

## 다축대각단조(MADF) 가공횟수에 따른 AA1100의 미세조직 변화

권상철<sup>1</sup> · 김순태<sup>1</sup> · 김다빈<sup>1</sup> · 김민성<sup>2</sup> · 이성<sup>3</sup> · 최시훈<sup>2,\*</sup> · 정효태<sup>1,#</sup>

### Microstructural Changes of AA1100 According to the Processing Number of Multi-Axial Diagonal Forging (MADF)

S.C. Kwon, S.T. Kim, D.V. Kim, M.S. Kim, S. Lee, S.H. Choi, and H.T. Jeong  
(Received November 15, 2018 / Revised March 4, 2019 / Accepted March 12, 2019)

#### Abstract

This study investigates the effects of multi-axial diagonal forging (MADF) processing number on the microstructures of AA1100 fabricated using MADF processes. The cast AA1100 was annealed at 400 °C for 3hrs in N<sub>2</sub> atmosphere and cut into 25 mm<sup>3</sup> cubes for the MADF processes. The MADF process consist of plane forging with a thickness reduction of 30% and a diagonal forging with a diagonal forging angle of 135 degrees. In order to analyze the microstructural variations based on the number of repetitions, 1, 2, 3 and 4 cycles of the MADF process were performed. AA1100 specimens were successfully deformed without cracking of the surface for up to 4 cycles of MADF. The grain size, average misorientation and average grain orientation spread (GOS) of MADF processed materials were analyzed using EBSD technique. The results showed that MADF process effectively refined the microstructure of AA1100 with an initial average grain size of 337.4 μm. The average grain sizes of specimens which were MADF processed for 2, 3, 4 cycles were refined to be 1.9 μm, 1.6 μm, 1.4 μm, respectively. The grain refinement appeared saturated when AA1100 got MADF processed over 2 cycles. When the specimen was subjected to two or more cycles of MADF, the degree of decrease in the average grain size drastically decreased with an increase in the number of cycle due to the softening phenomena such as dynamic recovery or dynamic recrystallization during processing.

**Key Words** : Severe plastic deformation, AA1100, MADF, Microstructure

#### 1. 서 론

현재 후판, 봉재, 각재 등의 재료를 대량생산하기 위한 가공법은 주로 대칭변형공정에 의해 이루어져 왔다. 대칭변형공정이란 재료의 소성유동이 제품의

대칭적인 중심면이나 중심축을 기준으로 대칭적으로 변형되는 공정을 의미하는 것으로, 대표적인 대칭변형공정은 압연, 압출, 인발 등이 있다. 그러나, 이러한 대칭변형공정은 오랫동안 연구개발되어 왔기에 기존의 가공방법에서 공정조건만을 변화시켜서는 혁신적인 재료물성의 변화를 얻기에 한계가 있으므로 최근에 비대칭 변형공정을 특징으로 하는 강소성가공법(severe plastic deformation, SPD)이 개발되어 재료물성의 향상을 위해 많은 연구가 진행되고 있다[1-6]. 이 연구에서 연구하고자 하는 고순도

1. 강릉원주대학교  
2. 순천대학교  
3. 국방과학연구소

# Corresponding Author : Gangneung-Wonju National University, Dept. of Advanced Metal and Materials Engineering, E-mail : htjeong@gwnu.ac.kr, ORCID ID : 0000-0002-4637-8186

\*Co-corresponding Author: Suncheon National University, Dept. of Printed Electronics Engineering, E-mail: shihoon@snu.ac.kr

의 알루미늄 벌크 소재의 결정립 극미세화에 대해서도 SPD를 통하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 비대칭변형공정을 기본특징으로 하는 SPD로는 봉재 또는 각재를 단면적의 치수 변화 없이 특정한 각도로 반복적으로 꺾어서 압출해내는 등통로 각압축(equal channel angular pressing, ECAP) / 등통로 각압출(equal channel angular extrusion, ECAE)가공법, ECAP가공법에서 꺾는 방향을 다수로 하는 ECAEP(equal channel multiple angular pressing)가공법, 수직으로 압력을 가하면서 비틀림회전을 가하는 고압비틀림(high pressure torsion, HPT)가공법 등이 사용되고 있다. 이와 같은 강소성가공기술들은 소재의 형상을 일정하게 유지하면서 반복적인 비대칭 가공을 가하여 소재에 큰 변형을 부가함으로써 미세조직을 극미세화하거나 항복강도 등의 기계적 성질을 향상시킬 수 있어, 기존의 대칭가공기술에서 얻을 수 없는 새로운 재료물성들이 강소성가공기술 연구에서 많이 보고되고 있다[1-6]. 그러므로, 다양한 SPD를 활용하면, 기존 가공공정을 통하여서는 가공소재에 발달하지 않는 새로운 집합조직이나, 극미세결정립 분포를 얻을 수 있으므로 혁신적인 새로운 소재 물성을 기대할 수 있다는 장점이 있다.

그러나 이와 같은 SPD의 장점에도 불구하고 현재까지의 강소성가공기술들은 가공장치가 복잡하고, 가공공정의 실시가 어려워 오랜 작업시간이 소요되며, 매 가공공정에 따라 재료의 손실이 발생하므로 대량생산에 적용하기 어려워 실험실 규모의 연구용 기술로 국한되고 있는 실정이다.

최근에 소재의 형상을 일정하게 유지하는 강소성가공법의 특징을 그대로 갖고 있음에도 대칭적인 변형공정을 통하여 재료의 손실이 거의 없고 공정의 무한반복이 가능하여 대량생산이 용이한 SPD로 다축대각단조(multi-axial diagonal forging, MADF) 가공기술을 개발하였으며, MADF 가공기술과 압연기술을 활용한 판재 제조공정 설계를 통하여 탄탈륨(Ta)소재의 입도미세화 및 미세조직 균질화를 효과적으로 구현하였다[8-9]. 또한 무산소동(OFC)의 결정립 미세화 및 기계적성질에 대한 결과가 최근 보고되었으며[10], MADF를 구성하는 개개의 단조공정에 따라 AA1100합금의 벌크소재 내부에 가해지는 변형의 불균질성을 해석한 연구결과가 보고되었다[11].

MADF 가공기술은 다음 절에서 설명하는 바와 같이 공정진행에 따른 가공재의 손실이 없고, 가공재

의 형상을 유지하도록 하는 단순한 일축단조공정을 반복하므로, 반복가공이 수월하여 기존의 강소성가공법들과는 달리 대량생산이 용이한 기술이다.

이 연구에서는 MADF 가공법을 사용하여 면심입방정(FCC)금속인 AA1100을 가공하였으며, 가공량에 따른 미세조직 변화를 연구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 다축대각단조(MADF) 가공법

MADF 가공법은 기존의 다축단조(multi-axial forging, MAF or multi-directional forging, MDF) 공정과 새로운 대각단조(diagonal forging, DF) 공정으로 구성되어 있다[8,9].

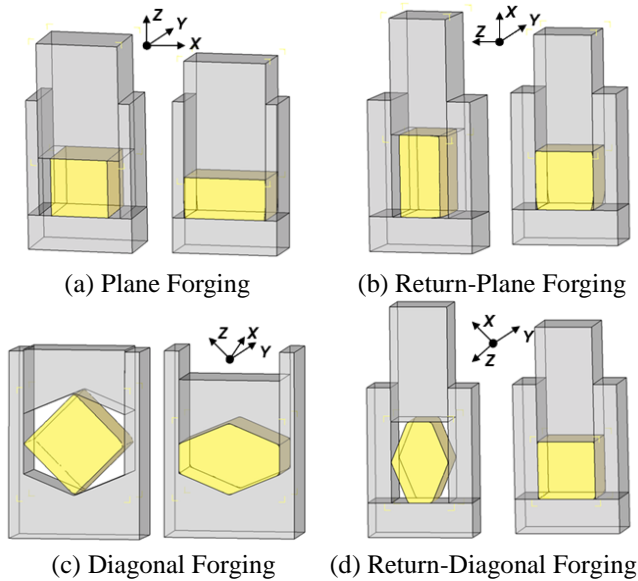
기존의 MDF 공정은 육면체의 벌크소재의 3면에 수직인 방향을 단조방향으로 하여 순차적으로 방향을 바꾸면서 자유단조 또는 구속단조를 수행함으로써 소재 내부에 변형을 인가한 후 초기 소재의 형상으로 복귀하는 강소성가공법이다[7]. 단순 다축단조는 엷단조의 특징에 따라 변형이 압축방향에 대해 45도인 면에 집중되므로 다축단조 가공 후에는 육면체 벌크소재의 모서리와 중심부에 변형이 집중되고 면에는 변형이 거의 이루어지지 않으므로, 소재 내부의 위치에 따른 미세조직 및 재료물성의 차이가 크게 나타난다.

이러한 다축단조의 변형 불균질성을 극복하기 위하여 대각단조공정을 수행한다. 대각단조공정은 마주하는 두 면의 방향으로 압축하는 다축단조와 달리 마주하는 두 모서리의 방향으로 압축가공하는 것으로, 다축단조와 비교하면 압축방향을 육면체의 면의 법선방향을 중심으로 45도 회전한 것이다. 그러므로 대각단조에서는 변형이 다축단조와 대조적으로 가공 후에 육면체 벌크소재의 면과 중심부에 집중되게 되어 소재 내부의 위치에 따른 변형의 균질성을 회복하게 된다.

Fig.1에 각 단조공정의 개략도를 나타내었다. MADF 공정은 총12패스의 단조공정으로, 1패스에서 6패스까지의 다축단조와 7패스에서 12패스까지의 대각단조공정으로 이루어진다. 이때 12패스의 모든 단조공정은 한 방향의 변형을 구속하는 구속단조(closed die forging)공정으로 이루어진다.

1~6패스까지의 다축단조를 설명하면, 정육면체의 세 모서리의 방향을 각각 X, Y, Z 축이라 할 때 다음

과 같다. Y방향의 변형을 제한하고 Z축 방향으로 일곱번 단조하는 면단조(plane forging, PF) 후, 면단조에 의해 돌출된 X방향을 단조하여 원래의 형상으로 복원시키는 복귀-면단조(return-plane forging, R-PF)를 수행하고, 3~4패스는 X방향의 변형을 제한하고 Y방향으로 PF 후 Z방향으로 R-PF, 그리고 5~6패스는 Z방향의 변형을 제한하고 X방향으로 PF 후 Y방향으로 R-PF를 수행하여 3개의 축방향으로 PF와 R-PF의 6패스 공정을 완료한다.

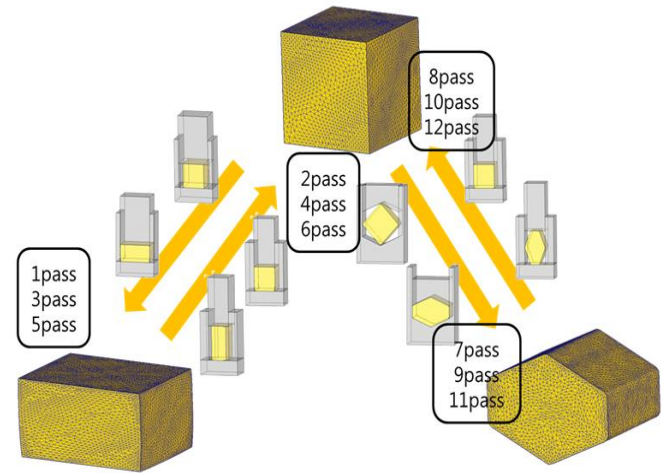


**Fig. 1 Schematic diagram of representative forging processes in MADF process**

이어서, 7~12패스의 대각단조공정은 Fig. 1의 (c)와 (d)에 나타난 것과 같이 정육면체의 마주보는 3개의 면에서 대각선 방향으로 이루어지는 대각단조(diagonal forging, DF)와 복귀-대각단조(return-diagonal forging, R-DF)로 구성되며 DF에서는 소재의 모서리를 지지하기 위하여 만곡다이(curved die)를 사용한다. DF는 Y축에 수직한 면의 변형을 제한하고, Y축 방향에 평행한 모서리 중 서로 가장 멀리 이격되어 있는 두 모서리를 서로 가까워지도록 DF를 한 후 DF에 의해 돌출된 부분을 단조하여 금속을 원래의 형상으로 복원시키는 R-DF를 수행하고, Y축 이외의 다른 두 축 방향에 평행한 두 모서리에 대하여 각각 DF 및 R-DF를 수행하는 것이다.

Fig. 2에 MADF의 단조공정순서와 가공재의 모양 변화를 개략적으로 나타내었다. MADF 공정은 앞에

서 설명한 바와 같이 12패스의 단조공정으로 완성되며, 이와 같은 12패스의 단조공정을 1 사이클(cycle)이라고 정의한다.



**Fig. 2 Schematic diagram showing MADF process**

## 2.2 다축대각단조(MADF) 가공실험

이 연구에서 AA1100 소재의 MADF 공정은 두께 감소율이 30%인 PF와 대각단조각이 135도인 대각단조로 구성하여 상온에서 수행하였다. 단조소재인 AA1100은 주조 후 각 변의 길이가 25 mm 길이의 정육면체로 절단하여 사용하였다. 초기 소재는 400 °C에서 질소분위기로 3시간 어닐링 후 사용하였으며, 어닐링 한 초기 소재의 평균 결정립 크기는 337.4 μm 였다. MADF 공정은 상하 복동식 200톤 프레스를 이용하여 원활없이 가공하였다.

1 사이클의 MADF 공정은 12패스의 단조공정으로 구성되는데, 1 사이클의 MADF 공정을 수행하고 나면 단조소재는 다시 초기의 정육면체 형상이 되므로 MADF 가공을 지속적으로 반복 수행할 수 있다. 그러므로 이 연구에서는 MADF의 가공 횟수에 따른 재료특성의 변화를 분석하기 위하여 최대 4 사이클 까지 MADF 가공을 하였다. 즉, 주조재를 400°C, 3시간 열처리한 초기 소재를 사용하여 가공공정 중간의 열처리 과정없이 1, 2, 3, 4 사이클의 MADF 가공을 수행하여 각각의 미세조직을 분석하였다.

Fig. 3에는 각 변의 길이가 25 mm의 AA1100 정육면체의 MADF를 이용하여 가공한 시편의 외형을 나타내었다. MADF를 4 사이클까지 가공하여도 여섯면 모두 건전하게 가공된 것을 확인할 수 있었다.

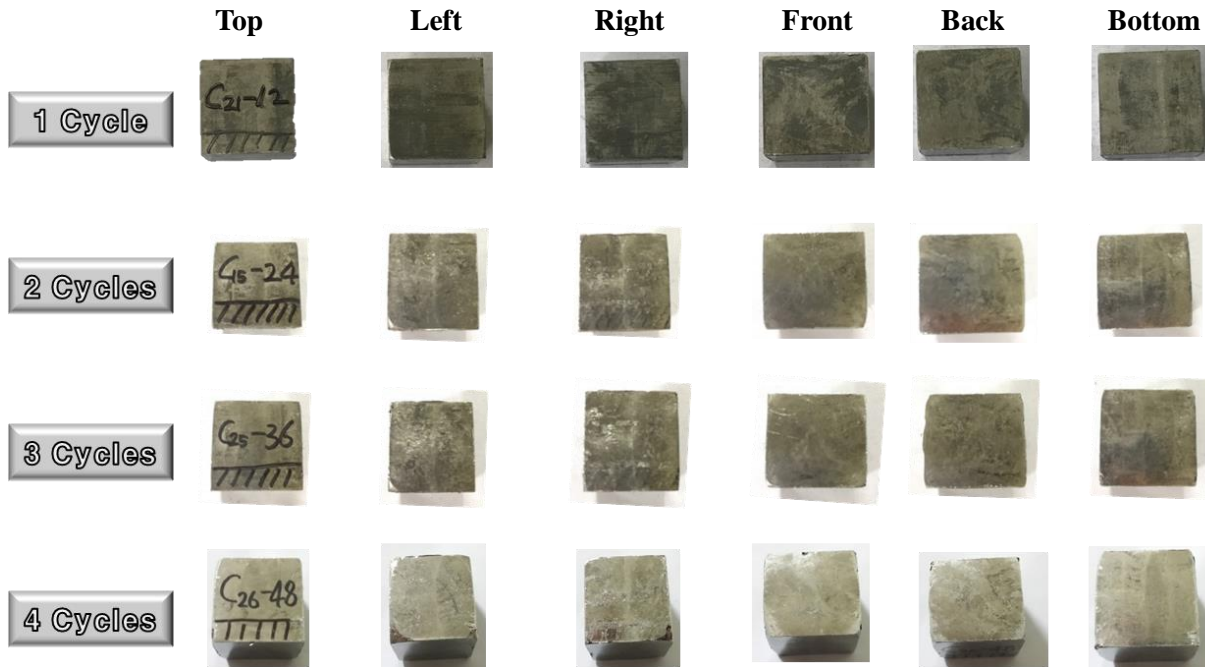


Fig. 3 The shape of the AA1100 specimens undergoing each cycle of the MADF process

### 2.3 미세조직 분석방법

MADF 가공이 완료된 정육면체 가공소재들은 마지막 공정에서 하중을 받은 방향을 Z방향으로 하고, 구속단조(closed die forging)의 변형제한면에 수직한 방향을 Y방향으로 하여 Fig. 4와 같이 축을 설정하였다. EBSD(electron backscatter diffraction) 측정법을 사용한 미세조직 분석실험에서는 시편의 방향을 구분하여 표기하는 것이 매우 중요하다. 이 연구의 MADF 가공재는 Fig. 4와 같이 압축하는 방향을 Z축, 변위가 구속되는 방향을 Y축 그리고 연신되는 방향을 X축으로 각각 정의하였다.

시편의 미세조직 분석을 위한 위치는 Fig. 4와 같이 Y축 방향의 정중앙으로 하였으며, 절단면은 최종단조방향에 평행하도록 절단하여 분석하였다. 분석면에서 위치에 따른 차이를 알아보기 위하여 채취한 중심면에 대하여 Fig. 4와 같이 가로와 세로방향을 3등분하여 9개의 영역으로 구분하였고, MADF공정의 대칭성을 고려하여 모서리(edge)영역, 2개의 면(face)영역, 중심(center)영역을 각각 Edge, Face1, Face2, Center로 표시하고 각 영역에서 시편을 채취하였다.

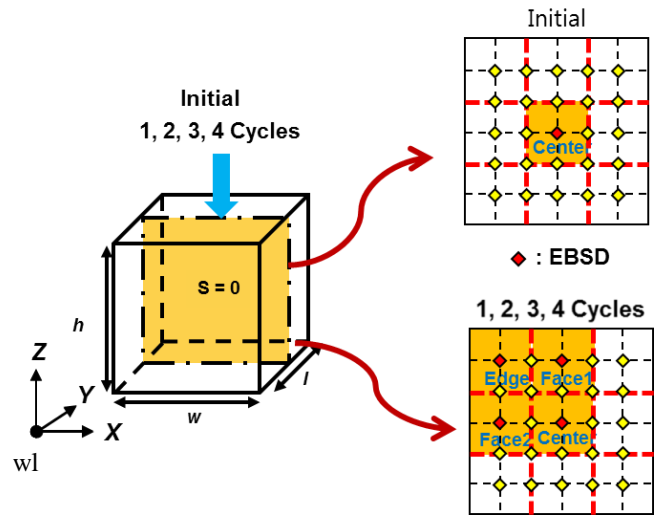


Fig. 4 Schematic drawing showing experimentally observed position

시편은 Struers Lectropol-5 장비를 사용하여 상온에서 80% Ethanol(95%), 14% distilled water, 6% perchloric acid(60%) 용액으로 전해연마하였으며, FE-SEM(field-emission scanning electron microscope, Model Name: FEI Inspect F)을 사용하여 Scan Step 0.15  $\mu\text{m}$  로 EBSD 측정을 하여 미세조직을 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 결정립도

AA1100합금 소재의 주조 후 열처리재와 MADF 공정 1, 2, 3, 4 사이클 가공재에 대한 EBSD 분석 결과인 inverse pole figure(IPF) 맵을 Fig. 5에 나타내었다. 초기 소재인 주조 후 열처리재의 경우 등축정의 조대한 결정립을 보여주고 있으나, MADF 공정이 1 사이클이라도 진행되면 초기 소재와 비교하면 매우 미세한 결정립 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 1 사이클의 MADF 가공한 시편의 경우는 Center영역과 Edge영역에 비하여 Face1, Face2영역의 결정립 크기가 훨씬 큰 상태이나, 2 사이클 이상의 MADF 공정을 수행한 경우에는 모든 위치에서 고르게 결정립 미세화가 발생했음을 알 수 있다. 결정립계의 구분을 위한 임계 불일치각(misorientation)을 5도로 설정한 후 결정립 크기 분포를 분석한 EBSD 측정 결과를 Table 1에 나타내었다. 사이클이 증가함에 따라 평균 결정립 크기의 변화를 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. 초기 주조 상태의 AA1100의 중심부에서 측정된 평균 결정립크기는 337.4  $\mu\text{m}$ 이었으나, 1 사이클의 MADF 가공 후에는 Edge와 Center에서는 각각 3.3, 1.3  $\mu\text{m}$ 로, Face 영역에서는 25.1, 15.8  $\mu\text{m}$ 로 상당한 결정립의 미세화가 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 2, 3, 4 사이클의 MADF 가공 후에는 Edge, Center, Face1, Face2에서 비교적 균일한 분포를 보이면서 각각 평균 결정립의 크기가 1.9, 1.6  $\mu\text{m}$  그리고 1.4  $\mu\text{m}$ 로 가공 횟수가 증감함에 따라 결정립이 균질하게 미세화되는 것을 알 수 있다

**Table 1** The grain size observed in the AA1100 specimens for different cycle of the MADF process ( $\mu\text{m}$ )

	Edge	Face1	Face2	Center	Average
Initial	337.4				
1 cycle	3.3	25.1	15.8	1.3	11.4
2 cycles	1.5	1.9	3.1	1.2	1.9
3 cycles	1.3	2.3	1.6	1.0	1.6
4 cycles	1.7	1.2	1.6	1.2	1.4

Center영역이나 Edge영역의 경우 가공 횟수에 따른 결정립 미세화 경향을 살펴보면 결정립이 1.5  $\mu\text{m}$  이하가 되면 가공 횟수가 증가하여도 결정립 미세화가 더 진행되지 않는 것으로 확인되었다. Edge의 경우 2 사이클의 MADF 가공 후 1.5  $\mu\text{m}$ 의 평균결정립 크기가 얻어지면, 이후 3, 4 사이클 가공 후에도 1.3, 1.7  $\mu\text{m}$ 로 같은 수준을 유지하고 Center의 경우에도 1 사이클의 MADF에서 평균 결정립 크기가 1.3  $\mu\text{m}$ 로 미세화되면, 추가적인 가공 후에도 1.0~1.2  $\mu\text{m}$ 의 값으로 비슷한 수준을 유지하였다.

#### 3.2 평균 불일치각과

##### 평균 GOS(Grain Orientation Spread)

Fig. 7과 Fig. 8은 주조재와 1~4 사이클 MADF 가공한 AA1100에 대한 평균 불일치각과 평균 GOS(Grain Orientation Spread) 분석 결과를 각각 나타낸 것이다. 평균 불일치각은 측정된 영역내에 존재하는 모든 결정립계의 결정학적인 방위의 불일치각을 평균한 값을 의미하며, GOS는 결정립내에서의 방위퍼짐 정도를 의미한다. MADF 사이클의 횟수가 증가할수록 평균 불일치각은 Center에서는 일정하게 유지되고, 다른 위치에서는 증가하는 경향을 보이고 있으며, 가공량이 증가할수록 위치별 편차가 줄어드는 것을 알 수 있다. 1 사이클의 MADF를 수행한 시편의 Face1, Face2에서 평균 불일치각이 작다는 것은 상대적으로 소경각 결정립계(low angle grain boundary, LAGB)가 발달하였다는 것을 의미하므로, 이 미세조직은 아결정립이 발달한 변형 미세조직으로 판단할 수 있다.

이러한 경향은 결정립계 내부의 방위변화를 표현한 평균 GOS값에서도 알 수 있다. GOS는 하나의 결정립 내부에서 결정방위의 퍼짐 정도를 나타내는 척도이므로 아결정립과 같이 국부적으로 방위의 변화가 클수록 GOS값이 크다. 그러므로 평균 GOS값이 크고 평균 불일치각이 작은 1 사이클의 MADF 가공의 경우는 변형에 의해 내부 아결정립이 형성된 변형 미세조직이며, 2 사이클 이후 MADF 가공에서는 사이클의 횟수가 증가할수록 결정립 내부의 아결정립 구조가 줄어들어 회복된 미세조직 또는 재결정된 미세조직이 발달하는 것으로 판단할 수 있다.

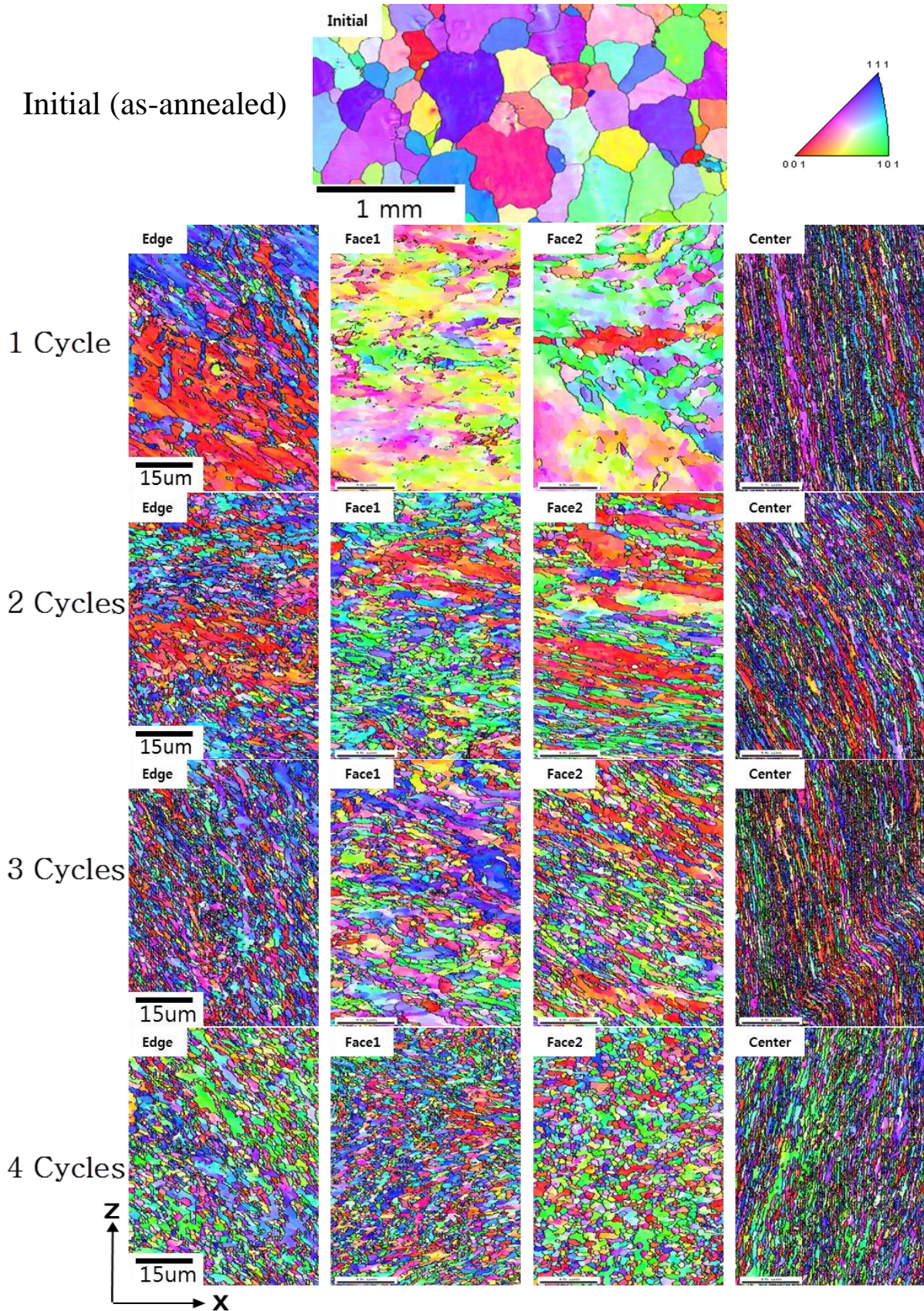
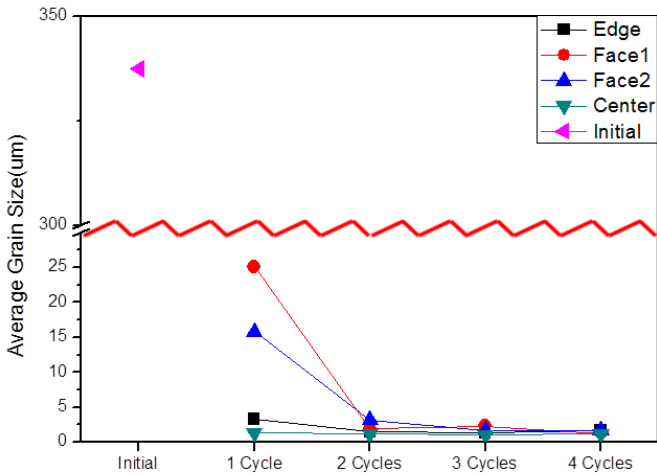
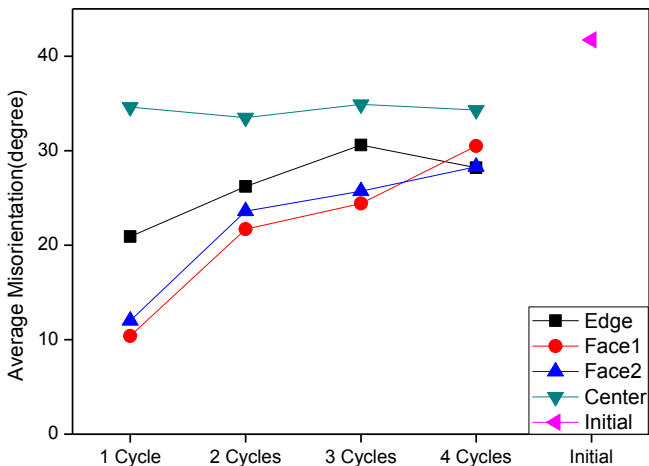


Fig. 5 Results of the IPF map developed in the AA1100 specimen as the MADF process cycle increases

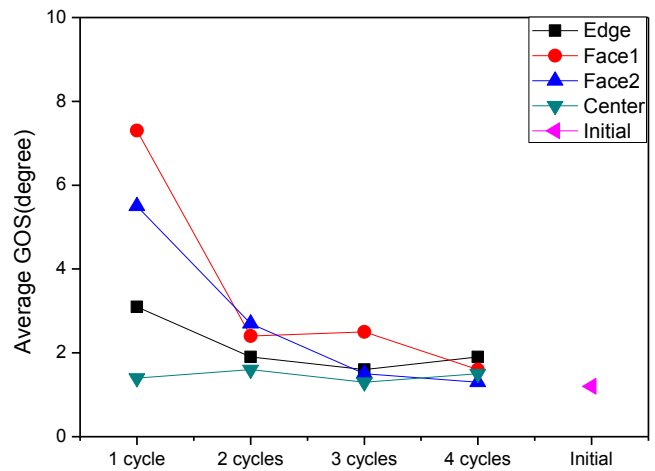


**Fig. 6 Evolution of average grain size of AA1100 specimen as MADF process cycle increases**

위와 같은 분석 결과에 근거하여 AA1100을 가공 소재로 하여 축대각단조 공정을 2 사이클이상 가공하여도 평균 결정립 크기가 1.0 μm 미만으로 미세해지지 않는 현상을 설명할 필요가 있다. MADF의 사이클의 횟수가 증가할수록 내부에 심한 변형이 축적되고 어느 이상의 수준에서는 동적 회복(dynamic recovery) 및 동적 재결정(dynamic recrystallization)과 같은 연화 현상이 동시에 발생하여 가공량이 증가함에도 불구하고 1.0 μm 미만으로 미세해지지 않는 것으로 판단할 수 있다.



**Fig. 7 Evolution of average misorientation of AA1100 specimen as MADF process cycle increases.**



**Fig. 8 Evolution of average GOS of AA1100 specimen as MADF process cycle increases**

#### 4. 결론

이 연구에서는 MADF 가공법을 사용하여 면심입방정금속인 AA1100을 1, 2, 3, 4 사이클로 가공하였으며, 가공량에 따른 미세조직 변화를 실험적으로 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MADF 공정으로 가공한 AA1100 가공재는 4 사이클의 MADF 가공까지 외부 균열없이 건전하게 소성가공 되었다.
- (2) 초기에 평균 결정립크기가 337.4 μm인 주조 후 열처리재는 1 사이클의 MADF 가공으로 평균 결정립크기가 11.4 μm로 매우 큰 감소율을 보였으나, 2, 3, 4 사이클로 MADF 가공한 시편의 경우 평균 결정립크기는 각각 1.9 μm, 1.6 μm, 1.4 μm로 매우 낮은 감소율을 보였다.
- (3) MADF의 사이클의 수가 증가할수록 평균 불일치각은 증가하였고, 평균 GOS는 감소하였다. 이는 변형량이 증가하면서 동적회복 및 동적재결정과 같은 연화현상이 일어나는 것으로 판단된다.
- (4) AA1100에 적용한 MADF 공정기술은 입도 극미세화에 효과적임을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

이 연구는 국방과학연구소의 기초연구(UD160058 BD)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

- [1] Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., & Yanagida, A, 2008, Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals*, Vol. 57, No. 2, pp. 716~735.
- [2] Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T. G, 1998, The process of grain refinement in equal-channel angular pressing. *Acta materialia*, Vol. 46, No. 9, pp.3317~3331.
- [3] Hwang, Y. M., & Tzou, G. Y, 1997, Analytical and experimental study on asymmetrical sheet rolling. *Int., J. Mech. Sci.*, Vol. 39 No. 3, pp. 289~303.
- [4] Lee, S. H., & Lee, D. N, 2001, Analysis of deformation textures of asymmetrically rolled steel sheets. *Int., J. Mech. Sci.*, Vol. 43, No. 9, pp. 1997~2015.
- [5] Y. Estrin, A. Vinogradov, 2013, Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science, *Acta Mater.*, Vol. 61, pp 782~817.
- [6] 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.
- [7] A. Kundu, R. Kapoor, R. Tewari, J.K. Chakravartty, 2007, Severe plastic deformation of copper using multiple compression in a channel die, *Scr. Mater.* 58 (2008), pp. 235~238.
- [8] 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
- [9] S. Lee, S. – H. Yang, S. – H. Lee, H. – T. Jeong, Y. – Y. Cho, 2016, Manufacturing method for metal, Korea Patent, Registration No 1016306670000
- [10] 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
- [11] 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, *Korean J. Metals and Mater.*, Vol. 57, No. 1, pp 18~27.