

고변형률 압축 하중에서 쾌삭 황동과 황동의 동적 변형 거동 특성

이역섭 †, 김경준*, 이종원*

Dynamic Compressive Deformation Characteristics of Free-Cutting Brass And Yellow Brass at High Strain Rates

Ouk Sub Lee†, Kyoung Joon Kim*, and Jong Won Lee*

Key Words : SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar), dynamic stress-strain curve(동적 응력-변형률 선도), stress wave(응력파), high strain rate(고변형률 속도), Free-cutting brass(쾌삭황동), Yellow brass(황동)

Abstract

Mechanical properties of the materials used for transportations and industrial machinery under high strain rate loading conditions such as high impact loading are required to provide appropriate safety assessment to varying dynamically loaded mechanical structures. The Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) technique with a special experimental apparatus can be used to obtain the material behavior under high strain rate loading conditions. In this paper, the dynamic deformation behavior of a brass under both high strain rate compressive loading conditions has been determined using the SHPB technique.

기호설명

•
 $\dot{\epsilon}$ = 단위 시간당 변형률
 $\epsilon_{specimen}$ = 시편의 변형률
 $\sigma_{specimen}$ = 시편의 응력
 L = 시편의 길이
 E = 탄성 계수
 R = bar 의 지름
 A = bar 의 단면적
 A_s = 시편의 단면적

C_0 = 응력파 전파속도
 C = 압력봉의 응력파 전파속도
 ϵ_I = 입력봉의 변형률
 ϵ_R = 반사된 변형률
 ϵ_T = 출력봉의 변형률

1. 서론

고변형률 속도 하에서의 압축과 인장 시험은 저 변형률 속도일 때의 시험과는 구분되어야 한다. 고변형률 하중 하에서의 시험에서 관성의 영향을 무시할 수 없기 때문이다.

동적인 실험에서 관성은 다음의 3 가지 영향을 나타낸다[1]. 첫 번째로 관성은 어떠한 조건에서는 무시할 수 있는 반경 성분을 가지게 된다. 두 번

† 인하대 기계공학부
 E-mail : leeos@inha.ac.kr
 TEL : (032)860-7315 FAX : (032)868-1716

* 인하대 대학원 기계공학과

재료는 실험의 초기에서 나타나는 변형의 이방성은 관성에 의한 것이다. 마지막으로 관성은 연신 안정성에 영향을 미치게 된다.

변형률 속도가 $10^3/s$ 이상의 상태에서 충격에 대한 압축과 인장 하중 하에서 동적 재료의 특성을 얻기 위해 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 기법이라는 특별한 실험 방법이 제안되었다. 일반적으로 SHPB 장치는 $10^3 \sim 10^4$ 사이의 고변형률 속도를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 SHPB 실험 기법을 이용하여 캐삭황동(Free-cutting Brass)의 고변형률 압축 하중에서의 변형 거동을 실험적으로 규명하고, 재료의 고변형률 변형특성에 대하여 면밀한 고찰을 수행하였다.

2. 이론

2.1 기본 가정 및 이론

SHPB 실험에서 봉끼리 완전 접촉된 시편에서의 길이 방향과 반경 방향의 관성 효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer[2]와 Chree[3] 등에 의해서 구해졌다. 그 결과는 SHPB 기법에 응용되었고, 응력파가 파장 λ 인 순수 코사인파(cosine wave)라면 $R/\lambda \ll 1$ (R:봉의 반경)일 때 응력파에 의한 축 변위와 응력은 봉의 단면에 걸쳐 균일하다는 사실이 발견되었다[4]. 압력봉 내에서 전파하는 응력파의 중요한 성질은 축 방향으로의 응력파 전파속도는 그 파장(wavelength)에 따라 변한다는 것이다. 이것은 파의 분산(wave dispersion)을 발생시키게 되며, 결과적으로 시편의 동적 응력-변형률 거동에 악영향을 끼치게 되므로 유의해야 한다.

2.2 일정한 시편의 변형 해석

탄성파가 봉을 통해서 전파를 하지만, 마찰이나 소성 변형에 대한 영향 때문에 시편의 변형을 정확하게 해석하기는 어려움이 있다. 따라서 마찰의 영향은 점성이 있는 윤활제를 사용하여 줄였다. 더욱이 시편의 변형은 일정하지만, 고변형률 속도에서는 갑작스런 입자들의 가속화 때문에 길이 방향이나 반경 방향의 관성이 발생하게 된다.

2.3 SHPB 에 대한 응력파 변형률 속도 측정

전통적인 SHPB 기법에서, 시편은 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmitted bar) 사이에 위치하게 된다. Fig. 1 은 SHPB 에서 발생한 압축 탄성파의 전파 거동을 나타내었다. 충격봉(striker)이 입력봉

에 충돌하게 되면, 응력파(stress wave)가 발생하고 시편까지 출력봉을 통해서 전파하게 된다. 입력된 응력파의 일부는 물질의 임피던스(impedance) 차에 의해 봉과 시편의 계면(interface)에서 반사되고, 그 일부는 시편으로 투과된다. 이러한 투과파는 출력봉 끝단까지 전파하게 된다. 이때 시편내의 응력, 변형률 그리고 변형률 속도는 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력봉을 통해 다음과 같이 얻어진다[5].

$$\sigma_{specimen} = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \epsilon_T \quad (1)$$

$$\epsilon_{specimen} = \frac{-2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{specimen} = \frac{d\epsilon(t)}{dt} = \frac{-2C}{L} \epsilon_R(t) \quad (3)$$

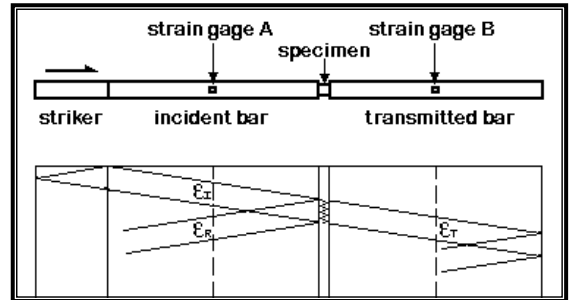


Fig. 1 A schematic diagram of specimen and elastic stress wave propagation for the compressive SHPB test.

3. 실험

3.1 하중제어장치와 충격봉

실험에서 사용된 입력봉, 출력봉과 충격봉의 재질은 모두 STB2(크롬도금 베어링 강)로서 항복강도는 490MPa 이고, 탄성계수는 225GPa 이다. Photo 1 은 실험에 사용된 SHPB 장치를 나타내었다.

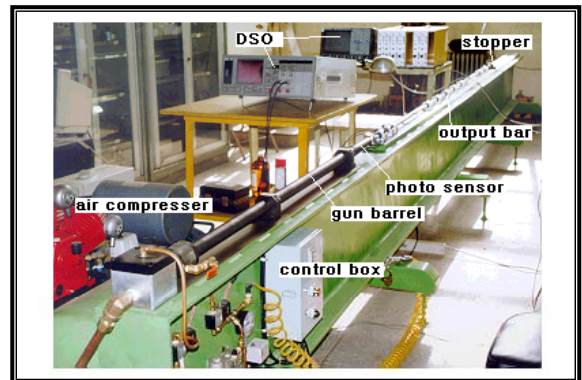


Photo 1 General view of SHPB experimental apparatus.

충격봉의 길이는 300mm, 직경은 16mm 이다. 충격봉에 빠른 하중을 가하기 위해 Photo 1 에서 보듯이 건 배럴(gun barrel)을 설치하였으며 압력을 발생시키는 장치와 입력봉에 정확한 충격을 주도록 정밀 하게 셋팅을 하였다.

3.2 압축 실험의 입력봉과 출력봉

입력봉의 직경이 작을수록 좀더 높은 변형률 속도를 얻을 수 있다. 봉의 길이는 봉에서의 응력과 길이 (stress wavelength)의 최소 두 배가 되어야 한다. 이러한 조건과 25% 이상의 변형률을 감안하여 봉의 길이(L) 대 직경(D)의 비(L/D)는 100 으로 하였다[4]. 이들 두 봉의 재질은 충격봉과 같은 재질인 STB2(크롬도금 베어링강)로 하였으며, 직경도 충격봉과 같이 16mm 로 하였다. 입력봉과 출력봉의 끝단의 면을 시편과 완전히 접촉하도록 정밀 연삭하였다[6],[7],[8].

3.3 직진도 유지장치

실험 장치에서 중요한 문제점은 봉에서의 응력파가 일차원으로 전파하기 위해 봉의 직진도의 유지이다. 따라서 I-beam 을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하였다[9].

3.4 속도와 응력파 측정 장치

속도를 측정하기 위해, 건 배럴(gun barrel)의 끝단에 50mm 의 간격으로 3 개의 광 센서(photo sensor)를 설치하였다. 충격봉이 광 센서의 빛을 차단시킬 때, Oscilloscope 와 Nicolet 410 에 전기적인 신호가 전달되게 하였다. 입력봉과 출력봉의 중간에 부착된 스트레인 게이지로부터 응력파의 신호를 검출하였다.

3.5 압축 시편(specimen)

Table 1 과 Table 2 는 본 연구에서 사용한 쾌삭 황동과 황동의 기계적인 특성과 화학 성분을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition for brass materials.

Chemical composition wt. %	C3605	C2680
Cu	57.560	63.000
Pb	3.800	0.070
Fe	0.260	0.070
Sn	0.350	-
Zn	Rem.	Rem.

Table 2 Static mechanical Properties of specimens.

Mechanical Properties	C3605	C2680
Hardness (Brinell)	145.1	-
Tensile Strength Yield	445MPa	427MPa
Modulus of Elasticity	97GPa	105GPa
Shear Modulus	37GPa	35GPa
Density	8.49g/cc	8.47g/cc

시편의 형상은 관성의 영향을 최소화하기 위한 상태로 접촉하여야 한다. 시편의 형상은 Fig. 2 에 나타내었다.

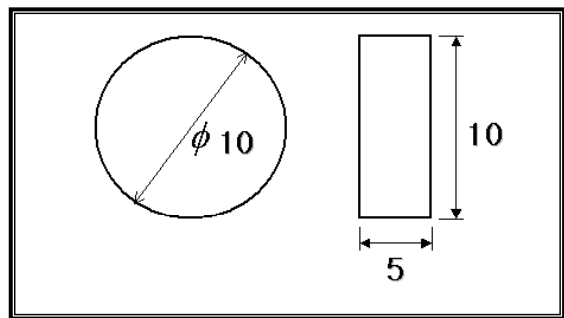


Fig. 2 Geometry of compressive specimen

4. 결과 및 고찰

입력봉과 출력봉에 부착된 스트레인 게이지로부터 얻어진 압축과 인장에 대한 오실로스코프 (oscilloscope)에 검출된 결과는 Fig. 3 에 나타내었다. 이론적으로는 출력봉 내에서 검출된 입력파는 투과파와 반사파의 크기(amplitude)와 같아야 한다. Fig. 3 의 결과는 이러한 이론적인 요구를 만족하고 있음을 알 수 있다.

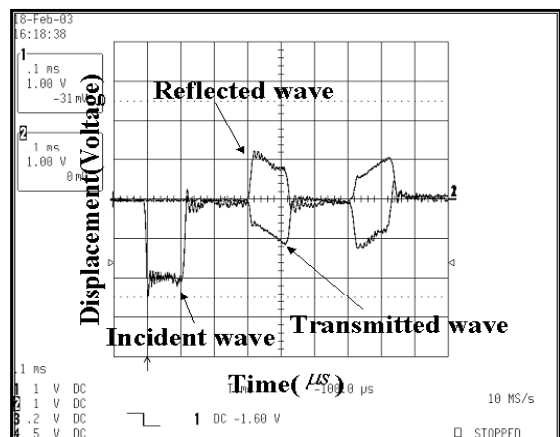


Fig. 3 Strain signal recorded at Oscilloscope under compressive loading for Brass

식(1), (2)와 (3)을 이용하여, 고변형률 속도의 압축 하중 하에서의 응력과 변형률 사이의 관계를 얻을 수 있다. Figs. 4, 5 는 쾌삭 황동과 황동의 동적 응력-변형률의 관계를 나타내었으며, Figs. 4, 5 에서 타원으로 표시된 부분에서 항복점을 지나 가공경화가 발생하는 영역의 거동을 면밀하게 분석 비교해 보았다[10]. 이러한 초기에 발생하는 관계를 Figs. 6, 7, 8, 9, 10, 11 에서 나타낸 황동에 대해 고변형률 응력-변형률 선도와 이것을 데이터-피팅(data-fitting)한 결과를 변형률 속도별로 Table 3, 4 에 나타내었다.

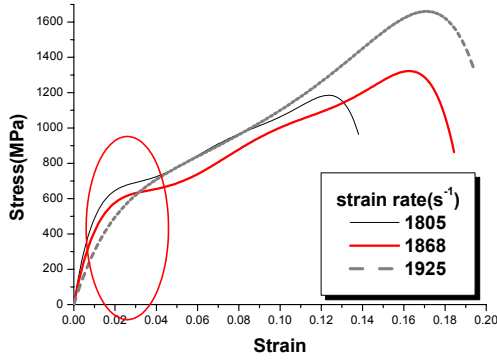


Fig. 4 Compressive stress-strain curve fitting for Free cutting Brass.

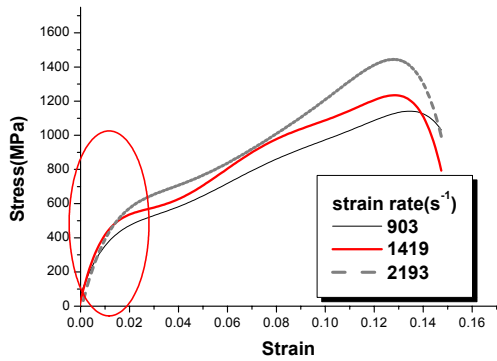


Fig. 5 Compressive stress-strain curve fitting for Free cutting Brass.

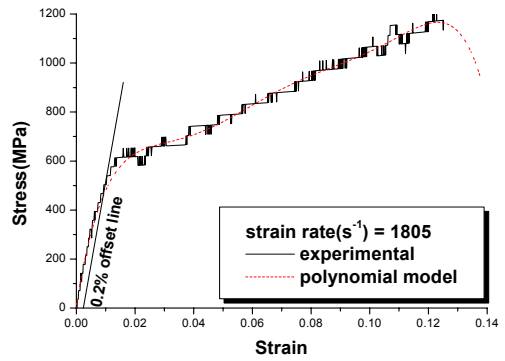


Fig.6 Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for Free-cutting Brass at strain rate of 1805

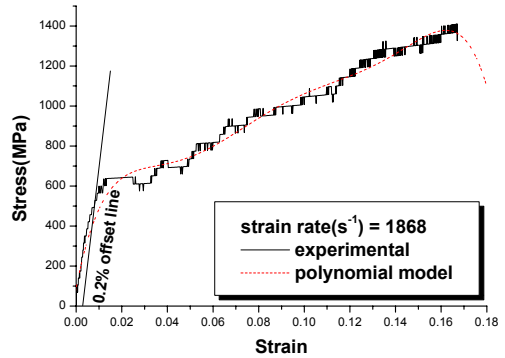


Fig.7 Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for Free-cutting Brass at strain rate of 1868.

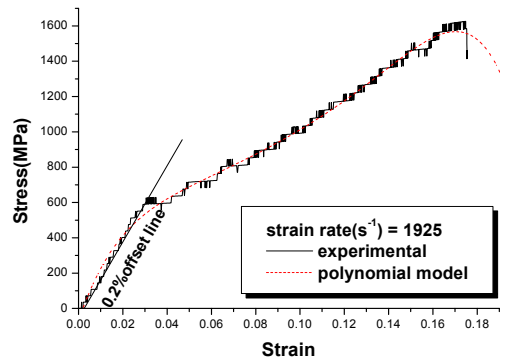


Fig.8 Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for Free-cutting Brass at strain rate of 1925.

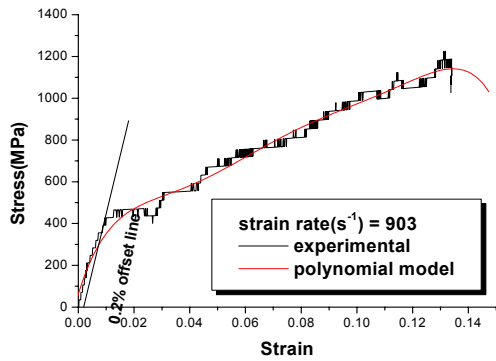


Fig. 9 Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for Yellow Brass at strain rate of 903

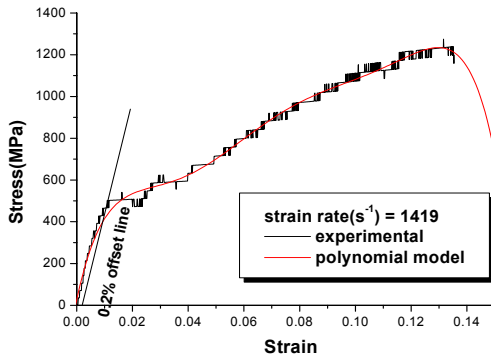


Fig. 10 Experimental and polynomial model of dynamic compressive stress-strain curve for Yellow Brass at strain rate of 1419

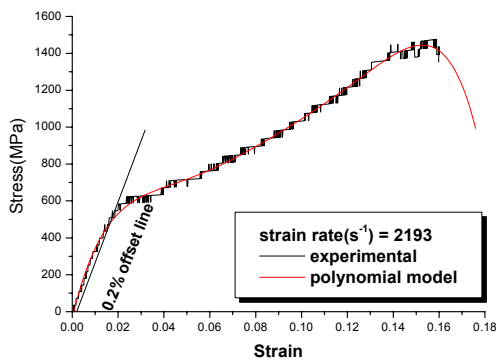


Fig. 11 Experimental and polynomial model of dynamic Compressive stress-strain curve for Yellow Brass at strain rate of 2183

Figs. 6, 7, 8, 9, 10, 11 에서와 같이 황동에서는 뚜렷한 항복응력이 그래프상에서 결정되지 않으므로 0.2%오프-셋(off-set)라인으로 항복응력

을 결정하였다.

이렇게 결정한 항복응력과 각 실험조건에서 결정된 대수 변형률속도의 관계를 나타낸 것이 Figs. 12, 13 이다. 이 결과를 보면 항복응력과 대수 변형률속도는 이중선형적인 관계를 나타내며 이것은 알루미늄, 플라스틱, 고무에 대한 결과와 유사한 것이 규명되었다.

Table 2 의 데이터-피팅의 결과식으로 캐삭 황동의 탄성계수를 추출해 보면 각각의 변형률 속도에 따라 73GPa, 57GPa, 36GPa 로 결정되어지고 Table 3 의 데이터-피팅의 결과식으로 황동의 탄성계수를 추출해 보면 각각의 변형률 속도에 따라 72Gpa, 61Gpa, 51Gpa 로 결정되어서 이 과정으로 탄성계수를 결정하는 것은 무리가 있다고 판명되었다.

Table 3 Coefficients of the six order polynomials for compressive test.

strain-rate (s ⁻¹)	$\sigma = a + b_1\varepsilon^1 + b_2\varepsilon^2 + b_3\varepsilon^3 + b_4\varepsilon^4 + b_5\varepsilon^5 + b_6\varepsilon^6$			
1805	a	b ₁	b ₂	b ₃
	0	b ₄	b ₅	b ₆
1868	0			
	0			
1925	0			
	0			

Table 4 Coefficients of the six order polynomials for compressive test.

strain-rate (s ⁻¹)	$\sigma = a + b_1\varepsilon^1 + b_2\varepsilon^2 + b_3\varepsilon^3 + b_4\varepsilon^4 + b_5\varepsilon^5 + b_6\varepsilon^6$			
903	a	b ₁	b ₂	b ₃
	0	b ₄	b ₅	b ₆
1419	0			
	0			
2193	0			
	0			

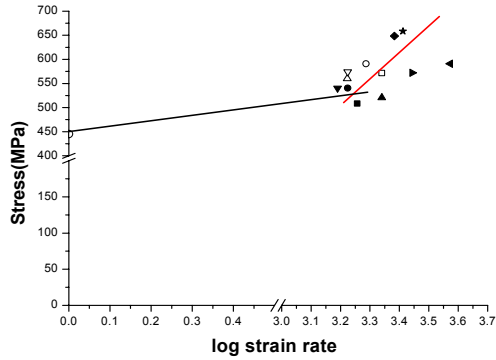


Fig. 12 Dynamic compressive yield stress vs. log strain rate curve for Free-cutting Brass

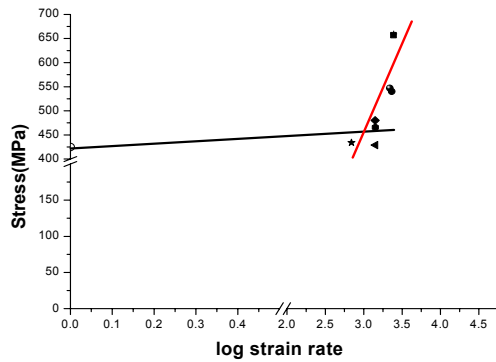


Fig. 13 Dynamic compressive yield stress vs. log strain rate curve for Yellow Brass

5. 결론

압축 하중하에서 Free-cutting Brass 와 Yellow Brass 에 대한 동적 변형 거동을 SHPB 기법을 사용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 쾌삭황동과 황동의 압축 항복 강도와 변형률의 관계는 이중 선형의 재료 특성이 나타남을 알 수 있었다.
2. 쾌삭 황동의 민감도 $[(\sigma_{dyn} - \sigma_{stat}) / \sigma_{stat}]$ 는 압축 항복 강도에 대해서는 39%가 되는 것을 알 수 있다.
3. 황동의 민감도 $[(\sigma_{dyn} - \sigma_{stat}) / \sigma_{stat}]$ 는 압축 항복 강도에 대해서는 30%가 되는 것을 알 수 있다.

후 기

여기에 본 연구는 한국 학술진흥 재단의 지원 (E00061)을 받아 수행 된 것 입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, O.S., Kim, M.S. and Back, J.H, “determination of Deformation Behavior of the Al5052-H32 under Dynamic Tensile Loading Using SHPB Technique”, KSPE ,Fall conference, pp.790~794, 2001.
- (2) Pochhammer, L., “On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder”, J. Reine Angewandte Math, vol. 81, p.324.
- (3) Chree, C., “The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates”, Their solutions and Applications, Cambridge Phil. Soc. Trans. Vol. 14, p.250, 1889.
- (4) Davies, R.M., “An critical study of the Hopkinson Pressure Bar”, Phil. Tran. A, Vol. 240, p.375, 1948.
- (5) Follansbee, P.S., “<The Hopkinson Bar>, in Metals Handbook Ninth Edition, Mechanical Testing”, American Society for Metals, Vol. 8, pp.198~203, 1985.
- (6) Lee, O.S., You, S.S., Chung, J.H. and Kang, H.S., “Dynamic Deformation Under a Modified Split Hopkinson Pressure Bar Experiment, KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp.1143~1149, 1998.
- (7) Lee, O.S., Lee, J.Y., Kim, G.H. and Hwang, H.S., “High Strain-rate Deformation of Composite Materials Using a Split Hopkinson Bar Technique, Key Engineering Materials”, Vol.183~187, Part 1, pp.307~312, 2000.
- (8) Lee, O.S. and Kim, G.H., Thickness Effects on Mechanical Behavior of a Composite Material(1001P) and Polycarbonate in Split Hopkinson Pressure Bar Technique”, Journal of Materials Science Letters, Vol19, pp.1805~1808, 2000.
- (9) Lee, O.S., Kim, M.S., Hwang, S.W and Cho, K.S “Dynamic Deformation Behavior of Alluminum Alloys under High Strain Rate Compressive/Tensile Loading”, KSPE, Vol.20, No.1 pp.196~204, 2003.
- (10) Bragow, A.M. and Lomunow., “Methodological Aspects of Studying Dynamic Material Properties Using the Kolsky Method”, Int.J.Impact Energy, Vol. 16, pp.321~330, 1994.
- (11) Zukas, J. A., “High Velocity Impact Dynamics”, John Wiley & Sons, Inc, 1990.
- (12) Nguyen, C. H., H. J. Schindler, “On Spurious reflection Wave in Hopkinson Bar Tensile Tests Using a Collar”, Journal DE Physique IV, pp.C3-85~C3-87, 1997.
- (13) Hopkinson, B., “A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of Explosives or by the Impact of Bullets”, Phil. Trans. A, Vol.213, p.437, 1941.