

암반역학 연구 및 기술동향

암반역학기술위원회

1. 서론

최근 도로, 철도, 고속철도, 지하철과 같은 사회간접시설의 확충과 더불어 암반을 대상으로 하는 프로젝트가 급격하게 증가하고 있으며, 유류, 가스, 폐기물, 농축산물에 대한 지하암반저장에 대한 사회적 요구가 증가하고 있어 암석 및 암반을 대상으로 하는 암석역학(Rock Mechanics)과 암반공학(Rock Engineering)에 대한 최근의 연구동향 및 현황의 관심이 증가되고 있다.

따라서 암석역학 및 암반공학 분야에 대한 지금까지의 연구개발활동에 대한 정리뿐만 아니라 최근 연구동향을 고찰함으로써 앞으로의 암반공학분야에 대한 새로운 방향을 고민하고 연구할 시점이라 생각된다.

초기 암석역학 분야는 자원개발을 위한 광산분야를 중심으로 암석물성, 채굴 안정성 평가 등에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 1980년대 이후 터널 건설이 활발하게 진행됨에 따라 지반조사, 터널 굴착에 관한 연구가 활발하고, 지하공간, 지하비축시설, 폐기물처리시설과 같은 대형 프로젝트가 진행되면서 암반의 상호작용, 불연속 암반에 대한 실험 및 해석적 연구가 활발히 진행되고 있다. 암반공학분야의 연구활동은 관련학회가 만들어지면서 학회를 중심으로 본격적으로 수행되기 시작하였고 학회지 발간과 학술발표회를 통해서 연구결과를 공유하고 정보를 교류하게 되었으며, 이러한 활동을 바탕으로 본 학회내에 암반역학기술위원회가 만들어져 토질공학, 암반공학, 지질공학과 같은 다양한 분야가 서로 협력할 수 있는 장이 만들어지게 되었다. 또한 암반공학분야는 연구의 폭이 넓어지고 적용 대상분야도 점점 다양해지고 있으며, 국가적 프로젝트가 진행됨에 따라 암반, 지반, 지질관련 연구자와 엔지니어들의 참여와 협동이 활발히 이루어져, 암반공학분야는 질적으로나 양적으로 커다란 발전을 이룩하고 있다.

본 고에서는 최근 3년간(2000년~2003년 현재)을 중심으로 암반역학 분야의 연구활동 현황을 분석하고 고찰하였다. 먼저 국내 학회의 논문집에 등재된 논문과 학술발표회서 발표된 논문을 중심으로 연구분야 및 연구현황을 살펴보았다. 그리고 국책연구소인 한국건설기술연구원과 한국지질자원연구원에서 암반공학관련 연구과제를 검토하여 암반공학 분야의 연구현황과 향후 중점과제 등에 대하여 간략하게 고찰하였다. 또한 해외에서의 최근 암반공학 분야의 연구현황을 고찰하기 위하여 오스트리아, 스웨덴, 미국 그리고 일본에서의 일부 대학과 연구소를 중심으로 수행중인 연구과제 및 주요 프로젝트를 소개하였다.

이러한 모든 과정은 한정된 자료와 지식을 바탕으로 작성된 것임을 다시 한번 주지하고 학회차원에서 체계적인 자료수집과 권위 있는 전문가들의 고견이 청취되고 많은 사람들의 의견이 모아져 완성도 높은 보고서가 되었으면 하는 바램이다. 특히 지금이야말로 암반역학기술위원회를 중심으로 하여 암반역학의 발전을 되돌아보고, 암반공학의 미래에 대한 비전을 만들어 가야할 중요한 시점이라고 생각하면서 부족하나마 본고를 준비하였다.

2. 국내에서의 암반공학 연구동향

2.1 학회지에 나타난 연구동향

먼저 최근 암반공학분야의 연구동향을 고찰하기 위하여 2000년 이후에 지반공학회 논문집에 실린 암반공학분야 관련논문을 정리하였으며 이를 표 1에 정리하였다. 본고에서는 관련논문을 암반역학분야와 암반터널과 사면과 같은 암반응용분야 그리고 발파진동과 같은 기타분야로 구분하였다. 해마다 약 6~8편 정도의 논문이 발표되고 있으며, 주로 암석과 절리의 공학적 특성에 대한 실험논문이 주를 이루고 있다. 특히 암반사면에 대한 논문이 증가되고 있는데, 이는 최근 암반사면 붕괴로 인한 문제점이 증가되고 있는 현상을 반영한 것으로 보인다. 또한 암반공학 관련 연구는 대학교나 연구소

표 1. 지반공학회 논문집에 실린 최근 암반공학 관련논문

년도	논문 제목	비고
2000년 (6편)	<ul style="list-style-type: none"> - 암축강도와 풍화도에 관련된 퇴적암의 공학적 특성 - 불연속성암반의 탄성계수에 영향을 미치는 불연속면의 조사인자에 관한 연구 - 발파에 의한 터널주변 암반의 손상영역평가에 관한 연구 - 링전단시험기를 이용한 암석절리의 잔류강도 특성에 관한 연구 - 발파진동이 양생중인 라이닝 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구 - 하중조건별 시험이 가능한 암석절리면 전단시험기의 개발 및 적용시험 	<p>영남대 건기연</p> <p>서울대 인하대 서울대 한양대</p>
2001년 (8편)	<ul style="list-style-type: none"> - 층리면을 고려한 세일의 공학적 특성 - 암석절리면 거칠기의 정량화에 대한 수치해석적 연구 - 퇴적암지반 터널의 이방성 해석 - 세일의 이방성 파괴특성 - 조사창 조사를 통한 절리길이분포의 추정에 관한 연구 - 암반분류방법간의 상관관계에 대한 고찰 - 개별요소법에 의한 암반사면의 안전을 평가 - 국내에 분포하는 암석의 절리면 전단강도에 대한 공학적 성질 	<p>경북대 한양대 경북대 경북대 서울대 자원연 수원대 고려대</p>
2002년 (8편)	<ul style="list-style-type: none"> - 구성방정식을 이용한 화강암 절리면의 주기전단거동 특성 - 거동특성에 따른 사면파괴지수 시스템 - 불연속면의 확률특성을 고려한 암반사면의 평면파괴확률 산정 - 암반사면의 평면파괴에 대한 신뢰성 해석 - 암석의 절리면 거칠기 정량화 기법 개발을 통한 절리면 전단강도 특성 분석 - 암석의 비선형 거동해석을 위한 손상모델 개발 - 손상모델을 이용한 심부터널 주변 암반의 손상영역 평가 - 간접인장강도시험을 통한 이방성 암석의 인장강도 특성 	<p>철기연 서울대 건기연 동국대 고려대</p> <p>서울대 서울대 경북대</p>

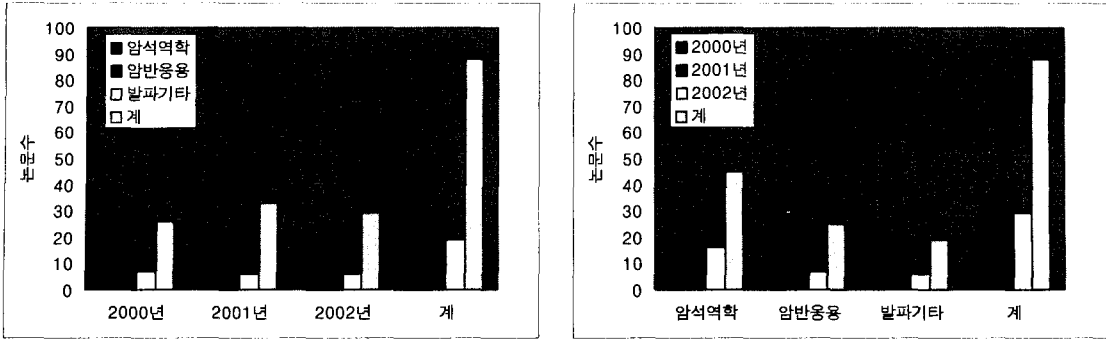


그림 1. 암반공학관련 논문발표 현황

에 주로 수행되는데, 이는 암반분야의 기초분야에 대한 기본적인 연구를 수행하기 때문인 것으로 판단된다.

암반공학 관련학회에 기고된 2000년 이후에 논문을 정리하여 분석하였으며 이를 그림 1에 나타내었다. 먼저 연도별 논문발표현황을 살펴보면 매년 약 30편 내외의 논문이 발표되고 있고, 연도별로 증가는 크게 나타나지 않음을 볼 수 있으며, 전체적으로는 2000년 이후 암반공학관련 논문이 총 88편의 논문이 발표되었다.

또한 분야별 논문발표현황을 살펴보면 암석물성, 절리면 특성, 해석모델 등과 같은 암석역학분야 논문이 전체의 50%를 차지하고 있으며, 이중에서는 특히 암반불연속면(절리)에 대한 다양한 실험과 해석이 수행되고 있다. 또한 터널, 암반사면, 지하공동과 같은 암반응용분야 논문이 30% 그리고 발파, 채광, 환기 등과 같은 기타분야 논문이 20%를 차지하고 있음을 알 수 있다.

다음으로는 최근 암반공학관련 학술발표회에서 나타난 주요 연구주제를 분석하여 보았다.

• 지질공학 및 조사분야

새로운 기술이 가장 활발하게 도입되고 현장에 적용되고 있는 분야로서 특히 지질조사시 조사자료의 정량화를 위한 화상처리 및 영상기법을 이용하는 기술과 새로운 암반분류를 시도하려는 연구가 진행되고 있으며, 석회암, 단층 등과 같은 문제지역에 대한 다양한 지반조사가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

• 암석물성 및 시험분야

이 분야는 암석절리(Rock joint)에 대한 역학적-수리적 거동에 대한 실험연구가 심도 있게 진행되고 있으며, 특히 시추코어를 이용한 초기응력측정방법이 소개되어 기존의 현장시험결과와 비교 분석되고 있다. 또한 암석과 흙의 문제 그리고 이방성에 대한 실험도 수행되고 있다.

• 모델링 및 수치해석분야

암반블록 및 절리에 대한 모델링 및 이에 대한 해석적 연구가 주를 이루고 있으며, 특히 기존의 개별요소법을 보완한 DDA에 대한 연구가 진행되고 있다. 이외에도 암반의 역학-수리-열의 상호작용 및 발파에 의한 암반손상영역에 해석적 평가가 수행되고 있다.

- 터널 및 지하공동분야

터널은 대단면 장대터널, 국내 최장터널, 근접 병설터널과 같은 중요 사례연구가 주를 이루고 있으며, 지하 저장고, 지하 하수처리장, LPG 지하 저장공동과 같은 지하공동 프로젝트에 대한 연구가 진행됨을 알 수 있다. 또한 방사성 폐기물 지하처분장에 대한 구체적인 연구가 상당히 진행되고 있으며, 최근 LNG 지하저장에 대한 연구가 새롭게 진행되고 있다.

- 암반사면 및 굴착분야

암반사면은 최근 다수의 붕괴사례로 인한 사면안정성 평가 및 보강에 대한 사례연구가 많으며, 유지관리를 위한 절토사면 관리시스템 개발 및 GIS를 이용한 평가에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 또한 기존의 사면해석과 달리 확률론, 퍼지이론을 이용한 해석연구가 수행되고 있다.

- 발파 및 진동분야

최근 발파분야는 신기술에 대한 개발이 활발한 상태로 각각의 공법에 대한 현장적용사례 및 특성에 대한 연구개발 사례보고가 증가하고 있다. 최근에는 발파설계 자동화를 위한 연구가 진행되어 이미 상품화된 상태이며, 발파진동 및 소음에 대한 문제는 현장사례 발표가 주를 이루고 있으며, 최근 암발파 기준에 대한 개선작업이 진행 중에 있다.

- 신기술 및 기타분야

퍼지, GIS 등과 같은 다른 분야의 신기술을 암반분야에 응용하려는 연구가 계속적으로 진행되고 있으며, 최근 터널내 환기/방재에 대한 관심이 증가하고 있어 이에 대한 연구가 활발해짐을 알 수 있다. 그리고 지하수 오염, 폐수처리와 같은 환경문제에 대한 연구도 수행되고 있다.

2.2 국책연구소에서의 암반/터널분야 연구현황

2.2.1 한국건설기술연구원의 연구현황

한국건설기술연구원 지반구조물그룹은 새로운 지하공간개발에 대한 요구에 적절하게 대응하기 위하여 터널 및 지하공간에 대한 연구를 활발히 하고 있으며, 이를 위해 지반굴착 및 보강기술에 관한 개발연구, 터널 및 지하공동의 해석·설계기술에 관한 연구, 터널 및 인접 구조물 안전진단 기술에 관한 연구, 신 지보재 및 보강재 활용기술에 관한 연구 등을 중점적으로 수행하고 있다. 이밖에도 터널 갱구사면 안정화 기술, 산사태 예측 및 억제기술들도 함께 연구개발하고 있으며, 최근에는 인공 지능기술, 지식기반기술, 친환경기술, 정보화기술 등을 접목시키려는 노력을 하고 있다. 현재까지 한 국건설기술연구원 지반구조물그룹에서 수행하였거나 수행하고 있는 주요 연구과제를 정리하면 표 2와 같다.

대표적으로 첨단기법을 이용한 연구분야에서는 국가지정 연구실 사업으로 “첨단기법을 이용한 터널 정보화 설계/시공 기술개발”에 관한 연구를 진행중이다. 이 연구에서는 ITIS(Intelligent Tunneling Information System)을 개발하여 인공지능기법과 VR(Virtual Reality)기법을 터널의 설계·시공에 적용하고자 시도하고 있다. 이는 현재까지 연구원에서 축적되어온 연구결과를 기반으로 한 터널 정보화 설계·시공에 관한 연구이다.

특히 불연속면과 같은 지반의 불균질성과 불확실성을 예측하는데 3차원 GIS 및 가상현실(Virtual

표 2. 한국건설기술연구원의 암반/터널분야 주요 연구과제

고속전철구조물 안전성 기술개발(터널부분)
도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 연구
첨단기법을 이용한 터널 정보화 설계/시공 기술개발
철도터널 통풍구 수직구 굴착공법 기술개발
Fuzzy 추론을 이용한 터널 정보화 설계/시공 기술 개발
음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴 조사 기술개발
광섬유 센서를 이용한 구조물 계측기법 개발
복개터널 구조물의 거동해석 및 설계요소기술 개발
복개터널 구조물의 성토하중 경감 및 라이닝 설계기술 개발
석회 공동 보강공법안 제시 연구
고성능 숏크리트 라이닝의 개발
석분토를 이용한 지하공동의 친환경적 충전재 및 충전보강공법 개발
내하체 조립식 영구앵커 인발력 특성평가
터널지반 및 시공정보 D/B구축
초장대 터널건설을 위한 터널막장 주변 안정성평가 및 배수시스템 개발

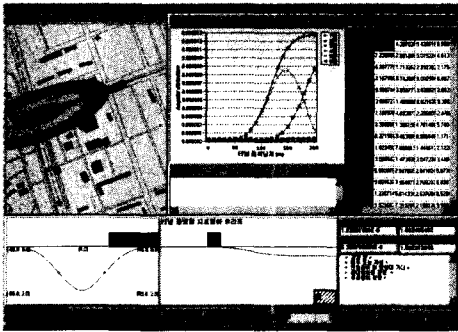


그림 2. 2차원 침하예측



그림 3. VR을 이용한 터널갱구부

Reality, VR)이 유용할 수 있다. 또한 가상현실에 의해 터널 설계·시공을 수행하고 불리한 지반조건으로 인한 사고를 방지하고 시공자료의 D/B 도구로 활용하기 위한 연구를 수행하고 있다. 다음은 터널 분야에 가상현실 기법을 적용한 사례들이다.

또한 터널 계측분야에서는 ITIS의 터널 시공관리 및 계측 모듈 개발의 일환으로 터널 막장 전방지질예측 연구를 수행하고 있다. 터널 굴착이전의 선행변위에 대한 정량적인 계측과 평가 기술이 필수적으로 요구되고 있다. 또한 막장전방의 지질변화에 따른 변위양상을 파악하여 막장전방의 지질상태를 추론하는 것이 필요하다. 이러한 연구에 필수적인 터널 막장 전방의 선행변위를 계측하기 위한 시험시공이 수행중이다.

터널 지보분야에서는 “고성능 숏크리트 라이닝의 개발”에 관한 연구가 진행중이다. 본 연구에서는 숏크리트의 시간의존적인 경화특성을 고려한 이론적 해석과 수치해석에서 사용되는 숏크리트 매개변수들에 대한 민감도 분석을 수행하고 있다.

이를 통해 지반과 숯크리트의 상호작용을 분석하여 지반 및 시공조건에 따라 요구되는 숯크리트의 특성을 파악하고 이를 터널의 설계에 실제 적용할 수 있는 방안을 강구하고 있다. 두 번째로 현장 및 실내실험을 통해 고성능 숯크리트를 개발하는데 필요한 각종 재료(급결제, 혼화제 등)에 대한 검토, 숯크리트 재료의 국산화 및 신재료 개발을 목표로 하고 있다. 세 번째로 숯크리트의 강도를 추정 하는데 적용되는 pin penetration test 등과 같은 새로운 품질관리 방안, 마지막으로는 급결제와 같은 숯크리트 재료를 정량적으로 조절할 수 있는 숯크리트 장비의 개발을 목표로 하고 있다.

건설교통부 산·학·연 연구과제인 “미래형 초장대 터널의 최적화 건설기술 시스템개발 연구”에서는 급속시공을 위한 터널 막장주변 안정성 평가 기술 및 초장대 터널용 배수 시스템 개발에 대한 연구를 수행하고 있다. 본 연구에서는 터널 시공중 붕락사태 조사 및 요인분석, 비파괴적 안정성 평가 시스템, 자료분석 및 평가기법 등을 개발한다. 또한 초장대 터널의 배수시스템 개념을 확립하고 flowform과 같은 신개념의 배수시스템을 적용하여 타당성을 검토하고자 한다.

터널 조사기술 분야에서 “음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴조사기술 개발” 연구가 수행되었다. 개발된 시스템에는 해머 타격음 분석을 위한 소프트웨어, 자동 해머타격 및 음향 측정장비 등이 포함된다. 또한 해석결과의 정량적인 평가를 위해 타격실험 지점의 건전성을 나타내는 지표로써 건전도 지수를 제안하였다.

그리고 터널의 보수·보강 및 유리관리분야에서는 터널의 안정성을 저하시키는 터널 배면 공동의 신속한 보수·보강을 위한 뒤채움재에 대한 연구를 수행하였다. 터널 변상의 형태에 따른 분류, 원인 및 현황 조사/분석을 실시하였으며, 터널 배면공동 뒤채움용 일반 모르타르와 경량기포 모르타르를 개발하여 뒤채움재의 현장 적용성을 시험하였다.

2.2.2 한국지질자원연구원의 연구현황

한국지질자원연구원 암반공학팀에서는 사면·터널과 같은 지상 및 지하구조물의 설계·시공·유지 등의 암반공학 기술과 관련한 암석물성시험, 현장암반 변형특성 및 초기지압 측정, 암반평가와 지보 패턴 설계, 전산모델링 해석을 통한 구조물의 안정성 평가, 지반침하 등의 환경피해 방지 및 복원기

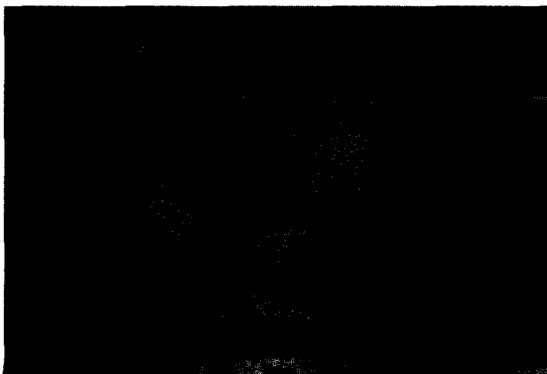


그림 4. 숯크리트패널 타설 시험장면

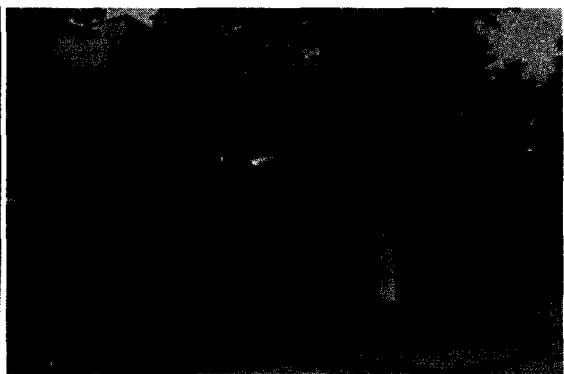


그림 5. 석분토 계량 및 교반 플랜트

술 등을 수행하고 있으며, 또한 지반진동·소음·비산을 조정하는 제어발파 및 노후 구조물의 발파해체기술을 연구 개발하고 있다. 각 연구분야 및 주요실적을 간단히 소개하면 다음과 같다.

■ 핵심 추진 연구과제

① 이산화탄소 대수층 저장을 위한 지층암반의 거동특성 연구

지구 온실화 및 각종 환경오염물질의 처분을 위해 이산화탄소의 대수층 저장이 새로운 연구과제로 부상되는 가운데, 대수층의 이산화탄소 처분능력 평가와 처분에 필요한 핵심요소기술의 확립을 위해, 1단계(3년), 2단계(3년), 3단계(4년) 등 총 10년의 계획으로 진행될 이 과제는, 1단계에서 기본특성연구, 2단계에서는 실험실 규모의 연구 및 균열망 해석 연구, 그리고 3단계에서는 현장시험연구 및 기반기술확립이 수행될 예정이다.

표 3. 한국지질자원연구원의 주요 연구분야

분 야	주요 연구분야
지반조사 및 평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현지 암반의 공학적 분류 및 평가 ○ 암석의 물리적 및 역학적 특성시험 ○ 지반조사자료의 정보화 및 3D 영상화 기술개발
현지암반 시험	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초기지압 측정 : 수압파쇄법, 응력개발법 ○ 암반 변형률 측정
구조물 안정성 해석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전산모델링에 의한 구조물의 안정성 평가
발파기술 및 환경영향평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 플라즈마 발파기술 개발 ○ 발파진동에 의한 구조물 영향평가
구조물 발파해체 기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고층건물 및 콘크리트 구조물 철거를 위한 발파해체기술 ○ 발파해체시 진동, 폭풍압, 분진 등의 예측 및 환경영향평가

표 4. 한국지질자원연구원의 주요 연구실적

분 야	주요 연구실적
암반공학	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사면의 현지암반 평가 ○ 지하 암반에 건설된 pilot cavern을 통한 암반내 냉동저장 기술개발 ○ 지하 암반내 하수처리장 건설을 위한 지반조사 ○ 시추자료 DB S/W GeoScope 개발 ○ 철도사면 관리 S/W Slopman 개발 ○ 암석물성시험자료 처리 및 설계입력자료 관리 S/W RocCal 개발 ○ 고속도로 및 일반 사면의 안정성 검토 ○ 지중변위 자동계측기(Time Domain Reflectometry) 개발 ○ 초기지압 측정
발파공학	<ul style="list-style-type: none"> ○ 건물 발파해체를 위한 제어발파 설계기술 개발 ○ 진동으로 인한 인과관계 검토기준 및 피해액 산정방법 개발 ○ 플라즈마 발파장치 개발 ○ 형강재 절단용 성형폭약기술 개발(특허) ○ 채석용 워터젯트 슬로터 개발(특허)

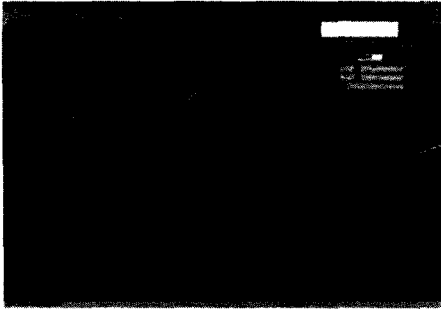


그림 6. 지반정보 3차원 영상화

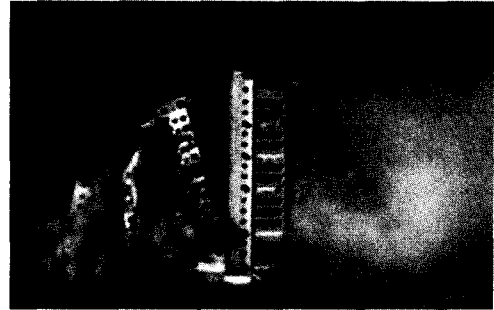


그림 7. 건물발파해체

② LNG 지하저장기반기술개발 및 Pilot plant 운영결과분석

LNG의 지하 암반 내 저장은 세계적으로 상업화되지 못한 기술로서, 산업계 및 외국과의 공동 연구를 통하여 세계 최초로 rock cavern 내에 LNG를 저장하기 위한 기반기술을 개발하고, pilot 규모의 지하 저장고 운영을 통해 그 결과를 분석, 상업적 규모의 지하저장고 건설을 위한 핵심요소기술을 개발코자 한다.

③ 핵폐기물 지하저장을 위한 지반안전유지기술연구

수년 전부터 꾸준히 수행해 온 연구과제로서, 핵폐기물의 안전한 지하저장을 위한 핵심 기술, 특히 Thermo-hydro-mechanical coupling에 대한 연구가 집중적으로 수행될 예정이며, 이와 함께 건설 이후에는 접근이 불가능하다는 점에서 장기적인 monitoring을 위한 새로운 탐사기법 및 장비의 개발을 연구목표로 하고 있다.

④ 석회석 광산의 갱내 안전유지기술 연구

산업자원부의 지원으로 수행되는 연구과제로서, 국내에 상당수 산재하고 있는 석회석 채광장의 갱내 작업장에 대한 국가차원의 평가와 안전성 제고 및 설계지침을 마련코자 하는 연구사업이다.

2.3 암반공학분야 주요 연구 이슈

2.3.1 LNG 지하동굴 저장기술

LNG(-162℃)를 지하 동굴에 무복공 상태로 저장하려는 국외의 많은 시도가 있었지만 극히 일부만이 성공을 거두었다. 주변 암반에 생성되는 열응력으로 암반내 대규모 균열이 발생하였으며, 이에 따라 가스 누출 및 LNG와 암반 사이의 열유속의 증가로 인한 저장물질의 과도한 기화가 실패의 원인이었다.

GEOSTOCK사와 SN TECHNIGAZ사는 안전하고 경제적인 대안으로 복공식 암반 Cavern에 LNG를 저장하는 새로운 개념을 수 년 동안 연구해왔다. 이론적인 해석과 설계를 거쳐, 1990년대 후반에 몇 가지 시험과 실증시험을 포함한 검증 프로그램을 수행하였다. 즉, 결빙으로 인한 절리의 영향(변

위 측정), 저온하 절리내 지하수 유동 시험(지하수 유동조건에 따른 절리내 지하수 동결 연구), 실험 규모 내조시스템(Containment System) 모델의 변형거동이 연구되어 저장 개념에 대한 효용성이 입증되었다.

① 복공식 LNG 지하저장시설의 개념

본 프로젝트의 기본개념은 다음과 같은 요소들의 조합을 기반으로 하고 있다.

- 열충격으로부터 암반을 보호하고 LNG를 안전하게 저장하기 위한 내조시스템
- 암반이 동결되기 전에 주변 지하수를 배수하고 내조시스템에 정수압이 걸리는 현상을 방지하기 위해 저장시설 운영 초반 몇 개월간 사용될 배수시스템

암반공학적 측면에서는, 열역학 및 수리지질 모델을 적용하여 0℃ 등온선의 주변 암반내 전파, 암반내 지하수 이동 및 얼음의 형성과 유기 열응력을 파악한다. 암반내에 존재하는 균열 및 절리와 같은 불연속체들이 온도 강하시 이완구조체로서 역할을 하여 기존 절리들을 확장시키는데 이러한 현상들은 역학적 수치모델로서 설명된다. 저온으로 인한 암반내 새로운 균열의 생성은 저장 냉각속도를 제어함으로써 조절할 수 있으며, 대부분의 암반이 록볼트 등으로 충분히 보장된다면, -80℃까지도 지탱할 수 있는 것으로 알려져 있다.

결빙에 대한 유체 유동해석과 관련 실험을 통해, 운영초기에 Cavern 주변 암반의 지하수를 일시적으로 배수하기만 하면, 콘크리트 라이닝 배면에 정수압이 형성되거나 얼음이 형성되는 것을 방지할 수 있다는 결론에 이르렀다.

0℃ 등온선이 Cavern 벽면으로부터 충분히 전파되면, 배수를 중단하거나 중단 후 물을 재주입하여 결빙층이 신속히 형성되도록 한다. 결빙 두께가 약 1~2m 정도면 외부의 간극수압을 충분히 견딜 수 있으리라 판단되며, 필요한 배수기간은 현장의 수리지질학적 조건에 따라 수 개월에서 1년까지 소요된다.

② LNG Pilot Cavern

연구용 Cavern까지는 기존 수평터널을 통해 진입하며 실험저장동굴의 천장은 지표에서 약 20 m 깊이에 위치하고 있다. 내조시스템을 완벽하게 설치하기 위해 Cavern 입구는 콘크리트 벽체로 마감된다. 부가적으로 Cavern 입구 상부에 계측제어 장치, 맨홀, 배관을 부착하기 위한 플랫폼이 설치된다. 완공된 후 연구용 Cavern의 내부 제원은 3.5 m x 3.5 m 폭에, 10 m 길이로 용량은 110 m³ 이다. 연구용 Cavern에는 주변 암반내에 배수공이 설치되어 있다.

현재 개발되고 있는 추가적인 기술들은 다음과 같다. 즉, 암반내 유기 열응력과 초기 지중응력이 결합된 저장기준을 세분화하기 위한 암반공학적 메커니즘 개발, 열응력으로 인한 균열발생 현상의 규명, 암반내 결빙층의 두께 및 거리를 파악하기 위한 레이더 토모그래피 물리탐사 기법의 개발 등이 이루어지고 있다.

2.3.2 대심도 터널에서의 과지압 문제

터널 시공이 대심도화 됨에 따라 해외에서 특수한 경우에만 발생하였던 암반공학적 문제들이 국내에서도 발생되고 있는데, 이중 과지압 구간에서의 암반 Spalling /Popping이 주요 이슈로 떠오르고 있다.

일반적인 주요 터널 및 지하저장 동굴의 굴착문제는 굴착으로 인한 주변 암지반의 이완(Loosening)이지만, 과지압 암반지반의 굴착문제는 굴착후 막장이나 천단/측벽으로부터 암반이 시간에 따라 점차 판상으로 떨어져 나가거나(Slabbing), 조각상으로 떨어져 나가(Spalling)는 문제로서, 찢어지는 소리 때문에 Popping이라 명명하기도 한다. 더욱 과도한 과지압하에서는 전형적인 보강을 해도 계속해서 밀려들어와 결국 대규모 파괴로 이어지는 팽창(Squeezing)문제 또한 발생할 수 있다.

Martin의 기준에 따라 검토한 결과 Spalling 취성파괴 기준에 해당하였으며, 파괴 깊이 또한 현장 파괴 양상과 유사하였다. 국내에서도 터널의 대심도화에 따라 암반의 초기응력을 측정하여 이러한 과지압 현상을 설계단계에서 검토하여야 할 것이며, 관련 암반공학적 기술개발이 요구되고 있다.

3. 해외에서의 암반공학분야 연구동향

3.1 해외 학술지에 나타난 연구동향

본 글에서는 암반공학을 주요 주제로 하고 있는 국내외 주요 전문학술지를 대상으로 2000년 이후 연구 동향을 살펴보고자 한다.

세부 연구분야를 고려함에 있어서 2001년에 개최된 제 38차 U.S. Rock Mechanics Symposium (Washington, D.C., U.S.A., July 10 - 12, 2001)에서의 분류기준을 참고하여 표 5와 같이 주제를 분류하여 분석에 사용하였다.

연구 논문을 주제별로 분류함에 있어서 명확히 주제가 결정되지 않는 논문들도 있었으며 이 경우 주관적 판단 하에 분류하였다. 예를 들어 수치해석 논문의 경우, 터널이나 사면의 안정성 해석에 적용한 경우라면 각각 터널과 사면분야에 넣었지만 새로운 모델이나 개념을 위주로 한 논문인 경우에는 수치해석분야에 포함시켰다.

① International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences(IJRMMS)

IJRMMS의 경우에도 전반적으로 각 분야가 골고루 분포하였으며 이 중 암반 특성화 부분이 47편으로 가장 많이 나타났다. 다만 저널의 성격상 광산분야의 논문도 계속해서 게재되는 것이 국내의 경우와 다름을 알 수 있다. IJRMMS의 경우 초창기(1964)에 비해 투고되는 논문 수 및 발행 논문 수가 3배 이상 증가하였으며 논문 편당 저자수도 세배 정도 늘어난 것으로 나타났다 (J.A. Hudson, 2003). 이는 개인별로 연구를 진행하던 초기와 달리 국제적으로 각 분야의 전문가들이 공동 연구를 수행해야 하는 특성으로 나타난 것이다. 예를 들어, 열-수리-역학적 상호작용(THM)과 관련된 연구의 경우 혼자서 모든 부분의 전문가일 수 없기 때문에 공동 연구는 필수적이라고 할 수 있다.

또한 인도와 중국의 경우 IJRMMS 특별호를 발행할 정도로 많은 발전을 하고 있는 실정이다. 인도

표 5. Topics of rock mechanical researches

Main Topics	Subtopics
Infrastructure	Blasting Mechanical excavation & drilling Rock support Underground structures - civil Tunnelling Slopes stability
Rock mass characterization	Rock physics Rock characterization & data management Laboratory testing In-situ stress, hydraulic fracturing Rock mass classification Seismicity
Joints and fractures	Fracture & fluid flow Fracture mechanics Characterization of joints & fractures
Waste repositories	Coupled THM analysis Rock mechanics of waste repositories Engineering barrier systems
Modelling	Modelling of fractured(jointed) rock masses Numerical modelling
Others	

의 경우 Vol. 31(1) Indian Rock Mechanics 특별호를 냈고, 중국은 Vol. 37(3), Rock Mechanics in China 특별호를 발행하였는데, 머지않아 한국 특별호가 발간되기를 기대해 본다.

② Rock Mechanics and Rock Engineering (RMRE)

RMRE의 발행 논문수는 IJRMMS에 비해 적으나 역시 영향력 있는 학술지이다. RMRE의 경우 논문수가 상대적으로 적어서 2000년도에서부터 2003년도 최근호까지의 자료를 가지고 분석하였다. RMRE의 경우 Infrastructure 부분이 논문 수에서는 가장 많은 것으로 나타났다. RMRE의 경우 병렬 처리를 이용한 수치해석에 관련된 논문이 유일하게 소개되었으며 앞으로 이 분야에 대한 연구도 3차원 불연속암반의 THM 모델링 분야의 연구와 병행하여 진행될 것으로 생각한다.

③ Tunnelling and Underground Space Technology (TUST)

TUST는 터널 및 지하공간의 조사, 설계, 시공 및 유지 관리와 관련된 기술 및 이론을 심고 있으며 다른 저널에 비해 안전(방재) 관련 논문이 많은 것이 특징이다. TUST의 경우 서론에서 언급한 카테고리리를 적용하기가 어렵기 때문에 소주제별로 정리하였다. 88편의 논문 중 35편이 터널에 관한 것인데 이 경우 각종 사례 및 시공/유지관리와 관련된 내용들이 다수 포함되어 있다. 안전의 경우 10편이 수록되었으며 터널내 화재와 관련된 연구가 다수 수행되고 발표되었다.

1998년 미국암반공학회(ARMA, American Rock Mechanics Association)는 "New Directions for U.S. Rock Mechanics"라는 포럼을 개최하였다. 이 포럼에서 암반공학 분야의 당면 과제 및 미래 연

구 방향에 대한 내용을 다루었으며 이 결과를 IJRMMS에 발표하였다. 이 포럼의 토론 주제는 (1) 미국 내 암반공학의 전략적 비전, (2) 당면한 중점 과제의 발제 및 기술, (3) 이러한 주제에 대한 연구의 역할, (4) 거론된 주제에 대한 핵심 연구 분야로 이루어졌다. 이를 근거로 암반공학 분야의 당면 과제 및 추후 연구/개발의 방향에 대해 살펴보면 다음과 같다.

■ 주요 연구주제

- 균열암반 (Fractured media)
- 불확실성/스케일링 (Uncertainty & scaling)
- 이미징/측정 (Imaging & measurement)
- 유체/암반 (Fluids & rocks)
- 연약암반 (Weak rock engineering)
- 암반파괴 (Catastrophic rock failure)
- 연구를 위한 학계, 산업계, 정부기관의 역할 (Research Roles of Industry, Government and Academia)

■ 추후 연구방향

각 분야의 공통된 내용은 '현장 불연속암반 특성화에 대한 근본적인 개선 (fundamental improvements in in-situ rock mass characterization)'이 가장 중요하다는 것이며 대규모 암반으로부터 타당한 정보를 확보하는 것이 발전의 선행조건임을 강조하였다. 이 경우 원격 이미징 및 지반 비파괴 검사/평가에 대한 연구 및 적용이 경제적이면서 실현가능한 정보들을 제공할 것이다.

각 포럼 참가자들은 또한 불확실성을 합리적인 방식으로 다룰 수 있는 추계론적 기법의 구현에 대한 연구가 필요하다고 제시하였다. 결국 '불확실성이 존재하는 암반으로부터 얼마만큼의 정보를 어느 정도의 신뢰도를 가지고 확보할 수 있으며 이를 적용할 수 있는 모델을 개발할 수 있는가?' 라는 것이 주된 연구 주제가 될 것이다.

해외학술지를 위주로 최근의 암반공학 분야 연구동향을 분석하였고 이로부터 앞으로의 연구 방향에 대한 제안이 이루어질 수 있을 것으로 본다. 무엇보다도 국내외적으로 인프라 구축사업이 완료되어 감에 따라 궁극적으로 토목관련 산업이 축소될 것이라는 지적과 함께 이에 따라 전문인력의 수요가 줄 것이라는 예측도 있다.

반면 장비성능의 향상으로 인하여 보다 복잡하고 현실적인 문제를 해결하려는 도전이 이루어지고 있다. 예로 컴퓨터 속도의 급속한 증가, 계측장비의 정밀성 증가 및 크기의 감소, 시각화 장비 성능의 급속한 발전 등을 들 수 있다. 또한 다른 전공분야의 이론 및 기술을 적용하는 예가 늘고 있다. 가령 X-ray의 이용, 인공지능망의 사용, VR(Virtual Reality)의 도입, 병렬 프로세서의 사용, 금속 및 합성 수지의 신물질 사용 등이 예가 될 수 있을 것이다. 오히려 다양한 전문지식에 대한 수요가 늘고 이와 함께 이를 통합할 능력이 있는 고급 전문가의 수요가 증가할 것으로 예측된다. 국외에서는 암반물성의 불확실성으로 인하여 해결이 어려운 문제로 고준위 핵폐기물의 지층 처분, 장기간 지하수 유동

및 오염물질 확산 등의 문제를 해결하기 위하여 막대한 예산을 사용하고 있다. 국내의 경우 (1) T-H-M-C 상호작용 연구를 위한 정밀 실내 시험 및 수치해석, (2) LNG 지하 저장을 위한 기반 기술 확보, (3) 절리면 거칠기 정량화 및 제어 전단시험, (4) 추계학적 기법을 사용한 암반 불연속면 특성화, (5) 제어발파 기법 향상, (6) 한국형 기계화 굴착공법 확립 등의 연구 주제에 대하여 특히 관심이 큰 것으로 파악된다.

3.2 오스트리아에서의 암반 및 터널공학 연구동향

본 고에서는 오스트리아의 대표적인 암반공학 연구기관인 터널 및 암반공학 연구소(TU-Graz 대학)에 대한 주요 연구시설 및 최근 연구내용에 대한 소개를 하도록 하겠다. 오스트리아 그라쯔대학 터널 및 암반공학 연구소는 12년 전 오스트리아 정부지원 및 건설과 관련된 기구에서 전문화된 터널 및 암반관련 연구 및 교육의 필요성으로 설립된 오스트리아 내에서 유일한 연구소이다. 터널 및 암반과 관련된 연구는 직·간접적으로 지질공학연구소(Institute of Engineering Geology)와 지반공학연구소(Institute of Geotechnical Engineering)와 공동으로 연구를 수행하며 서로 협력관계를 맺는 3G(Geotechnical Group Graz)라는 공동의 엔지니어링 회사를 통해서 실무와 관련된 각종 실용적인 연구들을 수행하고 있다.

① 터널 모니터링 데이터 분석 방법론 개발

3차원 절대 계측을 통해 얻어진 터널 내공 변위를 이용해서 전방의 연약대와 파쇄대 등의 위치를 파악할 수 있는 방법론을 개발하였으며, 현재는 연약대의 방향성 등과 규모 및 특성 등이 변위 경향에 미치는 영향을 연구 중에 있다.

한편, 3차원 계측 결과를 이용할 수 있는 Geofit이라는 3차원변위 분석 전용 프로그램을 개발하여 이미 상용화하였다. 본 시스템에서는 시공 중 얻어지는 실시간 3차원 변위결과를 통해서 내공변위 회귀식의 파라미터 뿐만 아니라 막장전방의 연약대, 변위 Stereographic Projection 등 다양한 결과들을 얻을 수 있도록 구성되어 있다. 또한 Top Heading, Bench Excavation, Temporary Invert 타설 등 시공 과정을 고려하여 몇 점의 실시간 계측결과를 토대로 향후 발생 가능한 내공변위를 예측할 수 있고, 실제 여러 현장 결과를 비교해서 매우 신뢰도가 높은 예측이 가능한 시스템을 개발하였다. 또한 막장에서 발생될 내공변위를 사전에 예측할 수 있는 전문가 시스템도 현재 개발되어 실용화를 준비하고 있다.

② 터널 지보재 거동연구 및 신지보재 개발

록볼트의 전단특성을 강화시켜 최종 록볼트 축방향 Tension을 증가시킬 수 있도록 록볼트 굴곡특성을 다양하게 변화시킨 록볼트를 개발하여 실험실 Pull-out test 및 실제 현장 타설 인발시험, 수치해석 등을 통해서 실용성을 입증한 연구를 수행하였다. 또한 Squeezing ground나 연약 암반 등 슛크리트에 하중이 많이 가해져서 파괴가 발생하는 경우, 이를 막을 수 있는 가축성 Membrane인 LSC(Lining Stress Controller)를 개발하여 몇몇 현장에 직접 적용해서 좋은 결과를 얻었고, 주로 응

력이 많이 발생되는 대심도 터널에 적용 중에 있다.

③ New Rock Mass Classification

기존 터널 설계 시 문제가 되는 RMR이나 Q-System에서의 암반에 대한 확실적인 상수 정의를 탈피하기 위해서 RMT(Rock Mass Type)이라는 새로운 개념을 도입하여 실제 터널 거동현상(System Behavior)에 의한 암반을 분류하여 시공중 결과를 Feed Back하여 지보를 결정하는 새로운 형태의 암반분류시스템을 개발하였고, 현재 NATM 개념을 새롭게 변화시키는 차원에서 New Austrian Guideline을 만들고 있고, 이러한 새로운 암반분류 시스템이 Guideline에 적용될 예정이다.

④ 터널 보강시스템 개발

대구경 Tube Umbrella, 파이프 루프 공법 등에 대한 천층 터널에서의 보강 Mechanism 및 거동 등을 현장 계측과 실험실 모형실험, 수치해석 등으로 규명하고, 궁극적으로 천층 터널 시공시 Guideline을 만들 예정에 있고, 현재 이에 대한 실험 및 계측 등 결과를 얻고 있는 시점이다. 한편, 터널 막장보강재(Face Bolt, Fiberglass Bolts 등) 등의 거동과 막장 안정성에 미치는 영향, 단계별 굴착과 이러한 막장 보강을 통한 전단면 굴착공법과의 역학적, 경제적, 시공성 등의 비교를 통해서 합리적인 공법 선정의 가이드라인을 연구 중에 있다.

⑤ Phyllite 암반에서의 터널 역학적 거동

Phyllite가 주로 구성되어 있는 연약 암반에서 터널 거동을 분석하기 위한 지질공학적, 역학적 특성을 찾고 이를 Phyllite 암반에서 시공 중인 터널 거동을 분석하여 Phyllite 암반 터널의 거동을 규명하는 연구를 수행 중에 있다. 현재 오스트리아 내에서 문제가 되는 몇몇 현장이 대부분 Phyllite 암반 파쇄대에 의한 것이기 때문에 이에 대한 연구를 수행하고 있다.

⑥ 터널 모형실험에 의한 파괴거동

파쇄대나 연약대가 있는 터널 거동을 실험으로 증명하기 위해서 2축(Biaxial Loading) 실험을 수행하여 파괴거동을 분석하고 있으며, 주기적인 절리구조를 갖는 암반 터널 파괴현상을 규명하는 연구도 수행 중에 있다.

⑦ 터널 모형실험에 의한 파괴거동

파쇄대나 연약대가 있는 터널 거동을 실험으로 증명하기 위해서 2축(Biaxial Loading) 실험을 수행하여 파괴거동을 분석하고 있으며, 주기적인 절리구조를 갖는 암반 터널 파괴현상을 규명하는 연구도 수행 중에 있다.

⑧ Geological Data Evaluation System

터널 현장에서 얻어지는 지질 및 막장에 관한 Imaging 측정결과를 토대로 터널 막장이 지질 상태

를 분류·가시화하고, 이를 토대로 막장 전방의 지질구조를 예측할 수 있는 시스템으로서 매우 실용적이면서도 기존의 방법으로는 해결하기 어려웠던 부분들을 해결하였으며, 현재 상용화되어 간편한 시스템으로 구성 중에 있다.

3.3 미국에서의 암반공학 연구동향

본고에서는 미국의 암반공학분야의 최근 연구동향을 살펴보기 위하여 Colorado주의 대표적인 암반공학분야 연구기관인 University of Colorado, Boulder와 Colorado School of Mines(CSM)에 대한 주요 연구시설 및 최근 연구내용에 대하여 소개하였다.

지질학 및 암반공학에 있어서 세계적으로 유명한 연구기관인 University of Colorado, Boulder에서 연구중인 과제를 정리하면 다음과 같다.

- The effect of anisotropy and fracturing on the deformability and strength of rock masses
- The modeling of glacier fracturing and calving
- The time-dependent behavior modeling with the Discontinuous Deformation Analysis(DDA)
- Boundary Element Analysis of Fracture Mechanics in anisotropic baterials
- Green functions and BEM formulation for 3D anisotropic media
- In-situ stress tensor measured in an Alaska Glacier
- Bayesian estimation of rock mass boundary conditions with application to deep tunnelling
- Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind tunnel face

세계적인 암반공학 연구기관인 Colorado School of Mines(CSM)에는 주요한 암반분야 연구소로서 Micro-tunneling Research Institute(MRI)와 Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute(EMI)를 보유하고 있다.

EMI는 1974년 Colorado School of Mines에 광산 및 토목을 위한 지하굴착기술분야의 교육과 연구를 위하여 설립되었으며, EMI에서의 기초 및 응용연구 분야는 다음과 같다. EMI는 거대한 규모의

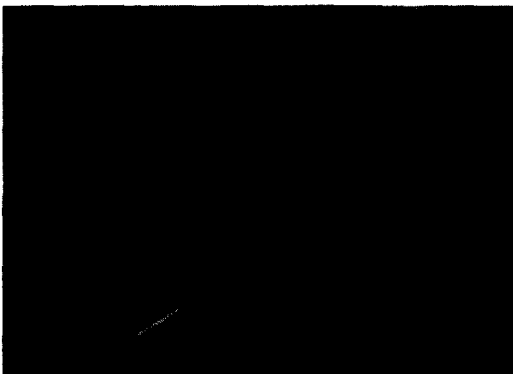


그림 8. Tunnel Testing Model

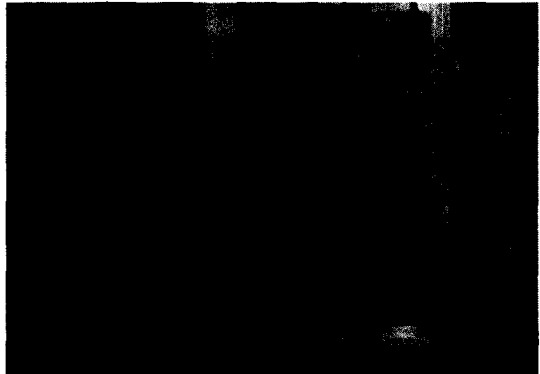


그림 9. NATM Tunnel Model

최신 암반공학 시험시설을 보유하고 있으며, 현재도 전문적인 장비가 요구되는 여러 가지 연구수요에 부응하기 위하여 지속적으로 개선 및 확장되고 있다.

- Rock fragmentation and drilling /
- Mechanical rock and soil excavation systems
- Tunnel, raise and shaft boring / Trenching, slotting, road headers
- Geologic disposal of nuclear waste
- Water jet drilling and jet assisted cutting / Cutter bit development
- Ground control and mine-design
- Automation, ground sensing, instrumentation
- Microseismic detection / Robotics and artificial intelligence

MRI는 Colorado School of Mines에 1993년 3월에 설립되었다. MRI의 주된 임무는 토질 및 암반 분야에서 빠르게 발전하고 있는 Micro tunnelling 기술을 개발하는 것으로 MRI에서의 주요연구 분야는 다음과 같다.

- Cutter Head Design, Hard Rock and Soft Ground
- Bit Selection and Performance Analysis
- Machine Control Systems / Guidance Systems / Laser Systems
- Slurry Disposal Systems / Slurry Pumping Systems / Ventilation Systems
- Hydraulic and Jacking Systems / Long Distance Jacking Requirements
- Machine Selection / Machine Performance Project Cost Estimation
- Micro-tunneling Project Feasibility / TBM Technology Transfer
- Nuclear and Hazardous Waste Site Cleanup
- New Excavation Technologies

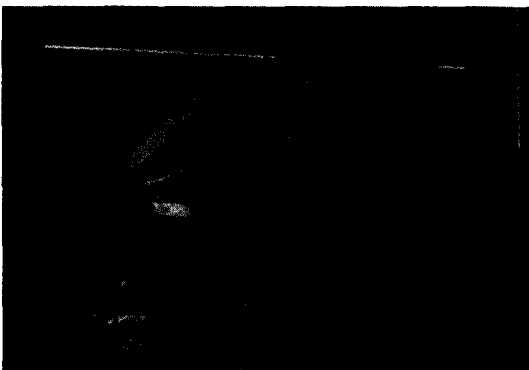


그림 10. TBM Inclined Boring Testing Facility



그림 11. TBM Main Body

3.4 유럽에서의 암반공학 연구동향

현재 유럽에서의 대규모 암반공학 프로젝트는 주로 방사성 폐기물 처분장 건설, 북해 유전 개발 그리고 알프스산맥 근방 터널 개발 등과 관련되어 진행되고 있다. 이 글에서는 주로 방사성폐기물 처분장 건설과 관련된 유럽의 기술적 동향 및 연구 현황, 특히 지하실험실(URL)과 관련된 연구들을 중심으로 살펴보고 국내 학계에 제기되는 몇 가지 중요한 암반공학 연구 주제들에 대해 간략히 고찰해보고자 한다.

국내와 마찬가지로 유럽 각국에서의 방사성 폐기물 처분장은 지하동굴처분방식에 기초해있다. 1970년대 말부터 각국별로 진행되어오던 폐기물 처분장 추진 사업은 EU 출범이후 주로 EU 산하 EURATOM (European Atomic Energy Community)으로 연구 개발 사업이 통합되어 각국의 연구활동을 지원하고 있다.

스웨덴, 핀란드, 프랑스 등 대부분 국가들은 이미 중저준위 폐기물 처분장을 운영하거나 건설중에 있다. 중저준위 폐기물 처분장 건설은 고준위 폐기물 처분장에 비해 제기되는 건설상의 문제점이 적기 때문에 연구활동은 주로 고준위 폐기물 처분장과 관련된 주제에 집중되고 있다. 실제 지질조건에서 처분장 상황의 종합 성능 평가를 위해 이미 주요 국가들에서는 실제 규모의 지하 암반 실험실이 설치, 운영되고 있다. 표 6은 주요 유럽국가들에서 진행중인 폐기물 처분 관련 연구프로젝트들을 보여준다.

그림 12는 1995년부터 건설되어 운영중인 스웨덴의 Äspö URL과 현재 건설이 진행되고 있는 프랑스의 Meuse/Haute-Marne의 수갱굴착 모식도를 각각 보여준다. Äspö URL은 스웨덴 남부 원자력발전소 부지 근처 지하 -500m 심도에 건설되어 현재까지 각종 암반학 및 수리지질, 지구화학과 관련된 현장시험과 모델링을 통해 처분장 안전성에 대한 신뢰성을 높이기 위해 다양한 기술 및 정보를 축적해오고 있다. 프랑스 Meuse/Haute-Marne 부지는 고준위 폐기물처분장 건설을 위한 전단계로서 굴착부터 수리역학적 상호작용 및 굴착손상권 평가 및 모델링을 위해 체계적인 실험계획을 가지고 지하실험실을 건설하고 있다.

현재 유럽에서는 URL과 직간접적으로 관련되어 암반 및 충전층(backfill) 그리고 처분구조물들의 성능 평가 및 모델 예측 검증을 위한 여러 연구 프로젝트가 진행 중이다. 표 6은 최근까지 유럽에서 진행되고 있는 주요 연구 프로젝트들을 보여준다. 이 표로부터 현재 주 관심이 되고 있는 주요 연구분야들에 대한 정보를 얻을 수 있다. 프랑스와 벨기에를 중심으로 하는 유럽의 처분장 관련 연구는 점토암의 수리역학적 상호작용, 구성모델 및 시간의존 거동(creep) 등을 더 중요하게 다루고 있는 반

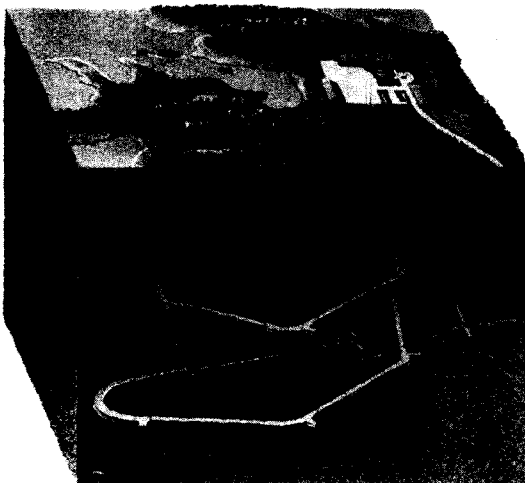


그림 12. Äspö 지하실험실의 모식도

표 6. EU에서 진행중인 폐기물처분 관련 주요 연구 프로젝트

주제	프로젝트 약칭	주요 이슈
THMC 모델링 및 안전도 평가	DECOVALEX III	THM 해석 모델 및 기법 확립 및 적용
	BENCHPAR	THM 모델 및 폐기물처분장 안전성해석 성능평가
	BENIPAR	벤토나이트의 THM 거동 및 성능평가
대규모 현장시험	BAMBUS II	독일 암염 광산에서 파쇄암염 충전(backfill), 기밀(sealing) 및 용기 재료 거동
	PROTOTYPE-REP	스웨덴식 고준위 폐기물 처분개념의 심부 결정질 암반의 모의 구조 시험
	APSE	결정질 암반 처분공주변의 열역학적 균열전파 및 안정성 평가
	FEBEX II	결정질 암반에서의 실규모 공학방벽 실험 Full-scale
공학방벽 실증 및 평가	EB	점토층내의 수평 처분개념 및 관련 충전 기법 시험
	RESEAL II	점토층내 수갱 및 보어홀 기밀
암반공학 부지 조사 방법 확립 및 평가	MODEX-REP	수갱 굴착 및 THM 거동 모델링, 시험 및 검증.
	OMNIBUS	점토층내 ultrasonic 기법의 적용을 위한 개발
	SAFETI	암반손상평가를 위한 3D TM 모델개발
	HE	점토층내 가열시험
	VE	점토층내 환기시험
	SELFRAC	점토층 EDZ 내 단열 거동 및 기밀 효과
연구 기반확충	CROP	처분개념 향상을 위한 URL 내 공학방벽 연구 평가를 위한 네트워크

면, 스웨덴, 스페인 등의 결정질 암 대상 지역에서는 불연속면과 관련된 열수리역학 상호작용과 그리고 암반거동에 영향을 초점을 맞추고 있음을 알 수 있다.

표 7은 유럽에서의 연구활동 현황에 근거하여 처분장 건설과 관련하여 국내 학계에서 제기되는 주요 연구주제들을 중심으로 열거 한 것이다. 기본적으로 국내 처분 대상 지역 지질환경이 결정질 암반임을 고려할 때 불연속면 및 특성 및 그 상호작용이 일차적으로 가장 중요한 주제가 될 것으로 예상된다.

대부분 암반공학 일반에서 중요한 주제들이지만 처분장 프로젝트가 갖는 정치 사회적 중요도 및 규모를 감안해본다면 대규모 연구 투자와 실험을 통해 풍부한 자료 획득 및 해석이 가능하므로 관련 연구의 비약적인 발전을 도모할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 암반 부지조사 방법과 관련된 주제들은 이러한 장점을 잘 살려 비약적인 기술 발전을 촉진할 수 있다. 현재 유럽에서의 주 관심사는 기본적으로 제한된 수의 부지 조사 자료로부터 어떻게 총체적인 암반특성을 가능한 정확히 기술하기 위한 모델을 정립할 것인가에 맞추어져 있다.

최근까지 유럽에서 진행되고 있는 폐기물 처분장 건설과 관련된 암반공학 연구 활동들의 고찰을 통해 현재 국내에서 관심이 요구되는 주요 연구과제들을 도출해 보고자 하였다. 이미 수십년의 지속적인 연구 개발 및 투자를 통해 각국의 수준은 현재 대상 처분장 주변 거동의 검증을 위한 지하 실험실 시험이 이루어지고 있음을 주시해야 할 것이다. 국내와 유사한 처분 지질환경을 고려할 때 유럽에서의 경험은 앞으로 관련 암반공학 연구 발전을 위한 시금석이 될 수 있을 것이며, 또한 적극적인 국가간의 협력 연구가 요망된다. 국내 폐기물 처분장 건설이 현실적인 일정에 오른 지금, 실제 처분

표 7. 폐기물처분장 관련 암반공학적 연구과제

분 야	주요 연구과제
암반 부지 조사	<ul style="list-style-type: none"> - 통합적 부지 특성 모델 개발 - 암반공학적 정수들의 불확실성 고려기법 - 장기 조사, 계측 시스템의 신뢰성 향상
THMC 상호작용	<ul style="list-style-type: none"> - 화학적 상호작용의 고려 - 충전재의 THMC 거동 - 효율적인 상호작용 예측코드 개발 - 예측모델의 신뢰성 검증
손상권 평가기법 확립	<ul style="list-style-type: none"> - 굴착 손상권 (발파, TBM) 평가 - 열교란 손상권 평가
불연속암반의 거동	<ul style="list-style-type: none"> - 불연속 시스템의 거동 평가 - 열교란으로 인한 균열 전파 및 확대 - 불연속 시스템의 불확실성 고려기법 확립
암반 구성모델	<ul style="list-style-type: none"> - 대상 처분장 암반의 구성모델 확립 - 실험을 통한 구성모델 검증 - 퇴적암 및 불연속면의 시간의존거동
기술감리 및 성능평가	<ul style="list-style-type: none"> - 체계적 평가기법 확립 - 평가 신뢰도의 정량화 방안

장 대상 암반에 대한 정확한 거동 평가 및 예측을 위한 체계적이고 종합적인 연구 노력이 절실히 필요한 시점이다.

3.5 일본에서의 암반공학 연구동향

최근 2~3년간 일본의 암반공학분야에서 진행된 연구내용을 살펴보기 위해 2002년 7월 서울에서 열렸던 ISRM regional symposium(제3차 한-일 공동 심포지움)과 2003년 3월 일본 교토에서 있었던 The 1st Kyoto International Symposium on Underground Environment에 제출된 논문의 내용을 분석하였다.

또한 2001년에 개편된 일본의 산업기술총합연구소의 지하공간개발 관련 연구조직을 살펴봄으로써 정부차원에서 추진되고 있는 연구 프로젝트의 성격에 대하여 알아보았다.

일본 산업기술총합연구소의 연구조직을 살펴보면 다음과 같다. 일본의 국립연구기관인 산업기술총합연구소(Agency of Industrial Science and Technology, AIST)는 2001년 경제산업성 산하의 독립 행정법인으로 재편되었다. 외형적으로는 이바라키현 쓰꾸바에 있는 8개의 연구소와, 홋카이도에서 큐슈 사이의 각 지방에 산재한 7개의 연구소로 이루어져 있다. 국가차원의 연구소인 만큼 에너지, 환경 등 중장기 투자가 필요하면서도 위험부담이 높은 연구, 중립성이 요구되는 계량 표준화 사업과 국제적 경쟁력을 높이고 새로운 사업분야를 창출할 수 있는 기초연구 등에 관심을 가지고 집중적으로 추진하고 있다. 이러한 목표아래 연구분야를 6개로 나누고 각 분야 안에는 연구센터(Research center)와 연구부문(Research institute), 그리고 연구랩(Research initiative)을 설치하였다. 연구센터는 학계 및 산업계에 적용성이 높은 전략적 과제를 추진하기 위해 조성된 한시적 연구단위이며 연구부문은 중장기 연구를 위한 연구단위이고 연구랩은 가장 기본적이며 유동성이 높은 연구단위이다.

현재 산업기술총합연구소는 28개의 연구센터와 21개의 연구부문을 가지고 있다. 이 중 지하공간개발과 관련된 연구단위로는 지권자원환경(地權資源環境)연구부문과 심부지질환경(深部地質環境)연구센터가 있다. 전자는 지열이나 화석연료 등의 지하자원의 탐사 및 개발에 관련된 연구를 진행하고 있으며 후자의 경우는 심부암반에 고준위 핵폐기물 처분장을 건설하는데 필요한 제반 기술을 연구한다. 고준위 핵폐기물 처분에 관한 연구가 한시적인 연구단위인 연구센터에서 추진되는 과제라는 점에서 최근 일본의 국가 차원의 관심사를 엿볼 수 있는 부분이라 할 수 있다.

심부지질환경 연구센터는 지구물리, 지구화학, 지하수, 심부유체, 지구정보(geo information) 등을 연구하는 팀으로 구성되어 있고 있다.

정부차원에서 추진되고 있는 과제가 고준위 핵폐기물 지하처분임을 고려할 때 핵폐기물 저장에 관한 논문이 가장 낮은 비중을 차지하고 있음이 상반되어 보이는 결과이나 고준위 핵폐기물에 관한 연구는 직접적인 현장실험의 어려움이 있고 핵폐기물 지하저장에 관련된 연구분야 중 관련성이 높은 분야는 지하수 유동과 온도변화에 따른 암석의 물성변화 등인 것으로 볼 때 정부정책 방향과 최근의 전반적 연구동향이 서로 관련이 없다고 판단하기는 어렵다.

그라우팅 및 지보재 분야 논문에서는 6편이 그라우팅에 관련된 내용이었고 지하수 유동분야에서는 산업총합기술연구소의 지권자원환경 연구부문에 수행한 고온암체에 관한 연구결과 2편을 포함하여 총 3편의 지열발전에 관련된 내용이 발표되었다.

계측분야에서는 GIS와 Photogrammetry를 이용한 변위측정이 다수 발표되었고 터널설계 및 시공 분야와 지하수 유동 분야에서 지구통계학의 이론을 적용한 3편의 연구가 소개되었다.

4. 암반공학분야의 향후 전망과 과제

우리나라는 국토가 좁고, 2/3 이상이 산악으로 구성되어 있으며 인구가 많아 터널, 암반사면 및 지하공간 등 암반을 대상으로 하는 공사의 수요가 다른 나라에 비해 많은 편이다. 이에 따라 과거 지하 자원 개발에만 국한되어 활용되던 암반공학은 1980년대에 이르러 토목공사에도 활용되기 시작하였고 현재는 토목 분야에서 큰 비중을 차지하게 되었다.

앞서 살펴본 세계 각국의 암반공학 관련 연구동향을 살펴보면 요소기술 개발, 당면 과제 해결을 위한 관련 분야간의 협동연구, 실험실 실험을 통한 개념의 이해, 대규모 시험 현장에서의 측정에 의한 검증, 그리고 해석 기법의 정밀도 향상 등으로 크게 구분할 수 있다. 주요 연구 대상으로는 터널과 핵폐기물 처분 공동이 주류를 이루고 있으며 지하 에너지 저장과 관련된 연구도 활발한 편이다. 국내에서도 이러한 연구 동향에 발맞추어 주로 학계와 연구소를 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있다.

최근 턴키 제도의 도입으로 지반조사 분야에서는 많은 신기술이 도입되고 있으나, 암반공학적인 연구결과와 활용은 상대적으로 활발하지 못하다. 이는 토목분야의 보수적인 특성과 더불어 연구 결과의 실용화 노력의 부족, 그리고 설계 및 시공 단계에서의 risk는 조사 단계에서의 risk에 비하여 매우 크기 때문인 것으로 생각된다.

그러나 국내 암반공학분야의 당면 과제인 새로운 굴착 공법의 개발, 지보 설계 및 시공과 관련된

합리적인 가이드라인의 제시, 새로운 지보재의 개발 및 적용, 지반 조사 결과의 정량화 및 국내 암반 특성에 적합한 암반분류 기준 확립 등이 조속히 이루어져야 할 것이며 이를 위해서는 산학연의 유기적인 협조가 필수적이다.

고속철도, 철도 및 도로의 확충과 관련하여 아직도 많은 터널이 구축되어야 하며, 에너지 및 물류 저장에 위한 지하 암반 저장 시설의 수요도 증가할 것으로 예상되어 암반 공학의 활용성은 점차 확대 될 전망이다.

암반공학은 기존의 자원·지질분야를 축으로 계속적인 성장을 가져왔으며 이제는 토목건설분야에서 토질분야와 더불어 지반공학의 중요한 분야로 자리잡게 되었고, 이러한 시대적 변화를 반영하여 이제는 학회내에도 암반역학기술위원회를 중심으로 다양한 활동을 전개하고 있다.

지반공학과 더불어 암반공학분야의 지속적인 발전을 위해서는 이 분야에 종사하는 많은 전문가, 기술자, 연구자들의 지속적인 노력이 수반되어야 함은 물론이다. 특히 이 분야는 기본전공이 다른 여러 분야의 사람들이 서로 협업하고 원활한 커뮤니케이션을 통하여야만 제대로 된 결과를 만들 수 있는 특성을 갖고 있으므로 서로 상호 학문적 영역과 특성을 이해하고 상호 교류하는 과정이 보다 활성화되어야 할 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 암반역학기술위원회의 역할은 더욱 중요한 의미를 가지며, 본 기술위원회의 지속적인 노력과 함께 학회 회원들의 적극적인 관심이 요구된다 할 수 있다.

21세기는 전기·전자분야를 선두로 모든 분야에 있어서 급격한 기술변화와 혁신의 시대라 할 수 있다. 특히 자연지반을 대상으로 암반 및 지반공학분야는 불확성성과 불확실성의 요소가 어느 분야보다도 많기 때문에 새로운 기술을 도입하고 타분야의 신기술과 접목하려는 시도가 그 어느 때보다 활발히 진행되고 있다. 이는 거대한 자연을 인간의 고유한 경험치를 바탕으로 첨단기술을 적용하여 이를 정량화하고 구체적으로 구현하려는 하나의 노력이라고 생각된다.

이러한 이유로 산업체, 대학교 그리고 연구소와 같은 각각의 연구집단체의 공동협동연구가 무엇보다도 필요하며, 여기에 기계, 전기, 전자 등과 같은 다른 분야의 기술과 접목된 융합기술(Fusion Technology)에 대한 연구개발이 적극적으로 추진되어야 할 것이다.

참고문헌

1. H. K. Lee (1995), "Research activities of rock mechanics field in Korea," Proc. Korea-Japan Symp. on Rock Eng. pp. 3-13.
2. 한국암반공학회지, 터널과 지하공간 (1991~2003), Vol. 1, No. 1 - Vol. 13, No. 4.
3. 한국지반공학회 논문집 (1990~2003), Vol. 6, No. 1 - Vol 19, No. 4.
4. 대한토목학회 논문집 (1990~2003), Vol. 10, No. 1 - Vol 19, No. III-2.
5. Int. J of Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abs. (1990-2003), Vol. 27, No. 1 - Vol. 36, No. 2.
6. Proc. 7th, 8th and 9th Int. Congress on Rock Mechanics, (1991), 1995, 1999, 2003, Balkema.
7. Review of Research on Tunnel and Underground Space at KICT (1999).
8. Rock Mechanics and Rock Engineering (2000-2003), Vol. 33-36.
9. Tunnelling and Underground Space Technology (2001-2003), Vol. 16 - 118.