

자동차용 브레이크 로터의 재료로 사용되는 회주철의 미세구조에 따른 마찰특성에 관한 연구

조민형·장호

고려대학교 공과대학 재료금속공학부

Effect of the Microstructure of Gray Cast Iron Disk on Friction Characteristics

Min Hyung Cho · Ho Jang

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract- The effect of microstructure of gray cast iron disk was investigated by using a pad-on-disk type friction tester. Three different rotors with different microstructures were studied in this work. They showed a pearlitic matrix, a ferritic matrix, and a martensitic structure, respectively. All of them have graphite flakes in common. Drag tests at different pressure and speed conditions were carried out to study friction stability, temperature rise during drags. The rotor containing pearlitic matrix showed lower values of friction coefficient, small amount of temperature rise, and less fading. The results showed that gray cast iron disk containing pearlitic matrix has good friction characteristics.

Key words- gray cast iron, friction characteristics, pearlite, ferrite, martensite.

1. 서론

자동차의 감속 및 정차에 사용되는 브레이크의 제동 성능은 주로 마찰재와 상대재인 로터의 재료적 특성과 그에 따른 마찰 특성에 의해 결정된다.

자동차용 브레이크 로터는 마찰열을 신속하게 마찰표면으로부터 제거해야 하며, 떨림현상(judder) 등을 방지하도록 감쇠능

(damping capacity)이 우수해야 하고, 마모량이 적어야 한다. 회주철은 이러한 측면에서 로터의 재료로 적합하다[1]. 회주철의 미세조직은 일반적으로 편상 흑연 (graphite flake), 페라이트(ferrite), 퍼얼라이트(pearlite)로 구성되어 있으며, 열전도율, 감쇠능의 특성은 편상 흑연의 형상과 크기에 의해 크게 좌우된다[2]. 편상 흑연이 A type 이고,

길이 길고, 양이 많을수록 열전도율, 감쇠능이 뛰어나지만, 편상흑연의 함량의 증가는 강도를 감소시키므로, 적절한 함량을 유지하여야 한다[1,3].

상용화된 브레이크용 디스크 로터의 미세조직은 A type의 편상흑연, 퍼얼라이트, 소량의 페라이트로 구성된다. 편상흑연의 형태와 함량은 C과 Si의 함량, 냉각속도 및 응고속도에 따라 달라지며, 퍼얼라이트와 페라이트의 상대적 비율도 주조시의 응고속도 및 냉각속도에 따라 결정된다. 일반적으로 고온 고압의 제동 조건에서는 로터의 표면 온도가 800°C 이상으로 증가하고, 급냉이 이루어지면 마르텐사이트가 생성되기도 한다고 알려져 있다[5].

본 실험에서는 실제 상대재 디스크에 나타나는 퍼얼라이트, 페라이트, 마르텐사이트 기지 조직을 갖는 로터의 마찰 특성을 분석함으로써 상대재의 미세조직의 변화에 따른 마찰특성의 변화를 예측해보고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 서로 다른 미세조직을 갖는 3가지 로터를 제작한 후, 실험을 통하여 로터의 온도상승률을 비교하고, pad-on-disk 형태의 마찰시험기를 이용하여 로터의 온도와 그에 따른 마찰계수의 변화를 분석하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용된 로터는 기존의 로터를 주물가공 하여 만든 3가지의 로터

중, 2가지 로터는 풀림(annealing)과 급냉(quenching)의 열처리 방법으로 미세조직을 변화 시켰다.

R1은 열처리를 하지 않은 로터이며, R2는 box furnace(Lindberg/Blue M)를 이용하여 1000°C에서 1시간 유지하고, 650°C까지 노냉 시킨 후, 공냉시켰다. R3은 1000°C에서 1시간 유지한 후 상온의 물에 급냉하였다.

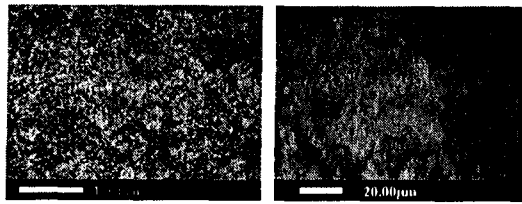
3가지 로터는 공통적으로 흑연을 포함하고 있으며, 열처리에 따라 기지조직의 차이를 나타내었다. R1의 기지조직은 퍼얼라이트와 소량의 페라이트로 되어있고, R2는 대부분 페라이트로 되어있으며, R3의 기지조직은 대부분 마르텐사이트로 구성되어 있다.

본 실험에서 상대재로 사용한 마찰재는 현재 우수한 제동 성능을 나타내는 것으로 알려져 있는 유기질(NAO, Non-asbestos organic)마찰재를 사용하여 실험하였다. 본 실험에서 사용한 마찰재는 phenolic resin을 결합재로 하여 10여가지 이상의 마찰 조절제와 충전제로 구성되어 있다.

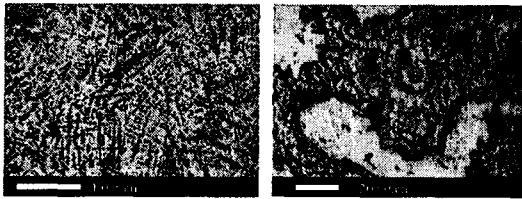
각 로터의 마찰열에 의한 온도상승률을 비교하기 위하여 hot plate(corning model pc-420)에 로터의 마찰면이 접하도록 하고, 반대편의 표면 온도를 적외선 온도측정기

Table 1. The chemical composition of original disk rotor (wt.%)

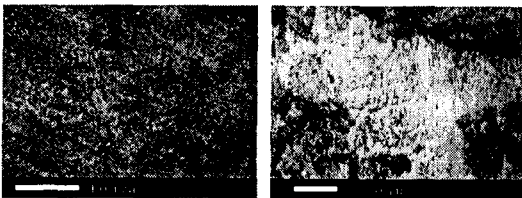
C	Si	Mn	S	Cr	Cu	P	Sn	Fe
3.5	1.7	0.8	<0.1	0.5	0.25	<0.2	0.05	Bal.



(a) Rotor1



(b) Rotor2



(c) Rotor3

Fig. 1. Microstructure of rotor disk surfaces
(Magnifications in the left micrographs are $\times 16$ and the right micrographs are $\times 560$ using an optical microscope).

(infrared heat tracer, 3M IR-16)를 사용하여 측정하였다. Hot plate의 온도는 일정하게 428°C 로 유지하도록 열을 가하였다.

마찰 시험은 pad-on-disk 형태의 정속 마찰시험기를 이용하였고[11], 마찰 시험은 모든 시편에 걸쳐 로터와 마찰재가 균일한 접촉이 되도록 저압, 저속으로 burnishing 작업을 시행한 후 실험하였다.

마찰 시험은 가압력과 속도를 변화시키

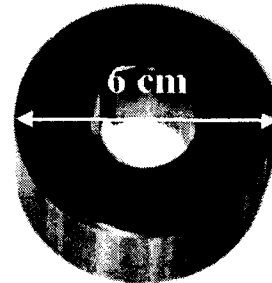
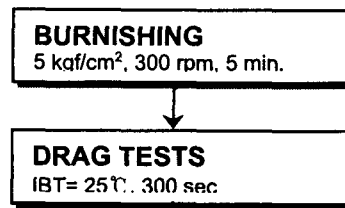


Fig. 2. The photograph of counter disk used in this work.

며 실험하였다(Table 2). 마찰계수를 환산하기 위해 필요한 토크량(torque)은 load cell을 이용하여 측정하였으며, 회전하는 로터의 온도는 적외선 온도측정기(infrared heat tracer, 3M IR-16)를 사용하였다. 로터의 회전축에 속도 감지기를 설치하여 실제 디스크의 회전속도를 측정하였고, 압력은 유압 시스템을 이용하여 일정하게 유지하였다.

Table 2. Experimental procedure



Rotor	R1	R2	R3
Pressure	5kgf/cm ²	7 kgf/cm ²	9 kgf/cm ²
Speed			
300 rpm	TEST 1	TEST 2	TEST 3
500 rpm	TEST 4	TEST 5	TEST 6
700 rpm	TEST 7	TEST 8	TEST 9

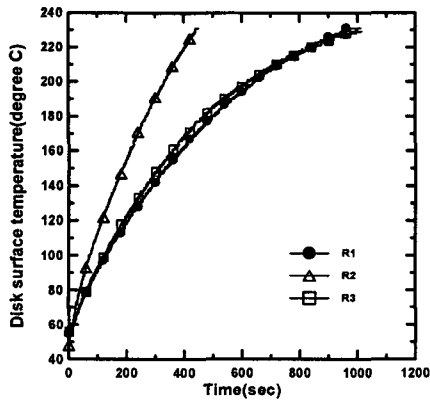


Fig. 3. Rear surface Temperature of disk. Front surface temperature was 428°C.

마찰시험기에 장착되는 마찰재의 시편의 크기는 1cm×1cm×0.7cm 이며, 로터는 6cm의 직경과 2.5cm의 두께이다(Fig. 2). 본 실험에 사용한 마찰재는 현재 상용화되어 있는 유기질마찰재를 사용하여 각 로터에 대해 9가지 모드의 실험을 하였다. TEST4 (500rpm, 5kgf/cm²)에 대해서 저속마찰재(low-metallic)로 실험하여, 이때의 마찰특성을 유기질 마찰재의 경우와 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 3. Thermal conductivity of phases in gray cast iron(W/mK)[4]

	Graphite	Pearlite	Ferrite	Cementite
0~100°C	2.93-4.19	0.5	0.71-0.8	0.071-0.084

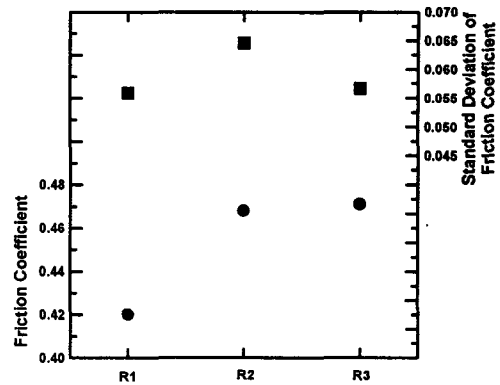


Fig. 4. Friction coefficient and Standard deviation of friction coefficient(●: friction coefficient, ■:standard deviation of friction coefficient).

3-1. 로터의 열전도율

마찰재와 상대재의 마찰특성은 온도에 매우 민감하기 때문에 마찰열에 의한 마찰계면의 온도 상승은 매우 중요한 요소이다. 각 로터의 마찰열에 의한 온도 상승을 상대적으로 비교하기 위하여 hot plate 위에 로터의 표면을 접하게 한 후 반대편 표면의 온도를 시간에 따라 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 페라이트를 기지조직으로 갖는 R2의 열전도율이 가장 우수했으며, 다른 2가지의 로터(R1, R3)는 서로 유사한 온도상승을 나타내었다. 이는 페라이트가 퍼얼라이트에 비해 열전도율이 높으므로 (Table 3), 페라이트를 기지조직으로 갖는 R2의 온도상승이 작게 나타난 것으로 사료된다. Fig. 3에서 나타난 것과 같이 마르텐사이트와 퍼얼라이트를 기지조직으로 갖는 로터(R1, R3)는 유사한 온도상승을 나타내었다.

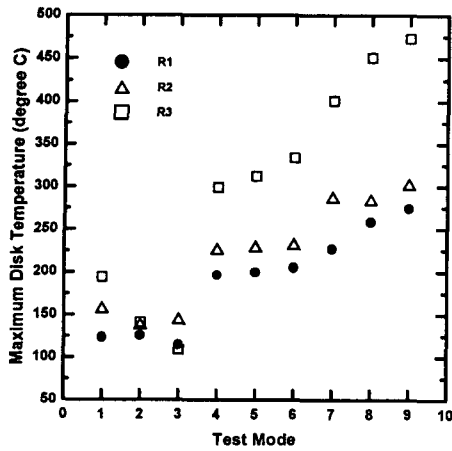


Fig. 5. Maximum temperature of rotor surface at different speed and pressure conditions.

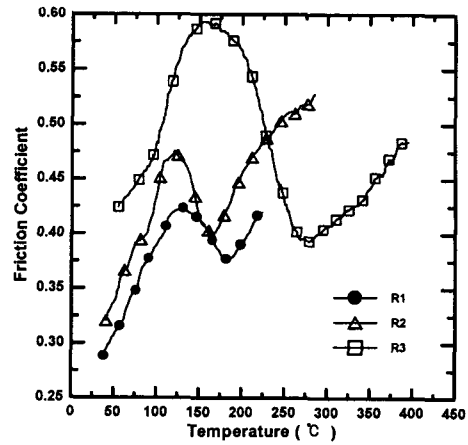


Fig. 6. Change of friction coefficient as a function of rotor temperature during TEST 7(5kgf/cm², 700rpm).

3-2. 평균마찰계수와 로터의 온도 상승

로터의 회전속도와 마찰열에 의한 온도 상승에 따른 마찰계수의 거동을 분석하기 위해, 각각의 로터에 대하여 동일한 마찰재를 사용하여 속도와 압력을 변화시키며 TEST1에서 TEST9까지 반복하였다. 초기 불균일한 마찰계수를 나타내는 6초까지의 값은 제외시키고, 마찰 거리를 일정하게 하기 위하여 300rpm은 294초, 500rpm은 176.4초, 700rpm은 126초까지의 데이터를 산출하였다. 로터에 따른 마찰계수의 수준을 알아보기 위하여, 마찰계수의 평균값을 Fig. 4에 나타내었다. R2와 R3의 로터가 R1에 비해 다소 높은 마찰계수를 나타내었다.

마찰계수는 마찰열에 직접적으로 비례하므로 평균마찰계수가 가장 높은 값을

나타내었던 로터가 가장 많은 마찰열을 받았던 것으로 추론된다. Fig. 4에서 R3와 R2의 마찰계수가 R1에 비해 높은 값을 나타냈으며, R3의 마찰계수가 R2에 비해 약간 높은 수치를 나타내었다. 이것은 R1에 비해 R3와 R2에서 많은 마찰열이 발생하였음을 나타낸다. 그러나, Fig. 5에서 로터의 최대 표면 온도는 R1과 R2가 상대적으로 낮은 값을 나타냈으며, R3은 상당히 높은 온도를 나타내었다. 높은 마찰열에도 표면온도의 상승이 적었던 R2의 경우, 열전도율이 우수하여 마찰열을 많이 방출함으로써 R1보다 약간 높은 정도의 로터 온도 상승을 나타내었다.

3-3. 온도에 따른 마찰계수와 마찰계수의 안정성

마찰계수는 온도에 민감하며, 고온에서

마찰계수가 급격히 감소하는 fading 이 발생하기도 한다. Fading 은 고온에서 마찰재에 사용되는 유기질 원료가 기화되어 마찰재와 로터의 접촉을 방해하거나 유기질이 변성되어 마찰효력을 상실함으로써 나타나는 현상이다[6]. 본 실험에서는 마찰 시험조건이 700rpm, 5kgf/cm² 일 때 공통적으로 fading 현상이 나타났으며, 이 때의 온도에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 최대표면온도가 가장 높았던 R3의 경우, 온도에 따른 마찰계수도 전반적으로 높았으며, fading 시 마찰계수의 감소량도 가장 컸다. 반면에 R1은 마찰계수, 표면온도, fading 시의 마찰계수 감소량이 다른 로터에 비해 상대적으로 적었다. 이러한 결과는 유기질마찰재를 사용하여 실험한 경우, 퍼일라이트를 다량 포함한 로터의 마찰계수가 페라이트 또는 마르텐사이트를 다량 포함한 로터에 비해 마찰계수가 낮게 나타남을 의미한다.

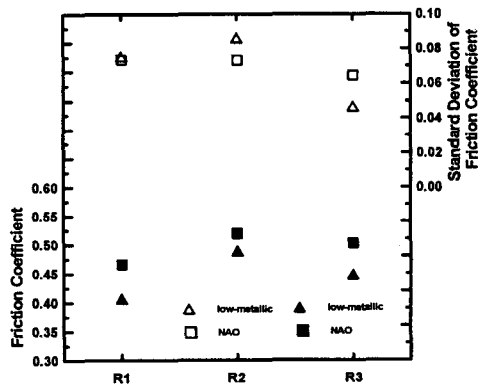


Fig. 7. Friction coefficient and standard deviation of NAO and low metallic friction materials at TEST4(500rpm, 5kgf/cm²).

3-4. low metallic 계열의 마찰재에 대한 마찰특성

각 로터에 대하여 저금속 마찰재를 사용하여 500rpm, 5kgf/cm²의 실험조건하에서 실험하여 평균마찰계수와 표준 편차를 구하였다(Fig. 7). 유기질마찰재가 0.46~0.52, 저금속마찰재는 0.41 ~0.49 범위의 마찰계수를 나타내었다. 로터의 변화에 따라 저금속마찰재의 마찰계수가 유기질마찰재의 값보다 약간 낮은 값을 나타내었으며, 이는 금속성 마찰재를 사용한 경우 마찰재에 다량 사용된 금속섬유의 열확산이 유기질 마찰재에 비해 우수하여 나타난 현상으로 사료된다. 저금속마찰재에서도 상대재로 R2와 R3를 사용했을 경우, 상대재가 R1인 경우에 비해 높은 마찰계수를 나타내었다.

저금속마찰재는 유기질마찰재에 비해 로터의 변화에 따른 표준편차의 변화가 컸으며, 이것은 저금속마찰재는 로터의 미세조직에 따라 마찰계수의 안정성이 변화하는 것을 의미한다.

4. 결 론

자동차용 브레이크의 디스크 로터로 사용되는 회주철의 미세조직을 변화한 후, Pad-on-disk 형태의 마찰 시험기를 이용하여 마찰 특성을 연구하였다. 마찰재는 기본적으로 유기질마찰재를 사용하였다. 로터의 미세조직에 따라 마찰계수, 로터의 최대온

도, fading 현상이 변화하였다. 퍼얼라이트 기지 조직을 갖는 로터가 마찰계수, 로터 표면 온도의 상승, fading 이 현저히 적게 나타났다. 페라이트를 기지조직으로 갖는 로터는 열전도율은 우수하지만, 퍼얼라이트를 기지조직으로 갖는 로터에 비해 높은 마찰계수를 나타내어, 퍼얼라이트를 기지조직으로 갖는 R1 보다 높은 디스크 온도를 나타내었다. 그러나, 페라이트는 마모에 대한 저항성이 약하다고 알려져 있다[12]. 본 실험에서는 마모량 측정을 하였으나 실험 오차 범위에 포함되어 표기하지 않았다. 마르텐사이트를 기지조직으로 갖는 로터는 높은 마찰계수, 높은 디스크 온도, fading 시 마찰계수의 변화가 컸다.

후 기

본 연구는 1998 년 한국과학재단 지원 특정기초연구(과제번호 98-0200-02-01-3)에 의한 결과의 일부입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Smith, Structure and Properties of Engineering Alloys, 2nd Edition , pp. 350-353, Mcgraw-hill, 1993.
2. Rena L. hecht, Ralph B. Dinwiddie, Wallace D. Porter, and Hsin Wang, "Thermal Transort Properties of Gray Cast Irons," SAE962126, pp.1-6, 1996.
3. Annual Book of ASTM Standards, vol.1, pp.118-119, 1991.
4. Metals Handbook, 10th edition, vol.1, pp.64.
5. S.K. Rhee, R. T. Ducharme, and W. M. Spurgeon, "Characterization of Cast Iron Friction Surface", SAE 720056, pp.1-7, 1972.
6. 김성진, 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰재의 마찰 특성에 관한 연구 II," 한국윤활학회지, 제 13 권, 제 3 호, 1997.
7. 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰 특성에 관한 연구 I," 한국윤활학회지, 13 권, 제 1 호, 1997.
8. 김성진, 최낙천, 장 호, "습도에 따른 자동차용 마찰재의 마찰특성에 관한 연구," 제 28 회 한국윤활학회 추계 학술대회 초록집 , 1998.
9. 이정주 장 호, "자동차 제동시 나타나는 Anti-fading 현상에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 14 권, 제 1 호, pp.70-78, 1998.
10. Ho Jang, Jung Joo Lee, Sung Jin Kim, Kee Young Jung, "The Effect of Solid Lubricants on Friction Characteristics", SAE 982235, 1998.
11. 김성진, 홍영석, 장 호, "자동차용 마찰재에 사용되는 페놀수지의 종류에 따른 마찰특성의 영향에 관한 연구", 제 29 회 한국윤활학회 춘계 학술대회 초록집, 1999.
12. T.S. Eyre, Metals Handbook, 10th edition, vol. 18, pp. 695-701.