유한요소해석을 이용한 AA1100의 다축 단조와 다축대각 단조의 비교

정효태¹ · 김민성³ · 권상철¹ · 김순태¹ · 이성² · 최시훈^{3,*}

¹국립 강릉원주대학교 신소재공학과

²국방과학연구원

³국립순천대학교 인쇄전자공학과

Comparison Between Multi-Axial Forging and Multi-Axial Diagonal Forging of AA1100 Using Finite Element Analysis

Hyo-Tae Jeong¹, MinSeong Kim³, SangChul Kwon¹, SunTae Kim¹, Seong Lee², and Shi-Hoon Choi^{3,*}

¹Department of Advanced Metal Materials Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 25457, Republic of Korea

²Agency for Defense Development, Daejeong 34186, Republic of Korea

³Department of Printed Electronics Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Republic of Korea

Abstract: The effect that forging routes (3 routes, A-C) exert on the development of deformation heterogeneity in AA1100 was theoretically performed using finite element analysis. Route A corresponded to a forging process that involved from 1 to 6 passes through multi-axial diagonal forging (MADF); Route B corresponded to a forging process that involved from 1 to 12 passes through the MADF; and, Route C corresponded to a conventional multi-axial forging process in which the operations from 1 to 6 passes of the MADF were simply repeated twice. From the aspect of strain uniformity developed on AA1100, Route B, which combined forging operations to the direction perpendicular to the face of the workpiece and forging operations to the diagonal direction of the face of the workpiece, was relatively advantageous compared with Routes A and C that only involved forging operations to the direction perpendicular to the face of the workpiece. Routes A and C showed a tendency toward regions where both the low and the high effective strains were restricted to specific regions of the workpiece. The low and high effective strains created by Route B, on the other hand, tended to be distributed over various regions of the workpiece.

(Received October 1, 2018; Accepted November 2, 2018)

Keywords: AA1100, forging, effective strain, multi-axial diagonal, finite element analysis

1. 서 론

후판, 로드 및 판재 형태의 재료를 대량생산하기 위한 가공법은 대부분 대칭-변형 공정에 기초하여 발전해 왔다 [1-3]. 여기서 대칭-변형 공정이란 금속 유동(metal flow)이 가공품(workpiece)의 중심 축 또는 중심 면을 기준으로 대칭적으로 발생하는 공정을 의미한다. 지금까지 상용화된 대표적인 대칭-변형 공정으로는 압연, 압출, 와이어 드로잉 등이 있다. 이러한 대칭-변형 공정을 사용하여 제조된 재

료의 기계적 성질은 동일한 합금계에서는 현격한 변화를 기대하기 어렵기 때문에 단순한 공정 조건의 변화 만으로 혁신적인 기계적 성질을 확보하기에는 많은 한계가 있다고 보고되어 왔다. 이러한 이유로 최근에 비대칭-변형 공정을 기본적인 특성으로 하는 강소성변형(severe plastic deformation, SPD)의 기술이 개발되었으며, SPD 기술을 이용하여 재료의 물성을 향상시키기 위한 연구가 최근 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔다 [4-14]. 비대칭-변형 공정은 대칭-변형 공정과는 달리 가공품의 중심 축 또는 중심 면을 기준으로 비대칭적인 금속 유동이 발생하면서 전단 변형이 매우 높은 수준으로 발생하는 특성이 있다. 이런 특성 때문에 상당한 정수압(hydrostatic pressure) 하에서 벌크 시편의 형상의 변화 없이 여러 사이클에 걸쳐 반

- 정효태·최시훈: 교수, 김민성·권상철·김순태: 박사과정, 이성: 연구원

*Corresponding Author: Shi-Hoon Choi

[Tel: +82-61-750-3556, E-mail: shihoon@scnu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

복적인 가공이 가능하여 대부분의 SPD 기술은 비대칭-변형 공정에 근간을 두고 있다.

횡단면의 치수를 변경하지 않고 특정 각도에서 봉재 또는 각재를 반복적으로 구부리거나 밀어내는 등통로각압축(equal channel angular pressing, ECAP) [13,15]/등통로각압출(equal channel angular extrusion, ECAE) 가공법 [14,16-19], 수직으로 가압하면서 비틀림 회전을 가하는 고압비틀림(high pressure torsion, HPT) 가공법 [20], 압연 후 판재를 절단하고 중첩하여 반복적으로 압연을 수행하는 누적압연접합(accumulative roll bonding, ARB)가공법 [21], 압연 롤을 지그재그로 소정의 각도로 배치하여 폭 방향으로 전단 변형시키는 교차압연(cross rolling) 가공법 [22-24], 상/하부 롤의 크기 또는 원주 속도를 상이하게 하여 전단변형을 유도하는 이속압연(differential speed rolling, DSR) 가공법 [12,25-29]과 ECAP와 압연기술을 접목한 등통로각압연(equal channel angular rolling, ECAR) 가공법이 개발되어 최근까지 활발한 연구가 진행되고 있다. 이러한 비대칭-변형 공정을 통해 기존의 대칭-변형 공정으로는 얻을 수 없었던 새로운 미세조직과 물성이 보고되고 있으나, 가공 장치 복잡성과 가공 중 발생하는 재료의 손실 때문에 대부분의 공정이 양산 기술로 발전하는데 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이런 비대칭-변형 공정과는 달리 재료 손실이 없는 대칭-변형 공정에 기초한 가공 기술이 최근에 많이 소개되고 있다. 그 중 가장 대표적인 예가 다축단조(multi-axial forging, MAF) 가공법이다 [30-38]. 초기 MAF 가공법은 가공품을 회전시켜 가면서 다축으로 자유단조를 수행하거나 채널다이(channel die)속에서 압축을 가하는 방식을 사용한다. 그러나 MAF 가공법은 기존 SPD 기술인 ECAP나 HPT 가공법에 비해 상대적으로 시편 내부에 발생하는 변형의 균일성이 낮다는 단점이 보고되어 왔다. 최근에 대칭-변형 공정을 통해 각 공정 단계에서 재료의 손실이 거의 없고 공정이 무한히 반복 가능하여 SPD를 비교적 쉽게 달성 할 수 있는 새로운 개념의 가공법인 다축대각단조 (multi-axial diagonal forging, MADF) 가공법이 본 논문의 저자들에 의해 개발되었다 [39,40].

그림 1은 MADF 가공법을 이해하기 쉽게 설명하기 위해 작성한 개략도이다. MADF 가공법은 한 사이클이 총 12 패스(pass)의 단조 공정으로 구성되어 있다. MADF 가공법의 1 패스부터 6 패스까지는 그림 1(a)에서 보여주듯이 기존 MAF 가공법과 유사하게 단조 방향을 회전시키면서 정육면체의 면에 수직하게 X, Y 및 Z 방향으로 면단조(plane forging, PF)와 이후 원래 모양인 정육면체의 형

Fig. 1. Schematic diagrams of the MADF processing method for easy understanding: (a) 1 pass ~ 6 pass and (b) 7 pass ~ 12 pass.

상으로 되돌리는 복귀-면단조(return-plane forging, R-PF)로 구성되어 있다. 이때 PF와 R-PF는 단조 방향에 수직인 한쪽 면의 변형을 구속시킨 채널-다이 압축(channel-die compression, CDC)변형으로서, 단조 면에 따라 구속 면도 차례로 변경된다. 상, 하부 펀치, 다이 및 가공품과 함께 PF 및 R-PF에 대한 좀더 상세한 개략도를 그림 2(a)에 나타내었다. 그림 1(b)에 7 패스부터 12 패스까지 진행하는데 펀치가 시편을 기준으로 어떻게 압축을 가하는지를 각각의 패스에서 새로운 시편 좌표계를 정의하여 나타내었다. DF 7 패스부터 12 패스까지는 만곡다이(curved die)를 사용하는데 가공품의 모서리를 위, 아래로 놓이게 한 후 면의 대각선 방향으로 압축을 가하여 육각기둥 형상의 가공품을 만드는 대각단조(diagonal forging, DF)와 그 후 원래 모양인 정육면체의 형상으로 되돌리는 복귀-대각단조(return-diagonal forging, R-DF)로 구성된다. DF의 단조 방향도 PF에서와 마찬가지로 가공품을 회전시켜 3개의 대각선 방향으로 변경하면서 가공이 진행되며, PF와 마찬가지로 단조 방향에 수직인 면의 변형을 구속시키는 CDC에

Fig. 2. Schematic diagrams of typical forging operations with top and bottom punches, a die and a workpiece: (a) PF, R-PF and (b) DF, R-DF.

해당된다. 이때 3개의 대각선 방향, 변형이 구속되는 방향 및 시편이 늘어나는 방향을 기준으로 새로운 좌표계($X'-Y'-Z'$, $X''-Y''-Z''$, $X'''-Y'''-Z'''$)를 추가로 설정하는 것이 가능하다. 상, 하부 펀치, 다이 및 가공품과 함께 DF 및 R-DF에 대한 좀더 상세한 개략도는 그림 2(b)에서 확인할 수 있다. 그러나 MADF 가공법을 이용하여 단조 공정을 수행하는 경우 재료에 발달하는 변형의 불균일 거동과 관련된 연구 결과는 지금까지 보고된 바가 없다.

이 연구에서는 단조 가공품의 변형 불균일성에 미치는 MAF와 MADF 가공법의 각각의 영향을 이론적으로 비교하고자 다음의 3가지 단조 Route를 고려하였다. Route A는 MADF 가공법의 1 패스에서 6 패스까지의 단조 공정을 포함한 과정에 해당하며, Route B는 MADF 가공법의 1 패스부터 12 패스까지 모든 패스의 단조 공정을 포함한 과정에 해당하며, 마지막으로 Route C는 MADF 가공법의 1 패스부터 6 패스까지의 단조 공정을 단순히 2회 반복하여 수행한 과정에 해당한다.

2. 유한요소해석

그림 3은 유한요소해석(finite element analysis, FEA)을 수행하기 위해 사용한 초기 메쉬(mesh)의 모양을 보여준다. 초기 가공품의 크기는 한 변의 길이가 25 mm인 정육면체로 설정하였다. 그림 4는 MADF 가공법에 해당하는 Route B의 FEA에 사용한 각 패스별 가공품, 펀치 및 다이의 형상을 함께 보여준다. Route B에는 PF, R-PF, DF 및 R-DF가 모두 포함되어 있기 때문에 별도로 Route A와 Route B에 대한 FEA를 위한 초기 형상에 대해서는 생략하였다. 93,924개의 tetrahedral 요소를 이용하여 초기 메쉬를 작성하였다. 비균일 메쉬(non-uniform mesh)를 가진 자동 리메싱법(automatic remeshing scheme)을 FEA에 적용하였다. FEA에 필요한 AA1100의 유효응력-유효변형률 곡선과 마찰계수를 결정하기 위해 높이 15 mm 직경

Total number of elements : 93,924

Fig. 3. The initial mesh used to perform finite element analysis (FEA)

10 mm의 표준시편과 MTS Exceed Series 40의 만능기계 시험장비를 이용하여 상온에서 일축 압축 실험을 수행하였다. 그림 5(a)은 압축실험으로부터 얻어진 AA1100의 유효응력-유효변형률 곡선을 보여준다. 마찰계수는 무윤활 상태에서 압축 실험으로부터 얻어진 압축 시편의 형상과 일축 압축 실험에 대한 FEA 결과로부터 얻어진 압축 시편의 형상을 비교하여 결정하였다. 그림 5(b)에서 보여주듯이 쿨롱마찰계수(Coulomb friction coefficient)가 0.3인 경우가 실험과 FEA결과가 가장 잘 일치하여 이 값을 단조 해석에 사용하였다.

상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D™을 이용하여 단조 공정 시 AA1100에 발생하는 변형 거동을 이론적으로 모사하였다. 본 해석에는 아래와 같은 강-점소성(rigid-visco-plastic) 재료의 기본 지배 방정식 및 경계조건을 사용하였다.

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

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

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

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

Fig. 4. Shape of a workpiece, punches and a die for each pass used in the FEA of Route B.

Fig. 5. (a) Effective stress-strain curve measured from uniaxial compression test and (b) comparison of specimen shapes obtained from uniaxial compression test and FEA.

재료가 기본적으로 아래와 같이 Von Mises 항복기준과 associated flow rule를 따른다고 가정하였다.

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

모든 단조공정이 채널다이압축 공정으로 이루어지는 MADF 공정의 유한요소해석에서, 면단조는 7.5 mm 압축 단조를, 복귀-면단조는 원래의 정육면체가 되도록 수행하였으며, 대각단조는 대각선의 길이를 기준으로 11.06 mm 압축 단조를 수행 후, 정육면체가 되도록 복귀-대각단조를

수행하였다. 여기서 면단조 공정의 압하율은 면단조 평균 유효변형률이 대각단조각(diagonal forging angle)이 135°인 만곡다이(curved die)를 이용하여 대각선 길이방향으로 압축하는 대각단조의 평균 유효변형률과 동일하도록 결정하였다.

또한, MADF 공정을 해석하기 위해 아래와 같이 단순화하여 수행하였다: (1) 가공품의 재료모델은 강-점소성; (2) 펀치와 다이의 물성은 rigid; (3) 쿨롱마찰계수는 상수 (=0.3); (4) 가공품, 펀치 및 다이에서 발생하는 열은 무시; (5) 가공품, 펀치 및 다이의 표면은 20 °C의 대기조건. 본 연구에서는 단조 공정에 대한 FEA 시 온도의 변화를 고려하지 않았다. 그 이유는 온도의 변화를 고려한 일축 압축에 대한 FEA 결과 최고 온도가 22.8 °C로 매우 낮은 정도의 온도 상승이 발생하였기 때문이다.

3. 결과 및 고찰

그림 6은 Route A, B, C에 포함되어 있는 각 패스 별 3차원 메시의 변화를 보여준다. 각 패스 별로 리메싱에 의한 요소 크기의 변화가 심하게 발생하지 않았음을 알 수 있다. R-PF와 R-DF 공정 이후 정육면체의 형상으로 복귀되어 변형되는 것을 확인할 수 있다. 또한 본 연구의 단조

Fig. 6. Changes in 3D meshes for each pass included in Routes A, B, and C: (a) Route A, (b) Route B, and (c) Route C.

Fig. 7. Distribution of the effective strain developed on the surface of the workpiece during one to six passes in Route A.

공정들은 자유단조가 아닌 구속단조이므로 각 패스 이후 가공품의 모든 면에 배부름 (barreling) 현상은 발생하지 않고 평평한 면을 유지하고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 Route A에서 1 패스부터 6 패스 동안 가공품의 표면에 발달하는 유효변형률의 분포에 대한 해석 결과를 보여준다. 가공 패스수가 증가함에 따라 가공품의 모서리(edge)와 꼭지점(vertex)에 유효변형률이 집중되는 거동을 확인할 수 있다. 특히 꼭지점 영역이 모서리 영역에 비해 상대적으로 높은 유효변형률의 분포를 보인다. 꼭지점 부근에서 최대 유효변형률의 값은 8.33 이었다. 그림 8은 Route B에서 7 패스부터 12 패스 동안 가공품의 표면에 발달하는 유효변형률의 분포의 해석 결과를 보여준다. Route B에서 1 패

스부터 6 패스는 Route A와 정확히 동일하기 때문에 생략하였다. 유효변형률이 높은 영역은 Route A와 달리 가공품의 모든 모서리와 꼭지점에 집중되기 보다는 가공 패스수가 증가함에 따라 일부 모서리와 꼭지점 그리고 가공품의 모든 면에 분산되어 발달하는 경향을 보여준다. 이때 최대 유효변형률의 값은 12.4 이었다. 그림 9은 Route C에서 7 패스부터 12 패스 동안 가공품의 표면에 발달하는 유효변형률의 분포에 대한 해석 결과이다. Route C는 가공품의 모서리와 꼭지점에 유효변형률이 집중되는 Route A를 그대로 2번 반복하여 가공한 것이므로, 가공품의 표면에 높은 값의 유효변형률이 가공품의 모든 모서리와 꼭지점에 집중되는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 이때 꼭지

Fig. 8. Distribution of the effective strain developed on the surface of the workpiece during 7 to 12 passes in Route B.

Fig. 9. Distribution of the effective strain developed on the surface of the workpiece during 7 to 12 passes in Route C.

점 부근에서 최대 유효변형률의 값은 15.1 이었다. 그림 7에 나타낸 Route B의 결과와 비교해보면 Route C에서 발생한 최대 유효변형률의 값이 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있다. 각 Route에서 가공 패스가 진행됨에 따라 가공품 전체에 걸쳐 발달하는 유효변형률 평균값의 변화를 그림 10에 나타내었다. Route A, B, C에 공통으로 포함되어 있는 1 패스에서 6 패스까지의 평균 유효변형률은 동일한 값으로 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 7 패스부터 12 패스로 진행하면서 Route B를 겪은 가공품의 평균 유효변형률이 Route C를 겪은 가공품에 비해 상대적으로 약간 크지만, 평균 유효변형률의 편차는 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 가공품 전체에 걸쳐 발달하는 유효변형률의 평균 값은 대각단조와 면단조에서 차이가 미미했는데 이 결과는 단조시의 압하율을 설계할 때 이 점을 고려했기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

보다 정확한 변형 상태를 파악하기 위해서는 평균 유효변형률 값과 함께 가공품에 발달하는 변형률텐서 성분들의 분포를 비교할 필요가 있다. 그림 10에서 알 수 있듯이 유효변형률의 편차값이 크게 다르므로, 유효변형률의 공

Fig. 10. The average value of the effective strains developed throughout the workpieces as the path progresses in each route.

간 분포는 Route 별로 차이가 발생할 것으로 예상할 수 있다. Route 별로 가공품에 발달하는 유효변형률의 공간적 분포를 좀더 엄밀하게 분석하기 위해 가공품 단면(section)에 대한 유효변형률의 분포를 분석하였다. 이를 위해서 3

Fig. 11. Distribution of the effective strain developed in the two-dimensional section of the workpiece: (a) Route A, (b) Route B, and (c) Route C.

차원으로 변형된 FEA 메쉬를 그림 11의 우측 상단에 도식적으로 나타낸 방법으로 3개의 2차원 단면을 가공품의 중심을 기준으로 서로 수직하게 절단한 후 그 절단면에 발달하는 유효변형률의 분포를 비교 분석하였다. 그림 11(a)은 Route A를 겪은 가공품의 X, Y, Z 단면에 발달하는 유효변형률의 분포 결과를 보여준다. X 단면의 결과를 보면 상대적으로 낮은 유효변형률은 모든 가장자리의 중심에서 발생하고 상대적으로 높은 유효변형률은 단면의 중심과 귀퉁이에서 발생하는 것을 알 수 있다. Y 및 Z 단면의 결과를 보면 X 단면의 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 단면 귀퉁이 좁은 영역에 유효변형률이 높은 영역이 집중되어 발생하는 것으로 해석되었다. 그림 11(b)에 Route B를 겪은 시편의 X''', Y''', Z''' 단면에 발달하는 유효변형률의 분포 결과를 나타내었다. X 단면의 결과를 보면 상대적으로 낮은 유효변형률이 발달하는 영역은 매우 좁은 영역으로 줄어들었고 상대적으로 높은 유효변형률이 발생하는 영역도 가장자리 전체에 걸쳐 발생하는 경향을 보인다. Y 단면의 결과를 보면 낮은 유효변형률이 발달하는 영역은 매우 좁은 영역에 제한되어 있고 높은 유효변형률을 갖는 영역이 두개의 귀퉁이를 중심으로 가장자리에 걸쳐 발생하는 것으로 해석되었다. Z 단면의 결과를 보면

낮은 유효변형률이 발달하는 영역이 다른 단면에 비해 약간 넓어졌으나 높은 유효변형률 영역이 상대적으로 좁아진 것으로 해석되었다. 그림 11(c)에 Route C를 겪은 가공의 X, Y, Z 단면에 발달하는 유효변형률의 분포 결과를 나타내었다. X 단면의 결과를 보면 상대적으로 낮은 유효변형률은 모든 가장자리의 중심에 발생하고 상대적으로 높은 유효변형률은 단면의 중심과 귀퉁이에서 발생하였는데 이 결과는 그림 11(a)에 나타낸 Route A의 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있다. Y 및 Z 단면의 결과를 보면 유효변형률의 분포가 X 단면의 결과와 매우 흡사함을 알 수 있다.

그림 11(b)와 (c)를 비교해보면 Route B가 Route C에 비해 상대적으로 균일한 유효변형률을 발달하게 하는 것을 확인할 수 있다. 이런 변형 거동의 차이는 Route C는 단순히 PF와 R-PF공정만이 가공품을 변형하는데 적용되는 반면 Route B는 DF와 R-DF공정이 PF와 R-PF공정과 함께 적용되어 나타난 결과로 판단된다. Route C에서는 PF와 R-PF공정에 의해 주변형률 방향이 서로 수직으로만 작용되지만 Route B에서는 DF와 R-DF공정이 추가되어 주변형률이 좀더 다양한 방향으로 작용하게 되고 결과적으로 가공품에 보다 효과적으로 균일한 유효변형률이 발달하는

Fig. 12. Distribution of effective strain and strain tensor components developed in each workpiece by each route.

것으로 이해할 수 있다.

그림 12은 Route 별로 가공품에 발달하는 유효변형률과 각 변형률텐서 성분들에 대한 해석 결과를 분율로 정리하여 나타낸 것이다. Route A와 Route C를 겪은 가공품의 유효변형률의 분포는 비정규분포로 일부 영역에서 매우 큰 유효변형률이 작용하는 것을 나타내고 있으며, Route C의 경우는 Route A를 겪은 가공품에 비해 상대적으로 넓게 퍼지면서 큰 값 쪽으로 이동하는 경향을 보여준다. Route B를 겪은 가공품의 유효변형률의 분포는 Route C를 겪은 가공품의 비해 상대적으로 분포의 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Route B가 Route C보다 가공품을 균일하게 변형시킨다는 것을 의미하며, Route B를 겪은 가공품이 Route C를 겪은 가공품에 비해 상대적으로 균일한 변형분포를 갖는 것으로 이해할 수 있다. Route A를 겪은 가공품 내부에 발달하는 변형률텐서 성분 크기의 분포는 0의 값을 중심으로 상이한 폭의 크기를 가지면서 모두 대칭의 분포를 보인다. Route B를 겪은 가공품에 발달하는 변형률텐서 성분들의 분포는 Route A를 겪은 가공품과는 달리 0의 값을 중심으로 대칭적으로 발달하지 않고 양 또는 음으로 약간 치우친 비대칭적인 분포를 보인다. Route C를 겪은 가공품에 발달하는 변형률텐서 성분들의 분포는 Route A를 겪은 가공품의 결과와 비교해보면 폭의

크기만 증가하고 매우 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다. 즉, PF와 R-PF만으로 구성되어 있는 Route A를 단지 2회 반복해서 수행한 Route C의 경우에는 변형률텐서 성분의 양과 음의 값이 유사하게 발생하며, 수직 변형률성분 뿐만 아니라 전단 변형률성분도 함께 비교적 큰 값이 발생하는 것으로 해석되었다. 한편, Route B의 경우에는 변형률텐서 성분들 모두 양과 음의 값이 균등하게 발생하지 않았으며 전단 변형률성분들이 Route A와 Route B에 비해 폭이 넓게 분포하므로 상대적으로 전단변형성분들이 강하게 작용하는 것으로 해석되었다. Route B에서 관찰되는 상대적으로 강한 전단 변형률성분의 발달은 그림 10에서 보여준 약간 높은 평균 유효변형률의 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 가공품에 발달하는 변형 집합조직에도 큰 영향을 줄 것으로 예상할 수 있다. 가공품의 변형 불균일성에 미치는 단조 Route의 영향에 관한 FEA 결과의 정확성을 증명할 수 있는 실험적인 연구와 변형집합조직(deformation texture) 발달에 관한 연구는 추후에 별개의 논문들로 심도 있게 다룰 예정이다.

4. 결 론

AA1100 가공품에 발달하는 변형 불균일에 미치는 단조

Route의 영향을 이론적을 고찰하고자 FEA를 사용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

가공품의 표면에 발달하는 유효변형률의 분포에 대한 해석 결과에 의하면 PF와 R-PF공정만이 수행되는 MAF공정의 Route A와 Route C의 경우에는 가공품의 모서리와 꼭지점에 유효변형률이 집중되었다. 그러나 PF와 R-PF공정과 DF와 R-DF공정이 연속적으로 진행되는 MADF공정인 Route B의 경우에는 유효변형률이 높은 영역이 가공품의 모서리와 꼭지점에 집중되지 않고 가공품의 면에 분산되어 발달하는 경향을 보였다.

가공품의 중심을 기준으로 절단한 3개의 수직 단면에 발달하는 유효변형률의 분포에 대한 해석 결과에 의하면 MAF공정인 Route A와 Route C를 겪은 가공품의 경우 3개의 수직 단면에서 상대적으로 낮은 유효변형률은 모든 가장자리의 중심에서 집중되었고, 상대적으로 높은 유효변형률은 단면의 중심과 귀퉁이에서 집중되어 발생하였다. 반면, MADF공정인 Route B를 겪은 가공품의 경우 3개의 수직 단면에서 상대적으로 낮은 유효변형률이 발생하는 영역은 매우 좁은 영역으로 제한되었으며 상대적으로 높은 유효변형률이 발생하는 영역도 가장자리 전체에 걸쳐 발생하는 경향을 보였으며, 유효변형률의 최대값과 최소값의 차이도 Route C에 비해 작으므로 균일한 변형이 이루어지는 것을 알 수 있었다.

MAF공정인 Route A와 Route C에서는 변형률텐서 성분 크기의 분율 분포는 0의 값을 중심으로 상이한 폭의 크기를 가지면서 모두 대칭의 분포를 보였다. MADF공정인 Route B의 경우에는 변형률텐서 성분들 모두 양과 음의 값이 균등하게 발생하지 않았으며 전단 변형률성분들이 Route A와 Route B에 비해 상대적으로 강하게 발생하는 것으로 해석되었다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구(UD160058BD)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. S. H. Choi and Y. S. Jin, *Mater. Sci. Eng. A* **371**, 149 (2004).
2. S. I. Kim, S. H. Choi, and Y. Lee, *Mater. Sci. Eng. A* **406**, 125 (2005).
3. L. B. Tong, M. Y. Zheng, L. R. Cheng, D. P. Zhang, S. Kamado, J. Meng, and H. J. Zhang, *Mater. Charact.* **104**, 66 (2015).
4. R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. G. Langdon, M. J. Zehetbauer, and Y. Zhu, *JOM* **68**, 1216 (2016).
5. C. F. Gu, L. S. Tóth, D. P. Field, J. J. Fundenberger, and Y. D. Zhang, *Acta Mater.* **61**, 3027 (2013).
6. J. B. Singh, R. Kapoor, A. Durga Prasad, and J. K. Chakravartty, *Mater. Sci. Eng. A* **581**, 26 (2013).
7. A. Kundu, R. Kapoor, R. Tewari, and J. K. Chakravartty, *Scr. Mater.* **58**, 235 (2008).
8. G. G. Yapici, C. N. Tomé, I. J. Beyerlein, I. Karaman, S. C. Vogel, and C. Liu, *Acta Mater.* **57**, 4855 (2009).
9. M. Montazeri-Pour, M. H. Parsa, and H. Mirzadeh, *Adv. Eng. Mater.* **17**, 1197 (2015).
10. M. Montazeri-Pour, M. H. Parsa, H. R. Jafarian, and S. Taieban, *Mater. Sci. Eng. A* **639**, 705716 (2015).
11. S. N. Mathaudhu and K. T. Hartwig, *Mater. Sci. Eng. A* **463**, 94 (2007).
12. W. J. Kim, K. E. Lee, and S. H. Choi, *Mater. Sci. Eng. A* **506**, 71 (2009).
13. B. Cherukuri, T. S. Nedkova, and R. Srinivasan, *Mater. Sci. Eng. A* **410-411**, 394 (2005).
14. S. Li, A. A. Gazder, I. J. Beyerlein, C. H. J. Davies, and E. V. Pereloma, *Acta Mater.* **55**, 1017 (2007).
15. A. S. Khan and C. S. Meredith, *Int. J. Plast.* **26**, 189 (2010).
16. Q. Wei, T. Jiao, S. N. Mathaudhu, E. Ma, K. T. Hartwig, and K. T. Ramesh, *Mater. Sci. Eng. A* **358**, 266 (2003).
17. S. R. Kalidindi, B. R. Donohue, and S. Li, *Int. J. Plast.* **25**, 768 (2009).
18. B. Beausir, S. Suwas, L. S. Tóth, K. W. Neale, and J. J. Fundenberger, *Acta Mater.* **56**, 200 (2008).
19. S. Suwas, B. Beausir, L. S. Tóth, J. J. Fundenberger, and G. Gottstein, *Acta Mater.* **59**, 1121 (2011).
20. P. B. R. Rajan, I. Monnet, E. Hug, A. Etienne, N. Enikeev, C. Keller, X. Sauvage, R. Valiev, and B. Radiguet, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **63**, 012121 (2014).
21. S. Li, F. Sun, and H. Li, *Acta Mater.* **58**, 1317 (2010).
22. Y. Chino, K. Sassa, A. Kamiya, and M. Mabuchi, *Mater. Lett.* **61**, 1504 (2007).
23. D. G. Kim, H. T. Son, D. W. Kim, Y. H. Kim, and K. M. Lee, *J. Alloy. Compd.* **509**, 9413 (2011).
24. Y. Chino, K. Sassa, A. Kamiya, and M. Mabuchi, *Mater. Sci. Eng. A* **473**, 195 (2008).
25. X. Huang, K. Suzuki, A. Watazu, I. Shigematsu, and N. Saito, *J. Alloy. Compd.* **470**, 263 (2009).
26. J. Choi, J. Cho, H. Kim, S. Kang, and S. Choi, *Korean J. Met. Mater.* **48**, 605 (2010).
27. X. Huang, K. Suzuki, and N. Saito, *Scr. Mater.* **60**, 651

- (2009).
28. X. Huang, K. Suzuki, and N. Saito, *Scr. Mater.* **61**, 445 (2009).
 29. X. Huang, K. Suzuki, and N. Saito, *Mater. Sci. Eng. A* **508**, 226 (2009).
 30. P. J. Szabó, P. Bereczki, and B. Verő, *Period. Polytech. Mech. Eng.* **55**, 63 (2011).
 31. S. M. Dasharath and S. Mula, *Mater. Sci. Eng. A* **675**, 403 (2016).
 32. G. A. Salishchev, N. D. Stepanov, A. V. Kuznetsov, S. V. Zharebtsov, O. R. Valiakhmetov, A. A. Kuznetsov, and S. V. Dobatkin, *Mater. Sci. Forum* **667-669**, 289 (2010).
 33. N. Y. Yurchenko, N. D. Stepanov, G. A. Salishchev, L. L. Rokhlin, and S. V. Dobatkin, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **63**, 012075 (2014).
 34. H. Q. Ning, F. F. Peng, S. F. Zhu, Q. H. Hu, Z. R. Li, J. Zhao, Q. Zhao, S. D. Huang, and X. Jin, *Mater. Res. Innov.* **17**, 16 (2013).
 35. A. K. Padap, G. P. Chaudhari, S. K. Nath, and V. Pancholi, *Mater. Sci. Eng. A* **527**, 110 (2009).
 36. S. Ghosh, A. K. Singh, and S. Mula, *Mater. Des.* **100**, 47 (2016).
 37. P. Trivedi, K. C. Nune, R. D. K. Misra, S. Goel, R. Jayganthan, and A. Srinivasan, *Mater. Sci. Eng. A* **668**, 59 (2016).
 38. J. Huang and Z. Xu, *Mater. Lett.* **60**, 1854 (2006).
 39. S. C. Kwon, S. T. Kim, D. V. Kim, J. K. Lee, S. J. Seo, T. S. Yoon, and H. T. Jeong, *Trans. Mater. Process.* **27**, 250 (2018).
 40. M.-S. Kim, S.-C. Kwon, S.-T. Kim, S. Lee, H.-T. Jeong, and S.-H. Choi, *Metals. Mater. Int.* (Accepted)