

냉각핀 형상에 따른 타이어 사이드월의 표면온도 저감 효과 예측에 관한 연구

박재현* · 정성필*[†] · 정원선* · 전철균**

* 자동차부품연구원 · ** 목포대학교 기계공학과

A Study of the Prediction of the Temperature Reduction of Tire Sidewalls According to the Shape of the Cooling Fins

Jae Hyen Park*, Sung Pil Jung*[†], Won Sun Chung* and Chul Kyun Chun**

* Korea Automotive Technology Institute,

** Department of Mechanical Engineering, Mokpo Nat'l Univ.

(Received February 27, 2015 ; Revised January 13, 2016 ; Accepted January 18, 2016)

Key Words: Tire(타이어), Sidewall(측면), Cooling Fin(냉각핀), Finite Volume Method(유한체적법), Thermal Analysis(열분석), Turbulent Flow(난류유동)

초록: 타이어의 반복적 변형과 노면과의 마찰은 열발생을 야기하여 타이어의 온도를 상승시킨다. 이 온도 증가는 타이어 손상을 가져오는 요인이 될 수 있다. 이 같은 온도 상승을 억제하고자 타이어 측면에 냉각핀을 적용하고, 이에 따른 냉각 효과를 규명하는 것이 본 연구의 목적이다. 이를 위하여 8개의 냉각핀 형상이 검토 되었으며, 냉각핀 형상에 따른 사이드월 표면 온도 저감 효과를 수치해석적 분석을 통해 규명하였다. 또한 핀 후류에서의 와류에 의한 유동특성과 열전달특성을 비교하였다.

Abstract: The friction and deformation of a tire causes heat generation, which causes a temperature rise of the tire. This temperature rise can be a source of tire damage. The object of this study is to investigate the cooling effect of the application of a fin to the tire side to suppress the temperature rise. Eight different fin shapes were considered, and the sidewall surface temperature reduction owing to the cooling fin shape was numerically analyzed. In addition, the flow characteristics and heat transfer characteristics of the vortex of the pin rear were compared.

- 기호설명 -

1. 서 론

- 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

최근 자동차의 고성능화 및 경량화 되면서 차량의 동적 특성인 조향, 안전성, 승차감, 정숙성 향상에 대한 관심이 새롭게 대두되고 있다. 특히, 자동차에서 타이어는 노면과의 접촉을 유지하고 있는 유일한 부품으로써 차체의 하중을 지탱하면서 주행하므로 노면의 요철에 의해 현가장치를 통해 차체에 전달되는 충격을 완화시켜 좋은 승차감을 유지하도록 해준다. 타이어는 복합재료인 점탄성 물질로 이루어져있다. 타이어는 차량이 주행할 때 지면과의 지속적인 마찰에 의해 변형이 일어나게 된다. 변형 에너지의 일부는 차량

[†] Corresponding Author, spjung@katech.re.kr

하중에 의하여 반복적인 인장과 압축을 통한 이력현상(hysteresis)을 통해 열에너지로 전환되어 타이어 내부 온도 상승의 주요한 요인으로 작용한다. 이렇게 발생된 열은 전도와 대류를 통해 외부로 발산하게 되는데, 이 과정에서 특정 지점에 열이 축적되게 되면 타이어 부재 간의 이탈현상이 발생하게 되어 타이어 파손의 원인이 된다.

현재까지 타이어에서 발생하는 열 관련 연구는 다음과 같다. Ebbott⁽¹⁾는 재료 및 모델 변화에 따른 타이어의 회전 저항과 정상 상태의 온도 분포에 대하여 이론적 예측을 수행하고 이를 실험 자료와 비교하였다. Tian⁽²⁾은 주행 중 이력현상과 차량의 부하, 속도, 주행환경 변화에 따른 타이어의 가열온도를 이론적으로 해석하였다. Lin⁽³⁾은 수치해석적 연구를 통해 속도, 공기압력, 하중 변화와 히스테리시스 손실에 따른 타이어 온도 분포를 예측 하였다. Behnke⁽⁴⁾는 타이어와 노면과의 마찰에 따른 타이어 트레드 온도 증가를 이론적으로 분석하였다. Kim⁽⁵⁾은 타이어 내부표면과 공기의 온도와 열전달률에 따른 타이어 외부표면의 열적 경계조건에 대한 영향을 이론적으로 분석하였다. Cho⁽⁶⁾는 주행 및 설계 조건을 변화시켜 그에 따른 런플랫 타이어 사이드월의 온도 상승에 따른 파괴 특성을 실험을 통해 규명하였다. Park⁽⁷⁾은 주행 중인 타이어 내부의 온도분포를 이론적 방법으로 해석하였다. Lee⁽⁸⁾는 수치해석적 연구를 통하여 히스테리시스 손실에 따른 회전하는 타이어의 온도 상승을 예측하였다. Jeong⁽⁹⁾은 트레드의 패턴 형상 변화에 따른 온도 변화를 연구하였으며, 평면(smooth)타이어와 패턴(pattern)타이어의 온도를 비교하였다. Park⁽¹⁰⁾은 정상상태에서 회전하는 타이어에 대한 열발생률 및 열원을 계산하고, 속도변화에 의한 온도분포를 비교하였다. Song⁽¹¹⁾은 회전하는 타이어의 회전저항과 트레드 및 타이어 내부 온도분포를 수치해석적 연구를 통해 분석하였다. Kim⁽¹²⁾은 주행 중 타이어 트레드부의 온도 분포를 수치해석을 통해 분석하고 이를 적외선 열화상 촬영을 통해 검증하였다.

기존의 연구는 대부분 다양한 상황에서 가열된 타이어의 온도 분포 예측 및 실측에 관한 연구들이다. 타이어 트레드 형상 변화에 따른 가열 특성을 검토한 연구⁽⁹⁾는 있지만 본 연구에서 수행하고자 하는 타이어 측면 냉각핀 적용을 통한 온도 저감에 관한 연구는 수행한 사례가 없다.

본 연구는 사이드월에 적용할 수 있는 다양한 형태의 핀 형상을 설정하고 이들의 온도 저감 성능을 비교 검토하기 위하여 수치해석적 방법으로 열분석을 수행한다. 이 과정에서 냉각핀이 없는 경우를 포함한 다양한 형상의 핀에 대하여 핀 형상 변화에 따른 표면온도, 주변 유동 분포, 핀 후부 와류 특성을 검토한다. 이를 통하여 냉각핀을 적용하였을 때 어느 정도의 온도 저감 효과가 나타날 수 있는지 규명 하고자 한다.

2. 해석 모델 개발

2.1 해석 대상

본 연구에서 해석하고자 하는 현상은 발열체인 타이어 사이드월에 냉각핀이 적용되어 있고, 외부 대기 유동에 의하여 타이어 표면이 냉각되는 상황으로 상온에서 시작하여 차츰 가열되는 과정인 비정상 열전달 과정이다. 또한 타이어의 구조를 감안하면 3차원 난류 유동 및 전도/대류 열전달 과정이다.

2.1.1 타이어 형상 단순화

타이어는 일반적으로 복잡한 형상을 가지고 있다. 사이드월 냉각핀의 냉각효과를 분석하기 위해 사이드월을 단순화하였다. Fig. 1은 타이어 사이드월의 단순화 과정을 나타낸 것이다. 도넛형 타이어 곡면의 일부를 형성하는 사이드월을 평면으로 단순화시켰고, 이 평면 위에 냉각핀이 생성하였다. 핀의 길이는 15mm, 너비는 20mm, 높이

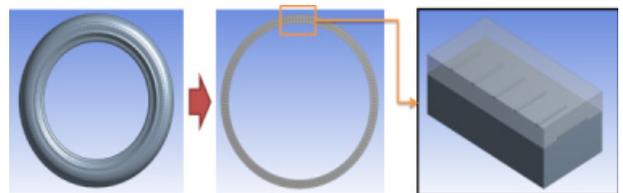


Fig. 1 Simple model of tire sidewall

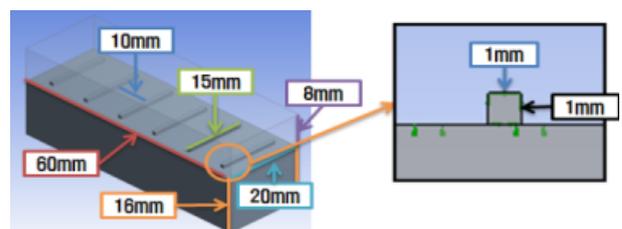


Fig. 2 Dimension for tire sidewall

는 1mm로 설정하였다. 핀과 핀 사이의 거리는 10mm로 설정하고, 냉각핀 6개 정도가 적용할 수 있는 60mm로 설정하였다. 핀의 높이와 폭은 1mm로 설정하였다. Fig. 2에 해석 대상의 형상과 크기를 나타내었다.

2.1.2 검토할 핀의 형상

본 연구는 냉각핀 형상 변화에 따른 온도 저감 효과 비교·검토가 목적이기 때문에 Fig. 3과 같은 총 8개의 냉각핀 형상에 대하여 해석을 수행하기로 하였다. 경우1은 핀이 없는 경우이고 수직선형, 오목 곡선형, 볼록 곡선형, 대각선형, 역대각선형, 음각 수직선형, 수평선형의 핀 형상에 대하여 해석을 하고자 한다.

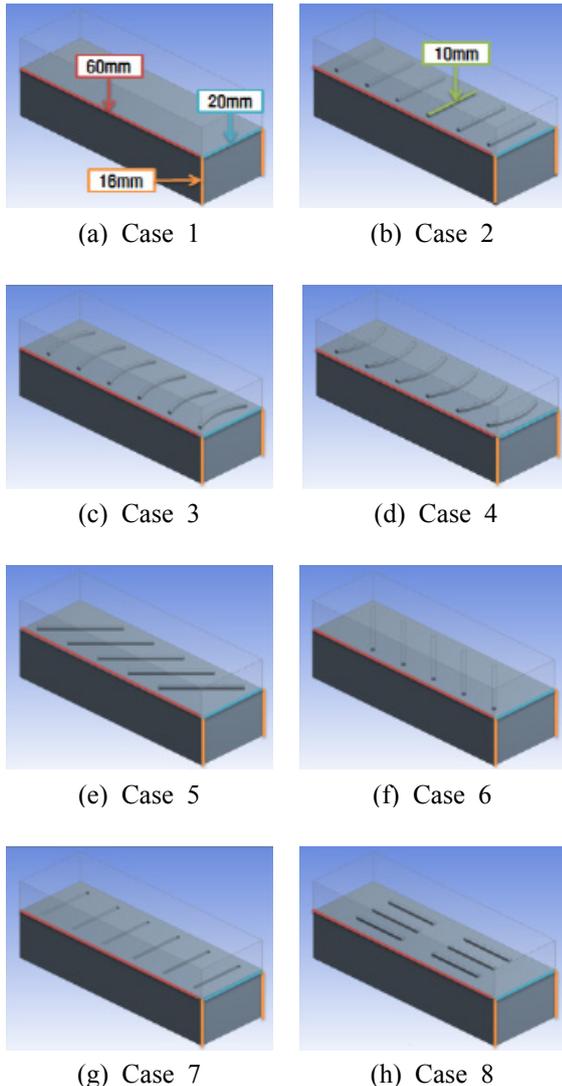


Fig. 3 Shape of cooling fins

2.2 지배방정식

본 연구에서 해석하고자 하는 현상은 타이어 사이드월과 외부의 대기 유동을 포함한 비정상상태 3차원 난류 공기유동과 고체 열전도 및 대류 열전달 현상이다. 이를 해석하기 위한 방정식^(13,14)들은 다음과 같다.

(1) 연속 방정식

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

(2) 운동량보존 방정식

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

(3) 에너지보존 방정식

고체 : $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$

유체 :

$$\rho c_\mu \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = -P \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} - \tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (4)$$

(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.

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

Table 1 Turbulent constant

C_1	C_2	C_μ	σ_k	σ_ϵ
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

Table 2 Result according to the number of nodes

Node number	120,000	240,000	480,000	600,000
Temperature(°C)	76.316	77.30	78.542	79.524
Velocity(m/s)	13.816	13.794	13.784	13.684
Time(h)	2	3.5	8.5	13

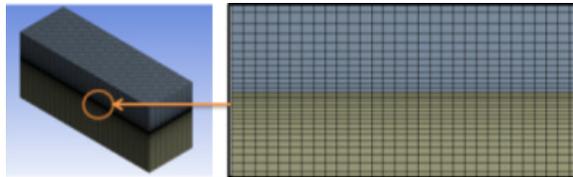


Fig. 4 Mesh at the interface

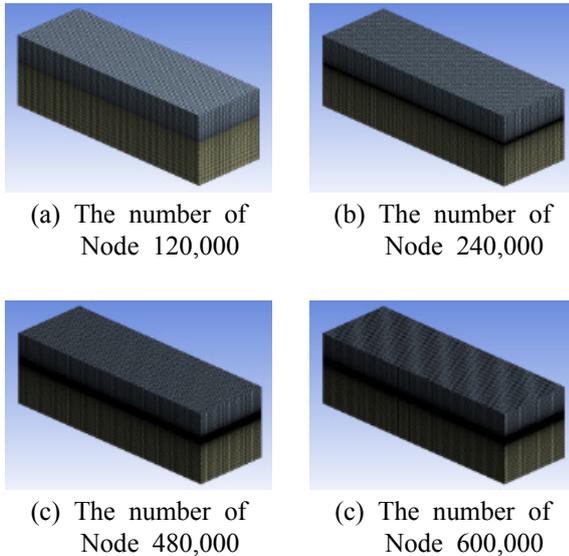


Fig. 5 Various nodes of the model

와류 점성 계수는 다음의 관계식을 사용한다.

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

본 논문에서 사용된 표준 k-ε 난류 모델 상수는 Table 1과 같다.

2.3 격자 생성

타이어(solid)와 대기(fluid)사이의 접촉면에서 대

Table 3 Material properties for tire & rubber

	Tire	Rubber
Density(kg/m ³)	1,218	1,100
Specific heat capacity(J/kg·K)	700	2,010
Thermal conductivity(W/m·K)	257	0.13
Reference State	Temperature(°C)	25
	Enthalpy(J/kg)	0
	Entropy(J/kg·K)	0

Table 4 Material properties for air at 25°C

	Air at 25°C	
Density(kg/m ³)	1.185	
Specific heat capacity(J/kg·K)	1.0044e+03	
Thermal conductivity(W/m·K)	2.61e-02	
Reference State	Temperature(°C)	25
	Enthalpy(J/kg)	0
	Entropy(J/kg·K)	0

류열전달이 활발하게 이루어지므로, 경계면 부근의 격자(mesh)는 조밀하게 구성하여 계산의 정확성을 높이고자 하였다. 다음 Fig. 4는 경계면 부근의 조밀한 격자를 나타낸다. 본 연구에서는 육면체(hexahedron) 격자를 이용하였다.

격자점(node)의 수를 변경해가며 해석을 수행한 결과, 온도와 속도 값의 오차범위가 3% 이내이고 해석 시간 대비 수렴성이 좋은 격자 수 24만개가 적정한 것으로 판단되며 Table 2와 Fig. 5에 나타내었다.

2.4 물성치

본 연구에서 적용되는 냉각핀은 타이어의 외부에 부착되는 것이 아닌 금형설계 변경을 토대로 적용되는 설계기술로써 핀의 물성치는 타이어와 동일하게 설정하였다. 다음 Table 3은 타이어와 고무의 물성치를 나타낸다. 타이어는 고무와 코드, 철사 등의 복합재료로 구성되어 있기 때문에, 천연고무의 물성치와 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 유동 영역의 25°C 공기의 물성치를 Table 4에 나타낸다.

2.5 해석 조건 및 계산 수행

타이어 온도 상승을 검토하기 위해 비정상상태로 해석해야 하므로 초기 조건의 설정이 필요하

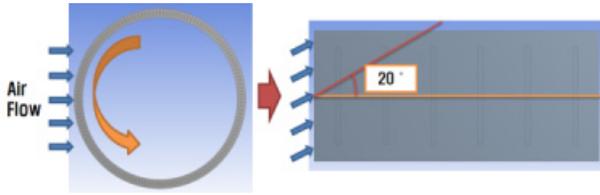


Fig. 6 Simplified model of tire rolling

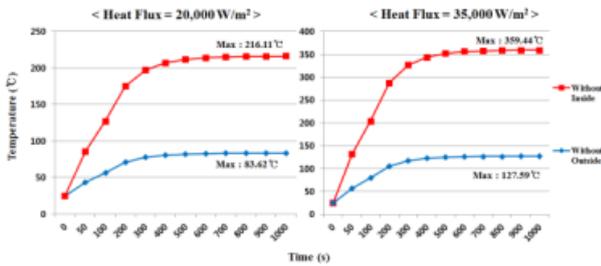


Fig. 7 Temperature rise due to the heat flux

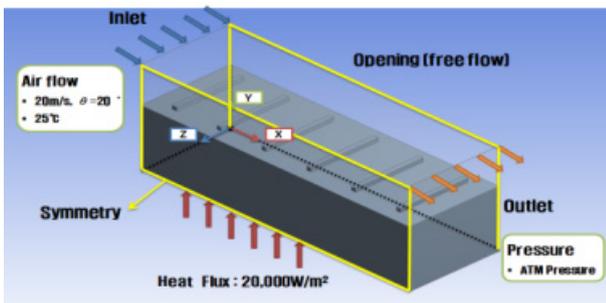


Fig. 8 Boundary conditions of model (aerial view)

다. 최초 타이어 사이드월 및 대기의 온도는 상온 25°C로 하였다. 차량의 주행 환경을 반영하기 위해 정지된 대기 속을 자동차가 70km/h의 속도로 주행하고 있는 것으로 가정하였다. 자동차 주행 속도를 타이어 회전 속도로 환산하여 20m/s의 속도로 타이어가 움직인다고 설정하였다. 또한, Fig. 6과 같이 타이어의 회전 효과를 감안하여 공기의 유입각을 20°로 입구의 경계조건을 설정하였다. 출구 조건의 경우 타이어 후부에 별다른 장애물이 없다는 가정을 통해 대기압 상태의 경계조건을 설정하였다.

타이어 업체가 제공한 자료⁽⁶⁾에 의하면 주행시 타이어 내부는 200~230°C, 표면은 75~85°C이기 때문에 이 같은 조건을 충족하는 내부 가열 열유속을 찾기 위해 해석을 수행하였다. Fig. 7의 해석 결과를 토대로 타이어 내부로부터의 열유속은 20,000W/m²로 설정하였다.

타이어 표면으로부터 멀리 떨어진 상부면은 대

기 자유흐름의 개방상태(opening)로 설정하였다. 본 해석모델의 경우 전체적인 타이어 형상에서 사이드월만 추출한 형태로 옆면은 타이어가 연속된다. 때문에 해석모델의 옆면의 경계조건은 대칭(symmetry)을 부여하였다. 이 같은 해석 조건과 더불어 해석 영역의 좌표계는 Fig. 8과 같이 X, Y, Z 축으로 설정하였다.

계산은 전산유체역학(CFD) 상용코드인 ANSYS CFX version 14.0을 사용하였고 HP Z800 워크스테이션(8 core, 32G RAM)을 이용하였다. 가열 개시 후 1000초에 이를 때까지 해석을 수행하였으며 1초 단위로 계산하였다. 잔류 생성(residual source)항 함 10e-04에서 수렴하도록 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

다음 Fig. 9는 타이어 및 유동 상태가 정상상태에 도달했다고 판단되는 1000초 경과 시의 표면에서의 표면 부근의 속도분포를 나타낸다. 경우1은 방해물이 없기 때문에 유동의 간섭이 없어 단순한 유동을 보여주고 있다. 반면, 경우2~8은 냉각핀으로 인해 핀의 전면에 부딪힌 유동이 유속이 증가하면서 핀을 통과하는 것이 나타난다. 이는 핀의 돌출 높이만큼 유도면적이 감소하면서 나타나는 현상으로 파악된다. 냉각핀으로 인한 핀 후부의 와류를 확대하여 Fig. 10에 나타낸다. 경우4는 경우3에 비해 핀 후부에서 더 빠른 유동이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이는, 핀의 형상이 핀 사이로의 공기유입을 원활하게 하는 형태이기 때문에 핀 사이로 유입되는 유동이 핀을 따라 중심부까지 원활히 진행되어 유동특성이 좋은 것으로 판단된다. 이로부터 핀의 받음 형상이 유동특성에 영향을 미치며, 그에 따라 표면온도 또한 영향을 받을 것으로 판단된다. 경우5는 경우4와 마찬가지로 핀의 형상이 유입되는 유동을 원활히 진행할 수 있게 하는 형태임을 확인할 수 있고, 경우6은 핀의 형상 때문에 유입되는 유동이 사이드월의 중심부까지 원활히 진행할 수 없는 것을 확인할 수 있다.

경우7은 오목하게 파인 형상으로 파인 부분을 통과하면서 유동면적확대에 따라 유속이 느려지고 이 영향으로 인해 핀 후부의 유속이 다소 느려진 것을 확인할 수 있다. 경우8은 유입되는 유동은 원활히 중심부까지 진행되는 것을 확인할

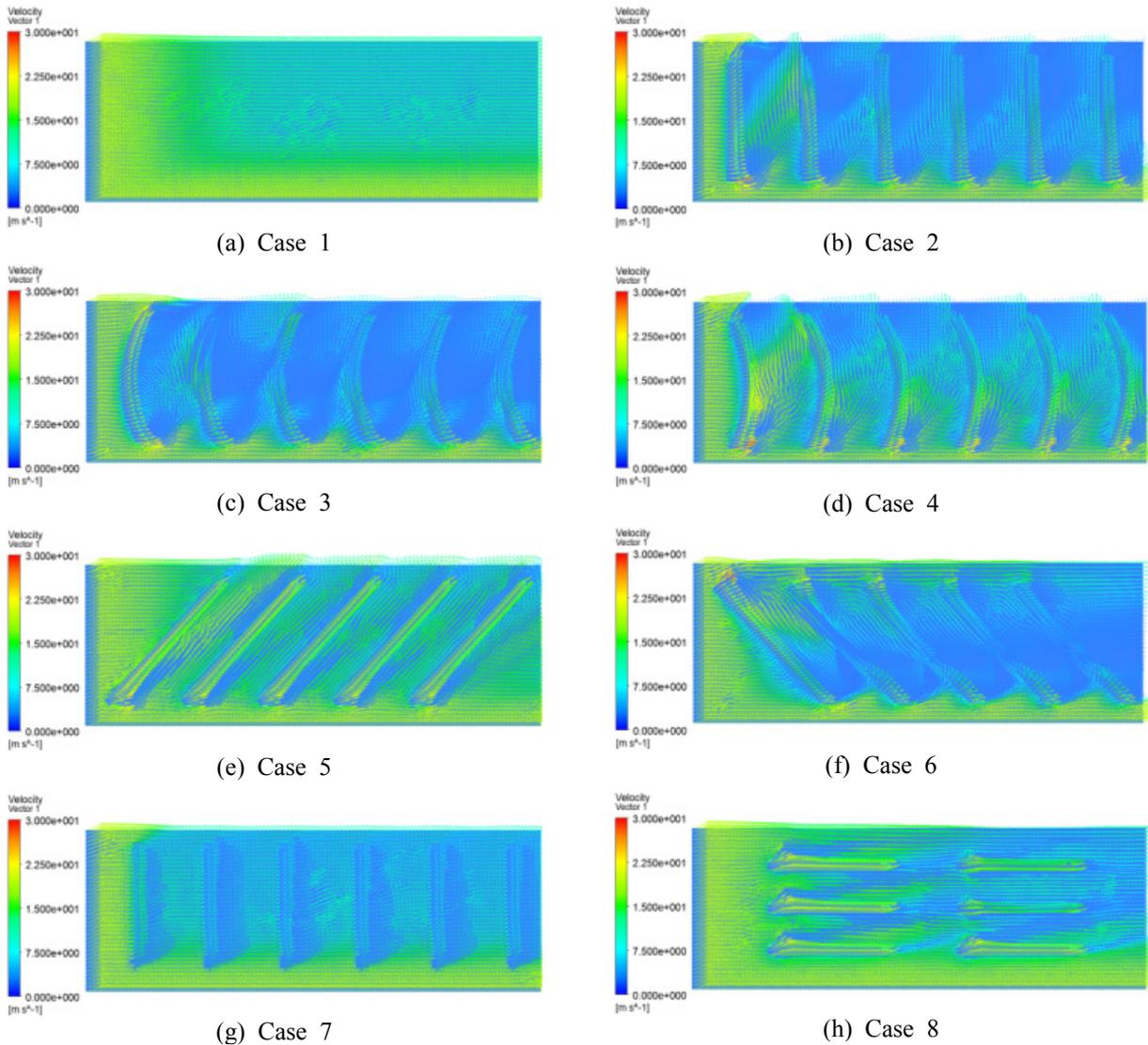


Fig. 9 Velocity distribution (surface)

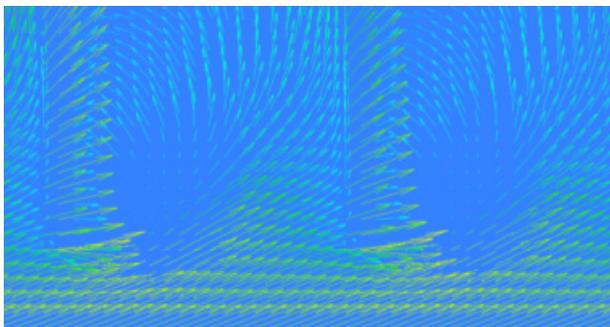


Fig. 10 Velocity distribution of Case 2 (detail view)

수 있으나, 핀의 전면부의 면적이 작아 난류 형성이 제대로 이루어지지 않는 것으로 확인된다.

다음 Fig. 11은 타이어 및 유동 상태가 정상상

태에 도달했다고 판단되는 1000초 경과 시의 표면에서의 표면의 온도분포를 나타낸다. 경우1은 냉각핀이 없는 단순한 형태의 온도분포이다. 반면, 경우2~8은 냉각핀이 없는 모델에 비해 전체적인 온도분포가 낮은 것을 확인할 수 있으며 이는 냉각핀으로 인해 난류형성으로 인한 핀 후부에 와류가 형성되어 대류열전달이 촉진되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 유동 방향에 대하여 오목한 곡선 형상을 가지고 있는 경우4가 경우3에 비해 상대적으로 온도분포가 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 핀의 형상에 따른 난류 형성은 작지만 비교적 큰 유속으로 핀 사이 영역을 통과하면서 대류열전달이 촉진된 결과로 생각된다. 또한 경우5와 경우6을 비교해보면 단순히 핀의

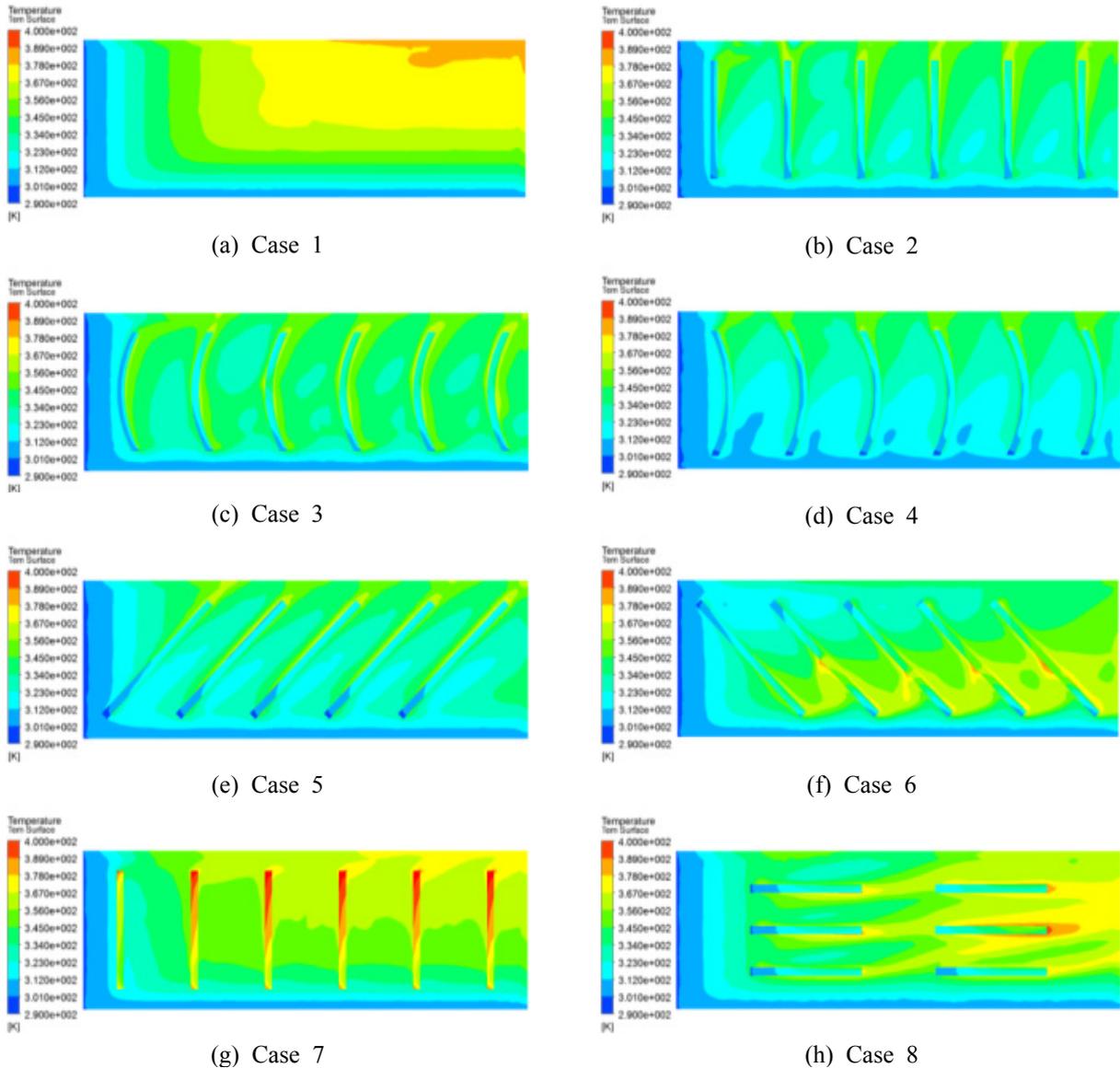


Fig. 11 Temperature distribution (surface)

형상이 유동에 장애가 된다고 해서 핀 후부의 온도 특성이 좋다고 판단할 수 없음을 보여주고 있다. 경우7은 내부에서 전도되는 내부열에 대해 외부 유동이 충분한 영향을 미칠 수 없음을 보여주고 있다. 경우8은 핀의 길이방향이 유동 방향과 수평에 가깝기 때문에 유입되는 유동에 의한 간섭이 작아 난류유동 및 와류가 잘 형성되지 않아 다른 형상에 비해 온도 저감 효과가 낮음을 확인할 수 있다. 또한, 핀 후부에서 국부적인 높은 온도 영역을 확인할 수 있다. 핀 후면의 온도를 확인해본 결과 각 형상의 평균 약 71℃로 이는 냉각핀이 없는 형상의 표면 평균 온도와 유사한 온도로 확인된다. 때문에 핀 후부의 국부적인

온도영역에 의한 타이어 부재의 이탈에 대한 안전성은 향상 되었다고 판단된다.

Fig. 12는 각 경우 표면에서 시간에 따른 온도 상승을 보여주고 있다. 온도 값은 해석 영역의 전체 표면에 대한 평균값으로 나타내었다. 해석 결과 냉각핀이 없는 경우1과 오목하게 파인 형상인 경우7은 초반에 다른 경우에 비해 급격한 온도상승률을 보이며, 표면온도 또한 77.2℃와 75.8℃까지 올라가는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 경우1과 경우7을 제외한 나머지 경우는 초반의 표면 온도상승률은 상대적으로 낮은 것으로 나타난다. 또한, 경우3, 6, 8은 최고 온도 60℃ 이상으로 나타났지만, 냉각핀이 없는 경우1에 비해서는

Table 5 Temperature comparison

		Maximum temperature (°C)	Temperature reduction effect (%)
Surface	Case 1	77.19	0
	Case 2	56.60	26.7
	Case 3	61.08	20.9
	Case 4	50.78	34.2
	Case 5	55.25	28.4
	Case 6	64.18	16.9
	Case 7	75.83	1.8
	Case 8	69.07	10.5

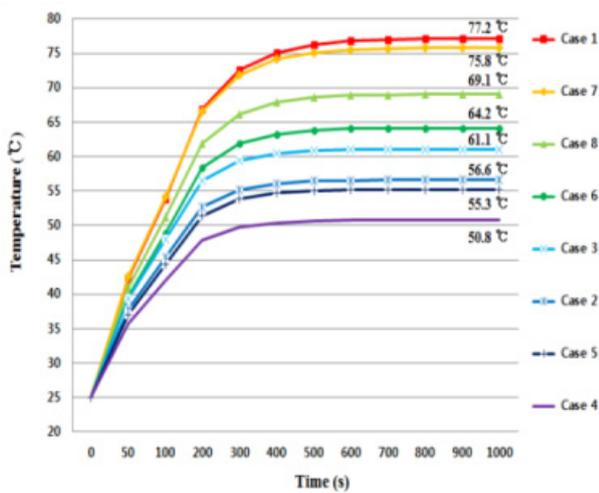


Fig. 12 Temperature increase curve of surface

낮게 확인되었다. 경우2, 4, 5는 60°C이하로 표면 온도가 저하되었음을 확인할 수 있었다. 전체적으로 냉각핀이 적용된 경우2~8은 냉각핀이 없는 모델에 비해 표면온도가 낮게 나타났으며, 이는 타이어 사이드월에 냉각핀을 적용함으로써 온도 저감 효과를 볼 수 있음을 나타내는 것으로 생각된다.

Table 5는 각 경우 표면 및 내부 발열면에서의 최고온도와 온도 저감 효과를 나타내었다. 냉각핀에 의한 사이드월의 온도 저감 효과에 대해서는 냉각핀이 없는 경우1을 기준으로 비교하였다.

4. 결 론

본 연구는 타이어 사이드월에 냉각핀을 적용하였을 때 나타나는 타이어 냉각 효과를 검토하기 위한 것이다. 이를 위하여 다양한 냉각핀 형상을 설정하고 이들의 열전달특성과 냉각 효과를 수치

해석적 방법으로 분석하였으며, 여러 경우에 대하여 표면온도를 비교·분석하였다. 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 타이어 사이드월에 냉각핀을 적용할 경우 핀의 돌출 높이만큼 유도면적이 감소하면서 유속이 증가해 난류형성을 유도하고, 이로 인한 핀 후부에 와류형성이 대류열전달을 촉진시키는 것으로 판단된다.

(2) 핀의 전면부 형상에 따라 유입되는 유동을 사이드월의 중심부까지 원활하게 진행시키는 요인이 표면온도 저감 효과에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(3) 핀 후부에 국부적인 높은 온도영역이 확인되지만, 약 71°C의 온도영역으로 냉각핀이 없는 형상의 표면온도보다 낮기 때문에 온도 상승에 의한 부재이탈 없을 것으로 판단된다.

(4) 타이어 사이드월에 냉각핀을 적용할 경우 핀의 형상에 따라 냉각핀이 없는 형상 대비 최고 34%의 온도 저감 효과를 볼 수 있을 것으로 예측되었다.

(5) 냉각핀을 이용한 사이드월의 온도 저감 효과는 타이어 발열을 제어함으로써 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 후속 연구로 타이어 회전 및 타이어 변형을 감안한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 지원으로 수행 중인 ‘모터스포츠 타이어 핵심 기술 확보 및 F1급 초고성능 타이어 개발’로 수행된 연구결과임을 알려드립니다.

참고문헌 (References)

(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. and Sergio, D. F., 2012, “Numerical Evaluation of the Temperature Field of Steady-State Rolling Tires,” *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, No. 5-6, pp. 1622~1637.

- (3) Lin, Y. J. and 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) Behnke, R. and Kaliske, M., 2015, "Thermo-mechanically Coupled Investigation of Steady State Rolling Tires by Numerical Simulation and Experiment," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 68, pp. 101~131.
- (5) Kim, Y. J., 1998, "Thermal Analysis of the Air Inside a Rolling Deformed Torus," *International Journal of Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 12, No. 4, pp. 688~693.
- (6) Cho, K. Y., Kim, G. H. and Cho, C. T., 2009, "Failure Effect Analysis of Run Flat Tire Depend on Driving and Design Conditions," *Annual Conference of KSAE*, pp. 1657~1661.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Jeong, K. M., Kang, S. J., Park, W. C., Kim, H. S. and 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.
- (10) Park, H. C., Youn, S. K., Song, T. S. and Kim, N. J., 1997, "Analysis of Temperature Distribution in a Rolling Tire due to Stain Energy Dissipation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 21, No. 5, pp. 746~755.
- (11) Song, T. S., Yu, H. J. and Park, B. G., 1998, "Rolling Resistance and Temperature Distribution Simulation of Tires," *Transactions of KSAE*, pp. 63~68.
- (12) Kim, J. Y., Lee, K. Y., Yang, D. J., Kim, C. H. and Kwac, L. K., 2002, "Analysis on Temperature Distribution of Tire Tread Part in a Running Infrared Thermal Vision Camera," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, pp. 134~139.
- (13) Holman, J. P., 2010, *Heat Transfer 10th Edition*, Textbooks, Paju, pp. 257~398.
- (14) Kim, Y. S., 1997, *Continuum Mechanics*, Bando Publisher, Seoul, pp. 35~243.