

論文

2층 고무/코드 적층판의 피로 수명 예측

임동진⁺, 이윤기^{**}, 윤희석^{***}, 김민호^{****}

Prediction of Fatigue Life in 2 Ply Rubber/Cord Laminate

Dong-Jin Lim⁺, Yoon-Ki Lee^{**}, Hi-Seak Yoon^{***}, Min-Ho, Kim^{****}

ABSTRACT

In order to simulate the crack connection between cords and the interply crack growth in the belt-layer of real tire, 2 ply rubber/cord laminate specimens with exposed edges were tested in 4~11mm displacement control. Measurement of the crack connection is evaluated when crack reaches the half of the length between 45° aligned cords, and the amount of the crack growth is measured by the steel probe method. 2 dimensional analytic modeling was performed to simulate the crack connection between cords at the exposed edges. Also, the theoretical life of the specimens was calculated from the crack connection life between cords(critical value) and from the critical value to the final failure by the use of Tearing energy(T); the strain energy release per unit area of one fracture surface of a crack. Then, theoretical life was compared with those of experiments. The life prediction up to the critical value has about 20% error compared to experimental life, and up to the final failure about 65% error. Therefore, total theoretical life has about 45% error compared to the experimental life, which is conceivable in the case of rubber.

초 록

타이어 벨트층내의 코드간 균열연결 및 층간균열진전을 모사하기 위해 자유단을 갖는 2층 고무/코드 적층시험편에 대한 4~11mm 변위제어 실험을 수행하였다. 자유단의 코드간 균열연결시의 폭방향 균열진전량은 45° 경사진 코드들간 길이의 절반에 도달할 때의 측정값으로 하였으며, 이는 탐침법에 의해 측정되었다. 또한, 자유단에서 코드들간 균열연결을 모사하기 위해 2차원의 이상화된 모델링 기법을 고안하였다. 이론수명은 테어링에너지(균열과단면의 단위면적당 방출에너지)를 이용하여 코드간 균열연결수명(임계값)과 이후 최종파손까지의 수명으로 구분하였으며, 이들을 각기 실험값과 비교하였다. 임계값까지의 수명예측은 실험과 비교하여 약 20%, 최종파손까지 약 65%의 오차가 발생하였다. 따라서, 전체 이론수명은 실험과 비교하여 약 45%의 오차를 발생하였다.

Key Words: 방출에너지(Tearing energy), 박리(Delamination), 층분리(Ply Separation), 변형률 에너지밀도(Strain Energy Density), 균열연결(Crack Connection), 균열성장(Crack Growth)

*+ 전남대학교 기계공학과 대학원, 교신저자(E-mail:djlim@kovico.com)

** 조선이공대학 자동차과

*** 전남대학교 공과대학 기계시스템공학부

**** 기아자동차

1. 서론

자동차 타이어는 차량의 중량을 담당하는 주 구조물로서 복잡한 형상으로 구성되어 있다. 타이어 주행시에 타이어의 모든 점은 반복 응력-변형률을 경험한다. 즉, 타이어가 회전할 때마다 외력은 벨트층에 반복적인 인장-인장 하중을 가하게 되며, 이 하중은 벨트 가장자리부의 코드 끝에서 응력 집중을 일으켜 균열의 시작을 초래하고, 결국에는 벨트층의 파손을 일으키게 된다. 타이어 벨트부 층분리 파괴의 과정은 크게 두 단계로 분류할 수 있다.

첫째, 처음에 고무에 의해서 덮여진 코드-끝(cord-end)부분이 작은 타원형 균열 역할을 하므로 이미 균열이 존재한다고 가정하여, 이 타원형 균열이 주행중 반복하중에 의해 코드 사이로 진전하여 서로 합쳐져 양 가장자리의 코드들이 연결되는 단계와 둘째, 합쳐진 균열이 벨트 층과 층 사이로 진전하여 최종적으로 파단되는 단계로 구분할 수 있다. 위에서 분류한 두 단계의 균열진전 양상을 살펴보면 고무-코드 계면(interface)을 따라 진전하기보다는, 전자의 경우 코드와 코드사이의 고무소재를 따라 균열이 연결되어 결국 일직선형태의 균열을 형성하며, 후자는 벨트 층과 층사이의 고무 소재를 따라 진전하는 특성이 있으므로, 벨트 층 분리에 의한 피로 수명 평가를 위해서는 우선적으로 벨트 층에 사용되는 고무소재 자체의 파괴 및 피로 균열진전 특성을 측정할 필요가 있다.

이를 위해 고무소재의 균열진전에 따른 테어링 파단면의 단위면적당 방출에너지인 T 가 일반적으로 사용되고 있으며, 고무-코드 복합체의 피로 및 파괴해석에도 널리 적용되고 있다[1]. Huang 등[2]은 코드 끝이 고무로 덮여 있는 2층 고무/코드 복합체에 대해 코드 끝의 타원형 균열에서 시작한 균열이 코드와 코드 사이로 연결되어 코드 끝이 노출 될 때까지의 T 의 변화에 따른 피로 수명을 연구한 바가 있으며, 벨트층과 같은 코드 강화 복합체에 있어서 축인장하중이 작용할 때, 자유단인 예지부에 가장 큰 응력이 작용한다고 알려져 있다[3-9].

본 연구에서는 이미 양 예지부에 코드가 노출된 2층 적층판에 대한 피로 인장 하중에 따른 층분리 과정을 첫째, 코드-끝간 균열이 서로 연결되는 단계(Fig. 1)와 둘째, 코드간 연결이후 층사이로 균열이 진전하여 최종 층분리되는 단계로 나누었다(Fig. 2). 그리고 각 단계별 피로 수명예측식을 유도하여 시험을 통한 예측식의 타당성을 검증하고자 한다. 본 연구내용에 대한 과정은 Fig. 3에 기술되어 있다. 먼저 고무소재 자체의 피로 균열진전특성을 측정하였으며 각 단계별 모사 시험편에 대한 파괴역학 매개변수 T 식을 유도하였다. 그리고 이들 각 T 를 이용하여 각 단계별 수명예측식을 유도하였으며, 이들의 합산 수명을 모사 시험

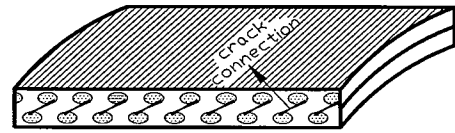


Fig. 1 Schematic crack connection between cords under the tensile fatigue loading.

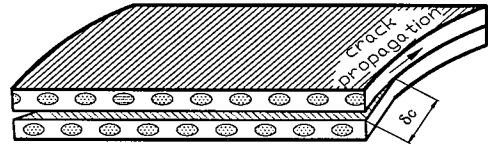


Fig. 2 Schematic idealization of interply crack propagation under the fatigue loading.

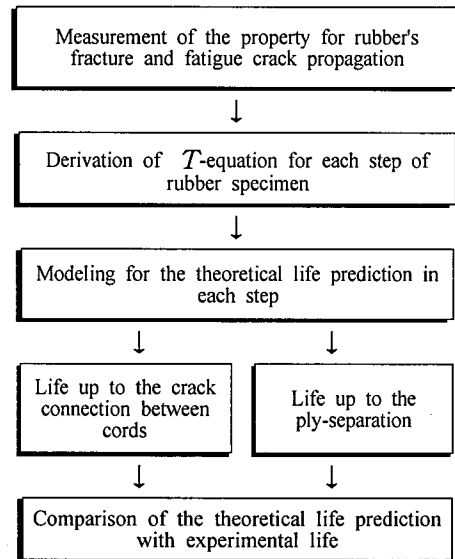


Fig. 3 Flow chart for the life prediction of 2 ply cord/rubber specimens.

편에 대한 층분리 최종수명으로 하였다. 마지막으로, 실험값과 비교하여 수명예측 방법의 타당성을 제시하고자 하였다.

2. 이론 수명예측

2.1 고무의 파괴 및 피로

고무 내에 균열이 존재할 때 단순 파괴 및 균열의 진전은 파괴역학 매개변수 T 의 지배를 받는데 수식적으로 T 는 식 (1)과 같이 정의 된다.

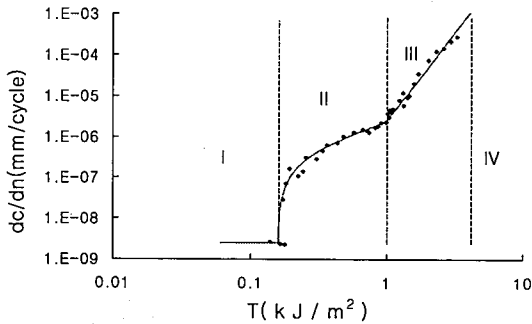


Fig. 4 Data of the fatigue crack propagation of the vulcanized rubber ($dc/dn \sim T$).

$$T = -\left(\frac{\partial U}{\partial A}\right)_l \quad (1)$$

이때 U 는 시편에 저장된 전체 탄성에너지, A 는 균열면의 한 쪽 면적, l 은 외력이 작용하지 않는 일정변위로 구속된 상태를 나타낸다. 식 (1)을 높이 h 인 순수전단형(pure shear) 시험편에 대한 상하 변위가 구속되는 경계조건에 대해 적용하면 식 (2)를 얻을 수 있다[2].

$$T = W_p h \quad (2)$$

여기서 W_p 는 균열 선단으로부터 멀리 떨어진 위치, 즉 균열의 영향을 받지 않는 위치에서의 변형 에너지 밀도이고 h 는 변형전의 초기 높이이다. 가류된 고무에 대한 피로하중 작용 시 일반적인 균열 진전 특성은 Fig. 4와 같이 주어지는데, 로그스케일상에서 T 의 함수로써 dc/dn 을 도시하였다. 이때 균열진전 양상을 네 영역으로 구분할 수 있는데 각 영역에 대한 수식적 표현은 다음과 같다[10].

(a) region I : 오존 균열진전 구간

$$\frac{dc}{dn} = aq \quad (3)$$

(b) region II : 응력-산화균열진전 ($T_0 < T < T_1$)

$$\frac{dc}{dn} = A(T - T_0) \quad (4)$$

(c) region III : 응력 균열진전 ($T_1 < T < T_c$)

$$\frac{dc}{dn} = BT^\beta \quad (5)$$

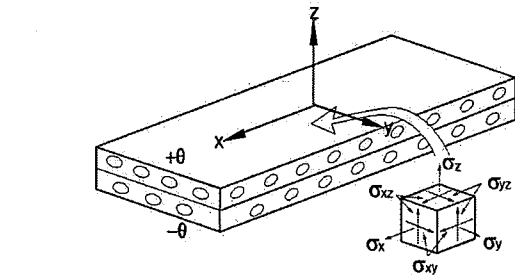


Fig. 5 2-ply laminate stress component.

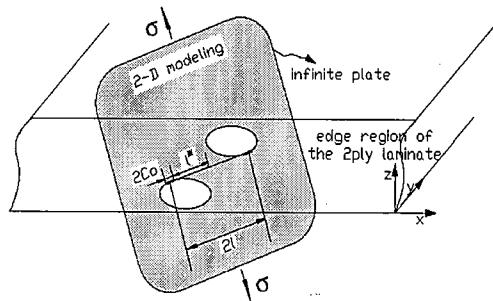


Fig. 6 2-dimensional modeling for life prediction until crack connection between cords.

Table 1 Fatigue property of the vulcanized rubber specimen

A	$2.725 \times 10^{-9} \frac{\text{m/cycle}}{\text{kJ/m}^2}$
T_0	0.163 kJ/m^2
T_1	1 kJ/m^2
B	$3.05 \times 10^{-9} \frac{\text{m/cycle}}{\text{kJ}^4/\text{m}^8}$
β	4

(d) region IV : 파괴 ($T = T_c$)

$$\frac{dc}{dn} = \infty \quad (6)$$

각 식에 정의된 재료 물성들은 고무의 순수전단형 시험편에 대한 균열진전 시험을 한 후에 커브 피팅에 의해 얻어진 값들을 사용하였으며, 그 값들은 Table 1에 나타내었다.

2.2 복합체의 균열진전에 따른 수명예측

2.2.1 코드-끝 사이 균열연결 수명

2층(±θ) 고무/코드 벨트층에 인장하중이 작용할 때 Fig. 5의 에지부에서는 3차원 응력상태가 존재하며, 이들 응력 중 층분리에 가장 큰 영향을 미치는 성분은 벨트 원주방향에 평행한 양끝단에 작용하는 σ_{xx} 성분이라고 널리 알려져 있다[6-8].

층간 균열진전에 관한 전반적인 균열진전특성을 살펴본 바 복합체 측면에 노출된 코드와 고무사이의 과도한 변형을 및 응력집중의 결과로서 균열은 발생한다. 이 균열은 점차 자라서 본격적인 층간 균열의 시작에 이르게 되며 코드간 균열 연결 수명에측식을 얻기 위해서 우선 복합체 자유단에서 코드간 균열진전 양상을 살펴보았다. 그 결과, 코드간 균열연결 수명은 초기 균열의 생성과정에 관한 시험 결과를 바탕으로 적절한 모델링 및 수식화를 통하여 예측하여야 한다.

축방향 예비 피로시험 결과 두께 방향의 양 코드 선단사이로 균열이 진전함을 알 수가 있었는데, 이는 에지부 길이방향으로부터 약 45°경사로 진전하였다. 그리고 코드가 노출된 에지부에 작용하는 응력중 σ_{xx} 성분만이 작용한다고 가정하였다. 따라서 균열발생의 주 요인인 σ_{xx} 는 Fig. 6의 2차원 모델링에서 45°회전한 방향에서 σ 가 작용하는 것으로 고려하였다.

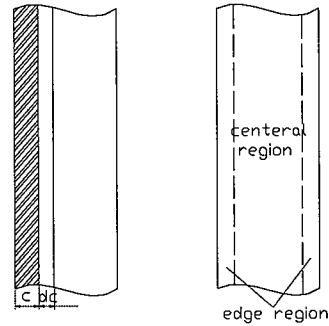
이는 매우 얇은 무한체 평판에 균열길이 $2c_0$ 가 존재할 때 모드 I 으로 피로하중 σ 가 작용하는 것으로 하였다. 결국, 코드간 균열연결 피로수명을 예측하기 위하여 Fig. 6과 같이 재료를 선형 탄성체로 가정하여 벨트 에지부를 2차원으로 모델링함으로써 T 를 산출하였다. 이에 얻어진 방출 에너지 T 는 아래 식 (7)과 같다. 여기서

$$T = \frac{K_I^2}{E} = \frac{\pi\sigma^2 c}{E} \tag{7}$$

K_I 는 응력확대계수이며 $\sigma\sqrt{\pi c}$ 로 표시된다. 본 단계에서 수명예측을 위한 가정 및 단순화는 다음과 같다.

- i) 본 복합체의 코드는 여러 개의 강철소선들이 꼬여진 필라멘트로 이루어져 있으므로 초기 균열 c_0 를 각 필라멘트들간의 중심간거리로 한다.
- ii) 초기 균열 c_0 에서 층간균열 진전구간으로 넘어가는 임계균열길이는 Fig. 6에서 l^* 로 하였다. 여기서, l^* 는 두 최근접 코드간 접선방향 길이의 절반이다.

위와 같은 가정에 코드간 균열연결까지의 수명예측식은 식 (7)을 식 (4), (5)에 대입하므로써 다음과 같이 얻어진다



(a) linear crack (b) measurement of $W_{lam,c}$

Fig. 7 Idealization for interply crack growth and ply-separation.

- i) 응력-산화 균열진전구간($T_0 < T < T_I$)

$$N = \frac{E}{\pi\sigma^2 A} \ln \left[\frac{\pi\sigma^2 l^* - ET_0}{\pi\sigma^2 c_0 - ET_0} \right] \tag{8}$$

- ii) 응력 균열진전구간($T_I < T < T_c$)

$$N = \frac{1}{-B(\beta-1)(\pi\sigma^2/E)^\beta} \left[\frac{1}{l^{1-\beta}} - \frac{1}{c_0^{\beta-1}} \right] \tag{9}$$

2.2.2 층간 균열진전 및 층분리 수명[11]

코드간 균열 연결이후 균열은 층간균열로 발달한다. 코드간 균열연결 직후의 층간균열길이는 시편두께의 절반으로 하였는데, 이는 수십차례의 측정으로부터 얻어졌다. 본격적인 층간균열 이후 층분리까지 균열은 Fig. 7에서 보듯이 일직선 형태로 진행한다고 이상화하였다.

파괴역학 매개변수인 T 는 시편 형상에 의존하는데 일상적으로 시편 체적의 변형에너지 밀도에 비례하며, 균열진전에 따른 δT 는 다음과 같다.

$$\delta T = W_{lam,c} t \delta c \tag{10}$$

여기서, $W_{lam,c}$ 는 2층 고무/코드 복합체의 층상영역 변형에너지 밀도이며, t 는 시편의 두께이다.

식 (10)에서 보듯이 δc 균열진전에 따른 에너지 손실량은 $W_{lam,c} t \delta c$ 이다. 따라서, 일직선 균열 δc 증가에 대한 에너지 손실은 단위길이당

$$\frac{\delta T}{\delta c} = W_{lam,c} t \tag{11}$$

가 된다. 식 (11)을 식 (4)와 (5)에 대입하여 피로수명 N 을 구하기 위해, 아래와 같은 가정을 사용하여 단순화하였다.

- i) Fig. 7(a)에서 초기 일직선 형태의 균열 c 가 존재하며, 이 크기는 시편 두께의 절반이다.
- ii) 에지는 균열의 진전과 함께 이동하며, 에지에서의 변형을 에너지 밀도는 "0"이다.
- iii) 층간균열진전의 최종 층분리시의 균열길이(c^*)는 시편의 폭 길이에 따라 값이 다르며, 균열진전 시험에서 변형에너지 밀도 값이 확실히 하락하는 점의 폭 균열 길이를 c^* 값으로 하였다(Fig. 8).

따라서, 식 (11)을 식 (4)의 응력-산화 균열진전구간과 식 (5)의 응력 균열진전구간에 대입하여 피로수명 N 을 다음과 같이 구하였다

- i) 응력-산화 균열진전구간 ($T_0 < T < T_1$)

$$N = \frac{2c^* - t}{2A(Wt - T_0)} \tag{12}$$

- ii) 산화 균열진전구간 ($T_1 < T < T_c$)

$$N = \frac{2c^* - t}{2B(Wt)^\beta} \tag{13}$$

3. 균열진전시험 및 층분리 관찰

3.1 시편의 제조

타이어 제조에 사용되는 벨트부 시트를 떼어 각도가 각기 $\pm 19^\circ$, $\pm 21^\circ$, $\pm 24^\circ$ 를 갖도록 스트립을 잘라내었다. 이를 몰드안에서 2층이 서로 대칭이 되도록 겹치고 압력 500psi, 온도 149°C 의 등온으로 30분간 가류시켰다. 가류된 스트립을 길이 200mm, 폭 20, 24.2, 26, 28mm의 네 종류의 시편을 갖도록 절단하였으며, 이들은 Table 2에서 보는 바와 같다. 가류시 높은 압력으로 인해 시편 양 가장자리 부분에는 고무 흐름으로 인한 코드의 변위가 발생하게 되며, 복합체 양 가장자리 부위에서 코드 배열이 흐트러지게 된다. 따라서, 피로시험편의 코드배열 균질성을 확보하기 위해 양 가장자리 20mm 정도를 절단하였으며, 양 절단면은 사포로 연마하였다.

3.2 시험절차

유압식 피로시험기를 이용하여 Table 2에서 보는바와 같이 각 시편에서 다양한 시험조건으로 변위제어 피로 시험

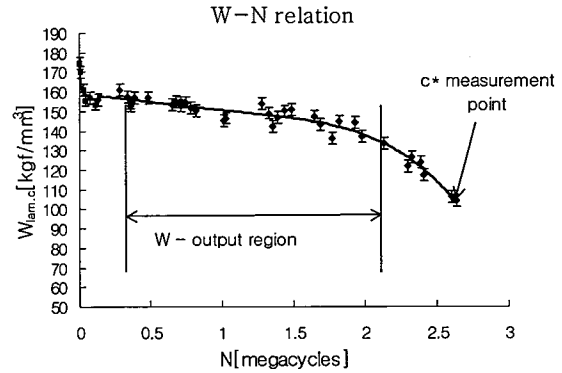


Fig. 8 The diagram of strain energy density vs. cycle number.

Table 2 Specimen size and test conditions

cord angle	width (mm)	thickness (mm)	displacement (mm)	frequency (Hz)
$\pm 21^\circ$	20	3.8	4	5
	20	3.8	5	4
	24.2	3.8	6	3
	28	3.8	7	3
$\pm 19^\circ$	26	3.8	10	3
$\pm 24^\circ$	26	3.8	11	3

을 수행하였다. 시편을 클램프로 고정하고 인장하중을 가할 때에 인장-비틀림 커플링 효과에 의해 코드 영향 부위가 존재하는데, Fig. 9(a)에 이를 도시하였다. 또한 Fig. 9(b)에서 보듯이 시편의 전면에 그리드 라인을 5mm 간격으로 그어 각 길이방향의 위치에서 코드간 균열연결 및 층간 균열 진전의 관찰을 편리하게 하였다. 균열진전량은 매 일정 사이클마다 엑츄에이터를 정지시킨 후 탐침을 이용하여 측정되었다.

3.2.1 코드 사이 균열연결 측정

식 (8), (9)에서 각 변위에 대한 σ 를 결정하기 위해서는 벨트 에지부에서의 전단 변형률(γ_{xz})을 측정해야 한다. 따라서, Fig. 10에서 보는 바와 같이 벨트 에지부의 순수인장 영역에 3개 직선을 표시하고 인장 시험기에서 주어진 각 변위에서 측면 사진을 촬영하였다. 변위가 증가함에 따라 각 선의 경사각이 증가하는데, 변위가 0 mm일 때의 3개의 선과 변형된 3개의 선과의 상대 각도를 측정하였으며, 이들 평균치의 탄젠트값을 에지부의 전단변형률로 하였다.

Table 3은 시험편에 대한 각 시험조건에서 구한 탄성계수, 전단변형률 및 피로하중 등을 기술하였다. 여기에서 탄성계수 E 는 고무 소재가 비압축성 및 비선형 탄성체라 가정하고, 각 변위에 대해 유한요소해석 모델에서 이용되고

있는 방정식으로부터 각 변위에 대해 얻어진 값들이다[12]. 또한, 구해진 전단변형률을 이용하여 τ 를 얻었으며, 이 값은 Fig. 6에서 기술한 2차원 모델링에서 보는 바와 같이 균열에 수직인 피로 하중 σ 와 같게 된다.

Table 4는 각 벨트각에 대한 노출된 코드-끝에서 측정된 c_0 , l' 의 값이며, 이는 최대배율 50배를 가진 이동식 확대 망원경(traveling microscope)으로 측정되었다. Table 5에서는 각 변위제어 피로 시험시의 T 값이 주어졌다. 코드간 균열 연결 구간에 있어서는 식 (8), (9)에서 보듯 T 값에 따라 계산수명이 달라지게 되므로 초기 균열길이 c_0 와 임계치인 l' 에서 각 T 를 계산해야 한다. 이들의 계산 결과값은 Table 1의 T_0 , T_c 와 비교할 때 모든 벨트 코드각도에 대해 응력-산화 및 응력 균열진전구간에 해당되었다. 따라서, 각 코드간 균열연결 수명은 식 (8), (9)에 대입하여 얻어진다.

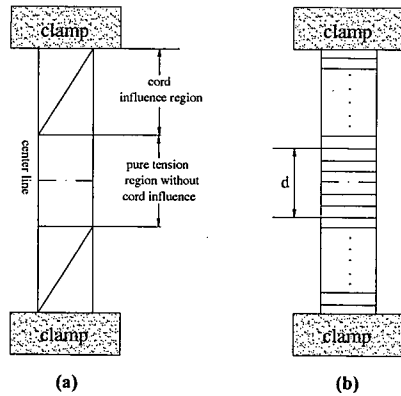


Fig. 9 Measurement region and the pure tensile region.

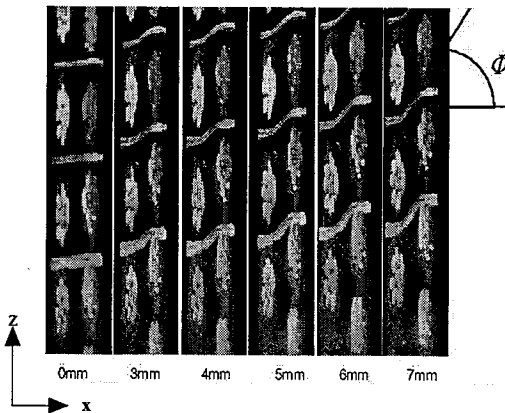


Fig. 10 Photography for measuring $\gamma_{xz} (= \tan \phi)$ at the belt edge.

Table 3 Mechanical properties of cord/rubber composite shear strain at the edge in each displacement control

cord angle & displacement	$E \times 10^4$ [kJ/m ³]	γ	$G \times 10^3$ [kJ/m ³]	$\sigma \times 10^3$ [kJ/m ³]	
±21°	3	1.3261	0.374	4.420	1.653
	4	1.3158	0.501	4.386	2.256
	5	1.3054	0.630	4.351	2.836
	6	1.2979	0.781	4.326	3.516
	7	1.2887	0.952	4.300	4.286
±19°	10	1.2082	1.620	4.511	6.889
±24°	11	1.1356	1.428	4.527	6.073

Table 4 Initial and critical crack length

cord angle	c_0 (mm)	l' (mm)
±19°	0.389	1.397
±21°	0.370	1.324
±24°	0.368	1.003

Table 5 Values of T calculated at each step

cord angle & displacement	crack connection between cords		interply crack propagation		
	T [kJ/m ²] (at $c = c_0$)	T [kJ/m ²] (at $c = l'$)	W [kJ/m ³]	T [kJ/m ²]	
±21°	3	0.163	0.857	-	-
	4	0.288	1.526	79.7	0.302
	5	0.484	2.563	109.1	0.423
	6	0.748	3.962	168.5	0.640
	7	1.120	5.926	599.0	2.324
±19°	10	4.299	15.420	506.6	1.966
±24°	11	3.831	10.435	348.1	1.351

3.2.2 층간균열진전 이후 층분리 고찰

이론 수명계산식에 필요한 변형률에너지 밀도값은 하중이 일정한 영역내에서 여러번의 시험을 통해 얻어진 하중-변위곡선을 통해 얻어진 전체변형률 에너지의 평균값을 그립사이의 체적으로 나눈 값으로 구하였다. 또한, 최종 층분리시의 임계 폭 방향 균열길이 c^* 는 Fig. 8에서 보듯이 각 사이클 수에 따른 전체변형률에너지 선도에서 에너지 값이 급속히 하락할 때의 균열길이를 정의하였으며, 균열의 진전양상을 조금 더 관찰하기 위하여 약간의 사이클 이후에 실험을 중단하였다.

층간균열 진전구간에 있어서는 식 (11)의 T 가 단지 변형률에너지 밀도값에만 의존하는데 벨트 코드각이 ± 21 도인 시험편에 대해 4,5,6mm 변위제어 조건에서는 응력-산화 균열진전 구간 값에 해당하며, 7mm 조건에서는 응력 균열진전 구간 값에 해당된다. 또한 벨트각 ± 19 도, ± 24 도에 대해선 둘 다 응력균열진전구간에 해당된다.

층간균열진전 구간에서는 ± 21 도의 경우 4,5,6mm 변위제어시의 피로 수명 N 은 식 (12)에 대입하여 얻어졌으며, 7mm 변위제어 피로시험값 ± 19 도, ± 24 도 코드각에 대한 수명 예측값은 식 (13)에 대입하여 얻어졌다.

4. 결과 및 고찰

Table 6에 각 구간별로 예측된 이론 수명과 실험 수명의 결과값들이 주어졌으며, 이들의 합산 수명이 복합체의 자유단에서 초기 코드-끝 균열 시작에서부터 연결까지, 그리고 본격적인 층간 균열의 시작부터 최종 파손까지의 피로 수명이 계산되었다. 코드각 ± 21 도에 대한 4mm 변위제어시의 T 값은 $0.3027 [kJ/m^2]$ 로써 오존에 의한 균열진전구간의 최대값인 T_0 값의 두배정도 밖에 되지 않는다. 따라서 초기균열의 시작 및 진전률이 매우 느리기 때문에 시험수명을 결정하는데 있어서 매우 장시간이 요구되므로 4mm 변위제어에서는 코드간 균열연결까지의 이론 수명만을 계산하여 비교하였다. Fig. 12는 피로하중에 따른 코드-끝에서 균열 시작이후 층분리까지의 연속적인 균열 진전양상을 측면에서 사진 촬영한 것이다. 처음 코드끝에서 균열이 발생한

이후 약 45도 기울어진 두께방향의 코드-끝간 균열이 연결되었으며, 점차 층간 및 길이방향으로 균열이 진전되었다. 그리고 최종적으로 층분리를 유발하였다. 따라서, 코드간 균열 연결을 모사하기 위하여 2차원으로 모델링한 기법의 증거를 제시하며, 오차가 비교적 적어, 얻어진 T 식의 타당성을 보여주었다.

반면, 비교적 오차가 큰 층간균열 진전구간의 오차발생 이유를 고려해 보면 첫째, 탐침법을 이용하므로 균열길이 측정시 정확도가 떨어지며 둘째로, 복합체의 T 값 계산을 위해 얻어진 변형률에너지밀도가 Fig. 8에 표시된 영역의 평균값으로 얻어졌다는 것이다. 하지만, 보다 더 큰 이유는 임계값 이후에 있어서 균열 진전양상을 이상화된 일직선 형태로 보았다는 것이다.

또한, 코드각 변화에 따른 에지에서 전단변형률(γ_{xz})의 차이를 살펴보았다. Table 7은 인장변형률에 따른 에지부의 전단변형률을 보여준다. 코드각이 적을수록 전단변형률 및 변형률 에너지 밀도가 커짐을 알 수 있으며, Fig. 13, 14에 도시하였다. 따라서, 적은 코드각일수록 피로수명은 보다 짧고 강도는 더 높을 것으로 사료된다.

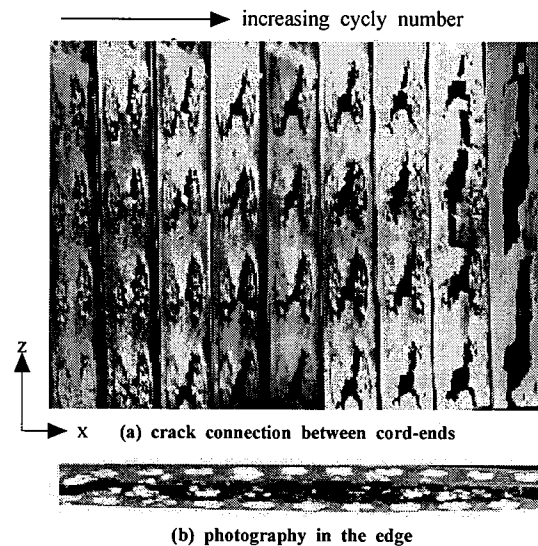


Fig. 12 Photography in the edge.

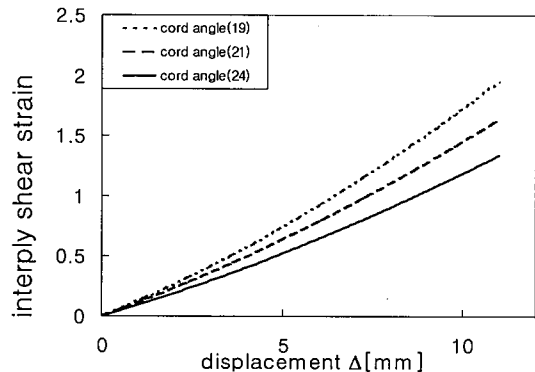


Fig. 13 The $\gamma-\Delta$ curve for tensile of the specimens with different cord-angles.

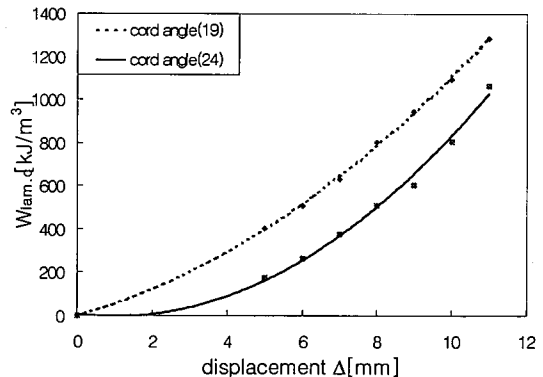


Fig. 14 The $W-\Delta$ curve for tensile of the specimen for each cord-angle.

Table 6 Comparison between theoretical life and experimental life
(A : up to crack connection, B : up to ply separation, C : experimental life, D : theoretical life, E : final failure)

cord angle & displacement	A & B	C[cycles]	D[cycles]	error [%]	E		total error [%]	
					C[cycles]	D[cycles]		
±21°	4mm	A	5,319,745	5,031,623	5.42	-	-	-
		B	-	-	-	-	-	-
	5mm	A	617,000	651,617	-5.61	2,660,000	3,540,339	-33.10
		B	2,043,000	2,888,722	-41.40			
	6mm	A	220,000	119,379	45.74	1,540,000	2,179,112	-41.50
		B	1,320,000	2,059,733	-56.04			
7mm	A	26,500	25,120	5.21	101,500	99,128	2.33	
	B	75,000	74,008	1.32				
±19°	10mm	A	3,000	1,200	60.00	28,000	47,741	-70.50
		B	25,000	46,541	-79.00			
±24°	11mm	A	11,000	5,205	73.38	111,000	211,554	-90.55
		B	99,000	206,349	-52.00			

Table 7 Strain of the laminate edge at each displacement control

cord angle	Δ[mm]	0	3	4	5	6	7	8	9	10	11
±19°	V _{xz} (=tanΦ)	0	0.388	-	-	0.949	-	-	1.5	1.62	-
		0	0.374	0.501	0.630	0.781	0.952	-	-	-	-
0		0.344	-	-	-	0.810	0.885	1	1.111	1.428	

5. 결론

1. 주행중인 타이어가 회전할 때마다 내부 벨트층이 받는 하중 상태를 반복적인 인장-인장 변위로 모사하고 벨트 부에 쓰이는 고무소재의 균열진전 특성값을 구함으로써, 피로수명예측식을 확립하였다.
2. 코드간 균열 연결 및 층간 균열진전현상을 해석하기 위하여 교차하게 코드가 배열된 두 개의 층으로 구성된 단순 벨트를 제작하여 반복하중을 가하면서 시험하였다. 시험에서 관찰 결과를 바탕으로 코드간 균열 연결과정을 모사하는 간단한 수학적 모델을 만들었으며 균열이 연결될 때까지의 수명을 예측한 결과 시험결과와 비교적 잘 일치하였다. 또한 완전한 층간 균열이 만들어진 후 안정된 진전을 하게 되는데 이에 대한 기존 이론을 이용하여 층간 균열진전 수명을 예측하였고 시험결과와 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 층분리에 의한 파괴시 균열길이는 폭길이의 약 30%로 단순인장시험에 대비해서 거의 동일하였다.
3. 코드간 균열연결 피로수명 예측을 위해 Fig. 5에서 2차원 선형 탄성체로 모델링하여 이론값을 실험값과 비교

한 결과 오차가 약 20%정도 발생하였으며, 이후 층분리까지는 약 65% 오차가, 그리고 이를 합산한 전체 수명은 약 45%의 오차를 발생 하였다.

4. 코드각이 적을수록 시험 자체의 인장강도는 증가하지만, 피로수명은 낮아지게 된다.

참고문헌

- [1] Rivlin, R. S. and Thomas A. G., 1953, *J. Polym. Sci.*, 10, pp. 291.
- [2] Huang, Y. S. and Yeoh, O. H., "Crack Initiation and Propagation in Model Cord-Rubber Composites," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 62, 1988, pp. 709-731.
- [3] Pipes, R. B. and Pagano, No. j., "Interlaminar Stresses in Composite Laminates under Uniform," *Journal of Composite Materials*, 4, 1970, pp. 538-548.
- [4] Ford, J. L., Patel, H. P. and Turner, J. L., "Interlaminar Shear Effects in Cord-Rubber Composites," *Fiber science*

- and Technology*, Vol. 17, 1982, pp. 255.
- [5] Kim, R. Y. and Soni, S. R., "Experimental and Analytical Studies on the Onset of Delamination in Laminated Composites," *Journal of Composite Materials*, 18, 1984, pp. 70-80.
- [6] Whitney, J. M. and Nuismer, R. J., "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *Journal of Composite Materials*, 8, 1974, pp. 253-265.
- [7] Brewer, J. C. and Lagace, P. A., "Quadratic Stress Criterion for Initiation of Delamination," *Journal of Composite Materials*, 22, 1988, pp. 1141-1155.
- [8] O'Brien, T. K., "Characterization of Delamination Onset and Growth in a Composite Laminate," in K. L. Reifsnider (ed.), *Damage in composite Material*, ASTM STP 775, 1982, pp. 140-167, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- [9] Pipes, R. B. and Daniel, I. M., "Moire Analysis of the Interlaminar Shear Edge Effect in Laminated Composites," *Journal of Composite Materials*, 5, 1971, pp. 255-259.
- [10] Gent, A. N., Lindley, P. B. and Thomas, A. G., *J. Appl. Polymer Sci.*, 8, 1964, pp. 455.
- [11] Breidenbach, R. F. and Lake, G. J., *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A299*, 1981, pp. 189.
- [12] ABAQUS Theory Manual, Version 5.5, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1995.