

## 다축대각단조(MADF) 가공횟수에 따른 OFC의 미세조직 변화

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

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

S.-T. Kim, S.-C. Kwon, D.-V. Kim, S. Lee, S.-H. Choi, and H.-T. Jeong

(Received November 16, 2018 / Revised November 20, 2018 / Accepted November 22, 2018)

#### Abstract

This study investigated the effects of the processing number of multi-axial diagonal forging (MADF) on the microstructural changes of OFC fabricated by MADF processes. The as-extruded OFC was cut to 25 mm<sup>3</sup> cube for the MADF processes. The MADF process consists of plane forging with a thickness reduction of 30% and diagonal forging with a diagonal forging angle of 135°. In order to analyze the microstructural evolutions according to the number of repetitions, 1, 2, 3 and 4 cycles of the MADF process were performed. OFC specimens were successfully deformed without surface cracking 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 and their Vicker's hardness were also measured. The results showed that MADF process effectively refined the microstructure of OFC with initial average grain size of 84.2 $\mu$ m. The average grain sizes of specimens MADF processed for 1, 2, 3, 4 cycles were refined to be 8.5 $\mu$ m, 2.2 $\mu$ m, 1.5 $\mu$ m, 1.1 $\mu$ m, respectively. The grain refinement seemed to be saturated when OFC was MADF processed over 2 cycles. In the case of specimens subjected to two or more cycles of MADF, the degree of decrease in average grain size was drastically reduced as the number of cycles increased due to softening phenomena such as dynamic recovery or dynamic recrystallization during processing. The degree of increase in average Vicker's hardness was also dramatically reduced as the number of cycles increased due to the same reason.

**Key Words** : SPD, OFC, MADF, Microstructure, Vicker's Hardness

## 1. 서론

압연, 압출, 인발, 단조 등과 같은 대칭적인 가공 공정은 최근까지도 많은 연구개발이 진행되어 왔으나 혁신적으로 재료물성을 개선시킬 수 없다는 한계점에 도달한 실정이다. 이러한 대칭적인 변형공정의 한계를 극복하고 혁신적인 재료물성의 향상을 확보하기 위한 목적으로 최근 비대칭적인 변형공정

에 기초한 연구결과들이 많이 보고되고 있다[1~4]. 이러한 비대칭적인 가공방법들중에서 봉재 또는 각재를 가공 공정 전후에 단면적 치수의 변화가 발생하지 않도록 가공함으로써 반복적인 가공이 가능하도록 설계한 강소성가공법(Severe Plastic Deformation, SPD)이 최근에 개발되어 많은 연구가 진행되고 있다[5~7]. 이러한 비대칭적인 변형공정을 기본특징으로 하는 SPD로는 봉재나 각재를 단면적 치수의 변화 없이 특정한 각도로 꺾어서 압출하는 공정을 반복적으로 수행하는 등통로각압축(equal channel

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

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

angular pressing, ECAP)[8~10] / 등통로각압출(equal channel angular extrusion, ECAE)[11,12]가공법, 수직으로 압력을 가하면서 비틀림회전을 가하는 고압비틀림(high pressure torsion, HPT)[10, 13] 가공법 등이 사용되고 있다. 이와 같은 SPD기술들은 이론적으로 무한반복 가공이 가능한 특징을 갖고 있으므로 소재에 상당량의 전단변형을 부여할 수 있어서 재료를 극미세화하는데 유리하며 지금까지 대칭적인 가공기술에서는 확인되지 않은 새로운 재료물성들이 보고되고 있다[1~13]. 그러나 이러한 SPD의 여러가지 긍정적인 측면이 있음에도 불구하고 현재까지의 SPD기술들은 가공장치의 구조 및 가공공정의 복잡성때문에 작업시간이 장시간 소요되고, 일부 SPD기술들은 1 cycle마다 재료의 일부분을 제거하여야 하는 번거로움 등 대량생산에 적용하는데 많은 부정적인 측면이 있어서 현재까지는 실험실에서 연구용 가공기술로 한정되고 있는 실정이다.

최근에 소재의 형상을 일정하게 유지하는 강소성 가공법의 특징을 그대로 갖고 있음에도 대칭적인 변형공정을 통하여 재료의 손실이 거의 없고 공정의 무한반복이 가능하여 대량생산이 용이한 SPD로 다축대각단조(multi-axial diagonal forging, MADF)기술이 개발되어 여러 소재에 적용 중에 있다. 새로운 SPD기술인 MADF 가공기술과 압연기술을 연계한 판재 제조공정 설계를 통하여 탄탈륨(Ta)소재의 입도미세화 및 미세조직 균질화를 효과적으로 구현한 결과가 이미 보고되었다[14,15]. 또한 최근에 MADF 가공량에 따른 무산소동(OFC) 열처리재의 결정립 미세화 효과 및 기계적 성질의 변화에 대한 결과 [16] 및 MADF를 구성하는 개개의 단조공정에 따라 AA1100의 벌크소재 내부에 가해지는 변형의 불균질성 및 1 cycle MADF 가공 시 가공품 전체의 평균유효변형률(Avg. effective strain  $6.8 \pm 1.2$  / cycle)을 해석한 연구결과가 보고되었다[17].

MADF 가공법은 이전 논문에서 상세하게 설명한 것처럼 단순한 일축단조공정을 재료의 손실없이 반복 수행함으로써 기존의 강소성가공법들과는 차별화되게 대량생산이 용이한 기술이다. 이 연구는 MADF 가공법을 적용하는 기초연구이므로, 대표적인 면심입방정(FCC)금속인 구리중에서 순도가 높은 OFC 압출재를 사용하여 MADF 가공을 하였으며, MADF 반복횟수에 따른 미세조직과 경도의 변화를 실험적으로 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 다축대각단조(MADF) 가공법

MADF 가공공정은 기존의 다축단조(multi-axial forging, MAF or multi-directional forging, MDF) 공정과 MADF 공정에서 새롭게 도입된 공정인 대각단조(diagonal forging, DF) 공정으로 구성되어 있다[14, 15].

가장 많이 알려져 있는 MDF공정은 육면체 형태의 소재를 가공함에 있어 육면체에서 서로 마주보는 3개의 면에 수직한 방향을 단조방향으로 하여 자유단조 또는 구속단조를 수행한다[18]. 보다 구체적으로 설명하면 3개의 시편 면에 수직한 방향으로 순차적으로 방향을 바꾸면서 단조를 수행하는데, 한 방향으로 단조를 수행한 후 소재가 변형되면 단조에 의해 연신된 면에 수직한 방향을 단조방향으로 하여 복귀단조를 함으로써 초기 소재의 형상으로 복귀하도록 하는 것이 MDF가공법의 기본 원리이다. MDF는 면단조의 특징에 따라 변형이 압축방향에 대해  $45^\circ$ 인 면, 즉, 육면체에서 서로 마주보는 모서리를 연결하는 소재 내부의 면에 집중되므로 MDF 가공 후에는 육면체 금속소재의 모서리와 중심부 그리고 그 직선적인 연결부위에 변형이 집중되고 외부 가공다이와 접촉하는 면의 중심부에는 변형이 거의 이루어지지 않으므로, 소재 내부의 위치에 따른 미세조직 및 재료물성의 차이가 심하다고 알려져 있다.

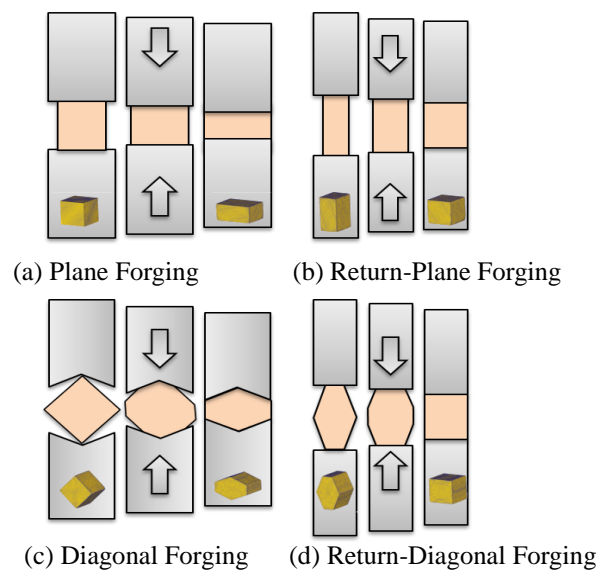


Fig. 1 Schematic diagram of forging processes in Multi-Axial Diagonal Forging(MADF)

이러한 MDF에서 발생하는 변형 불균질성을 해결하기 위한 목적으로 면단조를 수행한 후에 대각단조공정을 추가하였다. 대각단조공정은 육면체 금속소재에서 마주하는 두 면의 방향으로 압축하는 MDF와 달리 마주하는 두 모서리의 방향으로 압축가공하는 것으로, MDF와 비교하면 압축방향을 육면체의 면의 법선방향을 중심으로 45° 회전하는 것이 특징이다. 결과적으로 대각단조에서는 변형이 MDF와는 상이하게 가공 후에 육면체 금속소재의 면과 중심부, 그리고 그 직선적인 연결부에 분산되게 되므로 소재 내부의 위치에 따른 변형의 균질성을 확보하는데 매우 유리하다.

MADF 가공법을 구성하고 있는 각 단조공정의 개략도를 그림 1에 나타내었다. MADF 공정은 총 12패스의 구속단조(closed die forging)공정으로 구성되는데, 1패스에서 6패스까지의 변형 제한면이 고정된 채널다이 속에서의 공정과 7패스에서 12패스까지의 대각단조와 관련된 공정으로 이루어진다.

구체적으로 1~6패스까지의 MDF 공정은 정육면체의 세 모서리의 방향을 각각 X, Y, Z 축이라 할 때, Y방향의 변형을 제한하고 X축 방향으로 면단조(plane forging, PF)하는 1패스 후, PF에 의해 돌출된 Z 방향을 단조하여 원래의 형상으로 복원시키는 복귀-면단조(return-plane forging, R-PF)하는 2패스를 수행한다. 이후 Z방향의 변형을 제한하고 Y방향으로 PF하는 3패스, X방향으로 R-PF하는 4패스, X방향의 변형을 제한하고 Z방향으로 PF하는 5패스, Y방향으로 R-PF를 수행하는 6패스를 수행하여 3개의 축방향에 대한 PF와 R-PF의 6패스 공정을 완료하게 된다.

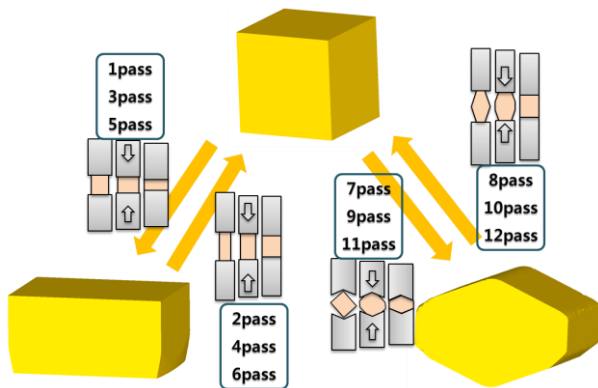


Fig. 2 Schematic diagram showing MADF process

이후 수행되는 7~12패스의 대각단조공정은 그림

1의 (c)와 (d)에 도식적으로 설명한 것과 같이 정육면체의 마주보는 3개의 면에서 대각선 방향으로 수행되는 대각단조(diagonal forging, DF)와 복귀-대각단조(return-diagonal forging, R-DF)로 구성된다. DF는 Y축에 수직인 면의 변형을 제한하고, Y축 방향과 평행한 모서리 중 서로 가장 멀리 떨어져 있는 두 모서리를 서로 가까워지도록 단조하며, R-DF는 DF에 의해 돌출된 부분을 단조하여 금속을 원래의 형상으로 복원시키는 공정이다. Y축에 대한 대각단조공정을 완료하면 이어서 Z축 및 X축 방향의 두 모서리에 대하여 각각 DF 및 R-DF를 수행하게 된다.

MADF의 단조공정순서와 가공재의 모양변화에 대한 개략도를 그림 2에 나타내었다. MADF공정에서 1 cycle은 앞서 설명한 12패스의 단조공정을 의미한다.

### 2.2 다축대각단조(MADF) 가공실험

이 연구에서 사용한 OFC 압출재에 적용한 MADF 공정은 PF와 대각단조각(diagonal forging angle)이 135° 인 DF로 구성되어 있으며 두께감소율을 30%로 설정하였다. OFC 압출재는 25mm 길이의 정육면체로 절단하여 사용하였으며, 초기 압출재의 평균 결정립 크기는 84.2μm 이었다. MADF 공정은 상하 복동식 200톤 프레스를 이용하여 무윤활의 상태로 진행하였다.

MADF 공정을 겪고 난 소재는 초기의 정육면체 형상으로 복원되므로 여러 번 공정을 반복 수행할 수 있다. 이 연구에서는 MADF가공의 가공횟수에 따른 재료특성의 변화를 분석하기 위하여 최대 4 cycles까지 중간 열처리없이 MADF 가공을 수행하였다. 그림 3은 25 mm의 OFC 정육면체의 MADF가공한 시편의 외형을 보여준다. MADF를 4 cycles까지 가공한 이후에도 여섯 면 모두 표면 균열 없이 건전하게 가공된 것으로 확인되었다.

### 2.3 미세조직 및 경도 분석

EBSD(electron backscatter diffraction) 측정법을 사용한 미세조직 분석실험에서는 시편의 방향을 구분하여 표기하는 것이 매우 중요하므로, 이 연구의 MADF 가공재는 그림 4와 같이 최종 단조방향을 Z축, 변위가 구속되는 방향을 Y축 그리고 길이가 늘어나는 방향을 X축으로 설정하였다.

MADF가공에 따른 미세조직의 변화를 분석하기 위한 위치는 Y축방향의 정중앙으로 설정하였으며,

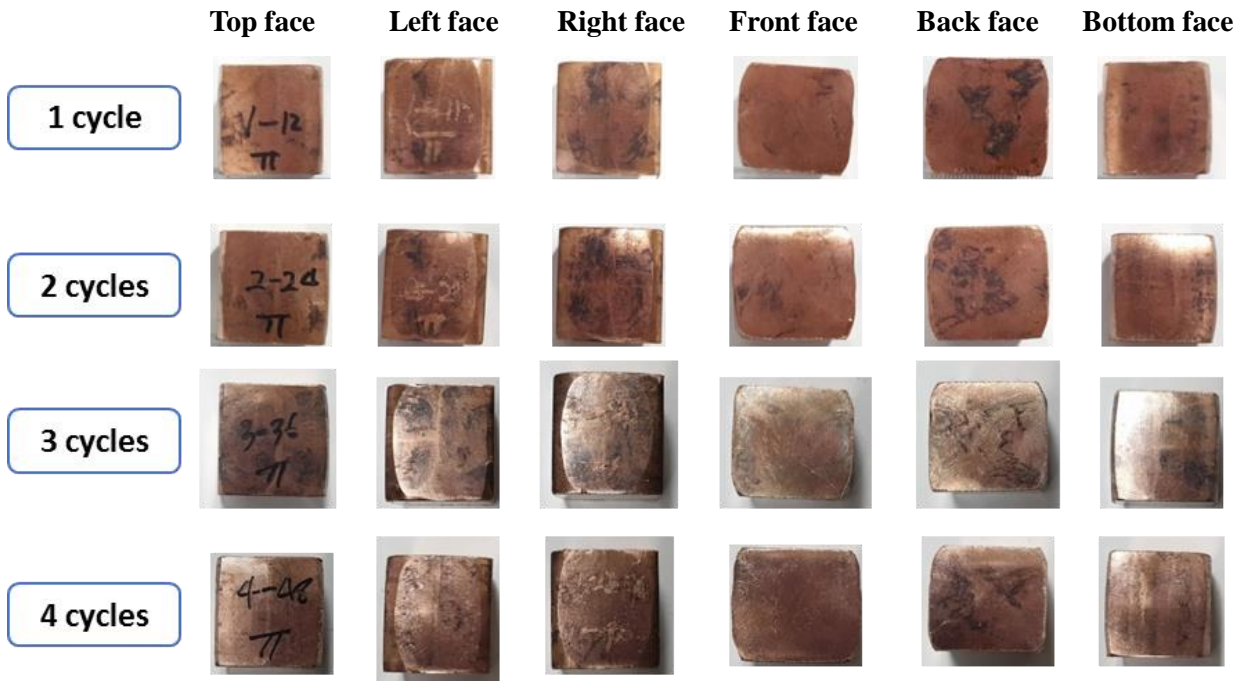


Fig. 3 Multi-axial diagonal forged OFC specimens

절단면은 최종 단조방향에 평행하도록 절단하여 분석을 수행하였다. 분석면에서 위치에 따른 차이를 확인하기 위한 목적으로 시편의 중심면에 대하여 그림 4 와 같이 가로와 세로방향을 3 등분하여 9 개의 영역으로 구분하였고, MADF 공정의 대칭성을 고려하여 모서리(edge)영역, 2 개의 면(face)영역, 중심(center)영역을 각각 Edge, Face1, Face2, Center 로 표시하고 각 영역에서 시편을 채취하였다. 시편은 17.5% distilled water, 82.5% Phosphoric acid(85%) 용액으로 상온에서 Struers Lectropol-5 장비를 이용하여 전해연마를 수행하였고, FE-SEM(field-emission scanning electron microscope, Model Name: FEI Inspect F)을 사용하여 0.15  $\mu\text{m}$ 의 Scan Step 로 EBSD 측정을 하여 미세조직을 분석하였다.

시편의 경도는 Vicker's Hardness 를 측정하였으며, 100 gf 의 Load 와 10 초의 Duration time 인 측정조건으로 12 회 측정 후 최대값과 최소값을 제외한 10 개의 데이터를 평균하여 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 결정립도

OFC 압출재와 MADF 공정 1, 2, 3, 4 cycles 가공재의 EBSD를 이용한 IPF Map(Z)을 그림 5와 그림 6에

각각 나타내었다. 초기 소재인 압출재의 경우 등축정의 조대한 결정립을 나타내고 있으나, MADF공정이 진행되면 초기 소재와 비교하여 급격한 결정립 미세화가 발생하였다. 1 cycle의 MADF를 수행한 시편에서는 Center영역과 Edge영역에 비하여 Face1, Face2영역의 결정립이 훨씬 조대했지만, 2 cycles 이상 MADF공정이 진행된 경우에는 모든 위치에서 모두 급격한 미세화가 발생하였다. 결정립계의 구분을 위한 임계 misorientation을 5°로 하여 분석한 EBSD의 결정립 크기 분포를 표 1에 나타내었다.

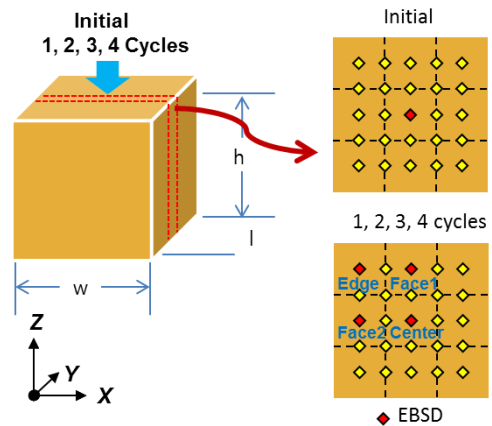


Fig. 4 Photos showing the analyzed part



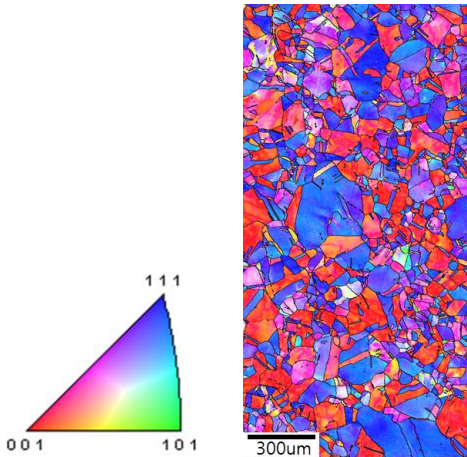


Fig. 5 IPF Map(Z) of initial as-extruded OFC

또한 MADF의 cycle 증가에 따른 평균 결정립 크기의 변화를 그림 7에 비교하여 나타내었다. 초기 소재인 무산소동 압출재의 중심부 평균 결정립크기는  $84.2\mu\text{m}$ 이었으나, 1 cycle의 MADF 가공 후, Edge와 Center에서는 각각  $2.9\mu\text{m}$ ,  $2.7\mu\text{m}$ 으로, Face 영역에서는  $8.6\mu\text{m}$ ,  $19.6\mu\text{m}$ 으로 현저한 결정립 미세화를 확인할 수 있었다.

MADF 2, 3, 4 cycles 가공 후에는 Edge, Center, Face1, Face2에서 모두 균일한 분포를 보이면서 각각 평균  $2.2\mu\text{m}$ ,  $1.5\mu\text{m}$  그리고  $1.1\mu\text{m}$ 로 가공 횟수가 증감함에 따라 결정립이 균질하게 미세화되는 것을 확인할 수 있었다.

가공 횟수에 따른 결정립 미세화 경향을 Center 영역이나 Edge영역에서 비교해보면 결정립이  $1.4\mu\text{m}$  이하의 수준에 도달하게 되면 가공 횟수가 증가함에도 불구하고 결정립 미세화는 매우 느리게 진행됨을 확인할 수 있었다. Edge의 경우 2 cycles의 MADF가공 후  $1.4\mu\text{m}$ 의 평균결정립 크기가 얻어졌으며, 이후에 수행된 3, 4 cycles 가공 후에는  $0.9\mu\text{m}$ ,  $1.1\mu\text{m}$ 로 약간의 미세화가 발생하였으며, Center의 경우에도 1 cycles에서 평균 결정립 크기가  $1.3\mu\text{m}$ 로 미세화되었지만, 추가적인 MADF의 cycle 후에도  $1.0\mu\text{m}$  ~  $0.9\mu\text{m}$ 의 결정립 크기로 비교적 낮은 수준의 미세화 경향을 보였다.

그러므로 평균 결정립 크기가  $84.2\mu\text{m}$ 인 OFC 압출재는 1, 2 cycles의 MADF 가공 후에는  $8.5\mu\text{m}$ ,  $2.2\mu\text{m}$ 로 급격한 미세화가 이루졌으며, 이후 추가적인 3, 4 cycles의 MADF 가공을 통해서도  $1.5\mu\text{m}$ ,  $1.1\mu\text{m}$ 으로 미약하게 결정립 미세화가 발생하는 것을 확인할 수

있었다.

### 3.2 평균 Misorientation과

#### 평균 GOS(Grain Orientation Spread)

압출재와 1~4 cycles 범위에서 MADF 가공한 OFC의 평균 misorientation과 평균 GOS(Grain Orientation Spread) 분석 결과를 그림 8과 그림 9에 각각 나타내었다. MADF의 반복 cycle의 횟수가 증가할수록 평균 misorientation값은 모든 위치에서는 증가하는 경향을 보이고 있었으며, 가공량이 증가할수록 위치별 편차가 줄어드는 것을 알 수 있었다. 1 cycle의 MADF 가공시편의 Face1, Face2에서 평균 misorientation값이 작다는 것은 상대적으로 소각각 결정립계(low angle grain boundary, LAGB)가 많이 발달하는 아결정립으로 구성된 전형적인 변형 미세조직으로 판단할 수 있다.

이러한 경향은 결정립계 내부의 방위변화를 표현한 평균 GOS 값에서도 확인할 수 있다. GOS는 하나의 결정립 내부에서 결정방위가 변화하는 정도를 나타내는 척도이므로 아결정립과 같이 국부적인 영역 안에서 방위변화가 많을수록 GOS값이 크다. 그러므로 평균 GOS값이 크고 평균 misorientation값이 작은 1 cycle의 경우는 변형에 의해 내부 아결정립이 형성된 변형 미세조직이며, 2 cycles이후 MADF 가공재에서는 결정립 내부의 아결정립 구조가 없어지는 동적으로 회복 또는 재결정된 미세조직이 발달하는 것으로 판단할 수 있다.

이와 같은 논의는 OFC 압출재를 가공소재로 하여 다축대각단조 공정을 수행하는 경우에 왜 2 cycles까지는 급격한 결정립 미세화 효과가 발생하고 3, 4 cycles까지의 MADF의 경우 매우 미미한 결정립 미세화 효과가 발생하는지를 일부 설명할 수 있다. MADF 가공의 cycle횟수가 증가할수록 가공소재 내부에 심한 변형이 축적됨으로써, 2 cycles 이상의 MADF 가공에서는 동적 회복(dynamic recovery) 또는 동적 재결정(dynamic recrystallization)과 같은 연화 현상이 변형과 동시에 발생하여 가공량이 일정하게 증가함에도 불구하고 결정립 미세화가 매우 느리게 진행되는 것으로 판단된다.

### 3.3 경도

압출재와 1~4 cycles MADF 가공한 OFC의 Vicker's Hardness를 Edge, Face1, Face2, Center영역에서 측정



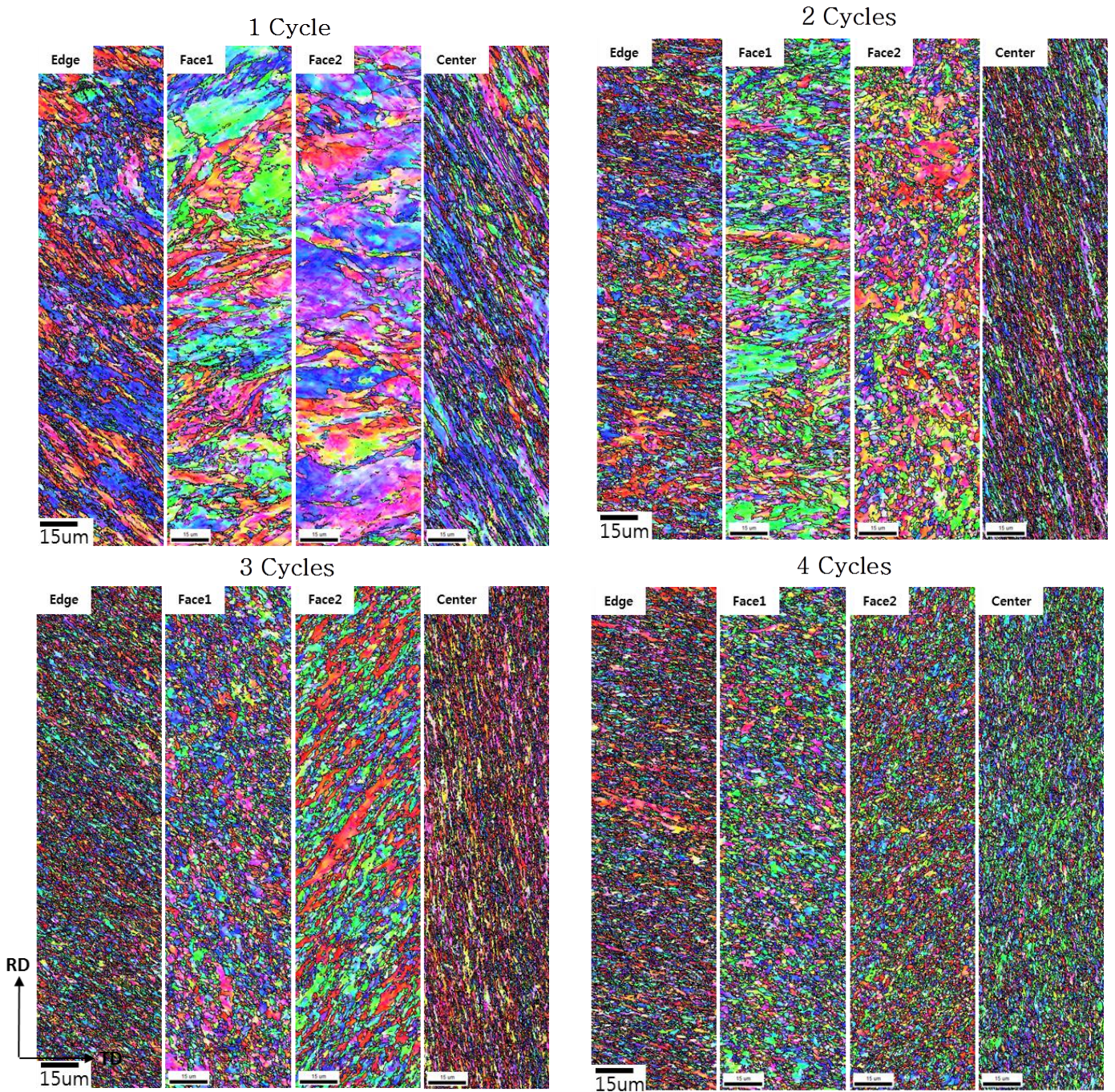


Fig. 6 Inverse Pole Figure Map(Z) of MADF processed OFC

하여 산술평균한 분석결과를 그림 10과 표 2에 나타내었다. 초기 소재인 OFC 압출재의 경도값인 99.5 Hv와 비교하면 1~4 cycles MADF 가공한 OFC의 경도값은 129.2 Hv, 132.9 Hv, 133.6 Hv, 134.7 Hv로 크게 증가하였는데, 1 cycle의 MADF 가공으로 초기 소재보다 29.7 Hv만큼 급격히 증가한 후 이후 2~4 cycles MADF 가공에서 경도의 증가폭이 급격히 감

소한 3.7 Hv, 1.7 Hv, 1.1 Hv로 경도가 약간씩 증가하였다.

이러한 경도값의 변화는 결정립 미세화 효과와 정성적으로 비례하는 현상이므로 그 원인도 결정립 미세화 효과와 마찬가지로 MADF 가공 횟수가 증가함에 따라 동적 회복 및 동적 재결정이 발생하기 때문인 것으로 판단할 수 있다.



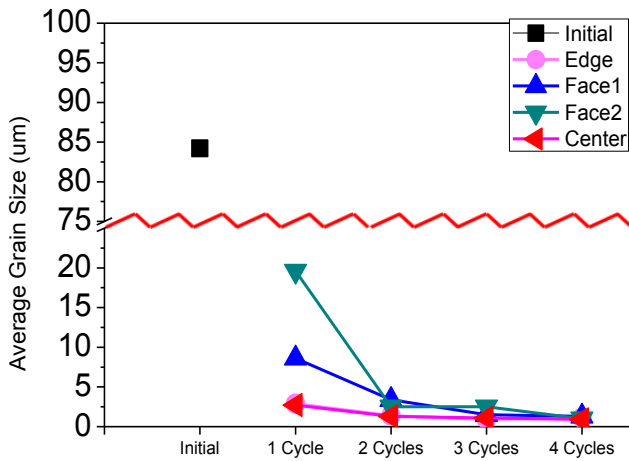


Fig. 7 The average grain size of MADF processed OFC for various cycles

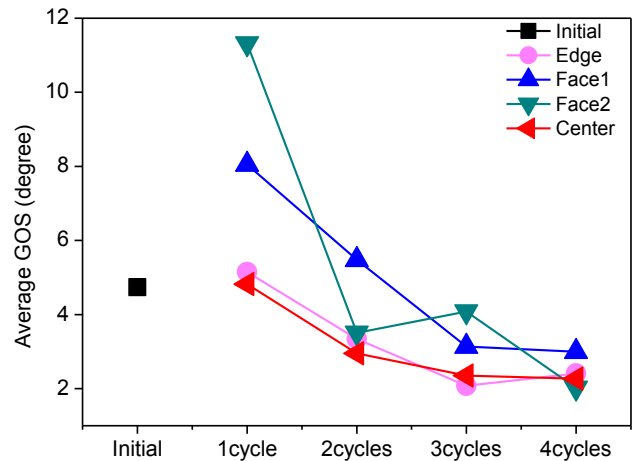


Fig. 9 The average GOS of MADF processed OFC for various cycles

Table 1 The average grain size of the MADF processed OFC for various cycles (um)

	Edge	Face1	Face2	Center	Average
Initial	84.2				
1 cycle	2.9	8.6	19.6	2.7	8.5
2 cycles	1.4	3.4	2.5	1.3	2.2
3 cycles	0.9	1.5	2.5	1.1	1.5
4 cycles	1.1	1.3	1.0	0.9	1.1

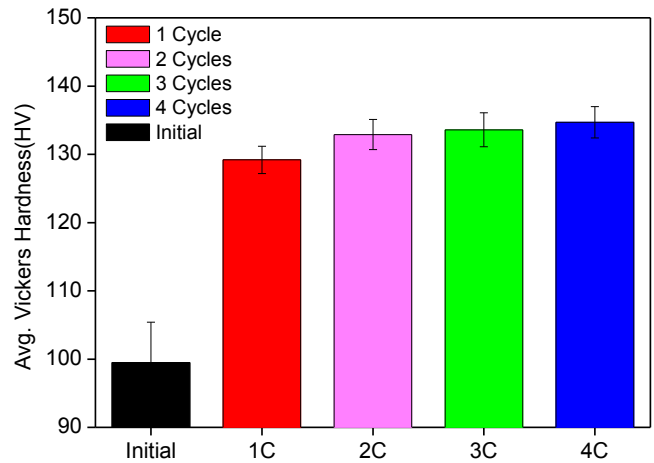


Fig. 10 The average Vickers hardness of MADF processed OFC for various cycles

Table 2 The average Vickers hardness of the MADF processed OFC for various cycles

	Hardness(HV)	Standard deviation
Initial	99.5	5.9
1 cycle	129.2	2
2 cycles	132.9	2.2
3 cycles	133.6	2.5
4 cycles	134.7	2.3

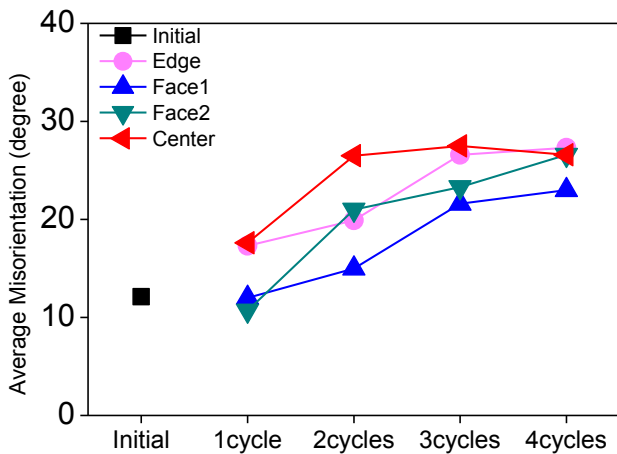


Fig. 8 The average Misorientation of MADF processed OFC for various cycles

그러므로 결정립 미세화와 높은 경도를 얻기 위한 공정으로 OFC압출재에 MADF 공정을 적용하는 경우라면, 2 cycles의 MADF 공정을 기준으로 결정립 미세화와 경도의 변화 양상이 크게 달라지므로 132.9 Hv의 높은 경도와 평균 결정립 크기  $2.2\mu\text{m}$ 의 미세한 미세조직을 얻을 수 있는 2 cycles까지 MADF가공하는 것이 가장 효율적이라고 판단된다.

#### 4. 결론

(1) MADF 공정으로 가공한 OFC 가공재는 4 cycles의 MADF까지 외부 균열없이 건전하게 소성가공 되었다.

(2) 평균 결정립크기가  $84.2\mu\text{m}$ 인 초기 압출재는 1 cycle의 MADF 가공으로 평균 결정립크기가  $8.5\mu\text{m}$ 로 크게 미세화 되었으나, 2, 3, 4 cycles MADF 가공한 OFC시편들의 평균 결정립크기는 각각 평균  $2.2\mu\text{m}$ ,  $1.5\mu\text{m}$ ,  $1.1\mu\text{m}$ 로 그 미세화 효과가 크게 감소하였다.

(3) Vicker's 경도 99.5 Hv의 초기 OFC압출재를 1 cycle MADF 가공하면 경도가 129.2 Hv까지 급격히 증가하지만, 추가의 MADF 가공 후에는 4 cycles까지 가공하여도 134.7 Hv 정도로 약간 증가하였다.

(4) MADF 가공 횟수가 증가할수록 평균 misorientation은 증가하였고, 평균 GOS는 감소하였다. 이는 변형량이 증가하면서 동적회복 및 동적재결정과 같은 연화현상이 일어나는 것으로 판단되며, 2 cycles MADF 가공소재를 기준으로 결정립 미세화 속도와 경도 증가 속도가 현격히 달라지는 원인이라 생각할 수 있다.

(5) OFC에 적용한 MADF 공정기술은 입도 극미세화에 효과적임을 확인할 수 있었으며, OFC압출재에 대하여 2 cycles MADF가공하는 것이 결정립 미세화와 높은 경도 측면에서 가장 효율적이라고 판단된다.

#### 후 기

이 연구는 국방과학연구소의 기초연구(UD160058B D)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. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 39 No. 3, pp. 289~303.
- [4] Lee, S. H., & Lee, D. N, 2001, Analysis of deformation textures of asymmetrically rolled steel sheets. International journal of mechanical sciences, Vol. 43, No. 9, pp. 1997~2015.
- [5] Estrin, Y., & Vinogradov, A, 2013, Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. Acta materialia, Vol. 61, No. 3, pp. 782~817.
- [6] Valiev, R. Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T. G., Zechetbauer, M. J., & Zhu, Y. T, 2006, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. Jom, Vol. 58, No. 4, pp.33~39.
- [7] Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K., & Alexandrov, I. V, 2000, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. Progress in materials science, Vol. 45, No. 2, pp.103~189.
- [8] Cherukuri, B., Nedkova, T. S., & Srinivasan, R, 2005, A comparison of the properties of SPD-processed AA-6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding. Materials Science and Engineering: A, Vol. 410, pp. 394~397.
- [9] Khan, A. S., & Meredith, C. S, 2010, Thermo-mechanical response of Al 6061 with and without equal channel angular pressing (ECAP). International Journal of Plasticity, Vol. 26, No. 2, pp.189~203.
- [10] Alexandrov, I. V., Dubravina, A. A., Kilmametov, A. R., Kazykhanov, V. U., & Valiev, R. Z, 2003, Textures in nanostructured metals processed by severe plastic



- deformation. *Metals and materials International*, Vol. 9, No. 2, pp.151~156.
- [11] Li, S., Gazder, A. A., Beyerlein, I. J., Davies, C. H., & Pereloma, E. V, 2007, Microstructure and texture evolution during equal channel angular extrusion of interstitial-free steel: Effects of die angle and processing route. *Acta materialia*, Vol. 55, No. 3, pp.1017~1032.
- [12] Kalidindi, S. R., Donohue, B. R., & Li, S, 2009, Modeling texture evolution in equal channel angular extrusion using crystal plasticity finite element models. *International Journal of Plasticity*, Vol. 25, No. 5, pp.768~779.
- [13] Rajan, P. R., Monnet, I., Hug, E., Etienne, A., Enikeev, N., Keller, C., Radiguet, B, 2014, Irradiation resistance of a nanostructured 316 austenitic stainless steel. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 63, No. 1, pp. 012121. IOP Publishing.
- [14] Yang, S. – H., Lee, S., Lee, S. – H., Jeong, H. – T., Cho, Y. – Y., 2016, Microstructure and texture control method of tantalum, Korea Patent, Registration No 1016320240000
- [15] Lee, S., Yang, S. – H., Lee, S. – H., Jeong, H. – T., Cho, Y. – Y., 2016, Manufacturing method for metal, Korea Patent, Registration No 1016306670000
- [16] Kwon, S. -C., Kim, S. -T., Kim, D. -V., Lee, J. -K. Seo, S. -J., Yoon, T. S., Jeong, H. -T. 2018, Mechanical properties of OFC copper fabricated by multi-axial diagonal forging(MADF), *Trans. Mater. Process.*, Vol. 27, No. 4, pp. 250~256.
- [17] Jeong, H.-T., Kim, M. S., Kwon, S. -C., Kim, S. -T., Lee, S., Choi, S.-H., 2018, Comparison between multi-axial forging and multi-axial diagonal forging of AA1100 using Finite Element Analysis, *Korean J. Metals and Mater.*, (Accepted).
- [18] Kundu, A., Kapoor, R., Tewari, R., & Chakravarty, J. K., 2008, Severe plastic deformation of copper using multiple compression in a channel die, *Scripta Materialia*, Vol. 58, No. 3, pp.235~238.