

## 충격하중을 받은 인공취성재료의 손상평가에 관한 연구

조상호<sup>1)</sup>, 조슬기<sup>1)</sup>, 천대성<sup>2)\*</sup>, 신중호<sup>2)</sup>, 양형식<sup>3)</sup>, 김승곤<sup>1)</sup>

### A Study on the Damage Assessment of Artificial Brittle Materials subjected to Impact Loading

Sang-Ho Cho, Seul-Ki Jo, Dae-Sung Cheon, Joong-Ho Synn, Hyung-Sik Yang, Seung-Kon Kim

**Abstract** Dynamic fracture mechanism of rock is important to improve rapid excavation method and develop precise damage assesment of rock mass in the vicinity of an excavation. In order to investigate dynamic fracture characteristics and dynamic damage mechanism of brittle materials, this study employed pulse shape-controlled Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system. The P- and S-wave velocities of the tested samples were measured before and after tests to examine damage of the samples. The decay ratios of the Ultrasonic wave velocities increased with impact velocities and the samples which have lower strength showed higher permanent strain significantly.

**Key words** Dynamic fracture mechanism, Damage assesment, Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB), Decay ratio of elastic wave velocity

**초 록** 암반 굴착기술의 고속화 및 정밀한 암반손상평가를 위해서는 암석의 동적파괴 메커니즘에 관한 연구가 중요하다. 본 연구에서는 충격 파형 제어 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 시스템을 이용하여 모의 암석시료에 단계별 충격하중을 가하여 취성재료의 동적파괴 특성 및 동적손상메커니즘을 분석하였다. 실험시료의 손상도 평가를 위하여 충격실험 전후에 모든 시료에 대하여 P파 및 S파 속도를 측정하였으며, 탄성과 속도 감쇠정도에 따른 손상도를 평가하였다. 모의 연암 시료와 경암 시료의 탄성과 속도 감쇠비는 충격하중이 증가함에 따라 비슷한 수준으로 증가하는 경향을 보였으나, 최종 변형률의 경우 모의 연암 시료에서 현저히 높은 값을 나타내었다.

**핵심어** 동적파괴 메커니즘, 손상평가, 스플릿 홉킨슨 압력바, 탄성과속도 감쇠비

## 1. 서 론

대규모 지하공간에서는 주로 발파에 의한 굴착이 이루어지는데, 특히 핵폐기물 처분장 및 에너지 저장시설과 같이 밀폐성과 차폐성(sealing)이 요구되는 경우에는 주변암반의 손상을 최소화 할 수 있는 굴착공법이 요구된다. 발파 굴착공법의 경우 폭약의 폭발에 의한 충격 에너지에 의해 암반의 파쇄가 발생하는데 이때 발생하는 암반 손상영역에 대한 손상발생 메커니즘 및 평가 방법에 대한 많은 연구가 진행 되고 있다. 각종 시험 방

법 중 탄성과 속도를 이용한 암반 손상 영역 평가 방법이 많이 이용되는데, 특히 탄성과 토모그래피 방법 및 탄성과 굴절법 탐사를 이용한 암반 손상영역의 평가가 이루어졌다(Carlson and Young, 1993; Maxwell and Young, 1993; Sato et al., 2000). 또한 실제 현장에서 회수한 암석 코어를 이용하여 실내 탄성과 시험으로 발파에 의한 터널 주변 암반의 손상 영역 평가에 관한 연구를 하였으며, 실제 손상영역에 대하여 탄성과 속도 측정법을 이용하여 발파 손상영역을 평가하였다(장수호 외, 2000; 최병희 외, 2008).

Kolsky(1949)는 처음으로 두 개의 압력바 사이에 시편을 설치하는 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 방법을 소개하였고, 손상을 받은 시료 내 응력과 변형률은 압력바의 변위 및 변형률과 직접적인 상관관계가 있음을 발표하였다. Kumar (1968)는 SHPB 실험에 화강암과 현무암의 시료를 적용하여 변형률속도와 온도변화가

<sup>1)</sup> 전북대학교 자원에너지 공학과

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원

<sup>3)</sup> 전남대학교 건설 지구 환경 공학부

\* 교신저자 : cds@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 11월 21일

심사 완료일 : 2008년 12월 17일

게재 확정일 : 2008년 12월 18일

암석의 동적강도에 미치는 영향을 연구하였다. Lundberg (1996)는 SHPB 실험 중 암석의 파괴과정을 고속카메라 화상촬영을 통하여 분석하고 하중방향의 균열과 파괴 입도는 하중속도가 증가함에 따라 증가한다고 지적하였다.

본 연구에서는 발파에 의한 암반손상과정 및 손상평가에 관한 기초적인 정보를 얻고자 충격하중을 받은 인공취성재료에 대한 동적손상 메커니즘 분석과 손상평가를 수행하였다. 이를 위하여 정밀 제작된 SHPB 시스템을 이용하여 모의 암석시료에 단계별 동적충격하중가하였으며, 이를 통하여 암반에 대한 단계적 손상을 모사하였으며, 이때 시료 내에 동적응력상태와 일정 변형률속도를 유지시키기 위하여 충격파형 제어기법 (Nemat-Nasser et al., 1991; Cho et al. 2007)을 적용하였다. 시료의 동적파괴특성과 동적손상도를 평가를 위하여 충격실험 이전과 이후의 탄성파 속도 측정을 수행하였으며, 이를 통하여 시료의 손상을 평가하였다.

## 2. Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 실험

### 2.1 SHPB 구성 및 실험법

암석의 동적 충격 하중에 따른 실험시료의 손상 정도를 파악하기 위해서 SHPB 시스템을 이용하여 실험시료에 충격하중을 가하였다. SHPB 시스템은 충격파를 전달해주는 충격바와 파형의 형상을 제어해주는 Pulse shaper, 입사바, 전달바로 구성되어있다.

그림 1에 나타낸 시스템은, 압축공기를 이용하여 충격바가 V의 속도로 입사바에 충돌하게 된다. 이때 바의 밀도가 ρ이면 입력바에는 ρCV/2의 크기를 갖는 응력파(입사파, Incident wave) ε<sub>I</sub>가 발생된다. 이 응력파는 입력바를 통하여 시편으로 전파되며 입사파 ε<sub>I</sub>가 경계면에 도달하여 두 개의 파가 생성된다. 파형은 입력바

를 따라 되돌아가는 반사파(reflected wave) ε<sub>R</sub>과, 시료를 통과한 뒤 계속 전진하여 출력바를 따라 전파되는 전달파(transmission wave) ε<sub>T</sub>가 생성된다.

입사바와 전달바를 전파하는 응력파는 변형률 게이지와 증폭회로, 고성능 오실로스코프를 통해 이산신호로 변환되어 컴퓨터에 저장된다. 저장된 데이터는 응력-변형률 관계, 변형률속도의 측정에 사용되며, 측정된 입사파 ε<sub>I</sub>, 반사파 ε<sub>R</sub> 및 전달파 ε<sub>T</sub>를 이용하여 시료 내 작용한 변형률속도 ε̇, 변형률 ε, 응력 σ을 구할 수 있다:

$$\dot{\epsilon} = -\frac{2C_0}{L} \epsilon_R \tag{1}$$

$$\epsilon = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R dt \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{A_0}{A} E_0 \epsilon_T \tag{3}$$

여기서 A<sub>0</sub>, E<sub>0</sub> 및 C<sub>0</sub>는 각각 입사바 또는 전달바의 단면적, 탄성계수 및 탄성파의 속도를 의미하며 A 및 L은 각각 암석시료의 단면적 및 길이를 표시한다. 충격바에서 측정되는 충격속도는 두 개의 레이저 다이오드와 고속 포토다이오드에 의해 측정된다. 충격바를 추진하기 위한 가스챔버는 500 psi의 허용용량을 가지고 있으며, 챔버 내 공기압이 150 psi을 초과하면 압축공기가 자동으로 방출되도록 설계되어 있다. 충격바의 길이는 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm의 다양한 길이를 적용하여 충격파형의 파장을 제어한다. 입사바의 길이는 2600 mm, 전달바의 길이는 1600 mm으로 하여 변형률 측정시에 충격파가 겹치지 않도록 하였다. 충격바, 입사바 및 전달바의 직경은 37 mm로서, 열처리한 고강도 Maraging 합금을 사용하고 있다.

### 2.2. Pulse shaper를 이용한 충격파 형상 제어법

SHPB실험법의 기본적인 가정 사항으로 시료는 반드시 파괴이전까지 응력 평형상태와 일정한 변형률속도를 유지하고 있어야 한다. 그러나 짧은 입사파의 증가 시간을 보여주는 전형적인 SHPB실험방법으로는 응력 평형과 일정 변형률속도의 가정 사항을 만족시키기 어려우므로 입사파의 증가시간을 제어할 필요가 있다.

입사파의 형상을 제어하는 방법으로 Pulse shaper 기법이 주로 적용되는데, 이 기법의 원리에 대하여 간단히 설명하면 다음과 같다. 가스챔버 내 임의의 압력의 압축공기를 일시에 방출시켜 베럴 내에 장착되어있는 충격바를 추진시켜 입사바에 충돌시킨다. 이때 입사바 끝단에 부착되어있는 금속재료의 Pulse shaper가 충격

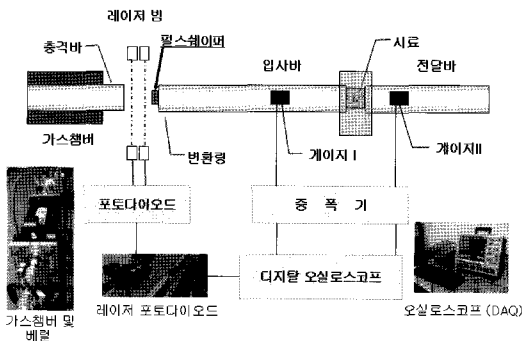


그림 1. Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system

바와 충돌 후, shaper의 소성변형과 동시에 단면적이 증가되어 입력파로 전파되는 입사파의 양이 서서히 증가하고, 이때 입사파의 형상이 변화하게 된다. 특히 입사파의 형상은 충격바의 길이, Pulse shaper 재질, Pulse shaper형상에 따라 달라지게 되는데, 이러한 특성을 이용하여 입사파의 형상을 제어하게 된다. 그림 2는 동재질의 Pulse shaper disk를 보여주고 있다.

그림 3은 Pulse shaper를 사용하지 않은 경우와 사용하는 경우의 입사파와 전달파의 파형을 비교하고 있다. Pulse shaper를 부착함으로써 파형의 변화를 관찰할 수가

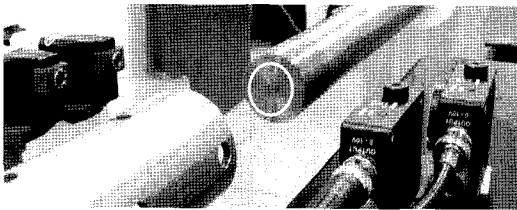
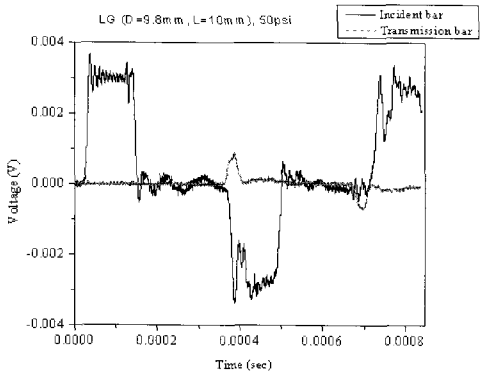
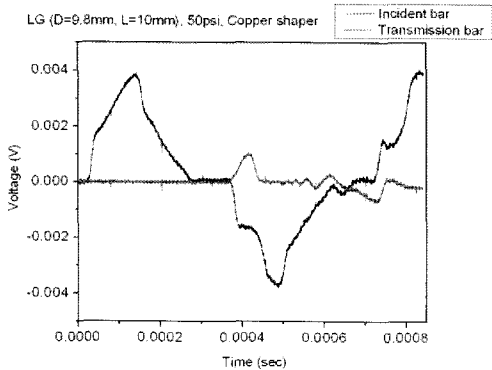


그림 2. 입사바에 부착되어 있는 Pulse shaper



(a) Pulse shaper 미부착



(b) Pulse shaper 부착

그림 3. 전형적인 SHPB와 펄스형상제어 SHPB에 의한 응력파의 비교

있는데 검은 실선의 입사파 파형이 점차적으로 증가하여 최고점에 도달하는데 까지 걸리는 시간(Rising time)이 달라지는 것을 그래프를 통해 확인 할 수가 있는데 이러한 증가시간(Rising time) 변화를 통해 시편 파괴 이전에 시료내의 응력 평형과 일정한 변형률 속도를 유지할 수 있으며 파형의 분산 등에 의한 고주파 발생을 억제 할 수 있다.

### 3. 암질재료의 동적손상실험

#### 3.1 실험시료

강도가 다른 모의 암석시료를 제작하기 위하여 시판되는 바닥용 시멘트 모르타르와 그라우트용 시멘트를 사용하여 두 강도를 가진 블록을 제작하였다. 이 블록으로부터 직경 31 mm의 코어시료를 얻었으며, 코어시료는 직경과의 길이의 비가 1이 되도록 30 mm의 길이로 절단하였다. 시료는 입사바와 전달바의 사이에서 위치하게 되므로 시료의 가압면을 정밀하게 가공하여 응력파가 전달되는데 지장이 없도록 하여야 한다. 본 연구에서는 실험시료의 양단의 편평도 오차를 10  $\mu\text{m}$  이내로 연마하였으며, 정밀 가공된 시료는 그림 4에 나타내었다.

시료는 압축강도의 차이로서 A와 B시료로 구분하였으며, 시료는 각각 20 MPa와 80 MPa로서 60 MPa의 강도차이를 보이고 있다. 각 시료의 평균 물성 값을 표 1에 나타내고 있다.

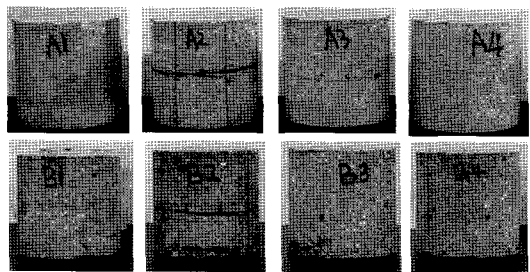


그림 4. 동적 손상 실험 시료

표 1. 동적 손상 실험 시료의 크기와 물성

물성값	A 시료	B 시료
길이(mm)	29.99	30
직경(mm)	30.92	31.54
비 중	2.203	2.209
일축 압축 강도(MPa)	20	80
S파 속도(m/s)	1820	3510
P파 속도(m/s)	1990	4260

3.2 실험 조건 및 동적 손상 실험

모의 암석시료의 단계별 동적손상을 제작하기 위하여, SHPB실험장비를 이용하여 점차적으로 충격하중을 증가시켰다. 실험 시료가 충격하중에 의하여 파괴편이 분산되는 것을 막기 위하여 시료표면에 유연성 테이프를 입혔다. 사전실험으로부터 가스압이 0.1~0.14 MPa에서 시료가 완전 파괴되는 것을 확인하였으며, 본 실험에서는 모의 연암시료는 0.05~0.14 MPa, 모의 경암시료는 0.04~0.14 MPa의 가스압을 주입하여 충격하중을 가하였다. 그림 5은 실험에서 적용한 가스압과 충격바의 추진속도 (또는 발사속도)의 관계를 보여주고 있다. 여기서 보여주는 선형적인 관계는 본 실험에서 적용한 SHPB장비의 정밀도 및 높은 재현성을 보여주고 있다. 특히 충격속도는 그림 1에서 보여주는 두 개의 레이저포인트와 고속 포토다이오드를 이용하여 두 포토다이오드의 간격과 반응 시간으로 측정하였다. 표 2는 동적손상실험의 조건과 입사 충격응력을 나타내고 있다. 여기서 충격응력은 앞서 말한  $\rho CV/2$ 의 이론식으로부터 계산된 값이며, 충격속도와 비례하는 것을 알 수 있다.

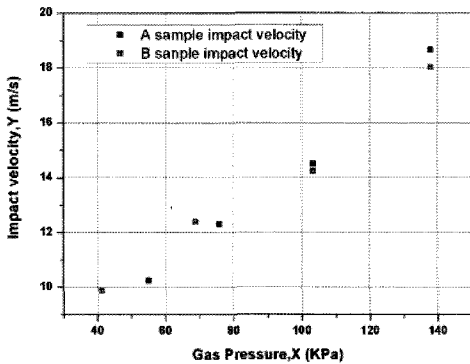


그림 5. 가스압과 충격 속도와의 관계

표 2. 동적 손상 실험 조건 및 입사 충격응력

시료번호	가스압 (kPa)	충격속도 (m/s)	충격응력 (MPa)
A1	55	10.24	230
A2	75	12.30	276
A3	103	14.50	326
A4	137	18.67	419
B1	41	9.88	221
B2	68	12.40	278
B3	103	14.26	320
B4	137	18.02	404

3.3 동적 손상 실험 결과

앞에서 언급한 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ , 변형률 $\epsilon$ , 응력 $\sigma$ 를 구하기 위하여 입사파 $\epsilon_R$ , 반사파 $\epsilon_T$  및 전달파 $\epsilon_T$ 를 측정할 필요가 있으며, 이것은 입사파 및 전달파에 부착되어 있는 변형률게이지를 통하여 측정된다. 그림 6. (a)에서는 모의 연암시료(A1)를 대상으로 한 충격실험에서 계측된 입사파와 전달파의 시간이력곡선을 보여주고 있다. 입사파와 반사파는 입력바에서 측정된 파형이며, 투과파는 전달바에서 측정된 파형이다. 여기서 입사파는 충격바와 입사바가 충돌하면서 발생한 응력파로 전달바를 향하여 전파하며, 입사파의 파형은 충격바의 속도, 충격바와 입사바의 재질과 형상, 충격바와 입력바의 사이에 놓여진 Pulse shaper의 두께 및 직경에 따라서 결정된다. 본 실험에서 사용된 Pulse shaper의 두께 및 직경은 각각 0.75 mm, 5 mm이다. 입력바에 부착된 변형률 게이지 1로부터 입사파와 반사파가 측정되고, 전달바에 부착된 변형률 게이지2로부터 전달파가 측정되게 된다. 입력바에 전달되는 입사파는 입력바에서 시편의 경계로 전달된다. 입력바와 시편의 경계에서 입사파는 시료와 입사바의 임피던스 차이에 의하여 일부는 반사되며 일부는 투과된다. 반사된 인장응력파(부의 기호)는 입력바에 다시 전달되어 입력바에 부착된 변형률 게이지에 의해서 다시 계측되며, 투과한 압축 응력파는 시료와 전달바로 전파되어 전달바에 부착되어 있는 스트레인게이지에서 측정된다. 계측된 입사파의 증가시간은 충격속도가 빨라짐에 따라서 134  $\mu$ s에서 75.2  $\mu$ s로 감소하였다(표 3 참조). 반사 인장응력파의 기울기가 작아지는 영역은 일정한 속도로 변형이 발생하는 구간이며, 이후 급작스럽게 다시 증가하는 양상을 보이는데 이것은 시료내 손상이 발생하기 시작하였음을 의미한다.

그림 6.(b)에서는 모의 경암시료(B1)시료의 실험으로부터 얻어진 계측파형을 보여주고 있다. 모의 경암시료의 실험으로 측정된 입사파의 증가시간은 충격속도가 빨라짐에 따라서 119  $\mu$ s에서 79.6  $\mu$ s로 감소하였다. 실험으로부터 얻어진 입사파, 반사파, 전달파를 식 (1), (2), (3)에 의하여 시료의 동적응력-변형률 곡선을 작성하였으며, 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서 보여주는 모의 연암시료 A1의 동적응력-변형률 관계를 살펴보면, 가압초기에 탄성거동을 보이며 125 MPa에서 응력값이 감소하기 시작하여 최종적으로 약 0.006의 변형률을 보이며 변형거동을 멈추었다. 나머지 A2, A3, A4시료의 경우에는 가압초기에만 탄성거동을 보이다가 그 이후에는 소성거동을 나타내었다. A4시료의 경우, 낮은 응력값을 보여주는데 이것은 높은 충격압에 의하여 시료 내 응력이 평형상태가

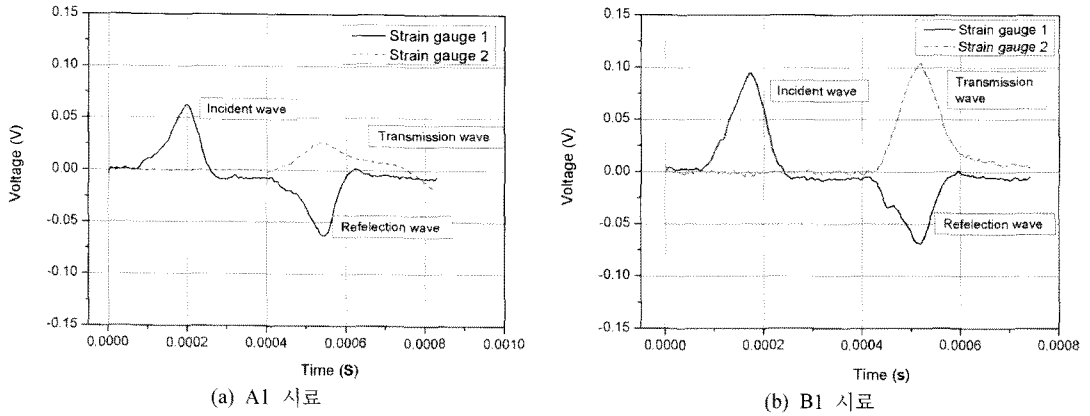


그림 6. 모의 암석 시료의 파형 측정 결과

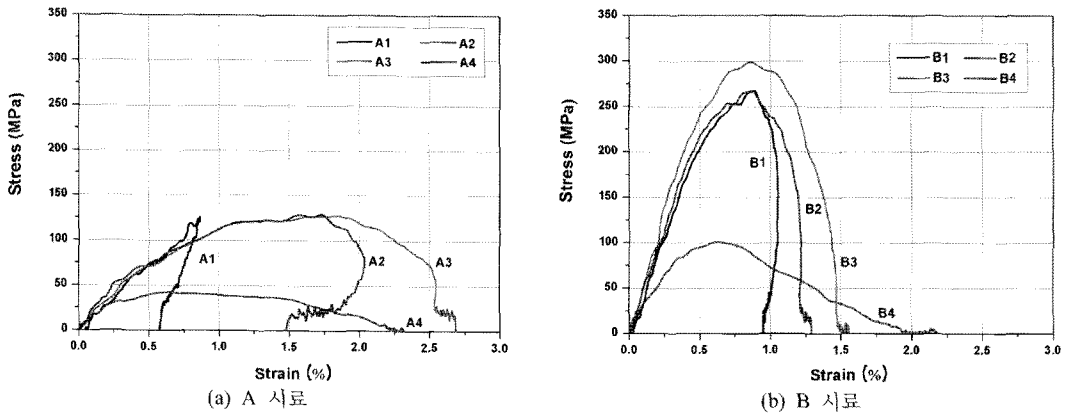


그림 7. 동적 손상 실험에 의한 모의 암석시료의 응력-변형률 관계

표 3. 모의 암석 시료의 동적손상실험결과

시료 번호	입사응력 증가시간 ( $\mu$ s)	최대 입사응력 (MPa)	충격 속도 (m/s)	파괴강도 (MPa)	임계변형	결보기변형률 (%)	최대 변형속도 (1/s)
A1	134.0	111	10.24	125.7	0.008	0.13	114
A2	126.7	141	12.30	129.3	0.017	0.4	266
A3	115.7	186	14.50	127.6	0.019	1.0	288
A4	75.2	226	18.67	42.3	0.006	1.5	362
B1	119.0	110	9.88	267.3	0.009	0	114
B2	123.7	175	12.40	267.3	0.008	0.06	122
B3	197.4	207	14.26	298.9	0.008	0.23	168
B4	79.6	212	18.02	100.8	0.006	0.5	227

되기 이전에 국부적인 파괴가 발생하여 전달되는 전달 파의 양이 급격히 감소하였기 때문이다. 모의 경암시료 B1, B2, B3의 경우 250 MPa~300 MPa 범위의 최대

응력값을 보이며, 손상이후에 응력 값이 감소하였다. 이들 시료는 재하 초기에 탄성거동을 보이다가 파괴직전에 약간의 소성변형을 나타내었으며, 최대 응력값 즉,

파괴강도의 평균값은 280 MPa이었다. 연암시료와 경암시료 모두 탄성계수의 변형률속도 의존성을 보이지 않았다. 이것은 충격하중이 증가함에 따라 시료내 발생된 균열이 증가하여 시료에서 전달바로 전달되는 파의 양이 감소하였기 때문으로 판단된다. 표 3은 동적 손상 실험 결과를 보여주고 있다. 여기서 파괴강도는 응력의 최대 값을 나타내며, 임계변형률은 응력이 파괴강도에 도달했을 때의 변형률을 의미한다. 겔보기 변형률은 충격실험 전후의 시료의 길이변화와 시료 길이에 따른 변형률을 나타내며, 충격 속도가 증가함에 따라서 겔보기 변형률도 증가하는 것을 볼 수 있다.

**4. 동적파괴시료의 탄성파 속도 측정 및 동적손상에 관한 고찰**

동적파괴실험 전후에 시료에 대한 탄성파속도 측정을 수행하여 각 시료에 대한 손상평가결과를 표 4에 정리하였다. 동적손상시료에 대한 손상도 $\omega$ 의 평가는 일반적으로 손상역학에서 사용되는 손상도 평가식을 사용하였다(Kim et al, 1998).

$$\omega = 1 - \left( \frac{V_{p-after}}{V_{p-before}} \right)^2 \quad (0 < \omega < 1) \quad \text{식 (4)}$$

여기서  $V_{p-after}$ 는 충격실험 후 시료의 P파속도,  $V_{p-before}$ 는 충격실험 전 시료의 P파속도를 의미한다.

표 4에서 보여주는 탄성파 속도 감쇠비는 충격실험 전후의 탄성파 속도 차이를 실험 전의 탄성파 속도로 나눈 값이다. 감쇠비는 충격속도와 함께 급격히 증가하다가 구배가 점차 감소하는 경향을 보여주었다. 이것은 충격속도가 증가함에 따라 시료 내에 많은 균열이 발생하여 탄성파의 진행을 방해하여 탄성파 속도가 감소하

였음을 의미한다. 그림 8은 표 4에서 보여주는 겔보기 변형률과 실험시료에 대한 속도감쇠비의 관계를 보여주고 있다. 모의 연암시료는 낮은 충격하중을 받은 경우 S파속도의 감쇠비는 P파속도보다 큰 값을 보였으나, 모의 경암시료는 P파속도와 S파속도의 감쇠비는 변형률이 증가함에 따라 비슷한 구배를 보이며 증가하였다. 특히 모의 연암시료와 경암시료의 속도 감쇠비는 비슷한 수준으로 증가하였으나, 겔보기 변형률은 최대 3배 이상의 차이를 보였다. 이 결과는 탄성파속도 감쇠비와 손상정도는 비선형적인 관계를 가지고 있음을 암시하고 있다. 이것은 탄성파 속도 측정방향이 시료 내 발생된 균열의 생성방향과 일치하여, 균열의 발생량이 탄성파의 속도의 감쇠정도에 비례하지 않은 것으로 판단된다. 최종 변형률이 균열의 발생빈도와 비례한다고 가정했을 때 탄성파 속도 감쇠비를 이용하여 손상도를 평가하는 것은 무리가 있다고 판단된다.

그림 9에는 실험시료의 손상도와 겔보기변형률의 관

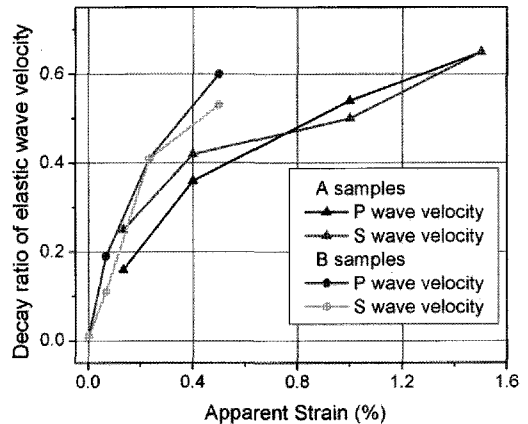


그림 8. 탄성파 속도 감쇠비와 겔보기 변형률 관계

표 4. 모의 암석시료의 탄성파 속도와 동적 손상도

시료번호	충격속도 (m/s)	충격실험 이후 탄성파 속도 (m/s)		탄성파 속도 감쇠비		손상도 $\omega$
		S파	P파	S파	P파	
A1	10.24	1530	2630	0.16	0.25	0.44
A2	12.30	1160	2050	0.36	0.42	0.66
A3	14.50	840	1750	0.54	0.50	0.75
A4	18.67	630	1220	0.65	0.65	0.89
B1	9.88	2030	4550	0.01	0.01	0
B2	12.40	1480	3120	0.19	0.11	0.53
B3	14.26	1070	2080	0.41	0.41	0.79
B4	18.02	730	1660	0.60	0.53	0.87

계를 나타내고 있으며, 낮은 변형률에서 손상도의 높은 증가율을 보이다가 0.4%이후에는 낮은 증가율을 나타내고 있다. 그림 10은 충격실험 후 시료 표면에 나타난 균열을 보여주고 있다. 대부분의 균열은 충격하중방향과 평행하게 발생하였으며, 충격속도가 증가함에 따라 균열의 길이는 짧아지고 균열의 발생 수는 증가하는 경향을 보이고 있다. 표면에 나타난 균열이 내부 균열과 연결되어 있다고 가정하면, 탄성파속도 측정에서의 측정방향은 시료 내 발생된 균열의 방향과 일치하여 탄성파속도로부터 평가된 손상도  $\omega$ 는 실제로 발생된 균열밀도와 비례하지 않게 된다. 다시 말하면, 충격하중의 증가에 따른 탄성파 속도 감쇠비의 영향이 과소평가된 것으로 판단된다. 본 연구는 탄성파 속도의 측정에 의한 손상도 평가에서 균열의 발생방향이 중요한 역할을 하고 있음을 보여주고 있으며, 시료 내 균열의 정밀한 평가가 요구된다. 본 연구에 대한 후속 결과로서, 3차원 단층촬영기법을 이용하여 실험시료 내 균열을 3차원으로 평가한 결과와 새로운 손상도 평가에 관한 내용을

발표할 계획이다. 본 연구에서는 강도의 변화와 균열의 관찰이 비교적 용이한 시멘트모르타르를 이용하여 인공 암질재료를 제작하고 동적손상실험을 수행하였으나, 자연 재료인 암석에 대한 동적손상실험과 동적강도의 변형률속도 의존성에 관한 연구가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 인공 취성재료의 동적파괴 특성 및 동적손상메커니즘을 분석하기 위하여 정밀 가공된 모의 연암시료 및 경암시료를 제작하여, SHPB 시스템으로 각 시료에 단계별 충격하중을 가하여 동적손상시료를 제작하였다. 파괴이전 시료 내 응력평형 및 일정 변형률속도를 유지하기 위하여 필스형상제이기법을 적용하였으며, 충격속도가 증가함에 따라 입사파의 증가시간은 감소하고 최대응력값은 증가하였다. 본 연구로부터 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

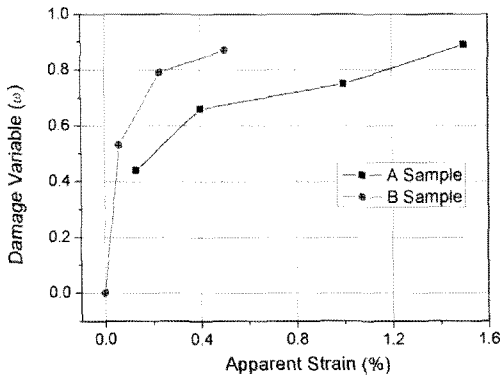
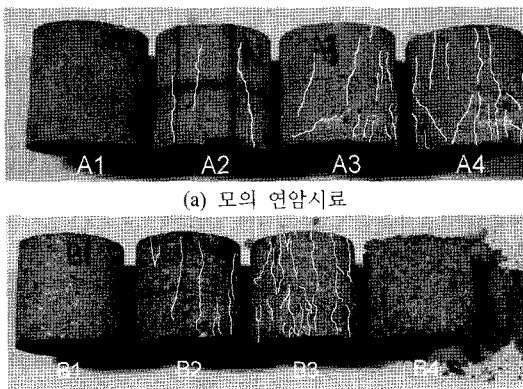


그림 9. 손상도와 겉보기 변형률과의 관계

- 1) 응력평형상태를 만족시킨 응력-변형률 곡선에서 모의 연암시료는 가압초기에 탄성거동을 보이다가 점차 소성변형이 발생하였으며, 평균 파괴강도는 125 MPa으로서 정적강도의 약 6배를 나타내었다. 모의 경암시료는 재하 초기에 탄성거동을 보이다가 파괴 직전에 약간의 소성변형을 보였으며, 평균 파괴강도는 280 MPa으로서 정적강도의 3.5배를 보여 주었다. 모의 연암시료와 경암시료 모두 탄성계수의 하중속도 의존성을 보이지 않았으나, 겉보기 변형률은 하중속도가 증가함에 따라 증가되었다.
- 2) 탄성파 속도 감쇠비와 겉보기 변형률 관계에서 모의 연암시료와 경암시료의 탄성파 속도 감쇠비는 비슷한 수준으로 증가하였으나 연암시료의 겉보기 변형률은 3배 이상 크게 발생하였다. 원인으로 탄성파 속도 측정방향이 시료 내 발생된 균열의 생성방향과 일치하여 균열의 발생량이 탄성파의 속도의 감쇠정도에 비례하지 않아 발생한 현상이다.
- 3) 손상시료의 표면관찰로부터, 균열은 충격하중방향과 평행하게 발생하는 것을 확인하였으며 충격속도가 증가함에 따라 균열의 길이는 짧아지고 균열의 발생 수는 증가하는 경향을 보여 주었다.



(a) 모의 연암시료

(b) 모의 경암시료

그림 10. 충격실험 후 모의 암석시료표면의 발생균열

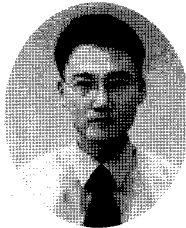
사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘고심도 지하연구실험실(URL) 구축 및 실증실험연구’ 과제에 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

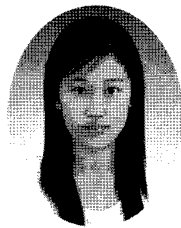
1. Carlson S. R. and R. P. Young, 1993, Acoustic emission and ultrasonic velocity study of excavation-induced microcrack damage at the underground research laboratory, *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 30, 901-907.
2. Maxwell SC and Young RP, 1993, Seismic Imaging of Blast Damage, *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 30, 1435-1440.
3. Sato, T., T. Kikuchi and K. Sugihara, 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, *Eng. Geol.* 56, 97-108.
4. 장수호, 신일재, 최용근, 이정인, 2000, 발파에 의한 터널 주변 압반의 손상영역 평가에 관한 연구, *한국지반공학회 논문집*, 제16권 제5호, 129-140.
5. 최병희, 정주환, 신중호, 조철현, 2008, 탄성파 탐사법을 활용한 광산갱도 주벽의 발파 손상대 평가, *대한화학발표 공학회 춘계학술발표회 논문집*, 21-31.
6. Kumar, A, 1968, "The effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite.", *Geophysics*, 33, 501-510.
7. Kolsky H, 1949, "An Investigation of the mechanical properties of materials at very high rate of loading." *Proc. Roy. Soc. Lon. B.* 62, 676-700.
8. Lundberg, B, 1976, "A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 13, 187-197.
9. Nemat-Nasser S, Isaacs JB, Strtrett JE, 1991, "Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments" *Pro. Roy.Soc.Lon.* A435, 371-391.
10. Cho SH, Mohanty B, Rajeev R, Xia K, Kaneko K, 2007, "Fragmentation mechanism of rock in Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test", *21st Canadian Congress of Applied Mechanics*, Ryerson University, Toronto, Canada, June 3-7, 607-608.
11. Kim D.S. and McCarter M.K., 1998, "Quantitative Assessment of Extrinsic Damage in Rock Materials", *Rock Mech. Rock Engng*, 31 (1), 152-171.

**조 상 호**



1998년 전북대학교 공과대학 자원공학과 학사  
 2000년 전남대학교 대학원 자원공학과 석사  
 2003년 북해도대학교 대학원 공학연구과 박사  
 Tel: 063-270-4636  
 E-mail: chosh@chonbuk.ac.kr  
 현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

**조 슬 기**



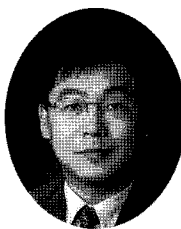
2007년 전북대학교 공과대학 자원공학과 학사  
 Tel: 063-270-4636  
 E-mail: anjo44@chonbuk.ac.kr  
 현재 전북대학교 자원·에너지공학과 석사 과정

**천 대 성**



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사  
 Tel: 042-868-3248  
 E-mail: cds@kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

**신 중 호**



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
 1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사  
 Tel: 042-868-3242  
 E-mail: jhsynn@kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

**양 형 식**



1979 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사  
 1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
 1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사  
 Tel: 062-530-1724  
 E-mail: hsyang@jnu.ac.kr  
 현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

**김 승 곤**



1977년 전북대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1980년 전북대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
 전남대학교 공과대학 자원공학과 공학박사  
 Tel: 063-270-2364  
 E-mail: skkim@chonbuk.ac.kr  
 현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수