전통기술로 제작된 방짜유기의 열간 단조 과정별 미세조직 변화

이재성 | 전익환* | 박장식**,¹

국립문화재연구소 문화재보존과학센터, *경기도박물관, **홍익대학교 재료공학과

Microstructural Change by Hot Forging Process of Korean Traditional Forged High Tin Bronze

Jae-sung Lee | Ik-hwan Jeon* | Jang-sik Park**,¹

Cultural Heritage Conservation Science Center, National Research Institute of
Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

*Gyeonggi Provincial Museum, Yongin, 17072, Korea

**Department of Materials Science & Engineering, Hongik University, Sejong, 30016, Korea

¹Corresponding Author: jspark@hongik.ac.kr, +82-44-860-2562

초 록 현재 유기공방에서는 전통기술로 하나의 방짜유기 숟가락을 만들기 위해 10단계의 작업 공정을 거쳤으며, 형태 제작에 큰 영향을 주는 열간 단조는 3~4단계의 과정을 거친다. 열간 단조를 통해 방짜유기 숟가락의 미세조직은 수지형상의 α 상이 미세화되고 잘게 분산되었으며, 두드림이 가해진 부분의 α 상에는 쌍정이 생성되었다. 또한 α 상은 가해지는 망치질에 따라 점점 다각형에서 원형으로 변형되었다. 이 과정에서 서로 근접한 α 상은 합쳐지는 현상이 발생하였고, 담금질 후에도 합쳐진 상태로 존재하였다. 이처럼 여러 개의 α 상이 합쳐진 미세조직은 방짜조성의 청동유물에서도 관찰되는 것으로 기술체계의 연관성을 보여준다. 방짜조성의 Cu-22%Sn 합금을 대상으로 실시한 열간 단조 실험 결과, 주조 당시 형성된 수지상의 감소율은 가공횟수에 따라 비례했으며, 두드림 작업에 의한 결정립의 미세화는 재질의 강도를 높이는 효과를 준 것으로 판단된다. 고대 유적에서 출토된 청동유물과 전통 유기공방에서 만든 방짜유기에서 동일하게 관찰되는 메자국은 문헌으로 남아 있지 않은 고대의 방짜유기 기술체계가 오늘날의 방짜유기 전통기술로 전승되었음을 보여준다.

중심어: 전통기술, 방짜유기, 열간 단조, 미세조직

ABSTRACT Currently, the fabrication of a high-tin bronze spoon by traditional manufacturing techniques involves 10 steps in the bronze ware workshop. Hot forging has a major influence on manufacturing and involves two to three steps. The dendritic α -phase in the microstructure of the high-tin bronze spoon is refined and finely dispersed through hot forging. In addition, twinning is observed in the α -phase of the hammered part, and the α -phase microstructure gradually transform from a polygon to a circular shape due to hammering. In this process, the adjacent α -phases overlap with each other and remain combined after quenching. The microstructure with the overlapping is also observed in bronze artifacts, and this shows the correlation with technical system. The results of the experimental hot forging of Cu-22%Sn alloys show that the decrease in in the amount of the dendritic microstructure, which forms during casting, is in proportion to the number of processing steps and that the refined grain obtained by hammering contributes to the improvement in the strength of the material. From the hammering marks, which are observed on both the bronze artifact excavated from archaeological

sites and on the high-tin bronze spoon produced in the traditional workshop, it is presumed that the knowledge regarding the unrecorded manufacturing system of bronze ware in ancient times has been passed down in a traditional way up to the system used currently.

Key Words: Traditional techniques, Forged high tin bronze, Hot forging, Microstructure

1. 서 론

한국의 전통 방짜유기 제작에는 구리 1근에 주석 4냥 5돈을 정확한 비율로 섞어 만든 합금이 사용되며 고온에서의 두드림 작업과 담금질 처리가 동원된다. 옛부터 질이 좋은 유기는 전통적으로 유기제작 방법인 방짜기법으로 제작했는데, 이는 떨어뜨려도 찌그러질 뿐 깨지지 않아 사람들이 매우 선호했다(Ahn, 2002). 하지만 구리 78%와 주석 22%를 정확한 비율로 배합하고 기물이 완성될 때까지 수백 번의 망치질을 가해야 하는 등 까다로운 제작방법 때문에 오늘날 이 기술은 거의 사장 단계에 있으며 극소수의 전통 장인들에 의하여 그 명맥만 이어지고 있다. 특히 전통적인 방짜기법으로 기물을 제작한다고 해도 방짜기술의 가장 중요한 과정인 수백 번의 망치질은 자동 프레스가 대신하고 있어 전통적인 방법으로 방짜유기를 제작하는 공방을 찾기는 매우 어려운 실정이다. 현재 전통기술로 방짜유기를 제작하는 유기공방에서도 많은 노동력이 필요한 그릇보다는 노동력이 적게 필요한 숟가락·젓가락(匙箸) 제작에 집중하고 있다. 방짜유기 숟가락은 첫 번째 단계인 ‘무질가락 만들기’에서부터 최종 단계인 ‘광내기’에 이르기까지 총 10단계를 거쳐 완성된다. 방짜유기 숟가락은 정확한 합금 비율과 수백 번의 망치질, 고온에서의 담금질을 통해 얇은 두께에도 강한 기계적 성질을 가진 우수한 제품을 생산할 수 있다. 이러한 가공기술은 금속재료가 귀했던 고대에 얇고 질긴 합금제품을 만들 수 있는 획기적인 발명이지만 어떠한 이유로 방짜기술이 시작되었는지는 정확하게 밝혀지지 않고 있다. 다만 유적에서 출토되는 유물과 조선후기에 저술된 문헌을 통해 방짜유기의 흔적을 찾고 있을 뿐이다(Lee, 2008; Seo, 2016). 여러 가지로 자료가 부족한 현 시점에서 방짜기술이 시작된 이유를 찾을 수 있는 가장 좋은 방법은 다양한 유적에서 출토되는 유물의 금속조직을 분석하는 방법과 현재 전승되고 있는 전통 방짜기술을 정확하게 분석하는 방법일 것이다(Lee, 2010). 특히 현재 전승되고 있는 전통 방짜기술에 대한 종합적인 조사연구는 역사 속의 방짜기술을 찾을 수 있는 단서를 제공할 것이다.

본 연구에서는 한국민속촌 유기공방에서 재현하는 전통 방짜유기 숟가락의 열간 단조(熱間鍛造) 과정에 따른 변화를 관찰하고, 조선시대에 제작된 청동숟가락과 비교하였다. 또한 열간 단조 작업의 단계별로 시편을 취하여 미세조직의 변화를 관찰하였다. 방짜유기는 가공을 거듭할수록 강도와 경도가 높아지는 것으로 알려져 있기 때문에 단조작업이 금속학적 측면에서 어떠한 효과를 주는지에 대한 실증적인 자료 확보가 필요하며(Jeong *et al.*, 1999), 이를 위해 실험실에서 방짜유기와 동일한 조성의 청동합금을 주조하고, 3차에 걸쳐 열간 단조하는 재현실험을 병행하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 연구대상

전통기술(傳統技術)은 지난 시대에 이미 이루어져 그 후로 계통을 이루어 전해지는 기술로 정의하고 있다(Rural Development Administration, 2018). 구리와 주석을 78:22의 비율로 합금한 청동을 망치로 두들기고 퍼서 모양을 만드는 방짜유기 기술은 국가 및 지방 중요무형문화재로 지정하여 전승하고 있다. 전통기술에 의해 제작되는 방짜유기 숟가락은 10단계의 까다로운 과정을 거쳐 하나의 숟가락으로 완성된다. 제작 순서는 ‘무질가락 만들기 → 손잡이 만들기 → 총메짜기 → 뽕갠질 → 우금질 → 담금질 → 벼

Figure 1. Manufacturing process of forged high tin bronze(Bangjja spoon) in Korean Folk Village.

림질 → 광내기' 과정을 거친다(Lee *et al.*, 2011). 방짜유기 손가락의 형태 가공은 크게 '술잎 만들기'와 '손잡이 만들기'로 나뉜다(Figure 1). 본 연구에서는 열간 단조에 의한 미세조직의 변화를 관찰하기 위해 손잡이보다 많은 형태가 공이 수행되는 '술잎 만들기' 단계에서만 살펴보았다. 또한 술잎을 오목하게 만들기 위한 '우금질' 단계에서도 열간 단조가 수행되지만 미세조직의 변화를 가져올 만큼 두드림 횟수가 많지 않아 본 연구에서는 배제하였다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 열간 단조에 따른 형태 변화의 비교 관찰

한국민속촌의 유기공방에서 전통기술로 제작된 방짜유기 손가락의 열간 단조 과정별 생산품의 형태와 특징을 확인하고, 유사한 제작기법으로 제작된 조선시대의 청동손가락의 특징과 비교 관찰하였다. 또한 전통 유기공방에서 열간 단조 시 사용하는 망치의 종류, 가공방향 등을 관찰하였다.

2.2.2. 미세조직 분석

시편은 집중적으로 열간 단조가 가해지는 술잎 부분에서 채취하고, 연마와 분석을 용이하게 하기 위해 에폭시수지로 마운팅하였다. 자동연마기에서 사포 800번, 1000번, 2400번, 4000번순으로 연마한 다음, 1 μ m diamond suspension으로 미세 연마를 실시하였다. 연마된 시편은 에틸알코올 120 ml, 염산 30 ml, 산화철(III) 10 g을 혼합한 용액으로 부식시켰다. 미세조직 관찰은 반사식 광학현미경(DMRBE, Leica, Germany)을 이용하였으며, 조직 전체를 50배로 확인하고 특징적인 부분을 100배, 200배, 500배로 확대하여

조사하였다. 광학현미경으로는 관찰이 어려운 고배율의 경우에 시편 표면을 카본코팅하여 주사전자현미경(JSM- 6460LV, JEOL, Japan)으로 조사하고, 에너지분산분광계(INCA Energy Oxford 7574, Oxford, UK)로 성분 분석하였다.

2.2.3. Cu-22%Sn 청동 시험편의 열간 단조 비교실험

실험실에서 구리와 주석을 무게비 78:22%의 배합 비율로 섞어 청동합금을 만든 뒤, 총 3차례의 열간 단조를 실시하였다. 열간 단조 조건은 유기공방과 유사한 가열 조건인 700℃의 고온에서 약 10분간 가열한 뒤, 상온에서 약 20회 가량 망치질하였다. 단조 방법은 1차 열간 단조가 끝나면 동일한 조건으로 2, 3차 열간 단조를 실시하였다.

3. 연구 결과

3.1. 방짜 손가락의 가공에 따른 형태 변화

Figure 2는 한국민속촌 유기공방에서 사용하는 다양한 크기와 형태의 망치로 제작 용도에 맞게 사용한다. 끝이 뾰족한 망치는 주로 길게 늘일 때 사용하며, 끝이 둥글고 편평한 망치는 넓게 펴는 용도로 쓰인다. 제작과정에서 수행되는 다양한 방법의 망치질은 방짜유기 손가락의 형태에 많은 변화를 주며, 그 흔적이 완성품에서 '메자국'으로 남는다. 방짜유기에 남아있는 메자국은 제작 과정상 어쩔 수 없이 생기는 가공 흔적으로 유적에서 출토된 방짜유기 조성의 청동유물에서도 흔하게 발견된다.

Figure 3a는 열간 단조를 시작하기 전인 '무질가락' 단계의 손가락 외형으로 앞면과 뒷면이 매끈한 상태이다.

Figure 2. Using hammers in workshop of Korean Folk Village.

Figure 3b는 무질가락을 손가락 형태로 만들기 위한 첫 번째 가공과정인 ‘손잡이 만들기’ 공정에서 열간 단조된 손가락의 외형이다. 앞면에는 메자국이 없으나, 뒷면에는 가공에 의한 메자국이 선명하게 나 있다. 특히 가공 당시 길이 방향으로 늘이기 위해 뾰족한 망치날로 메질한 자국은 일렬로 깊게 패여 있다. 반면 앞면에서는 메자국이 발견되지

않는데, 이는 완성품의 앞면이 되는 부분에 최대한 메자국을 안 남기기 위해 편평한 망치로 두드렸기 때문이다. Figure 3c는 초바닥을 나뭇잎 모양으로 만드는 ‘초바닥 만들기’ 공정에서 열간 단조된 손가락의 외형으로 손잡이 부분과 동일하게 앞면에는 메자국이 없고, 뒷면에만 깊게 패인 메자국이 선명하게 나 있다. 이 과정에서도 뾰족한 망치

(a) Before hammering in Mujilgark(as cast)

(b) Hammering direction and marks in making the handle

(c) Hammering direction and marks in making the bowl of spoon

(d) Hammering marks in quenching

(e) Hammering marks in finished product

Figure 3. Hammering marks by manufacturing process of high tin bronze spoons.

로는 숟가락의 뒷면을 두드려 길게 늘리고, 편평한 망치로는 앞면을 두드려 넓게 편다. Figure 3d는 모든 열간 단조 과정이 끝난 뒤 담금질한 숟가락의 외형으로 표면의 산화 피막이 제거되어 메자국이 더 잘 보인다. 열간 단조 단계에서 둥근 망치로 두드려 넓게 편 숟가락의 앞면에는 메자국이 없는 반면 뾰족한 망치로 길게 늘인 손잡이 뒷면에는 가로방향의 접힌 선이 존재한다. 가질로 표면을 깎아낸 Figure 3e의 최종 완성품에서도 가로방향의 접힌 선은 선명하게 남아 있다. 이 가로방향의 접힌 선은 ‘손잡이 만들기’ 과정에서 길게 늘이기 위해 두드린 뾰족한 망치질 자국으로 계속된 형태 가공에 의해 접히면서 손잡이 중앙에 몰린 것이다. 즉 주물 소재로부터 손잡이를 길이 방향으로 연

신시키는 단조과정 중에 중심선이 겹치고 접힘으로써 발생한다. 이 부분은 α 상과 불순물 편석이 집적되는 취약한 구조의 미세조직 영역으로 고대 방짜숟가락에서는 균열 부위로 관찰된다(Choe *et al.*, 2016).

Figure 4는 조선시대에 만들어진 청동숟가락(경기도박물관 소장)으로 메질에 의해 접힌 선이 손잡이 뒷면에서 뚜렷하게 관찰되어 손잡이 만들기 과정이 지금의 방짜유기 숟가락 제작 방법과 유사했음을 알 수 있다. 한편 청동숟가락은 앞면에서도 20여개 이상의 메자국이 관찰되는데, 이는 두께를 얇게 만들기 위해 안팎으로 많은 망치질을 가한 것으로 보인다.

Figure 4. Partial hammering marks of high tin bronze spoon in the Joseon Dynasty.

(a) Sampling and hammering marks of high tin bronze spoons in the Joseon Dynasty

(b) Microstructure of No.2 spoon (Left: Optics, Right: SEM) (c) Microstructure of No.1 spoon (Left: Optics, Right: SEM)

Figure 5. Optical and SEM micrographs in the Joseon Dynasty.

3.2. 유물에서 관찰되는 가공 부위에 대한 미세조직 분석

Figure 5a는 조선시대 청동술가락 2점의 외형을 보여주는 사진으로 형태 제작에 가해진 망치질 흔적이 술잎 부분에서 집중적으로 관찰된다. 형태가 서로 다른 두 점의 방짜술가락은 메질 흔적에서도 차이를 보인다. No.1 청동술가락의 메질은 일률적인 패턴 없이 넓게 형성된 반면 No.2 청동술가락의 메질은 길이 방향으로 길게 형성되었다. Figure 5b는 No.1 청동술가락의 술잎 부분 미세조직을 보여주는 사진으로 미세한 바늘형상의 마르텐사이트(β 상) 바탕에 α 상이 광범위하게 분포하고 있다. 마르텐사이트 상은 586°C 이상의 온도인 β 영역에서 담금질할 경우 출현하는 조직으로 이 유물에 급랭처리가 수행되었음을 보여준다. 또한 α 상의 결정립 내의 직선경계에 쌍정이 보이는데, 이는 비교적 높은 온도에서 두드림과 같은 작업을 통해 심각한 변형을 받아 재결정이 이루어졌음을 의미한다(Park and Yu, 2004). 미세조직 전체 구성에 대한 SEM-EDS 면분석 결과, 납(Pb)은 검출되지 않고 77.96 wt%의 구리(Cu)와 22.04 wt%의 주석(Sn)이 주성분으로 분석되었다. Figure 5c는 No.2 청동술가락 술잎 부분의 미세조직을 광학현미경과 전자현미경으로 관찰한 사진으로 마르텐사이트(β 상) 바탕에 α 상이 광범위하게 분포하고 있다. 미세조직 전체 구성에 대한 SEM-EDS 면분석 결과, 주성분인 구리에 주석을 21.42 wt% 포함하고 있어 방짜유기의 조성과 일치하는 것

으로 나타났다. Figure 5a의 방짜술가락 두 점의 성분과 미세조직은 서로 유사하지만 α 상의 형태에서 차이를 보인다. No.1 방짜술가락의 α 상은 둥글고 조밀한 반면 No.2 방짜술가락의 α 상은 길이방향으로 조대화된 덩어리 형태를 가진다.

3.3. 방짜유기 술가락의 가공에 따른 미세조직 변화

3.3.1. 주조: '무질가락 만들기' 단계

Figure 6a와 6b는 '무질가락 만들기' 단계에서 관찰되는 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. Figure 6a에서 밝게 보이는 α 상은 수지상으로 잘 발달해 있으며, 주사전자현미경으로 관찰한 Figure 6b에서는 짙은 회색으로 어둡게 보인다. Figure 6b에서 밝은 회색으로 관찰되는 부분은 520°C 이하의 온도구간에서 생성된 $\alpha+\delta$ 공석 조직으로 주조 단계에서 일어난 응고과정을 보여준다. 무질가락 만들기는 구리와 주석을 78:22 wt% 비율로 섞어 주조하여 술가락의 모재를 만드는 공정으로 열간 단조가 수행되지 않기 때문에 주조 과정에서 형성된 수지상의 α 상이 일정한 형태와 간격을 유지하고 있다.

3.3.2. 1차 열간 단조: '초바닥 만들기' 단계

Figure 6c와 6d는 1차 열간 단조 과정에 해당하는 '초바닥 만들기' 단계까지 작업된 방짜유기 술가락의 술잎에서 채취한 시편의 미세조직을 관찰한 광학현미경 사진이다. Figure 6c는 저배율에서 관찰한 사진으로 상단에는 일정한

Figure 6. Optical and SEM micrographs in manufacturing process of high tin bronze spoons.

방향성을 가진 α 상이 존재하고, 하단에는 잘게 부서진 α 상이 혼재되어 있다. Figure 6d는 Figure 6c의 우측 상단에 크게 뭉쳐진 α 상을 확대한 사진으로 높은 온도에서 반복된 망치질로 근접한 α 상끼리 겹치며 각각의 결정립을 가진 α 상 덩어리가 형성되었다. α 상의 입계 내에는 쌍정이 존재하는데, 이는 열간 단조에 의해 재결정이 일어났음을 보여준다(Choi and Park, 2004).

3.3.3. 2차 열간 단조: ‘뽕깎질’ 단계

Figure 6e, f는 2차 열간 단조 과정에 해당하는 ‘뽕깎질’ 단계까지 작업된 방짜유기 손가락의 술잎에서 채취한 시편의 미세조직을 관찰한 광학현미경 사진이다. 미세조직을 저배율에서 관찰한 Figure 6e를 보면 α 상이 미세한 크기로 잘게 분산되어 있다. 특히 1차 열간 단조 단계인 ‘초바닥 만들기’에 존재하던 α 상의 일정한 방향성은 거의 남아 있지 않으며, Figure 6f와 같이 α 상끼리 겹쳐져 있던 α 상 덩어리도 잘게 분산되어 있다. 열간 단조에 의해 미세하게 부서진 α 상은 원래 수지간 영역이었던 $\alpha+\delta$ 공석 조직 내에 혼재되어 있다. 2차의 열간 단조 과정을 거치며 망치질이 수십 차례 가해진 결과, 미세조직 내에는 주조 단계에서 관찰되는 금속학적 특징은 거의 남아 있지 않다. α 상의 형태도 주조 단계에서는 일정한 크기의 수지상정으로 끝이 뽕족한 특징을 가졌지만 2차 열간 단조 후에는 구상으로 변형되었으며, 크기도 다양해 졌다.

3.3.4. Quenching: ‘담금질’ 단계

Figure 6g, h는 열간 단조를 통해 형태를 갖춘 뒤, 600℃ 이상의 고온에서 담금질한 방짜유기 손가락의 미세조직 사진이다. 앞에서 살펴본 1, 2차 열간 단조 과정, 즉 ‘초바닥 만들기’, ‘뽕깎질’ 단계와 동일한 술잎 부분을 광학현미경 사진으로 저배율에서 관찰한 Figure 6g에는 미세한 바늘형상의 마르텐사이트(β 상) 조직 바탕에 α 상이 광범위하게 분산되어 있다. 마르텐사이트 조직은 600℃ 이상의 β 영역에서 담금질할 경우 출현하는 조직으로 취성이 강한 δ 상보다 강도가 높아 진다(Craddock and Hook, 2007). 주사전자현미경으로 확대 관찰한 Figure 6h를 보면 열간 단조 단계에서 수지간 영역에 존재하던 조밀한 α 상은 없어지고, 그 자리에는 새로 생성된 β 상과 구상의 α 상이 형성되어 있다. α 상의 결정립 내의 직선경계에 쌍정이 보이는데, 이는 앞선 열간 단조 단계에서 심각한 변형을 받아 생성된 재결정이 담금질 뒤에도 미세조직 내에 남아 있음을 보여준다.

3.4. Cu-22%Sn 청동 시험편 열간 단조 실험

3.4.1. Cu-22%Sn 청동 시험편 주물(열간 단조 전)

Figure 7a와 7b는 실험실에서 구리에 주석을 22 wt% 포함하여 주조한 청동합금의 미세조직 사진이다. 저배율에서 광학현미경으로 관찰한 Figure 7a를 보면 방향성을 가진 α 상이 일정한 형태와 간격을 유지하고 있다. 주사전자현미경으로 관찰한 Figure 7b에서 짙은 회색으로 나타나는 미

Figure 7. Optical and SEM micrographs in hot forging process of Cu-22%Sn samples.

세조직은 일정한 방향성을 가지고 성장한 수지상의 α 상으로 청동합금을 상온에서 공냉시킬 때 생성되는 전형적인 주조 조직이다. 이들 α 상 사이에는 $\alpha+\delta$ 의 공석조직이 형성되어 있다. 수지간 영역에 δ 상과 공존하는 미세한 α 상은 응고 완료 이후 냉각 과정에서 $\gamma \rightleftharpoons \alpha+\delta$ 의 공석 반응에 의해 형성된 것으로 응고 과정에서 생성된 수지상의 α 상과는 차이가 있다(Choi, 2003). 즉 응고과정에서 액상으로부터 주석함량이 낮은 α 상이 수지상정으로 먼저 응고되고, 수지간 영역에 남아 있던 액상은 799~520℃까지 $\alpha+\beta$ 와 $\alpha+\gamma$ 상으로 다양한 상변태를 거치다가 520℃ 구간에서 γ 상이 α 와 δ 상으로 공석 변태하여 상온에서는 $\alpha+(\alpha+\delta)$ 상으로 남게 된다.

3.4.2. 1차 열간 단조

열간 단조 방법은 주조한 시편을 700℃의 고온에서 약 10분간 가열한 뒤, 상온에서 약 20회 가량 망치질하였다. Figure 7c와 7d는 주조 시편을 1차 열간 단조한 미세조직의 광학현미경 사진이다. Figure 7c는 저배율에서 관찰한 사진으로 α 상이 주조 당시에 형성된 형태를 유지하며 일정한 방향성과 각격을 유지하고 있다. Figure 7c를 고배율에서 관찰한 Figure 7d를 보면 α 상은 두드림에 의해 완전히 깨지지 않고 주조 과정에서 형성된 형태를 그대로 유지하고 있다. 특히 Figure 7d에서 관찰되는 α 상의 끝부분은 뾰족한 형태로 주조 과정에서 형성된 α 상의 입계 형태를 그대로 유지하고 있다. α 상의 입계 내에는 열간 단조가 이루어졌음에도 쌍정이 생성되지 않았다. 이는 1회 수행한 열간 단조가 α 상에 재결정을 일으키거나 분산시킬 수 있을 만큼의 두드림 조건에는 도달하지 못했음을 보여준다.

3.4.3. 2차 열간 단조

2차 열간 단조 방법은 1차 열간 단조한 시편을 다시 가열한 뒤, 1차 단계와 동일한 방법으로 추가 열간 단조를 실시하였다. Figure 7e는 2차 열간 단조한 시편의 전체를 보여주는 미세조직 사진으로 α 상이 잘게 분산되어 있다. 여기서 관찰되는 α 상이 띠모양으로 무리지며 약간의 방향성을 가지기는 하나 일정한 방향성을 가진 것은 아니며, 띠모양은 Figure 7f와 같이 두드림 작업에 의해 인접한 α 상끼리 겹쳐지며 형성된 것으로 보인다. α 상의 입계 내에 존재하는 쌍정은 열간 단조에 의해 심각한 재결정이 일어났음을 보여준다. 또한 열간 단조에 의해 α 상의 결정립은 미세해지고, 형태도 구상으로 변형되었다. 2차 열간 단조는 수지상의 초정 α 상을 잘게 분산시키는 가공효과를 가져왔으나, 방짜유기 손가락의 미세조직에서 관찰되는 미세한 α 상

의 크기에는 미치지 못했다. 근접한 α 상들이 겹치는 특징은 방짜유기 손가락 제작의 1차 열간 단조에 해당하는 ‘손잡이 만들기’나 ‘초바닥 만들기’ 단계에서 관찰된다. 이는 실험실에서 수행한 두 번의 열간 단조가 유기공방에서 수행하는 한 번의 열간 단조 효과에 해당함을 알 수 있다.

3.4.4. 3차 열간 단조

3차 열간 단조 단계에서는 2차 열간 단조한 시편을 한번 더 열간 단조 하였다. Figure 7g는 3차 열간 단조한 시편의 전체를 보여주는 미세조직 사진으로 α 상이 2차 열간 단조한 시편보다 미세하게 분산되었으며, 방향성도 감소하였다. Figure 7g의 일부를 확대한 Figure 7h를 보면 α 상은 반복된 열간 단조에 의해 더 잘게 부서져 있으며, 매우 미세한 α 상이 $\alpha+\delta$ 공석 조직 사이에 생성되어 있다. 또한 Figure 7h에서 관찰되는 α 상이 겹쳐져 긴 띠모양을 이루는 미세조직은 추가로 수행된 두드림에 의해 구상으로 잘게 분산되었다. α 상의 입계 내에는 열간 단조에 의해 생성된 쌍정이 존재한다. 3차에 걸친 열간 단조가 수행된 시편의 미세조직 내에는 주조 당시에 형성된 미세조직이 관찰되지 않는다.

4. 고찰

한국민속촌 유기공방에서 재현하는 방짜유기 손가락은 첫 번째 단계인 ‘무질가락 만들기’에서부터 최종 단계인 ‘광내기’에 이르기까지 총 10단계를 거쳐 완성되었다. 제 1 단계인 ‘무질가락만들기’에서는 미리 준비한 주석함량 22%의 청동합금을 이용하여 막대형상의 노팅이를 주조한다. 이후 제 2~6단계에서는 이 노팅이를 대상으로 가열과 두드림을 반복함으로써 술잎과 손잡이를 포함하는 대략적인 외형을 만들어간다. 제 7~9단계에서는 고온으로부터의 담금질 처리와 상온에서 수행되는 작업을 통하여 형태가 마무리되며, 제 10단계에서는 표면을 연마하여 광택을 냄으로써 손가락이 완성된다. 미세조직을 관찰한 결과 주조공정을 거친 노팅이에는 $\alpha+\delta$ 공석 바탕에 수지형상의 α 상이 잘 발달해 있었으며, 열간 단조가 시작되는 2단계 이후로부터 담금질 처리가 수행되기 바로 전 단계까지의 시편에서는 바탕조직은 불변하였으나 α 상에는 상당한 변화가 관찰되었다. 즉 수지형상을 취하던 α 상은 열간 단조가 시작되는 순간부터 본래의 모습을 잃어갔으며, 두드림이 가해진 부분에 한하여 α 상 부위에 쌍정이 발생하였다. 이 과정에서 순간적이기는 하나 대형의 α 상 사이에 마치 이들로부터

부서져 나온듯한 미세한 α 상이 분산된 형태의 특이한 조직이 관찰되었다. 이 조직은 잠시 출현하였다가 작업이 진행되며 곧 사라짐으로써 완성품에서는 그 흔적을 찾을 수 없었다. 담금질 처리가 시작되면서 바탕에는 공석을 대신하여 β -마르텐사이트 상 또는 잔류 γ 상이 출현하였다. 이처럼 여러 과정에서 수없이 많이 가해지는 망치질은 결정립을 미세화시켰으며, 이로 인해 강도와 경도가 높아지는 효과를 가져왔다.

실험실에서 제작한 Cu-22%Sn 청동 시험편을 대상으로 총 3단계까지 각각 20여 차례의 망치질을 가하고 단계별로 미세조직을 관찰한 결과, 방짜유기 손가락과 유사한 미세조직의 변화를 확인할 수 있었다. 망치질을 가하기 전 단계인 주물 상태에서는 α 상이 수지상으로 일정한 형태와 간격을 유지하고 있다. 그리고 700°C의 고온에서 약 10분간 가열한 뒤, 상온에서 약 20회 가량 망치질한 1차 열간 단조에서는 α 상이 주조 당시에 형성된 형태를 유지하며 일정한 방향성과 간격을 유지하고 있었다. 특히 α 상의 입계 내에 쌍정이 생성되지 않았다는 점은 1회 열간 단조가 α 상에 재결정을 일으키거나 분산시킬 수 있을 만큼 충분하지 않았음을 보여준다. 1차와 동일한 방법으로 반복한 2차 열간 단조에서부터 근접한 α 상들이 합쳐지고 쌍정이 생성되었다. 이처럼 근접한 α 상이 합치는 특징은 방짜유기 손가락의 1차 열간 단조에 해당하는 ‘초바닥 만들기’ 단계에서부터 관찰되므로, 실험실에서 실시한 두 번의 열간 단조가 유기공방에서 수행하는 한 번의 열간 단조 효과에 해당함을 알 수 있다. 3차 열간 단조 단계에서는 앞의 단계보다 더욱 미세하게 분산되고, 방향성도 크게 감소했다. 특히 세 차례 걸친 열간 단조를 통해 주조 당시에 형성된 미세조직의 형태는 대부분 사라졌다. 이처럼 단계별 열간 단조는 미세조직의 변화에 큰 영향을 주었으며, 이는 방짜유기 손가락의 단계별 미세조직과도 유사한 공통점으로 나타난다.

유기공방에서 전통기술로 만드는 방짜유기는 여러 과정의 망치질로 만들기 때문에 그 흔적이 완성품에서 ‘메자국’으로 남는다. 이 메자국은 방짜유기의 제작 과정상 어쩔 수 없이 생기는 가공 흔적으로 유적에서 출토되는 방짜유기 조성의 청동유물에서도 흔하게 발견된다. 특히 전통방법으로 만들어진 방짜유기 손가락의 손잡이 부분에 가로로 나 있는 점힌 선은 고려시대의 유적에서 출토된 청동손가락에서도 동일하게 관찰되기 때문에 유물에 가해진 제작방법을 유추할 수 있다. 즉 청동손가락은 형태가공에 앞서 무질가락을 주조하고 이것을 망치로 늘리고 넓히는 현재의 전통

기술이 과거에도 동일하게 존재했음을 보여준다.

5. 결 론

전통 방짜유기를 과학적으로 분석하고 추가로 재현실험을 병행한 결과 방짜유기 기술체계에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전통 유기공방에서는 하나의 방짜유기 손가락을 만들기 위해 10단계의 작업 공정을 거쳤으며, 형태 제작에 큰 영향을 주는 열간 단조는 3~4단계 과정을 거친다. 이는 기계로 만드는 방짜유기 손가락이 1단계의 성형과정을 통해 열간 가공이 마무리되는 것과는 큰 차이를 보인다.

2. 방짜유기 손가락은 열간 단조에 의해 수지형상의 α 상이 미세화되고 잘게 분산되었으며, 두드림이 가해진 부분의 α 상에는 쌍정이 생성되었다. 또한 α 상은 가해지는 망치질에 따라 점점 다각형에서 원형으로 변형되는 것을 확인하였다. 이 과정에서는 근접한 α 상들은 서로 합쳐지는 현상이 발생하였고, 담금질 후에도 합쳐진 상태로 존재하였다. 이처럼 여러 개의 α 상이 합쳐진 미세조직은 방짜조성의 청동유물에서도 관찰되는 것으로 기술체계의 연관성을 보여준다.

3. 방짜조성의 Cu-22%Sn 합금을 대상으로 실시한 열간 단조 실험 결과, 주조 당시 형성된 수지상의 감소율은 가공 횟수에 따라 비례했다. 또한 α 상은 구상으로 잘게 깨져 미세조직 전체에 넓게 분산되었으며, 재결정에 의한 쌍정은 증가하였다. 이처럼 두드림 작업에 의한 결정립의 미세화는 재료의 강도를 높이는 효과를 준 것으로 판단된다.

4. 고대 유적에서 출토된 청동유물과 전통 유기공방에서 만든 방짜유기의 특정 부위에서 동일하게 관찰되는 메자국은 문헌으로 남아 있지 않은 고대의 방짜유기 기술체계가 오늘날의 방짜유기 전통기술로 전승되었음을 보여준다.

사 사

본 연구는 국립문화재연구소 문화유산조사연구(R&D) 사업의 일환으로 수행되었다.

REFERENCES

- Ahn, K.S., 2002, Yugijang. Hwasanmunhwa, Seoul. (in Korean)
Choe, B.H., Lee, B.G., Shim, J.H., Go, H.S., Jo, N.C., Lee, J.S.,

- Park, K.G., Kim, Y.C. and Park, J.S., 2016, Failure analysis of cracks in ancient and modern bronze spoons. Korean Journal of Materials Research, 26(10), 531~534. (in Korean with English abstract)
 - Choi, K.J., 2003, Achaeometallurgical study on the manufacturing of iron and bronze artifacts. Ph. D. dissertation, Hongik University, Seoul. (in Korean with English abstract)
 - Choi, K.J. and Park, J.S., 2004, On the manufacturing technology of some Koryo bronze artifacts. Journal of the Korean Society for Heat Treatment, 17(1), 2~9. (in Korean with English abstract)
 - Craddock, P. and Hook, D., 2007, The Bronzes of the South of India: a continuing Tradition?. Scientific Research on the Sculptural Arts of Asia, 75~89. (in Korean)
 - Jeong, D.C., Yoo, C.Y., Hong, H.S. and Yun, Y.H., 1999, Korean traditinal crafts in sciences. Minsokwon, Seoul. (in Korean)
 - Lee, G.G., 2008, Ojuseojongbagmulgobyeon(Choi, J., trans.). Hakyounmunhwasa Publishing Co., Seoul. (Original work published in 1984) (in Korean)
 - Lee, J.S., 2010, Analysis of metallurgical characteristics through the reproduction experiments of traditional forged high tin bronze in Korea. Ph. D. dissertation, Hongik University, Seoul. (in Korean with English abstract)
 - Lee, J.S., Jeon, I.H. and Park, J.S., 2011, A study on the change in microstructures of traditional forged high tin bronzes by quenching. Journal of Conservation Science, 27(4), 421~430. (in Korean with English abstract)
 - Park, J.S. and Yu, J.E., 2004, On the manufacturing technology of the bronze artifacts excavated from the Icheon Seolbong Fortress. Journal of Korean Cultural History, 21, 321~342. (in Korean with English abstract)
 - Rural Development Administration, 2018, Traditional technology dictionary of agricultural terms. <http://www.nongsaro.go.kr/> (July 23, 2018)
 - Seo, Y.G., 2016, The Imwongyeojeji Seomyongji(Jeong, M.H., Lee, D.I., Lee, G.M. and Kim, T.W. trans.). Pungseok Cultural Foundation, Seoul. (Original work published in the late of Joseon Dynasty)
-