타이어 벨트 끝단의 피로수명 예측

김재연*(전남대학교 대학원 기계공학과), 양영수(전남대학교 기계공학과),
김기운(금호타이어, 전남대학교 대학원 기계공학과)

Fatigue Life Prediction of Tire Belt Edge

J. Y. Kim(Mech. Eng. Dept., CNU), Y. S. Yang(Mech. Eng. Dept., CNU),
K. W. Kim(Kumho Tire, Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

Tire belt durability is characterized by the initiation of a crack at the belt edge region, and the propagation of the crack until the ply is separated. Experimental methods have been used to analysis of the belt durability in the cord-reinforced rubber composite tires, but it takes much cost and time to make experiments. In this paper, a finite element method to analyze the fatigue life of a crack at the belt edge of tires is presented. The fatigue life is analyzed by using a three-dimensional Finite Element Modeling. This method includes a global-local finite element analysis to provide the detail necessary to model explicitly an internal crack and use of the J-integral for energy release rate evaluation.

Key Words : Tire(타이어), Finite element method (유한요소법), Energy release rate (에너지 해방률), Fatigue life (피로수명), Crack(균열)

1. 서론

타이어는 자동차의 최종 운동 요소로서 연료 소비율, 승차감, 조종 안정성, 제동 및 등판능력 등을 결정짓는 중요 요소이다. 최근에는 환경 보호 및 자원 절약의 측면에서 내구 성능의 강화가 요구되고 있다. 그동안 타이어의 내구성 향상을 위한 신뢰성 평가에 대한 연구를 집중해왔으나 아직까지 파괴역학적 이론을 이용한 신뢰성 해석은 미진한 실정이다. 내구성 향상을 위한 파괴역학적 방법을 마련하기 위해서는 타이어에서의 응력분포와 균열을 고려해야 한다.

타이어 내부의 균열 진전 과정을 고려하기 위해서는 고무의 특성인 대변형에 의한 기하학적 비선형성과 재료의 비선형성, 타이어와 지면의 접촉에 의한 경계조건의 비선형성 등 타이어 구조 분석에 있어서 이러한 조건들을 고려하는 것은 매우 중요하다.[1-3] 타이어의 파단은 내부의 균열이 진전하기 때문에 발생한다. 실 주행중인 타이어는 매회전마다 벨트 층에 인장 하중을 지속적으로 받게 된다. Fig. 1에 보여지는 것처럼 벨트의 가장자리에는 경사지게 배열된 고무가 끝나는 부분(코드-끝)이 있는데 이곳은 응력이 심하게 집중된다. 따라서 코드 끝은 균열과 같은 역할을 하여 반복하는 하중에 의해 피로균열로 진전하고 벨트 가장자리가 주위 고무로부터 분리된다. 이 피로균열은 벨트가 분리 될 때까지 타이어의 내부로 진전하기 때문에 실험적으로 균열의 진전정도를 확인하기가 어렵고 타이어의 안전성에 큰 위험요소가 된다. 타이어 벨트 끝단부의 실제 균열 양상은 Fig. 1에 보여진다.

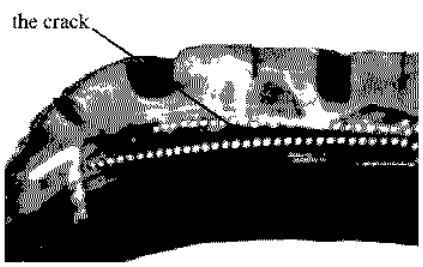

Fig.1 Crack of the tire belt edge

최근까지 타이어의 신뢰성 평가을 위해 주로 실험적인 방법에 의존해왔다. 타이어의 설계, 개발 단계에서 트레드(tread), 벨트, 측면(sidewall), 카카스(carcass), 비드(bead) 등 각 부위의 신뢰성 평가를 위해서는 각각의 경우에 해당하는 타이어로 피로 실험을 수행해야하므로 많은 시간과 경비가 소요된다. 따라서 파괴역학적 이론과 유한요소 해석기법을 이용하여 피로수명을 예측함으로서 많은 비용과 시간을 절감할 수 있으며 내구성의 향상과 신뢰성 평가에 기여할 수 있다.

본 논문에서는 타이어 3차원 유한요소 모델과 파괴역학적 이론을 이용하여 타이어의 파단이 자주 발생하는 벨트 끝단에서의 피로수명을 예측하였다. 이를 위하여 해석 시간을 줄일 수 있고 경계조건에 다양한 변화를 줄 수 있는 Global-Local 기법을 3차원 트럭 타이어 모델에 적용하였다.

2. 유한요소해석

2.1 Global-Local 기법

본 연구에서는 315/80R22.5 트럭 타이어를 모델로 하였으며 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 3차원 유한요소 해석은 Global-Local 기법으로 수행하였다. Fig. 2는 Global-Local 기법을 적용한 타이어 벨트 끝단의 유한요소 모델링을 나타낸다.

Global model에서는 타이어의 전체적인 응력 및 거동을 해석하고, Local model에서는 Global model의 결과를 가지고 초기 균열을 가정하여, 하중에 따른 최대 에너지 해방률과 최소 에너지 해방률의 차이값을 계산하였다.

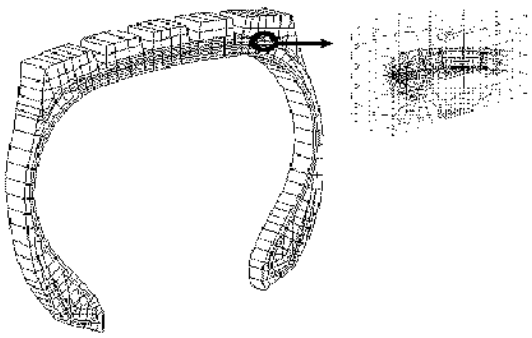

Fig.2 Global(left) and Local(right) finite element meshes

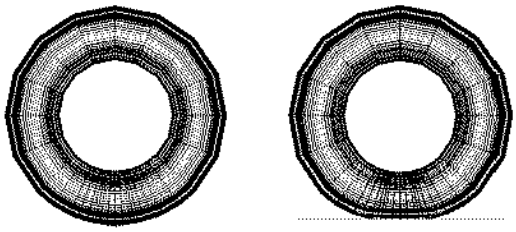

Fig.3 3D undeflected(left) and deflected(right) global finite element meshes

2.2 Global model

타이어 Global model은 Fig. 3과 같다. 17520개의 element와 19260개의 node 그리고 30개의 섹터(sector)로 이루어진 3차원 Global 유한요소모델로 해석을 실시하였다. element 종류로는 C3D6H(6-node linear triangular prism, hybrid element)와 C3D8H(8-node linear brick, hybrid element), Rebar element를 사용하였고 지면과 닿는 부분에서는 섹터를 조밀하게 모델링하였다. 공기압(inflation pressure)은 120psi이고 차량의 중량을 묘사한 수직 변위(deflection)는 완전한 타이어가 공기압이 주입된 후에 승용차의 무게를 지지할 때 나타나는 변위로서 본 해석에서는 1in를 적용하였다.

2.3 Local model

Local model은 초기 균열을 가정하여 메쉬 밀도(mesh density)와 균열 크기의 변화에 대한 단순한 모델링이 가능해야한다. Local model에서는 해의 수렴 및 고무재료의 탄성과 비압축성을 나타내기 위하여 hyperelastic 거동을 고려한 3D20H(20-node quadratic brick, hybrid element)와 Rivlin polynomial form을 사용하였다.[4]

$$U = \sum_{i+j=1}^{N} C_{ij}(\overline{I_1}-3)^i(\overline{I_2}-3)^j + \sum_{i=1}^{N}\frac{1}{D_i}(J^{el}-1)^{2i}$$

여기서 U는 변형률에너지밀도(strain energy density), C_{ij}와 D_i는 재료물성치, $\overline{I_1}$과 $\overline{I_2}$는 편차변형률불변량(deviatoric strain invariant), 그리고 J^{el}는 탄성부피변화율을 각각 나타낸다.

본 논문에서는 균열길이가 0.06in, 0.1in, 0.16in, 0.2in인 cylindrical local model들의 해석을 수행하였다. 벨트의 코드 직경인 0.06in를 초기균열로 가정하여 그 균열길이가 0.1in, 0.16in, 0.2in로 증가할 때 각각의 J적분값을 구하고 피로수명을 예측하였다. 각각 모델들의 형상은 Fig. 4에 나타내었다.

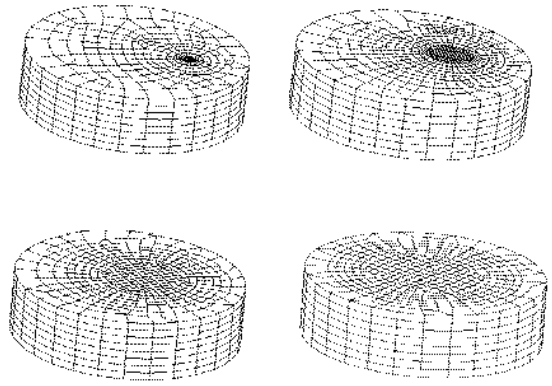

Fig.4 Local finite element meshes
(0.06in, 0.1in, 0.16in, 0.2in)

3. 피로수명

3.1 파괴역학적 해석

파괴역학은 피로균열성장 해석에 있어서 자주 이용된다. 초기균열이 존재하는 구조물에서 응력강도계수(K), J-integral, 에너지 해방율(G) 또는 tearing energy(T)를 계산하여 내구 성능을 평가한다. 본 논문에서는 유한요소법에 의한 파괴역학 적용시 J 적분에 의한 에너지 접근법은 선형문제와 비선형문제 모두 적용이 가능하므로 응력강도계수에 의한 접근보다는 이 방법을 선택하였다.

에너지 해방율에 대한 Griffith의 정의에 의하면, 단위 면적당 균열 성장을 발생시키는데 필요한 에너지가 재료의 저항을 이겨내는데 충분할 경우 재료내의 균열이 진전한다. 또한 단위 면적당 포텐셜 에너지(potential energy)의 변화율에 의해 표현이 가능하다. J 적분에 대한 일반적 표현은 다음과 같다.

$$G = -\frac{dU}{dA} = J \tag{1}$$

여기서 U는 시스템에 저장된 전체 탄성 변형 에너지이고, A는 변형전 상태의 면적이다. 2차원 문제의 경우 J 적분은 다음과 같이 정의된다.

$$J \equiv \int_{\Gamma} \left(W n_j - \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \sigma_{ij} n_j \right) ds \tag{2}$$

여기서 W는 변형률 에너지 밀도, n_j는 Γ에 수직한 단위 벡터 성분, u_i는 변위 벡터 성분, σ_{ij}는 응력 텐서, ds는 곡선 Γ를 따라 변하는 길이 증분이다. 식 (2)의 가정은 재료가 균열 진전 방향에 대해 균질하다는 것이므로 균열 해석에 있어서 주의해야한다.

3.2 피로수명 계산

에너지 해방율과 균열 성장률의 일반적인 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta G)^m \tag{3}$$

여기서 a는 변형전 균열길이, N은 하중 사이클의 수, ΔG는 한 사이클 동안의 에너지 해방율의 변화, 그리고 A와 m은 재료 상수이다. 파괴 역학에 기초한 유한요소법으로부터 ΔG는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta G = G_{\max} - G_{\min} \tag{4}$$

$G_{\max}$와 $G_{\min}$은 타이어가 1 회전을 하는 동안 원주방향의 다른 위치들에서 얻어지는 에너지 해방율의 최대값과 최소값을 각각 나타낸다. 식 (3)과 (4)로부터 타이어의 수명을 사이클 수로 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$N = \int_{initial}^{critical} \frac{da}{A(\Delta G)^m} = \frac{1}{A(\Delta G)^m}[a_f - a_0] \tag{5}$$

여기서 a_f는 최종 균열길이, a_0는 최초 균열길이다. 위식은 타이어 피로수명이 균열 크기와 재료 상수, 에너지 해방율에 의존함을 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

타이어 원주방향의 각 위치(0°, 90°, 140°, 160°, 180°)에 따라 에너지 해방률의 값을 구하였다. 지면과의 접촉이 시작되는 140°위치에서 에너지 해방률의 값이 증가하여 지면과 접촉하는 180°위치에서 가장 큰값이 나오는 것을 모든 균열길이에서 확인할 수 있다.(Fig. 5)

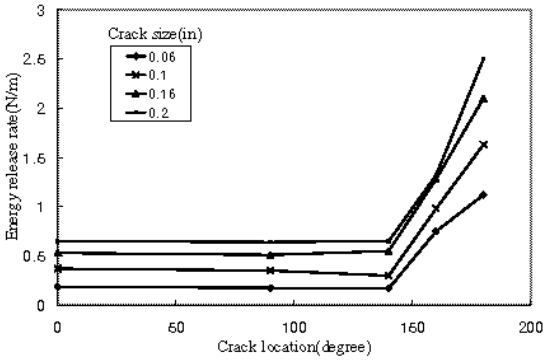

Fig.5 J-integral with respect to different crack size

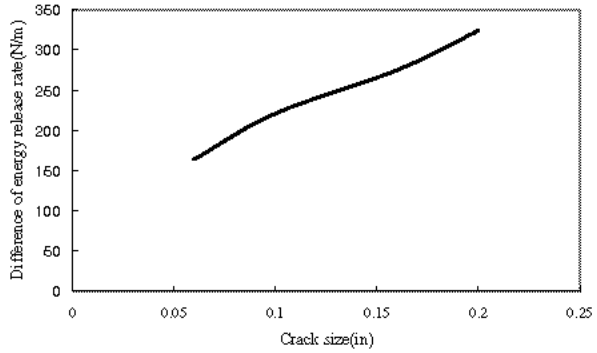

Fig.6 Difference of $G_{\max}$ and $G_{\min}$

균열길이의 변화와 에너지 해방률과의 관계를 살펴보았다. Fig. 6은 180°위치에서 균열길이의 증가(0.06in, 0.1in, 0.16in, 0.2in)와 함께 에너지 해방률 또한 증가함을 나타낸다.

피로수명의 계산에 앞서 임계 균열길이의 선정이 매우 중요하다. 고무재료의 임계 Tearing energy를 10 KJ/m^2이라 한다면 그 때의 임계 균열길이는 1in 정도임을 알 수 있다.[5,6] 식 (5)에서 타이어 벨트 끝단의 피로수명은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{A(\Delta G_1(a))^m} + \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{A(\Delta G_2(a))^m} + \int_{a_2}^{a_3} \frac{da}{A(\Delta G_3(a))^m} + \int_{a_3}^{a_f} \frac{da}{A(\Delta G_4(a))^m} \quad (6)$$

여기서 $\Delta G_i(a)$는 균열길이의 변화에 따라 달라지는 값이다. 재료상수인 A와 m의 값은 각각 8.2E-8과 2.5로서 SBR rubber의 피로균열 실험 데이터 값을 이용하였다.[6] 이러한 접근 방식을 통해 구한 피로수명의 값은 대략 55,129 kcycle(173,766 km)임을 얻었다.(Fig. 7)

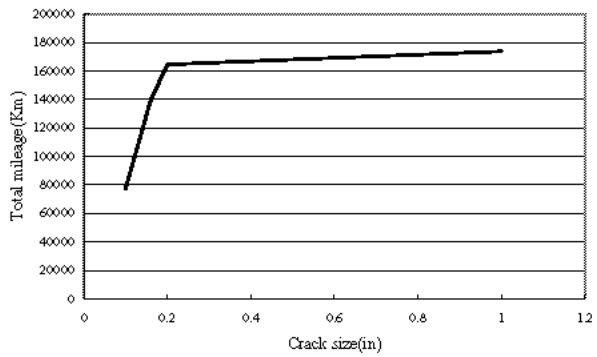

Fig.7 Total mileage(Km) with respect to crack size

4. 결론

본 논문에서는 타이어의 주된 피로파괴가 발생하는 벨트 끝단부에서의 피로수명을 파괴역학적 방법을 적용한 유한요소해석을 통해 구하였다. 유한요소해석에 Global-Local 기법을 적용하여 전체적인 해석시간을 줄일 수 있었고, 다양한 해석 결과를 쉽게 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제안된 파괴역학적인 방법을 이용한다면 타이어 제품을 비롯한 고무재료의 신뢰성 평가를 위한 많은 비용과 시간을 절감시킬 수 있을 것이다. 각각의 균열길이의 진전에 대한 피로수명 값을 살펴보면 균열이 0.06in에서 0.2in까지 진전하는데 대략 165,000 Km, 0.2in에서 임계 균열길이인 1in까지 진전하는데 약 9,000 Km가 걸린다. 균열 초기단계에서는 균열 진전량이 다소 느리지만 갑작스러운 파단을 일으키는 임계 균열길이에서 급격하게 진전함을 알 수 있다. 즉 초기 균열의 생성과 진전이 전체 피로수명 값을 크게 좌우한다는 것을 보여준다. 비록 이번 연구는 Global model의 정적 수직 변위 해석에 대하여 이루어졌지만 타이어의 운전조건(traction, free rolling, bracking)을 고려하여 해석을 수행한다면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 금호타이어가 지원하고 있는 광주·테크노파크 위탁연구개발 사업 과제 내용의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. Rother, H., Idelberger, H., Jacobi, W., "On the finite element solution of the three dimensional tire contact problem," Nulcl. Eng. Des., Vol.78, pp.363-375, 1984.
2. Wu, B., "Nonlinear Therr-Dimensional Finite Element Formulation of Radial Tires," Ph.D. Thesis, Harbin Institute of Technology, Harbin, 1992.
3. Pottinger, M. G., "The three-dimensional contact patch stress field of solid and pneumatic tires," Tire Sci. Technol., Vol.20, pp.3-21, 1992.
4. ABAQUS Theory Manual, H K S, Inc.
5. Wei, Y. T., Tian, Z. H., and Du, X. W., "A Finite Element Model for the Rolling Loss Prediction and Fracture Analysis of Radial Tires," Tire Sci. Technol., Vol.27, pp.250-276, 1999.
6. Govindjee, S. *Firestone Tire Failure Analysis*.