

AISI-4340 변형률 속도 변화에 따른 인장, 압축형 JC 구성방정식 변수에 관한 연구

우상현^{1,2)} · 이창수²⁾ · 박이주^{*,1,2)}

¹⁾ 과학기술연합대학원대학교 무기체계공학과

²⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

Experimental Studies on Tension, Compression JC Constitutive Equation Parameter of Strain Rate Effect for AISI-4340

Sanghyun Woo^{1,2)} · Changsoo Lee²⁾ · Leeju Park^{*,1,2)}

¹⁾ *Weapon Systems Engineering, Korea University of Science and Technology, Republic of Korea*

²⁾ *The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Republic of Korea*

(Received 2 November 2016 / Revised 10 May 2017 / Accepted 21 July 2017)

ABSTRACT

In this study, the experimental methods are compared for obtaining the parameters of the Johnson-Cook constitutive model. The parameters used for numerical simulation are very important in making an accurate estimation of numerical simulation. So, the testing method of obtaining the parameters is also very important. We compared the difference of conventional method, compression method and tensile method of AISI-4340 steel at various strain rate by using MTS, SHPB and SHTB. Taylor impact test and M&S were carried out to compare differences among these three types of JC constitutive parameter.

Key Words : Strain Rate(변형률 속도), SHPB(홉킨슨바), SHTB(인장형 홉킨슨바), JC Constitutive Parameter(JC 구성 방정식 변수)

기 호 설 명

ϵ : 변형률
 ϵ_R : 반사파 변형률
 ϵ_T : 투과파 변형률

$\dot{\epsilon}$: 변형률 속도
 σ : 응력
 A_B : 압력봉의 단면적
 A_S : 시편의 단면적
 C_B : 압력봉의 탄성과 속도
 E_B : 압력봉의 탄성계수
 L_S : 시편의 길이
 T_m : 시편의 응점

* Corresponding author, E-mail: ljpark@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서론

현대무기체계는 방산업체에서 생산되고 품질보증기관의 보증활동과 성능을 확인하는 단계를 거쳐 군요구성능(ROC)에 충족시 군에 도입되는 단계를 거치게 된다. 특히 탄두 개발 및 성능 개선에 있어 영향을 미치는 변수에 따라 시험을 함에 따라 비용이 소요되고, 사격에 따른 포신의 마모도 발생, 시간 및 시험 인력 투입 등을 고려할 때 많은 예산이 소요되므로 충분한 측정값을 얻기에 많은 어려움을 갖고 있다^[1]. 이러한 시간과 비용의 제한점을 개선하기 위해 M&S (Modeling and Simulation)와 실험을 병행한 연구가 활발히 진행되고 있다. 통상 구조용 재료의 외부 하중에 의한 변형 거동은 정적 하중에 대해서만 고려 및 해석되어져 왔으나 기계와 산업의 고성능화, 고속화에 따라 재료의 동적 변형 거동을 해석하기 위한 연구의 필요성이 증대되고 있다.^[2] 고압/고속의 환경에서 재료는 고 변형률 속도의 동적 변형의 거동을 나타내며, 이때의 변형은 하중 지속 시간이 매우 짧으므로 정적 상태의 재료 거동과는 다른 반응을 나타낸다고 알려져 있다. 금속 재료의 물성에 따른 변형 거동을 측정하기 위해 $10^{-3} \sim 10^3/s$ 의 변형률 속도 범위에서 각각의 영역에 따른 시험장비를 이용하여 변형률과 유동 응력 곡선을 측정하였다. 대부분 이렇게 측정된 데이터 중 저변형률 속도의 인장 시험결과와 고변형률 속도의 압축 시험 결과를 이용하여 동적 경화 구성방정식의 변수를 산출하여 사용한다.

본 연구에서는 BCC 결정구조를 갖는 AISI-4340에 관하여 압축과 인장 시험을 시험법에 따라 그룹화하여 실험을 실시하였다. 강도 모델 중 대표적 변형률 의존 경화모델인 Johnson-Cook^[3] 모델을 사용하여 시험법을 혼합하여 산출된 변수와 압축, 인장 각 일련의 시험법에 따른 변수를 산정하였다. 이를 M&S에 적용하여 Taylor 충돌 실험 결과와 비교해 상황에 따른 적합한 JC 변수를 도출하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 저변형률 속도 압축, 인장 실험

정적 시험은 최대 하중이 250 kN인 유압 서보식 재료시험기(MTS-810)를 사용하였다^[4]. MTS(Mechanical Test System)는 변위 제어(displacement control) 상태, 시

편 높이의 20 %로 하였다. 변형률 속도는 $10^{-3}/s$ 일 때 20 Hz, $1/s$ 일 때 1024 Hz의 DAQ(Data Acquisition)를 적용하였다. 변위 제어에 의한 시편 하중의 크기는 로드 셀(load cell)에 의해 측정되어 A/D 변환기를 통해 PC에 저장된다. 모든 시험은 상온(Room Temperature)에서 실시하였으며, 사용된 시편의 규격 및 시험 조건은 Fig. 1에 기술하였다. 압축 시험시 시편과 압반 사이의 마찰 영향을 줄이기 위하여 0.08 mm Teflon Sheet를 이용하였다^[5-7].

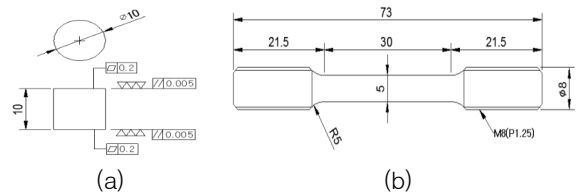
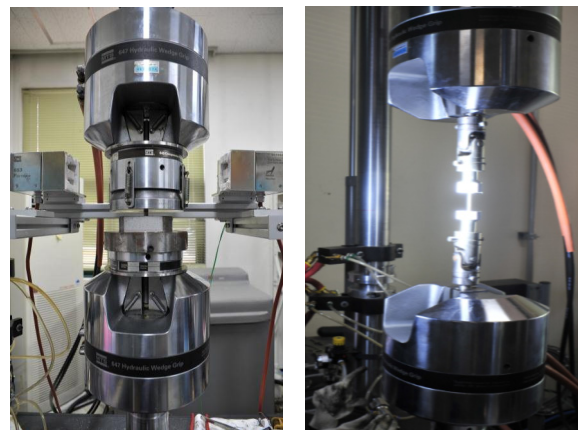


Fig. 1. Geometry of specimen used at low strain rate test (a) Compression test specimen (b) Tension test specimen



(a) Compression test (b) Tension test

Fig. 2. Low strain rate test using MTS-810

2.2 고변형률 속도 압축, 인장 실험

$10^2 \sim 10^4/s$ 의 고변형률 속도 범위에서 재료의 물성을 측정하기 위해 압축 시험에서는 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar), 인장 시험에서는 SHTB(Split Hopkinson Tension Bar) 시험 장치를 사용하였다^[8-10]. 상온 시험에 사용된 시편의 규격은 Fig. 3에 기술하였다. SHPB의 충격봉, 입력봉, 출력봉은 마레이징강 소재를 사용하였으며, Table 1은 탄성봉의 물성치를 나타낸다.

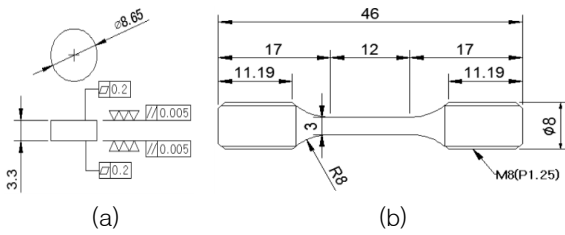


Fig. 3. Geometry of specimen used at high strain rate test (a) Compression test specimen (b) Tension test specimen

Table 1. Material property of maraging steel

Density	8.08 g/cc
Elastic wave velocity	4930 m/s
Young's Modulus	195 GPa
Diameter	2.54 mm
Length of Strike Bar	250 mm
Length of Incident / Transmission Bar	1500 mm

입력봉과 출력봉 끝단에서 750 mm 떨어진 위치에 각 2개의 스트레인 게이지를 대칭으로 부착하는 하프 브릿지를 적용하였다. Fig. 4는 SHPB와 SHTB 시험 장비를 도식화하여 표기하였다.

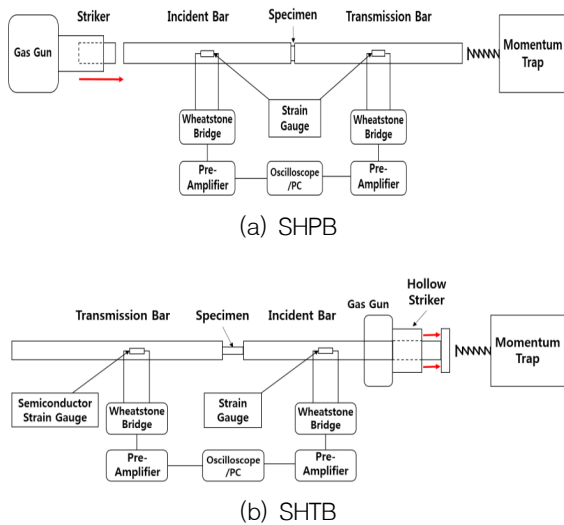


Fig. 4. Experimental apparatus in high strain rate testing

충격봉의 충돌로 인한 충격은 압축파를 발생시키며 이 압축파는 입력봉에 탄성과 형태로 전달된다. 압축파가 시편과 입력봉 사이의 계면에 도달하게 되면 임피던스 차이에 의해 일부는 ϵ_R 의 인장과 형태로 반사되어 입력봉의 변형률 게이지에서 측정되며, 나머지는 ϵ_T 의 압축파 형태로 투과되며 시편에 변형을 가한다. 투과된 압축파는 출력봉의 변형률에서 측정되며 시편이 충격방향으로 균일하게 변형되었다고 가정할 경우 변형률의 속도는 반사파 ϵ_R 의 크기에 비례하게 된다. 또한 시편에 가해진 응력은 투과파 ϵ_T 의 크기에 비례하며 이와 관련된 식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{-2C_B}{L_S} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{-2C_B}{L_S} \epsilon_R \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{A_B E_B \epsilon_T}{A_S} \quad (3)$$

속이 빈 원통형 충격봉을 이용한 Ogawa 방식의 SHTB를 사용하여 인장 시험을 실시하였다. 충격봉, 입력봉, 출력봉 소재는 압축형 SHPB와 동일한 마레이징 강을 사용하였다. 인장 시험에서 투과파의 신호가 약하여 변형률 게이지가 아닌 반도체 게이지를 사용하였다. 인장 시험 결과 또한 식 (1) ~ (3)을 이용하여 변형률, 변형률 속도, 응력을 구할 수 있다. 게이지로부터 측정된 신호는 미세한 저항으로 작용하며 이 저항은 Wheatstone-Bridge 회로에 의해 전압 변화로 나타나게 된다. 미세한 변화로 인해 증폭기를 거쳐 기록되게 하였다. 시험을 통해 획득한 공칭변형률, 공칭응력은 진변형률, 진응력으로 변환하여 사용하였다.

2.3 Taylor Impact Test

본 실험을 수행하기 위해 12 mm gas-gun을 사용하였으며, 실험장치의 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 충격시험시편은 직경 10 mm, 길이 50 mm로 직경비(L/D) 5의 원통형을 사용하였다. 초고속 카메라를 사용하여 초당 100,000 프레임의 속도로 충돌시 충격에 의한 변형을 촬영하였으며, 강체 모루(Rigid Anvil)는 마레이징 강 소재를 사용하였다.

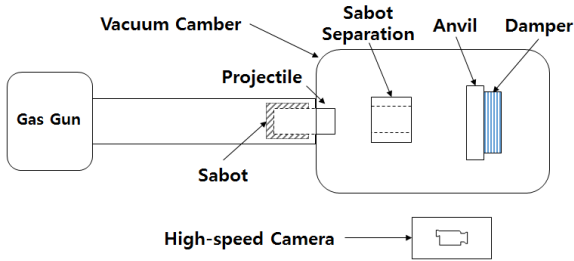


Fig. 5. Taylor impact testing apparatus

3. 결과 및 고찰

동일한 소재라 하여도 미세조직의 크기 및 분포에 따라 각기 다른 물성을 가지게 된다. Fig. 6은 4340의 미세조직을 나타내고 있으며 평균 크기는 43.74 μm 로 측정되었으며 ASTM Grain Size No. 6.08이다. 실험에 사용한 소재의 성분표는 Table 2에 기술하였다.

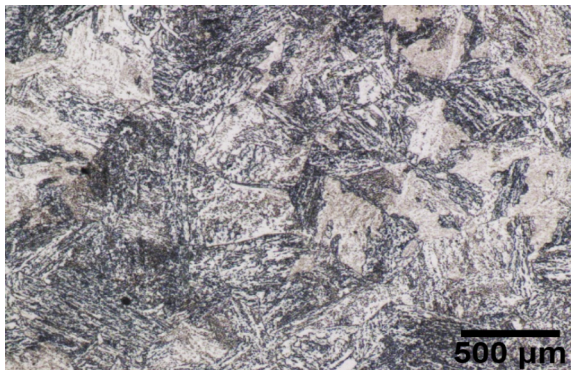


Fig. 6. Optical microstructure of AISI-4340

Table 2. Chemical composition of AISI-4340

	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
%	96	0.425	0.213	0.704	0.674	1.56	0.192	0.116

Fig. 7은 변형률 속도 1/s에서 인장 시험, 2313/s에서 압축 시험을 통해 얻어진 AISI-4340 진응력-진변형률 곡선이다. 일반적으로 JC 구성방정식의 변수를 구하기 위해 정적인 영역에서는 인장 시험으로 동적 영역에서는 SHPB를 이용한 압축 시험을 통해 얻은 데이터로 변수를 산정한다. 혼합형으로 산정된 변수는 Table 3(a)에 표기하였다.

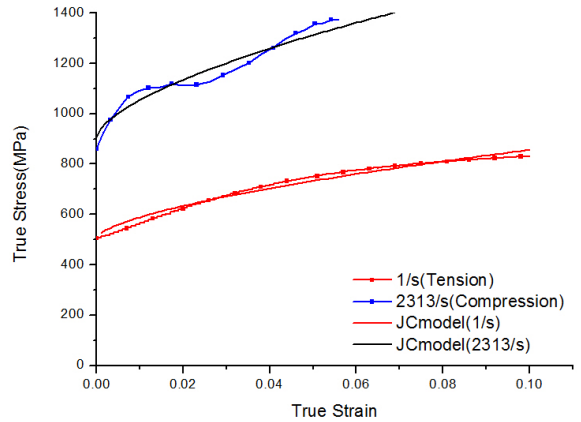


Fig. 7. True Strain-Stress curve of AISI-4340 at 1/s in tension, 2313/s in compression test

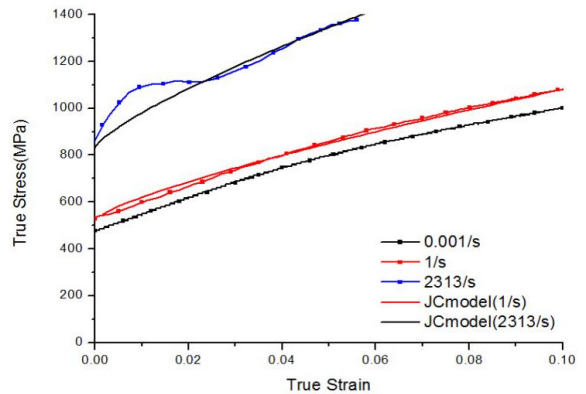


Fig. 8. True Strain-Stress curve of AISI-4340 at low, middle and high strain rate compression test

Fig. 8은 0.001/s, 1/s, 2313/s 3종류의 변형률 속도 구간에서의 AISI-4340 압축 진응력-진변형률 곡선이다. 변형률 속도의 변화에 따라 얻어진 서로 다른 세가지 곡선은 탄성구간을 제외한 소성변형 구간만을 나타내고 있으며, 저변형률 속도 구간에 비해 고변형률 속도에서 항복강도 및 유동응력이 급격하게 증가하는 모습을 나타낸다. 격자 내에서 원자들의 정렬이 어긋난 형태를 일컫는 전위는 유동응력이 증가하는 경화 현상과 밀접한 관계를 보인다. 소성변형을 하는 동안 전위는 생성 및 소멸이 일어나며 결정립계에 의해 전위의 움직임이 감소된다. 전위의 이동이 방해받음에 따라 소성 변형의 진행이 어려워지고 강도가 증가하는 경화현상이 발생하게 된다. 항복강도와 변형률이 0.05일 때의

증가량을 비교해보면 1/s에서는 62.14 %, 2313/s에서는 열연화 현상에 의해 57.6 %를 보이며 고변형률 속도에서의 응력 증가량이 작음을 확인할 수 있다. 이는 고 변형률 속도에서의 소성변형시 발생한 열이 저변형률 속도에 비하여 외부로 방출될 시간적 여유가 적어짐에 따른 현상으로 예상된다.

Fig. 9은 0.001/s, 1/s, 1227/s 3종류의 변형률 속도 구간에서의 AISI-4340 인장 진응력-진변형률 곡선이다. 변형률 속도의 변화에 따라 얻어진 서로 다른 세가지 곡선은 압축 시험 곡선과 동일한 항복강도 및 유동응력의 증가 현상을 관찰할 수 있다. 압축 시험법과 같이 고변형률 속도에서의 유동응력 증가량은 45.34 %로 저변형률 속도에서의 증가량 47.86 % 보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 마찰 등의 효과로 인한 압축 시험의 급격한 응력 증가 현상과는 다르게 다소 늦은 증가 형태를 나타낸다.

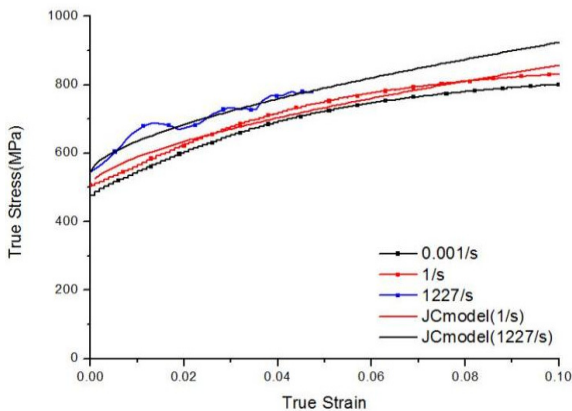


Fig. 9. True Strain-Stress curve of AISI-4340 at various strain rates in tension test

Fig. 10은 변형률 속도에 따른 인장, 압축 시험에 따른 항복강도의 차이를 비교한 그림이다. 압축 시험시 0.001/s에서 477.92 MPa, 1/s에서 526.97 MPa, 2313/s에서 860.44 MPa, 인장시험시 0.001/s에서 462.66 MPa, 1/s에서 506.1 MPa, 1227/s에서 545.02 MPa의 항복강도 값을 나타낸다. 변형률 속도 1/s 대비 고변형률 속도에서의 항복 강도 증가는 압축 시험은 63.3 % 증가한 반면 인장 시험에서는 7.7 % 증가하여 압축 시험이 인장 시험에 비해 변형률 속도에 따라 높은 민감도를 보인다. 모든 변형률속도 영역에서 압축시험이 인장시험에 비해 높은 항복강도 값을 나타내는데, 이는 시편과 압

반사이의 마찰 등 외부적 요소의 영향이 있을 것으로 판단된다.

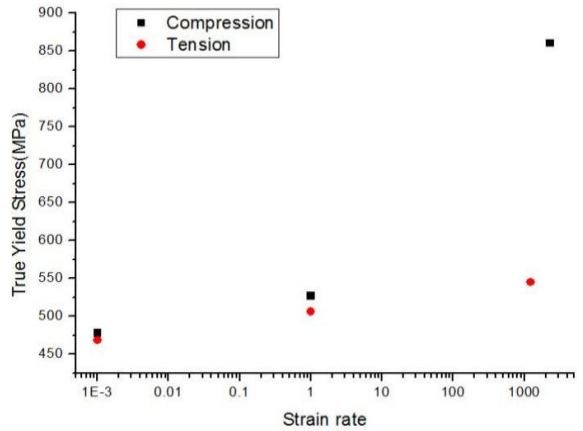


Fig. 10. Strain rate - yield stress curve of AISI-4340 depend on strain rates

종합된 실험 데이터를 식 (4)에 있는 Johnson-Cook 모델이 피팅하여 도출된 매개변수를 Table 3에 명시하였다. 본 실험에서는 열적 연화(Thermal Softening) 현상을 모사하는 마지막 항에서 기준 온도(T_{ref})가 실험 온도(T)와 상온으로 동일하여 Johnson-Cook 모델은 앞의 두 항에 의존적인 형태를 보인다. 이에 따라 A , B , C , n 4종류의 상수를 실험을 통해 산정하였다. 압축 시험을 통해 산정된 변수는 A_C , B_C , C_C , n_C 로 인장 시험을 통해 산정된 변수는 A_T , B_T , C_T , n_T 로 표기하였다. A 는 항복 응력, B 는 변형률 경화 상수, C 는 변형률 속도 상수, m 은 열 연화 상수이다.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0))(1 - (\frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}})^m) \quad (4)$$

Table 3. Simplified JC model parameter

(a) Conventional method type

A_M	506.101
B_M	1477.804
C_M	0.102
n_M	0.625

(b) Compression method type

A_C	526.974
B_C	3293.016
C_C	0.077
n_C	0.774

(c) Tension method type

A_T	506.101
B_T	1477.804
C_T	0.011
n_T	0.625

위에서 산정된 변수를 검증하기 위해 Taylor 실험에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. $10^3 \sim 10^4/s$ 의 변형률 속도 영역에서의 실험으로 산출한 JC 구성방정식 함수를 적용하였으며 상용 해석 프로그램인 LS-DYNA Explicit 코드를 사용하여 $10^4/s$ 이상의 고율 변형률 속도 현상이 나타나는 Taylor 충격 시험을 모사하였다. 실험 전, 후 시편의 형태와 초고속 카메라로 촬영한 충돌 후 시편의 사진을 Fig. 11에 나타내었다. 발사체는 Fig. 12과 같이 2차원 축대칭(2D axisymmetric)으로 모델링하였으며, 소변형 이론(Small strain theory)을 가정한 라그랑지안 요소(Lagrangian mesh)에서 Cauchy stress와 Infinitesimal strain 관계를 바탕으로 유한요소해석(FEM : Finite Element Analysis)을 실시하였다. Fig. 12와 Table 4는 JC 모델 변수에 따른 실험값과 비교한 결과를 나타내었다.



Fig. 11. Taylor impacting test specimen ($v = 183.3 \text{ m/s}$)

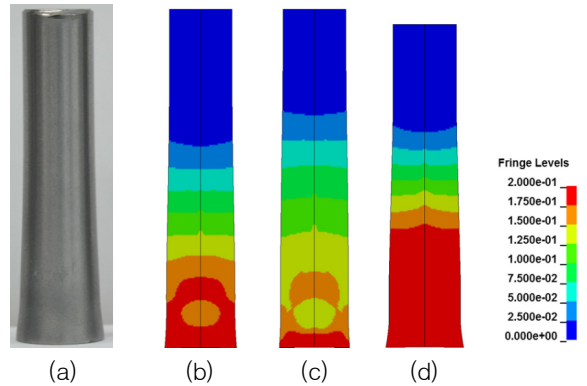


Fig. 12. Calculated plastic strain distribution($v = 183.3 \text{ m/s}$) (a) Test result (b) Conventional method (c) Compression method (d) Tension method

Table 4. Taylor test result and Length, diameter of specimen in each type

Type	H(mm)	D(mm)	Error(H)	Error(D)
Test Result	45.09	12.44		
Conventional	46.04	11.40	2.11 %	8.33 %
Compression	46.02	11.12	2.06 %	10.58 %
Tension	43.93	12.30	2.57 %	1.09 %

4. 결론

본 논문에서는 전산 모사에 사용되는 JC모델의 변수를 기존의 혼합된 시험법과 압축시험, 인장시험만을 통하여 획득하여 그 결과 값의 차이와 실제 모델에 적용할 때의 차이점에 대하여 연구하였다. 실험은 AISI-4340 소재에 대하여 저변형률 속도 영역에서는 기존의 MTS 시험 장비를 사용하여 획득하였고, 고변형률 속도 영역에서는 SHPB와 SHTB 시험 장비를 활용하여 각각의 변수를 획득하였다. 각 시험으로부터 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 고변형률 속도에서 압축 시험의 경우 항복강도는 저변형률 속도($1/s$)에 비해 63.3 % 증가한 반면 인장 시험은 7.7 % 증가하였다.
- (2) 고변형률 속도의 영역에서 변형률 0.05 기준 항복강도 대비 유동응력은 압축일 경우 57.8 % 증가,

- 인장일 경우 42.4 %의 증가량을 나타낸다.
- (3) 저변형률 속도의 영역에서 변형률 0.05 기준 항복 강도 대비 유동응력은 압축일 경우 66.6 % 증가, 인장일 경우 55.8 %의 증가량을 나타내며 압축에서의 응력 증가량이 변형률 속도와 상관없이 인장 응력의 증가량에 비해 큰 현상을 보였다.
 - (4) 소성변형 시 위로 볼록한 형태의 경화곡선을 나타내므로 전위의 생성에 따른 응력 증가가 지배적임을 알 수 있다.
 - (5) 소성구간에서의 진응력-진변형률 곡선을 이용하여 산정된 Johnson-Cook(JC) 구성방정식의 변수를 이용하여 수치해석을 진행한 결과 압축형 변수를 적용하였을 때 힘이 가해지는 축방향에 대한 높이의 길이가 실험값과 가장 적은 오차를 보였다. 인장형 변수를 적용하였을 때 인장이 지배적인 반경 방향에 대한 직경의 길이가 실험값과 가장 적은 오차를 보였다.

Fig. 10에서 시험법에 따른 항복 강도의 변화를 살펴 보면 인장 시험법은 변형률 속도에 따른 변화가 선형적인 반면 압축 시험법은 변형률 속도에 대하여 높은 민감도를 보인다. Fig. 8, 9에서 압축 시험법이 인장 시험법에 비해 큰 폭의 유동응력이 증가하는 경화현상을 확인할 수 있었다. 고변형률 속도에서의 유동응력 변화량이 저변형률 속도에 비하여 적은 것은 열연화 현상이 발생하는 것으로 보이며 AISI-4340의 고유한 특성으로 볼 수 있다. Taylor 충돌 시험에 있어 힘이 가해지는 높이의 변화는 압축이 지배적으로 발생함에 따라 압축시험법을 통해 산정된 변수를 적용하였을 경우 적은 오차를 보였다. 직경의 경우 시편 끝단이 증가하는 현상이 두드러지며 인장시험법에 따라 산정된 변수 적용시 높은 일치율을 보인다. M&S를 통해 예상하고자 하는 부분에서 지배적인 현상에 따라 적절한 변수를 적용하여야 하며, 전반적인 형태에 대한 예상치를 위해서는 적은 오차를 보이는 인장형 변수를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 또한 소성 변형시 소성에너지의 90 %가 열로 분산됨에 따라 열연화 현상, 소성변형을 모사하는 다양한 구성방정식 등을 고려한 추가적인 연구의 필요성을 알 수 있다.

본 연구에서는 압축과 인장에 따른 유동응력의 거동을 각각 확인할 수 있었으며 JC 구성방정식의 변수를 산정하여 수치해석을 통해 나타나는 차이를 확인할 수 있었다. 이상과 같은 방법을 통해 충격과 변형

률 속도의 민감도에 의한 유동 응력에 대한 거동은 타소재의 동적 거동 해석에도 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 표적과피 성능 증대를 위한 고압충격 정밀설계기술 연구(611555-912455201) 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] J. Kim, J. Kim, T. Na, B. Kim, N. Park, "An Integration Study of the Firing Test Stage at the Acceptance Test for the Propelling Charge," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology* Vol. 19, No. 2, pp. 171-176, 2016.
- [2] O. K. Min, S. W. Seo, "Size Effects of Aluminum Compression Specimen in SHPB Test," *The Korean Society of Mechanical Engineer Conference*, Vol. 1, No. 1, pp. 339-343, 1998.
- [3] Johnson. G. R., Cook. W. H., "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, Vol. 21, pp. 541-547, 1983.
- [4] Kim, K. H., K. C. Shin, and Jung Ju Lee, "Axial Crush and Energy Absorption Characteristics of Aluminum/GFRP Hybrid Square Tube," *Key Engineering Materials*, Vol. 183, 2000.
- [5] Standard, A. S. T. M., "E9-09," *Standard Test Method for Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*, Philadelphia, USA: ASTM International, 2002.
- [6] Woodward, R. L., "The Deformation of Metals," Ph.D. Thesis, 1973.
- [7] Kuhn, Howard, and Dana Medlin, "ASM Handbook. Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation," ASM International, Member/Customer Service Center, Materials Park, OH 44073-0002, USA, 998. 2000.
- [8] B. Hopkinson, "A Method of Measuring the Pressure

Produced in the Detonation of High Explosive or by the Impact of Bullets,” Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 213, pp. 437-456, 1914.

[9] Kolsky. H, “An Investigation of the Mechanical

Properties of Materials at Very High Rates of Loading,” Proceedings of the Physical Society, Section B, 62.11:676, 1949.

[10] Ogawa, Kinya, “Impact-tension Compression Test by using a Split-Hopkinson Bar,” Experimental Mechanics, 24.4, pp. 81-86, 1984.