

# 고무 부품의 신뢰성 평가

글 ◦ 김 완 두 / 한국기계연구원 구조연구부, 책임연구원

e-mail ◦ wdskim@kimm.re.kr

이 글에서는 가속 열노화시험을 통하여 노화수명을 예측하는 방법과 고무 재료의 수명 선도와 유한요소해석 결과로부터 고무부품의 피로수명을 예측하여 신뢰성을 평가하는 방법을 소개하였다.

고무란 일반적으로 상온에서 약한 외력에도 큰 변형이 가능하며, 이 외력이 제거되면 원 상태로 복귀되는 성질을 지닌 탄성체 물질이다. 일반 금속재료는 하중과 변형과의 관계가 선형적인 관계를 가지는데 반해 고무 재료는 비선형 특성을 가지게 되며, 동일한 하중이 작용했을 때 철계 금속의 10만 배, 플라스틱의 1,000배 정도의 큰 변형 양상을 보이는 물질이다. 전자 현미경을 통하여 고무 물질의 분자 상태를 살펴보면 여러 개의 분자가 사슬 모양으로 복잡하게 엉켜 있는 구조임을 알 수 있다. 이

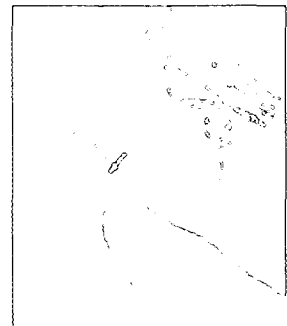
천연고무를 채취하는 헤베아고무나무

엉켜 있는 고분자 사슬이 늘어났다가 가교점으로 인하여 미끄러 빠져나가지 않고 원상으로 복귀하는 성질이 곧 고무의 탄성을 설명하는 열쇠가 된다.

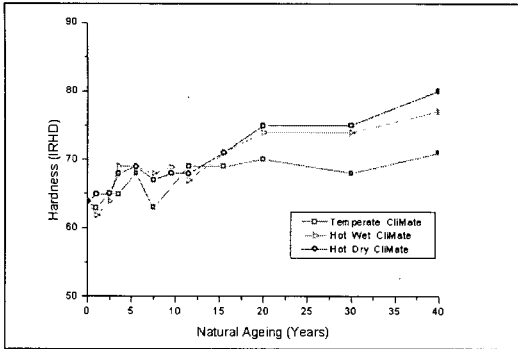
고무재료는 언뜻 보기에 최근 과학기술 분야에서 각광받고 있는 나노기술, 바이오기술, 그렇다고 정보통신기술과도 별 관련이 없어 보이긴 하나 큰 신축성과 유연성 그리고 고탄성 등의 특성으로 인하여 없어서는 안 될 핵심적인 기능부품으로서 폭넓게 사용되고 있다.

1986년 우주왕복선 챌린저호가 이륙 73초 후에 공중 폭발한 사고의 원인이 연료탱크의 고무실의 노화로 밝혀짐에 따라 고무 부품의 신뢰성의 중요성이 더욱 강조되게 되었다. 또한, 자동차 회사에서 주창하고 있는 10년 10마일 보증을 위한 핵심 애로기술이 바로 고무 부품의 신뢰성 확보에 있다는 사실은 공학자들에게 널리 알려져 있는 사실이다.

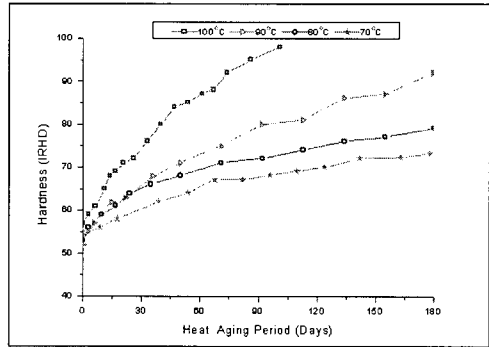
고무 부품의 신뢰성은 일반적으로 환경적인 요인, 즉 열, 빛, 공기, 오존, 기



연료탱크 고무실 노화로 인해 공중폭발한 챌린저호(1986. 1. 28)



40년간의 자연노화 고무의 경도변화



6개월간의 가속노화 고무의 경도변화

름, 산·알칼리, 습기 등에 의한 화학구조 변화에 따른 노화 현상 발생 수명과 물리적인 외적 자극에 의해 파손되는 피로수명으로 나누어 고려한다.

고무부품은 상온에서 외부의 다른 자극을 받지 않아도 시간이 지남에 따라 탄성을 잃고 딱딱해지는 노화현상이 발생된다. 영국의 라프라(Rapra Technology Limited)에서는 고무의 노화수명평가를 위하여 천연고무 등 19가지 종류의 배합고무에 대한 1948년부터 40년간에 걸친 자연노화시험과 6개월간의 가속노화시험을 실시하여 2000년도에 그 결과를 발표하여 고무 부품의 신뢰성에 관한 관심을 일깨워 주었다.

이 글에서는 가속 열노화시험을 통한 고무 부품의 수명 예측 방법과 고무 재료의 수명 선도와 유한요소해석 결과로부터 외부하중을 받는 고무부품의 피로수명 예측 방법 및 절차를 소개하고자 한다.

### 가속 노화시험

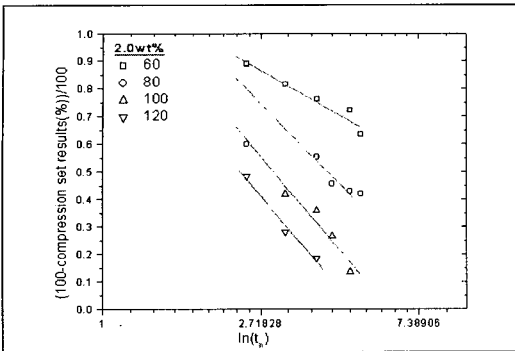
가속시험의 기본 개념은 특성저하 인자의 수준을 증가시켜 고무제품의 특성이나 성능을 단시간 내에 감소시키는 것으로서 사용 온도를 높게 하여 고무제품의 노화속도를 빠르게 하거나 오존농도를 증가시켜 균열이

보다 빠르게 진행되도록 하는 것이다. 이 때 열화 또는 파손은 동일한 양상을 나타내어야 한다.

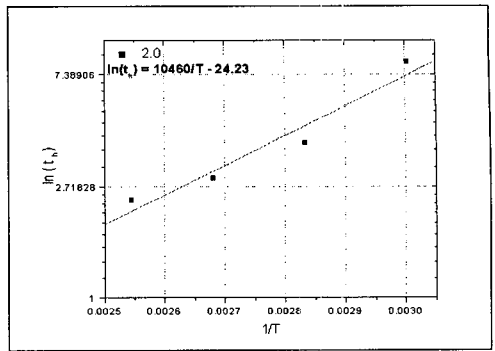
가속 시험을 통하여 얻어진 데이터로 고무 제품의 수명을 예측하는 방법에는 아레니우스(Arrhenius) 모델과 WLF(Williams Landel Ferry) 모델이 있다. 아레니우스 모델은 여러 온도에서 고무제품의 초기 특성 값의 일정 변화가 발생하는 시점을 수명으로 판단하여 시간-온도의 마스터 선도 및 관계식으로 표현된다. 이러한 관계로부터 특정 온도에서의 예측 수명을 계산할 수 있으며, 상온에서의 자연노화에 의한 수명을 가속 시험 결과로 얻어진 데이터를 이용하여 예측할 수 있다.

WLF 모델은 여러 온도에서의 시간-특성 값의 데이터를 시간-온도 중첩의 원리를 기본으로 하여 마스터선도를 구하는 것이다. 즉, 기준 온도에서 시간-특성치의 관계를 얻는 것으로서, 수명시간을 직접 계산하여 예측하기보다는 기준 온도에서 시간에 따른 특성 값의 변화를 알아보는 데 유용한 모델이다. 이 글에서는 여러 특성저하 요인 중 온도만을 증가시키는 가속시험 방법을 설명한다.

일반적으로 방진을 목적으로 하는 고무부품은 압축영구줄임량이 일정 수준 이상이



방진고무의 온도변화에 따른 압축영구줄음률

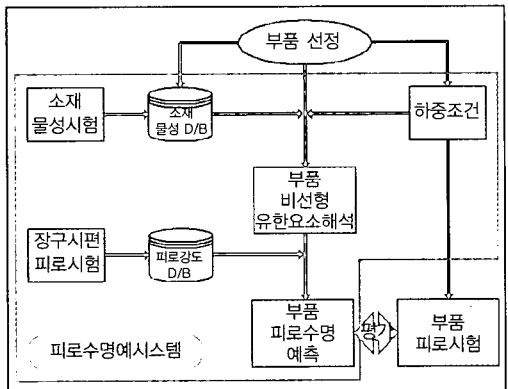


압축영구줄음률에 대한 아레니우스선도

되거나 경도가 지나치게 커지면 진동 감쇠의 성능을 발휘할 수 없게 되어 수명을 다했다고 판정할 수 있다. 여러 온도에서 시간에 따른 노화시험을 실시하여 압축영구줄음률이 20% 발생되었을 때를 수명으로 간주하여, 각 시험온도를 절대온도로 환산 값의 역수(1/T)를 x축에 나타내고 수명의 자연대수 값(ln(t))을 y축으로 나타내어 직선으로 나타낸 식이 바로 아레니우스 모델식이 된다. 이 모델식으로부터 알고자 하는 온도에서의 수명을 계산할 수 있게 된다.

### 고무부품의 피로수명 예측

자동차 엔진마운트와 같이 사용 중에 반복하중을 받는 고무부품의 신뢰성을 확보하기



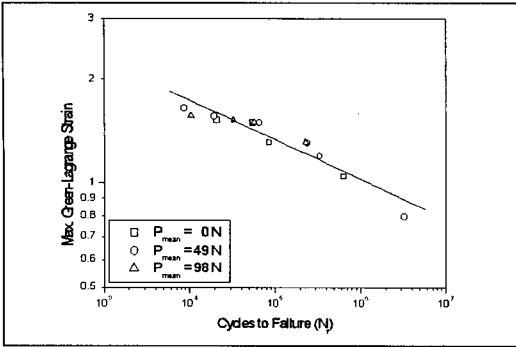
고무부품 피로수명 예측 시스템

위해서는 피로수명시험을 통한 내구성을 평가하여야 한다.

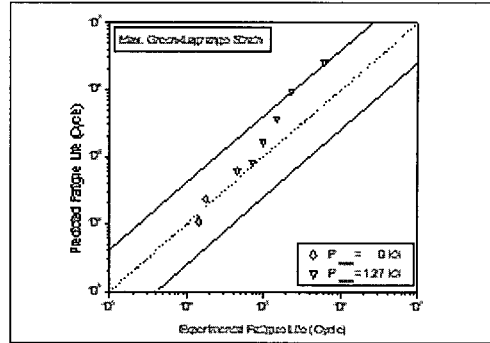
금속 재료로 만들어진 대부분의 자동차 부품은 수많은 연구결과를 통해 얻어진 피로수명식과 피로물성 데이터베이스를 이용하여 비교적 정확히 수명을 예측할 수 있는 수준에 이르게 되었다. 그러나 고무부품의 경우, 고무 물성의 비선형 및 대변형성으로 인한 해석의 어려움과 피로강도 물성 미비 등으로 인하여 피로수명 예측이 아직 미진한 실정이다. 특히, 고무부품의 비선형 물성과 피로 물성 등은 고무부품의 선진 업체에서 기술 자료 제공 및 공개를 극히 꺼리는 분야이다.

필자의 연구팀에서는 국가지정연구실사업의 일환으로 고무부품의 피로수명 예측시스템 개발을 위한 연구를 수행하고 있다. 고무부품의 피로수명 예측 절차는 다음과 같다.

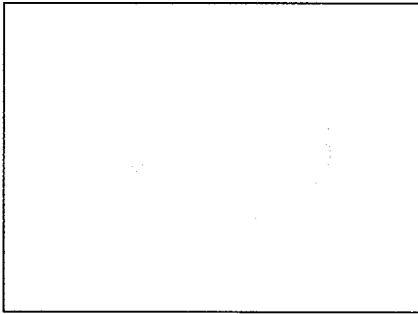
대상 부품이 선정된 이후에 고무소재의 물성시험 결과를 이용하여 부품의 유한요소해석을 수행하고, 최대변형률과 하중과의 관계를 구한다. 부품과 같은 물성을 갖는 장구형 시편의 피로시험을 수행하여 최대변형률과 피로수명과의 관계를 구한다. 부품의 유한요소해석 결과와 장구시편의 피로시험결과를 이용하여 부품의 피로수명을 예측하고, 예측된 피로수명과 실제 부품의 피로시험결과를



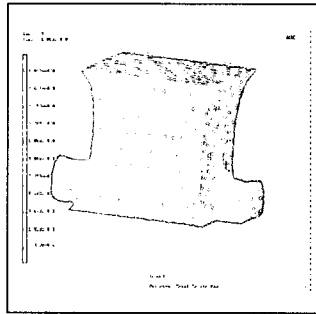
장구형 시편의 최대 변형률-피로수명 선도



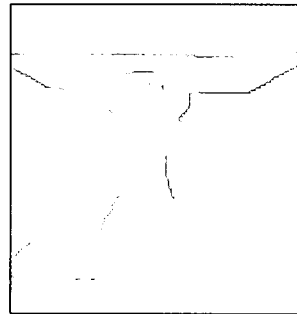
예측 피로수명과 실제 피로수명의 비교



상용차용 엔진마운트



엔진마운트의 유한요소모델



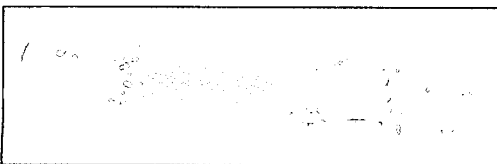
장구형 피로시편

비교 평가하여 제안된 피로수명 예측 절차의 타당성을 검증한다.

상용차용 엔진마운트를 대상으로 피로수명 예측을 수행한 결과 예측된 피로수명과 실제 부품의 피로수명 결과 3~4배 이내에서 잘 일치함을 알 수 있었으며, 동일한 절차로서 새롭게 개발되는 고무부품의 피로수명 예측에 활용할 수 있는 기반을 구축하였다.

### 고무부품의 신뢰성

일류화를 지향하는 고품질 · 고품위 · 고신



고무-코드 인공근육이 장착된 로봇팔

회성 제품의 경우 기본적인 기능 외에 저진동, 저소음화 및 작동감 향상 등을 위하여 고무 탄성체를 이용한 부품의 사용이 증가되고 있는 추세이며, 고무부품에 대한 높은 수준의 신뢰성이 요구되고 있다.

고무부품은 자동차, 철도차량 및 일반 산업분야뿐 아니라, 반도체, 정보통신, 바이오, 항공우주 산업 등 미래 산업분야에서도 핵심 기능부품으로서 널리 활용되고 있으며, 동 부품의 신뢰성이 전체 제품이나 시스템의 수명 또는 신뢰성을 좌우하게 된다는 사실에 주목하게 되었다. 그간 중요성에 비해 소재 물성의 재현성 및 신뢰성 미비 등으로 인하여 상대적으로 설계 엔지니어들의 관심분야에서 소외되어 왔던 고무부품의 신뢰성에 대한 많은 연구 개발을 통하여 한 단계 진보된 고품질의 제품을 만드는 데 기여할 수 있을 것이다.