

철도차량용 제동 디스크-라이닝의 열유동 해석

Numerical Heat Transfer and Fluid Flow of Brake Disk-lining for Rolling Stock

남성원(1), 조장형(2)

Nam Seong-Won, Cho Jang-Hyung

ABSTRACT

Numerical simulation is conducted to clarify the heat transfer and fluid flow characteristics of brake disk-lining for rolling stock. Multiple rotational reference frame, k-epsilon turbulent model and SIMPLE algorithm based on finite volume method are used to solve the physical disk-lining model. The governing equations are solved by TDMA(TriDiagonal 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 grooves in lining. The face lift of lining affects on the temperature distribution of rear surface of lining as well as the front surface of that. Due to the grooves in lining, it will be expected to extend the maintenance life circle of lining.

1. 서론

최근, 고효율성, 저공해, 안전성 및 계획적 수송 측면에서 많은 장점을 지니고 있는 철도차량을 이용한 수송 시스템이 세계 각국에서 각광을 받고 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, 고속전철의 도입 뿐 만 아니라 각 대도시에서의 지하철 건설과 기존선의 고속화로 철도차량의 고속화가 급속하게 진행되고 있다.

한편, 철도차량의 속도향상에 따른 고속화가 진행되면 이와 병행하여 차량의 제동성능 또한 향상되어야만 속도향상에 대비한 안전성이 확보된다고 할 수 있다. 철도차량의 제동장치는 전기제동과 기계제동이 병용되고 있으나 최종적으로 차량을 정지시키는 제동 작용은 차륜-제륜자 또는 디스크-라이닝의 마찰력에 의하여 이루어지게 된다. 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, 마찰면에서는 고온의 발열을 동반하므로 디스크 및 라이닝에는 고온의 열반점 또는 균열로 인하여 제품 내구성을 떨어뜨릴 뿐만아니라 점착력의 저하로 제동거리가 길어지는 등의 중대한 문제점을 야기시킨다. 따라서, 이들 부품에 대한 설계시에는 마찰열을 가능한한 축적시키지 않도록 여러 가지 고안이 적용되어 왔다.[1] 그 일례로서, 디스크의 경우, 마찰면에서 전달된 열을 방열시키기 위하여 디스크 마찰면 내부에 핀을 설치하여 냉각이 쉽게 이루어지도록 하였으며, 핀의 형상 또한 초기의 방사형 구조에서

(1) 한국철도기술연구원, 선임연구원

(2) CD-adapco Korea(주), 부장

주위 냉각공기와의 접촉면적을 넓히기 위한 다양한 구조가 제안되고 있으며 라이닝측면에서는 재질 뿐만아니라 마찰면에 홈을 내어 냉각성능을 향상시키고 있다. 본 연구에서도 라이닝 형상 결정에 있어서 마찰면에 설계한 홈이 온도분포에 끼치는 영향에 대하여 수치 열유체 해석을 통하여 정량적 및 정성적인 특징을 파악하였다.

2. 지배방정식

그림1은 본 연구에서 사용한 라이닝의 형상을 나타낸 것으로 세로 방향으로 각각 2개, 가로방향으로 1개의 홈을 만들어 홈이 없는 모델과의 온도분포 변화를 시뮬레이션하였다.

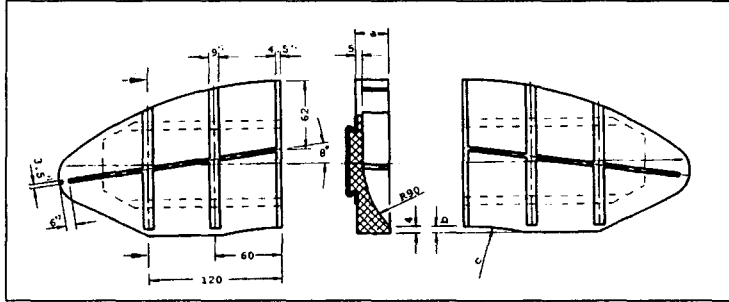


Fig. 1 Dimension of Lining

한편, 열유동과 관련된 지배방정식으로 화학적 반응이 없는 경우는 연속방정식, Navier-Stokes 방정식, 에너지방정식으로 구성되며 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다[2,3].

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

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

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

공기 제동시스템에서 디스크와 라이닝 사이의 마찰로 인하여 발생하는 제동시스템의 발열 문제는 장치주위의 유동문제뿐만 아니라 마찰재 내부의 열전도 문제도 함께 고려하여야 하므로 고체벽면의 열전달과 합성하여서 해석하여야 한다. 열생성이 있는 경우, 고체벽면의 열전도 방정식은 아래 식으로 주어진다.

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

제동시스템의 디스크-라이닝 주위의 열유동 문제와 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.

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

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

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

난류 지배방정식에 나오는 각 계수는 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $c_1=1.44$, $c_2=1.92$, $c_\mu=0.09$ 로 주어진다.

3. 수치해법

그림 2 및 3은 계산에 사용한 디스크와 라이닝의 3차원 모델을 나타낸 것이다. 디스크의 내부에 부착된 편 중심면을 좌우대칭 경계로 하였으며, 상하면은 캐도면과 차체하부에 해당되는 고체면으로 유입 및 유출은 차량 진행속도에 해당하는 60km/h와 자유 유출조건으로 각각 설정하였다. 또한, 라이닝과 디스크의 접촉면에는 마찰열 300℃가 일정하게 발생하는 것으로 가정하여 입력조건으로 부여하였으며, 차륜회전속도와 동일하게 회전하는 디스크에 대하여 다중회전 좌표계를 적용하여 해석하였다. 이산화된 방정식의 해석에는 상용 열유체 해석 프로그램인 STAR-CD Ver.3을 이용하였다. 계산에 사용된 격자점수는 약 20만셀로 구성하였으며 정상상태의 1회 계산에 SUN Ultra 170E 기종을 사용하여 수렴까지는 약 20시간이 소요되었다. 또한 표1에는 계산에 사용한 디스크와 라이닝의 열물성치를 나타내었다. 표1에서와 같이 디스크에 비하여 라이닝의 비열은 1.7배, 열전도율은 0.02배로서 열전달이 잘 이루어지지 않는 재질임을 알 수 있다.

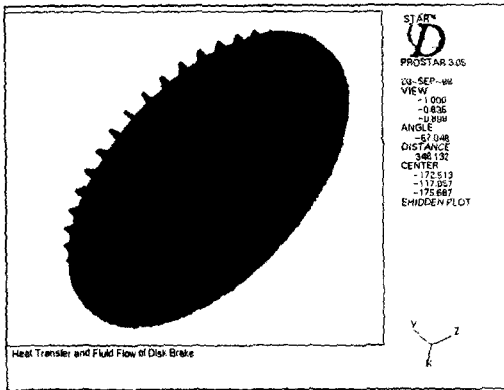


Fig. 2 Disk Model

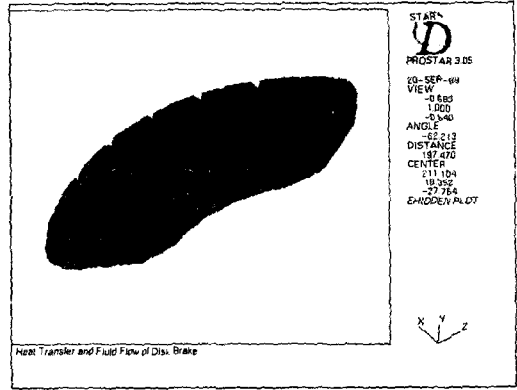


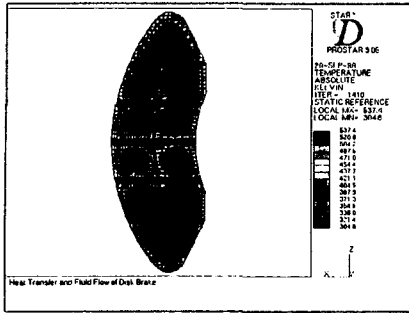
Fig. 3 Lining Model

Table 1 Thermal Properties of Disk and Lining[4]

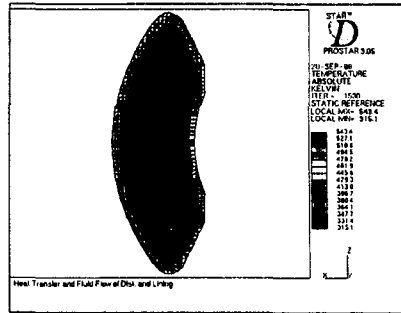
	밀도(kg/m ³)	비열(J/kgK)	열전도율(W/mK)
디스크	7200	504	52.5
라이닝	2200	840	1.05

4. 결과 및 고찰

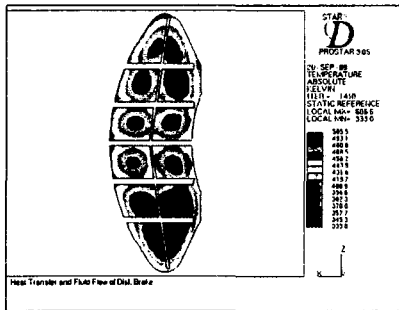
그림 4는 라이닝의 깊이별 단면에서의 온도분포를 각각 5, 13, 22, 30mm에 대하여 흡의 유무에 따라 비교한 것이다. 흡이 있는 라이닝의 경우, 흡으로 구획되어진 각 부분에서만 등온선이 형성되어 고온 분포의 확산 방지에 흡이 큰 역할을 담당하며, 이는 흡이 없는 부분의 단면 온도분포(g)에 까지 영향을 끼침을 알 수 있다. 일반 라이닝의 경우, 중앙부에 형성된 고온 영역은 단면 깊이가 22mm에서도 방열되지 못하고 동심원 구조를 이루고 있다. 이로부터 라이닝의 중앙부의 고온 영역에 대한 방열을 위하여는 흡에 의한 대류 방열이 적지 않은 효과가 있음을 알 수 있다. 계산 결과에서 상하부분에 온도분포의 차이를 보이는 것은 계산 모델에서 디스크의 회전방향이 반시계 방향으로 정하여져 있기 때문에 라이닝의 상부에 있는 흡에서는 주위의 차가운 공기가 흡입되는 통로가 되는 반면, 하부측의 흡은 흡을 지나며 열을 수수하여 온도가 상승된 공기가 배출되



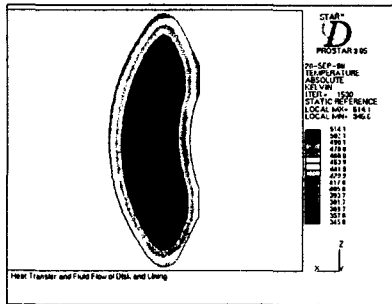
(a) grooved pad (5mm)



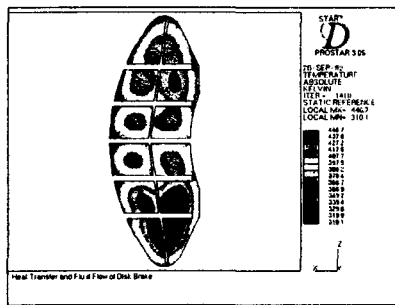
(b) normal pad (5mm)



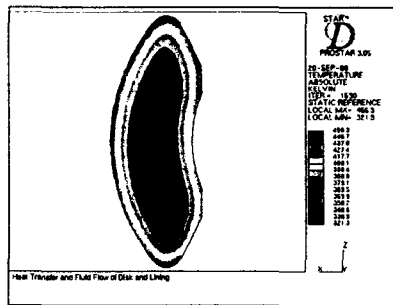
(c) grooved pad (13mm)



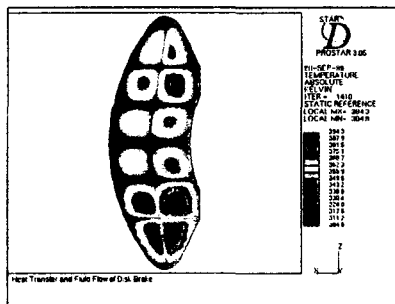
(d) normal pad (13mm)



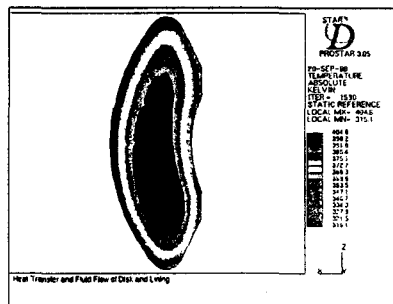
(e) grooved pad (22mm)



(f) normal pad (22mm)



(g) grooved pad (30mm)



(h) normal pad (30mm)

Fig. 4 Section View of Temperature Distribution

는 통로 역할을 하므로 냉각효과가 상부의 홈에 비하여 떨어지는데에 기인한 것으로 판단된다. 그러나, 본 해석에서는 디스크-라이닝 계로 유입되는 주위 공기의 흐름을 균일한 유동으로 가정하였으나, 실제의 차량 제동시스템 주위에서는 대차부위의 간섭 등으로 인하여 매우 복잡한 유동 형태를 나타내는 것으로 알려져 있으므로 이와 같은 다방향 유입유동을 고려하면 이러한 상하부의 온도 차이 등은 없어질 것으로 사료된다. 그림 5는 디스크-라이닝의 3차원 온도분포를 표시한 것으로 디스크 접촉면은 회전으로 인하여 원주방향으로 거의 동일한 온도를 형성함을 알 수 있다. 디스크 내부의 핀으로의 방열량이 차축 부위로의 전열보다 더 많음을 알 수 있는데 이는 핀의 경우 마찰판과 이음매없이 일체형 구조로 되어 있는 반면 디스크의 경우 차축에 볼트로 고정되어 있으므로 이종 재료간의 접촉저항이 부가되어 있으며 디스크의 림부 등을 통과하면서 열이 방출되므로 차축으로는 전열이 거의 이루어지지 않은 것으로 사료된다.

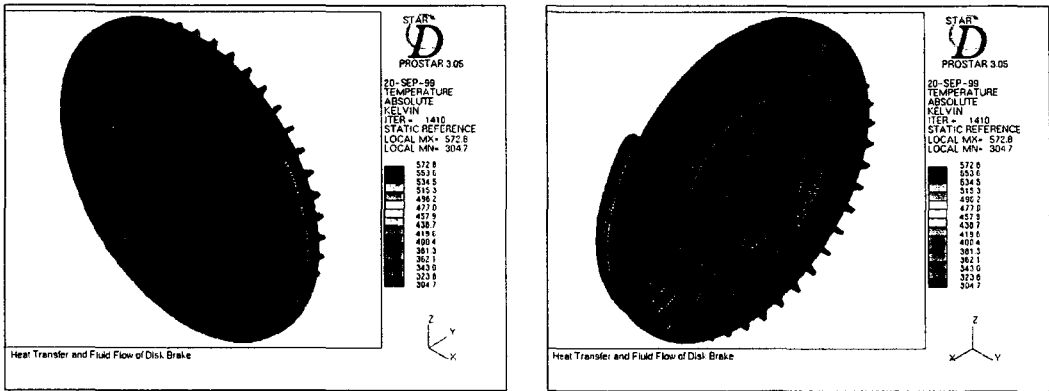


Fig. 5 3-D temperature Distribution of Disk-Lining

그림6은 홈이 있는 라이닝과 일반 라이닝에 대하여 접촉면과 후부의 온도 분포를 비교한 것이다. 그림에서 온도 분포 곡선의 중앙부에 함몰된 부분이 홈이 위치한 곳의 온도에 해당되는 것으로, 접촉면에서의 온도 곡선(▼기호) 후부에서의 온도 곡선(▽기호)보다 변화가 심한 것은 접촉면에서는 홈이 있는 반면, 후부에서는 고체면으로만 이루어져 있기 때문이다. 이로 부터 접촉면 근처에서는 홈을 통한 대류 열전달이, 후부에서는 전도 열전달이 각각 영향을 끼쳐 온도 강하가 이루어짐을 알 수 있다. 홈 주위의 온도를 제외하고는 후부에서의 모델간 온도차이가 접촉면에서의 온도차이보다 더 큰 것을 알 수 있는데, 이는 접촉면이 마찰 발열의 생성부위에 해당하므로

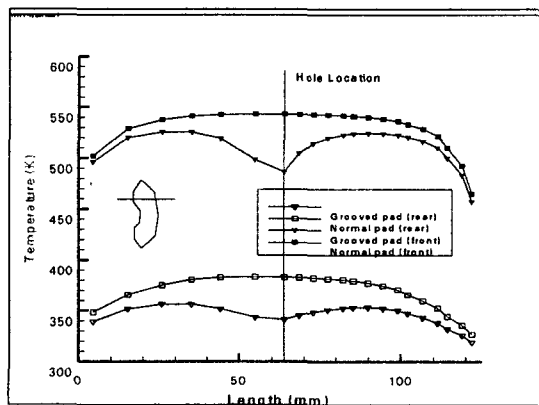


Fig. 6 Temperature Distribution on Contact and Rear Surface

홈에 의한 방열 효과가 후부에 비하여 작게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 디스크의 외주 쪽에 해당되는 라이닝 우측 온도가 좌측 온도에 비하여 낮은 것은 이 부위가 외부 공기와의 접촉이 용이하므로 냉각면에서 유리한 점에 기인한 것으로 사료된다. 홈이 있는 라이닝의 경우, 세로방향의 홈은 디스크 회전속도에 의한 원주방향의 열유동을 촉진시키며, 가로 방향의 2개의 홈은 차량주행으로 인한 유속의 유출입 및 디스크 회전에 따른 원심 방향의 유속을 이용한 대류 열전달 촉진 효과가 있는 것으로 판단된다. 일반적으로 라이닝에 있는 홈의 경우 홈의 넓이에 비하여 홈의 깊이가 더 깊기 때문에 라이닝의 홈은 열전달면에서는 그 효과가 탁월하지만 최적 개수 및 치수의 결정에 있어서는 디스크와의 고압부력으로 인한 재질의 형상 변형 및 마찰면적 감소로 인한 단위 면적당 열수수량의 과다가 일어나지 않도록 고안되어야 한다.

5. 결론

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

- (1) 디스크-라이닝의 3차원 온도분포 형상 및 라이닝의 단면별 온도분포를 정성적 및 정량적으로 구하였다.
- (2) 홈이 있는 라이닝의 경우, 접촉면 근처의 홈 주위에서는 대류 열전달, 후부에서는 전도열전달을 통한 방열 효과가 있다.
- (3) 세로 방향의 홈은 디스크 회전에 의한 방열 통로로, 가로 방향의 홈은 차량 주행에 따른 방열통로로서 온도 저감효과가 있다.

후기

본 연구는 한국베랄(주)와의 기업공동연구의 일환으로 이루어졌으며, 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] N.Berseddiq et al (1996), Optimization of design of railway disk brake pads, Proc. Instr. Mech. Engrs, Vol.210, pp.51-61
- [2] STAR-CD user's manual (1994) Computational Dynamics Limited
- [3] S.V.Patankar (1980) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow
- [4] Keith Dolbear, Private Communication