

현악기용 음향기능성 도료의 점탄성적 성질과 음향적 성질^{*1}

최 재 훈^{*2} · 이 병 후^{*2} · 김 현 중^{*2†} · 정 우 양^{*3}

Viscoelastic and Acoustic Characterization of Coatings for Stringed Instruments^{*1}

Jae-Hoon Choi^{*2} · Byoung-Hoo Lee^{*2} · Hyun-Joong Kim^{*2†} · Woo-Yang Chung^{*3}

요 약

현악기용 도료가 현악기의 음향기능에 미치는 영향을 조사하기 위해 음향분석장치(FFT)와 점탄성 분석장치(DMTA, dynamic mechanic thermal analyzer)를 이용하여 목재악기용 도료의 음향적 성능을 평가하였다. 목재악기용으로 사용된 도료는 악기용 우레탄계 상도도료, 오일 스테인계 도료, 천연바니쉬, 캐슈 도료 및 자외선 경화형 에폭시 도료를 사용하였다. 형성된 도막의 음향적인 특성은 FFT 분석기에서 측정된 공명주파수와 댐핑값(damping factor)과 DMTA에서 측정된 $\tan \delta$ 를 통하여 유추하였다. FFT에서 측정된 공명주파수와 댐핑값으로부터 도막이 가지는 음향특성에 대해 분석하였다. 측정된 도막의 점탄성적인 특성과 음향적 특성을 검토한 결과 악기용으로서의 적정도료를 결정하였다.

ABSTRACT

The acoustic properties of various coatings for stringed musical instruments made were investigated. The applied coatings were urethane topcoat, oil stain, natural varnish, cashew and UV-curable epoxy coating. Acoustic properties of coatings inferred from a resonance frequency and a damping measured by FFT analyzer and $\tan \delta$ measured by DMTA. Acoustic properties from resonance frequency and damping were analyzed. Optimum coating for stringed instruments was determined by viscoelastic properties and acoustic properties of coating.

Keywords: acoustic, viscoelastic, DMTA, FFT, stringed instrument, coating

^{*1} 접수 2005년 5월 2일, 채택 2005년 6월 13일

^{*2} 서울대학교 산림과학부 환경재료과학전공 바이오복합재료 및 접착과학 연구실, Lab. of Adhesion & Bio-Composites, Major in Environmental Materials Science, Department of Forest Science, Seoul National University

^{*3} 전남대학교 산림자원조경학부, Department of Wood Science and Engineering, Chonnam National University

† 주저자(corresponding author) : 김현중(e-mail: hjkim@snu.ac.kr)

1. 서 론

목재악기는 다른 악기들에 비해 쉽게 가공될 수 있는 목재를 통하여 만들어져 오랜 시간을 인류의 역사와 함께 발전되어 왔다. 목재악기는 대체적으로 전통적인 방식에 의존하고 있고, 체계적이고 과학적인 연구가 시작된 지는 오래되지 않았다. 또한, 목재악기에 대한 연구는 목재가 갖는 성질이 악기의 음향적 성능을 분석하는 방향으로 진행되어 왔다.

악기용 소재로서의 목재가 가지는 점탄성적 성질을 비롯한 목재악기에 대한 연구는 주로 함수율과 주파수에 따른 연구가 주를 이루어져 왔으며(Dunlop, 1978), 이후 악기용 목재의 음향성능을 파악하기 위해 목재의 점탄성을 응용한 연구도 진행되었다(Dunlop, 1989; Dunlop 등, 1991). 국내에서도 바이올린의 소재부분에 대한 진동모드와 음향성능과의 상관관계 구명에 대한 연구가 정 등(정 등, 1998; 정 등, 1999; 정 등, 2000)에 의해 진행되어 왔다.

목재 현악기의 음향성능은 주로 사용된 목재가 가진 성질에 의해 결정되고, 현악기의 외관과 내구성의 향상을 위해 목재의 표면에 도장처리를 해야만 한다. 내구성 향상을 위해 현악기용 목재 표면에 코팅된 도막은 현악기의 음향적인 성능에 여러 가지 영향을 미치게 되지만, 현재까지 이러한 도막에 대한 음향성능을 측정하고 이를 판단하는 기술은 대단히 미약하였다. 또한 현악기용 도료의 음향적 성질에 대한 자료 또한 극히 부족한 실정이다. 본 논문에서는 도료의 종류에 따라 형성된 도막이 현악기의 음향성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 FFT를 통한 음향적 성능과 점탄성 측정장치인 DMTA를 이용한 점탄성적 성질을 통한 음향성능을 비교분석하고 현악기용 도료에 대한 체계적인 자료구축을 위해 연구하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

음향기능성 도료의 도막물성을 측정하기 위해 사용된 목재는 음향관상재료로 주로 사용되는 가문비나무

(*Picea jezoensis*)를 사용하였다. 사용된 목재의 평균 함수율은 10.5%이며, 밀도는 $479.69 \pm 21.23 \text{ kg/m}^3$ 였다. 음향성능시험과 점탄성 성질을 측정하기 위해 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 와 두께 0.75 mm의 시편을 $50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 로 재단하여 사용하였다. 사용된 음향기능성 도료는 A사에서 분양받은 악기용 우레탄계 상도도료와 갈색의 오일스테인계 도료(상품명 SHENYUN)와 천연바니쉬, 캐슈(cashew) 도료, UV 경화형 에폭시도료를 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 시편의 제작

준비된 가문비나무 시편은 샌드페이퍼(#320)를 이용하여 표면을 연마한 후 음향기능성 도료를 No. 22 바코터(bar coater)를 사용하여 균일하게 도포하였고, 이 경우 습도막의 두께 $50.3 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 도장된 각 도료의 경화조건은 분양업체인 A에서 제시한 경화조건에 따라 실시하였다. 우레탄 상도도료와 오일스테인 도료는 상온에서 24시간 건조하였고, UV 경화형 에폭시 도료는 1120 mJ/cm^2 의 광량으로 고온 수은램프에 의해 경화하였다. 경화처리 후 도막의 두께는 약 $20 \pm 2 \mu\text{m}$ 으로 나타났다.

2.2.2. 음향성능 측정

미도장 시험편과 도장처리 목재시편의 공명주파수와 댐핑값(damping factor)을 측정하여, 음향기능성 도료에 따른 음향적 성능을 비교하였다. 사용된 기기는 DYTRAN사의 5.3 mv/g의 감도를 갖는 accelerometer와 94.3 mv/LBF의 감도를 갖는 impact hammer를 사용하여 측정하였다. 시편의 자유진동을 위해 Fig. 1과 같이 공중에 매달았으며, nodal point를 고려하여 고무줄의 위치를 정하고 지지대에 고정시켰다. 측정된 진동을 FFT 시스템을 통하여 분석하여 공명주파수와 댐핑값을 얻었다. 측정된 공명주파수와 댐핑값을 Timoshenko beam 이론을 기초로 한 TGH (Timoshenko-Goens- Hearmon) 이론의 식 (1)~(8)을 이용하여 동적탄성계수(elastic modulus, E)와 전

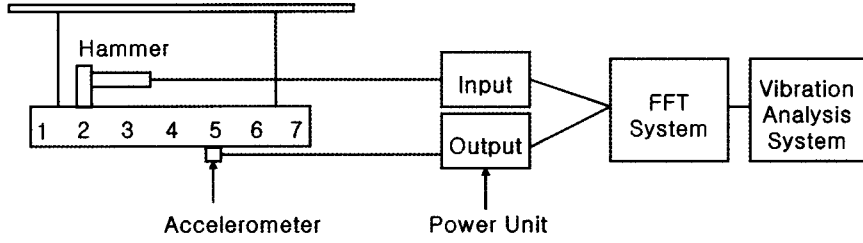


Fig. 1. Schematics of FFT analyzer.

단탄성계수(shear modulus, G)를 얻을 수 있다 (Hearmon, 1966).

Timoshenko 이론

$$\frac{Ei^2}{\rho} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - i^2 \left(1 + \frac{sE}{G} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho si^2}{G} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (1)$$

여기에서, E 는 동적탄성계수, i 는 회전관성, ρ 는 밀도, y 는 축변형(lateral deflection), x 는 길이, t 는 시간, $s=1.18$ 는 전단변형계수이다. 식 (1)을 양단 자유보에서 적용하게 되면 n 번째 모드에서의 주파수 f_n 은 다음과 같다.

$$f_n = \frac{ik_n^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

여기서 l 은 빔의 길이이다.

Goens 이론

$$\frac{m_n^4}{k_n^4} = 1 + \frac{i^2}{l^2} [m_n^2 F^2(m_n) + 6m_n F(m_n)] + \frac{i^2}{l^2} \frac{sE}{G} [m_n^2 F^2(m_n) - 2m_n F(m_n)] - \frac{4\pi^2 \rho si^2 f_n^2}{G} = T \quad (3)$$

여기에서, $m_1=4.730$, $m_2=7.853$, $m_n=(2n+1)$ ($n \geq 2$) 이고, $F(m_1)=0.9825$, $F(m_2)=1.0008$, $F(m_n)=1$ ($n \geq 2$) 이다.

Hearmon 이론

$$Y = \frac{E}{T} \left[1 + \frac{i^2}{l^2} m_n^2 F^2(m_n) + 6m_n F(m_n) - \frac{4\pi \rho i^2 f_n^2}{G} \right] \quad (4)$$

$$X = \frac{E}{T} \frac{i^2}{l^2} [m_n^2 F^2(m_n) - 2m_n F(m_n)] \quad (5)$$

$$\alpha = s \frac{E}{G} \quad (6)$$

$$\beta = E \quad (7)$$

식 4~7로부터,

$$Y = \beta - \alpha X \quad (8)$$

위에서 선형회귀식의 X , Y 로부터 인장저장탄성율(E)과 전단저장탄성율(G)을 얻는다. 음고(pitch)는 음악의 심리적인 특성을 나타내는 것으로 음계에 따른 주파수의 높고 낮음을 통해 파악하는 것으로 공명주파수를 통하여 확인할 수 있다. 목재시편이 가지는 밀도(ρ)와 E , G 값의 관계를 통하여 음향기능성 도료 도막이 가지는 음향성능을 분석하였다. 악기에서 음의 평가는 음반응성을 나타내는 시간축 평가와 소리의 울림, 깊이, 균형감 등의 음색을 나타내는 주파수축 평가로 나누어진다. 시간축 평가는 $E\rho$ 와 관계있으며, 주파수축 평가 E/G 와 관련이 있다. $E\rho$ 의 값은 진동계의 임피던스(impedence)를 나타내는 것으로 $E\rho$ 가 크면 음의 높아짐이 둔하여 반응도(response)가

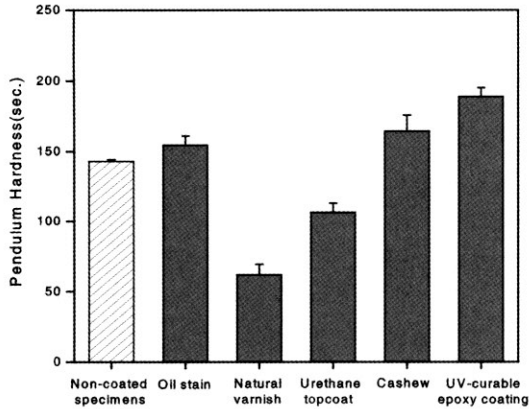


Fig. 2. Pendulum hardness of non-coated and coated specimens.

나쁘지만 유연도(flexibility)가 있으며 작은 경우 반대의 경향이 나타났다. 그리고 비탄성계수(E/ρ)가 클

수록 소리가 잘 난다는 것이다. 음의 깊이를 의미하는 E/G 는 깊이 클수록 소리가 깊고 목재음이 나며 반주부가 강하며, 작으면 소리가 얇고 금속음이 나며 melody부가 강하다(이, 2004).

2.2.3. 점탄성 측정

음향기능성 도료의 도막이 가지는 점탄성적 성질을 측정하기 위하여 Rheometric Scientific사의 DMTA (dynamic mechanic thermal analysis) Mark IV를 사용하였으며, three point bending method를 이용하였다. 실험조건은 frequency와 strain을 1 Hz와 0.1%로 고정하고, 30°C에서 150°C까지 2°C/min로 일정하게 승온시켜 저장탄성율(storage modulus, E')과 손실탄성율(loss modulus, E'') 그리고 $\tan \delta$ ($=E''/E'$) 값을 측정하였다. 측정된 E' 와 E'' , $\tan \delta$ 를 통하여 도막의 점탄성적 성질을 분석하였다.

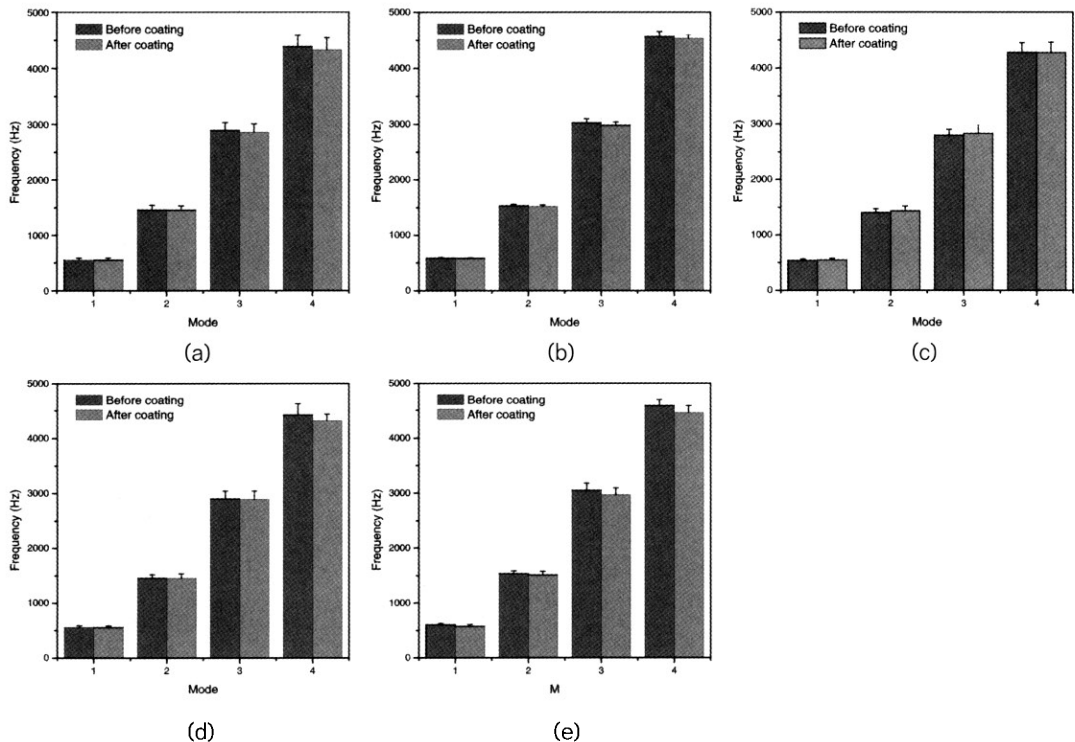


Fig. 3. Frequency as vibration modes before and after ((a) urethane coating, (b) UV-curable epoxy coating, (c) oil stain, (d) natural varnish, (e) cashew).

2.2.4. 도막의 경도 측정

도막 표면이 가지는 점탄성적인 성질 중 탄성적인 영역과 관련이 있는 경도에 대해 알아보기 위해 무도장처리 목재시편과 도장처리 후의 도막의 경도를 측정하여 보았다. 경도를 측정하기 위해 Sheen사의 pendulum hardness tester를 사용하였다. König pendulum을 사용하였으며 측정조건은 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 와 상대습도 $50 \pm 2\%$ 였으며 ASTM D 4366에 의거하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 음향적 특성

음향기능성 도료 도막의 음향성능을 측정하기 위해 도장 전후의 공명주파수와 댐핑값을 측정하여, 동적탄성계수와 전단탄성계수를 계산하고 밀도와 동적탄성계수, 전단탄성계수 사이의 관계를 분석하였다.

음고(pitch)는 음악의 심리적인 특성을 나타내는 것으로 음계에 따른 주파수의 높고 낮음을 통해 파악되는 것으로 공명주파수를 통하여 확인할 수 있다. Fig. 3에서는 도장 전과 후의 공명주파수의 측정값을 진동모드에 따라 보여주고 있다. 우레탄 상도 도료와 UV 경화형 에폭시 도료, 천연바니쉬, 캐슈도료의 경우 도장처리 전보다 도장처리 후의 측정된 1~4의 진동모드에서의 공명주파수가 줄어들었으나, 오일스테인은 반대로 증가하였다. 이러한 결과는 다른 도료를 도장하는 경우 음고가 낮아져 음역이 줄어들었으나, 오일스테인의 경우 음고가 증가하여 음역이 증가하는 것을 나타내었다.

측정 후의 공명주파수와 댐핑값을 통하여 식 (1)~(8)의 TGH 이론을 통해 동적탄성계수와 전단탄성계수를 계산하였고, 그 결과 Fig. 4와 같이 나타났다. 도장처리 전에는 목재의 개체에 따른 각각의 값의 차이가 뚜렷하게 나타났으나, 도장처리 후에는 형성된 도막으로 인하여 동적탄성계수와 전단탄성계수는 도료의 종류에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다. 그러나 밀도와와의 관계를 통하여 음을 평가하여 보면 각 도

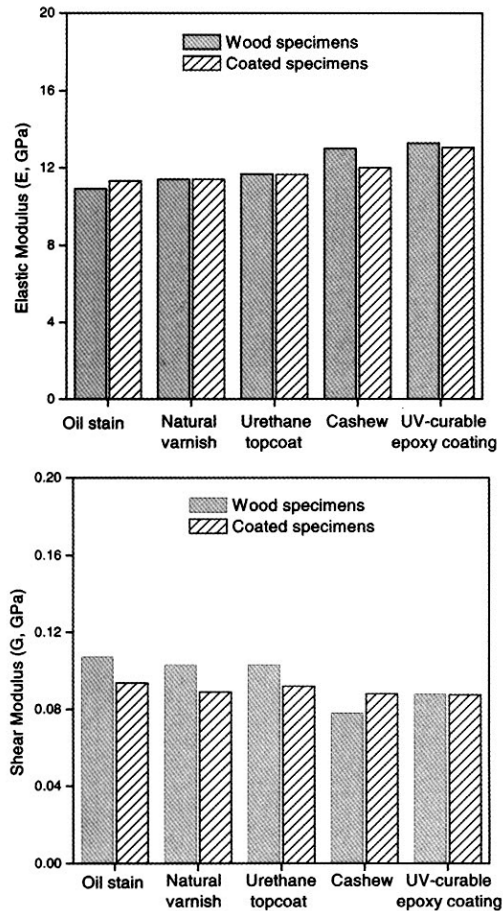


Fig. 4. Elastic modulus (E) and shear modulus (G) before and after coating.

막이 가지는 음의 반응성을 의미하는 $E\rho$ 는 Fig. 5에서와 같이 오일스테인과 천연바니쉬는 도장처리 후 음의 반응성이 향상된 것을 알 수 있으며, 우레탄 상도도막에서는 변화가 없었으나 UV 경화형 에폭시도료와 캐슈도료에서는 음의 반응성이 감소하는 상반된 결과가 나타났다. 이는 도막이 가지는 경도와 탄성적인 성질이 큰 도막일수록 음의 반응도가 높아지고 유연도가 떨어져 음의 반응성이 낮아지는 것으로 생각된다. 도막의 표면경도를 측정된 결과를 나타내는 Fig. 2를 통해 도장처리 후 UV 경화형 도료와 캐슈도료의 경도가 증가하였음을 알 수 있고 천연바니쉬와 우레탄계 상도도막은 감소된 것을 확인할 수 있었다.

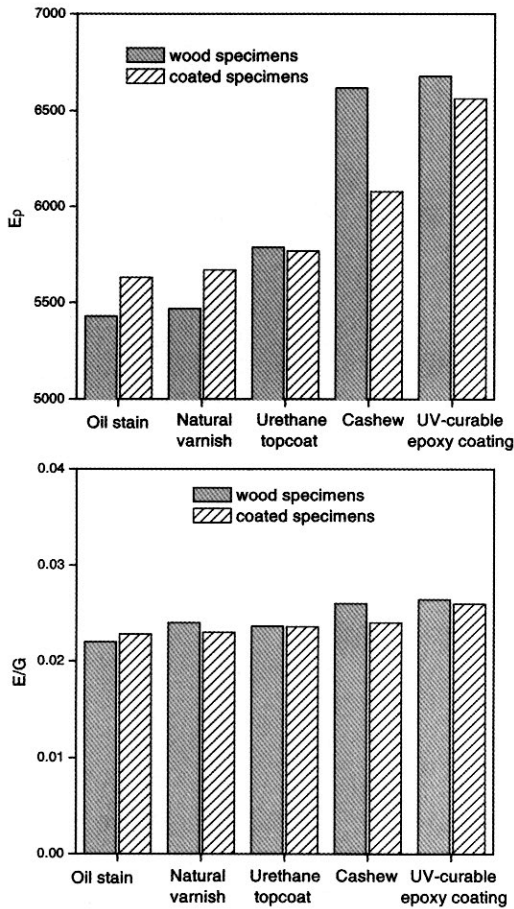


Fig. 5. Relationship between elastic modulus (E) and density (ρ) before and after coating.

그러나 오일스테인의 경우 경도가 증가하는 결과를 나타내었다.

비탄성계수(E/ρ)가 가지는 물리적 의미는 동일한 힘이 가해졌을 때, 비탄성계수가 클수록 소리가 잘 발생하는 것이다. 도장처리 전과 후의 비탄성계수는 Fig. 5에서와 같이 큰 차이를 나타내지 않았으며, 이는 도장처리과정으로 인한 소리의 감소가 크게 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 Fig. 6에서 나타나는 E/G의 값은 음의 깊이를 의미하며 오일스테인과 천연바니쉬, 우레탄 상도도막은 도장 후, E/G의 값이 감소하여 도장처리 전보다 소리가 얕아져 mel-

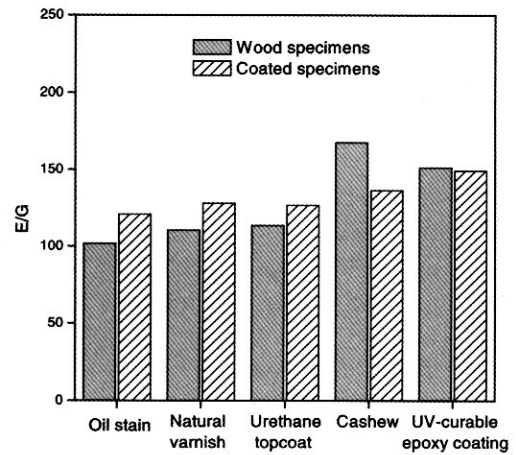


Fig. 6. E/G before and after coating.

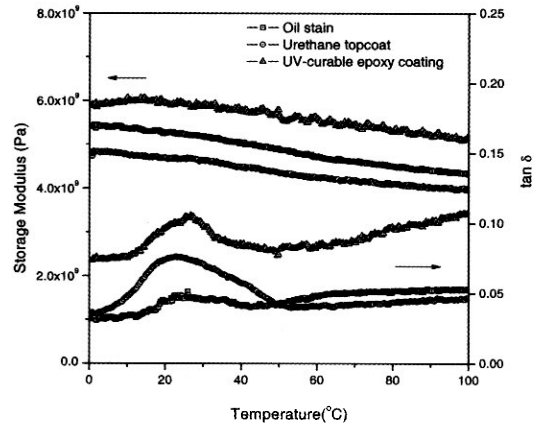


Fig. 7. Storage modulus and $\tan \delta$ of various coatings.

ody부가 강한 것으로 나타났다. 캐슈도료는 E/G 값이 크게 증가하여 도장처리 전보다 소리가 깊어 반주부가 강해지며, UV 경화형 에폭시 도료는 값의 변화가 크게 나타나지 않아 음의 깊이에는 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

3.2. 점탄성적 성질

음향기능성 도료 도막의 음향성능과 점탄성적 성질을 비교하기 위해 도막이 가지는 점탄성적 성질을 DMTA의 three point bending법을 이용하여 저장탄

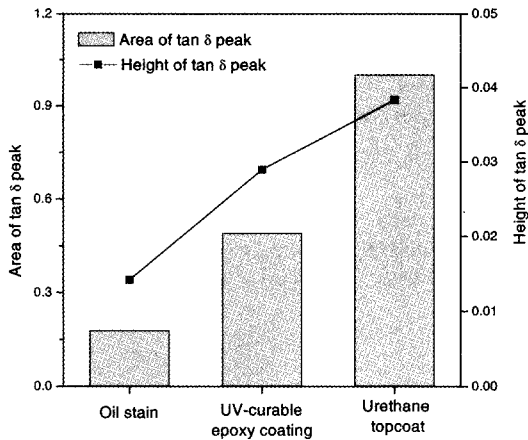


Fig. 8. Areas and heights of $\tan \delta$ peaks.

성율(E')과 손신탄성율(E''), $\tan \delta$ 를 측정하였다. 저장탄성율과 손신탄성율, $\tan \delta$ 는 주파수와 온도에 의해 영향을 받으며, 물질의 탄성적인 특성은 저장탄성율, 점성적인 특성은 손신탄성율에 의해 나타난다. 그리고 $\tan \delta$ 는 저장탄성율과 손신탄성율의 비로 나타나며 피크점에서 도막의 유리전이온도(glass transition temperature, T_g)를 나타내며, $\tan \delta$ 는 도막의 댐핑특성(damping factor)을 나타내기 때문에 이를 통하여 도막의 여러 가지 점탄성적인 성질을 판단하며 음향적인 성질도 판단할 수 있다(李, 1995).

Fig. 7은 도료의 종류에 따른 도막의 저장탄성율과 $\tan \delta$ 를 나타내었다. 저장탄성율은 도막의 탄성적인 영역을 나타내며 경도와 상관관계가 있다. 저장탄성율을 통하여 나타나는 도막의 경도는 UV 경화형 에폭시 도료 > 오일스테인 > 우레탄계 상도도료의 순이었으며 Fig. 2에서 나타나는 도막 표면의 경도값과 일치하는 것을 확인할 수 있다. $\tan \delta$ 의 피크의 높이와 넓이를 통하여 도막의 음향적인 성질을 확인할 수 있으며, 그 값은 Fig. 8에서 나타내었다. $\tan \delta$ 의 peak의 높이와 넓이는 유사한 경향으로 나타났으며 이때의 피크 높이와 넓이의 크기는 우레탄 상도도료 > UV 경화형 도료 > 오일스테인의 순으로 나타났다. $\tan \delta$ 의 피크의 높이와 넓이가 클수록 도막의 댐핑특성이 커지기 때문에 도막의 표면에서 음을 흡수하는 성질이 증가하고 이는 목재악기의 표면에 도장처리 후 형성된 도막에서의 음의 흡수가 발생하여 악기의 음향적

인 성능이 저하됨을 알 수 있다. 따라서 도막의 $\tan \delta$ 피크의 높이와 넓이가 작을수록 목재악기가 가지고 있는 본래의 음을 발생하는데 유리하다.

4. 결 론

음향기능성 도료들의 도막이 가지는 음향성능과 점탄성적 성질을 측정하기 위해 FFT와 DMTA를 이용하여 여러 가지 음향특성과 점탄성적인 특성을 측정하였다. 도막의 음향성능은 도장처리 전후의 공명주파수와 댐핑값을 FFT 분석기를 이용하여 측정하였고, 동적탄성계수와 전단탄성계수를 계산하고 밀도와 동적탄성계수, 전단탄성계수 사이의 관계를 검토하였다. 그리고 측정된 값들과 계산된 값들을 통하여 도막이 가지는 음고, 음의 반응성, 가진력과 음의 깊이 등에 대한 분석을 하였다. 도막의 점탄성적 성질에 따른 음향성능의 고찰은 DMTA를 이용하여 저장탄성율과 손신탄성율, $\tan \delta$ 를 측정하였다. 측정된 $\tan \delta$ 피크의 높이와 넓이를 통하여 도막이 가지는 음향성능을 분석하였다. 그 결과, 음향기능성 도료 중 목재악기의 음향성능을 향상시킬 수 있는 도료로 스테인 계통의 오일스테인 도료가 가장 좋은 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임. 또한 연구를 수행함에 있어서 최재훈은 두뇌한국 21사업에 의한 장학지원을 받아 수행하였음.

참 고 문 헌

1. Dunlop, J. I. 1978. Damping Loss in Wood at Mid Kiloherz Frequencies. Wood Sci. Technol. 12: 49~62.
2. Dunlop, J. I. 1989. The Acoustic Properties of Wood in Relation to Stringed Musical Instruments. Australian Acoustic Society. 17(2): 37~40.
3. Dunlop, J. I. and M. Shaw. 1991. Acoustical Pro-

- erties of Some Australian Woods. *Catgut. Acoust. Soc. J.* 1(7): 827~830.
4. 정우양, 홍병화. 1998. 바이올린용 주용 소재의 품질관리를 위한 음향학적 연구. 1998 학술발표논문집. 한국목재공학회. 108~113.
 5. 정우양, 박선행. 1999. 바이올린용 소재의 진동모드 해석에 관한 연구. *목재공학*. 27(3): 1~6.
 6. 정우양, 박선행. 2000. 바이올린계 현악기용 브릿지의 진동특성에 관한 연구. 2000 학술발표논문집. 한국목재공학회. 191~196.
 7. Hearmon, R. F. S. 1966. Theory of the Vibration Testing of Wood. *Forest Products J.*, 16(8).
 8. 이큰울. 2004. 휨진동법에 의한 국악기용 주요 국산재의 재질 및 음향특성 평가에 관한 연구. 석사학위 논문. 전남대학교.
 9. 李賢鍾, 水町 浩. 1995. 木材/高分子複合系のダンピング特性(第4報)アクリル酸2エチルヘキシル/スチレン共重合体とIPNs. *日本木材學會* 41(1): 9~16.