

## 냉장고 압축기용 고무마운트 수명예측에 관한 연구

우창수\*, 박현성

한국기계연구원 나노공장장비연구센터

### A Study on the Lifetime Prediction of Rubber Mount for Refrigerator Component

Chang Su Woo\*, Hyun Sung Park

Korea Institute of Machinery & Materials, Jang-dong 171, Daejeon, 305-343, Korea

#### Abstract

Rubber material properties and lifetime evaluation are very important in design procedure to assure the safety and reliability of the rubber components. This paper discusses the failure mechanism and material tests were carried out to predict the useful lifetime of NBR and EPDM for compression motor, which is used in refrigerator component. The heat-aging process leads not only to mechanical properties change but also to chemical structure change so called degradation. In order to investigate the aging effects on the material properties, the accelerated test were carried out. The stress-strain curves were plotted from the results of the tensile test for virgin and heat-aged rubber specimens. The rubber specimens were heat-aged in an oven at the temperature ranging from 70° C to 100° C for a period ranging from 1 to 180 days. Compression set results changes as the threshold are used for assessment of the useful life and time to threshold value were plotted against reciprocal of absolute temperature to give the Arrhenius plot. By using the

compression set test, several useful lifetime prediction equations for rubber material were proposed.

Key Words : rubber material(고무재료), heat-aging process(열노화과정), stress-strain curves(부하-변형곡선), Arrhenius plot(아래니우스 그래프), lifetime prediction equations(수명예측식)

## 1. 서론

최근 일류화를 지향하는 선진 제품의 경우, 기본적인 기능 외에 저 진동, 저 소음 및 작동감 향상 등을 통한 고 품질, 고 품위, 고 신뢰성 달성을 위해 고무부품의 사용이 날로 증가하고 있다[1,5]. 국산부품의 국내외 시장 진출 시, 고무소재의 신뢰성 문제가 주요 장애요인으로 대두되고 있어 고무부품에 대한 체계적인 신뢰성 향상기술이 절실히 요구되고 있다. 특히, 수출품의 경우에는 관련제품의 응용 실적을 요구하여 선진국에 비해 기술 후발국인 우리나라는 새롭게 진입하는 시장의 경쟁력 확보를 위해 관련기술 확보가 절실하나 국내 대부분의 고무부품 생산업체가 영세한 중소기업으로 기술개발의 투자부족과 관련 기술 인력의 잦은 이동 등으로 인해 체계적인 기술축적이 어려워 고무부품에 대한 연구가 절실하다 하겠다.

전자부품의 고기능, 소형화 추세에 더불어 높은 신뢰성이 요구되며 세계 초일류의 전자제품을 개발하기 위해서는 설계단계에서의 기술 확보가 중요하나 고무 관련기술들은 경험과 시행착오적인 방법으로 발전, 전수되어 왔으며 고무배합 및 핵심 설계기술들은 몇몇 엔지니어들의 전유물로 간주 되어 올 정도로 다른 산업에 비해 폐쇄적으로 기술 발전이 이루어져 체계적인 기술 축적이 어려운 실정이며, 소재의 낮은 신뢰성, 재현성 등으로 다른 금속소재에 비해 비교적 큰 물성치의 편차를 지니고 있어 신뢰성 설계 및 평가가 어려운 부품이다.

본 연구에서는 냉장고 압축기 모터에서 발생하는 소음과 진동을 제어할 목적으로 사용되는 고무마운트에 대해 열화요인 및 고장 파손사례를 조사하여 고장 메카니즘을 분석하였으며 고무소재에 대한 물성시험을 통해 변형률에너지 함수를 기반으로 고무재료 비선형 재료상수를 결정하였다. 또한, 환경시험에 의한 가속 열 노화시험을 통해 노화온도 및 노화일수에 따른 가교밀도, 응력-변형률 관계를 파악하였으며 아래니우스 관계식을 이용하여 고무소재의 노화수명을 예측하였다.

그동안 고무분야에 대한 국내 연구개발 및 투자는 다른 기술 분야에 비해 상대적으로 미비하였으나 세계 일류화를 지향하는 제품에 고무부품의 사용이 날로 증가하고 있어 고무소재 개발과 신뢰성 시험 및 평가를 통한 설계기술을 체계화시킨다면 가까운 시일 내에 선진 고무기술 수준에 도달할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 고무부품 고장 메카니즘

### 2.1 고장현상과 해석방법

고무부품의 고장은 제조(공정)시와 사용(시장)시의 두 가지 단계가 있는데 제조 시 고장은 비교적 조기에 발생하는 문제로 다루어지며 열화 등에 의한 사용 시 발생하는 고장은 장기 수명에 관한 문제로 생각된다. 최근 고무부품의 사용조건과 환경의 다양화에 따라 한층 복잡화하여 고장 파손 사례를 조사, 분석하여 보통 방법으로는 쉽게 문제를 해결할 수 없기 때문에 고장 파손 사례조사 및 분석과 재현시험을 통하여 고장 요인과 고장 메카니즘 규명이 이루어져야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 고무 제조단계와 시장단계에서의 고장현상과 요인 및 해석방법을 파악하여 고장 메카니즘을 분석하였다.

고무부품의 고장해석을 위해 고무 제조공정을 검토하였다. 제조공정은 크게 원료고무에 전단력과 온도를 가해 고무가 연화되면서 균일한 가소화 상태로 되는 소련작업과 소련된 고무에 배합약품을 균등히 혼합하여 분산시키는 혼련작업과 쇄상 고분자속에 있는 불포화 이중결합에 유황, 금속산화물, 유기과산화물의 가황제의 작용으로 망상결합 고분자 고무가 되어 탄성체가 되는 가황작업으로 크게 나누어진다.

제조단계에서의 고장원인 및 분석방법은 표 1에서와 같이 배합·혼련·성형단계에서는 배합미스, 분산불량, 이물질 혼입에 의한 고장이며 가황공정에서는 가황부족 및 과다, 후 가황 등의 문제로 크게 나눌 수 있으며, 분석방법으로는 조성분석, 형태해석, 물성해석으로 분류할 수 있다. 시장단계에서는 표 2에서와 같이 고장요인은 변색, 균열, 경화 등의 화학적 현상과 파손, 피로, 열화 등의 물리적인 현상으로 구별된다. 또한 문제의 요인으로는 산소, 오존, 빛, 응력 등의 외적요인과 앞에서 언급한 고무의 배합, 성형, 가황 등의 내적요인으로 나눌 수 있다.

이들 현상을 평가·해석하는 방법은 크게 열분해, 질량분석, 결정구조해석을 통한 조성분석과 광학현미경, 주사전자현미경 등에 의한 형태분석 및 열적성질, 동력학적 성질, 가교구조 등에 의한 물성해석의 3가지로 분류된다.

<표 1> 제조단계에서의 문제요인 및 분석방법 분류

· 분석방법 분류			제조단계 문제요인			배합, 혼련, 성형			가황 공정
			배합	분산 불량	이물질 혼입				
구성 분석	원소	· 형광 X선 · X선전자분광분석 (ESCA)	0	0	0	0			
	분리	· 열분해, 고속액체 (HPLC)	0	0	0	0			
	화학 구조해석	· 질량분석 (GC-Mass) · 분자량분석 (GPC)	0	0	0	0			
	결정 구조해석	· 광각 X선 해석 (WAXD) · 소각 X선 해석 (SAXS)	0		0				
형태 해석	형태관찰	· 투과전자현미경 (TEM) · 주사전자현미경 (SEM) · 3차원 표면조도계		0	0	0			
물성 해석	열적성질	· 열량계 (DSC), 열기계분석	0	0	0				
	가교구조	· 팽윤법, 팽윤압축법			0				
	기계적	· 인장강도, 신율, 점탄성		0	0	0			
	전기적	· 전기저항 측정		0					
	자기적	· 핵자기공명 흡수		0					

<표 2> 시장단계에서의 문제요인 및 분석방법 분류

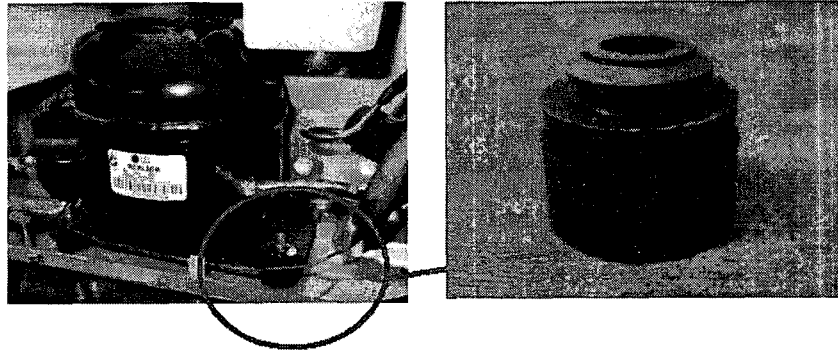
해석방법		문제요인	화학적 변화					물리적 변화									
			변색	균열	오존	경화	연화	파괴	피로균열	크립	강도저하	마모마찰	팽윤	추출확산	접착저하	분리	
문제요인	외적	산소	●	●		●	●	●	●	●	●						
		열	●	●		●	●	●	●	●	●				●	●	
		오존			●			●									
		광	●	●		●	●				●						
		응력		●				●	●	●	●				●	●	
		수분	●				●			●	●	●	●	●	●	●	
		유, 용매					●	●		●	●	●	●	●	●	●	
		유중첨가물 (중금속)		●		●		●									
		약품	●	●		●	●						●	●			
		소금														●	●
		고체		●			●										
		미생물	●	●			●				●						
내적		배합, 혼련, 성형	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●	●	
		가황공정 이상	●						●	●		●			●	●	

<표 2> 시장단계에서의 문제요인 및 분석방법 분류(계속)

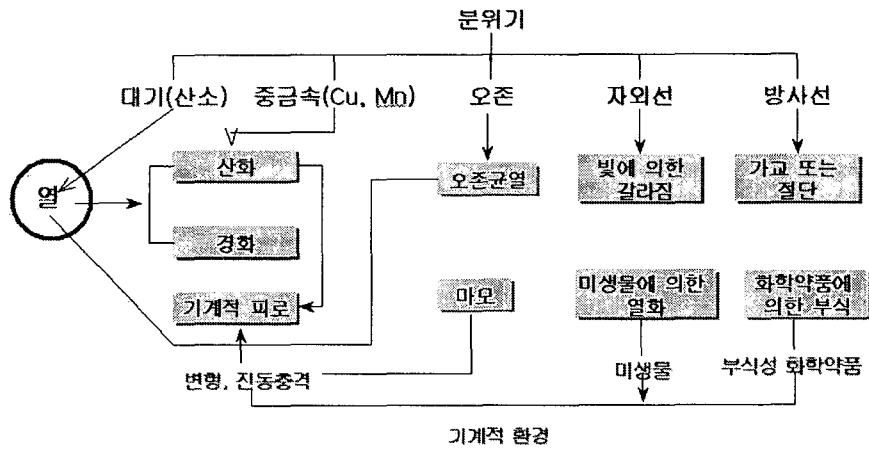
해석방법		문제요인	화학적 변화					물리적 변화										
			변색	균열	오존	경화	연화	파괴	피로균열	크립	강도저하	마모마찰	팽윤	추출확산	접착저하	분리		
해석방법	조성분석	원소분석	형광X선													●	●	
			전자분광분석		●	●	●										●	●
		분리분석	열분해						●	●	●	●	●				●	●
			고속액체	●														
		화학구조	적외분광분석	●	●	●	●	●				●		●		●	●	●
			질량분석	●										●				
			분자량분석					●				●		●				
		결정구조	광각 X선해석															
	소각 X선해석																	
	형태	형태 관찰	투과현미경			●						●						
			주사현미경		●	●			●	●		●				●	●	
			3차원 조도계			●							●					
	물성	열적성질	열량계				●	●	●	●								
			열기계분석				●	●	●			●	●					
		가교구조	팽윤법				●	●		●	●							
			팽윤압축법				●	●		●								
		기계	점탄성측정			●	●	●	●	●	●		●					
			경도				●	●	●	●	●		●					●
인장						●	●	●	●		●							
전기		전기저항측정									●							
자기		핵자기공명				●	●											
광학	광학측정	●	●		●	●												

## 2.2 고무마운트 고장 메카니즘

냉장고 압축기 모터에서 발생하는 소음 및 진동제어 목적으로 사용되는 고무마운트는 그림 1에서와 같이 압축기 몸체사이에 장착된 고무 부품으로 장기간 사용 시 열화(degradation)에 의해 경도 증가 및 형상 변형에 의해 압축기 진동에 대한 적절한 전달 특성을 갖지 못하는 방진 성능저하가 예상된다. 고무부품은 그림 2와 같이 여러 환경 가운데 빛, 열, 자외선, 미생물, 화학약품, 수분, 기계적 작용 등의 영향을 받아 열화 하는데 자연환경 하에서의 열화요인은 복합적으로 작용하므로 열화 메카니즘은 매우 복잡하다 하겠다. 냉장고용 고무마운트의 열화요인은 표 3과 같이 80° C의 열에 의한 노화와 진동과 하중에 의한 피로, 오존에 의한 균열, 기름에 의한 팽윤, 화학약품에 의한 노화 등이라 할 수 있다.



<그림 1> 냉장고 압축기에 사용되는 고무마운트



<그림 2> 고무마운트의 열화요인

<표 3> 고무마운트의 고장모드

고장모드		파손	피로균열	크립	강도저하	마찰마모	경화	팽윤
고장요인								
환경	열	●	●	●	●	△	△	△
	오존	○	●	△	○	△	●	△
	기름	△	○	△	○	△	△	●
	약품	△	○	△	○	△	○	○
	산소	○	●	△	○	△	○	△
응력	하중	●	●	●	●	○	○	△
	진동	●	●	○	●	○	△	△

※ 중요도 : 매우중요(●), 중요(○), 보통(△)

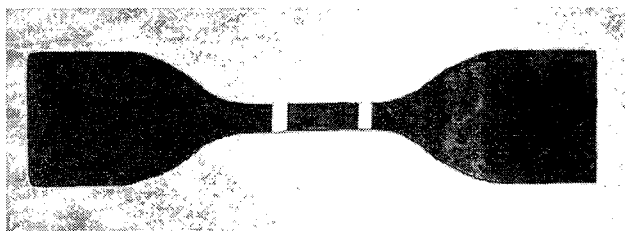
### 3. 고무재료 물성시험

#### 3.1 시편 및 시험조건

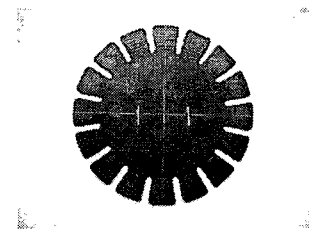
고무재료는 제조과정에서 배합성분 및 함량조건이 다양하고 재현성을 확보하지 못하기 때문에 아직까지 표준화된 물성이 자리 잡지 못하고 있다. 고무재료의 물성을 구하기 위한 시험으로는 먼저 시험에 적절한 시편을 제작한 후 경도를 측정하여 시편간의 오차가 최소화 되도록 한 다음에 시험 온도와 시험 속도 등 시험조건을 설정하여 물성시험을 실시한 후 시험을 통해 얻어진 데이터를 분석하여 고무재료의 물성을 결정하게 된다. 고무물성을 보다 정확하게 결정하기 위해서는 단축인장, 단축압축, 순수전단 또는 단순전단, 이축 인장시험 등 여러 가지 다른 하중 상태에서의 시험을 통하여 물성을 확보하는 것이 필요하다[1].

본 연구에서는 고무 물성시험 중 가장 기본적인 중요한 단축인장 및 이축인장시험을 수행하여 고무재료의 물성을 파악하고 유한요소해석에 필요한 비선형 재료상수를 결정하였다. 고무재료 물성시험용 시편은 고무마운트에 사용되는 NBR과 EPDM 재료로 가황시킨 고무 컴파운드를 ASTM D3182에 따른 금형을 이용하여 가황프레스를 이용하여 압축성형으로 제작하였다.

단축 인장시편은 그림 3(a)와 같이 고무판으로부터 시편커터를 이용하여 KS M6518의 아령 3호로, 이축 인장시편은 그림 3(b)에서와 같이 지름 75mm인 원형 금형 커터를 이용하여 제작하였다. 고무재료는 점탄성 특성으로 인하여 변형률 속도에 영향을 받으므로 변형률 속도가 클수록 재료의 응력은 증가하며, 작을수록 응력완화현상으로 인하여 상대적으로 응력이 감소한다. 정적 물성을 얻기 위한 적절한 속도 범위는 0.007/s~0.17/s이며 이 구간 내에서 고무의 응력-변형률곡선은 차이가 없어 0.01/s 속도로 물성시험을 수행하였다[2].



(a) 인장시편



(b) 이축인장시편

<그림 3> 고무재료 물성시험용 시편

#### 3.2 물성시험

단축인장시험은 그림 4(a)와 같이 재료시험기(Testometric, UK)에 500 N 용량의 로드셀

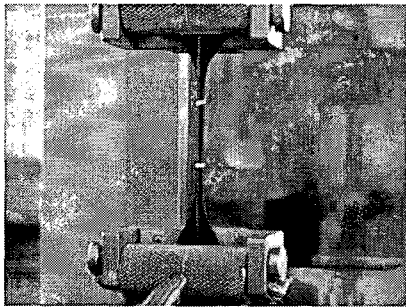
을 장착하여 수행하였으며 시편의 변형률을 측정하기 위해 레이저 신장계(laser extensometer)를 사용하였으며 시편의 표점거리는 레이저 반사 테이프(laser reflective tape)을 이용하여 20 mm가 되도록 하였다.

단축압축시험은 압축판과 고무시편의 접촉면에서 발생하는 마찰로 인하여 근본적으로 순수한 압축응력-변형률 관계를 얻기 어렵다. 이러한 문제를 극복하기 위해 압축시험과 동일한 변형모드를 갖는 이축인장시험을 수행하였다. 이축인장시험은 그림 4(b)와 같이 원주방향으로 균일하게 인장시켜 하중-변형률관계를 측정하였다[7].

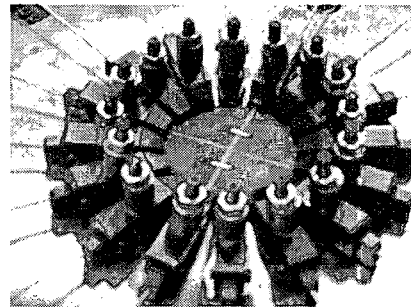
그림 5(a)는 고무재료에 대한 기본물성을 측정한 결과로 인장강도는 NBR이 약 9MPa, EPDM은 10MPa로 나타났으며, 신율은 각각 700~800%를 나타내었다.

고무부품은 반복 하중을 받으면 고무 가교(crosslink) 구조의 파손과 고무분자 표면의 보강제(fillers) 이탈 등으로 강성이 감소하는 Mullins 효과가 나타난다[4]. 이는 카본블랙과 같은 보강제가 들어간 고무에서 뚜렷하게 발생하며 이러한 현상으로 인하여 고무물성을 한 가지로 표현하기 어렵다. 일반적으로 고무물성은 분자구조가 어느 정도 안정화되었을 때의 데이터를 이용하여야 한다. 이를 위해서 재료시험 시에 시편을 일정변형률 구간에서 응력-변형률 관계가 어느 정도 안정화될 때까지 반복적인 부하-제하과정이 필요하며, 이때의 최대변형률은 고무부품이 시스템에서 받는 하중 또는 변형률 이력을 통하여 결정되어야 한다.

그림 5(b)와 (c)는 25%, 50%, 100% 변형률구간에서 각 5회의 반복 부하-제하과정을 통하여 측정한 하중-변위 관계로부터 계산된 응력-변형률 관계를 나타낸 것으로 Mullins 효과를 나타내었다.



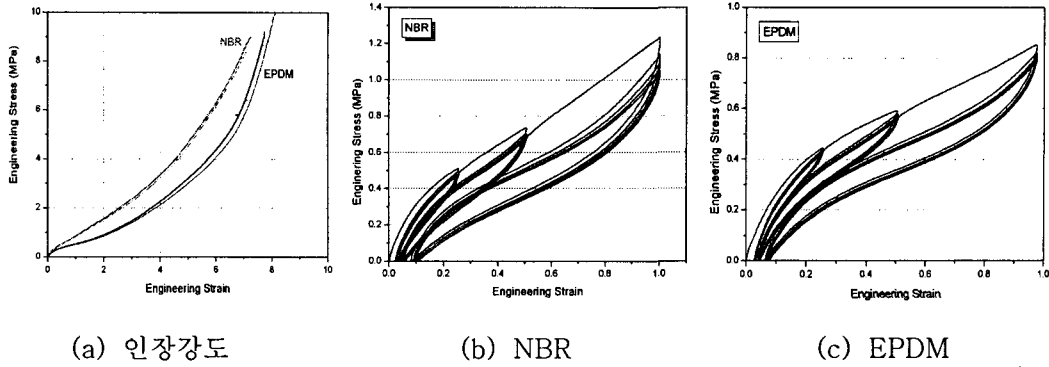
(a) 단축인장시험



(b) 이축인장시험

<그림 4> 고무재료 물성시험





<그림 5> 고무재료의 인장강도 및 Mullins 효과

### 3.3 비선형 재료상수

고무의 특성을 나타내는 재료상수는 고무부품의 유한요소해석에 필수적인 물성 데이터로 이 값의 변화에 따라 해석결과는 큰 차이를 나타내며 해의 안정성 및 수렴성에도 큰 영향을 미치게 되므로 정확한 재료상수를 결정하는 것은 매우 중요하다 하겠다[3].

본 연구에서는 단축인장, 이축인장시험을 통해 얻어진 응력-변형률 결과를 변형률에너지함수로부터 구해진 응력-변형률의 관계식을 이용하여 표 4에서와 같이 무니-리블린(Mooney-Rivlin) 2항과 오그덴(Ogden) 3항의 비선형 재료상수를 결정하였다. 표 4에서 보는 바와 같이 변형률이 클수록 강성(G)이 낮아짐을 알 수 있었으며 무니-리블린 함수와 오그덴 함수로 구한 재료상수 값들이 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

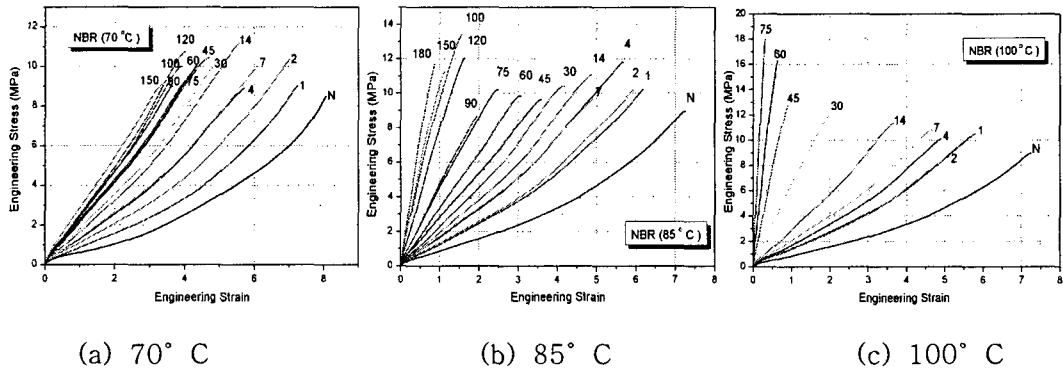
<표 4> 고무재료의 비선형 재료상수

재료	변형률	Mooney-Rivlin			Ogden						
		C10	C01	G_m	$\mu_1$	$\alpha_1$	$\mu_2$	$\alpha_2$	$\mu_3$	$\alpha_3$	G_o
NBR	25%	0.230	0.096	0.652	0.340	0.456	1.786	0.469	0.738	0.471	0.670
	50%	0.227	0.048	0.551	0.392	7.4e-5	0.946	0.773	0.574	0.772	0.587
	100%	0.221	0.023	0.489	0.017	0.958	1.044	1.012	0.004	0.523	0.536
EPDM	25%	0.256	0	0.510	3.8e-5	0.473	0.525	1.949	0.544	1.1e-5	0.511
	50%	0.189	0.013	0.405	2.5e-6	0.255	0.710	1.183	0.280	2.5e-6	0.419
	100%	0.175	0.004	0.369	0.195	1.348	0.365	1.346	2.596	2.8e-6	0.377

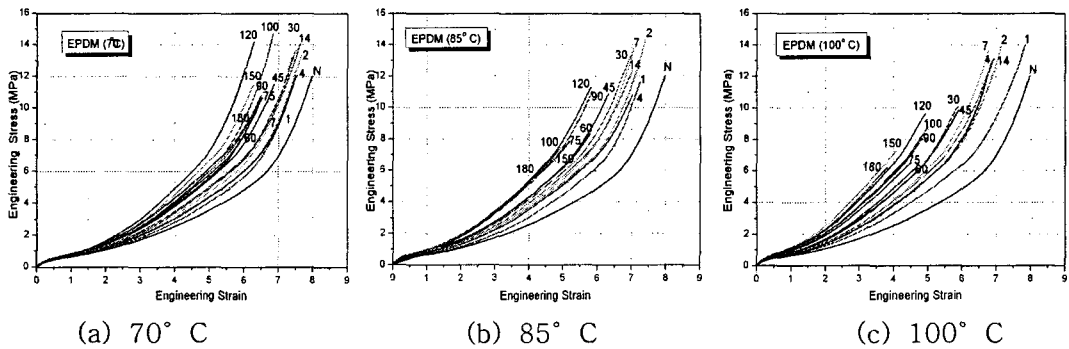
### 3.4 열 노화시험

대부분의 고무부품들은 환경적인 영향에 의한 열 노화와 반복하중에 의한 피로손상 누적에 의해 수명을 다하게 된다. 본 연구에서는 여러 가지 특성저하 인자 중에서 가장 주요한 인자인 온도를 고려하여 실제 제품이 사용되는 곳의 온도보다 높은 오븐에서 열 노화시키는 가속시험방법을 선택하여 고무소재의 물성변화와 수명을 예측하였다. 온도변화에 따른 노화조건은 70° C, 85° C, 100° C에서 180일 동안 노화시간을 갖도록 하였으며 일정기간동안 노화된 시편은 오븐에서 꺼내어 24시간 상온에서 방치한 후 물성시험을 하였다.

그림 6~7은 응력-변형률 관계선도를 나타낸 것으로 노화온도와 노화일수가 증가할수록 강성이 높아짐을 알 수 있었으며 EPDM보다 NBR의 강성변화가 훨씬 크게 나타남을 알 수 있었다.



<그림 6> NBR 재료에 대한 응력-변형률 선도



<그림 7> EPDM 재료에 대한 응력-변형률 선도

## 4. 고무재료 수명예측

### 4.1 아레니우스 관계식

고무제품은 사용 환경이나 조건이 복잡하고 수명예측에 필요한 데이터가 절대적으로 부족하며 온도, 습도, 오존, 빛, 유체, 기계 및 전기적 응력 등의 특성저하 인자(degradation factors) 및 사용조건(service condition)과 배합조건(compound recipes) 등이 다양하기 때문에 사용수명을 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히, 실제 사용될 때와 동일한 조건에서의 시험을 설계하여 수명을 예측하기란 매우 어려운 문제이다.[6]

본 연구에서는 고무재료에 대한 수명예측을 위해 열 노화시키는 가속방법을 선택하여 가속 시험을 통해 얻어진 데이터로 아레니우스(Arrhenius) 모델을 이용하여 수명을 예측하였다. 아레니우스 모델은 여러 온도에서 고무제품의 초기 특성 값의 일정 변화가 발생하는 시점을 수명으로 판단하여 시간-온도의 master curve 및 관계식으로 표현된다. 이러한 관계로부터 특정 온도에서 예측 수명을 계산할 수 있으며 상온에서의 자연노화에 의한 수명을 가속 시험 결과로 얻어진 데이터를 이용하여 예측할 수 있다.

가속 시험에 앞서 아레니우스 관계식에 대해서 알아보기 위해 노화 반응에서 고무의 특성 값을  $P$  라고 하면 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{dP}{dt} = kP \quad \text{즉,} \quad \ln\left[\frac{P}{P_0}\right] = -kt \quad (1)$$

$P$ : 고무 특성값,  $P_0$ : 노화전 고무 특성값,  $t$ : 시간,  $k$ : 반응속도정수(reaction rate)

식 (1)에서 반응속도정수  $k$ 는 특성값  $P$ 의 노화반응을 나타내는 정수로 1889년 S. Arrhenius는 식 (2) 및 (3)과 같은 실험식을 구하였다.

$$k = A \cdot e^{-E/RT} \quad (2)$$

$$\ln k(T) = -\frac{E}{RT} + C \quad (3)$$

$A$ ,  $C$ : 상수,

$E$  : 활성화에너지(activation energy, J/mol),

$R$  : 기체상수(gas constant, 8.314J/mol·K),

$T$  : 절대온도(absolute temperature, K)

식 (3)에서  $\ln k(T)$  는  $1/T$  와 기울기가  $E/R$  인 선형적인 관계를 보인다. 식 (1)에서 노화시킨 특성값  $P$ 가 있는 시점을 수명이라고 하면 그 시점의 수명  $t$ 는 식 (4)를 통하여 얻을 수 있다.

$$t = -\ln(P/P_0)/k \quad (4)$$

식 (4)에서 수명  $t$ 는 반응속도정수 관계식 (2)로 부터 온도의 관계로 표현되어 수명의 온도 환산이 가능해 진다. 특성값  $P$ 로 온도  $T_1$ 에서의 수명  $t_1$ 은 온도  $T_2$ 에서의 수명  $t_2$ 와 같은 것이 되어 이것을 식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\ln\left[\frac{t_1}{t_2}\right] = \frac{E}{R}\left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right] \quad (5)$$

다시 말하면 저온-장시간의 변화는 고온-단시간의 변화와 같게 되어 상온에서 수년의 변화를 고온 가속노화로 단 시간에 평가하는 것이 가능하다.

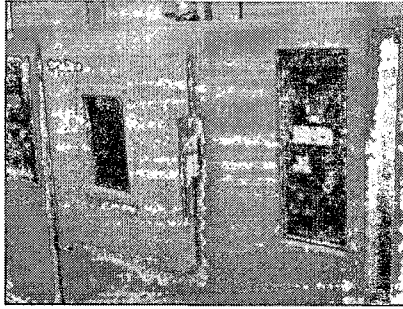
## 4.2 압축 영구줄음률 시험

가속노화시험을 위해 그림 8과 같은 압축 줄음률 장치를 이용하여 시편 초기 높이의 25%를 압축하여 압축 영구줄음률 시험을 수행하였다. 압축된 고무시편은 70℃, 85℃, 100℃의 환경 챔버에서 각각 1, 2, 4, 7, 14, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180일 까지 일정기간동안 압축된 상태로 두어 열 노화시켰다. 주어진 시간이 경과된 후 시편을 꺼내어 압축장치로부터 분리한 후 상온에서 30분간 방치하였다. 이 시간 동안 시편의 두께는 초기 압축상태보다 일정량 회복하여 두께가 약간 증가되는데 이 때의 두께를 측정하였다.

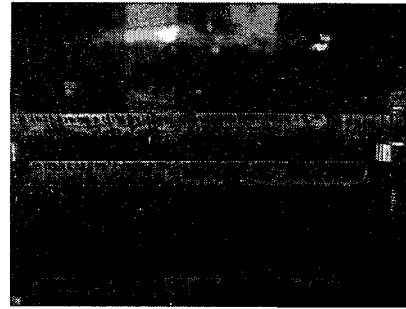
시편의 초기 두께와 노화시킨 후 두께를 이용하여 식 (6)과 같이 압축 영구 줄음률 (compression set)을 계산하였다.

$$\text{Compression Set(\%)} = \frac{t_0 - t_r}{t_s} \times 100 \quad (6)$$

$t_0$  : 초기 두께(mm),  $t_r$  : 노화 후 두께(mm),  $t_s$  : 초기 압축량



(a) 노화시험기



(b) 영구압축줄임률 시험

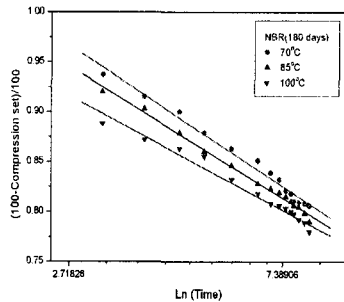
<그림 8> 영구압축줄임률에 의한 열 가속시험

### 4.3 노화수명 예측

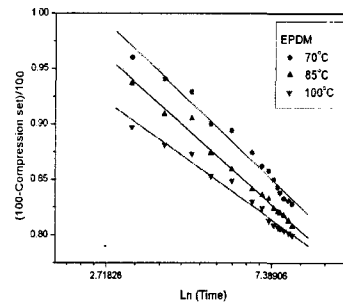
다양한 노화온도에서 노화일수에 대한 두께변화는 온도가 높고 노화일수가 증가할수록 증가함을 알 수 있었다. 그림 9는 온도변화에 따른 특성변화를 나타내기 위해 x축의 시간을 대수 값으로 선형화시켰으며 y축은 압축 영구줄임률을 무 차원 시켜 초기상태를 기준으로 변화된 값을 나타내었다.

고무재료의 노화수명을 압축 영구줄임률 변화율이 10%, 15%, 20%라고 한다면 온도와 시간 관계로부터 그림 10~11에서와 같은 아레니우스 선도를 구할 수 있고 최소 자승법으로부터 Table 3과 같은 아레니우스 관계식이 얻어진다. 시간 - 온도 관계식인 아레니우스 결과식을 이용하면 임의의 온도에서 사용할 수 있는 수명을 구할 수 있다.

표 5로부터 계산되어 예측된 노화수명은 그림 12 및 표 6에서 보는 바와 같이 EPDM이 NBR보다 노화수명이 훨씬 우수한 고무재료임을 알 수 있었다.

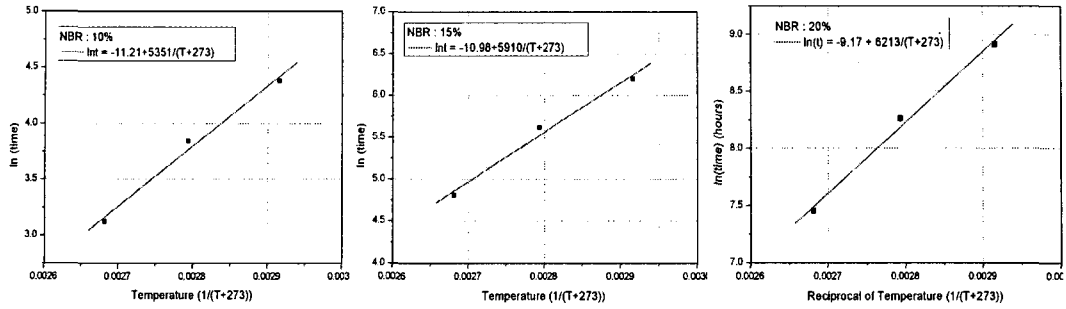


(a) NBR



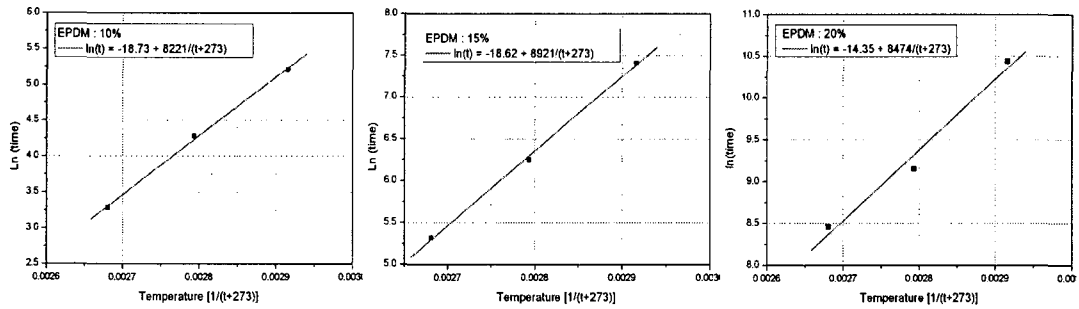
(b) EPDM

<그림 9> 열 노화에 의한 고무 물성변화



(a) 10% (b) 15% (c) 20%

<그림 10> NBR 재료에 대한 아레니우스 관계 선도



(a) 10% (b) 15% (c) 20%

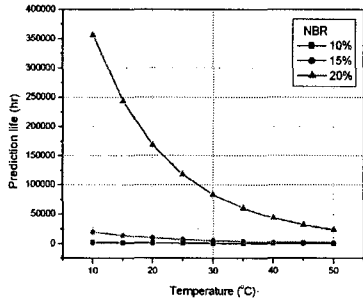
<그림 11> EPDM 재료에 대한 아레니우스 관계 선도

<표 5> 고무재료에 대한 아레니우스 관계식

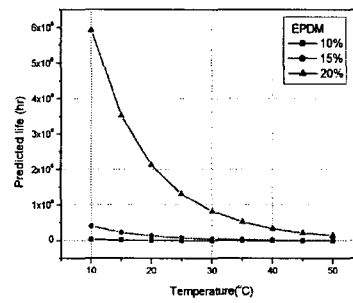
고무재료	특성변화율	아레니우스 관계식
NBR	10%	$\ln t = -11.21 + 5351/(273 + T)$
	15%	$\ln t = -10.98 + 5910/(273 + T)$
	20%	$\ln t = -9.17 + 6213/(273 + T)$
EPDM	10%	$\ln t = -18.73 + 8221/(273 + T)$
	15%	$\ln t = -18.62 + 8921/(273 + T)$
	20%	$\ln t = -14.35 + 8474/(273 + T)$

<표 6> 사용 온도에 따라 예측된 수명

사용온도 (°C)	수명(시간)					
	NBR (10%)	NBR (15%)	NBR (20%)	EPDM (10%)	EPDM (15%)	EPDM (20%)
15	1587	13916	243510	18306	232117	3518730
20	1156	9805	168514	11248	136899	2129723
25	850	6989	118065	7023	82125	1310925
30	632	5039	83696	4447	50111	819948



(a) NBR



(b) EPDM

<그림 12> 고무재료에 대한 수명예측 선도

## 5. 결론

냉장고 압축기에 사용 고무마운트에 고장 메카니즘 분석과 고무재료에 대한 물성시험 및 노화수명예측에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고무마운트에 제조공정과 시장단계에서의 고장현상과 요인 및 해석방법을 파악하여 고장 메카니즘을 분석하였다.
- (2) 고무재료 물성시험은 재료의 기계적 특성을 파악하기 위한 시험으로 본 연구에서는 단축인장, 이축인장상태에서 다양한 환경조건에서 시험을 수행하여 물성을 확보하였다. 노화온도와 노화일수가 증가할수록 물성변화가 커짐을 알 수 있었으며 NBR이 EPDM

보다 내열 특성이 떨어짐을 알 수 있었다.

- (3) 고무재료의 노화수명을 예측하기 위해 가속 열 노화시험을 수행하여 시간-온도 환산식인 아레니우스 관계식을 구하였다. 예측된 노화수명은 EPDM이 NBR보다 노화특성이 우수함을 알 수 있었다.
- (4) 고무부품에 대한 고장 메카니즘 분석과 고무재료 물성 및 특성변화에 대한 많은 시험 데이터가 축적된다면 고무부품의 수명예측 및 신뢰성 향상에 상당한 도움을 줄 수 있으리라 기대된다.

## 참고문헌

- [1] A. J. Tomas(1994) "The Development of Fracture Mechanics for Elastomers" , Rubber Chem. & Tech., Vol. 67, pp. 50-60.
- [2] G. L. Bradley, P. C. Chang(2001) "Rubber Modeling Using Uniaxial Test data" . J. of App. Poly. Sci., Vol. 81, pp. 837-848.
- [3] K. Miller(2002), "Structural testing of Materials for Finite Element Analysis of Elastomeric Parts" , Automotive Elastomers Conference.
- [4] L. Mullins(1969), "Softening of Rubber by Deformation" , Rubber Chem. & Tech., Vol. 42, pp. 339-362.
- [5] R. P. Brown(2002), "Rubber Product Failure" , RAPRA Reports, Vol 13, No. 3
- [6] R. P. Brown, T. Burtler and S.W. Hawley(2001), "Heat-Ageing of Rubber Accelerated Heat Ageing test Results" , RAPRA Technology.
- [7]. W. D. Kim, C. S. Woo(2003), "A Study on the Equi-biaxial Tension Test of Rubber Material" , Trans. of KSAE, Vol. 11, No. 5, pp. 95-104.