

초기 변형이 있는 방진고무의 동특성 규명 방법

Identification Method of the Dynamic Characteristics of Pre-deformed Elastomers

안 태 길[†] · 김 국 원^{*}

Tae Kil Ahn and Kug Weon Kim

(2003년 8월 6일 접수 : 2003년 11월 28일 심사완료)

Key Words : Elastomers(방진고무), Dynamic Characteristics(동특성), Pre-strain(초기 변형률), Dynamic Strain(동적 변형률)

ABSTRACT

Elastomers are extensively used in various machine design application, mainly for vibration/shock/noise control devices. However, there are still a lot of difficulties in designing the elastomeric components applied in complex shapes and under pre-deformed states. One of the most influential factors related to mechanical properties of elastomers are pre- and dynamic strains. Consequently, a large number of experiments have to be conducted to identify dynamic properties of elastomers considering their combined effects. In this paper, we present an efficient experimental method to identify mechanical properties of elastomers considering effects of pre- and dynamic strains. This method is capable of predicting the dynamic characteristics of elastomers under arbitrary strain states from reduced experimental data.

1. 서 론

고무재료는 필요한 기계적 특성을 갖도록 성형 제작이 가능하고 제조공정이 경제적인 뿐만 아니라, 금속과의 접착성도 우수하여 기계 및 건축 구조물의 충격, 진동 및 소음의 차단과 제어에 널리 이용되고 있다. 이러한 진동저감과 관련된 고무재료의 주요 물적 특성치는 탄성계수와 손실계수로서, 이들에 대한 보다 정확한 정보는 고무재료를 이용한 방진설계를 위해 필수적이라 할 수 있다.

그러나 고무재료의 동적 물성치는 일반 금속재료와

는 달리 여러 요인에 의해 영향을 받는데, 보통 온도와 주파수 의존성이 높으므로 이들에 관한 연구가 중점적으로 이루어져 왔다.^(1~3) 오랫동안 고무재료의 이러한 특성을 모형화하려는 많은 노력이 있어 왔으나, 인장시험과는 달리 압축시험에서는 시편의 고정부위의 경계조건 때문에 시편의 응력상태가 복잡하게 되어 실험결과로부터 재료상수를 추출하기가 매우 어려운 이유로 아직까지 압축된 고무재료에 대한 연구 내용은 그리 많지 않다.⁽⁴⁾ 그러나 대부분 고무재료를 이용한 기계요소들은 지지하고 있는 시스템의 무게에 의해, 또는 의도적으로 가해지는 압축하중 하에서 사용되고 있으므로 이의 영향을 고려하는 일이 매우 중요하다. 또한 고무재료의 동특성은 동적 변형률에 대해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 따라서 고무재료의 초기변형률 및 동적 변형률의 영향을 고려한 재료의 동특성을 얻기 위해서는 방대한 양의 실

[†] 책임저자 : 정희원, 호서대학교 기계건축토목공학부 기계설계전공

E-mail : tkahn@office.hoseo.ac.kr

Tel : (041) 540-5812, Fax : (041) 540-5818

^{*} 정희원, 순천향대학교 기계공학과

험이 필요하게 된다.

저자는 압축하중을 받는 고무재료의 동특성이 변형률 함수와 주파수 함수의 곱으로 분리될 수 있다는 가정으로부터 유한요소 해석을 이용하여 압축된 고무재료의 동특성의 예측 가능성을 제시한 바 있다.^(6, 7) 또한 동적 변형률의 영향은 온도의 영향과 마찬가지로 이동인자를 이용하여 한 특정 변형률에서 재료의 동특성을 알면 다른 변형률에서의 동특성을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 고무재료의 이러한 특성들을 이용하여, 초기 압축변형률과 동적 변형률을 고려한 고무재료의 동특성을 최소한의 실험횟수로 규명하는 방법을 제시하고자 하며 이의 타당성을 실험을 통하여 검증하였다.

2. 고무의 정적 거동

고무재료와 같이 대변형(변형률 500 % 이상)에서도 탄성거동을 나타내는 재료의 응력과 변형사이의 관계는 변형률에너지 함수를 이용하는 초탄성(hyperelasticity) 모델이 사용된다. 비압축성 고무재료의 등온 변형해석에 널리 이용되는 변형률 에너지 함수, U 는 다음과 같은 다항함수 형태를 가진다.

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j \quad (1)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (3)$$

여기서 N 은 에너지 함수의 차수, C_{ij} 는 실험으로

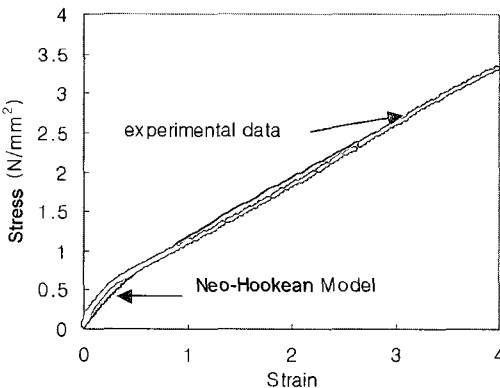


Fig. 1 Stress-strain relationship from uniaxial test and curve fitting for Neo-Hookean constant

부터 결정되어지는 재료상수, λ 는 주신장률을 나타낸다. 이중 가장 간단한 형태는 Neo-Hookean 모형 ($N=1$) 이다.

$$U = C_1(I_1 - 3) \quad (4)$$

이 모형은 1축 인장의 경우 60 %, 1축 압축의 경우 30 % 정도의 변형률까지 고무재료의 실제 거동을 잘 묘사하고 있는 것으로 보고된 바 있다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 부틸계 경도 60의 고무재료를 사용했으며 KS M6782의 아령 1호형 시편으로 UTM (universal testing machine, instron)을 이용하여 1축 인장 시험을 수행하였다. 시험기의 인장속도는 5 mm/min, 시험온도는 23 °C 이었다. Fig. 1은 인장 시험결과로서 공칭응력과 공칭변형률사이의 관계를 나타낸다. 시험결과로부터 얻어진 Neo-Hookean 모형의 재료상수 C_1 은 3.35×10^5 N/m² 이다.

3. 고무의 동적 특성

3.1 초기압축변형률의 영향

(1) 이론적 배경

고무재료가 초기 정적 변형상태에 미소 진폭의 동적 변형이 부가될 때, 고무재료의 응력은 주파수함수와 변형률함수로 분리될 수 있다고 가정하면⁽⁵⁾ 초기 변형률 p 인 재료시편의 동강성계수 K 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K(p, \omega) = K_{sta}(p) E_d(\omega) \quad (5)$$

K_{sta} 은 초기변형률 p 에서의 강성계수 (dF/dx)이며, E_d 는 주파수에 관련된 계수이다. 또한 초기 변형률이 q 인 시편의 동강성계수는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} K(q, \omega) &= K_{sta}(q) E_d(\omega) \\ &= \frac{K_{sta}(q)}{K_{sta}(p)} K(p, \omega) \end{aligned} \quad (6)$$

그런데 초기변형률에 따른 시편의 정강성계수 K_{sta} 는 Neo-Hookean 모형을 이용한 유한요소해석으로부터 얻을 수 있다. 즉 한 초기변형률에서 시편의 동적 특성을 얻은 후 유한요소해석으로부터 정강성계수의 비를 이용하여 다른 초기변형률에서의 동적

특성을 예측할 수 있다.

(2) 실험결과

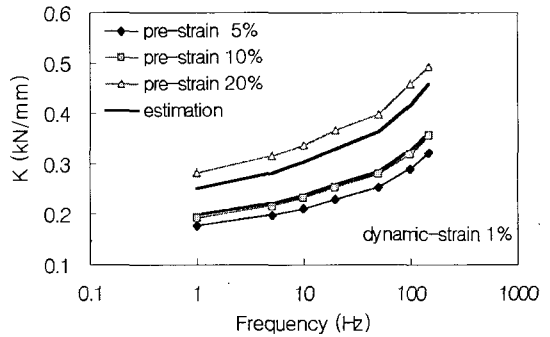
식 (6)의 타당성을 검토하기 위하여 이전의 연구에서 수행한 원통형 고무시편(지름 15 mm, 길이 10 mm)의 압축된 상태에서의 동적 물성치에 대한 실험 자료를 사용하였다.⁽⁶⁾ Fig. 2는 실험에 사용하였던 임피던스 측정법의 개략적인 모습을 나타낸다. 실험에 대한 자세한 내용은 참고문헌을 참조 바란다.

시편의 정적 강성계수를 구하기 위하여 상용 유한요소 패키지 MARC를 이용하였다. 재료의 특성은 2절에서 구한 값을 사용하였고, 축대칭 단면으로 모델링 하였으며 사용된 요소는 Element 82, 요소 수는 140개 이었다. Fig. 3은 유한요소모델을 나타내고 있다. MARC의 특성상 x 축이 회전축이 되므로 가장 아래 부분의 절점들에 대해 y 방향 변위 구속조건을 부과하였으며 오른쪽 절점들은 양방향 구속, 왼쪽 절점들은 초기 변형률에 해당하는 변위구속조건을 부과하였다. 초기 변형률을 부과한 후 미소 변형률에 대한 반력의 변화를 계산함으로써 강성을 계산할 수 있다.

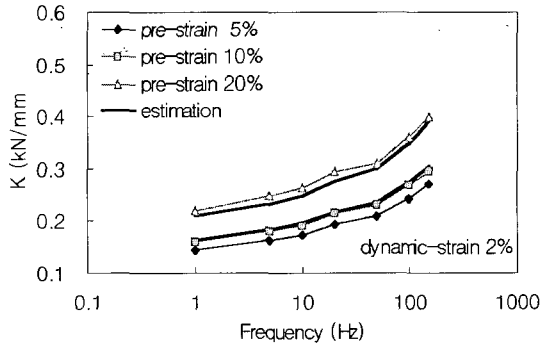
초기 변형률 5 %에서의 시편 동특성 실험치를 기준으로 하여 10 %, 20 % 초기 변형률에서의 시편의

동특성을 식 (6)을 이용하여 예측한 값과 실험값을 비교하였다(Fig. 4).

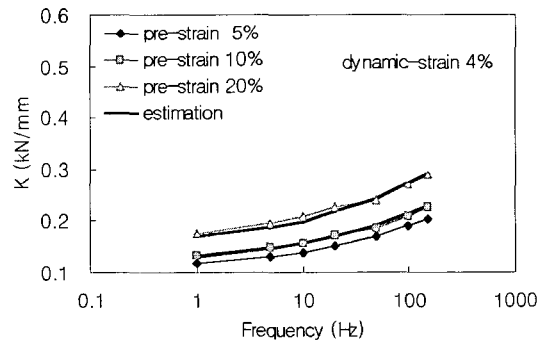
그 결과를 살펴보면 유한요소 해석으로부터 예측된 값이 동적 변형률이 1 %, 초기 변형률이 20 %인 경우를 제외하고는 실험값과 매우 잘 일치함을 알 수 있다(최대 6 % 오차). 또한 그 경우에서도 최대 오차는 10.6 %이며 전체적인 경향은 실험값의 거동을 잘 표현하고 있다.



(a) Dynamic strain 1 %



(b) Dynamic strain 2 %



(c) Dynamic strain 4 %

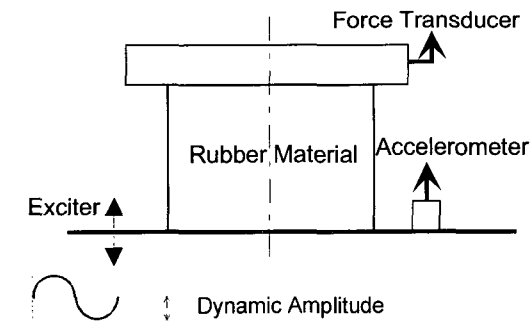


Fig. 2 Schematic diagram of the impedance method

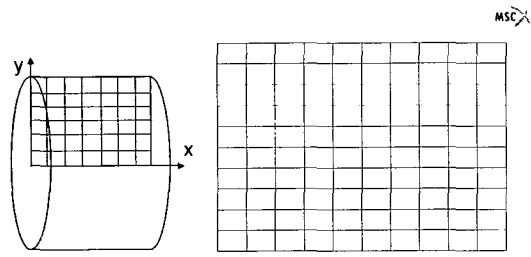


Fig. 3 Finite element model for rubber specimen

Fig. 4 Specimen stiffness from experiment and estimation with equation(6)

3.2 동적 변형률의 영향

(1) 이론적 배경

일반적으로 고무재료의 동적 변형률에 대하여 저장 탄성계수(storage modulus) E 는 Fig. 5 와 같은 경향을 나타내는 것으로 알려져 있으며, 로그평면에서 각 동적 변형률에 대하여 주파수에 따른 저장탄성계수 E 의 그래프를 수평방향으로 적절히 이동하면 하나의 부드러운 곡선(reduced frequency nomogram)을 얻을 수 있다.⁽⁵⁾ 즉 Fig. 6에 나타난 바와 같이 기준이 되는 변형률 ϵ_0 를 선택하고 변형률 ϵ_1, ϵ_2 에서의 그래프를 각각 우측과 좌측으로 평행이동 시키면 하나의 곡선이 형성된다. 이 때 평행이동 시키는 양을 이동인자(shift factor)라고 한다. 고무재료의 이러한 거동은 주파수-동적 변형률 중첩의 원리(frequency- dynamic strain superposition principle)로 알려져 있다.

(2) 실험결과

앞 절에서 사용된 원통형 고무시편의 실험결과를 가지고, 초기 압축변형률이 5 %인 경우에 동적 변형률 2 %에서의 동특성 실험치를 기준으로 하여 동적 변형률 1 %, 4 %에서의 시편의 동특성을 로그평면

에서 평행 이동한 결과는 Fig. 7 과 같다. 그림에서와 같이 강성을 나타내는 y 축도 로그 스케일로 나타내면 그래프는 거의 선형화 되므로 쉽게 이동인자의 값을 계산할 수 있다. 동적 변형률 1 % 인 경우의 이동인자는 3.7, 4 % 인 경우는 0.14 였다. 얻어진 이동인자 값을 이용하여 초기 압축변형률이 10 %와 20 %인 경우에 평행 이동된 시편의 동강성계수는 Fig. 8 과 9에 나타나 있다.

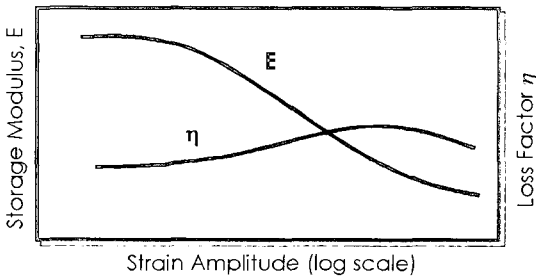


Fig. 5 Effect of strain amplitude on the dynamic characteristics of elastomers

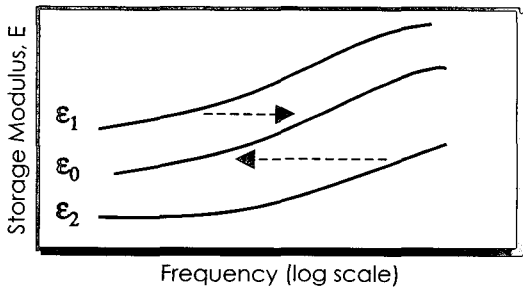


Fig. 6 Variation of the storage modulus with frequency and strain

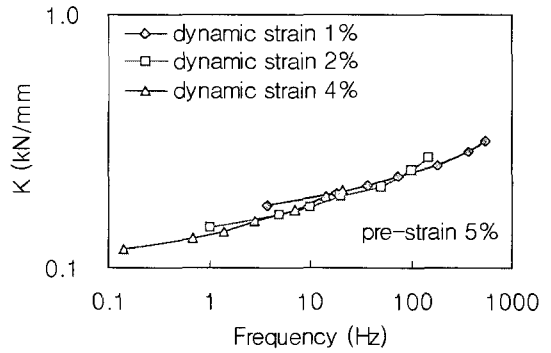


Fig. 7 Specimen stiffness with pre-strain 5 %

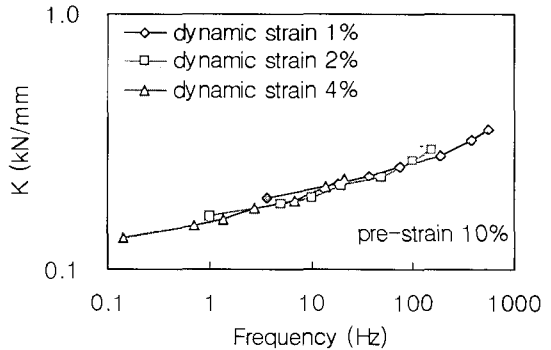


Fig. 8 Specimen stiffness with pre-strain 10 %

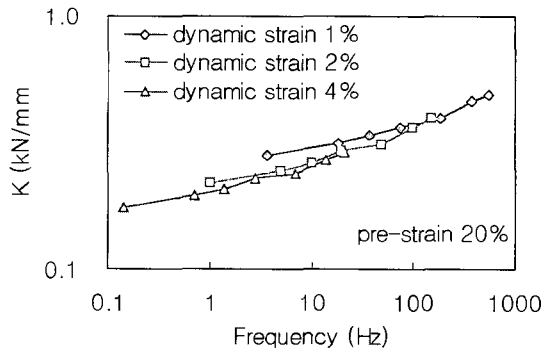


Fig. 9 Specimen stiffness with pre-strain 20%

Fig. 7을 살펴보면 평행 이동된 그래프들이 하나의 부드러운 곡선으로 비교적 잘 일치하고 있다. 여기서 얻어진 이동인자를 이용하여 다른 초기 압축변형률에서 평행 이동된 그래프들(Fig.8, 9)도 초기 변형률 20%, 동적 변형률 1%인 그래프를 제외하고는 Fig. 7과 마찬가지로 하나의 곡선을 이루고 있다. 결과적으로 동적 변형률에 따른 이동인자를 알고 있으면, 한 초기 변형률에 대한 동강성 정보로부터 다른 초기 변형률에 대한 동강성을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원통형 고무시편을 이용하여 초기 압축변형률과 동적 변형률에 따른 시편의 동강성계수의 특성을 살펴보았으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 초기 압축변형률이 시편의 동강성계수에 미치는 영향은 유한요소 해석을 이용하여 예측이 가능하다.

(2) 동적 변형률이 시편의 동강성계수에 미치는 영향은 이동인자를 이용하여 예측이 가능하다.

이상의 결과로부터, 인장 실험을 통하여 재료의 정적인 물성치를 얻고 원통형 시편을 이용하여 한 특정 초기 압축변형률에서 각각의 동적 변형률에 대하여 주파수에 따른 시편의 동강성계수를 얻으면 유한요소 해석과 이동인자를 이용하여 임의의 초기 압축변형률과 동적 변형률 하에서의 고무재료의 동적 특성을 예측할 수 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

(1) Jones, D. I. G., 1974, "Temperature-frequency Dependence of Dynamic Properties of

Damping Materials," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 33, No. 4, pp. 451~470.

(2) Oyadiji, S. O. and Tomlinson, G. R., 1985, "Determination of the Complex Moduli of Viscoelastic Structural Elements by Resonance and Non-resonance Methods," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 101, pp. 277~298.

(3) Ahn, T. K. and Kim, K. J., 1994, "Sensitivity Analysis for Estimation of Complex Modulus of Viscoelastic Materials by Non-resonance Method," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 176, No. 4, pp. 543~562.

(4) Rivin, E. I. and Lee, B. S., 1994, "Experimental Study of Load-deflection and Creep Characteristics of Compressed Rubber Components for Vibration Control Devices," *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 116, pp. 539~5497.

(5) Nashif, A. D., Jones, D. I. G. and Henderson, J. P., 1985, *Vibration Damping*, John Wiley & Sons.

(6) 김국원, 임종락, 한용희, 손희기, 안태길, 1998, "압축하중을 받는 방진고무의 동특성 해석 및 실험," *한국소음진동공학회논문집*, 제 8 권, 제 5 호, pp. 900~907.

(7) 김국원, 임종락, 손희기, 안태길, 1999, "압축된 고무재료의 정적 변형 해석과 동특성 예측," *한국소음진동공학회논문집*, 제 9 권, 제 3 호, pp. 472~476.

(8) Lee, B. S., 1991, *Study of Shape Effects on Creep and Load-deflection Characteristics of Elastomeric Components*, Ph.D. Thesis, Wayne State University.