

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.321

# 낙하충격실험을 통한 고무의 충격흡수성능과 전단계수 평가

강동환\* · 서무열\* · 김학인\*\* · 김태원†

(2009년 1월 7일 접수, 2009년 3월 16일 수정, 2009년 3월 25일 심사완료)

## Determination of Shock Absorption Performance and Shear Modulus of Rubbers by Drop Impact Test

Dong-Hwan Kang, Mu-Yeol Seo, Hakin Gimm and Tae-Won Kim

**Key Words :** Drop Impact Test(낙하충격실험), Shock Absorption Performance(충격흡수성능), Shock Absorption Efficiency(충격흡수효율), Shear Modulus(전단계수), Rubber(고무)

### Abstract

Shock absorption performances of various rubbers were investigated by using drop impact test. Several types of rubber such as NR, NBR, EPDM, SR and PUR with three respective levels of shore hardness were used for the test. As in the cases, the absorbed impact energies in rubbers were measured under seven different loads against impact energy between 5-80J. The impact absorption efficiencies of the rubbers then were evaluated by means of both single impact energy condition and summation of all impact energy applied condition. As shown in the results, PUR and EPDM have better shock absorption performances than other rubbers. Further analysis was extended to determine a shear modulus of SR through the finite element implementation with Blatz-Ko model. As can be seen, relatively higher level of absorption energy results in a decreasing shear modulus.

### 1. 서론

고무재료는 우수한 충격흡수성능을 지님에 따라 다양한 산업에서 그 활용도가 증가하고 있다.<sup>(1)</sup> 그러나 고무재료의 충격흡수성능이 고무의 종류, 경도 및 사용환경 등에 의해 다르게 나타남에 따라 실질적인 충격흡수 구조에 적용함에 있어 적합한 고무를 선정하는 데는 상당한 어려움이 따른다. 따라서 충격흡수재의 설계 시 보다 효과적인 고무의 선정을 위해 종류, 경도, 사용환경에 따른 충격

흡수성능의 체계적인 평가가 요구되고 있다.

또한 고무재료는 정적거동과 동적거동이 서로 다르게 나타나며 이는 충격거동 해석에서 요구되는 고무의 특성에도 영향을 미친다. 이에 따라 보다 정확한 고무의 충격해석을 위해 요구되는 고무의 동적 특성, 특히 동적 강성(dynamic modulus)의 평가를 위한 다양한 방법들이 제시되고 있다.<sup>(2-5)</sup>

본 연구에서는 다종 고무의 다양한 충격조건에서의 충격흡수성능을 평가하기 위해 낙하충격실험을 수행하고 충격흡수에너지를 측정하였다. 이를 통해 각 충격조건에서 고무의 충격흡수효율 및 충격흡수-비효율을 평가하였으며, 전체적으로 합당한 충격조건에 대한 성능도 함께 분석하였다. 또한 충격거동 해석 시 요구되는 동적 특성 평가를 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 해석과 실험결과로 얻어진 최대충격하중 값의 비교를 통해 특히 실리콘 고무의 동적 전단계수를 평가하였다. 본 논문에 제시된 방법론 및 제반 결과들은 고무

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : twkim@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0421 FAX : (02)2292-0401

\* 한양대학교 자동차공학과

\*\* 국방과학연구소

를 이용한 각종 제진재 또는 완충재 적용 구조물 설계에 매우 유용할 것으로 생각한다.

## 2. 낙하충격실험

고무의 충격흡수성능을 평가하기 위해 낙하충격 실험을 수행하였으며 7 가지 충격에너지 조건과 15 종의 다종 고무가 사용되었다. 한편 낙하충격 실험을 통해 얻어진 충격에너지(impact energy,  $E_{imp}$ ), 충격흡수에너지(impact absorption energy,  $E_{abs}$ )를 이용하여 각 고무의 해당 충격에너지 조건에서의 충격흡수효율(impact absorption efficiency,  $e_{abs}$ ) 및 충격흡수-비효율(specific impact absorption efficiency,  $e_{abs}/\rho$ )을 평가하였고, 합산한 충격에너지 조건에 대한 효율 및 비효율도 함께 평가함으로써 각 고무의 충격흡수성능을 상대비교 하였다. 여기서 충격흡수-비효율은 충격흡수효율을 각 고무의 밀도로 나눈 값으로 단위밀도당 충격흡수효율을 나타낸다. 이와 함께 고무의 동적 강성을 측정하기 위한 방법으로 실험 시 발생하는 최대충격하중과 유한요소해석 상의 결과를 비교함으로써 동적 전단계수를 추정할 수 있었다. Fig. 1 은 이와 같은 고무의 충격성능 평가 및 동적 전단계수 선정 과정을 나타내고 있다.

### 2.1 시험 고무의 종류 및 특성

고무의 종류에는 성분 및 그 사용목적에 따라 천연, 합성, 내유, 내열, 부틸, 지오폴, 하이프론,

폴리우레탄, 실리콘, 바이톤, 이피디엠 등이 있으며 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되고 있는 천연(NR), 내유(NBR), 이피디엠(EPDM), 실리콘(SR), 폴리우레탄(PUR) 고무 등 5 종을 선정하여 실험을 수행하였으며 선정된 고무의 일반적인 물리적 성질은 Table 1 에 나타내었다. 또한 경도에 따른 성능 차이를 확인하기 위해 각 고무는 30-90 쇼어 정도(degree of shore hardness) 범위 내에서 3 가지 다른 수준을 갖도록 추가로 선정하였다. 각 고무는 쇼어 경도계를 통해 경도값을 측정 후 사용하였으며 고무의 경도는 고무제조 시 가황(vulcanization)성분의 함량에 따라 조절 될 수 있다. 이상과 같이 하여 다종 고무의 종류는 총 15 가지로 구분하여 실험을 수행하였으며 각 고무의 종류 및 경도와 밀도는 Table 2 와 같이 요약하였다.

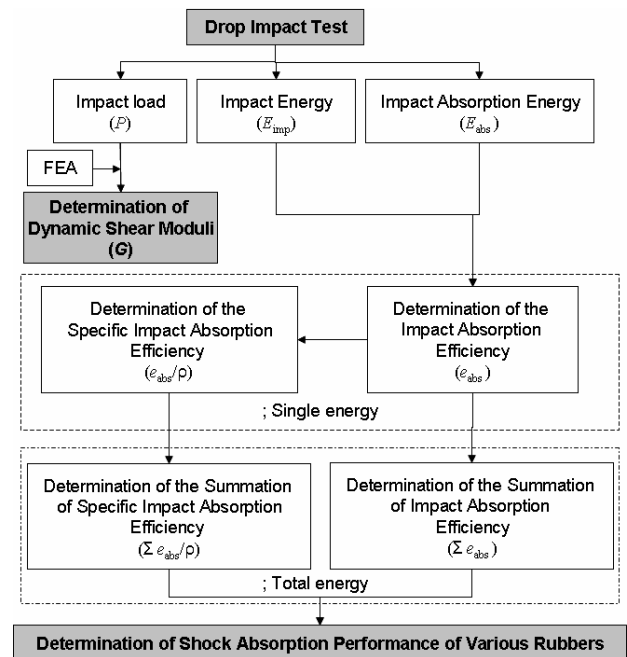
천연고무(NR)는 고무나무로부터 직접 얻어진 수액(Latex)으로 제조되며 기계적 특성이 우수하고 표면 감촉이 좋으며 내마모, 내굴곡성이 우수하나 내열성, 내오존성, 내유성 등이 나쁘며 고무의 점도 차이가 심한 단점이 있다. 여기서 내오존성은 오존 열화에 대한 저항성을 나타내고, 내후성은 대기 중에서 일광, 풍우, 건습 등의 자연의 작용에 저항하여 쉽게 변하지 않는 성질을 나타낸다. 내유고무(NBR)는 합성고무로서 정확한 명칭은 아크릴로니트릴-부타디엔 고무이며 내유성, 내마모성, 내열성, 내용제성 등이 우수한 장점이 있다. 주요

**Table 1** Mechanical properties of the rubbers [4]

Rubber types	U.T.S. (kg/cm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Shore hardness
NR	70-420	200-700	40-80
NBR	200-400	200-600	40-90
EPDM	150-200	300-400	30-80
SR	40-80	300-400	30-80
PUR	70-300	700	50-100

**Table 2** Rubber types with degrees of shore hardness and density

Rubber types	Degree of shore hardness (density, g/cm <sup>3</sup> )		
NR	40 (1.35)	60 (1.43)	90 (1.57)
NBR	40 (1.24)	70 (1.28)	90 (1.25)
EPDM	30 (1.16)	50 (1.2)	80 (1.25)
SR	30 (1.11)	50 (1.14)	80 (1.25)
PUR	50 (1.23)	70 (1.26)	80 (1.14)



**Fig. 1** Schematic diagram showing the evaluation process

용도로는 O-링, 크랭크 샤프트, 밸브 팩킹, 고온 호스, 인쇄 부품 등으로 널리 사용되고 있다. 이피디엠고무(EPDM)의 정식 명칭은 에틸렌 프로필렌 고무이며 내열성, 내오존성, 내후성, 전기적 특성 등이 우수하나 내유성은 좋지 않다. EPDM 고무는 주로 전선피복, 자동차 부품, 건축재료, 내열, 내후 및 내염, 내수성이 요구되는 곳에 주로 사용되고 있다. 실리콘고무(SR)는 내열성, 내한성, 내후성, 내오존성 등이 우수하며 가공성 또한 양호하고 폴리우레탄고무(PUR)는 내후성, 내열성, 내오존성이 우수하며 자동차 부품으로 널리 사용되고 있다.

2.2 낙하충격실험 (drop impact test)

낙하충격실험은 자유낙하형 충격시험기(Dynatup 9250HV)를 사용하였으며 시험기는 프레임, 충격자, 로드셀(load cell) 및 각종 센서 등으로 구성되어 있고 충격자가 임의의 높이로부터 자유낙하하여 운동에너지를 발생시키게 된다. 설치된 시험편에 충격자가 충돌하면 바닥의 로드셀을 통해 충격하중을 측정하고 또한 충격에너지 센서(tub) 및 낙하속도 감지센서를 통해 충격에너지를 측정한다.

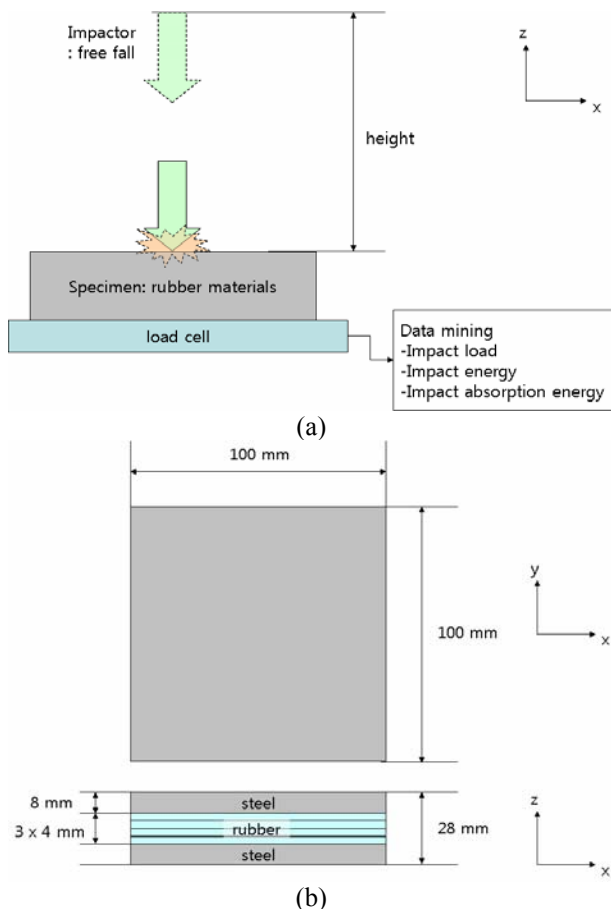
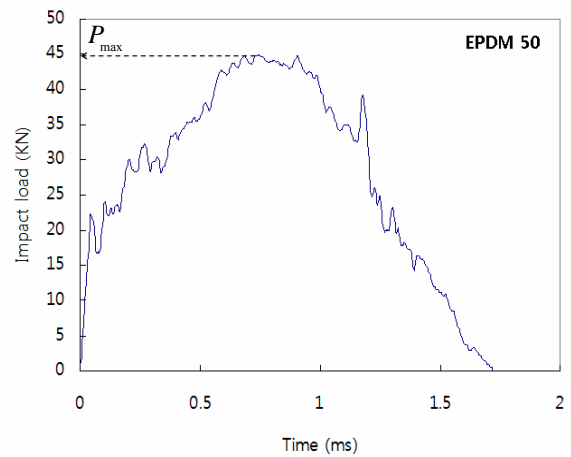


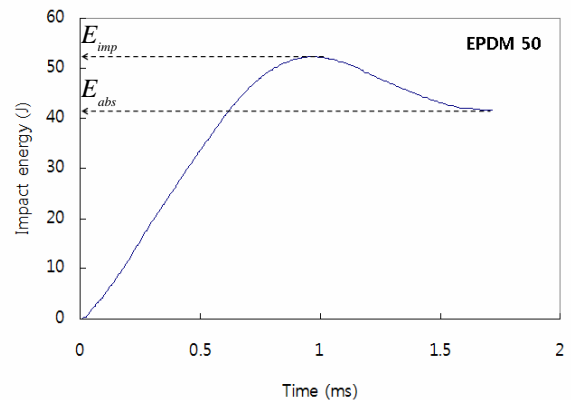
Fig. 2 Schematic diagrams showing (a) the drop impact test and (b) the test specimen.

실험에 사용된 충격자는 질량이 10.75 kg 이고 반추형으로서 충격부의 곡률반경은 6.35 mm 이다.

시험편은 가로, 세로 100 x 100 mm 와 두께 3 mm 를 갖는 고무를 4 장 적층하고 충격자에 의한 국부적 파손을 고려하여 8 mm 두께의 철판으로 적층고무의 상하부에 추가로 적층하여 전체 두께 28 mm 로 제작하였다. 따라서 실질적인 충격흡수 에너지는 철판과 고무로 구성된 시험편을 통해 측정되었으며 고무의 종류 및 경도를 달리하여 측정함으로써 다중 고무간의 충격흡수성능을 상대비교하였다. 시험편의 충격에 의한 철판상부의 국부적 소성변형은 채택하지 않았으며 따라서 철판에 의해 흡수되는 에너지를 일정하게 유지하기 위해 상부의 국부 압입(local indentation) 및 굴곡 발생 시 교체, 시험하였다. Fig. 2(a)와 (b)는 각각 낙하충격 실험의 구성도와 사용된 시험편의 형태 및 치수를 나타내고 있다.

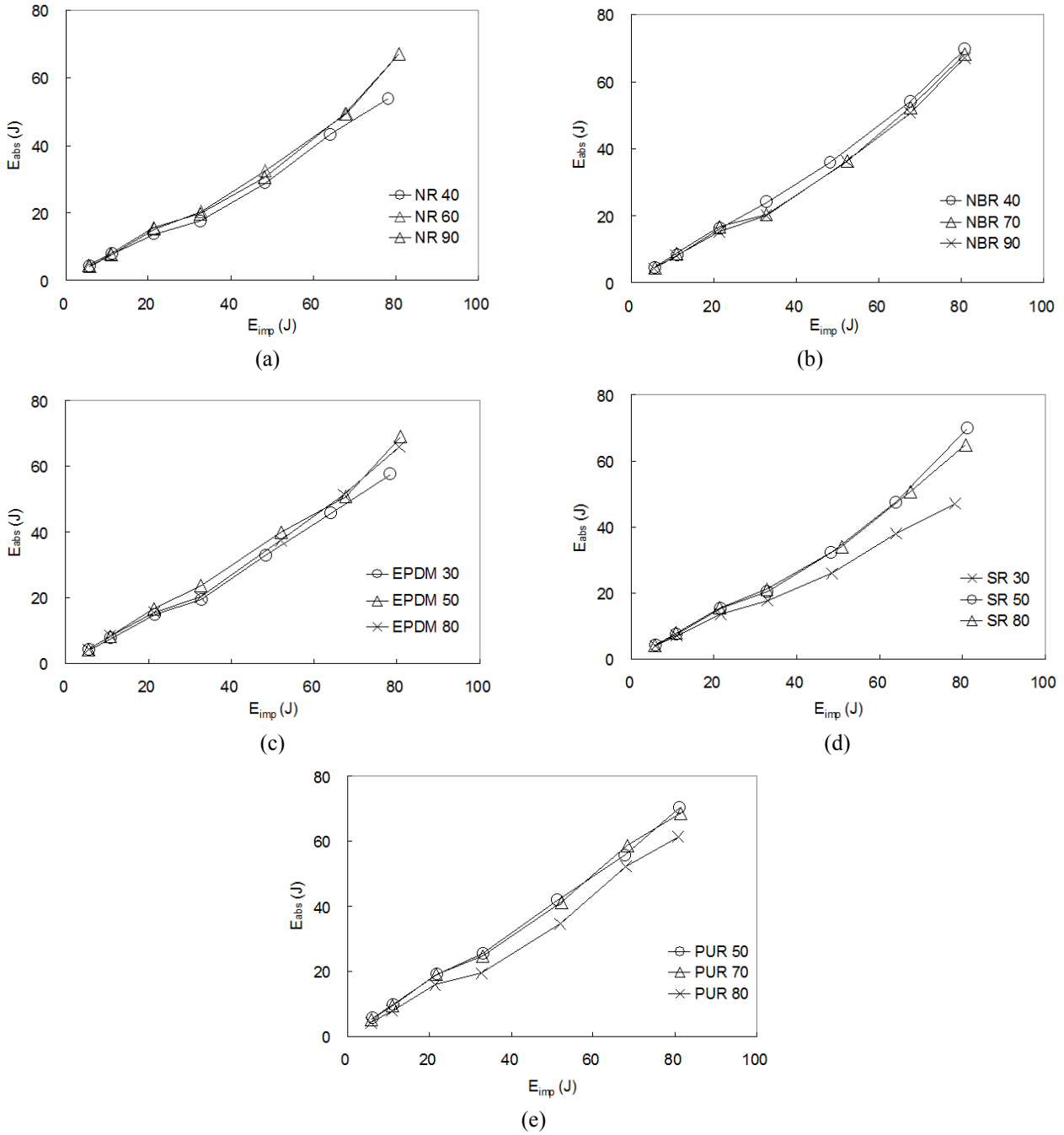


(a)



(b)

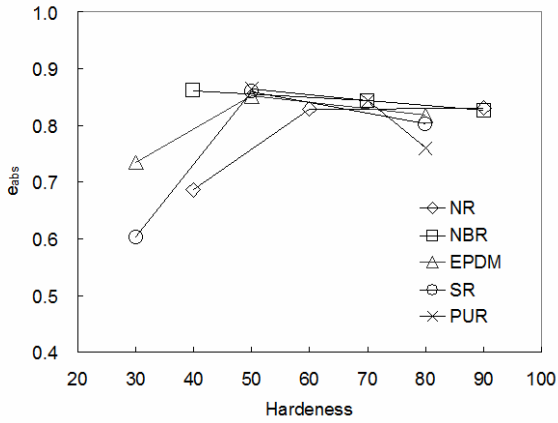
Fig. 3 Typical curves for the analysis: (a) impact force against time and (b) impact energy and absorption energy of the EPDM 50.



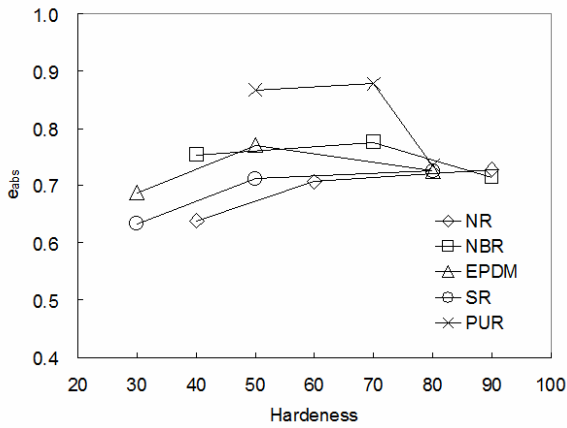
**Fig. 4** Impact absorption energies against impact energies of various rubbers: (a) NR, (b) NBR, (c) EPDM, (d) SR and (e) PUR

실험조건은 낙하충격에너지에 따라 다양한 하중 조건을 고려하기 위해 5-75J 범위 내에서 각 고무당 7 가지 조건으로 선정하였다. 시험기에 설정된 충격에너지의 목표조건은 5, 10, 20, 30, 45, 60, 75J 였으나, 실제로 가해진 충격에너지는 목표조건에 비해 다소 크게 측정됨에 따라 실제 계산에는 측정된 값을 이용하였다. 한편 동일 목표조건에 대해 반복 측정된 충격에너지가 대체로 일치함에 따

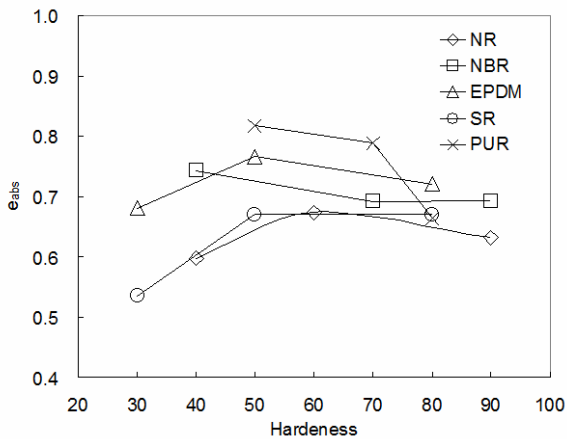
라 실측된 값을 목표조건과 동일시 하였다. 충격 에너지 조건을 7 가지로 상세히 구분한 이유는 다양한 충격에너지 조건에서의 데이터를 확보하기 위함이다. 특히 10.75 kg 의 질량을 갖는 충격자를 통해 5-75J 의 충격에너지를 발생시키기 위해서는 시험편 충돌 직전에 약 0.96-20.1 m/s 의 수직방향 속도가 요구되는데, 이는 조건에 따라 고무소재가 정적 상태에서 준-정적상태(quasi-static state, 대체로



(a)



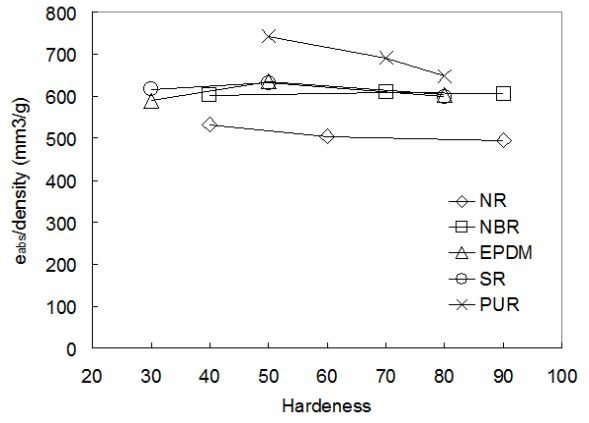
(b)



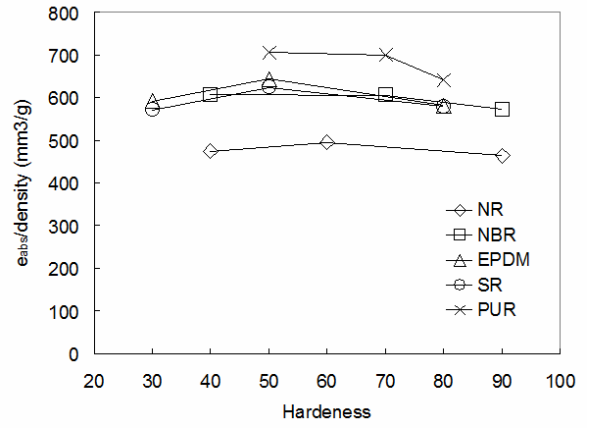
(c)

**Fig. 5** Impact absorption efficiencies against hardness under various impact energies: (a) 5, (b) 45 and (c) 75 J

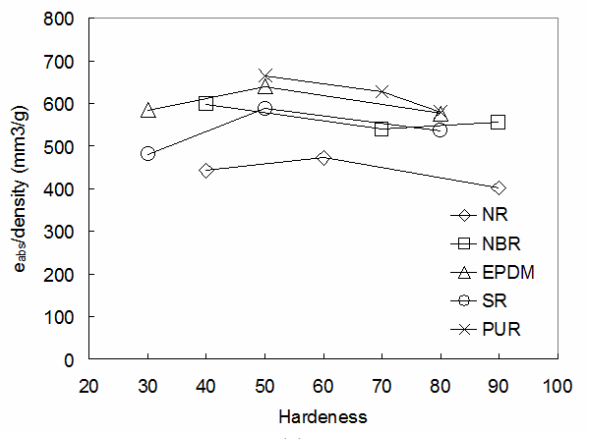
50 m/s 이하)로 변하는 천이구간에 해당한다. 따라서 천이영역에서의 데이터 확보의 어려움을 극복하기 위해 비교적 상세한 조건을 선정하였다. 아울러 유한요소해석을 통한 전단계수 추정을 위해 많은 조건에서의 데이터 확보를 위한 목적도 있다. 또한 낙하충격실험은 재현성을 고려하여 각 조건



(a)



(b)



(c)

**Fig. 6** Specific impact absorption efficiencies against hardness under various impact energies: (a) 5, (b) 45 and (c) 75 J

당 반복실험을 3 회 실시하였으며 결과의 평균값을 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

서로 다른 종류 및 경도를 갖는 15 가지 고무

에 대해 7 가지 충격에너지 조건으로 낙하충격실험을 수행하였으며 이에 대한 결과는 다음과 같다.

소재의 충격흡수성능을 정량화할 수 있는 인자에는 최대충격하중( $P_{max}$ ), 충격흡수에너지( $E_{abs}$ ) 등이 있으며 최대충격하중은 충격에너지 작용 시 구조물이 받는 충격하중의 최대값으로서 구조물의 굽힘강성 및 충격손상과 밀접한 연관이 있다. 또한 충격흡수에너지는 입사 충격에너지 중 진동, 처짐 등의 탄성변형과 국부 압입 및 충격손상 등의 소성변형에 의해 흡수된 에너지의 합으로 나타낼 수 있다. Fig. 3 은 이러한 최대충격하중 및 충격흡수에너지의 측정 예로, EPDM 50 에 대한 낙하충격실험 결과이며 3(a)는 시간에 따른 충격하중

( $P$ )의 변화이고, 3(b)는 에너지의 변화를 나타내고 있다. Fig. 3(b)에서 에너지의 최대값은 충격자에 의한 충격에너지( $E_{imp}$ )를 나타내며, 3(a)에서 충격하중이 0 이 되는 순간의 충격에너지가 충격흡수에너지( $E_{abs}$ )를 나타낸다. 이는 시험편에 충돌한 충격자가 반발하여 다시 시험편으로부터 떨어지는 순간을 의미하며 시험편의 충격흡수에너지는 이때 결정된다. 측정된 충격에너지 및 충격흡수에너지를 이용하여 충격흡수효율( $e_{abs} = E_{abs}/E_{imp}$ )를 계산하였으며 이를 통해 각 고무의 충격흡수성능을 평가하였다. 또한 충격흡수효율을 다시 각 고무의 밀도로 나눈 값을 통해 충격흡수-비효율( $e_{abs}/\rho$ )을

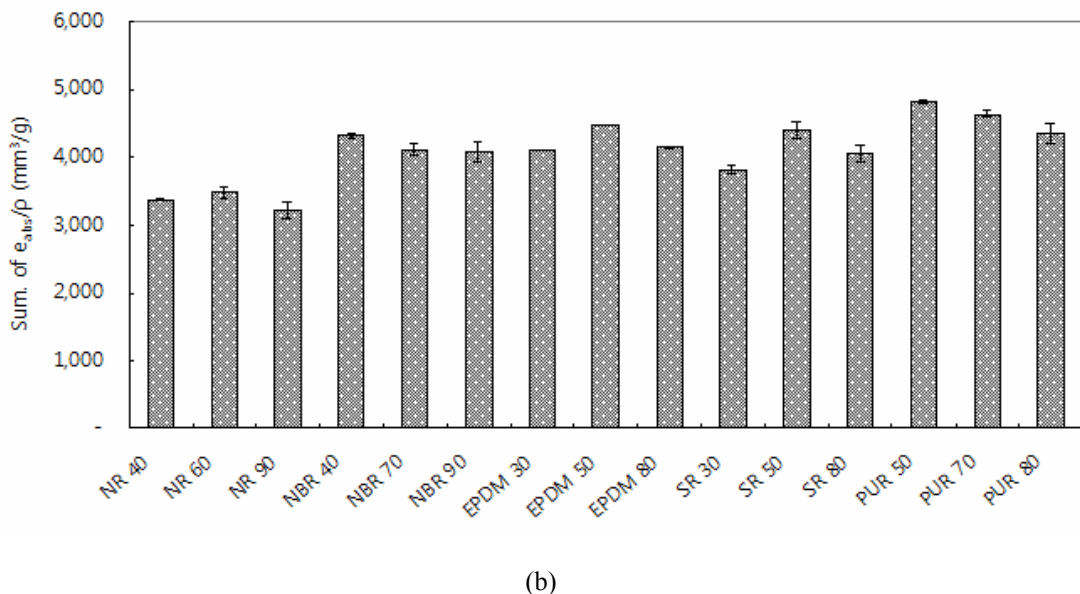
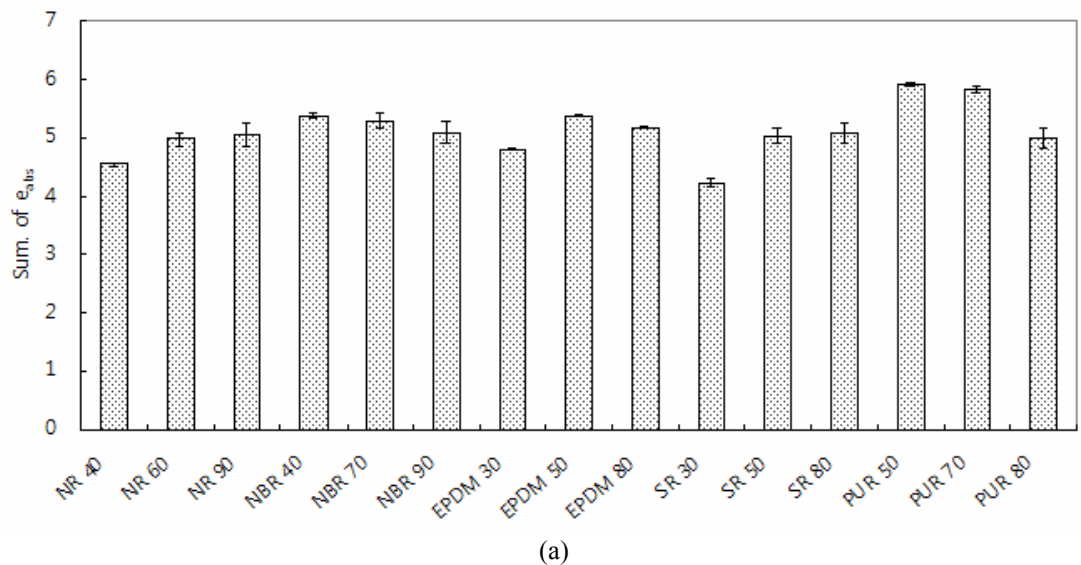


Fig. 7 (a) Total impact absorption efficiencies and (b) total specific impact absorption efficiencies of the rubbers

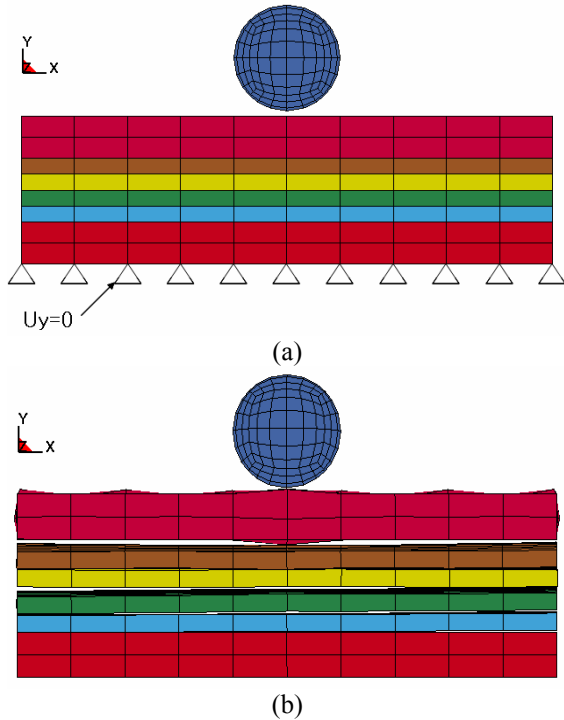


Fig. 8 The finite element model of impactor and specimen: (a) before impact and (b) after impact

평가하였다.

Fig. 4는 각 고무의 충격에너지 및 충격흡수에너지를 나타내고 있으며 4(a)-(c)는 각각 NR, NBR, EPDM, SR, PUR에 대한 결과를 나타내고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이, NR의 경우 NR 60, 90은 유사한 경향을 보이거나 NR 40의 경우 충격흡수에너지량이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. NBR 및 EPDM은 동종의 고무에서는 경도에 상관없이 비교적 유사한 경향을 보인다. SR에서는 SR 30이, PUR의 경우에는 PUR 80이 동종의 다른 경도에 비해 충격흡수에너지량이 다소 떨어지는 경향을 보임을 확인하였다.

### 3.1 충격흡수효율 및 충격흡수-비효율

Fig. 5는 Fig. 4의 충격에너지 및 충격흡수에너지 결과로부터 계산된 충격흡수효율이며, 5(a)-(c)는 각각 5, 45, 75J의 충격에너지 조건에서의 결과를 나타내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 5, 45J의 충격에너지 조건에서는 PUR 50 및 70이 가장 우수한 충격흡수효율을 나타내고 있으나 75J 조건에서는 NBR 40, PUR 50, EPDM 50 등이 우수한 성능을 나타내며 그 차이는 매우 작은 것으로 나타났다. 이는 동일한 고무에서도 충격에너지 조건에 따라 그 성능에 차이가 있음을 의미하며, 다종 고무간의 성능차이 역시 충격에너지 조건에 따라 달라짐을 확인할 수 있는 결과이다.

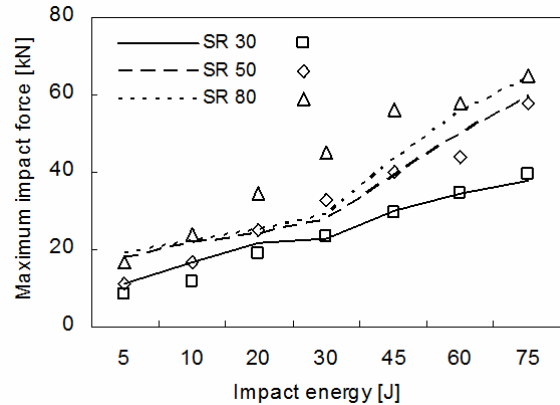


Fig. 9 The maximum impact force for various hardness of SR from FEA results (line) and experiments (symbol)

Fig. 6은 각 고무의 충격흡수-비효율을 나타내고 있으며 6(a)-(c)는 각각 5, 45, 75J의 충격에너지 조건에서의 결과를 나타내고 있다. 결과에서 보듯이 5, 45J 조건에서는 충격흡수효율과 유사하게 PUR 50, 70이 우수한 성능을 나타내고 있으며 다른 고무와의 차이가 크지 않음을 알 수 있고, 또한 75J의 조건에서는 SR 50 및 EPDM 50이 가장 우수한 성능을 나타냄에 따라 충격흡수-비효율을 고려할 경우 충격흡수효율에서의 성능순위가 뒤바뀔 수 있음을 확인하였다.

### 3.2 전체 충격에너지 조건에 대한 충격흡수효율 및 충격흡수-비효율

각 고무의 넓은 범위에서의 충격조건에 대한 충격흡수성능을 평가하기 위해 전체 충격에너지 조건에 대해 충격흡수효율 및 충격흡수-비효율의 합을 계산하여 평가하였다.

Fig. 7은 앞서 얻어진 Fig. 5, 6의 결과를 전체 충격에너지 조건에 대해 합산한 결과를 나타내며, 각 고무에 대해 7(a)는 충격흡수효율의 합(summation of impact absorption efficiency) 및 7(b)는 충격흡수-비효율의 합(summation of specific impact absorption efficiency)을 나타내고 있다. 그래프에서 막대 상부에 표시된 오차막대는 데이터의 표준편차를 의미한다. Fig. 7(a)에서 알 수 있듯이, 전체 충격에너지 조건에 대한 충격흡수효율의 합의 경우 PUR 50, 70이 가장 우수한 성능을 나타내고 있으며 이어 EPDM 50, NBR 40, 70 등이 우수한 성능을 보인다. 그러나 Fig. 7(b)의 충격흡수-비효율의 합에서는 PUR 50, 70, EPDM 50, SR 50, NBR 40 등의 순으로 우수한 성능을 보임에 따라 비효율을 고려할 경우 SR 50 고무가 NBR 40 고무의 성능을 추월함을 확인할 수 있다.

### 3.3 유한요소해석을 통한 전단계수 평가

충격거동 해석에 요구되는 고무의 동적 특성을 평

**Table 3** Shear moduli of SR resulting from the impact test and finite element simulation

Impact energy (J)	Shear modulus (GPa)		
	SR 30	SR 50	SR 80
5	-	-	-
10	0.014	-	-
20	0.022	3.306	-
30	0.1	-	-
45	0.045	1.5	-
60	0.055	0.395	4.5
75	0.064	0.98	2.55
Average	0.055	1.24	3.53

가하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 앞선 낙하충격실험을 통해 얻어진 SR 고무의 충격하중 결과를 이용하여 해석결과와 비교함으로써 적합한 전단계수를 결정하였다. 해석에 사용된 모델 및 결과는 Fig. 8(a)와 (b)에 각각 나타내었으며, 3 차원으로 작성된 해석모델에서 충격자는 강체(rigid body)로 가정하였고 고무의 비선형 재료거동 모델에는 Blatz-Ko 모델을 활용하였다.<sup>(6)</sup> 상하부 철판의 탄성계수는 200 GPa, 프와송비는 0.3, 항복강도는 207 MPa이고<sup>(7)</sup> 해석에 사용된 고무는 SR 30, 50, 80 이다. 해석결과에서 최대충격하중은 시험편에 충돌한 후 반발되는 충격자의 가속도와 질량의 곱으로 계산하였다. Fig. 9는 충격해석결과와 실험결과에서의 최대충격하중을 비교한 것으로 SR 고무의 경도가 30, 50 인 경우에는 비교적 결과가 일치하나 경도가 80 인 경우에는 차이를 보이고 있다. 특히 SR 80 에서 5-10, 60-75J의 충격에너지 조건에서는 비교적 작은 오차가 발생하였으나 20-45J 조건에서는 큰 오차를 나타내고 있다.

Table 3 은 각 충격에너지 조건에 대해 유한요소해석을 통해 얻어진 SR 고무의 전단계수를 나타내고 있다. 임의의 전단계수를 이용하여 유한요소해석을 수행한 후 해석결과로부터 얻어지는 충격하중과 실험결과를 비교하여 오차가 최소가 될 때의 고무 전단계수 값이다. 결과에서 알 수 있듯이, SR 30 의 경우 0.055 GPa, SR 50 의 경우 1.24 GPa, SR 80 의 경우 3.53 GPa 로 전단계수를 평가하였다. 결과에서 얻어진 전단계수가 가해지는 에너지에 따라 변하는 것은 SR 고무 자체의 비선형 크리프거동(time dependent nonlinear creep behavior)에 기인 하는 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

낙하충격실험을 통해 다중 고무의 충격흡수성능 및 전단계수를 평가하였으며 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 낙하충격실험을 통해 얻어진 충격에너지 및

충격흡수에너지를 통해 각 고무의 충격흡수효율을 계산하였으며 이를 통해 고무의 충격흡수성능을 효과적으로 평가할 수 있었다.

(2) 각 충격에너지 조건에서의 충격흡수효율을 계산한 결과, PUR 50 및 70 고무가 가장 뛰어난 성능을 나타내었으며, 특히 5-45J 의 충격에너지 조건에서 확연히 우수한 성능을 나타내었다.

(3) 질량대비 충격흡수성능을 평가하기 위해 충격흡수-비효율을 계산하였으며, 그 결과 5-45J 조건에서는 PUR 50 및 70 고무가 우수한 성능을 나타냈으나 75J 조건에서는 SR 50, EPDM 50, PUR 50 등이 가장 우수한 성능을 나타내었다.

(4) 전체 충격에너지조건에 대해 충격흡수효율 및 충격흡수-비효율을 합산한 결과, 충격흡수효율 면에서는 PUR 50, 70, EPDM 50, NBR 40 순으로 뛰어난 성능을 보였고, 충격흡수-비효율 면에서는 PUR50, 70, EPDM 50, SR 50 순으로 우수한 성능을 보였다.

(5) 유한요소해석을 통해 SR 30, 50, 80 고무에 대한 전단계수 평가를 실시하였으며, 충격거동에서의 전단계수로서 각각의 고무에 대해 0.055, 1.24, 3.53 GPa 의 값을 평가할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다 (계약번호 ADD-06-05-01).

#### 참고문헌

- (1)Gent, A. N., 1992, *Engineering with Rubber*, Hanser.
- (2)Masso-Moreu, Y. and Mills, N. J., 2003, "Impact compression of Polystyrene Foam Pyramids," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 653~676.
- (3)Jannace, F., Iannace, S., Caprino, G. and Nicolas, L., 2001, "Prediction of Impact Properties of Polyolefin Foams," *Polymer Testing*, Vol. 20, No. 6, pp. 643~647.
- (4)Kim, W. D., Kim, D. J. and Lee, Y. S., 2006, "Evaluation of the Dynamic Characteristics of Rubber Structure under Impact force," *Elastomer*, Vol. 41, No. 1, pp. 40~48.
- (5)Kim, W. D., Kim, W. S. and Woo, C. S., 2001, "Test Method of Rubber Material Model for Finite Element Analysis," *Proceedings of IRC 2001*, pp. 270~275.
- (6)2007, *LS-DYNA keyword User's Manual, ver. 971*, Livermore Software Technology Corporation, Vol. 2, pp. 38~95.
- (7)<http://www.matweb.com/>