

유한요소해석을 이용한 Cu-10wt%Fe 합금의 압출공정 모사

유태현¹ · Khushahal Thool¹ · 최시훈^{1, #}

Simulation of the Extrusion Process of Cu-10wt%Fe Alloy using Finite Element Analysis

T. H. Yoo, K. Thool, and S.-H. Choi

(Received January 28, 2024 / Revised January 31, 2024 / Accepted January 31, 2024)

Abstract

In this paper, the process of extruding Cu-10Fe alloy using a finite element analysis (FEA) was theoretically analyzed. To achieve this, the dependence of strain rate and temperature of the alloy required for the extrusion process was secured by utilizing databases for Cu and Fe and the KHL model. For microstructure analysis, FE-SEM with EDS was used to distinguish the phases present in Cu-10Fe alloy. The mechanical characteristics of Cu-10Fe alloy were secured using the results of fitting the mechanical properties of Copper and Steel from the Deform database to the KHL model. The deformation behavior within the alloy during hot extrusion was analyzed, providing insights into effective stress, effective strain, effective strain rate, and temperature. It was observed that the strain distribution was non-uniform. These research findings contribute to an improved understanding of the hot extrusion process of Cu-10Fe alloy and can aid in predicting the mechanical properties of the material.

Keywords : Cu-10Fe alloy, Extrusion , FEA , KHL model, Cu-rich

1. 서론

최근 환경 규제 강화에 따른 이산화탄소 배출 감소 필요성이 커지면서, 자동차 산업에서는 부품 및 소재의 경량화를 통한 이산화탄소 배출 저감 연구가 중요해졌다[1]. 특히, 자동차 산업에서 사용되는 전선의 경우, 세경화(細徑化)를 통한 경량화 연구가 진행되고 있다[2, 3]. 세경화 과정에서는 선재와 전장 장비 간의 인장력 때문에 단선 문제가 발생한다. 구리는 우수한 전기 전도성, 열 전도성, 부식 저항성으로 인해 전기 전송 분야에서 광범위하게 사용되어 왔으나, 순수 구리는 낮은 강도와 경도로 인해 산업 응용에 한계가 있다[4]. 이에 따라 고강도 및

고전기 전도성을 갖는 새로운 구리 합금 개발이 중요한 이슈로 부상하였다. 구리에 합금 원소를 첨가하면 강도는 증가하지만 전기 전도성이 저하될 수 있다. 실제 응용에서는 구리 기반에 제2상 강화를 통한 방법이 일반적으로 사용되며, 이는 주로 석출 강화 또는 분산 강화 방법을 포함한다[5].

Cu-Fe 합금은 응고 중 Cu-rich 영역(L1)과 Fe-rich 영역(L2)을 형성하는 준안정 불용성 합금의 전형적인 예이다[7]. 이는 응고 후 거시적 편석과 조성, 미세구조 및 특성의 불균일성을 야기한다[8]. Cu-Fe 합금 선재의 제조 기술은 두 가지 방법으로 구분된다. 첫 번째 방법은 분말을 활용한 방법으로, Cu와 Fe 분말을 혼합한 후 진공 열압 소결 공정을 통해 합금을 제조한다. 이 방법의 장점은 낮은 온도에서 Fe의 Cu로의 확산이 어려워 전기 전도성에 미치는 영향을 억제할 수 있다는 것이다[9]. 두 번째 방법은 주조를 통한 봉재 제조로, 이후 압출 및 인발 공정

1. 국립순천대학교 첨단부품소재공학과, 박사과정
2. 국립순천대학교 첨단부품소재공학과, 박사후 연구원
3. 국립순천대학교 첨단부품소재공학과, 교수
#Corresponding Author: Department of Advanced Components and Materials Engineering, Suncheon National University,
E-mail: shihoon@sncu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-2557-0646

을 거쳐 선재를 만든다[10].

Cu-10Fe 합금은 고강도 및 고전기 전도성을 가지는 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Cu-10Fe 합금 선재 개발을 위해 주조 공정 후 압출 공정이 필수적이며, 이 연구에서는 주조된 Cu-10Fe 합금을 압출 공정으로 가공하는 과정을 유한 요소 해석(FEA) 기술로 이론적으로 분석하였다. 압출 공정에 대한 FEA를 수행하기 위해 순 Cu와 Fe의 데이터베이스와 현상학적 가공 경화 모델인 KHL 모델을 사용하여 합금의 변형률 속도 및 온도 의존성을 계산하였다[11].

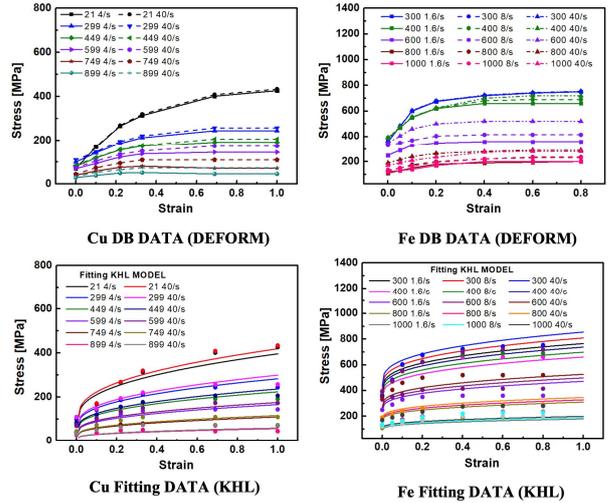
2. 실험방법

본 연구에서 사용된 Cu-10Fe 합금은 전기동과 전해철을 적절한 무게비로 혼합하여 용해로에 투입, 연속주조 방식으로 직경 75 mm의 봉재를 제조하였다. 주조된 합금의 열간 압출 특성을 개선하기 위해 단조 공정을 수행하였다. 열간 압출 공정은 빌렛을 상온에서 950도까지 3시간 동안 가열한 후, 1시간 동안 950도에서 유지하고, 160 mm/min의 램 속도로 5:1의 비율로 직경을 75 mm에서 15 mm로 줄이는 방식으로 진행되었다. Cu-rich상과 Fe-rich 상으로 구성된 것으로 알려져 있는 Cu-10Fe 합금의 초기 미세 조직과 성분 분석을 위해 FE-SEM의 EDS 기능을 활용하여 각 상을 구분하였다. 이를 위해 주조 후 단조된 Cu-10Fe 합금의 단면을 중심 및 표면 영역에 해당하는 15 mm×15 mm 크기로 절단하였다. 절단된 시편을 샌드페이퍼 및 연마천으로 표면을 기계적으로 연마한 뒤 FE-SEM(JEOL-7100F)을 이용해 미세조직의 분석을 수행하였다.

3. 유한요소해석

3.1 기계적 물성 예측

열간 압출 과정에서 Cu-10Fe 합금의 온도 및 변형률 속도에 따른 기계적 특성을 예측하기 위해 Deform 소프트웨어의 Copper와 Steel 물성 데이터베이스를 사용하였다. KHL 모델[11]과 간단한 혼합 규칙(mixture rule)을 적용하여 합금의 변형률 및 온도에 따른 기계적 특성을 분석하였다. KHL 모델은 재료의 유동 응력에 미치는 변형률, 변형률 속도 및 온도의 영향을 표현하기 위해 개발되었으며, 구성



A	B	n1	n0	C	m
104	280	0.029	0.428	0.026	1.107

A	B	n1	n0	C	m
384	370	3.395 × 10 ⁻⁶	0.321	0.034	1.749

Fig. 1 Mechanical properties of Copper and Steel measured at various temperatures and strain rates, and results fitted using the KHL model

방정식은 다음과 같다:

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

여기서 A는 재료의 기준 변형률 속도와 온도에서 항복 응력, B는 변형에 의한 강화 계수, m은 열에 의한 연화 지수, n₁은 변형률 속도 민감도 지수, D₀^p는 사용자 정의 상수로 10⁶을 사용하였다. Fig. 1은 Copper와 Steel의 다양한 온도 및 변형률 속도에서 측정된 기계적 성질을 KHL 모델로 Fitting한 결과를 보여준다. 각 상의 기계적 성질을 식 (1)로 Fitting한 후 모델 상수 값들은 Fig. 아래 부분에 추가하였다.

3.2 열간 압출 유한요소해석

본 연구에서는 Cu-10Fe 합금의 열간 압출 과정에서 발생하는 변형률, 응력, 변형률 속도, 그리고 온도 분포와 같은 변형 거동을 이해하기 위해 Deform-2D ver. 12.1 소프트웨어를 활용하였다. 이를 위해 Fig. 2와 같이 형상 및 경계 조건을 설정하여 열간 압출 공정을 모사하였다. 재료의 변형 거동은 축대칭을 가정하고, 빌렛과 다이 사이의 마찰은 sticking friction 조건을 적용하였다[12]. 금형과 빌렛의 온도는 실제 압출 공정에서 사용한 조건과 동일하게

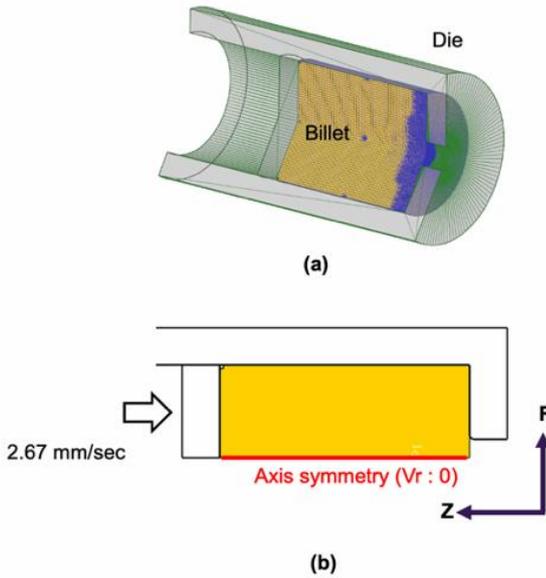


Fig. 2 (a) Mesh used for FEA; (b) boundary conditions for FEA

950도로 설정하였으며, 램의 전진 속도는 2.67mm/sec로 설정하였다. 금형과 빌렛 간의 열 전달 계수는 Cu-10Fe 합금의 데이터를 확보하지 못하여 빌렛이 Al 합금인 경우에 해당하는 11 N/sec·mm°C 로 설정하였다[13, 14]. Cu-10Fe 합금의 기계적 특성은 Deform 데이터베이스에 수록된 Copper와 Steel의 물성을 바탕으로 KHL 모델을 이용하여 피팅한 결과를 혼합 규칙(mixture rule)에 적용하여 Fig. 3에 나타내었다.

4. 결과

4.1 Cu-10Fe 합금의 미세조직

Fig. 4는 열간 압출 공정에 사용된 Cu-10Fe 합금의 SEM 및 EDS 분석 결과를 보여준다. 주조 후 단조된 Cu-10Fe 합금에서 밝은 회색의 기지 상과 어두운 회색의 제2상이 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. EDS 분석을 통해 밝은 회색 영역이 Cu-rich 상이고 어두운 회색 영역이 Fe-rich 상임을 확인하였다.

4.2 열간 압출 유한요소해석

Fig. 5는 압출 공정 중 Cu-10Fe 합금에 발생하는 유효 응력, 유효 변형률, 유효 변형률 속도, 그리고 온도에 대한 해석 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)는 빌렛이 압출 다이를 통과하는 동안 발생하는 유효 응력

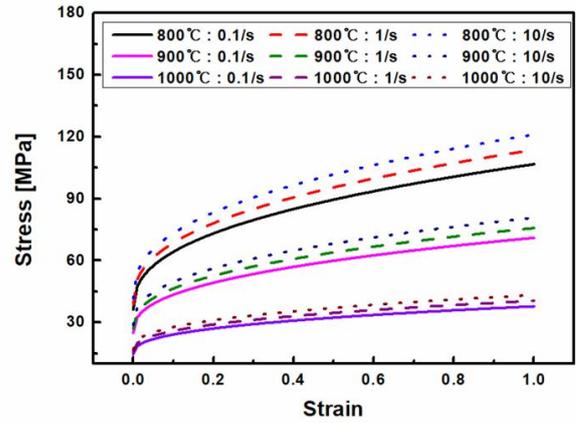
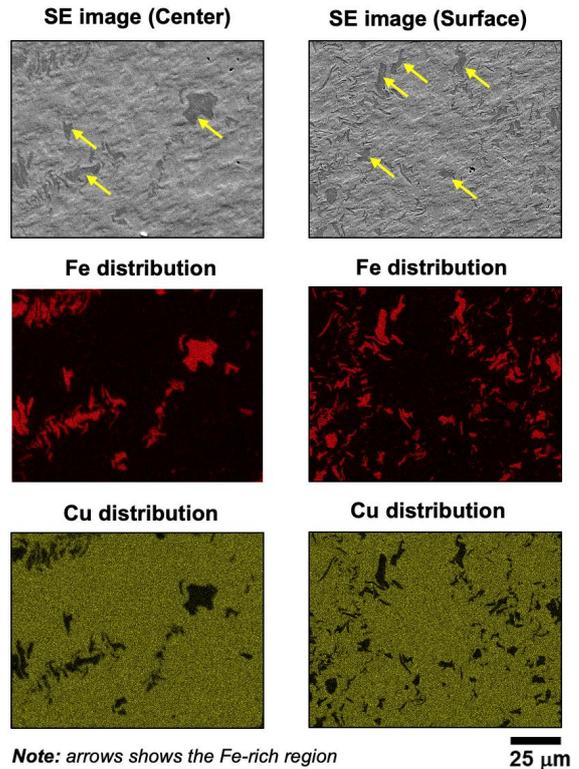


Fig. 3 Mechanical properties of Cu-10Fe alloy calculated by applying the mixture rule and fitting results using the KHL model



Note: arrows shows the Fe-rich region

Fe-rich region		
Element	Wt%	At%
FeK	88.10	89.39
CuK	11.90	10.61
Matrix	Correction	ZAF

Cu-rich region		
Element	Wt%	At%
FeK	08.97	10.08
CuK	91.03	89.92
Matrix	Correction	ZAF

Fig. 4 SEM and EDS analysis results of Cu-10Fe alloy

분포를 보여주며, 압출재의 반경 방향으로 비교적 균일한 유효응력 분포가 관찰되었다. 이는 표면 및 중심부에서 응력 집중에 의한 결함 발생이 적을 것으로 예상되는 결과이다. Fig. 5(b)는 압출 변형 시

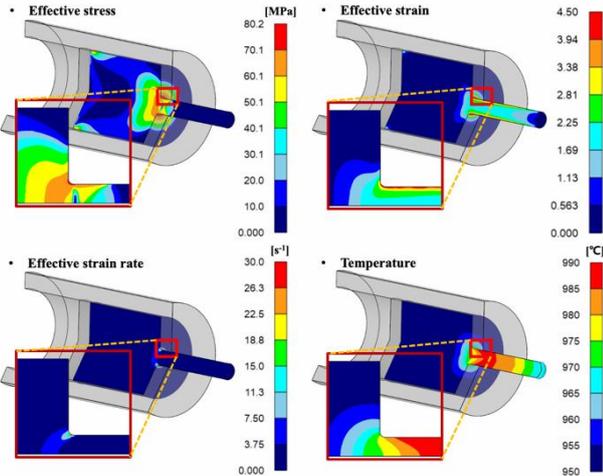


Fig. 5 Distribution of effective stress, effective strain, effective strain rate, and temperature during extrusion of Cu-10Fe alloy

발생하는 유효 변형률 분포를 보여주며, 압출 다이를 통과한 후 압출재의 반경 방향으로서는 불균일한 변형률 분포가 나타났다.

이는 압출재의 표면이 중심에 비해 더 높은 변형률을 경험하는 것으로, 이는 소재와 다이 사이의 마찰에 기인한 결과로 해석된다. Fig. 5(c)는 열간 압출 변형 시 발생하는 유효 변형률 속도 분포를 보여주며, 다이 출구부의 모서리에서 높은 변형률 속도가 관찰되었다. Fig. 5(d)는 열간 압출 시 Cu-10Fe 합금 압출재에 발생하는 온도 분포를 보여주며, 반경 방향으로 균일한 온도 분포가 나타났다. Fig. 6은 열간 압출 과정의 출구부를 통과한 후 발생하는 변형률 분포에 대한 보다 정량적인 분석 결과를 보여준다. Fig. 6(a)는 선재의 중심 영역에서 가장 낮은 유효 변형률 값을 보이며(1.94), 중간 영역에서는 2.12, 표면 영역에서는 가장 높은 값(3.62)을 보인다. 이는 중심에서 표면으로 갈수록 유효 변형률이 증가한다는 것을 의미한다. Fig. 6(b)는 전단 변형률 분포를 보여주며, 선재의 중심에서 0.06, 중간 영역에서 -0.14, 그리고 표면 영역에서 -1.80으로 큰 절대값을 보인다. Fig. 6(c)는 압출 방향 변형률 분포를 보여주며, 중심 영역에서는 1.92, 중간 영역에서 표면 영역으로 갈수록 변형률의 절대값이 점진적으로 증가한다.

Fig. 6(d)는 선경 방향 변형률 분포를 보여주며, 중심 영역에서 -0.96, 표면 영역에서 -0.61로 증가한다. 마지막으로, Fig. 6(e)는 원주 방향 변형률 분포를 보여주며, 중심 영역에서 -0.96, 표면 영역에서 0.74로

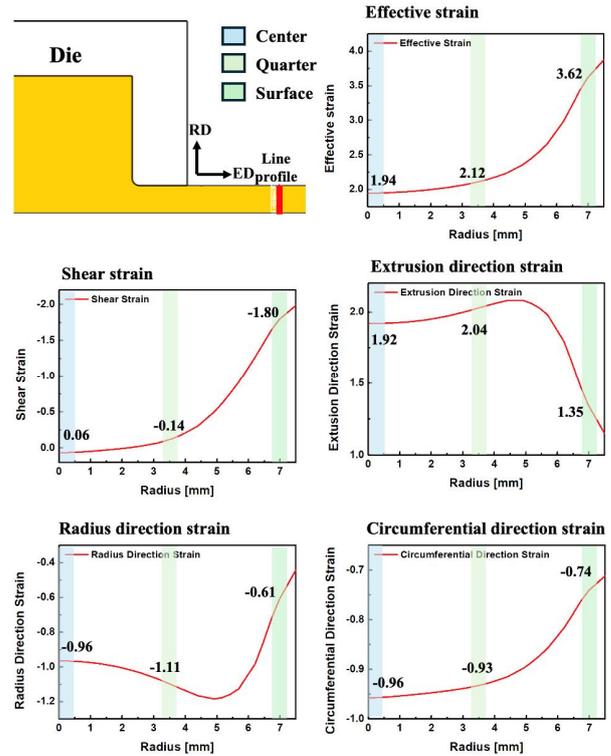


Fig. 6 Results of Line profile analysis of effective strain, shear strain, and strain components developed in the extrudate in the axial direction after extrusion

중심에서 표면으로 갈수록 절대값이 감소한다. 이러한 각 방향별 변형률 성분들이 선경 방향으로 불균일하게 발생한 결과, 유효 변형률의 분포가 불균일하게 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 열간 압출 시 Cu-10Fe 합금에 발생하는 변형 및 응력의 불균일성을 이론적으로 모사하기 위해서 FEA를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Cu-10Fe 합금의 물성을 평가하기 위해 필요한 정보를 얻기 위해 주조 후 단조 된 Cu-10Fe 합금의 미세조직을 분석하였고, 그 결과 Cu-10Fe 합금은 Cu-rich상의 기지조직과 불균일한 형상의 Fe-rich상으로 구성되어 있음을 확인하였다.

(2) 열간 압출 모사에 필요한 Cu-10Fe합금의 기계적 물성은 Copper와 Steel의 온도 및 변형률 속도 별 기계적 물성을 KHL모델을 통해 Fitting한 후 mixture

rule을 활용하여 확보한 후 해석을 수행한 결과 응력과 온도는 선경방향으로 상대적으로 균일할 것으로 확인하였다.

(3) FEA 결과 소재의 선경방향으로 불균일한 유효 변형률이 발생하였으며, 이러한 유효변형률의 불균일성은 다이와 소재 간의 마찰에 따른 방향별 변형률 성분들의 불균일성에 의한 결과로 확인되었다.

후 기

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-002).

REFERENCES

- [1] Y. Yamano, 2011, Development of Aluminum Wiring Harness, SEI Technical Review, pp. 81-88.
- [2] K. Hanazaki, N. Shigiri, N. Tsuji, 2010, Change in Microstructure and Mechanical Properties During Deep Wire Drawing of Copper, Mater. Sci. Eng. A, 527, pp. 96-103, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.057>
- [3] J.G. Bae, Y.S. Yang, D.Y. Ban, C.G. Park, 2006, The Effects of Die Design and Die Series on the Surface Residual Stress of Cold Drawn Eutectoid Steel Wire, Trans. Mater. Process., Vol 15, No. 2, pp. 153-157, <https://doi.org/10.5228/KSP.2006.15.2.153>
- [4] D.W. Yuan, H. Zeng, X.P. Xiao, H. Wang, B.J. Han, B.X. Liu, B. Yang, 2021, Effect of Mg addition on Fe phase morphology, distribution and aging kinetics of Cu-6.5Fe alloy, Mater. Sci. Eng. A, 812, pp. 141064, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141064>
- [5] N.D. Stepanov, A.V. Kuznetsov, G.A. Salishchev, N.E. Khlebova, V.I. Pantyrny, 2013, Evolution of microstructure and mechanical properties in Cu-14%Fe alloy during severe cold rolling, Mater. Sci. Eng. A, 564, 264-72, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.11.121>
- [6] Y.B. Jeong, H.R. Jo, J.T. Kim, S.H. Hong, K.B. Kim, 2019, A study on the micro-evolution of mechanical property and microstructures in (Cu-30Fe)-2X alloys with the addition of minor alloying elements, J. Alloys Compd. 786, pp. 341-345, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.169>
- [7] M. Wang, R. Zhang, Z. Xiao, S. Gong, Y.B. Jiang, Z. Li, 2020, Microstructure and properties of Cu-10 wt%Fe alloy produced by double melt mixed casting and multi-stage thermomechanical treatment, J. Alloys Compd. 820, pp. 153323, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153323>
- [8] J.S. Song, S.I. Hong, H.S. Kim, 2001, Heavily drawn Cu-Fe-Ag and Cu-Fe-Cr microcomposites, J. Mater. Proc. Tech., 113, pp. 610-616, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00665-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00665-3)
- [9] L.M. Tan, Z.X. Wang, Y.P. Li, Y. Liu, F. Liu, 2021, Strengthening the bimodal-grained powder metallurgy ferritic steels with Cu addition by aging hardening, Mater. Sci. Eng. A, 800, pp. 140312, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140312>
- [10] Y.H. Wu, W.L. Wang, J. Chang, B. Wei, 2018, Evolution kinetics of microgravity facilitated spherical macrosegregation within immiscible alloys, J. Alloys Compd., 763, pp. 808-814, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.022>
- [11] A.S. Khan, Y.S. Suh, R. Kazmi, 2004, Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys, Int. J. Plasticity, 20, pp. 2233-2248, <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2003.06.005>
- [12] A. Foydl, A. Segatori, N. Ben Khalifa, L. Donati, A. Brosius, L. Tomesani, A. E. Tekkaya, 2013, Mater. Sci. Tech., 29, pp. 100-110, <https://doi.org/10.1179/1743284712Y.0000000132>
- [13] J. Zhou, L. Li, J. Duszczek, J. Mater. Proc. Tech., 2003, 3D FEM simulation of the whole cycle of aluminum extrusion throughout the transient state and the steady state using the updated Lagrangian Approach, J. Mater. Process. Technol., Vol. 134, No. 20 pp. 383-397, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01128-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01128-7)
- [14] W. G. Seo, K. Thool, H. N. Lee, D. J. Yang, S. G. Park, S. H. Choi, 2023, Study on the Microstructure Evolution during Extrusion of Zn-Al-Mg alloy, Trans. Mater. Process., Vol. 32, No. 6, pp. 344-351, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2023.32.6.344>