

발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Damage Zone around Tunnel Induced by Blasting

장 수 호^{*1}

Chang, Soo-Ho

신 일재^{*2}

Shin, Il-Jae

최 용 균^{*3}

Choi, Young-Keun

이 정 인^{*4}

Lee, Chung-In

Abstract

Researches to evaluate damage conditions and changes of rock properties in rock mass induced by tunnel excavation have been carried out, mainly for underground nuclear waste repositories. Such a damage zone must be considered indispensable in stability analysis and optimal support designs for a tunnel constructed by NATM concept. However, the applicability and feasibility of various methods to evaluate damage zone have not been proved sufficiently. An approach was attempted to quantify damage zones by applying various methods such as core drilling, laboratory tests, blast vibration monitoring, and borehole camera technique. In-situ blasting test was performed by varying the rock mass and explosive conditions. The changes of some physico-mechanical properties of rock according to the degree of rock damage were also investigated quantitatively by using obtained rock cores. After core drilling, damage zones were investigated optically by using borehole camera. In addition, damage zone was predicted from the blast vibration monitoring and compared with results of laboratory tests.

요 지

최근들어 핵폐기물 지하처분장을 중심으로 터널굴착에 의한 주변 암반의 손상상태와 암반특성의 변화를 정량적으로 평가하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 이는 암반의 지지력을 적극적으로 이용하는 NATM 개념에 의해 터널을 시공할 경우 안정성 해석과 최적 보강설계를 위해 필수적인 사항으로 고려된다. 그러나 현재까지 암반 손상영역을 평가하기 위해 제시된 여러 방법들은 아직까지 그 적용성과 타당성이 충분히 검증되지 못한 실정이다. 이 연구에서는 코어시추, 실험실시험, 발파진동측정, 보어홀 카메라 등의 여러 방법에 의해 암반 손상영역을 정량적으로 평가하고자 하였으며 각 방법의 적용성을 검토하였다. 암반상태 및 발파조건을 달리하여 시험발파를 수행하였으며 발파 후에 터널벽면에 수직하게 시추를 하여 암석코어를 채취한 뒤 손상정도에 따른 암석의 물리적, 역학적 특성들의 변화를 정량적으로 나타내고자 하였다. 코어 채취 후 시추공에 보어홀 카메라를 사용하여 손상영역을 시각적으로 판별하고자 하였으며 발파진동 측정결과로부터 손상영역을 예측하고 채취한 암석시료에 대한 실험실시험 결과와 비교하여 적용성을 검토하였다.

Keywords : Damage zone, Blasting, Rock property, Blast vibration, Borehole camera

1. 서 론

터널은 안정된 초기응력 상태의 암반을 인위적으로 굴

착하여 만드는 구조물이므로 굴착으로 인한 주변 암반의 이완 및 지지력의 저하상태를 정확히 평가하고 파악하는 것은 터널의 안정성을 평가하는 매우 중요한 요소이다.

*1 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사수료

*2 김희원, 서울대학교 공학연구소 특별연구원

*3 경희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

*4 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

따라서 암반의 지지력을 적극적으로 이용하는 NATM (New Austrian Tunneling Method)에 의해 터널을 성공적으로 시공하기 위해서는 터널굴착시 굴착단면 주변 암반의 손상상태와 암반특성의 변화를 정량적으로 측정하여 평가할 필요가 있다. 이는 터널의 안정성과 최적 보강설계를 위해 필수적인 사항으로 고려된다.

굴착에 의해 영향을 받은 영역인 암반 손상·교란영역 (Disturbed Rock Zone, DRZ 또는 Excavation Disturbed Zone, EDZ)은 터널주변의 암반이 모암과 다른 특성을 나타내는 영역으로 파괴영역(failure zone), 손상영역(damage zone) 및 교란영역(disturbed zone)을 모두 포함하는 영역을 의미하는데 굴착방법, 현지응력, 암반상태, 터널의 형상 및 위치 등에 따라서 그 특성과 범위가 다르게 나타난다. 그림1은 터널주변 암반 손상·교란영역의 특징과 범위를 나타내는 모식도이다. 여기서 파괴영역은 암반블록이 암반으로부터 완전히 분리된 영역이고, 손상영역은 미소파괴가 발생하여 변형계수의 감소, 투수계수의 증가 등과 같은 암반특성의 영구적인 변화가 발생하는 영역이며 교란영역은 굴착에 의한 응력재분배 등으로 인하여 응력 또는 수리적 특성과 같은 상태변화가 발생하는 영역으로 손상영역과는 달리 암반특성의 변화는 크지 않거나 회복될 수 있는 영역으로 정의된다.

국외의 경우에는 암반 손상·교란영역(이하 DRZ)이 핵종이동 경로와 처분공동의 안정성 측면에서 중요하게 고려되는 지하 헤파기물 처분장을 중심으로 DRZ의 범위를 정량적으로 평가하기 위한 각종 시험방법(Holmberg & Persson, 1979; Fairhurst, 1999; Stephansson, 1999), DRZ에서 암반특성의 변화측정(SKB, 1991)과 이를 고려한 수리역학적 해석(Kelsall, 1984; Pusch & Stanfors, 1992; Pusch & Stanfors, 1993) 등의 수치해석적 연구가 활발히 수행되

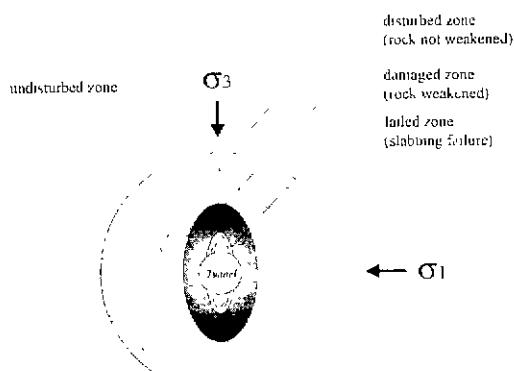


그림 1. 터널주변 암반 손상·교란영역의 특징과 범위

고 있다. 또한 최근에는 헤파기물 처분장이외에도 일반 터널의 안정성 해석과정에서 DRZ를 고려한 연구가 수행된 바 있다(Swoboda et al., 1998).

국내의 경우에는 DRZ에 대한 연구가 매우 부족한 상태로 수치해석을 통한 터널 발파하중 산정 및 손상영역 평가에 관한 연구(이인모 외, 1999)와 발파공 인접 암반의 동적 손상평가(임수빈, 1996)가 이루어진 바 있으나, 수치해석에 사용되는 입력변수의 결정과 실제 터널주변 암반의 손상과 관련이 있는 2자유면 발파에 대한 검토는 부족한 편이다.

본 연구에서는 발파에 의해 굴착이 이루어지고 있는 시험터널에서 코어시추, 발파진동 측정, 보어홀 카메라 등의 방법들에 의해 암반특성의 영구적인 변화가 발생하는 암반 손상영역을 정량적으로 평가하고자 하였다. 암반상태와 발파조건을 달리하여 시험을 수행하였으며, 발파 후에 터널벽면에 수직하게 시추를 하여 암석시료를 채취한 뒤 실험실시험을 통한 암석특성의 변화를 이용해 발파 후 굴착면으로부터 거리에 따른 암반의 손상정도를 정량적으로 나타내고자 하였다. 또한 시추공에 보어홀카메라(borehole camera)를 적용하여 굴착에 의한 암반손상을 시각적으로 판별하고자 하였으며 발파진동 측정결과로부터 손상영역을 예측하고 채취한 암석시료에 대한 실험실 시험결과와 비교하였다.

2. 암반 손상영역의 예측 및 측정방법

현재까지 발파작업에 의한 암반 손상영역의 예측과 측정은 대부분 발파진동속도 또는 입자속도(particle velocity)를 이용한 방법으로 이루어지고 있다. 발파진동 속도 이외에 암석 코어(core)시추, 탄성파 굴절법 탐사, 물리검증, 보어홀 카메라(borehole camera), 투수시험, 미소파괴음(Acoustic Emission, AE) 측정 등을 이용하는 방법들이 제시되어 있으나 아직까지 각 방법의 우수성과 타당성이 검증되지 못한 상태이다. 따라서 어느 한 방법에만 의존하지 않고 가능한 모든 방법들을 적용하여 굴착에 의한 손상영역을 예측하는 것이 유용하다고 논의되고 있다.

2.1. 발파진동속도에 의한 예측

일반적으로 발파공 부근의 발파진동을 직접 측정하기 어렵기 때문에, 대부분의 경우 원거리(far-field) 진동측정을 통하여 근거리(near-field)의 진동을 추정하는 모델을

적용한다(Holmberg & Persson, 1979).

여기서 최대입자속도는 다음과 같은 경험식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$V = KW^\alpha/R^\beta \quad (1)$$

$$= K \left(\frac{R}{W} \right)^n$$

여기서 V는 최대입자속도(mm/sec), W는 지발당장약량(kg), R은 폭원으로부터의 거리(m)이다. 상수 K, α , β , n은 암반의 구조적 특성 및 발파조건에 따라 달라지며 b는 1/2 또는 1/3이다.

식 (1)은 장약의 길이에 비해서 거리가 매우 긴 경우에만 유효하며 이런 경우 장약은 집중장약으로 간주될 수 있다. 이식을 변형하여 봉상장약의 경우를 살펴보면 봉모양의 선형장약량이 l (장약길이(m)당 장약량(kg))인 경우, 미소장약에 대해서 위 식을 적분하여 진동속도 V의 1차 근사치를 얻을 수 있다. 미소장약에 의한 진동파가 관측점에 거의 동시에 도착한다고 가정하면 장약의 다른 부분에 의한 미소장약의 도착시간의 차이는 무시될 수 있다.

관측점에서 장약공까지의 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다(그림 2).

$$R_i^2 = R_o^2 + (R_o \tan \theta - x_i)^2 \quad (2)$$

여기서 R_o 는 장약공과 측점과의 수직거리를 의미하고 θ 는 장약공의 하부에서 측점을 바라보았을 때의 각도이며, x_i 는 장약공의 하부에서 미소장약 W_i 까지의 거리를 나타낸다.

$$W_i = l dx \quad (3)$$

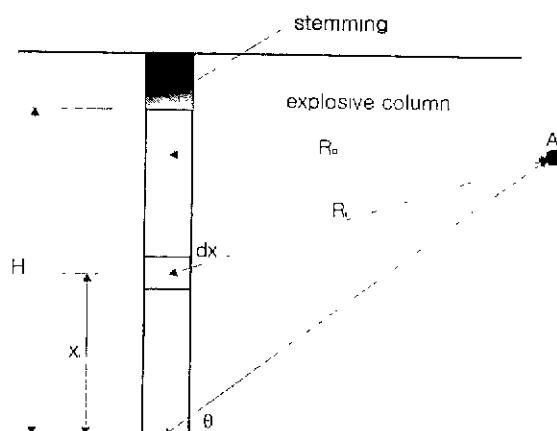


그림 2. 임의의 관측점에서 입자속도를 계산하기 위한 장약길이에 대한 적분

여기서 l 은 선형장약량이다.

식 (1)을 이용하여 장약길이 H까지 적분하면 최대진동 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$W = \int W_i dx = \int_0^H l dx$$

$$R = (R_o^2 + (R_o \tan \theta - x)^2)^{1/2}$$

$$\therefore V = kl^\alpha \left[\int_0^H \frac{dx}{[R_o^2 + (R_o \tan \theta - x)^2]^{1/2}} \right]^\alpha \quad (4)$$

임의의 폭약이나 폭제에 대한 선형장약량 l 은 weight strength(blasting gelatine dynamite의 폭력을 100%로 하고 이것과 동일약량의 공시폭약과의 폭력 비교치)가 1.02인 ANFO로 정규화시켜야 한다. ANFO에 대한 상대적인 weight strength는 다음과 같이 주어진다.

$$s_{ANFO} = \frac{(Q + V_g/0.85)}{5.04} \quad (5)$$

여기서 Q는 폭발열(MJ/kg)을 나타내고 V_g 는 표준상태에서의 방출가스 체적(m^3/kg)을 나타낸다.

이 모델은 발파공에서부터 에너지가 탄성매질을 따라서 감쇄함을 가정하고 암질이 우수한 경우에 잘 적용될 수 있다. 이를 통해서 구한 일정거리에서의 진동치를 다음의 변형율 손상모델(strain damage model)에 의한 최대입자 속도와 비교하여 발파손상 범위를 예측할 수 있다(Forsyth, 1993). 이때 변형율 손상모델에 의한 최대입자 속도는 암반의 손상한계에 대한 임계속도이다.

발파에 의한 암반의 손상은 발파로 인해 생성된 동적변형율 s의 결과로 탄성매질의 경우에 있어서 s는 입자속도 (V)와 충파전파속도(V_p)의 비율로서 계산된다. 즉,

$$s = \frac{V}{V_p} \quad (6)$$

암반의 한 요소에서 인장파괴가 발생한다면 인장응력과 인장강도는 같을 것이고

$$E = \frac{T_s}{S_t}, \quad S_t = \frac{T_s}{E} \quad (7)$$

여기서 E는 탄성계수, T_s 는 인장강도, S_t 는 인장균열이 개시되기 전의 인장변형율이다.

만일 V_d 가 손상이 발생할 때의 임계진동속도라고 한다면,

$$\frac{V_d}{V_p} = \frac{T_s}{E}$$

$$\therefore V_d = \frac{T_s \times V_p}{E} \quad (8)$$

인장강도를 단축압축강도의 1/10이라 고려하면, 새로운 균열이 발생할 것이라고 기대되는 진동수준은 다음과 같이 주어진다.

$$V_d = 0.1 \times UCS \times \frac{V_p}{E} \quad (9)$$

여기서 UCS는 일축압축강도이고 거의 단성에 가까운 매질에 대해서는 상당히 적절한 값을 나타낸다.

위와 같이 입자속도로부터 암반 손상영역의 범위를 예측하는 방법이 널리 적용되고 있으나 이러한 결과들은 원거리 입자속도로부터 예측된 것으로 최근에 들어서 근거리 입자속도를 이용하는 연구(Yang et al., 1993; Bogdanoff, 1996)들이 더욱 활발히 진행 중이다.

2.2. 물리탐사기법의 적용

탄성파 굴절법 탐사(Worsey, 1985)와 토모그래피(Sugihara et al., 1993)를 통해 암반 손상영역을 측정하기 위한 시도가 이루어지고 있으며 적용결과도 우수한 것으로 알려져 있다.

탄성파 굴절법 탐사를 적용한 경우에는, 각 해면 타격위치에 대한 첫 번째 도착시간을 지오플(geophone)으로부터의 거리에 대하여 도시하고, 이로부터 각 층(layer)의 탄성파속도를 계산하고 임계거리(critical distance)를 따라서 손상심도를 얻기 위하여 다음과 같은 방정식에 속도를 대입한다. 굴곡점이 없는 직선은 손상 받지 않은 암반을 나타낸다.

$$\text{Depth of damaged zone} = \frac{XC}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (10)$$

여기서 XC는 임계거리, V_1 은 손상 받은 암반의 탄성파속도이고 V_2 는 손상 받지 않은 암반의 탄성파속도이다.

2.3. 투수계수의 측정

Kesall et al.(1984)와 Jakubick & Franz(1993)은 암반의 투수계수를 밸파손상의 척도로 사용하였고 Pusch & Stanfors(1993)는 밸파 전, 후의 수압시험 결과 투수계수가

10^{-2} m/s정도 차이가 발생할 수 있음을 제시하였다.

2.4. 미소파괴음의 측정

Seto et al.(1996)은 Kaiser effect를 이용하여 암반 손상을 평가하고자 하였다. 재료가 이전에 받은 응력수준에 도달할 때까지는 AE event가 활발하게 발생하지 않는 현상을 Kaiser effect라 하는데 이러한 Kaiser effect에 근거하여 굴착으로 인해 암반이 받은 응력수준으로 암반손상을 평가하고자 하였다. 그러나 실제 굴착으로 인해 손상을 받은 암석에 대한 시험을 수행하지 않았으며 재하(unloading)-제하(unloading)를 반복하여 이러한 손상평가 방법을 검증한 단계이다.

또한 스웨덴의 SKB(Swedish Nuclear fuel and waste management Co.)는 암반 손상영역을 평가하기 위해 ZEDEX(Zone of Excavation Disturbance Experiment)라는 프로젝트를 수행하고 있다(Falls et al., 1996). 이 프로젝트에서는 밸파터널과 TBM터널의 굴착시에 미소파괴음을 측정하였고 그 결과 제어밸파를 한 경우, 밸파 후 대략 1분 당 1000개의 AE event가 발생하고 TBM 굴착의 경우에는 AE rate가 10배정도 감소하는 것을 밝혔다. 또한 음원추적(source location)결과 밸파터널의 경우 AE event의 대부분이 터널벽면과 막장의 약 1m이내에 밀집해 있는 것으로 나타났다. TBM터널의 경우에는 밸파터널에 비해 AE rate가 낮았고 1m보다 더 가까운 곳에 AE event들이 밀집해 있다는 것을 조사하였다.

2.5. 기타

Pusch & Stanfors(1993)가 코어시추를 통해 균열패턴 등을 조사한 바 있으나 회수된 코어의 실험실 시험을 통해 암석 특성의 경량적 변화에 대한 검토는 수행하지 않았다.

또한 보어흘 카메라를 이용하여 암반 손상영역을 가시적으로 조사하기 위한 연구가 수행된 바 있다(Pusch & Stanfors, 1993; Yang et al., 1993; Brent & Smith, 1996).

Graddy & Kipp(1987)은 밸파로 인한 암반손상을 표현하기 위해 손상변수(damage variable), D를 사용하였다. D 값은 0(무결암)과 1(완전파괴) 사이이며, 다음과 같이 손상암반의 변형계수 E_d 를 추정하기 위하여 사용될 수 있다.

$$E_d = E(1 - D) \quad (11)$$

여기서 E는 무결암의 변형계수이다.

3. 시험방법

3.1. 현장시험

암반 손상영역을 평가하기 위한 시험은 강원도 평창군 횡계에 위치한 대관령 제1터널 현장에서 수행되었으며, 연구 당시 이 터널은 강릉방향과 원주방향의 쌍굴터널로 시공 중이었다. 현장의 암종은 화강암으로 구성되어 있으며 대체로 경암에 속한다.

수평 시추작업이 용이하도록 바닥에서 대략 1m 정도 높이에 위치한 최외곽공의 위치를 발파 전에 표시하고 선형 장약량, 디커플링 계수 등의 발파조건을 기록한 뒤 발파 후에 표시된 해당위치에 시추를 하여 NX 크기의 암석코어를 회수하였다.

또한 암질에 따른 암반 손상정도를 판별하기 위하여 Type-4(RMR 4등급)로 시공되고 있는 지점에서 1공, Type-3(RMR 3등급)로 시공되고 있는 지점에서 4공을 시추하였다.

폭약의 종류에 따른 암반 손상을 조사하기 위하여 Finex-I으로 장약된 지점에서 1공, Himite 5500으로 장된 부분에서 1공을 시추하여 그 결과를 비교하고자 하였다.

일반적으로 터널 바닥부의 경우는 암반 손상의 주된 관심사는 아니지만 선형장약량이 매우 크기 때문에 최외곽공의 손상정도와 바닥공에 의한 손상정도를 비교하기 위하여 바닥공이 장약된 위치에 수직으로 1공을 시추하였다.

각 시추공은 약 2m 깊이로 시추하였으며, 회수된 코어는 심도별로 정리하여 실험실 시험에 사용하였다.

본 시험에서 사용한 시추공과 발파조건에 대한 자료는 표1과 같다.

실험실 시험을 위한 코어회수 작업이 외에, 코어를 회수한 뒤 시추공에 보어홀 카메라를 이용하여 시각적으로 규

표 1. 암반 손상영역 조사를 위한 시추공 정보

시추공 No.	시추위치	시추심도 (m)	RMR 등급
K-1	강릉방향 STA 820.61	2	Type-4
K-2	강릉방향 STA 828.21	2	Type-3
W-1	원주방향 STA 819.41	2	Type-3
W-2	원주방향 STA 819.41	2	Type-3
W-3	원주방향 STA 819.41	2	Type-3

열의 빈도변화 및 손상정도를 판별하였다.

또한 해당 현장의 발파진동식을 얻기 위하여 미국 Geosonic사 제품인 SSU 2000DK와 SSU Micro-Seismograph를 사용하여 입자속도를 측정하였다. Geosonic사 제품인 SSU 2000DK 발파진동측정기의 경우, 입자속도의 각 성분에 입자변위와 입자가속도를 최대 15초 동안 측정할 수 있으며, 일정수준 이상의 진동이 발생할 때 측정을 시작하는 trigger 기능이 있고 자체 프린터와 디스켓으로 측정자료를 저장할 수 있는 장치가 부착되어 있다. 한편 SSU Micro-Seismograph는 SSU 2000DK와 진동측정면에서는 거의 동일한 기능을 가지고 있으나 장비의 설정, 측정된 자료의 처리 및 출력은 본체인 SSU 2000DK와 연결하여 가능하고 자체 내에 저장 가능한 측정회수는 최대 20 회이다. 본 연구에서는 측정간격(sampling rate)을 1000회/sec로 하였고, 최대 15초까지 측정할 수 있는 기록시간은 현장에서 사용되는 지발뇌관의 시차를 고려하여 5초로 하였다. 또한 삼승근 환산거리가 $10\sim100\text{m/kg}^{1/3}$ 사이에 분포 할 수 있도록 센서의 설치위치를 결정하였다.

측정된 발파진동속도로부터 현장의 발파진동식을 구하여 2.1절에서 설명하였던 근거리 입자속도 예측식에 적용하였다.

3.2. 실내시험

현장에서 회수한 NX크기의 암석코어를 사용하여 터널 벽면으로부터 암반내부로의 심도에 따른 손상정도를 암석의 여러 물리적, 역학적 특성들을 측정하여 판별하고자 하였다.

본 연구에서는 단축압축강도, 탄성파속도(P파, S파), 탄성계수(Young's modulus) 등의 암석 특성과 2.4절에서 논의한 Kaiser effect를 이용하여 AE event가 급격하게 증가하기 시작하는 지점의 응력수준 σ_{AE} 를 구하였다. 발파로 인해 손상을 많이 받은 암석일수록 발파로 인해 암석이 가해진 동적-정적 응력수준이 높을 것이므로 이러한 Kaiser effect를 이용하여 심도에 따른 σ_{AE} 의 변화양상을 조사하였다.

벽면 근처의 암석코어는 파쇄가 많이 되어 있었고 코어 길이도 짧은 편이었다. 이렇게 코어길이가 짧게 회수된 경우에는 크기효과(size effect)로 인해 타당한 시험결과를 얻지 못할 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 시료를 성형한 뒤 시료길이가 70mm 이하(시료직경은 대략 52mm)인 경

우에는 탄성파속도를 측정하고, 예상되는 파괴하중의 70%까지 재하하여 탄성계수와 σ_{AE} 를 구하였다. 이후에 해당시료에 대하여 점하중시험(point load test)을 하여 그 결과로부터 일축압축강도를 추정하였다. 본 연구에서는 점하중시험으로부터 크기보정을 한 강도지수 $I_{s(50)}$ 을 구한 후 이 값에 보정계수 22를 곱하여 일축압축강도로 환산하였다. 시료길이가 70mm 이상인 경우에는 ISRM(국제암반역학회) 추천시험법에 근거하여 암석의 물리적, 역학적 특성을 측정하였다.

하중장치로는 일본 Shimadzu사의 200톤 시험기를 사용하였으며, 하중과 변형율의 자료를 얻기 위해 미국 Measurement Group사의 System 5100에 200,000 lbs 용량의 로드셀(loadcell)과 스트레인게이지(strain gauge)를 연결하여 자료를 측정하였다. System 5100의 자료획득속도는 정확도를 높이기 위하여 0.5초당 한번씩 자료를 받도록 설정하였으며 자료를 받은 후 아스키(ASCII)파일 형태로 저장을 한다. 이 자료들에 근거하여 응력-변형을 선도의 단축압축강도 50%수준에서 구한 접선계수로부터 탄성계수를 구하였다.

또한 미소파괴음을 측정하기 위하여 미국 Physical Acoustic Corporation의 MISTRAS 2001을 사용하였다. 최대 18개의 채널을 사용할 수 있으며 본체 내에 부착된 AEDSP 카드는 케이블로 preamplifier에 연결되며 이것을 통해 고주역필터(high-pass filter), 저주역필터(low-pass filter) 또는 대역필터(band-pass filter) 등을 선택할 수 있으며 증폭(gain)을 40 또는 60 dB로 조절할 수 있다.

본 연구에서는 2개의 AE센서를 사용하였으며, 시험편의 꼭대기반경에 의한 영향을 제거하기 위하여 알루미늄 재질의 $2 \times 2 \times 1\text{mm}$ 의 얇은 판을 제작하고 시험편 표면에 에폭시 접착제를 사용하여 부착한 뒤 알루미늄 판과 센서 사이의 접촉을 좋게 하고 미세한 요철 등의 영향을 제거하기

위하여 벌꿀성분으로 이루어진 미국 Panametric사 제품인 SWC 액체 커플런트를 사용하였다.

암석시험에 대해 제작회사에서 추천하는 사항에 근거하여 MISTRAS 세팅을 하였으며 Fixed Threshold를 40dB로 하였다. 미소파괴음을 감지하는데 중요한 변수인 PDT(Peak Definition Time), HDT(Hit Definition Time)과 HLT(Hit Lockout Time)은 각각 50, 100, 500 μs 로 하였고 저주역필터와 고주역필터에 대한 필터값은 각각 10kHz와 1200kHz로 하였다. 탄성파속도는 일본 OYO사의 Model 5217A Sonic viewer를 사용하여 P, S파속도를 측정하였으며, 50kgf/cm² 용량의 SBEL 점하중시험기를 사용하여 점하중시험을 수행하였다.

4. 암반 손상영역 측정결과

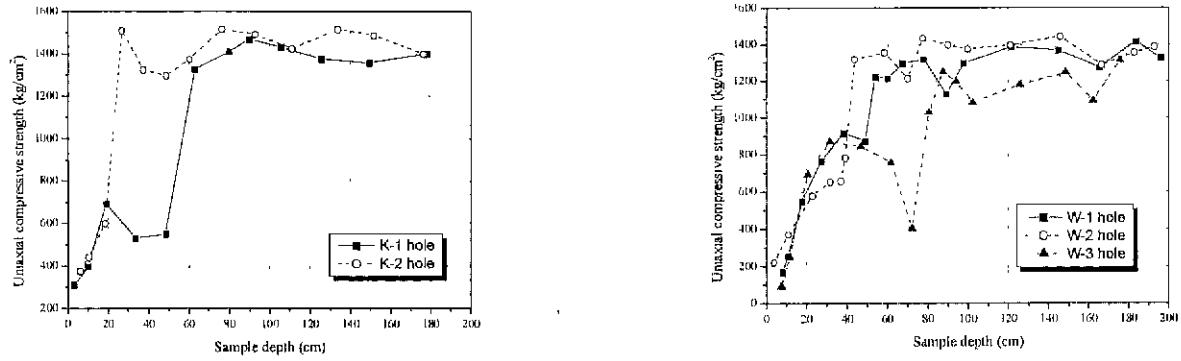
4.1. 암석시험 결과

심도에 따른 암석의 각종 물성변화는 그림 3~7에 나와 있으며 각 시추공에 대한 발파조건과 암석시험에 의해 예측되는 손상영역의 범위는 표2와 같다. 각 그림에서 심도는 시료 중간지점의 심도이며 W-1시추공에서는 Himite로 장악된 부분의 중간지점에서 터널벽면에 수직하게 시추하였다.

또한 Kaiser effect를 이용하여 발파로 인한 손상정도를 판별하기 위하여 AE count가 급격하게 증가하는 지점의 응력수준 σ_{AE} 를 구하였다. 그림8의 AE count-시간 그래프에서 AE가 급격하게 증가하는 부분을 식별할 수는 있으나 명확하게 그 지점을 찾기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 누적 AE count 곡선을 구하여 그림8처럼 누적 AE count 곡선에서 선형적으로 급격하게 증가하는 지점의 시간을 구하여 이로부터 그림9와 같은 응력-변형율 곡선에서 해

표 2. 시추공별 발파조건 및 암석시험으로부터 예측되는 손상영역의 범위

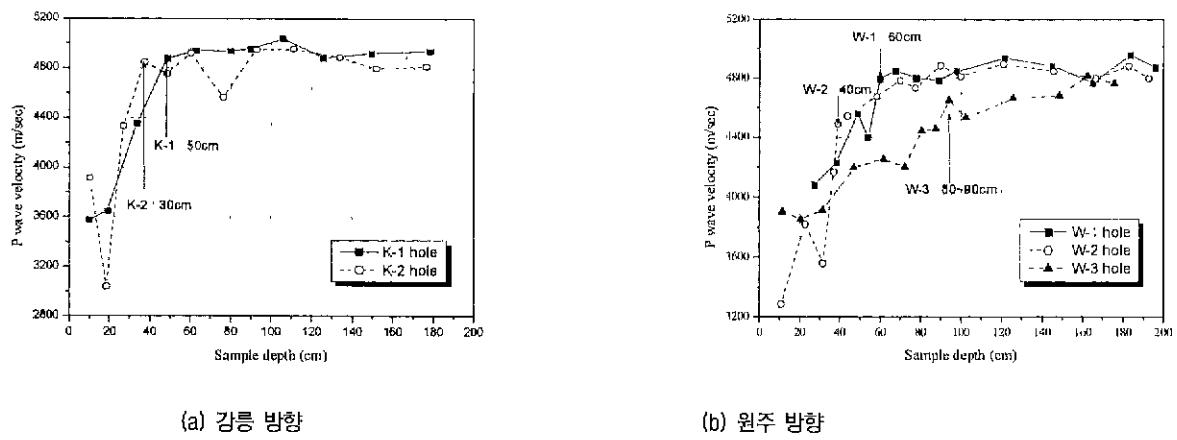
시추공 No.	천공경 (mm)	천공장 (m)	Himite 개수	Finex-I 개수	공당 장악량 (kg)	선행 장악량 (kg/m)	I_{ANFO} (kg/m)	디커플링 차수	손상영역의 범위 (cm)
K-1	41	2.2	0.5	3	0.4875	0.17	0.12	2.41	50
K-2	41	2.5	0.5	5	0.625	0.25	0.17	2.41	30
W-1	41	2.2	1	2	0.575	0.26	0.18	2.41	60~70
W-2	41	2.2	1	2	0.575	0.26	0.18	1.28	40~50
W-3	41	2.2	3	0	1.125	0.51	0.59	1.28	80~90



(a) 강릉 방향

(b) 원주 방향

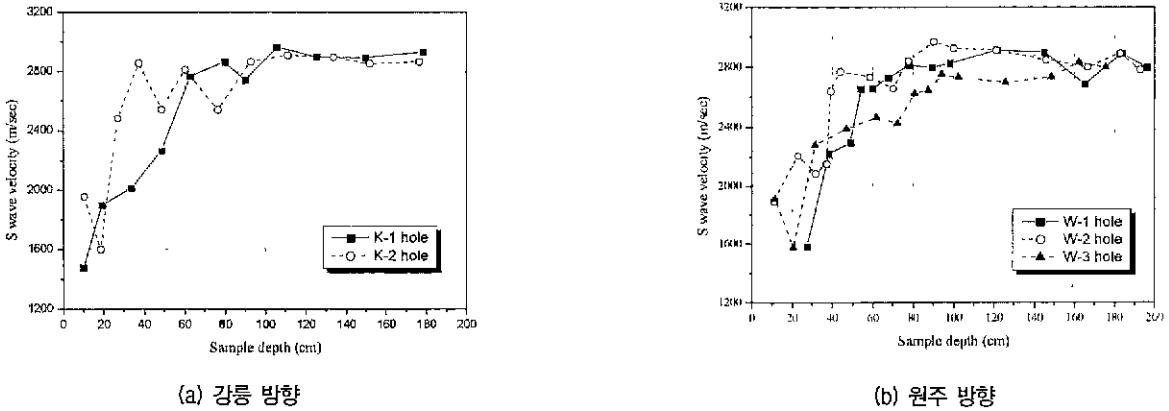
그림 3. 발파후 터널벽면으로부터 깊이에 따른 단축압축강도의 변화



(a) 강릉 방향

(b) 원주 방향

그림 4. 발파후 터널벽면으로부터 깊이에 따른 P파속도의 변화



(a) 강릉 방향

(b) 원주 방향

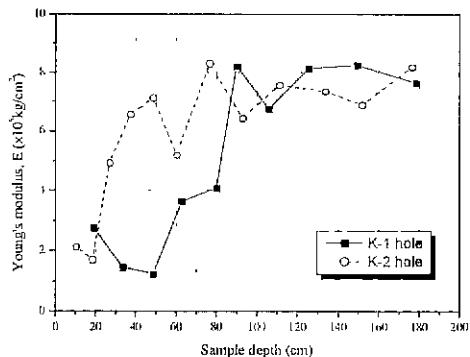
그림 5. 발파후 터널벽면으로부터 깊이에 따른 S파속도의 변화

당 시간에 대한 응력수준 σ_{AE} 를 구하였다.

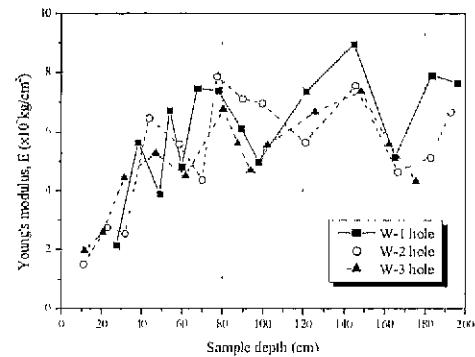
그림에서 살펴볼 수 있는 바와 같이, 암반조건과 발파조건에 따라 다르지만 최외곽공(K-1, K-2, W-1, W-2)의 경우 30~70cm, 바닥공(W-3)의 경우에는 80~90cm의 손상영역의 범위를 추정할 수 있었다. 또한 원암반(심도 1m 이상의 시험결과의 평균으로 계산)과 비교할 때 단축압축강도는 최대 8~26%, P파속도는 62~82%, S파속도는 50~70%

수준까지 감소하는 것으로 나타났다. 탄성계수의 경우에는 편차가 매우 커서 판별하기 어려우나 원암반과 비교하여 최대 18~35%까지 감소하였다.

일축압축강도(그림3)와 탄성파속도(그림4, 5)의 변화로부터 손상영역의 범위를 어느정도 추정할 수 있었으나 탄성계수와 σ_{AE} 의 변화는 편차가 매우 심하여 범위를 추정하기 어려웠다. 특히 탄성파속도 결과는 다른 암석의 특

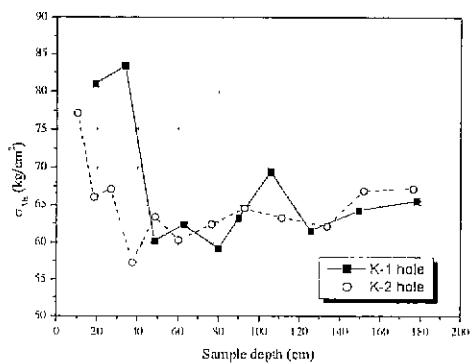


(a) 강릉방향

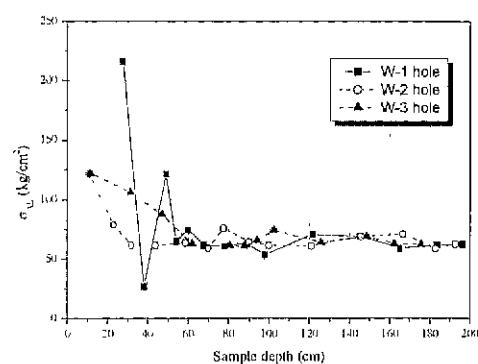


(b) 원주방향

그림 6. 발파후 터널벽면으로부터 깊이에 따른 탄성계수의 변화



(a) 강릉방향



(b) 원주방향

그림 7. 발파후 터널벽면으로부터 깊이에 따른 σ_{AE} 의 변화

성에 비하여 일정한 경향을 나타내어 손상영역의 범위를 대체로 쉽게 판별할 수 있었다. 일반적으로 탄성파속도는 암석내부의 미세균열, 밀도, 광곡율, 특히 파쇄정도에 따라 크게 달라진다는 점을 고려하면 암석의 물리적, 역학적 특성을 중에서 암석의 탄성파속도로 손상영역을 판별하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

또한 탄성계수(그림6)의 변화로부터 손상영역을 예측하기는 어려운 것으로 나타났고, σ_{AE} 의 측정결과(그림7)는 탄성계수의 경우보다 일정한 경향을 보이긴 하지만 암반의 다양한 응력이력과 시추시의 응력개방 등의 영향에 의한 것으로 판단되는 편차가 크게 나타나 추가적인 보완 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

선형장약량이 비슷한 K-1 시추공과 K-2 시추공에 대해 추정된 손상영역의 범위는 각각 50cm와 30cm로 암반조건이 좋은 암석(K-2, Type-3)일수록 동일한 발파조건에서 손상이 작게 나타난다는 것을 알 수 있다.

W-1 시추공과 W-2 시추공은 암반조건은 동일하나

W-1 시추공은 최외곽공 중 Himite로 장악한 공저 부분에서 시추하였으며 W-2 시추공은 Finex-I으로 장악된 부분의 중간지점에서 시추를 하였다. 그림7의 W-1 시추공에 대한 σ_{AE} 결과에서 알 수 있듯이 대략 20cm 지점의 응력수준이 W-2나 W-3의 경우보다 크게 나타났다.

이는 폭력이 강하고 디커플링 지수가 낮은 Himite를 사용한 경우가 상대적으로 폭력이 작은 Finex-I를 사용한 경우보다 더 큰 응력이 암반에 가해졌기 때문이다. 일반적으로 암반 손상영역에 영향을 미치는 여러 화학특성 중에서 폭속에 의해 손상영역의 범위가 크게 좌우되고 폭속이 큰 화약을 사용할수록 동일한 암반조건에서 손상영역이 더 작게 나타나는 것으로 알려져있다. 실제로 시험에 사용한 Finex-I과 Himite 5500의 폭속은 각각 4400m/sec와 5600 m/sec로 Himite 5500의 폭속이 더 크지만 폭속의 영향이 외에 디커플링의 차이가 손상영역의 크기에 크게 영향을 미친 것으로 보인다. Finex-I과 Himite 5500의 디커플링 지수(decoupling index, 공경/약경)는 각각 2.41과 1.28로 약 2배

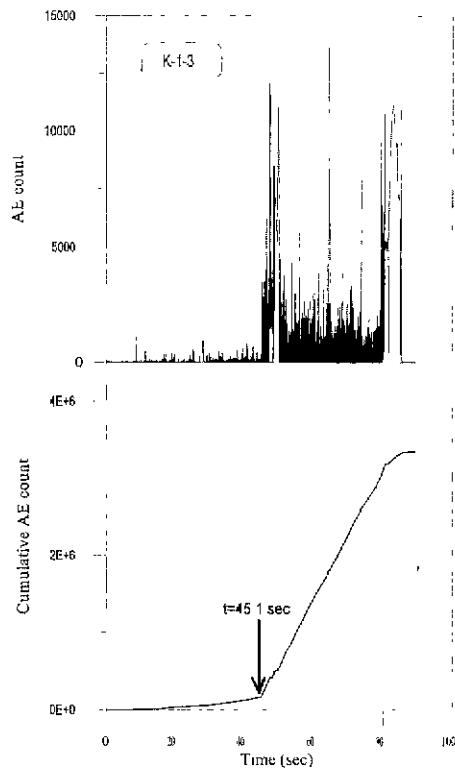


그림 8. 시간 대 AE count 그래프 및 시간 대 누적 AE count 곡선

정도의 디커플링 효과로 인해서 폭속이 작지만 Finex-I을 사용하는 경우가 손상영역이 약 20cm정도 적게 나타났다. 따라서 디커플링 지수가 높은 화약을 사용하는 제어발파에 의해 발파로 인한 암반손상을 효과적으로 감소시킬 수 있을 것이다. 이와 같이 화약특성에 따른 영향으로 인하여 암반상태는 거의 동일하지만 W-2 시추공의 결과가 W-1 시추공에 비하여 손상영역이 작게 나타난 것으로 보인다.

W-3 시추공은 바닥공에 대한 것으로 터널 바닥부의 암반손상은 터널벽면이나 천정부분의 손상에 비해 터널의 안정성에 큰 문제가 되지 않으나 선형장약량이 크고 디커플링 지수가 작은 경우의 암반손상을 조사하기 위하여 바닥공 위치에 수직으로 시추를 하였다. 암석시험 결과 대략 80~90cm로 암반손상영역의 범위가 나타나 Pusch & Stanfors(1992)의 연구결과와 비교할 때 본 연구의 바닥공 패턴은 매우 조심스러운 발파(Very Careful Blasting, VCB)의 범주에 든다는 것을 알 수 있다. 앞의 쇠외곽공에 대한 연구결과들과 비교할 때 20~60cm정도 손상영역이 더 크게 나타났으나, 바닥공에는 상부에서 burden으로 작용하는 파쇄된 암반까지 고려하여 장약량을 설계하므로 주변공이나 쇠외곽공에 비해 일반적으로 더 많은 장약량을 사용하게 된다. 대단면 터널인 경우에는 분할굴착하기 때문에

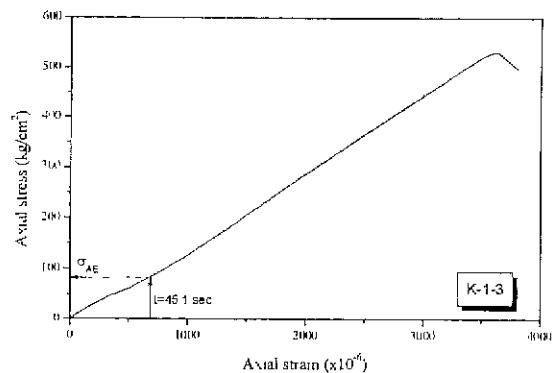


그림 9. 응력-변형을 곡선에서 σ_{AE} 의 결점

상부반단면 굴착완료후 바닥부분은 벤치발파로 굴착을 하게 되므로 이 경우는 하부 반단면에 대한 발파패턴에 따라 터널 최종 바닥면의 손상영역이 달라지게 된다. 따라서 W-3 시추공에 대한 결과는 선형장약량이 0.59kg/m이 고 디커플링 지수가 1.28정도로 선형장약량이 크고 디커플링 지수가 작은 바닥공 발파와 같은 경우의 암반손상에 적용할 수 있을 것이다.

4.2. 보어홀 카메라 측정결과

실험설시험을 위해 코어를 회수한 후 시추공에 보어홀 카메라를 적용하여 시추공 내부를 조사하였는데, 바닥에 수직하게 시추한 W-3 시추공의 경우에는 버력이 쌓이고 물이 고여서 촬영이 불가능하여 나머지 4공에 대해서 촬영을 하였다.

회수된 코어로부터 알 수 있었듯이 속크리트 뒷면의 암반벽면으로부터 대략 15~25cm 범위까지 균열빈도가 매우 높은 파쇄대가 관찰되었다. 그러나 이러한 파쇄대 이후로는 뚜렷한 균열을 판별하기가 어려웠다.

보어홀 카메라 측정결과는 거시균열들이 발생한 파쇄대를 시작적으로 확인할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 손상영역은 미세균열들이 발생하여 암석 특성의 영구적인 변화가 발생하는 영역으로 이러한 미세균열들을 확인하기 어렵기 때문에 손상영역의 정량적 평가에 적용하기는 어려운 것으로 판단된다.

4.3. 진동예측식에 의한 암반 손상영역의 예측

2.1절의 식 (4)와 같은 진동예측식을 사용하여 발파공부근에서의 진동수준을 산정하기 위해서는 진동상수 α , β , K와 선형장약량을 알아야 한다. 식 (1)로부터 다음과

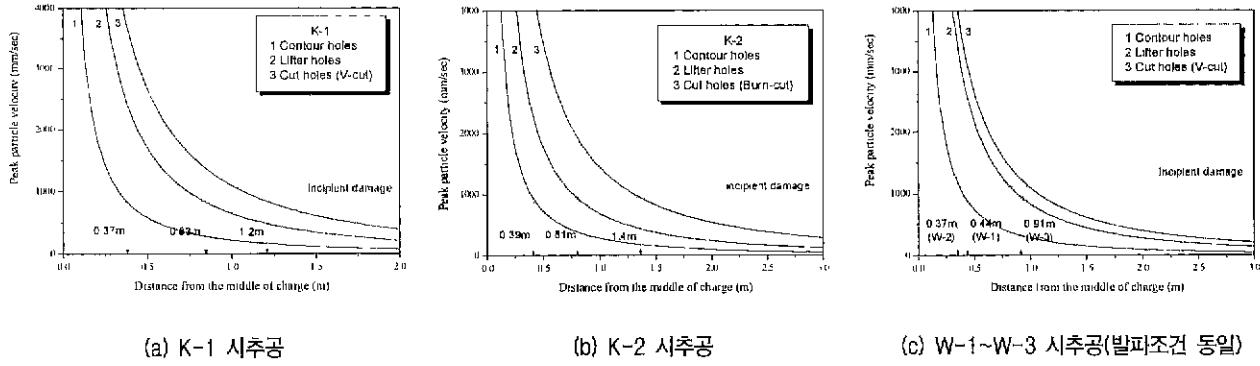


그림 10. 발파진동속도로 예측된 손상범위

같은 관계를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha &= b \cdot n \\ \beta &= n \end{aligned} \quad (12)$$

식 (1)에서 거리와 지발당 최대장약량의 비인 R/W^b 를 환산거리(Scaled Distance, SD)라 하며, $b=1/2$ 이면 자승근 환산거리(square root scaled distance), $b=1/3$ 이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라 한다. 이는 각각 거리를 장약량의 자승 및 삼승의 비율로 환산한 형태이며 둘다 사용되고 있으나 일반적으로 비교적 가까운 거리에서는 삼승근이, 먼거리에서는 자승근이 더욱 잘 맞는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 근거리의 발파진동속도를 예측하기 위하여 삼승근 환산거리를 사용하였다.

시험발파에서 측정된 진동속도와 환산거리를 log-log 그래프상에 도시하고 최소자승법에 의해 회귀분석을 하면 환산거리의 대수값과 입자속도의 대수값 사이의 관계를 나타내는 하나의 직선식을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 식으로부터 부지의 지질, 암반조건, 발파조건 등에 따라 좌우되는 발파상수인 K , n 값을 결정할 수 있는데 직선의 기울기로부터 n 값을 구할 수 있으며 K 값은 환산거리가 1일때의 입자속도값이 된다.

회귀분석 결과 심발공, 바닥공 및 최외곽공에 대해 얻어진 발파진동식은 다음의 (13), (14), (15)와 같다. 일반적으로 본 연구와 같이 심발공, 바닥공 및 최외곽공에 대한 발파진동식을 구하지 않고 해석하는 경우도 있으나 티널벽면 주변 암반의 손상에 주된 영향을 미치는 것은 최외곽공 발파에 의한 것이므로 각각의 발파진동식을 구해야 할 것이다. 잘못된 확대공 발파에 의해 주변 암반이 손상을 받은 경우도 보고된 바 있으나 본 연구에서는 확대공에 의해 손상을 받은 암반은 굴착되고 최외곽공 발파에 의해 주변 암

반의 손상이 발생하는 것으로 가정하였다.

$$V = 1174 \cdot (SD)^{-1.68} \quad (R^2=0.92, \text{ 심발공}) \quad (13)$$

$$V = 898 \cdot (SD)^{-1.82} \quad (R^2=0.89, \text{ 바닥공}) \quad (14)$$

$$V = 626 \cdot (SD)^{-1.84} \quad (R^2=0.92, \text{ 최외곽공}) \quad (15)$$

이상에서 얻은 심발공, 바닥공, 최외곽공에 대한 발파상수와 발파에 사용한 화약의 I_{ANFO} 를 이용하여 식 (4)를 수치적분하면 장약공의 중간지점에서 일정한 거리까지의 진동치를 구할 수 있다. 본 연구에서는 Simpson's rule을 사용하여 수치적분하였으며, 입력자료는 발파상수 K , n 및 장약길이와 ANFO로 정규화한 선형장약량 I_{ANFO} 이다.

이러한 단계로 얻어진 거리에 따른 근거리 입자속도를 도시한 뒤 2.1절에서 설명한 변형율 손상모델에 의해 식 (9)로부터 손상한계에 해당하는 진동수준을 구하여 손상영역의 범위를 예측할 수 있다. 이때 식 (9)에 암석물성을 대입해야 하는데 이 경우 각 시추공에서 손상을 받지 않은 것으로 예측되는 1m 이상의 심도에서 측정된 암석물성을 평균하여 사용하였다.

해석결과 그림10과 같은 그래프가 얻어지며 각 시추공별 발파진동속도로 예측된 손상영역의 범위는 표3과 같다.

실험실 시험으로부터 추정되는 암반 손상영역과 발파진동속도로 예측한 손상영역의 범위는 최대 20cm정도의 차이를 보이지만 암반조건이나 발파패턴에 따른 손상영역의 크기는 대체로 비슷한 경향을 보인다. 그러나 입자속도에 의해 예측되는 손상범위는 비교적 원거리에서 측정된 입자속도를 외삽(extrapolation)하여 얻어진 결과로 현재 근거리 입자속도를 직접 측정하여 그 타당성을 검토하고자 하는 많은 연구들이 진행중이고 근거리에서 실제 측

표 3. 발파진동속도로 예측된 암반 손상영역의 범위

시추공 No.	천공장 (m)	선형장약량 I_{ANFO} (kg/m)			V_d (mm/sec)	손상영역의 범위 (m)
		심발공	바닥공	최외곽공		
K-1	2.2	0.59	0.39	0.12	843	0.37 (최외곽공)
K-2	2.5	0.93	0.41	0.17	943	0.39 (최외곽공)
W-1	2.2	0.59	0.59	0.18	894	0.44 (최외곽공)
W-2	2.2	0.59	0.59	0.18	1121	0.37 (최외곽공)
W-3	2.2	0.59	0.59	0.18	953	0.91 (바닥공)

정한 결과와 외삽법으로 예측한 값이 차이를 보이는 사례도 보고되고 있다. 또한 이 방법은 발파공에서부터 에너지가 탄성매질을 따라서 감쇄함을 가정하고 암질이 우수한 경우에 잘 적용되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 구한 발파진동식의 상관계수가 비교적 높은 값을 나타내었고, 각 시추공의 암석시험 결과를 직접 입자료로 활용하였기 비교적 실험실 시험결과와 비슷하게 암반손상권이 예측된 것으로 판단된다.

현장에서 직접 암석시험편을 채취하여 암반 손상영역을 산정하는 방법의 경우 시추비용이 고가인 점을 고려할 때, 본 연구에서 적용된 방법 중에서 원거리에서 측정된 입자속도로부터 근거리 입자속도를 예측하는 방법이 적용성 측면에서 뛰어나다고 할 수 있다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 외삽에 의해 예측된 결과이며 시험회수가 적기 때문에 다양한 암반상태 및 발파조건을 가지는 여러 발파 현장에서 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 주된 결과는 다음과 같다.

- 1) 시추를 통해 채취한 암석시료의 실험실시험 결과, 암반 상태와 발파조건에 따라 차이를 보이지만 최외곽공의 경우 30~70cm, 바닥공의 경우에는 80~90cm 정도의 심도까지 손상영역으로 예측되었다. 또한 이 손상영역의 경우 원암반과 비교할 때 일축압축강도는 최대 8~26%, P파속도는 62~82%, S파속도는 50~70% 그리고 탄성계수는 18~35% 수준까지 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 암석의 여러 물리적, 역학적 특성을 충족하는 시험 결과로부터 손상영역의 범위를 예측하는 방법을 제시하였다. 특히 본 연구에서 사용한 방법은 원거리에서 측정된 입자속도로부터 근거리 입자속도를 예측하여 암반손상 영역을 예측하는 방법이 적용성 측면에서 뛰어나다고 할 수 있다. 그러나 이 결과는 원거리에서 측정된 입자속도를 외삽하여 얻어진 것이며, 발파진동식의 신뢰성과 임계속도 결정에 필요한 암석 특성의 선정 등에 있어 문제점을 내포하고 있기 때문에

느 정도 추정할 수 있었으나 탄성계수와 σ_{AE} 의 변화는 편차가 매우 커서 범위를 추정하기 어려웠다. 탄성파속도가 암석내부의 미세균열, 밀도, 공극율, 특히 파쇄정도에 따라 크게 달라진다는 점을 고려하면 탄성파속도로 손상영역의 범위를 추정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 한편 σ_{AE} 는 암반의 다양한 응력이력과 시추시의 응력개방 등으로 인해 편차가 크게 나타나 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

- 3) 동일한 발파조건에서 암반상태가 좋을수록 손상이 작게 나타나며 디커플링 효과가 손상영역의 범위에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 디커플링 지수가 높은 폭약을 사용하는 제어발파를 적용하면 발파로 인한 암반손상을 효과적으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 보어홀 카메라 측정결과, 암반벽면으로 대략 15~25cm 심도까지 균열이 매우 발달된 파쇄대를 관찰할 수 있었으나 손상영역이란 미세균열들이 발생하여 암석 특성의 영구적인 변화가 발생하는 영역까지를 포함하기 때문에 이러한 미세균열들을 확인할 수 없는 보어홀 카메라를 이용한 방법은 손상영역의 정량적 평가를 위해서는 적용하기 어려운 방법으로 판단된다.
- 5) 진동예측식에 의한 손상영역의 범위는 실험실시험 결과와 대체로 비슷한 범위가 예측되었다. 실험실 시험을 위한 암석시료의 채취에는 고가의 시추비용이 필요하다는 점을 고려하면 본 연구에서 사용한 방법들 중에서 원거리에서 측정된 입자속도로부터 근거리 입자속도를 예측하여 암반손상 영역을 예측하는 방법이 적용성 측면에서 뛰어나다고 할 수 있다. 그러나 이 결과는 원거리에서 측정된 입자속도를 외삽하여 얻어진 것이며, 발파진동식의 신뢰성과 임계속도 결정에 필요한 암석 특성의 선정 등에 있어 문제점을 내포하고 있기 때문에

추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 과제 R&D/96-0043 "터널발파-설계 자동화 프로그램의 개발에 관한 연구"의 지원에 의해 수행되었다. 아울러 현장시험에 협조해 준 영동고속도로 확장공사 제12공구 현대건설(주) 및 우원개발(주) 관계자 여러분께 깊이 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

- 1 이인모, 김상균, 이두화, 김신(1999). '터널 발파하중 산정 및 손상영역 평가에 관한 연구', 한국지반공학회 터널기술위원회 발파분야 워크샵, pp 1~20.
2. 임수빈(1996) "발파에 의한 터널굴착에 있어서 발파공 인접 암반의 동적 손상 평가", 박사학위논문, 경희대학교
3. Bogdanoff, Ingvar(1996), "Vibration measurements in the damage zone in tunnel blasting", Proc. 5th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 177~185.
- 4 Brent, G.F. & Smith, G.E.(1996), "Borehole inspection measurements behind blast limits as an aid to determining the extent of rock damage", Proc 5th Int Symp on Rock Fragmentation by Blasting, pp 103~112.
5. Fairhurst, C.(1999). "Rock Mechanics and Nuclear Waste Repositories", Proc. of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories. pp. 1~44.
6. Falls, S.D. & Young, R.P (1996), "Examination of the excavation -disturbed zone in the Swedish ZEDEX tunnel using acoustic emission and ultrasonic velocity measurements", Eurock '96, pp. 1337~1344.
- 7 Forsyth, W.W (1993), "A discussion of blast-induced overbreak around underground excavation", Proc. of 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 161~166.
8. Grady, D.E. & Kipp, M.E.(1987), "Dynamic fracture fragmentation", Fracture Mechanics of Rock, Academic Press Geology Series, pp 429~476
9. Holmberg, R. & Persson, P.(1979), "Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage", Proc. of IMM Tunnelling '79 Conference, pp. 3~6
10. Kesall, P.C. et al.(1984), "Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 21, No. 3, pp. 123~135.
11. Jakubick, A.T. & Franz, T.(1993), "Vacuum testing of the permeability of the Excavation Damaged Zone", Rock Mech. Rock Engng , Vol. 26, No. 2, pp. 165~182
12. Pusch, R. & Stanfors R (1992), "The zone of disturbance around blasted tunnels at depth", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 29, No. 5, pp. 447~456.
13. Pusch, R. & Svemar, C(1993), "Influence of Rock Properties on Selection of Design for a Spent Nuclear Fuel Repository", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 345~356
- 14 Seto, M. et al.(1996), "Evaluation of rock mass damage using acoustic emission technique in the laboratory", Proc. 5th Int. Symp. on Rock Fragmentation by blasting, pp. 103~112.
- 15 SKB(1991), "The role of the disturbed rock zone in radioactive waste repository safety and performance assessment - A topical discussion and international overview", SKB Technical Report 91-25
16. Stephansson, Ove(1999), "Rock Mechanics and Rock Engineering of Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Repositories in Sweden", Proc. of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories, pp. 205~227.
- 17 Sugihara, K., Yoshioka, H., Matsui, H. & Sato, T.(1993), "Preliminary results of a study on the response of sedimentary rocks to shaft excavation", Engineering Geology, Vol. 35, pp. 223~228.
18. Swoboda, G., Shen, X.P & Rosas, L (1998), "Damage Model for Jointed Rock Mass and Its Application to Tunnelling", Computers and Geotechnics, Vol. 22, No. 3/4, pp. 183~203.
19. Worsey, P.N.(1985), "Insitu measurement of blast damage underground by seismic refraction surveys", Proc. of 26th US Symp. on Rock Mech., pp. 1133~1140.
20. Yang, R.L., Rocque, P., Katsabaris, P. & Bawden, W.F.(1993), "Blast damage study by measurement of blast vibration and damage in the area adjacent to blast hole", Proc. 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 137~144

(접수일자 2000. 6. 29)