

고대 한국의 청동기 기술체계

박 장 식

홍익대학교 조치원캠퍼스 금속공학과

Bronze Technology of Ancient Korea

Jang-Sik Park

Dept. Metallurgical Engineering, Hongik University, ChoChiWon 339-701, Korea

1. 서 론

본고는 한국열처리공학회와 학술발표대회와 열처리 공학회지에 발표된 4편의 논문을 토대로 작성되었다¹⁻⁴⁾. 한반도에 청동기 문화가 유입되기 시작한 것은 학자에 따라 차이가 있을 수 있으나 대체적으로 기원전 10세기를 전후한 시기로 보는 견해가 유력하다⁵⁾. 이는 우리나라에서 청동기를 사용한 역사가 3천년 또는 그 이상 되었음을 의미하는 것으로 그 동안 한반도에 있었던 정치 및 사회상황의 변화만큼이나 청동기 문화의 전개에도 상당한 변동이 있었을 것임을 짐작케 한다. 이러한 청동기 문화의 전개과정을 추적하기 위하여 지금까지 수행된 연구는 주로 인문 사회학자들의 주도하에 형태학적 관찰을 토대로 수행되어 왔다. 그러나 이를 통하여서는 시대와 지역에 따른 외형적 변화의 추세가 어느 정도 밝혀졌을 뿐 청동기 제작에 관련된 기술체계상의 발전 또는 변천 과정에 대하여는 아무 것도 밝혀진 바가 없다. 특히 철기의 사용이 시작된 이후의 시기에 대하여는 철기의 중요성이 강조됨으로써 정작 청동기가 사용된 기간의 대부분을 차지하는 후대 2000년간의 청동기 문화는 상대적으로 관심의 대상에서 멀어지게 되었다. 그러나 청동기 문화가 도입되는 이른 시기로부터 오늘에 이르기까지 청동기는 간단없이 제작되어 왔으며 고대의 기술적 전통은 아직도 그 명맥을 유지하고 있다⁶⁾. 이는 청동기 제작에 관련된 기술체계의 변천 속에 역사적 사실의 한 단면이 담겨있음을 의미하는 것으로 이를 추적함으로써 다른 어느 것에서도 얻을 수 없는 과거에 대한 진실이 얻어질 수 있음을 뜻한다.

고대의 청동기 제작에 적용된 기술체계를 밝히려면

우선 무엇을 기준으로 청동기 기술을 논할 것인가를 분명히 할 필요가 있다. 이는 유물을 대상으로 하는 연구에서 제기되어야 할 질문의 성격을 규정하는 것으로 여기에서는 먼저 합금설계 단계에서의 화학조성은 어떠하였는지 그리고 제품생산에는 어떠한 제작기술이 적용되었는지에 대한 물음이 제기되어야 한다. 또한 청동합금의 화학조성과 제작과정 간에는 기술적으로 불가분의 관계가 존재하므로 이를 인식하여 종합함으로써 하나의 독특한 청동기 기술체계를 이루어 가는 과정에는 시기적으로는 물론 지역적으로도 차이가 발생할 수 있다. 이러한 차이는 물론 고대사회가 처해 있던 정치, 문화, 사회 및 지역적 특성을 반영하는 것이므로 청동기를 매개로 전개되었던 고대사회의 또 다른 측면을 이해하기 위하여서는 지역과 시대를 달리하며 전개되었던 청동기 기술체계의 보편성과 특수성을 밝히려는 연구가 필연적으로 실시되어야 한다. 여기에는 무엇보다도 시대와 지역에 따라 형성되어 있던 개별적 기술체계에 대한 충분한 자료를 축적하는 작업이 선행되어야 한다. 이를 위한 노력의 일환으로 본 고에서는 그간의 연구결과를 토대로 우리나라 청동기 제작에 사용된 합금의 특징과, 청동제품의 제작과정에서 실시된 열처리 기법을 살펴봄으로써 앞으로의 연구에서 중점 거론되어야 할 문제점이 무엇인지 향후 연구의 방향을 개관하고자 한다.

2. Cu-Sn 상태도

청동기 제작과정은 합금제작 단계와 주조단계 그리고 두드림 및 각종 열처리 단계로 요약될 수 있다. 합금제작 단계에서는 구리를 주성분으로 여기에 주석이나 기타의 합금원소를 혼합하여 가열함으로써 액상

의 합금이 제작되며, 이후 주조단계에서는 미리 준비된 형틀에 이를 부어 응고시키는 주조작업을 통하여 제품의 형태가 만들어진다. 청동기 중 일부는 여기에서 제작이 완료되나 그중 일부는 추가적으로 실시되는 두드림 및 각종 열처리를 거쳐 최종제품으로 완성된다. 고대의 청동기 제작에 사용된 합금의 종류와 제작방법에 관하여는 유물의 미세조직을 관찰함으로써 비교적 상세한 정보를 얻을 수 있다. 이를 위한 준비과정으로 Cu-Sn 상태를 살펴보기로 한다.

그림 1의 Cu-Sn 상태도는 평형상태도가 아니라 Cu-Sn 합금을 대상으로 하는 일상적인 열처리에 적용할 수 있는 일종의 준평형 상태도이다. 이 상태도는 대부분 평형상태도와 유사하나 500°C 이하의 구간에서는 양자간에 두드러진 차이가 보인다. 평형상태도에는 360°C에서 δ 상이 α 와 ϵ 로 분해되는 공석변태가 나타나 있으나 그림 1에는 이것이 생략되어 있으며, 또한 주석함량이 32% 이하일 경우 평형상태도에서와는 달리 상온에서 ϵ 상이 존재하지 않는 것으로 나타나 있다. 특별한 처리가 가해지지 않는 한 Cu-Sn 합금의 열처리에서는 그림 1에 준하는 상태변화가 발생한다.

청동기의 미세조직을 분석할 경우 그림 1의 상태도에서 특별히 주목해야할 점은 다음과 같다. 우선 주석함량이 10%를 크게 넘지 않는 합금에서는 주조와 그 이후의 냉각과정에서 냉각속도가 크지 않을 경우 α 단일상이 출현한다. 그러나 주석함량이 10%를 상회하게 되면 제3상인 δ 가 출현하여 상온에서 α 와 공존하게 되며, 합금 내의 주석함량이 32%에 이르게 되면 전 조직이 δ 단일상을 취하게 된다. 그러나 주조 또는 그 이후의 냉각과정에서 담금질과 같은 급랭처리가 수행되면 상온에서 관찰되는 조직에는 큰 변화가 초래된다. 우선 주조과정에서 응고속도를 증가시키면 주석함량이 낮은 합금에서도 α 수지상이 발달하게 되며, 이로 인하여 수지 간에 발생하는 편석현상은 상온에서도 그대로 유지되어 제3상으로 존재하게 된다. 한편 응고가 완료된 후 냉각과정에서 담금질이 수행될 경우에는 온도 범위에 따라 상온에서 존재하는 상의 종류가 달라진다. β 또는 γ 가 존재할 수 있는 온도와 조성 범위에서 담금질 처리가 수행될 경우 β 는 마르텐사이트로 변하게 되며 γ 는 상변태를 겪지 않고 고온에서의 상태를 그대로

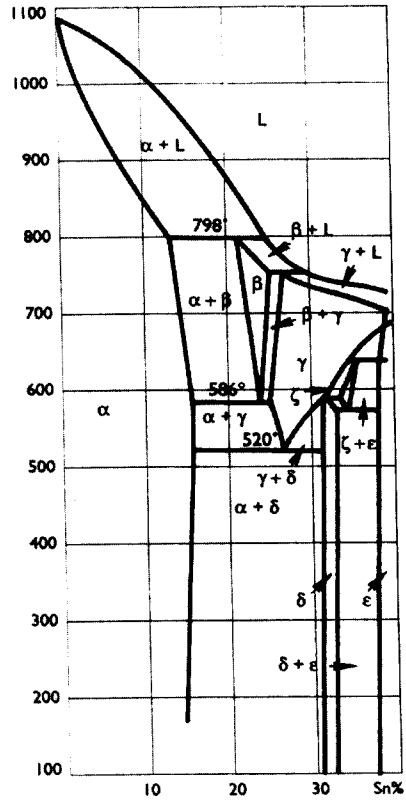


Fig. 1. Cu-Sn phase diagram in annealing.

로 유지하거나 광학현미경으로는 관찰이 불가능할 정도의 미세한 δ 상으로 변하게 된다.

3. 미세조직에 나타난 화학조성 및 열처리 기법

다음에는 앞서 살펴본 Cu-Sn 상태도를 염두에 두고 청동기 유물에서 발견되는 미세조직을 살펴보기로 한다. 그림 2는 익산의 미륵사지에서 출토된 청동과편의 미세조직을 보여주는 광학현미경사진이다. 여기에는 명암상 분명히 구분되는 두 종류의 영역이 자리하고 있는데, 조직의 형태로 보아 어두운 부위는 수지에 해당하며 밝은 부위는 수지 간 영역에 해당함을 알 수 있다. 이 부위의 평균 조성을 분석한 결과 여기에는 10% 정도의 주석과 3.7% 정도의 비소(As)가 합금원소로 포함되어 있었다. 미세한 수지상이 출현하여 응고당시의 원래 모습을 그대로 보존하고 있는 것으로 보아 이 유물은 주조 당시 빠른

Fig. 2. Optical micrograph showing the microstructure of a bronze artifact excavated from the Miruksa temple site.

Fig. 3. Optical micrograph showing the microstructure of a bronze mirror excavated from Choongnam.

속도로 응고되었으며 주조공정이 완료된 후 추가적인 열처리나 두드림 공정을 거치지 않았음을 알 수 있다. 주석함량이 10% 정도로 비교적 낮음에도 불구하고 α 상으로 된 수지와 더불어 수지 간 영역에 제 3의 상이 존재하게 된 데는 빠른 응고속도와 더불어 3.7%에 이르는 비소의 존재가 원인으로 작용한 것으로 판단된다.

그림 3은 기원을 전후하여 충남지역에서 제작된 청동거울의 미세조직사진으로 밝게 보이는 δ 결정립이 주를 이루는 가운데 회색으로 보이는 원형의 작은 구역에 납(Pb)이 소량 포함되어 있는 것으로 밝혀졌다. 그림 1의 상태도를 참고할 경우 이 유물 제작에는 주석함량이 30%를 상회하는 청동합금이 사용되었음을 알 수 있다. δ 상의 취성이 높아 이를 대상으로 하는 어떠한 기계가공도 불가능한 점을 고

Fig. 4. Optical micrograph showing the microstructure of a bronze mirror excavated from the Miruksa temple site.

려할 때 이 유물 또한 그림 2의 유물과 마찬가지로 주조 외에 다른 처리과정을 거치지 않았을 것으로 판단된다.

그림 4는 그림 2의 유물과 함께 익산 미륵사에서 출토된 청동거울의 미세조직사진이다. 여기에서는 검은색 또는 회색으로 보이는 수지형상의 α 영역과 그 사이의 밝은 곳에 형성된 $\alpha+\delta$ 의 공석영역이 확인된다. 조성분석 결과 이 시편에는 평균 약 20%에 달하는 주석이 함유되어 있는 것으로 나타났다. 조직의 특성으로 보아 이 유물은 주조 당시 비교적 느린 속도로 응고되었으며 이후 추가적인 처리 없이 서서히 냉각되었음을 알 수 있다.

그림 5는 경주지방에서 출토된 청동거울의 광학현미경 조직사진이다. 여기에는 응고당시의 형상을 일부 유지하고 있는 α 영역이 밝게 나타나 있으며 그 배경에는 어둡게 보이는 γ 상을 바탕으로 밝은 곳에 바늘 형상의 마르텐사이트 상이 자리하고 있다. 이 시편의 평균 주석함량은 24% 부근인 것으로 밝혀졌다. 마르텐사이트 조직은 주조공정 이후 이 유물에 급랭처리가 실시되었음을 말해준다. 주석함량이 24%임에도 불구하고 α 와 γ 상이 함께 관찰되고 있는 점으로 보아 담금질 온도는 586°C를 기준으로 이보다 그리 높지 않았던 것으로 추정된다.

그림 6은 고려시대의 분묘에서 출토된 수저의 미세조직을 보여주는 광학현미경사진이다. 이 그림에는 바늘 형상의 마르텐사이트 조직을 배경으로 쌍정을 포함하는 α 결정립이 자리하고 있다. 이 시편의 주석함량은 약 22%로 추정된다. 그림 6을 그림 5와

Fig. 5. Optical micrograph showing the microstructure of a bronze mirror excavated from Kyongju.

Fig. 6. Optical micrograph showing the microstructure of a bronze spoon made in Koryo.

비교해보면 몇 가지 유사점과 차이점이 발견된다. 우선 배경을 이루고 있는 조직에 마르텐사이트 상이 출현하고 있는 것으로 보아 비교적 높은 온도에서 담금질 처리가 수행된 것이 분명하며 이는 양자에서 동일하다. 그러나 그림 6에서 바탕조직 전체가 마르텐사이트로 구성된 점은 그림 5와 구별되는 부분이다. 이것은 그림 6의 시편이 훨씬 높은 온도에서 급랭되었음을 의미한다. 또 하나의 차이점으로는 그림 5에서와는 달리 그림 6의 α 결정립 내에는 쌍정이 존재한다는 사실을 들 수 있다. 이는 이 시편에 재결정이 초래되었음을 보여준다. 재결정 현상은 시편 내에 소성변형에 의한 내부에너지가 축적되었을 경우에 한하여 발생하는 현상으로 이것은 이 시편에 두드림에 의한 변형가공 작업이 수행되었음을 단적으로 보여준다. 그림 6에서 발견되는 조직상의 특징으로 보아 이 유물의 제작에는 주조공정과 더불어 두드림

공정이 함께 실시된 것으로 판단된다. 이것은 주조에 만 의존하여 유물의 외형을 완성하기 어려웠음을 시사한다. 한편 그림 6에서 확인되는 급랭처리의 흔적은 두드림이 완료되는 시점에 담금질 처리가 수행되었다는 사실을 말해줌과 동시에 두드림 작업이 실시된 온도범위가 600°C 를 훨씬 상회하였음을 의미한다.

그림 7은 경주에서 출토된 청동편의 미세조직을 보여주는 광학현미경사진이다. 비교적 밝은 영역은 α 상에 해당하며 어둡게 보이는 배경에는 γ 상이 자리하고 있다. 이 시편의 주석함량은 19% 정도인 것으로 나타났다. 그림 1의 상태를 기준으로 할 때 주석함량 19%인 합금의 상조직에 γ 상이 존재하려면 γ 구역에서 급랭처리가 실시되어야 한다. 이 유물은 주조공정을 거친 후 냉각되는 동안 또는 그 후 별도로 실시된 공정을 통하여 $520\text{-}586^{\circ}\text{C}$ 의 구간에서 담금질 처리된 것으로 보인다.

그림 8은 고려시대의 분묘에서 출토된 젓가락의 미세조직을 보여준다. 이 유물에는 약 22%의 주석이 포함되어 있는 것으로 밝혀졌다. 밝은 곳에는 α 상이 그리고 어둡게 보이는 바탕에는 γ 상이 자리하고 있다는 점에서 그림 8의 조직은 그림 7과 유사하다. 이는 이 유물에도 앞서 그림 7의 유물에서와 같이 주조 후 $520\text{-}586^{\circ}\text{C}$ 의 구간에서 담금질 처리가 수행되었음을 의미한다. 그러나 그림 8의 경우 그림 7에서와는 달리 α 영역 내에 쌍정이 존재하고 있으며, 또한 γ 상으로 된 바탕조직 내에는 젓가락 형상의 미세한 α 상이 석출되어 있다. 쌍정의 출현은 앞서 그림 6의 조직에서와 마찬가지로 이 유물의 제작에도 주조공정이 완료된 후 두드림에 의한 변형가공 작업이 수행되었음을 의미한다. 한편 바탕에 석출된 미세한 α 상에 관하여는 다소간의 설명이 필요하다. 이와 같은 α 상은 마르텐사이트 상을 뜨임처리할 때 출현하는 것으로 이 시편에 β 영역에서 담금질 처리된 이력이 있음을 말해준다. 이 유물은 담금질 처리가 끝난 후 다시 γ 영역으로 가열되었다가 급랭된 것으로 보인다. 이 같이 복잡한 열처리가 수행된 이유는 알 수 없으나 그림 8에 나타난 조직상의 특징으로부터 제작과정을 추정하면 다음과 같다. 우선 주조에 이은 급랭처리 과정을 거쳐 제품의 대략적인 형태를 만드는 작업이 1차적으로 완료되었으며, 이후 형태가공을 마무리하기 위하여 γ 영역으로 가열한

Fig. 7. Optical micrograph showing the microstructure of a bronze piece excavated from Kyongju.

Fig. 8. Optical micrograph showing the microstructure of a bronze chopstick made in Koryo.

다음 두드림 작업을 수행하였다면 그림 8에 보이는 조직이 형성될 수 있으며 이후 실시된 담금질 처리를 통하여 고온에서의 조직이 그대로 보존된 것으로 볼 수 있다.

그림 9에는 경주에서 출토되었으며 약 22%의 주석을 포함하는 청동수저의 미세조직이 나타나 있다. 여기에는 α 와 δ 가 혼합된 공석조직을 바탕으로 그 내부에 쌍정을 포함하는 α 결정립들이 산재해 있다. α 와 δ 로 이루어진 공석조직의 존재는 냉각속도가 비교적 완만하였음에 기인하며, 쌍정은 앞서 살펴본 그림 6과 8에서처럼 유물 제작과정에 두드림에 의한 변형가공작업이 수행된 결과 출현한 것으로 볼 수 있다. δ 상이 존재하는 한 두드림에 의한 변형가공이 거의 불가능한 점을 고려할 때 두드림 작업이 상온에서 이루어졌다고 보기는 어려우므로 β 또는 γ 영역에 해당하는 고온에서 두드림 작업이 수행되었으며

Fig. 9. Optical micrograph showing the microstructure of a bronze spoon excavated from Kyongju.

이후 비교적 느린 속도의 냉각과정을 거친 것으로 판단된다.

4. 고 찰

상기한 미세조직 관찰 결과를 바탕으로 우리나라의 고대 청동기제작 기술체계를 논할 경우 합금설계 단계와 제품제작 단계에서 다음과 같은 몇 가지 중요한 사실이 발견된다. 우선 합금설계 면에서 주목되는 점은 청동소재의 주요 구성성분인 구리와 주석 외에 그림 2와 3에서 각각 비소와 납의 존재가 발견된다는 사실이다. 청동기 제작에 납을 첨가하는 것은 흔히 있던 일로 그 자체가 문제될 것은 없다. 그러나 납의 첨가와 더불어 제작과정에서 작업조건을 달리하였을 가능성이 있다는 점과 납의 함량을 정하는 기준이 무엇이었는지, 납을 첨가함에 기술적 측면에서의 필요성은 무엇이었는지, 그리고 납의 첨가유무에 시대와 지역에 따른 특수성이 있었는지 등은 앞으로의 연구에서 중점 취급되어야 할 중요한 문제점으로 부각된다.

합금설계의 측면에서 반드시 언급되어야 할 사항은 특수 원소인 비소(As)의 존재이다. 비소는 주석과는 달리 합금제작 단계에서 의도적으로 첨가된 것이 아니라 구리광석 내에 포함되어 있던 것이 제련과정에서 우연히 포함되게 된 것으로 그 함량을 미리 정하거나 조절하기는 사실상 불가능하였다. 그러나 청동기 문화가 시작되는 단계에서 이의 역할은 지대하였으리라는 것이 일반적인 견해이다. 즉, 비소함유 광석을 제련하여 생산된 구리제품은 그렇지 아니한 경우에 비하여 강도 면에서 월등히 우수하였을 것이

며 이는 고대의 기술자들에게 합금에 대한 개념을 심어주는 계기가 됨으로써 결국은 주석 청동기 시대의 도래가 가능하였다는 것이다. 현재 고고학계의 청동기 관련 서적이나 학술지에서 발견되는 일반적인 견해에 따르면 합금설계의 측면에서 서구의 청동기 문화가 순수한 구리 단계에서 구리-비소 합금 단계를 거쳐 구리-주석 합금 단계로 발전하였음에 비하여 중국을 중심으로 하는 동아시아에서의 청동기 문화는 순수한 구리에서 곧바로 구리-주석 합금 단계로 발전하였다는 결론에 도달한다. 이는 청동기 문화에 대한 연구가 최근에 이르기까지 주로 서양학자들에 의하여 이루어졌음에 기인하는 것으로 그림 2의 결과는 이러한 통념이 재고되어야함을 강력히 시사한다. 물론 그림 2의 유물이 세계 청동기 문화의 틀 속에서 보면 비교적 늦은 시기에 제작되었으며 이 당시에는 이미 주석의 사용이 일반화되어 있었으므로 이 유물을 바탕으로 비소합금 사용단계에 대한 결론을 내리기는 어려울 것이다. 그러나 필자의 연구결과에 의하면 우리나라에서는 이른 시기부터 비소를 첨가한 청동제품이 제작되고 있었으며 이 경우 제작기법 면에서도 그 방법을 달리한 명백한 증거가 발견된다. 이러한 사실은 비소청동에 관련된 기술이 일찍부터 확립되어 있었음을 의미하는 것으로 주석에 의한 합금 효과를 인식하기 전에 비소에 의한 효과가 먼저 인식되었을 가능성이 높음을 시사한다. 이에 대한 가능성은 앞으로의 연구에서 반드시 고려되어야할 주제를 제공하며 한반도와 만주를 포함하는 동아시아 지역에서 전개된 청동기 문화의 발전과정을 밝히는 연구에 실마리를 제공하게 될 것이다.

합금설계 단계에서 주목되는 또 하나의 사실은 주석을 첨가함에 청동기의 기계적 성능을 제고하기 위하여 필요한 정도 이상으로 그 함량을 높게 책정하였다는 점이며, 이와 더불어 어느 시점에서부터가 그 함량이 20-24%를 목표로 조절된 흔적이 발견된다는 점이다. 그림 1의 상태도를 보면 주석함량이 13%를 상회할 경우 상온에서 8상이 석출되는 것을 막을 수 없으며 이의 출현은 청동합금의 취성을 크게 증가시켜 무기나 도구로서의 성능을 저하시킬 뿐 아니라 제작과정에서도 두드림 작업을 사실상 불가능하게 한다. 만일 그 사용처가 충격에 노출될 가능성이 낮은 경우라면 주석함량이 높은 것이 문제가 되지 않을

수 있으며 또한 제작단계에서도 주조 외의 다른 공정이 도입되지 않는다면 이것이 오히려 도움이 될 수 있다. 그러나 여기에는 앞으로의 연구에서 반드시 밝혀져야 할 몇 가지 중요한 문제가 내포되어 있다. 우선은 주석공급에 따르는 어려움을 어떻게 극복하였는지에 대한 의문이다. 고대 한반도에 구리와 주석 제련상황이 어떠한지 알려진 사실이 많지 않으므로 이에 대한 연구가 수행되어야함은 분명하다. 그러나 광산의 분포상황이나 매장량의 측면에서 어떠한 경우에도 구리에 비하여 주석의 생산에 제한이 심하였을 것은 분명하다. 이는 우리나라에만 국한되는 것이 아니라 극히 일부 지역을 제외하면 전 세계가 겪은 일반적인 현상으로 고대의 주석공급에 얽힌 미스터리는 고고학 연구에서 풀어야할 하나의 과제로 남아있다. 주석공급에 전혀 문제가 없었다할지라도 기계적 성능이나 제작과정 면에서 득보다 실이 클 것이 자명한 상황에서 굳이 주석함량을 높게 된 이유를 현재로서는 알 수 없으나 그 배경에 무엇이 절박한 사정이 있었을 것은 분명하다. 이 문제는 앞으로의 연구에서 심도 있게 다루어져야 할 것이나 이에 관련되어 한 가지 고려되어야 할 사항으로는 주석함량에 따라 청동기의 색조에 변화가 초래되는 점을 들 수 있다. 주석함량이 증가하게 되면 청동기의 색조에는 순 구리에서 볼 수 있는 붉은빛이 감소되면서 황금빛이 드러나게 되며 결국은 백색으로 변하게 된다. 앞서 살펴본 유물이 모두 철기와 함께 사용된 점으로 미루어 보아 이들에 무기나 도구로서의 실용성 보다는 의기로서의 기능이 강조되었을 가능성이 있으며 그렇다면 합금설계 단계에서 주석함량을 높여 외부로 드러나는 색조를 조절하는 것은 필연이었을 것이다. 제작과정이나 사용도중 발생할 수 있는 다소간의 충격에 대비하여 이들의 충격저항을 높이기 위한 방도가 적극적으로 강구되었을 것이다. 위에서 살펴본 몇몇 유물의 미세조직에는 이를 위하여 시도된 기술의 변천과정이 비교적 상세히 드러나 있다.

제품제작 단계는 다시 주조공정과 열처리 및 두드림 공정으로 나누어 생각할 수 있다. 제한적이기는 하나 지금까지 수행된 필자의 연구결과에 의하면 주석함량이 높은 청동기 제작에 주조와 더불어 두드림 작업이 실행된 것은 삼국시대 또는 통일기에 해당하

는 비교적 늦은 시기로 이 기간에는 청동기 문화 도입단계를 대표하는 청동 거울이나 청동 거울 보다는 각종 그릇이나 수저 등 생활용품의 제작이 두드러졌던 것으로 판단된다. 이 경우 거울이나 거울에서와는 달리 주조만으로 복잡한 형상을 제작하기 어려운 경우가 빈번하게 발생할 수 있으며 따라서 주조를 거쳐 대강의 형태가 얻어진 다음 더욱 정밀한 형태가 공을 목표로 추가적인 두드림 작업을 수행해야 할 필요가 자연스럽게 발생하였을 것이다. 많은 사람들이 이른 시기에 제작된 청동 거울에서 발견되는 복잡하고 세밀한 문양을 보고 그에 적용된 주조기술이 뛰어났을 것으로 판단하고 있다. 그러나 필자의 실험 결과에 따르면 주석함량의 증가에 따라 청동합금의 주조성은 크게 향상되어 그 함량이 10%를 넘을 경우 주형제작에 필요한 기술이 허락하는 한 복잡한 문양을 위한 주조공정 자체에는 그렇게 높은 기술이 필요하지 않은 것으로 밝혀졌다. 실제로 그림 3과 4의 거울에는 주조 외의 다른 공정이 수행되지 않은 것으로 나타났다. 이에 비하여 실용 용기에서와 같이 전체적인 형상 자체가 복잡한 상황에서 제품벽면의 두께 또한 제한되는 경우라면 두드림 작업에 의존하지 않고는 완제품 생산이 사실상 불가능할 수 있다.

그림 5, 6, 7, 8에는 이를 해결하기 위하여 시도되거나 개발된 기술의 흔적이 나타나 있다. 이들 미세조직에는 그림 1에 보인 상태를 기준으로 할 때 가능한 모든 경우의 기술이 시도된 사실이 담겨있다. 우선 그림 3, 4 및 5가 용도 면에서 차이가 없는 거울의 조직임에도 불구하고 주석함량 면에서 이른 시기에 제작된 그림 3의 유물과 후대에 제작된 나머지 두 유물 사이에 큰 차이가 발견되는 것은 우연이 아니라 진보된 기술의 결과로 보아야 할 것이다. 주석함량이 그림 3에서와 같이 30%를 상회할 경우 어떠한 처리를 통하여도 두드림 작업이 불가능할 뿐 아니라 제품의 색조 또한 크게 개선되지 않는 점을 감안하여 후대에 제작된 그림 4와 5의 거울에서는 주석함량을 대폭 낮춘 것으로 판단된다. 주석함량 면에서의 상한선은 이러한 과정을 거쳐 시간의 경과와 함께 설정되었을 것이다. 그림 4와 5의 거울은 주석함량 면에서 차이가 있기는 하나 그림 1의 상태대에서 이들이 모두 $\alpha + \beta$ 또는 $\alpha + \gamma$ 의 영역에 자리한다는 점에서는 동일하다. 이에 비하여 열처리 면에서는

큰 차이가 발견된다. 그림 4의 조직은 서서히 냉각된 조직임에 비하여 그림 5의 조직은 적어도 586°C 이상에서 급랭된 조직이다. 여기에서 제기될 수 있는 질문은 과연 이러한 열처리가 의도된 것인지 아니면 우연인지에 대한 것이다. 이에 대한 대답을 구하기에 앞서 나머지 조직을 살펴볼 필요가 있다. 그림 6에는 그림 5에서 볼 수 있는 담금질 열처리 흔적과 더불어 두드림 작업에 의한 변형의 흔적이 담겨있다. 이는 주석함량이 22%에 이르는 청동합금에서도 작업 온도를 적절히 조절해 줄 경우 두드림에 의한 변형공이 가능함을 보여준다. 그림 7과 8은 주석함량 면에서나 열처리 면에서 그림 5와 6의 관계와 동일하나 단지 담금질 처리 온도에 차이가 있다. 그림 7과 8의 바탕에는 마르텐사이트 대신 γ 의 존재가 확인되는데 이는 520-586°C 영역에서 실시된 급랭 처리에 기인한다. 그림 9에서도 두드림에 의한 변형의 흔적이 발견되나 이 유물은 그림 6과 8의 것과는 달리 두드림 작업이 완료된 후 비교적 서서히 냉각된 것으로 보인다.

위의 결과로 보아 주석함량이 20%를 상회하는 청동기의 제작에 두드림 공정이 가능함은 분명하며 미세조직 상에서 발견되는 여러 가지 처리의 흔적에는 이를 가능하게 하는 작업조건에 대한 정보가 담겨 있다. 이에 대한 이해를 얻기 위하여 본고에서는 간단한 실험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

그림 10a, 10b, 10c는 로크웰 B 스케일에 의한 압입실험 결과 조직 내에 발생한 변형을 보여주는 사진으로 압입 흔적은 모두 좌측 단에 나타나 있다. 그림 10a는 주석함량 20%인 청동합금을 공기 중에서 주조한 조직으로 밝게 보이는 넓은 부위에는 α 상이 그리고 이들 사이에는 α 와 δ 로 이루어진 공석 조직이 자리하고 있다. 여기에서는 압입 흔적 우편의 공석 영역에 크랙이 생성된 것을 볼 수 있다. 그림 10b는 주석함량 24%의 청동합금을 700°C에서 담금질하여 얻어진 마르텐사이트 조직을 보여준다. 여기에는 압입자의 하중에 의하여 우측 하단을 향하는 대각선 방향으로 슬립라인이 형성되어 있다. 그림 10c에는 주석함량 26%인 청동합금을 700°C에서 담금질 처리하여 얻어진 γ 조직이 형성되어 있으며 여기에서도 압입자의 우측으로 슬립라인이 관찰된다. 이상의 실험결과는 주석함량이 높은 청동합금에서도

하는 실제의 두드림 작업에서는 더 큰 변형도 수용될 수 있음을 뜻한다.

이상의 결과를 바탕으로 앞서의 미세조직에 나타난 기술의 변천과정을 재조명하면 다음과 같은 흥미로운 사실이 발견된다. 우선 합금설계 단계에서 주석함량이 20-24%의 범위를 목표로 정하여진 점과 그림 1의 상태도에서 그 중앙에 해당하는 22%에 포정점이 자리하고 있음이 주목된다. 앞으로 연구가 진행됨에 따라 이들의 상관관계에 대한 자세한 이유가 밝혀지겠지만 주석함량이 24%를 넘을 경우 취성이 급격하게 증가할 수 있다는 점과 20%를 밑돌 경우 색조나 주조성에 문제의 소지가 있을 수 있음을 지적해둔다. 한편 기술의 발전단계를 기준으로 유물의 제작 시기를 추정하자면 우선 주조 이외의 별다른 처리의 흔적이 없는 그림 2, 3, 4의 유물이 이른 시기에 오게 될 것이다. 그 다음으로는 주조 후 담금질 처리만을 거친 그림 5와 7의 유물이, 그리고 두드림 흔적은 있으나 최종 단계에서 담금질 처리가 수행되지 않은 그림 9의 유물이 그 뒤를 따를 것이며 두드림과 담금질 처리가 모두 수행된 그림 6과 8의 유물이 마지막에 자리하게 될 것이다. 그림 2, 3, 4 중에서도 그림 3의 주석함량이 30%를 상회하는 점으로 보아 이 유물이 제작되는 시기에는 아직 22%가 갖는 의미가 인식되지 않았던 것으로 판단할 때 이를 가장 이른 시기에 둘 수 있을 것이다. 그림 6과 8의 경우에도 후자의 유물에서 확인되는 복잡한 열처리 및 가공과정으로 보아 그림 8의 유물이 후대에 제작된 것으로 추정된다. 앞서 살펴본 유물 대부분의 제작 시기가 분명하지 않으나 그림 3의 유물이 가장 이른 시기에 위치하며 그림 6과 8의 유물이 가장 늦은 시기에 제작된 점은 확실하며 이는 기술 수준에 근거하는 본 고에서의 추정과 일치한다. 향후 연구의 진행과 더불어 청동기 기술체계를 바탕으로 하는 시대구분이 고고학적 편년체계 설정에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 10. Optical micrograph showing the microstructure of a bronze specimen and the Rockwell indentation made on the left edge. (a) 20%Sn, as-cast, (b) 24%Sn, quenched from 700°C, (c) 26%Sn, quenched from 700°C.

담금질 열처리를 통하여 마르텐사이트 또는 γ 상을 석출시킴으로써 δ 상의 출현을 억제할 경우 그 취성이 크게 완화될 수 있음을 분명히 보여준다. 특히 그림 10b와 10c에 보인 조직은 상온에서 관찰된 것으로 현재 이들은 그 모체인 β 나 γ 상에 비하여 크게 다른 상황에 있음이 분명하다. 그럼에도 불구하고 압입자의 하중에 의하여 발생된 슬립라인은 모체의 결정구조를 반영하고 있다. 이것은 그림 6과 8의 조직에서 확인되듯이 고온에서 이들 모체를 대상으로

5. 요약 및 제언

기원을 전후하는 시기로부터 고려시대에 이르기까지 우리나라에서 제작된 청동기 유물의 미세조직을 분석한 결과 청동기 제작에 적용된 기술은 유물의

의형이나 문양만큼이나 다양한 변화를 겪었던 것으로 밝혀졌다. 분석된 유물의 수량이 제한되어 시대나 지역을 달리하며 전개되었던 기술체계의 보편성이나 특수성을 밝힐 수는 없었으나 앞으로의 연구에서 중점적으로 제기되어야 할 문제점에 대한 윤곽은 분명히 드러난 것으로 판단된다. 청동기 제작에 관련된 기술의 특성을 논하자면 합금설계와 제작방법의 두 가지 측면이 동시에 고려되어야 한다. 합금설계 단계에서는 합금에 첨가되는 원소의 종류와 함량이 결정되며 여기에는 구리, 주석, 납 등의 금속소재를 생산하는 제련과정에서부터 이들을 혼합하여 유물제작에 필요한 합금을 생산하는 제련 과정이 포함된다. 실 제품 생산에 적용되는 제작방법은 주조와 그 이후에 실시되는 두드림 및 각종 열처리 공정을 조합하여 결정된다. 합금설계와 제작방법 간에는 불가분의 관계가 있으며, 이들은 고대사회가 처해있던 정치, 경제, 문화 및 지역적 특색을 반영하여 각기 다른 형태로 조합되어 하나의 독특한 청동기 제작기술체계를 이루어 갔을 것으로 보인다.

합금설계 면에서 주석과 함께 납과 비소가 합금원소로 사용되었음은 이미 알려진 사실이므로 새로울 것이 없다. 그러나 각 원소의 첨가유무와 정확한 함량이 어떤 근거에 의하여 결정되었으며 이것이 제작방법을 선택함에 어떠한 영향을 미쳤는지, 그리고 이러한 기술적 고려와 선택이 시기와 지역을 달리하며 어떻게 변천되어 왔는지 그 역사적 전개과정에 대한 질문은 청동기 기술체계를 밝히는 연구의 핵심으로 볼 수 있다. 여기에서 가장 주목되는 것은 우리나라에서 제작된 많은 청동기가 기계적 성질이나 가공방법 등의 기술적 측면에서 요구되는 적정 수준을 훨씬 상회하는 주석을 함유하고 있다는 사실이다. 한편 기원을 전후하여 제작된 일부 유물에서 30%를 상회하던 주석함량이 시간의 흐름과 더불어 22%를 지향하여 변천되어 왔으며 이 조성이 그림 1의 상태도에서 포정점이라는 특별한 위치에 해당한다는 사실은 우연으로 돌릴 수 없는 중요한 의미를 지닌다. 이러한 변화가 시간과 공간의 범주에서 정치 및 사회 상황과 맞물려 어떠한 경로를 거쳐 일어났는지 그리고 이를 통하여 우리 조상들이 의도한 바는 무엇이었는지 등에 관한 충분한 연구가 요망된다.

제작방법에서의 가장 큰 특징은 주석함량이 20%를

상회하는 청동제품 제작에 두드림 공정을 도입하기 위하여 시도된 각종 열처리 흔적이라고 볼 수 있다. 이른 시기에 만들어진 유물이 대부분 주조공정만을 거쳐 제작된 반면 후대로 오면서 유물제작에 주조와 병행하여 두드림 작업이 실행된 점으로 보아 청동기 문화 자체에 심각한 변화가 있었던 것으로 추정된다. 주조만으로 필요를 충족시킬 수 있었던 이른 시기와는 달리 청동기의 용도와 종류가 다양해지면서 이를 만족시키기 위한 기술혁신에 대한 동기가 강하게 부여되었던 것으로 판단되며, 자체적인 노력이나 외부에서 도입되는 정보에 의존하여 새로운 기술개발이 가능하였던 것으로 보인다. 그림 8의 유물이 제작되는 시기에는 이미 그림 1의 상태도에 나타나 있는 모든 영역에 대한 실험이 완료됨으로써 열처리와 이로부터 출현하는 조직의 기계적 성질에 관한 상관관계가 밝혀져 있었던 것으로 여겨진다. 이러한 변화와 기술혁신을 유도한 진정한 동기는 무엇이었는지, 이것이 시대와 지역을 배경으로 어떻게 전개되었는지, 특정 기술이 한반도에 최초로 등장한 것은 언제 어디에서였는지, 그리고 이를 주도했던 사람과 집단과 고대사회의 정치 및 사회상황은 어떠한 것이었는지에 대한 질문이 앞으로의 연구에서 심도 있게 제기되어야 할 것이다. 이를 위하여서는 여러 유적지에서 발굴되는 다양한 청동기 유물을 대상으로 하는 전문적인 분석 연구가 수행되되 본고에서 제시된 바와 같이 합금설계와 제작방법에 관련된 세세한 기술적 측면을 종합적으로 고려함으로써 기술체계의 시대와 지역에 따른 특수성과 보편성을 밝히려는 분명한 목표 하에 연구가 진행되어야 할 것이다.

마지막으로, 주석함량이나 두드림 및 열처리 조건에 따른 청동합금의 기계적 성질, 색감, 주조성 및 가공성 등에 대한 정밀한 자료를 얻기 위한 재현실험이 필요함을 언급해둔다.

참고문헌

1. 박장식, 지태구; 청동합금의 열처리시 출현하는 미세조직, 한국열처리공학회 2001년도 추계학술발표대회, 경상대학교 공과대학(진주), 2001년 10월, p. 46-47.
2. 박장식, 지태구; 청동기 유물에서 발견되는 고대의 열처리 기법, 한국열처리공학회 2001년도 추계학술발표대회, 경상대학교 공과대학(진주), 2001년 10월, p. 48-49.

3. 최광진, 지태구, 박장식; Cu-35%Sn 합금의 일방향 열처리에서 출현하는 미세조직, 열처리공학회지, 제16권 제6호 (2003), p. 320-328.
4. 최광진, 박장식; 고려 청동기 유물의 제작기법에 관한 연구, 열처리공학회지, 제17권 제1호 (2004), p. 2-11.
5. 김원용, 한국고고학개설 제3판, 일지사, 1986, pp. 60-70.
6. D. N. Lee, H. J. Lee; Metallurgical Characteristics of Jing and Kkwenggwari (percussion instruments), Proceedings, The Fifth International Conference on the Beginning of the Use of Metals and Alloys (BUMA-V), Kyongju, Korea, pp. 249-259.