

Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)에 의한 고 변형률 재료의 구성방정식 시뮬레이션 (Constitutive-law under high strain rate loading)

이억섭(인하대), 정주호, 강희수*, 김종호(인하대 원)

O. S. Lee(Inha Univ.),

J. H. Chong, H. S. Kang*, J. H. Kim, (Inha Graduate School)

Key Words : Dynamic Loading, High Strain Rate, Modified Split Hopkinson Pressure Bar (mSHPB), Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB), Stress-Strain Curve, Constitutive Equation, Hydrodynamic Code, FEM, Johnson-Cook Model

ABSTRACT : Dynamic deformation behavior under the high strain rate loading condition obtained with the aid of Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) technique is simulated by DYNA2D (an hydrodynamic code). A constitutive equation such as Johnson-Cook model is used by adjusting various parameters to fit experimentally determined dynamic stress-strain relationship.

1. 서론

변형률 속도가 매우 큰 동적하중 또는 충격하중을 받는 재료의 거동을 규명하기 위한 실험으로는 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 시험법이 널리 사용된다.

Hopkinson은 압력봉이 탄성한계 내에 있는 한, 압력봉의 변위는 응력에 직접적으로 비례하며, 봉에서의 파장(wave length)은 봉 내부에서의 음파속도에 관련하여 충격의 지속 기간에 관계된다는 것을 밝혀냈고, 이후 Kolsky와 Davies가 압력봉에서의 변위를 측정하기 위한 콘덴서를 설계함으로 실험기술에 있어서 많은 발전을 이루었다.^(1,2) 기존SHPB시험법은 균일 변형상태하에서 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 장점때문에 SHPB시험법은 고속충격시험에 많이 응용되고 있다.^(3,4) 그 후 Hauser와 Lee들은 10⁴이상의 고변형률을 얻기 위해 수정된 SHPB(mSHPB)시험법을 사용하였다.^(5,6)

본 연구에서는 DYNA2D(a hydrodynamic code)를 이용하여 기존 SHPB시험법 및 수정된 SHPB 실험 장치를 이용한 알루미늄합금 시편의 고변형률하중 하의 동적변형거동을 정확하게 시뮬레이션 하기 위한 구성방정식을 결정하였다.

구성방정식은 일반적으로 변형률, 변형률 속도, 온도, 내부 상태변수 등의 함수로 표현 되는데 본 연

구에서는 가장 널리 쓰이는 Johnson-Cook모델⁽⁷⁾의 매개변수들을 실험적으로 산출한 응력-변형률관계에 맞도록 결정하고 이 모델로 결정한 변형거동의 양상을 세밀히 관찰하였다.

2. 이론

2.1 압력봉변위에 의한 시편의 응력-변형률 관계

Fig. 1에서 변형하는 시편 내에서의 변형률 속도는 다음과 같다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾

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

여기서, V_1 과 V_2 = 각각 입력봉(incident bar)과 시편, 시편과 출력봉(transmitted bar)의 접촉면에서의 입자속도, L = 시편의 길이.

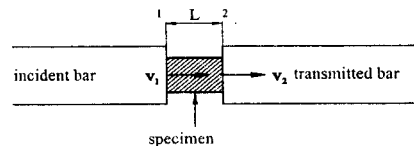


Fig. 1 Schematic diagram of specimen and pressure bars

Fig. 1에서 1점과 2점에서 걸리는 힘과 속도를 이용하여 $d\epsilon/dt$ 와 시편에 걸리는 평균응력을 계산하면

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

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{A} \epsilon_T(t) \quad (3)$$

2.2 수정된 SHPB에서의 응력-변형을 관계

Fig. 2 (b)에서 $v_2 = \sigma_E / \rho_E C_E$ 이므로 시편에서의 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 는

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_1 - v_2}{a} \quad (4)$$

여기서, v_1 =충격봉의 속도, a =시편의 반경.

식 (6)을 적분하면 변형률은

$$\epsilon = \int_0^t \frac{(v_1 - v_2)}{a} dt \quad (5)$$

로 나타나고, 평균응력은

$$\sigma_x = (A_E / A_S) \sigma_E \quad (6)$$

여기서, A_E, A_S =각각 봉과 시편의 단면적.

2.3 구성방정식

2.3.1 Johnson-Cook 모델

Johnson-Cook 모델은 변형률경화, 변형률속도 경화, 열연화의 영향을 고려하여 식(7)과 같이 표시한다.

$$\sigma = [A + B\epsilon^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - (T^*)^m] \quad (7)$$

여기서, σ : 응력, ϵ : 등가 소성변형률,

A : 상수(초기항복응력),

B : 상수(변형률 경화상수),

n : 상수(변형률 경화지수)

C : 상수(변형률 속도 경화지수)

m : 상수(열연화지수)

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad \text{: 무차원 등가 소성 변형률속도}$$

$$T^* = \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)} \quad \text{: 무차원 등가 온도}$$

$\dot{\epsilon}$: 등가 소성변형률속도,

$\dot{\epsilon}_0$: 기준 등가 소성변형률속도 ($= 1s^{-1}$),

T : 현재 온도, T_m : 용융 온도, T_r : 실온

2.3.2 DYNA2D 개요

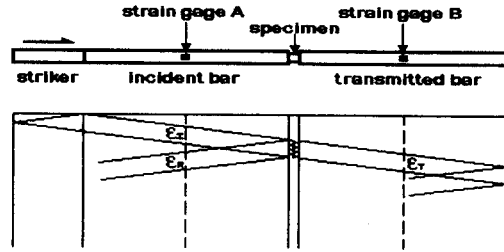
DYNA2D는 2차원 고체의 동적 과도 응답해석을 위하여 개발된 Explicit, Lagrangian, 유한요소코드이며 탄성, 소성, 복합재료, 열효과 변형률속도의존을 포함하는 광범위한 많은 재료모델에 사용가능하다. 추진과 폭발등을 포함하는 많은 재료의 유체동력학적인 거동을 정밀하게 모델링 하기 위해 다양한 상태 방정식이 지원되며 독립체 사이 또는 한 물체의 두 부분 사이의 기계적 상호작용을 다루기 위한 마찰미끄럼, 접합면, 단면접촉을 포함하는 복잡한 접촉면에

대한 모델을 할 수 있다.

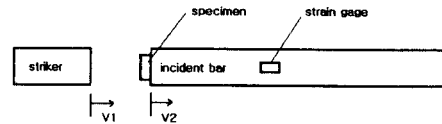
3. 실험 방법

3.1 실험 장치

Fig. 2 에 기존 SHPB와 mSHPB의 시편과 스트레인 게이지위치들의 개략도를 그리고 압력과 전파경로를 도시 하였다. 실험장치에 대한 상세한 사항은 참고문헌 [6]을 참고하시기 바란다.



(a) Conventional SHPB



(b) Modified SHPB

Fig. 2 Location of strain gages and specimens and Lagrange diagram

Fig. 3에는 실험장치의 개략적인 사진을 나타내었다.

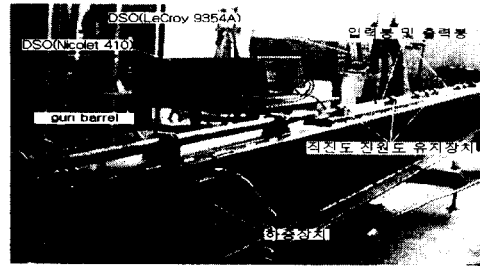


Fig. 3 General view of SHPB test setup

3.2 구성방정식 매개변수 결정

3.2.1 Johnson-Cook 모델

진응력-진변형률 선도로부터 결정해야 하는 Johnson-Cook 방정식(9)의 매개변수들은 A, B, n, C, m 이다.

실험에서 얻은 변형률속도($\dot{\epsilon}$)와 용융온도(T_m), 실온(T_r), 현재 온도(T)를 지정한 후 최소자승법을 이용하여 직접 작성한 프로그램을 이용하여 매개변수를 결정했다.

3.2.2 구성방정식 검증

DYNA2D를 이용하여 실제 SHPB시험과 같은 형상을 Fig. 4와 같이 모델링하였으며 사용된 요소는 1 적분점 4노드 사각형 요소로 모두 98개이다.

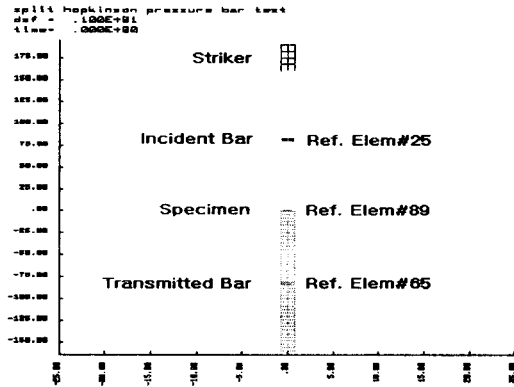


Fig. 4 FE modeling of SHPB by using DYNA2D

실험에서는 입력봉과 출력봉에 위치한 스트레인 게이지의 신호로부터 시편의 변형거동을 산출하나 시뮬레이션에서는 DYNA2D의 후처리 기능을 이용하여 Fig. 4의 스트레인게이지의 위치와 시편의 중간 위치에 대한 요소 데이터를 직접 얻어 실험과 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

Figs. 7과 8의 실선은 자체 제작한 SHPB실험장치를 이용하여 얻은 Al2011에 대한 응답파형이다.

4.2 구성방정식 매개변수

SHPB와 mSHBP의 응력-변형률을 Johnson-Cook 모델에 맞게 매개변수를 결정하기 위하여 최소 자승법을 사용했으며 그 결과는 Table 1과 같다.

D/L은 시편의 지름과 길이의 비이고, V_1 은 충격봉의 속도, $\dot{\epsilon}$ 은 실험시의 변형률속도, T는 실험시의 온도이다.

Table 1 The Johnson-Cook Parameters under various experiment condition.

Mat'l Cond. Para.	AL2024-T4 (SHPB)	AL7075-T6 (SHPB)	AL2024-T4 (mSHPB)	AL2024-T3 (mSHPB, Low temp.)
D/L(mm)	9/4.5	9/4.5	8/4	8/4
V_1 (m/s)	34.53	31.566	45.98	46.62
$\dot{\epsilon}$ (s)	2176.63	2402.33	11415	11576
T(°C)	Room Tem.	Room Tem.	Room Tem.	-29
A(MPa)	265	337	0	0
B(MPa)	426	343	1850	1540
n	0.34	0.41	0.51	0.62
C	0.015	0.01	0.015	0.013
m	1	1	1	1.25

4.3 SHPB에 의한 고변형률 변형 거동

4.3.1 시간별 응력과 전과 양상

실험에서 얻은 입·출력봉의 스트레인 게이지의 변형률과 시뮬레이션에서의 변형률을 비교한 결과를 Fig. 6 (SHPB)과 Fig. 7 (mSHPB)에 나타내었다.

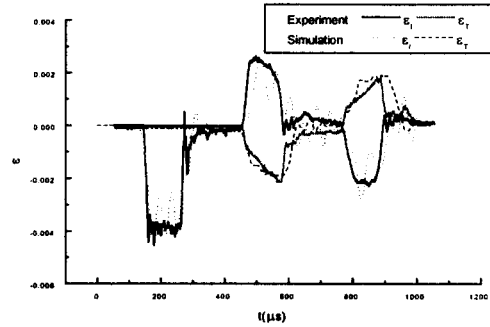


Fig. 6 Typical strain output and a computer simulation for the conventional SHPB

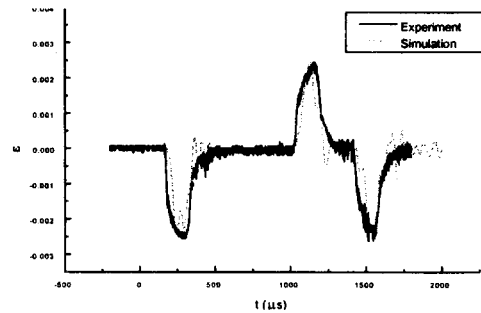


Fig. 7 Typical strain output and a computer simulation for a modified SHPB

Fig. 8와 Fig. 9에 SHPB와 mSHPB에서의 시간에 따른 시편의 변형 모습을 나타내었다. 두 시험법 모두 시편이 평행하게 변형 되므로 mSHPB에서 1차원 변형이 일어난다는 기본 가정이 적합함을 알 수 있다.

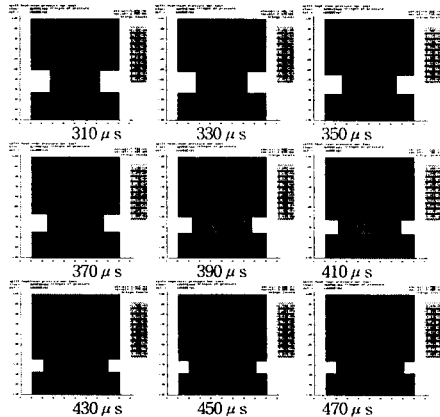


Fig. 8 Simulated deformation of specimen on SHPB

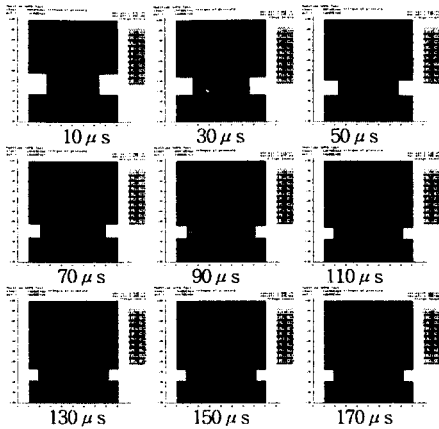


Fig. 9 Simulated deformation of specimen on mSHPB

4.3.2 응력-변형률관계

Table 1의 매개변수를 사용하여 기존 SHPB와 mSHPB에 대한 시뮬레이션 결과를 실험결과와 비교한 것이 Fig. 11 과 Fig. 12이다.

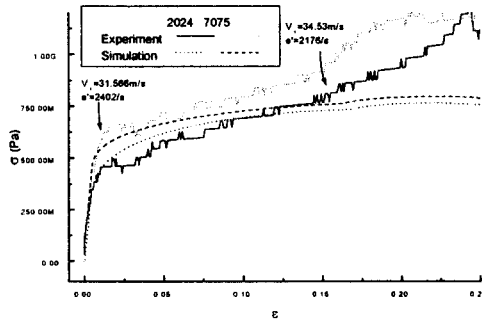


Fig. 10 Dynamic stress-strain behaviors for 7075-T6 and 2024-T4 aluminum alloys obtained from SHPB and a computer simulation

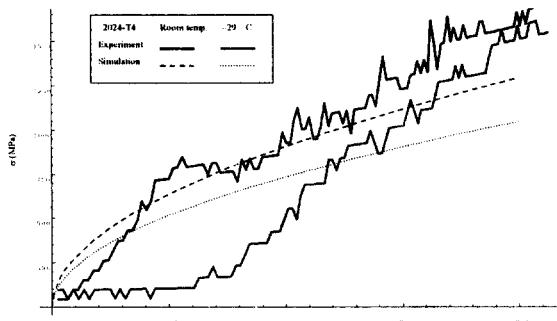


Fig. 11 Dynamic stress-strain behaviors for 2024-T4 aluminum alloy under room and low temperatures obtained from SHPB and a computer simulation

Fig. 10의 실선은 기존 SHPB로부터 얻은 진응력-진변형률선도이며 Johnson-Cook 모델은 변형률 0.2

정도 까지는 잘 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 11의 실선은 mSHPB로부터 얻은 진응력-진변형률 선도이며 지수함수 형태가 아니므로 매개변수를 결정하기가 쉽지 않았다. 특히 저온실험의 경우 오차가 크다.

5.결론

기존 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)와 mSHPB 실험 장치를 설계,제작 하여 여러 가지 알루미늄 시편에 대해서 $10^3-10^4/s$ 정도의 변형률 속도를 발생시킬 수 있었다. 수정 SHPB장치로서 충격봉의 충격속도를 증가시키면 $10^5/s$ 에 가까운 변형률 속도를 얻을 수 있을 것이다.

실험결과와 Johnson-Cook모델을 이용하여 결정된 구성방정식의 매개변수를 범용 동적해석 프로그램에 적용하여 구성방정식의 정밀도를 검증하였다.

후기 : 본 연구는 ADD-TEMD-413-961343에 의 해 수행된 것이다.

참고문헌

- [1] R.M. Davies, 1943, "A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar", *Phil. Trans. A*, Vol 240, p.375
- [2] H. Kolsky, 1949, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading", *Proc. Royal Soc. B*, Vol 62, p.676
- [3] 양동률, 양인영, 이철민 공역, 1992, "충격공학", pp.5-43, 169-201
- [4] B.Hopkinson,1914,"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
- [5] F.E. Hauser, J.A. Simmons, and J.E. Dorn, 1961,"Strain Rate Effects in Wave Propagation, in Response of Metals to High Velocity Deformation", *Metallurgical Society Conferences*, Vol 9, P.G. Shewmon and V.F. Zackay, Ed., Interscience, New York, p.93
- [6] 이억섭 외 4인, 1997, "고변형률하에서의 알루미늄의 동적 응력-변형률 특성의 결정(II)", 대한기계학회 '97년도 춘계 학술대회 논문집(A), pp.253-258
- [7] G. R. Johnson and W. H. Cook, 1983, in Proc. 7th Internation Symp. on Ballistics, The Hague, 541
- [8] 정동택, 1994, "SHPB를 이용한 응력-변형률 측정", 대한기계학회 '94년도 춘계 학술대회 논문집(I), pp.33-41
- [9] 이억섭 외 4인, 1996, "고변형률하에서 알루미늄의 동적 응력-변형률 특성의 결정(I)", 국방과학연구소, 제2회 국방소재 학술대회논문집, pp.685-694