

금속소재의 고변형률 영역 유동응력선도 평가

이상곤^{1,#} · 이인규² · 이성윤² · 이성민³ · 정명식¹

Evaluation of Flow Stress of Metal up to High Strain

S. K. Lee, I. K. Lee, S. Y. Lee, S. M. Lee, M. S. Jeong

(Received September 23, 2020 / Revised November 11, 2020 / Accepted November 12, 2020)

Abstract

The flow stress curve is usually determined via uniaxial tensile or simple compression test. However, the flow stress curve up to high strain cannot be obtained using these two tests. This study presents a simple method for obtaining the flow stress curve up to high strain via FE analysis, a simple compression test, and an indentation test. In order to draw the flow stress curve up to high strain, the indentation test was carried out with the pre-strained specimen using the simple compression test. The flow stress curve of Al6110 was evaluated up to high strain using the proposed method, and the result was compared with the flow stress curve of the uniaxial tensile test of the initial material.

Key Words: Flow Stress Curve, High Strain, FE analysis, Compression Test, Indentation Test

1. 서론

유동응력선도(flow stress curve)는 유효변형률(true strain)과 유동응력의 관계를 나타낸 선도로 금속소재의 가공량에 따른 가공경화(work hardening) 양상을 나타낸다[1]. 또한, 유동응력선도는 소성가공 시 소재의 기계적 물성 및 성형성 평가를 위한 중요한 데이터이다. 최근 성형공정 해석 및 설계를 위해 유한요소해석(finite element analysis)이 활발하게 활용되고 있으며[2~4], 유동응력선도는 유한요소해석을 위한 중요한 입력 데이터로 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 정확한 유동응력선도 확보 및 적용이 매우 중요하다[5].

일반적으로 단조(forging), 압출(extrusion), 압연(rolling), 선선(wire drawing) 등 냉간 성형공정의 경우 많은 변형률로 1.0 이상의 높은 변형률이 발생하는 경우가 많다[6~8].

냉간 성형공정해석을 위한 유동응력선도는 일반적으로 단축인장시험(uniaxial tensile test) 혹은 압축시험(compression test)을 통해 평가된다[9,10]. 그러나, 단축인장시험의 경우 고변형률 영역 도달전에 넥킹(necking) 및 파단(fracture) 발생으로 일반적으로 0.2 이하의 변형률까지만 데이터 확보가 가능하다. 또한, 압축시험의 경우 금형과 소재 사이의 마찰에 의한 베럴링(barreling)으로 인하여 고변형률 영역까지의 유동응력선도 확보가 곤란한 단점이 있다[11].

지금까지 고변형률 영역까지의 유동응력선도 확보를 위해 몇몇 연구들이 수행되었다. 기존 연구들에서는 다단 선선공정[12], 혹은 전방 압출공정[11] 등을 통해 pre-strain을 부가한 소재를 이용하여 인장 혹은 압축시험을 가공하여 고변형률 영역의 유동응력선도를 평가하였다. Joen 등은 넥킹발생 후 인장시험 결과와 유한요소해석 결과의 차이를 축차적으로 줄이면서 유동응력 선도를 평가하였다[13].

이러한 기존 연구들은 pre-strain 부가를 위한 성형공정이 까다로울 뿐만 아니라 pre-strain의 분포 또한

1. 한국생산기술연구원 기계소재부품연구그룹, 수석연구원
2. 한국생산기술연구원 기계소재부품연구그룹, 선임연구원
3. 한국생산기술연구원 기계소재부품연구그룹, 연구원
Corresponding Author : Mechanical Components and Materials R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: sklee@kitech.re.kr
ORCID : 0000-0003-4901-8132

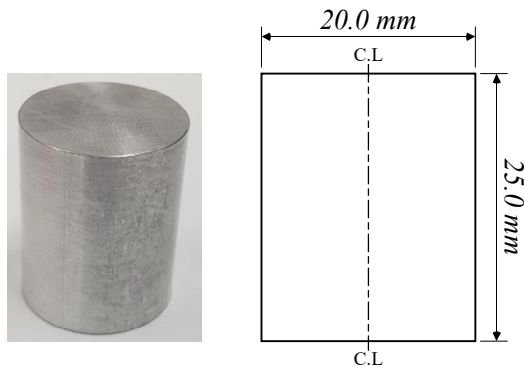


Fig. 1 Test specimen and dimension (unit: mm)



Fig. 2 Specimen of compressive test

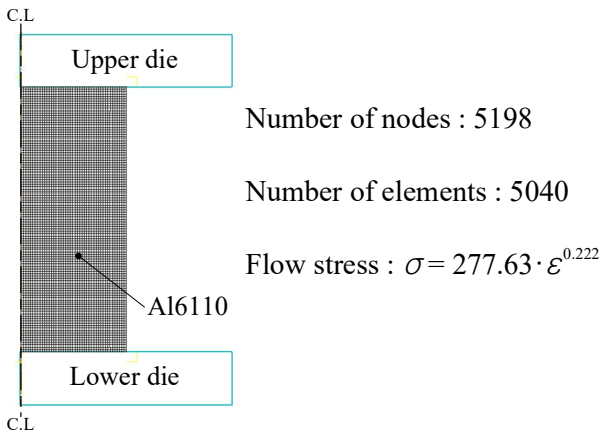


Fig. 3 Initial analysis model

불균일하기 때문에 고변형률 영역의 유동응력선도 확보에 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 단순 압축시험, 유한요소 해석, 그리고 압입시험(indentation test)을 이용해 고변형률 영역까지의 유동응력선도를 보다 효율적으로 확보할 수 있는 방법을 제안하였다. 이를 위해 먼저, 유한요소해석과 압축시험을 수행하여 압축된 시편의 위치별 변형률 분포를 평가하였다. 이후, 압축된 시편에 축적된 pre-strain 위치 별 유동응력을 압입시험을 이용하여 평가하였다. 이렇게 확보된 유

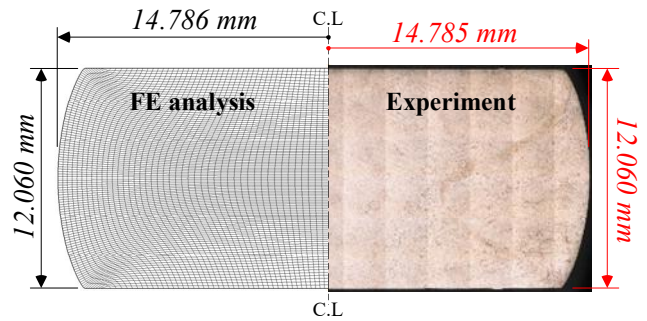


Fig. 4 Deformed shape of specimen

동응력선도들을 이용하여 고변형률 영역까지의 유동응력선도를 확보하였다. 제안된 방법을 적용하여 Al6110 에 대한 고변형률 영역까지의 유동응력을 평가하였으며, 그 결과를 초기 소재에 대해 단축인장 시험으로 확보한 유동응력선도와 비교하였다.

2. 압축시험 및 유한요소해석

2.1 압축시험

본 연구에서는 pre-strain이 부가된 시편을 확보하기 위하여 단순 압축시험을 실시하였다. 적용소재는 Al6110이며, Fig. 1에 압축시편 사진 및 치수를 나타내었다.

압축시험은 만능재료시험기(Zwick: Z250N)로 수행되었으며, 압축율은 52.0%로 시험 후 시편의 최종높이는 12.0 mm이다. Fig. 2에 압축시험 후 시편을 나타내었다.

2.2 압축시험 유한요소해석

압축된 시편 내부에 축적된 변형률 분포를 평가하기 위하여 압축시험에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 DEFOMR-2D로 수행되었으며, 압축소재는 강소성체(rigid plastic body)로 설정하였다. Fig. 3에 초기해석모델을 나타내었다. 초기소재 유동응력은 3장에서 기술할 압입시험을 통해 평가하였다. 마찰상수(m)는 Fig. 4에서 보듯이 유한요소해석과 압축시험 후의 시편 높이와 베럴링(barreling)부 반경을 비교하여 동일한 치수를 나타내는 0.3을 적용하였다.

Fig. 5에 해석결과 유효변형률 분포를 나타내었다. 해석결과에서 알 수 있듯이 변형률은 압축된 시편의 중심부가 가장 높으며, 상/하 금형과 가까워질수록 낮아짐을 알 수 있다. 압축율 52.0%에서 변형률

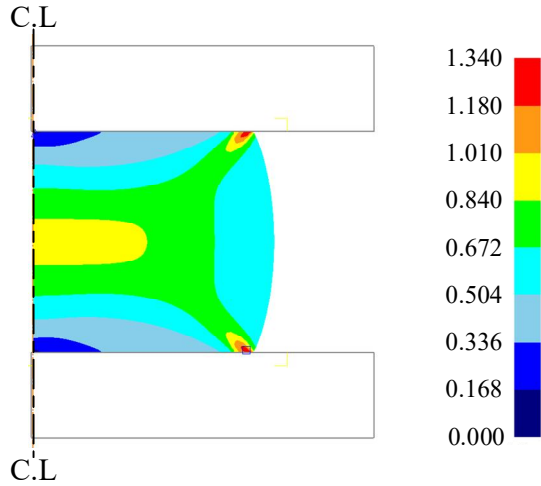


Fig. 5 Distribution of true strain

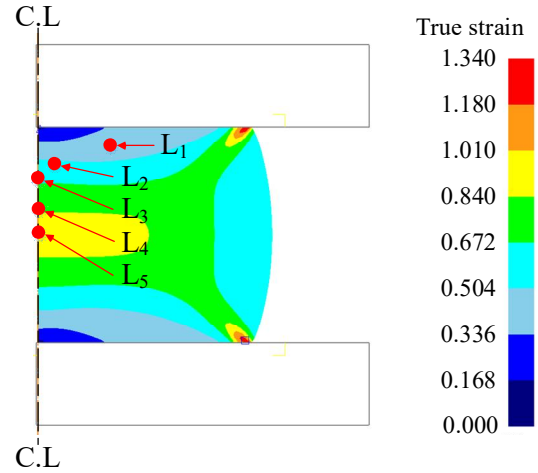


Fig. 7 Selected locations for indentation test

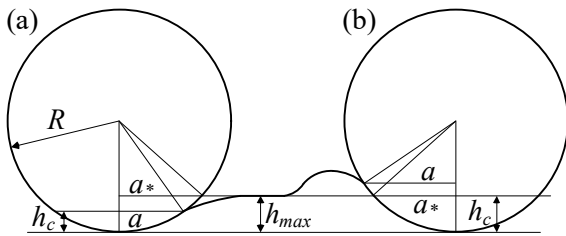


Fig. 6 The (a) sink-in and (b) pile-up phenomena[15]

은 1.010~0.255 사이의 값을 나타내었다. 따라서, 본 압축시험을 통해 약 1.000까지의 pre-strain을 고려할 수 있음을 알 수 있다.

3. 연속압입시험

3.1 압입시험 기초이론

연속압입시험은 기존 경도시험법을 보다 개선시켜 압입하중에 따른 압입깊이를 연속적으로 측정하여 소재의 기계적 물성을 평가하는 방법이다. Kwon 등은 이러한 연속압입시험을 적용하여 얻어진 하중-변위 곡선과 압입자 하부 응력장 해석, 그리고 접촉역학 해석을 기초로 일축인장물성, 잔류응력 및 파괴인성 등을 평가하였다[14~18]. 본 연구에서는 Kwon 등이 제안한 연속압입시험을 이용하여 압축된 시편의 유동응력선도를 평가하였다. 압입시험 시 압입자 주변에 소성변형에 의해 Fig. 6과 같은 변형이 발생하게 된다[15].

단축인장시험을 통해 소성변형 영역에서의 유동응력선도는 일반적으로 다음의 Hollomon 식으로 표현된다[1].

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (1)$$

여기서, σ 는 진응력, K 는 응력계수, ε 은 진변형률이다. 구형압입자를 이용한 압입시험에서 변형률은 다음의 식(2)로 나타낼 수 있다[15].

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} \quad (2)$$

여기서, R 은 압입자 반경, a 는 접촉반경, α 는 적합화상수이다[15].

또한, 압입자 하부의 응력은 다음의 식(3)으로 결정된다[15].

$$\sigma = \frac{P_m}{\varphi} \quad (3)$$

여기서, P_m 은 압입하중과 접촉면적의 비인 평균압력이고, φ 는 일정한 값의 상수비로 압입시험을 통해 결정되는 값이다.

3.2 압입시험을 이용한 유동응력 평가

본 연구에서는 압축시험을 통해 확보한 pre-strain이 축적된 시편과 연속압입시험을 이용하여 유동응력선도를 평가하였다. 압입시험 위치는 유한요소해석결과를 토대로 설정하였으며, Fig. 7과 Table 1에 압입시험 위치와 각 위치별 pre-strain(ε_{pre})을 나타내었다. Table 1에서 보듯이 pre-strain은 0.436에서 1.000

Table 1 Pre-strain at each location

Location	Pre-strain (ϵ_{Pre})
L ₁	0.436
L ₂	0.589
L ₃	0.720
L ₄	0.944
L ₅	1.000

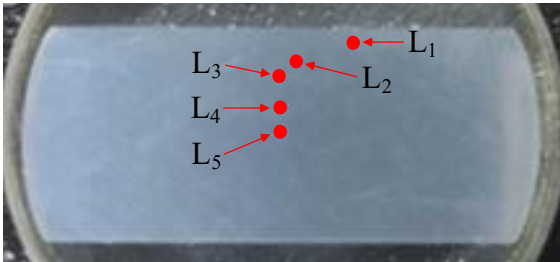


Fig. 8 Measuring points in the compressed specimen

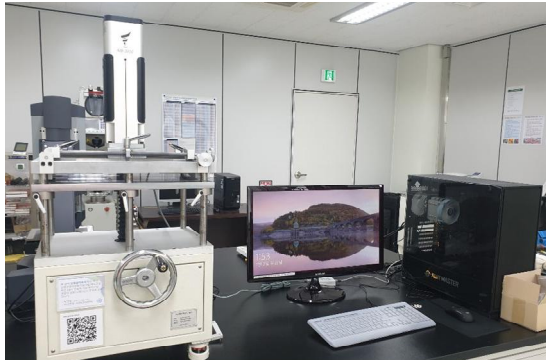


Fig. 9 Indentation test machine

사이의 값이다.

Fig. 8은 압축된 시편의 유동응력 측정위치를 나타낸 것으로 Fig. 7과 동일한 위치이다.

본 연구에서는 Fig. 9의 압입시험기(model: AIS3000, Frontics Inc., Korea)를 활용하여 초기소재와 압축된 시편 내 각 측정위치의 유동응력을 평가하였다.

Fig. 10에 초기소재 및 각 pre-strain이 고려된 위치에서 측정된 유동응력선도를 나타내었다. 유동응력선도 측정결과에서 알 수 있듯이 유동응력은 초기소재가 가장 낮으며, pre-strain이 높아질수록 가공경화에 의해 상승함을 알 수 있다.

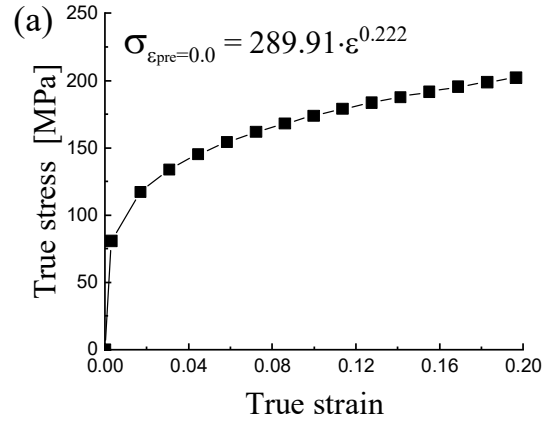


Fig. 10 (a) Flow stresses at each location: $\epsilon_{pre}=0.000$

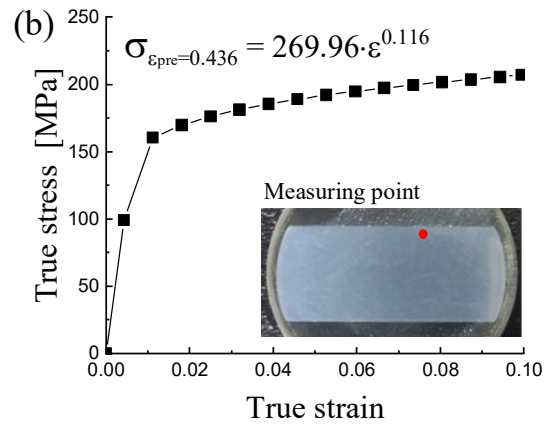


Fig. 10 (b) Flow stresses at each location: $\epsilon_{pre}=0.436$

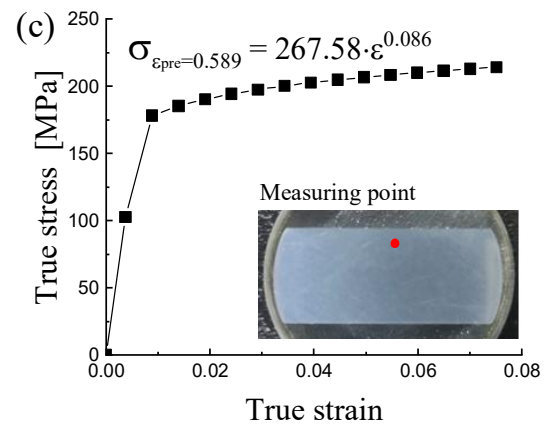


Fig. 10 (c) Flow stresses at each location: $\epsilon_{pre}=0.589$

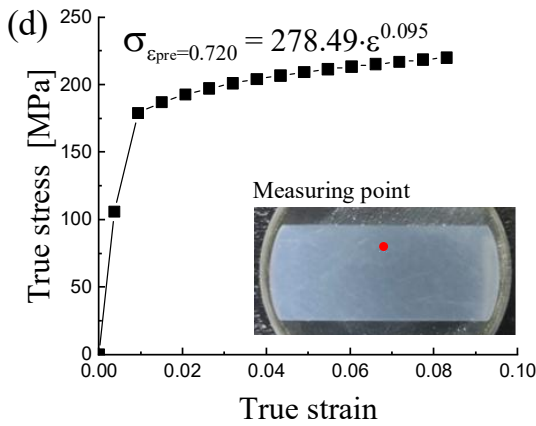


Fig. 10 (d) Flow stresses at each location: $\epsilon_{pre}=0.720$

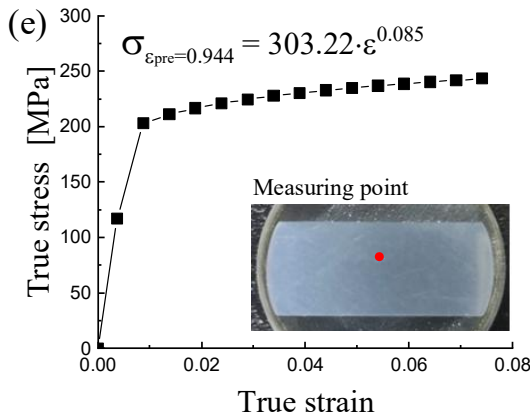


Fig. 10 (e) Flow stresses at each location: $\epsilon_{pre}=0.944$

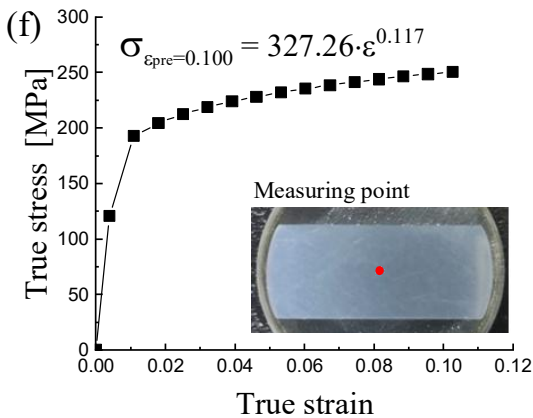


Fig. 10 (f) Flow stresses at each location: $\epsilon_{pre}=1.000$

4. 고변형률 영역 유동응력선도 확보

본 연구에서는 pre-strain이 고려된 각각의 유동응

력선도들을 활용하여 고변형률 영역의 유동응력선도를 도출하였다. Fig. 11에서 보듯이 Fig. 10의 각 유동응력선도를 pre-strain을 고려하여 하나의 그래프로 나타낸 후 각 유동응력선도의 연결점(connection point: UST)을 연결하여 고변형률 영역까지의 유동응력선도를 확보하였다. 본 연구에서 적용된 연결점은 각 유동응력의 인장강도(UTS) 값이다. 본 연구에서 적용된 Al6110 소재에 대하여 변형률 1.100까지의 유동응력선도를 확보하였다. 그래프에서 알 수 있듯이 변형률의 증가와 함께 응력도 점진적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 12는 초기 소재에 대한 인장시험 결과와 Hollomon식, 그리고 본 연구에서 제안한 방법으로

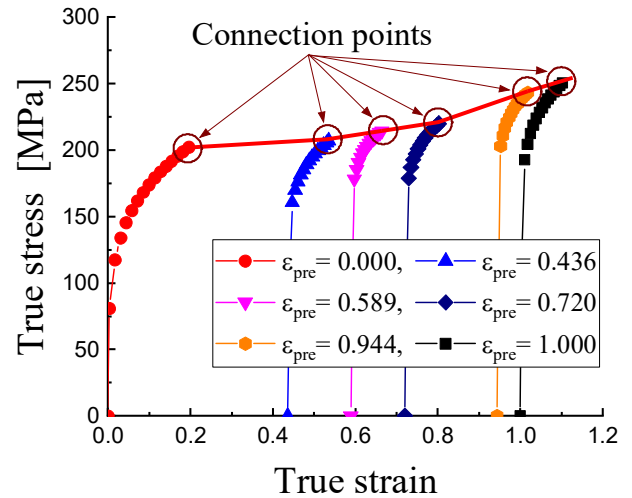


Fig. 11 Flow stresses

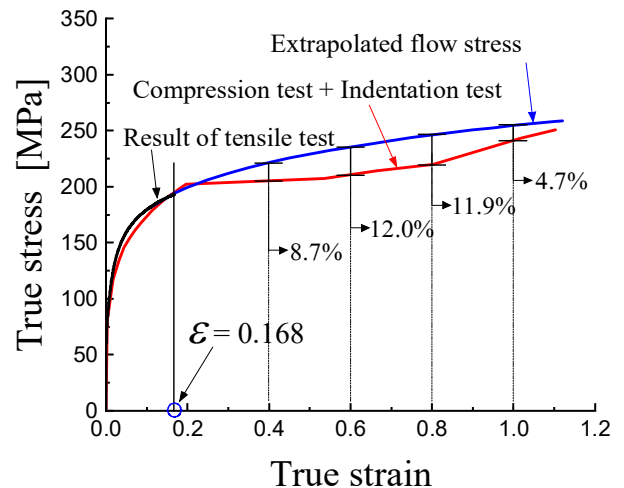


Fig. 12 Comparison of flow stresses

구한 고변형률 영역까지의 유동응력선도를 비교한 것이다. 인장시험결과 도출된 Hollomon 식은 다음의 식(4)와 같다.

$$\sigma = 254.67 \cdot \varepsilon^{0.153} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

Fig. 12에서 알 수 있듯이 인장시험 후 확보 가능한 유동응력의 한계 변형률은 약 0.168이었으며, 0.168 이상의 유동응력은 식(4)로 외삽(extrapolation)하여 확보한 것이다. 두 그래프 모두 변형률 증가와 함께 응력도 증가함을 알 수 있다. 그러나, 초기소재 인장시험 결과를 외삽하여 확보한 유동응력선도가 pre-strain을 고려한 유동응력 선도보다 응력이 높음을 알 수 있다. 이는 인장시험 시 넥킹(necking) 발생으로 인해 고변형률까지 유동응력 확보가 불가능하여, 저변형률까지의 변형률-응력 관계를 외삽(extrapolation)하여 고변형률까지의 유동응력을 예측하기 때문이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 변형률 약 1.100까지 두 선도의 응력 차이는 최대 12.0% 정도 발생함을 알 수 있다. 따라서, 인장시험 결과를 외삽하여 고변형률 영역까지 유동응력을 나타내는 경우 응력값이 과도하게 높게 평가됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 단순 압축시험과 연속압입시험을 이용하여 고변형률 영역까지 유동응력선도를 효과적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 단순 압축시험을 통해 pre-strain이 가해진 시편을 확보하였으며, 압축시험에 대한 유한요소해석을 통해 압축된 시편의 위치별 pre-strain을 평가하였다.

(2) 고변형률 영역의 유동응력선도 평가를 위해 연속압입시험을 이용하여 압축된 시편 내 pre-strain이 0.436 ~ 1.000인 지점의 유동응력선도를 평가하였다.

(3) Pre-strain이 고려된 유동응력선도들을 이용하여 유효변형률 1.100 이상의 고변형률 영역 유동응력선도를 확보하였다.

(4) 확보된 유동응력선도를 초기소재 인장시험을 통해 확보된 유동응력선도와 비교한 결과 고변형률 영역에서 유효응력값이 최대 12.0% 낮음을 알 수

있었다.

이상의 결론으로부터 변형률이 많은 냉간성형공정에 대한 유한요소해석 시 본 연구를 통해 확보된 고변형률 영역 유동응력선도를 적용할 경우 보다 신뢰도 높은 해석결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 이를 검증하기 위한 지속적인 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업기술혁신사업(산업소재핵심기술개발사업[과제번호: 20006979])의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] T. Altan, S. Oh, H. Gegel, 2000, Metal Forming: Fundamentals and Applications, 7th ed., American Society for Metals, Ohio. pp. 45~46.
- [2] H. Ji, J. Liu, B. Wang, X. Fu, W. Xiao, Z. Hu, 2017, A New Method for Manufacturing Hollow Valve via Cross Wedge Rolling and Forging: Numerical Analysis and Experiment Validation, J. Mater. Process. Technol. Vol. 240, pp. 1~11.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.004>
- [3] S. K. Lee, I. K. Lee, S. Y. Lee, S. K. Hwang, 2019, Fabrication of 50.0 μm Ultra-Fine Pure Rhodium Wire, Using a Multi-Pass Wire Drawing Process, for Probe Card Pins, Materials, Vol. 12, No.13, pp. 1~12.
<https://doi.org/10.3390/ma12132194>
- [4] J. M. Kim, S. W. Choi, B. M. Kim, 2019, Mechanical Splicing Characteristic of the Threaded Bar according to the Contact Conditions of the Transverse Rib, Trans. Mater. Process. Vol. 28, No. 3, pp. 145~153.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2019.28.3.145>
- [5] J. Chen, Z. Guan, J. Xing, D. Gao, M. Ren, 2020, A Novel Method to Determine Full-range Hardening Curve for Metal Bar using Hyperbolic Shaped Compression Specimen. J. Mater. Res. Technol. Vol. 9, No. 3, pp. 2704~2716.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.003>
- [6] S. K. Lee, S. Y. Lee, I. K. Lee, S. K. Hwang, 2019, Fabrication of Ultra-fine Rhodium Wire using Multi-pass Wire Drawing Process, Trans. Mater. Process. Vol.

- 28, No. 5, pp. 275~280.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2019.28.5.275>
- [7] S. J. Lee, K. H. Lee, B. M. Kim, 2015, Design of Roll Profile for Complex Shape in Shape Rolling by Combined 3D-EFA and BWT, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* Vol. 16, No. 2, pp. 281~286.
<https://doi.org/10.1007/s12541-015-0037-x>
- [8] T. W. Ku, 2020, A Combined Cold Extrusion for a Drive Shaft: A Parametric Study on Tool Geometry, *Materials*, Vol. 13, No. 10, pp. 1~19.
<https://doi.org/10.3390/ma13102244>
- [9] W. E. Hosford, R. M. Caddell, 2007, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 3rd ed., Cambridge University Press, New York. pp. 30.
- [10] J. Chen, Z. Guan, P. Ma, 2019, The Improvement of Stress Correction in Post-necking Tension of Cylindrical Specimen, *J. Strain Anal. Eng. Des.* Vol. 54, No. 3, pp. 209~222.
<https://doi.org/10.1177/0309324719852875>
- [11] O. Hering, F. Kolpak, A. E. Tekkaya, 2019, Flow Curve up to High Strain considering Load Reversal and Damage, *Int. J. Mater. Form.* Vol. 12, pp. 955~972.
<https://doi.org/10.1007/s12289-018-01466-z>
- [12] G. Langford, M. Cohen, 1969, Strain Hardening of Iron by Severe Plastic Deformation, *Trans. ASM.* Vol. 62, pp. 623~638.
- [13] J. G. Eom, C. W. Jee, M. C. Lee, M. S. Jeon, 2006, [14] Methodology of Acquisition of True Strain-stress Curves over Large Strain by the Tensile Test, Autumn, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., Korea Society for Technology of Plasticity, pp. 1~6.
- [15] J. H. Ahn, Y. Choi, D. Kwon, 2000, Evaluation of Plastic Flow Properties of Materials through the Analysis of Indentation Load-depth Curve, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* Vol. 38, No. 12, pp. 1606~1611.
- [16] S. H. Kim, H. H. An, Y. Choi, E. C. Jeon, D. I. Kwon, 2000, Evaluation of Tensile Property using Indentation Technique, Autumn, Proc. Kor. Inst. Indust. Saf. Conf., Korea Society of Safety, pp. 3~8.
- [17] J. I. Jang, D. I. Son, Y. Choi, C. Park, D. I. Kwon, 2002, Evaluation of Flow Properties of Steel using Advanced Indentation System, Spring, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., Korea Society for Technology of Plasticity, p. 191~194.
- [18] K. W. Lee, K. H. Kim, D. Kwon, 2008, Derivation of Tensile Flow Characteristics for Austenitic Materials from Instrumented Indentation Technique, *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 41, pp. 1~6.
- [19] D. Kwon, S. K. Choi, O. M. Kwon, W. Kim, 2019, Instrumented Indentation Testing that can Evaluate the Reliability of the Structure Nondestructively in the Field: Mechanical Properties and Residual Stress, Spring, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng. Conf., Korea Society of Mechanical Engineers, p. 14.