

자동차용 마찰재에서 철산화물이 마찰특성에 미치는 영향에 관한 연구

조근형, 장호 (고려대학교 신소재공학과)

The Effect of Iron Oxides (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) on Tribological Characteristics of Automotive Friction Materials

KeunHyung Cho*, Ho Jang

Dept. of Advanced Materials Eng., Korea Univ. hojang@korea.ac.kr.

ABSTRACT

The relationship between friction characteristics and iron oxides at the sliding interface was investigated. Three friction materials containing iron, magnetite (Fe_3O_4) or hematite (Fe_2O_3) were manufactured and friction tests were performed on gray cast iron disks to evaluate the friction coefficient as a function of sliding speed ($\mu-v$). In-situ noise spectrum analyzer was employed to compare noise propensity during friction tests. Results show that the specimens with magnetite are more sensitive to velocity than those with iron or hematite. The specimens containing magnetite and hematite generated noise with different peaks in the spectrum. The difference in the peak frequency seems attributed to the different surface aggressiveness of iron oxides and intermittent changes of real contact area at the sliding interface during sliding. Surface morphology and roughness of the counter disc after the tests are also consistent with the aggressiveness of iron oxides.

Keywords : iron oxide, squeal noise, tribological characteristics

1. 서론

자동차 브레이크 시스템은 운전자의 안전적이고 쾌적한 제동을 위한 필수적인 장치이다. 이러한 브레이크 시스템은 기본적으로 10종 이상의 원료로 구성되어 있는 마찰재와 상대재로 사용되는 회주철 로터간의 마찰에 의해 제동하도록 구성되어 있다[1]. 따라서 자동차의 제동 특성은 마찰재와 그 대상재인 회주철 디스크간의 마찰 및 마모 특성에 의해 결정되며, 이 때 떨림현상(judder)이나 소음(noise)을 일으키기도 한다. 일반적으로 마찰시 발생하는 squeal noise는 다음의 4가지 요인에 기인하는 것으로 알려져 있다 : 1) stick-slip 2) sprag-slip 3) negative friction-velocity slope 4) modal coupling mechanisms[2]. 이를 해결하기 위해 많은 연구가 마찰재의 구성요소 또는 시스템의 측면에서 이루어져 왔다. 마찰재의 견지에서 이러한 제동소음을 제거하기 위해 연마재와 윤활재에 대한 연구[3-4]가 활발히 진행되고 있으며, 시스템적인 측면에서는 브레이크 어셈블리에서의 진동모드를 분석하

는데 연구가 이루어지고 있다[5-6].

그러나, 최근에는 상대재인 회주철에 대한 연구 필요성이 제기되고 있다. 연구에 따르면 제동특성에 큰 영향을 미치는 마찰막의 구성요소 중 상당량이 철 및 철산화물로 이루어져 있으며[7], 이는 회주철 로터의 마모로부터 유입된 것으로 추정되기 때문이다. 회주철 로터의 마모로 형성된 철입자는 마찰과정에서 열이력을 받아 hematite (Fe_2O_3) 혹은 magnetite (Fe_3O_4)로 상변화가 일어날 것으로 예상되며, 또한, 회주철 디스크의 부식에 의해 표면에 형성된 철산화물 층이 제동과정에서 마찰재로 전이되거나 마찰막에 유입된다.

일반적으로 철산화물(iron oxide)은 연마재(abrasive)의 성질이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 철산화물이 제동특성에 미치는 영향 및 소음특성에 관한 체계적인 연구가 시도된 적이 없었다. 본 연구에서는 철산화물의 종류에 따른 마찰 특성 및 소음 특성을 관찰하고, 그 원인을 분석하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시편의 제작

본 실험에서는 회주철 로터의 부식에 의해 형성된 철산화물이 마찰재로 전이되는 현상을 재현하고자 하였다. 철산화물의 종류에 따른 마찰 마모 특성을 고찰하기 위해 철산화물 (Fe_2O_3 , Fe_3O_4)의 종류가 다른 2종의 마찰재를 제조하였으며, 회주철 로터로부터 나오는 마모입자의 마찰마모 특성을 고찰하기 위해 철을 혼합한 마찰재를 제작하였다. 철산화물의 종류 이외의 요인을 제거하기 위하여 결합제와 충전제만을 혼합하였다. 마찰시험에 사용된 시편의 구체적인 조성을 Table. 1에 나타내었다. 마찰재에 첨가한 철산화물 및 철분말의 함량은 50 vol%로 고정하였다. 본 실험에서 사용된 철산화물 및 철분말의 크기는 10 μm 이하의 입도분포를 지니고 있다. (Fig. 1).

마찰재의 제조공정은 건식혼합, 예비성형, 본성형, 열처리 (curing)의 순서로 제작되었다. 마찰재는 block-on-disc 방식의 마찰시험기에 장착할 수 있도록 12mm×12mm×4mm의 크기로 제작되었다.

Table 1. Compositon of friction materials

Friction Materials.	Compositon vol. %
#1	Fe 50% + resin 30% + aramid pulp 20%
#2	Fe_2O_3 50% + resin 30% + aramid pulp 20%
#3	Fe_3O_4 50% + resin 30% + aramid pulp 20%

2.2 Tribometer

본 실험에 사용된 마찰시험기는 block-on-disc 방식의 마찰시험기이다. AC servo motor(0.4kW)에 의해 구동되며, 마찰 상대재인 디스크는 직경이 60mm 이고 두께가 7mm 가 되도록 제작되었다. 미니로터가 놓이는 중앙 구동축은 모터에 의한 진동을 최소화하기 위해 magnetic coupling 으로 연결되어 있다. 실험기에 상세한 설명은 이미 발표한 바 있다[8].

2.3 마찰 마모 실험

마찰실험은 각 시편에 대하여 속도에 따른 마찰계수의 측정과 정속에서 진행된 제동소음 측정으로 진행되었다. 각각의 실험에 대하여 마찰 대상재인 미니 디스크의 초기 run-out 은 10 μm 이하로 조절하였다.

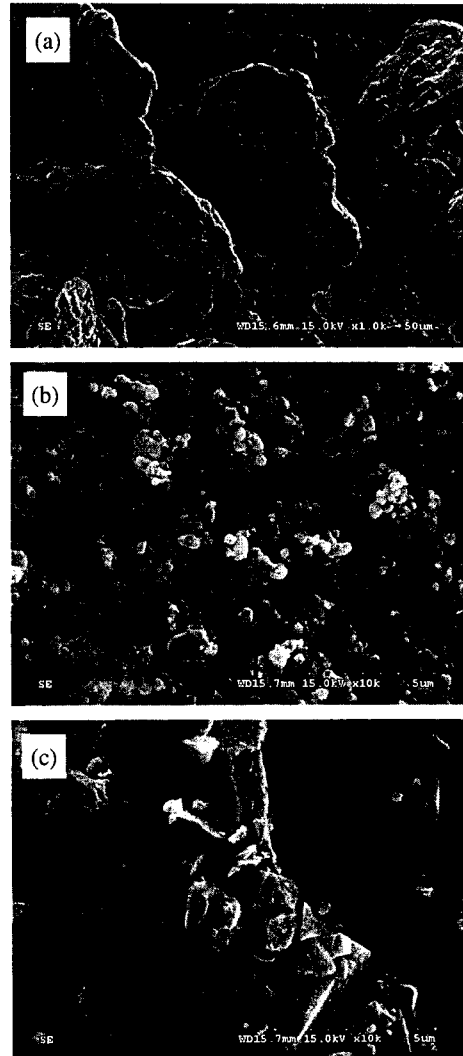


Fig. 1. SEM micrographs show the morphology of (a) Fe (b) Fe_2O_3 (c) Fe_3O_4 powders.

속도에 따른 마찰계수 측정은 10N의 수직하중 하에서 실시되었으며, 고속에서 저속으로 속도를 감소시키면서 측정하였다. 시험에 구현된 속도는 1.57, 3.14, 4.71, 7.85, 10.99, 15.7, 23.55, 31.4, 47.1, 57.7 m/sec 이며 각각의 속도에 대하여 5 회 반복실험을 실시하였다.

정속 마찰실험은 23.55m/sec의 속도에서 실시되었으며, 실험시작 후 매 2 시간마다 specific torque, run-out, noise level, noise spectrum 이 60 초 동안 측정되었다. 총 실험시간은 14 시간이며, 10N의 수직하중이 가해졌다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 속도에 따른 마찰계수의 거동

속도에 따른 철산화물의 마찰특성을 고찰하기 위하여 각 철산화물을 포함한 시편을 이용하여 마찰계수를 측정하였다. Fig. 2 은 속도에 따른 평균마찰계수의 분포를 철산화물의 종류에 따라 나타낸 것이다. 모든 시편에서 속도에 증가함에 따라 평균 마찰계수가 감소하는 현상이 관찰되었으며 높은 속도에서는 마찰계수의 변화가 상대적으로 작게 나타났다. Fe 또는 Fe_2O_3 을 포함한 시편의 경우 0.05~ 0.1 정도의 마찰계수 편차를 나타냈다. Fe_3O_4 를 포함한 시편의 경우 0.3 정도의 큰 편차를 나타내었다. 특히, Fe_3O_4 를 포함한 시편의 경우 1.57~23.55 m/sec 영역에서 급격한 평균마찰계수의 감소현상이 관찰되었으며, 다른 두 시편에 비해 더 큰 음의 μ -v 기울기를 나타내었다. 일반적으로 μ -v 기울기가 높을수록 stick-slip 현상이 가중되는 것으로 알려져 있다[9]. 특히, 자동차 브레이크에서는 제동시 나타나는 떨림현상(judder)이나 creep groan 은 제동시 승차감을 나쁘게 하는 요인으로 알려져 있으며 이들 현상의 요인으로 stick-slip 현상이 제시되고 있다. 이는 stick-slip 이 커짐으로써 제동시 높은 토크의 진폭을 나타내기 때문이다. 이러한 결과는 Fig. 3(c)에서도 확인할 수 있다. 높은 음의 μ -v 기울기를 나타낸 Fe_3O_4 를 포함한 시편의 경우 상대적으로 높은 specific torque 의 진폭을 관찰할 수 있었으며, 이는 저속에서 발생하는 stick-slip 현상에 기인한 결과로 평가된다.

3.2 저속에서의 마찰, 소음특성

본 실험은 저속에서의 철산화물의 종류에 따른 마찰특성을 고찰하기 위한 실험으로 Fig. 2 에서 상대적으로 저속에 해당하는 1.57~23.55 m/sec 영역중 측정의 재현성이 안정적이었던 23.55 m/sec 의 속도에서 마찰실험을 실시하였다.

Specific torque 를 측정하여 stick-slip 현상을 분석 하였으며, stick-slip 현상과 상대재인 회주철 디스크의 표면 변위와의 관계를 고찰하고자 디스크의 run-out 을 동시에 측정하였다. 또한, 마찰특성과 소음발생 현상을 동시에 분석하기 위하여 회주철 디스크의 1 회전을 기준으로 각위치 (angular position)에 따른 specific torque, run-out, noise level 을

동시에 측정하였다(Fig. 3). Fig. 3 는 마찰실험이 12 시간이 경과한 상황의 결과를 나타낸 것이다.

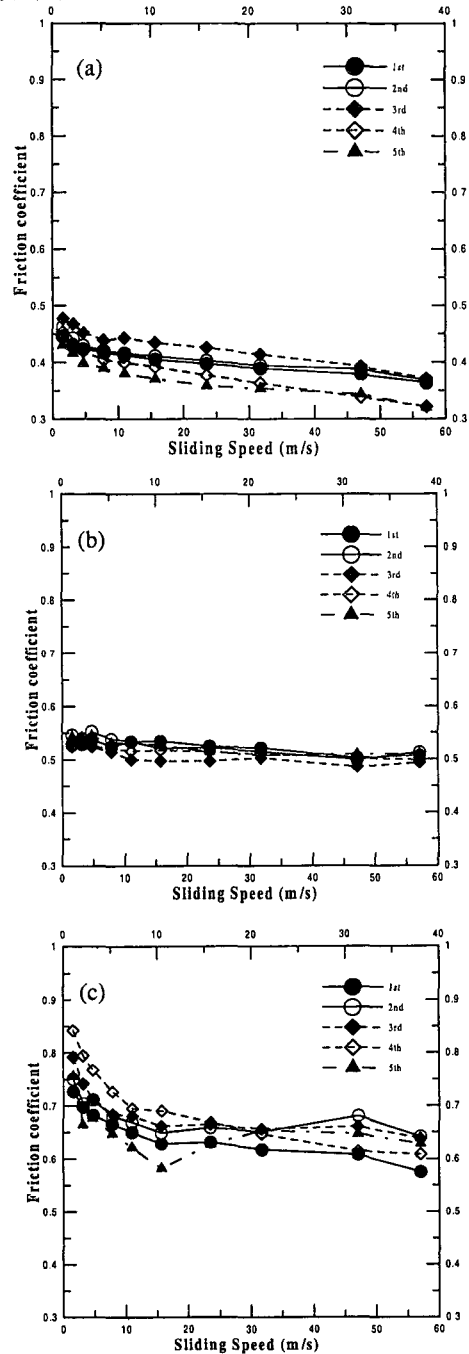


Fig. 2. Change of the friction coefficient as a function of sliding speed for friction materials containg (a) Fe (b) Fe_2O_3 (c) Fe_3O_4 .

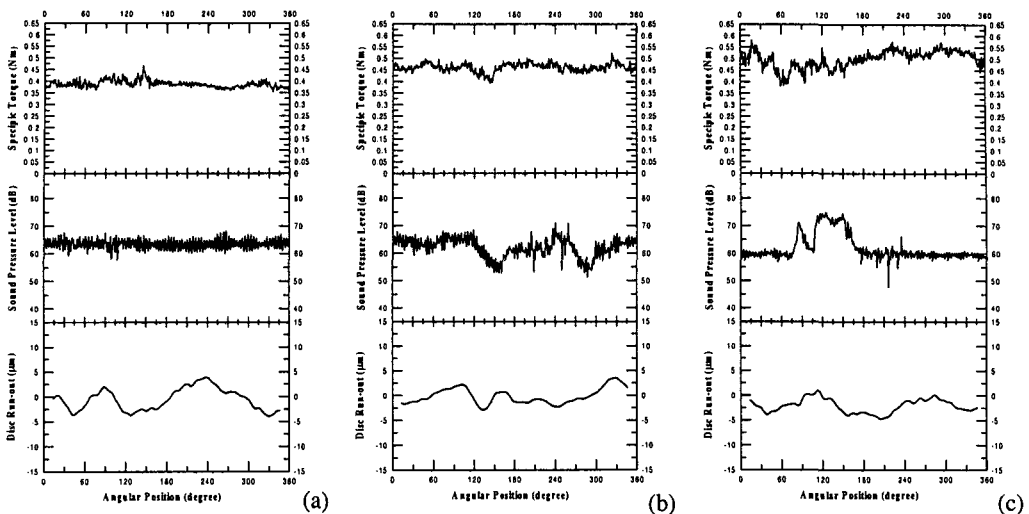


Fig. 3. Disk run-out, noise level and specific torque measured during friction tests as a function of angular position on the disk for specimens containing (a) Fe (b) Fe_2O_3 (c) Fe_3O_4 .

마찰실험을 시작한 후 6 시간까지는 마찰 계수가 지속적으로 증가하는 현상이 모든 시편에 대하여 관찰되었다. 이는 회주철 디스크 표면에 전이막 (transfer film)이 형성되면서 마찰계수의 안정화되는 현상에 기인한 것으로 사료되며, 본 실험의 경우 충전재로 사용된 aramid pulp 가 전이막 형상에 크게 기여한 것으로 판단된다. Fig. 3 에 나타낸 run-out 은 디스크 표면과 비접촉식 변위 센서 사이의 거리를 측정함으로써 run-out 곡선의 최고점을 디스크 변위의 최저점을 나타낸다.

일반적으로 디스크의 변위가 높아지는 곳에서 마찰력이 증가하며, 변위가 낮아질 경우 마찰력도 감소하는 것으로 알려져 있다. 이는 Meine [10] 등이 실시한 표면 거칠기(roughness)와 마찰현상에 관한 연구를 통해 확인된 바 있다. 그러나 본 실험에서는 디스크 표면의 변위에 따른 specific torque 의 관계를 도출할 수 없었다. 이는 마찰실험 시간이 충분하지 못하여 철산화물에 의한 디스크 표면의 편마모가 크지 않았기 때문으로 사료되며, 초기에 측정된 run-out 과 실험을 완료한 후의 run-out 값의 변화가 거의 없었던 것을 통해 확인할 수 있었다.

소음측정 결과 Fe 를 포함한 시편은 실험이 종료될 때까지 소음을 발생하지 않았다. 그러나, Fe_2O_3 나 Fe_3O_4 를 포함한 시편의 경우 실험 시작 약 2 시간 후부터 squeal noise 를 발생했다. Fig. 3 에서 소음을 발생하

지 않고 마찰하는 경우 55~ 60dB 이었으며, 소음 발생시 70~80dB 의 음압이 측정되었다. 소음을 발생한 두 시편의 경우 specific torque 가 급격히 증가하거나 감소하는 곳에서 squeal noise 가 발생함을 관찰 할 수 있었으나, specific torque 의 변화가 수반되지 않은 경우에도 squeal noise 가 발생하였다. Fe_2O_3 를 포함 한 시편의 경우 디스크에서 소음이 발생 하는 부분의 면적이 지속적으로 증가하였으나, Fe_3O_4 를 포함한 시편의 경우 시험 시작 후 10 시간 경과 시점까지는 점차 증가하였으나, 11 시간이 경과하자 잠시 사라졌으며, 30 분이 지난 후 다시 squeal noise 가 발생하였다.

Fe_2O_3 또는 Fe_3O_4 를 포함한 시편에서 발생한 squeal noise 를 noise spectrum analyzer 를 통해 분석한 결과 Fig. 4 과 같이 Fe_3O_4 를 포함한 시편의 경우 한가지 주진동수로 구성된 반면 Fe_2O_3 를 포함한 시편은 여러가지 진동수로 구성되어 있음을 관찰 할 수 있었다.

그러나, 본 실험에서는 squeal noise 의 원인으로 지적되어온 run-out, 속도, 하중의 변화를 관찰 할 수 없었다.

3.3 마찰표면의 관찰

철산화물의 종류에 따른 마찰특성 및 소음특성의 원인을 마찰표면의 관점에서 규명하고자 마찰표면의 형상을 분석하였다. 전자주사현미경 (SEM) 을 통해 마찰재의 표면형상을 관찰하였으며, 광학현미경을 통

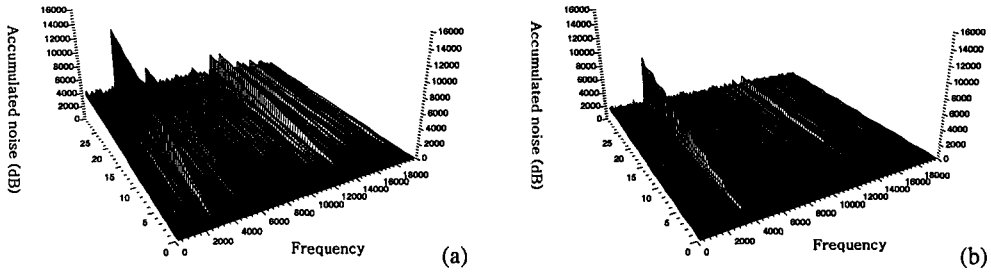


Fig. 4. The frequency spectrums of squeal noise for the friction materials containing (a) Fe_2O_3 and (b) Fe_3O_4

해 회주철 디스크의 마찰표면을 관찰하고 surface profiler (alpha-step 500 surface profiler, Tencor Instrument)를 통해 회주철 디스크의 R_a 를 측정하였다.

Fe를 포함한 시편의 마찰표면을 관찰한 결과 Fig. 5(a)에서와 같이 평평한 부분만이 관찰되었다. 반면, Fe_2O_3 나 Fe_3O_4 를 포함한 시편에서는 평평한 부분과 마모 입자의 응결에 의해 형성된 요철 부위가 모두 존재하였다 (Fig. 5(b), (c)). 그러나 Fe_2O_3 가 포함된 마찰재 표면의 평평한 부위 (Fig. 5(d))는 비교적 균일한 반면 Fe_3O_4 가 포함된 마찰재는 상대적으로 불균일 하였다(Fig. 5(e)). 마찰재 표면의 평평한 영역의 면적에 따른 마찰특성에 관한 연구는 Erikson [11]등에 의해 연구된 바 있다. 자동차의 제동과

정에서 마모입자 들이 기존의 평탄한 영역에 응착하여 평평한 부분의 면적이 증가시키고 이것으로 인해 real contact area가 증가하여 마찰력의 상승에 기여하는 것으로 알려져 있다.

마찰재의 상대재로 쓰인 회주철 디스크의 표면을 광학현미경으로 관찰한 결과 마찰 실험이 종료된 후 모든 디스크에서 표면 손상이 관찰되었다. 그러나, 상대적으로 Fe_2O_3 가 포함된 시편과 Fe_3O_4 를 포함한 시편으로 마찰된 디스크의 손상이 크게 나타났다. 이는 Fe_3O_4 입자가 Fe_2O_3 보다 상대적으로 큰 경도를 지니고 있으며, 그 형상도 더 날카로운 다각형 형태를 지니고 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, Fe_2O_3 를 포함한 마

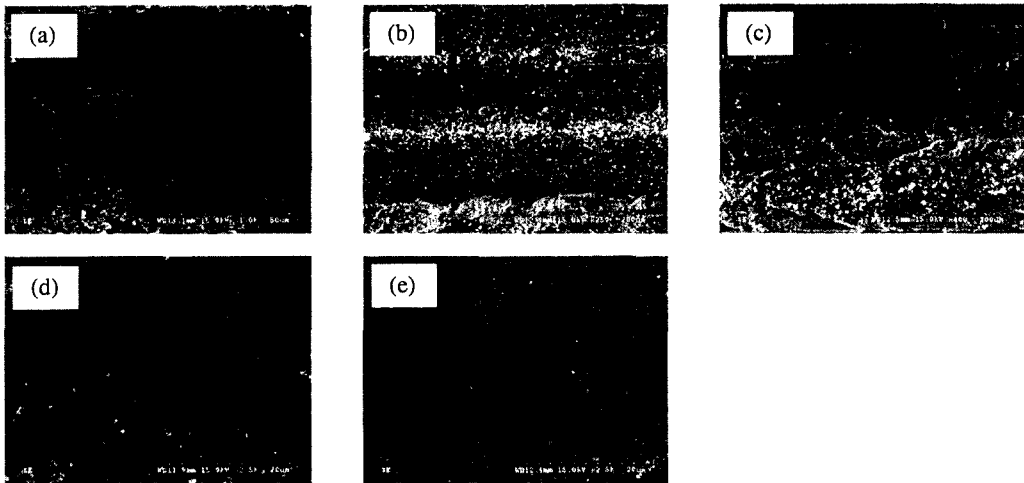


Fig. 5. SEM micrographs of worn surfaces of friction materials containing (a) Fe (b) Fe_2O_3 (c) Fe_3O_4 (d) and (e) are magnified surface of the plateau of (b) and (c).

찰재가 사용된 디스크에서는 철산화물의 대면공격성에 의한 표면손상 이외에 붉은 색의 응착물이 관찰되었으며, 표면거칠기를 측정된 결과 응착물의 높이는 5~8 μm 이고, 손상된 표면의 깊이는 4~6 μm 이었다.

Squeal noise 가 발생했던 회주철 디스크의 표면거칠기를 측정된 결과소 소음이 발생한 부분의 표면거칠기 분포가 소음이 발생하지 않은 부분에 비해 상대적으로 불균일했으며, Fe_3O_4 가 포함된 시편의 경우가 Fe_2O_3 가 포함된 시편에 비해 그 편차가 더 컸다. (Fig. 6)

이상의 결과를 기초로 하여 철산화물의 마찰 및 소음 특성의 원인을 추정해보면 다음과 같다.

Fe 가 포함된 마찰재는 Fig. 5 (a)와 같이 균일한 마찰막을 형성하며, 판상 형태의 Fe 입자형상은 초기의 평평한 면적을 넓여 주어 평평한 마찰막 형성이 상대적으로 쉽게 형성되도록 하는 것으로 판단된다. 또한, Fe 입자는 판상이기 때문에 다른 철산화물과는 달리 마찰시 구름 (rolling) 현상이 크지않을 것이므로 초기에 형성된 평평한 마찰막의 손상이 적을 것으로 생각된다. 이러한 이유로 real contact area 의 변화를 최소화하여 안정된 specific torque 를 유지하고 squeal noise 가 발생하지 않도록 하는데 기여할 것으로 사료된다.

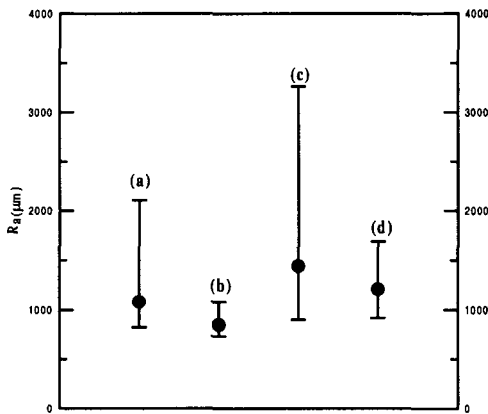


Fig. 6. Surface roughness of disks after sliding tests indicate R_a of the disks generating squeal noise when the specimens containing Fe_2O_3 (a), Fe_3O_4 (c) are used. (b) and (d) indicate R_a of the disks without generating squeal noise when the specimens containing Fe_2O_3 (b), Fe_3O_4 (d) are used.

Fe_2O_3 또는 Fe_3O_4 를 포함한 마찰재는 Erikson[11]등이 제시한 평평한 영역의 면적증가 현상과 철산화물의 대면공격성에 의한 마찰막의 손상이 동시에 진행되는 것으로 판단된다. 마찰재의 표면사진 (Fig. 5(d), (e)) 에서 관찰된 마모입자들은 일부가 기존 평평한 부분에 응착하여 그 면적을 증가시키지만, 다른 일부는 마찰시 마찰재와 디스크 사이에서 구름현상을 일으켜 회주철 디스크의 표면 및 기존 평평한 부분에 손상을 주어 real contact area 의 불연속적인 변화를 일으킬 것으로 사료된다. 이로 인해 specific torque 의 급속한 변화가 야기되며 squeal noise 발생의 원인으로 작용할 것으로 판단된다.

특히, Fe_2O_3 의 경우 앞서 언급한 원인 이외에 마찰재 마모입자의 회주철 마찰 표면으로의 응착이 또 다른 요인이 될 것으로 추측할 수 있다.

4. 결론

본 실험에서는 부식에 의해 형성될 수 있는 철산화물의 마찰특성 및 소음특성을 고찰하고자 하였다. 각각의 철산화물을 포함하는 마찰재를 제작하였으며, block-on-disc 방식의 마찰시험기와 소음 분석장비를 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 철 및 철산화물 (Fe , Fe_2O_3 , Fe_3O_4)이 포함된 마찰재에 대하여 속도에 따른 마찰계수를 측정된 결과 Fe_3O_4 를 포함한 마찰재가 속도에 따라 민감한 마찰계수 변화를 나타냈다.
2. Fe 를 포함한 마찰재에서는 소음이 발생하지 않았으며, Fe_2O_3 또는 Fe_3O_4 를 포함한 마찰재에서 squeal noise 가 발생했다.
3. squeal noise 와 specific torque, 디스크의 변위의 관계는 관찰되지 않았다.
4. 급격한 specific torque 와 squeal noise 의 발생은 마모입자의 응착에 의한 마찰재 표면의 평평한 부분의 면적이 증가하는 형상과 마모입자의 대면공격성에 의한 디스크 표면손상으로 인한 real contact area 의 불연속적 변화에 기인한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. J.D. Halderman, Automotive brake systems, Prentice-Hall, London, 1996.

2. R.A. Ibrahim, "Friction-induced Vibration, Chatter, Squeal and Chaos. Part 2. Dynamics and Modeling," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 47, 1994.
3. A. Wirth, K. Stone and R. Whitaker, "A Study of the Relationship Between Transfer Film Chemistry and Friction Performance in Automotive Braking Systems," SAE paper 922541, 1992.
4. 장호, "자동차 제동시 나타나는 마찰 특성에 관한 연구," *한국윤활학회지* 제 13 권, pp. 34~41. 1997.
5. S.K. Rhee, P.H.S. Tsang, Y.S. Wang, "Friction-induced Noise and Vibration of Disc brake," *Wear*, Vol. 133, pp. 39~45, 1989.
6. C. Guangsong, Z. Zhongrong, P. Kapsa, L. Vincent, "Effect of Surface Topography on Formation of Squeal under Reciprocating Sliding," *Wear*, Vol. 253, pp. 411~423, 2002.
7. W. Österle, I. Urban, "Friction layers and Friction films on PMC Brake pads," *Wear*, Vol. 257, pp. 215~226, 2004.
8. 김성진, "Experimental Investigation on Tribological Characteristics of Phenolic-Based Friction Materials for Automotive Brakes," *고려대학교 박사학위논문*, pp. 134~135, 2004.
9. Rabinowicz, E., *Friction and Wear of Materials*, Chap.4, pp. 105~112, John Wiley&Sons, New York, 1995.
10. K. Meine, T. Schneider, D. Spaltmann, E. Santner, "The Influence of Roughness on Friction Part I :The Influence of a Single step," *Wear*, Vol. 253, pp. 725~732. 2002.
11. M. Eriksson, S. Jacobson, "Tribological Surface of Organic Brake pads," *Tribology International*, Vol. 33, pp. 817~827, 2000.