

음향공진법을 이용한 PVC/MBS의 탄성적 특성 평가

이동환* · 박세만** · 박명균**

An Evaluation of Elastic Aspects of PVC/MBS
by An Acoustic Resonance Method

D. H. Lee, S. M. Bahk, M. K. Park

Key Words: Acoustic Resonance Method(음향공진법), Internal Friction(내부마찰), Natural Frequency(고유 진동수), Damping(감쇠)

Abstract

A certain amount of MBS rubber was added to improve toughness of PVC which has a strong tendency of being brittle, producing a mixture, PVC/MBS, from which test specimens were prepared. PVC has strong chemical resistance, oil resistance, flame retardancy and high mechanical strength. Also, it is relatively inexpensive to produce, but shows weakness to impact and difficult for processing. MBS, a typical toughening agent for PVC is generally known, when added in a small amount, to improve impact resistance and to minimize difficulties during the processing of the PVC without adversely affecting the positive aspects of the PVC. In this investigation, attempts were made to observe and determine the variations in elastic and damping constants of the PVC depending on the amounts of MBS added to the mixture, PVC/MBS, and also on the thicknesses of the specimens. An acoustic resonance technique was used for the tests in this investigation. It serves as a method to characterize properties of materials set in vibrational motions, which is initiated by low level stresses generated by externally supplied acoustic energy. Substantial variations were observed in the test results with the addition of the MBS to the PVC. Generally, the magnitudes of elastic constants decrease while the damping capacity improves when MBS rubber was added.

1. 서론

금세기에 들어서 고체물리가 크게 발전함과 더불어 고체성질에 관한 광대한 양의 정보가 쌓이게 됨과 아울러 새로운 소재가 속속 개발됨에 따

라 필요한 소재특성에 관한 정보도 점차 늘어나고 있는데 탄성계수는 소재특성을 파악하는데 중요한 특성평가 중의 하나이다.

목적에 맞는 신소재에 대한 요구가 증가함에 따라 국내외적으로 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 신소재를 이용하여 설계할 때 그 재료의 성질을 정확히 파악하여 안전하고 경제적인 설계의 필요성이 요구되고 있다. 따라서 소재특성에 대한 정보가 필수적으로 요구되고 평가방법에 대한 관심도 높아져가고 있는 현실이다.

고체에 있어서 탄성계수는 과학적인 관점과 공

* 비회원, 명지대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 명지대학교 기계공학과

** 회원, 명지대학교 기계공학과

학적인 관점모두에서 중요하게 여겨지고 있다. 그 이유는 어떤 재료를 어떤 특정한 목적에 사용할 때 설계 기준치를 설정하는 데 있어서 요구되는 것 중의 하나이기 때문이다.

구조재로 사용되고 있는 재료는 금속, 폴리머, 세라믹, 복합재료와 같이 크게 네 가지로 구분이 되는데 본 연구에 사용된 재료는 신소재 중에서도 기존의 금속재료를 대신하고 있는 폴리머재료로서 이곳은 다양한 목적으로 널리 사용되어지고 있다.

본 과제를 통하여 연구한 분야는 동적인 방법으로 탄성계수를 측정하는 분야이며 음향 공진법에 대해서 연구하여 보았다.

계의 진동원리를 이용하여 공진 주파수와 Q값 등의 재료의 진동특성을 측정하면 탄성계수 및 내부마찰등의 재료자체의 특성을 규명할 수 있다. 이것이 바로 음향 공진법의 원리이다. 이 개념이 음향에너지의 적용을 통한 오직 매우 낮은 응력들이 작용하는 공진법에 의해 진동된 재료의 강성을 결정하는 데 사용되어진다.

음향 공진법은 각 재료의 형상계수를 알고 있어야만 탄성계수를 측정할 수 있기 때문에 현재에는 특별한 형상 사각 봉이나 원형 봉의 경우에만 이미 계산되어 있는 형상계수를 이용할 수 있는 한계가 있으나 재료의 형상계수와 치수를 정확히 알고 있다면 임의의 재료에 대하여 특별한 가공 없이 탄성계수를 얻을 수 있고 측정에 소요되는 시간이 짧은 편이다.

이러한 음향 공진법을 이용하여 본 재료의 공진 주파수를 측정하여 동적 탄성계수를 산출하였다.

2. 이 론

2.1 굽힘 공진 주파수 (f_F)⁽¹⁾⁽²⁾

굽힘 공진 주파수(Flexural Resonance Frequency)와 종 탄성계수사이의 관계를 1차 모우드이고 시편의 길이가 L 인 사각막대의 경우에 대하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{0.94642 \rho f_F^2 L^4}{t^2} T \quad (1)$$

여기서 f_F : 굽힘 공진 주파수
 L : 시편의 길이
 ρ : 밀도
 T : 형상계수
 t : 시편의 두께

형상계수 T 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = 1 + 6.585(1 + 0.0752\mu + 0.8109\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0.868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - 8.340(1 + 0.2023\mu + 2.173\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^4 / (1 + 6.338(1 + 0.1408\mu + 1.536\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2) \quad (2)$$

2.2 비틀림 공진 주파수 (f_T)⁽³⁾⁽⁴⁾

비틀림 공진 주파수(torsional Resonance Frequency)와 횡 탄성계수 사이의 관계를 1차 모우드이고 길이가 L 인 사각막대의 경우에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$G = \rho(2L f_T)^2 R \quad (3)$$

여기서 f_T : 비틀림 공진 주파수
 L : 시편의 길이
 ρ : 밀도
 R : 형상계수

형상계수 R 은 사각막대의 경우 다음과 같은 방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$R = \left[\frac{1 + \left(\frac{a}{t}\right)^2}{4 - 2.521 \frac{t}{a} \left(1 - \frac{1.991}{e^{\frac{a}{t}} + 1}\right)} \right] \left[1 + \frac{0.00851 a^2}{L^2} \right] - 0.06 \left(\frac{a}{L}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{a}{t} - 1\right)^2 \quad (4)$$

여기서 a : 시편의 폭
 t : 시편의 두께

2.3 감쇠 측정⁽⁶⁾⁽⁷⁾

실제 계에서 진동 에너지는 점차로 열이나 소리

로 바뀌어지고 에너지 감소로 인하여 계의 변위와 같은 응답은 점차로 줄어들게 된다. 진동계에서 감쇠(damping)는 에너지의 분산과 연관되어진다.

계에서 감쇠의 양을 측정하는 한 가지 방법은 자유진동의 감소율을 측정하는 것이다. 자유진동(Free vibration)은 작용된 가진력을 갑자기 제거함으로써 수행되어진다.

재료의 내부 마찰(internal friction)로 알려진 Q^{-1} 은 주파수의 함수로 측정된 신호크기의 데이터로부터 구할 수 있다. 즉 재료의 가해주는 펄스의 주파수가 변화함에 따라 수신되는 신호의 크기가 변화하게 되는데 신호의 크기는 공진주파수에서 최대가 되고 이로부터 멀어질수록 점차 감소한다.

내부 마찰은 최대공진의 폭으로 측정된다. 그 값은 다음과 같이 주어진다.

$$Q^{-1} = \frac{f_h - f_l}{\sqrt{3} f_n} \quad (5)$$

여기서 f_h 와 f_l 은 공진주파수에서의 신호크기의 1/2되는 주파수이고 f_n 은 공진주파수이다.

그러므로 공진주파수 측정시 f_h 와 f_l 을 동시에 측정하면 재료의 내부마찰 계수 측정이 가능하다.

3. 실험

3.1 실험방법 및 구성

음향 공진법의 측정장치는 재료에 연속적인 진동을 가해주는 가진기 부분(Driver), 재료의 진동을 수신하기 위한 Pick-up부분으로 나뉜다. 전체장비의 구성은 다음과 같다.

진동을 가해주는 가진기로는 고음용 스피커(Tweeter Type Speaker)를 사용하였고, 함수발생기(Function Generator)로는 HP33120A Synthesized Function /Sweep Generator를 사용하였는데 15MHz까지 주파수의 분해능은 0.0001Hz이고, 외부출력은 10V의 출력을 얻을 수 있다. 그러므로 출력을 높이기 위한 증폭기는 사용하지 않았다.

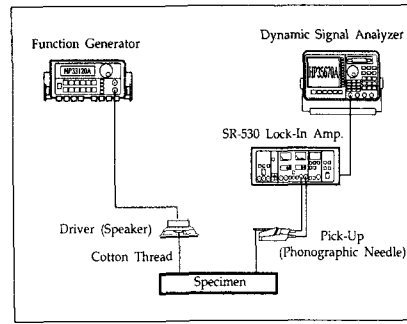


Fig. 1 General Block Diagram of Instrumentation for Acoustic resonance method.

Pick-up 장치로는 주파수 범위가 20~20000Hz 범위의 전축바늘(Phonographic needle)을 사용하였고 HP35670A Dynamic Signal Analyzer를 사용하여 신호를 분석하였다. 측정장치에서 가장 중요한 부분은 driver와 pick-up부분이다. driver로는 고음용 스피커, 고출력 압전 변환기(high-power piezoelectric transducer)등이 이용될 수 있는데 이중 가장 구하기 쉬운 고음용 스피커를 사용하였다.

pick-up에서 얻어진 신호는 매우 미약하기 때문에 이의 효율적인 검출을 위하여 전축바늘을 여러 가지 종류로 구하여 이중 최대의 효율을 낼 수 있는 세라믹 바늘을 사용하였다.

신호의 소리와 잡음비를 높이기 위하여 SR-530 Lock-in amplifier를 사용하였다.

재료를 지지하는 많은 방법 중에 실로 재료를 매다는 방법을 택하였는데 nodal points는 두 끝에서부터 0.224 L 위치에 있다. 이 nodal point에서는 진동이 생기지 않기 때문에 실의 매듭이 nodal points를 벗어나도록 해야하는데 대부분의 측정이 nodal points로부터 6mm 정도 벗어났을 때 잘 이루어진다.

매듭의 상대적인 위치를 변화시키면 다른 진동 모우드의 공진 주파수를 측정할 수 있는데 즉 두 개의 매듭이 재료의 중앙에 위치하면 굽힘 공진 주파수를 측정할 수 있고, 재료의 끝에 그리고 매듭의 위치는 대각으로 하게 되면 비틀림 공진 주파수를 측정할 수 있다.

3.2 실험 결과 및 분석

함유량이 각각 0phr, 5phr, 7phr, 9phr 인 시편을 두께에 차이를 두고 12개의 시편으로 시편의 탄성계수와 감쇠를 측정하기 위해 음향 공진법을 수행하였다.

Table 1은 시편의 각 실험시편들의 기본 dimension과 이를 통해 계산된 밀도값을 나타내었다.

음향 공진법으로 재료의 탄성계수를 측정하기 위해서는 재료의 굽힘 공진 주파수(f_F)와 비틀림 공진 주파수(f_T)의 측정이 필요하다.

각각 측정된 굽힘 공진 주파수와 비틀림 공진 주파수를 음향 공진법에 의한 이론식(1), (3)에 대입하여 탄성계수를 측정하였다.

Table 1 Dimension of specimen.

구분 함유량	길이(cm)	두께(cm)	폭(cm)	밀도(g/cm ³) (질량(g))	Poisson's ratio
0phr	8.994	0.2	0.996	1.40(2.52g)	0.4
	8.952	0.3	0.992	1.41(3.64g)	
	9.043	0.5	0.999	1.39(5.86g)	
5phr	8.821	0.2	1.003	1.36(2.42g)	
	8.9	0.3	1.007	1.37(3.55g)	
	8.974	0.5	1.004	1.36(5.78g)	
7phr	8.835	0.2	1.003	1.37(2.5g)	
	8.838	0.3	1.003	1.36(3.49g)	
	8.773	0.5	1.005	1.38(5.74g)	
9phr	8.884	0.2	1.003	1.36(2.5g)	
	8.915	0.3	1.003	1.36(3.44g)	
	8.868	0.5	1.003	1.35(5.66g)	

Table 2에는 제작된 시편을 가지고 굽힘 공진 주파수와 비틀림 공진 주파수를 측정한 후 이론식에 대입하여 E값과 G값을 산출한 것을 나타내었다

Table 2 Experimental values of tests from resonance Method.

구분 함유량	굽힘 공진 주파수 (Hz)	Young's Modulus (GPa)	비틀림 공진 주파수 (Hz)	Shear Modulus (GPa)
0phr	410	3.62	2010	1.33
	605	3.73	3370	1.98
	976	3.92	3776	1.23
5phr	404	3.16	1968	1.21
	584	3.35	3368	1.97
	970	3.6	3768	1.22
7phr	413	3.19	2000	1.21
	580	3.19	3362	1.91
	965	3.31	3710	1.14
9phr	402	3.06	1960	1.16
	547	2.84	3240	1.75
	938	3.17	3416	0.97

Fig. 2, 3, 4는 실험을 통해 얻어진 굽힘 공진 주파수로 구한 두께별 E값을 그래프로 나타낸 것이다.

그래프에 나타난 것 같이 함유량이 많아 질수록 E값이 감소하는 경향을 보인다. 또한 rubber를 첨가한 것과 그렇지 않은 것의 E값의 차이가 많이 나타남을 알 수 있다.

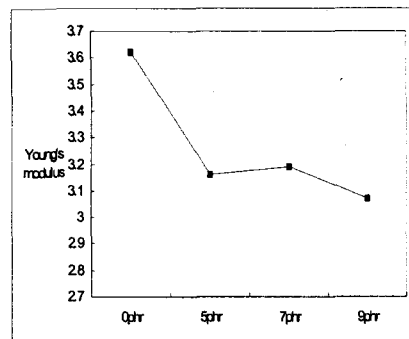


Fig. 2 Young's modulus for 2mm

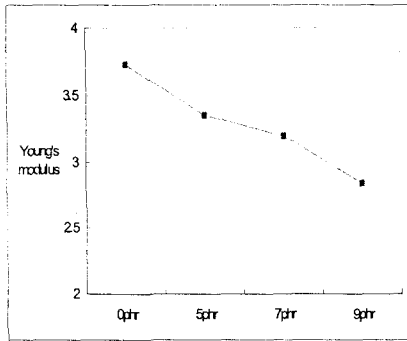


Fig. 3 Young's modulus for 3mm

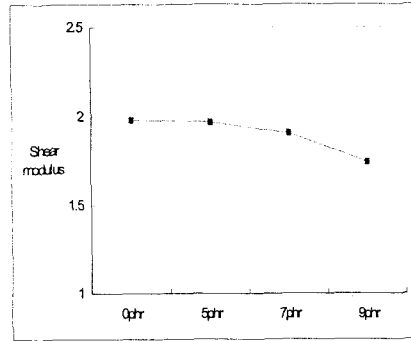


Fig. 6 Shear modulus for 3mm

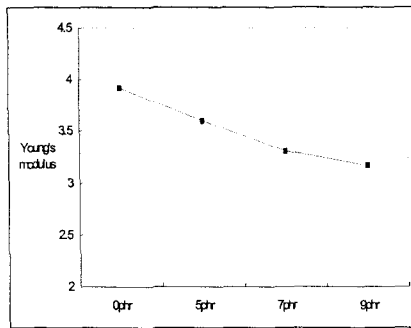


Fig. 4 Young's modulus for 5mm

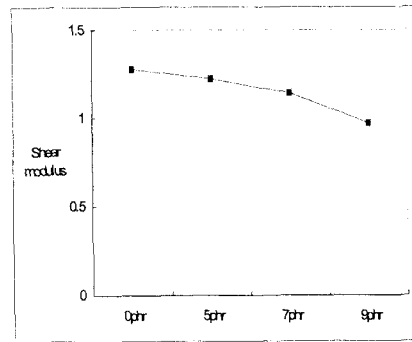


Fig. 7 Shear modulus for 5mm

하지만 두께가 2mm인 시편에서 rubber의 함유량이 7phr시편이 약간의 증가 현상이 일어났다. Fig. 5, 6, 7은 비틀림 공진 주파수로 구한 두께 별 G 값을 나타내었다.

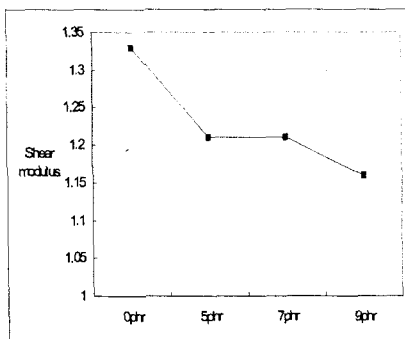


Fig. 5 Shear modulus for 2mm

비틀림 공진주파수들은 굽힘 공진주파수에 비해 높은 주파수대에서 형성되었다.

위에서 본 E 값의 경향과 마찬가지로의 결과를 얻을 수 있었는데 역시 여기서도 두께가 2mm인 시편에서 rubber의 함유량이 7phr시편에서 약간의 증가 현상이 일어났다.

이것은 Table 1에 나왔듯이 5phr과 9phr의 시편보다 밀도차에 의한 오차가 아닌가 생각된다. 감쇠를 알아보기 위해 굽힘 공진 주파수 측정시 동시에 공진주파수에서의 신호크기의 1/2되는 주파수 f_h 와 f_l 을 구해 이론식(5)에 대입하여 값을 산출하였다.

Fig. 8, 9, 10은 계산한 값들을 그래프로 나타내석이다.

그래프를 보면 알 수 있듯이 함유량에 따라 감쇠는 증가하고 있다.

하지만 앞의 E 값과 G 값의 경우와 마찬가지로 두께가 2mm인 시편에서 rubber의 함유량이 7phr 시편의 경우에 대해서는 급격한 감소현상을 나타내었다.

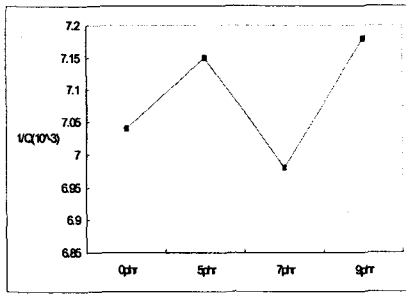


Fig. 8 Damping factor for 2mm

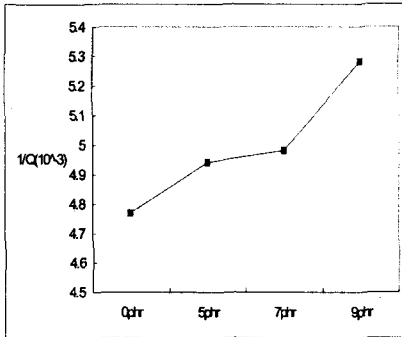


Fig. 9 Damping factor for 3mm

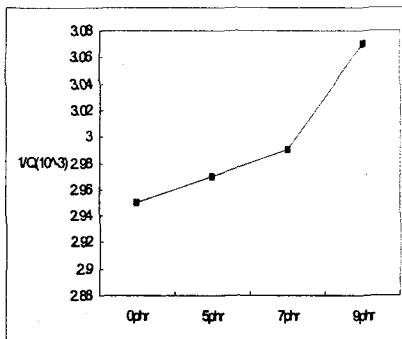


Fig. 10 Damping factor for 5mm

4. 결론

음향 공진법을 사용하여 PVC/MBS 재료의 탄성계수와 감쇠를 측정하여 보았다. 두께와 함유량의 변화를 주며 한 실험을 통해 rubber 함유량의 증가에 따라 탄성계수는 감소하고 감쇠는 감소함을 알 수 있었다. 두께의 차에 의해서도 탄성계수가 증가하는

경향을 보았다.

수차례의 결친 실험결과 두께가 2mm인 시편에서 rubber의 함유량이 7pr시편의 경우에 대해서는 오차가 발생하였다.

그것을 볼 때 미세한 밀도차이지만 값들에 크게 영향을 미치는 것으로 생각된다.

이 공진법은 탄성적 특성, 차원과 질량의 함수이다.

그러므로 정확한 질량과 차원의 측정이 좋은 실험결과를 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) G. Pickett, "Equations for computing elastic constants from flexural and torsional resonant frequencies of vibration of prism and cylinders", *Proceedings of ASTM* Vol. 45; pp.550~557.
- (2) S. Spinner, T. W. Reichard, W. E. Tefft "A comparison of experimental and theoretical relations between young's modulus and the flexural and longitudinal resonance frequencies of uniform bar", *J. Research NBS*, Vol.64A; pp.147~155
- (3) S. Spinner, W. E. Tefft, "A Method for Determining Mechanical Resonance Frequency and for Calculating Elastic Modulus from These Frequencies", *Proceeding of ASTM*. Vol.45; pp.1221~1238
- (4) D.P.N. Hasselman, 1961, *Tables for the Compilation of the Shear Modulus and Young's Modulus of Elasticity from the resonant Frequencies of Rectangular Prisms*, The Carborundum Company, New York, Niagara Falls
- (5) E. Schreiber, O. L. Anderson, N. Sega, 1974, *Elastic constants and Their Measurement*, McGraw-Hill, New-York
- (6) Lee, Won Jae, 1988, *Characterization of composites by internal friction and elastic modulus measurements*, M. S. Thesis, Michigan State University
- (7) Rao, 1995, *Mechanical Vibrations*, Addison-Wesley, New-York