

## 奚琴의 音響學的 特性

## The Acoustical Characteristics of the Hae-keum

林 武 悅\*, 尹 和 重\*

(Moo Yeol Lim, Wha Joong Yoon)

## 요 약

奚琴 音質의 音響學的 特性을 조사하기 위해 奚琴音의 파워스펙트럼과 時間波形을 FFT Analyzer를 이용하여 분석하였다. 奚琴絃의 張力과 遶山(bridge)의 위치, 腹板(top plate)의 두께등을 변화시키면서 분석을 하였다. 실험에 의하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

腹板의 共振周波數가 絃의 基音의 周波數보다 높기 때문에, 基音의 音壓보다 腹板의 共振周波數 부근의 1:2音들의 音壓이 더 큼을 알았다. 絃의 張力이 강할 때와 遶山이 腹板의 중앙에 위치하였을 때가 音質이 보다 우수하였다. 奚琴 遶絃의 inharmonicity 계수는 0.049 cents/n<sup>2</sup>이었다. 5kHz 이상의 上音은 발견할 수 없었으며, 奚琴의 inharmonicity가 violin의 inharmonicity보다 큰 값을 나타내었는데 이를 통해 奚琴音의 明瞭度와 豐富性이 부족하다는 것을 알 수 있었다. 奚琴筒의 共振周波數 (MAR)와 腹板의 共振周波數 (MWR)의 周波數比는 1 octave 정도일때 奚琴이 가장 좋은 음색을 갖는다는 것을 밝혔으며 이때 腹板의 두께는 4.5mm 정도이다.

## ABSTRACT

In order to investigate the acoustical characteristics of the Hae keum (Korean traditional musical instrument) tone quality, the spectrum and wave form of Hae keum sounds were analyzed by the FFT Analyzer. The analysis was carried out by the varying of the tension of Hae-keum strings, the positions of bridge and the top plate's thickness of Hae-keum respectively. According to the experiment, the following results are obtained: the over tone's amplitude nearby the top plate resonance frequency is greater than the fundamental tone's amplitude because the top plate resonance frequency is higher than the fundamental tone's frequency. Tone qualities are better when the bridge is situated in the middle of top plate and the tension of strings is larger. The inharmonicity coefficient of the Hae-keum's second string is 0.049 cents/n<sup>2</sup>. The brilliance and richness is poor, because we seldom found the over tone over 5kHz and the inharmonicity of the Hae-keum is greater than that of a violin. Also we confirmed that we are able to get the best tone quality in 4.5mm thickness of the Hae keum's top plate.

## I. 서 론

音樂에 대한 科學的 研究의 起源은 東洋에서는 錢謙益 著의 三才圖會中 한명인 黃帝에 연유한 三分損益法에<sup>1)</sup> 그 起源을 들 수 있겠고, 서양에서는 고대 그리스 시대의 哲學者이자 數學者인 Pythagoras (570~497 B.C)의 Pythagoras 音階론<sup>2)</sup> 들 수 있었으나, 樂器에 대한 科學的 研究가 본격적으로 행하여진 것은 Galileo Galilei (1564~1642)가 板과 絃의 振動을 수학적으로 분석하므로써<sup>3)</sup> 시작되었다. 특히 Violin을 비롯한 擦絃樂器族에 대해서는 Marin Mersenne (1588~1648, France)가 1625년에 논문을 발표한 이래<sup>4)</sup>, 오늘날까지 수 많은 과학자들에 의해 연구되어 왔으나, 東洋樂器 특히 韓國의 傳統樂器 중 擦絃樂器에 대해서는 그 연구가 전무하다고 볼 수 있다.

奚琴은 본래 中國 邊방의 한 종족인 奚族이 사용하던 악기로 高麗 睿宗때 宋에서 들여와 우리나라의 民俗樂器로 정착된 것이다<sup>5)</sup>. 奚琴의 소리는 활과 현의 마찰로서 발생되어 遼山(Bridge)을 통해 腹板(Top Plate)에 전달되어 筒을 울리면서 외부로 방사된다.

音色을 특징지을 수 있는 물리적인 양으로는 部分音(partial)의 수, 部分音의 분포, 部分音의 상대적 強度, 非調和 部分音(inharmonic partials), 基音(fundamental tone), 음의 全體強度 등을 들 수 있겠다<sup>6)</sup>. 可聽周波數 내에서 部分音은 그 수가 많을수록 음이 풍부하게 들리고, 高音部의 部分音이 많아질수록 음의 明瞭度(brilliance)가 증가하게 되며<sup>7)</sup>, 특히 violin과 같은 擦絃樂器에서는 彈絃時보다 擦絃時에 거의 모든 성분의 調和音(harmonics)이 발생되기 때문에, 擦絃時에 그 音色이 보다 아름다운 것으로 밝혀져 있다<sup>8)</sup>. 部分音들은 그 周波數比가 調和에 가까울수록 音色이 아름다우나, 周波數比가 정확한 정수가 되면 音色이 차갑게 들린다<sup>9)</sup>. 非調和部分音들은 音色을 풍부하게 하는데 다소 기여하기는 하지만 대부분의 非調和音은 소음에 속한 것으로 音質을 저하시키는 요인이 된다. 사람의 內耳의 달팽이관(cochlea)은 비선형적 감지를 하므로 소리를 들을 때 基音과 部分音들의 周波數 뿐만 아니라 각 部分音들의 差周

波數까지 인식하기 때문에<sup>10)</sup> 部分音들간에 inharmonicity가 존재하게 되면 각각의 差周波數의 값이 약간 차이가 나타나게 되어 그로 인한 맥놀이( beats)가 聽覺器官에 인식되어지는데 이 때의 맥놀이는 音色이 따뜻함(warmth)을 지니게 되는데 기여한다<sup>11)</sup>. 그러나 inharmonicity가 너무 커지게 되면 오히려 맥놀이에 의해 音色이 흩어지는 느낌이 들게 되어 音質이 혼탁해 진다.

奚琴에 있어서 그 소리의 音質을 결정하는 요인으로서는 악기의 구조적인 면가 연주시의 조건으로 나누어서 생각할 수 있겠는데, 그 구조적인 요인은 각 재료들의 材質, 腹板의 두께, 遼山의 크기 등이며, 연주시의 조건은 擦絃時 활의 속도와 압력의 세기, 遼山の 위치, 絃의 張力, 擦絃點의 位置 등이라 하겠다<sup>12) 13)</sup>.

擦絃樂器에서 발생되는 소리는 시간에 따라 크게 세 부분으로 나눌 수 있는데, 發聲狀態(attack state), 安定狀態(steady state), 減衰狀態(decay state)가 그것이다. 음이 시작될 때와 끝날 때의 音色은 發聲時와 減衰時에 각 部分音들의 發聲時間(attack time)과 減衰時間(decay time)에 의해 특징 지워지며, 安定狀態 동안에는 악기에 따라 spectrum의 구조가 변하는 경우도 있지만 擦絃樂器에 있어서는 部分音들의 구조가 거의 변화하지 않는다. 따라서 擦絃樂器의 spectrum은 安定狀態 동안의 部分音의 구조를 평균하여 나타내게 된다<sup>14)</sup>. 현악기에서 각 絃들을 半音 간격으로 소리를 내어 각 음의 성분들의 세기(loudness)를 周波數별로 나타낸 것을 loudness curve라 하는데, 이것은 악기의 품질을 나타내는데 매우 중요한 역할을 한다<sup>15)</sup>.

본 연구에서는 먼저 奚琴音의 평균적인 spectrum 구조와 波形을 조사하였고, 다음에는 絃의 張力과 遼山の 위치, 腹板의 두께 등을 변화시켜가면서 奚琴音의 音色 변화를 관찰하였으며 특히 奚琴이 보다 좋은 音質을 가질 수 있는 奚琴憵의 共振周波數(MAR)와 腹板의 共振周波數(MWR)의 周波數比를 규명하였고 이 때 腹板의 이상적인 두께를 밝혔다.

## II. 이 론

1. 剛性에 의한 絃의 inharmonicity

이론적으로 絃에서 발생되는 소리의 部分音들의 周波數는 基音의 정수배가 되어야 하나 실제로는 絃의 剛性에 의해서 部分音들이 周波數比가 정수배에서 약간 벗어나게 되며, 이때의 벗어난 정도를 cent(1/100 semitone)로 표현한 것을 inharmonicity D라 하고 그 값은 다음과 같다.<sup>15)</sup>

$$D=1.200 \log_2(f_n / nf_0) \approx \alpha n^2 \quad (1.1)$$

여기서  $\alpha$ 는 inharmonicity 계수(coefficient)라 불리우며, 그 값은 다음 식에 의해 구해질 수 있다.<sup>16)</sup>

$$\alpha=133.5 (d^2 / \bar{f}_0^2 L^4) (Y / \rho) \quad (1.2)$$

여기서 (d : 絃의 반경, Y : 絃의 영률,  $\rho$  : 絃의 密度)

따라서 n번째 部分音의 周波數는 다음과 같다.

$$f_n = nf_0 [1 + (\alpha / 1731)n^2] \quad (1.3)$$

또는<sup>18)</sup>

$$f_n = nf_0 (1 + Bn^2)^{1/2} \quad (1.4)$$

여기서 B는 다음 식에 의해 구하여 진다.

$$B = \Pi^3 Y d^4 / 64 L^2 T \quad (1.5)$$

결과적으로  $\alpha$ 와 B는 다음의 관계가 성립한다.

$$\alpha = 865.5 B \quad (1.6)$$

2. 腹板의 振動

腹板은 주위가 고정된 圓板으로 볼 수 있으므로 이때의 振動 方程式은 다음과 같다.<sup>17)</sup>

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = - \frac{\kappa^2 Y}{\rho(1-\sigma^2)} \nabla^2(\nabla^2 y) \quad (2.1)$$

따라서 圓板의 振動數  $\omega$ 는 다음 식에 의해 구하여 진다.

$$\omega = \kappa K^2 \{Y / \rho(1-\sigma^2)\}^{1/2} \quad (2.2)$$

한편 Bessel 함수에 의해  $Ka=3.20, 6.30, 9.44, 12.57, \dots$ 이므로,

圓板의 共振周波數는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_1 &= 0.47 \frac{d}{a^2} \{Y / \rho(1-\sigma^2)\}^{1/2} \\ f_2 &= 3.88f_1 \\ f_3 &= 8.70f_1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서

$\kappa$  : surface radius of gyration  $= d / (12)^{1/2}$ , d : 圓板의 두께,

a : 圓板의 面積,  $\rho$  : 圓板의 密度,  $\sigma$  : 圓板의 Poisson's ratio,

$$K = (\omega^2 c(1-\sigma^2) / \kappa^2)^{1/4}$$

III. 실험방법

1. 奚琴의 구조

奚琴의 구조는 Fig. 1에서 보는바와 같으며 그 재질은 다음과 같다.<sup>19)</sup>

奚琴의 音質에 가장 큰 영향을 미치는 筒은 지름 약 8cm 정도의 오래묵은 팽죽죽의 뿌리부분을 10cm 정도의 길이로 자른후에 膜을 하나만 남기고 모두 관통시킨후 속을 약간 파내어 만든다. 腹板은 두께 약 4.5cm 정도의 梧桐板을 筒에 붙인후 주위를 둥글게 갈아내어 사용한다. 絃은 中絃(굵은줄 : 1st string) 과 遊絃(가늘줄 : 2nd string)의 두가지가 있으며 명주실을 꼬아만든 것이다. 弓弦의 활대는 시누대를 쓰고 마미는 말총에 송진을 문질러 사용한다. 立竹은 본래 黃竹의 뿌리로 만들었으나 요즘은 보통 단단한 雜木으로 만든다. 끝으로 遠山은 박의 꼭지부분이 이용된다.

실험에 사용된 奚琴은 1980년에 이영수씨가 서울에서 제작한 상동품의 奚琴으로, 그 筒은 長半徑

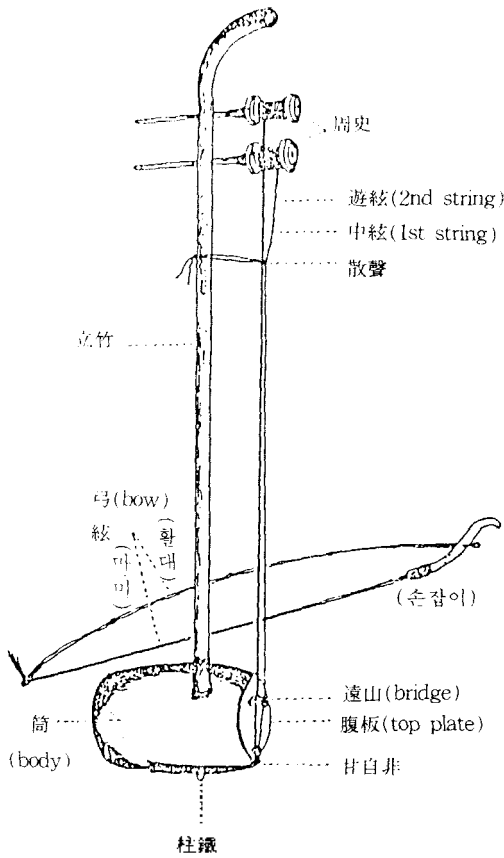


Fig. 1 The view of Hae-keum

약 4.2cm, 短半徑 약3.9cm 정도되는 타원형의 원통으로 筒의 길이는 약 11cm 정도이며, 腹板中央部の 두께는 4.1mm, 遊絃의 반경은 0.504mm, 總密度는 0.00115kg / m, Young率은  $3.5 \times 10^9$  N / m<sup>2</sup>, 中絃의 半徑은 0.645mm, 線密度는 0.0016kg / m, Young率은  $2.5 \times 10^9$  N / m<sup>2</sup>이다.

2. 奚琴音의 分析

1) 표준 奚琴의 音質 분석

奚琴의 연주는 無響실에서 행하여졌으며 연주는 본인이 직접하였다. 奚琴을 遊絃과 中絃에 대해 각각 平調와 界面調의 族法으로 낮은 仲呂音(A<sub>3</sub><sup>♭</sup>, 207.65Hz)에서부터 높은 太簇音(F<sub>5</sub>, 659.25Hz)까지 연주하여 그 소리를 Fig. 2에서 보는바와 같이 microphone 으로 잡아 measuring amplifier를 거쳐서 tape

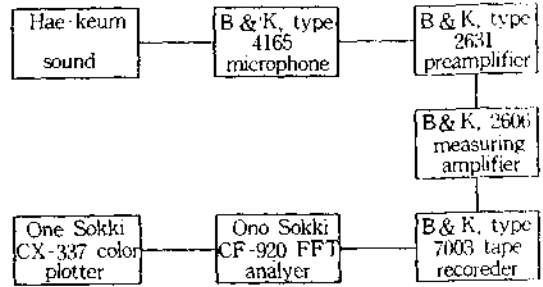


Fig. 2. Block diagram for measurement of the sound wave form and frequency spectrum.

recorder에 녹음한 후, FFT analyzer를 사용하여 그 음의 波形과 spectrum, 周波數 移動(frequency shifts), inharmonicity 등을 조사하였다.

2) 絃의 張力 변화에 따른 音質의 변화

奚琴絃은 그 張力에 따라 (1-5)식에서 보는바와 같이 絃의 inharmonicity의 값이 변화하고, 또한 진동하는 현의 길이에 대한 擦絃길이 (Bridge에서 擦絃點까지의 길이)의 바가 변하고, 이에따라 현의 機械的 impedance가 변하여 그 소리의 音色이 달라지므로 張力변화에 따른 奚琴音의 音色 변화를 조사하였다. 絃 張力의 크기는 平調族法에서 絃을 걸지순가라으로 잡았을 때의 크기이다. 絃의 張力을 遊絃 75 Newton, 中絃 50Newton 정도로 한 후, 1)에서와 같은 실험을 하고, 絃의 張力을 遊絃 50Newton, 中絃 30Newton 정도로 바꾸후에 다시 위의 실험을 반복한 후, 두 실험에 의한 奚琴音의 時間波形, power spectrum, inharmonicity 등을 비교하여 音色의 변화를 조사하였다.

3) 遠山の 위치의 변화에 따른 音質의 변화

遠山을 腹板위에서 상·하로 이동하는 것은 絃의 전체길이에 대한 擦絃길이의 비를 변하게 하는 것이며, 또한 奚琴腹板은 중앙부는 두껍고 가장자리는 얇아 전체적으로 큰 구의 일부와 같이 둥글게 되어 있기 때문에 腹板 중앙부와 兩부분은 각각의 위치에서 機械的 impedance가 다르므로 본 실험에서는 遠山을 腹板의 중앙에 놓았을때와 중앙에서 腹板直徑의 1/4만큼 兩쪽에 놓았을때의 奚琴音의 時間波

形, power spectrum, inharmonicity 등을 비교 관찰하였다.

4) 腹板의 두께에 따른 音質의 변화

奚琴의 腹板은 그 두께에 따라 共振周波數가 변화하여 奚琴音 spectrum 구조에 중대한 영향을 미치고, 실제로 奚琴은 腹板의 두께에 따라 그 音色이 현저하게 변하므로, 본 실험에서는 腹板 중앙부의 두께를 腹板을 둥글게 깎아 얇은 상태에서 5mm의 두께로 腹板 주위를 각지 낸 상태에서 5mm, 4.5mm, 3.8mm, 3.0mm로 변화시키면서 1)에서와 같은 실험을 행하면서 각 音의 時間波形, power spectrum, inharmonicity 등을 비교 관찰하여 音色의 변화를 조사하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 奚琴筒과 腹板의 loudness curve

Fig. 3은 奚琴 腹板을 주위를 갈지 않은 상태에서 중앙부의 두께를 5mm로 했을 때의 loudness curve 이고, Fig. 4는 腹板의 주위를 둥글게 갈아내고 그 두께를 각각 5.0mm(점선), 4.5mm(직선), 3.8mm(일점쇄선), 3.0mm(이점쇄선)로 했을 때의 loudness curve를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 MAR의 周波數와 音壓은 656Hz, 69.3dB, MWR은 1756Hz, 75.7dB 이고, Fig. 4에서 각각의 周波數와 音壓은 腹板 중앙부의 두께가 5.0mm일때 MAR은 638Hz, 75.1dB MWR은 1594Hz, 77.1dB, 4.5mm일때 MAR은 633Hz, 78.9dB MWR은 1450Hz, 78.0dB, 3.8mm 일때 MAR은 660Hz, 77.4dB MWR은 1325Hz, 77.8dB, 3.0mm일때는 MAR은 발견할 수 없었고 MWR은 1106Hz, 77.2dB였다. 그밖에서 보듯마의 같이 MAR의 周波數는 腹板두께의 변화에 대해 거의 변화가 없으나, MWR의 경우는 腹板 두께가 얇아질 수록 MWR의 周波數 또한 낮아진다는 것을 알 수 있었다. MAR과 MWR의 音壓은 腹板의 두께가 4.5mm 일때가 가장 크며 板의 두께가 4.5mm보다 더 두껍거나 얇아질수록 音壓이 작아진다는 것을 알 수 있었다. violin의 경우, MAR과 MWR의 크기가 거의 같고 서로간의 周波數比가 完全5度(3:2)일때 악기

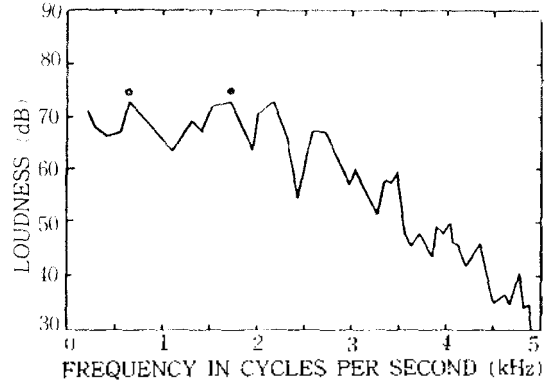


Fig. 3 Loudness curve for the Hae keum of unshaved 5.0mm thickness top plate.

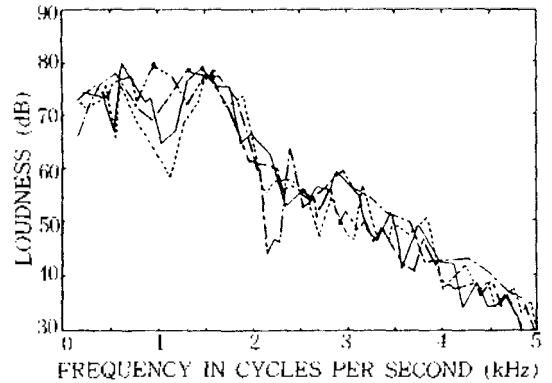


Fig. 4 Loudness curve for the Hae keum of which top plate is shaved and its thickness is 5.0mm(dotted line), 4.5mm(straight line), 3.8mm(one dotted chain line), 3.0mm(two dotted chain line) respectively.

가 가장 좋은 소리를 내게되며, 저질의 악기일수록 MAR의 크기가 작고 MAR과 MWR의 周波數 차이가 더 커지는 것으로 밝혀져 있으며,<sup>17)</sup> guitar는 MAR에 대해 MWR의 周波數가 한 옥타브(octave) 정도 높은 것으로 밝혀져 있으므로,<sup>18)</sup> 이러한 사실들과 비교해서 奚琴의 경우를 살펴보았다. MAR과 MWR의 상대적인 音壓을 고려하면 腹板의 두께가 4.5mm일때와 3.8mm일때가 두 값의 크기가 거의 같으므로 보다 좋은 조건이라 생각되나, 두 音壓의 크기를 고려할 때 腹板의 두께가 3.8mm 보다는 4.5mm일때가 보다 좋은 音質을 가질 수 있는 조건이라고 생각된다. Loudness curve를 violin의 경우와 비교해 보면, wood prime peak (MWR과 音壓의

크기는 거의 같고 周波數는 한 옥타브 낮음)가 奚琴에서는 전혀 발견되지 않았으며, MAR의 peak는 낮고오운데 비해 MWR의 peak는 오히려 넓게 퍼져 있는 것이 또한 奚琴의 특징이라 할 수 있다. MAR과 MWR의 周波數比는 1 octave 정도일 때가 奚琴에서의 가장 좋은 조건이라 생각된다. 腹板의 두께가 3.8mm이하가 되면 奚琴의 音色이 멍한 느낌이 들면서 音의 明瞭度가 매우 저하되는 현상을 나타내는데 이것은 Fig. 5에서 보는 것 처럼, 筒의 공기에 의한 機械的 impedance가 腹板의 機械的 impedance와 不調和를 이루어 MAR의 peak가 나타나지 않는 것이 그 원인이라 생각된다. 한편, 腹板의 振動을 수직적으로 붙여서 실험치와 비교해 보면 다음과 같다.

腹板의 재질인 오동나무의 Young率과 poisson's ratio는 <sup>(21)</sup>

$$Y_L : 60, Y_T : 6.0, Y_C : 2.5 \quad (\text{단위} : 10^9 \text{ kg/cm}^2)$$

여기서 ( $Y_L$ 은 縱方向의 영률,  $Y_T$ 은 橫方向의 영률,  $Y_C$ 는 接線方向의 영률임)

$$\sigma_{LT} : 0.60, \sigma_{LR} : 0.40$$

비중은 0.29이고, 腹板의 두께는 5.0mm, 腹板의 長半徑은 4.2cm, 短半徑은 3.9mm이고, 奚琴筒에 오동나무결이 수직하게 붙이므로  $Y_L, Y_T, \rho_{LT}$ 의 값을 각각 (2.3)식에 대입해보면,  $f_1 \approx 2386.8\text{Hz}$ ,  $f_r \approx 792.4\text{Hz}$ 가 된다. 따라서 이론적인 腹板의 共振周波數는  $f = ((f_1^2 + f_r^2) / 2)^{1/2} \approx 1772.1\text{Hz}$ 가 되며 이값은 실험치 1731Hz와 어느정도 근사한 값이라 생각된다.

## 2. 奚琴音의 분석

### 1) Spectrum의 구조

奚琴의 部分音들은 Fig.5~7.에서 보는바와 같이 보통 5KHz 미만의 값들 만을 관측할 수 있었는데, 서론에서 말한바와 같이 5KHz이상인 部分音들이 존재하지 않는 것은 奚琴의 音質이 서양의 다른 擦絃樂器에 비해 明瞭度(brilliance)나 豐富性(richness)

이 부족한 원인이 된다. 奚琴은 그 악기의 구조상 일반적인 동양의 현악기와 마찬가지로 윗판의 共振周波數가 絃의 共振周波數보다 높기때문에 <sup>(22)</sup> 基音의 音壓보다는 腹板의 共振周波數 부근에서의 部分音의 音壓이 가장 큰 값을 나타내는 것이 그 유질특색이라 하겠다. 그러나 여기서 문제가 되는 것은 전절에서 본 loudness curve에서는 奚琴筒 내부의 공기에 의한 共振의 크기가 윗판에 의한 共振의 크기와 거의 같은 것으로 나타났으나, 奚琴音의 power spectrum상에는 筒内部 공기의 共振周波數 부근에서의 部分音의 音壓이 윗판의 共振周波數 부근의 部分音들의 音壓에 비해 두드러지게 나타나지 않는가 하는 것인데, 그 이유는 전절의 그림들에서 보는 것처럼 MAR의 peak가 MWR의 peak보다 그 폭이 훨씬 좁기때문에 部分音의 周波數가 MAR의 周波數와 거의 일치하지 않고는 筒内部 공기를 共振시키지 못하기 때문이다. Fig. 5는 遊絃의 소리의 時間波形과 power spectrum을 나타낸 것이며, 각 그림에서 (a)는 현의 張力を 75Newton으로 하고 遠山을 腹板의 중앙에 놓았을 때 이고, (b)는 현張力은 75Newton 遠山은 腹板의 1/4의 위치에, (c)는 현張力은 50Newton으로 遠山은 腹板의 中央에, (d)는 絃張力은 50Newton으로 遠山은 腹板의 1/4의 위치에 놓은 것이다. 각 그림에서 보는바와 같이 絃의 張力이 50Newton일때는 部分音들이 MWR부근을 제외하고는 張力이 75Newton일때와 비교해서 전체적으로 매우 약하게 나타나는데, 이것은 音의 明瞭度가 저하되는 원인이 된다. 높은음을 연주할 경우 Fig. 5의 (b)에서 보는 것 처럼 遠山이 腹板의 1/4에 위치해 있을때가 遠山이 腹板의 中央에 위치해 있을때 [Fig. 5.(a)]보다 음색이 명료한 것을 알수 있는데, 이것은 奚琴 주법에서 平調族法에서는 遠山을 中央에 놓고, 界面調族法에서는 遠山을 윗쪽에 놓는 이유를 뒷받침 해 주는 것 이라 생각된다. Fig. 6에서 Fig. 7은 腹板의 두께를 변화시켰을 때의 소리의 spectrum과 波形을 나타낸 것이다. Fig. 6의 (a)와 (b)에서 보는바와 같이 腹板의 주위를 동글게 깎아내지 않았을때는 不調和部分音(inharmonic partials)들이 빈번히 나타나고 波形이 시간에 따라 약간 불규칙적인 변화를 보여주게 되어 音質이

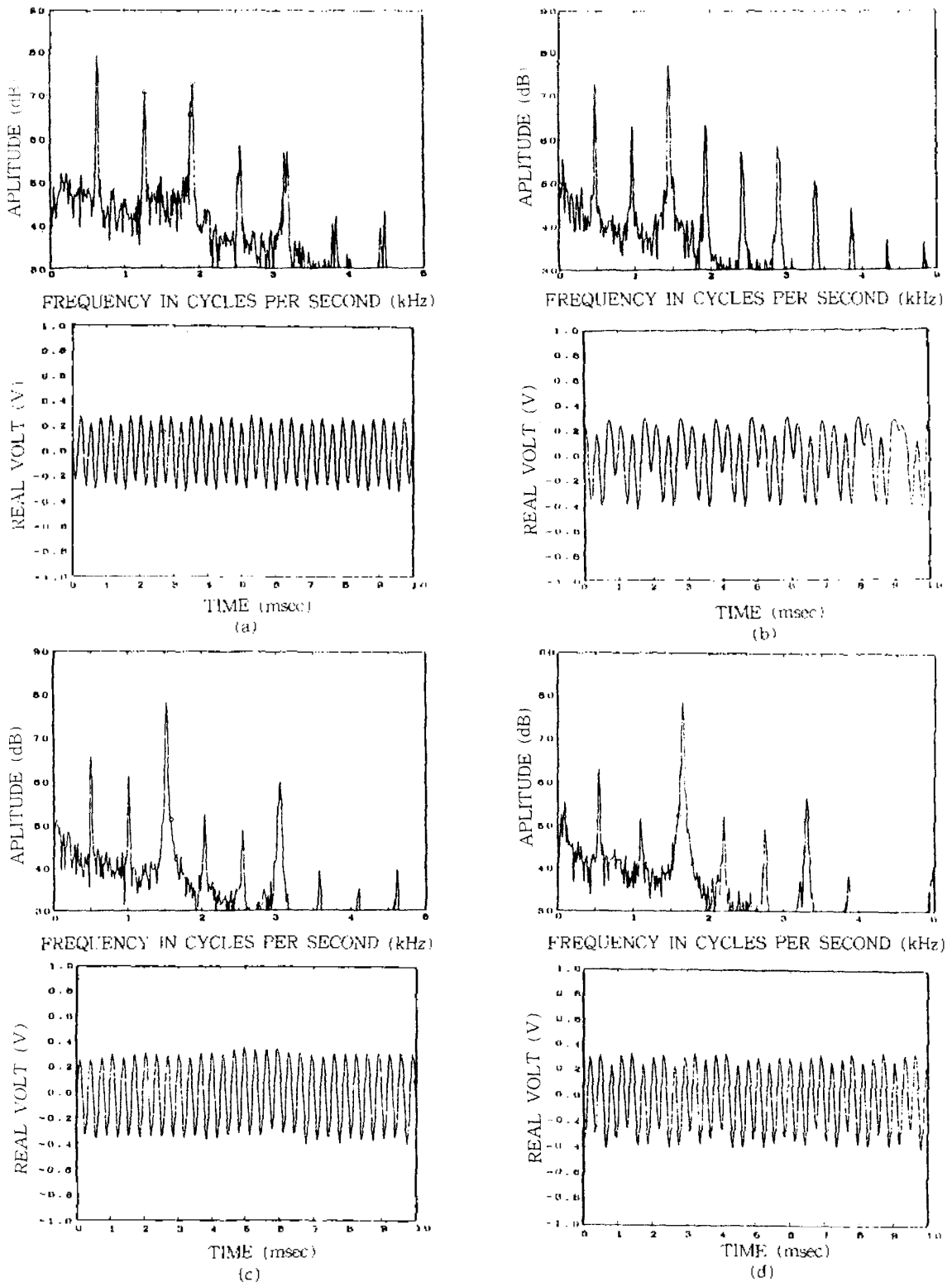


Fig. 5 Sound wave forms and Power spectrum for a Hae-keum's 2nd string. (a) String tension is high, bridge position is in the middle of top plate and fundamental frequency is 562.50Hz. (b) String tension is high, bridge position is in the upper part of top plate and fundamental frequency is 487.50Hz. (c) String tension is low, bridge position is in the middle of top plate and fundamental frequency is 512.50Hz. (d) String tension is low, bridge position is in the upper part of top plate and fundamental frequency is 562.50Hz.

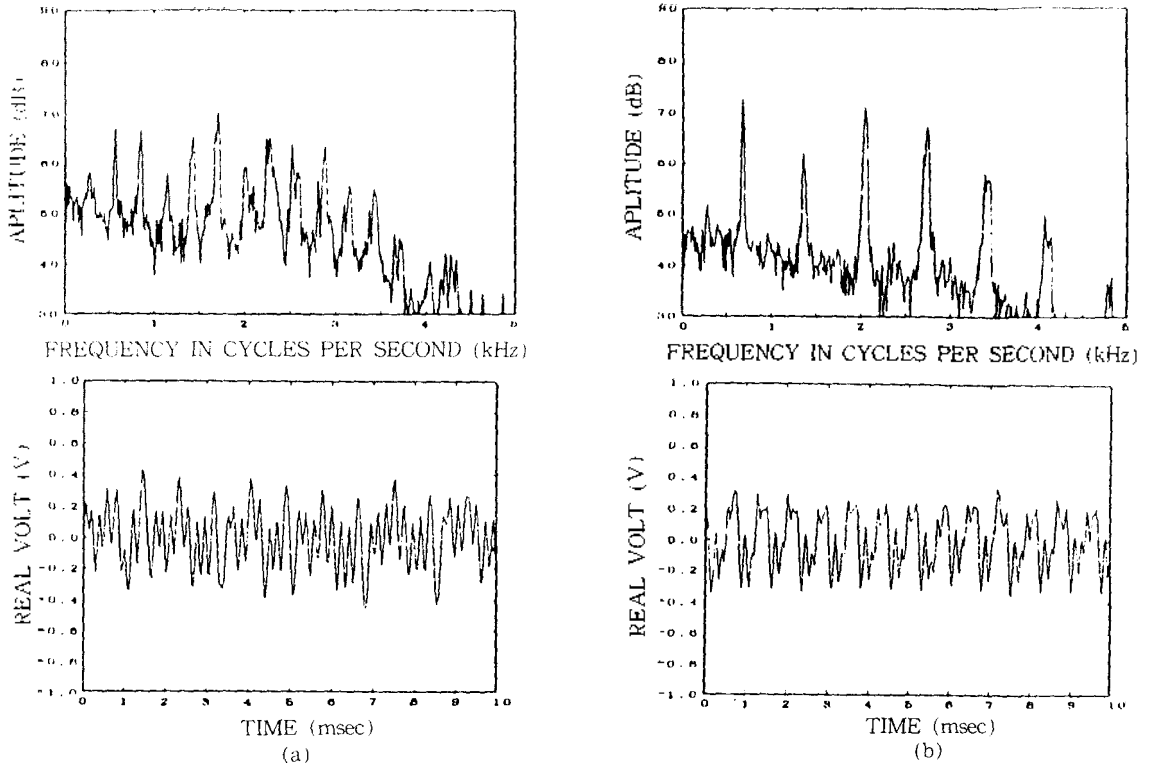


Fig. 6 Sound wave form and over spectrum of a Hae-keum in the lug finger position. Top plate is unshaved and it's thickness is 5.0mm.  
 (a) At the fundamental frequency is 281.25Hz for the 1st string.  
 (b) At the fundamental frequency is 681.25Hz for the 2nd string.

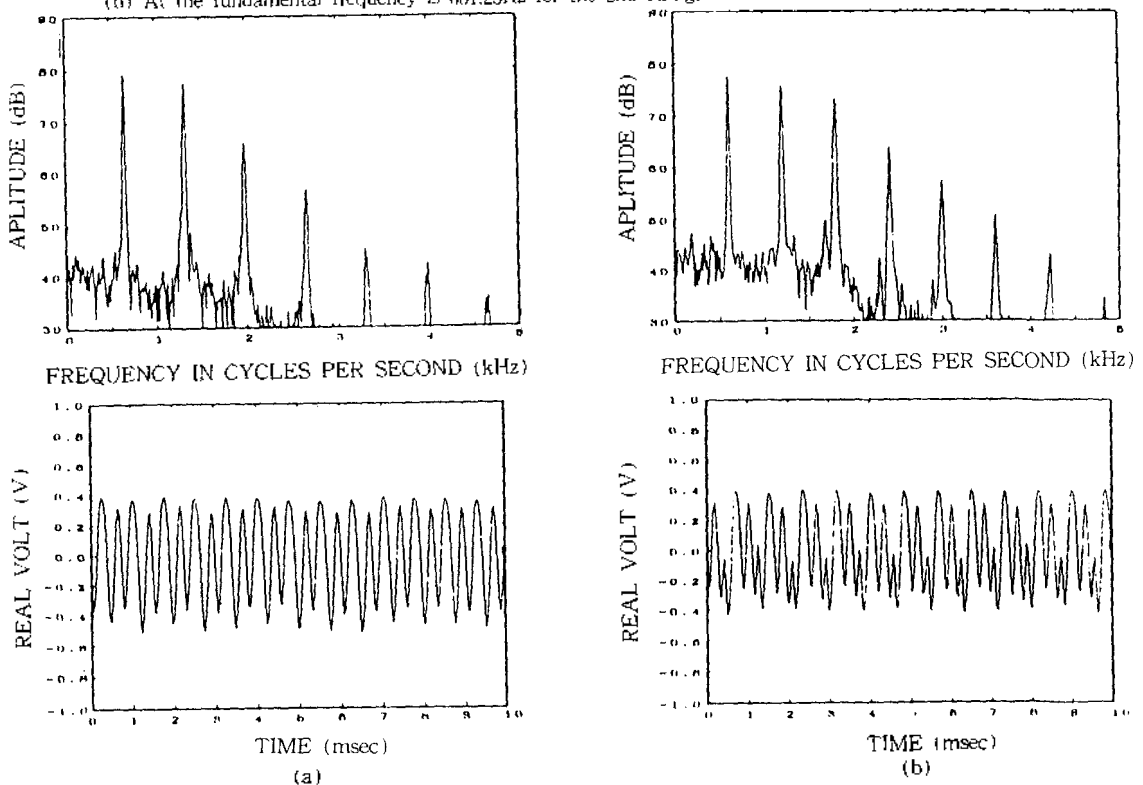


Fig. 7 Sound wave form and power spectrum for the 2nd string of a Hae-keum in the high finger position. (a) Top plate is shaved, it's thickness is 4.5mm and fundamental frequency is 662.50Hz, (b) Top plate is shaved, it's thickness is 4.0mm and fundamental frequency is 600.00Hz.



3. 악기의 음향학의 특성

때로 지나치게 현상을 나타내었다. 腹板의 두께가 얇아질수록 MAR 부근의 部分음들의 음壓이 점차 작아진다. 腹板의 두께가 1.0mm 이하로 갈수록 腹板의 두께가 4.0mm 이하에서는 조금씩 음壓이 작아지는 것을 관찰할 수 있었다. 腹板의 두께가 4.5mm와 3.8mm일때 清黃鍾( $E_4^b$ : 662.254Hz)에서 杏太簇( $F_4$ : 698.456Hz) 정도의 음을 연주하게 되면 다른 높이의 음들과는 달리 소리가 훨씬 크게 들리면서 대단히 맑은 음색을 느끼게 되는데 Fig. 7의 (a)와 (b)가 바로 이런 경우이다. 이에에는 연주된 소리의 기본음의 周波數와 MAR의 周波數가 거의 일치하게 되는데 이로인해 그림에서 보듯이와 같이 기본음의 음壓이

다른 어느 部分음들의 음壓보다도 크게 나타난다. Violin의 경우, 품질이 우수한 악기에서는 MAR peak의 크기가 작게 나타나는 것으로 알려져 있는데 이러한 事實의 이유에 관해, 奚琴은 腹板의 共振보다 그 胴내부의 공기의 共振의 음質의 明瞭度를 높이는 데 보다 기여한다고 할 수 있겠으나, 실험에 쓰인 奚琴의 MAR peak는 violin과는 달리 매우 쉼쳐 나타났기 때문에 筒内の 空氣가 쉽게 共振할 수가 없어서 violin과 같이 보다 맑은 소리를 내기가 어렵다. 따라서 보다 좋은 음質의 奚琴을 만들기 위해서는 筒内の 空氣가 보다 쉽게 共振할 수 있는 奚琴筒의 구조를 연구해야 할 것이다.

Table 1. Frequency shifts and inharmonicity coefficient  $\alpha$ (cents/n<sup>2</sup>) for A-string (440Hz) on a violin of good quality.

mode number	frequency shift	inharmonicity coefficient $\alpha$
2	1.0Hz	0.492
3	2.0Hz	0.291
4	4.0Hz	-0.061
5	1.0Hz	0.031
6	5.0Hz	0.091
7	2.0Hz	0.023
8	8.0Hz	0.061

Table 2. Frequency shifts and inharmonicity coefficient  $\alpha$ (cents/n<sup>2</sup>) of Hae keum 1st string tone's partials.

mode no.	2-1 (243.75Hz)		2-2 (243.75Hz)		2-3 (293.75Hz)		2-4 (325.00Hz)	
	f. shift	$\alpha$	f. shift	$\alpha$	f. shift	$\alpha$	f. shift	$\alpha$
2	0 Hz	0	-6.25Hz	5.512	0 Hz	0	0 Hz	0
3	0 Hz	0	-6.25Hz	1.637	6.25Hz	1.369	0 Hz	0
4	0 Hz	0	-6.25Hz	0.692	0 Hz	0	-6.25Hz	0.519
5	0 Hz	0	-6.25Hz	0.354	0 Hz	0	0 Hz	0
6	6.25Hz	-0.205	-6.25Hz	-0.205	6.25Hz	0.171	6.25Hz	-0.154
7	6.25Hz	0.129	6.25Hz	-0.129	6.25Hz	0.107	-12.50Hz	-0.194
8	6.25Hz	0.087	6.25Hz	0.087	0 Hz	0	12.50Hz	0.134
9	6.25Hz	0.061	12.50Hz	0.121	6.25Hz	0.050	0 Hz	0
10	-	-	12.50Hz	0.088	6.25Hz	0.037	6.25Hz	0.032

- 2-1 : string tension is high, bridge is situated in the middle position of top plate and input sound's fundamental frequency is 243.75Hz.
- 2-2 : string tension is high, bridge is situated in the upper position of top plate and input sound's fundamental frequency is 243.75Hz.
- 2-3 : string tension is low, bridge is situated in the middle position of top plate and input sound's fundamental frequency is 293.75Hz.
- 2-4 : string tension is low, bridge is situated in the upper position of top plate and input sound's fundamental frequency is 325.00Hz.

Table 3. Frequency shifts and inharmonicity coefficient  $\alpha$ (cents,  $n^2$ ) of Hae-keum 2nd string tone's partials.

mode	3-1 (562.50Hz)			3-2 (487.50Hz)			3-3 (512.50Hz)			3-4 (550.00Hz)		
no.	f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$	
2	6.25Hz	2.111		6.25Hz	2.765		0 Hz	0		0 Hz	0	
3	6.25Hz	0.714		6.25Hz	-0.820		0 Hz	0		0 Hz	0	
4	12.50Hz	0.602		12.50Hz	-0.692		0 Hz	0		0 Hz	0	
5	12.50Hz	0.308		25.00Hz	0.706		6.25Hz	0.168		0 Hz	0	
6	12.50Hz	0.178		25.00Hz	0.409		0 Hz	0		6.25Hz	0.091	
7	18.75Hz	0.168		31.25Hz	-0.322		0 Hz	0		12.50Hz	0.115	
8	-	-		37.50Hz	0.259		6.25Hz	0.042		-	-	
9	-	-		43.75Hz	0.212		6.25Hz	0.029		-	-	
10	-	-		43.75Hz	0.155		-	-		-	-	

3-1: string tension is high, bridge is situated in the middle position of top plate and input sound's fundamental frequency is 562.50Hz.

3-2: string tension is high, bridge is situated in the upper position of top plate and input sound's fundamental frequency is 487.50Hz.

3-3: string tension is low, bridge is situated in the middle position of top plate and input sound's fundamental frequency is 512.50Hz.

3-4: string tension is low, bridge is situated in the upper position of top plate and input sound's fundamental frequency is 550.00Hz.

Table 4. Frequency shifts and inharmonicity coefficient  $\alpha$ (cents/ $n^2$ ) of Hae-keum 1st string tone's partials, in the low finger position.

mode	1-1 (218.75Hz)			4-2 (212.50Hz)			4-3 (206.25Hz)			4-4 (187.50Hz)			4-5 (187.50Hz)		
no.	f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$	
2	6.25Hz	6.226		0 Hz	0		0 Hz	0		0 Hz	0		-6.25Hz	-7.152	
3	0 Hz	0		0 Hz	0		-6.25Hz	-1.933		6.25Hz	2.149		-12.50Hz	-4.228	
4	0 Hz	0		0 Hz	0		-6.25Hz	-0.816		6.25Hz	0.905		-12.50Hz	-1.788	
5	6.25Hz	0.397		18.75Hz	-1.211		-6.25Hz	-0.418		6.25Hz	0.463		-12.50Hz	-0.917	
6	6.25Hz	0.230		0 Hz	0		-6.25Hz	-0.242		12.50Hz	0.537		-18.75Hz	-0.795	
7	6.25Hz	0.145		6.25Hz	0.149		-6.25Hz	-0.152		18.75Hz	0.508		-18.75Hz	-0.501	
8	6.25Hz	0.097		31.25Hz	-0.492		12.50Hz	-0.204		12.50Hz	0.227		-25.00Hz	-0.447	
9	6.25Hz	0.068		37.50Hz	-0.415		-6.25Hz	-0.072		12.50Hz	0.159		-25.00Hz	-0.314	
10	6.25Hz	0.049		43.75Hz	-0.353		-12.50Hz	-0.105		18.75Hz	0.174		-31.25Hz	-0.286	

4-1: top plate is unshaved, it's thickness is 5.0mm and input sound's fundamental frequency is 218.75Hz.

4-2: top plate is shaved, it's thickness is 5.0mm and input sound's fundamental frequency is 212.50Hz.

4-3: top plate is shaved, it's thickness is 4.5mm and input sound's fundamental frequency is 206.25Hz.

4-4: top plate is shaved, it's thickness is 3.8mm and input sound's fundamental frequency is 187.50Hz.

4-5: top plate is shaved, it's thickness is 3.0mm and input sound's fundamental frequency is 187.50Hz.

Table 5. Frequency shifts and inharmonicity coefficient  $\alpha$ (cents/ $n^2$ ) of Hae-keum 2nd string tone's partials, in the high finger position.

mode	5-1 (437.50Hz)			5-2 (475.00Hz)			5-3 (425.00Hz)			5-4 (425.00Hz)			5-5 (425.00Hz)		
no.	f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$		f. shift	$\alpha$	
2	6.25Hz	3.102		0 Hz	0		0 Hz	0		-6.25Hz	-3.170		6.25Hz	3.164	
3	6.25Hz	0.918		0 Hz	0		0 Hz	0		-12.50Hz	-1.876		6.25Hz	0.945	
4	6.25Hz	0.387		0 Hz	0		6.25Hz	0.398		-12.50Hz	-0.793		12.50Hz	0.799	
5	12.50Hz	0.397		6.25Hz	0.183		0 Hz	0		-12.50Hz	-0.406		12.50Hz	0.409	
6	25.00Hz	0.460		12.50Hz	0.211		12.50Hz	0.236		-25.00Hz	-0.469		6.25Hz	0.119	
7	0 Hz	0		-25.00Hz	-0.265		-6.25Hz	-0.074		-31.25Hz	-0.370		18.75Hz	0.223	
8	0 Hz	0		31.25Hz	0.222		6.25Hz	0.048		-31.25Hz	-0.248		37.50Hz	0.300	
9	-6.25Hz	-0.031		-12.50Hz	-0.062		18.75Hz	0.105		-31.25Hz	-0.174		37.50Hz	0.210	
10	6.25Hz	0.025		-12.50Hz	0.046		18.75Hz	0.076		-37.50Hz	-0.152		31.25Hz	0.128	

- 5-1 : top plate is unshaved, it's thickness is 5.0mm and input sound's fundamental frequency is 437.50Hz.
- 5-2 : top plate is shaved, it's thickness is 5.0mm and input sound's fundamental frequency is 475.00Hz.
- 5-3 : top plate is shaved, it's thickness is 4.5mm and input sound's fundamental frequency is 425.00Hz.
- 5-4 : top plate is shaved, it's thickness is 3.8mm and input sound's fundamental frequency is 425.00Hz.
- 5-5 : top plate is shaved, it's thickness is 3.0mm and input sound's fundamental frequency is 425.00Hz.

Table 6. Frequency shifts and inharmonicity coefficient  $\alpha$ (cents:  $\alpha$ ) of Hae-keum 1st string tone's partials, in the high finger position.

mode 6-1 (281.25Hz)	6-2 (281.25Hz)	6-3 (293.75Hz)	6-4 (262.50Hz)	6-5 (243.75Hz)
no. f. shift $\alpha$	f. shift $\alpha$	f. shift $\alpha$	f. shift $\alpha$	f. shift $\alpha$
2 12.50Hz 9.724	0 Hz 0	6.25Hz 1.579	6.25Hz 5.183	6.25Hz 5.583
3 18.75Hz 1.321	6.25Hz 1.430	6.25Hz 1.359	6.25Hz 1.533	6.25Hz 1.651
4 31.25Hz 3.047	6.25Hz 0.602	12.50Hz 1.145	6.25Hz 0.646	12.50Hz 1.396
5 31.25Hz 1.556	6.25Hz 0.308	12.50Hz 0.587	12.50Hz 0.663	12.50Hz 0.714
6 31.25Hz 0.898	12.50Hz 0.357	75.00Hz 2.003	6.25Hz 0.191	25.00Hz 0.829
7 62.50Hz 1.139	6.25Hz 0.113	25.00Hz 0.427	31.25Hz 0.606	18.75Hz 0.390
8 37.50Hz -0.154	6.25Hz -0.075	31.25Hz 0.357	25.00Hz 0.324	31.25Hz 0.137
9 0Hz 0	25.00Hz 0.212	43.75Hz 0.351	12.50Hz 0.113	37.50Hz 0.369
10 75.00Hz 0.167	0 Hz 0	50.00Hz 0.293	37.50Hz 0.249	12.50Hz 0.089

- 6-1 : top plate is unshaved, it's thickness is 5.0mm and input sound's fundamental frequency is 281.25Hz.
- 6-2 : top plate is shaved, it's thickness is 5.0mm and input sound's fundamental frequency is 281.25Hz.
- 6-3 : top plate is shaved, it's thickness is 4.5mm and input sound's fundamental frequency is 293.75Hz.
- 6-4 : top plate is shaved, it's thickness is 3.8mm and input sound's fundamental frequency is 262.50Hz.
- 6-5 : top plate is shaved, it's thickness is 3.0mm and input sound's fundamental frequency is 243.75Hz.

Table 7. Frequency shifts and inharmonicity coefficient  $\alpha$ (cents:  $\alpha$ ) of Hae-keum 2nd string tone's partials, in the low finger position.

mode 7-1 (681.25Hz)	7-2 (631.25Hz)	7-3 (662.50Hz)	7-4 (600.00Hz)	7-5 (562.50Hz)
no. f. shift $\alpha$	f. shift $\alpha$	f. shift $\alpha$	f. shift $\alpha$	f. shift $\alpha$
2 0Hz 0	6.25Hz 2.117	6.25Hz 2.046	6.25Hz 2.260	0Hz 0
3 6.25Hz 0.369	6.25Hz 0.636	6.25Hz 0.606	6.25Hz 0.669	0Hz 0
4 25.00Hz 0.997	12.50Hz 0.537	12.50Hz 0.512	12.50Hz 0.565	6.25Hz 0.304
5 25.00Hz 0.506	25.00Hz 0.550	6.25Hz 0.131	12.50Hz 0.289	0Hz 0
6 25.00Hz 0.293	31.25Hz 0.308	18.75Hz 0.228	18.75Hz 0.251	6.25Hz -0.089
7 56.25Hz 0.419	31.25Hz 0.251	25.00Hz 0.191	25.00Hz 0.211	31.25Hz 0.281
8 - -	- -	- -	25.00Hz 0.111	-6.25Hz -0.038

- 7-1 : top plate is unshaved, it's thickness is 5.0mm and input sound's fundamental frequency is 681.25Hz.
- 7-2 : top plate is shaved, it's thickness is 5.0mm and input sound's fundamental frequency is 631.25Hz.
- 7-3 : top plate is shaved, it's thickness is 4.5mm and input sound's fundamental frequency is 662.50Hz.
- 7-4 : top plate is shaved, it's thickness is 3.8mm and input sound's fundamental frequency is 600.00Hz.
- 7-5 : top plate is shaved, it's thickness is 3.0mm and input sound's fundamental frequency is 562.50Hz.

2) 奚琴音의 inharmonicity

遊絃의 이론적인 inharmonicity를 (2.8)식에 의해 구해보면, 현의 반경은 0.0504cm, 활음의 周波數는 412.5Hz, 현의 길이는 31.5cm, 현의 영률은  $3.5 \times 10^{10}$  dyne/cm<sup>2</sup>, 현의 密度는 1.255g/cm<sup>3</sup>이므로 inhar-

monicity 계수  $\alpha$ 의 값은 0.019정도가 되는데, violin의 경우는 0.042, piano의 경우는 평균 1정도 이므로 2) 奚琴의 理論的인 inharmonicity 계수의 크기는 violin과 거의 비슷하다 할 수 있다. 그러나 현을 연결의 몸체(body)에 연결하게 되면 활과 몸체 상호간의 機械的 impedance에 의해 악기로서의 inhar-

inharmonicity 가 달라지게 된다. Table 1은 "Fundamental of musical acoustics"<sup>1)</sup> p513의 양질의 violin의 소리(周波數:440Hz)에 대한 周波數 移動 값을 (1.7)식에 대입하여 inharmonicity 계수를 계산하여 그 값을 나타낸 것이다.

Table 2는 中絃의 Table 3은 遊絃의 inharmonicity 계수의 周波數 移動(frequency shifts)을 각각 강한 張力과 중앙에 위치한 遠山, 강한 張力과 왼쪽에 위치한 遠山, 약한 張力과 중앙에 위치한 遠山, 약한 張力과 오른쪽에 위치한 遠山の 조건에 대해 나타낸 것이다. Table 4,~7은 腹板의 두께가 주위를 각지않은 5mm, 주위를 짝은 5mm, 4.5mm, 3.8mm, 3.0mm인때의 周波數 移動과 inharmonicity 계수를 나타낸 것으로 Table 4,는 平調族法의 中絃의, Table 5,는 平調族法의 遊絃의, Table 6,은 界面調族法의 中絃의, Table 7,은 界面調族法의 遊絃의 소리에 대한 것이다. 奚琴의 inharmonicity는 Table 1,의 violin에 비해 그값이 크며, 이것은 奚琴이 violin에 비해 음질이 밝지못한 원인의 하나라고 생각된다. Table 4,에서 Table 7,을 살펴보면 대체적으로 腹板의 두께가 4.5mm 일때 inharmonicity 계수의 크기가 가장 작고, 腹板의 두께가 3.8mm이하 일때는 inharmonicity 계수의 값이 특히 크다는 것을 알 수 있었다. 특히 Table 5,의 5-3(腹板두께 4.5mm, 425Hz)의 경우는 Table1,의 violin과 비교할때 inharmonicity 계수의 값이 violin과 거의 같음을 알 수 있다.

## V. 결 론

奚琴현만의 소리의 inharmonicity계수  $\alpha$ 는 0.049정도로 violin의 0.042와 거의 같은 값이나 奚琴음의 inharmonicity계수는 violin과 비교하여 크기때문에 奚琴의 음질이 저하되는 요인이 된다. 奚琴의 MAR(main air resonance)의 peak는 MWR(main wood resonance)의 peak에 비해 그 영역이 좁기때문에 部分音들과의 共鳴이 잘 일어나지 않는 관계로 奚琴음의 明瞭度가 저하되는 원인이 된다. 奚琴의 部分音(partial)은 5kHz이상에서는 거의 발견되지 않았는데, 이러한 것으로 비추어 奚琴의 음색에 있어서

明瞭度(brilliance)와 豐富性(richness)이 시양의 擦絃樂器(violin등)에 비해 떨어진다는 것을 알 수 있다. 奚琴의 腹板의 共振周波數가 현의 共振周波數보다 높은 관계로 奚琴음의 上音들의 음壓이 基音의 음壓보다 큰값을 나타내었으며 奚琴의 음향출력의 대부분은 腹板의 共鳴에 기인함을 알 수 있었다. 현재 통용되고 있는 奚琴의 주범은 연주와 난이도관계로 현의 張力を 약하게하여 연주하는 경향이 있으나, 본 연구결과로는 遊絃의 張力は 70Newton정도 中絃의 張力は 50Newton정도로 하여 연주하는 것이 奚琴의 음질을 보다 향상시키고 奚琴의 음량을 크게 하는데 유리하다고 하겠다. 통상 연주시 平調族法에서는 遠山の 위치를 腹板의 중앙에, 界面調族法에서는 遠山을 腹板의 왼쪽에 놓게되는데, 실험결과 界面調族法에서는 遠山을 腹板의 왼쪽에 놓는것이 遠山을 腹板의 중앙에 놓는것보다 음색이 보다 명료한 것으로 나타났다. 腹板은 주위를 둥글게 갈아내는 것이 갈아내지않는 것 보다 현저하게 共鳴度가 향상되는 것을 알 수 있었으며, 奚琴통의 MAR과 奚琴腹板의 MWR의 周波數비가 1 Octave정도일 때 두 음壓의 크기가 거의 같았으며 각 部分音(partial)들간의 inharmonicity 계수가 가장 작게 나타났다. 따라서 奚琴에 있어서 MAR과 MWR의 周波數차는 1 Octave정도가 가장 이상적이라고 판단되며 이때의 腹板 중앙部의 두께는 4.5mm 정도이었다.

## 참고문헌

1. 成視外 4人著, 李惠求 譯, "樂學軌範", 재단법인 민족문화추진회, 1978.
2. Frederick Vinto Hunt, "Origins in Acoustics", Yale University Press Inc., London, 11-15, 1978.
3. Galileo Galileo, "Dialogues on Music and Acoustics", J. Hoor, London 138-157, 1730.
4. Lindsay R.B., "the Story of Acoustics", J.A.S.A., 3 9, 629-644, 1966.
5. 金琪洙, "國樂入門", 世光出版社, 서울, 1983.
6. Harry F. Olson, "Music, Physics, and Engineering", 2nd ed, Dover Publications, Inc., New York, 217, 246-262, 1967.
7. John S. Rigden, "Physics and the Sound of Music", 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 227.

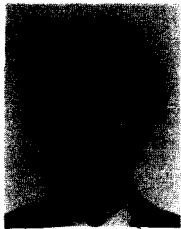
奚琴의 音響學的 特性.

1985.  
 8. Arthur H. Benade, "Fundamentals of Musical Acoustics", 2nd ed. (Oxford University Press, Inc., London, 507 512, 1976.  
 9. Fletcher, H., E.D. Blackham, and R. Stratton, "Quality of Piano Tones", J.A.S.A., 34(6), 749-761, 1962.  
 10. 杜世鍾 外 2人, "피아노의 等價回路와 低音部 音質의 改善方案", 韓國音響學會誌, 6(1), 39-47, 1987.  
 11. Anders Askenfelt, "Measurement of bow motion and bow force in violin playing", J.A.S.A., 80(4), 1007-1015, 1986.  
 12. Carl-Hugo Agren, "Measuring the Resonances of Treble Viol Plates by Hologram Interferometry and Designing an Improved Instrument", J.A.S.A., 51(6), 1971-1983, 1972.  
 13. Eric B. Arnold and Gabriel Weinrich, "Acoustical spectroscopy of violins", J.A.S.A., 72(6), 1739-1749, 1982.  
 14. Harvey Fletcher, E. Donnell Blackham, and O. Norman Greertsen, "Quality of Violin, Cello, and Bass-Viol Tones. I", J.A.S.A., 37(5), 851-863, 1965.

15. O.H. Schuck and R.W. Young, "Observation on the Vibratos of Piano Strings", J.A.S.A., 15(1), 1-11, 1943.  
 16. John C. Schelleng, "The lower string and the player", J.A.S.A., 55(1), 26-41, 1971.  
 17. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, and James V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics", 3th ed, John Wiley & Sons, Inc., New York, 92-94, 1982.  
 18. 金琪洙, 姜恩俊 編, "奚琴正樂", 韓國國樂高等學校, 서울, 2, 1979.  
 19. John C. Luke, "Measurement and Analysis of Body Vibrations of a Violin", J.A.S.A., 49(4), 1264-1274, 1971.  
 20. Ian M. Firth, "Physics of the guitar at the Helmholtz and first top-plate resonances", J.A.S.A., 61(2), 588-593, 1977.  
 21. 정희석, "목재이학", 서울대학교 출판부, 서울, 1986  
 22. Shih-yu Feng, "Some acoustical measurements on the Chinese musical instrument Pi-P'a", J.A.S.A., 75(2), 599-602, 1984.

▲ 임 무 열 (정희원)

1960년 10월 13일생  
 1983. 2. 25 : 충남대학교 이과대학 물리학과 졸업  
 1988. 8. 26 : 충남대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학석사)  
 1987. 7. 6 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 조교



▲ 尹 和 重 (정희원)

1931년 1월 5일생  
 1957년 3월 : 고려대학교 물리학과 졸업  
 1973년 8월 : 미국 Brigham Young Univ. 대학원 석사 수료  
 1975년 5월 : 충남대학교 대학원 이학박사취득  
 1981년 9월~1982년 8월 : 미국 Western Michigan Univ. 교환교수  
 1963년 5월~현재 : 충남대학교 전임강사~교수  
 1983년~현재 : 한국음향학회 이사

