도시철도 고속화에 대비한 금속계 소결마찰재에서의 흑연 형상 및 비율에 따른 마찰특성 연구

김영규 · 이희성[†]

서울과학기술대학교 철도전문대학원

Study on Dependence of Friction Characteristics of Sintered Brake Friction Materials on Graphite Shape and Ratio with regard to Speeding up Rapid Transit System

Young Kyu Kim and Hi Sung Lee[†]

Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology
(Received April 30, 2013 ; Revised June 17, 2013 ; Accepted June 25, 2013)

Abstract – This study aims to establish the fundamental basis for the design of materials used in high-speed trains, by using a lab-scale dynamometer to evaluate the characteristic behavior of metallic sintered friction materials in relation to the shape of graphite. The test results clearly demonstrate that when flake graphite and granular graphite are added equivalently, the average coefficient of friction is much lower, and it is less influenced by speed variation; moreover, friction wear is observed to be insignificantly low. Adding flake graphite increases the coefficient of friction, which leads to higher friction wear. In addition, the roughness of the disc surface was equivalent regardless of the shape of the graphite.

Keywords – graphite (흑연), sintered friction material (소결마찰재), copper alloy (구리합금), high speed (고속), optimization (최적화)

1. 서 론

도시철도의 역할인 승객을 안전, 정확, 신속하게 수송하기 위하여 현재 도시철도의 고속화에 관련된 영역에서 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 도시철도차량의 중고속화를 위해서는 신뢰성이 높은 추진장치 및 제동장치에 대한 연구가 요구되고 있다.

도시철도차량의 제동장치에는 크게 전기식 제동시스템과 공기압력을 이용한 기계식 제동시스템으로 나뉜다. 기계식 제동방식에는 디스크 장착위치에 따라 디스

크제동, 디스크휠제동과 담면제동이 있으며, 디스크 제동방식에 사용되는 마찰은 윤축에 장착된 디스크 표면의 상대 마찰재에 가해지는 압력으로 철도차량을 정지하도록 되어 있다.

현재 저속으로 운행하는 도시철도차량의 기계식 제동시스템에 적용되는 제동마찰재는 소음이 낮은 레진계 마찰재를 주로 사용하고 있다. 그러나 최근 승객의 신속한 수송을 위하여 도시철도의 고속화에 필요한 180 km/h급 중고속으로 운행할 수 있는 도시광역급행철도 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 이에 중고속용에 대비한 마찰재 개발이 시급한 실정이다. 이에 도시철도차량 고속화 시에 레진계 마찰재의 경우 열전도율이 낮아서 디스크에 열 부담력이 커지므로 열에 의한 균열 및 마찰계수 저하 등의 단점을 극복하고자, 동합

[†]Corresponding author : hslee@seoultech.ac.kr

© 이 논문은 한국윤활학회 2013년도 춘계 학술대회 (2013.4.26 서울테크노파크) 발표논문임.

Table 1. Chemical composition of the disk material

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.24~0.31	0.4~0.7	0.5~0.9	≤0.025	≤0.025	≤0.40	1.3~1.6	0.6~0.9	0.20~0.40

Table 2. Mechanical properties of the disk

인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율(%)	경도(H _B)
1,160	950	12	352

Fig. 1. Brake disc for lab scale dynamo test.

금 기지의 소결마찰재의 필요성이 부각되고 있으며, 사용범위 또한 넓어지고 있다.

본 연구에서는 도시철도고속화에 대비 도시철도차량용 금속계 소결마찰재에 적용되는 흑연(graphite) 구성비의 최적화 도출을 위해, 흑연의 형상 및 배합비율에 따른 마찰특성을 평가, 분석함으로써 도시철도차량의 고속화에 대비한 기계식 제동시스템의 소결마찰재에 있어서 흑연의 형상 및 배합비율의 합리적인 기준을 찾고자 하였다.

2. 시험방법

2-1. 시험편

2-1-1. 제동디스크

본 연구에서는 중고속용 철도차량에 적용되는 저합금 내열강(heat resistant low-alloy steel)을 디스크 형태로 가공하여 사용하였다. 디스크는 조질처리(quenching & tempering)과정을 거쳐 요구하는 물성치를 얻었으며, 디스크 마찰면의 조도는 실제 차량용 디스크 조도 조건에 따라 가공하였고 조도측정결과는 Ra 0.44 μm이었다. 디스크의 화학성분은 Table 1에, 물성치는 Table 2에 나타내었다. 디스크의 형상은 Fig. 1에 나타내었고, 크기는 외경 115 mm, 두께 9 mm이다.

2-1-2. 마찰시편

본 연구에 사용한 마찰시편은 도시철도고속화에 적

Fig. 2. Friction material sample for test.**Table 3. Chemical compositions of friction materials**

Matrix		Friction Modifier			Lubricant	
case	Cu	Cr	SiC	Cokes	Gr(입상)	Gr(판상)
1	74	10	1	5	10	0
2					7.5	2.5
3					5	5
4					2.5	7.5
5					0	10

용될 수 있는 동계 소결마찰재로, Fig 2는 마찰시편의 형상으로, 크기는 35×16×11 mm로 제작하였다.

각 마찰시편의 성분비율은 동일하며, 단지 고체 윤활제로 첨가된 두 종류 흑연의 상대적인 무게비율(weight percent)을 달리하여 가압소결법에 의해 제작하였다. 각 마찰시편의 조성은 Table 3에 나타내었다.

Fig. 3과 Fig. 4에는 첨가된 입상흑연(granular graphite)과 판상흑연(flake graphite)의 형상을 나타내었다. 입상흑연은 마찰재용으로 적용되는 인조흑연(artificial graphite)이며, 판상흑연은 천연흑연(natural graphite)을 사용하였다. 통상적으로 결정화도(crystallinity)가 높은 천연흑연이 인조흑연보다 윤활성이 뛰어난 것으로 알려져 있다.

Fig. 5는 3번 마찰시편의 마찰면 광학현미경 조직으로 입상흑연과 판상흑연이 공존하고 있지만, 마치 흑연이 입상으로만 보여진다. Fig. 6은 마찰시편의 수직면 광학현미경 조직으로 긴 띠모양의 판상흑연과 둥근

Fig. 3. Granular graphite.

Fig. 4. Flake graphite.

Fig. 5. Microstructure of surface friction material.

Fig. 6. Microstructure of friction material associated with vertical direction.

Table 4. Mechanical properties of friction material

SPL #	1	2	3	4	5
경도 (H_{RB})	82	80	79	77	75
밀도 (g/cm^3)	5.0

Fig. 7. Lab-scale dynamo tester.

Table 5. Test conditions

관성 ($kgfms^2$)	제동압력 (MPa)	선속도 (m/s)	제동회수
0.095	0.55	13.9	50
		19.4	50
		25.0	50

모양의 입상흑연이 공존하고 있다.

Table 4에는 각 마찰시편의 경도와 밀도를 나타내었다. 관상흑연이 많을수록 경도가 낮아지는 경향은 있지만, 그 차이는 미미한 것으로 판단되며, 가압소결법으로 마찰재를 제작하여 밀도는 동일 수준이었다.

2-2. 시험장치

마찰특성 평가는 KS R 4024에 따라 제작된 소형 다이내모 시험기(Lab-scale dynamometer)를 이용하여 수행하였다.(Fig. 7)

본 시험기는 제동디스크를 요구하는 속도로 회전시킨 후 마찰시편에 하중을 가하여 이때 발생하는 토크, 회전속도, 제동압력 등을 실시간으로 측정할 수 있다.

2-3. 시험방법

2-3-1. 제동시험조건

본 시험에서는 일정하중으로 마찰시편을 제동디스크에 압착시켜 마찰특성을 평가하는 압력모드를 적용하였다. 관성질량은 $0.095kgf \cdot m \cdot s^2$ 로 고정하였고 각 시편을 속도별로 50회씩 총 150회 실시하였다. 본시험

(main test)에 앞서 디스크와 마찰재의 접촉을 균일하게 할 목적으로 갈아 맞춤(bedding)을 실시하였다. 갈아 맞춤은 본 시험의 결과에 영향을 미치지 않도록 제동압력을 0.20 MPa, 선속도 6.0 m/s 조건에서 마찰면이 70% 이상 확보되도록 하였다. 본시험 조건을 Table 5에 정리하였다.

2-3-2. 평가 항목

마찰특성은 각 속도별 50회의 평균마찰계수와 평균마찰계수 안정성으로 나타내었다.

마찰계수 안정성(stability)은 제동시 순간마찰계수의 변화를 평가하는 항목으로 제동시 순간마찰계수의 변화가 평균마찰계수에서 벗어난 정도를 나타낸다. 마찰계수 안정성은 아래식⁽⁴⁾으로 나타내어진다.

$$\mu_s = \left[(\mu_{ave}) - (\mu_{max} - \mu_{min}) \times \frac{1}{2} \right] \times \frac{100}{(\mu_{ave})}$$

μ_s : 마찰계수 안정성

μ_{ave} : 평균 마찰계수

μ_{max} : 최고 마찰계수

μ_{min} : 최저 마찰계수

마찰시편의 마모량은 본시험이 동일한 제동에너지에 대한 평가이고, 밀도가 동일하기 때문에 실험 전 후의 중량차를 측정한 후 평가하였다.

제동시험 후 제동디스크의 표면상태는 표면조도계(roughness tester)로 마모트랙을 측정하여 Ra(중심선 평균조도) 값과 Ry(최대높이 거칠기)값으로 산출하였다.

3. 시험결과

3-1. 속도에 따른 평균마찰계수

Fig. 8은 속도에 따른 평균마찰계수를 나타내었다. 전 속도 영역에서 1번 시편은 0.364, 2번 시편은 0.343이며, 3번 시편은 0.329로 가장 낮고, 4번과 5번 시편에서는 각각 0.380과 0.376이 상대적으로 높은 평균마찰계수를 나타내었다.

즉, 판상흑연이 50%인 3번 시편까지는 평균마찰계수가 낮아지는 경향을 보이지만, 판상흑연이 75%, 100%로 증가하는 4, 5번 시편에서는 다시 증가하였다.

1번 시편의 경우는 저속(13.9 m/s)과 중속(19.4 m/s)에서는 각각 0.340과 0.347로 유사한 마찰계수를 나타

Fig. 8. Average friction coefficient.

Fig. 9. Friction surface of sample #1.

내지만, 고속(25.0 m/s)에서는 0.405로 각각 19%, 17% 높은 값을 나타내었다. Fig. 9는 1번 시편의 각각 속도에 따른 마찰시험 후 마찰시편의 마찰면을 나타내었다. 저속과 중속의 마찰면에서는 흑연(↑로 표시)이 마찰면에 잔존하는 것을 확인되며 이러한 마찰면의 흑연이 윤활역할을 수행하여 마찰계수가 낮은 것으로 판단된다. 반면, 고속의 경우는 마찰면이 치밀한 산화피막(Glaze layer)으로 덮혀있고 흑연이 마찰면에 잔존하지 않아 상대적으로 마찰계수가 증가한 것으로 판단된다. 고속에서 마찰면의 온도는 측정결과 최고 420°C까지 상승하였으며, 이러한 온도 영역에서의 산화피막은 Fe_2O_3 인 것으로 알려져 있다[4].

Fig. 10. Friction surface of sample 3, 5.

2번 시편의 경우는 저속(13.9 m/s)에서는 0.301로 낮은 마찰계수를 나타내지만, 중속(19.4 m/s)과 고속(25.0 m/s)에서 각각 0.366, 0.361로 약 20% 높은 마찰계수를 나타내고 있다. 2번 시편의 마찰면으로 저속에서는 흑연이 잔존하고 있지만, 중속과 고속에서는 마찰면에 흑연은 없고, 치밀한 산화피막이 형성되어있다. 즉 마찰면에서 형성된 산화피막과 흑연의 탈락으로 인해 중속과 고속에서 마찰계수가 증가한 것으로 판단된다.

1번 시편보다 2번 시편에서 더 낮은 속도에서 치밀한 산화피막이 형성된 원인은 향후 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

판상흑연은 입상흑연에 비해 높은 윤활성을 가지기 때문에 판상흑연 증가는 전체 마찰계수를 낮출 것으로 예상되어졌지만, 판상흑연이 75% 함유된 4번 시편과 100% 판상흑연이 함유된 5번 시편에서는 오히려 평균 마찰계수가 높아지는 경향을 보였다.

Fig. 10은 3번 마찰시편과 5번 마찰시편의 마찰시험 후 마찰면을 나타낸 것으로 3번 마찰시편의 경우 마찰면의 산화피막이 안정적인 반면, 5번 시편의 경우 마찰면에서 흑연이 탈락한 현상들이 관찰되었다. 즉, 판상흑연이 100%인 5번 시편의 경우 판상흑연의 형상적인 특성상 마찰시 쉽게 마찰면에서 탈락하여 마찰면에서 잔존하지 못하게 되며 이로 인해 판상흑연은 윤활재로써 작용을 못하기 때문에 마찰계수가 높아진 것으로 판단된다.

Fig. 11. Stability of friction coefficient.

Fig. 12. Wear of friction materials.

1번 시편의 경우 속도에 따른 마찰계수의 편차가 0.065로 17.9%가 발생한다. 2번 시편에서도 17.8%로 높은 마찰계수 변화폭을 나타내는 반면, 3~5번 시편에서는 10%수준의 마찰계수 변화를 나타내며, 특히 5번 시편은 5.6%로 속도에 따른 마찰계수 변화폭이 적다.

4, 5번 시편의 경우 마찰계수는 높고, 속도에 따른 마찰계수 변화폭이 적다는 것은 마찰력을 발생시키는 다른 요인이 작용한다는 것으로 이는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

3-2. 속도에 따른 마찰계수 안정성

Fig. 11은 속도에 따른 마찰계수 안정성을 나타내었다. 3번 시편을 제외하고는 속도에 따라 마찰계수 안정성을 변화가 높게 나타났다. 3번 마찰시편의 마찰계수 안정성이 높은 것은 평균마찰계수가 낮는데 일부 기인한 것으로 판단된다.

4, 5번 시편의 경우 고속에서 마찰계수 안정성이 낮은 것은 마찰면에서 흑연의 탈락과 관련되는 것으로 판단된다.

3-3. 표면조도 및 패드 마모량

Fig. 12는 시험 후 마찰시편의 마모량을 나타내었다.

Fig. 13. Wear track of disk.

Table 6. Surface roughness of brake disc

	Ra(μm)	Ry(μm)
시험전	0.044	3.397
1	3.1	18.3
2	3.4	19.5
3	3.2	17.4
4	3.5	22.4
5	3.4	18.3

1, 2번 시험의 경우 유사한 마모량을 나타내며, 3번 시험이 가장 낮은 마모량을 가졌고, 5번 패드의 마모량이 가장 많은 마모량을 나타내었다. 이러한 현상은 마찰계수 추이와 거의 동일하였다.

즉, 마찰계수가 가장 낮은 3번 시험이 패드의 마모량도 낮은 값을 가지며, 마찰계수가 가장 높은 5번 시험에서 패드의 마모량이 가장 많은 것으로 확인되었다.

Fig. 13은 시험전후의 디스크 마찰면의 형상을 3회 측정한 결과를 평균값으로 나타내었다. 시험에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

실제 차량에 적용하는데 있어서 속도변화에 따른 안정적인 마찰계수를 요구한다면, 판상흑연과 입상흑연이 각각 50%인 3번 마찰시편이 적합한 것으로 판단된다. 하지만, 3번 패드의 경우 마찰계수가 다른 마찰시편에 비해 상대적으로 낮기 때문에 높은 마찰력을 요

구하는 제동시스템에서는 비록 마모량이 높을지라도 판상흑연이 100%인 5번 마찰시편의 적용이 적극적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

1. 평균마찰계수는 입상흑연과 판상흑연이 각각 50%인 3번 마찰시편에서 0.329로 가장 낮게 나타났고, 판상의 양이 많은 4, 5번 마찰시편에서 0.380, 0.376으로 높았다.

2. 속도에 따른 평균마찰계수 변화폭도 판상흑연이 50%이상 3, 4, 5번 마찰시편에서 각각 0.032, 0.041, 0.027로 낮았고, 1, 2번 마찰시편은 0.061, 0.060으로 상대적으로 높았다.

3. 마찰계수 안정성은 3번 시험에서 가장 높고 속도에 따른 마찰계수 안정성 변화도 가장 낮게 평가되었다.

4. 마찰시편의 마모량은 3번 시험에서 가장 낮고, 판상흑연이 100%인 5번 시험에서 가장 높게 나타났다. 디스크 공격성은 모든 시험에서 동일한 수준으로 확인되었다.

5. 따라서 안정적인 제동성능을 요구시에는 판상흑연과 입상흑연이 각각 50%씩 첨가된 3번 시험을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

6. 단지, 마찰시편의 마모량이 많지만 높은 마찰력이 요구되는 경우는 판상흑연만 첨가된 5번 시험의 적용이 타당한 것으로 판단된다.

References

1. Amderson, A.E., "Friction, Lubrication, and Wear Technology", *ASM International, Materials park, OH, ASM Handbook*, 10th ed, Vol. 18, pp.569-577, 1992.
2. Jacko, M.G. and Lee, S.K., "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", Wiley, 4th ed, Vol. 4, pp. 523-536, 1992.
3. Sang Ho Kim and Hi Sung Lee, "Tribological Characteristics of Brake Disc for Train", *KSTLE*, Vol. 23, No.1, pp.19-28, 2007.
4. Sang Ho Kim and Hi Sung Lee, "Effect of Pressure on Tribological Characteristics between Sintered Friction Materials and Steel Disk", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.12, No.4, pp. 643-650, 2011.