

(寶物 第2號) 普信閣鐘의 傳播크랙 및 應力레벨에 關한 研究

廉 永 夏

湖南機工株式會社

1985年 9月 9日 接受

Study on Propagated Crack and Stress Level of
Boshinkak Bell (No.2 Treasure)

Yung Ha Yum

ABSTRACT

Boshin-Kak Bell, which is one of the largest bells, is located at Chong-Ro Square in the center of Seoul. The bell has been struck early morning and late evening for time-report since the 14th century in Lee Era. Therefore Boshin-Kak Bell has been an intimate old friend of Seoul citizen more than 500 years. Unfortunately, mortal large cracks were found inside this bell in the horizontal and vertical directions in 1979.

The present paper has investigated the propagated bell-crack by ultrasonic flaw detecting method, and the stress level, bell vibration and weight measurement by electric wire resistance strain gauge method. The results indicate that they are useful for further study of Korean bell by nondestructive test.

1. 緒 論

우리國民은 서울하면 먼저 南大門(國寶第1號)과 鍾路 普信閣鐘(寶物第2號)을 联想할만큼 깊은 因緣을 갖고 있다. 普信閣鐘 (1)(2)(3)은 現代에 이르기까지 517年間 經過하는 사이에 朝鮮朝에서는 寺刹의 鐘으로서 禮佛의 聖寶로 佛事에 使用되었고, 그後 鍾路에 있는 鐘閣에 移懸되어 罷漏(上午 4時)에 33番, 그리고 人定(下後 10時)에 28番 打鐘하여 서울市民에 時刻을 알려 주는데 쓰였고, 그리고 解放後에는 새해 새 出發을 알리는 除夜鐘으로서, 33番 打鐘하여 市民의

愛護를 받고, 또 3.1節과 8.15光復節을 紀念하기 위한 33番 打鐘은 民族正氣를 蘇生시키며, 團結을 다짐하는 鐘소리로서 서울의 名物로 되어 있다(Fig 1. 8.15 慶祝打鐘式)

1979年 普信閣을 서울시의 道路擴張工事로 重建하던 中에 普信閣鐘에 이미 發生되었던 크랙(crack)이 처음으로 發見되어 新聞에 報道된바 있다. 그러나, 이 크랙이 언제부터 생겼는지 그 時期는 알 수 없으며 크랙의 事由도 不明하다.

이 報告는 普信閣 保存에 關한 研究中에서 아직 發表되지 않은 普信閣鐘에 傳播되어 있는 크랙

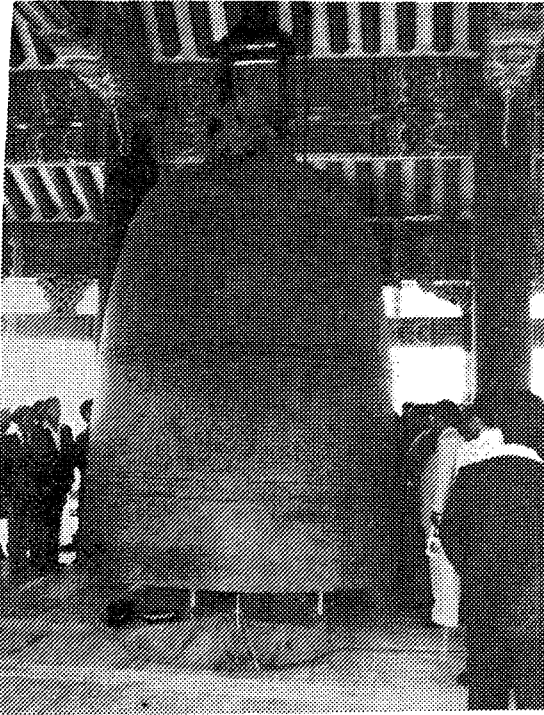


Fig.1 Boshinkak Bell and 8.15 Liberation ceremony

을 非破壞檢査法인 超音波 探傷法으로, 그리고 打鐘에 依한 應力과 振動, 또한 重量等은 電氣抵抗 strain gauge 를 사용하여 測定하고, 分析考察하여 鐘解析에 有用한 資料를 얻었다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2-1 實驗機器

1. 本研究에서는 鐘内部에 發生되어 있는 crack 을 測定하기 위하여, macro 試驗法으로서 鐘内部面의 crack 幅은 $\frac{1}{20}$ mm 까지 測定할 수 있는 portable microscope 를 使用하고, 깊이는 $\frac{1}{100}$ mm의 piano 線을 使用하여 crack 깊이를 豫測하는 方法을 使用하였다. 한편 傳播된 crack tip 과 分布를 spraying colour check 試藥을 使用하여 crack 깊이를 圖面化하였다.

한편 crack 깊이 測定에는 超音波檢査法을 使用하였다.

2. 鐘의 應力, 振動 및 重量에는 電氣抵抗線

스트레인게이지와 振動加速度計를 使用하였다.

아래의 實驗에 使用한 機器를 例示하면 다음과 같다.

1. Ultrasonic flow detector (Model USM-2MT) pick-up 0.5 - 5 MHz Krauträmer, Koln, West germany calibration reference block (Model V-1)..... 1 set
2. Ultrasonic tester (Model USIP, 2 MHz) Krauträmer (West Germany) and Calibration set assembly 1 set
3. Portable Brinell microscope Telebrinell scope 1 set
4. Spraying colour check assembly 2 set
5. Strain indicator (Kyowa Co)..... 1 set
6. Switching and balancing unit 12 channel 1 set
7. Strain amplifier (6 channel) (Kyowa Co) 1 unit
8. Recording scillography Rapicorder (6 channel) (Kyowa Co)..... 1 unit
9. Data corder (Kyowa Co) 1 unit
10. Bridge head and power assembly 1 unit
11. Load measuring hook (assembly) 1 unit

2-2 實驗方法

2-2-1 普信閣鐘 크랙 測定方法

本研究에서 크랙 測定에는 마크로 檢査法 (macro examination method)와 非破壞方法中에서 超音波 檢査法 (ultrasonic flow detecting method)를 使用하였다.

1. 마크로 檢査法

크랙이 肉眼으로 잘 보이는 부분은 테이프자 (Tape scale)로 길이를 表示하고 크랙先端의 마크로 檢査에서는 $\frac{1}{20}$ mm까지 測定할 수 있는 移動式 브리넬 顯微鏡 (Brinell microscope)을 使用하여 크랙先端分布를 仔細하게 調査하였고, 크랙의 先端이 잘 보이지 않는 부분은 크랙浸透用 칼라체크 (Penetrating Colour Check) 方法을 使用하여 着色한 後에 크랙길이를 브리넬 顯微鏡으

로 測定하였다. 그리고 크랙의 幅測定에는 브리넬 懸微鏡만을 使用하였다.

2. 超音波 檢査方法

크랙의 깊이 測定에는 超音波를 使用하는 方法과 X-ray 를 使用한 方法等을 생각할 수 있으나 普信閣鐘의 경우에는 크랙이 鐘表面에 垂直으로 發生하였으므로 X-ray 는 使用할 수 없기 때문에 超音波를 使用한 크랙깊이 測定方法을 選定하였다. 超音波 探傷器를 使用하여 測定한 位置의 두께를 實測된 圖面에서 帷認하고 이것을 超音波 探傷器의 補正用 標準試片에서 깊이를 補正한 後에, 크랙位置의 깊이와 크랙깊이를 測定하고 이에 앞서 크랙 各部位의 크랙깊이를 가느다란 피아노선 (Piano wire)(線의 直徑 0.018mm)으로 크랙깊이를 手動式으로 測定하였다. 이와 같은 豫備試驗後에 超音波 探傷器로 内部의 크랙 깊이 尖端을 追跡하여 크랙깊이를 測定하였다.

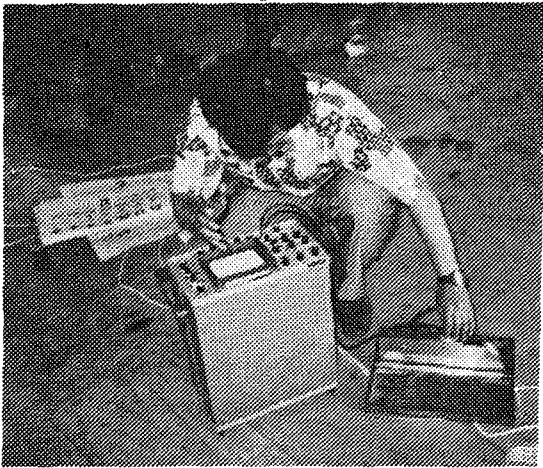


Fig.2 Ultrasonic flaw detection(No.3) and Calibration Work

2-2-2 strain gauge를 利用한 應力과 振動 測定法

鐘의 應力 振動測定에는 strain gauge 式의 加速度計 3個(記號A-1,A-2,A-3)等과 wire strain gauge(G-1,G-2, ... G-5)等을 鐘外側

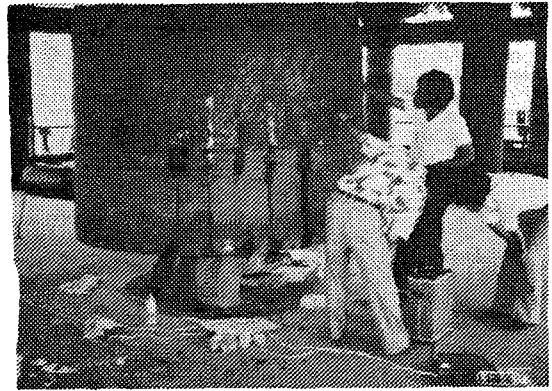


Fig.3 Measuring of bell crack depth by ultrasonic flaw-detector

에 附着하여 使用하였다.

Fig-12 는 應力振動測定에 使用한 加速度計와 strain gauge 의 配置 說明圖를 表示하였다.

加速度計와 스트레인 게이지를 브리지헤드(bridge head)에 連絡하고, 이것을 D.C Pack 에서 供給된 直流電源으로 作動하는 스트레인게이지 增幅器에서 balancing 한後, Rapicorder(RMV-300 A型 recording oscillograph)에서 打鐘時의 振動을 記錄하였다.

2-2-3 鐘의 重量

普信閣鐘의 重量算出에 2個의 方法을 使用하였다. 즉,

- (1) 第1方法은 스트레인 게이지(strain gauge)를 使用하여 實測하는 方法
 - (2) 第2方法은 實測圖를 使用하여 計算하는 方法
- 아래에서 (1)의 方法을 說明키로 한다.

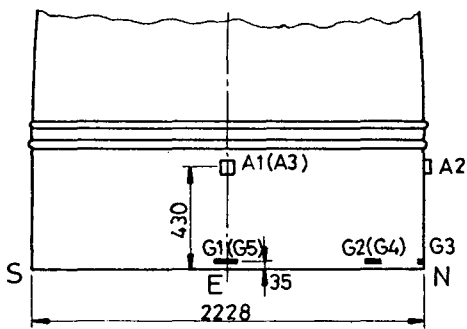
주어진 條件이 鐘閣内에서 重量을 測定하는 것이므로 計斤할 수 있는 方法으로서 몇가지 方法이 있을 것이나 여기서는 load cell 을 利用한 重量測定方法을 使用하기로 하였다. Photo 9 는 鐘重量測定에 使用한 hook 이다.

이 方法에서 40 ton 容量의 奘裝置(mechanical hook apparatus)를 만들어 여기에 電氣抵

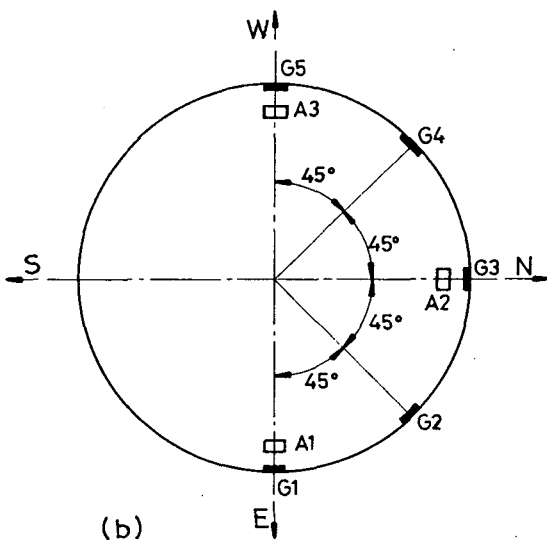
(加速度計 및 스트레인 게이지의 位置)

Table 1. Accelerometer and strain gauge location

Item No.	앞타격에서부터 角度 location	Classification	Remark
A-1	$\theta = 0$ h = 430 mm	accelerometer	5 g
A-2	$\theta = 90^\circ$ h = 430 "	"	1 g
A-3	$\theta = 180^\circ$ h = 430 "	"	1 g
G-1	$\theta = 0$ h = 35 "	strain gauge	120Ω, F=2
G-2	$\theta = 45^\circ$ h = 35 "	"	" "
G-3	$\theta = 90^\circ$ h = 35 "	"	" "
G-4	$\theta = 135^\circ$ h = 35 "	"	" "
G-5	$\theta = 180^\circ$ h = 35 "	"	" "



(a)



(b)

Fig.4 Layout of accelerometer (A) and strain gauge(G) in bell surface

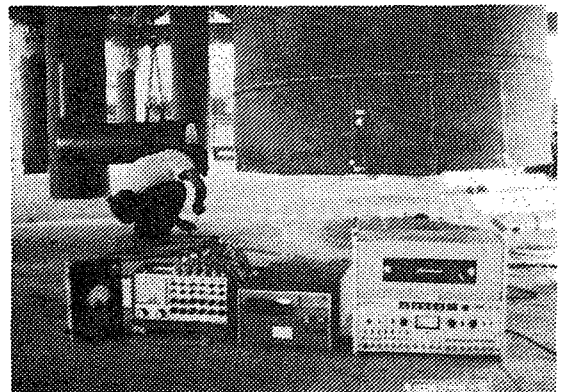


Fig.5 Strain measuring instrument of strain amplifier, Rapicorder etc.

抗式 스트레인 게이지 3개(A,B,C)를 引張軸 方向에 附着하고 여기서 A,B,C의 게이지는 12 Channel의 Switching and balancing box(Kyowa Co. 製)와 靜的 스트레인 指示計(static strain indicator)를 使用하여 스트레인을 測定하였다.

이것을 50 ton 容量의 油壓式 引張試驗機에서 5 ton, 10 ton, 15 ton, 20 ton 등에서 各各 荷重-스트레인 曲線(load-strain curve)을 그리고 여기서 얻은 各 荷重에 따른 스트레인值를 補正

曲線으로 使用하였다. Photo 10 은 補正曲線作業을 表示한다.

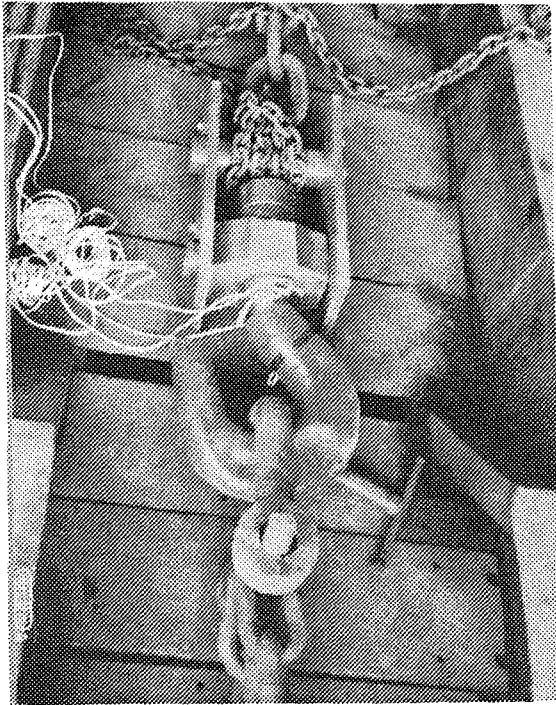


Fig.6 Hook and mounted strain gauge

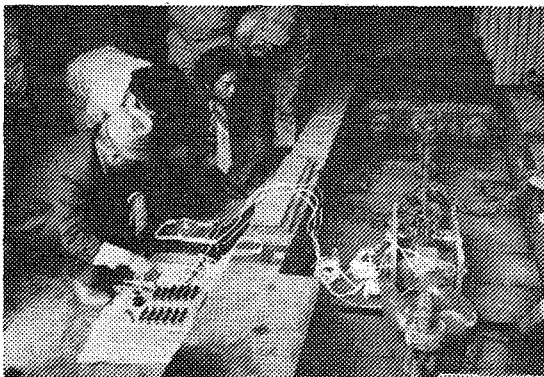


Fig.7 Loo Load calibration of hook

3. 結果 및 考察

3-1 鐘에 傳播된 크랙(propagated crack) 人間은 出生한 後 언젠가는 死亡이란 終着에 到達한다. 이것은 天理인 것이다. 모든 機械도

언젠가는 終末이 있다. 鐘의 경우도 例外가 될 수 없는 것이다.

實際 鐘은 使用하는 過程에서 破壞되는 일이 많다. 그 原因은 鑄造할때 생긴 内部에 含有된 組織의인 缺陷(不純物, 氣孔, 또는 偏析) 등에 起因되던가 또는 使用中에 힘(例를 들면 過度한 打撃力, 反覆되는 衝擊疲勞荷重, 運搬中の 取扱不注意에 따른 損傷) 등으로 因한 潛在된 크랙의 發生(crack initiation) 및 크랙傳播(crack-propagation)로 破壞를 일으키게 된다.

鐘에 크랙이 發生하면, 이것을 防止하기가 대단히 어렵다. 歷史적으로 有名한 美國의 自由의 鐘(Liberty bell)도 크랙이 發生하여 이의 防止를 위하여 할 수 있는 모든 現代技術을 動員하였으나 多少 破壞까지 時間적으로 遲延을 시켰을 뿐이고 結局 破壞되고 말았다.

사람의 경우, 一生의 限界壽命이 있는 것과 같이 鐘에도 尺度(order)가 다른 鐘의 壽命이 있다고 볼 수 있다.

西洋 鐘의 경우 鐘壽命을 約 400年으로 推定한 報告가 있다. 또한 國內에 現存한 國內最古 鐘인 上院寺鐘⁽⁴⁾(國寶 36號), 龍珠寺鐘(國寶 120號), 最近 鐘口에 균열이 생겨 壽命에 達한 것으로 推定되고 있고 朝鮮朝의 鐘中에서도 直指寺鐘, 前梵魚寺鐘, 新興寺鐘 등 그 例가 많다. 鐘에 크랙이 發生하고 이것이 成長되면 破壞를 일으키는 것은 위와 같이 흔히 볼 수 있는 일이다. 普信閣鐘에 크랙이 생겼다는 것은 1979年 3月에 新聞紙上에 紹介되었으므로 國民들이 잘 알고 있는 既定事實로 되어 있다. 이 크랙이 언제 어떤 原因으로 發生하였고 現在 어떤 狀態에 있는지에 대하여서는 報告된바 없다.

즉 普信閣鐘의 크랙 發生開始된 時期와 그 後의 進展에 對하여 觀察한 記錄이 전혀 없으므로, 이 에 對하여 더 以上 仔細히 言及할 수 없다. 그러므로 여기서는 普信閣鐘이 갖고 있는 다음 3가지 크랙 및 缺陷(defect)

즉

$$l_H = 3760 \text{ mm}$$

1. 鐘内部의 橫方向 크랙 (Lateral Crack)
2. 鐘内部의 垂直方向 크랙 (Vertical Crack)
3. 鐘外部의 鑄造缺陷 (Casting defect)

- (b) 橫方向의 크랙 全長길이 (Lateral Crack length (l_T))

鐘口徑面에 水平으로 展開한 平面上에 나타난 크랙의 總延長 길이 l_T (Fig 8 과 같이)

$$l_T = 3930 \text{ mm}$$

등을 들 수 있다.

3-1-1 橫方向 크랙

1. 크랙의 길이 (Lateral Crack length)

- (c) 橫方向 크랙의 높이 (Lateral Crack Height (H_l))

Fig 9는 普信閣鐘 内部 南西北側에 걸쳐 뻗쳐 있는 水平橫方向의 크랙 分布를 表示한다.

口徑部에서 부터 크랙의 最低 및 最高높이까지의 거리

여기서 알 수 있는 바와 같이 크랙의 길이는

$$H_l = 780 \sim 1330 \text{ mm}$$

- (a) 水平面上의 크랙길이 (Horizontal Crack length (l_H))

위의 (a)(b)(c)에서 알 수 있는 바와 같이 橫 크랙 全長은 南側 (S)에서 約 60 mm 되는 곳에서 부

鐘口徑面에서 水平으로 展開된 길이 l_H

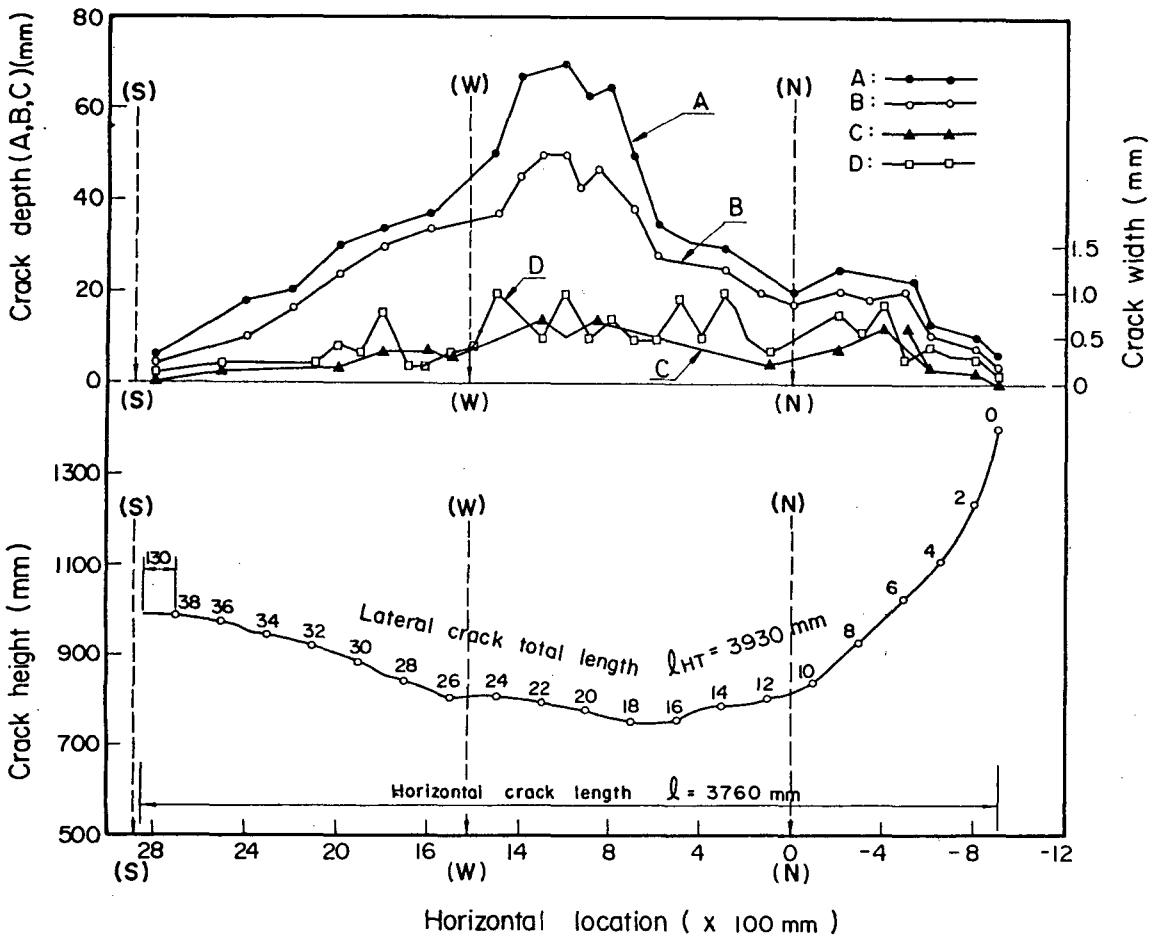
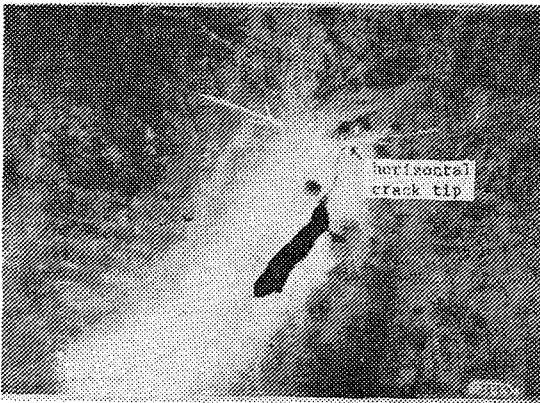


Fig.8 Relationship between horizontal crack depth(or width) and horizontal location of bell-inside

터 鐘内部 西北쪽으로 水平距離 3760 mm에 達하는 엄청나게 큰 크랙이다. 이 길이는 鐘의 内側 크랙이 있는 平均높이 1000 mm에 對한 内徑을 $Dic = 1920 \text{ mm}$ 라고 할때

$$\frac{b_T}{\pi Dic} \doteq \frac{3930}{6032} \doteq 0.6515 \doteq 65 \%$$

즉 크랙 길이는 内部 圓周의 65%에 達하는 큰 比率을 占有하고 있다. 즉 圓周의 約 $\frac{1}{3}$ 에 까지 짧히고 있다.



(a) horizontal Crack tip



(b) Vertical left crack

Fig.9 Horizontal and tip vertical crack tips by colour coating by penetrant liquid

2. 橫方向 크랙깊이 (depth) 와 폭 (Width)

(1) 橫 크랙 깊이 (depth of lateral crack)

Fig 8의 A,B,C 曲線등은 上圖의 橫方向의 크랙깊이를 測定한 값을 表示한다. 여기서, 曲線 A와 B는 前述한 超音波探傷機 (Ultrasonic flow detector)를 使用하여 測定한 것이다. A曲線은 Tracer로 0.5 MHz를 使用하여 크랙 先端部를 追跡한 것이고, B曲線은 1 MHz Tracer를 使用하여 測定值를 表示한다.

그리고 A曲線은 外國에서 訓練된 測定士와 高性能 Ultrasonic detector를 使用한 것이다. B曲線은 Tracer로 1MHz를 使用한 別途의 測定器를 使用한 것이다. Fig 8의 C의 曲線은 0.018 mm의 微細 Piano wire를 使用하여 手動으로 크랙 깊이를 測定한 것을 表示한 것이다. A, B와 C를 比較하면 超音波探傷機를 使用한 것이 手動式 피아노 線으로 測定한 것에 比하여 3倍 以上의 큰 크랙 깊이를 探傷하고 있어 여기서 C曲線은 參考測定值로 보고 A 및 B에 對하여 言及키로 한다. A 및 B의 경우 크랙의 깊이가 큰 것은 西北 (WN) 側의 W에 가까운 部에서

A曲線 $t = 63 \sim 70 \text{ mm}$ 이고

最大깊이 $t_{max} = 70 \text{ mm}$ 이다.

B曲線 $t = 43 \sim 50 \text{ mm}$ 이고

最大깊이 $t_{max} = 50 \text{ mm}$ 이다.

위의 測定值로 부터 橫크랙의 最大깊이의 범위는 大略 다음과 같이 推定할 수 있다. 部位는 西北 方向에서

$$t_{max} \doteq 50 \sim 70 \text{ mm}$$

그리고 正西方向에서는 約 크랙깊이 35 ~ 43 mm, 正北方向에서는 16 ~ 20 mm이고 最大值部位에서 左右 크랙端에서 接近하면서 漸進的으로 減少되어 감을 보여준다.

(2) 橫 크랙의 폭

크랙폭은 Fig 8의 上圖에서 D曲線과 같이 部位에 따라 다르나 最大幅이 $B = 2 \text{ mm}$ 로 되어 있다.

이것은 $\frac{1}{20}mm$ 까지 測定할 수 있는 Portable Brinell microscope 로 測定한 것이다.

3-1-2 垂直方向의 크랙 (Vertical Crack)

1. 크랙의 길이

普信閣鐘에는 前述한 橫크랙 以外에 垂直方向에 또한 큰 크랙이 있다. 이 垂直크랙의 位置는 鐘의 南側(S)에서 東側(E) 方向으로 260mm 그리고 Fig 10에서 알 수 있는 바와 같이 鐘口徑部에서 높이 약 20mm의 部位 H_1 이 크랙 尖端이다 (H_1 點은 크랙 分布를 探知하는데 Fig 9의 Penetrant liquid test 方法을 使用하여 Colour Coating 으로서 確認한 것이고 普通 肉眼으로는 잘 보이지 않는다) 여기서 부터 크랙이 垂直方向에 지그재그 方向을 바꾸면서 形成된 크랙은 中央部 H_2 까지 到達하고, 여기서 分岐되어 南(S)에서 東南南으로 方向을 바꾼 主軸을 이룬 크랙은 H_2 에서 H_3 로 延長되었다.

한편 H_2 에서 分岐되어 上向한 크랙은 鐘内部의 鑄造 결함이 있는 上部로 延長되어 H_4 까지 뻗었다.

垂直方向의 크랙길이를 Fig 10에서 測定한 結果를 보면

- (가) 크랙길이 $H_1H_2H_3 = 13.4 \times 100 = 1340 mm$
- (나) 크랙길이 $H_1H_2H_4 = 21.8 \times 100 = 2180 mm$

垂直 크랙의 全体길이는 (가)와 (나)를 합한것이 되나, 實際로 크랙이 下端 크랙 尖端에서 鐘上部에 뻗힌 直線거리 H_c 의 값은

$$H_c = 1990 mm$$

이다. 그러나 이것은 $H_1H_2H_4$ 크랙길이 2180mm에 對한 垂直直線 높이 이다. 이와 같은 點으로 미루어 보아 垂直크랙의 鐘身高 $H_o = 2880 mm$ 에 對한 比率(龍頭를 除外한 높이) H_o 에 對해

$$\frac{h}{H_o} = \frac{1990}{2880} \div 0.6909 \div 0.7$$

로 鐘高의 약 70%까지 크랙이 뻗었다. 그리고 垂直方向의 크랙 全長 h_e 은 鐘體高 H_o 에 對한 比는

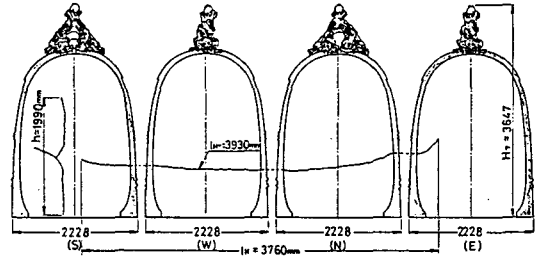


Fig. 10(A) Propagated crack length of Boshinkak old bell (S:South,W:West,N:North,E:East)

$$\frac{H_e}{h_o} = 0.7569$$

로서 약 75%에 달하고 있다.

2. 垂直크랙의 깊이와 幅

(1) 垂直크랙의 깊이

Fig 11의 (a)와 같이 口徑部에서 부터 垂直크랙의 깊이는 약 1000mm 높이인 H_2 部位에서 最大 깊이인 A 曲線은 40mm, 그리고 B 曲線에서는 口徑에서 900mm 높이에서 42mm 깊이를 보이고 있다. 그리고 一般的으로 口徑에서의 높이 900mm 以下에서 크랙 깊이인 減少되고 있다. 또한 높이 1000mm 以下에서도 크랙 깊이인 減少되고 있었다. 또한 H_2 에서 H_4 에 가는 途中에는 鑄造 흠집이 있고 크랙은 실금 같이 보였다.

한편 手動으로 피아노선 0.018mm로 크랙을 測定한 C 曲線은 最大 크랙 깊이인 8mm 이고, 口徑에서 約 800mm 높이에서 나타났다. 위의 垂直크랙의 깊이는 前述한 橫方向의 크랙 깊이 보다는 어느것이나 最大値가 작았다.

(2) 垂直 크랙 幅

크랙의 幅은 Fig.11의 D 曲線에서 보는 바와 같이 口徑에서 900mm 附近에서 最大値가 1.2mm를 表示하고 上部의 H_2-H_4 에서는 실금이 생겨 있었다.

垂直크랙의 幅은 最大値와 橫크랙의 幅의 最大値는 거의 같은 값을 보였다.

3-2 振動과 應力

普信閣鐘의 各部位에 對한 振動과 應力을 測定

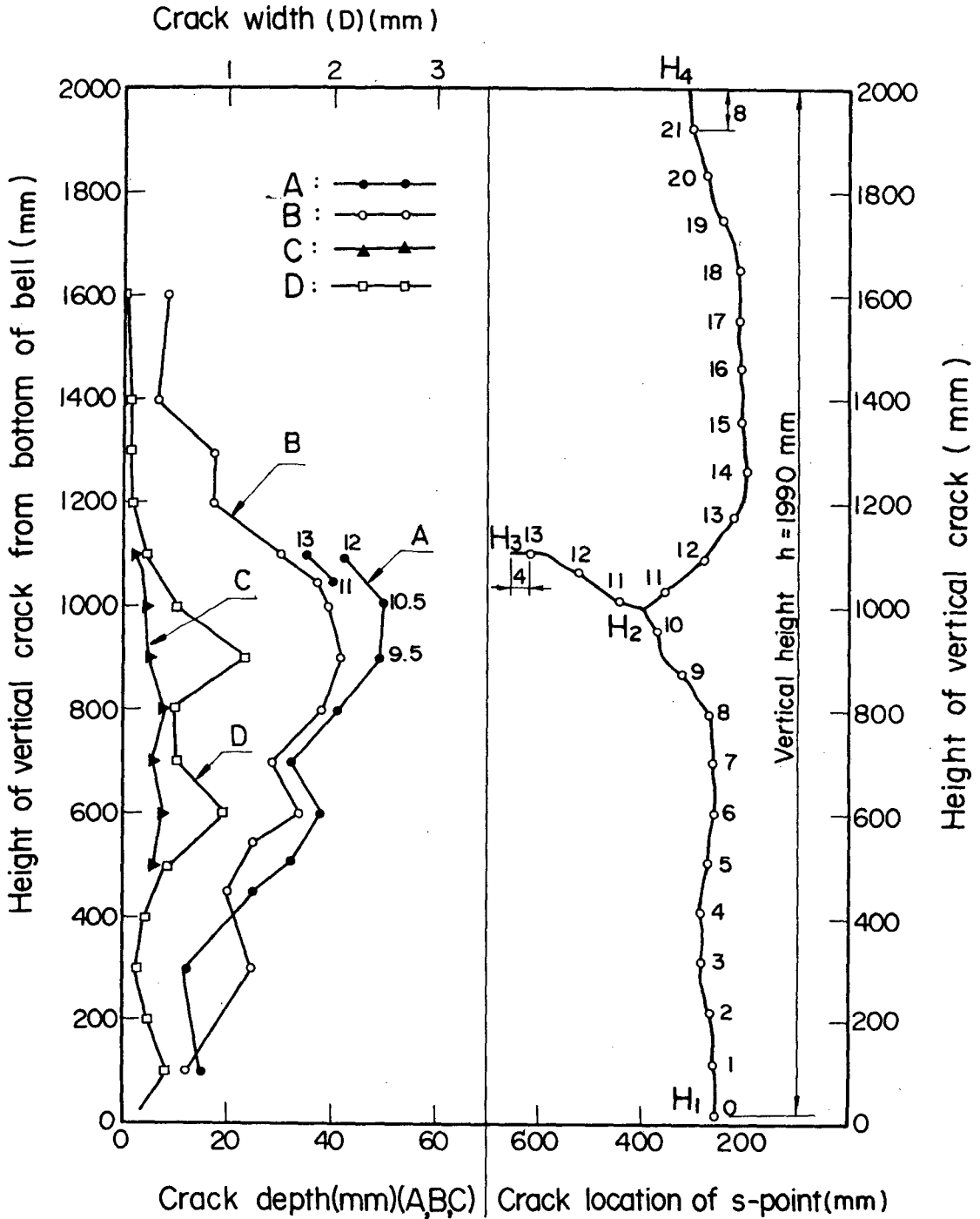


Fig. 10(B) Relation between vertical crack depth(or width) and crack length of bell inside :

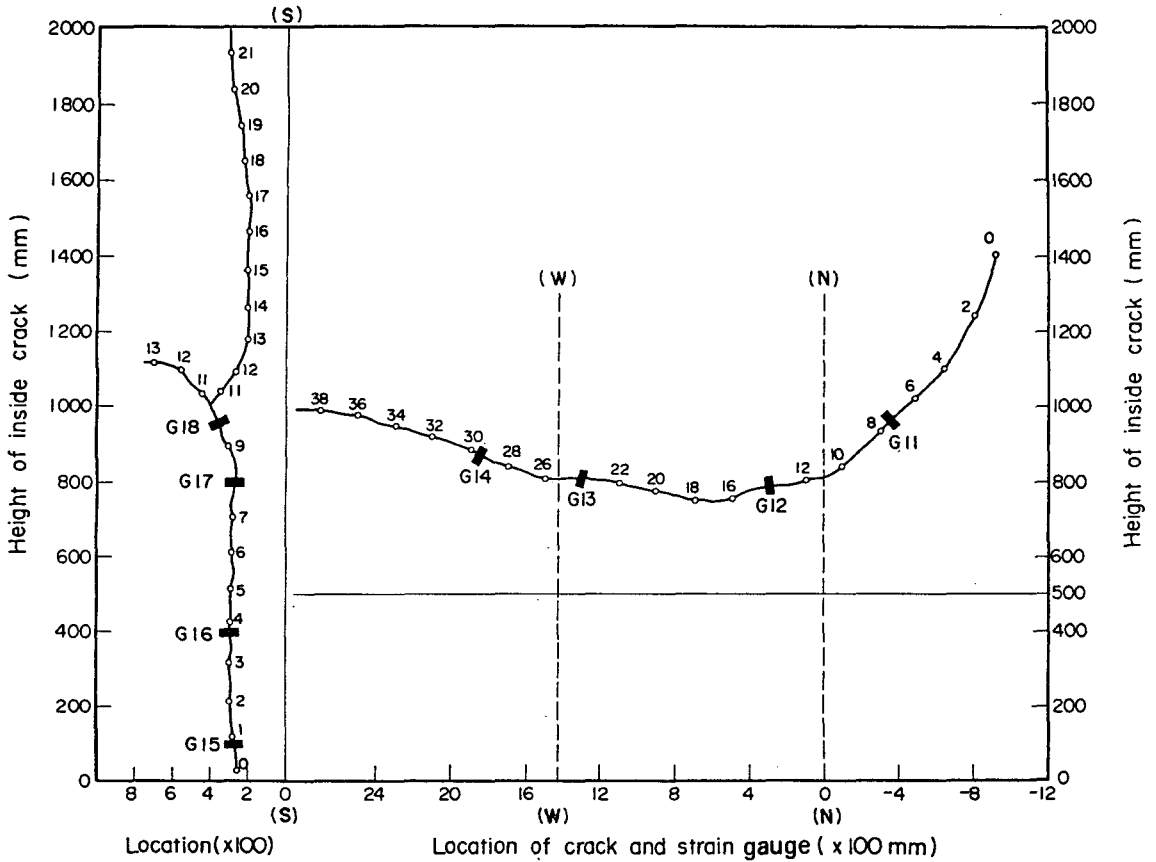


Fig. 11 Layout of inside strain gauge position.

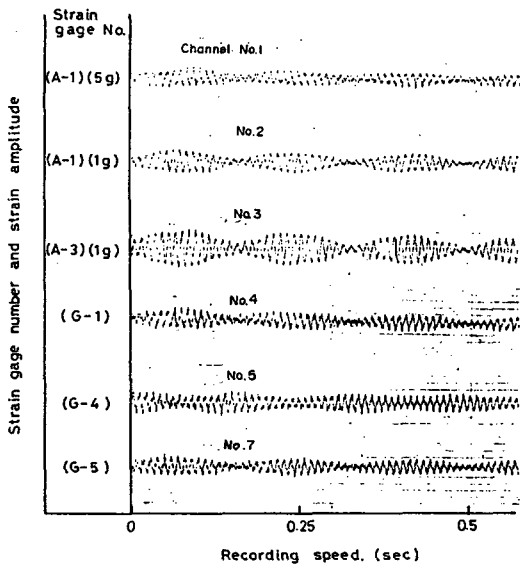


Fig. 12 Strain amplified curves of Boshinkak-Bell (chart speed 20Cm/sec)

하기 위하여 Strain gauge를附着하였다.

鐘外側に 붙친 Strain gauge는 前述한 Fig 4의 G-1, G-2, ... G-5 등과 鐘内部에 Fig 11과 같이 Strain gauge를附着시켰다. gauge No. 11~No. 14까지 4개는 横方向 크랙線上에, 그리고 gauge No. 15~18까지 4개는 垂直 크랙線上에附着하였다. 應力測定에는 日本 Kyowa Co.의 6-channel strain gauge amplifier와 bridge head, 그리고 6-channel의 Rapticorder 型의 recording oscillograph를使用하였다. 이와 더불어 鐘의 音響을 分析하기 위하여 data corder를使用하여 鐘聲의 錄音도 하였다.

Fig 12와 Fig 13은 普信閣鐘의 表面 및 内部 3-2-1 普信閣鐘의 應力分布

Fig 17은 普信閣鐘의 應力測定에서 얻은 應力 振幅曲線의 例이다.

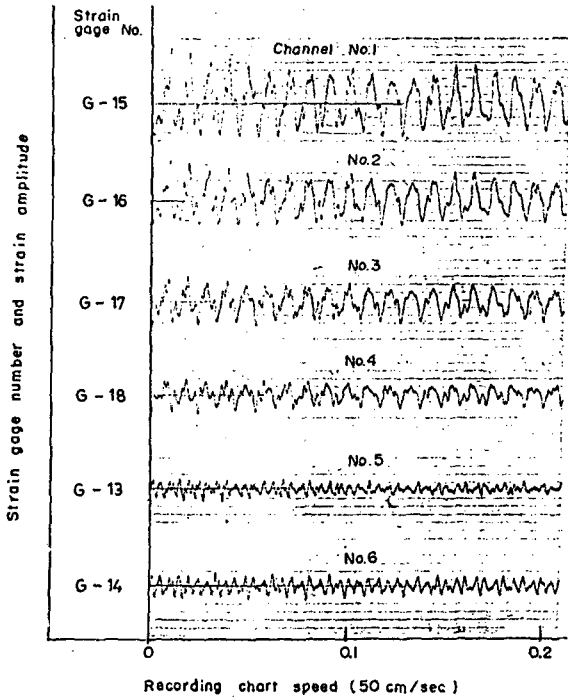


Fig. 13 Strain amplitude curve for inside of Boshinkak Bell

이들 應力振幅들은 打鐘할때 衝擊強度에 따라 다르게 되므로 이것을 同一한 打擊을 주었을때 各部位에 미치는 應力을 比較하기 위하여 Fig 13, Fig 14 및 Fig 17 등의 應力振幅曲線에서 얻은 data를 使用하여 相互間의 應力振幅比를 解析하므로써 同一한 打擊位置에서 同一打擊力을 준 때의 各部位의 應力크기로 調整할 수 있다.

이와 같이 한 것을 Fig 11에 表示하였다.

Fig 11에서 알 수 있는 바와 같이 鐘의 外側에 붙친 Strain gauge No. 1 - No. 5 까지에서 打擊位置는 A-1 下部와 G-1 사이에서 G-1에 가까운 쪽을 打擊하였다. (各 gauge의 配置는 前述한 Fig 12를 참조하기 바란다) 衝擊強度는 G-1과 이와 180° 位置의 G-5가 크고, 나머지 값은 이보다 작은 값이다.

그리고 内部의 橫方向크랙에 붙친 Strain gauge G-11~G-14 및 垂直方向 크랙에 붙친 St-

rain gauge G-15 ~ G-18까지는 어느것이나 크랙上的 應力分布가 크고 同一한 크랙상에 붙친 S-strain gauge에서는 크랙先端에 가까운 G-11 및 G-15 등이 높은 Stress level을 나타내고 있다. 이것은 크랙先端附近은 一般的으로 應力集中係數가 크기 때문에 크랙先端에 近接할수록 應力이 크다.

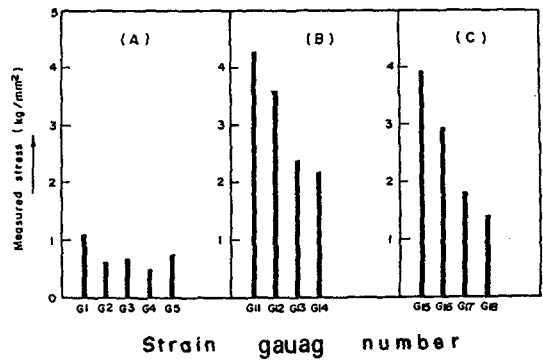


Fig. 14 Comparison of stress level for out-side and inside location

또한 Fig 11의 크랙先端部는 外部에서 힘이 作用할 경우 Stress level이 높아지기 때문에 外部의 힘을 받으면 크랙이 擴大되면서 成長하고 크랙의 傳播가 계속된다. 이와 같은 것을 立證하기 위하여, Strain gauge를 附着하고 強하게 打鐘하였을때 gauge No. G-11과 G-15가 破壞되었는데도 不拘하고 他部分은 Stress level만 增加하고 gauge의 破損이 없었기 때문에 普信閣鐘을 세게 打擊하면 크랙이 더 擴大된다는 것을 알 수 있다.

3-2-2 普信閣鐘의 振動

Fig 13는 普信閣鐘의 打鐘에 따른 振動曲線을 表示한다. 이때 chart speed는 1秒에 20 cm로 測定하였다.

여기서 1秒間의 固有振動數는 102 cycle/sec이다. 이 값은 사람의 귀에서 大端히 좋은 周波數라고 볼 수 있다.

우리나라 鐘中에서 上院寺鐘이 102 cycle/sec,

에밀레鐘⁽⁴⁾이 65 cycle/sec 인데 比하면 普信閣鐘은 上院寺鐘과 同一한 周波數를 갖고 있다. 한편 韓國鐘의 特性인 울림 (또는 餘韻)은 西洋鐘에서는 찾아 볼 수 없는 것이다.

上院寺鐘에서는 共鳴點이 울림 $N_r=2.77$ 회/sec 이고, 에밀레鐘에서는 0.35 회/sec 이다. 그러나 普信閣鐘에서는 울림이 極히 짧고 共鳴點이 울림數 $N_r=6.1$ 회/sec 이다.

普信閣鐘의 振動曲線의 形狀에 雜音이 생긴 것과 같은 變形된 形狀이 單位振動의 Sine 曲線의 peak 點 附近 또는 中間部에 나타나고 있다. 그러나 奉德寺鐘 (에밀레鐘)의 振動曲線은 圓滑하고 매끈한 Sine 曲線을 나타내고 있어 對照的 이다.

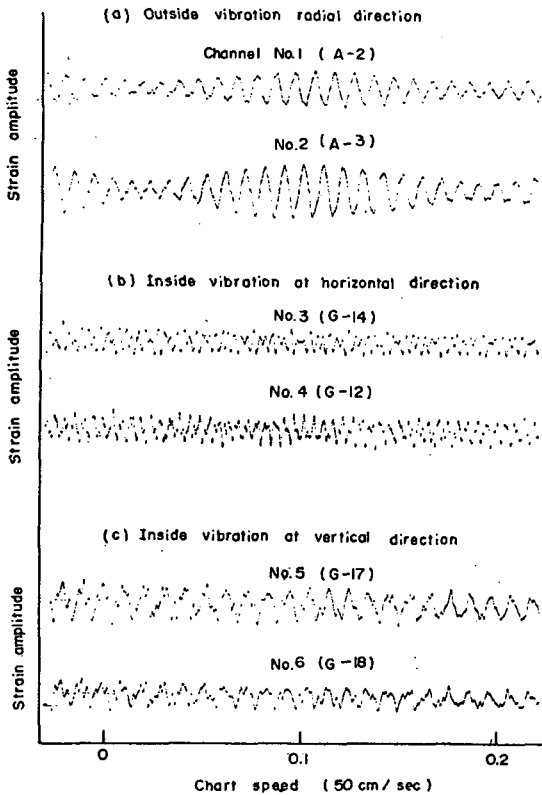


Fig. 15 Strain amplitude and chart speed (스트레인 振幅과 記錄速度)

普信閣鐘의 이와 같은 變則된 Sine 曲線形態는 鐘의 크랙部의 共振에 影響되는 것으로 解析된다. 이것은 内部 크랙部에 垂直으로 Strain gauge를 附着하고 振動曲線을 그려내면 Fig 15와 같이 된다.

Fig 15의 (a)는 鐘表面에 垂直으로 붙친 加速度計 (A-2, A-3), (b)는 鐘内部에 있는 水平 橫크랙에 붙친 Strain gauge (G-12, G-14), (c)는 垂直크랙에 붙친 Strain gauge (G-17, G-18)에서 Chart speed 50 cm/sec로 記錄한 振動曲線을 表示한다. 이것으로 보아 (a)는 正常的인 鐘 外側部 振動이다. (b)와 (c)는 鐘内部 크랙으로 因하여 曲線의 形狀이 不規則으로 되며 曲線에 異常이 보인다. 이것이 크랙이 있는 鐘의 特性이라고 본다. 이것을 究明하기 위하여 小形鐘을 利用한 試驗을 하였다.

鐘에 龜裂이 있고, 없는데 따라 鐘의 振動曲線에 미치는 影響을 檢討하기 위하여 口徑 300mm 重量 20貫의 鐘을 使用하여 試驗을 試圖하였다. 먼저 鐘에 龜裂이 없는 狀態에서 打鐘하여 振動曲線을 記錄하고 그後 口徑部에 鐘軸方向으로 길이 150mm의 龜裂을 톱으로 人工的으로 만들고 龜裂된 鐘의 振動試驗을 하였다.

Fig 16은 鐘에 龜裂이 없는 때와 龜裂이 있는 때의 振動曲線을 比較한 것이다. 이 結果로 보아 龜裂이 있을 때에는 鐘振動에 따른 Sine

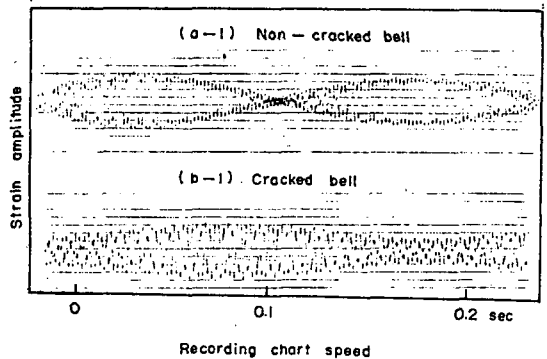


Fig. 16 Strain amplitude and chart speed for relationship between non-cracked and cracked bell

曲線의 形狀에 差異가 있고, 龜裂이 傳播되면 鐘 소리에 影響을 주고 또한 鐘은 完全히 破壞되어 버린다.

現在 普信閣鐘의 龜裂은 너무 크게 擴大 및 傳播되어 鐘機能을 完全히 喪失할때가 멀지 않다고 推定된다.

3-2-3 普信閣鐘의 重量

우리나라 梵鐘은 在來로 부터 鐘의 重量을 銘文에 表記하는 경우가 많다. 例를 들면 新羅時代의 上院寺鐘에는 鎬 三千三百鎰 (註: 330斤) 이라고 記入되어 있고 奉德寺의 鐘에는 銅一十二萬斤 (120,000斤) 이라고 表示되어 있다.

또한 朝鮮朝에서도 甲寺銅鐘에는 銘文中에 八千斤 (8,000斤) 으로 되어 있다. 그러나 普信閣에는 鑄成할때 重量에 對한 記錄이 없다. 그러므로 1979年 鍾閣重建과 더불어 鍾移懸에 따른 費

用算出 (例를 들면 ton當 몇 萬인) 에 實重量이 必要하였고 또한 從來부터 重量未知의 巨鐘인 普信閣鐘의 重量에 重量推定量이 驅驅하였으므로 實重量測定이 要求되었다. (단 여기서 添記코져 하는 것은 從來鐘에 記入된 重量은 實重量이 아니고 溶解에 必要한 靑銅의 重量으로 思料된다.)

1. Strain gauge를 利用한 重量實測

前述한 2-2-3에서 說明한바 있는 Strain 測定裝置 및 load cell로 補正한 hook 을 普信閣鐘의 引揚機에 裝置하여, zero-balancing 한 後에 回轉式 윈치 (Winch) 를 利用하여 Fig 17 과 같이 鐘을 引揚하면서 Photo 12와 같이 스트레인을 測定한 後, 이것과 前述의 荷重補正曲線을 使用하여 A,B,C의 測定値를 換算하면 $W_A = 19.88 \text{ ton}$, $W_B = 20.0 \text{ ton}$, $W_C = 19.5 \text{ ton}$ 으로 實測重量의 平均値를 보면 19.66 ton 으로 되었다.

2. computer 를 利用한 重量計算

前述한 實測方法과는 別途로 鐘의 體積을 計算하고 比重을 곱하면 重量을 計算할 수 있으므로 여기서 이 方法을 採用하였다.

鐘體를 n等分하고, 그 體積을 算出할 경우 全體의 鐘身體積은 다음 式으로 表示할 수 있다.

$$V = \sum_{i=1}^{i=n} V_i = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (3)$$

한편 鐘의 橫斷面을 分割한 一部는 圓錐形의 一部로 假定하고 標準機械設計⁽⁵⁾에 表示된 體積計算式

$$V_1 = \frac{\pi h}{3} (R^2 + Rr + r^2) - \frac{\pi h}{3} \times (R'^2 + R'\gamma' + \gamma'^2) \quad (4)$$

또는

$$V_1 = \frac{\pi h}{4} \left\{ a_0^2 + \frac{1}{3} b_0^2 \right\} - \left(a_i^2 + \frac{1}{3} b_i^2 \right) \quad (5)$$

여기서 $a = R + r$, $b = R - r$, 그리고 O字의

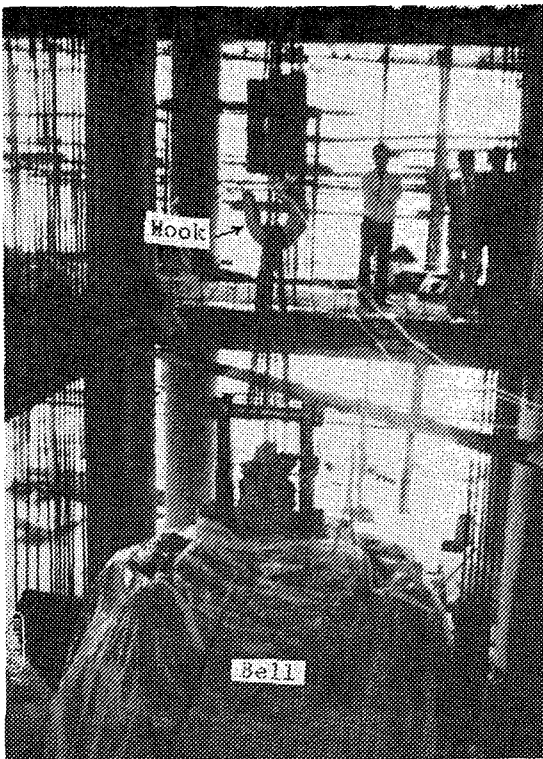


Fig. 17 Weight measuring by strain gauge mounted hook

添字는 外徑, *i* 字의 添字는 內徑을 各各 表示한다.

그리고 한편 龍頭의 重量을 340 kg로, 그리고 比重은 8.711 로 推定하였다.

여기서 比重은 銅과 朱錫의 密度를 各各 8.96 및 7.3 이라고 할때 그 配合比率을 銅 85%, 朱錫 15%로 假定할때 合金의 密度 ρ 의 값은 다음式으로 算出하였다.

$$\rho = \rho_1 \times 85\% \text{ Cu} + \rho_2 \times 15\% \text{ Sn}$$

$$\rho = 8.96 \times 0.85 + 7.3 \times 0.15 = 8.711 \quad (6)$$

Computer에서 計算하면 Table 4와 같이 全体重量은 19.6 ton으로 算出된다.

위에서 電氣式 스트레인 게이지를 利用한 實測한 19.66 ton과 Computer로 算出한 全体重量의 差異는 約 0.06 ton = 60 kg이다.

이것으로 보아 大略 一致된 값을 보인다고 생각할 수 있다.

Table 2 普信閣 重量計算 (Computer data)

```

FACON BOS/VS FORTRAN 5 -770127- V01-L14 79.10.10
OPTIONS IN EFFECT (FORTS1)
OBJECT,HOSTACK,SOURCE,NOHAP,NOISN,FCRCLC,NOAUTODEL,NOSEQUENCE
OPT(0),FUTRAC(256),FLAG(4),ORBUG(510)
0001 REAL H,MY,MYT,MX2,MX2T,KG2
0002 DIMENSION H(15),ROUT(15),RINH(15),K(15)
0003 FACT(A,B) = A**2 + A*B + B**2
0004 READ(5,100) M,RO,C,M,B,H5
0005 N1=N+1
0006 READ(5,110) (H(I),ROUT(I),RINH(I)),I=1,N1)
0007 READ(5,120) AA,DD,H1,H2,H3,H4,H5
0008 WRITE(6,300)
0009 PI=3.14159
0010 HM=HM*1.E06
0011 VT= 0.0
0012 MYT= 0.0
0013 MX2T= 0.0
0014 DO 10 I=1,N
0015 DH=H(I+1)-H(I)
0016 VO=PI*DH*FACT(ROUT(I),ROUT(I+1))/3.
0017 VI=PI*DH*FACT(RINH(I),RINH(I+1))/3.
0018 V=VO-VI
0019 VT=VT+V
0020 RML=(ROUT(I)+RINH(I))/2.
0021 RMS=(ROUT(I+1)+RINH(I+1))/2.
0022 IF(RML.GE.RMS) GO TO 20
0023 R=RML
0024 RML=RMS
0025 RMS=R
0026 GO 20
0027 G=(DH/4.)* (RML**2+2.*RML*RMS+3.*RMS**2)/FACT(RML,RMS)
0028 Y=G+H(I)
0029 M=V*RO
0030 MY=H*V
0031 MYT=MYT+MY
0032 X=C-Y
0033 MX2=M*X**2
0034
MX2

```

4. 綜 合

普信閣鐘의 Crack과 關聯하여 研究한 結果를 綜合하면 다음과 같다.

1. 普信閣鐘에는 現在 致命的인 2個의 内部 크랙이 發生되어 있다. 이 크랙은 前述한바 있으나 다음과 같다.

(1) 橫크랙의 경우

크랙의 全長이 3930 mm에 達하여 있고, 크랙이 存在하는 部位의 內側圓周가 約 65%를 占有하고 있다. 그리고 크랙의 깊이는 最高 約 70 mm이다. 이 깊이는 그 部分의 鐘두께의 約 1/2에 이르고 있다.

(2) 垂直크랙의 경우

크랙의 全長이 2180mm에까지 達하고 鐘身高的 約 70%에 해당한다. 또한 最高깊이는 約 42mm에 達하며, 그 部位 두께의 約 $\frac{1}{3}$ 에 해당하고 있다. 이들 두개 크랙 중에서 하나만 있어도, 人体에 比喩한다면 不治의 癌으로 醫師가 『살 希望이 없습니다』 할 程度까지 進行되어 있다고 볼수 있는데 雪上加霜으로 크나큰 致命的인 크랙이 2個所나 發生되어 있다.

그러므로 解放後 三·一節, 八·一五光復節 및 除夜の 鐘으로서 打鐘하던 普信閣鐘은, 内部 크랙으로 인하여, 1980년부터 除夜の 鐘으로서만 軟打하고, 三·一節과 八·一五光復節은 打鐘을 中止하였다. 그後 普信閣 새 鐘이 市民의 誠金으로 1985年 7月 14日에 鑄造에 成功하여, 1985年 8月 15日에 打鐘式을 맞췄다.

2. 鐘의 應力과 振動

(1) 鐘의 表面과 内部 크랙部에 Strain gauge를 附着하여 測定한 stress level은 内部 크랙部에서는 鐘表面의 4~5倍의 높은 값을 보였다. 특히 鐘内部 橫크랙에 붙친 gauge No. G-15와 같이 크랙 先端附近에 생겼고, 縱크랙은 gauge No. G-11과 같은 下部端部에서 極大值가 發生하였다. 그러므로 普信閣 破鐘을 打鐘하면 크랙이 더욱 進展된다는 것을 立證할 수 있었다.

(2) 普信閣鐘의 固有振動數는 102 Hz/sec 이고 餘韻의 울림수는 6.1 Hz/sec 이다. 에밀레鐘의 固有振動數 65 Hz/sec 및 울림수 0.35 Hz/sec 이며, 普信閣鐘과 에밀레鐘은 口徑이 222 cm로 同一하며, 두께는 普信閣鐘이 32 cm, 에밀레鐘이 20.3 cm로, 普信閣鐘이 固有振動數가 높다. 한편 普信閣鐘은 餘韻 및 맥놀이가 에밀레鐘 보다 크다. (註: 1985.8.15에 打鐘式을 한 普信閣 새 종은 固有振動數 62 Hz/sec 이고 울림수 0.26 Hz/sec 이고, 소리가 맑고 餘韻은 에밀레鐘보다 길다.

(3) 加速度計와 wire strain gauge로 測定된 鐘의 外部, 橫크랙部 및 垂直크랙部의 振動曲線 (Fig 15)을 分析하여 보면 크랙部에서 振動曲線에 noise가 있는 不規則인 異狀이 나타나 破鐘의 特性을 分析하였다. 이것을 究明하기 위하여 口徑 200 mm의 橫型鐘을 만들어 crack 없는것과 있는것을 各各 試驗하여 크랙이 없는 鐘에서는 正常的인 sine 曲線이 생기나, 人工크랙이 있는 鐘에서는 sine 曲線形狀에 異狀이 있는 noise가 發生함을 알 수 있었다.

3. 普信閣鐘을 境内에 두고 重量을 測定하는 일은 어려운 일이다. 여기서는 2個方法을 使用하였다.

(1) Strain gauge를 附着한 hook으로 測定한 重量은 19.66 Ton 이고,

(2) 作成圖面을 사용하여 computer로 計算한 重量은 19.6 Ton 이었다.

위의 (1)과 (2)의 差異는 0.06 Ton이며 大略一致하므로 重量을 19.6 Ton으로 하였다.

(註: 普信閣鐘 (寶物 第2號)는 鑄造되어 517年이 되는 1985.8.2 鐘路普信閣을 떠나, 國立中央博物館에 옮겨져 保存케 되었다.)

參 考 文 獻

1. 李重華: 「鐘樓와 普信閣鐘에 대하여」 檀震學報(2), 第6卷(1936) p.108-131.
2. 廉永夏: 普信閣鐘 保存對策에 關한 學術研究, 서울大·工大, 生産技術研究所, (1986.10)p. 1~86.
3. 廉永夏: 韓國鐘에 關한 研究 (第5報 普信閣鐘), 韓國梵鐘研究會誌「梵鐘」 No.4(1981) p.27~54.
4. 廉永夏: 韓國鐘에 關한 研究 (第7報 奉德寺鐘) 梵鐘, No.6(1983), p.1~34.
5. 小栗富士雄: 標準機械設計 便覽, 共立出版社 (1974), p.1~3.