

다축대각단조(MADF) 가공한 구리의 기계적 성질

권상철¹ · 김순태¹ · 김다빈¹ · 이재근² · 서승재² · 윤태식³ · 정효태^{1,#}

Mechanical Properties of OFC Copper Fabricated by Multi-Axial Diagonal Forging (MADF)

S. C. Kwon, S. T. Kim, D. V. Kim, J. K. Lee, S. J. Seo, T. S. Yoon, H. T. Jeong

(Received May 11, 2018 / Revised May 23, 2018 / Accepted May 24, 2018)

Abstract

Oxygen-free copper (OFC) was prepared as a 90 mm cube and then processed with Multi-Axial Diagonal Forging - Initialization of Prior manufacturing History (MADF). The MADF process has been newly developed as a severe plastic deformation method. The MADF process consists of upset forging with a thickness reduction of 30% and diagonal forging with a diagonal angle of 135°. 1 cycle process consists of a 12 passes forging process. In order to analyze the characteristic changes according to the number of iterations, 1, 2, and 3 cycles of the MADF process were performed. The OFC specimens were MADF processed without surface cracks up to 3 cycles. The microstructure, hardness and tensile test of processed materials were analyzed to study the change of material properties according to the amount of MADF process. The results showed that the MADF process effectively refined the microstructure and increased the strength of OFC. In the case of specimens processed for more than 2 cycles, the grains of all measurement regions were refined to be less than 7 μm of grain size. The 1 cycle MADF processed OFC showed the highest mechanical properties with the hardness of 132 HV and tensile strength of 395 MPa. Hardness and strength seemed to be saturated when processed over 2 cycles.

Key Words : SPD, OFC, MADF, Microstructure, Mechanical properties

1. 서론

벌크 구리 소재의 결정립 극미세화는 주로 강소성가공법(Severe Plastic Deformation)을 통하여 이루어진다. 이러한 강소성 가공법으로는 봉재 또는 각재를 단면적의 치수변화 없이 특정한 각도로 반복적으로 꺾어서 압출해내는 ECAP/ECAE(Equal Channel Angular Pressing/Equal Channel Angular Extrusion)가공법, 꺾는 방향을 다수로 하는 ECMAP(Equal Channel Multiple Angular Pressing)가공법, 수직으로 압력을 가

하면서 비틀림회전을 가하는 HPT(High Pressure Torsion)가공법 등이 사용되고 있다. 이와 같은 강소성 가공기술들은 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 [1~4]. 그러므로, 다양한 강소성가공법(SPD)을 활용하면, 기존 가공공정을 통하여서는 가공소재에 발달

1. 강릉원주대학교

2. (주)풍산 방산기술연구원

3. 방위산업기술지원센터, 광운대 방위사업학과

Corresponding Author : Gangneung-Wonju National University, Dept. Of Advanced Metal and Materials Engineering,

E-mail : htjeong@gwnu.ac.kr

하지 않는 새로운 집합조직이나, 극미세결정립 분포를 얻을 수 있으므로 혁신적인 새로운 소재 물성을 기대할 수 있다는 장점이 있다.

그러나 이와 같은 강소성가공법의 장점에도 불구하고 현재까지의 강소성 가공기술들은 대량생산에 적용하기 어렵기 때문에 실험실 규모의 연구용 기술로 국한되고 있는 실정이다. 예를 들어 재료물성의 변화가 현저하게 나타나는 ECAP 등의 가공기술은 가공공정의 실시가 용이하지 않으며, 매 반복가공마다 가공재의 말단을 절단하여야 하므로 대량생산의 측면에서는 가공의 난이도가 높고 재료의 손실이 일어나는 등의 문제점이 있다.

최근에 강릉원주대학교 연구팀은 국방과학연구소와의 공동연구에서 대량생산이 용이한 강소성가공법으로서 사전이력초기화 다축대각단조(Multi-Axial Diagonal Forging - Initialization of Prior manufacturing History, 이하 MADF) 가공기술을 개발하였으며, MADF 가공기술과 압연기술을 활용한 판재 제조공정 설계를 통하여 Ta소재의 입도미세화 및 미세조직 균질화를 효과적으로 구현하였다[6~7].

다축대각단조(MADF) 가공기술은 다음절에서 설명하는 바와 같이 공정진행에 따른 가공재의 손실이 없고, 가공재의 형상을 유지하도록 하는 단순한 일축단조공정을 반복하므로, 반복가공이 수월하여 기존의 강소성가공법들과는 달리 대량생산이 용이한 기술이다.

이 연구에서는 다축대각단조(MADF) 가공법을 사용하여 면심입방정(FCC)금속인 무산소동(OFC)을 가공하였으며, 가공량에 따른 재료특성의 변화를 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 다축대각단조(MADF) 가공법

다축대각단조(MADF) 가공법은 기존의 다축단조(Multi-directional Forging, MDF) 공정과 새로운 대각단조(Diagonal Forging) 공정으로 구성되어 있다[6,7].

기존의 다축단조(MDF)공정은[5] 육면체의 벌크소재의 3면을 순차적으로 각각 엷단조하여 소재내부에 변형을 인가한 후 초기 소재의 형상으로 복귀하는 강소성가공법이지만, 엷단조의 특징에 따라 변형이 압축방향에 대해 45도인 면에 집중되므로 다축단조 가공후에는 육면체 벌크소재의 모서리와

중심부에 변형이 집중되고 면에는 변형이 거의 이루어지지 않으므로, 소재내부에 위치에 따른 미세조직 및 재료물성의 차이가 크게 나타난다.

이러한 다축단조(MDF)의 변형 불균질성을 극복하기 위하여 대각단조공정을 수행한다. 대각단조공정은 마주하는 두 면의 방향으로 압축하는 엷단조와 달리 마주하는 두 모서리의 방향으로 압축가공하는 것으로, 엷단조와 비교하면 압축방향을 45도 회전한 것이다. 그러므로 대각단조에서는 변형이 엷단조와 대조적으로 가공후에 육면체 벌크소재의 면과 중심부에 집중되게 되어 소재내부의 위치에 따른 변형의 균질성을 회복하게 된다.

아래의 그림 1에 각 단조공정의 개략도를 나타내었다.

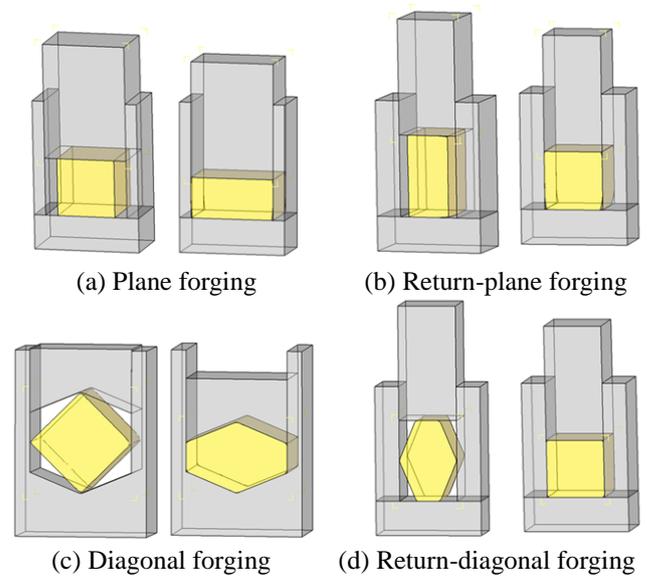


Fig. 1 Schematic diagram of forging processes in Multi-Axial Diagonal Forging(MADF)

다축대각단조(MADF) 공정은 총12패스의 단조공정으로, 다음과 같은 6패스의 다축단조와 6패스의 대각단조로 이루어진다.

다축단조는 정육면체의 세 모서리를 각각 X, Y, Z 축이라 하면, X축 방향으로 엷단조한 후, 엷단조에 의해 돌출된 부분을 단조하여 원래의 형상으로 복원시키는 엷단조 복귀 단조를 수행하고, Y축 및 Z축 방향으로 각각 엷단조 및 엷단조 복귀 단조를 하는 것이다.

대각단조는 X축 방향의 모서리 중 서로 가장 멀

리 이격되어 있는 두 모서리를 서로 가까워지도록 대각단조를 한 후 대각단조에 의해 돌출된 부분을 단조하여 금속을 원래의 형상으로 복원시키는 대각복귀 단조를 수행하고, Y축 및 Z축 방향의 두 모서리에 대하여 각각 대각단조 및 대각복귀 단조를 하는 것이다.

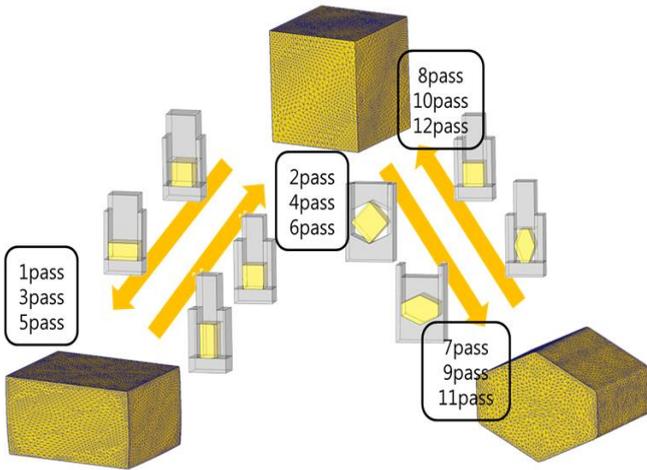


Fig. 2 Schematic diagram showing MADF process

림 2에 다축대각단조(MADF)의 단조공정순서와 가공체의 모양변화를 개략적으로 나타내었다. 다축대각단조(MADF)공정은 앞에서 설명한 바와 같이 12패스의 단조공정으로 완성되며, 이와 같은 12패스의 단조공정을 1 cycle이라고 정의한다.

2.2 다축대각단조(MADF) 가공실험

이 연구의 다축대각단조(MADF) 공정은 두께감소를 30%의 수직단조와 대각단조각 135°의 대각단조로 구성하여 수행하였으며, 단조소재로는 90mm 길이의 정육면체 무산소동(OFC)을 사용하여 (주)풍산의 4000톤 프레스를 이용하여 가공하였다.

12패스의 단조공정으로 구성되는 1 cycle의 다축대각단조(MADF) 공정은 1 cycle 다축대각단조(MADF) 수행 후 단조소재는 다시 초기의 형상이 되므로 다축대각단조(MADF) 가공을 반복적으로 수행할 수 있다. 그러므로 이 연구에서는 다축대각단조(MADF) 가공의 가공량에 따른 재료특성의 변화를 분석하기 위하여 3 cycles까지 다축대각단조(MADF) 가공을 하였으며, 1 cycle, 2 cycles, 3 cycles 다축대각단조(MADF) 가공소재를 비교하였다.

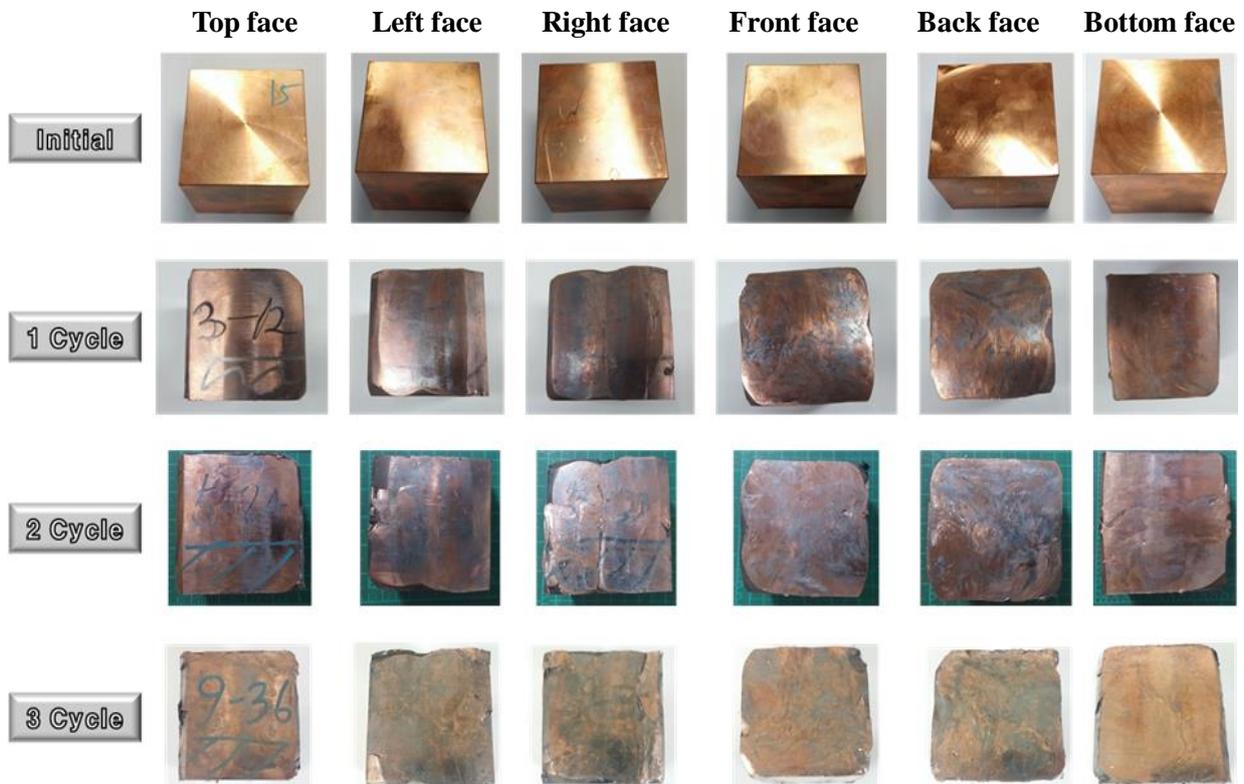


Fig. 3 Multi-axial diagonal forged OFC specimens

그림 3에는 90 mm의 무산소동 정육면체의 다축대각단조(MADF)가공한 시편의 외형을 나타내었다. 2 cycles 이후 표면에 crack으로 보이는 결함은 단조가공시 발생하는 버(burr)가 후속 단조공정에서 겹쳐진 것으로서 표면부에만 국한되므로, 이러한 표면결함 외에는 다축대각단조(MADF)를 3 cycles까지 가공하여도 모두 건전하게 가공된 것을 확인할 수 있었다.

2.3 다축대각단조(MADF) 가공재의 분석 방법

다축대각단조(MADF) 가공이 완료된 정육면체 가공소재들은 마지막 공정에서 하중을 받은 면을 S=1면으로, 반대쪽 면을 S=-1면으로 정의하고 하중방향에 수직인 중심면을 나타내는 S=0면을 절단하여 분석하였다. 중심면인 S=0면에서 위치에 따른 차이를 알아보기 위하여, 채취한 중심면에 대하여 모서리영역, 면영역, 중심영역을 그림4와 같이 Edge(1), Face(2), Center(3)로 표시하고 각 영역에서 시편을 채취하여 입도 분석 및 경도를 측정하였다. 정적항복강도의 경우 입도 및 경도를 측정하기 위하여 Center 영역에서 채취한 시편의 바로 위에서 가공하였으며 측정 시편의 위치를 그림 4에 나타내었다.

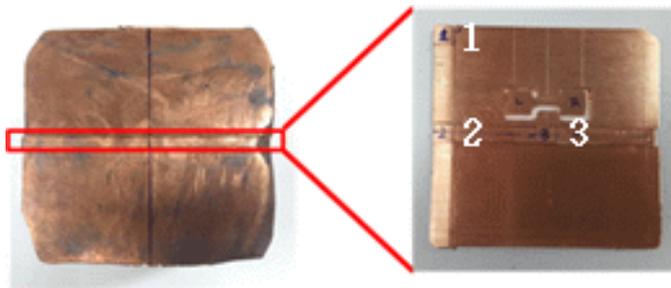


Fig. 4 Photos showing the analyzed part

다축대각단조(MADF) 가공재의 결정립은 증류수 120ml + 염산30ml + 염화철III 10g으로 부식 후 광학현미경(Optical microscope, OM)으로 미세조직을 관찰하였으며 FE-SEM(Inspect F, 1500M-T1-GE-EX)으로 EBSD 측정을 하여 입도분석을 하였다.

시편의 경도는 Vicker's Hardness를 측정하였으며, 측정 조건은 Load 100gf으로 Duration time 10초로 하였다. 경도의 경우 12회 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 10개의 data를 평균하여 분석하였다.

인장시험은 인장시편을 Center(3)영역 바로 위에서

채취하였으며, Gage Length 6mm, Width 1mm 의 인장시편으로 가공하여 Strain rate 2.8×10^{-3} /s로 인장실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 결정립도

광학현미경을 이용한 입도 분석결과를 그림 5에 나타내었다. 1 cycle 다축대각단조(MADF) 가공된 OFC의 결정립은 입도 미세화가 진행이 되었지만 일부 큰 결정립이 존재하고 있으며, 2 cycles 이상으로 다축대각단조(MADF) 가공 시 결정립이 균질하게 미세화되는 것을 알 수 있다.

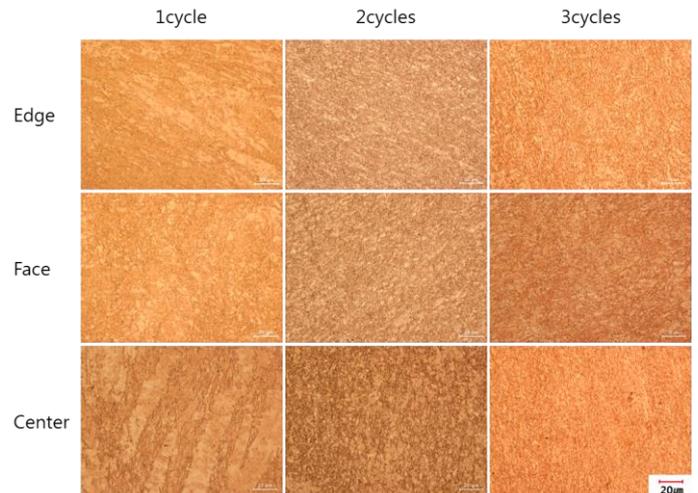


Fig. 5 Microstructure of MADF processed OFC

그림 6과 그림 7은 EBSD를 통한 입도 분석결과이다. 그림 6은 다축대각단조(MADF)가공전의 초기 소재에 대한 EBSD측정 Orientation Map과 결정립크기 해석을 나타내었고, 그림 7은 다축대각단조(MADF) 가공한 소재의 위치별, 가공횟수별 결정립 크기 해석을 나타내었다. EBSD를 통한 평균 결정립 크기 분석방법은 각 결정립의 크기를 결정립 숫자에 따라 산술적으로 평균하는 Number average방법과 각 결정립의 크기를 그 결정립이 차지하는 면적에 따라 가중평균하는 Area average방법이 있는데, 방위 차이에 따른 미세한 결정립까지 분석하는 EBSD에서는 Area average방법이 일반적인 결정립크기 분석결과와 일치하므로, 이 연구에서도 Area average값을 기준으로 하였다.

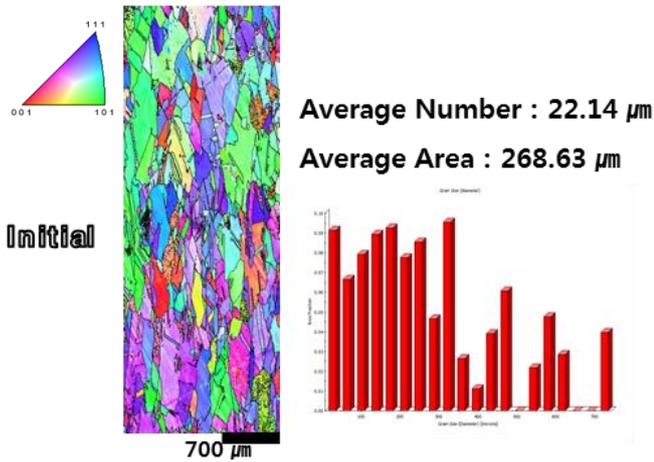


Fig. 6 The IPF Map(ND) of the initial OFC

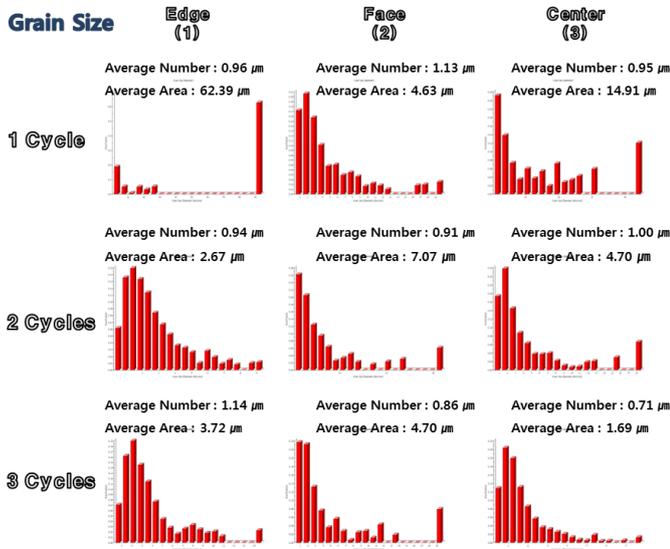


Fig. 7 The average grain size and grain size distribution of MADF processed OFC

초기소재의 결정립 크기는 268.6 μm으로 매우 조대한 미세조직이지만, 다축대각단조(MADF) 1 cycle 가공 후부터는 급격한 결정립 미세화가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 다축대각단조(MADF) 1 cycle 가공 후 Face 영역에서는 4.6μm로 현격한 결정립미세화가 이루어지고 Edge영역과 Center 영역에서 10μm 이하로 극미세화가 이루어지지 않았으나, MADF 2, 3 cycles 가공 후에는 Edge, Face, Center 모든 영역에서 10 μm이하로 극미세화가 이루어졌다.

3.2 기계적 성질

Vicker's Hardness 시험 결과를 그림 8과 표 1에 나타내었다. 가공 전의 초기시편의 경도값 101.5 Hv 과 비교하면 1 cycle 가공 후 Edge, Face, Center 영역의 평균 Hardness는 132.9 Hv, 2 cycles 가공 후 130.6 Hv, 3 cycles 가공 후 123.8 Hv로 가공 전의 초기시편에 비해 크게 상승하였다. 그러나 다축대각단조(MADF) 가공의 가공횟수가 많아질수록 Vicker's 경도 값이 낮아지고 가공재의 측정 위치에 따른 경도 편차도 작아지는 것을 알 수 있다.

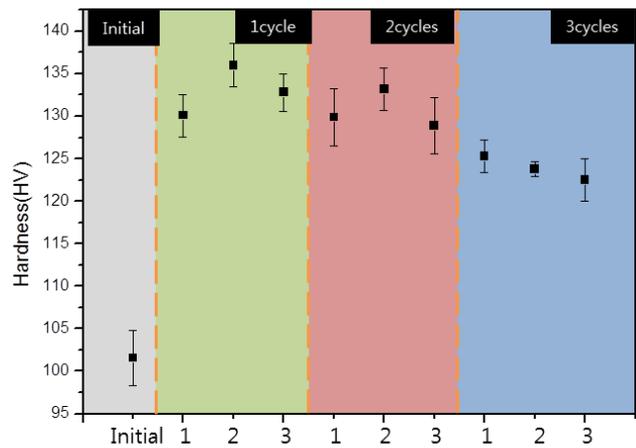


Fig. 8 The hardness of the MADF processed OFC for various cycles

Table 1 The average hardness of the MADF processed OFC for various cycles

	Hardness(Hv)	Standard deviation
Initial	101.5	3.2
1 cycle	132.9	2.95
2 cycles	130.6	2.25
3 cycles	123.8	1.45

그림 9의 인장시험 결과에서도 경도시험 결과와 유사한 경향이 나타나는 데, 인장강도가 초기시편의 188 MPa에서 다축대각단조(MADF) 1, 2, 3 cycles 가공한 시편에서 각각 395, 384, 359 MPa로 크게 증가하였다. 그러나 Vicker's 경도와 마찬가지로 다축대각단조(MADF) 가공횟수가 많아질수록 인장강도가 낮아졌다.

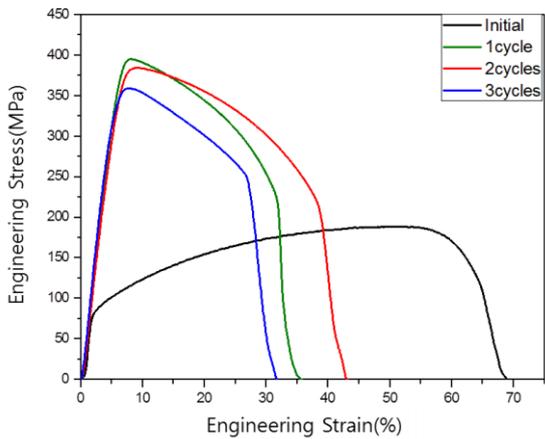


Fig. 9 The stress-strain curves of the MADF processed OFC for various cycles

Table 2 Tensile of MADF processed OFC

	YS(MPa)	UTS(MPa)	Strain(%)
Initial	78	188	67
1 cycle	334	395	34
2 cycles	319	384	40
3 cycles	295	359	31

경도시험과 인장시험에서 공통적으로 1 cycle의 다축대각단조(MADF) 가공으로 결정립 미세화와 더불어 경도와 강도의 급격한 증가가 이루어지는 것에 반해서, 1 cycle 가공 이후 연속되는 추가가공에서 결정립이 미세화됨에도 불구하고 경도와 강도가 서서히 감소하는 것은 특이한 점이다.

이러한 사실은 무산소동의 다축대각단조(MADF) 공정이 진행되면서 1 cycle 이상의 단조공정에서는 심한 변형의 축적과 가공열의 발생에 의한 동적 재결정이 일어나는 것으로 판단 할 수 있다. 즉, 2, 3 cycle의 다축대각단조(MADF)공정이 진행되면서 지속적인 결정립미세화와 더불어 동적재결정이 함께 일어나고, 결정립미세화에 의한 재료강화보다 동적재결정에 의한 재료연화의 기여가 커서 다축대각단조(MADF)공정이 1 cycle이상 진행되는 경우에 경도와 강도가 약간 감소하는 것으로 생각할 수 있다.

다축대각단조(MADF)공정은 1 cycle 가공만으로도 매우 효과적으로 무산소동의 결정립을 미세화할 수 있으며, 2 cycle 이상의 가공을 수행하는 경우 벌크소재 전체에서 균일하게 5 μm 수준의 결정립 미세화

를 얻을 수 있다. 또한, 이에 따라 1 cycle 다축대각단조(MADF)가공후 현격한 경도와 강도의 강화가 이루어지는 것을 알 수 있다. 그러므로 다축대각단조(MADF)공정은 무산소동의 결정립미세화와 경도와 강도의 향상을 효과적으로 할 수 있는 강소성가공법을 확인하였다.

4. 결론

1. 다축대각단조(MADF) 공정으로 가공한 무산소동 가공재는 다축대각단조(MADF) 3 cycles까지 건전하게 소성가공 되었다.
2. 다축대각단조(MADF) 가공공정이 반복됨에 따라 무산소동의 결정립은 계속적으로 미세화되었다.
3. 2 cycles 이상 가공된 무산소동의 결정립은 7 μm 이하로 미세화 되었다.
4. 위치별 평균 최대 경도와 인장강도는 다축대각단조(MADF) 1cycle 가공시 132.9 Hv, 395 MPa로 가장 높았으며 경도의 경우 다축대각단조(MADF) 가공량이 많아질수록 측정 위치에 따른 경도편차가 작아졌다.
5. 다축대각단조(MADF) 가공한 OFC의 경우 경도와 강도는 2 cycles 이후 다축대각단조(MADF) 가공횟수가 증가함에 따라 약간 연화된다. 이는 가공량이 증가하면서 동적재결정이 일어나는 것으로 판단된다.
6. 무산소동에 적용한 MADF 공정기술은 입도 극미세화와 인장특성의 개선에 효과적임을 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구는 방위산업기술지원센터로부터 연구비를 지원받아 수행되었고(계약번호 UC 160008D)에 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 Ann, 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 Mater*, 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] A. Kundu, R. Kapoor, R. Tewari, J.K. Chakravartty, 2008, Severe plastic deformation of copper using multiple compression in a channel die, *Scr. Mater.* Vol.58, no.3, pp. 235-238.
- [6] 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
- [7] S. Lee, S. H. Yang, S. H. Lee, H. T. Jeong, Y. Y. Cho, 2016, Manufacturing method for metal, Korea Patent, Registration No. 1016306670000