

자동차 브레이크용 디스크의 미세조직에 따른 편마모 특성에 관한 연구

이재영, 김성진, 한창주, 장 호

고려대학교 신소재공학과

Wear Characteristics of Automotive Disc Brakes: Effect of Gray Cast Iron Microstructures

Jae Young Lee, Seong Jin Kim, Chang Joo Han and Ho Jang

Department of Advanced Materials Engineering, Korea University

Abstract – The objective of the experiment is to investigate the effect of microstructures of gray cast iron on wear characteristics of automotive disc brakes. Six different gray cast iron rotors were manufactured by changing carbon equivalent and cooling rate. The change of DTV (disc thickness variation) before and after wear tests was measured to examine the wear properties according to the microstructures of gray iron discs since the DTV generation is caused by the circumferential uneven wear. Experimental results showed that the morphology of graphite flake and hardness in gray cast iron were crucially associated with the change of DTV. In particular, the DTV changes of rotor decrease when the length and area fraction of graphite flake in brake rotors increase and hardness of brake discs reduces.

Key words – wear characteristics, gray cast iron, DTV (disc thickness variation), microstructure.

1. 서 론

자동차 브레이크용 로터는 제동시 마찰재와의 마찰에 의해 차량을 감속시키는 마찰재의 상대재이다. 일반적으로 제동시 발생하는 열에너지는 로터와 마찰재를 통해 외부로 방출되므로 열전도율이 우수한 회주철을 주로 사용하고 있다[1]. 특히, 회주철은 감쇠능(damping capacity)이 우수하여 제동시 마찰계면에서 발생하는 진동을 감소시키는 역할을 한다[2].

일반적으로 회주철의 미세구조는 퍼얼라이트(pearlite), 편상흑연(graphite flake), 페라이트(ferrite)로 구성되며, 로터의 열전

도율과 감쇠능은 회주철내 편상흑연(graphite flake)의 길이와 형태에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이러한 흑연의 길이와 형태는 주로 주물 제조시 형성되며 냉각속도, 응고속도, 용탕의 주입속도 및 탄소당량(CE, carbon equivalent: $[C]wt\% + 1/3[Si]wt\%$)에 의해 결정된다[3]. 따라서 로터의 미세조직에 따른 마모특성은 로터조직내의 편상흑연과 퍼얼라이트의 형상 및 함량에 따라 다르게 나타난다. 특히, 제동시 로터의 편마모 특성에 의한 DTV(disc thickness variation)의 발생은 토크 변화량을 증가시켜 브레이크 떨림현상(brake judder)을 유발시키는 원인이 되고

있다[4,5]. 이러한 로터의 두께변화는 700°C 이상의 고온에서 열변형에 의해 발생하는 경우와 저온에서 로터의 강성 및 마찰계의 대면공격성에 따른 편마모 특성에 기인하여 나타날 수 있다. DTV 에 따른 judder 현상은 최근 제동시 발생하는 소음특성중 가장 큰 문제점으로 대두되고 있으며 이에 따른 체계적인 연구가 시급한 실정이다. 그러나 지금까지 로터에 대한 분석은 주로 열전달 해석에 관한 연구였으며, 로터의 미세조직에 따른 소음특성에 관한 연구보고는 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서 본 실험에서는 로터의 냉각속도와 탄소당량이 다른 6 종의 로터를 제조하여 미세조직에 따른 편마모특성을 연구하였다. 특히, 편마모의 차이에 따른 로터의 DTV 변화에 초점을 두었으며, 이를 흑연의 형상과 연관지어 상관성을 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 로터의 탄소당량과 냉각속도를 변화시켜 미세조직이 다른 총 6 종의 디스크 로터를 제조하였다(Table 1). 주물가공한 로터의 탄소당량은 각각 4.63, 4.33(상용), 4.14 로 나타났으며 냉각속도는 주형의 두께를 15T(mm)와 11T 로 변화시켜 조절하였다. 각 로터에 함유된 탄소와 규소의 구체적인 조성은 Table 1 에 나타내었다. 제조된 로터의 미세조직을 분석하기 위해 탕구 방향과 탕구 반대방향의 부분을 설정하여 절단면의 단면을 관찰하였다. 최대 흑연의 길이와 면적비는 광학현미경과 화상분석기(BMI plus, Bummi Universe)를

이용하여 분석하였으며, 로터의 경도는 Brinell 경도기를 이용하여 측정하였다.

Table 1. Carbon and silicon contents and CE of disc rotor used in this work

Disc	C(wt%)	Si(wt%)	CE	T(mm)
A	3.45	2.08	4.14	11
B	3.45	2.08	4.14	15
C	3.65	2.04	4.33	11
D	3.65	2.04	4.33	15
E	3.93	2.11	4.63	11
F	3.93	2.11	4.63	15

마모시험은 실제 차량의 로터를 장착할 수 있는 공압(pneumatic) 방식의 정속 마찰시험기를 이용하여 편마모 특성을 분석하였다(Fig. 1). 편마모 시험에 사용된 마찰계는 0.402 의 평균마찰계수와 53 HRs 의 평균 Rockwell 경도를 나타내는 저급속 재질의 상용마찰재이다. 시험기에 장착되는 마찰계의 크기는 2cm×2cm 이며, 총 접촉면적은 8cm² 이다. 편마모 시험은 0.69 MPa 의 압력과 200rpm (2.56m/s)의 속도로 48 시간동안 수행되었다.

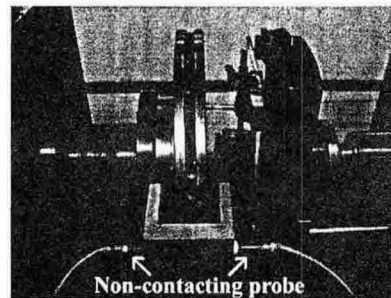


Fig. 1. A photograph of friction tester used in this work.

마모시험전 로터의 초기 run-out 은 30 μ m 이내로 조절하였으며 마모시험 전후의 DTV 변화(Δ DTV: Max DTV after wear test - Max DTV before wear test)를 측정하였

다. DTV의 변화는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 로터표면의 내외에 와전류식 비접촉 탐침(probe, Bently REBAM 3300)을 장착하여 로터의 두께변화를 측정하였다. 비접촉식 탐침을 통해 측정된 DTV는 100Hz와 500Hz의 데이터 처리속도로 실시간 저장하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 로터의 미세조직 관찰

본 실험에서는 서로 다른 미세조직의 로터를 얻기 위해 탄소당량과 냉각속도를 변화시켜 총 6종의 디스크를 제조하였다. Fig. 2는 광학현미경을 이용하여 $\times 100$ 의 배율로 측정된 로터의 미세조직을 나타낸 것이다.

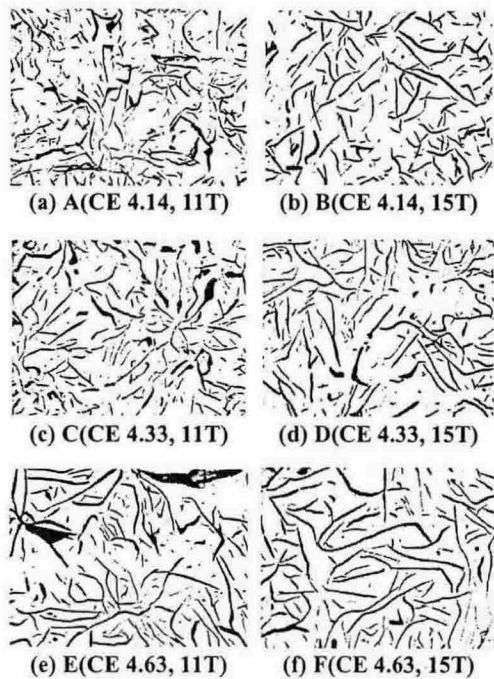


Fig. 2. Optical micrographs of the gray iron discs manufactured for this study.

Table 2. Graphite flake morphology and hardness of gray iron rotors

	Graphite flake		ASTM A247-67		Average Hardness (HB)
	Max length (mm)	Area fraction (%)	Flake Type	Size #	
A	22.9	11.8	A, B	3-4	204
B	23.4	11.2	A, B	3-4	201
C	29.1	12.8	A, B	3-4	187
D	33.0	12.7	A, B	2-3	182
E	34.6	14.9	A	2-3	169
F	36.3	14.1	A	2-3	166

그림에서 볼 수 있듯이 Group I(A, C, E)과 Group II(B, D, F)는 각각 동일한 주물두께로 제작되었으며 탄소당량이 서로 다른 시편이다. 탄소당량이 증가할수록 ASTM A247-67[6]에 의거하여 편상흑연의 형태와 크기를 구분할 수 있었다.

Table 2에 로터의 미세조직 분석결과를 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 로터의 탄소당량이 증가할수록 최대 흑연의 길이와 면적비는 증가하였으며 상대적으로 경도치는 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 주물두께에 따른 냉각속도의 차이가 최대 흑연의 길이에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 냉각속도가 느릴수록 흑연의 길이는 증가하였으나 면적에는 크게 영향을 미치지 않았다. 경도가 감소하는 현상은 상대적으로 낮은 경도를 나타내는 흑연의 함량이 증가하였기 때문이다. 또한 냉각속도에 따라 흑연의 길이가 증가하였으나 면적에 무관한 결과를 나타낸 것은 Fig. 2(e)에서도 볼 수 있듯이 두텁게 합쳐진 kish 흑연의 면적이 전체적인 결과에 영향을 주었기 때문에 오차범위로 평가된다.

3-2. 흑연의 형상 및 경도에 따른 DTV의 변화

Fig. 3은 최대 흑연의 길이에 따른 로터의 DTV 변화를 나타낸 것이다. 로터의 냉각속도와 탄소당량이 다른 6종의 로터에 대한 편마모시험 결과, 냉각속도가 느리고 탄소당량이 클수록 DTV 변화가 적게 나타났다. 이는 탄소당량이 증가함에 따라 높은 흑연의 함량에 기인하여 마찰재와 로터간 윤활작용을 향상시킴으로써 균일한 마모를 유발하여 적은 Δ DTV가 발생한 것으로 사료된다. 또한 냉각속도가 증가함에 따라 주조 과정에서 로터내 잔류응력이 줄어들어 로터의 불균일한 편마모 현상을 감소시킨 것으로 사료된다. 본 실험에서는 동일한 냉각속도 조건에서 탄소당량에 따른 DTV 변화가 동일한 탄소당량에서 냉각속도에 따른 DTV 변화보다 크게 나타났다. 이는 탄소당량에 따른 흑연의 형상에 미치는 영향이 냉각속도의 변화보다 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

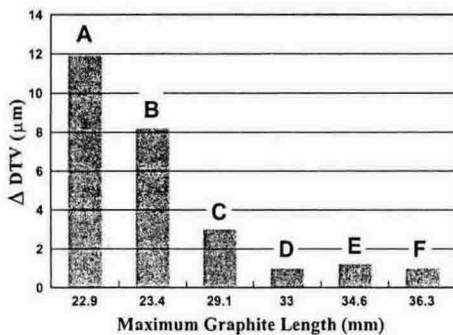


Fig. 3. The change of DTV as a function of maximum graphite length.

로터내 흑연의 면적비율에 대한 DTV 결과도 길이와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 4는 흑연의 면적비율에 따른 DTV의 변화를 나타낸 것이다. 탄소당량이 증

가할수록 흑연의 길이 및 폭의 증가로 인해 기지내 흑연의 면적비율이 증가하였다. 그러나, 화상분석기로부터 계산되는 면적비는 kish 흑연의 면적을 포함한 값이므로 실질적으로 냉각속도에 의한 면적비율의 차이는 거의 나타나지 않았다.

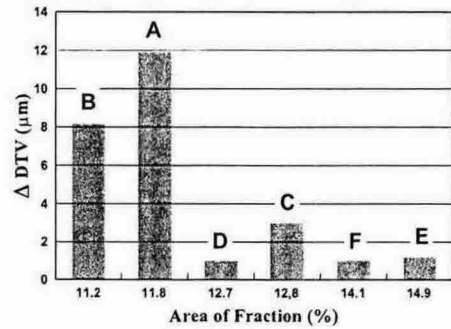


Fig. 4. The change of DTV as function of area fraction of graphite flake.

Fig. 5는 로터의 경도에 따른 로터의 DTV 변화를 나타낸 것이다. 탄소당량과 냉각속도의 증가에 따라 로터의 경도는 감소하였으며 로터의 경도가 낮을수록 DTV 변화량이 감소하는 결과를 나타내었다. 이러한 현상은 로터의 경도가 낮을 경우 원주방향으로의 균일한 마모를 형성하여 오히려 run-out의 변화를 감소시키는 것으로 사료된다.

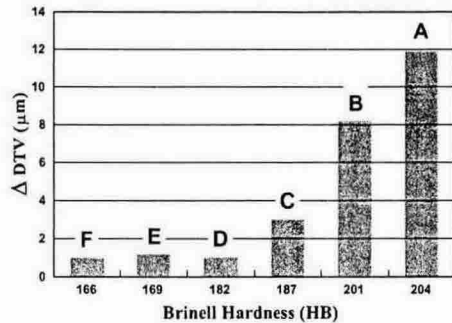


Fig. 5. The change of DTV as a function of Brinell hardness in gray iron disc.

4. 결 론

본 연구에서는 탄소당량과 냉각속도의 변화에 따른 총 6 종의 자동차용 로터를 대상으로 저온에서 편마모 시험을 수행하였다. 자동차용 회주철 로터는 탄소당량과 냉각속도에 따라 서로 다른 미세조직을 나타내었다. 특히, 탄소당량이 증가하고 냉각속도가 감소할수록 로터내 편상흑연의 길이와 기지내 면적비는 증가하였으며 상대적으로 로터의 경도는 감소하였다. 편마모 시험시 DTV 의 변화는 로터의 미세조직에 의해 크게 영향을 받았으며, 편상흑연의 길이가 증가하고 경도가 감소할수록 DTV 발생이 적게 나타났다.

후 기

본 연구는 현대자동차(주) 산학연구과제의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. M.G. Jacko, "Physical and Chemical Changes of Organic Disc Pads in Service," Wear, Vol.46, pp.163-175, 1978.
2. H. Metzler, "The Brake Rotor-Friction Partner of Brake Linings," SAE Technical Paper 900847, 1990.
3. R.L. Hecht, R.B. Dinwiddie, W.D. Porter, H. Wannig, "Thermal Transport Properties of Gray Cast Irons," SAE Technical Paper 962126, pp1-6, 1996.
4. M.J. Haigh, H. Smales, M. Abe, "Vehicle Judder under Dynamic Braking Caused by Disk Thickness Variation," IMechE, C444/022, 1993.
5. S.J. Kim, H. Jang, "Friction Characteristics of Non-Asbestos Organic (NAO) and Low-Steel Friction Materials: The Comparative Study," KSTLE International Journal, Vol.1, No.1, pp.1-7, 2000.
6. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings, ASTM Standard A247-67.