

# 부여 능산리사지 출토 금제구슬의 재료학적 특성 및 제작기법 연구

A Study on Material  
Characteristics and  
Manufacturing Techniques for  
Gold-granule Beads Excavated  
from the Neungsan-ri Temple  
Site in Buyeo

양수현\*, 노지현

국립부여박물관 학예연구실

Yang Soohyeon\*, Ro Jihyun

Curatorial Affairs Division, Buyeo  
National Museum

## 요약

국립부여박물관 소장 금제구슬 2점(부여5336)은 1993년 부여 능산리 공방터 주변에서 발견된 것으로 백제 시대에 제작된 누금제품이라는 희소성과 완형의 형태를 갖추고 있어 제작기법을 살펴볼 수 있는 매우 중요한 자료이다. 본 연구에서는 이동형 엑스선형광분석기와 실체현미경 및 분광분석기 부착 주사전자현미경 분석을 통해 금제구슬의 성분 조성을 확인하고 미세 형태와 표면 상태 관찰, 접합 부위 성분 분석을 통해 제작 기법을 살펴보았다.

금제구슬은 속이 비어있는 형태로 구멍을 뚫은 뒤 그 주변을 금선으로 둘러 장식하였으며 나머지 부분을 금알갱이로 장식하였다. 일부에서 금알갱이를 먼저 금판에 접합하고 금알갱이 위에 금선이 올라간 형태를 확인할 수 있었으며 금선과 금알갱이 모두 23.6K~23.7K로 분석되었다. 누금의 접합 부위 일부에서는 구리의 함량이 높게 검출되었으며 재현 실험 및 제작 방법 연구 결과를 참고로 하여 볼 때 구리확산법을 사용하여 제작한 것으로 추정된다.

**주제어** : 능산리, 누금, 금제구슬, 구리확산법

## Abstract

Two golden beads (Buyeo 5336) housed at the Buyeo National Museum were discovered in 1993 near the site of an ancient workshop in Neungsan-ri in Buyeo-gun, Chungcheongnam-do Province. These rare examples from the Baekje Kingdom of an application of granulation have maintained their original form intact, and thus serve as important materials for the investigation of production techniques applied. This study analyzed the composition of the golden beads using a portable X-ray fluorescence analyzer, a stereo microscope, and a scanning electron microscope with an energy dispersive X-ray spectrometer. The manufacturing technique was examined through the observation of the micro-shape and the surface condition and by a composition analysis of the joint part.

In both beads, a hole was pierced in a hollow body and the bead was decorated with golden wires around the hole and gold granules in other parts. In some areas, golden granules had been attached to the gold plate and golden wires were then placed over the granules. The purity of both the wires and the granules was analyzed as 23.6 - 23.7K. A high copper content was detected in some of the parts where the granules were attached. The findings of a previous reproduction experiment and study of production methods suggest that the beads were made using the copper diffusion technique.

**Keywords** : Neungsan-ri, Granulation, Golden beads, Copper diffusion

\* Corresponding Author :  
Yang Soohyeon

Tel : 82-41-830-8444  
E-mail : yangpp@korea.kr

투고일: 2021.09.30. 심사(수정)일: 2021.10.15. 게재확정일: 2021.10.28.

## 1. 서론

누금세공품이란 금선과 금알갱이 등으로 표면을 장식한 금속공예품을 의미한다<sup>[1],[2]</sup>. 우리나라에서는 평안남도 대동군 석암리 9호분에서 출토된 금제띠고리(국보 제89호)<sup>[2]</sup>가 가장 오래된 누금세공품으로 알려져 있으며, 이후 황남대총, 보문리 부부총, 계림로, 천마총 등 신라시대의 유적과 무령왕릉, 능산리사지, 왕흥사터 등 백제시대 유적에서 누금세공품이 주로 출토되고 있다. 우리나라 출토 누금세공품에 대해서는 다양한 학문 분야에서 연구가 꾸준히 이루어지고 있는데, 누금세공품의 역사와 조형 기법, 제작 실험 및 과학적 분석을 통한 제작 기법 연구 등이 주를 이루고 있다<sup>[1]~[11]</sup>. 최근에는 고대 및 현대의 기법을 활용한 제작 실험을 통해 고대의 누금 제작 기술을 밝히고자 하는 노력도 시도되고 있다<sup>[8],[9]</sup>. 특히, 누금세공품에 대한 과학적 분석 연구는 재료적인 특성뿐만 아니라 가공 방식 및 접합 방식 등을 이해하는 데 필수적이라 할 수 있는데, 이를 종합적으로 검토하면 나라별, 시대별 누금세공 기술의 발전 정도 및 기술 수준 등을 밝히는 데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

우리나라에서는 주로 삼국시대에 누금세공품이 확인되고 있는데, 과학적 조사를 통한 제작 기법 연구가 이루어진 경우는 보문동 합장분 출토 금제이식<sup>[4]</sup>, 계림로 출토 장식보검<sup>[5]</sup>, 부여 능산리사지 출토 누금세공품<sup>[6]</sup>, 무령왕릉 출토 금제장신구<sup>[7]</sup> 등이 있다. 그 중 부여 능산리사지 출토 금제구슬은 2010년에 성분 분석을 통한 제작 기술 연구가 진행되었으나 누금 접합 방식에 대한 뚜렷한 증거를 찾기 어려웠다는 한계가 있었다<sup>[6]</sup>. 누금세공품 연구에서 금알갱이 등을 만드는 방법과 더불어 이를 접합하는 것은 고도의 기술을 필요로 하며 금공품의 완성도를 결정짓는 중요 요소 중 하나이다. 따라서 이를 밝히는 것은 그 시대의 제작 기술 수준을 살펴보는 데 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 2010년 조사가 이루어진 능산리사지 출토 금제구슬 2점에 대하여 과학적 분석 연구를 추가 조사하고 접합 방법에 대한 실마리를 찾고자 하였다. 먼저, 엑스선형광분석으로 성분 조성을 살펴보고, 현미경 관찰을 통해 금제구슬의 표면 상태 및 미세 구조 등을 확인하였다. 또한 듀얼형 분광분석기 부착 주사전자현미경을 활용하여 금선과 금알갱이의 접합 부위 등 미소 부분에 대한 성분 조성 및 형태적 특징 등을 살펴보고, 분석 결과를 고찰하여 금제구슬의 제작 기법을 종합적으로 검토하였다.

2. 분석 방법

2.1. 이동형 엑스선형광분석(XRF)

금선 및 금알갱이의 성분 조성은 이동형 엑스선형광분석기( $\mu$ XRF Spectrometer Artax400, Bruker Nano GmbH, Germany)를 이용하였으며 분석 조건은 표1과 같다. 금의 순도를 확인하기 위해 사용한 표준시료는 브루커 AXS 코리아에서 제작한 Gold1(Au 84.71wt%, Ag 10.30wt%, Cu 4.99wt%)과 Gold2(Au 89.80wt%, Ag 9.13wt%, Cu 1.07wt%), Gold3(Au 76.83wt%, Ag 20.25wt%, Cu 2.92wt%)으로 이를 사용하여 각 원소별 검량곡선(Calibration curve)을 작성한 다음 100%로 표준화(Normalization)하였다. 표준시료의 분석 결과는 표2와 같다.

표1. XRF 분석 조건

분석 기기	분석 조건				
	타겟	가속전압	전류	콜리메이터	측정시간
Portable $\mu$ XRF Spectrometer, Artax400, Bruker Nano GmbH, Germany	Mo	50kV	600 $\mu$ A	0.2mm	200sec

표2. 금 표준시료에 대한 표면 성분조성 검량값

시료명	성분조성(wt%)		
	Au	Ag	Cu
Gold1	84.77	10.24	5.00
	84.91	10.01	5.07
	84.92	10.11	4.97
평균	84.87	10.12	5.01
Gold2	90.02	8.58	1.40
	90.02	8.73	1.25
	89.83	8.88	1.29
평균	89.96	8.73	1.31
Gold3	76.88	20.07	3.05
	77.02	20.30	2.69
	77.22	20.12	2.66
평균	77.04	20.16	2.80

## 2.2. 실체현미경 조사

금제구슬의 표면 상태 및 미세 구조 확인을 위하여 실체현미경 조사(M205-A, Leica, Germany)를 실시하였다. 조사는 부위에 따라 배율을 조절하여 실시하였으며, 육안으로 확인하기 어려운 금선 및 금알갱이의 형태 및 크기, 접합 방식 등을 중점적으로 관찰하였다.

## 2.3. 분광분석기 부착 주사전자현미경 분석(SEM-EDS)

금선 및 금알갱이의 접합 부위 등 미소 부위의 관찰 및 성분 조성 분석은 듀얼형 분광분석기가 부착된 주사전자현미경(QUANTAX XFLASH 6-30, Bruker, Germany 및 Prisma E, FEI, USA)을 이용하였으며 분석조건은 표3과 같다. 금의 순도를 확인하기 위해 사용한 표준시료는 이동형 엑스선형광분석에 사용한 표준시료와 동일하며, 이를 사용하여 각 원소별 검량곡선(Calibration curve)을 작성한 다음 100%로 표준화(Normalization)하였다.

표3. SEM-EDS 분석 조건

장비모델	분석조건		
	전압	전류	시간
SEM: Prisma E, FEI, USA EDS: QUANTAX XFLASH 6-30, Bruker, Germany	20kV	60 $\mu$ A	200Sec

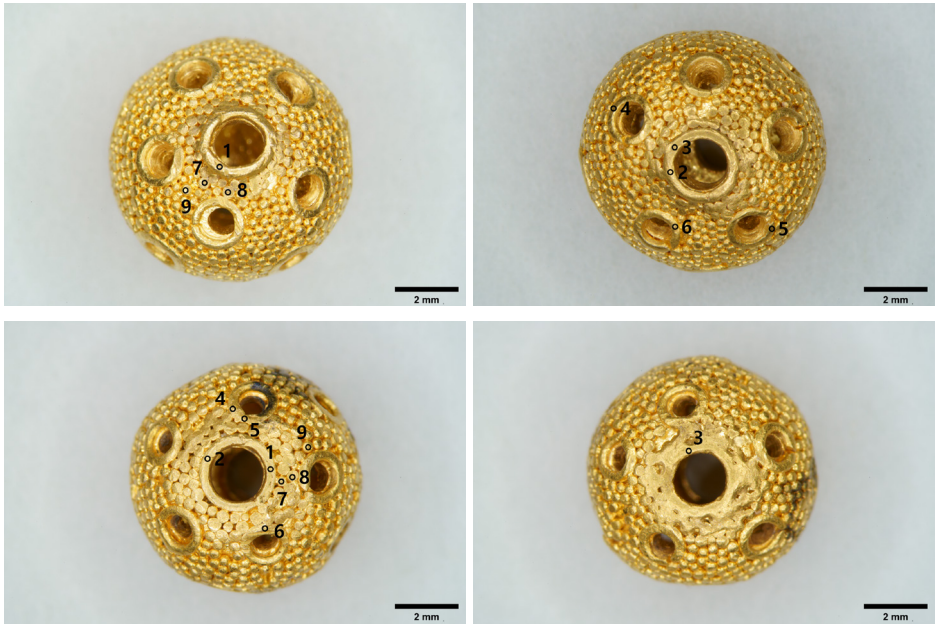
## 3. 분석 결과

### 3.1. 성분 조성

금제구슬의 제작에 사용된 금선과 금알갱이의 성분 조성을 살펴보기 위하여 이동형 엑스선형광분석기로 금선과 금알갱이 표면을 분석하고 분석 위치와 그 결과를 도1과 표4에 정리하였다. 금제구슬1의 큰 투공 주변 금선의 성분 평균 함유량은 금(Au) 98.61wt%, 은(Ag) 0.75wt%, 작은 투공 주변 금선의 성분 평균 함유량은 Au 98.66wt%, Ag 0.71wt%로 금 순도는 모두 약 23.7K이다. 금알갱이의 경우, Au 98.64wt%, Ag 0.74wt%의 성분 조성을 보이고 있으며, 금 순도는 약 23.7K이다.

금제구슬2의 경우, 큰 투공 주변 금선의 성분 평균 함유량은 Au 98.50wt%, Ag 0.68wt%, 작은 투공 주변 금선의 성분 평균 함유량은 Au 98.30wt%, Ag 0.79wt%로 금 순도는 각각 약 23.7K와 23.6K이다. 금알갱이의 성분 평균 함유량은 Au 98.55wt%, Ag 0.73wt%이며 금 순도는 약 23.6K이다. 즉, 금제구슬 1과 2에서 확인

된 금선과 금알갱이의 성분 조성은 금의 함유량이 98wt%이상으로 높게 검출되었으며 모두 유사한 순도(약 23.6~23.7K)를 보였다<sup>(도1),(표4)</sup>.



a	b
c	d

- (a) 금제구슬1 앞면
- (b) 금제구슬1 뒷면
- (c) 금제구슬2 앞면
- (d) 금제구슬2 뒷면

도1. 금제구슬 XRF 성분 분석 위치

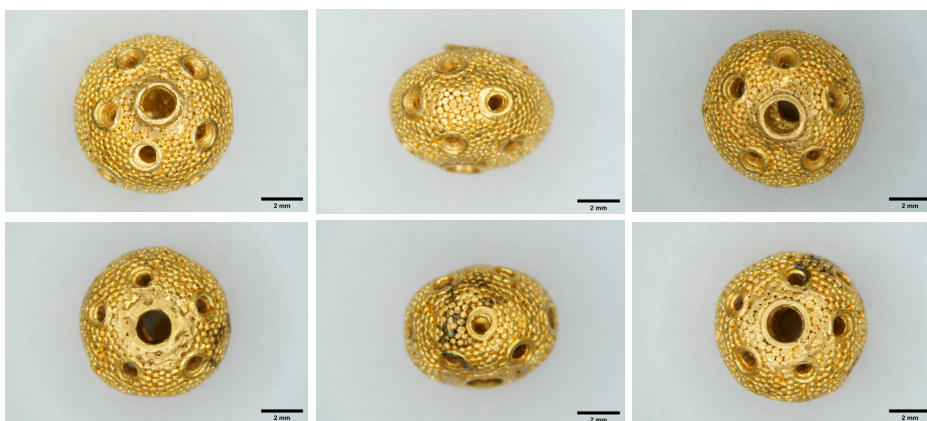
표4. 금제구슬의 성분 조성(wt%)

분석위치			검출 원소			순도
			Au	Ag	Cu	
금제구슬1	1	금선 (큰 투공 주변)	98.63	0.74	0.63	23.7K
	2		98.60	0.75	0.65	23.7K
	3		98.60	0.75	0.65	23.7K
	평균		98.61	0.75	0.64	23.7K
	4	금선 (작은 투공 주변)	98.57	0.71	0.72	23.7K
	5		98.76	0.70	0.55	23.7K
	6		98.65	0.72	0.63	23.7K
	평균		98.66	0.71	0.63	23.7K
	7	금알갱이	98.68	0.67	0.65	23.7K
	8		98.61	0.77	0.61	23.7K
	9		98.64	0.78	0.58	23.7K
	평균		98.64	0.74	0.61	23.7K
금제구슬2	1	금선 (큰 투공 주변)	98.61	0.64	0.75	23.7K
	2		98.66	0.70	0.64	23.7K
	3		98.23	0.69	1.07	23.6K
	평균		98.50	0.68	0.82	23.7K
	4	금선 (작은 투공 주변)	98.27	0.83	0.90	23.6K
	5		98.33	0.79	0.88	23.6K
	6		98.29	0.76	0.95	23.6K
	평균		98.30	0.79	0.91	23.6K
	7	금알갱이	98.54	0.78	0.68	23.6K
	8		98.54	0.69	0.77	23.6K
	9		98.57	0.72	0.72	23.7K
	평균		98.55	0.73	0.72	23.6K

## 3.2. 금제구슬의 제작 방법

### 3.2.1. 전체 형상

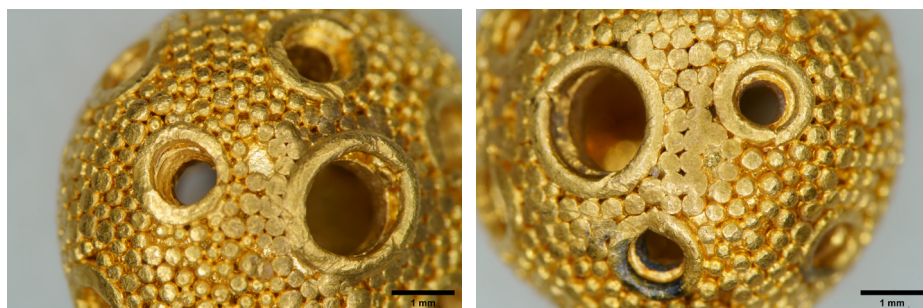
금제구슬 2점은 얇은 금판을 두드려 동그랗게 말아 만든 것으로 추정되는데, 표면을 금선과 금알갱이가 빈틈없이 메우고 있어 금판의 표면 상태 및 접합 부위를 확인하기는 어려웠다. 구슬의 내부는 비어있는데 상단과 하단에는 직경 약 2.35mm(구슬1: 평균 2.35mm, 구슬2: 평균 2.35mm)인 큰 구멍이 하나씩 뚫려 있으며, 구슬의 측면에는 직경 약 1.70mm(구슬1: 평균 1.69mm, 구슬2: 평균 1.72mm)인 작은 구멍이 5개씩 세 줄에 걸쳐 뚫려 있어, 투공의 개수는 총 17개이다. 투공 주변은 금선을 둘러 장식했고 나머지 부분은 금알갱이를 채워 넣었다<sup>(도2)</sup>. 큰 투공이 있는 구슬의 상·하단은 사용 또는 마모(磨耗)로 인해 금선 및 금알갱이의 원래 형태를 확인하기 어려운 부분도 관찰된다<sup>(도3)</sup>. 금제구슬 1점(구슬2)은 표면 일부 및 내부에 흑색 이물질이 피복되어 있다.



a	b	c
d	e	f

- (a) 구슬1의 상단  
(b) 구슬1의 측면  
(c) 구슬1의 하단  
(d) 구슬2의 상단  
(e) 구슬2의 측면  
(f) 구슬2의 하단

도2. 금제구슬의 형태



a	b
---	---

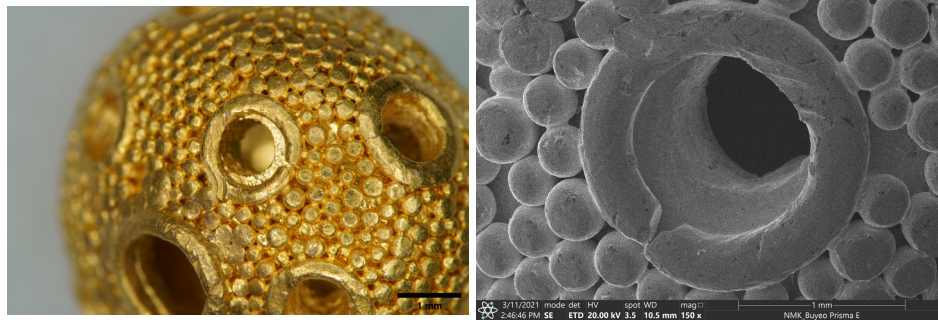
- (a) 구슬1  
(b) 구슬2

도3. 금제구슬 표면 세부 모습

### 3.2.2. 금선

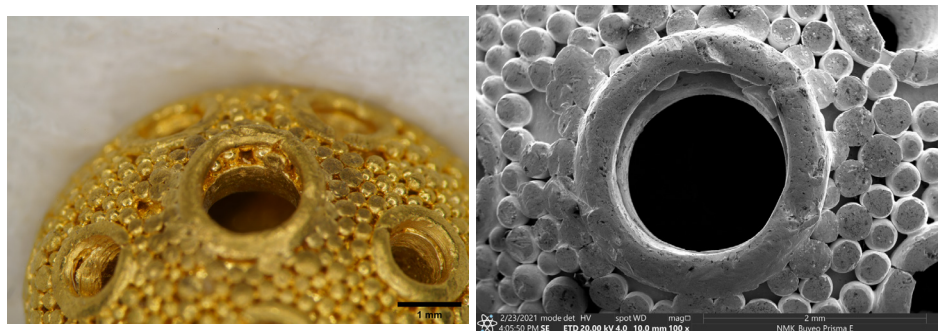
금선은 금제구슬의 투공 주변을 장식하는 데에 사용되었다. 상·하단의 큰 투공 주변을 장식하는 데 사용된 금선의 평균 너비는  $337.27\mu\text{m}$ 이다. 작은 투공 주변을 장식하는 데에 사용된 금선의 평균 너비는  $308.80\mu\text{m}$ 이며, 금제구슬 2점에 사용된 금선의 너비는 투공 크기에 따른 차이가 거의 없다. 대부분의 금선은 투공 크기에 맞춰 그 주변을 감싸고 있는데, 일부는 투공 부위에서 조금 벗어나거나 크게 접합되어 있다<sup>(도4)</sup>. 또한 금알갱이 위로 금선이 덧대진 부위도 확인되었는데, 먼저 금알갱이로 금판을 장식한 후 투공 주변을 금선으로 둘러쌀 가능성이 있다<sup>(도5)</sup>.

a b  
(a) 실체현미경 촬영  
(b) SEM 촬영



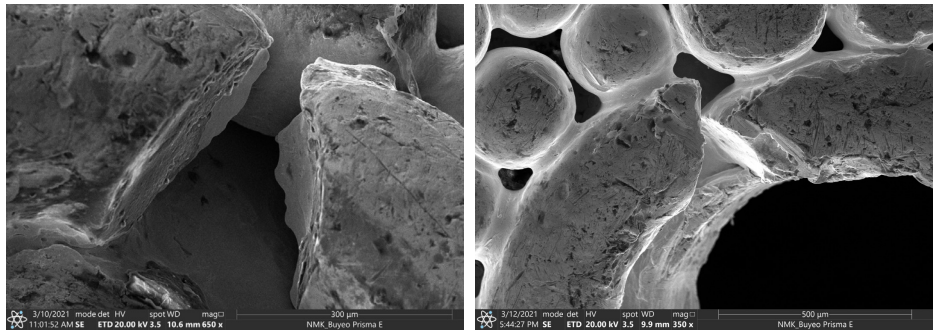
도4. 투공 크기와 맞지 않게 장식된 금선

a b  
(a) 실체현미경 촬영  
(b) SEM 촬영



도5. 금알갱이 위로 둘러진 금선

금선 표면에서는 꼬임이나 새김 등 장식의 흔적은 보이지 않았으며, 금선의 끝 부분은 대부분 사선으로 절단된 것으로 확인되었다. 투공을 장식한 금선은 양 끝이 접합되어 있으나 접합이 되지 않은 금선 일부에서는 끝이 매끄럽게 절단되지 않거나 완전히 잘리지 않은 부분도 관찰되었다<sup>(도6)</sup>.

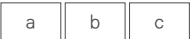
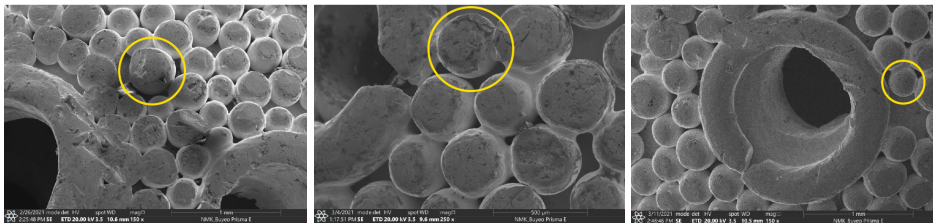


(a) 사선으로 절단된 금선  
(b) 단면이 매끄럽지 않은 금선

도6. 금선 세부 사진(SEM)

3.2.3. 금알갱이

금알갱이는 크기에 따라 세 가지(대, 중, 소)로 구분이 가능하였다. 크기는 대형 약 429.58 $\mu\text{m}$ , 중형 약 343.78 $\mu\text{m}$ , 소형 약 270.02 $\mu\text{m}$ 이며, 중형의 금알갱이가 대부분을 차지한다<sup>[도7]</sup>.



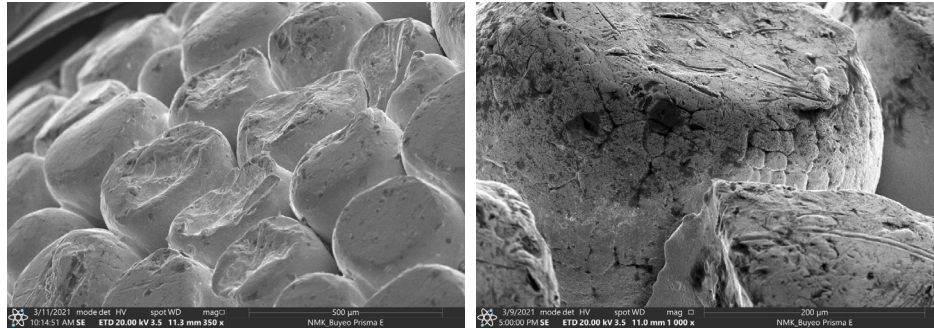
(a) 대형  
(b) 중형  
(c) 소형

도7. 금알갱이 크기

금알갱이 일부는 구슬의 상·하단을 중심으로 사용 또는 마모로 형태가 변형되어 있으며, 부분적으로 깨진 흔적도 관찰되었다<sup>[도8(a)]</sup>. 주사전자현미경(SEM)으로 금알갱이 표면을 확대하여 살펴본 결과, 합금에서 나타나는 수지상의 덴드라이트(Dendrite) 조직은 나타나지 않았으나, 그 외의 금속 조직의 성장이 관찰되었다<sup>[도8(b)]</sup>.

a      b

(a) 일부가 깨진 금알갱이  
(b) 금알갱이 표면 금속  
조직 성장



도8. 금알갱이 세부 사진

### 3.2.4. 금선 및 금알갱이 접합 방법

금알갱이의 접합 방법은 금랍법, 구리확산법, 용접법이 알려져 있다<sup>[1],[5],[8],[9],[12]</sup>. 금랍법은 모금(母金)보다 순도가 낮은 금뿔을 이용하여 금알갱이 등을 접합하는 방법으로 호암미술관 소장 금제세환이식<sup>[10]</sup>, 경주 감은사지 동삼층석탑 출토 금제 풍탁<sup>[11]</sup>, 경주 보문동 합장분 출토 금제태환이식<sup>[4]</sup> 등에서 확인된 바 있다. 구리확산법은 구리화합물 등의 화학적 반응을 이용한 방법으로 순도가 높은 제품의 접합에서 주로 확인된다고 알려져 있다<sup>[9]</sup>. 구리확산법을 이용한 예로는 평양 석암리 금제교구<sup>[3]</sup>, 부여 능산리 서고분군 출토 금제오각형장식<sup>[13]</sup> 등이 있다. 용접법은 매개체 없이 접합하는 방법으로 주로 금, 은, 구리 삼원계 합금에서 확인되는데, 이를 이용한 예로는 경주 계림로 보검<sup>[5]</sup>, 공주 무령왕릉 출토 금제소주<sup>[7]</sup> 등이 있다.

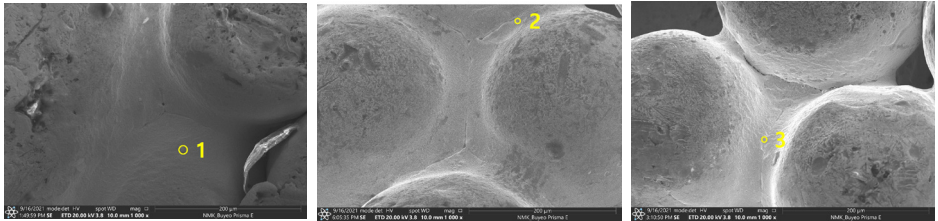
능산리사지 출토 금제구슬 2점은 2010년에 제작 방법을 밝히기 위한 연구가 진행된 바 있으나<sup>[6]</sup>, 금알갱이 및 금선의 균일하지 않은 높이 등으로 인한 검출 한계로 금알갱이 등의 접합 방법에 대한 증거를 찾지 못하였다. 본 연구에서는 이러한 기계적 한계를 보완하기 위하여 두 개의 검출기를 이용하였고, 분석 위치별로 검출 감도가 더 높은 검출기를 선택적으로 사용하여 이전 연구에서의 문제점을 극복하고자 하였다.

먼저, 금제구슬1의 경우 금알갱이 접합 부위에 대한 성분 조성을 살펴본 결과, 금선 및 금알갱이의 성분 조성과의 별다른 차이가 없었으나, 일부에서 구리(Cu)의 함유량이 3wt%이상 검출되는 특징을 보였다. 금제구슬 2의 경우 일부 접합 부위에서 Cu의 함유량이 금선, 금알갱이보다 1wt%이상 높게 검출되는 특징을 보였다. 한편, 금제구슬2는 표면 일부에 흑색 물질이 부분적으로 부착되어 있는데, Cu의 함유량이 높게 확인되었으며, 황(S)도 함께 검출되는 특징을 보였다<sup>(표5),(도9),(도10)</sup>. 접합면에서는 다른 금속뿔의 흔적은 발견되지 않았다. 즉, 능산리사지 출토 금제구슬 2점의 금알갱이 및 금선 접합 부위 일부에서 Cu가 모금보다 높게 확인되는 점으로 보아 금제

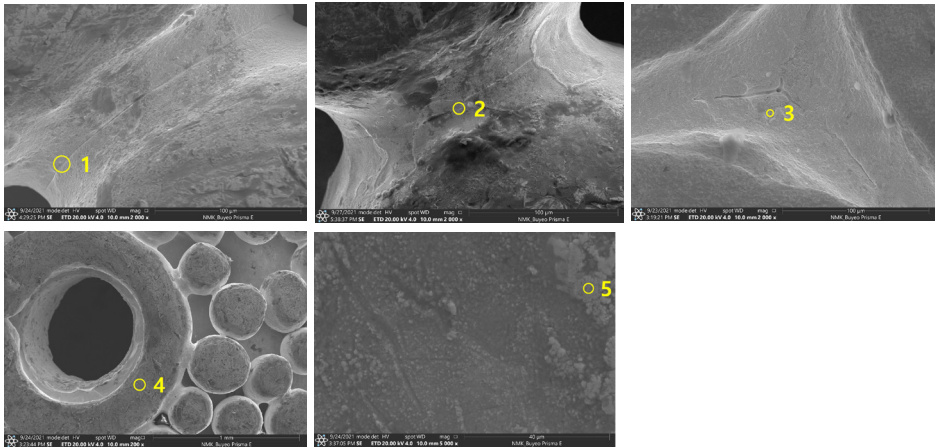
구슬의 제작에 사용된 접합 방법은 구리확산법일 가능성이 있다고 추정된다. 다만, 금제구슬2의 경우 표면 일부에서 확인되는 흑색 물질에서 Cu가 높게 검출되었으므로 접합 부위의 Cu 함유량은 이로 인한 영향일 가능성도 배제할 수는 없다.

표5. 접합 부위 성분 조성(wt%)

명칭	분석위치		검출 원소		
			Au	Ag	Cu
금제구슬1	1	금알갱이-금알갱이 접합	95.87	0.74	3.39
	2	금알갱이-금알갱이 접합	98.99	0.60	0.41
	3	금알갱이-금알갱이 접합	98.59	0.75	0.66
금제구슬2	1	금선-금알갱이 접합	97.76	0.65	1.59
	2	금알갱이-금알갱이 접합	98.28	0.65	1.06
	3	금알갱이-금알갱이 접합	98.78	0.62	0.60
	4	금선 위 흑색물질	84.45	0.76	14.79
	5	금선 위 흑색물질	8.21	0.02	91.77



도9. 금제구슬1의 접합부분 SEM 이미지



도10. 금제구슬2의 접합부분 및 흑색물질 SEM 이미지

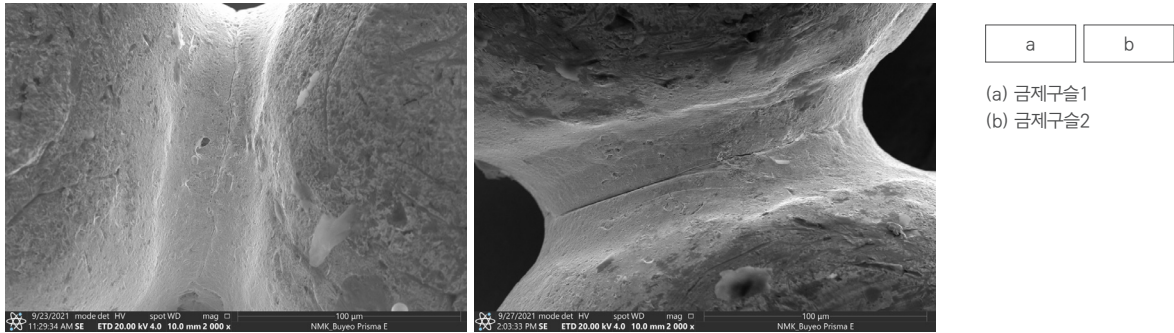
#### 4. 구리확산법에 의한 접합 가능성 고찰

능산리사지 출토 금제구슬의 제작에 사용된 접합 방식이 구리확산법일 가능성에 대하여 기존에 발표된 제작 기법 및 재현 실험 연구 결과<sup>[8],[9],[14]</sup>를 참고로 하여 살펴 보면, 금랍법은 접합면에서 뿔쇠의 사용 흔적과 수지상 조직이 관찰되는 특징이 있으며, 금알갱이 표면에서는 특이한 조직은 확인되지 않는다. 구리확산법은 접합 부분에서 뿔쇠의 사용 흔적이 확인되지 않고 접합면이 적고 매끈하며 표면에서 특이한 조직이 관찰되지 않는다. 합금용접법은 접합면이 균일하고 뿔쇠의 사용 흔적이 없다. 금알갱이 표면에서는 수지상 조직(dendrite)이 관찰되며 표면에 뿔쇠나 구리 화합물이 남지 않아 표면에 가장 깨끗하게 접합된다. 반면, 순금용접법의 경우, 재현 실험 결과 육안상으로는 금알갱이와 금판이 접합이 이루어진 것으로 보였으나 실제로는 봉사가 유리질화되면서 물리적으로만 접합되었으며, 이로 보아 고대 금제품에서 순금 용접법이 사용되었을 가능성은 낮다고 보고된 바 있다<sup>[8]</sup>.

고대 누금 재료의 제작기법 및 접합 방식에 따른 금알갱이 크기 및 순도와 장·단점을 정리한 연구에 의하면 금랍법은 작업 공정이 쉽고 낮은 순도의 금도 활용 가능한 장점이 있으나, 크기가 작은 금알갱이에는 적용이 어렵고 접합면이 뚜렷하지 않다는 단점이 있다. 또한 접합면의 결합력이 약하여 재가열했을 때 탈락의 위험이 있다. 구리확산법의 경우, 미세한 크기의 알갱이까지 활용할 수 있어 세밀한 표현이 가능하며 접합면에서 합금이 일어나므로 재가열시 탈락의 위험이 적다. 또한 순도가 높은 금을 사용하고 접합 매개물을 활용하여 접합하기 때문에 접합의 편차가 적으나 제작 기술의 난이도가 높고 접합 후 미세한 잔여물의 흔적이 남는다. 용접법의 경우, 작은 금알갱이까지 활용 가능하며 접합 후 잔여물의 흔적이 남지 않아 표면이 깨끗한 장점이 있으나 접합 기술의 난이도가 높고 금의 순도나 금알갱이의 크기 등에 따라 접합 정도의 편차가 큰 단점이 있다<sup>[9]</sup>.

한편, 누금 유물의 단면에 대하여 EDS 및 EPMA를 수행한 중국의 연구 결과에 따르면 구리염을 이용한 구리확산법의 경우, 접합 부분에서는 모금에 비해 Cu의 함유량이 1wt% 정도 높게 나타났다. 접합 부분에서의 Cu 함유량이 높게 확인되지 않는 이유에 대하여, 금알갱이의 크기가 작고 금판의 두께가 얇아 Cu의 함유량이 많지 않아도 열처리를 통해 충분한 접합이 가능하며, 단면에서 관찰되는 hexagonal grain의 성장이 이를 뒷받침한다고 밝히고 있다<sup>[14]</sup>.

위의 기존 연구 내용을 종합하여 살펴보면 능산리사지 출토 금제구슬의 경우 접합 부분에서 Cu의 함유량이 금알갱이 및 금선보다 높게 검출되었다는 점, 접합 부위에서 수지상 조직이나 뿔쇠의 사용 흔적이 발견되지 않았으며, 접합 부위가 매끈하다는 점 등<sup>(도11)</sup>으로 볼 때 구리확산법을 사용했을 가능성을 고려해볼 수 있다.



도 11. 금제구슬의 접합 부위 SEM 이미지

다만, 금제구슬2의 표면 일부에는 Cu와 S를 함유하고 있는 흑색 물질이 묻어있어 접합 부위에서 검출된 Cu가 이 흑색 물질에서 유래하였을 가능성도 배제할 수 없다. 한편, 흑색 물질은 구리확산법에 사용된 구리화합물의 재료 흔적일 가능성도 있어 추가 조사가 필요하다.

고대에 구리확산법을 사용하여 금선 또는 금알갱이를 접합할 경우, 구리화합물을 매개물로 이용하였는데, 이 때 사용하는 구리화합물의 재료는 공작석(Malachite,  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ )의 일종인 크리스코콜라(Chrysocolla, 일명 구리염), 녹청(Verdigris,  $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2$ ), 남동석(Azurite,  $(\text{CuCO}_3)_2 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ ), 적동석(Cuprite,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ), 황산구리(Copper Sulfate,  $\text{CuSO}_4$ ) 등을 사용하였다<sup>[9]</sup>. 이러한 구리화합물 재료를 사용하여 접합할 경우, 온도가  $100^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 가 되면 비금속 땀 속 구리화합물의 구리 성분(청색)이 산소와 결합하여 산화제2구리(흑색)로 변하면서 구리화합물을 도포한 바탕금속과 금알갱이 사이에서 흑색을 확인할 수 있다( $2(\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2) + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{CuO} + 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ ). 온도가 약  $600^\circ\text{C}$ 가 되면 비금속 땀 속 유기 접착제가 타면서 아교가 산소 역할의 탄소로 전환되고,  $850^\circ\text{C}$ 가 되면 탄소는 산화구리( $\text{CuO}$ )를 환원시켜 이산화탄소를 생성하면서 숯과 함께 금속의 산화를 방지하고 접합 부위에는 순동충만 남는다( $\text{C} + 2\text{CuO} \rightarrow 2\text{Cu} + \text{CO}_2$ ).  $950^\circ\text{C}$ 가 되면 환원된 순동충에 존재하는 구리 원자와 바탕 금속의 금의 원자가 표면이 용융되어 금-구리 합금 고용체가 되는데( $\text{Au} + \text{Cu} \rightarrow \text{Au} \cdot \text{Cu}$ ), 이러한 과정을 거쳐 접합이 이루어진다<sup>[4],[8],[9]</sup>.

금제구슬2의 표면 일부에서 확인되는 흑색 물질이 구리화합물 재료의 흔적이라면, 녹청 또는 황산구리 등을 접합 매개물로 사용했을 가능성이 있으며, 이 흑색 물질은 낮은 온도에서 확인할 수 있는 산화제2구리일 가능성이 높다. 그러나 이 흑색 물질이 구리화합물의 흔적이 아니라 매장 환경 내에서 주변의 청동부식물의 영향을

받은 결과일 가능성도 배제할 수는 없다. 금제구슬 표면에 부착된 흑색 물질이 정확히 무엇인지 규명하기 위해서는 추후 XRD 등 추가 분석이 필요하다.

## 5. 결론

능산리사지에서 출토된 금제구슬 2점에 대하여 과학적 분석 조사를 진행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 금제구슬은 17개의 투공이 있는데, 투공 테두리에는 금선을 두르고 나머지 부분은 금알갱이로 장식하였다. 금선의 두께는  $308\sim340\mu\text{m}$ 이며, 대부분이 사선으로 절단되어 있으며 투공을 따라 등글게 장식한 금선은 양 끝을 접합하여 마무리하였다. 일부에서는 금선을 접합하지 않고 마무리한 경우도 있었으며 끝이 균일하지 않게 절단된 흔적도 확인되었다.
2. 금알갱이의 크기는  $270\sim430\mu\text{m}$ 로 대, 중, 소로 구분되었고 대부분이 중형(약  $343\mu\text{m}$ )에 속하였다. 상·하단을 중심으로 사용 또는 마모로 인해 금알갱이의 형태가 변형되거나 원형을 찾아보기 어려운 부분이 확인되었고, 일부는 깨져있다.
3. 투공 테두리를 장식하는 금선 아래로 금알갱이가 위치한 부분이 확인되었는데, 금알갱이로 먼저 장식한 후, 투공 주변을 금선으로 둘렀을 가능성이 고려된다.
4. 금선 및 금알갱이의 성분 조성은 Au 98.54~98.76wt%, Ag 0.67~0.83wt%, Cu 0.55~1.07wt%으로 유사하였고 부위 별 성분 조성의 차이는 보이지 않았다. 금알갱이 접합 부분 일부에서는 Cu의 함유량이 1.06~3.39wt%로 모금보다 높게 검출되었다.
5. 고대 누금 제작 기법 및 접합 방법, 재현 실험에 대한 기존 연구 결과를 토대로 본연구의 분석 결과를 살펴본 결과, 금제구슬은 구리확산법을 사용하여 제작하였을 가능성이 있다. 표면에 부착된 흑색 물질은 구리화합물의 재료일 가능성이 고려되나, 매장 환경에서 주변 청동부식물의 영향을 받았을 가능성도 배제할 수는 없으며 정확한 규명을 위해 추가 분석이 필요하다.

보고된 바에 의하면, 신라시대 누금세공품의 경우 금알갱이 등의 접합에 주로 금랍법이 사용된 것으로 보인다<sup>[8]</sup>. 백제시대 누금세공품의 경우, 공주 무령왕릉 출토 금제소주<sup>[7]</sup>, 부여 능산리사지 출토 금제원추형장식<sup>[6]</sup> 역시 금랍법을 사용한 것으로 보고되었고, 부여 서고분군 출토 금제오각형장식<sup>[13]</sup> 등에서는 구리확산법이 확인된 바 있다. 본 연구 대상인 금제구슬은 구리확산법을 사용한 것으로 보인다. 추후 부여 금공리 출토 금꾸미개, 공주 무령왕릉 출토 장식용 감장, 경주 황오동 출토 금귀걸이

등 백제시대 및 신라시대 누금세공품에 대한 관련 연구를 지속하여 제작에 사용된 접합 방법을 확인한다면, 삼국시대의 금공기술의 발전과 지역적 양상을 확인하는데 중요한 정보를 제공하리라 기대한다.

## 참고문헌

1. 권향아, 삼국시대 이식(耳飾)의 누금기법(鑲金技法)에 관한 연구, *한국공예논총* **5**, p7-35, (2002).
2. 이유진, 고대 누금세공(鑲金細工)기법의 전개와 발전, *기초조형학연구* **7**, p377-383, (2006).
3. 노지현, 유혜선, 석암리 9호분 출토 금제띠고리의 제작 방법 고찰, *박물관보존과학* **17**, p1-16, (2016).
4. 유혜선, 윤은영, 횡혈식석실 출토 금제태환이식의 성분조성 및 금립세공기법, 경주 *보문동합장분*, p106-117, 국립경주 박물관, 경주, (2011).
5. 유혜선, 경주 계림로 14호분 장식보검 금립의 접합방법에 관한 고찰, *박물관보존과학* **16**, p4-13, (2015).
6. 이선명, 남궁승, 김연미, 부여 능산리사지 출토 누금세공 유물의 제작기술 연구, *보존과학회지* **26**, p13-24, (2010).
7. 최기은, 유혜선, 비파괴 분석법을 활용한 무령왕릉 출토 금제유물의 제작특성 연구, *무령왕릉 출토 유물 분석 보고서 (Ⅲ)*, p134-199, 국립공주박물관, 공주, (2007).
8. 신용비, 신라 금제품의 화학조성과 누금기술, p16, p111-114, p146-149, 공주대학교 박사학위논문, (2021).
9. 이진아, 그레놀레이션 기법과 활용에 관한 연구, p44-45, p52-64, 국민대학교 박사학위논문, (2020).
10. 허우영, 금제태환이식(보물557호)에 사용된 누금기법, *호암미술관 연구논문집* **6**, p113-123, (2003).
11. 문환석, 조남철, 강대일, 이명희, 재질분석을 통한 제작특성 연구, *감은사지 동 삼층석탑 사리장엄*, 국립문화재연구소, p154-171, (2000).
12. 유혜선, 몽골 도르릭나르스 홍노 무덤 2~4호분 출토 청동 및 금제 유물 분석, *보존과학회지* **28**, p176-184, (2012).
13. 부여군, *부여 능산리고분군 / 서고분군 제4차 발굴조사*, p258-259, 부여, (2019).
14. Fan Yang, Thilo Rehren, Ping Kang, Siran Liu, Kunlong Chen, On the soldering techniques of gold objects from the Boma site, Xinjiang, China, *Journal of Archaeological Science* **33**, 102572, (2020).