

## 함수율과 밀도가 참오동나무재의 음향 특성에 미치는 영향\*1

유 태 경\*2 · 정 희 석\*2

### Effect of Moisture Contents and Density of *Paulownia tomentosa* on Acoustical Properties\*1

Tae-Kyung Yoo\*2 · Hee-Suk Jung\*2

#### ABSTRACT

Paulownia wood has been used as sound board for Korean traditional musical instruments such as Keomungo(Korean lute), Kayagum(twelve-stringed Korean harp) and Changgu(hour-glass shaped drum), etc. The acoustic properties of wood affected not only by dimensions but also by density and stiffness of wood. Due to inhomogeneity and hygroscopicity of wood, the acoustic properties of wood are inconsistent.

To clarify the effect of moisture content and air dry density on acoustic properties, longitudinal vibration experiment was accomplished in 3 moisture content levels of 9.6, 11.1 and 12.5% and in 3 air dry density levels of 0.22, 0.25 and 0.28g/cm<sup>3</sup>. The results were as follows:

As the moisture content increased, the fundamental frequency, specific dynamic Young's modulus and sound velocity decreased, but the internal friction increased so that loss of energy increased. The values in damping of sound radiation were rapidly decreased at 12.5%. It meant that the damping of internal friction was larger than damping of sound radiation at high moisture content.

As the air dry density increased, the fundamental frequency, specific dynamic Young's modulus and sound velocity increased, but the internal friction and damping of sound radiation decreased so that loss of energy decreased. And acoustic converting efficiency was hardly influenced by increasing air drying density.

**Keywords** : Hygroscopicity, inhomogeneity, acoustical property

#### 1. 서 론

목재는 예로부터 인간에게 친숙한 재료로서 여러 가지 용도에서 인간생활과 매우 밀접한 관계를 유지해왔다. 그

중에서도 심리적으로 인간의 정서를 안정시켜주고 생기를 불어넣어 주는 악기로서의 용도는 그 중에서도 가치 있는 것이라 할 수 있다. 악기재료로서 중시되는 목재의 성질은 음원의 작은 진동을 증폭시켜 공기 중으로 울려

\*1 접수 1997년 4월 18일 Received April 18, 1997

\*2 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

피지계 하는 증폭기 역할을 하는 매질이 될 때의 음향 특성으로서 일반적으로 동적영률, 전단탄성계수 등의 탄성적 성질과 내부 마찰 등을 지표로써 측정한다. 이 중에서 영률과 전단탄성계수는 악기의 공진진동수 및 음속과 관련이 있으며 내부마찰은 음의 감쇠와 관계가 깊다. 이 중 음의 감쇠는 크게 두 가지로 구분되는데 음방사감쇠(Damping of Sound Radiation)와 내부마찰에 의한 손실감쇠(Damping of Internal Friction)로 악기의 경우에는 전자가 크고 후자가 작은 것이 바람직한 성질이다.

목재는 수분과 밀접한 관계가 있는 재료이다. 목재 세포벽의 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스는 흡습성이 매우 크기 때문에 주위 대기의 온도와 상대습도가 변화에 따라 목재의 함수율이 크게 변동하게 되므로 목재를 재료로 하는 악기의 경우에는 보관장소와 계절, 실내 및 실외 등의 연주 장소에 따라 소리의 특성이 바뀌어 음질이 변화한다.

악기의 음향 특성을 좌우하는 요인에는 재료, 구조 및 형상 등 여러 인자가 있겠으나, 그 악기를 구성하는 향판재의 영향이 매우 크기 때문에 우선 재료의 음향적 성질을 충분히 파악한 후에 이를 기초로 하여 악기의 진동 및 음향 특성을 평가할 수 있다.

목재를 이용한 악기 중 피아노와 바이올린을 비롯한 여러가지 서양 악기에 대한 연구가 이루어지고 있으나 우리 전통악기의 경우에는 접할 기회와 관심이 부족하며 전통악기 제작자들도 오직 구전과 경험에 의지하고 있는 실정 이어서 우리 전통 악기에 관한 연구는 체계적으로 이루어 지지 않은 실정이다. 따라서 우리 나라 고유의 독창적인 악기에 대한 계승과 발전을 위하여 체계적이고 과학적인 연구가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 거문고, 가야금, 장구 등 우리 전통 악기의 재료로 흔히 쓰이는 참오동나무재의 음향적 성질 중 비영률, 내부마찰, 음속, 음방사감쇠, 음전환효율 등이 참오동나무의 함수율과 기건밀도에 의해 영향받는 바를 구명하여, 악기를 제작할 때, 악기의 음이 목재의 특성 및 주위 환경에 의해 변화하는 것을 예측하고, 더 나아가 이러한 결과를 바탕으로 하여, 보다 안정된 악기 제작을 위해 목재의 음향적 성질을 구명하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 재료

#### 2.1.1 공시수종

본 연구에 사용한 재료는 현재 우리 나라 전통악기 제작자들이 수입하여 사용하는 중국산 참오동나무(*Paulow-*

*nia tomentosa*(Thunb.)Steud.)를 공시수종으로 하였다.

#### 2.1.2 시험편의 함수율과 기건밀도

시험편은 10×20×500mm(T×W×L) 크기의 기건재로 목리가 통직하고 결점이 없는 것을 60개 선별하고 20개씩 3 그룹으로 나누어 각각 목표 평형함수율 9.5%(건구온도 30℃, 상대습도 50%), 11.0%(건구온도 30℃, 상대습도 58%), 12.5%(건구온도 30℃, 상대습도 66%)의 조건에서 항량에 도달할 때까지 2개월간 조습처리하였다. 시험편 실제함수율의 평균과 표준편차는 표 1과 같다. 그리고 이들 시험편의 기건무게와 기건용적으로 구한 기건밀도는 0.20~0.29g/cm<sup>3</sup> 범위이나 크기를 3 수준으로 분류하여 구한 기건밀도의 평균과 표준편차는 표 1과 같다.

Table 1. Actual moisture contents and air dry densities of specimen used.

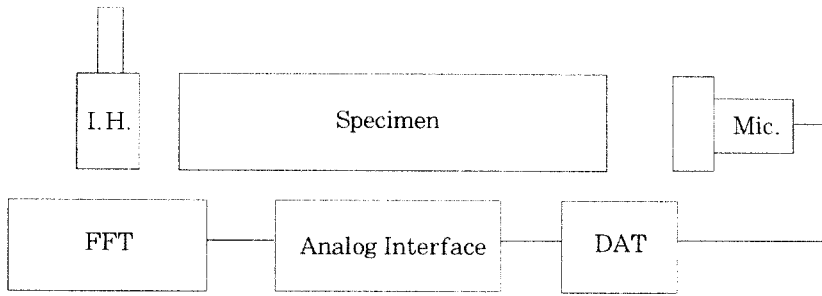
| Actual MC (%) | Air dry density (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------|--------------------------------------|
| 9.6 ± 0.63    | 0.22 ± 0.01                          |
| 11.1 ± 0.35   | 0.25 ± 0.01                          |
| 12.5 ± 0.61   | 0.28 ± 0.01                          |

### 2.2 시험편의 채움

오동나무 시험편의 직접음을 채움하기 위해 오동나무 시험편의 정중앙을 집게로 고정하고 한쪽 끝에서 5cm 떨어진 지점에 AKG사의 D330 BT microphone을 설치한 후, 다른 쪽 끝의 단면 정중앙을 충격 해머로 가격하여 16비트 디지털 방식인 Denon사의 DATDTR-100P에 녹음하였다. 이를 Analog Interface에서 16비트 정밀도로 32kHz sampling을 210개까지 채취하여 PC에서 Hypersignal Windows RT-2로 분석하였다. 측정장치는 그림 1과 같이 배치하였다.

### 2.3 음향특성

공진진동수와 기건밀도를 이용하여 탄성계수를 구하였으며, 시험편의 자유진동감쇠곡선으로부터 내부마찰계수를 계산해 내었다. 이로부터 각각 함수율과 밀도에 따른 시험편내 음속, 음방사감쇠, 음향계수 및 음전환효율을 구하였다.



I.H. : impact hammer,  
 Mic. : microphone,  
 DAT : digital recorder,  
 FFT : Fast Fourier Transform Analyser.

Fig. 1. Diagram of apparatus.

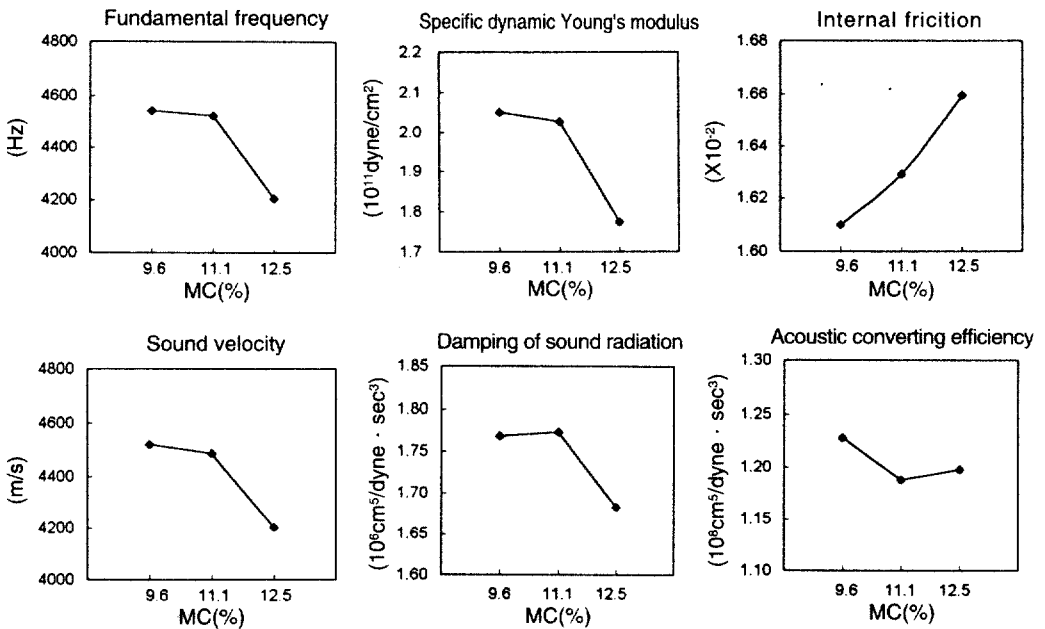


Fig. 2. Relationships between acoustic properties and moisture contents.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 함수율과 음향 특성

함수율 수준별 음향특성 중 1차 공진진동수는 그림 2와 같이 평균 함수율이 9.6%, 11.1%와 12.5%일 때에 각각  $4 \pm 542 \pm 267$ Hz,  $4521 \pm 339$ Hz와  $4203 \pm 282$ Hz

로서 함수율 9.6%에서 최고치를 나타내었고 함수율 11.9%까지 매우 완만한 감소를 보였으나 함수율 12.5%에서 급격한 감소를 보였다. 비동적영률의 변화는 각각  $2.05 \pm 0.26 \times 10^{11}$ ,  $2.03 \pm 0.34 \times 10^{11}$ 과  $1.77 \pm 0.24 \times 10^{11}$ dyne/cm $^2$ 로서, 비동적영률은 함수율이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다. 이러한 경향은 Sasaki(1988)

등이 편백나무와 가문비나무에서 횡진동법으로 구한 비동적영률이 함수율이 증가함에 따라 감소한다고 보고한 내용과 일치하였으며, Hong(1985)이 보고한 국산 오동나무재의 함수율이 0~30%까지 증가함에 따라 비동적영률이 곡선형으로 급격히 감소한다는 내용과도 부합하였다. 본 연구 결과에서는 함수율의 범위가 비교적 좁으므로 넓은 함수율 범위에 대한 경향은 알 수 없었으나 실내의 일반적인 온습도 조건 하에서 도달할 수 있는 목재 평형함수율의 범위에서 목재 함수수분이 목재의 탄성에 영향을 미침을 알 수 있었다.

함수율 수준 별 내부마찰은 함수율이 9.6%, 11.1%와 12.5%일 때에 각각  $1.61 \pm 0.10$ ,  $1.63 \pm 0.53$  및  $1.66 \pm 0.69 \times 10^{-2}$ 로서 함수율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 본 연구의 결과는 Hong(1985)이 국산 오동나무에 대하여 내부마찰이 함수율이 증가함에 따라 직선적으로 완만히 증가한다는 보고 내용과 일치하였다. 따라서 함수율이 높으면 음으로 방사되지 않고 내부마찰에 의해 손실되는 에너지가 증가함을 알 수 있었다. 음속의 경우에는 함수율이 9.6%일 때  $4520 \pm 290$  m/s 이었고, 11.1%일 때  $4487 \pm 382$  m/s이었으며 12.5%일 때  $4203 \pm 282$  m/s이었다. 함수율이 9.6%에서 11.1%로 1.5% 증가하였을 때 음속의 감소가 33m/s에 불과하였으나 함수율이 11.1%에서 12.5%로 1.4% 감소하였

을 때 음속이 284m/s 만큼 감소하였다. 따라서 함수율이 높아질수록 음속이 빠르게 감소함을 알 수 있었다.

함수율 수준별 음방사감쇠값은 함수율이 9.6%일 때  $1.768 \pm 0.10 \times 10^6$  cm<sup>5</sup>/dyne · sec<sup>3</sup>이었고, 11.1%일 때  $1.773 \pm 0.22 \times 10^6$  cm<sup>5</sup>/dyne · sec<sup>3</sup>로 약간 커졌으나 함수율이 12.5%일 때  $1.683 \pm 0.17 \times 10^6$  cm<sup>5</sup>/dyne · sec<sup>3</sup>로 감소하였다. 음방사감쇠는 전체에너지가 소리에너지로 전환되어 감쇠되는 것을 수치화한 값으로서 이 값이 클수록 악기로서 바람직하다.

함수율 수준별 음전환효율은  $1.23 \pm 0.47 \times 10^6$ ,  $1.19 \pm 0.38 \times 10^8$  및  $1.20 \pm 0.58 \times 10^8$  cm<sup>5</sup>/dyne · sec<sup>3</sup>이었는데 함수율이 9.6%일 때 효율이 가장 좋게 나타났으나 함수율이 증가함에 따라 일정한 경향을 나타내지는 않았다.

### 3.2 기건밀도와 음향 특성

기건밀도의 증가에 따른 음향 특성값의 경향은 그림 3의 내용과 같다. 기건밀도가 0.22, 0.25와 0.28g/cm<sup>3</sup>일 때 1차 공진진동수는 각각  $4326 \pm 365$ Hz,  $4378 \pm 359$ Hz 및  $4511 \pm 277$ Hz이었으며 기건밀도가 증가함에 따라 공진진동수도 증가하는 경향을 보였다. 비동적영률은 각각  $1.85 \pm 0.34$ ,  $1.97 \pm 0.37$  및  $2.09 \pm 0.22 \times 10^{11}$  dyne/cm<sup>2</sup>로서 기건밀도가 증가할수록 비동적영률도 증가하였다. Ono(1980)는 가문비나무의 비중이 0.4

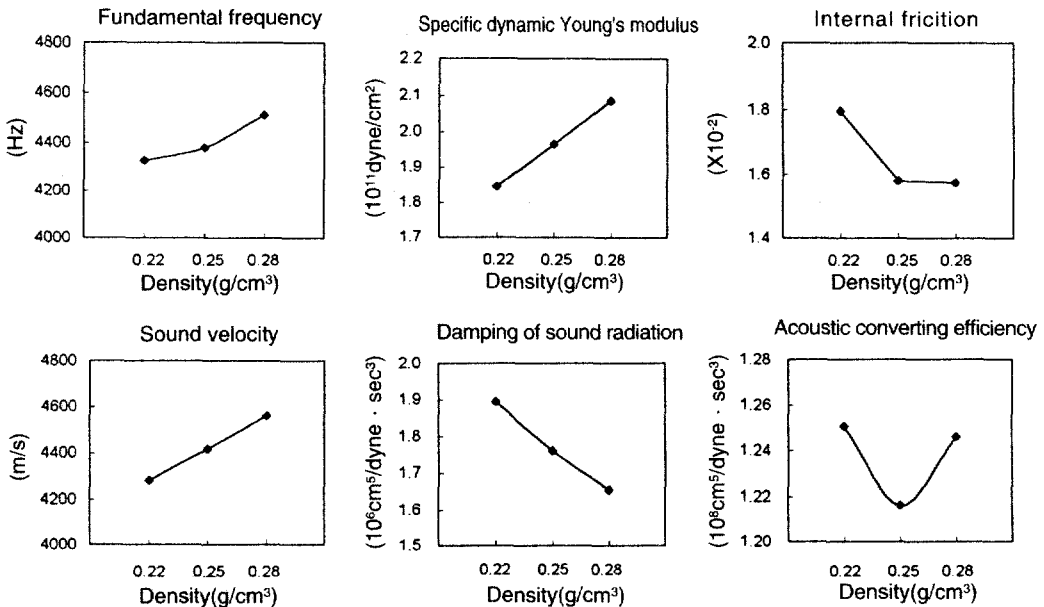


Fig. 3. Relationships between acoustic properties and air-dry densities.

~0.6사이에 있을 때 횡진동시험법에 의한 동적영률이  $1.3 \sim 1.7 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ 의 범위로서 비중과 동적영률에 양의 상관관계가 있음을 보고하였으며 Hong(1985)은 오동나무의 비중과 동적영률간에 상관관계가 0.999로 매우 높음을 보고하였으며 Kataoka(1976)도 가문비나무 향판의 밀도와 동적영률간에 양의 상관관계가 있음을 보고한 바 있는데 모두 본 연구의 결과와 일치하였다. 일반적으로 약기 용재는 밀도가 낮으면서도 영률이 크고 내부마찰값이 적은 것이 유리한데 참오동나무재의 경우에 밀도가 높을수록 동적영률이 증가하는 경향을 나타내었다.

기건밀도 크기별 내부마찰값은 각각  $1.79 \pm 0.63 \times 10^{-2}$ ,  $1.58 \pm 0.55 \times 10^{-2}$ 과  $1.57 \pm 0.56 \times 10^{-2}$ 로서 기건밀도와 내부마찰값간에 서로 음의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 기건밀도의 증가에 따른 내부마찰의 감소 정도는 기건밀도가 0.22에서 0.25g/cm<sup>3</sup>로 증가하였을 때  $0.21 \times 10^{-2}$ 만큼 감소하였고, 기건밀도가 0.25에서 0.28g/cm<sup>3</sup>으로 커졌을 때는  $0.01 \times 10^{-2}$ 만큼 감소하였으므로 내부마찰값의 감소정도는 기건밀도의 크기에 따라 약간 차이남을 알 수 있었다. 본 연구에서 참오동나무의 내부마찰값은 Kang 등(1991·1988)이 횡진동시험법을 이용하여 구한 참오동나무의 내부마찰값보다 매우 컸었는데 이것은 종진동시험법을 사용한 결과로 측정방법의 차이에 기인한 것으로 생각된다. Ono(1980)는 가문비나무 등 7수종에 대하여 연구하여 횡진동시험법에서는 본 연구 결과와 같이 기건밀도가 증가함에 따라 내부마찰이 감소하는 경향을 보였으나 회전진동(torsional vibration)시험법에서는 기건밀도가 커지면 내부마찰도 커진다고 보고하였다. Yano(1989)는 상등급과 중하등급 가문비나무의 내부마찰을 비교하여, 섬유방향으로는 상등급 가문비나무의 내부마찰이 중하등급의 경우보다 더 작게 나타났으나 방사방향으로는 큰 차이가 없음을 보고하였다.

기건밀도의 증가에 따른 음속의 변화는 기건밀도가 0.22, 0.25와 0.28g/cm<sup>3</sup>일 때 각각  $4281 \pm 384$ ,  $4416 \pm 412$  및  $4561 \pm 244 \text{ m/s}$ 로서 기건밀도가 클수록 목재 내에서의 음속이 빠르게 나타났다. Kollmann(1968)은 밀도가 증가하면 음속도 증가한다고 하였으며 증가 속도는 수종에 따라 상이하고 가문비나무와 참나무를 비교하면 참나무의 경우에 밀도의 증가에 따른 음속의 증가속도가 더 커진다고 보고하였다. 음속은 밀도에 대한 동적영률의 비의 제곱근으로 나타나므로 밀도와 반비례하고 동적영률과 정비례한다. 따라서 본 연구의 결과와 같이 기건밀도가 증가함에 따라 음속이 빨라지는 것으로 동적영률에 의한 음속의 증가폭이 기건밀도에 의한 감소폭보다 크게 영향함을 알 수 있었다.

기건밀도의 증가에 따른 음방사감쇠의 변화는 기건밀도가 0.22, 0.25와 0.28g/cm<sup>3</sup>일 때 음방사감쇠의 평균과 표준편차는 각각  $1.89 \pm 0.18$ ,  $1.76 \pm 0.17$  및  $1.65 \pm 0.10 \times 10^6 \text{ cm}^5/\text{dyne} \cdot \text{sec}^3$ 로서 기건밀도가 커질수록 음방사감쇠가 감소함을 알 수 있었다.

기건밀도의 증가에 따른 음전환효율의 변화는 기건밀도가 0.22g/cm<sup>3</sup>일 때  $1.25 \pm 0.34 \times 10^8 \text{ cm}^5/\text{dyne} \cdot \text{sec}^3$ 였고 기건밀도가 0.25g/cm<sup>3</sup>일 때  $1.22 \pm 0.45 \times 10^8 \text{ cm}^5/\text{dyne} \cdot \text{sec}^3$ 로 감소하였다가 기건밀도가 0.28g/cm<sup>3</sup>일 때  $1.25 \pm 0.57 \times 10^8 \text{ cm}^5/\text{dyne} \cdot \text{sec}^3$ 로 다시 증가하였다. Yano(1989)는 가문비나무의 음전환효율이 밀도에 반비례하는 경향이 있으나, 약기용재와 구조용재를 비교하였을 때 약기용재의 밀도가 더 크더라도 음전환효율이 더 큼을 보고하여 밀도 이외에도 다른 변수의 영향에 민감함을 보고한 바 있다.

## 4. 결 론

참오동나무재의 함수율과 기건밀도가 음향특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 종진동시험법을 적용하여 각각 함수율 수준 9.6, 11.1 및 12.5%와 기건밀도 수준 0.22, 0.25 및 0.28g/cm<sup>3</sup>에 따른 음향특성을 구명한 결과는 다음과 같다.

함수율이 증가함에 따라 공진진동수와 비동적영률은 감소하여 고유음이 낮아졌고, 탄성과 음속도 감소하였다. 또한 내부마찰값은 증가하여 에너지의 손실이 많아졌다. 음방사감쇠는 함수율이 12.5%일 때 크게 떨어져서 고품수율에서 음방사감쇠보다 내부마찰에 의한 감쇠가 더 컸었으며, 음전환효율은 함수율에 따라 일정한 경향을 나타내지는 않았다.

기건밀도가 증가함에 따라 공진진동수와 비동적영률이 증가하여 탄성이 커지고 음속도 증가하였으나 내부마찰값과 음방사감쇠는 감소하였다. 음전환효율은 기건밀도 크기에 따라 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

따라서 참오동나무 기건재의 음향특성은 함수율이 낮고 기건밀도가 높을수록 우수함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Hong, B. W. 1985. The dynamic mechanical properties of Paulownia coreana used for sounding boards. *Mokchae Konghak* 13(3) : 34 ~ 40
2. Kang, C. W., and H. S. Jung. 1991. Stud-

- ies on the evaluation of acoustical properties of the replaceable species for sounding board by vibration test. *Mokchae Konghak* 19(1) : 71~80
3. Kang, W., and H. S. Jung. 1988. Studies on the free vibrational properties of traditional and replaceable species for sounding board. *Mokchae Konghak* 16(3) : 48~64
  4. Kataoka, A., and T. Ono. 1976. The dynamic mechanical properties of sitka spruce used for sounding board. *Mokuzai Gakkaishi* 22(8) : 436~443
  5. Kollmann, F. F. P., and W. A. Côté. 1968. Principles of wood science and technology 1. Springer-Verlag New York Inc.
  6. Ono, T. 1980. The dynamic rigidity modulus and internal friction of several woods in torsional vibration. *Mokuzai Gakkaishi* 26(3) : 139~145
  7. Sasaki, T., N. Misato, T. Yamada, and R. M. Rowell. 1988. Effect of moisture on the acoustical properties of wood. *Mokuzai Gakkaishi* 34(10) : 794~803.
  8. Yano, H., and J. Mukudai. 1989. Acoustic properties in radial direction of sitka spruce used for piano soundboards. *Mokuzai Gakkaishi* 35(10) : 882~885