비파괴 분석법을 통한 안성 청룡사 금동관음보살좌상 내부구조 및 금박층 조사

Investigation of the Internal Structure and Gold-thin Layer of the Gilt-bronze Seated Avalokitesvara Bodhisattva at Anseong Cheonryong Temple through the Non-destructive Analysis

최정은*, 최학

불교문화재연구소

Jung Eun Choi*, Hak Choi

Research Institute of Buddhist Cultural Heritage, Seoul 03147, Korea

Received June 15, 2021

Revised July 13, 2021

Accepted November 2, 2021

*Corresponding author

E-mail: jechoi1203@gmail.com

Phone: +82-2-6261-6507

Journal of Conservation Science
2021;37(6):670-678

<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.6.06>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록 <안성 청룡사 금동관음보살좌상>을 봉안하고 있는 청룡사(靑龍寺)는 경기도 안성시 서운면 서운산 자락에 있는 사찰이며, 대한불교조계종 제2교구 본사인 용주사의 말사이다. 안성 청룡사 금동관음보살좌상의 바닥면 XRF 분석 결과는 Cu-27.2 wt%, Sn-12.6 wt%, Pb-48 wt%이며, 과거 여러 전란으로 인해 소지금속 성분과 차이가 있을 것으로 예상된다. 불상의 내부를 확인하기 위해 감마선(γ -ray, Ir-192)으로 촬영하였으며, 파손된 배면 부분과 후대에 나무로 덧대어 수리한 위치를 확인하였다. γ -ray 촬영 결과와 XRF 분석을 이용하여 확인한 좌, 우의 수리 경계면은 허벅지 중간부터 목 아랫부분까지로 청동과 나무로 분리된다. 안성 청룡사 금동관음보살좌상의 금박 두께를 추정하기 위해 표준시료를 이용해 계산한 결과 얼굴과 가슴과 같은 육신 부분의 금박 두께가 20.7 μ m와 21 μ m로 가장 두꺼웠으며, 나무를 소지 재료로 한 부분이 평균 11.9 μ m, 마지막으로 소지금속이 청동인 부분이 평균 7.4 μ m로 금박 두께가 가장 얇음을 확인할 수 있었다.

중심어 청룡사, 금동관음보살좌상, 청동, 금박, 비파괴, γ -ray

ABSTRACT Anseong Cheonryongsa, a temple located in Anseong Seoun Mountain, is a part of the second Jogye Order of Korean Buddhism, under the Yongju Temple, and enshrines a gilt-bronze seated Avalokitesvara Bodhisattva. In this study, X-ray fluorescence (XRF) analysis revealed that this statue is composed of Cu-27.2 wt%, Sn-12.6 wt% and Pb-48 wt%. A gamma (γ) ray (Ir-192) image confirmed damage on the backside of the statue, which was later repaired with wood. The XRF analysis and visual observation determined the boundary between the metal and wood in the statue. In addition, results of standard X-ray peak intensity of gold foil and correlation with thickness helped to derive an equation for calculating the thickness of the Avalokitesvara Bodhisattva's gold foil. It was determined that the gilded chest (21 μ m) and face (20.7 μ m) of the statue were the thickest sections, the wooden substratum (11.9 μ m) was the next-most thick, and the bronze (7.4 μ m) was the thinnest layer.

Key Words Cheonryongsa, Gilt-bronze seated avalokitesvara bodhisattva, Bronze, Gold, Non-destructive, γ -ray

1. 서론

<안성 청룡사 금동관음보살좌상>을 봉안하고 있는 청룡사(靑龍寺)는 경기도 안성시 서운면 서운산 자락에 위치한 사찰이며, 대한불교조계종 제2교구 본사인 용주사의 말사이다. 청룡사는 청룡사 절내의 부도밭으로 가는 입구에 서 있는 청룡사사적비에 고려 원종 6년(1265) 명본국사가 대장암이라 이름 지어 창건했으며, 공민왕 13년(1354) 나옹화상이 크게 중창하면서 청룡사로 개명했다고 기록되어 있다(Cultural Heritage Administration, 1990). 안성 청룡사 금동관음보살좌상은 본래 관음전에 봉안되어 있었으나 2010년대 초반 무렵 <소조석가삼존불상>(1603)이 봉안된 대웅전 수미단(須彌壇) 왼쪽 공간에 별도로 잠시 모셔지기도 하였다. 관음전의 청룡사 금동관음보살좌상은 단정하고 아담한 신체묘사, 얼굴과 다리, 신체의 곡선적인 양감처리, 세부가 살아있는 이목구비, 복잡하고 화려한 보관과 귀 옆으로 늘어진 장식이 위로 솟구치듯이 과장된 점에서 14~15세기, 고려 말~조선 초의 보살상으로 추정된다(Anseong-si, 2020). 또한, 변형통견식 착의법의 청룡사 보살상은 고려 후기 보살상의 <서주 부석사 동조관음보살좌상>, <양평 용문사 금동보살좌상> 등 많은 작품이 남아 있는 대표적인 유형이다(Anseong-si, 2020). 금동관음보살좌상의 배면은 정면과 달리 입체감이 떨어지고, 표면이 마감이 거칠어 후대에 수리한 것으로 보인다.

불상의 제작방법은 내부구조를 관찰하여 확인하는데, 목불이나 건칠불의 경우 X선을 사용하고, 금동불과 같은 X선이 투과하기 힘든 재질의 불상 조사에는 감마선(γ -ray) 투과 사진 촬영방법을 이용한다. 감마선 투과 사진 촬영을 이용한 금동불의 조사는 1963년 국보 78호, 83호의 반가사유상의 제작기법 연구를 시작으로 하였다(Go and Ham, 1963). 당시 이를 바탕으로 통칙으로 된 금동불과 내부가 공동인 금동불로 분류(Go and Ham, 1964)하였으며 내부기공 존재 유무, 금속 두께 등으로 미루어 제작 시기를 추측하였다. 이후 문화재청에서 중요문화재 기록화 사업을 하면서 철불의 감마선 촬영을 병행하였다(Cultural Heritage Administration, 2012). 최근에는 X선 CT 장비를 이용한 입체적인 불상 내부 형태 확인이 가능하며, 불상의 세밀한 구조까지 관찰할 수 있다.

금동불의 비파괴 성분분석 방법으로는 X선 형광분석이 있다. X선 형광분석법을 이용하면 표면에서 X선을 쏘아 특성 X선을 얻어 검출 가능하며, 비파괴로 정성, 정량 분석이 가능하다. 금동불의 도금 분석에 적용한 예로는 수은아말감도금 표준시료를 제작하여 유물의 도금 두께

Figure 1. Image of Avalokitesvara Bodhisattva.

측정(Kim, 2012), 금 피크(Au-L α)의 피크 강도만을 비교하여 오가타 고린의 홍백매도병풍에 얹어진 금의 두께를 비교한 연구도 있다(Abe *et al.*, 2011). Satoh는 X선 형광분석장비를 이용한 피막 두께 측정은 두께를 알고 있는 표준시료를 이용하여 금두께와 형광 X선 강도로 검량선을 만들어 실제 두께 분석에 적용할 수 있다고 보고(Satoh, 1989)하였다. 또한, 소지금속이 금인 경우 피복 금속의 두께 측정(Hagasegawa *et al.*, 2016)과 피복 금속이 금인 경우의 두께 측정 실험(Naganuguma *et al.*, 1990)을 실시하였다. 두께 분석 실험 결과, X선 강도와 금속 박막 두께의 사이에는 검량선이 직선인 일차방정식이 얻어지는 결과가 도출되었다. 이 연구를 바탕으로 현장에서 적용 가능한지 실험하기로 하였다. 이번 금동관음보살좌상의 비파괴 조사를 통해 정확한 내, 외부를 진단하고, 과거 수리 부분 및 개금층 두께를 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구 방법

안성 청룡사 소장 금동관음보살좌상의 구성 성분 및 표면구조를 파악하기 위해 X선 형광분석기(S1 titan 600, Bruker, USA)를 이용하였으며 금동관음보살좌상의 전·후·좌·우면과 바닥면 62개소를 측정하였다. XRF는 X선이 방출되는 장비로 장비 분석면과 유물이 최대한 밀착하여야 하므로 곡면이 심한 면은 분석에서 제외하였으며, 표면에 특이사항이 관찰되는 부분을 중심으로 분석하였다. 금동관음보살좌상 내부의 정확한 상태 판단을 위해 γ -ray(Ir-192) 투과사진촬영을 병행하였다. 선원 강도는 40 Ci이며 노출시간은 15분 혹은 40분으로 유물 두께에 따라

차등을 두었다. 선원과 유물과의 거리는 2 m이며, 필름은 Fuji #100을 사용하였다. 불상 바닥면에 보이는 탈락된 칠층의 단면 관찰에 광학현미경(ECLIPS LV100N POL, Nikon, JPN)을 사용하였다. 또한, 표면 금박을 통과하여 내부 금속 검출 여부를 확인하기 위하여 청동과 나무 샘플을 이용하여 금박 두께에 따른 X선 강도 변화를 확인하였다.

3. 연구 결과

3.1. 금동관음보살좌상의 성분분석

금동관음보살좌상의 소지 금속성분을 분석하기 위해 바닥면을 조사하였다. 조사 결과 전체 바닥면의 2/3 정도가 나무로 메워져 있고 앞쪽 옷자락 부분 바닥면만 소지 금속이 노출되어 있다. 소지 금속의 색은 회색에서 흑색이다. 양쪽 나무 바닥면을 칼로 등글게 깎아 나무와 금속 부에 석고로 추정되는 베이지색 물질을 채웠으며 옷자락 왼쪽 바닥면에 직물 부착 흔적이 보인다.

금동관음보살좌상 바닥면에 드러난 소지금속의 XRF 분석 결과, 구리(Cu) 27.2 wt%, 주석(Sn) 12.6 wt%, 납(Pb) 48.6 wt%이 검출되었다. 구리와 주석의 합금은 녹색 부식을 생성하기에 청동이라 하며 순수한 구리나 철에 비해 녹는점이 낮아 주물을 만들 때 자주 사용되는 합금이다. 오래된 청동일수록 내부 주석이 표면으로 확산하여 산화 주석농도가 높아지는 청동의 특성을 감안하였을 때 금동관음보살좌상의 실제 주석 성분 함량은 XRF로 검출된 농도보다 낮을 것으로 추정된다. 금동관음보살좌상은 특징적으로 납이 매우 높게 검출되었는데, 이처럼 청동(Cu-Sn)에 납(Pb)을 섞는 이유는 청동의 녹는점을 낮춰 금속이 거푸집 안에서 잘 흐르도록 하여 형태를 이루기 전에 굳는 것을 방지하기 위함이다. 또한, 완성된 주물의 표면을 마무리할 때 도구로 쉽게 깎을 수 있도록 하는 역할을 한다. 하지만 납이 과다하게 많아지면 금속이 너무 무

르게 되기 때문에 청동 주물에서 30 wt% 이상의 납이 검출되는 경우는 드물다(Hwang, 2008; Shin and Kim, 2020; Bae *et al.*, 2018; Gwak and Kwon, 2019). 또한, 1720년에 건립된 <안성 청룡사 사적비>에 따르면 “... 중간에 불에 타 재가 되고 불상은 거꾸로 엎어 졌으며(中間灰燼 金身顛倒 金身顛倒)”라는 표현이 있어 여러 전란을 거치면서 사찰과 불상의 훼손이 발생하였다고 추정하고 있다. 이때 불상 배면이 손상된 것으로 보이는데, 화재로 인해 불상의 절반가량이 녹아내린 불상의 바닥 면이기 때문에 소지 금속과 바닥 면에서의 XRF 값에 차이가 있을 수 있어 정확한 합금 함량은 추가 조사가 필요할 것으로 보인다.

3.2. 금동관음보살좌상 구조분석

금동관음보살좌상을 육안으로 관찰하면 불상의 정면에 비해 배면, 양옆 엉덩이와 허벅지 아랫부분은 입체감이 떨어지고 표면이 고르지 않다. 표면 마감의 차이가 생긴 이유를 알기 위해 표면 마감 경계 양쪽 부분의 XRF 분석을 하였고 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

그 결과 표면이 매끈한 부분(smooth surface)은 납과 주석의 함량이 높게 검출되고, 표면이 거친 부분(rough surface)은 납과 주석이 낮거나 검출되지 않았다. 검출 성분이 다른 것은 표면이 거친 부분과 매끈한 부분의 소지 재료가 다르다는 것을 의미한다. 표면이 거친 부분의 위치가 대부분 배면인 것을 고려하면 이곳의 소지 재료가 불상 바닥 면에서 관찰되던 나무일 가능성이 클 것으로 보인다.

정확한 내부구조 확인을 위해 γ -ray(Ir-192) 투과 사진을 촬영하였다. Figure 3, Figure 4의 금동관음보살좌상의 측면 촬영 이미지 확인 결과, 바닥부터 어깨까지의 등 대부분이 파손되었으며 겨드랑이에서 팔꿈치 부분의 청동이 찢어져 갈라졌으며 양쪽 허벅지 중간 부분까지 파손이 확인된다. 등과 둔부의 파손 손실 부분에 나이트가 확인

Figure 2. Images of the bottom of the Avalokitesvara Bodhisattva statue.

Table 1. Comparison of surface conditions of the components

Right elbow	Cu	Zn	Sn	Au	Pb
	① Rough surface	10.6	4.0	-	77.4	0.7
	② Smooth surface	11.9	2.4	7.4	61.4	11.5
Right hip	Cu	Zn	Sn	Au	Pb
	③ Rough surface	9.3	2.4	5.9	75.3	2.1
	④ Smooth surface	33.1	4.4	7.5	42.5	8.7
Right thigh	Cu	Zn	Sn	Au	Pb
	⑤ Rough surface	17.0	4.0	-	74.4	-
	⑥ Smooth surface	30.0	4.4	8.6	42.9	8.4
Left shoulder	Cu	Zn	Sn	Au	Pb
	⑦ Rough surface	12.2	3.5	-	77.3	0.6
	⑧ Smooth surface	26.0	0.9	7.3	40.8	21.9
Left elbow	Cu	Zn	Sn	Au	Pb
	⑨ Rough surface	13.4	4.0	-	75.2	0.9
	⑩ Smooth surface	30.0	2.3	12.9	43.8	6.1
Left side	Cu	Zn	Sn	Au	Pb
	⑪ Rough surface	20.4	4.3	-	70.0	-
	⑫ Smooth surface	39.9	6.2	7.6	35.0	4.2

되어 나무로 메워져 있음을 확인하였으며 나무 부재 연결에는 끼쇠를 사용하였다. 즉, 과거에 청동이 찢어질 정도의 큰 충격이 가해졌으며, 후대에 나무를 덧대 보수를 하고 개금하였다. 금동불의 파손 부분을 나무로 보수한 예는 현재까지는 파악되지 않으나 건칠불인 해인사 목조희

랑대사상(Jung, 2009) 수리에 나무를 사용하는 예는 있다. γ -ray(Ir-192) 투과 사진과 위의 XRF 분석결과 및 표면 마감 상태 등을 종합하여 불상 좌, 우측면의 청동과 나무 경계 부분을 γ -ray(Ir-192) 투과 사진 위에 그렸다(Figure 4).

Figure 3. X-ray images of the Avalokitesvara Bodhisattva statue.

Figure 4. Left and right sides of the boundaries of repairation.

3.3. XRF 검출 결과에 따른 금박 두께 분석

표면 금박층에서 실시하는 XRF 분석결과가 금박층 두께에 따라 피크 강도가 어떻게 변화하는지 확인하기 위하여 표준시료를 제작하여 XRF 분석하였다. 금박 표준시료는 금동관음보살상에서 탈락된 금박편(칠편 위 금박)의 XRF 분석 결과값(97.7 wt% Au - 2.3 wt% Cu)과 유사한 값의 금박을 선정하였다. 목불의 소지 재료인 청동판(Cu - 9.3 wt% Sn - 15.2wt% Pb)과 나무판 위에 시중에서 파는 금순도 97% 이상의 금박을 얹어 금박 두께에 따른 XRF의

X선 강도 변화를 조사하였다. 40 keV에서 금의 $\text{L}\alpha$ 선 피크를 비교하였으며, 측정시간은 60초이다. XRF는 측정 방법에 따라 콤프튼 산란선 강도 변화가 생기며, X선 조사량, 측정시간, 공기에 의한 소멸 정도 등의 변화를 평가하는 것이 가능하다(Abe *et al.*, 2011). 콤프튼 산란선 강도에 차이가 생기지 않게 되도록 측정면과 XRF 장비를 밀착시켜 분석을 진행하였다. 실험은 총 5회 진행하였으며, 최댓값과 최솟값을 제외한 3회의 평균값으로 선정하였다.

금 두께에 따른 $\text{Au-L}\alpha$ 선 강도변화를 측정한 결과가 Figure 5와 같다. 가로축은 금박의 장수, 세로축은 피크강

도(counts per second, CPS)이다. 청동과 나무 위에 금박을 올렸을 때 모두 금박 두께에 따른 Au-L α 의 피크강도는 비례해서 증가한다. 실험에 사용된 금박의 두께는 약 1.6 μm 로 위의 수식에서 얻어진 x (금박수) 값에 금박 두께를 곱해 분석 시료의 금박두께를 유추할 수 있다. 본 실험은 금박을 부착할 때 사용되는 옷칠 혹은 카슈에 의한 영향은 매우 미비한 것으로 가정하였으며, 금박을 부착할 때 사용되는 물질 및 첨가 물질에 대한 영향에 관하여 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

얻어진 일차방정식이 성립됨을 확인하기 위해 동일한 XRF 장비를 활용하여 현장에서 수습된 금동관음보살좌상 금박시편과 출토 금동 2점, 불화 장황에 사용된 금박

1점의 Au-L α 측정을 실시하고 금박 두께를 현미경으로 확인하여 검증하였다. 각 시료에 사용된 금박은 실험에 사용된 금박과 동일한 성분으로 가정하고, XRF Au-L α 선 피크 강도와 실험으로 얻은 방정식을 대입하여 금박 두께를 계산하였다(Table 2).

Table 2는 각 시편의 계산된 금박값과 실제 현미경으로 관찰하여 얻은 금박값의 비교표로 (A) 금동관음보살좌상 탈락 금박편 단면, (B) 황용사지 출토 금동귀면의 금박시편 단면, (C) 상하리사지 출토 금동불의 금박, (D) 울산박물관 소장 아미타팔대보살도 장황 금사의 단면이다. (A), (B), (C)는 소지금속이 청동이며, (A)는 금이 97.7 wt%, (B)는 금이 95 wt%, (C)는 63.6 wt%이며, (D)는 샘플 채취가

(A) X-ray CPS of the gold foil on metal

(B) X-ray CPS of the gold foil on wood

Figure 5. X-ray CPS (counts per second) of the gold foil.

Table 2. Calculation results of Au-L α peak for the thickness of gold foil

	(A) Cheongryongsa's buddha	(B) Goblin mask	(C) Sangharisaji's buddha	(D) Buddhist painting
Au-L α (CPS)	372.07	1173.5	687.18	40.36
Rh-K α (CPS)	7.83	10.97	15.07	30.47
Calculated value	2.9	10.6	6.1	-0.42
Actual thickness	1.6~4.8	9.3~16.8	1.4~6.2	1.6

(A) Cross-section image of Avalokitesvara Bodhisattva's gold foil

(B) Cross-section image of Goblin mask's gold foil that was excavated from Whangyongsaji

(C) Cross-section image of Buddha's gold foil that was excavated from Sangharisaji

(D) Gold foil of Wolsan museum's Buddhist painting

Figure 6. Images of the gold foil.

Figure 7. Analysis points of XRF.

불가능하여 순금박 값을 측정할 수 없었다. (A), (B)와 (C) 샘플의 단면 계산 값은 각 2.9 μm , 10.6 μm , 6.1 μm 로 광학 현미경으로 측정한 두께 범위 안에 들어오는 결과였다. (C)의 경우 금의 순도에 차이가 있어 결과 값의 타당성에 대해 추가 검토가 필요할 것으로 보인다. (D)의 경우도 계산 값이 마이너스 값으로 실제 두께와 차이가 있었다. 이는 콤프튼 산란선(Rh-K α) 강도의 차이로 유추하건대 측정 거리에 차이가 있거나, 금사의 두께가 얇아 장비에서 충분한 피크 강도를 얻지 못하였기 때문으로 보인다. 또한, (D) 시편의 Rh-K α 선 강도가 가장 큰 이유로 경원소를 주성분으로 하는 물질이 포함되었기 때문인데, 종이 위에 얇게 얹어진 금박은 Rh-K α 피크가 강하게 검출되어 위의 실험 결과 값이 적용되지 않는다. 하지만, 종이 위의 금박도 추가 실험을 통해 검증하면 두께 추정이 가능할 것으로 보인다.

위 결과를 바탕으로 안성 청룡사 금동관음보살좌상에 적용하기 위해 정면의 XRF 분석 결과(Table 3)를 검토해 보았다. XRF 분석결과, 왼쪽 뺨에서 금이 83.4 wt%, 삼도 아래 가슴에서 82.5 wt% 검출되는 등 육신 부분에서 금 농도가 높다. 오른 발목 옷자락에서는 금이 42.9 wt%, 하반신 옷 주름 중앙에서는 금이 49.8 wt%가 검출되어 육신 부분보다 금 농도가 낮다. 표준시편을 통해 얻어진 일차 방정식을 분석 대상인 안성 청룡사 금동보살좌상에 대입하여 보면 금니 부분인 왼쪽 뺨과 삼도 아래 가슴 부분은 두께가 20.7 μm 와 21 μm 이고, 금박을 올린 부분은 5.7 μm 와 8.3 μm 로 계산되었다. 정량분석결과는 전체 성분을 100% 비율로 환산한 값이므로 금박두께와 정량분석 결과

Table 3. Results of XRF analysis

①	wt%	②	wt%
Cu	6.4	Cu	3.7
Zn	1.0	Zn	0.4
Sn	4.6	Sn	6.2
Au	83.4	Au	82.5
Pb	1.6	Pb	3.5
Thickness (μm)	20.7	Thickness (μm)	21.0

③	wt%	④	wt%
Cu	26.6	Cu	21.4
Zn	2.0	Zn	2.6
Sn	10.0	Sn	8.4
Au	42.9	Au	49.8
Pb	13.0	Pb	13.8
Thickness (μm)	8.3	Thickness (μm)	5.7

는 대체로 비례하지만, 반드시 일치하지는 않는다.

소지 재료의 차이에 따른 금박두께의 비교를 위해 Table 4의 XRF 성분 경계 부분의 금박두께를 계산한 결과를 비교하였다. 그 결과 금니를 바른 육신 부분이 가장 금 두께가 두꺼웠다. 금박을 바른 부분을 비교하면, 오른 쪽 엉덩이의 나무-청동 경계 부분을 제외한 나머지 부분에서, 소지 재료가 청동인 부분에 비해 나무인 부분의 금이 평균적으로 두꺼웠다.

4. 결 과

비파괴 분석 및 표면 금박두께 추정 실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 안성 청룡사 금동관음보살좌상은 구리(Cu)와 주석(Sn)의 청동 합금이며 납(Pb)이 48.6 wt% 검출되었는데, 추가 검증을 통해 정확한 합금 농도를 조사할 필요가 있다. γ -ray(Ir-192)으로 배면 부분이 파손되어 후대에 나무로 덧대어 수리한 것을 확인하였다.

2. 좌, 우의 정확한 경계면 분류를 위해 육안 관찰과 XRF 분석을 이용하였다. 그 결과, 좌, 우측 모두 허벅지 중간부터 목 아랫부분을 경계로 소지 재료가 청동과 나무로 구분된다.

3. XRF 비파괴 분석을 이용하여, 도포된 금박의 두께 추정실험을 하였으며, 그 결과, 소지재료가 청동, 나무 상

Table 4. Comparison of the gold foil thickness (μm) in different locations of the Bodhisattva statue

Image
	Right cheek		Chest		Right hand	
Substrate	Bronze		Bronze		Bronze	
Thickness	20.7		21.0		17.2	
Image
	Right elbow		Right hip		Right thigh	
Number	①	②	③	④	⑤	⑥
Surface condition	Rough surface	Smooth surface	Rough surface	Smooth surface	Rough surface	Smooth surface
Substrate	Wood	Bronze	Boundary with wood and bronze	Boundary with wood and bronze	Wood	Bronze
Thickness	10.6	6.2	8.8	8.6	13.3	7.6
Image
	Left shoulder		Left elbow		Left side	
Number	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
Surface condition	Rough surface	Smooth surface	Rough surface	Smooth surface	Rough surface	Smooth surface
Substrate	Wood	Bronze	Wood	Bronze	Wood	Bronze
Thickness	12.6	9.5	10.6	6.2	12.6	7.6

관없이 금박 두께에 따라 X선 강도가 비례해서 증가하는 일차방정식을 도출할 수 있다. 방정식을 이용하여, 안성 청룡사 금동관음보살좌상의 금박 두께를 계산한 결과, 얼굴과 가슴과 같은 육신 부분이 가장 두꺼웠으며, 다음으로 나무를 소지 재료로 한 부분, 마지막으로 소지금속이 청동인 부분 순서로 금박 두께가 얇아짐을 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신부의 「기본연구」 지원을 일부 받아 수행되었습니다 (2019R1F1A1060043).

REFERENCES

- Abe, Y.N., Gondai, H.S., Takeuchi, S.G., Shirataki, J.K., Uchida, T.G. and Nakai, I., 2011, Investigation of production technique of the gold ground of Korin's "red and white plum blossoms" screen, a national treasure, using portable x-ray analytical instruments. *Bunseki Kagaku*, 60(6), 477-487.
- Anseong-si, 2020, Cultural heritage designation report. 12-13.
- Bae, G.W., Lee, S.O., Beom, D.G. and Chung, K.Y., 2018, Manufacturing techniques and provenance of gilt-bronze seated Bhaisajyaguru (Medicine Buddha) Statue of Cheongyang Janggoksa temple, Korea. *Journal of Conservation Science*, 34(1), 59-67.
- Cultural Heritage Administration, 1990, Cheongryongsa sajeokbi. <https://www.heritage.go.kr/> (Jun 1, 2021)
- Cultural Heritage Administration, 2012, Important movable cultural heritage wooden, Iron, Dry-laquered Buddha archival business report. 119-121.
- Go, J.G. and Ham, I.Y., 1963, Investigation of ancient art by radiographic method (1). Art reference 8.
- Go, J.G. and Ham, I.Y., 1964, Investigation of ancient art by radiographic method (2). Art reference 9.
- Gwak, H.I. and Kwon, M.H., 2019, A study on conservation and manufacturing techniques of a seated Avalokiteshvara with a thousand hands of Goryeo Dynasty. *Journal of Conservation Science*, 35(3), 253-258.
- Hagasegawa, M.K., Hashimoto, T., Itou, M.Y., Honda, S.O., Akieda, T., Matsumoto, Y.T. and Sakurai, Y.H., 2016, Verification of the lower detection limit of compton scattering element analysis under the noble metal and base metal coverage. Spring-8, SACLA Research Report, 388-392.
- Hwang, J.J., 2008, The study of chemical component range for major elements in Korean Bronze. Master's dissertation, Myungji University, Seoul, 34.
- Jung, M.G., 2009, A study on preservation of the image of buddhist priest huirang at Haeinsa temple. Master's dissertation, Gyeongju University, Gyeongju, 42-47.
- Kim, S.G., 2012, A material characteristics of Baekje gilt bronzed caps by non-destructive Analysis. Master's dissertation, Kongju National University, Gongju, 25.
- Naganuguma, H., Yoshitomi, J.K., Kubo, Y.K. and Nakahama, S.Y.M., 1990, Simultaneous determination of composition and thickness of thin film by X-ray fluorescence, 146. Aluminum Finishing Society of Kinki, 7-11.
- Satoh, M.O., 1989, X-ray fluorescence coating thickness measurement. *Surface Technology*, 40(2).
- Shin, Y.B. and Kim, J.H., 2020, Gilt-bronze Standing Avalokiteshvara from Gyuam-ri, Buyeo - The structure and production technique. *Conservation Science in Museum*, 23, 1-16.