

폴딩 기법을 이용한 스텔링실버 링 제조 공정

김익규, 김광배, 김은석, 송오성*
서울시립대학교 신소재공학과

Fabrication of a sterling silver ring with folding process

Ik gyu Kim, Kwangbae Kim, Eun-Seok Kim, Ohsung Song*
Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul

요약 스텔링실버 판재를 콜드-다이 포징(cold-die forging)과 어닐링을 반복하는 폴딩공정을 이용하여 반지모양으로 가공하는 신공정을 제안하였다. 도넛모양으로 재단된 판재에 선폭 0.43 μm 인 격자를 각인하였다. 그 후 경사가 45°, 60°, 75°인 다이(die)를 이용한 포징과 어닐링을 반복하여 폴딩하였다. 비교를 위해 어닐링을 생략한 시편 또한 준비하였다. 각인된 격자의 길이 변화를 측정하여, 공정과정에 따른 스트레인을 확인하였다. 버니어캘리퍼스, 비커스 경도 측정기(Vickers hardness tester)와 광학현미경, UV-VIS 컬러미터(colormeter)를 이용하여 크기, 경도, 미세구조, 표면색을 확인하였다. 어닐링을 생략하는 경우 크랙이 발생하였으나, 어닐링을 부가하는 경우 성공적으로 변형이 가능했다. 시편의 거시적인 스트레인을 분석한 결과, 최종공정 후 외경의 길이와 두께는 각각 감소하였지만, 내경의 길이와 폭은 각각 증가하였다. 시편의 미시적인 스트레인은 수평 방향에서 최대 +0.128 만큼 증가하였다. 비커스 경도의 경우, 열처리 시에는 감소하지만 폴딩공정 후에는 증가하는 경향을 나타내었다. 미세구조 관찰 결과 어닐링 직후 결정립의 크기가 증가하고 폴딩공정 직후는 감소하였다. Lab지수를 기준으로 색차는 모든 공정에서 10 이하로 확인되었다. 결국 도넛형태의 은 판재를 폴딩공정을 이용하여 성공적인 반지모양의 주얼리 제조가 가능하였다.

Abstract A novel folding process is proposed using a repeated cold-die forging and annealing to form a sterling silver ring. Sterling silver plate was cut into a doughnut shape, and lattices with 0.43-mm line-width were imprinted on it. The sample was folded by forging using dies with slopes of 45°, 60°, and 75° and annealing. For comparison, samples were also fabricated without annealing. Strain was identified by measuring the length of lattices. Vernier calipers, a Vickers hardness tester, an optical microscope, and a UV-VIS colorimeter were used to determine the size, hardness, microstructure, and body color. Without annealing, cracks occurred. However, successful deformation was possible when annealing was used. The results of macro strain measurements show that the outer diameter and width decreased, while the inner diameter and thickness increased after the final process. The maximum strain was increased 0.128 toward the parallel direction. The Vickers hardness decreased after annealing and increased after the folding process. The microstructure results showed that the grain size increased after annealing but decreased after folding. The color difference based on the Lab index was under 10 for all processes. Eventually, a doughnut-shaped silver plate was successfully deformed into a ring shape by the folding process.

Keywords : Folding Process, 925 Sterling Silver, Strain, Mechanical Properties, Annealing

본 논문은 2018년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임[S2597543]

*Corresponding Author : Ohsung Song(University of Seoul)

email: songos@uos.ac.kr

Received July 4, 2019

Accepted September 6, 2019

Revised August 22, 2019

Published September 30, 2019

1. 서론

최근 귀금속의 표면에 글자나 무늬를 반복하여 채용하거나, 무늬금속(모쿠메가네)과 같이 색이 다른 귀금속을 나뭇결무늬로 가공한 특수 판재를 채용한 귀금속이 제작되고 있다. 무늬금속은 일본에서 칼을 만들 때, 강도를 향상시키기 위해 여러 겹의 금속판을 붙여서 만든 데에서 유래되었으며, 색이 다른 두 가지 혹은 더 많은 종류의 금속들을 적층시키고, 열 확산에 의해 완전히 접합시킨 후 압연하여 나뭇결무늬와 같은 독특한 판재를 제작하는 기법이다[1].

일반적으로 반지형태를 제조할 때는 2차원 금속판재를 이용하여 3차원적인 링 형태로 제작하는 말음기법과 주조공법으로 구분이 가능하다. 말음기법의 경우, 금속판재를 직사각형 형태로 재단하고 이를 말아서 양쪽 모서리를 부분을 땀 접합시켜 반지를 제작하는 방법이다. 그러나 무늬가 있는 판재를 말음기법으로 3차원적인 링 형태를 제작할 경우, 필연적으로 발생하는 접합 부분으로 인하여 최종 제품에서 금속의 무늬가 끊기고 땀 접합부가 노출되어 심미성이 저하되는 문제가 발생한다[2]. 또한 주조공법은 복잡한 반지 형상을 쉽게 제조할 수 있고, 여러 가지 제품을 동시에 제작할 수 있어, 이에 대부분의 귀금속 제품의 제조에 이용되고 있으나 표면부의 연속적인 무늬가 있는 금속에는 주조공법을 채용할 수 없는 문제가 있었다.

이러한 문제를 해결하기 위해 E. Eruc 등[3]이 두꺼운 무늬 금속판의 중심부에 천공을 만들고, 천공의 크기를 점진적으로 확장시켜서 반지형태를 제작하는 방법을 보고한 바 있다. 그러나 이 공정은 귀금속으로 구성된 판재를 과도하게 잘라내고 연마해야하므로 공정재료의 손실과 직접 수작업으로 제작해야하는 공정특성상 공정 시간이 많이 소요되는 문제가 있었다.

한편 냉간-다이포징은 다이 위에 금속 판재를 상온에서 소성변형하는 방법으로, 다이의 형상에 따라 변형시킬 수 있다. 냉간-다이포징은 다이에 각인된 복잡한 형상을 거의 손실 없이 판재에 복사할 수 있으며, 매우 높은 재 생산성을 가지고 있어 대량생산에 용이하다[4].

냉간-다이포징은 M.A. Hassan 등[5]이 보고한 바와 같이 딥 드로잉(deep drawing)을 통해 얇은 금속판을 속이 빈 튜브모양으로 성형이 가능하며, 이미 알루미늄이나 마그네슘 제품과 같은 비철제품의 모양을 성형하는 방법 중 하나로 사용되어 왔다[6].

그러나 냉간-다이포징 공정의 경우, 압력이 판재의 특

정부분에 집중되면서 파손되는 문제가 보고된 바 있으며 [7], 이런 문제를 해결하기 위해, 공정 전후로 어닐링을 진행하여 금속의 연성을 증가시키거나 스트레스를 완화시키는 과정이 필수적이다.

이러한 냉간-다이포징 공정을 귀금속 제조방법으로 채용하고 각 공정에 따른 귀금속 판재물성의 정량적인 평가는 아직 보고된 바 없으며, 특히 도넛형태의 2차원 판재에 대해서 반복적인 냉간가공을 거쳐 폴딩하여 3차원 적인 반지형태로의 가공은 보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 무늬금속과 같이 표면에 심미적인 패턴이 있는 판재형상의 소재로부터 패턴의 단절 없이 반지를 제작하는 경우를 상정하여, 새로이 판재를 도넛형태로 재단하고, 냉간-다이포징 공법으로 3차원 적인 반지형태로 제작하는 폴딩(folding)공정을 제안하였다.

이에 따라 무늬금속과 일반적인 은합금 장신구에 많이 채용되는 925 스틸링실버 판재에 대하여, 표면패턴을 만들고, 폴딩공정을 채용하고 반지를 제작하는 각 단계별 공정에 따라 각 공정별 스트레인을 정량화하고 대표적인 물성인 경도와 미세구조의 변화를 측정하여 표면패턴의 손상 없이 반지형태의 새로운 가공이 가능한지 확인하였다.

2. 본론

2.1 실험방법

여러 개의 가로 × 세로 × 두께가 각각 50 × 50 × 0.5 mm인 스틸링실버 판재를 준비하였다. 스틸링 실버는 925 실버 라고하며 순은에 7.5 wt% Cu가 혼합되어 특유의 미려한 백색 금속광택을 띠며, 기계적인 전연성도 물질도 우수하여 일반 공예품에서 가장 많이 사용되는 소재이다[8].

판재의 손실을 최소화 하면서 많은 도넛 모양의 시료를 얻기 위해, 레이저 절단기(PLS6MW, Universal)를 이용하여 준비된 스틸링실버 판재를 Fig. 1과 같이 각 도넛모양 판재의 외경 23.5 mm, 내경 12.5 mm가 되도록 재단하였다. 도넛과 도넛 사이에는 1 mm의 유격을 두어 레이저 절단 시 발생할 수 있는 변형을 차단하였다. 결국 Fig. 1의 회색으로 표시된 도넛모양으로 시료를 재단하였다.

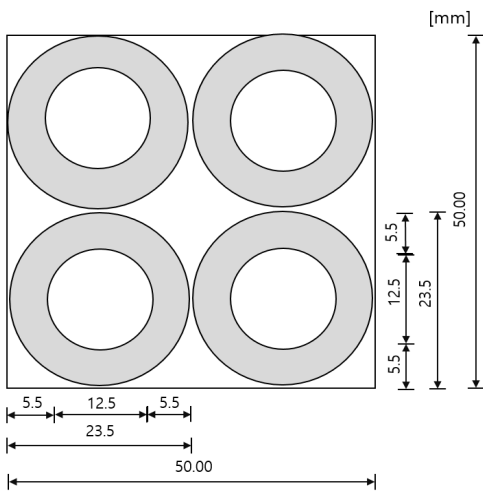
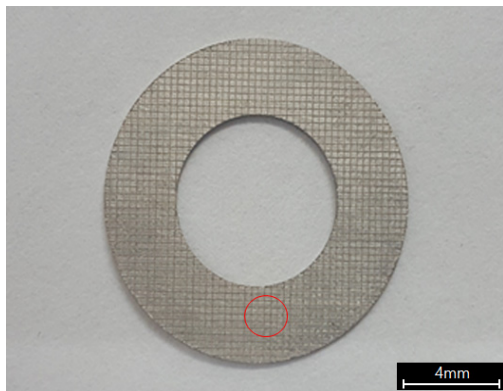
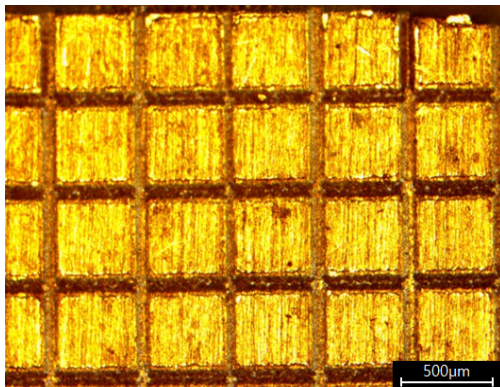


Fig. 1. Schematic diagram of cutting method.

Fig. 2는 재단된 시편의 이미지이다. Fig. 2(a)는 재단 직후의 이미지로 은판을 가공하여 외경 23.5 mm, 내경



(a)



(b)

Fig. 2. Initial sample image; (a) as-cut doughnut shape silver plate, (b) imprinted lattice.

12.5 mm인 도넛모양 판재로 가공한 것을 나타낸다. 소성과정에서 시료에 가해지는 스트레인을 정량화하기 위해, 레이저를 이용하여 은판에 격자무늬를 각인하였다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에서 적색원으로 표시한 부분을 확대한 이미지로, 길이가 0.43 mm인 정사각형 격자가 길이 40 µm로 각인된 것을 확인하였다.

Fig. 3에는 전체 공정의 모식도를 나타내었으며, 3번의 열풀림 공정과 3번의 폴딩공정으로 구성된 것을 나타내었다. 우선 도넛 모양의 시편에 700 °C 어닐링 공정을 진행한 후 원뿔모양의 몰드를 이용하여 압력을 가하여 폴딩된 시편을 제작하였다. 비교를 위해, 어닐링 공정을 생략하고 폴딩공정을 진행한 시편도 준비하였다. 폴딩공정 시 순차적으로 각도 45°, 60°, 75°인 서로 다른 몰드와 다이를 이용하여, 총 3회의 폴딩공정을 진행하였다. 이때 가해진 힘은 모두 3 ton으로 동일하였다.

폴딩공정에 의해 전위의 응집으로 재료의 소성파괴가 있을 수 있으므로 이를 방지하기 위해, 어닐링 공정을 폴딩공정 전에 시행하였다. 부탄 토치를 이용하여 30초간 전체 스텔링실버를 가열하여 작열시키고 이때 가열부 후면에 접촉된 열전쌍으로 온도가 700 °C 에 도달함을 각 어닐링 공정별로 확인하였다.

이후 폴딩공정에서 시편이 변형되면서 스트레스를 받게 되고, 이 스트레스는 전체시편에 소성변형을 가져온다. 거시적으로(macro) 전체시편의 외경, 내경, 폭, 두께의 스트레인과, 미시적으로(micro) 넓은 곳에서 좁아져야 하는 상부(top)와 좁은 곳에서 넓어져야 하는 하부(bottom)에 집중될 것으로 예상되는 스트레인을 측정하였다. 따라서 Fig. 3의 우측에 표시된 상부-중간부-하부(top-center-bottom) 부분의 각 수직(perpendicular)과 수평(parallel) 방향의 스트레인을 측정하였다.

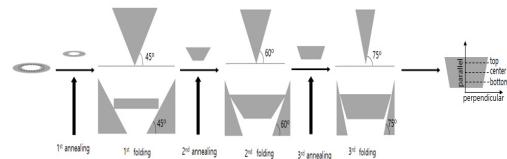


Fig. 3. Schematic diagram of whole process.

버니어캘리퍼스(Mitutoyo, EX-POWDER)를 이용하여 폴딩공정에 따른 시편의 외경, 내경, 폭, 두께의 길이 변화를 확인하여 Eq. (1)에 나타난 바와 같이 거시적인 스트레인을 계산하였다. 이때 L_0 는 ref시료의 길이, L_i i 번째 공정 후 시편의 길이이다.

$$strain = \frac{L_i - L_o}{L_o} \quad (1)$$

Fig. 4는 미시적인 스트레인을 측정하기 위해 광학현미경(ZEISS, AX-10)을 이용하여 시편의 미세구조를 분석한 이미지이다. Fig. 4(a)는 폴딩공정 전 도넛형 은판의 확대 이미지이고, Fig. 4(b), (c), (d)는 각각 상, 중, 하단에 대하여 3rd 어닐링 직후의 광학현미경 이미지를 나타내었다. 이미지에서 표시된 수평선(parallel line)은 성형압력 방향에 수평한 직선이고 수직선(perpendicular line)은 수직한 방향이다. 이때 수평선 방향으로 총 11개의 격자가 존재하며, 최상부와 하부 2개의 격자는 분석에서 제외하고 남은 9개의 격자를 3개씩 나누어 상, 중, 하단으로 정의하고 각 부분의 평균값을 분석하였다. 이때 폴딩공정 시 시편에 가해지는 스트레인의 크기와 방향을 정량화하기 위해, 각 공정에 따른 시편의 격자길이 변화를 Eq. (1)으로 환산하여 분석하였다. 이를 통해 상, 중간, 하부에 가해지는 스트레인과 스트레스의 종류를 확인하였다.

시편의 기계적인 특징인 비커스 경도를 측정하기 위해 상, 중간, 하부에 대해 각각의 비커스 경도기(Mitutoyo, MVK H1)를 이용하여 경도를 분석하였다. 폴리싱된 시편을 500 N, 15초 간 압입(indentation)하였으며, 각 경우에 대해 최소 5번을 측정하고 평균하였다.

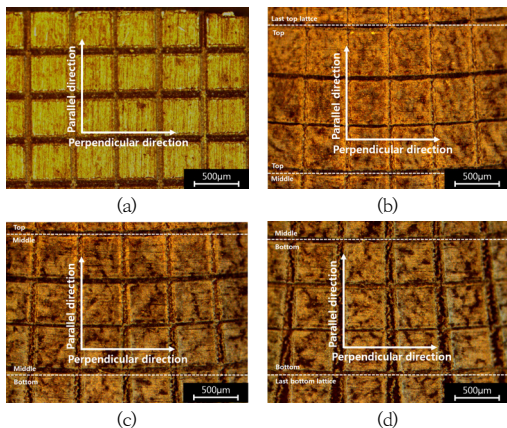


Fig. 4. Magnified images of sample after 3rd annealing according to positions, and lattices considered for strain calculation; (a) reference sample, (b) top, (c) middle, (d) bottom.

각 공정에 따른 미세구조를 확인하기 위해, 제작된 시편을 1 µm 다이아몬드를 이용하여 폴리싱하였다. 그 후 25 % 암모니아와 30 % 과산화수소를 3 : 1 부피비율로

혼합하여 에칭용액을 제작하고, 폴리싱된 시편을 수십 초 침지시켜 표면을 에칭하였다. 에칭된 시편을 광학현미경(ZEISS, AX-10)으로 ×200배까지 확대시켜 미세구조를 확인하였으며, 이미지 분석프로그램(IMT, iSolution DT ×64)을 이용해 관찰한 미세구조로부터 결정립 크기를 확인하였다.

폴딩공정에 따른 시편의 Lab 지수 변화를 통한 정량적인 색변화 확인하기 위해 UV-VIS 분광기(Shimadzu, UV-3150)를 이용하였다. 이때 반사모드(reflectance mode)로 200~800 nm파장에 대하여, 폴리싱 된 시편을 관찰하였다.

색차(Color difference, CD)는 아래의 Eq. (2)를 통해 계산하였다[9].

$$CD = \sqrt{(L_i - L_o)^2 + (a_i - a_0)^2 + (b_i - b_0)^2} \quad (2)$$

L_i , a_i , b_i 는 특정 공정의 L, a, b값이며, L_o , a_o , b_o 는 기준이 되는 시료의 L, a, b값이다.

2.2 실험 결과 및 논의

Fig. 5는 공정직후의 시편이미지이다. 좌측의 3개는 어닐링을 포함한 공정을 진행할 때의 제작된 시편이고, 맨 우측 시료는 어닐링 없이 공정을 진행할 때의 시편이다. 좌측 3개 시편의 경우 공정이 진행됨에 따라 경사가 급해지는 것을 확인할 수 있으며 어떠한 파괴도 발생하지 않았다. 그러나 우측에 나타난 어닐링을 생략하는 경우의 시편은, 1st 폴딩공정시 적색원으로 표시한 부분에서 파괴가 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 성공적인 공정을 위해서는 어닐링이 필수적인 것을 확인하였으며, 이후 시편의 스트레인 측정은 어닐링을 포함한 공정에 대해서만 진행하였다.

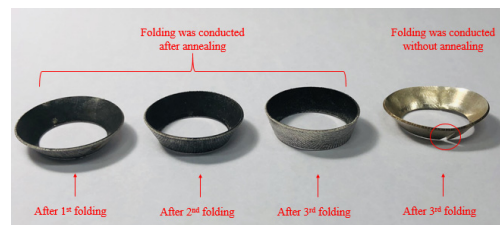


Fig. 5. Image of samples after folding process.

Fig. 6은 각 공정과정에 따른 거시적인 스트레인 변화를 나타내었다. 내경의 길이는 외경과 달리 공정이 진행됨에 따라 증가하였다. 어닐링 공정에 의해서는 내경의

스트레인에 큰 변화가 없었으나, 1st, 2nd, 3rd 폴딩공정 직후 각각 +0.149, +0.085, +0.108 만큼 증가하는 인장 (tensile) 변형이 작용하였다. 폭의 경우 어닐링, 폴딩공정에 상관없이 공정직후에 스트레인이 증가하였으며, 최종적으로 폭은 처음 판재 시료에 비해 +0.061만큼 증가했다. 내경의 경우와 마찬가지로 스트레인 증가는 주로 폴딩 공정에 의해 발생하였다. 외경의 스트레인은 공정이 진행됨에 따라 감소하였다. 앞선 경우와 마찬가지로 어닐링 공정이 진행될 때는 스트레인 변화가 거의 없었으나, 1st, 2nd, 3rd 폴딩공정에서 각각 -0.048, -0.037, -0.038 감소하여 최종적으로 약 -0.127 감소하였다. 이는 폴딩공정으로 인해 상부가 좁아지며 압축(compressive) 변형이 발생하기 때문으로 판단하였다. 두께의 경우 어닐링 직후는 스트레인이 일정하거나 증가하고 폴딩공정 직후에는 감소하는 경향을 나타내어, 최종공정 직후에는 기준 판재에 비해 약 -0.056 감소하였다. 결국 폴딩공정으로 인해 거시적으로는 시편의 내경과 폭이 증가하고, 외경과 두께는 축소되는 변형이 발생함을 확인하였다.

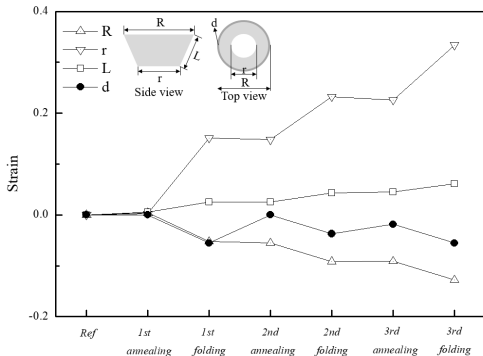
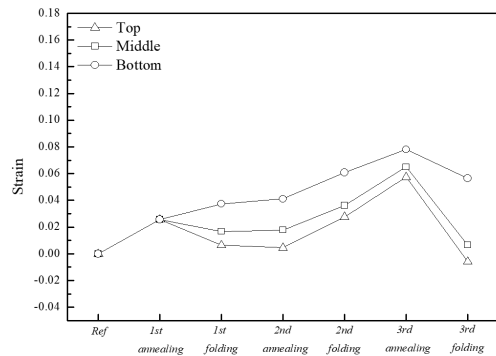


Fig. 6. Strains of macro dimension according to process.

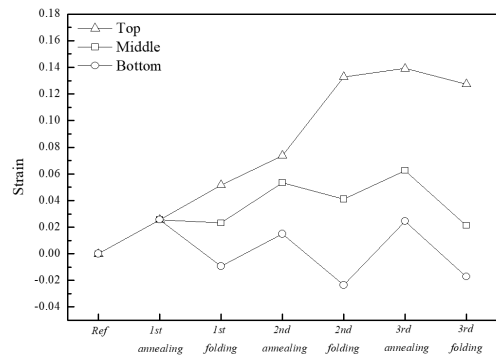
Fig. 7에는 각 공정과정에 따른 상, 중간, 하부 위치별 미시적인 패턴변화를 기준으로 한 스트레인을 나타내었다. Fig. 7(a)에는 수직 방향의 위치별 스트레인을 나타내었다. 어닐링 직후에는 위치에 상관없이 인장 스트레인이 증가한 것을 확인하였다. 폴딩공정 직후 스트레인의 변화는 공정마다 상이하게 적용되어, 1st 폴딩공정의 경우 하부에서는 수직 길이가 +0.012 증가한 반면, 상부와 중간부에서는 수직 길이가 각각 -0.019, -0.009 감소하였다. 2nd 폴딩공정의 경우, 상부, 중간부, 하부의 길이가 각각 +0.023, +0.018, +0.019 증가한 것을 확인하였고, 3rd 폴딩공정의 경우, 상부, 중간부, 하부에서 각각 -0.064, -0.058, -0.022 감소한 것을 확인하였다.

Fig. 7(b)는 수평 방향에서, 공정과정에 따른 위치별 스트레인을 나타낸다. 어닐링 직후에는 위치에 상관없이 스트레인이 증가한 것을 확인하였다. 1st 폴딩공정의 경우 상부는 +0.026 증가했으나 중간부와 하부는 각각 -0.003, -0.035 감소하였다. 유사한 증감이 2nd 폴딩공정 후에도 관찰되었으며 상부는 +0.059 증가했으나 중, 하부는 각각 -0.012, -0.039 감소하였다. 3rd 폴딩공정 직후 상, 중, 하부 각각 -0.012, -0.041, -0.042 감소하였다.

즉, 최종 폴딩공정 까지 수직과 수평 방향에서 각각 최대 +0.059, +0.128 만큼의 인장 스트레인을 견디면서 가공이 가능하였다. 이 최대 스트레인은 수평과 수직방향 각각 하부와 상부에 집중되어, 내경과 폭의 길이를 증가시킨 것으로 판단하였다.



(a)



(b)

Fig. 7. Strain of micro dimension according to process; (a) perpendicular direction (b) parallel direction.

Fig. 8은 공정과정에 따른 비커스경도 결과이다. 검은 색 그래프는 어닐링을 포함하는 경우를 나타내었고, 회색 그래프는 어닐링을 생략하여 파괴가 일어나는 경우의 비커스 경도를 나타내었다. 삼각형, 사각형, 구형의 기호는 각각 상, 중, 하부를 의미한다.

어닐링을 포함하는 경우, 어닐링 직후에는 비커스 경도가 감소하지만 폴딩공정 후에는 증가하는 것을 확인하였다. 아무처리하지 않은 실버 판재시료의 비커스 경도는 약 156 Hv로 측정되었으나, 1st 어닐링 직후에는 85 Hv로 감소하였다. 후속 공정인 1st, 2nd, 3rd 폴딩공정에서 비커스 경도는 각각 85 ~ 103 Hv, 90 ~ 102 Hv, 76 ~ 110 Hv의 범위를 가진 것으로 확인 되었다.

반면 어닐링 하지 않는 경우 약 155 ~ 160 Hv로 높은 값을 나타내어 어닐링을 진행하는 경우보다 높았으며, 이러한 결과는 Nassar 등[10]이 어닐링을 하지 않을 경우 경도가 높다는 결과와 일치하는 결과였다. 그러나 첫 번째 폴딩공정 부터 부분파괴가 시작되어, 폴딩공정이 계속될수록 파괴부가 점점 성장하여 제품으로서 활용성은 없었다.

위치에 따른 경도의 변화는, 폴딩공정 직후에 상부와 하부의 위치에서 가장 높은 경도를 나타내었으며 중간부의 위치의 경우 비교적 경도 변화량이 적었다. 특히, 2nd 폴딩공정까지는, 하부의 위치가 폴딩공정 직후에 가장 높은 비커스 경도를 나타냈으나, 3rd 폴딩 이후에는 상부의 위치가 가장 컸다. Fig. 7에서 확인한 바와 같이 상부나 하부에는 각각 수평과 수직 방향으로 높은 크기의 스트레인인 작용하기 때문에, 상대적으로 더 큰 가공경화가 발생하며 중간부에 비해 큰 경도를 보인 것으로 판단하였다. 한편 폴딩공정이 진행될수록 반복되는 소성변형으로 전위가 뭉쳐 더욱 명백한 결정립계가 확립되고, 결정 사이즈 또한 작아져 경도가 증가하므로 주얼리로 사용 시 스크레치에 대한 내구성이 향상될 것으로 판단하였다.

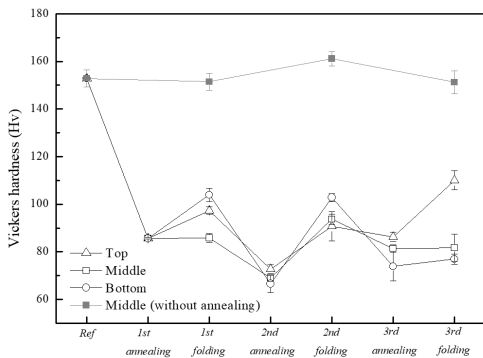


Fig. 8. Vickers hardness according to process.

Fig. 9에는 어닐링을 진행한 중간부 시편의 미세구조를 나타내었다. 각 이미지는 모두 200배로 확대된 이미지이다.

Fig. 9(a)는 기준판재 시료의 미세구조 이미지이다. 약 3.5 μm 로드(rod)형태의 미세구조를 확인하였으며, 이는 기준 판재시료가 압연되었기 때문에 나타는 현상으로 판단하였다. 기준 판재시료가 일반적으로 알려진 50~60 Hv보다 높은 경도값을 지닌 것은 압연가공으로 재료내 전위밀도가 증가하여 나타나는 가공경화현상 때문으로 판단하였다.

Fig. 9(b)에서는 1st 어닐링 직후의 이미지를 나타내었으며, Fig. 9(a)와 달리 등축 결정립이 됨을 확인하였다. 이는 G.S. Sun 등[11]이 어닐링을 통해 결정립의 방향성이 없어지는 것을 보고한 바와 일치하는 결과였다. 또한 Fig. 9(a)에 비해 결정립 크기가 증가하여 약 6.5 μm 로 확인되었다.

Fig. 9(c)는 1st 폴딩 직후의 이미지이다. 힘이 한 방향으로만 작용했음에도 불구하고 어떠한 결정립의 방향성도 확인되지 않았으며, 이는 폴딩가공 시 다이의 3차원적인 형상에 의해 변형방향이 분산되어 나타난 현상으로 판단하였다. 결정립의 크기는 3.4 μm 으로 Fig. 9(b)에 비해 약 52% 감소한 것을 확인하였으며, 이러한 결정립 미세화 효과로 인해 비커스 경도가 증가하는 것으로 판단하였다[12].

Fig. 9(d)는 2nd 어닐링 직후의 이미지이다. 평균 결정립의 크기는 6.5 μm 으로 이전공정에 비해 증가한 것을 확인하였다. 이는 Fig. 9 (b)와 마찬가지로 어닐링으로 인해 결정립이 성장했기 때문으로 판단하였으며, 이에 따라 경도가 감소하는 것으로 판단하였다.

Fig. 9(e), (f), (g)는 각각 2nd 폴딩, 3rd 어닐링, 3rd 폴딩 직후의 이미지이다. 앞선 경우와 마찬가지로 폴딩과 어닐링을 반복 하며, 결정립의 크기는 각각 4.9 μm , 5.1 μm , 4.6 μm 으로 측정되었다. 이에 따라 결정립 미세화 효과에 의해, 경도값이 증가-감소-증가하는 경향을 보였다.

Table 1은 공정 과정에 따른 Lab지수 변화이다. 모든 경우, 스텔링실버 특유의 약한 노란색이 도는 은백색으로 나타났으며, 공정이 진행됨에 따라 L값이 감소하는 경향이 있었다. 그러나 모든 공정에서도 L이 85 이상으로 나타났으며 이는 주얼리로 많이 사용하는 백금족 금속과 큰 차이가 없음을 나타낸다[13]. 또한 기준시료와 비교한 색차(color difference)값이 10이하로 확인되어, 공정과정에 따른 Lab값은 차이는 미미하며 육안 상으로는 구분할 수 없어서 공정상 지표로 활용하기는 부족하였다.

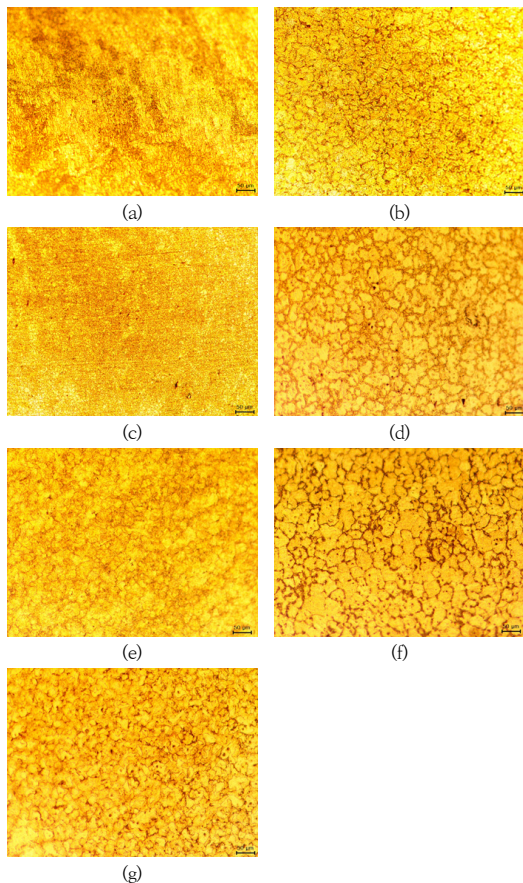


Fig. 9. Microstructure according to process with annealing; (a) before process, (b) after 1st annealing, (c) after 1st folding, (d) 2nd annealing, (e) after 2nd folding, (f) after 3rd annealing, (g) after 3rd folding.

Table 1. Lab index according to folding process.

	L	a	b	color difference
reference sample	95.52	-1.25	4.30	0
1st annealing	91.71	-1.14	2.99	3.1
1st folding	86.43	-0.95	1.46	9.53
2nd annealing	91.16	-0.4	1.61	5.19
2nd folding	87.57	-2.04	-0.16	9.15
3rd annealing	87.5	-0.95	2.64	8.20
3rd folding	87.58	-0.91	2.65	8.12

3. 결론

새로이 제안된 폴딩공정을 이용하여 패턴이 있는 도넛

모양의 판재를 3차원적인 반지형태로 패턴의 형태를 유지하며 성공적으로 소성변형 시켰다. 이때 어닐링을 진행하지 않는 경우, 폴딩공정 직후 파단이 발생하였으며 폴딩공정을 위해서는 어닐링 공정이 필수적임을 확인하였다. 제작된 시편의 비커스 경도는 약 70 ~ 110 Hv의 값을 가졌다. 미세구조의 경우 어닐링과 폴딩을 반복하여 3.4 ~ 6.5 μm 크기의 결정립을 지닌 미세구조를 만들 수 있었다. Lab지수 측정결과 공정이 진행됨에 따라 L값이 감소하지만 색차값은 10 이내로 육안상 구분은 불가능 하였다.

References

- [1] I. T. Ferguson, B. Derby, "Diffusion bonded Mokume Gane decorative metal laminate", *Material science and technology*, Vol.14, No. 6, pp.510-517, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708398790290181>
- [2] O. Untracht, "Jewelry conception and technology", Doubleday, USA, pp.366, 1985.
- [3] E. Eruc, R. Shivpuri, "A summary of ring rolling technology", *International journal of machine tools & manufacture*, Vol.32, No. 3, pp.379-398, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(92\)90009-6](https://doi.org/10.1016/0890-6955(92)90009-6)
- [4] P. J. Leitao, A. C. Teixeira, J. M. C. Rodrigues, P. A. F. Martins, "Development of an industrial process for minting a new type of bimetallic coin", *Journal of materials processing technology*, Vol.70, No. 1-3, pp.178-184, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)02914-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)02914-2)
- [5] M. A. Hassan, N. Takakura, K. Yamaguchi, "Friction aided deep drawing of sheet metals using polyurethane ring and auxiliary metal punch", *International journal of machine tools & manufacturing*, Vol.42, No. 5, pp.625-631, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00145-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00145-6)
- [6] M. Merklein, J. M. Allwood, B. A. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzmari, K. Mori, A. E. Tekkaya, A. Weckenmann, "Bulk forming of sheet metal", *CIRP Anneal*, Vol.61, No. 2, pp.725-745, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.007>
- [7] A. Danno, S. Berner, K. S. Fong, W. Ta. Yap, "Multi-stage cold forging of thin-walled components", *Procedia engineering*, Vol.81, pp.407-412, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.014>
- [8] A. E. Marquardt, E. M. Breitung, T. Dr. Weisser, G. Gates, R. J. Phaneuf, "Protecting silver cultural heritage objects with atomic layer deposited corrosion barriers", *Heritage science*, Vol.3, No. 37, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-015-0066-x>

- [9] S. Praipruk, G. Lothongkum, E. Nisaratanaporn, B. Lohwongwatana, "Investigation of supersaturated silver alloys for high hardness jewelry application", *Journal of metal, materials and minerals*, Vol.23, No. 2, pp.67-73, 2013.
<http://www.ojs.materialsconnex.com/index.php/jmm/article/view/95/66>
- [10] A. A. Nassar, A. N. Jarrad, "Study the effect of cold working and heat treatment on the mechanical properties of copper nickel alloys", *International journal of current engineering & technology*, Vol.5, No. 4, pp.2582-2586, 2015.
 DOI: <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/WHTZV>
- [11] G. S. Sun, L. X. Du, J. Hu, H. Xie, H. Y. Wu, R. D. K. Misra, "Ultrahigh strength nano/ultrafine-grained 304 stainless steel through three-stage cold rolling and annealing treatment", *Materials characterization*, Vol.110, pp.228-235, 2015.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.11.001>
- [12] T. Murakami, R. Sahara, D. Harako, M. Akiba, T. Narushima, C. Ouchi, "The effect of solute elements on hardness and grain size in platinum based binary alloys", *Materials Transaction*, Vol.49, No. 3, pp.538-547, 2008.
 DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2007265>
- [13] J. Brelle, A. Blatter, R. Ziegenhagen, "Precious palladium aluminium based alloys with high hardness and workability", *Platinum metal Research*, Vol.53, No. 4, pp.189-197, 2009.
 DOI: <https://doi.org/10.1595/147106709X472192>

김 익 규(Ik-Gyu Kim)

[준(학생)회원]



- 2018년 6월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재학과 석사과정

<관심분야>

주얼리소재, 내식성 재료의 에칭과 스트리핑

김 광 배(Kwangbae Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 서울시립대학교 신소재공학과 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 박사과정

<관심분야>

태양전지, 반도체재료

김 은 석(Eun-Seok Kim)

[준(학생)회원]



- 2018년 6월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재학과 석사과정

<관심분야>

구조 세라믹스, 다공성 물질

송 오 성(Ohsung Song)

[종신회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : MIT 재료공학 (공학박사)
- 1996년 3월 : MIT 기초연구원
- 1997년 8월 : 삼성전자 CPU 기술팀
- 1997년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>

태양전지, 반도체재료, 자성재료, 세라믹재료, 주얼리소재