

## 충격하중을 받는 고무구조물의 동특성 평가

김 완 두<sup>†</sup> · 김 동 진\* · 이 영 신\*\*

한국기계연구원 미래기술연구부

\*특허청 기계금속건설심사본부, \*\*충남대학교 기계설계공학과  
(2006년 1월 25일 접수, 2006년 3월 3일 수정 및 채택)

## Evaluation of the Dynamic Characteristics of Rubber Structure under Impact Force

Wan-Doo Kim<sup>†</sup>, Dong-Jin Kim\*, and Young-Shin Lee\*\*

Korea Institute of Machinery and Materials

\*Korean Intellectual Property Office

\*\*Chungnam National University

(Received January 25, 2006, Revised & Accepted March 3, 2006)

**요약**: 고무는 금속 및 플라스틱 재료와 달리 작은 하중에서도 큰 변형이 발생되며, 높은 변형 구간에서 탄성특성을 보이는 특징이 있다. 특히 충격흡수 특성이 금속 및 플라스틱보다 우수하므로 제진 및 충격 완충구조물로 널리 활용되고 있다. 충격하중을 받는 고무 구조물의 특성을 평가하기 위하여 자유 낙하형 충격시험기를 이용하여 충격실험을 실시하였으며, ABAQUS/Explicit를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 고무의 동강성은 충격펄스의 최대변형량과 충격지속시간으로부터 얻어진 진폭과 주파수를 적용하여 동특성 시험을 수행하고 WLF모형을 적용하여 높은 주파수 대역의 동강성을 예측하였다. 실험을 실시한 0.3~1.5J의 충격에너지 영역에서는 고무의 경도가 증가되면 충격흡수율이 감소되며, 충격에너지가 커질수록 충격흡수율은 감소하는 경향을 나타내었다.

**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. In the finite element analysis, elastic modulus of rubber using impact force was used as dynamic modulus, which are measured and predicted with dynamic property test and WLF model. The analysis result was coincided with the experimental results.

**Keywords**: Rubber, Impact, Dynamic modulus, WLF model, Impact absorbing ratio

<sup>†</sup>대표저자(e-mail : wd kim@kimm.re.kr)

## I. 서 론

고무 및 고무와 같은 소재(폴리머 폼, 우레탄, 실리콘 등)들은 충격흡수 능력이 우수하므로 산업의 다양한 분야에서 활용도가 증가되고 있다.<sup>1</sup> 예를 들어, 점프력을 향상시킬 수 있는 농구선수의 운동화 밑창(outsole), 고무와 플라스틱의 합성재료로 제작되는 자동차 범퍼, 휴대용 전자부품의 충격 흡수재, 핵연료 수송용기의 충격방지 기구, 헬멧 및 각종 보호대 등에서 많이 활용되고 있다.<sup>2</sup>

고무재료를 이용한 충격흡수재 설계는 최근 유한요소법 및 실험적 방법을 많이 활용하고 있으나 고무재료의 동강성(dynamic modulus)측정에 대한 어려움 때문에 아직도 경험에 의한 설계가 많이 이루어지고 있으며, 경향분석에 대한 연구가 발표되고 있다. 고무의 충격조건에 대한 유한요소 해석이 쉽지 않은 이유는 고무재료의 비선형 특성과 충격조건을 만족시키는 조건이 수반되어야 하기 때문이다.<sup>3</sup> 고무재료의 동강성 측정과 예측은 충격시험에서 발생하는 펄스 형상으로부터 얻어진 결과를 적용하였으며 동특성 시험으로 얻어진 동강성을 WLF모델을 적용하여 높은 주파수 조건의 동강성을 예측하는 방법을 사용하였다.

고무의 동강성을 고려한 충격해석과 실험은 많은 연구자들에 의해 진행되어왔다. Iannace 등<sup>4</sup>은 충격하중을 받는 폴리프로필렌 폼의 응력과 변형을 관계가 선형적으로 제시되는 것을 가정하여 고무의 충격특성을 분석하였다. Kurokawa 등<sup>5</sup>은 동특성 시험을 통해 고무의 변형속도가 20~70 m/s의 범위에서 동강성이 금속재료와 같이 선형적으로 변하는 것을 분석하였으며, 충격에너지에 따른 동강성을 비교하였다.

본 연구에서는 충격하중을 받는 고무재료의 동강성을 측정하고 예측하는 방법을 제시하였으며, 실험과 해석결과를 비교하여 측정법의 신뢰성을 검증하였다.

## II. 고무 충격실험과 유한요소해석

충격하중을 받는 고무구조물의 유한요소해석에서 고무의 물성은 정적물성과 동적물성을 사용하였다. 동강성 입력의 목적은 정확한 물성입력으로 실험결과와 유사한 해석결과를 얻기 위해 사용되었다.

### 1. 고무충격실험

고무의 충격실험은 Figure 1의 자유 낙하형 충격시험기를 사용하였다. 충격시험기는 충격하중을 측정하는 로드셀(load cell)과, 고무의 변위를 측정하는 틈새측정기(gap detector)가 장착되어 있다.

충격하중을 받는 고무재료는 Figure 2와 같은 정현파(half sine pulse)의 충격펄스를 발생시킨다. 충격펄스로부터 최대충격하중(maximum impact force)과 충격지속시간(time duration)이 측정된다. 충격하중 흡수율은 고무재료가 적충되지 않는 상태의 충격하중을 기준으로 고무재료가 적충된 상태에서 발생하는 최대충격하중의 값을 비율로서 계산하였다. 충격하중 흡수율은 식(1)과 같이 정의된다.

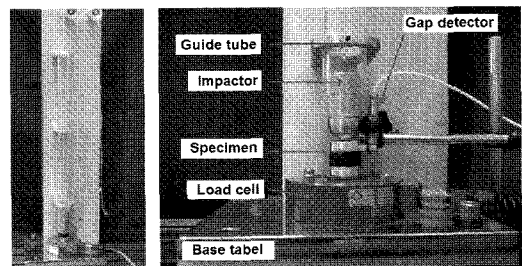


Figure 1. The photograph of free drop type impact tester.

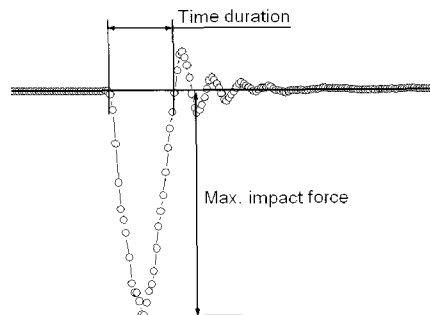


Figure 2. Typical impact pulse shape.

$$\eta = \left(1 - \frac{Fr}{Fn}\right)100 \quad (1)$$

여기서  $\eta$  는 고무재료의 충격흡수율을 나타낸다.  $Fr$ 는 고무가 적층된 충격시편에서 발생된 최대충격하중을 나타내며,  $Fn$ 은 고무가 적층되지 않은 충격시편에서 발생된 최대충격하중을 나타낸다.

충격하중은 3N의 금속 충격자를 사용하였으며, 충격자의 낙하높이에 따라 충격에너지를 변화시킬 수 있다.<sup>6</sup> 충격시편은 고무와 알루미늄의 적층구조로 구성되었으며, 고무의 상·하단에 알루미늄 블록이 접착되어 있다. 충격실험에 사용된 고무의 직경은 29 mm, 두께는 13 mm이며, 알루미늄이 포함된 충격시편의 전체 두께는 30 mm이다.

고무경도변화에 따른 충격특성을 분석하기 위해 NR45, NR50, NR55, NR60, NR65의 고무를 사용하였다. Figure 3은 충격실험에 사용된 충격시편의 형상을 보여준다. Table 1은 고무 시편의 기본 배합 성분을 보여준다. 충격에너지는 0.3~1.5 J의 범위에서 실험하였다.

NR45~NR65고무재료의 0.3~1.5 J 충격에너지 작용에 따른 최대충격하중은 Figure 4(a)와 같이 최소 300 N부터 최대 1450 N까지 나타났다. Figure 4(b)

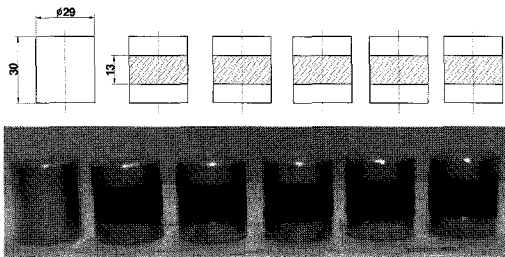


Figure 3. The impact specimens for various hardness.

Table 1. Compound formulations (phr)

Ingredient	NR45	NR50	NR55	NR60	NR65
SMR CV60	100	100	100	100	100
C/B FEF	13	22	27	40	40
C/B SRF		15	18	20	32
S/A	1	1	1	1	1
ZnO	5	5	5	5	5

는 NR45, NR55, NR65고무의 최대변형량을 나타낸다. Figure 5는 0.9 J의 충격에너지가 가해졌을 때의 NR65 시편의 충격하중과 변형의 실험 예를 보여준다.

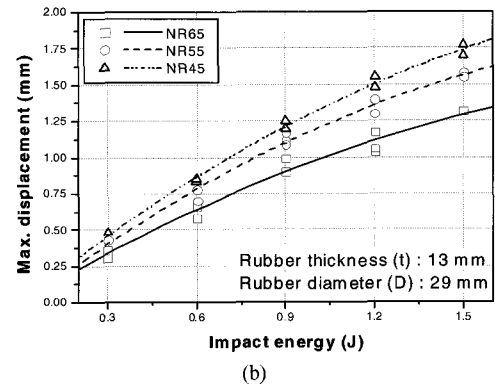
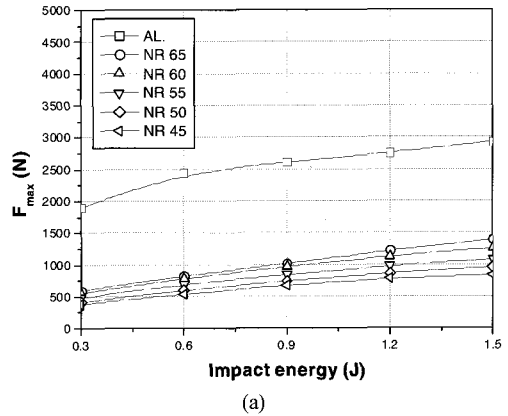


Figure 4. The maximum impact force (a) and displacement (b) for various impact energy and hardness.

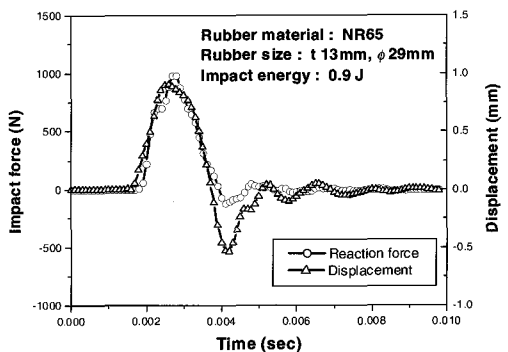


Figure 5. Impact pulse of NR65 under 0.9 J.

2. 정적물성을 고려한 유한요소 충격해석

정적물성을 고려한 고무의 유한요소해석은 단순인장(uniaxial tension), 순수전단(pure shear), 단순압축(uniaxial compression), 등이축인장 시험(equi-biaxial tension)으로 얻은 Mooney-Rivlin 상수 및 Ogden 상수와 같은 비선형 재료상수를 적용하였다.<sup>7</sup> 시험에 사용된 변형률 속도는 ASTM D412에서 제시하는 50 mm/min를 사용하였다. Figure 6은 단순인장, 순수전단, 이축인장 및 단순압축 시험으로부터 얻은 응력과 변형률 선도를 나타내며, Table 2는 물성시험으로부터 얻어진 비선형 재료상수인 Mooney-Rivlin 상수를 나타낸다. 얻어진 재료상수는 유한요소 해석의 기본 물성으로 사용된다. 표에서 전단계수와 탄성계수는 비선형 상수로부터 근사적으로 계산된 값이다.

고무의 충격특성은 비선형 해석에 신뢰성이 있

는 상용코드로 알려져 있는 ABAQUS/Explicit를 사용하여 분석하였다. 해석모델은 충격실험과 동일한 형상으로 모델링하였다. Figure 7(a)는 유한요소 해석모델을 나타낸다. 계산시간을 단축하기 위해 충격자와 충격시편을 충돌직전의 모습으로 모델링하였으며, 축대칭 4절점 요소를 사용하여 축 대칭 솔리드 모델을 구성하였다. 충격자와 충격시편의 접촉부분은 접촉요소를 사용하였으며, 접촉면의 상대운동을 무시하여 마찰계수는 적용하지 않았다. 충격시편 접촉부분의 접촉계의 영향과 접촉물질의 두께는 무시하였으며, 완전한 접촉을 가정하여 절점을 공유하는 방법으로 모델을 구성하였다. 축 대칭 조건을 만족시키기 위해 충격자와 시편의 중심면은 축 대칭 조건으로 자유도를 구속하였다. 충격시편의 하단면은 볼트에 의해 로드셀과 완벽하게 결합되는 것을 모사하기 위해 강제요소(RAX2)를 사용하였다. RAX2 요소는 2개의 절점으로 하나의

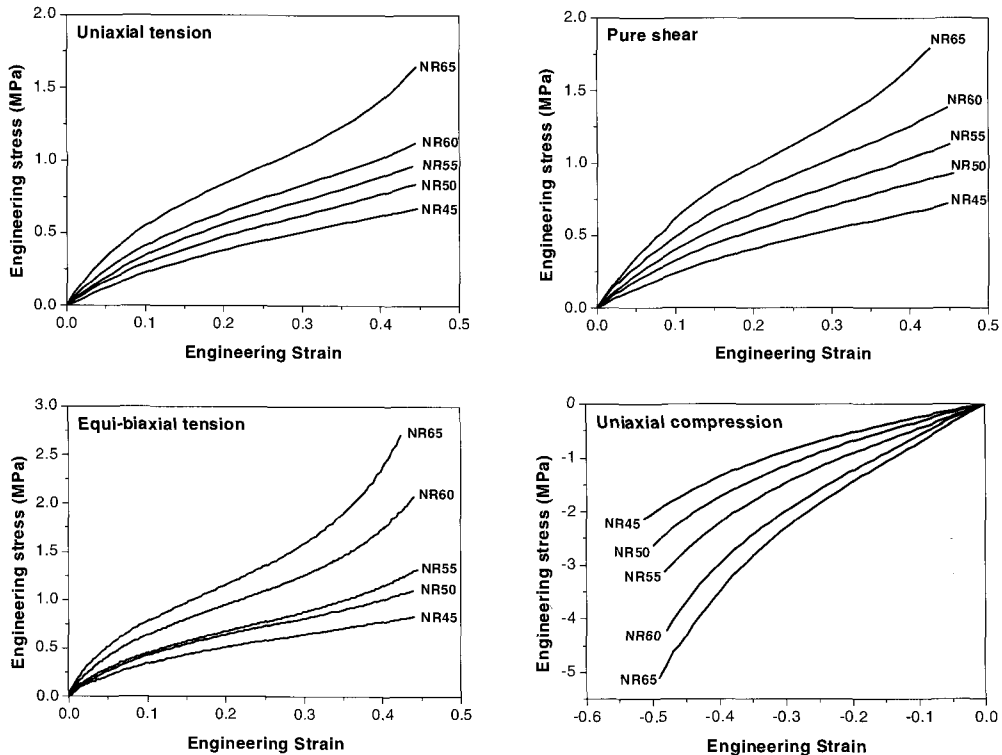


Figure 6. The stress-strain curves of rubber material.

요소를 이루고 있으며, 축 대칭 모델에 적합한 요소이다. 충격시편의 충격하중을 산출하기 위해 RAX2 요소의 기준절점은 6자유도를 구속하였으며, 기준절점에서 충격하중을 측정하였다. 충격하중은 충격자 모델의 모든 절점에 충격방향으로 충격속도를 부여하였다. Table 3은 0.3 J부터 1.5 J까지의 충격에너지를 부여하기 위한 충격자의 충격속도를 나타낸다. 충격자에 작용하는 충격속도는 1.41 m/s 부터 최고 3.16 m/s까지 고려되었다.

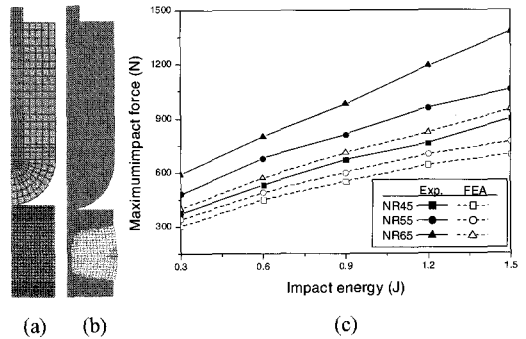
Figure 7(b)는 유한요소해석과 충격실험결과를 나타내었다. 실험결과가 해석결과보다 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 실험한 충격에너지 범위에서 NR45의 경우 17~21%, NR55의 경우 26~29%, NR65의 경우 28~34% 정도로 실험값이 크게 나타남을 알 수 있으며, 이는 유한요소 해석 시에 정적인 물성을 사용한 데에 원인이 있는 것으로 판단된다. 이상으로부터 고무재료의 정적 물성을 적용한 충격해석은 실험결과와 큰 오차가 발생되어 신뢰할 수 없는 결과가 얻어지는 것으로 판명되었으며, 고무재료의 동적 물성 적용에 따른 해석이 필요하게 됨을 알 수 있었다.

**Table 2. The Mooney-Rivlin constants of various rubber materials**

Rubber material	IRHD hardness	Mooney Rivlin in constant (MPa)		Shear Modulus G (MPa) = 2 (C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub> )	Elastic Modulus E (MPa) = 3G
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>		
NR45	45.0	0.34	0.00	0.68	2.04
NR50	53.2	0.46	0.00	0.92	2.76
NR55	58.3	0.47	0.00	0.94	2.82
NR60	64.4	0.65	0.00	1.30	3.90
NR65	72.2	0.73	0.04	1.46	4.38

**Table 3. Impact velocity for various impact energies**

Impact energy (J)	Drop height (m)	Impact velocity (m/s)	Weight of impactor (N)
0.3	0.10	1.41	3
0.6	0.20	1.99	
0.9	0.30	2.44	
1.2	0.40	2.82	
1.5	0.50	3.16	



**Figure 7. The FEA model (a), the deformed shape (b) and the experiment and FEA results (c).**

### III. 동특성 시험과 WLF모형을 이용한 동특성 측정 및 예측

충격하중을 받는 고무재료의 동강성 측정을 위해 동특성 시험이 수행되었다. 동특성 시험조건인 진폭(amplitude)과 주파수(frequency)는 충격시험에서 발생하는 시간-변위 펄스형상에서 측정된 최대 변형량과 충격지속시간을 적용하였다. Table 4는 NR45, NR55, NR65고무재료에 대한 충격펄스 형상에서 얻어진 최대변형량과 충격지속시간을 나타낸다.

충격시험으로 얻어진 진폭과 주파수는 극히 짧은 시간에 높은 진폭을 요구하므로 기존의 시험기에서 동특성 값을 구하기 쉽지 않은 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 범용적인 동특성 시험기를 통해 얻은 결과를 WLF모형에 적용하여 100 Hz이상에서의 동강성을 예측하였다.<sup>9</sup> 동특성 시험기는 Eplexor 500N(GABO co. Germany)을 사용하

**Table 4. Time duration and frequency of impact pulse for various rubber materials**

Rubber material	Time duration of pulse (msec)	Frequency of pulse (Hz)
NR45	3.4	294
NR50	3.1	322
NR55	2.7	370
NR60	2.3	434
NR65	2.1	476

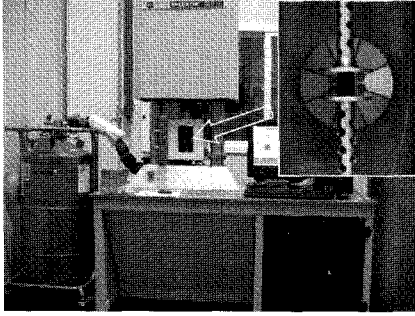
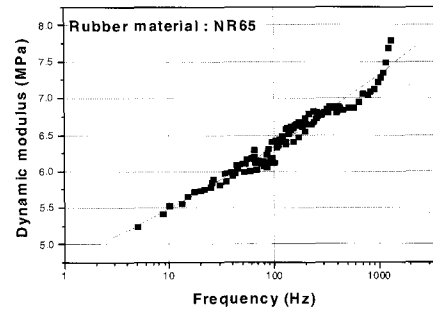
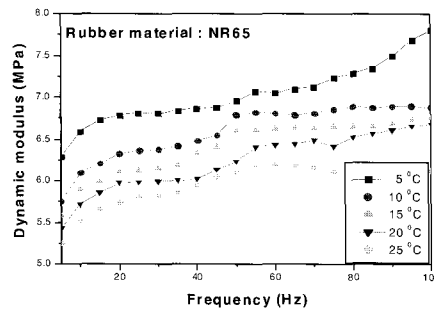
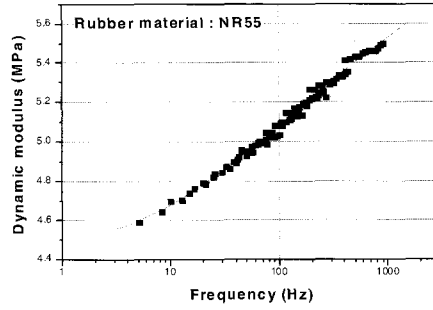
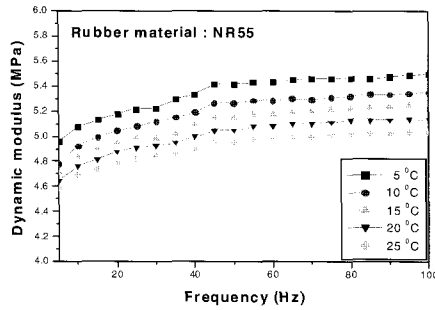
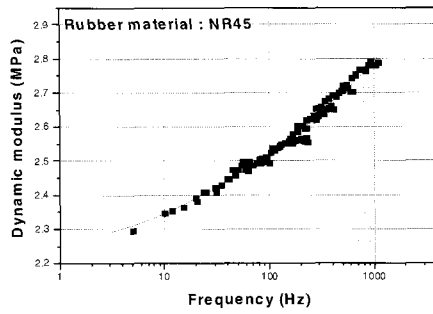
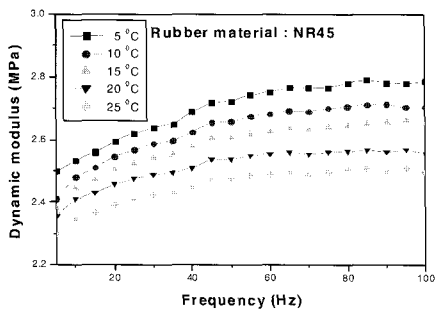


Figure 8. The dynamic property tester.

었다. Figure 8은 동특성 시험기와 지그에 체결된 시편 형상을 나타낸다.

동특성 시험은 4 Hz부터 100 Hz까지 5, 10, 15, 20, 25°C 온도 조건에서 수행되었다. Figure 9(a)는 동특성 시험결과를 나타낸다. 100 Hz 이상의 동강성을 얻기 위해 WLF 모델이 적용되었으며, 1 kHz까지의 동강성을 예측하였다. Figure 9(b)는 1 kHz까지 예측된 동강성을 나타낸다.

고무재료는 기준온도보다 저온상태에서 강성이



(a)

(b)

Figure 9. Variation of dynamic modulus with the frequency (a) superposed dynamic modulus by WLF model (b).

증가되는 특성이 있다. 상온(25°C) 이하의 온도조건에서 측정된 동강성은 상온과 동일한 조건으로 만족시키기 위해 식(2)에 따라 온도보정을 수행하였으며, Figure 9(b)와 같은 마스터 커브로 제시할 수 있다.

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

여기서  $T_0$ 는 기준온도를 나타내며,  $T$ 는  $T_0$ 로 변환되는 온도를 나타낸다. 5~25°C의 온도에서 얻어진 동적 탄성계수들은 25°C를 기준온도로 변환되었으며, 변환에 사용된 보정상수  $a_1$ 과  $a_2$ 는 NR45에서 2.57, -31.1이며, NR55에서 -6.5와 163.8, 그리고 NR65에서 -4.5와 111.2의 값을 갖는다. 5~20°C의 온도조건에서 얻어진 동적 탄성계수들은  $a_1$ 과  $a_2$ 의 보정상수에 의해 25°C조건 마스터 커브를 Figure 7(b)와 같이 얻었다.  $\log a_T$ 는 보정상수( $a_1, a_2$ ), 기준온도, 변환온도에 의해 얻어진 그래프의 이동상수(shift factor)이다.

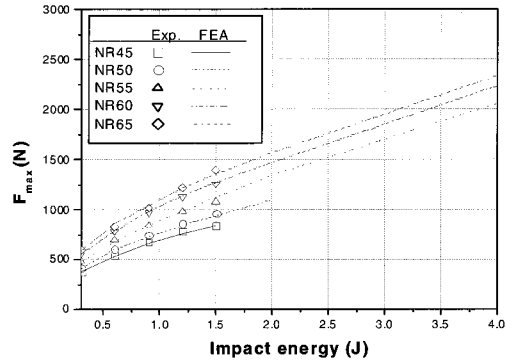
#### IV. 고 찰

##### 1. 동강성 물성 적용에 따른 고찰

Table 5는 동특성 시험과 WLF모형을 적용하여 예측된 동강성( $E_d$ )과 정강성 값을 보여준다. Figure 10은 Table 5의 동적 물성을 적용한 해석결과와 실험결과를 나타낸 그림이다. 실험은 장치 상의 제약으로 인해 1.5 J 까지 실시되었으며, 해석은 4.0 J 까지 수행하였다. Table 6은 고무 경도 변화에 따른 각 충격에너지 값에서의 실험 결과와 해석 결과를 보여 주고 있다. 정적인 물성을 이용한 해석

**Table 5. Dynamic modulus for various rubber hardnesses**

Rubber material	IRHD hardness	$E_d$ : Dynamic modulus (MPa)	$E$ : Stactic modulus (MPa)
NR45	45.0	2.6	2.04
NR55	58.3	5.3	2.82
NR65	71.2	6.9	4.38



**Figure 10.** Maximum impact force for various rubber material from FEA and experiment.

**Table 6. Maximum impact forces from experiment and FEA results**

Rubber hardness	Impact Energy (J)	Maximum impact force (kgf)		
		Experiment	FEA	Error (%)
NR45	0.3	38.62	38.43	-0.49
	0.6	55.03	54.18	-1.57
	0.9	69.07	67.07	-2.98
	1.2	79.60	76.87	-3.55
	1.5	85.05	86.01	1.12
NR50	0.3	41.71	42.10	0.93
	0.6	61.72	61.08	-1.05
	0.9	76.01	74.48	-2.05
	1.2	88.08	86.05	-2.36
	1.5	98.12	95.86	-2.36
NR55	0.3	49.26	48.47	-1.63
	0.6	70.66	69.46	-1.73
	0.9	85.72	86.05	0.38
	1.2	99.85	100.13	0.28
	1.5	109.94	115.09	4.47
NR60	0.3	56.31	56.76	0.79
	0.6	80.03	80.05	0.02
	0.9	98.91	100.14	1.23
	1.2	115.26	116.00	0.64
	1.5	128.08	130.07	1.53
NR65	0.3	60.38	59.99	-0.65
	0.6	84.13	87.34	3.68
	0.9	103.85	105.78	1.82
	1.2	124.28	124.02	-0.21
	1.5	141.88	138.43	-2.49

결과인 Figure 7에서의 실험과 해석 값의 차이인 최대 34%의 오차에 비해, 동적 물성을 이용한 Table 6의 결과는 5% 이내의 오차범위 내에서 유

사하게 일치하는 것을 알 수 있다. 경도 변화와 충격에너지 크기 변화가 해석과 실험 결과의 차이에 끼치는 영향은 크게 두드러지지 않음을 알 수 있다.

## 2. 고무 경도변화에 고찰

NR45~NR65 경도변화에 따른 충격흡수율은 최대 충격하중을 측정하여 얻어졌다. 식(1)을 적용하여 고무가 삽입되지 않은 충격시편에 대한 결과와 고무가 삽입된 시편의 최대충격하중을 충격흡수율로 제시하였다. Figure 11은 충격에너지 크기에 따른 충격흡수율을 고무 경도 변화에 따라 표시한 그림으로서, 충격에너지가 증가할수록 충격흡수율은 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. Figure 12

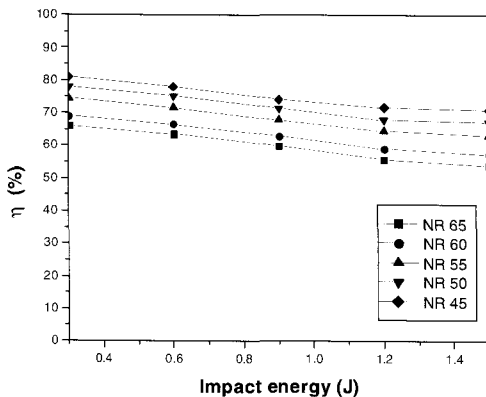


Figure 11. Impact absorbing ratio vs. impact energy for various IRHD hardness.

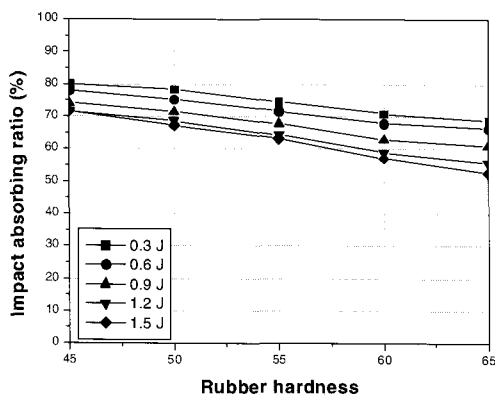


Figure 12. Impact absorbing ratio vs. rubber hardness for various impact energy.

는 고무 경도에 따른 충격흡수율을 충격에너지 변화에 따라 표시한 그림으로서, 경도가 높아질수록 충격흡수율은 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. NR45고무의 경우 충격흡수율은 70~80%, NR 65의 경우는 65%에서 55% 정도의 흡수율을 보였다.

## V. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석에서 고무재료의 충격물성을 입력하기 위한 동강성을 측정하고 예측하였다. 동강성을 적용한 해석결과는 시험결과와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 정적물성시험으로 얻어진 고무재료의 물성을 이용하여 계산된 유한요소해석결과는 실험결과와 최대 30%이상의 차이가 나타났으나, 동강성을 적용한 해석결과는 실험 결과와 5% 이내에서 잘 일치하였다.

2) 고무구조물이 충격하중을 받으면 높은 주파수의 파형이 전달되며, 충격 특성을 해석하기 위해서는 WLF모형을 적용하여 얻은 동강성 값을 이용하여야 한다.

3) 고무의 경도가 높아질수록 충격흡수율은 선형적으로 감소하는 경향을 보였으며, 충격에너지가 커질수록 충격흡수율은 감소하는 경향을 나타내었다.

## 참 고 문 헌

1. A. N. Gent, *Engineering with Rubber*, Hanser (1992).
2. H. Ho, "A Finite Element Analysis of the Impact-Contact Problem of a Portable Telephone Using I-deas and ADIA," *Computers and Structures*, **56**(2), 379-409 (1995).
3. Y. Masso-Moreu and N. J. Mills, "Impact Compression of Polystyrene Foam Pyramids," *International Journal of Impact Engineering*, **28**(6), 653-676 (2003).
4. F. Iannace, S. Iannace, G. Caprino, and L. Nicolais, "Prediction of Impact Properties of Polyolefin Foams," *Polymer Testing*, **20**(6), 643-647 (2001).
5. T. Kurakawa and D. Urabe, "Mechanical properties of Golf Balls under Impact Loading," *Transaction of*



- JSM E A*, **68**(666), 191-198 (2002).
6. C. M. Harris, *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill (1988).
  7. W. D. Kim, W. S. Kim, and C. S. Woo, "Test Method of Rubber Material Model for Finite Element Analysis," *Proceedings of IRC 2001*, 270-275 (2001).
  8. HKS, *ABAQUS Theory Manual*, HKS Inc (1998).
  9. G. Ramorino, D. Vetturi, D. Cambiaghi, A. Pegoretti, and T. Ricco, "Developments in Dynamic Testing of Rubber Compounds: Assessment of Non-linear Effects," *Polymer Testing*, **22**(6), 681-687 (2003).