

타이어 사이드월 온도 저감을 위한 Cooling Fin 해석 Analysis of the Cooling Fin for the Temperature Reduction of the Tire Sidewall

박재현‡ · 정성필† · 정원선* · 전철균**

JaeHyen Park, SungPil Jung, WonSun Chang and ChulKyun Chun

Key Words : Tire(타이어), Sidewall(측면), Cooling fin(냉각핀), Finite element method(유한요소법), Thermal analysis(열분석), Turbulent flow(난류 유동)

ABSTRACT

When the vehicle is traveling, the deformation caused by friction continued with the ground is made to occur because the tire is the composite material of a viscoelastic. Part of the deformation energy is converted into heat energy as Hysteresis and temperature inside the tire rises. The generated heat is shed to the outside through the convection and evangelism. Increase in the internal temperature of the tire is difficult to ensure the safety of vehicle by damage to the tire during driving. Recently, Even when the tire is damaged, it is designed to be possible to driving in case of run-flat tires but the fact is that the development of the technology for the synergistic effect of heat release inside the tire by the side reinforcement is necessary. In this study, by using the Finite Element Method (FEM), applying the cooling fins to the tire sidewall, it is intended to check the temperature distribution along the shape of the cooling fins and the temperature reduction effect.

1. 서 론

기 호 설 명

- C_1, C_2, C_D, C_μ : 난류 상수
- C_p : 비열
- u_j : 속도성분
- x_j : 좌표계 변수
- ϵ : 난류 운동에너지 소산율
- λ : 열전도계수
- μ_t : 와류점성계수
- ρ : 공기 밀도
- σ_k : 난류 상수

타이어는 일반적으로 고무(Rubber)와 코드(Cord), 철사(Steel)등의 복합재료인 점탄성 물질로 이루어져 있다. 타이어는 차량이 주행할 때 지면과의 지속적인 마찰에 의해 변형이 일어나게 된다. 변형 에너지의 일부는 차량 하중에 의하여 반복적인 인장과 압축을 통한 이력현상(Hysteresis)으로써 열에너지로 전환되어 타이어 내부 온도 상승의 주요한 요인으로 작용한다. 이렇게 발생된 열은 진동과 대류를 통해 외부로 발산하게 된다. 최근에는 타이어 안전성을 높인 런플랫 타이어의 경우 파손 시에도 주행이 가능하도록 설계되어 있지만, 그에 따른 사이드 보강재를 필요로 하기 때문에 타이어의 열 방출이 더 어려워질 것으로 예상되기 때문에 타이어 사이드월의 온도 저감 기술이 필요한 실정이다.

현재까지 물체의 열전달 특성을 고려한 해석을 하는 경우에는 주로 유한차분법(Finite difference

† 교신저자; 정성필, 자동차부품연구원
E-mail : spjung@katech.re.kr
Tel : 061-464-9979, Fax :061-464-9967

‡ 박재현; 자동차부품연구원
* 자동차부품연구원
** 목포대학교 기계공학과

method)을 이용하여 연구되어 왔으며, 형상이 복잡한 경우에는 유한요소법(Finite element method)을 이용하여 연구되어 왔다. 이와 관련된 타이어 열전달 문제를 다룬 논문을 살펴보면 Ebbott¹⁾는 재료 특성 및 모델링 구성에 따른 타이어의 회전 저항 및 정상 상태의 온도 분포에 대한 예측 방법을 유한요소법을 통해 실험 데이터와 비교하였고, Tian²⁾는 주행 중 이력현상과 차량의 부하, 속도, 주행 환경에 따른 타이어의 온도 영역을 평가하는 유한요소법을 통해 기법을 정립하였다. 최근 국내에서도 타이어 열전달해석기법에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 박창권⁴⁾은 주행 중 타이어 내부의 온도분포 해석을 유한요소법을 통해 계산하였고, 이한울⁵⁾은 유한요소법을 이용하여 히스테리시스 손실에 의한 회전하는 타이어의 온도 상승 예측하는 이론 및 방법에 대해 정립하였다. 또한 정경문⁶⁾은 트레드 패턴 형상에 따라 스무스(Smooth)타이어와 패턴(Pattern)타이어의 온도 예측 방법을 유한요소법을 통해 비교하였다.

본 연구에서는 타이어 사이드월의 냉각핀을 적용함으로써 온도 저감 효과를 확인하고, 냉각핀 형상에 따른 타이어 사이드월의 온도 저감 효과를 수치 해석을 통해 결과를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

타이어 사이드월의 비압축성 난류유동의 지배방정식은 다음과 같다.

(1) 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

(2) 운동량 보존방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i u_j) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu - \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 에너지 보존방정식

$$\text{고체 : } \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (3)$$

유체 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

(4) 난류운동에너지 방정식(k)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - C_D \rho \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

(5) 난류 소산율 방정식(ε)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] \\ &+ C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 G_k 는 난류운동에너지의 생성항으로 다음과 같다.

$$G = -u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \left[\nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

본 해석에서 사용된 난류 모델 상수는 다음과 같다. $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$ 이며, 와류 점성 계수는 다음의 관계식을 사용한다.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

타이어 사이드월의 3차원 비정상 상태 대류열전달의 지배방정식은 다음과 같다.

(6) 연속방정식

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

(7) 운동량 보존방정식

$$\begin{aligned} \text{x 방향 : } & \rho \left(-\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\ & -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + X \end{aligned} \quad (10)$$

$$y \text{ 방향} : \rho \left(-\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + Y \quad (11)$$

$$z \text{ 방향} : \rho \left(-\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + Z \quad (12)$$

(8) 에너지 보존방정식

$$\rho c_p \left(-\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \mu \Phi + q' \quad (13)$$

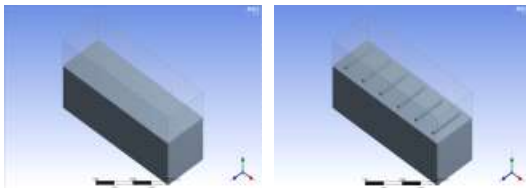
2.2 형상 설계

냉각핀 형상에 따른 온도 저감 효과를 확인하기 위해서 해석영역을 결정하였다. 타이어 전체에 대한 형상은 복잡하기 때문에 계산시간도 오래 걸리며 격자의 균일성과 조밀성을 확보하기 힘들기 때문에 계산결과에 신뢰도가 떨어질 수 있다.

본 연구에서는 핀 형상에 따른 온도 저감 효과를 확인하고자하기 때문에 형상을 단순화하여 사이드월의 일부만 표현하였다. 다음 Table 1에 평면과 핀의 크기를, Fig 1에 설계된 형상을 나타내었다.

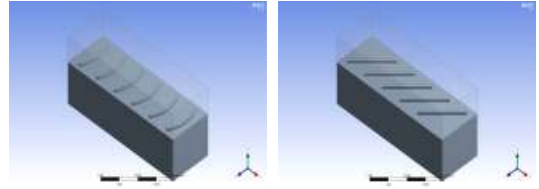
Table 1 Geometry sizing

| | l | h | w |
|-------|----|----|----|
| Plate | 60 | 16 | 20 |
| Fin | 15 | 1 | 1 |



(a) Case_1

(b) Case_2



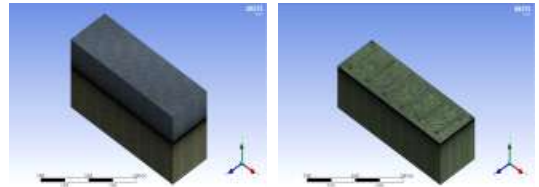
(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 1 Sidewall simple models

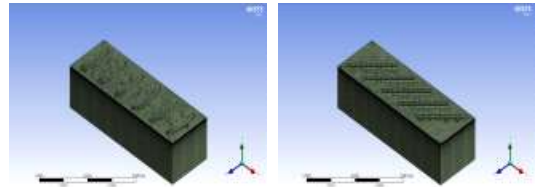
2.2 격자 구성

타이어 표면과 외부 대기 영역의 열전달 해석을 수행하는데 있어, 타이어(Solid)와 대기(Fluid) 사이의 접촉면에서 열전달이 활발하게 이루어질 것으로 예상되기 때문에 경계면 부근은 격자(Mesh)를 조밀하게 구성하여 계산의 정확성을 높이고자 하였다.



(a) Case 1

(b) Case 2



(f) Case 3

(g) Case 4

Fig. 2 Meshing

본 연구에서는 격자를 생성하는데 육면체(Hexahedron)를 이용하여 구성하였으며, Fig 2에 나타내었다. 평균 격자점(Node)의 수는 약 24만개이다.

2.3 경계 조건 설정

Fig 3, 4는 경계조건을 보여주고 있으며, 사이드월 표면으로 차량 주행환경 요소를 반영하기 위하여 25℃ 공기가 20m/s 유속을 가지고 있으며, 타이어 회전을 고려하여 유입 방향을 20°로 설정하였다. 또한 타이어 내부 열발생은 내부 표면에 Heat Flux = 20,000 W/m²로 설정하였다.

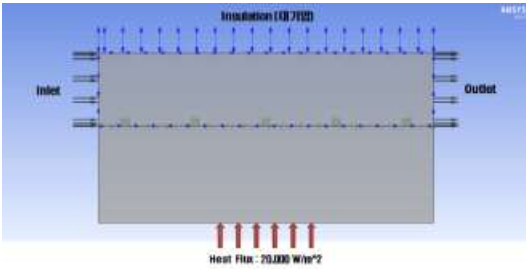


Fig. 3 Boundary conditions (Side view)

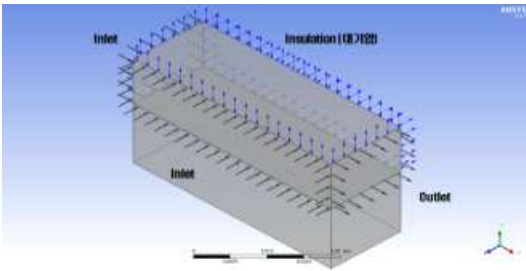
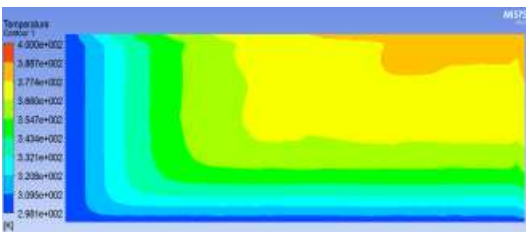


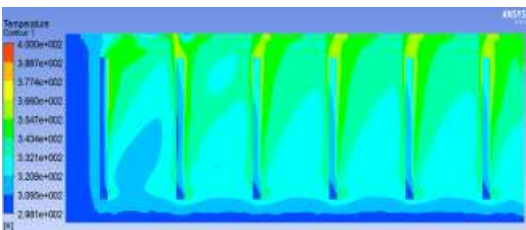
Fig. 4 Boundary conditions (Aerial view)

2.4 온도분포 해석

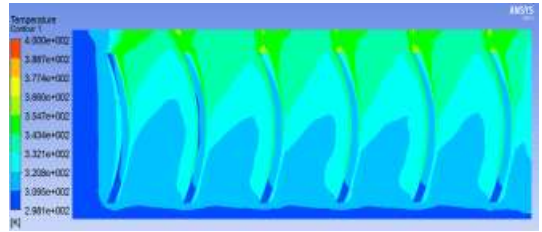
다음 Fig 5는 표면에서의 온도분포를 보여주고 있다. 핀 형상에 따라 표면온도의 차이는 있지만, 대체적으로 냉각핀이 있는 Case 2~4가 냉각핀이 없는 Case 1보다 표면 온도가 저감됨을 확인할 수 있었다. 이는 냉각핀으로 인해 핀 후부에 와류(Vortex)가 형성되어 대류열전달이 더 활발한 것을 예측할 수 있다.



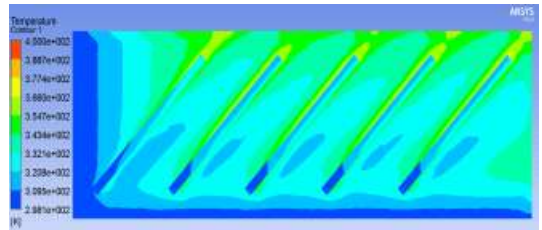
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

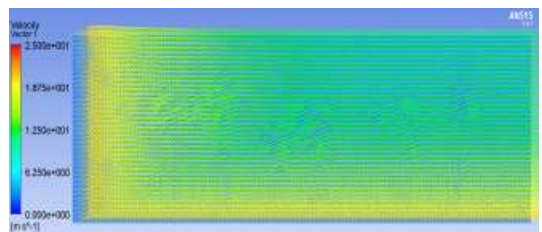


(d) Case 4

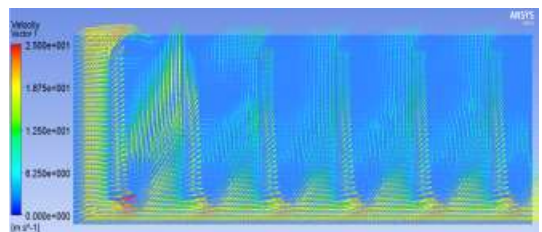
Fig. 5 Temperature distribution (Surface)

다음 Fig 6은 표면에서의 속도(Velocity)분포를 나타내고 있으며, 냉각핀이 없는 경우 최대 속도는 경계조건인 20m/s로 계산되었고, 냉각핀이 있는 형상의 경우 최대 26m/s까지 계산되었다. 이는 냉각핀으로 인한 핀 후부의 와류 때문인 것으로 예측된다.

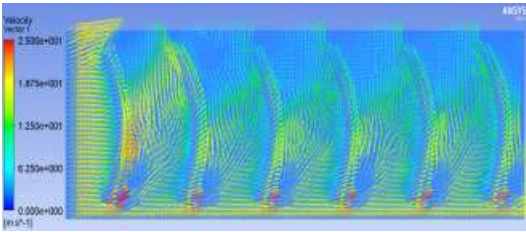
또한 냉각핀 형상에 따라 유동에 따른 핀 후부의 와류형성이 다르기 때문에 표면온도 또한 다른 것을 확인하였다.



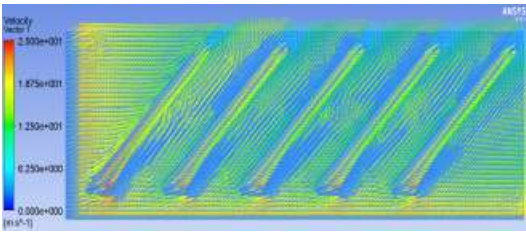
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

Fig. 6 Velocity distribution (Surface)

Fig 7은 시간에 따른 각 Case의 표면(Surface)에서의 시간에 따른 온도 상승률을 보여주고 있다. 냉각핀이 없는 Case 1은 초기에 급격한 온도상승률을 보이며 표면온도 또한 77.2℃까지 올라가는 반면, 냉각핀이 있는 Case 2~4의 경우 초기 온도상승률도 완만 상승률을 보이며, 표면온도 또한 낮은 것을 확인하였다.

Table 2는 각 Case의 표면에서 최고 온도 값을 나타냈으며, 온도 저감 효과에 대해서는 냉각핀이 없는 Case 1을 기준으로 하였다. 냉각핀이 있는 Case 2~4의 경우 냉각핀이 없는 Case 1에 비해 약 65~74%정도의 온도 저감 효과를 보이는 것을 확인하였다.

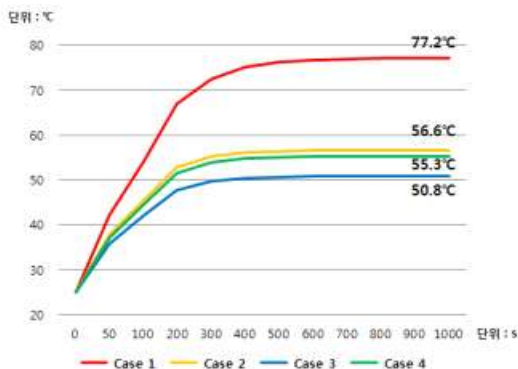


Fig. 7 Temperature rise (Surface)

Table 2 Temperature distribution (Surface)

| | Maximum temperature (°C) | Temperature reduction effect (%) |
|--------|--------------------------|----------------------------------|
| Case 1 | 77.19 | 100 |
| Case 2 | 56.60 | 73.3 |
| Case 3 | 50.78 | 65.8 |
| Case 4 | 55.25 | 71.6 |

3. 결론

본 연구는 유한요소법을 이용하여 타이어 사이드월의 온도 저감을 위한 냉각핀 형상에 따라 타이어 외부표면의 온도 저감 효과를 계산하였다. 해석결과 냉각핀이 적용된 경우 핀 형상에 따라 최대 65.8%에서 최소 73.3%까지 타이어 표면 온도가 저감됨을 확인하였다.

본 연구에서는 타이어 사이드월의 온도 저감 효과를 위해 사이드월에 냉각핀을 적용함으로써 표면 온도 저감 효과를 확인하였다. 이에 따라 최적화된 냉각핀을 적용함으로써 타이어 사이드월의 온도 저감 효과를 높이는 데에 기여할 것으로 예상되며, 나아가 실험계획법과 표면반응분석법을 통한 냉각핀의 최적화 형상개발에 기여할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 시행한 ‘차부품고급브랜드화 연구개발 사업’으로 수행된 연구결과임을 알려드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Ebbott, T. G., Hohman, R. L., Jeusette, J. P., and Kerchman, V., 1999, Tire Temperature and Rolling Resistance Prediction with Finite Element Analysis, Tire Science and Technology, Vol. 27, No. 1, pp.2~21.
- (2) Tian, T., Daniel, J., Robert E. S., Sergio, D. F., 2012, Numerical evaluation of the temperature field of steady-state rolling tires, Applied Mathematical Modelling, Vol. 38, Issue. 5-6, pp.1622~1637.
- (3) Lin, Y. J., Hwang, S. J., 2004, Temperature prediction of rolling tires by computer simulation, Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 67, Issue. 3, pp.235~249.
- (4) Park, C. G., Oh B. S., and Moon H. Y., 1999, Analysis of the Temperature Variation in a Rolling Tire, Transactions of KSAE, Vol. 7, No. 2, pp.202~209.
- (5) Lee, H. W., Cho, J. R., Jeong, W. B., Jeong, K. M., and Kim, K. W., 2011, Prediction Temperature Rise due to Hysteresis Loss of Rolling Tire, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp.677~678.
- (6) Jeong, K. M., Kang, S. J., Park, W. C., Kim, H. S., Kim, K. W., 2014, Finite Element Analysis for Temperature Distribution Prediction of Steady Rolling Tires with Detailed Tread Pattern, Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 1, pp.117~125.