

디스크 브레이크의 제동마찰 및 마멸특성에 관한 실험적 연구

김청균[†] · 이병관 · 김한구

홍익대학교 트라이볼로지연구센터

Experimental Study of Braking Friction and Wear Characteristics of Disk Brake

Chung Kyun Kim[†], Boung Kwan Lee and Han Goo Kim

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – This paper presents the braking friction and wears on the rubbing surfaces of a friction pad-disk brake. In this study, four friction disk specimens are sampled from unused and used disks in which are taken from the disk brake system when the friction induced vibration and noise problems have been occurred during a braking period at a running period of 10,000 km, 20,000 km, and 30,000 km in random. The experimental results indicate that the tribological characteristics of an unused disk brake shows equal and stable as a friction coefficient and temperature distributions during a braking friction/wear test period including a total friction mode from the start to running periods. But the used disk brake shows unstable and uneven friction modes between an outside and inside rubbing surfaces of a disk brake in terms of a friction coefficient and wears. This may lead to a friction induced friction vibration and noise problems of a used disk brake.

Key words – disk brake, friction, wear, braking friction, friction coefficient, friction temperature.

1. 서 론

자동차는 동력을 생산하는 엔진(engine), 생산된 동력을 바퀴로 전달하거나 차단하는 동력전달장치(power transmission), 이동하고 있는 자동차의 속도를 조절하거나 어떤 위치로 정지시키는 제동장치(braking system), 자동차를 원하는 방향으로 안내하는 조향장치(steering system), 상기의 부품을 안착하여 모든 하중을 지지하는 몸체(frame) 등으로 구성된다.

특히 이동하고 있는 자동차의 속도를 줄이거나 특정 위치에 정확하게 정지시키는 등 운전속도를 안정적으로 제어하기 위해 개발된 브레이크는 Fig. 1에서 보여준 것처럼 벤틸레이티드 디스크 브레이크(ventilated disk brake)가 대표적이다. 브레이크에서 제동력을 발생시키는 기본 메커니즘은 브레이크의 디스크와 패드의 상대

접촉 미끄럼 마찰운동을 하는 동안에 마찰력을 증가시켜 자동차의 운동에너지를 흡수함으로써 이루어진다. 즉, 제동과정에서 발생하는 마찰에너지를 모두 열에너지로 방사하는 기술로 브레이크 소재의 고마찰성, 내마멸성, 내열성, 내부식성, 열전도성, 내구성과 같은 트라이볼로지 기능을 요구하는 것은 물론이고, 저렴한 가격에 경량화를 추구하면서 안전성은 완벽하게 보장하는 최적설계 기술을 요구한다.

브레이크는 자동차가 탄생되면서 같이 개발된 핵심 구성품으로 가장 간단한 솔리드 디스크 브레이크, 드럼 브레이크, 벤틸레이티드 디스크 브레이크, ABS(anti-lock brake system) 등 다양하게 개발되었다. 최근의 브레이크는 가능한 제동력을 짧게 하면서 마찰제동에 의한 진동과 소음을 없애고, 고마찰을 유지하면서 마찰열 발생량은 극도로 줄이고, 마찰표면의 마멸량 발생을 억제하여 내구성과 안전성을 확보하는 기술이 중요하다. 여기에 브레이크의 마찰특성상 불가피하게 메탈소

[†]주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@empal.com

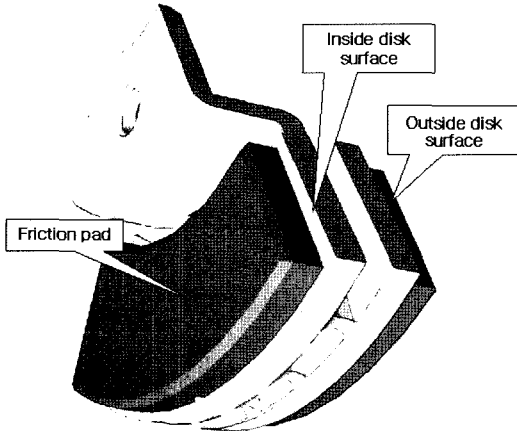
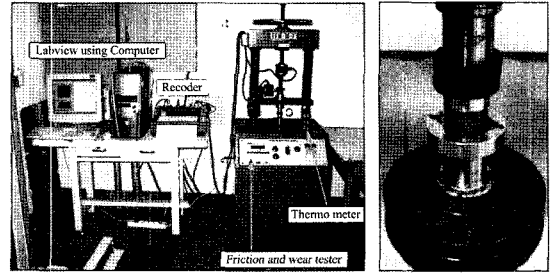


Fig. 1. General view of a ventilated disk brake.

제를 사용할지라도 새로운 경량소재를 적용하고, 최적 설계 기술개발에 의해 차량의 경량화와 연비를 개선하기 위한 모든 연구역량을 집중하는 것이 현재의 기술 개발 추세이다.

그 동안 디스크 브레이크의 트라이볼로지적 특성을 파악하기 위해 수행된 연구의 대부분은 컴퓨터와 프로그램을 이용한 수치해석[1,2]과 디스크 브레이크의 실제 적용을 통한 실험적 연구에 집중되어 왔다. Blau[3], Nicholson[4] 등은 브레이크의 마찰소재 조성을 개량하여 마찰특성을 향상시키는 실험과 수치적 연구로 제동 장치의 트라이볼로지 특성을 파악하는데 큰 기여를 하였다. 디스크 브레이크의 마찰특성에 관련된 데이터를 얻기 위해 보통은 다양한 실험조건에 대하여 마찰접촉 운동표면을 간편하게 모사할 수 있는 핀-디스크 실험을 많이 수행하였고, 최근에는 핀을 대신하여 실제의 라이닝-디스크 마찰실험을 통하여 실제의 미끄럼마찰 접촉운동 조건에 대단히 근접된 연구결과를 발표하였다[5,6]. Kim[7] 등은 자동차에서 실제로 장착하여 사용된 디스크 브레이크중에서 특히 디스크의 떨림현상이 발생되어 교체된 디스크 브레이크를 주행거리에 따라 분류하여 디스크 마찰면의 표면거칠기와 경도변화, 마멸패턴 등을 측정하거나 분석하여 실제의 브레이크 제동성을 고찰하였다.

본 논문에서는 자동차에 장착하여 실제로 사용중인 디스크를 주행거리에 따라 특히 떨림현상이 발생하는 문제의 디스크를 회수하여 핀-디스크 마찰·마멸 실험을 수행할 수 있도록 Fig. 2의 마찰/마멸시험에 적합한 시편을 다시 제작하여 디스크 브레이크의 트라이볼로지 특성을 고찰하였다.



(a) Tester

(b) Specimen

Fig. 2. Friction and wear tester.

2. 실험 방법

실험에 사용된 디스크 브레이크는 대형 승용차에 장착하여 운행중에 문제가 된 것을 탈거하여 시편을 제작한 것이다. 이 때에 브레이크의 주행거리는 0 km, 10,369 km, 20,983 km, 29,433 km의 4가지 디스크 제품을 선정하여 마찰/마멸시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 브레이크 제품은 신제품을 제외하면 모두 제동 과정에 디스크의 떨림이 발생하였기 때문에 교체된 것으로 일단은 트라이볼로지 마찰특성이 불량한 제품들이다. 시험편을 샘플링하는 기준은 디스크가 안정적으로 운전되어 트라이볼로지 거동특성이 양호한 제품보다는 제동장치가 1년정도 사용한 후에 문제가 된 디스크에 관심을 갖었기 때문에 기본적으로 매 10,000 km를 기준으로 선정하여 이에 적합한 디스크 시험편을 제작하고, 트라이볼로지 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 디스크 브레이크의 마찰/마멸실험을 위해 사용한 시험기와 디스크의 트라이볼로지 특성을 평가하기 위해 사용한 디스크 시편의 설치도이다. 시험기에는 마찰력을 100 kgf 정도 측정할 수 있도록 로드셀을 설치하고, 7.6 kg의 균일한 수직하중을 핀(pin)을 통하여 디스크의 마찰 접촉표면에 가해진 상태에서 미끄럼 마찰력을 측정하였다. 이 때에 시험기의 중심축에 설치한 시편에 대하여 300 rpm의 회전속도로 30분 동안 반복실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 시편은 브레이크를 사용하지 않은 신제품의 바깥쪽과 안쪽 디스크 마찰표면에서 채취하여 미끄럼 마찰과정에서 발생한 마찰계수와 마찰온도를 측정된 결과를 Fig. 3에서 제시한다. 초기의 마찰계수는

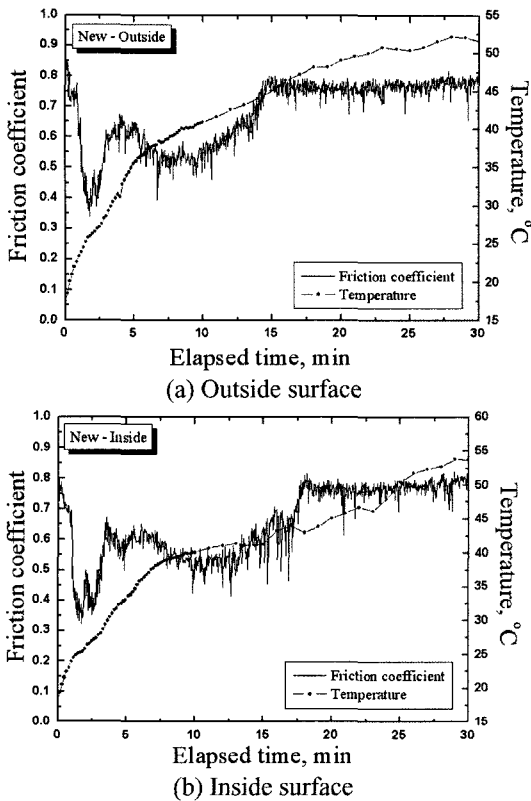


Fig. 3. Friction coefficient and temperature on the rubbing surface of unused disk brakes.

약 0.8 정도로 높게 나타나지만 초기의 길들이기 과정 (running-in period)으로 넘어가면서 마찰계수는 표면의 산화막층이나 가공표면에 있던 버(burr)와 같은 부스러기가 마찰작용에 의해 급격하게 떨어지지만 15~18분 정도를 넘어서면 미끄럼마찰 접촉운동이 점차 안정되고, 마찰계수는 다시 0.7 정도로 높게 유지되어 우수한 제동성을 유지한다. 그러나 미끄럼 마찰운동 과정에서 발생하는 마찰온도는 지속적으로 증가하다가 55°C 정도에서 수렴하는 안정된 마찰특성을 보여준다. 전체적으로 보면, Fig. 3에서 제시한 신제품에 대한 트라이볼로지 실험결과는 거의 같은 것으로 평가하여도 무방하다. 이것은 디스크 브레이크의 마찰표면에 대한 가공정밀도와 초기 거칠기 등의 마찰접촉 작동조건을 같게 제작하였기 때문에 얻어지는 결과라 생각된다.

Figs. 4~6에서 제시한 마찰계수와 마찰온도는 자동차의 제동장치에 실제로 장착하여 사용중에 떨림현상이 발생하였기 때문에 교체된 디스크 브레이크로부터 시편을 채취하여 마찰특성을 측정된 결과이다.

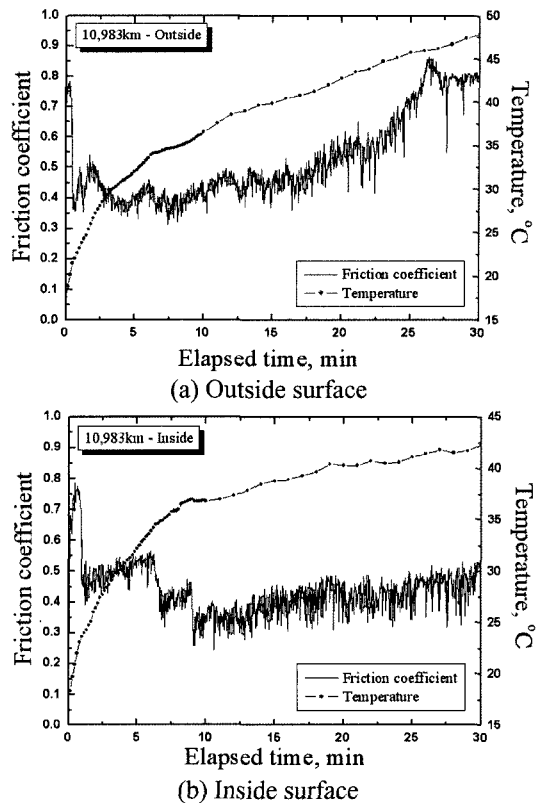


Fig. 4. Friction coefficient and temperature on the rubbing surface of disk brakes for a running distance of 10,369 km.

Fig. 4는 10,369 km를 주행한 디스크 브레이크에서 발생한 떨림으로 인해 사용이 중지된 디스크 브레이크의 바깥쪽과 안쪽으로부터 시편을 채취하여 마찰접촉 운동표면의 마찰계수와 마찰온도를 측정된 결과이다. 초기의 마찰계수 0.8 보다는 약간 낮은 상태에서 시작되어 길들이기 과정을 거치면서 낮은 마찰계수를 유지하는 것은 바깥쪽과 안쪽 디스크에서 모두 같은 거동패턴을 보여주지만, 마찰시험이 지속될수록 서로 달라지는 양상을 보여준다. 즉, 바깥쪽의 마찰표면에서는 마찰력이 완만하게 회복되면서 0.7 정도로 초기의 마찰계수에 근접되게 마찰특성이 발생하는 것에 비하여 내측 마찰면에서는 지속적으로 마찰계수가 떨어져 0.4~0.5 정도로 크게 떨어진 마찰력을 안정적으로 유지하려는 마찰현상이 발생한다.

바깥쪽 디스크에서 마찰계수가 안정화를 이루는 시간을 보면, 신제품의 경우는 약 15분 정도이지만, 10,369 km를 주행한 디스크에서는 28분 정도로 약 2배나 길

어지는 현상이 나타났고, 마찰계수는 0.7 정도로 대단히 높게 유지되는 특성을 보여준다. 반면에 안쪽 디스크의 경우는 마찰계수가 안정화되는 시간이 15분 정도로 신품과 같게 나타났지만, 마찰계수는 신품의 경우 0.7 정도로 높게 유지되는 것에 비하여 10,000 km 정도를 주행한 디스크에서는 0.45 정도로 크게 낮아지기 때문에 브레이크는 사용함에 따라서 제동력이 떨어진다는 사실을 예측할 수 있다.

Fig. 4에서 제시한 마찰특성 데이터를 보면, 디스크의 바깥쪽에서 발생한 마찰계수와 안쪽에서 발생한 마찰특성이 서로 다르기 때문에 제동력에서 불균일한 차이를 나타낼 것이라는 사실이다. 이것은 Fig. 4에서 사용한 시편이 10,369 km의 짧은 주행거리를 운행하였다 해도 바깥쪽 표면과 안쪽 표면의 마찰조건이 확연히 다르다면 디스크의 마찰표면에서 발생하는 떨림과 같은 불안정한 제동작용이 발생하므로 불가피하게 디스크를 교체해야 한다.

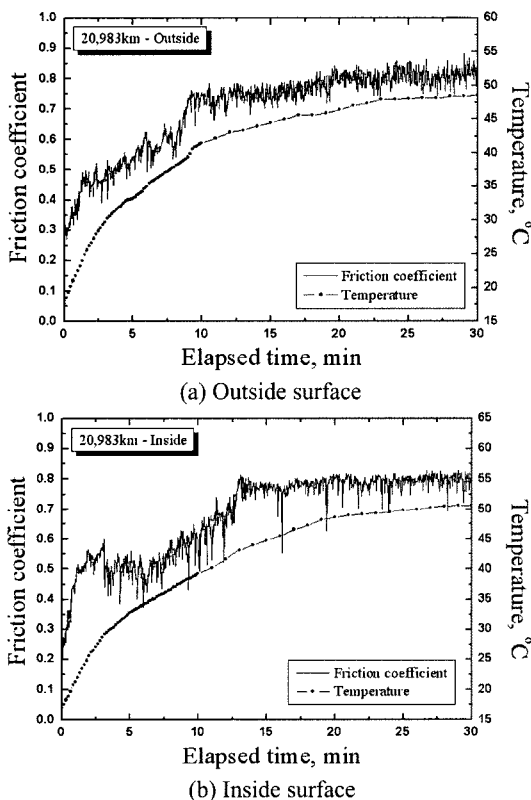


Fig. 5. Friction coefficient and temperature on the rubbing surface of disk brakes for a running distance of 20,983 km.

Fig. 5는 20,983 km를 주행한 디스크 브레이크의 운행중에 떨림현상이 발생하였기 때문에 디스크를 탈거하여 디스크의 바깥쪽과 안쪽으로부터 시험편을 각각 채취하여 마찰표면에서 발생하는 마찰계수와 마찰온도를 Fig. 2에서 보여준 시험기로 측정된 실험결과를 제시한다. Fig. 5의 실험결과에 의하면, 초기 마찰계수는 0.3 정도에서 시작하여 일정한 길들이기 과정을 거치면서 제동작용 시간이 10~13분 정도가 경과하면, 마찰계수는 0.7~0.8으로 안정된 마찰특성을 나타내고, 마찰온도는 50°C 정도로 대단히 안정된 실험결과를 각각 제시한다.

여기서 20,000 km 정도를 주행하는 과정에서 떨림 현상이 발생하였기 때문에 브레이크를 탈거하여 마찰 특성 시험을 수행하기는 하였지만, Fig. 4의 10,000 km를 주행한 브레이크보다는 마찰계수의 차이가 0.1 이내로 대단히 안정되었고, 디스크의 바깥쪽과 안쪽에서 발생한 마찰계수가 0.7~0.8로 신품처럼 마찰특성이 유사한 결과로 보아 20,000 km를 주행한 디스크의 제동 안정성은 우수한 것으로 판단된다. 그러나 초기 마찰계수를 비교하면, 신품에 비하여 10,000 km를 주행한 디스크의 마찰계수가 약간 낮기는 하지만 그 차이는 크지 않은 것에 비하여 20,000 km를 주행한 디스크에서는 초기 마찰계수가 0.3 이하로 크게 떨어지는 마찰 특성을 보여주는 것이 크게 다르다. 이것은 브레이크를 많이 사용함에 따라 미끄럼마찰 접촉표면의 거칠기가 매끄러져 초기의 순간 제동력 측면에서 보면 제동력이 크게 떨어질 것이라는 실험적 결과이다. 결국, 브레이크의 제동거리 누적량이 많아지면 초기의 제동력은 떨어지므로 위험한 순간에 제동작용을 하기보다는 높은 제동력 유지를 위해 주행중에 브레이크를 약간씩 밟아서 제동력을 최고도로 유지하는 제동습관을 길들이는 것도 높은 마찰계수를 유지하는 하나의 방법이라 할 수 있다.

Fig. 6은 29,433 km를 주행한 디스크 브레이크에서 떨림현상이 발생하였기 때문에 디스크 브레이크를 탈거하여 마찰접촉 운동표면에서 발생하는 마찰계수와 마찰온도를 측정된 결과를 제시한 것이다. Fig. 6(a)는 디스크의 바깥쪽 표면에서 측정된 마찰계수와 마찰온도를 제시한 결과로, 초기 마찰계수는 0.2~0.25로 Figs. 3~5에서 제시한 결과보다는 대단히 낮지만, 길들이기 과정을 지나면 마찰계수는 다시 0.7~0.8로 안정화 되는 제동력 마찰특성을 보여준다. 그러나 디스크의 바깥쪽에서 채취한 시편의 경우는 길들이기 과정이 10분

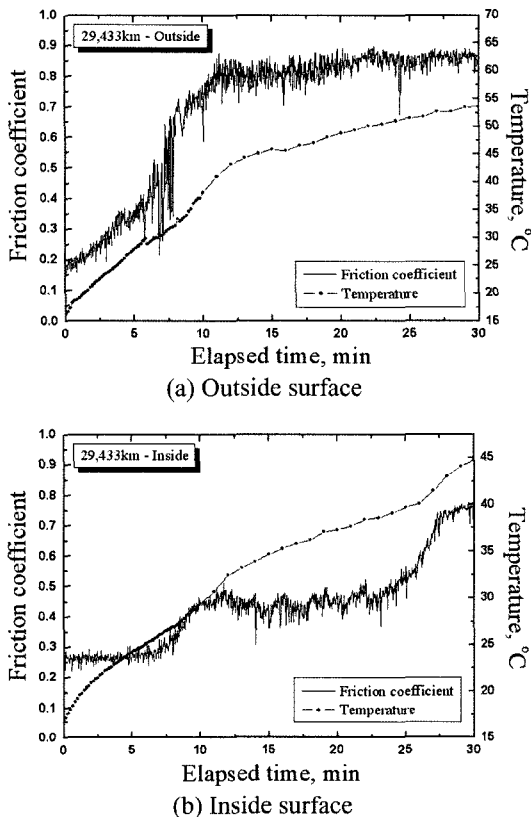


Fig. 6. Friction coefficient and temperature on the rubbing surface of disk brakes for a running distance of 29,433 km.

정도 지나면 마찰계수가 0.8 정도로 빠르게 안정되지만, 안쪽에서 채취한 디스크 시편의 경우는 28분 정도 지나야 마찰거동 특성이 불안정하게 안정화 과정을 거치는 것으로 나타났다. 이것은 디스크의 마찰접촉 운동표면에서 바깥쪽과 안쪽의 마찰특성이 서로 다르게 나타나는 것으로 보아 30,000 km를 주행한 디스크의 마찰특성은 비교적 불안정해지는 단계에 접어드는 것으로 판단된다.

이것은 마찰식 브레이크를 사용함에 따라서 초기 마찰계수가 점진적으로 떨어지고, 길들이기 시간이 길어지는 것 이외에 특히 디스크의 마찰접촉 운동표면에서 발생하는 마찰계수의 거동패턴이 균일하지 못하고 점점 달라진다는 사실에 비추어 마찰식 디스크 브레이크를 오랫동안 사용하면 자연스럽게 떨림현상이 발생하고, 소음도 증가된다는 것은 당연하다. 결국, 이러한 마찰거동 특성의 차이는 미끄럼마찰 접촉표면에서 발

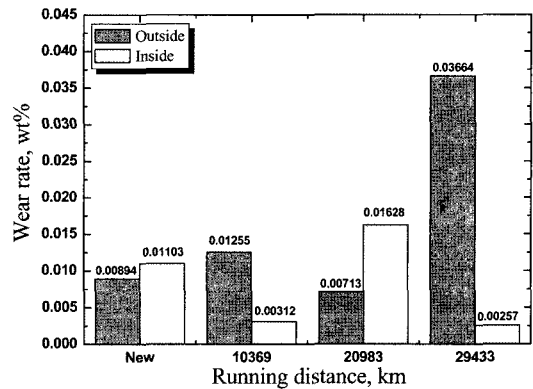


Fig. 7. Wear rate on the rubbing surface of disk brakes after friction and wear tests.

생하는 마멸(wearing)이 주행거리에 따라 점진적으로 증가하기 때문이고, 제동작용에 따른 떨림현상이나 소음의 발생은 자연스런 현상으로 일정시간을 사용하면 불균일한 마찰접촉 거동특성 때문에 떨림현상이 발생하기 때문에 디스크를 적기에 교환해 주는 것이 필요하다.

Fig. 7은 제동장치에 실제로 사용한 디스크 브레이크와 사용하지 않은 디스크 브레이크의 바깥쪽과 안쪽 디스크에 대하여 마멸시험을 수행한 결과이다. 실험결과에 의하면, 사용하지 않은 신품 디스크 브레이크의 경우는 디스크의 바깥쪽과 안쪽의 마멸 발생량이 비교적 균형을 유지하지만, 브레이크의 주행거리가 길어질수록 마멸 발생량이 증가하는 것은 물론이고, 특히 디스크 마찰표면의 바깥쪽과 안쪽에서 발생한 마멸량의 불균일성이 크게 높아진다는 것이다. 이것은 디스크의 제동과정에서 마멸 발생량이 증가할수록, 즉 마찰계수의 불균일성이 증가할수록 제동력은 약화되고, 브레이크의 떨림에 의한 진동과 소음(friction induced vibration and noise)에 의한 문제점이 많아진다는 사실과 일치된다. 결국 자동차의 주행거리가 길어질수록 디스크 브레이크의 마찰면 바깥쪽과 안쪽에서 발생하는 마찰이나 마멸의 불균일성 증가로 제동과정에서 발생하는 떨림현상과 소음의 발생은 밀접한 관계가 있다는 사실을 마찰/마멸특성 실험을 통하여 입증할 수 있었다.

4. 결 론

본 실험적 연구에서는 주행거리에 따른 디스크 브레이크의 마찰접촉 운동표면에서 발생하는 마찰 및 마멸 특성을 고찰하기 위해 자동차에 장착되어 사용중인 디

스크 브레이크의 제동과정에서 발생하는 떨림작용으로 탈거된 디스크 브레이크의 바깥쪽과 안쪽의 디스크 표면에서 시편을 제작하여 마찰계수, 마멸특성, 마찰온도를 각각 측정하였다.

실험결과에 의하면, 신품 브레이크의 경우는 제동 마찰면에서 발생하는 마찰계수나 마멸 발생량이 바깥쪽 디스크나 안쪽 디스크 양면에서 비교적 균일하게 발생되어 안정된 제동력을 보여주고 있다. 반면에 디스크 브레이크를 일정기간 사용함에 따라 특히 초기마찰 제동력은 크게 떨어지고, 마멸 발생량은 지속적으로 증가하여 바깥쪽 디스크의 마찰/마멸특성이 크게 달라지는 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 디스크의 떨림현상 및 소음의 증가와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그렇다면, 주행거리가 짧음에도 불구하고 떨림현상이 발생하는 이유는 결국 디스크의 바깥쪽 마찰면과 안쪽 마찰면의 마찰계수와 마멸발생에 의한 표면거칠기 차이로 인해 발생되므로 브레이크의 신품처럼 디스크의 바깥쪽과 안쪽의 마찰접촉 거동특성을 유사하게 유지하는 것이 대단히 중요함을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Kim, C. K., "Finite Element Analysis of Temperature Distribution and Thermally Caused Deformation in Ventilated Disk Brakes," 95' Korea-USA Tribology Symposium, pp.251-258, 1995.
2. Floquet, A. and Dubourg, M. C., "Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brakes," *J. of Tribology*, Vol. 118, pp.466-472, 1996.
3. Blau, P. J., "Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives," pp. 2-4, Oak Ridge National Laboratory, 2001.
4. Nicholson, G., "Facts about Friction," pp. 26-30, Goran Publishing, 1995.
5. Cueva G, Sinatora, "Wear Resistance of Cast Irons used in Brake Disc Rotors," *Wear*, Vol. 255, pp. 1256-1260, 2003.
6. Mikael Eriksson and John Lord, "Wear and Contact Conditions of Brake Pads: Dynamical in Situ Syurries of Pad on Glass," *Wear*, Vol. 249, pp. 272-278, 2001.
7. 김청균, 조승현 등, "주행거리에 따른 디스크 브레이크의 마찰/마멸특성 연구," 제38회 한국윤활학회 춘계학술대회 논문집, pp.256-260, 2004.