

암반공학분야의 최근 연구동향 및 전망(1)

암반역학기술위원회

1. 글을 시작하면서

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 현황에 대한 관심이 증가되고 있다.

다라서 암석역학 및 암반공학분야에 대한 지금까지의 연구개발활동에 대한 정리 뿐만 아니라 최근 연구동향을 고찰함으로써 앞으로의 암반공학분야에 대한 새로운 방향을 고민하고 연구할 시점이라 생각된다.

초기 암석역학분야는 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 활발히 진행되었고, 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 만들어지

게 되었다. 또한 암반공학분야는 연구의 폭이 넓어지고 적용대상분야도 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 암반공학분야의 연구활동현황을 분석하고 고찰하였다. 먼저 국내 학회의 논문집에 등재된 논문과 학술발표회에서 발표된 논문을 중심으로 연구분야 및 연구현황을 살펴보았다. 그리고 국책 연구소인 한국건설기술연구원과 한국지질자원연구원에서 암반공학관련 연구과제를 검토하여 암반공학분야의 연구현황과 향후 중점과제 등에 대하여 간략하게 고찰하였다. 또한 해외에서의 최근 암반공학분야의 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 작성되어진 것임을 다시 한번 주지하고 학회 차원에서 체계적인 자료수집과 권위 있는 전문가들의 고견이 청취되고 많은 사람들의 의견이 모여져 완성도 높은 보고서가 되었으면 하는 바램이다. 특히 지금이야말로 암반역학기술위원회를 중심으로 하여 암반역학의 발전을 되돌아보고, 암반공학의 미래에 대한 비전을 만들어가야할 중요한 시점이라고 생각하면서 부족하나마 본고를 준비하였다.

2. 국내에서의 암반공학 연구동향

2.1 학회지에 나타난 연구동향

2.1.1 학회 논문집

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 것으

로 보인다. 또한 암반공학 관련 연구는 대학교나 연구소에 주로 수행되는데, 이는 암반분야의 기초 분야에 대한 기본적인 연구를 수행하기 때문인 것으로 판단된다.

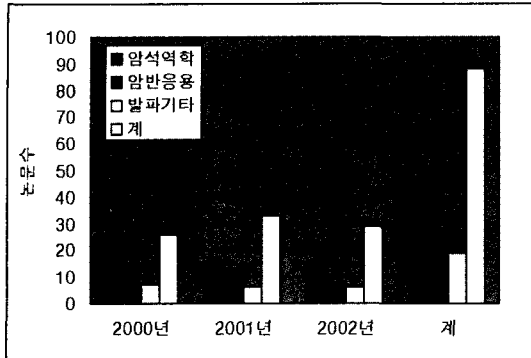
2.1.2 관련학회 논문집

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

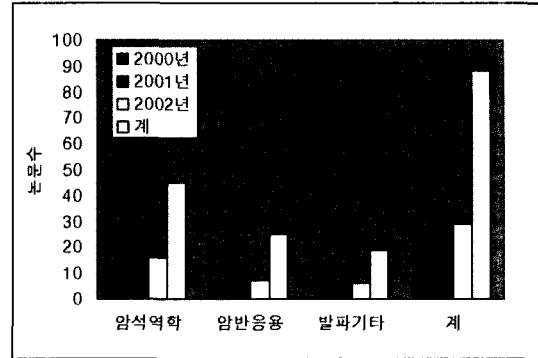
또한 분야별 논문발표현황을 살펴보면 암석물성, 절리면 특성, 해석모델 등과 같은 암석역학분야 논문이 전체의 50%를 차지하고 있으며, 이 중에서는

표 1. 지반공학회 논문집에 실린 최근 암반공학 관련논문

년도	논 문 제 목	비고
2000년 (6편)	<ul style="list-style-type: none"> - 압축강도와 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 	영남대 간기연 서울대 인하대 서울대 한양대
2001년 (8편)	<ul style="list-style-type: none"> - 총리면을 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 안전율 평가 - 국내에 분포하는 암석의 절리면 전단강도에 대한 공학적 성질 	경북대 한양대 경북대 경북대 서울대 자원연 수원대 고려대
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 전단 강도 특성 분석 - 암석의 비선형 거동해석을 위한 손상모델 개발 - 손상모델을 이용한 심부터널 주변 암반의 손상영역 평가 - 간접인장강도시험을 통한 이방성 암석의 인장강도 특성 	철기연 서울대 간기연 동국대 고려대 서울대 서울대 경북대



(a) 연도별 논문발표 현황



(b) 분야별 논문발표 현황

그림 1. 관련학회 암반공학관련 논문발표 현황

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.

2.1.3 최근 주요 연구주제

다음으로는 최근 암반공학관련 학술발표회에서 나타난 주요 연구주제를 분석하여 보았다. 먼저 분야를 구분하였는데, 기초분야를 지질공학 및 조사분야, 암석물성 및 시험분야, 모델링 및 수치해석분야로 응용분야를 터널 및 지하공동분야, 암반사면 및 굴착분야 그리고 발파 및 진동 분야와 신기술, 환기 등을 포함한 기타분야로 구분하여 정리하였다.

• 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 초기응력측정 방법이 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, 근접병설터널과 같은 중요 사례연구가 주를 이루고 있으며, 지하저장고, 지하하수처리장, LPG 지하저장공동과 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

표 2. 암반공학 분야 최근 발표논문 주제

1. 지질공학 및 조사분야	
2001년	· 지질조사 시스템 · TMR-net 영상을 이용한 절리방향 분석 · 균질화법 · 화상처리 및 입체사진측량학
2002년	· DOM 시추코어 · WebGIS · 핵석지반정수 산정
2003년	· 석회암 지대 · 암반예측시스템 · 2차원투수특성 · 양산지역 단층특성 · RQD 결정
2. 암석물성 및 시험분야	
2000년	· 암석절리의 수리적 거동 암석과 콘크리트의 미소파괴음
2001년	· 시추코어를 이용한 초기응력측정 · 암반굴착속도 · 링시험(인장강도)
2002년	· 수압파쇄법/응력개방법 비교 · 압과 흡진단강도
2003년	· 세일의 이방성
3. 모델링 및 수치해석분야	
2000년	· DDA 해석
2001년	· Barton-Bandis 절리모델 · 복합체 역학 · 대수학적 사면체 블록해석 · CCM 적용 균열전파 모델링 · 파괴인성산정 · 콘크리트 플러그 해석 · 열-수리-역학 상호작용 · 절리전단 수리거동 · 균열망 해석 · 수리전도해석
2002년	· 냉동온도분포 모델링 · 심지층 열역학모델링 · KeyBlock 해석
2003년	· 절리암반의 수리-역학적 거동 · 암반손상영역 · 비선형 Hoek-Brown 파괴기준
4. 터널 및 지하공동분야	
2000년	· 지하저장고 · 대단면 장대산악터널
2001년	· 지하하수처리장 · 방사성 폐기물 처분시설
2002년	· Multiple Index · 석탄층 터널굴착 · 국내 최대장대터널 · LPG 지하저장공동 · 탄광 인접터널
2003년	· LNG 지하동굴 · 대단면 근접병설터널 · 비균질암반 터널변위
5. 암반사면 및 굴착분야	
2001년	· 핵석사면 절토사면관리 프로그램 · 확률론 해석
2002년	· 단층파쇄대 사면
2003년	· 천매암 사면 · 사암-세일 사면
6. 발파 및 진동분야	
2001년	· 대구경 무장약공과 선균열 · 신경망 이론 적용 워터젯 · 발파해체사례 · 수공발파 뉴핵이펙가 · 에멀전 폭약 / 터널용 벌크폭약
2002년	· 발파패턴자동화
7. 신기술 및 기타분야	
2001년	· 고강도 FRP관 · GIS 이용(사면) 퍼지이론(암반분류/위험절개면 평가)
2002년	· 환기자유입 · Oil-Stop 시스템 터널화재
2003년	· 터널화재 확산 · 퍼지모델(암반물성)

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 사면해석과는 달리 확률론, 퍼지이론을

이용한 해석연구가 수행되고 있다.

• 발파 및 진동분야

최근 발파분야는 신기술에 대한 개발이 활발한 상태로 각각의 공법에 대한 현장적용사례 및 특성

에 대한 연구개발 사례보고가 증가하고 있다. 최근에는 발파설계 자동화를 위한 연구가 진행되어 이미 상품화된 상태이며, 발파진동 및 소음에 대한 문제는 현장사례발표가 주를 이루고 있으며, 최근 암 발파 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.

김영근 박사(삼보기술단)

2.2 국책연구소 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, 신지보재 및 보강재 활용기술에 관한 연구 등을 중점적으로 수행하고 있다. 이밖에도 터널 갱구사면 안정화기술, 산사태 예측 및 억제기술들도 함께 연구개발하고 있으며, 최근에는 인공지능기술, 지식기반기술, 친환경기술, 정보화기술 등을 접목시키려는 노력을 하고 있다. 현재까지 한국건설기술연구원 지반구조물그룹에서 수행하였거나 수행하고 있는 주요 연구과제를 정리하면 표 3과 같다.

대표적으로 첨단기법을 이용한 연구분야에서는 국가지정연구실 사업으로 “첨단기법을 이용한 터널 정보화 설계/시공 기술개발”에 관한 연구를 진행 중이다. 이 연구에서는 ITIS(Intelligent Tunneling Information System)을 개발하여 인

공지능기법과 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 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 계측관련 연구분야에서는 ITIS의 터널 시공관리 및 계측 모듈 개발의 일환으로 터널 막장전방지질예측 연구를 수행하고 있다. 터널 굴착 이전의 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 수행 중이다.

터널 지보분야에서는 “고성능 숏크리트 라이닝

표 3. 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

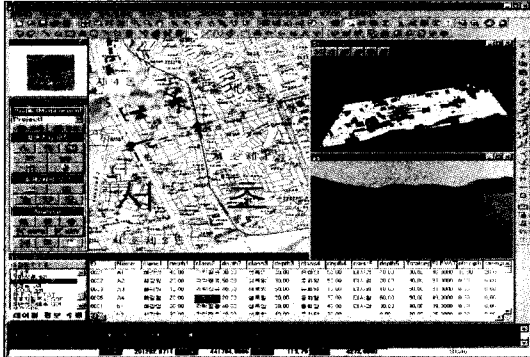


그림 2. ITIS 사용자 인터페이스

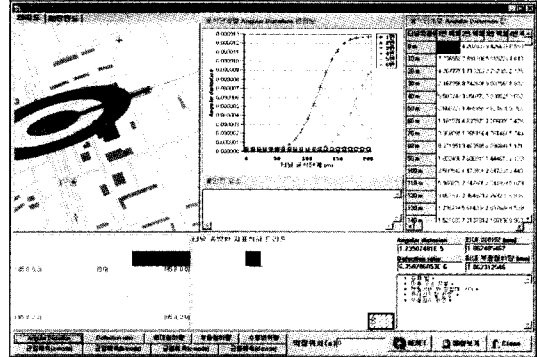


그림 3. 2차원 침하예측

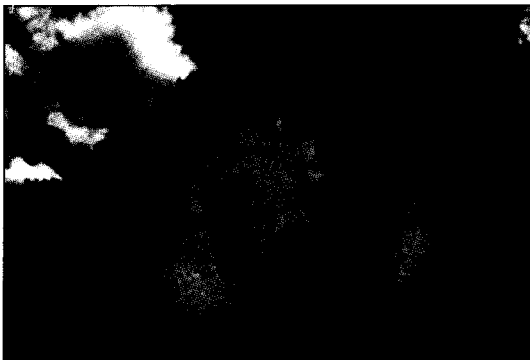


그림 4. VR을 이용한 터널갱구부

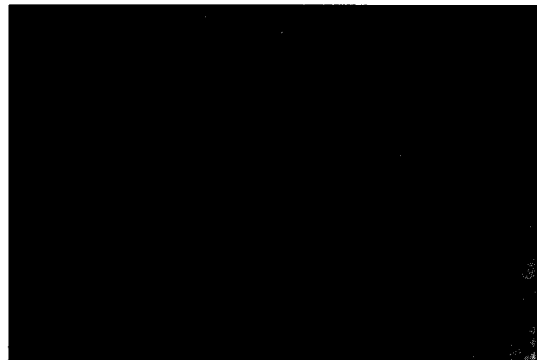


그림 5. VR에 의한 썩기파괴의 예측

의 개발"에 관한 연구가 진행중이다. 본 연구에서는 슛크리트의 시간의존적인 경화특성을 고려한 이론적 해석과 수치해석에서 사용되는 슛크리트 매개변수들에 대한 민감도 분석을 수행하고 있다.

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

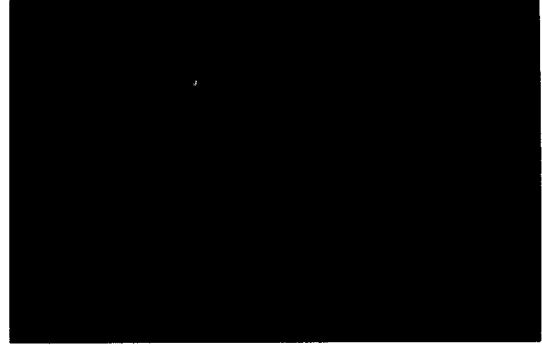
트 장비의 개발을 목표로 하고 있다.

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 불량사례 조사 및 요인분석, 비파괴적 안정성 평가 시스템, 자료분석 및 평가기법 등을 개발한다. 또한 초장대 터널의 배수시스템 개념을 확립하고 flow-form과 같은 신개념의 배수시스템을 적용하여 타당성을 검토하고자 한다.

터널 조사기술 분야에서는 "음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴조사기술 개발" 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 음향분석기법을 개발·활용한 건전도 조사 자동화 시스템을 개발하였다. 개



(a) 계측공 천공



(b) 그라우팅 및 확인

그림 6. 터널 막장전방 선형변위 계측을 위한 시험시공

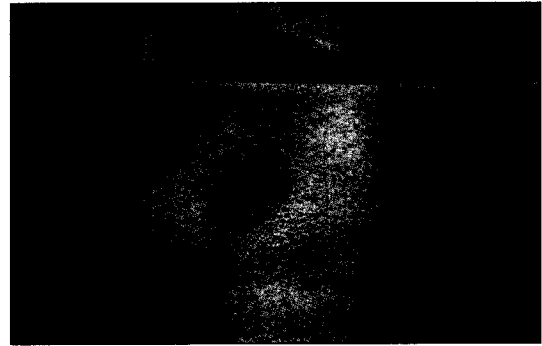
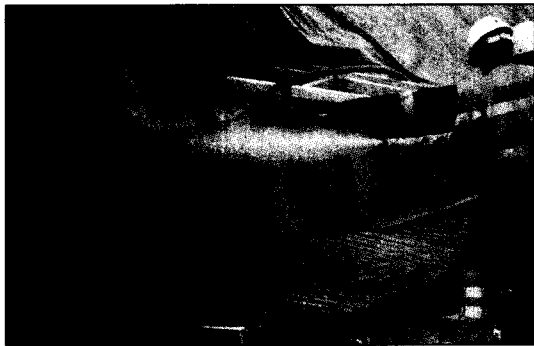


그림 7. 슛크리트 패널 타설시험 장면



그림 8. 경량기포 모르타르 뒤채움재의 주입

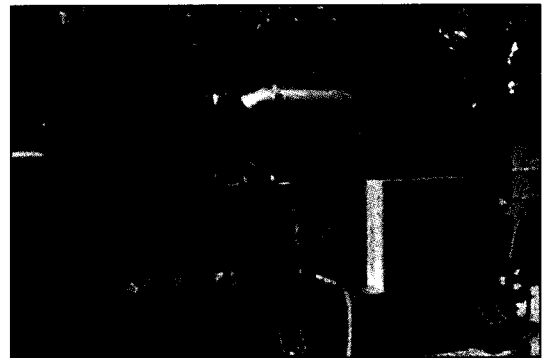


그림 9. 석분토 계량 및 교반 플랜트

발된 시스템에는 해머 타격음 분석을 위한 소프트웨어, 자동 해머타격 및 음향 측정장비 등이 포함된다. 또한 해석결과의 정량적인 평가를 위하여 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 뒤펀용 일반 모르타르와 경량기포 모르타르를 개발하여 뒤펀용재의 현장 적용성을 시험하였다. 다만 원터치 그라우팅 주입장치, 뒤펀용재를 터널 배면에 주입하기 위한 주입시스템과 배면공동의 투수 슬래시 시험 장치를 제작하여 연구에 적용하였다.

이 밖에도 공인시험기관으로서 다양한 암석시험 장비를 이용하여 암석의 각종 실험시험과 관련된 연구를 수행하고 있으며, 특히 TBM의 굴진성능을 예측하는데 사용되는 합경도(total hardness)를 구하기 위해 Schmidt hammer 시험과 병행하여 Taber abrasion 시험을 실시하고 있다.

장수호 박사(한국건설기술연구원)

2.2.2 한국지질지원연구원의 연구현황

한국지질지원연구원 암반공학팀에서는 사면 터널과 같은 지상 및 지하구조물의 설계 시공 유지 등의 암반공학 기술과 관련한 암석물성시험, 현장암반 변형특성 및 초기지압 측정, 암반평가와 지보패턴 설계, 전산모델링 해석을 통한 구조물의 안정성 평가, 지반침하 등의 환경피해 방지 및 복원기술 등을 수행하고 있으며, 또한 지반진동 소음 비산을 조정하는 제어발파 및 노후 구조물의 발파해체기술을 연구 개발하고 있다. 각 연구분야 및 주요실적을 간단히 소개하면 다음과 같다.

2.2.3 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 기본 특성연구, 2단계에서는 실험실 규모의 연구 및 균열망 해석 연구, 그리고 3단계에서는 현장시험연구 및 기반기술확립이 수행될 예정이다.

본 연구를 통하여 대수층 암반 모사 시험장치의 개발과 지하유체의 유동해석기법이 새로이 개발될 예정이며, 이를 통하여 향후 이산화탄소의 처리기술에 대한 상업화의 토대를 마련하게 될 것이며, 3차원 지구물리탐사기술, 고심도 시추 및 액체주입기술 등 관련사업과 지하수 오염방지 사업 등의 시장성 확대가 기대되며, 또한 지하수 오염물질의 유동 해석 및 지하폐기시설의 안전 설계에 활용될 것이다.

② LNG 지하저장기반기술개발 및 Pilot plant 운영결과분석

LNG의 지하 암반 내 저장은 세계적으로 상업화 되지 못한 기술로서, 산업계 및 외국과의 공동 연구

표 4. 한국지질지원연구원의 주요 연구분야

분야	주요연구내용
지반조사 및 평가 기술	○ 현지 암반의 공학적 분류 및 평가 ○ 암석의 물리적 및 역학적 특성시험 ○ 지반조사자료의 정보화 및 3D 영상화 기술개발
현지암반 시험	○ 초기지압 측정 : 수압파쇄법, 응력개방법 ○ 암반 변형률 측정
구조물 안정성 해석	○ 전산모델링에 의한 구조물의 안정성 평가
발파기술 및 환경영향평가	○ 플라즈마 발파기술 개발 ○ 발파진동에 의한 구조물 영향평가
구조물 발파해체 기술	○ 고층건물 및 콘크리트 구조물 철거를 위한 발파해체기술 ○ 발파해체시 진동, 폭발압, 분진 등의 예측 및 환경영향평가

표 5. 한국지질자원연구원의 주요 연구실적

분야	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 워터젯 슬로터 개발(특허)

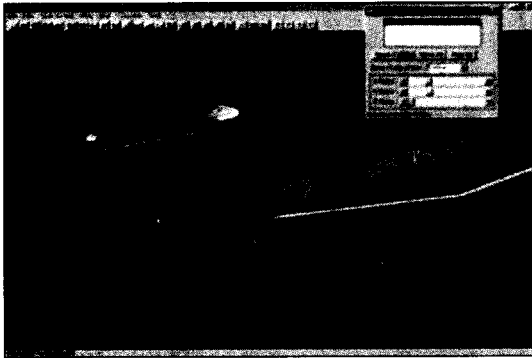


그림 10. 지반정보 3차원 영상화

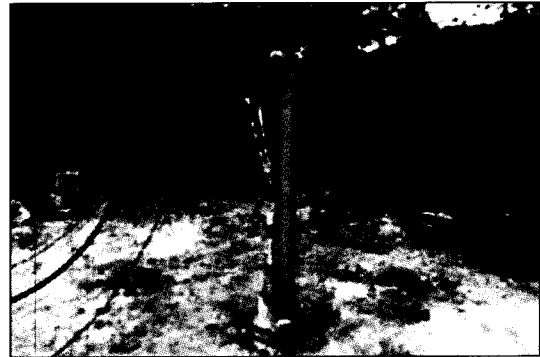


그림 11. 수압파쇄에 의한 초기지압 측정



그림 12. 발파 진동/풍압 측정

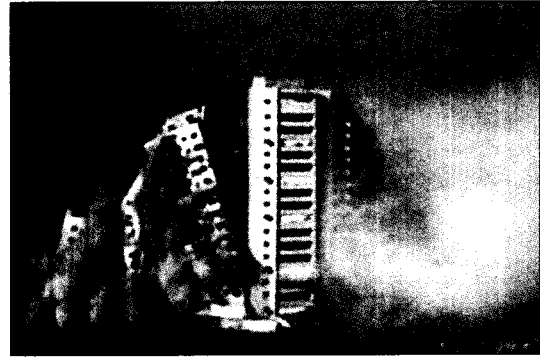


그림 13. 건물발파해체

를 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 개발

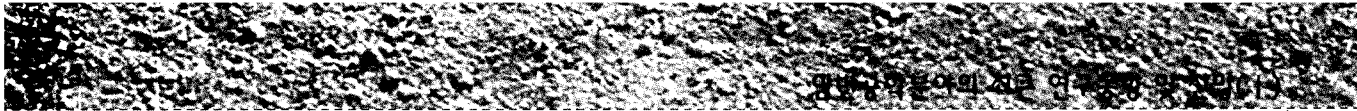


표 6. 한국지질자원연구원에서 수행된 연구과제

분야	수행 연구과제
① 지반조사 및 평가분야	핵폐기물 저장을 위한 화성암의 열역학 및 수문학적 거동 연구 지하구조물 기반암층에 대한 피로특성 연구 암반의 수문학적 거동 연구 / 지하구조물 조사 연구 지하구조물 기반암층에 대한 역학적 물성 연구 토공사를 위한 전석암 분석연구 암석의 경험적 파괴포락선의 수식화 연구
② 지하터널굴착 및 설계분야	지하에너지 저장시설 구축 및 유지기술연구 대규모 지하공간의 굴착유지 및 환경제어 기술연구 에너지 절약형 지하 냉장 및 냉동저장 설계기술 개발 대형갱도 굴착기술 연구 / 지하공간 활용기술 개발계획수립 연구 전단면 터널 굴착기술개발 / 대단면 터널굴착 및 지보법 개발 연구 록볼트의 지보거동 연구 / NATM 공법의 광산 적용 심부 석탄자원개발을 위한 암반거동 및 지압조정 연구 중압갱도의 지보법 개발 / 신형 록볼트 개발연구 중압 암반내 수광축벽 설계 / 암석갱도에 대한 NATM 공법 설계 탄성파속도를 이용한 현지암반 평가기술 연구 심부 암석터널에 대한 안정성 평가기술 연구 심부 대단면 시설터널에 대한 NATM 설계, 감리 심부 암석터널 유지를 위한 능동적 지보법 연구 심부 운반터널 유지대책 및 설계, 시공, 감리 지하 대규모 공동의 석유비축을 위한 U-2 펌프룸 모델 연구 지반침하 우려지역의 안정성 평가기법 및 대책연구 폐광산의 갱도 및 채굴적 활용방안 연구 지하에너지 저장시설 구축 및 유지기술연구
③ 사면해석 및 설계분야	보령댐 절취암반사면에 대한 안전연구 보령댐 여수로 사면 안정성 분석 및 유지방안 연구 탄전 노천채광장 사면설계를 위한 지반공학 연구 시간영역 반사법(TDR)에 의한 지반변위 계속 시스템 개발
④ 발파기술분야	터널굴착이 지상구조물에 미치는 영향 및 발파설계 지침수립연구 석회석 채광 및 환경기술 개선연구 발파진동이 콘크리트구조물의 건축에 미치는 영향 / 발파지침연구 진동으로 인한 피해의 인간관계 검토기준 및 피해액 산정방법 건물 발파해체를 위한 제어발파 설계기술 개발 Plasma 발파에 의한 암반굴착 기술연구 제어발파에 의한 구조물 해체기술 개발연구 발파진동식 확립과 제어발파 지침 결정을 위한 연구
⑤ 기타분야	채석장의 환경영향 평가기준개발 연구 석재가공 공구의 특성 연구 / 채석 및 석재가공기술 연구 Diamond saw와 Slot drill에 의한 채석 기술 한국형 Jumbo drilling M/C 개발연구

크자 한다. LNG를 지하암반 내에 저장하게 되면 cavern을 중심으로 일정한 반경 범위에서 ice-ring

이 형성되게 되는데, 이 ice-ring이 자연적인 불투수 및 불투기성 매체로서 작용하게 되어 LNG를

cavern 내에 가두어 두는 역할을 하게 되는데, 이러한 ice-ring의 형성 과정과 운영에 따른 변화 양상, ice-ring과 암반과의 접촉에 따른 암반공학적 제반 문제에 대한 연구는 상당한 수준의 첨단기술이 필요로 하는 부분이 될 것이다.

③ 핵폐기물 지하저장을 위한 지반안전유지 기술연구

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.

현재까지 대부분의 석회석 갱내 채광장은 뚜렷한 설계지침 없이 case-by-case에 따른 지엽적인 설계안을 제시하고 있어, 정부로서는 석회석 갱내 채광장에 대한 뚜렷한 설계지침의 마련을 절실히 요구하고 있어, 당 연구과제의 수행을 통해 국내 석회석 갱내 채광장에 대한 설계 및 운영지침이 마련될 것으로 기대하고 있다.

최성웅 박사(한국지질자원연구원)

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, 이

에 따라 가스 누출 및 LNG와 암반 사이의 열유속의 증가로 인한 저장물질의 과도한 기화가 실패의 원인이었다.

프랑스 GEOSTOCK사와 SN TECHNIGAZ사는 안전하고 경제적인 대안으로 복공식 암반 Cavern에 LNG를 저장하는 새로운 개념을 수년 동안 연구해왔다. 이론적인 해석과 설계를 거쳐, 1990년대 후반에 몇 가지 시험과 실증시험을 포함한 검증 프로그램을 수행하였다. 즉, 결빙으로 인한 절리의 영향(변위 측정), 저온하 절리내 지하수 유동 시험(지하수 유동조건에 따른 절리내 지하수 동결 연구), 실 규모 내조시스템(Containment System) 모델의 변형거동이 연구되어 저장 개념에 대한 효용성이 입증되었다. 이 후, 지하저장 건설과 운영 분야의 세계적인 선두주자인 SK건설과 함께 LNG 지하저장 기술의 상업화와 기술개발을 목적으로 2002년 Pilot Plant의 건설에 합의하였고, 약 1년간의 기본 및 실시설계를 거쳐 현재 대전 한국 지질자원연구원 부지내에 Pilot Cavern이 건설되고 있다.

① 복공식 LNG 지하저장시설의 개념

본 프로젝트에서 개발된 기본개념은 다음과 같은 요소들의 조합을 기반으로 하고 있다.

- 열충격으로부터 암반을 보호하고 LNG를 안전하게 저장하기 위한 내조시스템
- 주변암반이 동결되기 전에 저장동굴 주변 지하수를 배수하고 내조시스템에 정수압이 걸리는 현상을 방지하기 위해 저장시설 운영 초반 몇 개월간 사용될 배수시스템
- 배관 등의 Plant 설비

내조시스템은 암반과 LNG 사이에 다음과 같이 몇 개의 층으로 구성된다. 즉, 내조시스템과 암반 사이의 경계부를 지지하기 위한 콘크리트 라이닝 구조체, 내외 면을 합판으로 둘러싼 발포제 형태의 보냉 판넬, 저온에서 가스의 기밀성을 유지시켜주

는 주름진 1.2mm 두께의 스테인리스스틸 멤브레인으로 구성된다.

암반공학적 측면에서는, 열역학 및 수리지질 모델을 적용하여 0℃ 등온선의 주변암반내 전파, 암반내 지하수 이동 및 얼음의 형성과 유기 열용력을 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 암반은 록볼트 등으로 충분히 보장된다면, -80℃ 까지도 지탱할 수 있는 것으로 알려져 있다.

결빙에 대한 유체 유동해석과 관련 실험을 통해, 운영초기에 Cavern 주변암반의 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.

배수시스템은 지상 시추 양수공들과 지하의 시추

공들 (수벽공시스템)로 구성된다. 일반적으로 저장동굴 내부로 유입되는 다량의 물을 줄여야 하며 이는 굴착기간 동안 체계적인 그라우팅을 시행함으로써 가능하다.

② LNG Pilot Cavern

LNG 연구용 Cavern은 한국지질자원연구원 부지에 기 시공되었던 지하 냉동 및 냉장창고 연구용 시설을 증축하여 시공하고 있다.

연구용 Cavern까지는 기존 수평터널을 통해 진입하며 실험저장동굴의 천장은 지표에서 약 20m 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 3.5m × 3.5m 폭에, 10m 길이로 용량은 110m³ 이다. 그림 14는 연구용 Cavern의 모식도를 나타낸 것으로서 Cavern 주변 암반내에 배수공이 설치된 모습을 보여주고 있다. 또한 연구용 Cavern에 플랜트 설비들이 설치된 전체 모식도를 보여주고 있다.

③ 기술개발 과제

현재 개발되고 있는 추가적인 기술들은 다음과 같다. 즉, 암반내 유기 열용력과 초기 지중응력이 결합된 저장기준을 세분화하기 위한 암반공학적 메

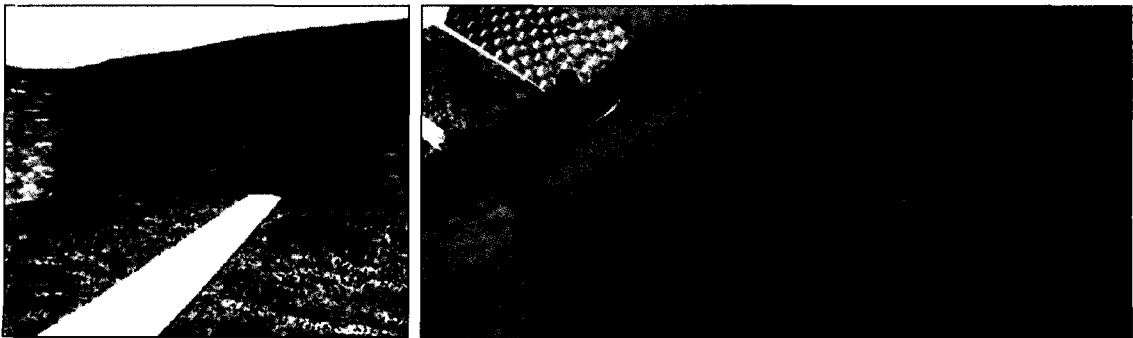


그림 14. LNG Pilot Cavern 모식도

커니즘 개발, 열응력으로 인한 균열발생 현상의 규명, 암반내 결빙층의 두께 및 거리를 파악하기 위한 레이더 토모그래피 물리탐사 기법의 개발등이 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 암지반의 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. 프랑스 Mont Blanc tunnel, 스위스 Gotthard tunnel, 일본 Dai-Shimizu tunnel, 노르웨이 Hoyanger-Lanefjord tunnel등에서 발생하였고, 00지하비축기지 현장에서 유사한 문제가 발생하고 있다. 그림 16은 심도별 최대, 최소 수평응력 상관도에 현장에서 측정된 응력수준을 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 최대 수평응력이 17MPa수준으로서 매우 크고, 최대 수평응력 대비 최소수평응력비가 3.7로서 매우 크다.

Spalling은 오히려 비교적 양호한 암반에서 발생하며, 전형적으로 현장에서는 깊이 0.5~0.8m의 암반파괴가 V notch 모양으로 발생하였으며, 시간에 따라 양과겉질이 벗겨지듯 순차적으로 파괴되었다. 이러한 Spalling과 같은 취성파괴 조건의 검토는 이미 캐나다 Martin교수 등이 10여 년 전부터 연구해 오고 있으며, Damage initiation criteria, Damage index criteria, Damage depth 이론식 등을 제안해왔다. 또한 일반 Mohr-Coulomb 파괴모델로는 이러한 과지압 암반 파괴 현상을 설명할 수 없고, 수정된 Hoek-Brown 파괴모델로서 설명된다고 하였다.

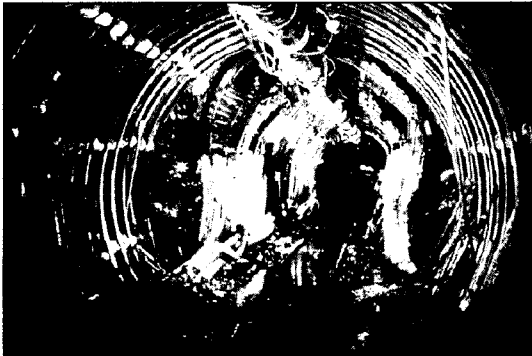


그림 15. Gotthard tunnel에서의 Squeezing 현상

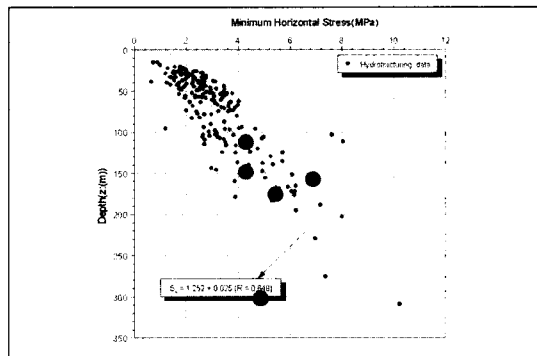
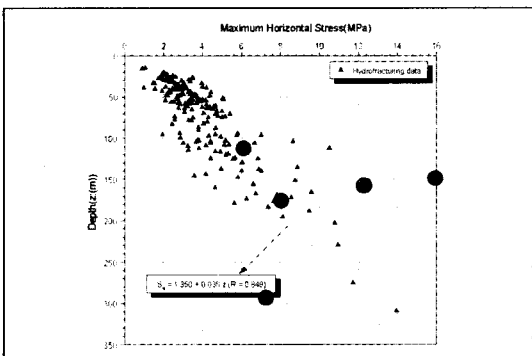


그림 16. 00유류비축기지 현장의 현지암반 응력수준

이러한 Martin의 기준에 따라 검토한 결과 Spalling 취성파괴 기준에 해당하였으며, 파괴 깊이가 또한 현장 파괴 양상과 유사하였다. 국내에서도 터널의 대심도화에 따라 암반의 초기응력을 측정하

여 이러한 과지압 현상을 설계단계에서 검토하여야 할 것이며, 관련 암반공학적 기술개발이 요구되고 있다.

이대혁 박사(SK 건설)

〈다음호에 계속〉

지반환경세미나 안내

미국 Soil Testing Engineers Inc의 Gordon P. Boutwell 박사를 모시고 아래와 같이 지반환경세미나를 개최하고자 하오니 회원 여러분들의 많은 참석을 바랍니다.

- 1. 발표제목** : Recent Trends in Municipal Solid Waste Landfill Design
- 2. 발표자** : Dr. Gordon P. Boutwell, Ph.D., P.E.
(미국 Soil Testing Engineers Inc 사장, Adjunct Professor of Civil Engineering, University of New Orleans, Editorial Board, ASCE Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering)
- 3. 장 소** : 고려대 공과대학 공학관 362호실 (토목환경공학과 세미나실)
- 4. 일 시** : 2003년 5월 27일(화) 오전 10:00~12:00
- 5. 특기사항** : 발표자료 및 주차권 제공
- 6. 연 락 처** :
 - 고려대 : 김지형 교수, 고려대 토목환경공학과, (전화)02-3290-3318, (Email) hyeong@korea.ac.kr
 - 미국 : Beyong-Seock Lim, Ph.D., P.E. (임병석 박사) (Phone)225-978-6502, (Email)limbs83@hotmail.com