원주형 고무구조물의 형상과 재질변화에 따른 충격흡수특성

김동진† · 김완두* · 이영신**

A Study on the Impact Absorbing Characteristics for Various Shape and Hardness of Cylindrical Rubber Structures

Dong-Jin Kim, Wan-Doo Kim and Young-Shin Lee

Key Words : Rubber(고무), Impact(충격), Maximum impact force(최대충격하중), Time duration(충격지속시간), Impact absorbing ratio(충격흡수율), Dynamic modulus(동적 탄성계수)

Abstract

Mechanical systems with rubber parts have been used widely in industry fields. The evaluation of the physical characteristics of rubber is important in rubber application. Rubber material is useful to machine component for excellent shock absorbing characteristics. The impact characteristics of rubber were examined by experimental and finite element method. The impact test was conducted with a free-drop type impact tester. The ABAQUS/Explicit was used for finite element analysis. The effects of thickness and diameter of the cylindrical rubber structures were investigated. The impact absorbing ratio of the rubber material was studied order to compare the peak reaction force of the specimen which only contained aluminum against the specimen with the inserted rubber part.

1. 서 론

고무는 금속 및 플라스틱 재료와 달리 작은 하중에서도 큰 변형이 발생되며, 높은 변형구간에서 탄성특성을 보이는 특징이 있다[1]. 특히 충격흡수 특성이 금속 및 플라스틱보다 우수하므로 제진 및 충격 완충구조물로 널리 활용되고 있다. 현재 고무재료를 이용한 충격흡수 구조물은 다양한 제품으로 생산되고 있으나 공학적 근거에 의해 설계되는 것이 아니라 경험에 의한 설계가 이루어지고 있다. 고무 충격흡수제의 설계는 고무의 충격흡수 특성을 형상과 재질에 따라 선행적으로 분석되어야 된다.

고무의 충격에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어오고 있다. 특히 고무를 비롯하여 고무와 유사한 성질을 갖는 폼(foam)에 대한 충격흡수 특성을 분석하는 연구들이 많이 수행되어왔으며, 유한요소해석 프로그램의 발전으로 인해 수치적 기법을 이용한 연구들이 최근에 많이 발표되고 있다. Gilchrist 및 Masso-Moreu[2]등은 유한요소해석과 충격실험을 통해서 폴리스텔렌 폼의 충격특성을 분석하였다. 폴리스틸렌 폼으로 피라미드 형상의 충격흡수 장치를 고안하여, 피라미드의 형상각도 변화에 따른 충격흡수특성을 분석하였다. Iannace 등[3]은 충격하중을 받는 폴리프로필렌(poly-propylene) 폼의 응력과 변형률 관계가 선형적으로 제시되는 것을 가정하여 고무의 충격특성을 분석하였다. 그러나 탄성체의 충격현상에서 발생되는 정현파 충격하중을 고려한 것이 아니라 스텝하중을 부여하여 수치적 방법으로 충격특성을 분석하였다. 그러므로 쉽게 충격특성 결과를 얻을 수 있었으나 실질적인 충격현상에 대한 충격흡수특성을 계산한 것이 아니라 폼 재료의 동적 탄성계수 변화에 따른 충격흡수 경향을 분석하였다.

본 연구에서는 자유 낙하형 충격시험기를 이용하여 고무재료의 충격실험을 수행하였다. 또한 ABAQUS/Explicit 를 이용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 실험결과와 비교하였다. 고무재료의 동적물성을 측정하기 위해 충격실험으로부터 얻은 최대 변형량(max. displacement)과 충격지속시간(time duration)을 이용하여 동특성 시험을 수행하였으며, WLF 모델을 적용하여 높은 주파수 범위의 동강성(dynamic modulus)를 예측하였다.

† 한국기계연구원, 마이크로응용역학그룹
E-mail : kimdj94@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7845 FAX : (042)868-7884
* 한국기계연구원, 마이크로응용역학그룹
** 충남대학교 기계설계공학과

2. 고무재료의 충격실험

2.1 고무재료 및 실험조건

2.1.1 충격시편의 크기와 재질

충격시험을 위한 시편의 형상과 크기는 ASTM 반발탄성 시험에서 제시한 시편과 동일한 크기와 형상을 사용하였다[4]. 시편의 형상은 원주형으로 제작되었으며, 표준시편의 크기는 직경이 29 mm 두께가 13 mm 이다. 고무의 재질변화에 따른 충격특성은 5 종의 경도를 이용하였다. 5 종의 고무경도는 제작사의 표기법에 따라 NR45, NR50, NR55, NR60, NR65 로 구분하였다. NR45 부터 NR65 까지의 IRHD (International Rubber Hardness Degree)고무경도는 5 회의 측정결과로부터 얻은 평균값을 취하였으며, 그 결과를 Table 1 에 제시하였다. 재질변화에 따른 충격흡수 특성을 분석하기위한 고무시편의 형상은 직경 29 mm, 두께 13 mm 인 표준시편의 크기를 동일하게 적용하였다. 형상변화에 따른 충격흡수 특성분석은 직경은 29 mm 이며, 두께는 5 ~ 20 mm 까지 변화된 고무시편을 사용하였다.

Table 1 The IRHD hardness of rubber material

Rubber material	Average (IRHD hardness)	Test data				
		1st	2nd	3rd	4th	5th
NR45	45.0	45.2	46.1	45.6	43.8	44.4
NR50	53.2	53.3	53.3	54.1	53.4	52.1
NR55	58.3	58.7	58.4	58.3	58.1	58.3
NR60	64.4	64.3	64.5	64.4	64.4	64.4
NR65	71.2	70.5	71.6	71.2	71.4	71.3

2.1.2 충격에너지

충격에너지는 내충격제 적용을 가정하여 휴대용 전자기기의 낙하충격시 발생되는 파손조건에 따라 최대 0.3 ~ 1.5 J 의 충격에너지를 적용하였다. 충격실험에 사용되는 충격자의 중량은 3 N 이므로 최대 0.5 m 의 높이를 고려하여 충격실험을 수행하였다. 이때 발생되는 낙하속도는 3.15 m/s 가 고려되었다.

2.1.3 최대충격하중과 충격하중 흡수율

충격하중을 받는 고무재료는 Fig.1 과 같이 정현파(half sine pulse)의 충격펄스를 발생시킨다. 충격펄스로부터 최대충격하중(maximum impact force)과 충격지속시간(time duration)이 측정된다. 충격하중 흡수율은 고무재료가 적층되지 않는 상태의 충격하중을 기준으로 고무재료가 적층된 상태에서 발생되는 최대충격하중의 값을 비율로서 계산하였다. 충격하중 흡수율은 식(1)과 같다.

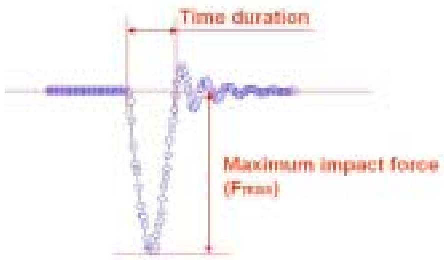


Fig. 1 The maximum displacement and time duration of impact pulse shape

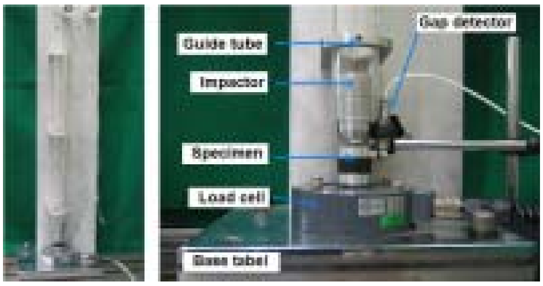
$$\eta = 100 - (\frac{Fr}{Fn}100) \tag{1}$$

여기서 η 는 고무재료의 충격흡수율을 나타낸다. Fr 는 고무가 적층된 충격시편에서 발생된 최대충격하중을 나타내며, Fn 은 고무가 적층되지 않은 충격시편에서 발생된 최대 충격하중을 나타낸다.

2.2 고무충격시험기

중력에 의해 충격하중을 부여하는 저속 충격시험기는 진자형, 미끄럼형, 자유낙하형의 충격시험법이 일반적으로 사용되고 있다[5]. 고무충격 시험기는 ASTM 및 KS 에 반발탄성 시험기가 소개되고 있다[6]. 반발탄성 시험기는 충격흡수 에너지 만을 측정하며 정확한 충격하중과 재료의 변형특성을 측정할 수 없는 단점이 있다. 반발탄성 시험기의 문제를 해결하기 위해 Fig.2(a)와 같이 자유 낙하형 충격시험기가 사용되었으며, 충격하중을 측정하는 로드셀(load cell)과, 시편의 변위를 측정하는 갭센서(gap detector)가 장착되었다. 로드셀과 갭센서는 충격시 발생되는 충격하중과 변형량을 측정할 수 있다.

충격자는 3 N 의 중량을 갖는 강(steel)으로 제작되었다. 충격면은 충격시편의 중심점 타격을 위해 반구형 형상으로 제작되었다. 충격시험기는 최대 최대 0.5 m 의 높이에서 중력방향으로 자유 낙하되어 충격시편과 충돌될 수 있도록 고안되었다. 다양한 에너지 변화에 따른 특성을 분석하기 위해 충격에너지는 0.3 ~ 1.5 J 이 고려되었다. Fig. 2(b)는 로드셀과 갭센서의 증폭기(amplifier)와 신호처리 장비의 구성을 나타낸다.



(a)

(b)

Fig. 2 The photograph of impact tester and DAQ system (a) Impact tester (b) DAQ system

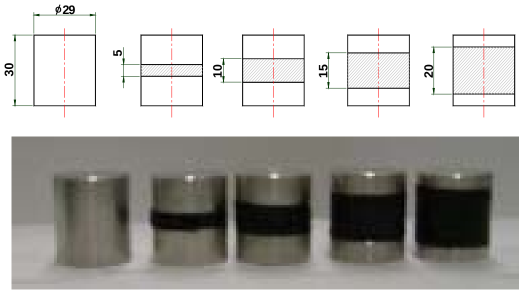


Fig. 3 The impact specimens for various rubber thickness

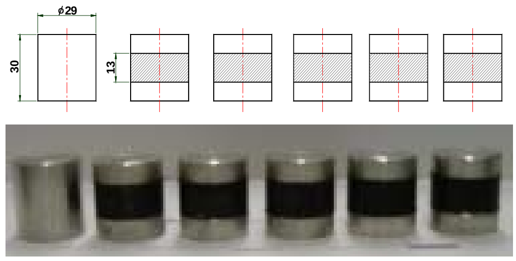


Fig. 4 The impact specimens for various hardness

2.3 충격시편

충격시편의 형상변화에 따른 충격흡수율 특성분석은 두께(t)와 직경(D)의 형상비(t/D) 변화에 대한 특성을 실험하였다. 고무재료의 양단은 알루미늄 블록으로 접착되었다. 상단블록의 역할은 반구형 충격자에 의해 고무재료가 부분적인 만입(Indentation)이 발생되지 않고 균일한 충격하중이 고무시편에 전달시키는 것이다. 하단블록의 역할은 고무시편으로부터 감쇠된 충격하중을 균일하게 로드셀에 전달시키는 것이다. Fig. 3 은 형상변화에 따른 특성을 분석하기 위한 충격시편의 형상을 나타내며, Fig. 4 는 재질변화에 따른 특성을 분석하기 위한 충격시편의 형상을 나타낸다. 금속부분이 포함된 충격시편의 전체 직경은 29 mm 이며, 전체 높이는 30 mm 이다. 고무재료는 충격시편의 내부에 적층된다. 고무시편의 두께와 직경에 대한 다양한 형상비를 분석하기 위해 5, 10, 15, 20 mm 의 고무 두께를 고려하였다. 충격흡수율 평가는 고무재료가 적층되지 않은 충격시편을 기준시편으로 사용하였다.

고무와 금속의 접착은 CN-4 (ALTECO co.)를 이용하여 접착하였다. CN-4 는 접착물질의 두께가 미소하며 강한 접착강도를 갖는다. 또한 고무에 화학적으로 안전성이 보장되는 접착제이다

2.4 최대충격하중과 변형량

형상과 재질변화에 따른 충격실험결과 Fig. 5, Fig. 6 과 같이 최대충격하중과 최대변형량을 얻을 수 있었다.

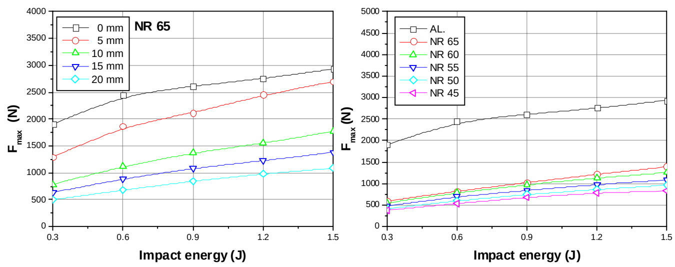


Fig. 5 The maximum impact force for various rubber thickness and hardness

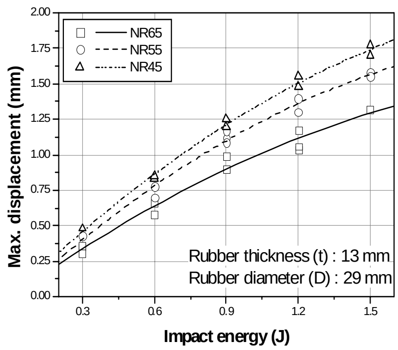


Fig. 6 The maximum displacement of impact specimen with NR 45, NR55, NR65 rubber material for various impact energy

3. 고무재료의 유한요소 충격해석

3.1 유한요소모델 및 경계조건

유한요소해석은 실험결과의 타당성 검증과 실험으로 얻을 수 없는 다양한 하중조건에서의 충격해석 결과를 얻기 위해 수행되었다. 본 연구에서는 비선형해석과 충격해석이 가능한 ABAQUS/Explicit를 사용하였다[7]. 유한요소해석에 사용된 형상모델은 실험에서 사용된 충격자와 충격시편의 기하학적 형상데이터를 동일하게 모델링하였다. 유한요소모델은 계산시간 단축을 위해 2차원 형상으로 3차원 모델을 구성할 수 있는 축 대칭 요소(CAX4R)를 사용하여 모델링하였다. 충격자와 충격시편은 충돌하기 직전의 모습으로 모델링 하였으며, 충격자 각각의 절점에 충격방향으로 충격전의 속도를 부여하였다. 충격시편의 하단면이 볼트에 의해 로드셀과 완전하게 결합되는 것을 모사하기 위해 RAX2강체 요소가 사용되었다. 충격하중은 충격시편 하단의 RAX2요소와 연동되어 있는 기준절점(reference node)에서 축방향의 하중을 측정하였다. 충격시편의 기준절점은 6자유도를 구속하였다. Fig. 7은 유한요소 충격해석을 위한 충격자와 충격시편의 요소와 절점형상을 나타낸다.

3.2 정적 물성적용의 문제

고무재료의 유한요소해석은 일반적으로 단순인장(simple tension), 단순압축(simple compression), 순수전단(pure shear), 이축인장(equi-biaxial tension)의 물성시험으로부터 얻은 비선형 재료상수를 이용하여 해석한다. 고무재료의 물성시험에 사용되는 시험속도는 50 ~ 500 mm/min의 시험속도를 규격에서 제시한다[8]. 그러나 고무재료의 충격해석은 충격시 발생되는 빠른 거동속도 때문에 정적 물성시험에서 얻은 결과를 사용할 수 없다. 0.3 ~ 1.5 J의 충격에너지가 작용하는 조건에서 천연고무의 충격해석 결과는 실험결과와 30% 정도의 오차가 나타난다. Fig. 8은 정적인 시험조건에서 얻어진 물성을 입력한 해석결과와 실험결과를 비교한 것이다. Fig. 8와 같이 최대 30%정도의 오차가 발생되는 원인은 실험에서 발생되는 변형률 속도와 재료 물성시험의 변형률 속도가 일치하지 않으므로 발생된 결과이다. 그러므로 충격거동속도와 시험속도를 동일하게 고려된 물성을 입력해서 해석을 수행해야 된다.

3.3 고무의 동강성 측정 및 예측

3.3.1 동특성 시험조건

고무재료의 동특성 시험은 짧은 시간동안 주기적인 반복하중에 의한 고무의 동적성질을 측정하는 시험방법이며, 시험결과는 저장탄성계수(storage modulus)와 손실계수(loss factor)와 같은 고무의 동적특성을 얻을 수 있다[9]. 충격실험에서 얻은 하중과 변위선도는 정현파의 형상을 나타내므로 동특성 시험에 적용할 수 있다.

Fig. 7 The finite element model of impactor and specimen

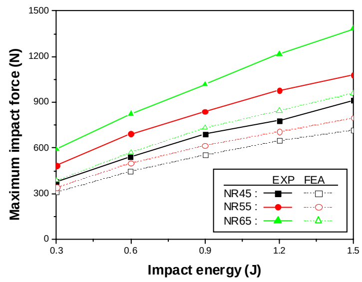


Fig. 8 The comparison of experiment result and FEA result to use static material properties

Table 2 The time duration for various rubber materials

Rubber material	Time duration (m/s)	
	0.3	1.5
NR45	3.5 (285 Hz)	3.4 (294 Hz)
NR50	3.1 (322 Hz)	3.1 (322 Hz)
NR55	2.6 (384 Hz)	2.7 (370 Hz)
NR60	2.3 (434 Hz)	2.3 (434 Hz)
NR65	2.1 (476 Hz)	2.1 (476 Hz)

Table 3 The dynamic property test condition for impact behavior

Rubber material	Amplitude (mm)	Frequency (Hz)
NR 45	1.75	294
NR 55	1.56	370
NR 65	1.29	476

충격실험에서 얻은 최대변형량은 동특성실험의 진폭(amplitude)으로 고려되며, 충격지속시간(time duration)은 주파수(frequency)로 적용될 수 있다. Table 2는 NR45 ~ NR65고무재료의 다양한 충격에너지에 따른 주파수를 나타낸다.

0.3 ~ 1.5 J의 충격에너지 범위에서, 동일 고무재료에 대한 충격지속시간은 Table 2와 같이 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 고무경도가 증가될수록 충격지속시간이 짧아지는 결과를 얻을 수 있었다. Table 3은 Fig. 6의 결과로부터 얻어진 진폭

과 table 2에서 제시된 주파수를 나타내며, 동특성 시험을 위한 시험조건이 된다.

3.3.2 동특성 시험과 WLF 모델 적용

고무의 동강성(dynamic modulus)측정은 Table 3에서 제시된 결과를 동특성 시험조건으로 적용하여 얻을 수 있다. 현재 국내외적으로 상용화된 동특성 시험기의 성능은 Table 3에서 제시한 시험조건을 만족시킬 수 없는 실정이다. 즉, 높은 주파수(300 ~ 400Hz)조건에서 큰 진폭(1.2 ~ 1.7 mm)을 부여하기가 어렵기 때문이다. 본 연구에서는 WLF 모델을 적용하여 높은 주파수 범위의 동적 탄성계수를 예측하는 방법을 사용하였다.

Fig. 9 는 고무재료의 동강성 예측을 위한 동특성 시험기와 시편이 체결형상을 나타낸다. 동특성 시험기는 Eplexor 500N(GABO co.)로서, 시험 주파수 범위는 5 ~ 100 Hz, 시험온도 범위는 -50 ~ 150℃ 이다. 고무의 동특성 시험을 위한 시편직경은 10 mm 이며, 높이는 13 mm 이다. 온도조건은 5 ~ 25℃, 주파수 조건은 5 ~ 100 Hz 를 고려하였다.

Fig. 10(a)는 NR45 고무재료의 동특성 시험결과를 나타낸다. NR45 고무의 동특성 시험조건은 1.75 mm 의 진폭, 5 ~ 25℃의 온도, 5 ~ 100 Hz 주파수이다. NR 55, NR65 고무재료의 동특성 시험조건은 NR45 시험조건과 온도와 주파수는 동일하게 고려하였으나 진폭은 Table 3 에서 제시한 1.56, 1.29 mm 를 적용하여 실험하였다.

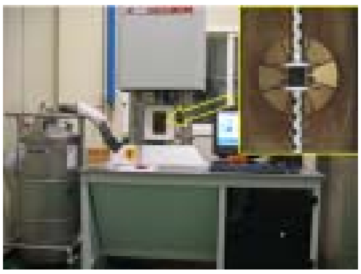
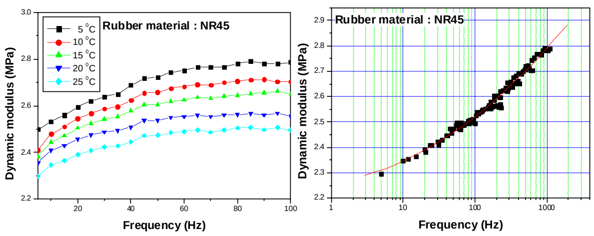


Fig. 9 The dynamic property tester and specimen



(a) (b)

Fig. 10 The dynamic modulus for various frequency and rubber material
(a) The dynamic modulus for various temperature
(b) The superposed dynamic modulus from (a)

Fig. 10(a)와 같이 다양한 온도와 주파수 범위에서 얻어진 고무의 동강성은 WLF(Williams-Landel-Ferry)을 적용하여 Fig. 10(b)와 같이 1 KHz 까지 확장된 동강성을 예측하였다.

고무재료는 기준온도보다 저온상태에서 강성이 증가되는 특성이 있다. 상온(25℃) 이하의 온도조건에서 측정된 동강성은 상온과 동일한 조건으로 만족시키기 위해 식(2)에 따라 온도보정을 수행하였으며, Fig. 10(b)와 같은 마스터 커브로 제시할 수 있다.

$$\log\ a_T = \frac{-\alpha_1(T-T_0)}{\alpha_2+(T-T_0)} \tag{2}$$

여기서 T_0 는 기준온도를 나타내며, T 는 T_0 로 변환되는 온도를 나타낸다. 5 ~ 25℃의 온도에서 얻어진 동적 탄성계수들은 25℃를 기준온도로 변환되었으며, 변환에 사용된 보정상수 α_1 과 α_2 는 NR45 에서 2.57, -31.1 이며, NR55 에서 -6.5 와 163.8 이 사용되었다. 그리고 NR65 에서 -4.5 와 111.2 가 사용되었다. 5 ~ 20℃의 온도조건에서 얻어진 동적 탄성계수들은 α_1 과 α_2 의 보정상수에 의해 25℃ 조건의 마스터 커브를 Fig. 10(b)와 같이 얻었다. $\log\ a_T$ 는 보정상수(α_1, α_2), 기준온도, 변환온도에 의해 얻어진 그래프의 이동상수(shift factor)이다.

Table 4 는 고무의 동특성 실험과 WLF 모델적용으로 예측된 동강성(dynamic modulus)를 나타낸다. NR45 고무는 2.63 MPa 의 동강성이 나타났으며, NR55 와 NR65 고무는 5.35 MPa, 6.97 Mpa 이 예측되었다.

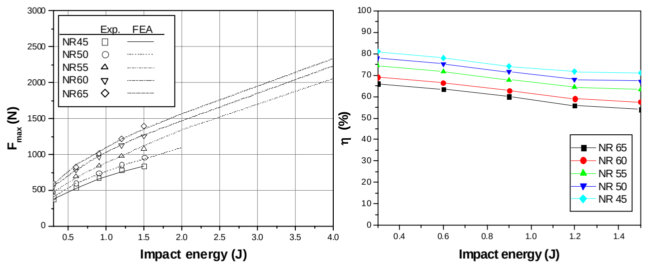
Table 4 The dynamic modulus of various rubber material from dynamic modulus test

Rubber material	Dynamic modulus (MPa)
NR45	2.63
NR55	5.35
NR65	6.97

4. 결과 및 고찰

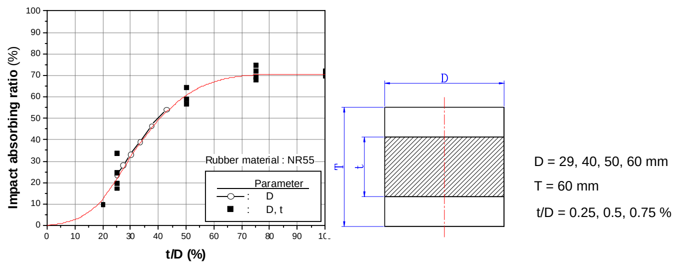
4.1 재질변화에 따른 충격특성 분석

NR45 ~ NR65 고무재료의 최대충격하중은 0.3 ~ 1.5 J 까지 실험으로 측정되었으며, 유한요소법은 4.0 J 까지 계산되었다. 동적 탄성계수를 적용한 유한요소해석결과는 Fig. 11(a)에서와 같이 실험결과와 우수하게 일치되므로 동특성 시험과 WLF 모델 적용에 따른 동적 탄성계수 획득방법의 신뢰성이 입증되었다. 고무의 경도가 낮을수록 충격흡수율이 우수하며, 경도 증가량에 비례적으로 증가되는 경향을 얻을 수 있었다. 또한 충격에너지의 증가에 따라 충격흡수율이 감소되는 경향을 얻을 수 있었다. Fig. 11(b)는 경도변화에 따른 충격하중 흡수율 결과를 나타낸다.



(a) (b)

Fig. 11 The max. impact force and impact absorbing ratio for various rubber hardness



(a) (b)

Fig. 12 The impact absorbing ratio for various shape and extended dimension of impact specimen

4.2 형상변화에 따른 충격특성 분석

원주형 고무구조물은 직경(D)과 두께(t)의 형상비(t/D) 변화에 따른 충격흡수율이 분석되었다. 형상변수는 Fig. 4 에서 제시한 것과 같이 적층된 고무의 두께를 5 ~ 20 mm 까지 변화된 조건을 실험적으로 측정하였으며, Fig. 12(b)와 같이 확장된 시편형상에 대한 조건을 유한요소 해석으로 분석하였다. 해석결과는 Fig. 12(a)와 같이 2 단계로 변화되는 충격하중 흡수특성 곡선을 얻을 수 있었다.

고무의 형상비가 증가될수록 충격흡수율은 일정한 기울기특성으로 증가되나 형상비가 50 ~ 70%의 구간부터 100%까지 안정화 되는 특성을 볼 수 있었다. 또한 형상비의 어떠한 변화조건에서도 평균흡수율은 최대 70%정도 발생됨을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 직경이 29 mm, 두께가 13 mm 인 원주형 고무시편을 이용하여 충격흡수 특성을 분석하였으며, NR45 ~ NR65 까지 5 종의 다양한 경도변화에 따른 충격흡수 특성을 분석하였다. 형상변화에 따른 특성분석은 적층된 고무의 두께를 5 ~ 20 mm 까지 변화시켜 분석하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

(1) 고무재료의 정적물성 시험으로 얻은 비선형 재료상수는 충격해석에 적합하지 않으며, 0.3 ~ 1.5 J 의 충격에너지 조건에서 최대 30%정도의 오차가 발생된다.

(2) 고무의 동적 탄성계수는 충격펄스의 최대변형량과 충격지속시간으로부터 얻어진 진폭과 주파수를 적용하여 동특성 시험을 수행하고 WLF 모델을 적용하여 높은 주파수 대역의 동강성(dynamic modulus)을 예측할 수 있다.

(3) 직경과 두께의 형상비 변화에 따른 충격흡수율은 형상비의 증가에 따라 흡수율이 증가되나 50 ~ 70%구간부터 100%까지 충격흡수율이 안정화 된다.

(4) 고무의 경도증가와 충격에너지의 증가는 충격하중수율을 감소시키며, 0.3 ~ 1.5J 의 충격에너지 영역에서는 충격흡수율의 증감이 비례적인 관계를 나타낸다.

후 기

본 논문은 국가지정 연구실 사업비에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) A. N. Gent, 1992, Engineering with Rubber, Hanser.

(2) Y. Masso-Moreu and N. J. Mills, 2003, “Impact Compression of Polystyrene Foam Pyramids,” International Journal of Impact Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 653-676.

(3) F. Iannace, S. Iannace, G. Caprino and L. Nicolas, 2001, “Prediction of Impact Properties of Polyolefin Foams,” Polymer Testing, Vol. 20, No. 6, pp. 643-647.

(4) ASTM, 2002, Standard Test Method for Rubber Property-Resilience Using a Goodyear-Healey Rebound Pendulum, ASTM D 1054-02.

(5) C. M. Harris, 1988, Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill.

(6) H. Ho, 1995, “A Finite Element Analysis of the Impact-Contact Problem of a Portable Telephone Using I-deas and ADIA,” Computers and Structures, Vol. 56, No. 2, pp. 379-409.

(7) HKS, 1998, ABAQUS Theory Manual , HKS Inc.

(8) W. D. Kim, W. S. Kim and C. S. Woo, 2001, “Test Method of Rubber Material Model for Finite Element Analysis,” Proceedings of IRC 2001, pp. 270-275.

(9) G. Ramorino, D. Vetturi, D. Cambiaghi, A. Pegoretti and T. Ricco, 2003, “Developments in Dynamic Testing of Rubber Compounds : Assessment of Non-linear Effects,” Polymer Testing, Vol. 22, No. 6, pp. 681-687.