

타이어나 고무제품에 파괴역학의 응용

Applications of Fracture Mechanics into Tire and Rubber

이 역 섭*
Ouk Sub Lee

1. 서 론

유화경화처리된 고무들의 강도나 다른 여러 가지 기계적 성질들에 대한 공학적인 이해를 돕기 위하여 파괴역학의 기본이론이 많이 응용되고 있는 사실은 잘 알려져 있다. 이들 재료들은 고탄성이며, 비선형거동을 하기 때문에 일반적인 접근법으로(비교적 간단한 방법) 문제를 해결하는 방안을 강구해야 공학적인 응용도를 높힐 수 있을 것이다.

1920년 Griffith에 의해 처음 제안된 “파괴역학의 에너지 개념”은 이러한 관점에서 성공적인 이론이라 할 수 있다.

따라서 성장하는 균열에 의해서 방출되는 에너지해방율이 고무의 여러가지 기계적 특성을 나타내는 하나의 파라메타로 널리 쓰여지고 있다. 고무에 대해서는, 파괴가 된다고 하는 것보다 찢어진다는 표현이 적절한 것 같아 “fracture energy”라는 용어보다 “tearing energy”라는 용어를 많이 사용한다. 그런데 고무에 Griffith의 에너지 개념을 응용할 때는 본래의 Griffith 아이디어와는 다음 두가지 점에서 차이가 나므로 유의해야 한다. 즉

(i) 여러가지 모양의 시편을 사용하여, 큰 비선형변형이 일어나더라도, 일반적인 접근법

으로 에너지해방율을 계산할 수가 있다.

(ii) 급작스런 파손에 대한 단일 표면에너지 크라이테리온의 개념을 여러가지 현상에 적용시킬 수 있다. 즉 시간에 종속적이며 반복적인 하중효과등이 포함된 경우들이나 화학적인 내습(attack)이 심한 경우등에도 단일 표면에너지 크라이테리온을 적용시킬 수 있다. 파괴역학을 고무에 응용하여 여러가지 종류의 고무의 파손현상에 수반하는 에너지를 산정해보면 그 범위가 꽤 넓은 것을 알 수 있는데 대개 $10\mu\text{J}/\text{cm}^2 \sim 10\text{J}/\text{cm}^2$ 의 범위내에 있다는 것을 알게 된다. 또한 선형탄성이라는 가정을 하지 않고 일반적인 관점에서 계산된 전체적인 변형에너지해방율은 균열선단에서 변형에너지 밀도와 매우 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있으며 변형에너지밀도는 파괴개시의 여부를 결정하기에 매우 기본적인 측정량이라 알려져 있다.

2. 고무의 찢김(Tearing)

파괴역학을 고무에 응용하게 된 근본적인 이유는 여러가지 모양의 시편편을 사용하여 전통적인 찢김시험(Tear test)을 했을 때 경화된 정도에 따라 순차적으로 나타나야 할 시험값이 뒤죽박죽이 되어 나타나기 때문이었다.

이러한 난점을 극복하기 위하여 변형에너지해방울에서 도출된 크라이테리온이 제안되었으며 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$T = -\partial u / \partial A$$

여기서 $\partial u / \partial A$ 는 균열의 단위 파괴 표면적 A 의 증가에 따라 시편에 축적된 탄성변형에너지 u 가 변화하는 율을 나타낸다. 여기서 편미분을 사용한 이유는 시편의 경계조건이 변형일정한 경우이며 따라서 외력은 아무런 일을 하지 않는다는 것을 나타내기 위해서이다. 여기서 찢김에너지(Tearing energy), T ,는 Griffith에 의해서 유도된 에너지해방울과 유사하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 고무가 찢어질 경우에는 에너지가 비가역적으로 발산되므로 T 는 표면자유에너지보다도 훨씬 크다. 그럼에도 불구하고 여러가지 다른 시험편(그림 1을 보라)을 사용하여 시험한 결과를 T 로 나타내면 시험편의 모양이나 변형의 형태에 관계 없이 T 값이 일정하다는 것을 안다.

에너지해방울은 균열선단에서의 응력집중과 밀접한 관계가 있다. 균열선단의 반원직경이 d 인 모델균열에 대해서는 다음과 같이 T 를 계산할 수 있다.

$$T = d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} W_{\phi} \cos \phi d\phi \quad (1)$$

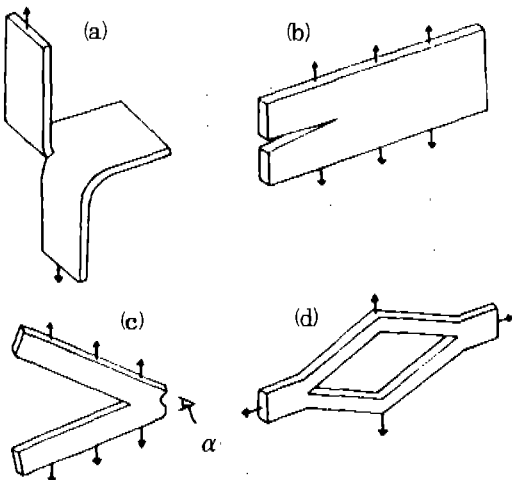


그림 1 고무의 시험편형상과 하중모양

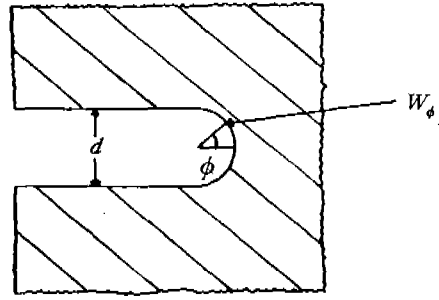


그림 2 모델균열선단

여기서 W_{ϕ} 는 균열선단의 극(pole)에서 각(角) ϕ 인 지점의 균열선단 표면층내의 단위체적당 저장된 탄성에너지이다.

식(1)은 재료의 응력-변형을 거동에 대한 아무런 가정없이 유도되었으며 실험적으로 증명된 것이다. 만약 균열선단의 평균변형에너지 밀도가 W_t 라면, 다음과 같은 근사식으로 T 를 표시할 수 있다.

$$T \approx W_t d \quad (2)$$

비결정체고무는 변형율의 변화나 온도변화에 민감하며 변형-결정체고무(strain crystallizing rubber)는 변형율변화나 온도변화에 대체로 민감하지 않는 특성에도 불구하고 찢김에너지(tearing energy) 접근법은, 결정체고무나 비결정체 고무들에 대해서 다같이 잘 맞는다는 실험결과가 발표되고 있다. 비결정체고무의 거동은 변형율변화나 온도변화에 따르는 점탄성성질의 변화와 깊은 관계가 있음이 판명되었으며, 이 사실은 점탄성 히스테리시스가 찢김강도(tear strength)에 미치는 주된 인자라는 사실을 나타낸다. 결정체고무에서는 결정체가 생성될 때 점탄성 효과가 없어지며 따라서 높은 변형율에서의 히스테리시스가 감소된다.

3. 균열성장

여러가지 다른 공업재료에서와 마찬가지로 고무에 있어서도 소규모의 균열성장이 발생하는데 이때에는 찢김이나 급작스런 파손에 필요한 에너지보다 낮은 에너지가 방출된다.

실제적으로 이러한 균열성장이 일어나는 경우는 반복적인 응력을 받을 때이다. 비결정체 고무에 대해서는 이와 유사한 균열성장현상이 일정한 응력하에서도 발생된다. (이것은 시간에 종속된 현상으로 나타난다). 위의 두 경우, 어느 것이나 결국 피로파손을 일으키게 되므로 이러한 현상을 상세하게 연구해 오고 있다. 반복응력이 작용하는 경우에는 한 사이클당 균열성장량을 그 사이클동안에 얻어진 최대 찢김에너지에 대해서 도시해 보면, 사용한 시편의 모양에는 무관하게 나타나고 있음을 그림 3a 를 보아 알 수 있다.

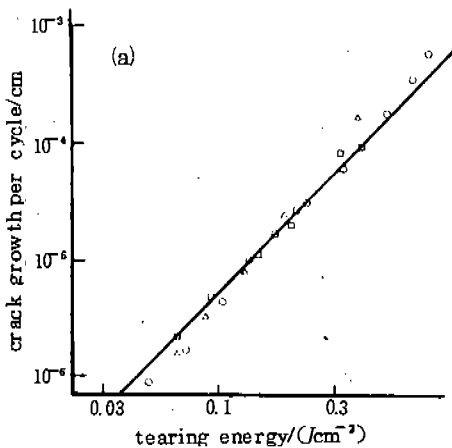


그림 3a 여러가지 모양의 시편을 사용하여 결정한 찢김에너지와 균열성장의 관계

따라서 찢김에너지개념이 소규모 사이클 균열성장과 시간에 종속적으로 일어나는 균열 성장에 대해서도 적용가능하다는 것을 알 수 있다.

찢김강도는 소규모 성장에 대한 상한계값에 상응된다. 이 상한계값보다 아래에서의 사이클 균열성장거동은 다음과 같은 관계식으로 근사적으로 표시할 수 있다.

$$\frac{dc}{dn} = BT^n \tag{3}$$

여기서 c 는 균열길이이고 n 은 사이클수, B 와 β 는 재료상수들이다. 대부분의 유화경화처리된 고무에 대해서는 β 가 1~6이며 사용한 elastomer 에 영향을 많이 받는다. 또

크로스-링킹(cross-linking)의 정도(degree)와 같은 인자들에 대해서는 β 의 변화범위가 크게 영향을 받지 않는다. 예로서 유화경화처리된 자연고무(natural rubber vulcanizates)는 β 가 약 2이며, Vulcanizates of the non-crystallizing styrene-butadiene rubber (SBR)에 대해서는 β 가 4 정도임이 실험적으로 밝혀진 결과들이다.

찢김에너지가 낮은 경우에는 멱수관계(Power law relations)가 성립하지 않는다. 많은 elastomer 들에 대해서 직선부분이 존재하고 이 직선이 T (찢김에너지)-축과 만나는 점의 T 값은 기계적인 균열성장이 개시되기에 필요한 찢김에너지 T_0 를 나타낸다. T_0 보다 적은 에너지에서는 균열성장이 매우 낮으며, 찢김에너지와는 무관하다고 보여진다. 이 경우의 균열성장은 오존에 의한 화학적인 내습(attack)의 효과라고 생각된다. 따라서 이 영역에서의 균열성장특성을 나타내는 식은 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dc}{dn} = H(T - T_0) + r_z \tag{4}$$

여기서 $H(T - T_0)$ 는 기계적인 균열성장을 나타내며, H 는 상수이다. r_z 는 오존균열성장을 나타낸다.

T_0 의 크기는 천연고무, SBR, Polychloroprene, butyl rubber 가 다같이 비슷한 값 5 mJ/cm^2 을 갖는다. 위의 재료들에 대해서 찢김강도나 인장강도를 측정해 보면 각각 다른 값들을 나타내는데 이와는 대조적으로 찢김에너지 T_0 값이 일정하다는 것은 상당히 관심을 끄는 결과라 할 만하다.

여러가지 조건하에서 다른 elastomer에 대해서 T_0 값이 일정한 것은, T_0 가 원천적(Primary)인 탄소-탄소의 결합강도에 의해서 지배받기 때문이라고 생각된다.

기계적인 결합의 파단을 일으키기에 필요한 최소 찢김에너지는 식(2)를 사용하여 산정할 수 있다. 물론 이 경우는 선단직경이 가능한 한 작다는 가정하에서 사용해야 하는데 이것은 elastomer 가 변형되기전에 크로스-링크사

이의 거리 정도의 크기라고 가정하는 것과 같다. 이러한 조건하에서는 $d \approx \xi \mu^{1/2}$ 로 된다. 여기서 ξ 는 모노머 유닛(monomer unit)의 길이이며, μ 는 크로스링크사이의 monomer units의 수이다.

힘이 크로스-링크를 통하여 전달된다고 가정하면 탄소-탄소의 단결합들이 파단되는 점에서 탄소-탄소의 이중결합수가 작기 때문에 최대 에너지밀도는 bJ 와 비슷할 것이다. 여기서 b 는 체적당 단결합의 수이고 J 는 파단점에서 각 단결합에 의해서 저장된 에너지 양이다. 이것은 식(2)에 대입하면 다음 식과 같이 된다.

$$T_0 \approx bJ \xi \mu^{1/2} \quad (5)$$

전형적인 유화경화처리된 천연고무(natural rubber vulcanizate)는 대개 다음과 같은 값들을 적용시키면 된다.:

$$\xi = 5 \times 10^{-8} \text{ cm}, b = 2.4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}, \mu = 100.$$

isoprene unit 내의 가장 약한 C-C결합의 분해에너지를 J 로 취하여 $J = 3.3 \times 10^{19}$ Joule 따라서 식(5)에서 $T_0 \approx 4 \text{ mJ/cm}^2$

더 정확한 계산을 해서 얻은 T_0 와 비교해 보면 $T_0 \approx 2 \text{ mJ/cm}^2$ 이 되는데 문제의 본질상 나타나는 여러가지 불확실한 점들을 고려한다면 좋은 결과들이라고 생각된다. 이러한 관점에서 본다면 여러 다른 elastomer 때문에 나타나는 변화는 상당히 작다. 따라서 T_0 를 원천적인 결합강도와 연관시켜 생각해도 좋겠고, 경질고무(Vulcanizate)의 분자구조와 관련된다는 생각도 할 수 있다.

T_0 를 초과할때는, 균열성장이 일어난다는 사실은 균열선단부근에서 재료의 retraction이 일어나는 영역이 있다는 것을 의미한다. 따라서 재료의 기계적인 히스테리시스가 선단에서의 응력집중에 영향을 미칠 것이며, 따라서 균열성장거동이 복잡한 양상을 띄게 될 것이다. 거시적인 파손스펙트럼의 상한값을 나타내는 찢김강도나 인장강도로서는 이러한 사항들을 명쾌하게 설명할 수 없다.

4. 피 로

균열성장이 작은 결합에서 시작된다고 가정하면 균열성장거동으로부터 피로수명을 예측할 수 있다. 인장시편에서 편축균열이 있는 경우 찢김에너지는 아래 식으로 주어진다.

$$T = 2 kW_c \quad (6)$$

여기서 W 는 시편의 변형에너지밀도(strain energy density)이며 k 는 변형율의 함수이고 서서히 변화하며 독립적으로 결정된다. 적은 변형율에서는, k 가 π 의 값과 비슷해지며 따라서 식(6)은 원래의 Griffith에 의해서 유도된 에너지해방율과 원칙적으로 같게 된다. 식(3)과 같은 변수관계식에 식(6)을 대입하고 적분하면 다음과 같은 피로수명이 얻어진다.

$$N = \{ (\beta - 1) B (2KW)^{\beta} C_0^{\beta-1} \}^{-1} \quad (7)$$

여기서 C_0 는 유효초기결합크기이다. 이 식은 중 혹은 대변형상태에서 변형율이 피로수명에 영향을 미치는 경우에도 실험결과와 잘 일치한다. 또한 결합의 크기가 10^{-3} cm 정도까지 즉, 고무내의 관찰 가능한 결합(Particulate impurities 나 mouldling 혹은 die-stamping imperfection 등)의 크기정도까지는 위의 식(7)이 실험결과와 잘 일치하는 것이 밝혀졌다.

위의 접근방법은 멱수관계법칙이 잘 맞지 않는 영역에도 식(4)를 사용해서 응용할 수 있다. 그림 3b는 넓은 범위의 변형율에 대한 피로실험결과를 도시하여 실험치와 이론치를 비교한 것이다.

N 이 급격히 상승하는 부분이 있는데 이것은 T_0 에 대응하는 점이라 생각되며, 기계적인 피로한도를 나타낸다고 생각하는 것이 좋고, 이것보다 낮은 범위에서는 파손이 오존에 의해서 개시된다.

일정한 하중이나 일정변형조건하에서의 피로파손은, 고무의 경우에는, 시간에 종속적인 균열진전현상으로 나타난다.

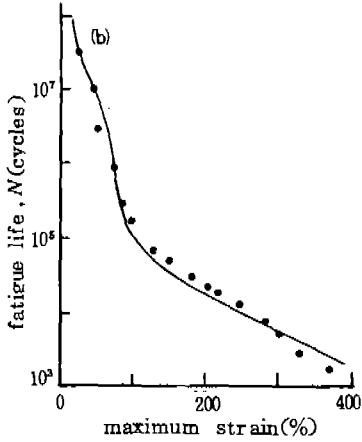


그림 3b 인장피로수명과 싸이클 당 최대변형율의 관계

5. 다른형태의 파손현상

고무에 응용된 파괴역학적인 방법론은 지금까지 논의한 현상의 여러가지 경우에도 사용된다. 그중 인장강도에로의 확장이 가장 눈에 띈다. 인장파손은 일(one)싸이클 피로현상으로 간주할 수 있으며, 비결정체고무에 대해서는(비록 복잡한 스케일 효과(Scale effect)가 균열 성장에 영향을 미치지만) 인장강도가 찢김강도의 크기로 될 때 파손이 일어난다. 결정체고무(Crystallizing rubbers)에 대해서는 시험편 전체가 결정질(Crystalline)로 될 경우에는 더욱 복잡한 현상이 일어나게 된다(인장파손전에 이런 현상이 일어난다) 그 이유는 이러한 현상이 일어나면 파손이 정규적인 찢김강도에서 일어나지 않고, 더 높은 찢김에너지에서 안정균열성장이 발생하기 때문이다. 이러한 현상을 잘 설명해 주는 수정된 이론이 발표된 적이 있으나, 이러한 복잡한 현상때문에 인장강도는 설명하기가 어려운 재료성질이다. 오존에 의한 화학적 내습(chemical attack)은 변형율이 낮은 경우, 피로거동에 영향을 미친다. 또한 오존은 일정 변형조건에 있는 고무에 크랙킹을 유발시킨다. 아무런 방지제(Protective agent)가 첨가되지 않는 고무에 대해서는 단지 수(a few)퍼센트의 인장에 상당하는 하한 변형율하에서

이러한 크랙킹이 일어난다. 균열이 있는 시험편으로 실험을 해 보면 이러한 크랙킹은 약 $10 \mu J / cm^2$ 의 에너지를 필요로 한다는 것을 알 수 있다.

이 에너지와 관찰된 하한 변형율을 사용하여 식(6)을 만족하는 결합크기가 $10^{-3} cm$ 정도 되는 것을 알 수 있다. 이 값은 고무에 대해 적절한 값인 것 같이 생각되며 실험값과도 잘 일치한다. 그래서 파괴역학적인 접근법이 오존에 의해서 발생하는 화학적 크랙킹에 대한 하한값을 만족스럽게 고려할 수 있다는 것을 알게 된다.

마쇄(Abrasion)현상도 에너지접근법으로 성공적으로 해석할 수 있다. 마쇄가 일어나는 동안에 작은 텅(tongues)들로 구성되는 패턴(Pattern)이 발생하며 이러한 텅이 균열 성장에 영향을 주게 된다.

단위폭당의 마쇄력(abrader force) F 가 선형마쇄기(Line abrader)에 작용하는 경우 이상적이고 균일한 패턴이 형성 될 것이며 찢김에너지는 아래와 같이 계산할 수 있다. [그림 4를 참조하라]

$$T = F (1 + \cos \theta) \tag{8}$$

여기서 θ 는 균열이 표면과 만드는 각이다.

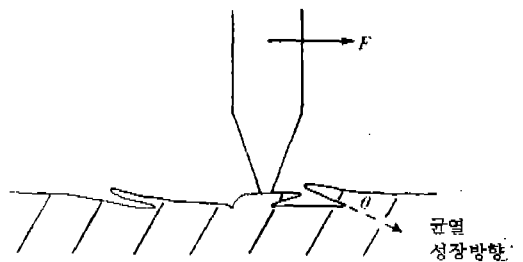


그림 4 마쇄력 F를 받는 면도날에 의해 형성된 마쇄패턴

텅들이 떨어져 나가기 때문에 마쇄가 발생된다고 생각되는데 식(8)에서는 균열길이가 포함되어 있지 않으므로, 균열이 어떻게 생겼느냐, 즉 단위싸이클에서 발생했느냐 혹은 많은 싸이클에서 발생했느냐는 문제되지 않는다. 따라서 만약 각 싸이클 즉 마쇄기(abra-

der)가 한 번 지나감에 따른 균열 진전길이
가 x 라면 단일 싸이클 단위표면적당 평균마
쇄체적은

$$V = x \sin \theta \tag{9}$$

여기에서 고무의 균열성장 특성으로부터 x
즉 V 를 계산할 수 있음을 알 수 있다. 여러
가지 비결정체고무에 대해서는 계산한 마쇄
율과 측정 한 마쇄율을 비교해 보면 잘 일치
하고 있음을 알 수 있으나 변형을-결정체로
되는 자연고무(strain-crystallizing natu-
ral rubber)에 대해서는 잘 맞지 않고 측정
한 값이 계산값보다 크다. 이것은 결정(Cr-
ystallization)이 발생되지 않았든지 혹은 마
쇄과정동안 결정(Crystallization)이 효력을
발생하지 않았기 때문이라 생각된다. 고무를
날카로운 카-터로 절단할 때에도 파괴역학
적인 접근법이 유효하다는 사실이 입증되고
있다. 타이어나 콘베어벨트를 젖은조건(Wet
condition) (즉 고무와 절단기 사이의 마찰
이 다소 감소될 때)하에서 절단할 때 절단과
정을 해석하는 일이 매우 중요하다. 젖은조건
하에서 절단하지 않으면 마찰력이 너무 커서
절단작업이 불가능하다. 마찰이 거의 없을 경
우의 절단과정을 해석하기 위하여, 신장된 찢
김시험편내의 균열선단에 면도날을 작용시키
는 방법이 개발되고 있다. 찢김에너지 접근방
법은 변형형태와 모양이 다른 시험편의 결과
들을 중첩할 수 있으므로 유용하다. 또한, 찢
김에너지가 낮은 영역에서는 고무의 변형과
면도날에 작용하는 힘으로부터 얻어지는 전
에너지가 일정한 값에 도달하면 빠르고 급격
한 절단이 일어나는 것을 실험적으로 발견하
였다. 이러한 사실은 비록 여러가지 다른 경
화고무(Vulcanizates)에 대해서는 크기가 각
각 다른 값을 나타낼지언정 모든 경화고무
(Vulcanizates)에 대해서 실험적으로 증명된
사실이다. 결과적으로, 동일한 에너지방법을
분리웨이브(Waves of detachment) (Sch-
allamach waves)가 형성되는 경우의 미끄
럼마찰을 해결하는데 혹은 여러가지 응착력

(adhesion)문제를 해결하는데 유용하게 사용
가능하다는 결론이 도출되고 있다.

6. 타이어나의 윤거 (tread) 홈 크랙킹

균열들이 가끔 타이어나의 윤거홈에 발생되어
타이어나가 파손되는 경우가 있다(그림 5a를 참
조하라).

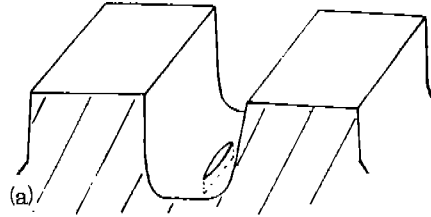


그림 5a 타이어나에 발생하는 전형적인 윤거
(tread) 홈 균열

이와 같은 윤거홈 크랙킹과정을 연구하기 위
하여 파괴역학을 고무에 응용하여 정량적이며
실제적인 방안을 강구할 수 있다. 이때 가장
어려운 점은 실제로 사용되고 있는 제품내에
있는 균열에 대한 변형에너지해방을 정량적
으로 결정하는 일이다. 실제로 사용되고 있는
제품은 대개 복잡한 현상이며, 복잡한 변형을
하기 때문에 더욱 문제가 복잡해진다. 윤거홈
크랙킹에 대해서는 찢김에너지와 타이어나 홈내
의 변형율을 산정할 수 있는 특수한 기법이
개발되어 있다. 이 기법에는 응력하에서 균열
이 열리는 양을 측정하는 방법이 포함되어 있
다(여기에서의 균열열림은 균열의 탄성열림
(elastic opening)이며 균열개구범위와 혼동
되지 않아야 한다). 열린 균열을 닫는데 필요
한 일량을 계산하는 관점으로 생각하여 판재
내의 균열에 대한 찢김에너지는 근사적으로
다음과 같이 구해진다.

$$T \approx \frac{1}{2} \sigma \frac{\partial S}{\partial C'} \tag{10}$$

여기서 σ 는 변형이 되지않은 상태(초기상
태)(unstrained state)에서의 응력이며 S
는 균열열림 면적, C' 는 변형되었을때의 균
열길이이다(그림 5b를 참조하라). 편미분은

변형이 일정한 조건하에서 실험하였다는 것을 의미한다.

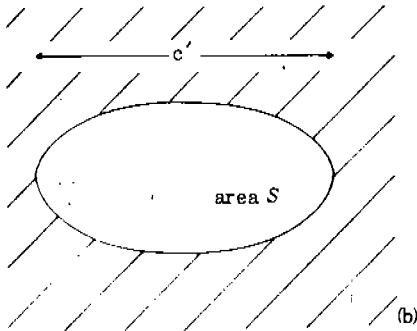


그림 5b 변형에너지해방율을 결정하기 위한 균열열림법에서의 파라메타들

이 방법은 모델시험편을 사용한 실험을 통하여 타당성이 입증되었으며 이때 사용한 시험편은 순수전단시험편 혹은 단순인장(simple extension) 시험편이었다. 중앙균열이 있는 순수전단시험편이 타이어홈에 있는 균열을 모델하는데 가장 좋다고 알려져 있다(그림 5c를 참조하라).

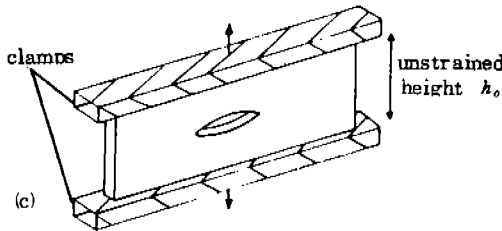


그림 5c 중앙균열을 포함하는 순수전단 시험편

그림 6a 는 식(10)을 사용하고 여러가지 크기의 균열길이에 대해서 실험적으로 측정된 찢김에너지를 도시한 것이며 두 실험값들이 아주 가깝게 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

타이어에 대한 결과는 약 4mm 정도 되는 깊이에 있는 균열에 대한 것이며 이 방법은 얇은 균열에 대해서도 역시 사용할 수 있으며, 이 경우에는 균열길이보다 균열깊이가 조절인자(controlling factor)로 한다.

균열열림기법(crack opening technique)는 타이어가 하중을 받지 않을 때 팽창된 타이어

의 홈내부에 측면인장변형율(lateral tensile strain)이 존재한다는 것을 명백하게 해준다. 하중은 변형율에 다음과 같은 두가지 효과를 나타낸다(그림 6b 를 보라).

- i) 길바닥과 접촉을 시작하는 부분에 가까이 갈수록 변형율은 어느정도 증가하며
- ii) 접촉부분내에서는 변형율이 급격히 떨어지며 그림 6b 에서는 0으로 저하한다.

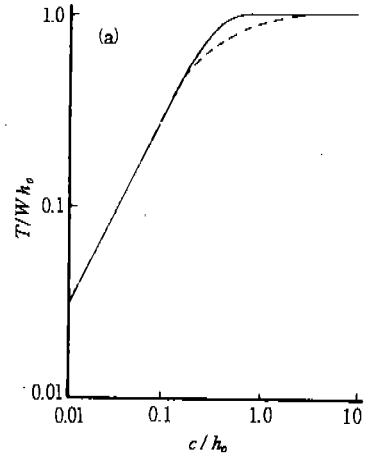


그림 6a 찢김에너지를 균열길이 C의 함수로 표시한 그림

- (-) : 순수전단시험편,
- (-) : 타이어홈에 깊은 균열이 있는 경우
- W : 균열선단에서 떨어진 곳의 변형에너지밀도
- h_0 : 순수전단시험편에서 변형이 없을 때의 시험편 높이 혹은 타이어홈의 폭

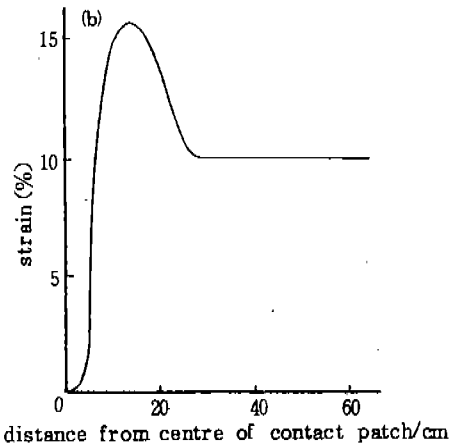


그림 6b 홈내의 측면인장변형율의 접촉조각(부분)의 중심부에서의 거리에 따른 변화(하중을 받는 트럭의 타이어)

측정한 변형을사이클과 그림 6a에서 보인 홈에 있는 균열에 대한 찢김에너지 변화양상과, 실험실에서 독자적으로 측정된 균열성장 특성을 이용하여, 홈에 있는 균열의 성장을 예측할 수 있다. 그림 7은 정상적인 운전상태에서의 타이어에서 관찰된 거동 및 시험리그(Testing Rig)를 사용해서 얻은 데이터 및 이론적으로 예측된 값들을 도시한 것이다. 홈 변형율사이클을 0-9%로 선택하여 예측한 값이 실험값들과 가장 근사하게 나타났다.

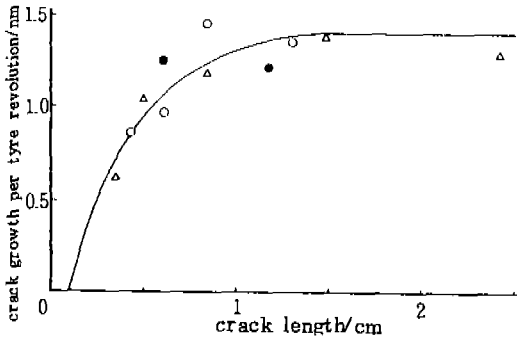


그림 7 홈크랙킹거동의 비교

실선 : 이론적인 예측값(실험값은 시내에서 운행하고 있는 버스에 부착된 타이어에서 얻은 값들이다)

- : 자연균열 ● : 인공적인 균열
- △ : 시험리그 사용하여 얻은 인공적인 균열에 대한 실험값

실제로 관찰된 평균변형율사이클은 0-11%이므로 이론치계산때 사용한 0-9%와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 7의 이론예측치가 균열길이축과 약 1mm에서 만나고 있는 것이 눈에 띈다. 이것은 기계적인 균열 성장한도 T_c 에 해당하는 것이며, 홈크랙킹이 일어나기 위해서는 어떤 형태의 균열개시기가 구명되어야 할 필요성을 느끼게 한다. 이러한 고찰과 상응하는 결과가 리그실험결과로 확인되었는데, 즉 1mm보다 작은 균열을 인공적으로 만들어 실험해 보았으나 크랙킹은 발생되지 않았다. 실제 운전시에는 아주 단단한 물건(flint)나 날카로운 물건에 의해서 생기는 커트(cutting)는 균열을 개시시키는 원인으로 될 수 있으며 오존크랙킹도 균열개시

의 원인이 될 수 있다.

7. 고무-코드적층판(rubber-cord laminates)의 피로

타이어, 콘베어벨트 등과 같은 고무제품은 고무-코드적층판구조물들이다. 다른적층판과 마찬가지로 이들 구조물들의 파손양상은 복잡하고, 코드와 고무사이의 접착력이 없어진다든지 또는 여러가지 모양의 크랙킹으로부터 인되는 경우가 많다. 아래에 대표적인 두개의 크랙킹현상에 대해서 논의했다. 즉,

- i) 프라이 층(ply layer)사이에서의 균열 성장
- ii) 각각의 코-드주위에서 대체적으로 보아 모양이 원형인 균열의 성장:소켓팅(socketting)이라 한다.

7.1 적층판변형과 파손기구

여기서 고려하는 구조물은 코-드가 대칭으로 배열되어 있는 두개의 판을 겹쳐서 만든 한장의 고무판이다. 이 코-드들은 고무에 강력하게 접착되어 있다. 이 판에 전체적으로 인장응력을 가하면 시험편은 크게 세개의 영역으로 변형구간을 나눌 수 있다(그림 8a를 참조하라): 즉,

- ① 변형이 상대적으로 균일하게 일어나는 영역; 이 영역에서는 만약 ply layer들이 가까우면 근사적으로 pantographing model(縮寫法)의 법칙을 따른다.
- ② 양쪽 가장자리에 연한 영역; 변형이 복잡하게 일어나며, 특히 코-드의 끝부분에서 큰 전단변형율이 발생된다.

구체적인 설계자료를 보면(전신장율은 약 5%인데) 전단변형율은 100%까지 상승되므로 이 영역에서 균열들이 매우 빠르게 개시된다. 그래서 이들 균열이 ply layer 사이에서 시편폭방향으로 혹은 시편폭을 가로질러서 성장하게 되는 것이다. 시편에는 코-드 끝부분(cord ends)이 많이 존재하게 되므로 길이를 따라서 균열개시가 될 가능성이 많으며 따라서 이 방향으로 성장이 쉽게 이루어

진다 그리고(영똥하게도) 이들 많은 균열들이 모여서 하나의 긴 inter-ply 균열을 형성한다. 횡방향으로의 균열성장은 종방향으로의 균열성장보다 더 잘 정의되며, 오차가 적다. 그리고 inter-ply 크랙킹이 발생할 때 이것이 시편의 수명에 영향을 미치는 주된 인자로 생각되고 있다. 가끔 ply-층들 사이에서 보다 각각의 코-드주위에 크랙킹이 발생하기도 한다. 이 'socketing' 과정은 inter-ply 크랙킹과는 급방 구별할 수 있다. 왜냐하면 시편이 신장되든지 축소됨에 따라서 코-드 끝부분이 고무에서 움직여 들어가고 나오는 것을 쉽게 볼 수 있기 때문이다. 이러한 파손은 접착상실이 원인일 수 있으나 여기에서는 균열성장의 결과로 기인하였다고 생각해서 해석을 하기로 한다.

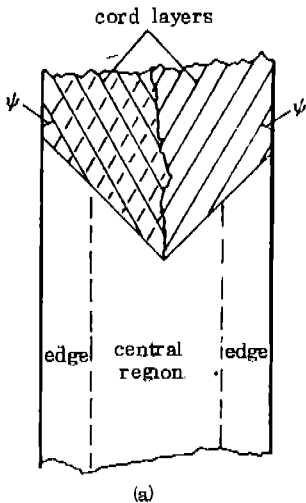


그림 8a 대칭인 두 개의 프라이 적층판(two-ply laminate) (코-드각(角) $\pm \phi$)과 세 개의 변형구역

7.2 이 론

inter-ply 크랙킹에 대해서는 H편에 연해 균일한 길이 c 를 갖고 있는 이상적인 균열로 모델링해서 고려해 보기로 한다(그림 8b 참조)

다음 2가지를 우선 가정 하기로 하자

i) 시편 양측가장자리에서의 복잡한 변형구역은 균열이 진전함에 따라 균열선단과 같이

움직인다.

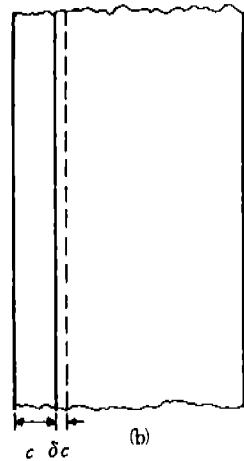


그림 8b 길이 c 인 이상적인 inter-ply 균열과 전파스텝 δc

ii) 균열이 충분히 길고, 단일 ply-layer의 강성(stiffness)은 충분히 작다.

이러한 가정하에서 균열이 δc 만큼 성장하면 중심 영역에서 가장자리영역으로 단위길이당 $t \delta c$ 만큼의 체적이 이동되는 결과를 가져온다. 따라서 이 과정에서 단위길이 당 없어진 에너지 δV 는 다음 식으로 얻어진다.

$$\delta V = Wc t \delta c$$

여기서 Wc 는 중앙영역에서의 변형에너지 밀도이다. T 의 정의를 기억해서, 이 경우의 $T = \delta V / \delta c$ 이므로

$$T = Wc t \tag{11}$$

만약, 파손이 각각 코-드 주위의 크랙킹에 연유되어 일어난다면, 'Socketing'이 시편에 연하여 균일하게 되는 이상적인 경우를 생각할 수 있을 것이다(그림 8c 참조).

Socketing이 ply layer 중 하나에만 발생되었다면 위에서의 가정을 다시 적용시켜도 좋다. 따라서 횡방향전파량 δc 에 의해서 해방되는 에너지는 하나의 inter-ply 균열에 대한 것과 같다(그림 8b를 참조하라). 그러나 Socketing의 경우에는 시편의 단위길이당의 균열성장의 전체면적은

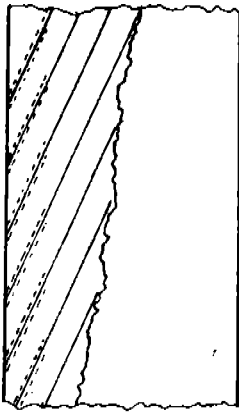
$$\delta A = \pi D m \delta c$$

여기서 m 은 단위길이당 코-드수(코드방향과 수직인 방향)이고 D 는 코-드주위의 균열의 직경이다. $T = \delta V / \delta A$ 이므로

$$T = Wc t / \pi m D \tag{12}$$

식(11)과 식(12)를 비교해 보면 균열성장에 필요한 에너지는 m 이 아래의 조건을 만족할 때 두기구(mechanism)에 대해서 동일한 결과를 나타낸다.

$$m = \frac{1}{\pi D} = m' \tag{13}$$



(c)

그림 8c 각각의 코-드 주위의 원형크랙 ('Socketing')

7.3 결 과

그림 9는 고정진폭으로 반복신장을 받는 적층판(laminate)내의 전형적인 inter-ply 균열이 성장하는 양상을 도시한 것이다.

그림 9에서 균열성장은 세가지 영역으로 나눌 수 있다. 즉,

- i) 균열개시영역(이 그림에는 데이터 없음) : 코-드 끝부근에서 균열이 성장하기 시작하여 길이방향으로 서로 이어진다. 구체적인 설계방안에 의하면 이 영역에서의 균열성장율은 그 다음 단계에서의 균열성장율보다 클 수도 있고 작을 수도 있다.
- ii) 안정균열성장영역 : 길이방향균열길이

횡방향균열길이보다 훨씬크고 횡방향균열크기가 적어도 시편두께 정도되는 경우 : 이 영역에서는 횡방향균열성장율은 일정하다.

iii) 최종영역 : 균열이 시편의 상당한 부분까지 성장하였고 파손되지 않은 영역의 체적변형이 꽤 비-균일적으로 일어난다. 이것은 균열의 모양에 따라서 횡방향으로의 균열성장율을 증가 혹은 감소시킨다.

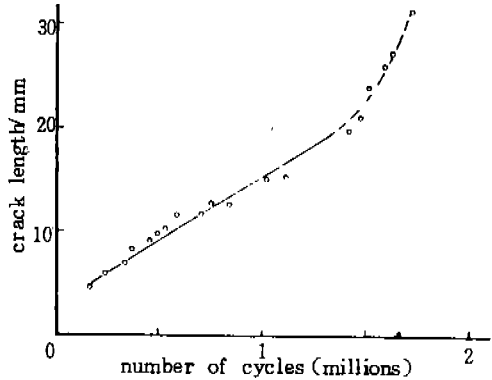


그림 9 횡방향균열길이 vs. 고정진폭을 갖는 반복인장변위를 받는 적층판내의 inter-Ply균열에 대한 반복사이클 수

여기에서 논의한 대부분의 측정값들은 안정성장구역에서 얻어진 것이며 이론들은 모두 안정성장구역에서의 실험값들과 관계가 있다. 이 구역내에서 균열성장율이 일정하다는 것은 식(11)의 결과와 여러가지 균열을 갖는 주어진 시편편에 대해서, 그림 9에서와 같은 모양의 그래프를 얻을 수 있다는 의미이다.

그림 10은 적층판내에서의 평균안정균열성장율을 보인다. 이 경우의 실험은 고정된 최대변형율의 범위가 2%~5%에서 행해졌으며 최소변형율은 0이었다.

그리고 찢김에너지는 식(11)을 사용하여 계산하였다. 변형에너지밀도는 직접 측정불가능한 중앙부분에 대한 값을 취하지 않고 전체시편편에 대한 평균값을 취했다.

그림 10에서는 편측균열을 포함하고 있는 고무의 인장스트레스시편에 대하여 독립적으로 측정된 균열성장특성을 나타내고 있다(T 는 식(6)을 이용하여 계산한다).

두 결과가 잘 일치되고 있으며 T 에 대한

종속도(dependence)가 유사하다는 것을 알 수 있다. 그림 10의 결과들은 표준시험두께, ply-separation과 코-드각을 이용하여 얻은 것들이다. ply-separation과 코-드각은 시험편의 stiffness에 영향을 미친다. 이때 코-드각의 영향은 매우 크며, 식(11)에 의하면, ply-separation은 찢김에너지에 직접적으로 영향을 미친다. 그림 11은 위의 세가지 변수를 모두 변화시켜서 얻은 결과이다.

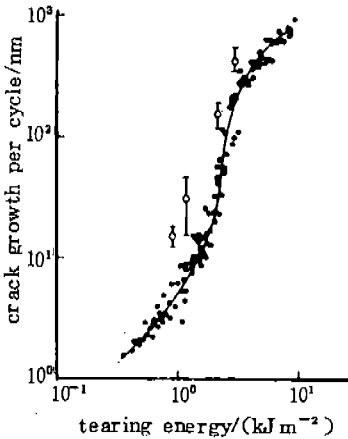


그림 10 표준적층판내의 평균균열성장률(○)과 Ply-rubber의 인장 스트레칭시험편에서 측정된 값(□)의 비교

이 결과에서 특기할 사항은 찢김에너지를 사용하면 모든 결과들을 중첩하여 하나의 관계식으로 나타낼 수 있다는 사실이다. 또한 그림 11에서는 코-드밀도를 표준값인 일인치

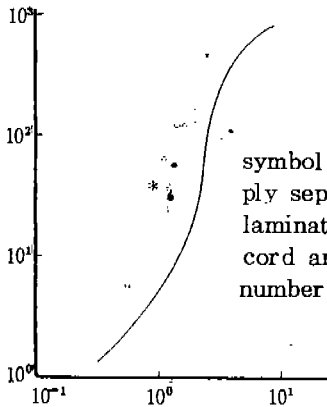


그림 11 여러가지 구조형태의 적층판에 대해 결정한 평균균열성장률(실선은 그림 10의 실선과 같다)

symbol	△	▽	×	■	◆	◇	*
ply separation/mm	2.0	2.3	2.0	1.3	1.3	1.3	1.3
laminate thickness/mm	3.4	7.0	9.7	3.5	3.5	6.2	6.5
cord angle, ψ /deg	22	22	22	30	15	22	22
number of cords per inch	10	10	10	10	10	5	3

당 10개(코-드방향에 수직인 방향으로)으로 하고 5개 3 $\frac{1}{2}$ 개로 바꾸어서 실험한 결과도 보이고 있다. 모든 경우에 대해서, 시험편의 파손은 inter-ply 크래킹에 의한 것이라기보다 Socketing에 의해서 발생된다는 사실을 알 수 있다(이것이 모든 다른 경우에 대한서의 파손의 근원적인 원인으로 알려져 있다). 이러한 파손거동의 변화는 매우 충격적으로 보일지 모른다. 왜냐하면 크래킹이 한번 일어났다면 시험편을 신장(extension)할 때 'Socketed Cords'의 끝부분은 고무내부로 사라져 보이지 않는다.

이러한 균열의 enclosed nature 때문에 Socket의 성장율을 측정하기가 쉽지 않으며 그림 11에서는 이들의 평균성장율을 보이고 있다. 이 평균성장율은 최종 Socket 길이(시험종료후 시험편을 절단하여 얻은 길이)를 인지할 수 있는 Socketing이 일어나는 싸이클수로 나누어서 측정한다.

그림 11에서 찢김에너지는 식(12)를 사용하여 결정했으며, 이 경우에는 inter-ply 크래킹에 대한 것과 같이 평균변형에너지 밀도를 사용하였다.

Socket 직경 D 는 강코-드다발(steel cord bundle)(약 1mm)의 바깥쪽 와이어에 의해 정의된 직경이다. 파손 후의 Socket를 관찰해 보면 이렇게 정의한 값이 적절한 산정값이라는 결과가 나온다(그림 12를 참조하라).

코-드에 매우 가까운 곳에 발생하는 파손

은 interfacial (adhesive) 파손으로 발전할 것이다. 이 경우는 소켓트(socket) 내의 와이어는 고무나 황동으로 Covering 하지 않은 강(bright steel)이었다. 그러나 선단부근에는 고무로 덮여져 있는 것으로 관찰되었다.

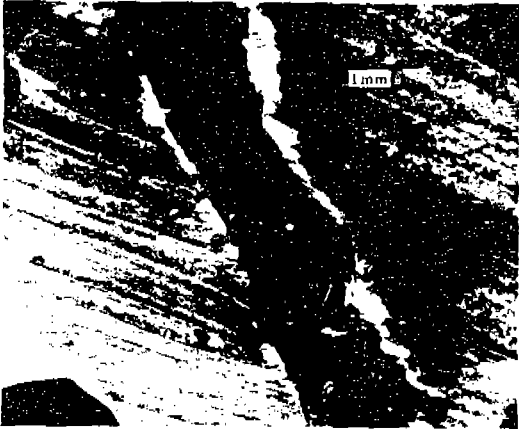


그림 12 한 개의 코-드 주위에 원통형균열의 성장에 의해서 형성된 Socket를 보이고 있는 저배율의 전자현미경 사진

이러한 사실은 그림 11에서의 결과와 일치하며 따라서 이 경우의 파손은 고무내에서의 균열 성장에 의한 것이며 강이 표출된 것은 연이은 마멸(subsequent abrasion)에 의한 것으로 생각된다. 식(13)에 의하면 inter-ply failure에서 Socketing으로의 전이(transition)는 코-드 밀도가 $m^* = \frac{1}{\pi D}$ 일때이다. 이것은 코-드를 1인치당 약 8개 정도 사용하는 것에 해당되며 실험적인 관찰 즉 1인치당 5-10개인 결과와 잘 맞는다. 따라서 여기

에서 논의한 이론은 Socketing으로의 전이 혹은 Socket 성장을 등을 예측하는데 매우 성공적이라 판단된다. 전이(transition) 바로 후에는 균열이 성장하는 각도에 의해서 Socketing이 발생하면 전반적인 파손율이 저하되는 영역이 존재하는 것도 이론적으로 나타낼 수 있다.

8. 결 론

성장하는 균열에 의한 변형에너지해방에 기반을 둔 간단한 파괴역학적인 접근법이 고무의 여러가지 특성을 규명하는데 성공적으로 응용되는 예들을 논의하였다. 이 방법은 전통적인 강도, 즉 찢김, 균열성장, 피로, 인장과 손등 뿐만 아니라 오-존내습(ozone attack), 예리한 광구들에 의한 마쇄, 절단현상을 규명하는데도 응용가능함을 밝혔다. 특히 에너지해방율은 여러가지의 다른 시험편에 대한 실험값들이 서로 연관성을 갖도록 허용하기 때문에 매우 유용한 특성이라 할 수 있다. 파괴역학적인 접근법은 실험실에서의 측정값을 이용하여 현장에서 사용할 때의 거동을 예측할 수 있게 하며, 한 예를, 홈그랙킹의 경우를 들어 설명하였다. 고무-코드적층판에 대한 균열성장의 결과가 고무에 대해서 독립적으로 측정된 특성과 동일성이 있다는 결과를 얻었는데, 이것은 에너지방법을 이들 재료의 복잡한 거동을 해석하는데 적용할 수 있다는 의미를 부여하는 것이다.