

유한요소해석을 이용한 다축대각단조 시 AA1100합금의 불균일 변형 거동에 관한 모사

김민성¹ · 이성음¹ · 이성² · 정효태^{3,*} · 최시훈^{1,#}

Simulation on Heterogeneous Deformation Behavior of AA1100 During Multi-axial Diagonal Forging Using Finite Element Analysis

M.S. Kim, S. E. Lee, S. Lee, H.T. Jeong, S.H. Choi

(Received December 19, 2018 / Revised February 22, 2019 / Accepted March 4, 2019)

Abstract

The present study numerically simulates the deformation heterogeneity developed in AA1100 during multi-axial diagonal forging (MADF) using finite element analysis (FEA). Diagonal forging type consisting of diagonal forging (DF) and return-diagonal forging (R-DF) proved to be relatively beneficial compared to plane forging type which includes plane forging (PF) and return-plane forging (R-PF) for minimizing the non-uniformity of deformation developed in workpieces. Simulation of the effective strain generated in workpieces during the two types of forging was done using 3-D FEA. FEA shows the effect of friction coefficient on the deformation behavior on workpieces. The simulation of 2 types forging with different friction coefficients revealed that the magnitude of barreling effect and strain heterogeneity in workpieces increases with an increase in the friction coefficient.

Key Words : Severe plastic deformation, AA1100, Forging, Friction, Finite element analysis

1. 서 론

관재 및 봉재 등의 대량 생산 기술은 대칭변형 (symmetric-deformation process)에 기반을 두고 있다 [1-3]. 재료 유동(mass flow)의 방향이 가공재의 중심 축 또는 중심 평면에 대하여 대칭으로 발생하는 공정을 대칭변형이라고 칭하며, 현재 상업화된 대칭변형 공정으로는 압연, 압출, 와이어 드로잉 등이 있다. 대칭변형으로 생산된 재료의 기계적 특성은 오랜 연구를 통하여 정교한 합금 설계에 따라 결정되었기에, 간단한 공정조건 제어 만으로 기계적 특성을 변화시키기에 한계가 있다고 알려져 있다. 최근

에는 비대칭변형(asymmetric-deformation process)에 기초한 연구 결과가 보고되고 있으며[4,5], 비대칭변형은 재료 유동이 중심 축 또는 중심 면에 대하여 비대칭적으로 형성되는 공정을 말한다. 비대칭변형 시 매우 높은 수준의 전단 변형률이 발생하는 특성이 있기 때문에 상당한 정수압 환경에서 재료 형상의 변화없이 반복 가공이 가능하며, 극 미세화(ultra-fine grains) 조직을 형성할 수 있는 강가공법(severe plastic deformation, SPD) 기술은 비대칭변형에 기초하고 있다[4-7].

SPD 기술을 활용한 연구는 재료의 강도, 연성과 같은 기계적 특성을 향상시키기 위한 목적으로 현재 까지 활발히 진행되고 있다. 대표적인 SPD 공정으로는 등통로각압축(equal channel angular pressing, ECAP)[7-8]/등통로각압출(equal channel angular

1. 국립 순천대학교, 2. 국방과학연구소, 3. 국립 강릉원주대학교

Corresponding Author : Suncheon National University,

E-mail: shihoon@snu.ac.kr, ORCID ID : 0000-0002-2557-0646

*Co-corresponding Author: Gangneung-Wonju National University, Dept. of Advanced Metal and Materials Engineering, E-mail : htjeong@gwnu.ac.kr

extrusion, ECAE)[9-13], 축적압연접합(accumulative roll bonding, ARB)[14], 고압비틀림(high-pressure torsion, HPT)[15] 등이 있다. 비대칭변형을 통하여 향상된 기계적 물성을 확보했다는 결과가 보고되고 있으나, 가공 중 재료의 손실이 발생하기 때문에 SPD 기술을 양산 기술로 발전시키는데 아직까지 많은 어려움을 겪고 있다. 이를 해결하기 위한 목적으로 재료의 손실이 없고 대칭변형 공정에 기초한 가공 기술인 다축단조(multi-axial forging, MAF) 공정이 제안되었다[16-23]. 초기 MAF 가공법은 재료를 시편 축을 기준으로 회전시키며 여러 방향으로 자유단조(free forging) 또는 폐쇄단조(closed die forging) 공정을 수행하는 기술이다. 그러나 MAF 가공법은 재료내부의 변형이 균질하지 못하다는 문제점이 있다.

최근 개발된 다축대각단조(multi-axial diagonal forging, MADF)기술은 대량생산이 가능하고 입도 미세화 및 미세조직 균질화를 구현할 수 있는 단조 공정이다[24-26]. MADF 가공법은 총 12 패스로 구성되며, 2 개의 단조 유형에 따라 각각 6 개의 패스로 나누어진다. 1~6 패스까지는 X, Y, Z 방향으로 시편을 회전시키며 정육면체의 면과 수직하게 단조를 수행하는 면단조(plane forging, PF)와 이후 원래 형상으로 되돌리는 복귀-면단조(return-plane forging, R-PF)로 구성되어 있다. 다음 7~12 패스에서는 만곡다이(curved die)를 이용하는데 정육면체의 재료를 45 도 회전시켜 위치한 후 대각선 방향으로 단조를 수행하는 대각단조(diagonal forging, DF)와 이후 원래 형상으로 되돌리는 복귀-대각단조(return-diagonal forging, R-DF)로 구성된다. PF, R-PF, DF, R-DF 공정은 모두 폐쇄단조로 수행되며, 단조 방향이 회전됨에 따라 재료에 가해지는 압축 및 인장 변형의 방향도 변경된다.

MADF 가공법을 활용한 연구 결과가 지속적으로 보고되고 있으며, OFC 구리합금의 결정립 미세화 및 인장 특성의 개선에 대한 결과가 최근에 보고되었다[26]. 또한 AA1100 합금에 발달하는 변형 불균일성에 미치는 단조 Route 의 영향을 이론적으로 고찰한 결과가 보고된 바 있다[27]. 그러나 MADF 공정이 재료 내 미세조직 균일성에 미치는 영향에 대하여 엄격히 연구되지 않았고, 특히 PF, R-PF 단조법을 사용하는 기존 MAF 기술과 달리 DF, R-DF 단조법을 사용하고 있어 단조 유형에 따른 변형거동의 차이에 대한 이론적 해석의 연구가 매우 미진한 실정이다.

본 연구에서는 3 차원 유한요소해석법을 활용하여 면단조(PF, R-PF)와 대각단조(DF, R-DF) 공정 동안 AA1100 합금에 발생하는 변형 균일성에 미치는 마찰계수의 영향을 이론적으로 이해하고자 하였다.

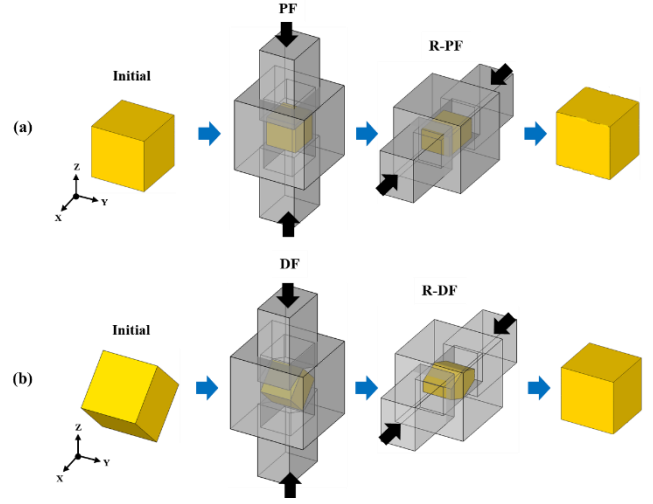


Fig. 1 Schematic diagram of forging processes
(a) plane forging (PF, R-PF), (b) diagonal forging (DF, R-DF).

2. 유한요소해석

PF, R-PF, DF, R-DF 공정을 전산모사 하기 위해 상용 프로그램인 Deform 3D 프로그램을 이용하여 3 차원 유한요소해석(finite element analysis, FEA)을 수행하였다. 해석 시에는 아래와 같은 강-점소성 (rigid-visco-plastic) 재료의 기본 지배 방정식 및 경계조건을 사용하였다.

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

여기서 σ_{ij} , $\dot{\epsilon}$, σ'_{ij} 와 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 각각 응력성분, 유효변형률속도, 편차응력성분 및 변형률속도성분을 나타낸다. S_F 는 힘이 작용하는 면, F_i 는 traction 응력 및 t_j 는 경계면에 수직한 단위벡터를 의미한다. 변분원리(variational principal)에 기초한 유한요소 해석은 아래의 식을 기초로 하여 수행된다.

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

여기서 V 는 가공품의 체적이고 K 는 penalty 상수이며 매우 큰 양수의 상수 값을 가진다. 재료가 기본적으로 아래와 같이 Von Mises 항복기준과 associated flow rule 를 따른다고 가정하였다.

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

또한 다음 3 가지 가정을 고려하여 수행하였다. (1) 재료는 강-점소성 모델이며, (2) 공정 시 사용되는 금형은 rigid 모델을 사용하였다. (3) 재료와 금형은 주변온도를 20 °C 로 가정하고 열전달을 무시하였다.

해석 시 사용한 재료는 한 변의 길이가 25 mm 인 정육면체 형상으로 AA1100 이었다. 해석 시 필요한 AA1100 의 유효응력-유효변형률 곡선을 결정하기 위하여 높이 15 mm 직경 10 mm 의 표준시편과 MTS Exceed series 40 의 만능기계시험장비를 이용한 상온 압축 실험을 수행하였다[27]. 각 단조 공정에서의 변위 조건으로 PF 에서는 7.5 mm, DF 에서는 11.06 mm 이며, 복귀 단조 시에는 정육면체 형상이 되도록 적용하였다. DF 시 사용하는 만곡 다이 금형의 대각단 조각(diagonal forging angle)은 135 도로 고정하였다. MADF 공정 시 마찰계수에 따른 변형 분포의 변화를 해석하기 위하여 마찰계수는 쿨롱마찰계수(coulomb friction coefficient) 0.1, 0.2, 0.3 의 3 가지를 고려하였다. MADF 의 모든 단조 공정은 Y 축으로의 변위가 없는 평면변형 조건하에서 수행하였다.

FEA 를 위한 초기 AA1100 의 메쉬는 93,794 개의 tetrahedral 요소로 PF 와 DF 공정 시 일정하게 적용하였으며, R-PF 와 R-DF 시에는 리메싱(re-meshing)법으로 적용하였다.

3. 해석 결과

3.1 공정별 3차원 요소변화

Fig. 1(a), (b)는 각각 PF 와 R-PF, DF 와 R-DF 공정을 나타낸다. Fig. 1(a)에서 보여주듯이 PF 공정 시에는 Z 축 방향으로 가해지는 압축변형에 의해 X 축으로 인장된 직육면체의 형상으로 변화한다. 반대로 R-PF 는 X 축 방향으로의 압축변형이 가해져 Z 축으로 인장되어 정육면체 형상으로 복귀하는 공정이다. Fig. 1(b)는 대각선 방향으로 압축하는 DF 공정을 포함하고 있어 육각기둥 형상으로 변화하고, R-DF 공

정을 통해 정육면체로 되돌아온다. Fig. 2 는 마찰계수에 따른 PF, R-PF 공정에서의 3 차원 형상의 변화를 단계적으로 보여준다. Fig. 2(a), (b), (c)는 각각 마찰계수 0.1, 0.2, 0.3 의 결과를 보여주는데, 마찰계수에 상관없이 3 차원 형상의 변화가 심하게 발생하지 않았음을 알 수 있다. 각 공정 동안 금형과 접촉하지 않은 두 개의 면에 배부름 현상(barreling effect)이 발생하며, 그 현상의 정도는 마찰계수 조건에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. Fig. 2 의 2 차원(+Y 면) 형상으로부터 PF 시 좌·우, R-PF 시 상·하 방향으로 배부름 현상이 발생하였으며, 마찰계수가 증가함에 따라 그 정도가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 R-PF 공정 시 접촉하고 있는 금형과 재료와의 마찰에 의하여 면 중앙부와 가장자리의 변형이 다르게 발생하여 중앙부에서 상대적으로 배부름 현상이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

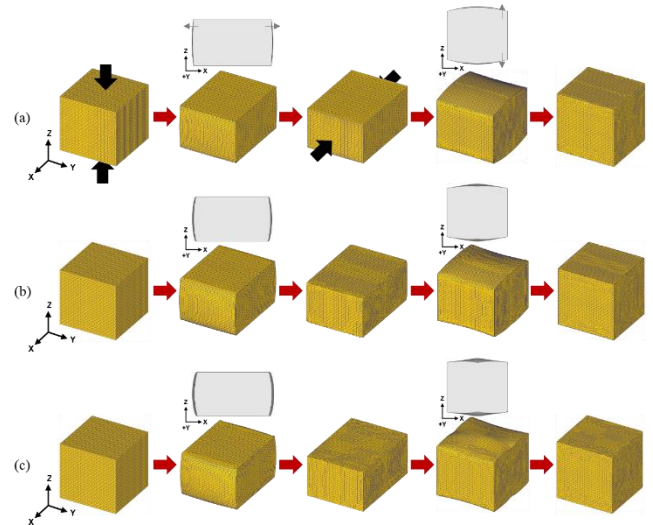


Fig. 2 The changes in the shape of the 3-D FE mesh during PF and R-PF processes (a) $\mu=0.1$, (b) $\mu=0.2$ and (c) $\mu=0.3$.

Fig. 3 은 DF, R-DF 에서의 3 차원 형상 변화를 보여준다. DF, R-DF 공정의 초기 상태부터 재료의 상·하·좌·우 방향 모두 금형과 접촉한 상태로 변형됨을 알 수 있다. DF 공정에서의 배부름 현상은 쉽게 관찰되지 않았으나 R-DF 시 마찰계수가 증가함에 따라 대각선 방향의 배부름 현상이 증가하는 것으로 해석되었다. 또한 본 연구의 단조공정들은 폐쇄단조이므로 각 패스 이후 가공품의 모든 면에 배부름 현상이 없고 평평한 면을 유지하고 있음을 알 수 있다.

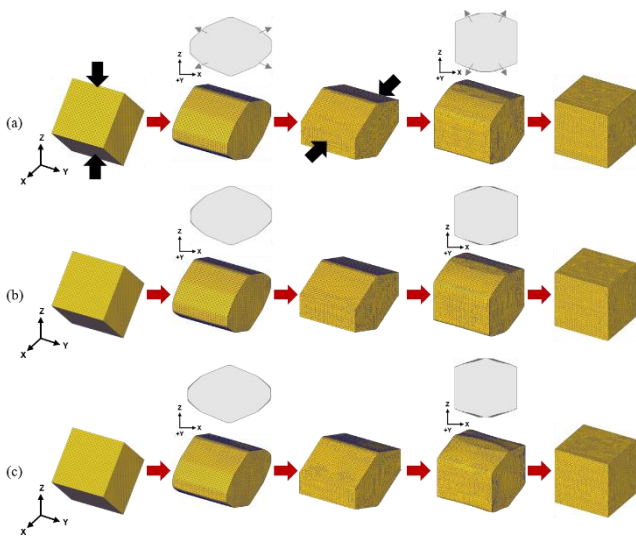


Fig. 3 The changes in the shape of the 3-D FE mesh during DF and R-DF processes (a) $\mu=0.1$, (b) $\mu=0.2$ and (c) $\mu=0.3$.

3.2 공정별 3차원 변형거동

Fig. 4는 PF, R-PF에서 재료의 표면에 발달하는 유효변형률의 분포에 대한 해석 결과를 보여준다. 가공이 진행됨에 따라 가공품의 모서리(edge)와 꼭지점(vertex) 부분에 변형이 집중되고 각 면의 중앙부는 상대적으로 낮은 유효변형률 값을 갖는 거동을 확인할 수 있다. 마찰계수가 작을수록 가공품의 표면에 나타나는 변형이 균일하였고, 최대 유효변형률 값은 감소하는 경향을 보여주었다. 그리고 평면 변형을 받는 Y 방향 면에서의 변형의 불균일성은 점점 감소하는 것으로 해석되었다. Fig. 5에서 보여주듯이 DF, R-DF 공정에서도 모서리와 꼭지점 부분으로 변형이 집중되는 거동으로 해석되었다. Fig. 4, 5에서 최종 가공품의 표면 유효변형률 분포가 R-PF, R-DF 이전 공정에 의해 서로 상이하게 발달하는 것을 알 수 있었다. R-PF에 비해 R-DF 이후 가공품의 표면에 발생하는 유효변형률이 상대적으로 균일하게 발달하는 것을 확인할 수 있다.

MADF 공정으로 인한 재료 내 미세조직 균일화 효과를 검증하기 위해서는 재료 내 분포하는 변형 균일성을 확인해 볼 필요가 있다. Fig. 6는 각 공정 이후 가공품에서 Y축으로의 중앙부를 절단한 단면의 유효 변형률 분포를 분석한 결과이다. 좌측 상단에 도식적으로 표시한 방법으로 절단하여 단면에 발달하는 유효변형률 분포를 2차원적으로 비교 분

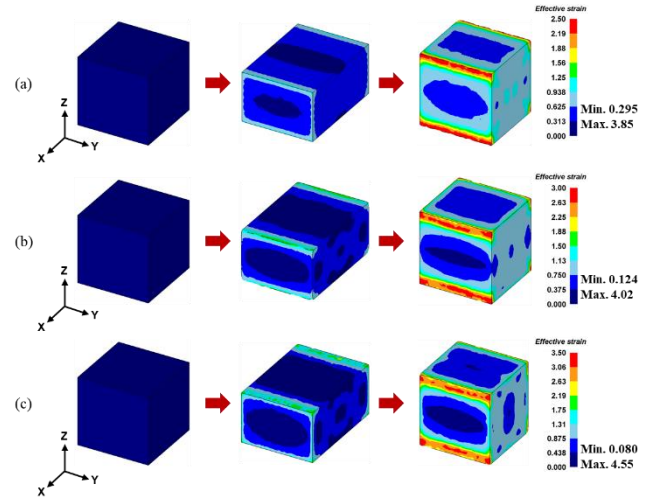


Fig. 4 Distribution of the effective strain developed on the surface of the workpiece during PF and R-PF (a) $\mu=0.1$, (b) $\mu=0.2$ and (c) $\mu=0.3$.

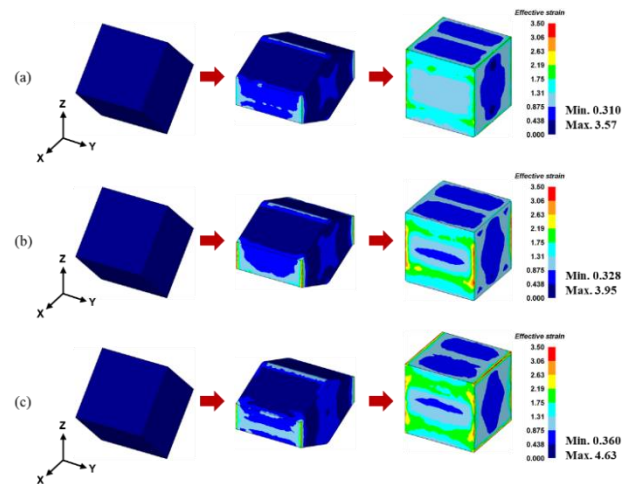


Fig. 5 Distribution of the effective strain developed on the surface of the workpiece during DF and R-DF (a) $\mu=0.1$, (b) $\mu=0.2$ and (c) $\mu=0.3$.

석한 결과이다. PF, R-PF 시 상대적으로 높은 유효변형률이 중앙부에서 대각선 형태로 발생하고 각 모서리에서 변형이 집중되어 있었다. 마찰계수가 증가함에 따라 모서리에서의 유효변형률이 높아지고 변형 불균일성도 점차 증가하는 것으로 나타났다. DF에서도 앞의 공정과 유사한 경향을 보였으나 R-DF에서는 꼭지점 보다 X 축 방향의 모서리와 중앙부에 높은 유효변형률이 발생하였다. 폐쇄단조와 접촉하는 Z 축 방향의 모서리와 중앙부의 상·하부 영역에 국부적으로 낮은 변형률을 갖는 것으로 해석되었다.

이 결과는 기존 MAF 공정과 달리 대각 단조를 포함하는 MADF가 가공품 내 변형 균일성을 증가시켜 발생한 것으로 이해할 수 있다.

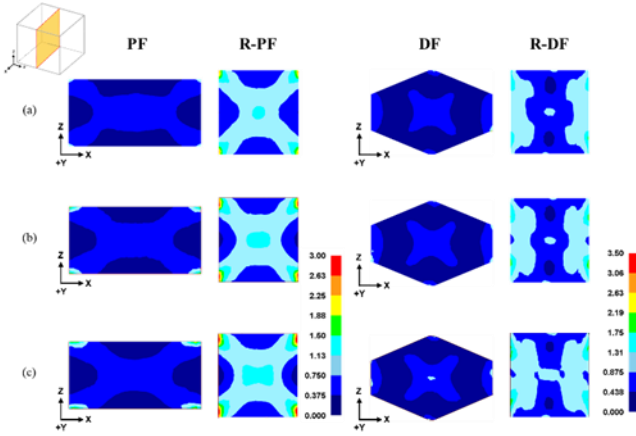


Fig. 6 Distribution of the effective strain developed in the 2-dimensional section of the workpiece (a) $\mu=0.1$, (b) $\mu=0.2$ and (c) $\mu=0.3$.

Fig. 4, 5에서 보여준 것과 같이 면단조 및 대각 단조 후에 가공품의 표면에 발생하는 최대 유효변형률 값이 증가되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 각 공정 별 가공품 전체 요소에 발달한 유효변형률의 평균값을 막대그래프로 나타낸 것이다. R-PF와 R-DF는 각각 PF와 DF 공정 이후 연속적으로 진행되는 공정으로써 상대적으로 높은 평균 유효변형률 값을 보여준다. 마찰계수 조건에 따른 변형률 분포는 뚜렷한 차이를 보였다. 즉, 단조 공정에 상관없이 마찰계수가 증가함에 따라 평균 유효변형률 값이 증가하였으며, 이러한 경향은 대각단조(DF, R-DF)에 비해 면단조(PF, R-PF) 공정에서 상대적으로 뚜렷한 것으로 해석되었다. 반면 최종 가공품 내 중심부에 발생하는 유효변형률은 Fig. 8에 보여주고 있다. 좌측 상단의 중심 절점(center node)으로부터 추출하였다. 마찰계수가 클수록 변형률이 증가하는 경향은 유사하였고 PF를 제외한 공정에서 마찰계수 조건별 유효변형률 차이가 미미한 것으로 해석되었다. 그리고 마찰계수와 관계없이 R-PF에서 가장 높은 유효변형률이 발달하였고 DF 및 R-DF 공정이 연속적으로 진행했음에도 불구하고 R-DF시 유효변형률이 급격히 증가하지 않고 있는 것을 알 수 있었다.

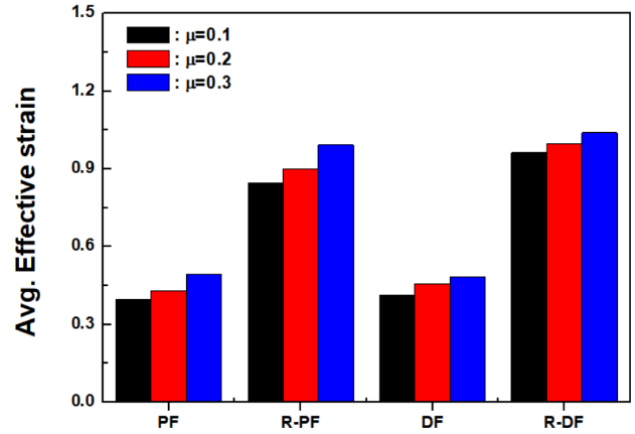


Fig. 7 A quantitative comparison of the effective strain sizes developed at the final stage of each processes.

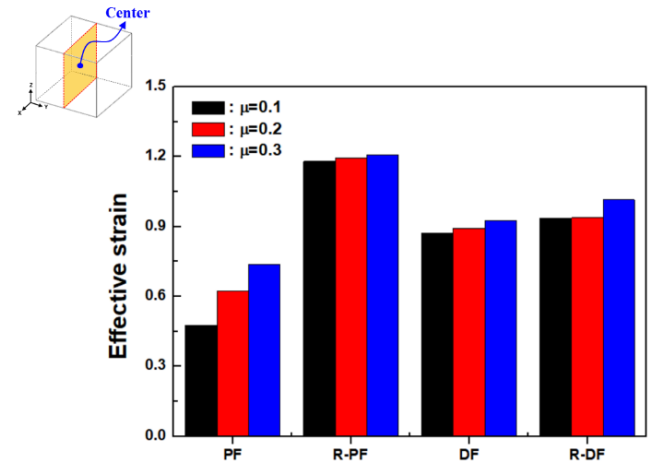


Fig. 8 A quantitative comparison of the effective strain sizes developed in the center region at the final stage of each processes.

4. 결론

본 연구에서는 MADF 공정의 각 단조 공정 시 AA1100 가공품의 형상 및 변형 불균일성을 이론적으로 고찰하고자 FEA를 활용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 각 단조 공정에서 가공품의 3-D 형상 변화를 단계적으로 분석한 결과에 의하면 단조 공정 동안 재료가 다이 금형과 접촉하고 있지 않은 면에서 배부름 현상(barreling effect)이 발생하며, DF와 R-DF

보다 PF, R-PF 에서 상대적으로 뚜렷한 것으로 관찰되었다.

(2) 단조 공정 동안 가공품에 발생하는 배부름 현상은 마찰계수가 증가할수록 그 정도가 증가하는 경향을 보였다. 각 단조 공정은 모두 폐쇄단조 공정 이므로 최종 가공품은 평평한 면을 갖는 정육면체로 형성되었다.

(3) 각 공정 이후 표면 및 가공품 중앙부 단면에서의 유효변형률 분포 해석 결과에 따르면 단조 유형에 관계없이 모서리와 꼭지점에 변형이 집중되어 높은 유효변형률로 발달하는 경향을 보였다. PF, R-PF 에 비해 DF, R-DF 이후 표면 유효변형률이 균일하게 분포하고 있었다. PF, R-PF, DF 이후 가공품 중앙 단면에서 중심부부터 대각선 형태로 유효변형률이 높게 발달하다가 꼭지점에서 가장 높은 유효변형률이 발생하는 것으로 해석되었다. 반면 R-DF 이후 가공품의 경우 단조 방향과 수직하게 낮은 유효변형률로 발달하였다.

(4) 마찰계수가 증가할수록 평균 유효변형률이 증가하였고, 표면 및 내부에서의 변형 불균일성도 증가하는 경향을 보였다. 각 공정의 최종 가공품 내 중심부에서의 유효변형률 값도 점차 증가하는 추세이지만 마찰계수 조건에 따른 유효변형률의 차이는 미미하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구(UD160058B D)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] S.-H. Choi and Y. S. Jin, 2004, Evaluation of stored energy in cold-rolled steels from EBSD data, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 371, No. 1~2, pp. 149~159.
- [2] S. I. Kim, S. H. Choi, Y. Lee, 2005, Influence of phosphorous and boron on dynamic recrystallization and microstructures of hot-rolled interstitial free steel, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 406, No. 1~2, pp. 125~133.
- [3] L. B. Tong, M. Y. Zheng, L. R. Cheng, D. P. Zhang, S. Kamado, J. Meng, H. J. Zhang, 2015, Influence of deformation rate on microstructure, texture and mechanical properties of indirect-extruded Mg-Zn-Ca alloy, *Mater. Characterization*, Vol. 104, pp. 66~72.
- [4] Y. Estrin, A. Vinogradov, 2013, Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science, *Acta Mater.*, Vol. 61, pp. 782~817.
- [5] R. Z. Valiev, Y. Estrin, S. Horita, T. G. Langdon, M. J. Zehetbauer, Y. Zhu, 2016, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: ten years later, *JOM*, Vol. 68, No. 4, pp. 1216~1226.
- [6] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, 2000, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Mater. Sci.*, Vol. 45, pp. 103~189.
- [7] B. Cherukuri, T. S. Nedkova, R. Srinivasan, 2005, A comparison of the properties of SPD-processed AA-6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 410~411, pp. 394~397.
- [8] A. S. Khan, C. S. Meredith, 2010, Thermo-mechanical response of Al 6061 with and without equal channel angular pressing (ECAP), *Int. J. of Plasticity*, Vol. 26, No. 2, pp. 189~203.
- [9] S. Li, A. A. Gazder, I. J. Beyerlein, C. H. J. Davies, E. V. Pereloma, 2007, Microstructure and texture evolution during equal channel angular extrusion of interstitial-free steel: effects of die angle and processing route, *Acta Mater.*, Vol. 55, No. 3, pp. 1017~1032.
- [10] Q. Wei, T. Jiao, S. N. Mathaudhu, E. Ma, K. T. Hartwig, K. T. Ramesh, 2003, Microstructure and mechanical properties of tantalum after equal channel angular extrusion(ECAE), *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 358, No. 1~2, pp. 266~272.
- [11] S. R. Kalidindi, B. R. Donohue, S. Li, 2009, Modeling texture evolution in equal channel angular extrusion using crystal plasticity finite element models, *Int. J. of Plast.*, Vol. 25, No. 5, pp. 768~779.
- [12] B. Beausir, S. Suwas, L. S. Toth, K. W. Neale, J.-J. Fundenberger, 2008, Analysis of texture evolution in magnesium during equal channel angular extrusion, *Acta Mater.*, Vol. 56, No. 2, pp. 200~214.
- [13] S. Suwas, B. Beausir, L. S. Toth, J. -J. Fundenberger, G. Gottstein, 2011, Texture evolution in commercially pure titanium after warm equal channel angular

- extrusion, *Acta Mater.*, Vol. 59, No. 3, pp. 1121~1133.
- [14] S. Li, F. Sun, H. Li, 2010, Observation and modeling of the through-thickness texture gradient in commercial-purity aluminum sheets processed by accumulative roll-bonding, *Acta Mater.*, Vol. 58, No. 4, pp. 1317~1331.
- [15] P. B. R. Rajan, I. Monnet, E. Hug, A. Etienne, N. Enikeev, C. Keller, X. Sauvage, R. Valiev, B. Radigueu, 2014, Irradiation resistance of a nanostructured 316 austenite stainless steel, *IOP conf. series: Mater. Sci. Eng.*, Vol 63
- [16] S. M. Dasharath, S. Mula, 2016, Mechanical properties and fracture mechanisms of ultrafine grained Cu-9.6% Zn alloy processed by multiaxial cryoforging, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 675, pp. 403~414.
- [17] S. Ghosh, A. K. Singh, S. Mula, 2016, Effect of critical temperatures on microstructures and mechanical properties of Nb-Ti stabilized IF steel processed by multiaxial forging, *Mater. And Design*, Vol. 100, pp. 47~57.
- [18] J. Huang, Z. Xu, 2006, Evolution mechanism of grain refinement based on dynamic recrystallization in multiaxially forged austenite, *Mater. Letters*, Vol. 60, pp. 1854~1858.
- [19] H. Q. Ning, F. F. Peng, S. F. Zhu, Q. H. Hu, Z. R. Li, J. Zhao, Q. Zhao, S. D. Huang, X. Jin, 2014, Coarsening kinetics of multiaxial forging(MAF) formed AZ91D magnesium alloy in semisolid state, *Mater. Research Innovations*, Vol. 17, No. 1, pp. 16~20.
- [20] A. K. Padap, G. P. Chaudhari, S. K. Nath, V. Pancholi, 2009, Ultrafine-grained steel fabricated using warm multiaxial forging: microstructure and mechanical properties, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, No. 1~2, pp. 110~117.
- [21] G. A. Salishchev, N. D. Stepanov, A. V. Kuznetsov, S. V. Zherebtsov, O. R. Valiakhmetov, A. A. Kuznetsov, S. V. Dobatkin, 2010, Effect of multiaxial forging on structure evolution and mechanical properties of oxygen free copper, *Mater., Sci., Forum*, Vol. 667~669, pp. 289~294.
- [22] P. Trivedi, K. C. Nune, R. D. K. Misra, S. Goel, R. Jayganthan, A. Srinivasan, 2016, Grain refinement to submicron regime in multiaxial forged Mg-2Zn-2Gd alloy and relationship to mechanical properties, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 668, pp. 59~65.
- [23] N. Y. Yurchenko, N. D. Stepanov, G. A. Salishchev, L. L. Rokhlin, S. V. Dobatkin, 2014, Effect of multiaxial forging on microstructure and mechanical properties of Mg-0.8Ca alloy, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 63
- [24] S. - H. Yang, S. Lee, S. - H. Lee, H. - T. Jeong, Y. - Y. Cho, 2016, Microstructure and texture control method of tantalum, Korea Patent, Registration No 1016320240000
- [25] S. Lee, S. - H. Yang, S. - H. Lee, H. - T. Jeong, Y. - Y. Cho, 2016, Manufacturing method for metal, Korea Patent, Registration No 1016306670000
- [26] S. C. Kwon, S. T. Kim, D. V. Kim, J. K. Lee, S. J. Seo, T. S. Yoon, H. T. Jeong, 2018, Mechanical properties of OFC copper fabricated by multi-axial diagonal forging(MADF), *Trans. Mater. Process.*, Vol. 27, No. 4, pp. 250~256.
- [27] H.-T. Jeong, M. S. Kim, S. C. Kwon, S. T. Kim, S. Lee, S.-H. Choi, 2019, Comparison between multi-axial forging and multi-axial diagonal forging of AA1100 using Finite Element Analysis, *Kor. J. Met. Mater.*, Vol. 57, No. 1, pp. 18~27.