

韓國梵鐘의 音管과 鳴洞

Acoustic Effects of the Sound Tube and Resonance Cavity in Korean Brahman Bells

*이병호 (Byung Ho Lee)

Abstract

The presence of the sound tube and resonance cavity is unique in Korea Brahman Bells which is no examples in other country bells in the world.

The sound tube erected in the crown is effective to emit the fundamental tone of the bell when the condition of resonant transmissibility is satisfied. The result of our analysis shows that the optimum length of the sound tube in the Bell Emile (Sungduk Great King's Bell) is 96cm but is not the present length, 77cm.

The resonance cavity erected underneath the lip of the Bell Emile is found to be for the resonance of standing waves in the space including both bell cavity and resonance cavity to the fundamental tone of the bell itself, in order that the strongest vibration can last long by least energy and lengthen the reverberation of the bell.

Some historical remarks are also made on the magic flute, MANPASIKJUK, which was in existence in Shilla that can lull all evil waves, such as plagues, storms, droughts, famines and even enemies. The sound tube erected in the crown of the bell was originated in this magic flute.

Finally, a strong proposal is advanced on the new national symbol of Korean traditional cultural assets. Indeed, it should be highly recommended that the Great King's Bell Emile would be the only real symbol of our national cultural assets by its own right of excellency and richness in every aspect of arts and sciences.

I. 緒 論

著者は 1981年 11月 6日 韓日共同音響學會의 主題講演에서 “韓國梵鐘의 音響學的解析”^①을 發表한바 있다. 거기서 鐘聲自體의 frequency spectrum을 分析하여, 各部分音의 基本音에 對한 周波數比를 求하고, 그로부터 和音度의 評點을 한 다음, 그들 部分音의 強度에 該當하는 音圧으로 무게를 부쳐 平均한 값으로 音質評點을 하

는 것이 妥當한 方法이라고 主張했다. 그리하여 聖德大王神鐘은 그音質이 100點滿點에 87點, 上院寺鐘聲은 72點, 鐘路普信閣鐘聲은 58點으로 評價되었다. 이들은 여러 音響學者들의 支持를 받은바있다.

그런데 韓國梵鐘에는, 西洋諸國의 鐘은 勿論, 東洋의 다른 諸國의 鐘에도 同類例가 없는 우리 의 固有한 音管과 鳴洞을 가지고 있으니 音管은

*정회원 · 한국과학기술원 교수

龍頭 가까이 뚫어져있고, 鳴洞은 鐘니 밑 땅바닥에 파여져있다. 本論文에서는 이를 音管이라 부르기로 한다. 이論文에서는 韓國梵鐘固有의 이 獨特한 音管과 鳴洞의 音響學的 效果를 밝혀보고자 한다. 前者는 그 옛날 實存했던 萬波息笛을 形相

한 音管을 鐘聲으로 울림으로써 國家와 百姓들의 厄運을 때으려했던 것이요, 後者는 鐘內部空間과 鳴洞空間을 合친 全體空間에 걸리는 standing wave의 固有振動과 鐘聲의 基本周波數를 一致시켜 共振케 하므로써, 가장 적은 Energy로 가

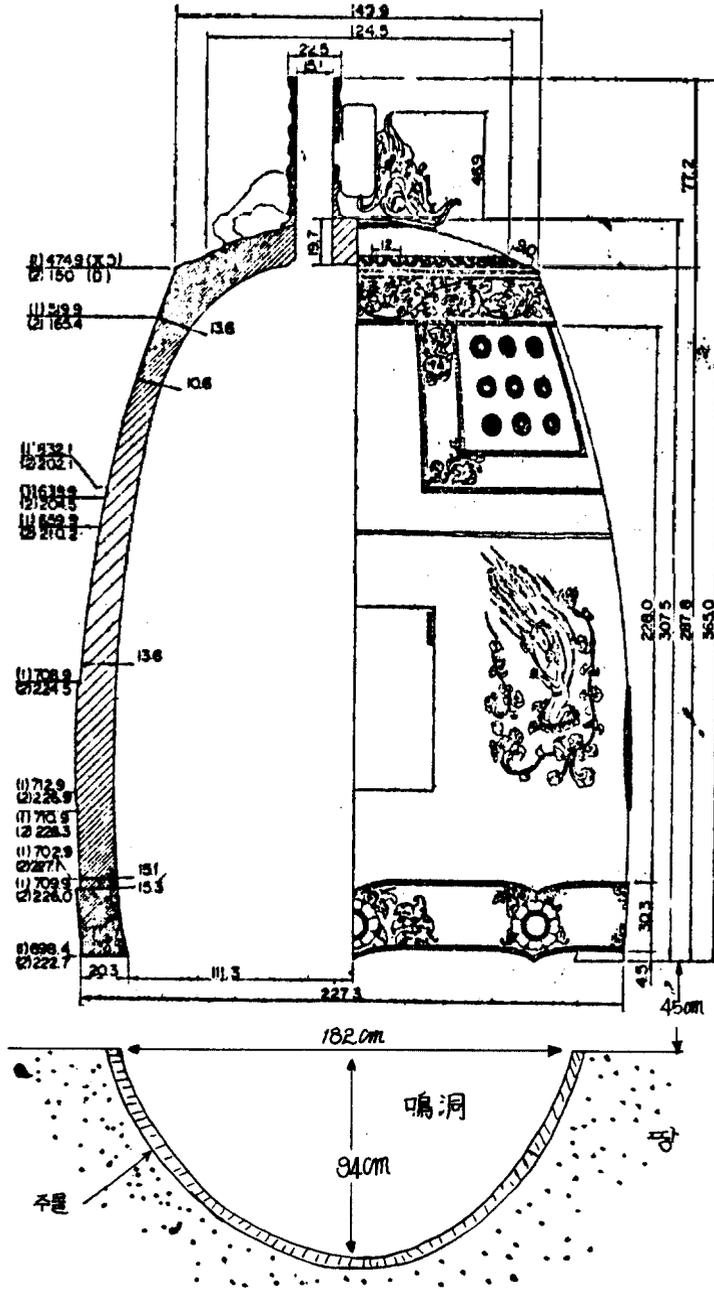


Fig. 聖德大王 神鐘의 正面 및 斷面圖

장 強하게 가장 오래 울리도록하여 莊嚴한 餘韻을 길게해보려는 實로 天才의인 發想이 아닐 수 없다.

여기서 잠시 龍頭附近에 全然 他의 類例가 없는 音管을 設置하여, 鐘을 칠때마다 그鐘소리가 그萬波息笛을 形相한 音管을 울려보려했던 奇想 天外의 發想과, 또 그發想을 實現해보려고 執拗한 精誠과 努力이, 어찌하여 全國家的으로 長長 34年間에 걸쳐 傾注케 되었는가, 이 驚異로운 史實에 對해서 생각해보기로 한다.

新羅는 第29代 武烈王에 이르러 AD660년에 羅唐聯合으로 百濟를 滅亡시키고, 다음 第30代 文武王에 이르러, 다시 AD668년에 羅唐聯合으로 高句麗를 征服하고, 唐軍을 이땅에서 追放하여 三國을 完全統一한것은 AD676年이다. 그리하여 그 다음 第31代 神文王은 父王의 三國統一의 偉業을 기리기 위하여, 오늘의 서울에 仁川에 該當하는 新羅의 서울 慶州 東海口에 文武王의 海中陵과 그 願利인 感恩寺, 그리고 至孝의 몸으로 맺길로 자주 海中陵을 參拜할수 없어 利見台를

萬波息笛와 新羅鐘

— 歷史的背景 —

代		A. D	
29	武烈王 (654-661)	660	羅唐聯合 滅百濟
30	文武王 (661-681)	668 676	羅唐聯合 滅高句麗 唐軍 追放 三國統一完遂
31	神文王 (681-692)	682	海中陵 感恩寺 利見台 三大土木工事完工 萬波息笛說話
32	孝昭王 (692-702)		
33	聖德王 (702-737)	725	◎上院寺鐘 鑄成 43年 萬波息笛音管
34	孝成王 (737-742)	737	◎聖德大王神鐘鑄成着手
35	景德王 (742-765)	745 754	◎无壽寺鐘(在日) 佛國寺·石窟庵 88年 ◎皇龍寺巨鐘(入重 49万斤) 今亡
36	惠恭王 (765-780)	771	◎聖德大王神鐘鑄成* 34年間 萬波息笛音管
	哀莊王	804	禪林寺鐘(今亡)
	興德王	833	青州蓮池寺鐘(今亡)
	文聖王	856	靈興寺鐘(今亡)
	孝恭王	904	松山村大寺鐘

*聖德大王神鐘：鑄鐘大博士大奈麻 朴從濫
次博士奈麻 朴資奈
奈麻 朴韓味、大舍 朴負岳

構築하여, 遙拜할 수 있도록 했다. 이 三大土木工事が 完成된 것은 AD682年이다. 그러면서 海中大王陵을 永久不犯之地로 만들기 위하여 陵設置에 對한 一切의 記錄을 남겨놓지 않고, 다만 神話와도 같은 萬波息笛의 說話를 남긴다. 즉 三國遺史卷二에 依하면, 海官이 神文大王에 이르기를 東海속에 작은 山이 있어 感恩寺를 向하여 머서오는데, 물결에 따라 왔다 갔다 한다고해서 大王이 크게 놀래 利見台로 幸次하여 그山을 바라보니, 山勢는 거북머리같이 생겼는데, 거기에

萬波息笛 …… 三國遺史卷二所載
 第三十一 神文大王 ……
 …… 王泛海入其山, 有龍奉黑玉帶來獻, 迎接其坐, 問曰; 此山與竹, 或判或合如何.
 龍曰; 此如一手拍之無聲, 二手拍則有聲, 此竹之爲物, 合之然後有聲, 聖王以譬 理天下之瑞也, 王取此竹, 作笛吹之, 天下和平, 二聖同心, 出此無價大寶, 今我獻之王驚善 ……………
 …… 駕還, 以其竹作笛, 藏於月城天尊庫.
 …… 吹此笛, 則兵退病愈, 旱雨晴, 風定波平, 號 萬波息笛, 稱爲國寶, 一王孝昭大王代 天授四年癸巳, 因失禮則注還之異, 更封號曰 萬萬波波息笛.

대나무가 하나있어 낮에는 돌로 되었다가 밤에는 하나로 되곤했다 한다. 그래서 大王은 바람 없는 고요한 날을 攄하여 뱃길로 그山에 들어가 보니, 龍이 있어 검은 玉帶를 바치면서 “大王은 將次소리로써 天下를 다스릴 瑞兆인데 이대를 겪어다가 피리를 만들어 불면 天下가 和平해질 것 이라고 大王에 이르니, 그대를 베어다가 피리를 만들어 부니, 果然 敵兵은 잠들고, 風浪도 잠들고, 染病도 사그라지는 奇蹟을 가져왔다한다.

그리하여 그 神笛을 萬波息笛이라 부르고, 天尊庫에 保管케 했다는 說話를 남긴다. 아주 浪漫的인 序曲을 海中陵說置의 記錄代身 남기는 新羅人들의 智慧를 엿볼수 있다.

이萬波息笛은 實存했던 新羅三寶中 하나였던 모양이고, 한때는 日本國에서 3萬兩을 보내면서 그 神笛을 달라고 했을때, 2萬兩을 보태서 5萬兩을 돌려보내면서 紛失해서 찾을수가 없노라고 拒絕했던 일도 있다한다.

이리하여 神鐘의 鑄鐘을 担當했던이는 그萬波息笛을 鑄에 부쳐 만들어서, 鐘을 칠때마다 울리게하여 國家의 百姓들의 모든 厄運을 때우려했던 깊은 信仰心이 그와같은 執拗한 精誠과 努力을 drive했을 것이 틀림없다고 생각된다.

그當時 鑄接에 對한 技術이 없었기 때문에 이萬波息笛의 音管을 鐘의 몸체하고 함께 鑄造해야 했기때문에, 音管의 鼓通寸數를 찾다보니, 여러차례의 鑄造를 거듭하지 않을수 없었을 것이라고 思料된다. 그리하여 第34代 孝成王이 着手하여 第35代 景德王을 거쳐 第36代 憲恭王에 이르는 前後34年間의 力作으로 完成을 본것이 이 聖德大王神鐘이며, 特히 銘文末尾에

…大歷六年歲次 辛亥十二月十四日
 鑄鐘 大博士 大奈麻 朴范謩
 次博士 奈麻 朴資奈
 奈麻 朴韓味
 大舍 朴負岳

으로 鑄鐘技術者의 이름과 稱號가 적혀 있고 特히 大博士, 次博士의 稱號는 國家의으로 얼마나 이 神鐘完成에 力點을 두어 그 成就의 業績을 強調했던 것인가를 미히 斟酌할수 있다.

참으로 이神鐘은 新羅의 全盛期인 景德王(佛國寺와 石窟庵도 모두 이대에 創建된것)을 前後하여 三代에 걸친 新羅人의 힘과 意志와 智慧와 精誠의 結晶体이며, 3千年 우리民族의 傳統文化의 精華인 것이다. 美術의으로 文學의(在銘)으로 工學的(鑄造技術)으로나, 科學的(音響)으

로나, 精神的(護國精神 및 佛教文化)으로 이와같은 훌륭한 文化財를 가진 것에 대한 無限한 民族的 矜持를 갖는바이다.

다음에 우리梵鐘에서만 固有한 音管과 鳴洞의 音響學的 機能을 解析해 보기로 한다.

II. 萬波息笛의 音管

著者が 처음 聖德大王神鐘을 본것은 1949年 9月 5日, 旧 慶州博物館에서이다. 그때 博物館長의 案内로 秀麗한 神鐘의 이모저모를 엿볼수가 있었고, 또 많은 說明을 들을수가 있었다. 또 館長님 責任下에 即席에서 울려보기도 했는데, 뱃가죽의 엄청난 振動때문에 몹시 놀라기도 했다. 低周波의 強振動에 依한 音波가 옆에 서있던 나의 배에 反應한 것이다. 表面의 아름다운 線과 彫刻, 그리고 밑으로 기어 들어가 鐘의 内面을 살펴보다도 어찌하면 그다지도 매끈한 巨鐘의 皮膚에 놀라지 않을수 없었는데, 더욱 놀라게 한것은 龍頭가끼이여 평 뚫어진 구멍이 있다는 事實이다.

그리하여 館長에게 물어보니 東洋鐘은 대개 卍重해서, 높은 鐘樓에, 가벼운 西洋鐘처럼, 다라낼수 없어, 나직하게 달아 鐘을 치되, 그대신 簾소리를 멀리멀리 퍼지게 하기 위하여 音筒을 龍頭에 만들어 鐘内部에서 울리는 소리를 그 音筒으로 뽑아내려함이라고 했다. 그래서 사다리를 가져오게하여 約4.5m높이에 달려있는 神鐘의 龍頭를 살펴보니, 음을 뽑아내려면 Impedance가 작은 나팔形같은 exponential Horn에 가까와야 할터인데, 그音筒은 直圓筒이라는데 數十年間 著者は 疑問을 품지 않을 수 없다. 勿論裝飾을 위하여 그렇겠지지만 그 音筒의 外面에는 대나무 마냥 마디 마디가 있고, 그마디마디로 작은 龍과 같은 紋樣을 하고 있는 것과, 또 그 기리도 相當히 커서, 두서너가량이나 위로 배죽하게 나와 있고, 内径은 자그만치 半尺 가량되는 굵은 直圓筒이었다. 또 마디마디의 間隙은 所謂 西洋美

學에서 말하는 黃金分割같은 것도 없어 거이 等間隔으로 되어 있다.

昨年 1981年 韓國科學院 自体研究로서 이音管과 鳴洞을 解析하여 今年 1982年 1월에 研究報告書를 쓴 가운데, 著者は 이 神鐘을 쳐서 울리는 基本音(171HZ)을 内径 15cm의 音管으로 가장 效率的으로 뽑아내려면, 그기리가 96cm라야 所謂 共鳴傳達條件을 滿足시킨다는 것을 發見하였다. 그런데 以後 3個月뒤인 1982年 4월에 黃壽永博士가 한국일보에 그 音管은 아마도 新羅의 神器의 하나인 萬波息笛을 模倣해서 만든것이 아닌가 하는 記事를 썼을때, 著者は 即刻 옳은 見解인것을 알았다. 萬波息笛이란 대나무 파리가 아니고서는 그音管을 굵이 直圓筒으로 할리 萬無하다.

그렇다! 統一新羅의 護國精神이 그 萬波息笛을 神鐘의 龍頭에 걸드려, 聲聞의 一葉의 鐘소리로 그 萬波息笛을 울리게 하여, 國家와 百姓들의 厄運을 막으려 했던 國泰民安의 誓願의 發露였던 것이다. 이러한 까닭으로 그들은 그當時 熔接의 技術이 따로 없었으므로 上院寺鐘에 이어 入重 49萬斤 皇龍寺 巨鐘을 鑄성한 經驗에도 不拘하고, 이 神鐘에서만은 꼭 共鳴傳達條件을 具現하여 萬波息笛의 實을 견으려고 34年間이나 여러차례 神鐘의 몸체와 더불어 音管도 함께 鑄造를 거듭하여 찾았으리라 믿는다. 그러나, 그條件은 제대로 찾지 못하였는지, 오늘날의 남아있는 音管의 기리 77cm로서는 그萬波息笛은 울리지 않았을 것이며, 그 後에 神鐘에 본을따서 만든 모든 韓國의 梵鐘에 音管을 說置했으되 어떤것은 音管의 밑에 붙은 鑄物突起를 다듬지 않은 것도 있고, 솟채 맥허있는 것도 있어, 제대로 音管의 구실을 못한것도 많을 것들보면, 努力은 했으되 失敗했던 것은 아닌가도 싶다. 아뭏튼 神鐘만이라도 그共鳴傳達條件을 滿足시켜 神秘的인 奇蹟이 나타났으리라는 所 믿은 懇切하나, 거기에 對한 記錄이 傳해지지 않으니 안타깝기 그

지없다.

다음에 음관의 공명 전달 조건을 해석해서求解 보기로 한다.

음관으로 入射하는 音壓 $p(x, t)$ 와 音管 끝에서 反射하는 音壓 $p_r(x, t)$ 의 合이 音管内의 音壓 $p(x, t)$ 을 形成한다. 但 音管의 壁은 音響學的으로 Hard하다고 假定한다. 이는 實際와 잘 一致하는 假定이다.

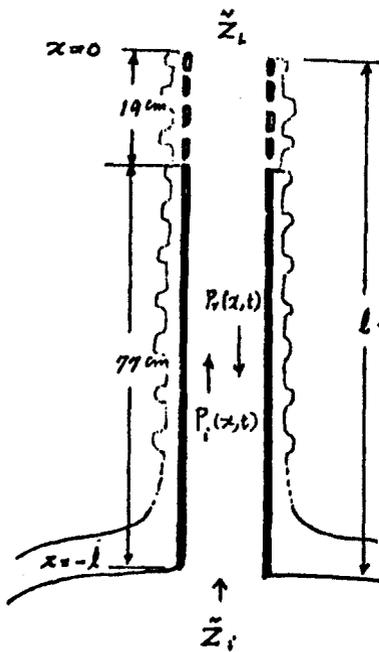


Fig. 2 萬波息笛의 音管

$$p(x, t) = Ae^{j\omega t - kx} + Be^{-j\omega t - kx}$$

따라서 體積速度는

$$u(x, t) = \frac{1}{Z_0} Ae^{j\omega t - kx} - \frac{1}{Z_0} Be^{-j\omega t - kx}$$

$$u(x, t) = \frac{1}{Z_0} \left\{ Ae^{j\omega t - kx} - Be^{-j\omega t - kx} \right\}$$

으로 表示된다.

그러므로 音管内의 Acoustic Impedance는

$$\frac{p(x, t)}{u(x, t)} = \tilde{Z}(x) = Z_0 \left(\frac{Ae^{-jkx} + Be^{-jkx}}{Ae^{-jkx} - Be^{-jkx}} \right), Z_0 = \frac{\rho_0 c_0}{s}$$

이다. 여기 s 는 音管의 内部 断面積이며, $\rho_0 c_0$ 는 空氣(大氣)의 specific impedance이다.

그런데 Acoustic Impedance를 Load Impedance $\tilde{Z}_L (= \tilde{Z}_{x=l})$ 와 Input Impedance $\tilde{Z}_i (= \tilde{Z}_{x=0})$ 로 表示해두는 것이 앞으로의 解析에 便利하다. 위의 式으로부터 곧

$$\tilde{Z}_L = Z_0 \left(\frac{A+B}{A-B} \right)$$

여기에 反射係數 $\tilde{r} = \frac{B}{A}$ 를 導入하면,

$$\tilde{Z}_L = Z_0 \left(\frac{1+\tilde{r}}{1-\tilde{r}} \right)$$

로 되며, Z_L 를 別途로 알 수 있다면 反射係數 \tilde{r} 를 다음과 같 쓸 수 있다.

$$\tilde{r} = (\tilde{Z}_L - Z_0) / (\tilde{Z}_L + Z_0)$$

이 反射係數를 利用하며, Acoustic Impedance $\tilde{Z}(x)$ 를 表示하면

$$\tilde{Z}(x) = Z_0 \left(\frac{e^{-jkx} + \tilde{r}e^{jkx}}{e^{-jkx} - \tilde{r}e^{jkx}} \right)$$

로 된다. 따라서 Input Impedance $\tilde{Z}_i = \tilde{Z}(x=0)$ 이므로

$$\tilde{Z}_i = Z_0 \left(\frac{e^{jkl} + \tilde{r}e^{-jkl}}{e^{jkl} - \tilde{r}e^{-jkl}} \right)$$

로 된다. 이 式에 $\tilde{r} = (\tilde{Z}_L - Z_0) / (\tilde{Z}_L + Z_0)$ 를 代 入하고, Euler 關係式을 利用하여 整理하면 Input Impedance는

$$\tilde{Z}_i = Z_0 \left(\frac{\tilde{Z}_L + j Z_0 \tan kl}{Z_0 + j \tilde{Z}_L \tan kl} \right)$$

로 된다.

지금 load Impedance \tilde{Z}_L 를 實數部와 虛數部로 나누어, $\tilde{Z}_L = \delta + i\sigma$ 로 表示하면, Input Impedance

\bar{Z}_1 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{Z}_1 = Z_0 \left[\frac{\delta Z_0 (1 + \tan^2 k\ell) + j \{ (\sigma + Z_0 \tan k\ell) (Z_0 - \sigma \tan k\ell) - \delta^2 \tan^2 k\ell \}}{(Z_0 - \sigma \tan k\ell)^2 + \delta^2 \tan^2 k\ell} \right]$$

우리 萬波息笛의 音管과 같이 끝에 flange 가 달려 있지 않은 open-to-space의 경우에는, 그 open end의 Load Impedance는

$$\bar{Z}_L = Z_0 \left(\frac{k^2 a^2}{4} + j 0.6ka \right)$$

로 주어진다. 이것이 널리 알려져 있다. 따라서

$$\delta = \frac{k^2 a^2}{4} Z_0, \quad \sigma = 0.6ka Z_0$$

로 주어진다. 여기 a는 音管의 內半徑이다 (a = 15/2 cm).

지금, 聖德大王神鐘의 경우에는, 앞서 論文 韓國音響學會誌 (Vol 1, pp 6-18)에서 밝힌바와 같이 그 基本音 (171Hz)에 대하여

$$ka = \frac{2\pi f}{c} a = \frac{2\pi(171)}{344} (0.075) = 0.234$$

이므로, $\frac{k^2 a^2}{4} \ll 0.6ka$

따라서 Load Impedance는

$$\bar{Z}_L \approx j 0.6ka Z_0$$

로 쓸 수 있으며, pure imaginary이다. 卽 Reactance만 있게되는 셈이다. 卽

$$\delta = 0, \quad \sigma = 0.6ka Z_0$$

故로 $\bar{Z}_1 \approx j Z_0 \left(\frac{0.6ka + \tan k\ell}{1 - 0.6ka \tan k\ell} \right)$.

管內의 共鳴傳達條件 (resonant transmissibility condition)은 이 Input Impedance \bar{Z}_1 의 Imaginary part가 零이되는 것이다. 卽

$$0.6ka + \tan k\ell = 0$$

이를 滿足하는 거리 ℓ 의 音管이라야 所期의 H의 을 達成할 수 있다. 여기서 ℓ 를 풀려면

$$-\tan k\ell = 0.6ka$$

or $\tan(\pi - k\ell) = \tan(0.6ka), \quad (\because 0.6ka \ll 1)$

$$\pi - k\ell = 0.6ka,$$

$$k(1 + 0.6a) = \pi$$

wave number k는 $2\pi/\lambda$ 이므로 音管의 共鳴傳達條件을 滿足하는 音管의 거리는

$$\ell_{\text{resonance}} = \frac{\pi}{k} - 0.6a$$

$$= \frac{c}{2f_{\text{resonance}}} - 0.6a$$

로 주어진다.

聖德大王神鐘의 경우에는 가장 오래까지 남아서 餘韻을 내는 基本波數 171Hz에 共鳴하여 가장 많은 소리가 그 音管을 빠져 나가려면

$$f_{\text{resonance}} = 171\text{Hz}, \quad a = 0.075\text{m}, \quad c = 344\text{m/sec}$$

를 代入하여

$$\ell = 0.96\text{m}$$

를 얻는다. 이것이 神鐘의 萬波息笛의 音管의 거리야 最大의 音量을 그 音管을 通하여 밖으로 울려 퍼지게 된다.

韓國科學院 音響學研究室에서는 작은 model-study를 通하여 上記 理論結果를 確認한바 있다. 즉 10cm直徑의 Al-cylinder 20cm길이를 잘라, 한 쪽은 막고 거기에 中心에서 若干 비껴서 內徑 1cm, 거리 8cm의 銅pipe의 音管을 꽂아놓고, 그 cylinder 內部에 작은 speaker를 그 Diaphragm이 縱軸과 平行하도록 設置하여, 周波數를 變化해가며 振動을 시키면, 約 2000Hz에서 그 音管을 通하여 빠이하고 共鳴通過가 일어나는 것을 알 수 있었다.

$$f_{\text{resonance}} = \frac{c}{2(1+0.6a)} = \frac{344}{2(0.08+0.6 \times 0.01 \times \frac{1}{2})} = 2005\text{Hz}$$

그리하여 그 音管을 들어막았을 때와 比해서 音管上端에 10cm 떨어진 곳에서 約 15dB가량 높은 sound level을 얻을수가 있었다. 이로서 우리의

音管의 共鳴傳達條件은 正確함을 確認한바 있다.

그러므로 聖德大王神鐘의 萬波息笛은 現寸數 內徑15cm, 길이 77cm로서는 울리지 않았고, 길이가 19cm가 더 길어야 했었다. 그러나 앞서에도 말한바대로 그 當時 이 19cm의 部品을 그 萬波息笛의 音管을 돋보이기 위하여 金管으로 아름답게 裝飾을 兼했었을 可能性을 排除할수 없는 일이다.

Ⅲ. 鳴 洞

巨대한 韓國梵鐘에는 鐘口 밑 땅바닥에 우묵히 파여진 共鳴洞을 設置한다. 허나, 큰 항아리나 독 같은 것을 물거나, 鑄物로 매끈하게 만든 것도 있다. 아마도 聖德大王神鐘을 完成한 그巨匠들의 손으로 神鐘의 餘韻을 길게하려는 共鳴洞의 設置가 11傳되어 오는 바람에 그가다로운 共鳴條件은 아랑곳 없이 模樣만 傳해져 내려왔는지도 모른다. 앞으로 이 共鳴洞을 두글자로 줄여서 「鳴洞」이라 부르기도 한다.

지금 新築 慶州博物館에 있는 聖德大王神鐘 밑에 검은 벽돌로 우묵하게 만들어 놓은것은 全然 音響學的 共鳴의 條件을 考慮한 것이 아니며, 다만 11傳에 따라 그 모양만 만들어 놓았을 따름이다.

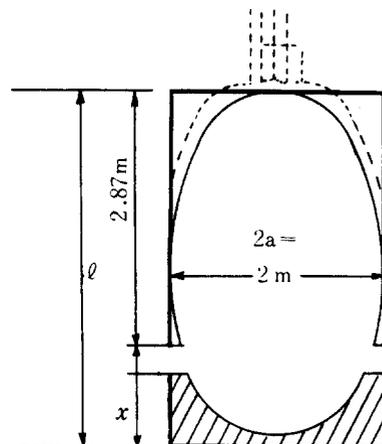
鳴洞의 구실을 제대로 하려면 그 神鐘의 基本音의 mode 및 周波數와 鐘內部 空間과 鳴洞으로 이루어진 全體空間(勿論 鐘口와 鳴洞사이의 떠 있는 空間까지 包含)에 걸리는 여러 standing wave中 그 mode 및 振動數가 matching하여 共鳴이 精確히 이루어져야 한다. 이 條件下에서만 가장 적은 Energy로 가장 強하게 가장 오래 울려서 餘韻을 길게길게하여 極樂往生의 幻想을 불러 일으킬 수 있을 것이다. 이것이 梵鐘의 生命이기도 하다.

著者가 생각하기에 聖德大王神鐘을 鑄成한 그巨匠들은 반드시 이 鳴洞의 空間處理法을 實驗的으로 제대로 찾아냈을 것이라고 믿어진다. 聖

德大王神鐘은 本是 AD771년에 鑄成되어 奉德寺에 있었는데 머지않아 大水害을 마지하여, 奉德寺全體가 流失되는 바람에(尙今 正確한 位置조차 모르고 있다) 入重12万斤이나 되는 壯重한 神鐘만이 떠나려 가지 않고 土砂에 비스듬히 누워서 650年間을 지나다가 李朝世祖五年(1460年)에 靈廟寺로 옮겨졌으나 다시 大火災를 만나 鐘閣이 燒失되어 中宗初年(1506年)에 慶州 城門鐘으로 約 410年間을 내려오다가 1915年 8월에 慶州古蹟保存委員會에 의해서 舊慶州博物館으로 옮겨졌다가, 다시 1973년에 現慶州博物館으로 移建保存케 되었다. 따라서 神鐘몸체에 붙어 있는 音管은 神鐘과 더불어 流流轉轉하는 가운데에서도 따라다녔으나, 神鐘 밑의 땅바닥에 따로 設置했던 鳴洞은 떨어져나가 찾을 길이 없다. 아마도 그 鳴洞은 鑄物(神鐘과 같은 材質)로 되어 있었으리라 믿어진다. 왜냐하면 新羅 哀莊王(804 - 833) 때 만든 雪嶽山 禪林寺鐘(6.25事變때 兵火로 鐘閣이 燒失되면서 그 熱로 주저앉아 지금 國立博物館 地下室에 保管되어 있음)의 鳴洞이 鑄物로 되어 있다 하니까, 著者의 推測이 옳다고 믿는다.

다음에 鳴洞의 最適共鳴條件을 導出하러 한다.

그림은 鐘口의 內部空間과 鐘口 밑의 땅바닥에 파여있는 鳴洞, 그리고 地平面과 鐘口사이에서 떠 있는 空間(이것은 窓이 있는 空間으로 생각



해도 無妨)으로 이루어진 全体空洞에 걸리는 standing wave를 解析함에 있어서, 이와 等價圓柱型空洞으로 바꾸어서 생각하기로 한다. 왜냐하면 앞으로 이 空洞에서 波動方程式을 풀어야하는데, 原空間의 模樣으로는 解析적으로 풀기 어렵기 때문이다. 따라서 앞으로 取扱하려는 것은 直徑2a, 높이 l인 等價圓柱空洞內에서 打鐘時에 걸리는 standing wave의 固有振動數를 求하고자 한다. 그 中固有振動數는 空洞의 寸數에 依存하는데, 그 固有振動數는 可及的 작은것과 鐘소리自體의 基本音의 振動數 171Hz와 一致하도록 鳴洞의 길이 x(鳴洞의 길이+창의 길이)를 求하는 것으로 鳴洞의 最適寸數의 決定은 要約된다.

이런 等價圓柱筒內의 波動方程式의 解는

$$p = \frac{\cos}{\sin}(m\phi) \cos\left(\frac{w_z z}{c}\right) J_m e^{-2\pi\nu t}$$

로 주어진다. 函數의 原點은 맨밑바닥 中央에 잡았다. p는 音圧이며, 이식은 音壓의 特性函數이다. 이로부터 固有振動數는

$$\nu_{n_z, m_n} = \frac{1}{2h} \sqrt{w_z^2 + w_r^2} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_z}{l}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{mn}}{a}\right)^2}$$

$$w_z \equiv \frac{\pi n_z c}{l}, \quad n_z = 0, 1, 2, \dots$$

$$w_r \equiv \frac{\pi \alpha_{mn}}{a}, \quad \alpha_{mn} \text{은 } \frac{dJ_m(\pi a)}{d\alpha} = 0 \text{의 根이}$$

다. J_m 은 第一種 Bessel 函數이다. 다음에 그값을 表에 실는다.

$$\frac{dJ_m(\pi a)}{d\alpha} = 0 \text{의 根: } \alpha_{mn} \text{의 값}$$

n \ m	0	1	2	3	4
0	0.0000	1.2197	2.2331	3.2383	4.2411
1	0.5861	1.6970	2.7140	3.7261	4.7312
2	0.9722	2.1346	3.1734	4.1923	5.2036
3	1.3373	2.5513	3.6115	4.6428	5.6624
4	1.6926	2.9547	4.0368	5.0815	6.1103
5	2.0421	3.3486	4.4523	5.5108	6.5494

聖德大王神鐘의 振動의 基本音의 周波數 171 Hz와 一致하는 이 等價空洞의 共鳴周波數를 가지려면

$$l = 2.87 + x, \quad a = 1 \text{ (단위 m) 이므로}$$

$$171 = \frac{344}{2} \sqrt{\left(\frac{n_z}{2.87+x}\right)^2 + \frac{\alpha_{mn}}{1}} \rightarrow \frac{n_z}{2.87+x} = \sqrt{1 - \alpha_{mn}^2}$$

그런데 $n_z \geq 0$ 인 整數라야 하므로 $\alpha_{mn} < 1$ 이라야 된다. 이 條件을 滿足하는 것은 表中 [] 內에 있는 mode: (0, 0), (1, 0) 및 (2, 0) 3個뿐이다. 그러나 이中에서 (0, 0) mode는 除外되어야한다. 이 mode는 全体空洞內에 mode가 없는 경우이며 縱으로도 橫으로도 振動이 없는 静止狀態의 경우이다. 따라서 3個中에 남은 두 mode (1, 0) 와 (2, 0) 만이 候補로 登場하게 된다.

$$\alpha_{10} = 0.5861;$$

$$\frac{n_z}{2.87+x} = \sqrt{1 - 0.5861^2} = 0.810$$

$$n_z = 3 \quad : \quad x = 0.84 \text{ (m)}$$

$$= 4 \quad : \quad = 2.05 \text{ (m)}$$

$$= 5 \quad : \quad = 3.31 \text{ (m)}$$

許容 mode : (3, 1, 0), (4, 1, 0), ……

$$\alpha_{20} = 0.9722;$$

$$\frac{n_z}{2.87+x} = \sqrt{1 - 0.9722^2} = 0.234$$

$$n_z = 1 \quad : \quad x = 1.39 \text{ (m)}$$

$$= 2 \quad : \quad = 5.66 \text{ (m)}$$

…… (非現實的)

許容 mode : (1, 2, 0), (2, 2, 0), ……

故로 全体空洞에 걸리는 standing wave의 固有振動數가 鐘自體의 基本音의 振動數 171Hz와 Matching하여 共鳴振動을 일으키는 許容 mode中 가장 큰 sound Energy를 가지는 것은 mode (1, 2, 0)이다. 왜냐하면 高次 mode일수록 sound wave의 振幅이 작아지기 때문이다. 따라서 $x = 1.39\text{m}$ 가 最適寸數이다. 따라서 鐘口와 地面사

이에 1尺半=45cm가 떨어져 있다면 鳴洞의 깊기는 139-45=94cm가 되어야 한다. 鳴洞의 橫方向의 寸數는 全体空洞의 上下左右對稱으로 만드는 것이 適切하므로 스스로 決定된다.

이 鳴洞의 機能도 1982年 4月 8日 韓國科學院音響學研究室에서 작은 scale의 model實驗을 했고, 그結果 우리의 解析方法이 全적으로 正確한 것을 밝혔다.

IV. 結 論

以上の 解析으로부터 韓國梵鐘固有의 萬波息笛의 音管과 鳴洞의 機能및 最適寸數를 算出할 수 있는 解析式을 求했다.

그結果 聖德大王神鐘의 경우에는

音管: 길이 96cm (現寸數 77cm)

內經 15cm (現寸數대로)

라야 鐘聲의 基本音 (171Hz)를 共鳴傳達하여 「萬波息笛」의 音管이 울리게 되고

鳴洞: 길이 94cm, (現模造寸數는 根據없음)

(鐘口와 地面사이의 떠있는 거리를 45cm

로 했을 때) 橫方向寸數는 全体空洞의

上下·左右對稱 에 스스로 決定

이 鳴洞의 機能은 全体空洞과 鐘聲基本音의 mode matching이 되었을때 共鳴이 이어나, 餘韻을 길게하는 效果를 나타낸다.