매실산을 이용한 월지 출토 금동삼존판불의 금도금법 복원

윤용현¹ | 조남철* | 윤대식 | 이태섭** | 배채린*

국립중앙과학관, *공주대학교 문화재보존과학과, **월생산방

Restoration of Gold Gilding Using Plum Acid for Geumdong-samjonpanbul Excavated from Walji, Gyeongju

Yong Hyun Yun¹ | Nam Chul Cho* | Dae-Sik Yoon | Tae Sub Lee** | Chaerin Bae*

Department of Scientific & Technological History, National Science Museum, Daejeon, 34143, Korea

*Department of Cultural Heritage Conservation Science, Kongju National University, Gongju, 32588, Korea

**Wolsaengsanbang, Gyeongju, 38126, Korea

¹Corresponding Author: yh-yun@hanmail.net, +82-10-5408-3248

초록 경주 월지에서 출토된 금동삼존판불을 복원하고자 고문헌에 공통적으로 기록되어 있는 매실산을 도금 실험에 적용하였으며 도금 결과를 색도, SEM-EDS, XPS 등의 분석을 통해 알아보았다. 색도 분석결과 전체적으로 황색도가 높았으며 10분 이상 매실산 처리를 한 시편이 명도가 높았다. SEM으로 표면을 관찰한 결과 아말감을 도포하고 바로 소성한 경우 도금이 거의 되지 않았으며 36시간 방치 후 소성한 경우 도금층이 불균일하게 관찰되었으므로 도금시간은 12시간~24시간 이내가 적절함을 확인할 수 있었다. EDS로 도금층의 성분을 분석한 결과 산처리 시간이 20분인 시료의 경우 5 wt.% 내외로 수은의 비율이 다른 시료에 비해 낮았다. 또한 XPS로 표면상태를 분석한 결과 산처리시간은 20분이 고 24시간동안 아말감을 도포한 시료가 Au의 XPS peak 분해능이 높으며, Hg가 다른 시편들에 비해 거의 남아 있지 않음을 확인할 수 있었다. 즉, 매실산을 이용한 실험 및 분석결과 산처리 시간이 20분이고 아말감 도포시간이 24시간일 때 도금이 잘 되는 것으로 확인하였고, 이 결과를 토대로 금동삼존판불을 복원하였다.

중심어: 고대 도금기술, 금동삼존판불, 금-수은아말감, 매실산

ABSTRACT This research involves a gilding experiment using plum acid that has previously been reported to restore Geumdongsamjonpanbul excavated from Wolji, Gyeongju. Chromaticity analysis revealed that the yellowness of the samples was high, and the samples treated with acid for more than 10 minutes showed high brightness. SEM studies revealed that the sample subjected to amalgam application and immediate heating was rarely gilded with gold. When the amalgam application time was longer than 36 h, the gold layer observed was uneven. Therefore, the optimum amalgam application time was 12–24 h. EDS analysis showed that mercury content was ~5 wt.% for samples with an acid treatment time of 20 min, lower than that in other samples. Gold gilding was successful for the sample with amalgam application time of 24 h and acid treatment time of 20 min. This sample showed the high-resolution XPS peak corresponding to Au and retains a little Hg compared with the other samples. In other words, experimental and analytical results using plum acid showed that gilding was successful when acid treatment time was 20 min and amalgam application time was 24 h. Based on these results, Geumdongsamjonpanbul excavated from Wolji, Gyeongju can be restored.

Key Words: Ancient gilding technique, Geumdongsamjonpanbul, Gold(Au)-mercury(Hg) amalgam, Plum acid

1. 서론

금동은 구리나 청동의 금속에 금도금을 하거나 금박을 입히는 것을 말한다. 금동을 제작하는데 필요한 금도금기술법은 삼국시대에 중국으로부터 기술이 전해져 불상에서부터 이용되기 시작하였다. 전통 도금은 금을 입히는 방법에 따라 금은 아말감을 칠하고 수은을 증발시키는 금아말감도금법, 수은을 이용해 금박을 씌우는 수은금박도금법 등으로 나뉜다(Han, 2000). 현재 고대 전통 도금기술에 대한 전승은 맥이 끊긴 상태이며, 구체적 기록 또한 소략한 상태이다. 이러한 자료의 부족을 극복하는 방법은 고문헌 속 도금에 관한 내용을 추려내어 이를 재구성하는 것이다.

『숙종인현왕후가례도감의궤(肅宗仁顯王后嘉禮都監儀軌)』에서는 도금장이 매실(梅實)을 사용한다는 기록이 있으며(Sukjong Queen Inhyun Garyedogamuigwe, 1681), 『단정왕후복위부묘도감의궤(端敬王后復位附廟都監儀軌)』 하권에는 도금장이 매실(梅實)과 오미자(五味子)를 사용한다는 기록이 있다(Queen Dangyeong Bokwibumyodogamuigwe, 1739). 이규경의 『오주서종박물고변(五洲書種博物考辨)』에는 ‘팽이밥’과 같은 산제즙(酸齏汁)에 며칠을 담갔다가 염매(鹽梅)로 한나절을 끓여 숯가루를 볶아 말리면서 (그 열을) 찌어 말린다. 매실(梅實)과 12시간 삶은 물로 씻어 내고 숯가루를 태운 불로 말린다. 수은을 조금씩 바른 연후에 금을 붙이면 금은 모두 하얗게 변하는데 불 위에서 열을 쪼이면서 금색으로 돌아오기를 기다려 광주(光珠)로 갈아서 윤을 낸다. 구리 그릇에 금을 입히자면 부드러운 벚짚으로 문질러 닦은 후 매실초(梅醋)를 바르고 다시 짚으로 깨끗이 쓸고 난 다음 수은을 바른단다. 이 위에 금박을 두어 불로 쪼인다. 수은에 금을 섞어 은그릇에 바르면 흰색이 된다. 불에 넣으면 수은은 없어지고 금만 남는다. 몇 차례 반복하면 황색이 된다.’고 기록되어있다(Lee, 2008).

또한 『확지신편(擴智新編)』에도 도금법에 대해 ‘구리나 주석에 어떤 기물(器物)을 도색하려는 사람은 먼저 초석용해(硝石溶解)에 담갔다가 맑은 물로 깨끗이 씻어내고 다시 매화수(梅花水)에 담갔다가 숯가루(炭末)로 갈고 닦기를 서너 차례 하면 그 바탕이 때 없이 아주 깨끗해진다. 반드시 이렇게 한 이후에 도금해야한다.’고 언급하였으며 ‘냉수로 서너 차례 깨끗이 씻어 물이 담긴 대야(大冶)에 넣어 센 불에서 끓이다가 오매침채수(烏梅沉菜水) 한 보시기[甫兒]를 함께 섞고 도금한 기물을 깨끗이 씻어서 담근다.’는 구절 또한 확인 할 수 있다(Hwakjisinpyeon, 1863-1907).

『묵아소록(墨娥小錄)』에는 원나라 말의 도금법이 기록되어 있으며 ‘산제즙(酸齏汁)에 며칠을 담갔다가 염상매(鹽霜梅)로 한나절을 끓여 말린 뒤, 수은을 바른 후에 금을 붙이고 열을 쪼여 금빛이 나면 호박으로 갈아 윤을 낸다.’는 기록이 있다(Mukasorok, 1571). 이외에 다양한 고문헌을 검토한 결과 빠지지 않는 재료는 매실(梅實)이었다.

선행 연구에서 수은하지도금을 하지 않고 매실즙(pH 4.5)을 바른 후 아말감을 적용하였으나 도금이 되지 않은 사례(Han, 2000)가 있었으며 그 외에는 매실을 이용하여 표면처리를 한 실험 및 연구가 시행되지 않았고 발표된 논문이나 보고서 또한 없다.

따라서 본 연구에서는 고문헌 자료를 토대로 매실을 이용한 도금법의 가능성을 실험해보고자 하였다. 고문헌을 기초자료로 활용하여 시편 실험을 통해 매실산을 사용한 금(Au)-수은(Hg) 아말감기법으로 고대 도금(鍍金)기술을 되살리고, 이를 토대로 경주 월지에서 출토된 금동삼존판불을 복원하여 고대 전통 도금기술의 복원기법을 제시하고자 한다. 복원을 진행하기에 앞서 시편 실험을 통해 금아말감도금을 시행하여 최적의 방법을 찾고자 하였으며, 이를 토대로 경주 월지에서 출토된 금동삼존판불(안 1454)을 복원하여 고대 전통 도금기술의 복원기법을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 실험방법

금동삼존판불을 복원하기에 앞서 가장 효과적인 금속표면처리법을 선정하기 위해 시편을 이용한 사전실험을 실시하였다. 선행 연구에 의하면 본 연구에서 복원하고자 하는 금동삼존판불(안 1454)의 소지는 구리가 평균 88.3%, 주석이 10.7%이며 미량으로 납 0.49%, 은 0.94%, 철이 2% 미만 함유되어 있다(Yu *et al.*, 2007). 이 분석을 토대로 구리와 주석을 89:11(Cu:6 kg, Sn:750 g)의 비율로 합금하여 시편(2.3 cm × 3.5 cm)을 제작하였다.

문헌 기록을 토대로 시편처리는 탈지-산 처리-도금-소성 순으로 진행하였다. 표면에 묻은 때와 기름을 제거하기 위해 거치는 탈지과정은 숯가루와 숯물을 이용하였다. 숯가루와 숯물로 세척하고 증류수로 행구어 낸 다음 매실액과 질산을 각각 시편 표면에 도포하여 산 처리 하였다. 산 처리가 끝난 시편에 아말감을 올려 소성한 뒤 도금 결과를 관찰하였다.

Table 1. Result of pH measurement

No.	Sample no.	Concentration	pH			
			1st	2nd	3rd	Aver
1	dc1	70%	2.26	2.23	2.20	2.23
2	dc2	50%	2.48	2.45	2.45	2.46
3	hc1	70%	2.21	2.16	2.30	2.22
4	hc2	50%	2.39	2.38	2.45	2.41
5	gc1	70%	1.99	1.93	1.90	1.94
6	gc2	50%	2.13	2.16	2.069	2.12
7	gv1	100%	3.43	3.45	3.44	3.44
8	nitric acid	20%	-0.65	-0.67	-0.62	-0.65

2.1.1. 산 선정

현대적 산 처리 방식에 사용되는 질산과 전통방식으로 사용되는 매실산으로 시편에 산 처리 한 후 각각 비교해 보고, 금-수은아말감과 시편의 밀착정도 및 아말감도포상태와 도금이 균질하고 원활하게 이루어지는지 확인해 보고자 하였다.

실험을 위해 전통적 방법으로 제조한 매실산이 필요하였으나 현재 전통제조법으로 만드는 대부분의 매실식초는 당류를 많이 첨가해 적절하지 않다고 판단하였다. 예로부터 매실은 신맛이 매우 강하여 매실즙 자체를 매실산이나 매실초라고도 불렀기에(Gil, 2004) 숙성 과정을 거친 식초와 매실을 가열 농축한 액기스(매실농축액)를 측정 비교하였다. 실험 대상으로 선정한 매실산은 그 제조과정을 확인 가능한 것으로만 선정하였으며 제조법이 서로 다른 매실농축액인 dc, hc, gc와 당류가 가장 적게 첨가 된 매실식초인 gv를 선정하여 그것의 pH 수치를 비교하였다(Table 1). dc는 매실을 수확한 뒤 바로 착즙하고 여과하여 농축하는 매실농축액이며 hc는 매실을 수확한 후 착즙하고 여과하여 농축한 후 1년의 숙성과정을 거친 매실농축액이다. gc는 매실을 수확한 뒤 바로 착즙하지 않고 3~4개월 숙성시킨 후 착즙, 여과하여 농축시킨 것이고 gv는 매실원액에 정백당을 약 0.3% 첨가하여 전통방식으로 제조한 매실식초이다. 질산은 함께 작업한 금속유물 복원기술자가 기존에 사용하던 방법대로 20%를 선정하였다.

매실 농축액의 경우 100% 원액은 점도가 매우 높아 pH를 측정하기 어렵고 시편을 세척하기에 적절하지 않으므로 70%, 50%로 희석하여 실험에 적용하였다.

전통적 방식으로 생산한 양조식초는 평균 pH가 3~4정도를 가지며 이는 gv1에서도 확인할 수 있다. 매실 식초보다 매실농축액이 pH가 낮았고 이를 통해 식초보다 농축액

이 더 강한 산인 것을 확인할 수 있었다. 측정 결과 시료 중에서 가장 강한 매실산인 gc1(pH 평균 1.94)로 실험을 진행하였다.

2.1.2. 산 처리시간

현대적 금아말감도금 기법에 사용되는 질산 20%의 수소이온농도는 gc1의 수소이온농도와 약 389.04배 차이가 난다. 그러므로 매실산이 시편에 노출되는 시간을 연장하여 질산이 시편에 반응하는 효과를 대동소이하게 낼 수 있어야 원활한 도금이 이루어 질 것으로 여겨져 매실산에 시편을 10초 내외(즉시)부터 10분 단위로 최대 30분까지 노출시켜 변화를 지켜보고 물로 세척 후 금도금하여 결과를 보았다. 이때 질산도 같은 시간 동안 시편에 노출시켜 매실산으로 산 처리한 시편과 비교하였다. 실험한 시편의 목록은 아래와 같으며 각각의 시편에 총 4회 아말감을 올려 결과를 확인하였다(Table 2).

2.1.3. 도금 시간

매실산으로 금속표면처리를 하고 금-수은아말감을 도포하여 도금을 할 때, 산 처리 시간 및 아말감 도포시간에 따른 도금 상태를 알아보고자 했다. 금아말감도금을 시행하는 도중, 복원방법에서 변수로 여기지 않았던 금 아말감 도포 시간에 따라 도금의 품질이 결정되는 것을 발견하였다. 때문에 매실산 처리시간에 따른 도금 상태와 금-수은아말감 도포시간에 따른 도금 상태를 비교하기 위해 산 처리시간은 10초, 10분, 20분으로 설정하였으며 아말감 도포시간은 즉시, 12시간, 24시간, 36시간으로 설정하고 시편에 실험하여 산 처리 시간과 도포시간에 따른 도금을 비교하였다(Table 3).

Table 2. Acid treatment test of nitric acid and plum acid

No.	Sample no.	Number of amalgam gilding	Time of acid treatment
1	gc1	4	10 s
2			10 min
3			20 min
4			30 min
5	nitric acid	4	10 s
6			10 min
7			20 min
8			30 min

Table 3. Gilding effect experiment according to plum acid treatment time and gold amalgam application time

No.	Acid	Time of acid treatment	Time of amalgam application	Sample
1	gc1 (70%)	10 s	right off	10 s-ro
2			12 h later	10 s-12 h
3			24 h later	10 s-24 h
4			36 h later	10 s-36 h
5		10 min	right off	10 min-ro
6			12 h later	10 min-12 h
7			24 h later	10 min-24 h
8			36 h later	10 min-36 h
9		20 min	right off	20 min-ro
10			12 h later	20 min-12 h
11			24 h later	20 min-24 h
12			36 h later	20 min-36 h

2.2. 분석 대상 및 방법

2.2.1. 분석대상

매실산 처리 시간에 따른 도금 상태와 아말감 도포시간에 따른 도금 상태를 비교(Table 3)하기 위해 실험한 시편(Figure 1)을 분석하여 가장 도금에 적절한 산 처리 시간을 알아보았다.

2.2.2. 분석방법

시료 채취 전 시편의 도금색상을 비교하기 위해 분광측색계(CM-2600d, MINOLTA, Japan)로 시편의 색도를 측정하였다. 측정 조건은 측정경 3 mm, 광원 D65, UV 100%, 정반사광 포함, 관찰시야 10°이고 3회 측정 후 평균값을 구하였다. 도금층의 단면과 표면을 관찰하고 성분을 분석하

기 위해 SEM-EDS 분석을 실시하였으며 다이아몬드커터로 시편의 일부를 채취하여 시료로 사용하였다. 채취한 시료 중 일부는 표면관찰을 위해 그대로 두고, 일부는 단면관찰을 위해 에폭시 수지로 마운팅(mounting)하여 SiC 연마지의 조밀 순서에 따라 #220, 400, 800, 1000, 1200, 2000, 2400, 4000의 순서대로 연마한 후 물로 세척하였다. 그 후 마무리 미세연마는 3 μm, 1 μm(DP-Spray, Struers, Korea)를 사용하여 스크래치가 없을 때 까지 실시하였다. 마운팅된 시료는 SEM-EDS(SEM : MIRA3, TESCAN, Czech / EDS : QUANTA300, BRUKER, USA) 분석을 통해 도금층의 두께와 성분을 분석·비교하였다. 분석시료들은 백금(Pt)으로 코팅하여 시료의 전도도를 높이는 한편 조성비에 미치는 영향을 최소화하였다. 마운팅하지 않은 시료는 그대

Figure 1. Analysis samples. (A:10 s-ro, B:10 s-12 h, C:10 s-24 h, D:10 s-36 h, E:10 min-ro, F:10 min-12 h, G:10 min-24 h, H:10 min-36 h, I:20 min-ro, J:20 min-12 h, K:20 min-24 h, L:20 min-36 h)

로 SEM-EDS를 이용해 도금층의 표면을 관찰하고 성분을 분석하였다. 시료 표면의 성분별 화학적 상태는 광전자분광분석기(XPS, MultiLab ESCA 2000, Thermo, USA)를 이용해 비교하였다. 전체 시료 중 재현실험에 적용하기에 적절하다고 생각되는 시료 3점을 선정하여 분석을 실시하였으며 매실산에 담근 후 즉시 꺼내 아말감을 24시간 한 시편(3:10 s-24 h), 10분 산 처리 후 아말감을 24시간 한 시편(7:10 min-24 h), 20분 산 처리 후 아말감을 24시간 한 시편(11:20 min-24 h)까지 총 3점을 다이아몬드커터로 시편의 일부를 채취하여 분석에 사용하였다.

3. 연구 결과

3.1. 산처리 시간에 따른 도금 상태

매실산과 질산으로 산 처리를 하고 금 아말감을 입힌 시편에 도금이 모두 이루어졌다. 1차 도금이 완료된 시편을 육안 관찰한 결과, 매실산으로 산 처리를 한 시편이 질산으로 산 처리를 한 시편보다 도금의 균질도가 다소 미흡한 것으로 보이나 도금은 모든 시편에 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 그러나 4차 도금까지의 결과를 보았을 때, 전통적

방법인 매실산 산 처리로 도금을 한 시편은 현대적 방법인 질산처리로 도금을 한 시편과 큰 차이가 없으므로 주조 완료된 청동삼존판불에 gc1로 산 처리를 하여 금도금하는 것은 이상이 없을 것으로 보인다. 평균적으로 금아말감도금 법으로 도금을 시행 할 때에는 7차례 이상 아말감을 덧바르는 것이 장인들의 공통된 작업이지만 시간 관계상 5차 도금 이상은 시행하지 못했다. 한편, 질산 산 처리한 시편과 매실산 산 처리 한 시편 모두 20분정도 노출 시켰을 때 금도금이 가장 원활히 이루어 졌음을 육안관찰을 통해 확인할 수 있었다. 추후 금도금을 할 때에는 시편을 10분에서 20분 내외로 매실산에 노출시키고 금도금을 하여야 균질도와 밀착도가 좋은 금도금을 할 수 있을 것으로 보이며, 작업 공정 상 때가 반복하여 묻을 경우를 대비하여 매 회 금 아말감을 입히기를 반복하기 전에 매실산으로 금속 표면을 닦아주며 도금을 하는 것이 효과적인 것으로 보인다.

3.2. 매실산처리 시간과 아말감 도포시간에 따른 도금 상태

3.2.1. 색도측정결과

시편의 분광측색계 측정값을 CIE LAB 색공간에 도시하였다(Figure 2). 전체 시편을 살펴보면, 명도(L^*)값은 38.62 ~ 62.92의 다양한 분포를 보였으며 a^* 는 0.01 ~ 4.6으로 큰 편차가 없고 b^* 는 10.25 ~ 29.76으로 비교적 넓은 색도 분포를 보였다. 시편 전체적으로 황색도가 높았으며 산 처리 시간이 10초일 때(No.1-4), 아말감 시간이 길수록 b^* 값이 커지므로 황색도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 산 처리 시간이 10분 이상일 경우(No.5-12) 황색도는 아말감 시간에 큰 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 또한 산 처리 시간이 10분 이상인 시편의 경우(No.5-12) 산

처리 시간이 10초인 시편(No.1-4)보다 비교적 명도가 높게 나타나는 경향을 관찰할 수 있었다. 황색도가 높을수록 도금이 잘 된 것이며 명도가 높게 나타날수록 도금이 균일하게 되었다고 볼 수 있으므로 산 처리 시간은 10분 이상인 것이 좋을 것으로 판단하였다.

3.2.2. 도금층 관찰결과

도금층의 표면 관찰 결과(Figure 3) 아말감 처리 시간이 짧은 시료는 비교적 매끈하였으며 아말감 처리 시간이 길어질수록 명암차가 두드러지는 것을 보아 도금층의 두께가 두꺼워 지는 것을 확인할 수 있었다. 낮은 바탕 층은 표면이 불균일하고 높은 곳은 표면이 평평한 것은 광쇠질의 영향이며, 두껍게 도금된 금이 광쇠질로 인해 압착되면서 생기는 스크래치가 함께 관찰된다. 표면에서 까맣게 관찰되는 부분은 도금이 되지 않은 영역이다. 아말감 도포시간이 즉시인 경우 도금이 거의 되지 않은 것을 확인할 수 있었고 36시간이 넘어갈 경우 금 도금층이 불균일하게 관찰되었으므로 도금시간은 12시간~24시간 이내가 적절할 것으로 보인다.

도금층의 단면 관찰결과 대체로 아말감 시간이 길어질수록 도금층의 두께도 두꺼워지는 것을 확인할 수 있었다. 사진 상에서 밝은 회색으로 보이는 부분이 도금층이고, 어두운 회색으로 보이는 부분이 소지금속이다. 아말감 도포 시간이 즉시인 시료의 도금층 표면은 매우 불균일하였으며 도금층과 소지금속의 경계도 불분명하였는데, 이는 도금층의 두께가 매우 얇아 상이 명확하게 맺히지 않았거나, 아말감 후 가열 과정에서 고온을 겪어 일부 소지금속과 도금층이 섞인 것으로 추정된다. 산 처리 시간이 20분이 넘어가면 아말감 시간은 도금층의 두께에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 보인다. 아말감도포시간이 즉시인 시료와 10분인 시료에서 관찰되는 가로방향의 균열은 광쇠질로 인해 도금층이 눌린 흔적으로 보인다. 도금층 표면을 EDS로 성분분석을 실시한 결과 산 처리 시간이 10초인 시료(Figure 4)의 경우 아말감 시간이 길어질수록 금의 비율이 높아지는 것을 관찰할 수 있었다(Table 4). 그러나 수은의 비율은 약 10 wt.% 내외로 비슷한 경향을 보인다. 산 처리 시간이 10분 이상인 경우(Figure 5)에는 아말감 시간에 따른 금의 비율 변화가 크지 않았으나 수은의 비율에 차이를 보인다. 산 처리 시간이 10분인 시료(Figure 5)의 경우 수은의 비율이 10 wt.% 내외였으나(Table 5) 산 처리 시간이 20분인 시료(Figure 6)의 경우 5 wt.% 내외로 수은의 비율이 다른 시료에 비해 낮은 것을 확인할 수 있었다(Table 6). 그러나 Hg의

Figure 2. Chromaticity analysis results.

Figure 3. SEM image of sample surfaces. (A:10 s-ro, B:10 s-12 h, C:10 s-24 h, D:10 s-36 h, E:10 min-ro, F:10 min-12 h, G:10 min-24 h, H:10 min-36 h, I:20 min-ro, J:20 min-12 h, K:20 min-24 h, L:20 min-36 h)

Figure 4. SEM image of cross section samples. (A:10 s-ro, B:10 s-12 h, C:10 s-24 h, D:10 s-36 h)

양은 산 처리 시간 이외에도 가열온도, 가열시간 등에도 영향을 받을 수 있으므로 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

도금층의 표면은 균일한 것이 좋으며 여러 번 중첩해서 도금하므로 1회에 입혀지는 도금의 두께보다는 도금층의 표면이 균일하면서 도금되지 않은 곳이 없고, 금의 순도가

높은 것이 복원에 적합할 것으로 보인다. 따라서 산 처리시간은 20분, 아말감도포시간은 24시간이 적당할 것으로 판단된다.

3.2.3. 화합물 분석결과

Figure 7은 분석 대상 시료인 No.3(10 s-24 h), No.7(10

Table 4. EDS analysis results of cross section samples

Analysis point	Element (wt.%)			
	Cu	Sn	Au	Hg
1-01	25.39	1.55	68.71	4.35
2-01	8.35	0.64	77.14	13.87
3-01	6.78	0.32	75.70	17.20
4-01	3.43	0.80	78.93	16.85

Figure 5. SEM image of cross section samples. (A:10 min-ro, B:10 min-12 h, C:10 min-24 h, D:10 min-36 h)

Table 5. EDS analysis results of cross section samples

Analysis point	Element (wt.%)			
	Cu	Sn	Au	Hg
5-01	41.82	4.53	50.09	3.56
6-01	2.87	0.59	76.79	19.75
7-01	5.48	0.49	82.73	11.30
8-01	27.82	1.92	64.08	6.17

Figure 6. SEM image of cross section samples. (A:20 min-ro, B:20 min-12 h, C:20 min-24 h, D:20 min-36 h)**Table 6.** EDS analysis results of cross section samples

Analysis point	Element (wt.%)			
	Cu	Sn	Au	Hg
9-01	31.11	5.67	59.04	4.19
10-01	4.39	0.64	81.01	13.96
11-01	15.85	1.23	72.98	9.93
12-01	2.64	0.23	81.52	15.61

Figure 7. XPS spectra of No.3(10 s-24 h), No.7(10 min-24 h), No.11(20 min-24 h).

min-24 h), No.11(20 min-24 h)의 표면을 분석한 결과이다. (A)는 Full scan 결과이며 C 1s, O 1s, Cu 2p, Sn 3d, Au 4f, Hg 4f 등의 피크가 검출됨을 확인할 수 있다. 분석 대상 시료 세 점 모두 1회 도금을 실시하여 아말감 두께가 두껍지 않으므로 Cu 2p, Sn 3d 등의 피크가 검출됨을 알 수 있다. (B)는 Carbon 1s 피크만을 세부 scan한 결과이며, 세 시편 285 eV에 피크가 검출되는 것으로 보아 표면의 탄소 상태는 큰 차이가 없어 보인다. (C)는 Oxygen 1s 피크들을 세부 scan한 결과이다. 세 시편 모두 O 1s 피크가 533 eV에서 검출되어 표면 화합물 상태는 유사하나, 매실산에서 즉시 꺼낸 것 보다는 산 처리 시간이 10분, 20분인 시료들에서 산 소화합물의 양이 큼을 볼 수 있다. (D)는 Copper 2p 피크만을 세부 스캔한 결과이며 도금한 두께에 따라 검출되는 Cu 2p의 양을 상대적으로 알 수 있다. 즉, 10 min-24 h 도금한 시편이 가장 두껍게 도금되어 Cu의 양이 가장 적게 검출되며, 10 s-24 h, 20 min-24 h 도금한 시편의 경우는 도금 두께가 얇아 소지금속인 청동의 Cu가 높게 검출됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 (E)의 Sn 3d만을 세부 스캔한 결과와도 일치한다. (F)는 Au 4f만을 세 시료에서 세부 스캔한 결과이다. 세 시료 모두 84 eV에서 검출되어 표면 화합물 상태는 유사하나, 검출된 Au의 양은 10 s-24 h 시료에서 가장 많은 양이 검출되며, 20 min-24 h 시료의 경우가 가장 적게 검출됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 (G)의 Hg 4f만을 세부 스캔한 결과와도 일치한다. XPS 분석을 한 세 개의 도금 시료의 경우 서로 다른 도금 상태를 보여주고 있다. No.3(10 s-24 h) 시료의 경우는 Cu, Sn의 함량이 높게 검출되고, Au, Hg등도 높게 검출된 것으로 보아 도금 두께는 얇으나 아말감 도금 상태는 양호해 보인다. 그러나 아말감도금 내에 Hg이 많이 남아 있음을 알 수 있다. No.7(10 min-24 h) 시료의 경우는 소지 금속인 Cu, Sn 등이 가장 적게 검출되고 Au, Hg 성분도 높게 검출되는 것으로 보아 도금은 두껍게 아말감 되었고 표면 금도금 상태는 양호하나 Hg가 도금 내에 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 마지막으로 No.11(20 min-24 h) 시료는 소지금속인 Cu, Sn이 높게 검출되나, Au의 XPS peak 분해능이 높으며, Hg가 다른 시편들에 비해 거의 남아 있지 않음을 확인할 수 있었다. 즉, No.11(20 min-24 h) 시료의 경우 아말감도금 이후 Hg는 거의 기화되고 소지금속과 표면이 잘 밀착되어 도금된 것으로 보인다.

4. 금동삼존판불 복원

과학적 분석을 통하여 매실산으로 산 처리를 20분 동안 진행한 다음 금아말감을 도포하였으며 24시간 동안 아말감과 바탕 소지가 잘 밀착되도록 한 뒤 380~400℃로 가열하기 전에 한 번 더 아말감을 도포하여 표면을 균일하게 하는 것이 최적의 도금 방법을 실험 및 분석을 통해 확인할 수 있었다.

실험 결과를 바탕으로 가장 적합하다고 판단된 방법을 통해 경주 월지에서 출토된 금동삼존판불의 복원을 진행하였다. 바탕 소지 제작은 금동삼존판불의 바탕금속인 청동과 같이 구리 89% : 주석 11%로 합금하여 주물사 주조법으로 청동삼존판불을 주조하였다(Figure 8). 바탕 소지인 청동삼존판불의 표면 처리는 금과 소지금속의 밀착력을 좋게 하기 위해서 사포, 광석, 천을 이용하여 연마를 하고 그 표면을 씻어내는 처리를 하였다(Figure 9, 10). 청동삼존판불의 표면은 숯가루로 닦고 숯물로 씻어낸 뒤(Figure 11), 맑은 물로 다시 씻어낸 다음 붓을 이용하여 매실산을 도포하였다(Figure 12). 그 다음 20분 동안 두어 부식 및 세척을 진행한 뒤 깨끗한 물로 다시 세척하고 건조하였다.

청동삼존판불에 대한 금도금은 금아말감법으로 진행하였다. 금아말감은 가온할 때 수은이 증발하는 양을 고려하여 금1 : 수은10 비율로 합금하여 아말감을 완성하였다.

가온하여 충분히 아말감 상태가 된 금아말감을 한지에 옮겨 수은을 짜내고 청동삼존판불 표면 위에 바른 후, 손과 구리주걱을 이용하여 청동삼존판불에 금아말감을 전체적으로 묻히고 붓으로 털어내어 균일하게 도포하였다(Figure 13, 14).

청동삼존판불에 금아말감을 도포하고 약 24시간 지난 다음, 같은 방법으로 재도포한 후 380~400℃로 가열하여 수은을 기화시켜 도금작업을 완성하였다(Figure 15, 16).

도금은 총 4회 진행되었으며 1차 도금과 2차 도금 시에는 전체적으로 금-수은아말감을 도포하여 도금을 시행하였고 3차 도금과 4차 도금 시에는 도금이 미흡하게 이루어진 부분에 선택적으로 재도금을 시행하였다. 금아말감도금을 완료 한 청동삼존판불을 도금이 이루어지지 않은 부분은 검게 탄 자국(산화물로 추정)으로 나타난다. 이 부분은 부분적으로 매실산을 도포하여 닦아내면 약한 부식으로 인한 세척이 이루어져 본래 청동이 다시 드러나므로 아말감도포 시 도금이 이루어지지 않은 부분을 매실산으로 닦아 도금을 시행하였다. 금아말감을 도포하고 소성시키는 금도금을 완료하고 도금의 품위를 확인하기 위해 도구를 이용

Figure 8. Casting bronze Samjonpanbul.

Figure 9. Surface polishing.

Figure 10. After polishing.

Figure 11. Degreasing.

Figure 12. Acid treatment.

Figure 13. Amalgam application.

Figure 14. After amalgam application.

Figure 15. Firing.

Figure 16. After firing.

Figure 17. Polishing.

Figure 18. Replicating Geumdongsamjonpanbul.

하여 표면에 광을 내는 광쇠질을 시행하였다(Figure 17). 광쇠를 양가죽에 문질러 머리 부분을 다듬고 넓은 부위부터 표면처리를 시행한다. 광쇠질은 시간이 상당히 걸리는 표면처리법으로 광쇠에 힘을 주어 청동삼존판불 표면을 눌러 문지르면 밀착이 완벽하게 되지 않은 부분이 밀려 벗겨지기도 하나 금아말감 도포와 표면 처리하는 도금장인의 숙련도에 따라 달라질 수 있는 부분이다. 마지막으로 광쇠질을 충분히 하여 금동삼존판불에 금 광택을 내어 도금과정을 완료하였다(Figure 18).

5. 고찰 및 결론

『오주서종박물고변(五洲書種博物考辨)』, 『확지신편(擴智新編)』, 조선시대 각종 의궤 등 고문헌에 기록된 도금 재료와 도금법 등을 확인하고 이를 기초자료로 활용하여 매실산을 사용한 금(Au)-수은(Hg) 아말감기법으로 고대 도금(鍍金)기술을 되살리고, 이를 토대로 경주 월지에서 출토된 금동삼존판불을 복원하였다. 고문헌에 공통적으로 등장하는 재료가 매실임에 주목하여 매실산을 이용해 산 처리를 하고 금아말감법을 수행하였다. 실험에 사용된 매실산 70%는 pH(수소이온농도)가 1.94로, 오늘날 산 처리에 사용하고 있는 질산 20%의 pH와 차이가 있지만, 청동 시편 실험을 통해 매실산에 20분 정도 담근 뒤 금아말감을 도포 후 24시간 지나 가열(380~400°C)했을 때 금도금이 잘 되어, 현대적 방법인 질산처리로 도금을 한 시편과 큰 차이가 없는 것으로 관찰되었다. 사전실험으로 선정한 최적의 금도금 조건(매실산 산 처리 후 금아말감 도포 후 24시간 후 가열)을 적용하여 경주 월지에서 출토된 금동삼존판불의 복원을 진행하였으며 기존 6~7회 수행했던 금도금 작업을 4차례의 도금만으로 완성시켰다. 지금까지 삼국시대부터 조선시대까지 이용한 도금법에 표면을 세척하고 부식시키기 위해 사용한 물질은 고문헌을 통해서만 짐작할 수 있었지만, 이번 실험을 통해 그 물질이 매실산임을 확인할 수 있었다. 이러한 점에서 이 연구의 가장 큰 의미는 “전통 소재와 기술을 복원했다”는 것이라 할 수 있다. 따라서 고대 전통 금아말감도금법의 매커니즘과 제작과정을 규명하고자 한 이번 연구는 금도금기술의 전주기적인 연구체계를 구축하고 금속 주조와 도금과정의 단계별 공정을 과학적 방법으로 확인함으로써 향후 금도금기법과 관련한 연구에 있어 중요한 선행 자료로 활용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 기초연구과제 일반연구자지원 사업(보호분야)“금속(청동·황동·오동·백동·금동) 전통 주조, 가공기술 및 응용기술연구(2015.11~2016.10)”의 지원을 받아 수행되었습니다.(과제번호 : NRF-2013R1A1A2058678)

REFERENCES

Gil, B.I., 2004, Physicochemical characteristics of brown rice vinegars produced by traditional and industrial manufacturing method. Journal of Institute of Natural Science, 11, 1-7. (in Korean with English abstract)
Han, M.S., 2000, Study on the ancient amalgam gilding method

in Korea. Master's thesis, Kookmin University, Seoul, 26. (in Korean with English abstract)
Hwakjisinpyeon, 1863-1907. (in Chinese character)
Lee, K.K., 2008, Ojuseojongbakmulgobeon(trans. Choi, J.). Hakyoun, Seoul. (Original work published 1834)
Mukasorok, 1571. (in Chinese)
Queen Dangeong Bokwibumyodogamuigwe, 1739. (in Chinese character)
Sukjong Queen Inhyun Garyedogamuigwe, 1681. (in Chinese character)
Yu, H.S., Park, H.S. and Shin, Y.B., 2007, Scientific analysis of gilt-bronze plaquettes with buddhist images(Panbul) from Anapji pond, Gyeongju. Conservation Science in Museum, 8, 49-69. (in Korean with English abstract)