

철도차량용 제동 디스크의 트라이볼로지 특성 연구

김상호[†] · 이희성[‡]

서울산업대학교 철도전문대학원

Tribological Characteristics of Brake Disc for Train

Sangho Kim[†] and Hisung Lee[‡]

Graduate School of Railroad, Seoul National University of Technology

Abstract – Mechanical Brake system is inevitable equipment for stability of train and speed growth of the train. Especially brake disk and brake pads are core parts of mechanical brake system. It was investigated with tribological characteristics of brake discs for train by using lab-scale dynamometer. Gray cast iron disk was most attacked with sintered brake pad. Alloyed steel disk and NCM cast iron disk had suitable friction coefficient, high stability and low disk attack to the sintered brake pad. But at the view of economy, low alloyed cast iron will be most suitable choice.

Key words – brake disk, brake pad, friction coefficient, disk attack, stability.

1. 서 론

최근 들어 기술선진국들은 철도차량의 고속화에 많은 노력을 기울이고 있다. 이는 그동안 철도차량의 높은 수송능력과 높은 안전성에도 불구하고 비행기 등 다른 수송매체에 비해 속도가 낮다는 문제점을 해결하기 위한 방안이기도 하다.

철도차량이 고속화되기 위한 전제 조건은 추진장치(Traction Equipment)와 신뢰성 높은 제동장치(Braking Equipment)의 개발이라 하겠다. 제동장치는 움직이는 물체의 운동에너지와 동일에너지를 운동의 반대방향으로 작용시키므로 움직이는 물체를 정지시키는 장치이다. 따라서 철도차량이 고속화되어 운동에너지가 높아지면 제동장치도 그만큼의 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 갖추어야 한다.

철도차량의 제동장치는 크게 전기제동장치와 기계식 제동장치(공기제동장치)로 구분되며, 전기제동장치에는 회생제동, 저항제동 및 와전류제동이 있고, 기

계식 제동장치에는 디스크제동, 휠 디스크제동, 담면 제동장치가 있다. 기계식 제동장치라 함은 공기압에 의한 제동방식을 의미하며, 이는 공기압에 의해 제동 패드를 제동디스크에 압착하므로 제동력을 얻게 방식이다.

최근에 제안된 여러 제동장치들은 주로 전기를 이용한 제동장치들이며 공기를 이용한 기계식 제동에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 하지만, 기계식 제동장치는 전기제동장치가 작동할 수 없는 상황에서도 기본 제동력을 확보해야하기 때문에 철도차량의 안정성 측면에서 필수적인 요소장치라 할 수 있다.

기계식 제동장치 중에서도 고속용 마찰디스크에 대한 연구는 아직까지 국내에서는 연구가 거의 이루어지지 않고 있으며, 특히 마찰특성에 대한 연구는 아직 기초단계에 머물러 있는 상태이다.

본 연구에서는 중·고속용 철도차량에 적용될 수 있는 제동디스크 개발을 위한 기초연구로 소형다이나모 시험기(Lab-Scale Dynamometer)를 이용해 제동 디스크와 제동패드의 트라이볼로지적 특성을 고찰하였다.

[†]주저자 : ganaon@dawinf.co.kr

[‡]책임저자 : hslee@snut.ac.kr

2. 시험편 및 시험방법

2-1. 시험편

2-1-1. 제동디스크(brake disk)

본 연구에서는 회주철(Gray Cast Iron), 저합금주철(Low-alloyed Casting Iron), 저합금내열강(Low-alloyed Heat Resistance Steel)을 디스크재질로 하여 시험하였다. Table 1에 시험에 사용된 디스크와 패드 조합을 나타내었다.

회주철(DI)은 기존철도에 사용되는 디스크재질이며, 저합금주철(DII)은 신칸센등 일부 고속열차의 제동디스크에 사용되고 있으며, 저합금내열강(DIII)은 KTX와 한국형 고속철도(G7)차량에 사용되는 디스크 재질이다. Table 2는 시험에 사용된 디스크 재질의 화학성분을 Table 3은 기계적 성질을 나타내었다.

본 연구에 사용된 회주철 디스크와 저합금주철 디스크는 주조 후 기계가공으로, 저합금내열강 디스크는 항공용 압연강판을 열처리 후 기계가공으로 제작하였다 (Fig. 1, 2).

Fig. 3은 본 연구에 사용된 회주철 디스크의 현미경 조직으로 페라이트(Ferrite)와 펄라이트(Pearlite) 혼재한 기지(Matrix)를 하며, 흑연(Graphite)은 A Type이며, 편상흑연의 크기는 D에 해당한다. Fig. 4는 저합금주철

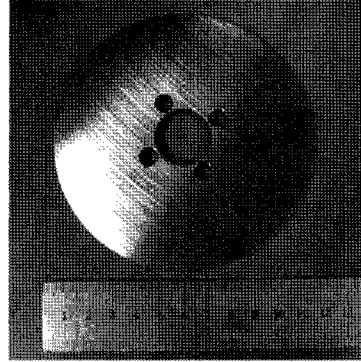


Fig. 1. Brake disc for test.

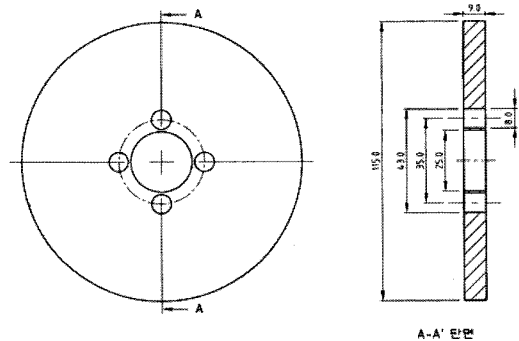


Fig. 2. Schematic of brake disk.

Table 1. Materials coupling for test

시험 No	Brake disk		Brake pad	
	Material	Mark	Material	Mark
I	회주철(Gray Cast Iron)	DI	소결마찰재 (Sintered Friction Material)	PI
II	저합금 주철(NCM Cast Iron)	DII		PII
III	저합금내열강(Heat Resistance Steel)	DIII		PIII

Table 2. Chemical composition of the disk materials

재 질	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
회주철	3.00~3.88	2.20	0.59	0.061	0.062				
저합금 주철	3.30~3.70	1.10~1.60	0.6~1.0	≤0.16	≤0.12	1.2~2.0	0.3~0.6	0.3~0.5	-
저합금 내열강	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 3. Mechanical Properties of the disk materials

	Tensile strength (Mpa)	Yielding strength (Mpa)	Elongation (%)	Hardness (HB)
회주철	271	233	1	214
저합금 주철	282	240	1	215
저합금 내열강	1,160	950	12	336

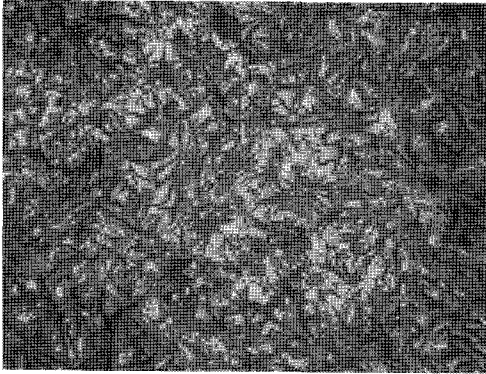


Fig. 3. Microstructure of NCM cast iron.

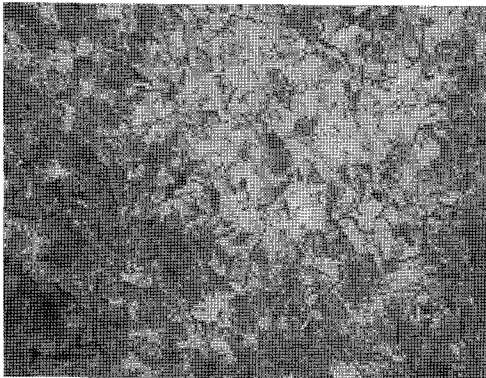


Fig. 4. Microstructure of gray cast iron.

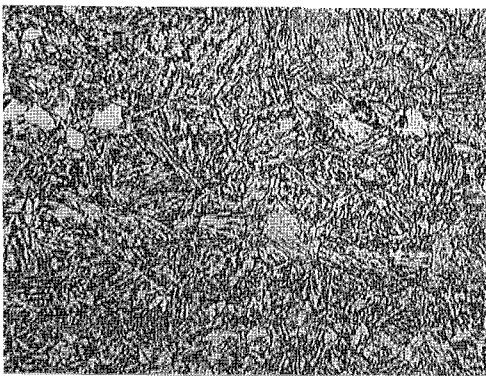


Fig. 5. Microstructure of low alloyed steel.

디스크의 현미경조직으로 페라이트(Ferrite)와 필라이트(Pearlite) 혼재한 기지(Matrix)를 하며, 흑연(Graphite)은 A Type이며, 편상흑연의 크기는 B에 해당한다. Fig. 5는 저합금내열강 디스크의 현미경조직으로 조질(Tempered Martensite) 조직을 하고 있다.

Table 4. Formulation of pad material for middle speed train

Matrix			Friction Modifier			Lubricant	
Cu	Fe	Sn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	기타	C	etc
50~60	5~20	1~6	1~5	1~4	5~15	10~20	-

Table 5. Mechanical properties of brake pad

Hardness (HRR)	Density (g/cc)	Shear stress (kgf/mm ²)
90~115	4.8~5.1	3.2~3.4



Fig. 6. Microstructure of brake pad (X50).

2-1-2. 제동 패드(brake pad)

본 연구에 사용된 제동패드는 중·고속 차량용 패드로 개발된 금속계 소결마찰재(Metallic Sintered Friction Material)이다. 중·고속 차량용 제동패드는 동합금기지(Cu-alloy matrix)에 마찰조절재(Friction Modifier)로 실리카(SiO₂)와 알루미나(Al₂O₃)를 윤활제(Lubricant)로 흑연(Graphite)를 첨가하여 제작된 것으로 고부하에서 마찰력을 유지될 수 있도록 고안된 것이다.

제동패드의 화학적조성은 Table 4, 물성치는 Table 5와 같다. Fig. 6은 본 연구에 사용된 중·고속용 제동패드의 현미경조직사진을 Fig. 7은 본 연구에 사용된 제동패드 시편의 형상이다.

2-2. 시험장치

Fig. 8은 마찰특성을 평가하기 위하여 소형 다이내모 시험기(Lab-Scale Dynamometer)이며, Fig. 9는 시험기의 모식도이다. 시험기는 구동부(Driving Unit), 기계 구조물을 포함한 시료 장착부, 유압-서보시스템 및 유압 장치, 제어 및 계측장치, 전원 장치 및 제어계측용 컴퓨터시스템으로 구성되어 있다. 시험기의 주요사양

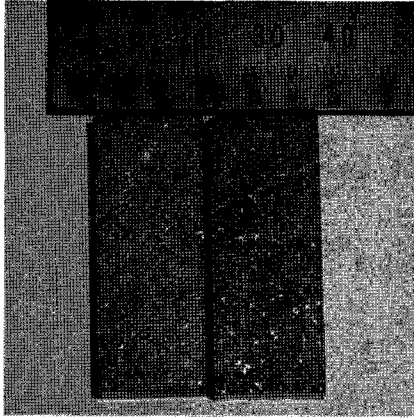


Fig. 7. Brake pad for test.

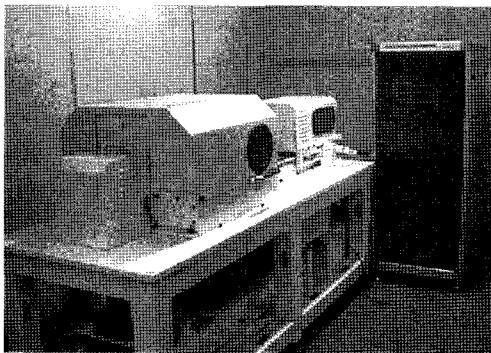


Fig. 8. Lab-scale dynamometer.

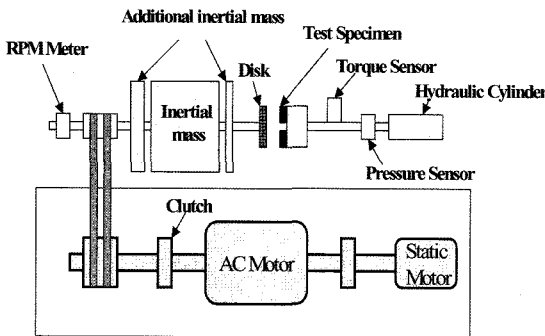


Fig. 9. Schematic of lab scale dynamometer.

을 Table 6에 나타내었다. 본 시험기는 제동디스크를 요구하는 속도로 회전시킨 후 제동패드에 하중을 가하여 이때 발생하는 토크, 회전속도, 하중 등을 실시간으로 측정할 수 있으며, 측정된 데이터는 컴퓨터에 의해 자동으로 분석, 저장 및 프린터 출력이 가능한 구조이다.

Table 6. Specification of lab. scale dynamometer

Part	Specification
Disk size	$\phi 110 \times 6t$
Friction material	Using 2 friction materials Friction Area : 11.2 cm^2
Disk speed	100~6,000 rpm(Normal 4,500 rpm↓)
Force	10~500 kgf
Inertia mass	Base Inertia : $0.40 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ Max Inertia : $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Torque	$25 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ (Max $35 \text{ kgf} \cdot \text{m}$)
Motor	DC : 7.5 kW
Cooling	Max $11 \text{ m}^3/\text{min}$
Test mode	Pressure, Torque Control, Parking • Revolution speed • Stop Time
Data acquisition	• Disk & Pad Temperature • Pressure, Torque

Table 7. Test conditions for lab. scale dynamometer test

Inertia mass	Pad area	Effective radius	Cylinder area
$0.095 \text{ kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$	11.2 cm^2	0.044 m	7.069 cm^2

2-3. 시험방법

2-3-1. 제동시험모드

본 연구에서는 일정압력으로 패드를 디스크에 압착시켜 마찰특성을 평가하는 압력모드(Pressure Control Mode)를 사용하였다. 시험에 적용한 압력은 실제 제동시 발생할 수 있는 최대압력인 5.5 kg/cm^2 로 설정하였다. 관성질량은 $0.095 \text{ kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ 로 고정하였으며, 마찰반경은 0.044 m, 브레이크 패드의 면적은 11.2 cm^2 ($5.6 \text{ cm}^2 \times 2$)로 시험하였다. 시험을 위한 기초 조건은 Table 7과 같이 하였다.

2-3-2. 갈아 맞춤(bedding)

본 시험(Main Test)에 앞서 디스크와 패드의 접촉을 균일하게 할 목적으로 갈아 맞춤(Bedding)을 실시한다. 갈아 맞춤은 저속, 저압에서 제동을 실시하여 패드의 마찰 접촉 면적이 70% 이상 될 수 있도록 실시하였다. 갈아 맞춤을 위한 제동프로그램은 Table 8과 같다. 만일, 갈아 맞춤 프로그램을 완료 후에도 70%의 마찰면을 얻지 못 할 경우는 요구사양을 만족할 때 까지 갈아 맞춤 프로그램을 실시한다.

Table 8. Bedding program for LSD

Sequence	Test mode	Pressure (kgf/cm ²)	Speed (rpm)		Stop No
			Start	Stop	
1	Pressure	1.8	1,097		20
2		3.1			20
3		3.1	1,645	5	30
4		4.3			30

Table 9. Main test program for lab. scale dynamometer

Sequence	Test mode	Pressure (kgf/cm ²)	Speed (rpm)		Stop No
			Start	Stop	
1	Pressure	5.5	1,645		50
2			2,194	10	50
3			2,742		50

2-3-3. 본 실험(main test)

본 시험은 규정된 압력에서 회전속도에 따른 마찰특성을 평가하였으며, 각 회전속도에서 50회 제동을 실시하였고, 이를 2회 반복하여 총 300회 제동하였다. Table 9에 본 실험의 조건을 나타내었다.

2-4. 마찰특성 평가

본 연구에서 마찰특성을 평가하는 항목은 마찰계수(Friction Coefficient), 패드의 마모량(Wear), 디스크의 마모량(Attack) 및 마찰계수의 안정성(Stability of Friction Coefficient)이다.

마찰계수는 제동시 발생하는 토크(Torque) 값과 압부력(Friction Force) 그리고 마찰반경(Friction Radius)에 의해 결정된다. 본 연구에서는 마찰반경이 일정하고, 압력일정모드로 시험을 실시하였으므로 토크 값의 변화가 마찰계수의 변화가 된다.

$$\mu = \frac{T}{P_0 R}$$

- 단, T : 제동 토크(Friction Torque)
- P_0 : 제동압력(Braking Pressure)
- R : 마찰반경(Friction Radius)

패드의 마모량 평가는 본 실험전후의 무게차를 측정하여 산출하였다.

마찰제에 의한 디스크의 마모량(Attack) 측정방법은

본 실험이 완료된 후 마모가 발생한 디스크의 각 4부위의 홈 깊이(최대깊이)를 측정하여 합산한 결과로 산출하며 단위는 μm 이다.

마찰계수 안정성은 제동시 마찰계수의 변화를 평가하는 항목으로 제동시 순간마찰계수의 변화가 평균마찰계수에서 벗어난 정도를 평가하게 된다. 마찰계수 안정성을 식으로 나타내면 다음과 같다.

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

- 단, μ_s : 마찰계수 안정성
- μ_{ave} : 평균 마찰계수
- μ_{max} : 최고 마찰계수
- μ_{min} : 최저 마찰계수

3. 시험 결과

3-1. 디스크에 따른 평균마찰계수

평균마찰계수는 각 속도별로 100회 제동시의 산술 평균값으로 나타낸 것이다.

Fig. 10은 DI 디스크를 속도별로 제동 시험한 결과를 나타낸다. 평균마찰계수는 1,645 rpm과 2,194 rpm에서는 각각 0.435, 0.440로 비슷한 수준이나, 2,742 rpm에서도 0.410로 약 0.03 낮아진다. 마찰계수 안정성은 제동 초속도가 증가함에 따라 낮아지는 경향을 보이며, 1,645 rpm에서는 37%이며 2,194 rpm과 2742 rpm에서는 각각 23%, 18%로 떨어진다.

Fig. 11은 DII 디스크에서 시험한 속도별 마찰계수와 마찰계수 안정성의 변화를 나타내었다. 1,645 rpm

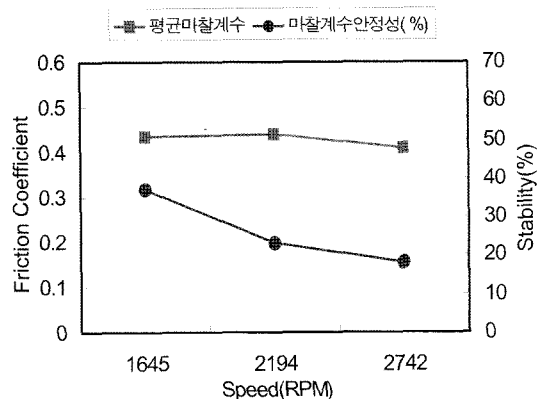


Fig. 10. Relation between friction coefficient & stability at different brake speed for DI.

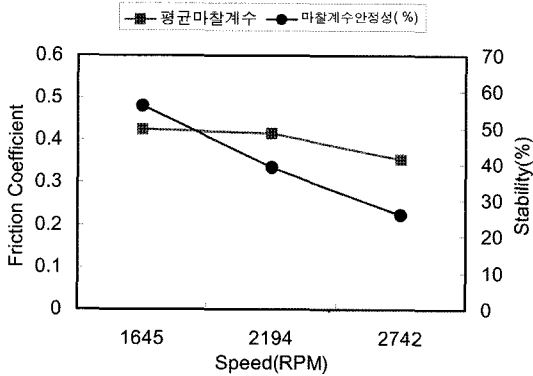


Fig. 11. Relation between friction coefficient & stability at different brake speed for DII.

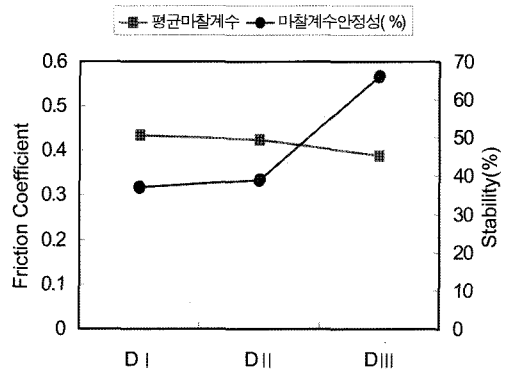


Fig. 13. Relation between friction coefficient & stability at 1,645 rpm.

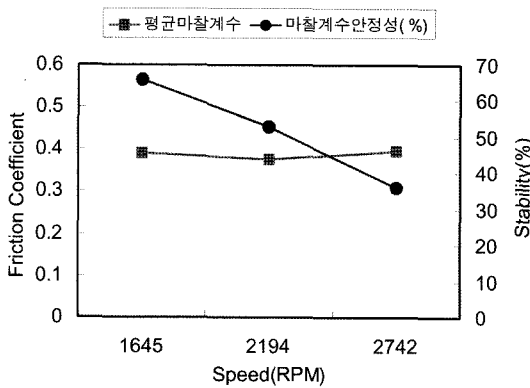


Fig. 12. Relation between friction coefficient & stability at different brake speed for DIII.

과 2,194 rpm에서 평균마찰계수는 0.425, 0.415이며, 2,742 rpm에서는 0.355값으로 약 11% 낮아진다. 마찰계수 안정성은 제동초속도가 증가함에 따라 감소하며 고속(2,742 rpm)에서는 26%로 낮아진다.

Fig. 12는 DIII 디스크에서 각 속도별 평균마찰계수와 마찰계수 안정성의 변화를 나타낸다. 1,645 rpm과 2,194 rpm에서 평균마찰계수는 0.390, 0.375이며, 2,742 rpm에서는 0.395값으로 고속에서 오히려 높은 마찰계수 값을 나타낸다. 전체적으로 속도변화에 따른 마찰계수의 변화는 거의 없다. 마찰계수 안정성은 역시 속도증가에 따라 감소하는 경향을 나타내지만, 다른 두 디스크에 비해 높은 값을 나타낸다.

3-2. 속도에 따른 평균마찰계수

각각의 속도에 대한 디스크 재질별 평균마찰계수 및 마찰계수 안정성 변화를 나타내었다.

Fig. 13은 1,645 rpm에서 디스크별 마찰계수 및 마찰계수 안정성을 나타낸다. 평균마찰계수는 DIII, DII, DI순으로 높아지며, 마찰계수 안정성은 이와 반대의 경향을 나타낸다. 특히, DI과 D의 경우 마찰면 표면에 존재하는 흑연의 영향으로 높은 마찰계수 안정성을 기대되었지만, 예상과 달리 합금강 디스크 보다 약 30% 낮은 마찰계수 안정성을 보였다. 이러한 결과는 표면에 존재하는 흑연이 오히려 이종재료로 인식되어 Stick-Slip 현상을 조장했을 가능성과 함께 DIII에 비해 상대적으로 경도가 낮은 DI, DII의 마모모드(Wear mode)의 차이에 의한 것으로 추정된다.

Fig. 14는 2,194 rpm에서 디스크별 평균마찰계수 및 마찰계수 안정성을 나타내었다. 1,645 rpm에서의 시험결과와 유사한 결과로 DI과 DII의 마찰계수는 유사하고, DIII에서는 마찰계수가 낮아진다. 마찰계수 안정성은 DIII, DII, DI 순으로 낮아진다.

Fig. 15는 2,742 rpm에서 시험결과를 나타내었다. 평

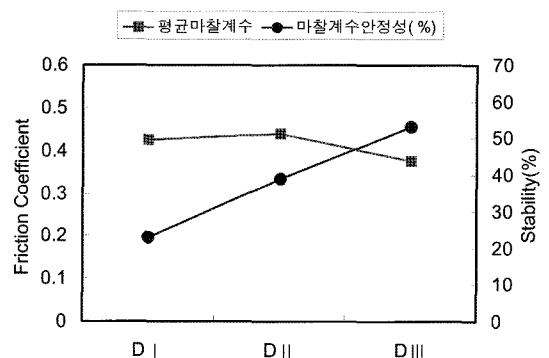


Fig. 14. Relation between friction coefficient & stability at 2,194 rpm.

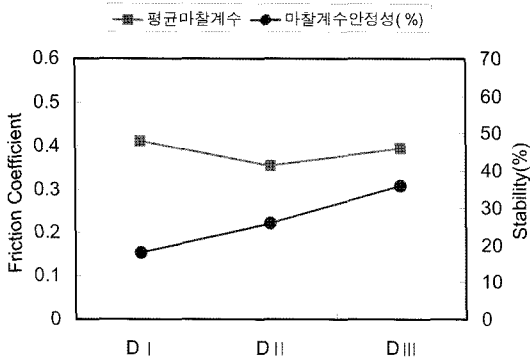


Fig. 15. Relation between friction coefficient & stability at 2,742 rpm.

균마찰계수는 DII, DIII, DI 순으로 낮다. 마찰계수 안정성은 DIII, DII, DI 순으로 낮아진다.

3-3. 패드 마모량과 디스크 공격성

본 시험 전후 무게변화를 측정하여 패드마모량을 평가하였다. 엄밀한 의미에서는 무게변화량과 밀도를 감안한 두께변화를 측정해야 하지만 동일 제동 패드를 사용했기 때문에 무게변화가 패드의 내마모성을 의미한다. 디스크 공격성은 디스크의 편 마모에 의한 데이터의 왜곡을 방지하기 위해 디스크의 마찰면을 십자방향으로 4부위를 측정하여 합계한 값으로 나타내었다. Fig. 16은 패드의 마모량과 디스크 공격성을 나타낸다.

PI의 마모량은 0.6 g로 가장 낮으며, PII, PIII는 각각 1.2, 1.4 g으로 나타났다.

PI의 경우 전 속도에서 마찰계수가 가장 높았는데도 불구하고 마모량은 가장 낮게 나타났으며, PIII의 경우는 마찰계수가 낮은데도 불구하고 마모량은 가장

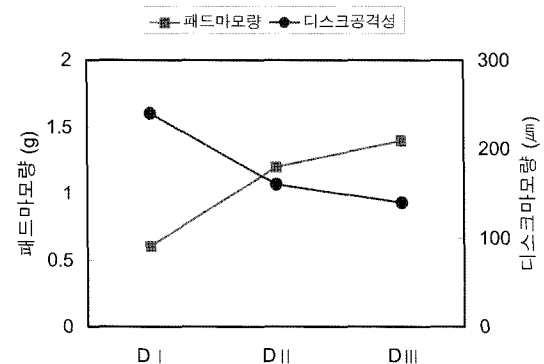


Fig. 16. Relation between wear rate of pad and disc attack.

나타났다.

디스크에 대한 공격성은 DIII와 DII에서는 각각 140, 160 μm로 비슷한 수준이나, DI의 경우는 240 μm로 DII나 DIII에 비해 50%이상 높은 공격성을 나타낸다.

3-4. 마찰면 관찰

패드와 디스크의 마찰면의 형상을 관찰하였다. Table 9는 각 시편의 시험후 표면 거칠기를 나타내었다.

DI 디스크의 표면 거칠기(Ra)는 4.93 μm로 다른 두 디스크(DII, DIII)에 비해 상대적으로 높게 나타났다. Fig. 17은 각 디스크의 표면상태를 나타낸 것으로 KEYENCE 3D Profile Microscope로 관찰한 것이다. DI이 가장 거칠게 관찰 되었으며 DII와 DIII는 비슷한 수준의 거칠기를 갖는다.

패드의 표면 거칠기는 PIII가 5.43 μm로 가장 높으며, PII가 3.86 μm로 가장 낮게 나타났다.

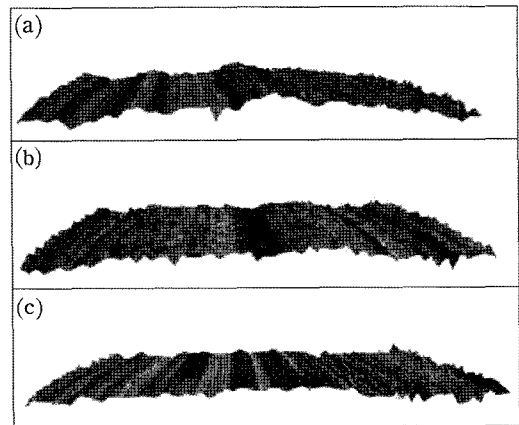


Fig. 17. Photography of disk surface. (a) DI (b) DII (c) DIII.



Fig. 18. Friction surface of PI.

3-4-1. 제동패드 마찰면

Fig. 18은 PI의 시험 후 마찰면을 SEM(Scanning Electron Microscopy)으로 관찰한 것이다. 마찰면에서 미끈한 면은 산화피막을 나타낸 것으로 이러한 산화피막이 균일하게 존재하면 안정된 마찰계수와 함께 마모량도 낮게 나타난다. 흰색으로 나타난 부분은 산화피막이 파괴되어 급속해 마모가 진행되는 불안정한 면을 나타낸다.

Fig. 19는 DII의 시험 후 마찰면을 나타내었다. 마찰면에는 흑연이 존재하는 부분을 제외하면 균일한 산화피막이 형성되어 있다. 이러한 산화피막은 안정된 마찰특성을 나타내는 것으로 알려져 있다.

Fig. 20은 DIII에 대한 시험 후 마찰면을 나타낸 것이다. 마찰면은 안정적인 마찰면과 부분적으로 탈락이 용이한 마찰면으로 구성되어 있다.

Fig. 21-23은 각 디스크에서 시험 마찰면을 EDX(Energy Disperse Spectrum)로 분석한 결과를 나타냈다.

PI와 PII에서는 마찰면에서는 Fe가 주 피크로 나타나는 반면 PIII에서는 Fe와 함께 Cu도 높은 피크를

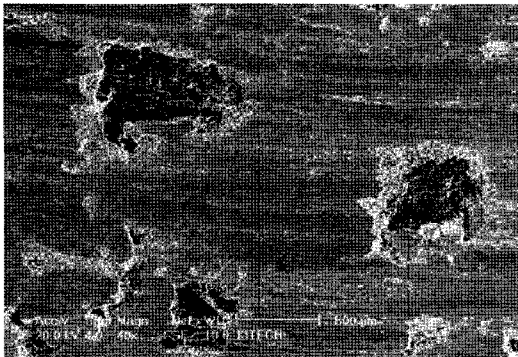


Fig. 19. Friction Surface of PII.

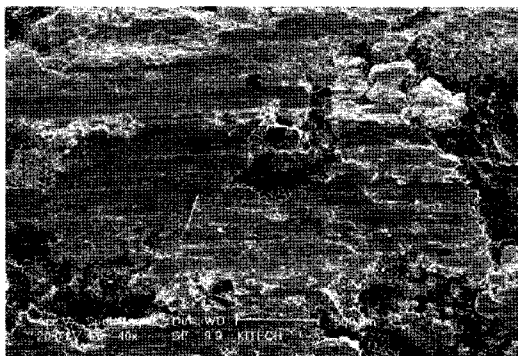


Fig. 20. Friction Surface of PIII.

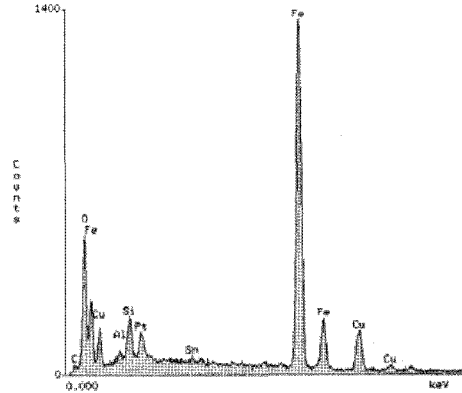


Fig. 21. EDX spectrum of PI

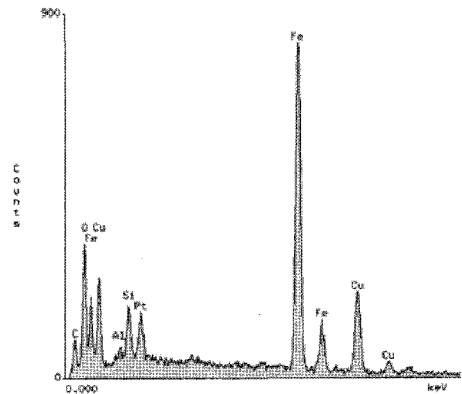


Fig. 22. EDX spectrum of PII.

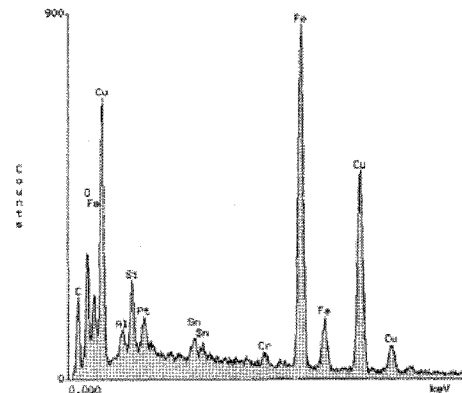


Fig. 23. EDX spectrum of PIII.

나타낸다. 육안으로 관찰시에도 PIII에서 마찰면 표면에 붉은색상이 나타난다. 반면 PI과 PII의 마찰면은 검은색으로 나타난다. 즉 DI과 DII의 경우가 DIII 보다 마찰재에 용이하게 Fe계 산화물이 형성되는 것으

로 나타났다. 하지만, PI에서는 Fe가 보다 높게 나타났지만, 안정된 산화물을 형성하지는 않는 것으로 나타난다. 마찰면에서 안정된 산화물은 PII와 같이 Fe와 Cu가 일정비율로 공존하는 영역에서 나타나는 것으로 추정된다.

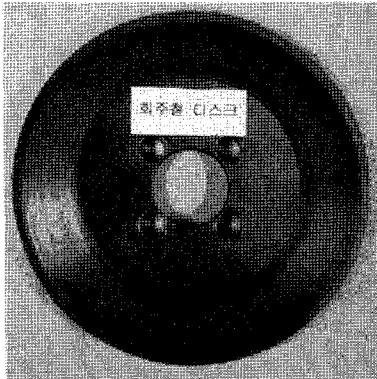


Fig. 24. Morphology of gray cast iron disc after test.



Fig. 25. Morphology of NCM cast iron disc after test.



Fig. 26. Morphology of alloyed steel disc after test.

3-4-2. 디스크 면

Fig. 24~26은 시험 후 디스크를 나타내었다. 마찰면은 얇은 산화피막이 형성되어 있다. DIII의 마찰면과 DI의 마찰면은 다른 양상을 보여준다. III의 경우는 산화피막이 뚜렷하게 나타나지만, DI의 경우는 산화피막의 형성이 거의 없는 깨끗한 면을 나타낸다. 이것은 마찰면에서 마찰기구가 다르다는 것을 의미한다. DII는 DI 디스크와 합금강 디스크의 중간정도의 색상을 하고 있다.

5. 결 론

중·고속용 철도차량의 디스크 재질선정을 위해, 회주철, 저합금주철 및 저합금 내열강 디스크를 대상으로 소형다이노모 시험기를 이용하여 마찰시험을 실시하고 고찰하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 저속과 중속에서 주철 디스크의 마찰계수 값이 가장 높게 나타나며, 다음으로 저합금 주철 디스크, 저합금 내열강 디스크 순이다. 고속에서 마찰계수는 주철디스크, 저합금 내열강 디스크, 저합금 주철 디스크 순으로 높게 나타났다.

2) 저합금 내열강 디스크와 주철 디스크의 경우 속도에 따른 마찰계수의 변화가 적은 반면, 저합금 주철 디스크의 경우는 고속에서 마찰계수가 저속에 비해 11% 감소하였다. 또한 마찰계수 안정성은 속도가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향이 보였으며, 저합금 내열강 디스크가 가장 높고, 주철 디스크는 20% 미만의 낮은 수준으로 나타났다.

3) 패드의 마모량은 주철 디스크, 저합금 주철 디스크, 저합금 내열강 디스크 순으로 나타났으며, 디스크의 공격성은 저합금 내열강 디스크와 저합금 주철 디스크는 비슷한 수준이나, 주철 디스크는 다른 디스크보다 50%이상 많은 공격성을 나타내었다.

4) 시험 후 마찰재 표면의 산화물은 Fe와 Cu로 구성되어 있으며, 패드 마찰면에서 Cu의 함량은 주철, 저합금 주철, 저합금 내열강 디스크에서 시험한 패드에서 각각 12%, 21%, 28%로 나타났으며, 저합금 주철에서 가장 안정된 산화피막을 형성하였다.

5) 저합금 내열강 디스크는 속도에 따른 마찰계수의 안정성, 디스크 공격성이 뛰어나지만, 패드 마모량이 높고, 제조공정이 난해하여 경제성에서 문제가 된다. 또한, 주철 디스크는 속도에 따른 마찰계수, 패드 마모량에서 뛰어난 특징을 보여주지만, 디스크 공격성에서

문제시 되는 것으로 나타난다. 저합금 주철 디스크는 마찰계수의 재현성, 패드 마모량, 디스크 공격성에서 뛰어난 특징을 보여주지만, 고속에서 마찰계수가 상대적으로 낮아지는 현상이 발생하였다.

참고 문헌

1. 坂本東男, “高速車兩用ブレーキディスクの開発 (第1報:フィン付鍛鋼 ブレーキディスク),” 主友金屬, Vol.45-6, pp11-22, 1993.
2. 迷村太郎, “鐵道車兩のブレーキ技術 (7)ブレーキ摩擦材料とその特性(その3),” 機械の研究 第49卷 第3号, pp379-388, 1997.
3. 迷村太郎, “鐵道車兩用金屬系摩擦ブレーキ材料に関する研究(その3),” 鐵系ブレーキディスク材料, RTRI REPORT, Vol. 5, No. 7, pp. 49-58, 1991. 7.
4. 和田雄一, “ブレーキライニング, ブレーキディスクの開発,” JR東 日本長野綜合車兩所, 研究と開發, pp.14-19, 1996.
5. 이종문, “철도 분야에서의 재료 기술의 진보(III),” Rolling Stock Engineering, pp. 100-111, 2002.
6. MMCs an Alternative Material for Railway Car Braking System.
7. 브레이크의 재료, 材料技術研究部, 摩擦材料研究室, RTRI?ムペーツ, 2004. 7.
8. 고속전철 차량 시스템의 기계기술 개발, “고속전철 제동역학 해석 및 시스템 예비설계 기술 개발,” pp. 64-95, 1995. 11.