

터널 변상부 주변 진행성 예측에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Prediction of Progressive Cracking around Tunnel Fallout

이준석[†] · 사공명* · 안성권* · 유상건** · 송석준***

Jun S. Lee · Myung Sagong · Sung Kwon Ahn · Sang Geon Yoo · Suk Jun Song

Abstract An estimation method of the fallout volume of a tunnel under construction is proposed based on an empirical method called bulking factor. For this, the main causes of the tunnel fallout are investigated and the scale of the fallout which is not accessible is considered. The calculated height of the fallout area is compared with borehole core data and the accuracy and efficiency of the proposed method is demonstrated. Another experimental approach on the detection of a progressive cracking around the tunnel fallout is provided based on an acoustic emission method. From the field tests near the tunnel fallout, it is shown that additional progressive cracking of the reinforced area is not foreseen and the effectiveness of the reinforcement is proven.

Keywords : Fallout, Bulking factor, Acoustic emission

요 지 본 연구에서는 시공중인 터널의 변상에 대한 원인을 규명하고 접근이 불가능한 일부 변상부에 대한 경험적 규모산정기법을 제시하였다. 부피팽창계수(bulking factor)를 이용한 변상부 규모예측 결과는 토모그래피용 시추공내 시추자료를 이용한 결과와 비교·분석하였으며 제시한 경험적 기법의 정확도를 확인하였다. 한편 변상부의 진행성 파괴 여부를 예측하기 위하여 미소파괴음(acoustic emission) 기법을 도입하여 계측을 수행하였으며 이 결과, 추가적인 진행성 파괴는 없는 것으로 파악되었다. 향후에는 미소파괴음 기법을 이용한 터널의 건전도 평가 등의 연구가 수행될 예정이다.

주요어 : 터널변상, 부피팽창계수, 미소파괴음

1. 서론

시공 중인 터널의 변상은 주로 교차하는 절리군에 의한 썩기형 파괴나 파쇄대 등의 작용에 의한 낙반 등이 주류를 이루고 있다. 일반적으로, 절리군의 교차에 의한 썩기형 파괴는 사전 예측이 가능하고 변상 위치도 막장부 인근인 경우가 대부분이나 파쇄대 및 slickenside 등에 의한 낙반인 경우에는 막장부 뿐만 아니라 내공변위가 안정화되었거나 숏크리트 등의 지보재가 타설된 이후에 발생하는 경우도 일부 있다.

본 연구에서는 파쇄대의 작용에 의한 시공중 터널의 변상에 대하여 조사하였다. 이를 위하여 변상이 발생한 터널의 변상원인을 규명하였으며 변상에 따른 낙반부의 규모를 산정하였다. 일반적인 경우, 변상이 수렴하게 되면 그 규모를 육안 혹은 실측을 통하여 산정할 수 있으나 본 연구대상 터널의 경우는 지속적인 변상이 발생하였으며 따라서 암성토 등에 의한 응급조치가 수반되었고 결국 변상의 규모를 직접적으로 확인할 수 없는 상황이 전개되었다. 변상의 규모를 간접적으로 산정하는 방법에는 경험적 방법과 실험적 방법이 있으며 본 연구에는 경험적 방법을 채택하였고 보강 후 시추공을 통하여 제안한 경험적 기법의 타당성을 입증하였다. 실험적 방법에 의한 변상의 규모산정은 다른 곳에서 다루기로 한다.

한편, 변상부 보강후 발생가능한 추가적 변상을 예측하기 위하여 미소파괴음(Acoustic Emission, AE) 계측기법을

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원
E-mail : jslee@krri.re.kr
TEL : (031)460-5342 FAX : (031)460-5814

* 정회원, 한국철도기술연구원

** 정회원, 삼림엔지니어링 부사장

*** 정회원, SOC건설엔지니어링 부사장

도입하여 진행성 변상유무를 확인하였다. 이를 위하여 유사현장에 대한 AE기법의 적용을 통하여 계측기법의 효용성을 확인하였으며 본 현장 적용을 통하여 보강효과를 입증하였다.

향후에는 변상부 규모산정을 위한 비파괴 실험기법을 도입하여 예측기법의 정밀도를 높일 수 있을 것으로 판단되며 보강효과에 대한 수치적 해석기법 등은 다른 곳에서 논의할 예정이다.

2. 터널변상 현황

2.1 터널주변 지질구조

본 연구대상 ○○터널은 터널방향과 평행하게 단층이 발달해 있으며 2개조의 단층이 터널방향과 예각으로 사교한다. 터널구간에 분포하는 암종은 갱구부쪽에 안산암질암이 분포하고 중간부위에는 중생대 백악기 화강암류인 화강섬록암이나 아다멜라이트가 분포하고 있다. 터널주변 선구조들은 두 개의 단층사이에 발달한 2차 파쇄대로 판단되며 터널내 변상 암석시료 및 활동면 분석결과, 파쇄대내에 slickenside가 발달되어 있고 절리틈 사이에 단층점토가 확인된 바 있으며 일부 부스러진 암편들은 강도가 매우 약한 단층각력 및 가우지 등으로 분류된다. 또한 파쇄대내 절리군의 경사는 거의 수직에 가까운 급격한 각도를 보이고 있으므로 변상의 형태와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 따라서 2차 파쇄대의 시간 의존적 혹은 외부 영향에 의한 거동이 변상의 직접적인 원인이 될 수 있음을 추론해 볼 수 있다.

2.2 변상의 원인

변상이 발생한 개소의 막장일지에 따르면 시공시 막장면의 기반암 및 절리면 풍화도와 용수상태 등은 비교적 양호하였으며 특이사항은 없었던 것으로 기록되어 있다. 한편 파쇄대 및 주절리 경사는 70~90° 정도로서 거의 수직한 방향임을 알 수 있으며 수평시추결과를 근거로 터널 좌우 측벽으로 근접하여 파쇄대가 존재하였을 것으로 추정된다.

현장 계측자료를 검토한 결과, 변상시점은 굴착 후 최소한 6개월 이상 경과한 때로서 내공변위는 계측값이 수렴되어 중지한 상황이며, 변상 직전까지 특이사항은 발견되지 않았다. 또한 슛크리트 응력 및 락볼트 축력의 경우, 전체적으로 허용응력 범위내인 것으로 파악되었으며 일부 이상 개소의 경우에도 변상구간과는 직접적인 관계가 없는 것으로 판단되었다. 마지막으로 지중변위의 경우, 최대 10mm 이하의 변위가 발생하였으며 급격한 변화양상을 나타내지 않았다. 따라서 변상의 직접적인 원인은 변상구간내 슛크

리트 배면에 미확인 2차 파쇄대가 존재하였고 터널 굴진방향과의 불리한 조건 및 터널내 부속공정 등 외부 상황변화에 따른 점진적 수직형 활동이라고 판단된다.

한편 터널내 변상은 인접한 3개소에서 유사한 형태로 각각 발생하였으며 모두 2차 파쇄대의 영향인 것으로 파악되었다. 1차 및 2차 변상의 경우에는 비교적 소규모로서 초기 대응에 의해 수렴된 바 있으나 3차 변상의 경우에는 비교적 대규모로서 압성토 등에 의해 추가적인 변상의 진전을 방지하였다. 따라서 3차 변상구간의 접근이 불가하였으며 정확한 변상의 규모를 파악할 필요성과 변상부 보강에 따른 보강효과 검증이 요구되었다.

3. 변상부 규모산정을 위한 부피팽창계수의 적용

3.1 부피팽창계수(Bulking Factor, BF)

부피팽창계수(BF)란 다음 Fig. 1과 같이 변상이 발생하는 터널 상부의 부피(V_s) 대비 굴착된 터널의 부피(V_v)를 의미하며 변상부 상부면적 및 터널 바닥면적 $w \times l$ 이 같다면 H/H_0 로 표기할 수 있다(이희중 외, 2008). 여기서 t 는 터널의 높이, H 는 변상체적의 높이를 의미하며, w 및 l 은 각각 변상부 바닥의 폭 및 길이를 의미한다. 실제로 변상전후 바닥면적 $w \times l$ 이 같다는 가정은 다소 엄격한 가설일 수 있으며 따라서 식 (1)에 따라 산정한 H 는 최대값이 된다.

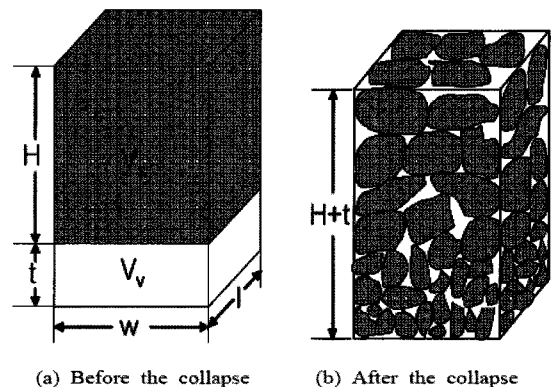


Fig. 1. Definition of bulking factor (이희중 외, 2008)

부피팽창계수의 현장적용에 있어서는 암반상태 및 압질과 변상의 형상을 고려하여야 한다. 본 연구의 경우, 3차 변상구간에 대한 정보가 없으므로 1차 및 2차 변상구간의 형상을 적용하였고 이 결과 수직형 절리 등에 의한 원통형 변상으로 판정하였다. 이 경우 부피팽창계수는 다음 식에 의해 정리될 수 있다.

$$BF = \frac{t}{H} \quad (1)$$

한편, 파쇄대의 특성을 고려하여 사암 형태의 연암을 가정하면 B.F.는 50%로 가정할 수 있다(이희중 외, 2008).

3.2 변상높이 산정

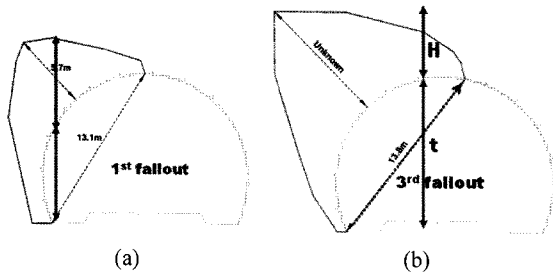


Fig. 2. Fallout dimension

Fig. 2에서 1차 변상구간의 변상형태는 터널 어깨부를 중심으로 발달하였으며 어깨부의 터널 높이가 약 4m인 점을 감안하면 식 (1)에 의해 변상 높이는 약 8m가 된다. 이는 실제 현장조사 결과와 부합하는 것으로서 제안한 부피팽창계수의 효용성을 입증할 수 있다. 이를 토대로 3차 변상구간에 대한 적용결과, 터널 천장부를 중심으로 변상이 발달하였으며 천장부의 높이가 약 10m인 점에 비추어 변상의 높이는 약 20m로 추정된다.

한편, 변상구간에 대하여는 보강공사가 실시되었으며 경량기포 콘크리트, 락볼트, 강관다단공법 및 철근라이닝공법 등이 시공되었다. 변상부 뒷채움부와 원지반 사이의 경계부는 추가로 시멘트 그라우팅이 실시되었으며 보강효과를 확인하기 위하여 NX크기의 보링공 2공 시추와 각종 비파괴시험 및 토모그래피 시험이 시행되었다. 보링공은 수직방향으로 시추하기 곤란하여 약 70°의 경사로 시행하였으며 시추데이터를 판독한 결과 최대 약 20m 및 최소 17m 부근에서 원지반의 경계가 발견되었다. 따라서 경사 시추공의 오차 및 원지반의 분포상황 등을 고려한 결과 제안한 부피팽창계수의 효용성을 입증하였다. 비파괴 시험결과 및 토모그래피 결과는 다른 곳에서 언급하기로 한다.

4. 미소파괴음 계측기법의 적용

4.1 미소파괴음 계측기법

변상부의 진행여부와 안전성 평가를 위한 방편으로 미소파괴음(Acoustic Emission, AE) 기법을 도입하였다. 미소파괴음은 암반의 미소한 파괴와 수반되어 발생하는 응력의 급격한 재분배 및 크랙의 발생으로 인한 탄성파의 생성과 관련이 있다. 즉, 미소파괴음은 암석내 응력의 증가로 인하여 입자의 파괴, 입자 경계부의 활동 혹은 미세균열의 발생

및 전파 현상과 수반하는 에너지의 방출 현상으로 이때 발생하는 음원을 의미한다. AE 기법은 실시간 측정을 통하여 암반내 균열의 발생 및 전진에 대한 계측이 가능하므로 국부적인 암반블럭의 미끄러짐이나 탈락을 측정하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

AE 기법에 관한 연구는 1940년대부터 광산의 암반파열(rockburst) 발생 예측 연구에서 시작된 이래, 재료에서 발생된 신호를 활용하여 균열이나 파괴과정을 연구하는데 사용되었다. 기존 연구결과를 살펴보면 Yoshikawa & Mogi (1981)는 일축압축 하중 하에서 물과 온도의 영향을 고려한 실내 반복 재하실험을 통하여 초기응력을 측정하였으며, Meglis 등(1995)은 원형 공을 중앙에 천공한 Lac du Bonnet 화강암 블럭을 이용한 일 및 이축압축 시험을 수행할 때 발생한 미소파괴음을 측정하여 음원의 발생 메커니즘을 규명하였다. Eberhardt 등(1998, 1999)은 미소파괴음의 특성들을 이용하여 균열개시를 포함한 균열 발전단계에 대한 보다 합리적이고 객관적인 기준 결정을 위해 다양한 실험을 실시하였다. 실험자료를 토대로 하여 응력 변형률 자료에 점이동 회귀분석(moving point regression)기법과 일축 및 삼축시험에서의 미소파괴음 분석을 종합적으로 응용한 방법을 통해 균열 닫힘응력, 균열 개시응력, 2차 균열 개시응력, 균열 결합응력, 균열 손상응력수준에 대한 기준을 제시하였다.

국내에서는 여수의 지하유류비축기지에서 스폐링(spalling)의 발생여부를 감시하기 위한 Micro Seismic(MS) 계측시스템이 도입되어 적용된 사례가 있다(Hong 등, 2006). 특히 Fig. 3과 같이 일정기간 계측된 자료를 분석하여 작업별 발생파형을 분석하였으며, 이를 토대로 하여 경고기준과 그에 따른 대처방안을 정하였다.

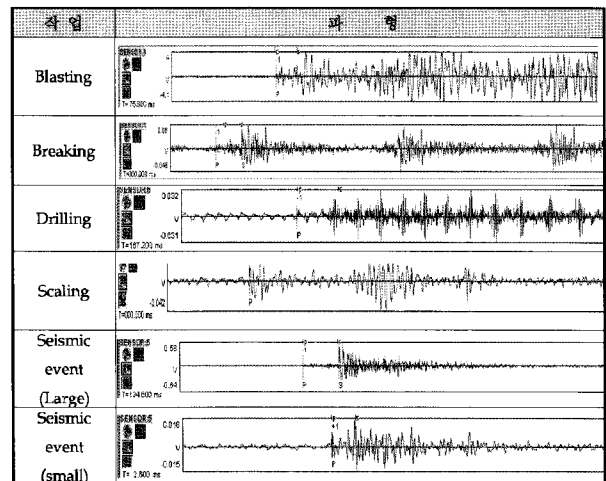


Fig. 3. Recorded wave patterns of Yeosu cavern(Hong 등, 2006)

4.2 미소파괴음 계측장치

미소파괴음 측정 시스템을 구성하는 주요 부분은 PC, 8 채널 PCI보드, 운용 소프트웨어, 센서, 증폭기, 케이블 등이다. 암반내에서 발생한 미소 파괴음은 센서에 의해 전기 신호로 전환되고, 증폭기에 의해 일정수준 증폭되어 PCI 보드에서 측정된다. PCI 보드를 통해서 획득한 데이터는 계측 프로그램을 통해서 실시간으로 파형의 저장, 재생 및 변환을 수행하며, 음원추적도 가능하다. 미소파괴음 측정 센서는 AE센서와 고감도의 가속도계 센서를 사용하였다. AE 센서는 공진형 센서로서 공진주파수가 140kHz이며 측정범위는 30kHz~1MHz이며 감도는 65±3 dB이며 가속도센서는 공진주파수가 40kHz이며 측정범위는 1~10kHz인 저주파형 센서이다. 센서에서 감지한 미소파괴음은 Preamplifier에 의해서 40dB만큼 증폭되어 PCI 보드에 전달된다.

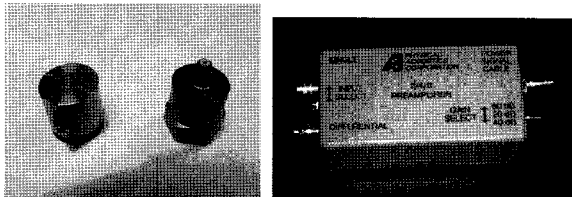
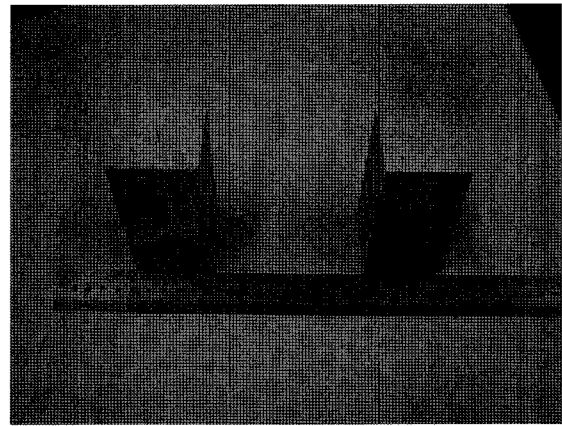


Fig. 4. AE, acceleration sensors & preamplifier

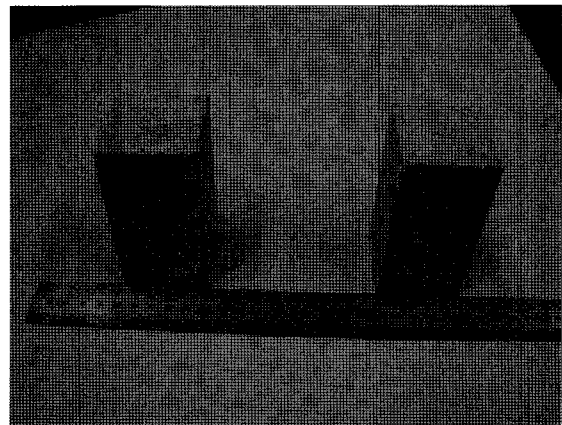
4.3 실내시험 및 유사현장 계측결과

암석 내 발생하는 미소파괴음의 특성분석을 위하여 현장에서 채취한 시료에 대하여 일축 압축시험 및 미소파괴음 검측 시험을 실시하였다. 미소파괴음의 검측 과정은 AE 검출한계(threshold), PDT(peak definition time), HDT(hit definition time), HLT(hit lockout time) 설정 등으로 이루어진다. AE 검출한계(threshold)는 40dB로 설정하였으며, AE 도달시간은 배경잡음 이상의 진폭이 발생한 지점의 시간으로 정의된다. AE의 파형 측정 과정에서 사용되는 시간변수인 PDT, HDT 및 HLT는 충분히 긴 파형을 포함할 수 있도록 200µsec, 800µsec, 1000µsec로 설정하였다. 신호취득속도(sampling rate)는 1MHz로 설정하였으며, 20kHz~400kHz 사이의 주파수 대역을 갖도록 필터링하였다.

트리거 방식은 개별트리거로 설정하여 각 센서마다 검출한계 이상의 파형이 측정될 때, 측정이 시작되도록 하였다. 트리거 이전시간은 256µsec로 설정하여 AE신호가 트리거되기 256µsec전부터 파형을 기록하도록 하였다. 저장되는 파형의 크기를 결정하는 AE 타격음의 길이는 2kbyte이며, 총 2000개의 포인트를 이용하여 2000µsec의 파형을 기록한다.



(a)



(b)

Fig. 5. Rock specimens from tunnel under consideration (a) Embedded rock specimen (b) Fresh rock specimen

현장에서 채취한 시료는 Fig. 5와 같다. 1번 시료는 원지반에 이종의 암이 관입하여 고결된 것으로 보이며, 2번 시료는 신선한 원지반의 상태를 보여준다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 일축압축시험결과 1번 시료의 강도는 152.6MPa이었으며, 탄성계수는 23.6GPa이었다. 2번 시료의 강도는 270.5MPa, 탄성계수는 32.7GPa이었다. 이종의 암이 관입함으로 인하여 압축강도가 약 2배 정도의 차이가 발생함을 알 수 있다.

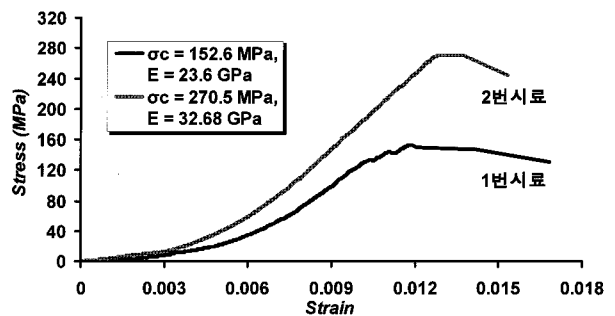


Fig. 6. Stress-strain curve of rock specimens

일축압축시험과 함께 미소파괴음 시험도 같이 수행하였으며 140kHz의 공진형 AE센서와 10kHz의 가속도계 센서를 같이 설치하여 계측하였다. 일반적으로 고주파수의 센서는 정밀한 계측이 가능한 대신에 그 측정범위가 작고, 저주파수의 센서는 정밀한 계측이 어려운 대신에 그 측정범위가 넓다고 알려져 있다. 따라서 현장계측에서는 가속도계를 사용하여 전반적인 범위의 미소파괴음을 계측하여 안전성을 검토한 후, 관심영역에 AE센서를 사용하여 정밀 측정을 시도하였다. 이를 위하여 우선 실내시험에서는 암반에서 발생하는 파괴음의 센서별 파형을 알아보기 위해 두 종류의 센서를 동시에 설치하고 계측하였다.

1번 및 2번 시료에 대한 미소파괴음 검측 실험결과는 Fig. 7과 같다. 하중단계별 미소파괴음의 누적곡선을 보면 가속도센서와 AE센서의 기울기와 미소파괴음의 계측수의 차이가 나타나는데, 이는 센서의 주파수 특성에 기인한 것으로 보인다. 가속도계 센서는 AE센서에 비해 상대적으로 작은 반응을 보이다가 최대하중의 50% 이후로 급격한 상향곡선을 보이며, 하중단계에 따른 명확한 증가량이 확연히 눈에 띈다. 이와는 반대로 AE센서는 가속도센서에 비해 점진적인 반응을 보이며 부드러운 곡선을 그리며 증가한다. 즉, 가속도계 센서는 낮은 정밀도로 인하여 시료 내 입자의 인장파괴나 전단으로 인한 급격한 파괴에 대해 반응을 하지만, AE센서는 높은 정밀도로 인하여 전반적인 영역에서 고른 반응을 보이기 때문인 것으로 파악된다.

Fig. 8은 하중단계별 발생한 미소파괴음의 대표적인 파형을 보여준다. 하중단계 1은 대략 최대강도의 30% 수준이며, 하중단계 2는 최대강도의 40%, 하중단계 3은 최대강도의 80% 수준이다. 하중단계 1은 초기 미세 균열들이 발생하는 단계로 누적곡선 상에서 기울기 변화가 처음으로 일어나는 구간이다. 그 이후 하중단계 2로 넘어가면서 추가적으로 2차 균열들이 발생하며, 발생한 균열들이 서로 연결되면서 미소파괴음들이 다량으로 발생하는 구간으로 보인다. 마지막으로 하중단계 3에 다다른 발생한 균열들이 서로 연결되면서 파괴면을 형성하고 이에 따라 급격한 미소파괴음 발생이 일어나는 것으로 보인다.

하중단계 1,2 구간에서 발생하는 미소파괴음의 파형을 보면 AE센서나 가속도계 센서 모두 초기에 최대점을 기록한 후 서서히 감소하는 파형의 특성을 보여준다. 이와는 반대로 하중단계 3에서 발생하는 파형은 최대점을 기록한 후 감소하는 파에 또 다른 파괴음들이 중첩되면서, 하중단계 1,2에 비해 파괴음의 지속시간이 길어지며, 파형의 진폭이 크게 높아지는 것이 파악되었다. 이는 하중단계 1,2에서 발생한 크랙들이 서로 결합하여 미끄러지면서 입자들 간의 탈락과 전단이 동시에 발생하며 P파와 S파가 복잡하게 수

신되는 단계이기 때문으로 판단된다. 따라서 현장계측 시에는 미소파괴음의 모니터링과 더불어 하중단계 3에서 발생하는 파형과 비슷한 신호에 대해 심도있는 분석이 필요할 것으로 사료된다.

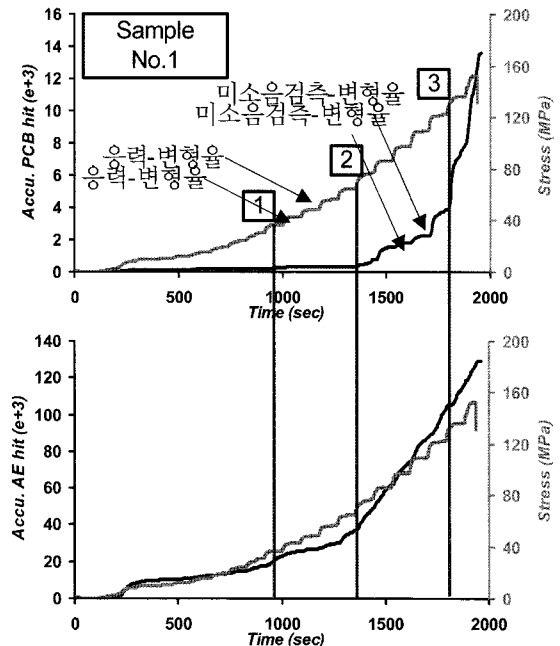


Fig. 7. Cumulative curve of AE according th load steps (Upper: Acceleration sensor, Lower:AE sensor)

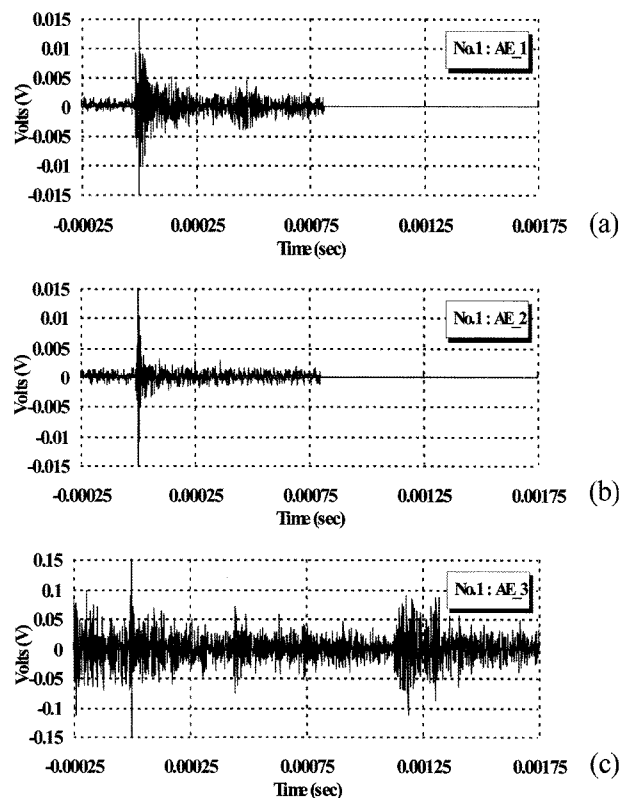


Fig. 8. Step-wise wave form of AE sensor

현장은 실험실과 다르게 발파, 굴착, 버럭처리 등 수많은 공정들이 이루어 진다. 따라서 AE계측에 있어 잡음에 대한 분석과 필터링은 계측의 정밀도와 신뢰도 측면에서 매우 중요한 작업으로, 계측에 앞서 이에 대한 평가가 반드시 수행되어야 한다.

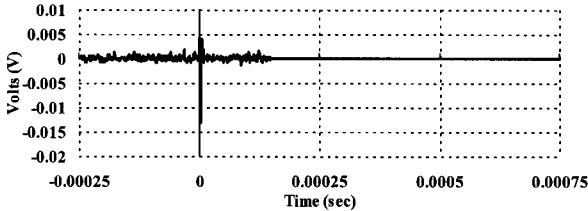


Fig. 9. AE form recorded from excavator vibration

Fig. 9는 터널 현장에서 기계 항타시 관찰된 음원의 대표적인 파형이다. 실내실험에서 얻은 파괴음과 다르게 파형의 모습이 단순하며, 급격히 감소하는 경향이 파악되었다. 이는 기계 항타가 순간적이며 주변 암반의 불연속면이나 비균질성으로 인한 감쇠현상으로 파악된다.

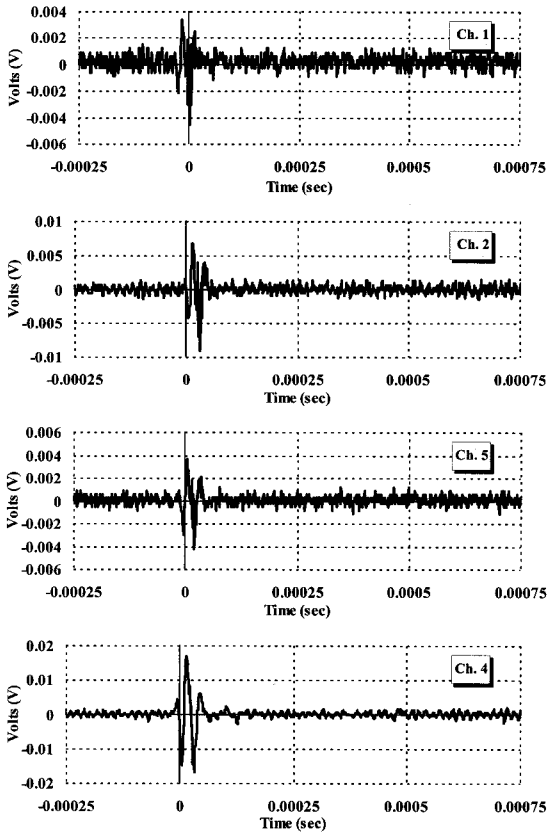


Fig. 10. AE form recorded from blasting

Fig. 10은 발파작업이 수행되고 있는 터널 현장에서 터널 발파 후 계측된 파형들이다. 터널 발파가 실시된 후 25분

경과후 계측을 수행하였으며, 계측은 막장면으로 부터 70여m 후방에서 실시하였다. 30여 분간의 계측동안 Fig. 10에서와 같은 파들이 지속적으로 관측되었다. 파형의 전체적인 모습은 실내실험의 하중단계 1,2와 유사하며, 이는 발파 후 발파에너지의 전파 및 소산에 의해 막장 내 암반들의 지속적인 탈락 및 미세균열들이 발생하기 때문으로 보여진다.

4. ○○터널 변상부 계측결과

미소파괴음 계측은 변상구간이 발생한 위치를 중심으로 수행되었다. 계측기의 설치는 Fig. 11 및 Fig. 12와 같으며 센서간의 횡방향 간격은 약 5m 정도이다.

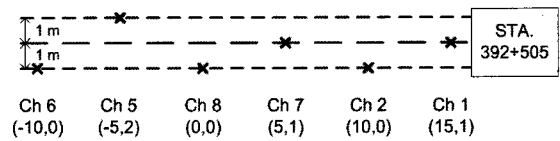


Fig. 11. Sensor location for AE measurement

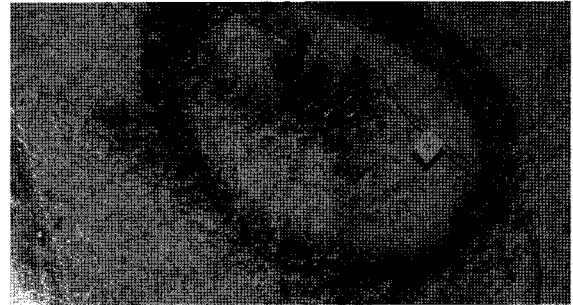


Fig. 12. AE sensor

변상구간에 대한 접근성이 떨어지므로 센서는 주로 변상이 발생한 후방에서 설치되었다. AE 계측을 위하여 사용된 센서는 감도 1000mV/g 센서로서 측정범위는 2Hz~10kHz이다. 이러한 센서를 총 6개 설치하였으며 설치 배열은 Fig. 11과 같다. 센서의 측정범위는 변상 구간의 폭인 13.8m 포함하도록 센서의 배치가 이루어 졌다.

각 계측결과에 대한 논의에 앞서 AE계측에 영향을 미칠 수 있는 현장에서의 시공순서는 Fig. 13 과 같다. 특히 여러 작업공정 중 발파에 의한 미소파괴음이 수신될 수 있으므로 발파음의 측정여부를 바탕으로 계측의 양호성을 판단하기로 한다. 계측이 시작된 후 측정에 가장 큰 영향을 미친 작업 공정은 발파라고 판단되는데 발파가 시작된 시점은 약 5580초(1시간 33분) 경과 이후이며 이는 Fig. 13과 어느 정도 일치하는 양상을 보인다. 발파 당시 계측된 파형은 Fig. 14와 같다. 계측된 파는 돌발형 신호로서 발파로 인한

대규모 에너지 전달이 이루어질 경우 발생하는 파의 형태이다. Fig. 14에서 관측된 파형은 전체 센서에서 거의 유사한 형태로 관측되었으며 FFT 수행결과 약 100kHz 대역에서 탁월주파수가 관측되었다. 각 센서로부터 관측된 파형이 거의 동일한 탁월주파수 대역을 보이는 것으로 관측되었다.

구분	내용	12월 30일												12월 31일												비고
		18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
변상구간	가압식 록볼트선공작업	[Shaded area]																								3차 변상구간
	하부보강 그래우팅	[Shaded area]																								392k470 ~ 535
	하부 breaker 작업	[Shaded area]																								392k412 ~ 416
	숏크리트 타설	[Shaded area]																								392k412 ~ 416
비변상구간	하부 말파	[Shaded area]																								393k465, 393k468, 393k474

Fig. 13. Tunnel excavation during measurement

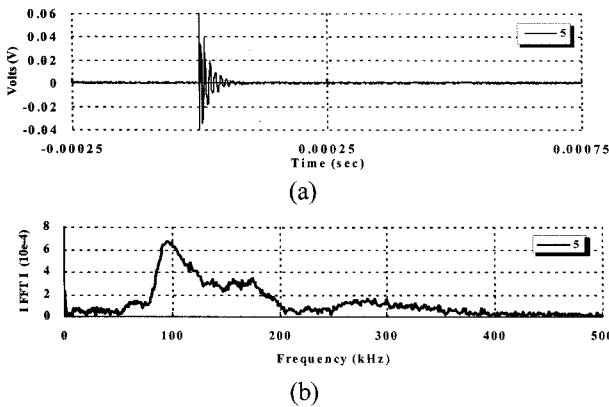


Fig. 14. Measured AE pattern during blasting & FFT transform

다중의 센서를 사용함으로써 각 센서에서 계측된 파를 바탕으로 음원의 발생위치를 추적할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 만족할 만한 음원추적을 할 수 없었는데 그 이유는 다음과 같다. 우선 발파가 가장 뚜렷한 발생 음원인데 비해 발파 수행 위치가 측정위치에서 약 1km 정도 이격된 거리이다. 이에 비해 센서의 배치는 Fig. 11에서 나타난 바와 같이 수평방향으로 약 25m 정도를 포함한다. 따라서 Fig. 13에서와 같은 여러 건설 행위를 추적할 만큼의 센서 배치가 적절하게 이루어지지 않았다. 그 이유는 앞서 언급한바와 같이 변상이 발생한 구간의 배면에서의 암반의 변

위를 확인하기 위해서 AE 계측이 이루어졌기 때문이다. 또한 센서의 배치이외 음원추적에 영향을 미치는 요소는 두 가지가 있는데 도달시간 계측오차와 암반물성의 편차를 들 수 있다. 특히 본 현장과 같이 여러 형태의 혼합체(암반, 흙, 경량기포 시멘트재료)가 불균질하게 존재할 경우 평균파의 속도를 추정하기 힘들며 이에 따라 음원추적 결과는 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 계측된 전체 이벤트를 이용하여 음원 추적을 하기보다는 센서 배열이 이루어진 구간과 변상 구간내에서 계측된 음원을 이용하여 음원추적을 수행하였으며 또한 발생하는 음의 크기를 산정하였다. 3차원 음원추적을 수행한 결과는 Fig. 15와 같다. 음원추적 결과를 살펴보면 주로 8번 센서 근처에서 파괴음이 관측된 것으로 확인이 되며 깊이는 약 1 m 전후의 위치임을 알 수 있다. 또한 우려하는 3차 변상구간에서는 음원이 발생하지 않는 것으로 확인되었으며 이는 충분한 보강으로 인하여 암반의 움직임이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

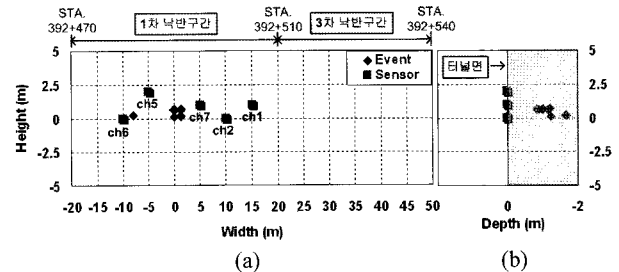


Fig. 15. Sensor location and measured values (a) XY plane, (b) YZ plane

5. 결론

본 연구에서는 굴착중 변상이 발생한 터널에 대하여 변상의 원인과 규모 그리고 변상보강후 추가 변상의 가능성 등을 검토하였다. 이를 위하여 공사중 계측자료, 막장일지 및 추가 지질조사 자료 등을 토대로 변상의 원인을 규명하였다. 변상은 시공시 미처 파악하지 못한 2차 파쇄대의 영향으로 파악되었으며 부피팽창계수를 이용한 변상의 규모를 경험적으로 산정하였다. 산정한 변상높이 약 20m는 시추결과 자료와 비교하였으며 원지반의 경계선 약 20m와 상응하는 결과를 나타내었다.

한편, 보강후 효과분석을 위하여 미소파괴음 계측기법을 도입하였다. 미소파괴음 계측은 재료 내부의 미시적 변형이나 파괴기동의 규명에 적합한 기술로서, 많은 구조물의 내부결함 및 손상도 평가 등에 관한 비파괴검사 기술로서 이용되어 왔다. AE기법을 이용한 암반구조물의 계측은 기존 암반 변위계를 중심으로 한 계측에서 감지할 수 없었던

부분적인 암반파괴 또는 갑작스러운 파괴현상을 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 현장에서 발생한 사고의 추가적인 위협이나 안정성을 평가하는데 많은 기여를 할 것으로 판단된다.

현장에서 채취한 2개의 시료에 대한 일축압축시험과 미소파괴음 계측을 실시한 결과 하중단계에 따른 센서별 파형의 특성을 파악할 수 있었다. 또한 현장에서의 기계 항타음과 발파 후 미소파괴음을 확보함으로써 현장계측 데이터 분석에 대한 좀 더 높은 정밀도와 신뢰도를 가질 수 있게 되었다. 현장계측은 15시간 18분 동안 수행되었으며 총 6개의 센서 중 의미있는 데이터를 확보한 5개의 센서로부터 획득된 데이터를 이용하여 음원의 발생위치를 추적하였다. 특히 센서의 배치는 1차 변상이 발생한 위치를 중심으로 설치되어 3차 변상구간까지 모니터링 하는 방식으로 수행되었다. 실험결과 계측중에 수행되었던 발파등 기타 공사 활동이 계측되었다. 계측구간에서의 이벤트와 관련해서는 1차 변상 구간에서 19개의 이벤트가 관측되었으며 3차 변상구간에서는 이벤트가 관측되지 않았다. 이러한 결과는 3차 변상구간의 경우 주변에서의 발파 및 굴착으로 인한 영향이 거의 없는 것으로 판단되며, 1차 변상구간에서는 관측된 이벤트의 규모와 빈도를 볼 때 터널의 불안정성을 야기할 수준에 도달하지 못하는 것으로 판단된다.

향후에는 AE계측을 이용한 터널 구조물의 건전도 평가 기법 등을 개발할 수 있을 것으로 보이며 비파괴 시험 등의 결과를 이용한 변상규모 산정기법은 다른 곳에서 논의하기로 한다.

참고 문헌

1. 이희중, 정용복, 최성웅(2008), “지반침하 거동특성 분석을 위한 암반의 부피팽창률에 관한 연구,” 터널과 지하공간, 제18권, pp.33-43.
2. Eberhardt, E.(1998), “Brittle Rock Fractures and Progressive Damage in Uniaxial compression,” Ph.D. dissertation, University of Saskatchewan.
3. Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B. (1999), “Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression,” Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 36, No. 3, pp. 361-380
4. Hong, J.S., Lee, H.S., Lee, D.H., Kim, H.Y., Choi, Y.T., Park, Y.J.(2006), “Microseismic event monitoring of highly stressed rock mass around underground oil storage caverns,” Tunnelling & Underground Space Technology, No. 214
5. Meglis, I.L., Chow, T.M., Young, R.P.(1995), “Progressive Microcrack Development in Terst on Lac du Bonnet Granite - I. Acoustic Emission Source Location and Velocity Measurements,” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 32, pp. 741-750.
6. Yoshikawa, S., Mogi, K.(1981), “A new Method for Estimation of the Crustal Stress from cored Rock Samples: Laboratory study in the case of Uniaxial Compression,” Technophysics, 74, pp. 323-339.

접수일(2009년 9월 10일), 수정일(2009년 10월 9일),
게재확정일(2009년 10월 14일)