

# 고무재료의 피로특성을 평가하기 위한 실험적 접근

- 피로균열 성장속도 측정 -

강 신 영 · 진 영 웅 · 임 완 빈

## 1. 서 론

타이어, V-벨트, 엔진 베어링 등과 같은 제품들은 가혹한 동적 조건에서 장시간 제품의 요구특성을 유지해야하는 주요 고무 부품들이다. 이들 제품은 반복적인 변형과 응력을 받는 과정에서 재료표면으로부터 균열이 시작되거나 재료내부의 결함으로부터 균열이 발생되어 점진적으로 성장하게 된다. 이는 결과적으로 제품의 파열로 이어지기 때문에 여기서 가장 중요한 요구 특성은 이들 제품의 피로수명이다. 고무재료에 있어 기계적 피로는 동적 하중이나 변형 과정에서 느린 균열성장의 결과 점진적으로 물리적 특성이 약화되는 현상을 말한다. 따라서 고무재료의 기계적 피로 특성은 고무배합 설계에 있어 고려해야 할 중요한 요소 중 하나라고 할 수 있다.

고무산업 현장에서 주로 적용하고 있는 피로수명 실험은 단지 완전 파괴될 때까지 누적된 변형주기를 제공한다. 이들 방법은 고무재료의 피로수명이 변형의 크기와 그 유형에 민감하기 때문에 잘못된 결과를 제공할 수 있어 피로 저항특성을 평가하는데 한계가 있다. 따라서 이들 시험방법이 갖는 한계를 극복하고 발전된 평가기준을 모색하기 위해 피로균열 성장속도를 측정하는 시험방법을 개발하고 이를 표준화할 필요가 있다.

고무재료의 균열은 고무재료가 자연적으로 갖



강신영

- 1976 전남대학교 화학공학과 (공학사)
- 1985 University of Akron, Polymer Science (M.Sc.)
- 1988 University of Akron, Polymer Science (Ph.D.)
- 1976~1988 (주)금호
- 1993~1994 University of Washington(미), Visiting Professor
- 1997 University of Leeds(영), Visiting Professor
- 1989~ 현재 전남대학교 공과대학 응용화학공학부, 교수
- 2002~ 현재 기술표준원 산업표준심의회 「고무 및 가죽부회」 회장
- 2004 광주광역시 「광주지역산업정책연구회」 위원장



임완빈

- 1990 인천시립대학교 화학과 (이학사)
- 1992 인천시립대학교 대학원 화학과 (이학석사)
- 1999 명지대학교 대학원 화학공학과 (공학박사)
- 1990~ 현재 기술표준원 화학용융표준과 공업연구원
- 2001~ 현재 한국스프츠과학연구원 기술자문 위원
- 2002~ 현재 환경마크협회 기술자문 위원
- 2004~ 현재 건교부 「건설신기술」 관련 자문/평가위원



진영웅

- 2002 전남대학교 공과대학 응용화학공학부 (공학사)
- 2004 전남대학교 공과대학 대학원 정밀화학과 (공학석사)
- 2004~ 현재 (주)무등 자동차연구소 연구원

고 있는 결점에 응력이 집중됨으로써 시작되고 반복되는 변형과정에서 그 균열은 서서히 성장된다. 따라서 고무재료의 피로수명은 파괴 시까지의 단순 반복주기가 아니라 피로균열이 어떻게 시작하고 또한 어떤 속도로 성장하는가를 관찰하여 정의하는 것이 필요하다. 피로균열 성장속도는 고무재료의 변형크기에 따른 인열에너지의 함수로 해석함으로써 고유 피로균열 거동을 보다 명확하게 규명할 수 있다. 여기에서는 변형주기의 변화뿐만 아니라 온도 변화가 피로균열 성장에 미치는 영향까지도 광범위한 조사가 가능하다. 특히 피로균열 성장은 고무의 종류, 충전제, 가교 시스템과 같은 물질변수에 의해 영향을 받을 뿐만 아니라 진동수, 온도 변화, 변형 크기와 같은 실험 조건에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 피로균열성장 시험기는 이러한 복합적인 조건들을 만족시킬 수 있도록 설계되어야 한다.

이와 같은 피로시험 방법은 동적 상태에서 사용되는 고무제품의 고무배합 설계시 이들 기술정보를 제공함으로써 보다 향상된 피로수명의 고무제품을 개발하는데 이바지하게 될 것이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 인열에너지 결정

고무에 있어서의 기계적 피로에 대해서는 다음과 같이 정의하고 있다. "동적 하중이나 변형이 고무에 적용되는 동안 느린 균열성장의 결과 야기되는 물리적 성질의 점진적 약화 현상"으로 정의하고 있다.<sup>1</sup> 고무제품에 있어서 기계적 피로는 내구성에 영향을 미치는 요소들 중에서 가장 중요한 고려대상의 하나이다. 내구성에 대해서 효과적으로 대처하기 위해 고무배합 설계 과정에서 우선적으로 기계적 피로를 고려하는 것이 필요하다. 고무재료의 기계적 피로파괴 거동은 파괴역학을 통해 성공적으로 접근할 수 있는데, 균열성장을 위한 에너지 기준은 Griffith가 제안한 이론에 근거하여 확립할 수 있다.<sup>2</sup> 그림 1에 고체재료에 외부에서 인장력이 가해졌을 때 균열이 생성되어 점진적으로

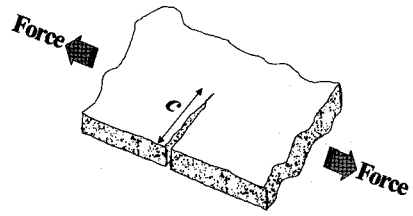


그림 1. 인장력을 받고 있는 고체 재료의 균열성장.

성장하고 있는 형태를 나타내었다. 그의 이론에 의하면 두께가  $t$  이고 일정한 길이  $l$  로 변형된 시편에서 균열  $c$  의 단위 증가로 인한 총 탄성에너지  $W$  의 감소가 새로운 균열표면을 형성하는데 요구되는 표면에너지  $G$  와 적어도 동일하게 되면 초기 균열  $c$  는 성장한다고 제안하였다. 위의 서술을 다른 방식으로 표현하면 다음의 식 (1)과 같다.

$$-(1/t)(\partial W / \partial c)_t \geq G \quad (1)$$

이 파괴기구 이론은 고무재료의 인열 거동을 해석하는데 Rivlin과 Thomas에 의해 성공적으로 적용되었다.<sup>3</sup> Griffith의 이론은 유리 같은 취약한 재료를 대상으로 하였으나 고무재료는 완전 취약성이 아니므로  $G$  값은 표면에너지의 크기와 동일하지 않다. 또한 고무재료는 균열의 끝에서 국부적 변형이 크고 에너지 소실이 많다. 그러나 그 에너지 소실이 균열 끝에서의 작은 영역에 국한된다면 위에서 언급한 변형 에너지 방출속도 기준은 고무재료에도 유효하다고 할 수 있다. 고무재료에서는  $G$  값의 크기를 특히 '인열에너지(tear energy)'라고 명명한다. 시편의 형태에 따라 비선형 용력-변형 관계로부터 유효한  $G$  값을 유도할 수 있다.

여기에서 균열성장 시험에 적용하고자 하는 순수전단 시편의 형태를 그림 2에 나타내었다. 본 실험에서 적용할 시편의 두께가  $t$  이고 초기 높이가  $h_0$  인 순수전단 시편에 대해  $G$  는 Griffith 이론으로부터 유도된 식 (2)를 이용하여 결정할 수 있다.

$$G = U \cdot h_0 \quad (2)$$

여기서  $U$  는 순수전단 영역의 변형에너지 밀도

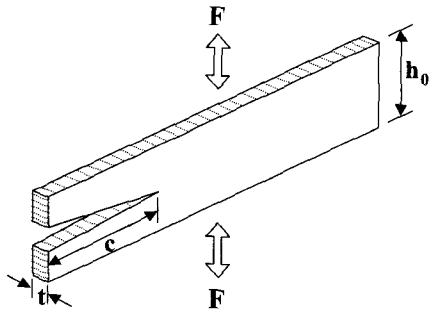


그림 2. 한쪽 모서리에 예비절단을 한 순수전단 시편의 개략도.

(strain energy density)를 의미한다. 실험적으로  $U$  값은 응력-변형 곡선의 면적으로부터 결정한다. 변형률  $\epsilon$ 이 증가할수록  $U$  값이 점진적으로 증가한다. 식 (2)를 적용하기 위해서는 균열과 집게들 사이에 변형되지 않은 영역이 있을 수 있도록 균열 길이가 충분히 길어야 한다. 순수전단 영역을 위해서는 높이에 대한 폭의 비(width-to-height ratio)가 충분히 커야한다. 또한 열 축적 효과를 최소화하기 위해 가능한 한 얇은 시편의 채택이 권장된다.

## 2.2 피로균열 개시

피로파괴는 작은 결함에 응력이 집중되어 균열이 개시되고, 그 균열이 서서히 성장하고 전파된다. 파괴역학의 중요한 전제 중 하나는 모든 물체는 자연적으로 결함이나 결점을 가지고 있다는 것이다. 배합고무에서는 첨가제나 젤 입자, 미세공동, 금형의 거칠음에 의한 결함 등이 균열개시를 위한 균열 핵으로써 작용할 수 있다.<sup>4</sup> 오존에 의한 영향도 기계적 피로균열 개시에 중요한 원인이 된다. 경화 고무재료 역시 장시간 반복적인 변형과 응력을 받는 과정에서 그 재료가 갖고 있는 결점에 응력이 집중됨으로써 균열이 시작되어 점진적으로 성장하게 되고 결국 완전파괴로 이어지는데, 이 같은 현상을 피로균열이라고 한다.

그림 3은 충전제를 함유하고 있는 고무시편의 사슬구조 형태를 보여주고 있다. 고무분자 사슬 간에는 황과 같은 가교제에 의해 가교되거나 긴 사슬의 얽힘(entanglements)으로 사슬의 움직임이 제한

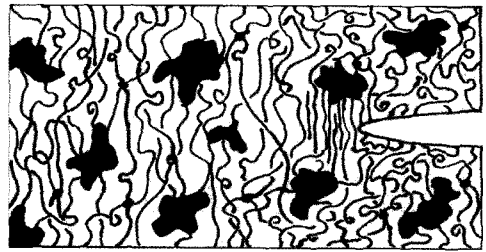


그림 3. 충전제를 포함하고 있는 고무분자 사슬 형태에서의 균열성장 개략도.

되고 결과적으로 고체 형태가 된다. 특히 충전제를 함유한 배합고무에서는 추가로 고무사슬과 충전제간의 상호 보강작용으로 고무는 보다 경직된 특성을 띠게 된다. 고무시편에 사전에 예비절단을 주고 주기적으로 응력을 가하면 고무사슬 망상은 응력방향으로 배향하게 된다. 이때 천연고무와 같은 결정화 고무의 경우 균열 정점에서 결정화가 되어 균열성장을 지연시키는 효과가 있을 수 있다. 또한 고무 기질에 균일하게 분포되어 있는 충전제는 균열이 성장하는데 하나의 장애가 될 수 있으며, 결과적으로 균열의 경로를 연장시키는 역할을 한다. 여기서 고무재료의 피로균열특성을 평가하기 위해서는 균열이 어떻게 성장하는가를 정의하는 것이 필요하며, 이를 위해 피로균열 성장속도를 고무재료에 공급된 인열에너지의 함수로 해석함으로써 고무재료의 피로균열 거동에 대한 해석이 가능하게 된다.

고무부품이 반복된 응력을 받았을 때 피로균열이 가시적으로 나타나기 전까지 일정 시간이 경과한다. 실질적인 문제는 일정 하중 조건에서 얼마나 빨리 일정 크기의 균열이 성장하느냐 하는 것이다. 고무시편의 고유 결함으로부터 시작하는 균열의 불규칙 과정은 예비절단을 통해 피할 수 있으며 이것은 재연성이 큰 실험으로 이어질 수 있다. 이 예비절단은 고무재료 고유 성질이 아닌 결함에 대한 민감성을 줄일 수 있기 때문이다. 파괴기구에 대한 초점은 피로균열 성장에 관한 것이다.

## 2.3 피로균열 성장

일반적으로 피로균열 특성은 균열성장속도와

인열에너지와의 상관관계를 고찰함으로써 접근이 가능하다.<sup>5</sup> 피로파괴 성장에서 인열에너지 값이 문지방 인열에너지(threshold tearing energy)보다 작을 경우 어떠한 기계적 균열성장도 발생하지 않는다. 이 때는 유일하게 오존에 의해서 발생할 수 있다.<sup>4</sup> 이 문지방 인열에너지보다 큰 에너지가 공급되었을 때 비로소 기계적 요인에 의한 균열성장 거동이 나타나기 시작한다. 이 과정을 지나 대단히 큰 인열에너지를 공급했을 때 환경요인에 의한 균열성장은 기계적 요인에 의한 균열성장에 비해 무시할 정도로 작아 기계적 균열성장만으로 그 거동을 해석할 수 있게 된다.

예비절단을 한 고무시편에 반복적 변형주기를 주었을 때 변형주기  $n$ 의 증가에 따른 성장된 균열 길이를  $c$ 라고 한다면 균열성장 속도는  $c$ 와  $n$ 과의 직선관계로부터 그 기울기인  $dc/dn$ 으로 결정할 수 있다. 이 때 재료의 균열성장 특성은 균열성장속도  $dc/dn$ 과 인열에너지  $G$ 와의 상관관계를 규명함으로써 설명할 수 있다. 기계적 요인에 의한 인열에너지  $G$  값이 시편에 공급될 경우 균열성장  $dc/dn$ 을 인열에너지  $G$ 의 함수로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>1,5</sup> 즉 인열에너지가 기계적 피로한계보다 훨씬 큰 경우의 균열성장속도는 균열성장속도와  $G$  사이에 지수관계가 성립한다. 이것은 고무상 재료나 비고무상 재료에서 모두 발견되는 특징이다.

$$dc/dn = aG^a \quad (3)$$

여기서  $a$ 와  $a$ 는  $dc/dn$ 과  $G$ 의 log-log plot에서 y-절편과 기울기에 해당되는 값으로 제한된 범위의  $G$  값 내에서 가황고무의 피로균열 성장 거동에 있어 고유 특성을 나타내는 값들이다. 이 값들은 시편 형태와는 관계없는 독립적인 특성을 가지고 있다. 균열성장속도와 인열에너지의 이 같은 지수관계는 물질의 피로균열성장의 거동을 해석하는데 사용되고 있다. 특히  $a$  값은 천연고무와 같은 결정 고무의 경우 2, SBR과 같은 비결정 고무의 경우 약 4를 갖게 되며, 고무배합 첨가제보다도 주로 고무 탄성체의 종류에 따라 보통 2에서 6까지의 범위

내에서 그 값이 변한다.

인열에너지( $G$ )는 온도와 균열성장속도의 함수로서 균열성장속도가 증가하고 온도가 상승함에 따라 감소한다.<sup>6</sup> 고무재료의 인열에너지는 화학결합을 파괴하기 위한 문지방 인열에너지보다 훨씬 큰 값을 나타낸다.<sup>4</sup> 이 때에 남은 에너지는 파괴나 소성변형 시 소모되지 않고 균열 주위에서 발산하거나 균열이 진행되면서 점탄성적으로 완화되어 소멸되는 것으로 보여 진다. 만약 균열이 매우 높은 온도에서 느린 속도로 진행한다면 이러한 점탄성적 손실들은 상당히 줄어들어 인열에너지 값은 화학결합의 파괴에 필요한 에너지와 거의 유사한 값을 보일 것이다. 화학결합을 파괴하기 위하여 필요한 문지방 인열에너지는 보강제의 입자크기가 작고 첨가량이 많을수록 증가하고 에너지의 소산이 클수록 파괴에너지는 증가한다. 고분자 내에 결정화도가 증가하면 에너지 소산이 더욱 증가하여 인열에너지는 크게 증가되며 보강제의 첨가 역시 인열에너지를 증가시킨다.<sup>1</sup> 고무의 피로균열 성장에 영향을 줄 수 있는 요소들에는 고무의 종류, 충전제, 가황 시스템 등의 재료적인 변수와 온도, 진동수, 변형 범위 등의 실험적 변수와 오존, 산소, UV 등의 환경적 변수가 있을 수 있다.

### 3. 실험적 접근

#### 3.1 기존 피로수명 평가방법에 대한 고찰

피로수명이란 응력제어(stress-controlled) 시험에서의 어느 특정 응력 또는 변형을 제어(strain-controlled) 시험에서의 어느 특정 변형 하에서 하나의 고무시편이 완전히 두 부분으로 나누어지는데 필요한 반복 주기의 횟수이다. 즉, 응력 또는 변형률을 제어하면서 시편이 파괴될 때의 사이클 수를 측정하는 피로시험 방법이다. 이 시험방법은 시편에 잠재되어 있는 임의의 결함으로부터 균열이 시작되므로 지루한 시간과 수많은 시편이 소요될 수 있다. 데이터 역시 넓은 분산을 나타내므로 데이터 분석을 통하여 어떤 기준점을 잡거나, 다른 강성을 가진 물질과 비교하기는 간단치가 않다. 특

정 시편에서 얻어진 데이터는 오로지 그 시편에 대해서만 유효하다.

전통적으로 적용되어온 피로시험은 고무 복합 재료의 분리 또는 반복 굽힘이나 신장시에 발생하는 균열성장 정도를 비교 측정(ISO 132, ASTM D430, KS M6695)하거나, 고무시편이 파열될 때까지의 반복주기 수를 측정(ISO 6943, ASTM D4482) 하며, 고무재료의 회전 또는 압축 굽곡시험에서 온도상승과 파열시까지의 반복주기의 수를 측정(ISO 4666-1,2,3, ASTM D623, KS M6675)하는 등의 표준화된 시험방법들이 있다.

이 시험방법들은 다양한 굽곡균열(flex-cracking)과 절단성장(cut growth) 시험기들이 굽힘 방식에서의 피로수명을 평가하기 위해 채택되어 왔고 이들 시험들은 벨트, 피복섬유, 그리고 신발류 같은 제품들의 사용조건을 모사하도록 설계되었다. 그림 4는 de Mattia 시험에서 사용된 시편과 인장시편에서의 피로저항과 Flexometer를 이용한 피로저항 및 온도상승을 측정하기 위한 시편 등을 나타내고 있다.

이들 시험방법에는 몇 가지 단점이 있다. 첫째로 일정 변형률이나 일정 응력에서 시험을 했음에도 불구하고 고무의 탄성률에 따라 피로균열 성장에

필요한 에너지가 달라지기 때문에 굽힘 변형을 제어하는데 어려움이 있다. 그림 5에서 보는 것처럼 일정 변형률에서 피로굽곡 시험을 하는 경우 높은 탄성률의 시편에 공급된 변형에너지 밀도가 상대

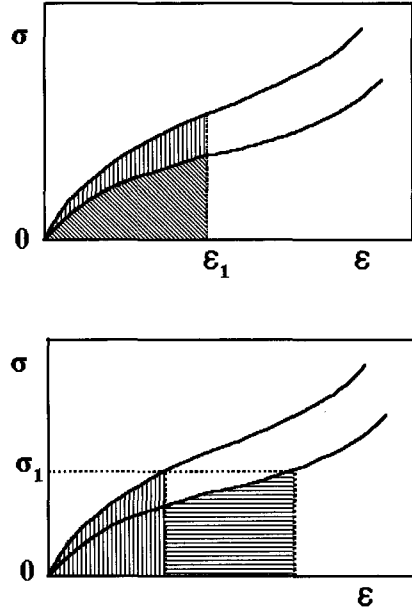


그림 5. 변형률 제어 피로시험(상)과 하중 제어 피로시험(하)에서 탄성률이 다른 고무 시편의 변형에너지 밀도.

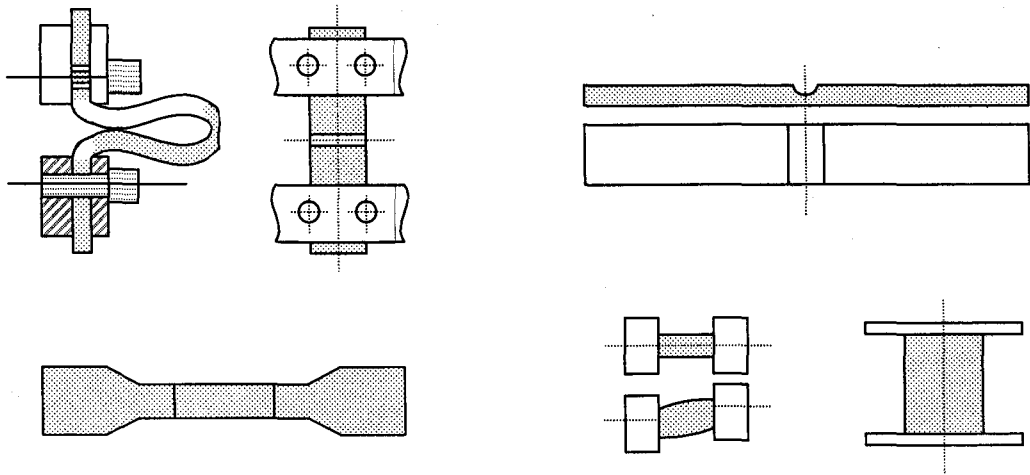


그림 4. de Mattia 시험에서 사용된 굽곡균열과 균열성장을 측정하기 위한 시편(상)과 인장피로를 측정하기 위한 시편(좌·하), 그리고 Flexometer 시험에서 온도상승과 피로저항을 측정하기 위한 회전식 시편(중·하)과 압축식 시편(우·하).

적으로 커 결과적으로 낮은 피로수명을 나타낼 수 있다. 반면에 일정 응력에서의 경우에는 낮은 탄성율의 시편에 더 큰 변형에너지 밀도를 갖게 되어 결과적으로 낮은 피로수명으로 이어질 가능성이 높다. 이들 시험의 문제점은 굽힘 변형의 조절이 고무의 탄성률에 크게 의존하며, 따라서 고무의 피로수명은 변형의 크기와 그 유형에 따라 잘못된 결과를 얻을 가능성이 있다는 점이다. 둘째로 고무의 피로수명은 적용된 변형의 유형과 크기에 민감하기 때문에 정확하고 일정한 데이터를 얻는데 많은 어려움이 있다. 더욱이 대부분 고무 제품들은 실험실에서 관찰된 것보다 더 복잡한 변형 패턴의 지배를 받고 있기 때문에 그 심각성은 크다고 할 수 있다. 세 번째로 피로시험 시 발생할 수 있는 발열이다. 만일 고무시편이 반복변형 중 생성되는 히스테리시스 열을 소산시킬 수 있도록 충분히 얇지 않다면, 피로균열 현상은 열 효과와 더불어 복합적으로 얽히게 될 것이다. 따라서 피로수명 적정화를 위한 가장 과학적 접근은 넓은 범위의 인열에너지에서 피로균열 성장속도를 실험적으로 결정하는 것이다. 이를 통해 균열성장 속도와 피로와의 상관관계를 확립할 수 있게 될 것이다.

### 3.2 피로균열 성장 주요인자

고무재료의 강도를 평가하는 가장 일반적인 방법은 인장강도를 측정하는 것이다. 그러나 고무제품은 한번의 하중으로 파괴되는 경우가 드물고 오히려 반복 하중에 의한 균열성장 결과 파괴되는 경우가 대부분이다. 따라서 인장강도의 측정은 고무제품의 파괴거동을 예측하는데 유용한 파라미터를 얻는 수단이라기보다는 단순한 품질관리의 한 방편으로 간주되어야 할 것이다.

고무재료가 주기적인 응력을 받아 변형될 경우, 고무재료 속에 있는 결합에서 균열이 개시되고, 변형이 반복되면 그 균열이 점진적으로 성장되어 결국 시편은 완전 파열된다. 그러므로 균열성장은 고무재료의 강도를 결정하는데 중요한 요소가 된다. 따라서 이들 특성을 근본적인 방법으로 정의해야 할 필요가 있다. 여기서 피로균열 성장에 영향을

미치는 주요 인자들을 살피고자 한다.

#### 3.2.1 변형주기

진동수 변화는 변형속도, 즉 단위 시간당 변형 주기의 수와 각 주기당 변형 시간이 변한다는 것을 뜻한다. 천연고무 같은 결정화 고무에서는 변형 주기의 영향이 거의 관찰되지 않은 반면, SBR과 같은 비 결정화 고무에서는 변형 주기의 영향이 비교적 크다.<sup>4,5</sup> 그 이유는 비 결정화 고무에서의 시간 의존 연속적 균열성장 때문이다.

만일 두꺼운 시편에서 진동수가 너무 높다면 지나친 발열이 수반될 수 있다. 이 경우 파괴의 주요 원인이 기계적 피로라기보다는 오히려 고온 열화라고 할 수 있다. 높은 속도와 과하중으로 달리는 공기압 타이어에서 이와 같은 파괴가 일어날 수 있다. 고온 열화에 의한 파괴를 기계적 피로와 혼동해서 해석해서는 안 된다.

#### 3.2.2 온도

온도의 영향은 비 변형유도 결정화 고무에서 대단히 크다. 이는 비 결정화 고무의 강도가 점탄성으로부터 유래하기 때문이다. 미충전 SBR 고무는 0℃에서 100℃로 상승함에 따라 피로수명이 10<sup>4</sup> 배 감소하는 것이 관찰된다. 반면에 미충전 NR의 경우 오로지 4배 감소만이 관찰되었다.<sup>6</sup>

100℃보다 높은 온도에서는 결정화가 방해되므로 결정화 고무의 균열성장은 온도에 크게 영향을 받는다. 미충전 SBR 고무의 온도 의존성은 충전제를 도입함으로써 완화되며 충전제의 함량과 그 유형에 따라 영향을 받는다.

#### 3.2.3 비 완화(non-relaxing)

변형주기에서 최소변형이 영(zero)이 아닐 때 이 변형을 비 완화로 간주한다. 고정된 진폭의 주기적 파동형태에 있어서 평균 응력은 최소하중의 증가와 더불어 증가한다. 일반적으로 금속의 피로수명은 평균응력의 증가와 더불어 감소하나 고무재료는 그 거동이 아주 상이하다.

천연고무 같은 변형 유도 결정화 고무의 피로수명은 비 완화 조건에서 상당히 연장된다. 이것은 균열 끝에서의 결정화로 균열성장이 저항받기 때

문이다. NR의 피로수명은 약 45%의 최소 변형에서 100배 향상되었다.<sup>5,7</sup>

비결정화 고무에서는 비완화의 영향이 감소되는 경향이 관찰되며 이는 부분적으로 시간 의존 균열 성장 때문으로 보인다. 비 완화 조건에서 비결정화 고무의 균열성장과 피로저항 향상은 주로 사이클의 변형에너지 감소에 기인한다. 변위조절을 통한 비 완화 시험은 크리프 현상 때문에 완화 시험에 비해 매우 어렵다. 더욱이 비 완화 조건에서 장시간 실험할 때, 산소 또는 오존 열화에 대한 민감성은 피로균열성장의 중요한 요소가 된다. 그럼에도 불구하고 에너지 방법은 비 완화 균열성장을 평가하는데 성공적으로 적용될 수 있다.

### 3.3 피로균열 성장속도 측정 설계조건

#### 3.3.1 인열에너지의 측정

그림 2의 순수전단 시편은 인열에너지가 균열길이와 무관하기 때문에 피로균열을 평가하는데 선호되고 있다. 따라서 균열성장 속도는 외부 에너지의 공급만으로 결정된다. 비정상적 균열성장은 내부에너지 방출 속도가 균열성장에 필요한 에너지를 초과했을 때 발생한다. 이 경우 균열은 가속화되고 제어되지 않는 결과를 초래한다. 모서리의 영향을 최소화하기 위해 최소 폭과 높이의 비( $w/h_0$ )가 10 이상의 값이 되도록 할 필요가 있다.<sup>8</sup> 또한 충전 배합고무의 경우 변형이력에 의존하는 특성을 갖고 있기 때문에 시험하는 동안 변형에너지 밀도( $U$ )를 계산해 두어야 한다. 변형에너지 밀도

를 측정하는데 가장 정확한 방법은 예비절단을 한 시편과 동일한 변형 조건에서 예비절단하지 않은 순수전단 시편을 대상으로 측정하는 것이다. 균열 성장 측정에 적용될 최대변형의 크기로 시편을 예비조절(precondition)하기도 하는데 이것은 변형연화(strain softening)를 감소하는 효과가 있다. 특히 충전고무에 있어서는 히스테리시스적 특성이 있으므로  $U$ 는 보통 복원력-변형 곡선의 면적으로부터 얻는다. 왜냐하면 균열성장 과정에서 방출되는 것은 이 탄성에너지( $U$ )이기 때문이다.

#### 3.3.2 균열성장 속도의 측정

균열성장 시험을 위해 한쪽 모서리에 예비절단을 한다. 순수전단 고무시편의 균열성장은 초기에 빠르게 진행되고 그 균열표면은 비교적 매끄럽다. 균열성장은 일정 속도에 도달할 때까지 점진적으로 감소되고 균열표면은 보다 거칠어진다. 이때의 일정 속도는 특정 인열 조건에서 자연 피로균열의 성장과 공통점이 있다고 가정한다. 균열성장은 경우에 따라서는 대단히 느린 속도로 진행되기 때문에 수백분의 1 mm 정밀도까지 측정한다. 균열성장 길이  $c$ 가 시편 두께의 1/10 이상일 때까지 측정을 계속한다. 보다 정밀한 실험을 위해 고속 광학 CCD 카메라를 부착하여 균열성장의 정점을 추적한다.

피로균열 성장속도를 측정하기 위한 시험절차와 조건들을 그림 6에 나타내었다. 우선 시험조건으로 온도범위, 변형주기의 범위, 변형율의 폭, 그리고 비 완화 설정여부 등을 결정하여야 한다. 이

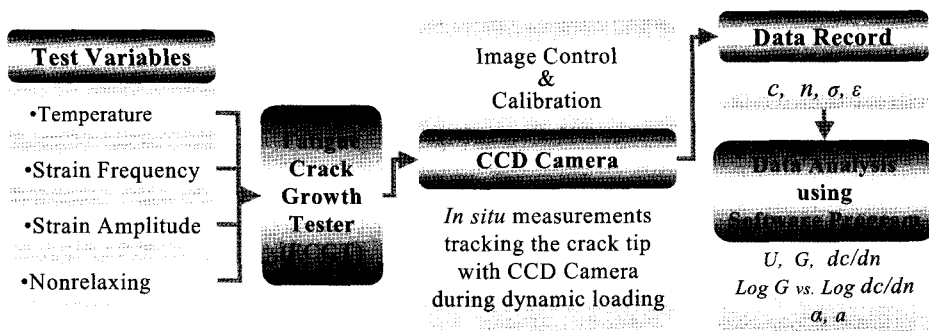


그림 6. 피로균열 성장속도 측정 흐름도.

들 시험조건이 설정되면 피로균열성장 시험을 시작할 수 있는데, 여기서 중요한 것은 균열성장 과정을 실시간으로 정밀하게 추적할 수 있는 기능이 가능해야 한다. 여기서는 고속 광학 CCD카메라를 고려할 수 있다. 실험을 통해 얻을 수 있는 원 데이터는 균열길이( $c$ ), 변형주기 누적 수( $n$ ), 응력( $\sigma$ ), 그리고 변형률( $\epsilon$ ) 등이다. 이들 원 데이터를 가공하여 얻을 수 있는 값들은 변형에너지 밀도( $U$ ), 인열에너지( $G$ ), 균열성장 속도( $dc/dn$ ), 그리고  $G$ 와  $dc/dn$ 의 로그관계로부터 얻은  $a$ 와  $a$ 값들이다.

### 3.4 피로균열 성장속도 측정 시험기 개발

피로균열 성장속도를 측정하기 위해 개발된 시험기는 상·하측 클램프로 고정된 순수전단 시편을 일정 실험온도를 유지하고 있는 항온조 내에서 변형의 크기와 주기를 달리하면서 변형주기를 장시간 반복하였을 때 균열성장 길이를 실험적으로 측정하는 장치이다. 변형율의 크기와 변형주기는 캠 드럼에 스크루 축을 장착하여 회전축의 중심을 이동한 상태에서 서보(SERVO) 모터의 회전수를 제어함으로써 조절하였다. 항온조 내 실험온도를 변화시킴으로써 피로균열 성장거동에 대한 온도의 영향도 평가하였다.

본 시험기에는 고무시편의 균열성장과정을 측정하기 위해 시편의 균열 정점을 실시간으로 자동 추적할 수 있는 고속 광학 CCD 카메라 장치를 시편의 전면에 부착하였다. 여기서 개발된 시험기의 실제 사진을 그림 7에 나타내었다.

실험온도는 실온에서 150 °C까지의 범위 내에서 임의로 설정할 수 있게 하였고, 시편에 가해지는 변형주기는 최대 10 Hz 이내에서 임의로 설정할 수 있게 하였다. 또한, 선형 스트로크의 이동범위를 200 mm까지 제작함으로써 인장 변형률은 최대 200%까지 가능케 하여 시편에 공급된 변형에너지 밀도와 인열에너지의 크기를 변화시킬 수 있게 하였다. 변형 에너지 밀도는 복원력-변형 관계로부터 측정하였다.

반복 변형의 각 주기마다 최소변형이 원상복귀가 아닌 일정 변형률을 유지하고 있는 상태, 즉 '비

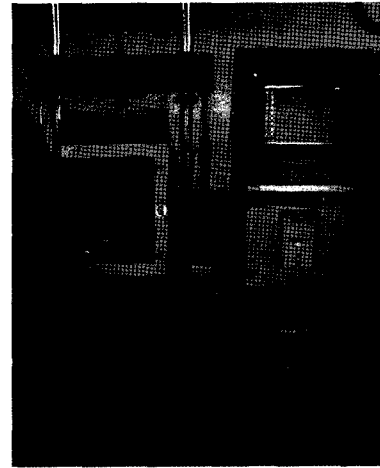


그림 7. 경화 고무재료의 피로균열 성장속도 측정 시험기의 실제 사진.

완화 조건'에서 피로균열성장 측정이 가능토록 시험기를 제작하였다.

고무재료의 기계적 피로에 의한 균열성장을 평가하고 히스테리시스적열 축적을 최소화하기 위하여 가능한 한 얇은 시편을 사용하였다. 또한 여기서는 인열에너지가 균열의 성장 길이에 영향을 받지 않은 순수전단 시편을 사용하였으므로 균열 성장 속도는 외부 에너지의 공급만으로 결정된다. 피로균열 성장속도 시험기를 보다 세부적으로 설명하면 다음과 같다. 그림 8은 피로균열 성장속도 시험기 전체를 보여주는 개략도이다. 온도 분위기를 임의 설정할 수 있는 항온조(1) 내에 고무시편은 상·하측 클램프(2)로 고정된다. 상측 클램프는 시험기 상단에 위치한 크로스 헤드(4)로부터 하향된 중심축의 선단에 위치하고, 하측 클램프는 드럼 캠(7)에서 상향된 중심축(8)의 선단에 위치한다.

항온조(1) 내부 온도는 온도조절 장치를 통해 실온에서 150 °C까지 변화시킬 수 있게 하였다. 500 N 용량의 로드 셀(3)이 장착된 크로스 헤드(4)는 정지 링(5)을 이용하여 고정시킬 수 있다. 드럼 캠(7)을 일회 구동시킴으로써 고무시편의 응력-변형(또는 복원력-변형) 거동을 측정할 수 있고, 여기서 얻은 복원력-변형 곡선의 하부면적으로부터 변형 에너지 밀도( $U$ )를 결정한다.



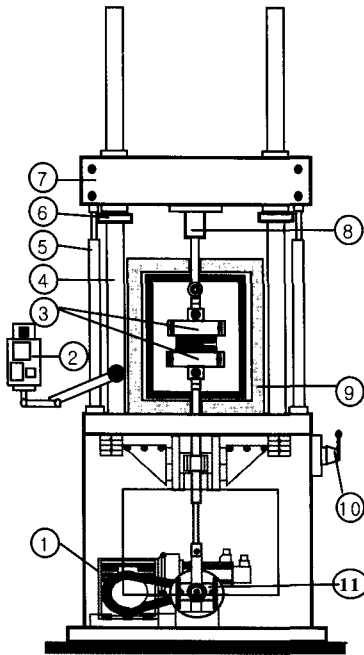


그림 8. 경화 고무재료의 피로균열 성장속도 시험기의 전체 개략도.

시편은 서보(SERVO) 모터(6)에 의해 구동되는 드럼 캠(7)을 회전시켜 중심축(8)이 상하 직선운동을 통해 주기적으로 변형되고, 변형주기는 서보 모터(6)의 회전수를 통해 조절된다. 이 같은 장치는 서보유압장치를 대신 설치함으로써 변형주기를 더욱 미세하게 제어할 수 있으며 이 때 시편의 변형률은 LVDT를 통해 조절이 가능하다. 시편의 전면부에 장착된 고속 광학 CCD 카메라 장치(9)를 통해 균열성장 정점의 이동거리는 실시간으로 측정되고, 시편의 피로균열 성장 길이는 PC에 자동 처리되도록 하였다.

비완화 조건 하에서도 실험이 가능하도록 최소 변형(또는 최소응력) 조절장치(10)를 상측 클램프 상단부의 중심축에 설치하였고, 이 조절장치로부터 상측 클램프가 상/하로 이동하게 하여 최소 변형율의 조절이 가능토록 하였다. 여기서 변형률 설정 대신 크로스 헤드(4) 하부에 부착된 로드 셀(3)을 이용하여 최소 응력을 설정한 후 비완화 조건의 피로균열 성장 실험을 할 수도 있도록 하였다. 대부분 고무제품은 비완화 조건, 즉 최소 변형률

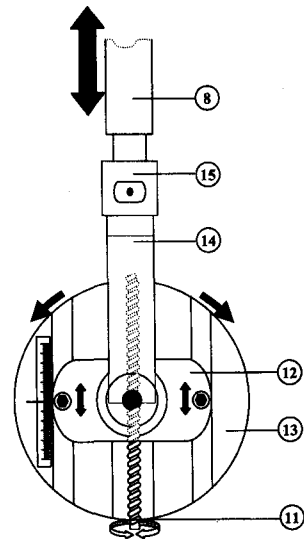


그림 9. 고무시편의 변형률을 조절하는 드럼 캠 장치 개략도.

이 있는 상태에서 사용되기 때문에 이에 대한 모의 실험을 요이하게 할 수 있도록 하였다.

그림 9는 그림 8의 드럼 캠(7)을 보다 상세하게 나타낸 것이다. 이심각조정나사(11)를 회전시킴으로서 이것과 결합된 록킹 블록(12)의 중심을 이심각조정나사의 길이방향으로 이동시킬 수 있게 하였다. 드럼(13)을 회전시킴으로서 로커 암(14)과 로드 부(15)를 통해 연결된 중심축(8)이 상·하 방향으로 직선 왕복운동을 하게 하였다. 이때 시편의 변형 폭은 상기 중심축(8)의 왕복 이동거리에 의해 조절되고, 이동거리는 록킹 블록(12)이 드럼(13)의 원심으로부터 벗어난 거리에 비례한다.

그림 10은 그림 8의 항온조(1) 내 구성과 고속 광학 CCD 카메라 장치(9)의 측면도를 도시한 것이고, 그림 11은 그림 10의 항온조 내 상·하측 클램프(2) 및 고무시편을 확대 도시한 정면도로써 고무시편이 항온조(1) 내에서 중심축(8)의 왕복운동으로 균열이 성장되는 것을 보여주고 있다. 피로균열 성장 시험용 고무시편을 상·하측 클램프(2)에 고정시키고 중심축(8)의 직선 왕복운동이 주기적으로 반복됨으로써 고무시편에 피로균열을 유발시킬 수 있다. 특히 상측 클램프 상단에 설치된 비완화

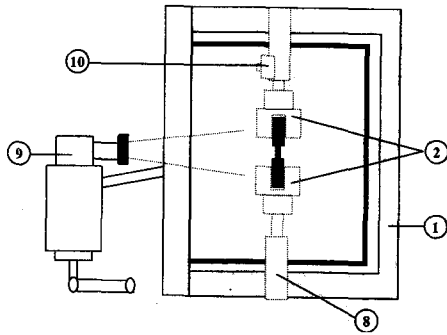


그림 10. 고속광학 CCD 카메라 장치와 항온조 내부 측면도.

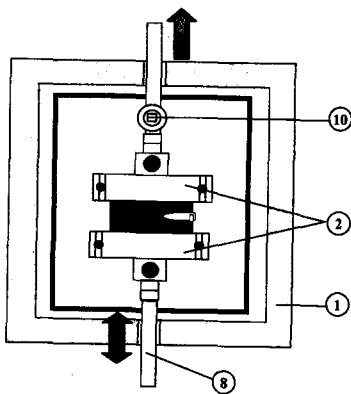


그림 11. 항온조 내부 고무시편의 균열성장을 보여주는 정면도.

조절장치(10)를 통해 시편의 변형률을 사전에 설정한 상태에서 피로균열성장 시험을 할 수도 있다.

### 3.5 평가실험

#### 3.5.1 고무배합

고무배합은 결정화 고무인 천연고무(NR)와 비결정화 고무인 SBR 합성고무를 대상으로 하였다. 여기서 천연고무는 SMR-CV60을 사용하였으며, SBR고무는 SBR1500S를 사용하였다. 배합고무의 보강제로 카본블랙 N351을 첨가하였다. 고무배합 세부 내역은 표 1에 정리하였다.

#### 3.5.2 고무시편

고무시편은 그림 12에 나타난 순수전단 형태를 갖는 시편으로 초기 두께가  $t_0$ 이고 초기 높이가  $h_0$

표 1. 고무 배합표

Materials	phr*	
	NR <sup>A</sup>	SBR <sup>B</sup>
Rubber	100.00	100.00
ZnO	4.00	4.00
S	2.00	1.70
S/A	2.00	2.00
N351	50.00	50.00
TBBS	1.40	1.70
6PPD	2.50	2.50
Total	161.90	161.90

\* Part per hundred parts of rubber, by weight

<sup>A</sup> SMR-CV60

<sup>B</sup> SBR1500S (Kumho Petrochemical Co., Ltd, Korea)

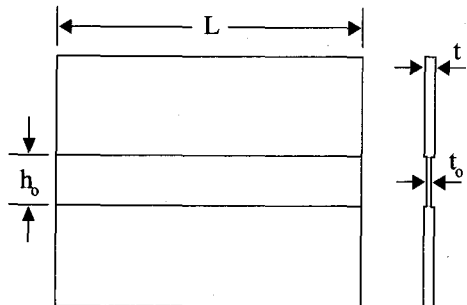


그림 12. 피로균열 성장 시험에 사용된 경화 고무시편의 평면도와 측면도.

이다. 여기서 피로균열 성장 시험 동안 히스테리시스적 발열의 영향을 최소화하기 위해 시편의 유효 초기두께  $t_0$ 는 2 mm로 하였고, 상-하 클램프로 고정시킬 부분인 시편의 두께  $t$ 는 5 mm로 하였다. 이 같은 시편의 형태는 균열성장 경로를 유도하는 효과뿐만 아니라 변형주기를 반복하는 동안 클램프로부터 시편의 미끄러짐을 방지하는 효과를 얻을 수 있다. 순수전단 영역을 확보하기 위해 높이에 대한 너비의 비를 10이상의 값을 갖도록 하였다. 이를 위해 여기에서는 시편의 너비  $L$ 은 200 mm, 그리고 유효 초기높이  $h_0$ 를 20 mm로 하였다.

#### 3.5.3 변형에너지 밀도( $U$ )와 인열에너지( $G$ )의 결정

충전 배합고무의 경우 변형이력에 의존하는 특

성을 갖고 있기 때문에 시험하는 동안 변형에너지 밀도  $U$ 를 계산해 둘 필요가 있다. 변형에너지 밀도를 결정하는 가장 정확한 방법은 피로균열성장 시험에서의 변형조건과 동일한 조건 하에서 예비절단을 하지 않은 순수 전단시편을 대상으로 복원력-변형 관계를 조사하는 것이다. 특히, 충전고무는 히스테리시스적 에너지 손실 특성이 있으므로 실제 고무시편은 균열성장 측정에 적용될 최대변형의 크기로 사전 처리하는데 이 같은 사전 처리는 변형연화를 최소화하기 위함이다. 변형에너지 밀도를 응력-변형 곡선 대신 복원력-변형 곡선의 하부면적으로부터 결정하는 것도 결국 히스테리시스적 영향을 최소화하는 것이 그 목적이다.

그림 13은 카본블랙 충전 NR과 SBR 배합고무에 대해 변형에너지 밀도  $U$ 를 항온조 내 설정온도 40°C와 100°C에서 측정된 결과를 각각 보여주고 있다. 빗금 친 부분은 주어진 변형률  $\epsilon$ 에서 변형에너지 밀도  $U$ 를 가리키고 있다. 전반적으로 변형률  $\epsilon$ 가 증가할수록 변형에너지 밀도  $U$ 값 또한 점진적으로 증가함을 알 수 있다. 변형률  $\epsilon$  변화에 따른 두 배합고무의 변형에너지 밀도  $U$ 값은 40°C에서 차이를 보이지 않았다. 그러나 이들 값은 온도 상승에 따라 현저한 차이를 나타내었다. 온도가 100°C로 상승할 경우 NR 배합고무의 변형에너지 밀도는 SBR 배합고무에 비해 상대적으로 크게 감소하였다. 이는 고무분자 사슬의 유연성 차이에 따른

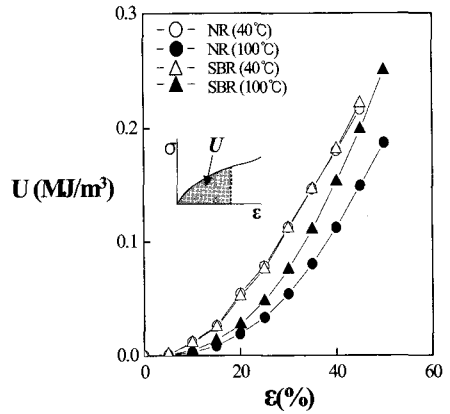


그림 13. 카본블랙 충전 NR과 SBR 배합고무의 변형 에너지 밀도.

온도 의존성 때문으로 보인다. 이들 변형에너지 밀도  $U$ 값과 시편의 초기높이  $h_0$ 값을 식(2)에 대입하여 인열에너지  $G$ 를 결정하였다.

### 3.5.4 피로균열 성장속도의 측정

순수전단 시편을 이용한 피로균열 성장시험의 경우 균열과 클램프들 사이에 변형되지 않은 영역이 있을 수 있도록 예비절단의 길이가 충분히 길어야 한다. 본 실험에서는 시편의 한쪽 모서리로부터 그 중심에 예리한 면도칼을 이용하여 약 30 mm를 균열성장 시험 시작 전에 예비 절단하였고 고무시편의 상하 양쪽을 클램프에 고정시켰다.

균열성장의 정점은 고속 광학 CCD 카메라 장치

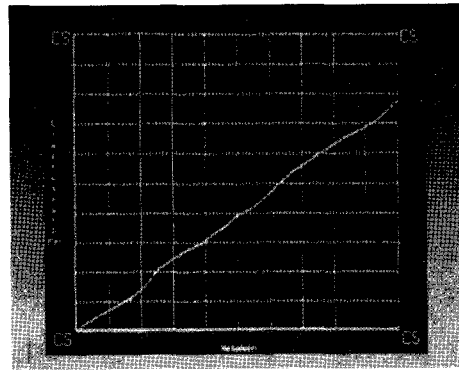
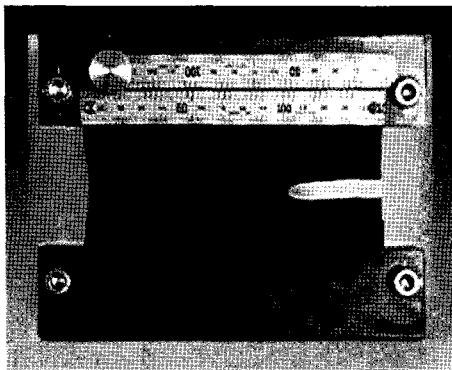


그림 14. 고무시편의 피로균열 성장 과정을 보여주는 사례의 실제 사진 (좌: 고무시편의 피로균열 성장, 우: 왕복주파수( $n$ )에 대한 균열성장 길이( $c$ )의 그래프).

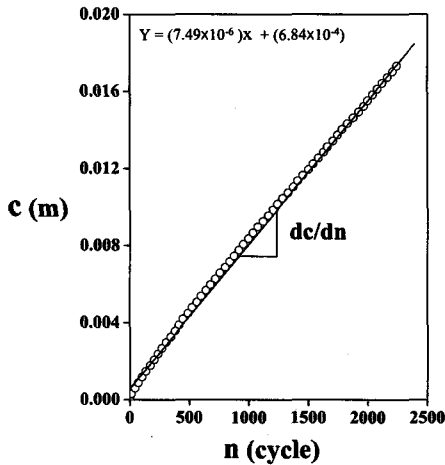


그림 15. 카본블랙 충전 SBR 배합고무에 대한 피로균열 성장 길이( $c$ )와 변형주기( $n$ )와의 상관관계.

를 통해 29 cuts/sec 속도로 추적하였으며  $1.0 \times 10^{-8}$  mm의 정밀도까지 측정하였다. 균열성장 길이  $c$ 가 최소 1 mm 이상일 때까지 측정을 계속하였다. 본 시험기는 균열성장 정점의 진행거리를 0.3 mm 간격으로 실시간 표시하였고, 측정 데이터는 PC에 자동 전송되어 데이터 처리 프로그램을 통해 분석토록 설계되었다.

그림 14는 고무시편의 피로균열 성장 과정에서

얻은 실제 사진이다. 여기서는 예비절단을 한 고무시편에 반복적 변형주기를 주었을 때 시편의 실제 변형 모양을 영상을 통해 관찰한 사진과 실시간으로 전송된 변형주기  $n$ 의 증가에 따른 균열성장 길이  $c$ 에 대한 측정 결과를 나타내는 그래프를 보여주고 있다.

피로균열성장 실험을 통해 처음으로 얻게 되는 그래프는 그림 15와 같다. 여기서 균열성장 속도  $c$ 와  $n$ 과의 직선관계로부터 그 기울기인  $dc/dn$ 으로부터 결정할 수 있다. 이것은 카본블랙 충전 SBR 배합고무를 40 °C에서 1Hz의 주기로 35% 변형을 주었을 때 얻은 실험결과이다.

고무재료의 피로균열 성장은 식 (3)의 균열성장 속도  $dc/dn$ 과 인열에너지  $G$ 와의 상관관계로부터 그 특성을 설명할 수 있다. 그림 16은 충전 NR과 SBR 배합고무를 대상으로 40 °C와 100 °C, 그리고 1Hz와 10Hz에서 얻은  $dc/dn$ 과 인열에너지  $G$ 와의 상관관계를 각각 보여주고 있다. 배합고무의 종류에 관계없이 인열에너지의 공급이 증가하면 피로균열성장속도가 선형적으로 증가하였다. 그러나 SBR 배합고무의 경우, 그 성장속도가 NR 배합고무에 비해 보다 빠르게 증가하는 것을 알 수 있었다. 왕복주기 1 Hz와 10 Hz의 범위 내에서는 피로

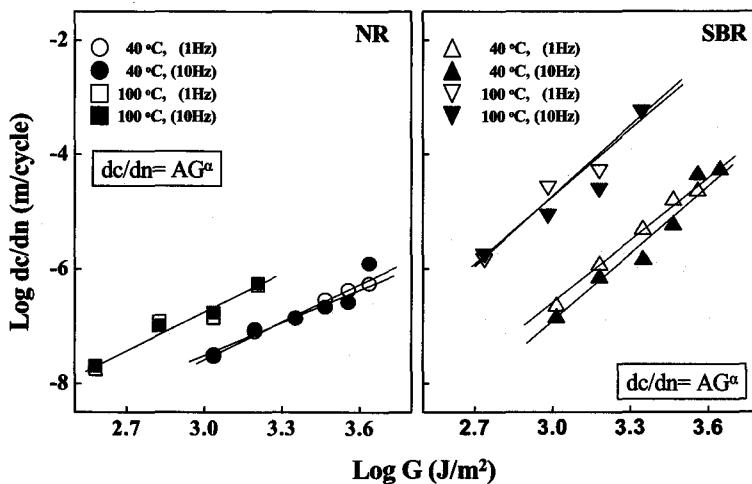


그림 16. 카본블랙 충전 NR과 SBR 배합고무에 대한 피로균열 성장속도( $dc/dn$ )와 인열에너지( $G$ )의 상관관계.

표 2. 카본블랙 충전 NR과 SBR 배합고무의 피로균열 성장지수( $a$ ) 값

Temperature	Frequency	C/B Filled NR	C/B Filled SBR
40 °C	1Hz	2.08	3.78
	10Hz	2.26	4.21
100 °C	1Hz	2.13	3.97
	10Hz	2.17	3.84

균열 성장 거동에 의미 있는 차이를 보이지 않았다. 그러나 온도가 40 °C에서 100 °C로 상승할 경우, NR 배합고무의 경우 피로균열 성장 속도가 약 10배 증가하였고 SBR 배합고무의 경우는 100배 증가하였다. SBR 배합고무의 피로균열 성장 거동은 온도 변화에 보다 현저하게 영향 받았다. 균열 성장 속도  $dc/dn$ 와 인열에너지  $G$ 에 대한 log-log plot의 직선관계에서 얻은 기울기는 식 (3)의 지수  $a$ 에 해당되는 값으로 각 배합고무의 피로균열성장 특성을 가리킨다.

결정화 고무인 천연고무(NR)와 비결정화 고무인 SBR 배합고무에 대한  $a$  값을 표 2에 정리하였다. NR 배합고무는 1Hz-10Hz와 40 °C-100 °C의 실험조건 내에서 2.08에서 2.26 범위의 값을 갖고 있었으며, SBR 배합고무에서는 동일 조건에서 3.78에서 4.21 범위의 값을 갖고 있었다. 이들 값은 변형주기와 온도 변화에 크게 영향 받지 않았다.

#### 4. 결 론

고무재료의 피로균열 성장속도 측정을 위한 시험기 개발을 위해 자료조사와 더불어 고무재료의 피로균열 성장에 영향을 미치는 요인들을 조사하였고, 개발된 시험기를 이용하여 결정화 고무인 NR과 비결정화 고무인 SBR 배합고무를 대상으로 모의실험을 실시하였다. 경화 고무시험편의 피로균열 성장속도를 시험편에 공급된 인열에너지의 함수로 분석하였고, 이를 통해 고무재료의 고유 피로균열 거동을 성공적으로 해석하였다.

여기서는 피로균열 성장 거동에 대한 실험적 접

근을 통해 장시간 동적 조건에서 사용되는 고무 제품들, 즉 타이어, V-벨트, 엔진 베어링, 방진고무 등의 고유 피로거동을 보다 근본적으로 접근할 수 있는 하나의 가능성을 제시하였다. 특히 피로균열 성장속도에 영향을 미치는 인자들, 즉 온도, 변형률, 변형주기, 그리고 비 완화 등 다양한 실험조건에 대한 광범위한 조사가 가능하다. 피로균열 성장속도 시험방법이 장차 고무재료의 피로거동을 사전 예측하고 고무배합 설계에 유익한 데이터를 제공하여 고무제품의 피로수명 향상에 긍정적으로 기여할 수 있기를 기대한다.

#### 감사의 말

본 연구는 산업자원부 산업기술평가원에서 시행한 표준화기술개발사업 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드린다. 또한 시험기 제작에 참여한 건화엔지니어링의 윤경기 사장에게도 감사를 드린다.

#### 참 고 문 헌

1. M. D. Ellul, "Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components," ed. by A. N. Gent, Hanser, New York, 1992, Chap. 6.
2. A. A. Griffith, *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, **221**, 163 (1920).
3. R. S. Rivlin and S. G. Thomas, *J. Polym. Sci.*, **10**, 291, (1953).
4. G. J. Lake and A. G. Thomas, "Natural Rubber Science and Technology," ed. by A. D. Roberts, Oxford University Press, Oxford, 1988, pp.731-772.
5. G. J. Lake, *Prog. Rubber Technol.*, **45**, 89 (1983).
6. G. J. Lake and P. B. Lindley, *J. Appl. Polym. Sci.*, **8**, 707, (1964).
7. P. B. Lindley, *Rubber Chem. Technol.*, **37**, 1341 (1964).
8. D. G. Young, *Rubber Chem. Technol.*, **58**, 785 (1985).