

## 팽창성 시멘트에 의한 암석균열시의 AE 특성

# Characteristics of Acoustic Emission by Expansive Cement Induced Rock Fractures

김 교 원 (Gyo Won Kim)

경북대학교 자연과학대학 지질학과

### 요약 / ABSTRACT

이 연구는 팽창성 시멘트의 팽창압에 의한 암석 파괴 시에 발생하는 AE 파의 특성을 규명하기 위하여 수행되었다. 연구결과 AE파의 우세 주파수와 최대 진폭은 팽창성 시멘트 충전공에서의 압력 발달 비율과 관련하여 변화되었다. AE파의 우세 주파수는 소 직경 충전공 시험에서 150~230kHz이었고 대 직경 충전공에서 400~500kHz이었으며, 최대 진폭은 각각 0.015~0.050cm/sec 및 0.025~0.064cm/sec이었다. 시험에서 충전공의 크기에 따라 각기 높은 주파수의 큰 진폭과 낮은 주파수의 작은 진폭의 AE파가 수신된다는 사실은 동일 시료에서 일정한 규모의 균열을 발생시키는데 필요한 총 에너지는 대체로 동일함을 강하게 암시하고 있다. 팽창성 시멘트에 의한 암석 균열은 진폭이 특별히 큰 AE파의 발생없이 안정적으로 진행되어서 거시적 암석균열은 미소균열의 안정적 성장의 결과임을 시사하였다.

주요어 : 암석균열, AE파, 팽창성 시멘트, 우세 주파수, 최대 진폭

A study was conducted to determine the characteristics of acoustic emission(AE) events generated by the expansive cement induced rock fracturing. The dominant frequency and the maximum amplitude of the AE events are changed in relation to the rate of expansive pressure development in the hole. The dominant frequencies are in the range of 150~230kHz for the small hole tests and 400~500kHz for the large hole test. The maximum amplitudes are in the range of 0.015~0.050cm/sec and 0.025~0.064cm/sec, respectively. The fact that AE events of higher amplitude with higher frequency on the large hole test and lower amplitude with lower frequency on the small hole tests were detected, may strongly imply that the amount of energy consumed for a macro-crack in both tests may be similar. The expansive cement induced crack propagates stably without any distinguished event having higher amplitude and this implies that a macro-crack is a result of stable growth of micro cracks.

**Key Words** : Rock Fracture, AE wave, Expansive Cement, Dominant Frequency, Maximum Amplitude

## 지반재료의 AE 특성

AE(acoustic emission)를 이용한 지반물질의 거동연구에 대하여 1930년대 이래 다수의 논문이 발표되어 왔다. AE는 갑작스런 변형에너지의 방출에 수반되는 물질의 변위나 파괴의 진행과 관계된다. Hardy(1977)가 언급하였듯이 지반물질에서의 AE는 전위(dislocation), 입자 경계의 이동, 균열의 발생 및 전파 혹은 단열이나 단층 등 지질구조의 상대적 운동의 결과로 발생된다. 이와 같은 과정에 수반하여 물질내부에 축적된 탄성변형 에너지의 갑작스런 해방으로 탄성 응력파가 발생되며, 이 응력파가 물질을 통과하여 전파되어 그 표면에 설치된 수신 장치에서 AE로 관찰된다. 이 연구는 팽창성 시멘트의 팽창압에 의한 암석 파괴 시에 발생하는 AE 파의 특성을 규명하기 위하여 수행되었다.

많은 연구자들은 압축력 하에서 하중이 증가하면 AE 발생빈도가 점차 증가하는 것으로 보고하였다. Koerner et al.(1976)은 조립토에 대하여 삼축 전단시험을 실시하고 Fig. 1과 같이 AE 빈도는 축차응력의 증가뿐만 아니라 일정한 축차응력에서 구속압이 낮아질 때도 증가한다는 사실을 발견하였다. Dowding and Labuz(1982)은 화강암 시료에서 인장응력의 재하(loading) 및 제하(unloading)를 반복하는 시험을 통하여 동일한 결과를 확인하였다.

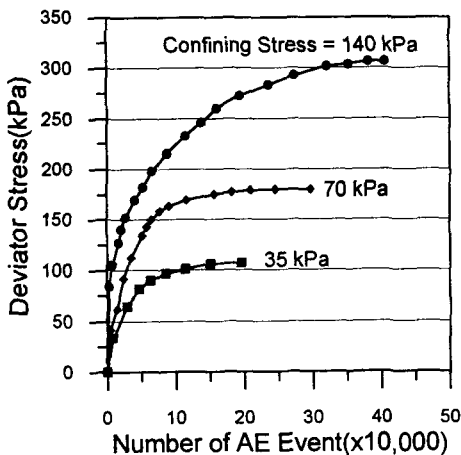


Fig. 1. AE rate and loading on granular soils(Koerner et al., 1976).

Suzuki et al.(1964)의 연구에 의하면 일축압축 상태 하에서 발생한 AE파의 주파수는 대부분 16~32kHz의 범위이었으며, Koerner et al.(1976)등에 따르면 조립토의 우세 주파수는 일축압축시험에서 0.5~2.0kHz이었고 삼축 전단시험에서 4~8kHz이었다. 또한 김교원(1996b)은 빔 형상의 화강암 시료에 대하여 4점 휨시험(four point bending test)을 실시하고 AE파의 우세 주파수의 범위가 200~350kHz이었다고 보고하였다. 이와 같은 다양한 결과로 미루어 볼 때 AE파의 우세 주파수는 시험 방법과 시료의 취성 및 탄성 등의 특성에 관계되는 것을 알 수 있다.

### 팽창성 시멘트

시험에 사용된 팽창성 시멘트는 녹색의 보통 시멘트와 유사한 무기질 성분에 특수 유기질 성분이 첨가된 상업명이 Bristar라는 일본 Onoda 시멘트 회사의 제품이다. 이 Bristar는 물과 혼합할 때 경화되면서 서서히 팽창하여 충전공 주변에 압력을 가하게 된다. 일반적으로 시멘트 계열 물질의 팽창력의 근원은 ettringite라는 물질의 형성에 기인하는 것으로 알려져 있으므로 Bristar의 팽창 거동도 이 물질의 형성 정도에 따라 결정되는 것으로 생각된다. 충전공 내에서의 팽창 압력이 증가하여 암석의 인장강도를 초과할 때 균열이 시작되며 팽창이 증가함에 따라 균열이 점진적으로 진행된다.

Onoda 시멘트 회사(1979)는 강도발현에 가장 적합한 Bristar-물의 배합비는 중량으로 10:3이라고 하였으며, 함수비 30%일 때 충전공의 직경에 따른 Bristar 팽창압의 변화를 Fig. 2와 같이 측정하였다. Dowding and Labuz(1982)는 두께가 서로 다른 중공관(center holed steel pipe) 내에 충전된 Bristar의 전형적인 팽창압의 시간에 따른 변화를 Fig. 3과 같이 측정하였다. 두꺼운 중공관 시험은 충전공 상하부를 구속한 상태에서 실시되었으며, 얇은 중공관 시험은 구속되지 않은 상태에서 수행되었다.

팽창성 시멘트에 의한 암석균열시의 AE 특성

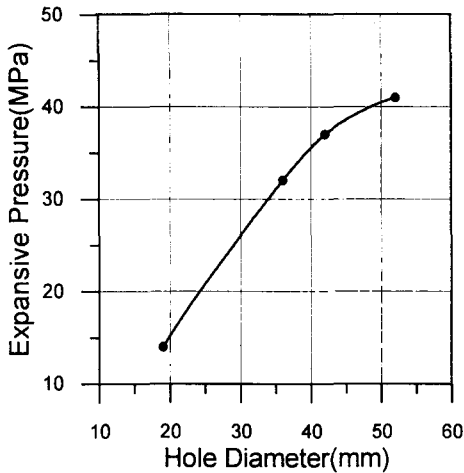


Fig. 2. Relationship between expansive pressure and hole diameter (Onoda cement co., 1979).

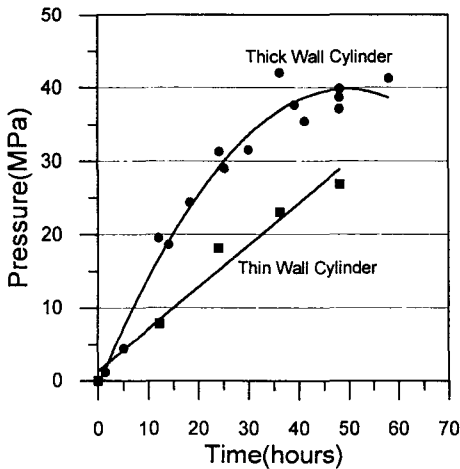


Fig. 3. Pressure development of expansive cement, Bristar, with time (Dowding and Labuz, 1982).

팽창압과 균열진행

Dowding and Labuz(1982)의 논문에 대한 토론에서 Ingraffea and Beech(1983)는 Fig. 4와 같이 시간에 따른 균열 길이와 압력과의 이상적인 관계를 제시하였다. 즉, 팽창압이 균열 발생 압력( $P_{co}$ )에 도달되어 일단 균열이 발생하면 구속압이 해방되고 충전공 내의 압력은 낮아진다(B). 균열이 다시 진행되기 위하여서는 충전공 내의 압력이 축적(C)되어

서 균열 선단부에서의 인장강도를 초과하여야 한다. 이러한 과정이 반복되면서 균열이 진행된다.

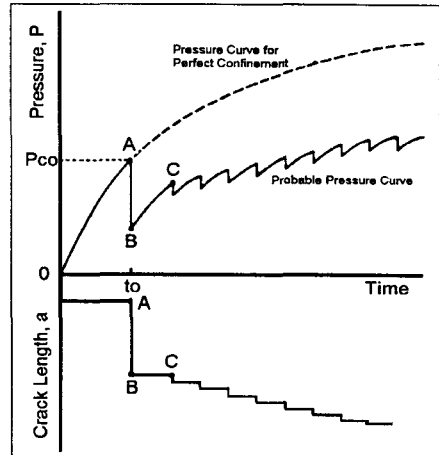


Fig. 4. Idealized pressure and crack length variations with time (Ingraffea and Beech, 1983).

실험 프로그램

암석시료

일리노이 리온의 Material Service Corporation의 채석장에서 생산된 대략  $60 \times 60 \times 60$ cm 크기의 석회암 암괴를 실험용 시료로 하였다. 이 암석은 층리면이 다소 발달되어 있으나 층리면의 결합력은 양호한 것으로 알려져 있다. 팽창성 시멘트를 충전하기 위하여 충격식 회전 착암기로 직경 19mm 및 32mm의 충전공을 층리면에 직각이 되도록 천공하였으며, 충전공에서 수신점인 탐촉자까지의 거리는 대략 45cm 정도로 하였다.

탐촉자 및 측정 장치

실험에 사용된 탐촉자는 입자속도 측정용 탐촉자인 2개의 Geo Space Co.의 Model GS-100과 입자변위 측정용 탐촉자인 1개의 Dunegan Co.의 Model S9208이었다. 탐촉자 S9208은 주파수 범위 100~1000kHz 범위에서 일정한 반응을 보이는 탐촉자로서, 김교원(1996a)에 따르면 이 탐촉자는 미국 국립표준국이 설계한 탐촉자 모델 IQI501과 Fig. 5에 보이듯이 거의 같은 반응을 보인다. 반면에 탐촉자 GS-100은 주파수 범위 125~2,500Hz에서 평

탄한 반응을 보이거나, 그 이상의 주파수 범위에 대하여서는 제조사의 제품 사양서 상에 언급이 없기 때문에, 이를 이용하여 고주파 특성을 가지는 AE를 측정하기 위하여서는 표준 탐촉자에 의한 보정이 필요하였다. Dowding and Kim(1986)이 보정한 바에 따르면 GS-100과 S9208 탐촉자는 평탄 반응 주파수 범위 이상의 주파수에서는 Figure 6과 같이 변화되는데, GS-100은 예민도가 -10dB/decade로 감소하는 반면 S9208은 -20dB/decade로 감소하였다. S9208 탐촉자의 반응을 GS-100과 같이 입자속도의 단위로 표시하면 예민비는 그림의 가늠 실선과 같이 표시된다.

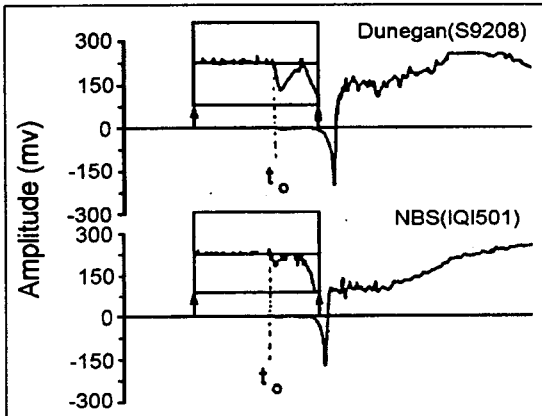


Fig. 5. Typical response of transducers for step unloading by capillary glass breaking (Kim, 1996a).

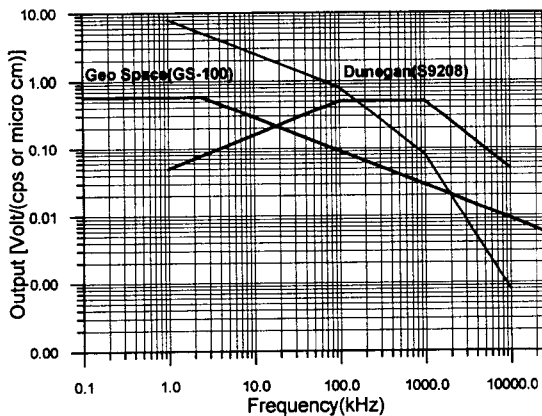


Fig. 6. Comparing of frequency response curves between transducers (Dowding and Kim, 1986).

탐촉자는 충전공에 직교되도록 예폭시로 표면을 평탄하게 정리한 후에 Fig. 7과 같이 부착하였으며, 실험에 사용된 AE 측정 장치는 LeCroy Co.의 제품으로 ①Module Housing(Model 8013A), ② Amplifier/Attenuator와 Trigger Generator(Model 6103), ③Transient Recorder(Model TR8837F) 및 ④CAMAC to GPIB Interface(Model 8901A)등으로 구성되었다.

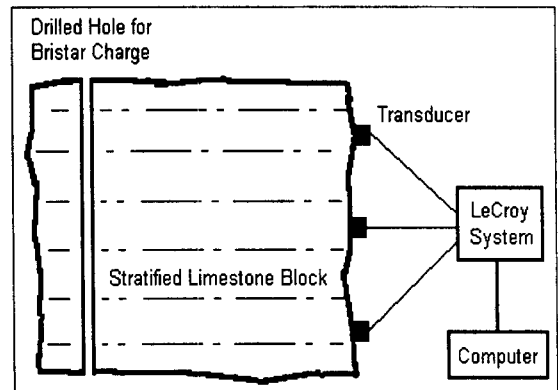


Fig. 7. Schematic section view of specimen and transducer setting.

### 시험준비 및 기간

충전공의 건조한 벽면이 Bristar-물의 배합물의 수분을 흡수하여 발생할 수 있는 충전재의 팽창성 저감을 방지하기 위하여 사전에 충전공을 물로 씻은 후에 혼합물을 충전하였다. AE 파는 일정 크기 이상의 진폭을 가질 때 자동으로 감지하여 격발 시점 전과 후의 파형이 컴퓨터에 저장되도록 사전에 조정하였다.

최초의 AE는 배합물을 충전한 후 2~4시간이 경과된 시점에서 기록되었으며 시험기간은 충전공 내의 발생 압력과 관계하여 소 직경(19mm) 충전공 시험에서는 약 145시간, 대 직경(32mm) 충전공에서는 약 50시간이 소요되었다.

### 결과 및 논의

시험결과 팽창성 시멘트의 충전공에서의 팽창압에 따른 석회암 파괴 시 발생된 AE파의 전형적인 파형은 Fig. 8과 같으며 시료 표면 등에서의 반사

팽창성 시멘트에 의한 암석균열시의 AE 특성

및 굴절에 의한 파형의 영향이 없는 것으로 판단되는 초동 파형만을 분석의 대상으로 하였다.

에너지량은 충전공의 규모와는 무관하게 거의 일정하다는 것을 암시하고 있다고 볼 수 있다.

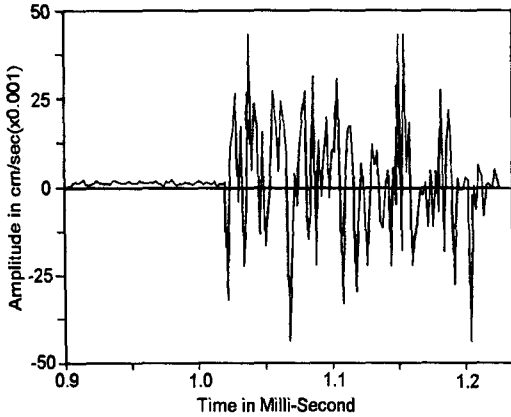


Fig. 8. Typical wave form of AE event.

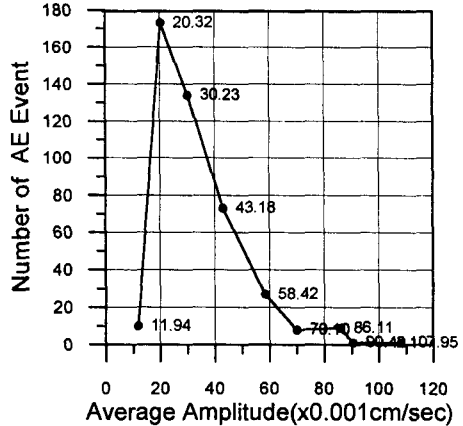


Fig. 9. Amplitude distribution with number of events for the small hole test.

측정된 AE파 중 초동 파형을 분석한 결과, 우세 주파수 및 진폭의 범위는 Table 1과 같이 요약되며, 소 직경 충전공 시험에서의 AE 파의 진폭은 Fig. 9와 같이 분포하였다. 표에서 보듯이 팽창압의 발달이 완만한 소 직경 충전공 시험(최초 균열 발생은 90시간 후)에서 발생한 AE파가 그 보다 팽창압의 발달이 상대적으로 빨랐던 대직경 충전공의 경우(최초 균열 발생은 15시간 후)보다 우세 주파수도 낮았고 진폭도 작았다. 이 결과로부터 충전공 내에서의 압력 발생 속도 즉 재하 속도가 AE파의 주파수와 진폭에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한, 우세 주파수가 상대적으로 낮은 소 충전공에서의 AE 진폭이 우세 주파수가 상대적으로 큰 대 충전공에서의 AE 진폭보다 적게 기록되었다. 이로 미루어 볼 때 정량적으로 평가하기는 어려우나 일정한 규모의 균열을 발생하는데 소모되는 총

AE 파의 진폭은 암석 균열 발생 시에 해방되는 탄성변형 에너지의 크기에 따라 증가하기 때문에 이들은 또한 균열 선단부의 강도 및 재하 속도와의 관련이 있다. Table 1에 정리한 바와 같이 대 직경 충전공 시험에서는 재하 속도가 소 직경 충전공 시험보다 빨랐으며 큰 진폭의 AE파가 발생하였으나 주파수가 높았다.

Fig. 10은 소 직경 충전공 시험에서 수신된 AE 파의 초동 진폭을 시간대별로 도식한 것이다. 이 그림에서 시료표면에 육안으로 관찰 가능한 균열이 발견된 시점에서 특별히 큰 진폭의 AE파가 없었던 점은 팽창압에 의한 암석 파괴시의 균열의 전파는 갑작스런 파괴(catastrophic failure)가 아니라 안정적으로 진행된다는 것을 암시하고 있다.

Table 1. Characteristics of AE wave generated by rock fracturing.

Test Hole Size	Dominant Frequency Range(kHz)	Dominant Amplitude (cm/sec)	Biggest Amplitude (cm/sec)	Approximate Cracking Time (hours)
Small (19 mm)	150 ~ 230	0.015~0.050	0.108	90
Large (32 mm)	400 ~ 500	0.025~0.064	0.085	15

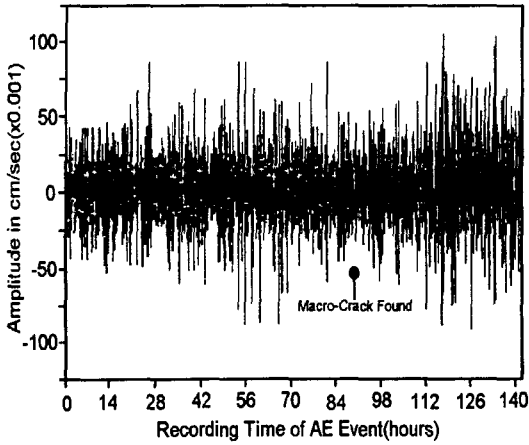


Fig. 10. Chronological distribution of peak amplitudes of AE events for the small hole test.

Fig. 11은 소 직경 충전공 시험의 시간별 AE 발생 개수의 누적치를 나타내는데, 이들의 관계는 거의 직선으로서 시간 경과에 따른 암석시료의 탄성 변형 에너지의 방출이 거의 일정함을 나타낸다. 이 결과는 전술한 Koerner et al.(1976)의 결과와는 상이한데 그 이유는 재하속도의 차이 때문인 것으로 판단된다. 즉, 팽창성 시멘트에 의한 재하 속도는 삼축 전단 시험시의 재하 속도에 비하여 매우 완만 하였으며, 이러한 완만한 재하 속도 하에서는 AE 발생빈도를 급격하게 증가시키는 급작스런 파괴를 예상하기는 어렵다.

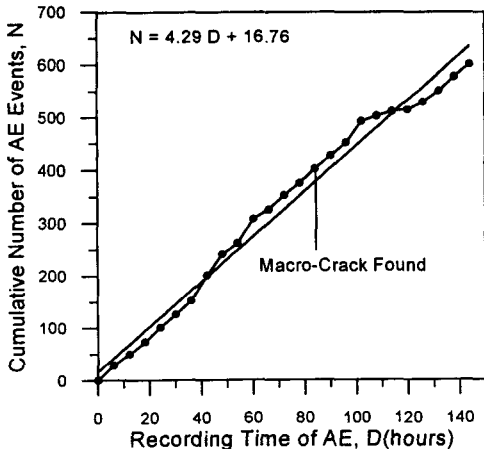


Fig. 11. Cumulative number of AE events for the small hole test.

## 결 론

팽창성 시멘트를 충전한 석회암 암괴가 인장 파괴될 때에 발생하는 AE파를 분석한 결과에 근거하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) AE파의 우세 주파수와 진폭은 소 직경 충전공 시험에서 150~230kHz 및 0.020~0.046cm/sec, 대 직경 충전공 시험에서 400~500kHz 및 0.025~0.064cm/sec를 보여서, 이들이 팽창압의 발생속도(재하속도)에 영향을 받고 있음이 확인되었다.

2) 충전공의 크기에 따라 각기 높은 주파수의 큰 진폭과 낮은 주파수의 작은 진폭의 AE파가 수신된다는 사실은 동일 시료에서 일정한 규모의 균열을 발생시키는데 소모되는 총 에너지는 대체로 동일함을 강하게 시사하고 있다.

3) 팽창성 시멘트의 완만한 팽창압의 증가에 의한 석회암의 인장 파괴는 특별히 큰 규모의 AE 발생없이 진행되어서 파괴면을 이루는 큰 균열(macro-crack)이 개개 AE의 발생의 원인인 미소 균열(micro-crack)의 지속적인 성장의 결과임을 알 수 있었다.

금후의 연구 과제로 시험 중 팽창성 시멘트의 팽창압의 발달과정을 측정하는 경우 균열의 진행에 따른 팽창압의 변화가 규명될 수 있을 것이며, 팽창압이 급격히 저하되는 순간의 AE의 진폭 등과의 대비가 가능할 것이라 생각된다.

## 참 고 문 헌

- 김교원, 1996a, AE 측정을 위한 탐촉자의 보정에 대한 고찰, 대한지질공학회지, 제6권 2호, 53-58.
- 김교원, 1996b, 암석파괴시 발생하는 미세균열의 발생원에 대한 연구, 대한지질공학회지, 제6권 2호, 59-64.
- Dowding, C. H. and G.W. Kim, 1986, Micro-Seismic Motions from Expansive Agent Induced Rock Fracturing, Final Report for U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, App.8-12.
- Dowding, C. H. and J. E. Labuz, 1982, Fracturing

팽창성 시멘트에 의한 암석균열시의 AE 특성

- of Rock with Expansive Cement, ASCE, GTE, vol. 108, no. GT10, 1288-1299.
- Hardy, H. R. Jr., 1977, Emergence of Acoustic Emission/Microseismic Activity as a Tool in Geomechanics, Proc. of 1st Conf. on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Material, 13-31.
- Ingraffea, A. R. and J. F. Beech, 1983, Discussion on Fracturing of Rock with Expansive Cement, ASCE, GTE, vol. 109, 1205-1209.
- Koerner, R. M., A. E. Lord, W. M. McCabe, and J. W. Curran, 1976, Acoustic Emission Behavior of Granular Soils, ASCE, GTE, vol. 102, GT7, 761-773.
- Onoda Cement Company, 1979, Demolition Agent -Bristar, Technical Note, Okayama, Japan.
- Suzuki, t., K. Sasaki, and T. Hirota, 1964, A New Approach to the Prediction of Failure by Rock Noise, Proc. 4th Int. Conf. on Strata Control and Rock Mechanics, New York, 1-9.
- 

김교원

702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

경북대학교 자연과학대학 지질학과

TEL : 053)950-5357 HP) 011-525-5357

FAX : 053)950-6344

e-mail : GeoDoc@chollian dacom.co.kr.