

스플릿 홉킨슨 바(SHPB)를 이용한 이방성 화강암의 동적파괴거동 연구

최미진¹⁾, 조상호²⁾, 양형식³⁾*

A Study on dynamic Fracturing Behavior of Anisotropic Granite by SHPB Test

Mijin Choi, Sang-Ho Cho, Hyung-Sik Yang

Abstract Dynamic fracturing of anisotropic granite was investigated by SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar). Energy absorption during the test and maximum stress were increased as strain rate increased. Maximum stresses in every direction were dependent on the strain rate but not so sensitive to anisotropy. Elastic wave velocity was decreased as strain rate increased and dependent on strain rate in every direction. Especially, elastic wave velocity decreased more rapidly in a strong rock.

Key words SHPB, Strain rate, Wave velocity, Maximum stress

초 록 본 연구에서는 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)를 이용하여 변형률 속도에 따른 이방성 화강암의 동적파괴과정을 조사하였다. 실험결과 변형률 속도가 증가할수록 에너지 흡수량 및 최대응력이 증가하였다. 최대응력은 모든 방향에서 변형률 속도에 의존적이나 역학적 이방성에 민감하지는 않았다. 변형률 속도가 증가할수록 탄성파속도가 많이 감소되고, 모든 방향에서 변형률 속도에 의존적이며 강한 암석일수록 감소가 빠르게 일어났다.

핵심어 SHPB, 변형률 속도, 탄성파속도, 최대응력

1. 서 언

암석은 절단, 천공, 발파, 파쇄 및 분쇄 등의 과정 중에서 동적응력을 받게 된다. 고변형률 속도하중(High strain rate load)하에서의 암석 파괴과정에 대한 이해는 암석 발파에서 발파과정을 정량화하는데 필수적인 사항이다. 하지만 발파에서의 파괴과정을 좌우하는 암석특성에 대한 이해정도는 빈약한 실정이다.

동하중 조건하의 암석강도 증가현상은 초기 Rinehart (1965)의 연구 이래 알려진 것으로서 암석의 동적인장 강도를 결정하기 위하여 뇌관에 의해 발생된 응력파의 반사를 이용하였다. 그 후 넓은 범위의 변형률 속도에 대한 암석의 동적강도를 측정하기 위하여 여러 가지 방법들이 시도되었다. 일반적으로 암석의 동적강도를 측

정하기 위하여 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 또는 이를 변형한 형태들이 많이 사용되었다. Kumar (1968), Hakalehto(1969), Lundberg(1976) 및 Buchar & Bilek (1981)들은 압축에 대하여, Birkimer(1971) 및 Mohanty (1987) 등은 인장에 대하여, Lipkin 외(1977) 등은 전단에 대하여 연구한 바 있다. Zhang 외(1999), Cho 외(2004)는 변형률 속도에 따른 암석파괴거동을, Zhang 외(2000)는 온도의 영향에 대해 보고하는 등 다양한 연구가 이루어 지고 있다.

본 연구에서는 SHPB를 이용하여 변형률 속도에 따른 동적응력-변형률 곡선, 탄성파속도의 감소정도 및 최대응력의 변화를 조사하였다.

2. 실험방법 및 시료

본 연구에서는 파형 성형 장치를 부착한 SHPB 시험을 실시하였다. SHPB의 이론적인 토대는 일차원 응력파의 전파이론이다. SHPB 시험은 가스총을 이용한 충격 바(bar)와 파형 성형장치(pulse shaper), 입사 바, 전달 바로 구성되어 있다. 암석의 시편은 입사 바와 전달

¹⁾ 전남대학교 대학원 지구시스템공학과

²⁾ 전북대학교 에너지자원공학과

³⁾ 전남대학교 건설지구환경공학과

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2008년 5월 27일

심사 완료일 : 2008년 6월 13일

게재 확정일 : 2008년 6월 17일

바 사이에 위치한다. 그림 1은 SHPB 모식도이다.

입사파 ϵ_I 와 반사파 ϵ_R , 전달파 ϵ_T 를 계측하기 위해 입사 바와 전달 바에 변형률 게이지를 부착하였다. 응력 $\sigma(t)$, 변형률 속도 $\dot{\epsilon}(t)$ 와 변형률 $\epsilon(t)$ 는 다음 식에 의해 계산 할 수 있다(Renliang Shan 외, 2000).

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \epsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2c_0}{L} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2c_0}{L} \epsilon_R(t) \quad (3)$$

여기서 A는 시편의 단면적, L은 시편의 길이, A_0 는 바의 단면적, E_0 는 바의 영률, c_0 는 1차원 응력파의 속도이다.

이러한 식들은 시편이 균질하게 변형되고 시편 내에서는 동적 응력이 평형상태인 것을 간주한다. 입사 바의 길이는 2,600 mm, 전달 바의 길이는 1,600 mm, 입사 바 및 전달 바의 지름은 37.67 mm이다. 충격속도는 5~25 psi로 하였으며 이 때 얻어진 변형률 속도는 3.71~15.17 m/s이다.

시료로는 황등화강암 블록의 X, Y, Z방향에서 지름 32 mm로 각 6개씩 총 18개의 시료를 제작하였다. 각 시편의 편평도는 0.01 mm 이내가 되도록 성형하였다.

황등화강암의 단위중량은 2.6 kg/m³이며, 특성의 최대값을 기준으로 구한 이방성지수(anisotropy index, A.I)는 식(4)와 같이 정의된다(김덕현 외, 1999).

$$A.I = (Max - Value) / Max \times 100 (\%) \quad (4)$$

이상과 같이 계산된 이방성지수는 Y 방향이 13~19%, Z 축은 8~15%였다. 표 1은 화강암 블록의 역학적 물성값이다.

3. 실험결과

그림 2는 SHPB 실험 후 회수된 시료를 보여준다. 변형률 속도가 10 m/s 이하에서는 암석시료의 표면에 아무런 가지균열이 보이지 않고 신선한 상태를 유지하였

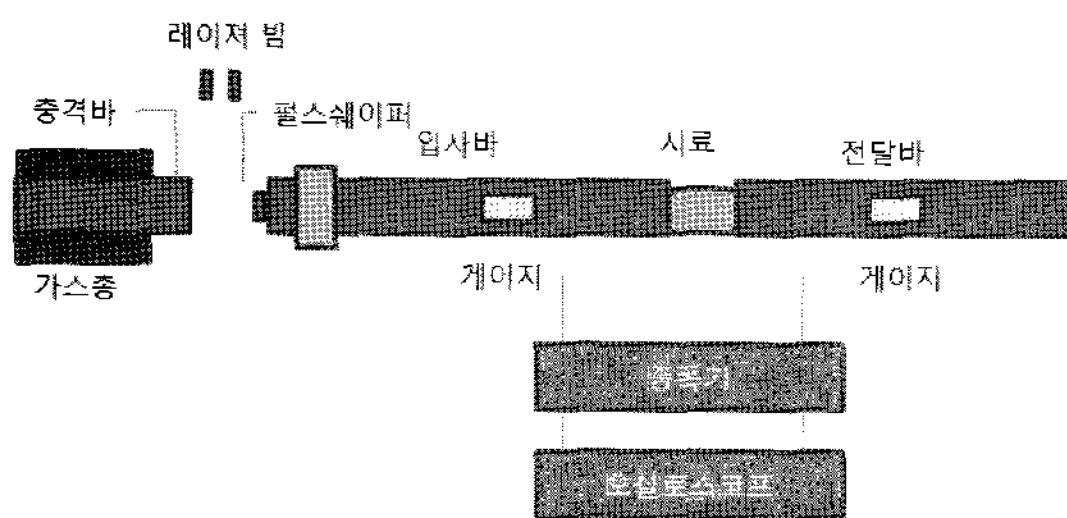


그림 1. 파형 성형 장치를 부착한 SHPB

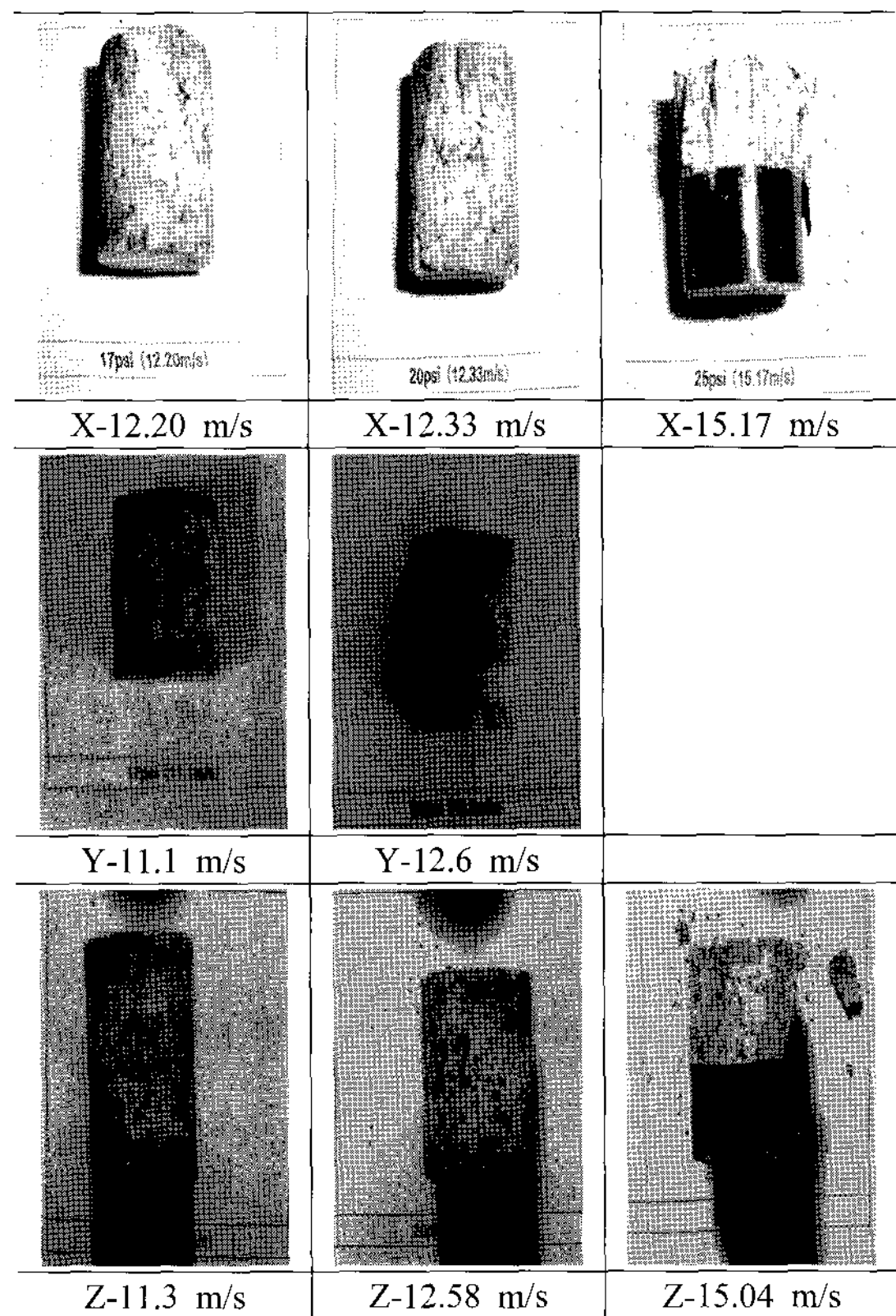


그림 2. SHPB 실험 후 회수된 시료

표 1. 화강암 블록의 역학적 특성과 이방성 지수

	압축강도		정적 인장강도		탄성계수		P파 속도	
	평균 (MPa)	이방성 지수(%)	평균 (MPa)	이방성 지수(%)	평균 (GPa)	이방성 지수(%)	평균 (m/s)	이방성 지수(%)
X	112	0	10	0	45.4	0	4599	0
Y	93.5	17	8.7	13	37.8	17	3709	19
Z	98.3	12	9.2	8	40.5	11	3902	15

다. 또한 10~12 m/s의 경우 암석시료는 표면에 가시적인 잔금들이 많이 발생하였으나 전체적인 외형은 유지되었다. 그러나 15 m/s 이상의 경우에는 시료가 심하게 파괴되었다. 즉 변형률 속도가 증가할수록 파괴가 심하게 발생함을 알 수 있다.

그림 3은 SHPB실험을 통해 얻어진 변형률 속도에 따른 응력-변형률 곡선이다.

응력-변형률 곡선의 면적은 시료에 흡수된 에너지를 의미하며, 그림 3과 같이 변형률 증가할수록 시료 파괴 과정에서 흡수된 에너지가 증가함을 알 수 있다. 변형률 4~12 m/s인 경우 시료가 충격 이후에 온전한 상태로 남아서 응력-변형률 곡선은 최대점 직후에 원 상태로 되돌아가는 형태가 된다. 또한 변형률 속도가 15 m/s 이상의 경우에는 최대점 이후의 응력-변형률 곡선을 따라 변형률이 연속적으로 증가하는데 응력이 감소되어 없어질 때까지도 변형률은 계속 증가하는 형태를 보인다. 이는 파가 되돌아오지 못하고 시료가 파괴됨을 의미한다.

그림 4는 각 방향에서의 변형률 속도에 따른 최대응력을 보여준다. 변형률 속도 11~15 m/s인 경우 새로운 균열이 생성되거나 혹은 파쇄가 시작되었다. X방향 샘플의 경우 재하방향과 주균열 방향이 수평이고, 이는 균열을 분리시키기가 용이하게 되어 Y, Z방향의 응력보다 더 작다. 변형률 속도가 증가할수록 최대응력은 증가하며 모든 방향에서 변형률 속도에 의존적이라는 것을 확인할 수 있다. 그러나 최대응력은 암석의 역학적 이방성에 민감하지 않음을 확인할 수 있었다.

각 시료의 탄성파속도를 측정하기 위하여 Technisonic사의 계측기 (C-0008-GP 모델)를 활용하였으며 이 때 응답주파수는 500 KHz로 설정하였다. 변형률 속도 15 m/s 이상의 충격을 받은 시료는 탄성파속도를 측정이 불가능 할 정도로 파쇄되어 분석에서 제외하였다. 표 2와 그림 5는 실험 전과 후의 탄성파 속도를 보여준다.

각 방향에서 획득한 시료의 SHPB 실험 전과 후의 탄성파속도의 감쇠정도는 충격파 속도가 증가할수록 증가하며, 모든 방향에서 충격파 속도에 의존적임을 확인할 수 있다. 그러나 12 m/s 이상에서는 X, Z 방향의 탄성파속도 감쇠가 다른 방향보다 크다는 것을 확인할 수 있다. 이는 강도가 큰 암석일수록 감쇠가 빠르게 일어남을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 역학적 이방성을 보이는 화강암 시편에 대하여 충격속도 5~25 psi, 변형률 속도 3.71~15.17 m/s의 조건으로 SHPB 실험을 실시하여 동적응

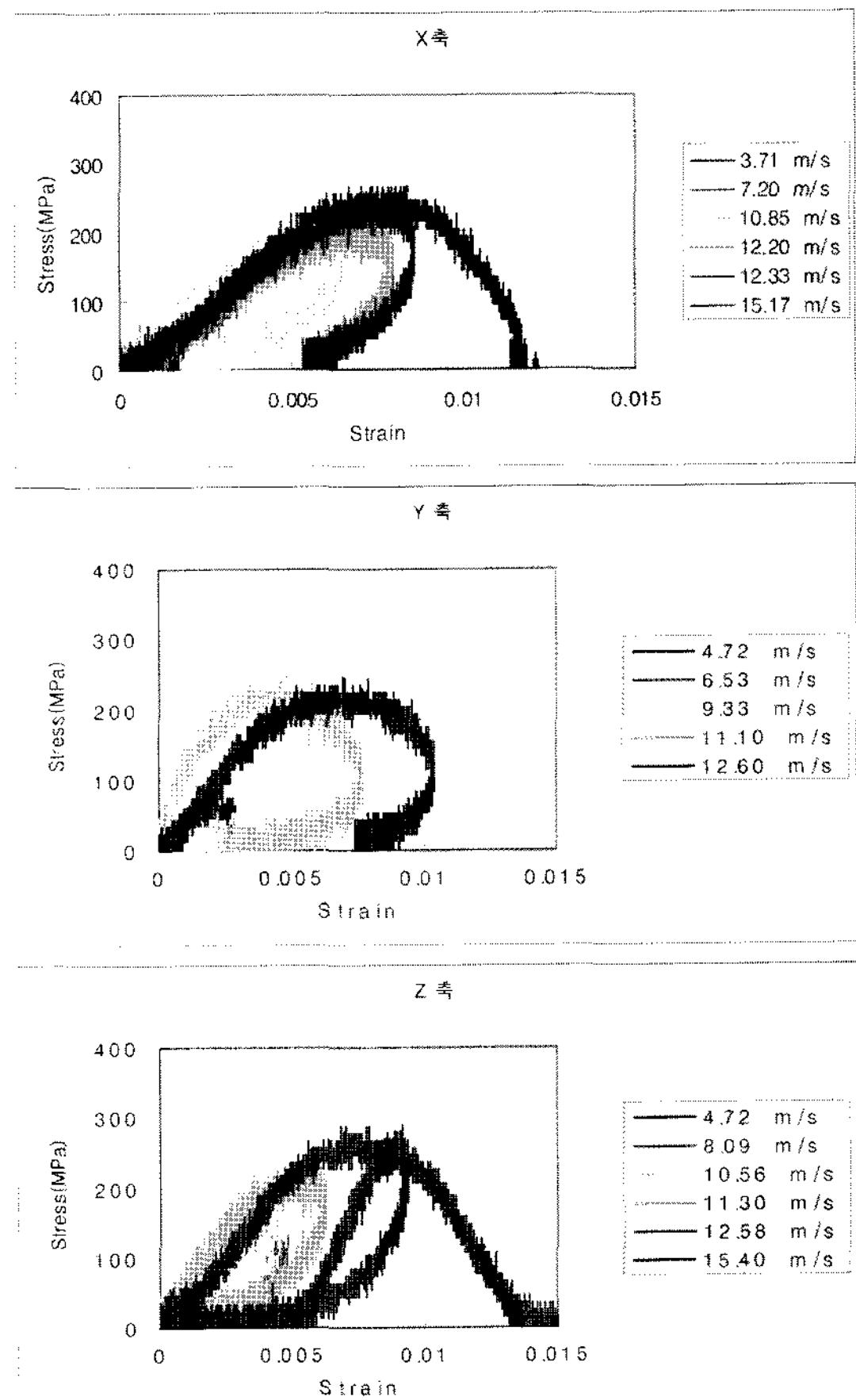


그림 3. 변형률 속도에 따른 압축응력과 변형률의 관계

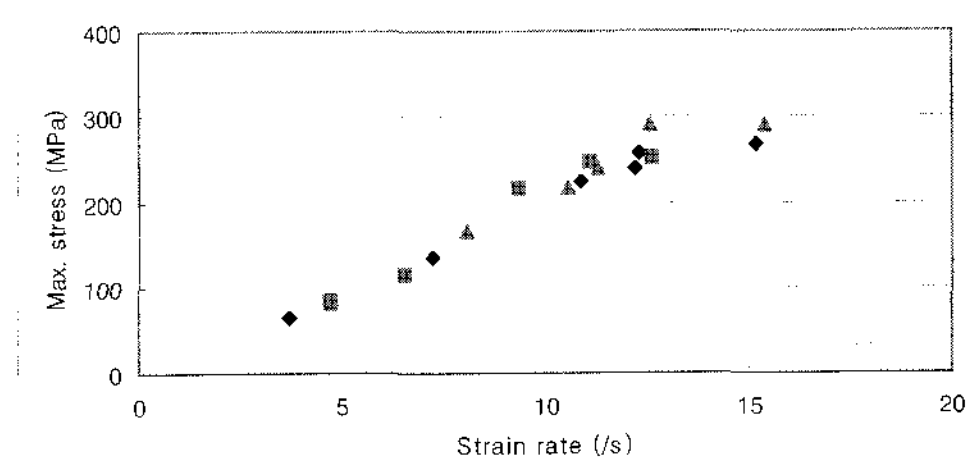


그림 4. 최대응력에 대한 변형률 속도의 영향

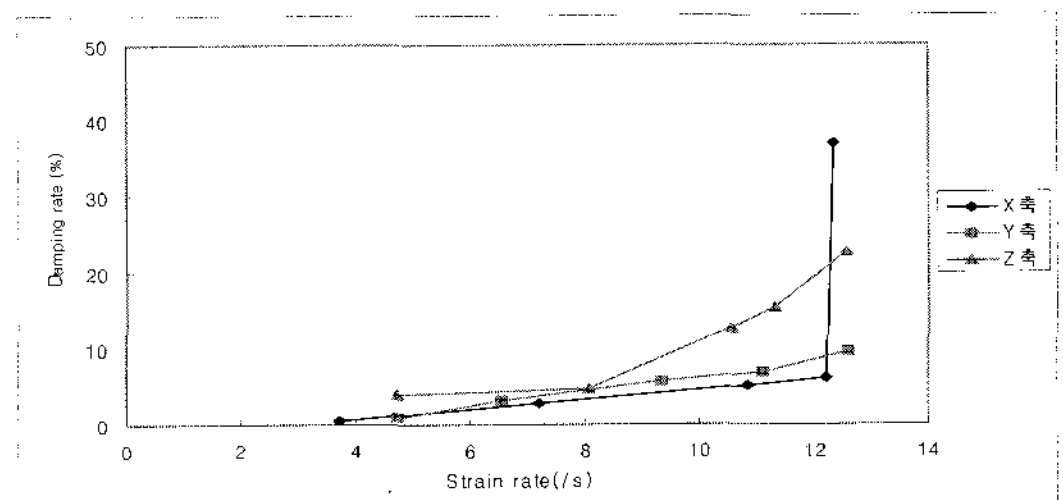


그림 5. 탄성파속도 감쇠정도

표 2. 실험 전 후의 탄성파속도 측정 결과

방향	가스압력 (psi)	충격속도 (m/s)	입사파 탄성파속도 (m/s)	전달파 탄성파속도 (m/s)	감소비 (%)
X	5	3.71	5075	5044	0.61
	10	7.2	4487	4619	2.94
	15	10.85	4303	4529	5.26
	17	12.2	4246	3980	6.25
	20	12.33	4685	2951	37.01
Y	5	4.72	3658	3621	1.00
	10	6.53	3666	3788	3.33
	15	9.33	3685	3474	5.71
	17	11.1	3846	3582	6.86
	20	12.6	3691	3339	9.52
Z	5	4.72	4067	3903	4.04
	10	8.09	3705	3529	4.76
	15	10.56	3943	3446	12.62
	17	11.3	3966	3356	15.38
	20	12.58	3829	2963	22.66

력 변형을 곡선, 탄성파속도의 감쇠정도, 최대응력의 변화를 고찰하였다.

- 1) 변형률 속도가 증가할수록 시료 파괴과정에서 흡수한 에너지가 증가한다.
- 2) 변형률 속도가 증가할수록 최대응력은 증가하며 모든 방향에서 변형률 속도에 의존적이나 암석의 역학적 이방성에 민감하지는 않았다.
- 3) 각 방향에서 획득한 시료의 SHPB 실험 전 후 탄성파속도는 변형률 속도가 증가할수록 감쇠정도가 크고 모든 방향에서 변형률 속도에 의존적이며 강한 암석일수록 감쇠가 빠르게 일어남을 확인할 수 있었다.

감사의 글

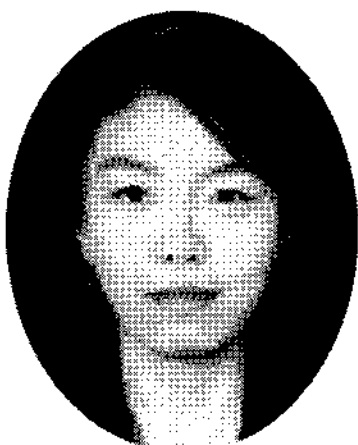
본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 'IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발(과제번호 : 05건설핵심 D03-01)'의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김덕현, 백환조, 1999, 미세균열의 방향에 따른 암석의 이방성에 관한 연구, 대한지질공학회 학술발표회 논문집, 58-63.
2. Birkimer, D. L., 1971, A possible fracture criterion for the dynamic tensile strength of rock, Proc. 12th US Symp. Rock Mech., 573-590.
3. Bucher, J. and Z. Bilek, 1981, Application of Hopkinson Split bar test to the mechanical and fracture properties to rock, Fracture for Ceramics, Rock, and Concrete, ASTM STP-745, Freiman, & Fuller (eds.), 185-195.
4. Cho, S.H., Y. Nakamura and K. Kaneko, 2004, Dynamic fracture process analysis of rock subjected to stress wave and gas pressurization, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41.3, CD-ROM.
5. Hakalehto, K. O., 1969, The behavior of rock under impulse loads: A study using the Split Hopkinson bar method, Acta Polytechnica Scandinavica, Ch. 81
6. Kumar, A., 1968, Effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite, Geophysics 33.3, 501-510.
7. Lundberg, B., 1976, Energy absorption in Dynamic rock fragmentation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 13, 187-197.
8. Lipkin, J. et al., 1977, Dynamic flow and fracture of rock in pure shear, Proc. 18th US Symp. Rock Mech., Keystone, Colorado, 3B2-1.
9. Mohanty, B., 1987, Strength of rock under high strain rate loading conditions applicable to blasting, Proc. of 2nd Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, USA, pp. 72-78.
10. Rinehart, J. S., 1965, Dynamic fracture strengths of rocks, Proc. 7th Symp. on Rock Mechanics I 205-208.
11. Zhang, Z. X., J. Yu, S. Q. Kou and P-A. Lindqvist, 2000, Effects of high temperatures on dynamic rock

- fracture, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 38, 211-225.
12. Zhang, Z. X., S. Q. Kou, J. Yu, Y. Yu and L. G. Jiang, P-A. Lindqvist, 1999, Effects of loading rate on rock fracture, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 36, 597-611.
13. Renliang Shan, Yusheng Jiang, Baoqiang Li, 2000, Obtaining dynamic complete stress-strain curves for rock using the Split Hopkinson Pressure Bar technique, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 37, 983-992.

최 미 진



2003년 조선대학교 공과대학 자원공학과
학사
2005년 전남대학교 대학원 지구시스템
공학과 석사

Tel: 062-530-0824
E-mail: wangle@hanmail.net
현재 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사수료

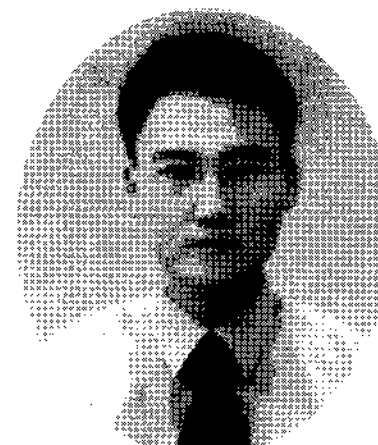
양 형 식



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

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