

## 내열 주강 디스크의 마찰특성: 열전도도 영향

김현승<sup>1</sup> · 이준상<sup>2</sup> · 조동현<sup>2</sup> · 강성웅<sup>2</sup> · 나태엽<sup>3</sup> · 장 호<sup>†</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 신소재공학과, <sup>2</sup>(주)유진기공산업, <sup>3</sup>생산기술연구소 신소재공정팀

### Tribological Properties of Heat-resistant Cast Steel Discs: Effect of Thermal Conductivity

H. S. Kim<sup>1</sup>, J. S. Lee<sup>2</sup>, D. H. Cho<sup>2</sup>, S. W. Kang<sup>2</sup>, T. Y. Na<sup>3</sup> and H. Jang<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Materials Science and Engineering, Korea University

<sup>2</sup>YUJIN Machinery Ltd.

<sup>3</sup>Advanced Material R & D Center, Korea Institute of Industrial Technology

(Received October 17, 2013 ; Revised December 2, 2013 ; Accepted December 10, 2013)

**Abstract** – The temperature-dependent tribological properties of brake discs for a train were examined in this study. The discs were produced using heat-resistant alloy steel, which showed different thermal conductivity after the heat treatments. A commercial brake friction material was used to evaluate the friction effectiveness, and the friction tests were carried out using a 1/5 scale dynamometer under various initial braking temperature conditions. The results showed that the tribological property of the disc was strongly affected by the heat treatment schedule. At low temperatures (below 250°C), the friction coefficient increased as a function of disc temperature, indicating that frictional heat increased the adhesion between the disc and pad. In addition, fade was observed at high temperatures (above 250°C); it was pronounced in the case of the disc with low thermal conductivity. The different fade resistances observed in the discs with different heat treatment schedules appear to be influenced by microstructural changes such as carbide redistribution occurring during the heat treatments, which affected the thermal conductivity.

**Keywords** – thermal conductivity (열전도도), fade (페이드), friction coefficient (마찰계수), brake (제동), adhesion (접착), heat treatment (열처리)

## 1. 서 론

마찰재의 상대재로 사용되는 디스크는 제동장치가 포함된 기계장치에 사용되는 핵심부품 중의 하나이다. 특히 자동차를 포함한 일반 무궤도 차량용 제동디스크의 경우, 디스크의 재질특성 및 미세조직이 마찰특성에 미치는 영향에 대해 다양한 연구가 진행되었으며[1-4] 그 연구결과는 자동차용 회주철 디스크의 국산화 및 품질 향상에 크게 이바지 한 바 있다. 그러나 철도에 사용되는 주강 디스크의 경우에는 연구가 활발하지 못하여

체계적인 연구결과를 찾아보기 어렵다. 특히, 고속과 고온의 조건에서 제동을 요구하는 고속철도(KTX: Korea Train eXpress)용 디스크의 경우에는 베어링, 감속기, 변속기, 연결이음구 등 타 제동부품의 상용화 성공에 비해 연구개발이 많이 뒤쳐진 상태이다. 따라서 고속철도용 디스크의 경우 대부분을 수입에 의존하고 있으며 국내 디스크 설계 및 제조기술에 대한 관련 연구가 시급한 실정이다.

현재까지 이루어진 국내 연구동향을 분석해 보면 적외선 카메라를 이용하여 회주철 디스크에 형성되는 열점들(hot spots)이 열크랙에 미치는 영향에 대한 분석[5], 편상후연주철 디스크를 이용해 표면 온도에 따른

<sup>†</sup>Corresponding author : [hojang@korea.ac.kr](mailto:hojang@korea.ac.kr)

인장 강도 및 파괴인성의 변화[6], 디스크 표면 온도 상승에 따른 피로 강도 측정[7]과 열전도도 측정[8] 등의 연구로 간추릴 수 있다. 그러나 상기한 연구결과들은 대부분 최고 제동온도가 230°C까지 상승하는 일반 철도에 사용되는 회주철 디스크를 대상으로 분석한 결과로서[8], 제동시 디스크의 온도가 1000°C 이상까지 상승하는 것으로 알려져 있는 고속철도의 제동상황에는 적용하기 어려운 것으로 알려져 있다.

이는 고속철도의 경우 300 km/h 이상의 고속조건 및 상대적으로 큰 중량으로 인해 마찰 시 디스크 표면온도가 크게 상승하기 때문이며 따라서 고속철도용 디스크를 개발하기 위해서는 높은 온도에서도 충분한 강도를 나타냄과 동시에 높은 디스크 표면 온도에서도 0.3 이상의 안정적인 마찰계수를 유지할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 기존 고속철도에 사용되고 있는 해외 제품 2종과 국내에서 제작한 개발품 1종을 이용하여 디스크 표면 온도의 변화에 따른 마찰계수 비교 분석하였다. 이에 대한 원인분석을 위해 디스크의 고온강도, 열전도도 측정을 동시에 수행하였으며 이를 이용하여 고속철도용 주강 디스크의 개선방향을 제시하였다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 마찰재료

본 연구에서는 기존 고속철도에 사용되고 있는 해외 제품 2 종(이하 디스크A, 디스크B)과 이를 바탕으로 국내에서 제조한 개발품 1종(이하 디스크C)을 사용하였다. XRF(X-ray Fluorescence Spectroscopy)를 이용해 각 디스크의 조성을 분석하였으며 조성 분석 결과는 Table 1과 같다. 조성 분석 결과 3 종의 디스크 모두 C 함유량이 0.3% 이하인 저탄소강으로서 가공성 및 내화성, 내산화성 개선을 위해 Si, Cr, Ni 등의 원소가 1 wt.% 미만으로 포함되어 있으나 디스크 간 조성의 차이는 미미한 수준이었다. 마찰시험 전 3종의 디스크 표면을 밀링기계를 이용하여 동일하게 가공하

**Table 1. Composition of brake discs (wt.%)**

Element	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
A	96	0.27	0.38	0.99	0.81	0.99	0.52	0.05
B	96	0.23	0.77	0.41	0.80	0.90	0.78	0.11
C	96	0.25	0.47	0.62	1.1	0.99	0.57	0.12

**Table 2. Surface roughness of brake discs**

Disc	$R_a$	$\sigma$
A	1.36(±0.14)	35.74(±0.23)
B	1.16(±0.09)	37.09(±0.94)
C	1.22(±0.04)	36.59(±0.33)

**Table 3. Composition of brake pad (wt.%)**

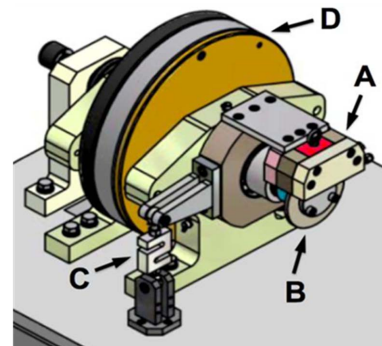
Element	Cu	Fe	Cr	S	Mo	Mg	Al	P
Brake pad	45	40	9.7	1.9	1.8	1.2	0.32	0.16

였으며 Table 2에 나타난 바와 같이 디스크 조도는 가공 후 매우 유사한 수준이었다.

디스크의 상대재인 마찰재 역시 XRF를 이용해 조성을 분석하였다(Table 3). 마찰재는 Cu, Fe, Cr 등의 금속원소가 다량 포함된 소결마찰재임을 확인할 수 있다. 이러한 소결마찰재는 대부분 금속으로 구성되어 있으며 연마재 및 고체 윤활재를 마찰조절제로 사용하여 다양한 조건에서 마찰력이 유지되도록 설계되어 있다[9].

### 2-2. 마찰실험

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 축소형 제동시험기를 이용해서 마찰시험을 진행하였으며 디스크 표면 온도에 따른 마찰계수를 확인하기 위해 Table 4와 같이 시험이 진행되었다. 온도에 따른 마찰계수 변화측정을 위한 시험 전 버니싱(burnishing) 과정을 실시하여 마찰재와 디스크가 균일한 접촉을 이룰 수 있도록 하였으며 실제 고속철도에서 적용되는 20 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력을 가하여 제동을 실시하였다. 유압력에 의해 캘리퍼를 통해 디스크에 제동이 가해지기 전까지 디스크는



**Fig. 1. Scale dynamometer used in this study (A: caliper, B: disc, C: load cell, D: inertia).**

**Table 4.** Friction test procedure

Speed : 130 km/h (610 rpm), Pressure : 20 kgf/cm <sup>2</sup> , Inertia : 120 kg	
Burnishing	IBT : 70, 50times
IBT test	IBT : 70, 170, 270, 370, 470, 30 times

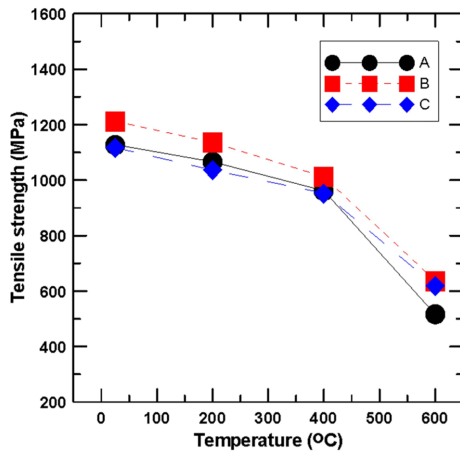
130 km/h(610 rpm)의 속도까지 회전하게 되며 압력에 의해 제동이 시작되는 순간 연속적인 속도 감소와 함께 마찰열이 발생하게 된다. 이때 발생한 마찰열은 적외선 온도계를 이용하여 연속적으로 측정되며 이때 마찰력에 의해 로드셀에 부과되는 토크를 이용하여 마찰계수를 도출하였다.

온도에 따른 마찰계수 측정은 초기온도가 70, 170, 270, 370, 470°C일때 진행하였으며 각 IBT(Initial Braking Temperature)에서 30회씩 반복시험을 진행하였다. 마찰계수는 30회 반복시험 중 마찰계수와 디스크 표면 온도가 안정되는 20회 이상부터 30회까지 총 10회에서 얻은 마찰계수의 평균값을 이용하였다.

### 3. 결 과

#### 3-1. 디스크의 재질특성

디스크의 강도가 마찰특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 상온(25°C)부터 600°C까지 200°C 단위로 각 디스크의 인장시험을 실시하였으며 그에 대한 결과는 Fig. 2와 같다. 인장시험 결과 디스크 간 인장강도는 최대 약 10%의 차이를 나타내었으며 온도변화에



**Fig. 2.** Tensile strength of discs measured at 25 to 600.

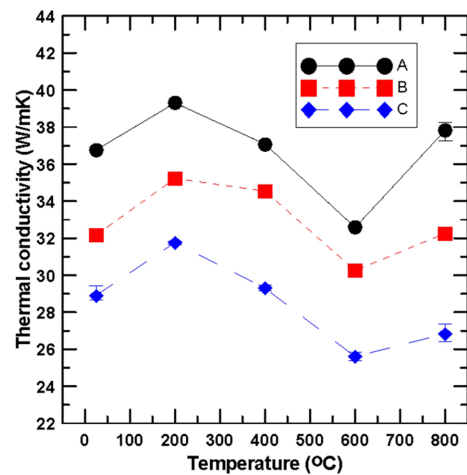
따른 강도의 감소율은 유사하였다. 상온에서 400°C 구간에서는 온도에 따라 0.44~0.53 MPa/°C 정도의 감소율을 나타내었고 400°C 이상에서는 1.67~2.23 MPa/°C의 감소율을 나타내어 디스크의 강도 감소율이 400°C를 이상에서는 약 4배의 급격한 감소율을 보여주었다. 이러한 강도의 급격한 변화는 실제적으로 표면과 표면이 접촉하여 발생하는 마찰현상에 큰 영향을 미칠 수 있다.

마찰 시 발생하는 마찰열의 신속한 방출은 디스크의 열전도도에 많은 영향을 받으며 이에 따라 LFM(Laser Flash Method) 분석을 이용하여 25, 200, 400, 600, 800°C의 온도에서 3종 디스크의 열전도도를 측정하였다. LFM을 이용한 열전도도의 측정은 아래와 같은 관계식을 통해 이루어진다.

$$\sigma = \alpha \times C_p \times \rho$$

열전도도( $\sigma$ )는 열확산계수 ( $\alpha$ ), 열용량 ( $C_p$ ), 밀도( $\rho$ )의 일차원적인 곱으로 이루어져 있으며 이에따라 각각의 온도에서의 열확산계수, 열용량 및 밀도를 측정하여 열전도도를 산출하게 된다.

LFM을 이용하여 측정된 열전도도는 Fig. 3과 같다. 3종의 디스크 모두 200~600°C 구간에서 열전도도의 감소가 발생한 후 600°C 이상에서 다시 증가하는 결과를 보여준다. 이러한 결과는 열확산계수의 경우 금속재료의 온도가 상승할수록 격자진동(lattice vibration)이 증가하여 운동에너지를 통해 열을 전달하는 전자의 이동을 방해하여 열확산계수가 감소하기 때문에 나타



**Fig. 3.** The thermal conductivity of discs as a function of temperature.

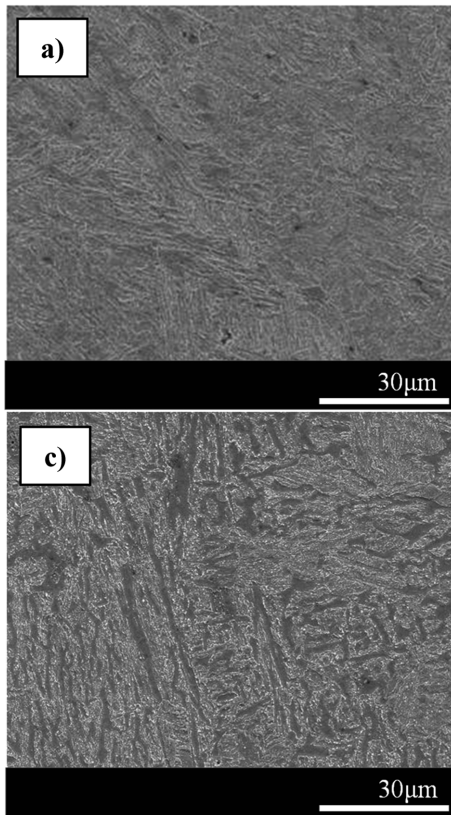


Fig. 4. SEM micrographs from discs before braking tests (a: disc A, b: disc C).

난 현상으로 사료된다. 이는 금속재료의 경우  $T_m$  이하에서는 온도변화에 따른 밀도 차이가 크지 않으며 열용량은 온도에 비례하는 관계를 가지고 있다고 알려져 있기 때문이다. 따라서 200~600°C 구간에서의 열확산 계수의 급격한 감소에 의해 열전도도가 전체적으로 감소하는 경향을 보이며 600°C 이상에서는 열용량의 증가율이 더 커 열전도도가 다시 증가하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 디스크 A와 디스크 C간의 열전도도 차이는 최대 약 25%의 차이를 보였으며 이러한 열전도도의 차이는 디스크의 미세조직에 의해 기인된 것으로 사료된다. 각 디스크의 미세조직을 확인하기 위해 마찰 시험 전의 디스크 표면을 SEM을 이용하여 측정하였다. 그 결과 Fig. 4과 같이 디스크 A와 디스크 C간의 미세구조 차이를 확인할 수 있다. 따라서 표면의 미세한 구조의 차이로 인해 열전도도의 차이가 발생하였으며 디스크 간 열전도도 차이에 의해 고온 마찰특성에 많은 영향을 미칠 것이라고 판단할 수 있

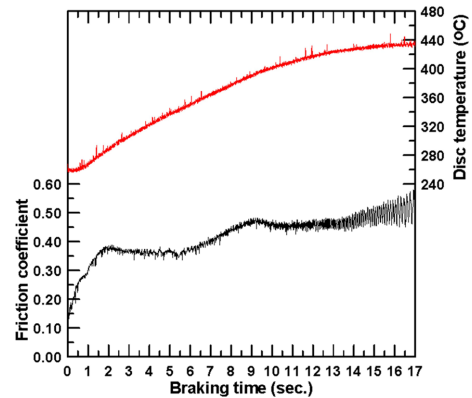


Fig. 5. The friction coefficient and disc temperature as a function of time during braking.

다. 일반적으로 주강의 열전도도는 강 내부에 존재하는 탄소의 분포에 의존되므로 보다 자세한 기구 규명을 위해서는 투과전자현미경을 이용한 탄소 분포 분석이 요구된다.

### 3-2. 저온 마찰특성

일반적으로 마찰계면에서 나타나는 마찰계수의 변화는 압력, 속도, 디스크의 온도 등 다양한 변수에 의해 변화되나 그 중 디스크의 온도에 따른 변화가 가장 명확히 나타난다. 이는 접촉하고 있는 디스크와 마찰재의 계면의 물성이 온도에 따라 변화하기 때문이다. 제동시 시간에 따른 마찰계수 및 온도의 변화 그래프에서 나타낸 바와 같이(Fig. 5) 마찰계수와 디스크의 표

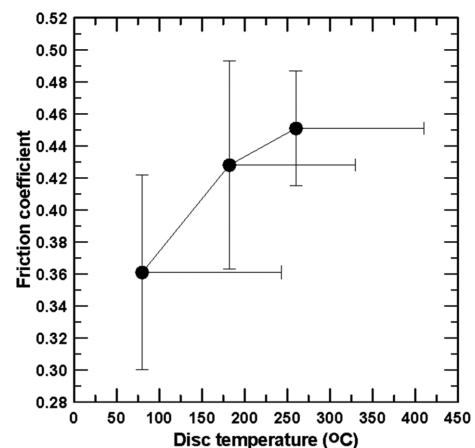


Fig. 6. The average friction coefficient at different IBT (initial brake temperature) measured using disc A at relatively low temperatures.

면온도는 연속적으로 변하게 된다.

따라서 디스크 초기 온도(IBT)에 따른 마찰계수를 측정하기 위해서 제동시 나타나는 최저 마찰계수와 최고 마찰계수의 평균값을 이용하여 IBT에 따른 마찰계수를 확인하였다. 그 결과 IBT가 270°C 이하의 저온 영역에서는 마찰열의 발생에 의해 계면온도 증가에 따른 접착력의 상승으로 인해 Fig. 6과 같이 마찰계수가 IBT의 증가에 따라 지속적으로 상승하였다. 계면온도의 증가에 따른 마찰계수의 증가는 아래 관계식을 이용하여 설명할 수 있다[10].

$$\mu = \frac{4Jr(k_1+k_2)}{\Delta Lv} \times \theta_m$$

위 식에서 J는 운동에너지를 열량으로 표현할 시 사용되는 상수이며, r은 접촉면의 크기를 나타내며, k<sub>1</sub>과 k<sub>2</sub>는 디스크와 마찰재 각각의 열전도도, ΔL은 마찰표면에 가해지는 하중이며, v는 속도, 그리고 θ<sub>m</sub>은 접촉 표면에서의 플래시 온도(flash temperature)이다. 그러나 플래시 온도의 경우 실제적인 값을 얻을 수 없으므로 일반적으로 디스크 표면 온도를 통해 유추하는 방법을 사용하게 된다. 위 식을 통해 마찰계수와 디스크 표면 온도간의 일차원적인 관계를 가지는 것을 알 수 있으며 이에 따라 3종의 디스크 모두 표면 온도가 상승할수록 마찰계수가 상승하는 것을 확인할 수 있다.

또한 마찰재와 디스크가 접촉하여 마찰이 발생할 때 실제적인 마찰은 마찰면 전체에서 발생하지 않고 마찰면에 존재하는 몇몇의 마찰돌기에서만 발생하는데[11] 3종의 디스크와 같이 거의 유사한 표면조도를 가질 경우 마찰표면에서의 마찰돌기의 수는 유사하다고 판단

된다.

이러한 실 접촉면적은 디스크의 강도에 큰 영향을 받는데 일반적으로 강도가 낮아질수록 마찰 표면에 존재하는 마찰돌기의 변형이 더 쉽게 이루어져 접촉면적이 커지는 결과를 도출하기 때문이다. 이렇게 넓어진 실 접촉면적에 의해 더 높은 마찰계수를 보여지게 된다. Fig. 2와 같이 디스크 표면 온도가 상승할 수록 디스크의 인장강도는 감소하게 되며 따라서 실 접촉면적이 점차 증가하게 된다. 그러나 디스크 간 인장강도의 차이가 크지 않아서 Fig. 7과 같이 디스크 표면 온도 상승에 따른 마찰계수의 증가율은 디스크의 종류에 따라 크게 다르지 않다는 것을 확인할 수 있다. 반면에 디스크의 종류에 따른 마찰계수 수준의 차이는 디스크의 열전도도의 차이에 의한 영향으로 판단된다. 열전도도가 좋지 않은 디스크 C의 경우 열전도도가 상대적으로 우수한 디스크 A에 비해 마찰시 계면 온도가 더 상승하여 접착력이 증가하여 나타난 현상으로 사료된다.

3-3. 고온 마찰특성

Fig. 8은 270°C 이상의 고온 영역에서 디스크 표면 온도 변화에 따른 마찰계수를 나타낸 것이다. 270°C 이상의 고온에서는 마찰계수가 지속적으로 하락하는 페이드(fade) 현상이 발생을 나타내고 있다. 이는 금속 재질로 이루어진 소결마찰재에서 페이드 현상이 발생하기 때문이며 높아진 계면온도로 인해 접촉부분에서 미시적인 국부용융이 발생하기 때문으로 판단된다. 본

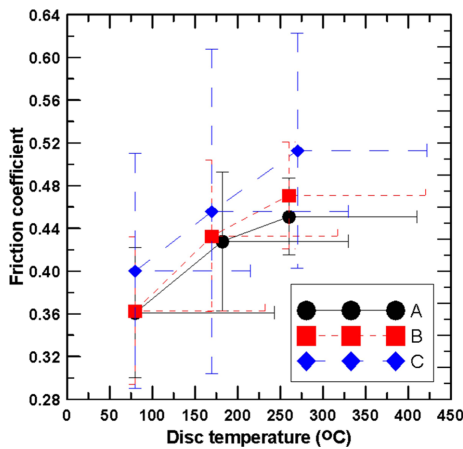


Fig. 7. The friction coefficient at low disc temperatures.

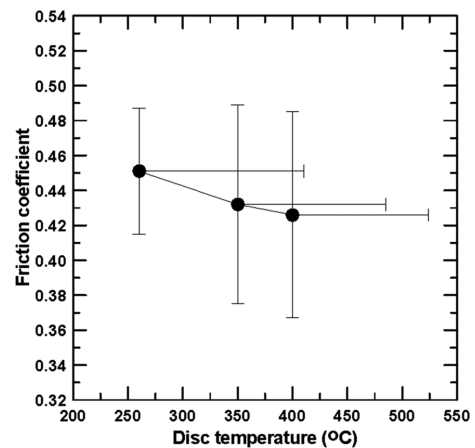


Fig. 8. The friction coefficient at different IBT (initial brake temperature) measured using disc A at relatively high temperatures.

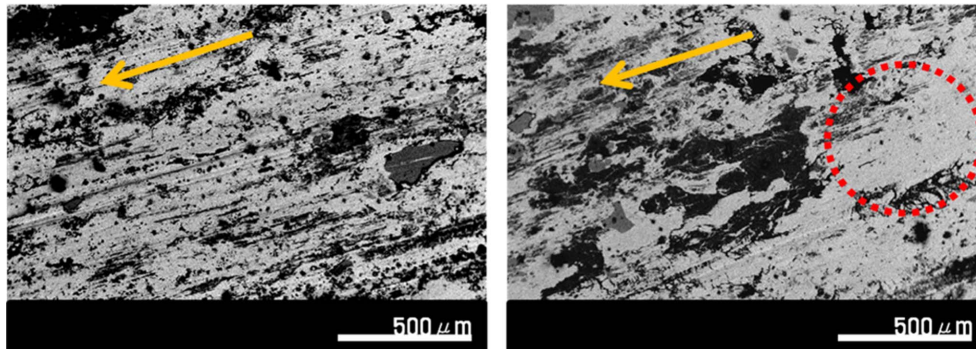


Fig. 9. SEM micrographs of transfer film on surface of the brake pads (left: (a), right: (b)).

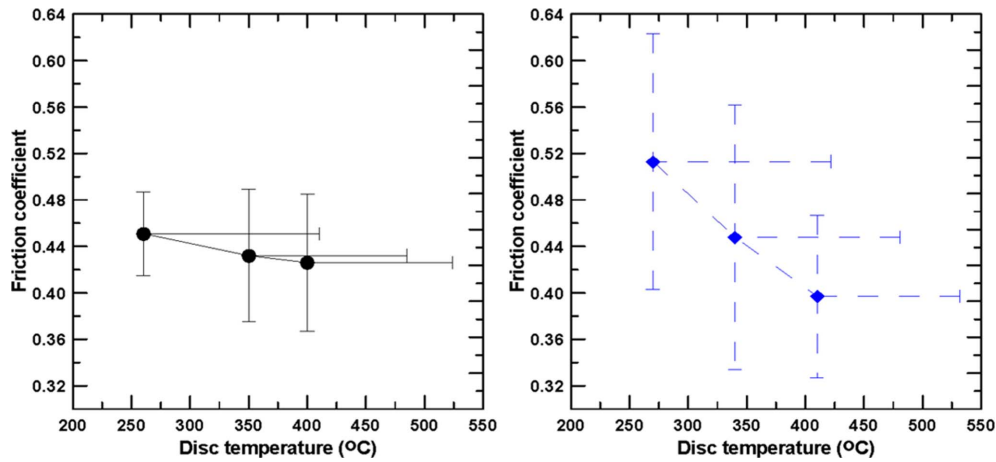


Fig. 10. The change of friction coefficient as a function of disc temperature from disc A and disc C at high disc temperatures (left: disc A, right: disc C).

연구에서는 적외선 온도계를 이용하여 디스크 표면의 온도를 측정하였으나 실제 접촉부분에서의 플래시 온도는 훨씬 높은 것으로 알려져 있다[12]. IBT 시험 후 SEM을 이용해 마찰재의 표면을 분석한 결과 Fig. 9(a)와 같이 전체적으로 마찰재 표면은 균일한 전이막을 나타내었으며 디스크에 의한 마찰 흔적(trace)이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 9(b)와 같이 부분적으로 이러한 마찰 흔적이 없이 평탄한 마찰표면을 가지는 부분이 있는데 이는 금속 재질로 이루어진 마찰재를 부분적 용융을 시킬 정도로 높은 마찰열이 형성되었음을 의미한다. 이러한 현상은 세 종의 디스크 모두 400°C 이상의 온도에서 인장강도가 급격하게 하락한 결과로도 설명할 수 있다. 따라서 마찰시 발생하는 마찰열은 고온 마찰조건 하에서 페이드를 일으키는 주요한 원인이 되며 이러한 마찰열은 열전도도가 높은 디스크일수록 더 신속하게 외부로 방출되어 고온

페이드 저항성을 향상시킬 수 있음을 시사하고 있다.

이러한 디스크 종류에 따른 열전도도의 차이는 Fig. 10과 같이 270°C 이상의 고온 영역에서 페이드에 대한 저항성에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며 열전도도가 더 높은 디스크 A의 경우 디스크 표면 온도가 증가하더라도 마찰계수의 하락 수준이 크지 않은 반면 디스크 C는 급격하게 마찰계수가 하락하는 페이드 현상이 악화됨을 알 수 있다. 또한 페이드 현상 뿐만 아니라 디스크 C의 경우 전체적으로 디스크 A보다 최대-최소 마찰계수의 차이가 크며 이러한 마찰불안정성은 접촉표면이 안정된 상태로 마찰을 이루지 못하기 때문으로 판단된다. 따라서 마찰돌기에서 형성된 마찰열이 낮은 열전도도로 인해 외부로 신속하게 방출되지 못하여 부분적 용융이 발생하고 이에 따라 마찰계수의 불안정성이 심해지는 결과를 나타낸 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

1. 저온 영역에서는 디스크 표면 온도가 증가함에 따라 마찰계수가 일차원적으로 증가하였다. 이는 마찰표면 온도의 증가에 따라 마찰재와 디스크 간의 접촉력이 상승하기 때문이다.

2. 디스크의 인장강도를 측정된 결과 세 종간 강도의 차이는 크지 않았으며 이에 따라 접촉표면에 존재하는 마찰돌기의 변형량이 유사하여 디스크 간 마찰계수의 큰 차이를 유발하지 않았다.

3. 고온 영역마찰의 경우 디스크 표면 온도가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 페이드(fade) 현상이 발생하였다. 실제 마찰이 발생하는 접촉표면에서는 실제 적외선 온도계를 통해 측정할 수 있는 온도보다 더 높은 온도가 가해져 접촉부분에서 부분적 용융이 발생하며 이러한 용융을 통해 균일한 마찰이 발생되지 않아 마찰계수의 급격한 하락이 발생하게 된다.

4. 접촉표면에서 발생하는 마찰열을 외부로 신속하게 방출하기 위해서는 디스크의 열전도도가 높아야 하며 열전도도가 높은 디스크일수록 페이드 저항성이 향상되며 반대로 열전도도가 낮은 디스크일수록 페이드 현상이 악화되었다.

#### Acknowledgements

본 연구는 (주)유진기공산업(과제번호:R1211411)과의 협력연구를 통해 수행되었습니다.

#### References

- [1] M. H. Cho, S. J. Kim, R. H. Basch, J. W. Fash, and H. Jang, "Tribological study of gray iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure," *Tribology International*, Vol. 36, pp. 537-545, 2003.
- [2] G. H. Jang, K. H. Cho, S. B. Park, W. G. Lee, U. S. Hong, and H. Jang, "Tribological Properties of C/C-SiC Composites for Brake Discs," *Metals and Materials International*, Vol. 16, No. 1, pp. 61-66, 2010.
- [3] M. W. Shin, K. H. Cho, S. J. Kim, and H. Jang, "Friction Instability Induced by Corrosion of Gray Iron Brake Discs", *Tribology Letters*, Vol. 37, pp. 149-157, 2010.
- [4] M. W. Shin, G. H. Jang, J. K. Kim, H. Y. Kim, and H. Jang, "The Effect of Residual Stress on the Distortion of Gray Iron Brake Discs," *Journal of Materials Engineering Performance*, Vol. 22, pp. 1129-1135, 2013.
- [5] J. G. Kim, B. C. Goo, and S. T. Kwon, "Hot Spot Analysis on Brake Disc Using Infrared Camera", *Journal of the Korean Society for Railway*, pp. 964-968, 2008.
- [6] J. H. Kim, "A study on the Mechanical Properties of the Braking Disk due to the Temperature Change (I)," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.8, No.3, pp. 222-227, 2005.
- [7] J. H. Kim, B. C. Goo, and C. S. Suk, "A Study of the Change of Temperature on Brake Disk Surface during the Service and The Fatigue Characteristic of disk material due to Temperature," *Journal of the Korean Society for Railway*, pp. 792-797, 2007.
- [8] J. H. Kim, B. C. Goo, and C. S. Suk, "A Study on the Temperature Change of Braking Disc and Thermal Conductivity during the Service," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 6, pp. 665-669, 2007.
- [9] S. K. Sinha and B. J. Briscoe, "Polymer Tribology," Chap. 15, pp. 520-545, Imperial College Press, London, 2009
- [10] E. Rabinowicz, "Friction and Wear of Materials," 2<sup>nd</sup> edition, pp. 96-98, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [11] J. F. Archard, "Elastic Deformation and the Laws of Friction," *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 243, pp. 190-205, 1957.
- [12] W. Ames and A. T. Alpas, "Wear Mechanisms in Hybrid Composites of Graphite-20% SiC in A356 Aluminum Alloy (Al-7%Si-0.3%Mg)," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 26A, pp. 85-98, 1995.