

스피커를 이용한 ABS와 PP의 손실계수 및 영률 측정

Measurement of Loss Factor and Young's Modulus of ABS and PP Specimens by Using a Speaker

전 병 수* · 정 성 수* · 이 종 규†

Byeong Su Jeon, Sung Soo Jung and Jong Kyu Lee

(Received July 21, 2014 ; Revised August 26, 2014 ; Accepted August 29, 2014)

Key Words : Loss Factor(손실계수), Young's Modulus(영률), ABS Specimen(ABS 시편), PP Specimen(PP 시편)

ABSTRACT

It is essential to control noise and vibration in various industrial fields. In the automobile industry, various plastics have been developed and replaced metallic materials in order to reduce mass and vibration effectively. In this study, we measured and analyzed the Young's moduli and the loss factors of Acrylonitrile butadiene styrene(ABS) and Polypropylene(PP). In order to solve the fundamental error to determine the two quantities, a loudspeaker was used instead of conventional electromagnetic devices to generate bending motion to the specimens and a laser vibrometer was also used in detection of vibration signal of the specimen. The measured Young's moduli and loss factors of the ABS specimen were nearly constant as the temperature(-10~60 °C) was increased. The loss factor of PP specimen showed peak value at 20 °C and it means that there is glass transition for the PP specimen. Young's modulus of PP specimen was linearly decreased as the temperature was increased.

기 호 설 명

η : 손실계수
 ρ : 시편의 체적밀도
 ω : 각주파수

a_n : 시편의 n 번째 공진모드의 계수
 E : 영률
 f : 주파수
 f_{rn} : 시편의 n 번째 공진주파수
 F : 힘
 H : 주파수 응답함수
 k : 스프링 상수
 L : 시편의 길이
 m : 질량
 t : 시편의 두께

1. 서 론

다양한 제품 개발에 있어 과거에는 성능에 초점을 두었지만 지금은 소음진동 저감을 위한 많은 연구와 투자가 이루어지고 있다. 특히, 자동차 산업의 경우 연비 개선과 소음진동 감소를 위해 금속 소재 대신 상대적으로 가벼운 플라스틱 소재의 비중이 점차 증가하고 있다. 소재의 진동 감쇠 특성 즉, 댐핑 효과를 예측하고 적절하게 활용하기 위해서는 그 소

† Corresponding Author ; Member, Pukyong National University
E-mail : jklee@pknu.ac.kr
Tel : +82-51-629-5567, Fax : +82-51-629-5549
* Korea Research Institute of Standards and Science

‡ Recommended by Editor SungSoo Na
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

재의 손실계수와 영률 등의 기본적인 물리량을 알아야만 한다. 이들 두 양을 실험적 결정하는 방법으로는 ASTM E 756⁽¹⁾과 ISO 6721-3⁽²⁾ 등의 표준 측정방법 등 다양한 방법들이 사용되고 있다⁽³⁾. 표준 측정법에서는 시편에 휨(bending) 진동을 가진 시키는 방법과 시편에 발생된 진동을 측정하는 방법 모두 비접촉식을 권장하고 있다.

한편, 철 성분을 가진 시편의 경우는 전자기 장치를 이용하여⁽³⁾ 시편에 진동을 가할 수 있지만 플라스틱과 같은 비철 시편인 경우는 불가능하기 때문에 얇고 가벼운 금속체를 대상 시편에 부착시켜 가진하는 방법을 택하고 있다. 하지만 이 경우는 플라스틱과 금속체 간의 결합된 값이 측정되기 때문에 플라스틱 시편만의 정확한 값을 측정하지 못하는 근본적인 문제점을 안고 있다. 한편, 시편에 발생된 신호는 변위센서^(1,4), 속도센서⁽⁵⁾, 레이저 진동계⁽⁶⁾ 등을 사용하여 비접촉식 방법으로 측정할 수 있는데 레이저 진동계의 감도가 다른 센서들에 비해 우수한 것으로 알려져 있다.

이 연구에서는 현재 자동차에 많이 사용되고 있는 플라스틱 소재인 ABS와 PP의 손실계수와 영률을 표준 측정방법으로 평가하였다. 시편에 진동을 가진하는 방법으로 스피커를 사용함으로써 기존의 전자기 장치로 인한 근본적인 단점을 해결하였으며, 시편에서의 진동 측정은 레이저 진동계를 사용함으로써 신호대 잡음비를 개선하였다. 재료의 손실계수와 영률은 가진하는 주파수와 온도에 따라 변하지만⁽⁴⁾ 대부분은 특정 주파수와 온도에서의 값만을 제공하는 경우가 많기 때문에 실제 적용하는데 한계를 가지고 있다. 따라서 이 연구에서는 실제 환경에서도 사용이 가능하도록 온도 조절장치를 이용하여 -10℃부터 60℃까지 온도를 변화시키면서 측정하였다.

2. 손실계수와 영률의 기본 이론

2.1 손실계수

두께와 너비에 비해 길이가 긴 시편에서의 휨 운동은 질량 m 과 스프링 상수 k 를 가지는 1차원적 운동으로 기술 할 수 있다. 점탄성 재료의 경우 k 는 손실계수 η 를 포함하여 복소량 $k^* (= k(1 + j\eta))$ 로 나타낼 수 있다. 정상상태의 조화힘을 $F e^{j\omega t}$

($j = \sqrt{-1}$)로 가정하면 계의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + k(1 + j\eta)x = F e^{j\omega t} \tag{1}$$

식 (1)의 특별해는 식 (2)처럼 나타낼 수 있다.

$$x = A \cos(\omega t - \varphi) \tag{2}$$

여기서 $A = F / \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + k^2\eta^2}$, $\omega = 2\pi f$ (f 는 주파수), $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{k\eta}{k - m\omega^2} \right)$ 이다.

힘에 대한 변위의 비를 주파수 응답함수 H 로 표현하면 다음 식처럼 요약할 수 있다.

$$H = \frac{x}{F} = \frac{1}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + k^2\eta^2}} \tag{3}$$

H 는 공진주파수 ω_r ($= \sqrt{k/m}$)에서 최대값 H_{max} 를 갖는다.

Fig. 1에서와 같이 H 의 값이 H_{max} 의 $1/\sqrt{2}$ 가 되는 두 지점에서의 주파수를 f_A 와 f_B 로 표현하면 식 (3)은 간단한 계산을 통해 식 (4)로 정리된다⁽⁷⁾.

$$\frac{\Delta f}{f_r} = \sqrt{1 + \eta} - \sqrt{1 - \eta} \tag{4}$$

여기서 $\Delta f = |f_A - f_B|$ 이고 f_r ($\omega_r = 2\pi f_r$)은 공진주파수이다.

만약 감쇠가 작다면 식 (4)는 다음 식으로 최종 정리된다.

$$\frac{\Delta f}{f_r} \approx \left(1 + \frac{\eta}{2} \right) - \left(1 - \frac{\eta}{2} \right) = \eta \tag{5}$$

식 (5)에서 보듯이 손실계수는 응답함수 H 로부터 H_{max} 가 되는 공진주파수 f_r 과 Δf 를 구함으로써 결정할 수 있다. 이러한 방법은 흔히 ‘3-dB’ 방법이라고 부른다.

2.2 영률

보의 굽힘 운동에는 압축과 전단변형 힘이 작용하게 된다. 시편의 길이에 비해 두께가 충분히 작은 경우(1/10 이상)의 보의 운동은 Euler-Bernoulli 보 이론으로 그렇지 않은 경우는 전단변형과 회전

관성을 포함하는 Timoshenko보 이론을 적용해야 한다. Euler-Bernoulli보의 경우, 영률 E , 체적밀도 ρ 그리고 횡단면에 대한 회전반경(radius of gyration) 인자 ξ 를 갖는 계의 굽힘 운동에 대한 방정식은 길이방향의 좌표를 x 축 그리고 굽힘 운동방향의 좌표를 y 축으로 설정할 경우 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{-E\xi}{\rho} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \tag{6}$$

식 (6)의 해를 조화운동 $y(x,t) = Y(x)e^{j\omega t}$ 로 가정할 경우 다음과 같은 해를 얻는다.

$$Y(x) = A \cosh(\omega x/v) + B \sinh(\omega x/v) + C \cos(\omega x/v) + D \sin(\omega x/v) \tag{7}$$

여기서 v 는 위상 속도이고, A, B, C, D 상수는 경계조건에 따라 결정되는 상수들이다.

한편, 이 연구의 경우처럼 길이 L , 두께 t 인 사각형 시편의 한쪽(원점)은 고정시키고 다른 한쪽 ($x=L$)은 자유롭게 운동하는 경우는 식 (7)에 대해 경계조건을 적용하여 일련의 계산을 하면 최종적으로 식 (8)과 같은 영률과 공진주파수에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$E = \frac{12\rho L^4 f_{rn}^2}{a_n^2 t^2} \tag{8}$$

여기서 a_n 은 n 번째 공진 모드에 대한 계수로 $a_1 = 0.5596$, $a_2 = 3.5069$, $a_3 = 9.8194$, $a_4 = 19.242$ 등의 상수값이고 f_{rn} 은 n 번째 모드의 공진주파수이다.

3. 실험방법

시편은 현재 자동차에 많이 사용되는 있는 ABS (체적밀도 $1,065 \text{ kg/m}^3$, 길이 228 mm , 두께 2.97 mm , 너비 9.80 mm , grade: HGX 4500)와 PP(체적밀도 $1,285 \text{ kg/m}^3$, 길이 228 mm , 두께 2.84 mm , 너비 9.81 mm , grade: GP 3400)를 선택하였다. Fig. 2에 전체 측정시스템을 나타냈는데, 우선 사각형 형태의 시편 위쪽은 고정시키고 아래쪽은 자유롭게 움직이도록 하였다. 음향학적인 방법으로 시편을 진동 가진 하기 위해 시편 아래쪽에 스피커를 설치하였다. 시편의 가진은 신호 발생 및 측정된 신호를 수집하는 5-채널 신호 분석기(B&K 3560-B-030)를 사용하였고, 증폭기(B&K 2706)를 통해 스피커에서 음압을 발생시킴으로써 시편에 진동을 유발시켰다. 진동에서는 관심 주파수 대역이 $1,000 \text{ Hz}$ 이하이기 때문에 $1,000 \text{ Hz}$ 까지의 백색잡음(white noise)을 사용하였다.

시편에 발생된 진동 신호를 레이저 빔으로 측정하기 위해 시편에 얇고 가벼운 반사판(질량 0.006 g)을 부착하고 레이저 진동계(Polytec, PDV100)를 사용하여 반사판에서 되돌아오는 진동 신호를 측정하였다. 스피커에 가진되는 입력신호 대 레이저 진동계로부터 측정되는 출력신호의 비인 주파수 응답곡선을 구하였으며, 이 때 신호대 잡음비를 향상 시키기 위해 주파수 응답신호를 $1,000$ 회 평균하였다. 한편, 시편의 온도는 항온조(fisher scientific, 146E)를 사용하여 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 씩 변화시켰다. 항온조 내부 온도는 교정된 온도계(SATO PC 9400)를 사용하여 측정하였으며, 온도를 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 씩 변화시키고

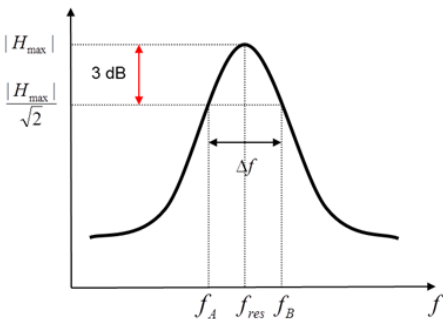


Fig. 1 Frequency response function curve

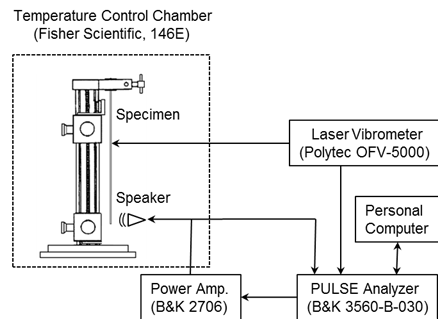


Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

안정될 때까지는 약 1시간 소요되었다. 레이저 빔을 시편에 조사하기 위해 항온조 옆면에 창(window)을 냈다.

4. 결과 및 고찰

4.1 ABS의 손실계수와 영률

ABS 시편에 대한 주파수 응답함수 측정 결과를 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3에서 보듯이 몇 개의 공진 주파수에서 주파수 응답함수의 피크가 발생되고 있다. 첫 번째 공진주파수는 16 Hz 근처에서 발생하지만 ASTM E 756에서 권장하는 것처럼 50 Hz 이상에서 신뢰성 있는 값을 가지기 때문에 안전하게 60 Hz 이상의 값을 나타냈다. ABS 시편의 경우는 온도 변화에 따라 낮은 공진 모드에 비해 높은 공진 모드에서 공진주파수의 이동이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 같은 공진 모드의 경우 낮은 온도에 비해 온도가 상승할수록 공진주파수는 낮은 주파수로 이동을 볼 수 있다.

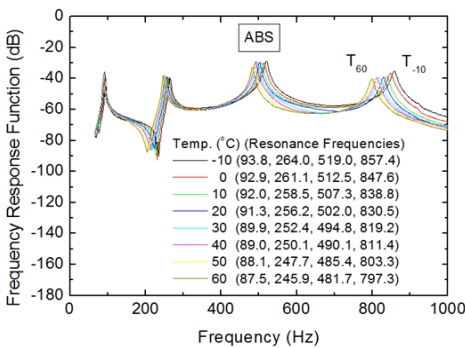


Fig. 3 Frequency response function of ABS specimen

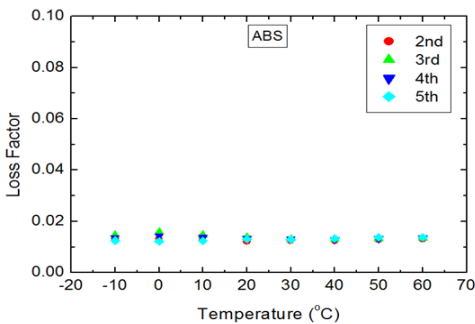


Fig. 4 Loss factor of ABS specimen

손실계수는 각각의 공진 모드에서 주파수 응답함수의 피크값을 중심으로 줌인(zoom in)을 하고, 이들 값이 3 dB 감소하는 두 지점 간의 주파수 차를 측정하여 식 (5)로부터 결정하였다. 각각의 공진 모드에 대한 손실계수값을 온도변화에 따라 나타내면 Fig. 4와 같다. 결과에서 보듯이 온도 변화에 따른 손실계수값은 거의 일정함을 알 수 있다.

영률은 측정된 공진주파수값을 이용하여 식 (8)로부터 산출하였는데 Fig. 5와 같다. 결과에서 볼 수 있는 것처럼 영률 또한 거의 일정하였다. 손실계수와 영률 측정결과에서 보듯이 ABS 소재는 이 실험 온도 범위에서는 거의 변하지 않는 특성을 나타냈다. 영률 측정값의 정확도는 ISO 6721-3에서 언급하는 것처럼 시편의 길이 대 두께 비가 50 이상 그리고 주파수 10~1,000 Hz 대역에서는 측정결과가 5% 이내이다. 또한 시편 고정단 효과가 영률측정 값에 미치는 영향을 최소화하기 위해 ISO 6721-3에서는 시편의 길이를 180 mm 이상으로 권장하고 있으며, 이 연구의 경우 시편의 길이가 228 mm이기 때문에 이들 영향은 미미할 것으로 판단된다.

4.2 PP의 손실계수와 영률

PP 시편에 대한 주파수 응답곡선을 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6에서 보면, PP는 온도 변화에 따른 공진 주파수 이동이 ABS보다 크다는 것을 알 수 있다.

온도 변화에 따른 각 모드별 손실계수를 Fig. 7에 나타냈는데 PP의 경우는 온도 증가에 따라 손실계수가 증가하다가 20 °C에서 피크값을 형성한 후 다시 감소하고 있다. 이런 현상은 온도에 따른 상전이 가 발생함을 암시하는데 PP시편에 대한 Gnatowski

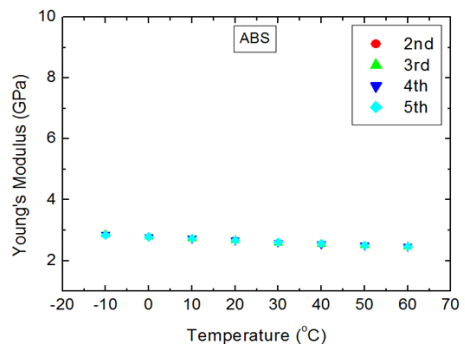


Fig. 5 Young's modulus of ABS specimen

등⁽⁸⁾의 연구 결과를 참고해 보면 PP 소재는 80 °C 이상에서 강한 α -상전이(transition)가 발생하고, 20 °C 근처에서는 유리-상전이(glass-transition)가 발생됨을 확인할 수 있었다. 이 실험에서의 온도 범위가 60 °C까지이므로 α -상전이 현상은 직접 볼 수 없지만 Fig. 7에서 보면 50 °C와 60 °C에서의 손실계수 값이 다시 증가하는 추세여서 80 °C 이상에서 다시 피크값을 가질 가능성을 보여주고 있다. 따라서 온도변화에

따른 재료의 손실계수를 측정하면 온도에 따른 상전이 현상을 볼 수 있는 하나의 방법이 됨을 알 수 있다. 한편, 영률은 Fig. 8에 나타냈는데 ABS와는 다르게 온도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 특성을 나타냈다.

4.3 부가질량이 손실계수와 영률에 미치는 영향 분석

기존의 전자기 방법에 의한 시편 가진은 플라스틱과 같은 비철 재료에 대해서는 직접 적용할 수 없다. 이 경우 표준측정방법에서는 시편 질량의 1% 이하인 얇은 금속을 시편에 부착하도록 되어 있다. 따라서 이들 부가적인 질량으로 인해 어느 정도 측정값에 영향을 미치는지 살펴보기 위해 상온에서 측정하고 분석하였다. 각각의 시편에 대해 시편 질량의 1% 이내로 원판 모양의 얇은 금속(ABS : 0.075 g, PP : 0.089 g)을 부착하였다. 온도 24.1 °C에서 ABS와 PP 시편에 대해 스피커 가진 방법으로 부가 질량의 유·무에 따른 주파수 응답곡선 측정 결과를 Fig. 9에 비교하였다. 두 결과에서 보듯이 부가 질량이 있는 경우는 없는 경우에 비해 모든 공진주파수가 저주파 대역으로 이동하고 있으며

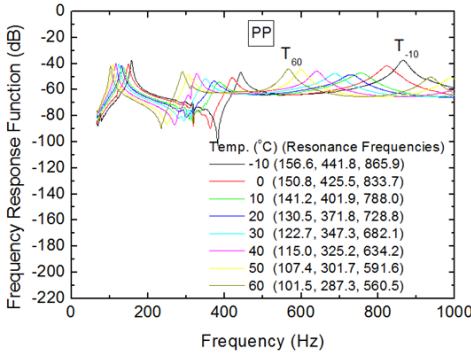


Fig. 6 Frequency response function of PP specimen

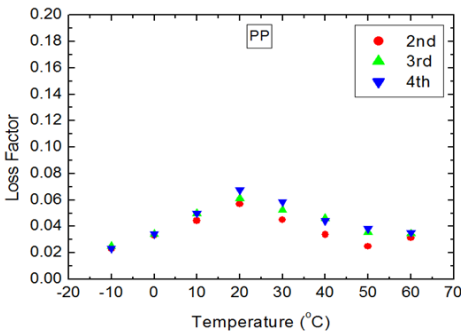


Fig. 7 Loss factor of PP specimen

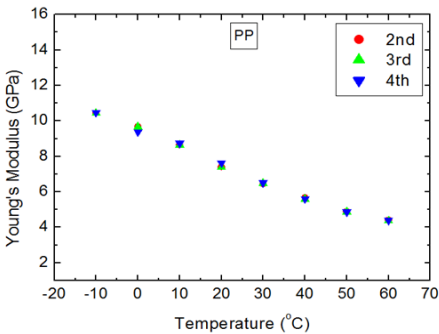


Fig. 8 Young's modulus of PP specimen

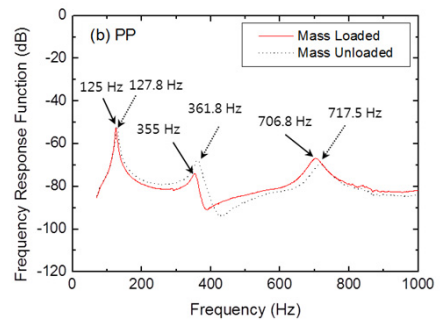
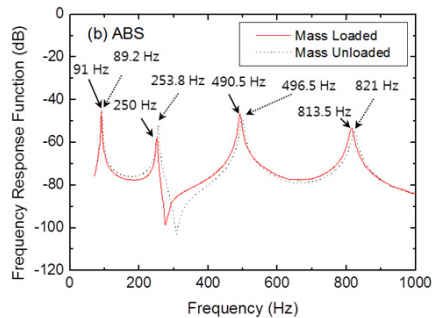


Fig. 9 Frequency response functions of ABS and PP specimens with and without mass loading

이것은 식 (8)에서 보듯이 영률에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

ABS 시편의 손실계수를 각각의 모드에 대해 측정된 결과 부가 질량이 없는 경우는 0.0128, 0.0125, 0.0136, 0.0137이며, 부가질량이 있는 경우는 0.0126, 0.0128, 0.0134, 0.0135이었다. 이들 두 방법에 의한 손실계수의 상대오차는 평균 1.8%이었다. 영률의 경우는 부가질량이 없는 경우 각 모드별로 2.64 GPa, 2.62 GPa, 2.61 GPa, 2.61 GPa 이었고 부가질량이 있는 경우는 2.53 GPa, 2.54 GPa, 2.54 GPa, 2.56 GPa였으며, 이들 두 방법으로 구한 영률의 상대오차는 평균 2.8%였다.

PP의 경우는 각각의 공진 모드별로 부가 질량이 없는 경우의 손실계수는 0.0386, 0.0526, 0.0564이며, 부가질량이 있는 경우는 0.0394, 0.057, 0.0532로 측정되었다. 두 방법에 의한 손실계수의 상대오차는 평균 5.4%로 ABS 시편에 비해 좀더 크게 나타나고 있다. 영률은 부가질량이 없는 경우는 각각의 모드에 대해 6.86 GPa, 7.01 GPa, 7.18 GPa 이었고 부가질량이 있는 경우는 6.56 GPa, 6.75 GPa, 6.97 GPa였으며 이들 두 경우의 상대오차는 평균 3.7%였다. 이들 결과로부터 부가질량이 있는 경우는 온도에 따라 다소 차이는 있었지만 근본적으로 시편의 손실계수와 영률 측정값에 오차를 포함하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 비철재료의 영률과 손실계수를 측정함에 있어 스피커를 이용하는 음향학적 방법을 적용하여 기존의 전자기 가진방법이 갖는 부가질량 효과로 인한 문제점을 해결하였다. 또한 레이저 진동계를 사용한 비접촉식 방법으로 시편을 진동을 측정함으로써 측정의 정확도를 향상시켰다. 비철재료로는 현재 자동차 소재로서 많이 사용되고 있는 ABS와 PP 시편을 선택하고 -10 °C에서 60 °C까지 온도를 변화시키면서 손실계수와 영률을 ASTM E 756 표준 측정방법으로 구하였다. 측정결과 ABS 시편은 온도증가에 따라 손실계수가 일정한 것에 반해, PP 시편은 20 °C에서 손실계수의 피크값이 형성되는 유리-상전이 발생함을 알 수 있었다. 영률은 ABS는 온도증가에 따라 일정하였지만 PP는 감소하는 특성

을 보였다. 이 연구에서 적용한 스피커를 사용하여 시편을 가진하는 방법은 모든 비철 소재에 적용이 가능하기 때문에 활용성이 클 것으로 기대된다. 또한 온도를 변화시키면서 손실계수와 영률을 측정하였기 때문에 이들 자료들은 실제 환경에서 사용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년) 지원으로 이루어졌습니다.

References

- (1) ASTM E 756, 1998, Standard Test Method for measuring Vibration Damping Properties of Materials.
- (2) ISO 6721-3, 1994, Plastics-Determination of dynamic mechanical properties - Part 3: Flexural vibration - Resonance-curve method.
- (3) Shin, S. H., Lee, Y. B., Jung, S. S. and Lee, D. H., 2004, Comparison of Test Methods for Vibration Damping Properties, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 9, pp. 852~860.
- (4) Shin, S. H., Jung, S. S., Lee, Y. B., Lee, D. H., and Nam, H. D., 2005, Damping Properties of Plastics with Temperature Variation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 213~218.
- (5) Jung, S. S., Kim, Y. T., Lee, Y. B., Shin, S. H., Kim, D.-W. and Kim, H. C., 2006, Measurement of the Resonance Frequency, the Loss Factor, and the Dynamic Young's Modulus in Structural Steel and Polycarbonate by Using an Acoustic Velocity Sensor, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 49, No. 6, pp. 1961~1966.
- (6) Rao, M. D., 2003, Recent Applications for Viscoelastic Damping for Noise Control in Automobiles and Commercial Airplanes, Journal of Sound and Vibration, Vol. 257, No. 3, pp. 457~474.
- (7) Nashif, A. D., Jones, D. I. G. and Henderson, J. P., 1985, Vibration Damping(Wiley, New York).
- (8) Gnatowski, A., Wawrzyniak, J. and Jaruga, T.,

2010, Performance Properties and Structural of Electrochemically Aged Polypropylene with a Dye Addition, Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 41, No. 1, pp. 37-44.



Byeong Su Jeon He received his Ph.D. degree in Physics from PuKyong National University in 2014. His research interests are assessment of vibrational sensor calibration and assessment of vibrational damping properties of

materials.



Sung Soo Jung received his Ph.D. degree in Physics from HanKuk University of Foreign Studies in 1995. His research interests are assessment of environmental noise including low frequency noise and measurement and analysis of the

acoustic properties of sound absorbent materials.



Jong Kyu Lee received his Ph.D. degree in Physics from KAIST in 1988. His research interests are Ultrasonics including composite transducers, Acoustic Emission, wave propagation and acoustic properties of materials.