

|||||||
技術資料
|||||||

聖德大王 神鍾의 鑄造法에 대한 考察

나 형 용

Molding and Casting Techniques of Temple Bell, named King Sung-Duck's Bell of Silla Era in Ancient Korea

Hyung-Yong Ra

1. 머리말

우리나라 國寶로 현존하는 新羅 梵鍾^(註1,2) 또는 문헌으로만 전해져 내려오는 皇龍寺 大鍾^(註3)은 모두 佛敎文化 전성기이었던 AD 725~771年 경에 주조되었다.

이러한 歷史的 遺品은 크기도 클 뿐아니라 紋樣이나 鍾모양이 아름답고 또 鍾소리도 우아하여 우리 後孫의 큰 자랑거리임이 틀림없으며, 우리나라 古代 鑄鍾技術 (靑銅 熔解 및 鑄造技術)이 가히 세계적 수준이었음을 입증하는 좋은 자료라고 생각된다. 그러나 이러한 歷史的 遺品에 관한 記錄, 특히 鑄鍾技術에 관한 資料는 거의 전래되지 않고 있어 古代 鑄鍾技術을 究明한다는 것은 매우 어려운 일이며, 동시에 위험하기 그지없는 작업이다. 따라서 現存하는 遺品의 形상을 분석하여 鑄鍾技術을 추정할 수밖에 없는데 이러한 경우에는 객관적 자료에 의한 추리보다 집필자의 개인적 견해에 크게 의존될 것임을 미리 말해둔다.

그런데 우리나라는 BC 3世紀경부터 鐵을 만들어 倭와 南灣에 수출하였다는 기록이 있으며 또 古代佛敎, 祭器 또는 金屬工藝品들이 최근 많이 발굴되고 있

어 우리나라의 古代 金屬加工技術은 온 世界에 자랑할만하다고 생각된다. 그러나 아직도 우리는 古代 金屬加工技術의 內容을 확실히 파악하지 못하고 있다. 즉 어떤 原材料(鑛石 또는 自然産 金屬)를 어디서 採取하여 어떻게 製鍊 또는 熔解하였으며 또 어떤 鑄型材料를 사용하여 어떻게 造型하고 鑄造하였는지 도무지 이해할 수 없는 문제가 너무 많다. 그러나 최근 몇몇 학자[1-4]들에 의하여 遺品의 구조 또는 화학성분을 분석하고 金屬組織을 조사하여 鑄造品인지 또는 鍛造品인지 구분하는 조사 연구가 있을 뿐이다.

그런데 오늘날에도 약 20톤의 鑄物을 鑄造하려면 상당한 인원과 장비, 그리고 많은 시간과 노력이 소요되는데 하물며 지금으로부터 약 1250년전에 物資와 人力이 부족한 상황에서 비교적 간단한 道具와 技術을 이용하여 아름답고 웅장한 聖德大王神鍾을 주조하였다는 것은 당시 新羅人들이 보여준 敦篤한 佛敎信仰心의 發露이며, 동시에 훌륭한 鍾을 주조해야 되겠다는 匠人精神의 結晶 라고 말하고 싶다.

아무튼 表題의 原稿를 수탁받고 감히 昃을 들었으나, 이미 말씀드렸듯이 本稿에는 著者의 주관적 견해

(註1) 五台山 上院寺 鍾; 國寶 36號, 新羅 聖德王 24年 (AD 725年) 주조, 鍾높이 : 1,670 mm 鍾下帶지름 : 903 mm 下帶두께 : 48 mm 鍾무게 : 1,290 kg
(註2) 慶州 박물관의 奉德寺鍾; 國寶 29號, 新羅 惠恭王 7年(AD 771年)주조, 鍾높이 : 3,663 mm, 鍾下帶지름 : 2,227 mm, 下帶두께 : 203 mm, 鍾 무게 : 18,900 kg. 奉德寺鍾 銘文에 따르면 “景德大王이 先王의 冥福과 國家安泰를 기원하기 위하여 銅 12萬斤을 喜捨하고 높이 1丈의 巨鍾을 만들다가 그 뜻을 이루지 못하고 景德王妃 만월이 소원을 드디어 완성하다.” 또 銘文 말미에 “大歷六年 辛亥 十二月 十四日에 鑄鍾 大博士 大奈麻 朴從諡과 次博士 奈麻 朴賓奈, 奈麻 朴韓味, 그리고 大舍 朴負岳이 鑄鍾하다”라고 부출 주조 되어있다.
(註3) 皇龍寺 鍾; 新羅 第三十五代 景德大王이 天寶(唐의 年) 13年 甲午年(AD 754年)에 皇龍寺 鍾을 주조하였는데 鍾높이가 1丈 3尺이요, 두께는 9寸이며 鍾重量은 497,581斤이다. 그리고 孝貞伊王 三毛 夫人의 施主로 下典 里上宅이 匠人으로 조성하다라는 기록이 있다(참조 : 三國遺史 3卷 皇龍寺 鍾造).

가 많으리라 생각한다. 따라서 앞으로 여러분의 훌륭한 의견과 또 여러 가지 자료를 참고하여 계속 수정한다면 반드시 우리나라 古代梵鍾의 鑄造技術을 정확하게 추정할 수 있으리라고 기대하는 바이다.

2. 新羅梵鍾의 구조적 특징

우리는 新羅梵鍾의 구조를 크게 두 부분으로 구분할 수 있다. 즉 梵鍾을 매달수 있도록 종고리를 붙인 鍾鈕部와 두들기면 소리를 내는 圓筒形의 鍾身部가 있다.

그런데 新羅梵鍾은 그림 1과 같은 구성 요소적 특징을 가진다. 즉 天板위에는 염주를 입에 물고 있거나 앞발에 들고 있는 龍 한 마리가 있는데, 용맹스럽고 활기찬 자세로 몸통을 구부리고 있어 종고리 역할을 하며, 또 구부린 龍의 몸통에 원통형 音筒(音管)을 바싹 붙여놓아 日本이나 中國의 鍾과는 달리 音筒이 있는 單龍의 鍾鈕部를 구성하고 있다.

그리고 달걀 몸체와 같이 아름다운 곡선을 가진 鍾身部가 있는데, 상단부에는 여러 가지 紋樣이 부출주조된 上帶가 있고 上帶 밑에 四方向으로 각각 네모진 乳廓이 있으며 각 乳廓안에 9개의 乳頭를 설치하였다. 그리고 鍾身의 東西方向에는 아름다운 飛天像과 南北方向에는 撞座를 설치하였다. 끝으로 鍾의 맨 아랫 부분에 각종 紋樣의 下帶를 부출주조하여 鍾의 두께를 조절하는 역할을 감당케 하였다.

이와 같이 新羅 梵鍾인 聖德大王神鍾은 그 구조적 특징으로 말미암아 熔湯을 上注法으로 鑄入하여 주조한

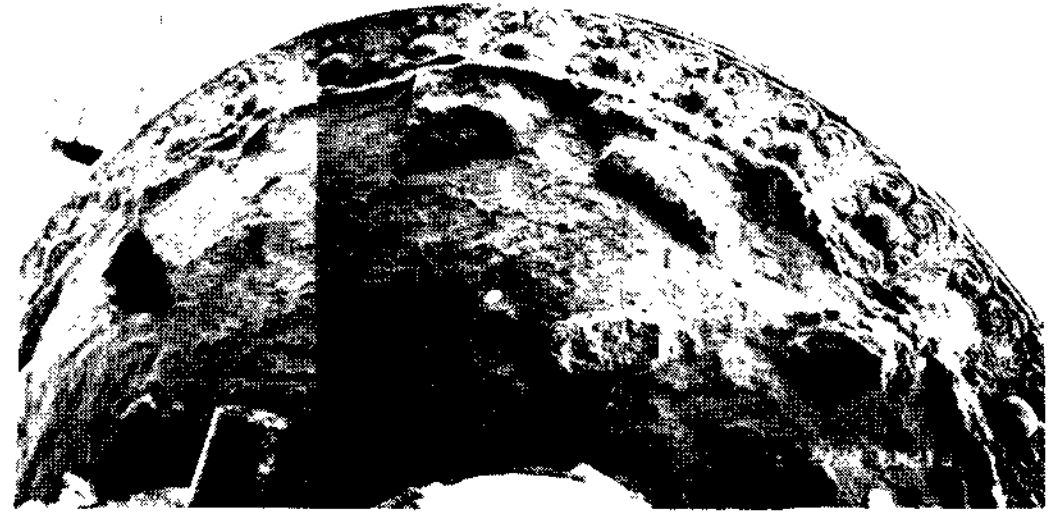


사진 1. 天板에 設置한 注入口 및 押湯 흔적 (東쪽).



사진 2. 天板에 設置한(西쪽) 注入口 및 押湯 흔적.

것으로 판단한다. 이러한 사실은 사진 1 및 사진 2에 나타난 注入口 및 押湯의 흔적으로 확인할 수 있다.

그런데 熔湯을 上注法으로 주입할 경우에는 용탕이 낙하할 때 鑄型(內型)에 충돌하여 飛散되기 쉬우며 또 주형을 파손시키므로 모래 또는 개재물(산화물)이 鍾身部 또는 天板에 모이게 되어 鑄物欠陷이 생기기 쉽다. 그러나 上注法을 택할 경우에는 造型하기 쉽고 또 용탕 주입이 용이하며, 특히 처음에 주입되어 용탕은 도가 떨어진 용탕은 鑄物의 하부에 있고, 후에 주입되는 뜨거운 용탕은 항상 윗부분에 주입되므로 押湯果가 좋은 方向性凝固를 誘導할 수 있다. 따라서 上注法에서는 下注法에 비하여 크기가 작은 押湯을 설치할 수 있는 장점이 있다.

3. 鑄造方案에 대한 考察

일반적으로 靑銅鑄物은 乾燥砂型에 주조하고 있다. 즉 朱錫靑銅의 熔湯이 鑄型안에 있는 수분과 접촉하면 수소 가스를 흡수하여 凝固중에 氣泡를 형성하므로 용탕과 수분의 접촉을 극히 억제해야 한다. 따라서 朱錫靑銅鑄物인 奉德寺鍾도 통기성이 우수하고 塗型

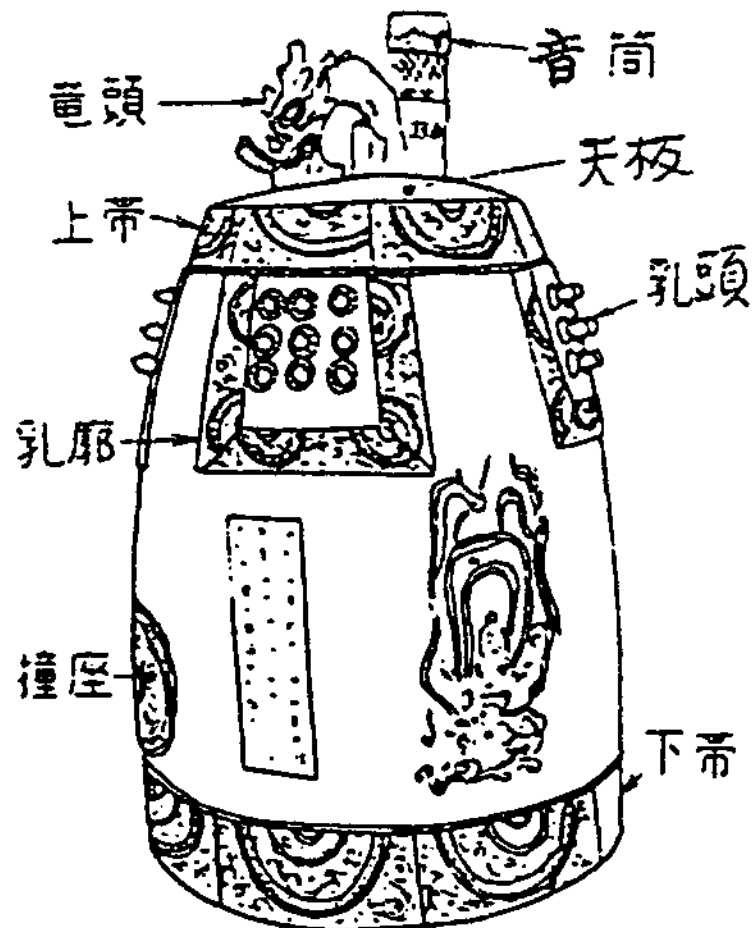


그림 1. 新羅梵鍾.

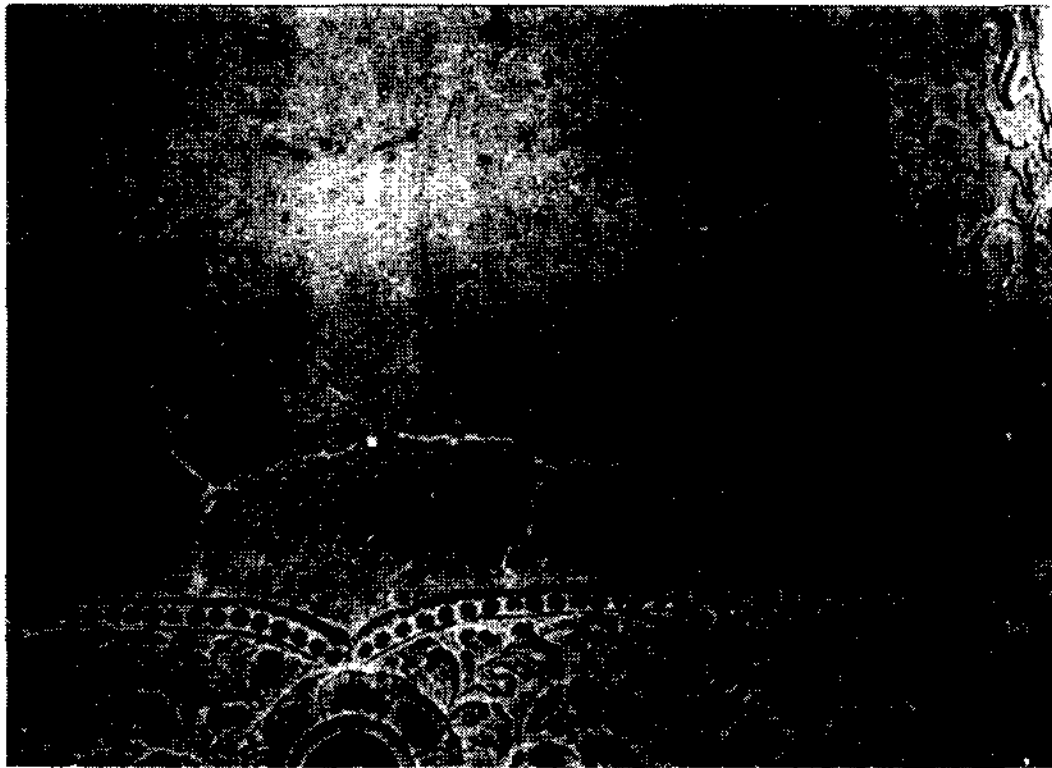


사진 3. 鑄物砂 膨脹에 의한 결함 (鍾身表面).

이 잘 된 乾燥砂型으로 주조되었을 것으로 추정한다. 이는 포항 산업과학연구원 보고서[5]의 주물사 파편의 현미경 사진이라든가, 또는 鍾表面에 나타난 鑄物砂 膨脹에 의한 결함(참조: 사진 3)등을 미루어 보아 추정할 수 있다. 그리고 奉德寺鍾의 鑄型으로 사용된 주물사에 대해서는 앞으로 조사 연구하여 발표할 예정이지만, 石野[6]에 의하면 1637년 中國 宋應星이 펴낸 天工開物 冶鑄 第八卷(註; 鍾의 鑄型 및 熔解 技術에 관한 最古의 書籍)에 알심(中子, Core)은 石灰三和土(註; 石灰, 砂, 粘土砂 등을 물에 잘 갠 흙)로 조형한다라는 기록이 있다고 발표하였다.

3.1 模型과 造型

鑄型을 造型하려면 첫단계로 模型을 준비해야 된다. 그런데 梵鍾과 같이 중심축을 기준선으로 한 圓筒型 鑄物인 경우에는 回轉型을 사용하면 비교적 쉽게 內型(Core, 中子)과 外型을 조형할 수 있다. 이러한 사실은 石野의 著書[6]에 인용된 “天工開物”에도 回轉型에 관한 그림이 있으며 또 신라시대에는 이미 첨성대 또는 석굴암과 같은 걸작품을 제작할 수 있는 幾何學的 技術이 완성되어 있었으므로 回轉型 사용에 관한 문제는 어렵지 않았을 것이라고 생각한다. 즉 梵鍾의 설계도에 따라 木板위에 실제 크기로 現圖를 작성하고 梵鍾의 外面이 될 線을 따라 절단하면 그림 2의 (A)와 같은 外型用 回轉模型이 만들어진다. 이 回轉模型의 중심축을 수직으로 固定하고 회전하면서 주물사를 다지면 그림 2의 (D)와 같은 外型을 조형할 수 있다.

또 같은 방법으로 梵鍾의 內面이 될 線을 따라 그림 2의 (B)와 같은 內型用 回轉模型을 만들고 역시 模型의 중심축을 수직으로 고정시킨 후 회전하면서 주물

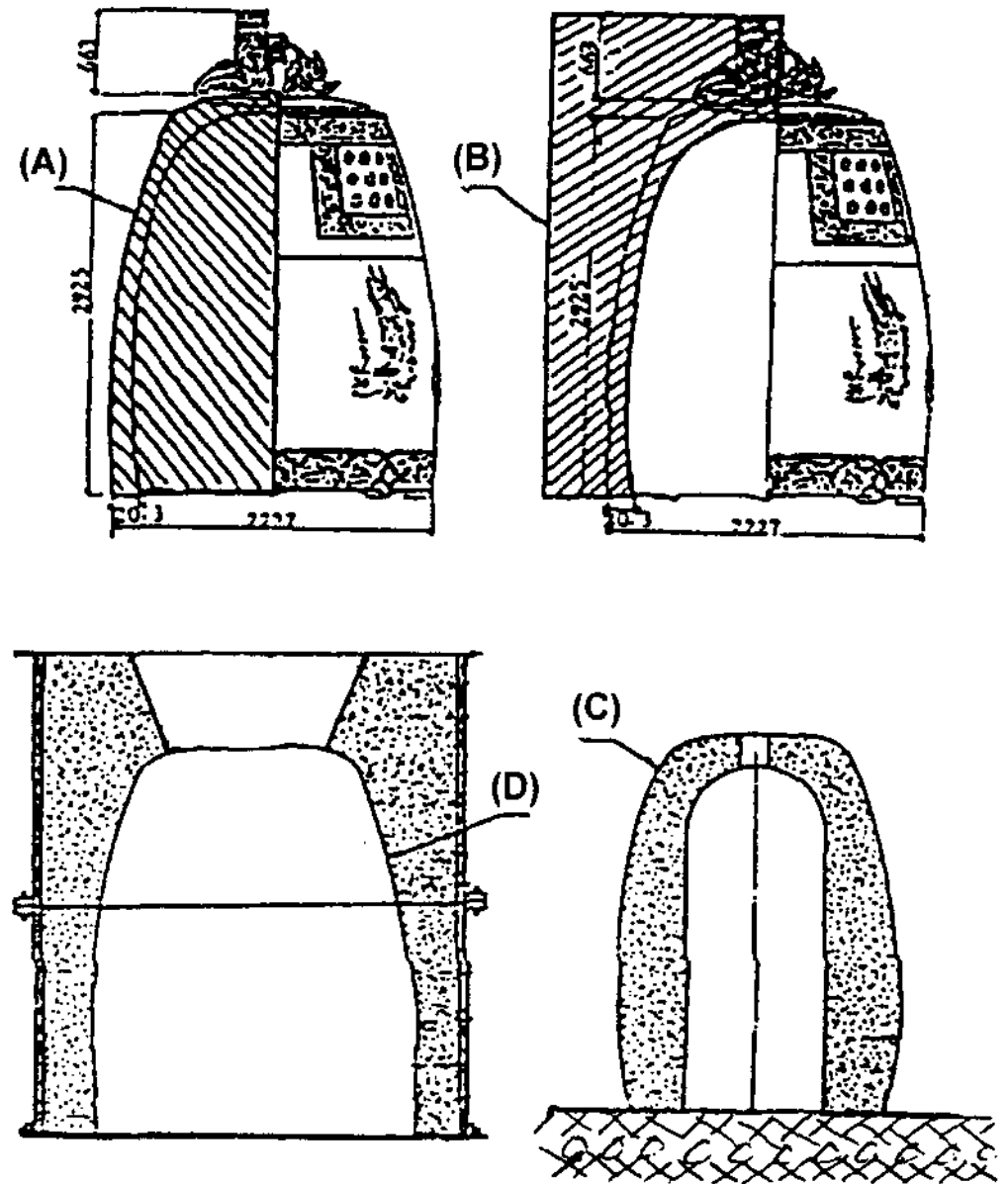


그림 2. 奉德寺鍾의 內·外型用 回轉模型. (A) 外型用 모형, (B) 內型用 모형, (C) 조형된 內型(코어), (D) 조형된 外型

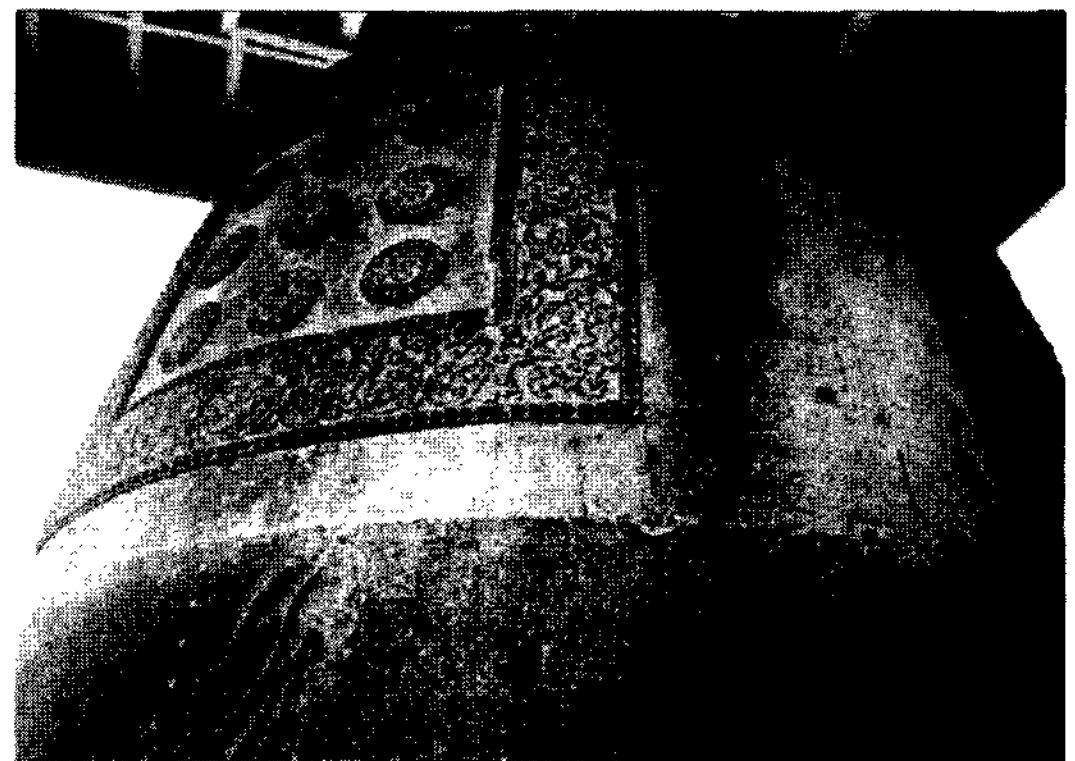


사진 4. 上型 및 下型의 分離線(鍾身중간부).

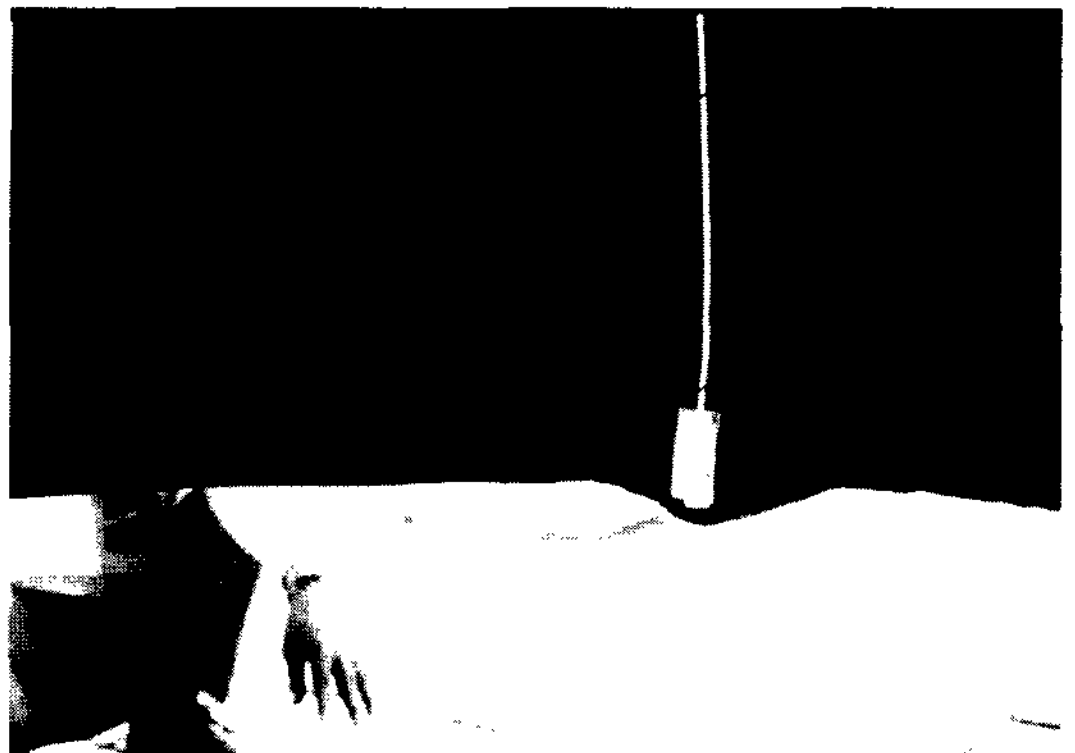


사진 5. 鍾內面 下部에 나타난 알심組立 흔적.

사를 다져서 그림 2의 (C)와 같은 內型(Core)을 조형한다.

이와 같이 회전형을 사용하여 조형하였다는 사실은 사진 4 및 사진 5에서 알 수 있는바와 같이 원주방향으로 줄무늬가 평행하게 나타난 것으로 추정할 수 있다.

3.2 地紋板과 紋樣部の 알심 제작

奉德寺鍾에는 이미 설명한 바와 같이 鍾身에 각종 紋樣이 부출 구조되어 있다. 이와 같은 紋樣은 다음과 같은 방법으로 구조하였을 것으로 추정한다.

즉, 가공하기 쉬운 목재를 사용하여 먼저 上帶, 下帶 및 乳廓部의 紋樣과 飛天像이나 撞座紋樣을 陽刻으로 조각한 地紋板을 각각 제작한다. 그리고 매우 고운 石灰三和土 판에 圖章과 같이 찍어서 陰刻의 알심(코어型)을 만들고 잘 건조하여 알심을 준비한다. 그리고 알심을 조립할 부분을 미리 파 놓은 外型에 알심을 넣고 견고히 조립하여 上帶, 乳廓, 乳頭, 飛天像, 撞座 및 下帶 부분의 紋樣을 완성한다.

이와 같은 방법으로 外型을 조형하였을 것으로 고찰한 이유는 다음과 같다.

- ① 天板 가장자리의 紋樣과 上帶紋樣사이에 주형 분할선이 없다(참조: 사진 6).
- ② 성덕대왕 신종 정밀 실측 및 수치자료분석 보고서(7)에 의하면 乳廓의 크기가 모두 다르며 또 乳頭가 일정하게 배열되지 않았다.
- ③ 남동쪽 乳廓 紋樣이 어그러져 있으나, 이는 용탕을 주입할 때 주형이 파손된 부분이 아니라, 파열된 알심을 그대로 조립한 결과라고 판단하다(참조: 사진 7).
- ④ 동 보고서[8]에 따르면 북쪽의 鍾身높이가 남쪽

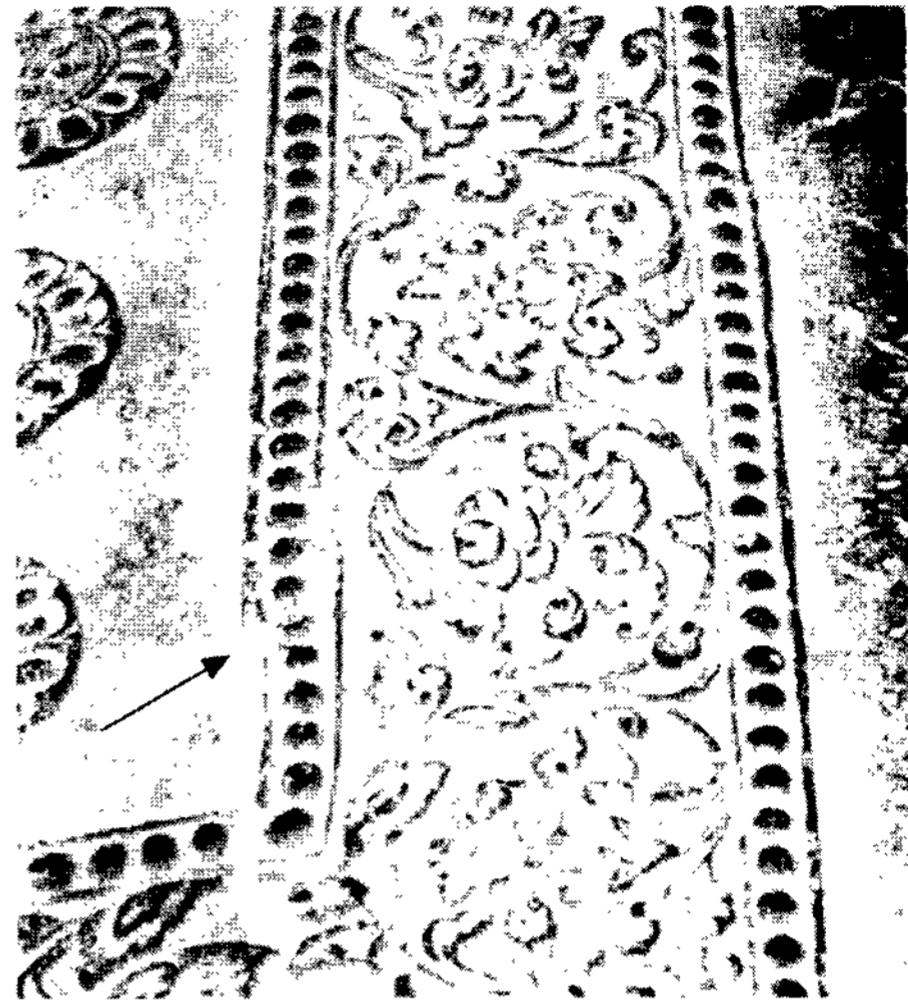


사진 7. 南東쪽 乳廓部의 어그러진 모양.

의 높이 보다 5 cm 더 짧다. 이는 밀납을 사용하여 조형한 경우, 또는 회전형으로 조형한 경우에는 절대 나타날 수 없는 결과이며, 다만 알심을 주형에 조립할 때 생긴 치수착오라고 판단한다. 또 下帶로부터 동일한 위치에서의 鍾의 두께가 일정하지 않다.

⑤ 下帶의 外部에는 주형 분할선이 보이지 않으나 사진 5에서 알 수 있는 바와 같이 梵鍾 안쪽 下部에 주형 분할선이 나타나 있음을 볼 때 梵鍾의 鑄型(外型)은 알심 조립형이라고 추정한다(참조: 사진 8).

3.3 密蠟型和 鍾鈕部 알심의 제작

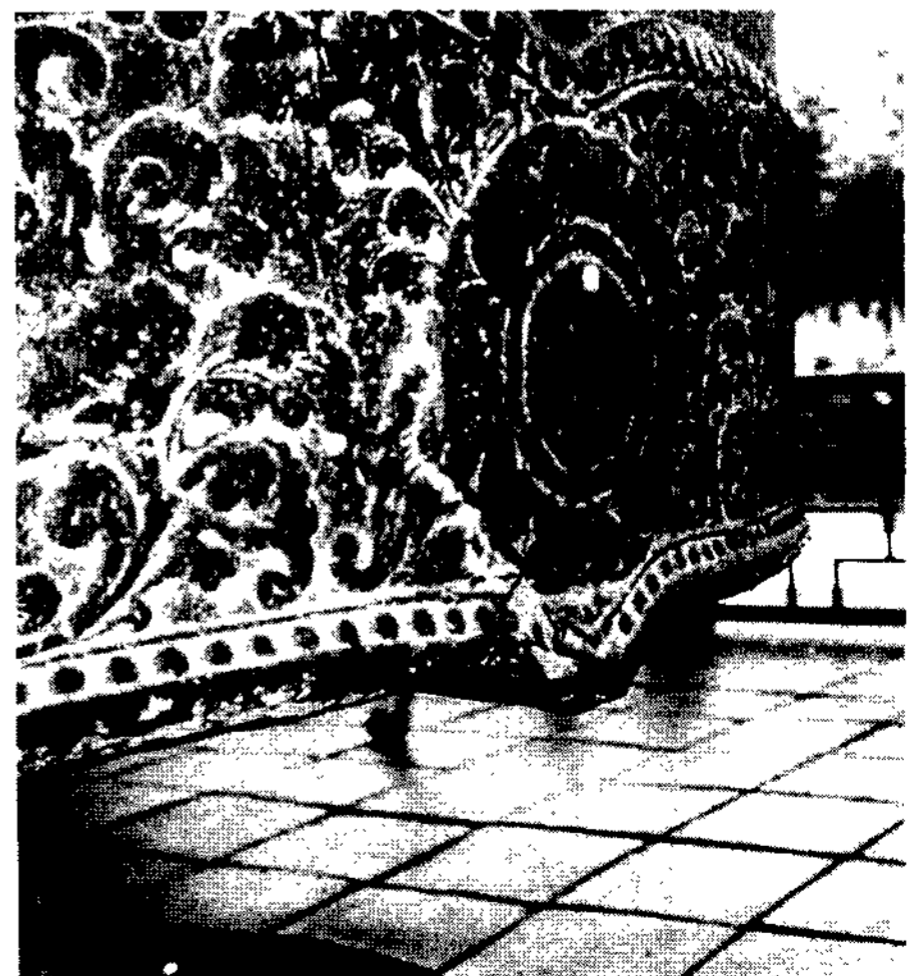


사진 8. 매끄러운 下帶紋樣 가장자리.



사진 6. 鍾鈕部 알심의 組立 흔적(鑄物 지느러미 자리가 언덕짐).

鍾鈕部 주형은 密蠟型을 사용하여 알심으로 조형하였을 것으로 추정한다. 즉 新羅 시대에 제조된 각종 佛像이나 祭器 등이 精密鑄造法(Lost Wax Process)으로 주조된 것으로 미루어 보아 梵鍾의 鍾鈕部の 鑄型에도 이 技法이 응용되었을 것이라고 생각한다.

밀납으로 조각한 龍頭 및 音筒模型을 天板의 곡면과 동일한 모양의 天板模型위에 올려 놓고 고운 石灰三和土로 鍾鈕部 鑄型을 다진다. 그리고 이 주형을 서서히 가열하여 密蠟을 전부 녹여 流出시키면 鍾鈕部 알심이 완성된다.

여기에서 한가지 지적하고 싶은 것은 포항산업과학연구원 보고서[5]뿐만 아니라, 奉德寺鍾 紋樣에 관한 자료에서는 天板의 音筒과 龍頭 주위에 연꽃 무늬가 부출주조된 것으로 기록하고 있으나, 本稿 그림 4와 같이 音筒주위에만 연꽃무늬가 있음을 알리고 싶다 (참조 : 사진 2).

3.4 鑄型的 組立

聖德大王神鍾의 鍾身 중간부분에 鑄型分割線이 나타나 있다. 즉 이 線은 上型和 下型을 合型할 때 생긴 境界線으로서 주형을 조립한 후 끝손질 할 수 없었기 때문에 나타난 것으로 추정된다. 즉 이 梵鍾은 天板까지의 높이(肩高)가 약 293 cm이며, 鍾의 지름이 약 223 cm이므로 鑄型틀을 2개로 분할하여 한 鑄型으로 造型하였으나, 鑄型을 조립할 때에는 下型(外型)을 먼저 內型(알심)에 조립하고 중두께(알심까지의 간격)를 검사한 후 다시 上型(外型)을 조립하였으므로 鑄型分割面을 수정할 수 없었을 것으로 생각한다. 따라서 이 梵鍾을 주조하기 위한 鑄型은 2段 組立式으로서 단단하게 잘 건조된 밀면에 설치 되었을 것이다.

그리고 鍾鈕部鑄型은 3-3항에서 설명한 바와 같이 알심으로 조형되어 上型(外型)에 삽입하는 식으로 조립되었다고 생각한다. 즉 사진 1 및 사진 2에서 알 수 있는바와 같이 天板위에 지름이 약 125 cm인 원형의 주물 지느러미 자국이 나타난 것으로 보아 알심을 조립하였을 것으로 추정한다. 특히 사진 6에서 볼 수 있는 바와 같이 鍾鈕部 알심을 上型에 조립할 때 天板 바깥 둘레의 연꽃무늬面과 동일한 面을 이루지 못하고 단이 생긴 것을 확인할 수 있다. 그리고 天板의 동쪽에서는 약 1.5 cm, 서쪽은 약 3.0 cm의 단이 생긴 것으로 보아 鍾鈕部 알심이 정확하게 조립되지 않았음을 알 수 있다.

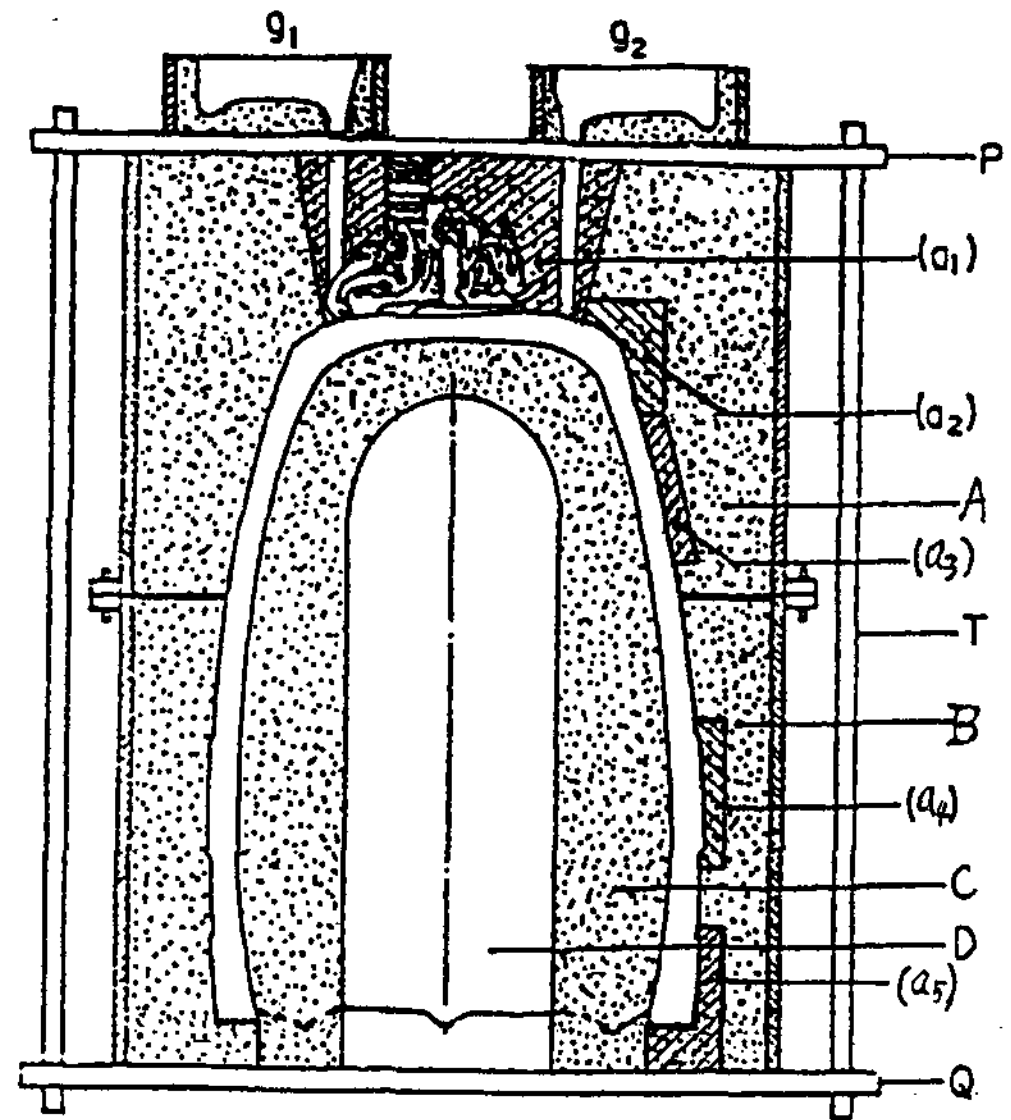


그림 3. 聖德大王神鍾의 鑄型 推定圖.

A: 上型 (a₁): 鍾鈕部 알심 (a₅): 下帶紋樣部 알심
 B: 下型 (a₂): 上帶 및 天板紋樣部 알심 g₁, g₂: 熔湯 注入口 C: 內型(코어) (a₃): 乳廓 및 乳頭部 알심
 P, T, Q: 鑄型고정장치 D: 煉瓦積 (a₄): 撞座 또는 飛天像 알심

위와 같은 모든 사실을 종합하여 聖德大王神鍾을 주조하기 위한 鑄型을 推定하여 다음 그림 3과 같이 나타내었다.

3.5 鍾鈕部 알심의 높이와 注入口 및 押湯의 위치

사진 9은 音筒의 최상단면으로, 音筒끝면이 매우 매끄러운 鑄物表面을 나타내고 있으며 또, 音筒두께 中心線부분이 수축된 것을 확인할 수 있다. 즉 이는 용



사진 9. 音筒上帶部(두께 중심부가 수축된 모양과 매끄러운 표면).

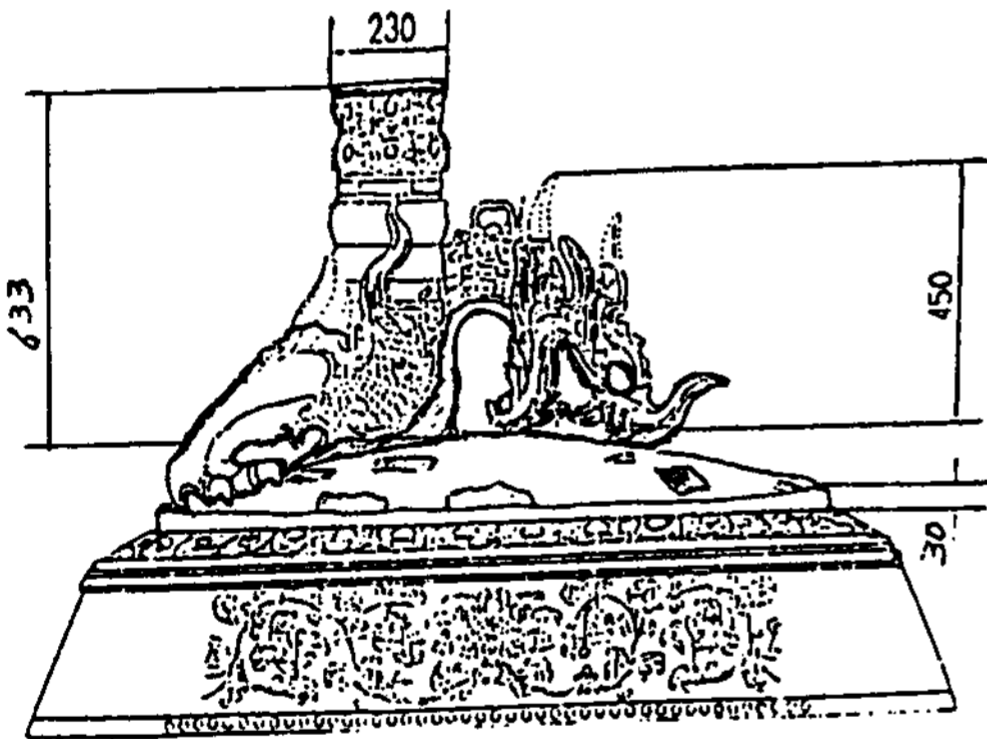
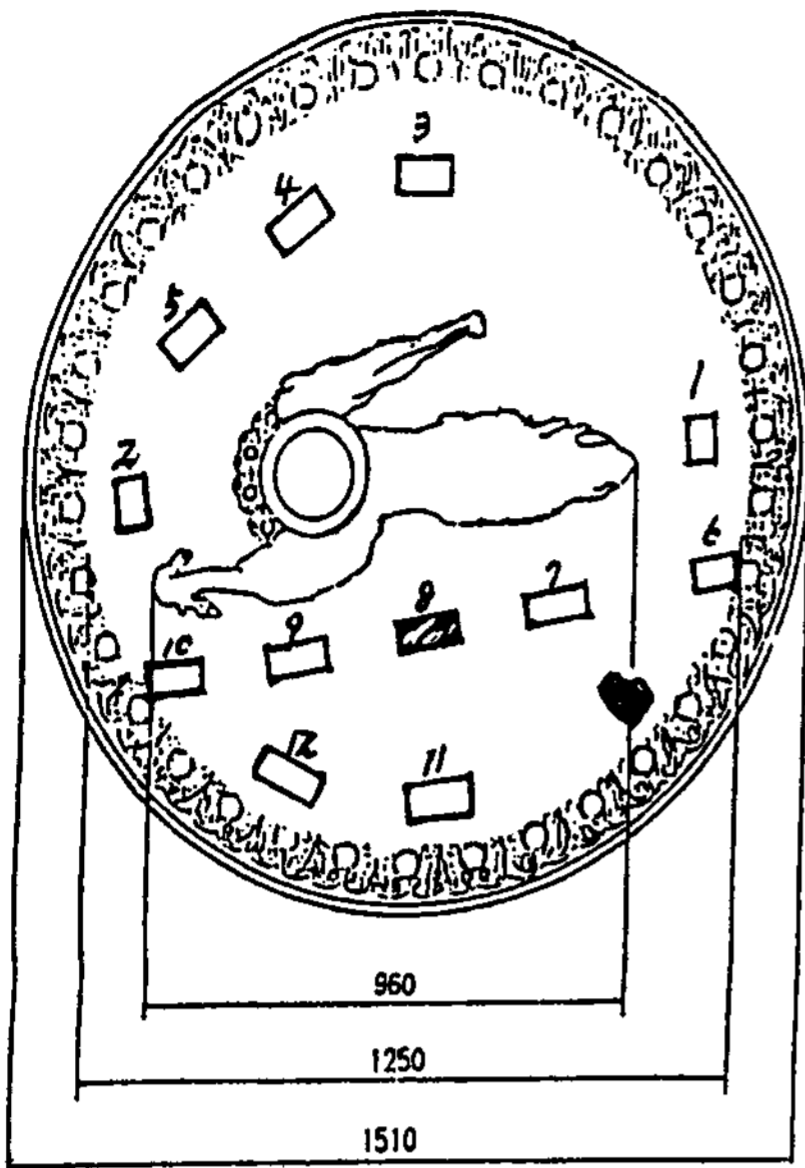


그림 4. 天板의 모양과 注入口 및 押湯의 위치.

탕이 응고할 때 수축한 흔적으로서, 용탕이 音筒상단 까지만 주입되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 音筒의 높이가 633 mm이므로 鍾鈕部 알심의 높이도 약 650 mm 정도이었을 것으로 추정한다.

다음 그림 4는 天板위에 설치한 熔湯注入口와 押湯의 위치를 나타낸 것이다.

일반적으로 용탕 주입구는 용탕이 가득 채워진 상태에서 응고하므로 헐잡물이나 가스 구멍과 같은 鑄造 欠陷이 발생하지 않는다. 사진 1 및 사진 2에서 ①번과 ②번 위치는 용탕이 가득 채워진 상태로서 주물결함이 없으므로 聖德大王神鍾은 그림 4에서 ①번과 ②번의 위치가 용탕 주입구인 것으로 추정한다. 그러나, ③번~⑧번 위치에서는 용탕이 가득 채워지지 않았을 뿐

만아니라 수축된 흔적 또는 파손된 주물사가 부상하여 구멍에 잔류한 것 등으로 미루어 보아 ③번~⑧번 위치는 압탕(가스배출구)이라고 추정할 수 있다. 압탕(가스배출구)이란 용탕을 주입할 때 주형내의 공기 또는 주형에서 발생한 가스 또는 용탕에 혼입된 불순물 등을 주형 밖으로 배출시키며, 동시에 덧싯물을 공급하는 역할을 담당하는 곳이다. 그리고 ⑨번~⑫번 위치도 압탕이라고 추정되는 위치이나, 용탕이 가득 채워진 상태로 응고되었다. 즉 다행스럽게 파손된 주형이 이 부분에는 부상하지 않았기 때문이라고 생각된다.

일반적으로 용탕이 주형에 주입되면 용탕의 열로 인해 주물사(규사는 약 578°C에서 급격히 팽창함)가 膨脹하여 破裂되기 쉽다. 聖德大王神鍾의 內面(core面)의 북북동쪽과 서서남쪽에 주물떡(scab : 주물사가 팽창하여 떨어져 나간 자리에 싯물이 덧붙은 곳)이 생성된 것을 확인할 수 있다. 이는 ①번과 ②번의 熔湯注入口에서 용탕이 주입되면서 주입이 끝날 때까지 장시간 열충격을 가하게 됨에 따라 內型(알심)이 열팽창하여 파손된 결과라고 생각한다. 그리고 ⑥번과 ⑦번 압탕 가까이에 큰 구멍이 남아 있는 곳은 파열된 주형덩어리가 부상한 자리로서 주물결함이라 할 수 있다.

3.6 鑄型の 固定과 熔湯注入준비

모든 주형을 완전히 조립한 후에는 주형을 견고하게 固定시켜야 한다. 즉 靑銅의 비중은 약 8.9이며 鑄物砂의 비중은 약 2.0정도이므로 靑銅의 熔湯이 주입되면 鑄型이 浮力을 받게된다. 따라서 여러 가지 固定 道具를 사용하여 주형틀을 견고하게 결합시켜야된다.

그리고 주형높이까지 흙을 쌓는데 용해로에서 주형 쪽으로 용탕이 흐르기 쉽도록 旬配진 작업장을 만들어야 한다.

그리고 音筒알심과 주입대야 및 싯물흙통을 설치하는데 주입대야는 용해로에서 흙통을 통해서 내려오는 용탕이 주형주입구에 정확하게 주입될 수 있도록 잘 연결시켜야 되며, 또 싯물 흙통은 완전히 건조시킨 후 숯불과 함께 補溫材(별짐재)를 덮어서 흘러내려오는 용탕이 냉각되지 않도록 주의해야 한다.

이러한 주입방법은 오늘날에도 일본에서 梵鐘을 주조할 때 이용하는 방법[9]이다. 또 이러한 鑄造方法은 가장 오래된 遺蹟에서부터 中世를 통하여 오늘날까지도 거의 변함 없이 傳手되고 있다고 坪井良平[10]씨는 설명하고 있다. 그리고 다음 그림 5는 神崎勝[11]가

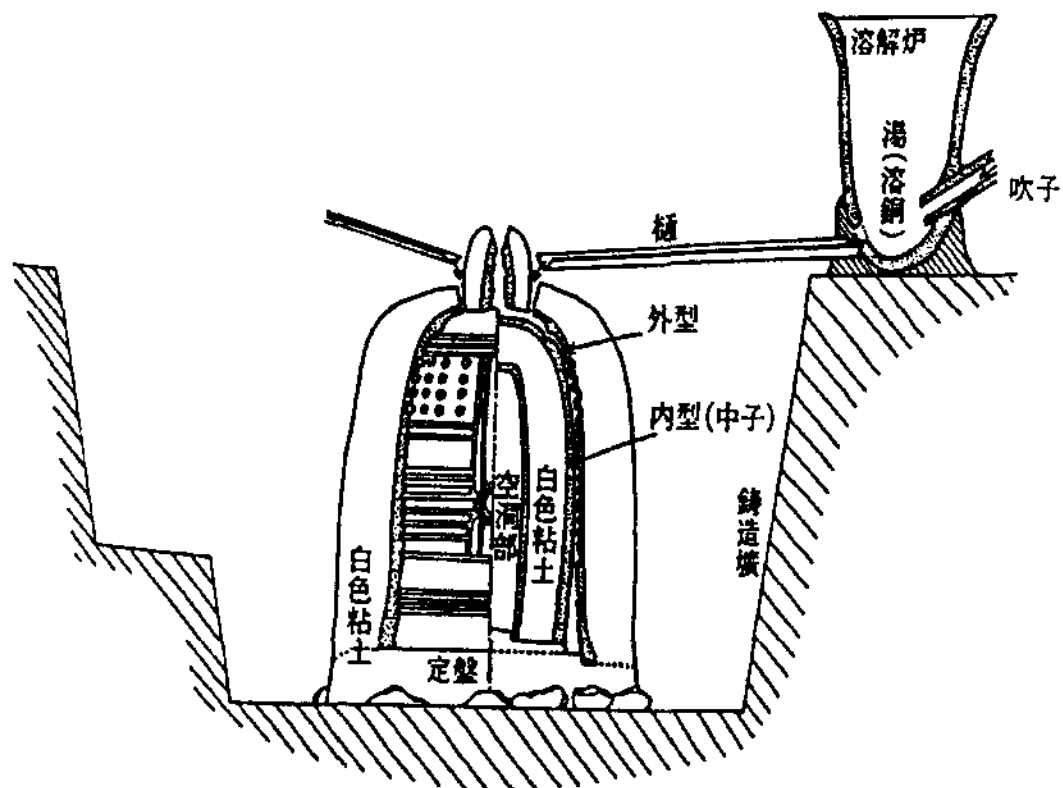


그림 5. 梵鐘 鑄造 推定圖.

日本 平安時代 中期(12世紀)의 遺蹟으로 추정되는 鑄 鍾遺構를 조사한 후 梵鐘의 구조방식을 추정하여 나 타낸 그림이다.

4. 梵鐘用 靑銅材料와 熔解

4.1 梵鐘用 靑銅材料

聖德大王神鍾의 銘文에 “王이 銅 12萬斤을 희사하 여 鍾을 주조하였다.”라고 부출주조되어있다. 그런데 新羅時代에 주조한 梵鐘의 化學조성을 살펴보면 다음 표 1과 같다.

이와 같이 新羅 梵鐘은 모두 銅 80~85%, 朱錫 12~ 15% 정도 함유한 朱錫靑銅으로 主조되었음을 알 수 있다.

그런데 聖德大王神鍾인 奉德寺鍾은 上層部, 中央部 및 下帶部의 化學조성이 각각 다르게 나타났다. 이러 한 사실은 靑銅熔湯을 커다란 容器(ladle)에 받아서 한 꺼번에 주형에 주입한 것이 아니라, 용해로에서 용해 되어 연속적으로 흘러내리는 용탕을 쇠물 흙통을 통

표 1. 新羅 梵鐘의 化學的 組成

鍾 名	化學組成(wt%)							참고 문헌	
	Cu	Sn	Pb	Zn	S	Fe	Ni		
上院寺鍾	83.87	13.26	2.12	0.32	-	-	-	(2)	
禪林寺鍾	80.2	12.2	-	2.2	0.14	-	-	(2)	
實相寺鍾	75.7	18.0	0.31	-	-	-	-	(2)	
奉德寺鍾	上部	84.39	11.21	0.23	0.009	0.22	0.64	0.07	(5)
	中部	78.56	15.51	0.45	0.009	0.22	0.30	0.07	
	下部	83.13	12.98	0.14	0.016	0.22	0.61	0.08	

하여 그대로 주형에 주입하였다는 것을 강하게 입증 한다.

다음 표 2는 미륵사에서 출토된 청동유물의 화학 조성을 나타낸 것(4)으로 주발 그릇 및 접시와 같은 주방용기는 銅 75~80%, 朱錫 18~21%인 주석청동으 로 제조되었다.

그런데 王이 희사한 銅 12萬斤은 어떠한 조성의 재 료인지는 모르겠으나, 경주 박물관에 소장된 靑銅판 장식(두께 3~4 mm, 폭 60~70 mm, 길이 약 150 mm)라 든가, 또는 民家에서 供養받은 주발과 같은 靑銅제품 이 梵鐘의 主材料로 熔解되었을 것이다. 그런데 朱錫 은 용해과정중 산화손실되어 감소될 것이 예상되므 로, 마침 주석함량이 많은 靑銅材料가 장입된 경우에 는 주석함량이 많게 잔류할 것이며, 혹은 주석함량이 적 은 靑銅材料가 장입된 경우에는 주석함량이 낮게될 것이므로 용해시기에 따라, 朱錫함량이 다른 熔湯이 흐르게 될 것이다. 따라서 熔解爐에서 용해된 熔湯을 그대로 鑄型에 注入하였으므로 범종의 위치에 따라 주석함량이 다르게 되었을 것으로 추정한다.

또 포항산업과학연구원 보고서(12)에서는 聖德大王 神鍾에서 시편을 채취하여 金屬組織을 검토한 바, 組 織중에 황화물(CuS)상태로 유황이 존재하며, 또 基地 組織중에 입자상태로 존재하여 충격을 완충하는 것으 로 해석하고 있다. 특히 이는 용해과정중에 황동광 (CuS)을 첨가하였을 것으로 해석하였다.

일반적으로 地球上에 賦存하는 銅床은 地表로부터 自然銅, 酸化鑛, 硫化鑛의 순으로 存在한다[13]. 다만 地表에 노출된 露頭 또는 酸化鑛帶가 氷河作用에 의

표 2. 미륵사에서 출토된 청동유물의 화학조성[4]

품 목	化學成分(wt%)							
	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Sb	Fe	As
불상	81.7	7.03	10.3	0.016	0.19	0.23	0.27	0.17
청동거울	67.4	25.8	4.88	0.0039	0.047	0.14	0.25	0.018
술가락	74.5	20.3	3.67	0.0028	0.23	0.21	0.27	0.020
젓가락	78.7	17.1	3.13	0.0026	0.17	0.18	0.23	0.017
주발	74.8	18.6	0.38	0.0014	0.27	0.28	0.28	0.021
그릇(1)	77.3	21.1	0.06	0.0015	0.065	0.042	0.049	0.021
그릇(2)	79.4	19.8	0.12	0.0023	0.058	0.26	0.34	0.015
접시	77.7	20.3	0.45	0.015	0.063	0.19	0.15	0.16
장식품(1)	82.1	13.0	3.76	0.0026	0.059	0.16	0.31	0.012
장식품(2)	80.0	14.7	3.39	0.0019	0.024	0.089	0.38	0.010

하여 제거된 경우에는 처음부터 硫化鑛帶가 나타나지만 古代 사람들은 硫化鑛을 제련하지 못하였다. 다만 古代 사람들은 露頭에서 自然銅을 채취하여 가공하거나 용해·주조 하여 銅을 이용하였을 것이다. 그러나 自然銅의 資源이 고갈됨에 따라 靑銅期 이후에는 酸化銅鑛石을 채취하여 銅資源으로 활용하였다. 즉 酸化鑛인 孔雀石(Malacite, $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$), 珪孔雀石(Chrysocola, $CuSiO_3 \cdot 2H_2O$), 藍銅鑛(Azurite, $2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$), 赤銅鑛(Cuprite, Cu_2O) 등을 還元製鍊하였을 것이다. 그리고 酸化銅鑛石은 색깔이 선명한 초록색 또는 남색을 띄고 있어 脈石과 쉽게 구분할 수 있어 選鑛하여 銅의 品位를 올리는데 별로 큰 어려움은 없었을 것이다.

그런데 硫化銅鑛은 항상 酸化銅鑛床의 하부에 부존하므로 酸化銅鑛을 채취할 때 硫化銅이 불순물로 혼입될 가능성이 높다. 이 경우 酸化銅鑛의 還元製鍊法에서는 硫化銅은 還元되지 않는다. 특히 黃은 鐵分과 함께 존재하므로 환원된 銅속에 銅鉞(matte, $Cu_2S \cdot FeS$) 상태로 잔류한다. 따라서 이렇게 제련된 銅을 사용하여 靑銅鑄物을 제조할 경우에는 銅鉞 조성의 物質이 항상 不純物로 기지조직중에 잔류하게 된다. 그런데 銅鉞의 용점은 구리, 철 및 황의 함량에 따라 다르지만 가장 낮은 경우 $915^{\circ}C$ 정도이다[14]. 따라서 靑銅주물이 응고할 때 銅鉞 조성의 物質은 結晶粒界에 모이게 되므로 聖德大王神鍾의 금속조직에 나타나게 된 것이라고 확신한다. 따라서 앞으로 우리가 銅遺物을 조사할 경우에는 철분과 함께 황함량을 조사한다면 어떤 광석을 제련한 것인지 확인할 수 있음도 아울러 언급하고 싶다.

또 동 보고서[12]에서는 鍾身部에 pin hole이나 blow hole과 같은 기공이 무려 350여 지점에 있으며 또 鍾表面에 朱錫이 농축된 부분이 있다고 보고하였다. 이러한 鑄物欠陷은 朱錫靑銅合金의 특징으로, 특히 두께가 두꺼워 냉각속도가 느린 경우에 심하게 나타나는 현상이다.

즉 銅-朱錫의 二元系平衡狀態圖[15]에서 알 수 있는 바와 같이 $Cu-13\sim 15\%Sn$ 합금의 녹는 온도는 약 $980^{\circ}C$ 이며 완전히 응고하는 온도는 $799^{\circ}C$ 이다. 따라서 이 합금이 주조되어 주형중에서 냉각될 때 주물표면은 냉각속도가 빨라 곧 냉각되어 凝固層을 형성할 것이나 내부로 갈수록 냉각속도가 느려 熔融狀態를 유지할 것이다. 따라서 表面凝固層이 완전히 응고되는 $799^{\circ}C$ 에 도달한 경우 $980^{\circ}C$ 정도로 냉각된 부분까지는 固相과 液相이 共存한다. 이와 같이 이 合金은 固液共存區間이 매우 넓은 合金으로 微細收縮孔(Interdendritic microshrinkage cavity)이 다량 잔류되는 合金이다. 특히 聖德大王神鍾과 같이 두께가 두꺼운 경우에는 매우 서서히 응고하므로 固液共存區域이 더욱 넓게 형성된다. 따라서 梵鍾表面부와 두께 中心部 사이에는 樹枝狀結晶(固相)이 길게 성장하여 液相의 毛細管이 형성된다. 따라서 이러한 微細收縮孔이 서로 연결되면 pin hole과 같은 결함이 남게 된다.

또 還元熔解중에 흡수하였던 수소가 응고시에 석출되면 용탕중의 가스압력이 높아진다. 따라서 樹枝狀結晶 사이에 형성된 毛細管현상과 중심부에 잔류한 용탕중의 가스압력이 높아지면 용질(朱錫)이 농축된 용액이 梵鍾의 表面으로 밀려 나와 응고하게 된다. 이러한 현상을 逆偏析 또는 Tin Sweat라 하며 朱錫靑銅鑄物에 흔히 나타나는 특징이다.

따라서 聖德大王神鍾의 表面部에서 주석이 농축된 조직을 발견하였다는 것은 절대로 기이한 현상이 아니라는 점을 밝히는 바이다.

4.2 熔解와 注入

① 熔解爐의 구조

우리나라에서는 아직 古代의 銅熔解爐趾 또는 冶爐趾가 발견되지 않고 있다. 따라서 熔解爐의 구조를 확인할 수는 없으나, 다만 李圭景은 五洲 衍文長箋散稿 [16]의 附錄인 五洲書種博物考辨에 酸化銅鑛의 還元製鍊이라 고찰되는 煉銅法을 다음과 같이 설명하고 있다.

銅	煉	法	另	爲	冶	爐	先	作	四	廓	內	築	小	牆	如	堦	制	仍	布	堦	石	其	
上	置	剛	炭	於	堦	上	踏	風	廂	消	五	六	時	後	置	銅	礪	於	炭	上	此	法	
上	邊	一	穴	入	于	堦	下	矣	灌	水	待	冷	取	出	煉	錫	全	此	法				

“즉 煉銅鉛爐法이란 풀무를 왼쪽에 놓고, 가로질러 바람구멍하나를 뚫어 놓는다. 별도로 冶爐를 설치하기 위하여 먼저 四方으로 벽을 쌓고. 그 안에 작은 골을 쌓는데 은돌처럼 만든다. 그리고 그 위에 재를 깔고 진흙으로 바른다. 이 골은 4면이 높는데 그 높은 한 변에 구멍을 하나 뚫어 놓는다. 그리고 강한 炭(白炭?)을 골 위에 놓고 풀무를 5~6시간 밟은 후 銅鑛을 炭 위에 놓으면 鑛石이 제련된다. 이것이 다 녹아서 골위로 흐르게 되면 銅표면에 포말처럼 찌거기가 끓어 올라 골 한쪽의 구멍으로 흘러내린다. 물을 부어 식기를 기다려서 銅鉛을 취한다.”

그리고 국립중앙 박물관에서는 忠北 鎭川郡 석장리의 古代 鐵生産 遺跡에서 조사한 자료를 인용하여 대형 상형로 또는 원통형로의 재현 실험(17)을 실시하였다. 따라서 저자는 위와 같은 자료를 종합하여 다음과 같이 靑銅熔解爐의 구조를 상상해 본다.

“먼저 재와 점토를 혼합한 모래로 용해로 바닥을 다져서 만드는데 地上보다 30~50 cm 정도 높게 만든다. 그리고 밑바닥은 중간부분이 약간 낮게 만들고 그 위에 일정한 형상으로 작은 골을 쌓고 장방형이나 원통형의 용해로벽을 축조한다. 그리고 용해 작업 중 바람이나 용탕이 새어 나오지 않도록 벽돌 틈을 진흙으로 잘 바른다. 熔解爐 밑바닥의 한쪽에 쇳물을 流出시키는 구멍을 뚫어 놓고, 이 구멍과 주형사이를 쇳물 흐름으로 연결시켜 용해로에서 유출된 쇳물이 직접 鑄型에 주입되도록 준비한다. 그리고 爐壁 중간에 바람을 송풍할 수 있는 구멍을 설치하고 연결관으로 풍구와 연결시킨다.”

② 熔解操業

靑銅의 熔解에 앞서 먼저 용해로의 爐床에 火木을 쌓고 연소시켜 용해로를 충분히 건조하고 예열해 놓는다. 다음에 木炭(白炭)을 送風口보다 높은 위치까지 장입한다. 이를 床積炭이라 부르는데 장입재료(靑銅材料)는 床積炭層 위에 놓는다. 그리고 一定量의 地金(1시간 동안 용해할 수 있는 양의 약 1/10 정도)과 木炭을 交互로 爐頂까지 장입한다. 약 30분 정도 기다려 장입재료가 충분히 예열되면 풀무질하여 바람을 熔解爐 속으로 불어 넣는다. 그러면 床積炭이 연소하면서 많은 熱을 발생하고 장입된 地金이 용해되어 爐床에 모이게 된다. 용해작업이 진행되면서 爐頂部의 재료가 下降하게 되면 다시 木炭과 地金을 追加裝入한다. 적당량의 용탕이 爐底에 고이게 되면, 粘土로 막아두었

던 용탕유출구를 뚫어 출탕한다. 이때 용탕은 흐름을 따라서 주형에 계속 주입되며 용탕이 押湯이나 音筒의 상단까지 채워지면 용탕의 물질을 다른 곳으로 돌리고 송풍을 중지한다. 용탕주입작업이 완료된 후 2~3일간 주형을 방치하여 서냉시킨다. 그리고 주형이 상온으로 냉각된 다음에는 주형을 털고 鍾에 붙은 주물사를 제거하고 鍾 표면을 끝손질하여 모든 주조작업을 완료한다.

5. 끝맺는 말

이미 서론에서 언급한 바와 같이 聖德大王神鍾이 어떤 方法으로 鑄造되었는지 아무런 기록이나 자료가 없는 상태에서 지금으로부터 약 1250년전의 梵鍾鑄造法을 고찰한다는 것은 매우 어려운 일이다. 다만 聖德大王神鍾이 우리나라 國寶 29호로 지정되어 오늘날까지 잘 보존되고 있으므로 神鍾의 内外面과 鑄造狀態를 세심하게 관찰하고 또 몇몇 자료들을 인용하여 聖德大王神鍾의 鑄造法을 고찰한 결과 다음과 같이 推定·整理할 수 있겠다.

(1) 神鍾의 몸체에 원주방향으로 鑄型分割線이 남아 있는 것으로 보아 鑄型은 上·下型의 2段 分割型으로 조립되었음을 알 수 있다.

(2) 鍾身部の 각종 紋樣과 鍾鈕部는 모두 알심으로 제작하여 조립하였다. 다만 鍾鈕部 알심은 蜜蠟型造形法으로 제조하였다. 따라서 聖德大王神鍾의 鑄型은 回轉型으로 造型한 鑄型에 알심을 組立한 알심 組立型이라고 말할 수 있다.

(3) 熔湯注入口는 天板위의 南北方向, 즉 龍頭의 전방과 龍尾의 뒤에 각각 1개씩 설치하였다. 따라서 神鍾은 上注法으로 鑄造되었다.

(4) 神鍾은 높이에 따라 朱錫함량이 다르다. 이것은 熔湯을 큰 容器에 담아 한꺼번에 주입하지 못하고 여러개의 熔解爐에서 용해된 熔湯을 쇳물흐름을 통하여 두 곳으로 모아서 장시간에 걸쳐 주입되었기 때문이다.

(5) 따라서 주입구 아랫쪽 즉 용탕이 주입되어 內型과 장시간 접촉되는 부분에서는 주물사의 팽창에 의한 주물결함이 크게 생성되었다.

(6) 熔湯이 音筒의 상단까지 도달할 때 용탕주입을 중지하였다.

(7) 神鍾의 材料는 銅 79~85%, 朱錫 12~15%인 朱錫

靑銅이나, 銅原料는 酸化銅鑛을 還元製鍊한 것을 사용하였다.

끝으로 본 원고를 작성하는데 도움을 주신 弘鍾社 朴漢鍾 사장님과 五洲書種博物考辨을 해석해주신 서울대학교 許成道 教授에게 감사드린다. 그리고 聖德大王 神鍾을 조사할 수 있도록 협력해 주시고 또 각종 資料를 제공해 주신 국립경주박물관 민병훈 연구관과 김종오 연구관에게 진심으로 감사드린다.

참 고 문 헌

- [1] 廉永夏 : 新羅時代に おける 梵鍾技術, 日本機械學會誌, 第87卷, 第790號(1984), pp. 989-995.
- [2] 廉永夏 : 韓國의 鍾, 서울大學校 出版部(1991), p. 43.
- [3] 孟琬在 : 新羅梵鍾에 대한 金相學的 研究, 大韓金屬學會誌, 第13卷, 第4號(1975), pp. 454-457.
- [4] 鄭光龍, 金英澈, 孟琬在 : 한국문화재 보존학회지, 第1卷, 第1號(1992).
- [5] 포항산업과학연구원 보고서 : 성덕대왕신종의 구조상태 및 환경변화에 따른 보존상태 진단, (1997. 12. 31), p. 153.
- [6] 石野 亨 : 鑄造技術の 源流と歴史, 日本産業技術センタ (1997), pp. 234-237.
- [7] 충남대학교 공과대학 토목공학과 김준목 : 성덕대왕신종 정밀실측 및 수치자료 분석(1997.2), pp. 35-38.
- [8] 상동 : pp. 35-38.
- [9] 石野 亨 : 鑄造技術の 源流と歴史, 日本産業技術センタ (1997), p. 228.
- [10] 坪井 良平 : 佛教藝術, 日本 佛教藝術學會, 第148號 (1983. 5), p. 107.
- [11] 神崎 勝 : 播磨産 銅史の研究, 妙見山鹿遺跡調査會 발행 (1986. 3), p. 51.
- [12] 포항산업과학연구원 보고서 : 성덕대왕신종의 구조상태 및 환경변화에 따른 보존상태 진단, (1997. 12. 31), pp. 144-145.
- [13] 植田 晃一 : 鑛業の源流を訪ねて, 日本鑛業史研究 (1997), pp. 12-31.
- [14] 吾妻 潔等 : 非鐵製鍊, 朝倉書店(1970), p. 10.
- [15] T. B. Massalski : Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd Ed., ASM, p. 1482.
- [16] 古典刊行會 : 五洲衍文 長箋散稿(下卷), 東國文化社, (1959), p. 1098.
- [17] 박물관신문(1997년 6월 1일자), 국립중앙박물관 발행.