

## 고려 청동기 유물의 제작기법에 관한 연구

최광진 · 박장식

홍익대학교 조치원캠퍼스 금속공학과

### On the Manufacturing Technology of Some Koryo Bronze Artifacts

K. J. Choi and J. S. Park

Dept. of Metallurgical Engineering, Hongik Univ., Chochiwon 339-701, Korea

**Abstract** This study has examined the metallurgical microstructures and alloy compositions of 3 bronze artifacts, a vessel, a spoon and a chopstick, manufactured in the Koryo Dynasty. The results show that they were made from Cu-Sn alloys whose Sn content ranges from 22 to 24% by weight. It is of significant importance to find that they were all given special thermo-mechanical treatments during their manufacturing. It has been found that the Koryo bronze workers were well aware of the mechanical properties of  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  and  $\delta$  phases that appear in the Cu-Sn alloys. Knowing how to promote or suppress the formation of each phase, they were able to find proper alloy compositions and temperatures for the high Sn alloys to be successfully forged. The present study will detail the Koryo bronze technology as estimated from the microstructures of the 3 bronze artifacts. The results of the reproduction experiments with Cu-24%Sn will also be presented to explain how the microstructures develop and to estimate the mechanical properties of each phase.

(Received September 22, 2003)

**Key words:** Koryo bronze artifacts, Manufacturing technology, Thermo-mechanical treatments, Cu-24wt%Sn alloy, Reproduction experiment, Microstructure, Mechanical property

#### 1. 서 론

최근 국내의 고고금속학 분야에서는 각종 금속 유물을 과학적으로 분석함으로써 고대 장인들의 기술수준 및 제작기법을 추정하는 연구가 진행되고 있다<sup>1,2,3</sup>). 이러한 연구는 고대 기술의 기원과 발전 및 전파경로 등에 관한 정보 뿐 아니라 사회상까지도 엿볼 수 있는 중요한 단서를 제공한다. 금속재료 중 청동은 인류가 최초로 사용한 합금으로 우리나라에서는 기원전 1000년경 또는 그 이전부터 이를 사용하기 시작한 것으로 여겨진다. 청동은 철기와 함께 고대 및 근대의 금속제품 제작에 매우 큰 비중을 차지하고 있었음에도 불구하고 철기에 비하여 이에 대한 기술적 연구자료는 거의 전무한 실정이다. 본 연구에서는 중량비로 22~24%의 주석을 함유하고 있는 고려시대의 청동제 합과 젓가락 및 숟가락 등 3점의 유물을 대상으로 미세조직과 성분분석실험을 수행하였다. 또한 이들 유물에서 발견되는 미세조직의 출현과정과 이에 따르는 기계적 성질을 추적하기 위하여 주석함량 24%인 청동합금을 제조하여 각종

열처리실험과 경도측정실험을 실시하였다. 이를 통하여 본 연구에서는 유물 제작에 사용된 기술의 종류와 그 수준을 살펴보고자 한다.

#### 2. 실험 방법

본 연구에서의 대상 유물은 모두 고려시대에 축조된 무덤에서 수거된 것으로 이들 중 청동제 합과 젓가락은 상주의 청리에서 그리고 숟가락은 보령의 관창리에서 출토되었다. 유물로부터의 시료 채취에는 제약이 있으므로 청동합과 숟가락 분석에는 파편을 이용하였고 젓가락 분석에는 유물로부터 직접 채취한 극소량의 시편을 사용하였다. 분석시료는 조직검사에 필요한 연마과정을 거친 후 증류수 100 ml와 염산 30 ml에 산화철(III) 10 g을 혼합한 용액에 부식시켰으며, 광학현미경 및 전자현미경(JSM 5410)을 이용하여 이들의 미세조직을 관찰하였다. 시료의 성분분석에는 전자현미경에 부착된 에너지분산분광계(Energy Dispersive Spectrometer: EDS)를 이용하였다.

재현실험을 위한 청동합금은 상용구리와 주석을 이

용해 중량비로 Cu-24%Sn이 되도록 대기 중에서 주조되었다. 24%Sn 청동은 열처리시 유물제작에 사용된 합금과 거의 동일한 상변태 과정을 거치게 된다. 열처리는 700°C 및 550°C에서 30분간 유지한 후 수냉, 공냉 및 로냉 등 냉각속도를 조절하는 방법으로 실시하였다. 또한 700°C에서 30분간 유지후 수냉한 시료를 582°C에서 30분간 유지한 후 수냉하는 뜨임처리를 실시하였다.

이상과 같은 처리과정에서 출현하는 미세조직과 기계적성질 간의 상관관계를 살펴보기 위하여 로크웰 경도를 측정하였으며 압입 흔적의 주변에 발생하는 조직변화를 현미경으로 관찰하였다. 로크웰 경도는 지름 1/16인치인 강철 볼을 이용하여 하중 100 kg에서 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Cu-Sn 평형 상태도

Cu-Sn 평형 상태도인 Fig. 1에서 주석함량이 20~24wt%인 영역을 살펴보면 799°C 이상의 온도에서는 액상과 α상이 공존하며 799°C 또는 그 이하의 온도에서 β상이 출현하며 응고가 완료된다. 586~799°C범위에서는 α상과 β상이 공존하거나 또는 조성 및 온도에 따라 β상만으로 존재하는 영역도 나타난다. 그러나 586°C에서는  $\beta \rightleftharpoons \alpha + \gamma$ 의 공석반응이 일어나므로 520~586°C의 온도범위에서는 α상과

γ상이 공존하게 된다. 냉각이 진행되어 520°C에 이르게 되면  $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \delta$ 의 공석반응이 일어나 α상과 δ상이 공존하게 된다. 또한 350°C에서는  $\delta \rightleftharpoons \alpha + \epsilon$ 의 반응이 일어나는 것으로 나타나 있으나 이 반응은 매우 느린 속도로 일어나므로 고려하지 않아도 된다. 따라서 주조 및 서냉에 의해 나타나는 미세조직은 일반적으로 α상과 δ상이 조합된 형태로 존재한다. 급냉에 의해 586°C이상의 β상은 마르텐사이트(martensite) 조직으로 변태될 수 있다. 따라서 100% β상으로 존재하던 영역에서 급냉된 시료는 모두 마르텐사이트 조직을 취할 수 있으며, α상과 β상이 공존하는 영역에서 급냉된 시료에는 α상과 마르텐사이트 조직이 출현할 수 있다. 520°C 이상의 γ상은 급냉에 의해 상온에서 잔류할 수 있다. 따라서 520~586°C의 범위에서 시료를 급랭할 경우 조직 내에는 α상과 γ상이 공존하게 된다<sup>4,5)</sup>.

이상과 같이 α상, β상, γ상 및 δ상은 상태를 통해 비교적 쉽게 그 생성조건을 유추할 수 있으나 처리조건에 따라 그 자세한 형상이나 각 상의 조합된 형태는 크게 달라지게 된다.

#### 3.2. 청동유물의 미세조직

Fig. 2a는 상주 청리 출토 청동합의 외형을 보여준다. Fig. 2b는 여기에서 발견되는 미세조직으로 α상과 마르텐사이트상이 존재하는 기지조직이 관찰된다. 또한 Fig. 2c는 Fig. 2b를 확대한 조직사진으로 기지조직 내에 침상의 마르텐사이트와 더불어 일부 매끈한 형태의 또 다른 상이 존재하고 있음을 보여준다. 이러한 조직상의 특징으로 보아 이 청동합은 주조 이후 추가적인 가공과정과 열처리를 거쳐 제조된

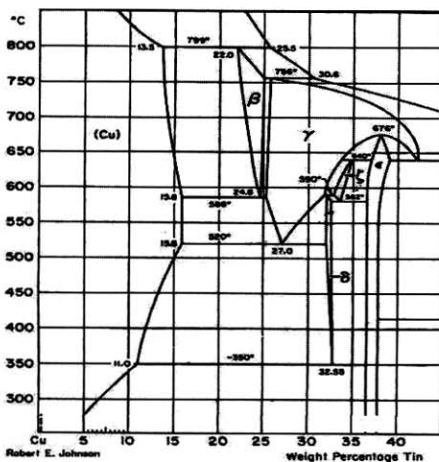


Fig. 1. Cu-Sn phase diagram.



Fig. 2a. Koryo bronze vessel from Cheong-ni Sang-ju.



Fig. 2b. Optical micrograph showing the microstructure of the bronze vessel shown in Fig 2a.

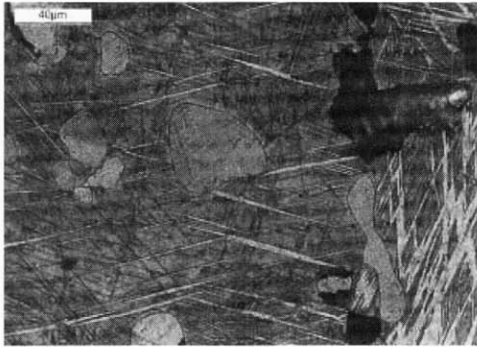


Fig. 2c. Optical micrograph magnifying the microstructure of Fig 2b.

것임을 알 수 있다.

Fig. 3a는 상주 청리에서 출토된 청동 젓가락의 외형으로 화살표로 표시한 부위에서 시료를 채취하였다. 채취된 시료의 미세조직을 Fig. 3b에 나타냈다. 그림에서 어둡게 보이는 기지조직은 담금질된 조직이며 밝게 보이는 부위는  $\alpha$ 상이다. 여기서 특이한 점은  $\alpha$ 상이 수직상으로 볼 수 있는 원형 외에도 길게 늘어진 막대형상으로도 존재한다는 것이다. 여기에서도 주조 후 실시된 가공 및 열처리 흔적이 발견된다.

Fig. 4a는 보령 관창리에서 출토된 청동 숟가락의 외형으로 1과 2로 표시된 부위에서 시료를 채취하였다. Fig. 4b와 Fig. 4c는 각각 1과 2로 표시된 부위의 미세조직으로 수직상의  $\alpha$ 상과 마르텐사이트 기지조직을 보여준다. 또한 이  $\alpha$ 상의 결정립 내부에서는 다수의 결정립계가 관찰된다. 따라서 이 수저 또한 앞의 합 및 젓가락처럼 주조 후 추가적으로 수



Fig. 3a. Koryo bronze chopsticks from cheong-ni Sang-ju.

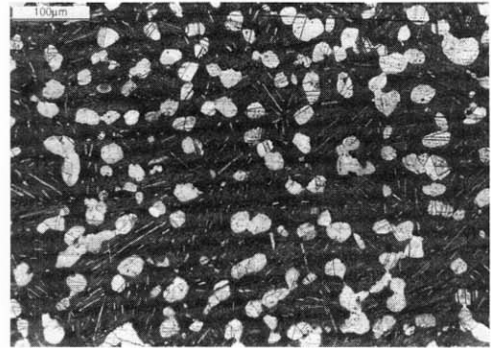


Fig. 3b. Optical micrograph showing the microstructure of one of the bronze chopsticks shown in Fig. 3a.



Fig. 4a. Koryo bronze spoon from Gwanchang-ni Boryong.

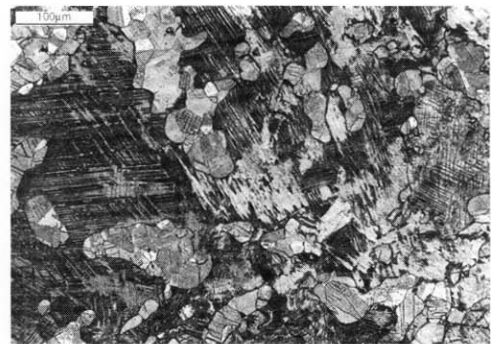


Fig. 4b. Optical micrograph showing the microstructure at arrow 1 labeling the bowl of the bronze spoon shown in Fig. 4a.

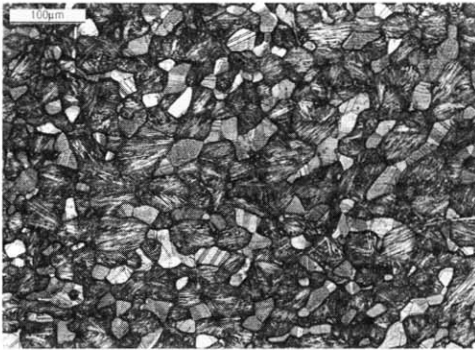


Fig. 4c. Optical micrograph showing the microstructure at arrow 2 labeling the handle of the bronze spoon shown in Fig. 4a.

행된 가공 및 열처리에 의하여 제조된 것임을 알 수 있다. 한편  $\alpha$ 상 내부에 보이는 결정립계는 재결정에 의해 생성된 것으로 재결정 정도는 변형의 정도에 비례하는 점을 감안할 때 1 부위에 주어진 가공정도가 2부위보다 심각하였던 것으로 판단된다.

### 3.3. 재현실험

#### (1) 주조

앞서 언급한 청동유물의 주석함량은 모두 20~24%의 범위에 속하는 것으로 이들에서는 모두  $\alpha$ 상과  $\beta$ 상을 관찰할 수 있었다. 상태도에서 이 조성 범위의 합금은 온도에 따라 거의 유사한 상변태과정을 거치게 된다. 특히 Cu-24%Sn 합금은 급랭에 의하여 100% 마르텐사이트 조직을 취할 수 있다. 이 점을 감안하여 본 연구에서는 24%Sn 청동합금을

제조하여 재현실험을 실시하였다.

Fig. 5a는 주조된 Cu-24%Sn 청동합금의 조직사진으로 다소 조대한  $\alpha$ 상과 공석조직인  $\alpha+\delta$ 상을 보여 준다. 이를 확대한 전자현미경 조직사진을 Fig. 5b에 보였다. 여기에서 조대한  $\alpha$ 상은 일부 응고에 의하여 생성된 것으로 판단되며,  $\alpha+\delta$ 의 공석조직은 520°C 이상에서  $\gamma$ 상으로 존재하던 부분으로 볼 수 있다. 주조된 시료의 기계적 성질을 알아보기 위하여 로크웰 경도를 측정된 후 압입 흔적을 관찰하였으며 이를 Fig. 5c와 Fig. 5d에 나타내었다. Fig. 5c의 중앙에는 압입자의 흔적이 나타나 있으며 이는 경도치 101에 해당하는 것으로 청동조직에서 관찰되는 경도 중 비교적 높은 편에 속한다. Fig. 5d는 Fig. 5c의 압흔 주위를 확대한 사진으로 좌측의 어두운 부위에는 압흔이 존재하고 있으며 1로 표시된 곳에는 다소 조대한  $\alpha$ 상이 그리고 2로 표시된 곳에는  $\alpha+\delta$ 의 공

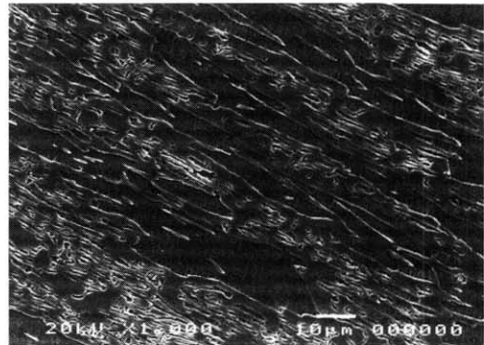


Fig. 5b. Secondary electron micrograph magnifying the microstructure of Fig. 5a.



Fig. 5a. Optical micrograph showing the as - cast microstructure of the Cu - 24wt%Sn alloy.

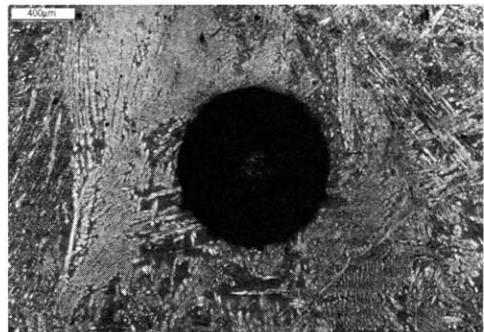


Fig. 5c. Optical micrograph showing the Rockwell indentation made in Cu - 24wt%Sn alloy and the microstructure in its neighborhood.

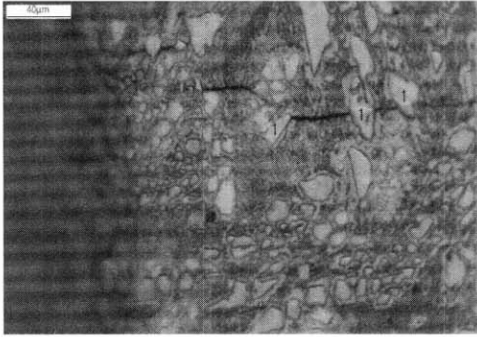


Fig. 5d. Optical micrograph providing the magnified view of the cracks formed in the microstructure near the indentation of Fig. 5c.

석영역이 관찰된다. 상단에는 검은 줄 모양의 crack이 형성되어 있음을 볼 수 있는데 이는 2로 표시된 공석영역에서 생성되어 전파되고 있으나 1로 표시된  $\alpha$ 상으로는 전파되지 않는 것을 볼 수 있다. 이러한 사실은 청동제품에  $\alpha+\delta$ 의 공석조직이 출현할 경우 그 취성이 크게 증가함을 의미하며, 주석함량이 높은 청동제품을 대상으로 상온에서 실시하는 단조작업이 현실적으로 불가능함을 나타낸다.

### (2) 700°C에서의 열처리

상태도를 보면 Cu-24%Sn 청동합금은 700°C에서  $\beta$ 상으로 존재하게 된다. 이러한  $\beta$ 상은 냉각속도에 따라 각기 다른 미세조직으로 변태된다. 따라서 700°C에서 30분간 유지한 후 수냉, 공냉 또는 로냉의 방법으로 열처리를 실시하였다. 이러한 실험결과 공냉 및 로냉과 같은 서냉시의 미세조직은 주조된 시료와 유사하게 나타났다.

Fig. 6a는 700°C에서 수냉한 시료의 미세조직으로 마르텐사이트 조직이 관찰된다. 이 시료의 로크웰 경도 압흔을 Fig. 6b에 나타냈다. 경도값은 108으로 앞서 살펴본 시료에 비하여 다소 높게 나타났다. 여기에서는 Fig. 5d에서와 같은 crack은 볼 수 없으나 사선 형태의 슬립선(slip line)이 관찰된다. 따라서 여기에 보이는 마르텐사이트상은 서냉시 출현하는  $\alpha+\delta$ 의 공석조직에 비하여 연성이 높으며 이를 대상으로 하는 상온가공이 가능함을 의미한다.

### (3) 550°C에서의 열처리

주석함량이 24%인 청동합금을 550°C로 가열하면  $\alpha$ 상과  $\gamma$ 상이 존재하게 되며 이를 급랭할 경우  $\alpha$ 상

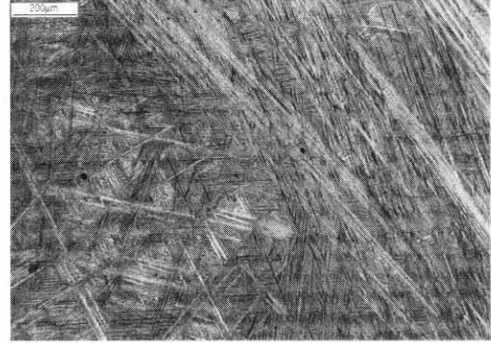


Fig. 6a. Optical micrograph showing the microstructure of the Cu - 24wt%Sn alloy quenched at the end of the 30 minutes heating at 700°C following the initial casting.

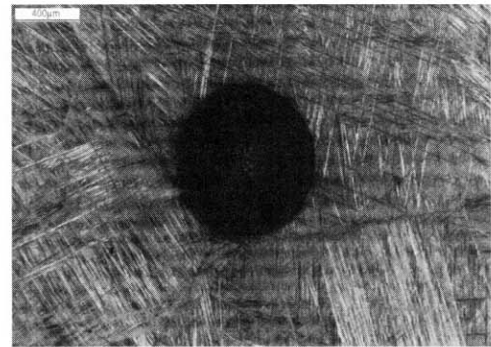


Fig. 6b. Optical micrograph showing the Rockwell indentation made in the alloy of Fig. 6a and the microstructure in its neighborhood

과  $\gamma$ 상이 잔류하게 된다. 또한 공냉 및 로냉과 같이 냉각속도가 느릴 경우  $\gamma$ 상이  $\alpha$ 상과  $\delta$ 상으로 다시 분해되어 서냉시와 유사한 미세조직이 출현하게 된다.

Fig. 7a는 550°C에서 30분 유지한 후 수냉한 시료의 미세조직 사진으로  $\alpha$ 상과  $\gamma$ 상으로 구성되어 있으며  $\gamma$ 상 결정립계가 관찰된다.

Fig. 7b는 Fig. 7a를 확대 촬영한 전자현미경 사진으로 중앙에 1로 표시된 부위는  $\alpha$ 상이며, 2로 표시된 부위는  $\gamma$ 상이다. 그 이외에도 3으로 표시된  $\delta$ 상이  $\alpha$ 상과  $\gamma$ 상의 계면 또는  $\alpha$ 상 및  $\gamma$ 의 결정립 내에 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 수냉 과정, 즉 노에서 꺼내어 물에 담금질하는 과정에서도  $\delta$ 상이 생성된다는 것을 의미한다. 또한 여기에 나타난  $\gamma$ 상은 주석함량이 대략 26%정도로  $\gamma$ 상으로는 주석함량이 낮은 편이다.

Fig. 7c에는 550°C에서 수냉한 시료의 로크웰 경도 압흔으로 경도값 105.7이 얻어졌다. crack은 발생하지 않았다. 따라서 이 시료는 700°C에서 수냉한

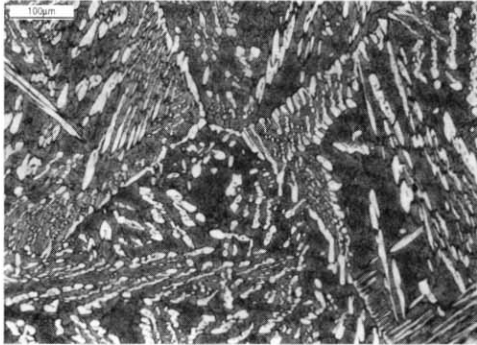


Fig. 7a. Optical micrograph showing the microstructure of the Cu - 24wt%Sn alloy quenched at the end of the 30 minutes heating at 550°C following the initial casting.

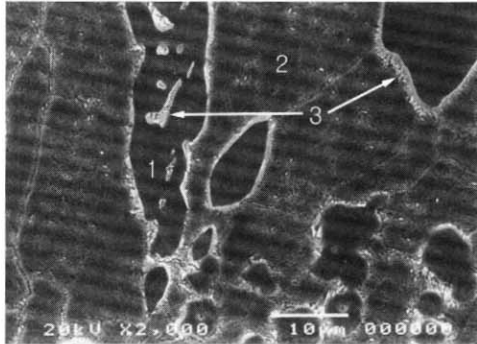


Fig. 7b. Secondary electron micrograph magnifying the microstructure of Fig. 7a.

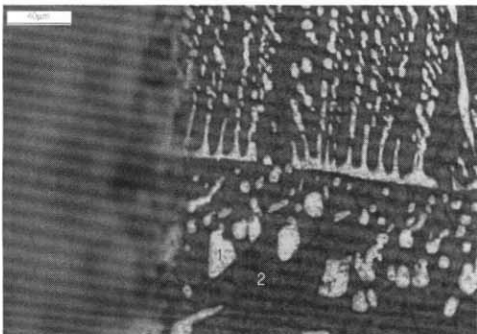


Fig. 7c. Optical micrograph showing the Rockwell indentation made in the alloy of Fig. 7a and the microstructure in its neighborhood.

시료와 마찬가지로 비교적 높은 연성을 갖는 것으로 볼 수 있다. 이는  $\alpha+\gamma$ 상의 조합이  $\alpha+\delta$ 상의 조합에 비해 인성 및 내충격성 등의 기계적 성질이 우수하다는 것을 의미한다.

(4) 700°C에서 수냉한 시편의 뜨임처리

앞서 언급한 바와 같이 700°C에서 수냉한 시료에는 마르텐사이트 조직이 나타나게 되며 이를 이용하여 뜨임처리를 실시할 경우 마르텐사이트 상의 분해가 일어나게 된다. Fig 8a는 700°C에서 급랭시킨 시편을 586°C에서 30분간 뜨임처리한 후 다시 급랭시킨 시료의 미세조직을 보여준다. 여기에서는 긴 막대모양의  $\alpha$ 상과 기지조직을 관찰할 수 있다. 이런 특이한 형태의  $\alpha$ 상은 마르텐사이트를 뜨임처리할 경우에만 출현하게 된다. 또한 기지조직에는 이 그림에서는 분명하지 않으나 2가지 서로 다른 상이 존재하고 있다. 이를 자세히 관찰하기 위하여 확대 촬영한 전자현미경 사진을 Fig. 8b에 나타냈다. 여기에서는 1로 표시된 거친 부위와 2로 표시된 매끈한 부위를 볼 수 있다. 이들 각 영역에서 EDS를 이용한 성분 분석 결과 1에서는 주석함량이 24.54%, 2에서는 25.14%로 나타났다. 반복적인 성분분석 결과에서도 2부위의 주석함량은 1부위에 비하여 항상 높게 나타났다. 이러한 성분분석 결과와 조직의 형상으로 미루어 보아 급랭 직전 1부위에는  $\beta$ 상이 그리고 2부위에는  $\gamma$ 상이 존재하였던 것으로 판단된다. 이는 급랭 직전 부위에 따라  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 상이 공존하고 있었음을 나타내는 것으로 급랭에 의하여  $\beta$ 상은 마르텐사이트로 그리고  $\gamma$ 상은 잔류하게 되었음을 보여준다. 에칭

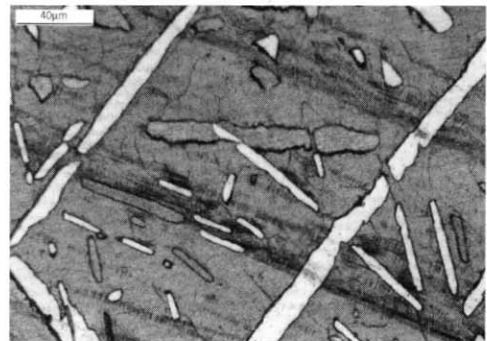


Fig. 8a. Optical micrograph showing the microstructure of the Cu - 24wt%Sn alloy quenched at the end of the 30 minutes heating at 582°C following the quench treatment from 700°C.

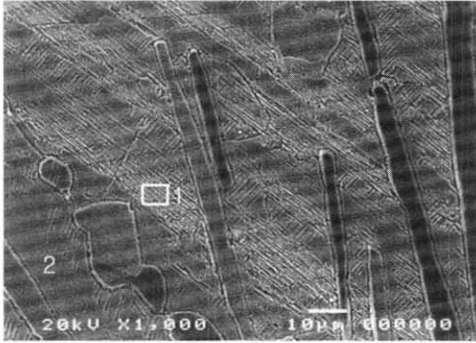


Fig. 8b. Secondary electron micrograph magnifying the microstructure of Fig. 8a.

에 의하여 마르텐사이트 부위는 거칠게 된 반면  $\gamma$ 상이 잔류하는 부위는 매끈한 상태를 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. 한편 550°C에서 뜨임처리 후 급랭한 시편에서는 Fig. 7a에서와 동일한 형상의  $\alpha$ 상과 더불어 잔류하게된  $\gamma$ 상과 미세한  $\delta$ 상이 함께 출현하는 것이 관찰되었다.

이상의 결과를 종합하여 앞서 살펴본 유물에서 발견되는 미세조직을 조명한 경우 각 유물의 제작과정을 다음과 같이 유추할 수 있다. 우선 청동합에서 다수의 결정립계를 포함하는  $\alpha$ 상이 발견되는 것은 이 유물의 제작에 두드림에 의한 변형가공 공정이 있었다는 점과 가공도중 또는 가공이 완료된 후에 실시된 고온 열처리에 의하여 재결정이 발생하였음을 의미한다. 또한 기지조직에 마르텐사이트상과 더불어  $\gamma$ 상이 존재하는 것으로 보아 최종단계에서 이 유물은 급랭되었음을 알 수 있다. 이상의 사실로 보아 청동합에는 고온에서의 변형가공과 급랭이 반복되는 특별한 제작방법이 적용되었으며 마지막 단계에서는 대략 586°C의 온도에서 급랭시키는 특수한 열처리가 수행된 것으로 판단된다.

젓가락의 미세조직에서는 마르텐사이트로 이루어진 기지조직을 바탕으로  $\alpha$ 상이 관찰되었다.  $\alpha$ 상은 원형의 조대한 것과 기지조직내에 미세한 막대모양으로 석출된 것이 관찰되었는데 전자는 응고시 수지상정의 형태로 생성된 것이며 후자는 앞의 재현실험 결과에서 언급한 바와 같이 마르텐사이트 상으로부터 변태된 것이다. 이러한 조직상의 특성으로 보아 이 유물의 제작에는 먼저 700°C부근의 고온에서 급랭되는

열처리 공정이 있었으며 그후 비교적 높은 온도에서 실시된 두드림에 의한 성형공정과 586°C부근의 온도에서 급랭하는 특수 열처리 공정이 최종단계에 실시된 것으로 판단된다.

수저의 경우 술잎 및 자루부위에서 발견되는 미세조직은 같은 형태의 상들로 구성되어 있었으나 자루에 비하여 술잎에  $\alpha$ 상이 더욱 조대화된 것으로 관찰되었으며 이들  $\alpha$ 상 내부에는 다수의 결정립계가 존재하고 있었다. 이는 술잎의 가공에 더 많은 변형이 가해졌음을 의미한다. 한편 기지조직에 마르텐사이트가 주를 이루는 점으로 보아 이 유물에는 제작 마지막 단계에 600°C이상의 고온에서 급랭시키는 열처리가 수행되었음을 알 수 있다.

본 고에서 살펴본 청동유물 3점은 제작과정 중 한결같이 급랭처리를 받은 것으로 드러났다. 이는 주석함량이 높은 청동제품 제작에 두드림 작업이 요구될 경우  $\delta$ 상의 존재로 인하여 초래되는 취성에 대비하기 위한 것으로 로크웰 경도실험 결과를 통하여 그 효과를 유추할 수 있다. 경도측정자극의 주변에 crack이 발생하는 경우는 서냉을 통하여  $\alpha+\delta$ 의 공석조직이 생성되었을 때에 국한되었으며, 급랭을 통하여 마르텐사이트나  $\gamma$ 상이 형성된 부위에는 crack이 관찰되지 않았다. 이는  $\delta$ 상의 생성이 억제되는 한 주석함량이 높은 경우에도 청동소재의 연성 및 내충격성이 뛰어난을 의미한다. 이러한 사실로 보아 고려의 장인들은 열처리를 통하여 얻어지는 기계적 성질변화를 정확히 인지하고 있었으며 이를 제품생산에 실제로 적용하고 있었던 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

고려시대에 제작된 청동제품 3점의 미세조직을 분석한 결과 당대의 청동기술체계에 관하여 다음과 같은 사실이 밝혀졌다.

1. 청동제품 제작에 주석함량이 높은 합금사용이 일반화되어 있었으며, 청동합금 내 주석함량은 22%를 목표로 하고 있었다.
2. 주석함량이 높은 청동제품 제작에 두드림에 의한 성형작업이 실시되었으며, 이를 위하여 특별한 열처리 기법이 개발되어 적용된 것으로 밝혀졌다.
3. 주석함량이 높은 청동합금에 출현하는  $\delta$ 상의 취

성이 높음을 알고 있었으며, 이에 비하여  $\beta$ 상과  $\gamma$ 상은 상대적으로 취성이 낮아 내충격성이 우수함을 인식하고 있었다.

4. Cu-Sn 합금계에서  $\beta$ 상과  $\gamma$ 상의 존재 구간을 인식하여 이를 토대로 두드림 작업온도가 조절된 흔적이 발견되었으며, 급랭에 의하여  $\delta$ 상의 형성이 억제될 수 있음을 인식하고 있었다.

5.  $\delta$ 와  $\beta$ 와  $\gamma$ 상이 각각 존재하는 조직에서 실시한 로크웰 경도실험 결과  $\delta$ 에서는 crack의 생성과 전파가 쉽게 관찰되었으나  $\beta$ 와  $\gamma$ 에서는 crack이 생성되지 않았다.

## 참고문헌

1. 박장식, 최광진, 정광용, 정영동 ; 1999년 추계 학술대회, 대한금속학회, (1999), 86.
2. 장대정, 최광진, 박장식, 정광용 ; 1999년 추계 학술대회, 대한금속학회, (1999), 85.
3. 최광진 ; 철기 및 청동기 유물 제작에 관한 고고금속학적 연구 ; 박사학위논문, 홍익대학교, 2003, 97.
4. 양훈영 ; 신금속재료학, 문운당, (1994) 372.
5. 박상준 ; 주물과 비철금속재료의 열처리, 원창출판사, (1994) 215.