

정적 대변형을 받고 있는 점탄성 재료의 동적 물성치 규명 시험

Testing for Identification of Dynamic Properties of Viscoelastic Material Subject to Large Static Deformation

이완술** · 이호정* · 조지현** · 김진성** · 윤성기* · 김광준*

Wan-Sul Lee, Ho-Jung Lee, Ji-Hyun Cho, Jin-Sung Kim,
Sung-Kie Youn and Kwang-Joon Kim

(2002년 12월 7일 접수 : 2003년 1월 22일 심사완료)

Key Words : Viscoelastic Material(점탄성 재료), Isolator(절연요소), Dynamic Complex Modulus(복소탄성계수), Dynamic Complex Stiffness(복소강성계수), Large Static Deformation(정적 대변형)

ABSTRACT

Viscoelastic components for vibration isolation or shock absorption in automobiles, machines and buildings are often subject to a high level of static deformation. From the dynamic design point of view, it is requisite to predict dynamic complex stiffness of viscoelastic components accurately and efficiently. To this end, a systematic procedure for complex modulus measurement of the viscoelastic material under large static deformation is often required in the industrial fields. In this paper, dynamic test conditions and procedures for the viscoelastic material under small oscillatory load superimposed on large static deformation are discussed. Various standard test methods are investigated in order to select an adequate test methodology. The influence of fixed boundary condition in the compression tests upon complex stiffness are investigated and an effective correction technique is proposed. Then, the uniaxial tension and compression tests are performed and its results are compared with analysis results from conventional constitutive models.

1. 서 론

고무로 대표되는 점탄성 재료는 대변형과 3차원 복합 변형이 가능하고, 제조의 용이성 및 다른 요소와 부착/분리가 쉬운 장점으로 인하여 다양한 시스템에 적용되고 있으며, 특히 금속 재료에 비하여 상대적으로 작은 강성과 큰 감쇠효과 때문에 차량엔진이나 압축기 등 기계류의 진동 및 소음을 저감하기 위한 제진 요소에 많이 사용되고 있다. 최근에는 고정밀도

를 요하는 반도체 제작 및 측정 장비의 진동 저감 등에 적용되면서, 점탄성 제진 요소의 정확한 거동 해석과 이를 응용한 설계 기법이 절실히 요구되고 있다.

제진 요소는 재료의 진동 감쇠 특성을 이용하기 때문에 점성과 탄성을 동시에 가지는 점탄성재료의 특성을 고려한 해석이 반드시 필요하다. 특히 대부분의 제진 요소들은 대상물의 자중에 의한 하중 때문에 정적으로 큰 변형을 겪고 있는 상태에서 추가 진동에 의한 작은 동적 하중을 받고 있는데, 그 동적 거동은 가해진 정적 하중에 의해서 영향을 받게 된다.⁽¹⁾ 그러나 현재 사용되고 있는 해석 방법들은 이러한 정적 변형의 영향을 제대로 반영하지 못하여 동특성에 대한 해석 결과와 실험 결과가 비교적 큰 차이를 보이고 있는 실정이다.⁽²⁾ 따라서 제진 요소들이 실제로 겪고 있는 하중조건을 고려한 해석 방법의 개발이 필수

† 책임저자, 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : kjkim@mail.kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3024, Fax : (042) 869-8220

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

적이고, 이를 위해서는 재료 시험을 통한 물성치 추출과 실험 결과를 이용한 해석 이론의 검증이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 제진 요소의 특성을 정확히 규명하고 이를 제품 설계에 응용하기 위하여, 정적 대변형 하에서 미소 동적 변형을 하는 점탄성 재료의 물성치 추출을 위한 실험적 접근 방법에 대해서 연구하고자 한다. 우선 점탄성 재료 시험에 관련된 국내 및 국제 시험 규격들을 검토하여 정적 압축/인장변형 하에서의 복소 탄성 계수 추출에 대한 시험조건들을 선정하고자 한다. 그리고 압축변형 시험에서 시험편 끝단의 고정 경계조건으로 인해 발생하는 문제점을 검토하여 이를 효과적으로 보정하는 방법을 제안하고, 시험 고정에 사용하는 집착재 종류에 따른 영향을 검토하고자 한다. 확립된 시험방법을 이용하여 정적 대변형을 하고 있는 점탄성 재료의 진동 특성을 실험적으로 측정하고, 이를 기존 해석 이론의 결과와 비교하여 기존 구성 방정식의 문제점을 검토하고자 한다.

2. 점탄성 재료의 정적/동적 특성 시험 규격

점탄성 재료의 탄성 계수 및 강성 계수 추출은 재료의 사용 목적 및 사용 환경에 따라 다양한 시험 방법을 통해 이루어진다. 현재 측정 기술의 발달로 인해 단순히 인장 또는 압축 시험을 통한 정적 특성 시험뿐만 아니라 기계적 진동에 대한 동적 성질인 복소 탄성 계수 추출 시험도 수행되고 있으며, 부가적으로 정적 압축 및 인장 변형의 영향까지 고려한 동특성에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 점탄성 재료의 시험에 관하여 여러 국내 및 국제 시험 규격에서 다양한 시험 방법과 조건들을 규정하고 있다. 본 장에서는 점탄성 재료의 정적, 동적 시험에 관한 국내 및 국제 시험 규격들을 검토하여 정적 대변형을 받고 있는 점탄성 재료의 복소 탄성 계수 추출 시험에 대한 시험 방법 및 조건을 규정하고자 한다. 본 연구에서 검토한 관련 국내 및 국제 시험 규격 자료는 SAE(the society of automotive engineers), ISO(international organization for standardization), ASTM(american society for testing and material), KS(한국공업규격, korean industrial standard)이다.

점탄성 재료의 정적, 동적 물성치 추출 시험 규격에

는 시험 조건뿐만 아니라, 시험편의 채취 과정과 시험기의 교정 및 시험 결과 분석에 대한 여러 사항들을 규정하고 있다. 우선 본 조사에서는 정적/동적 시험 그리고 인장/압축 시험별로 그 결과를 분류하였다.

(가) 정적 변형 압축 시험 규격 : ASTM D6049-96,⁽³⁾ ASTM D575-91,⁽⁴⁾ ASTM D395-01,⁽⁵⁾ KS M6518,⁽⁶⁾ KS M6785⁽⁷⁾

(나) 정적 변형 인장 시험 규격 : KS M6518,⁽⁶⁾ KS M6785,⁽⁷⁾ ASTM D1456-86⁽⁸⁾

(다) 동적 변형 압축 시험 규격 : ISO 4664,⁽⁹⁾ KS M6665⁽¹⁰⁾

(라) 정적 변형을 고려한 동적 압축/인장 시험 규격 : ASTM D2231,⁽¹¹⁾ KS M6604⁽¹²⁾

점탄성 재료의 동적 물성치 추출 시험은 주로 압축 시험을 통해 이루어진다는 사실을 확인할 수 있었으며, 압축 시험의 경우 시험편의 형상이나, 시험 조건들이 여러 규정들에서 언급되어 있다.⁽⁹⁻¹²⁾ 하지만 인장 시험을 통한 동적 물성치 추출 시험의 경우, 시험 조건은 ASTM D2231⁽¹¹⁾과 KS M6604⁽¹²⁾에 언급되어 있으나 시험편의 규격에 대한 자료는 미비한 상태이다.

2.1 시험편의 준비

(가) 점탄성 재료의 물성치 추출 시험시 사용되는 시험편의 경우 가황 후 24시간⁽¹²⁾ 또는 16시간이상⁽¹³⁾ 경과한 것으로 규정한다.

(나) 선결조건(preconditioning) : 시험 규격에서는 시험편의 채취 후 시험 조건의 온도와 습도에서 일정한 시간동안 보관하여 시험편 내부와 외부가 평형 상태로 도달하도록 규정하고 있다. 대표적으로 ISO 471⁽¹³⁾에서는 온도와 습도를 조절하는 경우 16시간, 온도만 조절하는 경우 3시간을 제안하고 있다. KS 6604⁽¹²⁾에서는 제품에 대해서는 시험 전에 6시간 이상, 시험편에 대해서는 시험 전에 1시간 이상, 표준 상태의 실온 중에 두고, 이 온도는 시험시 온도와 되도록 일치하도록 규정하고 있다.

(다) 시험편의 형상 및 크기 : 압축 시험에 사용되는 시험편의 형상은 원기둥 모양의 것을 공통적으로 추천하고 있으나, 인장 시험용 시험편의 경우 그 형상이나 크기에 대한 내용이 미비한 상태이다. 압축 시험용 원기둥 모양 시험편의 규격별 치수(지름/높이

[mm])는 다음과 같이 다양하게 규정되어 있다. 정적 압축 변형 시험의 경우 30/13,⁽³⁾ 28.6/12.5,⁽⁴⁾ 29.0/12.5, 13.0/6.0,⁽⁵⁾ 29/12.7,⁽⁶⁾ 29/12.5⁽⁷⁾로 규정되어 있으며 동적 시험 규격의 경우 50/19.65, 25/9.8,⁽¹⁰⁾ 39.9/40.0,⁽¹¹⁾ 29/12.5, 13/6.3,^(9, 14) 지름/높이 = 3⁽⁹⁾으로 규정되어 있다.

인장 시험의 경우 정적 물성치 추출용 시험편만 언급되어 있으며 압축용 시험편과 달리 다양한 형상을 허용하고 있다. KS M 6518⁽⁶⁾에서는 용도별로 아령형 1호형(신장률이 작은 시료), 2호형(인장강도가 작은 시료), 3호형(원칙적인 시료)로, KS M 6785⁽⁷⁾에서는 직사각형의 형상(폭/너비/길이[mm])으로 시험편을 규정하고 있으며, 1호형(5/2.0/100), 2호형(10/2.0/60)을 제시하고 있다.

(라) 시험편의 개수 : 시험편의 개수는 국내 및 국제 시험 규격에서 원칙적으로 3개로 규정하고 있다.

2.2 시험편의 조건

(가) 시험 온도/습도 : 각 규격에서는 시험 장소의 온도 및 습도에 대한 조건을 규정하고 있다. 각 규격의 조건은 Table 1에 나타나 있다.

(나) 시험 진동수 : Table 2에 나타나 있다. 동적 시험의 경우 진동수의 허용차는 진동수 $\pm 2\%$ 로 규정

한다.

(다) 평균 변형 : 평균(정적) 변형의 허용차는 각각의 변형의 $\pm 0.5\%$ 로 하며 평균 변형은 0.5, 10, 15, 20%(인장/압축)로 규정하고 있다.^(11, 12)

(라) 변형 진폭 : 변형(동적) 진폭의 허용차는 진폭이 1% 이하일 때에는 각각의 진폭의 $\pm 10\%$ 로 하고, 진폭이 1%를 초과할 때는 $\pm 5\%$ 로 한다. 진폭은 한쪽 진폭(전체 진폭의 1/2)을 변형 전의 두께로 나눈 값으로 정의하고 있으며 0.1, 0.3, 1, 2.5, 5%(인장/압축)로 규정하고 있다.^(11, 12)

(마) 정적 물성치 시험 및 시험 속도 : 정적 실험의 결과는 초기 하중 0에서부터 평균변형까지 6회,⁽⁹⁾ 또는 2회^(4, 12) 예비적으로 압축과 회복을 반복한 후 압축을 가하면서 정적 물성치를 추출한다. 이때 압축 및 회복 속도는 초기 하중 0에서 평균변형 사이를 30초간 오르내리는 속도로 하는 것을 원칙으로 하는 규격이 있는 반면,⁽¹²⁾ 10 mm/min,^(7, 16) 12 mm/min⁽⁴⁾와 같이 특정 속도로서 규정하고 있는 시험규격이 있다.

검토한 국내 및 국외 시험규격들을 바탕으로 본 연구에서의 인장/압축 평균 변형하의 점탄성 재료의 복소 탄성 계수 추출 시험시 설정한 시험편 규격과 시험 조건들을 정리하면 Table 3과 같다. 즉 압축 시험

Table 1 Temperature conditions

Standard	Standard temperature/humidity
	Temperature
KS M6785 ASTM D1456-86 ASTM D1349	23 °C \pm 2 °C/50 % \pm 5 % (-75, -55, -40, -25, -10, 0, 23, 40, 55, 70, 85, 100, 125, 150, 160, 175, 200, 225, 250) °C \pm 2 °C
	23 °C/50 % \pm 5 %, 25 °C/70 % \pm 5 % (-85, -70, -55, -40, -25, -10, 0) °C \pm 2 °C, (40, 55, 70, 85, 100) °C \pm 1 °C, (125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300) °C \pm 2 °C
ISO 471	20 °C
KS M6604	(-75, -55, -40, -25, -10, 0, 20, 50, 70, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250) °C \pm 2 °C

Table 2 Frequency conditions

Standard	Frequency
ISO 4664	1, 5, 15, 30, 50, 150, 200 Hz
ASTM D2231	0.1, 1, 10, 60, 100, 200 Hz
KS M6604	0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30, 100, 300 Hz

Table 3 Static and dynamic test conditions

	Test condition	Standard
Test specimen	i) Compression test : Cylindrical shape, diameter/height = 40/40[mm] ii) Tension test : Square pillar shape width/thickness/length = 20/20/80[mm]	ASTM D2231
Number of test specimens	3	ASTM D2231
Mean strain	0.5, 10, 15, 20 % (Compression/tension)	ASTM D2231
Static test condition	Repeat loading cycle(12 mm/min) a second time and then read and record the force and deflection a third time	ASTM D575
Dynamic strain amplitude	0.1, 0.3, 1, 2.5, 5 % (Compression/tension)	ASTM D2231
Frequency	0.1, 1, 10, 60, 100, 200 Hz	ASTM D2231

을 통한 동적 물성치 시험의 경우 ASTM D2331⁽¹¹⁾에서 자세히 제시하고 있기에 해당 시험 규격에서 시험조건과 시험편 규격을 인용하였으며, 인장 시험의 경우, 시험 조건들은 기존 규격에서 제시하고 있으나 시험편 규격과 관련한 자료는 미비하기에, 여러 선행 연구에서 사용한 조건들을 바탕으로 시험편 규격을 설정하였다.

3. 원기둥형 압축 시험편의 양 끝단 고정에 의한 영향 분석

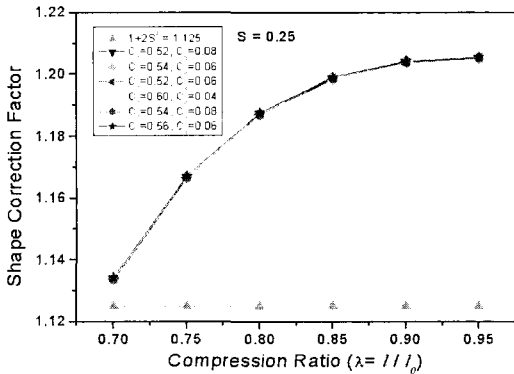
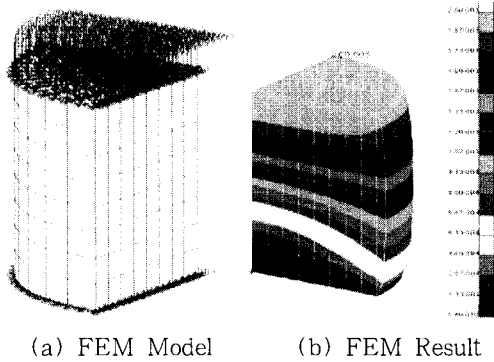
3.1 양 끝단 고정에 의한 변형 제한의 영향
 압축 시험의 경우 시험편의 양 끝단에서의 완전 윤회 구형 한계로 인해 일반적으로 양 끝단을 고정시키고 물성치 추출 시험을 수행한다. 이로 인하여 시험편 양 끝단의 변형 제한이 발생하게 되며, 추출한 물성치 결과에 영향을 주게 된다. 선형 범위 내에서는 시험편의 형상계수 ($S = d(\text{지름})/4l(\text{높이})$)를 이용하여 보

정해주는 방법을 사용해 왔으나,⁽¹⁶⁾ 비선형 특성이 나타나는 대변형의 경우 단순한 형상계수 외에 비선형의 영향도 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 상용 유한 요소 코드 ABAQUS의 비선형 해석 결과와 형상계수를 이용해서 시험편 양 끝단의 변형 제한 효과를 효율적으로 보정하고자 한다. Fig. 1은 해석에 사용한 유한 요소 모델과 해석 결과 및 끝단 고정에 따른 형상 보정 계수(R)를 나타낸다. 이때 형상 보정 계수 R 은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$F_{fixed} = RF_{lubricated} \quad (1)$$

FEM 해석에서 정적 비선형 정적 거동은 Mooney-Rivlin 초탄성 모델을 사용하였다. 이때 사용되는 정적 물성치가 조금 바뀌어도 R 값은 변화가 거의 없으며 R 은 시험편의 형상과 정적 변형의 크기에 의해서 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 이 해석 결과를 이용하여 각각의 형상계수(S)와 연신율($\lambda = l/l_0$)에 대해서 형상 보정 계수를 얻을 수 있었고 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

이 결과를 통해서 시험편의 압축 시험시 양 끝단 고정에 의한 영향의 보정은 시험편의 형상계수뿐만 아니라, 압축 변형률에 따라 달라진다는 사실을 발견할 수 있었다. 따라서 기존의 형상 계수만을 고려한 관계식⁽¹⁵⁾ $1 + 2S^2$ 과 함께 압축 변형에 따른 영향을 고려한 수식을 식 (2)에서 제안하고자 한다. 식 (2)에서 $R_\lambda(\lambda)$ 는 FEM 결과로부터 곡선 적합(curve-fitting)을 통해 얻어진 결과로서, 이를 이용해 특정 형상 계수에 대한 임의의 압축 변형에 대한 보정 계수를 매번 해석이나 시험을 통하지 않고 용이하게 구할 수 있으리라 판단된다. Fig. 2(a)는 시험편의 형상과



(c) Shape correction factor, R
Fig. 1 Procedure of calculating shape correction factor

Table 4 Comparison of shape correction factor for various shape factors and compression ratios

Shape factor	Shape correction factor						
	$1+2S^2$	FEM Analysis according to compression ratio[λ]					
		0.7	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
0.156	1.049	1.072	1.095	1.107	1.114	1.117	1.118
0.250	1.125	1.133	1.166	1.187	1.199	1.204	1.205
0.580	1.673	1.695	1.716	1.743	1.757	1.756	1.743
0.638	1.814	1.842	1.866	1.901	1.912	1.905	1.885
0.750	2.125	2.229	2.228	2.256	2.259	2.238	2.203

연신율에 따른 해석결과와 식 (2)를 이용해서 얻은 근사치를 비교한 결과이며 Fig. 2(b)는 오차를 의미한다.

$$R(S, \lambda) = R_S(S)R_\lambda(\lambda) = (1 + 2S^2)(0.25 + 1.81\lambda - 0.01\lambda^2) \quad (2)$$

$0.7 \leq \lambda \leq 0.95, \quad 0.156 \leq S \leq 0.75$

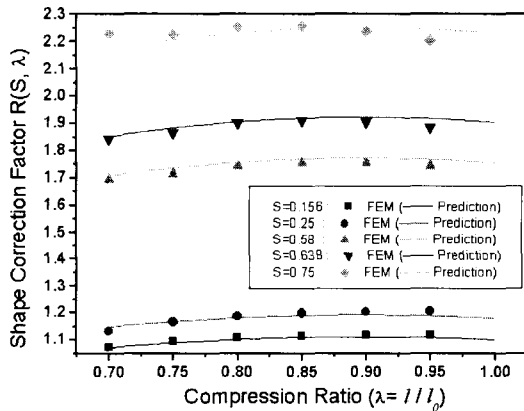
3.2 접착제 종류에 따른 복소 강성 계수 변화

압축 시험시 시험편은 고정용 금속판과 함께 틀가황하는 것이 이상적인 방법이나, 시험편을 먼저 가황한 후 시험 전에 금속판에 접착제를 이용하여 고정하는 방법도 여러 시험 규격에서 허용하고 있다. 이 경우, 시험 규격들에서 사용 가능한 접착제 종류에 대하여 규정하고 있지 않다. 접착제를 사용하는 경우 접착

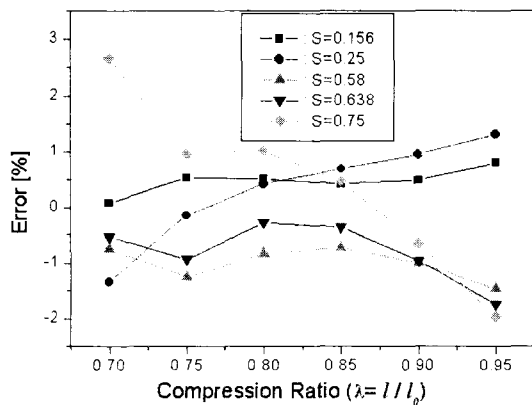
면에서 국부적인 재료의 특성 변화가 발생하여 시험편의 성질을 변화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 동적 성질 추출 시험시 접착제의 탄성 계수가 시험편의 탄성 계수보다 크지 않을 경우 스프링의 역할을 하여 시험결과에 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 본 절에서는 일반적으로 사용하는 순간 접착제(Instant adhesive) 4 종류를 사용하여 접착제 종류에 따른 시험치 변화와 시험편들 사이에서 발생하는 시험치 차이를 비교 검토하여 시험시 접착제가 미치는 영향을 검토하고자 한다. 시험에서 사용한 접착제는 Table 5에 나타난

Table 5 Instant adhesives

	Applications
A	Metals
B	Plastics, rubber
C	Metal, plastics, rubber
D	Metals, plastics, wood, rubber

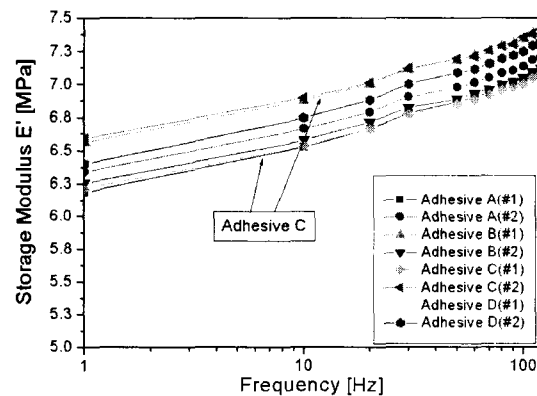


(a) $R_\lambda(S, \lambda)$

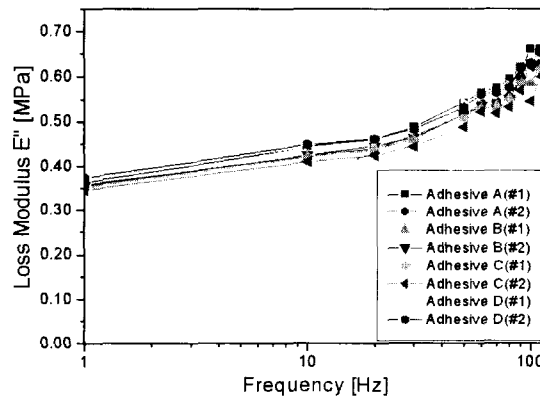


(b) Percentage error

Fig. 2 Prediction of shape correction factors by proposed $R_\lambda(S, \lambda)$



(a) Storage modulus



(b) Loss modulus

Fig. 3 Dynamic complex modulus for various adhesives(20% pre-strain, 1% dynamic strain)

것과 같이 시중에서 구입 가능한 시안화 아크리레이 트를 주성분으로 하는, 용도가 다른 4종류의 순간 접착제를 선정하였으며, 각 접착제당 2개의 시험편을 대상으로 시험하였다. 이는 동일한 접착제를 사용한 2개의 시험편의 실험 결과를 이용해 시험편간의 편차를 검토하기 위한 것이다. Table 5에서 알 수 있듯이 A에서 D로 갈수록 좀 더 범용으로 사용 가능한 접착제이다.

Fig. 3은 원기둥형 압축 시험용 시험편을 대상으로 정적 평균 변형 20%에 추가로 가해지는 변형 진폭 1%에 대한 복소 탄성 계수 추출 시험 결과이다. Fig. 3에서 접착제 A(#1)와 (#2)는 Table 5에서 금속용의 접착제(A)를 사용한 두 개의 시험편에 대한 복소 탄성 계수 추출 결과를 의미한다. 그 결과, 접착제 종류에 따라 발생하는 시험치 편차보다 시험편들 사이에서 발생하는 시험치 편차가 더 크게 나타난다는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 접착제 C제품을 사용할 경우의 2개의 시험편의 결과가 8개의 시험편 결과 중 가장 큰 값과 가장 작은 값을 보여주고 있다는 사실로부터 유추할 수 있다. 따라서 시험 결과의 편차는 시험편간의 편차 또는 시험기, 시험자에 따라 발생하는 편차이며 시험편 고정에 사용되는 접착제에 의한 영향은 지배적이지 않음을 알 수 있다.

4. 정하중을 받고 있는 간단한 형상의 점탄성 재료 시험편에 대한 정적/동적 실험

4.1 실험 개요

가황 고무의 비선형 점탄성 거동을 확인하고 실제 고무의 거동을 묘사하는 구성 방정식의 문제점들을 검토하기 위하여 고무 시편에 정적 대변형을 가한 상태에서 미소 동적 하중을 부가하는 시험을 수행하였다. 충전된 고무(filled rubber)의 동적 거동은 정적 변형의 크기에 영향을 받는다는 것이 실험을 통해서 알려져 있고^(1, 17) 실제 고무 재료는 대부분 충전된 상태로 사용되므로 충전된 상태의 시험편을 제작하여 시험하였다. 본 연구에서 수행된 시험은 단축 인장 시험 및 압축 시험이며 시험 결과를 통해 기존의 구성 방정식이 가지고 있는 문제점을 살펴보고자 한다.

4.2 시험 방법 및 시험편의 재료와 형상

시험은 유압을 사용하는 재료 시험기인 Instron-

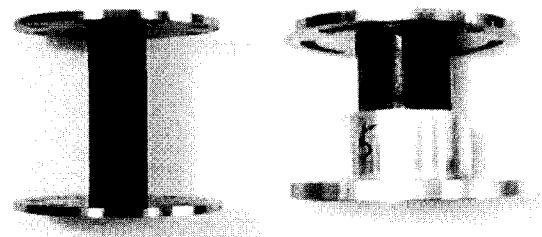
5802를 사용하여 상온($24 \pm 1^\circ$)에서 수행하였으며, 시험편 변형 방법으로는 정적으로 변형시킨 상태에서 20분 경과 후 동적 미소 변형을 부가하는 과정을 취하였다. 시험 결과로 시험편의 종류, 정적 변위로 나뉘는 각 경우에 대하여 3개의 시험편의 평균값을 취하였다. 시험편 제작에 사용된 고무의 구성 성분은 Table 6에 나타나 있으며, 제작된 시험편의 기본 물성치는 Table 7과 같다. 각 시험편은 Figs. 4(a)와 4(b)에서 나타난 것과 같이 시험용 고무의 상하에 시험기와 체결을 위한 알루미늄 평판을 접착제로 고정하였다. 인장 시험편은 크기가 $20 \times 20 \times 80$ [mm]으로 단면은 정사각형이며 변형을 1차원으로 가정할 수 있도록 길이를 충분히 길게 하였다. 정적인 시험을 위한 인장 시험편 규격은 정해져 있으나 정적 하중 하에서 동적 하중을 받고 있는 시험에 관한 시험편 규격은 미비한 관계로 인해 참고 문헌에 근거하여 제작하였다.⁽²⁾ 압축 시험편은 시험 규격을 근거로 길이, 40 mm, 지름 40 mm의 원기둥 모양이다.

Table 6 Recipes of specimens

Rubber	ZnO (phr)	Stearic acid (phr)	Carbon black GPF (phr)	TBBS (phr)	S (phr)	Antideg-radant (phr)
NR	3	1	50	1	1.75	3

Table 7 Material properties of specimens

Hardness (HS)	Tensile strength(kgf/cm ²)	Elongation at rupture(%)	Specific gravity
60	134	279	1.122



(a) Tension (b) Compression

Fig. 4 Test specimens

4.3 점탄성 재료의 정적/동적 물성치 추출 시험

(1) 정적/동적 물성치 결정 수식

고무의 정적 변형은 일반적으로 비압축성 초탄성 물질의 변형으로 간주할 수 있다. 본 연구에서는 변형 에너지 함수로 두 개의 물성 계수를 가지는 Mooney-Rivlin 모델을 사용하였다. 편차 변형 에너지를 표시하는 ψ 와 체적 변형 에너지를 표시하는 U 는 식 (3)과 같이 정의되며, 체적 변형 부분은 J 의 2차 다항식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \psi &= c_1(\bar{I}_1 - 3) + c_2(\bar{I}_2 - 3) \\ U &= \frac{1}{2}K(J - 1)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 c_1, c_2 는 편차 변형 특성을 표시하는 물성 값이고 K 는 체적 변화에 대한 Bulk 계수(Bulk modulus)이다. 이때 c_1, c_2 는 전단 계수 G_∞ 와 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$G_\infty = 2(c_1 + c_2) \quad (4)$$

고무는 거의 비압축성(nearly incompressibility) 성질을 가지고 있으므로 Young 계수 E 와 전단 계수 G_∞ 사이의 근사적 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E \cong 3G_\infty = 6(c_1 + c_2) \quad (5)$$

Mooney-Rivlin 모델의 일차원 정적 응력-변형 관계식은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_s = 2c_1(\lambda_s^2 - \lambda_s^{-1}) + 2c_2(\lambda_s - \lambda_s^{-2}) \quad (6)$$

여기서 아래첨자 S는 정적 변형 상태를 의미한다.

연실율에 따른 단면적 A 의 변화는 고무의 비압축성질(체적이 일정)을 이용하여 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$A_s = \frac{A_0}{\lambda_s} \quad (7)$$

여기서 A_0 는 변형 전 시험편의 단면적을 의미한다.

단축 인장 시험에 걸리는 힘 F 는 Cauchy 응력 σ

를 이용해 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$F(t) = \sigma(t)A(t) = \sigma(t)\frac{A_0}{\lambda(t)} \quad (8)$$

위의 관계를 이용하면 시험편에 걸리는 정적 응력은 측정된 정적 힘과 정적 시험편 길이 변화로부터 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_s}{A_0} \lambda_s \quad (9)$$

식 (9)에 정의된 정적 힘과 함께 동적 하중이 가해질 경우 시험편에 걸리는 힘은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = F_s + \Delta F(t) \quad (10)$$

여기서 동적 변형에 의해 발생하는 동적 응력 증분과 힘 증분 사이의 관계식은 식 (8)을 정적인 값과 증분 값으로 나누고 2차 이상 증분 항을 무시하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta F = \Delta \sigma A_s + \sigma_s \Delta A \quad (11)$$

여기서 ΔA 는 면적 증분과 동적으로 가해지는 변형률의 관계식으로 표시할 수 있다.

$$\Delta A = -\frac{A_0}{\lambda_s^2} \Delta \lambda = -\frac{A_0}{\lambda_s} \Delta \epsilon \quad (12)$$

식 (12)를 식 (11)에 대입하고 정리하면 식 (13)과 같은 응력 증분과 힘 증분 관계식을 얻는다.

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta F}{A_s} - \sigma_s \frac{\Delta A}{A_s} = \frac{\Delta F}{A_0} \lambda_s + \sigma_s \Delta \epsilon \quad (13)$$

인장 시험에 추가하는 동적 변형률이 정상 조화 함수라 하면 식 (13)은 다음 식과 같이 복소 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta \sigma^*(j\omega) = \frac{\Delta F^*(j\omega)}{A_0} \lambda_s + \sigma_s \Delta \epsilon^*(j\omega) \quad (14)$$

(2) 대변형 정적 시험

고무 시험편의 정적 물성치의 인장/압축 시험 결과

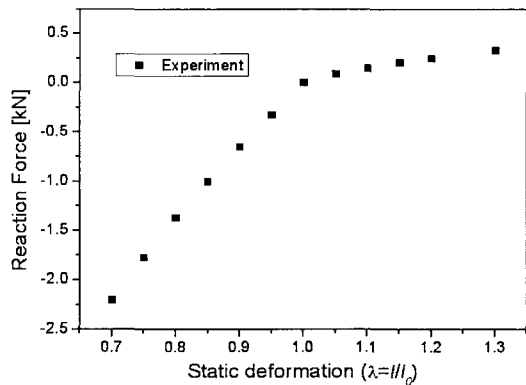
는 Fig. 5(a)에 나타나 있다. 그리고 압축 시험치는 3.1절에서 기술한 형상 보정 계수를 도입하여 형상 변화에 따른 영향을 보정하였으며, 그 결과는 Fig. 5(b)에 나타나 있다. 실험 결과를 바탕으로 Mooney-Rivlin 모델을 이용하여 곡선 적합(curve-fitting) 한 결과, Table 8에 나타낸 것과 같이 $C_1=0.59662$, $C_2=0$ 의 값을 얻었으며, 이는 본 시험시 사용한 시험편의 경우 그 특성을 Neo-Hookean 모델로도 충분히 묘사할 수 있음을 의미한다.

(3) 동적 인장 시험

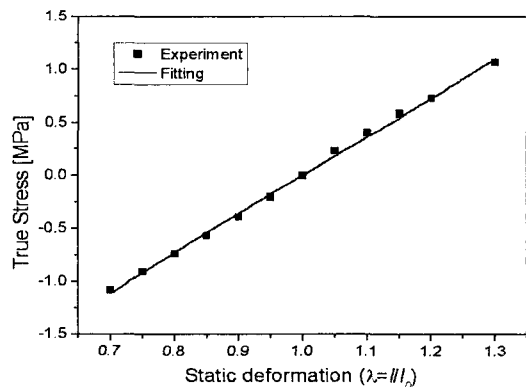
본 연구에서 수행한 동적 인장 시험의 시험 조건을 Table 9에 나타내었다. 시험 방법으로 우선 정적 대변형을 부과하고 20분 정도 응력을 완화시킨 후 미소

Table 8 Material properties for static behavior

C_1	C_2	G	K
0.59662	0	1.19324	596



(a) Reaction force



(b) True stress

Fig. 5 Static test results and curve-fitting

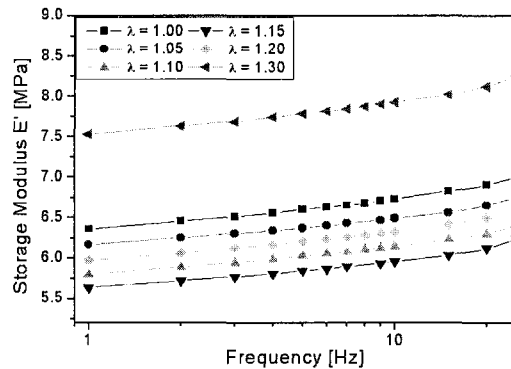
동적 변형(0.5%)을 추가하였다. 인장 시험은 기본적으로 일차원 변형이라고 가정할 수 있으므로, 고무의 동적 물성을 표현하는 복소 탄성 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$E^* = E' + jE'' = \frac{\Delta\sigma^*}{\Delta\epsilon^*} \quad (15)$$

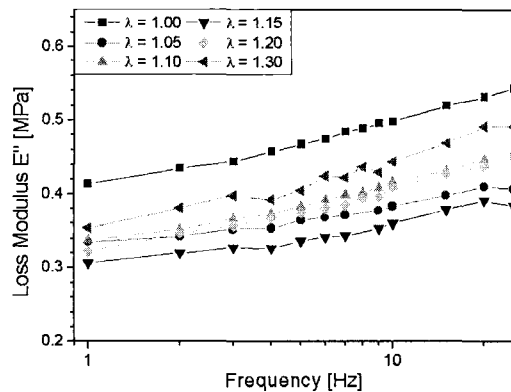
여기서 $\Delta\sigma^*$ 는 인장 시험편 단면에 걸리는 Cauchy

Table 9 Dynamic tension test specification

	Test condition	Standard
Test specimen	Square pillar shape (width/thickness/length) =20/20/80 [mm]	
Mean strain	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30%	ASTM D2331
Frequency	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 15, 20, 25, 30 Hz	ASTM D2331



(a) Storage modulus



(b) Loss modulus

Fig. 6 Dynamic complex modulus for various static deformations and frequencies

응력의 증분이다. 복소 탄성 계수 E^* 는 식 (9)와 식 (14)를 사용하여 시험에서 측정되는 값들로 표현하면 식 (16)과 같다.

$$E^* = \frac{\Delta\sigma^*}{\Delta\varepsilon^*} = \left(\frac{\Delta F^*}{A_0\Delta\varepsilon^*} + \frac{F_S}{A_0} \right) \lambda_s \quad (16)$$

Fig. 6은 각 정적 변형에서 주파수에 따른 복소 탄성 계수(dynamic complex modulus) 결과를 나타낸다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 동적 가진 주파수가 증가함에 따라 복소 탄성 계수가 증가하는 경향을 알 수가 있다. 이는 변형 주파수가 증가할수록 고무의 분자 사슬 전체가 변형할 수 있는 여지가 줄어들기 때문이라고 알려져 있다.

Fig. 7은 주파수 10 Hz에서 정적 변형에 따른 복소 탄성 계수의 변화의 시험 결과를 Morman의 모델에 의한 예측 결과를 함께 나타낸 것이다. Morman의 모델은 ABAQUS 등 많은 상용 유한요소 코드에서 수정

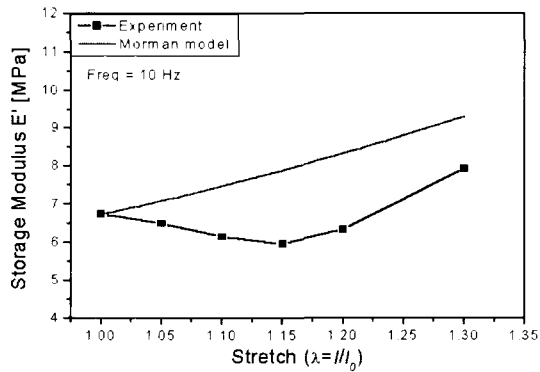
된 형태로 사용되고 있다.⁽¹⁷⁻²¹⁾ Fig. 7에서 볼 수 있듯이 Morman 모델의 해석치는 시험 결과로부터 얻은 정적 변형 증가에 따른 복소 탄성 계수 특성을 제대로 예측하지 못하고 있음을 알 수 있었다. 이는 Morman 모델의 경우 복소 탄성 계수가 정적인 하중에 무관하다는 가정에 근거하고 있기 때문으로 판단된다.

(4) 동적 압축 시험

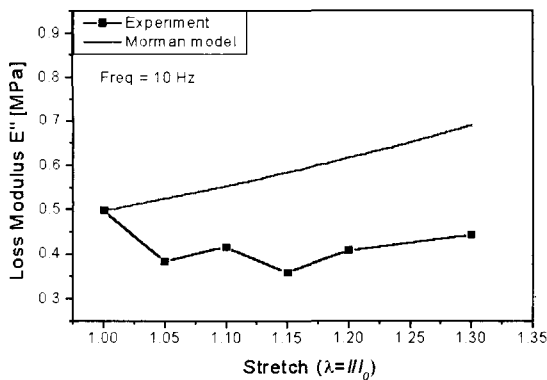
본 연구에서 수행한 동적 압축 시험의 시험 조건은 Table 10에 나타내었으며, 우선 정적 변형을 부과하

Table 10 Dynamic compression test specification

	Test condition	Standard
Test specimen	Cylindrical shape(diameter/height) = 40/40[mm]	ASTM D2331
Mean strain	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30%	ASTM D2331
Frequency	0.5,1,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150 Hz	ASTM D2331

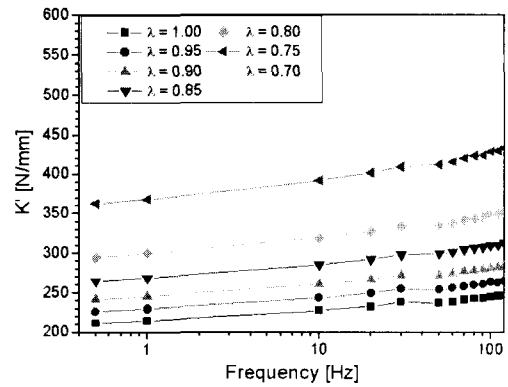


(a) Storage modulus

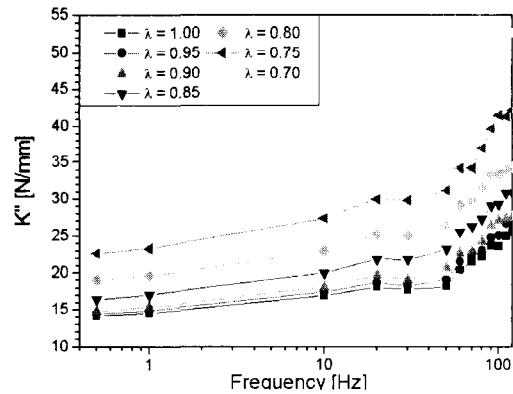


(b) Loss modulus

Fig. 7 Dynamic complex modulus at 10 Hz



(a) Real part of complex stiffness



(b) Imaginary part of complex stiffness

Fig. 8 Dynamic complex stiffness for various compression ratios and frequencies

고 20분 정도 응력을 완화시킨 후 미소 동적 변형(0.5%)을 부가하였다. 그 결과로 얻어진 정적 변형 하에서의 복소 강성 계수(complex stiffness)의 주파수에 대한 특성은 Fig. 8에 나타나 있다. 동적 압축 시험에서 고무의 물성을 표현하는 복소 강성 계수는 다음과 같이 정의된다.

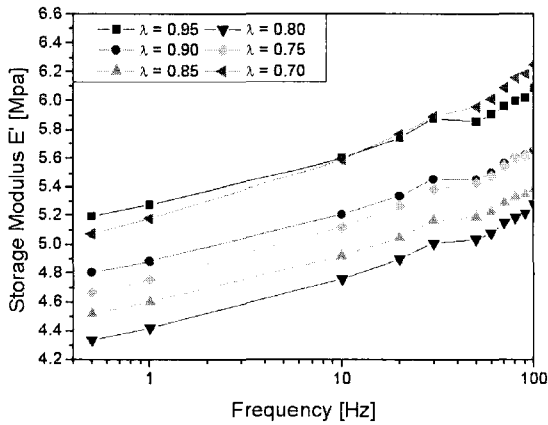
$$K^* = K' + jK'' = \frac{\Delta F^*}{\Delta l^*} \quad (17)$$

동적 압축 시험의 경우는 1차원이라고 볼 수가 없기 때문에 복소 강성 계수로 그 실험치를 표현하였다. 3.1절에서 기술한 형상 보정 계수를 이용하여 식 (18)과 같이 복소 탄성 계수를 근사적으로 일차원화를 시

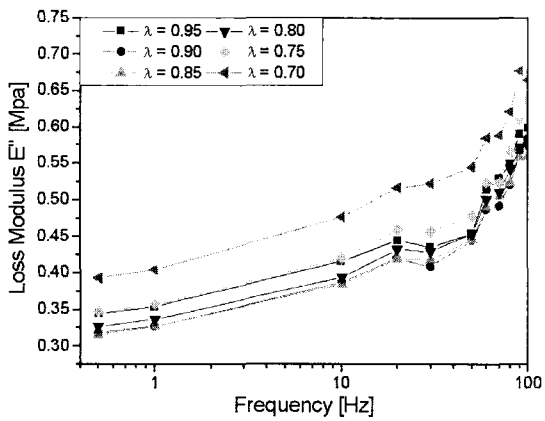
킬 수 있다.

$$E^* = \frac{\Delta \sigma^*}{\Delta \epsilon^*} = \left(\frac{\Delta F^*}{A_0 \Delta \epsilon^*} + \frac{F_s}{A_0} \right) \lambda_s \frac{1}{R(S, \lambda)} \quad (18)$$

Fig. 8에 나타난 실험 결과를 일차원화하여 얻어지는 복소 탄성 계수를 여러 주파수와 정적 변형에 대하여 Fig. 9에 나타내었다. 또한 주파수 10 Hz에서의 정적 변형에 대한 복소 탄성 계수를 Fig. 10에 나타내었고 Morman의 모델에 의한 예측 결과와 비교하였다. 동적 인장 시험의 경우와 마찬가지로 정적 대변형에 대한 복소 탄성 계수의 변화 경향에 대해서 기존의 구성 방정식이 그 실제 특성을 제대로 반영하고 있지 않음을 확인할 수 있었다.

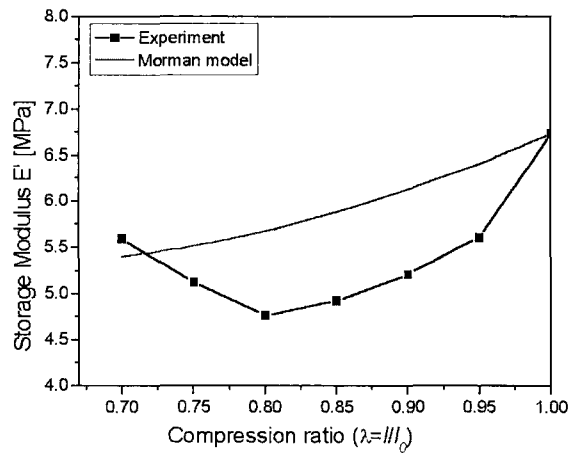


(a) Storage modulus

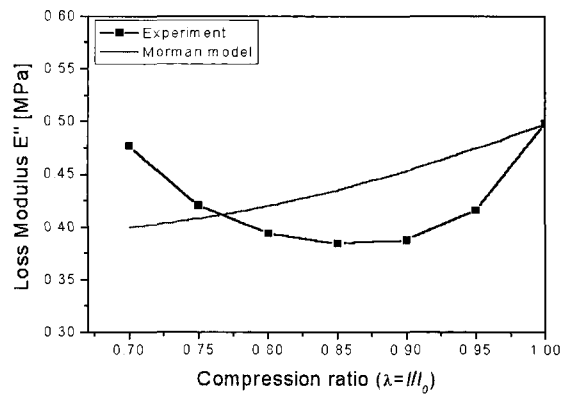


(b) Loss modulus

Fig. 9 Dynamic complex modulus for various compression ratios and frequencies



(a) Storage modulus



(b) Loss modulus

Fig. 10 Dynamic complex modulus at 10 Hz

5. 결 론

본 연구에서는 제진 부품의 특성을 정확히 규명하고 제품 설계에 응용하기 위하여, 정적 대변형 하에서의 동적 미소 변형을 하는 점탄성 재료의 물성치를 추출하기 위한 실험적 접근 방법에 대해서 검토하였다. 우선 문헌 조사를 통해 점탄성 재료의 정적, 동적 시험에 관해 현재 널리 알려진 국내 및 국제 시험 규격들을 검토하여, 정적 압축/인장 변형을 받고 있는 점탄성 재료의 복소 강성 계수 추출 시험에 요구되는 시험 방법을 결정하였다.

압축 시험에서 시험편의 크기 및 양 끝단의 고정에 의한 영향을 규명하였다. ABAQUS 해석에 의한 모사실험 결과를 이용하여 시험편의 압축 시험에서 끝단 고정에 의한 영향은 시험편의 형상 계수뿐만 아니라, 압축 변형률에 따라 달라진다는 사실을 발견할 수 있었다. 이를 바탕으로 기존의 형상 계수만을 고려한 식에 추가로 압축 변형에 따른 영향을 고려할 수 있는 수식을 제안하였다. 다음으로, 시험편 고정에 사용되는 접착제의 종류가 동적 물성치 추출 결과에 미치는 영향을 순간 접착제 4종류를 사용하여 검토하였고, 접착제의 종류에 따라 발생하는 편차들이 시험편 사이의 편차나 시험 과정에서 발생하는 다른 편차들에 비하여 작음을 알 수 있었다.

정하중을 받고 있는 간단한 형상의 점탄성 재료 시험편에 대한 정적, 동적 실험을 수행하였다. 우선 정적 탄성 계수를 결정하는 방법을 정리하였으며, 압축 시험편과 인장 시험편에 대해 다양한 정적 변형 하에서 복소 탄성 계수를 추출하였다. 얻어진 시험결과를 많은 상용 코드에서 사용되고 있는 Morman 모델을 이용한 해석 결과와 비교하였으며, 해석 결과가 정적 대변형에 따른 복소 탄성 계수의 변화를 제대로 반영하지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00393-0) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Voet, A. and Morawski, J. C., 1974, "Dynamic Mechanical and Electrical Properties of Vulcanizates at Elongations up to Sample Rupture," Rubber Chemistry and Technology, Vol. 47, pp. 765~777.
- (2) Kim, B. K. and Youn, S. K., 2001, "A Viscoelastic Constitutive Model of Rubber Under Small Oscillatory Loads Superimposed on Large Static Deformation," Archive of Applied Mechanics, Vol. 71, No. 11, pp. 748~763.
- (3) ASTM D6049-96, "Standard Test Method for Rubber Property-measurement of the Viscous and Elastic Behavior of Unvulcanized Raw Rubbers and Rubber Compounds by Compression Between Parallel Plates".
- (4) ASTM D575-91, "Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression".
- (5) ASTM D395-89, "Standard Test Method for Rubber Property-compression Set".
- (6) KS M 6518, "가황 고무 물리 시험 방법 (Physical Testing Methods for Vulcanized Rubber)".
- (7) KS M 6785-1999, "가황 고무의 저변형에서의 응력·변형 시험 방법 (Testing Methods of Stress-strain Properties at Low Deformation for Vulcanized Rubber)".
- (8) ASTM D1456-86, "Standard Test Method for Rubber Property-elongation at Specific Stress".
- (9) ISO 4664, "Rubber-guide to the Determination of Dynamic Properties".
- (10) KS M 6665, "방진고무 재료의 동적 성능 시험 방법 (Testing Method for Dynamic Properties of Rubber Materials for Vibration Isolators)".
- (11) ASTM D2231, "Standard Practice for Rubber Properties in Forced Vibration".
- (12) KS M 6604-1985, "방진고무 시험 방법 (Testing Method for Rubber Vibration Isolators)".

- (13) ISO 471, "Rubber-temperatures, Humidities and Times for Conditioning and Testing".
- (14) ISO 815, "Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-determination of Compression Set at Ambient, Elevated or Low Temperatures".
- (15) ASTM D1349-87, "Standard Practice for Rubber-standard Temperatures For Testing".
- (16) ISO 7743, "Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-determination of Compression Stress-strain Properties".
- (17) Sullivan, J. I., Morman, K. N. and Pett, R. A., 1980, "A Non-linear Viscoelastic Characterization of a Natural Rubber Gum Vulcanizate," Rubber Chemistry and Technology, Vol. 53, pp. 805~822.
- (18) Morman, K.N. and Nagtegaal, J.C., 1983, "Finite Element Analysis of Sinusoidal Small-amplitude Vibrations in Deformed Viscoelastic Solids, Part I : Theoretical Development," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, pp. 1079~1103.
- (19) Zdunek, A. B., 1993, "Theory and Computation of the Steady State Harmonic Response of Viscoelastic Rubber Parts," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 105, pp. 63~92.
- (20) Zdunek, A. B., 1992, Determination of Material Response Functions for Prestrained Rubbers, Rheologica Acta, Vol. 31, pp. 575~591.
- (21) Hibbit, K. and Sorenson Inc., 1997, "ABAQUS Theory Manual," Version 5.7.
- (22) 안태길, 허진욱, 김광준, 1992, "전달률 측정에 의한 점탄성재료의 복소탄성계수 추출시의 민감도분석," 한국소음진동공학회논문집, 제 2 권, 제 2 호, pp. 99~106.