



변형률속도 및 온도를 고려한 티타늄 합금 판재의 경화거동 모델링

채유진^{a,b}, 임성식^a, 김용배^a, 김민기^{a,*}

Modeling of Hardening Behavior for Titanium Alloy Sheet Considering Strain Rate and Temperature

Yujin Chae^{a,b}, Seongsik Lim^a, Yongbae Kim^a, Minki Kim^{a,*}^a Flexible Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^b School of Mechanical Engineering, Yonsei University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	7	October	2024
Revised	15	October	2024
Accepted	15	October	2024

Keywords:

Titanium alloy
Hardening behavior
Temperature
Strain rate effect

ABSTRACT

This paper discusses the modeling of hardening behavior for a representative titanium alloy sheet, Ti-6Al-4V (1 mm thick), considering the strain rate and temperature. To evaluate the material properties of Ti-6Al-4V, uniaxial tensile tests were performed along the rolling direction. The strain rate was set to 0.001 and 0.1/s, and the temperature was set to 25°C, 600°C, 900°C, and 1200°C. The material properties of Ti-6Al-4V were significantly different, depending on the strain rate and temperature. Several hardening laws were examined to select the best fitting model. The parameters of the selected model were then modeled as function of the temperature for each strain rate. A comparison of the predicted results from the model and the experimental data confirms that the hardening behavior is simulated by the model with high accuracy.

1. 서론

티타늄 합금은 다른 금속에 비해 우수한 기계적 특성을 가지고 있어, 자동차, 항공우주 산업과 같은 다양한 산업에서 많이 사용되고 있다^[1,2]. 티타늄 합금 중, 가장 널리 사용되는 소재는 Ti-6Al-4V($\alpha+\beta$ type)로, 하중방향에 따라 이방성이 나타나며 온도와 변형률속도에 따라 다른 복잡한 경화 거동을 보인다^[3,4]. 부품 설계 단계에서 주로 시뮬레이션을 이용하여 소재의 거동을 예측하고 안전성 검사를 수행한다. 정확한 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서는 재료의 신뢰도 높은 물성 데이터가 필요하므로 재료 물성 특성화의 중요성이 증대된다^[5]. 또한, 티타늄 합금은 상온에서 성형성이 제한적이고 주로 고온에서 성형하기 때문에 부품을 성형하는 데 있어, 고온에서의 티타늄 합금 재료 물성 확보는 필수적이다^[6]. 이에 따

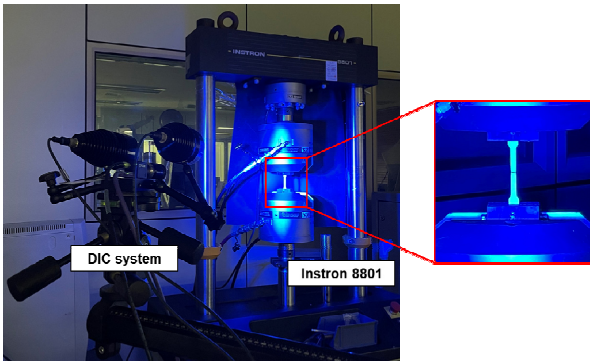
라 티타늄 합금 소재의 경화거동 및 항복합수 등 물성특성화에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다^[7-9].

소재의 온도 및 변형률 속도를 고려한 경화거동을 모사하기 위해서는 주로 Johnson-Cook 모델^[10]을 이용한다. Johnson-Cook 모델로 정적 및 상온에서의 데이터로부터 고온과 고속의 경화거동을 모사할 수 있으나 속도와 온도의 한계가 존재하고 경화식의 각 매개변수가 유동응력에 독립적인 영향을 미치지 때문에 복잡한 경화거동을 보이는 티타늄 합금의 거동을 예측하는 데 어려움이 있다^[11].

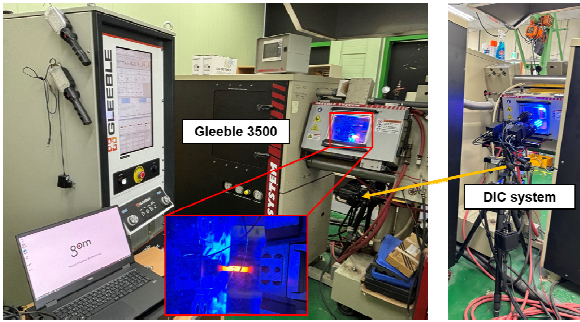
본 연구에서는 변형률 속도와 온도가 Ti-6Al-4V 소재의 경화거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 단축 인장시험을 수행하였다. 또한, Ti-6Al-4V 소재의 경화 거동을 모사하기 위하여 가장 적합한 경화식 결정 과정을 서술하였으며, 변형률속도 및 온도에 따른

* Corresponding author. Tel.: +82-32-850-0335

E-mail address: mkim@kitech.re.kr (Minki Kim).



(a)



(b)

Fig. 1 Experimental set-up at: (a) room temperature; (b) high temperature

경화식의 변수 모델링 과정을 통하여 경화거동을 모사하였다.

2. 인장시험을 통한 소재의 물성평가

본 연구에서는 여러 변형률속도 및 온도에 대한 Ti-6Al-4V 소재(두께 1 mm)의 물성평가를 위해 단축 인장시험을 수행하였다. Fig. 1은 단축 인장시험을 위한 장비 세팅을 나타내었으며, 광학센서 기반으로 변형을 측정할 수 있는 디지털 이미지 상관기법(digital image correlation, DIC) 시스템 ARAMIS를 이용하였다. 상온에서는 Fig. 1(a)에서 나타난 만능재료시험장비 Instron 8801을 사용하였으며, 고온에서는 Fig. 1(b)에 나타난 고온 시험이 가능한 Gleeble 3500 장비를 사용하여 시험을 수행하였다.

변형률 속도는 0.001/s와 0.1/s로 설정하였으며, 온도에 따른 상변화로 발생하는 물성거동을 분석하기 위해 온도는 Ti-6Al-4V 소재의 상변화가 일어나는 온도인 약 900°C 근처 온도 600, 900, 1200°C로 설정하여 판재의 압연방향(rolling direction, RD)에 대해 시험을 수행하였다.

변형률속도에 따른 대표적인 공칭 응력-변형률(engineering stress-strain) 선도를 온도별로 Fig. 2에 나타내었다. 또한, DIC 기법을 이용하여 측정된 각 변형률에 대한 분포를 Fig. 3에 도시하였다. 상온에 비해 고온(900°C)에서 소재의 파단 변형률이 약 6배

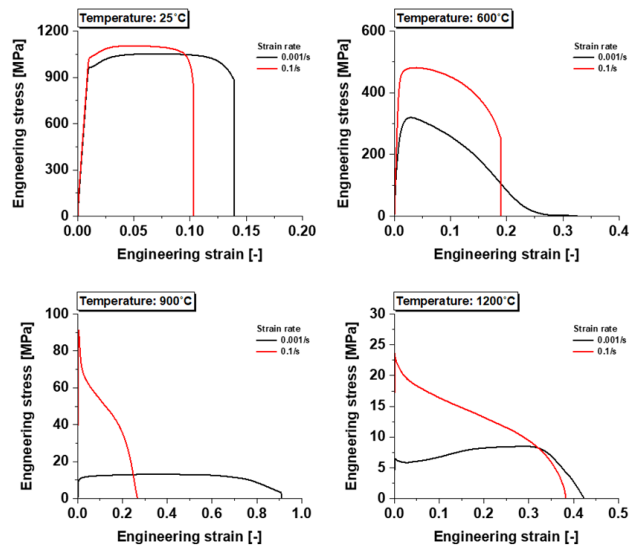
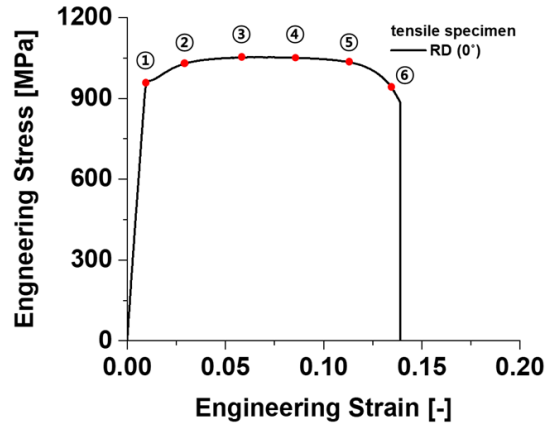
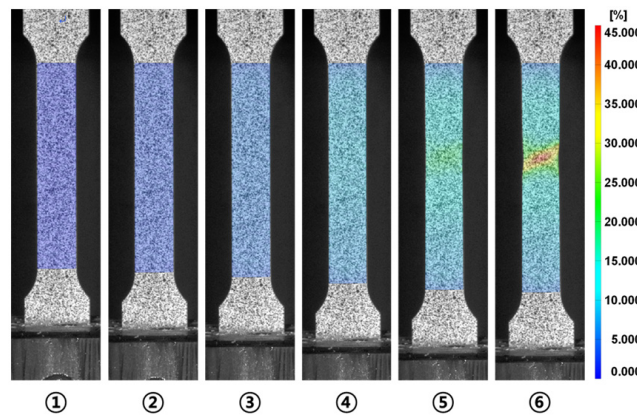


Fig. 2 Stress-strain relation regarding strain rate and temperature



(a) Engineering stress-strain curve



(b) Strain distribution captured by DIC

Fig. 3 Evaluation of the deformation behavior of Ti-6Al-4V (RD, 0.001/s)

증가하였으며 응력이 낮아지는 것을 확인하였다. 또한, 변형률속도가 증가할수록 응력의 크기가 증가하며 파단 변형률이 낮아지는 경향을 보였다.

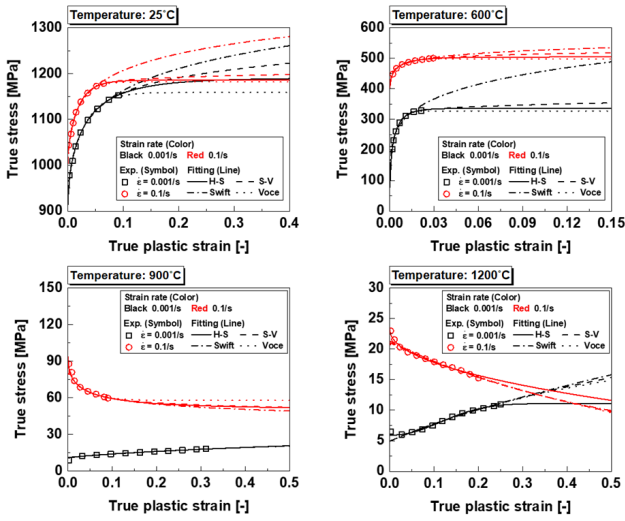


Fig. 4 Predicted results based on the hardening laws regarding temperature and strain rate

소재의 상변화가 일어나는 900°C 이상의 온도에서는 900°C 이하의 온도에 대한 경화거동과 다른 양상을 보였으며, 변형률속도에 따라 소재의 거동이 민감하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 상온에서는 변형률이 증가함에 따라 응력이 증가하는 일반적인 경화거동을 보이나 고온에서는 응력이 감소하는 경향을 보이는 특징이 있다. 이러한 특이거동을 모델링하기 위해서 기존의 널리 이용되는 경화식들의 유효성을 검토하여야 한다.

3. 경화거동 모델링

3.1 경화식 선정

부품 설계를 위한 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 경화거동 예측이 요구되고 이에 따라 복잡한 거동을 보이는 티타늄 합금의 변형률속도 및 온도를 고려한 거동을 묘사할 수 있는 경화모델이 필요한 실정이다.

유효 응력(σ)과 유효 소성변형률(ϵ_p)의 관계를 나타내는 경화거동을 예측하기 위한 대표적인 Swift, Voce, mixed Swift-Voce 그리고 modified Hockett-Sherby 경화식을 이용하여 변형률속도 및 온도에 따른 Ti-6Al-4V의 경화거동을 Fig. 4와 같이 예측하였다. 위의 경화식은 각각 식 (1)-(4)와 같이 정의된다^[12-14]. 각 경화식에 대한 변수($K, \epsilon_0, n, A, B, C, \alpha$) 값은 Table 1과 2에 나열하였다.

$$\sigma_{Swift} = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n \quad (1)$$

$$\sigma_{Voce} = A + B(1 - e^{-C\epsilon_p}) \quad (2)$$

$$\sigma_{S-V} = \alpha \sigma_{Swift}(\epsilon_p) + (1 - \alpha) \sigma_{Voce}(\epsilon_p) \quad (3)$$

Table 1 Hardening parameters of the Swift and the Voce model

Strain rate [s ⁻¹]	Temperature [°C]	K	ϵ_0	n	A	B	C	α
0.001	25	1330.192	0.002	0.059	965.498	193.429	33.172	0.622
	600	684.822	0.0001	0.178	142.881	185.068	241.133	0.163
	900	24.687	0.115	0.376	11.065	13.549	2.255	0.990
	1200	22.003	0.097	0.641	4.933	15.835	1.982	0.500
0.1	25	1332.613	0.001	0.043	1032.063	149.742	53.535	0.163
	600	575.014	0.0001	0.038	428.307	69.763	162.837	0.556
	900	45.230	0.002	-0.119	79.624	-21.914	24.215	0.650
	1200	193.911	1.942	-3.329	20.774	-24.226	1.239	0.500

Table 2 Hardening parameters of the modified Hockett-Sherby model

Strain rate [s ⁻¹]	Temperature [°C]	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
0.001	25	1190.347	266.125	9.522	0.657	0.010
	600	336.595	258.401	49.152	0.671	0.010
	900	74.917	64.508	0.281	0.706	0.009
	1200	11.104	5.181	58.199	2.162	-0.017
0.1	25	1185.514	160.039	36.354	0.902	0.010
	600	504.243	100.754	24.099	0.592	0.000
	900	50.599	-41.594	4.886	0.495	-0.001
	1200	-156.721	-179.923	0.093	0.486	-0.003

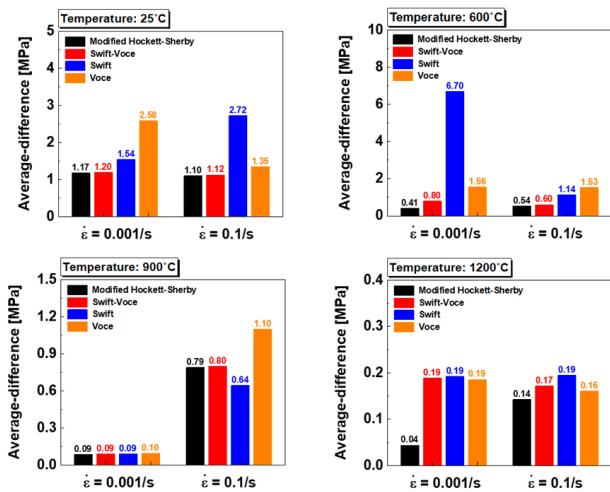


Fig. 5 Difference between experimental and predicted results by hardening laws

$$\sigma_{H-S} = C_1 - C_2 \exp(-C_3 \epsilon_p^{C_4}) + C_5 \epsilon_p \quad (4)$$

$$D_\epsilon = \frac{1}{n} \sum |\bar{\sigma}_{\text{exp}} - \bar{\sigma}_{\text{pred}}| \quad (5)$$

Ti-6Al-4V 소재의 경화거동을 가장 잘 예측하는 경화식을 선정하기 위해 식 (5)에 따라 실험결과와 예측결과의 차이를 계산하여 온도별로 각 변형률 속도 및 모델에 따른 그래프를 Fig. 5에 도시하였다. 모든 온도 및 변형률 속도 조건에서 modified Hockett-Sherby 경화식으로 예측한 결과와 실제 시험결과 값의 차이가 최소 0.04 MPa에서 최대 1.17 MPa로 작게 나타나, 가장 유사하게 묘사하는 것을 확인하였다. 따라서 modified Hockett-Sherby 경화식을 Ti-6Al-4V 소재의 경화거동을 묘사하기 위한 가장 적절한 경화식으로 선정하였다.

3.2 경화식 매개변수 모델링

상온의 데이터로부터 Ti-6Al-4V 소재의 고온에 대한 경화거동을 예측하고자 modified Hockett-Sherby 경화식의 각 매개변수를 온도에 대한 식으로 수정하여 식 (6)과 같이 나타내었다. 변형률 속도와 온도에 따른 경화식 매개변수의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 각 매개변수에 대한 경향 분석을 통하여 온도에 대한 각 매개변수 값을 잘 예측하기 위해 C_1, C_2, C_3 는 3차 다항식, C_4, C_5 는 지수함수로 모델링하였다. Fig. 2의 온도 및 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도와 같이 넥킹(necking) 이후 응력이 낮아지는 다른 데이터들에 비해, 변형률 속도 0.001/s, 온도 1200°C의 물성거동의 경우 변형률이 증가함에 따라 응력이 감소하다 증가하는 경향을 보인다. 이러한 특징을 묘사하기 위하여 변형률 속도 0.001/s에서 C_4 와 C_5 매개변수 경향이 온도 1200°C에서 급격한 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 반면, 0.1/s에 대해서는 완만한 변화양상을 보이므로 식 (6)과 같이 각 변형률 속도에 대한 서로 다른 식으로 모델링하였다. Fig. 6의 실선은 식 (6)으로 예측된 결과이며 심볼의 실험데이터를 잘 예측하는 것을 확인하였다. 변형률 속도 및 온도에 따른 각 변수 값은 Table 3에 명시하였다.

$$\sigma = C_1(T) - C_2(T) \exp(-C_3(T) \epsilon_p^{C_4(T)}) + C_5(T) \epsilon_p \quad (6)$$

$$\text{Where, } C_1, C_2, C_3(T) = aT^3 + bT^2 + cT + d$$

$$\text{Strain rate } \begin{cases} 0.001 \text{ s}^{-1} : C_4, C_5(T) = a \exp(-\frac{T}{b}) + c \\ 0.1 \text{ s}^{-1} : C_4, C_5(T) = a - bc^T \end{cases}$$

3.3 경화거동 모델링 검증

개발한 모델의 성능을 평가하기 위하여 기존에 널리 이용되는

Table 3 Parameters for the T dependent modified Hockett-Sherby model

Strain rate [s ⁻¹]	Temperature [°C]	a	b	c	d
0.001	C_1	1223.900	-1.733	0.0002	3.067E-07
	C_2	235.000	1.137	-0.003	1.214E-06
	C_3	-5.000	0.65	-0.001	7.270E-07
	C_4	0.662	1.456E-05	-103.961	-
	C_5	0.010	-8.465E-12	-54.795	-
0.1	C_1	1192.300	-0.097	-0.003	1.498E-06
	C_2	149.606	0.378	-0.001	3.764E-07
	C_3	34.326	0.072	-0.0002	1.086E-07
	C_4	0.428	-0.498	0.998	-
	C_5	-0.004	-0.015	0.998	-

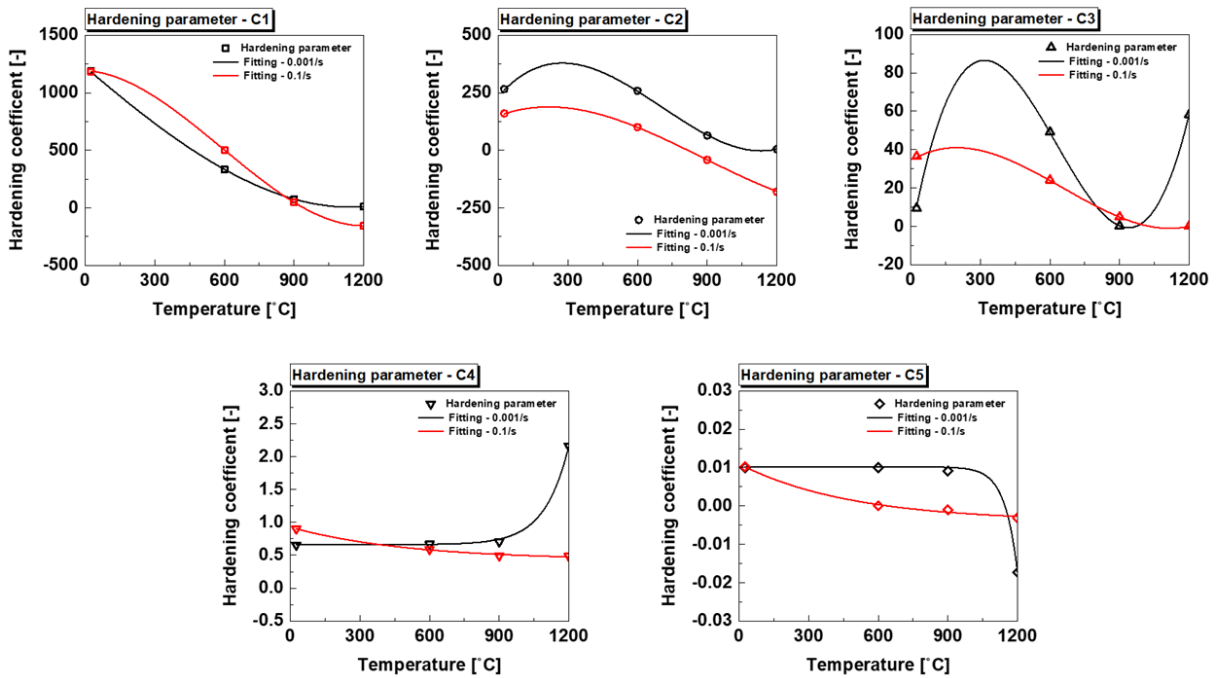


Fig. 6 Predicted parameters based on the T dependent modified H-S model regarding temperature and strain rate

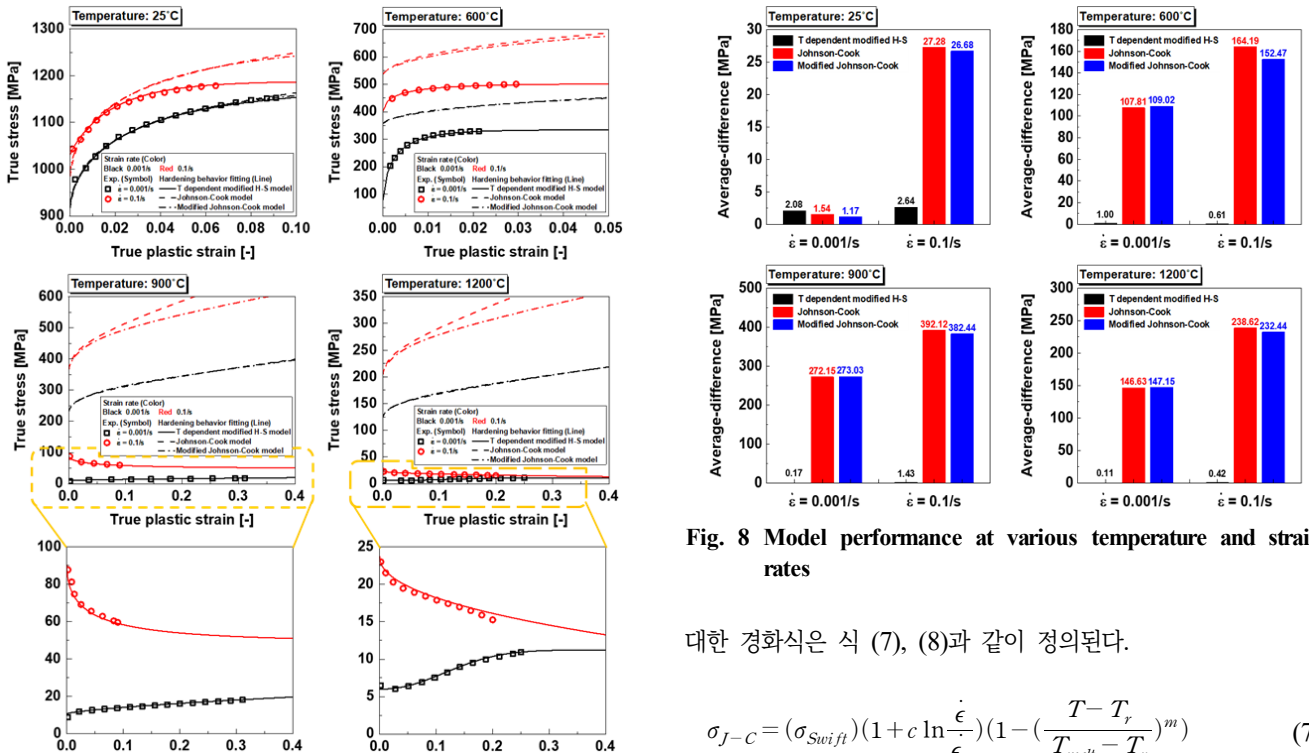


Fig. 7 Predicted results based on the T dependent modified Hockett-Sherby hardening laws regarding temperature and strain rates

Johnson-Cook 모델, 그리고 변형률경화 항을 수정한 modified Hockett-Sherby를 이용한 modified Johnson-Cook 모델을 이용하여 경화거동을 예측한 결과와 시험결과를 비교하였으며, 이에

Fig. 8 Model performance at various temperature and strain rates

대한 경화식은 식 (7), (8)과 같이 정의된다.

$$\sigma_{J-C} = (\sigma_{Swift})(1 + c \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0})(1 - (\frac{T - T_r}{T_{melt} - T_r})^m) \quad (7)$$

$$\sigma_{J-C} = (\sigma_{H-S})(1 + c \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0})(1 - (\frac{T - T_r}{T_{melt} - T_r})^m) \quad (8)$$

기존 Johnson-Cook 모델의 첫 번째 항인 변형률경화 항은 Swift 식을 이용하나 3.1절의 결과와 같이 Hockett-Sherby 식이

티타늄 합금에 더 적합하기 때문에 변형률경화 항을 수정하였다. 각 모델을 이용하여 예측한 경화거동 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 기존에 널리 이용되는 Johnson-Cook 모델의 경우 상온에서는 실험값을 유사하게 예측하지만 고온 데이터의 경우 잘 예측하지 못하였다. 또한, Johnson-Cook 모델은 상온에서의 변형률경화 양상을 기반으로 예측하기 때문에 온도 및 변형률속도에 따라 복잡한 물성거동을 갖는 Ti-6Al-4V 소재의 경화거동을 정확하게 예측하지 못했다. 마찬가지로의 이유로, 변형률경화 항을 Hockett-Sherby로 수정한 modified Johnson-Cook 모델 또한 고온에서의 실험값을 잘 모사하지 못 하였다. 그에 반해, 개발된 모델인 온도 의존 modified Hockett-Sherby 식은 모든 조건에서 실험값을 유사하게 예측하였다. 식 (5)에 따라 실험결과와 예측결과의 차이를 계산하여 온도별로 각 변형률속도 및 모델에 따른 그래프를 Fig. 8에 도시하였고 수정된 경화식인 식 (6)을 사용하였을 때, 값의 차이가 최소 0.11 MPa에서 최대 2.44 MPa로 가장 작게 나타나는 것으로 나타났다. 이를 통해 모델링 된 식이 다양한 변형률속도 및 온도에 따른 Ti-6Al-4V 소재의 경화거동을 가장 정확하게 예측함을 검증하였다.

4. 결론

유한요소 시뮬레이션을 이용하여 부품의 성형성을 평가하기 위해서는 소재의 경화거동을 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 티타늄 합금 소재는 변형률속도 및 온도에 따라 복잡한 경화거동을 보인다. 이로 인해 기존의 널리 이용되는 경화식으로는 경화거동을 정확히 예측할 수 없으므로 새로운 경화 모델이 필요하다.

본 연구에서는 변형률속도 (0.001/s, 0.1/s) 및 온도 (25°C, 60°C, 900°C, 1200°C)에 따른 Ti-6Al-4V 경화거동에 대한 경향을 분석하고 이를 고려한 경화식을 모델링하여 경화거동에 대한 실제 실험 결과와 예측 결과를 비교하였다. Ti-6Al-4V 소재는 변형률속도 및 온도에 따라 소재의 경화거동이 매우 상이하고 복잡하므로 modified Hockett-Sherby와 같은 자유도 높은 경화식이 필요하다. 또한, 온도 및 변형률속도에 대한 매개변수 모델링을 통하여 실험값을 잘 모사할 수 있다. 이러한 방법은 복잡한 경화거동을 갖는 소재를 대상으로 확장 적용할 수 있으며 더 정확한 시뮬레이션 결과를 얻기 위한 기초 물성 확보에 널리 이용될 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 한국생산기술연구원 내부연구과제(과제번호: KITECH UR-24-0008)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Pushp, P., Dasharath, S. M., Arati, C., 2022, Classification and Applications of Titanium and Its Alloys, *Materials Today: Proceedings*, 54:part 2 537-542, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.008>.
- [2] Williams, J. C., Boyer, R. R., 2020, Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components, *Metals*, 10:6 705, <https://doi.org/10.3390/met10060705>.
- [3] Xiao, J., Li, D. S., Li, X. Q., Deng, T. S., 2012, Constitutive Modeling and Microstructure Change of Ti-6Al-4V during the Hot Tensile Deformation, *J. Alloy. Compd.*, 541 346-352, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.048>.
- [4] Kim, M., Lee, H., Park, N., 2022, Evaluation of Deformation for Titanium Alloy Sheet in Single Point Incremental Forming Based on Asymmetric Yield Function, *Int. J. Mater. Form.*, 15 66, <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01712-5>.
- [5] Desai, C. S., 2015, Constitutive Modeling of Materials and Contacts using the Disturbed State Concept: Part 1 – Background and Analysis, *Comput. Struct.*, 146 214-233, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.07.018>.
- [6] Li, X., Guo, G., Xiao, J., Song, N., Li, D., 2014, Constitutive Modeling and the Effects of Strain Rate and Temperature on the Formability of Ti-6Al-4V Alloy Sheet, *Mater. Des.*, 55 325-334, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.069>.
- [7] Chen, G., Ren, C., Qin, X., Li, J., 2015, Temperature Dependent Work Hardening in Ti-6Al-4V Alloy over Large Temperature and Strain Rate Ranges: Experiments and Constitutive Modeling, *Mater. Des.*, 83 598-610, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.048>.
- [8] Hou, X., Liu, Z., Wang, B., Lv, W., Liang, X., Hua, Y., 2018, Stress-Strain Curves and Modified Material Constitutive Model for Ti-6Al-4V over the Wide Ranges of Strain Rate and Temperature, *Materials*, 11:6 938, <https://doi.org/10.3390/ma11060938>.
- [9] Cai, J., Wang, K., Zhai, P., Li, F., Yang, J., 2015, A Modified Johnson-Cook Constitutive Equation to Predict Hot Deformation Behavior of Ti-6Al-4V Alloy, *J. Mater. Eng. Perform.*, 24 32-44, <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1243-x>.
- [10] Deb, S., Muraleedharan, A., Immanuel, R. J., Panigrahi, S. K., Racineux, G., Marya, S., 2022, Establishing Flow Stress Behaviour of Ti-6Al-4V Alloy and Development of Constitutive Models using Johnson-Cook Method and Artificial Neural

Network for Quasi-Static and Dynamic Loading, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 119 103338, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103338>.

- [11] Wang, Y., Zhang, C., Yang, Y., Wang, Y., Zhao, G., Chen, L., 2020, The Identification of Improved Johnson-Cook Constitutive Model in a Wide Range of Temperature and Its Application in Predicting FLCs of Al-Mg-Li Sheet, *J. Mater. Res. Technol.*, 9:3 3782-3795, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.005>.
- [12] Swift, H. W., 1952, Plastic Instability under Plane Stress, *J. Mech. Phys. Solids*, 1:1 1-18, [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(52\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0022-5096(52)90002-1).
- [13] Voce, E., 1948, The Relationship between Stress and Strain for Homogeneous Deformation, *J. Inst. Met.*, 74 537-562.
- [14] Kim, M., Gu, J., Kim, H., 2022, Strain Rates-Dependent Hardening Behavior of Weld Metal in Laser Welded Blanks with GEN3 AHSS, *NUMISHEET 2022: Proceedings of the 12th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes*, 627-634, https://doi.org/10.1007/978-3-031-06212-4_57.



Yujin Chae

Researcher in Korea Institute of Industrial Technology and Graduate Student in the School of Mechanical Engineering, Yonsei University.

Her research interest is Material Testing & Modeling.

E-mail: cyj253@kitech.re.kr



Seongsik Lim

Principal Researcher (Ph. D.) in Korea Institute of Industrial Technology.

His research interest is Metal Forming.

E-mail: sslim@kitech.re.kr



Yongbae Kim

Researcher (Ph. D) in Korea Institute of Industrial Technology.

His research interest is Metal Forming.

E-mail: yb_kim@kitech.re.kr



Minki Kim

Senior Researcher (Ph. D.) in Korea Institute of Industrial Technology.

His research interest is Plasticity, Material Testing & Modeling, Experimental Mechanics.

E-mail: mkim@kitech.re.kr