

마그네슘 판재를 위한 온도 의존형 C-H/V 구성 모델에 관한 연구

박종현[#] · 이종길¹ · 김현영²

The Temperature Dependent C-H/V Constitutive Modeling for Magnesium Alloy Sheet

J. H. Park, J. K. Lee, H. Y. Kim

(Received January 6, 2012 / Revised April 25, 2012 / Accepted May 21, 2012)

Abstract

The automotive and electronic industries have seriously considered the use of magnesium alloys because of their excellent properties such as strength to weight ratio, EMI shielding capability, etc. However, it is difficult to form magnesium alloys at room temperature because of the mechanical deformation related to twinning. Hence, magnesium alloys are normally formed at elevated temperatures. In this study, a temperature dependent constitutive model, the C-H/V model, for the magnesium alloy AZ31B sheet is proposed. A hardening law based on nonlinear kinematic and H/V (Hollomon/Voce) hardening model is used to properly characterize the Bauschinger effect and the stabilization of the flow stress. Material parameters were determined from a series of uni-axial cyclic experiments(C-T-C) with the temperature ranging between 150 and 250 °C. The developed models are fit to experimental data and a comparison is made.

Key Words : Magnesium Alloy, C-H/V Constitutive Model, Bauschinger Effect, Stabilization of Flow Stress

1. 서 론

마그네슘 합금 박판은 뛰어난 경량 특성 뿐만 아니라 높은 비강도, 우수한 용접성, 좋은 내식성, 진동흡수능, 높은 열 및 전기 전도성 그리고 탁월한 전자기장 차단 성능 등을 갖는다[1~3].

반면에 마그네슘 가공재는 압연, 압출 등과 같은 공정과정 중에 형성된 집합조직이 방향성을 가지는 쌍정(twinning)과 결부 되어 변형 이방성을 야기하므로 상온에서 낮은 가공성을 가진다. 그러므로 쌍정 효과가 약해지고 마그네슘 합금의 재결정 작용(dynamic recrystallizing) 발생 가능성이 낮은 150~250 °C 범위에서의 소성 변형을 기술할 수 있

는 구성 모델이 요구 되고 있다[1, 3, 10, 11].

마그네슘 판재는 인장과 압축거동이 비대칭적인 특징이 있으며, 박판성형 가공 중에는 인장·압축 하중이 반복적으로 부여되는 하중 변환이 수반되기 때문에, 구성식에서 바우싱거 효과(Bauschinger effect)가 적절히 고려되어야 한다[1, 15].

바우싱거 효과를 고려한 구성 모델은 Prager와 Ziegler에 의해 ‘동적 경화 이론’으로 기초 체계가 세워졌다[2]. 두 이론 모두 항복 곡면 중심의 이동 방향을 선형적인 경화율 상수를 이용하여 정의하였다.

이러한 동적 경화 모델은 많은 연구자 들에 의해 보다 일반화된 두 가지 차별적인 접근 방법으로 발전되었다.

1. 한국산업기술대학교 기계시스템공학과
2. 국립강원대학교 기계의용공학과
교신저자 : 한국산업기술대학교 기계시스템공학과 대학원,
E-mail: parkhere@kpu.ac.kr

그 하나는 Dafalias 와 Popov[4]가 최초로 제안한 ‘두 항복 곡면 모델’이며, 다른 하나는 ‘선형 동적 경화 모델’의 직접적인 일반화 형태인 ‘비선형 동적 경화 모델’로 Armstrong 과 Frederick[1, 2, 5]에 의해 제안 되어졌다. ‘비선형 동적 경화 모델’은 이 후 Chaboche 에 의해 발전되었다[6, 8].

한편, 마그네슘의 경화를 더 세밀하게 기술하게 위해서는 동적 경화 모델과 함께 등방 경화 모델을 사용하는 것이 필요하며, ‘Hollomon 모델’(power law), ‘Voce 모델’(Voce equation)을 비롯한 다양한 등방성 경화 모델이 제안 되고 있다[1, 10~14].

특히 Hollomon 이 제안한 멱경화 법칙(power law)은 다양한 금속의 등방성 경화모델을 기술하는데 널리 사용되어 왔다[1]. 하지만 마그네슘 평판 소재에 경우 200℃ 이상의 고온에서 가공 경화(working hardening)가 감소하는 듯이 보이기 때문에, ‘Hollomon 모델’(power law)은 재료의 소성 거동을 묘사하기에 한계가 있는 것으로 보인다. 이를 보완하기 위해 ‘Hollomon 모델’(power law)과 ‘Voce 모델’(Voce equation)을 결합한 형태의 H/V 모델을 사용한 연구가 Sung 등에 의해 철강재를 대상으로 수행된바 있다[1, 7].

본 연구에는 Chaboche 의 ‘비선형 동적 경화 모델’ 과 Sung[7] 등의 ‘H/V 등방 경화 모델’을 조합하여 마그네슘의 구성식 모델인 C-H/V 모델을 제안하였다. C-H/V 모델은 온도 의존형 파라미터의 선정을 통해 특정 온도 구간에서의 마그네슘 판재 거동을 표현할 수 있다.

한편, 제안된 모델의 타당성 검증을 위하여 온실에서 마그네슘 판재의 ‘압축-인장-압축’, ‘인장-압축-인장’ 거동 실험 데이터와의 비교·평가를 수행하였다[9].

2. 구성 모델링

구성 모델은 Hill 의 2 차 이방성 항복 조건식을 기본 바탕으로 하며 ‘비선형 동적 경화 모델’ 과 ‘등방성 경화 모델’을 반영한 형태로 구성 하였다. 구성식의 재료 상수들은(C, γ , K, σ_0) 온도의 함수로 가정하였다.

2.1 항복 조건 식과 비선형 동적 경화 모델

Hill 의 2 차 이방성 항복식은 다음 식 (1) 과 같이 표현될 수 있는데, α 와 σ_{eq} 는 각각 항복 곡면의 이동과 관련된 동적 경화 변수와 항복곡면의

크기 변화를 나타내는 등방성 경화 변수이다. Φ 는 소성 포텐셜(plastic potential) 함수이다.

$$f = \Phi - \bar{\sigma}^2 = \frac{1}{2} [(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha})^T \cdot \mathbf{P} \cdot (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha})] - \bar{\sigma}_{eq}^2(\epsilon_{eq}^p, \theta) \quad (1)$$

여기서 $\boldsymbol{\sigma}$, \mathbf{P} , β_{ij} 는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{Bmatrix}; \quad \boldsymbol{\alpha} = \begin{Bmatrix} \alpha_{xx} \\ \alpha_{yy} \\ \alpha_{zz} \end{Bmatrix};$$

$$\mathbf{P} = 2 \begin{Bmatrix} 1 & -\beta_{12} & 0 \\ -\beta_{12} & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{66} \end{Bmatrix}$$

$$\beta_{12} = \frac{R_0}{1+R_0}; \beta_{66} = \frac{(R_0 + R_{90})(1+2R_{45})}{R_{90}(1+R_0)}$$

$$; \beta_{22} = \beta_{12} + \beta_{23}; \beta_{23} = \frac{R_0}{R_{90}(1+R_0)}$$

한편, 본 연구에서는 상기와 같은 구성식의 구체적인 적용 및 검증에 있어서 이방성 항복 함수에 기초한 구성식의 특수한 경우로 등방성을 가정한 β_{ij} 값을 사용하였다. 소성 유동 법칙을 이용하여 표현하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$d\boldsymbol{\epsilon}^p = d\lambda \left(\frac{\partial \Phi}{\partial (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha})} \right) = d\lambda (\mathbf{P} \cdot (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha})) = d\lambda \boldsymbol{\alpha} \quad (2)$$

이 때 항복 곡면의 이동과 연관된 비선형 동적 경화 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\boldsymbol{\alpha} = C(\theta)d\boldsymbol{\epsilon}^p - \gamma(\theta)\boldsymbol{\alpha}d\bar{\epsilon}^p + \frac{1}{C(\theta)} \frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta} \boldsymbol{\alpha}d\theta \quad (3)$$

위 식에서 C 와 γ 는 동적 경화를 나타내는 재료 상수 이다.

앞선 식(2),(3)을 이용하면 미소 응력 증분은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(d\boldsymbol{\epsilon} - d\lambda \boldsymbol{\alpha}) \quad (4)$$

이 때 C 는 탄성 행렬이다.

2.2 등방성 경화 모델

등방성 경화 모델은 Hollomon 모델과 Voce 모델

의 선형 결합하여 아래와 같이 표현 된다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{eq} = \bar{\sigma}_{HV} = & \beta(\theta) \cdot [K(\theta) \cdot \bar{\epsilon}_p^n] \\ & + (1 - \beta(\theta)) \cdot [\sigma_0(\theta) \cdot (1 - A \cdot \exp(-B \cdot \bar{\epsilon}_p))] \end{aligned} \quad (5)$$

앞서 언급한 등방성 경화식에서 베타(β)값이 ‘1’ 이 되면 순수 Hollomon 모델형태가 되고 ‘0’ 일 때 순수 Voce 의 등방성 경화식이 된다.

등방성·동적 경화 상수는 온도의 영향을 고려한 함수 형태로 나타낼 수 있으며 Lee 등이 제안한 절대 온도 값에 따른 지수 형태[1]와 Zener-Hollomon 매개변수(Z 매개변수)의 함수 형태가 제안되었다[10~12]. Z 매개변수는 마그네슘의 동적 재결정 현상과 결정 크기의 연관성이 비교적 높은 330℃ 이상의 온도에서 주로 사용되었으므로 본 연구에서는 식 (6)~(7)에서와 같이 지수 함수의 형태로 구성하였다[1, 12~14].

$$K(\theta) = k_1 \cdot \exp(-k_2 \cdot \theta) \quad (6)$$

$$\sigma_0(\theta) = \sigma_1 \cdot \exp(-\sigma_2 \cdot \theta) \quad (7)$$

$$\gamma(\theta) = \gamma_0 + \gamma_1 \cdot \exp(\gamma_2 \cdot \theta) \quad (8)$$

$$C(\theta) = C_0 + C_1 \cdot \exp(C_2 \cdot \theta) \quad (9)$$

3. 일축 인장 시험과 상관 관계

3.1 AZ31B 마그네슘 평판의 재료 물성치

150~250℃ 의 온도 범위에서 수행된 단축 압축-인장-압축(C-T-C), 인장-압축-인장(T-C-T) 사이클 실험 결과 중 변형률 범위가 상대적으로 더 넓은 압축-인장-압축 실험 결과로부터 재료 물성 상수들을 결정하였다. Chaboche 등이 제안한 참고 문헌[2]를 고려해볼 때 비교적 쌍정 효과가 약한 온도영역에서는 선행되는 변형률 모드(prestrain mode)에 따른 재료 물성치 결정방법에 차별을 두지 않는 것이 적절할 것으로 판단된다.

이 때 재료 물성치의 결정은 최소자승법(least square method)에 기초한 곡선 맞춤(curve fitting) 과정에 의해 이루어 졌으며, 상용 소프트웨어인 MATLAB®이 사용되었다[16].

등온 조건에서 비선형 동적 경화 모델을 반영한 소성변형률과 응력의 관계를 나타내는 단축 실험식은 아래와 같이 인장식과 압축식으로 구분된다.

$$\bar{\sigma}_{ten} = \bar{\sigma}_{kin,ten} + \bar{\sigma}_{iso} \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_{comp} = \bar{\sigma}_{kin,comp} - \bar{\sigma}_{iso} \quad (11)$$

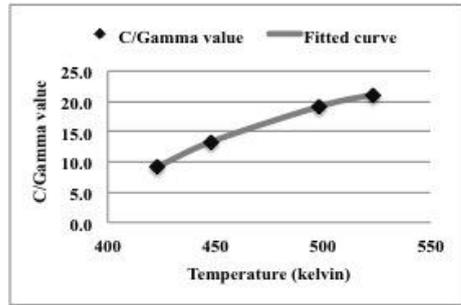


Fig. 1 Fitted values of ‘C/γ’ according to temperature

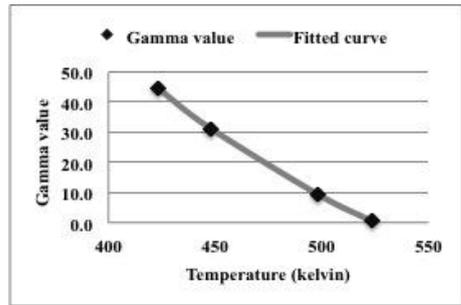


Fig. 2 Fitted values of ‘γ’ according to temperature

최소자승법에서 얻어지는 동적 경화 상수 C 값은 소성변형률 증분 방향을 따라 항복 곡면이 이동하는 정도는 나타낸다. 만약 γ 값이 0 이고 C 값이 양수면, 후방 응력이 전체 소성변형률 증가량에 따라 보다 자유롭게 변화하게 되며 이는 가공경화에서 동적 경화의 기여도가 최대가 되는 것을 의미한다. 또 다른 동적 경화 상수인 γ 값은 후방 응력 역방향으로 항복 곡면이 이동 량을 나타낸다. 만약에 C 와 γ 값이 0 이면 후방 응력은 일정하게 된다.

이러한 C 와 γ 는 150~250℃ 이하에서 아래 Fig. 1, 2 와 같이 온도 함수 형태로 나타낼 수 있으며 구체적인 함수 형태는 아래 식 (12), (13)과 같다.

상온에서 마그네슘 합금의 소성변형시 응력-변형률 관계는 Hollomon 모델(power law) 만으로 묘사하는데 어려움이 없어 보인다[15].

쌍정효과가 사라지는 약 150℃ 부터 재결정 작용이 일어나는 440℃ 까지는 Hollomon 모델과 같은 일반적인 경화식으로 소성 거동을 묘사할 수 있는 것으로 보이는 것으로 알려져 있다[1, 2, 10, 11].

$$C(\gamma)(\theta) = -1304.4 \cdot \exp(-0.01 \cdot \theta) + 28.1, 423 < \theta < 523K \quad (12)$$

$$\gamma(\theta) = 1080 \cdot \exp(-0.00555 \cdot \theta) - 58.65, 423 < \theta < 523K \quad (13)$$

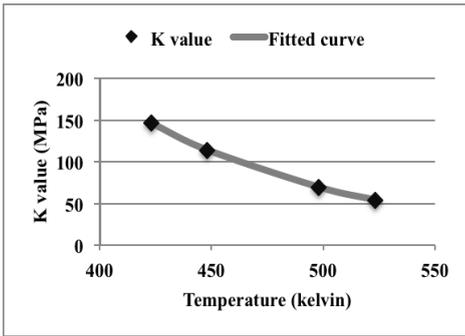


Fig. 3 Fitted values of 'K' according to temperature

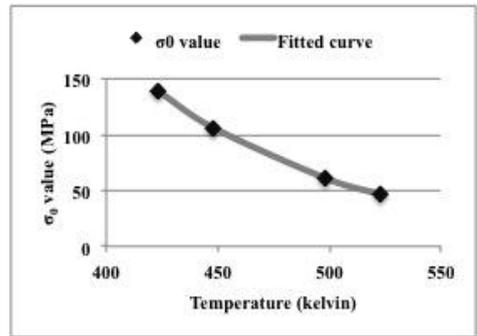


Fig. 4 Fitted values of 'σ₀' according to temperature

하지만 200℃ 이상에서의 Hollomon 모델 만으로 응력-변형률 곡선을 묘사할 경우 실험적인 결과와 오차가 증가하는 것으로 나타난다[1].

이러한 현상은 200℃ 이후 재료의 응력-변형률 곡선에서 응력 값이 특정한 값을 수렴(saturation)되는 경향을 Hollomon 모델의 재료상수 'n' 값 조정으로 표현하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다.

이 점을 고려하여 식(5) 와 같이 Hollomon 모델(power law)과 Voce 모델(saturation law)을 선형 결합한 H/V 모델을 사용하였다. 이 때 Hollomon 모델의 K 값과 Voce 모델의 σ₀ 값은 온도의 함수로 나타내어지며 나머지 n, A, B 는 일정한 값으로 구성된다. 200℃ 이후의 응력-변형률 재료 거동에서 응력값이 수렴하는 현상은 β 값을 조정하여 Voce 모델에 대한 의존도를 높이는 방법으로 표현하는 것이 합당한 것으로 판단된다[7].

그러므로 상온에서 440℃ 까지 마그네슘의 등방성 경화 거동은 Hollomon 모델과 Voce 모델의 선형결합 된 식으로 재료 거동을 묘사할 수 있다.

그 온도에 따라 그 의존도가 변화되며 상온에서 전적으로 Hollomon 식에 의존하고 그 의존도가 점차 감소하여 약 440℃에서는 순수 Voce 식에 의존하는 추세로 변화 될 것으로 판단된다.

다만 본 연구에서 주된 관심사인 150℃~250℃ 범위를 고려하여 150℃에서는 일반적인 등방성 경화 모델인 Hollomon 식에 전적으로 의존하고(β=1), 250℃에서는 Fig. 11, 12 에서와 같이 순수 Voce 식에 의존하는 것이 적절한 것으로 판단된다(β=0). 이는 I. Ulacia 등의 연구[17]의 실험결과에서도 확인할 수 있다.

150℃ 와 250℃ 사이 온도에서는 식(14) 과 같이 베타(β)의 값이 0 에서 1 사이의 값을 가지는 것으로 정의하였다. (0<β<1)

$$\beta = -0.01 \cdot \theta + 5.23 \quad (14)$$

이를 바탕으로 150~250℃ 범위에서의 등방성 경화 상수는 Fig. 3, 4 에서와 같이 나타내어 지며 구체적인 식은 (15)~(19) 와 같다.

$$K(\theta) = 10020 \cdot \exp(-0.01 \cdot \theta) \text{ (MPa)} \quad (15)$$

$$n = 0.022 : \text{constant} \quad (16)$$

$$\sigma_0(\theta) = 14651.2 \cdot \exp(-0.011 \cdot \theta) \text{ (MPa)} \quad (17)$$

$$A = 0.02 : \text{constant} \quad (18)$$

$$B = 11.5 : \text{constant} \quad (19)$$

3.2 단축 인장-압축 사이클 실험과 일치성
단축 인장-압축(인장-압축-인장, 압축-인장-압축) 실험으로 측정된 실험결과와 구성 모델의 비교를 통하여 그 적합성을 평가하였다.

측정된 데이터와 구성 모델을 비교 한 결과 150℃, 175℃ 의 압축-인장-압축 곡선, 인장-압축-인장 곡선은 Fig. 5~8 에서와 같이 Chaboche-Hollomon/Voce 모델(C-H/V model)이 재료 시험 결과와 좋은 일치를 보인다.

한편 Chaboche-Hollomon 모델(C-H model)도 또한 C-H/V 모델과 동일한 수준으로 좋은 일치를 보인다.

175℃의 압축-인장-압축 곡선, 인장-압축-인장 곡선은 Fig. 7, 8 에서와 같이 Chaboche-Hollomon/Voce 모델(C-H/V model)이 Chaboche-Hollomon 모델(C-H model) 보다 더 좋은 일치를 보인다.

아래 Fig. 9~12 에서와 같이 225℃, 250℃ 에서의 C-H/V 모델과 실험 데이터의 오차가 증가하는 것을 알 수 있다.

하지만 기존의 C-H 모델과 실험 결과의 오차 수준에 비해 개선 된 것을 Fig. 9~12 에 나타낸 바와 같이 잘 알 수 있다.

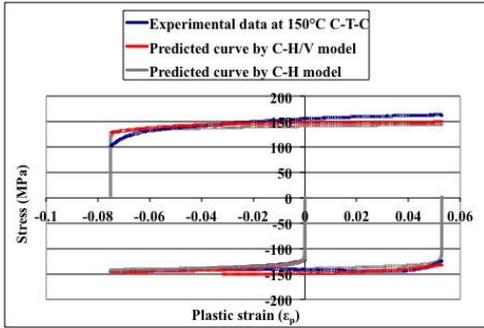


Fig. 5 Comparison with C-H/V model with C-T-C experimental data at 150°C

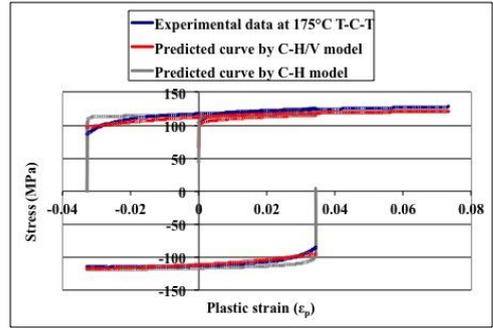


Fig. 8 Comparison with C-H/V model with T-C-T experimental data at 175°C

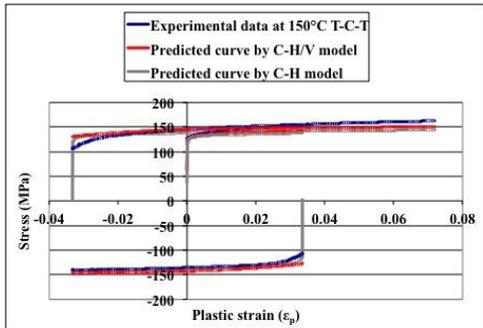


Fig. 6 Comparison with C-H/V model with T-C-T experimental data at 150°C

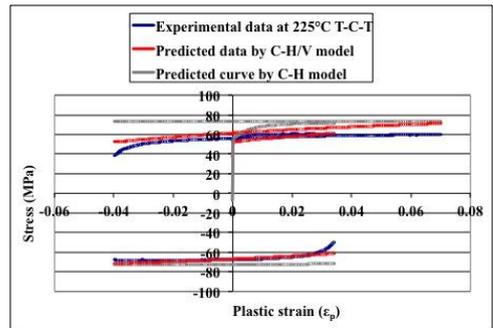


Fig. 9 Comparison with C-H/V model with T-C-T experimental data at 225°C

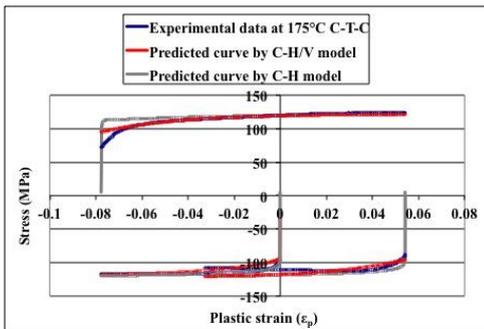


Fig. 7 Comparison with C-H/V model with C-T-C experimental data at 175°C

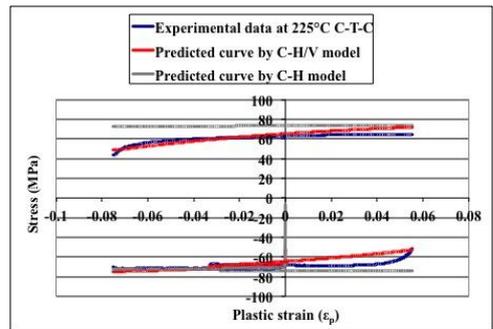


Fig.10 Comparison with C-H/V model with T-C-T experimental data at 225°C

이러한 오차 발생의 원인은 두 가지로 파악된다. 첫째는 재료 물성 상수를 추출할 때 단축 압축-인장-압축 실험 결과를 사용하였기 때문에 인장-압축-인장 재료 거동을 예측할 때 최대 25% 가량의 오차가(225°C T-C-T) 발생하였다. 다만 최대 75% 가량의 오차가(225°C T-C-T) 발생

한 Lee 등의[1] C-H 모델과 비교해 볼 때 200°C 이후에 나타나는 포화 소성 거동(saturation behavior of material in the plastic deformation)을 더 잘 따라감을 알 수 있다. 둘째는 250°C에서 ‘Hollomon 모델’의 경화 성분이 남아 있음에도 불구하고 전적으로 ‘Voce 모델’

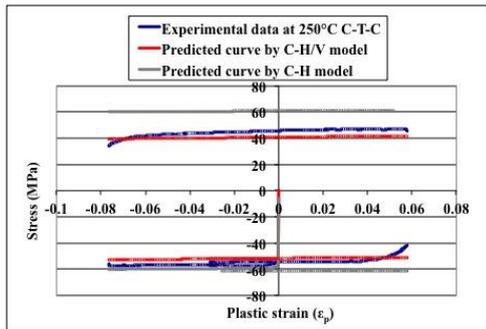


Fig.11 Comparison with C-H/V model with C-T-C experimental data at 250°C

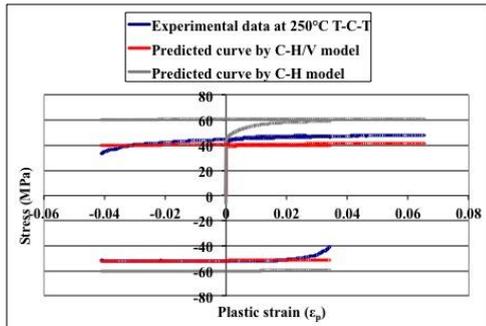


Fig.12 Comparison with C-H/V model with T-C-T experimental data at 250°C

에 의존하는 것으로 가정하면서($\beta=0$) 오차가 증가된 것으로 판단된다.

이러한 한계는 향후 상온으로부터 400°C 에 이르는 광범위한 온도 범위에서 베타(β)의 변화 과정에 관한 연구를 통해 보완될 것으로 예상된다.

4. 결론

본 논문에서는 150~250°C 에서의 마그네슘 합금의 동적경화와 등방성 경화를 고려한 ‘C-H/V 구성 모델’을 제안하고 그 유용성을 확인하였다.

(1) 기존에 사용된 ‘C-H 구성 모델’과 비교해 볼 때 ‘C-H/V 구성 모델’이 200~250°C에서 실험 결과와 더 좋은 일치를 보였다.

(2) 재료의 압축-인장-압축 실험으로 부터 얻어진 ‘재료 물성치’와 ‘C-H/V 모델’로 예측한 인장-압축-인장 소성 거동이 실험 결과를 잘 따라가는 것을 알 수 있었다.

향후 진행되는 연구에서는 보다 광범위한 온도

범위(상온~440°C)에 적용될 수 있는 구성식 연구가 필요하며, 온도 변화에 따른 베타(β)의 함수형태를 제안하는 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 WPM ‘수송기기용 초 경량 Mg 소재’ (과제번호 10037929) 연구비로 수행된 연구이며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. K. Lee, J. K. Lee, H. S. Kim, H. Y. Kim, 2010, AIP Conference Proceedings Vol. 1252, American Institute of Physics, Pohang, Korea, pp.1031~1038.
- [2] A. S. Khan, S. Huang, 1995, Continuum Theory of Plasticity, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 214~222.
- [3] S. H. Park, S. G. Hong, 2010, Effect of {10i2} Twinning Characteristics on the Deformation Behavior of Rolled AZ31 Mg Alloy, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 7, pp. 416~422.
- [4] Y. F. Dafalias, E. P. Popov, 1976, Plastic Internal Variables Formalism of Cyclic Plasticity, ASME, Trans. Ser. E-J. Appl. Mech. Vol. 43, No. 3, pp. 645~651.
- [5] C. O. Fredrick, P. J. Armstrong, 1966, Convergent Internal Stress and Steady Cyclic States of Stress, J. Strain Anal. Eng. Des., pp. 154~159.
- [6] J. L. Chaboche, 2008, A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories, Int. J. Plast., Vol. 24, No. 10, pp. 1642~1693.
- [7] J. H. Sung, J. H. Kim, R. H. Wagoner, 2010, A plastic constitutive equation incorporating strain, strain-rate, and temperature, Int. J. Plast., Vol. 26, No. 12, pp. 1016~1041.
- [8] M. G. Lee, R. H. Wagoner, J. K. Lee, K. Chung, H. Y. Kim, 2008, Constitutive Modeling for Anisotropic/Asymmetric Hardening Behavior of Magnesium Alloy Sheets, Int. J. Plast., Vol. 24, No. 4 pp. 545~582.
- [9] M. G. Lee, K. Piao, J. K. Lee, H. Y. Kim, R. H. Wagoner, 2007, AIP Conference Proceedings Vol. 908, American Institute of Physics, Porto, Portugal, pp. 667~672.

- [10] B. K. Raghunath, K. Raghukandan, R. Karthikeyan, K. Palanikumar, U.T.S. Pillai, R. Ashok Gandhi, 2011, Flow Stress Modeling of AZ91 Magnesium Alloys at Elevated Temperature, *J. Alloys Compd.*, Vol. 509, No. 15, pp. 4992~4998.
- [11] C. I. Chang, C. J. Lee, J. C. Huang, 2004, Relationship Between Grain Size and Zener-Holloman Parameter During Friction Stir Processing in AZ31 Mg Alloys, *Scr. Mater.*, Vol. 51, No. 6, pp. 509~514.
- [12] H. Takuda, H. Fujimoto, N. Hatta, 1998, Modeling on Flow Stress of Mg-Al-Zn Alloys at Elevated Temperatures, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 80, pp. 513~516
- [13] M. L. Ma, X. G. Li, Y. J. Li, L. Q. He, K. Zhang, X. W. Wang, L. F. Chen, 2011, Establishment and Application of Flow Stress Models of Mg-Y-MM-Zr Alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 21, No. 4, pp. 857~862.
- [14] W. F. Hosford, R. M. Caddell, M. Y. Huh, 1996, *Metal Forming : Mechanics and Metallurgy (handbook)*, PTR Prentice Hall & Hee Joong Dang, Seoul, Korea, pp 105~111.
- [15] M. G. Lee, R. H. Wagonor, J. K. Lee, K. Chung, H. Y. Kim, 2009, Constitutive Modeling for Anisotropic/Asymmetric Hardening Behavior of Magnesium Alloy Sheets : Application to Sheet Springback, *Int. J. Plast.*, Vol. 25, No. 1 , pp. 70~104.
- [16] MATLAB Version 7.12.0.635 (R2011a) user's manual, www.mathworks.com
- [17] I. Ulacia, N. V. Dudamell, F. Galvez, S. Yi, M. T. Perez-Prado, I. Hurtado, 2010, Mechanical Behavior and Microstructural Evolution of a Mg AZ31 Sheet at Dynamic Strain Rates, *Acta Mater.*, Vol. 58, No. 8, pp. 2988~2998.