

# 방진고무부품의 유한요소해석 및 수명예측 기술

김 완 두 · 김 완 수

## 1. 서 론

고무탄성체는 일상생활에서 뿐만 아니라 산업전반에서 없어서는 안될 중요한 소재로서 사용되고 있다. 최근에는 IT, BT, NT등의 첨단기술 분야에도 사용되어 적용 분야가 더욱 확대되고 있다.

고무는 가황과정을 통하여 단순히 얽혀 있던 분자구조를 화학적 접착상태 즉, 가교(crosslink) 상태로 만들어 점성 고체와 같은 거동을 나타내게 된다. 가교 정도가 클수록 고무의 탄성계수는 증가하게 되며,<sup>1</sup> 카본블랙과 같은 충전제(filler)를 첨가하여 기계적 물성을 향상시키기도 한다. 그림 1은 가황 및 미가황 고무, 플라스틱, 금속 등의 온도에 따른 탄성계수의 경향을 나타낸 것이다.

우리나라의 고무부품의 설계 및 제작기술은 대부분 경험이나 시행착오적인 방법에 의존해왔다. 90년대에 들어서 CAE(computer aided engineering) 기술을 이용하여 고무의 변형 거동 해석이 수행되어왔고 이로 인하여 개발기간을 단축시키고 품질향상을 도모할 수 있게 되었다.

그림 1은 각 소재의 탄성계수를 보여주는 그림이다. 고무의 탄성계수는 철강 소재의 약 10만분의 1, 플라스틱 소재의 약 1000분의 1의 값을 갖는다.

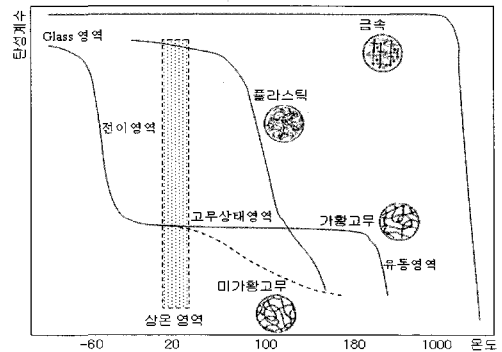
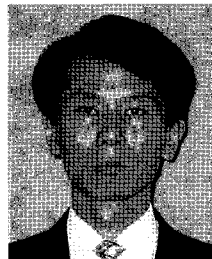


그림 1. 고무재료와 타 재료의 비교.



김완두

1976~ 서울대학교 기계설계학과  
1980  
1980~ 서울대학교 기계설계학과 석사  
1982  
1987~ 서울대학교 기계설계학과 박사  
1993  
1982~ 한국기계연구원 구조연구부  
현재



김완수

1993~ 충남대학교 기계공학과  
1997  
1997~ 충남대학교 기계공학과 석사  
1999  
2000~ 한국기계연구원 구조연구부  
현재

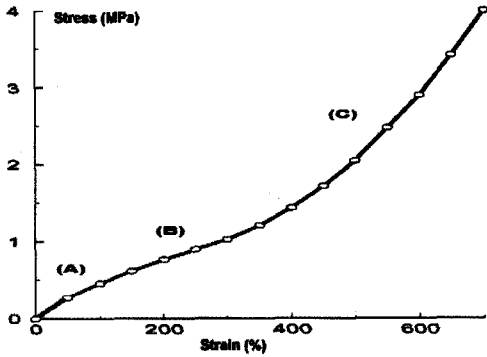


그림 2. 고무 탄성체의 비선형적 응력-변형률 선도

## 2. 고무부품의 유한요소해석

### 2.1 고무탄성체의 비선형 특성

고무가 탄성을 갖게 되는 것은 꼬여있는 고분자 사슬이 늘어났다가 가교점 때문에 미끄러져 빠져 나가지 않고 원상으로 복귀하는 특성으로 인해서다. 그림 2는 전형적인 고무재료의 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 초기 (A)는 꼬여 있는 고분자 사슬을 푸는 데 필요한 힘으로 인하여 발생하는 구간이며, (B)는 풀어진 고분자 사슬이 저항과 영킴 없이 자유롭게 변형하는 구간이다. 마지막으로 (C)는 충분히 늘어난 고분자 사슬을 늘리는데 힘이 필요한 구간이다.

고무탄성체는 일반적으로 하중-변형 관계가 비선형 관계를 보이는 것 이외에 반복하중을 받을 때 상대적으로 응력이 점점 감소되며 안정화되는 소위 Mullins effect, 이전의 변형률 수준보다 높은 변형률을 받을 때 상대적으로 응력이 감소하는 history dependent effect, 일정 변형률 이상의 변형을 받을 때 고무 내부 구조의 손상으로 인한 영구변형 발생 등이 있다. 이러한 이유 등으로 고무탄성체의 해석은 결코 쉬운 일이 아니지만 최근에 MARC, ABAQUS 및 ANSYS 등, 해석 소프트웨어의 발전으로 인하여 비교적 실제 값과 유사한 해석결과를 얻을 수가 있다.

### 2.2 초탄성 모델

고무는 대변형(large deformation)이 발생되며, 하중과 변형과의 관계가 비선형적인 과정에서도 탄성을 유지하는 초탄성(hyperelastic) 특징을 가지고 있다.

고무와 같은 거동을 표현하는 초탄성체 모델에서의 변형률 에너지 밀도( $W$ )와 응력( $\sigma_{ij}$ )과의 관계는 다음과 같다.<sup>2</sup>

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

여기서,  $\sigma_{ij}$ 는 2차 Piola-Kirchhoff 응력텐서이며,  $E_{ij}$ 는 Green-Lagrange 변형률 텐서이며 다음과 같이 표현된다.

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

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

단축거동의 경우 Green-Lagrange 변형률( $E$ ) 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 변형률 에너지 함수( $W$ )는 다음과 같이 변형률 불변량 함수와 주연신률의 함수로 나타낼 수 있다.

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

여기서, 변형률 불변량은 주연신률( $\lambda$ )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 주연신을 함수로 표현한 Ogden 모델이 초탄성 재료에 주로 사용되며 재료가 비압축성일 때 각각 다음 식과 같이 표현된다.<sup>3</sup>

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

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

위 식에서 재료상수들( $C_{ij}$ ,  $\mu_n$ ,  $\alpha_n$ )은 물성 시험 등으로 얻어진 응력-변형률 데이터를 이용하여 결정되며, 얻어진 재료상수는 유한요소 해석 시 재료의 변형을 에너지 함수로 정의되어 고무재료의 물성으로 사용된다.

### 2.3 재료물성 시험

재료물성시험에는 그림 3과 같이 단축인장, 평면인장 또는 순수전단, 단축압축 시험 등이 있으며 단축압축 시험은 이축인장시험으로 대체할 수 있다. 여기서, 단축인장시험 만으로는 재료물성을 평가하는데 다소 오류를 범할 수 있으며, 그림 4와 같이 최소한 2개 이상의 시험으로부터 응력-변형률 데이터를 얻는 것이 바람직하다. 압축성재료인 폼(foam)은 체적탄성 계수가 필요하여 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.<sup>4</sup> 방진 고무로 사용되는 천연가황고무의 경우 경도가 증가할수록 강성이 증가하고 반복하중시의 변형률 수준이 증가할수록 강성이 감소된다(표 1, 2). 또한 분위기 온도가 증가할수록 고무의 강성은 감소하며 고온보다 저온에서 특히 강성변화가 크게 나타난다(표 3).

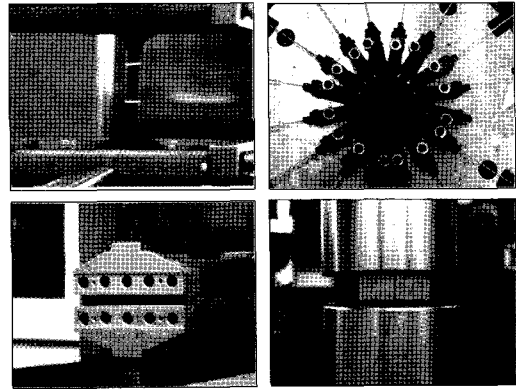


그림 3. FEA를 위한 고무탄성체의 기계적 물성 시험.

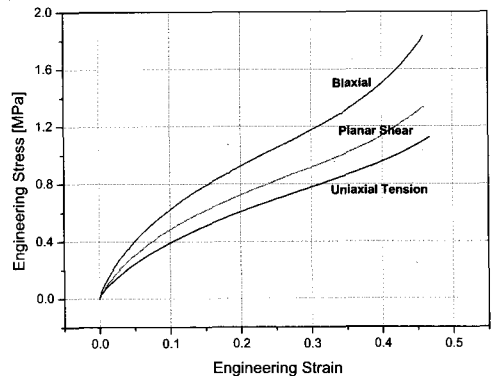


그림 4. 정적 물성시험 결과.

표 1. 고무 경도에 따른 재료상수

경도	Mooney 2-terms		G=2(C10+C01)
	C10	C01	
41	0.31	0.00	0.62
52	0.41	0.00	0.82
64	0.57	0.07	1.28
75	0.81	0.00	1.62

표 2. 변형률 수준에 따른 재료상수

변형률 수준	Mooney 2-terms		G=2(C10+C01)
	C10	C01	
~25%	0.69	0.00	1.38
~50%	0.57	0.07	1.28
~100%	0.54	0.00	1.08
~200%	0.48	0.00	0.96

표 3. 분위기 온도에 따른 재료상수

분위기 온도(℃)	Mooney 2-terms		G=2(C10+C01)
	C10	C01	
-10	0.71	0.00	1.42
23	0.57	0.07	1.28
55	0.60	0.00	1.20
85	0.58	0.00	1.16

고무는 시간에 따라 거동이 변화하는 점탄성 특성을 가지고 있다. 고무의 선형 점탄성 거동을 표현하기 위한 기계적 등가모델은 표 4에서와 같이 Maxwell 모델, Kelvin(Voigt) 모델 및 standard linear 모델이 있다.<sup>5</sup>

Maxwell 모델은 간단한 스프링과 댐퍼가 직렬로 연결되어 있는 모델로서, 매우 짧은 시간에서는 단순히 스프링처럼 거동하나 댐퍼가 응답하는데 시간이 걸리며, 오랜 시간이 지나서 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 전단변형률( $\gamma$ ) 가하고 일정하게

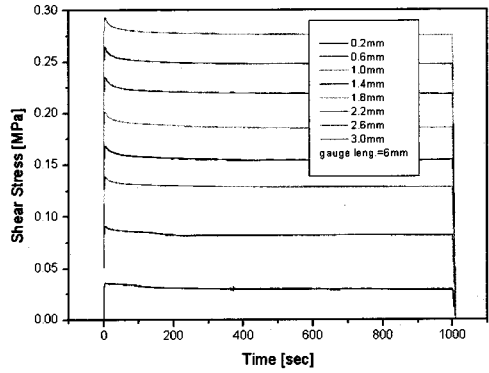


그림 5. 고무재료 응력완화시험 곡선.

유지시키는 전단완화시험을 통해서 가능하다. 그림 5는 단순전단시험을 이용하여 응력완화시험 곡선을 나타낸 것이다.

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 변형을 진폭비를 이용하여 저장탄성계수( $G_1$ ), 손실탄성계수( $G_2$ ) 및 고무재료의 감쇠의 크기를 나타내는 양인 손실계수( $\eta$ )를 구할 수 있다. 그림 6은 가황고무의 주파수 특성으로 100Hz 이하의 저주

표 4. 고무의 선형 점탄성 거동의 해석 모델

모 델	응 답	방 정 식	특 성
		$\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 탄성 특성 표현.</li> <li>- 정적 하중에서의 변형을 unloading 시에 대부분 회복함.</li> </ul>
		$\sigma = E\epsilon + \eta \dot{\epsilon}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 점탄성 특성 표현.</li> <li>- 변형의 순간 응답 및 unloading 시에 회복 되지 않는 flow를 설명 못함.</li> </ul>
		$\sigma + \left[ \frac{\eta}{E_0 + E_1} \right] \dot{\sigma} = \left[ \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1} \right] \epsilon + \left[ \frac{E_0 \eta}{E_0 + E_1} \right] \dot{\epsilon}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 탄성, 점탄성 특성 표현.</li> <li>- 가교 재료 (rubber)에 적합함.</li> </ul>

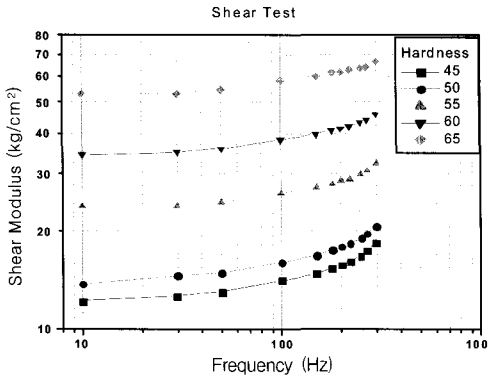
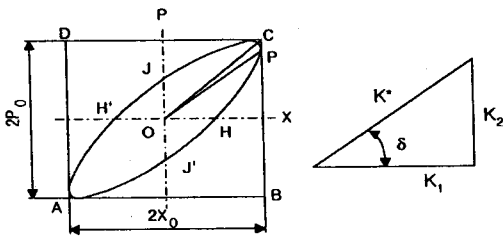


그림 6. 방진고무의 주파수 특성.



동스프링상수  $K^* = P_0 / x_0$   
 저장스프링상수  $K_1 = K^* \cos \delta$   
 손실스프링상수  $K_2 = K^* \sin \delta$

그림 7. 동적 하중-변위 곡선을 통한 동특성 계산.

파수 영역에서 저장탄성계수는 주파수와 관계가 거의 없게 나타난다. 방진고무의 동특성 평가 방법에는 비공진법과 공진법이 있다. 비공진법으로는 일반적으로 그림 7과 같이 하중-변위 곡선을 통하여 동스프링상수 등을 구할 수 있다.

### 2.4 방진고무의 특성 예측

방진고무는 하중과 변위의 관계가 비선형, 점탄성 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-변형률 곡선에서 초기 선형구간의 기울기를 탄성계수로 이용하거나, 표 5와 같이 경도와 전단계수의 관계식을 이용할 수 있다.<sup>6</sup>

방진고무가 대변형을 받거나 형상이 복잡해

표 5. 경도와 전단계수 관계식

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	$H_s = \frac{G}{G+0.662} \times 100$

지면 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.<sup>7</sup>

일반적으로 유한요소해석을 통하여 적절한 고무 경도를 선택하거나 형상을 변화시켜 정강성 계수를 조절한다. 또한, 변형률 분포를 통하여 취약부위를 예측하거나 피로수명을 예측하는데 이용할 수 있다. 그림 8의 (a), (b)는 자동차에서 엔진으로부터 차체에 전달되는 진동을 저감시키는 마운트에 수직방향 하중이 작용 시 비선형 대변형 유한요소해석을 통한 변형률 분포와 하중-변위 관계를 실험결과와 비교한 것이다.

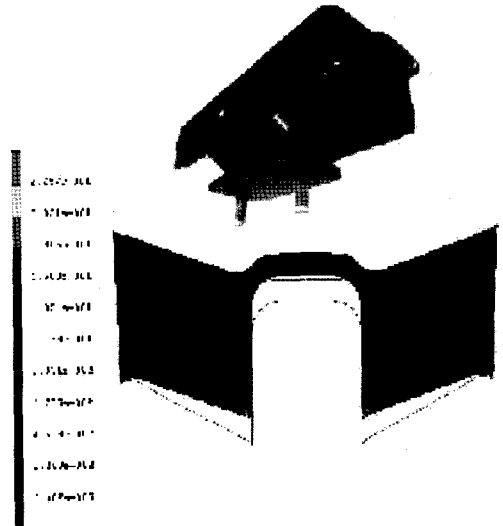
점탄성을 고려한 해석 방법에는 시간 영역에서의 점탄성 해석과 주파수 영역에서의 점탄성 해석 방법이 있다. 시간 영역에서의 점탄성 해석을 위해서는 점탄성 특성을 구하기 위해 그림 5의 전단완화 시험 또는 그림 6, 7의 저장 및 손실 탄성계수 시험을 통하여 시험 데이터를 얻고, 비선형 커브피팅으로 부터 Prony series의 상수항을 추출한다. 이와 같은 Prony 상수의 계산은 상용 유한요소 프로그램에서 자동으로 처리되어 해석이 진행된다. 장점으로는

시간에 따라서 점탄성 거동을 표현할 수 있어 히스테리시스를 구할 수 있으나 정확한 물성 데이터를 입력하지 않으면 적절한 해석이 어렵고 해석 시간이 길다는 단점이 있다. 주파수 영역에서의 점탄성 해석도 비슷한 과정을 거치고 있으나 장점은 해석 시간이 짧아 해석 기간을 단축시킬 수 있으나 단지 주파수에 따른 반력과 위상만을 구해주므로 자세한 점탄성 거동은 확인할 수 없다. 여기에서는 주파수 영역에서의 점탄성 해석 방법을 사용하였다. 그림 8의 (c)는 TM 마운트에 정적인 상태로 평균 변형률 5.0 mm가 작용한 다음, 미소 변형률  $\pm 0.5$  mm의 조화 가진을 작용시켰을 때, 주파수 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz 및 25 Hz에 대한 동적 저장 강성 및 손실 강성의 해석 및 시험 결과를 나타내고 있다. 가진주파수에 대한 저장 탄성계수의 시험 및 해석 결과는 최대 오차 20.0 %까지 차이를 보이고 있으나, 주파수가 증가할수록 저장 탄성계수가 증가하는 경향은 일치한다. 또한 손실 탄성계수의 시험 및 해석 결과는 최대 오차 18.6 %까지 차이를 보이고 있으나, 주파수가 증가할수록 손실 탄성계수가 증가하는 경향은 일치하였다.

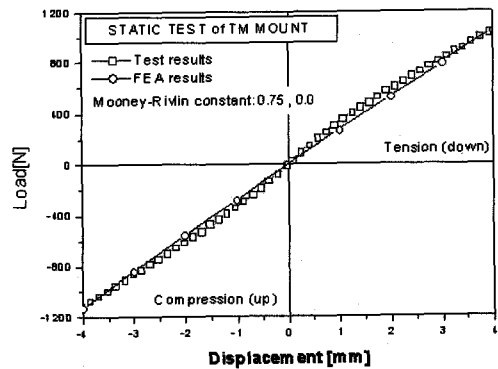
### 3. 고무부품의 수명예측

최근 부각되고 있는 신뢰성이 보증되는 고내구성 부품의 개발과정에서 수명예측은 반드시 필요하다. 수명을 판단하는 방법으로는 실제 고무제품을 필요한 곳에 사용하여 수명을 직접 평가하는 방법이 있으나 이는 현실적으로 거의 불가능한 방법이다. 경험에 의한 수명예측은 보다 짧은 시간에 비교적 정확한 수명 예측 가능하다. 마지막으로 가속시험 (ALT : Accelerated Life Test) 방법은 시간, 경제적으로 절약되나, 다음과 같은 요인으로 수명예측이 불가능하거나 부정확할 수 있다.

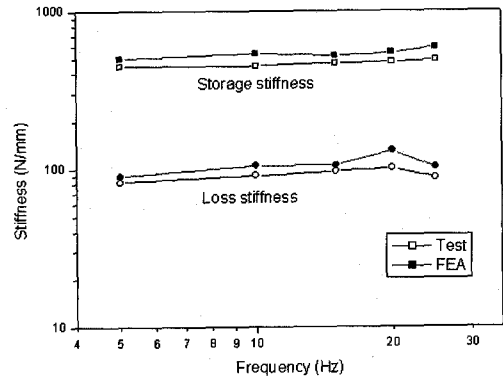
첫째, 수명예측을 위한 시험 설계가 복잡하



(a) 정적 최대 주 G-L 변형률 분포



(b) 정적 하중-변위 관계



(c) 동적 해석 결과

그림 8. TM 마운트의 정적 및 동적 유한요소해석.

고 데이터가 부족하다. 이는 고무부품의 수명에 미치는 요인이 한 가지로 요인이 아닌 열(온도), 산소, 빛, 오존, 오일, 약품 등의 화학적 요인과 creep 및 응력완화와 같은 정적 응력, 피로, 마모 등이 서로 복합적으로 작용하여 재현 시험을 수행하는 것이 매우 어렵기 때문이다.

둘째, 수명의 명확한 기준점(point)을 잡는 것이 쉽지 않다. 즉, 수명의 기준이 완전한 파단(rupture) 등과 같이 분명하지 않다는 것이다. 예를 들어, 오존 균열 길이를 3 mm가 되는 시점으로 할 것인가? 아니면, 강성의 변화율을 20%로 할 것인가? 는 아직 명확한 기준이 없다.

본 원고에서는 고무부품의 수명예측에 대한 사례를 언급하고자 한다.

### 3.1 열에 의한 노화 수명예측

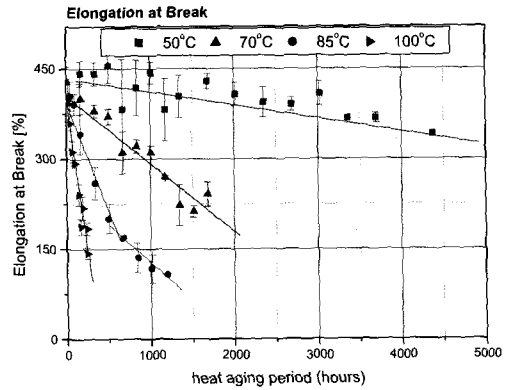
대부분의 고무부품은 공기 중에 포함된 산소나 오존 또는 자외선 등과의 화학반응에 의하여 일어나는 고무 분자구조의 절단과 가교에 기인하며 사용 온도에 의해 가속된다. 그 이외의 요인으로 인한 노화문제는 발생빈도가 낮으며 재현시험을 수행하는 것이 매우 어렵거나 불가능하다. 따라서 사용온도 또는 열을 가장 중요한 특성저하요인(degradation factor)으로 가정하고 가속시험을 수행하여 얻은 데이터를 Arrhenius 관계식 또는 WLF master curve를 통하여 수명을 예측하는 방법을 이용하였다.

고무부품의 수명예측에 가장 잘 알려지고 폭넓게 사용되는 모델이 Arrhenius 관계식이다. 이 방법은 특히 노화요인이 온도일 때 효과적으로 적용할 수 있다.

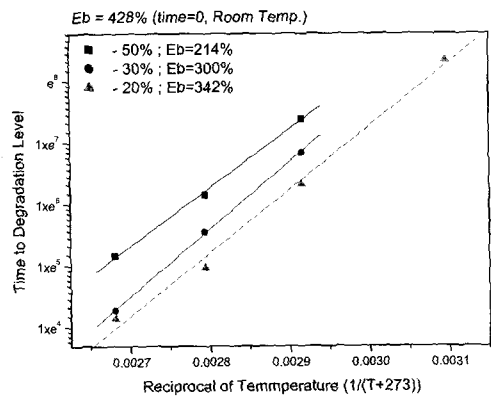
아레니우스 관계식은 다음과 같으며,  $1/T$ 에 대한  $\ln K(T)$ 의 선도는 기울기가  $E/R$ 인 직선이 된다.

$$\ln K(T) = -\frac{E}{RT} + C$$

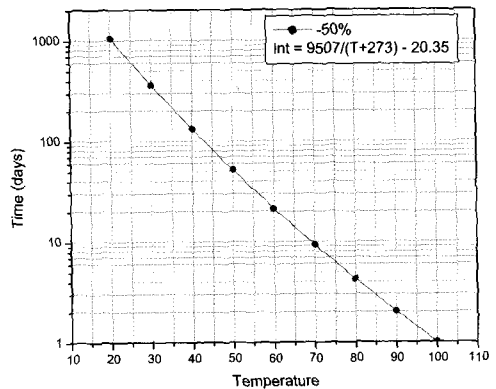
여기서,  $K(T)$ 는 반응속도,  $E$ 는 반응에너지,  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 절대온도,  $C$ 는 상수이다.



(a) 신율변화 곡선



(b) Arrhenius 선도



(c) 온도-시간 관계 (신율 -50%)

그림 9. Arrhenius model을 이용한 수명예측.

그림 9의 (a)는 고무부품의 시편을 여러 온도에서 일정시간동안 가속 노화시킨 후 신율을

측정한 결과를 나타낸 것이다. 가속온도가 높고 가속시간이 길수록 신율변화율이 커지는 것을 알 수 있다. 여기서 수명 기준을 신율이 각각 20, 30, 50% 감소되는 시점으로 하였을 때의 Arrhenius 선도를 최소자승법으로 커브피팅하여 그림 9의 (b)에 나타내었다.

커브 피팅을 위해서 최소한 두개의 점이 필요하나, 그 이상의 데이터를 이용하면 좀 더 정확한 수명예측을 할 수 있다. 여기에서는 50, 70, 85, 100℃에서 각각 시험하였기 때문에 4개의 Arrhenius point를 얻을 수 있지만, 50℃의 경우 시험 기간동안 20% 정도의 변화율이 발생하여, 30 및 50% 변화율에 대한 Arrhenius point는 얻을 수가 없어 총 3개를 이용하였다. 그림 9의 (c)는 50%의 신율 변화율이 발생하는 온도-시간 관계를 나타낸 것이다. 여기서 100℃와 20℃의 가속계수는 대략 1,000이며, 이를 통하여 20℃에서의 10년은 100℃에서 3.65일과 같은 결과를 얻음을 의미한다. 그러나 여기서 주의해야할 점은 시험시간을 단축시키기 위하여 가속온도를 높일 경우 실제 field에서 발생하는 파손모드(failure mode)와는 다른 결과를 얻을 수 있다는 것이다. 따라서 수명예측에 투

자 가능한 시간을 감안하여 가속 시험시간은 최대한 길게, 그리고 온도는 실제 사용온도와 유사하게 하는 것이 예측 오차를 줄일 수 있는 접근방법이라 할 수 있다.

고무부품의 또 하나의 수명예측방법으로 WLF (Williams - Landel - Ferry) 모델이 있다. 본래 이 방법은 다양한 온도에서 동·점탄성(storage & loss modulus 등)과 같은 물리적인 영향의 master curve를 얻는데 사용된다. 그러나 이는 화학적인 노화 반응에 대해서도 적용할 수 있다. 시간-온도 중첩을 실행하기 위한 WLF식은 다음과 같다.

$$\text{Log}(a_T) = \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)}$$

여기서,  $a_T$ 는 shift factor,  $T_0$ 는 reference temperature,  $T$ 는 온도,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 계수이다.

이러한 WLF 모델을 이용하여 그림 10은 실제 시간-온도 관계를 얻어 수명을 예측한 사례를 나타낸 것이다. WLF 모델은 곡선이 부분적으로 겹쳐질 때까지 선택한 reference 온도에서의 선도(곡선 (A))에 대해 다른 온도에서의 선도(곡선 (B), (C), (D))를 점차적으로 이동하여

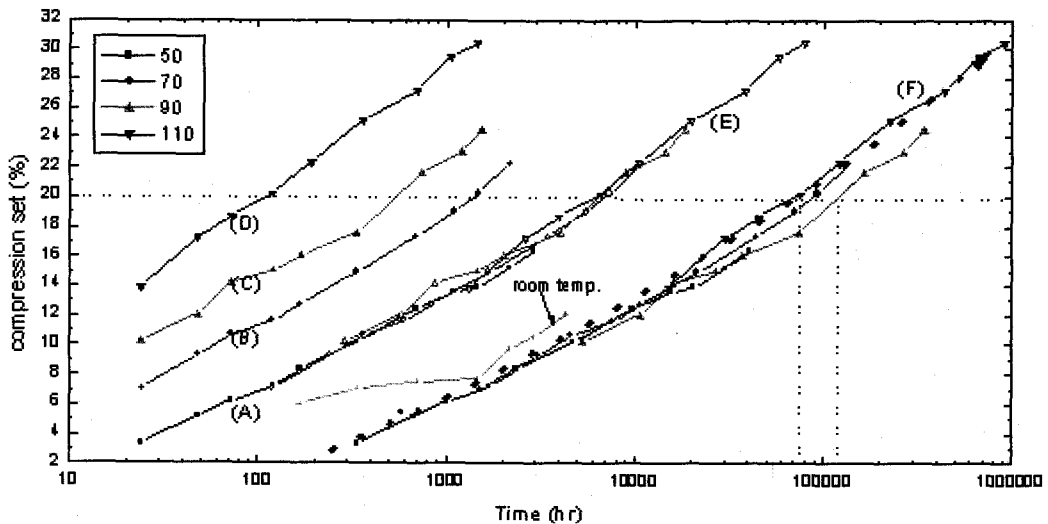


그림 10. WLF 모델을 이용한 수명예측.



reference 온도에서의 master curve(곡선(E))를 얻는다. 이 과정에서 WLF 식의  $c_1$ 과  $c_2$ 는 계수가 얻어져 실제 관심온도에서의 선도(곡선(F))를 예측할 수 있는 것이다. 따라서, 그림 10에서 곡선(F)는 23℃에서의 시간에 따른 압축 영구변형률 관계이며 변형률이 20% 되는 시점은 대략 100,000시간으로 예측할 수 있는 것이다.

그런데, 이러한 수명예측 모델에서 중요한 것은 수명기준을 선택하는 것이다. 표 6은 고무의 수명평가기준을 예로 든 것이다. 평가에 사용되는 고무의 특성은 일반적으로 강성의 변화는 모듈러스(탄성계수), 파단특성의 변화는 인장강도(tensile strength), 신율(elongation at break)을 선택하는 경우가 많지만 특성의 선택은 각 회사마다의 기준에 의하며, 고무마다 활성화 에너지가 다른 경우가 있기 때문에 그 선택에 관해서는 충분한 주의를 필요로 한다. 최근 완성차 업계에서는 field에서 일정기간 운행한 후 고품을 수거하여 특성 시험을 수행하고, 'field에서 ○년 사용 = 시험온도 ○℃에서 ○시간 후 특성 변화율 ○%' 라는 자체 기준을 마련하여 개발 초기 단계부터 내구성이 향상된 고무부품 설계에 적용하고 있다.

표 6. 고무의 수명 기준 예

case	고무 특성	시험온도	특성 변화율
A	인장강도, 신율	100℃ 이하	-20%
B	25% 모듈러스	100℃ 이하	+25%
C	신율 100% 모듈러스	100℃ 이하	-20~-30% +20~+20%
D	신율	60~100℃	-50%
E	인장강도, 신율 100% 모듈러스	80~120℃	-10~-50% +10~+50%
F	인장강도, 신율 100% 모듈러스	70~100℃	-20% +20%
G	인장강도, 신율	80~120℃	-20%
H	인장강도	80~120℃	-50%

### 3.2 기계적 피로하중에 의한 수명예측

방진고무부품은 경우에 따라 환경적 요인 외에 기계적 하중, 특히 피로하중에 의한 균열 및 파괴에 의해 수명이 다하기도 한다.

고무부품의 피로수명 예측 과정은 그림 11과 같다. 고무소재의 물성시험결과를 이용하여 부품의 유한요소해석을 수행하고, 최대 Green-Lagrange 변형률(G-L 변형률)과 하중과의 관계를 구한다. 부품과 같은 물성을 갖는 장구시편의 피로시험을 수행하여 최대 G-L 변형률과 피

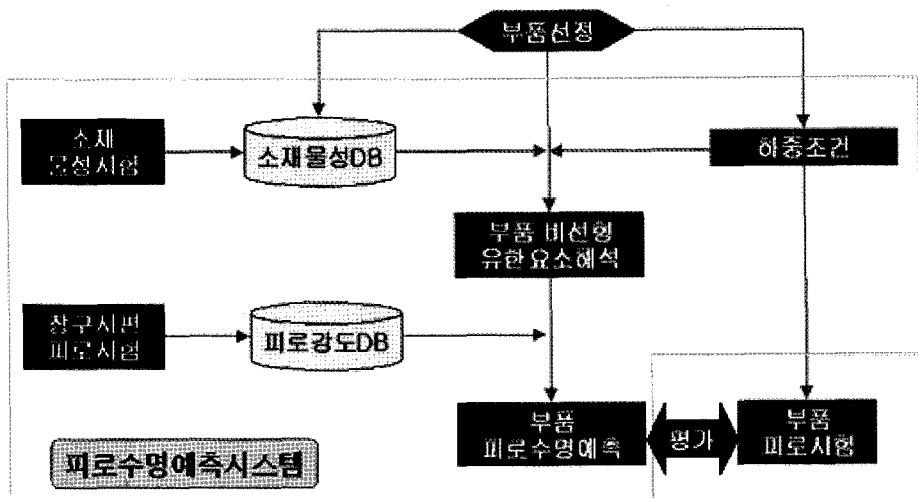


그림 11. 고무부품 피로수명 예측 과정.

로수명과의 관계를 구한다. 부품의 유한요소해석결과와 장구시편의 피로시험결과를 이용하여 부품의 피로수명을 예측하고, 예측된 피로수명과 부품의 피로시험결과를 비교하여 수명예측절차의 타당성을 검토한다.

그림 12는 장구형 고무피로시편과 정현파를 이용한 피로시험 모습을 나타낸 것이다. 그림 13은 엔진마운트와 동일한 물성의 장구형 고무시편의 최대 G-L 변형률과 피로수명과의 관계를 나타낸 것이며, 최대 G-L 변형률이 피로손상을 잘 고려할 수 있는 변수임을 알 수 있다. 실선은 최대 G-L 변형률과 피로수명과의 관계를 최소자승법을 이용하여 직선으로 커브피팅한 결과이며 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$N_f = 316,227 * \epsilon_{GL}^{-1.322}$$

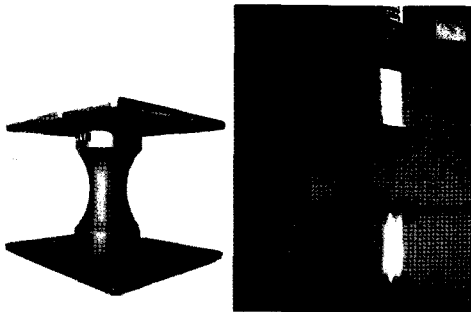


그림 12. 고무 피로시편 및 피로시험 모습.

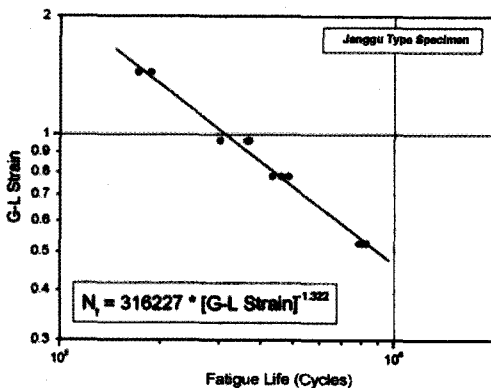


그림 13. 고무 피로수명 선도.

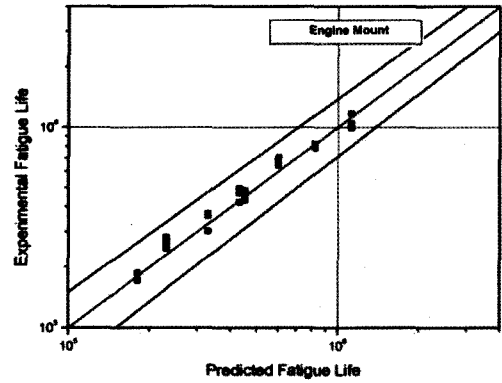


그림 14. 고무부품 피로수명 예측값과 실험값 비교.

그림 14는 엔진마운트 부품의 피로수명 예측값과 실험값을 비교한 것이다. 그림 11에서 제안된 절차를 자동차용 엔진마운트에 적용하여 피로수명을 예측한 결과, 예측된 피로수명은 오차범위 3배 이내에서 피로시험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 예측된 피로수명과 측정된 피로수명에서 차이가 나는 원인은 시편과 부품과의 크기, 표면 거칠기, 형상 효과에 의한 변형률 분포의 상이성 등으로 추정된다.

#### 4. 결 론

방진고무부품의 설계 및 특성 예측을 위해서 필요한 고무탄성체 재료의 역학적 특성과 실험 방법, 유한요소해석 등에 대해서 소개하였다. 또한, 고무부품의 초기단계에서 해석 결과 및 소재의 피로시험 결과를 이용하여 비교적 정확하게 부품의 피로수명을 예측할 수 있는 절차를 제안하였다.

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. Y.C. Fung 1965, *Foundations of Solid Mechanics*, Prentice-Hall.
3. Alan N. Gent 1992, *Engineering with Rubber*, Hanser.
4. R.P. Brown 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.