

## 제 9차 국제암반역학회 총회 발표논문 주제별 종합보고

정소길<sup>1)</sup> · 전석원<sup>2)</sup>

1)한국자원연구소 자원연구부

2)서울대학교 지구환경시스템공학부

지난 8월 25일에서 28일 사이에 프랑스 파리에서 제9차 국제암반역학회 총회가 개최되었다. 이 총회에서는 총 291편의 논문이 발표되었으며 이들은 크게 4가지의 주제로 분류되었다. 조직위원회 측에서는 주제별 종합보고를 하였는데 여기서는 그 보고내용을 소개하고자 한다.

### 종합보고 "암반공학, 환경안전과 제어에 대한 20세기의 교훈과 21세기의 과제" (General Report Concerning Some 20th Century Lessons and 21st Century Challenges in Applied Rock Mechanics, Safety and Control of the Environment)

Nick Barton, Technical Advisor, NGI, Oslo & Visiting Professor, USP, Sao Paulo

#### 1. 서 론

본 장은 건설분야와 자원개발 분야에서의 암반공학적인 연구를 요약한 것이다. 여기에 관련된 세부 연구분야는 암반의 취약성, 강도 및 그 외의 다양한 주제로 이루어져 있다. 특히 팽창성 암반과 암반의 constitutive modelling에서 응력변환을 하는 것 등은 기초적인 연구분야의 발전으로 볼 수 있다. 암반의 팽창성, 이방성 및 경계조건 등에 대한 연구도 활발하다. 암반의 특성이 복잡하다는 점과 불연속면을 많이 포함하고 있는 암반 내에 세계적으로 수많은 건설공사를 수행하기 위해서는 암반의 평가와 경험적인 암반구조물 설계에 대한 연구는 필연적인 과제로 볼 수 있다. 확장된 Q-system과 최근에 개발된  $Q_{TBM}$ 을 이용하여, 암반평가를 통해 설계의 입력자료 및 입력자료를 검증하는 연구도 상당히 유용하다. 연속체 모델링과 불연속체 모델링도 비교 검토되었다. 암반을 단순히 black-box인 연속체로 모델링하는 것보다 암석, 암석의 절리, 그리고 불연속면 등의 요소로 구분하여 모델링하는 개념은 훨씬 합리적이고 기술적으로 타당하다고 볼 수 있다. 시추공의 크기 보다 더 큰 공동을 암반 내에 굴착할 때 암반의 이방성으로 평가되는 절리라든지 암석 구성요

소들에 대한 거동을 무시하면 예상하지 않은 결과를 초래하게 된다. 부적절한 연속체 모델링을 하게 되면 coupled behavior와 같은 잘못된 결과를 낼 수도 있다.

21세기의 암반공학도는 지질학, 지구물리학, 수리학, 토질역학, 암석역학, 통계학, 확률론, 환경공학 등 다양한 분야를 종합하는 역량을 가지고 있어야 함은 물론 경제학, 보험, 제약, 장비설계, 장비운용, 시공 및 계획 등에 대해서도 이해할 수 있어야 할 것으로 본다(Nelson, 1996). 이와 같은 많은 분야를 나열한 것은 암반공학이 수적으로 보나 분야로 볼 때 큰 학문분야이기에는 하나 복합적인 다른 분야를 잘 조화해야 하는 기술을 필요로 한다. 첫 번째 주제와 관련된 세부 내용은 다음과 같이 분류될 수 있다.

- 절리 및 불연속면에 대한 응력변환
- 입력자료 및 constitutive model
- 암반의 물성을 예측하기 위한 암반평가 방법
- 절리암반과 단층대에서의 TBM 터널링
- 절리암반의 그라우팅
- 불연속체 모델링 및 이방성

#### 2. 절리 및 불연속면에 대한 응력 변환

대상 암반 내에 작용하는 주응력 성분으로부터 가상의 평면에 법선방향으로 작용하는 응력성분을 구할 때 일반적으로 Mohr의 이론(Mohr의 응력원)을 적용하며, 이는 대상암반의 주응력성분으로부터 가상의 평면에 작용하는 법선응력과 전단응력성분으로 변환될 수 있다. 암반과 토질에서는 절리와 단층면이 존재하고 대부분의 경우 팽창하는 특성을 가지고 있다. 아주 높은 응력하에서의 전단 시험을 제외하고는 다져진 실트, 모래, 자갈, rock fill 및 과밀 점토 등도 팽창을 하는 경향이 있다. 팽창이 되면 전단응력과 전단 변형률의 축이 일치하지 않게 되므로 토질역학 및 암반공학에서 Mohr 이론을 더 이상 적용할 수 없는 조건에 놓이게 된다. 따라서 팽창성 암반에 응력변환을 적용하려면 Mohr의 응력이론을 변형하여 non-coaxial 응력변환 계수가 포함되어야 한다. 토질역학 및 암반공학분야에서는 사면하부 및 터널주위 암반 내에서 일정한 응력 및 강성의 경계조건의 올바른 평가에 의한 에너지의 보정이 필요하다는 의견도 제기되고 있다. 역학적인 관점에서의 절리면 거칠기를 팽창에 의해 보정해야 할 뿐만 아니라 수리학적인 거칠기로도 보정해야 한다. 따라서 팽창은 단지 거칠기와 법선응력의 증가만을 의미하지 않음을 의미한다. Gale 등(1993)은 JRC-JCS 혹은 Barton-Bandis 모델의 수정을 제기하였는데, 이들 역시 Mohr의 응력변환에 대한 문제점을 발견하였기 때문이다. 이들은 전단시험을 할 때에 최대주응력 혹은 최소주응력 중의 하나를 전단절리면의 방향과 일치시키는 재래식 방법과는 달리 새로운 유압 2축 가압시스템을 이용하여 전단절리면의 각도를 45°만큼 기울였다. Mohr의 응력 변환을 보정하는 방법으로서 전단팽창각( $d_n$ )을 응력변환식에 보완하는 것이다. 이 전단팽창각은 응력, 변위 및 시편의 크기에 영향을 받으며, 이를 법선 및 전단변위를 축으로 하는 평면상에 나타내면 납작한 S자 형태가 된다. Bakhtar 및 Barton(1984) 등이 사용한 팽창을 보정한 응력변환식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\sigma_n &= 1/2(\sigma_1 + \sigma_2) - 1/2(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(\beta + d_n) \\ \tau &= 1/2(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2(\beta + d_n)\end{aligned}$$

축이 다른 응력변환식에  $d_n$ 를 추가함으로써, 법선응력  $\sigma_n$ 은 Mohr이론치 보다 항상 크고,  $\tau$ 는  $(\beta + d_n) < 45^\circ$ 일 때에 Mohr의 이론치보다 크고,  $(\beta + d_n) > 45^\circ$ 일 때는 작게 나타난다.  $\beta$ 의 값이  $45^\circ$ 인 특수한 경우에 전단 절리면에 작용하는  $\tau/\sigma_n$ 은 Mohr의 이론치 보다 현실적으로 작게 나타난다.

### 3. 입력자료 및 constitutive model

이번 Congress의 제1주제 분야에는 터널, 공동 그리고 암반사면 등의 수치모델링 결과에 대한 연구가 많이 발표되었다. 2차원 혹은 3차원의 연속 혹은 불연속체 모델링 방법이 소개되었고 부분적으로 절리면을 나타내는 방법으로서 통계적인 방법과 확률적인 방법을 적용하기도 하였다. 지금까지 20세기의 40여년 동안 암반공학이 발전되어 오면서 제기되었던 문제들을 다음 21세기에서 발전시키는 방법에 대해서도 생각하여야 할 것으로 본다. 가장 중요한 문제는 암반의 적절한 강도와 변형계수 그리고 이들 변수들을 활용하는 가장 적절한 모델링일 것으로 판단된다. Hoek-Brown의 경험적 변수와 Q시스템 혹은 RMR 값을 기초로 하여 결정된 C값 및  $\phi$ 값을 신뢰할 수 있는지가 의문이다. 암반 내 절리분포와 응력의 이방성을 고려하지 않았을 때, 그리고 이들 두 요소가 무시된 해석결과를 수용할 수 있는지도 문제가 된다. 신선암의 점착력 및 내부마찰각 그리고 물리적인 의미가 별로 없는 m값과 s값으로부터 암반의 강도를 예측하는 데는 문제가 제기될 수 있다. 암반을 대상으로 Hoek-Brown의 기준을 적용하기 위해서는 이들이 제안한 기준의 적용한계를 잘 따라야 한다. 즉, 이 Hoek-Brown 기준은 굴착공동의 크기에 비해 암반블럭의 크기가 상대적으로 작아야 되거나, 암반의 물성이 모든 방향으로 같다는 조건을 만족할 때 적용될 수 있다. 연속체 모델의 적용 빈도를 감안할 때, 대부분의 암반 및 경계조건을 등방연속체 모델링과 모든 방향의 암석 물성이 같은 것으로 가정하는 것은 부적합하다. 만약 점착력이 없는 절리면이 위에서 언급한 제한적인 등방성 조건을 만족할 수 없을 때, 점착력과 마찰각에 의해 결정되는 Mohr-Coulomb 이론이나, m 값과 s 값으로 암반의 등방성 전단강도를 결정하는 것은 암반의 실제적인 거동과는 거리가 멀다. 이러한 문제는 암반공학 분야에서 자주 나타난다. 3개의 단순화시킨 절리군을 2차원적으로 모델링할 때에도 절리군의 조건에 따라 아주 다른 하중-변형 거동을 보여주게 된다. 신선암의 물성으로부터 점착력, 마찰각, m 값, s 값 등으로 변형시켜 암반의 거동을 예측한다면, 이 방법 보다 더 합리적인 접근방법은 절리의 강도 및 절리의 변형을 토대로 한 모델링이라 할 수 있다. 파쇄암반이나 절리암반의 전단거동을 부분적으로 잘 설명해 줄 수 있는 것은 경험적으로 유도된 식으로서 이를 위해 입력자료로서, JRC, JCS,  $\phi$ ,  $\phi_0$  등이 필요하다.

#### 4. 암반의 물성을 예측하기 위한 암반평가 방법

암반의 파괴기준을 적용할 때 Mohr-Coulomb 이론 및 Hoek-Brown 이론의 원래 취지와 서로 다르게 활용되고 있는 것과 마찬가지로 1970년대 이후 활용되고 있는 두 가지의 암반분류법(Bieniawski, 1973 and Barton et al. 1974)도 잘못 활용되는 경향이 있다. 그러나, 암반분류법은 여러 가지 다양한 조건에서 비교적 유용하게 활용되어 왔다고 볼 수 있다. RMR과 Q-system이 개발된 이후 많은 토론이 이루어졌으며, 제안되었을 당시부터 지금까지 이들 두 방법은 각각 하나는 선형적이고 또 하나는 로그함수적인 스케일을 사용해 왔다. RMR에는 응력에 관한 요소가 없으나, Q-system에서 반영되고 있는 응력관련 변수인 SRF 값과 같이  $\sigma_1/\sigma_3$  값에 의해 간접적으로 반영되고 있다. RMR에는 절리면의 방향 혹은 이방성과 절리면 물성의 평균치를 고려하며, 유리한 방향과 불리한 방향에 대한 보정을 한다. Q-system에서는 터널이나 동굴의 안정성에 가장 불리한 영향을 주는 절리면의 거칠기 변수 및 풍화정도에 대한 변수를 적용한다.

##### 가. $V_p$ -Q 및 심도 영향

지표로부터 심도가 25m이고 공극률이 1%일 때의 암반내 탄성과 속도  $V_p$ 와 Q 값 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$V_p = 3.5 + \log Q_c(\text{km/sec})$$

탄성과 속도는 심도가 증가할수록 증가(비선형적으로)하며 공극률이 증가할수록 감소(선형적으로)한다. Q값을 사용하는 것은 일축압축강도가 100 MPa 보다 크거나 작을 때이며, 경암을 대상으로한 탄성과속도- $V_p$ - Q-심도-공극률 사이에는 일정한 관계가 있다(Barton 2000a).

##### 나. $V_p$ -Q-지보압

공동의 반경방향 지보압은 록볼트 및 앵커의 지지능력으로 나타낼 수 있다(Barton et al. 1974).

$$P_r = 0.1 Q_c^{-1/3} (\text{MPa})$$

위 식은 다음과 같이 암반의 변형계수에 반비례한다.

$$P_r \propto 1/M$$

즉,  $P_r = 100/M$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $P_r$ 은  $\text{tnf/m}^2$ , M의 단위는 GPa 이다. 따라서 공동굴착에 의해 교란된

지역을 대상으로 암반의 변형계수를 감소시키면 이는 지보압의 증가를 초래하게 된다. 그러나, 암말이나 암반의 판상으로 파괴되지 않는 한 암반의 변형률이 크기 때문에 처음에 설계된 지보압을 그대로 적용할 수 있다.

##### 다. $V_p$ -Q-Lugeon

Q값과 Lugeon 값 사이의 관계식을 프랑스의 댐건설 현장에 적용하였다. Lugeon 시험에서 현지암반 변형시험과 같은 과정으로 해석을 한다는 점은 이러한 관계식이 성립될 수 있다는 사실을 뒷받침해 준다. Lugeon 시험에서 수압이 10기압을 초과할 경우 암반내 절리면내 작용하는 유효응력이 크게 감소된다는 것을 뜻한다.

##### 라. 터널의 변형과 Q값

계측된 변위와 수치해석으로 예측한 변위를 비교하는 것은 컴퓨터 프로그램의 적용성을 검증하거나 혹은 입력 자료를 적정화할 필요성을 보여주는 것이다. 굴착으로 인해 교란된 지역에서는 입력자료를 적정화할 필요가 있으나, 응력조건이 이방성을 가질 경우, 변형률의 크기만 감소시키면 연속체 모델이 가지는 자체적인 문제를 야기할 수 있다. 그러나 수천 km 되는 터널구간 전체를 대상으로 모두 수치해석적인 방법을 적용할 수는 없으므로 경험적인 방법을 적용할 필요성이 있으며, 경험적인 방법을 수치해석의 예비 검증 방법으로 활용하는 것이 좋다. 다음은 연직응력( $\sigma_v$ )과 수평응력( $\sigma_h$ ) 및 암반의 일축압축강도( $\sigma_c$ )를 연직방향의 변위( $\Delta_v$ , mm)와 수평방향의 변위( $\Delta_h$ , mm) 사이의 관계식으로 나타낸 것이다.

$$\Delta_v = \frac{\text{SPAN}}{100Q} \sqrt{\frac{\sigma_v}{\sigma_c}}$$

$$\Delta_h = \frac{\text{HEIGHT}}{100Q} \sqrt{\frac{\sigma_h}{\sigma_c}}$$

$$K_0 = \left[ \frac{\Delta_h}{\Delta_v} \right]^2 \left[ \frac{\text{SPAN}}{\text{HEIGHT}} \right]^2$$

여기서, SPAN 및 HEIGHT의 단위 역시 mm이며,  $K_0 = \sigma_h/\sigma_v$  이다. 예를 들어 요빅경기장의 경우, 공동의 폭(Span)이 60 m(60,000 mm)이고 Q값이 10이었으며, 지표로부터 평균심도가 40 m이므로 연직방향의 응력  $\sigma_v$ 는 1 MPa이다. 이지역 암반인 변질 편마암의 일축압축강도는 75 MPa로 나타났다. 이와 같은 조건에서 연직방향의 변위는 다음과 같이 계산될 수 있다. 즉,

$$\frac{60,000}{100 \cdot 10} \sqrt{\frac{1}{75}} = 6.9 \text{ mm}$$

동굴을 시공할 때 예측된 변위가 6-8 mm 이었음을 감안하면 위의 관계식과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 예측결과와 계측결과가 일치하는 것은 드물며, 이 경우에 수평방향의 변위 성분이 연직방향의 변위성분의 크기에 영향을 미친 것으로 보인다. 다른 하나의 예로서 인도의 Nathpa Jhakri 발전소의 동굴(Chryssanthkis et al. 1996 및 Bhasin et al. 1996)의 경우 공동폭이 20 m(연직응력, 6 MPa, 일축압축강도, 35 MPa), 공동의 높이는 50 m(수평응력, 4 MPa, Q값, 3)로서 다점지중변위계에 의한 연직방향 지중변위가 25 mm, 수평방향의 지중변위는 50-55 mm로 계측되었다. 계산식에 의한 예측치는 각각 28 mm 및 56 mm로 나타나 이 경우에도 변위값이 잘 일치하고 있으며, 또한 축압계수도 0.64로서 측정된 값으로 계산한 것과 잘 일치하고 있다.

#### 마. 약식 암질평가 방법

탄성파속도, Q값, M값, 변위 등은 수치해석결과를 검증하고 계측치를 분석하는데 가장 효과적인 암반공학적 기법이라 할 수 있다. 그러나, Q-system에서  $J_w$ 라든가 SRF 그리고 RMR에서 지하수의 영향 등은 제외되어야 할 것 같다. 예를 들어 캐나다의 광업분야에서는 갱내에 물이나 전단면 혹은 단층면이 잘 나타나지 않기 때문에 Q-system에서  $J_w$ 와 SRF를 고려하지 않고 축소형인  $Q = RQD/J_n \times J_s/J_o$  (즉, block size  $\times$  block shear strength)로 나타내고 있다. 그러나 전단면, 단층 및 접토 등의 영향을 많이 받을 때에는 이와 같은 축소형 Q 값을 사용할 수 없다 (Goel and Wezenberg, 1999). 통계적인 접근방법을 활용할 때는 Q와 같이 로그함수 분포를 사용하는 것 보다 RMR이나 GSI(Hoek et al. 1995)를 활용하는 편이 더 유리하다 (Syrjanen and Loven, 1999).

#### 바. 터널지보에서 Q값과 RMR의 관계

GSI와 Q사이의 관계 및 RMR과 Q 사이의 관계식은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$GSI = 9 \ln Q' / 44$$

$$R \approx 50 + \log_{10} Q \text{ (Barton, 1995)}$$

### 5. 절리암반 및 단층대에서의 TBM 터널링

TBM 터널링에서 다음 두 가지의 문제가 가장 중요하다.

- (1) TBM 능률에 대한 올바른 예측, (2) 단층지역의 굴진.

이 두 가지의 문제가 터널의 내부 및 외부의 안전과 환경에 가장 큰 영향을 미친다. Barla et al.(1999)는 서로 다른 세 가지의 모델링 방법을 적용하여 단층대에서의 TBM 굴진능률에 대해 분석하였는데 그 결과 터널의 굴진기간이 6개월로부터 9개월까지 지연되는 것은 피압수의 출수, 입도가 작은 암편들이 터널로 흘러나오는 이른바 "church roof" 및 "natural shaft" 형태가 생기기 때문이라 설명하고 있다. 현장에서의 Q값은 0.007로 나타났으며, 불연속체 모델링이 현상에 가장 접근된 결과를 보여주었다. Astolfi et al.(1999) 등이 발표한 논문은 양수발전소에서 수압터널(penstock)을 교체하기 위해 굴착된 경사 TBM에 관한 것인데, Wickham et al(1974)의 RMR과 RSR을 이용하여 예측치와 계측치를 비교하였다. 이들은  $RSR_{TBM}$ 과 절삭심도의 역수 ( $FPI = \text{cutter load/penetration rate}$ ) 사이의 관계를 규명하고자 하였으며, 그 결과 한 지역에서는 관계가 있는 것으로 나타났고 다른 한 지역에서는 그렇지 않은 것으로 나타났다.

#### 가. 절리암반 및 단층대에서의 $Q_{TBM}$

암반과 커터 사이의 상호관계를 나타내는 변수인 SIGMA/F 등을 고려하지 않고 단지 지금까지의 Q값만으로는 절삭속도(PR)와 굴진속도(AR)를 정량화하기가 어렵다. SIGMA는 암반강도에 대한 경험적 예측치로서,  $Q$ ,  $\sigma_c$ ,  $I_{50}$ , 절리방향 절리강도의 이방성 등을 포함한다. F는 커터에 가해지는 힘, CLI는 커터의 수명을 나타내는 지수 (NTH, 1994), q는 석영함량을 백분율로 나타낸 것이며,  $\sigma_0$ 를 터널심도 100 m 수준에서의 응력으로 표준화시킨 것이다.  $Q_{TBM}$ 은 경우에 따라 최대치와 최소치의 비율이 12까지 되지만,  $10^3$ 보다 작거나  $10^4$ 보다 큰 경우에 속도가 아주 느려진다. 가장 이상적인 경우는  $Q_{TBM}$ 의 값이 0.1로부터 10까지이지만 터널의 크기에 영향을 받는다. 절삭속도(PR)는 다음과 같이 역해석을 통해 구할 수 있다.

$$PR = 5 Q_{TBM}^{-0.2}$$

혹은  $Q_{TBM} \approx (5/PR)^5$ 로 나타낼 수 있다. 이 식들은 타당성연구 단계에서 예측식으로 이용할 수 있으며, 아울러 터널 시공중 역해석(Barton, 1999b)으로 사용할 수 있다. 실제 굴진속도는 U값에 비례한다. 즉,

$$AR = U \cdot PR$$

또 다른 방법으로 주어진 시간(한공, 하루, 일주, 한달 등)에 대해 굴진속도의 반대개념인 감속지수를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$U = T^m$$

여기서, T의 단위는 시간이다.

나. TBM 터널 지연굴진의 정량화

터널의 길이가 길면 길수록 터널의 굴진속도가 감소하며 터널굴진에 역효과를 가져온다. 터널의 굴진기간이 경과할수록 장비가 서서히 마모되며, 경우에 따라서는 베어링을 교체해야할 필요가 있다. 145개의 TBM 시공현장 사례에서 보면, 터널굴진 기간이 경과할수록 굴진 능률이 점차 감소되는 것으로 분석되었다. 일반적으로 터널의 굴진능률 감소의 척도인 기울기(Gradient, 단위 시간에 대한 절삭속도 혹은 굴진속도)가 -0.5로부터 -0.25까지로 나타나지만 경사 TBM 터널의 경우(Astolfi et al. 1999)에는 PR = 25, 즉, 2.6/hr, 하루의 평균속도 11.2 및 12 혹은 AR이 약 0.55로부터 0.60 m/hr로 나타나 이 경우의 굴진능률이 더 크게 감소하는 것을 보여준다. 예상치 못한 경우에 그 기울기가 -0.5(Q값이 약 0.1) 및 -0.7(Q값이 약 0.01) 혹은 -0.9(Q값이 약 0.001)로 나타났으며, 이들은 다음 21세기에 풀어야 할 숙제이다.

6. 절리암반의 그라우팅

출수 터널에서 지반의 지수방법으로 폴리우레탄을 이용한 그라우팅을 실시하였다(Andersson, 1999). 폴리우레탄은 물과 반응을 일으켜 이산화탄소를 발생시킴으로써 출수가 심한 지역의 출수량을 조절할 수 있다. 노르웨이에서는 터널 시공을 위한 사전조사 및 출수, 호수의 수량저하, 조림지에 미치는 영향, 약 1 km 이상 떨어진 지역에서 민가의 지반침하 등으로 많은 어려움을 겪었다. 암반내 응력조건, 지질구조, 탄성과 속도, 투수계수, 및 이들의 빈도 및 이방성 사이에는 어떤 공통된 상관성이 있기 때문에, 암반내 응력측정, 투수시험, 반사법 탄성과 탐사 등이 수행되어야 한다(Barton, 2000b). 터널굴진, 특히 TBM 굴진에서 출수량이 많을 때, 시험시추와 폴리우레탄 및 마이크로 시멘트의 사전 주입으로 터널의 안정성 향상과 변위 및 출수량 조절에 큰 효과를 볼 수 있었다. 이와 같은 세 가지의 요소를 제어할 수 있을 경우 지속적

인 TBM의 능률 향상을 가져올 수 있다.

가. 사전그라우팅에 의한 암반물성의 개량

터널을 굴진하기 전에 환경영향을 저감하기 위한 선진 그라우팅의 효과를 파악할 때, Q-system의 변수를 사용할 수 있다. 투수성을 가지는 절리와 수로(주로 최대 주 응력방향과 평행한 경우)를 따라 그라우팅이 용이하기 때문에 그라우팅을 함으로써 투수계수 텐서의 방향이 심하게 바뀔 수 있고 투수계수의 크기가 감소될 수 있다 (Quadros and Filho, 1995). 시멘트와 암반사이의 결합과 접촉강도가 향상된다면 다음과 같이 암반물성이 개량될 수 있다. 즉,

- RQD 는 30%으로부터 50%로 증가
- $J_n$ 은 9로부터 6으로 감소
- $J_s$ 은 1로부터 2로 증가
- $J_r$ 는 2로부터 1로 감소
- $J_w$ 는 0.5로부터 0.66으로 증가(1까지도 증가)

따라서 그라우팅 이전에 Q값이  $Q=(30/9) \times (1/2) \times (0.5/2.5) \approx 0.3$  일 때, 선진그라우팅을 한 후에는 Q값이  $Q=(50/6) \times (2/1) \times (0.66/1 \text{ or } 0.25) \approx 11$  (or 4.4)로 개량된다. 선진 그라우팅후 터널을 굴진할 경우 Q값, 탄성과속도, 변형계수, 투수계수(Lugeon), 터널지보압, 터널의 변위 등이 서로 조합시켜 여러 가지 변수를 개량할 수 있다. 예를 들어 공극률이 1%이고 일축압축강도가 100 MPa일 때, 터널의 폭은 10 m로 할 경우 다음과 같이 각종 지반변수가 개량된다. 따라서 터널굴진시 영구 지보량도 다음과 같이 절감될 것이다. (아래의 Table 참조)

나. 그라우팅과 Lugeon 시험

Groutability를 평가할 때 또 하나의 중요한 요소는 주입압력이 Lugeon 시험의 압력보다 큰지를 고려해야 하는 점이다. Lugeon 시험에서는 1 MPa의 초과 압력을 사용하기 때문이다. 만약 주입압력이 Lugeon 시험시의 압력보다 큰 경우에는 그라우팅의 효과가 향상되며, 적어도 투수성이 있는 절리면에 대한 그라우팅 효과가 크다. Lugeon 값의 하한치는 다음과 같이 주어진다.

$$L \approx 1/Q.$$

| 지보방법   | 그라우팅전 | 그라우팅후(I) | 그라우팅후(II) | 비고      |
|--------|-------|----------|-----------|---------|
| 록볼트간격  | 1.5 m | 2.4      | 2.1       |         |
| 숏크리트두께 | 12 cm | 4        | 5         | S(fr)지보 |

| 탄성과 속도 km/sec | 6.5   | 5.5  | 4.5 | 3.5 | 2.5 | 1.5  | 0.5   |
|---------------|-------|------|-----|-----|-----|------|-------|
| Lugeon 값      | 0.001 | 0.01 | 0.1 | 1   | 10  | 100  | 1000  |
| $Q_c$         | 1000  | 100  | 10  | 1   | 0.1 | 0.01 | 0.001 |

또한 탄성과 속도와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$V_p \approx 3.5 + \log Q_c$$

따라서 Lugeon 값과 탄성과 속도 사이의 하한치는 다음 관계식으로 주어진다.

$$L \approx 10^{(3.5 - V_p)}$$

응력의 크기가 증가하거나 심도가 깊어질수록 탄성과 속도는 증가하기 때문에, 심도가 증가하더라도  $Q_c$  값이나  $Q_c$  값의 크기가 변하지 않더라도 심도가 증가할수록 Lugeon 값은 작아짐을 알 수 있다. 다음은 프랑스에 있는 두 개의 댐기초에 대한 예로서 현실적인 수치를 제시하고 있다. (위의 Table 참조)

$Q_c$  값은 심도에 따라 변하는데, 예를 들어 탄성과 속도가 5.5 km/sec 일 때 1000 m의 심도에서  $Q_c$  값은 약 0.4이며 심도가 750 m 일 때는 4, 그리고 심도가 100 m 일 때는 40이 되고, 심도가 25 m 일 때는 100이 된다. 광산의 갱도나 터널의 전방에 원격탐사 방법을 적용하였을 때 탄성과 속도가 커서 Lugeon 값이 낮은 지역으로 판단하여 그라우팅 효과가 과소평가될 수 있다. 그러나,  $Q_c$  값이나  $Q_c$  값이 그다지 크지 않을 수도 있기 때문에, 터널의 안정성 면에서는 탄성과 속도가 빠르다고 해서 암반의 조건이 양호하다고 단정할 수는 없다. 이러한 측면에서 볼 때, 절삭속도의 계측과 함께 선진천공을 실시하고 필요할 때에는 코어링을 실시하는 것은 반드시 필요하다. 주입시험(및 Leakage 모니터링)은 터널(특히 TBMT 터널) 굴진 막장 전방에서 필요할 때마다 적용함으로써 예상치 않은 현상과 환경영향을 최소화할 줄일 수 있다.

## 7. 불연속체 모델링 및 이방성

입력자료와 constitutive model에서 연속체 모델링을 수행할 때, 절리의 이방성에 대한 경향을 곧잘 간과함으로써 발생하는 문제가 제기되었었다. 그러면, 이와 관련된 또 하나의 예로서 입력자료의 크기에 있어 응력이방성이 크면 어떤 영향을 미치는가에 대해서도 문제가 제기될 수 있다. 이러한 관점에서 등방연속체 모델과 모든 방향으로 같은 값의 입력자료를 사용해서는 안 될 것으로 판단된다.

층리가 발달한 지층을 대상으로 연속체 모델을 적용할 때에는 입력자료가 transverse isotropic parameter 혹은 orthotropic 분포를 가지도록 하는 것이 현실에 더 가깝다. FLAC이나 FLAC3D에서 ubiquitous joint formulation을 적용하는 것은 연속체 모델링의 현실성을 나타내게 해준다.

### 가. 이방성 입력자료

Hibino and Motojima(1999)는 지하동굴 주위의 절리 암반의 이방성 거동에 대한 연구결과에서, 어느 특정방향의 절리 빈도가 10%에 불과한 암반의 변형률과 전단강도가 이 방향으로 2배까지의 이방성을 보이는데 대한 연구를 하였다. 동굴의 변위 측정결과 응력의 이방성에 의한 영향 보다 절리의 이방성에 의한 영향이 더 크게 미치고 있음이 발견되었다. 응력의 이방성, 혹은 절리의 이방성, 또는 이들의 조합에 의한 이방성의 축이 거의 일치할 때, 탄성과 탐사에 의해 이를 계측할 수 있다. 지표 근처에서는 반사법 탄성과 탐사가 적용될 수 있다(Nunn et al. 1983, Oda et al. 1986). 탄성과 속도가 0.5-1 km/sec 까지의 이방성을 나타낸다는 것은 변형계수의 이방성이 대단히 큼을 의미하며, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$M \approx 10.10^{\left[ \frac{V_p - 3.5}{3} \right]}$$

여기서, M의 단위는 GPa,  $V_p$ 는 km/sec 이다.

### 나. 불연속체 모델링에 대한 검토

불연속체 모델링은 60년대와 70년대 사이에 Cundall에 의해 개발되어 주로 사면에 많이 적용되어 왔으며 오늘날 UDEC, 3DEC, DDA 등으로 발전되었다. 이러한 불연속체 모델링에서는 절리의 분포를 어떻게 선정하는가에 따라 그 결과가 결정된다. 모델의 선택은 절리의 양에 따라 결정되는데 일반적으로 불연속체 모델의 적용 대상은  $Q_c$  값이 0.1로부터 100 정도까지에 해당되거나 RMR값으로는 30에서 80 사이의 값을 나타내는 암반이다. 절리가 이방성을 보이거나 주절리군이 주응력 방향과 평행하거나 직교하지 않을 때, 불연속체 모델링을 필요로 한다. 퇴적암에서도 공동의 전단파괴는 절리와 밀접한 관계를 보이

는 것으로 보고되고 있다. Barla et al.(1999)이 같은 공학적 구조를 가지는 구조를 대상으로 수행한 연속체 및 불연속체 모델링의 결과에서 큰 차이를 나타내고 있다. Backer(1995)가 수행한 고속도로 터널의 안정성 해석연구에서 연속체 모델에서 나타나지 않는 인장영역이 UDEC 모델에서 나타나고 있어, 불연속체 모델은 절리가 발달한 암반을 모델링하는데 적합한 방법으로 평가된다. 절리가 발달한 암반에서 큰 변위가 나타나는 것은 연속체 모델링에서는 간과되었음을 알 수 있다. FLAC에서는 과응력, 압밀 및 강도가 낮은 재료의 흐름 등을 고려할 수 있어 큰 변위에 대한 모델링이 가능하다. 최근에는 불연속체 모델링을 통하여 HTM (Hydro-Thermo-Mechanical) 거동 모델링으로 원유와 물과의 관계를 규명하는데 좋은 성과를 가져왔다(Gutierrez and Makurat, 1997). 다음 세기에서는 컴퓨터의 계산능력이 더 향상될 것으로 보아 FRACMAN, NAPSAC 혹은 3DEC 등을 이용하여 아주 복잡한 3차원 절리망의 특성을 고려한 비선형 완전 HTM 모델링이 가능할 것으로 판단된다. 미국 Nevada의 Yucca Mountain에서는 절리가 발달한 응회암을 대상으로 3차원 완전 HTM 모델링을 실시하였다(Damjanac et al. 1999). 이 연구에서 경도 규모로 열적 거동시험을 모델링하기 위해 UDEC 모델에서 절리거동을 지금까지 적용하지 않았던 수치해석 방법을 개발하였다. 입자유동 프로그램인 PFC에 의한 거친 절리면의 거동과 JRC의 크기가 서로 잘 일치하는 것으로 나타났다(Cundall, 1996).

## 8. 종합토론

제 1주제에는 주로 '응용암반공학에 관한 내용으로서, 여기에 관련된 문제는 상당히 광범위한 영역이며, 절리 및 암반, 터널, 지하공동, 광산, 지하저장시설, 석유저류층, 기초, 사면, 환경, 모델링, 기타문제 등을 들 수 있다. 이러한 영역에 20세기 동안 적용하여 왔던 기술을 바꾸고 발전시켜 다음 세기의 시작과 함께 활용하는 것이 필요하다.

응력변환법은 Mohr(1882)에 의해 토목 및 지반 분야에 오랫동안 적용되어 왔으나, 팽창성 재료인 암반의 절리, 모래, 자갈, rockfill, 및 과압밀 점토를 대상으로 한 지반분야에서는 이에 대한 재평가가 요구된다. 앞서 다룬 바와 같이 절리암반에서 강성이 큰 재료에서 절리 간격이 달라져서 dilation이 발생하면 법선응력과 강성도가 바뀌어야 된다. 장래에는 dilation이 일어날 경우 전단응력도 변화시켜야 할 것으로 본다. 이를 위해 실험실 및 현장

시험연구가 필요하며, 그 다음으로 constitutive law 및/혹은 응력변환 방법의 개선이 필요할 것이다. 파괴되기 이전까지의 신선암의 점착력에 대해서는 문제가 없지만, 절리암반은 봉합이 된 경우에만 점착력을 가짐에 유의해야 한다. 수학적 편의상 Mohr-Coulomb의 포락선을 직선으로 가정하지만 이점 역시 오차를 유발할 가능성을 가지고 있으며, 응력수준이 낮은 경우에는 과대평가될 수 있고, 응력수준이 큰 경우에는 과소평가될 수 있다. 점착력이 없고, 절리를 포함하며, 마찰력이 있는 재료로 구성된 암반내에 굴착된 터널이나 채광장 및 사면을 대상으로 하중을 제거하거나 지나친 하중이 가해짐으로써 파괴되는 사례가 흔하다.

지난 30여년간 암반을 평가하는 방법은 공통적으로 하나의 숫자로 표현되어 왔다. RQD, RMR 및 Q-system을 광범위하게 적용하여 오면서 잘못 사용되거나, 혹은 비판의 대상이 되었다. 전문가들 사이에서는 암반공학에 적용되는 Q-system의 변수 및 Q값에 대해 암반공학의 원리를 무시하는 것으로 생각하는 경향이 있는데, 사실은 그렇지 않다. 실제로 암반의 파괴 메커니즘에 대한 가능성을 깊이 생각하지 않고 암반분류법을 적용해서는 안 된다. 최근 암반공학 분야에 암반분류법 보다는  $J_n, J_s, J_r$  및 SRF를 결정하는 과정이 더 많이 이용되고 있다. 사람은 여러 가지 문제에 대해 상당히 유연하게 생각하는 것이 보통이며, 숙련된 전문가는 여러 상황에 창조적인 능력을 발휘할 뿐만 아니라 경험을 쌓아 가며 터득한다. Q-system은 일종의 전문가 시스템으로서 Q-system을 기초로 보강을 하였을 때, 오차를 더 줄일 수 있다. 암반공학 및 지구물리학적 변수와 Q 값을 손쉽게 연관시킬 수 있기 때문에 Q 값(암반블록 크기×마찰계수×응력/강도의 비)의 한계치를 예측할 수 있다. Q값이나 RMR값을 고려하지 않았을 때, 몇 몇 변수를 대체시켜야 하며, 기본적인 관계식을 적용할 수 없다. 집중적인 투자를 필요로 하는 TBM 기계로 어떤 경우에는 하루에 100 m 굴진하고 또 다른 경우에 여러해 동안 굴진을 하지 못하고 기계를 세워 둘 때 지구물리 기술자, 지질기술자, 수리지질 기술자 등의 주의가 요망된다. 여기서 암반공학을 다양한 분야에 적용할 때, 암반을 대상으로 연속체 모델을 적용하지 말고, 불연속적으로 간주하여 불연속체로 모델링해야 한다. 물론 응력이 크게 작용하는 피상암반이나 시추공, 완전히 분해된 재료, 원래 신선한 암반 혹은 등방성 재료일 때는 연속체 모델링의 신뢰도가 더 큰 것이 사실이다.

## 9. 결 론

가. 전단 변위에 의해 발생된 절리의 dilation은 법선응력, 법선강성도 및 절리간격 등과 같이 절리면에 직교하지 않는 변수이며, 이 때 발생하는 전단응력은 절리와 주응력 사이의 각도에 따라 그 크기가 달라진다. Mohr 이론에 근거를 둔 응력변환은 dilation을 일으키는 재료에는 부적합하다.

나. 암반의 절리 및 신선압 그리고 암반분류 값들에 대한 입력자료는 소숫점 이하의 정밀도를 가지도록 표현해서는 안 된다. 보다 더 현실적인 방법의 적용이 가능할 경우, 등방성과 신선압을 나타내는 방법을 절리 암반에 적용하는 것도 지양하여야 한다.

다. 입력자료를 얻고 경험적 예비 설계단계를 위해 암반평가를 하는 것은 숙련된 전문가가 암반공학적 원리를 효과적으로 적용하는 것을 의미한다. 이 때 숙련된 기술자는 설계 변수를 결정하여 나타날 결과에 대한 예측을 할 수 있는 능력을 가져야 한다. 세계적으로는 이론적 혹은 수치해석적 분석이 필요한 수많은 굴착공사(터널, 광산, 사면)가 수행되고 있으나 훌륭한 결정을 해야할 전문가가 아주 적다. 그러므로 기초가 충실하고 검증이 충분히 거친 경험적 방법이 경험이 풍부한 전문가에 의해 적용될 때, 판단의 일관성을 가지게 된다.

## 참 고 문 헌

- Nelson P., 1996, Rock engineering for underground civil construction. Rockanics, Eds. Aubertin, Hassani & Mitri. Balkema, Rotterdam.
- Gale J. E., Macleod R., Guterrez M. & Makurat A., 1993, Integration and analyses of coupled stress-flow laboratory test data on natural fractures - MUN and NGI tests. Report to AECL, Manitoba, Canada.
- Bakhtar K. & Barton N., 1984, Large scale static and dynamic friction experiments. Proc. 25th US Rock Mechanics Symp. Northwestern Univ. Illinois.
- Bieniawski Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications: a commete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. J. Wiley.
- Barton N., Lien R. & Lunde J., 1974, Engineering classification of rockmasses for the design of tunnel support. Rock Mechanics. 6(4), 189-236.
- Barton N., 2000a, Rock-quality and seismic velocity. In Press.
- Chryssanthkis P., Bhasin R.K. & Barton N., 1996, Using NMT principles in predicting performance of a powerhouse in the Himalaya, India. Conf. on Recent Advances in Tunnelling Technology, New Dehli, 1996, 143-155.
- Bhasin R., Barton N., Grimstad E., Chryssanthakis P. & Shende F.P., 1996, Comparison of predicted and measured performance of a large cavern in the Himalayas. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 6, 607-626.
- Hoek E., Kaiser P.K. & Bawden W.F., 1995, Support of underground excavations in Hard Rock. Balkema. Rotterdam.
- Syrajane P. and Loven P., 1999, Tunnelling methods for squeezing ground.
- Barla G., Barla M. & Repetto L., 1999, Continuum and discontinuum modelling for design analysis of tunnels.
- Astolfi G., Sapigni M., Barla G. & Innaurato N., 1999, Inclines: some rock mechanics and excavation problems in two Italian cases.
- Wickham G.E. & Tiedemann H.R., 1974, Ground support prediction model(R.S.R. concept). Jacob Assoc. TR125, Jan. '74.
- NTH, 1994, Hard rock tunnel boring. Project Report 1-94, NTH/NTNU, Trondheim, Norway.
- Barton N., 1999b, TBM performance estimation in rock using QTBM Tunnels and Tunnelling International. London, Sept. 1999.
- Andersson H., 1999, Chemical rock grouting - an experimental study on polyurethane foams.
- Barton N., 2000b, TBM tunnelling in jointed and faulted rock. In Press.
- Quadros E.F. & Filho D.C., 1995, Grouting efficiency using directional(3-D) hydraulic tests in Pirapora Dam, Brazil. Proc. 8th Congress of ISRM. Tokyo, Ed. Fujii, Balkema, Rotterdam, 2, 823-826.
- Hibino S. & Motojima M., 1999, Anisotropic behavior of jointed rock mass around large-scale caverns.
- Nunn K.R., Garker R.D. & Gamford D., 1983, In 나 서 seismic and electrical measurements of fracture anisotropy in the Lincolnshire Chalk. A. Jl. Engng. Geol. 16, 187-195. Northern Ireland: The Geological Society.
- Oda M., Yamabe T. & Kamemura K., 1986, A crack tensor and its relation to wave velocity anisotropy in jointed rock masses. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 23 (6), 387-397.
- Gutierrez M. & Makurat A., 1997, Coupled HTM modelling of cold water injection in fractured hydrocarbon reservoirs Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34, 3-4. Paper No. 00113.
- Damjanac B., Fairhurst C. & Brandshaug T., 1999, Numerical simulation of the effects of heating on the permeability of a jointed rock mass.
- Cundall P.A., Voegele M. & Fairhurst C. 1977, Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data. Proc. of 16th US Rock Mech. Symp. Univ. of



Minnesota, ASCE. New York, 5-14.  
 25. Mohr O., 1882, über die darstellung des spa-

nnungszustandes und des deformationszustandes eines  
 k rper-elements. Zivil Ingenieur, 113.

제 1주제 "암반공학, 환경안전과 제어  
 (Applied Rock Mechanics - Safety and Control of the Environmental)"

J. Nielen van der Merwe, CSIR Miningtek, Johannesburg, South Africa

**초 록** 제 1주제에는 총 106편의 논문이 접수되었으며, 이 논문들의 내용, 성격, 해석방법 등을 정리하였다. 일반적으로 논문의 수준은 모두 우수했으며, 구두발표를 위한 논문을 선정하는데 어려움이 있었다. 해석적인 방법에 있어서는 수치해석 방법이, 계측에 있어서는 직접 계측방법이 가장 일반적으로 사용되었다. 논문 면 수에 제한이 있었기 때문에 대부분의 저자들은 자세한 해석내용을 생략하고 있었다. 특이한 점은 암석역학과 유체동력학과의 접합이라 할 수 있으며, 암반 안전성에 미치는 시간의 영향 등에 대한 연구가 계속적으로 이루어져야 한다.

1. 서 론

제출된 106편의 논문은 10개의 부주제로 나누어졌다. 그들은 저장소 굴착, 공동, 수치 모델링, 사면 안정성, 터널, 환경, 석유공학, 기초, 광산, 절리암반 등을 포함한다. 구두발표를 위한 논문을 선정하는데 어려움이 있었는데, 이는 제출된 우수한 논문의 수는 많은데 비하여 구두발표에 할당된 시간이 총 90분이었기 때문이다. 이 종합보고에서도 지면의 제한으로 전반적인 경향에 대하여 다루기로 한다.

2. 주제별 분류 (Grouping by topic)

10개의 부주제 중 사면에 관한 논문 편수가 가장 많았으며, 자세한 내용은 다음과 같다.

터널 (16편), 사면 (18편), 수치모델링 (6편), 공동 (17편), 저장소굴착 (8편), 절리암반 (7편), 광산 (14편), 석유공학 (7편), 환경 (5편), 기타 (3편).

3. 논문의 성격

여기서는 제출된 논문이 새로운 개발을 시도하고 있는지 혹은 이미 개발이 이루어진 부분에 대한 적용을 시도하고 있는 지에 대하여 살펴보았으며, 또한 논문의 성격이 서술적(descriptive)인지, 실험적(experimental)인지, 개념적(philosophical)인 지 조사하였다. 제출된 논문의 58%는 서술적 성격이었으며, 19%는 개념적이었다. 79%

의 논문은 이미 개발된 결과를 적용하였으며, 21%만이 새로운 방법의 개발을 시도하고 있었다. 이러한 결과로부터 20세기를 마감하는 시점에서의 암반공학의 수준은 몇 가지 분야에서 새로운 개발을 필요로 하지만 이미 무척 성숙한 단계에 도달하였다고 판단할 수 있다.

4. 논문에서 적용된 방법

암반공학에서 가장 흔히 사용되는 방법은 수치모델링이었다. 해석적(analytical) 혹은 물리적(physical) 모델링 기법은 상대적으로 사용이 감소되었다. 계측에 의한 방법에서는 직접 계측방법이 주로 사용되었으며, 육안 관찰이나 원거리 계측은 사용 예가 드물었다.

수치모델링과 관련된 논문에서는 놀랍게도 41% 이상이 계측자료와 비교하지 않고 있다. 몇몇 경우에는 아직 시도된 바 없는 설계를 해석하기 때문에 계측자료가 없는 것은 당연하다. 반면, 많은 수의 논문은 이전 수채해석 결과와의 비교를 시도하고 있는데, 이로부터 수치해석 모델의 타당성을 검증하기는 어렵다고 판단된다. 그러나 논문의 총 면수의 제약 때문에 관련된 비교를 시도하지 않은 경우도 있으리라 판단되어 지면 할당의 합리적인 운영이 필요하다. 결론적으로 기존의 문제점에 대한 의미있는 개선을 위한 모델링이 아닌 단순한 새로운 모델의 개발은 노력의 낭비이며, 이러한 노력은 보다 생산적인 방향으로 사용되어야 한다.

5. 도출된 경향

새로운 경향은 암석역학과 유체동력학과의 상관성 연구이다. 이미 이 내용은 석유공학에 사용되고 있지만 이 영역은 석탄층에서의 메탄가스와 석탄층 환경과 관련된 방향으로 확장하고 있다. 현재 암반공학의 주된 방향은 안정성에 대한 연구이다. 즉, 구조물의 총체적인 안정도에 관심을 두고 있다. 안정도가 부정적으로 계산되면, 설계를 변경하거나, 보강에 대한 방법을 고려한다. 이 과정에서 사용되는 해석방법과 암반 및 초기응력 특성이 논란의 대상이 되고 있다. 또한 시간에 따른 안정성 예측도 많은 관심을 끌고 있다. 이와 같은 연구는 모두 최종 결과에 주목하고 있으며, 여기서 암반공학의 역할의 중요성을 찾으려 한다. 그러나, 교란되지 않은 암반을 굴착하여 파괴에 도달하기까지 중간 단계에 대한 연구가 필요하다. 암반 내 유체 전도도 등은 이러한 단계에서 많은 영향을 받는다.

또 다른 중요한 주제로 지하 유체 유동에 대한 장기간의 영향을 들 수 있다. 암석에 응력이 이완되면 유체전도도가 증가하고 다른 지역으로 이동하여 그 곳의 화학적 환경에 영향을 받는다. 그러므로 지하 굴착은 지하유체의

유동뿐만 아니라 그 성질에도 영향을 미친다. 21세기에 암반공학자들이 맞게될 가장 중요한 과제는 다른 과학분야와 접목하는 것이다. 이로써 우리의 이해를 증진시킬 수 있다. 그리고 우리의 환경에 대하여 보다 나은 이해를 할 수 있다.

제출된 논문들로부터 아쉬운 점은 파괴 시점을 예측하는 중요한 주제를 다루지 않고 있다는 것이다. 이에 대해서는 지금보다 훨씬 더 많은 관심이 필요하다.

## 6. 결 언

우수한 논문들이 제출되었다. 시간의 제약으로 많은 논문이 구두 발표되지 못한 점이 아쉽다. 그러나 수치모델에 있어서는 개발이나 사용 면에서 검증이 부족하였다. 암석역학의 21세기의 과제는 시간의 영향과 암석 내 유체의 흐름과 관련된 부분이 될 것이다. 또한 인류 문명에 의한 암반 환경의 교란에 대한 폭 넓은 이해가 필요하다. 그리고 다른 과학 분야와 교류하는데 있어서 발생하는 문제점을 극복하여야 한다.

### 제 2주제 "역학적 현상과 열·수리·화학적 현상과의 상호작용 (Coupling mechanical phenomena with thermal, hydraulic and chemical phenomena)"

E. Detournay, University of Minnesota, USA

M. Van Sint Ian, Pontificia Universidad, Chile

본 주제에 대해서는 조직위원회의 종합보고가 없으므로 한국암반공학회 사무국에서 준비한 자료를 사용합니다.

**초 록** 핵폐기물 지하처분, 지열개발, 지하 환경의 안전과 제어 등과 관련된 문제에 있어서 암석 및 암반의 역학적 거동 외에 열·수리·화학적 상호작용에 대한 이해가 필요하다. 이미 전세계적으로 국가별로 혹은 공동연구를 통하여 열·수리·역학적 상호작용에 관하여 많은 연구가 진행되었으며 최근 화학적 상호작용에 대한 문제가 추가적으로 제기되고 있다. 특히 장기간의 지하 환경의 안정성에 미치는 중요한 요소로 크립현상과 열·수리·화학적 상호작용 연구에 대한 필요성이 제기된 바 있다. 이 중 열·역학적 상호작용에 대해서는 현장문제에 적용 가능한 많은 연구결과가 제시된 바 있으나 기타 상호작용에 대해서는 다양한 시험방법과 모델링으로 인하여 아직까지 통일된 의견이 제시된 바 없다. 제 2주제에는 총 92편의 논문이 접수되었으며, 이 논문들의 내용, 성격, 해석방법 등을 간략히 정리하였다.

#### 1. 서 론

제 2주제에는 총 92편의 논문이 제출되었으며, 그들은 실내 압축시험, 실내 전단시험, 실내 수리·역학 상호작용에 대한 시험, 현장 시험, 암석 거동의 모델링, 그리고 기타의 6개의 부주제로 분류되었다. 이 중 17편이 구두발표

논문으로 채택되었다.

#### 2. 주제별 분류

6개의 부주제 중 실내 압축시험과 암석 거동의 모델링에 관한 논문이 각각 29편씩으로 가장 많았으며, 실내 수

리·역학 상호작용에 대한 시험이 14편, 실내 진단시험이 8편, 현장 시험이 3편, 그리고 암석 조직이나 광물입자에 따른 거동의 연구 등 기타 주제의 논문이 9편 발표되었다. 실내 압축시험의 부주제에서 다루고 있는 내용은 미소파괴음, 고온, 초음파속도, 강도기준, 강도이방성, 파괴기구, 크립, 등이며 대상으로 하는 암종은 암염, 점토암, 화산암 등이었다. 실내진단시험의 부주제에서는 마찰과 거칠기, 최대마찰각, 충전물 등을 다루었다. 상호작용의 부주제에서는 균열망과 유동, 공극수압과 암석거동, 다공질 매질로서의 암석, 수리 진단 시험을 위한 장비, 수압과쇄, 석유공학에의 적용 등을 다루고 있다. 현장시험의 부주제에서는 미국의 Yucca Mountain에서의 상호작용 시험, 브라질 지하철에서의 3차원 수리시험, CSIR cell의 이용 등을 다루고 있다. 암석거동 모델링에서는 암석의 손상과 미소파괴음, 하중에 의한 균열망 및 탄성정수 변화, 이방성, 절리와 불연속면, 주파수의 의존적 미소파괴음과 탄성파, 유체유동 등의 내용을 포함하고 있다.

### 3. 논문의 성격

여기서는 제출된 논문의 성격을 실험적(experimental), 해석적(analytical), 수치적(numerical), 그리고 개념적(conceptual)으로 분류하였다. 제출된 논문의 약 46%는 실험적 성격이었으며, 17%는 해석적, 15%는 수치적, 22%는 개념적인 것으로 나타났다. 실험적 논문의 수가 가장 많았으며, 물성 간의 새로운 관계를 구하는 것을 주된 목적으로 하고 이를 위하여 새로운 장비나 시험법 등

이 소개되었다. 본 주제에서 수치적 논문의 수가 예상외로 적었으며, 모델링 등의 개념적인 논문의 수가 많았다. 실험과 모델링에 관한 연구가 많이 이루어지고 있는 반면, 수치해석 등의 시도가 적은 것은 이 주제에 대한 연구가 아직 성숙한 단계에 도달하지 못함을 보여주고 있다고 판단된다.

### 4. 도출된 경향

상호작용의 연구에 있어서 수리·역학적 관계를 구하기 위한 실험적 연구결과와 개념적 모델링 등이 많이 소개된 반면, 열·역학적 혹은 열·수리·화학적 관계에 대한 연구는 그 수가 적었다. X-ray나 주파수 분석 등을 통한 새로운 실험 방법이 제시되고 있으며, 본 주제는 rock physics와 많은 관련을 갖는 반면 현장 적용에는 아직 한계가 있는 것으로 보인다.

### 5. 결 론

제 1주제의 결론으로 암석역학의 21세기의 과제는 시간의 영향과 암석 내 유체의 흐름과 관련된 부분이 될 것이라고 지적하고 있고, 제 3주제에서는 과거 어느 때보다도 암석물성의 고려가 중요하게 이루어지고 있는 추세라고 결론 짓고 있듯이, 암석의 열·수리·화학·역학적 상호작용은 앞으로 불연속 암반의 정확한 이해와 효율적인 이용을 위해서 폭 넓게 연구되어야 할 분야이다. 다른 과학 분야와의 활발한 교류가 이루어져야 한다.

## 제 3주제 "암석 동역학 및 지각물리학 (Rock Dynamics and Tectonophysics)"

I. McGarr, US Geological Survey, Menli Park, CA, USA  
 J. Dubinski, Central Mining Institute, Katowice, Poland

**초 록** 지하에서의 안전성과 광체의 경제적 회수가 광업계의 주요관심분야이다. 지하구조물과 주변 응력의 상호작용으로 채굴로 인한 지진활동(seismicity)이 지하안정성과 생산성에 결정적인 영향을 미치며, 암석절단, 천공, 발파기술 등을 적절하게 사용하는 것이 주요관심의 대상이 된다. 이 들에 대한 기초적인 이해는 석유 생산이나 천공장비 개발 등에도 적용될 수 있다.

### 1. 서론 및 주제의 범위

채광으로 인한 지진활동은 경암 광산에서 특히 문제가 되어 생산량이 감소되고 인명피해가 발생한다. 따라서 지

하에서의 불안정성 요인을 줄이기 위한 지하계측과 이론적 모델링을 통한 위험관찰이 필요하다. 이에 따른 연구 목적은 다음 내용을 포함한다.

(1) 적절한 지보재 개발을 위해 지하구조물에 영향을 주는 지반활동에 대한 이해를 증진시킨다.

(2) 진동위험을 줄이기 위해 특정형태의 광산이 암반과 어떤 상호작용에 의해 지진활동이 발생하는지에 대한 이해를 증진시킨다.

(3) 단층, 암맥과 같은 지질적 형상에 의한 지진활동 위험도를 감지하여 이를 감소시키는 기술을 개발할 수 있다.

Microearthquake와 미소균열음(AE)은 이의 측정을 통해 지하거동을 관측할 수 있다는 점에서 유용하게 사용될 수 있다. 예를 들면 microseismic 측정을 통해 암반의 응력집중구간의 추적할 수 있다. 또한 응력측정으로 지하 굴착으로 인한 지진활동과 같은 불안정성을 감지할 수 있다. 당장 중요하게 사용되고 있지는 않지만, 특정지질의 현지응력을 알 경우, 탄화수소의 집중형태 등 지하의 중요 정보를 얻을 수 있다.

암석절단의 경제성을 향상시키기 위해 효과적인 절단기구를 설계하고 기구의 절단효율에 대해 이해하여야 하고 암석의 미세구조와 절단에 필요한 물성의 이해를 통해 효과적인 기구를 설계할 수 있다. 이와 마찬가지로 천공과 발파도 그 중요성이 크며 이와 관련된 문제점은 다음과 같다.

(1) 발파로 인해 암반파쇄를 일으키는 응력이 어떻게 발생하는가를 이해하여야 한다.

(2) 부수적인 파괴의 최소화하여야 한다.

(3) 평탄한 파쇄면을 만들기 위한 정확한 발파기술이 필요하다.

추가로 두가지 주제에 대한 발표가 이루어졌는데 그들은 다음과 같다. 첫째는 암석층의 강도 (lithospheric strength)로 Shimada (1999)는 이에 대한 실내 시험을 수행하였다. 둘째는 탄화수소물을 포함한 지층의 역학 (geomechanics of hydrocarbon-bearing basins)으로 Barnichon 등 (1999)은 유한요소모델링을 수행하였다.

## 2. 발표된 논문의 경향

발표된 44편의 논문은 2편을 제외하고는 다음의 4가지 주제를 다루었다. (1) Rockburst and Seismicity (15편), (2) 현지응력 (13편), (3) 암석절단 (8편), (4) 발파 (6편), 그리고 (5) 실내시험 및 (6) basin modelling에 대한 각각 1편의 논문이 발표되었다.

첫 번째 주제(Rockburst and Seismicity)에 대해서는 발표된 논문의 내용 및 편 수는 다음과 같다. (1) 수치해석, 실험을 통해 굴착으로 인한 지진활동의 원인과 영향을 밝힘 (7편), (2) AE와 지진파를 관측하여 caving과 응력집중과 같은 geomechanical process를 이해 (3편), (3) 유도된 지진의 빈도와 영향을 모델링으로 모사 (5편). 두 번째 주제인 현지응력에 대하여는 다음과 같다. (1) 국지적, 광역적인 지표응력의 측정 (7편), (2) 지표응력의 새로운 측정법, 기존방법의 개선 (4편), (3) 지질적 관측에 의한 응력 상태 (2편). 셋째로 암석절단에 대하여는 (1) 암석물성의 영향, 절단기구의 선택과 성능 (6편), (2) 기구설계 및 사례연구 (2편)가 발표되었다. 넷째로 발파에 대해서는

(1) 신발파기술 (3편), (2) 부수적인 발파피해의 경감 및 평가방법 (2편), (3) 제어발파 (1편)의 논문이 발표되었다.

## 3. 결 론

이제껏 지표응력이 지하굴착에 의한 암반변형과 연관이 있다는 것은 알고 있었지만, 세부적인 내용은 이해되지 못하였으며 예측이 불가능하였다. 최근의 경험에 의해, 이런 현상에 대한 이해가 많이 진전되었으며, seismic monitoring과 같은 지하관측과 모델링이 지속적으로 요구된다. 최근에는 지하 시설물의 굴착, 채광, 보어홀 천공, 암석절단, 발파 시에 과거 어느 때보다도 암석물성의 고려가 중요하게 이루어지고 있는 추세이다.

### 제 4주제 "현장시험 및 계측 (In-Situ Tests and Measurements, Monitoring)"

O. Stephansson, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden  
W. Steiner, B+S Ingenieur AG, Bern, Switzerland

**초 록** 제 4주제에서는 49개의 논문이 신기술, 암석특성, 계측, 데이터획득 및 처리, 암반보강의 5가지 분야에 대해 발표되었다. 발표된 논문으로부터 다음과 같은 신경향을 알 수 있다. (1) 암반계측, 분류의 신기술 분야에 컴퓨터 이용, (2) 지진파와 수압파쇄를 이용하여 굴착파쇄지역(EDZ) 파악, (3) fractal과 fractal 차원의 응용, (4) 수평방향 드릴링(HDD)을 통한 부지조사, (5) GPS를 통한 거대암체 계측, (6) 터널에 구조해석, 지질, geotechnique, 컴퓨터를 복합이용.

## 1. 서 론

### 1.1 주제와 부주제

총 250여 쪽에 달하는 49편의 논문은 신기술 (11편), 암석특성 (16편), 계측 (7편), 데이터획득 및 처리 (8편), 그리고 암반보강 (7편) 등의 부주제로 구성되어 있다.

### 1.2 종합보고의 목적

조직위원회에서는 각 주제별로 두 명씩의 보고자를 선정하였다. 그들로 하여금 접수된 논문의 검토, 발표 및 토론 일정 결정, 종합보고 작성 등을 하도록 하였으며, 종합보고의 목적은 다음과 같다.

- (1) 제출된 논문으로부터 일반적 경향을 제시한다.
- (2) 각각의 주제별에 대한 개인의 견해를 나타낸다.
- (3) 토론을 위한 특정영역을 제시한다.

## 2. 제출된 논문의 경향

(1) 암반계측, 분류의 신기술 분야에 컴퓨터 이용하고, 지하굴착 중의 지질학적 이상과 지반조건변화 측정에 최신단층촬영 이용한다.

(2) 지하폐기물저장시설 건설시 굴착교란지역(EDZ)의 역학적, 수리적 성질과 같은 지하공동 굴착시 주변암반에 미치는 영향이 관심사이다. 예) ZEDEX 시험

(3) 팽관재하시험과 같은 팽창계(dilatometer) 시험이 암반변형을 측정하는 중요한 측정법으로 쓰인다.

(4) Fractal과 fractal 차원을 이용하여 암반, 절리의 성질결정에 유용하게 사용한다.

(5) 터널시공 전에 방향성 코어드릴링이나 수평 드릴링(HDD)을 실시하여 지반정보수집한다.

(6) 구조해석, 암석역학, 터널링, 컴퓨터를 이용한 시각화를 통해 터널기술자가 굴착과 암반보강시 참고할수 있는 통합시스템 구축한다.

(7) GPS(Global Positioning System)을 사면과 지표침하의 안정성해석에 이용한다.

(8) 케이블볼트, 수동적 앵커, 폴리에탄 멤브레인을 이용한 지보를 지보재로 사용한다.

## 3. 제출된 논문의 내용 검토

### 3.1 신기술

#### 3.1.1 디지털 화상, 사진측량, 자료처리 (Digital image, photogrammetry, and data management) (3편)

(1) 암석의 변형률측정을 위한 디지털이미지분석 (H.Kanduth and R. Corthesy, Canada): 일반적인 스트레인지이지 측정법보다 정확, 정밀하고 센서와 시료가 부착될 필요가 없는 방법을 사용하였다.

(2) 항공측량시 total station method를 이용한 물체의 길이, 크기, 방향 측정 (Q. Feng, P. Sj gren, O. Stehansson and L. Jing of KTH, Stockholm, Sweden): 노출된 암반면의 균열방향이 측정가능하다.

(3) 보어홀 데이터처리시스템 (M.W. Yu, H.D. Park, W.K. Song, South Korea): GeoScope의 소개와 적용사례를 제시하고 있다.

#### 3.1.2 지진파 및 미소지진파 연구 (Seismic and microseismic methods)

(1) 락볼트 설치후 소형보어홀에서 사용할 수 있는 소형 수직지진파예측시스템(VSP) (A. Hirata eta al., Japan): 센서를 보어홀 표면에 설치하여 해머의 충격에 의한 진동을 측정하였다.

(2) 투수율과 굴착교란지역의 탄성파속도와의 관계 (H.J. Alheid, M. Knecht, Germany and J.Y. Boisson, F. Homand-Etienne and S.Pepa, France)

(3) P파의 반사에 기초한 비파괴 슛크리트 두께측정법 (M. Momayez, F.P Hassani and P. Guevremont at Mc Gill University, Canada): 슛크리트 두께는 P파의 속도와 주파수와 관련된다.

(4) 지하굴착 중의 지질학적 이상과 지반조건변화를 감지할 수 있는 경보시스템 (D.M. Neil and H. Habenicht, Austria): Rock3D를 이용하여 탄성파가 암반을 통과할 때 생기는 에너지 변화를 측정하였다.

#### 3.1.3 응력과 강도의 결정 (Determination of stress and strength)

(1) 콘크리트 강도측정을 위한 핀관입시험 (M.L. Lin, Taiwan): 연암과 초기스�크리트에도 적용가능하다.

(2) 오버코어링을 이용한 점토질암석의 현지응력 측정 (M. Quiertant and J.F. Shao, France): 탄소성을 이용한 구성모델을 개발하였다.

### 3.2 암반특성 (Rock characteristics)

#### 3.2.1 암반변형계수 (Rock mass modulus)

(1) 대형 평판재하시험 실시 (T. J. George, R. E. Finley and M. Riggins of the Sandia National Laboratory, USA): Yucca Mountain에서 수행된 시험으로 열-역학적 상호작용에 의한 암반이 거동을 측정하였다.

(2) 암석 8종의 변형에 대한 그랑우팅의 영향 (K. Kikuchi, Y.MIto and I. Hirano at University of Kyoto, Japan): 1600개의 보어홀에 대해 실험을 실시하였으며 압밀그라우팅을 중력 및 아치법의 기초에 사용하여 암반을 차수시키고 변형도(deformability)를 증가시켰다.

(2) Flexible Dilatometer Test (M. Gharouni-Nik and L. Faramarzi, Iran): 실험의 일반적인 소개와 자료의 처리방법을 설명하고 있다.

(3) Ethiopia의 Gilgel Gibe발전소의 십년 이상된 암반에서의 풍화의 영향에 대한 사례연구 (L. Lulseged and G. Reik, Technical University of Clausthal, Germany): 풍화에 따른 암반분류 파라미터와 암석물성의 변화를 도표를 통해 제시하고 있다.

#### 3.2.2 암반 절리의 전단강도와 거칠기 (Shear strength and roughness of rock joints)

(1) 일반적인 절리면의 전단강도 모델의 고찰 (R.Kumar and A. K. Dawan, India): 상용되고 있는 모형과 암반 절리의 전단강도 기준을 검토하였다.

(2) 3차원 레이저를 이용한 절리거칠기의 크기의존성 연구 (F. Lanaro, L. Jing and O. Stephansson, KTH, Stockholm, Sweden): 절리거칠기의 특성을 구하기 위한 시료 크기를 제안하고 있다.

#### 3.2.3 필라의 변형과 응력 (Deformation and stress of mine pillar)

(1) 암염 기둥에서의 creep 현지응력시험 (I. Plischke of BGR, Germany): 실험실시험에서 얻은 creep식을 현장에 맞게 변형하였다.

(2) 석탄광의 탄주설계 (J. W. Cassie, P. B. Cartwright and P. Altounyan of Rock Mechanics Technology, U.K): 20개의 석탄광에서 63번 응력을 측정하여 고변형과 저변형으로 광산을 분류하고 광주의 강도와 안정성을 결정하였다.

#### 3.2.4 유체유동과 물질이동 (Fluid flow and mass transport)

(1) 화강암에서의 유체유동에 대한 현장시험 (M. Shimo et al., Japan and T. W. Doe, USA): Dipole tracer 시험법을 사용하여 일본의 핵폐기물 저장을 위한 폐광 시험부지에서 시험을 수행하였다.

#### 3.2.5 지반조사와 통합시스템 (Site investigation and integrated system)

(1) 터널시공 전에 수평방향 드릴링(HDD)을 실시하여 지반정보수집 (S. Barret, Hong Kong and S. Lee, Canada)

(2) Fractal 과 Fractal 차원을 이용한 막장면의 단층위치 예측 (Y. Udagawa, Japan): 막장면을 디지털화하고 box-counting method를 사용한 fractal 분석을 수행하여 단층위치를 예측하였다.

(3) 구조해석, 암석역학, 터널링, 컴퓨터를 이용한 시각화를 통해 터널기술자가 굴착과 암반보강시 참고할수 있는 통합시스템 구축 (G. Beer, H. Golser, A. Fasching and A. Gaich, Technical University of Graz, Austria)

### 3.3 계측 (Monitoring)

#### 3.3.1 사면안정성 계측 (Slope stability monitored with GPS, Surveying and vibration monitoring)

(1) GPS를 이용한 길이 2000m, 높이 120m의 체석장 사면 계측 (Shimizu, Japan): 변위를 지속적으로 계측하여 변위와 속도를 예측하였다.

(2) 대형굴착에서의 사면불안정성에 대한 2가지 사례연구 (Yoshinaka, Kido, Sasaki and Hagiwara, Japan)

(3) 4개의 터널(길이 493, 368, 263, 1154m)이 지나는 길이 4.5km 도로 구간에서의 계측 (Cargnel, Italy)

#### 3.3.2 수렴도 계측과 자동자료취득 (Convergence measurements and automated data acquisition)

(1) 2,300m overburden의 고응력암반에서의 터널거동 (Sevume, South Africa): 폭 3m, 높이 5m의 마제형터널 주위에 자석링과 함께 incremental extensometer를 설치하여 계측을 실시하였다.

(2) Extensometer, inclinometer, convergence measurement를 이용한 터널계측 (Cunha, Portugal)

(3) 석탄광에서의 자동변위계측 (Srinivasulu and Gupta, India)

(4) 3차원 보어홀 slotter의 실험실 검증 (Gorthesy, Gill, Leite from Canada): 6개의 slots cut을 가진 보어

홀 1개로 측정이 가능하여 2차원의 단점을 극복하였다.

3.4 역산문제 (Inverse problems)

3.4.1 역해석 (Back Analysis)

- (1) 역해석의 함정에 대한 이론적 연구 (Dimov, Dimova and Lalov, Bulgaria)
- (2) 폭 22 m, 높이 35.6 m 공동의 라이닝에서의 힘에 대한 역해석 (Fotieva and Swammal, Russia)
- (3) 탄성-점성-소성 모델을 이용한 터널에서의 3차원 역해석 (Sugimoto, Sakurazawa, and Kageyama, Japan)
- (4) 탄성모델을 이용한 광산에서의 역해석 (Kahniko, Ashimin, Shoupletsov, Russia)
- (5) 대형굴착시 안정성 연구 (Deng, Gai, Xue, Cheng, and Lee, China)

3.4.2 역학적 특성의 분류 및 결정 (Classification and assignment of mechanical properties)

- (1) 5개의 수력발전소의 현장측정에 기반한 Carpatian 산의 Flysch의 분류 (Bestyniski and Thiel, Poland)
- (2) 풍화도가 다른 퇴적암에서 평판재하시험과 탄성과굴절법의 평가 (Klimis, Papazachos and Efremidis, Greece)
- (3) 인공신경망을 이용한 RQD와 RMR의 비교 (Bardakastanis and Karlaftis, Greece)

3.5 암반보강 (Rock reinforcement)

3.5.1 케이블 볼팅 (Cable bolting)

- (1) 암반과 케이블볼트의 파괴모델 개발 (Mosavi, Iran)
- (2) SMART 케이블을 이용한 케이블볼트의 재하력 계

측 (Graaf, Hyett, Lausch, Bawden and Yao from Canada)

- (3) 케이블볼트의 분리시 영향 (Satola from Finland)

3.5.2 피동 그라우트 볼트 (Passive grouted bolts)

- (1) Roof 볼트의 설계의 정적모델 (Korzoniowski from Poland)
- (2) 절리면에 장착된 완전그라우팅된 볼트의 실험실 전단시험 (Asroun from Algeria and Durville from France)
- (3) 신형 비파괴시험(boltometer) (Vrkljan, Szavits-Nossan and Kovacevic from Croatia)

3.5.3 분사형 라이닝 (Sprayed lining)

- (1) 박막 분사형 라이닝에 대한 고찰 (Tannant, Barclay, Espley, Diederichs from Canada)

4. 토의 주제 (Areas for dicussion at the congress)

Congress에 제출된 논문에 기초하여 다음의 주제에 대한 논의가 필요한 것으로 판단된다.

- (1) 실험실, 보어홀 시험에 의해 암반물성의 예측
- (2) 암석역학에서의 이미지처리와 사진측량의 이용
- (3) 모델링, 예측시 현지응력측정 이용
- (4) 변위율, 신경망 등의 측정을 통한 파괴 및 붕괴 예측
- (5) 경암, 연암에서의 암반물성
- (6) 역해석의 한계
- (7) 락볼트, 라이닝, 스틸셋, lattice girder 등의 암반지보재의 선택 및 설치시기

정 소 겁



1975년 서울대학교 자원공학과, 공학사  
 1982년 Nancy Ecole Des Mines (in France), 공학석사  
 1984년 Orleans 대학(in France), 공학박사

Tel : 042-868-3231

E-mail : skchung@kigam.re.kr

현 재 한국자원연구소 자원연구부 책임연구원

전 석 원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 1991년 미국 켈리포니아 주립대학, 공학석사  
 1996년 미국 아리조나 주립대학, 공학박사

Tel : 02-880-8807

E-mail : sjeon@rockeng.snu.ac.kr

현 재 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수