

직접전단시험을 통한 암석 절리의 변형거동 및 미소파괴음 발생에 관한 연구

김태혁¹⁾ · 이상돈¹⁾ · 이정인²⁾

Deformation Behaviors and Acoustic Emissions of Rock Joints in Direct Shear

Tae-Hyok Kim, Sang-Don Lee and Chung-In Lee

ABSTRACT

Direct shear tests were conducted in a laboratory setting in order to investigate the shear strength and deformation behavior of rock joints. Also, the characteristics of acoustic emissions (AE) during shearing of rock joints were studied. The artificial rock joints were created by splitting the intact blocks of Hwangdeung granites and Iksan marbles. Joint roughness profiles were measured by a profile gage and then digitized by Image analyzer. Roughness profile indices (R_p) of the joints were calculated with these digitized data. Peak shear strength, residual shear strength, shear stiffness and maximum acoustic emission (AE) rate were investigated with joint roughness. The peak shear strength, the residual shear strength and the shear stiffness were increased as roughness profile index or normal stress increased in the shear tests of granites. In the tests of marble samples, the shear deformation characteristics were not directly affected by joint roughness. As the result of two directional shear tests, the shear characteristics were varied with shear direction. AE count rates were measured during the shear deformation and the AE signals in several stages of the deformation were analyzed in a frequency domain. The AE rate peaks coincided with the stress drops during the shear deformation of joint. The dominant frequencies of the AE signals were in the vicinity of 100 kHz for granite samples and 900 kHz for marble samples. The distribution of amplitude was dispersed with increasing normal stress.

1. 서 론

최근 사회적 관심이 고조되고 있는 지하공간개발이나 지하자원의 개발, 암반사면의 굴착에 있어서는 굴착작업의 안정성과 암반구조물의 유지를 위하여 암반의 낙반, 붕괴 등의 사고와 불안정성을 사전에 예측하는 것이 대단히 중요하다. 현지암반은 생성초기부터 지질구조적으로 절리, 단층 등의 불연속면이 발달되어 있어 지하공동의 낙반이나 암반의 붕괴는

역학적으로 이 불연속면의 전단변형에 의한 파괴메커니즘에 크게 좌우된다고 볼 수 있다. 그러므로 불연속암반의 역학적 안정성 및 변형특성을 파악하기 위하여는 기초연구로서 암반절리면의 직접전단시험을 통한 변형파괴거동을 연구하는 것이 대단히 중요하다. 한편 암반구조물의 낙반, 붕괴 등 암석과 같은 취성재료의 파괴현상에서는 미소균열이 발생, 전파하여 파손(failure)되기까지 많은 미소파괴음이 발생(Acoustic Emission, AE)하므로 암반구조물의 붕

* 1994년 12월 13일 접수

- 1) 정회원, 서울대학교 자원공학과 박사과정
- 2) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

피나 불안정성을 미리 검지하는 데 응용하기 위한 기초연구로서 실험실에서 암석의 변형·파괴시에 발생하는 미소파괴음(AE)을 계측하여 그 특성을 규명하려는 연구가 많이 이루어져 왔다.

실험실에서 암석의 미소파괴음 발생(AE)에 관한 연구는 무결암(intact rock)의 압축시험이나 3축압축 및 직접전단시험에 의한 것이 대부분으로 이에 관한 연구^{5,6,17,18)}가 발표되었으나 암석의 불연속면에 대한 연구는 그렇게 많지 않다. Holcome, Teufel⁸⁾은 매끄러운 인공절리면을 가진 응회암의 삼축시험에서 발생하는 AE에 관하여 연구하였으며, Alheid와 Rummel⁹⁾은 일정한 각도를 가진 sawcut 시료에 대한 삼축압축시험을 실시하여 이때 발생하는 AE에 관하여 연구하였다. 그리고 Li C. and Lordlund E.⁷⁾는 실제 암반의 경우와 비슷한 거칠기를 가진 인공절리면에 대한 전단시험시 발생하는 AE에 대하여 연구하였다. 그리고 국내에서는 김기주¹⁶⁾에 의해 여러 개의 절리면을 가지는 인공절리면의 전단시험시 발생하는 AE에 대한 연구가 보고되고 있다. 이들 연구는 AE 발생 빈도에 대한 결과를 주로 제시하고 있으나, 현재까지 주요한 변수인 절리면의 거칠기 및 절리면에 작용하는 수직응력에 관계한 AE 특성에 관한 연구는 아직 많이 이루어지지 못하여 규명되어야 할 연구의 대상이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 암석절리면의 전단변형특성에 따른 미소파괴음의 발생(AE)특성을 규명하기 위하여 인공절리면을 가진 황동화강암과 익산대리석의 대형 시험편에 대하여 전단방향의 변위속도를 제어하는 절리전단시험을 실시하고, 절리면의 거칠기, 절리면에 작용하는 수직응력, 전단방향에 따른 변형 및 미소파괴음 발생특성에 대하여 검토하였다.

2. 거칠기 파라미터 및 AE 신호의 주파수 분석

2.1 거칠기 파라미터

현재 절리의 거칠기를 나타내는 파라미터로 가장 널리 사용되고 있는 것은 Barton이 제시한 절리거칠계수(Joint Roughness Coefficient, JRC)이다. 절리거칠계수를 결정하는 방법에는 10개의 표준 형상과 측정하고자 하는 절리면 형상을 상호 비교하는 방법, 경사시험을 통하여 결정하는 방법 등 여러 가지가

있으나, 이들 방법에는 시험하는 사람의 주관성이 개입될 수 있는 등 약간의 문제점이 있다. 이를 개선하기 위해 다른 파라미터로 거칠기를 표시하고, 이것들과 JRC의 상관관계를 파악하려는 연구가 많이 수행되어 왔다.

최근에 Maerz et al.¹⁾, Yu and Vayssade²⁾ 등은 거칠기형상지수(roughness profile index)가 절리의 거칠기를 나타내는 적절한 파라미터라는 연구결과를 발표하였다. 이 거칠기형상지수 R_p 는 절리면에 투영된 직선 길이에 대한 절리표면의 실제 길이의 비로서 다음과 같이 표시된다.

$$R_p = \frac{1}{L} \sum [(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

- y_i : i번째 측정점의 y좌표
- y_{i+1} : (i+1)번째 측정점의 y좌표
- x_i : i번째 측정점의 x좌표
- x_{i+1} : (i+1)번째 측정점의 x좌표
- L : 절리면의 직선길이

한편 Turk and Dearman³⁾은 Patton의 전단강도 경험식에 포함되어 있는 거칠각 i 와 거칠기형상지수 R_p 사이에는 다음과 같은 관계가 있다고 제시하였다.

$$i = \cos^{-1} \frac{1}{R_p} \quad (2)$$

본 연구에서는 절리의 거칠기를 표현하는 파라미터로 이 거칠기형상지수를 사용하여 시험결과를 표시하였다.

2.2 AE 신호의 주파수 분석

AE 신호를 검출할 때 시간 영역에서는 시간에 따른 AE의 크기를 측정하지만 주파수 분석은 측정되는 AE 신호에서 가장 우세한 파형의 주파수 대역을 찾는 것이 목적이다. 주파수 분석을 수행하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 시간 영역의 파형을 주파수 영역으로 바꾸어야 하는데, 이는 다음의 Fourier 변환과정을 통해 이루어진다.

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

$$S(f_k) = \sum_{i=0}^{N-1} s(t_i) e^{-j2\pi f t_i} (t_{i-1} - t_i), \quad (4)$$

$$k=0, 1, \dots, N-1$$

- t : 시간
- t_i, t_{i+1} : $i, i+1$ 에서의 시간
- f : 주파수
- f_k : k번째의 주파수
- s(t) : 시간 변수의 함수
- $s(t_i)$: t_i 에서의 시간함수
- S(f) : 주파수 변수의 함수
- $S(f_k)$: t_i 에서의 주파수함수

식 (3)은 해석식이고, 식 (4)는 컴퓨터 해석을 위한 Fourier 변환식이다. 측정 가능한 최대 주파수인 Nyquist frequency는 일정시간에 대해 샘플링하는 경우 $f_c = 1/2 \Delta T$ 이고, 그 분해능은 $1/N \Delta T$ 이 된다(ΔT : 시간 간격, N: 샘플링 횟수).

3. 시료, 실험장치 및 실험방법

3.1 시료의 물리적, 역학적 기본 성질

본 연구에서 사용한 시료는 황등화강암과 익산대리석이다. 황등화강암은 세립 내지 중립질의 화강암으로 석영, 장석, 운모를 조암광물로 하는 회색 화강

Table 1. Mechanical and physical properties of Hwangdeung granite and Iksan marble.

Rock Type	Granite	Marble
Property		
Specific gravity	2.64 ± 0.008	2.71 ± 0.004
Apparent porosity (%)	0.776 ± 0.018	0.274 ± 0.022
P wave velocity (m/sec)	2510 ± 400	2850 ± 110
S wave velocity (m/sec)	1780 ± 220	1910 ± 78
Uniaxial compressive strength (MPa)	170.8 ± 11.0	58.7 ± 2.6
Young's modulus (GPa)	40.3 ± 5.0	55.1 ± 9.0
Poisson's ratio	0.215 ± 0.038	0.377 ± 0.056
Tensile strength (MPa)	7.06 ± 0.8	5.76 ± 0.5

암이다. 익산대리석은 유백색의 균질한 성상을 가지고 있는 대리석으로서, 재료의 압축강도가 전단강도 및 변형특성에 미치는 영향을 비교해 보기 위해 시료로 채택하였다. 대상 암석의 기본적 물성을 파악하기 위해 각종 실내 물성시험을 실시하여 비중, 공극률, 단축압축강도, 인장강도, 영률, 포아송비 등을 구하였으며, 이 결과를 Table 1에 제시하였다. 각 물성치는 시험을 5회 반복하여 구한 결과의 평균값이다.

3.2 시험편 제작

직접전단시험용 시험편은 황등화강암의 경우 150×100×115 mm의 직육면체로, 익산대리석의 경우는 120×100×115 mm의 직육면체로 성형한 후 가압부의 양면을 연마하여 각 시료별로 11개씩의 시료를 준비하였다. 질리 시료는 시험편의 전단면을 따라 균열을 형성시키는 인장균열 발생장치(splitter)를 이

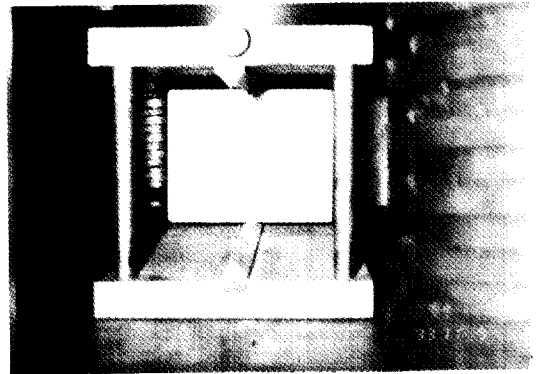


Fig. 1. A view of fracturing in specimen for shear test.

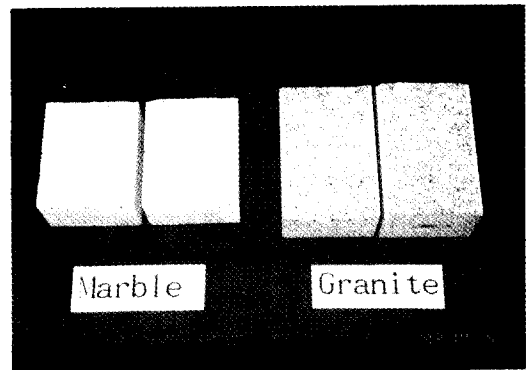


Fig. 2. A view of fractured specimen for shear test.

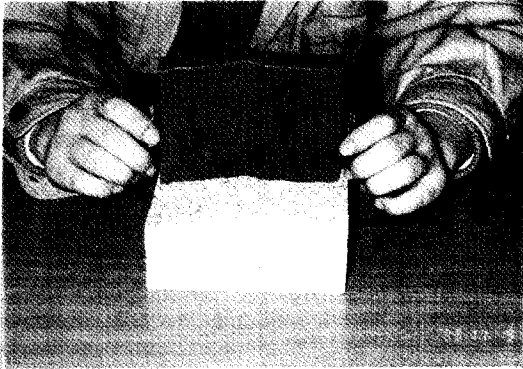


Fig. 3. A view of measuring of the joint roughness profile.

용하여 제작하였다. Fig. 1은 전단시험용 시료에 인장 균열을 형성시키는 장면이고, Fig. 2는 이렇게 제작된 인공절리 시험편의 모습이다.

이러한 방법으로 만든 인공절리면의 거칠기 형상은 형상측정계이지(profile gauge)를 이용하여 측정하였다. 각각의 절리면에 대하여 전단방향과 평행하게 1.5 cm의 일정한 간격을 두고 5회의 측정을 실시하였다. 측정된 절리면의 형상은 영상분석기(Image Analyzer)를 이용하여 수치화시켜 거칠기형상지수(R_p)로 표시하였고, 그 값을 절리거칠계수(JRC)로도 환산하여 비교하였다. Fig. 3은 절리면의 형상을 측정하는 모습이다.

며, Fig. 4는 이렇게 측정된 대표적인 절리면의 거칠기 형상으로서 이 시료의 평균 R_p 값은 1.02506이다.

3.3 실험장치

거칠기형상지수값을 결정하는 데 이용한 영상분석기(Image Analysis System)는 일본 PIAS사의 KIT-500 화상처리장치를 기본 시스템으로 하여 IBM PS/2 컴퓨터, CCD 카메라, RGB 컨트롤 모니터로 구성되어 있다. 이 시스템의 해상도는 512×512 픽셀(pixel)이며, 휘도(grey level)는 256이다.

직접전단시험기는 미국 MTS사의 재료시험기에 설치하여 사용하였다. Fig. 5는 전단시험 및 AE 측정의 계통도이며, 재료시험기의 작동 경로는 다음과 같다. 시험 통제기는 재료시험기의 작동 명령과 동작 상태를 제어하는 부분으로서 직류 조절기에서 작성된 명령에 의해 작동한다. 이 명령에 따라 유압기의 밸브 구동장치가 유압 실린더의 자동제어 밸브를 개폐시켜 실린더를 작동시키며, 송신된 명령과 작동 결과를 비교하여 다시 밸브 구동장치가 작동하게 된다. 이와 같이 시험기는 명령-시행-결과비교-재명령의 과정을 반복하는 폐쇄회로형 구조로 되어 있다.

MTS 시험기에 설치된 일면 직접전단시험기는 전단하중을 재료시험기로 수직으로 가할 수 있도록 저자들에 의하여 제작된 것으로 구조는 Fig. 6에 표시한

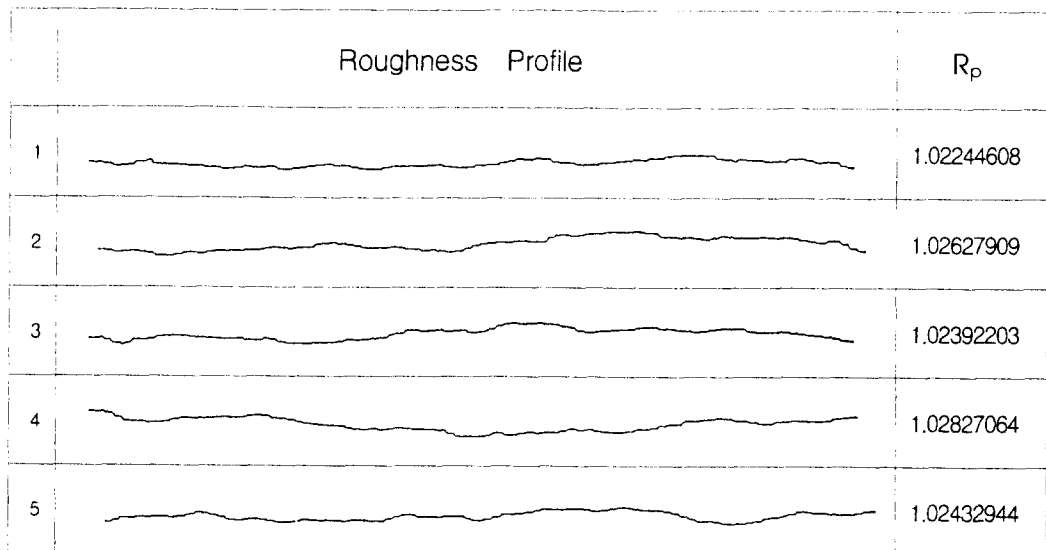


Fig. 4. Joint roughness profiles and R_p of granite sample GH-1.

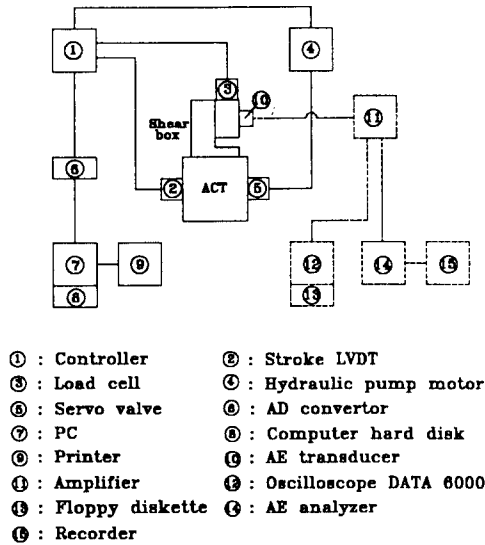


Fig. 5. Block diagram of the overall testing system.

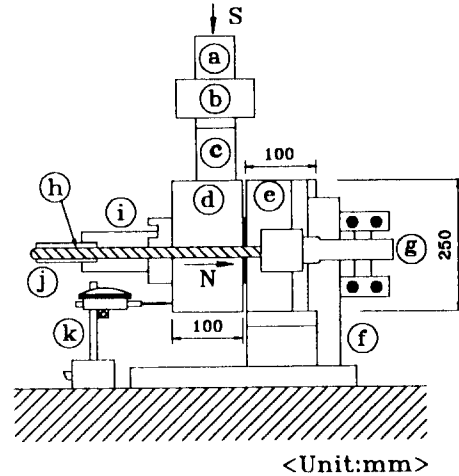
바와 같다. 이 시험기에서 수직하중은 20톤 용량의 유압램에 의해 요크(Yoke)와 로프를 통하여 수평으로 가해지며, 유압램은 수동 펌프에 의해 작동된다. 전단하중은 재료시험기로 가하게 되며, 전단하중-전단변위 곡선은 재료시험기에 연결되어 있는 컴퓨터로 저장된다. 전단시험중에 발생하는 수직변위는 다이얼 게이지를 이용하여 측정하였다.

전단변형중에 발생하는 미소파괴음(AE)은 B & K 사의 AE 측정기기(Acoustic Emission System)를 사용하여 측정하였다. AE 검출기는 전단상자의 측면에 고무 밴드를 이용하여 부착하였다. 본 연구에서는 0.25 V, 0.5 V, 1.0 V, 2.0 V의 threshold level을 가지는 4개의 채널에 기록되는 값들을 합산하여 AE 신호의 총에너지를 표시하는 Weight mode를 사용하여 AE 신호의 총에너지를 측정하였으며, 그 값은 기록제(Model 2307)로 보내져 기록하였다.

AE 신호의 주파수 분석은 신호분석기(Data Precision사의 DATA 6000)를 사용하여 수행하였다. AE 신호의 측정간격은 200 ns, 측정횟수는 초당 2048회로 하였다. 이 기기의 분석이 가능한 최대 주파수인 Nyquist 주파수는 2.5 MHz이고, 분해능은 2441.4이다.

3.4 실험방법

먼저 시험편의 길이와 폭을 측정하여 전단면적을



- Ⓐ Load cell
- Ⓑ Loading plate
- Ⓒ Spherical seat
- Ⓓ Upper shear box
- Ⓔ Lower shear box
- Ⓚ Frame
- Ⓛ Bushing
- Ⓜ Rope
- Ⓝ Hydraulic ram
- Ⓟ Yoke
- Ⓠ Dial gage
- S : Shear force
- N : Normal force

Fig. 6. Schematic diagram of the direct shear testing apparatus.

구한 후 전단시험기의 본체를 가압대에 고정시킨다. 이후 전단시험기의 각 부분을 프레임에 장치하고 유압램을 작동시켜 수직응력을 가한다. 그리고 시험 통제기와 수직변위 측정용 다이얼게이지를 조정후 증폭기와 AE 해석기, 신호분석기를 작동시켜 시험을 시작한다.

본 연구에서는 전단변위가 시간에 따라 일정하게 유지되도록 변위속도를 0.008 mm/sec로 고정하였다. 시험에서 pre amp.의 증폭률은 34 dB, main amp.의 증폭률은 48 dB로 조정하였으며 시험 진행에 따른 AE의 측정 상황과 DATA 6000의 신호를 보고 특정 지점의 AE 파형을 저장하였다. 전단변위가 10 mm 이상 일어나고 1 mm의 전단변위에 대한 전단응력 변화가 5% 이내이면 잔류전단강도에 이른 것으로 보고 시험을 중단하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 수직응력에 따른 전단변형 특성의 변화

Fig. 7에서 Fig. 9까지에는 수직응력에 따른 여러

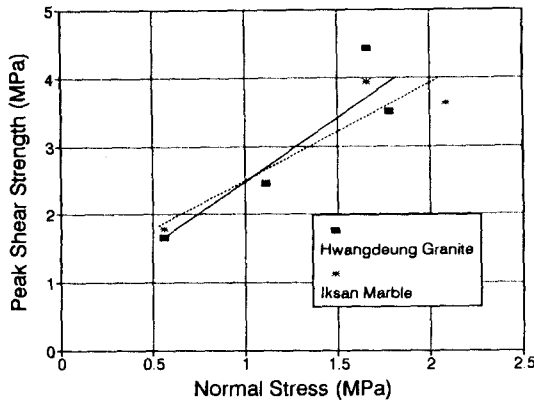


Fig. 7. Relationship between normal stress and peak shear strength.

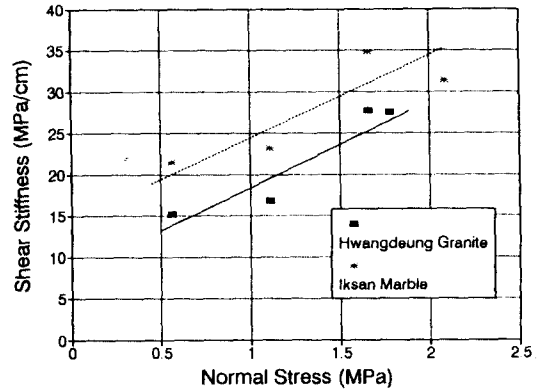


Fig. 9. Relationship between normal stress and shear stiffness.

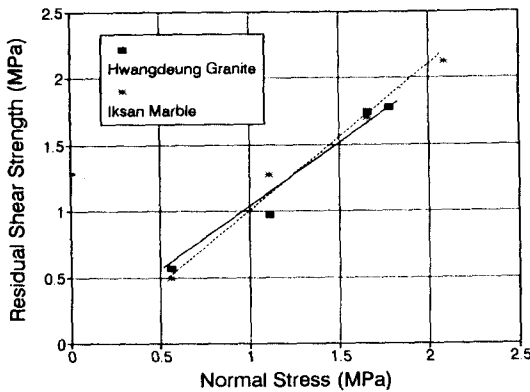


Fig. 8. Relationship between normal stress and residual shear strength.

전단변형 특성의 변화가 제시되어 있다. 여기에 사용한 시료들은 같은 암종에서 거칠기가 거의 비슷한 시료들을 사용하였다(화강암의 경우, $R_p=1.0271\sim 1.0284$, 대리석의 경우, $R_p=1.0252\sim 1.0260$). 화강암의 경우에는 일반적으로 전단강도나 전단강성 등이 거칠기에 관계없이 수직응력이 커지면 거의 선형적으로 증가하며, 대리석의 경우에서도 화강암의 경우와 비슷한 경향을 보인다. 그러나 화강암의 경우는 대리석의 경우에 비해 수치의 분산이 크며, 특히 최대전단강도의 분산이 비교적 더 심한 편인데, 이는 수직응력, 절리면강도와 더불어 절리면 자체의 형상에 의해 최대전단강도가 큰 영향을 받기 때문이다. 즉 같은 R_p 값을 가졌다 하더라도 기울기가 더 급한 거칠면이 조금이라도 있는 절리면에서 더 큰 전단저

항을 나타내기 마련인데, 대리석과 같이 절리면 자체의 강도가 작은 암석의 경우에는 거칠면의 부분적인 파괴가 비교적 쉽게 발생할 수 있지만, 화강암과 같이 강도가 큰 거칠면을 가진 경우에는 이러한 파괴가 용이하게 일어나지 못하기 때문에 판단된다. 대리석에서도 여러 전단변형 특성이 수직응력에 따라 거의 선형적으로 증가하는 이유는 화강암이 거칠기에 민감한 데 반해, 대리석은 압축강도/수직응력의 비가 화강암의 1/3 밖에 되지 않아 거칠면의 파괴가 화강암에서보다 훨씬 쉽게 일어나므로 전단변형 거동에 미치는 수직응력의 역할이 거칠기보다는 훨씬 더 큰 작용을 하기 때문이다.

4.2 거칠기에 따른 전단변형 특성의 변화

Fig. 10에서 Fig. 15까지는 수직응력이 0.55 MPa과 1.66 MPa로서 일정할 때 R_p 값에 따른 전단변형 특성의 변화를 보여준다. 이 그림에서 보면 수직응력이 일정할 때 거칠기형상지수가 커질수록 최대전단강도, 잔류전단강도, 전단강성의 값이 증가함을 알 수 있다. 전단강성은 최대전단강도의 25~75% 사이의 전단응력을 전단변위로 나눈 평균 기울기로 결정하였다.

화강암의 경우, 각 수직응력 수준이 단축압축강도의 1/100에도 미치지 못하므로 수직응력의 차이가 크다고 보기는 어렵지만, 거칠기에 대한 최대전단강도와 잔류전단강도의 증가 경향이 수직응력이 1.66 MPa인 경우에서 0.55 MPa인 경우보다 선형회귀 했을 때의 기울기에서 살펴보면 다소 크게 나타났다. 전단강성은 수직응력이 0.55 MPa인 경우의 거칠기에 따른 증가

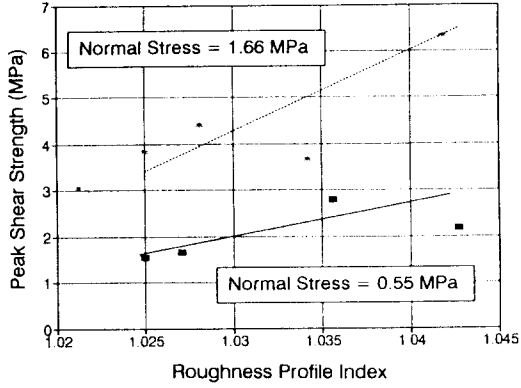


Fig. 10. Relationship between roughness and peak shear strength in Hwangdeung granite.

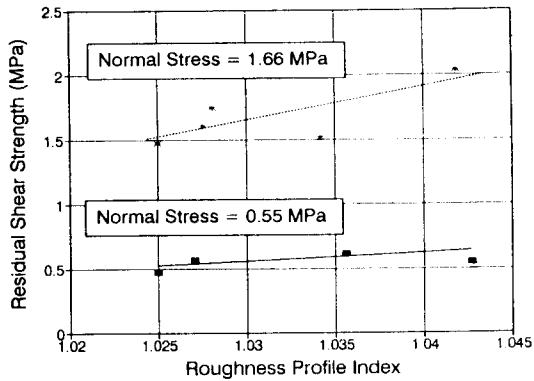


Fig. 11. Relationship between roughness and residual shear strength in Hwangdeung granite.

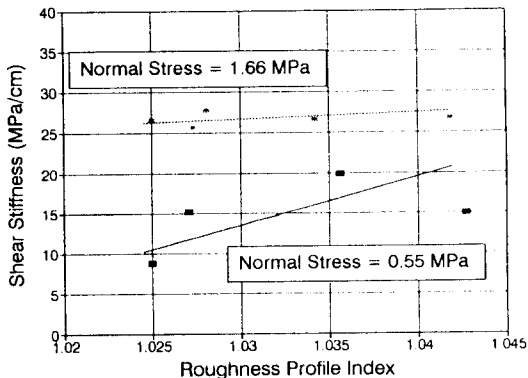


Fig. 12. Relationship between roughness and shear stiffness in Hwangdeung granite.

폭이 1.66 MPa인 경우에 비해 더 크게 나타났는데, 이는 전단강성의 경우 수직응력이 작은 때에는 거칠

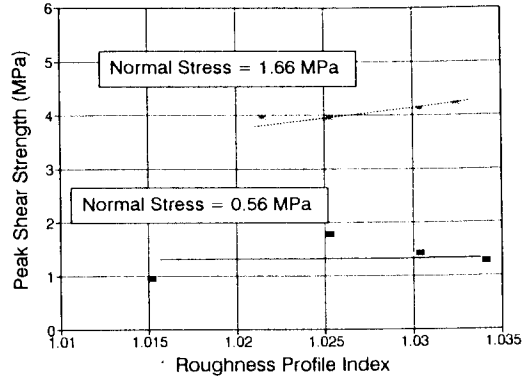


Fig. 13. Relationship between roughness and peak shear strength in Iksan marble.

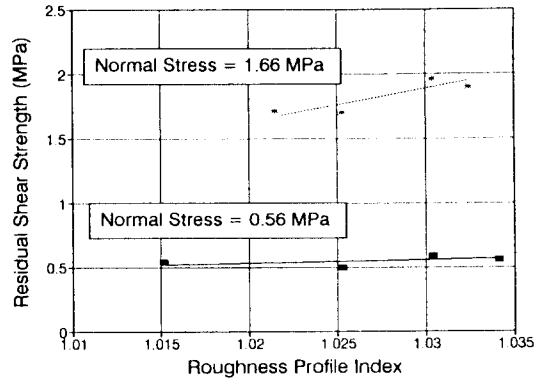


Fig. 14. Relationship between roughness and residual shear strength in Iksan marble.

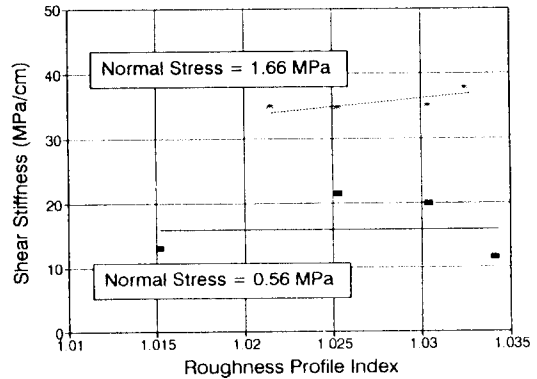


Fig. 15. Relationship between roughness and shear stiffness in Iksan marble.

기의 변화에 따른 영향이 상대적으로 크지만 수직응력이 클 때에는 거칠기보다는 수직응력에 의한 영향이 커져서 비슷하게 수렴되는 것으로 판단된다. 이에

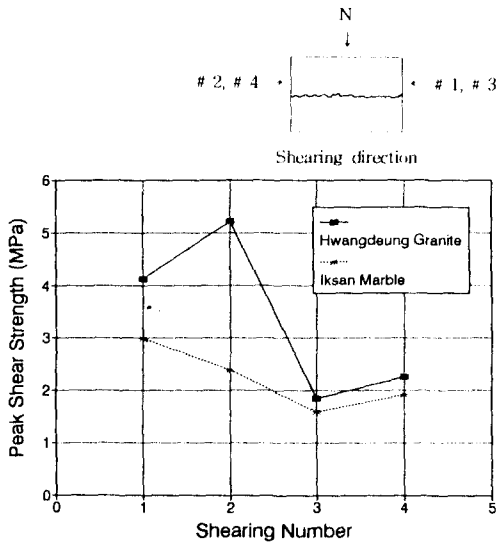


Fig. 16. Effect of shear direction and repeated shearing to the peak shear strength.

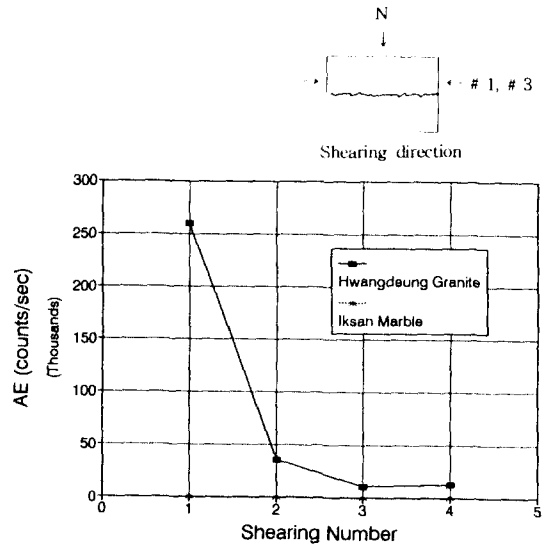


Fig. 18. Effect of shear direction and repeated shearing to the max. AE counts/sec.

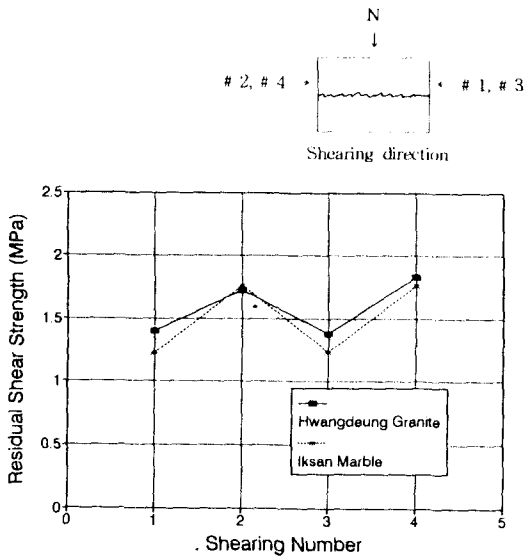


Fig. 17. Effect of shear direction and repeated shearing to the residual shear strength.

비해 대리석은 거칠기의 변화가 전단변형 특성에 영향을 덜 미치는 것으로 나타났는데, 이러한 현상은 대리석 시료의 압축강도가 화강암의 1/3 정도밖에 되지 않아 거칠면의 파괴가 상대적으로 용이하므로 전단거동에 미치는 수직응력의 역할이 화강암에서보다 더 크기 때문으로 판단된다.

4.3 두 방향에 대한 방향성 전단시험의 결과

인공절리면의 전단방향에 대한 전단저항의 변화에 대하여 알아보기 위해 전단의 방향을 서로 바꾸어 4 번의 반복시험을 실시하였다. 시험에서의 최대 변위는 10 mm로 하였고, 최대전단강도, 잔류전단강도, 초당 최대 AE 값 등의 결과를 비교하였다.

Fig. 16에서 Fig. 18까지는 화강암 및 대리석 시료에 대한 두 방향 전단시험에서 얻은 시험횟수에 따른 전단변형 특성들의 변화이다. 화강암의 경우 전체적으로 전단강도값이 전단방향과 상당한 관련이 있음을 보이고 있다. 그러나 초당 최대 AE 값에서는 이런 현상이 보이지 않고 2차전단 이후에 발생하는 초당 최대 AE 값이 1차전단 때의 잔류전단강도 수준에서 나타나는 값으로 떨어지는데, 이는 AE에 직접적으로 관련되는 작은 규모의 2차거칠기가 1차 전단시에 상당히 파괴되기 때문으로 판단된다. 대리석의 경우도 최대전단강도 및 잔류전단강도가 전단방향에 영향을 받고 있는 것을 볼 수 있지만 화강암에 비하여 그 변화폭이 작는데, 이는 대리석 절리면의 압축강도가 화강암에 비하여 아주 작아서 전단시험시에 거칠면의 파괴가 상당히 넓은 범위에 걸쳐 발생하기 때문인 것으로 보인다.

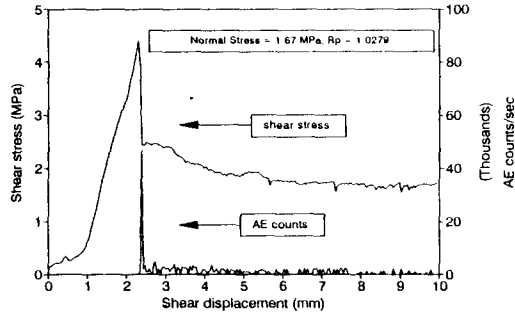


Fig. 19. (a) Test results for Hwangdueng granite GH-2.

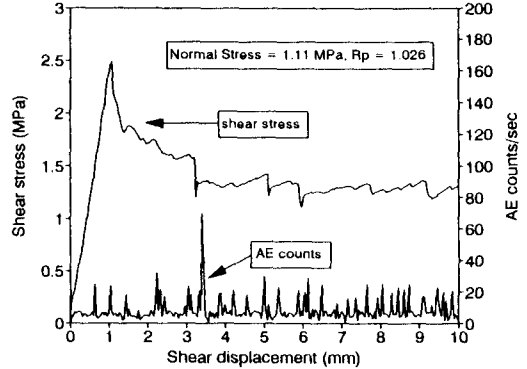


Fig. 20. Test results for Iksan marble MM.

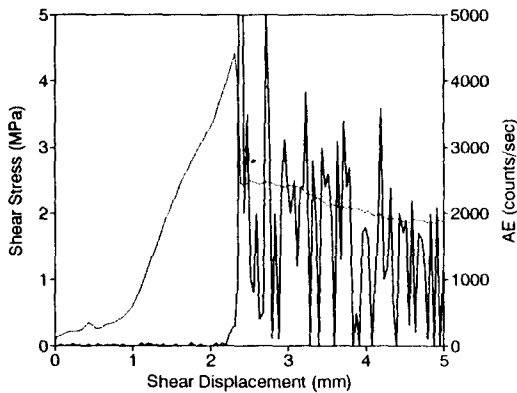


Fig. 19. (b) Enlargement of AE counts/sec.

4.4 전단응력과 AE의 관계

Fig. 19(a)는 화강암의 전단시험시 발생하는 초당 AE 값을 전단변위-전단응력 곡선과 함께 표시한 것이다. Fig. 19(b)는 전체 시험구간 중 전단변위 5 mm 내의 시험결과로 초당 AE 값을 20배 확대하여 그린 그림이다. 화강암의 경우 최대전단강도는 보통 2 mm 내외의 전단변위에서 나타났다. 최대전단강도 이후 전단응력은 변위가 계속 진행됨에 따라 잔류전단강도로 수렴되는데, 잔류전단강도 수준에서의 전단응력 곡선에서는 갑작스런 응력감소 현상이 주기적으로 나타났다. 이는 부분적인 소규모 거칠기의 파괴에 기인하여 일어나는 현상으로 볼 수 있다. 전단변형 초기에 초당 AE의 발생횟수는 5~50 정도로 아주 작았다. 하지만 최대전단강도의 60~90% 수준에서부터 초당 AE 값이 증가하기 시작하여 최대전단강도 이후 응력감소가 시작될 때 최대의 초당 AE 값을 나타냈다(Fig. 19(b)). 전단응력이 잔류전단강도 수준

으로 떨어지면 전단응력의 갑작스런 감소와 관련하여 많은 양의 AE 발생이 관측되었는데, 그래프상에서 볼 때 응력감소가 일어나는 지점에서 초당 AE 값의 변화가 있음을 볼 수 있다. 이런 현상은 수직 응력이 작은 경우에서보다는 수직응력이 큰 경우에서 훨씬 분명하게 나타났다.

Fig. 20은 대리석의 전단변형시에 발생하는 AE의 측정결과이다. 화강암과 마찬가지로 최대전단강도는 2 mm 내외의 전단변위에서 관측되었지만 AE는 화강암과 매우 상이한 양상을 보이고 있다. 대리석의 경우에는 최대전단강도 이후 응력이 감소할 때 발생하는 AE의 양과 잔류전단강도 수준에서 발생하는 AE의 양이 거의 비슷한 값을 보였고, 비슷한 횟수의 초당 AE 값이 최대전단강도 이전에서도 관측되었다. 또한 전체적인 초당 AE의 발생량도 화강암의 1/500 정도였다.

최대전단강도 직후에 응력감소가 발생할 때 화강암에서는 1,000~240,000회의 초당 AE 값이 측정되었으나, 대리석의 경우에는 30~6,000회 정도의 초당 AE 값이 측정되었다. 두 암종에서의 이러한 차이는 화강암과 대리석 절리면을 구성하는 재료 자체의 강도차이에 기인하는 것으로 생각된다. 반면에 잔류전단강도 수준에서 일어나는 응력감소와 AE 발생의 형태는 대체적으로 일치하는 양상을 보였다.

4.5 AE에 대한 수직응력 및 거칠기의 영향

Fig. 21과 Fig. 22는 화강암과 대리석에서 거칠기와 수직응력에 따른 최대의 초당 AE 값을 나타낸 것이다. 화강암에서는 대체적으로 절리면이 거칠수록 관측되

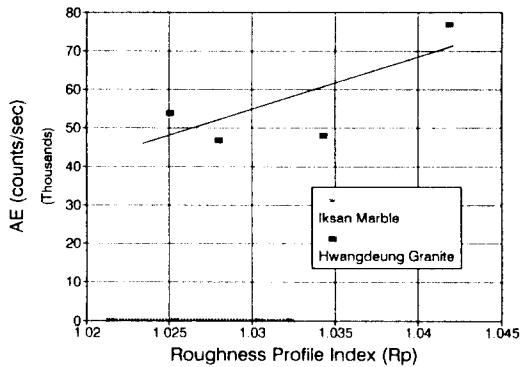


Fig. 21. Relationship between roughness and max. AE counts/sec.

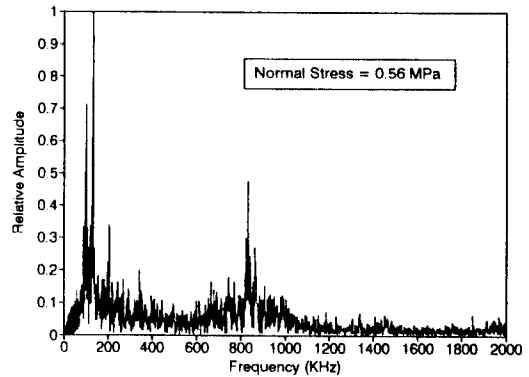


Fig. 23. Results of AE frequency analysis for Hwangdeung granite specimen GL-2.

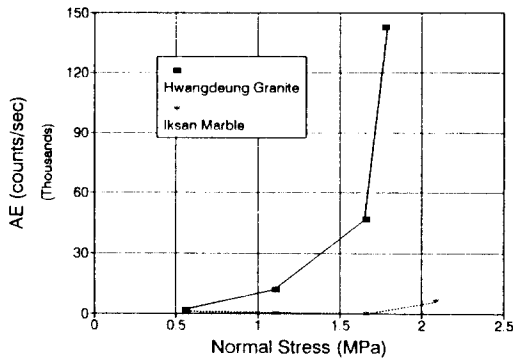


Fig. 22. Relationship between normal stress and max. AE counts/sec.

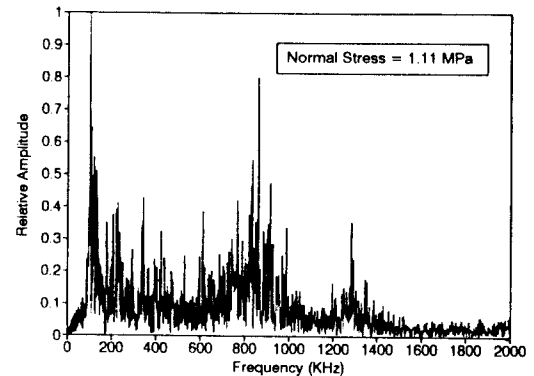


Fig. 24. Results of AE frequency analysis for Hwangdeung granite specimen GM.

는 초당 최대 AE 값이 증가함을 알 수 있다. 이는 거칠면의 파괴가 직접적으로 초당 AE 값에 영향을 미치며, 거칠기가 클수록 절리면의 부분적인 파괴가 더 많이 수반됨을 의미하는 것이다. 수직응력에 따른 초당 최대 AE 값의 변화에서도 거칠기에 관계없이 수직응력이 커지면 AE의 최대값도 더 큰 폭으로 증가함을 볼 수 있다. 이 현상은 수직응력이 작은 경우보다는 수직응력이 큰 경우에 거칠면의 파괴가 더 큰 규모로 일어남을 의미한다.

그러나 대리석의 경우에는 전체적으로 거칠기와 수직응력에 대하여 AE 발생량의 변화가 두드러지게 나타나지 않고 있다. 이는 대리석에서는 화강암과는 달리 최대전단강도 직후에 응력이 감소할 때 최대의 초당 AE 값이 나타나지 않고 시험의 전구간에서 비슷한 양의 초당 AE 값을 나타내는 사실에서 비롯되며, 일부 원인은 전체 시료 중 몇 개의 시료가 광물학적

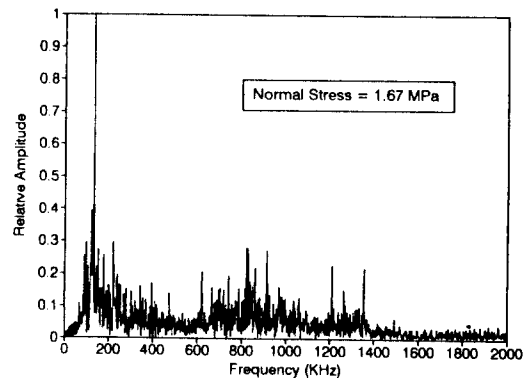


Fig. 25. Results of AE frequency analysis for Hwangdeung granite specimen GH-2.

으로 불균질한 거칠면을 포함한 결과라고 생각된다. 위의 결과를 종합해 보면 전단변형시 측정되는 AE

에너지의 크기는 절리면의 거칠기, 시료의 압축강도, 수직응력 등에 민감한 영향을 받는다고 할 수 있다.

4.6 AE 신호의 주파수 분석 결과

본 연구에서는 AE의 주파수 분석을 위해 만능파형분석기인 DATA 6000을 이용하여 AE 신호를 분석하였다. 다음은 주파수 분석의 계통도이다.

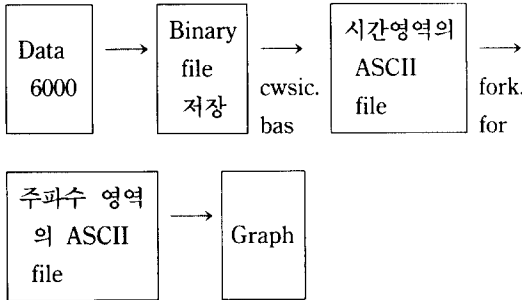


Fig. 23에서 Fig. 25까지는 이렇게 하여 구한 화강암의 주파수 분석 결과로서, Fourier 변환을 통해 주파수별 상대진폭을 구한 것이다. 암석의 종류가 동일하고 수직응력이 일정한 경우에는 주파수별 상대진폭의 분포가 전단변형의 단계에 관계없이 서로 비슷한 경향을 나타내었다. 이는 각 시료에 대한 시험에서 거칠면의 파괴정도가 수직응력과 밀접한 연관관을 가지고 있어 동일 수직응력하에서는 비슷한 양상을 유지하는 것으로 판단된다.

화강암에 있어서 AE 주파수에 대한 수직응력의 영향을 알아보기 위해 R_p 값이 1.0271~1.0284 정도로 거칠기가 거의 비슷한 시료 GL-2, GM, GH-2에 대하여 주파수 분석을 수행하였다. 수직응력이 0.56 MPa인 GL-2 시험편의 경우 최대 진폭은 100 kHz 부근의 저주파 영역에서 나타났고, 900 kHz 부근에서도 상대진폭이 크게 나타났다. 그러나 수직응력이 1.11 MPa인 GM 시험편의 경우에는 상대진폭이 큰 또 하나의 주파수 대역이 1300 kHz 부근에서도 나타났는데, 수직응력이 증가함에 따라 전체적인 진폭의 분포양상은 점점 분산되는 특징을 보였다. 이러한 현상의 원인은 수직응력이 작은 경우에는 거칠면의 파괴보다는 미끄러짐이 우세한 반면, 수직응력이 커질수록 거칠면의 파괴가 더 큰 규모로 발생하여 AE 파형에 영향을 주는 주파수 범위가 넓어지기 때문으로 생각된다.

Fig. 26에서 Fig. 28까지는 대리석에 대한 주파수

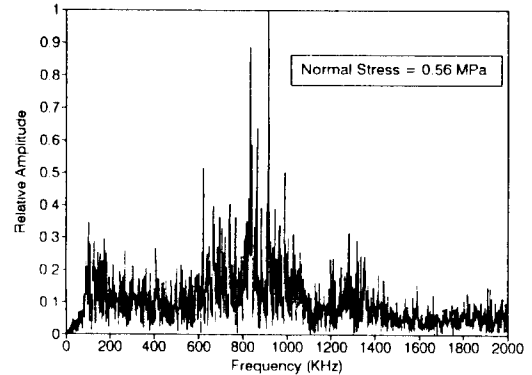


Fig. 26. Results of AE frequency analysis for Iksan marble specimen ML-2.

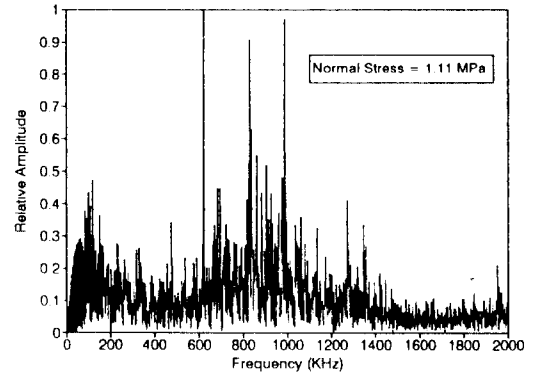


Fig. 27. Results of AE frequency analysis for Iksan marble specimen MM.

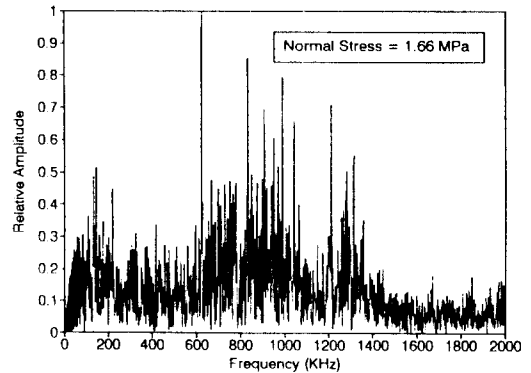


Fig. 28. Results of AE frequency analysis for Iksan marble specimen MH-2.

분석 결과이다. 대리석에서도 R_p 값이 1.0252~1.0260 정도로 비슷한 거칠기를 가지는 시료에 대해서 주파수 분석을 실시하였다. 이 경우에도 수직응력이 커질수록

전체적인 진폭의 분포양상이 점점 분산되는 현상이 나타났는데, 그 원인은 화강암과 마찬가지로 수직응력의 증가에 의한 거칠면의 파괴 부분이 많아지는 결과에서 비롯되는 것으로 생각된다. 그러나 대리석의 경우 최대 진폭을 가지는 주파수 대역이나 파형이 화강암과는 다른 것을 볼 수 있는데, 이는 광물입자의 성장차이와 시료의 물리적 특성차이에서 비롯되는 것으로 판단된다. 그리고 화강암에서는 절리 벽면의 압축강도가 크기 때문에 거칠면의 파괴와 미끄러짐의 복합작용 중 미끄러짐이 우세한 반면, 대리석에서는 미끄러짐보다는 거칠면의 파괴가 우세하여 AE 파형에 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

5. 결 론

이 연구에서는 역학적으로 연약한 절리면을 가진 암석의 전단변형에 따른 미소파괴음 발생(AE)특성을 규명하기 위하여 전단하중을 수직으로 가할 수 있는 대형 직접전단시험기를 제작, MTS시험기에 설치하여 인공절리면을 가진 황등화강암과 익산대리석 시험편에 대하여 전단방향의 변위속도를 제어하는 절리전단시험을 하였다. 이 시험에서 얻은 결과로부터 절리면의 거칠기, 절리면에 작용하는 수직응력, 전단방향에 따른 변형 및 미소파괴음 발생특성을 검토하였다.

이 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1) 화강암 절리에 대한 직접전단시험의 결과 최대 전단강도, 잔류전단강도, 전단강성 등은 절리면의 거칠기형상지수가 커짐에 따라 증가하였으나, 대리석에서는 거칠면 자체의 강도가 낮아 화강암에 비하여 전단강도 등에 대한 거칠기의 영향이 작게 나타났다.

2) 화강암과 대리석 시료 모두에서 수직응력이 커질수록 최대전단강도, 잔류전단강도, 전단강성 등의 값은 크게 증가하였는데, 이는 전단변형 거동에 미치는 수직응력의 역할이 거칠기 보다는 훨씬 더 큰 작용을 하기 때문으로 판단된다.

3) 전단방향에 따른 전단저항의 변화를 알아보기 위해 전단의 방향을 바꾸어 시험한 결과 전체적으로 절리면 자체의 강도와 거칠기의 형상이 시험방향에 따른 전단변형 특성들의 변화에 직접적으로 관여하는 것으로 나타났다. 그러나 화강암의 경우 초당 최대 AE 값은 전단방향에 관계없이 지수함수적으로 감소

하였는데, 이는 1차 전단시 작은 규모의 2차 거칠기와 대부분 파괴됨으로써 일어나는 현상으로 보인다.

4) 화강암의 전단변형시에 발생하는 AE는 전단응력이 선형적으로 증가하는 초기에는 아주 적게 발생하다가 최대전단강도에 가까워질 무렵에서부터 초당 AE 발생량이 증가하기 시작하여 최대전단강도에서 잔류전단강도로 떨어지는 지점에서 초당 AE 값의 최대치가 측정되었다. 또 잔류전단강도 수준에서는 갑작스런 응력감소가 일어나는 지점에서 많은 양의 AE가 측정되었다. 대리석의 경우는 화강암과는 달리 전단변형의 전 구간에 걸쳐 화강암에 비해 아주 작은 초당 AE 값이 측정되었으나, 전단응력이 감소될 때 많은 AE가 측정되는 현상은 비슷하였다.

5) 화강암 절리시료에 대한 전단시험을 통하여 측정된 초당 최대 AE 값은 거칠기와 수직응력이 커짐에 따라 증가하였다. 그러나 대리석에서는 이러한 현상이 관측되지 않았는데, 그 이유는 시료의 거칠면이 상대적으로 연약하고 전체적인 AE의 발생량이 화강암에 비해 매우 적기 때문으로 판단된다.

6) AE 신호의 주파수 분석을 실시한 결과, 암석의 종류와 수직응력이 동일한 경우에는 주파수별 AE 신호의 분포양상이 전체적으로 비슷하였다. 최대의 상대진폭을 나타내는 주파수는 화강암의 경우 100 kHz 부근에서 나타났고, 대리석의 경우는 900 kHz 부근에서 나타났다. 두 암종 모두에서 수직응력이 커질수록 상대진폭의 분포양상이 전체 주파수 대역으로 분산되어 가는 경향을 보였다.

그러나 절리의 거칠기에 따른 전단변형에서의 미소파괴음 주파수특성에 대하여는 앞으로 계속적인 연구가 필요하다.

6. 감사의 글

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구된 것입니다. 연구비를 지원해주신 재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Maerz N.H., Franklin J.A. and Bennett C.P., 1990, Joint roughness measurement using shadow profilometry. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.

- Abstr., Vol. 27, No. 5, pp. 329-343.
- 2) Yu X. and Vayssade B., 1991, Joint profiles and their roughness parameters. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 28, No. 4, pp. 333-336.
 - 3) Turk N. and Dearman W.R., 1985, Investigation of some rock joint properties: Roughness angle determination and joint closure. *Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints, Björkliden, Sweden*, pp. 197-204.
 - 4) Huang T.H. and Doong Y.S., 1990, Anisotropic shear strength of rock joints. *Proc. Int. Symp. on Rock Joints*, pp. 211-218.
 - 5) Robert L. Rothman, 1975, Acoustic Emissions in rock stressed to failure, *Proc. of 1st Conf. on AE/Microseismic Activity in Geologic Structure and Materials*, pp. 109-133.
 - 6) M. Terada, T. Yanagidani, S. Ehara, 1981, AE rate controlled compression tests of rocks, *Proc. of 3rd Conf. on AE/Microseismic Activity in Geologic Structure and Materials*, pp. 159-171.
 - 7) Li C. and Lordlund E., 1990, Characteristics of acoustic emissions during shearing of rock joint. *Proc. Int. Symp. on Rock Joints*, pp. 251-258.
 - 8) David J. Holcomb and Lawrence W. Teufel, 1981, Acoustic emission during deformation of jointed rock, *Proc. of 3rd Conf. on AE/Microseismic Activity in Geologic Structure and Materials*, pp. 37-44.
 - 9) H.J. Alheid and F. Rummel, 1975, Acoustic emission during frictional sliding along shear planes in rock, *Proc. of 1st Conf. on AE/Microseismic Activity in Geologic Structure and Materials*, pp. 149-154.
 - 10) Stimpson B., 1982, A rapid field method for recording joint roughness profiles. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 19, No. 6, pp. 345-346.
 - 11) Hutson R.W. and Dowding C.H., 1990, Joint asperity degradation during cyclic shear. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 27, No. 2, pp. 109-119.
 - 12) Tse R. and Cruden D.M., 1979, Estimating joint roughness coefficients. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 16, pp. 303-307.
 - 13) 이상돈, 1990, 절리면의 거칠기에 따른 암석의 전단 강도 및 변형특성에 관하여, *서울대학교 공학석사 학위 논문*.
 - 14) 김대상, 이정인, 이희근, 1991, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구, *한국자원공학회지*, 28권 6호, pp. 444-455.
 - 15) 김기주, 이희근, 이정인, 김재극, 1982, 불연속면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구(제 1보) - 인공적 불연속면의 방향 및 매수에 의한 영향 -, *대한광산학회지*, 19권 4호, pp. 252-259.
 - 16) 박철환, 이정인, 1981, 암석의 실험실 강도시험에서의 acoustic emission에 관한 연구(제 1보) - 단축압축 시험에서의 AE 현상 -, *대한광산학회지*, 18권 4호, pp. 219-228.
 - 17) 박철환, 이정인, 1982, 암석의 실험실 강도시험에서의 acoustic emission에 관한 연구(제 2보) - 면전단시험에서의 AE 현상 -, *대한광산학회지*, 19권 4호, pp. 268-273.