

## 암석 및 콘크리트의 압축변형거동과 미소파괴음 측정에 관한 연구

심현진<sup>1)</sup> · 이정인<sup>2)</sup>

### A Study on the Measurement of Acoustic Emission and Deformation Behaviors of Rock and Concrete under Compression

Hyun-Jin Shim, Chung-In Lee

**ABSTRACT** Acoustic emission is a burst of microseismic waves generated by microscopic failure due to deformation in materials. The study on the detection of initiation and propagation of microcracks from acoustic emission measurement is very important for the evaluation of the stability of underground rock structures by the nondestructive testing method. In this study, acoustic emission was measured under uniaxial stiffness loading test used to obtain the complete stress-strain curves of marble and concrete used as reinforced materials of rock structures. The analysis of acoustic emission parameters and source location were performed to discuss the characteristics of the deformation and failure behavior of rock and concrete. And acoustic emission was measured under cyclic loading test to verify the Kaiser effect associated with the damage of materials, in situ stress of rock, and stress history of concrete structure.

**Key words** : Acoustic emission(AE), AE parameters, stiffness loading test, source location, Kaiser effect,

**초 록** 암석 재료의 변형에 따른 미시적 파괴 현상으로부터 발생하는 미소파괴음(Acoustic Emission, AE)을 측정하여 암석 구조물 내의 미세균열의 생성과 전파를 탐지하는 연구는 지하 암반 구조물의 안정성을 비파괴검사로 평가하는데 대단히 중요하다. 본 연구에서는 암반 구조물의 보강재로 사용되는 콘크리트와 대리석 암석 시험편에 대하여 전과정 응력-변형률 곡선을 얻기 위한 강성압축시험을 실시하였고, 시험 중에 미소파괴음 발생을 측정하여 미소파괴음 파라미터 분석 및 음원추적을 수행하여 대리석과 콘크리트의 변형 및 파괴거동 특성을 살펴보았다. 또한 시험편에 계단식 반복재하시험을 수행하여 그 변형거동을 고찰하였으며, 미소파괴음 측정을 통하여 재료의 손상, 암반의 현지응력 및 콘크리트 구조물의 응력이력 등과 관련된 카이저효과를 검증하였다.

**핵심어** : 미소파괴음(AE), AE 파라미터, 강성압축시험, 음원추적, 카이저효과

### 1. 서 론

최근 국토의 효율적 활용과 환경보전, 안보 및 에너지 절약 등의 여러 이점으로 인한 지하공간 개발이 국가적 중점사업으로 부각되면서 유류 비축기지, 지하 양수발전소, 핵폐기물 지하처분시설, 터널 등의 많은 구조물들이 지하 암반층에 건설되고 있다. 이러한 암반구조물의 건설은 점차 대형화, 심부화됨에 따라 현지응력이 증가하고, 굴착시 천공, 발파 등으로 인해 주변암반에는 균열들이 생성되어 손상을 받아 소성상태에 이르게 된다. 이에 따라 지하 암반 구조물의 안정성 문제가 중요시되고 있는데, 특히 미세균열은 암반의 변형 및 파괴거동에 결정적

인 영향을 미치므로 암반 구조물의 안정성 해석에 있어서 미세균열의 생성과 전파에 의한 암반의 변형거동 및 역학적 거동에 대한 연구가 필수적이다.

미소파괴음(Acoustic Emission, AE) 발생은 재료 내부의 미시적 변형이나 파괴거동의 규명에 뛰어난 특성을 가지는데, 이로 인해 많은 구조물의 내부결함 및 손상도 평가 등에 관한 비파괴검사 기술로 이용되어 왔으며, 지하 암반구조물의 안정성 평가에도 이용되어 왔다.<sup>1)</sup> 따라

1)정회원, (주)덕천엔지니어링 부설연구소 연구원

2)정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

원고 접수일 : 1999년 11월 18일

원고 심사 완료일 : 1999년 12월 30일

서 미세균열의 생성과 전파에 의한 암반의 변형거동 및 역학적인 거동에 대한 연구를 위해서는 미소파괴음에 대해 연구할 필요가 있다.

현재까지의 미소파괴음에 관한 연구는 크게 두 방향으로 이루어지고 있다. 첫째는 미소파괴음 발생 특성 및 파라미터 분석을 통하여 응력 증가에 따른 재료의 파괴 과정을 연구하는 방향이고<sup>2-5)</sup>, 둘째는 재료의 손상도 및 암반의 현지응력과 콘크리트의 응력이력 등을 측정하기 위한 카이저효과(Kaiser effect)에 대한 연구이다<sup>6-13)</sup>.

본 연구에서는 암반 구조물의 보강재로 사용되는 콘크리트와 대리석 암석 시험편에 대하여 전과정 응력 변형률 곡선을 얻기 위한 강성압축시험을 실시하였고, 시험중에 미소파괴음 발생을 측정하여 미소파괴음 파라미터 분석 및 음원추적을 통해서 대리석과 콘크리트의 변형 및 파괴거동 특성을 살펴보았다. 또한 시험편에 계단식 반복재하시험을 수행하여 그 변형거동을 살펴보았으며, 미소파괴음 측정을 통하여 재료의 손상, 암반의 현지응력 및 콘크리트 구조물의 응력이력 등과 관련된 카이저효과를 검증하였다.

## 2. 기초이론

### 2.1 미소파괴음 파라미터

미소파괴음 신호는 재료의 손상과 관련된 갑작스런 변형에너지 방출시에 발생하는 탄성파로서, 대부분이 결정 및 교결 입자들로 구성된 암석 및 콘크리트에서는 결정이나 입자의 전위, 입자 경계부의 활동, 미세균열의 발생 및 전파 등이 일어날 경우 파괴면의 형성과 함께 이루어지는 에너지 방출의 한 형태로서 발생하게 된다. 이러한 미소파괴음은 매질 내를 전파하여 재료의 표면에 부착된 압전재료 형태의 AE 센서에 도달하여 전기적 신호로 변환된다. 이 전기적 신호는 증폭기에서 증폭된 후 AE 기록장치를 통해 기록된다.

최근 미소파괴음 감지장치와 기록장치의 발달로 인해 취득된 신호의 파형 뿐만 아니라 얻어진 파형을 각종 AE 파라미터로 변환하여 보다 효과적으로 계측, 분석할 수 있게 되었다. 측정기기의 검출한계를 초과하는 개별 미소파괴음 신호를 AE 타격음(AE hit)이라 하며, AE 타격음에서 분석할 수 있는 AE 파라미터들은 다음과 같다(Fig. 1).

**AE 계수(AE count)** : AE 타격음이 검출한계를 교차한 횟수로서, 일반적으로 큰 타격음들은 작은 타격음들에

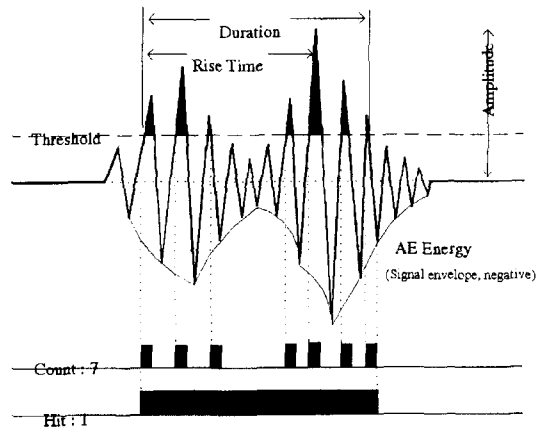


Fig. 1. Illustration of conventional AE parameters in the AE envelope monitoring

비해 검출한계를 교차하는 횟수가 많아지므로, AE 계수는 미소파괴음 신호의 세기에 대한 평가기준이 된다.

**진폭** : 검출된 AE 타격음에서의 최대진폭을 말하며, 상대진폭분포는 재료 인자들과는 무관하기 때문에 여러 하중 단계의 AE 신호의 상대적 특성을 규명하는데 유용하다.

**지속시간(duration)** : AE 타격음이 제일 처음 검출한계를 지나 마지막으로 검출한계를 지날 때까지의 시간으로, 잡음 필터링 등에 유용하게 쓰인다.

**오름시간(rise time)** : AE 타격음이 검출한계를 초과한 후 최대진폭값에 도달하는데 걸리는 시간으로, 음원과 센서 사이의 파 전파과정에 의해 제어되기 때문에 AE 신호를 전자기적 잡음으로부터 분리하기 위한 목적으로 많이 사용된다.

**AE 에너지(PAC 에너지)** : 지속시간동안의 AE 타격음 파형 포락선 밑의 면적에 해당하는 측정값으로, 지속시간과 진폭에 민감하고, 검출한계 설정값이나 구동 주파수에는 덜 의존적이기 때문에 AE 계수보다 더 많이 사용된다.

### 2.2 카이저효과

카이저효과는 1950년대에 Kaiser가 발견한 현상으로, 재료에 하중을 가한후 재차 하중을 가했을 때 처음 재하하중에 이르기까지는 미소파괴음이 발생하지 않는다는 것이다. 이 효과는 어떠한 응력이 발생하여 그 결과로서 미세균열 등이 발생하면 그 이하의 응력이 다시 작용하여도 균열의 진전이 없을 경우에 생기며, 작용방향이 다

르면 보다 작은 응력이 작용한 경우라도 미소파괴음이 발생하게 된다. 이 현상을 역으로 이용하면 암반의 현저 응력을 추정할 수 있을 뿐만 아니라 기존에 설치되어 있는 콘크리트 구조물의 응력이력에 대한 추정이 가능하다.

한편, 비교적 높은 응력수준에서 재차 가압시 이전에 가한 최대응력에 도달하지 못해도 미소파괴음이 발생하는 현상을 felicity 효과라고 하며, 이전 사이클의 최대응력에 대한 AE 개시응력의 비로 정의되는 felicity 비에 의해 정량적으로 표현된다. felicity 비는 재료의 질을 측정하는 기준이 되는데, felicity 비가 높으면 그만큼 재질이 우수하다고 할 수 있다<sup>11,13)</sup>.

### 3. 시험편, 시험장치 및 시험방법

#### 3.1 시험편

본 연구 수행을 위한 대상 시료로 암석과 콘크리트를 사용하였다. 암석은 여산 대리석을 사용하였으며, NX 코어를 채취하여 길이대 직경비가 약 2가 되도록 시험편을 제작한 후 수분의 영향을 제거하기 위해 105°C로 24시간 건조시키고 실내에 일주일 이상 방치시킨 후 시험에 사용하였다.

콘크리트는 KSF 2403에 의거한 10×20cm의 원주형 공시체로 제작하여 보통강도 콘크리트에 사용되는 배합을 적용하였으며(Table 1), 실험실 내 20±3°C의 항온수조에서 수중양생을 실시하여 재령 28일이 경과한 후 시험을 수행하였다. 각 시험편의 물리적, 역학적 물성시험 결과는 Table 2와 같다.

#### 3.2 시험장치

##### 3.2.1 압축시험 장치

압축시험을 수행하기 위해서 미국 MTS 사의 재료시험기(Model 315.02A-01)를 이용하였다. 본 재료시험기는 명령-시행-결과비교-재명령의 과정을 반복하는 폐회로 자동제어형 시험장치로서 크게 하중프레임, 시험통제기, 유압공급장치, 개인용 컴퓨터 등의 네 부분으로 구성되어 있으며, 암석역학 시험용으로 특별히 설계되어 272 톤의 압축용량과 136 톤의 인장용량, 그리고 1.08×10<sup>6</sup> kg/cm

의 높은 강성도를 지닌다.

##### 3.2.2 미소파괴음 측정장치

압축시험시 시험편에서 발생하는 미소파괴음은 미국 PAC 사의 MISTRAS 2001 시스템을 이용하여 측정하였다. MISTRAS 2001 시스템은 MI-3DL 및 MI-TRA 프로그램을 통한 미소파괴음 신호 및 파형의 측정 뿐만 아니라 실험을 통해 얻은 미소파괴음 자료의 저장 및 분석, 재생이 수행되는 다채널 컴퓨터 구동 시스템으로 센서와 전치증폭기, 케이블, PC 본체 등으로 구성되어 있다(Fig. 2). 재하 상태의 시험편에서 발생한 미소파괴음 신호는 AE 센서에 의해 감지되어 전기 신호로 변환되고, 전치증폭기를 통해 40 dB 만큼 증폭된 다음 PC 본체 뒷부분에 부착된 AEDSP-32/16 카드에서 측정되어 컴퓨터에 저장된다.

AE 측정에 사용한 센서는 직경 및 높이가 각각 18 mm, 17 mm인 PAC 사의 R15 압전 트랜스듀서로서, 공진주파수는 150 kHz이고 반응 주파수 대역은 50 kHz에서 1 MHz 사이이다. 본 연구에서는 3차원 음원추적을 수행하기 위해서 6개의 센서를 사용하였다. 센서를 원통형 시험편 표면에 맞추고, 3차원 음원추적의 정확도를 높이기 위해서 센서와 시험편 사이에 강철로 만들어진 두께 1 mm, 직경 5 mm의 파유도물질(waveguide)을 삽입하였으며, 에폭시 수지를 사용하여 시험편에 접착시켰다. 센서와 파유도물질 사이의 접촉을 좋게 하기 위해

Table 2. Physical and mechanical properties of rock and concrete specimens

Sample Properties	Marble	Concrete
	Bulk specific gravity	2.72
Apparent porosity (%)	0.22	8.73
P-wave velocity(m/sec)	3760	3900
S-wave velocity (m/sec)	1890	1940
Uniaxial compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	720	290
Young's modulus (×10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	4.32	2.46
Poisson's ratio	0.27	0.23

Table 1. Mix proportion of concrete specimen

W/C (%)	S/A (%)	Unit Material Weight (kg/m <sup>3</sup> )				
		Water	Binders	Coarseaggregate	Fineaggregate	AEagent
45.0	38.0	158	351	681	1144	0.527

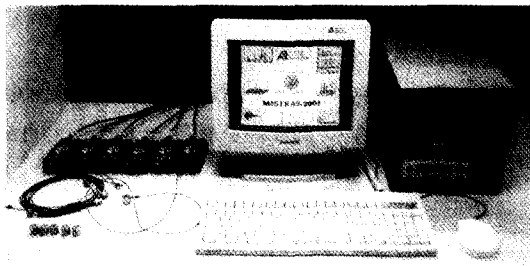


Fig. 2. Photograph of MISTRAS 2001 system

Panametric 사의 SWC 액체 커플런트를 사용하였다.

AE 검출한계를 50 dB로 설정하여 50 dB 이상의 최대 진폭값을 갖는 AE 타격음만을 측정하였으며, AE 파형 측정과정에서 사용되는 시간 파라미터들인 PDT, HDT, HLT는 각각 50, 100, 500  $\mu$ s로 설정하였다.

3.3 시험방법

3.3.1 미소파괴음 전파속도 결정

음원추적을 수행하는데 필요한 미소파괴음 전파속도를 결정하기 위해 대리석 및 콘크리트 시험편이 응력을 받기 이전의 속도장이 등방성이며 전파경로를 직선이라 가정하여 Fig. 3과 같은 시험을 수행하였다.

시험편 상단 옆면에 일정한 간격으로 두 개의 센서를

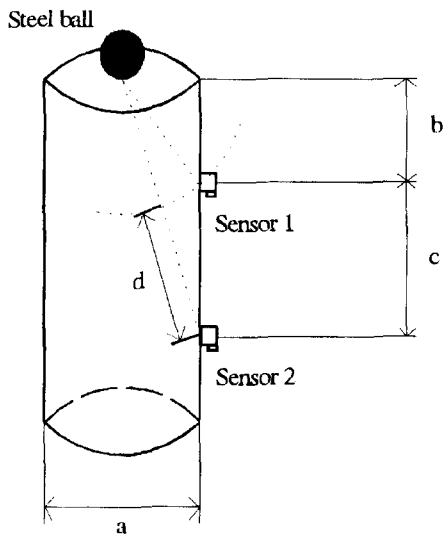


Fig. 3. Diagram of method for determining AE velocity [a : 53.8 mm, b : 30 mm, c : 90 mm, d : 53.64 mm for marble, a : 99.4 mm, b : 60 mm, c : 150 mm, d : 80.11 mm for concrete]

부착하고, 시험편 상단 중앙에 설치된 급속구에 집중응력을 가하여 두 센서에 도달한 미소파괴음 도달시간차를 구하고 집중응력 작용점과 두 센서를 일직선상에 놓여있는 것으로 하여 두 센서 사이의 거리를 구하여 미소파괴음 전파속도를 계산하였다.

3.3.2 전과정 응력-변형률 곡선을 얻기 위한 강성압축 시험

전과정 응력-변형률 곡선을 구하기 위하여 MTS 재료 시험기를 사용하여 변위가 초당 1  $\mu$ m의 속도로 증가하도록 시험편을 가압하였다. 시험은 응력-변형률 곡선에서 응력이 잔류강도 부근으로 떨어지기 시작한 후부터 0.5 mm의 변위가 지날 때까지 수행하였다. 압축시험 동안의 시험편에 대한 변형거동을 살펴보기 위해 System 5000에 하중변환기와 변위변환기, 변형률게이지 등을 연결하여 하중 및 변위, 축방향과 횡방향 변형률을 측정하였으며, 변형에 따른 미소파괴음 발생의 변화를 측정하기 위하여 MISTRAS 2001 시스템을 이용하였다. Fig. 4는 전과정 응력-변형률 곡선을 구하기 위한 강성압축시험 장치 및 재측장치의 개요도이다.

3.3.3 계단식 반복재하시험

계단하중을 받는 시험편의 변형거동 및 미소파괴음 발생 변화 등을 측정하기 위하여 시험편에 재하(loading) 및 제하(unloading)를 반복하는 계단식 반복하중시험을 수행하였다. 시험편의 최대응력에 이를때까지 재하시 하중을 순차적으로 증가시켜 가면서 6~8회 동안 재하 및 제하를 반복하였다. 이후 최대응력에 도달하여 시험편 잔류강도까지 떨어질 때까지 시험을 수행하였다. 시험은 변위제어로 하였으며, 재하 및 제하 속도는 각각 초당 1  $\mu$ m의 변위증가, 초당 2  $\mu$ m의 변위감소를 갖도록 하였다. 특정 하중수준까지 하중을 가한 후, 60 초 동안 하중을 유지시켰으며, 이후에 하중을 제거하였다. 하중이 제거되

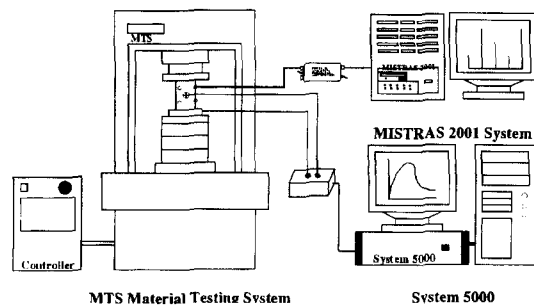


Fig. 4. Diagram of uniaxial compression test and measurement system

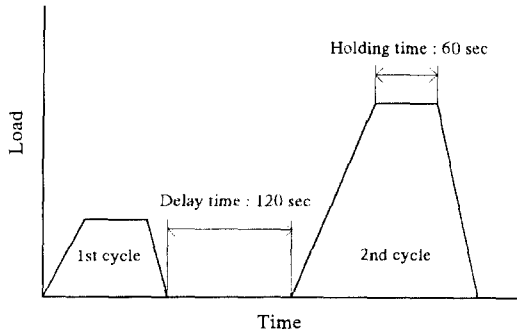


Fig. 5. Sketch showing the loading path in incremental cyclic loading test

어 가압관 변위가 원점으로 돌아오면 120 초 동안의 지연시간을 주고 나서 다시 이전 하중사이클의 최대 하중 이상으로 재하시켰다(Fig. 5).

강성압축시험에서 수행한 것과 마찬가지로 System 5000과 MISTRAS 2001 시스템을 이용하여 응력-변형률 곡선을 구하기 위해 하중, 변위, 변형률과 미소파괴음을 측정하였다.

#### 4. 시험결과 및 해석

##### 4.1 미소파괴음 전파속도

미소파괴음은 재료 내의 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 순간적인 탄성파이기 때문에 P파, S파 등이 혼합된 혼합파의 형태를 가지게 된다. 따라서, 미소파괴음 신호의 파형을 분석해보면 먼저 진폭이 작고 속도가 빠른 P파가 도달하고 이후에 진폭이 크고 속도가 느린 S파가 도달하게 된다.

미소파괴음이 대리석 시험편 매질을 전파하는 속도를 결정하기 위한 시험을 통해 측정된 미소파괴음 신호의 파형을 Fig. 6에 나타내었다. 두 센서에서 측정된 파형 모두 진폭이 작고 속도가 빠른 P파가 먼저 도달하였고, 15~25  $\mu\text{sec}$  후에 진폭이 큰 S파가 도달하였다. 첫 번째 센서와 두 번째 센서와의 미소파괴음 도달시간차가 28.6  $\mu\text{sec}$ 이므로 미소파괴음이 두 센서간 도달거리 53.64 mm를 전파하는 속도는 1876 m/sec가 되며, 탄성파 속도 측정기를 사용하여 구한 대리석의 S파 속도 1890 m/sec와 거의 일치하므로 음원추적에 사용되는 미소파괴음의 전파속도로 S파 전파속도를 적용하였다. 파형 역시 P파의 최대진폭과 트리거지점과는 큰 차이를 보이

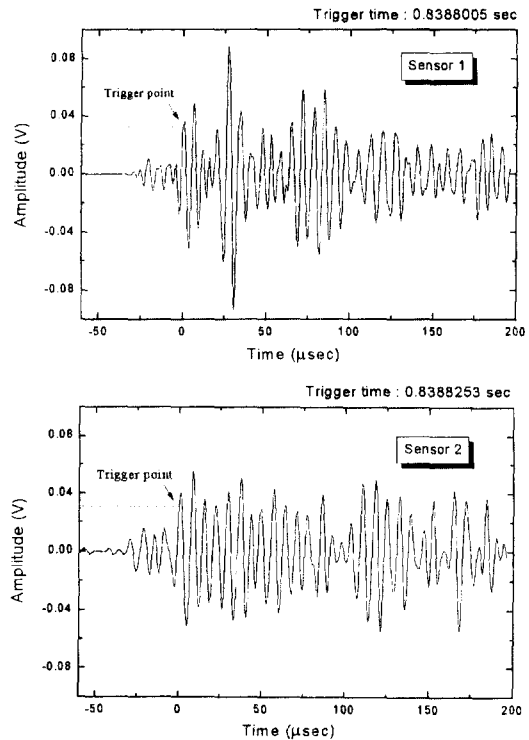


Fig. 6. AE waveform used in determining the velocity of marble

고 있어 미소파괴음이 센서에서 트리거되는 전파속도는 S파 속도임을 확인할 수 있다. 동일한 시험과정에 의해 구한 콘크리트의 미소파괴음 전파속도는 1917 m/sec로 탄성파 속도 측정기를 통해 측정된 S파 속도 1940 m/sec와 거의 일치하여 콘크리트 역시 S파 전파속도를 미소파괴음 전파속도로 적용하였다.

##### 4.2 강성압축시험에 의한 암석 및 콘크리트의 압축변형거동 특성

Fig. 7은 대리석 시험편의 전과정 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 암석 내에 존재하는 기존 미세균열이나 공극이 닫히면서 나타나는 비선형구간이 보이며 이후 선형적으로 응력이 증가하였다. 최대응력에 이른 후에도 어느 정도의 허용지지력을 가지고 있었으며 이후에 지지력은 점차 저하되어 최대응력점까지의 변형량의 2배에 해당하는 부분에서 일정치에 도달하였다. 최대응력 이후 형성된 전단면은 두 번에 걸쳐 미끄러졌으며, 최대응력 이후의 최대강성도는  $1.58 \times 10^6 \text{ kg/cm}$ 로 나타났다. Fig. 8의 응력-체적 변형률 곡선에서 변형 초기에 기존 미세균열이나

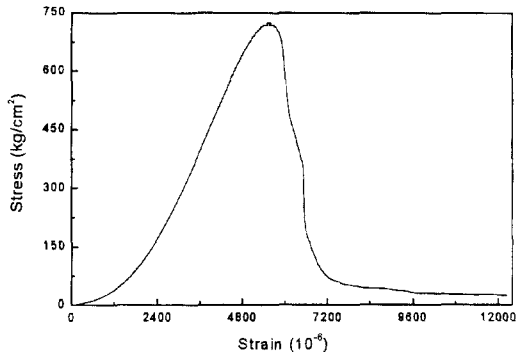


Fig. 7. The complete stress-strain curve in marble

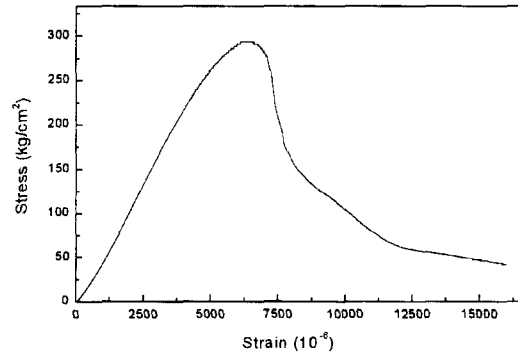


Fig. 9. The complete stress-strain curve in concrete

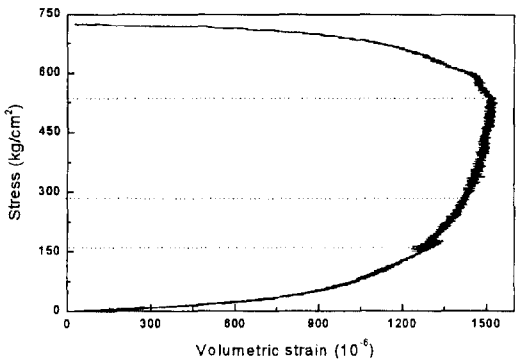


Fig. 8. The stress-volumetric strain curve in marble

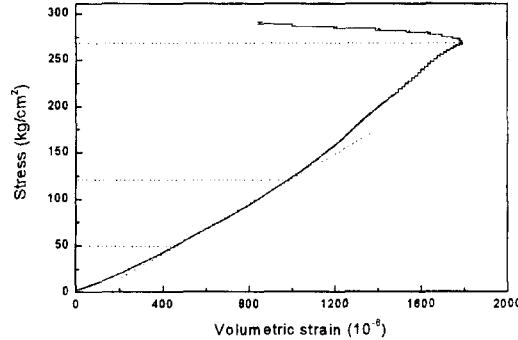


Fig. 10. The stress-volumetric strain curve in concrete

공극이 닫히면서 나타나는 비선형구간과 선형탄성구간의 경계는 대략 최대응력의 20% 정도이며 안정한 균열전파가 발생하는 지점은 대략 35-40% 정도에 해당하였다. 불안정한 균열전파가 시작되는 최대다짐점은 최대응력의 80% 정도에서 나타나며, 최대다짐점 이후 균열들이 불안정하게 전파하면서 급격한 체적팽창을 이루어 체적변형률 곡선은 (-) 방향으로 반전되었다.

Fig. 9~10은 콘크리트 시험편에 대하여 수행한 시험 결과를 나타낸다. 전과정 응력-변형률 곡선에서(Fig. 9) 대리석의 경우와는 달리 처음에 공극의 영향에 의한 비선형 부분이 명확하게 나타나지 않았다. 또한 최대응력 이후에 나타나는 파괴후 거동 부분의 곡선도 대리석의 경우보다 완만하였으며, 최대 강성도가  $4.75 \times 10^6 \text{ kg/cm}$ 로 대리석의 30% 정도였다. 콘크리트 역시 최대응력까지의 변형량의 2배에 해당하는 부분에서 응력이 일정치에 도달하였으며, 이러한 잔류강도는 최대응력의 약 18% 정도로서 최대응력에 대한 잔류강도의 비가 대리석의 경우보다 대략 5배 정도 크게 나타났다. 응력-체적 변형

률 곡선의 경우(Fig. 10), 최대응력의 91%에서 나타나는 최대다짐점까지 대체적으로 선형성을 보였다. 초기 비선형구간, 선형탄성구간, 안정한 균열전파구간의 구분이 명확하게 나타나지는 않으나 그래프에서 직선 부분을 선형탄성구간으로 볼 때, 초기 비선형구간은 최대응력의 15~20%, 선형탄성구간은 40~45%, 안정한 균열전파구간은 91%까지로 볼 수 있다.

#### 4.3 계단식 반복하중을 받는 시험편의 변형특성

시험편에 재하(load) 및 제하(unload)를 반복하는 계단식 반복재하시험시의 응력-변형률 곡선의 경우, Fig. 11에 나타나는 바와 같이 재하시의 응력-변형률 곡선과 제하시의 응력-변형률 곡선이 일치하지 않으며 어느 면적이 두 곡선 사이에 끼워지는데, 이 면적은 재하응력이 증가함에 따라 커짐을 볼 수 있다. 이미 발표된 보고들에 의하면<sup>14)</sup>, 응력을 증감시키는 과정 사이에 나타나는 응력-변형률 곡선 내부의 면적은 파괴과정, 즉 소성변형 과정에 소비된 에너지를 나타낸다. 따라서 재하응력이 암석의 탄성영역을 지나 비탄성영역에 이르게 되면 이러한

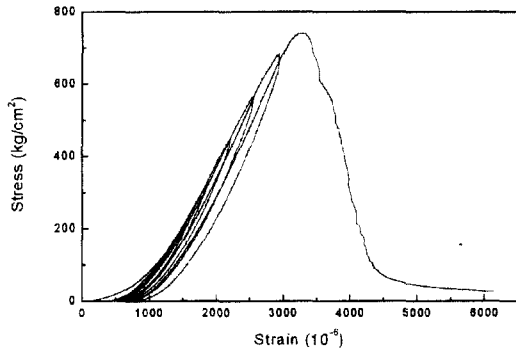


Fig. 11. Stress-strain curve from incremental cyclic loading test for marble specimen

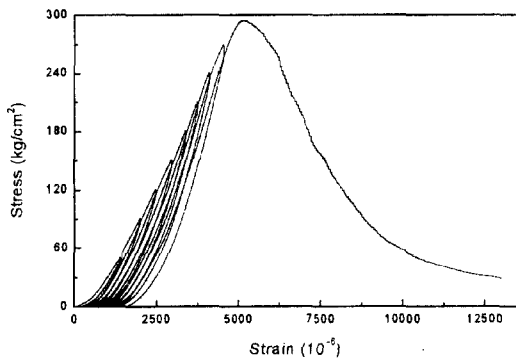


Fig. 12. Stress-strain curve from incremental cyclic loading test for concrete specimen

곡선 내의 면적은 더욱 커지게 됨을 알 수 있다. 최대응력 이후의 최대강성도는  $4.92 \times 10^5$  kg/cm 로 나타나서, 반복하중을 가하지 않는 단축압축시험에서 얻은 대리석 시험편의 최대강성도의 30%에 해당하였다. Fig. 12는 콘크리트 시험편에 계단하중을 가하여 얻은 응력-변형률 곡선이다. 콘크리트 시험편 역시 대리석 시험편과 마찬가지로 소성변형과정에 의한 특징이 나타난다. 최대응력 이후의 최대강성도는  $4.0 \times 10^5$  kg/cm 로 나타났으며, 이는 단축압축시험에서 얻은 콘크리트 시험편의 최대강성도의 약 85%에 해당하였다.

4.4 강성압축시험에서의 미소파괴음 특성

4.4.1 AE 에너지, AE 계수 분석

대리석 및 콘크리트 시험편에 수행한 강성압축시험을 통해 얻은 전과정 응력-변형률 곡선과 시험 중에 측정된 AE 타격음의 파라미터들 중 AE 에너지와 AE 계수를 비교 분석하였다. 대리석의 경우(Fig. 13), AE 에너지

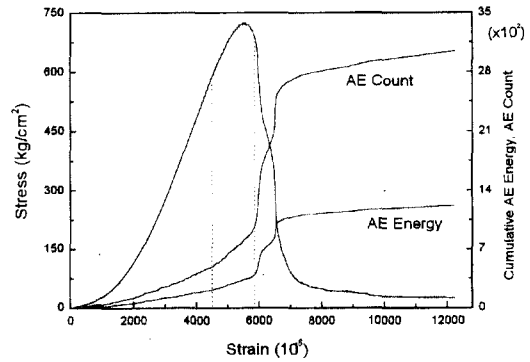


Fig. 13. Axial stress and cumulative AE energy & AE count as a function of axial strain for marble specimen

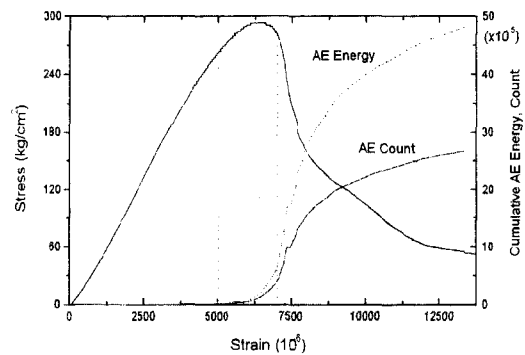


Fig. 14. Axial stress and cumulative AE energy & AE count as a function of axial strain for concrete specimen

및 AE 계수 모두 같이 응력-변형률 곡선의 선형부분에서는 일정한 양만큼 발생하고 되고, 최대응력의 80% 수준, 즉 Fig. 8의 응력-체적변형률 곡선상의 최대다짐점 부분에서 점차 발생률이 높아지다가 최대응력을 지나서 거시균열 형성에 의한 블록이 형성됨에 따라 많은 양이 발생하는데, 두 차례에 걸친 전단면의 형성으로 인하여 두 차례의 AE 에너지 및 AE 계수 급증이 발생하였다. 이후에 잔류응력에 다다른 약간의 파동성을 보이지만 거의 균일한 발생분포를 이루었다. 콘크리트의 경우 초기에서부터 탄성변형부분까지 미소파괴음이 미세하게 발생하였으며, 최대응력의 90% 지점, 즉 최대다짐점에서부터 AE 에너지와 AE 계수가 증가하기 시작하여 블록 형성 과정에서 발생량이 급증하였다(Fig. 14).

따라서 위의 미소파괴음 측정을 통한 AE 에너지 및 AE 계수의 분석을 통해 시험편 변형의 여러 단계들, 특

히 소성영역에서의 변형단계들의 구분이 가능하였다.

#### 4.4.2 응력수준의 변화에 따른 AE 사상의 진폭분석

대리석 시험편에 대한 강성압축시험을 수행하여 AE 신호음을 측정 후 음원추적을 실시하여 총 2102개의 AE 사상(AE event)을 취득하여 각 응력수준의 변화에 따라 취득된 AE 사상 발생빈도를 진폭별로 분석한 결과, 암석이 하중을 받기 시작하여 최대응력의 80% 정도까지의 응력수준에 이르는 동안에 발생한 AE 사상들의 진폭은 대개 50-64 dB 범위에 분포하는 반면, 최대응력의 80% 이상의 하중을 받기 시작하면서부터는 65 dB 이상의 진폭값을 갖는 AE 사상들이 점차적으로 증가하기 시작하였다(Fig. 15). 이를 통해 최대응력의 80% 응력수준 이하의 영역에서 지배적인 64 dB 이하의 진폭값을 갖는 AE 사상들과 최대응력의 80% 이후에서 발생하기 시작하여 그 이후의 변형거동에서 주종을 이루는 65 dB 이상의 진폭값을 갖는 AE 사상들의 발생원은 서로 다른 파괴 메커니즘을 가질 것으로 추정된다.

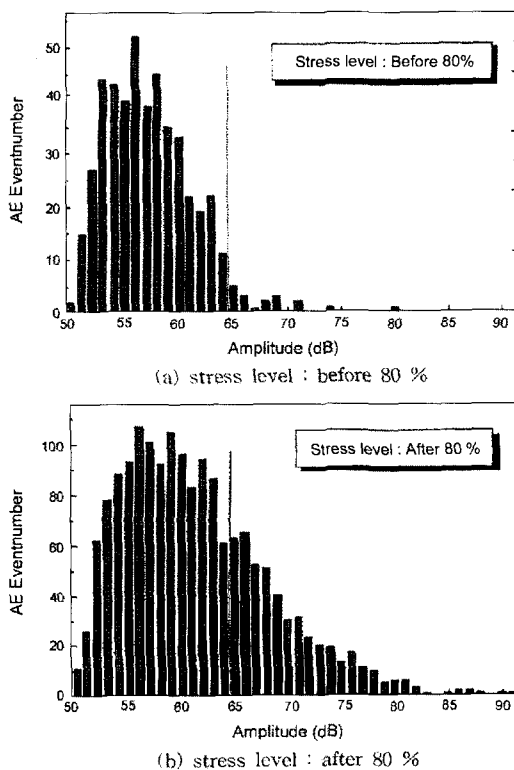


Fig. 15. Differential AE event amplitude distribution before and after 80% stress level of maximum stress in marble (a) stress level : before 80% (b) stress level : after 80%

압축하중을 받는 암석의 광학현미경 및 전자현미경 관찰에 의해 암석의 변형거동 단계에 따라 발생하는 균열 형태는 일반적으로 크게 세가지로 나눌 수 있다<sup>15,16)</sup>. 첫 번째 균열형태는 입자 경계로 전파하는 입자경계균열(intergranular crack)로서, 공극 닫힘, 입자 사이의 마찰 및 미끄러짐과 관계되며, 암석의 압축변형 초기에서부터 발생하여 주로 탄성한계까지 균열의 발달이 진행된다. 두 번째 균열형태는 전적으로 입자 내에서만 발생하고 머무르는 입자내부균열(intragranular crack)로서, 주로 탄성영역의 후기단계와 소성영역에서 주요 변형형태로 나타난다. 세 번째 균열형태인 입자관통균열(transgranular crack)은 입자내균열들의 결합 및 상호작용으로 인해 발생하며, 주로 시험편 파괴를 포함한 소성영역에서 지배적으로 나타난다.

따라서 위의 세가지 균열형태와 본 연구의 대리석 시험편의 변형거동 측정결과 및 AE 사상 진폭분석결과를 종합적으로 고려해볼 때, 대리석 시험편에서 불안정한 균열이 전파하기 시작하는 구간인 최대응력의 80% 응력수준 이전의 영역에서 지배적인 64 dB 이하의 진폭값을 갖는 AE 사상들의 발생원은 공극의 닫힘과 입자의 마찰 및 미끄러짐 등에 의한 것이며, 최대응력의 80% 응력수준에서부터 증가하기 시작하여 이후의 변형거동단계에서 지배적인 65 dB 이상의 진폭값을 갖는 AE 사상들의 발생원은 입자 내에서 발생하는 미세균열들의 상호작용 및 결합과 이에 의한 거시균열의 형성에 의한 것으로 판단된다.

#### 4.5 음원추적에 의한 균열의 진단

대리석에 대한 강성압축시험을 통해 측정된 AE 신호음으로부터 음원추적을 실시하여 얻은 AE 사상 분포 양상을 응력수준에 대하여 구분하였을 때, 최대응력의 20% 응력수준까지의 음원추적 결과 시험편이 하중을 받으면서 시험편 양 끝단에서 대각선 방향으로 응력집중이 이루어져 그 부분에 AE 사상들이 주로 분포하였으며(Fig. 16.(a)), 최대응력의 80%에 해당하는 응력수준까지에서는 시험편 양 끝에서 응력집중으로 인해 발생한 AE 사상들이 점차 중앙으로 확장해 나갔다(Fig. 16.(b)).

시험편이 최대응력에 이르고 다시 잔류강도에 도달할때까지의 최종 음원추적 결과 시험편 상부 지점에 AE 사상들이 많이 분포하고 있으며, 이 부분을 중심으로 해서 두 부분으로 전단면이 발생하였음을 알 수 있다(Fig. 16.(c)).



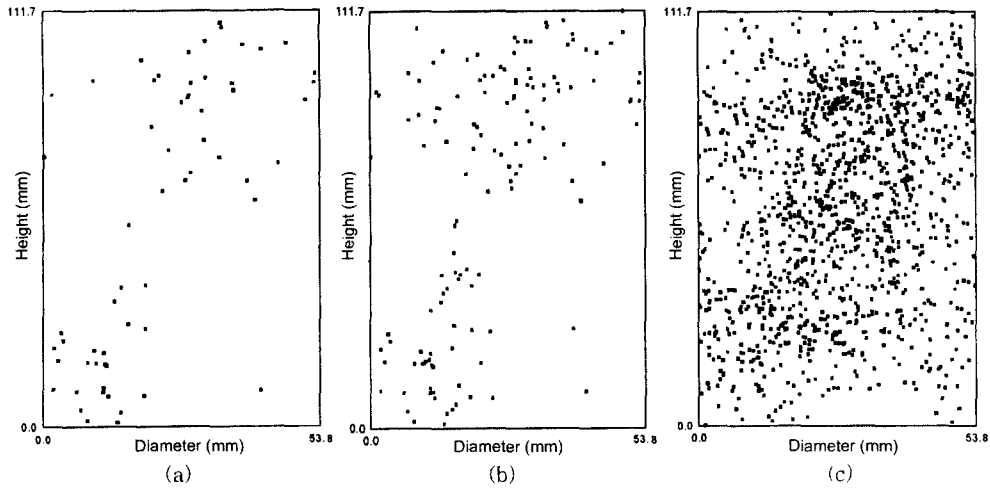


Fig. 16. Plot of AE source location for marble specimen (a) stressed up to 20% of maximum stress (b) stressed up to 80% of maximum stress (c) after failure

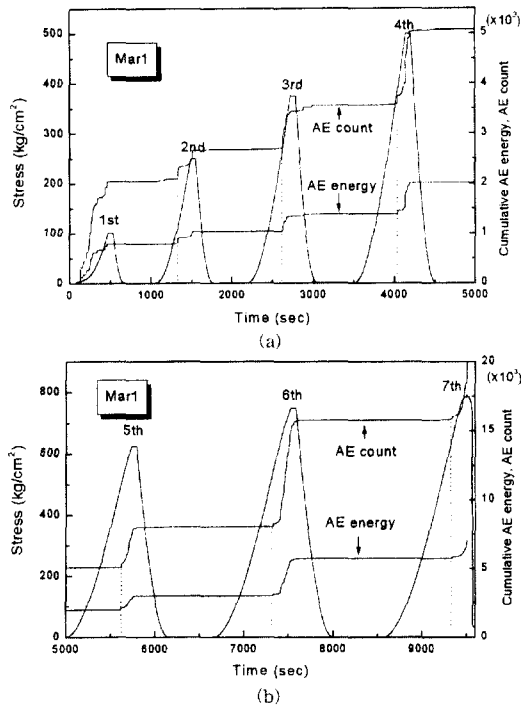


Fig. 17. The cyclic loading pattern and the AE signatures (a) from the 1st to 4th loading (b) from the 5th to 7th loading

4.6 카이저효과 검증

재하 및 제하의 반복에 의한 계단식 반복재하시험을 통해 카이저효과를 검증하였다. Fig. 17과 같이 AE 에

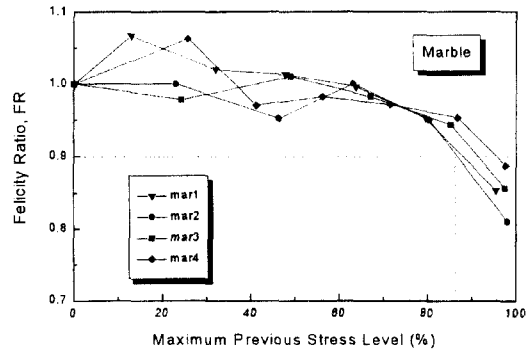


Fig. 18. The relation between felicity ratio and the maximum previous stress level for marble specimens

너지의 급증점에 해당하는 응력을 이전 사이클 최대응력으로 나누어 felicity 비를 구하였으며, Fig. 18-19는 대리석 및 콘크리트 시험편에 대한 계단식 반복재하시험을 통해 측정된 각 가압사이클의 이전최대응력수준(maximum previous stress level)에 대한 felicity 비의 변화를 나타낸다. 대리석 및 콘크리트의 felicity 비가 0.9 이상인 응력수준은 각각 이전최대응력수준의 85%와 65%에 해당되었으며, 0.9 이상의 felicity 비를 갖는 경우를 카이저효과가 명확하게 확인되는 것으로 볼 때, 대리석의 경우 최대응력의 85%, 콘크리트의 경우 최대응력의 65%에 해당하는 응력을 받기까지는 카이저효과가 명확하게 확인되었다고 볼 수 있다. felicity 비가 0.9 이하로 떨어지는 이유는 이전최대응력수준이 최대응력에 가까워

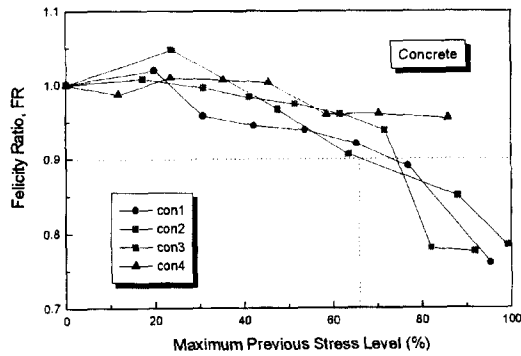


Fig. 19. The relation between felicity ratio and the maximum previous stress level for concrete specimens

지면서 불안정한 균열 전파가 진행되어 시험편이 다시 재가압될 때 AE는 이전 사이클의 최대응력보다 낮은 응력수준에서도 발생하기 때문일 것으로 추정된다. 응력수준의 증가에 따른 felicity 비의 변화를 살펴볼 때 대리석에 비하여 콘크리트가 Felicity 비의 감소율이 두드러지게 나타나고 있다.

지금까지 카이저효과는 현지응력을 측정하는데 이용되어 왔다. 또한 최근의 많은 연구들에 의하면 felicity 비는 시험편 손상도에 대한 정량적인 측정 기준, 즉 시험편이 안정하게 하중을 견딜 수 있는 정량적인 측정점으로 사용된다<sup>(11-13)</sup>.

따라서 위의 Kaiser 효과에 관한 실험 결과를 통해 다음과 같은 해석을 내릴 수 있다. 먼저 본 연구는 단축상태하에서 시험이 이루어졌기 때문에 암석 및 콘크리트가 단축 하중을 받고 있는 경우, AE 측정을 통해 암석 및 콘크리트가 받고 있던 응력이력을 측정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 felicity 비를 시험편이 안정하게 하중을 견딜수 있는 정량적인 측정기준으로 사용할 때, 크립 등으로 인하여 암석 및 콘크리트가 파괴되지 않기까지의 안전하중을 판단하기 위한 기준으로 임의로  $FR = 0.9$ 를 선택하면, 위의 측정결과로부터 대리석의 경우는 시험편에 부과된 응력이 최대응력의 85% 이하일 경우에 시험편은 오랫동안 파괴되지 않고 이 하중을 견딜 수 있음을 의미하며, 콘크리트의 경우는 최대응력의 65% 이하의 하중을 받고 있을 경우 안전함을 의미한다. 또한 대리석과 콘크리트의 시험결과를 비교할 경우, 응력수준이 증가함에 따라 콘크리트가 암석에 비하여 손상이 빨리 진전되는 것으로 간주할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 강성압축시험을 통해 미소파괴음 파라미터 분석 및 음원추적을 수행하여 대리석과 콘크리트의 변형 및 파괴거동 특성을 조사하였으며, 계단식 반복재하시험 수행시 미소파괴음 측정을 통해 카이저효과를 검증하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. 강성압축시험에서 측정된 미소파괴음 파라미터들 중 AE 에너지 및 AE 계수 분석결과 시험편에 소성변형이 시작됨에 따라 미소파괴음이 현저하게 발생하였으며, 따라서 불안정한 균열전파구간 및 전단블록형성구간의 식별이 가능하였다.

2. 음원추적을 수행하기 위한 미소파괴음 속도결정시험 결과, 미소파괴음 측정장치에서 트리거되는 미소파괴음의 전파속도는 S파 속도와 동일하였다. 음원추적 수행 결과 대리석의 경우 2102개의 AE 사상을 획득하였다. 이러한 AE 사상의 진폭분석 결과, 최대응력의 80% 응력수준 이전에서는 64 dB 이하의 진폭을 갖는 AE 사상이 우세하였으나, 80% 응력수준 이후의 변형에서는 65 dB 이상의 진폭을 갖는 AE 사상들이 증가하기 시작하였다. 이와 같은 측정결과를 시험편의 변형거동 측정결과와 비교해볼 때 64 dB 이하의 진폭을 갖는 AE 사상의 발생원은 공극의 닫힘과 입자의 마찰 등에 의한 것으로 추정되며, 65 dB 이상의 진폭을 갖는 AE 사상의 발생원은 입자 내에서 발생하는 미세균열들의 결합 및 이에 의한 거시균열의 형성에 의한 것으로 판단된다.

3. 계단식 반복재하시험을 통해 암석 및 콘크리트에서 카이저효과를 확인할 수 있는 응력수준을 측정할 수 있었으며, 카이저효과의 적용성 측면에서 미소파괴음 측정에 의해 단축압축하중을 받고 있는 암석 및 콘크리트의 응력이력을 측정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 시험편 손상도에 대한 정량적인 측정기준으로서 felicity 비를 사용할 경우 본 연구의 측정결과로부터 응력수준이 증가함에 따라 대리석보다 콘크리트 시험편의 손상이 빨리 진전됨을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Koerner, R. M., McCabe, W. M., and Lord, Jr., A. E., 1980, Overview of Acoustic Emission Monitoring of Rock Structures, 27-35
2. Mansurov, V. A., 1994, Acoustic Emission from Failing Rock Behaviour, Rock Mech. Rock Eng. 27.3,

- 173-182
3. Shi, L. P., Huang, T. H. etc., 1995, A study on the uniaxial compression behaviors and acoustic emission characteristics of rock in Taiwan, ISRM proceedings, 1, 211-214
  4. Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., Read, R. S., 1997, Changes in Acoustic Event Properties with Progressive Fracture Damage, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 34:3-4, paper No. 071B
  5. Butt, S. D., Calder, P. N., 1998, Experimental Procedures to Measure Volumetric Changes and Microseismic Activity During Triaxial Compression Tests, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 35. 2, 249-254
  6. Kaiser, E. J., 1950, A study of acoustic phenomena in tensile test, Doctoral Thesis, Technische Hochschule Munchen
  7. Seto, M., Utagawa, M. and Katsuyama, K., 1989, Estimation of geostress from AE characteristics in cyclic loading of rock(in Japanese), Proc. 8th Japan Symp. on Rock Mechanics, The Japan National Committee for ISRM, Tokyo, Japan, 321-326
  8. Seto, M., Utagawa, M. and Katsuyama, K., 1997, Application of acoustic emission technique to determination of in situ stress, Environmental and Safety Concerns in Underground Construction, Balkema, Rotterdam, 2, 691-696
  9. Seto, M., Utagawa, M. Katsuyama, K. and Kiyama, T., 1998, In situ stress determination using AE and DRA techniques, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 35:4-5, paper No. 102
  10. Holcomb, D. J., 1993, Observations of the Kaiser effect under multiaxial stress state: Implications for its use in determining in situ stress, Geophys. Res. Lett., 20, 2119-2122
  11. Li, C., Nordlund, E., 1993, Assessment of Damage in Rock Using the Kaiser Effect of Acoustic Emission, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30. 7, 943-946
  12. Seto, M., Nag, D. K., Vutukuri, V. S., 1996, Evaluation of rock mass damage using acoustic emission technique, Rock Fragmentation by Blasting, 139-145
  13. Pestman, B. J., Van Munster, J. G., 1996, An Acoustic Emission Study of Damage Development and Stress-Memory Effects in Sandstone, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 33. 6, 585-593
  14. Lee, C. I., 1977, A study on post-failure deformations of coal measure rocks under the stiff loading compression, J. of Korean Inst. of Min. and Mining Engineers, 14. 4, 325-334
  15. Kranz, R. L., 1979, Crack-crack and crack-pore interactions in stressed granite, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, 37-47
  16. Mlakar, V., Hassani, F. P., Momayez, M., 1993, Crack Development and Acoustic Emission in Potash Rock, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30. 3, 305-319



**심 현 진**

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사

TEL : 02-473-6622(815)

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

현 재 (주)덕천엔지니어링 부설연구소 연구원



**이 정 인**

1963년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1965년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 1974년 일본 동북대학 대학원 자원공학과, 공학박사

TEL : 02-880-8708

E-mail : cilee@plaza.snu.ac.kr

현 재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수