

방진고무재료의 기계적 특성 예측 및 평가

김원두* · 김완수

(한국기계연구원)

1. 머리말

고무제품은 여러 산업분야에서 제진, 방진, 내진, 충격 흡수 및 완충 재료로 널리 사용되고 있다. 이는 금속과 달리 고무 자체가 내부 마찰에 의한 점탄성 특성으로 인하여 외부에너지를 소산시킬 수 있는 특성을 가지고 있기 때문이다.

우리나라의 고무부품의 설계 및 제작기술은 대부분 경험이나 시행착오적인 방법에 의존해 왔다. 90년대에 들어서 CAE 기술을 이용하여 고무의 변형 거동 해석이 수행되어왔고 이로 인하여 개발기간을 단축시키고 품질향상을 도모할 수 있게 되었다.

방진고무부품의 설계 및 특성 예측을 위해서는 우선 고무재료의 기계적 특성치를 알아야 한다. 본 고에서는 고무탄성체 재료의 역학적 특성과 실험방법을 알아보고, 방진고무의 특성에 대해서 설명하고 사례를 통하여 예측 및 평가방법에 대해서 기술하고자 한다.

2. 고무탄성체의 역학적 특성

2.1 정적 비선형성

고무는 가황과정을 통하여 단순히 얽혀 있던 분자구조를 화학적 접착상태 즉, 가교 상태로 만들

기 점성 고체와 같은 거동을 나타내게 된다. 가교 정도가 클수록 고무의 탄성계수는 증가하게 된다.⁽¹⁾ 카본블랙과 같은 보강제를 첨가하여 기계적 물성을 변화시키기도 한다. 고무는 역학적으로 금속재료와는 달리 상대적으로 작은 하중으로도 대변형이 발생되며 하중과 변형과의 관계가 비선형적이다. 이런 과정에서도 탄성을 유지하는 초탄성을 가지고 있다. 또한, 고무탄성체는 일반적으로 반복하중을 받을 때 분자구조의 재배치로 인하여 상대적으로 강성이 낮아지는 응력완화현상을 보이며, 일정변형을 이상의 변형을 받으면 분자구조의 파손 등으로 인하여 영구변형이 발생하게 된다.

고무와 같은 재료의 거동을 표현하는 초탄성체 모델에서 변형을 에너지 밀도(W)와 응력(σ_{ij})과의 관계는 다음과 같다.⁽²⁾

$$\sigma_{ij} = \partial W / \partial E_{ij}$$

여기서, σ_{ij} 는 2차 Piola-Kirchhoff 응력텐서이며, E_{ij} 는 Green-Lagrange 변형을 텐서이며 다음과 같이 표현된다.

$$E_{ij} = 1/2[F^T F - I]$$

여기서, F 는 변형 구배 텐서(deformation gradient tensor)이며 $F_{ij} = \partial x_i / \partial X_j$ 이다.

단축거동의 경우 Green-Lagrange 변형률(E)

* E-mail : wdkim@kimm.re.kr

및 2차 Piola-Kirchhoff 응력(S_2)는 다음과 같다.

$$E = 1/2(\lambda^2 - 1)$$

$$S_2 = P/A(L_0/L)^2$$

여기서, P 는 외력, A 는 단면적, L_0 는 초기길이, L 은 변형 후의 길이이다.

방진고무는 비선형, 대변형 거동을 보이며 변형을 에너지 함수(W)는 다음과 같이 변형을 불변량 함수와 주연신율의 함수로 나타낼 수 있다.

$$W = W(I_1, I_2, I_3), \quad W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$$

여기서, 변형을 불변량은 주연신율(λ)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

변형을 에너지 함수를 변형을 불변량 함수로 표현한 Mooney Rivlin 모델과 주연신율 함수로 표현한 Ogden 모델이 초탄성 재료에 주로 사용되며 재료가 비압축성일 때 각각 다음 식과 같이 표현된다.⁽³⁾

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

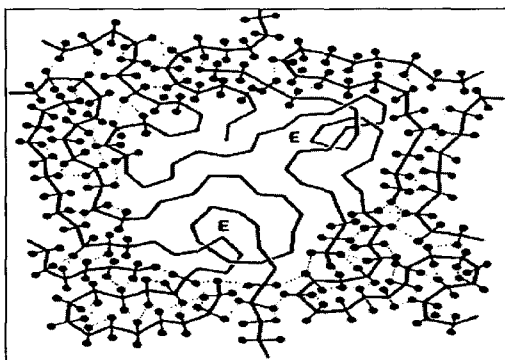


그림 1 가황 고무의 망상 분자구조

$$W = \sum_{n=1}^N \mu_n / \alpha_n (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3)$$

위 식에서 재료상수들(C_{ij} , μ_n , α_n)은 물성시험 등으로 얻어진 응력-변형을 데이터를 이용하여 결정되며, 얻어진 재료상수는 방진고무부품의 유한요소해석 시 재료의 변형을 에너지 함수로 정의되어 고무재료의 물성으로 사용된다.

재료상수를 얻기 위한 물성시험에는 그림 2와 같이 단축인장, 평면인장 또는 순수전단, 단축압축 시험 등이 있으며 단축압축 시험은 이축인장시험으로 대체할 수 있다. 여기서, 단축인장시험 만으

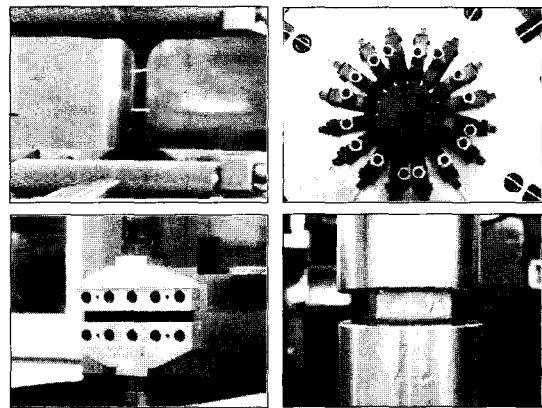


그림 2 고무탄성체 물성시험

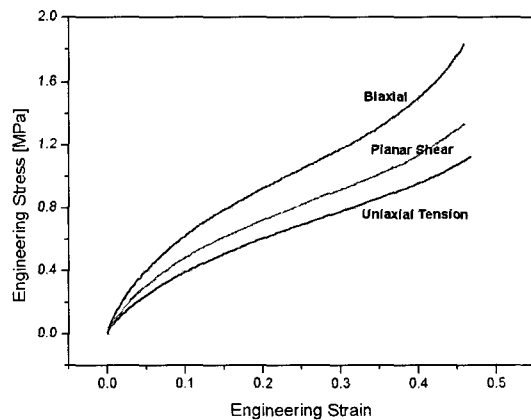


그림 3 정적 물성시험 결과

로는 재료물성을 평가하는데 다소 오류를 범할 수 있으며, 그림 3과 같이 최소한 2개 이상의 시험으로부터 응력-변형률 데이터를 얻는 것이 바람직하다. 압축성이 있는 고무탄성체인 폼(foam)과 같은 재료는 체적탄성계수가 필요하며 이를 위하여 추가적으로 체적압축시험을 수행한다. 고무재료는 반복하중에 의해 강성이 감소하는 Mullins 효과가 나타나므로 시험 시 응력-변형률 관계가 어느 정도 안정화될 때 까지 반복적인 부하-제하과정이 필요하다.⁽⁴⁾ 방직고무로 사용되는 천연가황고무의 경우 경도가 증가할수록 강성이 증가하고 반복하중시의 변형률 수준이 증가할수록 강성이 감소된다. 또한 분위기 온도가 증가할수록 고무의 강성은 감소하며 고온보다 저온에서 특히 강성변화가 크게 나타난다.

2.2 점탄성

고무는 시간에 따라 거동이 변화하는 점탄성 특성을 가지고 있다. 고무의 선형 점탄성 거동을 표현하기 위한 기계적 등가모델은 표 1에서와 같이 Maxwell 모델, Kelvin(Voigt) 모델 및 standard linear 모델이 있다.⁽⁵⁾

Maxwell 모델은 간단한 스프링과 댐퍼가 직렬

로 연결되어 있는 모델로서, 매우 짧은 시간에서는 단순히 스프링처럼 거동하나 댐퍼가 응답하는데 시간이 걸리며, 오랜 시간이 지나는 경우, 댐퍼의 응답만 남아 응력은 제로에 가깝게 된다. Kelvin 모델은 순간적으로 댐퍼를 변형시키기 위해서는 무한대의 힘이 요구되므로 응력완화시험에는 사용할 수 없다. Standard linear 모델은 위의 두 모델을 결합한 모델로서 탄성 및 점탄성 특성을 모두 표현하고 고무와 같은 특성을 잘 나타낸다. 점탄성 거동을 해석하기 위하여 전단완화함수 $g(t)$ 가 필요하며 이는 $t=0$ 에서 γ 를 가하고 일

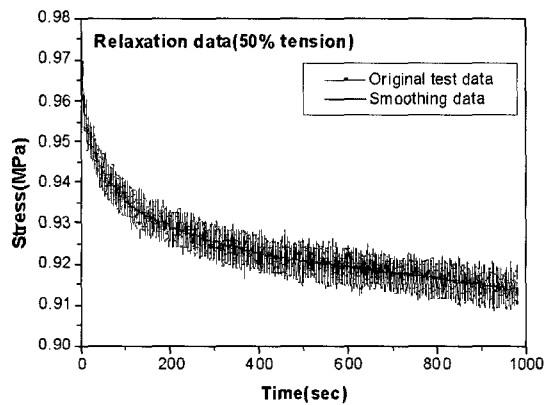


그림 4 고무재료 응력완화시험 결과

표 1 고무의 선형 점탄성 거동의 해석 모델

| 모델 | 응답 | 방정식 | 특성 |
|----|----|--|---|
| | | $\sigma = \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon}$ | <ul style="list-style-type: none"> - 탄성 특성 표현 - 정적 하중에서의 변형을 unloading시 대부분 회복함 |
| | | $\sigma = E\epsilon + \eta \dot{\epsilon}$ | <ul style="list-style-type: none"> - 점탄성 특성 표현 - 변형의 순간 응답 및 unloading시에 회복 되지 않는 flow를 설명 못함 |
| | | $\sigma + \left[\frac{\eta_1}{E_0 + E_1} \right] \dot{\sigma} = \left[\frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1} \right] \epsilon + \left[\frac{E_0 \eta_1}{E_0 + E_1} \right] \dot{\epsilon}$ | <ul style="list-style-type: none"> - 탄성, 점탄성 특성 표현. - 가교 재료 (rubber)에 적합함 |

정하게 유지시키는 전단완화시험을 통해서 가능하다. 그림 4는 완화시험을 통한 응력완화곡선을 나타낸 것이다.

2.3 동특성

고무재료의 정적물성치는 변형을 에너지함수로 표현되는 반면에 동적물성치는 일반적으로 저장탄성계수 및 손실탄성계수로 나타내어지는 복소탄성계수로 표현된다. 이러한 방진고무의 동적 물성치를 얻기 위하여 한 쪽에는 정현파 변위나 하중을 주고 다른 쪽에서 하중이나 변위를 측정한다. 동적 응력성분과 변형률 진폭 비를 이용하여 저장탄

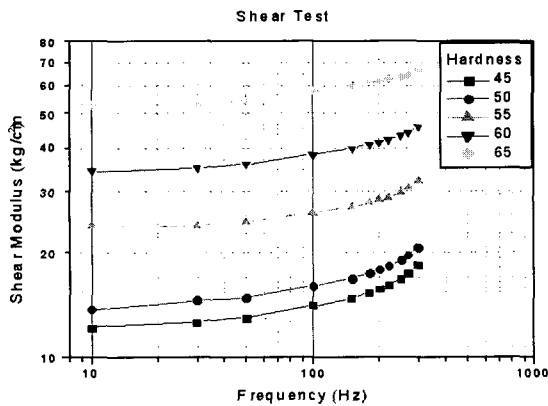
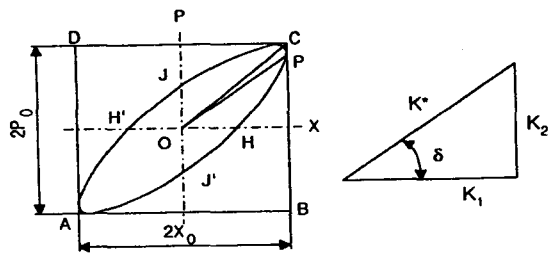


그림 5 방진고무의 주파수 특성



$$\begin{aligned}
 \text{동스프링상수 } K^* &= P_0/x_0 \\
 \text{저장스프링상수 } K_1 &= K^* \cos \delta \\
 \text{손실스프링상수 } K_2 &= K^* \sin \delta
 \end{aligned}$$

그림 6 동적 하중-변위 곡선을 통한 동특성 계산

성계수(G_1), 손실탄성계수(G_2) 및 고무재료의 감쇠의 크기를 나타내는 양인 손실계수(η)를 구할 수 있다. 그림 5는 가황고무의 주파수 특성으로 100 Hz 이하의 저주파수 영역에서 저장탄성계수는 주파수와 관계가 거의 없게 나타난다.

방진고무의 동특성 평가 방법에는 비공진법과 공진법이 있다. 비공진법으로는 일반적으로 그림 6과 같이 하중-변위 곡선을 통하여 동스프링상수 등을 구할 수 있다.

3. 방진고무의 특성

3.1 방진고무 설계 요구사항

그림 7은 방진고무제품의 기능 및 성능향상 방안에 대해서 설명하고 있다. 그림 8은 방진고무의 동특성 설계 요구사항을 설명하고 있으며, 방진고무의 동특성을 향상시키기 위해서는 동 배율은 낮고 손실계수는 크게 하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 손실계수를 높이기 위한 방법으로는 충전제 또는 수지, 금속분말 등의 첨가방법이 이용되고 있으며, 동 배율을 낮추기 위해서는 고무 분자 끝의 자유 고리의 변성 및 유리섬유 강화 등의 방법이 있다.

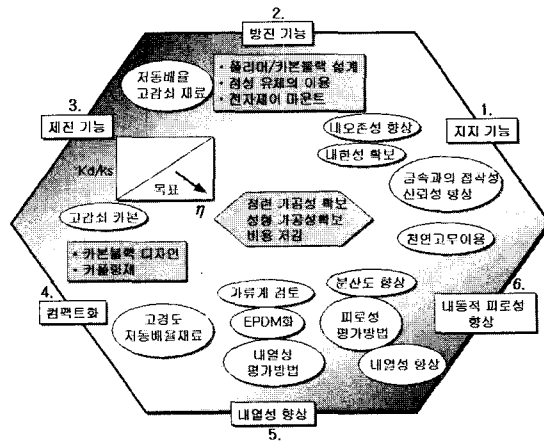


그림 7 고무의 기능 및 성능향상 방안

3.2 방진고무의 감쇠특성

점성 감쇠를 동반하는 1-자유도계 강제진동 모델은 질량 m , 동강성 k_d , 감쇠계수 c 로 구성되고, 이 모델이 지지 기반과 연결된 상태에서 질량 m 에 강제 조화 진동이 작용한다고 할 경우, 기초에 전달되는 진동 전달률, τ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{F_{TR}}{F_0} = \sqrt{\frac{1 + \eta^2 (f/f_0)}{1 - (f/f_0)^2 + \eta^2 (f/f_0)^2}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_d}{m}}, \quad \eta = \frac{c}{\sqrt{mk_d}}$$

여기서, F_{TR} 은 지지 기반에 전달되는 힘, F_0 는 강제력의 진폭, f 는 가진 진동수, f_0 는 고유 진동수, η 는 감쇠비를 나타낸다.

이 식에서 진동절연 특성을 나타내는 진동 전달률은 고유진동수 f_0 및 감쇠비 η 에 깊이 관련되어 있는 것을 알 수 있다. 위 식을 이해하기 위해서 횡축에 진동수비(f/f_0), 종축에 진동의 전달률(τ)을 표시하고, 동강성 k_d 와 감쇠비 η 의 변화에 따라 전달률이 어떤 거동을 보이는가를 그림 11에서 설명한다. 외부에서 가진되는 진동수 f 가

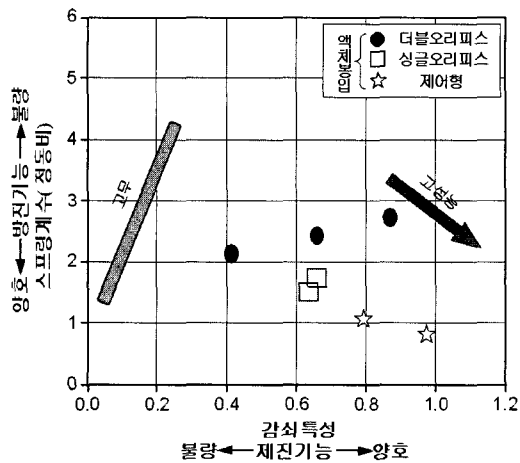


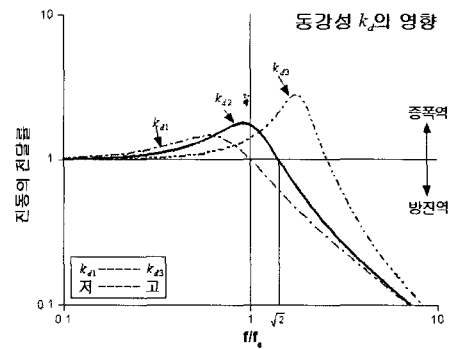
그림 8 방진고무의 동특성 설계 요구사항

증가해 가면서 진동 전달률이 정확히 1이 되는 진동수 f 는 고유 진동수 f_0 에 대해서 $f = \sqrt{2} f_0$ 일 때이다.

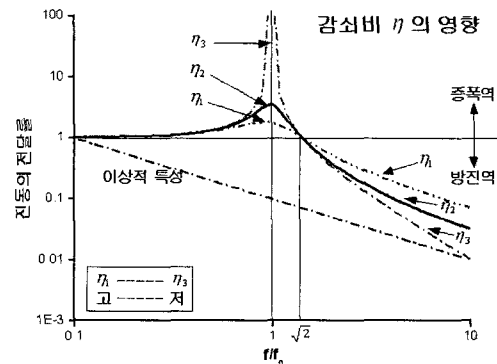
그림 9(a)에서처럼 방진 설계의 목표가 되는 진동수 f 를 $f > \sqrt{2} f_0$ 의 방진 영역에 포함시키기 위해서는 동강성 k_d 를 충분히 작게 할 필요가 있고, 그림 9(b)에서처럼 낮은 진동수에서 피할 수 없는 공진현상을 가능한 한 저감하기 위해서는 감쇠비 η 를 높게 하면 진동 진폭을 낮출 수 있음을 알 수 있다.

3.3 방진고무의 특성 예측

방진고무는 하중과 변위의 관계가 비선형, 점탄



(a) 동강성 영향



(b) 감쇠비 영향

그림 9 방진고무의 성능에 영향을 주는 인자

특집 · 흙 · 차음재/제진재

성 특성으로 인하여 설계 시 어려운 점이 있다. 그러나 변형이 작은 부품이나 전체 시스템에서 방진고무에 상대적으로 작은 하중이 걸리는 곳에서는 선형으로 간주하여 설계하는 것은 충분히 타당성이 있다. 이는 응력-변형을 곡선에서 초기 선형구간의 기울기를 탄성계수로 이용하거나, 그림 10과 같이 경도와 전단계수의 관계식을 이용할 수

| 재료 | 경도(Hs)-전단계수(G, MPa) 관계식 |
|------|--------------------------------------|
| NR | $H_s = \frac{G}{G+0.730} \times 100$ |
| SBR | $H_s = \frac{G}{G+0.666} \times 100$ |
| NBR | $H_s = \frac{G}{G+0.578} \times 100$ |
| HR | $H_s = \frac{G}{G+0.657} \times 100$ |
| CR | $H_s = \frac{G}{G+0.700} \times 100$ |
| EPDM | $H_s = \frac{G}{G+0.662} \times 100$ |

그림 10 경도와 전단계수 관계식

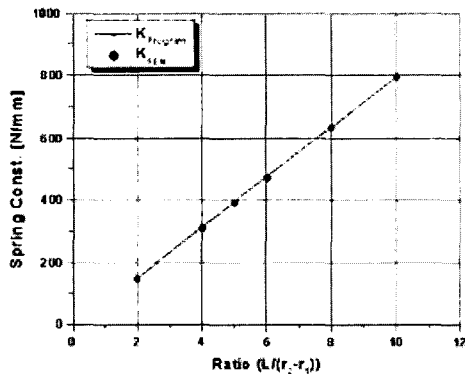
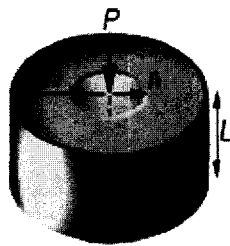


그림 11 설계식을 이용한 고무부싱의 정강성 평가

324 · 한국소음진동공학회지 · 제13권 제5호, 2003년

있다.⁽⁶⁾ 방진고무의 형상이 비교적 단순하고 변형이 작은 경우 정강성 설계식을 유도하여 이용할 수 있으며 그림 11은 일례로 설계식을 이용하여 축방향 전단하중을 받는 고무부싱의 정강성을 평가한 것이다.

방진고무가 대변형을 받거나 형상이 복잡해지면 설계식을 유도하는 데 매우 어렵기 때문에 이 때는 비선형 유한요소해석을 이용한다. 유한요소해석에서 고무는 대변형으로 인한 요소의 찌그러짐 등으로 해의 수렴성이 떨어지며, 때에 따라서는 요소 재분할과정이 필요하다.⁽⁷⁾ 일반적으로 유한요소해석을 통하여 적절한 고무 경도를 선택하거나 형상을 변화시켜 정강성 계수를 조절한다. 또한, 변형률 분포를 통하여 취약부위를 예측하거나 피로수명을 예측하는데 이용할 수 있다.⁽⁸⁾ 그림 12는 자동차에서 엔진으로 차체에 전달되는 진동

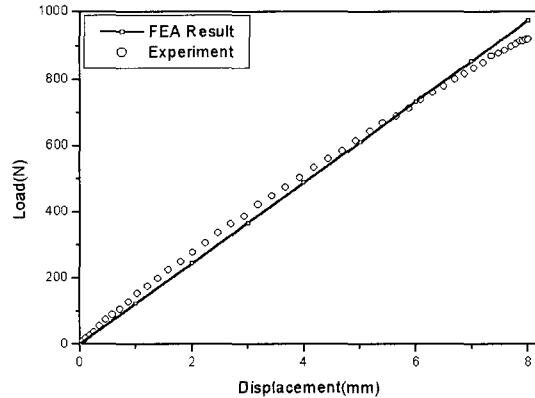
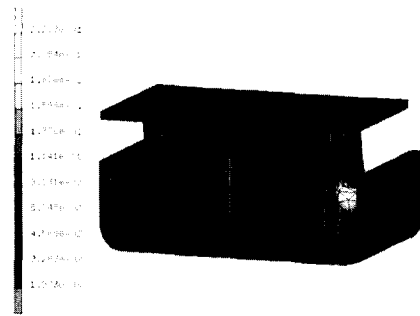


그림 12 엔진마운트의 유한요소해석

을 저감시키는 엔진마운트에 횡방향 하중이 작용 시 유한요소해석을 통한 변형률 분포와 하중-변위 관계를 실험결과와 비교한 것이다.

4. 맺 음 말

방진고무부품의 설계 및 특성 예측을 위해서 필요한 고무탄성체 재료의 역학적 특성과 실험방법과 방진고무의 특성 평가에 대해서 소개하였다.

그간 고무류 기계부품의 설계, 해석 및 평가에 관한 연구 개발 투자는 자동차 방진고무 업계를 중심으로 부품 설계 시스템 구축과 내구성 및 신뢰성 향상을 목적으로 진행되어 왔다. 이 분야에 대한 국내 연구개발 투자는 다른 기술 분야에 비해 상대적으로 미비하였으나 세계 일류화를 지향하는 제품에 방진고무류 부품의 사용이 날로 증가하고 품질 및 성능향상에 꼭 필요한 핵심기술로 대두되고 있음을 감안할 때 방진고무에 대해서 많은 관심을 가져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Indian Rubber Institute 1998, "Rubber Engineering," McGraw-Hill.
- (2) Fung, Y. C., 1965, "Foundations of Solid Mechanics," Prentice-Hall.
- (3) Alan N. Gent, 1992, "Engineering with Rubber," Hanser.
- (4) Brown, R. P., 1996, "Physical Testing of Rubber," Chapman & Hall.
- (5) MSC Software Co, 2001, "Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers," Technical Paper.
- (6) 방진고무연구회 1998, "신판 방진고무," 일본 철도차량공업회.
- (7) MARC User's Manual.
- (8) 김완두 외, 고무류기계부품 통합설계시스템 개발, KIMM 연구보고서, 2001.