

장신구 디자인을 위한 모쿠메가네 효과 은 합금 공정

송오성^{1*}

Silver Alloying Process for Mokumegane-like Effect for Jewelry Design

Oh-Sung Song^{1*}

요약 은은 주조성과 가공성이 뛰어나 장신구 제작에 주된 소재로 채택되어 왔다. 이런 은 소재 자체의 장점을 이용한 전통적인 방법 중 하나인 모쿠메가네는 나뭇결무늬와 같은 자연스러운 금속의 혼합문양을 표현할 수 있어서 부가가치가 높지만 제작 공정이 복잡하고 힘들어서 경제적으로 장신구를 제작하는데 어려움이 있었다. 기존의 모쿠메가네 공정 대신 은과 구리의 용점차를 이용한 변형 주조 방법과 냉간압연으로 구리와 은 두 금속간의 우수한 결합을 유지하면서도 기존의 모쿠메가네와 유사한 표면 장식 효과를 얻을 수 있는 새로운 공정을 제안해 보았다. 직경 3 mm의 구리 그레놀과 0.5 mm, 1.5 mm 두께의 구리 판재에 순은 용탕을 부어 두 금속간의 확산 접합이 완성된 괴를 만들고, 이후 롤러 압연을 실시하여 두께 1.5 mm의 판재를 만들어서 이를 이용하여 반지 시제품을 제작한 결과, 제안된 공정으로 이종 금속 접합도가 우수하면서 모쿠메가네와 유사한 효과를 성공적으로 낼 수 있었다. 제안된 공정은 기존의 반복된 열간 가공에 의한 복잡한 모쿠메가네 공정에 비해 보다 간단하고 경제적으로 모쿠메가네 효과를 갖는 은 장신구 디자인을 가능하게 함을 확인하였다.

Abstract Silver is one of the most appropriate jewelry materials for jewelry casting and bench working. The technique known as 'Mokumegane' is good for making silver jewelry with natural patterns, such as wood grain patterns, but the process is not easy for silversmithing because it requires complicated and heavy labour. Instead of using conventional Mokumegane technique, we propose a new modified silver-copper casting process that enables a similar surface effect with good metal bonding strength between silver and copper. Simply pouring the molten silver into pre-aligned copper granules or 0.5 mm to 1.5 mm-thick copper sheets leads to well embedded copper silver ingots. The rolled silver plates from those ingots show excellent bonding interface even after the silver plate rolled ten times. We successfully fabricated prototype rings with copper embedded silver plates. Our result implies that our newly proposed process may be a simpler way to fabricate silver jewelry with a pseudo-Mokumegane effect.

Key Words : silver jewelry, natural pattern, embedded copper, diffusion, Mokumegane

1. 서론

장신구에 이용되는 의장용 소재로서 은은 미려한 표면 광택성을 비롯해 주조성과 우수한 가공성을 가지고 있기 때문에 기원전부터 이미 널리 사용되었다. 특히 금보다 경제적으로 저렴한 소재이므로 주얼리용 원본을 제작하는 주 소재로서 쓰였고 순은 뿐 아니라 다양한 은 합금 특히 순은보다 가공성을 향상시킨 정은(Ag-7.5%Cu) 역

시 오랜 전통을 가지고 이용되어 왔다.(1)

은은 장신구 특유의 복잡한 형상을 만들기 위한 주조성이 우수하고 용점과 다른 열 접합 특성도 뛰어나 장신구 디자인 분야의 주된 소재로 채택되고 있다. 그러나 은은 대기 중에서 화학적으로 안전하여 색상 변화를 일으키지 않는 다른 귀금속과는 달리 대기 중의 황성분에 의해 쉽게 변색되어 주기적으로 표면 연마 처리를 실시하여야 하는 단점도 갖고 있다. 따라서 이를 보완하기 위해서 표면에 로듐을 도금하여 산화를 방지하여 변색을 방지거나 니켈, 아연, 팔라듐 등을 합금하여 변색이 잘 안되

¹서울시립대학교 신소재공학과

*교신저자: 송오성(songos@uos.ac.kr)

는 은 합금을 개발하기 위한 노력이 지속 되고 있다.(2)

이러한 소재 자체의 단점을 개선하기 위한 노력 이외에도, 은이 가진 장점을 살려서 고부가가치 장신구를 개발하기 위한 여러 방안이 연구되었다. 은합금의 색에 어울리는 이종 금속을 정밀 가공시켜 기계적으로 결합시키거나 [그림 1] 다른 색을 가진 재료가 혼합되어 보이도록 색상이 서로 다른 이종재료를 고온에서 열 접합 처리하여 표면을 가공하는 모쿠메가네 (Mokumegane)라고 하는 방법 등이 좋은 예이다.[그림 2]



그림 1. 정밀하게 맞물려지도록 제작 된 이종 금속 반지.



그림 2. 모쿠메가네 반지 / 은, 오동

모쿠메가네란 일본에서 17세기경에 개발된 도검이나 장신구의 금속 표면을 나무테 무늬로 꾸미는 일본 전통 기법이다. 이 방법은 평범한 단색의 은제품에 비해 자연스런 나무테 무늬가 표현되므로 일반 제품의 10-100배 정도의 고부가가치가 가능한 상품이 가능하다.

일반적인 모쿠메가네 공정은 색이 다른 이종, 삼종의 금속을 여러 층 겹쳐 놓고 고온으로 가열하면서 망치질을 해서 단조와 압연에 의해 서로 다른 금속들이 반응용 상태에서 기계적으로 혼합시키는 것이다. 이렇게 반복적인 망치질과 프레스 작업을 반복하여 얻은 원판 피를 부분적으로 갈아내거나 깎거나 파서 금속이 쌓여진 단층을 노출 시킨 후 다시 아주 점진적인 압연과정을 반복하게 되면 요철 부분이 평면화 되면서 자연스런 나무테 무늬를 얻을 수 있다.(3)

이와 같이 복잡한 공정을 거치는 모쿠메가네는 색상이 다른 금속을 한 몸이 되도록 하여 나무결과 같은 자연스

런 무늬를 표출할 수 있기에 신기(神奇)에 가까운 심미적 표면효과를 창출할 수 있어서 단순한 은소재에 비해 수십배의 부가가치가 있지만, 작업 공정이 까다롭고 많은 시간과 노력을 필요로 할 뿐 더러 숙련된 경험을 통해서야 비로소 빼어난 무늬를 만들 수 있는 등 재현성있는 대량생산을 위한 많은 공정상 문제점을 갖고 있다.

세부적인 문제점을 살펴보면, 첫째로 이종, 삼종의 금속판을 용착 시키기 위해서는 산화를 막기 위해 환원 분위기가 가능한 특수한 고가의 대형 가열 설비가 필요하고, 둘째, 금속판의 압착을 위해서 고온 고강도 특수강으로 다이(die)를 만들어 적층된 은, 구리 금속판을 다이 사이에 끼우고 가열한 뒤 압력을 주는 열간 단조 작업이 반복되어야 하는데 고온 상태에서 여러 명의 노동력 또는 고가 자동화 장비가 필요하므로 생산가가 증가한다. 셋째로 가공된 금속 피를 깎거나 파내어 표면 무늬를 드러내는 방법으로 줄로 갈거나 핸드피스 등의 전동구를 사용하여 표면부로부터 많은 양의 금속을 제거하는 난이도가 높은 후작업을 해야 하므로 시간적으로 오래 걸릴 뿐 더러 경험이 부족할 경우 효과적인 무늬를 얻는 데 실패할 확률이 큰 문제점이 있었다. 넷째로, 반복되는 열간 압연 과정에서 열팽창이 부족해 가공경화를 일으킨 원판에 균열이 발생한 경우 이를 회복할 수 있는 방법이 없어 시간과 노력 그리고 재료가 낭비되기 쉬운 문제가 있었다. 따라서 모쿠메가네는 금속의 용착과 색상차를 이용 독특한 표면 무늬를 낼 수 있는 기법이기는 하나 그 공정의 복잡함과 고비용으로 대량생산이 어려웠다. (4)

본 연구는 장신구용 은소재의 부가가치를 획기적으로 높이기 위해 모쿠메가네와 유사한 표면 효과를 좀 더 쉬운 공정으로 내는 공정개발을 모색하였다. 일반적으로 기존의 모쿠메가네에서 많이 사용하는 은과 구리를 중심으로 금속 주형틀에 먼저 구리 판재를 위치시키고 은용탕을 주입하여 은이 응고하면서 구리가 혼입되어 응고한 피를 만든 후, 이들을 10번의 냉간 롤링압연을 실시하여 최종적으로 모쿠메가네와 유사한 형상을 갖는 은합금 판재를 개발하는 신공정을 개발하였다.

2. 모쿠메가네 효과의 은-구리합금의 공정 개발 실험

순은의 용점은 961.9℃, 구리의 경우 1083℃이나 두 금속의 접촉면에서는 그 보다 낮은 온도 950~870℃에서 상호확산 상태가 진행 되므로 용탕 상태의 순은을 그보다 부피가 극히 작은 구리에 주입하게 되면 두 금속 계면에서는 온도 조건과 시간 경과에 따라 확산이 발생하여

궁극적으로 구리가 혼입되어 있는 은 합금 피를 제작하였다.

합금 피를 만들기 위해 세 가지 방법으로 나누어 준비하였는데 구리는 모두 순수한 구리를 사용하였고 구리를 함포할 은은 모두 순은 50g, 구리총량 4.0g으로 조정하여 정은의 함량조건인 Ag-7.5%Cu가 되도록 맞추었다.

첫 번째 합금 피 시편은 직경 3 mm의 구리 그레놀(99.99%)을 2.0X4.5 cm 크기의 주철재 금형 주형틀의 바닥에 적당한 거리로 위치시킨 후 마그네시아 도가니에 산소-프로판 토오치로 용융시킨 순은(99.99%) 용탕을 주형틀에 주입한 후 서냉 시켜서 완성하였다.

두 번째 합금 피 시편은 은 용탕 주입 시 용탕의 와류로부터 직경 3 mm 구리 그레놀을 격리하기위해 폭 4 mm X 길이 50 mm X 두께 0.5 mm의 구리박판을 금형 주형틀 사이에 위치시킨 후 첫 번째 방안과 동일한 방법으로 순은 용탕을 주입, 서냉 하였다.

세 번째 시편은 두 번째 방법에서 구리판보다 두꺼운 폭 4 mm X 길이 50 mm X 두께 1.5 mm의 구리판재를 주형틀에 중심부에 물결 형태로 세워놓고 구리판 양쪽에 직경 2~2.5 mm 구리 그레놀을 배치한 후 나머지 경우와 같은 방법으로 정은 용탕을 주입하여 서냉시켜 응고시켰다.

완성된 피들은 일차적으로 육안으로 접합 상태를 확인하고 노출된 구리-은 합금 부분의 확산을 광학현미경, 주사전자현미경과 성분분석기기를 이용 정밀 분석하였다. 완성된 피의 노출된 구리와 은 표면을 연마하고 계면부의 이미지와 상호확산 정도를 알아보기 위하여 100배 까지 확대가 가능한 광학현미경과 JEOL사의 주사전자현미경에 부착된 EDS(energy dispersive spectroscopy)의 <line scan> 성분분석 기능을 이용하여 알아보았다. 이들 분석 자료에 근거하여 구리를 중심으로 돌레부의 약 10%에서 계면 분리부가 확인되었으며 분리가 없는 부분을 확인한 결과 상호확산이 발생함을 정량적으로 확인할 수 있었다.

분석이 완료된 피를 압연롤을 이용, 상온에서 통상 10 회 정도 반복 압연하여 원래 두께 5 mm의 피를 1.5 mm 두께의 판재로 만들었다.

이렇게 제작된 판재를 이용 이를 반지로 제작 한 뒤 가공 경화에 따른 은-구리 접합면의 일탈정도와 표면 효과를 광학현미경을 통해 확인하였다. 반지의 시제품 제작은 판재를 길이 방향으로 1.5x6 cm이 되도록 싹둑으로 절단하고 반지봉에 말아 끝부분을 맞추고 Ag-40wt%Cu 성분의 은땀을 이용하여 접합부를 땀하고 땀부위를 연마하여 2개의 시제품을 완성하였다.(5)

3. 실험 결과와 토의

3.1 구리와 은 상호확산 정도

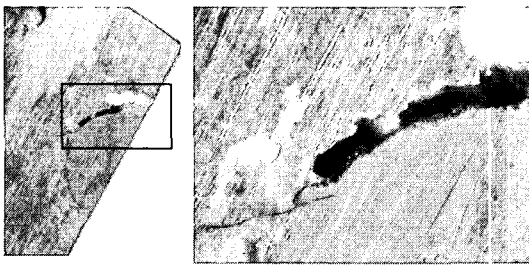
본 연구에서 시도된 모꾸메가네와 비슷한 구리를 함포한 은 합금 제작의 목적은 은 장신구에 응용 될 소재로서의 적합도를 확인하는 것으로 일단 기계적으로 구리상이 은기지내에 충분한 강도를 가지고 가공 후에도 안정적이어야 한다.

첫 번째 방안으로 구리 그레놀만을 사용한 경우는, 용융된 은을 주입할 때 구리 그레놀이 처음 놓여진 위치에서 이동하면서 주입 방향에 휩쓸려 안으로 몰려드는 문제가 있었고 최종적으로 가장자리에 위치한 구리 그레놀은 은기지와 쉽게 분리되어 이종재료로서의 건전한 접합 상태를 유지하지 못하였다.[그림 3] 그리고 부분적으로 구리와 은의 완전한 용착이 이루어지지 않은 부위를 광학현미경을 이용 10배, 40배 촬영한 [그림 4]의 (a), (b) 사진을 보면 계면부가 분리된 미세한 이탈부를 보이고 있다. 이는 은 용탕 주입 시 직경 3 mm의 구리 그레놀과의 접촉면에서 충분한 은과 구리의 상호확산이 이루어지지 못했음을 보여준다. 이러한 결합 발생의 원인은 불순물에 의한 것이라기보다는 은 용탕 주입 시 시간차와 구리 그레놀의 크기와 위치에 따라 용탕의 온도가 저하되어 열전달이 미흡, 구리와 은의 상호확산이 충분히 이루어지지 못한 것이다. 이를 통해 원활한 구리와 은의 결합의 중요 요건이 되고 있는 열전달을 위해서는 구리 그레놀의 크기를 3 mm 이하로 조정하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다. 또한 이 공정 방안은 대부분의 구리 그레놀이 은 내부에 함유되어 구리를 밖으로 노출시켜 원하는 구리의 혼입 모습을 보이기 위해서 많은 양의 은을 표면부로부터 제거하여야 하므로 공정상 극히 불리하였다.



그림 3. 은기지에서 이탈된 구리 그레놀.

두 번째 방안으로 시도된 시편의 경우, 용융된 은의 주입 후 두께 500 μm 의 구리 박판제는 은 용탕의 주입 후 육안 식별이 어려운 정도로 확산이 일어나 은과 구리의 경계면 없어서 [그림 5]의 (c) 표시부와 같이 육안식별이 불가능 하였다. 은과 구리 접촉면의 확산도를 측정할 결과 구리계면부의 약 100 μm 정도는 확산에 의해서 은과 결합 붉은 빛을 잃어버리는 현상이 있었다. 따라서 구리 그레놀 또는 판재를 구리색을 지닌 채 함포시키려면 100 μm 정도의 확산구간을 고려하여 직경과 두께가 1 mm 이상 정도의 구리를 배치하는 것이 유리함을 알 수 있었다.



(a) (b)

그림 4. 극심한 기계적인 분리가 일어난 구리와 은 계면. (a) 10배, (b) 40배 확대 촬영.

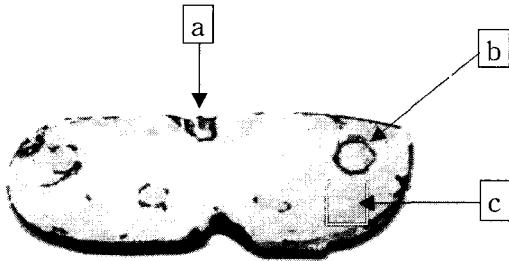


그림 5. 구리 그레놀과 박판 구리 혼합 은패, a. 외곽 구리 그레놀 이탈, b. 압연으로 인해 은과의 접촉면이 분리 된 내부 구리 그레놀, c. 구리 박판이 은과 혼합된 합금부분.

세 번째 방안으로 준비된 두께 1.5 mm의 구리판재와 그레놀을 이용한 시편은 은과 구리판재의 건전한 결합상태를 보여 원래 위치한 물결무늬를 유지하면서 응고하였다. 구리 그레놀의 경우에서는 은의 최외곽에 위치한 경우만 약간의 비접합부를 보이기는 했으나 다른 공정에 의한 피 시편에 비해 육안으로 보기에 우수한 접합 상태를 확보하였다.[그림 6]



그림 6. 구리 판재와 그레놀이 안정적으로 은 기지와 결합한 시편.

[그림 7]과 [그림 8]은 세 번째 공정에 의한 잉곳의 은과 구리 계면부를 중심으로 은과 구리의 성분을 EDS 라인 분석한 결과이다. 은과 구리 계면부에 10 μm 정도의 보이드가 보여서 이를 이용하여 전자현미경상의 계면을 점선으로 정의하였다. 이때 [그림 7]에 표시된 계면부를 따라 Ag와 Cu의 540 μm 의 길이의 상대적 성분 변화를 [그림 8]에 나타내었다. 약 200 μm 위치에 있던 계면의 안쪽으로 Ag와 Cu의 상호확산이 진행되었으며 이때 Ag의 상대 확산속도가 빨라서 계면이 이동한 것처럼 보이는 Kirkendall 효과가 발생했음을 알 수 있다.(6) 약 100 μm 의 상호확산구간이 발생하여 이로부터 용액상태의 은은 확산속도가 빨라서 구리 속으로 쉽게, 많이 확산하여 들어갔으며, 이 혼합구간은 본 연구에서의 경험적인 확산정도와 잘 일치하고 있다.

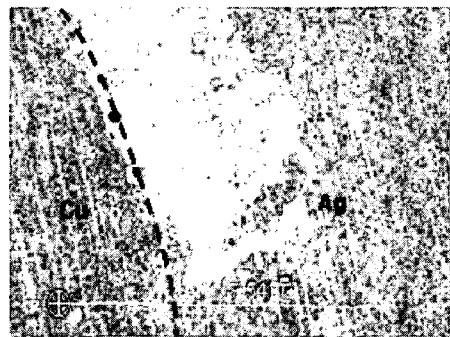


그림 7. 은/구리 경계의 라인 스캔 (EDS).

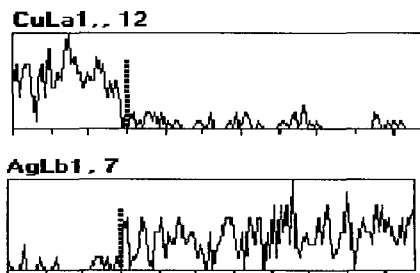


그림 8. EDS 분석을 통한 구리와 은의 위치에 따른 함량 분석.

구리 함포 은 합금 시편 중 확산 정도가 가장 우량한 세 번째 괴 시편을 이용 압연을 10회 반복 진행하여 [그림 9]와 같이 자연스런 타원형과 선을 가진 무늬를 가진 두께 1.5 mm의 판재로 가공할 수 있었다. 이 판재 시편의 경우 기계적으로 접합이 우수하게 진행되어 광학 현미경 40배의 확대검사에도 계면부에서 보이드 발생이 없었고, 특히 열풀림 후 벤딩 가공에서도 은과 구리의 분리부가 발생하지 않았다.[그림 10, 11]

이 판재를 이용하여 성공적으로 말음기법으로 만든 2개의 모꾸메가네 표면효과를 갖는 시작품을 [그림 12]에 나타내었다.

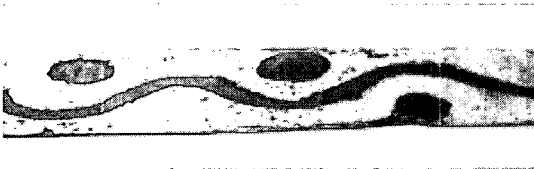


그림 9. 가공 가능한 두께(1.5 mm)로 압연하는 과정에서 자연스런 타원형 무늬와 물결무늬를 얻게 된다(식별을 위해 시편을 가열 검은 산화피막 유도).

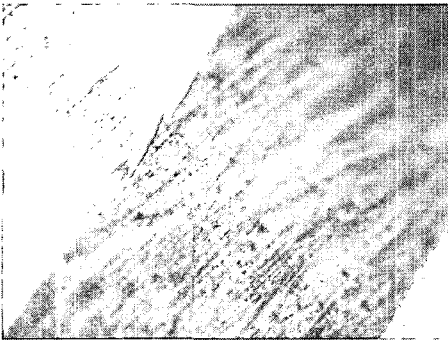


그림 10. 압연이 끝난 시편 표면

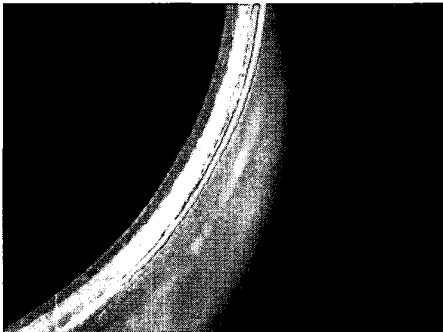


그림 11. 벤딩 한 시편 단면

제안된 공정으로 제작된 최종 시작품을 고려해서 더욱 부가가치가 높은 은 장신구 제품의 개발을 위한 논의는 아래와 같다.

첫째는 은 용탕과 구리는 매우 짧은 주입시간에도 확산에 의해서 약 0.2 mm의 계면부가 구리색을 잃어버릴 정도로 확산이 진행되므로 이를 고려하여 최종 제품 디자인과 표면 모꾸메가네 효과를 예측하는 것이 필요하다. 특히 처음 괴를 제작할 때 나무결 무늬를 극대화하기 위해서는 열 전달이 불리하고 위치 고정인 쉽지 않은 구리 그레블 보다는 여러 개의 1.0 mm~2.5 mm 정도 두께의 구리판재를 채택하고 이들을 적절한 모양새로 초기에 배치시킨 후 압연 등의 2차 가공을 부가하여 원하는 금속의 심미적 혼합모양을 나타내는 것이 바람직하였다. 본 실험 범위 내에서 3번째 시편 제작 방법과 같이 1.5 mm두께의 구리판재를 그대로 혹은 의도하는 형태로 성형한 뒤 은 용탕을 주입하는 것이 가장 적합한 공정이었다.

둘째는 기존의 모꾸메가네가 임의적인 무늬가 나오에 따라 본 제안 공정은 필요에 따라 압연 전 혹은 압연 과정 중에 압연 방향에 따라 또는 초기의 구리 형상과 위치를 제어하여 최종 목적하는 무늬의 튜닝이 가능하고 동일 무늬의 재현이 가능한 특징이 있었다. 특히 구리 판재는 배치가 용이하고 자체 소재의 탄성을 이용하여 주입 과정 중에 고정이 가능 해 이 방법은 유사한 문양을 재현성 있게 생산 할 수 있어 표면의 무늬가 정량화 된 장신구 제작이 가능하다고 본다.

셋째로 기존의 모꾸메가네 기법을 이용한 제품의 경우 대부분 바닥 면 내지 안쪽 면은 바탕 금속을 남겨 놓아 무늬가 드러나지 않는 것과는 달리 제안된 구리 함포 은 합금의 경우 앞면 뒷면의 구분이 없이 양쪽 면 모두 무늬가 발생하므로 장신구의 안과 밖, 앞과 뒤 모두를 장식할 수 있는 장점이 있었다.

따라서 제안된 신 공정은 기존의 공정에 비해서 주조 공정과 냉간압연을 위주로 획기적으로 공정이 단순화되었고 기존의 모꾸메가네 효과와 비슷한 표면 효과를 가지면서도 무늬의 재현성, 조절성, 전체성 면에서 디자인의 선택폭이 넓어지는 긍정적인 효과가 있었다.

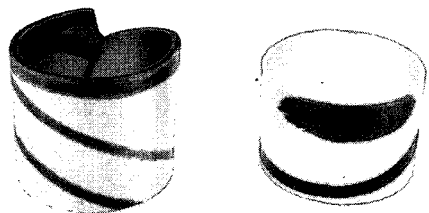


그림 12. 구리 함포 은 합금을 이용해 제작한 반지

4. 결론

장신구 재료로 다양하게 활용되는 은을 기본으로 하여 장점이자 단점이기도 한 백색의 은 표면에 색감을 더하고 통상의 복잡한 공정이 필요 했던 모쿠메가네와 유사한 효과를 낼 수 있는 구리가 합포된 의장용 은 합금 공정을 성공적으로 완성하였다. 단순하게 변형된 주조기법과 압연공정을 기반으로 모쿠메가네와 비슷한 구리가 나무결 모양으로 합포된 자연스런 문양을 내는 은합금 제조가 가능하였다. 최종적으로는 이 소재를 이용한 반지 시작품을 완성한 결과 은과 구리의 결합이 안정하여 모쿠메가네와 표면효과가 유지되는 것을 확인하였다. 결과적으로 기존의 고비용의 모쿠메가네 공정을 대신하여 표면 장식 효과는 비슷하면서도 경제적이고 간단한 새로운 공정을 개발하였다.

참고문헌

[1] 김경아, 이정임, “공예가를 위한 귀금속 공예기법”, 주얼리 우먼, 서울, 1999

[2] 전용일, “금속공예기법”, 디자인하우스, 서울, 1994

[3] Steve Midgett, "Mokume Gane", Earthshine Pr, 1996

[4] Oppi Untracht, "Jewelry concept and technology", Doubleday, 1985

[5] Tim McCreight, The Complete Metalsmith, Davis Publications Inc. (*YEAR)

[6] D. A. Porter, K. E. Easterling, "Phase transformation in metals and alloys", Van Nostrand Reinhold Co., 1981

송 오 성(Oh-Sung Song)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : MIT 재료공학 (공학박사)
- 1996년 3월 : NTT기초연구원
- 1997년 8월 : 삼성전자 CPY 기술팀

<관심분야>
자성재료, 주얼리.