

## 부여 쌍북리 유적 출토 7세기 도가니의 정량분석과 고고과학적 해석

박진영<sup>1)</sup> · 이찬희<sup>2)\*</sup> · 한이현<sup>2)</sup> · 장성윤<sup>3)</sup>

## 1. 서론

부여 쌍북리 유적은 대전지방국토관리청에서 시행한 부여-탄천간 도로확장 및 포장공사 구간 내에서 확인되었으며, 2004년부터 발굴조사가 진행되었다. 유적은 총 4개 지역에 분포하나, 이 연구에서는 쌍북리 유적 내 II지역에서 출토된 7세기 백제시대 도가니를 비롯한 공방 관련 유물을 대상으로 하였다.

고대의 도가니는 물질의 용해 및 배소 등 고온처리에 사용되는 내열성 용기로, 용도가 명확하여 출토 유적의 성격추론에 결정적 단서를 제공하는 중요한 유물이다. 그러나 발굴사례가 많지 않아 고고학 및 자연과학 분야의 체계적 연구 또한 미진한 실정이다. 최근 부여 쌍북리 유적에서 7세기에 제작된 것으로 추정되는 도가니(그림 1)가 출토됨에 따라 유적의 공방지 내에서 행해진 공예품 제작 및 가공기술에 관한 연구의 필요성이 제기되었다.

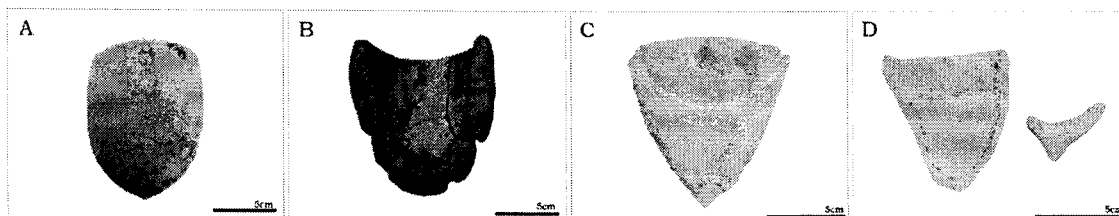


그림 1. 쌍북리 출토 도가니의 산상. (A, B) 유리 용융 도가니. (C, D) 청동 용융 도가니.

이 연구에서는 쌍북리 유적에서 출토된 백제시대 도가니와 내부 용융물질 및 유적의 백제 토양을 대상으로 산출상태와 기재적 특성, 광물학적 및 지구화학적 연구를 실시하였다. 또한 동일유적에서 출토된 금동보살입상을 대상으로 도가니 내부 용융물질과의 재료학적 상관관계 규명을 위한 광물학적 및 지구화학적 특성을 분석하였다. 이를 종합하여 도가니의 기능 및 제작조건과 소성온도, 내부 용융물질의 가공기술을 검토하였으며, 유적 내 출토유물과의 비교검토를 통해 제작환경 및 원료의 산지를 해석하였다.

## 2. 시료 및 분석

이 연구를 위해 부여 쌍북리 유적에서 백제시대 토제 도가니 10점과 금동보살입상 1점을 수습하였다. 주로 파손된 편 상태의 도가니를 대상으로 기질과 내부의 유리질 용융물질을 분

주요어 : 7세기 백제, 유리용융 도가니, 청동용융 도가니, 금동보살입상, 제작환경

1) 충청남도 역사문화원 (nabillera15@naver.com)

2) 공주대학교 문화재보존과학과 (chanlee@kongju.ac.kr, roadhome@hanmail.net)

3) 국립문화재연구소 복원기술연구실(ftite0@empal.com)

류하여 시료를 채취하였으며, 금동보살입상은 원형을 훼손하지 않는 범위에서 파손된 목과 대좌를 중심으로 미량의 금속층을 분리하였다.

분리된 시료를 대상으로 정밀기재, 전암대자율 측정, 현미경 관찰, 주사전자현미경 관찰 및 분석(SEM-EDX), 전자현미분석(EPMA), X-선 회절분석(XRD), 열중량 및 시차열분석(TG-DTA), X-선 형광분석(XRF), 유도결합 플라즈마 원자방출분광 및 질량분석(ICP-AES, ICP-MS), 중성자 방사화분석(INNA), 열이온화 질량분석(TIMS)을 실시하였다.

### 3. 분석결과

#### 1) 도가니

도가니의 기질은 대체로 회갈색과 황갈색의 색조를 띠며, 내부에는 석영과 장석 및 파쇄된 토기편이 혼재되어 있다. 도가니의 내벽에는 용융물질이 고착되어 있으며, 외벽에는 약 1.5mm 두께로 정선된 석영입자가 분포한다. 주사전자현미경 관찰에서도 파쇄된 토기 입자가 도가니의 기질과의 상이한 공극 분포 및 경계를 보이며 나타났다. 유적의 백제시대 토양을 대상으로 X-선 회절분석을 실시한 결과, 석영, 정장석, 운모, 카올리나이트, 사장석 등이 검출되었다. 도가니에서는 토양과 마찬가지로 석영과 정장석이 확인되었으며, 이외에도 고온 생성광물인 물라이트가 동정되었다.

도가니 기질 내부에서 특징적으로 나타나는 회색조의 비짐 물질을 대상으로 분석을 실시한 결과, 석영과 물라이트로 구성되었음을 확인하였으며 일부 시료에서는 정장석의 분해가 관찰되었다. 구성광물의 상전이 온도를 근거로 할 때 쌍복리에서 출토된 도가니는 1,000~1,200℃의 소성 및 용융온도를 경험한 것으로 해석된다. X-선 회절분석과 병행하여 도가니의 열적특성을 명확히 밝히기 위해 열분석을 실시하였다. 모든 시료는 500℃ 이하에서 흡착수 및 층간수의 증발에 의한 중량감소가 확인되었으며, 평균 중량 감소율은 약 1.72%이다. 공통적으로 570℃와 970℃ 부근에서 광물의 상전이에 의한 열적반응이 관찰되며 1,060℃를 기준으로 도가니별 소성온도에 차이가 나타났다.

토양과 도가니를 대상으로 주성분, 미량, 희토류, 호정 및 불호정 원소를 정량분석하였으며, 측정치를 각각의 원소를 대표하는 평균함량으로 표준화하였다. 이 결과, 주성분원소에서는 토양을 포함한 모든 도가니의 기질이 같은 영역에서 증감하였으나 미량, 희토류, 호정 및 불호정 원소에서는 크게 두 그룹으로 분리되어 나타났다. 이는 대자율 결과와도 일치하는 내용이다. 한편 SiO<sub>2</sub>의 함량이 높고, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 낮은 태토를 이용했던 도가니와 SiO<sub>2</sub>의 함량이 낮고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 높은 태토를 이용했던 도가니가 있다. 이는 도가니를 이루는 태토의 정선 정도가 도가니의 기능적 측면에 영향을 주었음을 지시하는 것이다.

#### 2) 도가니 내부 용융물질

도가니의 용도를 확인하기 위해 내부에 고착되어 있는 용융물질을 대상으로 정량분석을 실시한 결과, 부여 쌍복리에서 출토된 도가니는 크게 유리 용융 도가니와 청동 용융 도가니로 구분된다. 유리 도가니 내부에서 확인된 용융물질을 현미경으로 관찰한 결과, 연녹색과 적갈색 유리가 혼재하는 것으로 나타났으며(그림 2A, 2B), 이 물질의 표면에서는 백색의 풍화층이 관찰되었다. SEM-EDS 결과, 이 유리질 물질에서는 비교적 높은 함량의 납이 검출되었으며, 내부에는 덜 용해된 석영입자를 비롯한 다양한 불순물들이 공존하였다. 이를 정량적으로 검토하

기 위해 전자현미분석을 실시하였다.

다양한 색조를 보이는 유리질 물질들은 대체로 유사한 화학조성을 보였으나, 색상에 따른 경향성은 나타나지 않았다. 백색 풍화층에서는 PbO를 제외한 다른 원소들의 함량이 낮게 검출됨에 따라 풍화과정에서 구성원소의 손실이 발생했음을 알 수 있다. 이 풍화층만을 대상으로 X-선 회절 분석한 결과, 백연석( $PbCO_3$ )이 검출되었다. 이는 풍화에 민감한 납유리의 표면이 산성의 매장환경에서 구조적인 변화를 경험했기 때문인 것으로 판단된다.

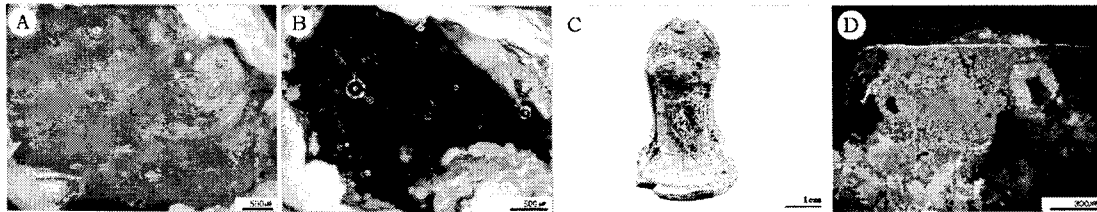


그림 2. 쌍복리 출토 유리질 물질과 금동보살입상의 산출상태. (A, B) 유리 도가니에서 수습한 연녹색 및 적갈색 용융물질. (C) 금동보살입상. (D) 금동보살입상 소지의 내부조직.

청동 도가니 내부의 용융물질에서는 금속광택을 보이는 황색의 균질한 조직이 나타나며, 외부에서는 다양한 색을 갖는 산화물이 관찰되었다. 내부에는 냉각과정에서 형성된 납의 편석이 관찰되며, 주사전자현미경에서도 유사한 결과가 확인되었다. 이들의 조성을 SEM-EDS로 분석한 결과, 구리, 주석 및 납이 검출되었다. 시료의 대부분은 고도로 정련된 구리를 사용한 청동 합금으로 밝혀졌으며, 구리의 합금 비율이 높게 나타났다. 일부 시료는 불순물의 함량이 높고, 납과 주석의 함량이 높은 것으로 보아, 또 다른 단계에서 제작된 물질일 가능성도 있을 것으로 판단된다. 청동 용융물질을 대상으로 X-선 회절분석을 실시한 결과,  $SnO_2$ 의 결정구조를 갖는 석석이 동정되어 합금물질인 주석의 원료형태가 확인되었다.

### (3) 금동보살입상

청동도가니 내부 용융물질과의 재료학적 동일성을 확인하기 위해 같은 유적 내에서 출토된 금동보살입상을 대상으로 정량분석을 실시하였다(그림 2A). 현미경 관찰결과, 도금층은 10~20 $\mu m$ 의 두께로 도포되었으며, 이들은 대체로 균일한 경향이 나타나나, 부분적으로 입자들이 모여 두꺼운 층을 형성하고 있었다. 또한 도금층 내부에는 균열이 발달되어 있으며, 이를 따라 유물 내외부에 부식이 진행된 것으로 판단된다. SEM-EDS 분석결과, 수은이 검출되어 이 유물의 제작기법의 추정이 가능하였다.

또한 유물의 함량을 정량화하기 위해 금동보살입상의 구성물질을 대상으로 전자현미분석을 실시하였다. 소지층에서는 주로 구리와 주석이 검출되었으며, 납의 함량은 비교적 낮은 분포를 보였다. 금동보살입상을 대상으로 X-선 회절분석을 실시한 결과, 소지 층의 이차적 부식산화물인 공작석( $Cu_2(OH)_2CO_3$ )과 적동석( $Cu_2O$ )이 동정되었으며, 수은의 원료인 진사( $HgS$ )와, 금과 수은의 아말감 합금인 유제나이트( $Au_5Hg$ )가 검출되었다.

## 4. 토의 및 결론

도가니의 태토에서 다량의 광물 비짐과 파쇄된 토기편이 관찰되었으며, 68.44 wt%의  $SiO_2$

와 19.81 wt%의  $Al_2O_3$ 의 구성을 갖는 내화점토로 제작되었다. 또한 외벽에서는 정선된 석영 입자의 배열이 관찰되는 것으로 보아, 이미 도가니의 제작에는 내열성과 구조적 안정성을 고려하여 제작된 유물임을 알 수 있다.

도가니 재료의 산지해석을 위해 전암 대자율을 측정한 결과에서는 이 일대의 토양과 도가니 기질이 크게 두 그룹으로 분류되었다. 그러나 유적 일대의 층적도는 화강편마암 및 흑운모 화강암의 풍화산물로 구성되어 있어 도가니의 제작에는 부분적으로 성인이 다른 토양이 혼재할 가능성도 있어 보인다. 또한 주성분 원소의 거동경향이 동일하고, 토양 및 도가니 태토의 풍화정도가 유사한 것으로 보아 도가니를 구성하는 태토는 모암이 다른 쌍북리 일대의 풍화토로 구성되었을 것으로 판단된다.

일반적인 납유리와 동의 제련온도는  $1,000 \sim 1,200^\circ C$ 로 알려져 있다. 용융혼적이 없는 도가니에서도  $1000^\circ C$  이상에서 소성된 증거가 확인되어 쌍북리 도가니는  $1,000 \sim 1,200^\circ C$ 의 범위에서 소성 및 용융이 이루어졌던 것으로 판단된다. 또한 열에 의한 구조적 결합이 확인되지 않음에 따라 도가니는 유리 및 청동 용융시에 충분한 내화도를 유지하고 있었던 것으로 추정된다. 도가니의 용도에 따른 원소함량의 경향성은 확인되지 않았으나, 고고학적으로 용도에 따른 기형의 차이를 보임에 따라 도가니의 형태에는 용융물질의 재료적 특징이 반영되었던 것으로 보인다. 이를 통해 도가니는 용도에 따라 다양한 제작방법이 적용되었던 것으로 해석할 수 있다.

유리도가니 내에서 확인된 물질은  $PbO-SiO_2$ 계 유리이다. 열이온화 질량분석을 실시한 결과, 원료로 사용된 납은 원산지 해석이 불가능한 것으로 밝혀졌으며, 비평형 상태의 동위원소 교환반응이 있었던 것으로 판단된다. 이는 오랜 시간 용융과정을 거치는 유물의 제작과정과 휘발성을 갖는 납의 특성 때문인 것으로 해석된다. 안정제로는  $Al_2O_3$ 와  $CaO$ , 착색제 성분으로는  $CuO$ 와  $Fe_2O_3$ 가 검출되었다. 이를 선행 연구에서 밝혀진 고대 납유리의 화학조성과 비교분석한 결과, 5세기 이후에 나타나는 납유리의 전형에 해당하는 것으로 보인다.

청동 도가니 내에서 추출된 금속화합물에서 검출된 원소는  $Cu$ ,  $Sn$ ,  $Pb$ 를 주성분으로 하는 청동 합금이다. 이들 용융물질은 고순도로 정련된 구리를 이용해 제작된 청동과, 합금 이전에 납과 주석의 정련단계에서 제작된 청동으로 분류되었다. 합금물질인 주석은 석석을 원료로 사용했으며, 납의 원산지는 유리질 물질의 분석 결과와 마찬가지로 해석이 불가능한 비평형 상태를 유지하고 있었던 것으로 추정된다.

금동보살입상은 고순도의 금을 아말감 기법을 이용해 도금하였으며, 소지금속 역시 고순도로 정련된 청동을 이용한 것으로 해석된다. 소지금속의 원료는 산지해석이 불가능한 상태이나 청동 도가니 내의 용융물질과는 상이한 결과가 도출되어 분석된 청동 물질과 재료적 유사성은 낮은 것으로 판단된다. 비록 유적 내에서 금공예 관련 유물은 출토되지 않았으나, 도가니 내부 청동과 마찬가지로 고도의 청동 가공술이 적용되었음을 감안할 때, 외부에서의 유입보다는 유적 내에서의 제작 되었을 가능성이 높은 것으로 판단된다.