

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2019.43.12.951>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

최적화 방법을 이용한 Johnson-Cook 모델 계수 결정

장택진* · 유요한** · 김종봉***†

* 서울과학기술대학교 자동차공학과, ** 국방과학연구소,

*** 서울과학기술대학교 기계자동차공학과, 전기정보기술연구소

Determination of Johnson-Cook Model Parameters using Optimization Method

Taek Jin Jang*, Yo-Han Yoo** and Jong-Bong Kim***†

* Dept. of Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science & Tech.,

** Agency for Defense Development,

*** Dept. of Mech. and Automotive Eng., Res. Center for Electrical and Inf. Tech.,
Seoul Nat'l Univ. of Science & Tech.

(Received August 1, 2019 ; Revised September 3, 2019 ; Accepted September 4, 2019)

Key Words: Multi-Objective Optimization(다목적 최적설계), Model Coefficient(모델 계수), High Strain Rate Condition(고변형률 조건)

초록: Johnson-Cook(JC) 모델은 일반적인 재료구성모델 중 하나로써 고 변형률, 고 변형률 속도, 고온의 조건에서 금속재료의 거동을 비교적 잘 표현할 수 있다. 지금까지는 대부분 여러 속도와 온도에서 측정된 응력-변형률 선도를 커브 피팅하여 고속 물성 계수를 결정하였다. 이 경우 각각의 시험에서 변형률 속도는 일정하다고 가정한다. 하지만, 시험 중 변형률 속도는 변하기 때문에 일정하다고 가정하면 오차를 유발할 수 있다. 본 연구에서는, 모델 계수(JC 모델의 경우 A, B, C, n)를 설계변수로 하고, 시험으로 얻은 응력-변형률 선도와 설계변수를 이용하여 유한요소해석(시험과 같은 조건)을 이용해 얻은 응력-변형률 선도와 차이를 목적함수로 하여 목적함수를 최소화 하는 최적화를 수행하였다. 이 방법으로 JC 모델 계수를 결정하였고, 시험과 해석으로 구한 응력-변형률 선도가 잘 일치함을 알 수 있었다. 실험과 해석을 연계한 최적화 방법으로 재료 물성 계수를 결정하는 방법론을 제안하였다.

Abstract: Thus far, the majority of Johnson-Cook (JC) model parameters have been determined by fitting of the experimental data. To achieve this, some values in each test, such as the strain rate and temperature, are assumed to be fixed. After numerous tests with various strain rates and temperatures, the flow stress is fitted as a function of the strain, strain rate, and temperature. However, the fixed test conditions may vary during the test. For example, the strain rate is not constant during a test if the test velocity is constant. In this paper, an optimization method is proposed to determine the model parameters. Tensile tests are performed for various strain rates. A finite element analysis is also conducted for the same conditions, and the model coefficients of the JC model are used as the design parameters. The error is defined as the discrepancy between the experimentally and numerically obtained stress-strain relations. This error is then used as a minimization objective. By this method, the model coefficients can be determined such that the numerically obtained stress-strain relation almost coincides with the experimentally obtained stress-strain relation. Moreover, a determination method of the material model coefficients by optimization is proposed.

- 기호설명 -

σ : 유동 응력

ε : 등가 소성 변형률

A : 초기 항복응력

B : 변형률 경화 계수

C : 변형률 속도 계수

n : 변형률 경화 지수

m : 열연화 지수

$\dot{\varepsilon}$: 등가 소성 변형률 속도

† Corresponding Author, jbkim@seoultech.ac.kr

© 2019 The Korean Society of Mechanical Engineers

- $\dot{\epsilon}_0$: 기준 소성 변형률 속도
- T_r : 기준 온도
- T_{meit} : 용융 온도
- A_0 : 시편의 초기 단면적
- L : 표점 거리
- L_0 : 초기 표점 거리
- σ_i : 진응력
- ϵ_i : 진변형률
- σ_i^{ref} : 기준 진응력

1. 서론

제품의 설계 및 공정 설계 등에서 유한요소해석 등의 전산 해석이 많이 활용되고 있다. 전산해석에서 재료의 거동을 정확하게 예측하기 위해서는 사용되는 재료의 물성을 정확하게 구해서 사용해야 한다. 그래서, 모델의 계수를 결정하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.⁽¹⁻⁹⁾ 기존에는 여러 가지 온도 및 변형률 속도에서 시험을 수행하여 응력-변형률 선도를 구하고, 그 시험 결과를 커브 피팅(curve fitting)하여 계수를 결정하였다.⁽¹⁻⁷⁾ Johnson과 Cook⁽¹⁾은 온도와 변형률 속도에 따른 재료의 응력-변형률 모델을 제안하고 시험으로 구한 응력-변형률 선도를 피팅하였고, Kim과 Shin⁽²⁾은 여러 구성 모델의 특성을 비교하고 수정된 모델(modified PTW model)을 제안하고 실험 결과를 피팅하여 모델 계수를 결정하였다. Zerilli와 Amstrong⁽³⁾은 BCC(Body Centered Cubic) 재료와 FCC(Face Centered Cubic) 재료의 구성 모델을 제안하였다. Song과 Huh,⁽⁴⁾ 그리고 Lee 등⁽⁵⁾은 Johnson-Cook 모델에 대해 시험 결과를 피팅하였고, Kim⁽⁶⁾은 샌드위치 판재의 구성모델 계수를, 그리고 Cho와 Bang⁽⁷⁾은 응력-변형률 관계를 측정하였다. 이와 같은 시험 결과의 피팅으로 모델 계수를 결정하는 방법은 온도와 변형률 속도 등의 인자에 대한 여러 가지 시험을 수행하여야 한다. 또한, 시험 중에 변화하는 온도 및 변형률 속도를 고려하여 결정하기 어렵다.

최근에는 시험 중에 변화하는 인자를 고려하기 위해 해석과 연계하여 모델 계수를 결정하는 연구가 시도되고 있다. Shrot과 Baker⁽⁸⁾는 절삭가공 과정의 해석과 절삭 시험을 연계하여 Johnson-Cook 모델의 계수를 결정하였다. 계수 결정 과정에서 Levenberg-Marquardt 최적화 알고리즘^(9,10)을 사용하였다. Kim 등⁽¹¹⁾은 DIC(Digital Image Correlation)를 이용하여 측정된 변형률 분포와 그

에 대한 해석을 통해서 손상모델의 계수를 결정하였다. Dehghan 등⁽¹²⁾은 봉상 시편의 단축 인장에 대한 시험과 해석, 그리고 유전자 알고리즘을 사용하여 Johnson-Cook 모델 계수를 결정하였다.

본 연구에서는 속도별 인장시험, 인장시험의 해석, 그리고 LS-OPT⁽¹³⁾를 이용한 최적화 방법을 이용하여 재료의 구성모델 계수를 결정하는 방법을 제안하였다. 여러 가지 속도에 대한 인장시험으로 구한 하중-변위 곡선과 해석으로 구한 하중-변위 곡선의 차이를 목표값으로 설정하고, 목표값을 최소화하는 구성 모델의 계수를 결정하는 방법이다. 결정된 계수를 이용하여 검증을 수행하여 본 연구에서 제안한 방법이 신뢰성이 있음을 확인하였다.

2. 해석 모델

2.1 응력-변형률 모델

본 연구에서는 최적화 기법을 이용한 계수 결정 방법의 타당성을 검증하기 위해 수치적으로 시험을 수행하였다. 수치적 시험은 Fig. 1에 보인 표준 인장시험 시편을 모델링하고 속도별 해석을 수행하여 시험 결과를 생성하였다. 해석은 ABAQUS Explicit⁽¹⁴⁾으로 수행하였다.

최종 결정하고자 하는 모델 계수는 Johnson-Cook 모델 계수이고, 동일한 모델을 해석에 사용하였다. Johnson-Cook 모델은 Johnson과 Cook⁽¹⁾이 제안한 재료구성모델로서 변형률 경화, 변형률 속도, 열 연화를 고려하여 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

여기서 σ 는 유동 응력, ϵ 은 등가 소성 변형률, A 는 초기 항복응력, B 는 변형률 경화 계수, n 은 변형률 경화 지수, C 는 변형률 속도 계수, m 은 열연화 지수이다. $\dot{\epsilon}$ 은 소성 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 소성 변형률 속도, T_r 은 기준온도, T_m 은 용융온도이다. 본 연구에서는 제안한 방법의 효율성을 검

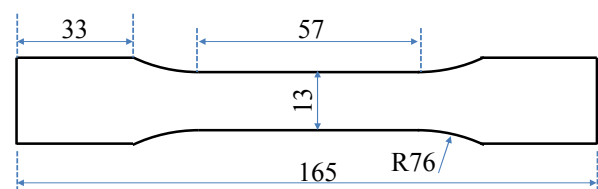


Fig. 1 Geometrical specification of ASTM D638 type 1 specimen (thickness = 2.0 mm, unit: mm)

Table 1 Material properties of specimen⁽¹⁵⁾

Material	AISI 1045
Density (kg/m ³)	7,850
Young's modulus (GPa)	206
Poisson's ratio	0.29
A (MPa)	615.8
B (MPa)	667.7
C	0.0134
n	0.255

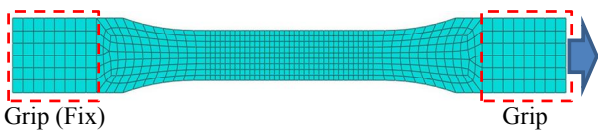


Fig. 2 Analysis model of ASTM D638 type 1 specimen

증하는 단계로 단순한 문제에 적용하기 위해 열연화의 영향을 고려하지 아니하였고, $\dot{\epsilon}_0 = 1.0s^{-1}$ 로 설정하여 Johnson-Cook 모델을 식 (2)와 같이 적용하였다.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad (2)$$

수치 시험 생성을 위한 해석에 사용된 재료의 물성은 Table 1에 기술하였다. 온도 항은 사용하지 않았기 때문에 온도 관련 물성은 기술하지 않았다.

2.2 유한요소해석을 이용한 수치 시험

형상 모델링은 Fig. 1에 보인 표준 인장시험 시편 규격인 ASTM D638 type 1 시편을 이용하였다. 유한요소해석을 위해 생성한 요소는 Fig. 2에 도시하였다. 시편의 왼쪽 그립(grip) 부분은 고정하였고, 오른쪽 그립 부분에 속도 경계조건을 부여하여 해석하였다.

해석은 Fig. 2의 오른쪽 그립 부분의 변위를 6mm만큼 인장 해석하였다. 해석을 통해 인장 하중 F 와 변화된 표점 거리 L 을 얻을 수 있고, 식 (3)과 (4)를 이용하여 진 응력 σ_t 와 진 변형률 ϵ_t 를 구하였다.

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0} \frac{L}{L_0} \quad (3)$$

$$\epsilon_t = \ln \frac{L}{L_0} \quad (4)$$

여기서 A_0 는 시편의 초기 단면적, L_0 는 초기 표

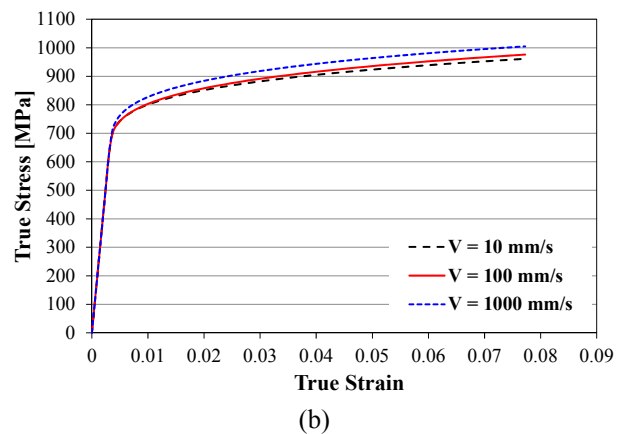
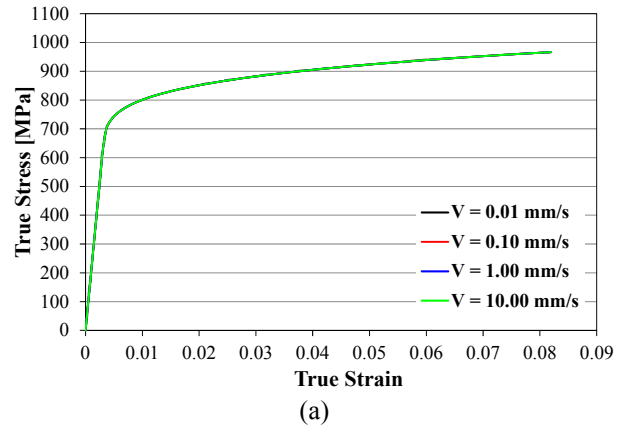


Fig. 3 Stress-strain curve at (a) 0.01~10 mm/s; (b) 10~1,000 mm/s

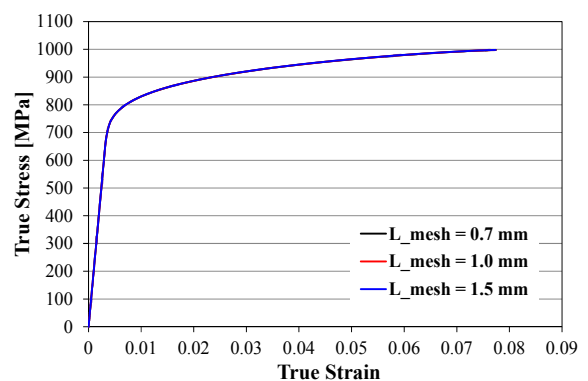


Fig. 4 Stress-strain curve for various element size (tensile speed = 1,000 mm/s)

점 거리이다.

해석은 0.01mm/s~1,000mm/s 구간에서 로그 스케일의 등간격으로 6개의 인장 속도에 대해 수행하였다. Fig. 3은 인장 속도에 따른 진 응력-진 변형률 선도를 보여준다. 인장 속도가 10.0mm/s 이하인 경우에는 변형률 속도 의존성이 작아 응력-변형률 선도가 거의 일치한다. 인장 속도 1.0mm/s 이하인 경우에는 해석 시간이 오래 걸리는 단점이

있고 결과의 민감도도 작기 때문에 추후 해석에서는 제외하고, 인장 속도 10.0mm/s 이상인 경우에 대해서만 연구를 진행하였다.

요소의 크기가 해석의 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 요소의 크기가 0.7, 1.0, 그리고 1.5mm인 경우에 대해 인장 속도 1,000mm/s로 해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 세 가지 경우의 요소 크기에 대해 응력-변형률 선도가 일치하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 추후 해석에서는 모두 요소의 크기를 1.5mm로 하였다.

3. 최적화를 이용한 계수 결정

3.1 최적화 정의

본 연구의 목적은 유한요소해석과 최적화를 이용하여 Johnson-Cook 모델의 계수를 결정하는 것이다. 이를 위해 식 (5)와 같이 목적함수를 수치 시험에서 구한 응력-변형률 선도와 설계변수를 이용한 해석에서 구한 응력-변형률 선도의 차이로 정의되는 MSE(Mean Square Error)로 설정하였다. 최적화의 수렴성을 위해 제한 조건을 식 (6)과 같이 적용하였고 상세 제한 조건은 Table 2에 기술하였다. 설계변수로는 Johnson-Cook 모델 계수 A, B, C, n 으로 식 (7)과 같이 정의하였다.

$$Min. MSE(\sigma_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_i^i - \sigma_i^{ref})^2 \quad (5)$$

$$Subject\ to \quad a_j \leq X_j \leq b_j \quad (6)$$

$$Design\ Variables \quad (A, B, C, n) \quad (7)$$

여기서 N 은 각 시험에서 총 샘플링 데이터의 개수, σ_i^i 는 최적화 진행 중인 변수 A, B, C, n 을 이용하여 최적화 과정의 해석으로 구한 진 응력이며, σ_i^{ref} 는 Table 1의 물성을 적용하여 2장에서 기술한 수치 시험으로 구한 Fig. 3(b)의 각 시험의 진 응력이다. X_j 는 설계 변수이고, a_j 와 b_j 는 각각 설계 변수의 최소값과 최대값이다.

Table 2 Constraints of design variables

Design variable	Min. value	Max. value
A (MPa)	300	1,000
B (MPa)	300	1,000
C	0	0.1
n	0	1

3.2 최적화 방법

최적화는 상용 최적화 프로그램 LS-OPT를 사용하였다. Fig. 5는 LS-OPT를 이용한 최적화 과정을 보여준다. 최적화 환경 설정 후에 진행되는 모든 최적화 과정은 자동으로 수행된다. LS-OPT에서, 최적화 과정 중에 필요한 해석 값을 구하기 위해 외부 프로그램인 ABAQUS를 자동으로 실행한다. 또한, 저자가 작성한 Python 프로그램을 실행하여 목적함수 설정에 필요한 응력-변형률 자료를 추출한다. Python 프로그램은 ABAQUS 결과 파일에서 인장 하중 F 와 표점 거리 L 을 추출하며, 식 (3)과 (4)를 이용하여 진 응력 σ_i 와 진 변형률 ϵ_i 를 계산하는 역할을 한다. 최종적으로 목적함수 최적화 조건과 제한조건이 만족되면 최적화 과정을 종료한다.

Fig. 6은 이와 같은 방법으로 구성된 LS-OPT 최적화 과정을 보여준다. 결과의 보간은 은닉층(hidden layer)을 이용하는 RBF(Radial Basis Function) network 방법을 사용하였고, 최적화는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 사용하였고, 한 세대에서 유전자 해석 샘플링은 10개로 진행하였다. 인장 속도 10, 100, 1,000mm/s에서의 목적값 MSE를 최소화하도록 다목적 최적화를 진행하였다.

3.3 최적화 결과

Fig. 7은 최적화 진행 중의 목적함수(MSE)의 변화를 보여준다. 최종적으로 57번의 반복(iteration) 후에 최적화가 완료되었다. Table 3은 최적화 과정

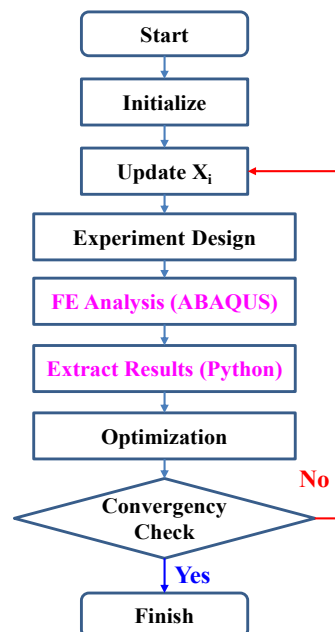


Fig. 5 The flowchart of optimization process

중의 최적화 변수 A , B , C , n 의 값을 보여준다. 최종적으로 결정된 Johnson-Cook 모델의 계수 A 는 630.3MPa, B 는 683.6MPa, C 는 0.0134, n 은 0.279이다. 목적함수인 MSE는 6.87E-6으로 충분히 낮기 때문에 수렴이 된 것으로 판단이 된다. Table 4는 최적화로 결정된 모델 계수와 수치시험 결과 생성 시 사용된 계수의 비교를 보여준다. ‘Given values’로 표시된 값들이 수치시험 결과 생성에 사용된 계수들로 참값이라고 볼 수 있다. A , B , n 값들은 다소 오차가 있지만, C 값은 정확하게 결정이 되었음을 알 수 있다. 가공경화 지수 n 은 가공경화 되는

크기를 결정하는 인자로 계수 A 와 연관되어 있다. A 값의 오차를 보상하기 위해 n 이 다소 크게 결정된 것으로 사료된다.

3.4 최적화 검증

3.3절에서 최적화 방법을 통해서 결정된 계수를 이용하여 해석한 결과와 수치시험 결과 생성에 이용한 Table 1의 물성을 이용하여 해석한 결과를 비교하여 본 연구에서 제안한 모델 계수 결정법의 타당성을 검증하였다. Fig. 8에 최적화를 통해 결정한 Johnson-Cook 계수를 이용하여 해석한 진 응력-진 변형률 선도과 Table 1의 물성을 적용하여 해석을 수행하여 얻은 진 응력-진 변형률 선도를 비교하였다. ‘Determined’는 최적화를 통해서 결정한 Johnson-Cook 계수를 이용한 결과이고, ‘given’은 Table 1의 물성을 이용하여 구한 결과이다. 또한, 인장 속도 10, 100, 1,000mm/s일 때 진 응력-진 변형률 관계가 모두 두 결과가 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 최적화 방법을 이용한 모델 계수의 결정 방법이 타당함을 검증하였고, 향후 고 변형률 속도 시험 및 파손 등의 다른 시험에도 본 연구의 방법을 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 3 Results of design variables during optimization

Iteration	A (MPa)	B (MPa)	C	n
1	370	930	0.01	0.1
10	742.4	767.1	0.0181	0.495
20	648.6	728.5	0.0127	0.314
30	644.2	691.5	0.0122	0.296
40	653	694.5	0.0134	0.309
50	636.9	702.3	0.0134	0.292
57	630.3	683.6	0.0134	0.279

Table 4 Comparison of optimized and given parameters

Parameters	Given values	Determined values	Error (%)
A (MPa)	615.8	630.3	2.3
B (MPa)	667.7	683.6	2.3
C	0.0134	0.0134	0
n	0.255	0.279	8.6

4. 결론

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS와 상용 최적화 프로그램인 LS-OPT를 연계하여 Johnson-Cook 모델 계수 A , B , C , n 을 결정하는 방법론을 제시하였다. 유한요소해석을 통해 인장 속도 0.01~10mm/s에서의 진 응력-진 변형률 선도가 거의 일치하는 것을 확인하였고, 이를 통

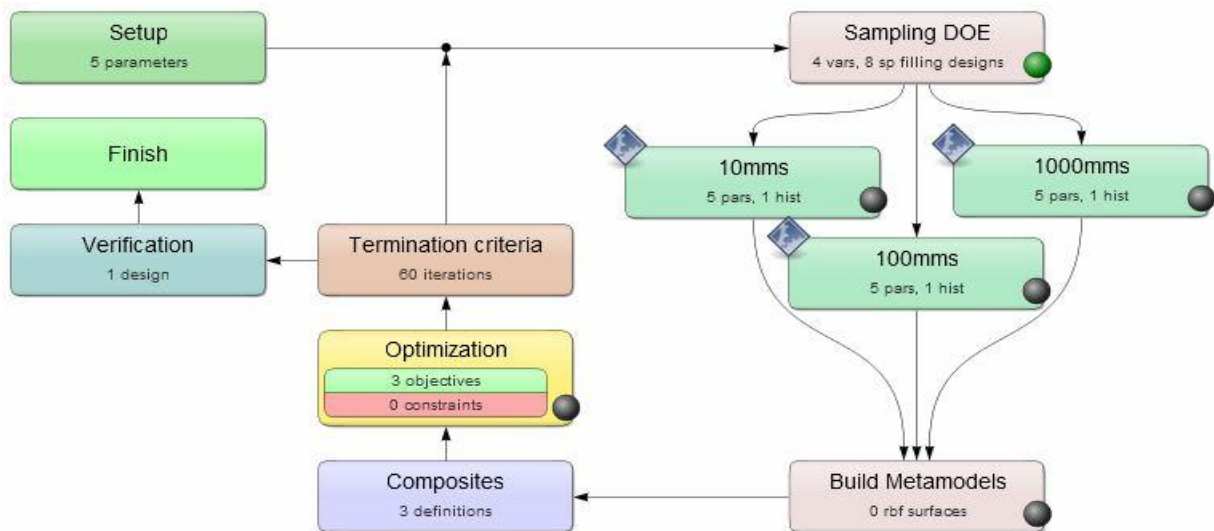


Fig. 6 The flowchart of optimization in LS-OPT

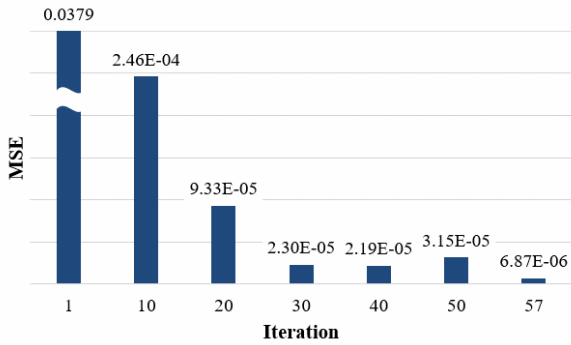
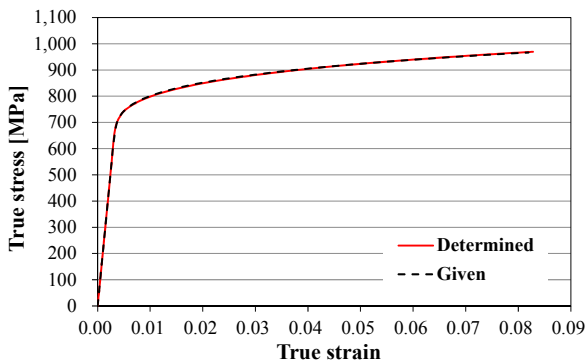
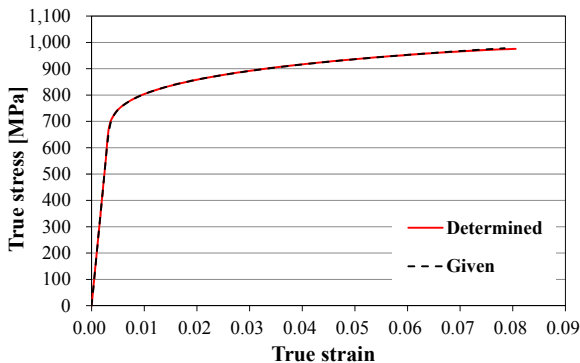


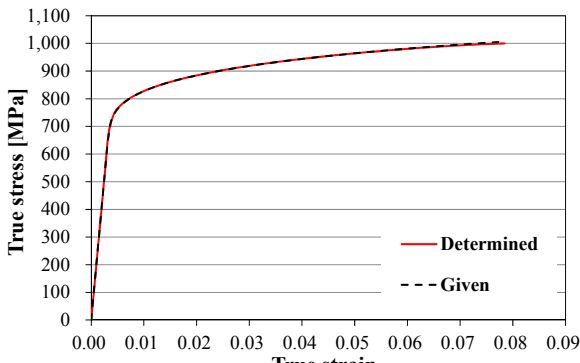
Fig. 7 MSE (mean square error) during optimization



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Comparison of stress-strain curves obtained by the analysis using determined and given parameters: (a) 10 mm/s; (b) 100 mm/s; (c) 1,000 mm/s

해 인장 속도 10, 100, 1,000mm/s에서 해석을 통해 결정된 진 응력-진 변형을 곡선을 이용하여 최적화의 목적값을 설정하였다. 또한 요소 망 크기에 따른 해석 결과를 분석하여 해석에 적정한 요소의 크기를 결정하였다. 최적화의 목적함수는 현재 변수를 이용하여 해석한 진 응력-진 변형을 곡선과 수치적으로 생성한 시험 결과의 진 응력-진 변형을 곡선의 MSE(Mean Square Error)로 설정하여 MSE가 최소가 되도록 최적화를 진행하였다. 최적화 완료 후의 목적값 MSE는 6.87E-6로 충분히 낮음을 확인하였고, 최적 모델과 기준 모델의 Johnson-Cook 계수가 거의 일치함을 확인하여 본 연구의 최적화가 타당함을 검증하였다. 본 연구에서는 단순한 시험에 대해 모델 계수를 결정하여 방법의 타당성을 분석하였고, 향후 고온, 고 변형률 속도 시험 및 파손 모델 등의 계수 결정에 본 연구의 방법을 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 성과는 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(No. NRF-2016R1D1A1B01014711)과 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Johnson, R. G. and Cook, H. W., 1983, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," *7th International Symposium on Ballistics*, pp. 541~546.
- (2) Kim, J. B. and Shin, H., 2009, "Comparison of Plasticity Models for Tantalum and a Modification of the PTW model for Wide Ranges of Strain, Strain Rate, and Temperature," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 36, pp. 746~753.
- (3) Zerilli, F. J. and Armstrong, R. W., 1987, "Dislocation-Mechanics-based Constitutive Relation for Material Dynamics Calculations," *J. Appl. Phys.*, Vol. 61, pp. 1816~1825.
- (4) Song, J. H. and Huh, H., 2006, "Dynamic Material Property of the Sinter-Forged Cu-Cr Alloys with the Variation of Chrome Content," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 30, No. 6, pp. 670~677.
- (5) Lee, O. S., Kim, G. H., Kim, M. S. and Hwang, J. S., 2003, "Dynamic Deformation Behavior of Aluminum Alloys Under High Strain Rate Compressive/Tensile Loading," *J. Mech. Sic. Technol.*, Vol. 17, No. 6, pp. 787~795.

- (6) Kim, K. J., 2019, "Deformation Behavior and Tensile Properties of AA5182/Polypropylene Sandwich Sheets," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 43, No. 1, pp. 9~13.
- (7) Cho, C. and Bang, H., 2017, "Failure Behavior/ Characteristics of Fabric Reinforced Polymer Matrix Composite and Aluminum 6061 on Dynamic Tensile Loading," *J. Mech. Sic. Technol.*, Vol. 31, No. 8, pp. 3661~3664.
- (8) Shrot, A. and Baker, M., 2012, "Determination of Johnson-Cook Parameters from Machining Simulations," *Computational Materials Science*, Vol. 52, No. 1, pp. 298~304.
- (9) Levenberg, K., 1944, "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 2, No. 2, pp. 164~168.
- (10) Marquardt, D., 1964, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *J. the Soc. for Ind. and Appl. Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431~441.
- (11) Kim, M., Lee, H. and Hong, S., 2018, "Experimental Determination of the Failure Surface for DP980 High-Strength Metal Sheets Considering Stress Triaxiality and Lode Angle," *The Int. J. Adv. Manufac. Tech.*, Published Online, <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2867-z>.
- (12) Dehgolan, F. R., Benzadi, M. and Sola, J. F., 2016, "Obtaining Constants of Johnson-Cook Material Model Using a Combined Experimental, Numerical Simulation and Optimization Method," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 10, No. 9, pp. 1622~1629.
- (13) LSTC, 2013, *LS-OPT 5.0 User's Manual*, Version 5.2.1, Livermore Software Technology Corporation, USA.
- (14) ABAQUS, 2012, *ABAQUS Manual*, Version 6.12, Dassault Systems, USA.
- (15) Wang, K., 2016, "Calibration of the Johnson-Cook Failure Parameters as the Chip Separation Criterion in the Modelling of the Orthogonal Metal Cutting Process," *M.S. Thesis*, McMaster University, Ontario, Canada.
- (16) Holmquist, J. T. and Johnson, R. G., 1991, "Determination of Constants and Comparison of Results for Various Constitutive Models," *Journal de Physique IV Colloque C3*, Vol. 1, pp. 853~860.
- (17) Zhang, Y., Outeiro, J. C. and Mabrouki, T., 2015, "On the Selection of Johnson-Cook Constitutive Model Parameters for Ti-6Al-4V using Three Types of Numerical Models of Orthogonal Cutting," *Procedia CIRP 31*, pp. 112~117.