**〈학술논문〉** **DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.5.511**

# 수치해석을 이용한 SHPB 시험의 마찰영향 분석과 보정에 대한 연구

차성훈* · 신현호** · 김종봉***†
* 서울산업대학교 NID융합대학원, ** 강릉원주대학교 재료공학과, *** 서울산업대학교 자동차공학과

# Numerical Investigation of Frictional Effects and Compensation of Frictional Effects in Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Test

Sung-hoon Cha*, Hyunho Shin** and Jong-Bong Kim***†
* Graduate School of NID Fusion Tech., Seoul Nat'l Univ. of Tech.,
** Dept. of Materials Engineering, Gangneung-Wonju Nat'l Univ.
*** Dept. of Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Tech.

(Received February 25, 2009 ; Revised March 3, 2010 ; Accepted March 16, 2010)

**Key Words**: High Strain Rates(고변형률속도), Split Hopkinson Pressure Bar(스플릿 홉킨스 바), Incident Bar(입력봉), Transmitted Bar(출력봉)

**초록**: SHPB시험은 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 위치시키고 고속으로 변형하여 동적 응력-변형률 선도를 추출하는 것이다. 그렇기 때문에, 소재와 입력봉 사이 또는 소재와 출력봉 사이의 마찰이 측정되는 응력-변형률 선도에 영향을 주게 된다. 이것은 측정되는 응력이 유동응력이 아니고 축방향 응력이기 때문임을 확인 하였다. 본 연구에서는 측정되는 축방향 응력을 보정하여 정확한 유동응력을 구하기 위해 새로운 보정식을 제안하였다. 소재가 업셋팅 형태로 변형한다고 가정하고, 에너지 보존에 기초하여 보정식을 제안하였다. ABAQUS를 이용한 수치적 실험을 통해 마찰계수 0.3까지 보정한 결과 보정식이 유용함을 확인하였다.

**Abstract**: The split Hopkinson pressure bar (SHPB) has been widely used to determine the mechanical properties of materials at high loading rates. However, to ensure test reliability, the source of measurement error must be identified and eliminated. During the experiment, specimens were placed between the incident and the transmit bar. Contact friction between the test bars and specimen may cause errors. In this study, numerical experiments were carried out to investigate the effect of friction on the test results. In the SHPB test, the stress measured by the transmitted bar is assumed to be the flow stress of the test specimen. However, performing numerical experiments, it was shown that the stress measured by the transmit bar is axial stress components. When the contact surface is frictionless, the flow stress and axial stress of the specimen are approximately equal. On the other hand, when the contact surface is not frictionless, the flow stress and axial stress are no longer equal. The effect of friction on the difference between the flow stress and axial stress was investigated.

- 기호설명 -

$V_1$ : 입력봉과 시편의 접촉면에서의 입자속도
$V_2$ : 출력봉과 시편의 접촉면에서의 입자속도
$L$ : 시편 (Specimen)의 길이
$\bar{\sigma}$ : 유동 응력 (flow stress)
$\bar{\varepsilon}$ : 등가소성변형률
$A$ : 초기항복응력계수
$B$ : 변형률경화계수
$C$ : 변형률 속도 경화계수
$n$ : 가공경화지수
$m$ : 열연화지수
$T^* = \frac{(T - T_{room})}{(T_m - T_{room})}$ : 무차원 등가온도
$\dot{\bar{\varepsilon}}$ : 등가 소성 변형률속도
$\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ : 기준 소성 변형률속도 ( = 1.0 $S^{-1}$ )
$T_m$ : 용융 온도

† Corresponding Author, jbkim@snut.ac.kr

## 1. 서 론

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 압축하중 하에서의 공학소재의 물성에 대한 연구가 진행되어 왔다.[6] Nicholas,[7] Franz 등,[8] Newmat-Nasser 등,[9] Tamesh와 Narasimhab,[10] Gray[11] 등에 의해 최근 다양한 실험 방법들이 논의되었으며 실험 기술에 있어서 많은 발전을 이룬 결과 최근에는 $10^2$부터 $10^4$ $s^{-1}$ 사이의 고변형률까지 실험이 가능해졌다. SHPB실험법은 균일 변형상태 하에서 단축 압축실험을 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.[11,15~17] 대부분의 실험에서는 이러한 오차를 극복하기 위해 압력봉과 시편사이 표면을 특수가공하거나 윤활처리 하여 마찰이 없다는 가정 하에 시험하고 있다.

SHPB 실험시 마찰효과에 대한 연구는 Hartley[16]의 링 압축 실험을 이용한 마찰 효과 분석, Meng[17]의 CAE를 이용한 연구 등이 진행되어져 왔다.[18] Park 등[19]은 윤활한 경우와 윤활 하지 않은 경우 실험결과가 차이가 없다고 발표한 바 있으나, 윤활에 의한 마찰계수의 변화를 정량적으로 분석하지는 않았다. 본 연구에서는 범용해석 프로그램인 ABAQUS를 이용한 수치적 실험으로 마찰계수의 영향을 분석하였다. 일반적으로 사용되어지는 Johnson-Cook 모델로 재료 물성을 입력하여 SHPB 실험을 해석적으로 수행하였다. 마찰계수를 변화시키면서 입력봉과 출력봉에서 측정된 변형률을 이용하여 시편의 변형률과 유동응력을 계산하여 입력한 물성과 비교함으로써 마찰이 유동응력 측정에 미치는 영향을 분석하였다.

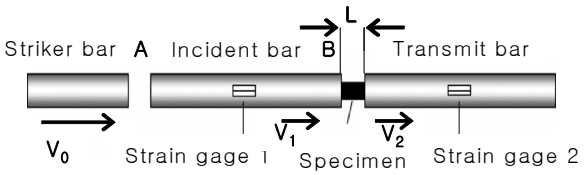


**Fig. 1** Schematic of the SHPB device[1]

## 2. 이 론

### 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 길이를 지나는 시간의 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.[20]

Fig. 1에서 시편의 변형률 속도는 아래와 같다.

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

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 $\sigma(t)$, $\dot{\varepsilon}(t)$, $\varepsilon(t)$ 을 구하면 다음과 같다.

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

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R \tag{3}$$

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

$$C_0 = \sqrt{E/\rho} \tag{5}$$

여기서 $E_0$, $\varepsilon_T$, $\varepsilon_R$는 각각 탄성계수, 출력봉에서 측정한 투과파에 의한 변형률과 입력봉에서 측정한 반사파에 의한 변형률이며, $C_0$는 탄성응력파 속도이다.

2.2 Johnson-cook 구성방정식

해석에서 입력한 재료의 소성구성방정식 모델로 Johnson-Cook 모델을 이용하였다. Johnson-cook 모델은 변형률경화, 변형률속도 경화, 열연화의 영향을 고려하여 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\varepsilon}^{n})(1 + C\ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - (T^*)^m) \tag{6}$$

$$T^* = (T - T_{room})/(T_m - T_{room}) \tag{7}$$

여기서, $\bar{\sigma}$는 유동응력, $\bar{\varepsilon}$은 등가소성변형률, 그리고, $A$, $B$, $C$, $n$, $m$은 핏팅 계수이다.

## 3. 해 석

3.1 형상모델링

해석은 범용 해석프로그램 ABAQUS를 이용하여 수행하였다. Fig. 2는 해석을 위한 개략적인 형상을 보여준다. 길이 3m 직경 0.019m의 입력봉(Incident bar)과 출력봉(Transmit bar) 사이에 길이와 직경이 0.01m인 시편(Specimen)이 위치한다. 입력봉 끝단에 길이 0.25m 직경 0.019m의 충격봉(Striker bar)이 설치되어 임의의 속도로 입력봉(Incident bar)에 충격을 가한다. 충격봉의 속도 $V_0$을 변화시키면 입력봉의 속도 $V_1$이 변화되어 변형률속도를 제어할 수 있다. 충격봉의 속도와 입력봉의 속도는 다음과 같은 관계가 있다.

$$V_1 = \frac{\sigma(V_0)}{\rho C_0} \tag{8}$$

형상은 실험에서 일반적으로 적용되고 있는 표준 장비의 치수를 이용하였다. 이때 충격파에 의한 간섭이 발생하지 않도록 충분한 길이의 입·출력봉을 사용하였다. 입력봉과 출력봉의 게이지 장착 부분에서 변형률을 추출하여 응력과 변형률을 계산하였다.

3.2 유한요소 격자 및 경계조건

해석은 축대칭으로 수행하였다. 탄성변형을 하는 충격봉, 입력봉, 그리고 출력봉은 비교적 격자를 크게 하였고, 소성변형이 발생하고 관심의 대상인 시편은 격자를 작게 하였다. 각 개체의 유한요소 격자수는 Table 1과 같고 Fig. 3은 시편 부분만을 확대한 격자를 보여준다.

각 부품의 경계면은 접촉조건(Surface-to-surface contact)으로 설정하였다. 변형이 작고 세장비가 큰 경우에는 마찰효과가 큰 영향을 미치지 않지만 세장비가 작고 변형이 큰 경우 초기 윤활막이 깨져 마찰이 커지며 이러한 이유 때문에 벌징이 발생하게 된다. 본 연구에서는 입력봉과 시편사이, 시편과 출력봉 사이 경계면은 마찰을 고려하기 위해 마찰계수(Friction coefficient)를 0.0, 0.1, 0.2 그리고 0.3으로 변화시키면서 해석을 수행하

**Table 1** Number of mesh

| Part | Number of mesh |
|---|---|
| Striker bar | 900 |
| Incident bar | 15030 |
| Specimen | 1200 |
| Transmit bar | 15030 |

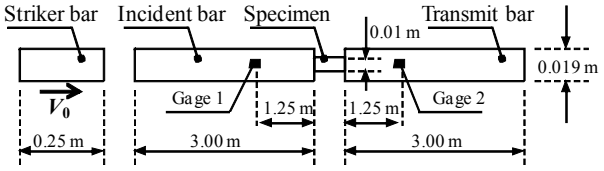


**Fig. 2** Configuration of the analysis model

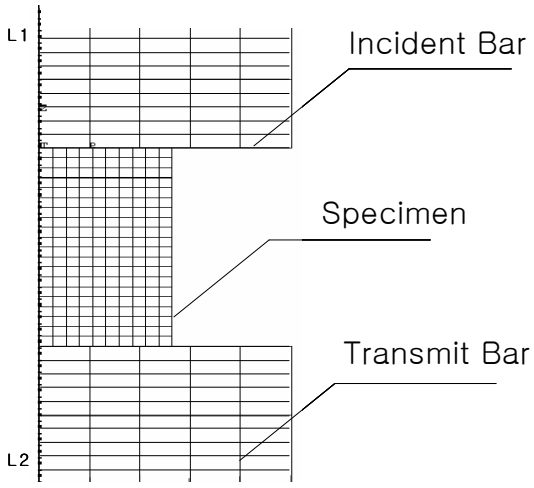


**Fig. 3** Mesh of specimen

**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 3** 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 |

였다. 보통 실험에서 적용하는 충격봉 속도 20 m/s를 해석의 충격봉 초기속도로 설정하였다.

### 3.3 소재의 물성

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

소재의 임피던스는 식 $Z = \rho A C_0 = A\sqrt{\rho E}$ 과 같이 정의되며, 해석에 이용된 소재의 임피던스는 다음과 같아 해석결과의 수렴성과 신뢰성에 영향이 없는 것으로 판단된다.

$Z_{tantalum}$ = 3.42×103 Kg · m$^{-2}$· s$^{-1}$
$Z_{steel}$ = 11.23×103 Kg · m$^{-2}$· s$^{-1}$

## 4. 결과 분석

마찰이 측정되는 물성에 미치는 영향을 분석하기 위해 마찰계수를 0.0, 0.1, 0.2, 그리고 0.3에 대해 해석을 수행하였고 다음과 같이 분석하였다. Fig. 4는 해석을 통해 입력봉(Incident bar)과 출력봉(Transmit bar)에서 측정된 변형률을 보여준다. 충격봉과 입력봉의 충격 발생 후 입력봉에서는 최초 압축 충격파가 지나가게 되고 이 충격파가 시편이 설치된 자유단에서 반사되면 인장파로 바뀌어 뒤로 전달되는 것을 볼 수 있다. 이 결과를 식 (2)와 식 (4)에 대입하여 응력-변형률곡선을 도출하였다.

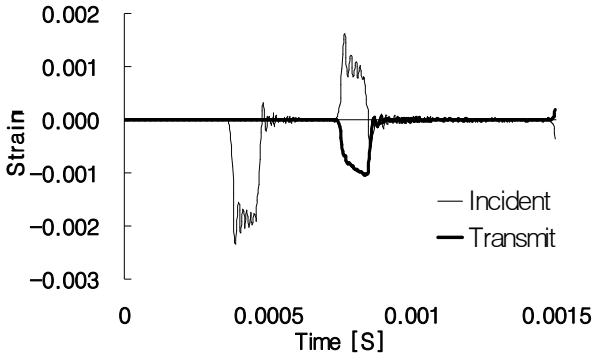


**Fig. 4** Strain history at the incident and transmitted bars in a numerical SHPB test

마찰효과가 유동응력 측정에 미치는 영향을 분석하기 위해 다음의 경우에 대해 분석을 실시하였다.

(a) Johnson-Cook 모델을 이용한 응력-변형률 곡선 재구성 (R1) :해석에서 계산된 시편의 유효변형률과 변형률 속도를 식(6)에 대입하여 응력을 계산하여 $\bar{\varepsilon}_{FEM} - \bar{\sigma}_{JC}$ 선도를 도출하였다.

(b) 시편에 발생하는 유효변형률-유동응력 관찰 (R2) : 해석에서 시편에 걸리는 유효변형률과 유동응력을 찾아 $\bar{\varepsilon}_{FEM} - \bar{\sigma}_{FEM}$ 선도를 도출하였다.

(c) 시편에 발생하는 유효변형률-축방향응력 관찰 (R3) : 해석에서 시편에 걸리는 유효변형률과 축방향 응력을 찾아 $\bar{\varepsilon}_{FEM} - \sigma_{22,FEM}$ 선도를 도출하였다.

(d) 입력봉과 출력봉의 게이지 신호를 이용하여 계산한 응력-변형률 관찰 (R4) : Fig. 4와 같이 입력봉과 출력봉에서 측정한 게이지 응력을 식 (2)와 식 (4)에 대입하여 $\bar{\varepsilon}_{\mathrm{Exp}} - \bar{\sigma}_{\mathrm{Exp}}$ 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. 5는 시편과 입력봉 사이의 마찰계수가 0.0, 0.1 그리고 0.2 인 경우에 시편의 변형을 해석을 이용해 얻어진 이미지 이다. 시편과 입력봉 사이에 마찰이 존재 할 경우 시편에서 벌징(Bulging)이 일어나는 것을 확인 할 수 있으며 마찰계수가 클수록 벌징(Bulging)이 크게 일어나 축방향 응력 이외에 반경방향의 응력이 발생 하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 마찰계수가 0.0인 경우와 0.2인 경우의 응력-변형률곡선을 보여준다. Fig. 6 의 그래프를 보면 마찰이 0.0인 경우 R1, R2, R3, 그리고 R4의 그래프가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 반면 마찰계수가 0.2인 Fig. 7의 그래프에서는 R1과 R2가 같은 경향을 보이고, R3과 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 측정한 것은 축방향 응력이라는 것이다. 물성 측정 시험에서 측정하는 값은 유동응력($\bar{\sigma}$) 이어야 하지만 축방향 응력($\sigma_{22}$)을 측정한다. 마찰이 0이 아닐 경우 $\bar{\sigma} \neq \sigma_{22}$이기 때문에 입력봉과 출력봉의 변형률을 이용해 측정된 응력은 유동응력이 아니다 그렇기 때문에 마찰을 고려하지 않고 응력-변형률 선도를 얻을 경우 실제 시편의 물성과 차이가 있다.

Fig. 7에서 R1=R2, R3=R4 이기 때문에 R2와 R4만을 이용하여 마찰의 영향을 분석하였다. Fig. 8 과 Fig. 9 은 마찰에 따른 응력-변형률 곡선 R2와 R4를 각각 보여준다. R2의 경우 그래프는 마찰에 관계없이 일정한 경향을 보이는 반면 R4의 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 벌징이 발생한 경우나 마찰이 큰 경우에는 그에 대한 보정이 필요하다.

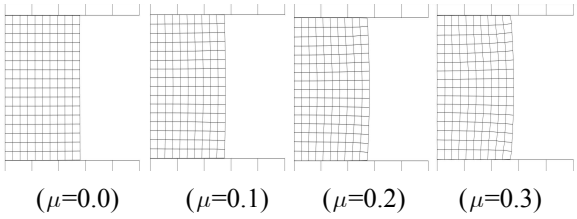


**Fig. 5** Bulging for various values of friction coefficient

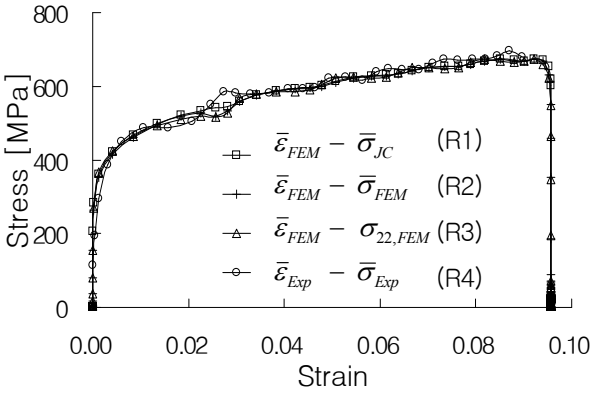


**Fig. 6** Stress-strain curve ($\mu$=0.0)

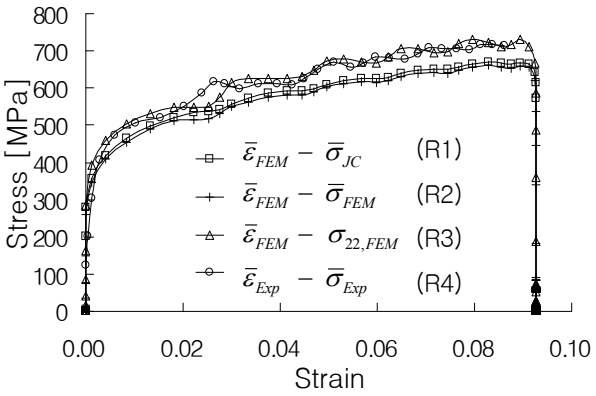


**Fig. 7** Stress-strain curve ($\mu$=0.2)

## 5. 유동응력 보정

SHPB시험으로 측정된 재료의 물성은 고속 변형하는 소재의 거동 해석에 이용이 된다. 해석에

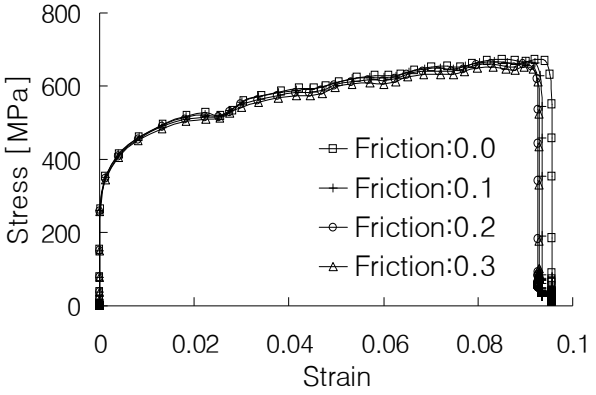


**Fig. 8** Stress-strain curve for various values of friction coefficient (R2)

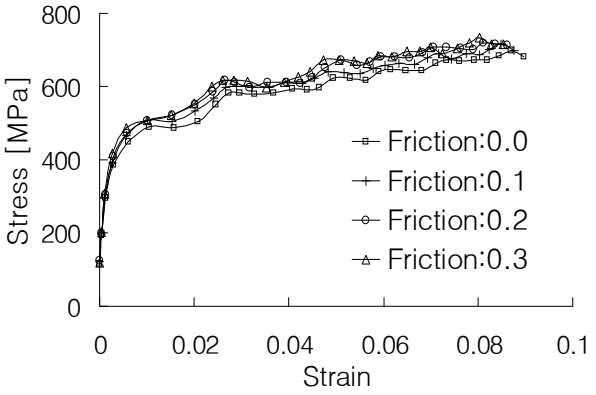


**Fig. 9** Stress-strain curve for various values of friction coefficient (R4)

필요한 물성은 축방향 응력성분이 아니라, 유동응력이다. 하지만 마찰이 존재하는 경우에는 측정된 축방향 응력이 유동응력과 다르다. 그래서 해석에 사용하기 위해서는 유동응력으로 보정해야 한다. Rand[21]는 쿨롱(Coulomb) 마찰이 작용할 때 축방향 응력과 유동응력과의 관계를 다음과 같이 정의하여 보정하고자 했다.

$$\bar{\sigma} = 0.5\sigma_a\beta^2/(e^{\beta}-\beta-1) \tag{9}$$

$$\beta = (\mu d/L)(1+\varepsilon)^{-3/2} \tag{10}$$

여기서, $\bar{\sigma}$는 유동응력, $\sigma_a$는 평균 축방향 응력, $\mu$는 마찰계수, $d$는 소재 직경, 그리고 $L$은 소재의 길이이다.

본 연구에서는 업셋팅(Upsetting) 공정에서 마찰의 영향을 해석한 식[22]을 이용하여 추가적으로 보정을 수행해 보았다. Hill[22]은 업셋팅 공정에서 마찰이 있는 경우에 대해 평균 축방향 응력과 유동응력과의 관계를 다음과 같이 유도하였다.

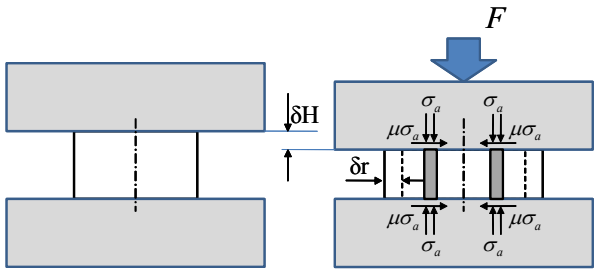


**Fig. 10** Analysis of the deformation in upsetting

$$\sigma_a = \bar{\sigma}\frac{2L}{\mu D}\left[\frac{L}{\mu D}\left(e^{\mu D/L}-1\right)-1\right] \tag{11}$$

식 (9)와 (11)의 식을 이용하여, 측정된 축방향 응력을 보정한 결과가 Fig. 11에 도시되어 있다. 마찰계수는 0.3으로 하였고, 직경은 10 mm로 고정하고 길이를 변화시키면서 해석하였다. 보정된 값이 입력값과 일치해야 잘 보정된 것으로 볼 수 있다. Fig. 11(a)의 D/L=1.0인 경우에는 입력값과 측정값의 차이도 상대적으로 크지 않고 보정한 값은 입력값과 거의 일치한다. Hill의 식을 이용하여 보정한 값이 보다 잘 맞지만, D/L값이 커질수록 오차는 커진다.

본 연구에서는 보다 정확하게 마찰효과를 보정하기 위하여 에너지 보존을 이용하여 보정식을 유도하였다. 변형 에너지 계산과정에서 벌징은 발생하지 않는다고 가정하여 Fig. 10과 같이 분석하였다. 외부에서 소재에 가한 에너지는 변형에너지와 마찰에너지로 사용이 되기 때문에 다음의 식으로 표현이 된다.

$$E_{EXT} = E_{DEF} + E_{FRI} \tag{12}$$

높이가 $\delta H$ 만큼 변하는 미소 변형 동안의 에너지를 계산하면 식 (12)는 다음과 같이 된다.

$$\delta H\int \sigma_a dA = \int \delta\bar{\varepsilon}\,\bar{\sigma}\,dV + \int \mu\sigma_a \delta r dA_0 \tag{13}$$

여기서 $\sigma_a$는 축방향 응력, $\delta\bar{\varepsilon}$는 등가변형률 증분, $\bar{\sigma}$는 유동응력, 그리고 $\delta r$은 높이가 $\delta H$ 변할 때 반지름의 변화량이다. 식 (13)의 각 항을 높이 변화와 등가변형률 증가의 관계($\delta\bar{\varepsilon} = \delta H/H$)와 높이 변화와 반경변화의 관계($\delta r = r \cdot \delta H/(2H)$)를 이용하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\delta H\int \sigma_a dA = \sigma_a \pi r^2 \delta H \tag{14}$$

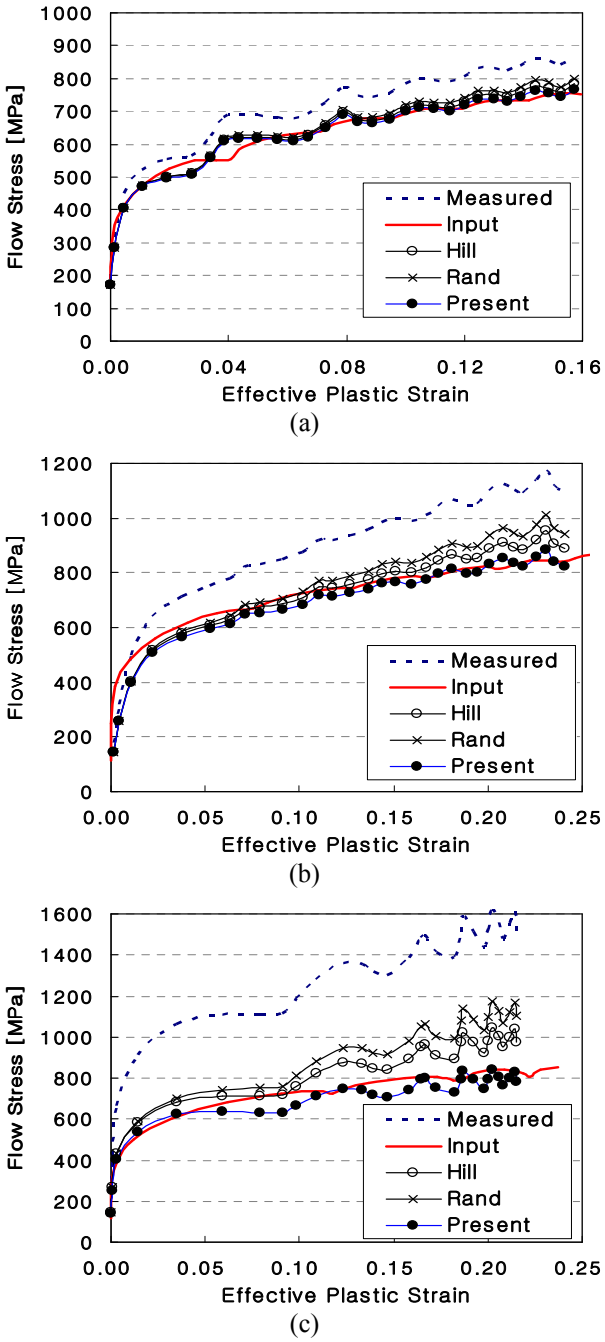


**Fig. 11** Compensated flow stress from the measured axial stress by equations (9), (11), and (17); (a) D/L= 1.0; (b) D/L=2.0; (c) D/L =4.0

$$\int \delta\bar{\varepsilon}\,\bar{\sigma}\,dV = \bar{\sigma}\frac{\delta H}{H}\pi r^2 H = \bar{\sigma}\pi r^2 \delta H \tag{15}$$

$$\int \mu\sigma_a \delta r dA = 2\int \mu\sigma_a \frac{r}{2H}\delta H \cdot 2\pi r dr = \frac{2\pi\mu\sigma_a r^3}{3H}\delta H \tag{16}$$

식 (14)~(16)을 식 (13)에 대입하여 정리하면 재료의 유동응력과 축방향 응력과의 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \sigma_a\left(1-\frac{2\mu r}{3H}\right) \tag{17}$$

본 연구에서 제안한 보정식 식(17)을 이용해 보정한 결과를 Fig. 11에 "Present"로 도시하였다. 그래프에서 알 수 있듯이 D/L이 큰 경우에도 유동응력을 가장 잘 보정하는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

SHPB 시험에 대해 해석을 수행하여 시험에서 측정하는 응력은 시편의 유동응력이 아닌 축방향 응력임을 확인하였다. 그리고 마찰계수에 따른 측정된 유동응력의 차이를 관찰하였고, 마찰이 큰 경우에는 SHPB시험에서 측정한 응력이 시편의 유동응력과 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 그래서 측정된 축방향 응력을 유동응력으로 보정하는 방법에 대해 추가적으로 연구하였다. SHPB 시험결과를 보정하는 식으로 잘 알려진 Rand의 식을 이용하여 여러 가지 시편 형상에 대해 측정한 결과를 보정한 결과 입력값을 만족스럽게 복원하지 못했다. 또한 Hill이 업셋팅 해석에서 제안한 식을 SHPB 시험결과의 보정에 적용했을 경우에는 앞의 두 모델보다 정확하게 입력값을 복원했지만 D/L가 큰 경우에는 여전히 오차가 발생함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이전의 모델보다 더욱 정확하게 입력값을 복원하는 보정식을 제안하였고, 검증을 통하여 정확성을 확인하였다.

## 참고문헌

(1) Sasso, M., Newaz, G. and Amodio, D., 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) Hopkinson, B., 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,* Vol. 213, pp. 437~452.

(3) Kolsky, H., 1949, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading," *Proc Phys Soc Lond Sec B* Vol. 62, pp. 676~700.

(4) Kolsky, H., 1949, "An Investigation of the Mechanical Studies in Plastic Wave Propagation," *J Mech Phys Solids*, Vol. 10, pp. 195~223.

(5) Kolsky, H., 1963, *Stress Waves in Solids*, Dover Publications Inc., New York.

(6) Forrestal, M. J., Wright, T. W. and Chen, W., 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]*, New York: Wiley.

(8) Franz, C. E., Follansbee, P. S. and Wright, W.H., 1984. "New Experimental Techniques with the Split Hopkinson Pressure Bar," In: Berman, I. and Schroeder, J. W., editors., *Eighth International Conference On High Energy Rate Fabrication, Pressure Vessel and Piping Division*. ASME.

(9) Nemat-Nasser, S., Isaacs, J. B. and Starrett, J. E., 1991, "Hopkinson Techniques for Dynamic Recovery Experiments," *Proc R Soc Lond A,* Vol. 435, pp. 371~391.

(10) Tamesh, K. T. and Narasimhan, S., 1996, "Finite Deformations and the Dynamic Measurement of Radial Strains in Compression Koldky Bar Experiments," *Int. J Solids Struct.* Vol. 33, pp. 3723~3738.

(11) Gray, G. T., 2000, "Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Technique," *ASM Handbook 8*, Mechanical Testing and Evaluation ASM International, Materials Park, OH, 44073-0002.

(12) Lee, O. S., Chong, J. H., Kang, H. S. and Kim, J. H., 1997, "Constitutive-law Under High Strain Rate Loading," *Proc. of KSPE, Fall*, pp. 724~727.

(13) Pochhammer, L., 1876, "On the Progagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder," *J. Reine Angewandte Math*, Vol. 81 p. 324.

(14) Chree, C., 1889, "The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates, Their Solutions and Applications," *Cambridge Phil. Soc. Trans.*, Vol. 14, p. 250.

(15) Gorham, D. A., Pope, P. H. and Cox, O., 1984, "Sources of Error in very High Strain Rate Compression Tests," *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) Hartley, R. S., Cloete, T. J. and Nurick, G. N., 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) Meng, H. and Li, Q. M., 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.

(18) Lee, O. S., Kim, G. H. and Hwang, S. W., 2000, "Determination of Deformation Behavior of the A16061-T6 Under High Strain Rate Tensile Loading Using SHPB Technique," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 24, No. 12, pp. 3033~3039.

(19) Park, K. J., Yang, H. M. and Min, O. K., 2001, "The Effect of Temperature in Hign Temperature SHPB Test," *Proc. of the KSME, Fall*, pp. 349~354.

(20) Yang, H. M., and Min, O. K., 2006, "Constitutive Equation for SM45C at High Temperature and High Strain Rate," *Proc. of the KSME, Fall*, pp. 21~25.

(21) Bertholf, L. D. and Karnes, C. H., 1975, "Two-Dimensional Analysis Of The Split Hopkins Pressure Bar System," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 23, pp. 1~19.

(22) HIll, R., 1950, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press, London, p. 277.