

## 단계별 손상에 따른 화강암의 손상 발달특성 연구

### A study on damage propagation characteristics of granite in different damage levels

---

박	혁(Hyuck Park)	안동대학교 지구환경과학과
정	교 철(Gyo Cheol Jeong)	안동대학교 지구환경과학과

---

#### 요약 / ABSTRACT

화강암의 응력하에서의 손상발달특성을 연구하기 위해 국내의 조립, 중립, 세립 화강암 시료를 채취하였으며, 일축압축에 의한 손상 전과 후에 탄성파속도시험, 투수성시험이 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해 수행되었고, 시료의 단면에 발생된 크랙의 육안관찰을 용이하게 하기 위하여 셀룰로즈 아세테이트 필름 복제법이 사용되었다. 그리고 아세테이트필름 상의 크랙을 좀더 명확하게 촬영하기 위해, 암시야조명을 이용한 근접촬영법이 적용되었다. 개인용 컴퓨터와 그래픽 프로그램을 이용하여 크랙을 확대 후 스케치하여 측정함으로써 시료단면에 발생한 크랙을 입도 별로 비교·분석하였다. 손상이 발생한 후, 조립·중립화강암이 세립화강암에 비해 상대적으로 더 낮은 탄성파속도, 더 높은 투수성을 가졌으며, 더 많은 크랙 발생을 보였다.

**주요어:** 암반손상, 탄성파속도, 투수시험, 아세테이트필름복제, 크랙의 조밀성

The purpose of this study is to characterize damage propagation in granite which exists in South Korea. Coarse, medium and fine-grained granite specimens were sampled respectively. In order to perform this study, elastic wave velocity test and permeability test were carried out to estimate the physical specificities of specimens before and after damage. Cellulose acetate film duplication method was used to select only cracks from cross section and to make these visible. Using dark-field illumination, approach photographing technique was used to get more distinct photographs of cracks from acetate peel. Computer programs named Photoshop were used to

describe cracks. After damage, coarse and medium-grained granite had lower elastic wave velocity, higher permeability, more cracks and more distinct shear fractures than fine-grained granite.

**Key Words:** Damage propagation, Elastic wave velocity test, Permeability test, Cellulose acetate film duplication method, Density of crack

## 서 론

대규모 지하구조물의 건설을 위해서는 대상이 되는 암반에 대한 다각적인 연구가 선행되어야 한다. 방사성 폐기물 지층처분시설과 같은 고도의 안전을 요하는 지하구조물을 건설할 때에는 암반 내에 존재하는 불연속면에 대해 장기적이면서도 세밀한 연구가 필요하다. 불연속면은 크랙(crack), 엽리(foliation), 층리(bedding), 절리(joint), 단층(fault) 등 다양한 형태와 규모로 존재한다. 이러한 불연속면들은 지하수의 유동경로 역할을 하기도 하고, 등방성 매질에서 기대할 수 없는 여러 형태의 암반변형(deformation)의 직·간접적 원인이 되기도 한다. 이러한 불연속면 외에도 대상 암반의 압축 또한 중요한 요소라고 하겠다. 일본의 경우를 예로 들면, 화강암과 응회암이 지하동굴처분 시설의 주 대상이 되고 있으며, 우리나라는 화강암을 그 대상으로 하고 있다.

화강암은 거의 등방성으로 취급하는 것이 일반적이거나 이미 여러 연구에서 화강암 역시 역학적으로 이방성이라는 것이 알려져 있다. 과거 연구를 살펴보면, 화강암은 불연속면의 방향에 따라 압축강도가 이방성을 보이고(Osborne, 1935), 불연속면의 방향이 지하 응력의 방향성을 지시함 이 보고되었으며(Plumb et al, 1984), 이상은(1999)과 박덕원 외(2001)는 현미경 관찰에 의하여 불연속면의 방향을 제시하였다. 불연속면의 수리특성에 관한 연구는 1960년대 중반 Snow(1968)에 의해 본격적으로 시작되었다. Gale(1982)은 불연속면 간극, 방향, 연결도 등이 암반의 투수성에 영향을 미치는 것으로 해석하였으며, Long et al.(1982)은 불연속면 체계가 불연속면의 밀도, 간극, 방향 그리고 시료 크기 등에 의존한 등다공성 거동(equivalent porous behaviour)을 보인다고 주장하였다. 정교철(1999)은 응력분포 및 파괴에 관한

연구에서 미시적 균열의 진전은 거시적인 탄성영역으로부터 이미 발생되며, 이들 균열들은 주어진 응력에서 안정적으로 존재하고 공시체의 파괴에는 직접적으로 연결되지 않는다고 주장하였다. 이상과 같이 암반 내에 존재하는 불연속면에 대한 연구는 다양한 측면에서 진행되어왔다. 하지만 단일 입도의 암석에 대한 연구가 대부분이었으며 동일 압축에 입도를 달리하여 관찰·비교한 연구 사례를 찾아보기는 힘들다. 본 논문에서는 과거 밝혀진 바와 같이 화강암이 등방균질체가 아님을 인식하고 더 나아가 화강암의 입도 차에 따른 손상특성을 찾고자 하였다. 조립, 중립, 세립 화강암의 입도 차에 따른 손상특성을 비교하고 향후 이루어질 방사성폐기물 지층처분장과 같은 대규모 지하구조물 설계의 기초자료로 활용하고자 하는 것이 본 논문의 목적이다.

본 연구에서는 각기 다른계별 손상에 따른 손상 발달특성을 파악하고자 조립, 중립, 세립화강암을 채취하였으며, 시추시료 중 입도 별로 각각 7개씩 총 21개의 시료를 제작하였다. 단계별 손상을 가하기 전에 시료의 물성과약을 위해 각 입도별 평균 탄성파속도를 측정하였으며, 7개 시료중 3개씩 이용하여 일축압축강도를 구하였다. 그 후 남은 시료에 각기 다른 손상하중(일축압축강도의 75, 85, 95, 96~98%)을 가하고 각각의 탄성파속도, 투수성, 손상후 단면에서의 크랙의 조밀성을 관찰·비교하였다. 손상 후 발생한 크랙을 정밀관찰하기 위해 시료를 축의 수직방향으로 4등분하였으며, 상, 중상, 중, 중하, 하단면을 아세테이트 필름 복제법(Acetate film duplication method)을 이용하여 시료단면의 크랙을 가시화하고, 이를 암시야조명법(Dark-field illumination method)을 이용한 근접촬영 하여 좀더 관찰이 용이하게 하였다. 또한 크랙을 스케치하고 크랙밀도를 구함으로써 시료에 발생한 손상크랙의 조밀성을 입도 별로 비교·분석하였다.

공시체제작 및 손상발생 시험

**암석공시체 제작**  
 본 연구에 사용된 공시체는 입도별로 분류된 화강암으로써 조립화강암, 중립화강암, 세립화강암으로 분류하였다. 시료는 3개 지역(조립: 경기도 포천군 관인면의 주라기 흑운모화강암, 중립: 경남 거창군 웅양면의 백악기 흑운모 화강암, 세립: 경북 상주군 공성면 주라기 흑운모화강암)에서 시추(NX)를 통해 채취되었다. 시료별 채취 구간은 지표를 기준으로 조립·중립·세립 화강암 각각 11.05 ~ 11.90m, 24.04 ~ 24.94m, 11.32 ~ 12.76m 구간이며, 입도 별로 각각 7개씩 제작하여 총 21개의 시료를 제작하였으며, 평균직경 11.03cm, 오차 ±0.5mm, 지름 5.48cm 이다. 시료 선정시의 조건은 다음과 같다. 1) 육안관찰에 의한 결함(맥, 절리, 풍화)이 없는 구간 내에서 시료를 선택한다. 2) 최대한 인접한 구간에서 시료를 채취하기 위해 7개의 시료 모두 수직거리 최대 1.5m 구간 내에서 선택한다.

일축압축시험 및 암석 손상 발생

입도 별로 3개씩의 시료를 대상으로 일축압축 시험을 실시하고 여기서 구해진 압축강도의 평균치를 각 입도별 시료의 일축압축강도로 취하였다. 일축압축시험에 사용된 기기는 영국 ELE사의 Hook Cell ADR 2000 Compression Machine이며, 이 시험에서 적용된 하중속도는 0.4MPa/sec이다(Fig. 1). 일축압축시험 결과, 조립화강암 1828.27 kgf/cm<sup>2</sup>, 중립화강암 1659.61 kgf/cm<sup>2</sup>, 세립화강암 2634.24 kgf/cm<sup>2</sup>의 일축압축강도값을 보였다. 중립화강암이 제일 낮은 일축압축강도를 보이는 것은 중립화강암이 공학적 분류범주에서는 경암에 속하지만 풍화 내지 암석생성당시의 조건 차이 등으로 인해 상대적으로 낮은 강도값을 보이는 것으로 사료된다. 이렇게 결정된 일축압축강도 값을 기준으로 입도별로 각 4개의 시료에 일축압축강도의 75, 85, 95, 96~98%의 손상하중을 가하였다(Table 1). 95%이상의 손상에서는 일정한 목표 하중값을 정하지 않고 초기 파괴음이 인지되는 순간까지 하중증가를 실시하였다. Table 1은 입도별 시료에 가해진 손상을 %로 표현한 것으로 (가

해진응력/일축압축강도)×100 으로 표현한 것이다

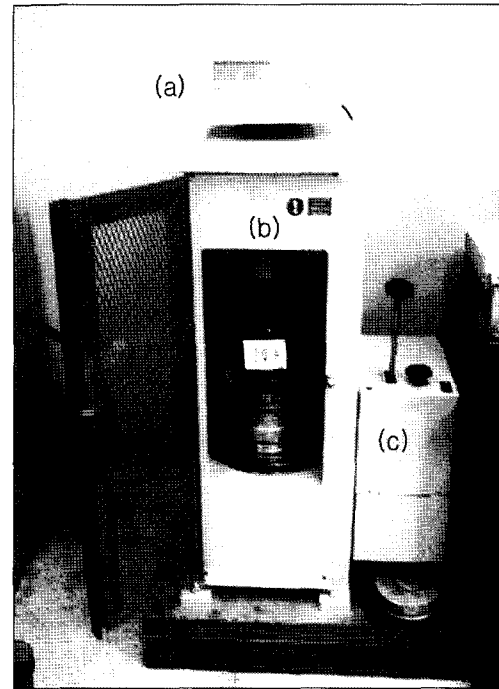


Fig.1. ELE-Hook Cell ADR 2000 Compressive machine Unit System. (a) ADR Digital Readout Unit (b) Load Frame Assembly (c) Hydraulic Power Supply.

Table 1. Damage percentages of specimens.

Granite	Stress (kgf/cm <sup>2</sup> )	Damage percentage (%)
Coarse-grained	1381.8	75.00
	1567.4	85.08
	1754.8	95.25
	1771.7	96.17
Medium-grained	1250.2	75.33
	1408.2	84.85
	1578.3	95.09
	1954.7	98.00
Fine-grained	1969.0	75.00
	2231.7	85.00
	2499.2	95.19
	2519.9	95.98

### 손상발달특성과 물성 비교

#### 탄성과 속도 시험

본 탄성과 속도시험을 위해 사용된 기기는 PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester)이며 P파와 S파를 동시에 측정할 수 있는 Wave Transducer를 사용하였다(Fig. 2). 본 기기의 오차범위는  $\pm 0.1\mu s$  이다.

본 연구에서는 모든 시료에 대하여 일정하게 1ton의 하중을 가하고 탄성과 전달속도를 측정하였다. 손상을 가하기 전의 모든 시료에 대한 탄성과 속도시험 결과 P파와 S파의 평균속도는 각각 조립화강암 3.64 km/sec, 3.38km/sec, 중립화강암 3.60km/sec, 3.32km/sec, 세립화강암 4.18km/sec, 4.07km/sec로 나타났으며, P파와 S파 공통적으로 세립-조립-중립화강암의 순으로 속도가 감소하였다. 이 결과는 세립질 화강암이 중립 또는 조립질 화강암에 비해 더욱 치밀한 조직을 가짐을 지시한다. 그러나, 시료의 산출지, 마그마 관입 당시의 환경, 그리고 냉각조건들이 다르므로 단순히 입자 크기만을 기준으로 비교하는데는 무리가 있다. 각기 다른 손상하중이 가해진 후의 탄성과속도시험 결과를 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다.

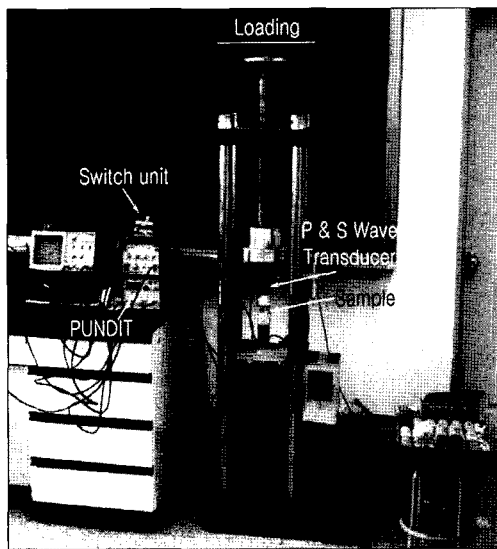


Fig. 2. PUNDIT & Instruments for Elastic wave velocity measuring.

Table 2. Elastic wave velocity in each damage percentage.

Granite	Damage percentage (%)	P-wave velocity (km/sec)	S-wave velocity (km/sec)
Coarse-grained	75.00	3.33	3.01
	85.08	3.26	2.92
	95.25	3.26	2.91
	96.17	3.24	2.84
Medium-grained	75.33	3.38	3.08
	84.85	3.38	3.06
	95.09	3.36	3.06
	98.00	3.30	2.86
Fine-grained	75.00	3.96	3.83
	85.00	3.93	3.77
	95.19	3.81	3.67
	95.98	3.82	3.64

손상이 가해진 후의 시료들에 대해서 탄성과 속도를 측정해 본 결과 전체적으로 손상 전보다 속도가 감소하는 경향을 볼수 있다. 특히 조립 화강암에서는 손상진행에 따른 탄성과속도의 감소비가 다른 입도 시료들에 비해 높음을 확인할 수 있으며 P파와 S파에서 공통적으로 나타난다(Table2, Fig. 3). 이는 결국 조립화강암의 손상발달이 중립 내지 세립 화강암에 비해 더욱 급격히 이루어 짐을 시사한다고 하겠다.

#### 실내투수시험

단계적 손상을 가한 후 실내투수시험을 실시하여 손상이 진행됨에 따른 투수성의 변화를 비교해 보았다. 이 시험을 위해 사용한 기기는 Pressure Test 3500 unit이고, 실내투수시험을 통해 구해진 결과를 이용한 투수계수(k) 산출 공식은  $k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot h}$  이다. 여기서 Q는 Burette에서 측정된 투수량, L은 물이 통과하는 시료의 길이, A는 시료의 단면적, t는 투수시간, h는 수두높이로 여기서는 투수압을 높이로 환산하여 사용하였다. 투수계수의 단위는 cm/sec 이며, 동일조건을 위하여 투수압과 봉압을 모든 시료에 대하여 각각 2250kPa, 4500kPa로 동일하게 적용하였다. 입도 별로 단계별 손상을 가한 후, 각 시료별 투

단계별 손상에 따른 화강암의 손상 발달특성 연구

수특성을 살펴보았다(Fig. 3). 전반적으로 손상정도가 증가함에 따라 투수계수도 증가하는 양상을 나타낸다. 즉, 손상정도가 증가하면 새로운 크랙의 발생 및 틈이 증가하고 이는 탄성파속도의 감소 원인이 된다. 그리고 이 크랙들이 서로 연결되어 투수시험 시 주입된 물을 상대적으로 원활히 이동시킬 수 있는 경로가 되므로, 손상증가에 따른 투수계수 증가가 발생한 것으로 설명할 수 있다.

한편, 입도별 화강암의 손상증가에 따른 투수성의 변화양상을 비교해 보면, 조립화강암의 경우 75% 손상과 비교해 보았을 때 96%의 손상에서 가해졌을 때의 투수계수가 약 8.2배 높은 값으로 나타난다. 중립화강암의 경우 75%와 98% 손상에서의 투수계수를 비교하면 약 3.0배의 증가를 보이

며, 세립화강암의 경우 75%와 96% 손상에서의 투수계수를 비교하면 약 2.9배의 증가를 보인다. 조립화강암에서 손상 진행에 따른 투수성의 증가 폭이 다른 입도에 비해 현저히 큼을 알 수 있다(Fig. 4). 이를 통해 조립화강암이 중립 내지 세립 화강암에 비해 암석 내에 존재하는 미세크랙 혹은 입자경계가 손상응력에 더 민감하게 변형됨을 짐작할 수 있다. 이는 입자간 경계도 잠재적인 크랙으로 작용할 수 있음을 고려하면, 조립화강암의 단일 입자경계 길이가 다른 시료에 비해 훨씬 길기 때문에 일정 응력이 가해질 경우 이들이 훨씬 쉽게 변형되고 서로 연결되므로, 투수가 원활해지는 것으로 생각된다.

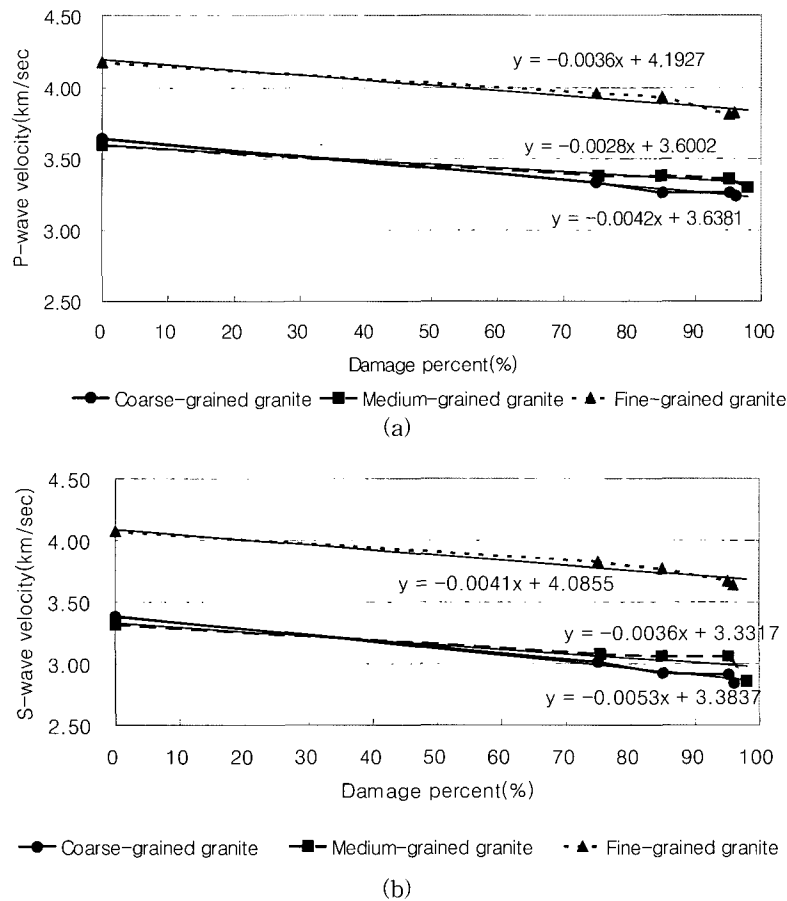


Fig. 3. Elastic wave velocities according to each damage percentage. Coarse-grained granite has the highest decreasing rate of elastic wave velocity. (a) P-wave, (b) S-wave.

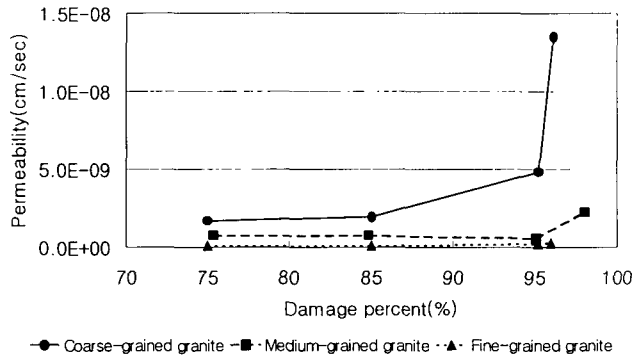


Fig. 4. Comparison of coefficient of permeability on damage.

### 아세테이트필름 복제법을 이용한 손상특성 관찰

아세테이트 필름 복제법과 암시야 조명법  
 시료단면의 관찰을 용이하게 하기 위해 본 연구에서는 아세테이트 필름을 이용한 시료단면 복제법을 사용하였다(Fig. 5, 6). 아세테이트 필름(acetate peel) 방법은 암석 박편과 더불어 현미경을 통한 화석, 퇴적암의 미세구조나 조직 등을 관찰하기 위해서 사용하는 방법이다. 아세테이트 필름은 연마한 암석을 산처리하여 부분 용식한 표면을 셀룰로오즈 아세테이트(Cellulose acetate) 필름으로 복제 한 것으로 보통 고생물학의 석회암을 중심으로 하는 탄산염암 연구에서 다양한 목적으로 이용되어 왔다. 이 연구에서는 시료의 절단면에 존재하는 크랙의 형상을 좀더 면밀히 관찰하려는 목적으로 사용되었다. 아세테이트 필름 복제법은 단면 넓이에 제한이 없다는 점, 표품의 손실을 최소화 할 수 있다는 점, 신속하게 정보를 얻을 수 있다는 점, 복수의 복제가 가능하다는 점, 사진 묘사시 사진 인화용 음화(negative)의 대용으로 사용할 경우 해상도가 매우 우수한 양화(positive) 사진을 얻을 수 있다는 점, 슬라이드 필름으로 제

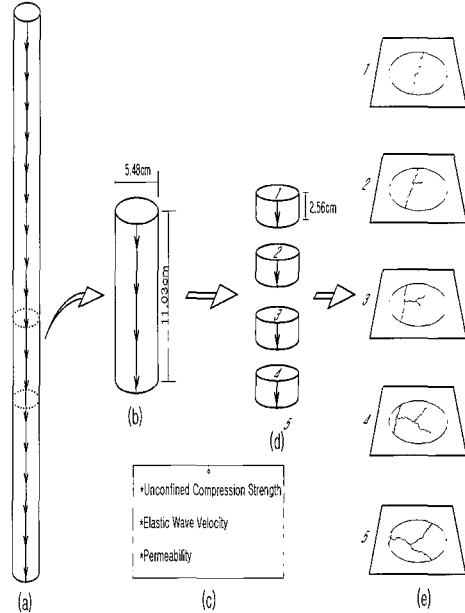


Fig. 5. (a) Cores which had cracks were assembled to revert to the original direction, then standard line was lined (b) Specimen (c) Tests were performed for Unconfined compression strength, Elastic wave velocity and Permeability (d) Column sectioned into four discs of equal thickness (e) Five sections were duplicated by acetate films.

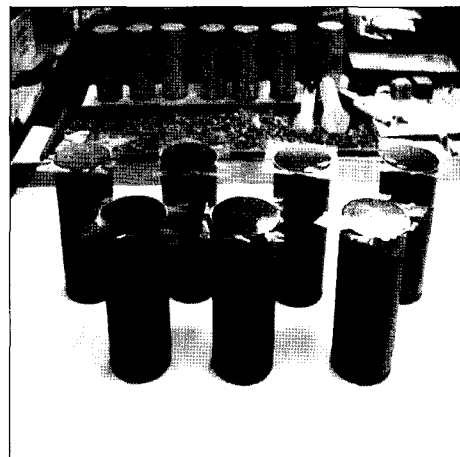


Fig. 6. Acetate film duplication.

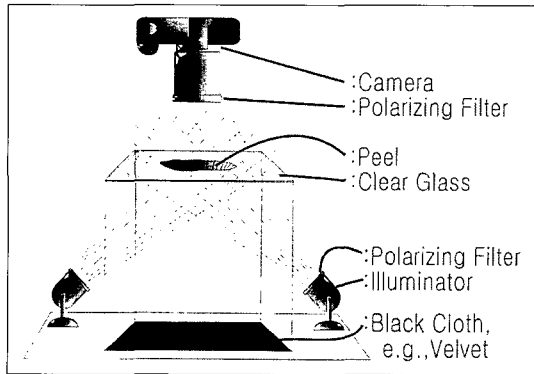


Fig. 7. Schematic description of dark-field illumination method.

작하면 해상도가 매우 좋은 슬라이드 필름을 얻을 수 있다는 점, 소요되는 시간과 비용이 박편제작에 비하여 경제적이다는 점 등 박편에서 기대할 수 없는 여러 유용성을 가지고 있다. 그러나, 광물의 광학적 특성과 성분의 분석에 이용할 수 없다는 점과 암석의 색상을 표현할 수 없다는 제한성을 가지고 있다. 한편, 아세테이트 복제 필름을 사진으로 나타내기 위해서 암시야 조명법(Dark-field illumination)을 채택한 근접 사진 기법이 사용되었다(Fig. 7), (White, 1984; Sorauf and Tuttle, 1988). 이 사진 기법은 단면적이 큰 시료 등의 표현에 극히 유용하며 복제된 필름에서 묘사에 필요한 부분을 강조할 수 있는 장점이 있다. 본 실험에서 사진은 실제 아세테이트 필름 약 2배 확대한 크기이며, 해상도 200dpi 로 스캐닝하여 다시 2배 확대되었다. 이를 그래픽 프로그램을 이용하여 다시 2배 확대된 상태에서 크랙의 밀도 관찰을 위해 컴퓨터 상에서 스케치하였다(Fig. 8).

Fig. 5은 본 논문에서 진행된 실험의 전반적 진행과정을 묘사한 것이며 (d)와 (e)는 아세테이트 필름을 이용한 시료단면 복제를 표현한 것이다.

Fig. 5에서 나타낸 것과 같이, 한 개의 코어시료에서 상, 중상, 중, 중하, 하단면으로 총 5개의 단면에 대하여 스케치가 이루어지므로, 총 60개의 단면 스케치를 실시하였다. 그러나 세립화강암의 경우 8배 확대에도 불구하고 컴퓨터 상에서 크랙의 존재 여부를 확인하기 힘든 시료가 많았으며

로 시료단면 크랙관찰에서는 세립화강암을 제외시키고, 조립과 중립화강암에 대하여 크랙의 밀도를 비교하였다.

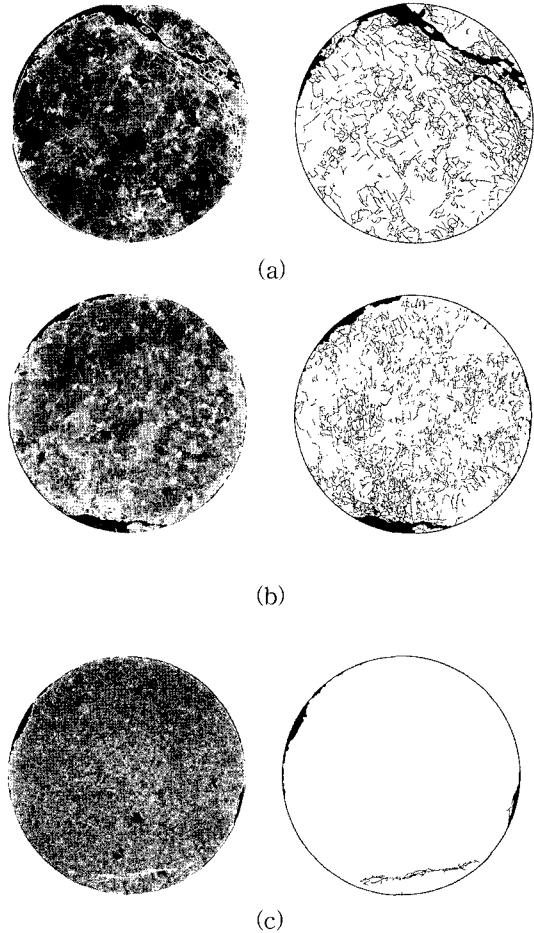


Fig. 8. Photograph(left) and traces(right) of cracks acquired from acetate film copy method and dark field illumination method; (a) Coarse-grained granite, (b) Medium-grained granite, (c) Fine-grained granite.

#### 크랙 밀도 및 연결성

크랙의 밀도는 해석차원에 따라 다음에 정의하는 세가지로 표현할 수 있다. ① 1차원밀도 ( $\rho L$ ) : 크랙면의 수선방향의 단위길이당 교차하는 크랙 갯수이며 단위차원은 L-1 이다. ② 2차원밀도 ( $\rho$

A) : 크랙면의 수직면에 있어서 단위면적당 교차하는 크랙 trace 중점의 개수이며 단위차원은 L-2 이다. ③ 3차원밀도 ( $\rho V$ ) : 단위체적당 교차하는 크랙면 중심점의 개수이며 단위차원은 L-3 이다. 이 연구에서는 크랙의 밀도를 표현하기 위해 1차원밀도  $\rho L$ 를 구하여 입도별로 비교하였다.

$$\rho L = \frac{N}{SL}$$

식을 이용하였으며, 여기서 N은 조사선(scanline)과 크랙의 교차점 수, SL는 조사선 길이 이다. 1차원밀도를 구함에 있어서, 앞의 정의에 따르면 크랙면의 수선방향으로 조사선을 그어야 한다. 그러나 본 실험에서는 모든 방향에 대한 크랙밀도를 구하기 위해서 조사선의 방향을 남북방향을 기준으로하여 45° 각도로 배열하여 하나의 단면에 대하여 4개의 조사선을 동일하게 적용하였다(Fig. 9).

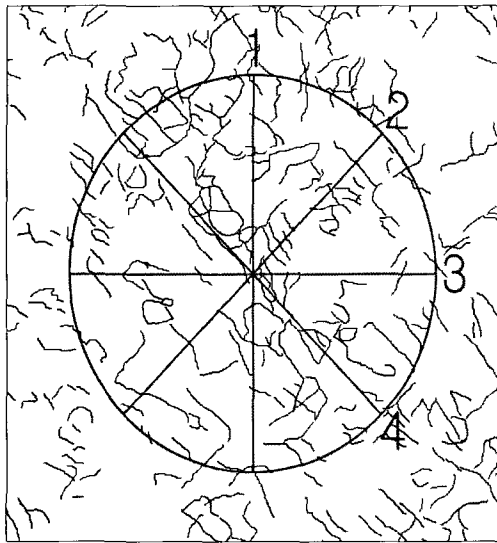


Fig. 9. Scanlines on cross section.

입도별 시료들 중 가장 많은 손상이 가해진 시료(조립화강암: 96.17% 손상시료, 중립화강암: 98.00% 손상시료, 세립화강암: 95.98% 손상시료)를 대상으로 비교하였다. 시료 단면의 중심점을 기준으로 하는 지름 2.74cm의 원을 그어 그 범위 내의 크랙을 관찰하였다(Fig. 9). 확대배율에 따라 관찰 가능한 크랙의 범위가 달라지므로, 동일한

배율로 확대한 상태에서 관찰을 시도하였다. 크랙 스케치를 모든 시료에 대해 실시한 결과, 세립화강암의 경우 동일한 배율 하에서 크랙을 인식하기 불가능하여 본 논문에서는 세립화강암에 대한 크랙의 밀도 및 연결성 관찰을 생략하기로 하였다. Fig. 10, 11는 조립, 중립 화강암의 5개 단면(Fig. 5)에서의 크랙 스케치와 1차원 크랙밀도를 그래프로 표현한 것이다. 그림에서와 같이, 조립화강암의 크랙밀도가 각기 대응하는 중립화강암의 1차원 크랙밀도에 비하여 높은 것을 알 수 있다. 이 역시 조립화강암 내에 더 많은 크랙이 분포함을 의미하는 것이며, 이는 앞의 탄성과속도시험이나 투수시험에서 조립화강암의 값이 중립 내지는 세립화강암의 값보다 큰 값을 보이는 이유를 설명하는 것이라 하겠다.

1차원 크랙밀도를 이용하여 손상시료단면의 크랙밀도를 관찰한 결과, 조립화강암과 중립화강암 모두 시료의 중앙부에서 크랙밀도가 높다는 공통점을 확인할 수 있다. 이는 횡방향 구속력이 없는 상태에서 상·하 방향의 하중만이 주어질 때, 시료의 상·하 면에서 시험기와 접촉하면서 하중과 동시에 마찰력이 작용하여 상대적으로 중앙부보다 변형이 구속되기 때문이다. 그러나 이러한 구속조건에서도 입도 별로 각기 다른 크랙밀도를 보여주고 있다. Fig. 10, 11에서 조립화강암 96.17%, 중립화강암 98.00%로 손상의 정도에 있어서 1.83%의 차가 있다는 점을 배제하고도, 각기 대응하는 1차원 크랙밀도를 비교하면, 조립화강암의 크랙밀도가 중립화강암보다 큼을 알 수 있다. 이는 앞서 언급된 바와 같이 조립화강암이 중립 내지 세립화강암에 비해 암석 내에 존재하는 미세크랙 혹은 입자경계가 손상응력에 더 민감하게 변형되며, 조립화강암의 단일 입자경계 길이가 다른 시료에 비해 길기 때문에 손상 응력이 가해질 경우 훨씬 쉽게 변형된다는 것을 뒷받침해주는 증거라고 생각된다.

1차원크랙밀도 외에도, 2차원크랙밀도, 3차원크랙밀도, 크랙이 단면에서 차지하는 면적비 등을 관찰하여 좀더 다양한 측면에서의 입도별 손상특성을 비교해볼 필요가 있다.



단계별 손상에 따른 화강암의 손상 발달특성 연구

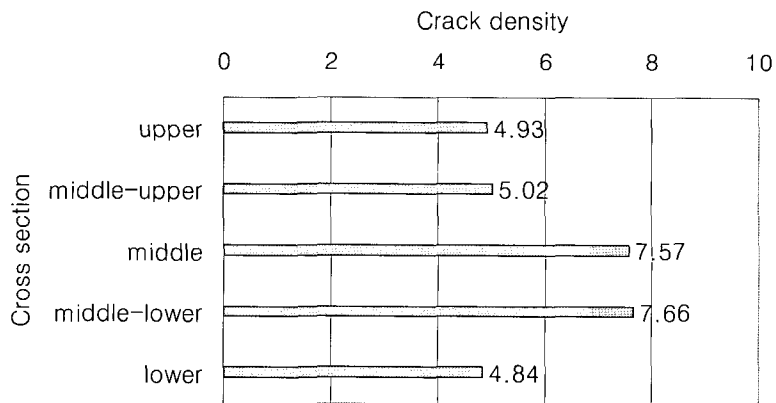
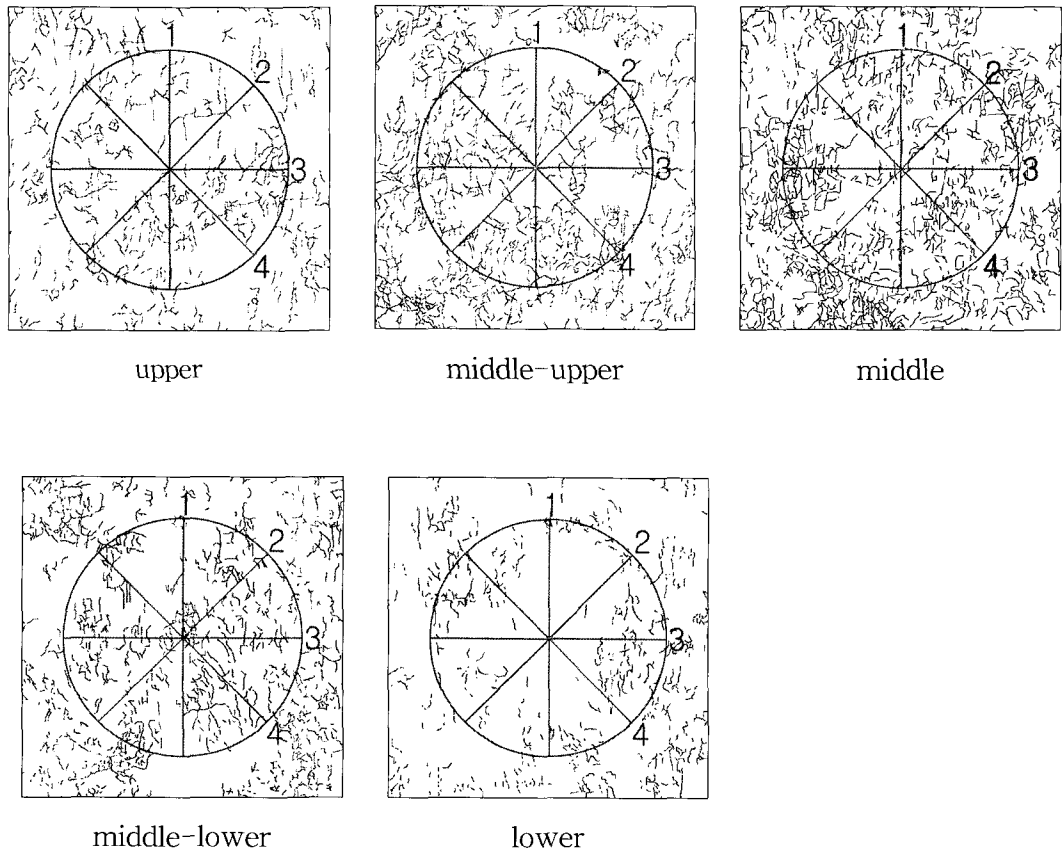


Fig. 10. Crack densities of each cross sections (Coarse-grained granite, 96.17% damage).

박 혁, 정교철

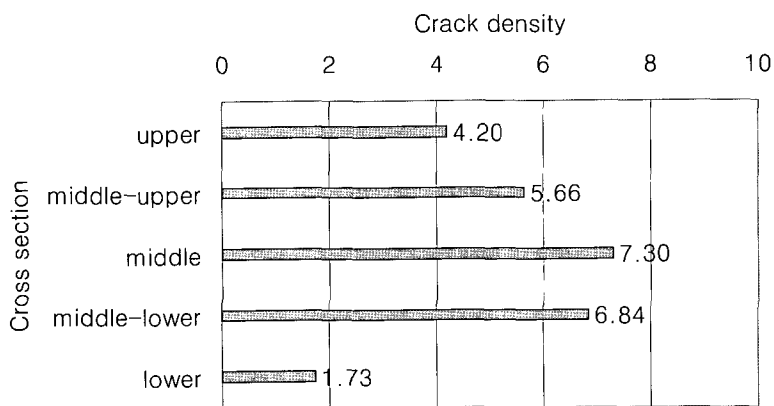
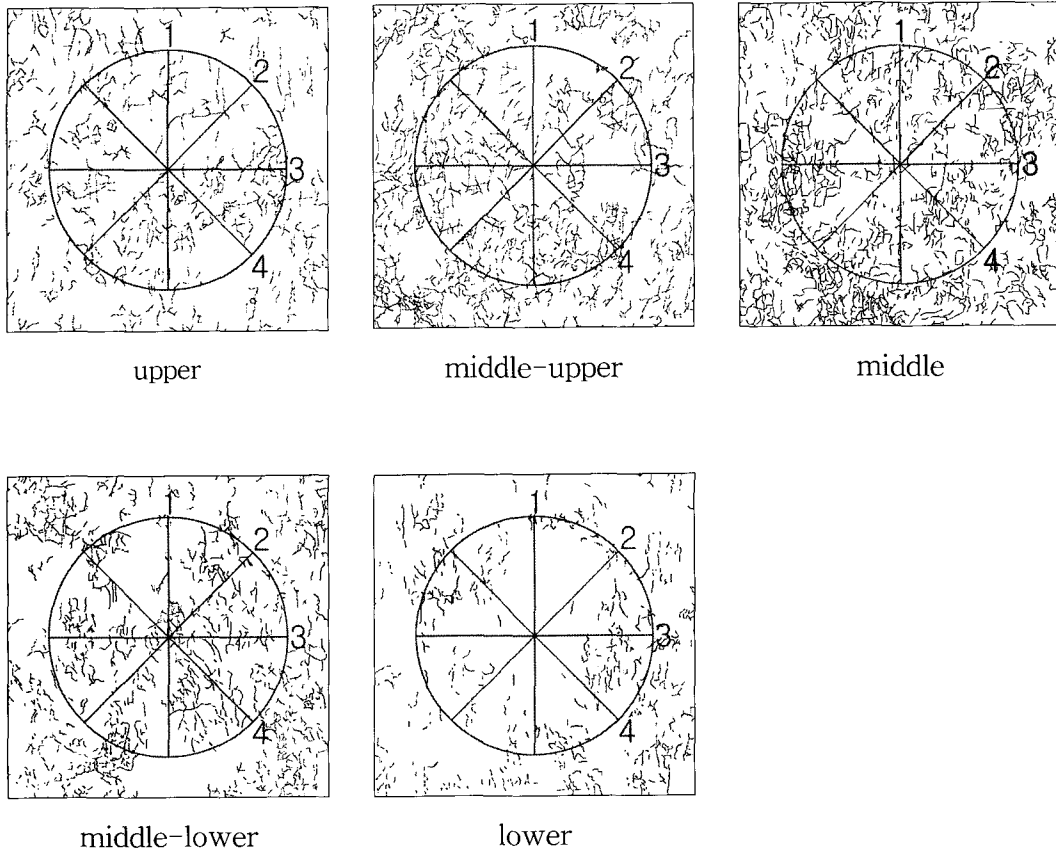


Fig. 11. Crack densities of each cross sections (Medium-grained granite, 98.00% damage).

## 결 언

연구 대상이 된 조립·중립·세립 화강암은 각각 경기도 포천군 관인면에 분포하는 주라기 흑운모 화강암, 경북 거창군 웅양면 산포리에 분포하는 백악기의 흑운모 화강암, 경북 상주군 공성면 영오리에 분포하는 주라기의 흑운모 화강암이다. 시료별 채취 구간은 지표를 기준으로 조립·중립·세립 화강암 각각 11.05 ~ 11.90m, 24.04 ~ 24.94m, 11.32 ~ 12.76m 구간이며, 지름 5.48cm의 코어형태로 시추되었다. 평균길이 11.03cm로 입도 별로 7개씩, 총 21개의 시료가 제작되었다.

단계별 손상을 가하기 전, 각 입도별 시료의 탄성파속도를 측정하고 그 평균치를 서로 비교해본 결과, P파와 S파의 평균속도는 조립화강암 3.64 km/sec, 3.38km/sec, 중립화강암 3.60km/sec, 3.32km/sec, 세립화강암 4.18km/sec, 4.07km/sec로 나타났으며, 세립-조립-중립의 순서로 탄성과 속도가 느려지는 경향을 보였다.

입도별 일축압축강도를 구하기 위해 각각 3개의 시료를 선별하여 일축압축강도를 구하고 그 평균값을 각 시료의 일축압축강도로 취하였다. 조립화강암이 1828.27 kgf/cm<sup>2</sup>, 중립화강암이 1659.61 kgf/cm<sup>2</sup>, 세립화강암이 2634.24 kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 보여, 세립-조립-중립 순으로 일축압축강도가 작아짐을 볼 수 있었다.

초기에 구한 압축강도값의 약 75, 85, 95, 96~98%의 손상을 인공적으로 가해주고 각각의 탄성파속도를 관찰해 본 결과, 공통적으로 손상의 정도가 클수록 탄성파의 속도는 느려지고, 조립 화강암이 중립 세립화강암에 비해 손상에 따른 탄성파속도의 감소비율이 큼을 알 수 있었다.

손상정도에 따른 투수성의 변화경향은 조립화강암의 경우 75.00%와 96.17%의 손상을 비교하면 약 8.2배의 증가를 보이고, 중립화강암의 경우 75.33%와 98.00%의 손상을 비교하면 약 3.0배의 증가를 보이며, 세립화강암의 경우 75.00%와 95.98%의 손상을 비교하면 약 2.9배의 증가를 보였다. 이를 근거하여 볼 때, 조립화강암이 다른 화강암들에 비해 손상이 진행됨에 따른 투수성의 증가비가 큼을 알 수 있었다.

손상이 가해진 화강암에서의 크랙의 조밀성을 관찰하기 위해 조립화강암과 중립화강암 각각 96.17%와 98.00%의 손상이 가해진 시료를 수평방향으로 절단하고 1개 시료에서 5개의 절단면을 정밀 관찰한 결과, 조립화강암의 경우 1차원크랙 밀도가 상단면부터 하단면까지 4.93, 5.02, 7.57, 7.66, 4.84 순으로 나타났으며, 중립화강암의 경우에는 4.20, 5.66, 7.30, 6.84, 1.73으로 나타났다. 시료의 중간부분이 상·하부에 비해 상대적으로 높은 1차원 크랙밀도 값을 보이는 공통점이 있으나 각 단면을 위치별로 비교해보면 조립화강암의 1차원 크랙밀도가 각기 대응되는 중립화강암의 1차원 크랙밀도에 비해 높은 값을 가진다.

이상의 결과들은 입도가 큰 조·중립 화강암의 손상이 진행될수록 입자의 경계면이나 기존에 생성되어있던 크랙의 집중과 성장에 의해 전단면을 형성하게 되는 반면 세립화강암은 크랙의 성장이 불리한 조건이므로 특정 방향으로의 전단면을 형성하지 않으며 더 높은 압축강도를 가짐으로써 상대적으로 더 양호한 강도특성을 갖는다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호 : R02-2000-000080-0)의 지원으로 수행되었음을 밝힌다. 연구비 지원에 감사한다.

## 참 고 문 헌

- 김만일, 1999, 암반손상에 따른 투수성 변화에 대한 연구, 석사학위논문, 안동대학교, 121 p.
- 박덕원, 서용석, 정교철, 김영기, 2001, 주라기 화강암에 발달하는 결의 현미경학적 분석, 지질공학, 11권, 51-62.
- 이상은, 조상호, 양형식, 박홍민, 1999, 조사선을 이용한 화강암의 미세 불연속면 분포성상 평가, 터널과 지하공간, 9권, 364-372.
- 정교철, 1999, 일축압축하 결정질암석 공시체에서의 응력분포 및 파괴에 대한 연구, 자원환경지질, 32권, 1호, 93-100.
- Gale, J., 1982, Assessing the permeability charac-

- teristics of fractured rock, G.S.A. Special Paper, v. 189, 163-181.
- Jeong, G.C., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T., 1993, Direct observation of microcracking and subsequent failure in quartz-feldspar rock (Bisphere) under uniaxial compression. In: Pasamehmetoglu, A.G, Kawamoto, T., Whittaker, B.N., Aydan, Ö.(Eds.), Proc. Int. Symposium on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul. Balkema, Rotterdam, 335-341 p.
- Kranz, R.L., 1983, Microcrack in rocks: a review. Tectonophysics, v. 100, 449-480.
- Long, J., Remer, J., Wilson, C. and Witherspoon, P., 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resources Research, v. 18, 645-658.
- Mandado, J.A. and Tena, J.M., 1986, A peel technique for sulfate (and carbonate) rocks. Journal of Sedimentary Petrology, v. 33, 228-230.
- O'Hara, S.K., Parker, B.L., Jorgensen, P.R. and Cherry, J.A., 2000, Trichloroethene DNAPL flow and mass distribution in naturally fractured clay: Evidence of aperture variability, WATER RESOURCES RESEARCH, v. 36, n. 1, 135-147.
- Osborne F., 1935, Rift grain and hardway in some Pre-cambrian granites, Quebec, Economic Geology, v. 30, 540-551.
- Plumb R., Engelder, T. and Yale, D., 1984, Near-surface in situ stress : 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire Granites. J. Geophy. Res, v. 89, 9350-9364.
- Seo, Y.S., Jeong, G.C., Kim, J.S., and Ichikawa, Y., 2002, Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression. Engineering Geology, v. 63, 256-275.
- Siegesmund, S., Kern, H. and Vollbracht, A., 1991, The effect of oriented intragranular and grain boundary cracks on seismic velocities in an ultramylonite. Tectonophysics, 241-251 p.
- Snow, D., 1968, Rock fracture spacings, openings and porosities, Jour. Soil Mech. and Foundation Division, Proceedings, ASCE, 94(SMI), 73-91.
- Sorauf, J.E. and Tuttle, D.W., 1988, Dark-field illumination in photography of acetate peels. Journal of Paleontology, v. 62, 153-156.
- Splunt, E.S. and Brace, W.F., 1974, Direct observation of microcavities in crystalline rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geophys. Abstr. v. 11, 139-150.
- Wilson, M.A. and Palmer, J.T., 1989, Preparation of acetate peels. in R.M. Feldmann, R.E. Chapman and J.T. Hannibal (eds.) Paleotechniques. The Paleontological Society Special Publication, v. 4, 142-145.

투 고 일 2002년 6월 25일  
 심 사 일 2002년 6월 26일  
 심사완료일 2002년 8월 2일

---

박 혁  
 안동대학교 자연대 지구환경과학과  
 760-749 경북안동시 송천동 388번지  
 Tel : 054-820-5753  
 E-mail: geosaico@hanmail.net

정교철  
 안동대학교 자연대 지구환경과학과  
 760-749 경북안동시 송천동 388번지  
 Tel : 054-820-5753  
 Fax : 054-823-1627  
 E-mail: jeong@andong.ac.kr  
 Dept. of Earth and Environmental Sciences  
 Andong National University  
 760-749, South KOREA