

< 논문 >

차체용 강판의 온도에 따른 동적 구성방정식에 관한 연구 (II)

- 온도에 따른 동적 구성방정식 -

이희종* · 송정한* · 허 훈† · 박성호**
(2006년 7월 19일 접수, 2006년 12월 21일 심사완료)

Dynamic Constitutive Equations of Auto-body Steel Sheets with the Variation of Temperature (II)

- Flow Stress Constitutive Equation -

Hee-Jong Lee, Jung-Han Song, Hoon Huh and Sung-Ho Park

Key Words : Intermediate Strain Rate(중변형률속도), Strain Rate Sensitivity(변형률속도 민감도), Temperature Sensitivity(온도 민감도), Constitutive Equation(구성방정식)

Abstract

This paper is concerned with the empirical flow stress constitutive equation of steel sheets for an auto-body with the variation of temperature and strain rate. In order to represent the strain rate and temperature dependent behavior of the flow stress at the intermediate strain rates accurately, an empirical hardening equation is suggested by modifying the well-known Khan-Huang-Liang model. The temperature and strain rate dependent sensitivity of the flow stress at the intermediate strain rate is considered in the hardening equation by coupling the strain, the strain rate and the temperature. The hardening equation suggested gives good correlation with experimental results at various intermediate strain rates and temperatures. In order to verify the effectiveness and accuracy of the suggested model quantitatively, the standard deviation of the fitted result from the experimental one is compared with those of the other two well-known empirical constitutive models such as the Johnson-Cook and the Khan-Huang-Liang models. The comparison demonstrates that the suggested model gives relatively well description of experimental results at various strain rates and temperatures.

1. 서론

최근의 자동차 개발동향은 소비자의 요구에 호응하여 차체 안전도와 충돌 특성에 중점을 두고 있다. 뿐만 아니라, 자동차 배기가스 규제에 대응 및 연비향상을 목적으로 하는 차량 경량화가 필수적으로 대두되고 있다. 이러한 차량의 경량화는

충돌안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 한다. 이러한 경량화 및 충돌안전성을 동시에 만족시키기 위하여는 차체의 고속변형에 의한 동적 물성특성을 고려한 충돌해석을 바탕으로 차체 설계가 수행되어야 한다.⁽¹⁾ 이를 위하여 자동차의 작동온도 범위에서 차체용 강판의 정확한 물성치를 확보하여야 하며 추가적으로 소재의 동적 특성을 충돌해석에 정확하게 적용하기 위한 재료의 물성 구성방정식(constitutive equation)에 대한 연구가 필수적이다.

물성 구성방정식은 재료의 변형률, 변형률속도 및 온도에 따른 유동응력의 변화를 표현할 수 있어야 한다. 그러나 이를 모두 고려하여 재료거동을 완벽하게 나타낼 수 있는 수학적인 해는 찾기

* 한국과학기술원 기계공학과

** 포스코 자동차강재연구센터

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hhuh@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3222 FAX : (042)869-3210

어려우며 많은 연구들이 적절한 가정을 도입하여 재료의 소성영역에서 변형률속도, 온도에 대한 의존성에 초점을 맞추어서 연구를 진행하였다.^(2,3) 기존에 연구된 물성 구성방정식은 크게 전이이론에 기초한 물리적 구성방정식과 실험으로부터 얻은 결과를 적절한 응력-변형률 함수식으로 표현한 실험적 구성방정식으로 구분할 수 있다.

전이이론에 기초한 대표적인 물리적 구성방정식으로 Hoge-Mukherjee 모델,⁽⁴⁾ Zerilli-Armstrong 모델⁽⁵⁾ 등이 있다. 이러한 전이이론에 기초한 구성방정식은 유한요소 코드에 적용하기 어렵기 때문에 많은 경우에 있어서 실험적인 방법을 통하여 구한 구성방정식이 사용된다.

대표적인 실험적 구성방정식으로 Cowper-Symonds 모델,⁽⁶⁾ Johnson-Cook 모델,⁽⁷⁾ Khan-Huang-Liang 모델⁽⁸⁾ 등이 있다. 그러나 실험적 구성방정식은 특정 변형률속도 범위에서 성립하게 되므로 사용상에 많은 주의를 요하며, 실험을 통하여 검증된 변형률, 변형률속도, 온도 범위를 벗어날 경우 그 타당성에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다. 특히 대부분의 실험적 구성방정식은 1000 /sec 이상의 고변형률속도 구간에서 홉킨슨바 시험기(Hopkinson bar)를 이용하여 확보한 실험결과를 근사하여 제안하였기 때문에 차량 충돌 시 차체의 변형률속도 구간인 중변형률속도 (intermediate strain rate) 영역에서의 타당성에 대한 충분한 검토가 필요하다.

본 논문에서는 차체용 강판에 대하여 중변형률속도 영역에서 동적 인장실험을 수행하여 확보한 실험결과를 바탕으로 온도 및 변형률속도 변화에 따른 유동응력의 변화를 정확하게 근사할 수 있는 실험적 구성방정식을 새롭게 제안하였다. 우선 동적 실험결과와 비교하여 기존의 대표적 구성방정식인 Cowper-Symonds 모델, Johnson-Cook 모델, Khan-Huang-Liang 모델에 대하여 중변형률속도에서의 타당성을 검토하였으며, 이를 개선하기 위하여 Khan-Huang-Liang 모델을 수정하여 제안하였다. 제안된 모델을 이용하여 근사한 결과를 실험 결과 및 기존모델의 예측결과와 비교함으로써 제안된 구성방정식의 신뢰성을 검증하였다.

2. 기존의 물성 구성방정식 고찰

실험적 구성방정식은 재료 거동을 변형률 경화, 변형률속도 경화 및 열적 연화 효과의 함수로 표현하는 방법으로써 적용이 쉬어 많은 상용 유한요소 프로그램에 채택되어 있기 때문에 사용하기 편

리한 장점이 있으나, 그 타당성에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다. 본 장에서는 실험에 근거한 대표적 모델인 Cowper-Symonds 모델, Johnson-Cook 모델, Khan-Huang-Liang 모델에 대하여 중변형률속도 구간에서 차체용 강판인 SPRC45E의 고속인장실험결과를 기준으로 실험결과와 각 구성방정식 모델의 응력 예측값을 비교함으로써 중변형률속도에서 기존의 실험적 구성방정식의 타당성을 고찰하였다.

Cowper-Symonds 모델⁽⁶⁾은 식 (1)과 같이 표현되는 구성방정식으로 변형률 경화항과 변형률속도 경화항의 곱으로 표현되어 재료의 고속변형을 나타낼 수 있다.

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_0(\varepsilon) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (1)$$

여기서 $\sigma_0(\varepsilon)$ 는 정적 상태에서의 유효응력이고, $\dot{\varepsilon}$ 는 유효변형률속도이다. 그리고 C 와 p 는 각각 재료상수이다.

Johnson-Cook 모델⁽⁷⁾은 Ludwik 방정식을 기초로 하여 식 (2)와 같이 표현되며 T^* 를 식 (3)으로 정의하여 열적 연화를 나타낸다. 여기서 T_{room} 과 T_{melt} 는 실험온도와 시편재의 녹는점을 나타낸다.

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\varepsilon}^n][1 + C \ln \bar{\dot{\varepsilon}}][1 - T^{*m}] \quad (2)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (3)$$

Johnson-Cook 모델은 총 5개의 상수로 표현되며 실험적으로 A , B , n , C , m 의 변수를 결정한다. Johnson-Cook모델의 첫 번째 항의 A , B , n 은 재료의 변형률 경화(strain hardening)효과를 나타내며 두 번째 항은 변형률속도 경화(strain rate hardening)효과를 자연대수함수를 이용하여 표현한다. 여기서 C 는 재료의 변형률속도 민감도를 의미하며, 변형률속도가 1/sec인 경우에 대하여 정규화(normalize)를 하여 사용하게 된다. 세 번째 항의 m 은 열적 연화(thermal softening)효과를 각각 나타낸다.

Khan-Huang-Liang 모델⁽⁸⁾은 Johnson-Cook 모델과 동일하게 Ludwik 방정식을 기초로 하여 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\sigma = \left[A + B \left(1 - \frac{\ln \dot{\varepsilon}}{\ln D_0} \right)^n \varepsilon^{n_0} \right] e^{C \ln \dot{\varepsilon}} (1 - T^{*m}) \quad (4)$$

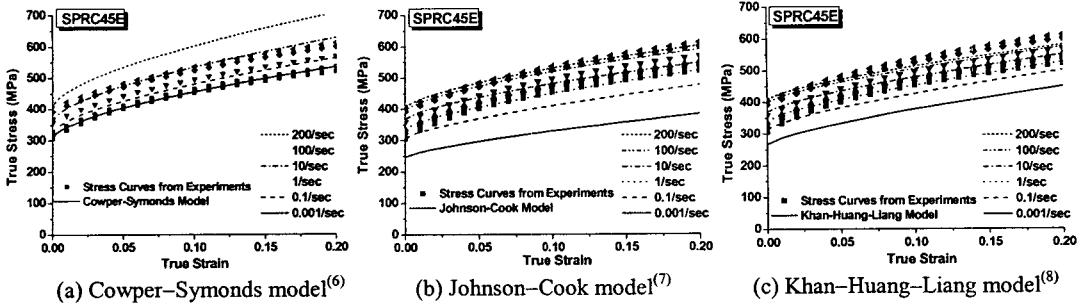


Fig. 1 Interpolation of the flow stress at room temperature using the several constitutive equation (SPRC45E)

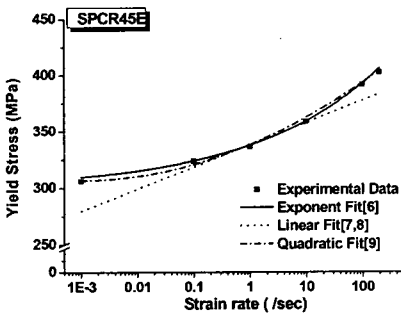


Fig. 2 Interpolation of strain rate sensitivity of yield stress using the several constitutive equation

총 6개의 상수로 표현되며 실험적으로 A, B, n_0, n_1, C, m 의 변수를 결정한다. 이 때 재료상수 n_1 의 값이 물리적으로 변형률속도 변화에 따른 가공 경화속도 변화를 나타내며 D_0' 는 최대 변형률속도로써 $10^6/\text{sec}$ 로 가정한다. 그리고 Johnson-Cook 모델과 유사하게 변형률속도 민감도를 변형률속도의 일차 자연대수함수로 근사한다.

Cowper-Symonds 모델, Johnson-Cook 모델, Khan-Huang-Liang 모델에 대하여 $-40^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C}, 200^\circ\text{C}$ 의 온도에서 차체용 강판 SPRC45E의 고속 인장실험 결과를 이용하여 각 모델의 계수를 결정하였다. Fig. 1에 상온에서의 실험결과와 각 모델을 통하여 근사한 유동응력곡선을 비교하여 도시하였다. 여기서 기호는 실험에서 얻어진 유동응력곡선을 나타내며 실선은 각 구성방정식 모델로 예측한 유동응력곡선을 의미한다.

Fig. 1(a)의 Cowper-Symonds 모델은 정적 하중선도에 변형률속도 경화항을 Fig. 2와 같이 변형률속도의 지수승으로 근사하기 때문에 항복응력은 정확하게 예측하지만 변형률이 증가할수록 유동응력을 실제보다 크게 예측한다. 그리고 주변온도를 고려할 수 없는 단점이 있다. Fig. 1(b)의 Johnson-Cook 모델은 변형과정에서 재료의 온도상승효과를 고려하여 변형률

이 증가할수록 유동응력이 감소하는 특성을 표현할 수 있는 장점이 있지만, 중변형률속도 영역에서 소성일에 의한 재료의 온도상승효과를 정확하게 정의할 수 없으며 Fig. 2와 같이 응력의 변형률속도의 민감도를 일차의 자연대수함수를 이용하여 근사하기 때문에 유동응력을 정확하게 예측할 수 없다. 이를 개선하기 위하여 Huh^(9,10) 등이 이차 또는 삼차함수의 형태로 변형률속도 민감도를 표현한 수정된 Johnson-Cook 모델을 제시하였다. Fig. 1(c)에 도시한 Khan-Huang-Liang 모델 또한 Fig. 2와 같이 변형률속도 민감도를 일차 자연대수함수로 근사하기 때문에 부정확한 응력을 예측한다. 그러나 변형률 경화항의 재료상수 n_1 을 정의하여 중변형률속도에서 부정확한 온도 상승을 고려하지 않고도 변형률속도가 증가할수록 유동응력의 기울기가 감소하는 현상을 표현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 온도변화에 따른 변형률속도 민감도의 변화를 표현하지 못하여 응력예측의 신뢰도가 떨어진다.

3. 새로운 물성 구성방정식의 제안

앞 장에서 유동응력의 비교를 통하여 기존의 실험적 구성방정식이 중변형률속도 영역에서 정확한 응력을 근사하지 못하는 사실을 확인하였다. 이는 대부분의 실험적 구성방정식이 $1000/\text{sec}$ 이상의 고변형률속도 구간에서 확보한 실험결과를 근사하여 제안하였기 때문이다. 차체용 강판에 대하여 중변형률속도 구간에서 온도에 따른 정확한 유동응력 곡선을 확보하더라도 기존의 구성방정식으로는 온도 및 변형률속도에 따른 유동응력의 변화를 정확하게 묘사할 수 없기 때문에 이를 충돌해석에 정확하게 적용할 수 없으며 해석의 신뢰도 또한 현저하게 저하된다.

따라서 본 논문에서는 차체용 강판에 대하여 중변형률속도 영역에서 동적 인장실험을 수행하여 확보한 실험결과를 바탕으로 온도 및 변형률속도

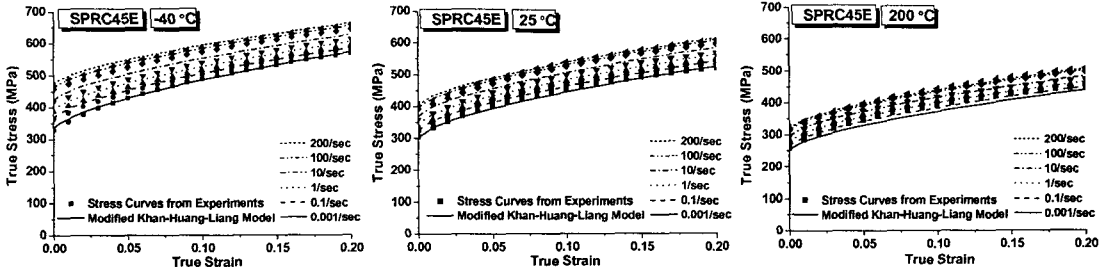


Fig. 3 Interpolation of the flow stress using the modified Khan-Huang-Liang model (SPRC45E)

변화에 따른 유동응력의 변화를 정확하게 근사할 수 있는 실험적 구성방정식을 새롭게 제안하였다.

앞 장에 설명한 기존의 실험적 구성방정식 중에서 Khan-Huang-Liang 모델은 중변형률속도에서 부정확한 온도 상승을 고려하지 않고도 변형률속도가 증가할수록 유동응력의 기울기가 감소하는 현상을 표현할 수 있는 장점이 있다. 하지만 변형률속도가 1/sec인 경우에 대하여 정규화(normalize)를 하여 사용하고 변형률속도 경화를 일차 자연대수 함수를 이용하여 근사하므로 저변형률 속도에서 신뢰성이 떨어지는 단점을 가지고 있기 때문에 본 논문에서는 이를 보완하고 수정하는 방향으로 새로운 물성 구성방정식에 접근하였다.

우선 다양한 변형률속도 영역을 포괄하고 저변형률속도에서의 신뢰성 저하를 해결하기 위하여 식 (5)과 같이 시험상의 가장 낮은 준정적변형률 속도인 $\dot{\epsilon}_{ref}$ 로 정규화한 $\dot{\epsilon}^*$ 를 정의하였다.

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ref}} \quad (5)$$

또한 Khan-Huang-Liang 모델에서는 변형률속도 민감도를 일차 자연대수함수를 이용하기 때문에 부정확한 응력을 예측하였다. 응력의 변형률 속도에 따른 변화는 Fig. 2와 같이 Cowper-Symonds 모델로 정확히 근사됨을 확인하였다. 따라서 Khan-Huang-Liang 모델의 변형률속도 민감도를 식 (6)과 같이 변형률속도에 대하여 자연대수함수의 지수승 형태로 수정하였다.

$$1 + C(\ln \dot{\epsilon}^*)^p \quad (6)$$

변형률속도에 따라 변하는 온도 민감도와 온도에 따라 달라지는 가공 경화성을 표현하기 위하여 재료상수 m 과 n_1 의 값을 각각 식 (7)과 식 (8)의 함수로 가정하였다.

$$m = m_1 + m_2 \cdot \ln \dot{\epsilon}^* \quad (7)$$

$$n_1 = q_1 \cdot (1 - T^{*q_2}) \quad (8)$$

이와 같이 본 논문에서는 기존의 Khan-Huang-Liang 모델을 수정하여 중변형률속도 영역에서 온도변화에 따른 유동응력의 변화를 예측하기 위한 수정된 Khan-Huang-Liang 모델을 식 (9)와 같이 정의하였다.

$$\sigma = \left[A + B \left(1 - \frac{\ln \dot{\epsilon}^*}{\ln D_0^p} \right)^{n_1} \right] \epsilon^{n_0} \left[1 + C(\ln \dot{\epsilon}^*)^p \right] (1 - T^{*q_2}) \quad (9)$$

where $n_1 = q_1 \cdot (1 - T^{*q_2})$, $m = m_1 + m_2 \cdot \ln \dot{\epsilon}^*$

위의 수정된 Khan-Huang-Liang 모델은 총 9개의 재료상수를 가지며 변형률 경화항과 변형률속도 경화항, 열적 연화항이 분리된 형태이고 변형률속도에 따라 변하는 온도 민감도와 온도에 따라 변하는 가공경화 정도를 연계하여 표현한 구성방정식이다. 제안된 모델의 효용성을 조사하기 위하여 차체용 강판인 SPRC45E에 대하여 수정된 Khan-Huang-Liang 모델을 이용하여 근사한 유동응력을 실험결과와 비교하였다. Fig. 3에 도시된 결과를 통하여 실험결과와 비교하여 본 논문에서 제안한 수정모델이 다양한 주변온도에 대하여 변형률속도 변화에 따른 유동응력의 변화를 효과적으로 근사하고 있음을 살펴볼 수 있다.

본 논문에서 제안한 모델에 대하여 각 재료상수의 물리적 의미를 고찰하면 변형률 경화항의 A 는 준정적변형률속도에서 항복응력을 나타내는 상수이며, B , n_0 는 준정적변형률속도의 가공경화 정도를 나타낸다. 변형률속도 경화항 C 와 p 는 재료의 변형률속도 민감도에 관련된 재료상수로서 변형률속도 민감도가 큰 재료일수록 C 와 p 의 값이 증가한다. q_1 은 변형률속도 증가에 따른 가공경화의 변

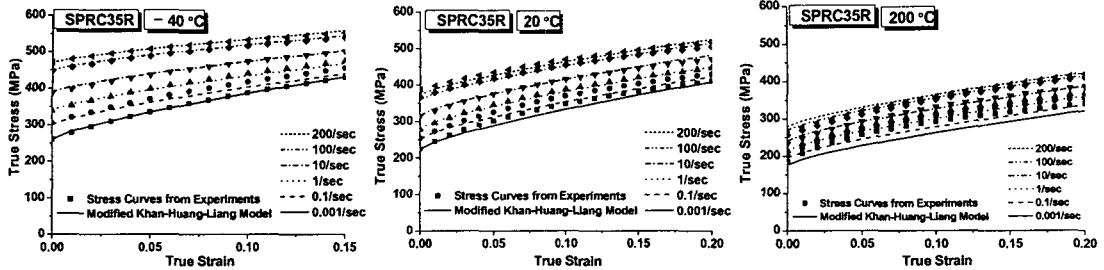


Fig. 4 Interpolation of the flow stress using the modified Khan-Huang-Liang model (SPRC35R)

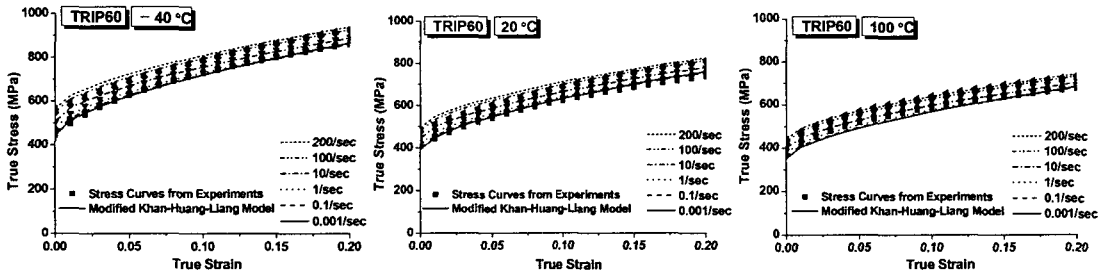


Fig. 5 Interpolation of the flow stress using the modified Khan-Huang-Liang model (TRIP60)

Table 1 Material constants of the modified Khan-Huang-Liang model.

Material	A	B	n_0	q_1	q_2	C	p	m_1	m_2
SPRC35R	260.53	709.09	0.75	1.41	0.25	0.0119	1.68	0.61	-0.0104
SPRC45E	330.35	691.18	0.65	0.69	0.27	0.0091	1.54	0.78	-0.0135
TRIP60	443.69	1135.3	0.61	0.40	0	0.0009	2.27	0.65	0

화 정도와 관련된 재료 상수로써 q_1 의 값이 클수록 변형률속도가 증가할 때 응력-변형률 곡선의 기울기가 보다 더 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고 온도가 증가할수록 변형률속도 증가에 따른 기울기 감소 경향이 적어져서 q_1 의 값이 감소하게 되는 현상을 q_2 를 통해 표현할 수 있다. 열적 연화항의 재료 상수 m 은 온도증가에 따른 유동응력의 감소를 표현하며 m 의 값이 클수록 열적 연화가 적음을 의미한다. 이때 m_1 의 값은 준정적변형률속도에서의 열적 연화 정도를 나타내며 음의 값을 가지는 m_2 를 통해 변형률속도가 증가할수록 열적 연화 정도가 증가하는 것을 표현한다.

4. 물성 구성방정식의 검증

앞 장에서 총 9개의 재료상수를 가지는 수정된 Khan-Huang-Liang 모델을 제안하고 차체용 강판인 SPRC45E에 대하여 제안된 모델로 예측한 결과와 실제 실험결과를 비교함으로써 본 논문에서

제안한 모델의 효용성을 살펴보았다. 본 장에서는 강판의 종류를 각각 변형률속도 민감도가 더 큰 SPRC35R과 변형률속도 민감도가 더 작은 TRIP60으로 달리한 경우에 예측 정도를 살펴봄으로써 수정된 모델의 범용성을 조사하였다. 그리고 실험결과와의 근사오차를 정의하고 기존의 Johnson-Cook 모델, Khan-Huang-Liang 모델과 근사오차를 비교함으로써 본 논문에서 제안한 모델의 신뢰성을 평가하였다.

SPRC35R과 TRIP60에 대하여 실험결과를 이용하여 수정된 Khan-Huang-Liang 모델의 재료 상수를 결정하고 실험결과와 수정된 Khan-Huang-Liang 모델을 통하여 근사한 결과를 비교하여 Fig. 4와 Fig. 5에 도시하였다. 각 재료에 대하여 온도가 증가할수록 오차가 조금씩 증가하는 경향은 있으나 전체 온도, 변형률속도 범위에서 비교적 정확하게 응력-변형률 선도의 경향성을 모사하고 있다. 각 강판에 대하여 수정된 Khan-Huang-Liang 모델의 재료상수를 Table 1에 명시하였다. TRIP60

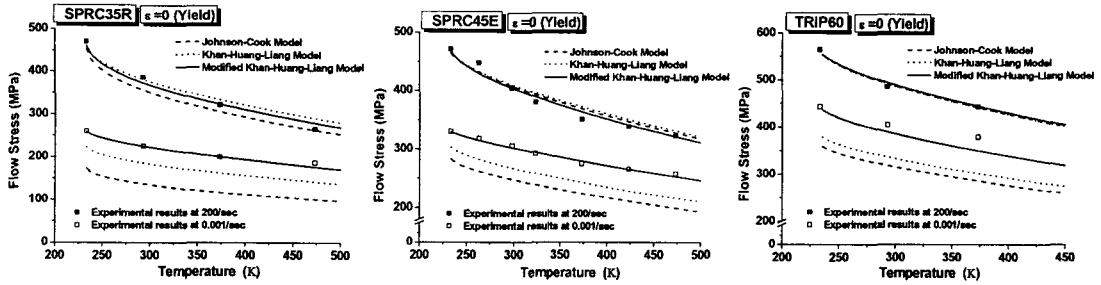


Fig. 6 Comparison of constitutive equations with experimental results at indicated strain and strain rate (yield stress)

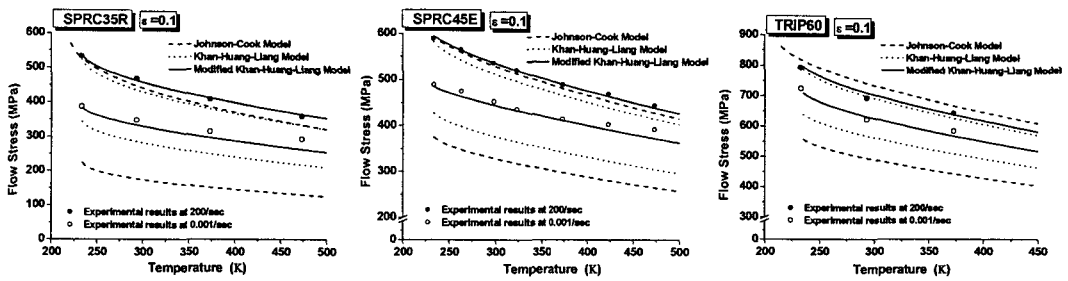


Fig. 7 Comparison of constitutive equations with experimental results at indicated strain and strain rate ($\epsilon_p=0.1$)

의 경우에 실험결과 변형률속도 민감도가 작은 재료로써 변형률속도에 따른 온도 민감도 변화가 적고 온도 변화에 따른 가공 경화 변화도 적으므로 A, B, n, q, C, p, m, l 의 7개의 재료상수만으로도 충분히 신뢰성 있는 응력예측을 나타낼 수 있다.

본 논문에서 제안한 모델의 신뢰성을 평가하기 위하여 중변형률속도 영역에서 온도변화에 따른 유동응력의 근사정도를 기존의 Johnson-Cook 모델, Khan-Huang-Liang 모델과 비교하였다. Fig. 6에 SPRC35R, SPRC45E 및 TRIP60에 대하여 특정 변형률속도에서 온도에 따른 항복응력 변화를 구성방정식별로 비교하여 도시하였다. 변형률속도가 200/sec인 경우에는 세가지 구성방정식 모델 모두 실험값을 잘 근사하는 것처럼 보이지만 변형률속도가 0.001/sec인 경우에는 Johnson-Cook 모델, Khan-Huang-Liang 모델은 실험값보다 낮은 응력을 예측한다. 본 논문에서 제안한 모델은 준정적 상태와 200/sec의 중변형률속도 모두에 대하여 온도에 따른 항복 응력의 변화를 가장 잘 근사하고 있다. 뿐만 아니라 Fig. 7에 도시한 바와 같이 변형률이 0.1일 경우의 유동응력 역시 수정된 Khan-Huang-Liang 모델은 실험값을 잘 예측하는 반면 Johnson-Cook 및 Khan-Huang-Liang 모델은 오히려 오차가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이상의 정성적 비교를 통해 본 논문에서 제안한 수

정된 Khan-Huang-Liang 모델이 실험 결과를 가장 잘 근사하는 것을 정성적으로 확인할 수 있다. 각 구성방정식의 신뢰도에 대한 보다 정확한 비교를 위하여 방법으로 Stevenson⁽¹¹⁾ 등이 Ludwick 식, Swift식과 같은 변형률 경화식(hardening equation)에 대하여 실험과의 오차를 평가하기 위하여 수행한 방법과 동일하게 표준오차(standard error)를 도입하여 비교하였다. 표준오차란 식 (10)으로 표현되는 표준편차 s 를 \sqrt{n} 으로 나누는 형태로 식 (11)과 같이 se 로 정의하였다.

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)} = \sqrt{s^2} \quad (10)$$

$$se = s / \sqrt{n} \quad (11)$$

이때 X_i 를 구성방정식에 의한 응력 예측값으로 설정하고 평균 \bar{X} 를 실험을 통해 얻어진 응력 값으로 표현할 때 식 (10)과 (11)을 통해 계산된 표준오차 값은 식 (12)와 같이 시험 결과에 대한 구성 방정식의 오차범위를 나타낸다.

$$\sigma_{\text{model}} = \sigma_{\text{experiment}} \pm 2 \times se \quad (12)$$

오차계산을 위한 샘플개수 n 은 최대 인장응력이 발생하는 변형률까지 0.01간격으로 설정하였다.

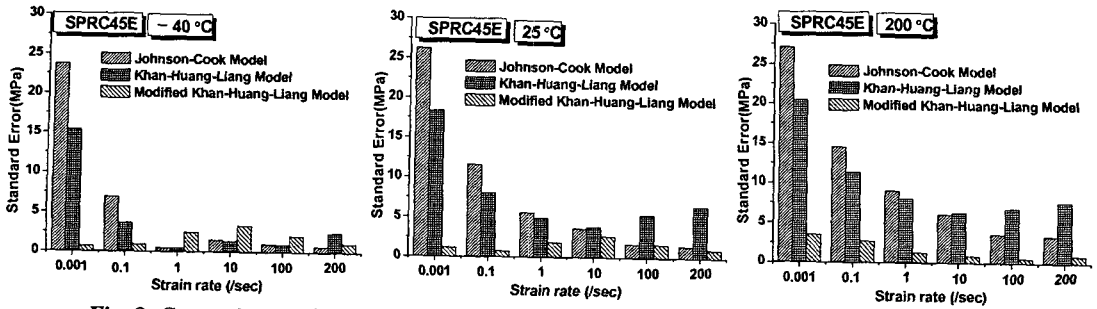


Fig. 8 Comparison of the standard error for SPRC45E with respect to the constitutive equations

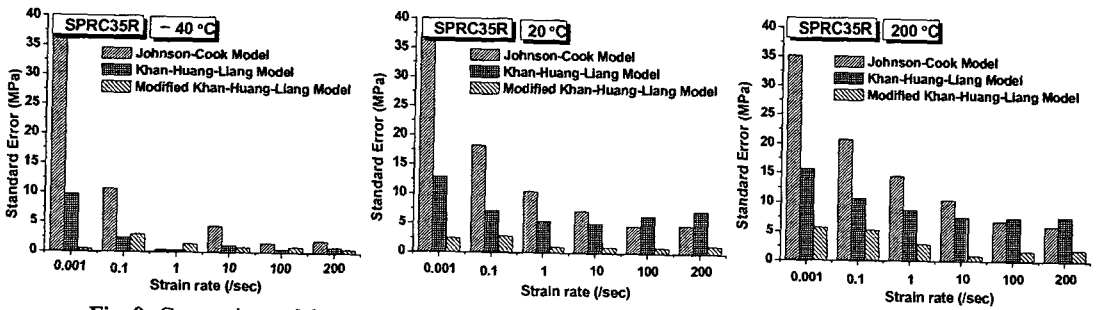


Fig. 9 Comparison of the standard error for SPRC35R with respect to the constitutive equations

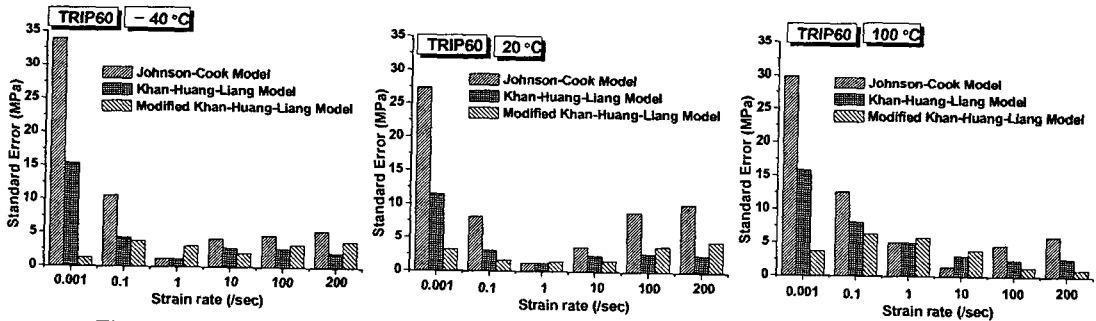


Fig. 10 Comparison of the standard error for TRIP60 with respect to the constitutive equations

Fig. 8에 SPRC45E 재료에 대해 각각의 온도, 변형률속도에서 Johnson-Cook 모델, Khan-Huang-Liang 모델 및 수정된 Khan-Huang-Liang 모델의 예측값과 실험값과의 표준오차를 도시하였다. Johnson-Cook 모델과 Khan-Huang-Liang 모델은 기준온도인 -40°C , $1/\text{sec}$ 이상의 변형률속도에서는 2MPa 내외의 표준오차로 비교적 정확한 응력예측을 보이지만 저변형률속도에서는 20 MPa까지 표준오차 값이 증가한다. 온도가 증가할수록 Johnson-Cook 모델은 최대 27 MPa까지 표준오차가 증가하며, Khan-Huang-Liang 모델은 20 MPa까지 표준오차가 증가한다. 그러나 본 논문에서 제

안한 모델은 전체 온도, 변형률속도 범위에서 최대 3 MPa 이내의 표준오차 값을 가지며 매우 정확하게 유동응력을 예측함을 살펴볼 수 있다. 이와 동일한 방법으로 SPRC35R, TRIP60 재료에 대하여 실험값과의 표준오차를 계산하고 그 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 도시하였다. SPRC35R의 경우에 SPRC45E의 경우보다 오차가 증가하여 수정된 Khan-Huang-Liang 모델의 경우 최대 6MPa까지 표준오차가 증가하지만 보이지만 Johnson-Cook 모델 및 Khan-Huang-Liang 모델의 오차와 비교하여 평균오차 2 MPa로 여전히 높은 신뢰도를 보인다. TRIP60의 경우 7개의 재료상수로 표현되는 수정

된 Khan-Huang-Liang 모델로 최대 6 MPa 내외의 신뢰도를 갖는 정확한 응력예측이 가능하다는 사실을 확인 할 수 있다. 이와 같은 각 구성방정식에 대한 표준오차 값의 정량적인 비교를 통하여 본 논문에서 제안한 수정된 Khan-Huang-Liang 모델이 중변형률속도 범위에서 주변온도 변화에 따른 유동응력을 상대적으로 정확하게 예측한다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 차체용 강판에 대하여 중변형률속도 영역에서 동적 인장실험을 수행하여 확보한 실험결과를 바탕으로 온도 및 변형률속도 변화에 따른 유동응력의 변화를 정확하게 근사할 수 있는 실험적 구성방정식을 새롭게 제안하였다. 기존의 Cowper-Symonds 모델, Johnson-Cook 모델, Khan-Huang-Liang 모델 등은 중변형률속도 구간에서 온도에 따른 재료의 거동을 정확히 표현하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 Khan-Huang-Liang 모델에서 변형률속도 민감도를 변형률속도에 대하여 자연대수함수의 지수승 형태로 수정하고, 변형률속도에 따라 변하는 온도 민감도와 온도에 따라 변하는 가공경화 정도를 고려하여 총 9개의 재료상수를 갖는 수정된 Khan-Huang-Liang 모델을 제시하였으며, 제안된 모델에서 각 재료상수의 물리적 의미를 고찰하였다.

대표적인 차체용 강판인 SPRC35R, SPRC45E, TRIP60에 대하여 시험결과를 기준으로 제안된 모델의 재료상수를 결정하고 실험결과를 근사하였다. 제안한 모델의 신뢰성을 비교·검증하기 위하여 시험결과와의 표준오차를 정의하고 기존의 Johnson-Cook 모델 및 Khan-Huang-Liang 모델과 제안된 물성 구성방정식의 신뢰도를 정량적으로 평가하였다. 본 논문에서 제안한 모델은 SPRC45E 강판에서는 전체 온도, 변형률속도 범위에서 최대 3 MPa이내의 표준오차 값 범위 내에서 정확하게 유동응력을 예측하였으며, SPRC35R과 TRIP60에서는 평균오차 2 MPa, 최대 6 MPa 이내의 표준오차 값을 보인다. 이상의 결과를 통하여 중변형률속도 범위에서 본 논문에서 제안하는 모델이 비교적 정확하게 온도변화에 따른 차체용 강판의 유동응력

을 예측한다는 사실을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Huh, H., Lim, J. H., Song, J. H., Lee, K. S., Lee, Y. W and Han, S. S., 2003, "Crashworthiness Assessment of Side Impact of an Auto-Body with 60 TRIP Steel for Side Member", *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 4, No.3, pp.149~156.
- (2) Meyers, M. A., 1994, *Dynamic Behavior of Materials*, John Wiley & Sons, New York.
- (3) Zukas J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B. and Curran, D. R., 1982, *Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, New York.
- (4) Hoge, K. G and Mukherjee, A. K., 1977, "Temperature and Strain Rate Dependence of the Flow Stress of Tantalum", *J. Mater. Sci.*, Vol. 12, No. 8, pp. 1666~1672.
- (5) Zerilli, F. J. and Armstrong, R. W., 1987, "Dislocation-mechanics-based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculation", *J. Appl. Phys.*, Vol. 61, No. 5, pp. 1816~1825.
- (6) Jones, N., 1989, *Structural Impact*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (7) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1985, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperatures and Pressures", *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 21, pp. 31~48.
- (8) Liang, R. and Khan, A. S., 1999, "A Critical Review of Experimental Results and Constitutive Models for BCC and FCC Metals over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures", *Int. J. Plasticity*, Vol. 15, pp. 963~980.
- (9) Kang, W. J., Cho, S. S., Huh, H and Chung, D. T., 1999, "Modified Johnson-Cook Model for Vehicle Body Crashworthiness Simulation", *Int. J. Vehicle Des.*, Vol. 21, No. 4/5, pp. 424~435.
- (10) Huh, H, Kang, W. J. and Han, S. S., 2002, "A Tension Split Hopkinson Bar for Investigating the Dynamic Behavior of Sheet Metals", *Exp. Mech.*, Vol. 42, No. 1, pp. 8~17.
- (11) Stevenson, R., 1982, "Inferring Microscopic Deformation Behavior from the Form of Constitutive Equation for Low-Carbon Steel and 5182-0 Aluminum", *Mechanical Testing for Deformation Model Development*, ASTM STP 765, R. W. Rohde and J. C. Swearingen, Eds., ASTM, pp.366~381.
- (12) Lim, J. H., Kim, S. B., Kim, J. S., Huh, H., Lim, J. D. and Park, S. H., 2005, "High Speed Tensile Test of Steel Sheets for an Auto-body at the Intermediate Strain Rate", *Transaction of KSAE*, Vol. 13, No. 2, pp. 127~134.