

기술 위원회 기술 칼럼

| 암반역학기술위원회 |

암반공학분야의 연구 및 기술개발 현황과 전망

암반역학기술위원회

1. 서 언

우리나라는 대부분이 산지로 이루어져 있기 때문에 건설공사에서 필연적으로 암반을 접하게 되며, 특히 터널 및 지하공간에 대한 대형 프로젝트를 접하면서 암반역학(Rock mechanics) 또는 암반공학(Rock engineering)의 중요성은 점점 증가하고 있다. 특히 토목을 전공한 기술자의 경우 현장에서 겪는 지질이나 암반관련 문제는 가장 현실적인 어려움중의 하나일 것이다.

암반공학은 암석 및 암반의 공학적 특성을 바탕으로 터널, 사면, 기초 등에 응용되는 지반공학의 한 분야로서 발전하게 되었으며, 이러한 기술적 배경을 바탕으로 본 학회내 암반역학이라는 분야의 기술위원회가 설립되게 되었다. 특히 암반공학은 토질공학 그리고 지질공학 등과 상호 연관이 깊기 때문에 서로의 협동작업이 매우 중요하므로 지반공학내의 다른 분야와의 커뮤니케이션과 실무교육이라는 중요한 역할을 담당하게 되었으며, 이에 대한 인식도 많이 개선되어가고 있다.

최근 국내 기간시설의 확충에 의해 고속도로, 고속철도 등이 건설됨에 따라 터널 및 사면과 같은 암반구조물의 구축이

급격히 증가하고 있다. 또한 지하유류비축기지, 지하양수발전소, 지하폐기물저장소 등과 같은 대형 지하공간의 구축됨에 따라 보다 전문적인 암반공학의 필요성이 요구되고 있는 실정이다.

이에 산학연을 중심으로 전문적인 암반공학관련 기초연구와 터널 및 사면관련 실용기술에 대한 응용연구가 활발하게 진행되고 있으며, 국책사업화를 통하여 연구과제의 구성이 대규모화 된 종합적인 연구시스템을 구축하여 보다 장기적인 비전을 가지고 R&D사업이 수행되고 있다.

본고에서는 암반공학 및 관련분야의 최근 연구 및 기술개발동향을 고찰하고자 하였다. 이를 위해서 지반공학회, 암반공학회, 터널공학회 등의 관련 학회지에 나타난 논문의 분야별 경향을 분석하였고, 대표적 국책연구기관인 건설기술연구원과 지질자원연구원에서 수행되었거나 수행되고 있는 주요 연구과제의 특성을 분석하였다. 그리고 시공사 및 설계사를 포함한 건설업체에서 수행하고 있는 주요 특징적인 기술개발내용을 살펴보았다.

현재 국내에서 수행되고 있는 암반공학 관련 연구 및 기술개발에 대한 현황 및 동향을 고찰하고 현장에서 사용할 수 있는 실용적인 기술개발과 다양한 분야의 기술이 통합된 혁

신적인 연구개발 계획과 암반공학의 미래 비전을 전망해 보고자 하였다.

2. 학술지에 나타난 암반공학분야 연구 동향

송재준(서울대학교)

본고에서는 암반공학분야의 연구동향 및 기술개발현황

을 파악하기 위하여 최근 3년간 한국지반공학회와 한국암반공학회 그리고 한국터널공학회의 학술지에 실린 암반역학분야 논문을 분야별로 분류하여 보았다. 한국지반공학회 논문집에서는 암반공학관련 논문(26편)을 선별하였으며, 한국암반공학회와 한국터널공학회의 학술지에서는 해당기간의 전체 게재논문(각 102편 및 67편)을 대상으로 하였다. 같은 암반역학분야 논문일지라도 학술지에 따라 소분야별 논문편수 구성비가 다르므로 소분야 분류는 학술지에 따라 다소 차이를 두었다.

분석결과 한국지반공학회 논문집에서는 총 6 개 소분야

표 1. 한국지반공학회 논문집의 암반공학분야 논문

분야	비고
지반조사(2편, 8%)	-암반 불연속면 탐측을 위한 초음파 반사이미지 -디지털 영상계측 기술의 영향인자에 따른 정밀도 분석
시험/해석(6편, 23%)	-마이크로플레인 모델을 이용한 화강암의 3차원 구성방정식 개발 및 암석거동 모사 -울산지역 퇴적암의 강도추정법 연구 -Schmidt hammer 반발지수로 울산지역 퇴적암의 공학적 특성을 추정하기 위한 연구 -퇴적암의 공학지수를 추정하기 위한 LA,마모율시험 -개별요소법을 이용한 쇄석재료의 직접전단시험 모델링 -대형직접전단시험과 대형삼축시험을 통한 석산골재의 전단거동 특성비교
암반터널(5편, 19%)	-한계변형을 개념을 활용한 터널 안정성 평가에 관한연구 -NATM터널의 배수시스템 수리가능저하가 터널 라이닝에 미치는 영향 -터널굴착변위를 활용한 시공중 피드백 해석기법연구 -페이스볼트의 타설각도가 보강효과에 미치는 영향분석 -투수 및 이완하중 파악을 위한 터널 라이닝의 인공신경망 역해석
암반사면(6편, 23%)	-절리 암반사면에서의 인자효과에 의한 유한요소 해석의 타당성 검토 -3차원 절리게 모사를 통한 대규모 암반비탈면 파괴블록크기 추정방법 -절리조사결과에 의한 현장 낙석무게분포추정 및 추정결과와 낙석시뮬레이션 적용성 검토 -Fuzzy set theory 와 MonteCarlo simulation을 이용한 암반사면의 파괴확률 산정기법연구 -Newmark방식 강체블럭 변위해석에 대한 유연도의 영향 -암층별 특성이 고려된 국내절취사면의 유지관리방안에 관한연구
말뚝기초(5편, 19%)	-암반에 근입된 부착형 앵커의 거동특성 -풍화암에 근입된 선단확장형 PHC 말뚝의 선단지지력 -풍화암에 근입된 현장타설말뚝 지지력 공식의 신뢰성 분석 -암반에 설치된 송전철탑 심형기초의 주면마찰력 평가 -풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 저항계수 산정
발파/기타(2편, 8%)	-방사균열 모델을 적용한 암반 발파에 의한 손상영역예측 -발파진동이 인접한 터널의 콘크리트 라이닝과 록볼트의 인정성에 미치는 영향평가

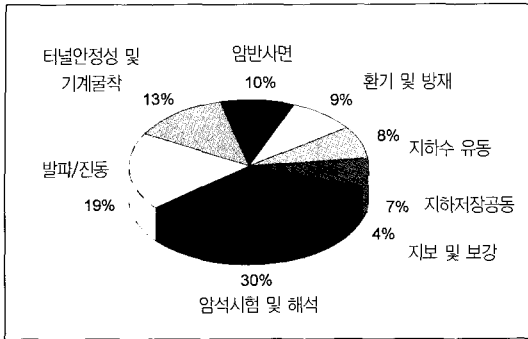


그림 1. 한국암반공학회지의 분야별 논문구성

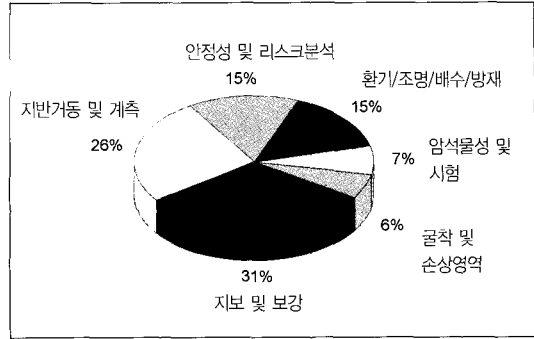


그림 2. 한국터널공학회지에서의 논문 구성

중 '시험/해석' 및 '암반사면' 전체 논문의 각각 23%로 비교적 높은 비중을 차지하였고 그 다음으로 '암반터널' 과 '말뚝 기초' 가 각각 19%로 동일한 수치를 보였다(표1 참조). 그 뒤로 '지반조사' 와 '발파/기타' 가 각각 8% 비중을 차지하였다. 전체적으로 암반역학관련 기초분야에 대한 연구와 터널, 사면 및 기초 등의 응용분야에 대한 연구가 활발하게 진행됨을 알 수 있으며, 특히 풍화암에 타설된 말뚝에 관한 논문이 3편으로 풍화암에서의 말뚝거동에 대하여 상대적으로 높은 관심을 알 수 있었다.

한국암반공학회 학술지는 암반역학분야 전문학술지의 특성상 다양한 논문주제들이 포함되어 그림 1과 같이 총 8개의 소분야로 분류하였다. 해당 기간중 투고된 논문중 가장 높은 비율을 차지하는 것은 '암석시험 및 해석' (30%)로서 두 번째로 높은 비중을 차지하는 '발파진동 및 손상영역' (19%)에 비해 10%이상 높은 점유율을 나타내어 한국암반공학회 학술지의 기초연구에 대한 관심이 대단히 높은 것을 알 수 있다. 그 다음으로 높은 비중을 차지한 것은 '터널안정성/기계굴착' (13%) 이었다. 흥미로운 것은 뒤에 소개할 한국터널공학회 학술지에서 31%로 가장 높은 비중을 차지한 '지보 및 보강' 이 한국암반공학회 학술지에서는 4%로 가장 낮은 비중을 차지하고 있다는 사실이다. 한국지반공학회 학술지에서도 유사한 주제인 '암반터널' 이 상대적으로 높은 비율을 차지하고 있는 것을 상기하면 이는 한국암반공학회 학술지의 큰 특징이라고 할 수 있다.

한국터널공학회 학술지에서는 앞서 언급한 바와 같이 '지보 및 보강' 이 가장 높은 비중을 차지하였고 그 뒤로 '지반거동/계측' (26%), '터널 안정성/리스크분석' (15%), '환기/조명/배수/방재' (15%) 등이 따르고 있었다. 그의 '암석물성/시험' 과 '굴착 및 손상영역' 등은 10% 미만의 비중으로 암석에 대한 기초연구분야에 상대적으로 낮은 관심도를 나타내었다.

3개 학술지 발표논문을 비교해 보면 한국지반공학회 학술지에서는 상부지반의 암반에 설치되는 기초 및 지보와 더불어 암석 물성에 대한 기초연구에 비교적 높은 관심이 있음을 알 수 있고 한국암반공학회 학술지에서는 암석에 대한 기초연구와 발파분야가 가장 관심있는 분야임을 알 수 있다. 한편 한국터널공학회지에서는 터널시공시의 지보 및 보강과 지반거동 및 계측 분야에 많은 논문이 투고된 것으로 나타났다. 정리해 보면 각 학술지별로 주요 관심주제에 대한 차이가 비교적 뚜렷하여 암반공학분야가 3개 학술지를 통해서 서로 보완적으로 발전하고 있음을 알 수 있다.

2. 연구기관에서의 암반공학분야 연구 동향

박의섭(한국지질자원연구원),
장수호(한국건설기술연구원)

2.1 한국지질자원연구원의 연구 현황

한국지질자원연구원에서 수행하였거나 수행중인 암반공학분야의 연구과제는 70~90년대에는 국내 자원의 개발에 따른 광산관련 내용이 주를 이루었고, 90년대 이후 지하철, 도로/철도터널, 지하유류비축기지 등의 암반구조물의 건설이 활발해짐에 따라 지하공간관련 내용으로 바뀌어왔다. 표 2에는 한국지질자원연구원에서 수행하였거나 수행중인 연구과제에 관한 내용을 나타내었다.

한국지질자원연구원은 국내 지형 및 지질조건에 적합한 채탄법 개발 및 기계화 시스템을 위한 수많은 연구를 수행하였으며, 이를 통하여 얻은 암반공학적 연구결과는 현재 국내에 개발되었거나 추진중인 지하공간시설, 즉 지하 유류비축기지, 지하 양수발전소, 지하 냉장/냉동 저장고, 지하 LNG 저장시설 및 지하 핵폐기물 처분시설 등에 활발히 적용되어 왔다. 한국지질자원연구원의 연구 성과중 대표적인 것은 아래와 같다.

- **국내 최초 지하암반내 냉장냉동저장 파일럿 플랜트 개발**
 - 농수축산물 지하냉장냉동저장 파일럿 플랜트 및 실증 모니터링시스템 개발(지하 20~30m, 총연장 80m, 0~-25℃ 냉장냉동저장실)
 - 국내 최초 상업용 농축산물 지하냉장냉동저장시설(근지암 지하저장 터미널) 건설 실현으로 기술 실용화 성공
- **세계 최초 극저온 상압식 LNG 지하저장기술 개발**
 - 극저온 상압식 지하암반내 LNG 저장기술의 파일럿 플랜트 구축 및 실증검증 (저장온도: -162℃, 저장용량: 110m³)
 - 기존의 지상식 및 반지하식 저장탱크에 비하여 경제성, 안전성이 매우 우수한 지하복공식 저장기술 개발
- **고심도 지하연구실험실 구축 및 지하공간개발 실증기술 시스템 개발**
 - 기존광산 지하갱도를 이용한 심부환경(고온, 고압) 구현 지하 500m 고심도 지하연구실험실 및 실증실험시스템 구축
 - 암반응력 신계측 기법/시험장치 개발(국내/국제 특허

출원) 및 심부암반 균열탐지 AE/MS 모니터링시스템 개발(중소기업 기술이전 실용화)

- **한국형 Jumbo Drilling M/C 설계 및 국산화 개발**
 - 한국 지형에 적응하는 시험모델 설계 및 성능시험을 통한 점보드릴 전체 시스템 설계기술 개발
 - 주요 부품인 Boom, Feed 및 유압회로 등의 국산화를 약 70% 확보
 - **대형갱도의 안전성 확보를 위한 지보 및 굴착기술 개발**
 - 불연속 암반의 통계적 시뮬레이션 및 안정성 평가 S/W 개발
 - 단층대, 균열암반 및 탄층 등의 안정성 확보를 위한 갱도보강공법 개선
 - **대규모 지하공간 굴착, 유지 및 환경제어 기술 개발**
 - 도심지 지하공간, 교통터널 등의 설계 및 안정성 해석 기법 개발
 - 도심지 환경피해 최소화를 위한 암반굴착기술 개발
 - 지하공간의 시공 및 운영중 유지관리를 위한 암반거동 예측 모니터링 시스템
 - 지하공간의 폐쇄구역내 환경감시장치 및 프로그램 개발
- 이 중에서도 세계 최초로 개발된 극저온 상압식 LNG 지하저장시설과 국내의 가행중인 광산을 활용하여 심도 500m 이하에 구축된 고심도 지하연구실험실은 암반공학분야의 연구에 있어 빛나는 연구성과라 할 수 있다. 한편 개발된 LNG 지하저장기술은 그동안 국내에 많은 기술 및 경험이 축적된 대규모 지하공간 구축/유지 기술과 LNG 선박 및 저장탱크 내조시스템의 융합기술이다. 따라서 향후 본 기술이 실용화되면, 전 세계적으로 수요가 급증하는 천연가스시장에 대응하여 환경적으로나 기술적으로 안전한 LNG 지하저장시설에 대한 기술을 우리나라가 선도할 것으로 기대된다.
- 이와 더불어 중추 활석광산 및 정선 한덕철광 신에미광업소에 구축된 고심도 지하연구실험실은 심부 지하공간(심도 500~1000m) 개발 및 환경위해물질(방사성폐기물·이산화탄소)의 지중처분을 위한 지구과학적 핵심기술을 개발하는데 주로 사용될 것이다.

표 2. 최근 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 수행하였거나 수행중인 연구과제

연구과제명	연구기간	연구분야
한국형 Jumbo Drilling M/C 개발	1995~1998	광산개발
지반침하 안정성 평가기법 및 대책연구	1997~1999	광산개발
대규모 석탄 노천광의 연약사면 안정성 및 생산성 향상 연구	2007~2009	광산개발
대규모 지하공간 굴착유지 및 환경 제어 기술 연구	1994~1996	지하공간
암반의 냉열유동 및 저온하의 공동 안정성 해석기술개발	1994~1997	지하공간
지하에너지 저장시설 구축 및 유지기술 연구	1997~1999	지하공간
지하임반내 고온/저온 저장기술연구	2000~2002	지하공간
천연액화가스(LNG) 지하공동 저장기술 개발 및 비축 타당성분석	2002~200	지하공간
고심도 지하연구실험실 구축 및 지중저장처분기술 개발	2005~2008	지하공간
해저사실물 차폐기술개발	2005~2010	지하공간
시간영역 반사법(TDR)에 의한 지반변위 계측시스템 개발	1996~1998	지반안전
인구밀집지역 지반안전대책 연구	2001~2003	지반안전
표준발파공법 공동연구	1996~1997	발파
유류비축기지 건설을 위한 표준발파공법 개발	1997~1998	발파
Plasma Blasting을 이용한 암반굴착 설계기술 개발	1997~1999	발파
제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체 기술	2000~2002	발파
고효율의 터널 급속시공을 위한 신개념 굴착공법 개발	2005~2010	발파
철도연변 낙석·산사태 위험분석 DB 구축	1999~2000	사면
철도연변 사면 위험도 평가를 위한 기초자료 조사	1999~2002	사면

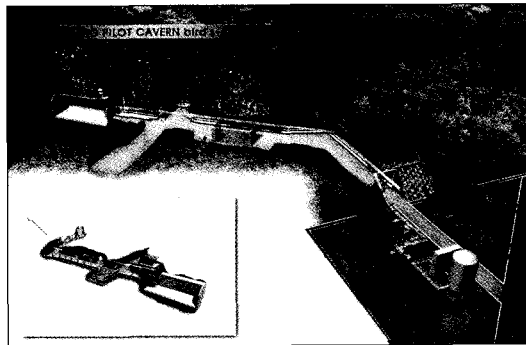


그림 3. LNG 지하저장 Pilot Plant (KIGAM 부지내)

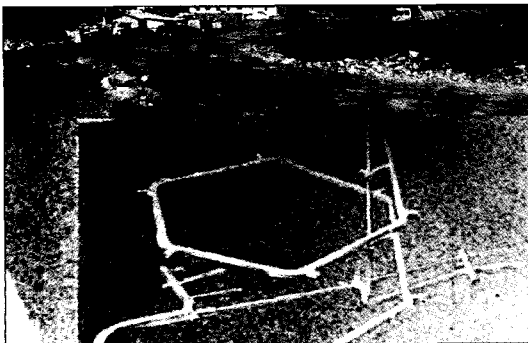


그림 4. 신에미광업소의 고심도 지하연구실험실



그림 5. 수리적 굴착손상영역 URL 현장시험

표 3. 한국지질자원연구원(KIGAM)이 보유하고 있는 암반공학관련 연구시설

연구시설/기자재명	성능
지하 극저온실험 Pilot Cavern	LNG 지하저장 Pilot Test
3D Laser Scanner	터널 및 지반의 3차원 형상측정
MTS 실험장비	저온/고온 (재하하중 200톤, -200~100°C)
Creep 시험장치	암반의 장기간 거동 평가
절리면 전단시험장비	암반 절리면의 역학적 물성 측정
절리면 수리전단시험장비	암반 절리면의 수리역학적 거동 평가
국내 최대의 진상축 시험장비	3방향 구속응력하의 파괴거동 분석
절리면 3차원 측정장치	절리면 거칠기의 3차원 형상 측정
Hydraulic Fracturing System	시추공을 이용한 현지응력 측정
Goodman Jack	시추공을 이용한 현지변형계수 측정
3차원 코어 스캐너	시추코어를 이용한 3차원 절리 분석
AE/MS 측정장치	미소파괴음을 이용한 암석 파괴모드 분석
TDR 계측센서 및 계측장비	터널 변형측정 시스템

표 4. 한국건설기술연구원(KICT) 주요 수행 연구과제

과제명	기술분야	수행기간	비고
터널공사 재해 최소화 및 예방기술 개발	재해예방	2004.1~2009.12	수행중
터널건설 환경영향 최소화 기술 개발	재해예방	2004.1~2009.12	수행중
노후터널 안전관리 및 재해예방 기술개발	재해예방	2004.1~2009.12	수행중
IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발	터널/굴착	2005.6~2010.6	수행중
지하공간 환경개선 및 방재기술 개발 - 지하구조물 재해손상 대응기술 개발	재해예방	2003.12~2008.12	수행중
해저터널 방배수 설계기술 및 신재료 개발	방·배수	2005.6~2010.6	수행중
도로시설물 안전관리 네트워크 구축 기술 개발(사면분야)	사면	2006.6~2011.7	수행중
낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발	사면	2005.11~2010.11	수행중
리브 보강형 프리캐스트 아치를 이용한 개착터널의 설계 및 시공법 개발	터널	2006.12~2008.12	수행중
노치비트 시스템 최적화 연구	발파	2006.12~2008.8	수행중
특수대단면 터널시공 및 평가기술의 전략상품 개발	재해예방	2007.5~2009.4	수행중
지반설계 정수산정 및 분석사업	시험·분석	계속사업	수행중
미래형 신공구/인프라 창출을 위한 지반기술의 신개념 활용방안 기획 연구	-	2006.6~2006.12	완료
영상정보를 이용한 터널 막장면 관찰 및 계측시스템 개발	조사, 계측	2005.5~2007.12	완료
터널 기계화시공을 위한 TBM 굴진성능 평가기술 개발	기계화시공	2004.8~2007.7	완료
한국형 싱글셀 터널공법 개발	설계, 시공	2003.12~2006.12	완료
SMART 터널 OBSERVATION 전문가시스템 개발 연구	조사, 계측	2003.12~2006.12	완료
시간열화특성을 고려한 터널 갱구사면 안정성기법 및 상시 계측시스템 개발	사면	2003.10~2006.10	완료
지능형 터널 모니터링 Expert System 개발	조사, 계측	2005.5~2006.3	완료
미래형 초장대 터널의 최적화 건설기술 시스템개발 연구	방·배수	2002.12~2005.12	완료
고내구성 록볼트의 개발	지보	2004.6~2006.8	완료
고성능 슛크리트 라이닝의 개발	지보	2002.5~2004.5	완료

2.2 한국건설기술연구원의 연구현황

한국건설기술연구원은 암반구조물인 터널, 지하공간 및 사면을 건설하는데 필요한 제반 핵심 요소기술들의 개발과 실용화를 추구하고 있다. 연구 분야에는 지하구조물에 대한 조사, 계획, 설계, 시공 및 유지관리 분야가 포함되며, 최근에는 지하구조물 및 사면에서 발생할 수 있는 각종 재해에 대한 사전 대응기술, 고효율의 발파 및 기계화굴착 기술, 지보재·방배수 관련 신재료 개발, 새로운 시험법 및 실험형 시험설 구축 등에 주력하고 있다.

최근 5년간 한국건설기술연구원 지하구조물연구실에서 수행하였거나 수행 중에 있는 주요 연구과제를 정리하면 표 4와 같다. 이 중에서 암반공학과 관련된 주요 연구실적을 소

개하면 다음과 같다.

① 웹기반 터널 붕괴 위험도 평가 및 시공관리 시스템

본 연구에서는 터널 붕괴 위험도의 정량적이고 객관적인 평가를 위하여, 대형 붕괴현장을 중심으로 50개 이상의 터널 붕괴 D/B를 구축하고, 붕괴 D/B기반 터널 붕괴 위험도 지수, 위험도 평가 tool 및 인공신경망 기반의 민감도 해석기법을 개발하였다. 이상의 연구 성과들을 웹기반의 평가 시스템으로 구현하였다(그림 6).

② 터널건설로 인한 환경영향 모니터링 기술

본 연구에서는 터널굴착으로 인한 지상 생태계 변화를 감지하기 위한 지하수 예측 및 모니터링 기술 개발을 목표로 설정하였다. 현재까지 고정식 전극을 활용한 지하수 환경변화 평가 기술을 정립하였으며, 개발된 지하수 예측 및 모니터링 프로그램을 실제 터널현장에 시범 적용하여 개발기술의 적용가능성을 검증하였다(그림 7).

③ 첨단 IT기반의 터널 침전계측 및 조사 기술

터널 붕괴·붕락의 주요 원인인 단층대와 연약대에 대한 사전 예측기술 확보를 목표로 하여, 첨단 디지털 영상계측에 의해 터널 내공변위 계측, 시공 중 굴진면 관찰 및 계측 표준화를 도모하고 있다(그림 8). 특히 3차원 절대변위를 활용하여 굴진면 전방의 단층대 구조를 예측하는 기술을 최초로 개발하여 터널 시공 중에 예측하지 못한 단층대에 의한 붕괴·붕락 사고를 예방하는데 활용하고자 하였다.

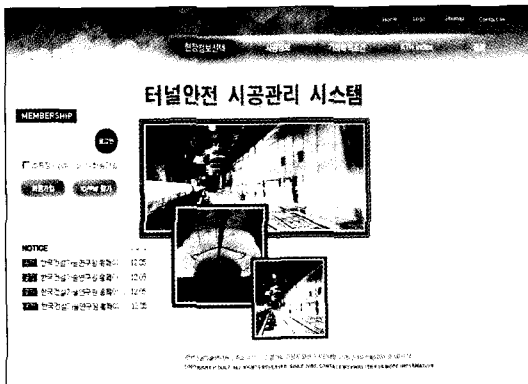


그림 6. 터널안전 시공관리 시스템

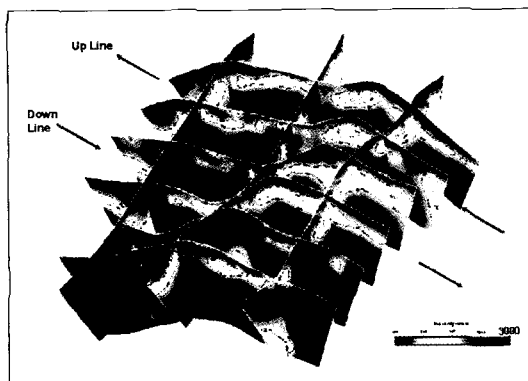


그림 7. 지하수 모니터링 기법과 현장 적용

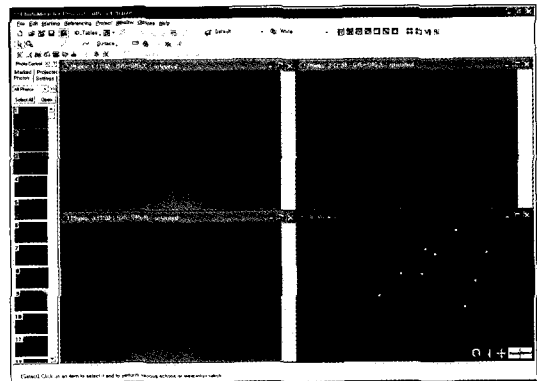


그림 8. 터널정보 영상 정보시스템

④ 고성능 터널 지보재 및 싱글셸 터널공법

IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발 연구단에서는 불리한 지반조건, 대단면 터널 등에서 터널의 조기안정화를 도모하고 콘크리트 라이닝을 생략할 수 있는 싱글셸(single-shell) 터널공법을 적용하기 위한 가장 핵심적인 기술인 고성능 터널 지보재의 개발에 매진하고 있다(그림 9).

⑤ TBM의 최적 설계 및 굴진성능 평가 기술

TBM의 설계와 굴진성능 평가 기술의 자립을 위하여 최초로 실물절삭시험용 선형절삭시험기(LCM)와 노르웨이 NTNU모형 기반 실험인프라를 동시에 구축하는데 성공하였으며(그림 10), 이를 활용하여 TBM 설계에 핵심이 되는 커터 작용력, 커터 압입깊이 등에 대한 예측모델을 개발하였다.

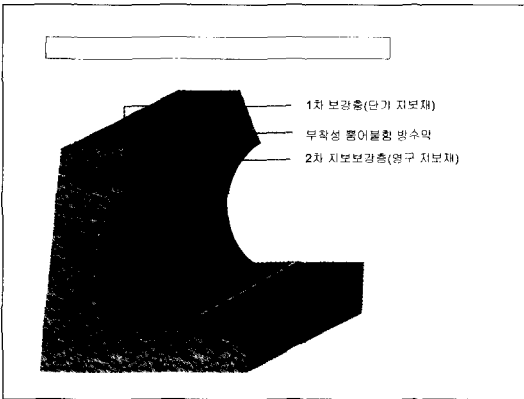


그림 9. 싱글셸 터널 공법

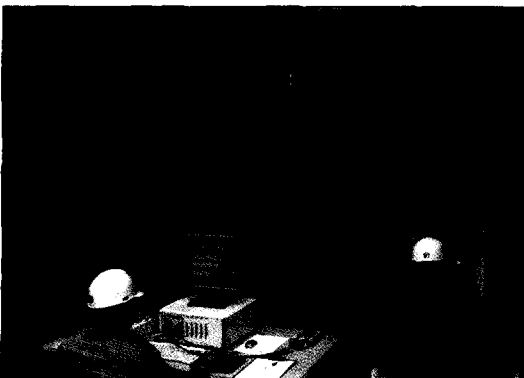


그림 10. 굴진성능 예측용 선형 절삭시험기(LCM)

⑥ 방·배수 설계기술 및 신재료 개발

본 연구에서는 대용량 터널 바닥배수판의 국산화를 목표로 설정하였으며, 외국 바닥배수판 대비 약 125%의 구조적 안정성이 향상되고 기존 도로터널 배수시스템 대비 약 150%의 통수능 증대 효과를 가진 바닥배수판 개발에 성공하였다(그림 11).

⑦ 지반구조물 실험형 재하시스템 구축

핵심 발기술들의 검증과 다양한 지반구조물의 거동 커니즘을 평가하는데 활용하기 위한 지반구조물 실험형 재하시스템을 구축하였다. 지난 2005년에 구축된 지반구조물 실험형 재하시스템은 세계에서 최초로 구축된 직립형 실물 실험인프라로서, 총 17개의 대용량 유압 액추에이터에 대해 종래의 구조시험에서 채용하고 있는 일반적인 변위·하중 제어 뿐만 아니라 개별 또는 동시에 강성제어를 가능하게 하여 실제 지반구조물의 거동을 보다 정확히 모사하고자 하였다(그림 12).

⑧ 암반사면분야

본 연구는 IT기술을 접목한 첨단기법을 이용하여 현장 절토사면 조사의 효율성을 극대화하는 조사 및 자료 정보화 기술개발에 해당한다. 기존의 복잡하고 비효율적인 절토사면 현장조사 및 평가 체계를 혁신적으로 개선하기 위하여 PDA 기반의 현장조사 장비와 웹기반의 DB 관리 시스템을 개발하고 두 시스템간의 무선통신 쌍방향 정보공유 체계를 구축하는 것이 주요 목적이다(그림 13).

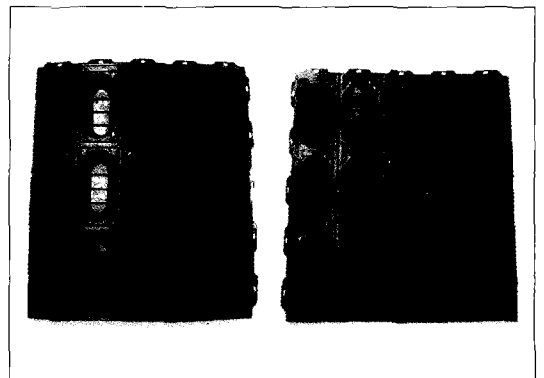


그림 11. 대용량 터널 바닥배수판의 완성품

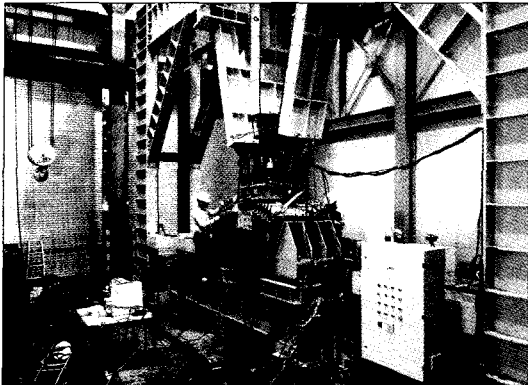


그림 12. 지반구조물 실험형 재해 시스템

3. 건설업체에서의 암반공학관련 기술 개발 동향

김영근(삼성건설), 강준호(현대건설), 서경원(대우건설)
김택곤(SK건설), 장석부(유신코퍼레이션)

삼성건설의 경우 터널 영상정보시스템, 암반사면 통합관리시스템, 발파 여굴관리, 특수대단면 시공기술 등과 같은 기술개발과제를 산학연 공동연구를 통하여 수행하고 있으며, 현장적용 및 신기술개발에 노력하고 있다.

터널 영상정보시스템이란 디지털 영상정보를 처리하여 굴착 중 터널 막장면 관찰 및 절대면위 계측 등을 수행할 수 있는 시스템으로써 막장면과 막장면 후방에서 3차원 디지털

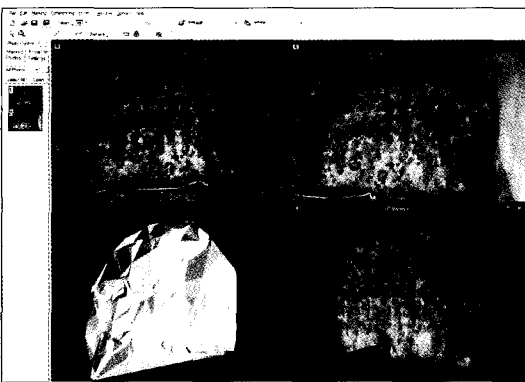


그림 14. 터널영상 정보 시스템

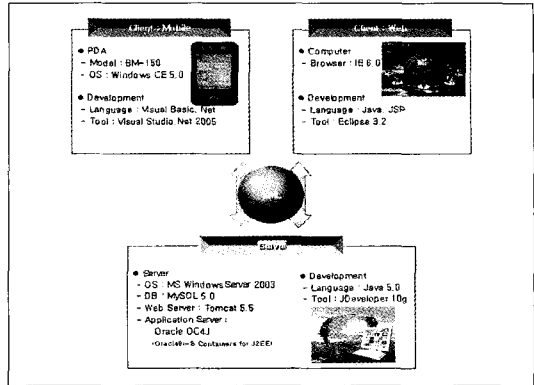


그림 13. 절토사면 조사&관리 정보공유 체계

이미지를 구현하여 절대좌표를 획득한 후 이를 분석하여 객관적인 막장면 관찰과 전체 굴착면의 절대면위 계측을 신속하게 실시할 수 있다(그림 14).

또한 사면활동으로 인한 재해를 방지하기 위해 체계적인 시공관리와 시공 중 자료축적을 목적으로 시공관리 전산화 시스템을 개발하였고, 지질구조에 따른 운동학적 해석과 운동 역학적 해석, 확률론적 해석을 한 프로그램 내에서 순차적으로 수행할 수 있는 통합해석시스템을 개발하였다(그림 15).

도폭선관 비전기 순발뇌관을 이용한 여굴 감소 발파공법은 기존의 비전기 지발뇌관을 사용하면 기록 시차로 인하여 여굴 발생량이 많아지는데 비전기 순발뇌관(OMS)을 사용하여 최외곽공 전체를 동시기폭함으로써 제발효과에 의해서



그림 15. 암반사면 통합해석시스템

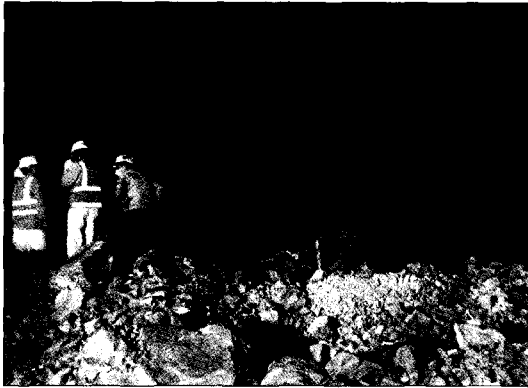


그림 16. 터널 여굴 감소 발파공법

굴착경계면이 매끄럽고 여굴 발생량을 최소화 할 수 있도록 개발하였다(그림 16).

특수대단면 터널 시공기술개발은 국내 최단면 터널을 대상으로 대단면구간에서의 이중지보공법, 근접병설터널구간에서의 필라부 보강공법, 단층대 통과구간에서의 보강공법, 변단면 라이닝 시공기술 등에 대한 기술개발을 수행하고 있다(그림 17).

현대건설에서는 1996년 방사성폐기물 처분 연구용 시험 터널을 기술개발원 부지에 완공하여 현장시험 및 연구를 수행하였고, 2007년 원자력연구소 내에도 시험터널을 완공하였다. 또한 초창기부터 지하비축기지, 양수발전소를 시공하면서 지하공간의 안정성 해석, 수리지질 및 계측 분야에서 활발한 연구를 진행하였다. 이후 원효터널, 여천터널, 둔내

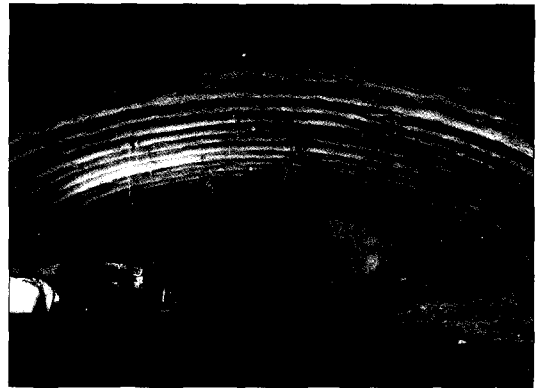


그림 17. 특수대단면 터널 시공기술

터널 등 장대터널을 시공하면서 설계 및 시공 관련 기술을 축적하였다. 특히 원효터널의 경우 터널굴착에 따른 습지구간 지하수 유동분석 및 설계, Pilot 터널 굴착을 통한 지하수 저감대책, 시공중 지질조사를 위한 갱내탄성파 탐사, 환경 모니터링으로 안전한 터널굴착 및 천성산 습지보전에 기여하였다(그림 18과 그림 19).

해외에서는 싱가포르, 말레이시아 및 홍콩지하철, 인도네시아 도수로 터널(TBM) 및 수력발전용 터널과 대만 고속철도 터널을 수행하면서 매우 어려운 지질조건(미고결 토사, 과다 용출수 등)에서 수평제트 그라우팅, 소일시멘트 복토 후 굴착, TBM 성능개선 등 터널설계 및 문제해결을 통해 관련 기술을 발전시켰다.

현재 수행중인 연구과제로는 지하공간 근접시공 관련 연

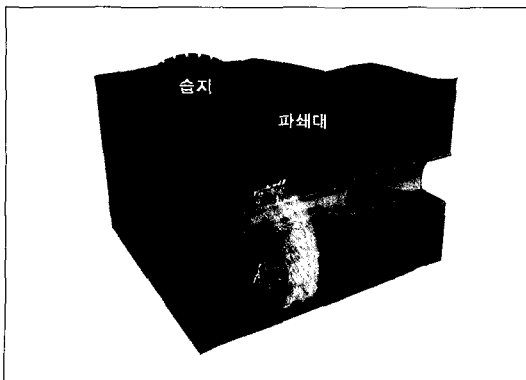


그림 18. Pilot tunnel 및 차수그라우팅

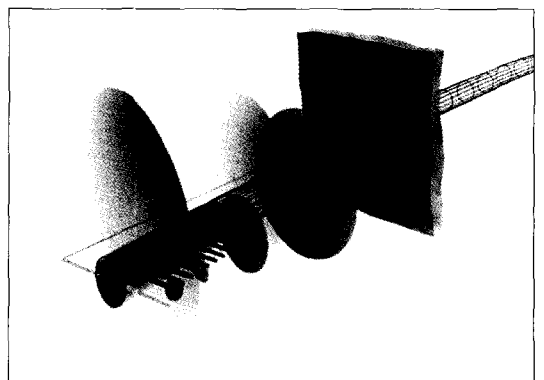


그림 19. 갱내 탄성파 탐사기술

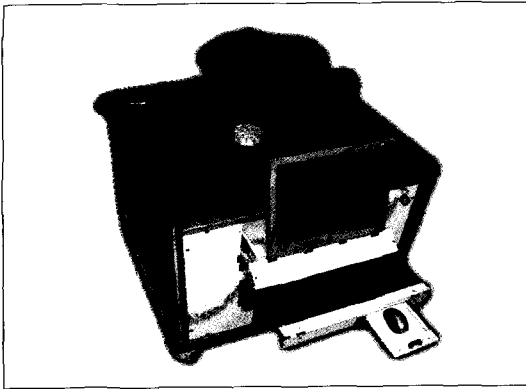


그림 20. HDXLS

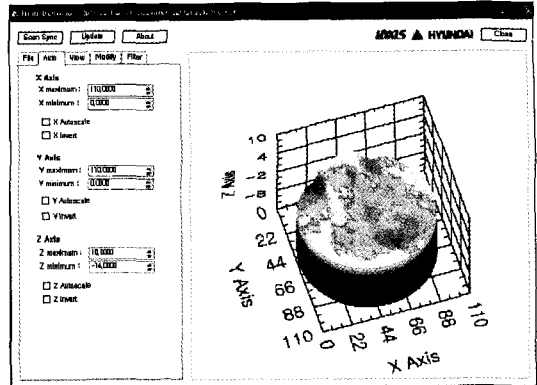


그림 21. RocSA(Rock Surface Analyzer)

구가 진행중이며 최근 연구성과로는 3D 레이저 프로파일러(그림 20) 및 거칠기 분석 프로그램의 개발로 불연속면 특성의 고성능 분석이 가능하도록 하였다(그림 21).

또한 도심지 시공을 위한 민원저감형 대체공법 개발에 착수하여 도심지터널의 변위저감형 강체세그먼트공법을 주제로 협동연구가 진행 중이며 프리스트레스 도입이 가능한 강재가인버트 공법을 특허로 출원하였다.

그리고 세계 수준의 기술(WCT : World Class Technology)과제로 장대터널 분야를 선정하였고 본격적인 대규모 지하공간시대를 맞아 이에 대한 관심과 연구도 지속적으로 준비 중에 있다.

대우건설에서는 1985년 NATM 터널 해석관련 과제를 시작으로 2008년 현재 터널관련 총 15개 과제를 수행하고 있으며 이들 연구의 대부분은 터널 현장과 밀접한 관계를 가지고 진행된 것이 대부분으로 현장에서 필요한 요소기술을 지속적으로 개발 및 적용하고 있다. 특히 터널의 조사, 설계, 시공, 재료, 유지관리에 걸친 전 분야에 걸친 기술 개발로 현장의 니즈에 부응하는 현장용기술을 개발하고 있는 것이 큰 특

징이다. 표 5에는 최근 수행하고 있는 각종 연구 과제를 나타내었으며 주여 개발기술을 나타내면 다음과 같다.

○ **공용중인 터널의 리뉴얼 및 확장 시공법 개발**

- 현재 공용중인 터널의 주변부를 안전하게 확장 시공할 수 있는 프로젝터 개발
- 기존 교통의 통행금지 없이 교통흐름을 유지하면서 기존의 소단면 터널을 대단면 터널로 리뉴얼 및 확장 시공할 수 있는 시공법 개발

○ **국내최초 터널 막장의 화상처리 기법 개발**

- 국내최초로 터널 시공중 입반 불연속면 및 암질 판정 등의 특성을 정량화 할 수 있는 터널 막장 화상처리 기법 개발
- 디지털 카메라를 이용한 터널 막장의 안정성 평가 기술 개발

○ **터널 건전도 평가시스템 개발**

- 터널의 건전도를 객관적으로 평가할 수 있는 시스템 DW-TSES 개발
- 국내 최초로 터널의 건전도 평가시스템에 인공지능망

표 5. 최근 대우건설에서 수행중인 연구과제 현황

년도	과제명	수행기간
2007	공용중인 터널의 리뉴얼 및 확장시공법 개발	'07.1~'08.12
2006	입출공법을 적용한 전단면 프리캐스트 터널 라이닝 공법의 개발	'06.1~'06.12
2004	SCM 및 MJM 공법의 친환경적 지반보강공법으로서의 실용화	'04.10~'06.6
2001	특수지반불량구간에서의 터널보강공법	'00.1~'01.12

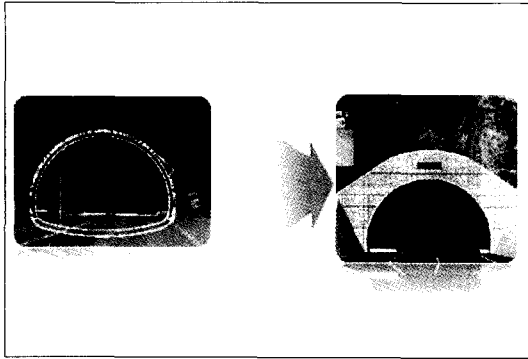


그림 22. 공용중인 터널 확장 시공법

적용

- 터널 건전도 평가의 합리적 추론 및 보수보강 대책 선정

또한 기술연구 뿐만아니라 현장과 밀착하여 국내최초로 시공되는 방사성 폐기물 처분장의 지하동굴 건설, 침매터널, 한강하저 대단면 실드TBM, 국내 최장 철도터널인 영동터널에 대한 현장기술 개발을 수행하고 있다.

SK건설은 고속철도, 지하철, 도로, 통신구, 식품지하냉동 저장시설, 지하에너지비축시설 등 다양한 국가 간접시설 터널 및 지하공간 건설에 적극 참여해 왔다. 특히 1985년 울산 LPG저장시설 공사를 필두로 평택 LPG터미널 등 지하 LPG 저장시설과, K-1, U-1 등 대규모 원유 및 제품유 지하 저장 시설의 설계 및 시공에 참여해오으로써 지하 에너지 저장 시설 분야에서 국내 최고의 기술력을 확보하고 있다. 현재 SK



그림 23. 과지압구간 저장단면변경

건설이 추진하고 있는 암반공학 관련 기술을 다음과 같다.

(1) 석유류 지하암반 저장기술

지난 30여년간의 대규모 동굴공사의 시공경험을 통해 자체 핵심기술들을 확보하여, 이제는 설계기술능력까지 갖추고 있다. 여수추가비축기지에서는 슛크리트 탈락과 과지압 현상을 계측과 비교분석한 후, 단면변경, 적절한 보강대책을 수립하여 과지압 발생 구간의 대규모 지하공동에 탄력적으로 적용하였다(그림 23).

(2) 가스터빈용 압축공기 지하저장

가스터빈용 압축공기저하저장시설(CAES)의 누기방지 기밀성을 확보하기 위해서는 water curtain 설계기술이 필요하며, 500m 이상의 고심도에 압축공기를 위한 저장 공동이 위치하므로, 과지압 관련 기술이 중요하다(그림 24).

(3) 극저온 LNG 지하암반 저장기술; Ice ring 차폐기술

LNG 지하공동 저장기술의 타당성 입증하기 위해 지질자원연구원 부지 내에 Pilot Plant를 건설하였고, 콘크리트 라이닝과 내조시스템으로 구성된 지하공동과 주변암반의 안정성, 주변암반에 형성된 빙벽의 범위와 수치해석 결과와의 일치성 및 이론적으로 계산된 기화율과 실제 측정된 값의 부합성을 확인하였다(그림 25).

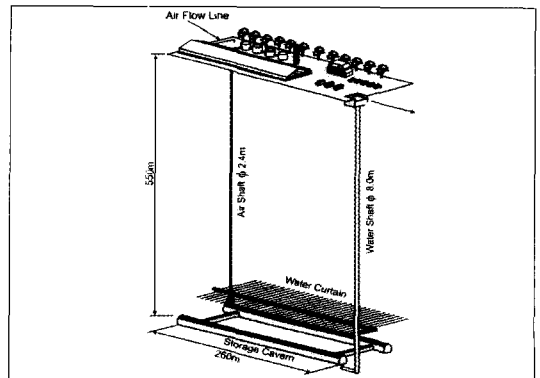


그림 24. CAES 개념도

(4) 에너지 절감형 농축수산물 지하저장기술

또 다른 저온기술로서 에너지 절감형 농축수산물 지하저장고를 들 수 있다. 이미 지하 냉장저장고에 대한 제반 기술적인 사항들을 충분히 검토하고 이를 분석할 수 있는 기술이 개발되어, 곤지암 석굴냉동터미널이 운영 중에 있다(그림 26).

(5) 파괴역학을 고려한 T-H-M 프로그램 개발

온도변화에 따른 암반의 열충격 영향을 고려할 수 있는 해석프로그램을 국제협력과제로 개발하고 있다. 이미 극저온 지하저장에 따른 신규 균열 발생 억제 기준 제시관련 특허를 출원하였으며, 저온하 파괴역학 코드인 FRACOD를 개발중에 있다.

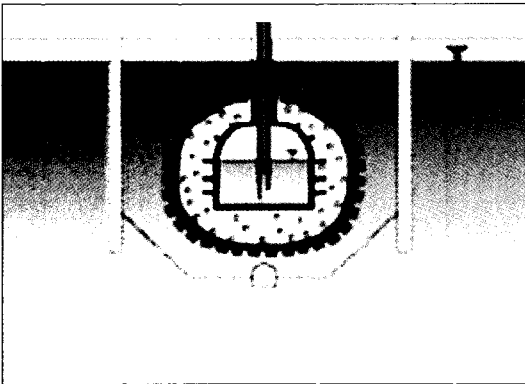


그림 25. LNG 지하암반저장 개념

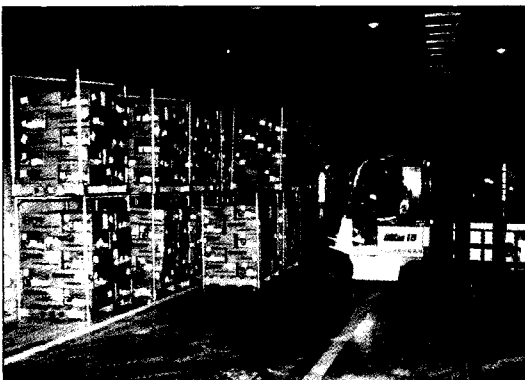


그림 26. 곤지암 석굴냉동

(6) 시공시물레이션 프로그램 개발

복잡하고 지질학적 리스크를 가진 지하공간의 시공을 효율적으로 건설하기 위해 터널 및 지하공간용 4D기반의 시공시물레이션 프로그램을 건교부 CTIRM과제를 통해 개발하고 있다(그림 27).

(7) 장대터널 급속시공기술

발파기술을 이용한 급속시공법으로 벌크 에멀전을 이용한 기계화 장전시스템을 개발하고 있다. 본 시스템은 현장에서 시험시공한 결과 양호한 암반조건에서 기존 발파대비 최대 천공장을 15% 증가시켰음에도 평균 굴진효율은 10%이상 향상된 결과를 얻었다(그림 28).

이외에도 도심지 민원방지를 위해 전자뇌관을 이용한 OBM(Ochestra Blasting Method, 일명 오케스트라 연주공법)과 막장자립이 어려운 터널주변의 불량암질을 안전하게 굴착하고 원지반 손상을 최소화하는 굴착공법으로 '터널 소단면 분할 굴착방법' (SUPEX-AB)을 개발하였다.

유신코퍼레이션에서는 숏크리트 및 발파관련 연구를 진행하고 있으며, 숏크리트 품질 및 안전관리 최적화 기법에서는 대형 지하공간건설에서 숏크리트의 품질은 공사중은 물론 운영중 안정성에도 큰 영향을 미침에도 불구하고 시공중 품질관리기준 및 시험의 부재로 인하여 정량적이고 객관적인 품질관리가 곤란한 실정을 반영하여 숏크리트의 현장강도시험기술의 개발 및 품질관리기준 수립에 대한 연구를 수

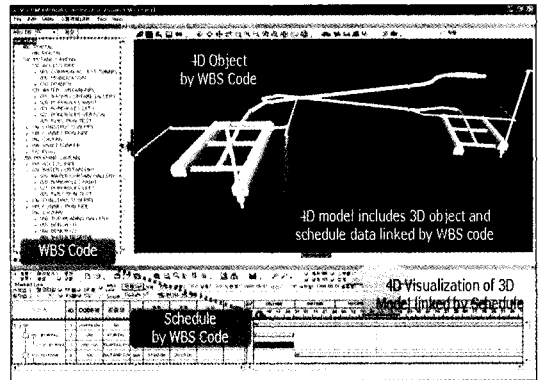


그림 27. 시공시물레이션 프로그램

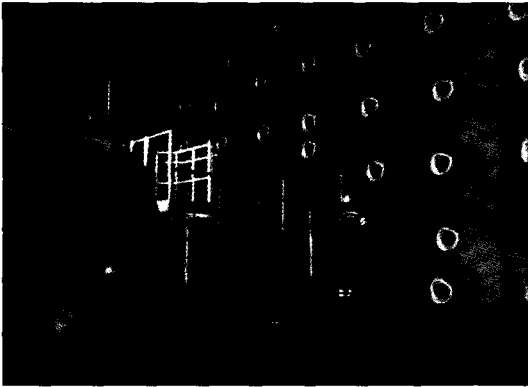


그림 28. 벌크에멀전 charging

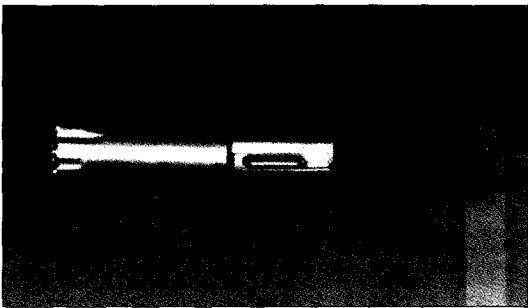


그림 29. 선균열 압굴착 노치장비

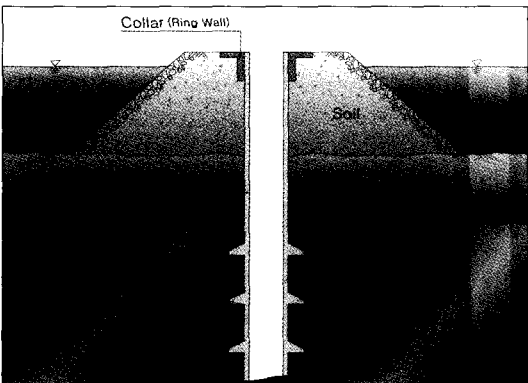


그림 30. 시공시뮬레이션 프로그램

행하고 있다. 또한 선균열 압굴착 노치장비 및 시공기술에서는 발파공해 저감 및 여굴제어 효과가 우수한 노치비트장비 시스템을 개발하여 발파진동을 무진동에 가까운 최소기준 이내로 저감시켜 무진동발파가 어려운 구간의 시공성을 향

상시키고, 비용을 절감시키고자 하였다(그림 29).

하경엔지니어링에서는 “해저시설물 차폐기술 연구” 관련하여 설계표준화 분야의 수직구 설계기술 표준화에 대한 연구를 수행하고 있다(그림 30). 연구방향은 수직구 설계인자 검토 및 보강기술 조사와 실내모형실험을 통한 지반조건에 따른 수직구 주변지반의 응력분석 결과를 근간으로, 현장계측을 통한 수직구 작용하중 파악과 지반 및 지하수조건 변화에 따른 수치해석적 검토를 단계적으로 수행하여, 수직구 설계기술 표준화와 더불어 단면설계기술에 대한 연구를 수행하고 있다.

단우기술단에서는 스파이럴 볼트의 터널 지보재 활용성 연구를 수행하고 있는데, 스파이럴 볼트는 기존 록볼트에 비하여 경량이면서 나선형 형태로 공내 삽입시 몰탈을 선단까지 끌어올려 밀충진으로 선단채움이 용이하고 정착력이 우수하며 압질에 따른 불연속면으로 인한 천공홀이 불량한 경우에도 볼트삽입이 원활하다. 그리고 기존 록볼트에 비하여 최대 인발하중이 훨씬 크게 작용되므로 록볼트로서의 품질 유지와 지반보강 효과를 극대화 시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 지하공간 수직구 터널굴착 공법개발에서는 하부경도가 개설했던 경우 적용이 가능하기 때문에 동일한 요구조건을 갖고 있는 RBM 혹은 RC 공법을 대체할 수 있으며, 타 공법에 비해 굴진 속도가 빠르고 경제적이라는 장점을 갖고 있다. 따라서, RBM 혹은 RC로는 경제성이 떨어지는 심도 영역인 100m 이내의 수직구를 대상으로 할 경우 경쟁력이 기대된다.

4. 조사분야에서의 암반공학분야 연구 개발 동향

윤운생(넥스지오)

암반 공학 분야에서 조사 기술은 영상 분석, 지표지질조사, 시추조사 및 제반 시험과 물리 탐사 등 제반 부문에서 지속적인 발전을 계속해 오고 있다. 특히 최근에는 전기 전자

공학기술과 정보화 기술의 발전으로 이들 기술의 조사 분야에의 접목을 통해 새로운 영역의 창출이 주요한 변화의 양상이 되고 있으며, 기계화 시공의 추세와 함께 이에 대한 조사기술의 연계 발전도 최근 주요 동향 중 하나이다. 최근 조사분야의 최신 연구 동향을 현재 수행되고 있는 연구과제를 중심으로 기술하고자 한다.

(1) 비접촉식, 비파괴형 조사 기술의 확대

일반적으로 활용되고 있는 지구물리탐사 또는 검층 기술 이외에 노출된 암반 상태의 정보를 비접촉식으로 획득하는 레이저 또는 화상 분석 기술 등이 최근 급속히 그 활용 영역이 증대되고 있다. 이러한 비접촉식 조사 기술은 직접 접촉하여 조사하기 어려운 위치의 조사 또는 정량화시키기 어려

운 특성을 원거리 또는 근거리에서 측정하여 정량화 시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

특히 레이저 스캐닝 기술은 최근 암반 공학 분야에서 그 활용도를 높여가고 있는 기술로서, 암반 상태 특히 거칠기, 방향 등 절리 상태에 대한 조사 등 지반 조사 뿐 아니라, 사면의 형상 및 붕락 현황 조사, 터널의 굴착 단면 및 거동 평가, 지하 비축 기지의 용적량 평가 등 그 적용 사례가 급격히 증가하고 있다(그림 31).

(2) 복합 기능화, 자동화 조사 장비의 개발 추진

지반조사 장비 역시 지속적인 개발과 성능의 개선을 보이고 있다. 기존 장비에 추가적인 센서를 부착하여 추가적인 지반 정보를 획득할 뿐 아니라, 서로 관련되어 있는 정보를

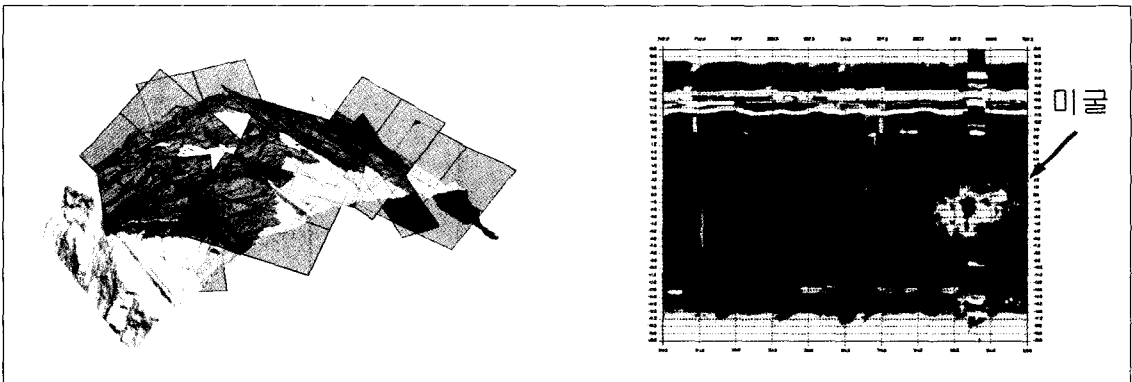


그림 31. 레이저 스캐닝 기술이 암반공학 분야 적용

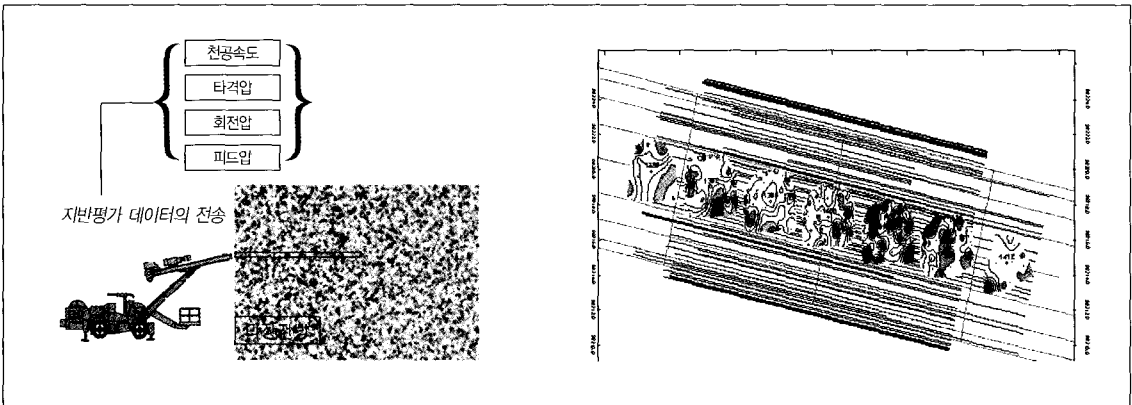


그림 32. 천공데이터 활용시스템 개요 및 현장적용결과

효과적으로 이용하여 기존의 장치의 활용도를 높이고 보다 많은 암반 상태를 인지할 수 있도록 하는 복합 기능화, 자동화 장비가 개발되고 있다.

대표적인 것으로 굴착 공정 중 발파 혹은 보강재 설치를 위해 필수적으로 수행되는 천공 작업시의 천공기의 유압 변화나 천공속도를 분석하여 암반을 예측하는 기술이 대표적인 사례로서, 유럽에서는 천공기 자체 내에 탑재된 시스템을 이용하여 천공시 발생하는 유압변화 등으로 터널 굴진면 전방을 가시화 하고 있으며, 일본에서는 별도 제작된 데이터 로깅 시스템을 점보기에 부착 후 일련의 분석과정을 통하여 천공에너지를 구하고 막장평점이나 화약소비량 등을 예측하고 있다. 최근 국내에서도 이에 대한 연구가 활발하다. 이러한 기술 개발은 별도의 조사 과정을 두지 않고 공정상 필수적으로 수행되는 과정에 조사 장치를 부가하여 필요한 정보를 획득하고자 하는 것으로 추가적인 시간의 소비와 정보의 낭비 없이 효과적으로 암반 상태를 조사하고자 하는 필요에 의해 지속적인 장비의 개선이 이루어지고 있는 분야이다 (그림 32).

(3) 3차원 통합 정보화 분석 및 관리시스템 기술로 진화

암반은 다양한 암석의 특성과 단층 등 지질 구조의 3차원적 분포 특성에 의해 정의되므로, 공간상의 어느 한 점 또는

선, 면에 의해 분석되어 지는 개별 정보에 의해 특성화 하는데 한계가 있다. 따라서, 현재 대표적인 3차원 조사 기술인 3차원 지구물리탐사 및 분석 기술이 이미 현장에서 활용되고 있으며, 비단 해당 부지의 특성화 정보에 그치지 않고, 지반의 상태 변화(이완 또는 오염 등)의 상시 또는 수시 관측 기술로 확대 사용되고 있는 추세이다.

특히 3차원 조사 기법의 개발과 궤를 달리하여, 다양한 차원에서 조사된 자료를 활용하여 정보화 기술과 연계된 통합적인 3차원 지반 상태를 구성하는 지오모델링 기술의 개발과 적용이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 3차원 지오모델링 기술의 발전은 단순한 3차원 가시화의 수준을 넘어 데이터베이스와 연계된 지반 정보의 통합 관리와 공정과의 연계를 통한 관리 시스템으로 활용될 전망이다(그림 33).

5. 암반공학분야의 연구개발 전망

김영근(삼성건설)

최근 암반공학 분야는 도심도 대형 지하공간에 대한 연구를 기반으로 초장대터널, 해저저터널, 지하저장시설과 같은 특수 목적물에 대한 응용연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 지난 20여년 동안 암반공학에 대한 기초적인 연구결과를 바탕으로

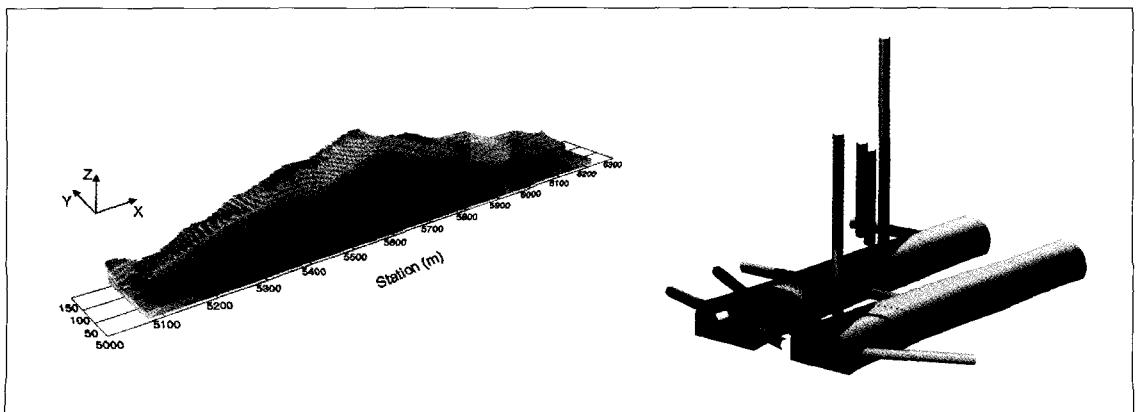


그림 33. 3차원 통합 지오모델링의 활용

산학연 합동연구를 통하여 이루어진 성과라 할 수 있다.

또한 관련분야의 연구과제들이 대형과제로 결합되어 공동으로 연구를 진행함으로써 연구결과를 공유하고 그 시너지효과를 극대화하는 방향으로 자리잡고 있음을 볼 수 있다. 또한 산업계에서는 암반공학관련 분야의 기술개발을 통하여 현장의 문제점을 해결하고 이를 특화하여 신기술·신공법을 개발하고자 노력하고 있다.

암반공학분야에서의 산학연에서 수행되었거나 수행되고 있는 연구동향을 분석하여 봄으로서 향후 암반공학분야의 주요 기술개발 주제는 다음과 같이 전망할 수 있을 것이다.

(1) 고심도의 대형 지하공간 구축기술

50m 이상의 고심도 암반을 대상으로 한 대형지하공간에 대한 사회적 요구가 계속 증가하므로 안전하고 경제적인 공간구축을 위한 기술개발이 필요하다.

(2) 초장대 및 해하저 터널 건설기술

산맥을 관통하고, 해저를 연결하는 초장대 및 해하저 구간에서의 대형 교통인프라구축에 대한 계획이 진행되므로 이에 대한 기술개발이 필요하다.

(3) IT와 결합된 융합 기술

첨단 전자 및 기계산업이 무한히 발전함에 따라 관련 첨단 기술을 현 암반공학분야 기술에 결합하여 새로운 융합기술의 개발이 필요하다.

(4) 조사시험기술의 복합 자동화

불확실성 요소를 포함하고 있는 지질 및 암반에 대한 객관화 및 정량화에 대한 노력과 이의 처리과정에서의 소프트웨어 기술개발이 필요하다.

(5) 현장 응용기술의 통합 시스템화

현장에서의 적용가능하며, 실현가능한 살용화된 기술개발과 조사, 설계, 시공 및 유지관리 단계의 통합시스템 기술 개발이 필요하다.

이상과 같이 암반공학분야의 연구 및 기술개발에 대한 전망을 해보았지만 가장 중요한 것은 관련분야의 상호협동과 노력이라고 할 수 있다. 암반공학관련 기술자들이 끊임없는 연구개발을 통하여 국가 및 사회발전에 기여하고 또한 존경받는 모습을 기대해 본다.

