

## 축소모형실험 폭원으로로서 도폭선의 폭력조절

양형식<sup>1)\*</sup>, 김종관<sup>2)</sup>, 최미진<sup>2)</sup>, 최병희<sup>3)</sup>, 류창하<sup>3)</sup>

### Detonating Cord as a Controllable Source for Scaled Model Blasting Test

Hyung-Sik Yang, Jong-Gwan Kim, Mi-Jin Choi, Byung-Hee Choi and Chang-Ha Ryu

**Abstract** A method using detonating cord was suggested to control the blasting source for scaled model test. Blasting of 5 concrete block was carried out to verify the method. It was proved that blasting power can be controlled by suggested method. It seemed to be reasonable to use the reduction ratio based on the explosion heat.

**Key words** Scaled model test, Reduction ratio, Detonating cord

**초 록** 도폭선의 길이를 조절하여 폭력이 조절되도록 축소모형 실험하는 방법을 제안하였으며 콘크리트 블록의 발파에 적용하여 타당성을 검토하였다. 제안된 방법은 폭원 조절이 가능하고 또 축소모형실험 방법으로서 타당한 것으로 판단된다. 또 폭발열을 이용하여 산정한 폭원 축소율은 상당한 근거가 있는 것으로 판단되었다.

**핵심어** 축소모형실험, 축소율, 도폭선

## 1. 서 론

터널 및 지하공간 공사에서 암반굴착을 위한 발파작업은 폭약의 폭발력을 이용한 암반 파쇄 효과의 극대화와 굴착면 주변의 암반손상 및 여굴 최소화라는 조건을 동시에 충족시켜야 한다. 폭약으로부터 발생하는 에너지가 암반으로 전달되는 과정은 암반의 파괴나 손상과 관련하여 매우 중요하면서도 명확히 파악되지 않은 부분이다.

발파는 존재하는 구조를 해체하는 특성이 있으므로 실험의 재현이 대단히 어렵다. 현장에서 발파 실험을 하면 종종 막장을 망치게 되고 이후의 시공에 큰 어려움을 초래하기 때문에 현장 실험 자체가 어렵다. 그러므로 축소모형실험이 대안이 된다.

현지암반의 발파에 의한 변형거동을 연구하기 위해 축소모형실험을 정량적으로 수행하기 위해서는 현장의 제반요소들에 대한 차원해석을 실시하여 각 변수별로 축소율을 산정하고 이에 부합하는 재료를 선택하여야

한다. 그동안 축소모형실험에서는 적절한 폭력을 가진 폭원을 구하기가 어려워 뇌관을 주로 사용하였는데, 뇌관만으로 폭원을 삼는 경우 적절한 축소율로 맞추기가 어려워 사실상 정량적인 해석이 어려웠다.

본 연구에서는 기존 연구사례에서 뇌관을 이용한 폭원의 단점을 해결하기 위해 도폭선의 길이를 조절하여 폭력을 조절하는 방안을 제시하였으며 간단한 모형의 축소모형실험을 통하여 타당성을 검토하였다. 그리고 산정된 폭발력을 역산하여 원지반의 폭력 및 장약량과 비교하여 보았다.

## 2. 폭원 조절이 가능한 축소모형실험의 제안

### 2.1 차원해석

세 가지 기본 차원을 길이[L], 시간[T], 질량[M]이라고 할 때 축소율을 산정할 때에는 우선 길이에 대한 축소율을 결정하고 나서 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다(Hobbs, 1969). 정도영 등(2004)은 발파 문제의 경우 현장이나 축소모델이나 물체에 작용하는 중력가속도는 언제나 일정하게 작용한다는 점을 중시하여 중력가속도의 축소율을 1로 하고 시간의 축소율을 산정하였고 양 등(2007)도 같은 방법으로 축소율을 산정하였다.

본 연구에서는 실험의 편의상 길이에 대한 축소율을

<sup>1)</sup> 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

<sup>2)</sup> 전남대학교 대학원 지구시스템공학과

<sup>3)</sup> 한국지질자원연구원

\* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2007년 8월 2일

심사 완료일 : 2007년 8월 17일

1/3로 하였다. 중력가속도[ $LT^{-2}$ ]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 식 (1)에 의하여 시간[T]의 축소율을 계산하면 1/1.73이 된다.

$$\frac{L}{T^2} = 1 \tag{1}$$

길이[L]의 축소율이 1/3, 대상암반의 밀도  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , 시멘트모르타르의 밀도  $2 \text{ g/cm}^3$ 이므로 암석과 시멘트 모르타르의 밀도비는  $\frac{1}{1.32}$  이고, 질량[M]의 축소율은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$M = \frac{1}{1.32} \times L^3 = \frac{1}{1.32} \times \left(\frac{1}{3}\right)^3 = \frac{1}{35.64} \tag{2}$$

강도[ $ML^{-1}T^{-2}$ ]의 축소율은 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율이 모두 결정되었으므로 식 (3)과 같이 산정된다.

$$\frac{M}{LT^2} = \frac{\left(\frac{1}{35.64}\right)}{\left(\frac{1}{3}\right) \times \left(\frac{1}{1.73}\right)^2} = \frac{1}{3.97} \tag{3}$$

화약의 폭원은 일 또는 에너지 개념으로서 폭발에너지인 폭발열로 결정하였고, 그에 대한 차원은 공학단위로는 [FL] 그리고 LMT계 절대단위로는 [ $ML^2T^{-2}$ ]이며 축소율은 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{M \times L^2}{T^2} = \frac{\left(\frac{1}{35.64}\right) \times \left(\frac{1}{3}\right)^2}{\left(\frac{1}{1.73}\right)^2} = \frac{1}{106.93} \tag{4}$$

### 2.2 폭원제어 방법

기존의 축소모형실험 연구에서는 폭력의 최소단위로 뇌관을 주로 사용하였다. 그러나 뇌관의 경우 1개의 위력이 강하고 폭력조절 또한 불가능하다는 고질적인 문제점을 안고 있어 본 연구에서는 모델의 외부에서 뇌관을 발파시켜 그 폭력이 모델에 직접 작용하지 않도록 하였으며 폭력은 모델 내에 장치된 도폭선의 길이에 비례하도록 축소모형실험 발파 방법을 제안하였다. Fig. 1은 그 개념도이다. 이 방법은 뇌관의 폭발력이 모델에 직접 영향을 미치지 않아야 하고, 도폭선의 폭력이 모델에 폭평압으로 작용하지 않아야 하며, 폭발과정 중에 전색부를 통해서 폭평압이 모델에 작용하며 먼저 파괴가 되지 않도록 하여야 한다. 이를 위하여 도폭선은 공벽에 닿지 않도록 하여야 한다.

전색의 경우 OHP 필름을 이용하여 원통을 제작하고

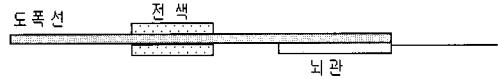
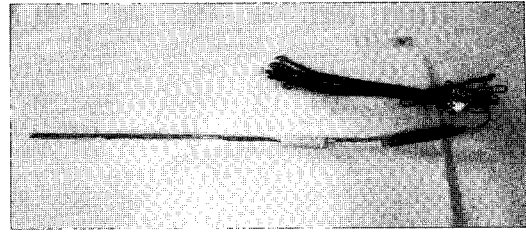


Fig. 1 축소모형 도폭선 폭원 개념도

중앙에 도폭선을 위치시킨 후 실리콘 수지로 도포하여 전색부위의 도폭선 폭력이 블록에 미치는 영향을 최소화하였다. 또한 외부에 위치하고 있는 뇌관의 폭력이 블록에 영향을 미치지 않고 발파로 인해 발생할 수 있는 소음과 비산을 최소화하기 위하여 축소모형 전체를 모래로 덮어 방호하게 하였다.

### 3. 검증

#### 3.1 실험조건 및 방법

도폭선의 길이에 따라 폭력 조절이 가능한 축소모형 발파실험의 검증을 위하여 콘크리트 블록에 대해 실험하였다.

본 연구에서는 비교적 구입이 용이하고 국내 모형실험에 많이 사용되고 있는 물, 시멘트, 모래를 이용하였다. 모델로는 물, 시멘트, 모래의 배합비가 0.4 : 1 : 1.25인 50×50×50 cm의 정방형 콘크리트 블록을 제작하였다.

또한 안전한 콘크리트 블록 폭발시험을 위하여 5 mm 두께의 철망으로 2.5×3×2 m 규모의 실험장을 제작하였으며, 내부에 5 cm 두께의 스티로폼을 부착하고 바닥부에 두께 10 cm로 모래를 쌓아 소음, 진동 및 비산의 위험을 최소화하였다.

Fig. 2는 제작된 콘크리트 블록의 하나이며 Fig. 3은 폭발시험을 위한 실험장이다.

Fig. 4는 실험에 사용된 도폭선이다. 본 연구에서는 총 5개의 콘크리트 블록에 대해 축소모형 실험을 실시하였으며 Table 1에 각 사례별로 장약량(장약장약량 - 사용된 도폭선 총약량) 등 발파제원을 나타내었다. Fig. 5는 공경으로부터 각 자유면까지의 저항선비(1 : 2 : 3 : 4)를 갖도록 제작한 콘크리트 블록이다.

Fig. 6은 장약 후 공 주위에 실리콘 수지를 도포한 모습이며, Fig. 7은 소음 및 비산방지를 위해 방호작업을 실시한 모습이다.

3.2 실험결과

Fig. 8은 콘크리트 블록의 균열 및 파괴양상을 나타낸다. 실험결과 CASE 1의 경우에는 블록이 파괴되지 않았으며, CASE 2의 경우에는 공경으로부터 자유면까지의 최단거리 쪽으로 균열이 발생하였고 CASE 3, 4, 5는 저항선의 비가 1배, 2배, 3배 쪽으로 콘크리트 블록이 파괴되었으며 장약량이 증가할수록 파괴정도가 심하게 나타났다.

길이에 대한 축소율을 적용하고 역산하여 모델에서의 폭발열을 계산하였으며, 축소율을 적용하여 실제 발파

Table 1 발파제원

CASE	1	2	3	4	5
도폭선종류	10 g/m	10 g/m	10 g/m	10 g/m	10 g/m
약량 (g)	1.5-1.75	1.55-1.8	1.6-1.85	1.75-2	2-2.5
천공장 (cm)	17.5	18	18.5	20	25
공경 (mm)	15	15	15	15	15
약경 (mm)	5	5	5	5	5
장약장 (cm)	15	15.5	16	17.5	20
전색장 (cm)	3.5	2.5	2.5	2.5	5
강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	229	237	267	277	297

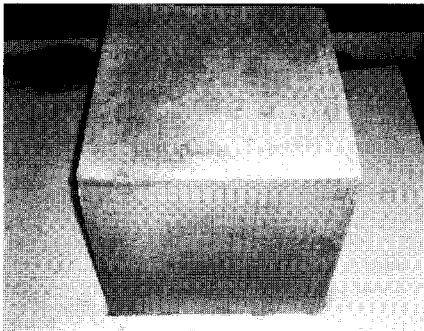


Fig. 2. 콘크리트 블록

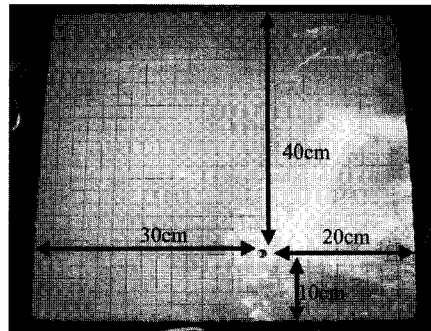


Fig. 5. 천공모습

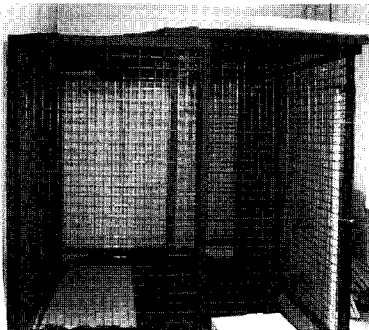


Fig. 3. 실험장

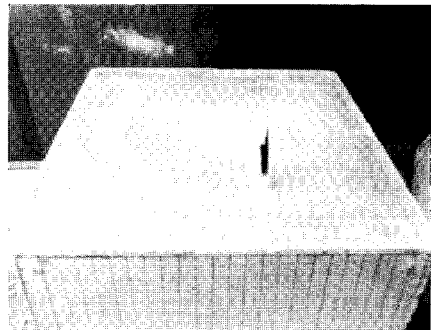


Fig. 6. 전색 후 모습

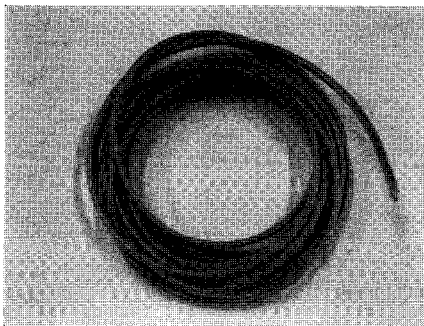


Fig. 4. 도폭선

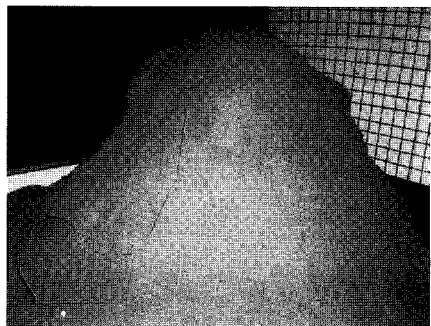
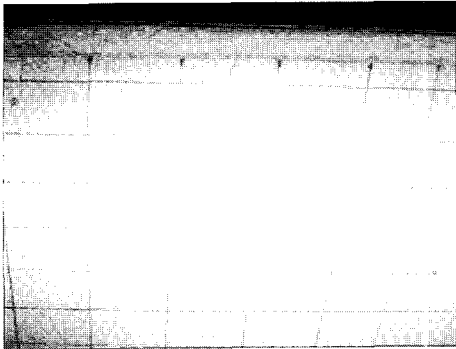
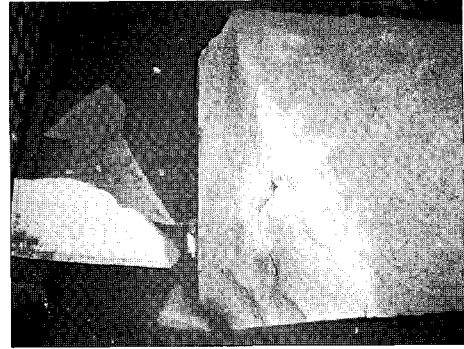


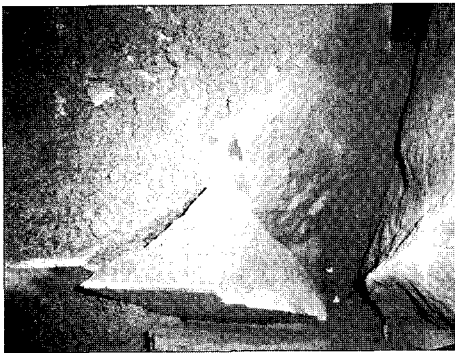
Fig. 7. 방호 모습



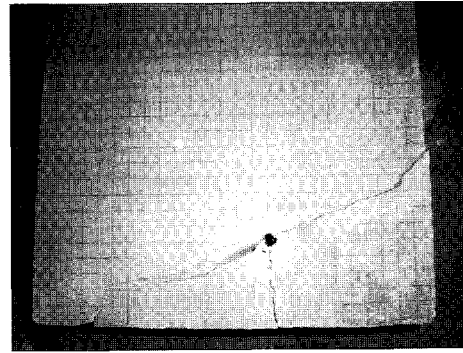
CASE 2



CASE 3



CASE 4



CASE 5

Fig. 8. 콘크리트 블록의 파괴양상

시의 폭발력 및 장약량을 산정하였다.

CASE 2에 대하여 길이 축소율을 적용할 경우 실제 암반에서는 공경 45 mm, 약경 17 mm, 천공장 54 cm, 장약장 46.5 cm, 전색장 7.5 cm로 간주할 수 있으며, 이때 사용된 약량은 도폭선 10 g/m의 경우 165.7-192.5 g이 된다. PETN의 폭발열은 1450~1540 kcal/kg이므로 PETN의 폭발열이 1450 kcal/kg일 경우 폭발열은 240.3~279.1 kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100 kcal로서 나머지 140.3~179.1 kcal의 FINEX 2.2~2.8개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다. 만약 PETN의 폭발열이 1540 kcal/kg일 경우 폭발열은 255.2~296.4 kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100 kcal로서 나머지 155.2~196.4 kcal의 FINEX 2.4~3개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다.

CASE 3의 경우에는 실제 지반에서는 공경 45 mm, 약경 17 mm, 천공장 55.5 cm, 장약장 48 cm, 전색장 7.5 cm에 해당하며 이때 사용된 약량은 도폭선 10 g/m의 경우 171.1~197.8 g이 된다. PETN의 폭발열은 1450~

1540 kcal/kg이므로 PETN의 폭발열이 1450 kcal/kg일 경우 폭발열은 248.0~286.8 kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100 kcal로서 나머지 148.0~186.8 kcal의 FINEX 2.3~2.9개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다. 만약 PETN의 폭발열이 1540 kcal/kg일 경우 폭발열은 263.4~304.6 kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100 kcal로서 나머지 163.4~204.6 kcal의 FINEX 2.6~3.2개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다.

CASE 4의 경우에는 공경 45 mm, 약경 17 mm, 천공장 60 cm, 장약장 52.5 cm, 전색장 7.5 cm이며 이때 사용된 약량은 도폭선 10 g/m의 경우 187.1~213.8 g이 된다. PETN의 폭발열은 1450~1540 kcal/kg이므로 PETN의 폭발열이 1450 kcal/kg일 경우 폭발열은 271.3~310.1 kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100 kcal로서 나머지 171.3~210.1 kcal의 FINEX 2.7~3.3개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다. 만약 PETN

의 폭발열이 1540 kcal/kg일 경우 폭발열은 288.1~329.3 kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100 kcal로서 나머지 188.1~229.3 kcal의 FINEX 2.9~3.6개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다.

CASE 5의 경우도 실제 지반에서는 공경 45 mm, 약경 17 mm, 천공장 75 cm, 장약장 60 cm, 전색장 15 cm이며 이때 사용된 약량은 도폭선 10 g/m의 경우 213.8~267.3 g이 된다. PETN의 폭발열은 1450~1540 kcal/kg이므로 PETN의 폭발열이 1450 kcal/kg일 경우 폭발열은 310.1~387.6 kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100 kcal로서 나머지 210.1~287.6 kcal의 FINEX 3.3~4.5개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다. 만약 PETN의 폭발열이 1540 kcal/kg일 경우 폭발열은 329.3~411.6 kcal로서 이를 터널 최외곽공 발파로 적용하면 뉴마이트 플러스 0.5개, 이때의 폭발열은 100 kcal로서 나머지 229.3~311.6 kcal의 FINEX 3.6~4.9개의 화약을 사용하는 것과 상응한 발파의 양상이다

이상의 검증실험에서 폭원을 조절함에 따라서 블록의 파괴 양상이 달라졌고, 약량이 증가하는데 따라 파괴의 정도가 커지는 것을 볼 수 있었다. 일반적으로 뇌관 한 개로 블록이 폭발되는 것에 비하여 도폭선의 길이를 조절하여 블록의 파괴 정도를 조절할 수 있었다. 또 축소율로 역산한 폭약량은 실제 발파의 경우와 크게 다르지 않았으며 폭발열을 이용하여 산정한 폭원 축소율은 상당한 근거가 있는 것으로 생각된다.

앞으로 좀 더 정교한 계측이 이루어진다면 폭발 에너지에 따른 파괴의 전개나 손상의 정도를 정량적으로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 도폭선의 길이 변화를 이용하여 폭원조절이 가능하도록 축소모형실험하는 방법을 제안하였으며 콘크리트 블록의 발파에 적용하여 타당성을 검토하였다.

폭원 조절에 따라서 블록의 파괴양상이 비례하여 파괴 또는 손상되었으며 뇌관 한 개로 발파하는 것보다 더 정교한 축소모형실험 발파가 이루어져 제안된 방법은 폭원 조절이 가능하고 또 축소모형실험 방법으로서 타당한 것으로 판단된다.

폭발열을 이용하여 이론적으로 산정한 축소율을 적용하여 정량적으로 산정한 폭약의 량은 대략 실제 발파에서 적용하는 범위에 해당하여 폭발열을 이용하여 산정한 폭원 축소율은 상당한 근거가 있는 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 'IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발(과제번호: 05건설핵심 D03-01)'의 일환으로 수행되었습니다. 관계자에게 감사를 드리며 실험에 도움을 주신 대한석탄공사 회순광업소 안철수 과장님께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 양형식, 하태욱, 김원범, 김종관, 류창하, 최병희, 2007, 축소모형실험을 위한 기초 연구, 화약발파(대한화약발파공학회지) 25.1 79-84
2. 정도영, 양형식, 2004, 폭원의 축소율 산정과 축소모형 실험에의 적용, 화약발파, Vol. 22, No. 4, pp. 1-6
3. Hobbs, D.W., 1969, Scale model study of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., Vol. 5, pp. 237-251

**양 형 식**



1979 서울대학교 공과대학 자원공학과  
학사  
1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724  
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr  
현재 전남대학교 건설지구환경공학부  
교수

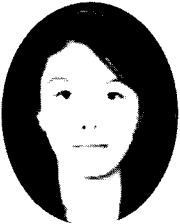
**김 종 관**



2003 전남대학교 공과대학 자원공학과  
학사

Tel: 062-530-0824  
E-mail: 00kjg@hanmail.net  
현재 전남대학교 대학원 지구시스템공  
학과 석사과정

**최 미 진**



2003 조선대학교 공과대학 자원공학과  
학사  
2005 전남대학교 대학원 지구시스템공  
학과 석사

Tel: 062-530-0824  
E-mail: wangle@hanmail.net  
현재 전남대학교 대학원 지구시스템공  
학과 박사수료

**최 병 희**



1988 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
2002 전남대학교 대학원 자원공학과 공학  
석사  
2005 전남대학교 대학원 지구시스템공  
학과 공학박사

Tel: 042-868-3237  
E-mail: bhchoi@kigam@re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원

**류 창 하**



1976 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1979 서울대학교 대학원 자원공학과 공학  
석사  
1989 University of Utah(in USA) 공학  
박사

Tel: 042-868-3236  
E-mail: cryu@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부  
책임연구원