

전자부품 고무소재 신뢰성 설계기술

우창수[†] · 박현성* · 최성신**

Reliability Design Technology of Rubber Materials for Electronic Components

Changsu Woo, Hyunsung Park and Seongshin Choi

Key Words: Rubber materials(고무부품), Reliability(신뢰성), Failure Mechanism(고장 메카니즘)
Material test(물성시험), Heat aging (열 노화), Life prediction(수명 예측)

Abstract

The materials characteristics and lifetime evaluation are very important in design procedure to assure the safety and reliability of rubber components. This paper discusses the failure mechanism and material test were carried out to predict the useful life of NBR and EPDM rubber mount for compression motor which is used in refrigerator. In order to investigate the heat-aging effects on the materials properties, stress-strain curve were obtained from the results of material tests. Compression set results changes as the threshold are used for assessment of useful life and the time were plotted against reciprocal of absolute temperature to give the Arrhenius plot.

1. 서 론

전자부품의 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 요구하고 있어 선진국에 비해 기술 후발국인 우리나라는 새롭게 진입하는 시장에서의 경쟁력을 확보하기 위해서는 관련기술 확보가 절실하다 하겠다. 그러나 국내 대부분

의 고무부품 생산업체가 영세한 중소기업으로 기술개발에 대한 투자부족과 관련 기술 인력의 잦은 이동 등으로 인해 체계적인 기술축적이 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 냉장고 압축기 모터에서 발생하는 소음과 진동을 제어할 목적으로 사용되는 고무마운트에 대해 열화요인 및 고장 파손사례를 조사하여 고장 메카니즘을 분석하였으며 고무재료에 대한 물성시험을 통해 변형률에너지함수를 기반으로 고무재료 비선형 재료상수를 결정하였다. 또한, 환경시험에 의한 가속 열 노화시험을 통해 노화온도 및 노화일수에 따른 응력-변형률 관계를 파악하였으며 아레니우스 관계식을 이용하여 고무재료의 노화수명을 예측하였다. 그동안 고무분야에 대한 국내 연구개발

† 정회원, 한국기계연구원

E-mail : cswoo@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7882 FAX : (042)868-7884

* 정회원, 한국기계연구원

** 정회원, 세종대학교

및 투자는 다른 기술 분야에 비해 상대적으로 미비하였으나 세계 일류화를 지향하는 제품에 고무 부품의 사용이 날로 증가하고 있어 재료개발과 신뢰성 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 초기에 발생하는 문제이며 열화 등에 의한 사용 시 발생하는 고장은 장기수명에 관한 문제로 다루어진다. 최근 고무부품의 사용조건과 환경의 다양화에 따라 한층 복잡화하여 보통 방법으로는 쉽게 문제를 해결할 수 없기 때문에 고장 파손 사례조사 및 분석과 재현시험을 통하여 고장 요인과 고장 메카니즘 규명이 이루어져야 할 것이다[1,2].

본 연구에서는 고무 제조단계와 시장단계에서의 고장현상과 요인 및 해석방법을 파악하여 고장 메카니즘을 분석하였다. 고무부품의 제조공정은 크게 원료고무에 전단력과 온도를 가해 고무가 연화되면서 균일한 가소화 상태로 되는 소련 작업과 소련된 고무에 배합약품을 균등히 혼합하여 분산시키는 혼련작업과 쇄상 고분자속에 있는 불포화 이중결합에 유황, 금속산화물, 유기과산화물 등의 가황제 작용으로 망상결합 고분자 고무가 되어 탄성체가 되는 가황작업으로 크게 나누어진다. 제조단계인 배합·혼련·성형단계에서의 고장원인은 배합미스, 분산불량, 이물질 혼입에 의한 고장이며 가황공정에서는 가황부족 및 과다, 후 가황 등의 문제로 크게 나눌 수 있으며, 분석방법으로는 조성분석, 형태분석, 물성분석으로 분류할 수 있다. 시장단계에서의 고장요인은 변색, 균열, 경화 등의 화학적 현상과 파손, 피로, 열화 등의 물리적인 현상으로 구별된다. 또한 고장의 요인으로는 산소, 오존, 빛, 응력 등의 외적 요인과 앞에서 언급한 고무의 배합, 성형, 가황 등의 내적요인으로 나눌 수 있다. 이들 현상을

평가·해석하는 방법은 크게 열분해, 질량분석, 결정구조분석을 통한 조성분석과 광학현미경, 주사전자현미경 등에 의한 형태분석 및 열적성질, 기계적 성질, 가교구조 등에 의한 물성분석의 3가지로 분류된다.

2.2 고무마운트 고장 메카니즘

냉장고 압축기 모터에서 발생하는 소음 및 진동제어 목적으로 사용되는 고무마운트는 Fig. 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 성능 저하가 예상된다.

고무부품은 여러 환경 가운데 빛, 열, 자외선, 미생물, 화학약품, 수분, 기계적 작용 등의 영향을 받아 열화하는데, 자연 환경 하에서의 열화요인은 복합적으로 작용하므로 열화 메카니즘은 매우 복잡하다 하겠다.

냉장고용 고무마운트의 열화요인은 Table 1과 같이 80°C의 열에 의한 노화와 진동과 하중에 의한 피로, 오존에 의한 균열, 기름에 의한 팽윤, 화학약품에 의한 노화 등이라 할 수 있다.

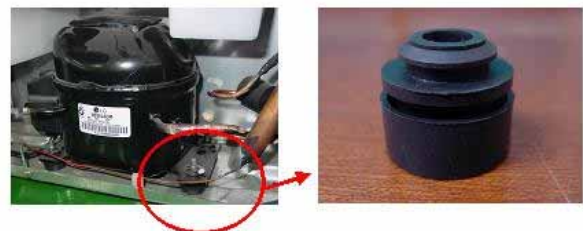


Fig. 1 Rubber mount for refrigerator

Table 1 Failure mode for rubber mount

Failure modes Requirements	파손	피로 균열	크립	강도 저하	마찰 마모	경화	팽윤
	열	●	●	●	●	◇	◇
환경	오존	○	●	◇	○	◇	●
	기름	◇	○	◇	○	◇	●
	약품	◇	○	◇	○	◇	○
	산소	○	●	◇	○	◇	○
진동, 하중	●	●	●	●	○	◇	◇

※ 중요도 : 매우중요(●), 중요(○), 보통(◇)

3. 고무재료 물성시험

3.1 시편 및 시험조건

고무재료 물성시험용 시편은 고무마운트에 사용되는 NBR과 EPDM 재료로 가황시킨 고무 컴파운드를 ASTM D3182에 따른 금형을 이용하여 가황프레스를 이용하여 압축성형으로 제작하였다. 고무재료는 점탄성(viscoelastic) 특성으로 인하여 변형률 속도(strain rate)에 영향을 받는다. 일반적으로 변형률 속도가 클수록 재료의 응력은 증가하며, 작을수록 응력완화현상으로 인하여 상대적으로 응력이 감소한다. 정적 물성을 얻기 위한 적절한 속도 범위는 0.007/s ~ 0.17/s 이며 이 구간 내에서 고무의 응력-변형률 곡선은 별 차이가 없었다. 따라서 본 연구에서는 0.01/s의 동일한 변형률속도로 각각의 시험을 수행하였다[3].

3.2 물성시험

3.2.1 기본 물성시험

단축인장시험은 Fig. 2(a)와 같이 재료시험기에 500 N 용량의 로드셀을 장착하여 수행하였으며 시편의 변형률을 측정하기 위해 레이저 신장계를 사용하였다. 시편의 표점거리는 레이저 반사 테이프를 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 Fig. 2(b)와 같이 원주방향으로 균일하게 인장시켜 하중-변형률관계를 측정하였다[4].

Fig. 3(a)는 고무재료에 대한 기본물성을 측정 한 결과로 인장강도는 NBR이 약 9MPa, EPDM은 10MPa로 나타났으며, 신율은 각각 700 ~ 800%를 나타내었다.

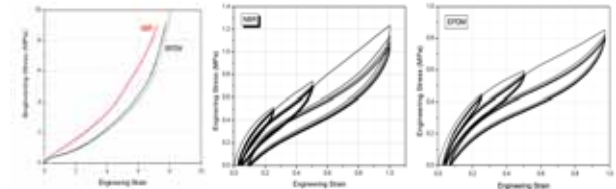
고무부품은 반복 하중을 받으면 고무 가교(crosslink) 구조의 파손과 고무분자 표면의 보강제(fillers) 이탈 등으로 강성이 감소하는 Mullins 효과가 나타난다[5]. 이는 카본블랙과 같은 보강제가 들어간 고무에서 뚜렷하게 발생하며 이러한 현상으로 인하여 고무물성을 한 가지로 표현하기 어렵다. 일반적으로 고무물성은 분자구조가 어느

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. Fig. 3(b)와 (c)는 25%, 50%, 100% 변형률구간에서 각 5회의 반복 부하-제하과정을 통하여 측정 한 하중-변위 관계로부터 계산된 응력-변형률 관계를 나타낸 것으로 Mullins 효과를 나타내었다.



(a) Uniaxial (b) Equi-biaxial

Fig. 2 Mechanical tests of rubber material



(a) Tensile strength (b) NBR (c) EPDM

Fig. 3 Tensile strength and effect of Mullins

3.2.2 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[6].

본 연구에서는 단축인장, 이축인장시험을 통해 얻어진 응력-변형률 결과를 변형률에너지함수로부터 구해진 응력-변형률의 관계식을 이용하여 Table 2에서와 같이 무니-리블린 2항과 오그덴 3항의 비선형 재료상수를 결정하였다.

Table 2 Nonlinear material coefficient

Mat.	Strain	Mooney		Ogden					
		C10	C01	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3
NBR	25%	0.230	0.096	0.340	0.456	1.786	0.469	0.738	0.471
	50%	0.227	0.048	0.392	7.4e-5	0.946	0.773	0.574	0.772
	100%	0.221	0.023	0.017	0.958	1.044	1.012	0.004	0.523
EPDM	25%	0.256	0	3.8e-5	0.473	0.525	1.949	0.544	1.1e-5
	50%	0.189	0.013	2.5e-6	0.255	0.710	1.183	0.280	2.5e-6
	100%	0.175	0.004	0.195	1.348	0.365	1.346	2.596	2.8e-6

3.2.3 열 노화시험

대부분의 고무부품들은 환경적인 영향에 의한 열 노화와 반복하중에 의한 피로손상 누적으로 인해 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.

Fig. 4~5는 응력-변형률 관계선도를 나타낸 것으로 노화온도와 노화일수가 증가할수록 강성이 높아짐을 알 수 있었으며 EPDM보다 NBR의 강성변화가 훨씬 크게 나타남을 알 수 있었다.

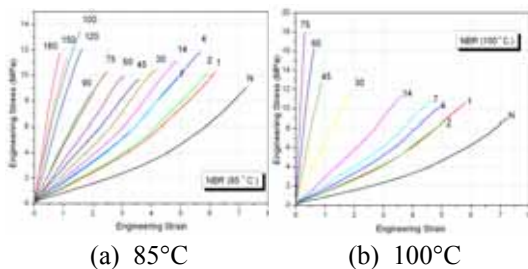


Fig. 4 Strain-stress curve for NBR

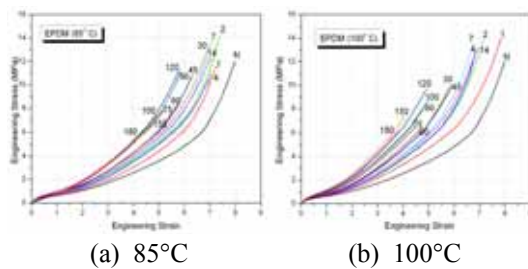


Fig. 5 Strain-stress curve for EPDM

4. 고무재료 수명예측

4.1 가속 열 노화시험

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.[7]

본 연구에서는 고무재료에 대한 수명예측을 위해 열 노화시키는 가속방법을 선택하여 가속시험을 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[7].

고무부품의 가속 열 노화시험을 위해 압축줄음률장치를 이용하여 고무부품 초기 높이의 25%를 압축하여 압축 영구줄음률 시험을 수행하였다. 고무부품은 50°C, 70°C, 85°C, 100°C의 환경챔버에서 1일에서 45일까지 일정기간동안 압축된 상태로 두어 열 노화시켰다. 주어진 시간이 경과된 후 시편을 꺼내어 압축장치로부터 분리한 후 하중-변위 관계의 특성시험을 수행하여 온도와 시간에 따른 특성변화를 파악하였다.

다양한 노화온도에서 노화일수에 대한 특성변화는 온도가 높고 노화일수가 증가할수록 증가함을 알 수 있었으며 EPDM 보다 NBR 소재의 고무부품이 특성변화가 심하게 나타났다.

Fig. 6은 온도변화에 따른 특성변화를 나타내기 위해 x축의 시간을 대수 값으로 선형화시켰으며 y축은 특성변화률을 무 차원 시켜 초기상태를 기준으로 변화된 값을 나타내었다.

고무부품의 사용수명을 특성변화율이 25%, 50%라고 한다면 온도와 시간 관계로부터 Fig. 7에서와 같은 아레니우스 선도를 구할 수 있고 최소 자승법으로부터 Table 3과 같은 아레니우스 관계식이 얻어진다. 시간 - 온도 관계식인 아레니우스 결과 식을 이용하면 임의의 온도에서 사용할 수 있는 수명을 구할 수 있다.

Table 3으로부터 계산되어 예측된 사용수명은 50%의 특성변화가 있을 때 NBR은 0.5년, EPDM은 2.5년으로 EPDM이 NBR보다 사용수명이 훨씬 우수한 고무재료임을 알 수 있었다.

Table 3 Arrhenius equations for rubber materials

Materials	Degradation	Equations
NBR	25%	$\ln t = -5.85 + 3399 / (273 + T)$
	50%	$\ln t = -15.18 + 6936 / (273 + T)$
EPDM	25%	$\ln t = -8.84 + 4398 / (273 + T)$
	50%	$\ln t = -22.98 + 9821 / (273 + T)$

4. 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.
- (3) 노화온도와 노화일수가 증가할수록 물성변화가 커짐을 알 수 있었으며 NBR이 EPDM보다 내열 특성이 떨어짐을 알 수 있었다.
- (4) 고무부품료의 노화수명을 예측하기 위해 가속 열 노화시험을 수행하여 시간-온도 환산식인 아레니우스 관계식을 구하였다. 예측된 노화수명은 EPDM이 NBR보다 노화특성이 우수함을 알 수 있었다.
- (5) 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.

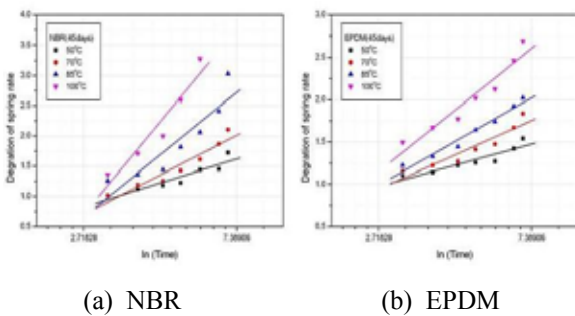


Fig. 6 Variation of properties for heat aging temperatures

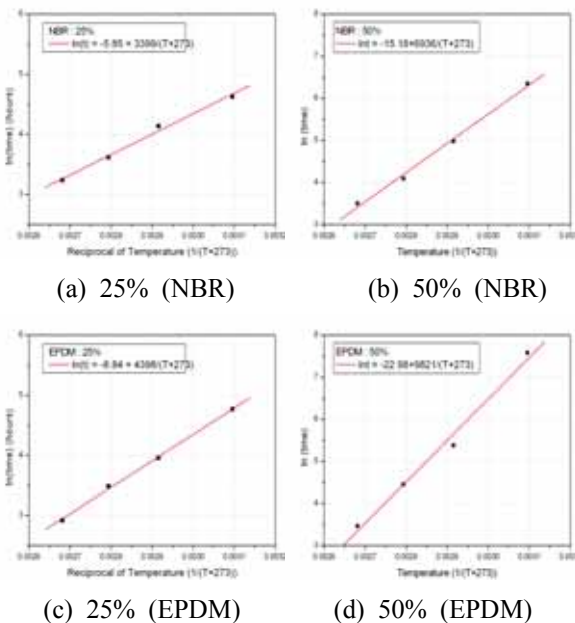


Fig. 7 Arrhenius curve of rubber materials

후 기

본 논문은 과학기술부 국책연구개발사업인 전자부품 신뢰성 설계기술사업의 연구결과의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

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