

## 도막두께에 따른 현악기용 도료의 음향적 성질\*1

최재훈\*2 · 황현득\*2 · 이병후\*2 · 김현중\*2† · 정우양\*3

### Acoustic Characterization of Coatings for Stringed Instruments with Various Coating Thickness\*1

Jae-Hoon Choi\*2 · Heon-Deuk Hwang\*2 · Byoung-Hoo Lee\*2 ·  
Hyun-Joong Kim\*2† · Woo-Yang Chung\*3

#### 요약

본 연구는 현악기에 사용되는 현악기용 도료가 현악기의 음향성능에 미치는 영향을 조사하였다. 음향분석장치(FFT)를 이용하여 목재악기용 도료의 도막두께에 따른 음향적 성능을 평가하였다. 목재악기용으로 사용된 도료는 악기용 우레탄계 상도도료, 오일 스테인계 도료, 자외선 경화형 에폭시 도료이다. 형성된 도막의 음향적인 특성은 FFT 분석기에서 측정된 공명주파수와 댐핑값(damping factor)으로부터 동적탄성계수와 전단탄성계수를 계산하여 얻고, 밀도와와의 관계와 탄성계수간의 관계를 통하여 도막의 두께에 따른 음향적인 특성을 측정하고 비교분석하여 상관관계를 조사하였다.

#### ABSTRACT

The acoustic properties of various coatings for stringed musical instruments made were investigated. The applied coatings were urethane topcoat, oil stain and UV-curable epoxy coating. Acoustic properties of coatings inferred from the elastic modulus and the shear modulus that were calculated from a resonance frequency and a damping measured by FFT analyzer. The relationship between elastic modulus and density and the relationship between elastic modulus and shear modulus of coatings for stringed musical instruments were investigated as a function of coating thickness.

\* 1 접수 2005년 10월 6일, 채택 2005년 12월 1일

\* 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: hjokim@snu.ac.kr)

**Keywords:** acoustic, viscoelastic, RPT, FFT, stringed instrument, coating thickness

## 1. 서 론

인간과 목재는 역사 이래로 삶을 영위하는 곳에서는 적용되어 다양하게 사용되어 왔으나, 최근에는 돌, 콘크리트, 금속, 플라스틱 등의 다양한 재료들의 개발로 인해 서서히 바뀌어져 가고 있다. 그러나 이러한 추세 속에서도 악기분야에서는 몇 가지를 제외하고는 목재를 재료로 그대로 사용하고 있다(山田 正 編, 1987). 목재를 이용한 악기는 목재의 높은 가공성과 탄성 그리고 뛰어난 음향성능으로 인해 지금까지도 꾸준히 사용되고 있다. 이러한 목재악기에 대한 연구는 다음과 같이 진행되었다.

악기용 소재로서의 목재가 가지는 점탄성적 성질을 비롯한 목재악기에 대한 연구는 주로 함수율과 주파수에 따른 연구가 주로 이루어져 왔으며(Dunlop, 1978), 이후 악기용 목재의 음향성능을 파악하기 위해 목재의 점탄성을 응용한 연구도 진행되었다(Dunlop, 1989; Dunlop 등, 1991; 강 등, 1991). 또한 공진주파수를 이용하여 목재의 동적탄성계수를 추정하는 연구가 진행되었다(이 등, 1997). 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.

이러한 과거의 목재 악기의 음향성능은 소재로 사용된 목재에 대한 연구에 집중되었으나 도료의 종류에 따른 음향성능과 점탄성과의 상관관계에 대한 연구(정 등, 1998; 최 등, 2005)도 일부 진행되고 있다. 이러한 도료의 종류에 따른 목재악기의 음향성능에 대한 연구를 토대로 코팅된 도막의 두께가 목재악기의 음향성능에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 본 논문에서는 도료의 도막두께에 따라 도막이 현악기의 음향성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 FFT를 이용한 음향적 성능을 비교분석하고 현악기용 도료에 대한 체계적인 자료구축을 위해 연구를 진행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

도료를 통해 형성된 도막의 음향성능을 측정하기 위해 기재로 사용된 목재는 음향관상재료로 주로 사용되어 온 가문비나무(*Picea jezoensis*)를 사용하였다. 사용된 목재의 평균함수율은 10.5%이며, 밀도는  $479.69 \pm 21.23 \text{ kg/m}^3$ 였다. 음향성능시험과 점탄성적 성질을 측정하기 위해  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 와 두께 7.5 mm의 시험편을  $50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 로 재단하여 사용하였다. 사용된 도료는 국내 A사에서 분양받은 악기용 우레탄계 상도도료와 갈색의 오일스테인계 도료(상품명 SHENYUN)와 천연바니쉬, 캐슈(cashew) 도료, UV 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료를 사용하였다.

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 시험편의 제작

음향기능성 도료의 도막물성을 측정하기 위해 사용된 목재는 음향관상재료로 주로 사용되어 온 가문비나무(*Picea jezoensis*)를 사용하였다. 사용된 목재의 평균함수율은 10.5%이며, 밀도는  $479.69 \pm 21.23 \text{ kg/m}^3$ 였다. 도막의 음향성능을 측정하기 위해 가문비나무 시험편을  $20 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 로 재단하여 기재로 사용하였다.

사용된 음향기능성 도료는 이전의 연구(최 등, 2005)에서 사용되었던 도료 중 악기용 우레탄계 상도도료와 갈색의 오일스테인계 도료(상품명 SHENYUN)와 UV 경화형 에폭시도료를 선정하여 사용하였다. 각 도료의 경화조건은 제공한 회사의 경화조건으로 경화시켰다. 도막의 두께는 No. 22 bar coater를 통하여 일정한 두께로 도장 후 경화시킨 것을 1회로 하는 도장 횟수로 결정하였다.

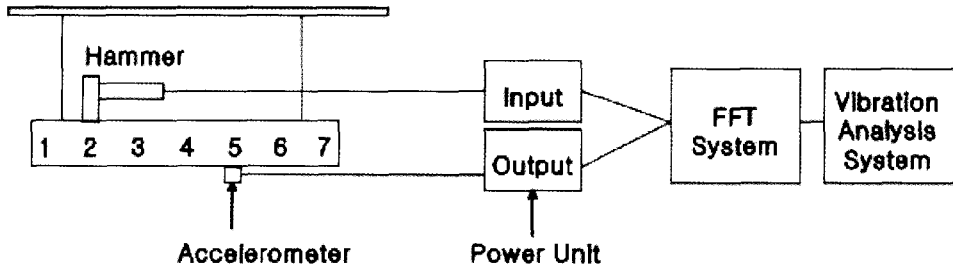


Fig. 1. Schematics of FFT analyzer.

### 2.2.2. 도막의 경도 측정

도막 표면이 가지는 점탄성적인 성질 중 탄성적인 영역과 관련이 있는 경도에 대해 알아보기 위해 미도장 목재시편과 도장처리 후 도막의 경도를 각각 측정하였다. 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.

### 2.2.3. 음향성능 측정

미도장 시험편과 도막두께에 따른 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) 이론을 이용하여 동적탄성계수(elastic modulus, E)와 전단탄성계수(shear modulus, G)를 얻는다(Hearmon, 1966).

목재시편이 가지는 밀도( $\rho$ )와 E, G값의 관계를 통하여 음향기능성 도료 도막이 가지는 음향성능을 분석하였다. 악기에서 음의 평가는 음반응성을 나타내는데 시간축 평가와 소리의 울림, 깊이, 균형감 등의

음색을 나타내는 주파수축 평가로 나누어진다. 시간축 평가는  $E/\rho$ 와 관계있으며, 주파수축 평가 E/G와 관련이 있다.  $E/\rho$ 의 값은 진동계의 임피던스(impedence)를 나타내는 것으로 E/ $\rho$ 가 크면 음의 높아짐이 둔하여 반응도(response)가 나쁘지만 유연도(flexibility)가 있으며 작은 경우 반대의 경향이 나타났다. 그리고 비탄성계수( $E/\rho$ )가 클수록 소리가 잘 난다고 밝힌 바 있다. 음의 깊이를 의미하는 E/G는 값이 클수록 소리가 깊고 목재음이 나며 반주부가 강하며, 작으면 소리가 얇고 금속음이 나며 melody부가 강하다(이, 2004).

## 3. 결과 및 고찰

도료의 도막에 대한 특성을 조사하기 위하여 도막의 두께에 따른 도막의 경도를 pendulum hardness tester를 이용하여 측정하였다. 측정된 결과는 Table 1에 나타내었으며, 우레탄 상도도료와 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우 도장 횟수가 증가함에 따라 도막의 경도는 증가하였다. 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우 도막의 경도가 크기 때문에 도장횟수가 증가함에 따라 경도는 급격하게 증가하였으나 우레탄 상도도료의 경우 도막의 경도가 높지 않아 미미한 증가값을 나타내었다. 오일 스테인의 경우 도장처리 후 경도가 증가하였으나, 2회 도장이후의 경도값은 일정한 값을 유지하였다. 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 높은 경도값을 가지고 있으며, 오일스테인과 우레탄 상도도료는 유사한 값을 가지고 있으므로 두 도료의 음향적인 성능이 유사한 경향을 가질 것으로 사료된다.

Table 1. Pendulum hardness of coatings as a function of coating thickness

Number of coating	Urethane topcoat	Oil Stain	UV-curable epoxy acrylate coating
0	36.17±3.80	37.33±6.30	39.90±2.47
1	40.60±7.41	40.37±6.03	92.40±9.41
2	50.87±6.05	52.50±4.22	199.03±10.46
3	58.57±3.24	47.60±9.50	213.50±9.23
4	59.03±2.99	51.33±5.06	223.77±12.38

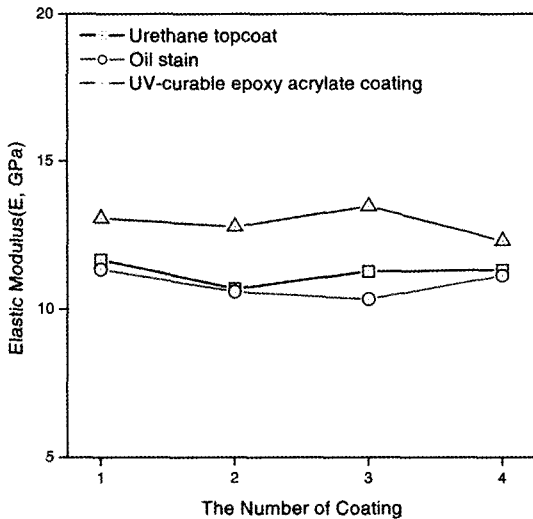


Fig. 2. Elastic modulus of coating surface as a function of coating thickness.

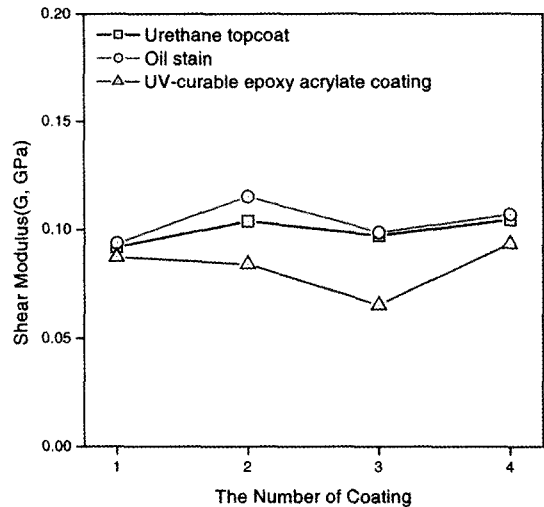


Fig. 3. Shear modulus of coating surface as a function of coating thickness (a: urethane topcoat, b: oil stain c: UV-curable epoxy acrylate coating).

도료 도막의 음향성능을 측정하기 위해 도장 전후의 공명주파수와 댄핑값을 측정하여, TGH 이론에 따라 동적탄성계수와 전단탄성계수를 계산하였고, 밀도와 동적탄성계수, 전단탄성계수 사이의 관계를 분석하였다. Fig. 2와 3에서는 3가지 종류의 도료(우레탄 상도도료, 오일스테인, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료)의 도막의 두께에 따른 동적탄성계수와 전단탄성계수를 나타내었다. 동적탄성계수는 도장처리하기 전과 후의 값이 유사한 경향을 가지고 있으며, 전반적으로 도장처리한 후의 값이 낮아지는 경향을 가지고 있다. 특히 도막의 두께가 증가함에 따라 경도가 증가하는 결과는 Table 1의 pendulum hardness 측정 결과로 알 수 있었고, 동적탄성계수는 도막의 두께에 따른 영향이 크지 않음을 Fig. 2를 통해 알 수 있다. 이는 고분자물질로 이루어진 도료보다는 기재인 목재

의 영향을 크게 받는다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 그러나 도막 자체가 가지는 경도가 큰 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우에는 동적탄성계수의 값이 다른 두 도료에 비해 큰 것을 통해 도막이 가지는 경도에 따른 영향을 전혀 무시할 수는 없다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에서 나타나는 도막의 두께에 따른 전단탄성계수는 도장처리 후 미도장처리 시편에서 나타나는 시편에 따른 편차가 크게 나타나지 않았다. 도막의 두께에 따른 영향은 크지 않았으나 도료에 따른 차이는 뚜렷한 것으로 나타났다. 그리고 동적탄성계수와는 달리 전단탄성계수에서는 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 값이 작은 것으로 나타났다. 그리고 전단탄성계수는 동적탄성계수에 비해 기재인 목재의

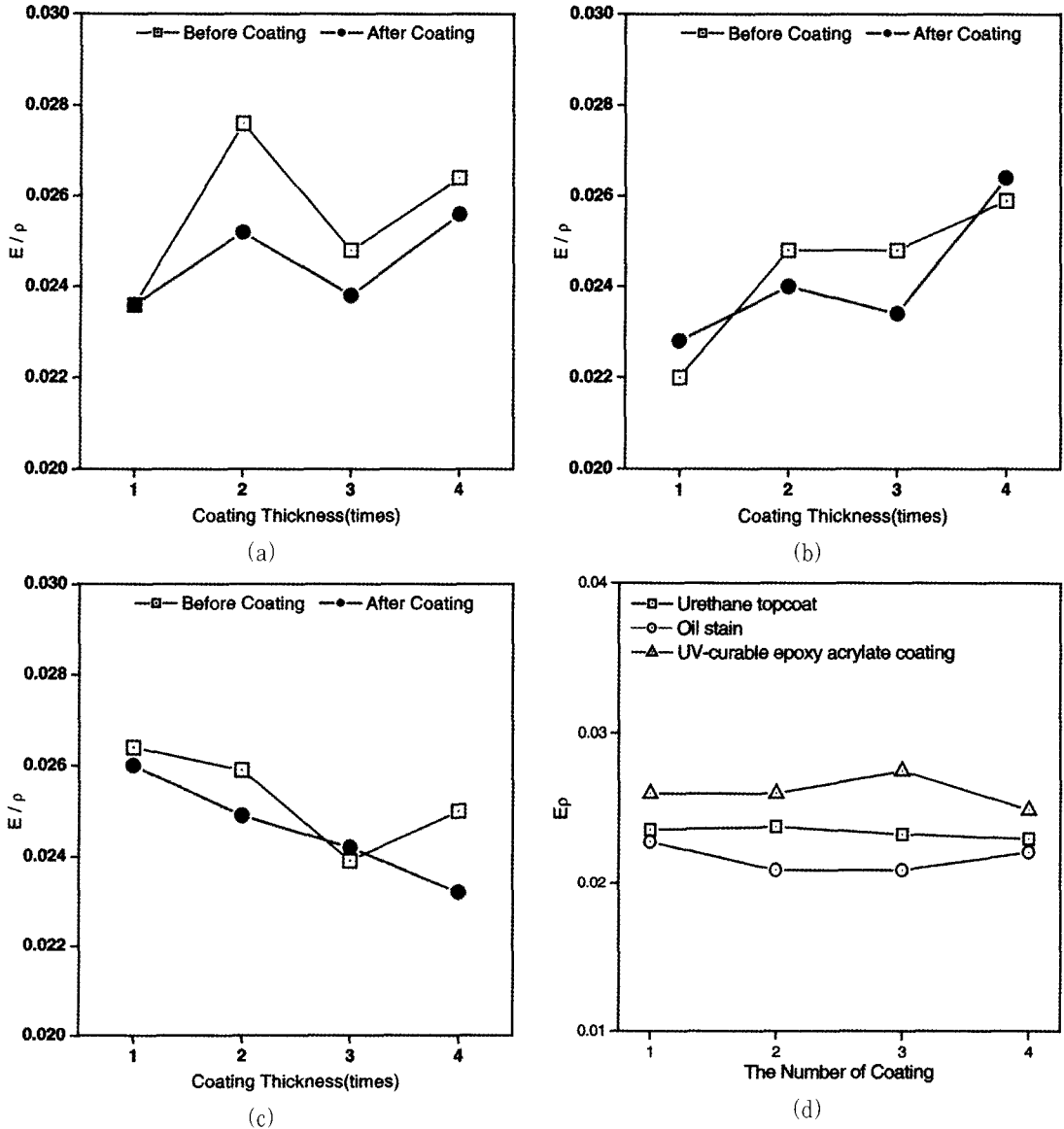
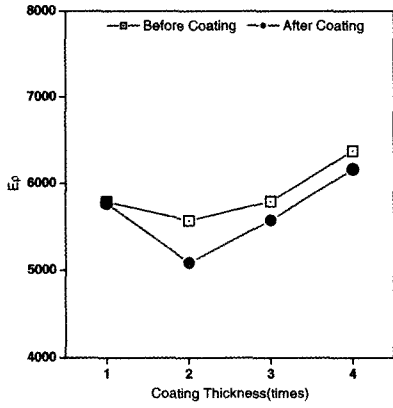


Fig. 4.  $E/\rho$  of coatings as a function of coating thickness (a: urethane topcoat, b: oil stain, c: UV-curable epoxy acrylate coating, d: relation among them).

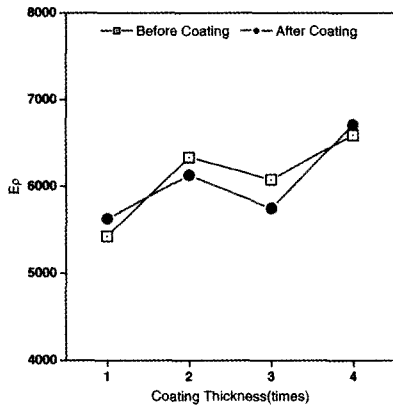
영향을 적게 받는 것으로 나타났다.

탄성계수와 밀도와의 관계를 통하여 비탄성계수 ( $E/\rho$ )와 음의 반응성( $E\rho$ )을 통하여 음을 평가하기 위해 Fig. 4와 5에서는 도막의 두께에 따른 비탄성계수와 음의 반응성을 나타낸 것이다. 비탄성계수가 가

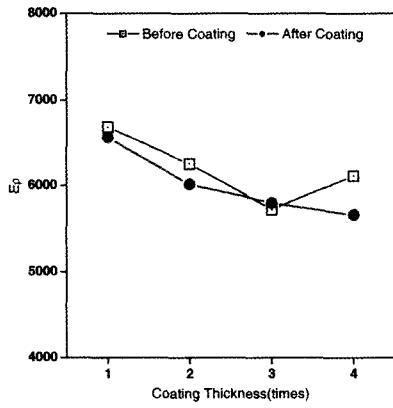
지는 물리적 의미는 동일한 힘이 가해졌을 때, 비탄성계수가 클수록 소리가 잘 발생하는 것을 의미하며, 진동전달속도와 관련이 있다(木質環境의科學, 山田正編, 海靑社(1987년 출판)). 이러한 비탄성계수는 Fig. 4(a), (b), (c)에서와 같이 도막의 영향보다는 기재인



(a)

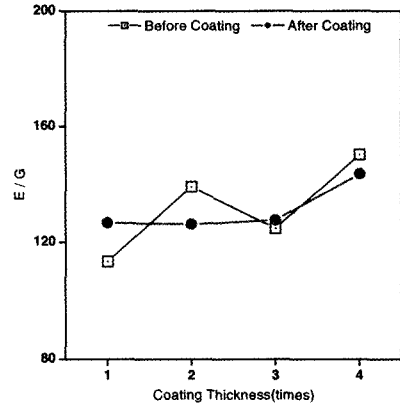


(b)

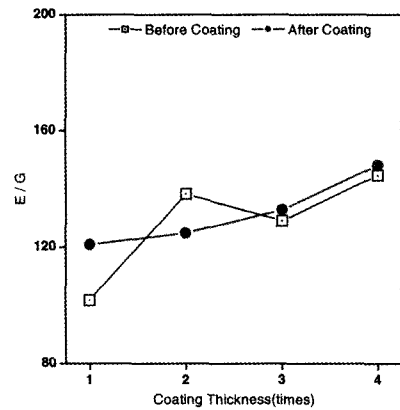


(c)

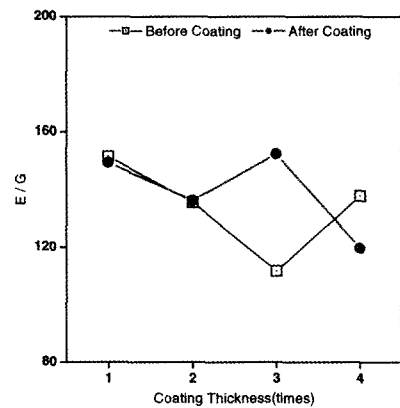
Fig. 5.  $E\rho$  of coatings as a function of coating thickness (a: urethane topcoat, b: oil stain, c: UV-curable epoxy acrylate coating).



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.  $E/G$  of coatings as a function of coating thickness (a: urethane topcoat, b: oil stain, c: UV-curable epoxy acrylate coating).

목재의 변위차로 발생하는 값에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 이것은 앞의 동적탄성계수의 경향과 마찬가지로 시편에서 도막이 차지하는 비율이 시편 전체에서 목재가 차지하는 비율에 비해 크게 작고 목재의 탄성계수가 각각의 도료가 지니고 있는 탄성계수보다 크기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 그러한 점을 감안하면 Fig. 4(d)에서와 같이 도막의 두께가 증가함에 따라 비탄성계수가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

도막이 가지는 음의 반응성을 의미하는  $E\rho$ 는 Fig. 5(a), (b), (c)에서와 같이 우레탄 상도도료와 오일스테인은 도막의 두께가 증가함에 따라 음의 반응성이 증가하였으나, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 도막의 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 도막이 가지는 경도와 탄성적인 성질이 큰 도막일수록 음의 반응도가 높아지고 유연도가 떨어져 음의 반응성이 낮아지기 때문이다. Table 1을 통해 도장처리 후 UV 경화형 도료의 경도가 도막의 두께가 증가함에 따라 크게 증가하였음을 통하여 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 음의 반응성이 도막의 두께가 증가함에 따라 감소하는 것을 보여준다. 비탄성계수와 음의 반응성은 도막이 시편에서 차지하는 비율이 낮기 때문에 도막의 탄성계수에 의한 영향보다는 밀도에 따른 영향이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 나타나는  $E/G$ 의 값은 음의 깊이 혹은 고저를 의미하며 우레탄 상도도료와 오일스테인은 도막의 두께가 증가함에 따라  $E/G$ 의 값이 증가하고, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 감소하는 경향을 보여준다. 이는 우레탄 상도도료와 오일스테인은 도막의 두께가 증가함에 따라 소리가 깊어지고 저음화 되기 때문에 이에 따라 반주부가 강해지며, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료는 소리가 얇아지고 고음화 되기 때문에 melody부가 강해지는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

도막의 두께에 따른 목재시편의 음향적인 성능을

조사하기 위해 우레탄 상도도료와 오일스테인, 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료를 사용하여 도막의 두께가 증가함에 따른 동적탄성계수와 전단탄성계수를 구하였다. 그리고 동적탄성계수와 밀도와의 상관관계와 두 탄성계수간의 상관관계를 통하여 도막의 두께에 따른 목재시편의 음향성능을 분석하였다.

도막의 동적탄성계수와 전단탄성계수는 pendulum hardness test를 사용하여 측정한 결과, 도막 표면의 경도와 상관관계를 보였으나, 도막의 두께에 따른 영향은 크게 나타나지 않았다. 또한 밀도와의 상관관계를 통하여 유추하여 본 비탄성계수( $E/\rho$ )와 음의 반응성( $E\rho$ ) 등의 음향성능은 도막의 두께에 따른 영향보다 기재인 목재가 가지는 성질에 미치는 영향이 크게 나타났다. 그러나 비탄성계수에서는 도막의 두께가 증가함에 따라 비탄성계수가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 도막의 경도가 높은 자외선 경화형 에폭시 아크릴레이트 도료의 경우도 같은 경향을 보여주었다. 그리고 음의 깊이를 의미하는  $E/G$ 는 도막의 탄성영역 즉 경도에 따라 상대적인 경향을 보여주었다.

전반적으로 시편에서 도막이 차지하는 비율이 낮고, 기재인 목재의 영향이 높아서 도막의 두께에 의한 영향을 정확히 분석하기는 어려웠지만, 도막의 두께가 증가함에 따라 음향적인 성능이 감소되는 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. 山田 正 編. 1987. 木質環境の科學, 海青社.
2. Dunlop, J. I. 1978. Damping Loss in Wood at Mid KiloHertz Frequencies. *Wood Sci. Technol.* 12: 49~62.

3. Dunlop, J. I. 1989. The Acoustic Properties of Wood in Relation to Stringed Musical Instruments. Australian Acoustic Society. 17(2): 37~40.
4. Dunlop, J. I. and M. Shaw. 1991. Acoustical Properties of Some Australian Woods. *Catgut. Acoust. Soc. J.* 1(7): 827~830.
5. 강춘원, 정희석. 1991. 진동시험에 의한 대체 향관수종의 음향적 성질 평가에 관한 연구. 목재공학. 19(1): 71~80.
6. 이원희, 황권한. 1997. 공진주파수에 의한 목재의 동적 탄성계수 추정. 목재공학. 25(1): 42~50.
7. 정우양, 홍병화. 1998. 바이올린용 주용 소재의 품질관리를 위한 음향학적 연구. 1998. 학술발표논문집. 한국목재공학회. 108~113.
8. 鄭雨陽, 朴善行. 1999. 바이올린용 素材의 진동모드 解析에 관한 연구. 목재공학. 27(3): 1~6.
9. 정우양, 박선행. 2000. 바이올린계 현악기용 브릿지의 진동특성에 관한 연구. 2000 학술발표논문집. 한국목재공학회. 191~196.
10. 정희석, 유태경, 권주용. 1998. 전통악기 음향관의 양면도장이 음향성에 미치는 영향. 목재공학. 26(4): 26~33.
11. 최재훈, 이병후, 김현중, 정우양. 2005. 현악기용 음향기능성 도료의 접탄성 성질과 음향적 성질. 목재공학. 33(4): 15~22.
12. Hearmon, R. F. S. 1966. Theory of the Vibration Testing of Wood. *Forest Products J.*, 16(8).
13. 이큰울. 2004. 휨진동법에 의한 국악기용 주요 국산재의 재질 및 음향특성 평가에 관한 연구. 석사학위 논문. 전남대학교.
14. 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.