

# 모꾸메가네 장신구를 위한 은/동 접합 잉곳 소재 개발

송오성<sup>1\*</sup>, 김종률<sup>1</sup>, 김명로<sup>1</sup>

## Development of the Ag/Cu Ingots for Mokumegane Jewelry

Oh-Sung Song<sup>1\*</sup>, Jong-Ryul Kim<sup>1</sup> and Myung-Ro Kim<sup>1</sup>

**요 약** 모꾸메가네는 나무결 모양을 낼 수 있는 고부가가치가 가능한 장신구 소재이며 서로 다른 금속을 가공하기 위해 용점이 다른 두 가지 이상 금속을 적층하여 붙인 잉곳 제작이 필수적이다. 기존의 모꾸메가네용 잉곳은 숯을 이용한 환원성 분위기에서 경험에 근거한 육안 판별로 만들어져서 접합의 신뢰성과 후속 가공 도중 층간 분리가 일어나는 문제가 있었다. 900℃에서 2.5kg의 압력을 가하면서 진공 열처리로를 이용하여 90% 이상 접합율이 가능한 조건을 확인하였다. 계면에서의 계면 확산계수가 통상의 벌크 확산계수보다 100배 향상되는 것을 확인하였고 이중 접합시에 계면 확산계수를 확인하여 700℃의 저온에서 10분동안 진공열처리, 90% 이상 접합율을 가진 모꾸메가네용 잉곳을 성공적으로 제조하였다. 제조된 잉곳으로 핸드폰 외장용 모꾸메가네 시작품을 성공적으로 제조할 수 있었다.

**Abstract** Mokumegane is one of the sophisticated metal craft techniques enabling wood grain surface effect. To embody the mokumegane, an ingot of well-bonded stacked metal plates has been required. Traditionally prepared mokumegane ingots were bonded using charcoal which enables reduction atmosphere, but sometimes end up with collapse of bonding interface due to the lack of reliable process control. We proposed a systematic vacuum direct bonding process for ingots. First, we confirmed copper//copper homogeneous plate bonding at 900℃ by applying uniaxial press of 2.5kg. We observed 80min required to obtain 90%-bonding ratio and the diffusion coefficient would be enhanced up to 100 times due to surface effect. Second, by considering enhanced diffusion behavior, we also obtained optimum bonding condition in copper/silver heterogeneous plates that ensures 90%-bonding ratio at 700℃ for 10min with apply uniaxial press. A 7-layered copper/silver ingot is prepared successfully, and eventually the prototype mokumegane cases for mobile phone were fabricated with these ingot.

**Key Words** : Mokumegane, ingot, diffusion bonding, annealing condition, mokumegane ring

### 1. 서론

모꾸메가네는 금속 가공법의 하나로 약 400여 년 전에 일본에서 개발된 방법으로 두 가지 혹은 더 많은 종류의 금속들을 적층시켜 붙인 후에 가공하여 나무결 무늬와 같은 독특한 표면효과를 얻는 금속 공예적인 가공 기술이다 [1~3].

모꾸메가네 기법을 활용하여 두 가지 이상의 금속을 접합 가공하는 것은 그 접합 가공의 어려움에도 불구하고 다음 세 가지 이유에 의한다. 첫째로 통상의 금속보다

획기적으로 강도를 향상시킬 수 있기 때문이다. 보통의 통나무보다 서로 다른 나무판을 수직으로 덧대어 적층한 합판이 더욱 강도가 높은 이치이다. 예를 들어 도검을 이리한 기법으로 연강과 고탄소강을 합쳐서 만들면 강도는 증가하면서 충격에 강한 칼의 제작이 가능하다. 이러한 특징을 가진 모꾸메가네 기법은 이미 서양에서도 주로 무기를 만들 때 사용되어 다마스쿠스, 셸우드 기법 등으로 불리며 고급 장신구나 무기 제작에 활용되었다[4~5]. 장신구에서도 연성 큰 소프트한 귀금속 소재의 강도를 향상시켜 내구성을 높이기 위해 이용된다.

두 번째는 서로 다른 금속 특유의 색을 낼 수 있으므로 심미적으로 아름다워서 매우 높은 부가가치를 얻을 수 있기 때문이다. 호피무늬의 옷이 더 비싸듯이 적층에 의한 심미적인 특징을 나타낼 수 있다. 아래 표 1에 나타낸 바와 같이 통상의 최종 모꾸메가네 제품은 단일 소재

이 논문은 2006년 서울시 산학연 협력사업 중 서울형 미래도시산업 육성 지원사업(과제번호 10834) 지원에 의해 연구되었음

<sup>1</sup>서울시립대학교 신소재공학과

\*교신저자: 송오성(songos@uos.ac.kr)

로 이루어진 통상의 제품에 비해 약 10배 이상의 부가가치를 기대할 수 있다.

세 번째는 재료의 절약이 가능하다. 순수한 귀금속 재료만 사용하기 보다는 일반 금속 재료를 반 이상 합쳐서 제작할 수 있으므로 재료적인 면에서 생산비를 대폭 낮출 수 있다. 따라서 경제적인 관점에서 매우 유리한 주얼리용 소재이다. 아래 표1에 나타낸 바와 같이 동=5.4원/g, 은=270원/g, 목금=동+은=140원/g 정도의 단위가격을 고려하고 거의 비슷한 제조비를 가정하면 약 3.7 g의 재료가 들어가는 반지 제품을 제작하더라도 원재료 부분에서 기존의 귀금속 원료비를 대폭 낮추면서도 특이한 표면효과에 의한 큰 판매이익이 가능한, 즉 저비용으로 고부가가치를 얻는 신소재라 할 수 있다.

표 1. 모꾸메가네 생산품의 경제적 가치 (단위:원).

	Copper	Silver	Mokumegane
Material value	20	1,000	520
Process cost	10,000	10,000	20,000
Final value	15,000	100,000	1,000,000

이러한 모꾸메가네 장신구를 만드는 공정은 표 2에 나타낸 바와 같이 기본적으로 동서양 모두 비슷하여 서로 다른 금속 판재를 적층하여 붙이는 것에서 시작한다. 이때 각 판재는 면이 평탄하여 이물질이 없도록 하고 압력을 가한다.

모든 물질은 원자간 거리까지 가까워지면 인력이 작용하여 접합이 진행된다 [6]. 일상생활에서 대부분의 금속을 서로 붙여 놓아도 붙지 않는 것은 표면 사이에 산화막이나 불순물이 존재하고 있거나 또한 원자 수준까지 평탄하지 않기 때문이다.

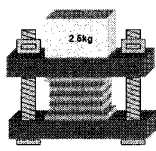
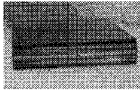
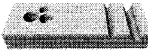
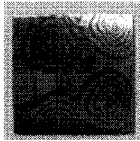

실제로 매우 평탄한 실리콘 기판과 같은 경우는 깨끗이 세척하여 먼지가 없는 상온에서 접촉시키면 접합이 진행된다.

그러나 모든 금속판을 거울면과 같이 평탄화시키고 산화막이 없는 상태로 먼지가 없는 상태에서 접촉시키려면 매우 많은 비용이 요구되므로, 실제적으로는 어느 정도 압력을 줄 수 있는 지그를 이용하여 적층된 판에 압력을 주면서 고온에서 접합을 진행한다.

따라서 일반적인 모꾸메가네 판재를 이용한 시작품 제작을 예로 들어 세부공정을 알아보면 표 2의 (1)과 같이 먼저 색이 다른 순동과 순은을 준비하여 같은 크기로 절단한 후 표면산화막을 제거하는 전처리를 하고 정렬시켜 지그로 압력을 주어 세팅하는 공정과, 이들을 진공열처리하는 공정단계를 거쳐서 완전히 층간 접합이 완료되어 후속가공에도 하나의 물질처럼 강도를 유지하는 (2)와 같

은 잉곳을 제작하는 과정이 필요하다. 이후에는 (3)에 나타낸 바와 같이, 이 잉곳을 활용하여 특정부위를 따낸 후 기계적으로 (4)와 같이 압연 가공하여 독특한 무늬를 내는 판재를 만들고, (5)와 같이 원판을 이용하여 최종 장신구를 만드는 공정이 필요하다.

표 2. 일반적인 모꾸메가네 소재를 이용한 반지 가공의 세부공정.

Process	description
(1) 	색이 다른 이종 판재를 동일한 크기로 준비하고, 표면을 산세처리 후 적층하여 압력을 가할 수 있는 지그에 넣고 압력을 가하면서 진공이나 환원성 분위기에서 가열하면 접합시킨다. (동/은의 실제 예)
(2) 	700℃-10분 조건에서 진공로로 확산접합이 완료된 잉곳. 6면을 기계적으로 가공한 후 크리닝 처리한 잉곳의 모습.
(3) 	상기 판재의 특징면을 절단가공하고 압연한 일차적인 모습. 드릴, 밀링 등의 가공기법으로 독특한 결무늬를 가지도록 따낸다.
(4) 	상기 일차적인 요소들을 압연 처리하여 판재로 가공한 모습.
(5) 	상기의 2차적인 가공요소를 이용하여 핸드폰 외장용으로 가공한 예.

이중 공업적인 대량생산이 가능한 부분은 1, 2단계의 완벽한 잉곳을 만드는 공정까지이며 전체 공정 중에서 60%이상의 중요성을 가진다. 이 후의 나머지 공정은 작가별로 창의성에 의한 작품제작이 진행되므로 개별 제작자에게 신뢰성과 재현성 있게 잉곳을 제공하는 것이 매우 중요하게 된다.

이제까지는 모꾸메가네 소재의 장신구를 만들려면 각각의 제작자가 직접 경제적인 이유 때문에 대기 중에서 숯가루를 이용하여 환원 분위기를 만들고 개인 경험에 기초하여 서로 다른 금속층들을 열처리하여 잉곳을 제작하는 첫 단계부터 시작하여야 하므로 많은 제품이 제작

되기 힘들었고 대중화되기 어려운 상황이었다 [7]. 국내는 전문적인 모푸메가네 장신구를 제작하는 브랜드나 제작자가 전무한 형편이며, 미국에서도 상업적으로 모푸메가네를 전문적으로 취급하는 제작자는 10인 이내일 정도로 활성화가 안 되고 있는 상황이다 [8].

따라서 국내의 고부가가치 모푸메가네 주얼리의 경쟁력을 확보하기 위해서는 고부가가치 잉곳을 재현성 있고 신뢰성 있게 공학적 관점에서 제작할 필요가 있다.

모푸메가네 기법을 위한 잉곳은 기계적으로 완전한 접합 상태를 유지하여야 (이론 강도 유지) 후속 단조 가공에서 파괴가 일어나지 않으므로 90%이상의 접합율을 갖는 잉곳 제작 공정조건을 개발해야 하며, 일반적으로는 용점이 서로 다른 동과 은이 압력을 받으면서 접합되므로 실제 이들의 주어진 온도에서의 확산계수를 확인하여 항상 재현성 있는 잉곳개발이 가능하여야 한다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 일단 동과 은 (용점이 각각 1100℃ 와 950℃)을 위주로 하여 동/동 동종접합시의 동/동 표면확산계수를 확인하여 보고 이를 근거로 동/은 접합시의 표면확산계수를 알아내어 최적 동/은 접합 공정 조건을 확인하여 실제 잉곳을 제작하여 보았다.

## 2. 실험방법

### 2.1 동/동 동종 소재의 접합

동/동의 동일한 소재들을 접합시킬 때의 계면에서의 확산현상을 확인하기 위해서 900℃의 열처리 온도를 고정하고 시간을 달리하며 동일한 압력 하에서의 확산 현상을 확인하였다.

두께 0.2 mm 순동(99.99%)판을 절단가위를 이용하여 1 cm × 1 cm 크기로 절단하였다. 준비된 동 조각들은 10% 황산(H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)에 5분간 침지시켜 세척한 후 초순수로 린스하여 곧 바로 2개 동 조각들을 마주보도록 한 후 진공로에 장입하였다. 진공로에는 동조각 상하에 두께 0.3 mm 알루미늄판을 깔고 그 위에 두께 2 mm의 탄소강판을 위치시킨 후 동판전면에 압력을 주기 위하여 정사각형의 2.3 kg 추(2.3 kg/cm<sup>2</sup> = 2.3 Pa)를 올려 열처리 과정에서 동일한 압력이 동조각의 계면에 전달되도록 하였다.

열처리는 아래 그림 1과 같이 진공로(vacuum furnace)에서 900℃까지 승온시간을 40분으로 하였고, 목표온도에서 유지시간을 10, 20, 40, 80, 300분으로 각각 변화시키면서 유지시킨 후에 로냉으로 냉각되도록 하였다.

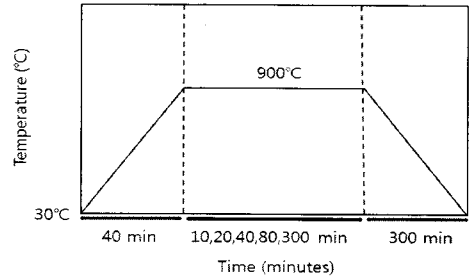


그림 1. 동/동 접합 열처리온도 및 공정시간에 대한 도식도.

완성된 각 시간별 접합시편들은 중심부를 절단하고 마운팅하여 폴리싱한 후 수직단면을 관찰할 수 있도록 처리하고 접합된 듯이 관찰된 계면에는 50% 질산에 5분간 에칭하여 접합부를 명확히 하여 광학현미경으로 관찰하였다.

정량적인 접합을 정의하기 위해 관찰된 수직단면이미지의 1000 μm 계면 길이에 대한 접합된 계면길이의 퍼센트로 접합율을 결정하였다. 통상적으로 90% 이상의 접합율에 대해 후속 압연처리가 가능한 건전한 접합이라고 판단하였다.

### 2.2 동/은 이종소재의 접합

동종재료와 마찬가지로 두께 2 mm의 순은판 1 cm × 1 cm로 자르고 양면에 두께 0.2 mm 동판을 위치시키고 700℃ 온도에서 시간은 0, 5, 8, 10, 15, 20분으로 달리하며 이때의 접합율은 확인하고, 구해진 최적조건인 700℃-10분 조건에서 5 cm × 5 cm 의 두께 2 mm의 동/은/동/은/동/은/동의 7층 구조를 접합시켜 최종 응고를 확인하였다.

### 2.3 동/은 잉곳을 이용한 실제 핸드폰 외장 시제품의 제작

두께 2 mm의 순은판과 동판을 각각 5 × 5 cm<sup>2</sup>로 준비한 후 총 7점이 되게 준비하였다. 최적온도 700℃에서 10분간 접합을 시킨 후 그림 2와 같이 절단하였다.

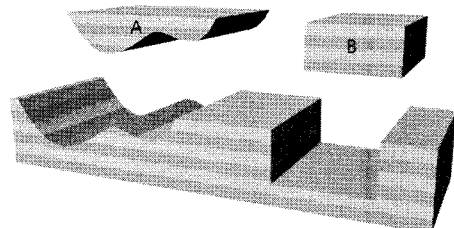


그림 2. 나무결 무늬를 만들기 위한 동/은 잉곳의 공정도식도.

절단된 A요소와 B요소를 햄머링하고 압연롤을 이용하여 늘려서 그림 3과 같은 최종판재를 만들었다. 최종판재를 이용하여 정밀절단하고 굽힘 작업으로 시작품을 제작하였다.

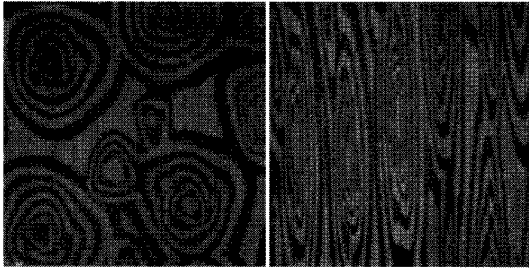


그림 3. 최종판재의 이미지.

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1 동/동 동종소재의 접합

그림 4에 나타낸 바와 같이 동/동 결합에서는 동의 확산계수를 확인하고자 동의 용점(1100℃)의 80% 정도 되는 900℃를 설정하여 접합율을 확인하였다. 900℃에서 80분부터 접합이 진행되어 85% 정도의 접합율을 보이다가 300분 정도에서 90% 이상의 접합율을 보이고 있다.

그러나 300분에서는 시편의 모서리부위가 등골게 변화하는 등 표면확산에 의해서 표면장력에 의한 시편이 변형되는 문제가 발생하였다.

특히 동의 벌크확산계수는

$$D_{Cu} = 0.31 \exp\left(-\frac{2.003 \times 10^5}{RT}\right) [cm^2/s] \text{로 알려졌는데}$$

[9] 이를 근거로 900℃에서 5시간 동안의 확산거리를 추정하면,

$$X = 2\sqrt{Dt} = 2\sqrt{(10^{-9})(5 \times 3600)} \\ = 8.486 \times 10^{-3} cm = 0.85 \mu m$$

정도로 계면조도가 1 μm 정도라고 하면 접합율이 50% 정도로 낮아야 한다.

그러나 본 실험과 같이 95% 이상 되고 표면부의 변형이 0.5 mm 정도라고 가정하여, 확산거리는 500 μm 정도로 추정하면  $D = 3.7 \times 10^{-8} cm^2/s$  정도로 벌크확산계수의 약 100배정도 향상되었음을 알 수 있다. 따라서 이러한 기초실험을 바탕으로 이후의 이종재료의 조합인 동/은/동 계면을 가진 모꾸메가네 접합에서 각 물질의 확산 계수를 주어진 온도에서 100배정도 계면효과에 의해 향상된다고 가정하여 최적 접합조건을 확인하였다.

#### 3.2 동/은 이종소재의 접합

그림 5 에는 동/은/동 구조의 시편을 700℃에서 20분

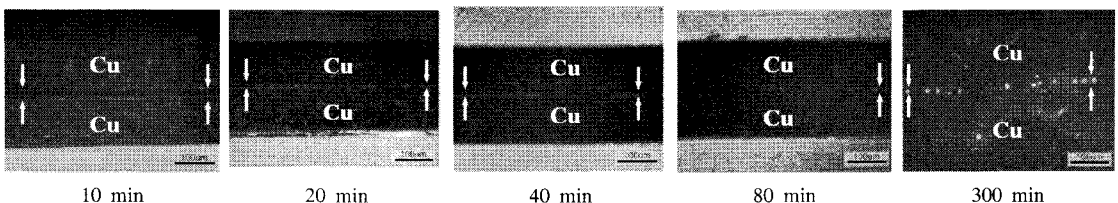
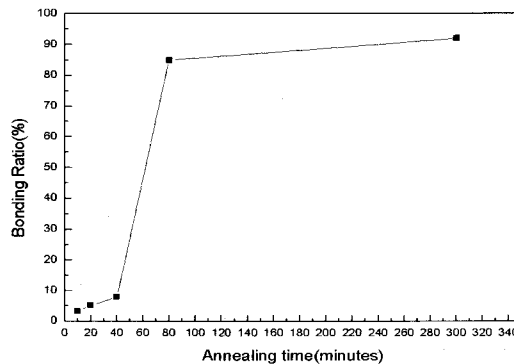


그림 4. Cu/Cu 접합률 변화와 열처리 시간.

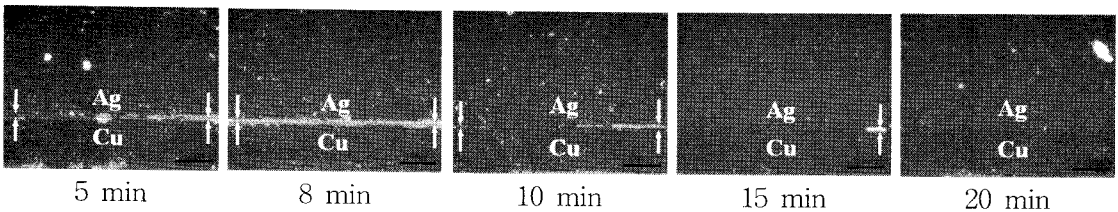
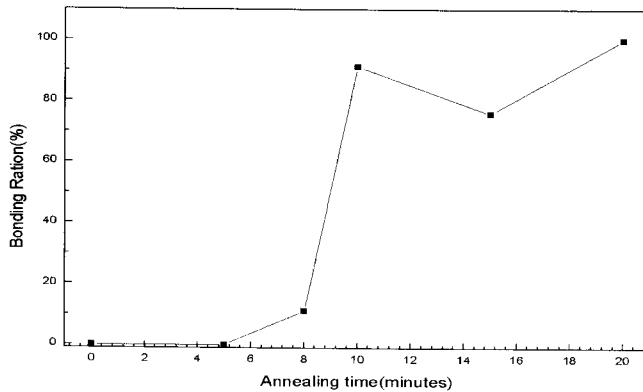


그림 5. 5 Cu/Ag 접합률 변화와 열처리 시간.

간까지 진행한 접합율을 나타내었다. 그림과 같이 10분부터 급격한 접합이 일어나서 20분에는 동과 은이 합금화되면서 용융이 일어나서 은소재가 변형되는 현상이 있었다. 5시간 열처리한 경우는 동부분까지 완전히 합금화가 되어서 접합의 의미보다는, 균질한 합금 잉곳이 되어버리고 만다.

면의 보이드를 쉽게 채워서 접합이 용이하게 되어 8분과 10분의 2분 사이간격에 급격한 접합율의 증가가 있게 된다. 확산이 계속 진행되면 양쪽계면에서 계속 변형부가 생겨서 궁극적으로 압력에 의해 시료의 끝 부분이 동그랗게 변형되거나 변형되어 빠져나오는 현상이 나타난다.

따라서 동/은의 접합은 본 실험에서 확인한 바와 같이 본래시료의 소성변형이 적으면서 접합율이 90% 이상 될 수 있는 공정윈도우가 10분에서 15분 정도로 매우 좁은 특징이 있다.물론 이 조건은 2.5 kg의 압력과 동/은 재료에 해당하는 것으로 압력이 커지면 더욱 최적 공정윈도우가 줄어들 가능성이 있다. 따라서 이종재료의 접합에서는 가능하면 압력효과를 줄이고 온도를 저온에서 넓은 시간대에서 조절하는 것이 열처리 시간의 공정 윈도우를 넓히는 것이 용이하다고 예상되었다.

이상과 같이 이종재료의 접합은 동종재료의 접합에 비해서 공정 윈도우가 작아지는 단점이 있었다. 특히 용점차가 더 있는 Al(780℃)과의 3종 이상 이종재료의 접합이 실시될 때는 더욱 공정 윈도우가 좁아지거나 접합할 수 있는 가능영역이 없을 수 있다. 따라서 3종이상의 재료에서는 2종의 고용점 판재를 먼저 고온에서 접합시킨 후 제3의 저용점 판재를 저온에서 처리하는 2단계 접합공정이 바람직하다고 예상되었다.

기존에 알려진 상태도나 확산계수에 의한 예측보다 접합 공정 윈도우가 좁아지는 현상은 압력에 의해서 확산 현상이 가속화되고 심지어 압력에 의해 소성변형이 일어

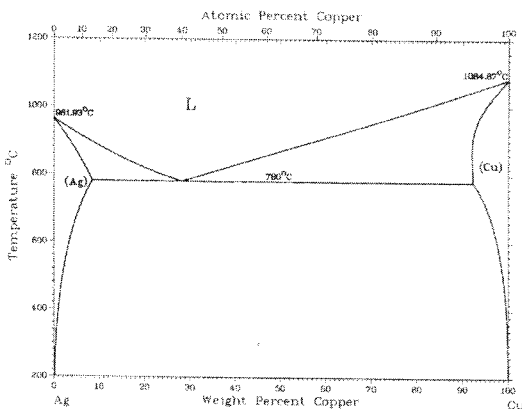


그림 6. Ag-Cu 2원 상태도.

이렇게 동/은이 합금화 되는 것은 그림 6의 상태도 [10]와 같이 30% Cu가 혼입되게 되면 공정조직으로 용융점이 770℃가 되어 쉽게 소성변형이 가능하고 특히 2.5 kg의 추에 의한 압력을 받으므로 은이 계속 변형되어 계

나서 최종 잉곳의 접합형태가 왜곡되어 못 쓰게 되는 경우도 있다. 이러한 문제의 해결방법으로 어닐링 중 무게 추에 의한 압력을 배제하기 위해서 일단 접합할 판재들을 스폿용접으로 미리 일부분을 접합시켜 접합면이 충분히 가접합될 수 있도록 한 후 추가 어닐링을 한다면 좀 더 넓은 공정 구간에서 작업이 가능할 수 있다고 예상되었다.

그림 7 에는 700℃-10분 조건에서 2.5 kg의 추에 의한 압력으로 제작된 최종 잉곳의 테두리를 기계적으로 연마하고 표면 크리닝 처리한 후의 이미지를 나타내었다. 이 잉곳은 저배율 광학현미경에 의해 확인한 결과 전 계면에서 90% 이상의 접합율을 가진 우수한 잉곳임을 확인하였다. 이 잉곳을 이용하여 일부분을 절단하고 반복 밀링하여 모쿠메가네 효과가 나타난 판재를 만들고 이 판을 사용하여 굽힘기법으로 완성한 핸드폰 외장용 시작품을 그림 8에 나타내었다. 성공적으로 시작품외면에 모쿠메가네 효과가 나타났으며 표면 결함 없이 완전한 시제품의 제작이 가능하였다.

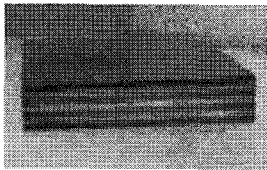


그림 7. 700℃, 10분에서 접합된 Cu/Ag 잉곳의 최종이미지.

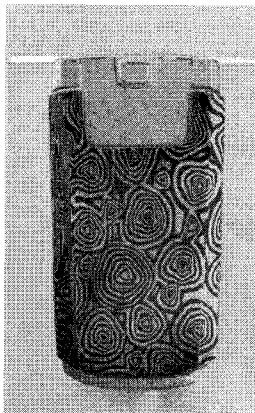


그림 8. Cu/Ag 잉곳으로 제작된 모쿠메가네 핸드폰 케이스 시제품.

#### 4. 결론

동/은을 대상으로 나뭇결무늬를 내는 모쿠메가네 제품

을 만들기 위한 잉곳제작을 실시하였다. 동/동 동종재료의 900℃에서 열처리시간을 달리한 접합율에서 판재의 계면효과에 의해 확산계수가 100배정도 커져서 접합속도는 가속되었다. 가속확산을 고려한 동/은의 접합은 700℃에서 10분~15분 정도가 적합하였고, 이 조건에서 제작된 7층의 동/은 잉곳을 이용하여 핸드폰 외장용 모쿠메가네 시작품을 성공적으로 제작할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] 잔크스 맥그레이스, 최승욱 역, 장신구 제작기법, 서울, 예경, 2001
- [2] O. untracht, metal techniques for craftsmen, Doubleday & Company, Inc., 1968, p.182
- [3] O. D. Sherby, J. Wadsworth, Journal of materials processing technology, 117, 2001, p.347-353
- [4] W. Kochmann, M. Reibold, R. Goldberg, W. Hauffe, H. Muller, A. Belger, P. Paufler, Journal of alloys and compounds, 372, 2004, p.15-18
- [5] Y. T. Puyate, C. J. Lawrence, Chemical engineering science, 61, 2006, p7177
- [6] J. F. Shackelford, Introduction to material science for engineers(5th), Prentice-Hall, 2000, p.21-5
- [7] O. S. Lim, Journal of korea society design science, 13(4), 2000, p.53
- [8] [http://www.mokume-gane.com/Pages/What\\_is\\_Mokume.html](http://www.mokume-gane.com/Pages/What_is_Mokume.html)
- [9] D. A. Porter, K. E. Eastering, Phase transformation in materials, 2nd, Chapman & Hall, 1992, p.80-2
- [10] T. B. Massalski, Binary alloy phase diagrams(Volum 1), American Society for Metals, 1986, p.19

송 오 성(Oh-Sung Song)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : MIT 재료공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>

반도체 재료, 자성 재료, 보석재료

---

**김 종 루(Jong-Ryul Kim)**

[준회원]



- 2006년 2월 : 서울시립대학교 신소재공학과 (공학사)
- 2006년 8월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 석사과정

<관심분야>

반도체 재료, 철강 재료, 보석재료

---

**김 명 로(Myung-Ro Kim)**

[정회원]



- 2004년 2월 : 국민대학교 테크노디자인대학원 주얼리디자인전공 (디자인석사)
- 2006년 8월 ~ 현재 : 서울시립대학교 서울주얼리연구센터 연구원

<관심분야>

주얼리 디자인, 보석재료