



## 전주공정을 이용한 팔만대장경 동판제작

김인곤<sup>a\*</sup>, 강경봉<sup>a</sup>, 이재근<sup>a</sup>, 오명현<sup>b</sup>

<sup>a</sup>동의대학교 나노공학부 재료금속공학과, <sup>b</sup>(주)엠앤제이코퍼레이션

### Duplication of Koryo Tripitaka (Taejang'kyong) by Copper Electroforming

I. Kim<sup>a\*</sup>, K. B. Kang<sup>a</sup>, J. K. Lee<sup>a</sup>, M. H. Oh<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Materials and Metallurgical Engineering, Division of Nano Engineering, Dong-eui University, Busan 614-714

<sup>b</sup>M&J Corporation, M&J bldg. 578, Sangdo-dong, Dongjak-Gu, Seoul 813-7140, Korea

(Received 26 January 2004 ; accepted 10 February 2004)

#### Abstract

Copper electroforming process has been applied to duplicate Koryo Tripitaka (Taejang'kyong), wooden printing block. Thin copper replica printing plates of 1mm thickness was successfully manufactured from the printing face (54.5 × 25.5 cm) of wooden printing plate. Major processes are (1) silicon rubber replication of the master (2) silvering on silicon rubber (3) copper electroforming (4) separation of copper from the silicon mandrel (5) final coloring by brass plating and trimming. This process has various potential applications in making thin metallic objects such as plaques, statues, bust and hollow metal objects for jewelry.

*Keywords* : Copper electroforming, Koryo Tripitaka (Taejang'kyong), Silicon rubber, Silvering, Printing plate, Replica

## 1. 서 론

전주공정은 전기도금원리를 이용한 것으로, 소지 물체에 도금한 후 도금층을 소지금속에서 분리하여 원하는 형상이나 부품을 만드는 공정이다<sup>1)</sup>. 이것은 1838년 러시아 Academy of Science의 Jacobi 교수가 동 인쇄판에 동을 전기도금하여 분리된 도금층의 표면을 살펴본 결과 원본과 꼭 같은 음형으로 복제된 것을 발견한 것이 시초가 되었다. 이 발견은 전주공정의 대표적인 장점으로 꼽히는 표면형상의 탁월한 복제능력을 보여주는 것으로 초기에는 비교적 간단한 bas-relief, 조각작품, status의 제작과 조판이나 인쇄판 복제에 활용되었다<sup>2,3)</sup>. 이 이후에는 보다 복잡하고 미세한 형상이 새겨진 전축판<sup>4)</sup>, CD, DVD stamp<sup>5)</sup> 나아가 최근에는 MEMS나 nano imprint기술<sup>6)</sup>에도 적용되고 있다. 또한 두께가 얇은 속빈 동상, 흉상, 주얼리등의 금속제품<sup>7)</sup> 제작도 가

능해졌다. 상기한 이러한 응용분야는 스탬핑, 주조, 기계적 가공, 심가공등 전통적인 금속가공방법으로는 불가능하거나 시간과 노력이 많이 요구되어 전주공정만이 가능하다.

본 연구에서는 전주공정을 이용하여 팔만대장경 원본에 새겨진 활자판을 두께 약 1 mm의 동판으로 완벽하게 복제하는 과정을 소개하고자 한다. 원판에는 약 3 mm깊이의 한자가 수백자 정교하게 조각되어있다. 또한 조각칼의 칼자국과 나무결, 심지어 벌레나 부식으로 손상된 부위도 있다. 따라서 한자 새기고는 부처님께 이배 절을 올린 우리 선조의 얼과 혼이 장구한 세월속에서도 숨쉬고 있는 귀중한 문화유산이다. 그러나 팔만대장경은 목판이어서 수명의 한계가 있으므로 영구보존하고자 동판제작이 시도되었다. 지난 수년 동안 조각, 부식, 주조등의 여러 기술이 시도되었지만 원판과 꼭 같은 형상의 두께 1 mm의 동판 제작에는 실패하였고 국내에서는 최초로 본 연구실에서 구리전주공정이 시도하였다.

\*Corresponding author. E-mail : igkim@dongeui.ac.kr

## 2. 실험방법

전주 동판 제작공정 순서는 다음과 같다.

- |  |
|--|
| (1) 원본 — (2) 컴퓨터 스캔 — (3) 컴퓨터 조각<br>— (4) 실리콘고무 복제 (멘드렐) — (5) 은코팅<br>— (6) 동전주 — (7) 분리 — (8) 표면처리 —<br>(9) 마무리가공 — (10) 완성 |
|--|

주요공정을 살펴보면

### 2.1 멘드렐 제작

(1)에서 (4)에 해당되는 공정이다. 멘드렐(mandrel 혹은 master)이란 복제할 물체를 칭한다. 따라서 팔만대장경 목판을 멘드렐로 사용하는 것이 이상적이지만 기술적인 면에서 원본사용은 불가능하였다. 목재에 동도금을 하기 위해서는 방수처리, 은코팅 그리고 동전주를 거쳐야만 하는데 이 과정에서 원본의 손실은 피할 수 없었고, 또한 1mm 두께의 동판을 원본에서 분리하는 것이 불가능하였기 때문이었다. 따라서 원판의 미세형상을 거의 완벽하게 복제할 수 있는 이액형 실리콘 고무(ShinEtsu KE 1300T)로 복제한 복제물을 멘드렐로 사용하기로 하였다. 그러나 이마저도 복제작업시 원형손상에 대한 우려 그리고 원본에 끼어있는 굳은 먹물찌꺼기 제거 또한 방대한 작업이어서 원본의 실리콘고무복제는 허락되지 않았다.

그 차선책으로 수년간에 걸쳐 원본의 활자판을 컴퓨터로 스캔한 활자 이미지를 이용해야 했다. 이 활자이미지는 먼저 타일에 컴퓨터를 이용하여 조각되고(그림 1) 이 조각판에서부터 고무를 복제하여 멘드렐로 사용하였다. 활자이미지를 동판에 직접 조각하는 방법도 시도되었지만 조각속도가 하루에 1개로 너무 느리고, 조각도중 조각칼을 여러 번 교체해야하기 때문에 작업자가 상주해야하는 번거로움 그리고 고가의 장비가격등으로 더 이상 진행하지 못하였다.

그림 1의 타일 조각판에 이액형 실리콘 고무를 붓으로 고르게 바르고 스프레이 건으로 압축공기를 분사시켜 실리콘고무 혼합 시 유입된 기포와 활자깊이 갇혀있는 기포를 제거하였다. 탈기는 최종제품의 승패를 결정하는 중요한 단계이다. 완전히 탈기되지 않으면 동 표면에 공기방울 형태의 흔적이 남기 때문이다. 많은 시행착오를 겪어야만 했다. 깊숙하고 좁은 홈에 갇힌 공기는 압축공기에도 빠져나오지 않은 경우도 있어 돋보기로 한자 한자 일일이 확인하여 발견되면 핀으로 강제적으로 뽑아내어

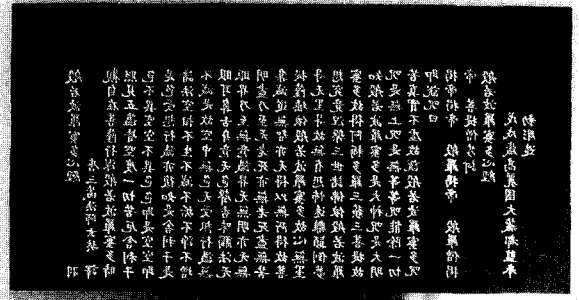


Fig. 1. Master.

야 했다. 탈기 방법은 앞으로 개선해야 할 과제중 하나이다. 일차로 어느 정도 경화되면 그 위에 가제를 놓고 다시 실리콘 고무로 덧칠을 하였다. 이렇게 제작된 실리콘고무의 두께는 약 5mm였으며 중간에 삽입한 가제는 실리콘 고무 판의 강도를 높이기 위함 이었다. 또한 실리콘 고무판의 변형을 방지하기 위해 실리콘고무 뒷면에는 보강제로 강철봉을 넣고 그 위에 FRP를 부어 경화시켜 고정하였다. 실리콘고무와 FRP 보강판은 실리콘 가장자리에 여러개의 단추를 달아 FRP에 끼워 고정하였다. 이렇게 함으로써 전주후 FRP로부터 동전주와 실리콘고무의 분리가 용이하였다.

### 2.2 은코팅<sup>8)</sup>

실리콘고무는 전기를 통하지 않으므로 전도성을 부여해야하는데, 본 연구에서는 은 분사방법을 채택하였다. 은 코팅 순서는 다음과 같다. (a) 알칼리 탈지 (b) 수세 (c) wetting (d) 수세 (e) 주석 활성화 (f) 수세 (g) 은 스프레이코팅. 특히 주의해야 될 점은 마지막 은 스프레이 코팅 전 단계에서 고무 표면이 완전히 젖음 상태가 되어야 한다는 점이다. 젖음 상태는 수세 후 물방울이 뭉치지 않고 완전히 퍼진 상태로 판단하였다. 젖음 상태가 아닌 경우에는 (c)와 (f)과정을 수차례 반복해야만 했다. 이렇게 활성화된 실리콘고무위에 은 이온을 함유하는 은용액과 환원제를 동시에 분사시키면 은 이온이 은으로 환원됨으로써 얇은 은막이 형성된다. 은 분사에 사용된 주성활성화, 은 및 환원용액의 조성은 표 1에 나타내었다.

은 코팅이 완료되면 동 전주를 위해 전주시스템의 부스바와 은코팅 중간에 전기적 연결을 해주어야 한다. 먼저 멘드렐 판에 드릴로 구멍을 내어 부스바에 연결될 고리를 달고, 은 페이스트 혹은 전도성 구리테이프를 이용해서 부스바에 연결될 구리선과 은 코팅층을 연결하였다. 얇은 은 코팅층(~0.5미크론)은 탄력성 있는 실리콘고무에 형성되어 있

Table 1. Bath composition and operating conditions of acidic copper sulfate electroforming

CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	230 g/l
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	60 g/l
HCl	60 mg/l
Brightner (SP-95)	2 mg/l
Anode	phosphorized copper ball (Titanium basket/anode bag)
Temperature	room temperature (20~25°C)
Agitation	air bubble, continuous filtering
Cathode	silvered silicon rubber
Purification	activated carbon, dummying

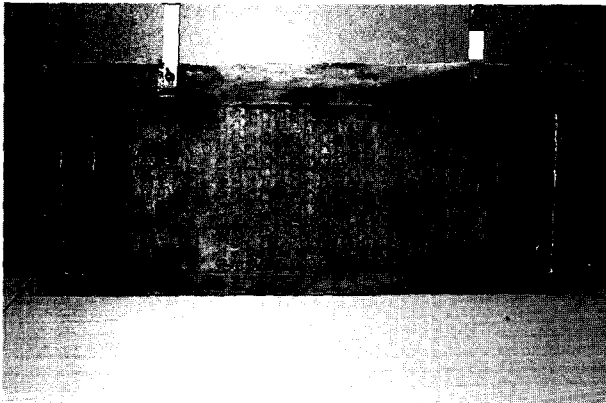


Fig. 2. Silvered silicon rubber mandrel. Ready for copper electroforming.

어 약간의 충격에도 쉽게 절연되므로 부스바에 걸 때까지는 세심한 주의가 필요하였다. 동선과 은 코팅면과의 전기적 저항은 0.2~0.3옴으로 도금하기에 충분히 낮은 저항치를 보였다. 또한 이 저항값으로 전기적 접점 및 은 코팅면의 전도성을 확인하였다.

그림 2는 상기 공정을 거쳐서 준비된 동 전주 직전의 은이 코팅된 실리콘 맨드렐이다.

### 2.3 동전주

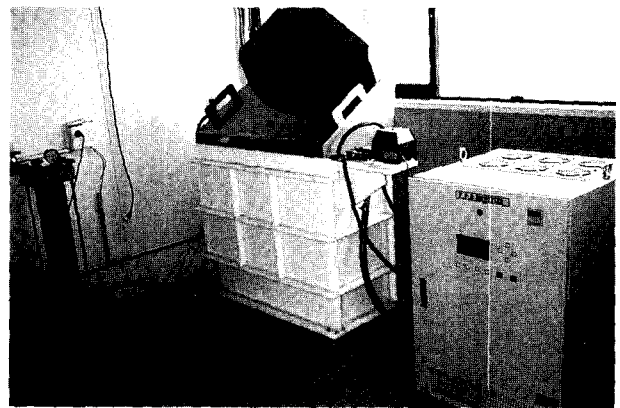
#### 2.3.1 동도금액

황산동 욕을 사용하였으며 욕조성과 사용조건은 표 2에 나타내었다. 도금과 달리 장시간 도금해야 하는 전주에서는 도금액내의 불순물과 입자들을 제거하는 것이 매우 중요하다. 불순물에는 유기물과 무기물이 있으며, 전자는 전욕 후 활성탄을 넣고 24

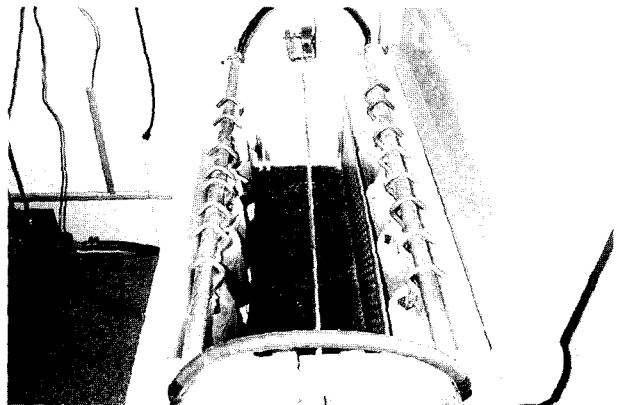
시간 교반하여 제거한 후 활성탄은 여과기로 걸러내었다. 금속이온을 포함하는 무기불순물은 전류밀도가 낮은 약 2 mA/cm<sup>2</sup>에서 철망을 지그재그형태로 접어 만든 음극에 24시간 약전해를 실시하여 제거하였다.

#### 2.3.2 구리전주시스템

그림 3은 구리전주시스템을 나타낸다. 그림 3(a)의 중앙에 보이는 것은 900×400×820 mm 크기의 PP 도금탱크로 약 230리터의 도금액이 들어있어 도금



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Copper electroforming system showing plating tank (center), rectifier (right) and continuous filtering system(left). Air pump is located upper right side of the plating tank (b) Close view of the plating tank. Four titanium baskets filled with copper balls are located at the two opposite sides. Cathode bus bar is shown in the center. One perforated polypropylene shield is seen near the right anode.

Table 2. Chemical composition of the solutions used for silvering process

Sensitization	Silver solution	Reduction solution
stannous chloride 3 g/l stannic chloride 3 g/l hydrochloric acid 40 m/l (35% w/w) sodium chloride 175 g/l	silver nitride 20 g/l ammonium hydroxide 30 g/l (0.88 M) sodium hydroxide 2 g/l (adjust to 1.25 l with deionized water)	formaldehyde(40%) 22 m/l sodium hydroxide 0.5 g/l lead acetate 0.5 g/l (adjust to 1.25 l with deionized water)

액 높이는 570 mm였다. 좌측에는 연속여과장치가 설치되어 있으며, 여과필터의 기공 크기는 15 μm이고, 여과속도는 시간당 600 l였다. 도금탱크 상단우측에 보이는 air blower는 도금탱크 하단에 설치된 air tube에 연결되어 연속여과와 함께 용액의 교반이 충분히 이루어지도록 하였다. 그리고 그림 3(a)의 우측에 보이는 것이 정류기(30V, 330A)다. 그림 3(b)는 도금탱크내부 구조를 나타낸다. 중앙에는 맨드릴이 위치하며, 양쪽에는 원통형 티타늄 바스켓에 함인동을 채우고 여과포로 싸 아노드를 4개씩 설치하였다. 우측 아노드앞에 보이는 판은 shield판으로 균일한 전류층을 얻기 위해 PP 판에 좁은 간격으로 구멍을 뚫어 전류밀도를 제어하는데 사용하기 위함이다.

2.3.3 동 전주

은 코팅은 매우 얇아 고 전류시 열에 의해 단락될 위험이 있다. 따라서 초기에는 전류밀도를 낮추어 5 mA/cm<sup>2</sup>으로 하였다. 동도금은 은코팅 층과 연결된 접점부위에서 시작되어 서서히 퍼져나가므로 약 1시간 도금 후 꺼내어 전체 면이 동으로 도금된 것을 확인하였다(그림 4). 접점부위에 결함이 있는 경우 저항으로 인해 은 코팅이 타는 경우도 있으므로 이러한 확인 절차는 꼭 필요하였다. 그런 다음 전류밀도를 20 mA/cm<sup>2</sup>, 40 mA/cm<sup>2</sup>로 단계적으로 증가시켜 두께 1 mm를 얻는데 필요한 이론적 전기량의 약 2배를 가하였다. 왜냐하면 모서리나 가장자리에 전류가 집중되어 원하는 지역의 도금효율이 감소하였기 때문이었다.

장시간이 소요되는 전주에서 가장 큰 문제점은 모서리, 가장자리, 돌출부위 혹은 마스킹 지역의 결함부위등에서 발생하는 전류집중 현상이다. 전주 초기에는 큰 비중을 차지하지 않지만 어느 정도 성장하면 수지상정형태로 급속히 성장해서 원하는 지역의 도금효율이 절반이하로 떨어진다. 수지상정의 구

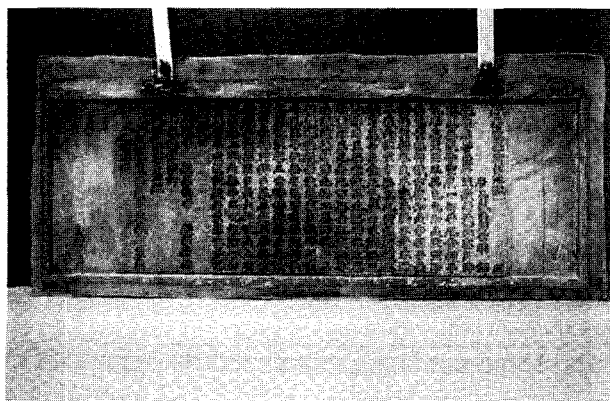


Fig. 4. Initial stage of copper electroforming.

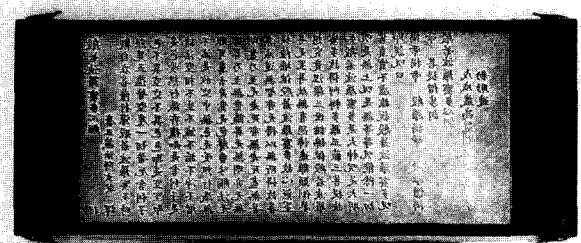
리 도금층을 방치할 경우 심한경우에는 약 30 cm 이상으로 성장하여 도금효율저하 뿐 아니라 양극판에 닿아 단락을 초래하기도 하였다. 따라서 5~6시간 간격으로 이들을 제거하고 필요한 경우 마스킹 페인트나 테이프로 가려주어야만 했다. 앞으로 이와 같은 고 전류밀도 지역을 차단해서 전주과정에서 행해지는 번거로운 작업공정을 향상시키기 위한 shield와 rack 등에 대한 연구가 요망된다.

2.4 전주 후 공정

도금탱크에서 꺼내어 세척한 후 실리콘 고무에서 FRP 보강판을 분리하였다. 그런 다음 실리콘 고무를 동 전주판에서 벗겨내었다. 조각형상은 taper 없이 수직으로 되어있기 때문에 생각보다 강한 힘을 가해야 분리되었다. 분리과정에서 동판이 변형될 위험성이 있어 주의를 요하였다. 얇은 실리콘 고무 내에 가제를 넣어 보강시키지 않으면 실리콘고무가 찢어져 못쓰게 되는 경우도 있었다.

3. 결과 및 고찰

그림 5(a)는 완성된 동판을 나타낸다. 동판(54.5×



(a)



(b)

Fig. 5. Completed electroformed copper printing plate (a), and its close view (b) showing fine details of the origin.

25.5 cm)의 두께는  $1\text{ mm} \pm 0.15\text{ mm}$ 로 약 15%의 두께 편차를 보였고, 무게는 1,184 g이었다. 이는 같은 면적의 두께 1 mm 동판의 무게 1,240 g보다 약 56 g 가볍다. 그림 5(b)는 그림 5(a) 일부를 확대한 것으로 글자는 물론이고 타일면의 미세한 형상도 완벽하게 복제되어 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

시작품으로 만족할 만한 결과를 얻었으나 양산시 작업의 효율을 위해 개선해야 할 공정으로는 다음과 같다.

- (1) 실리콘 고무의 탈기
- (2) 실리콘 고무판의 평탄성 유지를 위한 보강판 구조
- (3) 은 코팅층과 부스바간의 전기적 접촉 방법
- (4) 균일한 도금층을 얻기 위한 shield 방법

- (5) rack 설계
- (6) 황산구리도금액의 첨가제에 의한 물성향상
- (7) 구리전주시스템 개선

팔만대장경제작에 사용한 전주공정을 나무조각판 및 주석기념품 복제에 적용하여 보았다. 그림 6은壽자와 미세한 듯음을 새겨 넣은 나무 조각판(a)에서 실리콘고무를 복제한 멘드렐을 사용해서 만든 두께 약 0.5 mm의 전주 동판이다. 동판의 면적은  $938\text{ cm}^2$ , 무게는 465 g이며, 전주 후 금색을 내기 위해 황동을 도금하였다. 그림 6(b) 전면의 배경색깔이 검은 것은 Jax Brown/Black(Shor International Corp.)용액으로 착색을 하였기 때문이다. 그림 7(c)는 뒷면을 나타낸다.

그림 7은 독일제 주석 기념품(a)에서 만든 니켈전주 복제품이다. (b)는 전면 (c)는 뒷면을 나타내며, 두께 1 mm의 원본과는 달리 니켈 전주복제품의 두

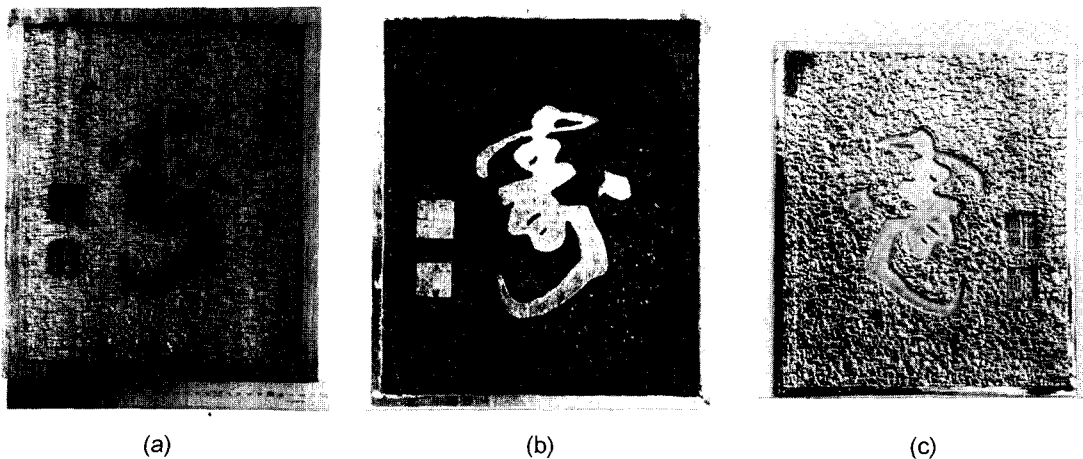


Fig. 6. (a) Wooden 壽 sculpture with finely embossed background (b) front face of bronze plated electroformed copper (c) rear view, the background was blackened by coloring agent of Jax Brown/Black, the thickness is 0.5 mm.

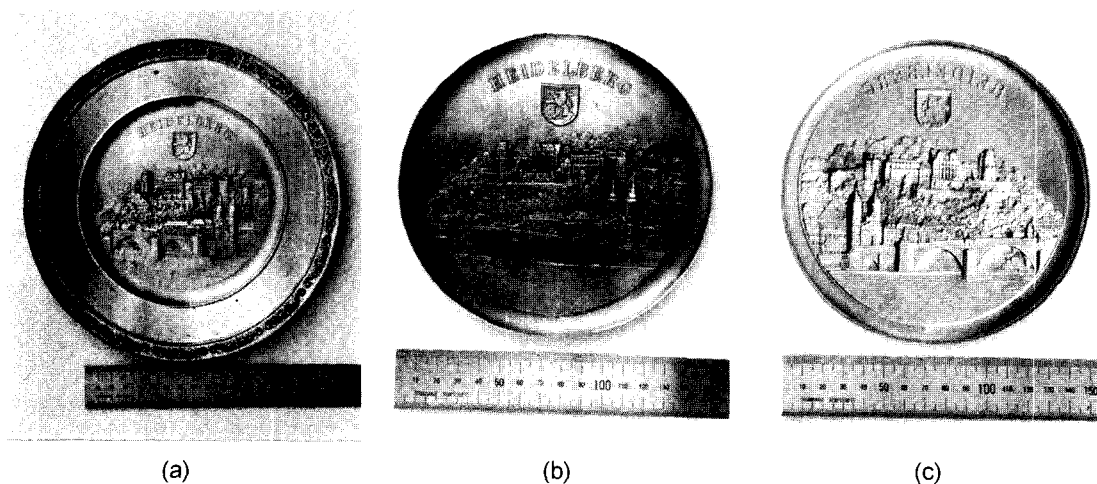


Fig. 7. (a) Original Tin Plaque, 2 mm thick (b) 0.2 mm thick electroformed nickel (c) Rear View of the Electroformed Replica.

께는 약 0.1 mm, 무게는 약 20 g으로 원본에 비해 약 10분의 1정도 가벼운 복제품을 제작할 수 있었다.

이와 같은 얇은 두께의 조각판은 스탬핑이나 주조방법으로는 제작하기 불가능한 제품으로 전주공정의 장점을 잘 보여준다.

팔만대장경 원판을 사용할 수 없어 제작공정이 보다 복잡해 졌고, 무엇보다 원형을 그대로 재현해 낼 수 없는 점이 아쉽다. 앞으로 공정을 개선하여, 귀한 문화재 및 고가의 예술품 복제가 이루어져 널리 보급되었으면 한다.

## 후 기

본 연구에 지원을 한 M&J(주)와 동의대학교 전자세라믹스센터 그리고 도금설비비용에 협조를 해주신 환성공업(주)에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. ASTM Standard B450. Engineering Design of Electroformed Articles, 1981 Annual Book of ASTM standards, p.236.
2. O. I. Pavlova, Electrodeposition of Metals - A Historical Survey, U.S. Department of Commerce, Springfield, VA 22151.
3. C. A. Smith, Early Electroplating, Part 2. Commencement of Industrial Applications (1836-1862), *Finish. Ind.*, 1(3) (1977) 24-28.
4. A. M. Max, Record Quality and Its Relation to Manufacturing, *Journal, Audio Engineering Soc.*, 3 (1955) 19.
5. T. G. Bifano, H. E. Fawcett, P. A. Bierden, *Precision Engineering*, 20 (1997) 53-62.
6. Y. Hirai, S. Harada, S. Isaka, M. Kobayashi, Y. Tanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41 (2002) 4186-4189.
7. Symposium on Electroforming - Application, Uses, and Properties of Electroformed Metals, ASTM Special Technical Publication No., 318 (1962).
8. Lawrence J. Durney, *Electroplating Engineering Handbook*, (1996).

1. ASTM Standard B450. Engineering Design of Elec-