

<논문>

수치해석을 이용한 SHPB 시험의 마찰영향 분석

차성훈* · 신명수* · 신현호** · 김종봉†

An Investigation into the effect of friction in the split hopkinson pressure bar (SHPB) test by numerical experiments

Sung-hoon Cha, Myoung-Soo Shin, Hyunho Shin, and Jong-Bong Kim

Key Words: High strain rates (고변형률속도), Split Hopkinson pressure bar (SHPB), Incident bar (입력봉), Transmitted bar (출력봉)

Abstract

The interest in the mechanical behavior of materials at high strain rates has increased in recent years, and by now it is well known that mechanical properties can be strongly influenced by the speed of applied load. The split Hopkinson pressure bar (SHPB) has been widely used to determine mechanical properties of materials at high loading rates. However, to ensure test reliability, measurement error source must be accounted for and eliminated. During experiment, the specimens were located between the incident and the transmit bar. The presence of contact frictions between the test bars and specimen may cause errors. In this work, numerical experiments were carried out to investigate the effect of friction on test results. In SHPB test, the measured stress by the transmitted bar is assumed to be flow stress of the test specimen. Through the numerical experiments, however, it is shown that the measured stress by the transmit bar is axial stress components. When, the contact surface is frictionless, the flow stress and the axial stress of the specimen are about the same. When the contact surface is not frictionless, however, the flow stress and the axial stress are not the same anymore. Therefore, the measured stress by the transmitted bar is not flow stress. The effect of friction on the difference between flow stress and axial stress is investigated.

기호설명

V_1 : 입력봉과 시편의 접촉면에서의 입자속도
 V_2 : 출력봉과 시편의 접촉면에서의 입자속도
 L : 시편 (Specimen)의 길이
 σ : 유동 응력 (flow stress)
 ϵ : 등가소성변형률

A : 초기항복응력계수

B : 변형률경화계수

n : 가공경화지수

C : 변형률 속도 경화계수

m : 열연화지수

$T^* = \frac{(T - T_{room})}{(T_m - T_{room})}$: 무차원 등가온도

$\dot{\epsilon}$: 등가 소성 변형률속도

$\dot{\epsilon}_0$: 기준 등가 소성 변형률속도 ($=1.0 \text{ S}^{-1}$)

T_m : 용융 온도

T_{room} : 실온

† 책임저자, 회원, 서울산업대학교 자동차공학과

E-mail : jbkim@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6434 FAX : (02)979-7092

* 서울산업대학교 NID융합대학원

** 강릉대학교 세라믹공학과

1. 서론

최근 변형률 속도가 매우 큰 고변형률에서 재료의 기계적 거동에 대한 관심이 커짐에 따라 이를 규명하기 위해 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 실험법이 널리 사용된다.⁽¹⁾

탄성한계 내에 있는 압력봉의 변위는 응력에 직접적으로 비례하며, 봉에서의 파장은 봉 내부에서의 음파속도에 관련하여 충격의 지속 기간에 관계된다는 것이 Hopkinson⁽²⁾에 의해 밝혀지고 Kolsky⁽³⁻⁵⁾에 의해 실험법이 발전된 이후 다양한 연구가에 의해 동 압축 하중 하에서의 공학소재의 물성에 대한 연구가 진행되어져 왔다.⁽⁶⁾ Nicholas⁽⁷⁾, Franz 등⁽⁸⁾, Nemat-Nasser 등⁽⁹⁾, Tamesh와 Narasimha⁽¹⁰⁾, Gray⁽¹¹⁾ 등에 의해 최근 다양한 실험 방법들이 논의되어졌으며 실험 기술에 있어서 많은 발전을 이룬 결과 최근에는 10^2 부터 10^4 s⁻¹ 사이의 고변형률까지 실험이 가능해졌다. SHPB 실험법은 균일 변형상태 하에서 단축 압축 실험을 통해 고변형률 속도를 얻을 수 있고, 로드셀(load cell)이나 스트레인 게이지(strain gage)를 시편에 직접 붙일 필요가 없는 장점이 있다. 이런 장점 때문에 SHPB 실험법은 고속충격실험에 많이 응용되고 있다.^(2,12)

SHPB 실험에서 시편의 응력과 변형률은 시편과 압력봉사이의 마찰과 반경방향의 관성, 축방향의 관성의 요소로 인해 영향을 받게 된다. 반경방향의 관성과 축방향의 관성효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer⁽¹³⁾와 chree⁽¹⁴⁾ 등에 의해 구해져 수학적 예측이 가능하지만 시편과 압력봉과의 마찰효과는 실험 시 결과에 큰 영향을 미치게 된다.^(11,15,16) 대부분의 실험에서는 이러한 오차를 극복하기 위해 압력봉과 시편사이 표면을 특수가공하거나 윤활처리 하여 마찰이 없다는 가정 하에 시험하고 있다.

SHPB 실험시 마찰효과에 대한 연구는 R.S.Hartley⁽¹⁷⁾의 링 압축 실험을 이용한 마찰 효과 분석, H.Meng⁽¹⁸⁾의 CAE를 이용한 연구 등이 진행되어져 왔다. 본 연구에서는 범용해석 프로그램 ABAQUS를 이용하여 일반적으로 사용되어지는 Johnson-Cook 모델을 적용해, 시편의 변형률과 압력봉에서 계산되어진 변형률 사이의 마찰에 따른 차이 값을 분석함으로써 마찰의 영향을 분석하였다.

2. 이론

2.1 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 실험⁽¹¹⁾

SHPB 실험 장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 충격봉(Striker bar)과 두 개의 탄성봉으로 구성되어 있다. 두 개의 탄성봉은 각각 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmit bar)이라 불리고, 입력봉과 출력봉 사이에 시편이 설치된다.

충격봉이 속도 V_0 로 가속되어 입력봉의 단면 A와 충돌하게 되면 압축탄성파가 생성되며, 압축파는 충격봉 길이의 두 배만큼의 지속시간을 가진다.

압축파가 입력봉과 시편의 경계면(B)에 도달하게 되면 입력봉과 시편의 임피던스(impedance)차이에 의하여 일부는 인장파로 반사되고 나머지는 시편을 통해서 출력봉으로 전파된다.

입력봉과 출력봉에 설치된 두 개의 스트레인 게이지에 의해서 반사파와 투과파의 시간에 따른 변화를 측정할 수 있으며, 이 신호를 이용하여 시편의 진응력-진변형률 관계를 얻을 수 있다.

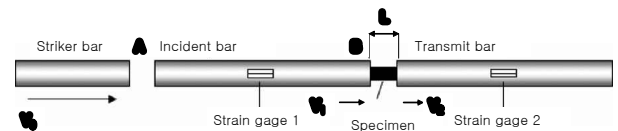


Fig. 1. Schematic of the SHPB device⁽¹⁾

Fig. 1에서 시편의 변형률 속도는 아래와 같다.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L} \quad (1)$$

여기서 V_0 는 충격봉의 초기 속도, V_1 은 입력봉과 시편의 접촉면의 속도, V_2 는 출력봉과 시편의 접촉면의 속도, 그리고 L 은 시편의 길이이다.

Fig. 1에서 시편의 양 끝단에 걸리는 힘과 속도를 이용하여 시편에 걸리는 평균응력, $\dot{\varepsilon}(t)$, $\varepsilon(t)$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C}{L} \varepsilon_R \quad (3)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (4)$$

여기서 ε_T 는 출력봉에서 측정된 투과파에 의한 변형률이고, ε_R 은 입력봉에서 측정된 반사파에 의해 변형률이다.

2.2 Johnson-cook 구성방정식

해석에서 재료의 소성구성방정식 모델로 Johnson-Cook 모델을 이용하였다. Johnson-cook 모델은 변형률경화, 변형률속도 경화, 열연화의 영향을 고려하여 식(5)과 같이 표현된다.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0})(1 - (T^*)^m) \quad (5)$$

$$T^* = (T - T_{room}) / (T_m - T_{room}) \quad (6)$$

여기서, σ 는 유효응력, ε 은 등가소성변형률, 그리고, A, B, C, n, m은 피팅 계수이다.

3. 해석

3.1 형상모델링(Feature modeling)

해석은 범용 해석프로그램 ABAQUS를 이용하여 수행하였다. Fig. 2는 해석을 위한 개략적인 형상을 보여준다. 길이 3m 직경 0.0019m의 입력봉(Incident bar)과 출력봉(Transmit bar) 사이에 길이와 직경이 0.001m인 시편(Specimen)이 위치한다. 입력봉 끝단에 길이 0.25m 직경 0.0019m의 충격봉(Striker bar)이 설치되어 임의의 속도로 입력봉(Incident bar)에 충격을 가한다. 해석은 외연적(Explicit) 방법으로 수행하였다. 입력봉과 출력봉의 게이지 장착 부분에서 변형률을 추출하여 응력과 변형률을 계산하였다.

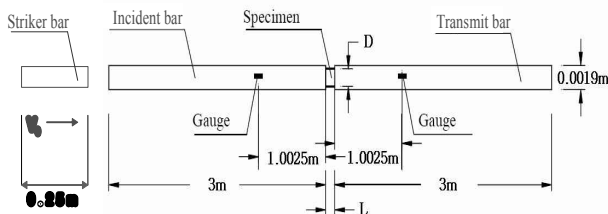


Fig. 2 Configuration of the analysis model

3.2 유한요소 격자 및 경계조건

해석은 축대칭으로 수행하였다. 탄성변형을 하는 충격봉, 입력봉, 그리고 출력봉은 비교적 격자를 크게 하였고, 소성변형이 발생하고 관심의 대

상인 시편은 격자를 작게 하였다. 각 개체의 유한요소 격자수는 Table. 1 과 같고 Fig. 3은 시편 부분만을 확대한 격자를 보여준다.

Table 1 Number of mesh

Part	Number of mesh
Striker bar	150
Incident bar	2505
Specimen	200
Transmit bar	2505

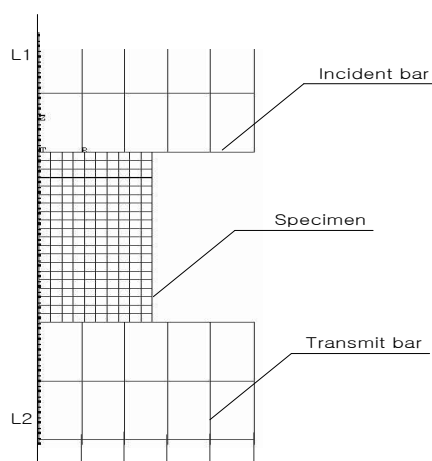


Fig. 3 Mesh of Specimen

각 부품의 경계면은 접촉조건(Surface-to-surface contact)으로 설정하였다. 입력봉과 시편사이, 시편과 출력봉 사이 경계면은 마찰을 고려하기 위해 마찰계수(friction coefficient)를 0.0, 0.1, 0.2 그리고 0.3으로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 충격봉의 속도는 20m/s 로 설정하였다.

3.3 소재의 물성(Material property)

충격봉, 입력봉, 그리고 출력봉의 소재는 강(Steel)의 물성을 적용하였고 시편(specimen)의 소재는 Tantalum의 물성을 적용하였다. 각 소재의 물성은 Table 2와 Table 3에 나타내었고, 시편의 소성유효응력은 Johnson-Cook 모델을 사용하였다.

Table 2 Material properties of striker, incident, and transmit bar.

Material	Steel
Mass Density	7000 kg/m ³
Young's Modulus	200 GPa
Poisson's Ratio	0.3

Table 4 Material properties of specimen

Material	Tantalum
Mass Density	18,970 kg/m ³
Young's Modulus	100 GPa
Poisson's Ratio	0.3
A	185 MPa
B	675 MPa
C	0.047
n	0.3
m	0.425
Melting Temp	3250 K
Transition Temp	298 K

4. 결과 및 고찰

마찰이 측정되는 물성에 미치는 영향을 분석하기 위해 마찰계수를 0.0, 0.1, 0.2, 그리고 0.3에 대해 해석을 수행하였고 다음과 같이 분석하였다.

Fig. 3은 해석을 통해 입력봉(incident bar)과 출력봉(transmit bar)에서 측정된 변형률을 보여준다. 이 결과를 식(2)와 식(4)에 대입하여 응력-변형률 곡선을 도출하였다.

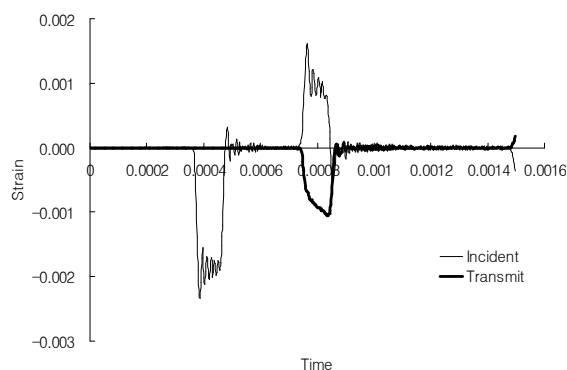


Fig. 3 Strain history at the incident and transmitted bars in a numerical SHPB test.

마찰효과가 유동응력 측정에 미치는 영향을 분석하기 위해 다음의 경우에 대해 분석을 실시하

였다.

- Johnson-Cook 모델을 이용한 응력-변형률 곡선 재구성 (R1) : 해석서 계산된 시편의 유효 변형률을 식(5)에 대입하여 응력을 계산하여 $\bar{\varepsilon}_{FEM} - \bar{\sigma}_{JC}$ 선도를 도출하였다.
- 시편에 발생하는 유효변형률-유동응력 관찰 (R2) : 해석에서 시편에 걸리는 유효변형률과 유동응력을 찾아 $\bar{\varepsilon}_{FEM} - \bar{\sigma}_{FEM}$ 선도를 도출하였다.
- 시편에 발생하는 유효변형률-축방향응력 관찰 (R3) : 해석에서 시편에 걸리는 유효변형률과 축방향 응력을 찾아 $\bar{\varepsilon}_{FEM} - \sigma_{22,FEM}$ 선도를 도출하였다.
- 입력봉과 출력봉의 게이지 신호를 이용한 응력-변형률 관찰 (R4) : Fig. 3과 같이 입력봉과 출력봉에서 측정된 게이지 응력을 식(2)와 식(4)에 대입하여 $\bar{\varepsilon}_{Exp} - \bar{\sigma}_{Exp}$ 선도를 도출하였다.

본 논문에서는 편의상 Johnson-Cook 모델 선도를(R1), 시편에 발생하는 유효변형률-유동응력 선도를(R2), 시편에 발생하는 유효변형률-축방향응력 선도를(R3), 그리고 게이지 신호를 이용한 응력-변형률 선도를(R4) 라고 표시한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 마찰계수가 0.0인 경우와 0.2인 경우의 응력-변형률곡선을 보여준다. Fig. 4의 그래프를 보면 마찰이 0.0인 경우 R1,R2,R3, 그리고 R4의 그래프가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 반면 마찰계수가 0.2인 Fig. 5의 그래프에서는 R1과 R2가 같은 경향을 보이고, R3와 R4가 비슷한 경향을 보이고, 두 그룹 간에는 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 마찰이 0인 경우에는 단축인장 시험과 같아서 축방향 응력이 곧 유동응력이지만 마찰이 존재하는 경우에는 단축인장 시험과 차이가 있기 때문이다. 그리고 R1의 물성을 해석에 이용했기 때문에 시편이 경험하는 응력-변형률 곡선 R2가 마찰에 관계없이 R1과 같게 나오는 것은 당연하다. 결과적으로 게이지를 이용하여 계산한 응력은 축방향 응력임을 확인할 수 있다.

여기에서 중요한 것은, 충격해석을 수행할 때 이용하는 응력-변형률 선도는 R2 인데, SHPB 시험에서 입-출력봉의 게이지신호를 이용하여 측정

한 것은 축방향 응력이라는 것이다. 물성 측정 시험에서 측정하는 값은 유효응력이어야 하지만 축방향 응력을 측정한다. 마찰이 0이 아닐 경우 $\bar{\sigma} \neq \sigma_{22}$ 이기 때문에 입출력봉의 변형률을 이용해 측정된 응력은 유효응력이 아니며 이렇게 응력-변형률 선도를 얻을 경우 실제 시편의 물성과 차이가 있다.

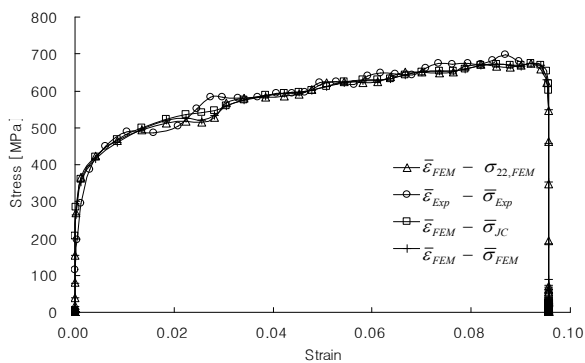


Fig. 4 Stress-strain curve ($\mu=0.0$)

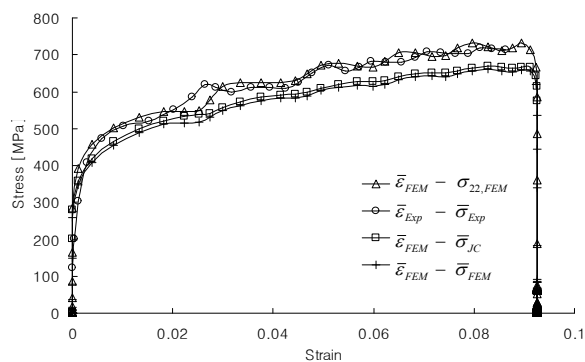


Fig. 4 Stress-strain curve ($\mu=0.2$)

Fig. 5에서 $R1=R2$, $R3=R4$ 이기 때문에 $R2$ 와 $R4$ 만을 이용하여 마찰의 영향을 분석하였다.

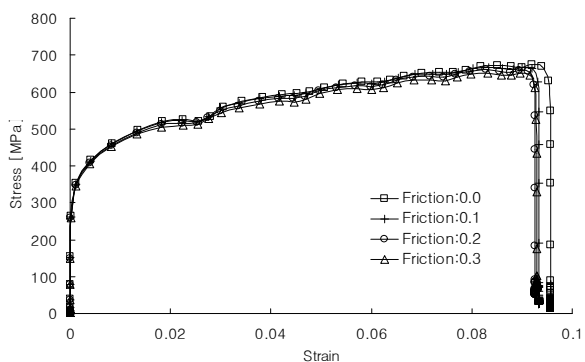


Fig. 6 Stress-strain curve for various values of friction coefficient ($R2$)

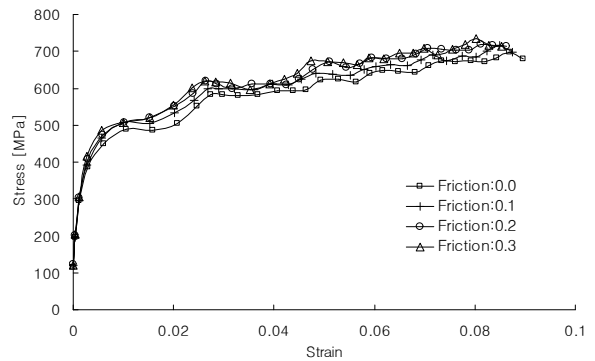


Fig. 7 Stress-strain curve for various values of friction coefficient ($R4$)

Fig. 6 과 Fig. 7 은 마찰에 따른 응력-변형률 곡선 $R2$ 와 $R4$ 를 각각 보여준다. $R2$ 의 경우 그래프는 마찰에 관계없이 일정한 경향을 보이는 반면 $R4$ 의 경우 마찰에 따라 그래프가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 마찰이 0인 경우와 마찰이 0.3인 경우 약 10%의 차이가 있음을 알 수 있다. 그렇기 때문에 시편에서 별징이 발생한 경우나 마찰이 큰 경우에는 그에 대한 보정이 필요하다.

5. 결론

SHPB 시험에 대해 해석을 수행하여 시험에서 측정하는 응력은 시편의 유효응력이 아닌 축방향 응력임을 확인하였다. 그리고 마찰계수에 따른 측정된 유효응력의 차이를 관찰하였고, 마찰이 큰 경우에는 SHPB시험에서 측정한 응력이 시편의 유효응력과 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 그렇기 때문에 마찰계수와 시편 형상에 따른 측정 응력과 실제 시편의 유효응력의 차이를 규명하고 보상해야 함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고문헌

- (1) M.Sasso, G.Newaz, D.amodio, 2007, "Material

- characterization at high strain rate by Hopkinson bar tests and finite element optimization", *Materials science and Engineering A*, Vol.487, pp.289-300
- (2) B.Hopkinson, 1914, "A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets", *Philos Trans R Soc Lond Series A* 213, pp. 437 - 452.
- (3) H.Kolsky, 1949, "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading", *Proc Phys Soc Lond Sec B* 62, pp. 676 - 700.
- (4) H.Kolsky, 1949, "An investigation of the mechanical studies in plastic wave propagation", *J Mech Phys Solids*, Vol 10, pp.195-223
- (5) H. Kolsky, 1963, "Stress waves in solids", *Dover Publications Inc.*, New York
- (6) M.J.Forrestal, T.W.Wright, W.Chen, 2007, "The effect of radial inertia on brittle samples during the split Hopkinson pressure bar test", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.34, pp.405-411
- (7) Nicholas T. 1982 "Material behavior at high strain rates", *Impact dynamics* [chapter 8], Mew York: Wiley
- (8) Franz CE, Follansbee PS, Wright WH, 1984. "New experimental techniques with the split Hopkinson pressure bar", Berman I, Schroeder JW, editors. Eighth international conference on high energy rate fabrication, pressure vessel and piping division. ASME.
- (9) Nemat-Nasser S, Isaacs JB, Starrett JE, 1991, "Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments", *Proc R Soc Lond A* ;435:371-91
- (10) Tamesh KT, Narasimhan S, 1996, "Finite deformations and the dynamic measurement of radial strains in compression Koldky bar experiments", *Int. J Solids Struct* ;33:3723-38
- (11) Gray, G.T., 2000 "Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Technique," *ASM Handbook8, Mechanical Testing and Evaluation* ASM International, Materials Park, OH, 44073-0002.
- (12) O. S. Lee, J. H. Chong, H. S. Kang, J. H. Kim, 1997, "Constitutive-Law under high strain rate loading" *Proc. of KSPE*, Fall, pp.724-727
- (13) L. Pochhammer, 1876, "On the Proagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder", *J. Reine Angewandte Math*, Vol.81 pp.324
- (14) C.Chree, 1889, "the Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates, Their Solutions and Applications", *Cambridge Phil. Soc. Trans.*, Vol.14, pp.250
- (15) Gorham DA, Pope PH, Cox O, 1984, "Sources of error in very high strain rate compression tests", *Mechanical Properties at High Rates of Strain*, 1984: proceedings of the Third Conference on the Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain, Oxford, 9-12 april, 1984, Conference series, no. 70, Instityte of Physics, Great Britain, pp.151-158,
- (16) R.S.Hartley, T.J.cloete, G.N.Nurick, 2007 "An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test", *International Journal of Impact Engineering*, vol.34, pp. 1705-1728
- (17) R.s.Hartley, T.J.Cloete, G.N.Nurick, 2007, "An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test" *International Journal of Impact Engineering*, Vol.34, pp.1705-1728
- (18) H.Meng, Q.M.Li, 2003 "Correlation between the accuracy of a SHPB test and the stress uniformity based on numerical experiments", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.28, pp.537-555
- (19) Hyunmo Yang, Oakkey Min, (2006) "Constitutive equation for SM45C at high temperature and high strain rate" *Proc. of KSME*, Fall, pp.21-25