

불량암반에서의 최적 그라우트 주입을 위한 암반 간극 특성 연구

김종태¹ · 강선미¹ · 추창오¹ · 이상은² · 정교철^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과

²강원대학교 에너지자원공학과

Characterization of Crack Aperture in Weak Bedrock for Optimum Grouting Method

Jong-Tae Kim¹, Seon-Mi Kang¹, Chang Oh Choo¹, Sang-Eun Lee², and Gyo-Cheol Jeong^{1*}

¹Dept. of Earth & Environmental Sciences, Andong National University

²Dept. of Mineral and Energy Resources Engineering, Kangwon National University

이 논문은 연약암반 내 불연속면 내에서의 그라우트에 의한 보강효과를 극대화하기 위한 하나의 방법으로써 균열의 간극 폭과 길이를 규명하는 것으로 암반을 대상으로 한 건설공사에서 연약암반 개량의 기초자료로 활용하게 함에 그 목적이 있다. 결과는 각 균열에서의 평균 트레이스 길이는 1.5~3.0 mm 범위로 나타난다. 이들 각 균열에서의 개구성 분포 성상의 해석결과 간극 폭의 추정치가 실험치와 잘 일치하고 간극 폭의 분포성상에 있어서 추정치가 음의 경향을 갖는다.

주요어 : 연약암반, 그라우트, 균열, 간극, 트레이스 길이

The purpose of this paper is to make a close inquiry into the relationship between width and length of crack as a method to maximize compensation effect by grouting discontinuity within weak bedrock, together with emphasis on application of the basic data to the reformation of weak bedrock in a construction site. The result reveals that the length of trace at each fracture averages 1.5~3.0 mm. Based on analysis of openness distribution pattern at each fracture, the estimated values are quite well in agreement with those of the experiment, with a negative trend in the distribution of aperture width.

Key words : weak bedrock, grout, crack, aperture, trace length

서 언

불연속성암반에는 절리(joint), 층리(bedding plane), 단층(fault), 파쇄대(fracture zone) 등과 같은 여러 가지 종류의 불연속면이 존재한다. 또한 이들이 특정영역 내 집중되어 있어 주변 모암과 비교하여 연약화 되어 있어 목적상 기초암반 및 투수 특성상 보강을 필요로 하는 암반을 불량암반 혹은 연약암반이라 한다.

일반적으로 댐 및 터널 등이 계획되어 현지조사가 시작되면 현장에서는 먼저 지표지질조사, 시추조사를 하여 상세한 지질도를 만든다. 그것과 병행하여 시추공에서 투수시험 및 공내재하시험 등을 실시하고 불량암반을 판

정하여 그라우팅에 의한 차수 혹은 보강 계획을 세우게 된다. 이 때 반드시 필요로 하는 것이 투수성 시험으로서 그라우트입자 크기 및 그라우트에 의한 차수 및 보강 공법을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 특히 최근에는 화산암 지대나 석회암 지대와 같이 차수기능에 문제가 있는 지질의 댐 현장에서도 인접한 유역으로 저수지의 물이 누수되는 중대한 문제가 발생할 때도 있어 차수단면의 목적도가 필요하기 때문에 이러한 수리지질학적 해석은 매우 중요하다고 하겠다.

침투류 해석방법에 관한 연구에 대해서는 연약암반 절리 내의 지하수 유동을 수치해석 방법을 이용하여 평가하려는 시도가 이전부터 많이 있어왔다. 절리의 투수

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

성 평가는 매우 어렵고, 복잡한 모델화 방법이 확립되어 있지 않기 때문에 해석 모델로서는 연약암반을 다공질 매체로 취급한 연속체로서 해석하는 것이 주었다. 그러나 불연속성암반은 여러 형태의 다양한 불연속면을 포함하기 때문에 암반을 연속체로서 취급하는 것은 한계가 있다(Barenblatt et al., 1960; Gale, 1977; Gentier et al., 1989).

이 논문은 연약암반 내 불연속면 내에서의 그라우트에 의한 보강효과를 극대화하기 위한 하나의 방법으로써 균열의 간극 폭과 길이를 규명하는 것으로 암반을 대상으로 한 건설공사에서 연약암반 개량의 기초자료로 활용하게 함에 그 목적이 있다.

간극 폭과 주입재의 침투성

각종 시멘트주입재의 입자경은 대체로 Table 1과 같이 1 μm에서 100 μm사이에 분포하고 있다.

일반적으로 주입재의 입경은 균열의 간극 폭의 1/3 이하일 때, 그 주입재가 간극내로 침투하기 쉽다. 보통 시멘트(N)는 투수계수(K_s) 10⁻⁴cm/sec 이하에서 주입재로서는 전혀 불필요하고, 콜로이드 시멘트(C)는 K_s=10⁻⁴cm/sec 이상에서만 주입재로서 유효하며, K_s=10⁻⁵cm/sec 이하에서는 거의 효과가 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 토양지반과는 달리 암반에 있어서는 K_s=10⁻⁵cm/sec 정도로서도 누수문제가 자주 제기되는 점에 비추어 이러한 암반조건에도 적용될 수 있음이 알려진 초미립시

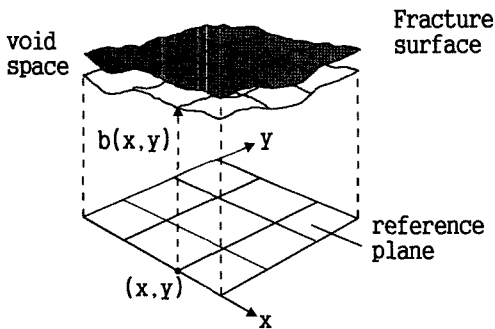


Fig. 1. Definition of aperture.

Table 1. grain size of grout materials.

	Grain size	Max.	Ave.	80%
N	Normal portland Cement	100	21	40
C	Colloid Cement	40	9	12
S	Superfine Cement	10	3	4

멘트(S)는 K_s=10⁻⁶cm/sec 인 암반에까지도 일부 적용이 가능하다는 점을 고려할 때 실제 암반내의 균열 간극 폭을 규명하여 그 적용성에 응용하는 것이 매우 중요하다.

불연속면에서의 수리학적 간극 폭

간극 폭의 측정법

간극(aperture)이란 용어는 흔히 절리 간극공간(void space)를 기술할 때 사용되며 복잡한 3차원 구조를 갖는다. 이 용어는 Fig. 1에서 설명된 것처럼 정의 될 수 있다. 즉 전반적인 균열 표면들은 기준면에 평행한 것으로 결정된다(이희석, 1999; Hakami and Stephansson, 1993; Hakami and Larsson, 1996; Pyrak et al., 1987).

수리학적 간극 폭

불연속면내의 흐름에도 이방성이 존재하는 것은 간단한 수치실험에서도 확인되지만 여기에서는 등방적이라고 가정한다(Rayan and Farer, 1987). 따라서 여기에서는 계측량으로 스칼라 양을 이용한다. 불연속면의 폭을 w, 거리 L만큼 떨어져 있는 두 점의 수두차를 Δh로 하면 수리학적 간극 폭은 정상유 및 방사류 각각의 경우에 있어서 다음과 같이 된다(Suzuki, 1995).

$$\text{정상류: } Q = -\frac{\gamma}{12\mu} \frac{\Delta h}{L} t^3 w, \left(t_h = \frac{12\mu Q L}{\gamma w \Delta h} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$\text{방사류: } Q = -2\pi \frac{\gamma}{\mu} \frac{1}{12} t^3 \frac{\Delta h}{\ln(r_0/r_1)}$$

$$t_h = \left[\frac{6\mu Q}{\pi \gamma \Delta h} \ln \left(\frac{r_0}{r_1} \right) \right]^{1/3} \quad (2)$$

여기에서 γ는 유체밀도, Q는 μ단위시간당 유량, 는 유체의 점성계수, r₀ 및 r₁는 외경 및 내경이다. 이들은 삼승법칙을 가정하여 얻은 것이기 때문에 특히 구별하여 삼승법칙 간극 폭(cubic law aperture)이라고 하는 경우도 있다(Gale, 1977). 그 외 추적자 시험에 의해 얻은 데이터로부터 역산하여 간극 폭에 질량평형간극 폭(mass balance aperture) 또는 추적자 간극 폭(tracer aperture)이 있고, 이것은 유량 Q, 추적자의 평균관류시간 t_w 및 불연속면의 면적 를 이용하여 다음 식과 같이

나타내어진다(Suzuki, 1995).

$$Qt_w = At_m \quad t_m = \frac{Qt_w}{Lw} \quad (3)$$

위의 식은, 불연속면의 간극체적과 유량의 질량보존 법칙으로부터 얻어지기 때문에, 이 간극 폭은 추적자가 통과한 간극의 산술평균 간극 폭이라고 생각된다(Tsang, 1992; Suzuki, 1995). 또한 마찰손실 간극 폭(frictional loss aperture)이 있다. 이것은 추적자가 주입된 점으로부터 계속된 점까지의 속도 v 로 이동한 경우를 고려하여, 추적자의 평균잔류시간 t_w 는 다음과 같다.

$$t_w = \int_{l_1}^{l_2} \frac{1}{v} dl \quad (4)$$

마찬가지로 흐름의 경우는 l_1 으로부터 l_2 까지의 유속은 일정하기 때문에 다음 식과 같이 된다.

$$v = -\frac{\gamma}{\mu} \left(\frac{1}{2} r^2 \right) \frac{\Delta h}{L} \quad (5)$$

마찰손실 간극 폭은 다음 식과 같이 나타내어진다(Suzuki, 1995).

$$t_i = L \left(\frac{12\mu}{\gamma \Delta h t_w} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

방사류의 경우는 유속이 다음과 같은 식에 의해 변화되기 때문에,

$$v = -\frac{\gamma}{\mu} \left(\frac{1}{2} r^2 \right) \frac{1}{r} \frac{\Delta h}{\ln(r_o/r_i)} \quad (7)$$

식 (5)에 대입하면 다음과 같이 나타난다.

$$t_i = \left[\frac{6\mu}{\gamma \Delta h t_w} \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) (r_o^2 - r_i^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

이상의 세 종류의 수리학적으로 동일한 간극 폭은 다음과 같은 관계로 된다(Suzuki, 1995).

$$t_h^3 = t_i^2 t_m \quad (9)$$

실내 실험

본 실험을 위해 제작한 공시체 12개를 대상으로 실시한 압열 인장시험으로 Fig. 2와 같이 불연속면을 형성시켰다(Sundaram, 1987).

투수시험에 사용된 장비는 크게 5부분으로 나누어지는데 암석공시체에 투수압과 봉압을 가압할 수 있는 Base Cell Assembly와 이와 연결되어 투수압을 일정하게 가압하는 투수시험기인 Pressure Test 3500(EL 70-5130 series, ELE International), 가압되는 투수압을 측정하는 Pressure Gauge (EL70-5135 3500 kPa, ELE International) 및 Base Cell Assembly로 일정한 봉압을 가압하는 Constant Pressure Test Unit(ELE International) 등으로 구성되어 있다(Fig. 3). Base Cell Assembly의 내부에 장착되는 Urethane Rubber Jacket은 NX 코어 크기로 내경이 54.74 mm이며 허용오차는 ± 0.75 mm, 길이는 130 mm이다. 본 시험에 사용되는 암석공시체의 크기는 NX 코어로 제작되었다.

그리고 투수시험기인 Pressure Test 3500은 유압식으로 실린더 상부에는 유압유, 하부에는 순수한 물이 함께 분리되어 가득 차 있으며 투수압을 가할 경우 최소 500kPa에서 최대 3500kPa까지 투수압을 일정하게 Base

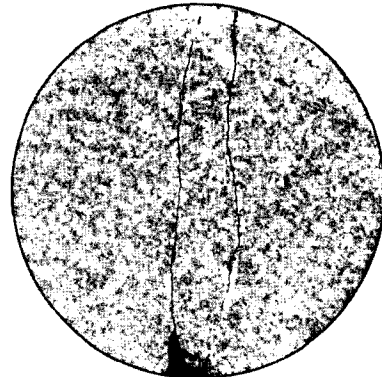
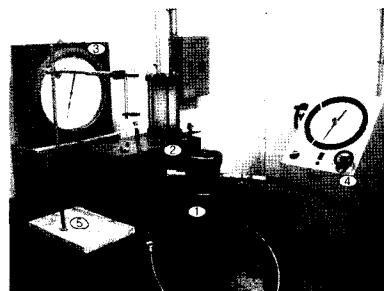


Fig. 2. Discontinuities due to brazilian test.



(1) Base Cell Assembly (2) Pressure Test 3500
(3) Pressure Gauge (4) Constant Pressure Test Unit
(5) Burette

Fig. 3. Permeability test unit equipment.

Cell Assembly 내에 장착되어 있는 암석공시체에 가압할 수 있다. 각각의 암석공시체에 대한 투수시험은 Base Cell Assembly에 암석공시체를 장착시키고 하부 Permeability End Cap으로 연결된 Nylon Opaque Tube와 Burette 내부의 공기를 제거한 후 상부 Permeability End Cap을 닫고 투수시험기인 Pressure Test 3500으로 투수압이 전달되는 Nylon Opaque Tube를 연결한다. 그리고 Constant Pressure Test Unit에서 서서히 봉압을 증가시키면서 동시에 투수압도 함께 증가시킨다. 여기서 사용되는 연결튜브인 Nylon Opaque Tube는 외경이 6 mm, 내경이 4 mm로 Pressure Test 3500에서 전달되는 투수압을 최대 3500 kPa까지 견딜 수 있다.

이 때 투수되어 나온 물의 유출량을 Burette(diameter 10 mm, length 120 mm)를 통해 확인하면서 시험에 적용되는 일정한 봉압 및 투수압까지 상승시킨 후 시간에 따른 투수유량을 지속적으로 측정하였다.

3차원 균열분포의 관로모델

3차원 네트워크해석 모델에 있어서 중요한 파라미터(parameter)로 되는 것은 불연속면 내의 유로의 위치, 크기 및 형태 등이다. 본 해석에서는 각 유로요소 내의 흐름 모델에 대하여 복수병렬 파이프모델을 이용하였다. 유로 요소가 넓어지기 때문에 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 원형관의 집합체로서 복수의 병렬 파이프를 고려한다. 이 경우 j 번째의 유로요소에서의 투수계수 K_j 는 다음과 같이 된다.

$$K_j = \frac{gt_j^2}{32\nu} \tag{10}$$

여기에서, t_j : 유로요소 j 의 개구 폭
 g : 중력가속도
 ν : 동점성계수

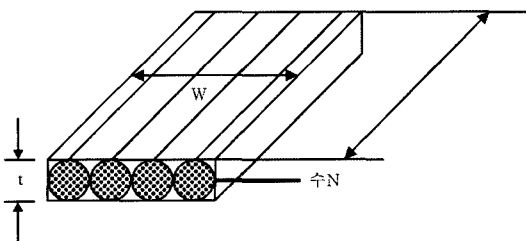


Fig. 4. Pipe model using arranging in a row of plural.

등이다. 경계조건으로서는 다음 식에서 나타내는 수두의 Dirichlet조건을 이용한다.

$$h(x) = h_n(x) \quad (x = X \text{ 상의 경계조건}) \tag{11}$$

결과 및 토의

Fig. 5로부터 각 균열에서의 평균 트레이스 길이는 1.5~3.0 mm 범위로 나타난다. 이들 각 균열에서의 개구성 분포성상의 해석결과 추정치가 실험치와 잘 일치하지만 추정치가 양의 관계 및 음의 관계가 모두 나타나고 있다. 일반적으로 트레이스 길이가 길수록 간극 폭이 커지는 경향이 있다. 그러나 레이저 현미경을 이용한 간극 폭의 측정에 대하여는 암석학상 운모 주변에 있어서 크랙의 간극 폭은 다른 광물 주변에 있어서 크랙의 간극 폭과 비교해서 크게 나타난다. 다른 광물과 비교하여 운모의 주변 길이는 짧고 주변 크랙의 트레이스 길이도 비교적 짧다. 따라서 개구성 분포성상에 있어서 트레이스 길이가 짧아도 간극 폭이 큰 운모에서의 크랙이 발생하고, 트레이스 길이가 길어지면 운모에서의 크랙이 발생하지 않기 때문에 간극 폭이 작은 크랙밖에 발생하지 않는다. 따라서 개구 폭의 분포성상에 있어서 추정치가 음의 경향을 갖는다고 생각된다(Fig. 6).

결 언

투수성 시험으로서 얻어지는 균열의 간극 폭은 그라

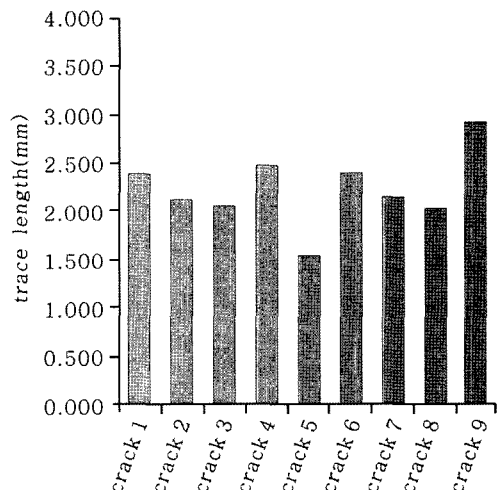


Fig. 5. Average values of each trace length.

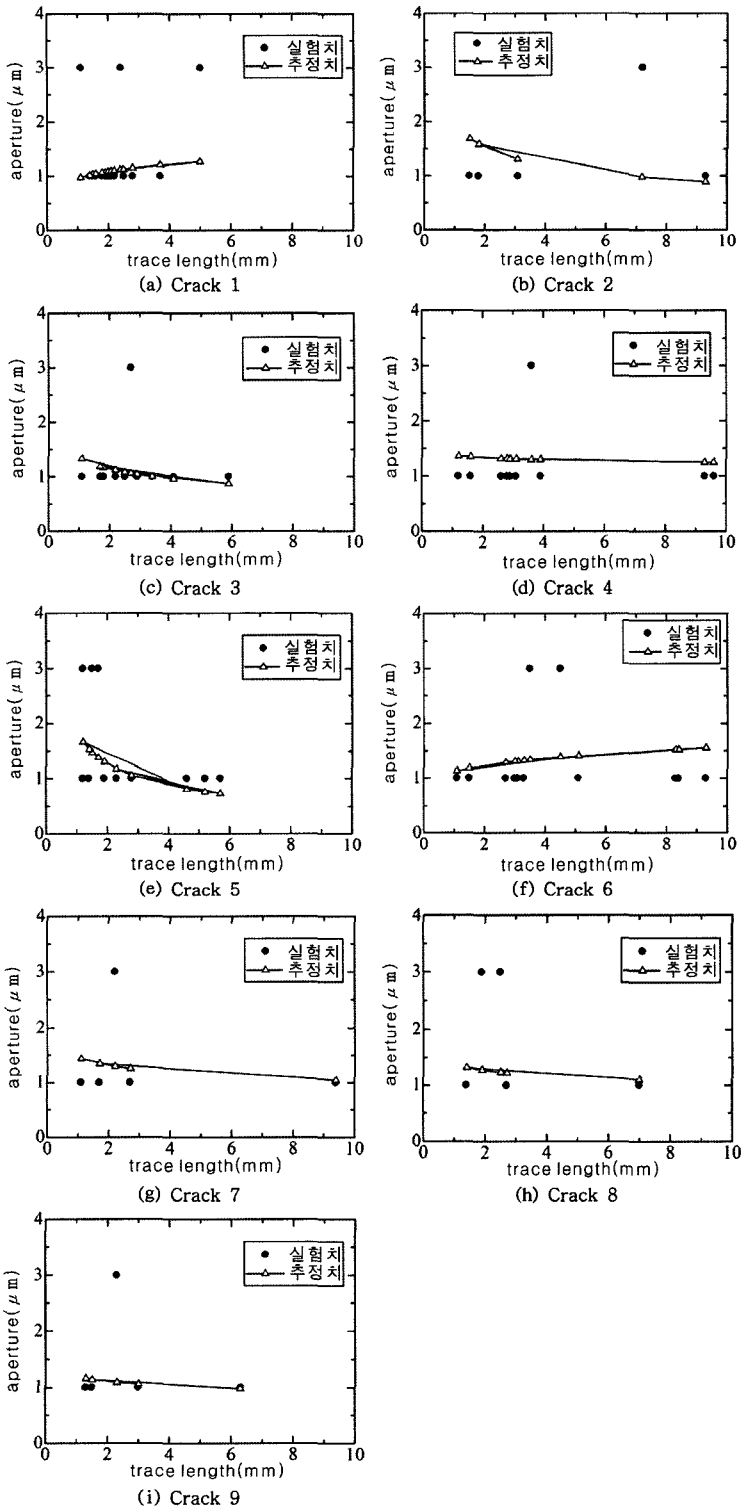


Fig. 6. Relationship of aperture between trace length in each crack.

우트입자 크기 및 그라우트에 의한 차수 및 보강 공법을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 투수계수 결정으로부터 역으로 간극 폭을 결정하는 해석이 최근 많이 연구되고 있다.

이 연구는 연약암반 내 불연속면 내에서의 그라우트에 의한 보강효과를 극대화하기 위한 하나의 방법으로써 균열의 간극 폭과 길이를 규명하는 것으로 암반을 대상으로 한 건설공사에서 연약암반 개량의 기초자료로 활용할 수 있다. 결과적으로 각 균열에서의 평균 트레이스 길이는 1.5~3.0 mm 범위로 나타난다. 이들 각 균열에서의 개구성 분포성상의 해석결과 추정치가 실험치와 잘 일치하며 음의 관계를 나타내고 있다. 일반적으로 트레이스 길이가 길수록 간극 폭이 커지는 경향이 있다. 그러나 레이저 현미경을 이용한 간극 폭의 측정에 대하여는 암석학상 운모 주변에 있어서 크랙의 간극 폭은 다른 광물 주변에 있어서 크랙의 간극 폭과 비교해서 크게 나타난다.

사 사

이 연구는 2006년 (재)산학협동재단의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 이희석, 1999, 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 및 수리학적 거동 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, pp. 37-40.
- Barenblatt, G. I., Zhenltov, I. P., Kochina, N., 1960, Basics concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fractured rocks., *Prikl. Mat. Mekh.*, 24, 5, pp. 852-864.
- Gale, J. E., 1977, Comparison of coupled fracture deformation and fluid flow models with direct measurements of fracture pore structure and stress-flow properties, *Proc. 28th U. S. Symp. on Rock Mechanics*, pp. 1213-1222.
- Gentier, S., Billiaux, D. and Van Vliet, L., 1989, Laboratory testing of the voids of a fracture, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 22, pp. 149-157.
- Hakami, E. and Stephansson, O., 1993, Experimental technique for aperture studies of intersecting joints, *Eurock '93, Proc. ISRM Int. Symp. on Safety and Environmental Issues in Rock Eng.*, Lisbon, pp. 301-308.
- Hakami, E., and Larsson, E., 1996, Aperture Measurements and Flow Experiments on a Single Natural Fracture, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 33, No. 4, pp. 395-404.
- Pyrak-Nolte, L. T. Myer, L. R., Cook, N. G. W. and With-

erspoon, P. A., 1987, Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, *Proc. 6th ISRM Congress, Montreal, Vol. 1*, pp. 225-231.

- Rayan, T. M. and Farer, I. W., 1987, Laboratory determination of fracture permeability, *Proc. of 28th U. S. Sympo. on Rock Mechanics*, pp. 593-600.
- Sundaram, P. N., Watkins, D. J., and Ralph, W. E., 1987, laboratory investigations of coupled stress-deformation-hydraulic flow in a natural rock fracture, *Proc. 28th U. S. Sympo. on Rock Mechanics*, pp. 585-592.
- Suzuki Kenichiro, 1995, 불연속성암반의 수리역학특성의 평가와 암석풍화의 관계에 대한 기초적 연구, *saitama university 박사학위논문*, p. 61-62

2007년 5월 16일 원고접수, 2007년 6월 16일 게재승인

김종태

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388번지
Tel: 054-820-5182
Fax: 054-822-5467
E-mail: jongtae98@empal.com

강선미

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388번지
Tel: 054-820-5182
Fax: 054-822-5467
E-mail: eqgd0000@nate.com

추창오

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388번지
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: mordenite@hanmail.net

이상은

강원대학교 삼척캠퍼스
공학대학 에너지자원공학과
245-711 강원도 삼척시 중앙로 1번지
Tel: 033-570-6306
Fax: 033-573-6317
E-mail: lee9367@kangwon.ac.kr

정교철

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388번지
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@andong.ac.kr