴착 기술의 선진화를 기대할 수 있을 것으로 판단됨.
- 국가의 도로/철도 건설과정에서 암반사면의 안정성 확보와 여굴/미굴의 저감을 통한 안정성 제고 및 추가비용 발생을 억제하며, 도로/철도 터널의 선형개량 및 장대화에 따라 경제성 높은 고속굴진 기술개발에 기여.
- 도심지, 인구밀집지역, 민가 부근에서의 터널굴진, 암반굴착 작업의 증가추세에 따라 과도한 발파로 인한 민원발생을 최소화할 수 있는 환경영향의 예측 및 제어 가능한 공해저감형 최적발파 시스템의 개발로 사회간접비용의 저감에 기여.
- 국내의 암반특성 및 발파여건을 충분히 고려한 발파교란대 제어기술의 개발로 대규모 지하저장시설의 안정성 확보와 저장물의 누출방지 효과를 기대하며 발파설계 표준패턴을 제공함으로써 시공 중에 발생하는 빈번한 설계변경으로 인한 공사기간 및 공사비 증가우려를 해소함.
- 발파관련 설계자료, 시공자료, 조사결과 등의 중요 기술 자료들에 대한 체계적인 축적 및 분석 시스템의 개발 및 보급으로 중복투자로 인한 경제적 손실을 저감하며, 낙후되어 있는 국내의 암반발파 분야에서 독자적인 기술축적을 이룩함으로써 급증하는 국내의 터널건설 수요에 따른 외국기업의 국내시장 잠식에 대처함.

- ❁ 터널을 포함한 다양한 지하공간개발을 위한 굴착 시에 안정성 증대, 시공비 절감, 설계/시공의 체계화 작업에 활용가능하며, 국내의 지질 및 암반조건에 적합한 굴착능률 평가지수의 개발로 산업발과 현장에서의 설계지침으로 활용.
- ❁ 향후 국내에서 건설될 것으로 예상되는 지하대피소, 지하스포츠시설, 지하주차장 등 다양한 지하생활공간 개발에 활용할 수 있으며, 산맥/하저/해저를 통과하는 초장대터널의 건설에 직접적으로 기여할 수 있음.
- ❁ 본 연구과제에서 개발하고자 하는 한국형 고성능 숏크리트의 개발이 성공적으로 이루어질 경우, 내구년한 100년의 터널에서 기존 숏크리트 공법과 비교하여 터널 연장 1km당 42억원의 경제적 절감 효과가 있음. 즉, 터널 연장이 20km/년 증가하고 본 연구과제에서 개발될 기술 채택율과 기술 수명을 각각 20%와 10년으로 가정할 경우, 터널 내구년한 측면에서 약 2,400억원의 경제적 파급효과가 있음.
- ❁ 터널 내구년한 측면뿐만 아니라 숏크리트의 고성능화로 인해 숏크리트 타설 두께가 20% 감소하고 리바운드도 10% 정도 절감된다고 가정할 경우, 1km당 3,000m³/km의 타설물량이 감소되어 4.5억원/km의 공사비가 절감되고 향후 10년간 900억원의 예산 절감이 가능함.
- ❁ 한국형 고성능 숏크리트 라이닝의 개발은 직접적인 경제적 절감 효과뿐만 아니라 실리카 흙과 같은 국외 고가 혼화재의 수입 대체효과를 기대할 수 있으며 관련 국내 혼화재 산업을 활성화할 수 있는 계기가 될 것임.
- ❁ 또한 숏크리트 타설두께 절감과 불리한 지반조건에서도 터널의 급속 안정화를 도모할 수 있기 때문에 상당한 공기 단축 효과가 기대됨.
- ❁ 메타카올린과 같은 한국형 신 혼화재 관련 산업의 활성화를 도모할 수 있음.
- ❁ 고성능 록볼트시스템의 개발로 터널공사기간 및 비용을 감소시킬수 있으며 새로운 급속안정화 시공기술 개발에 토대를 마련할 수 있음.
- ❁ 현재 매우 비싼 특수강봉을 사용하고 있는 lattice girder를 대체할 수 있는 값싼 고강도 이형철근과 같은 일반강재를 이용한 강지보의 개발로 경제성 확보에 매우 유리함. 따라서 연구성과가 도출되는 대로 즉시 현장에 적용할 수 있는 연구항목임.

2. 국외기술동향

- 최근 전세계적으로 10 km이상의 초장대 터널 건설이 매우 활발하게 진행되고 있으며, 특히 유럽과 아시아를 중심으로 권역별로 터널 건설이 활발한 실정임. 대표적으로 유럽대륙과 영국을 연결하는 Channel터널 건설은 수백 년 동안의 숙원 사업으로서 이미 개통이 되어 운영되고 있고, 유럽내 알프스를 통과하는 Mont Blanc 터널, Frejus터널, Loetschberg 터널, Gothard 터널 등 초장대 터널들이 알프스 주변과 유럽 대륙을 중심으로 활발히 건설되고 있음. 이외에도 유럽 내 대도시 지역의 지하철 및 경전철, 고속철도 등의 건설이 활발하고 EU가입국들과 향후 가입대상국들과의 동서축을 연결하는 고속도로 및 철도망 구축이 활발히 진행되고 있으며, 대부분 EU 가입국들 중 알프스 주변국들을 중심으로 터널 시공경험이 풍부한 국가들을 중심으로 대규모 Mega 터널 프로젝트 구상이 활발히 이루어지고 있는 실정임
- 아시아권도 초창기 유럽의 NATM기술을 전수받은 일본을 중심으로 아시아권을 하나로 연결하기 위한 대규모 터널 프로젝트들이 구상하고 있으며, 특히, 한·일 해저터널건설 계획과 같은 세계 최장 터널 건설 계획은 가히 현 세대를 대표할 수 있는 세계적 터널 프로젝트로 볼 수 있음. 이러한 상황에서도 일본에서의 신간센 해저터널건설은 유럽의 Channel터널 프로젝트 이후에 가장 긴 터널이 이미 일본의 기술로 건설이 되었고, 일본내 지하철, 도로터널 및 철도터널 등 가히 세계적인 규모의 터널 건설이 활발히 진행 중에 있음. 한편, 대만, 싱가포르, 중국 등이 현재 고속철도 건설을 활발히 수행하고 있으며, 대부분 터널로 건설되는 경우가 매우 많고, 현재까지 SOC 후발 주자였던 이들 동남아시아권의 터널 건설이 유럽의 기술이전으로 매우 안전하고 경제적인 터널 건설을 이뤄 나가고 있음
- 유럽과 아시아 대륙간의 터널 건설이 매우 활발함에도 불구하고 유럽과 아시아의 지형학적/지질학적인 차이 및 다양한 터널 건설 경험 차이로 인한 터널 건설 기술 격차와 단위 km당 터널건설비용이 매우 격차가 많이 발생하고 있는 것이 현실임. 특히, 유럽 내에서도 NATM 공법이 개발된 오스트리아를 중심으로 한 경제적 터널 건설을 추구하는 방향과 이탈리아 프랑스를 중심으로 한 터널 안정성 및 공사기간을 중시하는 터널 건설 방향, 그리고 유럽 내에서도 지반/암반조

건이 매우 상이한 노르웨이 및 스웨덴을 중심으로 한 경암반 터널건설 등 지리적/지질학적인 차이로 인해서 유럽 내에서도 터널 기술이 매우 상이한 형태로 진행되고 있는 실정임

- ❁ 이러한 상황에서 현재 SOC건설이 활발히 이루어지고 있는 동유럽 및 동남아시아 시장은 독일, 오스트리아 등 유럽 쪽의 기술선진국과 한국, 일본 등을 위시한 아시아 기술 선진국들이 직접적으로 참여하여 터널 시장을 개척할 필요가 있음

3. 기술동향 분석 결론

- ❁ 인공 지능 및 정보화 관련 요소 기술은 세계적 수준에 근접하고 있음. 단, 많은 경우, 시공 전 터널 설계 단계 또는 유지 관리 단계에서 주로 활용되고 있으며, 터널 시공 중의 정보화에 대한 실질적 활용에는 아직까지 미흡함.
- ❁ 국내에서 추진 중인 지반 정보 시스템은 신규 계획, 설계 및 유지 관리에 중요한 기본 정보를 제공할 수 있을 것임. 그러나 터널과 같이 시공 중에 최종 설계가 이루어지고, 막대한 양의 지반 및 시공 정보가 획득되는 시공 현장의 즉각적인 정보 입력과 설계 활용에는 부합하지 못한 측면이 있음.
- ❁ 터널 시공 중 지반 정보를 3차원 공간상의 자료 처리와 과학적 예측을 구현함으로써 보다 정확한 지반 조건의 이해와 복잡한 형태의 지하 구조물 설계에 활용할 수 있는 접근이 다양하게 이루어지고 있으며, 이를 시공 중에 활용한다면, 효과적인 시공 중 정보화와 공정 관리에 유용할 것임.
- ❁ 국외의 경우, 급속히 발달하고 있는 IT 기술을 설계 단계 뿐 아니라 시공 현장에 직접적으로 활용하고자 하는 시도가 진행 중이며, 특히 모바일 기기를 이용한 현장 정보의 실시간 입력과 처리 및 다자간 의사소통을 통한 신속한 변경 설계 및 시공 관리에 활용되고 있음.
- ❁ 현장 정보 단말기의 소형화와 경량화는 현장 작업 및 입력/처리 도구로서 단말기를 활용할 수 있게 만들고 있으며, 간단하고 편리한 현장 입력을 통해 정보의 디지털화가 가속화되었다. 또한 이동통신 매체의 발전으로 PDA나 GPS 등의 mobile 기술을 통한 공간정보의 제공이 가능함.

- ❁ 국내·외에서 IT 기술을 활용한 다양한 지반분석 기법들이 간헐적으로 연구되어 왔으나, 급속 안정화 터널 설계/시공 분야에 특화된 지반분석 기술 개발은 아직 미흡한 상태임. 특히, 인공지능 기법을 활용한 지능형 시스템의 개발, 데이터 퓨전을 통한 다양한 자료의 상호 연관성 분석, 미시추 구간 지반정보 예측의 최적화, 급속시공 중 산출 자료의 디지털 정보화 기술 등은 해외에서도 아직 기술의 안정화가 이루어지지 않은 분야로서 국내에도 적극적인 연구 개발과 실용화 대책이 필요함.
- ❁ 주지보재중에서 록볼트에 관한 기존의 연구를 살펴보면 록볼트의 거동을 상당히 정밀하게 표현하기 위한 요소기술 개발이 주류를 이루고 있음. 그러나 록볼트 주변 지반에 대한 모델화가 아직까지 온전하게 이루어지지 못하기 때문에 록볼트 요소에 대한 정밀한 해석을 실시하더라도 “현장지반 상황에 적합한 록볼트의 지보효과를 재현할 수 있는가” 에는 의문이 남아있음.
- ❁ 기존 국내의 시공 현장에서 수행되고 있는 지보재 계측은 특정한 계측방법을 획일적으로 적용하여 측정된 계측 결과의 정확성을 확인하기 어려우며 지보재 계측 결과를 시공에 반영하려는 시도는 매우 미흡한 실정임.
- ❁ 현장 실무적 입장에서는 국소적인 록볼트 거동보다는 록볼트 타설로 인하여 지반의 전체적인 거동이 달라지기 때문에 이러한 현상을 감안하여 록볼트 타설에 따른 지보 효과를 정량적으로 평가하는 시도를 하고자 함.
- ❁ 또한 현장에서 계측되는 지보재의 지보효과와 지반 변위 계측데이터를 활용하여 굴착중인 지반의 안전성을 평가하는 방법을 수립하고, 굴착에 따른 터널 주변지반의 물성변화를 터널 시공현장에서 신속하게 반영하여 굴착 다음 단계에서의 지반의 거동을 예측할 수 있는 현장지원용 지반거동 평가 시스템을 개발하여 현장에 적용코자 함.
- ❁ 터널의 발파굴착에 있어서의 세계적인 추세는 기존의 노천발파에서 적용되어 온 기계식 장전개념의 도입과 전자뇌관과 같은 정밀 화공품류를 이용한 발파공법 개발, 천공자동화 등으로 옮겨가고 있으며, 국내에서도 전자뇌관을 이용한 진동 및 소음 제어, 천공자동화 소프트웨어의 개발 등이 초기단계에 있고, 벌크에 멀전의 기계식 장전장치를 도입하여 일부 현장시공에 적용하고 있음.
- ❁ 선진외국의 발파관련 기구, 장비류나 공법의 무분별한 도입은 국내여건에 맞지 않고 오히려 기술종속을 심화시킬 수 있는 소지가 있으므로 국내의 복잡한 지질

환경과 암반조건에 적합한 발파기술을 개발하기 위해서는 무엇보다 먼저 발파과정과 대상암석에 대한 파괴특성 등을 철저하게 규명한 독자적인 정보기술 체계를 구축할 필요가 있음.

- 국내에서의 대규모 장대터널의 건설비중이 큰 폭으로 증가할 것으로 예상되는 가운데 과거 발파/구조물 병행시공 과정에서 나타난 공정흐름 상의 문제점을 개선하고, 라이닝 타설기술, 환기시스템 구축기술 등의 연계개발을 통해 고효율의 한국형 급속시공 굴착공법을 개발함으로써 이 분야에서 세계시장을 주도해 나갈 필요성이 있음.

- 현재까지 수행된 숯크리트 관련 국내 연구는 대부분 건식 숯크리트와 강섬유보강 숯크리트에 대해 수행되었으며, 더욱이 단기 연구로 수행된 관계로 실용화 연구가 아닌 기초 연구에 머무르고 있음.

- 국내 숯크리트의 강도/내구성은 선진 외국과 비교하여 약 20년간의 기술격차를 보이고 있으며, 특히 숯크리트 성능 개선에 필수적인 실리카 흙을 전량 수입에 의존할 수밖에 없어 실제 적용이 이루어지지 않고 있으며 이를 개선하기 위한 국산화 연구는 전무한 실정임.

- 국내 숯크리트의 내구성 관련 기준은 전무하고 또한 숯크리트의 최적 배합, 제반 품질기준 및 품질관리를 위한 시험방법들이 규정되어 있지 못하고 있으며, 급속안정화시공을 위한 고내구성을 갖는 신재료를 이용하여 현장적용성과 시공성을 고려한 신지보재 개념의 록볼트시스템 시공법에 대한 연구가 매우 미비한 실정임.

- 본 연구에서 추진 중인 경제적으로 저렴한 일반강재를 이용하여 구조 및 형상 최적화를 통한 강지보재 시스템연구는 특수강재의 가격이 매우 비싼 현실에서 경제성을 확보할 수 있는 새로운 연구내용이라 사료됨.

- 본 연구의 목표 중 하나인 지반거동 특성 분석/평가 시스템 개발은 국내에서는 매우 생소하여 적용된 바 없는 기술로 설계뿐만 아니라 굴착 및 지보 등의 시공 기술의 향상에도 기여할 수 있는 신기술 연구 분야로 판단됨.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제1세부과제

급속안정화 터널시공을 위한 IT 접목형 지반특성조사/분석 기술 개발

〈Part I〉 정보화 전략(ISP) 수립

1. 정보화 전략의 필요성

1.1 급속안정화 터널시공을 위한 지반정보 활용 프로세스의 혁신

1.1.1 터널 시공 중 잦은 설계 변경 발생

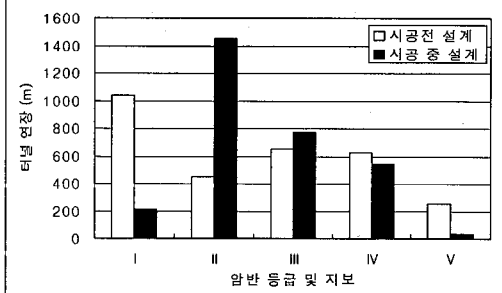
표 1은 국내 00 비축기지 터널 시공 사례로서 총 3012.85m 중 2236.7m의 암반 조건의 불일치로 인해 설계 변경이 이루어진 사례로, 시공 전 예측된 지반 조건과 실제 시공 중에서 확인된 지반 조건의 차이를 보여주고 있다. 따라서, 지반의 불확실성 또는 불균질성에 의해 설계 단계에서 충분히 예측할 수 없는 지반 조건을 시공 중에 확인하여 이에 적합한 능동적인 대응이 필수적이며, 급속시공 중 시간적 제약 조건을 감안하여 신속한 정보화 프로세스 및 이에 따른 적절한 지반조사가 필요하다.

1.1.2 시공중 지반 상태의 예측 및 평가 실패로 인한 빈번한 시공 지연 발생

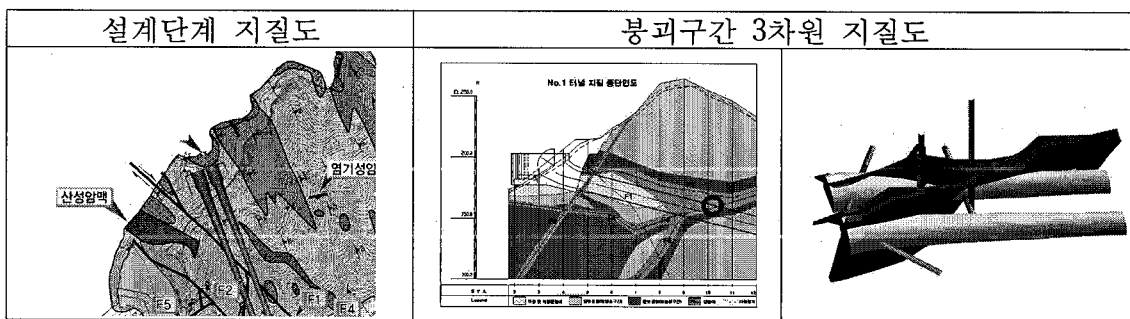
그림 1은 국내 00댐 보조여수로 건설 공사 사례로서, 설계 시 예측하지 못한 대규모 단층파쇄대 구간에 의해 터널 상부지반의 붕괴가 발생하였다. 본 사례는 시공 중 막장 관찰 정보의 신속/정확한 처리가 미흡하여, 예기치 못한 지반조건에 대해 대처방안 수립이 미비하여 공기가 6개월 이상 지연되었다.

<표 1> 00 비축 기지 건설 공사 중 설계 암반 및 지보 등급과 실제 등급의 차이

등급	시공 전 설계	시공 중 설계	변경 구간
I	1038.35m	213m	825.35m
II	447.5m	1448.05m	1000.55m
III	652m	769.8m	117.8m
IV	622m	545m	77m
V	253m	37m	216m
합계	3012.85m	3012.85m	2236.7m

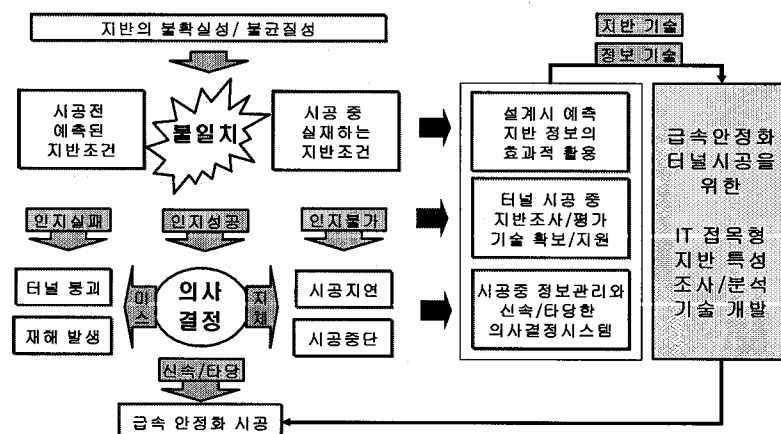


변경 설계율 = 74.2%



<그림 1> 예기치 못한 지반조건의 대처방안 미비로 발생한 붕괴 사례

따라서 설계 지반 정보와 시공 중 지반 상태의 불일치 조건의 발생 시, 신속하고 타당한 지반 평가를 통해 시공 지연 및 재해를 효과적으로 방지하여 급속 안정화 터널 시공을 수행할 수 있도록 하는 IT 기술을 접목하여 지반 정보를 활용한 터널 시공 중 의사 결정 지원 시스템을 개발할 필요가 있다.



<그림 2> 터널 시공 중 지반 정보 활용 프로세스 혁신의 필요성

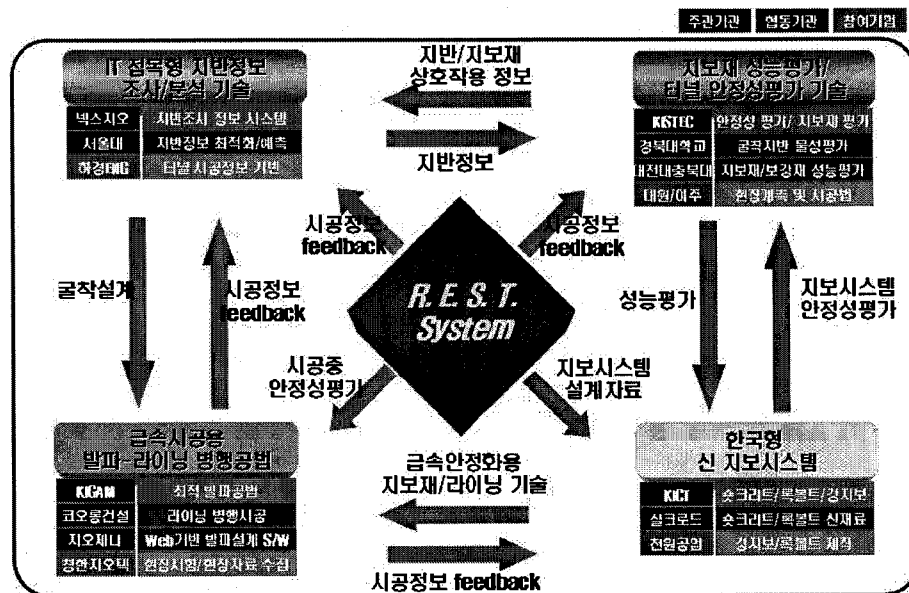
1.2 급속안정화 터널시공을 위한 신속 의사결정 지원시스템 구축

급속 안정화 터널 시공 기술은 “발파-라이닝 병행시공 터널”을 대상으로 IT기반기술과 신지보시스템을 접목시켜, 최종적으로 근 미래 수출 가능한 세계 경쟁력을 갖춘 한국형 IT 및 신소재 융합형 터널 급속 시공 기술 확보를 목적으로 한다.

본 연구과제에서는 “IT 및 신소재를 이용한 급속안정화 터널 시공기술 개발”이라는 목표를 달성하기 위하여 다음과 같은 4가지 핵심기술들을 설정하였다.

- 1) IT 접목형 지반특성 조사/분석 기술(1세부과제)
- 2) 시공현장 지원을 위한 굴착 터널 안정성 평가 기술(2세부과제)
- 3) 고효율의 급속시공을 위한 신개념 굴착공법(3세부과제)
- 4) 급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발(4세부과제)

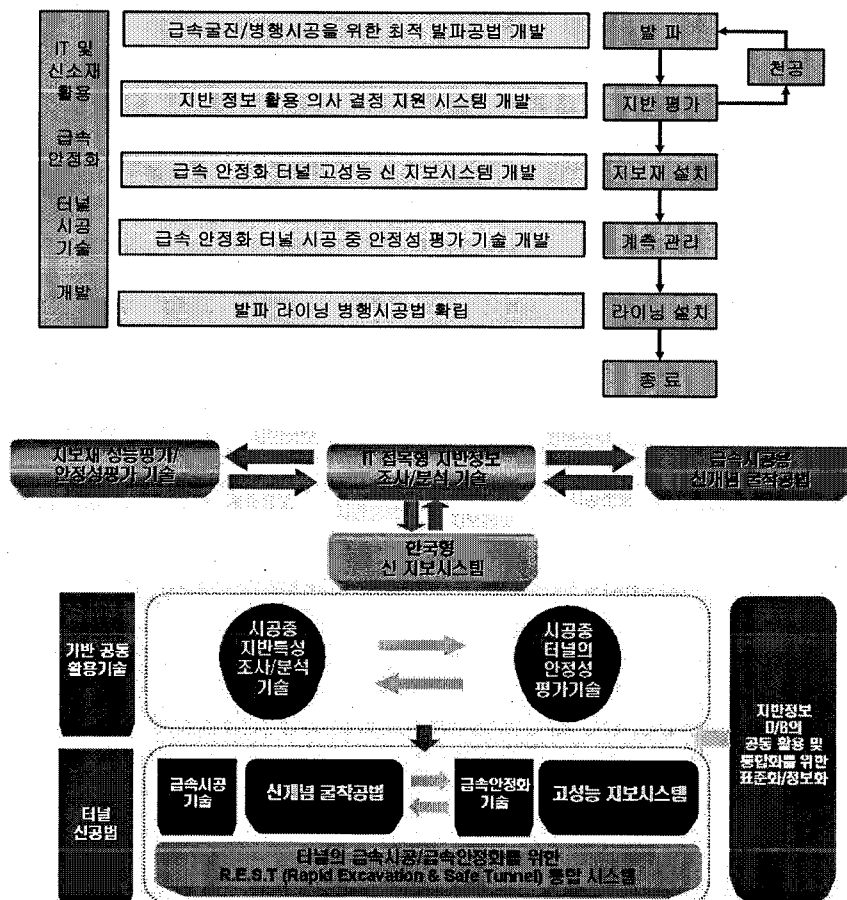
각 세부 핵심기술들은 각 분야에서 독립적으로 활용될수 있으며, 동시에 하나의 최종 목표인 “Rapid Excavation and Safe Tunnel(R.E.S.T)”를 달성할 수 있도록 세부핵심기술들이 상호연계성을 가질 수 있도록 하여야 한다 (그림 3).



〈그림 3〉 R.E.S.T 달성을 위한 세부기술별 상관관계

상기 4가지 핵심기술을 IT 기술과 접목시키기 위해서, 정보화 전략 계획(Information Strategy Planning(ISP))을 수립하고, 수립된 정보화 전략 계획(ISP)에 따라, 4가지 핵심기술에서 사용되는 정보유형에 대한 통합 표준 모델을 수립하는 것이 1차년도 최종 목표이다.

따라서 터널 설계시 획득되는 일련의 정보와 시공시 획득되는 정보(지반, 지보재, 계측, 발파)를 유기적으로 활용할 수 있는 일련의 시스템을 구성하는데 정보화 전략의 필요성이 제기된다. 발파 라이닝 병행 시공을 중심으로 한 급속 안정화 터널 시공 기술은 일련의 터널 시공 단계에 대해 핵심 연구 개발 목표를 가지고 수행되고 있으며, 이 모든 기술이 유기적으로 다음의 그림4와 같이 연결되어야 한다.



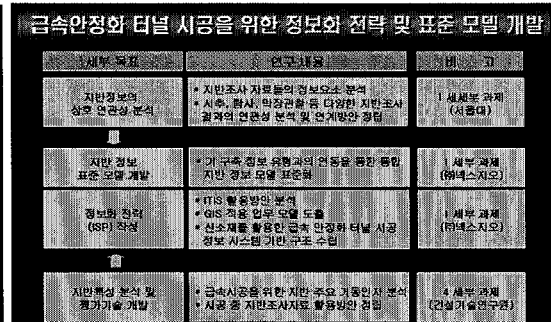
〈그림 4〉 터널 시공 단계별 급속 안정화 터널 시공을 위한 핵심 개발 내용

2. 정보화 전략 수립 방법

ISP 및 통합 표준모델 수립을 위해, 본 세부과제에서는 주변환경, 현황분석 및 터널 공정 프로세스 분석을 통해 요구사항을 도출하고, 도출된 요구사항을 반영하여 향후 발전적 미래모형을 정립할 수 있도록 연구추진 방향을 설정하였다.

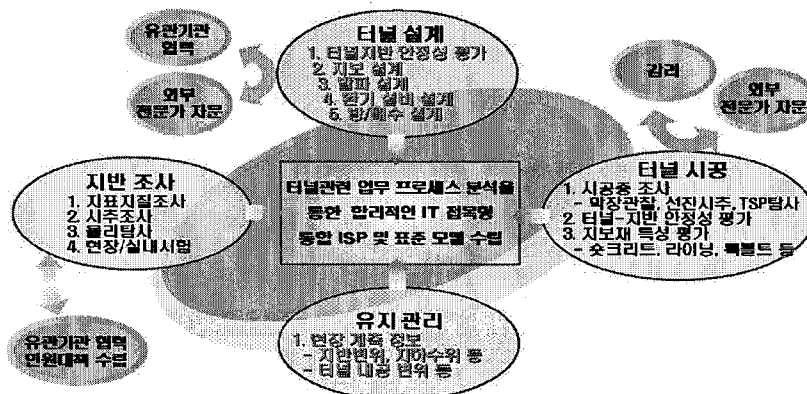


〈그림 5〉 업무 추진 방향 수립



〈그림 6〉 1차년도 세부 연구 목표 및 내용

터널의 조사-설계-시공-유지관리 단계에서 획득되는 다양한 지반정보는 개별 단계에서의 활용도는 높으나, 각 단계간의 연계성 확보는 매우 미흡한 실정이다. 따라서, 각 단계에서의 유의미한 지반정보를 체계적으로 분류하고 구조화하는 작업이 요구된다. 이를 통해, 개별 지반 정보간의 연계 방안을 수립하고, IT 기술을 접목한 자동화 방안 수립이 시급하다. 정보화 전략 수립을 위한 터널 관련 업무의 프로세스 범위는 그림 7과 같다.



〈그림 7〉 터널 관련 업무 프로세스 범위

3. 지반정보 및 상호 연관성 분석

3.1 개요

지반의 불균질성과 불확실성은 설계 단계에서의 지반 조건 예측을 어렵게 하는 요소이다. 시공전 설계 지반정보를 이용하여 과업구간의 지반조건을 판단하기 위한 다양한 분석 기법들이 개발되어 왔지만, 불확실한 지반조건에 대한 예측 정확도는 아직까지 높지 않은 실정이다.

본 연구에서는 급속 시공중 지반조건 분석의 신뢰성 향상을 위한 새로운 전략으로서 시공중 지반조사 자료의 퓨전(fusion)을 통한 동적 지오 모델링 기술을 개발하고자 한다. 동적 지오 모델링 기술은 기존의 지반정보 분석 기법들이 시공전 설계 지반정보만을 대상으로 모델링이 수행되었던 한계를 극복하여, 시공중 획득 가능한 지반정보들을 효과적으로 통합함으로써 지반조건 분석 결과의 신뢰성을 높이고, 신속한 위해요소 판단이 가능하도록 하는 기술이다.

동적 지오 모델링 기술 개발을 위해 당해연도 연구에서는 지반정보 퓨전 활용을 위한 지반조사 항목간 상호 연관성 분석을 수행하였고, 상호 연관성 분석 결과를 바탕으로 설계 지반정보와 시공 지반정보의 연계 활용 방안을 검토하였다. 또한 급속 시공중 유사 실시간 공정 위해요소 분석 시스템 전략을 개발하여, 본 연구에서 최종적으로 개발될 동적 지오 모델링 기술의 실용화 모델을 제시하였다.

3.2 터널 시공관련 지반정보 요소분석

지반조사를 통해 획득되는 정보들은 터널 시공과 관련된 노선선정, 설계, 시공 및 완성 후의 유지 관리에 중대한 영향을 미친다. 특히 시공 단계에서는 굴착방식 결정, 발파설계, 지보패턴 결정 등과 직·간접적으로 관련되기 때문에 지반조사로부터 신뢰성 있는 충분한 양의 지반정보를 획득하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 건설교통부에서 1999년 제정한 터널설계기준을 바탕으로 최근까지 공사가 진행되었던 터널 시공현장들의 지반조사보고서를 분석하여, 터널 시공관련 지반정보 요소 및 지반조사 방법을 정리하였다. 지반조사는 조사단계별로 예비조사, 본 조사,

시공중 조사로 구분할 수 있으며, 그 세부 내용은 표 3과 같이 정리될 수 있다.

〈표 3〉 지반조사단계별 조사내용

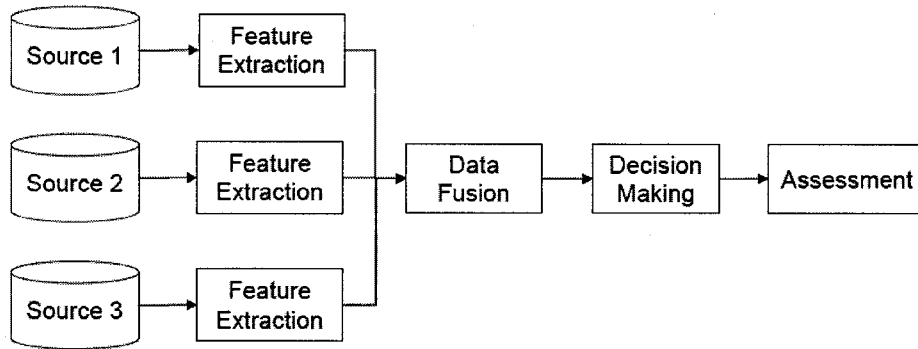
조사 단계	조사 시기	조사 내용	상세 조사 내용	조사 범위
예비조사	자료조사	사업구상 단계에서 구체적으로 계획	· 각종 기존자료 조사 분석 · 지표답사	대상구간의 광범위한 지역
	현장답사 개략조사	비교노선 검토에서부터 노선결정까지	· 지형 지질조건에 대한 개략조사	계획터널노선 및 비교터널노선을 포함하는 광범위한 지역
본 조사	터널노선결정 이후부터 공사 착공까지	· 설계 수행 및 시공 계획의 수립 · 설계입력 자료 평가 · 공법 선정 · 단면 해석 · 공사비 산출	· 환경 입지조건에 대한 광역조사 · 상세한 지질, 지반조사 · 터널 주변 환경 및 공사에 필요한 법규 등 조사	결정된 터널노선 및 주변 지역
시공 중 보완조사	시공 중	시공 관리, 공사 통제	· 막장조사 및 계측 · 주변 환경의 영향정도조사 · 시공관리조사	터널 내부 및 터널 시공으로 영향을 받을 우려가 있는 터널주변지역

3.3 데이터 퓨전(Fusion) 기법의 도입 방안

데이터 퓨전 (data fusion)은 단편적이고 정형화된 분석 방법이 아닌 분석틀 (framework)로서 다수의 장비로부터 획득된 측정 결과들을 결합시켜 관심 항목의 계측치에 대한 측정 영역과 범위, 그리고 방법론적 한계를 극복할 수 있는 기법이다. 다수의 측정 기법 및 장비로부터 획득된 1차적 자료들을 상호 보충하고, 결합시켜 분석 가능한 데이터의 양을 증가시키거나, 또는 고품질의 정보들을 추출하는 방법으로 데이터 퓨전이 수행된다. 따라서 데이터 퓨전 기법으로부터 산출되는 양질의 정보들을 이용하면, 제한된 자료로부터 최적의 결론을 이끌어낼 수 있다.

본 연구에서는 지반정보 분석 과정에 데이터 퓨전 기법을 도입하여, 지반정보 예측의 신뢰도를 높이고, 보다 신속한 지반정보 분석을 수행하고자 한다. 지반조사 결과들은 일반적으로 현장 계측이나 실내실험 결과로부터 수식계산 등의 전 처리 과정을 거쳐 지반물성 정보로 환산된다. 따라서 지반정보의 유사한 물성들을 그룹화하고, 데이터 퓨전 기법의 적용을 위한 입력 자료로 특성화함으로써 그림 8과 같이 지반정보 분석을 수행할 수 있다. 급속 시공중 데이터 퓨전의 입력 자료로 특성화 가능한 시공 지반정보 요소에는 막장 RMR, 막장 스케치, 막장 이미지, 막장 레

이저 스캐닝을 통한 미굴·여굴 산정 결과, 천공 에너지 및 드릴링 속도 데이터 등이 있으며, 산출물의 목적에 따라 다양한 데이터 퓨전 기법의 적용이 가능할 것이라 판단된다.



〈그림 8〉 특성자료 (feature data) 기반 데이터 퓨전 흐름도

3.4 터널 지반정보의 상호 연관성 분석

3.4.1 공정별 조사 목적에 따른 상호 연관성 분석

터널 시공중 조사하여야 하는 지반조사 항목은 입지환경조사 단계와 본조사(상세조사) 단계에 따라 분류될 수 있다. 본 연구에서는 입지환경조사 단계에서 수행되는 지반조사 항목을 지형조사, 환경조사, 지장물조사, 사토장조사, 공사용 설비조사, 보상조사로 다시 세분화하여, 공정별 조사항목 및 목적에 따른 상호 연관성 분석을 수행하였다.

본 조사(상세조사) 단계에서는 입지환경조사 단계와 비교하여 보다 자세한 지반조사가 수행되며, 시추조사, 지표지질조사, 물리탐사, 현장조사 및 시험으로 세분화될 수 있다. 조사 목적에 따라 본조사 단계의 지반조사 항목의 상호 연관성을 분석한 결과는 표 10과 같다.

<표 10> 본조사(상세조사) 단계에서 조사항목과 조사방법의 상호연관성 분석

	시추조사		지표지질조사		물리탐사												현장조사 및 시험										
조사 목적	수평 및 경사시추	수평영상분석	지표노두조사	비탈면조사	레이저 스캐닝	원격탐사	굴절법탄성파탐사	반사법탄성파탐사	전기탐사	전자탐사	중력탐사	자력탐사	레이더탐사	방사능탐사	미진동	표면파탐사	열적외선탐사	표준관입시험	현장투수시험	수압시험	공내재하시험	시추공전단시험	수압파쇄시험	시추공시험발파	실내 시험	수질분석	광물분석
구조물 지지층 위치 파악	◎ △	◎					◎ ○									△					○						
지층 분포 특성 파악	◎ ◎ △	◎ ○ ○					○ ◎ ○								△												
토성 파악	○ △		○ △				○ ○ ○																				
이상대 지층 확인	○ ◎ ○ △	○ △	◎ ◎ ○ ○				◎ ◎ ○ ○	◎ ○ ◎ ○ ○																			
수직 절리 구간 분석		◎ ○ △ ○ △	○ ◎				◎ ◎	◎ ○						○													
역학적 특성 분석	◎ ○		○				◎ ○ ○														○						
연약지반 분포특성 파악	◎			○			◎ ○ ○											○		○							
설계지반 정수(N) 산정	◎																	◎			○				○		
토사층 및 기반암의 수리특성 파악									◎ ◎											◎							
지층의 강도 및 변형특성 파악	◎						◎ △ ○											◎		◎					◎		
기반암의 설계 지반정수 산정	◎																				△ ◎				◎ ◎	◎	
발파-진동 영향범위 파악																								◎			
지반등급 산정	◎				△															△							△
토질 및 암석의 기본물성 파악	◎						◎ ◎		◎ ◎												◎				◎ ◎		○
강도정수(c, ϕ) 파악	◎																				◎				◎ ◎		○
초기응력 평가 및 축압계수 보완	◎						◎													○			○				○
연속체 해석을 위한 제반물성 산정																									◎		○
불연속체 해석을 위한 지반정수 산정																									◎		○
지반의 동적거동특성 파악							◎																○ ○				△
강우시 지하수 함양량 평가							○		◎ ◎								○		○ ◎				○			△	○
압밀도 평가(잔류침하 및 부마찰력 평가)	◎																			◎			○		○		
수리특성치 산정																			○ ◎				◎			△	

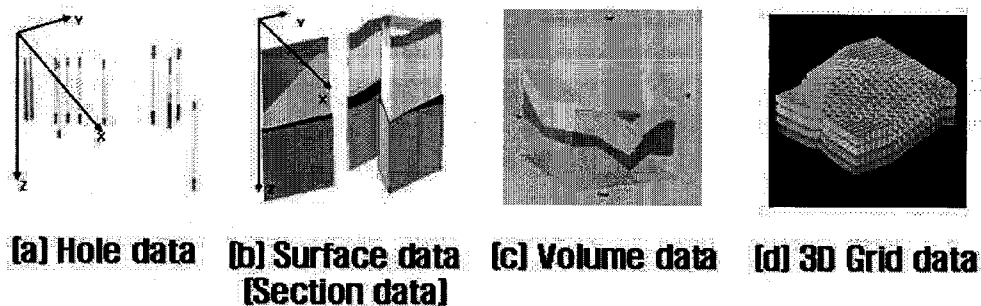
◎ : 필히 수행하여야 할 조사방법, ○ : 상황에 따라 적용 가능한 조사방법, △ : 참고할 수 있는 조사방법

3.4.2 데이터 구조에 따른 지반정보의 상호 연관성 분석

데이터 퓨전 기법과 지구통계 기법 모두 전산환경에서 데이터 연산과정을 통해 최종 결과를 산출하기 때문에, 지반정보의 특성을 효과적으로 반영할 수 있는 데이터 구조를 정의하는 것이 매우 중요하다. 또한 정의된 데이터 구조에 따라 데이터 퓨전 기법 및 지구통계 예측 기법이 상이하게 적용될 수 있기 때문에, 데이터 구조에 따른 지반정보의 상호 연관성을 분석하는 작업이 필요하다.

지반정보를 전산환경에서 표현할 수 있는 데이터 구조에는 대표적으로 홀 구조(hole data), 면 구조(surface data 또는 section data), 볼륨 구조(volume data), 3차원 격자 구조(3D grid data) 등이 있다(그림 9).

본 연구에서는 급속 시공중 지반정보의 동적 지오 모델링을 수행하기 위해 우선적으로 고려해야한 지반정보 요소들을 선별하였고, 지반정보 요소의 특성을 분석하여 전산환경에서 효과적으로 표현할 수 있는 자료구조를 정의하였다. 또한 정의된 지반정보의 자료구조를 중심으로 상호 연관성 분석을 수행하여, 데이터 퓨전 및 지구통계 기법을 이용한 동적 지오 모델링 전략 개발시 참고할 수 있도록 하였다. 표 11은 공정단계에 따라 획득되는 지반정보의 표현방식을 자료구조와 대응하여 매트릭스 형태로 나타낸 것이다. 시공중 획득되는 지반정보의 경우 면 구조 형식으로 표현되는 것들이 대부분이기 때문에, 시공중 지반정보의 동적 지오 모델링을 위해서는 면 구조 중심의 데이터 퓨전 기법의 개발이 선행되어야 한다.



<그림 9> 지반정보 표현을 위한 대표적인 데이터 구조들

〈표 11〉 자료구조에 따른 지반정보의 상호연관성 분석

구분	예비조사					상세조사															시공중		동적	적		
	자료구조	지형도	항공사진	지표지질조사	지질도	지하매설도	시추조사	지표노두조사	노출비탈면조사	사면레이저스캐닝	물리탐사	표준관입시험	현장투수시험	수압시험	공내재하시험	시추공전단시험	수압파쇄시험	시추공시험발파	실내압축토질시험	지표투수시험	양수시험	터널레이저스캐닝	천공데이터	막장스캐치 / 이미지	3D 동적지오모델	막장전방 예측모델
H																										
S																										
V																										
G																										

* H : Hole data, S : Surface data (or Section data), V : Volume data, G : 3D Grid data

4. 지반정보화 활용 전략

4.1 개요

고효율 급속 시공(발파-라이닝 병행시공) 중 지반 정보 활용시스템 구축에 초점을 맞추어 본 과제의 정보화 전략 및 표준모델을 수립하고, 이를 기반으로, 최종 시스템의 모델을 수립하였다. 또한, 수립된 모델로부터 개별 지반정보의 유형 및 기능을 분류하고, 개별 정보유형으로부터 도출되는 각종 단위 시스템을 구성하고, 이를 통합하는 최종 시스템 구축안을 마련하였다. 또한, 시스템 구축 이후 시공 중 지반신속 평가 및 의사결정 시나리오를 각 세부과제의 정보유형과 연계하여 작성하였다.

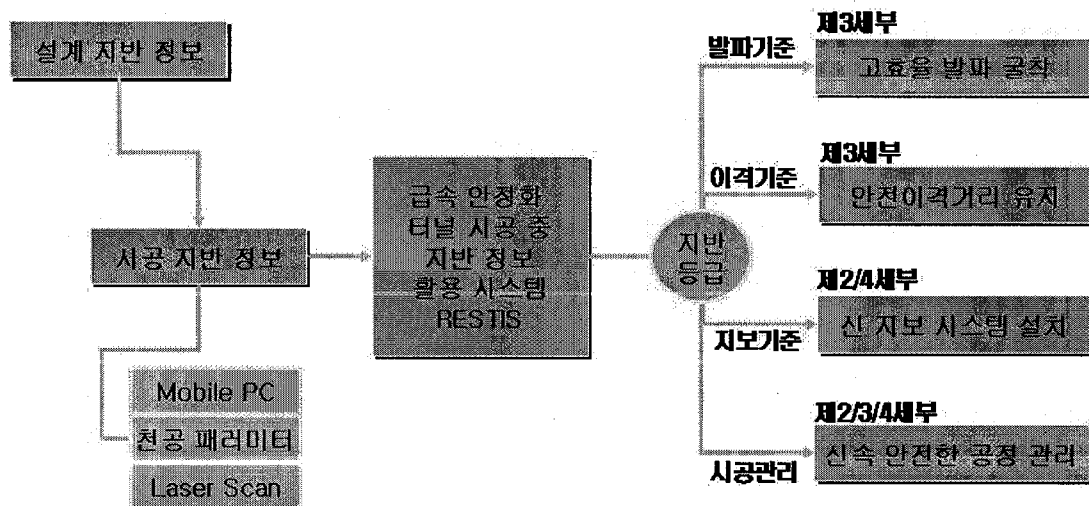
4.2 급속 안정화 터널 시공을 위한 지반 정보시스템 모델 수립

터널 공정의 각 단계 중 설계단계와 시공단계에서 터널 지반의 다양한 정보를 획득하게 된다. 본 시스템은 시공 중 획득한 지반 정보에 기존 설계 시 지반 및 지보패턴 정보를 융합하여, 설계 지반정보와 시공지반 정보간의 불일치를 신속히 예측하고, 즉각적인 대처방안을 수립할 수 있도록 구축되어 있다. 특히 고효율 급속 시공법인 발파-라이닝 병행시공과 급속 안정화 시스템인 신소재를 활용한 지보 설

치 시스템에 유의미한 설계 및 시공지반정보를 체계화하여, 즉각적인 의사결정을 지원할 수 있도록 설계되어 있다.

본 시스템은 시공 중 다양한 지반 정보 수집과 관련하여, 1)Mobile 장비 및 디지털 사진 측량을 활용한 막장 관찰 기법, 2)발파설계 적정성 여부 평가를 위한 Tunnel Laser Scanning System 및 3)천공 파라미터를 이용한 신속-정량화 현장 지반 평가 기법의 지반 정보 활용 시스템을 구성하여 보다 신속하고 정량적인 지반 정보를 획득할 수 있는 장점이 있다. 그리고, 기존 설계지반 정보와 시공 지반정보를 융합하여 각종 지반정보의 즉시 갱신이 가능할 수 있도록, 3D 동적 지오모델링 기법을 적용한 예정보 시스템 및 통합 설계-시공 지반정보 연동 시스템을 수립하였다.

본 시스템은 “급속안정화 터널 시공 중 지반 정보 활용 시스템(RESTIS)”으로 명명하였으며, 최종 모델구성 개요도는 그림 10과 같다.



〈그림 10〉 급속 안정화 터널 시공을 위한 지반정보시스템 모델 개요

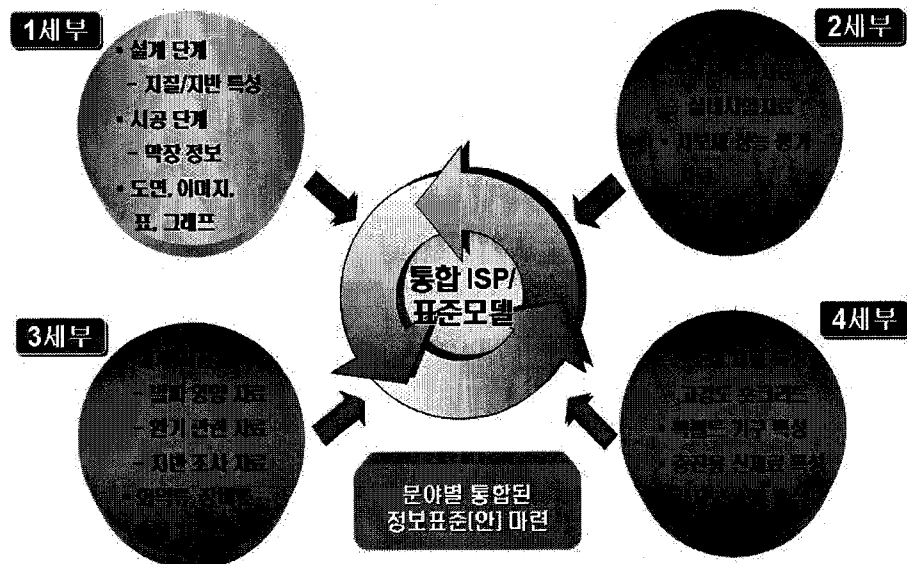
4.3 각종 지반 정보 유형 및 기능 분류

급속안정화 터널 시공 중 지반 정보 활용 시스템(RESTIS)에서 활용되는 각종 지반 정보 유형은 표 12와 같다.

〈표 12〉 지반정보 유형

구 분		정보 유형	비 고
터널 일반 정보		• 설계정보: 단면형상, 단면제원, 연장, 곡률 등 • 시공정보: 굴착단면 형상(여굴, 미굴) 등	공통
설계 정보	지질 /지반	• 시추조사: 주상도, 시추코아사진 등 • 물리탐사: 탐사image, 주시곡선, 역산단면 등 • 지표지질조사: 암석, 광물, 단층, 파쇄대 등 • 현장/실내시험: 물리적, 역학적 특성 등 • 설계지반정수 정보 • 계측정보	1,2 세부
	지보재	• 지보패턴: 록볼트, 슛크리트, 라이닝 등 • 계측 정보	2,4 세부
시공 정보	막장 정보	• Moblie 장비 및 디지털 사진 측량 자료 - 암중, 풍화도, 단층, 파쇄대 등 - 암반 평가 정보: RMR, Q-System	1세부
	측량 정보	• Tunnel Laser Scanning System - 굴착단면 평가: 여굴, 미굴 등 • 발파진동 영향 계측 정보	1, 3세부
	천공 파라미터	• 막장전방 천공 Data : 천공속도, 천공에너지	1세부

세부 분야별 지반 정보 유형 분석은 그림 11과 같으며, 1세부 과제에서 정보화 전략 수립 및 통합표준모델 구축에 활용되는 대상 지반정보 자료는 표 13과 같다. 즉, 도출된 정보유형에 따른 기능(프로세스)을 분류하면, 표 13과 같다.



〈그림 11〉 세부분야별 정보 유형 분석

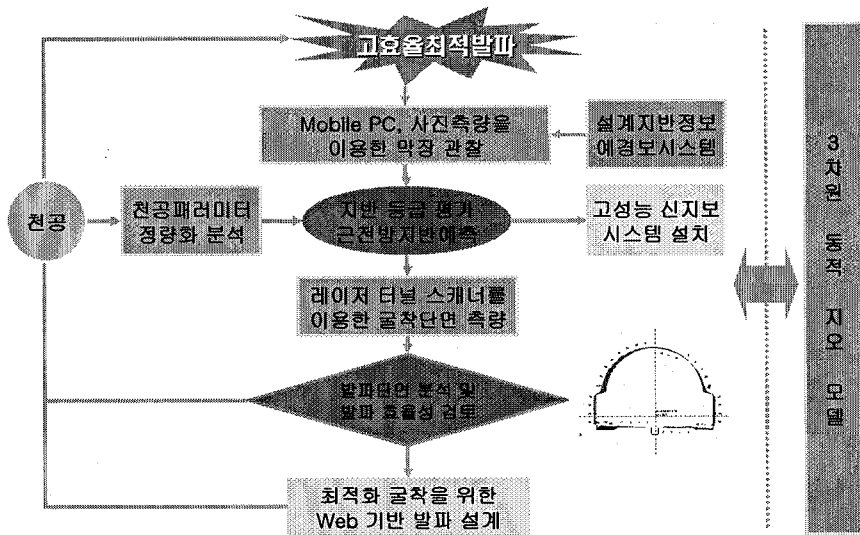
〈표 13〉 정보의 기능(프로세스) 분류

정보 유형	기능(프로세스)
터널 일반 정보	- 프로세스의 정의 - 신규프로젝트 생성 : 공사 일반사항, 터널 일반사항 등
설계 정보	- 지반조사 정보의 표준화, 정보화 전략 수립 - 지반거동 영향인자 분석을 통한 통합 system 구축 - 설계/시공 중 지반정보 가시화를 통한 전방 지반 특성 예측기술 확립: 지구통계학적 기법, 데이터 융합 기술 활용
시공 정보	- 터널 공정 연계 지반조사 시뮬레이션 구축 - 터널 레이저 스캐닝 시스템 구축: 굴착단면평가기법 개발 - 시공 중 지반정보 입출력 Mobile System 구축

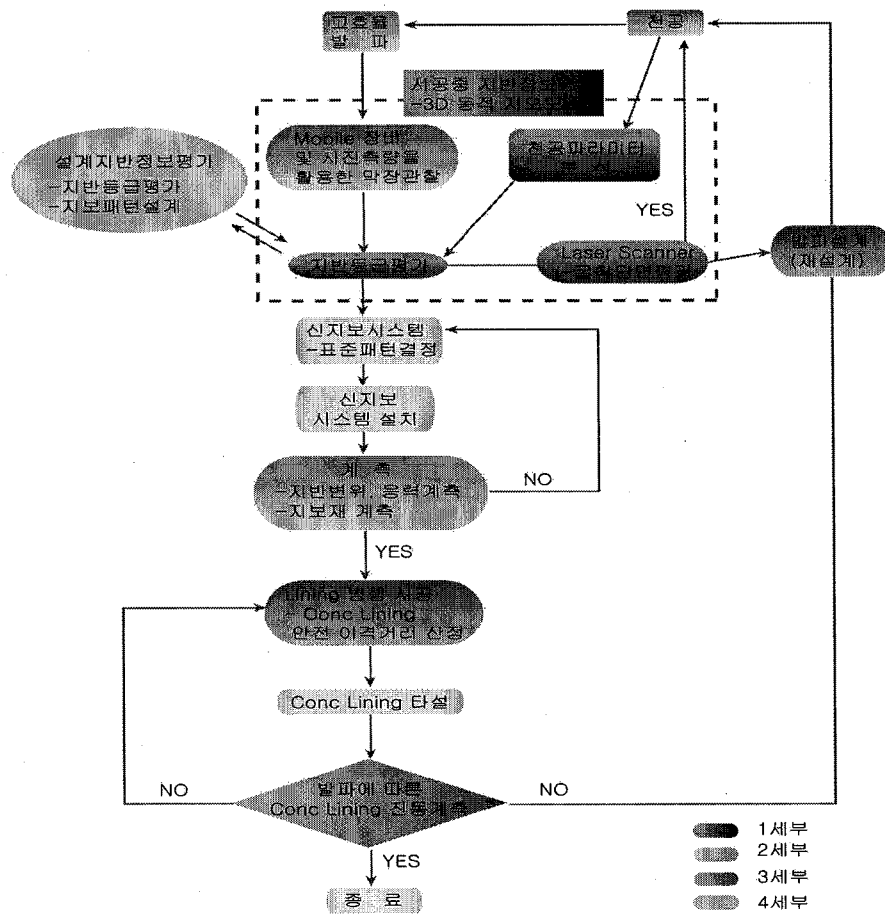
4.4 정보활용 시나리오 작성

정보 유형 및 프로세스 분석을 통해 시스템 구축을 위한 ISP 수립 및 통합 표준 모델을 구축하고, 구축된 시스템의 활용을 통한 시공 중 지반 신속평가 및 의사결정 시나리오를 전체 세부과제 분야의 연계와 1&3세부과제 분야의 연계로 구분하여, 작성하였다 (그림 12).

각 세부분야별 개별 시스템을 통합 구축하여, 설계 및 시공 정보를 종합하고, 이를 통해 신속한 의사결정 단계를 거침으로서, 고효율 급속시공을 가능케 한다. 기존의 다양한 설계정보를 D/B로 구축하여, 터널 시공중 현장 기술자가 항상 설계정보에 접근이 가능하며, Mobile System, Tunnel Laser Scanning System 및 DRISS System을 통해, 전산화된 정보로 막장전반의 지반상태를 파악할 수 있다. 더욱이, 설계정보와 시공정보간의 비교를 통해, 막장전반 상태를 보다 정확하게 예측할 수 있다. 설계-지반 정보의 융합을 통해, 신속하게 발파 및 지보재에 대한 변경설계 수행이 가능하고, 이를 즉시 시공에 반영할 수 있는 장점을 가진다 (그림 13).



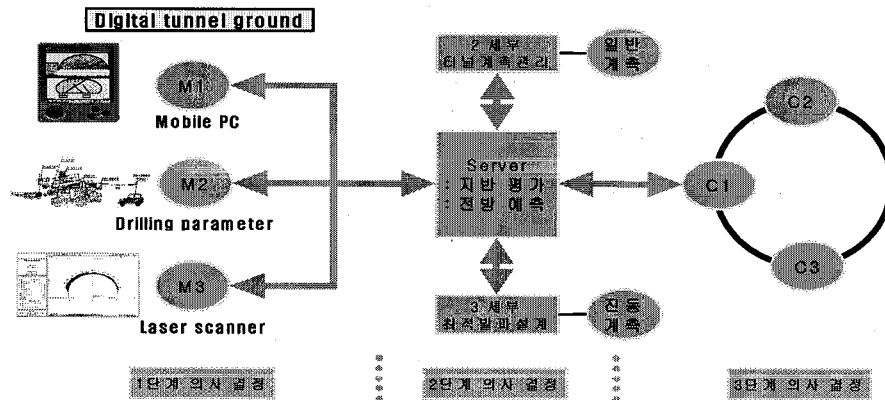
<그림 12> 고효율 최적 발파를 위한 지반 정보 활용 의사 결정 시나리오



<그림 13> 발파 라이닝 병행 터널 시공 중 의사 결정 시나리오

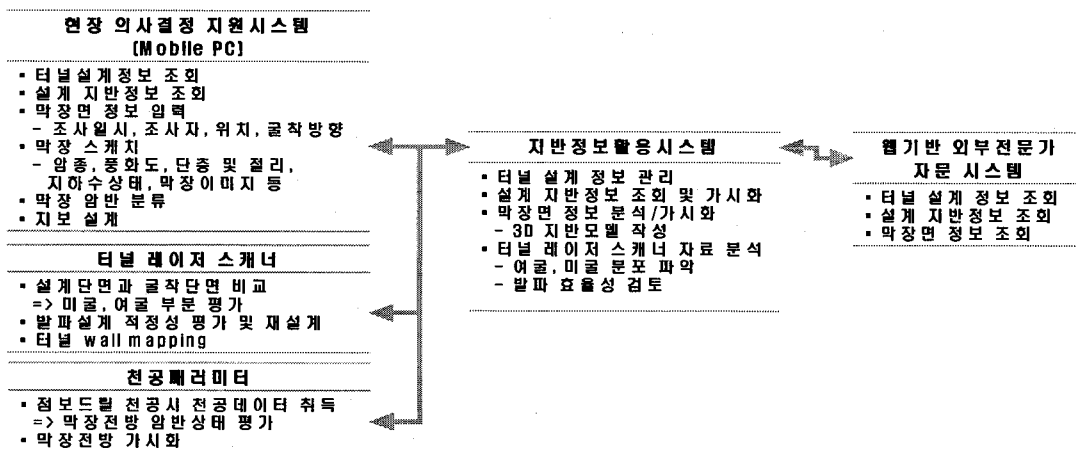
4.5 터널 지반정보활용 시스템 구성(통합안) 및 연계방안

급속 안정화 시공을 위한 IT 접목형 지반 정보 활용 시스템은 3단계의 의사결정 과정을 통해 고효율 발파-라이닝 병행시공 및 신지보시스템을 이용한 급속안정화 터널 시공을 가능케 할 수 있는 시스템으로 구성한다 (그림 14)



〈그림 14〉 지반정보 활용 시스템 구성

위의 그림 14와 같은 3단계 의사 결정 지원 체계에 의해 지반 정보 활용 시공 중 의사 결정 지원 시스템은 크게 현장 의사 결정 지원 시스템, 지반 정보 활용 시스템, 웨기반 외부 전문가 자문 시스템으로 구분되며, 각 시스템의 기능은 그림 15와 같다.



〈그림 15〉 시공중 지반 정보 활용 의사결정 지원 시스템의 주요 기능

5. 개별 지반 정보 활용 시스템의 구성

개별 지반 정보 활용 시스템은 크게 설계지반정보 활용 예정보 시스템, Mobile 장비를 활용한 의사결정지원시스템, 터널 레이저 스캐너 시스템 및 천공패러미터를 이용한 신속,정량화 분석 시스템 및 시공 중 지속적으로 확보되는 지반 정보를 유사 실시간으로 갱신 처리하는 동적 3D 지오모델링 시스템으로 구성된다.

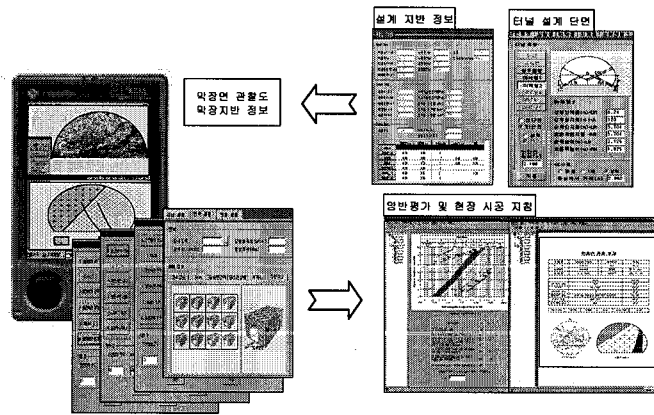
의사결정 지원 시스템에 사용되는 터널 설계 정보는 설계정보관리시스템을 통해서, 시공 정보는 Mobile 장비를 이용한 현장의사결정지원시스템, 터널레이저스캐너 시스템 및 천공 패러미터 등에 의해서 구축된다. 설계 정보와 시공 정보를 통합하는 통합정보시스템은 3D 동적지오모델 기법에 의해 구현된다. 이때, 활용되는 대상 지반 정보는 표 14와 같다.

〈표 14〉 활용되는 대상지반정보의 분류

대분류	소분류	활용 정보 유형
설계 정보	지질/지반정보	• 시추조사정보, 현장/실내시험정보, 지표지질조사정보, 설계 정수정보
	터널설계정보	• 평면도, 종단면도, 터널단면도
시공 정보	막장지질정보	• 암종, 풍화도, 단층/절리, 지하수 상태 등
	막장암반평가정보	• RMR, 천공 패러미터 등
	터널시공정보	• 지보패턴, 레이저 스캐너 정보 (굴착단면형상, 미굴, 여굴 등)

5.1 Mobile 장비를 활용한 의사결정지원 시스템

Mobile 장비를 활용한 의사결정지원시스템은 기존 설계지반정보(설계 표준단면, 설계 지보패턴 등)를 관리, 조회할 수 있는 설계지반정보 관리시스템과 터널현장에서 기술자가 획득한 막장관찰정보, 막장 지반상태 평가 및 현장시공지침을 입-출력할 수 있는 시스템으로 구성된다 (그림 16).

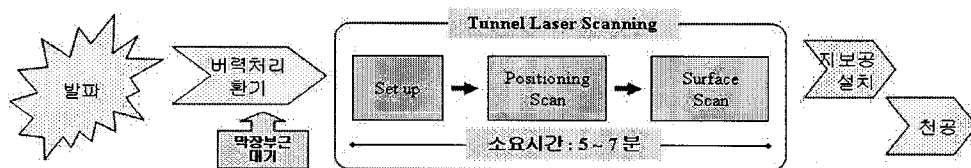


〈그림 16〉 Mobile 장비를 활용한 의사결정 지원시스템 개요

5.2 Tunnel Laser Scanning System

5.2.1 레이저 스캐너 시스템의 장점

터널 건설현장에서 중요한 요소가 작업공정의 관리임을 감안할 때, 계측시스템 현장운용 소요시간은 시스템의 효용성을 판단하는 주요 사항이다. 본 시스템의 경우 발파, 환기 및 버력처리, 지보공 설치, 천공으로 이어지는 일반적인 터널 건설과정 중 버력처리 후 지보공 설치전의 5~7분 사이에 작업을 마칠 수 있어 전체공정에 영향을 주지 않는다. 또한, 측정된 데이터가 즉시 사무실의 컴퓨터로 전송되어 30분 정도 소요되는 분석작업을 마칠 경우, 관리자는 발파 후 약 1시간 내에 당회 발파 단면의 정확성 및 발파작업의 적정성여부를 판단할 수 있다 (그림 18).



〈그림 18〉 레이저 스캔 측정 과정 순서도

5.2.2 시스템 적용 및 결과활용

본 시스템의 현장운동을 통해 얻어진 기초자료(raw data)는 대상구조물의 표면을 구성하는 격자점의 3차원 좌표와 해당 측정점의 반사강도(Intensity) 값이다. 이를 이용

하여 분석작업을 실시하기 위해서는 사전에 터널의 설계자료가 입력되어 있어야 하며, 여기에는 터널 전구간의 중심점 좌표자료 및 각 구간별 종방향, 횡방향 측정사, 터널 각 단면의 설계자료 및 각종 설계 기준자료가 포함된다. 기 입력된 설계자료와 현장 측정으로 얻어진 계측자료의 상호 분석결과를 이용하면 시공품질 및 유지 관리에 활용할 수 있으며 분석내용의 이용분야는 표 15와 같다.

<표 15> 레이저 스캔 결과 활용 개념

설계 자료		측정 자료			분석
		Surface 3D 좌표 coordinate	반사강도(Intensity) 영상자료(Image)		
단면 프로파일 설계 기준 - 쇼크리트 두께 - 쇼크리트 요철 - 건축한계	VS	형상, 치수 발파면 쇼크리트면 라이닝	누수 보강재 암종 변화 etc.	= >	- 과굴, 미굴 현황 정량 분석 - 타설 쇼크리트 두께, 물량 - 변위 모니터링 - 쇼크리트 표면 굴곡도 - 준공 후 건축한계 검사 - 누수 위치 및 현황 - 락볼트,보강재 위치 및 물량 - 발파면 지질현황 D/B

5.3 신속-정량화 평가에 근거한 지반 평가 시스템

5.3.1 신속-정량화 지반평가 시스템을 통한 지반거동 분석

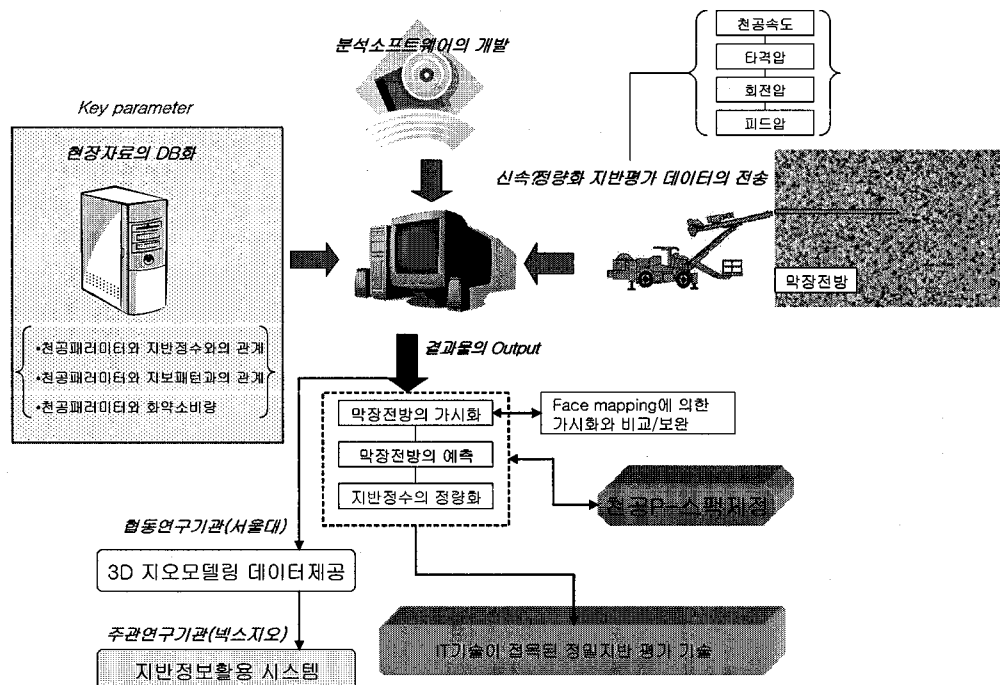
Nishimatsu건설과 Toda건설이 공동 개발한 NT-NITS (Nishimatsu Toda New Intelligent Tunnelling System, 일본) 의 계측시스템(천공퍼러미터의 계측)은

- PC카드에 저장된 계측데이터(피드압, 회전압, 타격압, 천공속도)를 컴퓨터에서 분석하고
- 계측데이터를 이용한 천공에너지 산출 및 거리에 따른 도식화
- 천공중 슬라임의 성상과 막장관찰 데이터 및 기존 축적 데이터와의 비교 분석을 통하여 막장 전방의 지반상태 예측 하는 시스템으로 구성되어 있다.

5.3.2 신속-정량화 지반평가 시스템 구축을 통한 지반정보화 활용전략

NATM 터널굴착 공정중 천공작업은 발파 및 락볼트 설치 등을 위한 필수공정이며 1단면에서도 수십공 이상 시행되고 있다. 이때 천공작업시에 생성되는 데이터는 막장전방에 대한 지반의 정량적 데이터를 내재하고 있으므로 이를 활용하는 기술은 작업공정에 영향을 주지 않고 실시간으로 분석되기 때문에 신속-정량적인 평가

가 가능하다. 본 연구에서 구축하려는 신속·정량화 지반평가 시스템은 다음 그림과 같이 신속·정량화 지반평가 데이터의 전송모듈과 분석소프트웨어, 현장자료의 DB모듈로 구성되어 있다. 이러한 세 개의 모듈로 구성된 신속·정량화 지반평가 시스템은 결과물로서 막장전방의 가시화, 막장전방의 예측, 지반정수의 정량화로 표시된다 (그림 24).



〈그림 24〉 신속·정량화 지반평가 시스템 구축

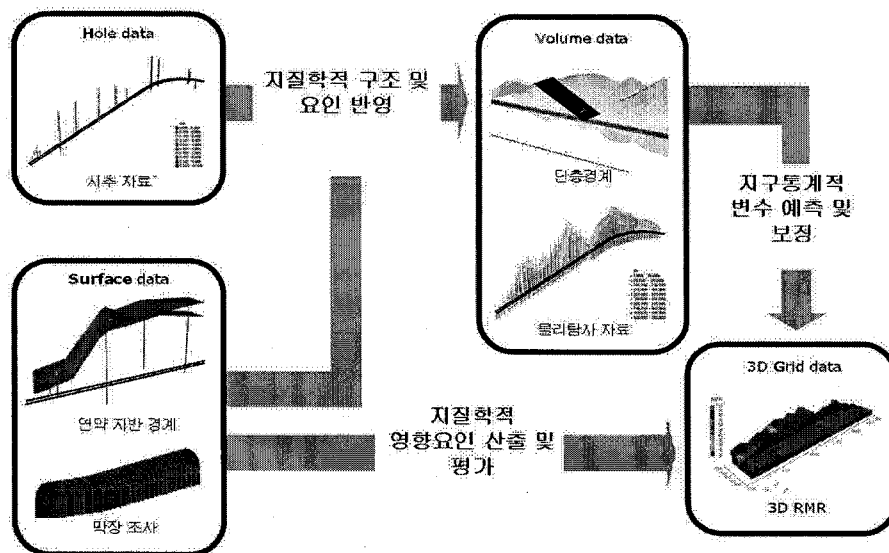
5.4 3D 지오 모델링 기법을 활용한 통합 정보 시스템

- 동적 지오 모델링 기술 개발을 위한 상호 연관성 분석 결과의 활용 방안

당해연도 연구에서 수행된 지반정보 상호 연관성 분석 결과는 향후 동적 지오 모델링 기술 개발을 수행하는데 있어 중요한 의미를 갖는다. 지반정보의 상호 연관성을 근거로 하여, 급속 시공중 위해요소 분석을 위해 필요한 지반정보를 우선 선별해 낼 수 있으며, 지반정보의 데이터 구조에 따라 데이터 퓨전 기법 및 지구통계 기법의 적용 순서를 결정할 수 있기 때문이다.

산악 터널 시공구간을 대상으로 동적 지오 모델링을 수행하게 되는 경우 초기 단

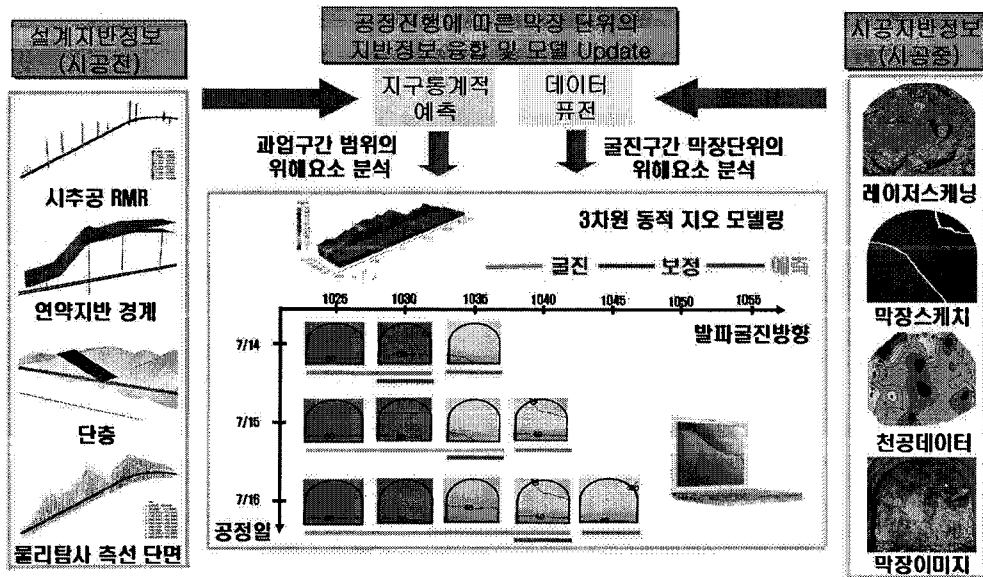
계에서는 설계 지반정보를 이용하여 전체 과업 구간의 암반 물성을 대표할 수 있는 3차원 RMR 분포 모델 등을 생성하게 된다. 3차원 RMR 분포를 모델링하기 위해서는 일축압축강도, RQD, 불연속면간격, 불연속면상태, 지하수상태, 불연속면의 방향에 대한 정보를 알아야 하며, 이를 획득하기 위해서 필요한 자료들은 앞서 제시한 상호 연관성 분석 결과로부터 쉽게 선별될 수 있다. 또한 자료구조에 따른 상호 연관성 분석 결과를 활용함으로써 홀 구조로 표현된 시추공 RMR 데이터와 면 구조로 표현된 2차원 공간 데이터를 순차적으로 결합하여 3차원 블록 구조의 모델을 생성하고, 지구통계 기법의 적용하여 격자별로 암반 물성에 대한 정보를 담고 있는 3차원 격자 구조의 모델을 완성할 수 있다 (그림 25).



<그림 25> 3차원 RMR분포 모델링을 위한 상호연관성 분석 결과의 활용 flow

5.4.1 급속 시공중 유사 실시간 공정 위해요소 분석 시스템 전략 개발

본 연구에서는 당해연도에 수행된 지반정보의 상호 연관성 분석 결과를 종합하여, 지반정보의 연계 방안을 정립하였다. 또한 당해연도에 수행된 연구 결과를 바탕으로 본 연구의 최종 목표인 급속 시공중 유사 실시간 공정 위해요소 분석 시스템의 구체적인 정보 모델을 개발하였다. 그림 26은 동적 지오 모델링 기술을 바탕으로 신속하게 터널 공정 위해요소를 판단하는 정보 시스템의 개요를 보여준다.



〈그림 26〉 급속 시공중 유사 실시간 공정 위해요소 분석 시스템 전략 개발

먼저, 지반정보 상호 연관성 분석 결과에 따라 우선 고려되어야 하는 설계 지반정보 (시추공 RMR, 연약 지반경계, 단층, 물리탐사 축선 단면)를 이용하여 과업 구간 전체의 3차원 암반 물성 모델을 생성한다. 이때 생성된 3차원 모델은 과업 구간 전체의 위해요소 분석에 활용된다. 이후 급속 시공이 시작되면, 공정일 단위로 시공 지반정보 (막장 이미지, 막장 레이저 스캐닝을 통한 미굴·여굴 계산 결과, 천공 데이터, 막장 스케치)들이 모델에 입력되며, 데이터 퓨전을 통해 공정 진행에 따라 막장 단위의 모델 보정 및 예측을 반복하게 된다. 설계 지반정보뿐만 아니라, 시공중 발견되는 막장 지반상태까지 유사 실시간으로 반영하여 동적 지오 모델링을 수행하기 때문에, 신뢰성 높은 공정 위해요소 분석이 가능하다. 대표적인 공정 위해요소에는 절리선, 연약 암반 등이 있으며, 동적 지오 모델링 수행중 근전방 5m 이내의 막장에서 절리면, 연약 암반 등이 출현하는 경우 공정 위해요소로 판단한다. 공정 위해요소에 대한 분석 결과는 다음 막장구간의 시공전 현장 작업자에게 신속하게 전달되어, 예기치 못한 막장 분괴로 공정이 지연되거나 시공이 중단되는 사태를 사전에 대비할 수 있도록 한다.

〈Part II〉 표준자료모델 수립

1. 터널 설계 및 시공자료의 분류

터널 관련자료는 공사일반자료, 설계정보, 시공중 정보로 구분된다. 또한 설계정보는 설계일반정보, 설계시 조사하는 시추관련정보, 현장시험 및 실내시험 정보로 구분되고, 시공중 정보는 막장 정보, RMR 정보, 시공중 시험 정보로 구분된다.

〈표 16〉 터널 자료의 분류

대분류	중분류	소분류	세분류
프로젝트 정보	공사일반정보	-	공사명, 시공사, 공사기간 등
	터널정보	터널설계정보 터널시공정보	• 단면형상(타입별), 단면제원, 터널연장, 터널곡률 등 • 굴착단면형상, 여굴, 미굴 등
지질 및 지반정보	시추조사정보	일반정보	• 시추자, 시추기, 일시, 공경 등
		위치정보	• 시추위치(TM, 경위도) 등
		지층정보	• 암석정보 : 지질암종, 공학적 지질 특성 등
			• 암질정보 : TCR/RQD, D, R 등
			• 불연속면정보 : J, F 등
		공극정보	• 시추경사방향, 경사각 등
		시료정보	• SPT 시료, 불교란 시료, 암석 시료 등
	시험 정보	현장시험 정보 (원위치 시험)	공내시험 • 표준관입, 투수/수압, 공내재하, 공내전단, 유용성시험, 수압파쇄 등
			물리검층 • DHT, 밀도검층, BIPS, S-PS, BHTV, 전기비저항검층 등
		실내시험 정보	토질시험 • 기본물성, 입도분석, 강도, 압밀, 공진주 시험 등
			암석시험 • 강도 시험, 절리면전단시험, 이방성 시험, Slaking & Swelling, XRD, 현미경 모달 시험 등
막장 정보	지표지질조사 정보	위치정보	• 노두 조사 위치
		지질정보	• 암상, 광물특성, 단층, 파쇄대 등
	막장지질정보	지질 정보	• 암종, 풍화도, 단층대, 파쇄대 등
		수리지질 정보	• Seepage 지점, 유출량 등
설계정수 산정 정보	암반평가정보	RMR	• 강도특성, 불연속면특성, 지하수특성, 풍화도, 보정계수
		Q-System	• 블록 크기정보, 전단강도 정보, 응력정보
	연속체 정보 (토사, 암석)	변형계수	• 공내재하시험결과 및 각종 경험식
		전단강도(c, ϕ)	• Hoek-Brown 파괴이론 방법(GSI, mi, σ_c) 및 경험식
		단위중량, 포아송비	• 각종 시험결과 및 경험식
	불연속체정보	방향성	• Strike/Dip, Dip/Dip Direction 등
		분포특성	• 간격, 연장 등
		강도특성	• JRC, JCS, c, ϕ 등
		강성	• 수직강성, 전단강성 등
	지중응력정보	축압계수	-
계측 정보	현장 계측 정보	변위 정보	• 천단변위, 내공변위 등
		지하수 정보	• 지하수위, 유입량 등
	실내시험자료	-	-

2. 데이터 모델

○ 데이터 모델의 정의

데이터 모델은 현실 세계의 정보들을 컴퓨터에 표현하기 위해서 단순화, 추상화하여 체계적으로 표현한 개념적 모형이다. 현실 세계를 데이터베이스에 표현하는 중간과정, 즉 데이터베이스 설계 과정에서 데이터의 구조를 논리적으로 표현하기 위해 사용되는 지능적 도구이다.

○ 데이터 모델의 구성요소

- 개체

개체는 데이터베이스에 표현하려는 것으로, 사람이 생각하는 개념이나 정보단위 같은 현실 세계의 대상체이다.

개체는 유형, 무형의 정보로서 서로 연관된 몇 개의 속성으로 구성된다.

파일 시스템의 레코드에 대응하는 것으로 어떤 정보를 제공하는 역할을 수행한다.

독립적으로 존재하거나 그 자체로서도 구별 가능하다.

- 속성

속성은 데이터의 가장 작은 논리적 단위로서 파일 구조 상의 데이터 항목 또는 데이터 필드에 해당한다. 속성은 개체를 구성하는 항목이다.

- 관계

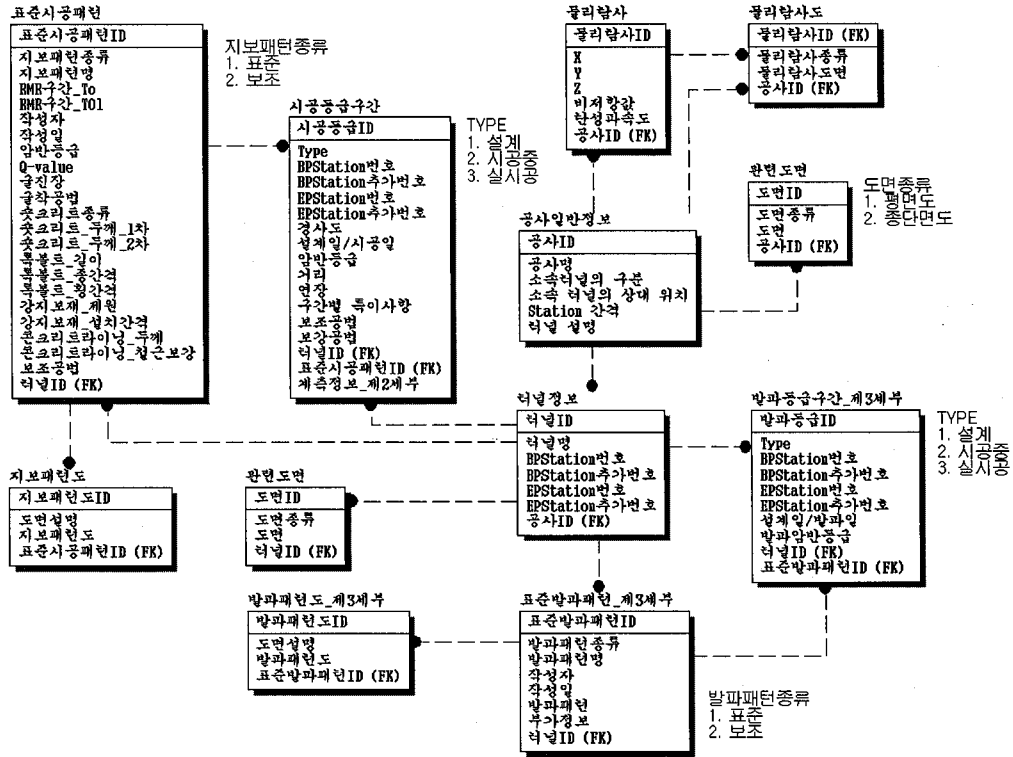
개체간의 관계 또는 속성 간의 관계이다.

관계의 형태

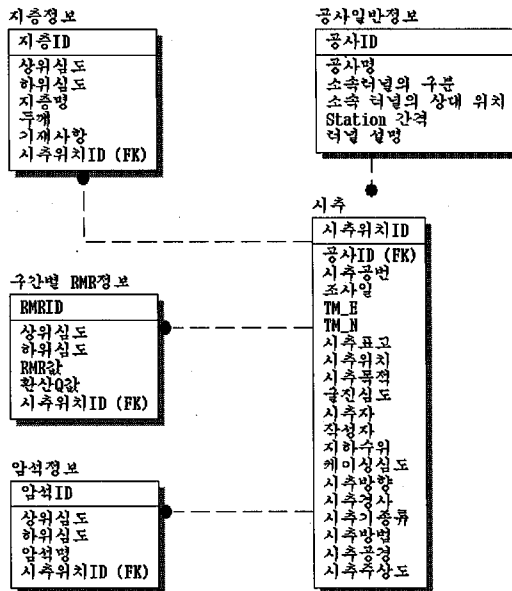
- 일대일 : 개체 집합 A의 각 원소가 개체 집합 B의 원소 1개와 대응하는 관계
- 일대다 : 개체 집합 A의 각 원소는 개체 집합 B의 원소 여러 개와 대응하고 있지만, 개체집합 B의 각 원소는 개체 집합 A의 원소 1개와 대응하는 관계
- 다대다 : 개체 집합 A의 각 원소는 개체 집합 B의 원소 여러 개와 대응하고, 개체 집합 B의 각 원소도 개체 집합 A의 원소 여러 개와 대응하는 관계

본 연구에서 제안하는 터널 관련자료의 데이터모델은 그림 27에서 그림 30과 같다.

○ ERD(Entity Relation Diagram)



〈그림 27〉 설계지반정보-일반



〈그림 28〉 설계지반정보-시추

각각의 데이터에 대한 주요 테이블 구조는 아래와 같다.

○ 주요 테이블 구조도

- 공사일반정보

컬럼명	데이터타입	Null 허용	Key	비고
공사ID	NUMBER	NOT NULL	PK	
공사명	VARCHAR2(100)	NOT NULL		
소속터널의_구분	VARCHAR2(100)	NOT NULL		
소속_터널의_상대_위치	VARCHAR2(200)	NOT NULL		
Station_간격	NUMBER	NULL		
터널_설명	VARCHAR2(255)	NULL		

- 터널정보

컬럼명	데이터타입	Null 허용	Key	비고
터널ID	NUMBER	NOT NULL	PK	
터널명	VARCHAR2(100)	NULL		
BPStation번호	NUMBER	NULL		
BPStation추가번호	NUMBER	NULL		
EPStation번호	NUMBER	NULL		
EPStation추가번호	NUMBER	NULL		
공사ID	NUMBER	NOT NULL	FK	

- 막장면

컬럼명	데이터타입	Null 허용	Key	비고
막장ID	NUMBER	NOT NULL	PK	
Station번호	NUMBER	NULL		
Station추가번호	NUMBER	NULL		
굴착방향	CHAR(1)	NULL		
심도	NUMBER	NULL		
조사일시	DATE	NULL		
조사자	VARCHAR2(50)	NULL		
검수자	VARCHAR2(50)	NULL		
막장스케치도	BLOB	NULL		
암반등급	NUMBER	NULL		
부가정보	VARCHAR2(255)	NULL		
터널ID	NUMBER	NOT NULL	FK	
시공등급ID	NUMBER	NULL	FK	
발파등급ID	NUMBER	NULL	FK	

제2세부과제

시공현장 지원을 위한 굴착터널 안정성 평가 기술 개발

1. 서론

본 연구에서는 터널이 시공중인 굴착터널 현장에서 신속한 터널안정성 평가기술 개발을 수행하고 있다. 일반적으로 구조물의 안정성을 판단하는 기준으로는 응력개념과 변형률 개념으로 나눌 수 있다. 이러한 판단기준은 터널 시공현장에서도 그대로 활용되고 있다. 오늘날 대부분의 터널현장에서는 막장의 지반굴착과 더불어 변위 및 응력과 관련된 계측을 실시하도록 규정하고 있으며, 실제 현장에서도 계측을 수행하고 있다.

그러나 실제 터널시공현장에서는 변위계측(주로 A계측)이 주류를 이루고 있으며, 응력계측(주로 B계측)은 특별한 관리대상 구간에 대해 수행하고 있다. 이러한 계측 결과는 터널의 안정성에 가장 중요한 판단기준으로 활용되고 있다. 일반적으로 터널시공현장에서는 변위에 대한 관리기준치를 제시하고 있으며 계측치가 관리기준치 이내이면 터널의 안정성이 확보된 것으로 판단하고 있다. 또한 지보재에 설치된 응력계를 통하여 계측된 값은 부재가 가지고 있는 내하력 이내의 값으로 판단되면 그 부재는 안정성을 확보한 것으로 쉽게 판단할 수 있다.

터널시공현장에서 계측치를 활용하여 터널의 안정성을 판단하는 이러한 방법은 하나의 시스템으로서 그 역할을 충실히 수행하는 것으로 보이는 일면이 있다. 그러나 실상 터널시공현장의 상황을 살펴보면 계측으로 터널의 안정성을 판단하는 것이 그렇게 단순하지만은 않은 것을 알 수 있다.

먼저 응력계에 의해 계측된 값으로 터널의 안정성을 파악함에 있어서는, 응력계의 설치 및 계측에 경제적·시간적 제한은 있으나, 그 반면에 안정성 판단은 비교적 간단하게 수행될 수 있다. 그러나 터널 굴착현장에서 매 굴착위치마다 응력계를 설치하여 안정성을 판단할 수는 없기 때문에 주로 특별히 관리가 요망되는 지점에

대해서만 수행하고 있다. 따라서 구조물의 연장이 구조체의 단면적에 비해 긴 특징을 가지는 터널에서는 전체 구조체의 안정성 확보측면에서는 제약이 많다.

한편, 터널굴착과 더불어 주변지반의 변위를 계측하는 것은 응력계측에 비해 매우 단순하며 계측지점도 손쉽게 확보할 수 있어 이를 터널안정성 판단에 활용하는 것이 훨씬 경제적이며 유리한 것을 알 수 있다. 그러나 변위 계측치를 관리기준치와 비교하여 안정성을 판단함에 있어서는, 변위계측을 시작하는 시점과 막장으로부터 떨어진 거리 및 시간 등에 의해 계측되는 변위값이 크게 달라질 수 있기 때문에, 단순히 계측된 변위값을 그대로 관리기준치와 비교할 수 없다. 또한 무엇보다도 중요한 것은, 현장에서 계측된 변위로 안정성 여부를 판단하기 위해 활용되고 있는 계측관리기준치는, 나라마다 지역마다 그리고 터널시공현장마다 서로 다른 값을 보이고 있는데, 그 근거에 대한 뚜렷한 지침이 없는 실정이다. 다만 계측관리기준치를 설정함에 있어서 현장의 경험적 사례나 수치해석을 통해 설정하는 것으로 알려져 있을 뿐이다. 따라서 새로운 터널현장에서 계측관리 기준치를 설정함에 있어서 통일적 지침이 될 수 있는 뚜렷한 기준이 부재한 실정이기 때문에 아직까지 국내 터널시공현장에서 터널계측에 대한 중요성이 높지 않으며 그 활용성도 매우 미비한 실정이다. 그러나 앞에서 지적한 바와 같이, 터널시공현장에서 신속한 안정성 판단을 위해서는, 응력계측보다 변위계측이 매우 효과적이며 그 활용성이 크다는 것을 알 수 있다.

터널시공현장마다 달리 적용되고 있는 관리기준치는 결과적으로 터널이 굴착되는 지반의 변형특성을 의미하는 것이기 때문에, 지반의 변형특성을 적절히 규정해 줄 수만 있다면, 시공관리 기준치에 대한 통일적 지침을 마련할 수 있을 뿐만 아니라, 관리기준치의 합리성을 확보할 수 있고, 더 나아가 터널의 안정성과 연계되어 경제적인 터널시공을 수행할 수 있다. 이와 더불어 터널시공현장에서 신속하고 합리적으로 터널안정성을 판단할 수 있게 되어 본 연구단이 지향하고 있는 급속시공에 매우 중요한 역할을 담당할 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 관점에서 시공 중인 터널현장에서 합리적인 계측기법 및 기기를 개발하여 신뢰성 높은 계측치를 확보하고 동시에 이를 활용하여 터널의 안정성을 시공현장에서 신속하게 판정하여 곧바로 시공현장에 반영할 수 있는 feedback기술을 개발하여 굴착중인 터널의 안정성 평가기술을 개발하고자 한다.

2. 굴착터널의 안정성 평가 기술개발

2.1 현행 터널구조물의 시공관리 및 안정성 평가기법 활용 현황

1975년 이후 NATM공법이 도입됨에 따라 현장계측과 막장관찰을 중심으로 한 시공관리 기술은 체계적으로 산악터널의 시공에 도입되어, 그 시공 합리화, 경제성 확보 및 안전성 향상에 일조해 온 것이 사실이다. 특히 막장관찰에 의한 시공관리는 산악터널에서 시공경험이 많기 때문에, 시공실무에서 많이 이용되어 지보 패턴 선정이나 공법 변경 등 거의 대부분은 이 막장관찰에 기초하여 실시되고 있는 것이 현실이다.

이에 비해 내공변위, 천단침하 등 비교적 간단하게 수행되는 변위계측 결과는 관리기준치 설정이 불합리하기 때문에 안전성 판단에 효과적으로 활용되고 있지 못한 실정이며 그 중요도가 높지 않은 것으로 인식되고 있다.

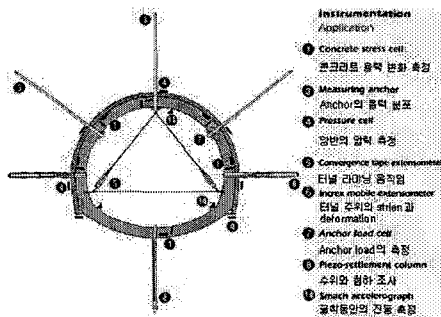
그러나 현장에서 계측되는 지반의 변위거동 계측결과는 계측지점의 지질조건하에서 실제 굴착터널의 역학적 거동을 수치적으로 보여주는 의미 있는 정보로서 이를 제대로 분석, 평가함에 따라, 시공된 지보재에 대한 지보효과를 정량적으로 평가할 수 있을 뿐만 아니라, 굴착중인 지반의 안전성을 판단하는데 매우 중요한 자료로 활용될 수 있다.

한편, 지중변위, 록볼트 축력, 슛크리트 응력 등에 대해서도 현장계측은 실시되고 있으나, 계측기의 설치 및 계측에 경제적·시간적 제약이 커 안전성 판단에 그 활용도가 크지 않다. 또한 터널 굴착현장에서 매 굴착위치마다 계측기를 설치하여 안정성을 판단할 수는 없기 때문에 주로 특별히 관리가 요망되는 지점에 대해서만 수행하고 있다. 따라서 구조물의 연장이 구조체의 단면적에 비해 긴 특징을 가지는 터널에서는 전체 구조체의 안정성 확보 측면에서 활용하기에는 제약이 많다.

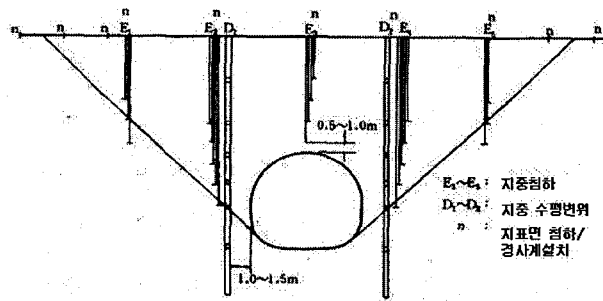
2.2 굴착터널 안정성 평가에 대한 현황 조사

현행, 터널에 대하여 시행되는 계측 종류를 살펴보면, 다음 그림 1과 같이 터널 내 계측과 터널외 계측으로 대별된다. 또한 터널의 계측은 일상계측인 A계측과 대

표단면에 대하여 실시되는 B계측으로 구분되기도 한다.



(a) 터널내 계측



(b) 터널외 계측

<그림 1> 현행 시공중 터널에 대하여 시행되는 계측의 종류

현재 계측치를 활용하여 굴착터널의 안정성을 판정하는 수단으로는 일반적으로 터널시공현장에서 변위(천단변위, 내공변위) 혹은 변위속도를 구하게 되고, 그 값을 지반의 조건(혹은 지질조건) 또는 구조물의 형식별로 관리기준치를 달리 설정하여 이를 초과하는 경우에 대하여 굴착공법 및 지보공법을 변경하는 방식으로 적용되고 있는 실정이다. 표1은 모두 국내외의 관리기준치를 나타낸다.

<표 1> 계측항목 및 간격

구 분	계측항목	계측간격
A 계측 (일상계측)	갱내관찰조사	전연장
	내공변위측정	10 ~ 30 m
	천단침하측정	10 ~ 30 m
	Rock Bolt 인발시험	50 ~ 100 m
B 계측 (정밀계측)	지반재료 시험	200 ~ 500 m
	지중변위	
	Rock Bolt 축력측정	
	Shotcrete 응력측정	
	지표 및 지중침하	500 m 마다(필요시)
	갱내 탄성과속도 시험	500 m 마다(필요시)

〈표 2〉 계측관리 기준치 통합 표

국내외 기준		구분조건		관리기준치				
일본 (주)SIMIZU건설 ¹¹⁾ · 내공변위는 수평측선 기준		지반분류		내공변위(mm)	내공변위구배 (mm/m)			
					막장에서의 거리			
				0~0.5D	0.5D~1.5D	> 1.5D		
		봉적토	기준치	40	8	4	2	
			경계치	80	16	8	4	
			한계치	120	24	12	6	
		기반암	기준치	30	6	3	2	
			경계치	60	12	6	4	
			한계치	88	18	9	6	
오스트리아 Alberg터널 관리기준 ⁷⁾		최대허용 변위		터널반경 및 R/B길이의 10% 이내				
		이상적인 변위		터널반경 및 R/B길이의 3~4% 이내				
		내공변위 속도		2차 라이닝 설계강도에 따라 200 kg/cm ² 인 경우, 0~1mm/30일, 240 : 1~3mm, 320 : 3~5mm				
일본 국철 관리기준 ¹³⁾		지반 분류	특s, Is	단 선	75 mm 이하			
				복 선	150 mm 이하			
			IN	단 선	25~75 mm 이하			
				복 선	50~150 mm 이하			
			II _N , V _N	단 선	25 mm 이하			
				복 선	50 mm 이하			
프랑스 공업성 ⁷⁾ · 천단침하 관리기준		최대허용변위량		경질지반에서 토피고에 따라 10~50m인 경우, 1~2mm 50~100m인 경우, 2~6mm 100m이상인 경우, 6~12mm	소성지반에서 토피고에 따라 10~50m인 경우, 2~5mm 50~100m인 경우, 10~20mm 100m이상인 경우, 20~40mm			
		1일 허용변위량		막장통과시, 전체 허용변위량의 1/5~1/4 1주일 경과후, 전체 허용변위량의 1/20				
		한국지반공학회 ²⁾		주의레벨 I		내공변위속도가 막장에서 5mm/일 이상	지반은 비교적 안정, 이완영역 발생 시작	
주의레벨 II				내공변위속도가 - 막장에서 10mm/일 이상 - 후방에서 5mm/일 이상	이완영역이 발생하는 것으로 간주			
주의레벨 III				내공변위속도 가속	확실한 이완영역이 발생된 것으로 판단			
서울지하철 3, 4호선구 간 관리기준 ⁷⁾ · K ₀ : 정지토압계수		항 목		K ₀	단선구간		복선구간	
					풍화토	풍화암	풍화토	풍화암
		천단침하(mm)		0.5	6.8~38.1	2.0~6.8	8.7~43.7	4.5~16.6
				1.0	0.4~9.0	0.9~1.5	-0.6	2.5~7.2
		내공 변위 (mm)	상반	0.5	8.3~44.2	3.2~11.4	2.0~12.4	2.4~5.5
				1.0	23.5~95.2	7.8~29.1	15.5~59.0	8.1~26.1
			하반	0.5	2.9~12.3	2.1~8.4	0.5~3.9	1.7~5.9
				1.0	10.6~34.4	5.0~19.6	14.4~55.3	5.2~18.6
일본 토질공학회지 ¹⁰⁾ · 터널반경 5m 기준				지반분류		주의레벨 수준		
				I		II		III
		경압		0.3~0.5		1.0~1.5		3~4
		연압		0.5~1		1.5~4		4~11
		풍화암		1~3		4~9.5		11~27

상기 조사결과에서 나타내고 있는 바와 같이 국내외 계측관리 기준치들은 나라마다, 터널시공현장마다 서로 상이함을 알 수 있으며, 지반의 분류에 있어서도 통일된 기준이 제시되어 있지 못한 것을 알 수 있다.

2.3 현장계측 기법의 문제점

2.3.1 국내 지보재 계측의 문제점

국내에서 가장 활발히 이용되고 있는 터널 공법은 슙크리트와 강지보를 1차 지보재로 이용하고 이차로 콘크리트를 현장에서 타설하게 된다. 현재 국내에서는 지보재에 작용하는 하중 및 응력을 측정하기 위해서 주로 슙크리트에 응력계를 설치하는 방법이 가장 널리 수행되고 있다.

슙크리트에 가해지는 응력은, 실내시험을 통해 얻어지는 슙크리트의 응력-변형률 관계를 바탕으로, 측정된 변형률을 응력으로 환산하여 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 몇 가지 큰 문제점을 가지고 있다. 첫째는 터널에 슙크리트를 타설한 후 슙크리트의 건조·수축에 의한 변형률과 온도변화에 의한 변형률 등과 같이 지반하중과 관계없는 변형률을 지반 응력에 의한 슙크리트 변형과 구분하기 어렵다는 것이다. 둘째는 슙크리트의 탄성계수가 시간에 따라 변하므로 현장에서 측정된 변형률을 응력으로 환산할 때 사용될 슙크리트 탄성계수 값의 결정이 어렵다. 그러므로 국내 터널의 주지보재 계측값은 지반 응력에 의한 절대적인 터널 하중값을 제시해 주지는 못하고 슙크리트 타설 이후 시간이 경과함에 따른 슙크리트 라이닝의 상대적인 변위량만을 나타내주고 있는 실정이다. 박동순 등(2003)의 국내 ○○댐 도수로터널에서의 연구결과에 의하면 콘크리트 라이닝의 건조·수축 및 온도변화에 따라 발생한 변형률은 약 $+50 \mu\epsilon$ 이었으며 이는 약 11kg/cm^2 의 응력에 해당되므로 무시할 수 없는 정도이다.

국내에서 사용되는 슙크리트 응력계는 슙크리트 터널 라이닝의 반경방향응력과 접선응력을 함께 계측할 수 있도록 설계되어 있다. 이러한 슙크리트 응력계중 일부는 터널 내의 응력을 정확하게 측정하고 편심 방향의 압력에 따른 오차를 줄이기 위해 알루미늄으로 만든 육면체통 내에 내장하여 응력값을 얻도록 설계 되어 있다. 그러나 알루미늄통의 강성이 너무 큰 경우에는 응력집중현상이 발생하여 지반응력이 실제보다 더 크게 계측되는 경우가 있으므로 주의해야 한다. 이에 대한 연구는 본 사업단의 연구를 통하여 해결해야 할 과제이다.

강지보에 계측기를 설치하여 지반하중을 측정하는 경우에는 지반과 강지보의 접촉이 양호하도록 특별한 주의를 기울여야 한다.

기술외적인 문제로서 국내 터널 계측은 소규모의 계측회사들이 난립해 있는 실정이며 저가경쟁으로 인하여 신뢰성 있는 계측값을 얻기 어려운 실정이므로 이에 대한 개선이 절실히 필요한 실정이다.

2.3.2 선행변위 계측의 문제점

현재 국내 및 국외에서 사용되고 있는 계측기는 크게 두 가지 종류로 구분된다. 첫 번째는 수평경사계를 이용하여 휨변형을 직접 계측하여 천단침하를 계산하는 방법이고, 두 번째는 변형을 게이지를 이용하여 변형률을 측정하고 계산에 의하여 보강재의 변형률을 산정하는 방법이다. 따라서 본 연구에서 추구하고 있는 터널굴착에 따른 선행변위를 측정하기 위해서는 두 가지 방법이 모두 적용되어야 하며, 동시에 적용하여 측정결과와 신뢰성을 확인할 필요도 있다.

수평경사계를 이용한 측정방법은 지반 또는 강관내부에 계측기를 삽입하여 경사계에 의하여 측정되는 지반 또는 보강재의 휨변형을 측정하는 방법이다. 현재까지 밝혀진 문제점으로는 다음과 같은 점이 있다. 대부분의 제품이 외국산으로서 매우 고가이므로 현장에서 사용하기 곤란하고, 국내 생산의 경우도 많은 부품이 외국산이어서 외화유출의 단점이 있다. 또한 국내에서 현장별 가변성이 떨어져서 활용도가 극히 저조한 실정이다. 그리고 굴착에 따른 진동 및 먼지 등에 대한 내구성이 떨어져 실제 계측 개시 후 망실되는 비율이 높은 실정이다. 또한, 터널계측은 정밀도 0.1 mm 단위가 요구되는 고정밀 계측임에도 국내 조립품의 경우 그 정밀도가 기준에 미치지 못하는 경우도 있다. 또한 현장에서 시공하기가 매우 복잡하고 긴 시간을 요하므로 터널 굴착 사이클을 지연시키는 단점을 가지고 있다. 계측기법은 각 회사별로 서로 다른 기준을 가지고 시공하거나, 시공매뉴얼이 없어 계측당시의 담당자에 따라 시공방법이 서로 달라 계측결과와 신뢰성을 저해하고 있다.

막장전방 계측을 위한 기기 개발을 위하여 다음과 같은 점이 필요하다. 수평경사계 형태의 계측기를 국산화하여 단가를 현재보다 현저히 낮추는 것이 절대적으로 필요하다. 새롭게 개발될 계측기는 터널현장의 열악한 시공환경에서도 장기간 작동이 가능하고, 반복사용이 가능하도록 고내구성이어야 하며, 그 정밀도도 터널계측의 기준을 만족하는 범위를 갖추어야 한다. 또한 시공성도 간편하면서도 표준화함으로써 현장 기술자들이 손쉽게 수행할 수 있도록 해야 한다. 시공방법을 표준화하여 현장 계측결과와 신뢰성을 제고하고, 현장에서 사용가능한 매뉴얼을 제작하여

배포할 필요가 있다. 그리고 보강재 내부는 물론 지반자체에 직접 천공 후 시공이 가능하도록 설계될 필요가 있다.

2.3 [한계변형률] 개념을 이용한 시공관리

일반적으로 터널시공현장에서 가장 신속하게 지반의 정보를 얻을 수 있는 것은 막장관찰이며, 지반이 굴착된 후 타설된 현 지보상태에서의 굴착터널의 안정성을 가장 신속하게 판단할 수 있는 방법은 변위계측과를 활용하는 것이다. 그러나, 변위계측 결과에 의한 시공관리 및 터널의 안정성판단에 대해서는 그 활용성 측면에서 다소 부정적인 의견도 존재한다. 그 원인으로는 첫째, 변위계측치가 굴착에 의한 절대변위 개념이 아닌 상대변위개념이라는 점. 둘째, 계측기를 설치하기 이전에 이미 지반굴착으로 인해 선행변위가 발생한 상태이고, 셋째, 지보재의 타설 시기, 타설량, 계측기 설치시기, 설치 위치 등 시공현장의 다양한 요인에 의해 계측변위가 크게 달라진다는 점 등을 들 수 있다.

상기에서 지적한 세 가지 원인에 대한 구체적인 대응방안은 다음과 같이 제시될 수 있다.

- ▶ 변위계측치의 절대치 개념 : 터널시공현장에서는 현재의 계측기술로도 충분히 절대변위를 구할 수 있다. 다만, 이를 위해서는 계측을 실시하는 지점과 멀리 떨어진 지점에 기준점을 설치하고, 계측대상지점에서 계측을 실시할 때에, 그 기준점을 동시에 계측하여야 하기 때문에 다소 번거로운 점이 있다. 본 연구에서는 디지털 사진측량기법을 새롭게 도입함으로써 계측대상지점 및 기준점의 계측을 비교적 쉽고 신속하게 하기 위한 연구를 수행할 것이다.
- ▶ 계측기 설치 이전의 선행변위 : 시공현장에서는 굴착 후 막장으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 후에 지보재를 타설한 지점에서 내공편 등에 의해 변위값을 읽기 때문에 계측기 설치 이전에 발생한 변위 즉, 선행변위를 놓쳐 버리게 된다. 이러한 선행변위를 파악하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔으나, 아직까지 국내에서는 실제의 계측데이터를 이용하여 비교한 사례는 많지 않으며 대부분 이론식, 수치해석 등을 이용하여 추정하기만 하는 정도에 머물러 왔다. 본 연구

에서는 다양한 계측기기/기법을 개발함과 동시에 터널시공현장에서 실증적으로 선행변위 계측을 실시하여 그 결과를 토대로 선행변위를 추정하여 신뢰성을 높이고 동시에 실무 활용을 극대화시킬 것이다.

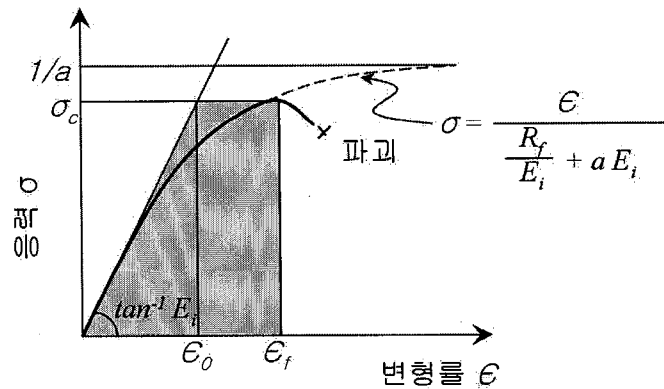
- ▶ 시공현장의 다양한 요인에 의한 변화 : 터널굴착 현장은 지반의 상태에 따라 굴착방법, 지보재의 타설 시기, 타설량, 계측기 설치시기, 설치 위치 등의 다양한 요인에 의해 계측변위가 달라진다. 그러나 이 중에서 지반의 굴착방법과 지보재의 영향은 결과적으로는 계측변위 자체에 영향을 미치기 때문에, 계측되는 변위 값속에 그 영향이 포함되어 있다고 볼 수 있다. 한편, 계측기의 설치위치 및 설치시기에 대해서 국내에서 적용 가능한 뚜렷한 지침을 제시하고 계측된 결과를 분석할 수 있는 기술개발을 유도함으로써 변위계측결과의 활용성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- ▶ 본 연구에서는 이러한 점들에 대한 기술개발을 유도함으로써, 시공현장에서 중요성과 활용성이 아직까지 미비한 계측결과를 활용하여 시공현장에서 신속하게 평가하여 대처할 수 있는 feedback 기술개발을 수행하고자한다.
- ▶ 해외에서는, 터널시공 관리 및 안정성 판정수단으로서 현장계측결과를 역학적으로 평가해, 시공으로의 피드백을 실현하는 방법 중에서, 굴착지반에서 계측된 변위를 변형률로 환산하여 평가하는 [변형률]개념의 평가방법이 있다.
- ▶ 이 중에서 대표적인 사례로 S. Sakurai(1982)는 변형률을 이용하여 지반의 안정성을 판정하는 수단으로서 한계변형률 이론을 제안하였으며, 이를 터널시공현장으로 확장하여 그 활용성에 대한 검증을 실시하였다(S. Sakurai, 1997).
- ▶ Hoek(1998), Hoek(2000), Hoek and Marinos(2000)는 터널의 초기설계지침으로서 지중응력에 대한 암반강도의 비와 터널의 직경에 대한 해석변위의 비를 변형률로 환산하여 실무에 적용하고 있다. 터널에서 발생하는 변형률 개념이 포함된 관계를 이용하여 팽창성지반의 문제성 여부를 판정하는 도표(생략함) 및 지보압(support pressure)을 이용하여 지보를 설계할 수 있는 도표(생략함)를 각각 제시하였다.

2.4 한계변형률 개념과 현장 적용성

2.4.1 한계변형률 개념

한계변형률(Critical strain) 개념은 앞에서 언급한 바와 같이 일본의 S. Sakurai(1982)에 의하여 처음으로 제안되었으며, 초기에는 주로 암석의 실내실험 결과를 토대로 정립된 개념이다. 한계변형률(ϵ_0)은 그림 2와 같은 무결암 암석시편(intact rock specimen)의 일축압축시험결과인 응력-변형률 관계로부터 쉽게 이해할 수 있는 개념이다. 즉 한계변형률(ϵ_0)은 암석시료의 일축압축시험으로부터 초기탄성 영역의 거동특성과 파괴시의 일축강도를 이용하여 계산되는 변형률(strain)로서 일반적으로 파괴변형률(ϵ_f)보다 작은 값이며, 식 (1)과 같이 표현된다(그림 2).

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E_i} \quad (1)$$



〈그림 2〉 무결암 암석시편의 응력-변형률선도

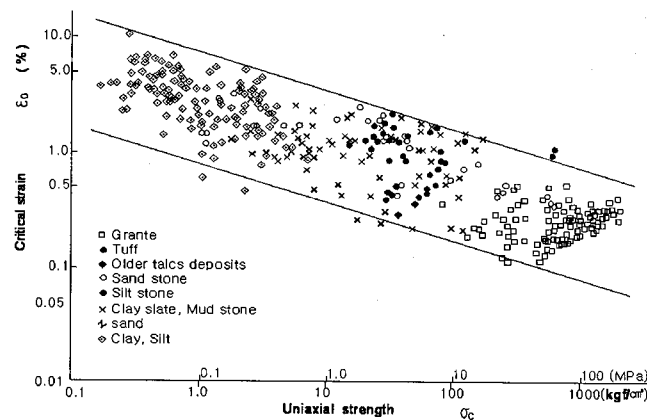
또한, 이때 암석의 파괴변형률(ϵ_f)은 한계변형률(ϵ_0)을 이용하여 식 (2)와 같이 계산될 수 있다.

$$\epsilon_f = \frac{\sigma_c / E_i}{1 - R_f} = \frac{\epsilon_0}{1 - R_f} \quad (2)$$

여기서 R_f 는 파괴강도에 관련된 상수이다.

흙 및 암석에 대한 한계변형률(ϵ_0)과 일축압축강도(σ_c)의 관계는 그림 2.9와 같다. 그림 3에서 나타낸 바와 같이 한계변형률은 일축압축강도가 증가할수록 감소하는

경향을 나타낸다. 일반적으로 암석의 경우에 대한 한계변형률의 범위는 0.1~1.0%이고, 토사(주로 점성토)의 경우에 대한 한계변형률의 일반적 범위는 1~8%로서 암석에 비하여 약 10배가량 큰 범위를 보인다. 또한 그림 2.9에서는 일축압축강도가 0.05MPa인 토사에서 200MPa인 경암에 이르기까지 일정한 경향을 보이며 그 분산 폭도 강도의 크게 영향 받지 않고, 일정한 범위 내에서 연속적으로 변화하는 특징을 가지고 있다(S. Sakurai, 1982). S. Sakurai(1982)는 토사와 암석의 R_f 는 대체적으로 0.05~0.8의 범위이며 일축압축강도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 여기서 암석의 R_f 범위는 0.05~0.6이며, 토사의 경우에는 0.2~0.8로 조사되었다. 이 값을 이용하여 암석과 토사에 대한 파괴변형률을 식 2.2를 이용하여 계산하면 각각 0.1~2.5%, 1.3~40%로 계산되며 파괴변형률이 한계변형률보다 최대 2.5~4.0배 정도 더 큰 것을 알 수 있다.



〈그림 3〉 실내시험에 의한 한계변형률과 일축압축강도와의 관계(S. Sakurai, 1982)

2.4.2 한계변형률 개념의 현장 적용성

한계변형률은 그 정의에서 알 수 있는 바와 같이, 지반이 가지고 있는 역학적 특성 중에서 무엇보다도 중요하다고 판단되는 지반강도와 변형계수에 의해 결정된다. 따라서 한계변형률 개념을 터널굴착현장에서 변위관리 기준으로 활용할 수 있다면 지반에 대해 통일적인 관리기준을 설정할 수 있는 계기를 마련해 줄 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 한계변형률 개념을 터널시공현장 실무에서 활용하기 위해서는 먼저 다음 표와 같은 세부사항에 대해 명확한 해결방안을 제시하여야 하며 동시에 현장에서의 활용성을 확보할 수 있어야 한다.

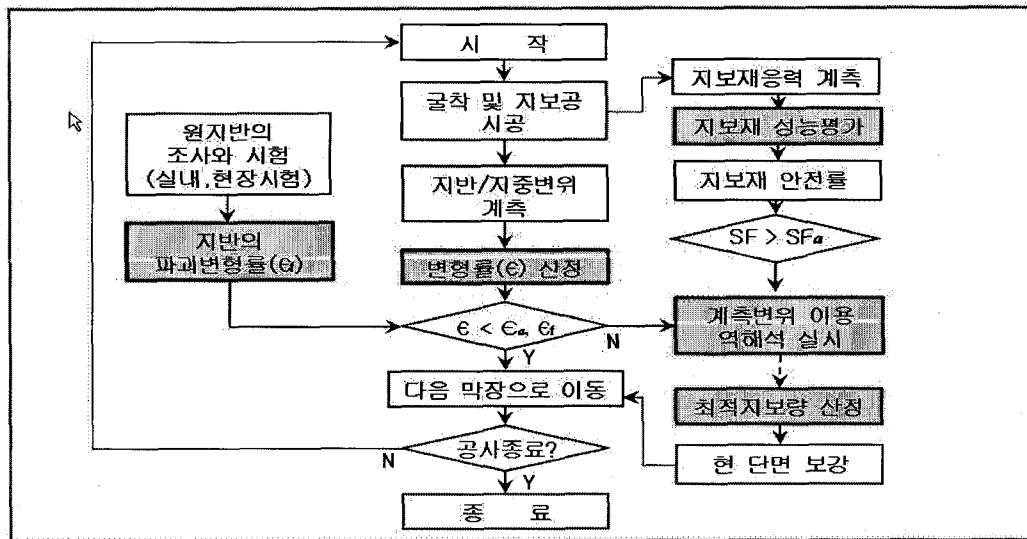
〈표 3〉 한계변형률 개념을 위한 선결조건

순번	한계변형률 개념을 위한 선결조건
1	● [변형률] 개념을 터널시공현장에 대응시키는 방법
2	● [Rock Mass]에서 한계변형률 산정 방법
3	● 실내의 [일축압축실험]의 응력조건과 현장의 [삼축응력상태]
4	● [상대변위]와 [절대변위]의 구분
5	● [상대변위] 계측현실에서 [절대변위]로의 접근방법
6	● [계측변위]와 [총변위]와의 관계
7	● [계측변위]의 활용방법
8	● 현장실무 측면에서의 계측지침
9	● 토사지반이 아닌 암반지반에서의 적용 및 활용방안
10	● 계측변위(변형률)가 한계변위(변형률)를 초과하는 경우의 대처방안

본 연구에서는 굴착터널 안정성 평가기술의 안정성 해석모델을 한계변형률 개념을 도입하여 개발하고자 한다. 따라서 상기에서 언급한 선결조건들은 안정성 평가기술의 핵심 요소기술에 해당하는 것들이며, 당해연도 연구에는 한계변형률 개념을 활용하기 위한 선결조건들에 대한 해결방안을 제시하고 이에 대한 현장 활용성을 높이기 위한 기반기술을 조성하였다. 이하에서는 상기의 선결조건들에 대해 항목별로 수행한 연구 결과다.

2.5 한계변형률 개념을 활용한 굴착터널안정성 평가기술 구상도

터널 굴착이 진행중인 터널 시공현장에서 신속하게 터널의 안정성을 정량적으로 판단하기 위해서는 현장계측결과 중에서도 일상적으로 실시하는 A 계측결과를 활용하는 것이 매우 합리적인 것으로 판단된다. 이를 위해서는 변위계측결과를 지반의 특성에 따라 통일적으로 관리할 수 있는 계측관리 지침을 수립할 필요가 있다. 현장에서 얻어지는 천단변위 및 내공변위는 터널을 굴착하는 대상지반 및 계측시점에서 타설된 지보재와의 상호 거동에 의해 나타나는 값이기 때문에 이에 대한 정량적 평가를 수행함으로써 굴착터널에 대한 안정성 평가가 충분히 가능할 것으로 기대된다. 그림 4는 본 연구에서 구축하고자 하는 굴착터널 안정성 평가 기술의 전체적인 구상도를 나타내고 있다.

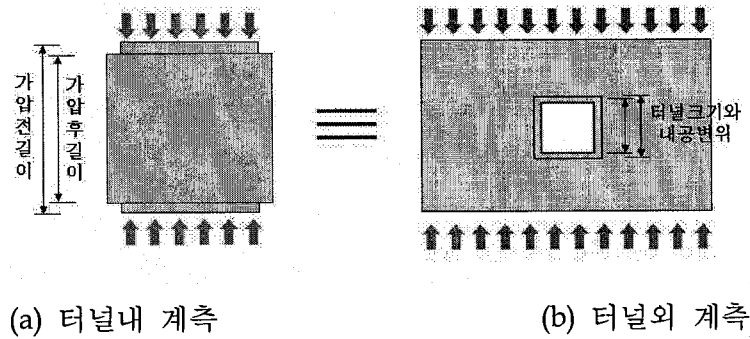


〈그림 4〉 굴착터널 안정성 평가의 절차 및 구상도

3. 굴착터널 안정성 평가의 핵심 요소기술 연구

3.1 [변형률]개념을 터널시공현장에 대응시키는 방법 연구

한계변형률 개념을 터널시공현장에 활용하기 위해서는 먼저 변형률 개념을 현장 실무에 활용하기 위한 방안이 필요하다. 즉, 계측에 의해 얻어지는 변위값을 변형률 값으로 변환하여야 한다. 변형률은 정해진 일정 길이와 변화된 길이의 비로 결정되며, 터널시공현장에서는 다음과 같은 두가지 방법으로 평가가 가능하다. 터널 계측 중에서 B계측에 해당하는 지중변위를 계측하게 되면 두 계측점의 데이터를 이용하여 변형률이 산정된다. 또 한 가지 방법은 일반적인 변형률 산정법의 응용방법으로서, 지반내부에서 굴착에 의해 단면을 형성하게 되면, 지반이 원래받고 있던 지중응력에 의해 단면의 변화가 발생된다. 터널에서는 굴착단면의 크기와 내공변위의 비로서 변형률 값을 구할 수 있게 되며, 실무적인 측면에서는 천단변위, 내공변위를 계측하여 터널의 크기 또는 직경과 비교하면 된다(그림 5).

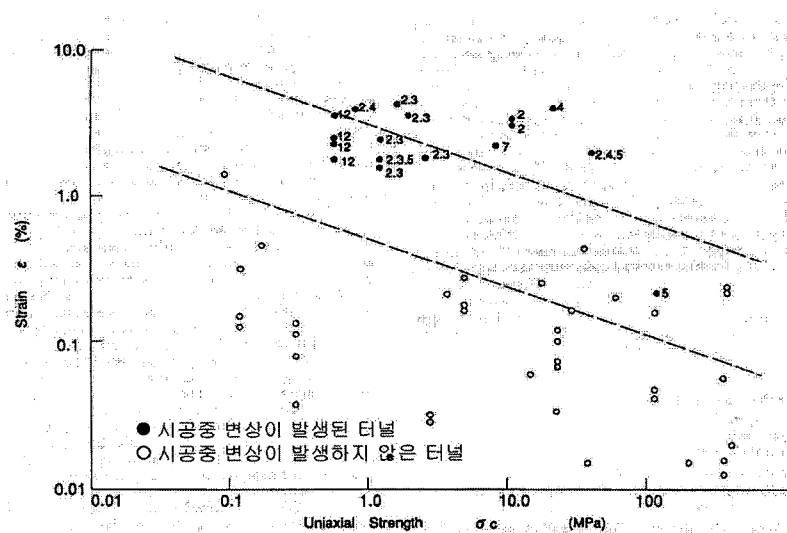


<그림 5> 내공변위 평가법

3.2 [변형률]개념을 활용한 기존 연구사례 연구

S. Sakurai(1997)는 실내실험결과에 의해 한계변형률 개념을 정립한 이후 다시 그 결과를 터널현장으로 활용을 시도하였다.

그림 6에서는 굴착으로 인하여 발생하는 천단변위를 터널반경으로 나누어 그 값을 종축의 변형률로 설정하고, 천단변위를 측정한 지점에서의 일축압축강도를 횡축으로 하여 각각 표시한 것이다.



<그림 6> 천단침하에 의한 변형률 개념의 평가 사례(S. Sakurai, 1997)

이 그림에는 터널시공 도중에 변상이 발생한 경우와 변상이 발생하지 않은 경우의 계측값들이 함께 표시되어 있다. 또한, 변상이 발생한 경우에 대해서는 검은색

으로 표시하였으며, 이 때 숫자도 함께 표시하였는데, 각각의 숫자가 의미하는 것은 다음 표 4의 내용과 같다. 그림 가운데 표시된 두개의 파선은 일축압축시험에 의해 구해 한계변형률 실험 결과(그림 6)를 그대로 나타낸 것이다.

<표 4> 터널에 발생한 변상구분

번호	변상 구분	번호	변상구분
1	터널막장에서의 붕괴	2	숏크리트의 균열 등
3	강지보공의 좌굴	4	록볼트의 파단
5	천단의 붕락	6	인버트 변상
7	그 밖의 경미한 변상	8	

상기의 연구결과에서는 일축압축강도가 매우 넓은 범위에 걸쳐 조사된 것을 알 수 있으며, 터널시공현장에서 변상이 발생한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 계측값의 분포가 뚜렷이 구분되는 것을 알 수 있다. 특히, 한계변형률 개념에서 구한 하한경계치의 아래에서는 시공 중 아무런 변상이 발생하지 않은 것을 쉽게 판단할 수 있다. 그 반면에 한계변형률의 상한경계치에 근접할수록 터널시공도중에 다양한 변상이 발생하여 터널의 안정성에 문제점이 있는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 한계변형률의 특성을 잘 보여주는 사례로서 현장에서 측정되는 A 계측의 하나인 천단변위를 이용하여 터널 안정성을 평가하는 것이 어느 정도 가능하다는 것을 의미하고 있다. 그러나 여기서 주의할 것은, 현장에서 계측하는 내공변위 및 천단변위 값들은 계측기를 설치하는 시점, 계측기와 막장면과의 떨어진 거리뿐만이 아니라 지보재의 타설시기, 타설시간, 타설량 등의 다양한 요인에 의해 영향받아 큰 차이를 나타내게 된다는 점이다. 아울러, 계측된 변위는 계측기 설치전에 발생하는 선행변위를 포함하고 있지 않으며 지반의 불연속성 등의 영향을 일축압축시험에 의한 강도만으로 평가하기에는 많은 한계가 있다는 점이다.

3.3 [Rock Mass]에서 한계변형률을 산정 방법 연구

암석 및 토사시료에 대하여 실내시험을 통해 산정된 한계변형률 개념을 실제 터널이 굴착되는 원지반으로 활용하기 위해서는 [Intact Rock]에 대한 실험결과를 각

중 불연속면이 존재하는 [Rock Mass]로 대응시킬 수 있어야 한다. 대상지반이 토사만으로 구성되었다면, 실내시험결과로부터 추정된 한계변형률은 현장의 토사지반에 대한 한계변형률과는 큰 차이가 발생하지 않을 것으로 추정할 수 있으나, 암반지반의 경우에는 크기효과, 불연속면 등으로 인하여 큰 차이가 발생할 수 있다.

여기에서는 [Rock Mass]의 원지반에서 한계변형률을 산정하는 방법에 대해서 논하기로 한다. 실내시험에 의한 [Intact Rock]과 원위치 암반지반의 [Rock Mass]에 대한 한계변형률은 각각 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\text{Intact Rock } \epsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_i} \quad (3)$$

$$\text{Rock Mass } \epsilon_R = \frac{\sigma_R}{E_R} \quad (4)$$

상기 식을 서로 조합하여 아래 식과 같이 정리하면, 암반지반에서의 한계변형률을 실내시험에 의한 값으로 표기가 가능한 것을 알 수 있다.

$$\epsilon_R = \frac{\sigma_R}{E_R} = \frac{m\sigma_i}{nE_i} = \left(\frac{m}{n}\right)\epsilon_i \quad (5)$$

그러나 여기서 암반지반에 대한 탄성계수와 일축상태에서의 압축강도를 어떻게 구하는가 하는 것이 문제로 제기된다. 이들 각각에 대한 산정방법은 다음과 같이 정리할 수 있다. 원위치 암반지반에 대한 탄성계수(E_R)는 평판재하시험과 같은 재하시험을 실시함으로써 산정할 수 있다. 반경 r 인 재하판을 이용하여 재하시험을 실시하면, 그림 2.14와 같은 하중-변위관계 곡선을 얻을 수 있으며 이를 이용하여 암반지반의 탄성계수(E_R)를 산정할 수 있다.

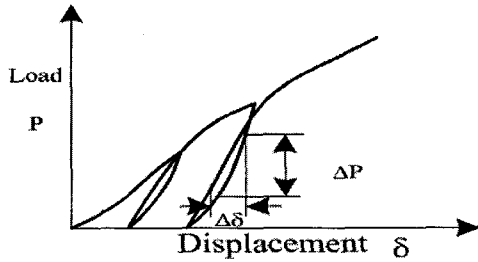
$$E_R = \frac{1-\nu^2}{2r} \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \quad (6)$$

여기서, ν 는 암반의 포아송비를 나타낸다.

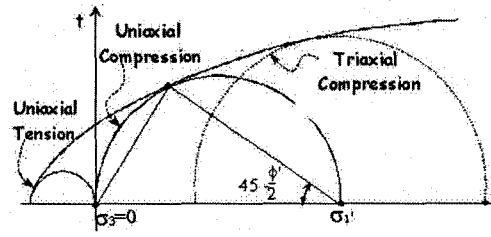
원위치 암반지반의 일축상태에서의 압축강도를 구하기 위해서는 먼저 현장전단시험 등을 실시하여 암반지반의 파괴포락선을 결정하여야 한다. 파괴포락선이 설정되면, 구속압이 “0” 이고 파괴포락선에 접하는 Mohr원을 그릴 수 있는데 이때의 최대주응력이 곧 일축상태에서의 압축강도를 의미하게 된다. Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 활용하여 암반의 강도정수(c_R, ϕ_R)를 이용하면 암반지반의 일축압축강도

(σ_{cR})를 다음과 같이 산정할 수 있다(그림 2.15).

$$\sigma_R = \frac{2c_R \cos \phi_R}{1 - \sin \phi_R} \quad (7)$$



<그림 7> 재하시험을 통한 탄성계수 <그림 8> 원위치 전단시험에 의한 일축압축 강도의 추정



식 (5)에서 나타낸 바와 같이 intact rock과 rock mass에 대한 강도 및 변형계수에 대한 상관관계를 미리 파악해 둘 수 있다면, 터널이 굴착되는 원지반에서 채취한 intact rock에 대한 한계변형률만으로도 원지반의 rock mass에 대한 한계변형률을 추정할 수 있으며 이로서 원지반에 굴착되는 터널에 대해서 한계변형률 개념을 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

<표 5> 암석과 암반의 한계변형률 비교(S. Sakurai, 2002)

암종 (암질) ¹⁾	암석(Intact rock)			암반(rock masses)			$\frac{\epsilon_{0R}}{\epsilon_R}$
	σ_c (MPa)	E_i (GPa)	ϵ_0 (%)	σ_{cR} (MPa)	E_R (GPa)	ϵ_{0R} (%)	
화강암(CH)	227.4	62.7	0.362	16.70	2.65	0.631	1.74
화강암(CM)	211.5	59.8	0.534	11.60	1.96	0.592	1.67
화강암(CL)	141.8	47.1	0.301	6.39	1.37	0.466	1.54
섬록암(CH)	145.2	37.3	0.389	16.70	2.65	0.631	1.62
섬록암(CM)	153.5	38.2	0.402	11.60	1.96	0.592	1.47
화강암(D)	130.2	47.5	0.274	20.97	8.60	0.244	0.89
화강암(CH)	117.6	44.3	0.265	14.31	2.98	0.480	1.81
화강암(CM)	44.7	23.7	0.189	6.99	1.21	0.578	3.06
사암	137.2	28.4	0.483	6.27	0.381	1.642	3.43
혈암	78.4	21.6	0.364	3.82	0.411	0.930	2.57
사암	137.8	54.1	0.255	7.89	1.96	0.403	1.57
사암	22.9	10.1	0.227	7.49	1.08	0.231	1.01
혈암	61.1	57.2	0.107	7.81	2.25	0.347	3.26

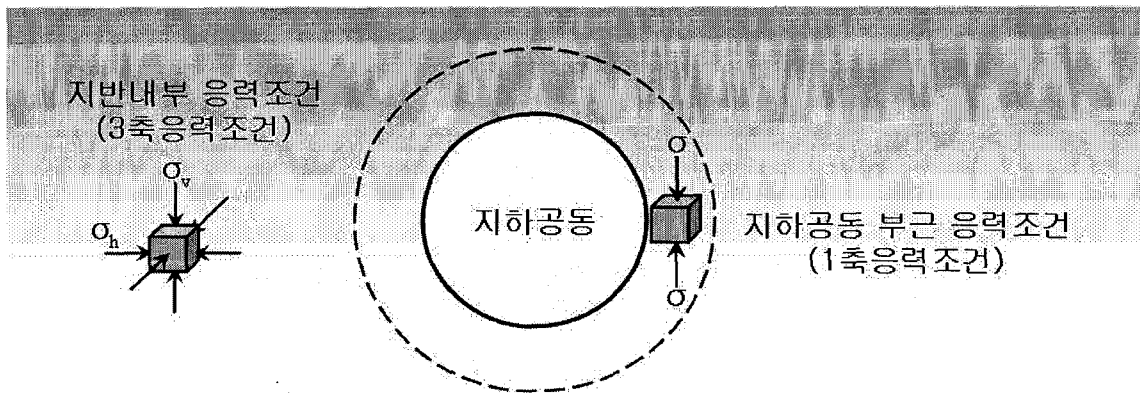
¹⁾ 암질(rock class): 일본 지질공학출판위원회(CRIEPI, 1992)에서 제안된 암반분류임.

암질	정의	절리간격 (cm)
CH	암반이 비교적 견고	> 100
CM	암반이 다소 연약	50~100
CL	암반이 연약	10~50
D	암반이 상당히 연약	-

Sakurai(2002)는 한계변형률에 대한 후속연구를 수행하여 암종과 암질(rock type & rock class)에 따라서 암석과 암반에 대한 한계변형률을 표 5와 같이 비교하였다. 비교결과에서 나타난 바와 같이 암석의 한계변형률에 대한 암반의 한계변형률의 비는 대체적으로 1~3의 범위를 나타내고 있다. 이 사실로부터 암반의 한계변형률은 암석의 한계변형률과 거의 같거나 약간 큰 값을 갖는다는 사실을 알 수 있다. 이는 암반의 일축강도와 탄성계수가 절리의 영향으로 인해 그 각각의 값이 저하하지만, 일축강도보다 탄성계수의 저하가 상대적으로 더 큰 것을 의미하고 있다. 또한 암석의 한계변형률과 암반의 한계변형률이 거의 같은 값을 보이는 것은 한계변형률은 지반재료 자체가 가지고 있는 재료고유의 값을 의미하고 있는 가능성이 크다. 이러한 사실로부터 보수적인 시공관리 측면에서는 암석의 한계변형률을 암반의 한계변형률로 활용함에 있어서 타당한 근거를 제시하는 것으로 볼 수 있다. 또한 한계변형률 개념은 습기나 온도 등의 환경적인 영향을 크게 받지 않는다.

3.4 실내의 [일축압축실험]의 응력조건과 현장의 [삼축응력상태]

종래의 터널역학에서는, 터널굴착을 위해 지중에서 지반굴착을 실시하고 지보재가 설치되기 이전 상태에서의 굴착면을 일축응력상태로 가정하고 있다. 굴착전 삼축응력상태에 놓여있던 원지반이 터널 굴착에 의해 굴착면의 응력이 제거된다고 하더라도 터널의 종방향으로는 여전히 지반에 의한 구속력이 작용하고 있으며 또한 굴착후 곧바로 타설된 스킨크리트와 같은 지보재의 반력으로 인해 지반은 다시 구속을 받고 있음을 쉽게 이해할 수 있다(그림 9). 따라서 지보재의 역할에 따라 삼축응력 상태 또는 이축~삼축응력 상태에 놓여 있는 것으로 추정할 수 있으며, 이에 대한 역학적 특성을 규명해 둘 필요가 있다. 이하 구체적인 내용은 생략하기로 한다.

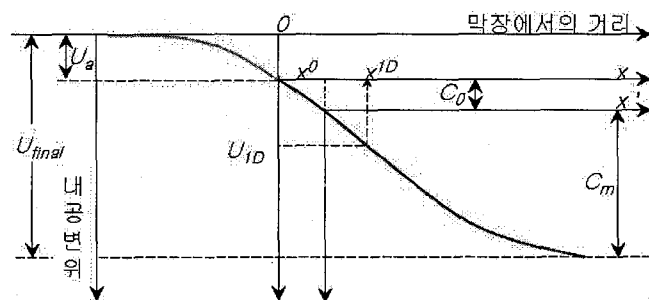


〈그림 9〉 지반내부 및 지하공동 부근에서의 응력조건의 차이

3.5 [상대변위], [절대변위], [계측변위] 및 그 활용성 연구

변위 및 변형을 개념을 활용하기 위해서는 먼저 터널굴착에 따른 변위발생의 특징을 명확히 구분하여야 한다. 특히, 한계변형을 개념을 활용하기 위해서는 상대변위, 절대변위에 대한 개념 구분 및 실제 현장에서 계측되는 계측변위를 구체적으로 어떻게 활용할 것인가에 대한 명확한 지침을 수립할 필요가 있다. 일반적으로 터널을 굴착하게 되면 지반의 응력조건이 변화하게 되며, 이러한 터널 주변지반의 응력이력의 가시적인 결과로서 터널에는 변형이 발생하게 된다. 터널의 변형은 오직 계측을 통하여만 그 양을 측정할 수 있다.

터널에 발생하는 변위의 발생경향은 Panet(1982)에 의하여 그림 10과 같이 제시하였으며 터널에 발생하는 전체변위는 식 (8)과 같이 표현된다.



〈그림 10〉 터널 굴착에 따른 지반변위(Panet, 1982)

$$U_{final} = U_a + C_0 + C_m \quad (8)$$

여기서 U_{final} : 총변위

U_a : 굴착전 발생변위

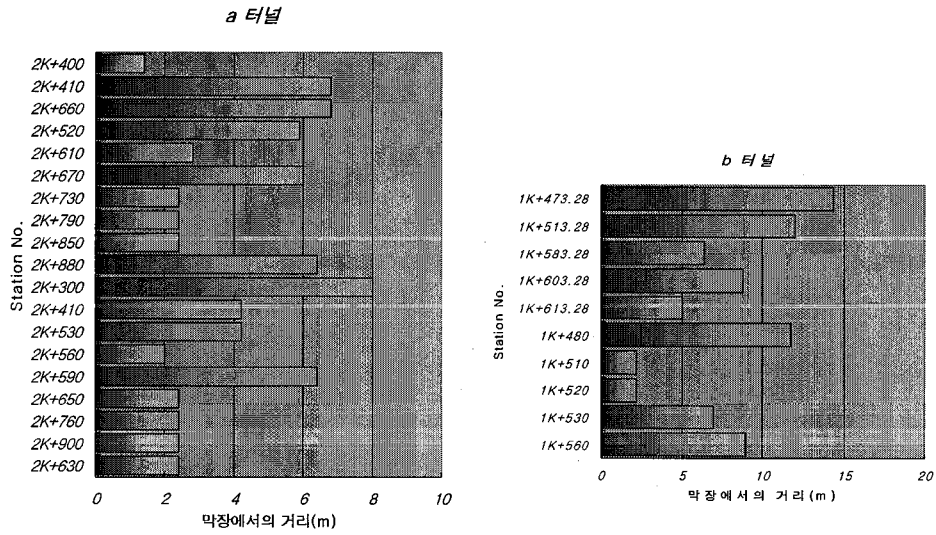
C_0 : 계측전 선행변위

C_m : 계측변위

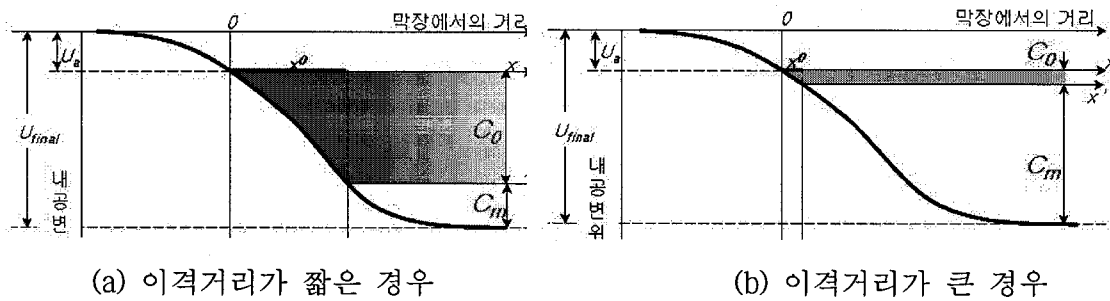
즉 전체변위는 막장 전방에 발생하는 변위(U_a), 계측전에 발생하는 선행변위(C_0) 및 계측변위(C_m)으로 구성된다. 여기서 주목할 사항은 현장에서 실측되는 계측변위(C_m)는 전체발생 변위중에서 일부분에 해당할 뿐이라는 것이다.

터널굴착에 의해 발생하는 변위에 대한 이론적, 수치해석적 연구는 국내외에서 다수 수행되었다. 그러나 국내에서는 아직까지 계측결과를 이용하여 [굴착전변위], [선행변위], [계측변위]에 대한 체계적인 연구는 수행되지 않은 상태이다. 일반적으로 계측변위는 지보재의 타설시기, 계측을 시작하는 시점, 지반의 변형특성 등에 크게 의존하며 그 값에 큰 차이가 나타난다. 아래표는 해석적인 방법으로 총변위에 대한 굴착전 변위의 연구성과를 요약한 것이다.

상기 표에서 나타난 바와 같이 굴착전 발생변위(U_a)에 대한 터널형상의 영향은 미비한 것으로 판명되었으며, 대체적으로 전체변위의 20~30%정도의 비율임을 알 수 있다. 실계측은 굴착후 일정시간(t_0)이 경과하고, 일정거리(x_0)가 진행된 다음에 시작되므로 계측전 선행변위(C_0)가 발생하게 된다. 정형식(1998)에 의하여 시행된 국내터널 현장조사에 의하면 일반적으로 막장에서 선행변위계측지점까지의 이격거리는 약 5~6m 정도로 조사되었다(그림 11). 그림 12와 같이 계측관리가 양호하여 막장에서 계측지점까지의 이격거리가 짧은 경우에는 계측전 선행변위(C_0)가 적으나, 반대로 계측관리가 불량하여 막장에서 계측지점까지의 이격거리가 큰 경우에는 계측전 선행변위(C_0)가 크게 된다.



〈그림 11〉 계측지점에서 막장까지의 이격거리 조사(정형식, 1998)



〈그림 12〉 이격거리에 따른 계측전 선행변위의 영향

계측전 선행변위와 총변위를 예측하는 기법은 여러 연구자에 의하여 수행되었으며 크게 곡선함수식에 의한 회귀분석방법과 선형회귀분석에 의한 분석방법으로 대별될 수 있다.

내공변위는 터널주위 암반의 거동특성에 의해 여러 가지 형태의 함수로 모델화되며, 이를 요약하면 표 2.15(생략함)와 같다. 실제 측정된 내공변위를 모델함수에 대해 회귀분석 함으로써 함수의 parameter를 결정할 수 있다. 그러나 이 경우, 계측전 선행변위(C_0)를 고려해야한다. 곡선함수식에 의한 회귀분석방법의 기본식은 식 (9)와 같다.

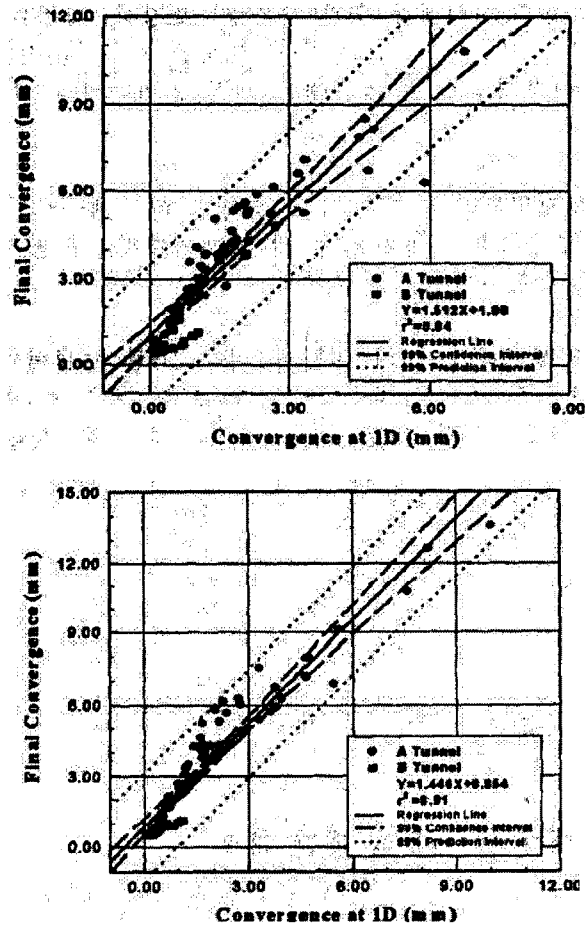
$$C_m = C(x, t) - C_0 \quad (9)$$

여기서 계측전 선행변위(C_0)도 미지수가 되어 모델함수에서 주어진 parameter와 함께 해석에 포함되어야 한다.

김호영 등(1993)은 곡선함수식에 의한 회귀분석방법을 이용하여 계측전 선행변위와 전체변위를 산정하였다. 해당 터널의 단면과 실제측결과를 각각 그림 2.20과 그림 2.21에 표시(생략함)하였다. 해당 터널이 위치하는 굴착지층의 암질계수(RMR)가 51이고, Q-value가 2.145로서 경암으로 판정되어 탄성적인 거동을 한다고 가정하고 지수함수를 적용하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석에 의하여 곡선식의 각 parameter를 결정하고 상대오차를 검토하였다. 그림 ○(그림생략)에 분석결과에 의한 변위이력곡선과 함께 실제측결과를 함께 도시하였다. 그러나 이 연구에서는 계측기 설치 후의 변위 데이터만을 활용한 것이며, 회귀분석에 의해 추정된 선행변위를 실제의 계측데이터와 비교한 것은 아니다.

굴착에 의해 발생하는 변위는 일반적으로 곡선형태를 보이게 된다. 그러나 곡선함수식에 의한 회귀분석방법을 이용하는 경우에는 최종변위량을 추정함에 있어서 일정량 이상의 계측값이 필요하기 때문에 계측결과를 이용하여 신속한 시간내에 선행변위를 예측하여 이를 굴착터널의 안정성 판정에 활용하기에는 곤란한 점이 있다. 그러나 막장에서 비교적 가깝고 짧은 구간에서는 선형적 변형특성을 보이기도 한다(鈴木健之 등, 2003). 이러한 특징을 고려하여 계측전 선행변위(C_0)를 선형 회귀분석 방법으로 추정한 사례(정형식, 1998)도 있는데, 이는 굴착개시 후 초기변위구간과 계측전 선행변위구간에서의 변위증가경향(속도)이 동일(선형)하다는 가정을 전제로 한 것이다.

정형식 등(1998)과 송승곤 등(2002)은 초기계측변위를 이용하여 총변위를 추정하기 위한 연구로 고속도로 터널 계측결과를 통계처리하여 최종변위를 막장거리 1D (여기서, D: 터널의 직경) 및 2D 변형량의 직선함수식으로 나타낸 바 있다. 그 일례로서 정형식 등(1998)이 제시한 신선한 상태의 편마암지대를 통과하는 고속도로 터널의 계측자료를 이용하여 막장거리 1D에서의 초기계측변위와 총변위에 대한 직선함수식은 그림 13와 같으며 높은 상관성을 얻었다.



(a) 지수함수를 이용한 경우

(b) 선형회기분석을 이용한 경우

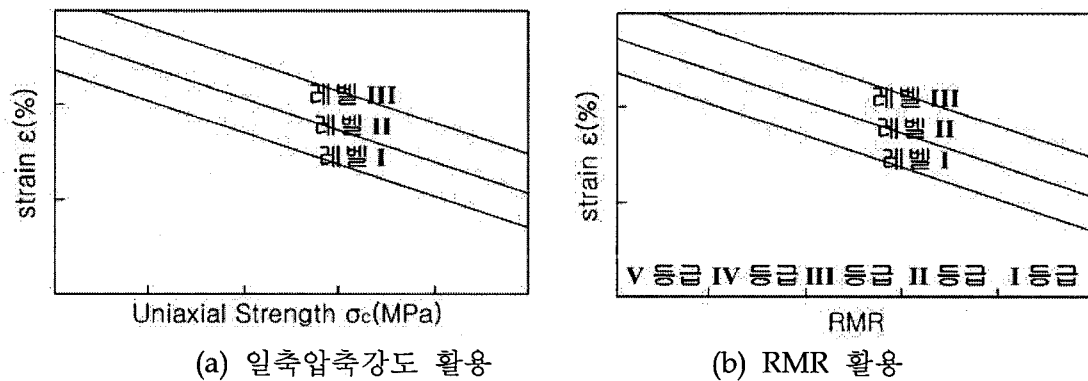
<그림 13> 초기계측변위(U_{1D})와 총변위와의 직선함수식(정형식 등, 1998)

3.6 [계측변위]의 활용방법 및 안정성 평가 기법의 제안

본 연구에서는 현장의 계측결과를 이용하여 굴착터널의 안정성 평가를 실시하여 한계변형률 개념을 도입하고자 한다. 한계변형률은 굴착에 의해 터널의 안정성을 확보하기 위한 절대변위 개념의 이론으로서, 상대변위 개념이 강하고 또한 계측방법에 따라 그 값이 서로 달라질 수 있는 계측변위를 활용하기 위해서는 [계측변위]에 대한 활용방법과 계측지침을 수립하여 현장계측실무에 적용할 필요가 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 계측의 초기단계 값들을 이용하여 선행변위를 포함한 변위량 추정방법에 대한 연구를 수행할 계획이며, 아울러 현장에서 초기 변위 데이터를 얻기 위한 계측지침에 대한 연구도 함께 수행할 계획이다.

한계변형률은 그 정의에서 알 수 있는 바와 같이, 지반이 가지고 있는 역학적 물성 중에서 무엇보다도 중요하다고 판단되는 지반강도와 변형계수에 의해 결정된다. 한계변형률 개념은 해당 지반에 대해 터널의 규모(크기)가 결정되면, 이로 인해 터널 굴착시 발생할 수 있는 변위에 대한 시공관리측면에서의 최대 허용변위를 설정할 수 있으며 이는 기존에 터널 굴착시 시공현장마다 달리 제시하는 변위관리 기준치에 대한 통일적 관리가 가능한 것으로 기대된다. 물론 터널굴착에 의해 발생하는 변위의 양상은 단순히 지반의 변형특성에 의해서만 결정되지는 않으며, 시공 상황을 반영한 다양한 요인이 함께 작용하여 그 양상이 복잡하게 나타날 것이다. 그러나 터널의 파괴시에 발생하는 파괴변형률보다 안정적인 한계변형률을 활용함으로써 시공관리 측면에서 매우 합리적이며, 아울러 특정규모의 터널을 시공함에 있어서 허용 가능한 변위량을 명확히 제시할 수 있는 것은 터널현장 실무측면에서 매우 유용한 자료가 아닐 수 없다. 또한 한계변형률 그래프에서 나타난 상, 하한 경계치를 활용함으로써 굴착중인 터널의 안정성을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 구체적으로는 상, 하한 경계치와 그 중간 경계치 등을 활용하여 터널굴착 중에 계측된 굴착변위를 주의레벨로 구분하여 활용 가능할 것으로 기대된다. 이를 위해서는 터널굴착으로 인해 발생하는 변위 특성을 명확히 할 필요가 있으며, 실내에서의 일축응력조건과 실제지반에서의 삼축응력 상태에 대한 관계 및 역학적 물성치(압축응력 및 변형계수) 설정방법 등에 대한 지침을 수립할 필요가 있다. 이와 더불어 한계변형률 그래프에 대해서도 국내지반 특성을 반영한 새로운 지침을 수립할 필요가 있다. 이를 위해서는 먼저 국내지반에서 채취한 시료를 이용하여 한계변형률 그래프를 작성할 필요가 있으며, 또한 지반의 특성을 일축압축강도로만 평가할 것이 아니라 암질계수(RMR) 분류에 의한 값 등을 한계변형률 개념에 활용함으로써 암반지반에 대해 그 적용성을 평가하여야 할 것이다.

아래 그림은 한계변형률 개념을 활용하여 굴착중인 터널에 대한 안정성 평가 기법의 일례를 도시한 것이다. 그림 14(a)은 현장에서 채취한 시편의 일축압축강도와 터널굴착면의 변위(변형률)를 활용하여 안정성을 3단계로 구분하는 평가기법의 일례이다. 또한 그림 14(b)은 막장면에서의 RMR 값을 이용하여 안정성을 평가하는 기법으로 RMR 값의 변화에 대해 연속적인 평가가 가능할 것으로 기대된다.



<그림 14> 한계변형률 개념을 활용한 안정성평가 도표

3.7 [한계변형률] 개념의 암반지반으로의 활용방안 연구

S. Sakurai에 의해 처음 제안된 한계변형률 개념은 주로 일본의 암석에 대한 일축압축실험 결과만을 활용하였으나 이는 국내 지반 및 지질조건과 상이한 결과를 나타낼 수 있다. 또한 앞서서도 언급한 바와 같이 실제 터널은 암반속에서 굴착되기 때문에 암반의 보다 다양한 특성을 반영할 필요가 있다. 현행 국내의 NATM 터널에 있어서는 지반의 등급 결정, 굴착공법 및 지보공법 변경 등을 실시함에 있어서 지표로 활용하고 있는 것은 표 ○(표생략)과 같은 절차로 산정되는 RMR 기법이 다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 일축압축강도는 RMR 산정에서의 하나의 항목일 뿐이다.

국내 터널시공현장에서 한계변형률 개념을 활용하기 위해서는 국내 암반 및 암석에 대한 실내 및 실외시험을 실시하여 한계변형률을 설정할 필요가 있다. 그리고 암반지반에서의 터널현장에서도 그 활용성을 높이기 위해서는 단순히 일축압축강도에 의해서 구분하기보다, 암반의 RMR 값을 구하고, 한계변형률과 RMR에 대한 상관관계를 검토하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

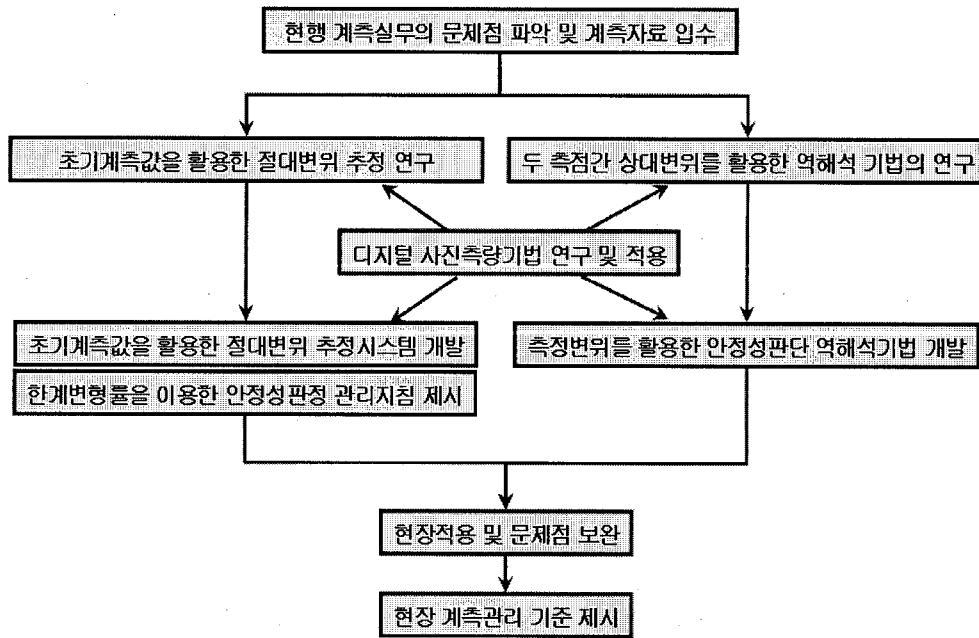
3.8 계측변위(변형률)가 한계변위(변형률)을 초과하는 경우의 대처방안

터널굴착 현장에서 계측된 변형률이 한계변형률을 초과하는 경우가 발생할 수도 있다. 이는 곧 현재의 지보상태가 불합리하거나, 부족한 경우에 발생할 수 있는 것으로 이러한 경우에는 지보재의 양을 변화시킬 필요가 있으며 이를 위해서는 현 지보상태에서의 지반의 변형특성을 새롭게 평가할 수 있는 tool이 필요하다. 이러한 feedback tool로 대표될 수 있는 것이 바로 역해석적 기법이며 본 연구에서는 역해석 기법을 새롭게 개발하여 계측결과를 신속하게 평가하고자 한다.

그림 ○(그림생략)에서와 같이 통상 역해석(Back analysis)이란 구조물에 작용하는 응력, 변형률, 변위 등을 현장에서 계측하여 그 값을 입력값으로 하여 그 구조물에 작용하는 하중, 재료의 역학적 특성 등을 구하는 해석방법으로 정의된다. 이러한 방법은 하중, 재료의 역학적 특성 등을 입력하여 응력, 변형률, 변위 등을 구하는 통상의 해석(순해석)과는 그 개념이 다르다. 그러나 역해석에서는 순해석과 달리 지반모델링의 방법에 따라 출력치가 달라지기 때문에 유일한 해를 유도해내지 못하는 한계성을 지녀왔다. 본 연구에서는 지반모델링에 대한 연구를 수행하여 기존의 역해석 기법과는 구분되는 역해석 tool을 새롭게 개발할 것이다.

3.9 굴착터널 안정성 평가 기술개발을 위한 연구진행 방향

[한계변형률] 개념을 활용하여 굴착터널의 안전성 평가를 실시하기 위해서는 터널시공현장에서 실시되고 있는 천단변위 및 내공변위 계측이 무엇보다 중요하다. 그러나, 국내에서는 아직까지 터널계측에 대한 중요성은 인지하고 있음에도 불구하고 계측을 위한 지침부재, 계측결과를 활용하기 위한 feedback 기술의 부재, 계측결과를 활용하여 터널의 안전성을 판단하기 위한 명확한 판단기준 부재, 간편하면서도 높은 신뢰성을 가지는 천단 계측기법의 부재 등의 원인으로 인해 터널계측에 대한 현장실무에서의 인식이 높지 않다. 본 연구에서는 이러한 터널계측의 신뢰성, 중요성, 활용성을 높이기 위한 연구를 지속적으로 수행할 것이며 터널계측을 실무에서 구체적으로 활용하기 위한 다양한 성과를 유도해 나갈 것이다. 향후 터널계측과 관련된 연구 진행 절차를 그림 15에 도시하였다.



〈그림 15〉 현장계측관련 연구진행 절차

현장에서 즉각적인 안정성 판정을 위해서는 신속하고도 정밀한 계측이 필수적이라고 할 수 있는데, 현행 터널변위 계측 시에는 내공변위계 또는 토털스테이션 등을 이용하고 있다. 내공변위계의 경우에는 절대변위 계측이 불가능하며, 토털스테이션을 이용하는 경우에는 기준점 설정 및 측정에 시간이 많이 소요되며 기술자의 능력에 따라 측정값에 큰 편차가 있을 수 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 디지털 사진측량기법을 새롭게 도입하여 터널의 천단침하 및 내공변위를 더욱 더 정밀하고 신속하게 측정할 수 있는 기법을 제시함으로써 사진측량 결과를 활용하여 굴착터널의 안정성 평가를 신속하게 수행해 나갈 것이다. 그림 ○(그림생략)에 디지털 사진측량을 이용한 절차를 도시하였다. 즉 터널의 스크리트면에 설치한 타겟을 일반 사진기로 측정하고 측정된 사진을 사진해독 프로그램을 통하여 타겟의 절대 위치를 좌표화하며 시간경과에 따른 측정을 하여 변위이력을 추정할 수 있다.

제3세부과제

고효율의 급속시공을 위한 신개념 굴착공법 개발

1. 개요

제3세부과제는 장대화되는 터널 건설 기술력을 확보하기 위하여 급속시공이 가능한 새로운 개념의 굴착공법을 개발·확립하여, 터널굴착 기술과 공정 개선을 통한 급속시공이란 목표를 달성하고, 시공과정에서의 공기단축과 비용절감을 도모하고자 하는데 목적이 있다.

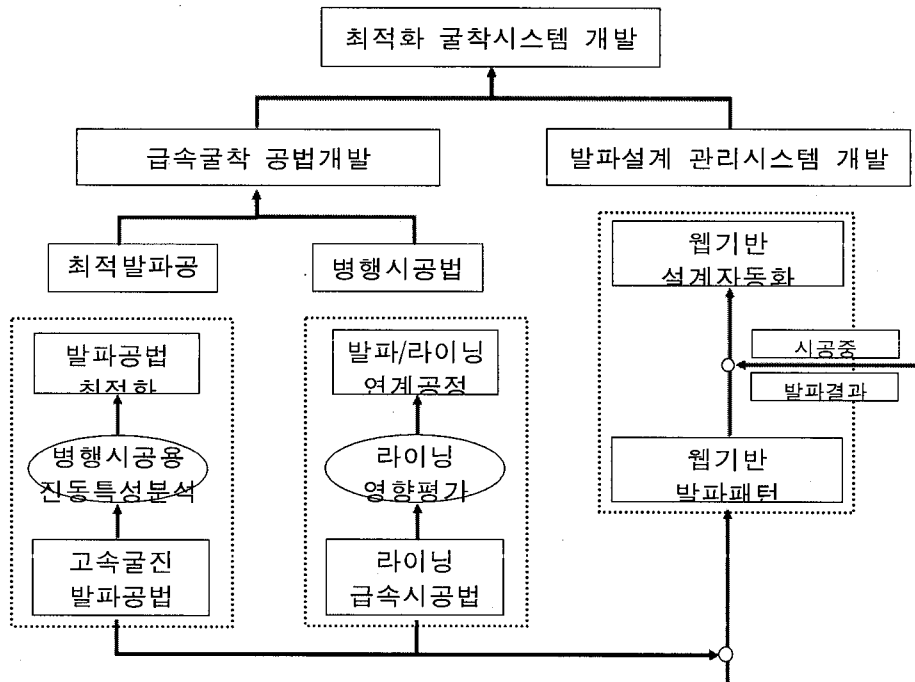
본 과제에서 목표로 하고 있는 기술 개발은 두가지로 구분될 수 있다. 첫 번째는 터널의 급속굴착을 가능하게 하는 공법의 개발과 관련된 기술로서 이는 최적발파공법과 병행시공법으로 양분된다. 병행시공법은 라이닝의 시공과 발파굴착을 동시에 병행하는 공법으로서 터널의 시공 공기를 대폭적으로 단축시킬 수 있는 이점이 있다. 굴착 완료후 콘크리트 라이닝 타설을 하도록 하고 있는 현행 국내 설계에서는 콘크리트 라이닝 시공에 많은 공사기간이 소요되므로, 콘크리트 라이닝 시공을 발파굴착과 동시에 진행하는 발파굴착-라이닝 병행공법은, 특히 장대터널 건설시 공기단축을 적극적으로 도모할 수 있는 유력한 방법으로 고려된다. 하지만 콘크리트 라이닝 시공으로 인해 발파굴착을 위한 환기가 곤란해지거나, 이와 반대로 발파굴착의 영향으로 콘크리트 라이닝의 품질에 문제가 발생할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하고 나아가 콘크리트 라이닝 공법 자체를 병행시공에 적합하도록 개선하여 발파굴착-라이닝의 병행시공법을 확립함으로써 공기단축과 비용절감을 도모하고자 한다.

최적발파공법은 병행시공법에 최적화된 고속굴진 발파공법으로 정의된다. 즉, 병행시공법이 적용되는 상황 하에서는 발파효율이 높은 고속굴진 발파공법만으로는 터널구조물의 발파안정성을 확보하기 어려우므로 본 과제에서는 고속굴진 발파공법의 개발과 더불어 개발된 공법에 터널구조물의 진동영향 평가기술을 접목시킨

최적화된 발파공법을 개발하고자 한다. 이를 위하여 발파설계 인자의 최적화와 국내 암반조건에 부합되는 발파패턴의 표준화 등을 통해 터널굴착을 위한 발파공법을 최적화함으로써 발파효율의 증대를 통해 최대한의 굴진장을 확보하며, 발파에 의한 교란대를 정밀하게 평가하고 그 영향을 최소화할 수 있는 제어기법을 개발함으로써 시공의 질 향상과 함께 숏크리트 타설을 위한 공기 및 비용을 절감한다.

두 번째는 발파설계 관리시스템의 개발과 관련된 기술로서 발파패턴의 자동설계 및 관리, 그리고 데이터베이스와 같은 기본적인 기능을 포함하여 시공 중 지반정보를 토대로 한 웹 환경 하에서의 피드백 설계가 가능한, 설계와 시공이 효과적으로 연계될 수 있는 솔루션을 개발하게 된다.

본 연구의 성과로서는 국내의 암반조건 및 발파여건이 충분히 고려된 신뢰성 있는 정보기술을 바탕으로 한 최적화된 굴착공법의 전형을 마련하게 됨으로써 미래의 교통수요에 부응할 수 있는 대규모 장대터널의 건설과정에서 시공성 향상, 공기단축 및 비용절감의 효과와 더불어 암반터널의 장기적인 안정성도 확보할 수 있을 것으로 기대된다.



<그림 1> 신개념 터널굴착공법 개발과정에 대한 개념도

2. 1차년도 주요 연구수행 내용

1차년도 연구사업에서는 발파고도화를 위한 기반기술 및 핵심요소기술의 개발에 주력하였다. 1차년도 연구결과, (i) 암반의 동적파괴 특성분석을 위한 동적실험에 대한 개념 정립과 실험시스템 설계, 그리고 설계변수 분석을 위한 수치해석적 모델링 기법을 개발하고, 재료의 파괴역학적 고찰 및 파괴인성 모드실험과 수치해석적 비교검증을 실시하였으며, (ii) 발파굴착-라이닝 병행시공법의 개발을 위하여 터널현장실험을 통하여 라이닝 구조물에 대한 발파영향을 평가하고 병행시공 중 환기문제 해결을 위한 새로운 기법을 제안하였으며, (iii) 웹기반의 발파패턴 자동화 설계를 위하여 .NET 기술 중 스마트 클라이언트 기법을 이용한 웹 기반 프로그램의 개발계획을 수립하고 단순화된 발파패턴의 설계를 GUI를 통해 간편하게 결과를 확인할 수 있는 프로토타입의 개발범위를 정의하였다. 주요 연구내용은 다음과 같다.

- 1) 굴착에 영향을 미치는 발파 설계변수로서 화약류의 특성, 발파패턴, 암반조건의 분석 평가와 시공중 현장에서 축적해야 할 지반 및 발파관련 정보의 데이터베이스를 위한 기초 기반 확립; 발파교란대 평가를 위한 이론적 기초연구
- 2) 발파하중 하에서의 재료거동평가를 위한 실험장치 설계 및 수치해석연구
- 3) 발파-라이닝 병행시공시 발파에 의한 양생중 콘크리트 및 라이닝에 대한 영향평가
- 4) 발파-라이닝 병행시공 방법의 현장적용 시험 (계룡터널 건설현장)
- 5) 발파-라이닝 병행시공시 발파굴착으로 인한 환기 문제점 분석 및 개선방안 도출
- 6) 현장에서 시시각각 변하는 지반/발파정보에 작업자가 즉각 대처할 수 있도록 Web 환경 하에서의 발파패턴 설계프로그램 개발을 위한 .NET 기술분석 및 프로토타입 설계프로그램 구현

3. 터널 발파 설계와 영향인자 분석

화약발파를 이용한 암반굴착방법은 지질 및 지형적 조건의 변화에 대한 대처능력이 뛰어나고 경제성면에서 매우 유리하여 가장 보편적으로 적용되어 온 방법이다. 발파설계에 고려하여야 할 요소로는 첫째, 암반을 효율적으로 파쇄하여 설계된

굴진장을 확보하는 것과, 둘째, 파쇄되지 않은 주변 암반이 가능한 한 손상을 받지 않도록 하는 것과, 마지막으로, 주위 환경에 대한 손상을 방지하는 일이다. 발파에는 지반진동, 소음, 비산, 분진 등과 같은 공해적 요소가 수반된다. 따라서 인근에 민가가 있을 경우, 가옥과 같은 건물이나 인체 또는 가축에 영향을 줄 수 있으며 인접한 터널에 대한 손상이나 타설 중인 라이닝에도 영향을 미칠 수 있다. 또한 파이프라인, 정밀기기류 등 주요 시설물에 손상을 줄 수 있으므로 사전 환경영향평가는 매우 중요한 요소의 하나이다. 1차년도에 분석된 설계 인자들은 다음과 같다.

- 심빼기 방법으로서 경사공 심빼기(angled cut), 평행공 심빼기(parallel cut) 방법의 개념과 장단점; 심빼기 방법을 응용한 최근 특허 및 신기술 공법의 분석; 기존의 발파패턴 설계 및 장약량 계산 방법

4. 여굴 발생과 조절기법

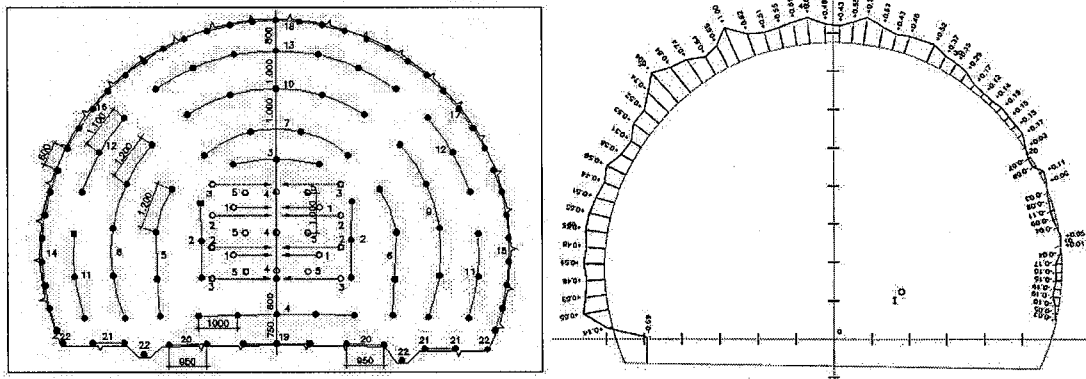
주위 암반에 대한 손상을 최소화하고 설계대로 굴착면을 얻기 위해서는 폭약 에너지와 그 작용방향을 제어하는 것이 필요하며 이를 위하여 제어발파라고 하는 특수한 발파방법이 이용된다. 암반 굴착시 주위암반의 손상을 저감하기 위해 적용되는 대표적인 제어발파기법은 스무스 발파공법(smooth blasting)과 프리스플리팅 공법(presplitting)으로서 1차년도에는 각 공법의 개념과 원리와 기타 디커플링(decoupling) 장전효과, 기폭시차 효과 등이 분석되었다.

또한, 국내 현장에서 과대한 여굴을 발생시키는 요인들을 분석하고 개선안을 찾기 위해 현장조사를 통해 가) 천공오차, 나) 천공패턴, 다) 폭약 종류 및 장전방법, 라) 기폭방법 (시차, 점화패턴), 마) 암반의 특성 등의 영향을 평가하였다.

<미시령터널현장에서의 조사결과 사례>

- 터널 길이 : 3.565 km • 터널 제원 : 10.8 m(폭) × 8.3 m(높이)
- 암반 : 기반암대보화강암, 화강암질 호상 편마암

1) 적용 발파패턴과 여굴발생 현황



2) 실험내용

분 석 대 상	조 사 내 용	비 고
굴착선 표시 정밀도 효과	굴착선 표시할 때 표시빈도에 따른 굴착선 및 천공착점의 정확성 조사	
천공방법에 따른 천공각 변화	점보드릴의 천공 위치 및 작업자의 의지에 따른 천공각 변화 조사	
천공착점 위치 효과	천공착점 위치에 따른 여굴량 차이 조사	
굴착선공의 적정 천공패턴	굴착선공의 공간격을 변화시켰을 때 발생하는 여굴량 차이 분석	RMR 2-5 등급

3) 실험결과

현장조사로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

가) 천공착점의 위치는 여굴 및 미굴량의 크기와 직결되며 따라서 굴착선 표시, 적절한 천공착점의 설정이 중요하다.

나) 암반등급에 따른 천공간격 조정이 필요하다.

다) 터널규모에 적합한 천공장비의 선정, 장비위치 등도 영향인자로 파악되었다.

5. 터널주벽 발파교란대 평가 및 최소화 기술 개발

파괴역학을 이용한 손상영역 평가방법에 대한 1차년도 연구범위는 이론적 고찰과 국내·외 연구동향 분석 그리고 실험 및 수치해석 기법에 대한 검증을 실시하여

2차년도 연구의 사전준비 작업으로 활용하는데 있다.

첫 번째 과정은 파괴역학 개념에 입각한 국내·외 발표논문들을 중심으로 기존 연구 성과들을 분석함으로써 파괴역학 개념을 도입한 파괴인성과 균열발생과의 관계를 이론적 측면에서 검토하였다. 두 번째, 기존의 국제암반역학회(ISRM)에서 제시하고 있는 파괴인성 실험법들과 그 밖의 실험법들에 장·단점을 분석하여 발파메커니즘과의 상관성 및 이를 접목시킬 수 있는 방법을 검토하였다. 또한 기존 실험법들의 개량 방안을 모색을 추진 중이다. 세 번째, 현재까지의 파괴인성 실험법에 대한 수치해석 검증은 2차원 해석을 바탕으로 수행되어져 왔다. 그러나 실제 파괴인성 실험법들의 거동형상을 묘사하기 위해서는 3차원 해석이 실시되어야 한다. 이에 각각의 실험법들을 2차원 및 3차원으로 해석을 실시하고 그 결과치의 상관성 및 오차범위를 검토하여 3차원 수치해석의 필요성을 타진하려 한다.

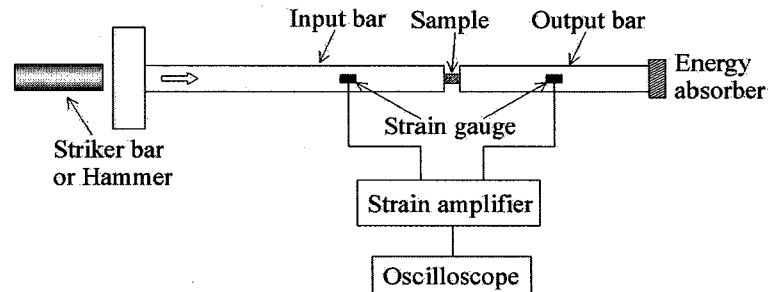
기존의 파괴인성 실험법들에 대한 수치해석적 검증은 2차원 유한요소 및 개별요소법들이 주종을 이루어 왔다. 그러나 국제암반역학회(ISRM)에서 추천하고 있는 CB, SR, CCNBD 시험편들은 시험동안 균열의 안정한 균열전파를 유도할 수 있는 세브론 노치를 가지고 있고, 수치해석을 통한 실질적인 파괴양상을 묘사하기 위해서는 3차원 형상의 세브론 노치를 필연적으로 표현해야 한다. 본 연구에서는 기존 파괴인성 모델들의 수치해석 연구사례를 검토하고, 2차년도 연구와 연계하여 3차원 수치해석의 필요성을 검증한다.

6. 동적거동 실험개념정립 및 수치해석 기법 개발

발파와 같은 동적 응력 하에서 매질의 거동특성(동적 구성방정식)을 규명하기 위하여 홉킨슨 효과를 이용한 동적 실험 개념을 정립하였고, 입자유동해석방법에 기초한 수치해석적 모델링 기법을 개발하였다. 본 연구에서는 Cho(2003)¹⁾가 Inada 화강암을 사용하여 실험하고 유한요소법을 이용하여 해석한 동적인장파괴 해석과정의 일부분을 (i) Test I: 외력을 적용하는 기존의 방법과 (ii) Test II: 접촉력을 적용하는 새로운 폭원모델링 기법을 통하여 각각 묘사하여 봄으로써 SHPB(Split

1) Cho, S., 2003, "Dynamic Fracture Process Analysis of Rock and Its Application to Fragmentation Control in Blasting", Ph.D. Thesis, Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., pp.39-76.

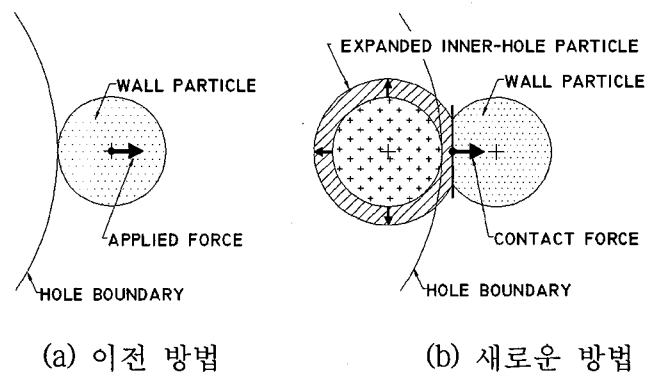
Hopkinson Pressure Bar) 실험의 모사과정에서 필요한 압축 중에서의 응력파의 전파과정과 균열발생의 측면에서 서로 비교될 수 있도록 하였다.



<그림 2> 동적 거동 시험장치의 개념도.

6.1 새로운 폭원모델링 기법

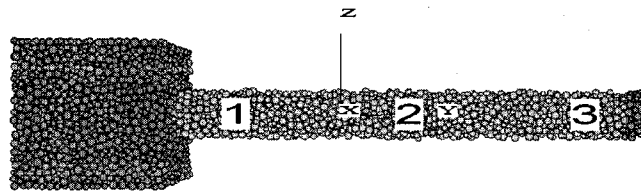
일반적인 폭원모델 방법은 그림 3(a)와 같이 천공된 발파공을 모사하기 위해 먼저 발파공 내부에 해당하는 입자요소들을 제거하지만 본 모델에서는 그림 3(b)에서와 같이 공내 입자들을 제거하지 않고 공벽입자에 필요한 만큼의 접촉력을 발생시키기 위하여 공내 입자들의 반경을 제어기로 이용하여 그 크기를 팽창 또는 수축시키는 기법을 사용한다. 본 폭원모델링 기법에서 가중 방법은 PFC^{3D}에서 제공하는 FISH 언어를 사용하여 구현하였다.



<그림 3> 하중 모델링 방법의 비교

6.2 동적실험의 수치해석모델의 구성 및 입력물성의 결정

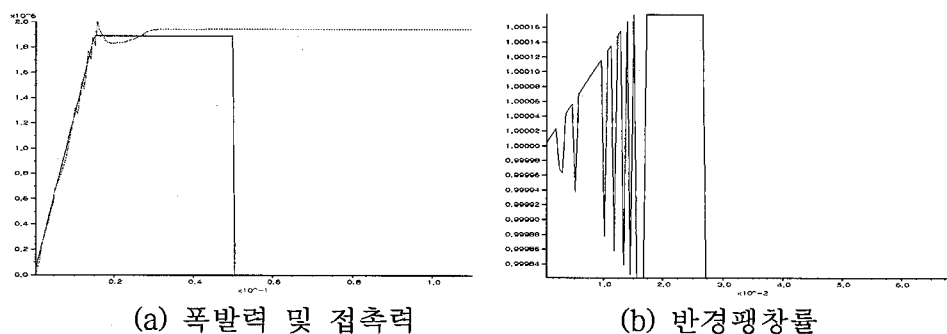
그림 4는 Hopkinson 효과와 암석시료에서의 응력파의 전파 및 파괴과정을 모사하기 위하여 구성한 PFC^{3D} 입자결합모델이다. 해석모델은 정육면체의 약실과 암석 코어로 구성되며, 사용입자의 개수는 총 35,727개, 직경은 평균 3 mm이다. 약실 내에는 입사파를 생성하기 위한 폭약이 위치하게 되며, 장약공은 직경 20 mm, 길이 30 mm의 크기로서 코어시료의 축방향을 길이방향으로 한다. 시료내부에서 발생하는 응력과 변형률속도를 ①, ②, ③의 위치에서 측정하며, 변형률은 각 시간단계에서 측정된 변형률속도로부터 계산을 통하여 구한다. 암석시료의 물성은 Inada 화강암의 물성에 따라 수치시험을 통하여 결정하였다.



〈그림 4〉 가중모델을 이용한 인장파괴모사를 위한 입자결합모델

6.3 해석결과 및 검토

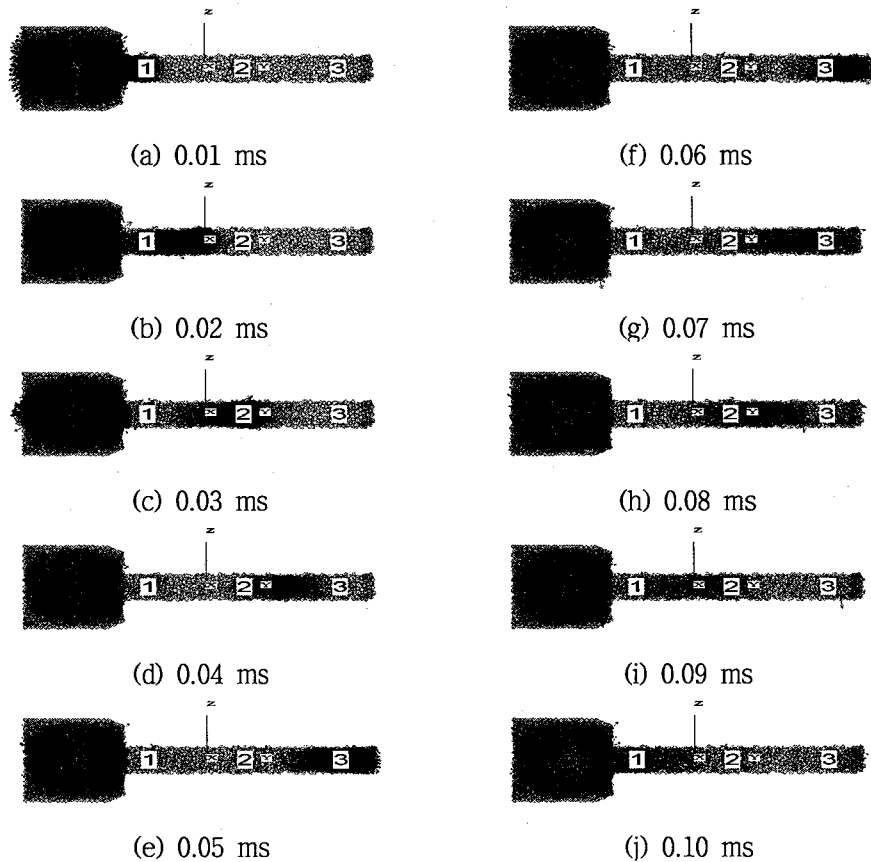
그림 5(a)는 폭발력과 유도된 접촉력의 크기를 도시한 그래프이고, 그림 5(b)는 공내 입자들의 반경팽창율의 변화를 보인 그래프이다.



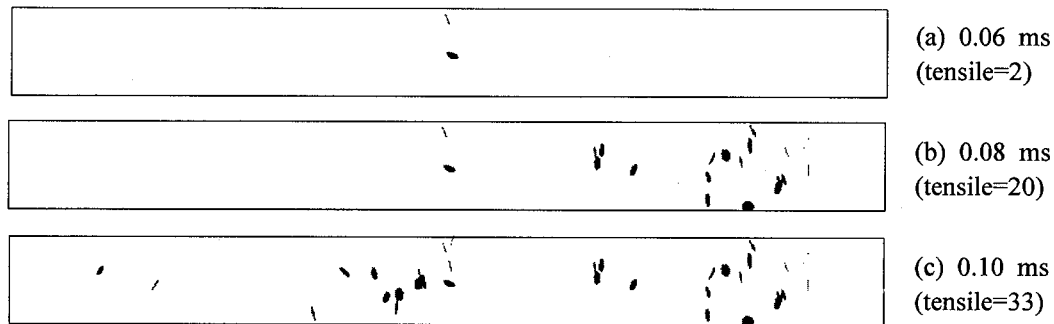
〈그림 5〉 폭발력과 접촉력 및 반경팽창률

6.3.1 암석시료 중에서의 응력파의 전파양상

그림 6은 모델링 결과로서 구성입자들의 속도벡터장을 표시한 것이며 약실의 화살표는 공내 입자의 반경변화에 따라 공벽입자들이 보이는 변위벡터를 단위벡터로 표시한 것이다. 그림 6(f)에서와 같이 기폭 후 약 0.06ms가 지나면 압축응력파의 선단이 암석시료의 끝에 도달하며, 이후 반사인장파가 시료 중으로 되돌아오게 된다. 해석결과에서 측정구 간의 거리와 응력파의 최고치가 각 측정구에 도달하는 시차로부터 암석시료 중에서의 응력파의 전파속도는 약 4,167 m/s로 계산된다. Inada 화강석에서 실측된 P파속도는 4,300 m/s로서 오차는 약 3% 수준으로 근소한 차이를 보였다. 수치해석적으로 모사된 동적 인장균열의 발생 양상의 예는 그림 7과 같다. 또한 암석시료 중에서의 축응력 발생양상, 변화 양상 등을 분석하였다.



<그림 6> 암석시료 중에서의 응력파의 전파양상 모델링 결과



〈그림 7〉 동적 인장 균열의 발생 모사 결과, Test I

7. 발파-라이닝 병행시공의 발파진동 영향평가 및 허용수준 분석

터널굴진과 터널 내 콘크리트 라이닝 및 본체 구조물 시공을 병행 시공할 경우, 터널 굴진을 위한 발파로 인해 발생하는 지반진동이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위하여 국내·외 허용 기준, 관련 사례 및 자료들을 수집·분석하였다. 대부분의 발파진동에 대한 영향평가는 민원의 대상으로서 구조물의 경우 가옥과 같은 건축물에 대한 것이 주를 이루고 있고 발파진동과 같은 충격진동에 대해 허용기준을 갖고 있는 국가들도 대부분 건축물에 대한 기준을 설정하고 있으나 터널은 특수한 구조물로서 일반 건축물과는 다른 범주에서 평가되어야 하며 병행 시공이라는 특수한 상황은 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 대한 평가를 필요로 한다.

7.1 구조물에 대한 발파진동 영향평가

당해년도에 분석된 기존의 제안, 기준들은 다음과 같다.

- 서울시 지하철 공사시 채택하였던 건축물별 기준; 터널시방서에 제시된 기준; 독일 공업표준서의 기준 (DIN 4150 Part 3, 1986); 스웨덴 기준 (SS 460 48 66); 중국 기준 (폭파안전규정, GB 6722-03); 스위스 기준 (Norm 640 312a.); 소련 기준; 미국 노천채광청 기준, 광무국(USBM) 제안 기준; Persson 등의 암반 중 터널에 대한 연구²⁾; 국내 영동고속도로 확장공사 사례; 일본 산양신간선(山陽新幹線) 완성 후 직하 10m에 수로터널 굴착사례; 스웨덴 폐기물 처분장 동굴 굴착 사례 (스웨덴 CLAB Stage II 프로젝트); 벤치발파시 터널 라이닝 영향조

2) Persson, P.A. et al, 1980, Underground blasting in a city, Subsurface Space: Proceed. of the Int. Symp. (Rockstore'80), Stockholm, vol.1, 199-206, Pergamon Press.

사 사례 (일본); Duvall and Atchison, 1959; US Army Corps of Engineers, 1972; Sakurai and Kitamura, 1977 & 1990; Oriard, 1980; Yausoka & Kaneda, 1994; Dowding, 1996; Siskind, 2000 등

7.2 양생콘크리트에 대한 허용 수준

양생중인 콘크리트는 경화가 완료된 콘크리트와는 다른 범주에서 영향평가가 되어야 한다. 당해년도에 분석된 기존의 제안, 기준들은 다음과 같다.

- 미국 양회학회 제안 기준 (Whitman & Seed, 1970); Hulshizer 및 Desai의 제안 기준.³⁾; National Highway Institute에서 제시된 기준 (NHI, No. FHWA-HI-92-001, 1991); 스웨덴 기준; 기타 연구 사례- Esteves(1978); Vibratech사⁴⁾; 권영웅 등⁵⁾; 정동호⁶⁾; Bastian, 1970; Esteves, 1978; Oriard, 1980; Dowding, 1996; Shin, 1999 등; 국내 죽령터널 시공시 시험사례

시간대에는 약간의 차이가 있지만 이러한 결과들을 종합하여 보면, 콘크리트 양생시 초기진동은 수화반응을 촉진시켜 다짐효과를 주기 때문에 오히려 강도 면에서 유리하며, 어느 시간대 이후에는 응결되는 시멘트 입자 간에 새로운 균열의 발생원이 될 수 있으므로 강도를 저하시킬 수 있는 것으로 해석된다.

7.3 적용기준 설정

국내의 경우 발파진동에 대한 허용수준은 국가적인 기준이 아직 마련되어 있지 않아 대부분 발주처에 따라 프로젝트별로 허용기준을 적용해오고 있는 상황이다. 특히 발파-구조물 병행시공을 위한 콘크리트 타설시 양생중인 콘크리트에 대한 적용기준은 현재 자료들이 다양하고 이론적으로도 접근하기가 용이하지 않으므로, 일차로 기존 자료들을 종합하여 보수적인 수준으로서, 표 1과 같은 수준을 적용수준으로 설정하여 현장시험에 적용하고 향후 현장계측자료와 수치해석 등의 방법을 이용하여 좀 더 합리적인 기준을 설정할 예정이다.

<표 1> 양생 콘크리트에 대한 평가기준 설정

3) Hulshizer, A.J. & Desai, A.J., 1984, Shock Vibration Effects on Freshly Placed Concrete, J. Construction Engineering & Management, v.110, n.2, ASCE

4) Vibratech, 1980, Vibration Study

5) 권영웅 외, 1990, 진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향, 대한주택공사

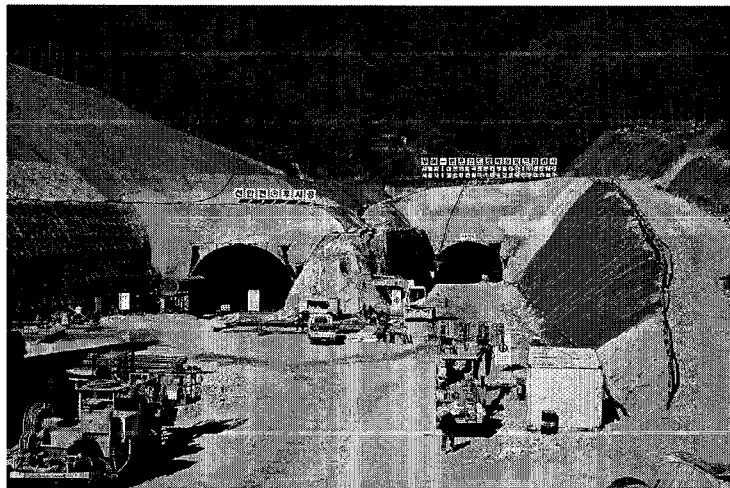
6) 정동호, 1994, 발파진동이 양생콘크리트의 강도에 미치는 영향, 박사학위논문, 강원대학교

타설후 경과시간	PPV (cm/sec)
0 ~ 3 시간	5.08
3 ~ 24 시간	0.63
1 ~ 3 일	2.54
3 ~ 7 일	5.08
7 ~ 10 일	12.70
> 10 일	25.40

8. 발파-라이닝 병행시공 현장적용시험

1차년도 연구기간중 터널 굴착을 위한 발파와 라이닝 등 본체 구조물을 병행시공할 경우 발생할 수 있는 문제점을 파악하고자 국도 1호선 도로확장공사 중 계룡터널에서 현장실험을 실시하였다(그림 8). 연구 수행방법은 그림 9와 같다.

- 터널 길이 : 두마-반포 계룡터널 (두마방향 : 2,665m / 반포방향 : 2,600m)
- 터널 제원 : 10.406m(폭) × 8.688m(높이) • 실험 위치 : 시점측 두마방향

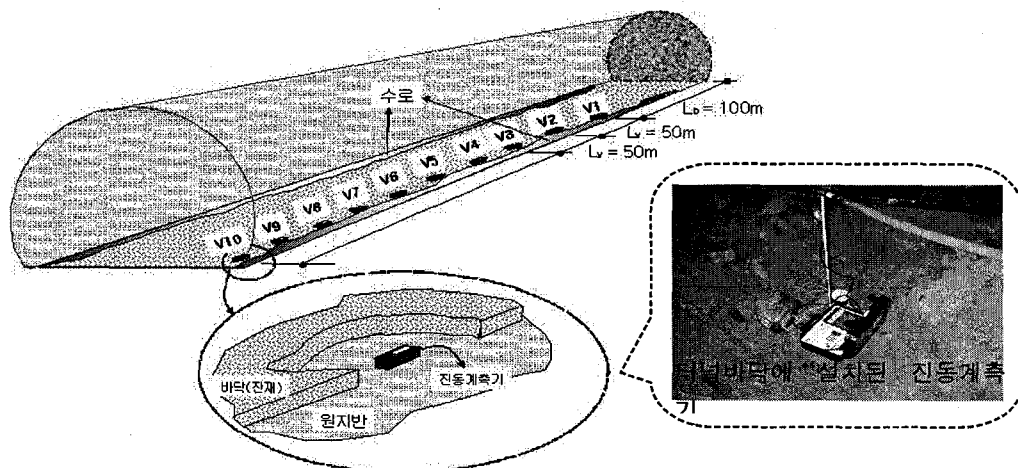


〈그림 8〉 현장시험이 실시된 계룡터널 현장 전경

허용 수준 설정	국내외 기준, 기존 연구사례를 토대로 라이닝 등 구조물과 양생콘크리트에 영향을 미치지 않는 허용 진동 한계치 설정
현장계측 및 자료획득 (발파 및 진동계측)	- 실제 터널 발파시 진동계측 및 자료획득 - 발파진동 전파양상을 파악할 수 있도록 최소 50측점 이상
자료처리 및 진동전파식 도출	- 획득된 계측자료의 회귀분석 - 진동전파식(예측식) 도출
영향권 분석	도출된 진동추정식을 이용하여 허용수준을 만족시킬 수 있는 라이닝 타설지점까지의 최대 이격거리(안전거리), 이격거리에 대한 최대 지발당 장약량 조건 등의 산정
검증을 위한 모형 라이닝 타설	- 영향권 분석 결과를 토대로 콘크리트 타설 위치 설정 - 막장으로부터 일정한 지점에 소규모 모형라이닝을 타설 - 현장에서 사용될 성분과 동일하게 라이닝 콘크리트 배합 - 타설시 진동을 받지 않은 콘크리트의 강도를 확인하기 위해 표준몰드 제작하여 수중양생
발파진동 재하 및 콘크리트 강도시험	- Con'c 타설후 가장 예민한 시간대에 진동을 받도록 발파 실시 - 현장 발파작업하에서 28일동안 양생(모형라이닝, 표준몰드) 28일동안 지속적인 진동을 받은 콘크리트의 최종 강도시험
산정된 이격거리에 대한 타당성 확인	28일 후 콘크리트 강도가 설계강도를 만족시키는지 평가
시공지침 제시	병행시공을 위한 조건, 시공지침 및 안전확보 대책 제시

〈그림 9〉 연구 수행 흐름도

8.1 현장계측

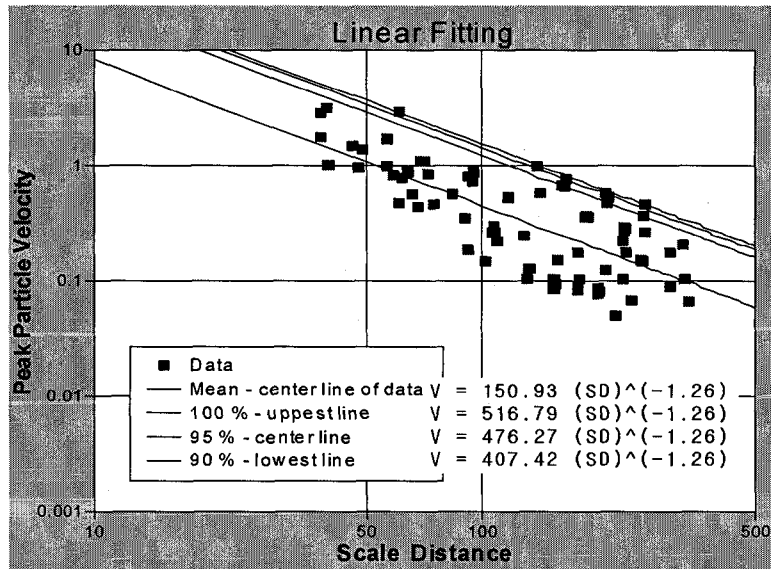


〈그림 10〉 진동측정계 설치 (11개 측정점, 3차 계측)

8.2 시험결과 및 영향권 분석

(1) 발파진동 측정결과 해석

총 12회 측정 결과 획득한 123개소 측점에 대한 data를 이용하여 진동예측식을 도출하였다. 그림 11은 벡터합 진동의 회귀분석을 나타낸 그림이다.



$$PPV(sum)_{50\%} = 150.93 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.26}; \quad PPV(sum)_{95\%} = 476.27 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.26}$$

<그림 11> 벡터합 진동의 회귀분석 (단위 : $PPV = \text{cm/sec}$, $D = \text{m}$, $W = \text{kg}$)

(2) 발파 영향권 분석결과

<표 2> 허용수준(0.63cm/s)을 만족시키기 위한 막장으로부터 타설지점까지 이격거리

지발당 최대장약량 (kg)	평균진동예측식	95% 신뢰구간	현장 적용
10.5	169 m	422 m	500 m

<환산거리를 이용한 안전기준 설정>

$$SD = D/W^{1/3} = 192.55$$

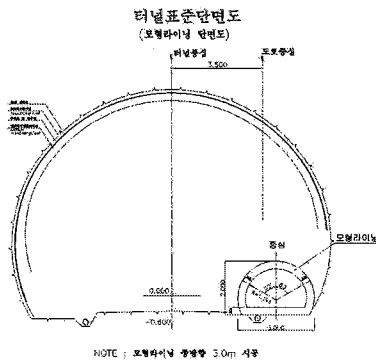
D = 이격거리 (m); W = 지발당 최대 장약량 (kg)

8.3 양생콘크리트 검증 실험

(1) 양생콘크리트 실험조건

① 모형라이닝 및 표준몰드 제작

타설지점은 전단면 발파가 진행 중인 막장면의 후방에 해당하는 터널의 하단부 우측부분 4곳에 거푸집을 제작한 후 발파 4시간 전까지 콘크리트 모형라이닝을 타설하였다. 그림 12는 계룡터널 표준설계단면도에 모형라이닝을 표현한 그림이다.



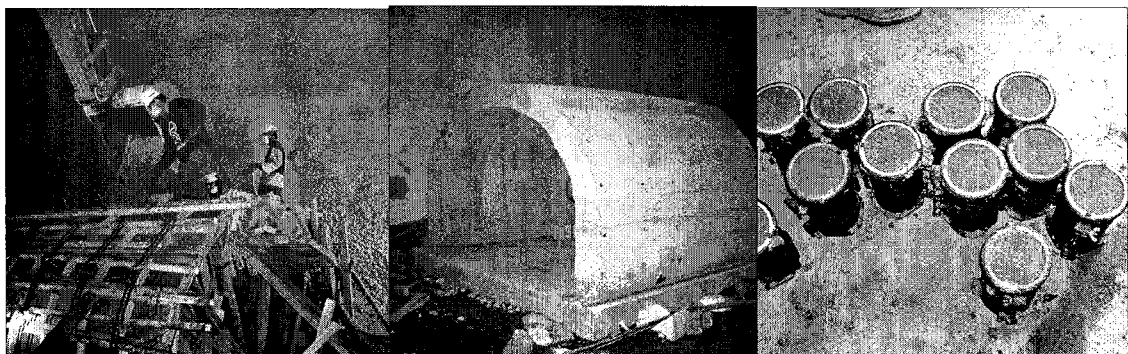
콘크리트 모형라이닝 제원

모형라이닝 크기	가로 3m×세로 3m×높이 2m
타설두께	30cm
설계강도	240kg/cm ²

<그림 12> 모형라이닝 설치 단면도 및 제원

<표 3> 모형라이닝 타설지점

기호	막장으로부터 타설지점 (m)	비 고
A	145	타설일시 : 2005. 11. 10 오전 10시 ~ 오후 1시
B	245	
C	445	
D	545	



<그림 13> 모형라이닝 및 표준몰드 제작

② 모형라이닝 발파진동 측정

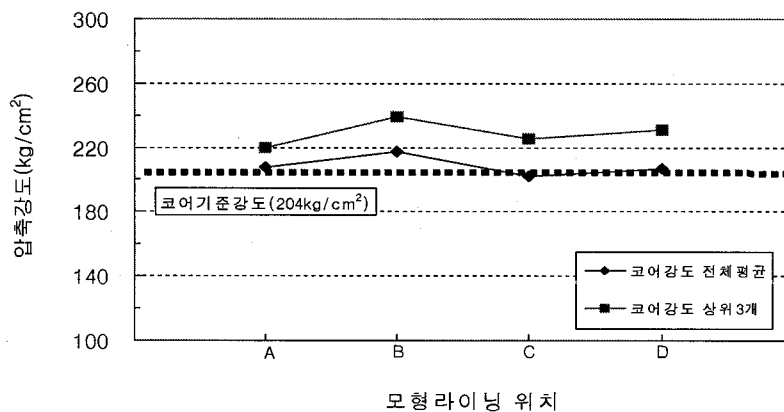
콘크리트 모형라이닝 타설이 완료된 다음, 4시간 경과 후 최초 발파를 실시하였으며, 진동계측은 라이닝 타설후 4시간, 20시간, 28일 발파진동을 측정하였다.

(2) 콘크리트 강도시험

터널 내 콘크리트 모형라이닝을 타설할 때 제작된 콘크리트 표준몰드 중에서 수중 양생시킨 시료와 터널 모형라이닝 내에서 양생한 시료 및 코어강도에 대한 28일 압축강도 시험결과는 표 3과 같다.

〈표 3〉 강도시험 결과 (표준몰드, 코어강도)

구 분		A (145m)		B (245m)		C (445m)		D (545m)		표준몰드 수중양생
		표준 몰드	코어 강도	표준 몰드	코어 강도	표준 몰드	코어 강도	표준 몰드	코어 강도	
28일 강도 (kg/cm ²)	1	214	200	233	242	266	185	303	199	277
	2	189	211	216	211	268	182	291	230	274
	3	214	184	219	227	277	247	305	182	278
	4	199	219	224	208	247	234	305	224	283
	5	185	216	230	247	268	195	311	238	289
	6	198	200	215	204	289	182	291	175	269
	7	200	225	224	182	245	187	299	199	282
	평균	200	208	223	217	266	202	301	207	279
	기준강도	240	204	240	204	240	204	240	204	240
기준대비		83%	102%	93%	107%	111%	99%	125%	101%	116%
참 고		■ 현장 콘크리트 라이닝 설계기준강도 : 240kg/cm ²								
		■ 코어 채취에 의한 강도인 경우 - 설계기준강도는 다음과 같다.								
		▶ 출처 : 현장공사 시방서 P 7-27 ⑥ 현장코어 채취에 의한 강도								
		▶ 최소강도 = 설계강도의 72%(172.8kg/cm ²) 이상일 것								
		▶ 평균강도 = 설계강도의 85%(204kg/cm ²) 이상일 것								



〈그림 14〉 콘크리트 코어 압축강도시험 결과

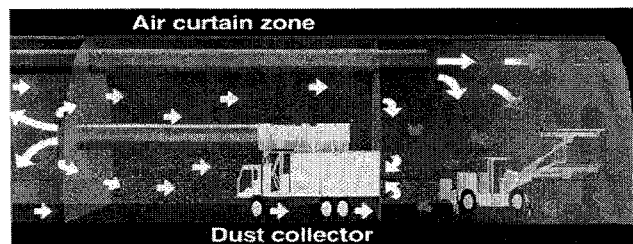
8.4 현장실험 결과 요약

계룡터널 발파-구조물 병행시공 현장실험에 있어서, 총 12회의 발파진동 계측과 123측점에 대한 회귀분석을 통해 진동예측식을 도출하고 양생중인 콘크리트에 영향을 미치지 않는 허용진동수준 설정값을 만족시키는 안전이격거리를 지발당 최대 장약량에 따라 결정한 후 시공하였다. 영향권 분석을 통하여 산정된 안전이격거리의 타당성을 검증하기 위하여 발파진동을 받는 실험용 콘크리트 모형라이닝을 터널내 4개소를 선정하여 타설하고, 진동에 가장 예민한 시간대에 발파 진동을 가한 조건하에서 타설된 콘크리트 라이닝 28일 강도를 시험하였다. 채취한 코어 강도시험 결과, 1개소를 제외하고 이격거리 이내의 콘크리트 모형라이닝 평균강도가 현장 코어 채취에 의한 강도 기준대비 만족시킬 수 있는 것으로 나타나고 있어 충분한 안전이격거리인 것으로 판단할 수 있었다.

9. 발파-라이닝 병행시공중 환기시스템 평가 및 개선

9.1 대상 터널의 환기방식

본 실험은 국도1호선 두마-반포간 도로확장공사 중 계룡터널에서 실시하였다. 총 연장 2.6 km 중 2 km가 굴착된 시점에서 터널내의 분진 및 가스농도를 측정하였다. 현장에서는 송기+집진기 혼합 환기방식으로 환기를 수행중이다(그림 15).



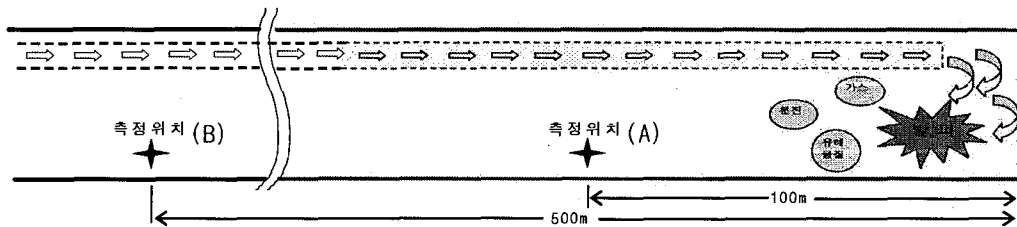
〈그림 15〉 송기+집진기 혼합 환기방식의 개요도

9.2 터널내 오염농도 측정

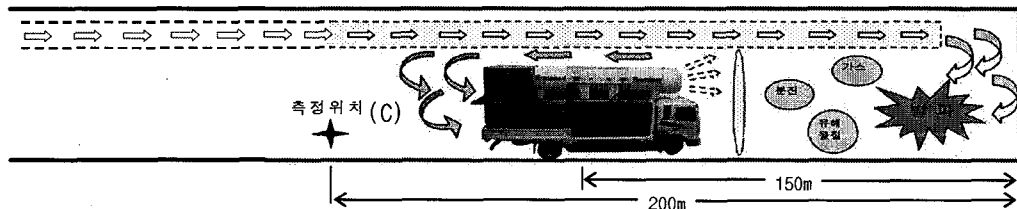
① 환기방법별 측정위치

터널시공 중 작업환경 상태를 파악하기 위하여 발파 및 버력처리 작업시 발생하

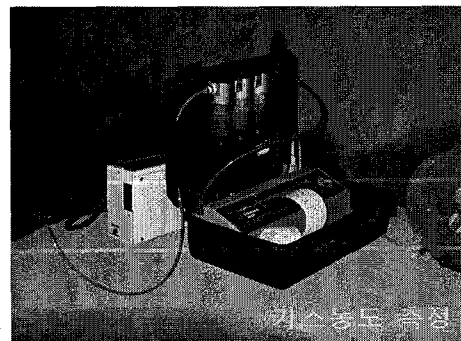
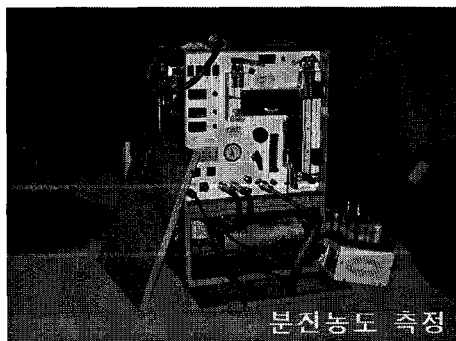
는 분진과 가스의 특성과 농도를 갱내환기를 급기에 의해서만 수행할 때(그림 16) 및 급기와 집진기를 조합하여 수행할 때(그림 17)의 경우를 측정하였다.



<그림 16> 급기에 의한 환기 및 오염농도 측정 개요도



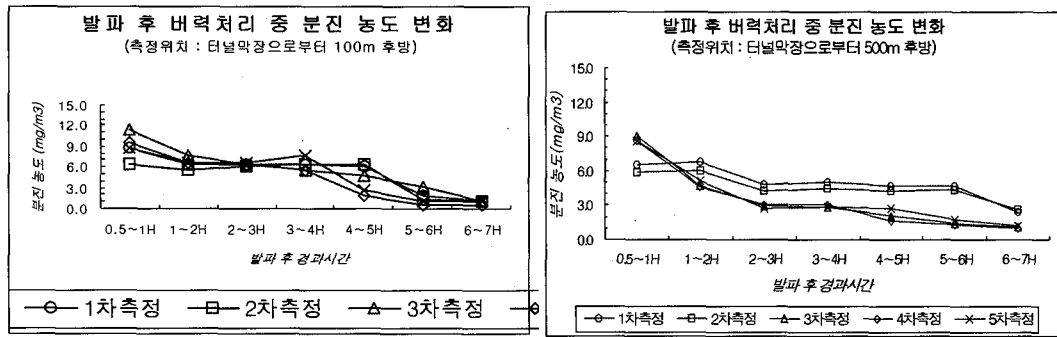
<그림 17> 급기+집진기에 의한 환기 및 오염농도 측정 개요도



<그림 18> 발파 후 버력처리 중 오염농도 측정

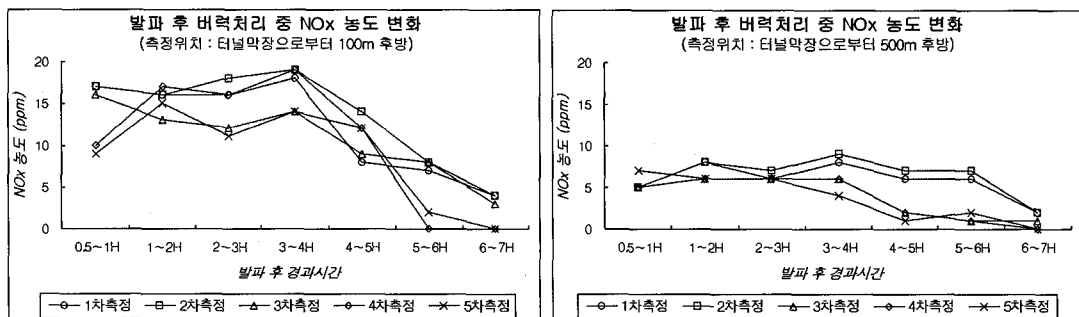
② 측정결과

터널내 환기가 급기에 의해서만 이루어질 때 공기 오염도의 측정 및 분석결과 A 위치에서의 발파 및 버력처리 중에 발생하는 분진 농도는 $6.0 \sim 9.0 \text{ mg/m}^3$ 로 버력 처리가 완료될 때까지 지속되었다. 이는 가시거리가 50 m도 확보되지 않을 정도의 열악한 상태이며, 호흡에도 상당히 곤란을 겪는다. B 위치에서도 오염된 공기가 확산되어 버력처리 공정이 완료될 때까지 6.0 mg/m^3 내외로 유지되었다 (그림 19).



<그림 19> 급기에 의한 환기시 분진 농도 변화

발파후가스에 의한 CO는 A, B 지점 모두 발파 후 300ppm 내외의 수치를 보이다가 시간이 지날수록 점차 희석되어 3~4시간이 경과하면 허용기준치인 50ppm 이하로 유지되었다. NO와 NOx는 버력을 적재하고 운반하기 위한 다수의 차량이 정차 및 대기하는 A 위치에서는 10~20ppm으로 허용기준치 이내이나 인력에 의한 작업을 지속적으로 수행하기에는 어려운 조건이다. B 위치에서는 차량이 정차하지 않고 통과하므로 비교적 낮은 5ppm 내외로 나타났다 (그림 20).



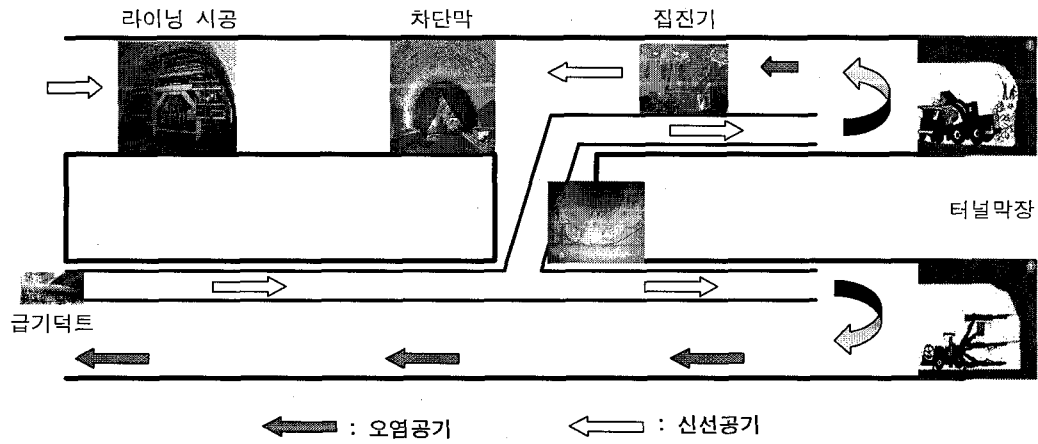
<그림 20> 급기에 의한 환기시 NOx 농도 변화

터널내 환기가 급기+습식집진기에 의해서 이루어질 때 공기 오염도의 측정 및 분석결과 급기만으로 환기를 수행하는 방법에 비하여 절반으로 감소하여 집진기의 효과가 나타났다. CO 농도는 집진기를 사용하였을때 초기에는 효과를 보이나 시간이 흐를수록 집진기의 배기가스 제거효율은 떨어지는 것으로 판단된다.

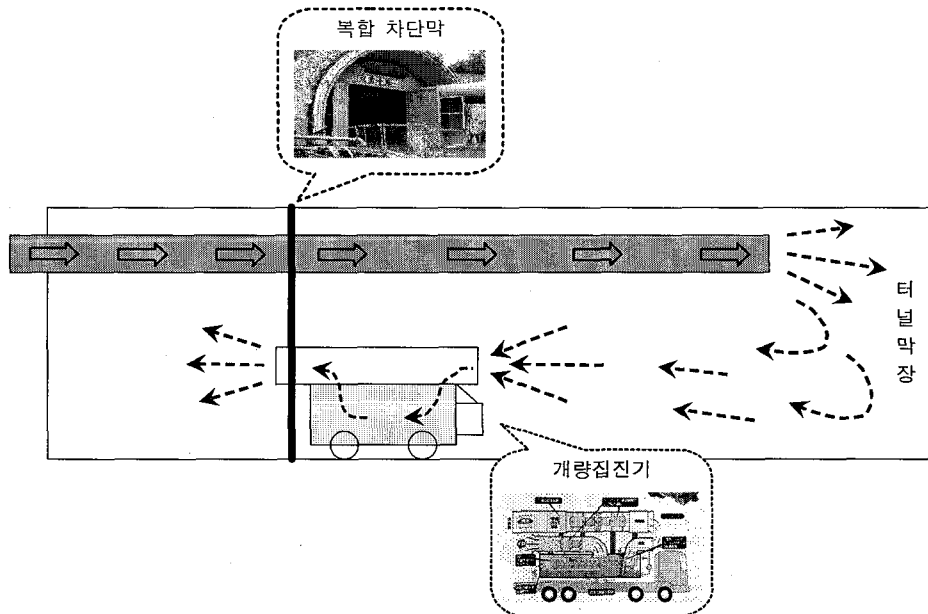
③ 환기시스템 개선안 도출

병행시공을 위한 라이닝 타설작업시 라이닝 구간의 환기용 풍관 제거에 따라 막

장에서 굴착작업을 위한 급기가 곤란한 문제점을 해결하기 위해 복합 환기시스템을 도출하였다. 복합 환기시스템은 기존 급기덕트를 횡갱을 이용하여 이동 배치, 막장부분의 환기를 실시하고 라이닝 타설구간의 작업환경을 확보하기 위하여 집진기와 차단막으로 오염공기를 제거 및 차단하는 시스템이다 (그림 21).



<그림 21> 복합환기시스템 개요도



<그림 23> 복합환기시스템의 개량 및 개발 요소

10. 정보기반 발파설계 프로그램 개발

10.1 연구 수행 내용

항 목	계 획	연구 결과
.NET 기술에 대한 기초 연구	•.NET 기술자료 수집 •웹기반 프로그램 개발에 대한 .NET 기술 적용 방안 연구	•기초 기술자료 수집, 분석 수행 •.NET 기술 중 스마트 클라이언트 기법을 이용한 웹기반 프로그램 개발 계획 수립
발파설계 프로그램 프로토타입 구현	•프로토타입 개발범위 정의 •웹에서 구동되는 발파설계 프로그램 프로토타입 구현	•간단한 사용자 입력을 통해 단순화된 발파패턴 설계가 가능하고, GUI를 통한 결과 확인이 가능하도록 개발 범위 설정 •스마트 클라이언트 기법을 적용한 웹기반 프로토타입 구현 완료
데이터베이스를 위한 정보 분류	없 음	•발파설계 프로그램에 필요한 자료구조 분석을 통해 기본적인 데이터 베이스 스키마 작성 •제1세부과제의 지반정보 시스템과의 연계에 활용

10.2 발파설계 프로그램의 프로토타입 개발

최종 목표인 웹기반 발파설계 프로그램의 구현 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 미리 파악하여 이에 대한 해결 방안을 사전에 검토하기 위해 웹에서 구동되는 프로토타입을 개발하였다. 먼저, 프로토타입이 지원해야 할 기능을 정의하였으며, 그에 따라 프로토타입이 사용하게 될 데이터구조를 설계하고 직접 코딩을 수행하여 프로토타입을 완성하였다. 완성된 프로토타입은 웹을 통해 직접 구동할 수 있다. 웹을 통해 해당하는 사이트에 접속하면 자동으로 프로토타입 프로그램이 설치되며, Internet Explorer 상에서 직접 구동된다. 저항선, 공간격 등과 같은 발파패턴에 대한 설계변수를 입력하여 기초적 형태의 발파패턴을 생성할 수 있으며, 설계된 발파패턴은 확대, 축소, 이동 등의 인터페이스를 통해 즉각 확인할 수 있다.

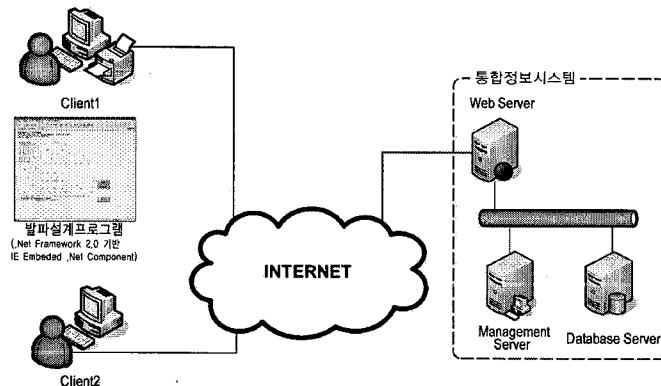
프로토타입을 구현해 봄으로써, .NET Framework를 이용한 스마트 클라이언트 개발에 있어서 사용자 PC의 .NET Framework 보안 문제와 프로그램 개발 시에 디버깅 문제를 발견하였다. 발파패턴 설계 프로그램이 충분한 요구 수준을 확보하기 위해서는 발파패턴 설계 프로그램에 대한 보안 권한을 높게 설정하도록 강제하는 방법 등을 적용함으로써 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 개발 과정에서 발

생하는 디버깅 문제는 다양한 개발자 지원 도구와 개발자 포럼 활용 등과 같은 추가적인 자료 조사와 연구를 통해 해결되어야 할 것으로 판단된다.

프로토타입의 시스템 구조

발파설계 프로그램의 프로토타입은 .NET 어셈블리(.dll)의 형태로 웹서버에 저장되며, 웹서버로 해당되는 페이지가 요청되었을 경우 자동으로 클라이언트 PC에 다운로드되어 설치된다. PC에 설치된 .NET 어셈블리(웹기반 발파설계 프로그램의 프로토타입)는 클라이언트의 컴퓨팅 파워를 그대로 이용하여 발파패턴 설계를 수행한다. 향후 수행할 과제에서는 .NET 어셈블리가 웹서버로부터 기존에 설계된 데이터베이스의 발파패턴을 입력받아 확인 및 수정이 가능하게 되며, 새로 작성된 발파패턴이나 수정된 발파패턴을 웹서버를 통해 데이터베이스에 저장할 수 있게 된다.

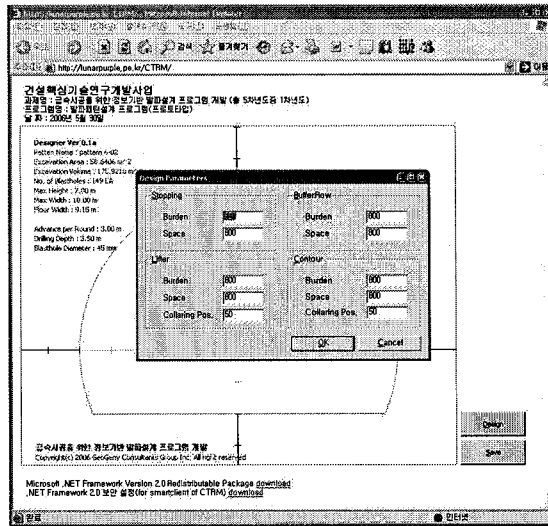
그림 24와 같이 사용자는 원격지에서 인터넷을 통해 웹서버에 접속하여 데이터베이스의 발파패턴을 확인하고 수정할 수 있다.



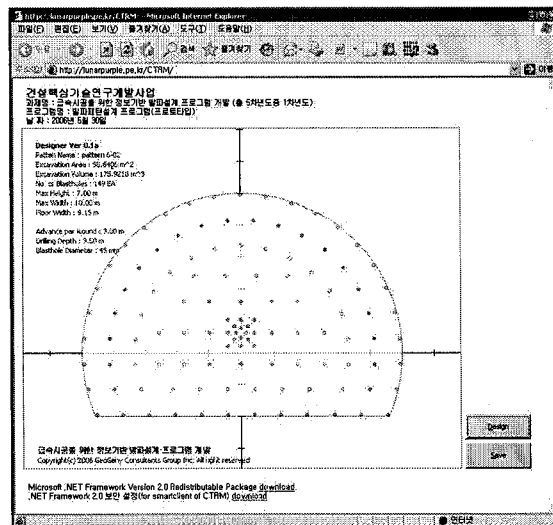
〈그림 24〉 시스템 구조도

실행 예

Microsoft Internet Explorer를 실행시켜 해당하는 주소를 입력한다. 페이지가 로딩되면서 웹기반 발파설계 프로그램의 프로토타입이 다운로드 되고 PC에 자동으로 설치되어 화면에 로딩된다. Design 버튼을 눌러 설계에 필요한 정보를 입력하면 입력한 설계정보에 맞는 발파패턴이 설계된다. (그림 25 및 26)



〈그림 25〉 설계정보 입력 예제



〈그림 26〉 발파패턴 설계결과 예제

10.3 데이터베이스를 위한 정보 분류

급속시공을 위한 정보기반 발파설계 시스템은 다양한 지반 정보와 설계 정보 등을 포함하는 데이터베이스를 사용하여 현장 상황에 즉각적으로 대응할 수 있는 정보 시스템과 통합되어 운영될 계획이다. 이 연구에서는 발파설계 프로그램이 사용할 시스템 설계와 관련하여, 발파패턴 정보에 대한 기초 분석을 수행하고 데이터베이스에 적용될 세부 정보를 작성하였다. 이러한 과정을 통해서 작성된 발파패턴 정

보는 제1세부과제의 지반정보 시스템과 연계되는 효과도 창출하였다.

발파패턴 정보 : BlastingPatternTable

발파설계 프로그램이 작성한 발파패턴과 기초 정보를 포함한 단위 발파패턴; 통합 시스템은 여러 개의 발파패턴을 DB에 저장, 관리하게 되며, 웹기반 발파설계 프로그램을 이용하여 새로운 발파패턴을 작성하거나, 기존의 발파패턴을 수정.

BastingPatternTable		
Field	Type	Description
PID	autonumber(PK)	발파패턴의 고유번호(Primary Key)
PName	varchar(100)	발파패턴의 이름(예. Type I, Type II 등)
Creator	varchar(30)	작성자
Date	datetime	작성일
Pattern	text	설계된 발파패턴. 발파패턴은 최종적으로 XML파일로 저장되며, 이진이나 텍스트형태 중 택일
Description	varchar(255)	작성자가 패턴에 대한 추가 설명을 작성할 수 있음

구간별 발파패턴 정보 : PatternForSectionTable

터널의 각 구간별로 설정된 발파패턴에 대한 설계정보 저장; 시공시 특정 막장을 선택하면 터널의 구간에 따라 해당되는 발파패턴 정보가 기본적으로 할당.

PatternForSectionTable		
Field	Type	Description
PSID	autonumber(PK)	고유번호(Primary Key)
Start	float	시작 위치(m)
End	float	끝 위치(m)
PID	int(FK)	발파패턴 아이디(Foreign Key)

막장별 발파패턴 정보 : PatternForFaceTable

특정 막장에 대해 적용된 발파패턴 정보를 저장; 시공시 현장 상황에 따라 막장별 발파패턴을 지정하거나 수정할 수 있다.

PatternForFaceTable		
Field	Type	Description
PSID	autonumber(PK)	고유번호(Primary Key)
FacelD	int(FK)	막장 ID(Foreign Key)
PID	int(FK)	발파패턴 ID(Foreign Key)
Description	varchar(255)	부가정보(예, 상반, 하반 등)

10.4 1차년도 결론 및 향후 추진 계획

본 연구에서는 .NET Framework의 기본적인 구조와 활용방안 등에 대해 연구하였으며, 웹기반 발파설계 프로그램의 개발 생산성과 최종 목표 달성의 측면에서 .NET Framework가 가장 적절한 플랫폼임을 확인하였다. .NET 기술 기초 연구를 통해 웹기반 발파설계 프로그램은 스마트 클라이언트 시스템으로 구현하는 것이 효과적이며, 스마트 클라이언트 시스템 구현에 있어서도 .NET Framework 시스템과 .NET Framework이 지원하는 개발 도구의 적용이 유용함도 확인하였다.

.NET 기술 기초 연구 결과에 기초하여 웹기반 발파설계 프로그램의 프로토타입을 구현하였으며, 이를 통해 웹을 기반으로 구동되는 프로그램의 구현 가능성을 확인하였다. 본 프로그램 개발에 앞서 프로토타입을 구현하는 과정에서 웹기반 프로그램의 사용시 보안권한 설정, 개발시 디버깅 어려움과 같은 문제를 사전에 인지할 수 있었으며, 이에 대한 해결 방안을 도출하였다.

한편, 향후 개발될 웹기반 발파설계 프로그램에 필요한 기초 자료 구조를 분석하고 이를 기반으로 기본적인 데이터베이스 스키마를 구성하였다. 이러한 자료 구조 분석과 스키마 구성 결과는 제 1세부과제의 지반정보 시스템과 연계되는 효과도 창출하였다. 향후, 당해년도 연구 결과에서 확인된 .NET 기반 스마트 클라이언트 방식의 프로그램 구조를 바탕으로, 웹기반 발파설계 프로그램이 사용할 XML 형태의 파일 구조와 내부 데이터 구조를 설계하기 위한 연구를 진행할 계획이며, 이러한 연구 결과를 통합하여 웹기반 발파설계 프로그램을 개발할 예정이다. 또한, 발파설계 프로그램이 작성한 발파패턴을 데이터베이스에 저장하고 관리하는 발파설계 관리시스템을 서버 애플리케이션 방식으로 개발하고, 통합 정보 시스템과 연계되는 웹사이트를 구축함으로써 급속시공에 적합한 발파설계 시스템을 개발할 계획이다.

제4세부과제

급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발

〈Part I〉 고성능 숏크리트

1. 개요

본 세부과제에서는 국산 신소재를 활용한 숏크리트의 고강도 및 고품질화를 목표로 하고 있다. 기본적으로 숏크리트의 고성능화를 위한 필수적인 핵심 재료로서 급결제, 혼화재 및 고성능감수제를 선정하였다. 급결제로는 숏크리트의 조기강도 뿐만 아니라 장기강도의 확보를 위해서 알칼리프리게 급결제를 사용하였으며, 특히 본 세부과제의 목표 달성을 위해 고성능 숏크리트를 위해 필수적인 국외의 실리카 흙(silica fume)을 대체할 수 있는 혼화재인 고반응성 메타카올린 (High Reactivity Metakaolin, HRM)과 물/시멘트비 저감과 함께 장대터널에서 유동성을 확보할 수 있는 폴리카르본산계 고성능 감수제를 핵심 재료로 선정하였다.

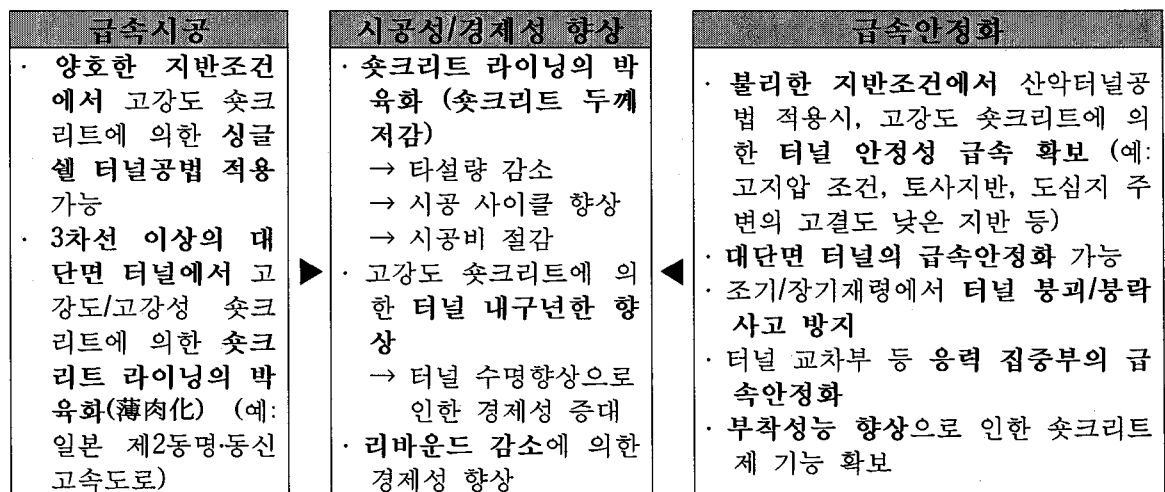
당해연도의 본 세부과제에서는 이상과 같이 고반응성 메타카올린과 폴리카르본산계 고성능 감수제의 적용을 통한 숏크리트 고성능화에 대한 기초 실험 연구를 실시하였으며, 주된 내용은 다음과 같다.

2. 고성능 숏크리트의 필요성 정리

본 연구에서는 국내외 고성능 숏크리트의 사례를 분석하여 고성능 숏크리트의 필요성과 그에 따른 적용분야를 적용하였다. 이상과 같이 분석된 고성능 숏크리트의 사례는 다음 장에서 설명할 고성능 숏크리트의 설계강도 결정시에도 사용되었

다. 숏크리트의 고성능화로 인한 효과는 본 연구과제에서 추구하고자 하는 터널의 급속시공과 급속안정화로 구분할 수 있다.

첫 번째로 숏크리트의 고성능화로 인한 급속시공의 도모이다. 대단면 터널에서 기존의 일반 숏크리트를 적용할 경우에는 숏크리트 라이닝의 타설 두께가 증대되는데, 고강도 숏크리트를 적용할 경우에는 숏크리트의 타설 두께를 저감시켜 급속시공에 기여할 수 있게 된다. 본 연구에서 정리한 고성능 숏크리트의 필요성은 다음의 그림 1과 같다.



<그림 1> 고성능 숏크리트의 필요성

두 번째로 숏크리트의 고성능화에 의해서 터널의 급속 안정화를 도모할 수 있다는 것은 자명한 사실이다. 특히 불리한 지반조건에서, 예를 들어 고지압 조건, 토사지반, 단층대 주변 또는 도심지의 고결도가 낮은 지반 등에서 고강도 숏크리트를 적용하여 굴착 직후 터널의 변형을 최소화하여 터널의 급속 안정화를 도모할 수 있다.

이외에도 숏크리트의 내구성이 증대됨으로 인해 터널의 장기 내구성을 확보할 수 있게 된다. 또한 숏크리트의 고성능화에 필수적인 실리카 흙과 같은 미분말 혼화재를 사용할 경우, 타설면에 대한 숏크리트의 부착성이 향상되어 결과적으로 숏크리트의 리바운드(rebound)를 저감시킬 수 있게 되어 터널의 안정성 확보와 내구년한 향상을 고려한다면 숏크리트의 고성능화로 인한 재료비 상승부담을 배제할

수 있을 것으로 판단된다.

3. 고성능 슛크리트의 설계강도 결정

본 연구에서 목표로 하고 있는 고성능 슛크리트의 성공적인 개발을 위해서는 슛크리트의 미래 수요와 기대 성능을 고려한 목표 강도를 설정하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

Clements(2002)는 다음의 표 1과 같이 슛크리트의 발전 동향과 미래 성능을 예상하였다. 이에 따르면 2000년대의 슛크리트 압축강도는 40 MPa로 예상하고 있으며, 리바운드는 10%이하, 그리고 급결제로는 안전하고 장기 강도를 확보할 수 있는 알칼리프리계 급결제를 기본으로 고려하고 있다.

<표 1> 슛크리트의 발전동향과 미래 예상

변수	1980년대	2000년대	2020년대
압축강도	25 MPa	40 MPa	40 MPa
리바운드	30 %	10 %	5 %
급결제	물유리계 실리케이트 급결제	알칼리프리계 급결제	안전하고 작업성이 좋은 급결제
생산성	6 m ³ /hr	8 m ³ /hr	10 m ³ /hr
비용(\$)	100	125	75
인성(round panel)	200 J	400 J	1,000 J
유해성 및 안전성	나쁨	우수	훨씬 좋음

또한 국외의 고성능 슛크리트 라이닝에 대한 설계강도 기준을 조사한 결과를 정리하면 다음의 표 2와 같다. 고성능 슛크리트 라이닝에 요구되는 1일 강도는 현행 국내 기준과 마찬가지로 10 MPa인 경우가 대부분이었으며, 재령 28일에는 30 MPa 이상인 경우가 많았다. Melbye(2000)는 다음의 표 3과 같이 슛크리트의 요구 성능에 따른 제반 품질기준을 설정하였다. 또한 각 슛크리트 종류에 따른 주요 배합설계시의 특징은 표 4와 같다.

〈표 2〉 국외의 고성능 스폿크리트에 대한 설계강도 기준

양생일수	압축강도 (MPa)	출처
3시간	1.0~3.0 2.0	일본Geo-Front연구회(2000): 싱글셀 일본제2동명·동신터널(2000): 대단면터널
8시간	5	Wood(1992)
1일	5 7 8* 9 10	일본 터널협회(1991) 오스트리아(J1기준) AFTES(1992), 영국 오스트리아(J2기준) EFNARC(1992), 일본Geo-Front연구회(2000): 싱글셀 일본제2동명·동신터널(2000): 대단면터널
3일	20	Wood(1992)
7일	17* 25 30	AFTES(1992) EFNARC(1992) Morgan(1991), Wood(1992)
28일	18 25** 30 35 35*** 36 38 40* 40 45	일본 터널협회(1991) AFTES(1992) JCI(1991), EFNARC(1992) 영국, 스웨덴 스톡홀름 교통국(1990) Maidl(1992) 일본Geo-Front연구회(2000): 싱글셀 일본제2동명·동신터널(2000): 대단면터널 오스트리아(J1기준) Maidl(1992): 독일 오스트리아(J2기준), Morgan(1991): 캐나다 등 스웨덴 철도청(1991)
90일	35	EFNARC(1992)
* 산술평균 ** 특성강도(characteristic strength) *** 단일수치 EFNARC: European Specification for Sprayed Concrete JCI: Japan Concrete Institute AFTES: French Tunnelling Association		

<표 3> 슛크리트에 대한 최소 성능 요구사항 (Melbye, 2000)

변수		시험방법	Sprayed concrete P1	Sprayed concrete P2	Sprayed concrete P3
Characteristic in situ cube strength****					
Site trial	재령 1일	BS1881	10 MPa	**	**
	재령 7일	BS1881	28 MPa	20 MPa	**
	재령 28일	BS1881	45 MPa	37 MPa	30 MPa
Works test	재령 1일	BS1881	8 MPa	**	**
	재령 7일	BS1881	21 MPa	20 MPa	**
	재령 28일	BS1881	35 MPa	28 MPa	23 MPa
Flexural strength					
Site trial	재령 28일	EFNARC	4.6 MPa	4.6 MPa	**
Works test	재령 28일	(1996)	4.2 MPa	4.2 MPa	**
Residual strength value		Deflection			
		1mm/3mm			
Site trial	재령 28일	EFNARC	3.5/3.0 MPa	2.0/1.5 MPa	**
Works test	재령 28일	(1996)	3.5/3.0 MPa	2.0/1.5 MPa	**
Bond strength to rock***			0.5 MPa	0.5 MPa	**
Durability/permeability test (maximum penetration)			**	30mm	**
Dry density (재령 28일)		ASTM C642-90	2,275 kg/m ³	2,275 kg/m ³	2,275 kg/m ³
Boiled absorption (재령 7일)		ASTM C642-90	최대 9%	최대 8%	**
Voids volume (재령 7일)		ASTM C642-90	최대 19%	최대 17%	**
Setting time		EFNARC (1996)	9분	**	**
초결 종결			60분	**	**

<표 4> 슛크리트 성능에 따른 배합 요구사항

변수	Sprayed concrete P1	Sprayed concrete P2	Sprayed concrete P3
시멘트량	포틀랜드시멘트 Class 52.5N(또는 pfa혼합 시멘트) 및 마이크로 실리카	포틀랜드시멘트 Class 52.5N 및 마이크로 실리카	포틀랜드시멘트 Class 52.5N 및 마이크로 실리카
최소 시멘트량*	400 kg/m ³	400 kg/m ³	400 kg/m ³
최대 w**/c+s 비율	0.5	0.45	0.45
마이크로실리카 함량	5~10% (pfa혼합시멘트의 경우에 4~8%)	5~10%	5~10%
섬유: 최소 인장강도 최소 길이 최대 길이 최소 사용량*	> 800 MPa 25mm 40mm 40 kg/m ³	> 800 MPa 25mm 40mm 40 kg/m ³	*** *** *** ***

* = 작업시

** = 물에는 액상 혼화재료의 액체 함량이 포함됨

*** = 사용되지 않음

<표 5> 국외의 고성능 숯크리트 적용 현장 사례

3시간(4시간)강도	< 1 MPa	1~3 MPa	3~5 MPa	≥ 5 MPa		
빈도 (비율 %)	0	2 (25%)	4 (50%)	2 (25%)		
(a) 3시간 또는 4시간 강도						
1일 강도	< 10 MPa	10~15 MPa	15~20 MPa	20~25 MPa	≥ 25 MPa	
빈도 (비율 %)	1 (4.1%)	6 (25.0%)	9 (37.5%)	4 (16.7%)	4 (16.7%)	
(b) 1일 강도						
28일 강도	20~25 MPa	25~30 MPa	30~35 MPa	35~40 MPa	40~45 MPa	≥ 45 MPa
빈도(비율 %)	0 (0.0%)	2 (6.4%)	5 (16.1%)	3 (9.7%)	7 (22.6%)	14 (45.2%)
(c) 28일 강도						

세계 최대의 숯크리트 관련 재료 생산업체인 degussa사의 알칼리프리게 급결제 적용 현장 사례를 분석한 결과에서도 표 5와 같이 매우 유사한 경향을 나타내었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 설정한 고성능 숯크리트의 목표강도는 표 6과 같다. 여기서 강섬유 혼입량은 40kg/m^3 을 기본으로 하고 있으며, 급결제는 알칼리프리게 급결제로서 협동연구기관이자 참여기업인 실크로드시엔티의 제품을 사용하게 된다. 또한 숯크리트의 고강도화를 위하여 국산 미분말 혼화재인 고반응성 메타카울린을 적용한다. 그리고 고성능감수제는 폴리카르본산계인 실크로드시엔티의 제품을 사용한다.

<표 6> 본 연구에서 설정한 고성능 숯크리트의 설계강도

세령	3시간*	1일**	28일***
압축강도	1-3 MPa	10 MPa	40 MPa

*: 일본 고강도 숯크리트 및 오스트리아(싱글셀터널 기준) 기준 참조

**: 가장 일반적인 고강도 숯크리트의 1일 강도

***: Clements(2002)의 발전 동향 등 참조

※ 강섬유 혼입율: 40 kg/m^3

※ 급결제: 액상 급결제 (실크로드시엔티 제품)

※ 혼화제: 메타카울린(국산/외국산)

※ 고성능감수제: 폴리카르복실계 (실크로드시엔티 제품)

4. 고성능 숯크리트의 기본 배합설계

본 연구에서는 실리카 흙을 대체할 수 있는 미분말 혼화재인 국산 메타카울린과 물/시멘트비 저감과 유동성 확보를 위한 폴리카르본산계 고성능감수제를 활용한 고

성능 숯크리트의 기본 배합설계를 위한 실내 배합시험을 실시하였다. 이상의 결과로부터 고성능 숯크리트의 기본적인 최적 배합조건을 도출하고 이를 차년도 이후의 실제 숯크리트 타설 시험을 통해 수정·보완할 계획이다.

4.1 사용재료

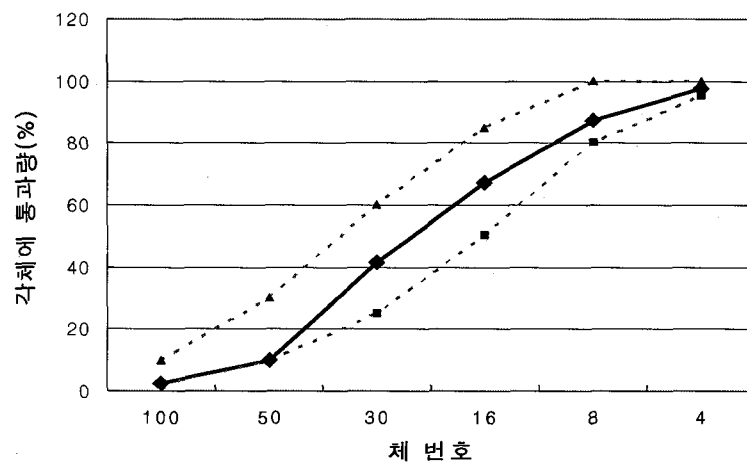
4.1.1 시멘트 및 골재

본 연구의 배합시험에서 사용한 시멘트는 시중에서 판매되는 KS L 5201에 적합한 H사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 물리적 특성은 표 7과 같다.

굵은 골재는 최대치수 13mm인 쇄석을 사용하였고 잔골재는 비중 2.6, 흡수율 0.67이었다. 잔골재의 입도는 그림 3과 같이 KS 입도표준 범위를 벗어나지 않았으며 조립률은 KS F 2526의 잔골재의 조립률 2.3-3.1 범위 안에 들어오는 2.86의 강사를 사용하였다.

<표 7> 시멘트의 물리적 특성

구 분	분말도 (cm ² /g)	비 중	안정도 (%)	압축강도 (MPa)		
				3 days	7 days	28 days
1종시멘트	3,488	3.15	0.08	22±2	30±2	38±3
KS L 5201	2,800	-	0.8↓	13↑	20↑	29↑



<그림 3> 잔골재 입도분포곡선

4.1.2 메타카올린

메타카올린은 카올린(고령토)을 활성화하여 콘크리트에 혼입할 경우 실리카 폼처럼 콘크리트 내부의 수산화칼슘과 반응하여 포졸란 반응을 일으키는 재료이다. 표 8과 같이 4개 지역에서만 약 2,646만톤 가량의 카올린이 매장되어 있었다. 국내의 실리카 흙의 경우 전량 수입에 의존하고 있고 다른 혼화재에 비해 가격이 비싸고 국내에 매장되어 있는 카올린을 이용한 고성능 쏫크리트를 개발하여 재료절감으로 인한 공사비용을 줄일 수 있다고 본다. 양질의 카올린(kaolin)을 하소하여 생성되는 메타카올린의 화학성분의 한 예를 실리카 폼과 비교하여 나타낸 것이 표 9이다. 실리카 폼이 약 90% 이상이 SiO_2 인데 비하여 메타카올린은 SiO_2 와 함께 Al_2O_3 도 많은 비중을 차지하고 있다.

이렇게 메타카올린은 주로 실리카(SiO_2)와 알루미나(Al_2O_3)로 구성되어 있으며, 두 성분이 모두 비정질이며 큰 비표면적을 가지고 있기 때문에 고도의 포졸란성 재료이다. 메타카올린이 시멘트 페이스트 배합에 혼입될 때 뚜렷한 수밀성을 가지고, 이러한 수밀성은 강도 증진과 투수성 감소의 결과를 나타낸다. 메타카올린은 평균 입경이 시멘트 입자(약 $10\mu\text{m}$)보다는 더 작으나 실리카 폼($0.1\mu\text{m}$)보다는 더 큰 약 $1\sim 2\mu\text{m}$ 정도이다. 입자의 형상은 실리카 폼이 둥근 구형인데 반하여 메타카올린은 작은 판상 모양을 하고 있다. 메타카올린의 비표면적은 약 $120,000\sim 150,000\text{cm}^2/\text{g}$ 정도이며 비중은 종류에 따라 다르나 약 2.4~2.5 정도이다. 그림 4와 그림 5는 메타카올린과 실리카 흙 입자의 모습이다.

<표 8> 국내서부 경남지역의 카올린 매장량(단위: 톤)

지역	등급별 매장량	지역별 매장량	총 매장량
산청지역	백색 6,400,000	14,600,000	백색 9,713,000 도색 16,847,000 총 매장량 26,560,000
	도색 8,200,000		
하동지역	백색 460,000	5,520,000	
	도색 5,060,000		
합천지역	백색 2,750,000	5,761,000	
	도색 3,010,000		
단성지역	백색 103,000	680,000	
	도색 577,000		

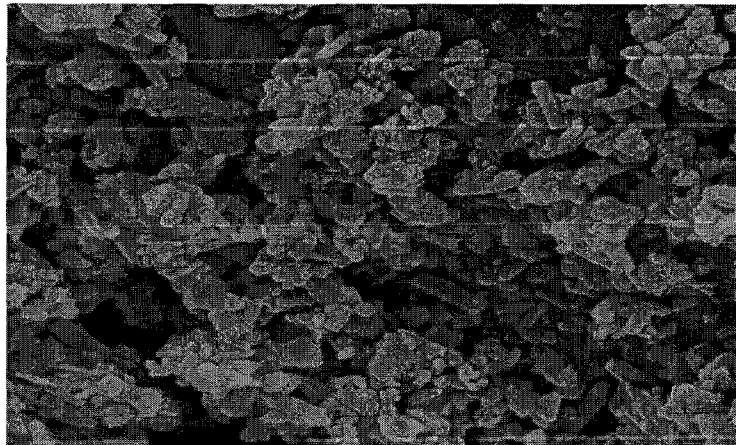
<표 9> 실리카 폼과 메타카올린의 성분

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SrO	SO ₃	LOI
MK [*]	52.06	45.29	0.60	1.64	0.02	-	0.05	0.21	0.16	0.10	0.10	-	0.51
SF ^{**}	94.0	0.3	0.8	-	-	0.4	0.3	0.2	0.8	-	-	-	2.8

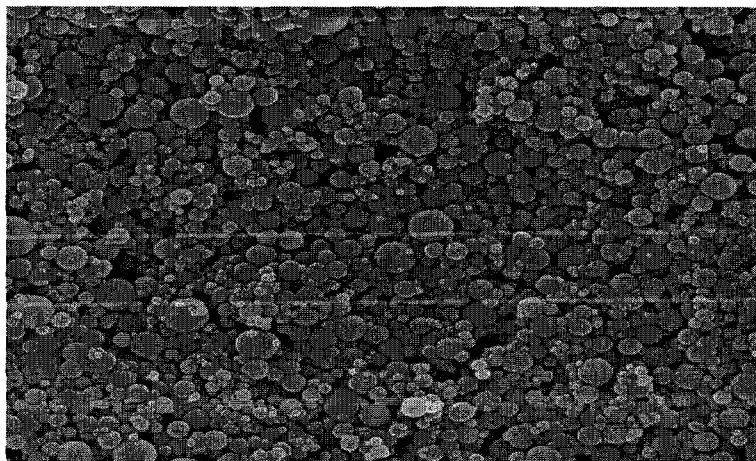
* : Metakaolin

** : Silica Fume

본 실험에서는 국외(중국산)에서 생산되고 있는 메타카올린과 국내에서 생산되는 메타카올린을 사용하였다. 표 11과 표 12 및 그림 6과 7은 국외산과 국내산의 메타카올린의 특성을 나타내었다.



<그림 4> 메타카올린의 SEM 촬영모습



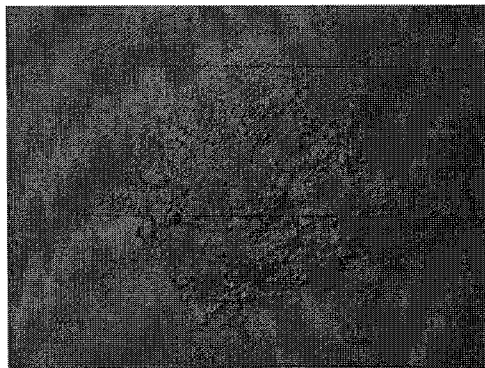
<그림 5> 실리카 폼의 SEM 촬영모습

<표 11> 국외산 메타카올린의 물리·화학적 특성

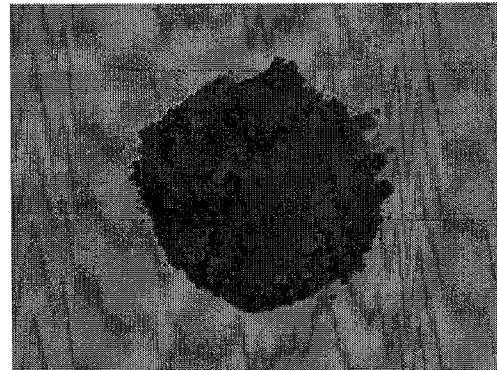
Metakaolin (MK)	물 리 적 특 성				
	분말도(cm ³ /g)		비 중		
	12000		2.43		
	화 학 적 특 성				
	화 학 성 분 (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
		52.1	45.3	0.60	1.64
K ₂ O		Na ₂ O	CaO	lol	
0.16		0.21	0.05	0.51	

<표 12> 국내산 메타카올린의 물리·화학적 특성

Metakaolin (MK)	물 리 적 특 성			
	분말도(cm^3/g)	비 중	입도[44 μm Pass(%)]	부착수분(%)
	10000	2.53	90	0
	화 학 적 특 성			
	화 학 성 분 (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
		52	40	3
		K_2O	Na_2O	CaO
		0.6	0.4	1.2



<그림 6> 국외산 메타카올린



<그림 7> 국외산 메타카올린

4.1.3 급결제

인체에 무해하고 장기강도가 저하율이 적은 알칼리프리계 급결제는 실크로드시 엔티에서 앞서 표 6에서 설정한 목표강도, 특히 재령 3시간 및 1일 강도를 달성하기 위해 Taylor-made형태로 새롭게 제작한 알칼리프리계 급결제를 사용하였다. 사용된 급결제의 기본 물성은 표 13과 같다.

<표 13> 알칼리프리계 기본물성

급결제	주성분	형태	비중	pH
알칼리 프리계	알루미늄 화합물	연백색 액체	1.40	2.5 ~ 4.0

4.2 적정 급결제 사용량 결정을 위한 공기압식 Pin 관입시험

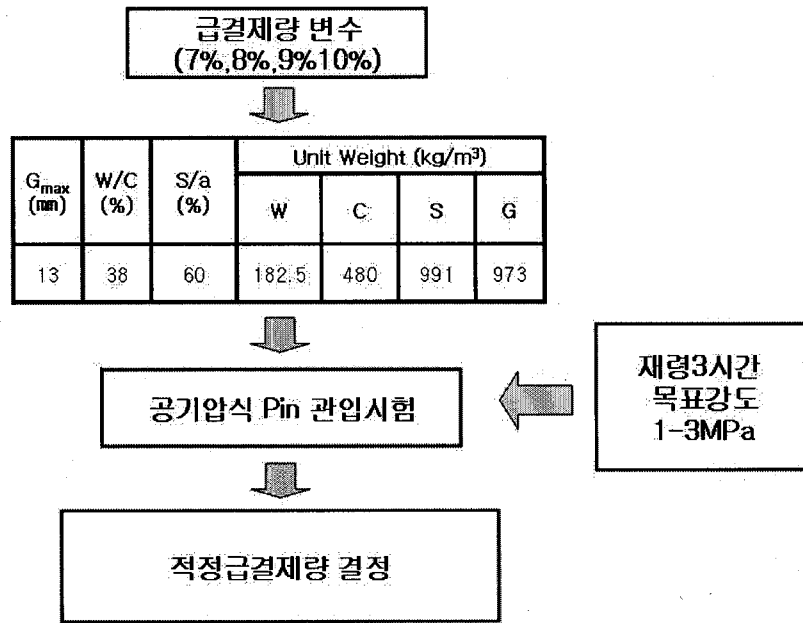
4.2.1 개요

지반과 슛크리트의 상호작용 측면에서, 지반의 지지력이 충분히 발현되기 이전에 지반하중을 지지할 수 있는 초기재령의 1-2일 강도가 중요한 것으로 보고되고 있다. 그러나 초기재령에서는 슛크리트 공시체를 제작하기 어려우며 코어링을 수행할 만큼 슛크리트의 초기강도가 충분하지 않기 때문에 슛크리트의 초기강도를 측정하기 위한 많은 간접적인 시험방법들이 요구되고 있으나 시험과정이 어렵거나 측정 가능한 강도 범위가 낮고 시험결과 신뢰성이 떨어지는 등 많은 문제점을 가지고 있다. 이에 현재 일본도로공단에서는 슛크리트의 강도측정방법을 공기압식 Pin 관입시험으로 규정하고 있다.

이에 고성능 슛크리트의 재령 3시간 목표압축강도 1-3MPa를 만족하는 급결제량을 결정하기 위하여 공기압식 Pin 관입시험을 통하여 적정 급결제량을 결정하고자 하였다.

4.2.2 실험계획

고성능 슛크리트를 위한 적정 급결제량을 결정하기 위하여 W/C=0.38, S/a=0.60의 배합비에 급결제량을 7-10% 변수로 하여 그림 8과 같이 실험을 실시하여 적정 급결제량을 결정하였다.



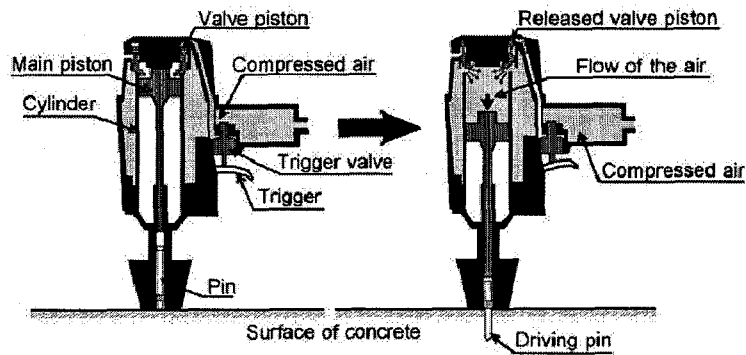
〈그림 8〉 적정 급결제량 결정을 위한 실험계획

4.2.3 공기압식 Pin 관입시험 장비

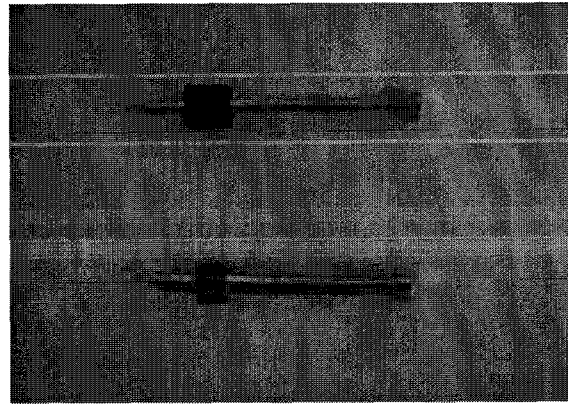
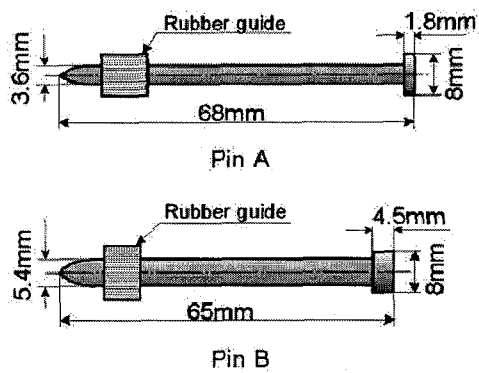
그림 9는 공기압식 nailer의 기계장치를 설명하고 공기압력은 1.47MPa이고 공기 호스와 장비 사이의 연결 부위에 디지털 압력계가 설치되어 있어 작동자가 쉽게 공기압력을 확인할 수 있다. 공기압식 Pin 관입시험에 사용되는 Pin은 그림 10과 같다.

4.2.4 공기압식 Pin 관입시험 방법

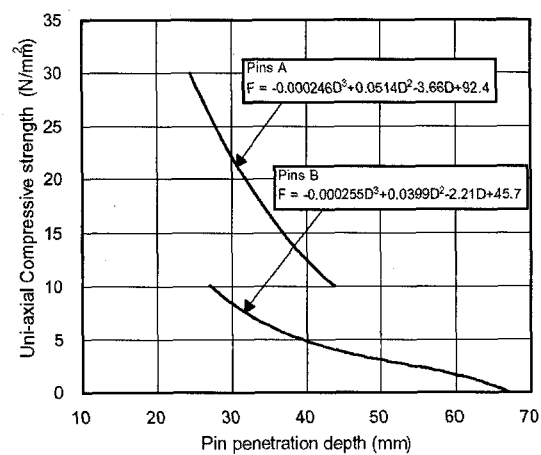
Iwaki 등은 슛크리트의 조기강도를 평가하기 위한 공기압식 Pin 관입시험의 적용성을 규명하기 위하여 실험실 시험과 현장시험을 실시하였다. 그 결과 Pin 관입깊이로부터 슛크리트의 압축강도를 추정하기 위하여 그림 11과 같은 식들을 제시하였다. 그림 12는 공기압식 Pin 관입시험 모습이며 그림 13은 관입깊이를 측정하는 모습이다.



〈그림 9〉 공기압식 nailer의 기계장치

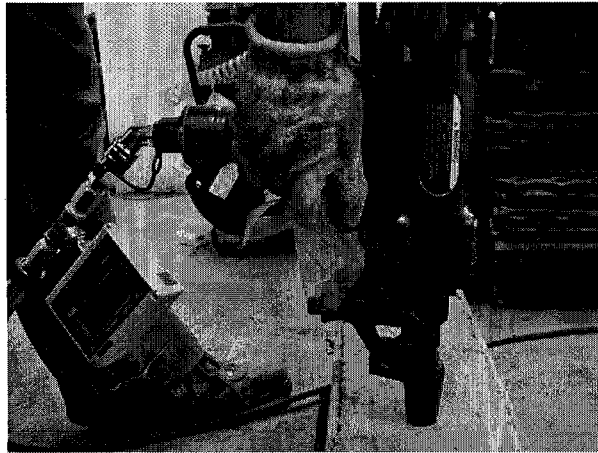


〈그림 10〉 공기압식 Pin 관입시험에 사용되는 Pin의 형태



*F=압축강도(MPa), D=관입깊이(mm)

〈그림 11〉 Pin 관입깊이와 일축압축강도 사이의 관계식



〈그림 12〉 공기압식 Pin 관입시험 모습



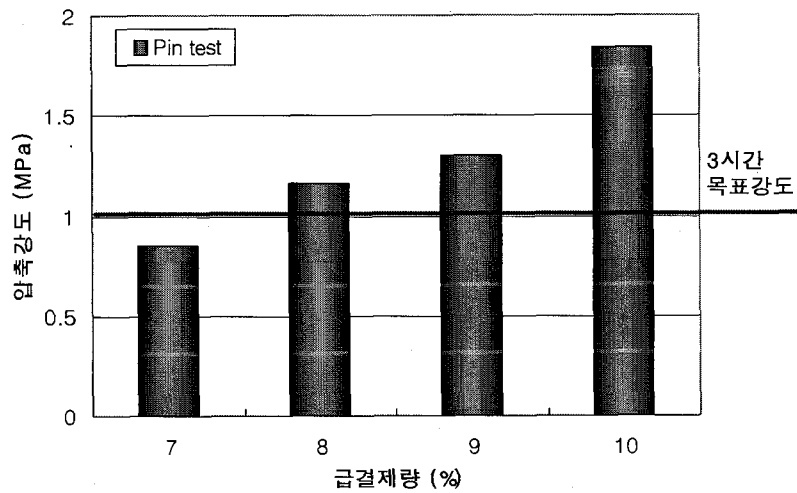
〈그림 13〉 공기압식 Pin 관입깊이에 따른 관입깊이 측정 모습

4.2.5 공기압식 Pin 관입시험 결과

메타카올린을 사용한 고성능 슛크리트를 위한 적정급결제량을 결정하기 위하여 공기압식 Pin 관입시험결과는 표 14 및 그림 14와 같다. 압축강도 결과를 보면 급결제 사용량 7%를 제외한 모든 급결제량에서 3시간 목표압축강도 1-3MPa를 만족하는 결과를 나타내었다. 또한 급결제량이 증가할수록 압축강도가 증가하는 것을 볼 수 있으나 급결제 사용량이 증가하면 장기강도가 강도가 현저히 감소하므로 본 연구에서는 3시간 목표압축강도 1-3MPa를 만족하고 경제성 대비 및 장기강도 저하가 적게 예상되는 알칼리프리계 급결제량을 8%로 결정하였다.

<표 14> 공기압식 Pin 관입시험의 압축강도 결과

급결제량 (%)	구 분		측정위치				평균 (mm)	압축강도 (MPa)
	Pin B		1	2	3	4		
7	1번	관입깊이	64.13	64.05	64.13	64.27	64.15	0.81
	2번	관입깊이	64.25	64.31	64.28	64.32	64.29	0.77
	3번	관입깊이	64.21	64.27	64.19	64.24	64.23	0.79
	평균						64.22	0.79
8	1번	관입깊이	62.43	62.48	62.29	62.69	62.47	1.18
	2번	관입깊이	62.58	62.65	62.54	62.84	62.65	1.15
	3번	관입깊이	62.53	62.76	62.45	62.72	62.62	1.15
	평균						62.58	1.16
9	1번	관입깊이	60.91	61.81	61.83	61.70	61.56	1.37
	2번	관입깊이	62.21	62.34	61.75	62.27	62.14	1.25
	3번	관입깊이	62.59	61.82	61.96	61.89	62.07	1.27
	평균						61.92	1.30
10	1번	관입깊이	58.94	58.53	59.46	60.11	59.26	1.79
	2번	관입깊이	57.69	58.57	58.10	58.11	58.12	1.97
	3번	관입깊이	59.37	60.37	58.87	59.20	59.45	1.75
	평균						58.94	1.84



<그림 14> 공기압식 Pin 관입시험의 압축강도 결과

4.3 목표 슬럼프 및 공기량을 위한 폴리카르본산계 유동화제량 및 AE제량 결정

국내외 문헌조사를 통해 결정한 10%를 치환한 메타카울린을 기준으로 8%와 12%의 변수를 토대로 예비시험을 실시한 후 표 15와 같은 배합비를 결정하였다. 이 배

합비의 목표슬럼프 및 공기량을 측정한 후 그 범위를 만족하는 폴리카르본산계 유동화제와 AE제의 혼입률을 결정하였다. 각 배합당 슬럼프, 공기량 및 혼입율은 표 16 및 그림 15-16과 같다.

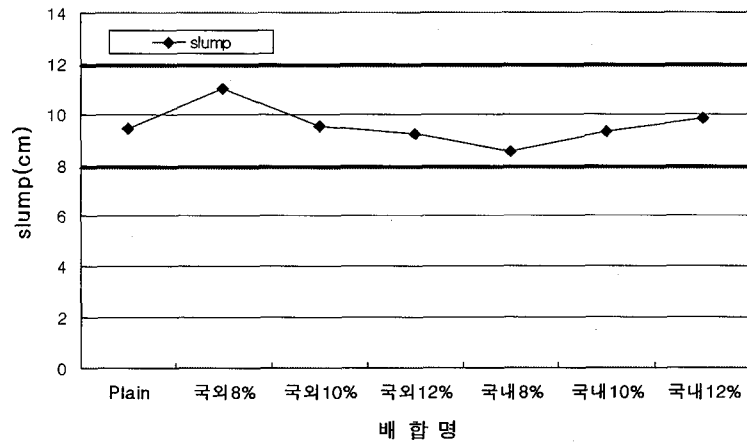
메타카울린 혼입량이 증가할수록 슬럼프가 저하되므로 유동화제량을 증가시켜 목표 슬럼프 값 $10 \pm 2(\text{cm})$ 의 만족시켰다. 또한 공기량은 배합에 상관없이 제조회사에서 추천하는 첨가량을 사용하여 목표 공기량 $3 \pm 1(\%)$ 을 모두 만족하였다.

<표 16> 메타카울린을 사용한 숏크리트 배합

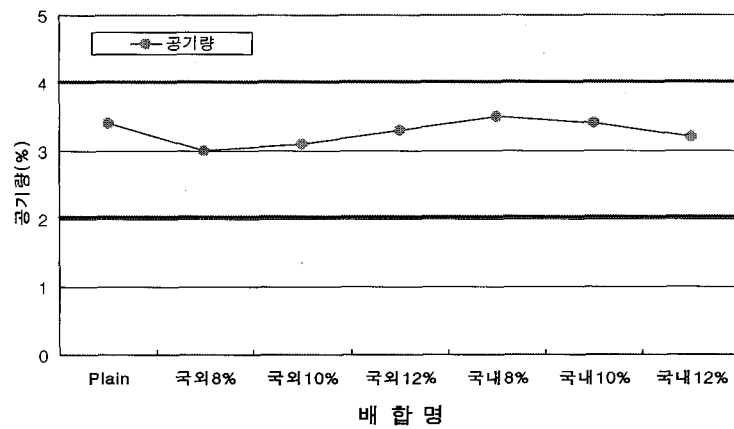
배합명	G _{max} (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kg/m ³)						
						W	C	MK	S	G	SP (g/m ³)	AE (g/m ³)
plain	13	10±2	38	60	3±1	182.5	480	-	991	973	-	-
MK8 (국내/외산)							446.4	33.6			-	-
MK10 (국내/외산)							436.8	43.2			-	-
MK12 (국내/외산)							427.2	52.8			-	-

<표 17> 메타카울린을 사용한 숏크리트의 혼화제 혼입율

배합명	Slump(cm)	Air (%)	혼 입 율 (결합제비 $\times$ %)	
			SP	AE
Plain	9.4	3.4	0.4	0.03
MK8%(국외)	11.0	3.0	0.5	
MK10%(국외)	9.5	3.1	0.6	
MK12%(국외)	9.2	3.3	0.7	
MK8%(국내)	8.5	3.5	0.5	
MK10%(국내)	9.3	3.4	0.6	
MK12%(국내)	9.8	3.2	0.7	



<그림 15> 배합별 슬럼프 측정 값



<그림 16> 배합별 공기량 측정 값

4.4 메타카올린을 사용한 고성능 슛크리트의 배합설계

메타카올린을 혼입한 슛크리트의 성능을 평가하기 위하여 4.2절 및 4.3절과 같이 급결제량 및 혼화제량을 결정하여 표 18과 같은 배합비를 결정하였다

<표 18> 메타카올린을 사용한 고성능 슷크리트의 배합설계

배합명	급결제 (kg/m ³)	G _{max} (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kg/m ³)					SP (g/m ³)	AE (g/m ³)
							W	C	MK	S	G		
plain	알칼리 프리계 급결제 (8%)	13	10±2	38	60	3±1	182.5	480	-	991	973	38.4	14.4
MK8 (국외)								441.6	38.4			48.0	
MK8 (국내)								432	48			57.6	
MK10 (국외)								422.4	57.6			67.2	
MK10 (국내)													
MK12 (국외)													
MK12 (국내)													

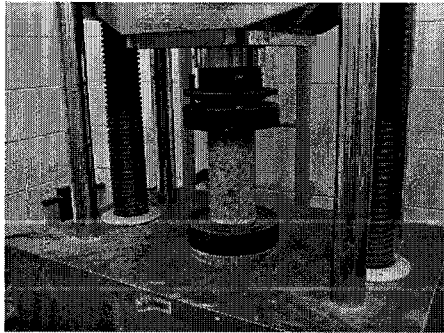
4.5 슷크리트의 고성능화를 위한 기본 배합실험

4.5.1 콘크리트 혼합

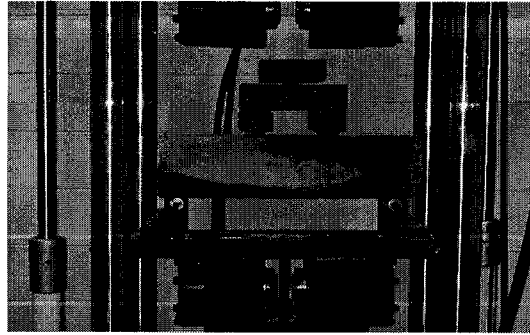
콘크리트는 20±3℃의 실험실에서 팬형 강제식 믹서를 사용하여 배합을 실시하였다. 재료투입 순서 및 혼합은 시멘트, 골재 및 미분말 혼화재를 투입하여 30초간 건비빔을 한 후 물과 고유동화제와 공기연행제를 미리 혼합한 후 된 비빔을 1분 30초간 실시한 후 급결제를 첨가하여 공시체를 제작하였다.

4.5.2 압축강도 및 휨강도 시험방법

그림 17과 같이 메타카올린을 혼입한 고성능 슷크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트 압축강도 시험방법」에 의하여 실시하였다. Ø100×200mm의 실린더형 공시체를 제작하여 재령 1일, 7일, 28일에 3개씩 제작하여 2회 반복실험을 실시하였다. 슷크리트의 휨성능을 평가하기 위하여 KS F 2408 「콘크리트의 휨강도 시험」에 의하여 그림 18과 같이 실시하였다. 150×150×150mm의 각주형 몰드를 재령 1일, 7일, 28일에 대하여 2개씩 공시체를 제작하였다. 제작된 공시체는 온도 23±2℃, 상대습도 50%의 항온항습실에서 1일 양생 후 23±2℃의 항온 조건에서 수중양생을 하였다.



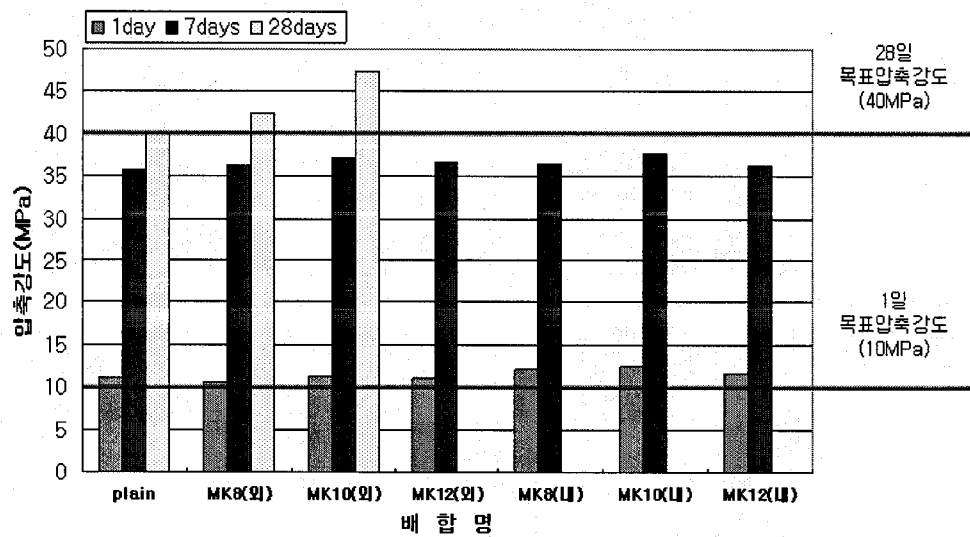
〈그림 17〉 압축강도 측정 모습



〈그림 18〉 휨 강도 측정 모습

4.5.4 실험결과

메타카올린을 사용한 숯크리트의 압축강도의 압축강도 결과는 표 19 및 그림 19와 같다. 재령 1일에서는 모든 배합에서 목표강도인 10 MPa를 만족하였고 재령 7일에서 모든 배합이 35MPa이상의 고강도를 나타냈으며 재령 28일에서 모든 배합이 목표강도인 40MPa를 만족할 것이라 본다.



〈그림 19〉 메타카올린을 사용한 숯크리트 압축강도 결과

〈표 19〉 메타카올린을 사용한 슛크리트 압축강도 결과

배 합	재 령 (일)	공 시 체 (MPa)			평 균 (MPa)
		1	2	3	
Plain	1	11.20	11.68	10.30	11.06
	7	36.06	35.74	35.24	35.68
	28	39.65	40.51	40.41	40.22
MK8% (국외)	1	11.29	10.19	10.43	10.64
	7	36.14	36.49	36.04	36.22
	28	41.33	43.45	42.68	42.49
MK10% (국외)	1	10.72	12.67	10.59	11.33
	7	37.05	37.87	36.78	37.23
	28	47.24	47.95	47.13	47.44
MK12% (국외)	1	11.20	11.62	10.65	11.16
	7	35.39	36.64	37.68	36.57
MK8% (국내)	1	12.20	11.85	12.43	12.16
	7	36.17	36.37	36.75	36.43
MK10% (국내)	1	12.97	12.14	12.23	12.45
	7	38.17	37.31	37.75	37.74
MK12% (국내)	1	11.29	11.33	12.45	11.69
	7	35.99	36.06	36.61	36.22

5. 정밀 슛크리트 타설장비의 도입

본 연구에서는 고성능 슛크리트의 기본 배합설계를 목적으로 실험실 조건에서 배합시험을 실시하였다. 이와 같이 도출된 기본 배합조건은 최종적인 최적 배합조건을 도출하기 위한 필수적인 자료이지만, 실제 실험실에서 배합된 슛크리트 공시체는 고압 분사에 의해 타설되는 실제 슛크리트와 상당한 차이를 보일 수 있다. 더욱이 슛크리트의 성능을 크게 좌우하는 변수 가운데 하나인 급결제 사용량을 정량적으로 조절할 수 있는 슛크리트 타설장비 또한 매우 부족한 실정이다.

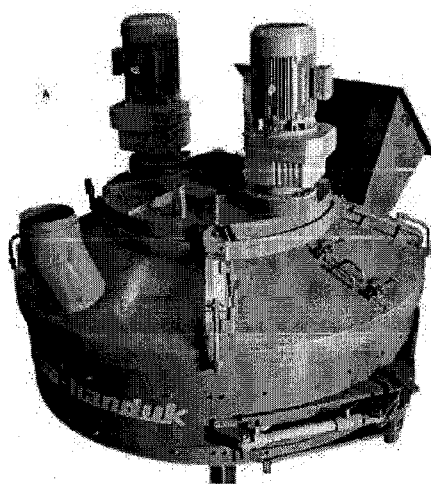
따라서 본 연구에서는 신재료를 사용하여 고성능 슛크리트를 개발하는데 목적을 두고 있기 때문에, 연구에 필요한 다양한 배합조건에 대해 급결제 사용량 등을 정량적으로 조절할 수 있도록 정밀 슛크리트 타설장비를 도입하게 되었다. 국내 자체 생산과 국외 제품 등을 전반적으로 검토한 결과, 장비 가격과 성능을 고려하여 슛크리트 정밀 자동화 타설장비인 SUPREMA 시스템을 도입하게 되었다.

이상의 SUPREMA 시스템의 외관은 그림 20과 같으며 PLC제어에 의해 콘크리트 토출량과 급결제 사용량이 정밀하게 제어되게 된다. 또한 원활한 콘크리트 토출을 위해서 double piston pump가 적용되어 있다. 이상의 SUPREMA 시스템은 7월말 도

입 예정이며, 2차년도에 도입할 그림 21의 대형 믹서 시스템과 함께 다양한 배합조건에서 실제 현장 조건을 고려한 타설 시험을 실시하여 본 연구에서 목표로 하는 메타카울린과 폴리카르본산계 고성능감수제에 의한 숏크리트 고성능화를 달성하고자 한다.



<그림 20> 정밀 숏크리트 타설시스템 SUPREMA (MEYCO사)



<그림 21> 고용량 대형 믹서 시스템

〈Part II〉 고성능 록볼트

1. 개요

록볼트는 숏크리트와 함께 터널의 안정성을 확보하기 위해 필수적인 터널의 주지보재이다. 하지만 숏크리트의 고성능화에 대한 연구는 국내외에서 비교적 활발히 진행되고 있는 반면, 록볼트에 대한 개선 사항이 많음에도 불구하고 록볼트의 고성능화에 대한 관심과 노력은 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 숏크리트와 함께 터널의 주지보재인 록볼트의 고성능화, 즉 고내력화와 고내구성화를 통해 터널의 급속시공 및 급속안정화에 기여하고 터널의 내구년한 향상을 도모하는데 목적을 두고 있다.

2. 고성능 록볼트의 필요성 정리

록볼트도 앞선 숏크리트와 마찬가지로 록볼트 정착재의 고내력화로 인해 터널의 급속시공과 급속안정화를 도모할 수 있을 뿐만 아니라, 정착재의 고내구성으로 인해 터널의 장기 내구성을 확보할 수 있게 된다.

일례로 대단면 터널인 일본의 제2동명·동신고속도로 시공시에 종래의 록볼트를 사용하는 표준지보패턴과 고내력의 록볼트를 사용하는 변경 지보패턴을 비교하였다. 여기서 종래 록볼트의 인발내력은 12-18톤에 불과하나, 고내력 록볼트의 인발내력은 30-40톤에 해당한다. 그 결과, 표 21과 같이 고내력의 록볼트를 적용함으로써 록볼트의 설치 간격을 줄일 수 있게 되고, 그로 인해 록볼트 설치 시간이 단축되어 시공 사이클의 효율을 향상시킬 수 있게 된다 (표 22).

〈표 21〉 일본 제2동명·동신고속도로에서 표준볼트패턴과 고내력 록볼트를 사용하는
변경패턴의 비교 (CI지산조건)

지보패턴	볼트 재질	내력	횡단면상 간격	종단면상 간격	볼트 길이
표준패턴	표준	18ton	1.2m	1.5m	6m
변경패턴	고내력	30ton	2.0m	1.5m	6m

〈표 22〉 록볼트 타설 사이클의 비교 (일본 제2동명·동신고속도로)

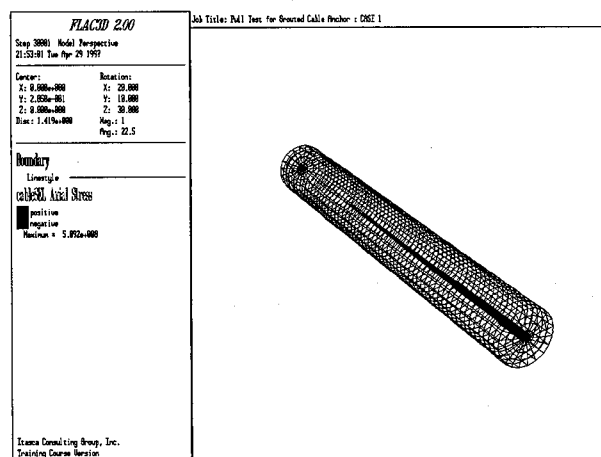
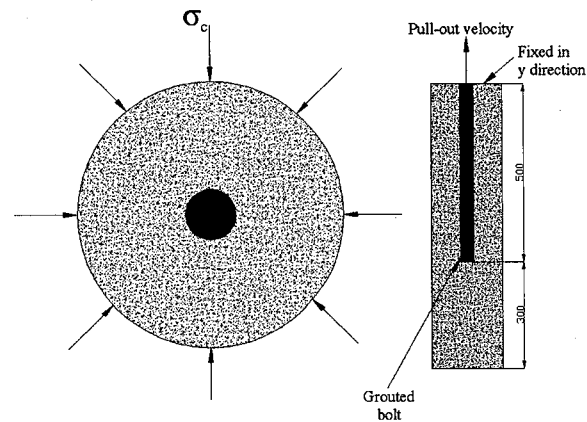
지보패턴	단위	CI지산조건	타설시간	표준패턴 대비 비율 (%)
표준패턴	개	17개	119분	100
변경패턴	개	11개	77분	65

3. 현행 록볼트 정착재의 성능평가와 문제점 분석

3.1 현행 시멘트 모르타르계 및 레진계의 성능 평가

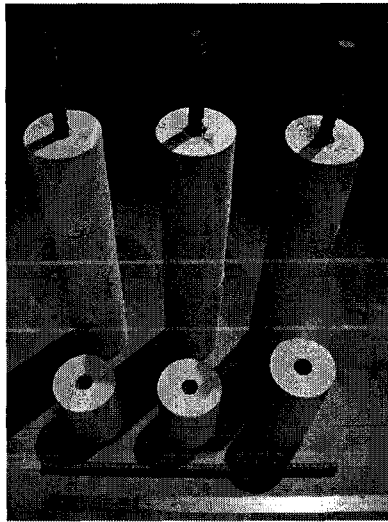
3.1.1 실험실 시험

실제 터널 현장조건에서는 록볼트가 설치된 직후에 슛크리트가 타설되므로 재령에 따른 록볼트의 성능을 평가하기가 어렵다. Stillborg(1994)는 록볼트의 하중-변형 특성을 실험실 조건에서 모사하기 위해 $3\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$ 크기의 시험장비를 적용하였으나, 시험장비가 비교적 큰 편인 관계로 시험이 용이하지 않으며 록볼트에 작용하는 구속압의 영향을 고려할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 록볼트의 재령에 따른 인발 성능을 쉽게 측정할 수 있는 시험장비를 고안하였다. 이때 사용되는 시험편의 크기와 경계 효과를 배제할 수 있는 최적의 시험편 크기를 결정하기 위하여 사전 수치해석을 실시하였다 (그림 22). 시험편은 암석에 구속압을 가할 수 있도록 원통형 형태로 가정하였다. 수치해석에 사용된 시멘트 모르타르 록볼트의 물성들은 ITASCA(1997)의 연구결과로부터 도출하였다. 수치해석 결과, 암석 시험편의 지름과 길이가 각각 140mm과 700mm 이상인 경우 크기 효과와 경계효과를 배제할 수 있는 것으로 얻어졌다.

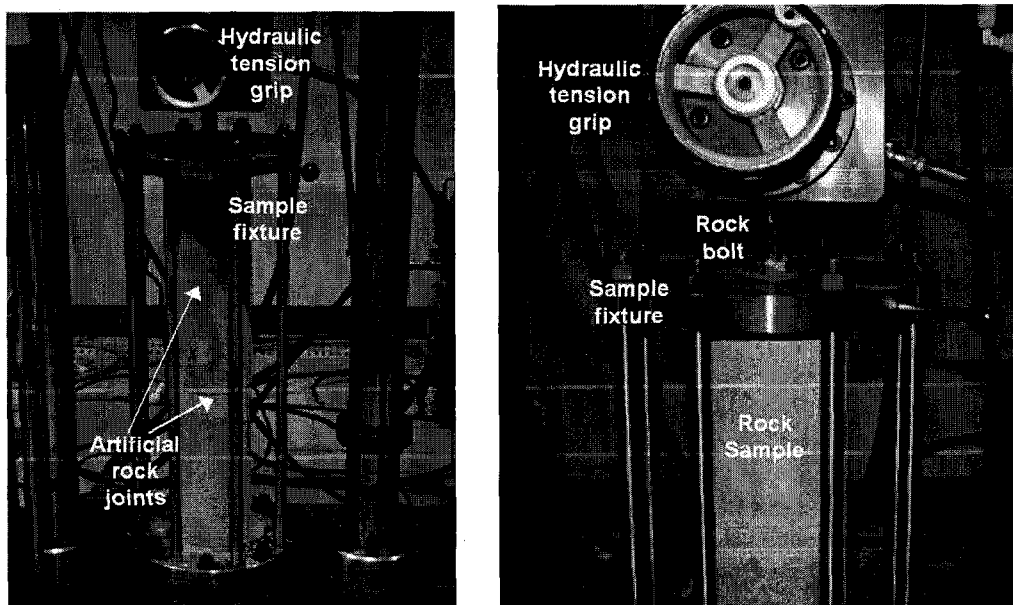


〈그림 22〉 록볼트 실험실 성능평가 장비 개발을 위한 수치모델

이상과 같이 결정된 록볼트 시험편의 재원은 시험지름 외경이 140mm, 시험높이가 700mm, 천공지름이 38mm, 천공깊이가 500mm, 록볼트길이가 650mm, 그리고 록볼트 지름이 25mm.이다. 그림 23은 이와 같이 제작된 실험실 시험용 록볼트 시험편의 재원을 보여 주고 있다. 제작된 록볼트 시험편은 그림 24와 같이 다목적 인장시험기를 이용한 록볼트 인발시스템과 록볼트 시험고정용 지그에 장착된다. 록볼트시험편에서 돌출된 록볼트는 유압그립으로 잡아서 인발실험을 수행하였다, 록볼트 인발력 실험은 한국도로공사규정, ASTM D-4435-04, 4436-04. 및 ISRM 추천시험법 등을 바탕으로 수행하였으며, 특히 ASTM에서 규정되어있는 록볼트의 인발응력 환산법을 사용하였다.



〈그림 23〉 완성된 록볼트 시편과 구성성분



〈그림 24〉 록볼트 실내 성능평가 시험기

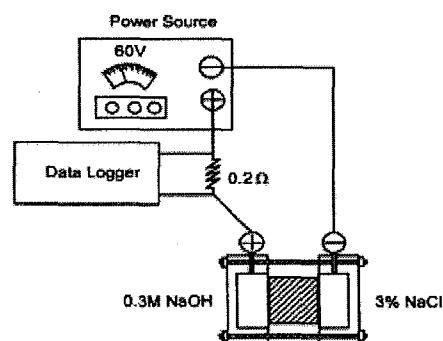
여기서 σ_b 는 볼트에 작용하는 응력, P 는 볼트에 작용하는 하중, A 는 볼트 단면적, U_b 는 볼트의 탄성변형, L 은 앵커와 두부 사이에 노출된 볼트 길이, E 는 볼트 강재의 탄성계수, U 는 볼트 두부의 전체 변위, 그리고 U_c 는 볼트 두부의 보정된 변위이다.

본 연구에서는 세 가지의 록볼트 정착재를 사용하여 록볼트 시편을 제작하였다.

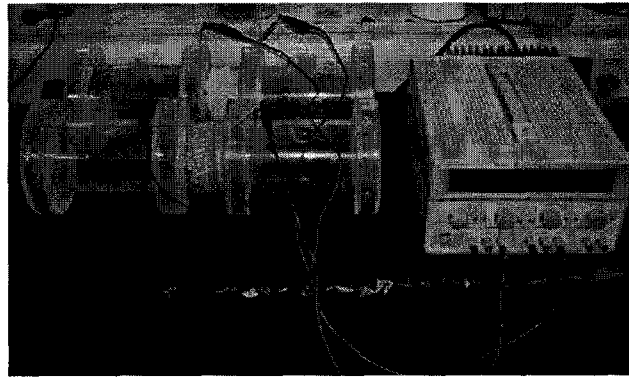
재령별로 2가지의 시멘트 모르타와 1가지의 레진 정착재에 대한 성능평가를 실시하였다. A사 제품은 물/시멘트비가 42%이고 B사 제품은 25%이다. 반면 수지계의 레진은 유리캡슐속에 MDI(Methylene diphenyl diisocyanate)와 PPG(Polyether polyol)가 개별적으로 포함되어 있다가 록볼트를 회전시키면서 두 재료가 혼합 발포하여 록볼트가 정착되게 된다.

그리고 각 정착재 종류에 따른 부식속도를 예측하기 위하여 염화물 확산계수(chloride diffusion coefficient)를 이용하여 록볼트 주변에 충전되어 있는 그라우팅재의 두께에 따라 시공 후 록볼트 부식시기를 추정하였다. 대표적인 염소이온 확산 실험인 electric acceleration method 방법 중의 하나인 Rapid Chloride Permeability Test (RCPT)을 AASHTO T277-89에 의거하여 수행하였다.

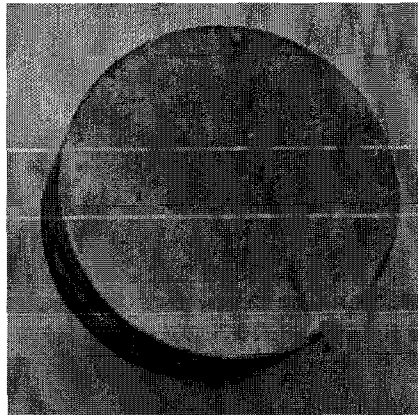
그림 25와 그림 26은 RCPT의 상세도와 실험장비를 이용하여 RCPT를 수행하고 있는 모습을 보여주고 있다. 그림 27에서 보여주듯이 RCPT를 위한 시멘트 그라우트 시편의 직경 및 지름은 각각 100mm와 50mm이다. RCPT장비는 음극과 양극에 각각 연결된 챔버에 3%의 NaCl용액과 0.3M의 NaOH용액으로 채운다. 그리고 30볼트의 전기를 각 챔버에 있는 시료 표면에 8시간동안 가한다. 이것은 염화물 이온이 시멘트 그라우트 시편속을 침투하는 것을 가속화 시키는 역할을 한다. 8시간동안의 촉진실험을 마친 시편은 염화물 이온의 침투 깊이를 추정하기 위하여 정확하게 둘로 쪼개어 진다. Colormetric method은 염화물 이온의 침투깊이를 추정하기 위하여 사용되어 지는데 이것은 $AgNO_3$ 용액을 둘로 쪼개어진 시편표면에 골고루 분사한 후 그 깊이를 측정하는 것이다. 그림 28은 염화물 침투 깊이를 측정하는 모습을 보여주고 있다.



<그림 25> Rapid Chloride Permeability Test 상세도



<그림 26> Rapid Chloride Permeability Test 장면



<그림 27> RCPT를 위한 시멘트 그라우트 시편



<그림 28> Colormetric method를 이용한 염화물 침투깊이의 측정

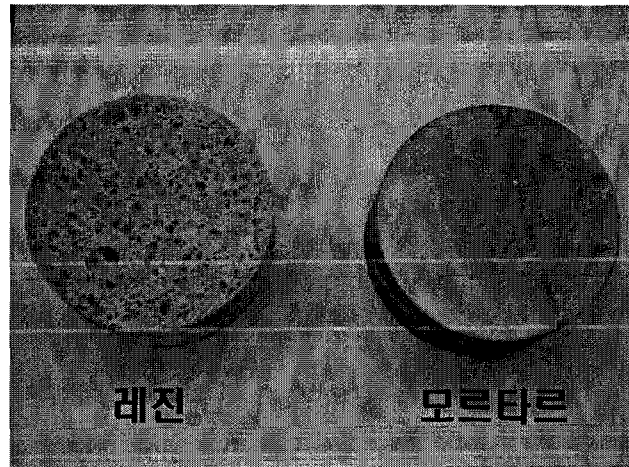
이상과 같이 3가지 종류의 록볼트 정착재에 대해 수행된 록볼트 인발시험 결과를 정리하면 다음의 표 24와 같다. 표 24의 결과에서 처럼 모르타르계 정착재를 사용한 경우에는 록볼트 정착길이가 단지 약 50cm였음에도 불구하고 상당히 큰 인발력이 얻어졌음을 알 수 있다. 하지만 레진계의 경우에는 조기재령뿐만 아니라 재령

28일에서도 인발 성능이 잘 발휘되지 않음을 알 수 있다. 이는 레진 생산업체의 저가경쟁과 국내 록볼트 관련 품질기준이 미흡하기 때문인 것으로 유추할 수 있다. 특히 국내 록볼트 인발성능에 대한 기준은 고속철도공사 시방서에는 지름 25mm 볼트의 경우 인발하중으로 12ton, 그리고 한국도로공사에서는 지름 25mm 볼트의 경우 인발하중 10ton을 표준으로 하고 있다. 그러나 이상의 인발하중 기준에는 록볼트 정착깊이와 재령에 대한 고려가 전혀 이루어지지 않고 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 록볼트 설치후 슛크리트가 바로 타설되기 때문에 록볼트 품질관리가 현실적으로 어려우며 발포 성능만 확보된 상태에서 충분한 인발력의 발현 없이 레진계 정착재가 사용되고 있는 것으로 보인다. 물론 이에 대해서는 논란의 여지가 있을 수 있기 때문에 추가적인 보완 연구를 실시하고자 한다.

<표 24> 실험실 시험에서 얻어진 록볼트의 인발 성능 평가 결과

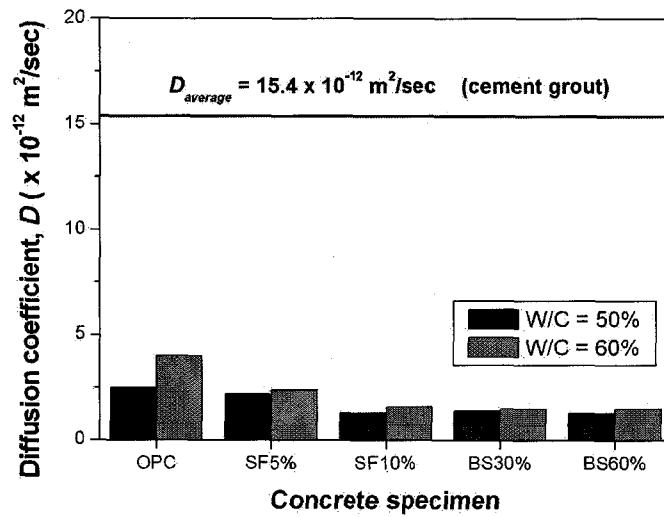
재령	모르타르계(국내 A사)	모르타르계(국내 B사)	레진계
1일	224.87 MPa (22.06 ton/m)	46.97 MPa (4.62 ton/m)	11.81 MPa (1.16 ton/m)
4일	469.38 MPa (46.08 ton/m)	271.08 MPa (26.66 ton/m)	15.67 MPa (1.54 ton/m)
7일	472.43 MPa (46.38 ton/m)	441.23 MPa (43.28 ton/m)	18.96 MPa (1.86 ton/m)
28일	600.56 MPa (58.96 ton/m)	-	46.60 MPa (4.58 ton/m)

이상의 인발 성능 평가결과 이외에도 록볼트 정착재의 내구성능을 평가하기 위해서 본 연구에서 처음 시도한 염화물 확산계수 측정시에도 레진계 정착재에 대해서는 실험이 불가능하였다. 즉, 레진계 정착재는 그림 29와 같이 매우 다공질인 관 계로 염화물과 같은 부식요인이 확산이 아닌 투과 형태로 전달되어 록볼트 설치 지점 주변에 부식 요인이 있는 경우에는 록볼트 설치후 짧은 시간내에 록볼트가 부식될 가능성을 가지고 있다.

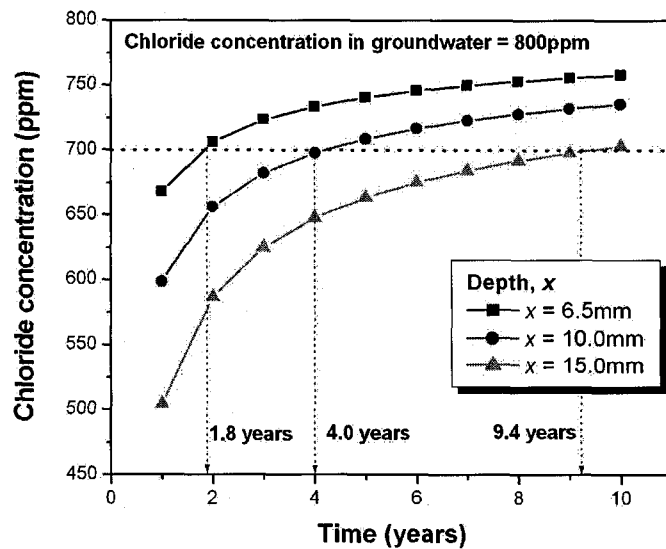


〈그림 29〉 염화물 확산계수 측정에 사용된 록볼트 정착재 시험편

모르타르 정착재의 경우에는 평균 확산계수가 $15.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 측정되어 일반 콘크리트와 비교하여 약 6~7배 정도 크게 나타났다 (그림 30). 즉, 이상의 결과로부터 일반 콘크리트 재료에서보다 모르타르 정착재에서 염화물에 의한 철근 부식이 더 크게 나타날 수 있을 것으로 얻어졌다. 예를 들어, 록볼트 설치시 염화물의 초기농도를 800ppm으로 가정하고 천공경과 록볼트 지름을 각각 38mm와 25mm로 설정한 경우, 1년 경과후 모르타르 내부의 염화물 농도는 초기 농도의 83.48%까지 이르게 된다 (그림 31). 필요한 경우에는 모르타르 정착재의 두께 증가를 통한 록볼트 부식을 지연시킬 수 있지만, 록볼트의 단지 35~50%만 완전충전되는 것으로 보고되고 있어(Stillborg, 1994), 부식환경에서는 록볼트의 완전충전이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 더욱이, 앞선 논의된 바와 같이 이와 같은 장기 내구성 측면에서 현행 레진계 정착재는 적용의 한계가 있는 것으로 평가할 수 있겠다.



〈그림 30〉 모르타르 정착재와 일반 콘크리트의 염화물 확산계수 비교



〈그림 31〉 모르타르 정착재의 시간경과에 따른 염화물 농도 예측

3.1.2 현장 시험

현장에서 록볼트의 초기인발력을 측정하기 위하여 강원도 OO터널현장에서 록볼트를 시공한 후 재령별로 현장 인발실험을 수행하였다. 실내실험에 사용된 록볼트 시편은 현장여건과 상이한 면이 있으므로 현장 인발실험결과와 실내실험결과를 비교하기 위하여 현장 록볼트 인발실험을 수행하였다. 표 25는 록볼트의 제원, 천공경 및 상용된 록볼트 충전재를 보여주고 있다. 현장인발실험에 사용된 록볼트는 이

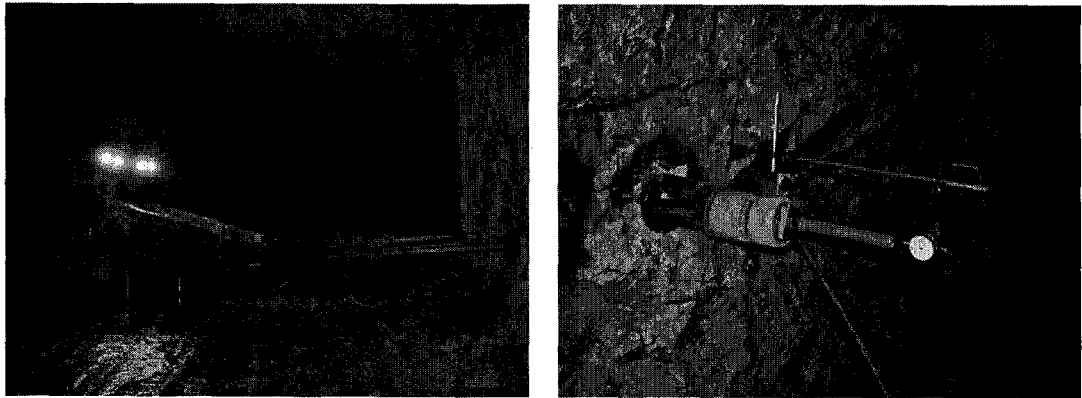
형철근이고 록볼트의 길이는 2m이며 록볼트의 직경은 25mm이다. 록볼트 충전재는 시멘트 밀크와 레진 두가지를 사용하였다. 록볼트 시공후 록볼트의 현장인발력은 재령 1일, 3일 및 7일에 수행되었으며 각 충전재별로 각 재령에서 2개의 록볼트가 인발시험되었다. 현장조건은 지하수가 많았으며 현장 록볼트 인발실험을 수행하기 위한 암반은 절리가 많은 석회암이었다. 또한 표면으로 드러난 석회암에는 절리와 절리사이에 clay가 존재하는 구역도 상당히 많이 발견되었다.

<표 25> 현장 록볼트 인발실험 개요

록볼트길이	2m
록볼트 직경	이형철근 25mm
천공직경	45mm
충진재	시멘트 밀크, 레진
인발재령	1일, 3일 7일

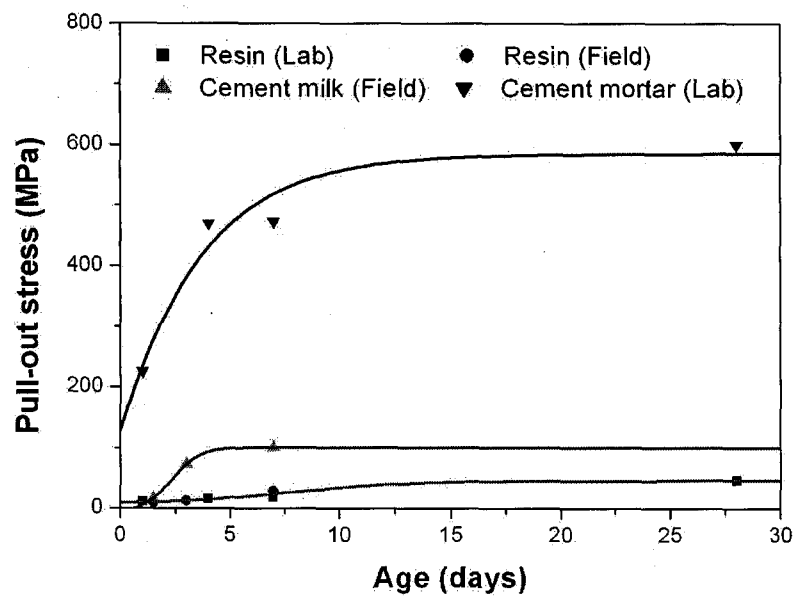
그림 32와 같이 점보드릴로 암반을 2m정도 천공하였으며, 천공경 지름은 약 45mm로 나타났다. 천공된 구멍에 시멘트 밀크와 레진을 이용하여 록볼트를 시공하였다. 충전재 레진은 공장제품으로 급결용 캡슐을 삽입하고 충전용 캡슐을 삽입한 후 록볼트를 삽입하고 에어드릴로 록볼트를 고속회전 시키면서 시공하였다. 시멘트 밀크 충전재를 이용한 록볼트 시공은 먼저 충전재 주입장치가 장착된 록볼트를 천공구에 삽입한 후 천공구 표면을 급결시멘트를 이용하여 밀폐시켰다. 완전히 밀폐가 된 후 시멘트 밀크를 고압으로 주입하였다. 현장 인발실험을 위한 록볼트는 지면에 수직인 암반면에서 수직으로 천공하였으며 방향은 지면방향과 일치하게 천공되었다.

현장에서 시공된 록볼트의 초기인발력을 측정하기 위한 록볼트 시공후 1일, 3일, 및 7일에 현장 인발실험을 수행하였다. 각 충전재별로 각각의 재령에서 2개의 록볼트에 대하여 현장인발실험을 수행하였다 (그림 33).



〈그림 32〉 록볼트 설치를 위한 천공작업 〈그림 33〉 현장 록볼트 인발시험 장면

현장에서 측정된 레진계 정착재를 사용한 록볼트의 인발성능은 실험실 시험결과와 매우 유사하게 나온 것을 알 수 있으며, 시멘트 밀크를 사용한 인발성능보다도 떨어지는 것으로 나타났다 (그림 34). 이상과 같이 실험실 시험을 통한 록볼트의 신속하고 간편한 성능평가가 가능하다는 것을 알 수 있다.

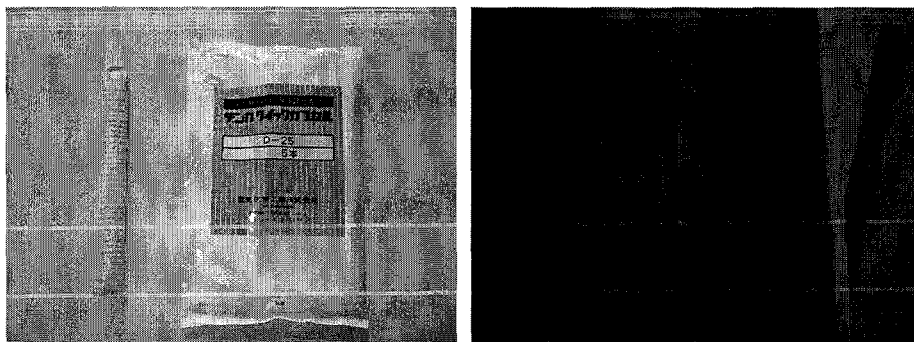


〈그림 34〉 재령에 따른 록볼트 인발성능 평가 결과

3.2 모르타르 캡슐형 정착재의 성능평가

본 연구에서 성능평가 대상으로 선정한 캡슐형 정착재는 일본 Denka에서 생산·판매하고 있는 제품으로서 그림 35와 같이 모르타르 정착재가 종이 성분의 포장내에 포함되어 있으며, 시공직전에 캡슐 정착재를 물에 약 20~30초 동안 적신 후 시공을 실시하게 된다.

표 26은 모르타르 캡슐형 정착재에 대한 인발성능 평가 결과로서, 재령 1일의 인발성능은 앞선 표 24의 국내 B사 모르타르 정착재의 경우와 유사하게 나타났으나 장기 재령의 인발성능 발현은 그다지 크게 나타나지 않은 것으로 나타났다. 특히 시공시에 유동성이 약하여 인력으로는 정착깊이가 긴 록볼트 시공이 불가능할 것으로 판단된다. 또한 수분에 약하므로 장기간의 보관에 유의해야 한다는 문제점도 있다. 따라서 모르타르 캡슐형 정착재 개발시에는 이러한 사항에 대한 고려가 필요할 것으로 보인다.



〈그림 35〉 모르타르 캡슐형 정착재

〈표 26〉 모르타르 캡슐형 정착재를 사용한 록볼트의 인발 성능

재령	모르타르 캡슐형 정착재 (일본 Denka사)
1일	60.22 MPa (5.92 ton/m)
4일	158.98 MPa (15.62 ton/m)
7일	213.94 MPa (21.00 ton/m)
28일	-

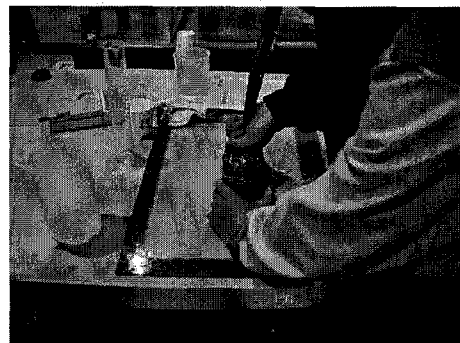
3.3 가소성 재료 검토

본 연구에서는 가소성(thixotropy)을 가진 일본 에르지社의 재료 특성을 록볼트 정착재로 반영하기 위한 검토 연구를 실시하였다. 여기서 가소성이란 특정한 비뉴턴성 유체가 가지는 고유특성으로서, 흔들어 준다던지 저어준다던지 하는 외부 힘을 가해주면 유동성이 좋아지고 운동이 멈추면 유동성이 낮아져 고형화되는 성질을 말하며 흘러내림 방지의 주요한 개념이라고 할 수 있다.

본 연구에서 검토한 가소성 재료는 그림 36과 같이 주입과 가압시에 유동성이 생성되며, 주입과 가압이 완료된 직후에는 고형 상태가 유지됨을 알 수 있다.



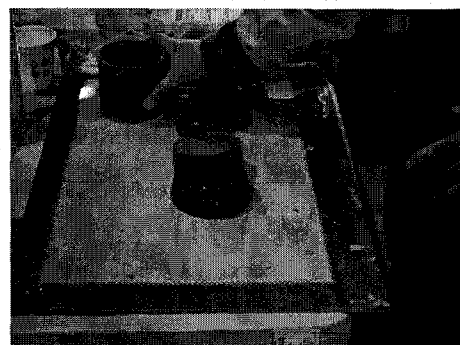
(a) A액과 B액의 혼합



(b) 혼합재 주입



(c) 주입 직후



(d) 탈형후

〈그림 36〉 가소성 그라우트 재료의 시험

이와 같이 일본 에르지社의 가소성 재료는 정착재 흘러내림을 방지하고 주입시의 유동성을 확보할 수 있는 좋은 재료로 판단되나, 모래와 같은 골재가 포함되어 있지 않아 재령 1일의 인발성능은 2.55 MPa (0.26ton/m)에 불과하여 시멘트 모르타

르게 정착재 인발성능의 1~5% 수준에 불과하였다. 가소성 재료를 만드는 기술은 이미 일반화되어 있기 때문에, 본 연구에서는 록볼트 정착재용으로 홀러내림 방식을 도모할 수 있는 가소성 재료를 개발하고자 한다.

3.4 종합 분석

이상과 같은 재료 검토 결과를 분석하고 그에 따른 문제점을 정리하면 다음의 표 27과 같다.

<표 27> 록볼트 정착재별 특징 및 문제점 분석

종류	시멘트 모르타르계	수지계	캡슐형
방법	· 첨가제(급결제, 경화촉진제 등)를 넣어 경화를 앞당긴다.	· 캡슐 안의 수지(resin)과 경화제를 락볼트의 삽입, 회전에 의해 화학반응을 일으켜 경화시킴	· 모르타르 캡슐을 물에 약 20~30초간 침지시킨후 천공홀에 투입
장점	· 저렴 · 천공경은 확대해도 모르타르를 충분히 충전할 수 있고, 정착력 확보가능 · 긴 구멍에서도 시공 가능 · 부식의 영향이 적고 내구성이 뛰어남	· 시공성이 좋음. · 조기에 큰 정착력이 얻어짐 · 다소의 용수가 있어도 시공이 가능	· 조기강도 발현이 빠름 · 시공과정 단순
문제점	· 품질관리에 주의 필요- 너무 경화하거나 너무 유동성이 있어도 시공성이 좋지 않음 · 용수가 있는 경우 모르타르가 홀러내리기 쉬움 · 조기강도의 발현이 수지형보다 늦음 · 팽창성(SO ₃) 없음	· 모르타르계보다 고가 · 천공경이 커지면 정착재가 부족하게 되어 정착 부족 · 천정부 시공시의 홀러내림 문제 · 플라스틱 캡슐 파편으로 인한 작업자의 상해 가능성 · 산,알카리등에 부식되기 쉬움(내구성 저하)	· 유동성이 낮아 시공 어려움 · 시공시간 조절이 어려움 · 습기에 취약하여 보관시 주의 필요

4. 록볼트 정착재의 재료 분석

4.1 국내·외 록볼트 정착재 조사 및 선행 특허 분석

4.1.1 시멘트 모르타르계

시멘트 모르타르계 정착재의 문헌 및 특허 조사로부터 정리한 국외 시멘트계 정착재의 종류 및 화학성분을 표 28에, 그리고 표 29에 시멘트 모르타르계 관련 국외 특허 및 내용을 나타내었다.

시멘트 모르타르계 정착재는 시멘트와 골재에 물을 혼련한 모르타르를 정착재로서 사용하는 것이지만 용출수 구간 등이 있을 경우나 지반의 변형이 큰 경우에는 단시간 내에 소정의 강도를 내는 정착재가 필요하게 된다. 단시간에 소정의 강도를 내는 정착재로서는 레진계의 정착재가 사용되고 있지만, 레진계 정착재는 가격이 고가이고 인발 내력의 발현과 장기 내구성 등의 문제점이 있어 내구성이 있고 단시간 강도가 높은 시멘트를 기본으로 한 재료가 절실히 요망되고 있다. 이를 위해 급경 시멘트 밀크를 이용한 방법이 제안되었지만 작업성이나 정착성이 떨어지는 문제가 있다.

또한 시멘트가 수화되면 수화열이 발생하며, 대량 타설을 실시할 때 수화열이 축열되어 온도균열이 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 소정의 입도를 가진 $3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$ 와 무기황산염을 사용하여 건조수축이나 수화열을 억제하고 강도발현도 향상되는 제품이 특허 JP1990-271945호로 등록되었다. 한편, 양호한 충전성을 보이면서 흘러내림 방지 및 재료분리성을 방지할 수 있는 시멘트 조성물(특허 JP2005-15426호)이 있으며, 그 외 다수의 특허가 유사한 재료 특성을 보이고 있다.

<표 28> 국외 시멘트 모르타르계 정착재의 종류 및 화학성분

생산업체	시멘트 모르타르계 종류	구성물질
Masei Cement사	캡슐형	시멘트, 입경 1.0mm이하의 골재, 감수제, 무수석고 칼슘알루미늄네이트 화합물, 칼슘설포알루미늄네이트 화합물
Denki Kagaku 工業사	캡슐형	시멘트, 무수석고, 칼슘알루미늄네이트, 쿠엔산, 탄산칼륨 골재 5호 or 7호 규사
Asai Kasei 工業사	캡슐형	알루미나 시멘트, 산화칼슘, 산화철 무수축제, 감수제
Asai Denka 工業사	시멘트계	비표면적 5000cm ² /g이상 미립자 시멘트, 알카리금속 규산염, 알카리 금속의 탄산염, 불화물염
Denki Kagaku 工業사	시멘트 모르타르계	조강 시멘트, 칼슘설포알루미늄네이트계, 알루미늄산 나트륨, 탄산칼륨, 1.2mm이하의 세골재, 고성능 감수제 분말, 셀룰로오스계 증점제
Asai Denka 工業사	시멘트 모르타르계	시멘트 BET 비표면적 1m ² /g 이상의 산화마그네슘, BET 100~200m ² /g인 황산마그네슘, BET 비표면적 1~10m ² /g인 트리폴리인산나트륨, 골재 5호 규사, 질산마그네슘

<표 29> 시멘트 모르타르계 관련 국외 특허 및 내용

종류	특허번호	내용 및 특징
캡슐형	JP1989-10046호	시멘트와 골재의 분리에 의한 주입식 록볼트의 패쇄, 천공경에서의 흘러내림 문제는 그 모르타르를 구성하는 시멘트와 골재의 입도차이에서 생긴. 따라서 모르타르 입도구성을 작게하여 해결.
	JP1992-55600호	문제점: 불연내열 성능을 저하시키지 않고, 제조시 분말의 부유를 방지 하고 충전성을 현저하게 향상시킨 캡슐형 정착재.
시멘트 모르타르 계	JP1973-89222호	3CaO·3Al ₂ O ₃ ·CaF ₂ 를 주성분으로 하고 황산칼슘이 혼합된 시멘트 조성물. 문제점: 큰 팽창성을 가지나 건조수축이 큼, 급격하게 급경화하여 온도 균열이 발생.
	JP1982-160947호	플라이애쉬나 고로수쇄슬래그를 함유하는 수경성 시멘트, 비정질 칼슘 알루미늄네이트, 석고로 이루어지는 저발열 저건조수축성 시멘트 조성물. 문제점: 플라이애쉬나 고로수쇄슬래그를 함유하는 수경성 시멘트는 범용성이 없는데다가 강도저하가 있고 실용적이지 못함.
	JP1990-271945	3CaO·3Al ₂ O ₃ ·CaF ₂ 와 무기황산염을 사용하여 건조수축이나 수화열억제에 효과가 있고 강도발현도 향상함.
	JP2003-63853호	충분한 투수성 및 적절한 겔 시간이 얻어지고, 1일에 실강도를 발현하여 정착할 수 있고, 환경부하가 적은 정착재. 비표면적 5000cm ² /g이상의 미립자 시멘트를 필수성분으로하는 수성슬러리(a)액과 규산소다 수용액을 필수성분으로 하는 (b)액으로 구성됨.
	JP2005-15426호	천공경 내부 표면의 미세한 굴곡을 채울 수 있고 또한 큰 강도, 특히 경시적으로 큰 강도를 유지할 수 있는 록볼트용 정착재 조성물. 산화마그네슘과 함께 비교적 반응성이 완만한 트리폴리인산나트륨을 사용함으로써 반응이 격렬하여도 크랙이 발생하지 않음.

4.1.2 레진계

레진계 록볼트 정착재의 문헌 및 특허 조사와 관련하여 국외 레진계 정착재의 종류 및 화학성분을 표 30에, 그리고 레진계 관련 국외 특허 및 내용을 표 31에 나타내었다. 기존 레진계 정착재는 실트암 또는 점토암과 같은 연약한 암반에 있어서는 록볼트를 충분히 정착할 수 없는 결점이 있다. 또한 기존 레진계 정착재는 경화시 수축하기 때문에 그 경화물과 천공벽사이에 빈틈이 생길 경우가 있다. 또한 암반내에 균열이 있는 경우에 있어서도 균열내에 정착재를 충분히 채울 수 없기 때문에 정착강도가 충분하지 않았다. 여기서 이들 결점을 개선하기 위해 발포성의 폴리우레탄 수지를 이용한 정착재가 제안되었다. 초기에 이들 제품은 동결기 저장 안정성이나 고점도화에 대해서 고려되지 않았다. 또한 폴리이소시아네이트와 폴리올과의 반응성이 향상되었지만 강도발현성이 너무 빨라 주입약액조성물이 주입중에 점도상승하여 주입불량을 일으켜 충전부족, 공극이 발생하기 쉬웠다. 더욱이 폴리이소시아네이트 조성물을 친수성의 활성수소기함유 화합물로 변성시켜 얻은 친수성 이소시아네이트기 말단 우레탄 프리폴리머(전구체)는 암반 또는 지반에 함유되어 있는 수분에 대한 친수성이 향상되어 있기 때문에 雨水등에 의해 용출물이 발생하여 지하수, 하천수의 오염 원인이 되기 쉬웠다.

〈표 30〉 국외 레진계 정착재의 종류 및 화학성분

생산업체	레진계 종류	主劑, 초기물질	경화제
일본 Polyurethane 工業사	우레탄 수지	· 폴리올: 폴리프로필렌옥사이드 · 우레탄화 촉매: 테트라메틸헥사메틸렌디아민 · 실리콘계 기포조절제 · 발포제: 물	· MDI(디페닐메탄 디이소시아네이트) · Polymeric MDI · 난연제: 트리부틸포스페이트 · 희석제: 프로필렌 카보네이트
일본 油脂사	불포화 폴리에스테르 수지계	· 무수말레인산, 무수프탈산, 프로필렌글리콜, 스티렌, 하이드로퀴논 · 디메틸아닐린 · 실리콘계 기포조절제 · 포름산	· 벤조일퍼옥사이드 · 산분해형 발포제-탄산칼슘
일본 Decolatex사	불포화 폴리에스테르 수지와 에폭시 아크릴레이트 수지의 혼합계	· 비스페놀A-에틸렌글리콜 부가물 · 비스페놀A-에폭시 아크릴레이트 · 무수말레인산 · 스티렌	· 메틸에틸케톤퍼옥사이드
일본 Polyurethane 工業사	우레탄 수지-무기그라우트 혼합계	· 규산염수용액 · 촉매-DMIZ (1,2-디메틸이미다졸) · 폴리올-PPG200(폴리옥시프로필렌, 분자량 200)	· MDI(디페닐메탄 디이소시아네이트) · Polymeric MDI · 희석제: 카프릴산과 2-에틸헥산올의 에틸렌옥사이드 부가물과의 모노에스테르 · 실리콘계 기포조절제

<표 31> 레진계 관련 국외 특허 및 내용

수지종류	특허번호	내용 및 특징 (문제점)
우레탄 수지계	JP1977-33412호	톨루엔디페닐이소시아네이트(TDI)와 디페닐메탄디이소시아네이트(MDI), 폴리올, 발포팽창제, 경화촉진제, 계면활성제로 이루어지는 정착재 문제점: 정착액의 동결기 저장안정성 문제, 고점도화 문제
	JP1977-78955호	이소시아네이트기 함유 친수성 우레탄 prepolymer, 유기 폴리이소시아네이트, 시멘트, 물로 이루어지는 속경성 폴리우레탄 수지 조성물 문제점: 물과의 혼합성이 향상하여 강도발현성이 빠르지만 정착재 주입시 점도상승
	JP1978-93623호	유기 폴리이소시아네이트나 이 이소시아네이트기 말단 우레탄 prepolymer에 친수성을 부여하여 시멘트나 물과의 혼합성을 향상시킴. 문제점: 물과의 혼합성이 향상하여 강도발현성이 빠르지만 정착재 주입시 점도상승하여 정착 불량률 초래
	JP1980-39568호	3급 아민기 함유 폴리올을 사용하여 발포경화성을 향상시킴 문제점: 폴리이소시아네이트와 폴리올과의 반응성이 향상되어 강도발현성이 빠르지만 정착재 주입시 점도상승하여 정착불량을 초래
	JP1994-33697호	폴리이소시아네이트를 주성분으로 하는 T액과 폴리올을 주성분으로 하는 R액의 2액을 용량비율로 T액: R액 = 2:1의 비율로 혼합함. 문제점: 정착액의 동결기 저장안정성 문제, 고점도화 문제
	JP1996-302348호	규산나트륨 수용액(A성분)과 이소시아네이트 화합물(B성분)을 반응시켜 발포경화할때, A성분중에 다관능 알코올에 프로필렌옥사이드를 개환부가중합하여 이루어지는 폴리하이드록시 화합물 및 실리콘계 계면활성제를 포함함. 문제점: 발포배율이 불충분
	JP2000-281742호	폴리올과 촉매, 물을 함유하는 A액과 이소시아네이트를 주성분으로 하는 B액으로 구성되어 있고, 상기 A액과 B액의 혼합비가 중량비로 A액: B액= 1:3~1:7의 범위. 또한 상기 물의 배합량이 A액과 B액의 총합량중 0.8~2.5중량%의 범위를 갖음. 문제점: 발포체의 수질 오염성에 관한 고려가 없음

<표 31> 레진계 관련 국외 특허 및 내용(계속)

수지종류	특허번호	내용 및 특징 (문제점)
불포화 폴리에스테르 수지계	JP1981-16530호	산분해형 발포제를 첨가하여 발포배율이 수분, 주위온도에 영향받지 않고 항상 일정함. 문제점: 내알카리성이 부족. 침식되어 장기적으로 정착력 열화
	JP1990-281018호	불포화 폴리에스테르 수지에 제3아민계 경화촉진제와 나프텐산 양을 함유시켜 주제를 형성하면 나프텐산을 함유하지 않는 것과 비교해 상기 주제의 겔화가 일어나지 않음. 또한 유기과산화물을 주성분으로하는 경화제에 의한 주제의 경화반응을 억제하지 않음. 문제점: 경화시간이 짧으면 주제의 저장 안정성이 충분하지 않음. 하이드로퀴논 등의 중합금지제가 함유되어 있으면 저장 안정성은 좋아지지만 중합금지제의 함유량이 많아지면 경화시간이 길어진다는 문제가 있음
	JP1995-286156호	현장의 작업공정의 효율화로서, 동결기의 저온시에 있어서 빠른 정착강도를 발휘하게 함. 불포화 폴리에스테르 수지에 이소시아놀산에틸렌옥사이드 변성트리(메타)아크릴레이트의 다관능 모노머를 배합하여 이루어짐.
	JP1997-88498호	과피성 캡슐 및 캡슐내에 분리층을 사이로 충전된 경화성수지성분 및 분말상 또는 과립상의 경화제성분으로 이루어져있고 상부가 가열용해에 의해 분해되어 있음 문제점: 용융분해에 의한 방법은 제조중에 폭발사고 위험이나 발화사고를 일으킬 가능성이 있음
	JP2001-19913	인체에 대하여 악영향을 미치지 않고 또한 인발강도 및 내알카리성에 뛰어나. 불포화 폴리에스테르 수지는 통상 가교성 모노머로서 스티렌이 병용되고 있고 그 조성물은 적당한 점성을 가지며 취급면에서도 뛰어나고 상당한 고착강도를 발휘함. 그러나 스티렌은 휘발성이 높고, 악취도 강하며 인체에 대해 악영향을 미칠 우려가 있어 그 사용에 주의가 필요함 따라서 독성이 적고 취급이 편리하며 인발강도, 내알카리성이 뛰어난 가교성 모노머로서 피부독성지수가 3이하인 (메타)아크릴계 화합물을 사용함.

<표 31> 레진계 관련 국외 특허 및 내용(계속)

수지종류	특허번호	내용 및 특징
불포화 폴리에스테르수지와 에폭시 아크릴레이트 수지의 혼합계	JP1991-227390 호	초기 정착력과 내알카리성을 동시에 만족시키기 위해, 불포화 폴리에스테르 수지는 다가알코올에 알킬렌 옥사이드 부가물이 포함되고 불포화 폴리에스테르 수지 100중량부에 대하여 에폭시 아크릴레이트 수지 5-80중량부가 배합되어 구성됨. 수지의 경화를 촉진하기 위해 경화촉진제를 이용할 수 있으나 단, 경화촉진제는 경화제와 분리해 둘 필요가 있음
우레탄 수지와 무기 그라우트의 혼합계	JP1986-9482호	폴리이소시아네이트와 몰유리(규산소다 수용액)을 이용, 몰유리층에 폴리이소시아네이트의 3량화 촉매로서 특정 방향족 3급아민을 배합하여 이루어지는 조성물.
	JP1995-207654 호	폴리이소시아네이트와 몰유리를 이용, 몰유리층에 분자량이 120이상으로 질소원자수가 2이상인 수용성 지방족3급 아민을 이용한 조성물
	JP2001-19913	발포상의 무기-유기복합 고결체를 형성하는 것에 의해 고강도화, 내구성, 작업성이 뛰어난 조성물. 알칼리 규산염 수용액(A) 성분중에 형성되어 있는 실라놀기와 폴리이소시아네이트(B) 성분중의 이소시아네이트기가 반응하여 무수규산-우레탄 복합체가 형성됨. 동시에 (B)성분과 물이 반응하여 탄산가스가 발생하면서 요소반응에 의해 다량체나 무수규산-요소가교복합체를 형성하면서 발포상의 고결체를 이룬다.

이소시아네이트기 말단기 우레탄 폴리머를 이용하는 경우, 희석제를 이용하는 방법은 희석에 의해 점도저하 효과가 있기 때문에 주입중의 점도 상승을 억제할 수 있고 더욱이 아치 상부와 지반사이의 공극 충전이나 실드공법에 의해 굴진되는 갱도와 이 갱도의 라이닝을 시공하는 원형 축방향 연결로 이루어지는 라이닝과의 사이에서 생기는 공극의 충전이나 암반·지반으로 침투성의 향상을 도모할 수 있다. 그러나 희석제는 경화된 수지 중에 갇혀있다가 경시에 따라 조금씩 수지밖으로 스며나오는 것이 일반적이기 때문에 토양오염의 방지관점에서는 바람직하지 않다.

환경보호상 이들 희석제를 사용하지 않으면 점도상승이나 저온에서의 고화현상을 일으키고 실용적으로 곤란하게 된다. 실용상의 이점과 환경보호의 양립을 도모하는 것이 이제까지 곤란한 상황이었으나, 충전작업시 환경부하가 적고 발포체로 인한 토양오염의 정도를 경감할 수 있으며 작업성이 뛰어나고 저장안정성이 양호한 정착제가 특허 JP2002-256054호로 등록되었다.

이 우레탄 수지는 주제로 폴리프로필렌옥사이드(분자량 470, 590, 100)와 촉매인 N,N,N,N-테트라메틸헥사메틸렌디아민(TMHD)와 실리콘계 기포안정화제 그리고 발포제인 물로 구성되어 있고 경화제는 디페닐메탄다이소시아네이트(MDI)와 polymeric MDI, 희석제 프로필렌카보네이트, 난연제 트리부틸포스페이트로 이루어

져 있다.

우레탄계 정착재는 저장시 안정성에 문제가 있고, 또한 경화제인 이소시아네이트의 독성으로 인하여 취급시 문제가 있었다. 더욱이 무엇보다도 항상 일정 발포배율의 경화체를 얻는 것이 곤란하였다. 즉, 우레탄계 정착재의 반응은 주제인 폴리올과 경화제인 이소시아네이트의 경화 반응 및 이소시아네이트와 물과의 발포반응으로 이루어져 있지만, 암반의 천공경에 대부분의 경우 수분이 있기 때문에 이 발포반응은 수분량에 의해 크게 영향을 받고 더욱이 암반 천공 내부의 온도에 의해서도 영향을 받기 때문에 발포배율을 조절하는 것이 어려웠다. 따라서 발포반응이 경화반응과 비교해 너무 빠르면 정착재가 암반의 천공경내에서부터 흘러나오기 때문에, 충분한 정착강도를 얻을 수 없고, 반응시에 경화반응이 발포반응에 비해 너무 빠르면 앞서 서술했듯이 천공경내에 정착재를 충분히 채울 수 없기 때문에 충분한 정착강도를 얻을 수 없다.

따라서 이들 결점을 개선하기 위해 불포화 폴리에스테르수지에 조절된 산분해형 발포제를 첨가하고, 그 분해반응을 경화반응 전에 종료시켜 발포배율이 수분 및 주위온도 등에 영향을 받지 않고 항상 일정하게 되는 발포성 정착재가 개발되었다(JP1995-286156호, JP2001-19913호).

이 수지계에서 주제로 이용되는 불포화 폴리에스테르수지는 무수말레인산 또는 필요에 따라서 일부를 무수프탈산으로 치환한 것과 프로틸렌글리콜 등의 글리콜류와 중축합하여 얻어지는 불포화 폴리에스테르를 스티렌 등의 가교용 불포화 단량체에 용해시키고 하이드로퀴논 등의 중합금지제를 첨가하여 얻어진다. 한편, 경화제는 유기과산화물인 벤조일퍼옥사이드와 상기 산분해형 발포제인 탄산칼슘으로 구성되어 있다.

불포화 폴리에스테르수지는 적당한 점성을 가지고 있고 취급면에서 뛰어나며 상당한 고착강도를 발휘하는 한편, 불포화 폴리에스테르수지를 구성하는 다염기산이나 다가알코올을 선택하는 것에 의해 고유의 성능이 얻어지기 때문에 실용화되어 있다. 하지만 초기 정착력이나 내알칼리성을 동시에 만족시킬 수 없어 개선의 여지가 있다. 즉, 예를 들어 이소프탈산이나 오르소프탈산계의 불포화 폴리에스테르수지는 내알칼리성의 개선필요가 있고 또한 비스페놀계 불포화폴리에스테르수지는 초기 정착력의 개선이 요구되고 있다.

내알칼리성이 부족하다는 것은 록볼트 정착부의 수지경화물이 콘크리트 중에 포

함되어 있는 알칼리 성분에 의해 침식되어 록볼트 타설후 시간경과 따라 서서히 정착력이 저하하는 결점이 되는 것이고, 초기 정착력의 부족은 충분한 록볼트 정착력을 얻기 위해 장시간이 필요하게 되어 작업성이 떨어진다는 결점이 된다. 따라서 이러한 결점을 보완한 것이 특허 JP1991-227390호로 등록되었다.

주제로서 불포화 폴리에스테르 수지는 다가 알코올성분으로서 비스페놀 A-에틸렌글리콜 부가물, 에폭시 아크릴레이트 수지는 비스페놀A-에폭시에 아크릴산을 반응시킨 반응물, 축매인 무수말레인산과 불포화 폴리에스테르 수지와 에폭시 아크릴레이트 수지를 가교할 가교제인 스트렌으로 이루어져 있고 경화제는 유기과산화물인 메틸에틸케톤퍼옥사이드로 구성되어 있다.

무기계 그라우트제인 물유리는 고착강도가 낮다. 또한 정착재가 물과 접촉하게 되면 경시변화를 일으켜 Na_2O 나 SiO_2 등의 주성분을 용출되므로 알칼리 오염과 큰 폭의 강도저하에 이르게 되는 문제가 있다. 또한 요소계 등의 유기 그라우트제도 정착 강도부족이나 황산, 포르말린 등의 경화성분이나 부성분의 용출이 발생하는 문제가 있다. 한편, 우레탄 수지는 단시간에 고착하여 어느 정도 강도가 요구되는 곳에 안정화하는 장점을 가지기 때문에 발포상의 무기-유기복합정착체를 형성하는 것에 의해 정착강도가 크고, 내구성 및 작업성이 뛰어난 특징을 가지고 있다 (특허 JP2001-181634호).

우레탄 수지-무기 그라우트 혼합계는 (a)약액과 (b)약액 즉, 우레탄 수지 약액과 무기 그라우트 약액이 나뉘어져 있으며, 우레탄 수지 약액은 디페닐메탄디이소시아네이트(MDI)와 폴리머 MDI, 그리고 이 MDI와 폴리머 MDI성분의 저점도화, 저장안정성에 뛰어난 희석제로 구성되는데 이것은 카프릴산과 2-에틸헥산올의 에틸렌옥사이드 부가물과의 모노에스테르화물이다. 또한 기포안장화제로 실리콘계 계면활성제가 첨가된다. 무기 그라우트 약액은 알칼리 규산염 수용액과 이소시아네이트 조성물과 반응시킬 활성 축매로서 1,2-디메틸이미다졸, 그리고 폴리프로필렌옥사이드로 구성된다.

4.2 현행 록볼트 정착재 재료성분 분석

4.2.1 시멘트 모르타르형

현재 국내·외에서 사용중인 시멘트 모르타르형 록볼트 정착재를 입수하고 XRF(X-ray Fluorescence)기기로 시멘트의 화학성분 분석을 행하였다.

1) 입도분석 결과

체가름을 통하여 시멘트 부분과 골재부분을 분리하였으며 그 결과는 표 32와 같다. 국내 A사 모르타르계는 골재가 없는 반면, 캡슐형에서 국내 A사는 20%를, 일본 Denka사는 40%가 혼입되어 있는 것으로 나타났다.

<표 32> 시멘트 모르타르계 정착재의 체가름 분석결과

Wt(%)	국내 A사 (모르타르계)	국내 A사 (캡슐형)	일본 Denka사 (캡슐형)
골재	-	20	40
시멘트	100	80	60

※ Sieve No. 200(75 μ m)로 체가름 함

2) 화학성분 분석결과

XRF(X-ray Fluorescence)기기에 의한 국내·외 시멘트 모르타르계 정착재의 화학성분 분석결과는 표 33과 같다. 표 33에 보이는 바와 같이 국내 A사 모르타르계는 일반 시멘트 성분과 거의 흡사한 성분을 가지고 있는 것으로 나타나, 시멘트의 고유한 성분만을 가졌을 뿐 록볼트 정착에 필요한 조기강도 발현성, 팽창성과 흘러내림 방지성은 없는 것으로 파악된다. 한편 국내 A사와 일본 Denka사의 캡슐형은 일반 시멘트에 비해 Al_2O_3 성분과 SO_3 성분이 많은 것으로 보아 조기강도 발현성(Al_2O_3)과 팽창성(SO_3)이 있는 것으로 추정된다.

<표 33> XRF에 의한 국내·외 시멘트 모르타르계 정착재의 화학성분 분석결과

성분(산화물) Wt%	국내 A사 (모르타르계)	국내 A사 (캡슐형)	일본 Denka사 (캡슐형)	시멘트
CaO	66.46	61.62	63.60	64.73
SiO ₂	17.51	15.72	13.09	20.30
SO ₃	2.18	7.79	9.91	2.11
Al ₂ O ₃	4.05	7.64	8.40	5.23
Fe ₂ O ₃	2.30	2.95	2.41	2.81
MgO	3.97	1.81	0.59	3.50
K ₂ O ₃	0.36	1.03	0.82	0.22
Na ₂ O	0.32	0.10	0.21	0.27
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.11	-
TiO ₂	0.30	0.36	0.41	1.33

3) 국내 A사 시멘트 모르타르계의 물리성능 시험결과

물/재료비(W/M)에 따른 압축강도, 길이변화(KS F 2424, 다이얼게이지 방법), flow(KS F 4041, 콘: $\phi 50 \times 51\text{mm}$) 및 유하속도(KS F 2432, 콘: $\phi 70 \times \phi 10 \times 420\text{mm}$, 출구: $\phi 10 \times \phi 14.3 \times 30\text{mm}$) 등의 시험결과를 표 34에 나타내었다. Flow 및 유하속도 시험은 믹싱 후 경과 시간별(5분, 10분)로 측정하였다. 시험결과, 물/재료비 25%에서 시공시 적절한 유동성을 나타내었으며 물/재료비의 증가에 따라 강도는 하락하고 수축률은 증가하였다.

<표 34> 국내 A사 시멘트 모르타르계 물리성능 시험결과

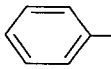
물/재료비 (W/M) (%)	압축강도(MPa)			Flow(mm)		유하속도(sec)		길이변화	재료분리 (육안관찰)
	1일	7일	28일	5분	30분	5분	30분		
20	24.5	55.0	68.0	132	89	40	50	-0.95×10^{-4}	무
25	15.0	42.5	52.5	164	119	20	30	-1.65×10^{-4}	무
30	9.2	35.0	40.5	200	155	8	15		유

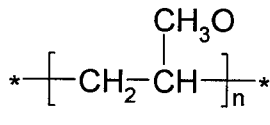
4.2.2 레진계

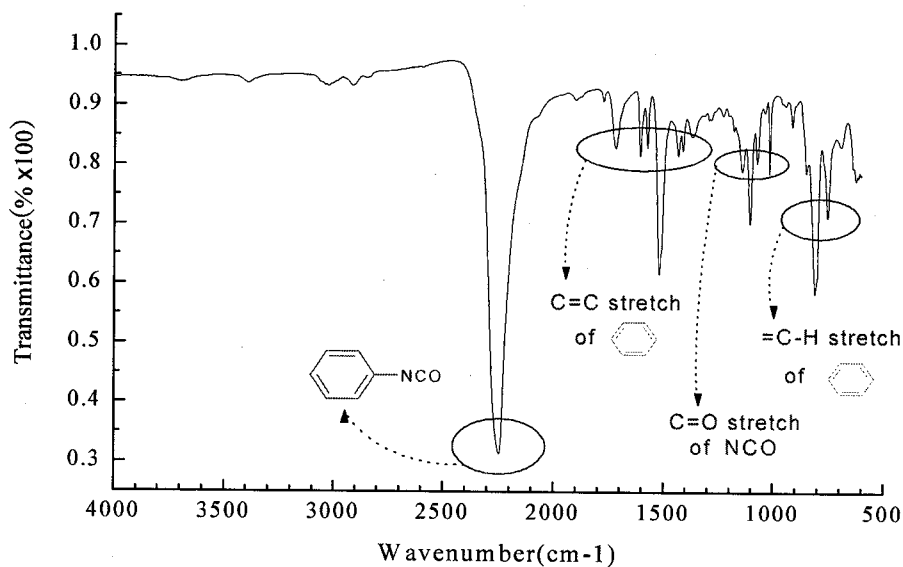
현재 국내 현장에서 사용중인 레진계(폴리우레탄계, 국내 B사, 성분(a)와 성분(b)로 구성되어 있음)를 입수하여 FT-IR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)을 통하여 화학구조 및 성분을 확인하였고 그 결과를 그림 37과 그림 38에 나타내었

다.

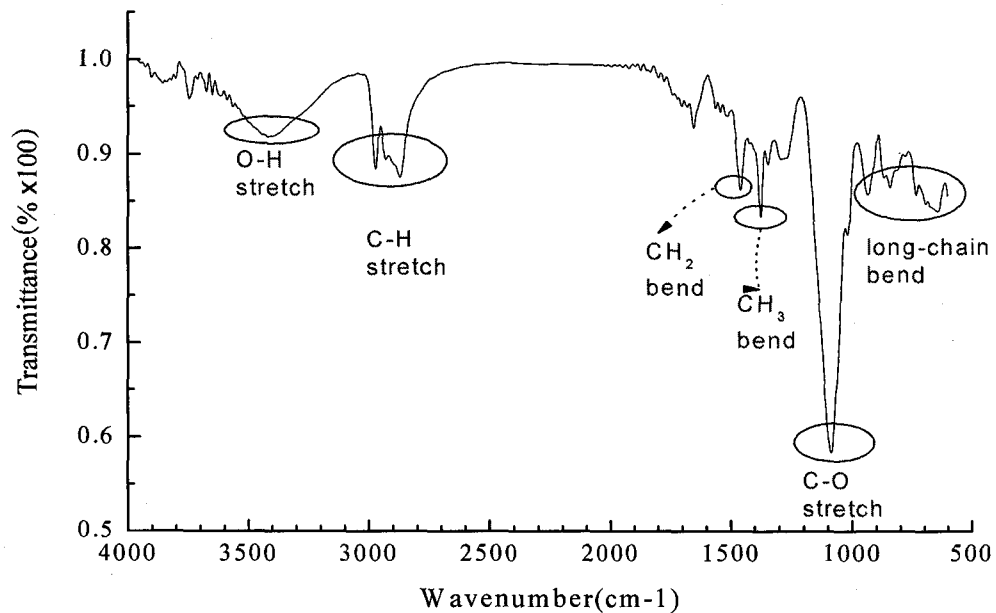
폴리우레탄계 수지는 다가알코올 계통의 물질(주제)과 디이소시아네이트계 물질(경화제)의 우레탄화 반응, 요소화 반응, 발포 반응 등 화학반응이 일어나 불용, 불용성인 3차원 그물구조의 탄성 합성고분자이다.

그림 37에서 페닐이소시아네이트() 및 이소시아네이트(-NCO)기가 나타나는 것으로 보아 경화체인 메틸렌 디페닐 디이소시아네이트(MDI; methylene diphenyl diisocyanate)임을 알 수 있다.

한편 그림 38에서는 CH, CH₂, CH₃ 및 CO결합과 장쇄사슬이 나타나 폴리프로필렌옥사이드(PPO; polypropyleneoxide )임을 알 수 있고, 또한 OH기가 보이는 것으로 보아 물이 포함되어 있는 것으로 추정된다. 따라서 그림 37은 디이소시아네이트계 경화제, 그리고 그림 38은 주제인 다가알카올계 물질임을 알 수 있다.



<그림 37> 레진계 정착재 성분(a)의 FT-IR



〈그림 38〉 레진계 정착재 성분(b)의 FT-IR

5. 록볼트 정착재의 개발방향 수립

앞선 분석결과로부터 기존 록볼트 정착재의 문제점을 종합해보면 표 35와 같이 정리할 수 있으며, 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 다음과 같은 특성이 확보되어야 한다.

- ① 정착재 주입시 유동성의 확보
- ② 조기강도 발현성 확보(레진계 대비 현행 모르타르의 급결성 취약)
- ③ 장기 내구성 확보(현행 레진계 내구성 취약)
- ④ 충전시 흘러내림 방지 성능 확보

또한 이상의 단점들을 개선시킬 수 있는 재료의 도입에 있어서 레진계보다는 시멘트 모르타르계가 접근 및 개선성이 용이하다고 할 수 있다.

〈표 35〉 국내·외 기존 시멘트 모르타르계 정착재의 문제점 분석결과

기존제품	특성	문제점
국내 A사 (모르타르형)	유동성이 있음	· 조기강도 발현이 느림 · 흘러내리기 쉬움 · 팽창력(SO ₃) 없음
국내 A사 (캡슐형) 일본 Denka사(캡슐형)	조기강도 발현이 빠름(Al ₂ O ₃)	· 유동성이 낮아 시공어려움 · 시공시간 조절이 어려움

상기의 분석결과를 바탕으로 시멘트 모르타르계 충전재의 개발방향은 크게 첫 번째로 가소성(thixotropy)을 부여하는 것이며, 두 번째로 가소성의 부여에도 불구하고 흘러내림이 발생할 경우 이를 보완해줄 신개념의 흘러내림 방지기구를 개발하는 것이다. 여기서 가소성이란 특정한 비뉴튼성 유체가 가지는 고유특성으로서, 흔들어 준다던지 저어준다던지 하는 외부 힘을 가해주면 유동성이 좋아지고 운동이 멈추면 유동성이 낮아져 고형화되는 성질을 말하며 흘러내림 방지의 주요한 개념이라고 할 수 있다.

따라서 이러한 개념을 바탕으로 재료적인 측면에서 시멘트 모르타르계 정착재의 개발방향을 정리하면 다음과 같다.

- ① 가소성이 있는 시멘트 조성물
- ② 시멘트 그라우트 재료의 응용
- ③ 폴리머 시멘트(polymer cement)의 응용

5.1 가소성이 있는 시멘트 조성물

충전 이전에는 점성의 변화가 없으나, 충전 직후에는 급격한 점도상승을 보이며 강도 발현성이 뛰어나고 수중불분리성이 있는 효과를 가지는 시멘트 조성물 및 시멘트 모르타르계 정착재를 개발하려고 하며 이하에 그 구성 재료에 대해서 서술한다.

- ① 시멘트는 통상 보통포틀랜드시멘트를 사용하지만 조강 또는 초조강 시멘트도 적용할 필요가 있을 것이다
- ② 가소제는 시멘트를 주재료로한 유동성의 현탁액을 가소상 고결(固結)로 변질시키는 재료이며, 구체적으로는 물유리, 알루미늄염, 점토광물, 고흡수성폴리머

및 알칼리 증점형 폴리머 에멀전이 있다. 시멘트가 수화를 시작하면 알칼리 성분(Ca^{2+})을 내놓기 때문에 알칼리에 의해 증점효과를 가지는 가소제가 필요하며, 알칼리 증점형 폴리머 에멀전이 이에 해당한다. 이 에멀전은 불포화카르복실산과 에틸렌성 불포화화합물의 공중합에 의해서 생성되며 불포화카르복실산으로는 아크릴산 또는 메타아크릴산이 적절하고, 에틸렌성 불포화화합물로서는 아크릴산 에스테르 모노머 및 메타아크릴산 에스테르 모노머를 적용할 것이다. 위와 다른 가소제의 측면으로 충전후의 증점효과 증대를 가져올 수 있는 탄산칼륨과 증점제인 카르복시메틸셀룰로오스의 적용을 고려할 수 있다

- ③ 경화촉진제는 강도발현성이나 재료분리저항성의 면에서 바람직하며 알루미늄염과 황산염을 병용할 수 있다. 알루미늄염은 반응활성면에서 비정질의 알루미늄산칼륨($12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 조성물)이, 황산염으로서는 강도발현성이 뛰어난 황산칼슘인 무수석고를 적용할 것이다
- ④ 이외에 세골재 및 고성능감수제, 응결조절제(지연제)를 적용할 것이다

5.2 시멘트 그라우트 재료의 응용

급경성 그라우트 재료의 요구성능으로는 유동성이 양호하고 그 유지성이 뛰어나 것, 초기강도의 발현성이 뛰어나 것, 길이변화 안정성이 뛰어나고 팽창과괴 등을 일으키지 않는 것을 들 수 있다. 본 연구에서는 이 모두를 만족시키는 재료조성물을 개발하여 록볼트 정착재로 사용하고자 한다. 이하에 그 구성물질에 대하여 서술한다.

- ① 수경성 재료로는 시멘트 이외에 $11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$ 와 무수석고를 적용하여 단 시간에 강도발현성을 발휘하도록 할 것이다
- ② 촉진제는 칼슘 이외의 황산염을 주제로 황산알루미늄이나 명반을 적용할 것이다
- ③ 유동성 확보를 위해 고성능 감수제를 적용하며 너무 빠른 응결을 막기 위해 응결조절제로 유기산을 적용할 것이다
- ④ 더욱이 구조체와의 완전일치를 도모하기 위해 가스 발포물질을 병용할 것이다. 이것은 아직 굳지 않은 상태의 시멘트 모르타르가 침하 또는 수축하는 것

을 억제할 목적으로 사용하는 것이다. 가스 발포물질은 과황산염, 과탄산염 및 과망간산염의 과산화물이 있다

5.3 폴리머 시멘트의 응용

주로 모르타르나 콘크리트 구조물의 보수·보강용 등에 사용되는 부착력이 높은 시멘트계의 재료로서, 강한 부착력과 높은 유동성이라는 상반하는 성질을 동시에 가지고 있으며 더욱이 강력한 부착력은 시공후 단시간에 발휘될 수 있고 경화후의 내구성도 뛰어난 폴리머 시멘트를 개발하여 적용하고자 한다.

폴리머 시멘트를 이용한 개발 개념은 다음과 같다.

즉, 폴리머 시멘트와 포졸란 반응성 물질에 특정 양의 다공질물질을 첨가하면 유동성 확보상의 장애가 되는 폴리머중의 표면활성성분이 다공질물질에 선택적으로 흡착되어 높은 유동성이 얻어진다. 그리고 시공 후에는 시멘트의 수화반응의 진행에 의해 수분이 소비되고, 수분소비에 의한 다공질물질 부근의 폴리머 필름의 형성 효과도 추가되어 흡착력이 계속 유지되어 강한 부착력이 발현되고, 경화 후에는 높은 치밀성을 보이는 원리를 이용하고자 한다.

이상과 같이 개발할 조성물에 대하여 자세히 언급하면 다음과 같다.

- ① 폴리머 시멘트에 사용하는 폴리머는 아크릴계 폴리머에멀전, 아세트산비닐계 폴리머 에멀전, 스티렌-부타디엔 고무의 라텍스 을 들 수 있고, 그 외에도 추가적인 부착력을 높이기 위해 증점제를 병용할 수 있다
- ② 다공질물질로는 활성탄, 제올라이트 등을 들 수 있다.
- ③ 그 외에 세골재, 팽창재, 고성능 감수제도 병행할 것이다

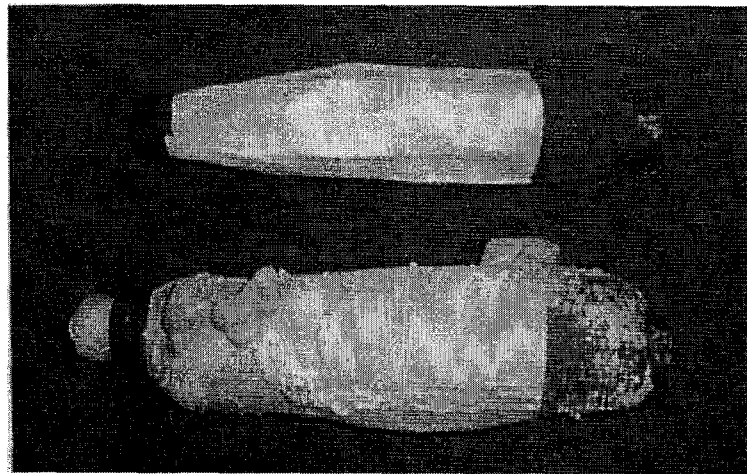
5.4 수지계 흘러내림 방지용 패커

기존의 흘러내림 방지캡 등의 대책을 적용하는 경우에도 공 입구의 형상이 불규칙하거나 공 자립이 어려운 경우 등에서 정착재의 흘러내림을 완전히 방지하기 어려운 실정이다.

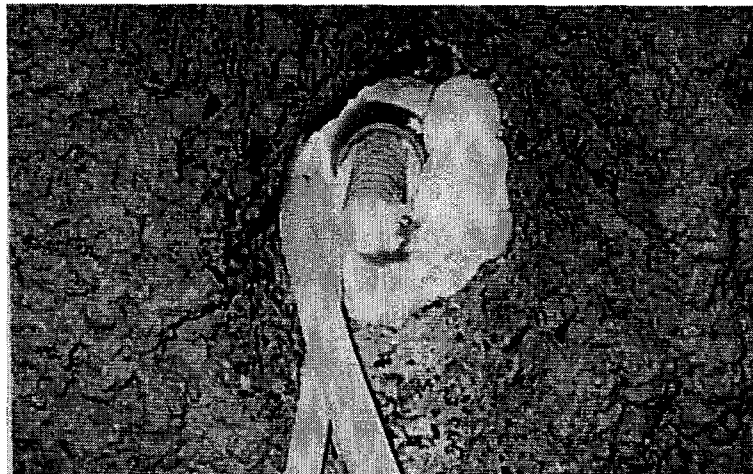
따라서 본 연구에서는 수지 재료의 팽창성을 이용하여 신속하게 공 입구를 밀봉

하여, 정착재 주입시 정착재의 흘러내림을 방지하고 고압 주입이 가능토록 하여 균열성 지반에서 정착재 주입으로 인해 지반보강 효과까지도 유도할 수 있도록 새롭게 고안을 하였다 (그림 39).

본 연구에서는 이와 같이 팽창성 수지계 패커(packer)를 개발할 예정으로, 패커는 폴리우레탄계 레진으로 구성하여 반응전에는 천공경보다 작으나 반응후에 팽창을 하여 천공 하단부 입구 부분을 완전히 밀봉할 수 있는 제품을 개발하고자 한다 (그림 40).



〈그림 39〉 흘러내림 방지를 위한 팽창성 수지계 패커 (상: 반응전, 하: 반응후)



〈그림 40〉 수지계 패커의 적용 사례

〈Part III〉 최적 강지보재

1. 개요

강지보재는 숏크리트와 록볼트와 함께 굴착 직 후 터널의 안정성을 확보하기 위한 필수적인 터널의 주지보재이다. 강지보재는 터널굴착 후 지반변형을 억제하여 터널의 안정성을 확보하기 위하여 사용된 나무지보재를 대체하는 지보재로 사용되어 왔으며 콘크리트 라이닝을 타설하기전에 터널 안정성 확보를 위한 주지보재 역할을 하여왔다. 기술의 발전과 함께 록볼트와 숏크리트의 개발로 터널의 장기 안정성 측면에서 강지보재의 역할은 점점 축소되었으며 NATM의 출현 후 강지보재는 지반이 매우 연약한 지반에서 주로 초기 지반변형을 막아주는 지보재로만 사용되어지고 터널의 전체적인 안정성 및 장기 내구성측면에서는 숏크리트와 록볼트에 역할이 점점 증대되어 지고 있다. 이러한 상황에 따라 숏크리트나 록볼트의 고성능화에 대한 연구는 국내외에서 비교적 활발히 진행되고 있는 반면, 강지보재에 대한 개선 노력은 90대 중반부터 거의 이루어 지지 않고 있는 실정이며 경제적이고 합리적인 강지보재의 개발을 위한 관심과 노력이 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 숏크리트 및 록볼트와 함께 경제적이고 현장적용성 및 시공성측면에서 강한 장점을 가지며 굴착지반의 급속안정화를 통한 급속시공을 가능하게 하는 강지보재를 개발하는데 목적을 두고 있다. 또한 고성능 강지보재 개발 뿐 만 아니라 숏크리트와 록볼트의 일체화를 통하여 장기내구성을 갖는 최적 지보시스템의 구축에 목적을 두고 있다.

2. 최적 강지보재의 필요성 정리

강지보재도 앞선 숏크리트 및 록볼트와 마찬가지로 강지보재가 갖는 강성으로 인해터널의 급속시공과 급속안정화를 도모할 수 있을 뿐만 아니라, 강재의 고내구성으로 인해 터널의 장기 내구성을 확보할 수 있게 된다.

그러나 초기의 강지보재인 H형강은 나무지보재에 비해 강성이 좋고 장기내구성이 좋다는 장점이 있지만 너무 무거워 시공성이 매우 떨어졌다. 또한 터널의 주지

보재로 개발된 슛크리트를 터널공사에 사용한 이후 강지보재에 뿔여 붙여진 슛크리트가 강지보재 배면을 완전하게 채우지 못하여 강지보재와 슛크리트의 일체성 떨어지는 단점을 가지게 되었다. 그래서 시공성을 고려하고 강지보재 자체의 무게를 줄이고 타설되는 슛크리트와 일체성을 향상시키기 위해 격자지보인 레티스거더가 개발되어 전세계적으로 터널공사에 사용되어지고 있다. 이러한 레티스거더도 H-형강같은 강성을 유지하기 위하여 특수강재를 사용하므로 경제적인 측면에서 불리한 점을 가지고 있다. 또한 레티스거더는 거의 수작업에 의한 복잡한 조립생산체계를 가지고 생산되므로 품질에 대한 신뢰도가 작업자에 크게 좌우된다. 현재 터널공사에서 강지보재로 주로 사용되어지고 있는 레티스거더는 공장에서 제작된 몇 개 조각들을 터널단면형상에 맞게 조립하여 시공하고 있으며 설계단면에 맞게 제작된 레티스거더는 발파에 의해 발생한 여굴로 인하여 지반에 밀착되게 시공되지 않아 초기 지반변형억제에 기여하지 못하고 있는 실정이다. 비록, H-형강에 비해 시공성 및 현장적용성을 개선한 레티스거더도 급속시공 및 급속안정화를 위해서는 시공성을 좀 더 개선하여야 하며 강지보재의 주 역할로 여기지는 굴착직 후 초기 지반변형을 억제하기 위하여 여굴에 대처할 수 있는 단면과 기능을 가져야 할 것이다. 또한 가격이 비싼 특수강재 대신 일반강재를 사용하여 경제성을 향상시켜야 하고 일관된 제품의 품질을 위해 생산과정을 단순화 및 자동화시켜야 할 것이다.

터널의 설계 및 시공을 위한 강지보재 설계패턴은 일반적으로 암반의 종류에 따라 획일적으로 적용되어져 왔다. 공학적인 근거에 의해 강지보재의 패턴이 결정된 것이 아니라 지금까지의 터널공사 경험을 바탕으로 결정되어져 왔다. 이러한 이유로 터널의 단면형상, 터널의 목적, 지반종류 및 터널주변의 여건을 고려한 최적의 강지보재 설계패턴을 적용하기 보다는 과다하게 설계/시공되는 것이 현실이다. 또한 국내 터널 설계시 강지보재에 대한 거동 및 역할을 전혀 고려하지 않고 있으며 단지 슛크리트와 록볼트의 성능만으로 터널의 안정성을 검토하고 설계하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 궁극적인 목표인 최적 지보시스템의 개발을 위하여 강지보재의 역할을 재조명하고 터널의 목적과 지반 및 주변여건을 고려하여 위상최적화라는 새로운 기법을 적용하여 최적 강지보재의 설계패턴을 제시할 예정이며 최종적으로 슛크리트 및 록볼트와 일체화된 최적지보 시스템을 개발하여 지반의 급속안정화를 통한 급속시공을 가능케 할 예정이다.

3. 강지보재의 현황

지반의 급속안정화를 통한 급속시공을 위한 최적 강지보재의 개발을 위하여 본 차년도에서는 국내외적으로 사용되어지고 있는 기존 강지보재의 종류와 국내외 강지보재의 개념과 설계패턴에 대하여 고찰하였다. 이것을 바탕으로 급속시공 및 급속안정화를 위한 최적 강지보재의 개념을 재정립하고 개발할 예정이다

3.1 강지보재의 개념

강지보재는 숯크리트, 록볼트 등과 함께 터널 안정에 필요한 지보재 중의 하나이다. 강지보재의 사용 목적은 터널 단면의 형상 및 크기, 굴착면의 자립성, 지반압의 크기, 지표 침하량의 제한 등에 따라 다르나 일반적으로 다음과 같이 구분할 수 있다.

- (1) 숯크리트 또는 록볼트의 지보기능이 발휘되기까지 굴착면의 안정을 도모할 필요가 있는 경우 강지보재는 설치와 동시에 충분한 강도를 갖는 지보재이므로 굴착면의 자립 시간이 짧은 토사 지반이나 균열이 발달된 지반에서 숯크리트나 록볼트의 소요 강도가 발휘되기 전에 지보 효과가 발휘된다.
- (2) 막장면 휘폴링 등 보조공법의 반력 지지점이 필요한 경우 굴착면의 자립성이 나쁜 지반에서 굴착면 전방의 지반을 보강하기 위하여 휘폴링이나 경사볼트 등의 보조 공법을 사용하는 경우가 있는데, 이때 이들의 반력 지지점으로 강지보재가 필요한 경우가 있다.
- (3) 큰 지압으로 인해 지보재의 강성을 증가시킬 필요가 있는 경우 숯크리트는 초기 재령에서 변형 계수가 작기 때문에 변형하기 쉽고 또한 강도도 작기때문에 지반 조건에 따라서는 강지보재를 사용하여 숯크리트와 일체화함으로써, 지보재의 강성, 강도 등을 증가시킬 필요가 있는 경우가 있다.
- (4) 지표 침하 등 지반변위의 억제가 필요한 경우 숯크리트는 초기 재령에서 변형 계수가 작기 때문에 변형하기 쉽고 또한 강성이 작아, 예를 들면, 토사 지반 등에서 터널 변형이나 지표침하를 극히 제한할 필요가 있는 경우에는 강지보재를

사용하여 슛크리트와 일체화함으로써 지반변위의 억제를 도모할 수 있다.

3.2 강지보재의 종류

NATM 터널에 강지보재를 사용할 때에는 시공목적에 적합한 지보재의 종류, 형태 등을 선택하여야 하는데 지금까지 사용되어 온 강지보재의 종류로는 H형강, U형강, 강관(Pipe)지보재 등이 있지만 일반적으로는 H형강 및 U형강이 많이 사용되어 왔다.

표 36 에는 터널공사에 사용된 대표적인 강지보재의 종류를 나타내었다. 또한 기존의 H형강, U형강, I형강 등의 강지보재 외에도 그림 41과 같이 Y-형태의 새로운 지보재를 개발하여 제안하고 있으며, 일본의 경우에는 그림 42와 같이 H형강을 50mm 만큼 절단한 후 그 내측 4곳에 4개의 이형철근을 용접하여 만든 일명 “철근지보”를 개발하여 터널현장에 시험 시공한 사례도 있다.

국내에서는 이와 같은 여러 가지 강지보재 중에서 H형강 지보재를 대부분의 터널현장에서 사용하였는데, H형강 지보재는 무게가 무거워 설치시간이 지연되고 설치한 후에도 터널벽면의 여굴의 대소에 따라 지보재 배면에 슛크리트가 완벽히 타설되지 않는 공동이 국부적으로 형성되어 슛크리트와의 일체화된 복합구조체를 형성하지 못하고 분리구조로 거동하기 때문에 효과적인 하중지지 효과를 나타내지 못하는 등의 문제점들이 제기되었다. 그래서 이러한 단점을 보완하기 위하여 스위스에서 개발되어 전세계적으로 NATM 터널지보용 강지보재로서 사용되어지고 있는 레티스거더는 90년대 중반부터 국내에서 사용되어지고 있다.(그림 43, 44 참조)

표 36 대표적인 강지보재의 종류 및 제원

종 별	규 격 (mm)	단면적 (cm ²)	중 량 (kg/m)	단면계수(cm ³)		단 면
				W _x	W _y	
H형강	100×100×6×8	21.90	17.2	76.5	26.7	
	125×125×6.5×9	30.31	23.8	136.0	47.0	
	150×150×7×10	40.14	31.5	219.0	75.1	
	175×175×7.5×11	51.21	40.2	330.0	112.0	
	200×200×8×12	63.53	49.9	472.0	160.0	
	250×250×9×14	92.18	72.4	867.0	292.0	
I형강	180×100×6×10	30.06	23.6	186.0	28.2	
	230×100×7.5×11.5	39.08	30.7	291.0	33.5	
	200×150×9×16	64.16	50.4	449.0	103.0	
강철강	(MI105)105×84×9	28.89	22.7	93.4	24.1	
	(MI115)115×95×11	36.51	28.7	127.3	32.4	
U형강	(MU21)113×102	26.77	21.0	59.5	58.6	
	(MU29)133×120	37.00	29.0	97.4	95.8	
	(VB20)117×97	25.40	20.0	52.9	56.6	
	(VB23)123×99	30.70	24.2	65.2	69.3	
레일	(30kg)108×108	38.30	30.1	108.0	28.0	
	(37kg)122×122	47.30	37.2	149.0	37.0	
	(50kg)144×127	64.30	50.4	225.0	55.0	
강관	Ø114.3×4.5	15.52	12.2	41.0	41.0	
	Ø139.8×6.0	25.22	19.8	79.0	79.7	
	Ø165.2×7.1	35.25	27.7	134.0	134.0	
	Ø190.7×7.2	41.51	32.6	184.0	184.0	
	Ø216.3×8.2	53.61	42.1	269.0	269.0	
	Ø267.4×9.3	75.41	59.2	470.0	470.0	

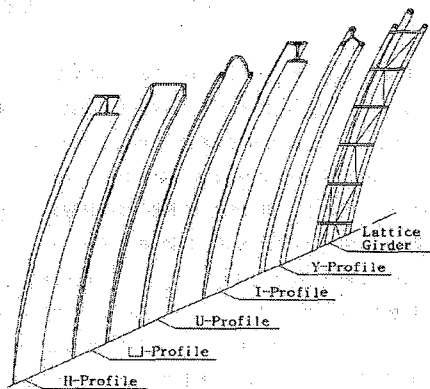


그림 41 여러 가지 형태의 강지보재

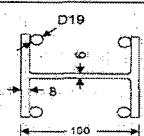
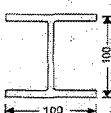
(단위 : mm)		
	철근지보	H형강 지보재
형상		
강재단면적 (cm ²)	11.5(52.5%)	21.9(100%)

그림 42 철근지보의 형상 및 제원

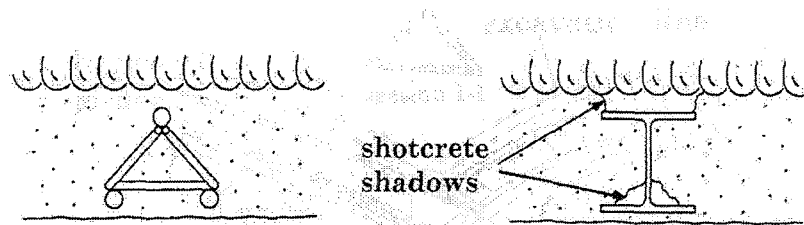
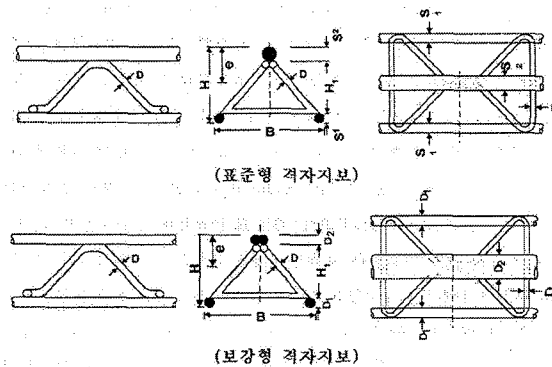
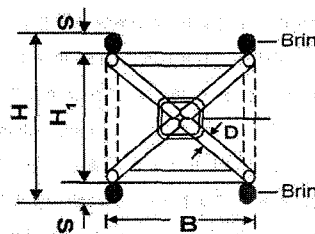


그림 43 격자지보와 H형강 지보재의 배면공동 발생특성 비교



a) 표준형 및 보강형 3-bar 격자지보



b) 집하방지용 4-bar 격자지보

그림 44 격자지보의 일반적인 형태

3.3 강지보재 지보패턴

본 연구과제의 궁극적인 목표중에 하나인 터널의 급속시공 및 급속안정화를 위한 최적 강지보재의 개념 재정립과 개발을 위하여, 국내외 11개의 터널지보패턴을 조사하였으며 터널지보패턴이 없는 경우에는 실제 설계/시공된 사례를 바탕으로 요약 정리하였다.

3.3.1 RMR분류법

암반분류를 위해 국내외적으로 가장 많이 사용되어지고 있는 암반분류법중 하나인 RMR 분류법은 남아공화국의 Bieniawski가 1973년에 최초로 제안하였고 1979년에 일부 수정/보완된 암반분류방법으로 “The Geomechanics Classification”이라고도 한다. RMR분류법을 이용한 각 등급에 대한 지보지침은 4~12m 폭의 터널에 대하여 표로 제안되어 있다. 다음 표 37은 발파에 의해 굴착되는 10m 폭의 마제형 터널의 경우, 수직지압이 25MPa 이하인 조건에서 굴착될 때 암반등급별 지보지침을 보여준다. RMR분류법을 적용한 터널 지보 설계패턴에서는 강지보재가 RMR값이 40이하인 불량한 지반부터 적용되었다. 강지보재의 설치간격은 최대 1.5m이고 최소간격은 0.75m이다.

표 37 암반터널에서의 굴착과 지보를 위한 암반분류 지침(Bieniawski, 1976)
(마제형, 폭 10m, 수직응력 25MPa 이하, 발파굴착)

암반구분	굴 착	지보재		
		목볼트(직경 20mm, 전면접착식)	-shot크리트	강제지보
매우 양호한 암반 I RMR : 81~100	· 전단면 굴착 · 굴진장 3m	국부적인 장소에만 실시하는 Spot bolting 외에는 일반적으로 지보 필요없음		
양호한 암반 II RMR : 61~80	· 전단면 · 굴진장 1.0~1.5m · 막장면에서 20m에 지보설치 완료	· 국부적 철망 설치 · 목볼트 : 천정부에 길이 3m, 간격 2.5m	· 필요한 경우천정부에 두께 50mm	—
보통의 암반 III RMR : 41~60	· 상부도개 및 벤치 · 굴진장 1.5~3.0m, · 매발파마다 즉시 지보시공 · 막장면에서 10m에 지보설치 완료	· 천정부 철망설치 · 목볼트 : 천정 및 측벽부 길이 4m, 간격1.5~2.0m의 시스템 볼트	· 천정부 두께: 50~100mm · 측벽부 두께: 30mm	—
불량한 암반 IV RMR : 21~40	· 상부도개 및 벤치 · 굴진장 1~1.5m · 굴착과 동시작업으로 막장면에서 10m에 지보설치 완료	· 철망설치 · 목볼트 : 천정 및 측벽부에 길이 4~5m, 간격 1~1.5m의 시스템볼트	· 천 정 부 두 개 : 100~150mm, · 측벽부 두께: 100mm	· 필요한 지점에서 경량~중간리브를 1.5m 간격 설치
매우 불량한 암반 V RMR : < 21	· 다단도개 · 굴진장 0.5~1.5m · 굴착과 동시 작업으로 지보설치 완료 · 발파후 가능한 조기에 shot크리트 타설	· 철망설치 · 목볼트 : 천정 및 측벽부에 길이 5~6m, 간격1~1.5m의 시스템볼트	· 천정부 두께: 150~200mm, · 측벽부 두께: 150mm · 막장면 두께: 50mm	· 필요한 경우 강재판 (steel lagging), 휘폴링과 함께 중간~중량리브를 0.75m간격으로 설치 · 인버트 폐합

3.3.2 Q-system(NGI)

NGI분류법은 Q-system이라고도 하며, 터널 지보체계 결정을 위한 암반등급(rock mass quality)을 나타내는 지표로서 1974년 Norwegian Geotechnical Institute(NGI) 소속의 Barton, Lien, Lunde 등에 의해 제안되었다. 그림 45은 Q값과 등가직경(굴착 목적과 규모의 함수로 굴착지보비율(excavation support ratio, ESR), 굴착스팬, 터널 직경 또는 높이에 의해 표시)에 의해 결정되는 터널의 지보패턴을 보여주고 있다. 다음과 같이 Q값과 등가직경에 따라 터널의 지보패턴을 9가지로 구분하였다.

- (1) 무지보
- (2) 랜덤 록볼트
- (3) 시스템 록볼트
- (4) 시스템 록볼트+쏘크리트 40 ~ 100 mm
- (5) 시스템 록볼트+강섬유 쏘크리트 50 ~ 90mm
- (6) 시스템 록볼트+강섬유 쏘크리트 90 ~ 120mm
- (7) 시스템 록볼트+강섬유 쏘크리트 120 ~ 150 mm
- (8) 시스템 록볼트+강섬유 쏘크리트 150 mm이상+ 강지보공
- (9) 시스템 록볼트+강섬유 쏘크리트 150 mm이상+ 강지보공+보강 콘크리트 라이닝

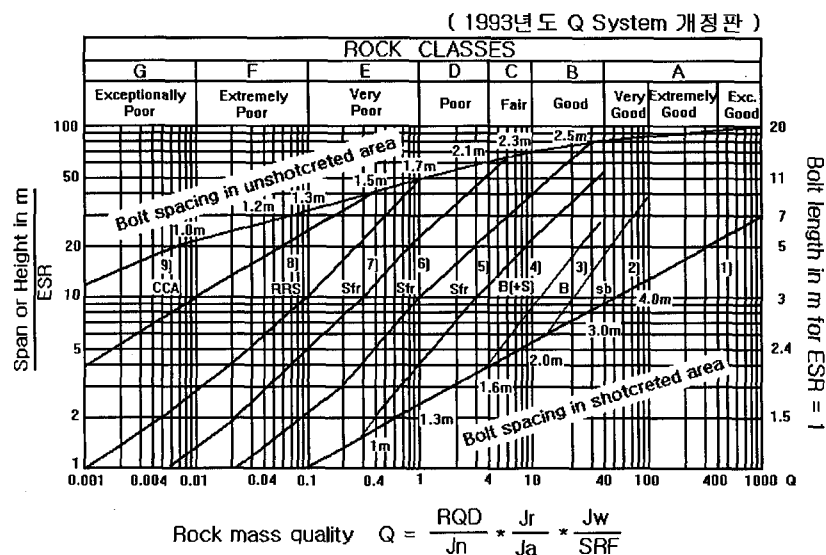


그림 45 Q-System에 의한 암반 등급분류 및 적용 지보공

3.3.3 RSR(rock structure rating)분류법

지반의 지보량 예측모델인 RSR개념은 1972년 미국에서 Wickham, Tiedemann & Skinner에 의해 개발되었다. 이 개념은 암반의 암질을 평가하고 적절한 지보법을 선택할 수 있도록 정량적 방법을 제시하고 있다. RSR은 터널단면의 크기에는 관계 없이 25~100 사이의 값을 가지며 27 이하는 많은 보강을 필요하고, 77이상은 보강이 불필요한 것으로 간주하며, 중간부분은 그림 46에 따라 보강한다. 강지보재의 설치가 필요한 구간에서는 최소간격 1ft에서 최대간격 7ft로 규정하고 있다.

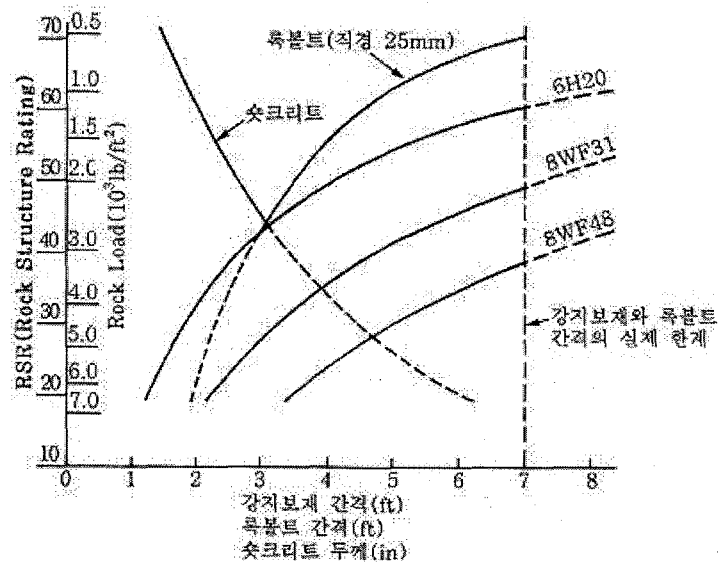


그림 46 RSR분류법에 의한 보강방안(직경 7.3m 터널의 경우, Wickham et al., 1972)

3.3.4 한국도로공사

고속도로 터널 건설에 적용하고 있는 터널 단면 표준도는 굴착 암반의 공학적 특성치와 터널의 토피에 따라, 즉 암질에 따른 적용 표준단면을 굴착방식과 관련지어 제시, 적용하고 있다. 아직까지는 암반을 분류하는 기본 암반 분류방법이 정립되어 있지 않지만 실제 고속도로 노선별 암반분류법을 종합분석해 본 결과 RMR, Q값, RQD, 탄성과 속도, 일축압축강도, 코아회수율등을 적용하여 암반을 5등급으로 분류하고 있다.

표 38은 한국도로공사에서 1992년과 2001년에 제시한 2차선 터널에 대하여 6

등급의 암질(경암~갱구보강용)에 대한 표준지보패턴을 보여주고 있다.

표 38 2차선 터널 지보패턴별 적용 지보 현황 (상부/하부)

터널단 면		1회 굴착거리		굴 착 방 법	쏫크리트 두께		록볼트				강지보공 (100x100x6x 8)		적용 암 질	RMR		Q값
		1992	2001		1992	2001	길 이	간격		간격		1992		2001		
								1992	2001	1992	2001					
2차 선	Type-I	3.0m	3.5m	전단 면	5cm	5cm	3m	임의로	임의로	-	-	경암	90~ 100	81~ 100	40 이상	
	Type-II	3.0m	3.5m	전단 면	5cm	5cm ¹⁾	3m	중:3.0m 횡:1.5m	중:2.0m 횡:2.0m	-	-	보통암	70~90	61~80	10~ 40	
	Type-III	2.0m	2.0m	전단 면	10c m	8cm ¹⁾	4m	중:2.0m 횡:1.5m	중:2.0m 횡:1.5m	2.0m	-	연암	50~70	41~60	4~ 10	
	Type-IV	1.5m	1.5m / 3.0m	반단 면	15c m	12cm ¹⁾	4m	중:1.5m 횡:1.5m	중:1.5m 횡:1.5m	1.5m	1.5m	풍화암	25~50	21~40	1~4	
	Type-V	1.2m	1.2m / 1.2m	반단 면	20c m	16cm ¹⁾	4m	중:1.2m 횡:1.5m	중:1.2m 횡:1.5m	1.2m	1.2m	풍화토	25 이하	20 이하	1이하	
	Type-VI	-	1.0m / 1.0m	반단 면	-	16cm ¹⁾	4m	-	중:1.0m 횡:1.5m	-	1.0m	갱구보강용	--		-	

1) 강섬유 보강 쏫크리트 적용

3.3.5 서울시 지하철 건설본부

서울시 지하철 건설과 관련한 터널설계 표준지보패턴에 관한 내용은 제3호선, 4호선, 제2기 서울 지하철(5호선~8호선) 및 9호선 표준지보패턴을 근거로 작성하였다.

표 39에 나타난 것처럼 서울지하철 3~8호선을 위한 단선 및 복선 터널 표준지보패턴은 4개의 지보패턴을 가지고 있으며 모든 조건이 거의 동일하다. 지반은 주로 N값과 RQD값을 사용하여 분류되었으며 강지보재의 경우 경암1(RQD 30~50)부터 토사층까지 적용되어 졌다. 표 40은 서울지하철 9호선을 위한 터널표준지보패턴을 보여주고 있다. 여기서는 풍화암(상부)과 연암(하부)이 같이 존재하는 구간을 추가하여 5개의 지보패턴을 채택하였다. 또한 대상지반도 RMR분류법을 도입하여 분류하였으며 지반의 좀 더 정확하게 분류하기 위하여 분류기준을 다양화하였다. 강지보재의 경우 경암구간에도 시공되도록 채택되었다.

표 39 서울지하철 3 ~8호선 표준지보패턴

구분		단선터널				복선터널			
지보패턴		PS-2	PS-3	PS-4	PS-5	PD-2	PD-3	PD-4	PD-5
적용지반		충적토 및 풍화토	풍화암(N1 00이상)	연암(RQD 30이하) 경암1(RQD 30~50)	경암2(RQD 50이상)	충적토 및 풍화토	풍화암(N1 00이상)	연암(RQD 30이하) 경암1(RQD 30~50)	경암2(RQD 50이상)
굴착공법		Ring Cut, Short Bench	Ring Cut, Short Bench* 또는 Bench Cut	Bench Cut 또는 Full Face	Full Face	Ring Cut, Short Bench	Ring Cut, Short Bench* 또는 Bench Cut	Bench Cut	Full Face
굴진장(m)		1.0~1.5	12.~1.8	1.35~2.0	1.5~2.5	1.0~1.5	12.~1.8	1.35~2.0	1.5~2.5
쉴크리트 두께(cm)		20	15	10	10	20~25*	20	15	10
록볼트	길이(m)	3	3	2	Random Rock Bolting	3	3	3	Random Rock Bolting
	간격(m)	1.0	1.2	1.35		1.0	1.2	1.35	
강지보재		H-125 1.0m 간격	H-100 1.2m 간격	H-100 1.35m 간격	-	H-125 1.0m 간격	H-125 1.2m 간격	H-100 1.35m 간격	-
와이어메쉬		2층 사용	2층 사용	1층 사용	-	2층 사용	2층 사용	1층 사용	-
콘크리트 라이닝(cm)		30	30	30	30	30	30	30	30

*: 지하철 3,4호선만 적용

표 40 서울지하철 9호선 표준지보패턴

구분		단선터널					복선터널				
지보패턴		PS-2	PS-3A	PS-3B	PS-4	PS-5	PD-2	PS-3A	PS-3B	PD-4	PD-5
적용지반		충적토 및 풍화토(N 50미만/10cm)	풍화암(RQD 10미만, N 50이상/10cm, RMR* 33미만)	풍화암(상부), 연암(하부), RQD 10이상, RMR* 34~40)	연암, 보통암(RQD 25이상, RMR* 41~55)	경암(RQD 50이상, RMR* 56이상)	충적토 및 풍화토(N 50미만/10cm)	풍화암(RQD 10미만, N 50이상/10cm, RMR* 33미만)	풍화암(상부), 연암(하부), RQD 10이상, RMR* 34~40)	연암, 보통암(RQD 25이상, RMR* 41~55)	경암(RQD 50이상, RMR* 56이상)
굴착공법		Short Bench	Bench Cut	Bench Cut	Bench Cut	Full Face	Ring Cut, Mini Bench	Ring Cut, Short Bench	Ring Cut, Bench Cut	Bench Cut	Bench Cut
굴진장(m)		1.0	1.0	1.0	1.2	1.3	0.8	0.8	0.8	1.0	1.2
쉴크리트 두께(cm)		20	15	15	10	10	25	20	20	15	10
록볼트	길이(m)	3	3	3	3	3	5	4	4	4	4
	간격(m)	횡:1.2 중:1.0	횡:1.2 중:1.0	횡:1.35 중:1.0	횡:1.35 중:1.2	Random	횡:1.2 중:0.8	횡:1.3 중:0.8	횡:1.3 중:0.8	횡:1.3 중:1.0	Random
강지보재		H-100 1.0m 간격	H-100 1.0m 간격	H-100 1.0m 간격	H-100 1.2m 간격	H-100 8막장당	H-125 0.8m 간격	H-125 0.8m 간격	H-125 0.8m 간격	H-100 1.0m 간격	H-100 8막장당
와이어메쉬		2층 사용	1층 사용	1층 사용	1층 사용	1층 사용	3층 사용	2층 사용	2층 사용	1층 사용	1층 사용
콘크리트 라이닝(cm)		30	30	30	30	30	40	40	40	40	40

3.3.6 한국철도시설공단

철도설계기준의 노반편에 의하면 터널 지보패턴은 다음과 같은 두가지에 근거하여 선정되도록 되어 있다.

- ① 지보패턴은 지반조사 자료를 근거로 설정한 지반등급에 따라 터널의 용도 및 규모, 지형, 안정성, 경제성, 시공성 등 제반 설계조건을 고려한 지보재로 설계한다.
- ② 지보패턴의 선정은 RMR 및 Q-시스템에서 제안한 지보패턴 선정방법을 참고하며 설계시에는 현장조건 및 대상터널의 목적에 따라 적합한 선정방법으로 설계한다.

철도터널은 도로터널이나 지하철 터널같이 표준지보패턴이 제시되어 있지 않다. 철도터널의 지보패턴 조사를 위하여 실제 설계/시공된 철도터널의 지보패턴을 입수하여 분석하였다. 총 26개의 복선 철도터널과 총 5개의 단선 철도터널을 위한 지보패턴을 본 연구에서 분석하였다. 표 41과 표 42은 단선 및 복선 철도터널의 지보패턴을 요약하여 보여주고 있다.

표 41 단선 철도터널 지보패턴

RMR			81~100	61~80	41~60	21~40	20이하
굴착방법			전단면굴착	전단면굴착	상하반단면굴착 전단면굴착	상하반단면굴착	상하반단면굴착
굴진장(m)			3.0~3.5	2.0~2.5	1.5~2.0	1.5	1.0~1.2
쏜크리트 두께(cm)			5, 5*	5~7	8~12	12~14	16~17
복볼트	길이(m)		3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	간격 (m)	종	Random	2.0~2.5	1.5~2.0	1.2~1.5	1.0~1.2
		횡	Random	1.5~2.0	1.5	1.2~1.5	1.0~1.2
강지보재			-	-	LG-50 1.5m	LG-70 1.2m LG-50 1.5m	LG-95 1.0m LG-50 1.0m
Wire Mesh			-	-	-	-	-
콘크리트 라이닝(cm)			30	30	30	30	30 [#] ~40 [#]

*: 일반쏜크리트, #: 철근보강 콘크리트

표 42 복선 철도터널 지보패턴

RMR			81~100	61~80	41~60	21~40	20이하
굴착방법			전단면굴착 상하반단면굴착	전단면굴착 상하반단면굴착	상하반단면굴착 전단면굴착	상하반단면굴착 CD분할굴착	상하반단면굴착 CD분할굴착 Ring Cut
굴진장(m)			2.5~3.5	2.0~3.5	1.5~2.5	1.0~1.5	0.8~1.2
쏿크리트 두께(cm)			5*~10*	5*~10*, 5	15*, 8	20*, 12~16	25*, 16~20
록 볼 트	길이(m)		3.0~5.0	3.0~5.0	3.0~5.0	4.0~5.0	4.0~5.0
	간격 (m)	중 형	Random, 2.5~3	2.0~3.5	1.5~2.5	1.0~1.5	0.8~1.25
		형	Random, 2	2.0~2.5	1.1~2.0	1.1~1.5	1.0~1.5
강지보재			-	-	H-100 1.5m~2.0m LG-50 1.5m	H-125 1.3m~1.5m LG-70 1.0m~1.2m LG-50 1.2m~1.5m	H-150 1.0m LG-95 0.8m~1.0m LG-50 1.0m~1.2m
Wire Mesh			1층	1층	2층	2층	2층
콘크리트 라이닝(cm)			30~40	30~40	30~40	40, 40 [#]	30 [#] ~40 [#]

*: 일반쏿크리트, #: 철근보강 콘크리트

표 41과 42에서 보여주듯이 철도 터널의 지보패턴은 일반적인 경향을 보여주고 있지만 각 철도터널에 따라 다양한 지보패턴을 가지고 있음을 보여주고 있다. 강지보재의 경우 RMR값이 60이하 지반에서 강지보재를 사용하고 있다.

3.3.7 미 육군공병단(US Army Corps of Engineers)

미 육군공병단에서 Proctor 와 White에 의해 1946년에 최초로 집필된 'Rock Tunneling with Steel Supports'와 'Earth Tunneling with Steel Supports'를 강지보재의 설계와 시공을 위한 최고의 가이드로 추천하고 있다. 두권의 매뉴얼에서는 암반터널과 토사터널에서 강지보재의 설계와 시공을 지질조건, 터널의 목적, 터널의 형상 및 굴착방법등에 따라 다양하게 강지보재를 설계시공하는 방법을 추천하고 있으며 각각의 경우에 따라 고려해야 할 사항들을 고려하여 직접 계산하는 방식을 채택하였다.

레티스거더는 파쇄대와 같은 빠르게 시공하는 구간의 적용을 추천하고 있으며 레티스거더를 시공한 후 쏿크리트를 타설한 경우에는 레티스거더와 쏿크리트를 하나의 합성부재로 보고 Reinforced Concrete의 해석과 유사한 방법(쏿크리트는 압축부재, 레티스거더는 인장부재)으로 이 합성부재에 발생하는 응력과 모멘트를 계산하여 레티스거더와 간격 및 쏿크리트의 두께를 결정하는 방법을 추천하고 있다. 미

국의 ASTM에서는 터널분야에 대한 시방서나 매뉴얼을 영국의 ‘Specification for Tunnelling’ 과, ‘Tunnel Lining Design Guide’ 을 추천하고 사용하고 있는 실정이다.

3.3.8 일본도로공단

터널 설계를 위해 터널 굴착에 의해 주변 지반의 거동을 예측함에 있어서, 암석의 강도가 터널 굴착에 의한 하중보다 크고 절리 등의 역학적 불연속면이 중요하게 작용하는 경우와, 암석의 강도가 터널 굴착에 의한 하중보다 비교적 작아서 터널의 변형이 연속체적 거동을 나타내는 경우가 있다. 전자의 경우, 지반의 거동은 암반 중의 불연속면의 방향, 절리계의 수, 분포 밀도, 연속성, 충전물의 상태 등에 관련되므로, 지표 지질 답사, 보링 조사에 의해 암반의 불연속면의 조사결과를 중요시하고, 이들을 보완하는 목적으로 탄성과 속도를 이용하여 지반을 평가하고 분류한다. 후자는 암석이 가지는 강도가 작용하는 응력에 비교하여 같은 정도 혹은 적은 경우이다. 분류의 주된 지표로서 터널의 거동을 정량적으로 표현할 수 있는 지반 강도비 (지표 지질 답사, 보링 조사, 탄성과 속도 조사로부터 추정된 지반의 압축 강도에 의해 산정한다)를 이용한다. 위에 언급한 내용을 바탕으로 지반을 5등급으로 구분하고 표 43과 44에서 지보 선정의 방식 및 지반 분류로부터 각 지반 등급에 대응하는 지보 구조의 적용 범위를 나타내고 있다.

표 43 지반 등급에 대응하는 지보 구조의 범위

번호	지보 구조의 종류	지반 등급					적용 조건과 특성
		B	CI	CII	DI	DII	
①	-shotcrete - rockbolt						지반의 자립성이 비교적 양호한 지반에 적당하다.
②	-shotcrete - rockbolt 강제 아치형 지보공						강제 아치형 지보공에 의해 응력이완 하중을 직접 지지한다. 또는 shotcrete에 인성을 준다.
③	①의 지보 구조와 인버트						굴착시의 변위는 작지만, 장기적 안정이 손상될 염려가 있는 경우.
④	②의 지보 구조와 인버트						굴착시의 변위가 큰 경우.

표 44 2차선 터널의 표준 지보 패턴표

지반 등급	지보 패턴	표준 1사 이클 굴진 장 (m)	록볼트				뿔어붙이 기 콘크리트	강제 아치형 지보공		복공두께 (cm)		변형 여유 (cm)	굴착 공법	
			길이 (m)	시공 간격 (m)		시공 범위		두께 (cm)	상반 사이즈	하반 사이즈	아치 측벽			인버트
				둘레 방향	연장 방향									
B	B-a	2.0	3.0	1.5	2.0	상반 120°	5	-	-	30	0	0	보조벤치설치 전단면 공법 또는 상반 공 법	
C I	C I-a	1.5	3.0	1.5	1.5	상반	10	-	-	30	(40)	0		
C II	C II-a	1.2	3.0	1.5	1.2	상하반	10	-	-	30	(40)	0		
	C II-b			1.5	1.2			H125	-					
D I	D I-a	1.0	3.0	1.2	1.0	상하반	15	H125	H125	30	45	0		
	D I-b	1.0	4.0											
D II	D II-a	1.0 이하	4.0	1.2	1.0 이하	상하반	20	H150	H150	30	50	10		

3.3.9 일본철도공단

일본 철도 공단의 경우 일본도로공단과 거의 동일한 설계방법을 적용하고 있으며, 암반분류 및 지보패턴에 대하여 다른 기준을 가지고 있다. 탄성과 속도, 지반 강도비, 상대 밀도, 세립분 함유율과 암반종류에 따라 지반을 6개의 표준지보패턴으로 나누고 있다. 표 45는 표준지보패턴에 대한 지보부재를 보여주고 있다.

표 45 표준 지보 패턴(철도 건설 공단)

(a) 재래선 단선 터널

지보 부재 표준 지보 패턴	록 볼트			쉴크리트 두께(cm)		강제 지보공 종류
	배치	길이×수 (m) (개)	종단 간격 (m)	아치 측벽	인버트	
IV _{NP}	-	-	-	5(평균)	-	-
III _{NP}	아치	2×0~4	(적절하게)	10(평균)	-	-
II _{NP}	아치	2×6	1.5	10(평균)	-	-
I _{NP}	아치·측벽	3×10	1.0	10(최소)	-	(100H)**
I _{SP}	아치·측벽	3×12	1.0	10(최소)	10(최소)	100H
I _{LP}	아치·측벽	3×8	1.0	10(최소)	-	100H

(b) 재래선 복선 터널

지보 부재 표준 지보 패턴	록 볼트			쉴크리트 두께(cm)		강제 지보공 종류
	배치	길이×수 (m) (개)	종단 간격 (m)	아치 측벽	인버트	
IV _{NP}	-	-	-	5(평균)	-	-
III _{NP}	아치	2×0~6	(적절하게)	10(평균)	-	-

II _N	아치·측벽	3×10	1.5	10(평균)	-	-
I _{NP}	아치·측벽	3×14	1.0	15(최소)	-	(125H)**
I _{SP}	아치·측벽	3×8 4×10*	1.0	15(최소)	15(최소)	150H
I _L	아치·측벽	3×10	1.0	20(최소)	-	125H

(c)신칸센 복선 터널

지보 부재 표준 지보 패턴	록 볼트			쑏크리트 두께(cm)		강제 지보공
	배치	길이×수 (m) (개)	종단 간격 (m)	아치 측벽	인버트	종류
IV _{NP}	-	-	-	5(평균)	-	-
III _{NP}	아치	2×0~6	(적절하게)	10(평균)	-	-
II _{NP}	아치·측벽	3×10	1.5	10(평균)	-	-
I _{NP}	아치·측벽	3×14	1.0	15(최소)	-	(125H)**
I _{SP}	아치·측벽	3×8 4×12*	1.0	15(최소)	15(최소)	150H
I _{LP}	아치·측벽	3×12	1.0	20(최소)	-	125H

(주) * 4m의 록볼트는 SL부근(아치 각부 및 측벽)에 배치한다.

** 강제 지보공을 이용하는 경우에는 ()안의 종류로 한다.

(기타) 표준 지보 패턴의 분류 기호는 지반 등급과 구별하기 위해서 P(Pattern) 기호를 붙였다.

3.3.10 일본토목학회

일본토목학회에서 표준시방서가 발간되어 있으나, 대부분 일본 도로공단과 철도 건설공단의 기준을 설명하는 형태로 발간되어 있다. 설계방법에 있어서 수치해석을 적용하는 법등에 대하여 설명하고 있으며, 영어로도 발간되어 있다. 토목학회의 지침은 도로터널에 관한 내용은 도로공단의 기준을 소개하고 철도터널의 내용은 철도건설공단의 기준을 소개하고 있다.

3.3.11 영국터널학회(The British Tunneling Society)

영국터널학회에서 발간된 'Specification for Tunnelling', 과 'Tunnel Lining Design Guide' 을 검토해 본 결과 강지보재에 대한 재질이나 시공시 주의사항에 대하여 간단하게 언급되었을 뿐 강지보재의 설계에 대한 내용은 전반적인 내용은 전무하였다.

3.4 기존 강지보재의 거동분석

국내에 강지보재로 가장 많이 사용되어지고 있는 레티스거더의 시험편으로부터 실제로 견뎌내는 강도 및 하중에 의한 레티스거더의 변형을 분석하였다. 거동분석을 위해 사용된 레티스거더와 실험방법은 다음과 같다.

1. 하중벤딩실험: 레티스거더 50×30×20와 70×30×20
2. 환봉 인장강도 실험: 환봉 무가공 시편

그림 47는 휨모멘트시험에 사용된 길이 1.5m의 레티스거더의 시편을 보여주고 있으며 그림 48은 휨모멘트시험 후의 모습을 보여주고 있다. 그림 49는 두 개의 레티스거더에 대하여 수행한 휨모멘트 실험결과를 보여주고 있다. 레티스거더 50×30×20에 대한 휨모멘트 실험결과 변위 12.38 mm에서 최대하중 2,430Kgf(23,814Nf)이 측정되었고 실험수행 중 형상 스파이더가 점진적인 변형을 이루며 하중이 작용하여 파괴되지 않았으며 용접부도 파괴되지 않았다. 레티스거더보 70×30×20에 대한 휨모멘트 실험결과 변위 13.9mm에서 최대하중 3,850Kgf(37,730Nf)가 측정되었으며 시험편의 시험은 형상 스파이더의 R부위에서 변형이루어졌으며 용접부가 부분적으로 파괴되었다.

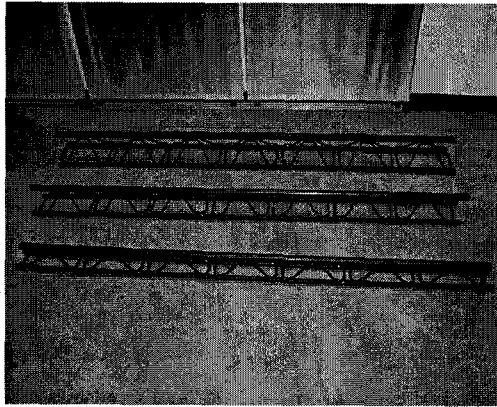


그림 47 레티스거더 시편

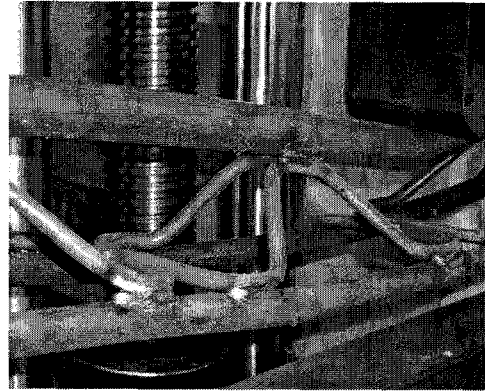
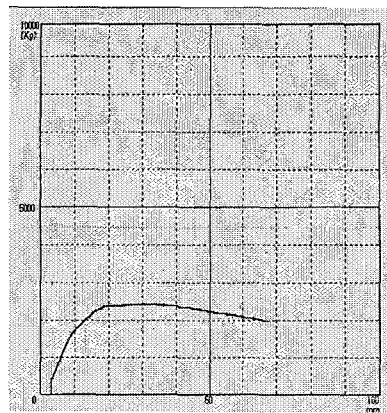
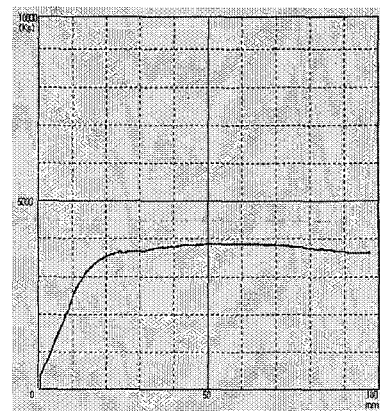


그림 48 휨모멘트 실험 후 시편



(a) 레티스거더 50×30×20



(b) 레티스거더 70×30×20

그림 49 휨모멘트실험결과

그림 50은 지름 30mm를 갖는 무가공 환중시편에 대해 수행한 인장강도 실험결과를 보여주고 있다. 변위 13.90mm에서 69.22Kg(678.38N)의 인장강도와 59.80Kg(586.06N)의 항복강도를 보였다.

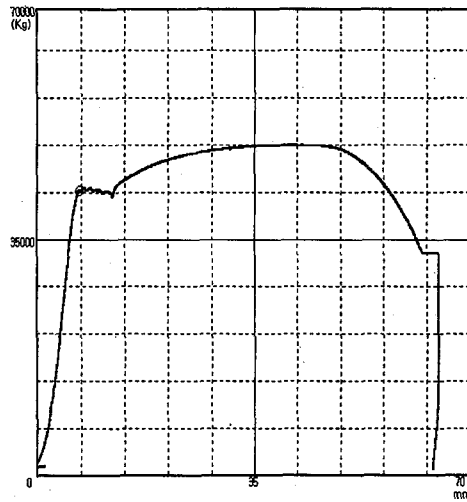


그림 50 환봉 인장실험 결과

4. 최적 강지보재의 개발을 위한 위상최적화 연구

4.1 구조물의 반응해석

본 연구는 강지보 시스템의 연결고리를 제시하기 위하여 연결고리의 응력해석을 반복적으로 수행하여야 한다. 연결고리의 위상을 적절히 도출하기 위해서는 3차원 유한요소 해석이 필요하며 반복계산중에도 정확한 수치해석결과를 도출하기 위하여 적합한 고체요소 선정을 위한 문헌조사를 실시하였다. 그 결과 컴퓨터의 계산시간을 줄이고 실용적인 구조해석을 위해 저차고체요소를 도입하였다. 저차고체요소는 일반적으로 묶임현상이 발생하여 이에 대한 성능을 개선하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 mean dilatation approach을 고체요소개발에 적용하기 시작한 이래 선택적인 감차적분법을 도입한 바 있으며 감차적분으로 발생하는 수치적인 불안정을 해소하기 위하여 모래시계제어법이 제시되기도 했다. 이후에도 표준변형률장을 대신하는 대체 변형률에 대한 많은 연구가 진행되었다. 이러한 맥락에서 본 연구에서는 위상최적화를 효율적으로 수행하기 위하여 가변형도를 이용한 저차고체요소를 도입하고 이를 최적설계과정의 반응해석을 위해 이용하였다.

4.2 다공성물질

본 연구에서는 위상최적화를 수행하기 위하여 다공성 물질을 도입하였으며 본 절에서는 도입된 다공성 물질에 대하여 기술하였다. 위상최적화는 임의의 설계영역 Ω 내에서 탄성텐서 E_{ijkl} 의 값을 재분배하는 문제로 정의할 수 있다. 이때 연속성을 가지는 밀도함수 ξ 를 도입하면 탄성텐서 E_{ijkl}^h 는 다음과 같다.

$$E_{ijkl}^h = \xi E_{ijkl} \quad (1)$$

여기서 밀도함수 값의 범위는 $0 \leq \xi \leq 1$ 이다.

따라서 구조물을 구성하는 물질의 부피는 다음과 같다.

$$V_s = \xi \Omega \quad (2)$$

여기서 V_s 는 구조물을 이루는 물질의 초기부피이며 최적화과정을 통하여 일정한 값을 유지한다고 가정한다.

최적화과정을 통하여 보다 뚜렷한 위상을 구하기 위해 밀도함수 ξ 에 지수 γ 를 도입하게 되면 식 (1)의 탄성텐서는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$E_{ijkl}^h = \xi^\gamma E_{ijkl} \quad (3)$$

여기서 γ 는 일반적으로 $\gamma \geq 1$ 이어야 하며 주로 3에서 9사이의 값이 사용된다. 참고로 γ 의 값이 커질수록 최적화로부터 구해진 위상이 뚜렷하게 나타난다.

위에서 정의된 임의의 밀도함수 ξ 는 구조물을 이루는 미소구조체의 기하학적 형태와 관계가 있으며 그림 51에서와 같이 사각형 빈 공간을 포함하는 단위셀의 경우 밀도함수는 $\xi = 1 - ab$ 로 나타낼 수 있다. 빈 공간은 $0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1$ 의 범위를 가진다.

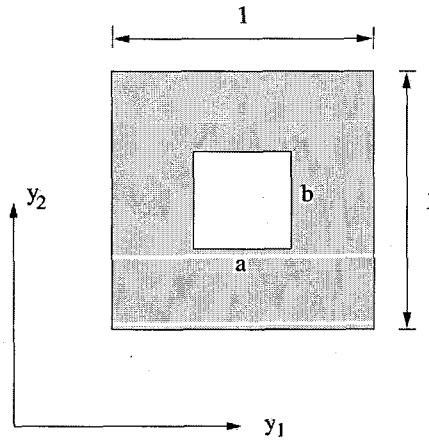


그림 51 미시좌표계내의 사각형 구멍을 가지는 단위셀

미소구조체를 채우고 있는 부분을 등방성 물질이라고 가정하면 구조물의 강성행렬 D 는 a 와 b 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = D^h(a, b) \quad (4)$$

여기서 a, b 는 요소내에 존재하는 빈 공간의 크기를 결정하는 변수이며, 물성행렬 $D^h(a, b)$ 는 식(3)을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D^h(a, b) = (1 - ab)^3 D = \rho(a, b)^3 D \quad (5)$$

본 연구에서는 그림 51의 사각형 구조체의 모양을 정사각형으로 가정하고 최적화과정중 설계변수로 사용할 재료밀도매개변수 r 을 다음과 같이 정의하였다.

$$r = 1 - a \quad (6)$$

위에서 정의한 재료밀도매개변수를 이용하면 평면응력상태에 있는 구조물의 물성행렬 D^h 는 다음과 같다.

$$D^h = \frac{\rho(r)^3 E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 - \nu & 0 \\ \nu & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 밀도함수는 $\rho(r) = 2r - r^2$ 이며 그림 52에 도시하였다.

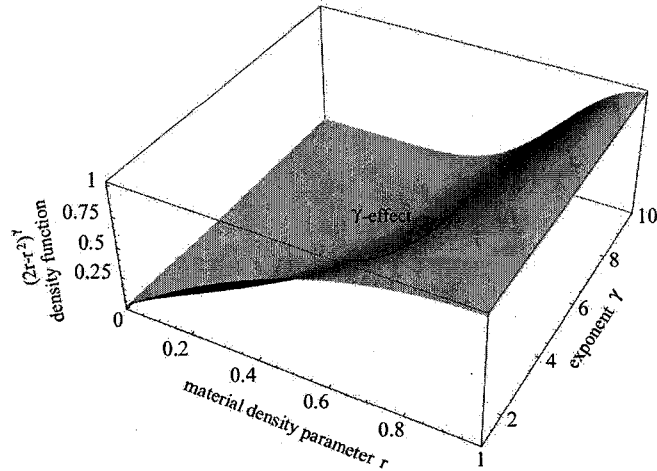


그림 52지수 γ 에 대한 밀도함수 분포도

식(7)에 정의된 가동질화된 물질은 구조체의 차원에 관계없이 쉽게 적용될 수 있는 장점이 있다.

4.3 위상최적화 알고리즘 제시

본 연구에서는 연결고리의 응력 및 진동특성을 동시에 고려하기 위하여 변형에너지에 기초한 위상최적화 알고리즘을 새롭게 제시하였다. 본 연구에서는 연결고리의 응력 및 진동특성을 동시에 고려하기 위하여 변형에너지에 기초한 위상최적화 알고리즘을 새롭게 제시하였다.

설계영역 Ω 내에 존재하는 다공성물질을 재분배하기 위하여 물질의 초기부피를 일정하게 유지하면서 변형에너지를 최소화하는 최적정기준을 사용하였다. 그리고 식(6)에 정의한 각 단위요소의 재료밀도매개변수를 설계변수로 이용하였다. 유한요소법을 사용한 이산화된 영역에서는 구조물이 재료밀도매개변수 r_e 를 가지는 요소 e 의 조합으로 표현되며 설계변수의 수는 유한요소의 수와 동일하게 된다.

구조물설계에 고려할 진동모드를 전부 n 개라고 가정하면 이들에 대한 구조물의 전체변형에너지는 다음과 같이 가중치 도입하여 표현할 수 있다.

$$U = \sum_{i=1}^n w_i U^i \quad (8)$$

여기서 U^i 는 i 번째 자유진동모드에 의해 유발되는 변형에너지를 나타내며 w_i 는

상응하는 가중치를 나타낸다. 식 (8)에 정의된 변형에너지를 이용하면 다수의 진동 모드를 고려하는 구조물의 위상최적화문제는 다음과 같이 정의할 수 있다.

Minimize U

$$\text{subject to } V_s = \sum_{e=1}^{nel} (2r_e - r_e^2) V_e \quad (9)$$

여기서 U 는 구조물의 전체변형에너지를 나타내고 V_s 는 설계영역 Ω 내에 물질이 존재하는 부분의 부피를 나타낸다. 설계영역이 nel 개의 유한요소로 이산화되면 설계변수벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_e, \dots, r_{nel}]^T \quad (10)$$

식 (9)에 정의된 최적화문제는 라그랑지승수를 이용하여 구속조건을 목적함수에 첨가함으로써 다음과 같이 라그랑지함수 L 로 정의된다.

$$L(\mathbf{r}_e) = U - \Lambda \left(\sum_{e=1}^{nel} (2r_e - r_e^2) - V_s \right) - \sum_{e=1}^{nel} \lambda_{r_e}^+ (r_e - 1) + \sum_{e=1}^{nel} \lambda_{r_e}^- r_e \quad (11)$$

여기서 U 는 구조물의 전체변형에너지를 나타내고 $\Lambda = [\lambda_{r_1}^+, \lambda_{r_2}^+, \dots, \lambda_{r_{nel}}^+]$, $\lambda_{r_e}^- = [\lambda_{r_1}^-, \lambda_{r_2}^-, \dots, \lambda_{r_{nel}}^-]$ 는 라그랑지 승수이며 r_e 는 설계변수를 나타낸다. 식 (11)에서 라그랑지승수 $\lambda_{r_e}^+, \lambda_{r_e}^-$ 는 항상 만족되므로 식 (11)에 정의된 라그랑지함수 L 의 정상 조건(stationary condition)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{2\Lambda(1-r_e)} \frac{\partial}{\partial r_e} \left(\sum_{i=1}^n U_e \right) = 1 \quad \text{또는} \quad B_{r_e} = 1 \quad (12)$$

식 (12)는 재료밀도매개변수와 변형에너지의 관계를 나타내는데 이를 이용하면 식 (13)과 같은 크기조절 알고리즘이 제시된다.

$$\begin{aligned} r_e^{k+1} &= \max\{(1-\zeta)r_e, 0\} \quad \text{if } r_e^k(B_{r_e}^k)^n \leq \max\{(1-\zeta)r_e, 0\} \\ &= r_e^k(B_{r_e}^k)^n \quad \text{if } \max\{(1-\zeta)r_e, 0\} \leq r_e^k(B_{r_e}^k)^n \leq \max\{(1+\zeta)r_e, 1\} \\ &= \max\{(1+\zeta)r_e, 1\} \quad \text{if } \max\{(1+\zeta)r_e, 1\} \leq r_e^k(B_{r_e}^k)^n \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 n 은 조절변수, ζ 는 이동변수 그리고 $B_{r_e}^k$ 는 k 번째 반복계산에서 B_{r_e} 값을 나타낸다.

최적정기준을 이용하여 구조물의 위상최적화 알고리즘을 형성하면 다음과 같다.

- ① 주어진 재료의 양을 이용하여 초기 설계변수값을 계산한다. 설계변수값은 재료밀도벡터로 주어진다.
- ② 초기(또는 갱신된) 재료밀도벡터로 형성한 등질화된 물질을 사용하여 구조물의 변위값을 구한다.
- ③ 계산된 변위값을 사용하여 목적함수 값 U_e 를 구하고 식 (12)에서 필요한 설계변수에 대한 목적함수의 민감도 $\sum_{i=1}^n \partial U_e / \partial r_e$ 를 계산한다.

- ④ 식 (12)을 이용하여 라그랑지승수 Λ 를 구한다.
- ⑤ 설계변수값을 갱신한다.
- ⑥ 갱신된 설계변수값을 여과한다.
- ⑦ 갱신된 설계변수값이 주어진 정지조건을 만족하면 최적화를 멈추고 그렇지 않으면 ②-⑥을 반복한다.

4.4 위상최적화 모델 선정 및 최적화수행

연결고리의 새로운 위상을 제시하기 위하여 유한요소모델을 형성하고 다음과 같은 중간결과를 도출하였다.

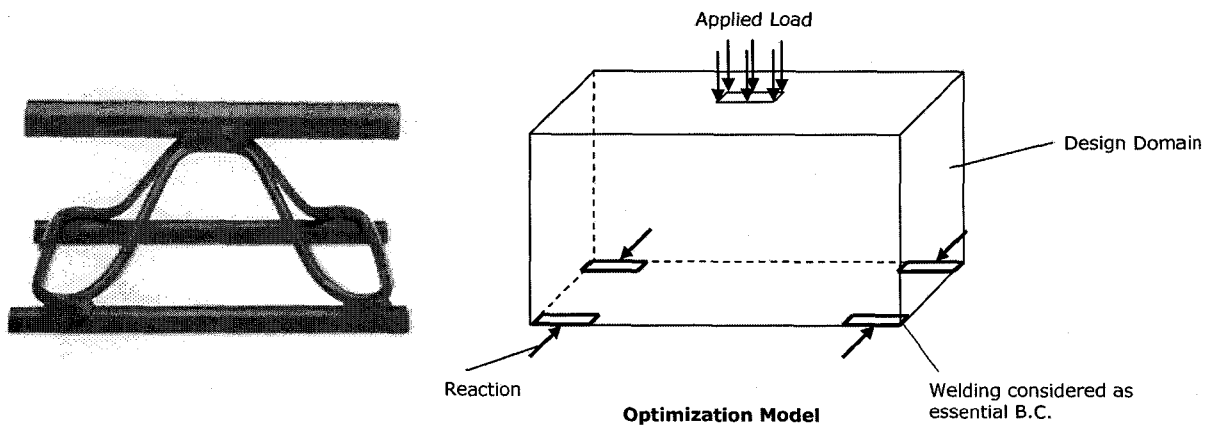


그림 53 연결고리형상 및 최적화 모델

위상을 도출하기 위하여 크기가 $12cm \times 4cm \times 4cm$ 인 직육면체 영역의 보를 이용하여 보의 중앙 상부에 집중하중이 가하였다. 보의 형상은 그림 53에 도시된 바와 같으며 이때 가해진 하중의 크기는 $5000N$ 이다. 보의 재료특성치는 탄성계수가 $E=10 \times 10^4 N/m^2$ 이고 프와송비가 $\nu=0.3$ 이다.

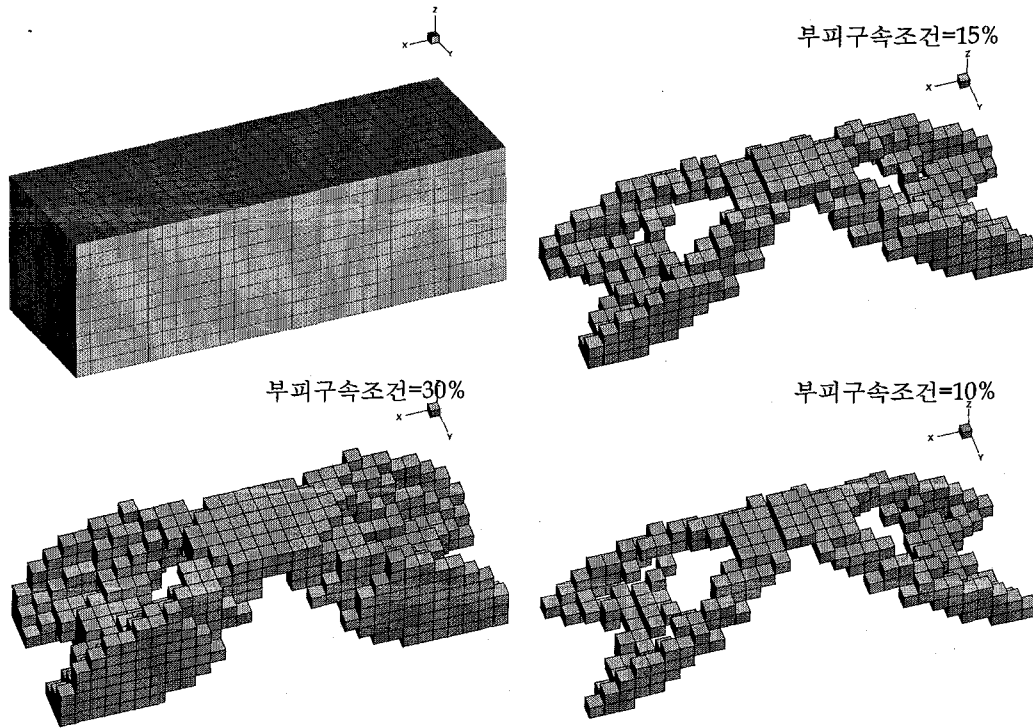


그림 54 해석 모델과 부피조건에 따른 최적위상

위상최적화에 필요한 변형에너지를 계산하기 위해 보를 3872개의 절점과 3000개의 3차원 유한요소로 이산화하였으며 유한요소 모델은 그림 4에 도시된 것과 같다. 이때 보의 재료는 가동질화된 물질로 표현하였고 지수값은 $\gamma=5$ 를 택하였다. 최적정기준을 바탕으로 유도한 크기조절 알고리즘의 조절변수와 이동변수값은 각각 $n=1.0$, $\zeta=0.02$ 를 사용하였다. 그리고 30%, 15%, 10%의 초기부피를 부피구속조건으로 이용하였으며 그 결과를 그림 4에 도시하였다. 위상최적화는 반복계산이 200번째에 이르면 멈추게 하였다. 이때 부피구속조건 30%, 15%, 10%에 따른 변형에너지의 감소는 각각 98.38%, 99.91%, 99.98%를 나타내었다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 연구개발목표의 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
급속안정화 터널 지반 정보 표준모델 개발 (제1세부)	100	■ 각 세부과제에서 도출되는 각종 지반정보의 유형 정의, 분류 및 기능(프로세스) 정의를 통해, ERD Map 작성
급속안정화 터널 지반 정보화 전략(ISP) 작성 (제1세부)	100	■ 급속안정화 터널시공을 위한 지반정보 활용시스템 구축 및 개별 요소 기술의 기반 확립
시추조사, 물리탐사, 지표지질조사, 막장 단면 이미지 등 다양한 지반조사 결과의 상호 연관성 분석 (제1세부)	100	■ 급속 안정화 터널 설계/시공 현장의 공정 진행 에 따른 지반정보 요소 분석 ■ 시추조사, 물리탐사, 지표지질 조사, 막장 단면 이미지 등 다양한 지반조사 결과의 상호 연관성 분석
지반특성에 따른 터널거동 분석 연구 (제1세부)	100	■ 특수 지반 사례 분석을 통한 거동특성 연구
신속·정량화 지반평가 기술 분석 (제1세부)	100	■ 신속·정량화 평가방법과 지반 정수와의 상관관계 분석
굴착지반에 대한 지반해석 모델 개발 (제2세부)	100	■ 시공중 굴착지반의 해석기법 분석 및 검토 ■ 한계변형률 개념에 근거한 시공 중인 터널에 대한 안정성 평가 기법 연구
굴착지반의 물성선정 및 평가 기술 (제2세부)	100	■ 설계 및 시공단계에서의 원지반 물성치 선정방법 조사 ■ 터널거동의 예측 및 수치해석의 결과를 분석한 지반거동 연구사례 조사

지보/보강재의 성능평가 기법 개발 (제2세부)	100	■ 지보효과에 대한 문헌조사 및 문제점 도출 ■ 록볼트 지보재 지보효과에 대한 실험적 연구 사례 조사
지보/보강재의 현장계측 실시 및 계측기기 및 기법 개발 (제2세부)	100	■ 주지보재의 현장설치 기법 및 계측기법 조사 연구 ■ 막장 전방 보강재의 현장계측 기법 및 시공 안정성 평가에 대한 문제점 연구
동적실험 개념정립 및 시스템 설계 (제3세부)	100	■ 동적실험시스템 설계요소의 정립
수치해석적 파괴모델링 기법 개발 (제3세부)	100	■ 홉킨슨 효과를 이용한 암석 중에서의 응력파의 전파모델링
발파진동의 구조물 영향평가 (제3세부)	100	■ 병행시공 현장적용(계룡터널) - 발파진동 영향평가 - 안전이격거리 산정
병행시공 작업공간의 환기법 개발 (제3세부)	100	■ 시공중 터널내 오염농도 평가 ■ 복합 환기시스템 도출 - 개량집진기 시작품 제작 - 복합차단막 설계 및 시작품 제작
.NET 기술에 대한 기초연구 (제3세부)	100	■ .NET 기술에 대한 기초 자료 수집 ■ .NET 기술을 이용한 Web 적용 방안 연구
발파설계 프로그램의 프로토타입 구현 (제3세부)	100	■ 프로토타입 개발범위 정의 ■ Web에서 구동되는 프로토타입 구현
파괴역학과 굴착과 발파로 인한 암반 손상영역의 국내·외 문헌적 고찰 (제3세부)	100	■ 파괴역학을 이용하여 수압파쇄, 기계굴착과 함께 조절발파시 생성되는 균열의 발생 기구 확립, 손상영역 평가 및 효과적인 균열제어용 시도들을 적용
파괴인성 실험법들의 장·단점 분석과 발파 메커니즘과의 상관성 및 접목 (제3세부)	100	■ 인장시편을 이용하여 실시하는 CNSCB, SCB, CCNBD 등의 실험법들의 개량화 방안을 모색 (2차년도 연계)

2차원과 3차원 수치해석 결과의 상관성 비교 (제3세부)	100	■ CB, SR, CCNBD 등의 모델들 을 2차원과 3차원 수치해석을 실시 (2차년도 연계)
고성능 숏크리트의 기본 배합설계 (제4세부)	100	■ 고성능 숏크리트의 필요성 분 석 연구 ■ 고성능 숏크리트의 목표 설계 강도 결정 ■ 메타카울린과 고성능 감수제 의 병용 혼입시의 최적 급결제 사용량 결정 ■ 폴리카르본산계 고성능 감수 제와 AE제량 결정 ■ 메타카울린을 사용한 고성능 숏크리트의 배합설계 ■ 배합설계에 따른 숏크리트의 성능 평가 실시
고성능 록볼트용 신재료 방안 및 분석 (제4세부)	100	■ 기존 록볼트의 문제점 분석 ■ 기존 록볼트 정착재에 대한 성능 비교 평가 실시 ■ 캡슐형 정착재와 가소성 그라 우트재와 같은 신재료 검토 ■ 기존 록볼트 정착재 제품의 재료 성분분석을 통한 장단점 분석 ■ 고성능 록볼트 정착재 재료 개발 방향 선정 ■ 발포성 수지재료를 이용한 록 볼트 정착재 홀러내림 방지기 구 개념 정립
실내 숏크리트 타설시스템 개발(I) (제4세부)	100	■ 숏크리트 타설시 급결제 사용 량과 콘크리트 재료의 토출량 을 정밀 제어하기 위한 숏크리 트 타설시스템 발주 완료 (2차 년도 이후의 타설시험시 활용)
최적 강지보재 설계를 위한 위상최적화 기법 및 강지보재의 재료분석 (제4세부)	100	■ 최적 구조체 결정을 위한 위상 최적화 기법 연구 ■ 강지보재의 최적 연결구조 형상 제시 ■ 급속시공/급속안정화를 위한 최 적 강지보재 개념 제시 ■ 강지보재용 재료 조사 및 경제 성 분석

2. 연구개발 수행 진도율 (연구단 총괄)

구 분 개발내용	연 구 개 발 기 간												진도(%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
연구단 workshop 개최													100
연구단 자체평가 실시													100
국제협력 (MOU 체결 등)													100 (계획외)
연구단 성과 홍보													100 (계획외)
총 진도율	0	0	20	20	60	60	60	60	60	100	100	100	100

..... 당초계획
실 적

3. 관련 분야에의 기여

3.1 기술적 측면

지반조사 분석 및 활용기술 개발분야

- 기존의 도식적인 암반 평가 시스템과 굴착 및 지보를 위한 카테고리는 주로 특정한 조건들에 대한 경험으로부터 개발되었으며, 굴착 대상 지반과 주변 조건에 대한 일반화는 종종 부적절한 설계를 야기함. 결과적으로 기술적으로 타당하고 경제적인 설계와 시공은 프로젝트와 암반의 구체적인 절차를 적용함으로써만 달성될 수 있다고 할 수 있음. 이를 위하여 지반조건의 표현에 있어 모든 불확실성에도 불구하고 터널 설계는 전 프로젝트를 통해 사용가능한 일관적이고 논리적인 설계 절차를 허용하는 방법을 필요로 하며, 또한 시공 중 조사 등의 결과를 신속히 feedback함으로써 시공 중 설계를 보완하고, 안전한 급속 시공을 이룰 수 있음
- 실제 국내 터널 시공시 일반적으로 시공 전 예측된 지반 조건과 실제 시공 중에서 확인된 지반 조건의 차이를 명확히 나타나고 있음. 따라서 지반의 불확실성 또는 불균질성에 의해 설계 단계에서 충분히 예측할 수 없는 지반 조건을 시공 중에 확인하여 이에 적합한 능동적인 대응이 필수적이며, 급속 시공 중 시간적 제약 조건을 감안하여 신속한 정보화 프로세스 및 이에 따른 적절한 지반조사가 필요함
- 시공 시의 제반 여건이 설계 당시의 조건과 상이함으로부터 발생하는 설계 변경의 경우, 일부 사례에서 예기치 않은 지반 조건이 출현할 경우, 변경 설계가 용이치 않아 시공이 지연되거나 중단되는 경우가 존재함. 또한 설계 변경이 터널 특성 상 불가피하다 하더라도, 이에 대한 제도적 장치가 없는 경우 시공자가 성실 시공 이외의 불순한 목적으로 변경시킬 우려가 존재하는 것도 사실임. 따라서 시공자, 감리 및 감독 기관에서 객관적으로 현장 터널 상태를 전달 받고, 변경 설계안에 대한 합리적인 의사소통 및 신속한 결정 체계를 구성하는 것이 바람직함. 이를 위해서는 터널 굴착 및 시공 현장과 각 관련 기관을 연결하는 정보 네트워크의 필요성이 제기됨. 따라서

기존의 설계 정보 및 터널 현장에서 획득되는 다양한 정보에 대한 분석/처리를 모바일 장치 등을 이용해 온라인 네트워크화 한다면, 보다 신속하고 보다 객관화된 의사결정을 위한 도구로 활용되어 질 수 있을 것임.

- 터널 시공 중 획득되어 지는 정보는 저장으로서의 의미보다는 활용이라는 것에 초점이 맞추어져야 함. 따라서 상기에 언급된 다양한 시공 중 지반조사 및 분석 결과는 체계화된 시스템 내에서 운영되고 활용되어야 함. 궁극적으로 급속 안정화 시공을 위한 핵심정보로 활용되어 질 수 있을 것이며, 터널 시공의 효율성 및 안정성을 극대화 시킬 수 있을 것임.

- 대부분의 터널에서 각 막장의 지반 상태 관찰 결과의 분석이 효과적으로 이루어지면, 막장 전방의 지질 및 지반 조건에 대한 일정한 예측이 가능함. 이러한 예측이 가능하다면, 터널 급속 시공 중의 공기단축, 현장 안전성, 비용절감 등의 상당한 효력을 발휘할 수 있음. 그러나 많은 경우, 이를 수행할 수 있는 전문적 기술자가 부족한 실정에 있으며, 있다 하여도 지반 조건의 3차원적 공간 분포에 대한 분석이 쉽지 않은 것이 사실이다. 따라서 각 막장에서 수집되는 각종 자료를 정보화 하고 이를 3차원 상에서 분석함으로써 기존 설계 정보과 비교하고, 전방 지질 예측 능력을 제고함으로써 터널 시공 중의 안정화에 반영할 수 있는 시스템이 필요함.

- 본 연구를 통해 급속안정화 및 급속시공을 위한 합리적인 지반분류 기술, 지반조사 항목 및 암반타입에 바탕을 둔 굴착에 의한 지반거동 평가, 최적 지보시스템 선정을 위한 지반특성 평가를 통한 통합 지반거동 특성 분석시스템을 개발함으로써 국내 기술을 세계적 수준으로 향상시키고 향후 신공법 및 신기술 개발 연구를 제시할 수 있을 것으로 기대함.

굴착터널 안정성 평가기술개발분야

- 설계단계에서 사전 조사된 지반 개략 조사결과를 토대로 비합리적으로 선정된 시공 지보패턴에 대하여, 구체적으로 지보재의 지보효과에 대한 연구를 수행함으로써 지보재의 최적화에 대한 연구를 수행할 수 있음.
- 지보재중에서는 록볼트에 대한 기존의 연구내용은 주로 요소 기술적 측면이 강하며 이를 시공현장에 적용할 수 있는 지보효과에 대한 연구를 수행함으

로서 지보재의 현장 신뢰성을 확보하게 됨.

- 국내 불안정 지반에 시공되고 있는 막장전방 보강재의 설계기법 및 시공기술을 확보함으로써 과다보강을 막고 최적 지보량을 시공함으로써 경제적 시공을 도모할 수 있으며, 최대 사고발생 원인인 불리한 지질구조대를 신속하고 안전하게 급속 시공할 수 있는 기술을 확보하게 됨.
- 굴착에 의해 변화된 지반물성에 대한 연구를 수행하고 아울러 이러한 지반물성을 반영한 지반거동 해석기법에 대한 연구를 수행하여 현장에 시공 중인 지반의 거동 특성을 실제에 보다 더 가깝게 재현함으로써 굴착 중 지반거동의 신뢰성 확보 및 사전 거동 예측 등에 관한 기술을 확보할 수 있게 됨.
- 상기의 관련 기술을 시공현장에서 신속하게 반영하여 굴착 중 지반에 대한 안전성 평가 기술을 개발함으로써 터널 굴착 현장의 안전성 확보에 기여할 수 있음.

급속 시공을 위한 굴착기술 개발분야

- 국가의 운송 및 교통망 확대구축에 따른 도로/철도 건설과정에서 암반사면의 안정성 확보와 터널굴착에서의 여굴/미굴의 저감을 통한 안정성 제고 및 추가비용 발생억제를 위한 고도의 제어발파기술에 대한 수요증대
- 도로/철도 터널의 선형개량, 장대화, 대단면화에 따라 터널주벽을 이루는 암반구조물의 안정성 확보 기술 및 경제성 높은 고속굴진 기술에 대한 개발필요성 증대
- 발파굴착에 중대한 영향을 미치는 암반조건(물리적, 역학적 성질과 불연속면의 특성, 동적파괴특성 등)의 변화에 대응할 수 있는 정보기반 제어발파기술의 개발필요성 증대
- 다양한 산업발파 현장에서 설계지침으로 활용할 수 있는 발파에 대한 암반의 응답특성 파악과 정보자료화에 대한 필요성 증가와 더불어 국내의 지질 및 암반 특성과 발파여건에 적합한 제어발파 설계법 개발에 대한 수요증대
- 장대터널의 증가로 인해 절대 공사기간이 증가하고 있으며, 특히 국내의 콘크리트 라이닝 시공기간이 매우 길어 발파굴착-라이닝의 병행시공이 긴요한

상황이지만 발파굴착을 위한 환기시스템, 라이닝의 안정성 확보보장 등의 문제의 해결이 요구됨

- 도심지, 인구밀집지역, 민가 부근에서의 터널굴진, 암반굴착 작업의 증가 추세에 따라 과도한 발파로 인한 민원발생을 최소화할 수 있는 환경영향의 예측 및 제어가 가능한 공해저감형 최적발파 시스템에 대한 필요성 증대

신지보 시스템 개발분야

- 고성능 숏크리트의 배합에 있어 실리카 흙과 폴리카르복실계 고성능 감수제와 같은 고품질 숏크리트 재료의 사용이 필수적임에도 불구하고, 전량 수입에 의존할 수밖에 없는 실정으로 국내 숏크리트의 품질은 선진 외국의 숏크리트 품질과 비교할 때 강도/내구성 측면에서 현저히 떨어짐
- 국내 숏크리트의 낙후된 품질과 성능으로 인해 숏크리트 타설시 과다한 리바운드 발생과 부착력 저하 또한 연약지반에서 숏크리트의 타설두께가 증가되어 급속시공 및 급속안정화를 저해하고 있음
- NATM개념에 따르면 2차 콘크리트 라이닝은 시설공간 확보 및 미관확보에 주안점을 두고 있으나, 국내 숏크리트 성능에 대한 불확실성 등으로 인해 현재 2차 콘크리트 라이닝이 구조체 개념으로 시공되고 있는 실정임
- 구조체 개념의 2차 콘크리트 라이닝 시공은 급속시공을 저해할 뿐만 아니라 이에 따른 공사비 증가를 야기함
- 따라서 숏크리트의 부착력 향상으로 인한 터널의 급속 안정화, 숏크리트의 강도 증진에 따른 숏크리트 타설 두께 절감으로 인한 터널 급속시공 및 터널의 장기 내구성 확보를 위하여 한국형 고성능 숏크리트 재료의 적용과 최적 배합설계 기술개발이 필수적임
- 급속시공을 위하여 신재료를 이용한 록볼트 시스템의 개발로 터널의 급속시공 및 안정화를 위한 설계·시공기술의 발전이 예상
- 고성능 록볼트 시스템을 위한 신재료 개발에 대한 연구가 활발하게 증대될 것이며 신재료를 이용한 록볼트 시스템의 시공을 위한 장비 개발 연구가 기대됨
- 현재 위상 및 구조최적화를 통하여 토목재료의 재료적 단가를 낮추며 성능

을 유지시키거나, 향상시킬 수 있는 연구가 타 분야에서 활발히 진행되고 있음. 따라서 본 연구에서 수행코자 하는 터널 지보재의 구조적 최적화를 통하여 재료적인 측면에서의 경제성을 확보할 수 있는 신재료 개발을 추진하고자 함

- 터널분야에서는 생소한 위상 최적화 기법(topological optimization)을 도입하여 터널분야에서 신재료 개발을 위한 새로운 연구분야를 창출할 수 있는 가능성을 제시하고자 함

3.2 경제·산업적 측면

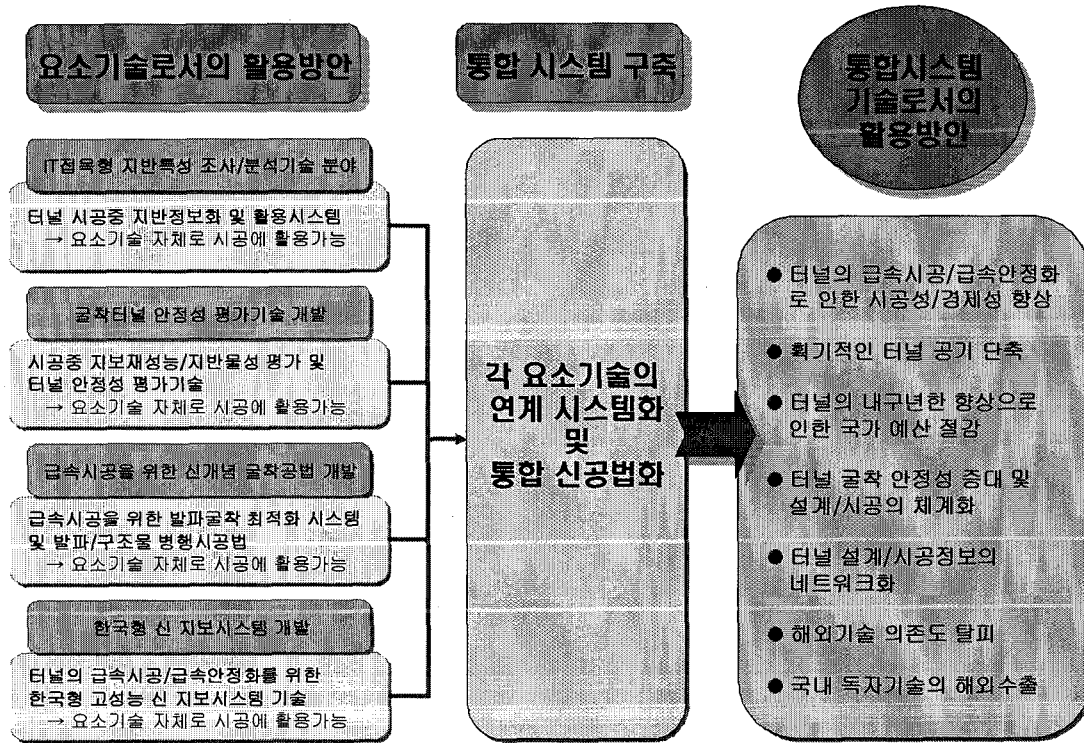
- 급속 터널 설계/시공 현장에서 실시되는 지반조사에는 많은 시간과 비용이 소요된다. 본 연구를 통해서 개발될 최적 지반조사 선정 시스템, 급속시공을 위한 지반종류 평가 기술 및 지반거동 형태 평가기술, GIS기반 지반정보 데이터베이스 시스템, 터널 지반정보 모바일 입/출력 시스템, 터널 지반정보의 시공관리 활용 시스템 개발, 데이터 퓨전 산출 지반정보와 최적 데이터베이스 구조를 활용한 전문가시스템, 미시추 구간 지반정보 예측/평가 기술의 공정화, 그리고 연속 디지털 이미지 획득/분석을 위한 최적 작업 프로세스를 통해서 지반조사 및 분석에 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대됨. 본 연구의 성공적인 수행결과는 급속 터널 설계/시공 현장뿐만 아니라, 지반조사를 필요로 하는 다른 토목 설계/시공 현장에도 효과적으로 적용 가능할 것으로 기대됨.
- 국내의 많은 암반굴착 현장에서 시공 시 기본발파설계의 문제점으로 인하여 빈번한 설계변경이 발생함으로써 공사기간 및 공사비 증대의 원인이 되고 있어 국내의 암반조건 및 발파여건을 충분히 고려한 발파설계 표준패턴 등을 도입할 필요성이 있음.
- 발파관련 설계자료, 시공자료, 조사결과 등의 중요자료들에 대한 체계적인 축적 및 분석과정의 결여로 대부분의 기술노하우가 사장되고 있어 중복투자로 인한 국가 경제적 손실이 우려되고 있음.
- 도로/철도 터널, 암반사면의 건설과 관련된 대규모 토목구조물의 안정성 제

고와 시공 및 관리 과정에서의 재해예방에 대한 필요성 증대.

- ❁ 현재 암반발파 분야에서의 국내기술은 연구투자의 미흡, 전문인력의 부족으로 외국에 비해 매우 낙후된 상태에 있으며, 점증하고 있는 국내의 터널건설 수요와 외국의 발파기술 고도화 추세에 비추어 볼 때 외국기업의 국내시장 잠식에 대처할 수 있는 독자적인 기술축적을 위한 연구가 시급한 상황임.
- ❁ 시멘트 사용량의 10%를 고성능 숏크리트 재료로 대체할 경우에 숏크리트의 생산 단가는 현행 15억원/km에서 17억원/km으로 증가하지만, 현행 터널의 내구년한이 30년인 반면 고성능 숏크리트를 적용할 경우 터널의 내구년한을 100년까지 증가시킬 수 있음. 즉, 내구년한 30년인 현행 1km의 숏크리트 시공비는 내구년한 100년의 터널에서는 59억원/km에 해당하므로 터널 연장 1km당 42억원의 경제적 절감 효과가 있음.
- ❁ 터널 연장이 20km/년 증가하고 본 연구과제에서 개발될 기술 채택율과 기술 수명을 각각 20%와 10년으로 가정할 경우, 터널 내구년한 측면에서 약 2,400억원의 경제적 파급효과가 있음.
- ❁ 터널 내구년한 측면뿐만 아니라 숏크리트의 고성능화로 인해 숏크리트 타설 두께가 20% 감소하고 리바운드도 10% 정도 절감된다고 가정할 경우, 1km당 3,000m³/km의 타설물량이 감소되어 4.5억원/km의 공사비가 절감되고 향후 10년간 900억원의 예산 절감이 가능함.
- ❁ 한국형 고성능 숏크리트 라이닝의 개발은 직접적인 경제적 절감 효과뿐만 아니라 실리카 흙과 같은 국외 고가 혼화재의 수입 대체효과를 기대할 수 있으며 관련 국내 혼화재 산업을 활성화할 수 있는 계기가 될 것임.
- ❁ 또한 숏크리트 타설두께 절감과 불리한 지반조건에서도 터널의 급속 안정화를 도모할 수 있기 때문에 상당한 공기 단축 효과가 기대됨.
- ❁ 급속시공에 의한 공사기간 및 공사비용의 감소로 경제적이고 합리적인 터널을 건설할 수 있으며 특히 도심지 터널 공사 시 공사기간의 단축으로 공사기간동안 발생하는 민원의 소지 및 환경적인 문제점들을 감소시킬 수 있음.
- ❁ 본 연구에서 추진코자 하는 신 강지보 시스템은 특수강재의 가격이 상당히 비싼 현실에서 일반강재를 이용한 새로운 구조형식을 제시함으로써 강지보재 시장을 확대해 나갈 수 있는 좋은 계기를 마련할 것으로 기대됨.

- 지반거동 특성 분석시스템 개발을 통하여 지반거동을 고려한 최적의 터널 설계 및 시공이 이루어짐으로써 경제적 파급 효과가 상당히 클 것으로 판단됨.
- 또한 세계적 수준에 부합되는 기술력 향상을 통해 제 3 국으로의 기술 수출이 가능할 것으로 기대됨.
- 설계단계에서 선정된 현장의 지보패턴에 대한 지보효과를 평가할 수 있는 기술을 개발함으로써 시공현장에서 지반의 거동특성(각종 현장계측치)을 신속하게 반영하여 최적의 지보효과에 대한 평가가 가능하여 시공 공비 절감 효과가 기대된다.
- 현재 굴착이 진행중인 시공현장 지원용 시스템을 개발함으로써 IT 및 첨단 기술을 토목시공현장에 연계시킴으로써 관련분야 기술의 확장성에 기여.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획



- 이상대 분포구간에서의 막장관찰, 탐사, 선진시추 등의 지반조사 기법을 통한 자료를 신속히 정보화 하고 이를 공유하여 의사결정자료로 제시
- 터널 시공 현장에서 조사자가 시공 중 획득된 각종 정보를 실시간 현장에서 직접 입력을 통한 업무 처리
- 터널 시공 현장에서 조사자가 시공 중 획득된 각종 정보를 실시간 현장에서 직접 입력을 통한 업무 처리
- 단위 지역에 대한 시공 전 설계자료를 기반으로 지보 변경 요인에 대해 자료 비교 및 분석이 실시간 자동적으로 진행
- 터널 시공 중 자료가 입력됨과 동시에 3차원으로 가시화되어 현장과 중앙의 시공간적 제약이 해소
- 디지털방식으로 자료처리가 자동화되어 자료입력의 중복과 손실을 방지
- 기존 자료가 보존되어 시간적 경과에 따른 터널 구조물의 변화를 추적할 수 있어 4차원 터널 모델링 관리가 가능

- 시공 전 설계자료와 시공 중 설계자료가 전산으로 관리되어 자료 출력 및 관리를 위한 비용을 획기적으로 절감.
- 업무 자동화로 터널 조사자가 공학적 활동에 집중할 수 있는 여건 확보
- 현장 모바일 기기와 자료분석 및 처리를 위한 서버 시스템의 효율적인 운용으로 건설 관련 통합 시스템 구축과 건설 CALS 실현에 기여
- 조사자료의 실시간 통계적 분석처리와 단면도 작성 툴을 사용할 수 있어 조사작업의 효율성을 향상하며, 건설 관리 기능을 극대화
- 부분적인 요소기술보다 통합화되는 추세에 맞게 자료의 입력-처리-분석-안정성 해석 등의 일련의 과정을 원스톱으로 자동화하는 모듈 개발
- 터널 급속 시공을 위한 시공현장 지원용 지반 안전성 평가 기술 개발
- 터널 지보재 및 보강재(막장전방 장척 보강재)의 성능평가에 대한 연구를 실시하여 지보효과의 정량화를 유도하고 최적 지보에 의한 경제성 확보
- 시공현장에서 실시한 계측 결과의 정보화 처리 및 다음 굴착을 위한 신속한 반영(Feedback) 시스템 개발(IT 기술의 시공현장 기술력 확보)
- 굴착에 의한 지반이완 영향을 고려한 지반물성 평가 시스템을 개발하여 시공현장의 지반 거동 평가의 신뢰성 확보
- 지보재 및 보강재의 현장 계측기법에 의해 계측 결과의 신뢰성 향상 및 지보 성능평가 기술개발
- 터널의 토목 구조물 시공시 계측 기술의 신뢰성 확보
- 급속시공으로 공사비 절감효과를 창출하기 위한 시공 중 현장에 대해 지반 안전성의 신속한 판단 기준으로 활용
- 현장에서 설치한 계측기기의 성능 평가 기술로 인해 지보 효과의 정량적 판단에 활용
- 터널을 포함한 다양한 지하공간개발을 위한 굴착 시에 안정성 증대, 시공비 절감, 설계/시공의 체계화를 위한 활용
- 국내 지질 및 암반조건에 적합한 굴착능률 평가지수의 개발로 산업발파 현장에서의 설계지침으로 활용
- 도로, 철도 등의 장대터널 굴착시 발파굴착/라이닝구조물 병행시공법을 설계에 반영함으로써 획기적인 공기단축에 활용
- 길이가 긴 철도터널의 공기 및 공사비 절감, 간편한 유지보수가 가능한 슛크

리트 라이닝공법 및 강지보 시스템을 개발함으로써 국내 다양한 터널건설 현장에서의 설계 및 시공에 활용

- 핵폐기물 지하처분장, 에너지 지하저장시설의 건설에서 핵종이동 및 저장물누출 경로의 차단을 위한 암반주벽의 교란대 평가 및 제어 기술로 활용
- 개발된 정보기반 자료관리 및 분석 소프트웨어의 제작 및 보급
- 향후 국내에서 건설될 것으로 예상되는 지하대피소, 지하스포츠시설, 지하주차장 등 다양한 지하생활공간 개발에 활용
- 국내,외 학술지 및 학술회의에 활발한 발표를 통한 학계, 산업계 등에서의 연구결과의 공유
- 신기술을 활용한 솔루션 개발로 지반정보 전반에 걸친 통합관리의 모델을 제공
- 모바일, 천공장비 등 여러 매체와의 네트워크화 활용 가능
- 국내 설계·시공업체에 대한 기술교육, 홍보 등을 통해 한국형 신지보재 기술을 실무에 활용할 수 있도록 적극 유도
- 적극적인 활용을 도모하기 위하여 정기적인 기술강좌를 개설함은 물론, 시험시공을 설계·시공업체와 협동으로 추진하여 자연스러운 실무활용을 유도함
- 관련 설계·시공업체에 적극적인 한국형 신지보재의 기술이전 도모

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

※ 주요 내용은 제3장의 “연구개발수행 내용 및 결과”에 포함함

※ 상세 내용은 각 세부과제별 보고서 참조

제 7 장 참고문헌

- (1) 건설교통부, 1996, 도로공사표준시방서
- (2) 건설교통부 정보화 기획단, 2001, 건설교통 정보화 장기발전구상
- (3) 건설교통부, 1997, 터널 발파설계 자동화 프로그램의 개발에 관한 연구, p80.
- (4) 건설교통부, 1998, 21세기 건설정보화 추진을 위한 건설CALS 기본계획(안) (1998 ~ 2005)
- (5) 건설교통부, 1999, 도로설계편람
- (6) 건설교통부, 1999, 터널표준시방서
- (7) 고와라, 2004, 3차원 GIS를 이용한 지반침하 연구, 전남대학교 대학원 석사학위 논문.
- (8) 국토개발연구원, 1996, GIS 데이터베이스 구축에 관한 외국사례연구.
- (9) 국토개발연구원, 1997, 지하시설물 관리체계 개발시범사업 종합보고서.
- (10) 김낙영, 김성환, 정형식, 2000, 고속도로터널의 붕락유형과 원인 분석, 터널기술, V2, 3, 13-23
- (11) 김은정, 1996, GIS 데이터베이스 구축에 대한 외국사례 연구, 국토개발연구원.
- (12) 김창용, 홍성완, 김광엽, 백승한, 배규진, 2005, NATM 터널 설계/시공을 위한 새로운 가이드라인 고찰, 한국터널공학회 터널기술, Vo. 7, No. 1, pp.75-90.
- (13) 김창제, 1997, Web 기반의 환경 GIS 자료 구축과 검색, 한국 GIS 학회지, vol.5, 195-198.
- (14) 김현구, 이두성, 2001, ArcView를 이용한 지하 정보 및 시각화 시스템 구축 사례 연구, 물리탐사, 제 4권, 제 4호, pp.101-109.
- (15) 넥스지오, 2002, TMT-face maual.
- (16) 대한토목학회, 1997, NATM 터널용 프리캐스트 콘크리트 라이닝의 개발 연구
- (17) 대한토목학회, 1998, 터널공학분야의 기술개발현황과 미래수요예측 및 개발전략, p.72.
- (18) 류동우, 이유리, 장윤섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 터널과 지하공간, 제 10권, 제 3호, pp.329-343.
- (19) 류창하, 1996, “암굴착을 위한 제어발파설계“, 제 1회 한화 심포지움,

p.384-396.

- (20) 류창하, 2001, 발파공학의 국내 외 연구동향 및 기술적 수준 분석, 화약발파, v19, n3, 대한화약기술학회지, p.7-26.
- (21) 류창하, 2003, 수치해석적 방법의 설계적용 및 문제점 고찰, 제2회 한화 발파 심포지움, 1-13.
- (22) 류창하, 선우춘 외, 1993, 제어발파에 의한 구조물 해체기술 개발연구 (I), 과학 기술처, 258p.
- (23) 류창하, 신희순 외, 1998, 표준발파공법 공동연구 (II), 한국석유개발공사, 589p.
- (24) 류창하, 최수일, 박용원, 김양균, 1996, “철근콘크리트기둥 발파해체를 위한 방호재 특성에 대한 실험적 연구”, 터널과 지하공간, v6, n3, 한국암반공학회, p.250-256.
- (25) 박광준, 이인근, 1994, 도심지 지하철 터널의 붕괴 유형과 원인, 지반공학회 봄 학술발표회
- (26) 박해균, 이명섭, 김재권, 정명근, 2001, 고품질 슛크리트 개발을 위한 새로운 급결제 적용, 한국터널공학회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp. 45-55.
- (27) 배규진, 김창용, 신후성, 1998, 터널 굴착현장에 인접한 지상구조물의 안정성 평가용 전문가 시스템 개발, 지반공학회지, V14, 12, 107-123
- (28) 배규진, 이성원, 1998, 지하구조물 유지 관리 및 계측, 대한토목학회지, V16, 11, 43-54
- (29) 배규진, 이성원, 조만섭, 이광호, 2001, 국내외 터널 구조물의 변상에 관한 조사 및 분석, 터널기술, V3, 3, 31-44
- (30) 배규진, 장수호, 신후성, 박해균, 이명섭, 김재권, 2004, 슛크리트의 고성능화를 위한 미분말 혼화재의 활용, 터널기술
- (31) 배기훈, 윤운상, 추석연, 이상태, 2001, 암반터널설계를 위한 지층 분포의 3차원 모델링과 3D Kriging 기법을 이용한 암반 등급 분포의 지구통계학적 처리 방안 연구, 지반공학회 봄학술발표회.
- (32) 배찬권, 2001, PDA를 이용한 모바일 오피스의 도입 현황과 기업의 대응전략, KISDI IT FOCUS
- (33) 백신원, 김동백, 1996, 강섬유보강 슛크리트에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 제16권 제I-3호, pp. 217-226.

- (34) 백신원, 김동백, 1996, 강섬유보강 슛크리트에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 제16권 제III-2호, pp. 147-154.
- (35) 서울시 지하철건설본부, 1994, 제2기 서울지하철 터널 및 시공감리 종합 보고서, 550
- (36) 서울시, 2003, 서울특별시 웹기반 지반정보 관리 시스템 구축사업. 245p.
- (37) 손영진, 박광준, 강기돈, 이인모, 1997, 터널 막장 전방의 지반 변화예측에 관한 연구, 지반공학회 가을학술발표회 논문집
- (38) 송원경, 신희순, 박형동, 1999, GIS용 시추자료 관리 프로그램 개발, 한국지반 공학회 1999년 가을학술발표회 논문집, pp.337-344.
- (39) 시설안전기술공단, 2001, 터널 구조물 상태 평가 기준안
- (40) 시설안전기술공단, 2001, 터널 유지관리 매뉴얼
- (41) 신희순, 선우춘, 이두화, 1999, 토목기술자를 위한 지질 조사 및 암반 분류
- (42) 안상기, 1993, 슛크리트의 리바운드 절감에 대한 재료개발 연구시험, 한국콘크리트 학회지, 제5권 제1호, pp. 54-61.
- (43) 안조범, 2003, 지반침하지역 지반조사 자료의 통합 해석을 위한 전문가시스템 개발, 전남대학교 대학원 박사학위논문.
- (44) 양형식 역, 1995, 발파진동학, 구미서관, 288p.
- (45) 오병환, 박칠립, 백신원, 장성욱, 1994, 터널의 SHOTCRETE 최적배합에 관한 실내 및 현장 모형 실험 연구, 한국콘크리트학회논문집, 제6권 제4호, pp. 131-140.
- (46) 오혁희, 신용석, 이종우, 박남서, 김영근, 2001, 터널 구조물의 상태 평가 기준에 관한 연구, 터널 기술, 25-55
- (47) 위용곤, 노상립, 윤지선, 2000, 다변량 분석을 이용한 터널에서의 효율적인 암반 분류에 관한 연구, 터널기술, V2-3, 41-49
- (48) 유광호, 박연준, 배규진, 2000, 연약 암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가, V2,3, 47-58
- (49) 윤서연, 박형동, 2001, 시추데이터와 불연속면 데이터를 이용한 지반공간 3차원 GIS, 한국 GIS 학회지, 제 9권, 제 3호, pp.465-475.
- (50) 윤지선, 1992, 최신발파기술, 구미서관, pp.158-195.
- (51) 이규병, 김유성, 조우석, 김영진, 2000, 시추공 정보의 클러스터링 기법을 이용

- 한 지반분석시스템의 개발, 한국 GIS 학회지, 제 8권, 제 2호, pp.301-315.
- (52) 이대혁, 한일영, 김기선, 진석우, 터널 시공 및 유지관리 단계 내공변위 계측 시스템 적용 사례 연구, 터널 기술, v2, 3, 59-70
- (53) 이앤티소프트, 한국화약, 2002, Blast-AZ 매뉴얼
- (54) 이인모, 김상균, 최종원, 김동현 터널발파의 수치해석적 모델링 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, 2000
- (55) 이철욱, 문현구, 1994, 암반 터널의 예비 설계를 위한 인공신경회로망 전문가 시스템의 개발, 터널과 지하공간, V10, 3, 79-96
- (56) 이희근, 양형식, 1997, 응용암석역학, 서울대학교출판부, 487p.
- (57) 일본토목학회, 2000, Pre-Lining 공법, 일본 토목학회
- (58) 장동일, 손영현, 1998, 강섬유와 실리카 흙이 숏크리트의 리바운드율에 미치는 영향, 한국콘크리트학회지, 제10권 제4호, pp. 125-133.
- (59) 장운섭, 박형동, 2002, 암석영상분석의 신뢰도 향상을 위한 컬러보정기법 연구, 한국암반공학회지, 제 12권, 제 1호, pp.1-9.
- (60) 장은주, 박형동, 전효택, 2003, 터널 공사 지역의 지반 공간 데이터 활용을 위한 3차원 GIS 구현, 한국지구시스템공학회지, Vol. 40, No. 1, pp.1-10.
- (61) 장척선수공법 WG, 1994, 주입식 장척선수공법 시공매뉴얼, 일본 Geofront연구회
- (62) 정동호, 김선홍, 배효진, 석진호, 추용범, 2001, 터널 발파설계에서 적정장약량 산정에 관한 연구, 터널 기술, V3, 1, 11-20
- (63) 정상국, 이창학, 심태섭, 2000, Silica fume 첨가량에 따른 SFRS의 강도특성에 관한 실험적 연구, 2000년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 549-552.
- (64) 지하철 건설 본부, 1992, 서울지질특성에 따른 터널 설계-시공 현황 및 개선 방안
- (65) 최만용, 박정학, 김치엽, 허광희, 노운방, 2000, 암반사면 안정성 평가를 위한 영상계측기술(1), 2000년 한국구조물진단학회 학술발표회 논문집, pp.57-60.
- (66) 최배근, 2001. SQL Server 2000 Bible, 1200p.
- (67) 최수일, 류창하 외, 1996, 건물발파해체를 위한 제어발파 설계기술 개발, 건설교통부, 204p.
- (68) 한국건설기술연구원, 1997, 건설 GIS의 구축 및 활용에 관한 기획연구(I).

- (69) 한국건설기술연구원, 1999, 고속철도 터널기술개발
- (70) 한국건설기술연구원, 1999, 도로관리통합시스템 개발 2 단계. pp. 405.
- (71) 한국건설기술연구원, 2000, 첨단 기법을 이용한 터널 정보화 설계/시공 기술 개발
- (72) 한국건설기술연구원, 2001, 지반정보 데이터베이스 시스템 개발. 365p.
- (73) 한국도로공사 도로연구소, 2001, 강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(II), 도로연 01-37.
- (74) 한국도로공사, 1997, 지반조사자료 정보화 시스템 구축 연구. 81p.
- (75) 한국도로공사, 2000, 고속도로공사 전문 시방서
- (76) 한국자원연구소, 1998, 표준발파공법 공동연구 (II), p.589.
- (77) 한국터널공학회, 2004, 터널의 이론과 실무, 구미서관, 518p.
- (78) 한국토지개발공사, 1993, 암발파 설계 기법에 관한 연구, 학림사, 604p.
- (79) 행자부, 국립방재연구원, 1998, 경사면 및 축대 유지 관리 체계 개발. pp. 354
- (80) 홍성완, 배규진, 서용석, 김창용, 박치현, 2002, 터널건설을 위한 지질정보 데이터베이스 구축 및 가시화, 2002년도 대한토목학회 정기총회 및 학술발표회 논문집, pp.227-234
- (81) 木村 眞, 1987, 海外における建物解体の現状, 工業火薬, 第48卷(3), p.139-150.
- (82) 富田幸助, 加藤僚一, 1987, 筑波萬國博覽會'國連平和館'制御破碎解体工事について, 工業火薬, 第 48卷, p.385-394.
- (83) Amadei,B. & Savage, W.Z., 2001, "An analytical solution for transient flow of Bingham viscoplastic materials in rock fractures", I. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 38, pp.285-296.
- (84) Ang, Alfredo H. S. and Tang, Wilson (1975) "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", John Wiley & Sons, Inc.
- (85) Arora, J. S. (1989) "Introduction to Optimum Design", McGraw-Hill, Inc.
- (86) Bang,S. & Kroetch,P. & Shen,C.K.(1992) "Analysis of soil nailing system", Proc. of the Inter. Symp. on Earth Reinforcement Practice, Japan, Vol. I : pp.457-462.
- (87) Beer, Opriessing, 2001, Applications virtual reality in geomechanics, EUROCK2001, 535-540

- (88) Bieniawski, 1984, Rock mechnics Design in Mining and Tunneling, Balkema, 112-120
- (89) Bieniawski, 1984, Rock mechnics Design in Mining and Tunneling, Balkema, 112-120
- (90) Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications, New York: Wiley.
- (91) Bollinger, G.A., 1980, Blast vibration analysis, Carbondale: Southern Illinois University Press, 132p.
- (92) Byrne, R. J. (1992) "Soil nailing: A simplified kinematic analysis" , Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 12, Vol. 2, pp.751-763.
- (93) C TECH, 2004, C TECH earth science software tutorials and documentation ver. 7.0, <http://www.ctech.com/download/CTechManuals.pdf>. Accessed 2004 May 14
- (94) Charles Petzold, 2002. Programming Microsoft Windows with C#, p.850.
- (95) D. W. Pfeifer and J. A. Hanson, Precast Concrete Wall Panels: Flexural Stiffness of Sandwich Panels, Symposium on Precast Concrete Wall Panels, UMI, 1995, pp. 67~86.
- (96) Duvall, W.I. and Fogelson, D.E., 1962, Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations, U.S. Bur. Mines Rep. Invest. 5986, 19p.
- (97) EFNARC, 1996, European Specification for Sprayed Concrete
- (98) Einar Broch, Eivind Grov, Kjell Inge Davik, 2002, "The inner lining system in Norwegian traffic tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.17, pp.305-314
- (99) Elias, V. & Juran. I.(1991) "Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations", Federal Highway Administration Report FHWA.
- (100) Erich Gamma, 2002. Design Patterns, p.433.
- (101) Frangopol, Dan M. (1985) "Structural of Reliability-Based Optimization Design" , ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 8, pp. 1703-1721.

- (102) Frangopol, Dan M. (1985) "Structural Optimization Using Reliability Concepts" , ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 11, pp. 2288-2301.
- (103) Gronhaug, A, 1996, Performance of shotcrete linings in road tunnels, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Norwegian Concrete Association, pp. 345-358.
- (104) Hagan, T.N., 1980, Understanding the burn cut-a key to greater advance rates, Trans. Instn. Min. Metall.(Sect. A: Min. Industry), v. 89, A30-36.
- (105) Hagan, T.N., 1982, Controlling blast-induced cracking around large caverns, Proc. ISRM Symp. Rock Mechanics Related to Caverns and Pressure Shafts, Aachen, West Germany.
- (106) Hardy M.P., 1973, Fracture Mechanics Applied to Rock, PhD Thesis, University of Minnesota, Michigan.
- (107) Hoek, Brown, 1980, Underground excavation in rock, IMM, 22-27
- (108) Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, Underground Excavations in Rock, London: Institution of Mining and Metallurgy, 527p.
- (109) Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden. W.F., 1995, Support of underground excavations in hard rock, Rotterdam: Balkema.
- (110) HSE, 1996, Safety of New Austrian Tunneling Method tunnels, 15-28
- (111) Hudson, J.A. and Harrison, J.P., 1997, Engineering rock mechanics: an introduction to the principles, Oxford: Pergamon, 444p.
- (112) ISEE, 2000, Blaster's handbook, Cleveland, Ohio: International Explosives Engineers, 744p.
- (113) ITA working group, 1988, Guidelines for the design of tunnels, Tunneling and underground space technology, V3, 3, 237-249
- (114) J. M. Brocherieux, 1992, "High Performance Concrete in Tunnel Linings", High Performance Concrete: From Material to Structure, E&FN Spon, London, pp.347-364
- (115) Juran, I. & Elias, V.(1992) "Soil nailed retaining structures: Analysis of case

- histories“, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 12, New York, pp.232-244.
- (116) Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K. & Elias, V. (1990) “Kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures“, Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 1, pp.54-73.
- (117) Kim et al, 2001, Neural network based prediction of ground surface settlements due to tunneling, Computers and Geotechnics 28, 517-547
- (118) Kurt Buehler, Lance McKee (Eds), 1996, The OpenGIS Guide - Introduction to interoperable geoprocessing, Part I of the OGIS (open geodata interoperability specification.
- (119) Langefors, U. and Kihlstrom, B., 1973, The modern technique of rock blasting, 2nd edn., New York: Wiley, 405p.
- (120) Langefors, U. and Kihlstorm, B., 1963, Rock Blasting, John Wiley & Son, pp.300-301.
- (121) Leshchinsky, d. (1991) “Discussion on kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures“, Journal of the geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp.1821-1824.
- (122) Mark Birbeck, 2002. Professional XML 2cnd Edition, p.1274.
- (123) McIntyre, J.S. and Hagan, T.N., 1976, The design of overburden blasts to promote highwall stability at a large strip mine, Proc. 11th Canadian Rock Mech. Symp., Vancouver.
- (124) Melbye, Tom, 2000, Sprayed Concrete for Rock Support, MBT International
- (125) Michell, J. K.(1992) “Reinforcement of earth slopes and embankments“, NCHRP-290, Transportation Research Board
- (126) Obert, L and Duvall, W.I., 1967, Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock, New York: Wiley, 65p.
- (127) Ouchterlony, F., 1974, Fracture mechanics applied to rock blasting, 3rd Int. Congress I.S.R.M.
- (128) Singh, B., 1993, Blasting in ground excavations and mines, Rotterdam : A.A. Balkema, 177p.

- (129) T. Melbye, 1994, Sprayed Concrete for Rock Support, MBT Int. Underground Construction Group.
- (130) Thompson, S. R. & Miller, I. R.(1990) "Design construction and performance of a soil nailed wall in seattle Washington", Geotechnical Special publication ASCE, No. 25, New York, pp.629-643.
- (131) Wolfard, 1990, Analysis of collapse on tunnel construction sites on the new lines of the german federal railway, Tunneling and Underground Technology, 1990, V5, 199-203
- (132) Yoon, W. S. et al, 2001, Kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes, EUROCK

별첨 자체평가의견서

자체평가 결과서(연구단용)

1. 과제 현황

연구단명	IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발 연구단			
주관연구기관	한국건설기술연구원		연구책임자	배 규 진
세부연구과제	제1세부과제명	급속안정화 터널시공을 위한 IT 접목형 지반특성조사/분석 기술 개발		
	협동연구기관	(주)넥스지오	연구책임자	윤 윤 상
	제2세부과제명	시공현장 지원을 위한 굴착터널 안정성 평가 기술 개발		
	협동연구기관	한국시설안전 기술공단	연구책임자	박 시 현
	제3세부과제명	고효율의 급속시공을 위한 급속안정화 시공기술 개발		
	협동연구기관	한국지질자원 연구원	연구책임자	류 창 하
	제4세부과제명	급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발		
	협동연구기관	한국건설기술 연구원	연구책임자	배 규 진
당해 지원연구비 (천원)	과제명	정부	민간	계
	제1과제	132,000	50,000	182,000
	제2과제	180,000	100,000	280,000
	제3과제	223,000	85,000	308,000
	제4과제	410,000	150,000	560,000
	계	945,000	385,000	1,330,000

2. 평가일 : 2006. 6. 7 ~ 2006. 6. 8

3. 평가위원(참석자) 명단

구 분	성 명	소 속	직 위
위원장	배 규 진	한국건설기술연구원	연구위원
위원	김 교 원	경북대학교	교수
	임 종 철	부산대학교	교수
	최 해 준	(주)청석엔지니어링	상무
	김 낙 영	한국도로공사	책임연구원
	류 창 하	한국지질자원연구원	책임연구원
	윤 운 상	(주)넥스지오	대표이사
	박 시 현	한국시설안전기술공단	과장

4. 평가 결과

세부과제	과제명	평가 점수		총 점	평가 순위
		연차 실적	차년도 연구계획		
제1과제	급속안정화 터널시공을 위한 IT 접목형 지반특성조사/분석 기술 개발	70.71	23.29	94.00	3
제2과제	시공현장 지원을 위한 굴착터널 안정성 평가 기술 개발	69.86	22.57	92.43	4
제3과제	고효율의 급속시공을 위한 신개념 굴착공법 개발	71.86	22.86	94.72	2
제4과제	급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발	72.86	23.86	96.72	1
계		285.29	92.58	377.87	
종합 점수	세부과제 평균			94.47	

5. 평가위원회 주요 의견사항

주요 지적사항	지적사유
1) IT기반 지반특성 조사·분석시스템은 국내외의 선행 연구들에서 구축한 현장지원시스템과 차별성이 있어야 하며, 사용자 편의를 고려해야 함	1) 본 연구과제에서 개발하려고 하는 시스템의 목적, 활용분야 및 장점을 부각시켜야 하기 때문임
2) 굴착 터널의 안정성 평가를 위한 한계 변형률 이론을 적용할 경우에는 지반조건에 따른 접근방법과 기준을 명확히 해야 함	2) 터널의 안정성 평가를 위해서 한계변형률 이론에 전적으로 의존하는 경우 한계변형률에서 고려하지 못하는 위험성이 포함될 수 있기 때문임
3) 한계변형률 이론은 응력개념에서는 문제가 없는데 변위개념에서 문제가 생기는 경우에 대한 대처방안 필요	3) 현행의 터널 계측에서는 응력보다는 변위를 대상으로 하는 것이 일반적이기 때문임
4) 병행시공법 적용시의 공사비·공사기간에 대한 경제성 분석이 필요함	4) 병행시공법의 폭넓은 적용을 도모하기 위해서는 병행시공법의 적용으로 인한 경제적 이익을 정량적으로 제시해주는 것이 필요함
5) 막장과 라이닝 타설 위치를 현재보다 더 근접시키는 것이 가능한 지에 대한 연구가 필요함	5) 병행시공법으로 인한 경제적 이익을 극대화하기 위해서는 막장과 라이닝 타설 위치를 가능한 범위내에서 최대한 근접시키는 것이 유리하기 때문임
6) 현행 지보재의 문제점과 고성능 지보재의 적용에 따른 장점과 파급효과를 부각시켜야 함	6) 고성능 지보재 개발의 필요성과 그에 따른 기대효과를 부각시키기 위해서는 지보재의 장단점 분석이 필수적임
7) 고성능 지보재의 개발뿐만 아니라 고성능 지보재의 상호작용과 이를 고려한 지보패턴 설계가 필요함	7) 지보재의 재료개발뿐만 아니라 개발될 지보재가 실무에 적용되기 위해서는 신 지보재를 활용할 수 있는 설계·시공 기반이 마련되어야 하기 때문임

6. 주요지적사항에 대한 향후 조치(해결)방안

- 1) 본 연구에서 개발할 시스템은 현장지원은 물론 현장 자료취득 또한 기본 시스템과는 차별되는 부가 장치의 통합으로 연구되고 있음. 또한 발파-라이닝 병행시공시의 안정성 평가 및 고성능 지보재 시공 등과 연관되어 상호 연동되도록 되어 있음. 보고서 및 발표자료 등에서 개발할 시스템의 차별성과 장점을 부각 시키겠음
- 2) 암반조건에서 한계변형률 이론을 적용하기 위한 연구는 이미 과제내에 포함되어 있음. 더욱이 본 연구단은 산악터널에서 발파-라이닝 병행시공을 실시하기 위한 제반 기술개발을 목표로 하고 있음. 하지만 지적된 바와 같이 한계변형률의 적용 가능한 조건과 범위를 명확히 제시하도록 하겠음
- 3) 한계변형률 이론은 기본적으로 변형률을 활용한 안정성 평가 개념임. 또한 지보재의 응력 계측을 실시하여 계측결과를 안정성 평가에 반영할 계획임. 그리고 역해석 기법을 활용한 연구를 계속 추진하고자 함
- 4) 병행시공법 적용시 터널 연장에 따른 손익분기점은 검토한 바 없으나 현장 적용시험이 실시된 특정 장대터널에 대해서는 공사비 분석이 수행되었음. 터널 연장에 따른 일반적인 손익분기점의 산정이 가능한 지 공사비 분석을 수행하겠음. 또한 터널 규모에 대해서도 경제성 평가를 수행하겠음
- 5) 1차년도 현장 실험 및 평가에서는 기존 연구결과와 종합 분석하여 가장 보수적인 이격거리 수준을 추정함. 본 연구단에서는 이론적·해석적 연구와 현장 실험 등을 통해 병행시공시 막장과 라이닝 타설위치의 최적 이격거리를 제시하고자 함
- 6) 자체평가지 1차년도 연구성과 위주로 발표를 수행하여 고성능 지보재를 적용함으로 인한 장점과 기존 지보재에 대한 문제점이 부각되지 못하였음. 지속적으로 이에 대한 기본 조사연구를 꾸준히 실시하여 연구성과를 보다 부각시킬 수 있도록 하겠음
- 7) 본 연구단에서는 1차년도에서 3차년도까지는 현행 지보재의 문제점을 개선한 국산 고성능 지보재 개발에 집중하며, 3~4차년도 이후에는 이와 같이 개발될 고성능 지보재의 시스템화와 지보 시스템을 실제 설계·시공에 적용할 수 있는 지보패턴 개발에 대한 연구가 연구계획에 이미 포함되어 있음. 보고서 및 발표자료 등에서 지보패턴에 대한 연구가 수행될 예정이라는 점을 부각시키도록 하겠음

7. 평가위원별 의견사항 및 조치계획

연구단(총괄)	
평가위원 의견사항	평가위원 의견에 따른 조치계획
< 김교원 평가위원 > ○ 총괄연구기관의 연구진이 연구단 운영과 방향 수립에 매우 노력하고 있음. 하지만 기관내에서의 업무 부담을 고려한다면, 행정요원 이외에 연구단의 연구추진 내용 파악 업무를 전담할 수 전문 석·박사 인력을 활용할 것을 추천함	○ 지적하신 바와 같이 차년도에는 행정요원 이외에 연구단 연구내용과 연구추진방향을 확인하여 각 세부과제와 협의가 가능한 전공분야의 석·박사급 전담인력을 활용토록 하겠음
< 임종철 평가위원 > ○ 타 CTRM 연구단의 경우를 보면, 한정된 예산에 연구기관과 연구진이 지나칠 정도로 많이 투입되어 실제 각 연구기관별로 집행할 수 있는 연구 예산이 매우 한정적임. 그러나 본 연구단은 비교적 핵심 분야를 집중적으로 선택하는 방식을 채택하고 있어 바람직함. 하지만 본 연구단의 연구내용 특성상 많은 현장 및 실규모 실증실험에 의한 검증작업이 이루어져야 하므로 이에 필요한 예산을 충분히 확보할 수 있어야 함	○ 주어진 예산과 연구기간 내에서 최대의 연구성과를 얻을 수 있도록 연구진과 연구내용을 구성하도록 하겠음. 또한 현장 및 실증실험 등에 필요한 연구예산을 충분히 확보할 수 있도록 노력하겠음
< 김낙영 평가위원 > ○ 제4세부과제에서 발표한 정밀 숏크리트 타설장비 등은 급속시공과 품질향상을 위해 필수적인 시공장비임. 따라서 여건이 허락한다면 급속시공을 도모할 수 있는 장비 개발 분야에 대한 연구도 수행하면 좋은 것으로 판단됨	○ 향후 4개년의 연구기간과 예상되는 연구 예산을 고려한다면, 자동화 시공장비 개발 연구 분야를 추가하는 것은 현실적으로 어려움. 하지만 연구 예산이 대폭 증대될 경우에는 기계·제어 분야의 연구진 활용을 통해 새롭게 연구 분야를 개척하는 것도 필요하다고 고려됨

제 1 세부과제	
평가위원 의견사항	평가위원 의견에 따른 조치계획
< 임종철 평가위원 > ○ 급속시공을 위해서는 계측, 막장면, 전방정보가 거의 실시간으로 분석되어야 함. 또한 막장과 막장 전방을 비교하기 위한 해석시스템을 갖추어야 함	○ 신속하고 정량화된 현장 데이터의 취득·분석작업을 위한 요소기술(레이저 스캐너, Mobile 입력기, 천공패러미터 등)을 개발하고 있으며 막장자료를 통한 전방에 대한 예측기술 또한 개발할 예정임
< 김교원 평가위원 > ○ 지하수에 관련된 정보도 1세부의 세부 내용에 삽입되어야 함(지하수는 작업환경과 민원에 밀접하게 관련이 있음). 또한 계측정보도 포함되어야 함(유지관리 시에 필요함)	○ 설계와 관련된 지하수 정보(지하수위, 수압시험, 투수시험결과 등)와 시공중 RMR 평가시의 지하수정보는 반영되어 있음. 보다 세부적인 내용은 연구를 진행하면서 추가로 검토할 예정임 ○ 계측정보는 2세부과제에서 DB를 설계하고 있으며 1세부과제에서 취합하여 전체 정보시스템에 반영할 계획임
< 김낙영 평가위원 > ○ 현장마다 작업환경이 조금씩 틀리므로 DB를 구축할 때 제3자가 수정보완 할 수 있도록 유연하게 구축하여야 함	○ 타세부과제와의 연계성, 현장 적용성 및 확장성을 충분히 고려하여 설계하였으며 현장 상황에 따른 수정·보완이 용이하도록 설계할 예정임
< 배규진 평가위원 > ○ 천공 패러미터를 이용한 급속 정량화 지반평가와 관련하여 국외에서 DB를 얻는 것은 매우 어려움, 해외에서 최소 10년 이상 걸려서 구축된 DB를 얻기는 매우 어려움, 천공할 때 질리·충진물의 상태를 정확히 구분하지 못하는 우려가 있음	○ 국내 도입된 천공장비로부터 데이터를 수집하여 DB화 할 예정으로 탈착식 데이터로거를 탑재시켜 보다 효율적으로 현장데이터를 수집할 계획임. 또한 질리·충진물 평가는 현장모형시험과 막장 mapping에 의한 상호보완 및 비료를 통하여 보완할 예정으로 연구를 진행중임
<최해준 평가위원> ○ 현장지원시스템을 구축하는데 있어 기존에 해왔던 것과 시스템적으로 달라야 함	○ 본 시스템은 현장지원은 물론 현장자료취득 또한 기존의 시스템과는 차별되는 부가 장치의 통합으로 연구하고 있음

제 2 세부과제	
평가위원 의견사항	평가위원 의견에 따른 조치계획
< 임중철 평가위원 > ○ 현장계측을 실시함에 있어서 자동 계측기법 도입의 필요성 ○ 현장에서 위험레벨에 도달함에 따라 경보, 알람 등의 경보도입 필요 ○ 절리, 지층 등을 포함한 암반지반에서 한계변형률 이론을 사용하기 위해서는 그 접근 방법이 달라야 함. ○ 터널 시공시 문제가 발생한 사례를 활용하여 한계변형률을 평가할 필요가 있음	○ 첨단 자동 계측기법을 도입할 예정임 (디지털 사진측량기법) ○ 1세부 연구내용에 포함되어 있음 ○ 암반지반을 대상으로 한 연구는 이미 포함되어 있음 ○ 현재 검토 중에 있음
< 김교원 평가위원 > ○ 현장에서는 실제발생하는 전체 변위를 찾기가 어렵다. ○ 변형률 계산시, 그 기준을 명확히 할 필요가 있음. ○ 안정성 평가를 실시함에 있어서는, 응력평가 및 변형률 평가가 있는데, 이 두 가지 방법을 동시에 실시하는 것이 필요할 것임	○ 전체변위를 찾기 위한 연구도 포함되어 있음(2-4세세부) ○ 변형률 계산의 기준으로는 터널의 직경, 폭, 단면적이 있는데, 이에 대해서 종합적으로 검토할 계획임 ○ 한계변형률은 기본적으로 변형률을 활용한 안전성 평가 개념임. 여기에 더하여 2-3세세부에서는 지보재의 응력 계측을 실시하며, 응력에 대해서도 함께 안정성 평가에 반영할 계획임
< 최해준 평가위원 > ○ 현장 실무에 반영할수 있는 한계변형률 개념의 안전성 평가 기법은 실무에 그 활용 가치가 높다고 판단됨 ○ 응력개념에 대해서는 문제가 없는데, 변위개념에서 문제가 생기는 경우에 대한 대처방안은?	○ 실무에 반영할 수 있도록 최대한 노력하고자 함 ○ 이에 대해서는 역해석 기법으로 연구를 계속 추진할 계획임
< 김낙영 평가위원 > ○ 계측 데이터를 얻을때, 계측지점의 보강상태, 계측지점의 위치 등을 구분 표기하여 분석할 필요가 있음	○ 반영할 계획임

○ 막장보강재 관련 연구에서는 보강재의 보강효과 판단시, 보강과다 부분에 대한 검토도 함께 요망	○ 반영할 계획임
< 배규진 평가위원 > ○ 전방에 이상지질대가 있을 경우에 대해서도 검토요망 ○ 현장의 작업인부 레벨에서도 활용할 수 있는 기법 제안이 요망	○ 이상지질대, 단층대 등에 대해서도 안정성 평가기법을 함께 제시 ○ 작업인부가 쉽게 활용할 수 있는 지침을 제시할 예정임
< 류창하 평가위원 > ○ 계측지점, 계측위치에 따라 발생하는 변형률이 달라질수 있음. 이에 대한 반영이 필요함	○ 현장에서 사용할 수 있는 계측관리 지침을 제시할 예정임
< 윤운상 평가위원 > ○ 한계변형률 이론을 현장 계측자료로 어떻게 plotting하는지?	○ 관련 연구를 수행할 예정임
제 3 세 부 과 제	
평가위원 의견사항	평가위원 의견에 따른 조치계획
< 임종철 평가위원 > ○ 발파후 지보 안정성에 대한 물리적인 평가방법은 있는가? ○ 라이닝 모형실험시 경계조건의 차이는 있는가?	○ 1차년도 현장적용실험에서는 발파후 콘크리트 타설 블록에서 시료를 채취하여 역학적 강도시험을 통해 영향평가를 하였음 ○ 기타 국내외에의 안정성에 영향을 미치는 발파진동 수준에 대한 연구사례분석으로부터 적정기준을 설정하여 영향평가 여부를 판단하고 있으며, ○ 향후 동적하중에 대한 수치해석적 안정성 평가를 수행할 예정으로 있고, ○ 또한 제 2세부과제에서 지보 변형/응력 등의 현장계측/해석을 통한 안정성 평가부분을 담당하도록 1차 워크숍에서 조율한 바 있음 ○ 주위 암반과의 접촉상태 등 결계조건 차이가 있음. 1차년도 현장실험시 라이닝 타설 전단계의 평가실험으로서 축소모형이 불가피하였으며 축소모형과 실

○ 환기방식에서 집진기 먼지농도에 따라 작업공률이 변화하므로, 무인화 필요가 있을 것으로 보임.	규모 라이닝과의 경계조건의 차이는 수치해석적으로 분석될 계획임 ○ 현 시스템에서는 자동조절을 고려하지 않고 있으나 적용성에 대해 검토하겠음
< 김교원 평가위원 > ○ 발파진동의 영향에서 일반 현장조건의 라이닝이 방수쉬트와 분리되어 있으므로 frequency 고려할 필요가 있는지 검토 ○ 발파후 여굴 등에 따라 패턴 설계 수정 반영(feedback)이 되는 것이 바람직함 ○ 짧은 기간 동안에 많은 일을 수행한 것으로 평가됨	○ 과거 연구사례 결과에 의해 1차년도 영향평가는 진동속도의 수준에 의해 평가하였으나, 주파수에 대한 영향문제의 검토를 수행하겠음. ○ 본 과제에서 발파결과의 평가결과가 설계에 반영되도록 계획되어 있음.
< 최해준 평가위원 > ○ 터널연장에 따라 병행시공법의 경제성이 달라질 것이므로 공사비분석을 통해 손익분기점 검토 필요. ○ 환기시스템에서 배기식을 검토하였는가?	○ 손익분기점은 검토한 바 없으나 현장 적용시험이 실시된 특정 장대터널에 대해서는 공사비 분석이 수행되었음 ○ 터널연장에 따른 일반적 손익분기점의 산정이 가능한 지 공사비분석을 수행하겠음. ○ 검토하였음. 팬 이동에 따른 비용과 풍관 연결비용 등의 문제로 경제성이 불리한 것으로 분석되었음
< 김낙영 평가위원 > ○ 라이닝의 두께에 따른 발파진동 영향 문제는?	○ 과거 연구사례에서는 라이닝 두께의 영향이 다루어지지 않은 것으로 파악되고 있음. 2세부과제와 연계하여 수치해

○ 터널규모(2차로, 3차로)에 따라 집진차량 운영의 특실이 좌우될 수 있음- 국내 집진차량을 갖다놓고 사용하지 않는 문제	석적/현장계측을 통한 영향평가방법을 고려하겠음 ○ 집진차량 규모, 운영방식 등을 검토하겠음
< 배규진 평가위원 > ○ 시험현장 확보를 위한 타 시공사 참여 가능한지? ○ 현 시험에서 막장-라이닝 거리 약 500 m에 달하는데 강도저하현상을 고려한다면 10-20m도 가능하지 않은가? ○ 진동영향 외에 막장토공, 지보, 배수처리, 비산, 공정 사이클, 장비이동, 버력처리, 기존배수시스템 처리 등을 고려 실질적으로 단축 가능한 거리 제시	○ 과제의 목표를 달성하기 위해 필요하다면 참여하도록 하겠음. ○ 가능한 것으로 판단되지만 이론적 근거 및 실증적 자료의 제시가 필요함. ○ 본 과제에서 타당한 거리를 산정할 수 있도록 이론적/수치해석적/현장실험 등의 방법을 사용하여 제시할 예정임. ○ 1차 현장 실험 및 평가에서는 기존 연구결과를 종합 분석하여 가장 보수적인 수준을 채택하였음. ○ 적정 이격거리의 산정에 제안된 인자들의 영향이 고려될 예정임
< 윤운상 평가위원 > ○ 터널 규모에 따른 본 공법의 경제성 제시 필요. ○ 발파효율의 극대화, 최적발파 등의 정성적인 표현에 정량적인 목표수치를 제시하여 목표를 확실히 할 것.	○ 터널규모에 따른 공사비분석을 통해 경제성 평가를 수행하겠음 ○ 본 과제에서 목표로 하고 있는 최적발파공법의 굴진율, 여굴 기준, 진동수준의 발생 등에 대한 정량적 수치를 표시하겠음
< 박시현 평가위원 > ○ web기반 발파프로그램 개발에서 현장 조사결과가 (본부를 통해) 전송 분석되어 설계도 재작성, 설계변경이 이루어질 수 있도록 입력 자료의 규정, 계측	○ 평가의견과 같이 본 과제에서 계획하고 있는 web기반 발파프로그램은 현장 결과의 분석에 따라 interactive하게 설계반영이 이루어지도록 목표설정을 하고 있으며, 필요한 현장지반자료에 대

자료 수집(2세부과제) 필요	해 1세부과제와 조율한 바 있음. 계속 관련하여 2세부과제와도 지속적인 협력을 추진하겠음
제 4 세부과제	
평가위원 의견사항	평가위원 의견에 따른 조치계획
< 임종철 평가위원 > ○ 고강도 지보재의 적용시 터널의 기본 원리와 상충되지 않도록 주의하여야 함 ○ 현행 지보재의 문제점 조사가 선행되어야 함 ○ 숏크리트 강도의 적정성, 강지보의 거동에 대한 지반별 분석, 용출수 구간에 대한 록볼트 대책 등에 대한 분석이 필요	○ 고강도·고내구성 지보재는 터널의 기본 원리와 상충되지 않도록 3차년도 이후의 해석적·실증적 연구를 통해 패턴설계가 이루어질 예정임 ○ 현행 지보재 문제점에 대한 조사를 지속적으로 수행할 예정임 ○ 숏크리트 강도의 적정성, 지반별 강지보 거동, 용출수 대비 록볼트 등에 대한 계획이 이미 2차년도 이후의 연구내용에 포함되어 있음
< 김교원 평가위원 > ○ 각 지보재의 상호 복합작용에 대한 효과 검토가 필요함 ○ 지보재와 지반사이의 부착성의 영향을 고려할 필요가 있음 ○ 급속시공을 위한 강지보 및 록볼트 간격, 숏크리트 두께 등의 절감에 대한 평가가 있으면 좋겠음	○ 본 연구에서 개발할 숏크리트, 록볼트 및 강지보의 통합 시스템에 대한 패턴설계와 함께 상호작용에 대한 연구가 3차년도 이후에 수행될 예정임 ○ 지보재의 강도와 강성 증진뿐만 아니라 지반과의 상호 작용이 중요하기 때문에 부착성에 대한 고려와 평가가 연구계획에 포함되어 있음 ○ 지보재의 성능 향상으로 인한 급속시공 유도 효과에 대한 추가 조사를 통해 고성능 지보재의 적용으로 인한 효과를 부각시키도록 하겠음
< 최해준 평가위원 > ○ 현 지보시스템의 문제점을 정확히 파악하고 있으나 정성적으로 표현하고 있음. 따라서 현 지보재의 문제점들을 정량적으로 나타낼 수 있는 방법을 제시하는 것이 필요	○ 새로운 지보재가 개발되어 실용화되는 단계에서 현행 지보재 대비 경제성·시공성 등을 정량적으로 비교·평가하겠음

< 김낙영 평가위원 > ○ 고품질 숏크리트를 위한 혼화재의 국산화에 초점을 맞추어야 함 ○ 급속시공과 고품질의 좌우여부는 시공 현장에서 이루어지므로 숏크리트 타설장비에 대한 연구도 중점을 둘 필요가 있음 ○ 장기적인 측면에서 레진계는 한계가 있는 것으로 판단되므로 시멘트 모르타르계에 역량을 집중한다면 매우 실용적이고 현실적인 연구가 결과가 얻어질 것으로 기대됨	○ 본 연구에서는 국산 메타카울린에 의한 실리카 흙의 대체, 그리고 국산 알칼리프리계 급결제와 폴리카르본산계 고성능감수제의 사용이 필수적이기 때문에 강조한 내용과 일맥상통함 ○ 예산이나 연구기간의 한계 때문에 숏크리트 타설장비의 개발은 현실적으로 불가능함. 하지만 본 연구에서는 1차년도에 구축한 고정밀 숏크리트 타설장비를 사용하게 되므로 이와 같은 고정밀 타설장비의 중요성과 장점을 부각시키도록 하겠음 ○ 1차년도 연구결과에서도 레진계는 급속안정화와 장기내구성을 고려할 때 재료 개발 대상으로 선정하기에는 무리가 있음. 따라서 지적된 바와 같이 시멘트 모르타르계의 성능 개선을 통한 신제품 출시를 목표로 하고 있음
< 류창하 평가위원 > ○ 새롭게 보급되고 있는 지보재 신제품에 대한 지속적인 추적과 분석이 필요함	○ 지적하신 바와 같이 국내외 신제품 동향을 파악하여 중복성이 없도록 하겠음. 또한 1차년도의 기획단계에서 조사했던 특허맵을 업데이트하여 활용토록 하겠음
< 박시현 평가위원 > ○ 급속시공과 급속안정화와의 연계성을 부각시켜야 함 ○ 지보의 설계, 최적 지보량 설정방법, 지보패턴 변경 등과 관련된 연구 필요	○ 신 지보재의 적용으로 인한 급속시공과 급속안정화 유도효과를 더욱 부각시키겠음 ○ 신 지보재의 적용에 따른 지보패턴 설계는 3차년도 이후의 연구계획에 이미 포함되어 있음

8. 연구단장 자체평가

8-1. 연구개발 실적 평가

평가항목	가중치 (A)	평가척도(B)					특점 (A×B)	평가의견
		수	우	미	양	가		
		5	4	3	2	1		
연구수행								
① 연구개발 결과의 우수성 및 창의성	2	○					10	본 연구단에서는 터널의 급속시공과 급속안정화를 위하여 “IT기술”과 “신재료”를 접목한 발파-라이닝 병행시공과 이를 위한 지반조사 및 지반정보 분석, 굴착 터널의 안정성 평가와 고성능 신지보의 적용 연구를 수행하여 독창적인 연구성과를 도출하였으며 1차년도 연구계획을 모두 달성한 것으로 평가할 수 있음
② 연구개발 수행 노력의 성실도	2	○					10	본 연구단은 1차년도 연구성과 목표를 초과달성했을 뿐만 아니라, 3건의 현장적용·현장평가와 함께 IT기반의 지반정보 시스템, 발파설계프로그램 및 신지보 재료 개발 등의 기본단계 성과를 성실히 달성한 것으로 판단됨
③ 연구개발 결과에 대한 활용가능성	2	○					8	발파-라이닝 병행시공법은 현 단계에서도 실제 시공시에 적용이 가능하며 이에 대한 보완을 성실히 수행하여 활용 가능성을 보다 높이하고자 함. 단, 활용가능성을 보다 부각시키기 위해서는 본 연구단에서 목표로 하고 있는 각 연구성과별 장점과 경제적 이점을 보다 부각시켜야 함
④ 연구개발 결과의 파급효과	2	○					8	발파-라이닝 병행시공법과 이를 가능케 하기 위한 지반조사, 안정성 평가 및 급속안정화 지보재 기술은 급속시공과 급속안정화를 통해 안정성을 확보하면서 공사비와 공사기간을 절감할 유도할 수 있는 대안이 될 수 있을 것으로 기대됨. 뿐만 아니라 각각의 세부기술들은 발파-라이닝 병행시공 이외에도 NATM와 같은 중

							래 터널 공사시에도 개별적으로 성공적인 적용이 가능할 것임. 그러나 역시 각 세부기술과 총괄 기술 package의 장점 부각을 통한 기술 파급 및 기술 홍보가 필요함
⑤ 공개 발표된 연구개발 성과 (논문 게재 또는 산업재산권 출원 및 심사 가능성, 발표회개최 등)	2	○				10	본 연구단의 1차년도 연구성과는 2개월의 연구기간이 남아있음에도 불구하고 계획대비 250%의 성과를 달성함. 여기에는 당초 계획에 없었던 국제 MOU체결, 현장 적용실적, SCI논문 게재 등이 포함되어 있음
연구목표 달성도(연구개발계획서상에 기술된 연구목표)							
⑥ 지반정보 모델 및 정보화 전략 수립/지반정보 분류 및 운용체계 표준화 기술 개발	2	○				10	각 세부과제와의 총괄 연계연구를 위해 각 세부과제에서 도출되는 각종 지반정보를 정의·분류하여 표준모델을 개발함. 또한 급속안정화 터널 지반 정보화 전략(ISP)을 작성하여 지반정보 활용 시스템을 구축. 그리고 다양한 지반조사 결과의 상호 연관성 분석 등 당초 연구목표를 모두 달성한 것으로 판단됨
⑦ 터널 안정성 평가 기법 / 지 보 재·보강재 성능평가기법 조사·분석	2	○				8	한계변형률 개념에 근거한 시공중 터널에 대한 안정성 평가기법을 연구하였으며, 설계·시공단계의 원지반 물성치 선정방법, 지보재·보강재의 현장계측기법 및 시공 안정성 평가에 대한 문제점을 연구하여 발파-라이닝 병행시공을 위한 지원기술 개발을 성실히 수행함
⑧ 병행시공 핵심 요소기술 정립 /Web 기반 발파설계기법 개발/교란대 평가 기술	2	○				10	동적실험기반과 수치모델링 기법과 같은 최적 발파기법 개발을 위한 기반기술을 확립하였으며, 병행시공시 발파진동의 영향평가와 안전이격거리 산정에 대한 연구를 수행함. 또한 시공중 터널내 오염농도 평가와 함께 병행시공에 적용하기 위한 복합 환기시스템을 도출함. 마지막으로 .NET기술에 근간한 발파설계 프로그램의 prototype을 구현함. 이상과 같이 당초 연구계획을 모두 달성

							한 것으로 판단됨
⑨ 고성능 숏크리 트 기본배합설 계/고성능 록볼 트 신재료 방안 및 분석/강지보 설계를 위한 위 상최적화 기법 및 재료분석	2	○				10	실리카 흙을 대체할 수 있는 국 산 미분말 혼화제인 메타카울린 과 숏크리트 성능향상을 위한 폴 리카르본산계 고성능 감수제를 사용하는 고성능 숏크리트의 기 본 배합설계를 완료하고 성능평 가를 실시함. 그리고 기존 록볼트 정착재의 문제점과 재료분석을 통해 재료적인 측면에서 고성능 록볼트 정착재 재료의 개발방안 을 구체적으로 수립하는데 성공 함. 그리고 강지보재의 최적 구조 형상 결정을 위한 위상 최적화기 법 연구를 통해 강지보재의 최적 연결구조 형상을 제시하는데 성 공함
⑩ 연구단 공동 연 구추진 방향 수 립/기반구축/현 장적용/홍보/연 구단 운영 등	2	○				10	각 세부과제의 성공적인 연구수 행뿐만 아니라, 연구단 운영위원 회와 제1세부과제가 주축이 되어 각 세부과제 기술의 package화와 효율적인 연계에 대해 지속적으 로 검토·토의를 수행함. 그리고 당초 계획했었던 숏크리트 타설 시스템 등의 기반구축을 성공적 으로 수행함. 또한 연구단 자체의 workshop을 2회 실시하였으며 점차 대외적인 행사로 발전시킬 예정임. “국도1호선 두마-반포간 도로확장 및 포장공사” 구간 이 외에 총 3건의 현장적용 및 현장 평가를 실시함. 2006년 3월에는 “토목의 날” 행사에 연구단 홍보 부스를 설치하여 대외적으로 연 구단의 구성, 보유기술 및 향후 예상되는 연구단의 근 미래 기술 을 홍보함
소 전문가 평가점수 계 (100점 만점)	20					94	

8-2. 종합의견

가. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 이상과 같은 본 연구단의 1차년도 연구결과는 당초 계획대로 성실히 수행된 것으로 판단됨
- 더욱이 터널의 급속시공과 급속안정화를 도모할 수 있는 package 성과 도출 방안에 매진함
- 실용화와 현장 적용이 본격적으로 이루어지는 2차년도 이후부터는 보다 가치적인 성과가 얻어질 것으로 예상됨
- 연구단의 연구성과와 파급효과를 극대화하기 위해서 개발될 각 요소기술과 package기술의 장점 및 그에 따른 경제적 이점들을 보다 부각시키는데 주력하고자 함

나. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- 현재까지의 연구결과는 총 5개년간의 연구과정중 1차년도에 해당하는 것으로서, 본 연구단에서 목표로 하고 있는 각종 요소기술의 실용화와 package 기술 개발을 위한 기술적 전략수립과 기반 기술 도출과정에서 얻어진 것이라는 점이 평가시에 고려되어야 함
- 현재까지의 1차년도 연구성과는 당초 성과계획 대비 초과 달성하였으며, 연구단 운영 및 홍보 등을 성실히 수행하였다는 점이 고려되어야 함
- 발파-라이닝 병행시공과 이를 위한 급속시공·급속안정화 지원기술 개발을 목표로 하고 있는 연구단의 특성상 많은 현장실험 및 실규모 실증연구가 이루어져야 하므로 이에 필요한 예산이 충분히 확보되어야 함 (평가위원 의견사항 참조)

다. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 2차년도 이후부터 신재료 지보재 분야와 IT기반 시스템·프로그램 분야의 요소기술이 도출되고 이에 대한 실용화가 이루어질 것으로 예상됨. 3차년도 이후부터는 1차년도에 수립한 기술 전략에 근거하여 연구단 기술의 package화를 통해 실용화를 추진하고자 함
- 자체 평가위원의 의견을 참고하여, 연구단 행정요원 이외에 연구단 연구내용과 연구추진 방향을 충분히 숙지할 수 있으며 기술적 지원이 가능한 전공분야의 석·박사급 연구단 전담인력을 투입할 예정임
- 개발 기술의 실용화를 위한 연구단 차원의 적극적인 홍보와 기술 지원을 수행할 예정임

주 의 사 항

1. 본 보고서는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업의 최종(중간) 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

- | | |
|---------------------|------------------|
| ■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 | TEL 031)381-6311 |
| 한국건설기술연구원 | TEL 031)910-0238 |

R&D / 05건설핵심 D03-01

IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발

- 발행일 / 2006. 8. 29.
- 발행처 / 한국건설기술연구원
경기도 고양시 일산서구 대화동 2311번지
TEL : 031-910-0114(대)
- 인쇄처 / 카피코

