

SHPB 시험과 알루미늄 합금의 압축 변형거동[§]

김종탁* · 우성충** · 김진영*** · 김태원****†

* 한양대학교 자동차공학과, ** 한양대학교 국방 생존성기술 특화연구센터,
*** 국방과학연구소, **** 한양대학교 기계공학부

Compressive Deformation Behaviors of Aluminum Alloy in a SHPB Test

Jong-Tak Kim^{*}, Sung-Choong Woo^{**}, Jin-Young Kim^{***} and Tae-Won Kim^{****†}

^{*} Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,
^{**} Survivability Technology Defense Research Center, Hanyang Univ.,
^{***} Agency for Defense Development,
^{****} School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received December 22, 2011; Revised April 10, 2012; Accepted April 12, 2012)

Key Words: SHPB(Split-Hopkinson Pressure Bar), Finite Element Analysis(유한요소해석), Deformation Behavior(변형거동), Strain Rate(변형률 속도), Impact(충격)

초록: 구조부재는 정적, 동적 또는 충격과 같은 다양한 하중의 영향을 받고 있다. 결과적으로 이와 같은 하중의 영향이 고려된 재료의 물성치를 획득하기 위해 각 조건에 적합한 실험적 또는 해석적 방법이 수반되어야 한다. 일반적으로 고변형률 속도에서 재료의 기계적 물성을 얻는 방법으로써 홉킨슨 압력봉 시험법(SHPB)이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 SHPB 시험을 통해 충격 하중 조건에서 알루미늄 합금의 압축변형거동을 고찰하였으며, 실험결과와 해석결과를 비교, 분석하였다. 결론적으로 1000 ~ 2000 s⁻¹ 영역에서 진응력-진변형률 곡선을 비교하였을 때 실험 결과와 해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 특히, 변형률 속도가 30% 증가함에 따라 최대유동응력은 17%증가, 변형률은 20% 증가함을 확인하였다.

Abstract: Structures are often subjected to various types of loading such as static, dynamic, or impact loading. Therefore, experimental and numerical methods have been employed to find adequate material properties according to the conditions. The Split-Hopkinson pressure bar (SHPB) test has frequently been used to test engineering materials, particularly those used under high strain rates. In this study, the compressive deformation behaviors of aluminum alloy under impact conditions have been investigated by means of the SHPB test. The experimental results were then compared with those of finite element analyses. It was shown that reasonably good agreement with the true stress-strain curves was obtained at strain rates ranging from 1000 s⁻¹ to 2000 s⁻¹. When the strain rate increased by 30%, the peak stress in particular increased by 17%, and the strain also increased by 20%.

- 기호설명 -

ρ : 밀도(g/mm³)
 E : 탄성계수(GPa)
 G : 전단계수(GPa)
 ν : Poisson's ratio
 σ_y : 항복응력(MPa)

σ_U : 인장강도(MPa)
 m : 변형률 속도 민감도 계수
 $\dot{\epsilon}$: 변형률 속도(s⁻¹)
 ϵ : 변형률
 σ_p : 최대응력(MPa)

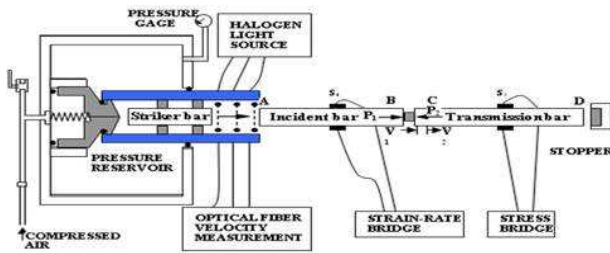
1. 서론

다양한 하중조건에서 유지 또는 운전되고 있는 구조재료들 중 특히 동적 또는 충격 하중을 받는 재료는 변형률 속도 조건 하에서 그 재료의 기계-재료적 특성이 반영된 설계가 수반되어야 한다.⁽¹⁾

[§] 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 2.-4., EXCO) 발표논문임
[†] Corresponding Author, twkim@hanyang.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Material properties of maraging

Material	ρ (g/cm ³)	E (GPa)	G (GPa)	ν	σ_Y (MPa)	σ_U (MPa)
Maraging Steel	8.00	183.0	70.0	0.3	2620.0	2693.0
Aluminum 5083	2.66	70.0	26.5	0.33	190.0	300.0

Fig. 1 Apparatus for SHPB test⁽³⁾

특히 충격에 의한 재료의 변형 및 파손은, 변형률 속도가 클 경우, 재료내부에 형성된 응력파가 급속도로 전파되어 정적 또는 저속충격에서와 다른 응력 집중현상이 발생한다.⁽²⁾ 이러한 변형률 속도 영향에 대하여, Kolsky 에 의해 제안된 홉킨슨 압력봉 시험법(SHPB, Split-Hopkinson Pressure Bar)은 고속변형시 재료의 기계적 특성을 안정된 방법으로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁽³⁻⁵⁾ 현재 SHPB 시험법을 이용하여 자동차, 항공기 및 고속운송수단 분야 등에서 알루미늄 합금, 스테인레스 강, 복합재료 등 다양한 소재에 대해 물성평가 연구가 진행되고 있다.⁽⁶⁻⁸⁾ 본 연구에서는 이와 같은 시험법을 이용하여, 공업용 또는 구조용 재료로 사용되는 알루미늄 5083 소재에 대한 충격시험을 수행하였으며 각 속도에 대한 변형률 속도 분석과 함께 응력-변형률 특성 및 최대응력을 평가하였다. 아울러 실험 조건과 동일한 변형률 속도 하에서 유한요소해석을 수행하여 실험결과와의 비교, 분석을 하였으며, 이를 바탕으로 충격 조건에 따른 재료의 변형 특성을 고찰하였다.

2. SHPB 충격시험

Fig. 1 에서 보듯이 SHPB 는 충격봉(striker bar), 입력봉(incident bar) 및 출력봉(transmission bar)으로 구성되어 있다. 충격봉을 이용하여 입력봉에 주어진 속도로 충격을 가하면, 이로 인해 입력봉

내에 임의 변형률($\varepsilon(t)$)을 갖는 압축파가 발생된다. 이 압축파가 시편에 도달되면, 일부는 변형률 $\varepsilon_R(t)$ 의 인장파로 반사가 되고, 나머지는 변형률 $\varepsilon_T(t)$ 를 갖는 압축파로 투과된다. 이때 입력봉과 출력봉에 부착된 변형률 센서(strain gage)를 이용하여 각각의 입력파, 반사파 및 투과파를 시간에 대한 변화로 측정할 수 있다. 한편 시편이 균일하게 변형한다고 가정할 경우 시편내의 변형률 속도는 반사파의 크기에 비례하고, 시편내에 가해진 응력의 크기는 투과파의 크기에 비례하게 된다. 이와 관련된 식은 다음과 같다.

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{-2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (1)$$

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (2)$$

여기서 C_0 는 압력봉의 탄성과 전파속도, L 은 시편길이, A 는 시편 단면적, A_0 는 압력봉 단면적 E 는 압력봉의 탄성계수이다.

실험에 사용된 소재는 상용재료인 알루미늄 5083이며, 주요 기계적 특성은 Table 1과 같다. 전술한 바와 같은 SHPB의 구성 요소인 입력봉, 출력봉 및 충격봉 소재는 마레이징 강(maraging steel)을 사용하였다. 알루미늄 시편은 강도와 SHPB 시험에서 모사될 수 있는 응력파의 1차원 거동을 만족시키기 위하여 그 형상을 높이고, 지름이 각각 8 mm인 1:1 원통형으로 제작하였다. 또한 안정적으로 데이터를 획득할 수 있는 속도인 30 m/s 이하의 구간에서 즉, 15.4 m/s, 20.0 m/s 및 23.8 m/s의 3 영역을 선택하였고, 각각의 속도에서 3회 반복 실험을 수행하였다.⁽⁹⁾

3. 유한요소해석

충격하중에 따른 알루미늄 5083의 압축거동 예측을 위해 비선형 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 통해 수치해석 하였으며, 대변형 효과를

Table 2 Dynamic material properties of aluminum 5083

No.	Diameter (mm)	Pressure (psi)	Impact Vel. (m/s)	$\dot{\epsilon}$ (/s)	ϵ	σ_Y (MPa)	σ_p (MPa)
1	8	30	15.28	1379.1	0.18998	328	628
2			15.58	1388.55	0.19916	343	631.15
3			15.48	1399.78	0.198	349	633.34
4		50	20.13	1823.64	0.267	299	765.578
5			20.09	1803.99	0.262	307	755.3
6			19.53	1802.6	0.262	298	748.204
7		70	23.85	2202.16	0.3124	337	877.41
8			23.8	2192.925	0.3075	292	872.94
9			23.58	2182.844	0.3109	262	872.558

Table 3 Comparison between numerical and experimental results

No.	Strain rate (s ⁻¹)	Flow stress at $\epsilon=0.1$ (MPa)		Flow stress at $\epsilon=0.2$ (MPa)		Flow stress at $\epsilon=0.3$ (MPa)		Peak stress (MPa)	
		FEA	Exp.	FEA	Exp.	FEA	Exp.	FEA	Exp.
1	1388.55	475	500.51	-	-	-	-	629	631.15
2	1803.99	478	485.709	649	641.283	-	-	756	755.3
3	2202.16	481	504.73	656	652.689	879	863.142	879	877.41

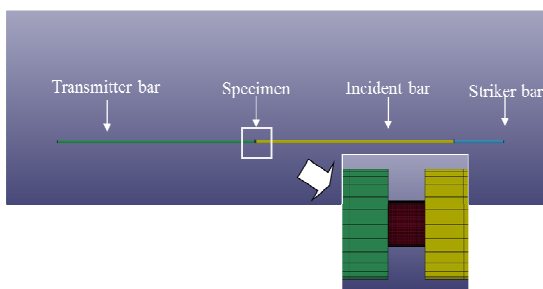


Fig. 2 Schematic diagram of the bars and specimen

고려하여 응력과 변형률텐서를 up-date 하였다. SHPB 시험의 재료거동 모사는 Fig. 2 와 같이 설정하였고, 충격봉, 입력봉, 출력봉에 사용된 소재 물성값은 Table 1 과 동일하다. 경계조건은 SHPB

시험조건과 같은 1 차원 운동을 모사하기 위하여 X 축 방향을 제외한 Y 및 Z 축 방향을 고정 하였다. 각 요소는 8 개의 절점을 갖는 직육면체 요소로 구성되어 있으며, 충격봉, 입력봉과 출력봉은 각각 5,700 및 9,000, 9,000 의 요소로 설정하고, 해석에서의 정확도를 높이기 위하여 시편은 32,300 개의 요소로 모델링 하였다. 한편 알루미늄 5083 은 Al-Mg 계열의 합금으로서 95%가 알루미늄 기반으로 조성된 합금이다. 알루미늄 합금의 주요 결정구조는 면심입방구조(FCC)를 지니며, 시편은 재료의 방향성과 무관하게 높이 대 지름이 1:1 인 봉상으로 가공하였다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금을 등방성이라고 가정하였다.

SHPB 실험은 마레이징 강의 탄성영역 내에서 수행되었으며 이에 따라 충격봉, 입력봉, 출력봉의 거동은 LS-DYNA 의 탄성모델을 사용하였고, 봉상의 시편 변형은 von Mises 항복이론과 등방탄소성

파손조건을 바탕으로 모델링 하였다. 아울러 3 개의 주응력 상태를 모두 고려한 삼축응력 조건에 따라 소성변형률과 재료파손 해석을 수행하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 접촉조건(contact condition)으로 Eroding single surface 을 사용하여 유효 소성 변형률을 초과하는 요소들을 삭제함으로써 재료의 균열 또는 파괴를 효과적으로 모사할 수 있었다.

한편 해석에 사용된 충격봉의 속도는 3 회 반복 시험 중, 충격봉 압력에 따른 속도의 중간값, 즉 부과 압력별 15.48 m/s, 20.09 m/s 및 23.85 m/s 을 각각 적용하였으며, 해석결과 분석을 통해 획득한 변형률과 응력을 바탕으로 실험에서 얻은 변형률-응력 선도와 비교 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

변형률 속도에 따른 알루미늄 5083 의 동적 압축시험의 결과는 다음과 같다. Table 2 는 SHPB 실험을 통해 얻은 재료물성 데이터이다. 변형률 속도가 1388.55 s⁻¹ 일 때 변형률 0.199 및 최대응력이 631.15 MPa 가 됨을 확인할 수 있었으며 마찬가지로 변형률 속도 1803.99 s⁻¹ 에서는 변형률 0.262, 최대응력 755.3 MPa 그리고 2202.16 s⁻¹ 일 때 변형률 0.3124, 최대응력 877.41 MPa 를 각각 얻었다. 이와 같은 실험 결과를 통해 충격에 따른 변형률 속도가 30% 증가함에 따라 변형률이 약 20% 증가하며 아울러 최대응력 또한 약 17% 증가함을 알 수 있었다. 이상과 같은 결과를 통해 변형률 속도는 변형률과 최대 응력의 변화에 민감하다는 결과를 얻을 수 있다. Fig. 3 은 입력봉과 출력봉의 변형률 센서로부터 획득한 전압신호이다. 이를 바탕으로 식 (1)과 (2)를 통하여 Fig. 4 와 같은 진응력-진변형률 그래프를 획득할 수 있다. 한편 이와 같은 그래프를 통해 변형률 속도 증가에 따른 응력과 변형률의 변화를 보다 정확하게 분석할 수 있다.

실험 결과로부터 얻은 재료물성을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. Table 3 과 Fig. 5 는 유한요소해석을 통해 예측한 응력과 변형률을 실험결과와 비교하고 있다. 변형률 값이 각각 0.1, 0.2 및 0.3 에서 얻은 응력 결과와 최대응력에서의 결과값이 5% 이내로 유사함을 확인할 수 있으며, 전반적으로 실험결과와 매우 근접함을 알 수 있다. 한편 Fig. 6 는 유한요소해석을 통해 예측한 8mm 시편의 초기 상태의 형상과 변형 후의 시편 형상을 보여주고 있다.

Table 4 는 실험과 해석에 따른 시편의 길이 변화를 비교하고 있다. 실험결과를 통해 변형률 속도가 1388.55 s⁻¹ 일 때 길이는 약 30% 감소를 보이고 있으며, 마찬가지로 1803.99 s⁻¹ 일 때 약 44% 및 2202.16 s⁻¹ 일 경우 약 53%의 길이 변화를 보였다.

한편 실험 결과를 토대로 1300~2200 s⁻¹ 영역에서의 변형률 속도 민감도 계수(Strain rate sensitivity)를 계산

Table 4 Comparison of specimen length

No.	strain rate (s ⁻¹)	Initial Length (mm)		Deformation Length (mm)		Change Shape Size (%)	
		FEA	Exp.	FEA	Exp.	FEA	Exp.
1	1388.55	8	7.96	6.45	5.6	-19.4	-29.6
2	1803.99	8	7.98	5.63	4.47	-29.6	-44.0
3	2202.16	8	7.97	5.15	3.74	-35.6	-53.1

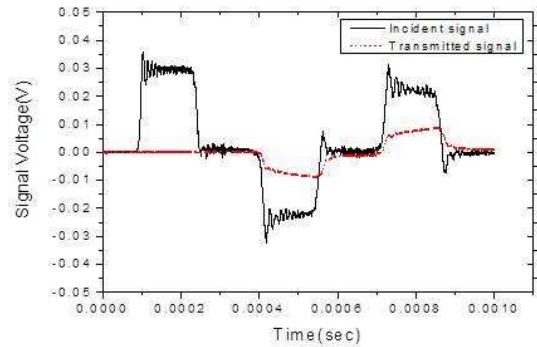


Fig. 3 Typical strain signals obtained from incident and transmitted pressure bars ($\dot{\epsilon} = 1388.55 \text{ s}^{-1}$)

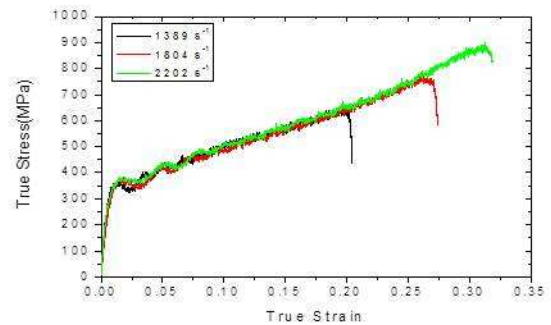


Fig. 4 True stress-strain curve of aluminum 5083 obtained from SHPB tests

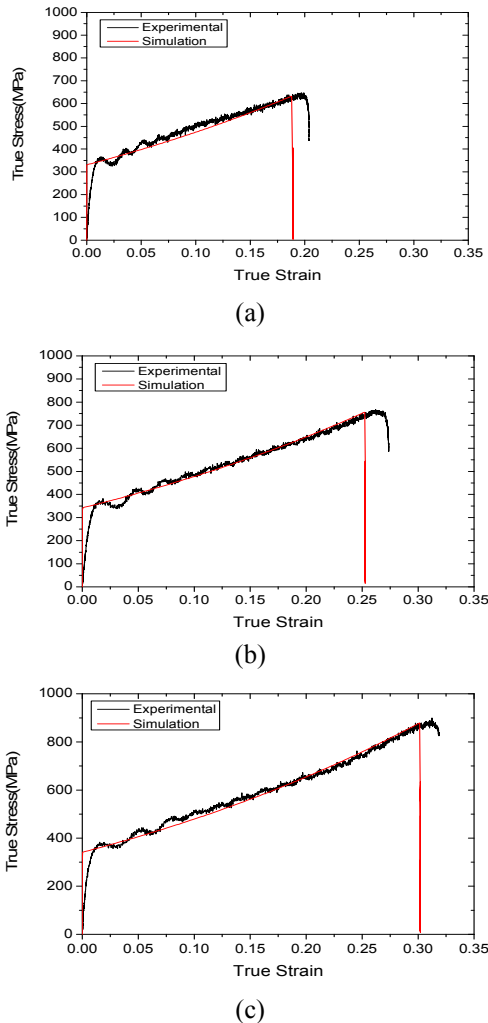


Fig. 5 Comparison of true stress-strain curves between experimental and simulation: (a) 1388.55 s^{-1} , (b) 1803.99 s^{-1} , and (c) 2202.16 s^{-1}

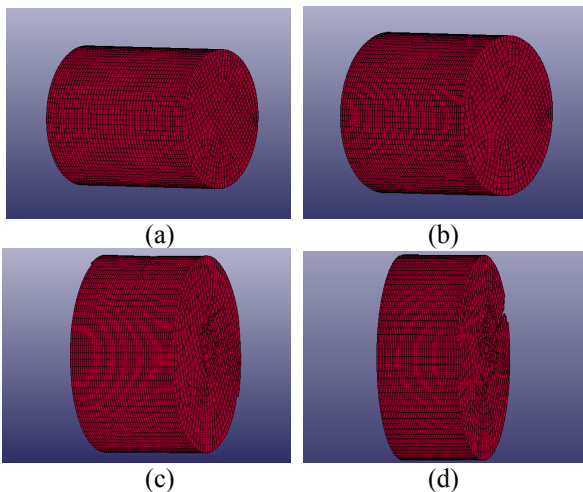


Fig. 6 Deformation shapes by finite element analyses: (a) initial, (b) at 1388.55 s^{-1} , (c) at 1803.99 s^{-1} , (d) at 2202.16 s^{-1}

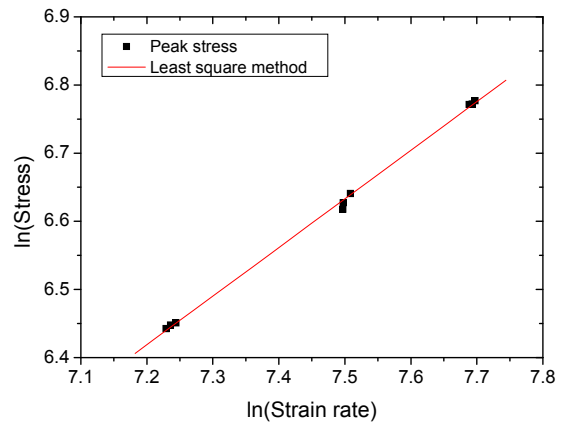


Fig. 7 Strain rate sensitivity at the peak stress

하였다. 변형률 속도 민감도 계수는 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며 1에 가까울수록 보다 용이한 변형이 나타남을 의미한다.

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

여기서 m 은 변형률 속도 민감도 계수를 나타내며, σ 는 유동응력, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도를 의미한다. 실험 결과로부터 획득한 변형률 속도와 최대응력의 대수 그래프는 Fig. 7과 같다. 그래프에서 알 수 있듯이 변형률 속도 민감도 계수는 최소자승법 (method of least squares)을 통하여 0.713의 결과를 얻었다. 위의 내용을 토대로 알루미늄 5083은 $1300 \sim 2200 \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 속도 하에서 매우 큰 압축 변형이 초래될 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

충격에 따른 $1300 \sim 2200 \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 속도 하에서 수행한 SHPB 시험과 유한요소해석을 바탕으로 알루미늄 5083의 압축 변형거동을 고찰하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

입력봉과 출력봉의 변형률 센서로부터 획득한 전압신호를 바탕으로 응력과 변형률을 예측한 결과, 약 5%의 최대응력 값 오차 범위로 고속충격을 모사할 수 있었으며 따라서 충격과 변형률 속도의 변화 및 재료의 동적 거동의 상관성을 확인할 수 있었다. 한편 높은 변형률 속도 하에서 알루미늄 소재의 물성을 평가하였을 때, 30%의 변형률 속도 증가 시, 최대 응력은 약 17% 증가하였

으며 아울러 변형률은 약 20% 증가함을 확인하였다. 이를 통하여 충격에 따른 변형률 속도가 최대 응력 및 변형률의 증가에 주요 원인이 됨을 알 수 있다. 1300~2200 s⁻¹ 변형률 속도 영역에서 변형률 속도 민감도 계수는 $m=0.713$ 으로 산출되었으며 예상한 바와 같이 알루미늄 5083 은 매우 큰 압축 거동을 나타내었다.

이상과 같은 방법을 통해 충격과 변형률 속도 및 변형률 속도 민감도 계수의 연관성은 타 소재의 동적 거동 해석에도 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각한다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화 연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음 (계약번호 UD090090GD).

참고문헌

- (1) Kim, J.T., Cho, C.H., Jeon, J.I., Gimm, H.K., Koo, M.H. and Kim, T.W., 2010, "A Study of the Projectile-Material Shape on Damage and Fracture Behavior of Aluminum Alloys Under High Velocity Impact," *Proceeding of 40th Anniversary Conference on the Establishment of Agency for Defence Development*, New Special Energy, pp. 371~374
- (2) Jena, P.K., Jagtap, N. and Siva Kumar, K. and Balakrishna Bhat, T., 2008, "Some Experimental Studies on Angle Effect in Penetration," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 489~501
- (3) Jeong, D.-T., 1994, "Split Hopkinson Pressure Bar Technique for Stress-Strain Measurement," *The Korean Society of Mechanical Engineers Annuals Spring & Fall Conferences*, pp. 33~41.
- (4) Kuhn, Howard, Medlin and Dana, 1984, "ASM Handbook Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation," *ASM International Handbook Committee*, Vol. 8, pp. 462~476.
- (5) Davies, E., 1948, "A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar," *Philos. Trans. A*, Vol. 204, pp.375~457.
- (6) Lee, O. S., Kim, G. K. and Kim, M. S., 2003, "Dynamic Deformation Behavior of Aluminum Alloys Under High Strain Rate Compressive/Tensile Loading," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 17, No. 6, pp. 787~795.
- (7) Lee, O. S. and Kim, D. H., 2008, "Reliability Estimation and Dynamic Deformation of Polymeric Material Using SHPB Technique and Probability Theory," *KSME-A*, Vol. 32, No. 9, pp.740~753.
- (8) Moon, W., Seo, S., Lim, J. and Min, O., 2002, "Dynamic Shear Stress of Tough-Pitch Copper at High Strain and High Strain-Rate," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 16, No. 11, pp. 1412~1419.
- (9) Ruiz, C. and Mines, RWA. 1985, "The Hopkinson Pressure Bar: An Alternative to the Instrumented Pendulum for Charpy Tests," *International Journal of Fracture*, Vol. 29, pp. 101~109.
- (10) Hallquist, J. O., 2006, "LS-DYNA Theory Manual," *Livermore Software Technology Corporation*.
- (11) Shim, J. and Mohr, D., 2009, "Using Split Hopkinson Pressure Bars to Perform Large Strain Compression Tests on Poluurea at Low, Intermediate and High Strain Rates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 1116~1127.
- (12) Lee, O. S., Choi, H.B. and Kim, H.M., 2011, "High-Temperature Dynamic Deformation of Aluminum Alloys Using SHPB," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, pp.143~148.
- (13) Abotula, S. and Chalivendra, V. B., 2010, "An Experimental and Numerical Investigation of the Static and Dynamic Constitutive Behavior of Aluminium Alloys," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 45, pp.555~565