

## 다축대각단조(MADF) Ver.1 및 Ver.2 공정으로 가공한 IF Steel의 미세조직 및 기계적 성질에 대한 연구

정도현<sup>1</sup> · 조유연<sup>4</sup> · 권상철<sup>1</sup> · 김순태<sup>1</sup> · 이성<sup>3</sup> · 최시훈<sup>2\*</sup> · 정효태<sup>1#</sup>

### A Study on Microstructure and Mechanical Properties of IF Steel Cube Fabricated by Multi-Axial Diagonal Forging Ver.1 and Ver.2 Processes

D.H. Jeong, Y.Y. Jo, S.C. Kwon, S.T. Kim, S. Lee, S.H. Choi, H.T. Jeong

(Received October 29, 2021 / Revised December 1, 2021 / Accepted December 1, 2021)

#### Abstract

In this study, IF steel, which has a body-centered cubic (BCC) crystal structure, was fabricated as a 25 mm-long cube, and then processed for one cycle without intermediate heat treatment by applying MADF Ver.1 and Ver.2 processes. MADF processing was performed with graphite lubrication for each pass at room temperature. The development of the microstructure and texture was analyzed and compared by the location of the specimen using EBSD measurements of the IF steel. Vickers hardness test and miniature tensile test were also performed to analyze the mechanical properties. The coarse grain size of 742.6  $\mu\text{m}$  of the as-received IF steel was refined to a grain size of 53.0  $\mu\text{m}$  after one cycle of MADF Ver.1 processing and 27.0  $\mu\text{m}$  after MADF Ver.2 processing. Vicker's hardness of the as-received IF steel at 94 Hv was increased to 185.6 Hv and 191.2 Hv after one cycle of MADF Ver.1 and Ver.2 processing, respectively.

**Keywords** : Interstitial-Free Steel, MADF, EBSD, Texture, Microstructure, Vicker's Hardness

#### 1. 서 론

벌크 소재의 결정립 극미세화는 주로 강소성 가공법(SPD, Severe Plastic Deformation)을 통하여 이루어진다. 강소성 가공법에는 소재에 대한 단면적의 치수 변화 없이 특정한 각도로 반복 압출하는 등통로각압축(ECAP, Equal Channel Angular Pressing)/등통로각압출(ECAE, Equal Channel Angular Extrusion) 가공법, 수직으로 압력을 가하면서 비틀림 회전을 이용한 HPT(High Pressure Torsion)가공법, 반복 다축단조를 이용한 다축단조(MAF, Multi Axial Forging) 가공법 등이 존재한다[1~5].

이러한 강소성 가공법들은 소재의 형상을 동일하게 유지하면서도 반복적인 전단 변형을 통하여 소재에 큰 변형력을 부여하므로, 기존의 대칭가공기술로는 달성이 불가능했던 새로운 재료물성과 집합조직을 획득할 수 있게 한다.[6,7] 그러나 위와 같은 강소성 가공법들은 가공 방법이 다소 복잡하고 반복공정에 있어 재료의 손실이 일어나기 때문에 연속 공정에 있어 불리함을 가진다.

최근, 강소성 가공법의 특징을 그대로 갖고 있으면서도 재료의 손실이 거의 없고 공정의 반복이 가능하여 대량 생산이 용이한 다축대각단조(MADF, Multi-Axial Diagonal Forging) 가공 기술이 개발되었으며, MADF 가공한 소재의 미세조직 및 물성에 대한 연구결과가 보고되고 있다. [7]

본 연구에서는 체심입방정(BCC)금속인 IF Steel (Interstitial-Free Steel) 주조재를 기존 MADF Ver.1 가

1. 강릉원주대학교 신소재금속공학부, 대학원생

2. 순천대학교 첨단부품소재공학과, 교수

3. 국방과학연구소, 책임연구원

4. ㈜솔루션소재 강릉연구소, 선임연구원

# 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

공법과 새로 개발한 MADF Ver.2 을 사용하여 가공한 후 재료의 특성 변화를 연구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 MADF 공정

MADF Ver.1 공정은 기존의 다축단조(MAF, Multi-Axial Forging)공정과 새로운 대각단조(DF, Diagonal Forging) 공정으로 구성되어 있다.

MADF Ver.1은 Fig. 1과 같이 정육면체의 소재면에 수직으로 힘을 가하여 직육면체의 형태로 만드는 면단조(PF, Plane Forging)와 PF된 소재를 다시 정육면체의 형태로 되돌리기 위한 복귀면단조(R-PF, Return-Plane Forging), 마주하는 두 모서리의 방향으로 압축하는 대각단조(DF, Diagonal Forging)와 DF된 소재를 다시 정육면체의 형태로 되돌리기 위한 복귀대각단조(R-DF, Return, Diagonal Forging)으로 구성된다.

MADF Ver.1의 1 cycle은 총 12 pass로, 1~6 pass는 PF와 R-PF, 7~12 pass는 DF와 R-DF로 시편의 방향을 순차적으로 바꿔가며 전 방향으로 가공을 진행한다. [6,7]

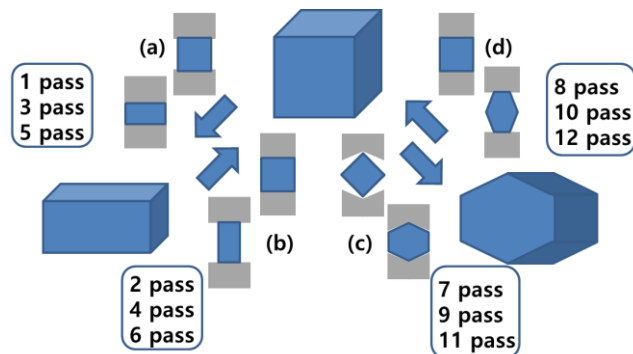


Fig. 1 Schematic diagram showing MADF process(a) Plane Forging(PF), (b) Return-Plane Forging(R-PF), (c) Diagonal Forging(DF), (d) Return-Diagonal Forging(R-DF)

이와 달리 기존의 MADF Ver.1공정을 통하여 새롭게 설계된 MADF Ver.2 공정은 MADF Ver.1과 동일하게 1 cycle은 총 12 pass의 단조공정으로 이뤄지나, 전 공정이 모두 DF와 R-DF공정으로만 구성된다는 차이점이 있다.

### 2.2 IF-Steel의 MADF 가공 실험

이 연구에서는 MADF Ver.1과 Ver.2 가공법에 따른 재료 특성의 변화를 분석하기 위하여 IF Steel 소재에 대한 MADF Ver.1과 Ver.2 공정을 진행하였다.

IF Steel 소재는 주조 후 각 변을 25 mm의 정육면체로 절단하여, 상하 복동식 200톤프레스를 이용하여 윤활 없이 1 cycle 가공하였다. Fig. 2에 MADF 1 cycle 가공된 시편의 형상을 나타내었다. IF Steel의 MADF Ver.1과 Ver.2 공정 모두 시편 표면에 큰 결함 없이 건전하게 가공되었다.

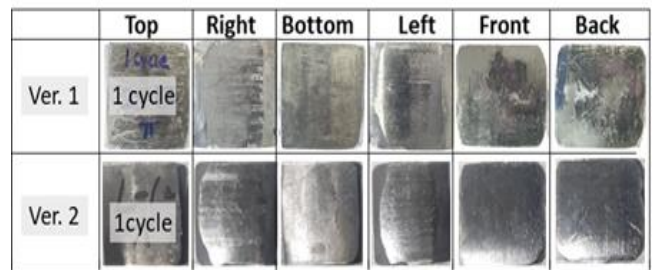


Fig. 2 The shape of the IF Steel specimens after 1 cycle of MADF Ver.1 and Ver.2 process

### 2.3 MADF Ver.1과 Ver.2 공정으로 가공된 IF Steel의 분석

MADF 1 cycle 가공이 완료된 정육면체 시편의 마지막 공정에서 상부 punch에 맞닿은 면을 Z면, 하부 punch에 맞닿은 면을 -Z면으로 정의하고, 하중방향에 평행하며 소재의 중심을 지나는 면을 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 S=0면으로 정의한 후 절단하였다. S=0면을 절단 한 후 대칭성을 고려하여 모서리 영역, 면 영역, 중심 영역을 Edge, Face 1, Face 2, Center로 표시하고 각 영역에서 시편을 채취하여 기계적 연마를 수행한 후 EBSD 및 비커스 경도를 측정하였다.

EBSD 및 비커스 경도 측정 조건은 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 경도는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 측정 면의 각 모서리부터 중심으로 3 mm를 제외한 안쪽의 총 25 지점에 대해 각 지점별로 경도를 측정하여 S=0면의 경도 Mapping을 진행하여 분석하였다.

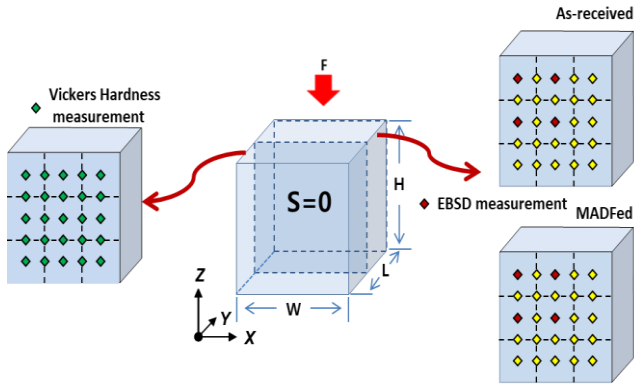


Fig. 3 Schematic drawing showing experimentally observed positions

Table 1 Measurement condition of EBSD

	As-Received	MADF Ver.1	MADF Ver.2
Scan area[ $\mu\text{m}$ ]	1600*4800	120*150	120*150
Step size[ $\mu\text{m}$ ]	5	0.2	0.2
Magnification	x150	x2000	x2000

Table 2 Measurement condition of Vickers Hardness

	As-Received	MADF Ver.1	MADF Ver.2
Load [gf]	250	250	250
Dwell Time [sec]	10	10	10
Number of measurement	25	25	25

### 3. 결과

이 연구에서는 MADF Ver.1과 MADF Ver.2 공정을 사용하여 BCC금속인 IF Steel을 1 cycle 가공하였으며, 1 cycle 가공된 소재의 미세조직 변화 및 기계적 성질의 변화를 실험적으로 관찰 및 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

#### 3.1 미세조직 분석 결과

MADF Ver.1과 Ver.2 공정으로 1 cycle 가공한 IF Steel의 EBSD 측정 결과인 Image Quality Map(IQ Map

을 Fig. 4에 나타내었다. 두 공정 모두 1 cycle 가공 후 결정립의 크기가  $742\mu\text{m}$ 에서 ver. 1 공정은  $53.0\mu\text{m}$ , ver. 2 공정은  $27.0\mu\text{m}$ 로 초기재에 비해 매우 미세해진 것을 확인 할 수 있었으며, 두 공정 모두 Center 영역의 결정립이 가장 미세화 되었고, Face 2 영역이 다른 영역들보다 덜 미세화 되었다.

MADF Ver.1 공정의 경우 Center 영역의 결정립이  $778\mu\text{m}$ 에서  $2.4\mu\text{m}$ 까지 결정립 미세화가 진행되었으며, Ver. 2의 경우 Edge 영역은  $3.9\mu\text{m}$ , Center 영역은  $2.5\mu\text{m}$ 로 두 영역에서 상당한 결정립 미세화가 진행되었다. 각 부위의 평균 결정립 크기는 Table 3에 자세히 표시하였으며, 각 부위의 평균 결정립 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

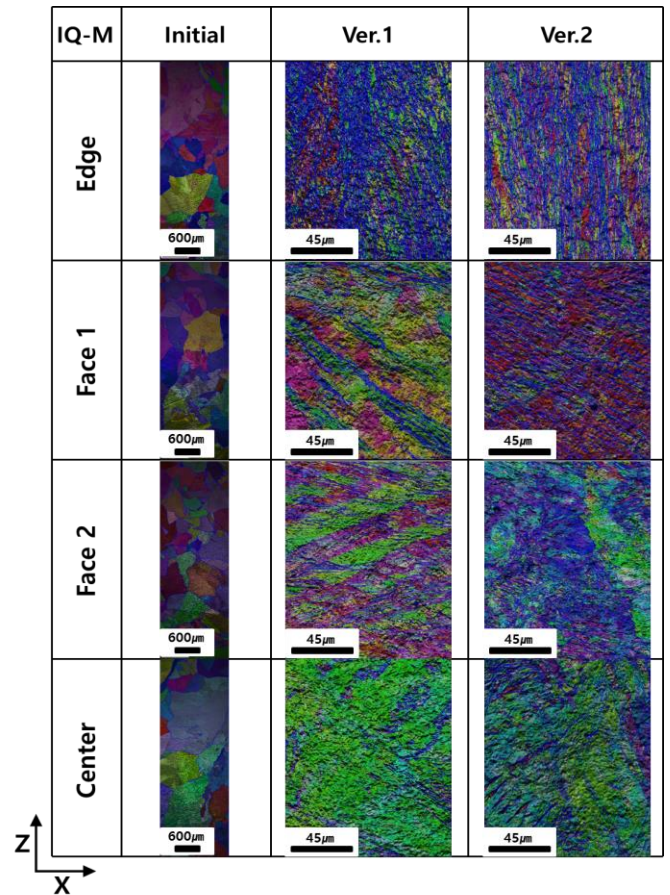


Fig. 4 Results of the IQ map developed in the IF Steel specimen after 1cycle of the MADF Ver.1 and Ver. 2 process

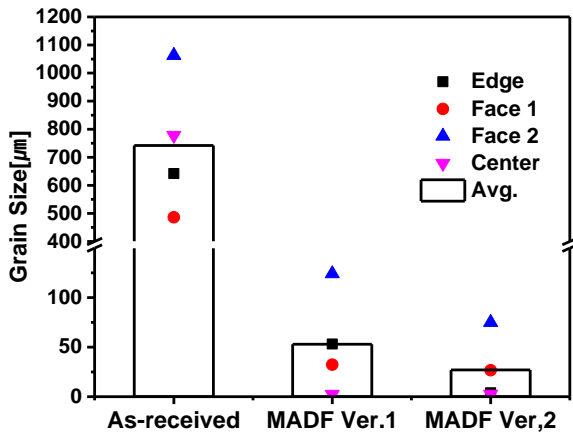


Fig. 5 Evolution of average grain size of IF Steel processed by MADF Ver.1 and Ver.2

Table 3 Grain size of IF Steel processed MADF Ver.1 and Ver. 2 by area

Grain Size[μm]	As-Received	MADF Ver.1	MADF Ver.2
Edge	642	53.2	3.9
Face 1	486	32.3	26.7
Face 2	1063	124.1	75.0
Center	778	2.4	2.5
Avg.	742	53.0	27.0

따라서 초기소재 대비 MADF Ver.1보다 Ver.2가 결정립 미세화에 더욱 유리한 공정임을 확인할 수 있었다.

### 3.2 기계적 성질 분석결과

MADF Ver.1과 Ver.2의 공정으로 1cycle 가공한 IF Steel의 기계적 성질의 변화를 분석하기 위해 비커스 경도를 측정하였으며, 분석결과를 Table 4에 나타내었다.

두 공정 모두 1 cycle 가공 후 초기 94 Hv에서 Ver.1은 185.6 Hv, Ver. 2는 191.2 Hv로 평균 경도 값이 크게 상승하였으며, Ver.1 보다 Ver.2의 평균 경도 값이 높은 값으로 분석되었다. Fig. 6에 나타낸 경도맵을 보면, Ver.1의 경우 측정면 중심에서 가장 높은 경도값인 232.0Hv를 보였고, 각 면의 중심은 상대적으로 낮은 134.9Hv로 분석되었으며, Ver.2는 Ver.1보

다 비교적 균일한 경도 분포로 분석되었다. 또한, 표준편차의 경우도 Ver.1보다 Ver.2가 더 낮게 분석된 것으로 보아, MADF Ver.1 공정보다 Ver.2 공정으로 가공된 시편이 더 균질하게 가공된 것으로 분석되었다.

Table 4 Average Vickers Hardness of IF Steel processed by MADF Ver.1 and Ver.2

	As-Received	MADF Ver.1	MADF Ver.2
Avg. Hv	94	185.6	191.2
Standard deviation	3.8	21.9	17.3

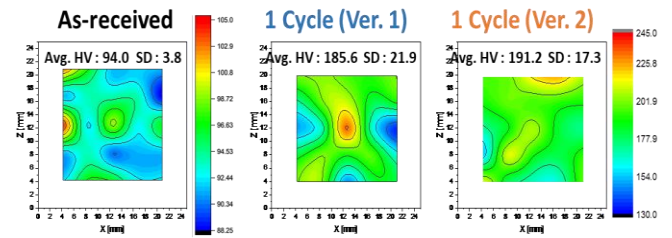


Fig. 6 Vickers Hardness map of IF Steel processed by MADF Ver.1 and Ver.2

## 4. 결론

이 연구에서는 MADF 가공법을 사용하여 체심입방정금속인 IF Steel을 MADF Ver.1 과 Ver.2로 가공하였으며, 미세조직 변화와 기계적물성을 실험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) MADF Ver.1 및 Ver.2로 가공한 IF Steel은 1cycle 가공 시 건전하게 소성 가공되었다.

(2) MADF Ver.1 및 Ver.2 모두 IF Steel의 결정립 크기를 미세화하는 효과가 우수하였으며, Ver.1보다 Ver.2 공정이 결정립 미세화에 더욱 효과적인 공정으로 분석되었다.

(3) 경도 분석결과 Ver.1 보다 Ver.2가 더 균질하게 가공하는 방법으로 분석 되었다.

(4) IF Steel의 MADF 가공에서 MADF Ver.2 공정이 Ver.1 공정보다 결정립 극미세화와 균질가공에 의한 기계적 성질의 균질화에 효과적임을 알 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, Severe plastic deformation (SPD) processes for metals, *CIRP Annals*, Vol. 57, No. 2, pp. 716~735, 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>
- [2] Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T. G, The process of grain refinement in equal-channel angular pressing, *Acta materialia*, Vol. 46, No. 9, pp.3317~3331, 1998.  
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(97\)00494-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00494-1)
- [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.  
[https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(96\)00024-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(96)00024-0)
- [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.  
[https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00025-X)
- [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.  
DOI: 10.1007/s11837-016-1820-6
- [6] S.C. Kwon, S.T. Kim, D.V. Kim, M.S. Kim, S. Lee, S.H. Choi, and H.T. Jeong, Microstructural Changes of AA1100 According to the Processing Number of Multi-Axial Diagonal Forging (MADF), *Transactions of Materials Processing*, Vol.28, No.2, pp.63~70, 2019  
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2019.28.2.63>
- [7] S.-T. Kim, S.-C. Kwon, D.-V. Kim, S. Lee, S.-H. Choi, and H.-T. Jeong, Microstructural Changes of OFC according to the Processing Number of Multi-Axial Diagonal Forging (MADF), *Transactions of Materials Processing*, Vol.27, No.6, 20, pp.347~355, 2018  
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2018.27.6.347>