

종의 Crack과 용접에 관하여

염 영 하*

1. 서 론

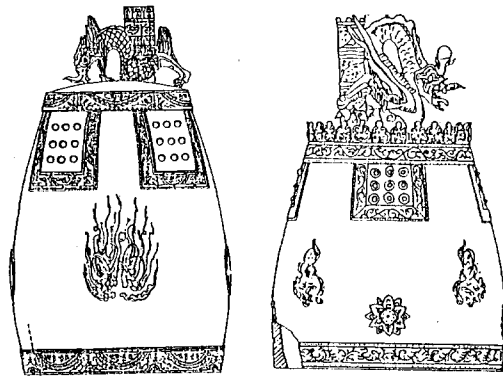
고래로부터 종은 종교의식과 밀접한 인연을 갖고 있고, 동양종과 서양종으로 대별하고 있으나, 우리가 범종이라고 하는것은 불교사원에 있는 동양종을 말한다. 동양종은 한국종, 중국종, 일본종 등으로 구분하고 있으며 이들 중에서 한국종을 대표하는 신라, 고려시대의 범종은 용두에 외국종에서 볼 수 없는 음관(통)이 있고, 우아하며 아름다운 문양이 종의 표면에 새겨져 있다. 설계에 있어 독창적인 특징을 갖추고 있고, 제작이 또한 우수하며 동양종 중에서도 극치를 이루고 있다.

우리나라의 대표적 종에는 신라시대에 제작된 국내 최고인 상원사종(A.D. 725)과 국내 최대인 구봉덕사종(A.D. 771) 등이 있고, 고려시대에 제작된 천흥사종(A.D. 1010), 내소사종(A.D. 1222), 탑산사종(A.D. 1233), 용주사종(11세기 전기) 등 많은 걸작들이 있다. 이들 우수한 종^{1),2)}들은 거의 전부 신라와 고려시대에 주도되었고, 우리나라 청동문화의 정수로서 세계적으로 유명하다. 특히 신라시대에 세계적 걸작인 명종이 제작되었다는 것은 우리나라가 범종설계기술에 있어서나, 청동합금 및 주조기술의 발달에 있어서 외국에 비하여 대단히 높은 기술수준을 보유하고 있었다는 것을 입증하고 있다.

종은 타명기로서, 소리(음향)를 내기 위해서는 동양종은 외부에서 타격하고 서양종은 내부에서 타격한다. 그러므로 종을 사용하는 사이에 이 타격으로 인하여 종에는 누적된 피로(Cumulated fatigue)가 생기고, 이것이 원인이 되어 크랙의 발생→성장→파괴로 진전되어 사용 불가능케 된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이와 같은 사례는 국내에서 그 실례를 많이 볼 수 있다.

예① 상원사종(국보 36호), ② 보신각종(보물 2호), ③ 완주송광사종, 또한 외국의 경우, 미국의 자유의 종(Liberty Bell) 등 대단히 많다.

여기서는 위의 종에 대한 크랙과 상원사종의 용접을 중심으로 말씀드리기로 하겠다.



(1) 신라종(상원사종)
(2) 고려종

2. 종의 크랙(Crack)

2-1 미국 자유의 종의 크랙(Crack)

미국의 「자유의 종(Liberty Bell)」에 대하여 A.R. Rosenfield가 1976년에 International Journal of Fracture지에 발표한 「Crack of Liberty Bell」 논문은 인용하여 설명키로 한다. 이 논문은 미국 독립 200주년을 맞이하여 발표되어 더욱 감회를 깊게 하였다.

2-1-1 종의 개요

미국 Philadelphia에 있는 자유의 종은 크랙에 의한 파손으로 가장 유명한데 비해 상대적으로 그

* 서울대학교 공과대학

종의 Crack과 용접에 관하여

것에 대한 공학적 해석에 관해서는 발간된 것이 거의 없다. 공학적 해석의 어려움은, 그 종의 길고 복잡한 역사와 적당한 지식과 관심이 없었다는 두가지 점에 기인된다. 그러나 그 종은 그후 특히 1차대전 후부터는 잘 보존되어 왔고 현대기기에 의한 몇가지 검사도 실시되어 왔다. 따라서 기록을 재구성하는 것은 가능할 것이나 다만 필요한 기록이 완전하지 못하므로 우리는 단정적인 결론보다는 후론으로 만족해야 할 것이다.

종을 만드는 방법은 근세에 있어 별로 변한 점이 없다. 다른 모든 종과 마찬가지로 자유의 종도 고도의 주석(Sn)이 함유된 청동주물인데 이러한 점에서 더 이상은 열처리할 필요가 없다.

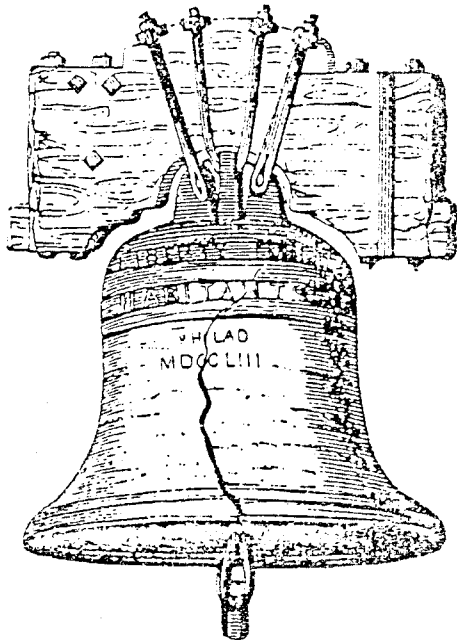


Fig 1. THE LIBERTY BELL

제작의 마지막 단계는 음울의 조정인데 이것은 현재 특수선반에서 림(Rim)부분의 절삭으로 완성되고 있다. 2세기 전에는 이 작업이 끌(Chisel)에 의해 끌작업으로 완성되었는데 자유의 종도 이에 포함된다. 종에 있어서의 전형적인 결점은 댐핑용량(Damping capacity)을 증가시키는 Porosity, 그리고 그만은 못하지만 여러가지 불순물 원소에 의한 것이 있다. 이것은 은이나 금처럼 한때는 톤(Tone)을 부드럽게 해주는 원소라 믿어졌던 것에 있어서도 마찬가지다. 어떤 구조물에 있어서나 작용은 설계와 재질간의 상호작용을 반영

해야 한다. 청동에 있어서의 세가지 중요한 점은

- a) 음속과 E/P 들은 치수를 부여하면 음색을 결정한다.
- b) 댐핑용량(Damping capacity)
- c) 강인성(Toughness)

여기서 뒤의 두개가 취급된다. 그런데 이 두개는 현미경 조직과 밀접한 관계를 가지고 있다. 그런데 현미경 조직은 취성이 있는 공석기지에 생기는 강인한 고밀도 구리 합금의 고립체를 구성한다.

종의 평균 수명을 추정한다는 것은 대단히 어려운 일이다. Horn이 주장한 바에 의하면 보통종은 250년이면 크랙이 생겨난다고 한다. 그리고 종이 잘 보관되어도 500-600년이면 음색이 변한다고 한다. 이 후자의 현상에 대한 정확한 성질은 분명치 않고 현재로서는 미시적 다수의 균열에 의한 발전으로서 어떠한 피로에 의한 손상에 의한 것으로 설명되고 있다.

자유의 종에서 보는 바와 같은 커다란 크랙의 원인은 논쟁의 대상이 되어왔다. 중청동은 극히 취성적인 성질을 들어서, 종을 만드는 사람들은 그 이유를 단 한번의 과부하에서 찾으려 하고, 피로의 현상에 대해서는 회의적이었다. 그러나 영국 Westminster사원의 BIG BEN 종에 있어서는 크랙이 이 타종 위치의 180도 부근에서 일어났다는 사실이 있다. 한번 크랙이 일어나거나 소리가 둔화되면 그 종을 수리하는 것이 아니라 본래 금속으로부터 재구조하는 것이 일반적이다. 상대적으로 간편한 본래의 표면을 생산하기 위한 주형을 뜨는 작업이 여러 세기동안 실시되어 왔다. 재구조한 종은 본래의 것보다 못하다는 제한이 있었지만 그것을 뒷받침 할만한 결론적 지지 근거가 금속문헌상에 없다. 잔류응력의 영향에 대한 의문, 이것은 자유의 종에 있어서는 중요한 원인이라고 주장되어 왔는데, 이것은 증거의 부족에 의해 미해결로 남아 있다.

2-1-2 자유의 종의 역사

자유의 종에 대하여 일반적으로 알려져 있는 것은

- 1) 제1회 자유의 종 : A.D. 1751년에 시작되는데 이때는 자유의 종이 필라델피아에 있는 주청사를 위해 펜실바니아 지방의회가 영국에 주문하였던 것이다. 토마스 레스터(Tomas Lester)에서 만든 주물종이 도착한 것은 1772년 늦은 여름이었

다. 그해 9월초에 그것은 최초로 매달려 타종되었는데 거기서 파손되고 말았다.

2) 제2회 자유의 종 : 영국 가는 다음 화물선이 만선이었기 때문에 2명의 지방 일꾼이 그 종을 재주조하기 위해 고용되었다. 그들은 본래 10% 청동의 구리양을 첨가시킬 것인가를 정하기 전에 강도 음향에 관한 것을 시험하기 위해 많은 소형 시험종을 만들었다. 결국 두번째 만든 종은 소리가 신통치 않았다.

3) 제3회 자유의 종 : Pass와 Stow의 2인은 다시 시도하였다. 이번에는 1/4%의 은을 첨가하였는데, 그 당시는 이것이 음색을 부드럽게 해 준다고 생각되었다. 이 세번째 것이 바로 지금의 것이다. 일견하여 그 당시 지방회의가 이것에 만족하지 않았다는 것은 화이트 채플(White Chapel) 회사에서 새 종을 들여오자는 이야기가 있었던 것을 봐도 알 수 있다. 비록 패스(Pass)와 스토우(Stow)의 종이 달갑지 않게 받아들여졌지만 결국 그것은 공적으로는 최초로 낭독(선언)되는 독립선언문을 경청하러 올 시민들을 소집하기 위한 종이 되었던 것이다.

그후 이종은

(1) 1753-1777년까지 Philadelphia의 의회소집을 위한 목적으로 사용되었고,

(2) 1778년에는 한때 영국군의 진격때문에 Pennsylvania의 Allenton에 옮겨졌다.

(3) 1778년 Philadelphia에 다시 돌아와 자유의 종의 임무를 수행하였다.

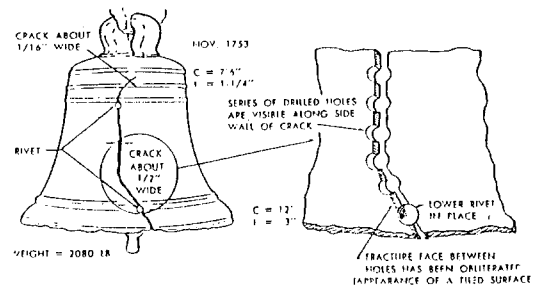
(4) 그후 대심원장 Jone Marshall의 장례식(A. D. 1835)타종중에 큰 크랙이 발견되었다.

(5) 1846년 Washington 탄생일에 사용하기 위하여 보수작업이 시작되었다. 그 크랙이 마찰로 닳는 것을 방지하고 크랙이 더 성장되는 것을 방지하기 위하여 구멍을 뚫었다. 그러나 그 종을 타종하였을 때 다시 새로운 크랙이 전파되어 종의 상부까지 진전되었다.

(6) 1846년 이후 단지 중요한 일이 있을 때면 작은 나무로 가볍게 타종되었고 독립기념관에 전시되었다.

(7) 1885-1917년까지 9번 종을 전시하기 위하여 독립기념관 밖으로 내 갔다.

(8) 1976년 1월에 200주년 독립기념인파를 예상하여 새로운 전시관을 옮겼다.



CRACKED LIBERTY BELL, INDEPENDENCE HALL, PHILADELPHIA.

Fig 2. 自由의 鍾의 크랙과 드릴구멍

2-1-3 크랙의 원인

1) 과도한 주석량

우리가 왜 그 종이 깨졌나를 고려해야 할 여러 가지 원인들이 논의 되어진다. 그 첫째는 그 종이 처음 매달리게 된 1752년의 화이트 채플회사에서의 주조에서 발생한다. 이 종은 청동내에 지나친 주석(Sn)의 양 때문에 취성이 큰 것으로 보여졌다. 이 사실은 오랫동안 의심되어 왔는데, 1960년부터 1961년 사이에 실시된 화학분석에 의해 근거를 얻게 되었다. 분석은 종에서 구멍을 뚫어 얻은 작은 금속 조각으로 실시되었다. 이것은 가장 자리와 1835년 크랙에서 가까운 자리에서 채취된 것이었다. 이 부분의 화학성분이 만일 전체적인 성분을 대표할 수 있는 것이라면 우리는 원래의 종이 중량 주석=26%라는 추정을 할 수 있는데 이것은 인성의 관점으로 볼 때 너무 높은 것이다. 가장자리 부분만 비정상적으로 성분 밀도가 높아 전체적인 구성비는 안맞을 가능성은 남아있다. 만일 이것이 사실이라면 1752년 화이트 채플 종의 균열은 과하중 타종되었다는 이유 때문일 것이다.

2) 거칠은 끝작업

다음의 사실을 명확히 하기 위해 왜 그 종이 미국에서 주조되지 않았는가를 밝히도록 하자. 그 당시 종을 제작하는 자들은 있었지만 펜실바니아 식민 관리들은 그 일을 자기 소관으로 하는 것을 꺼렸다.

화이트 채플회사는 균형이 거의 이상에 가까운 종을 생산 했다. 틀림없이 거친 종 가장자리 부분은 화이트 채플 회사에서 본래 실시한 끝 작업 때

종의 Crack과 용접에 관하여

문일 것이다.

패스와 스토우는 커다란 종을 음색 맞추는데 충분한 전문가가 아니었던것 같다. 패스와 스토우를 재고할 때 그들에 의한 재주조 종이 결국 균열이 일어났다는 것은 하등의 놀랄만한 사실이 아니었다는 결론에 도달한다.

3) 지나친 충격, 과하중타격

현존하는 증거들이 그 종은 계속 과하중이 걸려 왔다는 것을 뒷받침하고 있다. 떨어지기도 한 것 뿐만 아니라 일상적으로 계속된 타종이 지나친 충격이 되었던 것이다.

4) Drill 구멍

1846년처럼 종을 타종하려 한다는 것은 무모한 일이었다. 균열을 드릴링한다는 것은 결국 현대에 있어서 피로크랙의 성장을 막는 방법과 크게 다르지 않는데 더 이상의 확산을 지연시킬 수 있었으며, 그 종을 조금 더 오래 울릴 수 있게 되었다. 결국에는 큰 흠집의 존재가 가장자리 부분에서부터 새로운 크랙을 유발시키고 긴 거리의 크랙의 성장과 전파를 생기게 했다는 것은 필연적이었다. 크랙의 전파를 막기 위해 균열에 구멍을 뚫자는 제안은 실시되지 않아 왔다. 이것이 필요한 것인가 아닌가는 우리가 지금도 크랙이 성장하고 있는 지를 모르기 때문에 알 수가 없는 것이다. 이 해답은 시간의 경과에 의해 제시될 것이다.

2-2 송광사종의 크랙

종에 생긴 크랙을 방지하기 위하여 드릴 구멍을 뚫고 크랙 첨단의 응력집중을 확산시키려고 한 실례를 전북 완주 송광사종에서도 찾아볼 수 있다. 이 종은 조선조 숙종 42년(A.D.1716)에 주조되어 1980년까지 사용되었으나, 그 후 1981년에 새종을 만들었다.

Fig. 3은 크랙으로 파손된 전북 완주 송광사종의 외관을 보여준다. 이 종에 언제 크랙이 시작되었는지는 알 수 없으나 종하부의 종구에서 크랙이 진전되어 260mm까지 성장되었다.

송광사종에서도 크랙이 95mm까지 성장되기 전에 크랙 성장을 방지하기 위하여 제1의 드릴 구멍을 뚫었고, 그후 260mm에서 제2차 드릴구멍을 뚫었으나, 효과를 거두지 못하고 새 종을 만들게 되었다. Fig.4는 송광사종의 크랙 상부의 사진 설명도이다. 그리고 Fig.5는 송광사종의 크랙 전체 치수를 표시한 상세도를 나타낸다.

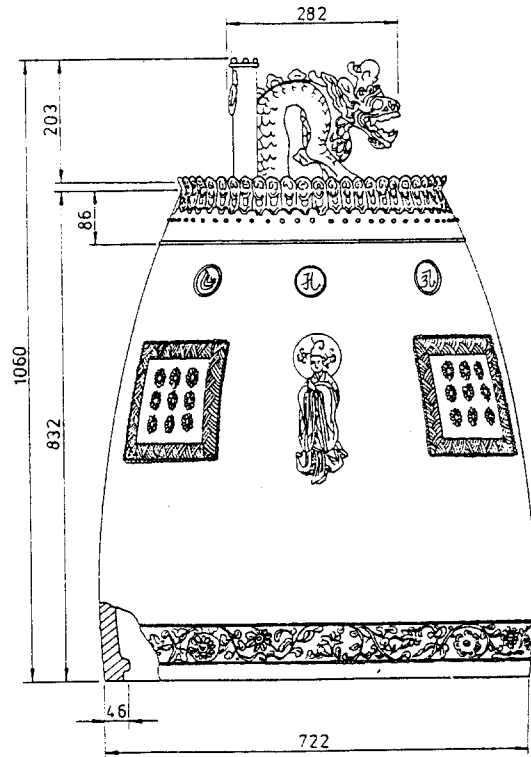


Fig 3. 松廣寺鐘(A.D.1716)

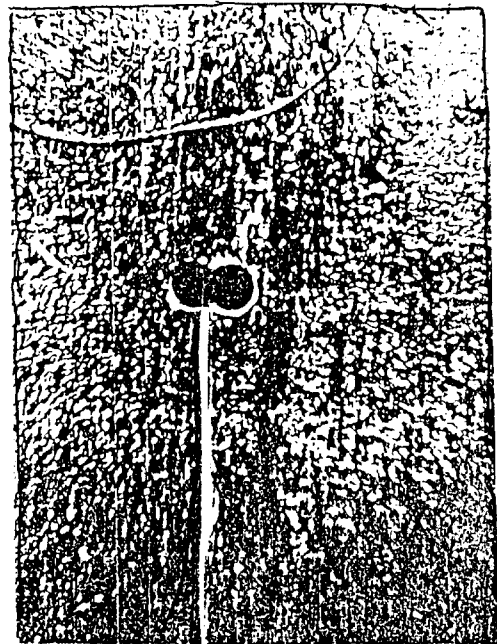


Fig 4. 松廣寺鐘의 크랙 上部

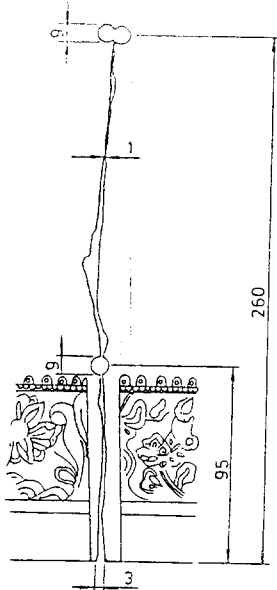


Fig 5. 송광사종의 크랙 상세도

2-3 보신각종의 크랙

2-3-1 보신각종

우리 국민은 서울하면 먼저 남대문(국보 제1호)과 종로 보신각종(보물 제2호)을 연상할 만큼 깊은 인연을 갖고 있다. 보신각종은 현대에 이르기까지 517년간 경과하는 사이에 조선조에서는 사찰의 종으로서 예불의 성보로 불사에 사용되었고, 그후 종로에 있는 종각에 이현되어 파루(상오 4시)에 33번, 그리고 인정(하오 10시)에 28번 타종하여 서울시민에 시각을 알려 주는데 쓰였고, 해방후에는 새해 새 출발을 알리는 제야종으로는 33번 타종하여 시민의 애호를 받고, 또 3.1절과 8.15광복절을 기념하기 위한 33번 타종은 민족정기



Fig 6. 보신각종(보물2호) 8.15경축타종식

를 소생시키며, 단결을 다짐하는 종소리로서 서울의 명물로 되어 있다(Fig.6 8.15경축타종식)

1979년 서울시의 도로확장공사로 증건하던 중에 보신각종에 이미 발생되었던 크랙이 처음으로 발견되어 신문에 보도된 바 있다. 그러나, 이 크랙이 언제부터 생겼는지 그 시기는 알 수 없으며 크랙의 사유도 불명확하다.

2-3-2 종에 전파된 크랙(Propagated crack)

인간은 출생한 후 언젠가는 사망이란 종착역에 도달한다. 이것은 천리인 것이다. 모든 기기도 언젠가는 종말이 있듯이 종의 경우도 예외가 될 수 없다.

실제 종은 사용하는 과정에서 파괴되는 일이 많다. 그 원인은 주조할 때 생긴 내부에 함유된 조직적인 결함(불순물, 기공, 또는 편석)등에 기인되던가 또는 사용중에 힘(예를 들면 과도한 타격력, 반복되는 충격피로하중, 운반중의 취급부주의에 따른 손상)등으로 인한 잠재된 크랙의 발생(Crack initiation) 및 크랙전파(Crack propagation)로 파괴를 일으키게 된다.

종에 크랙이 발생하면, 이것을 방지하기가 대단히 어렵다. 역사적으로 유명한 미국의 자유의 종(Liberty Bell)도 크랙이 발생하여 이를 방지하기 위하여 할 수 있는 모든 현대 기술을 동원하였으나 파괴까지 다소 시간적으로 지연시켰을 뿐이고 결국 파괴되고 말았다.

사람의 경우, 일생의 한계수명이 있는 것과 같이 종에도 척도(Order)가 다른 종의 수명이 있다고 볼 수 있다.

서양종의 경우, 종수명을 약 400년으로 추정하고 보고가 있다. 또한 국내에 현존한 국내 최고종인 상원사종(국보 36호), 용주사종(국보 120호)도 최근 종구에 균열이 생겨 수명에 달한 것으로 추정되고 있고, 조선조의 종 중에서도 직지사종, 진범어사종, 신흥사종 등 그 예가 많다.

종에 크랙이 발생하고 이것이 성장되면 파괴를 일으키는 것은 위와 같이 흔히 볼 수 있는 일이다.

보신각종에 크랙이 생겼다는 것은 1979년 3월에 신문지상에 소개되었으므로 국민들이 잘 알고 있는 기정사실로 되어 있다. 이 크랙이 언제 어떤 원인으로 발생하였고 현재 어떤 상태에 있는지에 대하여는 보고된 바 없다.

즉, 보신각종의 크랙 발생이 개시된 시기와 그

종의 Crack과 용접에 관하여

후의 진전에 대하여 관찰한 기록이 전혀 없으므로, 이에 대하여 더 이상 자세히 언급할 수 없다. 그러므로 여기서는 보신각종이 갖고 있는 다음 3가지 크랙 및 결함(Defect)

- 즉, 1. 종내부의 횡방향 크랙(Lateral crack)
- 2. 종내부의 수직방향 크랙(Verticla crack)
- 3. 종외부의 주조결함(Casting defect)

등을 들 수 있겠다.

1) 크랙의 길이(Lateral crack length)

Fig.8은 보신각종 내부 남서북측에 걸쳐 뻗어 있는 수평횡방향의 크랙 분포를 표시한다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 크랙의 길이는

(a) 수평면상의 크랙 길이(Horizontal crack length(l_H)) 종구경면에서 수평으로 전개된 길이 l_H
 $l_H = 3,760\text{mm}$

(b) 횡방향의 크랙 전장길이(Lateral crack length(l_L)) 종구경면에서 수평으로 전개한 평면상에 나타난 크랙의 총연장 길이 l_L (Fig.7과 같이)
 $l_L = 3,390\text{mm}$

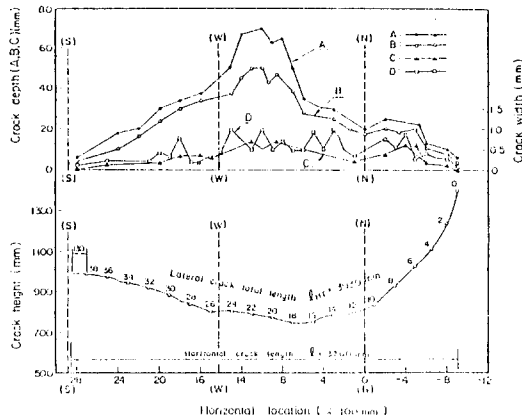


Fig 7. Relationship between horizontal crack depth(or width) and horizontal location of bell-inside

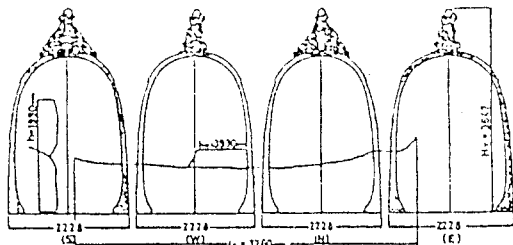


Fig 8. Propagated crack length of Boshingak old bell (S : Southm, W : West, N : North, E : East)

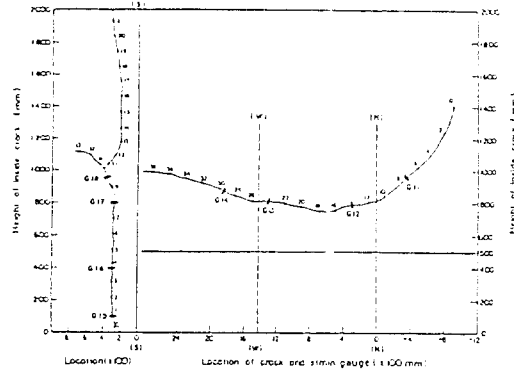


Fig 9. Layout of inside strain gauge position

(c) 횡방향 크랙의 높이(Lateral crack height (H_L)) 구경부에서부터 크랙의 최저 및 최고 높이까지의 거리 H_L

$$H_L = 780 \sim 1,300\text{mm}$$

2-3-3 보신각종의 크랙 요약

보신각종에는 현재 치명적인 2개의 내부 크랙이 발생되어 있다. 이 크랙은 전술한 바 있으나 다음과 같다.

(1) 횡 크랙의 경우

크랙의 전장이 3,930mm에 달하여 있고, 크랙이 존재하는 부위의 내측원주가 약 65%를 점유하고 있다. 그리고 크랙의 길이는 최고 약 70mm이다. 이 길이는 그 부분의 종두께의 약 1/2에 이르고 있다.

(2) 수직크랙의 경우

크랙의 전장이 2,180mm에까지 달하고 종전체 높이의 약 70%에 해당한다. 또한 최고 길이는 약 42mm에 달하며, 그 부위 두께의 약 1/3에 해당하고 있다. 이들 두개 크랙 중에서 하나만 있어도 인체에 비유한다면 불치의 암으로 의사가 “살 가망이 없습니다”라고 할 정도까지 진행되어 있다고 볼 수 있는데 실상가상으로 크나큰 치명적인 크랙이 2개소나 발생되어 있다.

그러므로 해방후 3.1절, 8.15광복절 및 제야의 종으로서 타종하던 보신각종은 내부크랙으로 인하여, 1980년부터 제야의 종으로서만 언타하고 3.1절과 8.15광복절은 타종을 중지하였다. 그 후 보신각 새 종이 시민의 성금으로 1985년 7월 14일 주조에 성공하여, 1985년 8월 15일에 타종식을 마쳤다.

2-4 상원사종의 크랙

2-4-1 국보 36호 상원사종의 크랙

상원사종(국보 36호)은 우리나라 최고의 종(A.D. 725)으로서 대표적인 한국종의 기본형식을 구비하고 있고, 또한 종소리에서 국내 최상급이라는 평가를 받고 있는 국보종에서도 가장 귀중한 국보이다.

이 상원사종이 주성되어 1256년간(1981년 현재)의 오랜 파란과 우여곡절로 많은 세파를 거치는 사이에 우리나라 역사의 증인으로서 오대산 상원사에 정착하고 있다.

1976년 필자가 상원사종을 실측하는 연구조사에서 종의 하부에 있는 구대내측에 크랙이 발생되어 있는 것을 발견하여 보고한 바 있다. 그후에 종을 보존하기 위하여 타종을 제한하기에 이르렀다. 한편에서는 국보인 상원사종을 영구히 그 형태를 보존하여 후손들에게 남겨 주기위한 문화재 관리당국의 사명감과 한국범종연구회 회원들의 보존대책에 대한 시험연구결과로 얻은 기술적인 발전을 토대로 상원사종에 발생한 크랙 방지를 위한 보존연구사업을 추진하게 되었다. 그러나, 여기서 중요한 문제점이 발생하였다. 이 보존을 위한 작업은 종에 용접작업이란 대수술을 가할 경우 형태는 보존되나 종소리는 원상대로 보존하기 어렵다는 것이다. 이런 기로에서 종에 대한 크랙 진전으로 종체와 종소리를 둘다 상실하느냐 또는 그 중에서 종체만이라도 살리느냐 하는 문제가 생겨, 결과적으로는 제1차로 종체를 먼저 살리고 종소리는 제2차적인 문제로 삼게 되었다.

대종은 구조품으로 언젠가는 파괴(파손)된다. 이것은 사람이 출생하여 살다 언젠가는 죽음이 오게 마련인 것과 같다. 그러나 우리의 욕구는 역사적인 종을 오래 보존하고 남기고, 또 후손에게도 얼을 심어주고 싶은 간절한 마음이 있다.

종에 크랙이 생기면 이것을 방지하려는 노력은 예나 지금이나 다름없다. 그러나 일단 종에 크랙이 발생하면 용접으로는 방지할 수 없다는 것이 지금까지 상식으로 되어 왔다. 그러나 종에 크랙(Crack)이 생겼을 때 이것을 방지하려는 방안은 여러가지가 있었다. 그 예로서 발생된 크랙을 더 이상 전파되지 않게 하기 위하여 크랙의 첨단전방에 구멍을 뚫어 크랙의 진전을 방지하려고 하는 방법을 사용한 예를 볼 수 있다. 즉,

(1) 미국독립선언에서 타종한 자유의 종 (Liberty Bell)

(2) 전북 원주에 있는 송광사종(A.D. 1716-1981)

등에서 찾아볼 수 있다.

미국의 경우, 독립을 기념하는 자유의 종이 주성한지 200년도 못되어 크랙이 생겼을때 미국의 모든 과학기술을 동원하여도 종의 크랙을 방지하지 못하고 파괴되어 버렸다. 또한 원주 송광사종도 크랙이 또 다시 진행되어 사용할 수 없게 되었다. 그러므로 상원사종을 살리기 위해서는 용접법밖에 없다고 다시 생각해 되어 이에 대한 연구를 하게되었다.

이 연구에서는 상원사종을 1/5로 축소한 모형종을 만들어 크랙 방지를 위한 용접시험을 하고, 이것을 토대로 하여 상원사종에 생긴 다음과 같은 크랙을 용접하였다.

- (1) 종 하부에 있는 대, 중, 소 등 3개소에 있는 크랙 용접
- (2) 음관부에 생긴 대형 크랙의 용접
- (3) 절단되어 망실된 용두부의 귀를 새로 구조성형하여 만드는 용접
- (4) 용두 뒤에 있는 뒷발의 털 상부 절손부의 용접

그리고 하대, 용두의 귀부 등 용접부위의 문양을 복구재생하기 위한 조각을 실시하여 상원사종의 형태에 대한 보존작업을 완료하여 앞으로 후손들에게 보여 줄 수 있게 하였다.

2-4-2 노쇠한 상원사종

상원사의 종은 국내 최고의 기록종으로서 신라시대부터 많은 풍설을 겪으면서 1262년을 맞이하게 되었다. 그간에 타종회수는 잘 알 수 없으나 사원의 대종의 경우 상례에 따르면, 즉 새벽, 주간 및 저녁의 타종수를 각각 28회, 5회 및 36회로 하고 있으므로,

n	: 1일간 타종수69회
N1	: 정규 1년간 타종수	25,185회(69회×365)
N2	: 모임을 위한 타종수(최소)
	250회(년50회×5타/회)
N4	: 1년간 총타수 합계(N1+N2)
	25,435회/년
N	: A.D.725년부터의 총타종수(N4×1253년)
	31,870,055회

종의 Crack과 용접에 관하여

위와같이 추산할 경우 상원사종의 타종회수는 3,000만회를 넘어서게 된다.

기계에서 피로시험할 경우라면 100만회~1000만 회를 기준으로 반복외력을 가하여 피로한도를 정하고 있다. 현재 상원사종은 기계적인 내구한도의 3~10배 이상의 타종충격을 받으면서 금일에 이르고 있다. 그간 실제 상원사종은 노쇠기에 들어갔기 때문에 현재는 피로에 지쳐있는 상태로 추정되고 있다. 그러나 이것을 알아주는 사람은 별로 없는 것 같다.

상원사종은 소리가 국내에서 가장 아름답다 하여 노쇠한 종을 힘껏 타종하려는 사람들 때문에, 만신창이가 되어가고 있다.

상원사종에 있어 이보다 더 큰 애환은 없을 것 같다. 현재 이 종은 하대부 내측의 균열, 음관부의 파손 등으로 본연의 상태를 유지하기 힘들다. 이 노쇠한 종이 더 이상 파손되지 않도록 국보를 관리하는 문화재관리국 및 사원 등에서 깊이 인식하여 선조들이 남겨준 이 아름다운 음향의 종을 길이길이 잘 보존하여 주기를 간절히 바라는 마음이다.

2-4-3상원사종의 균열

신라종 중에서 타종할 수 있는 것은 경주국립박물관의 봉덕사종과 상원사의 종각에 걸려있는 상원사종 2개 뿐이었다.

국보 제29호인 봉덕사종은 별로 이렇다 할 균열이 아직은 전혀 없으나, 국보 제36호인 상원사종에는 몇 군데에 균열이 있다. 이들 균열에 대하여 이미 1976년 7월1일부로 필자가 문화재관리국에 보고한바 있다. 여기서는 상원사종에 생긴 균열 현황을 살펴피기로 한다.

1) 음관 중간부의 균열

음관부 중앙보다 조금 높은 각부에 전술한 Fig. 10의(a)부와 같이 수평 불연속적인 균열이 생겨 있다는 것은, 외관으로 보아도 쉽게 알 수 있다. 이 균열은 이전부터 잘 알려진 균열이다.

2) 용두 좌측의 이부 절손

이것도 오래된 것으로 보인다. 그러나 발생된 그 시기를 알 수 없다.

3) 하대부에 균열이 생긴 것을 용접한 뚜렷한 흔적이 있다. 이것을 여기서 제1차 균열 용접부라고 부르기로 한다. 이 균열은 현재 진행되지 않고 정지상태에 있는 것으로 보인다. 이외에 새로운 균열이 발생되어 전파(Propagation)되고 있다.

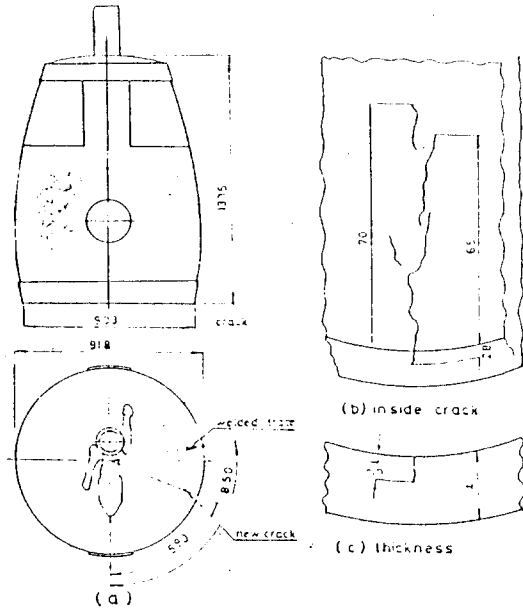


Fig 10. 上院寺鍾의 新龜裂 위치

이것이 문제의 제2차 신균열이다.

신균열은 종의 전방에 있는 당좌를 통하는 구진 선상에서 역시계방향으로 590mm의 위치에 있으나, 종귀 내면측에 균열이 있어 외부에서는 전혀 보이지 않는다. 그러므로 많은 사람들이 상원사에 명종을 찾았으나 이 균열은 알지 못하였다.

이 균열은 미세한 선으로 형성되어 있으므로 종 내부에 들어가서 전등으로 조사하지 않으면 잘 보이지 않는다 이 균열이 언제 어떻게 생겼는지 알 수 없으며, 현재의 균열이 미소하나마 성장 및 전파종이라고 추정된다.

3. 상원사종의 용접

전술한 바와 같이 국보 36호 종을 보존하는 것이 필요하여 다음과 같은 순으로 하였다.

- (1) 상원사종의 결손 망실된 부위에 대한 모형 제작 및 부품을 주조하는 작업
- (2) 상원사종에 대한 각부위의 크랙부 용접작업
- (3) 용접후의 원형 복원을 위한 조각 보완작업

3-1 상원사종 망실 결손부의 모형제작

망실 결손부위라고 하는 것은 주로 용두부에 한정되어 있다. 즉 용두부에 우측 귀만 있고 좌측 귀가 망실되어 있었고, 또한 코 위의 장식이 일부 결손되어 있었으므로 이들에 대한 모형을 만들었

다.

Fig.11은 상원사종의 용두에 망실된 좌측 귀의 모형과 용두의 상부결손의 망실부의 보완을 위한 모형제작 작업을 표시한다. 이와 같은 모형작업은 일부 결손되었으나 일부 남은 부분에서 대칭되는 원형이 남아있어, 남은 원형을 사용하여 보완에 필요한 모형을 제작하였으므로 작업이 순조롭게 진행되었다. 용두의 귀 상부 모형 및 코 상부결손 부위의 모형 등을 사용하여 Sn 16%를 함유하는 청동으로 주조하여 결손부의 형상을 만들고 이것

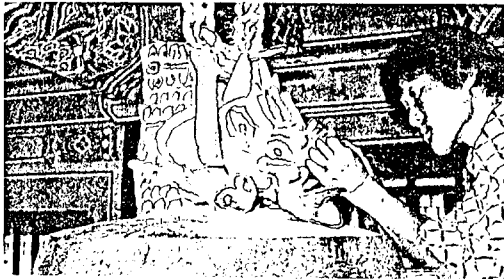


Fig 11. 龍頭의 코 上部缺損 亡失部の 模型製作

으로 용두부를 원형으로 보수하였다.

3-2 상원사종에 대한 용접작업

1) 보수용의 시설장비

상원사종을 보수하기 위하여 전술한 불활성 가스식 "TIG" 용접기를 사용하기 위해서는 220Volt의 전압과 25Kw 전기용량이 필요하였다. 이 전원은 상원사에서 얻을 수 없어 서울에서 디젤엔진과 발전기를 가지고 가야만 하였다.

Fig.12는 디젤 엔진(75Hp, 1,800rpm)과 직결되어 있는 60사이클, 220V 및 120V 양용 45 Kw 용량의 미국 General Electric Company제 발전기를 표시한다. 이 발전기에서 발전된 전기로 용접과 전등에 사용하였다.

상원사종의 시공 및 측정에 사용한 시설 및 장치를 열거하면 다음과 같다.

1. 디젤 엔진 직결식 45Kw 발전기(미국 GM사) 1대
2. TIG 용접기 25Kw 용량(시성전자산업사 제) 1대
3. DC 12Volt 충전기 1대
4. 100-200Volt용 가변변압기 1대

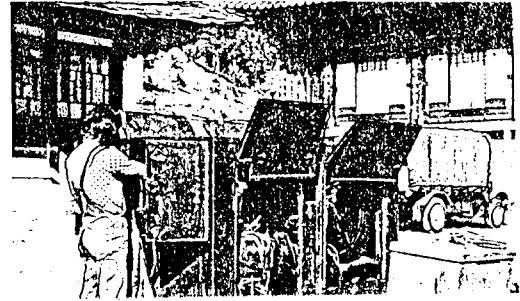


Fig 12. 디젤 엔진 直結式 45kkw 發電機

5. 산소-아세틸렌 가스 용접기 1조
6. 체인 블록 1.5ton 용량과 조립식 3발 지주 1대
7. 가스 토오치 장치 1조
8. 헬륨 가스 bombe 2개
9. 아세틸렌 가스 bombe 5개
10. 칼라체크용 약품 1조
11. 산소가스bombe 4병
12. 이동식 연삭기(연삭 숫돌 및 커터 검용) 1대
13. 냉각수용 탱크 1조
14. 수공구(망치, 줄, 톱, 용접봉, 커터)1식

서울에서 2대의 화물자동차로 운반한 용접장비는 도착 후에 점검하고 시운전을 하였다.

2) 상원사종의 용접작업

(1) 용접한 부위의 재확인

용접한 부위를 정밀하게 알기 위해서는 크랙이 진행된 첨단 부위를 찾아내지 않으면 안된다. 이것은 화학약품을 침투시키고 이것을 착색하여 크랙 첨단위치를 찾아내는 칼라체크(Color check)방법이 널리 쓰이므로 여기서도 용접작업에 앞서 종하대의 내외측에 크랙 부위를 칼라 체크하여 크랙의 크기와 방향을 찾았다.

Fig.13은 종하부 외측에 있는 크랙 부위의 칼라

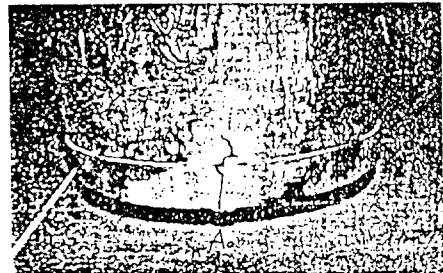


Fig 13. 鍾 下部外側에 있는 크랙 部の 칼라체크

종의 Crack과 용접에 관하여
 체크한 흔적을 나타낸다. 여기서 Ao는 종 외측
 크랙을 표시한다.

Fig.14는 종하부 내측에 있는 크랙 부위의 칼라
 체크를 표시한다. 여기서 Ai는 제1크랙, Bi은
 제2크랙, Ci(중간부)는 제3크랙을 각각 표시한
 다.

(2) 크랙 부위의 연삭

위의 칼라체크로 종하부 크랙의 크기와 위치를
 찾은 크랙 부위를 연삭 제거하기 위하여 휴대식

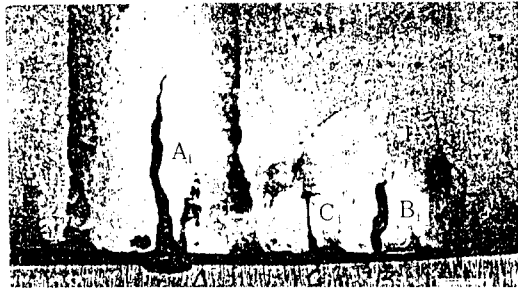


Fig 14. 鍾下部 内側에 있는 크랙의 칼라체크(A₁, B, C,
 는 第1, 第2, 第3 크랙)

그라인더로 연삭작업을 개시하였다. 연삭작업은
 크랙의 전장에 걸쳐 내부 쪽으로부터 크랙 첨단부
 위를 완전히 깎아 제거하지 않으면 후에 또다시
 크랙이 생길 가능성이 있으므로 연삭한 후 다시
 칼라체크하여 크랙의 흔적(Trace)이 남았는지를
 확인하였다. 만약 크랙이 남았을 때에는 다시 연
 삭작업하여 크랙 첨단이 남지 않도록 재연삭하였
 다.

Fig.14는 Ai(제1크랙)부위를 연삭하여 크랙을
 제거하는 작업을 예시한 것이다.

이와같이 하여 Bi(제2크랙), Ci(제3크랙)등도
 연삭작업으로 제거하였다. 연삭이 끝나면 그 부위
 를 브러시(Brush)로 청정하고 용접준비에 들어간
 다.

(3) 종하부 외측의 용접작업

종의 용접은 대단히 어려운 작업이다. 그러나
 외국자료조사와 예비시험의 경험을 살려 여기서는
 불활성 가스를 사용한 텅크스텐 아아크 용접
 (TIG)법을 썼다.

불활성 가스에는 헬륨(He)75%와 아르곤(Ar)
 25%의 혼합가스를 사용하였고 용접봉에는 AWS
 (American Welding Society) 규격의 E(Cu·Sn·C)
 를 사용하였다.

이 용접봉은 Sn=약9%, P=0.30%이하, Pb=

0.02%, 잔부 Cu로 된 성분이다. 여기서, 용접작
 업은 서울 특수용접사의 이중구 사장이 직접 용접
 하였다.

Fig.15는 종하부의 내측에 있는 Ai크랙을 TIG
 용접 작업하는 과정을 표시한다. 여기서는 연삭된
 V형 홈부를 전술한 용접기와 용접봉으로 약 3
 mm 내외의 얇은 용접금속층을 만들고, 이어 냉
 각하기 전에 용접금속층을 피이닝(Peening)하여,



Fig 15. 鍾下部의 内側研削

주조조직과 같은 용접금속층과 모재금속의 일부를
 주조조직과 같은 상태로 만들었다. 그리고 그 표
 면을 브러시로 깨끗이 한후 용접과 피이닝 작업을
 반복하면서 용접작업을 완결하였다. 이와 같은 용
 접작업은 종하부의 내측에 있는 Ai크랙, Bi크
 랙, Ci크랙 및 종외부의 Ao, Bo크랙 등으로 진행
 하였다.

(4) 용두 결합부의 보관을 위한 용접

용두부의 용접은

① 음관의 상중부를 크랙이 한바퀴 돌아서 음관
 상부가 절단되기 직전에 있는 음관의 균열을 용접
 하였고,

② 용두부위의 좌측 귀가 절손되어 망실된 상태
 에 있으므로 본 연구에서는 전술한 바와 같이 상
 원사종의 용두부의 귀 모형을 제작하고 주조한 것

을 새로 용접하였다.

Fig.16은 가접한 후에 귀 주위를 TIG로 완전 용접하는 작업을 나타낸다.

③ 한편, 좌측 귀도 절손 크랙 상태에 있는 것을 보수하여 완전히 고착되게 용접하였다.

④ 또한 콧등에는 콧등 장식이 있었으나 이것은 반만 남아 있어 부족한 반부분은 Fig.10과 같이 모형을 만들고 이것을 주조하여 보수용접으로 원상을 도로 찾게 하였다. Fig.18은 상원사종의 음관 및 용두부의 용접보수된 위치와 모양을 보여주고 있다.

⑤ 상원사종용의 뒷발부분의 털 뒷부분에 균열이 생겼으므로 Fig. 17과 같이 보수를 위한 용접을 하였다.

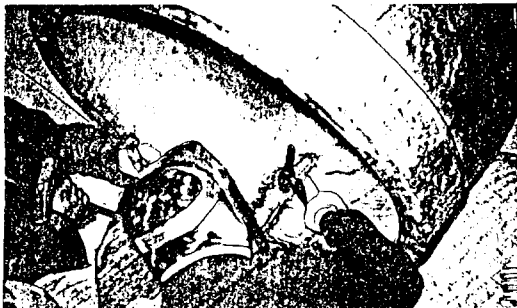


Fig 16. 鍾下部の 内部의 TIG溶接

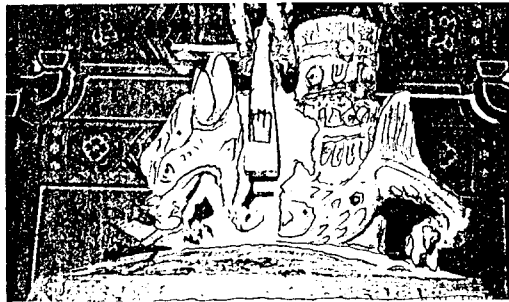


Fig 17. 音管部の 크랙



Fig 18. 上院寺鍾의 龍頭 귀의 溶接



Fig 19. 溶接된 音管과 龍頭部

Fig. 18은 상원사종의 음관 및 용두부의 용접보수된 위치와 모양을 보여주고 있다.

(5) 기타 보수용접

① 상원사종의 용두부의 뒷발 무릎 상부 털부에 크랙이 있어 Fig.18과 같이 용접하는 보수작업을 하여 망실을 방지하고 외형을 다듬었다.

위와 같이 하여 각부위를 용접한 후 용접부의 잔류응력(Residual stress)을 제거하기 위하여 용접된 부위를 산소 아세틸렌 중성염으로 200~250℃ 가열하는 저온뜨임(Low temperature tempering)을 하여 용접부의 청동조직의 균질화를 기하였다.

② 상원사종의 용두부

현가장치가 불완전하여 용두부의 음관과 용귀 등에 크랙과 파손망실의 원인이 되어 있으므로 종의 파손을 방지하기 위하여 이 부분을 개조하고 또한 일부 대체하게 되었다.

3-3 용접후의 문양조각

크랙이 발생한 부위를 각아내고 용접함으로써 하대, 음관, 용두부의 일부 문양이 소실되었다. 소실된 문양재생을 위하여 성중사 원광식 사장님이 지휘하는 국내 제1류의 조각사들이 용접후에 조각작업을 하게 되었다.

Fig.18은 하대 Ao크랙 외측을 용접하고 문양재생을 위한 조각작업을 나타낸다. 그리고 Fig.19는 음관부의 크랙을 용접하고 문양을 조각하는 것을 보여준다.

위와같이 하대부의 문양, 음관부의 문양 뿐만 아니라 용두의 양측귀 부분 등 모든 용접부의 문양을 재생하는 조각을 차례차례로 끝내어 문양 보완 재생을 완성하였다.

3-4 상원사종의 진동

상원사종은 1262세라는 노쇠한 상태에서 종구에 3개소의 크랙과 음관 및 용두등에 많은 파손이 생

종의 Crack과 용접에 관하여

거 실질적으로 종의 수명 이상으로 장수하였다 하여도 과언이 아닐 것이다. 여기서 노쇠한 상태에서 설상가상의 크랙으로 중병의 종을 대수술하여 모든 면에서 완전무결하게 1262년전의 원상으로 재생시킨다는 것은 불가능한 일이다. 그러므로 상원사종을 완전 파괴에서 구출하여 우리 조상이 남긴 위대한 문화의 유산인 이종을 보수하여 원형이라도 후손들에게 남겨 주겠다는 것이 본 사명이라고 본다. 본 보존 작업을 통하여 종의 형체 뿐 아니라 상원사종이 지니고 있는 국내 제1인 음향까지를 원상으로 할 수 있다면 그 이상 바랄 것이 없겠으나 종을 용접하였을 때 종소리는 희생되더라도 종체만이라도 살린다는 목적으로 진행되었던 것이다.

여기서는 상원사종이 보존작업 하기 전과 후에 종성이 어떻게 변화 되었는지를 검토기로 한다.

3-4-1 상원사종 모형종의 진동

상원사종을 1/5로 축소하여 만든 모형종에 대한 진동을 측정검토한 바 있다. 이 모형종을 주조한 것과 모형종을 인공적으로 크랙을 넣어 용접한 종에 대한 진동을 측정하였다.

모형종체에는 전기저항식 스트레인 게이지 (Strain gage)를 부착시키고 이것을 브릿지 헤드 (Bridge head)에 배선한 후에 Fig.23의 응력증폭기인 Dynamic strain amplifier에 연결하고 여기서 나오는 출력을 Rapicorder 기록계에 기록하였다.

Fig.20은 모형종의 진동측정에 사용한 장치를 표시한다. 이와 같이하여 측정된 모형종 주조상태의 것과 인공 크랙을 넣고 용접한 것의 진동곡선을 Fig.21에 표시하였다.

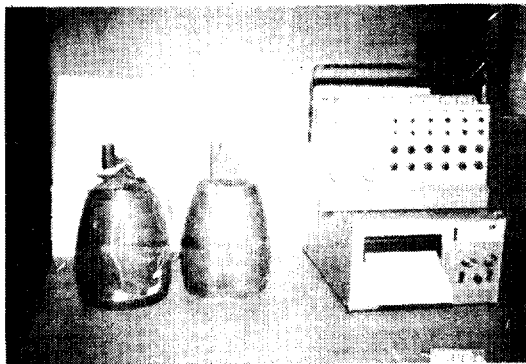


Fig 20. 모형종 진동 측정 장치

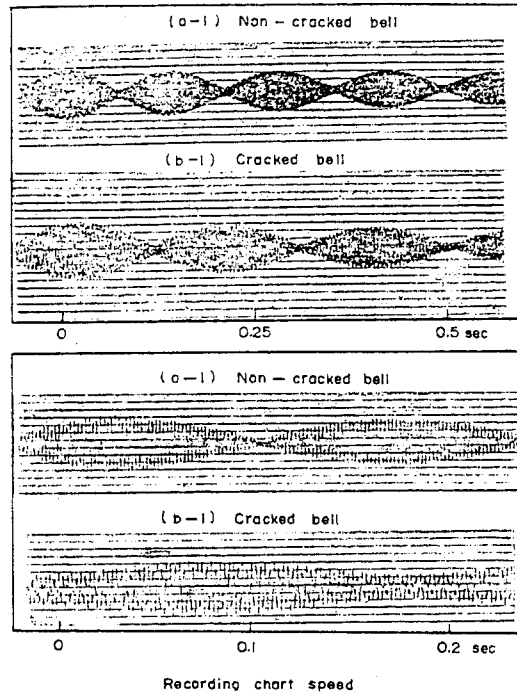


Fig 21. 상원사 鍾模型의 진폭과 기록속도 크랙없는것 (a-1)과 크랙있는것(b-1) (Strain amplitude and chart speed for relationship between non-cracked and cracked bell)

Fig.21에서 크랙이 없는 것과 크랙이 있는 것을 비교한 것이다. 크랙이 없는 모형종의 고유진동수는 540 cycles/sec 인데 대하여 크랙이 있는 것의 고유진동수는 425 cycles/sec을 표시하였고, 일초간의 울림수는 크랙이 없는 것이 7.227회이고, 크랙이 있는 것은 울림수가 5.223회로 나타났다. 이것으로 보아 크랙이 존재하면 고유진동수와 울림회수가 감소됨을 알 수 있다.

한편 Fig.21에서 알 수 있는 바와 같이 크랙의 유무에 따라 종체의 진동곡선의 진동특성에 차이를 보이고 있다. 즉, 크랙이 없는 종에서는 진동이 규칙적인 정상 싸인곡선(Sine curve)을 나타내나, 크랙이 존재할 때에는 진동곡선이 불규칙하게 되고, 이상적인 진동이 혼재된 상태로 된다는 것을 알 수 있다.

3-4-2 상원사종의 진동

상원사종의 진동측정에는 종체에 가속도계를 부착하고 이것을 직접 6볼트 출력의 건전지로 작동하는 스트레인 진동기에 연결하였다. 여기에서 나

오는 스트레인 출력을 12볼트(V) DC pack으로 작동되는 라페트형(Rapet model)의 진동기록계의 진동곡선으로 종재용접 전후의 진동곡선을 측정하였다.

Fig.22는 용접후의 진동측정에 사용한 장치를 표시한다. 여기서 측정된 진동곡선과 필자가 측정한 상원사종의 용접전의 진동곡선을 비교하여 용접전후의 진동특성을 분석하였다.

상원사종의 용접전의 고유진동수는 102cycles/sec이고, 또한 울림수는 1초간 2.02회로 되어 있었다.

Fig.23은 용접후의 종의 진동을 측정된 곡선을 표시한다. 여기서 용접후의 고유진동수는 106 cycles/sec로서 용접전에 비하여 4cycles/sec의 증가를 보이고 있으나, 용접전후에 고유진동수의 변동이 극히 작으며, 음색에 있어서는 거의 동일하다는 것도 알 수 있다. 그러나 울림수에 있어서는 0.406cycles/sec로서 용접전의 울림수 2.02회/sec

에 비하여 1.61회/sec의 감소를 나타내고 있다. 이것은 용접으로 인하여 울림회수가 크게 감소되어 용접전에 비하여 약 2.5배 감소된 것이다. 그 이유는 용접작업으로 종이 연화되어 진동의 울림수의 감소를 초래한 것으로 추정할 수 있다.

3-5 상원사종의 화학성분과 경도분포

종소리는 종재질과 밀접한 관계를 가지고 있다고 전하여지고 있다. 그래서 청범하고 심홍을 혼드는 아름다운 종소리를 지니고 있는 신라시대에 만든 상원사종의 재질은 어떤 원소로 구성되어있는지 현재까지 많은 사람들이 궁금하게 생각하였던 것이다.

신라종 중에서 선림사종(6.25사변중 월정사에서 전화로 파괴)과 실상사종(동국대 박물관에 파손품 보장)의 재질에 대하여 종지에 발표된 바 있으나, 국내에 실존하는 상원사종과 봉덕사종에 대한 종재질은 아직까지 미지의 상태에 있었다.

그러던 중, 상원사종에 대한 본 연구에서, 보수하기 위하여 크랙부위를 연삭할 때 채취한 시편을 사용하여 화학성분을 분석함으로써 국보 상원사종에 대한 재질을 밝힐 수 있게 되었다.

여기서는 전술한 선림사종 및 실상사종의 재질과 비교하기 위하여 Table 1에 함께 표시하였다.

Table 1에서 동일한 선림사종의 성분에서 동(Cu), 주석(Sn)등의 성분차는 시편채취 위치의 차에 따른 것으로 해석된다. Table 1에서 주석량은 Sn=12~18%의 범위에 있다. 청동압연재에 대한 기계적 성질은 Sn=10~17%에서 최대인 장강도를 가지고, 연율은 Sn=4~5%에서, 그리고 경도는 Sn=32%에서 최대치를 나타낸다.

실제 종재질로서는 강도와 경도가 높은 것이 필요하나 주석이 20% 이하되면 경도는 커지나, 취성이 나타나게 되므로 충격에 따른 피로에 약하고, 또한 응고할 때 편석이 나타나기 쉬우므로 재질의 균일성을 갖기 어려워진다. 그러므로 주석 15% 내외의 것이 종재질로 사용된 것으로 보인다.

이와같은 주석의 함유량은 종의 크기 및 형상과도 밀접한 관련성이 있는 것으로 추정된다.

Table 1에서 상원사종의 Sn=13.26% 인데 Pb의 양이 높은 값으로 나타난 것은 특기할 사항이다. Pb는 광물에서 혼재되어 들어간 것인지 또는 우아한 문양을 선명하게 부조시키는 어떤 목적으로 첨가한 것인지는 불분명하나, Pb의 값이 높은

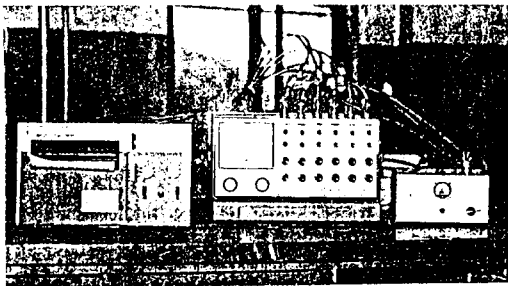


Fig 22. 模型鍾 振動測定裝置

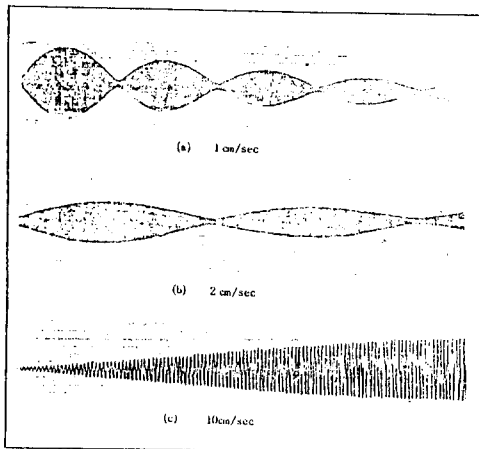


Fig 23. 上院寺鍾의 溶接後의 應力振動과 記錄速度曲線
記錄速度(a)는 1秒에 1cm, (b)는 1秒에 2cm
(c)는 1초에 10cm

Table 1. 上院寺鐘 및 古代鐘의 化學成分(%)

鐘 名	化 學 成 分 (%)					備 考
	Cu	Sn	Pb	Zn	其 他	
上院寺鐘	83.87	13.26	2.12	0.32	Ag0.23 및 Au0.04	豐山金屬分析 (1979. 2. 3)
整林寺鐘 ¹⁹⁾⁰⁶	80.2	12.2	-	2.2		考古美術資料No.37
實相寺鐘	75.7	18.0	0.31	-		鎧振分析鐘(1977.6)
朝鮮鐘 ⁴⁾	80.1	12.2	-	-		坪井良平著"朝鮮鐘"

Table 2. 上院寺鐘의 歷架의 化學成分(%)

C	Si	Min	P	S	remark
0.259	0.09	0.02	0.032	0.035	大韓重機Co. 分析



Fig 24. 상원사종의 현미경조직

값을 보이고 있다.

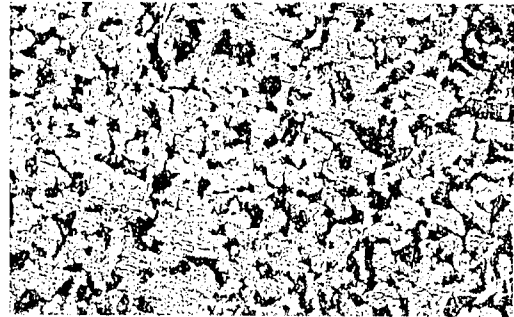
한편, 상원사종의 현미경 사진을 보면 Fig.24에서 기지(Matrix)는 알파 고용체(α -solid solution)이고, 백회색의 피상은 델타(σ) 고용체를 각각 나타낸다. 그리고 현미경 조직에는 군데군데 Pb의 편석으로 보이는 검은 구상 또는 미상개재물을 볼 수 있었다.

3-6 상원사종의 현가쇠

현가쇠도 신라 것으로 보이므로 이것을 분석한 결과 Table 2와 같은 분석치를 얻었다.

Fig.25는 상원사종의 현가용쇠의 조직사진을 표시한다. 이것을 절단하여 본 결과 단련강이라는 것을 알았다. 옛날 신라시대에는 현재와 같은 용강로를 만들지 못하고, 단철을 침탄하여 강을 만들었을 것으로 추정되므로, 상원사종의 현가쇠도 역시 이와 같이 하여 만든 것으로 생각하게 된 것은 현미경 조직을 보면 개재물이 많고, 또한 퍼일

라이트(Pearlite)를 각각 보이고 있다. 여기서 페라이트와 퍼일라이트의 조직분포로 보아 탄소량은 약 2.6%이다.



4. 결 언

종의 크랙으로서 미국의 자유의 종, 한국의 전북 원주 송광사종들의 크랙방지에 대한 것을 보고, 우리 국보 제36호 상원사종(AD 725 주조 : 국내최고종)을 파괴에서 살리려는 우리의 집념은 종 크랙부를 성공적으로 용접할 수 있었다. 이것은 한 개의 자료로서 앞으로 더욱 활용되기 바란다. 위에서 실시한 상원사종 크랙의 용접에 대한것을 요약하면 다음과 같다.

(1) 상원사종의 크랙 방지를 위한 보존작업을 위하여 상원사종의 1/5에 해당하는 모형종을 제작하여 인공 크랙을 넣고 용접하는 예비시험을 하였다.

(2) 용접작업에는 TIG용접기를 사용하였고, 불활성 가스에는 헬륨(He)75%와 아르곤(Ar)25%의 혼합가스를 그리고 용접에서는 AWS의 E(Cu-Sn-C)용접봉을 사용하였다.

(3) 상원사종의 절손 망실된 중요부위(좌측 귀 및 코 상부, 수염 장식부등)는 모형을 만들고 주조된 부품을 고증을 통하여 새로 보완하여 원상으로 복원하였다.

(4) 종내외의 크랙 부위는 연삭으로 완전히 깎아내고, 내측 및 외측순으로 용접하면서 피이닝(Peening)하였고, 그후에 크랙 유무를 칼라체크하여 완전히 크랙이 없음을 확인하였다.

(5) 크랙을 용접한 후에 종 조각가들이 문양재생의 조각을 시행하였다.

(6) 종의 현가부의 결함으로 용두부의 귀와 음관이 파괴었으므로 현가쇠의 일부를 개조하고, 종을 안전하게 보존하게 하였다. 이에 따라 절단된

현가쇠를 분석함으로써 신라시대의 철의 화학성분을 밝힐 수 있었다.

(7) 상원사종의 보존작업 전후의 타중 진동측정을 통하여 고유진동수는 약 1.04%의 차에 불과하여 거의 동일 하였으나, 울림수는 용접전에 1초간에 2.02회에서 0.406회로 많이 감소하였다. 이것은 용접작업으로 종이 연화되어 진동의 울림이 감소된 것으로 추정된다.

(8) 상원사종의 보존작업에서 채취된 시편을 통하여 상원사종에 쓰인 청동의 화학성분을 밝힐 수 있었다.

(9) 상원사종의 중량을 로오드셀(Load cell)을 제작하여 실시함으로써 1,290Kg 임을 확인하였다.

참고문헌

1. 奉弘變：韓國美術全集(8), 金屬工藝, 同化出版公社(1974), pp. 14~15, p135
2. 黃壽永：韓國의 佛教美術, 五臺山 上院寺鐘

搬移事實(1974), pp. 270~282

3. 韓國佛教研究院：韓國의 寺刹(13), 月精寺 一誌社 發行(1977), pp. 81~83
4. 坪井良平：朝鮮鐘, 角川書店(1974), pp. 46~49
5. 廉永夏：韓國鐘에 대한 研究(제1보上院寺鐘), 韓國鐘研究會 “梵鐘”, No 1(1978), pp.23~68
6. 廉永夏, 嚴基元：“熔接工學” 特殊熔接, 東明社 發行, 1974年
7. 美國熔接學會(AWS: American Welding Society)Welding Handbook, Copper and Copper Alloys, Vol. 7, (1972), pp. 683~6845.
8. 曁선재：新羅鐘에 대한 金相學的 研究, 大韓金屬學會誌, Vol. 13, No. 4, (1975), pp. 454~457)
9. 韓國美術史學誌：“考古美術資料”貞元年, (禪林寺)銅鐘分析, No 37, pp.19~20
10. 廉永夏：機械材料學, 東明社 發行(1976), pp. 202~208.