

## 동적하중 하에서 석회암의 변형 및 파괴거동에 관한 실험적 연구

강명수, 강형민, 김승곤, 천대성, 金子勝比古, 조상호\*

## Experimental Study on Deformation and Failure Behavior of Limestones under Dynamic Loadings

Myoung-Soo Kang, Hyeong-Min Kang, Seung-Kon Kim, Dae-Sung Cheon,  
Katsuhiko Kaneko, Sang-Ho Cho\*

**Abstract** Information on the deformation behavior and fracture strength of rocks subjected to dynamic loadings is important to stability analyses of underground openings underground vibration due to rock blasts, earthquakes and rock bursts. In this study, Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system was applied to estimate dynamic compressive and tensile fracture strengths of limestone and also examine deformation behavior of limestones under dynamic loadings. A micro-focus X-ray CT scanner was used to observe non-destructively inside the impacted limestone specimens. From the dynamic tests, it was revealed that the limestone have over 140MPa dynamic compressive strength and the strain-rate dependency of the strength. Dynamic Brazilian tensile strength of the limestone exceeds 21MPa and shows over 3 times static Brazilian tensile strength.

**Key words** Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB), Dynamic compressive strength, Dynamic Brazilian tensile strength, Limestones

**초 록** 동적하중 하에서 암석의 변형거동 및 파괴강도는 발파, 지진 또는 암반돌출의 지진동에 의한 지하구조물의 안정해석에 중요하다. 본 연구에서는 스플릿 홉킨슨 압력봉(SHPB) 충격실험시스템을 석회암시료의 일축압축 시험과 압열인장시험에 적용하여 고변형률과 동적강도 평가를 수행하였다. 충격봉의 발사속도를 제어하여 파괴강도 이하 동적응력 상태에서의 석회암시료의 동적응력-변형거동을 분석하였다. 시료 내 파괴여부 및 파괴양상을 파악하기 위하여 Micro-focus X-ray 단층촬영을 수행하였다. 동적 압축강도 실험결과, 석회암시료의 동적 압축강도는 변형률속도 의존성을 보였으며, 동적 압축파괴강도는 140 MPa 이상으로 평가되었다. 동적 압열인장 실험결과, 석회암시료의 동적 압열인장강도는 21 MPa 이상으로 정적 압열인장강도보다 3배 이상 높은 것으로 평가되었다.

**핵심어** 스플릿 홉킨슨 압력봉(SHPB), 동적 압축강도, 동적 압열인장강도, 석회암

## 1. 서 론

최근 국내 석회석 광산의 경우, 노천채광에서 갱내채

광으로 전환하거나 비산, 먼지, 진동 등의 환경 유해요소를 저감시키기 위하여 갱외시설물을 갱내화 하는 사례가 증가하고 있다. 특히 파쇄기와 선광시설 등 갱외 시설물을 지하에 설치하는 경우에는 지진이나 발파와 같은 지진동에 대한 지하공동 주변암반의 지속적인 안정성이 확보되어야 한다. 석회석 지하광산개발은 폭약을 이용한 굴착이 이루어지므로 공동주변 암반에 손상영역이 남게 되며, 이러한 영역은 지하공동의 장기간의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 발파하중과 같은 동적하중에 의한 암반의 손상에 관한 연구는 발파손상영역 예측과 손상대 평가법의 개발에 중요한 정보이지만

Received: Oct. 12, 2012

Revised: Oct. 22, 2012

Accepted: Oct. 23, 2012

\*Corresponding Author: Sang-Ho Cho

Tel) +82632704636, Fax) +82632704636

E-Mail) chosh@jbnu.ac.kr

Department of Minerals Resources and Energy Eng., Chonbuk National University, 567 Baekje-daero, deokjin-gu, Junju 561-756 Korea

이와 관련된 연구는 미미한 실정이다. 암석의 동적강도는 발파, 지진, 암반돌출에 의한 지진동과 같은 동적하중에 대한 암반 구조물의 안정성 평가에 중요한 요소가 된다. 또한 암석의 동적 파괴강도는 변형률속도 또는 응력속도와 비례하여 증가하는 경향을 보이며, 일반적으로 동적 파괴강도는 정적 파괴강도의 2배 이상으로 알려져 있다(Jason et al, 2002, Cho et al, 2007, Cho et al, 2009, Yang et al, 2011).

본 연구에서는 스플릿 홉킨슨 압력봉(SHPB) 충격실험시스템에 일축압축시험과 압열인장시험을 적용하여 석회암에 대한 동적강도 평가를 수행하였다. 사용된 암석시료는 장수광업소에서 채취한 백운암질 석회암으로 재현성을 높이기 위하여 정밀하게 제작되었다. 응력평형 이전에 시료 내의 파괴를 방지하기 위하여 펄스웨이핑 기법을 적용하여 입사파의 증가시간을 제어하였으며, 동적 변형률 측정법으로 계측된 변형률-시간 곡선으로부터 동적압축 및 동적 압열인장강도, 변형률 속도를 평가하였다. 충격봉의 발사속도를 제어하여 파괴강도 이하의 동적응력상태에서 석회암시료의 동적응력-변형거동을 분석하였다. 시료 내 파괴여부 및 파괴양상을 파악하기 위하여 고해상도 Micro-focus X-ray 단층촬영을 수행하였다.

## 2. 실험시료

### 2.1 시료 채취

시료 채취 현장은 전북 장수에 위치한 ○○산업(주)



Fig. 1. Underground limestone mine, Chonbuk province

장수광업소로서, 부근 지질에는 선캄브리아기 흑운모편마암과 백운암질 석회암, 구질 석회암이 주로 나타나고 있다. 광산에서 생산되는 백운암질 석회암은 백색 및 회백색의 결정질이며, 암맥의 경사방향은 110-130°, 경사는 20-60°의 범위를 보이고 있다. 본 실험에서 사용한 시료는 발파 후 발생한 파괴블록으로부터 드릴 코어를 수행하여 제작되었다. Fig. 1은 암석블록을 채집한 지하채굴장으로 발파 직후 파쇄상태를 보여주고 있다.

## 2.2 암석 물성

석회암 블록으로부터 회수한 암석코어를 절단 및 연마하여 밀도, 탄성파속도, 정적 일축압축강도(6회), 정적 압열강도(3회)를 수행한 결과의 평균값을 Table 1에 나타내었다. 대상 석회암 시료는 건설표준품셈기준으로 보통암이다.

## 3. 실험방법 및 결과

### 3.1 실험방법

#### 3.1.1 동적 일축압축실험

스플릿 홉킨슨 압력봉(SHPB) 충격실험시스템은 크게 충격봉 발사대, 입사봉 및 전달봉으로 이루어진 고속하중 제어장치부와 동적변형률 및 충격봉 발사속도를 측정하는 동적데이터 획득장치부로 구성되어 있다. 봉의 재질은 열처리 머레이징강을 사용하였으며, 입사봉의 길이는 2,600 mm, 전달봉의 길이는 1,600 mm, 봉 직경은  $\phi 37.67$  mm이다. 입사봉 및 전달봉의 재질은 동일한 것으로 탄성파 속도는 5.756 m/s, 밀도는 7.81 g/cc 탄성계수는 195 GPa 이다. 입사파  $\epsilon_I$ , 반사파  $\epsilon_R$  및 전달파  $\epsilon_T$ 는 입사봉과 전달봉의 중앙에 부착된 변형률게이지를 통하여 계측되며, 다음 식 (1), 식 (2), 식 (3)에 대입하여 시료 내 변형률속도, 변형률, 응력을 구한다(Cho et al, 2007, Frew et al, 2002).

$$\dot{\epsilon} = -\frac{2C_0}{L}\epsilon_R \quad (1)$$

Table 1. Physical and mechanical properties of the limestone specimens

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Young's modulus $E$ (GPa)	Poisson's ratio $\nu$	P wave velocity (m/s)	S wave velocity (m/s)	Uniaxial compressive strength $S_c^s$ (MPa)	Brazilian tensile strength $S_t^s$ (MPa)
2.8	34.25	0.21	3,454	2,096	76	7.3

$$\epsilon = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R d\tau \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{A_0}{A} E_0 \epsilon_T \quad (3)$$

여기서  $A_0$ ,  $E_0$  및  $C_0$ 는 각각 강봉의 단면적, 탄성계수 및 탄성파의 속도이며,  $A$  및  $L$ 은 각각 암석시료의 단면적 및 길이를 나타낸다.

암석과 같은 취성재료를 본 실험에 적용하기 위해서는 암석시료가 최종 파괴이전에 시료 전체에 걸쳐 응력 평형상태가 도달하여야 하고, 일정한 변형률속도를 유지해야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 금속제 디스크를 이용한 충격파형을 제어하는 펄스쉐이핑 기법을 적용하였다(Frew et al, 2002). 본 실험에는 직경 10 mm, 두께 0.58 mm의 구리디스크를 사용하였다. 충격봉의 발사속도는 6~14 m/s범위가 되도록 압축공기압을 제어하였다.

### 3.1.2 동적 압열인장실험

동적 압열인장실험은 앞서 설명한 스플릿 홉킨슨 압력봉(SHPB)을 이용하여 디스크 형상의 암석시료에 동적인 압축을 가하여 시료 내 중심부에 축방향과 수직인 방향으로 동적인 인장응력발생을 유도하여 수행된다. 이때 시료 내 발생된 인장응력  $f_{td}$ 는 다음 식 (4)로부터 평가되며, 인장하중  $P_T$ 이 최대가 될 때 값을 입력하여 동적 인장강도를 결정한다(Joseph et al, 1993, Zhao and Li, 2000). 즉 인장응력  $f_{td}$ 의 최대값은 동적 인장강도가 된다.

$$f_{td} = \frac{2P_T}{\pi LD} \quad (4)$$

여기서  $P_T = \pi R^2 \sigma_T$ 가 되며,  $L$ 은 시료의 길이(mm)이고,  $D$ 는 시료의 직경(mm),  $R$ 은 강봉의 반지름(mm)을 의미한다. 추가적으로, 응력속도  $\dot{\sigma}$ 와 시료의 변형률 속도  $\dot{\epsilon}$ 은 다음 식으로 계산된다.

$$\dot{\sigma} = \frac{f_{td}}{\tau} \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \quad (6)$$

여기서  $\tau$ 는 전달파의 도달 시점으로부터 피크 값까지의 경과시간이며,  $E$ 는 시료의 탄성계수이다.

동적인장강도실험은 단계별 변형률 속도 하에 동적인 장강도를 평가하기 위하여 충전 압축공기압력을 10 psi와 15 psi로 제어하였으며, 실험시료가 파괴되기 전에 시료 내 준정적 응력상태가 유지되도록 펄스쉐이핑 기법을 적용하여 입사파의 증가시간을 제어하였고, 200 mm의 충격봉을 사용하였다.

## 3.2 실험결과

### 3.2.1 동적 일축압축실험결과

Fig. 2는 석회석 시료의 동적 일축압축강도실험에서 입사봉과 전달봉의 중심부에 부착된 변형률게이지로부터 발생된 변형률 신호-시간 이력곡선이다. 입사압축파형은 삼각형 펄스에 가까운 형태를 보이고 있으며 이후 약 300  $\mu$ s가 경과한 후에 시료와 입사봉의 경계에서 반사된 반사인장파가 도달하였다. 입사압축파 중 시료를 통과하여 전달파로 전파된 압축파는 입사압축파와 비슷한 파형을 보이고 있으나 최대 진폭이 감소함을 보이는데, 이것은 입사압축파가 입사봉과 시료경계에서 입

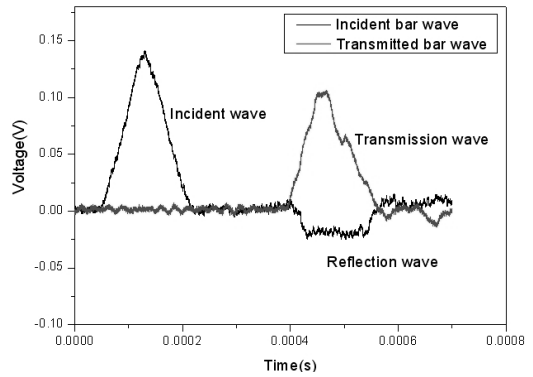


Fig. 2. Measured strain signal-time history(A-35-17-3 specimen)

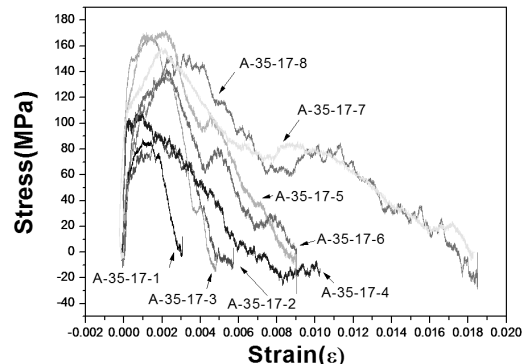


Fig. 3. Dynamic stress-strain curves of limestone specimens

사용으로 반사되거나 시료 내에 흡수되어 발생하는 현상이다.

실험으로부터 얻어진 입사파, 반사파, 전달파는 변형률 보정계수를 통해 변형률-시간 곡선으로 전환시키고, 식 (1), (2), (3)에 대입하여 시료 내 최대응력과 변형률 속도를 평가하여, Table 2에 정리하였다. 최대 압축응력값은 변형률속도가 증가함을 보이고 있다. 각 석회암 시료의 동적응력-변형률의 그래프를 Fig. 3에 나타내었다.

동적응력-변형률 곡선을 살펴보면, 응력값이 60MPa 까지 대부분의 시료는 비슷하게 탄성거동을 보이다가, 이후 충격속도의 변화에 따라 응력-변형률 곡선의 기울기와 최대값에 따라 달라지는 경향을 보이고 있다. 최대값 이후에는 모든 시료에서 변형률연화거동을 보이고 있다. A-35-17-1시료와 A-35-17-2시료는 충격실험 이후에 표면이 약간 떨어져나간 표면박리현상으로 보였으나 원형은 그대로 유지하였으므로, 두 시료의 최대

응력 값은 파괴강도로 볼 수 없다. 반면에 A-35-17-3 ~ A-35-17-8시료는 완전 파괴되거나 표면에 많은 균열이 관찰되었으므로, 10 m/s 이상의 충격속도를 받은 시료에 대한 응력의 최대값은 파괴강도로 볼 수 있다. 특히 A-35-17-4시료의 경우, 불완전파괴와 완전파괴패턴의 중간으로 원형에 큰 변화 없이 표면에만 균열이 발생되고 있어, 대상 석회암시료의 동적 임계파괴강도는 대략 140 MPa로 볼 수 있다.

### 3.2.2 동적 압열인장실험 결과

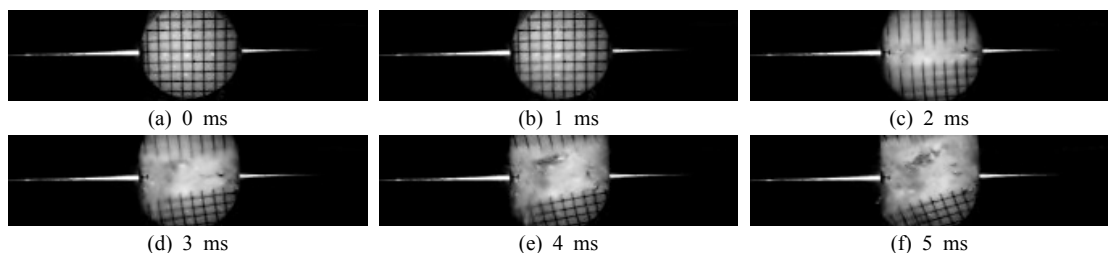
동적 압열인장실험으로 부터 얻은 충격속도 및 변형률 시간이력을 이용하여 동적 인장강도( $f_{td}$ ), 응력속도( $\dot{\sigma}$ ), 변형률속도( $\dot{\epsilon}$ )를 평가하여 Table 3에 정리하였다. 대략 7 m/s의 충격속도를 받은 암석시료(A-45-BD-1, A-45-BD-2)는 비슷한 수준의 변형률속도가 발생하였으나, 최대 인장응력값에는 비교적 큰 차이를 보이고

**Table 2.** Estimated dynamic compressive strengths of the limestone specimens

Specimen No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Impact velocity (m/s)	Strain rate (1/s)	Peak failure stress (MPa)	Remarks
A-35-17-1	35	17	6.32	56	88	Surface exfoliation
A-35-17-2	35	17	7.13	103	92	Surface exfoliation
A-35-17-3	35	17	10.34	145	172	Complete failure
A-35-17-4	35	17	11.01	179	108	Surface cracking
A-35-17-5	35	17	11.48	95	166	Complete failure
A-35-17-6	35	17	11.62	167	142	Complete failure
A-35-17-7	35	17	13.37	370	160	Complete failure
A-35-17-8	35	17	13.37	370	154	Complete failure

**Table 3.** Estimated dynamic Brazilian tensile strengths of the limestone specimens

Specimen No.	Length (mm)	Diameter (mm)	Impact velocity (m/s)	Peak failure stress (MPa)	Strain rate (1/s)
A-45-BD-1	22	45	7.24	21	9.47
A-45-BD-2	22	45	7.12	29	9.02
A-45-BD-3	22	45	11.48	29	12.26
A-45-BD-4	22	45	11.23	36	15.59



**Fig. 4.** Fracture process of the dynamic tensile strength test (1000 frame/s)

있다. 충격속도 11 m/s에서 최대 인장응력은 변형률속도에 의존하여 증가하는 경향을 보이고 있다.

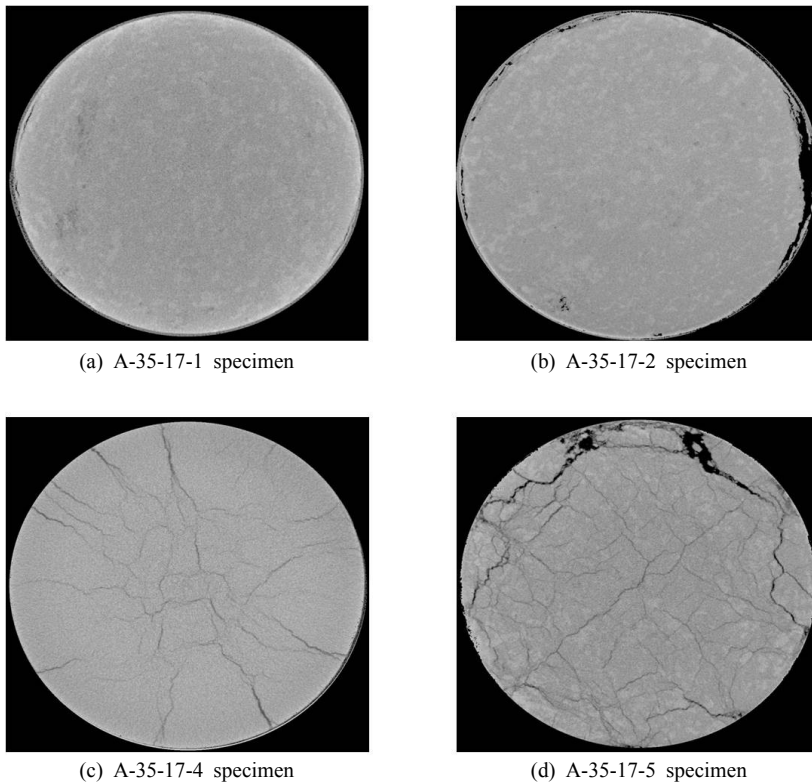
동적 압열인장실험 중 시료 내 중앙부분에 발생하는 인장균열을 확인하기 위하여 고속카메라 촬영을 수행하였다. Fig. 4는 석회석 시료에 대한 고속카메라 촬영 화상을 보여 주고 있다. Fig. 4(a)는 입사봉의 움직임이 확인된 시점의 시료를 보여주고 있으며, Fig. 4(b)는 시료에 특이한 변화가 없었으나 Fig. 4(c)는 입사봉과 전달봉을 잇는 인장균열을 보여주고 있다. 결과적으로, 1 ms 이후 2 ms 사이에 균열이 발생했음을 알 수 있다.

**4. 충격하중에 의한 석회암시료 내 파괴형성에 관한 고찰**

충격하중을 받은 석회암 암석시료 내 파괴양상을 관찰하기 위하여 Micro-focus X-ray CT 스캐너가 적용되었다. X-ray 스캐너는 원리상 암질재료와 같이 밀도가 높은 재료를 스캐닝 할 경우에는 빔하드닝(beam hardening) 및 동심원상 화상결함(ring artifact)이 발생하는데 이러한 현상을 방지하기 위해서 다양한 게인(gain)보정법이

적용된다. 본 연구에서는 관전압 130 kV와 관전류 98  $\mu$ A의 콘빔(cone beam)조건으로 시험시료에 대하여 촬영을 수행하였다. 암석은 고밀도의 재료이므로 6 mm의 구리 필터를 이용하여 게인(gain) 보정을 실시하였다. 슬라이스의 해상도는 1,024 $\times$ 1,024로 설정하였다.

Fig. 5(a)와 (b)는 각각 표면박리를 보인 A-35-17-1과 A-35-17-2시료의 단면화상을 보여주고 있다. A-35-17-1시료의 경우, 파단면은 보이지 않으나 단면화상 왼쪽표면 부근에 작은 흠집이 보이고 있다. Fig. 5(c)는 시료 표면에 다수의 균열을 보인 A-35-17-4시료로서 축하중을 받은 방향으로 발생된 수직균열로 중심부에 파괴단이 형성되었다. Fig. 5(d)는 완전 파괴된 A-35-17-5시료의 단면화상으로, 시료 내 전체적으로 수직균열이 형성되어 파괴단을 형성시키고 있다. 수직균열의 형상을 파악하기 위하여 단면화상을 3차원으로 재구성하여 축하중 방향으로 단면화상을 제작하여 Fig. 6에 나타내었다. A-35-17-1과 A-35-17-2시료의 경우, 표면부근에 조그마한 흠집이 보이나 내부에 균열은 보이지 않았다. A-35-17-4시료 화상을 살펴보면, 시료의 상하단에 보인 표면균열들은 서로 연결되어 있음을 볼 수 있다. 완



**Fig. 5.** Cross sectional slice images of center in the specimens

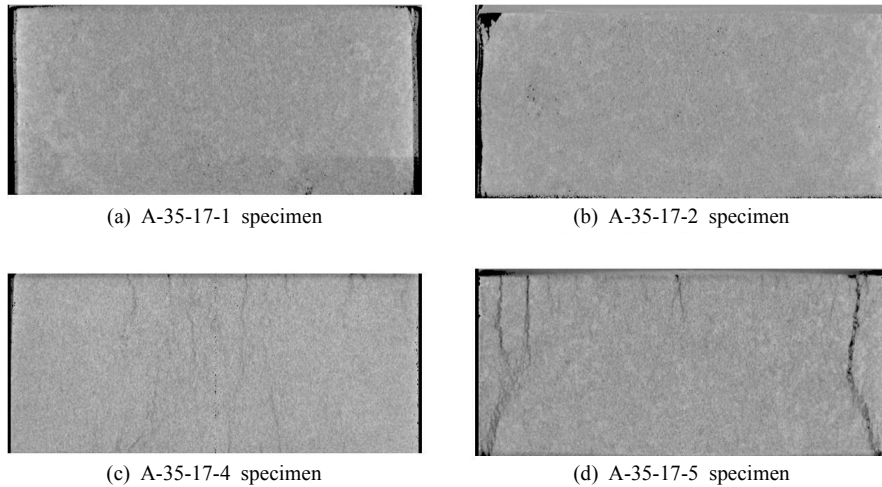


Fig. 6. Frontal cross-sectional slice image of the specimens(upper side closer to incident bar)

전 파괴된 A-35-17-4시료는 시료 표면부근에 전단파괴의 흔적을 보이고 있다. 이것은 변형률속도가 증가하면서 시료와 가압면 즉 입사봉과 전달봉 사이에 구속효과가 증가되면서 발생된 것으로 판단된다. 이러한 파괴패턴은 취성도가 높은 암석의 정적 압축파괴실험결과에서 볼 수 있다.

## 5. 결론

동적압축 및 동적인장 하중에 의한 석회암의 변형거동 및 파괴강도를 파악하기 위하여, 스플릿 홉킨슨 압력봉(SHPB)실험법에 일축압축실험과 압열인장실험을 적용하여 석회암에 대한 동적강도 평가를 수행하였다. 단계별 충격하중에 의한 석회암시료의 변형률속도 및 최대파괴강도를 평가하였다. 동적 일축압축실험으로부터, 석회암시료는 동적 압축강도의 변형률속도 의존성을 보여주었으며, 동적 임계파괴강도는 140 MPa로 평가되어 정적 압축강도보다 높은 값을 보였다. 동적 압열인장실험결과, 석회암시료의 동적 압열인장강도는 21 MPa 이상으로 정적강도보다 3배정도 높았으며, 변형률속도 의존성을 보였다. 동적 일축압축실험 시료에 대한 Micro-focus X-ray 단층화상 분석으로부터, 석회암 시료의 동적 임계파괴강도 이상에서는 시료 내 전단파괴양상이 나타나고 있음을 보여주었다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제 기술혁신사업(에너지자원 융합원

천기술개발사업, 2011T100200108)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사의 말씀 드립니다. 그리고 시료 채취 및 현지조사에 도움을 주신 ○○산업(주) 장수광업소의 이경희소장님과 관계자 여러분께 감사의 말씀 드립니다.

## 참고문헌

1. Cho S.H., Cho S.K., Kim S.K., P C., Kaneko K., 2009, Experimental Study on the Dynamic Damage Mechanism of Rocks Under Different Impact Loadings, Korean Society for Rock Mech., Tunnel and Underground Space, 19.6, 545-557.
2. Yang J.H., Ahn J.L., Kim S.K., Song Y.S., Sung N.H., L Y.K., Cho S.H., 2011, Estimation of Dynamic Brazilian Tensile Strength of Rocks Using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) System, Korean Society for Rock Mech., Tunnel and Underground Space, 21.2, 109-116.
3. Cho S.H., Nakamura Y., Ogata Y., Mohanty B., Kitayama H. and Kaneko K., 2007, Fracture processes of rocks in dynamic tensile-splitting test, the 1st Canada and U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada.
4. Jason T.G., Arun S. and Atul S., 2002, Photoelastic Evaluation of Stress Fields and Fracture During Dynamic Splitting Experiments, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, ETATS-UNIS, 30.3, 186-196.
5. Cho S.H., Mohanty B., Rajeev R., Xia K., and Kaneko K., 2007, Fragmentation mechanism of rock in Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test, 21st Canadian Congress of Applied Mechanics, Ryerson University, Toronto,

Canada, 607-608.  
 6. Frew D.J., Forrestal M. J. and Chen W., 2002, Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split hopkinson pressure bar, Experimental Mechanics, 42.1, 93-106.

7. Joseph W.T., Allen R.C. and Steven T.K., 1993, Experimental and Numerical Analysis of High Strain Rate Splitting Tensile Tests, ACI Materials Journal, 90.2.  
 8. Zhao J. and Li H.B., 2000, Experimental determination of dynamic tensile properties of a granite, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 861-866.



**강 명 수**  
 2011년 전북대학교 공과대학 자원공학과 학사

Tel: 063-270-4636  
 E-mail: kcems2000 @chonbuk.ac.kr  
 현재 전북대학교 자원·에너지공학과 석사과정



**강 형 민**  
 2012년 전북대학교 공과대학 자원공학과 학사

Tel: 063-270-4636  
 E-mail: zcsxzcsx@chonbuk.ac.kr  
 현재 전북대학교 자원·에너지공학과 석사과정



**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



**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 지구환경연구본부 선임연구원



**金子勝比古**  
 1970년 교토대학 자원공학과 학사  
 1972년 교토대학 자원공학과 석사  
 1986년 교토대학 공학연구과 박사

E-mail: kaneko@geo-cr.eng.hokudai.ac.jp  
 현재 북해도대학 대학원 공학연구과 교수



**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