

유한요소해석을 이용한 인발 공정 시 Cu-0.2wt%Mg 합금의 변형률 분포에 미치는 마찰계수 영향의 이해

유태현¹ · 백승원² · 김정호² · 최시훈^{3, #}

Understanding the Effect of Friction Coefficient on Strain Distribution in Cu-0.2wt%Mg Alloy during Wire Drawing using Finite Element Analysis

T. H. Yoo, S. W. Baek, J. H. Kim, S. H. Choi

(Received November 7, 2022 / Revised November 17, 2022 / Accepted January 20, 2023)

Abstract

In the case of a wire with a very fine diameter during the multi-stage drawing process, the heterogeneity of the deformation in the radial direction tends to develop strongly as the amount of deformation is accumulated. It is known that the heterogeneity of deformation in the radial direction of the wire is closely related to the process parameters during the multi-stage drawing process. In this study, finite element analysis (FEA) was used to theoretically examine the effect of friction between the surface of the wire and the drawing die during the multi-stage drawing process of Cu-0.2wt%Mg alloy on the deformation heterogeneity developed in the radial direction of the wire. The distribution of effective strain, radial strain, circumferential strain, and shear strain developed in the radial direction of the wire during the multi-stage drawing process was analyzed while changing the friction coefficient, and the results were analyzed and compared for each path and position. The FEA results revealed that the shear strain developed in the radial direction of the wire during the multi-stage drawing process of Cu-0.2wt%Mg alloy showed the most non-uniform distribution and was also severely affected by the friction coefficient.

Keywords: Cu alloy, Wire Drawing, FEA, Friction Coefficient

1. 서 론

최근 탄소 배출과 연비와 관련된 환경 규제가 강화됨에 따라 자동차의 경량화에 대한 요구가 증가하고 있다[1]. 이에 따라 자동차 내부 부품의 전원 및 신호를 연결하는 하니스의 경량화 기술 또한 큰 관심을 얻고 있다[1,2]. 하니스의 경량화는 선경을 줄이는 방법으로 주로 인발 공정을 적용하는 것으로 알려져 있다[2,3]. 세경화를 위한 다단 인발 공정은 봉재 혹은 선재를 하나 혹은 여러 개의 다이

스 사이로 잡아당겨 단면적을 줄이는 가공법으로 많은 변형량을 동반하는 공정이다[5-11]. 이러한 다단 인발 공정으로 가공된 철강, 금, 구리, 알루미늄, 니켈 합금 등 다양한 소재들은 자동차 타이어 스틸코드, 현수교의 케이블, 반도체의 본딩와이어 및 전기전자장비의 전선 등과 같이 산업적으로 다양하게 적용되고 있다[1-4].

세경화 전선의 소재로서 우수한 강도와 전기전도도를 동시에 만족하는 선재를 요구하고 있지만, 일반적으로 선재의 직경이 감소함에 따라 인장강도, 피로강도 등의 기계적 특성이 감소하는 경향이 있다. 특히 구리 합금의 경우 세경화 전선으로 가공되면 인장강도는 향상되나 전기전도도가 감소하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다[12,13].

1. 순천대학교 첨단부품소재공학과, 석사과정

2. 키스트론 연구소, 대리

3. 순천대학교 첨단부품소재공학과, 교수

Corresponding Author: ⁴Department of Advanced Components and Materials Engineering, Suncheon National University

E-mail: ⁴shihoon@snu.ac.kr. ORCID: 0000-0003-2122-6351

인발 공정으로 제조된 선재의 기계적 물성은 인발 공정의 공정변수에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다[4-9]. 인발 공정에서 주요 변수로는 다이 반각, 단면 감소율 그리고 다이 베어링 길이와 같은 다이 형상과 다이와 선재 표면부에서 마찰계수가 있으며, 이런 공정 변수들은 최종 선재의 기계적 물성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다[4-9]. 인발 공정 동안 다이와 접촉하는 선재의 표면부에서는 다이와의 마찰 효과로 인해 소재의 중심부에 비해 상대적으로 많은 변형과 열이 발생된다[4,5]. 이러한 다이와 선재 표면부 사이의 마찰에 의한 열 발생과 변형의 불균일성은 선재의 생산성, 최종 선재의 품질 그리고 다이의 수명 등에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다[5,7]. 따라서 다이와 선재 표면부 사이의 마찰효과를 줄이기 위해 일반적으로 인발 공정에서는 윤활제를 사용한다. 윤활제는 다이와 선재 표면부 사이의 마찰을 줄여 발열 및 변형 불균일을 줄여주고, 선재를 냉각시키는 효과가 있어, 다이의 수명과 최종 선재의 기계적 물성에 긍정적인 영향을 주는 것으로 보고되고 있다[3].

다양한 구리합금의 인발공정에 대한 연구는 지속 되었으나, 우수한 강도와 전기전도도를 동시에 만족하는 Cu-Mg 합금의 인발 공정에 대한 연구는 미진하여 본 연구에서는 Cu-0.2wt%Mg 합금의 인발 공정 시 반경방향으로 발달하는 불균일한 변형 분포에 미치는 다이와 선재 표면부 사이의 마찰계수의 영향을 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 통하여 이론적으로 고찰하였다.

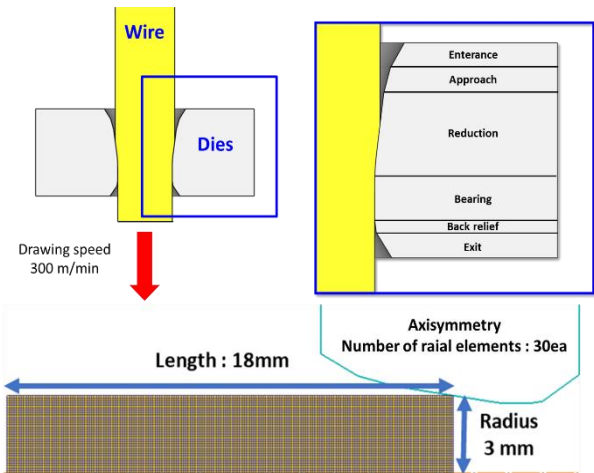


Fig. 1 Schematic of drawing process, die geometry and simulation condition.

2. 유한요소해석

인발 공정 시 Cu-0.2wt%Mg 선재에 발생하는 변형 거동을 이론적으로 모사하기 위하여 상용 FEA 프로그램인 DEFORM-2DTM 을 이용하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 인발 공정 모식도, 다이 형상 및 해석 조건을 나타낸 것이다. 인발 공정에 대한 2 차원 FEA 를 수행하기 위해서 선재의 변형 거동을 축대칭으로 가정하였다[9]. 반경이 3mm 인 초기 선재의 형상과 동일한 크기로 초기 메쉬를 작성하였다. 압출 후 소둔 열처리를 수행한 초기 시편의 기계적성질을 측정하기 위해 상온에서 일축 압축 시험을 진행하였다.

일축 압축 시험 결과와 그 결과를 Swift equation을 이용해서 Fitting한 결과를 Fig. 2에 함께 나타내었다. 상온에서 일축 압축 시험을 수행하여 얻은 유동곡선의 결과를 FEA 시 필요한 Cu-0.2wt%Mg 합금의 초기 물성으로 활용하였다.

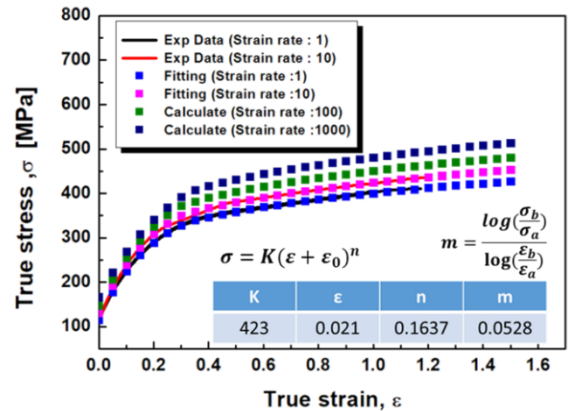


Fig. 2 Uniaxial compressive stress-strain curve and fitting results of Cu-0.2Mg alloys

인발공정 해석은 아래와 같은 강-점소성(rigid-visco-plastic) 소재의 기본 지배 방정식 및 경계조건에 기초하여 수행되었다.

$$\sigma'_{ij} = \left(\frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}}\right) \dot{\epsilon}_{ij} \quad \sigma_{ij}t_j = F_i \text{ on } S_F \quad (1)$$

여기서 σ_{ij} , $\dot{\epsilon}$, σ'_{ij} 와 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 각각 응력성분, 유효 변형률속도, 편차응력성분 및 변형률속도성분에 해당한다. S_F 는 힘이 작용하는 면, F_i 는 traction 응력 및 t_j 는 경계면에 수직한 단위벡터를 의미한다. 변분원리(variational principal)에 기초한 FEA 은 아래의 식을 기본으로 한다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2)$$

여기서 v 는 가공품의 체적이고 K 는 penalty 상수이며 매우 큰 양수의 상수 값을 가진다.

소재가 기본적으로 아래와 같이 von Mises 항복기준과 associated flow rule 을 따른다고 가정하였다.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})}^{1/2} \quad \text{and} \quad \bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{3}{2}(\epsilon_{ij}\epsilon_{ij})}^{1/2} \quad (3)$$

본 연구에서는 다단 인발 공정 시 금형-소재 간 마찰 정도의 차이를 주기 위해 쿨롱(Coulomb)마찰계수가 각각 0.05, 0.1, 0.15 에 해당하는 3 가지 마찰 조건을 FEA 에 적용하였다.

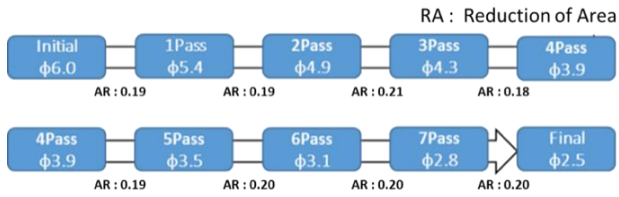


Fig. 3 Die schedule of drawing process

다단 인발 공정에서 각 패스 별 경계 조건은 인발 공정 시 선재가 다이를 통과하는 속도 조건을 기준으로 설정하였다. 즉, 이 연구에서는 실제 인발 공정에서 각 패스 별로 사용되는 속도를 고려하여 적용하였다. 해석의 수렴성을 향상시키기 위하여 소프트웨어 내 자동 리메싱(remeshing) 기법을 적용하였으며, 금형과 가공품 간의 최대 상대 간섭 깊이(maximum relative interference depth) 인자는 0.01 로 설정하였다. 또한, 각 인발 공정의 해석을 위해 아래와 같이 시스템을 단순화하여 해석을 수행하였다:

- (1) 가공품의 소재모델은 강-점소성;
- (2) 다이의 물성은 rigid;
- (3) 가공품, 다이에서 발생하는 열은 무시;
- (4) 가공품, 다이의 표면은 20 °C의 대기조건.

Fig. 1 에 나타난 인발 공정 모식도 및 다이 형상을 FEA 을 위한 preprocessing 작업에 사용하였다.

인발 공정에 대한 FEA 에 적용된 선재의 초기 직경은 6mm 이었고 최종 선재의 직경은 2.5mm 로 설정하였다. 인발 공정을 위한 전체 패스 수를 8 로 설정하여 인발공정 FEA 을 진행하였다. Fig. 3 에 다단 인발 공정에 대한 패스 스케줄을 각 패스 단계에서 선재의 직경의 변화와 단면 감소율(Reduction of Area, RA)을 함께 나타내었다.

3. 결과

선재의 다단 인발 공정 동안 소재에 발달하는 변형률을 비교하기 위해서는 패스 별 그리고 마찰계수 별로 변형된 시편을 동시에 보여주는 것이 효과적이다. 이런 관점에서 Fig. 4 에 다단 인발 공정 시 선재에 발생하는 유효 변형률(effective strain) 분포에 미치는 마찰계수의 영향에 대한 FEA 결과를 나타내었다. 인발 공정 초기에는 표면부에서 유효 변형률이 집중적으로 발생하고, 패스가 진행됨에 따라서 표면부, 중간부 및 중심부까지 유효 변형률이 증가하는 경향을 보였다. 유효 변형률에 미치는 마찰계수의 영향은 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.

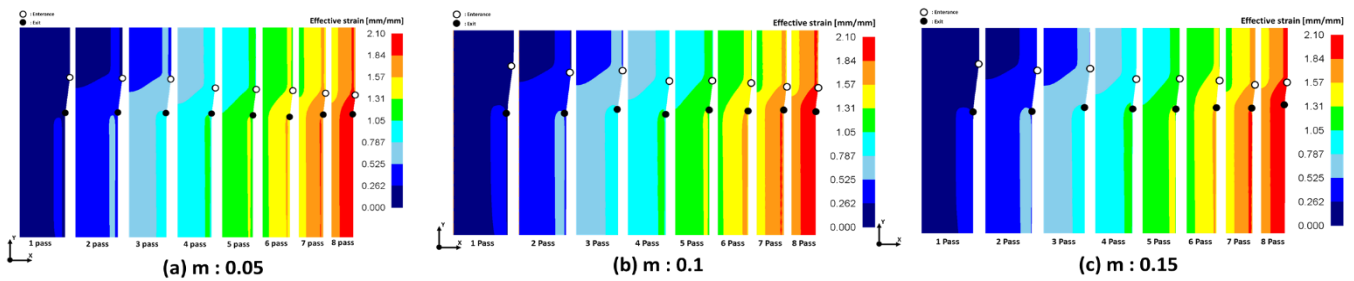


Fig. 4 Distribution of effective strain developed in the wire during multi-stage drawing process: (a) m=0.05, (b) m=0.1, (c) m=0.15.

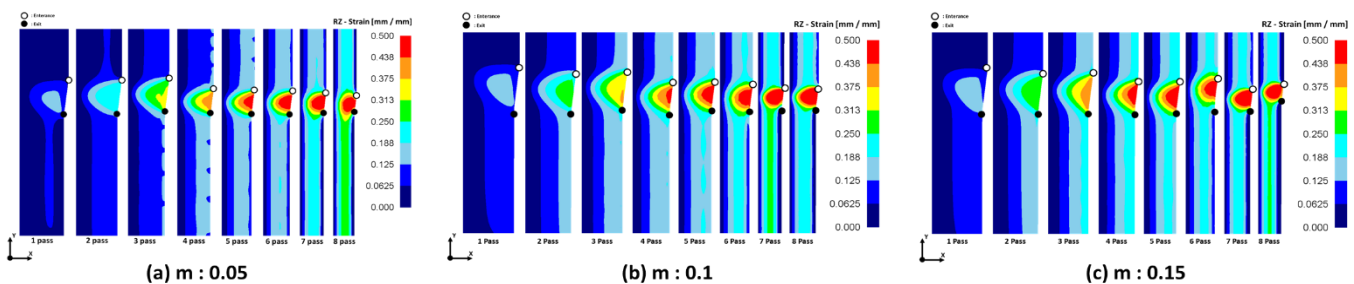


Fig. 5 Distribution of shear strain developed in the wire during multi-stage drawing process: (a) m=0.05, (b) m=0.1, (c) m=0.15.

한편, 다단 인발 공정 시 선재에 발생하는 전단 변형률(shear strain) 분포에 미치는 마찰계수의 영향에 대한 FEA 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 선재에 발달하는 전단 변형률은 선재가 다이 통과시 다이와 접촉하는 영역에서 우선적으로 발생하였다. 인발 가공이 진행됨에 따라 선재의 표면부에 전단 변형률이 누적되는 경향을 보여주었다.

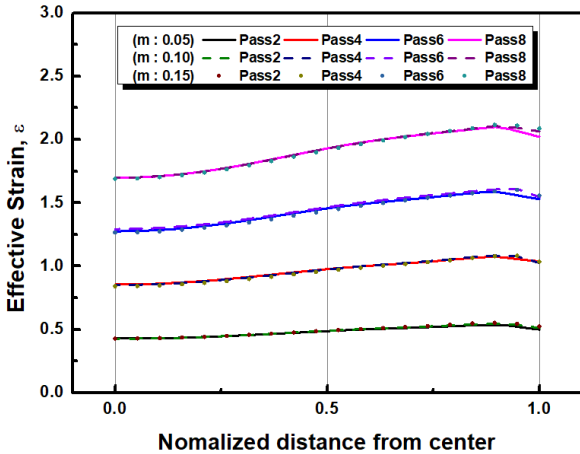


Fig. 6 Effect of the coefficient of friction on the development of effective strain in the radial direction of the wire during the multi-stage drawing process

다단 인발 공정 시 선재의 반경 방향으로 발생하는 변형의 불균일성을 보다 자세히 분석하기 위해 line profile 을 이용하였다. 다단 인발 공정 시 마찰계수 별로 선재의 반경 방향으로 발달하는 유효 변형률의 분포에 미치는 마찰계수의 영향을 Fig. 6에 line profile 의 형태로 나타내었다. 유효 변형률은 표면부에서 가장 심하게 발생하고, 패스가 진행됨에 따라 표면부, 중간부 및 중심부에 걸쳐 유효 변형률이 증가하였으며, 중심부와 표면부의 유효 변형률 차이는 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 8 패스에서 마찰계수별 유효 변형률은 마찰계수 증가에 따라 2.02, 2.06, 2.09로 해석되었다. 한편, 마찰계수에 따른 유효 변형률의 분포를 비교해 보면 반경방향으로 유효 변형률에 미치는 마찰계수의 영향은 미미한 것을 확인할 수 있었다.

다단 인발 공정 시 선재의 반경방향으로 발생하는 반경방향 변형률 분포에 미치는 마찰계수의 영향에 대한 FEA 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 인발 공정이 진행됨에 따라 선재의 단면 감소로 변형률은 (-)값을 보였다.

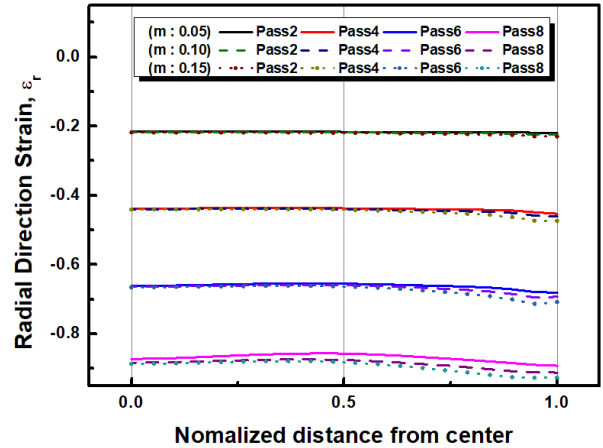


Fig. 7 Effect of the coefficient of friction on the development of radial direction strain in the radial direction of the wire during the multi-stage drawing process

마찰계수가 증가함에 따라 8 패스에서 표면부의 반경방향 변형률은 -0.892, -0.912, -0.927로 점차 절대값이 증가하는 것으로 해석되었고, 마찰계수와 관계없이 중심부보다 표면부에서 큰 절대값을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 다단 인발 공정 선재의 반경 방향으로 발생하는 인발방향 변형률 분포에 미치는 마찰계수의 영향에 대한 FEA 결과를 보여준다. 중심부와 비교해보면 표면부에서 인발방향 변형률이 1.764, 1.795, 1.814로 마찰계수 증가에 따라 인발방향 변형률도 미미하게 증가하는 경향을 보였으며, 중심부와 비교하여 표면부에서 상대적으로 약간 높은 것을 확인할 수 있었다.

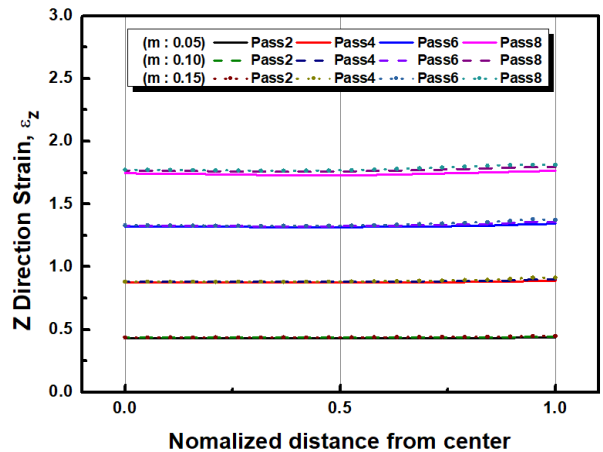


Fig. 8 Effect of the coefficient of friction on the development of Z-direction strain in the radial direction of the wire during the multi-stage drawing process

Fig. 9 은 다단 인발 공정 시 마찰계수별 선재의 반경 방향으로 발생하는 원주방향 변형률 분포에 대한 FEA 결과를 보여준다. 중심부와 표면부의 결과를 비교해보면 마찰계수증가에 표면부에서 원주방향 변형률은 -0.872, -0.884, -0.887 로 미미하게 증가하는 것으로 해석되었다. 또한, 인발 공정이 진행에 따라 원주방향 변형률이 누적되는 경향을 확인할 수 있었다.

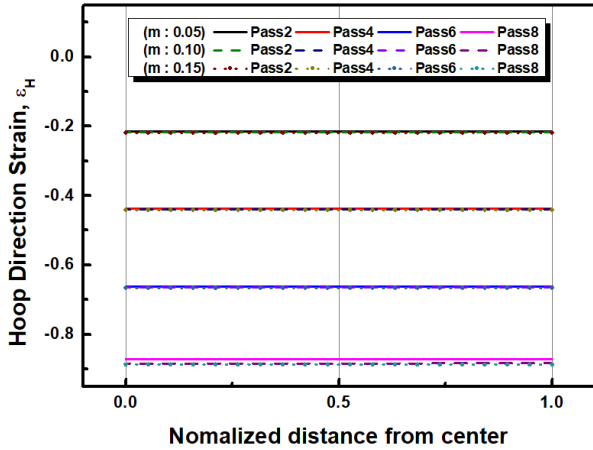


Fig. 9 Effect of the coefficient of friction on the development of hoop direction strain in the radial direction of the wire during the multi-stage drawing process

Fig. 10 은 다단 인발 공정 시 선재의 반경 방향으로 발생하는 전단 변형률 분포에 미치는 마찰계수의 영향에 대한 FEA 결과를 보여준다. 마찰계수 별로 전단 변형률의 변화를 비교한 결과 최대 전단 변형률은 선재 중간부 근처에서 발달하는 경향을 보였으며, 마찰계수가 증가할수록 이 지점에서의 전단 변형률의 절대값이 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 8 패스에서 마찰계수 별 반경방향으로 전단 변형률 거동을 비교결과 최외각 표면부에서 (-)방향으로 역전되며, 마찰계수가 증가함에 따라, 최외각 표면부에서 전단 변형률은 -0.028, -0.169, -0.220 으로 절대값이 점차 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 거동은 마찰계수의 증가에 따라, 표면부와 다이간의 마찰효과로 표면부에서 전단 변형이 집중이 되어 가공경화가 심하게 발생하는 영역의 층의 변화에 의한 결과로 판단된다. 이런 변형된 층의 차이는 다단 인발 공정 중 다이 형상에 의한 기하학적 전단(geometrical shear)의 양의 증가를 발생시키고 그 결과 패스가 진행되면서 다이와 접촉하

는 영역에서 전단 변형의 크기가 급격하게 증가되는 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 이 부분에 대한 정확한 이해를 위해서는 변형구배 텐서 (deformation gradient tensor)를 패스 별 그리고 위치별로 분석하여 마찰에 의한 전단과 기하학적 전단의 기여를 구분하여 해석할 필요가 있다. 이와 관련된 내용은 인발 공정 시 선재 내부에 발달하는 변형집합조직을 이론적으로 예측하기 위한 별도의 연구에서 다룰 예정이다.

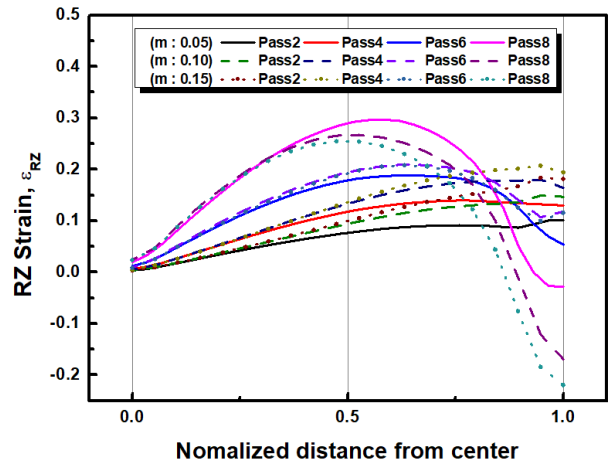


Fig. 10 Effect of the coefficient of friction on the development of shear strain in the radial direction of the wire during the multi-stage drawing process

4. 결론

Cu-0.2wt%Mg 합금의 다단 인발 공정 시 선재 반경방향으로 발달하는 변형 불균일성에 미치는 선재와 다이 사이의 마찰계수의 영향을 FEA를 사용하여 이론적으로 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다단 인발 공정 시 선재 반경방향으로 변형의 불균일성에 미치는 선재와 다이 사이에 마찰계수의 영향은 변형률의 성분에 따라 큰 차이가 있는 것으로 해석되었다.
- (2) 다단 인발 공정 시 유효 변형률은 표면부에서 가장 심하게 발생하였고, 패스가 진행됨에 따라 표면부, 중간부 및 중심부에 걸쳐 증가하였고, 중심부와 표면부에서의 차이는 점진적으로 증가하였다. 한편, 반경방향으로 유효 변형률에 미치는 마찰계수의 영향은 미미하였다.

(3) 다단 인발 공정 시 선재의 반경방향 변형률은 인발 공정이 진행됨에 따라 선재의 단면 감소로 변형률은 (-)값을 보였다. 마찰계수가 증가함에 따라 반경방향 변형률은 -0.892, -0.911, -0.927로 점차 증가하였고, 마찰계수와 관계없이 중심부보다 표면부에서 큰 절대값을 보였다.

(4) 다단 인발 공정 시 인발방향 변형률은 중심부에 비해 표면부에서 상대적으로 약간 높았다. 패스 2, 패스 4, 패스 6, 패스 8에서 결과를 비교해 보면 마찰계수가 증가할수록 인발방향 변형률은 1.764, 1.795, 1.814로 미미하게 증가하였다.

(5) 다단 인발 공정 시 원주방향 변형률은 중심부와 표면부에서 마찰계수의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, 인발 공정이 진행에 따라 원주방향 변형률이 누적된 것으로 분석되었다.

(6) 다단 인발 공정 시 전단 변형률의 분포를 해석한 결과 최대 전단 변형률은 선재 중간부 근처에서 발달하는 경향을 보였다. 마찰계수가 증가할수록 이 지점에서의 전단 변형률은 0.297, 0.267, 0.255로 점차 낮아지는 경향을 보였다.

후 기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20011576)

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, doi:10.1016/j.msea.2010.05.057
- [3] S.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
- [4] A. Haddi, A. Imad, G. Vega, 2011, Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process, Mater. Design, 32, 4310-4315, doi:10.1016/j.matdes.2011.04.010
- [5] G.A.S. Marinez, W.-L. Qian, L.K. Kabayama, U. Prisco, 2020, Effect of Process Parameters in Copper Wire Drawing, Metals, 10, 105. doi:10.3390/met10010105
- [6] S. Messaoudi, M. Zidani, T. Baudin, C.E. Derfouf, A. Boulagroun, M.H. Mathon, 2012, Deformation Texture in Wire Drawing Copper, Metal, 5, pp. 23 – 25
- [7] G. Vega, A. Haddi, A. Imad, 2009, Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing, Mater. Design, 30, 3308-3312, doi:10.1016/j.matdes.2008.12.006
- [8] O. Rodriguez-Alabanda, 2018, Software implementation of a new analytical methodology applied to the multi-stage wire drawing process: the case study of the copper wire manufacturing line optimization, Int. J. Adv. Manuf. Technol., doi.org/10.1007/s00170-018-1657-y
- [9] C. J. Luis, J. Leon, R. Luri, 2005, Comparison between finite element method and analytical methods for studying wire drawing processes, J. Mater. Process. Technol. 164-165, 1218-1225 doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.13
- [10] Karthic R. Narayanan, I. Sridhar, S. Subbiah, 2012, Experimental and numerical investigations of the texture evolution in copper wire drawing, Mater. Sci. Process. A., 107, 485-495. DOI 10.1007/s00339-012-6777-x
- [11] H. Park, S. H. Kim, S. J. Kim, H. J. Lee, 2018, Effect of Shear Deformation During Drawing on Inhomogeneous Microstructures and Textures in High Purity Copper Wires After Annealing, J. Kor. Inst. Met. Mater. Vol. 56, No. 12 pp.861-869 doi:10.3365/KJMM.2018.56.12.861
- [12] F. Baira, M. Zidani, H. Farh, S. Messaoudi, T. Ziar, A.L. Helbert, T. Baudin, 2017, Deformation and Recrystallised Texture Evolution and the Followed Mechanical and Electrical Properties of Drawn and Annealed Copper Wires, Int. J. Eng. Research in Africa, 31, pp. 20-28. doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.31.20
- [13] S. Gorsse, 2015, Microstructural design of new high conductivity – high strength Cu-based alloy, Journal of Alloys and Compounds 633, 42-47 http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.234