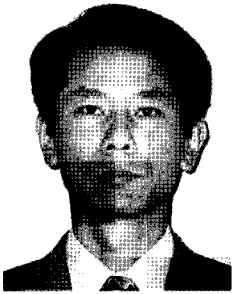


고무류 기계부품의 피로수명 평가



김완두
(KIMM 구조시스템연구부 고무역학국가지정연구실)

- '76 서울공대 기계설계학과(학사)
- '80 서울공대 기계설계학과(석사)
- '93 서울공대 기계설계학과(박사)
- '95 ~ '96 미국 퍼듀대학교 Visiting Scholar
- '82 ~ 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서언

고무재료는 진동 감쇠, 탄성 변형 및 밀봉성 등 공학적으로 우수한 특성으로 인하여 여러 분야에 널리 사용되고 있다. 고무스프링, 완충기, 셀, 가스켓, 호스, 고무벨트, 각종 고무롤 등 일일이 열거하기에도 너무 많은 부품들이 광범위하게 사용되고 있음에도 불구하고, 고무에 관련된 학문과 기술은 다른 분야에 비해 놀랄 만큼 뒤떨어져 있는 것이 현실이다. 그 원인은 고무에 관련된 많은 기술들이 체계화되어 있지 못하였으며, 설계 공학자 들에게 고무는 의심쩍고 신뢰성 및 재현성이 좋지 않은 재료로 취급되어 왔으며 가능하면 사용을 기피하려는데 있었던 것으로 알려져 있다. 그러나, 많은 경우에서 고무 부품의 사용은 공학적인 문제점에 간단하고 명쾌한 해결책을 제공하기도 한다^[1].

고무는 1493년에 콜럼버스가 두 번째로 신대륙을 탐사하다가 하이티 섬에서 원주민이 고무공을 가지고 놀던 것을 보고 유럽에 최초로 소개하였으며, 그 이후 1770년에 산소를 발견한 영국의 유명한 화학자인 Priestry의 저서에서 고무를 지우개로 사용할 수 있음이 언급되어 이것으로부터 고무(rubber; 문지르다)라는 명칭이 태어났다. 19세기 말에 미국의 Goodyear는 가황법을 우연히 발견하여 고무가 공업용 재료로 사용될 수 있는 계기를 마련하였으며, 1, 2차 세계대전 중에 대량의 고무 수요를 충족하기 위하여 합성고무가 개발되게 되었다. 표 1은 고무의 개략적인 역사를 보여주며, 표 2는 대표적인 고무 종류와 특징을 보여준다.

고무는 1881년 '인도고' 라는 명칭으로 국내에 맨 처음 소개된 이후로, 통상 신고무 소비량으로 정의되는 고무산업의 규모가 90년대에 해마다 2.7% 씩 증가하여 1997년에는 74만톤에 이르러 미국, 중국, 일본에 이어 세계 4위의 자리를 차지하고 있다^[2].

최근 일류화를 지향하는 선진 제품의 경우, 기본적인 기능 외에 저진동, 저소음화 및 작동감 향상 등을 통한 고품질·고품위·고신뢰성 달성을 위해 자동차를 비롯한 대부분의 기계제품에 고무류 부품의 사용이 날로 증가하고 있는 추세이다. 다른 기계류 부품과 마찬가지로 고무류 기계부품도 성능 향상과 품질 고도화의 요구에 따라 부품 개발 시 고도의 설계 및 해석기술이 요구되고 있는 실정이다. 대부분의 고무류 기계부품의 설계는 재료의 비선형성과 대변형의 특수한 성질로 인하여 시행착오에 의한 경험적인 수법에 의존하여 왔다. 최근에는 컴퓨터의 대형화 및 고속화에 따라 유한요소법을 이용한 비선형 해석을 통하여 고무 재료의 거동을 해석하는 것이 가능해짐에 따라 고무부품의 설계·해석에 체계적이고 분석적인 방법을 이용할 수 있게 되었다. 인장, 압축 및 전단 시험 등을 통하여 구한 고무의 비선형 재료상수를 이용하면 하중-변형-응력-변형률 등의 관계를 유한요소해석으로부터 비교적 정확히 예측할 수 있게 되었다^[3].

고무류 기계부품은 대부분 사용 중에 반복되는 하중을 받는 경우가 많으며, 부품의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 피로수명 및 내구성에 관한 검토가 수행되어야 한다. 고무 재료 및 부품의 피로수명 평가에 대해서는 여러 연구자들에 의해 오래 전부터 연구되어 오고 있으나, 흔히 사용되는 금속재료에서와 같은 피로 물성 데이터는 잘 알려져 있지 않아 고무 부품의 피로수명 설계는 현실적으로 불가능한 실정이다. 특히, 고무 재료는 고무만이 지닌 특수한 성질로 인하여 일반적인 금속재료의 피로 현상과 상이한 결과를 보이기도 한다^[4, 5, 6].

본 고에서는 고무 피로시험 방법과 피로 과정에 대해 간략히 살펴보고, 피로수명에 영향을 주는 여러 가지 인자들을 조사·분석하고 고무의 피로수명 평가에 관련하여 국가지정 연구실 사업에서 수행하고 있는 연구내용을 소개하고자 한다.

2. 고무 피로시험 및 피로파괴 과정

2.1 고무 피로시험 분류

고무재료의 시편 상태에서의 피로시험 방법은 피로파괴 양상에 따라 피로균열시험(응력집중부에서의 파괴)과 발열에 의한 내부 파괴시험으로 분류할 수 있으며, 시험편의 형상과 반복 변형 부여 방식에 따라 분류하면 그림 1에 보는 바와 같다. 표 4는 그림 1의 시험편 및 변형 방식을 파괴 양상과 피로시험 방법에 따라 다시 분류한 것이며, 결국 피로시험은 다음의 4가지 방법으로 분류, 정리할 수 있다.

- 굴곡(굽힘) 피로시험
- 인장·압축 피로시험
- 회전전단, 회전굽힘 피로시험
- 압축·전단·비틀림 피로시험

그림 2는 정변위 피로시험과 정하중 피로시험의 시간에 따른 하중 및 변위의 변화 양상을 보여준다.

2.2 피로파괴 과정

고무에 반복응력 또는 변형률을 가하는 경우, 시험조건, 고무재질 등에 따라서 피로의 과정은 다르지만 물성은 일정한 경향을 가지고 변화하며, 물성 변화를 다음의 3단계로 구별할 수 있다.

- 제1단계 : 부하 개시 직후의 응력, 변형이 급격히 저하하는 기간 (초기단계—연화현상)
 → 순고무에서는 거의 일어나지 않는다. 약한 결합, 고무분자간의 응집 결합의 절단 등이

技術現況分析

표 1. 고무의 역사

○ Columbus(1493) : Haiti 섬 원주민 고무공 놀이 유럽에 소개 → Hevea Braziliensis(천연고무나무)
○ Priestry(영, 1770) : 지우개로 사용(Rubber 명칭)
○ Goodyear(미, 1893) : 가황법 발견, 공업재료로 활용 기반 구축
○ Wickham(영, 1877) : 고무 종자 밀반출, 싱가포르 이식 → 고무 주산지 : 동남아시아(1900년대 초)
○ Dunlop(스코, 1888) : 공기 Tire 실용화
○ 가황 촉진제 발견(1906), Carbon Black 보강제(1910) 발견
○ 합성고무 개발(독일, 1933) : 일본 동남아 점령, 고무 부족
○ 합성고무의 발전(1940년 이전, ~1959년, 1960년 이후)
용어 : 고무(불어 : Gomme, 일어 : 고무)

표 2. 대표적인 고무 종류 및 특징

고무종류	주요 특성	경도 (쇼아A)	인장강도 (kg/cm ²)	신장률(%)	주요 용도
천연고무	촉감이 좋고 기계적 성질 우수	30-90	70-280	100-600	자동차, 트럭의 타이어, 신발, 호스, 공기스프링
스틸렌-부타디엔고무	내마모성, 내노화성이 양호하고 값이 싸다.	40-90	50-230	100-500	자동차 타이어와 신발, 고무 방수포, 운동용품, 벨트
부타디엔 고무	탄성이 좋고 내마모성이 우수	40-90	50-230	100-500	방진고무, 항공기 타이어, 신발, 고무롤, 벨트, 호스 등 공업용품
클로로프렌 고무	내후, 내오존, 내열, 내약품, 내노화성이 우수	40-90	60-250	100-500	전선피복, 콘베어 벨트, 방진고무, 창틀고무, 집착제, 고무방수용 및 일반 공업용품
니트릴 고무	내유, 내마모, 내노성이 우수	40-90	50-250	100-500	오일실, 가스켓, 내유호스, 콘베어벨트
부틸고무	내후, 내오존, 내가스 투과성 우수	35-90	50-250	100-600	자동차 타이어용 튜브 curing bag, 전선피복, 창틀고무, 증기호스
에틸렌-프로필렌 고무	내노화, 내오존, 극성액체에 대한 저항성, 전기적 성질 양호	40-90	50-200	100-500	전선피복, 자동차 웨더스트립, 증기호스, 콘베어벨트
클로로솔론화 폴리부틸렌 고무	내노화, 내오존, 내약품, 내마모성 양호	50-90	70-200	100-500	내후성, 내식성도료, 탱크라이닝, 고무방수포, 내식성 패킹
아크릴 고무	고온에서의 내유성 양호	40-90	60-140	190-400	자동차 트랜스미션, 크랭크샤프트의 패킹 및 시일
플루오르 고무	최고의 내열, 내약품성	60-90	70-150	100-300	내열, 내유, 로켓패킹, 내식 패킹, 다이어프램
실리콘 고무	고도의 내열성과 내한성	30-80	30-90	100-150	패킹, 가스켓, 오일시일

표 3. 고무산업 규모(신고무 소비량 74만톤, 세계 4위, 1997년)

국가	미국	중국	일본	한국	기타(인도, 독일, 프랑스, 러시아 등)
비율	20.2	11.8	11.2	4.4	52.4

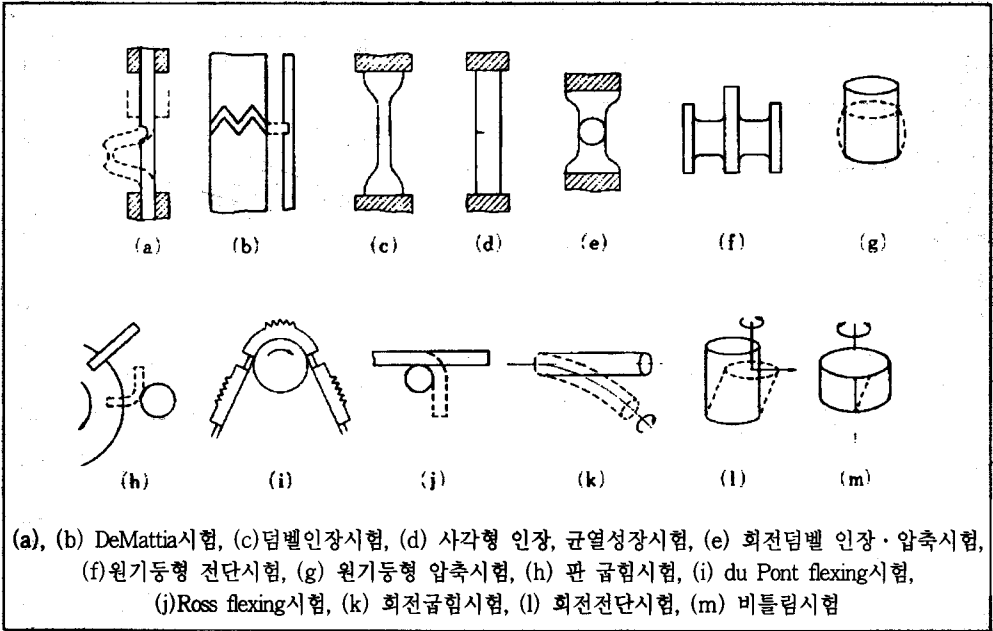


그림 1. 피로시험 시험편과 변형 방식의 개념도

표 4. 피로시험방법의 분류

파괴양상	시험편의 특징	변형양식	피로시험방법
피로균열	<ul style="list-style-type: none"> 변형률(응력) 집중부를 지닌 시험편 그림 1의 (a), (b), (d), (h), (i) 	굽힘	<ul style="list-style-type: none"> 굽힘 피로시험 그림 1의 (a), (b), (h), (i), (j)
	<ul style="list-style-type: none"> 동일한 변형률 분포를 가지는 자유 표면적이 큰 시험편 그림 1의 (c) 	인장	<ul style="list-style-type: none"> 인장·압축 피로시험 그림 1의 (c), (d), (e)
	<ul style="list-style-type: none"> 블록 모양의 시험편 그림 1의 (e), (f), (m) 	인장·전단 비틀림·굽힘	<ul style="list-style-type: none"> 인장·압축 피로시험 회전전단·회전굽힘 피로시험 압축·전단·비틀림 피로시험 그림 1의 (c), (d), (e), (f), (g), (k), (l), (m)
내부파괴	<ul style="list-style-type: none"> 블록 모양의 시험편 	인장·전단	<ul style="list-style-type: none"> 압축·전단·비틀림피로시험 회전전단·회전굽힘피로시험 그림 1의 (f), (g), (k), (l), (m)

발생한다. 응력 또는 진동수 의존성이 나타나지만, 반복을 중지하면 회복된다.

제2단계 : 응력, 또는 변형의 변화가 완만한 기간으로 고무의 표면 또는 내부에 파괴의 핵이 생성되는 기간 (온도가 그다지 높지 않을 때는 경화현상 발생).

→ 물성결합의 변화, 산화에 의한 분자사슬의 절단 및 가교, 유황 가교의 변화, 고무와 충전제 입자표면의 응집결합의 변화, 충전제의 재분산 재결합 등 내부의 구조 변화가 일어난다.

제3단계 : 파괴의 핵이 성장하여 균열이 감지

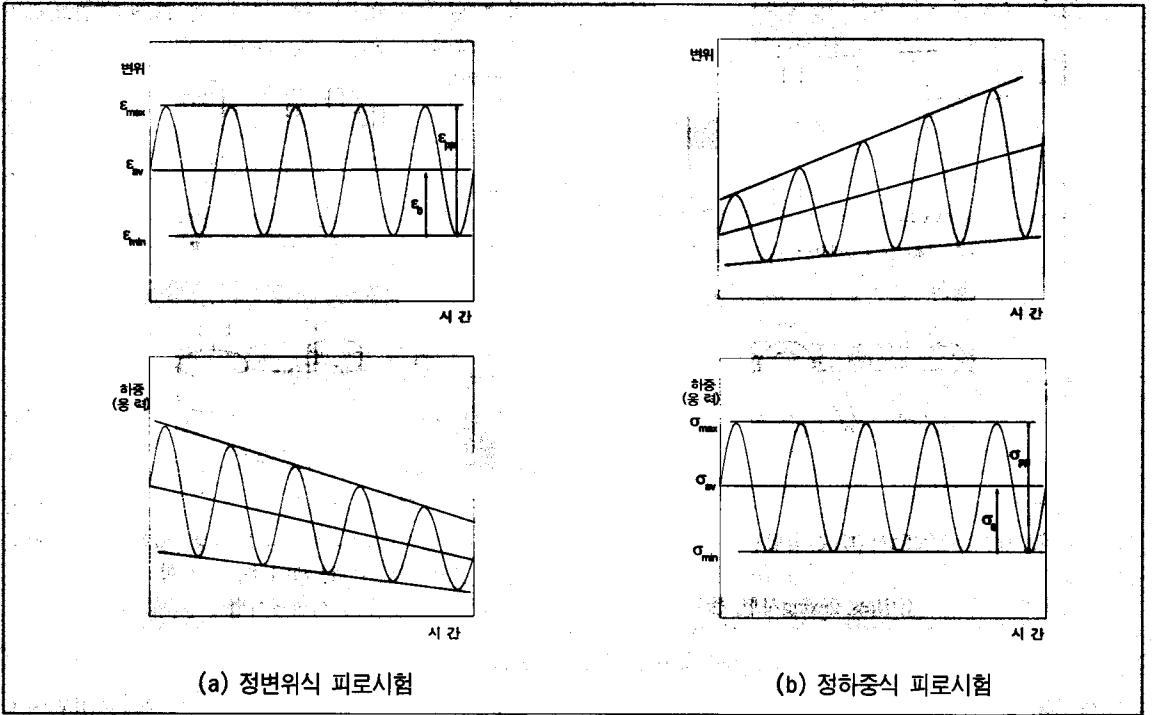


그림 2. 정변위 피로시험과 정하중식 피로시험

되어, 마침내 계 전체가 파괴에 이르기까지의 기간(파괴현상-피로파괴).

→ 파괴의 핵이 집중응력을 받아 성장하여 파괴에 이른다. 시료의 형상(극부변형)이 크게 영향을 준다.

피로현상에 미치는 요인으로서 폴리머의 종류, 충전제의 종류와 양, 가황제 및 가황조건, 연화제, 가소제, 노화방지제 및 고무의 반죽조건 등을 들 수 있고, 또 시험조건도 그 요인의 하나이다. 피로파괴는 피로과정의 제2단계 도중부터 제3단계의 끝까지의 현상이라고 볼 수 있으며, 고무표면의 흠집, 오존에 의한 균열 또는 구조변화에 의해서 파괴의 핵이 생성되어 균열의 끝 부분에서 응력의 집중이 일어나고, 균열이 성장하여 결국에는 고무의 파괴에 이르는 현상이다. 고무의 파괴에 이르기까지 균열부 표면의 마찰에 의해서 고무의 용융 점착화도 가해지는 일이 있다. 또한, 반복속도가 빨라지거나 응력(또는 변

형) 진폭이 큰 경우에 고무의 발열이 발생하고, 그것이 축적되어 내부가 고온이 되어 파괴되는 경우도 발생된다.

피로파괴 과정을 i) 미세 균열 생성 과정, ii) 균열의 성장 과정, iii) 파괴의 최종 과정으로 분류하여 특징을 살펴보면 다음과 같다^[7].

2.2.1 미세 균열 생성 과정

크랙이 어떻게 해서 생성되는가는 실제로 잘 알려져 있지 않다. 다만, 임의 조건 (예를 들면 마이너스 압력)이 성립되면 크랙이 발생한다고 하는 것은 대략 알려져 있지만, 항상 그 같은 조건하에서 크랙이 발생하는가에 대해서는 아직 의문이 남아 있는 실정이다. 그러나 고무를 포함하는 고분자재료에서는 일단 다음의 과정을 거쳐 파괴 기점이 되는 미세 균열이 형성된다고 알려져 있다.

① 재료가 부하를 받으면 분자고리는 인장 방

향으로 움직이고 서로 미끄러져 재배열된다.

- ② 재료 내에 분자고리의 움직임을 방해하는 인자, 즉 가교, 엉킴, 충전물 등이 존재하면 분자고리에 긴장상태의 응력이 발생되어 국부적 절단이 초래된다.
- ③ 1개 분자고리가 절단되면 그 옆의 분자고리가 응력을 부담하게 되므로 분자고리의 절단은 주위로 전파되고, 집합되어 결국 미소보이드를 형성한다.
- ④ 미소보이드 중 임계크기 (C_0)로 성장한 것은 미세 균열이 되어 비가역적으로 성장을 계속하고, C_0 에 도달하지 못한 것은 소멸한다.

고무 재료 내에 이물질이나 기공 등의 잠재 결함이 없을 경우, 위의 과정을 거쳐 미세 균열이 형성되는데 비해, 계 안에 잠재 결함이 있을 경우, 그 결함이 미세 균열 역할을 한다. 고무나 플라스틱 안에는 이같은 결함이 많이 존재한다고 생각되며, 미세 균열의 발생은 먼저 잠재 결함을 기점으로 한다고 하는 가정이 일반적이다. 어느 정도 크기의 결함이 임계 균열이 되는가에 대해서는 고무의 종류나 카본 충전의 유무에 상관없이 거의 $40 \pm 20 \mu\text{m}$ 정도라고 추정되고 있으며, 이것은 날카로운 노치가 같은 결함이 존재한다고 했을 때의 값이고, 보통의 둥그스름한 것에서는 $100 \mu\text{m}$ 이상의 크기가 된다고 알려져 있다.

2.2.2 균열의 성장 과정

Griffith 이론에 따르면, 길이 C 인 균열을 지닌 탄성체에 부하를 가하면 균열이 성장할 경우, 변형에 의해 탄성체에 축적되어 있던 탄성변형에너지의 일부가 감소하고, 표면에너지를 가지는 새로운 면이 형성된다고 밝히고 있다. 그 결과 탄성변형에너지의 감소분이 표면에너지 증가분보다 많아지는 조건이 성립되면 계 전체로서는 에너지가 저하되기 때문에 균열은 성장을 계속한다. 이 임계조건을 정해주는 것이 균열의 길이이며, 전술한대로 C 가 C_0 보다 클 때 위의 조건이 성립되어 균열은 성장하게 되며, C_0 이하의 크기

에서 균열은 성장하지 않고 소멸한다. Griffith이론은 균열주변의 탄성역학과 합쳐져 파괴역학으로 전개되어 오늘에 이르고 있다.^[8]

Rivlin과 Thomas는 대변형 재료인 고무에 Griffith의 파괴조건을 적용했으며, 균열 길이의 증가에 수반되는 변형에너지(W_E) 감소량과 인열에너지(T)의 관계를 다음과 같이 정의 하였다.^[9]

$$T = -\frac{1}{d} \frac{\partial W_E}{\partial C}$$

여기서, d 는 시편 두께이며, T 는 두 개의 새로운 파괴표면을 만들어내는데 필요한 에너지로 임계치 T_c 를 넘었을 때 파괴가 시작된다. T_c 값은 실험적으로 구해져, 노치가 있는 사각형 시험편에서 다음 식으로 주어진다.

$$T_c = 2kW_{EC}$$

단, k 는 변형률의 함수이며, W_{EC} 는 시험편에서 파괴가 시작되었을 때의 변형에너지이다.

Lindley & Thomas는 균열의 성장속도 (dc/dn)와 T_c 사이에 다음 식이 성립한다는 것을 실험적으로 밝혔다.^[8]

$$\frac{dc}{dn} = \frac{1}{G} T_c^\beta$$

여기서, n 은 반복수, G 와 β 는 균열의 성장에 관련된 재료상수이다.

그림 3은 dc/dn 와 T_c 의 관계를 보여준다.

한편, 재료의 피로파괴특성을 나타내는 표시법으로서 일반적으로 이용되어 온 것이 응력-수명, 변형률-수명 선도 등의 S-N곡선이다. S-N곡선을 이용하면 그 부재에 가해지는 응력 또는 변형률 값에 대해 파단까지의 반복수 n 을 직접 예측할 수 있다고 하는 장점을 가지지만, 피로파괴 메카니즘 해석 등으로까지의 접근에는 적합하지 않다. Fukahori는 파괴역학을 기본으로 하여 S-N 선도를 이론적으로 해석하였으며, 고변형률에서 저변형률까지 폭넓은 영역을 하나의 S-N 선도로써 간단히 구할 수 있는 방법을 제시하였다.

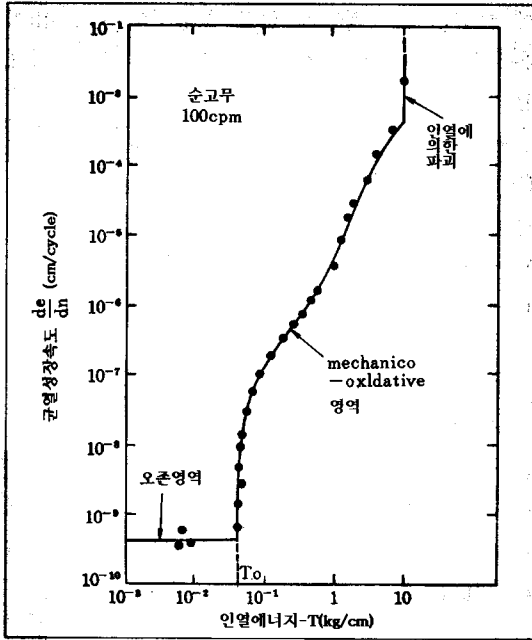


그림 3. 균열성장속도 dc/dn과 T의 관계

서로 다른 초기 균열길이를 지닌 사각형 형상의 시험편에 대한 신장비 대 수명($\lambda \sim \log N$) 선도를 구한 후 이들 선도를 수명 축을 따라 평행 이동시켜 균열이 없는 시험편의 선도와 겹쳐 통합선도를 구하였다^[10]. 그림 4는 카본이 보강된 천연고무의 균열길이 변화에 따른 S-N 선도이며, 그림 5는 균열길이가 영인 경우로 통합시킨 S-N 선도를 보여준다.

피로파괴에 관련된 재료상수로부터 피로수명(N)은 다음 식으로 산출되며, 표 5에 대표적인 고무 재료의 재료상수 값을 보여준다.

$$N = \frac{G}{(\beta-1)(2kW)} \left(\frac{1}{C_0^{\beta-1}} \right)$$

표 5. 고무의 피로파괴 재료상수

	E(dyn/cm ²)	β	C ₀ (cm)
NR 순고무	4.3×10 ⁶	2.42	5.8×10 ⁻³
카본 보강 NR	4.1×10 ⁷	1.78	5.0×10 ⁻³
폴리우레탄 A	4.0×10 ⁷	3.00	4.4×10 ⁻³
폴리우레탄 B	5.0×10 ⁷	2.64	3.0×10 ⁻³
DVB 보강 IR	8.2×10 ⁷	2.30	3.7×10 ⁻³

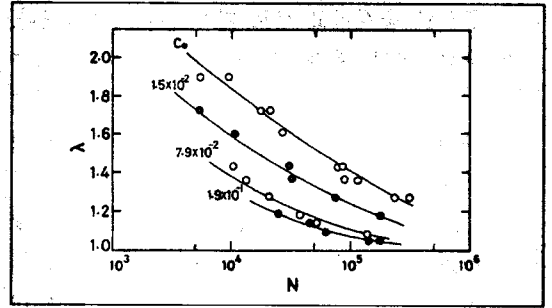


그림 4. 균열길이에 따른 S-N 선도

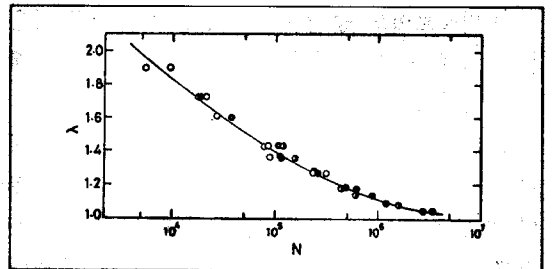


그림 5. 통합 S-N 선도

3. 피로수명 영향 인자^[4]

3.1 피로파괴의 개시원

피로파괴의 원인이 되는 흠집은 고무의 표면 및 내부의 불균일성에 기인하지만, 최초로 존재하고 있는 흠집의 크기를 이미 알고 있다면 피로수명은 관계식으로부터 추정할 수 있다. 금형의 표면에 의한 고무제품의 흠집의 크기는 10⁻³cm의 order이고, 천연고무 중의 이물질의 크기는 10⁻²cm에 도달하는 것도 있지만 대체로 이 이하이다. 고무에 생긴 흠집의 크기, 또는 고무 중의 이물질의 입자경과 피로수명의 관계를 그림 6과 7에 보여준다.

3.2 반복변형의 영향

균열성장을 시작하기 위해서 필요한 최소균열 에너지 T₀는 단순신장의 경우에 다음과 같다.

$$T_0/C_0 = (2KW) e_0$$

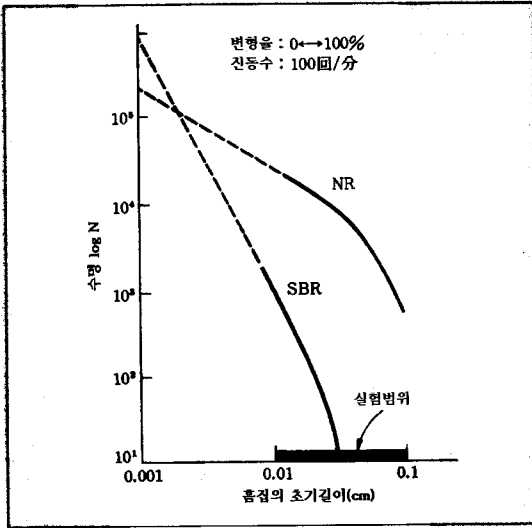


그림 6. 흠집의 크기와 수명

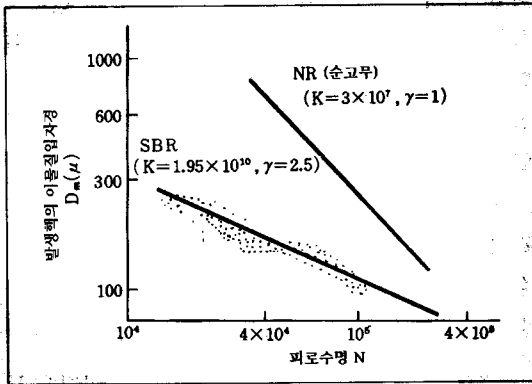


그림 7. 이물질 입자경과 수명

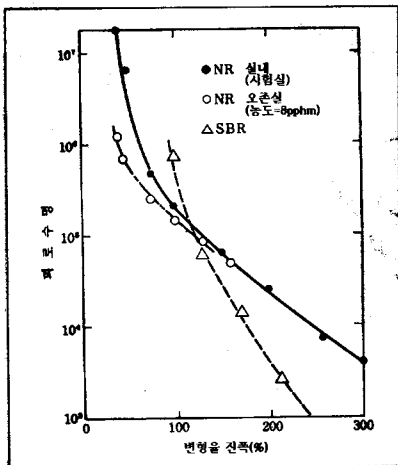


그림 8. 변형률 진폭 의존성

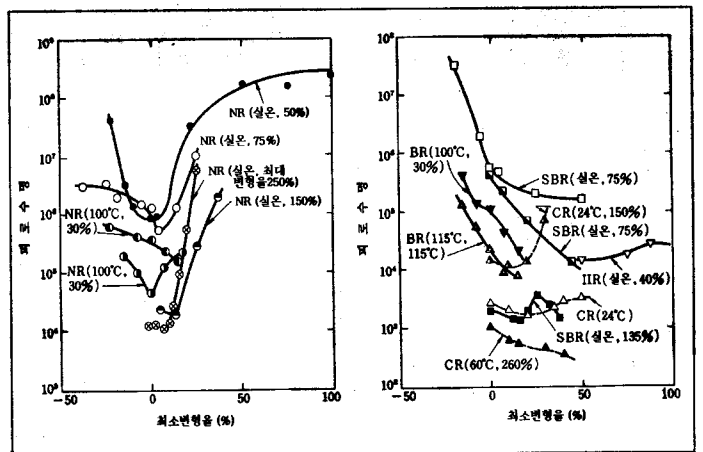


그림 9. 최소변형률의 영향

여기에, e_0 : 피로한계(최소)에 대응하는 인장 변형률(한계변형률)이다. 실험에 의하면, NR의 순고무 배합에서는 e_0 는 약 75%로 알려져 있으며, 한계변형률 이상의 변형률에 의해서 균열은 성장할 것이다. 변형률의 영향에서는 변형률 진폭과 최소변형률의 영향이 있다.

그림 8에 변형률 진폭과 피로수명의 관계를 보여주며, 그림 9는 최소변형률의 영향을 보여준다. 최소변형률의 영향을 정리하면,

- (i) 최소변형률이 압축 측으로 이동하면 수명이 증가하고, 이 증가의 경향은 고무재료에는 관계가 없다. 그러나, 압축변형이 커지면 제품의 형상, 크기에도 좌우되며 주름이 발생하여 주름에 의한 균열의 발생, 고무의 점착의 문제가 생기게 된다.
- (ii) 최소변형률이 인장 측으로 이동하면 수명이 증가하는 것과 감소하는 경우가 있다.
- (iii) 인장 측에서 수명이 증가하는 경우는 수명이 일단 저하한 후 극소치를 취하고, 이어서 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이것은 고무의 영구변형의 영향이 나타나고 있는 것으로 추정된다.

그림 10은 변형률에너지와 피로수명의 예를 보여주는데 수식에 있어서 $N \propto W^{-\beta}$ 의 관계가 있고, 이 W 는 고무의 신장비에 의해서 크게 영향

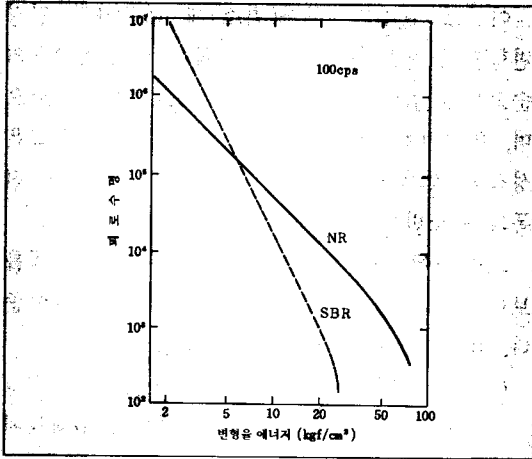


그림 10. 변형률에너지와 피로수명

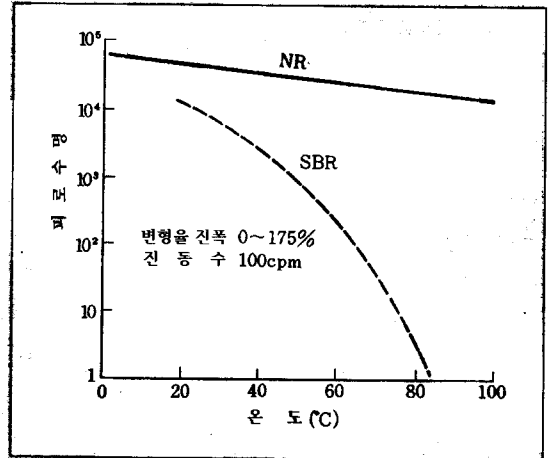


그림 11. 온도와 피로수명

을 받고 있다.

3.3 온도의 영향

온도는 산화와 그 외의 반응을 촉진시키기 때문에 피로수명에 영향을 준다. 온도와의 관계를 그림 11에 나타내었다. NR은 100℃까지는 그다지 변화는 없지만 SBR에서는 온도에 따라 상당한 수명 저하 현상을 나타내었다.

3.4 분위기의 영향

고무제품이 사용되고 있는 장소는 대기 중이

고, 산소 및 빛 또는 오존의 영향을 받는 것을 피할 수 없다. 산소와 빛의 영향은 고무 전체의 성능 및 표면 균열의 현상으로써 피로파괴의 원인 및 촉진에 관여한다. 오존은 고무 표면에 직접적인 균열을 발생시키기 때문에, 피로파괴에 있어서는 대단히 중요한 인자이다.

변형률 및 오존에 노출된 시간과 피로수명의 관계를 그림 12에 보여준다. 수 %의 변형률 지점에서 수명이 최소치를 취하고 있다. 또한, 그림 8에서는 8pphm의 오존 공기 중에서의 결과가 병기되어 있으나, 오존의 영향은 약 75% 신장 이상에서는 거의 없어지고 있는 것으로 나타나고 있다.

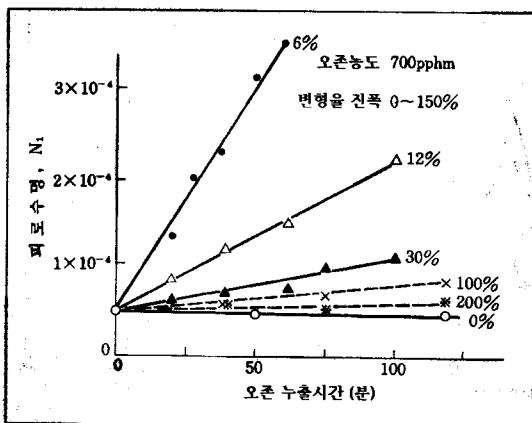


그림 12. 오존에 노출된 시간과 수명

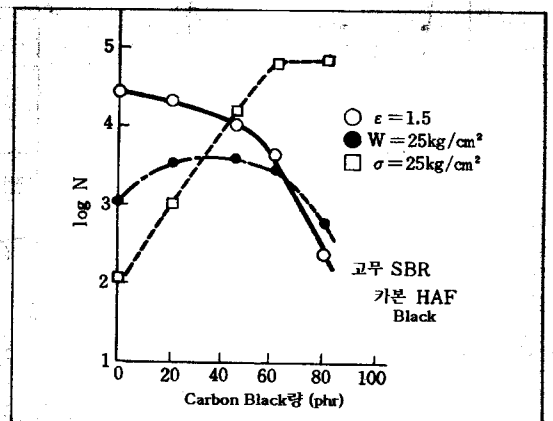


그림 13. 충전제와 피로수명의 관계

3.5 고무재료의 영향

고무의 종류, 가황계, 가황의 정도, 충전제의 종류 및 양, 노화방지제 등은 피로수명에 영향을 미치며, 충전제의 경우에는 입자경의 영향 외에 분산 또는 폴리머 분자와의 결합 및 반복조건 하에서의 구조변화 등에 의해서 피로수명에 영향을 준다. 그림 13에 충전제의 양과 피로수명의 관계와 시험조건(변형률, 응력, 변형률에너지)에 따른 피로수명의 결과도 같이 보여주고 있다.

3.6 고무의 형상

압축 또는 전단에서 사용되는 제품의 경우에는 고무의 형상을 및 고무부의 형상, 특히 접착부에 있어서의 필렛 반경이 피로수명에 큰 영향을 끼친다. 고무를 압축하면 주름의 발생을 확인할 수 있는데, 25% 이상의 압축이 가해지면 어떤 형상이라도 반드시 주름이 발생하게 된다. 주름의 발생은 균열의 생성 또는 마찰에 의한 고무의 접착을 일으키기 때문에 피로수명에 크게 영향을 미친다.

그림 14는 고무의 피로균열의 발생위치 및 균열의 방향에 대한 현상의 예를 도시하였다. 고무의 접착 부위로부터 약 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 각도의 위치에 발생하고 있으며, 이 위치는 표면의 최대응력 발

생지점과 일치하고 있다.

3.7 정변위와 정하중식 피로시험

재료평가에 있어서 정변위식 피로시험을 실시하는가, 정하중식 피로시험을 실시하는가는 신중한 검토를 요하는 문제이다. 이 양자의 비교에서 문제가 되는 점은 다음의 세가지이다.

- 1) 피로시험 중 고무재료의 물성변화에 의한 응력, 변형률 등의 변화에서 기인하는 문제로, 피로시험조건이 크게 변하는 문제
- 2) 탄성율이 다른 재료를 비교할 경우의 문제
- 3) 제품에 적용할 경우에 변형률을 기준으로 하는가, 응력을 기준으로 하는가 라고 하는 문제

한편, 유한요소법 등의 계산에서 요구되는 제품의 응력분포를 실험적으로 확인하기 위해서는 변형을 측정해 이를 응력으로 환산하는 것 외에 좋은 방법이 없다는 것에도 주의해야한다.

그림 15와 16은 정변위와 정하중식 피로시험을 실시해 얻어지는 피로수명곡선의 예로, 전자는 피로균열, 후자는 내부파괴에 의한 수명을 구하고 있다. 그림 15에서, 변형의 정의에 따라 결과가 다른 것에 주의해야한다. 그림 16에서, 정변위와 정하중의 피로시험에서는 고무의 경도에 따라 재료평가가 완전히 달라짐을 알 수 있다^[11].

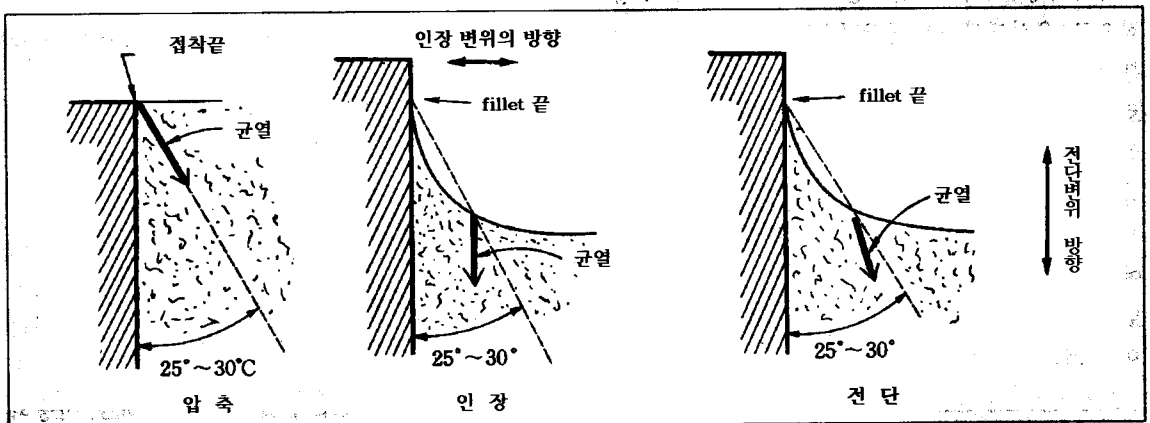


그림 14. 필렛에서의 피로균열 발생 양상

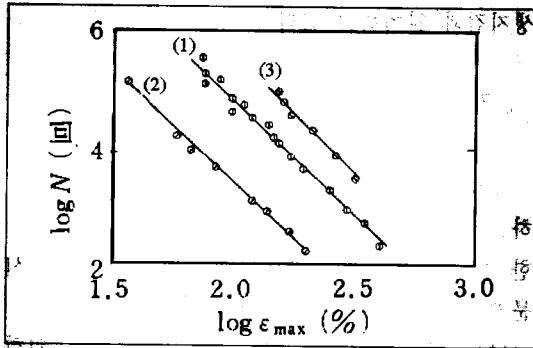
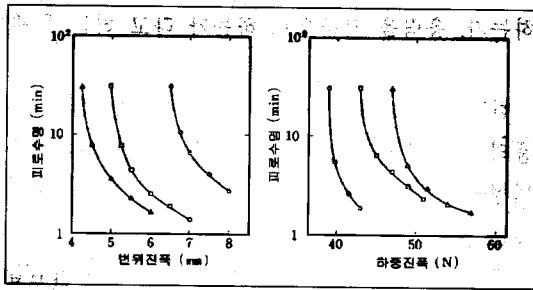


그림 15. 정하중과 정변위식 피로시험

- 시험방법 : $\epsilon_{min} = 0, 4.27\text{Hz}$
- (1) 정변위식 피로시험
- (2) 정하중식 피로시험 (ϵ_{max} : 1회 반복시의 변형률)
- (3) 정하중식 피로시험 (ϵ_{max} : 파단 시의 변형률)



○ 경도 53 □ 경도 58 △ 경도 63

그림 16. 내부파괴에 의한 피로수명곡선

4. 국가지정연구실 연구사업과 피로수명 평가

국가지정연구실 사업이란 국가 차원에서 전략적으로 육성해야 할 핵심기술(Core Technology) 분야의 우수 연구실을 발굴하여 국가지정연구실로 지정하고 이들의 핵심연구 역량을 강화할 수 있는 연구 과제를 선정하여 지원하는 연구개발사업으로서, 국내의 고무류 부품 설계, 해석 및 평가에 관한 종합적인 기술 지원 시스템을 구축하여 국내 산업 분야의 기술 요구에 대응할 수 있도록 한국기계연구원 내에 고무역학 연구를 전문으로 하는 국가지정연구실이 지정되었다.

고무역학연구실은 세계 일류의 연구실 구성과 종합 기술지원 체계를 구축하고자 고무 부품 물

성시험 및 데이터베이스 구축, 대변형·비선형 해석, 고무부품의 피로수명 및 신뢰성 평가 등 고무역학 전반에 관한 연구를 수행하고 있으며, 궁극적으로 고무류 기계부품의 통합설계시스템 개발을 목표로 연구에 매진하고 있다. 특히, 피로수명 평가 분야에 있어서는 그 동안 수행해 온 많은 연구 실적을 바탕으로 설계 초기 단계에서 고무 부품의 피로수명을 예측할 수 있는 방법을 개발하고 있다.

그림 17은 본 연구사업에서 추진하고 있는 고무부품의 피로수명 예측 절차를 보여준다. 재료의 물성시험(인장, 압축, 전단) 결과를 이용하여 부품 및 장구형 시험편에 대한 유한요소해석을 수행하고, 최대 인장변형률 및 최소 압축변형률을 고려하는 “부호를 고려한 주변형률법(signed principal strain method)”을 이용하여 장구형 시험편의 하중조건을 결정한다. 결정된 하중조건으로 장구형 시험편에 대한 피로시험을 수행하여 부품의 피로수명을 예측하고, 예측된 피로수명과 부품의 피로시험결과를 비교하여 제안된 피로수명 예측 절차의 타당성을 검토하고 있다^[12].

그림 18은 고무 시험편의 물성 시험 모습을 보여주며, 그림 19는 피로수명 평가 절차에 의한 예측된 수명과 실제 시험에서 구한 수명과의 관계를 보여준다. 오차 범위 3배 이내에서 비교적 정확하게 피로수명을 예측할 수 있음을 보여주고 있다.

그림 20은 고무역학 국가지정 연구실의 연구 분야 및 현황을 보여준다.

5. 맺음말

고무 재료 및 부품에 대한 피로파괴 연구는 고무 특유의 대변형과 비선형 현상 및 물성의 큰 편차 등으로 인하여 다른 금속 재료나 플라스틱 재료 등에 비해 발전이 미진한 분야이었다. 특히, 기계 부품으로서 고무가 긴요하게 사용되어 왔음에도 불구하고, 신뢰성과 재현성 등의 문

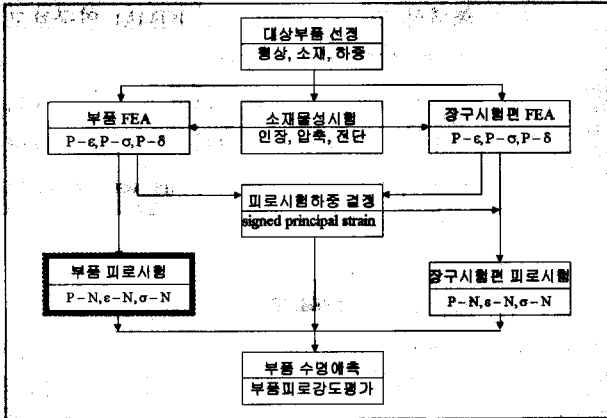


그림 17. 고무부품의 피로수명 평가 절차

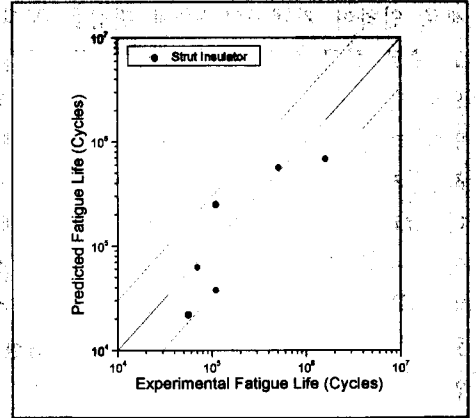
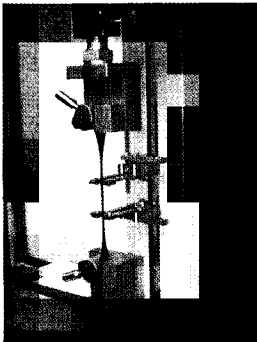
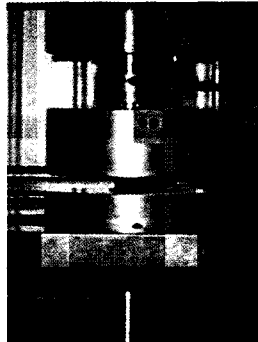


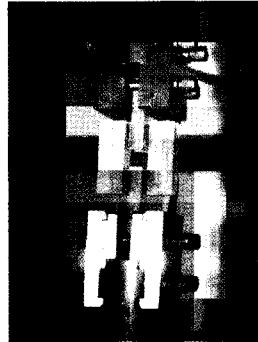
그림 19. 피로수명 예측결과



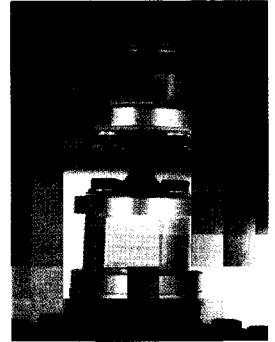
인장시험



압축시험



전단시험



피로시험

그림 18. 고무의 재료시험 모습

국가지정연구소

고무역학연구소
Rubber Mechanics Research Lab.

<http://rubber-nri.kimm.re.kr>

▲

세계 일류의 고무역학 연구실

- ▶ 종합기술 지원체계 구축
- ▶ 연구분야
 - ▶ 고무부품 비선형 FEA
 - ▶ 고무소재 Database
 - ▶ 고무부품물성시험
 - ▶ 고무부품수명예측
 - ▶ 고무부품내구성 및 신뢰성 평가
 - ▶ 최적설계 및 통합설계 시스템 개발

연구개발

- ▶ 국가지정연구소
- ▶ 고무부품연구체
- ▶ 고무소재연구개발
- ▶ 부품국산화개발
- ▶ 산업지속추진
- ▶ 중소기업 기술지원

Advisors Board

- ▶ 기술자문단
- ▶ 산학연 전문가

연구지원

- ▶ 고무역학 이론
- ▶ 특성시험/예측 (피로, 점탄 특성)
- ▶ 비선형 FEA
- ▶ 최적 설계

시험지원

- ▶ 기본 물성시험
- ▶ 정동 특성시험
- ▶ 피로수명시험
- ▶ 자체개발 S/W
 - 비선형 FEA
 - Data Base 시스템
 - 피로수명예측
- ▶ 구조해석 S/W

그림 20. 고무역학 국가지정연구소 현황

제로 인하여 기계공학자들의 관심을 끌지 못하고 주로 화공 및 고분자 재료 전공자들을 중심으로 연구 발전되어 왔으며, 이로 인하여 피로수명에 대한 연구 결과를 실제 공학 설계에 응용하는 시도가 활성화되지 못하고 있는 실정이었다. 그러나, 최근 각종 기계류 부품의 설계 개념이 갈수록 고강도·경량화 및 고신뢰성 추구로 바뀌어감에 따라 고무 부품도 피로수명 설계의 도입이 적극 추진되고 있으며 이를 위한 많은 연구 개발이 수행되고 있다.

당 연구팀에서는 고무역학에 관한 전반적인 기술 수준 발전과 보급을 위하여 연구 노력하고 있으며, 특히 고무류 기계부품의 피로수명 평가에 많은 관심을 가지고 관련 기술 분야 발전에 기여하고자 연구에 매진하고 있다.

참 고 문 헌

[1] Gent, A. N., Engineering with Rubber, Hanser Pub., 1992.
 [2] Korean Rubber Industry, Proceedings of IRC'99 Seoul, p. 21
 [3] 김완두, "고무부품 설계의 유한요소해석기 술응용," 기계저널 제38권 12호, p. 42, 1998.
 [4] 개정 방진고무, 방진고무연구회편, 일본철 도차량공업협회, 1975.
 [5] 김완두 외, 초탄성체 고무류 기계부품의 변

형해석 및 설계기술 개발, KIMM 연구보고서, UCN236-712.M, 1999.

[6] K. Takeuchi, M. Nakagawa, H. Yamaguchi and T. Okumoto, 1993, "Fatigue test technique of rubber materials for vibration insulators and their evaluation," International Polymer Science and Technology, Vol. 20, No. 10, pp. T/64-T/69.
 [7] Y. Fukahori, "엘라스토머의 피로파괴," 일본 고무협회지, 제71권 11호, pp. 654-661, 1998.
 [8] G. J. Lake, P. B. Lindley, A. G. Thomas, "Fracture Mechanics of Rubber," Proceedings of the 2nd International Conference on Fracture, Brighton, Chapman & Hall, London, p. 493, 1969.
 [9] R. S. Rivlin, A. G. Thomas, "Rupture of Rubber - Characteristic Energy for Tearing," Journal of Polymer Science, Vol. X, No. 3, pp. 291-318, 1953.
 [10] Y. Fukahori, "엘라스토머의 피로수명 예측," 일본고무협회지, 제58권 10호, pp. 625-633, 1985.
 [11] 고무시험법(신판), 일본고무협회 편, pp. 336, 1980.
 [12] 이학주, 김완두 외, "승용차용 스트러트 고무마운트의 피로수명 예측," 대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 A. pp. 298-303, 2000.