

〈논 문〉

회전하는 타이어의 변형에너지 손실에 의한 온도분포 해석

박현철* · 윤성기** · 송태석*** · 김남전****

(1996년 7월 6일 접수)

Analysis of Temperature Distribution in a Rolling Tire due to Strain Energy Dissipation

Hyun Cheol Park, Sung-Kie Youn, Tae Sok Song and Nam-Jeon Kim

Key Words : Energy Dissipation(에너지 손실), Viscoelasticity(점탄성론), Heat Generation(열 발생), Steady State Rolling Tire(정상상태로 회전하는 타이어)

Abstract

This paper addresses the systematic procedure using sequential approach for the analysis of the coupled thermo-mechanical behavior of a steady rolling tire. Not only the knowledge of mechanical stresses but also of the temperature loading in a rolling tire are very important because material damage and material properties are significantly affected by the temperature. In general, the thermo-mechanical behavior of a pneumatic tire is highly complex transient phenomenon that requires the solution of a dynamic nonlinear coupled themoviscoelasticity problem with heat sources resulting from internal dissipation and friction. In this paper, a sequential approach, with effective calculation schemes, to modeling this system is presented in order to predict the temperature distribution with reasonable accuracies in a steady state rolling tire. This approach has the three major analysis modules-deformation, dissipation, and thermal modules. In the dissipation module, an analytic method for the calculation of the heat source in a rolling tire is established using viscoelastic theory. For the verification of the calculated temperature profiles and rolling resistance at different velocities, they were compared with the measured ones.

1. 서 론

오늘날 승용차나 화물차 등의 차량들은 자체 경량화 및 효율적 엔진의 개발로 인하여 주행거리가 증가되고 있으며, 차량 고속화 및 적재량이 증가되

고 있다. 이러한 상황에서 위의 요구조건을 만족시켜 주는 타이어가 필요하게 되었다.

이는 타이어의 모든 구성요소를 사이에 응력과 변형률이 최대한 고르게 분포되어 있어야 함을 의미한다. 그리고 재료의 파손강도 및 물성치 등의 온도에 의존하므로 응력 이외에 타이어 내부의 온도분포에 대한 정보 역시 매우 중요하다. 즉 온도 및 응력분포에 대한 정보가 타이어의 파손에 대한 예측을 가능하게 해주기 때문이다.

따라서 좀 더 나은 예측을 하기 위해서는 응력분

*한국과학기술원 기계공학과

**회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** (주)금호타이어 연구 1부

****회원, (주)금호타이어 연구 1부

포와 더불어 타이어 내부의 온도분포를 알아야 된다. 일반적으로 공기압 이 가해진 회전하는 타이어(pneumatic tire)의 연계된 열-기계적(coupled thermomechanical) 거동은 내부 분산(internal dissipation), 접촉 그리고 마찰 등의 결과로 발생하는 열원(heat source)을 갖는 비선형 열점탄성(nonlinear coupled thermoviscoelasticity) 문제의 동적해석을 필요로 하는 매우 복잡한 과도현상이다. 이처럼 복잡하며 비선형성이 강한 계(system)는 모양(geometry), 물질상수(material property), 마찰계수(friction coefficient), 손실 매카니즘(dissipation mechanism), 대류 열전달계수(convective heat transfer coefficient) 그리고 그 밖에 현재까지는 충분히 밝혀지지 않은 타이어 디자인에 관계되는 여러 요인들에 대한 정보를 필요로 한다.

회전하는 타이어의 온도분포 예측은 이미 여러 사람들에 의해 연계된 계를 순차적 접근방식으로 모델링하여 실시하여 있으며, 다음과 같은 가정들이 채택되어 이용된다. 에너지 손실만이 내부의 열원으로 전환되며, 원주방향의 온도구배는 없으며, 지면과의 마찰로 인한 온도증가는 무시할 수 있다는 것 등이다. 순차적 접근방식은 변형해석(deformation module), 손실(dissipation module) 및 열해석(thermal module) 등의 세 과정으로 구성된다.^(1~4) 이때 손실계산단계에서는 변형에너지로부터 열원(heat source)을 구하는 역할을 하는데, 이는 타이어 내부의 온도분포를 예측하는데 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 에너지 손실을 얻기 위해 다음과 같은 여러 방법들이 이용되었다. 즉, 매개변수 연구(parameter study)에 의한 결정, 선형 및 비선형 점탄성 모델, 변형비율의 경험적 함수를 이용한 결정 및 점탄성 재료의 특성을 이용한 결정 등이 있다. Dehnert 등⁽¹⁾은 간단한 점탄성 모델을 이용하여 열손실을 계산하였으며, Whicher 등⁽³⁾은 응력해석 후 그 결과를 Fourier 급수전개(series expansion)를 이용하여 계산하였다. 그리고, Kwon 등⁽⁴⁾은 변형률의 경험적 관계로부터 열원을 얻었다.

본 연구에서는 이러한 여러 현상들이 연계된 계를 순차적 접근(sequential approach) 방식으로 모델링하여 회전하고 있는 타이어의 정상상태(steady state)에서의 온도분포를 예측하였다. 이 모델은 한 방향으로 연계된 접근(one-way coupling

approach) 방법, 즉 접촉문제의 단순한 응력해석을 통하여 얻은 변형에너지의 일부가 열원으로 변환되어 열해석을 실시하는 순차적 해석방법을 기본으로 하고 있다. 이때 비선형 탄성 모델을 이용하여 응력해석을 실시하며, 응력해석단계에서 구한 변형에너지를 열원으로 변환하여 열해석을 실시한다. 타이어의 내부 열원의 주 원인은 점탄성 재료의 주기적 변형에 의존하므로, 점탄성 이론을 도입하여 에너지 손실 및 열원을 구한다. 따라서 이러한 순차적 접근방법은 변형해석단계, 손실계산단계 그리고 열해석단계 등의 세 단계로 나누어진다. 본 연구의 손실계산단계에서는 열원 및 열발생률(rate of heat generation)을 구하는 과정을 검토하여 에너지 손실을 구하는 체계적인 이론 및 방법을 확립하고, 이를 바탕으로 하여 타이어 내부에 대한 열-기계적 해석을 실시하였다. 응력해석의 결과를 충분히 이용하기 위해서는 원주방향 전체에 대한 근사화보다는 각 구간별로 나누어서 근사화하는 것이 변형률의 원주방향에 대한 변화를 보다 잘 묘사하므로 본 연구에서는 각 구간별로 근사화하여 열손실을 구하였다. 이러한 과정을 거쳐 예측(계산)된 타이어 내부의 온도 및 구름저항(rolling resistance)은 실험치와 비교되었으며, 이는 파손여부를 결정하는 신뢰성있는 주요 인자가 된다.

본 글의 2절은 타이어의 일반적인 순차적 열-기계적 해석방법에 대하여 기술하였고, 3절은 본 연구에서 제안한 에너지 손실을 구하는 방법에 대하여 기술하였다. 그리고 4절과 5절에서는 실제 예제로 205/60R15 금호타이어에 대한 해석 및 결과에 대하여 기술하였다.

2. 타이어의 열-기계적 해석

타이어에 관한 열-기계적(thermo-mechanical) 해석을 실시하기 위해서는 Fig. 1에서 보여지는 순서로 순차적 해석(sequential analysis)을 실시한다. 이때 변형에서 단계(deformation module), 손실계산단계(dissipation module), 열해석단계(thermal module) 등의 주요 3모듈들을 Fig. 1에서의 사각블록으로 표시하였다.

이러한 축차적 모듈접근(iterative modular approach) 방법은 복잡한 문제를 간단화 할 수 있고, 연계된 문제를 나누어서 풀 수 있으며, 각 모듈별로 독립적 계산이 가능하다는 잇점이 있다. 각

모듈별로 내용은 다음과 같으며, 본 연구에서 검토된 손실계산단계에 대한 구체적인 내용은 3절에 나타내었다.

2.1 변형해석단계

이 모듈의 기능은 주어진 형상, 물성치, 경계조건 및 온도분포 등에 대한 변형을 계산하는 것이다. 타이어의 경우는 초기 온도분포를 예측하여, 이에 맞는 재료상수를 결정한 후 변형해석을 실시한다. 특히 타이어는 지면과 접촉하고 있기 때문에 이 모듈에서는 접촉(contact)에 대한 처리가 필수적이다. 회전하는 타이어에 대한 마찰 및 관성에 의한 영향을 무시하면, 내압, 접촉 및 원심력을 갖는 정적문제로 취급할 수 있다. 본 연구에서는 비선형 탄성 모델을 이용하여 정상상태(steady state)에서 회전하는 타이어에 대한 변형해석을 실시하였다.

2.2 손실계산단계

타이어에 대한 선형 점탄성 이론과 전단계에서 구한 변형 등을 이용하여 단위 체적당 에너지 손실률(rate of energy dissipation) 및 열원(heat source)을 계산한다. 타이어 열손실률의 발생은 타이어 고무의 점탄성적 반응에 의존하므로 대부분의 경우 점탄성 이론이 이용되고 있다. 이는 본 연구에서 중요하게 다뤄져야 할 문제이므로 3절에 구체적으로 기술하였다. 에너지 손실률을 계산하기에는

선형 점탄성 거동을 나타내는 모델이 효과적이지만 고무의 기계적 거동을 나타내기에는 적합하지 않다. 즉, 기계적 거동(응력해석)의 해석을 위해서는 고무의 비선형적 거동을 나타내는 구성식이 필요하지만 점탄성의 특성에 의한 에너지 손실을 계산하기 위해서는 중첩의 원리가 적용되는 선형 점탄성 이론의 도입이 필요하다. 따라서 변형해석단계에서는 비선형 탄성 모델을, 손실계산단계에서는 선형 점탄성 이론을 이용하였다.

본 연구에서는 손실계수(loss modulus)와 저장계수(storage modulus)의 비를 나타내어 주는 $\tan \delta$ 를 대상재료의 실제 시험을 통하여 확보한 후, 이를 이용하여 내부의 열발생률을 계산하였다. 즉 변형해석 단계에서 구한 응력과 변형률을 이용하여 한 주기동안 시간에 따른 응력과 변형률의 변화를 표시하였다. 그리고 확보된 위상각(phase angle) δ 를 이용하여 응력과 변형률의 상(phase)을 변화시킨 후 손실 및 열발생률을 계산하였다.

2.3 열해석단계

앞에서 구한 결과를 열원을 이용하여 타이어 내부의 온도분포를 계산하는 단계이다. 일반적인 열해석과정과 마찬가지로 복사(radiation), 대류(convection) 및 전도(conduction)에 의한 타이어 내부의 열분포를 계산하였다.

이 모듈에서 최종적으로 구한 온도분포와 변형해석단계에서 처음 예상했던 온도분포를 비교하여 그 차이를 줄이는 방향으로 진행한다. 그리고 열해석단계에서는 경계조건(복사, 대류, 마찰 등)에 의하여 온도분포가 달라지므로 실제 상황을 가장 잘 묘사할 수 있는 경계조건이 필요하다.

3. 손실계산단계

본 연구에서 제안한 에너지 손실을 구하는 과정에 대하여 기술하기로 한다. 우선 정상상태에서 회전하는 타이어를 정적(static) 탄성문제로 근사하여 변형해석을 실시한 후, 응력, 변형률 및 변형에너지를 계산한다. 정적 탄성문제로서 변형해석을 실시하였지만 실제로는 Fig. 2와 같이 회전하고 있기 때문에, Fig. 2에서의 임의의 위치 A에 대한 응력(또는 변형률)의 시간에 따른 변화는 경로 C상의 응력(또는 변형률)의 변화라 할 수 있다. 점탄성 이론에 의하여 주기적 변형이 에너지 손실로 변

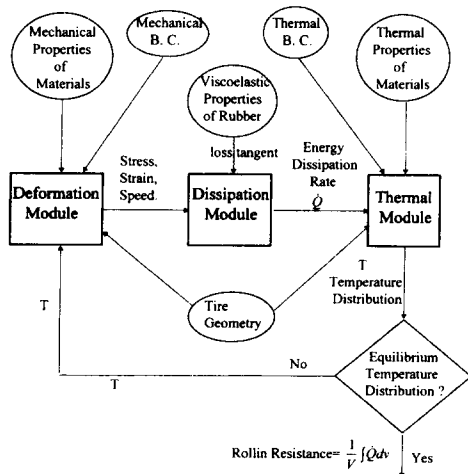


Fig. 1 Block diagram of an iterative thermo-mechanical tire model

환되며, 에너지 손실이 열발생률로서 열해석시 열원이 된다.

변형해석단계에서 구한 응력과 변형률의 한 주기당 시간에 따른 변화는 같은 위상(in phase) 상태에 있게 된다. 이때 점탄성 이론에서는 시간 지연상수(time lag : δ)를 도입하여 응력과 변형률에 위상차이를 준다. 즉 회전하는 타이어의 경우 외부의 강제가진에 의하여 변형이 변화하며, 임의의 시간(δ)이 지난 후에 앞서 발생한 변형률에 대응하는 응력이 나타남을 의미한다. 이러한 관계를 이용하여 주기적 변형에 의한 에너지 손실 및 열발생률을 얻게 된다. 이때 응력과 변형률의 성분은 xyz 좌표계가 아닌 $r\theta z$ 좌표계에서 계산된 값을 이용하여야 한다.

설명의 편의를 위하여 Fig. 3에서의 한 구간(section)이 하나의 요소(element) 만으로 되어 있고, 각 요소의 응력, 변형률 값들은 구간과 구간사

이의 경계면 중앙에 대하여 표시되어 있다고 하자. 임의의 한 단면이 원주방향으로 1개의 요소를 갖는 영역을 하나의 구간으로 설정하였다. 각 구간에서는 3차의 다항식으로 응력, 변형률 값들을 묘사하였다. 즉 응력, 변형률은 아래 식 (1), (2)처럼 근사화할 수 있다.

$$\sigma_{ij}^k(t) = a_{ij}^k t^3 + b_{ij}^k t^2 + c_{ij}^k t + d_{ij}^k \quad (1)$$

$$\epsilon_{ij}^k(t) = e_{ij}^k t^3 + f_{ij}^k t^2 + g_{ij}^k t + h_{ij}^k \quad (2)$$

여기서 $i=r, \theta, z$ $j=r, \theta, z$, t 는 시간이고, $a_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k, d_{ij}^k, e_{ij}^k, f_{ij}^k, g_{ij}^k, h_{ij}^k$ 은 변형해석단계에서 구한 응력과 변형률로부터 결정되는 상수이며, $k=1, 2, \dots, K$ (구간의 총 개수)를 의미한다. 임의의 k 번째 구간에서의 응력, 변형률을 위 식 (1), (2)으로 근사화하기 위해서는 $k-1$ 과 $k+1$ 번째 구간 경계의 응력, 변형률 값들이 필요하게 된다. 따라서 k 번째 구간의 응력, 변형률에 대한 근사화 된 식은 인접한 구간의 영향을 포함하고 있다.

이때 실험으로부터 구한 시간지연상수(δ)를 이용하여 식 (1)로 계산된 응력성분의 시간변화를 아래 식과 같이 변화(모든 k 에 대하여 동일하게 변화시킴)시킨다.

$$\sigma_{ij}^k(t) = a_{ij}^k (t + \delta)^3 + b_{ij}^k (t + \delta)^2 + c_{ij}^k (t + \delta) + d_{ij}^k \quad (3)$$

일반적으로 한 주기(period : T) 당 에너지 손실

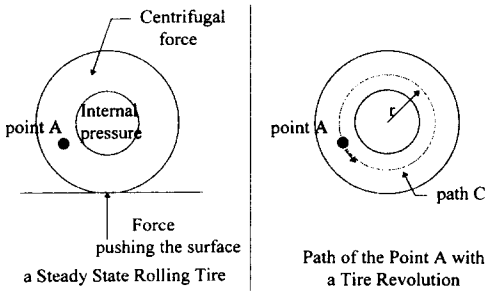


Fig. 2 Simple inflated rolling tire model

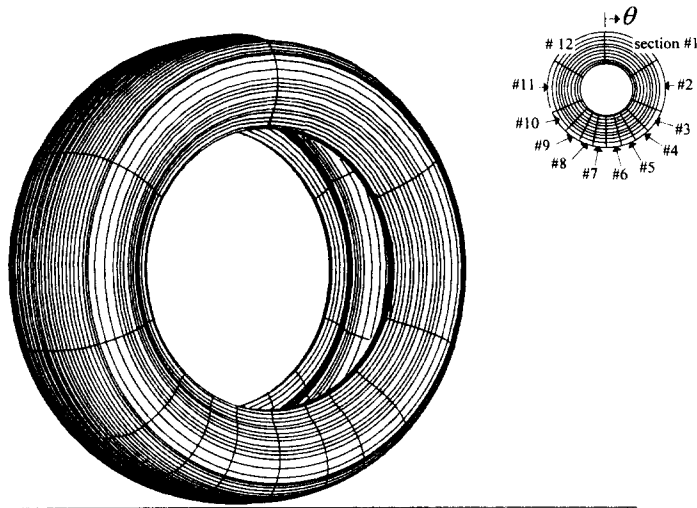


Fig. 3 3-D finite element mesh of a 205/60R15 Kumho tire

ΔW (energy loss per one cycle) 과 열 발생률 \dot{Q} (rate of heat generation) 은 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta W = \int_0^T \sigma_{ij}(\tau) \frac{d\varepsilon_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (4)$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta W}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma_{ij}(\tau) \frac{d\varepsilon_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (5)$$

식 (2), (3)으로 표현된 응력, 변형률에 대한 에너지 손실과 열발생률을 얻기 위하여 식 (4), (5)를 이용하자. 이 경우 에너지 손실과 열발생률은 아래 식 (6), (7)과 같이 나타내어진다.

$$\Delta W = \sum_{k=1}^K \int_{t_{k-1}}^{t_k} \sigma_{ij}^k(\tau) \frac{d\varepsilon_{ij}^k(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (6)$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta W}{T} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^K \int_{t_{k-1}}^{t_k} \sigma_{ij}^k(\tau) \frac{d\varepsilon_{ij}^k(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (7)$$

여기서, K 는 변형해석 및 열해석에서 구성된 유한요소 모델에서 구간의 총 갯수이며, 시간 $t_{k-1} \sim t_k$ 는 한 주기 내에서 k 번째 구간이 차지하는 시간을 의미한다.

회전하는 타이어를 정적 탄성분제로 근사하여 변형해석을 실시하였으므로, 임의의 한 요소에 대한 한 주기(T) 사이에 발생하는 에너지 손실 및 열발생률은 각각의 구간에 대한 에너지 손실 및 열발생률의 총화이다. 따라서 식 (6)과 (7)은 전체 구간에 대한 에너지 손실 및 열발생률을 포함하므로 한 주기(T) 사이에 발생하는 에너지 손실 및 열발생률을 의미하게 된다. 이때 구하여진 열발생률은 Fig. 2의 경로 C처럼 같은 경로 상에 있는 모든 요소에 대하여 동일한 값을 갖는다.

4. 205/60R15 타이어의 해석

205/60R15 타이어에 대한 열-기계적 해석을 실시하였으며, Fig. 3에는 2차요소로 구성된 3차원 유한요소 모델을 나타내었다. 타이어의 3차원 유한요소 모델은 5184개(12구간(section)으로 구성되었으며, 한 구간당 432요소(elements)가 포함)의 20절점 육면체 요소(brick element)와 15절점 오면체 요소(wedge element) 요소로 구성되어 있다.

상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 변형 및 열해석을 수행하였다. 본 연구에서는 변형해석 실시 후 그 결과로부터 에너지 손실을 구하는 이론 및 방법을 정립하고, 이를 이용하여 실

제 타이어의 온도분포와 구름저항을 구한 후 실험 결과와 비교하였다.

본 글의 3절 방법을 적용하여 변형해석 결과로부터 에너지 손실률을 구하였으며, 변형해석시 사용한 유한요소 모델에 대하여 열해석이 수행되었다. 재료의 물성치가 온도에 무관하다고 가정하여 단 한번의 변형-손실-열 해석단계가 이용되었다.

4.1 변형, 손실 및 열해석

실험실 내에서 반지름이 큰 드럼(drum)과 일정한 힘으로 접촉하여 회전하고 있는 타이어 대한 열-기계적 해석이 수행되었다. 정상상태의 타이어에 대해 241320.0[Pa]의 내압과 5839.29[N]의 접촉력 하에서 정적(static) 변형해석이 시행되었으며, 이 결과 값인 응력, 변형률을 이용하여 다음 단계의 계산을 실시하였다. 즉 Fig. 3의 각 단면의 동일한 지점에 위치하는 요소들에 대하여 첫번째 구간에서부터 시작하여 마지막 12번째 구간까지의 응력, 변형률의 변화를 한 주기당 응력, 변형률의 시간 변화율로 보고, 에너지 손실 및 열발생률을 구하였으며, 이는 열해석단계에서의 열원으로 적용하였다. 열해석시 열경계조건과 속도에 따른 대류계수값을 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구에서는 타이어와 휠(wheel)의 접촉부위(Fig. 4에서의 Heat rim)에 대한 열교환방법을 전도(conduction)가 아닌 대류(convection)로 대치하여 해석하였다.

대류계수는 층류에서는 속도의 제곱근에 비례하고 난류에서는 속도의 0.8 지수승에 비례한다고 알려져 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 외부에 직접 노출되어 있는 경계(Fig. 4에서의 heat-side, heat-tread)에

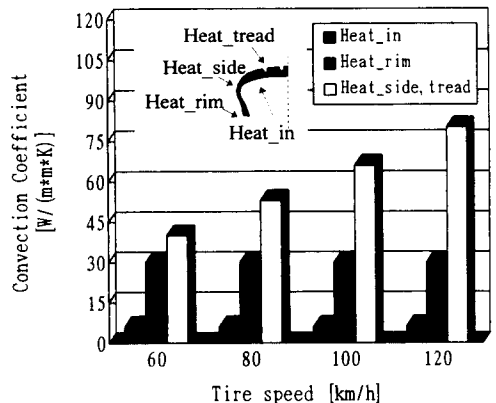


Fig. 4 Thermal convection coefficients for the cross-section of a tire

대한 대류계수는 속도에 비례한다고 보였다. 따라서 일정한 속도에서 타이어 측면(Fig. 4에서의 heat-side)에 대한 대류계수는 반지름에 선형적으로 비례하여 증가한다. 그 이외의 열경계(Fig. 4에서의 heat-in, heat-rim)에서의 대류계수는 내부 및 휠(wheel)과 접촉하고 있음으로 속도에 무관한 상수로 취급하였다. 실제 상황을 잘 묘사하기 위해서 이러한 열경계에 대한 연구가 필요하며, 지면과의 접촉에 대한 열전달과정에 대해서는 무시하였다. 본 과제에서 타이어 경계면에 대하여 복사와 대류경계조건(외부온도 25[C]이라 가정)을 주었다.

에너지 손실률 및 열발생률은 모든 구간에 일정하게 작용하며, 지면과의 접촉마찰(frictional contact)에 대한 열발생은 미미하고, 열해석시 원주방향의 열전달은 무시할 수 있기 때문에 에너지 손실 및 온도분포를 단면에 대해서만 표시하였다.

4.2 구름저항

손실계산단계에서 구한 열발생률에 대한 검증의 일환으로 실험으로 측정된 구름저항(rolling resistance)과 비교하기로 한다. 정상상태에서의 구름저항은 타이어 내부에서 발생하는 열발생률(동력손실

율 의미)을 타이어 속도로 나누어진 값이 된다.

4.3 해석결과

시속 60[km/h]에서의 에너지 손실률과 시속 60, 80, 100, 120[km/h]에 대한 온도분포를 Figs. 5, 6, 7, 8, 9에 나타내었다. 손실계산과정에서부터 얻어진 에너지 손실률은 식 (7)에 의하면 속도에 비례하므로 60[km/h]에 대해서만 나타내었다.

이론적으로 열발생률은 항상 양의 값을 갖지만 Fig. 5의 결과처럼 열발생률의 절대값이 상대적으로 작은 범위에서는 음의 값을 갖는 경우가 발생한다. 이는 응력, 변형률을 3차의 다항식으로 내삽(interpolation)했기 때문에 상대적으로 작은 범위에서의 값은 계산상의 오차로 볼 수 있다.

온도분포의 경우 속도에 따른 경향을 비슷하며, 온도의 최고치가 벨트의 가장자리(belt edge) 부근에서 발생한다. 그리고 아펙스(apex) 내부에도 주위에 비해 높은 온도구배가 형성된다.

Fig. 10은 타이어 내부에서의 측정온도와 계산치와 비교한 것이며, Fig. 11은 타이어 표면에서의 비교한 그림이다. 여기서 계산된 온도는 온도센서가 부착되었다고 여겨지는 좌표의 불확실성으로 인하여 그 구간의 평균치를 취하였다.

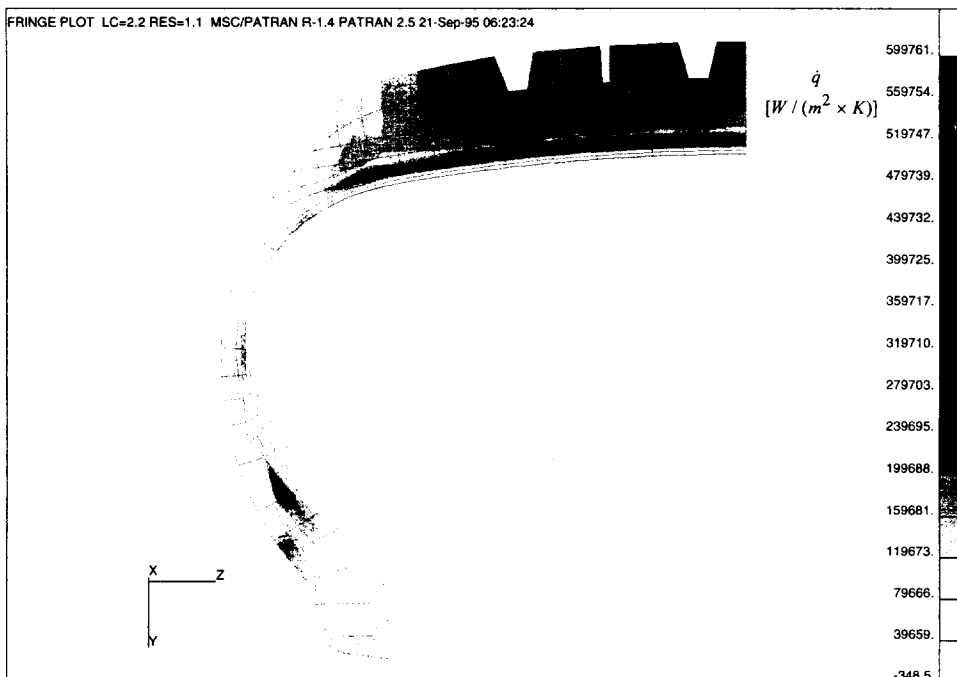


Fig. 5 Calculated energy dissipation rate of a 205/60R15 Kumho tire at a speed of 60[km/h]

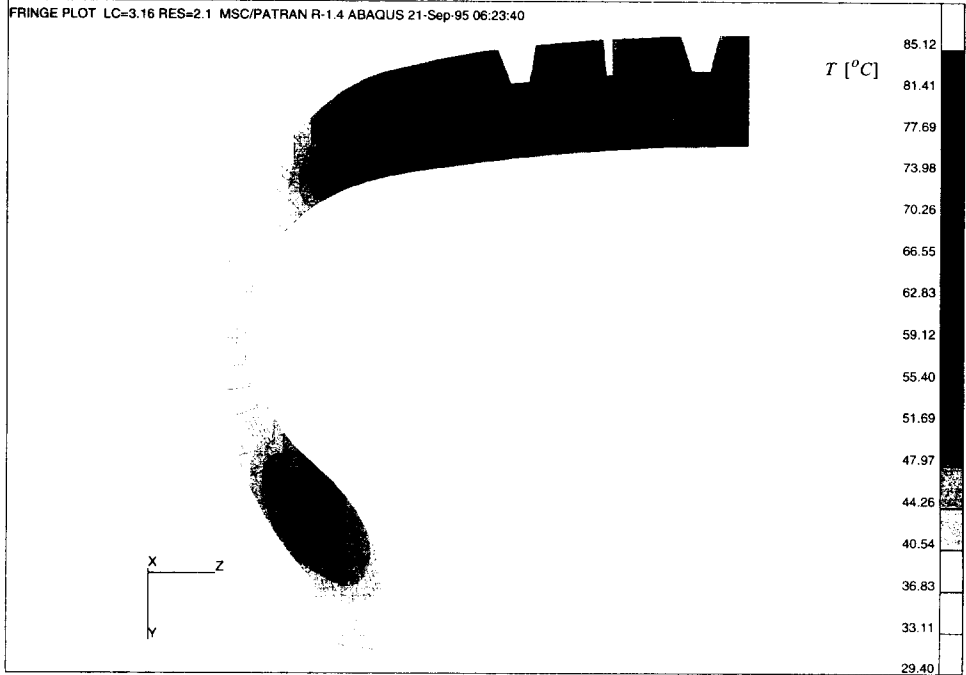


Fig. 6 Calculated temperature distribution of a 205/60R15 Kumho tire at a speed of 60[km/h]

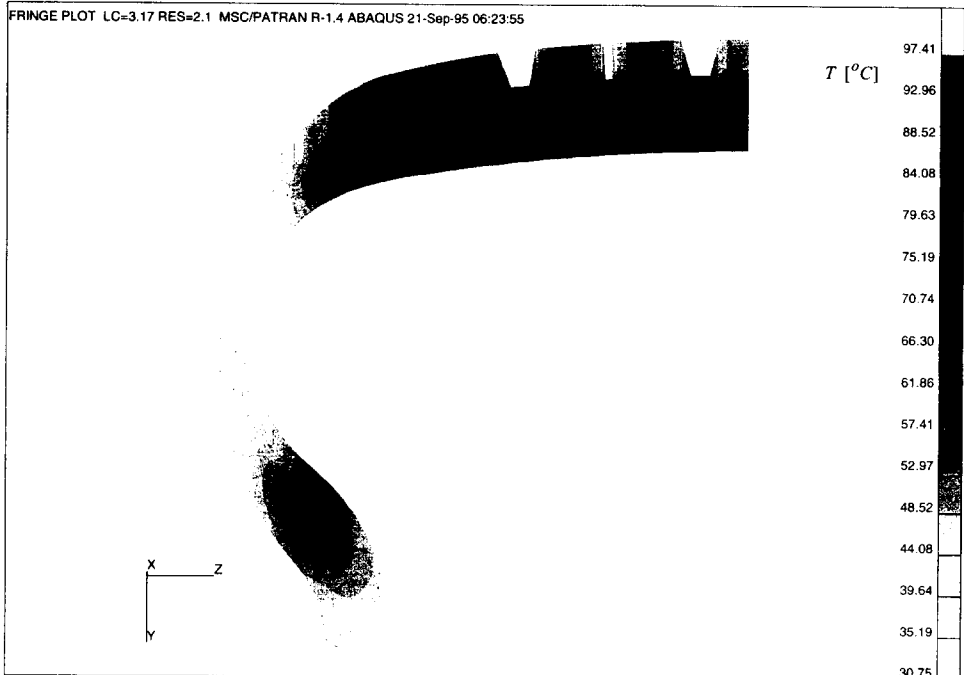


Fig. 7 Calculated temperature distribution of a 205/60R15 Kumho tire at a speed of 80[km/h]

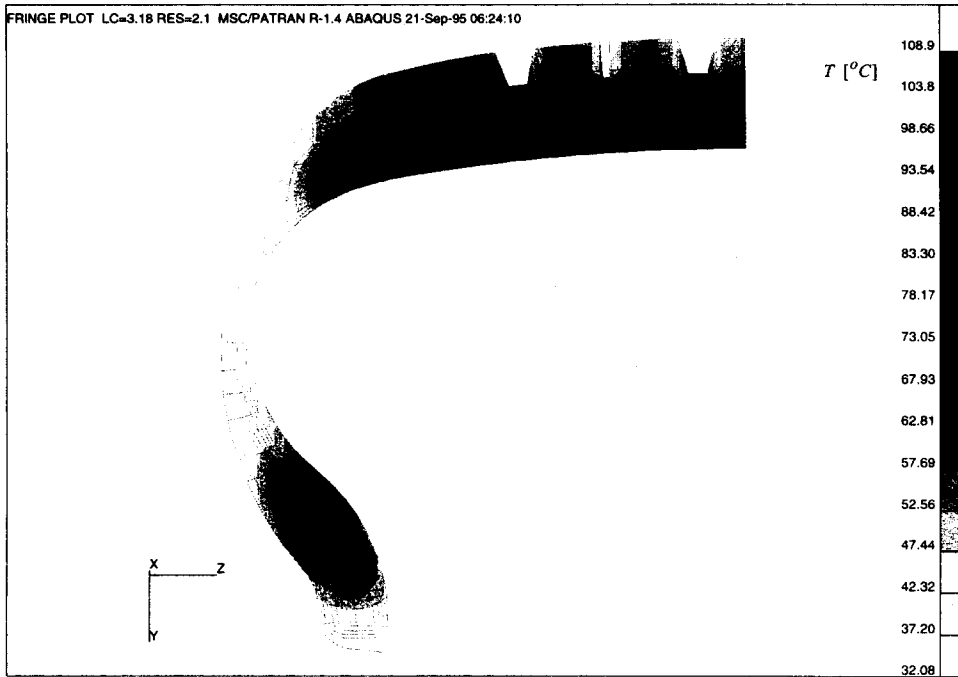


Fig. 8 Calculated temperature distribution of a 205/60R15 Kumho tire at a speed of 100[km/h]

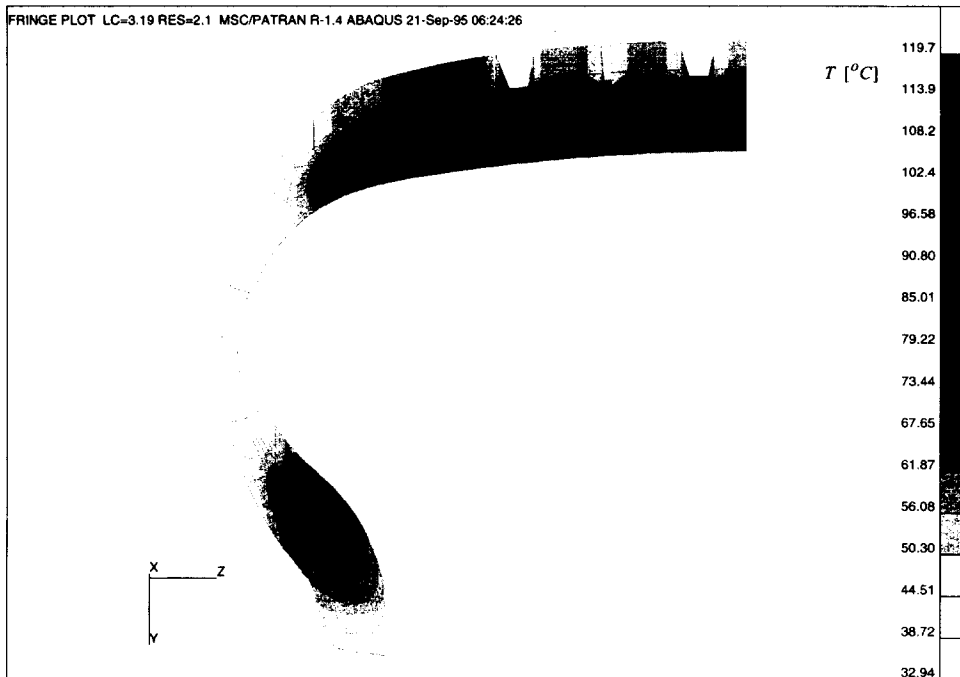


Fig. 9 Calculated temperature distribution of a 205/60R15 Kumho tire at a speed of 120[km/h]

타이어 내부(belt edge, apex)에서는 측정온도와 근접한 온도값을 주고 있다. 속도에 의한 벨트 가장자리 부근에서의 측정온도 변화와 순차적 방법을 이용하여 계산된 온도변화는 유사한 형태를 갖는

다. 그러나 타이어 경계부근에서의 측정온도와의 비교는 상당한 차이가 있다. 타이어 경계면에서 측정된 온도값은 경계면 만의 온도를 의미하지 않는다. 이는 실내온도의 영향을 직접적으로 받기 때문

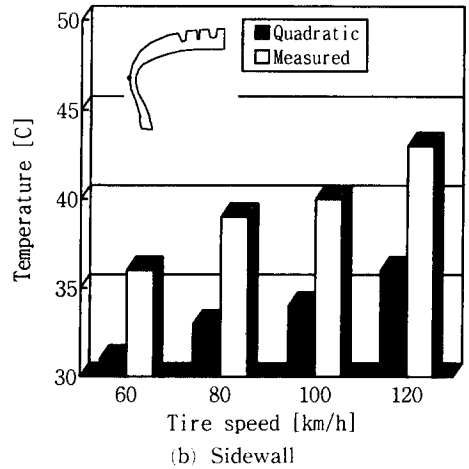
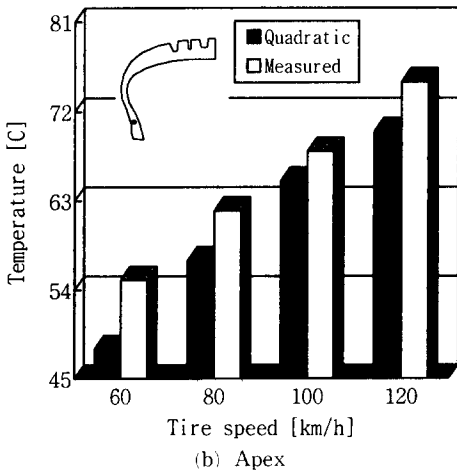
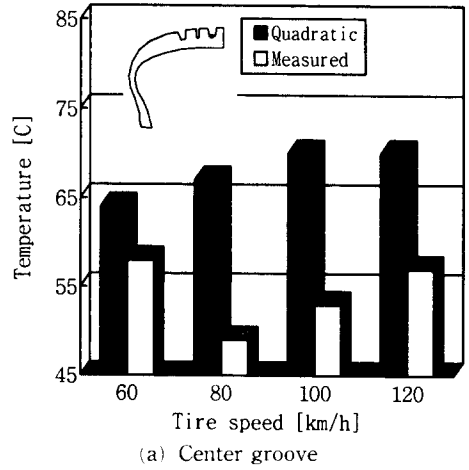
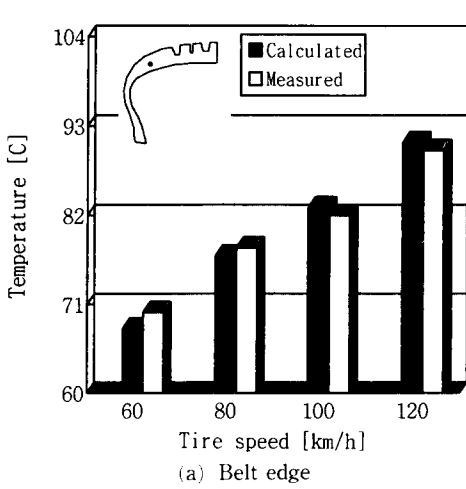


Fig. 10 Comparison of measured and calculated temperature inside a 205/60R15 Kumho tire

Fig. 11 Comparison of measured and calculated temperature at the surface of a 205/60R15 Kumho tire

Table 1 Comparison of measured and calculated rolling resistance(=RR) for a 205/60R15 Kumho tire

| Method \ Speed | Measured RR[kgf] | Calculated RR using linear element[kgf] | Calculated RR using quadratic element[kgf] |
|----------------|------------------|---|--|
| 60/[km/h] | 7.06 | 7.02 | 6.83 |
| 80/[km/h] | 7.07 | 7.02 | 6.83 |
| 100/[km/h] | 6.98 | 7.02 | 6.83 |
| 120/[km/h] | 6.99 | 7.02 | 6.83 |

에 계산된 온도와 많은 차이가 나는 것으로 사려된다.

관측된 구름저항과의 비교를 Table 1에 나타내었다. 계산된 구름저항의 경우, 속도에 관계없이 일정한 값을 갖고 있으며, 측정된 구름저항도 거의 일정한 값이라고 할 수 있다. 이는 고속주행시 동일한 양의 연료를 이용하여 더 먼 거리를 이동할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

정상상태에서의 회전하는 타이어에 대한 정적 응력해석 결과를 이용하여 열발생률 및 열원을 구하였으므로 속도에 의한 열발생률의 변화는 속도에 선형 비례한다. 따라서 속도변화에 의한 온도분포의 경향차이는 타이어 경계면에서의 대류계수값의 변화에 의존한다.

타이어 내부에서의 측정된 온도와 비교하여 보면 상당히 유사한 해를 주고 있지만, 타이어 경계부근에서의 측정온도와는 많은 차이를 보인다.

본 연구에서는 효율적인 수치해석을 위하여 연계된 지배방정식, 변형경계조건, 열경계조건 및 재료특성의 단순화를 이용하였다. 그러나 타이어 내부에서 온도상승의 주원인이 점탄성의 주기적 변형에 기인하기 때문에, 본 연구에서 제안된 방법으로 계산된 온도분포 및 구름저항 등은 측정치를 잘 묘사하였다.

참고문헌

- (1) Jorg Ehnert and Heiner Volk, 1991, "An Approach to Predict Temperature Distributions in Rolling Tires Using FEM," 10th Meeting of the Tire Society, The University of Akron, Ohio, March, 19~20.
- (2) Yavari, B., Tworydlo W. W. and Bass, J. M. 1993, "A Thermomechanical Model to Predict the Temperature Distribution of Steady Rolling Tires," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 21, No. 3, pp. 163~178.
- (3) Donald Whicker, Alan L. Browne and Daniel J. Segalman, 1981, "The Structure and Use of the GMR Combined Thermo-mechanical Tire Power Loss Model," *SAE Technical Paper* 810164.
- (4) Sarkar, K, Kwon, Y. D. and Prevorsek, D. C., 1987, "A New Approach for the Thermomechanical Analysis of Tires by the FEM," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 15, No. 4, pp. 261~275.
- (5) Browne, A. L. and Wichliffe, L. E., 1980, "Parametric Study of Convective Heat Transfer Coefficients at the Tire Surface," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 8, No. 3~4, pp. 37~67.
- (6) Christensen, R.M., *Theory of Viscoelasticity An Introduction*, 2nd Ed.
- (7) Atkin, R. J. and Fox, N., 1980, *An Introduction to the Theory of Elasticity*.
- (8) William. N. Findley, James S. Lai and Kasif Onaran, 1976, *Creep and Relaxation of Non-linear Viscoelastic Materials*.
- (9) Frank P. Incropera and David P. Dewitt, 1985, *Introduction to Heat Transfer*.