

암석-콘크리트 불연속면의 전단변형 및 파괴특성에 관한 연구

Shear Deformation and Failure Characteristics of Rock-Concrete Discontinuities

홍창우¹⁾, Chang-Woo Hong, 전석원²⁾, Seok-Won Jeon

황대진³⁾, Dae-Jin Hwang, 최해문⁴⁾, Hae-Moon Choi, 박의섭⁵⁾, Eui-Seob Park

¹⁾서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate student, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National University

²⁾서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수, Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National University

³⁾삼성건설기술연구소 수석연구원, Principal Researcher, Samsung Institute of Engineering & Technology

⁴⁾삼성건설기술연구소 전임연구원, Senior Researcher, Samsung Institute of Engineering & Technology

⁵⁾서울대학교 지구환경시스템공학부 연구원, Researcher, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National University

요지 : 암석-콘크리트 불연속면의 전단변형 및 파괴특성을 규명하기 위해 상부 재료를 콘크리트로, 하부 재료를 암석으로 하는 규칙·불규칙 톱니형 시료와 인공 절리시료를 제작하여 실험실 직접전단시험을 실시하였다. 전단과정 동안 하중과 변위 외에 미소파괴음의 계수와 에너지를 측정하여 전단과정의 단계별 특징을 규명하였고 미소파괴음 음원추적을 실시하여 불연속면에서의 거칠기 파괴부분의 변화를 고찰하였다. 또한 암석 불연속면과 암석-콘크리트 불연속면의 거동을 비교하고 거칠기의 불규칙성 증가에 따른 전단거동의 변화를 관찰하였다.

주요어 : 암석-콘크리트 불연속면, 직접전단시험, 미소파괴음

1. 서론

암석-콘크리트 불연속면의 거동은 일반적인 암석 불연속면 전단거동의 특수한 경우로서, 댐, 교대 및 사면 기초, 록볼트, 말뚝 등의 다양한 지반공학 문제에서 발생한다. 이러한 혼합 재료로 구성된 구조물을 설계할 때에는 구조물과 암반 접촉면의 전단저항에 대해 정확하게 평가하는 작업이 필요하다. 암석-콘크리트 전단면의 거동에 관한 연구는 Johnston 등(1984)이 암석-콘크리트 평면 불연속면에 대해 실시하였고 Johnston 등(1989)과 Lam 등(1989)은 규칙 톱니형 절리 시료에 관해 연구하였으며 Kodikara 등(1994)이 불규칙 톱니형 절리에 관한 연구를 수행하였으나 이러한 연구들은 단순한 형태의 불연속면 시료에 대한 시험으로 자연절리면을 대표할 수 있는 실험이 없었고 전단시험동안 미소파괴음(acoustic emission)을 측정할 사례가 없었다. 전단시험 중의 미소파괴음을 측정한 김태혁(1994)의 연구는 암석 불연속면에 대해 실험한 것으로 미소파괴음의 계수와 에너지만 측정했을 뿐 미소파괴음의 음원추적을 실

시하지는 않았다.

본 연구에서는 암석-콘크리트 불연속면의 전단거동 특성을 규명하기 위해 경사각이 다른 규칙·불규칙 톱니형 시료와 자연절리면을 모사하는 인공절리면 시료를 제작하였으며 각각 시료에 대해 일련의 직접전단시험을 실시하였다. 규칙 톱니형 시료와 불규칙 톱니형 시료, 그리고 인공절리면 시료의 거동 비교를 통하여 표면 거칠기의 불규칙성의 증가가 전단거동에 미치는 영향을 조사하였으며 일반적인 암석 불연속면과 비교하여 암석-콘크리트 불연속면의 특징을 살펴보았다. 또한 전단시험을 하는 동안 전단거동 미소파괴음 음원추적(AE source location)을 실시하여 표면거칠기 파괴부분과 접촉면의 변화를 관찰하였으며 미소파괴음의 계수 및 에너지를 측정하여 전단거동과의 관련성을 규명하였다.

2. 시료, 실험장치 및 실험방법

2.1 시험편의 특성과 준비

전단시험에 사용된 시험편은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 규칙·불규칙 톱니형 시료로서 상부는 콘크리트로 제작하였으며 하부는 황등화강암을 사용하였다. 하부 화강암시료를 먼저 제작한 후 그 위에 콘크리트 시료를 양생하여 접합부가 완전히 일치되도록 하였다. 콘크리트는 초조강시멘트와 골재 그리고 물을 혼합하여 제작하였으며 배합은 (시멘트:골재:물)의 중량비를 2:2:1로 하여 물-시멘트비(W/C)가 50%가 되도록 하였다. 시료의 가로×세로×높이는 100×80×90 mm이다. 두 번째는 인장균열을 발생시킨 인공절리면으로 자연절리면을 모사하였다. 상부 재료는 콘크리트, 하부는 황등화강암을 사용하였다. 시료의 크기는 가로×세로×높이가 각각 100×60×90 mm가 되도록 하였으며 시료의 거칠기는 3차원 레이저 거칠기 측정기를 사용하여 측정하였다. 이 시료의 Barton(1976)이 제안한 JRC값은 실험 후 Barton & Choubey(1977)가 제안한 방법으로 역산한 결과 대략 11의 값을 얻었다. 각각의 시료 모양은 Fig. 1.에 나타내었고 재료의 물리적 성질은 Table 1.에 제시하였다.

2.2 실험장치 및 시험방법

2.2.1 3차원 레이저 거칠기 측정기

3차원 레이저 변위계는 일본 Keyence사에서 만든 LC-2450을 레이저 센서를 사용하며 이 레이저 변위계에서 나온 레이저가 측정된 지점에서의 반사된 빛의 각도에 따라 거리를 계산하게 된다. 레이저의 파장은 670 nm, 최대 출력은 1.9 mW, 레이저 펄스의 지속 시간은 10 μ s이며 초당 50000개의 펄스가 방출되고 초당 20000개의 데이터를 측정하여 이 자료의 평균값으로 표시된다. 최소 측정 한도는 0.5 μ m이고 센서 헤드로부터 5cm 떨어진 지점을 중심으로 ± 8 mm 사이가 측정 가능한 범위가 된다.

Table 1. Physical and mechanical properties of the granite and concrete

Properties	Granite	Concrete
Bulk specific gravity	2.72	2.05
P-wave velocity (m/sec)	3650	3750
S-wave velocity (m/sec)	1970	2320
Uniaxial compressive strength (MPa)	150.0	47.0
Brazilian tensile strength (MPa)	13.7	3.6

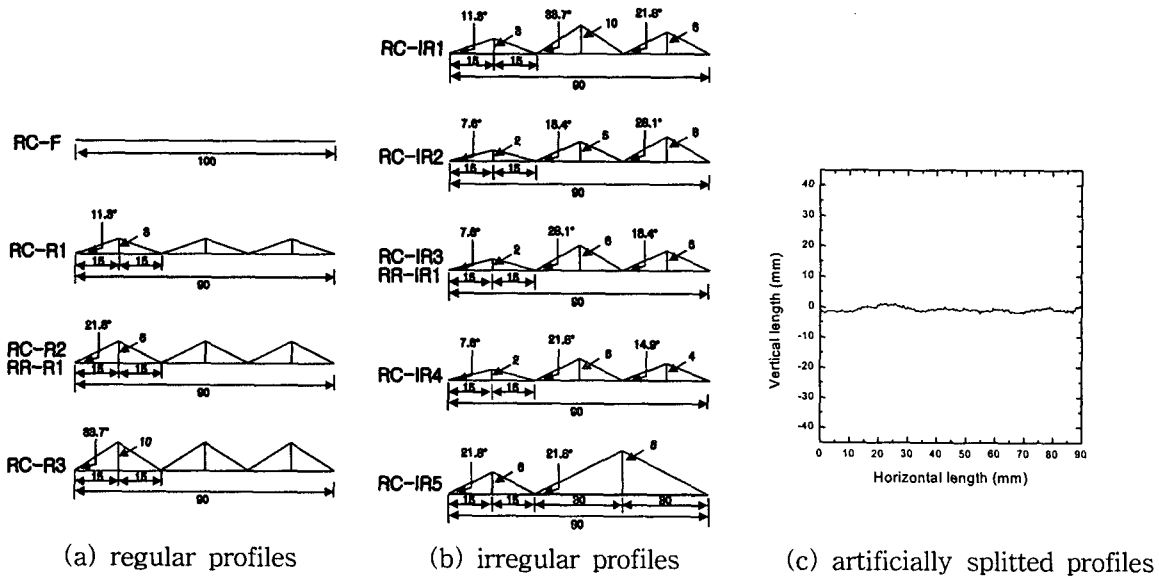


Fig. 1. Schematic diagram of tested profiles (unit : mm)

2.2.2 직접전단시험기

직접전단시험장치는 캐나다 ROCKTEST 사의 전단시험장치인 PHI-10을 사용하였다. 전단시험기의 전체 시스템은 크게 전단박스의 조합부, 수동유압계와 압력유지계 및 수직압과 수평압을 주기 위한 부속장비, 시료준비를 위한 틀의 3가지로 이루어져 있다. 수직하중과 수평하중을 재하하는 램은 최대 45 kN까지의 하중을 재하할 수 있다. 전단실험 중 시료에 가해진 하중의 크기는 유압펌프에 부착되어 있는 압력변환계(pressure transducer)를 이용하여 측정하며 전단변위는 전단박스의 측면에 1개의 LVDT를 설치하여 측정하고 수직변위는 2개의 LVDT를 전단박스의 상부에 대각선 방향으로 위치시켜 측정하였다. 이러한 전단응력과 수직응력, 전단변위와 수직변위는 미국 Measurement Group 사의 System 5000 scanner를 이용하여 0.5초마다 PC에 저장하였다. 전체적인 모습은 Fig. 2와 같다.

2.2.3 미소파괴음 측정기

전단과정 동안의 미소파괴음을 측정하기 위하여 미국 Physical Acoustic Corporation (PAC) 사의

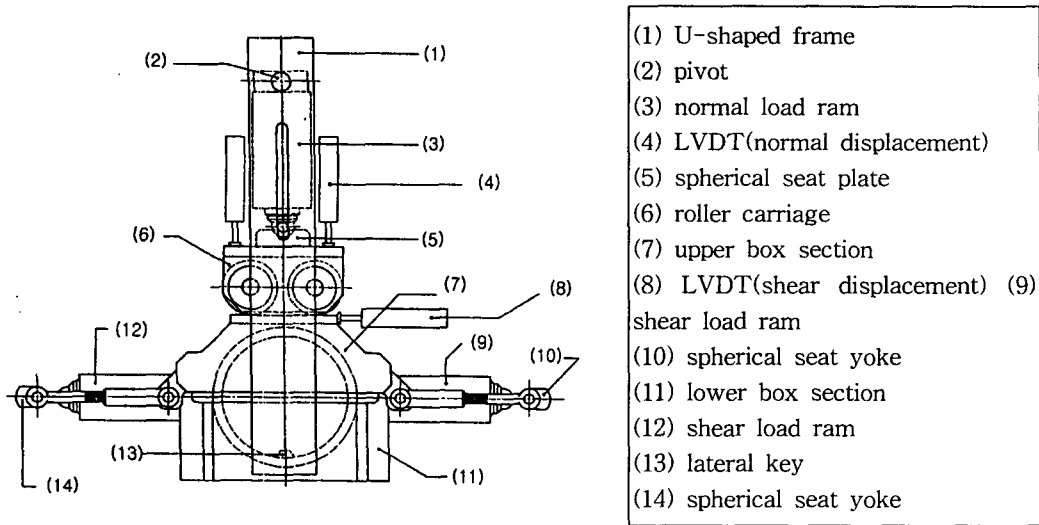


Fig. 2. Schematic diagram of PHI-10 shear box

MISTRAS 2001 시스템을 사용하였다. MISTRAS 2001 시스템은 센서와 전치증폭기(pre-amplifier), 케이블, PC 본체 등으로 이루어져 있다. 미소파괴음 측정에 사용된 센서는 PAC 사의 R15 압전 트랜스듀서이며 본 연구에서는 미소파괴음을 이용한 음원추적을 위해 6개의 센서를 사용하였다. 음원추적의 정확도를 높이기 위해 두께 1 mm, 직경 5 mm의 파유도물질(waveguide)를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 거칠기 형상에 따른 거동

암석-콘크리트 접촉면과 암석 불연속면의 역학적 성질을 조사하기 위하여 톱으로 절단된 평평한 시료에 대해 평면불연속면 시험을 실시하여 기본마찰각을 구하였다. 암석-콘크리트 면의 기본마찰각은 30.67° , 암석-암석 면에 대해서는 기본마찰각이 34.00° 로 나타났다.

Fig. 3.에 규칙 톱니형과 불규칙 톱니형 시료, 그리고 인공절리에 대한 전단변위-전단응력 곡선을 도시하였다. 먼저 규칙 톱니인 RC-R2 시료의 경우는 전단변위가 증가함에 따라 최대전단강도를 이후 전단강도가 급격히 감소하였으나 불규칙 톱니인 RC-IR1는 최대전단강도 이후 전단응력이 감소하다가 전단변위가 3 mm인 지점에서 다시 한번 전단응력이 증가하고 다시 감소하는 형태를 보였다. 인공절리면의 경우는 최대전단강도에 도달한 이후 전단응력이 미세한 요동(stickslip)을 반복하면서 점차적으로 감소하여 잔류전단강도에 도달하는 것을 볼 수 있다. 이러한 거동의 차이는 불연속면 거칠기의 불규칙성의 증가로 설명할 수 있다. 규칙 톱니형 시료의 경우는 거칠기의 경사각이 일정하므로 전단변위의 증가에 따라 상하부의 불연속면에 상대적인 변형이 발생하기 시작하고 모든 톱니가 같은 형상이므로 전체의 마찰저항을 개개의 톱니가 같은 크기로 분배하여 저항하게 된다. 전단변위에 의한 전단응력이 톱니가 가진 저항력보다 더 커질 경우에 모든 톱니는 동시에 파괴가 일어난다. 불규칙 톱니형 시료의 경우 초기에 수직응력에 의한 탄성적인 변형 이후 전단변위가 발생하게 되면 불연속면의 미끄러짐은 경사각이 가장 큰 톱니를 따라서만 일어나게 된다. 이 때 톱니에 탄성변형이 없다면 경사각이 가장 큰 톱니가 전

체 전단저항의 모든 부분을 차지하고 이 크기는 규칙 틈니의 전단저항 값보다 훨씬 작은 하나의 틈니의 전단저항 값으로만 나타날 것이다. 그 이후에는 2번째로 경사각이 큰 틈니의 전단저항이 전체 전단저항으로 나타날 것이다. 그러나 실제의 불연속면에서는 수직응력에 의한 탄성적인 변형으로 인해 경사각이 낮은 틈니에서도 접촉이 발생하며 전체의 전단강도는 규칙 틈니와 강체인 불규칙 틈니형의 중간 정도의 값을 가지게 된다. Fig. 4.에 이상적 강체인 규칙, 불규칙 틈니형 시료와 탄성변형이 일어나는 불규칙 틈니형 시료에 대한 전단변위-전단응력을 도시하였다. 불규칙 틈니형 시료는 규칙 틈니형 시료와 비교하면 최대전단강도는 감소하게 되며 모든 틈니의 파괴를 위해서는 더 큰 전단변위가 필요하게 된다.

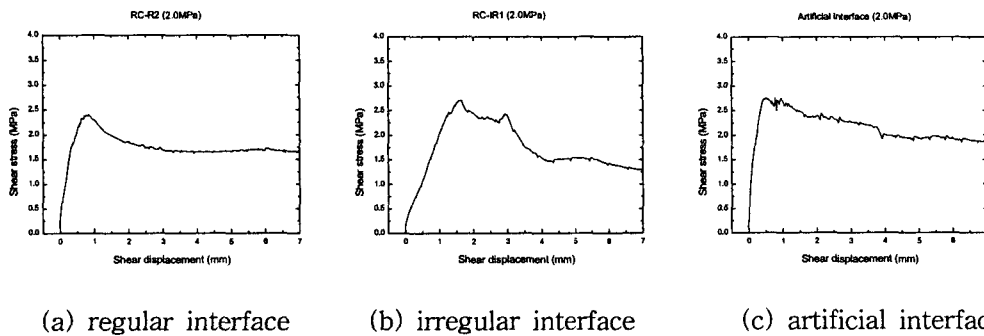


Fig. 3. Comparison of regular, irregular and artificial interface specimen for shear displacement-shear stress curve(Rock-Concrete interfaces)

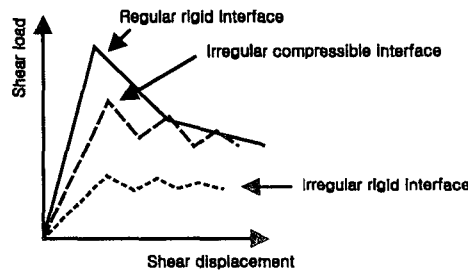


Fig. 4. Comparison of response curves for idealized profiles

표면 재료의 특성이 같은 틈니형 시료와 인공절리면을 비교하면 인공절리면의 경우 수많은 돌출부들의 경사각이 모두 다르므로 거칠기의 불규칙성이 더욱더 증가하며 이로 인해 최대전단강도 도달 이후에 최대전단강도가 서서히 감소하게 된다. 그러므로 불연속면에서의 불규칙성이 증가할수록 최대전단강도 이후의 전단응력의 변화는 더욱더 많아지며 최대전단강도 값은 감소하게 될 것이다. Barton(1980)은 자연적인 암석 불연속면에 대해 전단거동이 전단이 일어나는 불연속면의 길이가 증가할수록 최대전단강도가 감소한다는 것에서 불연속면의 거동이 취성적(brittle)에서 연성적(ductile)으로 변해간다고 주장하였다. 이것은 불연속면의 길이가 증가하게 되면 불연속면의 변화 또한 더 커지게 될 것이므로 위의 결과를 뒷받침하는 것처럼 보인다.

3.2 암석-콘크리트 불연속면과 암석 불연속면의 거동 비교

일반적인 암석 불연속면과 암석-콘크리트 불연속면의 전단거동 그래프를 Fig. 5.에 도시하였다. 암석

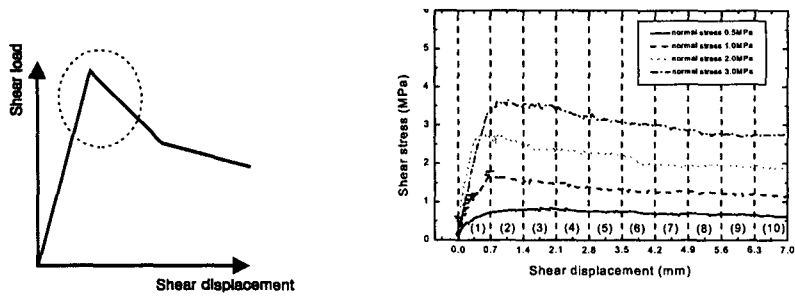
불연속면의 경우는 Fig. 5.(a)의 점선 부분과 같이 전단강도의 감소부분이 분명히 나타나 뚜렷한 최대전단강도와 잔류전단강도 단계로 나뉘지만 Fig. 5.(b)와 같은 암석-콘크리트 불연속면의 경우 표면 거칠기 JRC가 11정도의 값을 나타내지만 전단강도의 급격한 저하가 발생되지 않으며 최대전단강도와 잔류전단강도의 차이가 암석 불연속면에서처럼 크게 발생하지 않았다. 그러므로 암석-콘크리트 불연속면에서는 잔류전단강도가 전단저항을 대표하는 값이라고 생각할 수 있다. 이것은 암석-콘크리트 불연속면의 경우 암석과 콘크리트의 강도차이(암석은 150MPa, 콘크리트는 47MPa)에 의해 거칠기의 파괴가 대부분 상부의 콘크리트 면에서만 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 최대전단강도와 전단강성은 암석 불연속면이 암석-콘크리트 불연속면에 비해 더 큰 값을 가졌다.

3.3 미소파괴음을 이용한 음원추적

인공절리면에서 음원추적을 실시한 결과를 Fig. 5.(c)에 나타내었다. Fig. 5.(b)의 전단응력-전단변위 그래프를 10단계로 나누어 각각의 단계에서 발생한 음원을 도시하였다. 전단시험이 시작된 이후 상부 전단면과 하부 전단면이 밀착되는 초기 단계에서는 음원이 거의 발생하지 않고 발생한 음원의 위치 또한 불규칙적인 성질을 나타낸다. 전단변위가 발생함에 따라 전단표면 전반에서 거칠기의 파괴가 발생한다. Kana 등(1996)에 의하면 암석 절리의 거칠기는 거시적인 절리면의 기울기인 1차 거칠기(primary asperities)와 미세한 요철의 2차 거칠기(secondary asperities) 성분이 있으며 이들은 각각 전단에 다른 영향을 준다고 하였다. 초기의 음원은 이러한 2차 거칠기가 파괴되는 것으로 생각되며 전단 표면 전반에 걸쳐 발생한다. 전단이 더욱 진전되면 전단 접촉면이 어떤 국지적인 면으로 변화한다. Fig. 5.(5), (7), (8)에서 음원이 집중하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 음원은 1차 거칠기가 파괴되어 나타난 것으로 볼 수 있다. 결국 전단이 진행됨에 따라 표면 돌출부의 파괴는 전단표면 전반에서 발생하는 2차 거칠기의 파괴에서 일부 국지적인 영역인 1차 거칠기의 파괴로 전이되는 것을 알 수 있으며 최대전단강도 성분은 주로 미세한 2차 거칠기들의 역물림에 의한 값이며 잔류전단강도는 1차 거칠기의 전단강도에 기인하는 성분임을 알 수 있다.

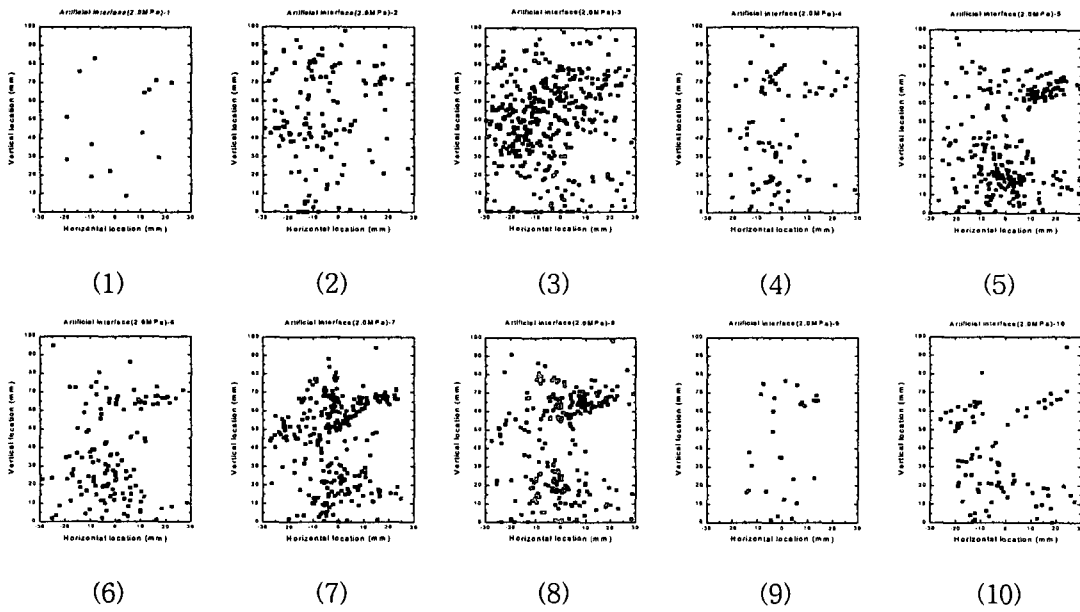
3.4 미소파괴음 에너지와 계수

전단시험 과정 중에 미소파괴음의 에너지와 계수를 측정하여 전단의 진행정도 및 시료파괴와의 상관성을 관찰하였다. 미소파괴음의 에너지와 계수는 불연속면 표면의 파괴에 기인하여 발생하므로 이것으로써 전단시료의 파괴정도를 예측할 수 있다. 수직응력에 따른 미소파괴음의 발생은 수직응력이 증가함에 따라 불연속면에서의 거칠기의 파괴가 증가하므로 미소파괴음 계수의 발생빈도와 에너지의 크기가 모두 커지는 형태를 보였다. Fig. 6.에 인공절리면에 대한 미소파괴음 계수와 에너지를 도시하였다. 분포의 특징은 최대전단강도에 도달하기 전 단계(Fig. 6.A)에서는 미소파괴음이 거의 검출되지 않았으며 이로부터 이 단계에서는 거칠기의 파괴가 거의 발생하지 않았다고 판단할 수 있다. 전단이 진행될수록 점차적으로 그 크기가 증가하며 최대전단강도에서 잔류전단강도로 작아지는 구간(Fig. 6.B)에서 미소파괴음의 발생 비율이 급격하게 증가하여 최대값을 기록하였다. 잔류전단강도에 도달한 이후(Fig. 6.C)에는 전단강도가 작아지는 구간에서 미소파괴음의 발생빈도가 증가하였다. 결국 미소파괴음을 이용하여 전단과정 중의 불연속면 거칠기의 손상 및 전단의 진행정도를 예측할 수 있을 것으로 생각되며 전단응력-전단변위의 측정이 없더라도 미소파괴음의 발생빈도에 따라 전단의 단계를 명확하게 구분할 수 있을 것으로 생각된다.



(a) rock discontinuities

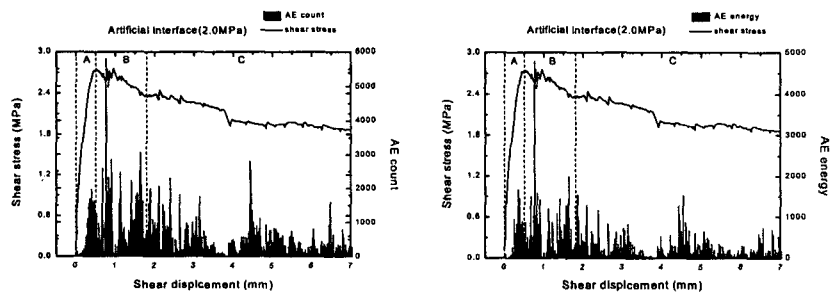
(b) rock-concrete discontinuities



Sequence of time : (1)→(2)→(3)→(4)→(5)→(6)→(7)→(8)→(9)→(10)

(c) AE source location

Fig. 5. Typical shear test & AE source location results for artificial interfaces



(a) AE count rate

(b) AE energy rate

Fig. 6. Typical AE energy and count rate results for artificial interfaces

4. 결론

암석-콘크리트 불연속면의 규칙·불규칙 톱니형 시료와 인공절리면 시료를 제작하여 이 시료에 대해 일련의 직접전단시험을 실시하였으며 실험결과로부터 도출되는 결론은 다음과 같다.

1) 규칙·불규칙 톱니형 시료와 인공절리면 시료의 거동을 비교하면 전단 표면 거칠기의 불규칙성이 증가함에 따라 최대전단강도 이후 전단강도가 급격하게 저하되는 거동에서 전단강도가 증가, 감소를 반복하며 서서히 감소하는 거동으로 변화하였다.

2) 암석-콘크리트 불연속면의 전단거동은 최대전단강도에서 잔류전단강도로의 강도감소가 일반적인 암석 불연속면에 비해 작게 나타나 잔류전단강도가 암석-콘크리트 불연속면의 전단강도를 대표하는 값임을 알 수 있었다.

3) 미소파괴음 음원추적으로부터 인공절리면의 경우 최대전단강도 이후 2차 거칠기의 파괴로 인해 표면 전체 영역에서 미소파괴음이 발생하나 잔류전단강도에 도달한 이후에는 1차 거칠기의 파괴로 일부 국지적인 영역에서만 미소파괴음이 발생하였다.

4) 미소파괴음의 계수와 에너지를 측정된 결과로부터 전단면 거칠기의 손상정도를 미소파괴음의 발생빈도로부터 예측할 수 있으며 전단과정에 따른 명확한 단계구분이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. 김태혁(1994), 암석 절리면 전단시험에서 미소파괴음 발생에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문
2. Bandis, S. and Barton, N.R.(1981), Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rocks joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 18, pp. 1-21
3. Barton, N.R.(1976), The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 13, pp. 255-279
4. Barton, N.R. and Choubey, V.(1977), The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech.* 10, pp. 1-54
5. Johnston, I.W. and Lam, T.S.K.(1984), Frictional characteristics of planar concrete-rock interfaces under constant normal stiffness conditions, *Proc. 4th ANZ Conf. on Geomechanics, Perth*, Vol. 2, pp. 105-108
6. Johnston, I.W. and Lam, T.S.K.(1989), Shear behaviour of regular triangular concrete/rock joints-Analysis. *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, 115, pp. 711-727
7. Kana, D.D., Fox, D. J., and Heiung, S. M.(1996), Interlock/friction model for dynamic shear response in natural jointed rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 33, 371-386
8. Kodikara, J.K. and Johnston, I.W.(1994), Shear Behavior of irregular triangular rock-concrete joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 31, pp. 313-322
9. Lam, T.S.K. and Johnston, I.W.(1989), Shear behaviour of regular triangular concrete/rock joints-Evaluation. *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, 115, pp. 711-727