

제3차 아시아 암반공학회 심포지엄 (3rd ARMS 2004)

글 | 조 현 토목기술부 부장 02-3433-7760 이메일 | hcho@ssyenc.com / 글 | 박부성 토목기술부 과장 02-3433-7715 이메일 | bspark@ssyenc.com



작년 11월 30일부터 12월 2일까지 일본 교토국제회관에서 제3차 아시아 암반공학회 심포지엄이 개최되었다. 본 심포지엄은 ISRM Regional Symposium으로서 국제암반역학회(ISRM), 일본지반공학회(JGS) 및 일본암반역학회(Japanese National Group of ISRM)의 후원으로 “Contribution of Rock Mechanics to the New Century”란 주제 하에 열렸는데 전 세계 수백 명의 관련 전문가들이 참석하였으며 우리나라에서도 대학교수, 국책연구소 연구원 및 시공사 임직원 등이 대거 참석하는 등 그 열기가 대단했다.

이에 심포지엄 관련 발표 논문들에 대한 소개 및 연구동향을 위주로 하여 아래와 같이 정리해 보았다.

1 교토 가는 길

오전 10시경 인천공항을 출발한 일행은 오전 11시 40분경에 오사카 간사이 공항에 도착했다. 비행 중 기내에서 일본해가 아닌 우리 동해의 아름다운 쪽빛바다를 내려다 보고 싶었는데 날씨가 흐려 구름 외에는 아무 것도 보이지 않아 다소 아쉬움을 남겼다. 공항에 도착하자마자 다시 심포지엄이 열리는 교토국제회관이 위치한 교토에 가기 위해 JR 특급(Express)을 탔다.

열차 안에서 바라본 도시 외곽의 풍경은 우리나라의 그것과 별다른 차이가 없었으나 대부분 1~2층의 자그마한 일본식 전통 가옥이 밀집되어 분포하고 있고 간간히 보이는 집 정원에는 국내에서 보지 못했던 여러 가지 아열대 식물의 꽃들이 군데군데

호드러지게 피어있을 뿐만 아니라 우리나라에서는 지금쯤 단풍이 지고 있는데 반해 여기서는 이제 사뭇은 단풍이 도처에 물들고 있는 등 가까운 곳임에도 불구하고 이국적인 느낌을 자아내게 하는 요소가 많았다.

교토는 혼슈의 중서부에 위치한 킨키지방의 다른 어떤 도시보다도 일본의 역사와 문화 유적이 많은 곳으로 794년 일본의 수도로 정해진 이후 약 1,000여년 동안 중심지로 발전해 왔다. 일본 역사의 시작이라고 할 수 있는 교토는 제2차 세계대전 중에도 폭격을 피할 수 있어서 사찰과 신사, 여러 유적들이 잘 보존되어 있고 국보와 중요 문화재로 지정된 많은 문화 유산의 보고로 알려져 있다.

약 75분간의 열차여행을 마치고 교토역에 도착한 일행은 교토역 광장 앞에 위치한 교토타워호텔에 여장을 풀자마자 지하철을 타고 교토국제회관으로 향했다.

회의장 앞에 도착한 일행은 흡사 일본 무사의 투구와 같은 형상을 한 거대한 건물의 위용에 적잖이 놀랐다. 1966년에 일본 최초의 국제회의시설로 설립된 본 회관은 156,000m²의 넓은 부지에 70여 개의 회의실을 갖춘 Main Building과 2개의 다목적용 Hall로 구성되어 있는데 회의장을 구성하고 있는 건물과 정원은 일본의 전통적 건축양식과 현대적 감각의 조화로움이 돋보였으며 구조물 하나하나에도 전통을 부여하는 세심한 설계는 이채로움을 느끼게 했다.

■ 사진 1. 교토역 내부



■ 그림 2. 교토국제회관



2 심포지엄

3일간의 일정으로 개최된 본 심포지엄은 기조강연(Key-note Lectures)과 논문발표로 구분되어 진행되었으며, 그 외 약 36개의 암반공학관련 설계, 조사, 분석, 장비 및 시공 회사가 참여하는 기술전시회(Technical Exhibition)가 행사기간 중 개최되어 열띤 홍보의 장이 되었다.

기술전시회에서 필자의 눈에 띈 것은 암반사면의 안정성 검토를 위한 불연속변형법(DDA, Discontinuous Deformation Analysis)과 3차원 낙석 Simulation 및 낙석이 예상되는 암반을 접착시키는 공법인 Rock Master 공법 등으로 이들은 향후 국내 암반사면의 설계 및 시공에 적용가능 할 것으로 사료된다.

특히 본 전시회 중에는 2011년 제 12차 ISRM Congress를 우리나라에 유치하기 위한 목적으로 한국암반공학회(KSRM)에서 부스를 운영하고 있었는데 열심히 우리나라의 암반공학 관련 기술력을 홍보하고 있는 회원들의 모습이 눈에 띄었으며 성공적인 유치가 기대된다.

기조강연은 총 7건이 있었는데 연사 및 강연제목은 표 1과 같으며 기조강연 중 필자에게 가장 큰 관심을 끈 암반터널에서의 위험 및 위험감소와 에너지 개발 과정에서의 지반환경적 피해와 관련한 강연내용에 대하여 구체적으로 소개하면 다음과 같다.

■ 표 1. 기조강연

연 사	강 연 제 목
Prof. R. Paul Young	Imaging and visualization of fracture in rock engineering
Dr. Phan Tien Vien	An integration approach to seismic data. A case study from Cuulong basin
Dr. Archivok V. Sunderam	Risk and hazard management in rock engineering
Dr. Nick Barton	Risk and risk reduction in rock tunnelling
Prof. Chun'an Tang	Energy development and associated geo-environment damage in China
Prof. Maurice B Dusseault	Deep biosolids injection: environmental protection with energy recycling
Dr. Takashi Ohsumi	Geological storage of carbon dioxide

■ 그림 3. Barton 박사의 기조강연



2-1. Risk and risk reduction in rock tunneling - Dr. Nick Barton

암반터널에는 지반공학적 잠재 위험요소가 아주 많이 존재한다. 즉 주요 단층대, 수많은 평면형 점토 협재 절리, 매우 연약한 암반, 매우 강하고 괴상인 암반, 마모성이 아주 강한 암반, 매우 낮거나 높은 응력, 다량의 지하수 및 높은 투수율은 가장 주요한 위험요소들이 분명하다. 터널에서 이러한 위험요소들의 부분적인 조합은 엄청난 재난을 가져올 수도 있다. 지질학적 및 수리지질학적 암반특성을 고려한 충분한 지표지질조사, 굴절법 탄성파탐사, 시추주상도 작성 및 시추공 시험 등의 조합을 이용한 적절한 사전조사 방법들을 통하여 상기의 위험요소들을 분명히 최소화 시킬 수 있다. 그러나 이러한 위험요소들은 좀처럼 제거되기 힘들며 소위 예기치 못한 문제들이 여전히 발생할 수 있다. 대부분이 지표부근에서 수행하는 이러한 조사방법은

터널이 깊어지면 깊어질수록 예기치 못한 상황에 대처하기 위하여 측정방법의 충분한 계획 및 평가에 대한 필요성이 더 커지게 된다.

특히, 본 발표내용 중에는 예기치 못한 위험요소의 조합에 의하여 TBM 공법을 포기하고 발파공법(Drill & Blast)으로 변경한 대표적인 사례를 제시하였는데 그 사례는 다음과 같다.

- 1) 터널심도 700~900m의 대규모 수압을 동반한 Fault swarm 발달 (Pont Ventoux HEP, N. Italy)
- 2) 터널심도 약 750m의 괴상의 규암과 활석질 파쇄 천매암의 호층대 지역으로 규암층내의 대수층 발달에 기인한 최대 70m³/분의 피압수 동반 등의 원인에 의하여 4000m³ 내외의 붕락발생 (Dul Hasti HEP, Kashmir)
- 3) 마모성이 강한 규암과 변성사암으로 구성된 지반으로 점토협재 절리군 발달 및 지하수 유출 등의 원인에 의해 압출성 변형(Squeezing deformation) 발생 (Pinglin Tunnels, Taiwan)
- 4) 다량의 지하수 유출 및 국부적인 단층대 발달 (Tunnel F, SSDS, Hong Kong)

Barton 박사는 또한 터널공사에 있어 개별 위험요소보다는 이러한 위험요소의 조합을 예측하기가 매우 어렵다는 것을 다시 한번 강조하였으며 위험요소를 사전에 파악하여 위험을 저감하는 방법 및 측정결과 해석 시 유의사항을 아래와 같이 제시하였다.

- 1) Q-histogram logging 을 활용함으로써(선진시추코아 또는 선진도갱 등을 대상으로 Q-system에 의한 암반평가) 잠재적 위험을 감소시킬 수 있다.
- 2) 막장전방을 대상으로 한 선진시추 및 본 공을 활용한 물리검층(음파검층 등), 탄성파 굴절법탐사, 탄성파 반사법탐사 등도 역시 위험 감소에 효과적이며 지반상황에 따라 이러한 측정방법의 조합에 의한 비교분석 시 더 나은 결과를 도출할 수 있다.
- 3) 대심도 터널의 경우 깊은 심도에 위치함에 따른 응력과 단층대의 치밀화(Compaction) 효과 때문에 P파 속도(Vp)에 대한 심도(또는 응력) 보정을 실시하는 것이 중요

하다. P파 속도는 이를 증가시키는 원인이 되는 응력효과 때문에 실제로는 불량 암질인데 양호한 암질이라는 잘못된 결과를 나타낼 수도 있으니 유의해야 한다.

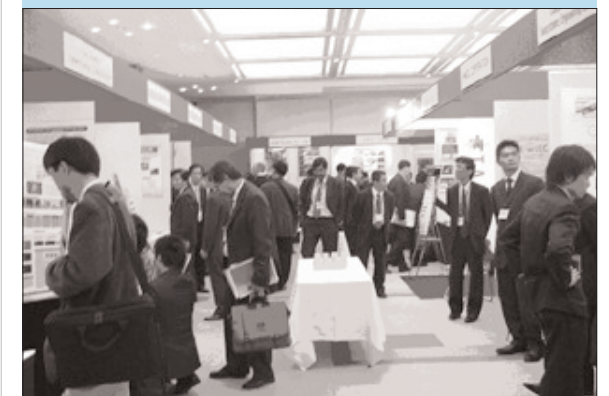
- 4) 효율적인 배수시설과 막장 전방에 대한 프리그라우팅은 위험을 감소시키는 아주 효과적인 방안이 될 수 있다. 그러나 불행히도 TBM 굴착공사에서 이러한 방법들을 효과적으로 적용하기는 어렵지만 매우 중요한 방법들이라고 할 수 있다.
- 5) 프리그라우팅 시 주입압력은 고압을 사용해야 하지만 상세한 지질구조를 고려하여 실시되어야 한다. 암반물성을 개선시키는 이러한 프리그라우팅은 국지적으로 수행될 수 있다.

2-2. Energy development and associated geo-environment damage in China - Prof. Chun'an Tang

본 강연에서는 최근 중국의 에너지 개발 및 전략 상황에 대하여 소개하였다. 중국의 실제 상황을 기초로 한 에너지 개발 전략은 “석탄을 기반으로 한 전력 중심의 전력 및 석탄의 통합적 개발”이라고 설명할 수 있다.

중국의 에너지 개발 과정에서 광산분야에서의 재난 및 지반 환경적 피해는 탄광 지반침하, Rockburst(암반파열현상), 석탄 및 가스의 폭발, 수리학적 및 지질학적 환경파괴, 수질오염 및 광미적지에 의한 피해 등을 포함하고 있으며 이러한 지반환경적 피해를 통제하기 위해 새롭게 개발된 몇 가지 분석방법 및 공

■ 그림 4. 기술전시회장



학적 기술(Rockburst modeling, Coal strata movement modeling, Outburst modeling, Gas drainage modeling 등)을 소개하였다.

논문발표는 “암반공학에서의 가시화(Visualization)”, “암반공학에서의 위험 및 재난 관리(Risk and Hazard Management)”, “에너지 개발 및 환경 보존”, “암반역학 및 암반공학의 개발” 등 4개 분야의 세션별 주제하에 총 201편의 논문이 구두발표(일부 논문은 발표 취소) 되었으며 이 중 일행인 조현 부장을 포함한 한국인에 의해 발표된 논문은 총 19편으로 전체 발표논문수의 약 10% 정도로서 우리나라의 암반공학분야에 대한 관심과 저력을 보여주는 계기가 되었을 뿐만 아니라 참석자들로부터 많은 관심을 끌었다.

발표된 논문들을 살펴보면 “암반공학에서의 가시화”란 주제하의 발표논문은 총 27건으로 이에는

- 터널전방 암질특성 파악을 위한 탄성파탐사 관련 사례, 측정 방법 및 암질평가시스템
- 전기탐사 결과를 이용한 산사태 발생지역의 지질조사 사례
- 탄층, 수리-지질 구조 등에서의 Visualization simulation 및 Imaging method
- Computational rock mechanics 등의 내용에 관한 연구 논문이 주류를 이루었고, “암반공학에서의 위험 및 재난 관리”란 주제하의 발표논문은 총 27건으로
- 사면안정: 확률론적 분석, GIS 기반 접근, GPS에 의한 3차원 연속변위 모니터링 기반의 안정성 평가, 3차원 Simulation, Remote sensing 기술, Micro geo-electric signals를 이용한 모니터링 방법 등
- 폐광지역 재해
- 지하공간: Rock burst 안전관리, 균열전파, Multi-tunnel의 안전율, Micro seismic monitoring 기술의 적용 등
- 핵폐기물 문제: 고준위 핵폐기물 처분장 설계 시 부지특성에 대한 불확실성 관리 등
- 지진위험 평가 등의 내용에 관한 연구 논문이 주류를 이루었다. 또한 “에너지 개발 및 환경 보존”이란 주제하의 발표논문은 총 13건으로
- 핵폐기물 문제: 암반거동에 관한 열역학, 불포화 Argillite의

소성변형 및 손상 모델링 등

- 지열 이용: 지열수의 탐사, 터널을 이용한 온방 및 냉방 등
- 천연가스과 석유 개발: 지하저장시설, 유전에서 지압의 3-D FEM 모델링 등의 내용에 관한 연구 논문이 주류를 이루었으며, 마지막으로 “암반역학 및 암반공학의 개발”이란 주제하의 발표논문은 4개의 주제 중 가장 많은 134건으로 가장 큰 관심을 보인 분야이다. 주된 내용은
- 암반사면안정: 심하게 풍화된 도로절취사면의 안정성 분석 및 보강 설계, 층상의 연암반 사면에서의 공극 수압의 분포, 절리가 발달한 암반사면의 파괴거동에 대한 수치해석, 마이크로웨이브를 이용한 암반사면의 계측, Digital terrain model기반의 암반사면분석, 암반사면 모니터링을 위한 사진측량법 등
- 댐 기초: 댐 그라우팅 기술, 댐 기초 커튼 그라우팅의 최적 간격, Needle penetration test에 의한 연암반 댐 기초의 굴착 관리 등
- 실내시험: 열린 절리를 가진 암반의 루전값과 투수성의 상관관계에 대한 이론적 고찰, 암반절리에서의 물의 흐름에 대한 2차원 평면 모델, 대전화강암의 크립 변형 거동에 대한 실험 및 수치 해석, 저온 암반에서의 공학적 성질에 대한 실험적 연구, 지하굴착에 있어서 실트스톤의 슬레이킹 거동, 암반균열의 전단거동에 대한 Interlocking 효과 등
- Numerical simulation: 동하중을 받는 암반의 균열 특성, 3차원 FEM을 이용한 Shaft pillar의 안정성 분석, 절리성 암반의 변위 역해석, 암반의 균열망을 통과하는 비선형 침윤에 대한 분석 모델, 균열암반으로 구성된 냉동 저장고의 열이동 분석 등
- 계측: FEM을 이용한 불균질 암반의 지역적 응력 평가, 암반 응력측정을 위한 혁신적 Probe의 실험 및 수치해석, 균열암반의 1차원적 P파의 감쇠 특성, 수압파쇄 및 AE법을 이용한 3차원 현장 응력의 결정, 시추코어의 균열 빈도에 주안점을 둔 기반암 평가 방법 등
- 불연속 암반의 수치해석: DDA를 이용한 낙석 시뮬레이션의 응용성, DDA를 이용한 지진 기원의 산사태, 3차원 DDA에 의해 계산된 쉘기파괴의 안전율, DDA에 의한 낙석모델의 지진응답분석, 현지 응력의 공간적 분포, 불연속 암반내에 분포하는 대규모 지하공간의 안정성 분석, DEM을 이용한 터널



막장의 안정성 효과, 삼축압축하에서의 블록 매스 모델의 수치모델링 등이다.

3 맺음말

본 아시아 암반공학회 심포지엄은 국제 암반공학 및 암반역학 분야의 최근 연구동향과 기술정보를 파악할 수 있는 매우 유익한 자리였을 뿐만 아니라 세계적인 석학들의 발표내용을 직접 대할 수 있는 기회였기에 더욱더 뜻 깊었다. 다만 일본의 암반사면, 터널 및 지하공간 등 암반공학 관련 기술견학을 하고 싶었는데 Technical tour가 계획되어 있지 않아 아쉬움으로 남았다.

우리나라는 국토면적이 좁은 편이며 다른 나라에 비해 지형적 굴곡이 심할 뿐만 아니라 매우 다양한 암종 및 복잡한 지질구조를 지니고 있으므로 모든 면에서 지하공간 개발 등 암반공학 관련 분야의 연구 및 기술 개발이 더욱 중시되고 있으며 특히 인구증가, 산업다양화 및 공간수요 증가 등에 부응하여 이러한 분야의 필요성은 더더욱 증대되고 있는 실정이다.

최근 국내의 경우 암반공학과 관련한 다양한 대규모 건설사업이 준공되었거나 진행 및 계획되고 있다. 예를 들면 고속철도, 원유, LPG, LNG 등을 저장하기 위한 지하비축시설, 지하핵폐기물처리장, 양수발전소, 대단면 정거장, 댐 비상여수로 등이 대표적인 구조물이라 볼 수 있으며 그 외에도 지하철, 도로 및 철도 터널 등 무수한 사회간접자본시설들이 개발되고 있다.

특히, 이러한 터널 및 지하공간은 최근 들어 장대화 및 대형화의 경향을 보이고 있으며 열악한 지질조건을 회피하기 보다는 기술적으로 이를 극복하려는 과정으로, 또한 기존의 요소기술개발에서 통합시스템개발로의 설계 및 시공을 유도하려는 연구가 활발히 진행되고 있는 것이 작금의 현실이다.

따라서 점점 더 중요도가 높아지고 있는 암반공학 관련 분야의 다양하고 우수한 기술 및 연구개발 결과를 발굴하여 관련 프로젝트별 설계 및 시공에 접목하기 위한 노력이 필요하며 그 적용성에 대한 면밀한 검토가 요구된다.