

# AE와 DRA를 이용한 초기응력의 측정에 관한 연구

## In-situ Stress Measurement Using AE and DRA



박배한\*  
Park, Pae-Han



전석원\*  
Jeon, Seok-Won



김양균\*  
Kim, Yang-Kyun

### Abstract

In-situ stress measurement using AE (Acoustic Emission) and DRA (Deformation Rate Analysis) is usually carried out under uniaxial loading in the laboratory and it consumes delay time from drilling to testing. Therefore, it should be considered how the lateral stress and delay time influence on the test results for the in-situ stress determination. As the delay time increased, the accuracy of estimating the pre-stress decreased. The pre-stress of the specimen loaded only axially was determined within an error of less than 9% (using AE) and 4% (using DRA). And the specimen on which axial pre-stress and the confining pressure were loaded had an error of less than 17% (using AE) and 14% (using DRA). The results of AE and DRA for field specimens were very similar with each other but smaller than those of hydraulic fracturing method.

**Keywords:** AE, DRA, In-situ stress, Pre-stress, Cyclic loading, Delay time, Strain difference function

### 요지

AE와 DRA를 이용한 초기응력 측정법은 실험실 시험을 통해 초기응력을 측정하는 방법 중의 하나이다. 이 방법은 시추와 실험실 시험간에 지연시간이 발생하며 시료에 축방향 반복하중을 가하여 초기응력을 결정하기 때문에 지하 암반의 응력 상태와는 다른 결과를 얻을 수도 있다. 이 연구에서는 지연시간을 다르게 하여 지연시간이 선행응력 결정에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고 축방향 선

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부

\*2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수

\*3 코오롱건설기술연구소

행응력만을 가한 시료와 축방향 선행응력과 봉압을 모두 가한 시료에 대해 AE와 DRA를 이용하여 선행응력을 결정하여 봉압이 축방향 선행응력 결정에 미치는 영향을 살펴보았다. 지연시간이 길어질수록 오차가 약간씩 증가하는 경향이 나타났으나 지연시간이 1개월 인 시료라 할지라도 AE와 DRA를 이용한 경우 각각 16%와 12%의 오차범위 내에서 선행응력을 결정할 수 있었다. 축방향 선행응력만을 가한 경우 AE를 이용하면 9%, DRA를 이용하면 4%의 오차범위 내에서 축방향 선행응력을 결정할 수 있었으나 축방향 선행응력과 봉압을 모두 가한 경우는 각각 17%와 14%의 오차범위 내에서 축방향 선행응력을 결정할 수 있었다. 터널현장에서 시추한 코어를 이용하여 초기응력을 측정할 결과 AE와 DRA는 유사한 결과를 나타내었으나 수압파쇄법에 의한 결과보다는 작은 값을 갖는 것으로 나타났다.

**주요어:** AE, DRA, 초기응력, 선행응력, 반복하중, 지연시간, 변형률차함수

## 1. 서론

지하 구조물의 안정성에 영향을 미치는 응력집중도는 구조물 주변에 작용하는 초기응력의 크기와 구조물의 형상 등에 따라 달라지기 때문에 지하 구조물을 설계하거나 안정성을 평가할 때 초기응력은 중요한 변수로 작용한다. 암반의 초기응력을 측정하는 방법에는 현장에서 초기응력을 측정하는 응력보상법(jacking method), 응력해방법(stress relief method), 수압파쇄법(hydraulic fracturing method) 등이 있으며, 암석 코어를 이용하여 실험실 시험으로 초기응력을 측정하는 방법으로 AE (Acoustic Emission), DRA (Deformation Rate Analysis), DSCA (Differential Strain Curve Analysis), ASR (Anelastic Strain Recovery) 등을 이용한 방법들이 있다(Amadei and Stephansson, 1997).

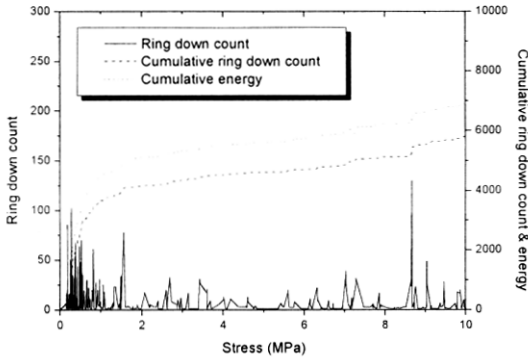
AE를 이용한 초기응력 측정법은 카이저 효과를 이용하는 방법으로 암석 시료에 축방향 하중을 가하여 AE가 급증하는 곳을 찾아 초기응력을 결정하는 방법이며 DRA는 축방향 변형률과 응력과의 관계를 나타내는 변형률차함수(strain difference function)를 이용하여 초기응력을 결정하는 방법이다(Kaiser, 1950; Yamamoto et al., 1990; Utagawa et al., 1997; Seto et al., 1998; Seto et al., 1999). AE와 DRA를 이용하여 초기응력을 측정할 경우 시추와 실험실 시험 사이에 지연시간이 발생하며 시료에 축방향 반복하중을 가하여 초기응력을 결정하기 때

문에 지하 암반의 응력상태와는 다른 결과를 얻을 수도 있다. 따라서 이 연구에서는 선행응력을 가한 후 지연시간을 1 시간, 1 일, 1 주일, 1 개월로 다르게 하여 지연시간이 선행응력 결정에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 수직응력 결정에 미치는 수평응력의 영향을 살펴보기 위하여 축방향 선행응력만을 가한 시료와 축방향 선행응력과 봉압을 모두 가한 시료에 대해 축방향 선행응력을 결정하였다. 마지막으로 터널현장에서 시추한 코어를 이용하여 초기응력을 결정하여 수압파쇄법에 의해 결정한 값과 비교하여 AE와 DRA를 이용한 초기응력 측정법의 현장적용가능성을 살펴보았다.

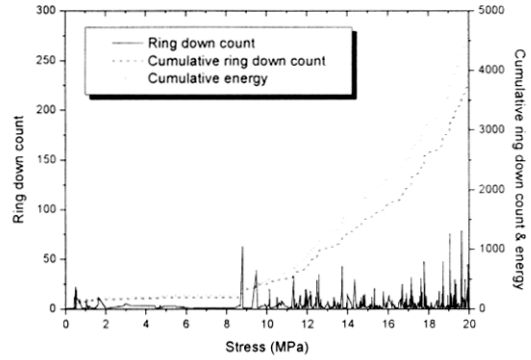
## 2. AE와 DRA를 이용한 초기응력 측정법

### 2.1 카이저 효과와 초기응력의 측정

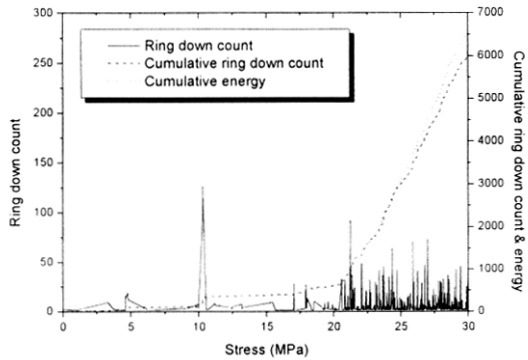
Kaiser(1950)는 금속재료의 인장시험으로부터 재료 내부에서 AE가 발생하는 현상을 발견하였으며 구성입자 경계의 미끄러짐이 AE의 음원이라고 생각하였다. 그는 또한 이전에 작용했던 최대응력을 초과할 때까지는 새로운 AE가 발생하지 않는다는 사실에 주목하였는데 이것을 카이저 효과(Kaiser effect)라고 한다. 재료가 어느 크기 이상의 응력을 받으면 미세균열들이 성장하여 작용한 응력과 평형상태에 도달하고 이 응력은 미세균열 형성을



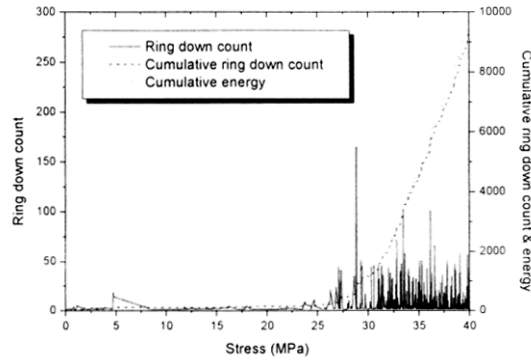
(a) 10 MPa까지 가압



(b) 20 MPa까지 가압



(c) 30 MPa까지 가압



(d) 40 MPa까지 가압

그림 1. 카이저 효과의 검증

통하여 재료에 기억된다. 만일 이전에 작용한 응력을 초과하면 AE가 다시 발생하게 된다. 재료에 부과된 응력이 이전에 작용한 응력을 초과할 때까지 AE는 감지되지 않는다는 것이다.

암석에도 카이저 효과가 있다는 사실이 Goodman(1963)에 의해 확인되었고 일본 전력중앙연구소의 金川忠 등(1977)은 이것을 초기응력 측정법으로 이용할 것을 최초로 제안하였다. 암석 시료에 일정한 속도로 압축하중을 가하면서 AE 신호를 측정하면 AE 신호가 급격하게 증가하는 지점이 발생하게 되는데 그 곳에서의 응력이 암석에 작용하였던 초기응력을 의미한다.

그림 1은 황등화강암 시료를 사용하여 카이저 효과를 검증한 것으로 (a)는 시료에 선행하중을 가하지 않고 일정한 속도로 10 MPa까지 가압한 결과이며 (b)는 10 MPa까지 가압했던 시료를 다시 20 MPa까지 가압하여 나타난 AE 발생양상을 나타낸 것이다. 선행응력에 해당하는 10 MPa 부근에서 링다운 카운트와 에너지의 발생량이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 (c)는 20 MPa까지 가압했던 시료를 다시 30 MPa까지 가압한 것이며 (d)는 이것을 다시 40 MPa까지 가압한 것이다. 각각의 선행응력에 해당하는 20 MPa과 30 MPa에서 AE의 발생량이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

## 2.2 변형률차함수(strain difference function)와 초기응력의 측정

DRA는 시료에 두 번 이상의 반복하중을 가한 후 얻은 축방향 변형률과 응력과의 관계를 나타내는 변형률차함수를 이용하여 암반의 초기응력을 측정하는 방법이다. 변형률차함수는 식(1)과 같이 정의된다(Yamamoto et al., 1990).

$$\Delta \varepsilon_{j,i} = \varepsilon_j(\sigma) - \varepsilon_i(\sigma); j > i \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 작용한 축방향 응력이고  $\varepsilon_i(\sigma)$ 는  $i$  번째 가압시의 축방향 변형률이다. 식(1)에 의한 변형률차함수 ( $\Delta \varepsilon_{j,i}$ )는 그림 2와 같이 변곡점을 갖게 되는데 이 변곡점에서의 응력이 암반에 작용한 초기응력을 나타낸다(Yamamoto et al., 1990; Kojima et al., 1994). 이전에 작용한 최대응력 전까지 변형률차함수는 거의 직선이며 이전의 최대응력 부근에서 기울기가 급격하게 변하게 된다. 이전에 작용한 최대응력 보다 더 큰 응력에서의 음의 기울기는 암석 시료가 연속되는 2회의 가압시 두 번째 가압에서 보다 첫 번째 가압에서 변형하기가 더 쉽다는 것을 의미한다. 큰 응력이 처음으로 작용할 때 시료는 기존

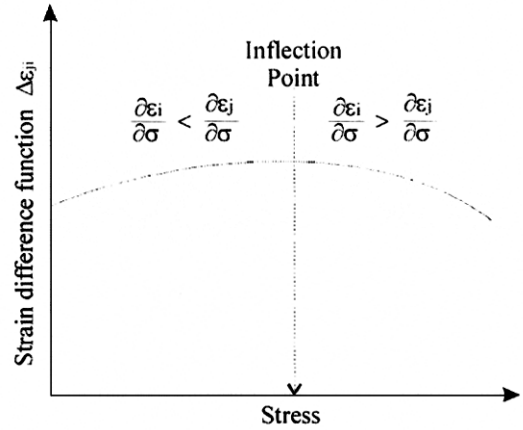


그림 2. 변형률차함수의 그래프

의 균열을 확장하거나 새로운 균열을 생성한다. 반면에 양의 기울기는 첫 번째 가압보다 두 번째 가압시에 시료가 작용한 응력에 더 순응적이라는 것을 의미한다.

변형률의 탄성적 요소들은 식(1)의 과정 즉  $j$  번째 가압시의 변형률에서  $i$  번째 가압시의 변형률을 빼는 과정을 통해서 제거된다. 암석 시료에 작용한 축방향 응력이 임의의 응력 수준을 초과하게 되면 기존의 균열을 확장하거나 새로운 균열을 생성한다. 카이저 효과가 의미하는 것을 고려해 볼 때 이것은 특히 작용한 응력이 이전 응력의 최대값을 초과했을 때 발생해야 한다. 이것으로부터 기인

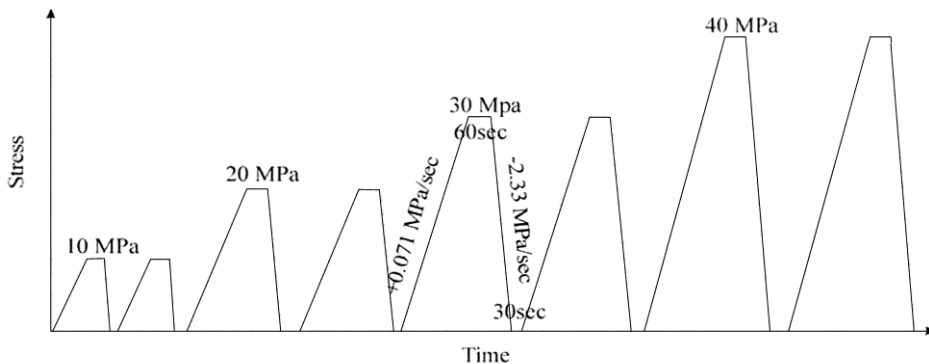
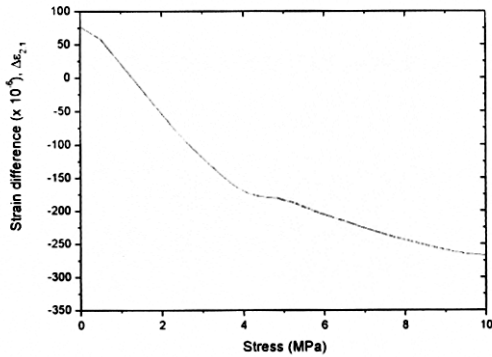
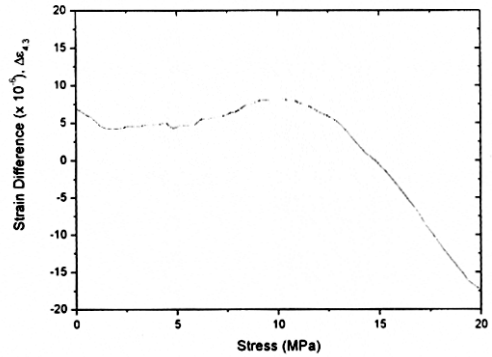


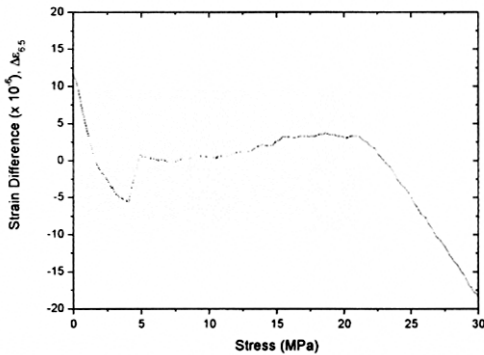
그림 3. DRA를 위한 반복하중 패턴



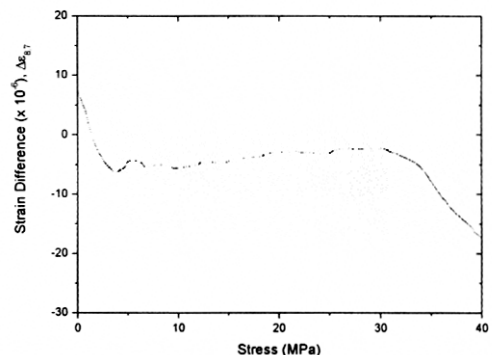
(a) 변형률차 함수  $\Delta\epsilon_{2,1}$



(b) 변형률차 함수  $\Delta\epsilon_{4,3}$



(c) 변형률차 함수  $\Delta\epsilon_{6,5}$



(d) 변형률차 함수  $\Delta\epsilon_{8,7}$

그림 4. DRA를 이용한 선행응력의 결정

한 변형률은 2회의 연속적인 가압에 대해서 비탄성적이며 식(1)로 정의된 변형률차함수에서 제거되지 않는다. 이상의 결론으로부터 변형률차함수가 탄성적 요소를 제거함으로써 측정된 변형률의 비탄성적 요소를 강조하는 장점을 갖는다는 것을 알 수 있다.

그림 3과 같은 방법으로 시료에 반복하중을 가하여 얻은 축방향 변형률을 그림 4와 같은 변형률차함수의 그래프로 나타내었다. 그림 4(b)는 전 단계에서 10 MPa까지 2회의 반복하중을 가했기 때문에 선행응력은 10 MPa이다. 따라서 선행응력에 해당하는 10 MPa 부근에서 변형률차함수 그래프의 기울기가 변하는 것을 확인할 수 있

다. 마찬가지로 각각의 선행응력에 해당하는 20 MPa과 30 MPa에서 변형률차함수 그래프의 기울기가 변하는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1 시료의 특성

전라북도 황등 지역에서 산출되는 중·세립질의 황등 화강암을 대상으로 실험을 실시하였다. 황등화강암은 석

표 1. 황등화강암의 특성

Bulk specific gravity	2.66
Effective porosity (%)	0.63
P-wave velocity (m/sec)	3,700
S-wave velocity (m/sec)	2,650
Uniaxial compressive strength (MPa)	169
Brazilian tensile strength (MPa)	8
Young's modulus (GPa)	45.5
Poisson's ratio	0.27

영, 미사장석, 장석, 흑운모 등으로 이루어진 중생대 쥐라기의 흑운모 화강암이다. 황등화강암 블록을 코어링하여 길이가 직경(54 mm)의 두 배 이상이 되도록 성형한 후 SHIMADZU사의 UDH-200AR과 OYO사의 Sonic Viewer 170 등을 사용하여 단축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비, 탄성과 속도, 비중, 유효 공극률 등을 결정하였으며 그 결과를 표 1에 나타내었다. 각 물성값은 5회 측정값의 평균값으로 결정하였다.

### 3.2 압축시험 장치 및 자료획득 장치

SHIMADZU사의 UDH-200AR을 사용하여 하중을 가하였다. UDH-200AR은 최대 200톤까지 하중을 가할 수 있으며 하중제어(constant load speed)가 가능한 만능재료시험기이다. 축방향 변형률 측정을 위해 Tokyo Sokki Kenkyujo사의 스트레인 게이지와 Measurement

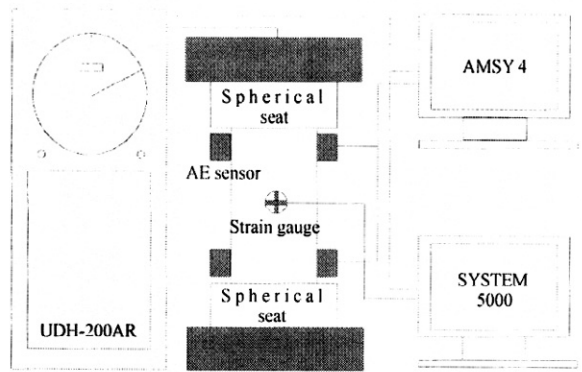


그림 5. 초기응력 측정 시스템의 개요

Group사의 System 5000을 사용하였다. System 5000은 만능재료시험기에서 들어오는 하중과 스트레인 게이지에서 들어오는 신호를 받아들여 처리한다.

### 3.3 AE 측정 장치

독일 Vallen-Systeme사의 AMSY 4를 사용하여 AE 신호를 측정하였다. AMSY 4는 36채널까지 확장 가능한 다채널 AE 시스템으로 각 채널의 측정회로는 AE 센서, 전치증폭기와 시스템 케이스에 내장된 ASIPP (Acoustic Signal Preprocessor) 등으로 구성되어 있다. Vallen-Systeme사의 SE 150-M 공진형 센서를 사용하였으며 검출한계(threshold)는 34 dB로 설정하여 그 이상 되는 신호만을 측정하였다. 전치증폭기와 시그널컨디셔너에

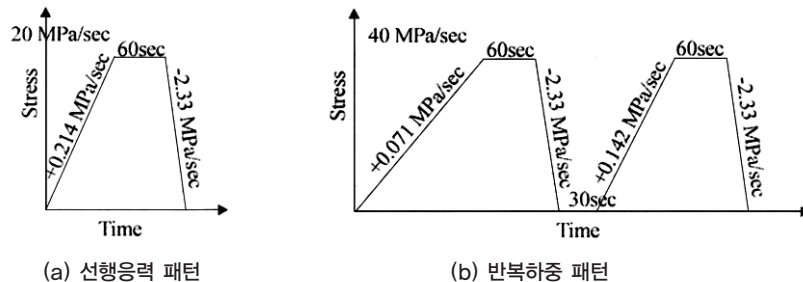


그림 6. 가압 패턴

서 각각 40 dB 씩 증폭시켰다. 그림 5에 초기응력 측정을 위한 실험장치를 개략적으로 나타내었다. 이 연구에서는 잡음을 효과적으로 제거하기 위해 2차원 음원추적의 원리를 이용하여 측정영역을 제한함으로써 특정한 부분에서 발생하는 AE 신호만을 측정하였다. 그리고 시료와 구면좌 사이에 폴리에틸렌 필름을 끼워서 유압원에서 발생하는 기계적 잡음을 제거하였으며 이른 아침과 저녁에 실험을 실시하여 환경적 잡음을 최소화하였다.

### 3.4 실험 절차

지연시간이 선행응력 결정에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 6(a)와 같이 0.214 MPa/sec의 속도로 20 MPa까지 응력을 가한 후 60초 동안 유지하였다가 2.33 MPa/sec의 속도로 하중을 제거하였다. 다시 30초 후에 같은 속도로 하중을 가하였으며 이와 같은 과정을 10회 반복하였다. 선행응력을 가한 다음 1시간, 1일, 1주일, 1개월 후에 40 MPa까지 그림 6(b)와 같은 방법으로 5회의 반복하중을 가하여 AE와 DRA를 이용하여 선행응력을 결정하였다.

수평응력이 수직응력 결정에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 15 MPa의 축방향 선행응력만을 가한 시료와 15

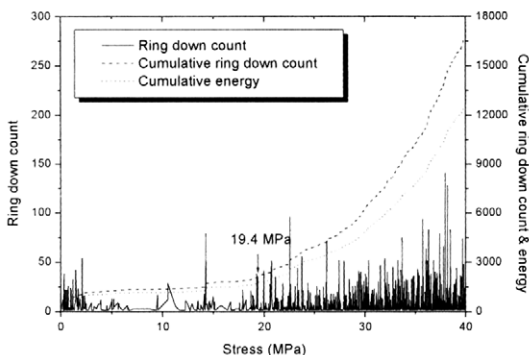
MPa의 축방향 선행응력과 30 MPa의 봉압을 모두 가한 시료에 다시 40 MPa까지 축방향 반복하중을 가하여 AE와 DRA를 이용하여 축방향 선행응력을 결정하였다. 그림 6(b)와 같은 방법으로 반복하중을 가하였다.

AE와 DRA를 이용하여 결정한 초기응력과 수압파쇄법에 의해 측정된 결과를 비교하기 위하여 A 터널과 B 터널에서 시추한 코어를 이용하여 초기응력을 측정하였다. 시추한 코어를 길이가 직경의 2배 이상이 되게 성형한 다음 그림 6(b)와 같은 방법으로 각각 5회의 반복하중을 가하였다. A 터널에서 얻은 시료는 직경 47 mm의 화강암으로 심도는 120.4~172.6 m이며 시추 6개월 후에 실험을 실시하였다. B 터널에서 얻은 시료는 105.7~124.7 m에서 시추한 것으로 직경 47 mm의 천매암(phyllite)이며 시추 5개월 후에 실험을 실시하였다.

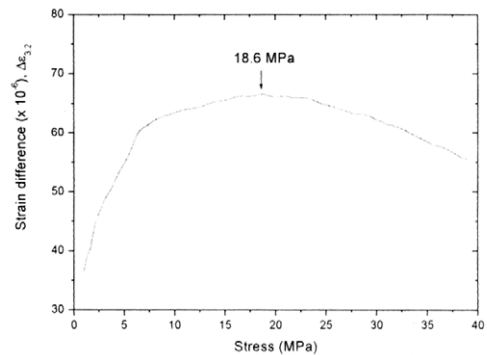
## 4. 실험 결과

### 4.1 지연시간이 선행응력 결정에 미치는 영향

지연시간이 선행응력 결정에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 20 MPa의 선행응력을 가한 다음 1시간, 1일, 1주

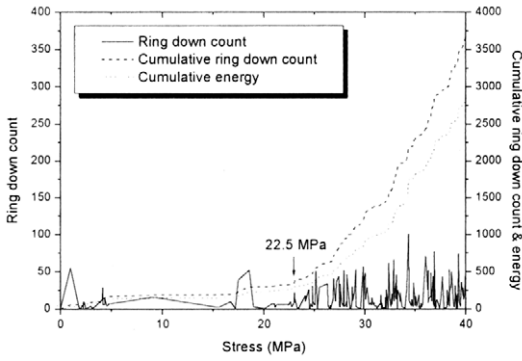


(a) AE

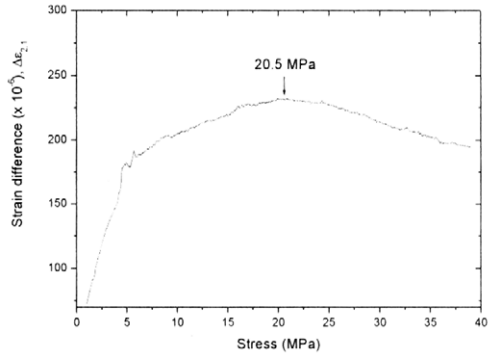


(b) DRA

그림 7. 선행응력의 결정(지연시간: 1시간, G-31)

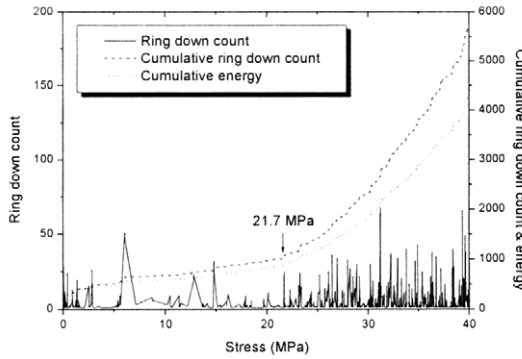


(a) AE



(b) DRA

그림 8. 선행응력의 결정(지연시간: 1일, G-49)



(a) AE

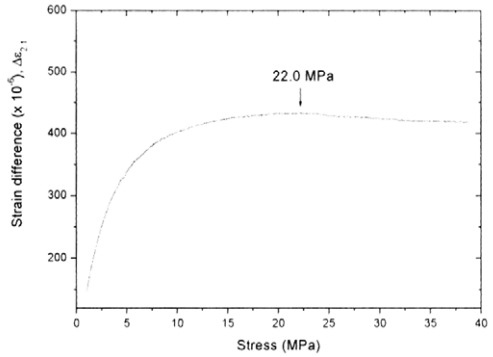
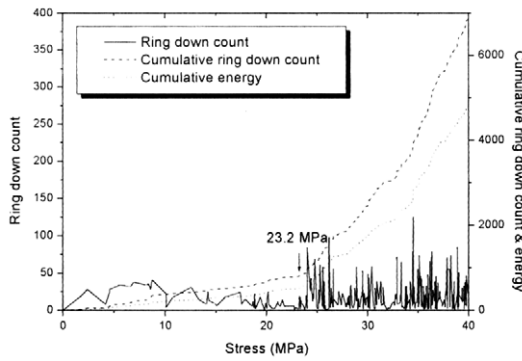
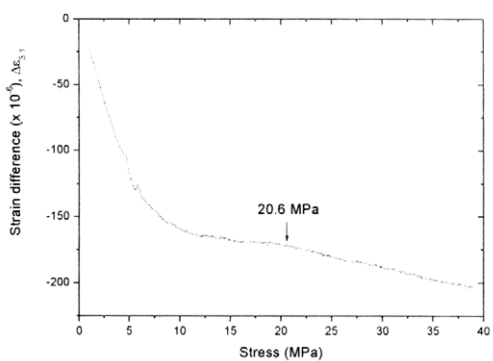


그림 9. 선행응력의 결정(지연시간: 1주일, G-45)



(a) AE



(b) DRA

그림 10. 선행응력의 결정(지연시간: 1개월, G-39)



일, 1개월 후에 반복하중을 가하여 선행응력을 결정하였다. 그림 7부터 그림 10은 지연시간이 각각 1시간, 1일, 1주일, 1개월인 시료에 대해 AE와 DRA를 이용하여 선행응력을 결정하는 모습을 나타낸 것이다. 그림 7은 지연시간이 1시간인 시료에 대한 결과를 나타낸 것으로 (a)에서는 19.4 MPa에서 링다운 카운트와 에너지가 급격하게 증가하고 (b)에서는 18.6 MPa에서 변형률차함수 그래프의 기울기가 양에서 음으로 변하는 것을 볼 수 있다. 그림 11에서 알 수 있듯이 지연시간이 길어짐에 따라 오차가

약간씩 증가하는 경향이 나타났으나 지연시간이 1개월인 시료의 경우라 할지라도 AE를 이용할 경우  $9.50 \pm 6.00\%$ , DRA를 이용할 경우  $6.70 \pm 5.08\%$ 의 오차범위 내에서 선행응력을 결정할 수 있었다. 지연시간은 선행응력을 결정하는데 큰 영향을 주지 않으며 심지어 2년이 경과한 시료라 할지라도  $\pm 10\%$ 의 오차범위 내에서 선행응력을 결정할 수 있다는 연구결과들(Seto et al., 1996; Seto et al., 1997; Seto et al., 1998; Seto et al., 1999)을 살펴볼 때 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

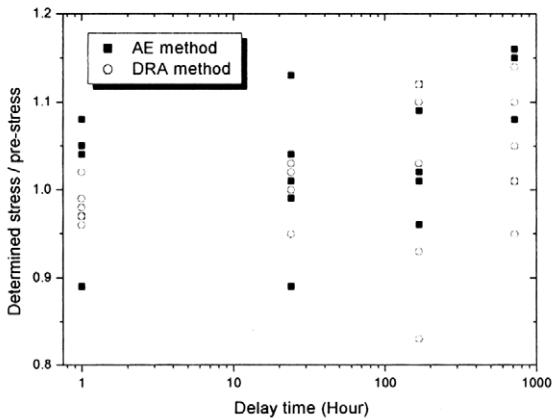
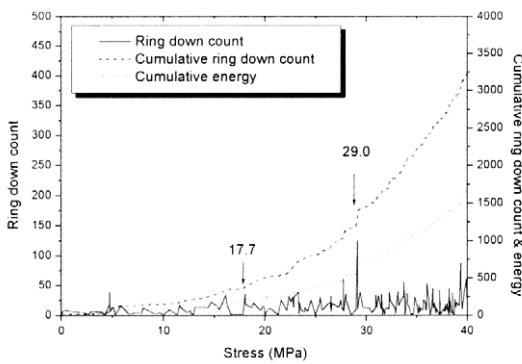


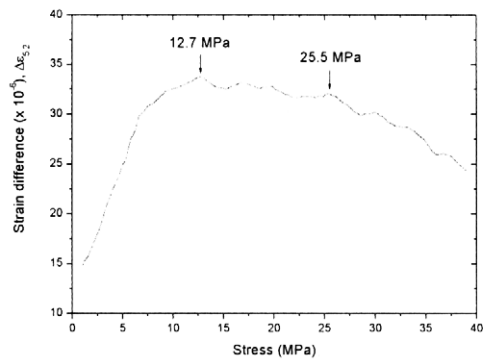
그림 11. AE와 DRA를 이용하여 결정한 선행응력과 지연시간의 관계

#### 4.2 봉압이 선행응력 결정에 미치는 영향

수평응력이 수직응력 결정에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 15 MPa의 축방향 선행응력만을 가한 시료와 15 MPa의 축방향 선행응력과 30 MPa의 봉압을 모두 가한 시료에 다시 축방향 반복하중을 가하여 AE와 DRA를 이용하여 축방향 선행응력을 결정하였다. 선행응력은 10회씩 가했으며 반복하중을 가하는 패턴은 그림 6(b)와 같다. 그림 12는 AE와 DRA를 이용하여 축방향 선행응력과 봉압을 결정하는 모습을 나타낸 것이며 이렇게 결정한 5개의 시료에 대한 결과를 표 2에 정리하였다. 축방향 선행응력만을 가한 경우 AE를 이용하면  $5.78 \pm 2.89\%$ , DRA



(a) AE



(b) DRA

그림 12. 축방향 선행응력과 봉압의 결정 (T-03)

표 2. AE와 DRA를 이용하여 결정한 축방향 선형응력과 봉압(축방향 선형응력: 15 MPa, 봉압: 30 MPa)

Result (MPa)	AE		DRA	
	Axial	Confining	AE	Confining
Mean	16.0	28.8	14.1	28.4
S. D.	1.57	1.95	1.18	2.10

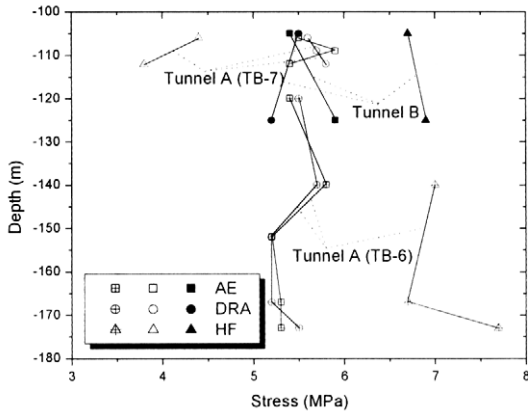


그림 13. AE, DRA 및 수압파쇄법에 의해 측정된 초기응력

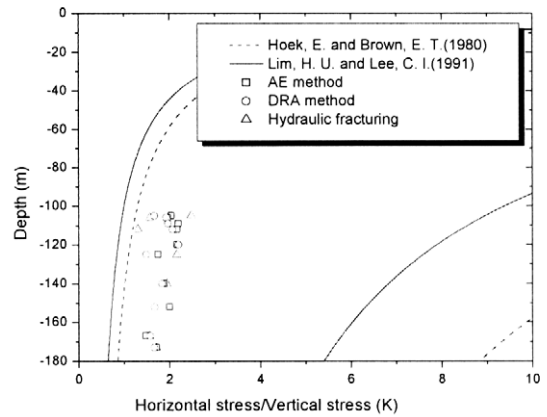


그림 14. 심도에 따른 축압계수(K)의 변화

를 이용하면  $2.60 \pm 1.29\%$ 의 오차범위 내에서 축방향 선형응력을 결정할 수 있었으며 축방향 선형응력과 봉압을 모두 가한 경우 AE를 이용하면  $9.33 \pm 7.79\%$ , DRA를 이용하면  $6.40 \pm 7.31\%$ 의 오차범위 내에서 축방향 선형응력을 결정할 수 있었다. 그러나 횡방향 응력이 축방향 응력 결정에 영향을 주지 않는다는 연구결과(Seto et al., 1996; Utagawa et al., 1997)가 발표된 바 있기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다. 축방향 선형응력 뿐만 아니라 봉압의 크기도 AE를 이용할 경우  $4.67 \pm 5.92\%$ , DRA를 이용할 경우  $6.33 \pm 5.86\%$ 의 오차범위 내에서 결정할 수 있었다.

### 4.3 현장시료를 이용한 초기응력의 측정

AE와 DRA를 이용한 초기응력 측정법의 현장 적용성을 살펴보기 위하여 터널 현장에서 시추한 코어를 이용한

여 초기응력을 결정하였으며 그 결과를 그림 13에 나타내었다. 터널 현장에서 시추한 코어를 사용하여 초기응력을 측정된 결과 AE와 DRA는 매우 유사한 결과를 나타내었으나 수압파쇄법에 의한 결과보다는 대체로 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 수평방향 최대주응력의 경우 AE를 이용한 경우가 수압파쇄법에 의한 결과보다 A 터널의 경우 약 8%, B 터널의 경우 약 17% 작게 평가되었다. 그림 14는 두 터널현장의 초기응력을 Hoek(1980) 등이 제시한 식, Lim(1991) 등이 제시한 식과 비교한 것이다. 두 터널현장의 K값은 모두 1.3에서 2.5 사이의 값을 갖는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 지연시간이 선행응력 결정에 미치는 영향을 살펴본 결과 지연시간이 길어짐에 따라 오차가 약간씩 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 지연시간이 1개월인 시료의 경우라 할지라도 AE를 이용할 경우  $9.50 \pm 6.00\%$ , DRA를 이용할 경우  $6.70 \pm 5.08\%$ 의 오차범위 내에서 선행응력을 결정할 수 있었다.
- 2) 축방향 선행응력만을 가한 경우 AE를 이용하면  $5.78 \pm 2.89\%$ , DRA를 이용하면  $2.60 \pm 1.29\%$ 의 오차범위 내에서 축방향 선행응력을 결정할 수 있었으며 축방향 선행응력과 봉압을 모두 가한 경우 AE를 이용하면  $9.33 \pm 7.79\%$ , DRA를 이용하면  $6.40 \pm 7.31\%$ 의 오차범위 내에서 축방향 선행응력을 결정할 수 있었다. 축방향 선행응력 뿐만 아니라 봉압의 크기도 AE를 이용할 경우  $4.67 \pm 5.92\%$ , DRA를 이용할 경우  $6.33 \pm 5.86\%$ 의 오차범위 내에서 결정할 수 있었다.
- 3) 터널 현장에서 시추한 코어를 사용하여 AE와 DRA를 통해 초기응력을 측정된 결과 AE와 DRA는 매우 유사한 결과는 나타내었으나 수압파쇄법에 의한 결과보다는 대체로 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 수평방향 최대주응력의 경우 AE를 이용한 경우가 수압파쇄법에 의한 결과보다 A 터널의 경우 약 8%, B 터널의 경우 약 17% 작게 평가되었다.

### 참고 문헌

1. 金川忠, 林正夫, 仲佐博 (1977), "岩石における地壓成分の Acoustic Emission による推定の試み", 土木學會論文報告集, 第258, pp. 63-75.
2. Amadei, B. and Stephansson, O. (1997), Rock stress and its measurement, Chapman & Hall, London, pp. 289-302.
3. Goodman, R. E. (1963), "Subaudible noise during compression of rocks", Geological Society of America Bulletin, Vol. 74, pp. 489-490.
4. Hoek, E. and Brown, E. T. (1980), Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 87-127.
5. Kaiser, J. (1950), "An Investigation into the Occurrence of Noises in Tensile Tests or a Study of Acoustic Phenomena in Tensile Tests", Ph. D. thesis, Tech. Hosch. Munchen, Munich, Germany.
6. Kojima, T., Nishiyama, T. and Matsuki, K. (1994), "A Fundamental Study of Three-dimensional In-situ Stress Measurement by Deformation Rate Analysis (DRA)", 資源と素材, Vol. 110, pp. 143-148.
7. Lim, H. U. and Lee, C. I. (1991), "The Trends and Variations of Natural Stressed in Rock Masses with Depth", J. of Korean Society for Rock Mech., Vol. 1, pp. 91-101.
8. Seto, M., Nag, D. K. and Vutukuri, V. S. (1996), "Experimental verification of the Kaiser effect in rock under different environment conditions", Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering(Eurock '96), ISRM, Torino, Vol. 1, pp. 395-402.
9. Seto, M., Nag, D. K. and Vutukuri, V. S. (1999), "In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 17, pp. 1-26.
10. 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, Seoul, Vol. 2, pp. 691-696.
11. 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., Vol. 35, 4-5, Paper No. 102.
12. Utagawa, M., Seto, M. and Katsuyama, K. (1997a), "Determination of in-situ stress using DRA and AE techniques", Environmental and Safety Concerns in Underground Construction, Seoul, Vol. 2, pp. 745-750.
13. Utagawa, M., Seto, M. and Katsuyama, K. (1997b),

"Estimation of initial stress by Deformation Rate Analysis (DRA)", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 34, 3-4, Paper No. 317.

14. Yamamoto, K., Kuwahara, Y., Kato, N. and Hirasawa, T. (1990), "Deformation rate analysis: a new method for in-situ stress examination from inelastic deformation of rock samples under uni-axial compressions", *Tohoku Geophys. J.*, Vol. 33, pp. 127-147.