

화물열차용 제륵자의 열유동 해석

Numerical Analysis on Heat Transfer and Fluid flow of Brake Shoe for Freight Car

남성원(1)

Nam Seong-Won

ABSTRACT

Numerical simulation is conducted to clarify the heat transfer and fluid flow characteristics of brake shoe for freight car. High order up-wind scheme for governing equations, k-epsilon turbulent model and SIMPLEC algorithm based on finite volume method are used to solve the physical shoe model. The governing equations are solved by TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm) with line-by-line method and block correction. From the results of simulation, the characteristics of cooling pattern is strongly affected by the velocity of train and the material of shoe. The face lift of shoe affects on the temperature distribution of rear surface of shoe as well as the front surface of that. Due to the grooves in shoe, it will be expected to cool the frictional heat and result in the reduction of maintenance efforts.

1. 서론

철도를 이용한 수송시스템은 대량수송, 에너지 절약, 저공해, 안전성 및 정시성 등의 많은 장점을 지니고 있다. 우리 나라에서도 과거 도로 위주의 편중된 투자는 자동차의 수요 급증으로 도로 정체, 배기 가스로 인한 환경 오염 등의 문제를 야기시켰다. 이러한 여러 가지 요인으로 인하여 철도에 대한 투자 인식의 폭이 넓어지고 있으며, 최근에는 고속전철의 도입뿐만 아니라 각 대도시에서의 지하철 노선 증대와 기존선의 고속화로 철도의 르네상스를 맞이하고 있다.

한편, 철도차량의 속도향상에 따른 고속화가 진행되면 이와 병행하여 차량의 제동성능 또한 향상되어야만 속도향상에 대비한 안전성이 확보된다고 할 수 있다. 화물열차의 제동장치는 주로 차륵담면에 제륵자가 접촉하여 필요한 제동력을 확보하는 구조로서, 차륵-제륵자의 마찰력에 의존한다. 이와 같은 두 상대 마찰재는 설계된 제동력을 얻기 위하여 접촉하였을 때 적절한 점착 계수를 유지하여야 함은 물론 상대 마찰재에 대한 내마모성과 같은 유지보수성이 양호하여야 한다. 일반적으로 제동 작용시, 차륵담면 및 제륵자 접촉면에서는 고온의 마찰열이 발생하므로 찰상, 고온의 열반점 또는 제륵자 균열로 인하여 제륵 내구성을 떨어뜨릴 뿐만아니라 점착력의 저하로 제동거리가 길어지는 등의 중대한 문제점을 야기시킨다[1]. 따라서, 이들 부품의 설계시에는 마찰열을 가능한한 축적시키지 않도록 여러 가지 고안이 적용되어 왔다. 제륵자의 마찰면에 흠을 두는 것은 마찰시 발생하는 미세입자들을 배출시켜 줄뿐만 아니라 방열면의 증대 및 압부력의 균등한 분배 등과 같은 역할도 한다. 본 연구에서는 제륵자 형상 결정에 있어서 마찰면의 흠과 제륵자 재질이 온도분포에 끼치는 영향에 대하여 전산해석을 통하여 정량적 및 정성적인 특징을 분석하였다

(1) 한국철도기술연구원, 선임연구원

2. 지배방정식

그림1은 본 연구에서 사용한 제륜자의 형상을 나타낸 것으로 흙의 유무와 제륜자 재질 및 주위 유동 속도변화에 대한 온도분포 변화를 시뮬레이션하였다.

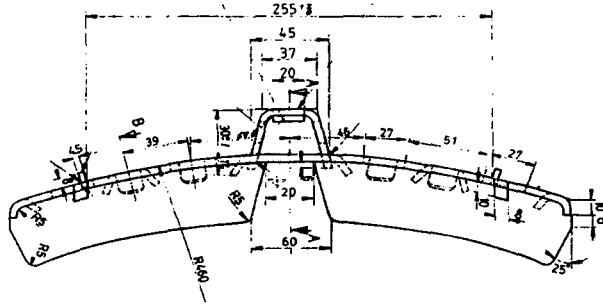


Fig. 1 Dimension of Shoe

한편, 열유동과 관련된 지배방정식으로는 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식으로 구성되며 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다[2,3].

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] + S \quad (3)$$

차륜-제륜자의 마찰로 인하여 발생하는 발열 문제는 접촉면 주위의 유동뿐만 아니라 마찰재 내부의 열전도 문제도 함께 고려하여야 하므로 고체벽면의 열전달과 합성하여서 해석하여야 한다. 열생성이 있는 경우, 고체벽면의 열전도 방정식은 아래 식으로 주어진다.

$$\rho_w c_w \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_w \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q \quad (4)$$

또한, 차륜-제륜자와 같이 해석 대상물의 형상이 복잡한 구조에서는 유동 형태가 일반적으로 난류이므로 레이놀즈 응력에 대한 적절한 모델링이 필요하다. 난류모델로 많이 이용되고 있는 k-ε 난류 모델은 레이놀즈 응력이 평균속도 구배에 비례한다는 Boussinesq가설과 이 응력이 모든 방향에 대하여 등방향 길이를 갖는다는 가정에 기초한 모델로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho (P - \epsilon) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j \epsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho \frac{\epsilon}{k} (c_1 P - c_2 \epsilon) \quad (6)$$

$$P = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

지배방정식의 계수는 각각 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $c_\mu = 0.09$ 로 주어진다.

3. 수치해법

그림 2 및 표1에 계산에 사용한 제륜자 모델과 재질의 특성을 나타내었다. 제륜자와 차륜과의 접촉면에 온도 경계조건(573K)을 주었으며, 차량속도에 해당하는 풍속(60km/h)을 지정하였다. 이 산화된 방정식의 해석에는 상용 열유체 해석 프로그램인 Fluent Ver.5.5을 이용하였다. 계산에 사

용된 격자는 Tetra-hedral 비정렬격자 약 5만개로 구성하였으며 운동방정식과 에너지방정식은 QUICK, 난류방정식은 상류차분을 사용하였으며 압력방정식은 SIMPLEC 알고리즘 이용하였다. 연속방정식 및 운동방정식은 1.0×10^{-3} , 에너지방정식은 1.0×10^{-6} 을 수렴판정 조건으로 하여 정상상태의 1회 계산에 SGI Indigo-2 기종을 사용하여 약 3시간이 소요되었다. 표1에서의 같이 합성재료자는 주철재료자에 비하여 비열은 8.7배, 열전도율은 0.6배로서 열전달이 잘 이루어지지 않는 재질임을 알 수 있다.

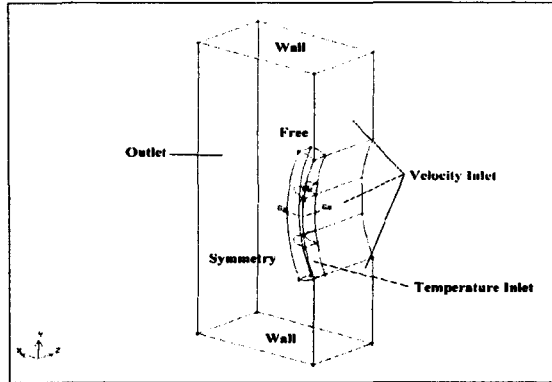


Fig. 2 Calculation Model

Table 1 Thermal Properties of Shoe

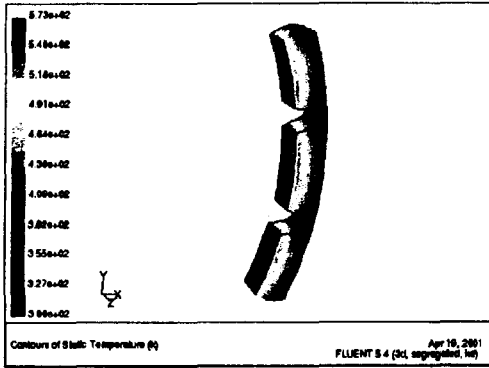
| | Density (kg/m ³) | Specific Heat (J/kgK) | Thermal Conductivity (W/mK) |
|-----------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Cast Iron | 7200 | 120 | 12.5 |
| Resin | 2010 | 1040 | 7.5 |

4. 결과 및 고찰

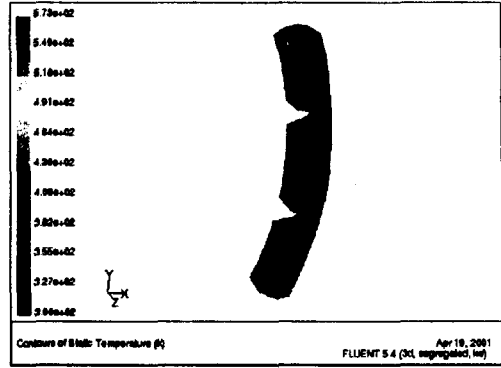
그림 3은 재료자의 3차원 온도분포 결과를 나타낸 것이다. 차량속도 60km/h에 해당하는 레이놀즈수 4.0×10^5 에서는 재료자 표면에서의 활발한 대류 열전달에 의하여 고온영역이 그다지 크게 형성되지 않았으나, 차량속도 0.1km/h에 해당하는 레이놀즈수 2400에서는 재료자 전체가 고온영역으로 형성됨을 알 수 있다. 이는 주철재료자와 합성재료자의 열확산율 $\alpha = k/\rho c_p$ 을 비교하면 각각 1.446×10^{-5} , 3.587×10^{-6} 으로 4배 정도의 차이가 나기 때문으로 사료된다. 즉, 재료자 접촉면에 주어진 동일한 온도입력 조건에 대하여 주철재료자 내부의 온도 확산이 더 잘 이루어진 것으로서 그림(c) 및 (d)의 경우가 합성재료자 결과인 그림(a)(b)보다 고온영역이 넓게 분포되어 있다.

두 재질간의 온도 변화는 주위 공기의 유속이 큰 경우가 유속이 작은 경우보다 온도변화 차이가 증가하였다. 또한, 주위 공기의 유속이 작은 경우는 재료자의 표면에 비교적 큰 열유속이 분포되어 있음을 알 수 있다. 한편, 재료자 접촉면에 만든 홈은 마찰열의 방열측면에서 큰 역할을 담당함을 알 수 있다. 이는 주위유속이 큰 경우가 그 효과가 컸으며, 주위 유속이 작은 경우는 대류 열전달이 미약하여 홈이 방열측면에서는 큰 역할을 하지 못함을 알 수 있다. 주위 공기속도가 60km/h인 경우인 그림(a)(c)의 경우에서 보듯이, 접촉면을 중심으로 형성되는 고온영역은 홈 근방에서는 비교적 낮은 온도분포를 나타낸다.

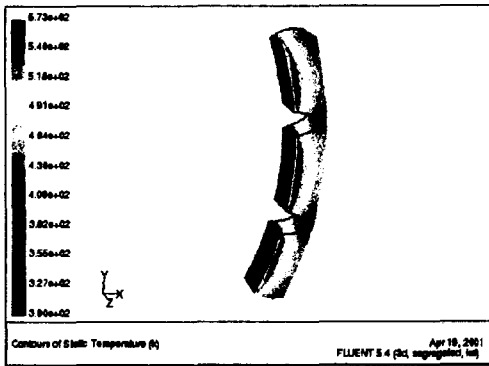
이와 같이 재료자 접촉면의 홈은 재료자 재질에 상관없이 주위 공기유동이 있는 상태에서는 방열측면에서 큰 효과를 발휘함을 알 수 있다.



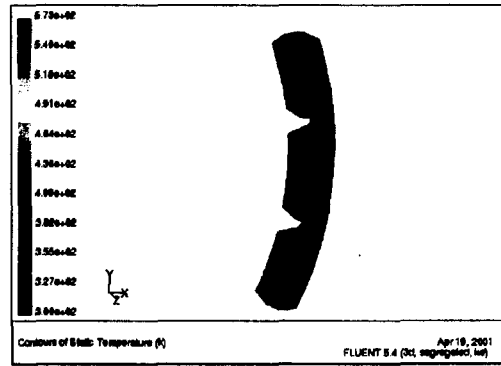
(a) resin shoe (60km/h)



(b) resin shoe (0.1km/h)



(c) cast iron shoe (60km/h)



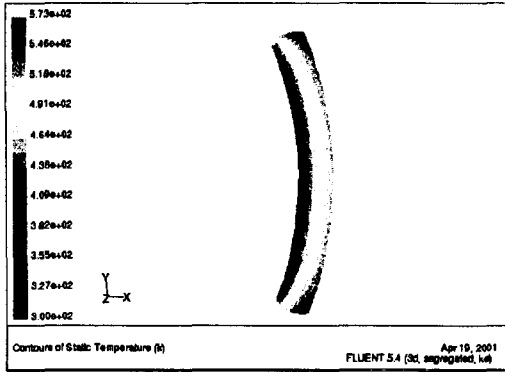
(d) cast iron shoe (0.1km/h)

Fig.3 3-D temperature Distribution of Shoe

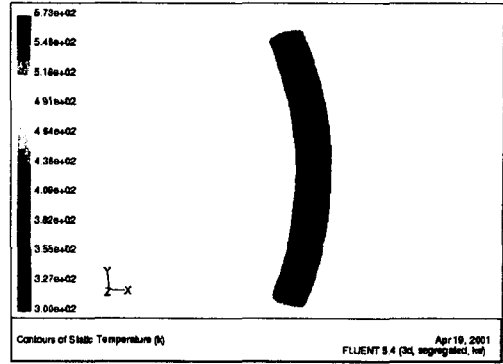
동일한 입력조건에 대하여 전반적으로는 합성 재료가 고온 영역이 작았으며, 이는 주위 공기 속도 크기에 관계없이 주철 재료가 낮게 나타났다.

그림4에 합성 재료의 속도별, 형태별 온도 분포를 나타내었다. 온도 분포는 재료의 중심 단면에 대한 것으로 흠의 유무 및 주위 공기 유속에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 흠이 없는 경우는 접촉면을 중심으로 고온 영역이 방사선 형태로 분포되고 있으나, 흠이 1개 또는 2개 있는 경우는 흠 근처에서도 저온 영역이 형성되어 전체적으로는 고온 영역이 줄어든 분포를 나타낸다. 주위 공기 유동 속도가 작은 (b)(d)(f)의 경우는 흠의 유무에 관계없이 고온 영역이 재료 전체에 걸쳐 형성됨을 알 수 있다. 국소 열전달계수가 $h \propto \sqrt{U_0}$ 또는 $\partial T / \partial x_{wall}$ 와 같이 주위 공기유속 또는 벽면에서의 온도 구배에 비례하므로 주위 공기속도가 작은 경우는 재료 표면에서의 대류 열전달이 미미하기 때문이다.

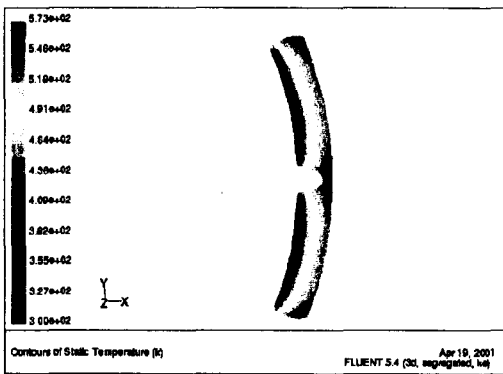
그러나, 실제 열차운용 상황을 고려하면, 열차속도가 10km/h에서는 레이놀즈수가 60000, 40km/h에서는 약250,000 이므로 열차속도가 0인 경우에 비하여 대류 열전달도 각각 3배, 6배로 증가될 것이므로, 흠이 있는 재료가 마찰열의 냉각측면에서는 적지 않은 효과가 있을 것으로 사료된다. 그러나, 재료 흠으로 인한 전체 마찰 면적의 감소로 단위면적당 부가열량이 많아지는 제한 조건이 있으므로 적절한 개수로 한정되어야하며, 이같은 역효과를 최소화하기 위하여, 흠 형상의 최적화와 재료 측면을 요철형상으로 하여 방열 면적을 증대시키는 방안을 생각할 수 있다.



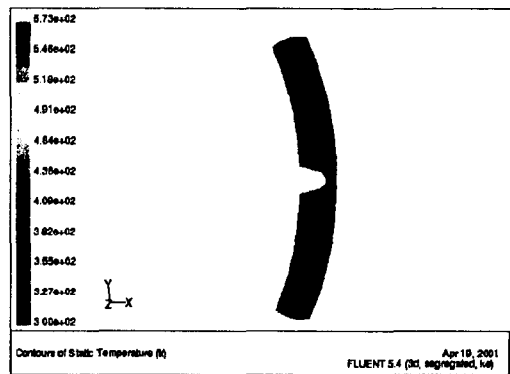
(a) normal (60km/h)



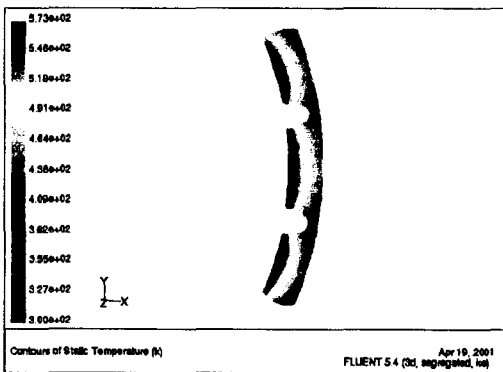
(b) normal (0.1km/h)



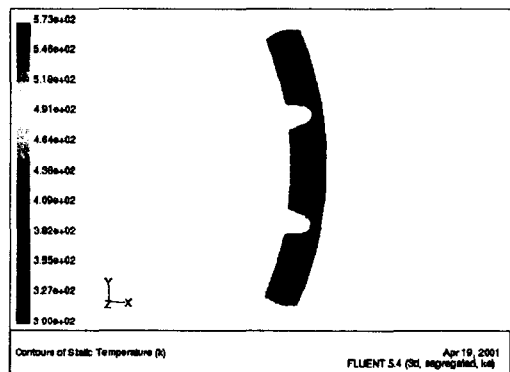
(c) one groove (60km/h)



(d) one groove (0.1km/h)



(e) two grooves (60km/h)



(f) two grooves (0.1km/h)

Fig.4 Section View of Temperature Distribution (Center)

그림5에 제류자 중심축을 따라 변하는 온도 분포를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 합성 제류자의 차량속도 60km/h에 대한 분포(○기호)가 가장 큰 온도 변화를 나타내었으며, 주철 제류자인 경우도 차량속도가 크면(△기호) 온도변화도 크게 나타났다. 그러나, 차량속도가 작은 경우 합성제류자(●기호), 주철제류자(▲기호) 모두 온도 변화가 미미하였으며, 접촉면의 온도가 제류자

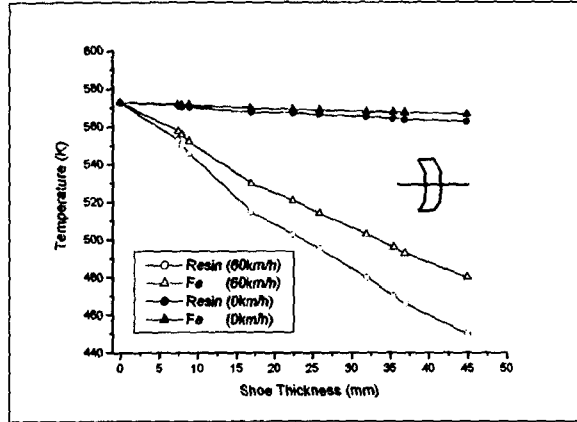


Fig. 5 Temperature Variation along Center Line

후부까지도 전달됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 제륜자 캘리퍼에도 고온의 영향이 끼치게 되어 유압 제동시스템 등에서는 작동유의 온도 상승으로 이어져 비등과 같은 현상을 일으키므로 요구되는 제동력을 얻지 못하는 문제점을 야기시키기도 한다. 이처럼, 철도차량의 마찰재의 온도는 가능한 한 공랭을 통하여 방열시키는 것이 바람직하며, 이는 제륜자의 최적형상 설계시에도 흡의 개수 및 형상, 제륜자 측면의 요철구조를 통한 냉각 면적의 확대 방안 등을 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 화물열차용 제동시스템의 제륜자의 열유동 특성에 대하여 전산해석을 하였다. 유한체적법의 해석에는 Control volume법에 기초한 SIMPLE알고리즘, 다중 회전 좌표계 및 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용한 상용 해석 프로그램인 Fluent를 이용하였다. 제륜자의 3차원 모델에 대한 해석을 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 제륜자의 재질과 차량속도별 3차원 온도분포 형상의 정성적 및 정량적으로 구하였다.
- (2) 흡이 있는 제륜자의 경우, 접촉면 근처의 흡 주위에서는 대류 열전달, 후부에서는 전도열전달을 통한 방열 효과가 있다.
- (3) 합성 제륜자는 주철 제륜자에 비하여 방열 특성이 양호하였으며 주위 유동이 큰 경우일수록 전열효과 크다.

참고문헌

- [1] N.Berseddiq et al (1996), Optimization of design of railway disk brake pads, Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol.210, pp.51-61
- [2] Fluent & Gambit User's manual FLUENT Inc.
- [3] S.V.Patankar (1980) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow