

響板用 오동나무材의 動力學的性質¹

洪秉和²

The Dynamic Mechanical Properties of *Paulownia coreana* Used for Sounding Boards¹

Byung Wha Hong²

Summary

The characteristics of *Paulownia coreana* wood used for sounding boards has been revealed through this study. The 80 specimens were selected from *Paulownia coreana* wood. The dynamic Young's modulus, the internal friction and resonant frequency of wood were measured by the method of making a rectangular bar resonate in the audio frequency range.

The results obtained are summarized as follows:

1. The average values of the specific gravity, the dynamic Young's modulus and the internal friction concerning *Paulownia coreana* used for sounding boards are 0.252 ± 0.022 , $(0.494 \pm 0.068) \times 10^{11}$ dyne/cm and $(7.89 \pm 1.692) \times 10^{-3}$ respectively.

2. The average values of resonant frequency, the velocity of sound, and K values are 504 ± 24.298 Hz, 5018 ± 219.83 m/s, and $(9.907 \pm 2.05) \times 10^{-4}$ respectively.

3. The dynamic Young's modulus of *Paulownia coreana* increases with the increase of the specific gravity, and that on the contrary the internal friction decreases.

4. The dynamic Young's modulus was abruptly decreased as the moisture content of wood specimens was increased up to the fiber saturation point, and the internal friction was linearly increased as the moisture content of wood specimens were increased.

5. The vibration properties of *Paulownia coreana* are that the dynamic Young's modulus is fairly high, the internal friction is low, and the ratio of Young's modulus to specific gravity shows large value.

Key word; sounding board, *Paulownia coreana*, specific gravity, resonant frequency, dynamic Young's modulus, vibration property.

緒 論

樂器의 響板材로서 갖추어야 할 條件은 振動에 너지에 대하여 木材 内部의 分子摩擦로 損失減衰가 작아야 하고 振動 에너지가 音波로서 良質의 音を 많이 放射하는 響板材를 必要로 한다. 즉 比重에 比하여 動的彈性率이 높고 内部摩擦이 적은 木材가 좋다는 것은 잘 알려져 있는 사실이다.

우리나라 固有樂器인 伽倻琴과 지문고 製作에 옛날 부터 響板材로 利用된 오동나무의 動力學的 性質에 對한 研究報告는 찾아보기 어렵다.

木材의 振動的 性質에 關한 研究는 秋山¹⁾가 木材의 振動에 따른 音響學的 性質에 對한 研究가 있으며, 深田^{4,5,6,7)}가 피아노 響板用 가문비나무, 계수나무, 고로쇠나무 등에 대한 樂器用材의 特徵에 대하여 動的영率, 内部摩擦과 溫渡 및 습

1. 接受 5月 9日 Received May 9, 1985.

2. 慶尙大學校 農科大學 College of Agriculture, Gyeong sang National University, Jinju 620, Korea

水率과의 關係를 報告한 바 있다.

Kadaoka¹⁴⁾ 등은 樂器響板用 시트카 스프루스材의 動力學的 性質에서 響板의 適材인 시트카 스프루스와 다른 樹種과 比較하여 比重에 비하여 動的영률이 크고 内部減衰가 적은 것을 確認하고 그 材의 特性을 밝힌 바 있다. 또한 Aoki, Yamada³⁾ 는 樂器用材와 다른 樹種의 粘彈性을 比較하고 그의 音響的 特性과 木材組織과의 關係를 論한 바 있으며 洪⁸⁾ 은 韓國產 響板用材의 振動的 性質에 關한 研究에서 20個 樹種의 振動的 性質에 對하여 表한 바 있다. 그의 Matsumoto^{9,10,11,12,13)} 가 動的彈性率과 橫振動에 대한 特性 등을 상세히 밝힌 바 있으며 또한 鈴木^{14,15)} 는 水分에 의한 木材의 動的영률 減少量과 比重과의 關係를 報告한 바 있다.

오동나무 響板은 다른 洋樂器에는 거의 使用치 않으나 거문고와 伽倻琴의 響板材로서 많이 利用되고 있으며 傳統藝術 發展에 크게 관심을 보이는 현실정에 비추어 거문고와 伽倻琴響板材에 대한 科學的인 研究가 修訂되어야 할 것으로 생각되어 木材의 動力學的性質中 共鳴周波數, 動的영률, 内部摩擦, 縱波速度 그리고 Andrev²⁾가 提案한 響板材의 基準을 評價하는 K값과 含水率 變化에 따른 動的영률과 内部摩擦과의 關係등을 研究한 結果를 報告한다.

材料 및 方法

1. 供試材料

正常的으로 生育한 21年生 오동나무 (*Paulownia coreana* Uyeki)를 根元部에서 2m 길이로 절단하여 柱目으로 製材된 것을 實驗室內에서 1年以上 乾燥된 것을 길이는 纖維方向, 두께는 接線方向, 幅은 半徑方向으로 각각 300 mm, 10 mm, 20 mm의 試片을 135個를 만들어 1/20 mm 精度的 캘리퍼로 精確히 測定되고 결함이 없는 試片 80個를 溫度 25 ± 1 °C, 相對溫度 65 ± 2 %로 調整된 恒溫恒溫室內에서 平衡에 達한 것을 供試片으로 하였으며 供試樹種의 平衡含水率은 11.4 % 였으며 平均年輪幅은 10.25 mm였다.

2. 測定方法

測定裝置는 그림 1과 같이 勵振과 檢出을 電磁的方法을 使用한 兩端自由共振法을 適用하여 測定하였는데 使用된 generator는 Brüel & kjaer社 製品이 sine generator 1023을 使用하였으며 周波數測定은 universal counter timer를 使用하고 oscilloscope는 美國 HEWLETT·BAC-KARD社에서 製作한 1740 A (100 MHz)을 使用하였다.

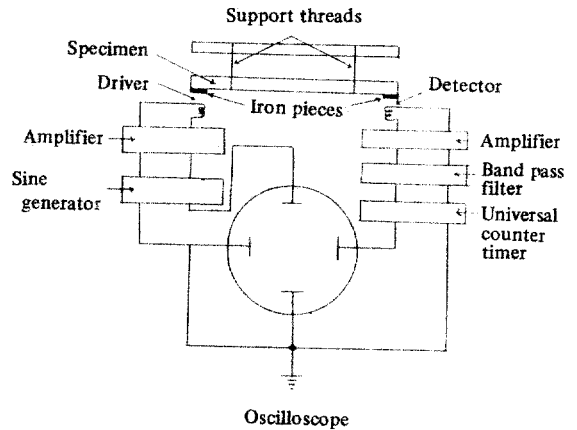


Fig. 1. Block diagram of experimental apparatus.

測定은 一端은 勵振하고 다른 一端은 檢出하는 共振法에 따라 發振器 出力과 檢出器 出力을 각각 陰極線 oscilloscope에 連結하여 發振器의 勵振周波數를 낮은쪽에서 점차 높은쪽으로 올려 檢出器 出力이 最大의 共振曲線을 그릴 때에 共振周波數와, 内部摩擦을 決定하였는데 모든 機器의 精密度를 維持하기 위하여 供給電源은 交流 automatic voltage regulator를 裝置하였다. 含水率 調整은 恒溫恒溫槽를 使用하여 含水率 變化에 대한 動的영률과 内部摩擦등을 測定하여 曲線 回歸方程式으로 求하고 内部摩擦은 直線 回歸式으로 구하였다.

3. 計算式

共鳴周波數 (f)와 動的영률, 内部摩擦, 縱波速

度 그리고 K값 등은 다음 식들에 의하여 計算되었다.

$$f = f_0 (1 + \alpha a^2 / \ell^2) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 f_0 는 周波數카운터의 數值

α 는 振動形式에 따라 決定되는 定數로서 8.2, a 는 試片의 두께, ℓ 는 試片의 길이, 動的영률 $E = 48 \pi^2 \rho \ell^4 f^2 / m^4 a^2 \dots \dots \dots (2)$

여기서 ρ 는 比重, m 는 基本振動의 경우 4.73을 쓰고 ℓ 은 試片의 길이, a 는 試片의 두께임.

内部摩擦 (Q^{-1})은 振動 1 사이클 중에서 物體의 内部에서 손실되는 에너지를 振動 에너지로 除함으로서 表示되는데

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta f}{f_0} \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{縱波速度는 } \sqrt{E/\rho} \text{ (m/s)} \dots \dots \dots (4)$$

여기서 E 는 動的彈性率, ρ 는 比重임.

Andrew²⁾가 提案한 K값은

$$K = Q^{-1} \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \dots \dots \dots (5)$$

여기서 Q^{-1} 은 内部摩擦, ρ 는 比重임.

結果 및 考察

1. 比重, 動的彈性率 및 内部摩擦

比重의 測定結果는 表 1, 그림 2에서 보는 바와 같이 氣乾比重의 範圍는 0.201에서 0.332사이로 平均 0.252 ± 0.022 를 나타내었는데 0.240에서 0.260 사이가 全試片의 46%을 佔하였다.

우리나라에서 오동나무는 다른 樹種에 비하여 比重이 가장 낮은 樹種으로 알려져 있는데 거문고와 가야금의 響板材로 利用된 것은 흥미있는 일이다. Kataoka¹⁴⁾가 響板材로서 가장 좋다는 시트카스 프루스의 平均比重值가 0.427 ± 0.042 임을 밝히고 다른 樹種에 비하여 比重이 낮으면서 動的彈性率이 높고 内部摩擦이 적음을 알 수 있다고 하였으며 縱波速度도 크다고 報告한바 있다. 그림 3은 比重과 動的영률과의 關係를 나타낸 것으로 比重이 增加하면 動的영률이 增加됨을 볼 수 있다. 이는 鈴木¹⁵⁾와 Matamoto¹³⁾의 研究 結果와 一致한다.

表 2에서 比重과 動的영률의 相關係數는 0.6970으로 높은 有意性을 보이며 内部摩擦도 높은 相關을 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Average values of specific gravity, dynamic Young's modulus, internal friction, resonant frequency, velocity of sound and K values of *Paulownia coreana*

	Range		Mean \pm S.D.*
	Min.	Max.	
Specific gravity (g/cm ³)	0.201	0.333	0.252 \pm 0.022
Dynamic Young's modulus (Ex10 ⁻¹¹ dyne/cm ²)	0.338	0.637	0.494 \pm 0.068
Internal friction (Q x 10 ⁻³)	4.170	12.140	7.894 \pm 1.692
Resonant frequency (Hz)	440	557	504.8 \pm 24.928
Velocity of sound ($\sqrt{E/\rho}$ m/s)	4,483	5,768	5,018.4 \pm 219.838
K value (K x 10 ⁻⁴)	5.540	17.720	9.907 \pm 2.050

* standard deviation.

Table 2. Correlation coefficients

	S.G	f	E	Q ⁻¹	$\sqrt{E/\rho}$	K
S.G	—	0.1369	0.6970**	-0.3856**	0.9990**	0.2820**
f	0.1369	—	0.8026**	-0.3671**	0.1535	-0.2576*
E	0.6970**	0.8026**	—	-0.4984**	0.7084**	-0.0190
Q ⁻¹	-0.3856**	-0.3671**	-0.4984**	—	-0.3966**	0.7641**
$\sqrt{E/\rho}$	0.9990**	0.1535	0.7084**	-0.3966**	—	0.2723**
K	0.2820	-0.2576*	-0.0190	0.7641**	0.2723**	—

Notes: S.G: Specific gravity (g/cm³), f: Resonant frequency (Hz), E: Dynamic Young's modulus (E x 10⁻¹¹ dyne/cm²), Q⁻¹: internal friction (Q⁻¹ x 10³), $\sqrt{E/\rho}$: Velocity of sound (m/s), K: K value (K x 10⁻⁴).

** significant at 1% level

* significant at 5% level

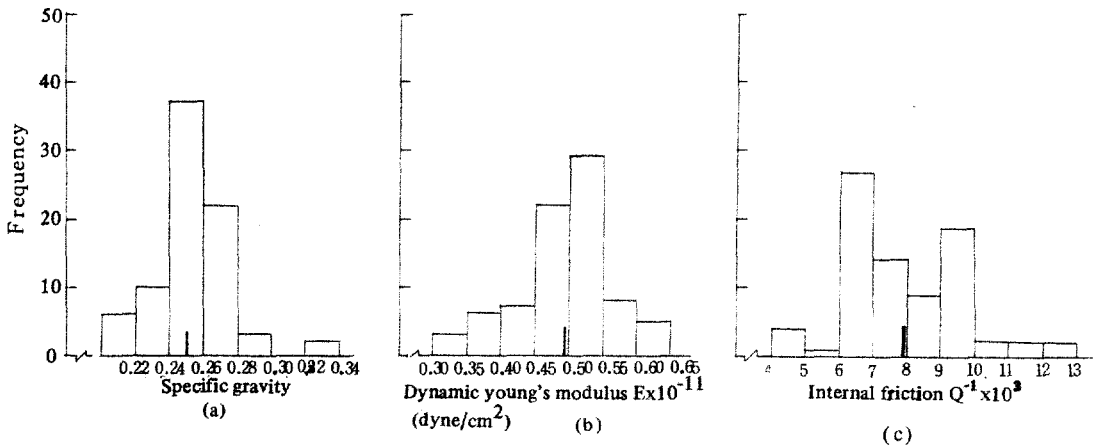


Fig. 2. Frequency histograms for specific gravity, dynamic Young's modulus and internal friction of *Paulownia coreana*. The short heavy line shows the average value of 80 specimens.

動的영률의 範圍는 0.338 에서 0.637로 平均 0.494 ± 0.068 (E × 10⁻¹¹ dyne/cm²)로 Kataoka¹⁴⁾ 가 시트카 스프루스의 平均 動的영률을 1.25 ± 0.24 (E × 10⁻¹¹ dyne/cm²)라는 값에 크게 못미치나 比重에 비하여 높은 動的영률을 나타낸다.

内部摩擦은 4.17 에서 12.14 範圍로 平均 7.89 ± 1.692 (Q⁻¹ × 10³)로 Kataoka¹⁴⁾ 가 시트카 스프루스의 内部摩擦이 6.35 ± 0.88 (Q⁻¹ × 10³)이라 報告한것 보다 약간 높은 값을 보이나 洪⁸⁾

이 調査한 바에 의하면 가문비나무가 10.02, 잣나무 11.84, 뽕나무가 10.54, 단풍나무가 10.57, 동백나무가 15.16 등 17個 樹種이 높은 값을 나타내는데 비하여 참오동나무가 9.77, 구상나무가 9.34로 비교적 낮은 값을 보였다. 動的영률과 内部摩擦의 相關係數는 -0.498로 높은 有意性을 나타내나 그림 4에서 보는 바와 같이 比重이 增加하면 動的영률에 비하여 넓은 範圍에 걸쳐 變化가 많으나 内部摩擦이 낮아짐을 볼 수 있다.

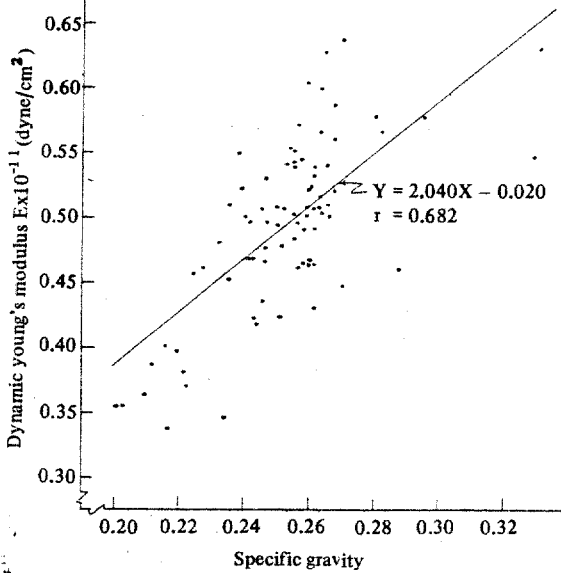


Fig. 3. Relationship between specific gravity and dynamic Young's modulus of 80 specimens.

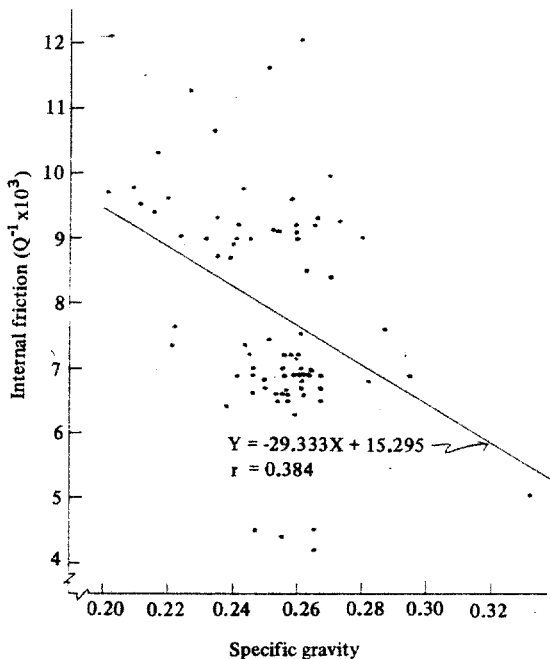


Fig. 4. Relationship between specific gravity and internal friction of 80 specimens.

2. 共鳴周波數, 縱波速度 및 K값

共鳴周波數의 範圍는 表 1에서와 같이 440 Hz에서 557 Hz 사이로 그의 平均値는 504.8 ± 24.928 Hz로 비교적 높은 周波數를 나타낸다. 洪⁸⁾이 몇 樹種의 共鳴周波數를 測定한 結果에 의하면 가문비나무가 583 ± 0.166 Hz, 잣나무가 407.1 ± 0.1794 Hz, 구상나무가 497.7 ± 0.1527 Hz 그리고 시트카 스프루스가 651.5 ± 0.2236 Hz로 가문비나무와 시트카 스프루스에는 못미치나 잣나무와 구상나무 보다 높은 共鳴周波數를 보인다. 表 2에서 보는 바와 같이 動的영率과의 相關係數가 0.8024이고 内部摩擦과의 相關係數가 -0.3856으로 높은 有意性을 보이는 것이 比重이 낮는데 비하여 共鳴周波數가 높은 것은 이 材의 特性이라 생각된다.

響板材로서 音速이 낮거나 内部摩擦이 클때는 音響的 性質이 좋지 못하는데 表 1에서와 같이 縱波速度($\sqrt{E/\rho}$ m/s)는 4483에서 5768 m/s로 平均 5018.4 ± 219.838 m/s로 Kataoke¹⁴⁾報告한 산벚나무가 4153 m/s, 로스우드(rosewood)가 4243 m/s, 편백나무가 5142 m/s, 소나무가 4338 m/s, 삼나무가 4078 m/s 등 33 樹種의 平均은 4536 m/s 이들중 시트카 스프루스가 5392 m/s로 가장 높은 값을 나타낸다고 發表한 바 있는데 오동나무가 시트카 스프루스에는 못미치나 比重에 비하여 상당히 큰 音速을 나타낸다. 表 2에서와 같이 比重과의 相關係數가 0.9990, 動的영率과는 0.7084, 内部摩擦은 -0.3966으로 다 같이 높은 相關을 보인다.

Andrev²⁾가 提案한 K값의 範圍는 5.540에서 17.720 ($K \times 10^{-4}$)으로 平均 (9.909 ± 2.050) $\times 10^{-4}$ 으로 洪⁸⁾이 가문비나무 6.913, 잣나무 8.142, 벚나무 6.034, 단풍나무 9.036, 자작나무 4.411×10^{-4} 등 20個 樹種의 平均値인 5.380×10^{-4} 에 비하여 높은 값을 나타내어 좋은 響板材임을 알 수 있었다.

3. 含水率 變化에 대한 影響

그림 6에서 보는 바와 같이 含水率 增加에 따른 動的영率의 變化를 曲線回歸方程式으로 구하고 内部摩擦은 直線回歸式으로 구한 結果이다. 含水

率 增加에 따른 動的영률 性質에 關한 研究는 F-ukuda^{6,7}, Suzuki¹⁵, Matsumoto¹³, 洪⁸) 등 많은 報告가 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 含水率이 增加함에 따라 動的영률이 急激히 떨어져지다가 纖維飽和點 以後에는 完만한 2次曲線을 그렸으며 内部摩擦은 含水率이 增加함에 따라 直線의으로 完만히 增加하였다. 이는 앞서 指摘한 研究者들의 報告와 一致함을 알 수 있었다.

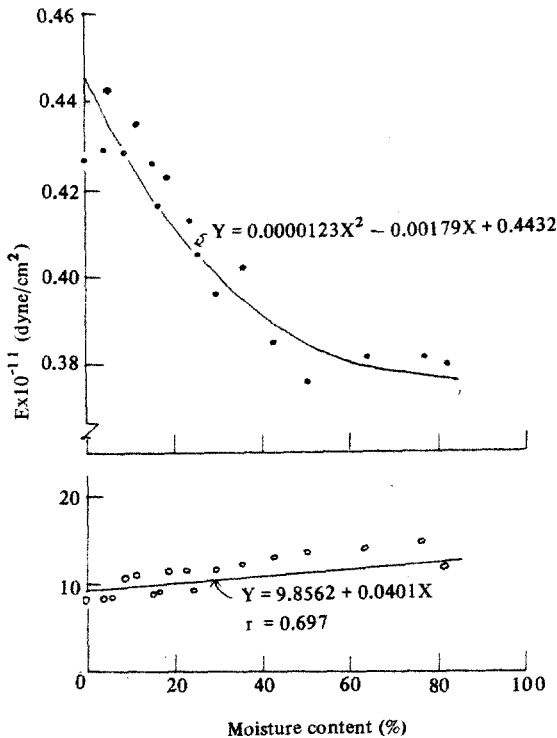


Fig. 5. Relationship between dynamic Young's modulus and moisture content (upper) and internal friction and moisture content (below) of *Paulownia coreana*.

結 論

響板用 오동나무材의 特性을 究明하기 위하여 80 個의 試片으로 兩端自由橫振動裝置를 使用하여 動的영률, 内部摩擦, 共鳴周波數, 縱波速度 그리고 K값을 測定分析한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 比重, 動的영률 그리고 内部摩擦의 平均値는 各各 0.252 ± 0.022 , $(0.494 \pm 0.068) \times 10^{11}$ dyne/cm², $(7.89 \pm 1.69) \times 10^{-3}$ 이었다.
2. 共鳴周波數, 縱波速度 그리고 K값의 平均値는 各各 504.8 ± 24.92 Hz, 5018.4 ± 219.83 m/s, $(9.907 \pm 2.05) \times 10^{-4}$ 이었다.
3. 比重이 增加하면 動的영률은 增加 하였으나 内部摩擦은 減少하는 傾向을 보였다.
4. 含水率이 增加하면 動的영률이 急激히 낮아 지다가 纖維飽和點以後에는 緩慢한 曲線을 나타내 었으나 内部摩擦은 含水率이 增加하면 서서히 直線의으로 增加 하였다.
5. 오동나무의 振動的 性質은 動的영률이 크고 内部摩擦이 적으며 比重에 비하여 영률이 높은것 은 오동나무의 動力學的 性質의 特性이라 생각된다.

引用文獻

1. 秋山郎. 1947. 木材의 振動並びに 音響的性質에 就いて, 東大理工研究, 1: 38.
2. 安藤由典. 1973. 樂器의 音響學. 音樂의 友社, p.145-147.
3. Aoki, T. and T. Yamada. 1972. The viscoelastic properties of wood for the musical instrument I, Wood research, 52:13-30.
4. 深田榮一. 1950. 피아노響板用木材의 振動的 性質, 科學, 20:568.
5. 深田榮一. 1951. 木材의 振動的性質, 小林理研報告, 1:21.
6. 深田榮一. 1951. 樂器用 木材의 振動的 性質, 波勞による 木材振動損失의 變化, 小林理研報告, 1:278.
7. 深田榮一. 1956. 木材의 振動的 性質, 木材工業, 8:152-155.
8. 洪秉和. 1983. 韓國産 響板用材의 振動的 性質에 關한 研究, 慶尙大學校 論文集 22:31-59.

9. Matsumoto, T. 1956. Studies on the measurement of the dynamic modulus E of wood by the transverse vibration, J. Fac. Agri., Iwate Univ., 3:46-61.
10. Matsumoto, T. 1968. Studies on the dynamic modulus E of wood by transverse vibration 2. The relationship of dynamic modulus of moisture content and of the dynamic modulus to the static modulus, J. Fac. Agri., Iwate Univ., 4(1):73-78.
11. Matsumoto, T. 1960. Studies on the dynamic modulus E of wood by transverse vibration. The effect of temperature on the dynamic modulus of wood, J. Fac. Agri., Iwate Univ., 5: 20-24.
12. Matsumoto, T. 1961. Studies on the dynamic modulus E by transverse vibration. On the dynamic modulus E and the damping of vibration in compression wood, J. Japan Wood Res. Soc., 7:90-95.
13. Matsumoto, T. 1962. Studies on the dynamic modulus E and the logarithmic decrement of wood by transverse vibration, Bulletin of the Kushu University Forests, 36:1-86.
14. Kataoka, A. and T. One. 1976. The dynamic mechanical properties of Sitka spruce used for sounding boards J. Japan Wood Res. Soc., 22 (8):436-443.
15. Suzuki, M. 1980. Relationship between specific gravity and decrement of dynamic young's modulus with water, J. Japan Wood Res. Soc., 26(5):299-304.