

# 편경 제작용 경석 표본의 역학적 물성 측정

## Measurement of Mechanical Properties of Pyeongyeong Chime Stone

박 상 하\*, 노 정 옥\*, 성 썩 모\*  
(Sang Ha Park\*, Jung Uk Noh\*, Koeng-Mo Sung\*)

\*서울대학교 전기·컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소 음향공학연구실  
(접수일자: 2007년 8월 3일; 수정일자: 2007년 9월 28일; 채택일자: 2008년 5월 15일)

본 논문에서는 편경 제작에 사용되는 경석 표본의 기본적인 역학적 물성을 측정하였다. 물성값들은 돌을 파괴하지 않고 음파를 이용하여 측정되었고, 측정된 물성값들은 경석 표본의 밀도 및 준종파 (extensional wave)와 굽힘파 (bending wave)의 고유 진동 주파수, 그리고 이를 통하여 구한 영률 (Young's modulus)이다. 영률을 구하기 위하여 준종파와 굽힘파의 주파수 스펙트럼 분석을 통해 얻은 첫 번째 고유 진동 주파수 값을 이용하였고, 보의 준종파와 굽힘파에 대한 이론적 고찰과 실험으로 경석 표본의 영률을 구하였다. 그 결과, 준종파와 굽힘파의 고유 진동 주파수로 2%의 이내의 편차를 갖는 경석 표본의 영률을 구하였다.

**핵심용어:** 편경, 경석, 준종파 속도, 굽힘파 속도, 영률

**투고분야:** 음악 음향 및 음향 심리 (8)

In this paper, we have measured the fundamental properties of chime stone for Pyeongyeong. The properties are measured by wave propagation in the stone without destroying the stones, the measured properties are the chime stone density, natural frequencies of extensional wave and bending wave, and Young's modulus which is calculated by the measured properties. To find a value for Young's modulus, the fundamental frequencies which are obtained through spectrum analysis of extensional wave and bending wave are used. We calculated Young's modulus of chime stone by theoretical study and measurement on extensional wave and bending wave of the beam. As a result, we obtained Young's modulus by the fundamental frequencies of extensional wave and bending wave which deviation is within 2%.

**Keywords:** Pyeongyeong, Chime stone, Extensional wave, Bending wave, Young's modulus

**ASK subject classification:** Musical Acoustics and Psychoacoustics (8)

### I. 서론

동서양을 막론하고 거의 모든 나라에 존재하는 타악기는 인류의 역사에 있어 가장 오래 전부터 사용된 악기이다. 그럼에도 불구하고 악기의 진화나 악곡에서의 쓰임이 현악기나 관악기에 비해 상당히 더딘 편이었다. 악기의 더딘 발전과 헤아릴 수 없을 정도로 다양한 종류 때문에 악기 음향학 분야에서도 다른 악기에 비해 타악기에 관한 연구는 가장 적은 편이었다. 그러나 현대에 들어서면서 작곡가들의 새로운 매체와 음색에 대한 관심으로 인하여 모든 장르에서 타악기의 사용 빈도가 늘어나고 있다. 이와 더불어 몇몇 서양 타악기의 진동모드나 음색

등에 대한 연구들이 수행되었고, 현재에도 이루어지고 있다.

반면, 국악기의 경우 타악기 뿐 아니라 모든 종류의 악기에 대한 연구가 미흡한 편이다. 특히 국악 타악기에 대한 연구는 21세기에 들어서면서 이루어지기 시작했다고 해도 과언이 아니다. 한국 고음악에 대한 연구와 국악기 제작 및 개량을 위하여 국악기에 대한 과학적이고 음향학적인 연구가 이루어져야 한다.

여러 국악 타악기 중 특히 편경의 경우, 서양 타악기에서 일반적으로 사용되는 재질인 나무, 금속, 가죽이 아닌 돌로 제작된다. 그래서 편경은 악기가 제작된 후 여러 해가 지나도 악기 형태나 음고가 거의 원형 그대로 보존된다. 이는 옛 음악에 대한 연구에 좋은 조건을 제공해주며, 아직까지 한국 전통음악 음 체계의 표준이 확립되지 않은 현실에서 편경의 음향 분석은 옛 국악에서 사용

책임저자: 성 썩 모 (kmsung@acoustics.snu.ac.kr)  
151-600 서울특별시 관악우체국 사서함 34호  
서울대학교 공과대학 전기공학부 #025  
(전화: 02-880-8407; 팩스: 02-880-8207)

된 음 복원과 국악에서의 음 체계 확립에 필수적이다.

편경의 음향 분석 연구의 일환으로 본 논문에서는 편경 제작에 사용되는 경석의 역학적인 물성을 연구하였다. 편경 디자인에 있어 중요한 요소이자 악기 재질의 물성들 중 가장 기본적이고도 중요한 것은 밀도와 영률 (Young's modulus)이다. 일반적으로 암석의 영률은 시료를 파괴 하면서 측정된 변형력 (stress)과 변형 (strain)으로부터 계산된다. 하지만 편경의 음향을 이러한 방법으로 직접 측정하는 것은 과거 편경 유물의 양적인 부족과 암석을 직접 깎기 힘들다는 단점이 있다. 본 논문에서는 시료를 파괴하지 않고, 영률값을 구하고자 음파 측정법을 사용하였다. 보의 준종파 (extensional wave)와 굽힘파 (bending wave)의 고유 진동 주파수 및 밀도 측정을 통하여 영률값을 계산하였고, 준종파와 굽힘파를 통해 각각 구한 영률 값을 서로 비교해보았다.

## II. 편경과 경석

편경은 고정된 음높이를 가진 돌로 만든 타악기이다. 고려 예종 11년 (1116) 중국 송나라로부터 들여와 궁중의 의식음악에 사용되었다. 편경은 'ㄱ'자 모양으로 깎은 16개의 경석이 음높이의 순서대로 위, 아래 두 단에 8개씩 매어 달려 있는 형태이며, 경의 두께에 따라 음높이가 달라진다. 편경의 형태는 그림 1과 같다.

편경 제작에 사용되는 돌을 경석 혹은 옥돌이라 부르는데, 처음에는 이러한 경석이 희귀하여 중국에서 들여다 썼다. 세종 7년 (1425) 경기도 남양에서 무늬가 아름답고 소리가 맑은 경석이 발견된 이후, 이 경석을 이용하여 편경과 특경을 제작하였다. 남양 이외에 평안도 성천, 함경

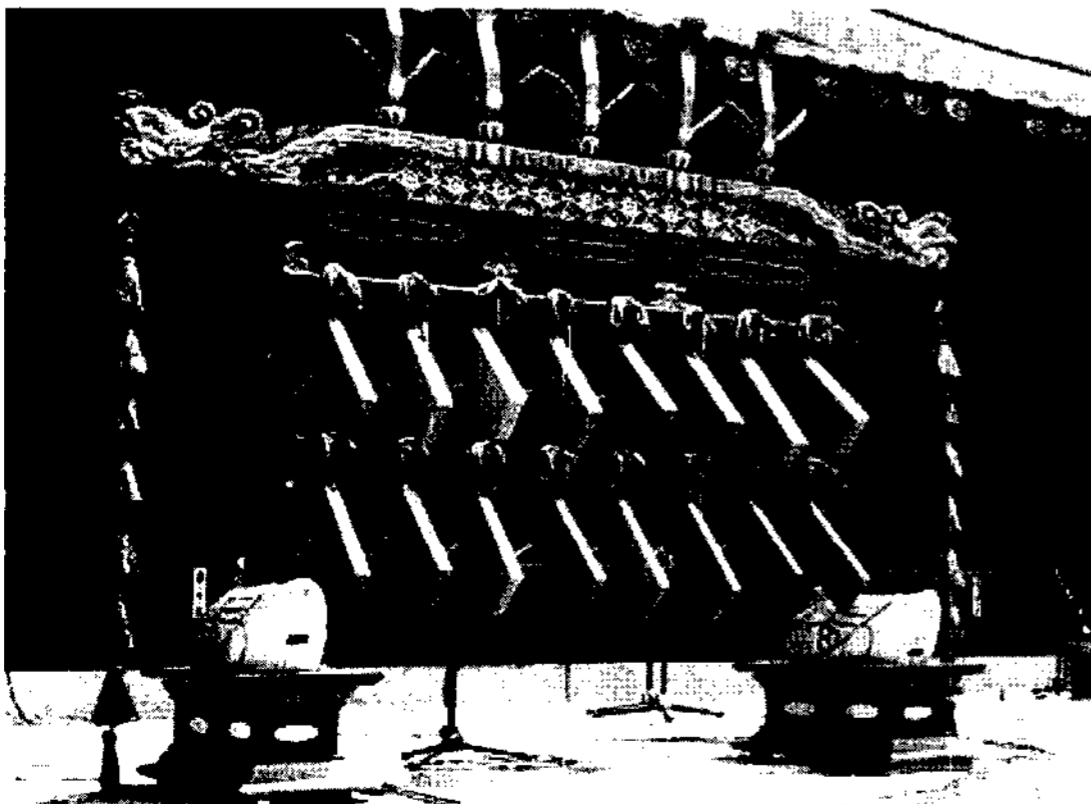


그림 1. 편경  
Fig. 1. Pyeongyeong.

도 단천에서도 경석이 생산된다고 하나, 남양의 것이 가장 질이 좋아 세종 이후에도 여러 번 채취되어 쓰였다. 하지만 근래에 들어서면서 다시 중국에서 수입한 경석을 사용한다고 알려져 있다.

경석이란 지질학적인 전문 용어가 아니라 맑은 소리가 나는 옥돌이라 하여 지어진 이름이기에, 경석이 속하는 암석의 분류에 대하여는 정확히 알려져 있는바가 없다.

## III. 보 (beam)의 고유 진동 주파수와 영률 (Young's modulus)의 관계

### 3.1. 보 (beam)에서의 준종파 (extensional waves)

순수한 종파 (longitudinal wave)는 모든 방향의 길이가 파장에 비해 매우 큰 경우에만 발생한다. 하지만 본 연구의 대상인 편경 제작용 경석 표본과 같이 시료가 보 (beam)인 경우에는 순수한 종파 대신 준종파 (extensional wave, quasi-longitudinal wave)가 발생하게 된다. 이때, 보 속에서의 준종파 속도 (extensional wave velocity)  $c_E$  와 영률 (Young's modulus)  $E$ , 매질의 밀도  $\rho$  사이의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 [1-4].

$$c_E = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

따라서, 시료의 영률  $E$ 를 직접 측정할 수 없어도, 보의 준종파 속도  $c_E$ 와 편경 표본의 밀도  $\rho$ 를 구하면 위 관계식으로부터 영률  $E$ 를 계산해낼 수 있다. 한편 준종파 속도  $c_E$ 는 유한 길이  $l$ 이고, 양 끝단이 자유단 조건인 보의 고유 진동 주파수  $f_1$ 와 다음과 같은 관계가 있다 [1].

$$f_1 = \frac{c_E}{2l} \quad (2)$$

편경 제작용 경석 표본을 종방향으로 가진하여 고유 진동 주파수  $f_1$ 를 측정하면, 위 두 식으로부터 식 (3)과 같이 영률  $E$ 를 구할 수 있게 된다.

$$E = 4\rho l^2 f_1^2 \quad (3)$$

### 3.2. 보 (beam)에서의 굽힘파 (bending waves)

굽힘파 (bending wave)의 일반적인 파동 미분 방정식은 다음의 식 (4)와 같다. 이는 오일러-베르누이 보 모델 (Euler-Bernoulli beam model) 혹은 고전적 보 모델

(classical beam model)이라 하며, 일반적으로 시료가 길이에 따라 균일하고 가는 경우에 시료의 탄성을 계산한 것이다 [1],[3],[5].

$$-B \frac{\partial^4}{\partial x^4}(v_y, \omega_z, M_z, F_y) = m' \frac{\partial^2}{\partial t^2}(v_y, \omega_z, M_z, F_y) \quad (4)$$

- $B$  : 굽힘강성 (bending stiffness),
- $v_y$  : 횡방향 속도 (lateral velocity),
- $\omega_z$  : 각속도,
- $M_z$  : 굽힘모멘트 (bending moment),
- $F_y$  : 전단력 (shear force),
- $m'$  : 단위길이 당 질량

반면 길이가  $l$  이고, 양 끝단이 자유단 조건인 보의 경우, 돌림힘 (torque)과 전단력 (shear force)이 0이 되고, 굽힘파와 고유진동주파수들과의 관계는 다음과 같다 [2].

$$\frac{\omega l}{2c_B} = \frac{\pi}{4}(3.011, 5, \dots) \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)로부터 길이가  $l$  이고, 양 끝단이 자유단 조건인 보에서 굽힘파의 이상적인 고유 진동 주파수를 구하면 다음과 같다 [2],[5].

$$f_n = \frac{\pi K}{8l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} [3.011^2, 5^2, 7^2, \dots, (2n+1)^2] \quad (6)$$

- $K$  : 단면의 회전반경 (radius of gyration)

위 식으로부터 오일러-베르누이 보 모델의 경우, 1차, 2차, 3차 고유진동주파수 비가 1 : 2.76 : 5.40 임을 알 수 있다.

그러나 앞의 오일러-베르누이 보 모델은 굽힘파의 파장이 보의 단면 치수에 비해 상당히 큰 경우에만 가능하다. 본 논문에서 사용한 경석 샘플의 경우, 굽힘파 측정 결과 파장은 0.5~0.6 m이었으나, 샘플의 평균 길이는 0.435 m, 단면 넓이는 평균 10 cm<sup>2</sup> 안팎이었다. 이러한 경우에는 보의 전단변형과 보 단면의 회전관성의 영향을 고려한 티모센코 보 모델 (Timoshenko beam model)을 사용하여야 한다. 티모센코의 파동 미분 방정식은 다음과 같다 [1][3][6].

$$\frac{B}{m'} \frac{\partial^4 v_y}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial t^2} - \left[ \frac{\Theta'_z}{m'} - \frac{B}{K} \right] \frac{\partial^4 v_y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\Theta'_z}{K} \frac{\partial^4 v_y}{\partial t^4} = 0 \quad (7)$$

- $\Theta'_z$  : 보의 단위길이 당 질량 관성 모멘트 (mass moment of inertia)

식 (7)로부터 구한 보에서의 굽힘파 위상속도 (bending wave phase velocity)  $c_B$  는 식 (8)과 같다.  $h$  는 보의 두께이다 [3].

$$c_B = \sqrt[4]{\frac{B}{m'} \sqrt{\omega} \left( 1 - 3.6 \left( \frac{h}{\lambda} \right)^2 \right)} \quad (8)$$

굽힘강성  $B$  와 단면이 직사각형일 때의 관성 모멘트  $I$  는 각각 식 (9), (10)과 같이 계산된다. 식 (10)에서  $h$  와  $b$  는 각각 보의 두께와 폭을 나타낸다 [3].

$$B = E \cdot I \quad (9)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (10)$$

식 (8)에 길이가  $l$  이고 자유단인 경계 고전을 적용시키고, 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 보의 굽힘파의 보정된 첫 번째 고유 진동 주파수  $f_1$  을 계산하면 다음과 같다.

$$f_1 = \frac{3.56082}{\sqrt{12}} \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[ 1 - 3.6 \left( \frac{h}{1.32836l} \right)^2 \right]^2 \approx \frac{3.56082}{\sqrt{12}} \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[ 1 - 7.2 \left( \frac{h}{1.32836l} \right)^2 \right] \quad (11)$$

따라서 앞의 준종파의 경우와 같이, 편경 표본을 횡방향으로 가진하여 첫 번째 고유 진동 주파수  $f_1$  을 측정하면 식 (12)과 같이 영률  $E$  를 구할 수 있다.

$$E = \left( \frac{\sqrt{12}}{3.56082} \right)^2 \rho \frac{l^4}{h^2} f_1^2 \left[ 1 - 3.6 \left( \frac{h}{1.32836l} \right)^2 \right]^4 \approx \left( \frac{\sqrt{12}}{3.56082} \right)^2 \rho \frac{l^4}{h^2} f_1^2 \left[ 1 - 7.2 \left( \frac{h}{1.32836l} \right)^2 \right]^2 \quad (12)$$

오일러-베르누이 보 모델의 경우 1차, 2차, 3차 고유진동주파수 비가 1 : 2.76 : 5.40인 데에 반해, 티모센코 보 모델의 경우 1차, 2차, 3차 고유진동주파수 비가 1 : 2.71 : 5.15로 나타난다 [7]. 이는 이미 식 (8)에서 보인 바와 같이 유한한 두께의 보에 대해서는 굽힘파의 위상속도가 주파수가 올라감에 따라 이상적인 경우보다 조금 떨어지는데 기인한다.

### IV. 실험방법

편경 제작용 경석의 영률을 구하기 위해 다음과 같은 측정 실험을 진행하였다. 먼저 편경 제작자에게 보 형태의 편경 제작용 경석 표본 제작을 의뢰하여 두께, 폭, 길이가 각각 다른 3개의 시료를 준비하였다. 본 연구에 사용된 시료는 중국에서 채취한 경석으로, 하나의 암석으로부터 세 조각의 시료를 추출하였다.

각 시료의 치수 및 질량을 디지털 마이크로미터와 전자저울로 측정하였고, 이를 이용하여 밀도를 구하였다. 각 시료의 형태와 치수, 질량, 밀도는 그림 2, 표 2와 같다.

이어서 그림 3, 4와 같이 각 시료를 각각 종, 횡방향으

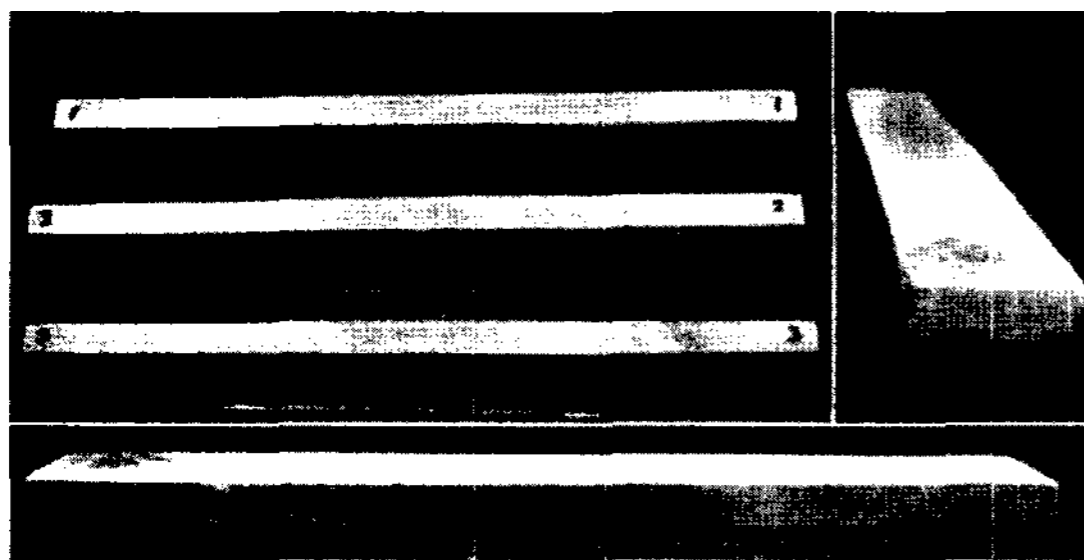


그림 2. 편경 제작용 경석 표본  
Fig. 2. Chime stone samples for Pyeongyeong.

표 1. 각 시료의 치수, 질량, 밀도  
Table. 1. The dimension, mass, density of chime stone.

시료	평균 길이 [mm]	평균 두께 [mm]	평균 폭 [mm]	질량 [kg]	밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]
1	437.00	20.97	50.35	1.2200	2644.1
2	439.43	20.03	57.43	1.3540	2678.0
3	440.16	18.48	40.78	0.8920	2689.1

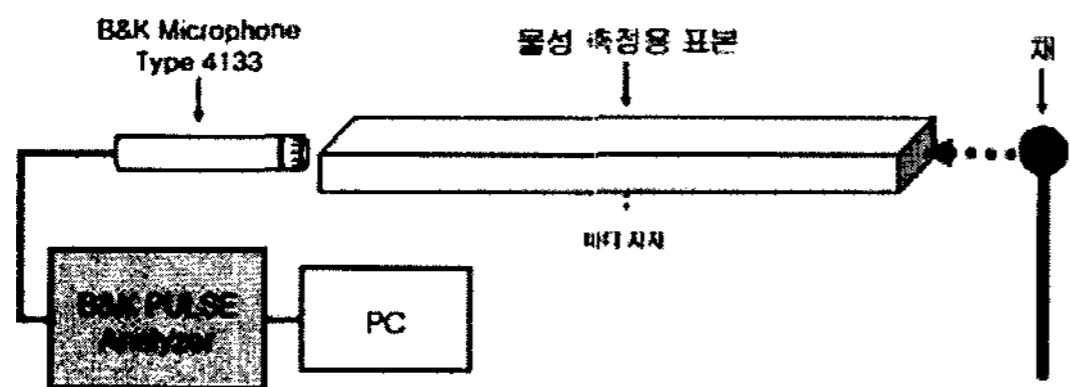


그림 3. 준종파 측정 개요  
Fig. 3. The scheme of extensional wave measurement.

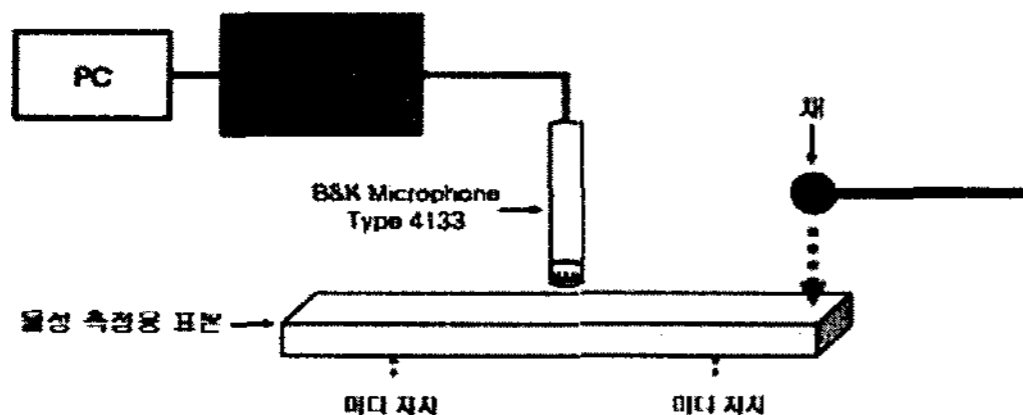


그림 4. 굽힘파 측정 개요  
Fig. 4. The scheme of bending wave measurement.

로 가진하여 준종파와 굽힘파의 첫 번째 고유 진동 주파수를 측정하였다. 측정시 경계 조건은 자유단이라 가정하였고, 이를 위하여 시료가 진동하지 않는 마대 부분만 최소한으로 지지하였다. 동기화 방법은 수동으로 시작 버튼을 누른 후 채로 가진하여 신호를 받아들이도록 설정하였고, 주파수 스펙트럼 분석 전에 사용한 가중함수 (window function)는 해닝 윈도우 (Hanning window)이다. 측정을 통해 얻은 결과를 식 (3)과 식 (12)에 대입하여 각 경우에서의 영률을 구하였고, 그 결과가 서로 일치하는지를 알아보았다.

측정에 사용한 장비는 다음 표 2와 같다.

표 2. 측정 장비  
Table. 2. The measurement equipment.

기기명	비고
B&K condenser microphone type 4133	1/2" 측정용 마이크로폰
B&K condenser microphone type 4136	1/4" 측정용 마이크로폰
B&K PULSE 3560C Front-End	측정 신호 입/출력 인터페이스
B&K PULSE Labshop	분석 소프트웨어

### V. 실험 결과

#### 5.1. 준종파 측정 결과

그림 5, 6, 7은 각 시료의 준종파 측정 결과이다.

준종파 측정 결과 피크점들이 정수배 간격으로 나타났고, 이는 각각 첫 번째, 두 번째, 세 번째 고유 진동 주파수를 의미한다. 각 시료의 첫 번째 고유 진동 주파수  $f_1$ , 준종파 속도  $c_E$  및 식 (3)으로부터 구한 영률  $E$ 는 표 3과 같다.

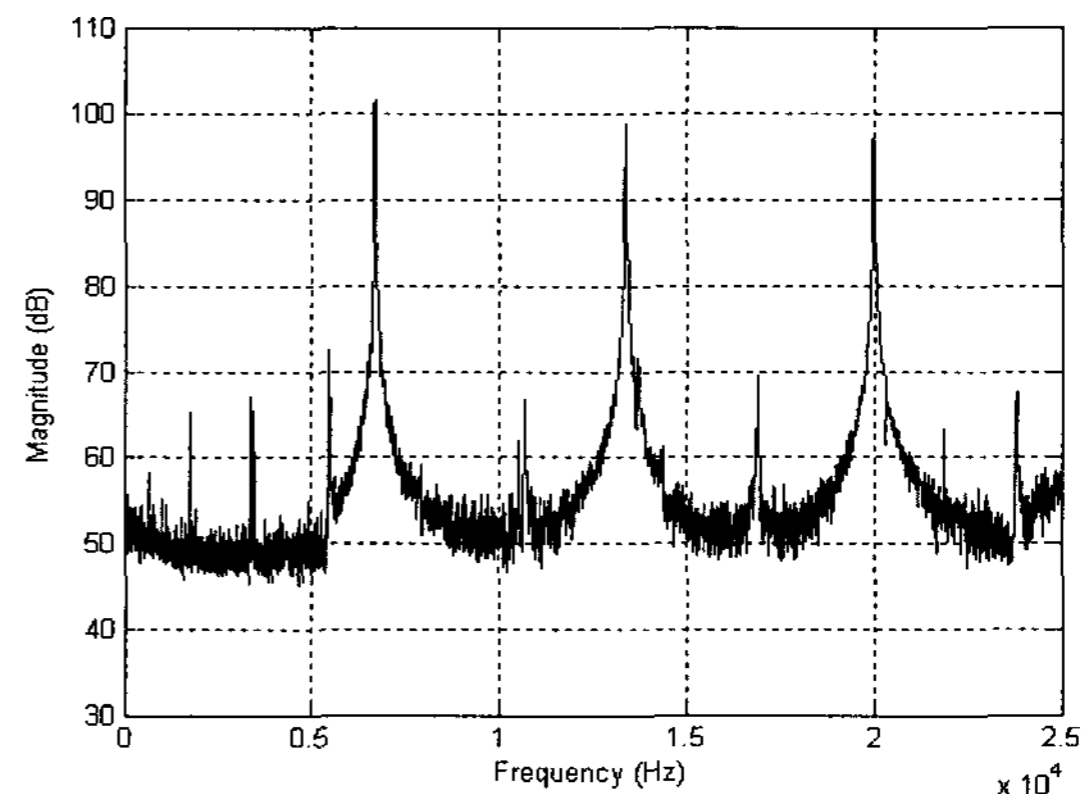


그림 5. 시료 1의 준종파 주파수 스펙트럼  
Fig. 5. Frequency response of extensional wave-sample 1.

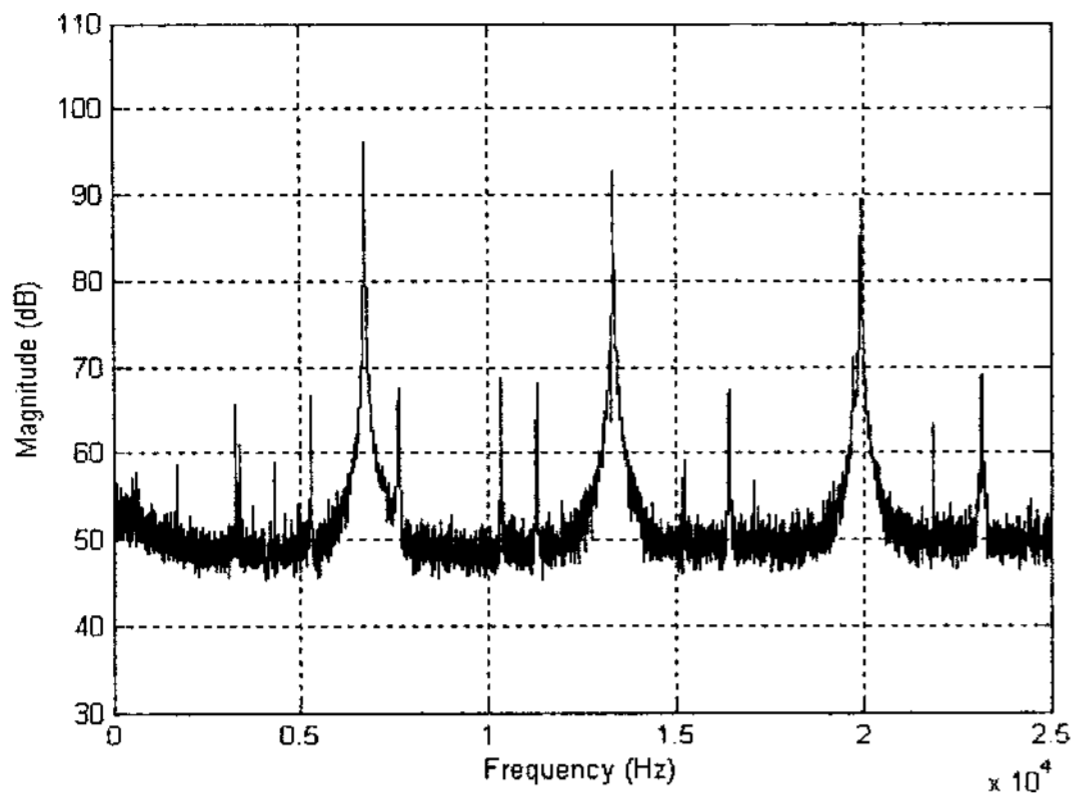


그림 6. 시료 2의 준종파 주파수 스펙트럼  
Fig. 6. Frequency response of extensional wave-sample 2.

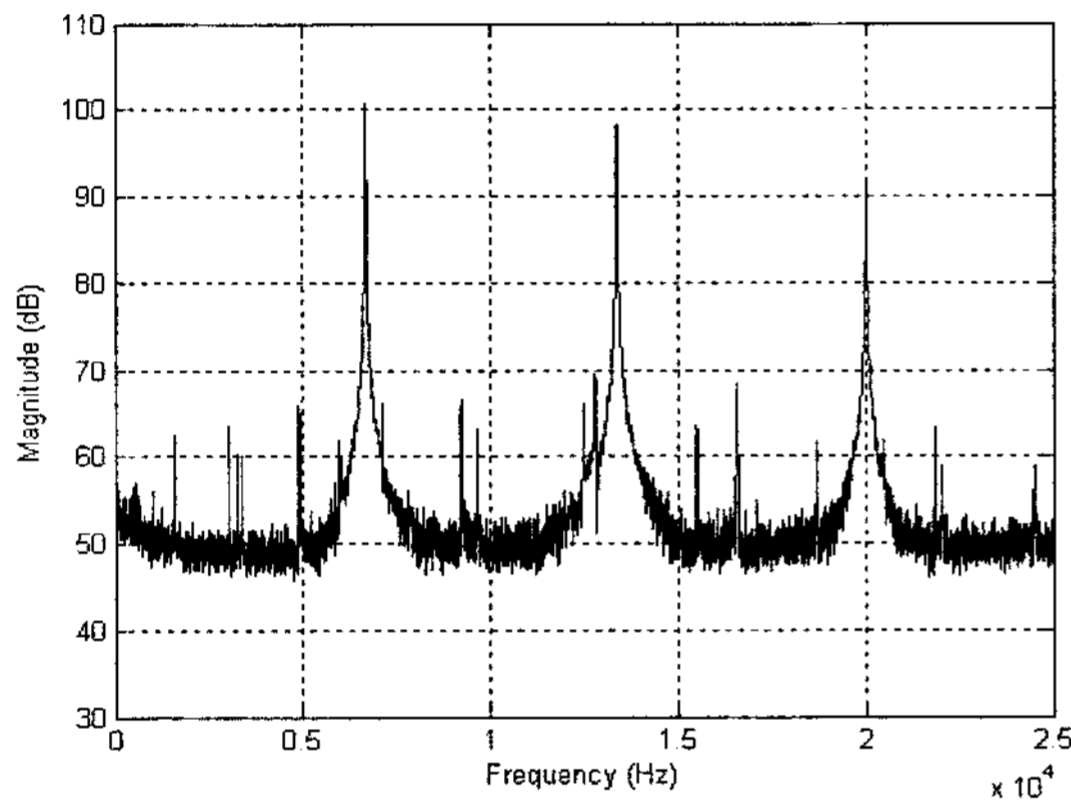


그림 7. 시료 3의 준종파 주파수 스펙트럼  
Fig. 7. Frequency response of extensional wave-sample 3.

표 3. 각 시료의 첫 번째 고유 진동 주파수, 준종파 속도, 영률  
Table 3. Fundamental frequency, extensional wave velocity, Young's modulus of samples.

시료	$f_1$ [Hz]	$c_E$ [m/s]	$E$ [N/m <sup>2</sup> ]
1	6676.6	5835.3	9.00e+10
2	6703.1	5891.2	9.29e+10
3	6665.6	5868.0	9.26e+10

위 결과를 보면 시료 1의 영률 값이 시료 2, 3과 약 2.8% 정도 편차가 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 표 2에서 볼 수 있듯이 시료의 밀도 차이가 가장 큰 원인일 것으로 생각된다. 세 시료가 본래 한 덩어리의 편경 제작용 경석을 잘라 만든 것임에도 불구하고 밀도에서 어느 정도 차이가 존재하는 것은 암석이라는 재료의 불균일성 (inhomogeneity)에 의한 것으로 보인다. 반면 시료 2, 3의 결과는 편차 0.4% 이내로 나타나고 있다. 이러한 차이는 다음의 굽힘파 측정 결과에서도 나타난다.

### 5.2. 굽힘파 측정 결과

그림 8, 9, 10은 각 시료의 굽힘파 측정 결과이다.

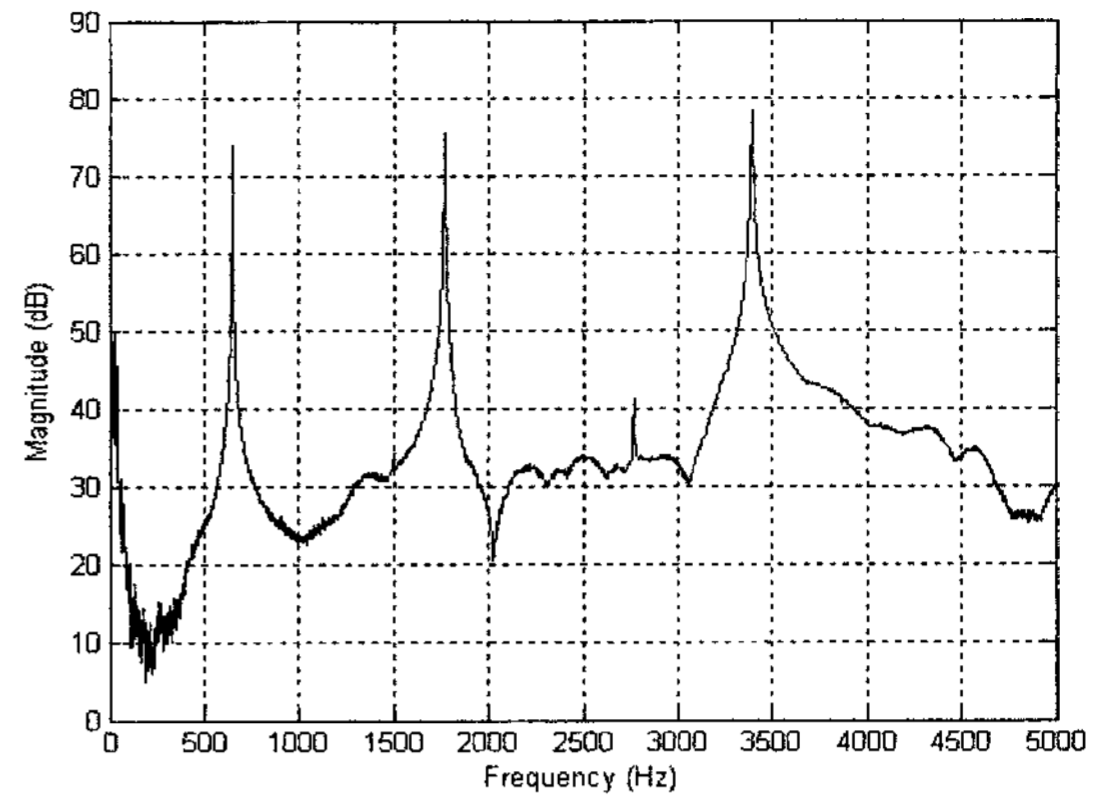


그림 8. 시료 1의 굽힘파 주파수 스펙트럼  
Fig. 8. Frequency response of bending wave-sample 1.

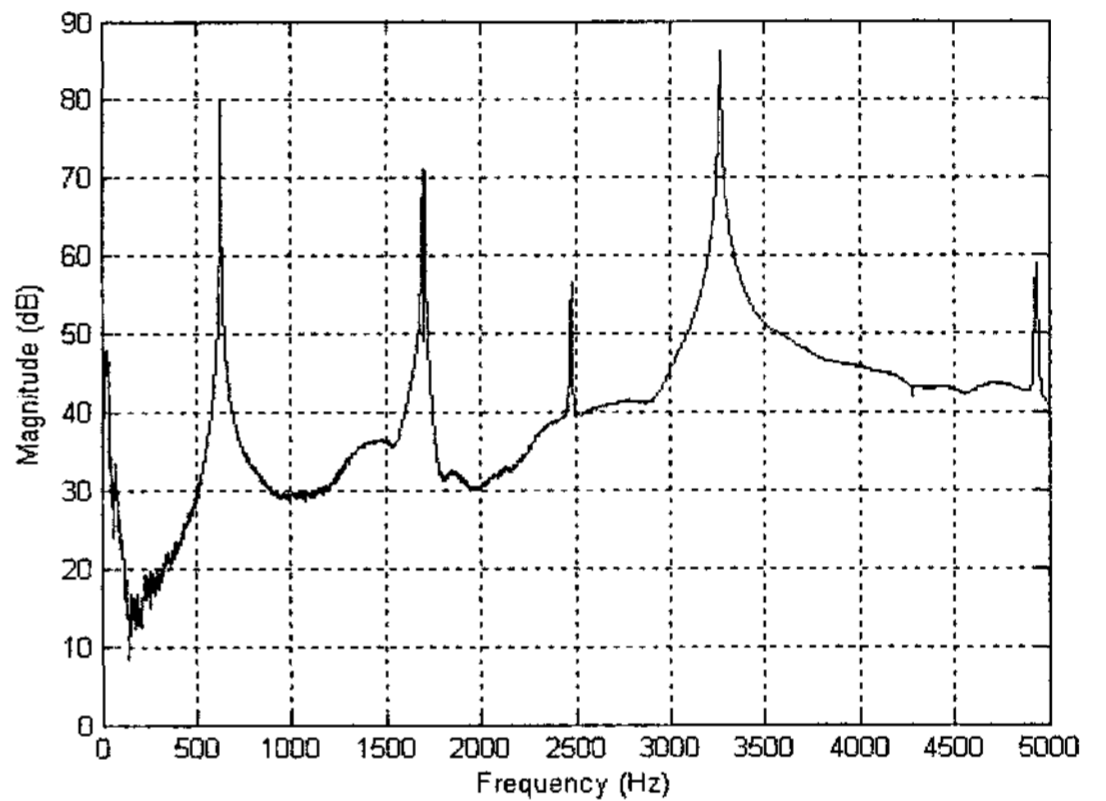


그림 9. 시료 2의 굽힘파 주파수 스펙트럼  
Fig. 9. Frequency response of bending wave-sample 2.

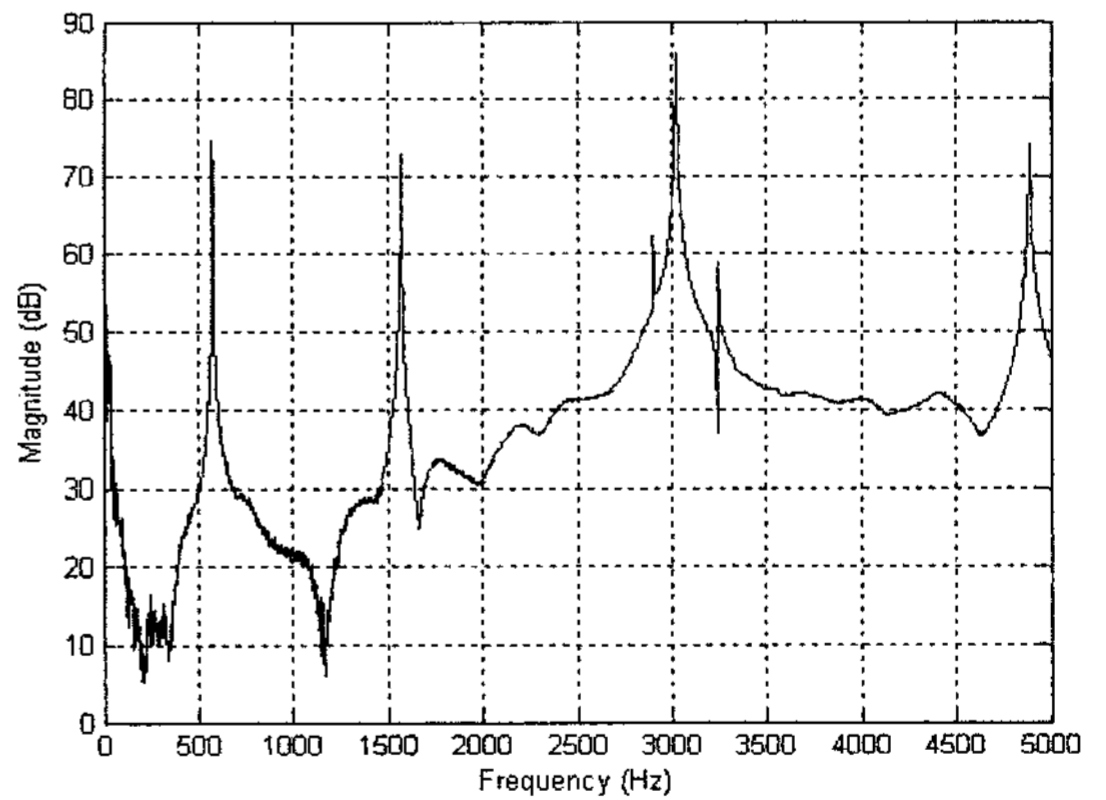


그림 10. 시료 3의 굽힘파 주파수 스펙트럼  
Fig. 10. Frequency response of bending wave-sample 3.

각 시료의 굽힘파 주파수 스펙트럼의 첫 번째, 두 번째, 세 번째 피크점으로부터 굽힘파의 고유 진동 주파수값들을 구하였다. 주 피크점들 사이에 간혹 작은 피크점들이 존재하기도 하였으나, 이는 세 시료의 측정 결과에서 공통적으로 나타난 피크점이 아닐뿐더러 굽힘파의 이론적인 고유 진동 주파수 비에 적합하지 않은 값이었기에, 이런 피크점들은 보의 진동에 의한 것이 아닌 측정 시스템



에 의한 에러라 판단하고 배제하였다.

시료들의 첫 번째 고유 진동 주파수와 그 배음들의 주파수비는 표 4와 같다.

표 4. 시료 1~3의 첫 번째 진동 주파수에 대한 배음들의 주파수 비

Table. 4. Frequency ratios of sample 1~3.

주파수비 (f1)	시료1	시료2	시료3	오일러-베르누이 보	티모센코 보
f1	1	1	1	1	1
f2	2.73	2.71	2.73	2.76	2.71
f3	5.23	5.19	5.25	5.40	5.15

위 결과를 통해 본 논문의 편경 샘플은 오일러-베르누이 보 모델보다 티모센코 보 모델로 가정할 수 있음을 다시금 확인할 수 있다. 서양의 글로켄슈필 (Glockenspiel) 을 이용한 굽힘파 주파수 스펙트럼 측정 결과도 티모센코 보 모델로 설명되었다는 사실도 이러한 가정을 확신할 수 있게 한다.

각 시료의 첫 번째 고유 진동 주파수  $f_1$  과 식 (12)로부터 구한 영률  $E$  는 표 5와 같다.

표 5. 각 시료의 첫 번째 고유 진동 주파수와 영률

Table. 5. Fundamental frequency, Young's modulus of samples.

시료	$f_1$ [Hz]	$E$ [N/m <sup>2</sup> ]
1	648.4	8.89e+10
2	628.9	9.47e+10
3	575.8	9.41e+10

앞의 준종파 측정 결과에서와 같이, 굽힘파 측정 결과에서도 시료 1의 결과가 시료 2, 3의 결과와 약 6% 정도 편차가 있음을 알 수 있다.

위의 결과를 종합하여 준종파와 굽힘파로 각각 구한 영률  $E$  를 표 6에 나타내었다.

표 6. 준종파, 굽힘파로 각각 구한 영률

Table. 6. Young's modulus obtained by extensional wave and bending wave.

시료	$E$ (준종파) [N/m <sup>2</sup> ]	$E$ (굽힘파) [N/m <sup>2</sup> ]	편차 [%]
1	9.00e+10	8.89e+10	1.24
2	9.29e+10	9.47e+10	1.94
3	9.26e+10	9.41e+10	1.63

표 6의 결과로부터, 준종파와 굽힘파로 구한 영률 값이

시료 1과 시료 2, 3의 사이에서는 최대 약 6% 정도의 편차가 존재하고, 시료 2와 3 사이에서는 최대 0.7%의 편차가 존재함을 알 수 있다. 그러나 각 시료의 준종파와 굽힘파로 구한 영률 값들간의 편차는 1.24~1.94% 정도로 어느 정도 비슷한 양상을 나타냄을 확인할 수 있었다.

준종파와 굽힘파로 구한 영률값의 차이는 준종파를 이용하여 영률을 구하는 과정에서 발생한 것으로 보인다. 굽힘파로부터 영률을 구하는 경우, 보의 전단변형과 보 단면의 회전관성의 영향을 고려한 티모센코 보 모델을 사용하여 에러 보정을 하였다. 하지만 준종파로부터 영률을 구하는 경우, 보의 길이가 단면 형상에 비해 충분하지 않음에 따른 보정이 이루어지지 않았다. 이에 대한 연구는 추후에 더 이루어져야 할 것으로 보인다.

하나의 암석에서 추출한 세 조각의 시료임에도 불구하고 굽힘파 속도나 준종파 속도 측정 결과에서 시료간 차이가 나타났다. 이러한 시료간의 영률값의 편차는 밀도 편차와 비례하였다. 시료간의 영률값 차이는 일차적으로 대상 재질의 불균일성 (inhomogeneity)에 기인한 것이라 생각된다. 이외에도 시료의 가공정밀도 또한 영률값 차이 발생의 요인이 될 수 있으며, 이는 좀 더 많은 시료의 확보 및 측정, 시료의 가공 정밀도 향상 등의 향후 진행을 통해 보완해야 할 것으로 보인다.

이러한 방식으로 측정된 경석의 물성값들로부터 FEM 과 같은 시뮬레이션을 통하여 편경의 음향 분석이 가능할 것으로 보인다. 편경의 음향분석은 과거 편경 샘플의 고유 진동 주파수 복원과 이를 토대로 한 국악의 황종음 복원 및 한국음악 음체계의 표준화 작업의 첫걸음이라 생각한다.

## VI. 결론

본 논문에서 편경 제작용 경석 표본의 기본적인 역학적 물성들을 이에 대한 이론적 고찰과 실험을 통하여 알아보았다. 우선 실제 보의 경우에서 밀도, 준종파 속도, 굽힘파 속도와 Young's modulus간의 수식적 관계를 구하였다. 그 다음, 시료의 치수 및 질량을 측정하여 밀도를 구하고, 각 시료를 종, 횡방향으로 가진하여 준종파와 굽힘파의 첫 번째 고유 진동 주파수를 측정하였다. 실험을 통해 구한 밀도, 준종파 및 굽힘파의 첫 번째 고유 진동 주파수를 앞서 구한 수식에 대입하여 각 경우에서의 영률을 구하고, 영률의 편차를 알아보았다.

그 결과 각 시료의 준종파와 굽힘파로 구한 영률값들은

각각  $90 \times 10^9 \sim 93 \times 10^9$  [N/m<sup>2</sup>],  $89 \times 10^9 \sim 95 \times 10^9$  [N/m<sup>2</sup>]으로 나왔고, 그 편차는 2% 이내로 나타났다. 하지만 세 시료간의 영률값 편차는 최대 6% 정도로 나타났다. 이러한 결과는 준종파 수식에서 약간의 에러 보정이 이루어지지 않은 점과 대상 재질의 불균일성에 의한 시료의 밀도 차이가 가장 큰 원인일 것이라 생각되지만, 시료의 가공 정밀도 또한 하나의 요인이 될 수 있으며 그 이외에도 다른 요인들이 존재할 것이라 생각된다. 이는 좀 더 많은 시료의 확보 및 측정, 시료의 가공 정밀도 향상 등의 향후 진행을 통해 보완해야 할 것으로 보인다.

### 참고 문헌

1. L. Cremer, M. Heckle, and E. E. Ungar, *Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*, (springer, second edition, Jan, 1990).
2. Neville H. Fletcher and Thomas D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, (springer, second edition, 1998).
3. Miguel C. Junger and David Feit, *Sound, Structures, and Their Interaction*, (Asoa, 1993).
4. William T. Thomson, *Theory of Vibration with Applications*, (Printice-Hall, third edition, 1981).
5. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, (wiley, fourth edition, 2000).
6. Arturs Kalnins, Clive L. Dym, *Vibration-Beams, Plates, and Shells*, (Halsted Press, first edition, 1976).
7. Felipe Ordutla-Bustamante, "Nonuniform beams with harmonically related overtones for use in percussion instruments", *J. Acoust. Soc. Am*, 90, 2938, 1991.

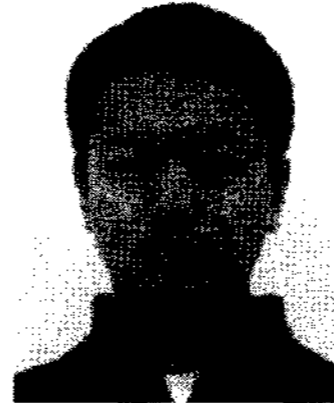
### 저자 약력

#### •박 상 하 (Sang Ha Park)



1982년 1월 27일생  
 2005년 2월: 서울대학교 음악대학 기악과 졸업 (학사)  
 2008년 2월: 서울대학교 공과대학 전기·컴퓨터공학부 졸업 (공학석사)  
 2008년 3월~현재: 서울대학교 공과대학 전기·컴퓨터공학부 박사 과정

#### •노 정 욱 (Jung Uk Noh)



1977년 10월 19일생  
 2000년 8월: 서울대학교 공과대학 전기·컴퓨터공학부 졸업 (학사)  
 2003년 2월: 서울대학교 공과대학 전기·컴퓨터공학부 졸업 (공학석사)  
 2003년 3월~현재: 서울대학교 공과대학 전기·컴퓨터공학부 박사 과정

#### •성 쾡 모 (Koeng-Mo Sung)



1947년 2월 1일생  
 1965년~1971년: 서울대학교 전자공학과  
 1971년~1973년: 독일 아헨공대 Vordiplom  
 1973년~1977년: 독일 아헨공대 전자통신공학 Dipl.-Ing.  
 1977년~1982년: 독일 아헨공대 음향공학 Dr.-Ing. (공학박사)  
 1977년~1983년: 독일 아헨공대 음향공학연구소 연구원  
 1983년~현재: 서울대학교 공과대학 전기·컴퓨터공학부 교수