관성에 따른 소결마찰재와 제동디스크간 마찰특성 연구

이종성[†] · 강부병^{*} · 이희성[‡]

서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과
*우송대학교

Influence of Inertial Mass on Tribological Characteristics between Sintered Friction Material and Disk

Jong Seong Lee[†], Bu Byoung Kang^{*} and Hi Sung Lee[‡]

Department of R/S System Engineering, Graduate School of Railroad,
Seoul National University of Science and Technology

*Woosong University

(Received January 31, 2013 ; Revised March 5, 2013 ; Accepted March 11, 2013)

Abstract – Cu-matrix-sintered brake pads and heat-resistant low-alloy steel are commonly applied to basic brake systems in high-energy moving machines. We analyzed how the tribological characteristics are influenced by the inertial mass. A high inertial mass decreased the friction coefficient by about 15% compared to a low inertial mass under all velocity conditions. The wear rates of the friction materials increased with the inertial mass. Thus, the inertial mass influences the friction coefficient and wear rate of the friction materials and disk but not the friction stability.

Keywords – sintered brake pad(소결제동패드), disk(디스크), wear(마모), tribofilm(산화막), disk attack(디스크공격성)

1. 서 론

도시철도의 선택적 서비스경쟁에 따라 고속화의 추세가 급격히 진행되고 있다. 도시철도의 고속화는 철도 차량의 운동에너지가 높아짐을 의미하며 이를 감당할 수 있는 공기제동시스템을 요구하게 되었다.

고속화에 대응할 수 있는 대표적인 공기제동시스템은 저합금 내열강 제동 디스크(Heat Resistant Low-Alloy Steel)와 금속계 소결마찰재(Metallic Sintered Friction Material)로 구성된다.

제동 디스크는 장착되는 위치에 따라 구분하면 휠 디스크(Wheel Mounted Disk)와 축 디스크(Axle Disk)로 나누어지며 동력차의 경우는 배치를 위한 공간적인

이유 때문에 휠 디스크가 주로 적용되며, 객차의 경우는 축 디스크가 주로 적용되지만 최근에서 동력차에도 휠 디스크와 축 디스크를 함께 적용하는 경우도 있다.

금속계 소결마찰재는 분말야금(Power Metallurgy)을 근간으로 하는 공법으로 제작되며 제한된 범위 내에서 적절한 분말의 혼합비를 조절함으로써 시스템이 요구하는 제동특성을 만족시키게 된다.

공기 제동시스템을 설계하는데 있어서 핵심중 하나는 차량의 축중량(Axle Weight)에 따라 디스크가 감당해야 하는 에너지를 성능적 관점과 경제적인 관점에서 고려하는 것이다. 즉 철도차량의 설계에 따라 축중량이 결정되면 합리적 제동시스템을 구축하기 위해 축당 디스크 수량을 설정해야 한다. 이를 위해서는 디스크 한 개가 감당해야 하는 하중에 따른 마찰특성의 검토가 이루어져야 하지만, 아직까지 이 분야에서 대한 체계적인

[†]주저자 : ssfmd@naver.com

^{*}책임저자 : hslee@seoultech.ac.kr

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.

기초연구가 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 도시철도의 고속화에 따른 공기제동시스템의 설계 자료를 제공하고 위한 기초연구로써 관성질량(Inertial Mass)에 따른 저합금 내열강 디스크와 금속계 소결마찰재간의 마찰특성을 소형 다이내모 시험기(Lab Scale Dynamometer)를 이용하여 고찰하고자 하였다.

2. 시험방법

2-1. 시험편

2-1-1. 제동디스크

본 연구에서는 중고속철도용으로 적용되는 저합금 내열강(Heat Resistant Low-alloy Steel)을 디스크 형태로 가공하여 사용하였다. 디스크는 조질처리(Quenching & Tempering)를 통해 요구하는 경도값을 얻었으며, 마찰면의 조도는 실제 차량용 디스크 조도를 만족하도록 가공하였다. 마찰면 조도측정결과는 Ra 0.44 μm 이었다. 디스크의 화학성분은 Table 1에, 물성은 Table 2에 나타내었다. 디스크의 형상은 Fig. 1에 나타내었고, 크기는 외경 115 mm, 두께 9 mm이다.

2-1-2. 마찰시편

본 연구에 사용한 마찰시편은 중고속철도용으로 개발된 동계 소결마찰재로, Fig 2는 마찰시편의 형상을

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

Matrix		Friction modifier		Lubricant		etc
Cu	Fe	Si	Cr	Gr	Ca	
45~55	15~25	1~3	5~10	6~15	-	5~10

Table 4. Mechanical properties of friction material

경도 (H _{RB})	밀도 (g/cm ³)	전단강도 MPa
80	5.0	21.6

나타내었고, Fig. 3은 마찰재시편의 광학현미경조직사진이다. 마찰시편은 Fig. 2와 같이 제작하였다. Table 3, Table 4 마찰재 조성 및 기초물성치를 각각 나타내었다.

2-2. 시험장치

마찰특성 평가는 KS R 4024에 따라 Fig. 4와 같이 제작된 소형 다이내모 시험기(Lab-Scale Dynamometer)를 이용하여 수행하였다.(Fig. 4)

Fig. 4. Lab-scale dynamo tester.

Table 5. Test velocity conversion

실차 조건			소형 다이내모 시험기	
차량속도 (km/h)	차량 RPM	마찰선속도 (m/s)	시험 RPM	마찰선속도 (m/s)
50	298	13.9	1,673	13.9
70	417	19.4	2,342	19.4
90	536	25.0	3,012	25.0

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

특히, 본 시험기는 실제 차량과의 상관관계를 나타내는 스케일 팩터(Scale Factor) 개념을 적용할 수 있어 일반적인 마찰시험기의 시험결과보다 현장성이 뛰어나다.

2-3. 시험방법

2-3-1. 제동시험조건

본 연구에서는 실제 철도차량의 제동조건을 모사하기 위해 스케일팩터를 적용함으로써 마찰시편의 마찰선속도와 제동압력을 실제 차량과 동일하게 하였다. 차량의 제동속도는 공기제동이 체결되는 속도를 감안하여 차량기준으로 50/70/90 km/h가 되도록 설정하였다.

실제 차량의 휠 외경은 890 mm, 제동디스크 외경은 640 mm, 마찰반경은 247 mm이며, 제동압력은 0.55 MPa 이고, 본시험에 사용된 소형 다이내모 시험기에서의 디스크 마찰반경은 44 mm, 마찰시편의 면적은 5.6 cm², 제동압력은 0.55 MPa가 되도록 설정하였다. 실제 차량과 소형 다이내모 시험기에서의 제동속도 조건을

Table 6. Test Conditions

	관성 (kgf·m·s ²)	제동압력 (MPa)	선속도 (m/s)	제동회수
1	0.065	0.55	13.9	50
			19.4	50
			25.0	50
2	0.095	0.55	13.9	50
			19.4	50
			25.0	50
3	0.125	0.55	13.9	50
			19.4	50
			25.0	50

Table 5에 나타내었다.

본 시험에서는 일정하중으로 마찰시편을 제동디스크에 압착시켜 마찰특성을 평가하는 압력모드를 적용하였다. 관성질량은 0.065/0.095/0.125 kgf·m·s²으로 변화시켰으며, 각 관성 조건에서 제동시험은 속도별로 50회씩 총 150회 실시하였다. 시험에 앞서 디스크와 마찰재의 접촉을 균일하게 할 목적으로 갈아 맞춤(Bedding)을 실시하였다. 갈아 맞춤은 마찰면이 70% 이상 확보되도록 하였다. 시험조건을 Table 6에 정리하였다.

2-3-2. 평가 항목

마찰특성은 각 속도별 50회의 평균마찰계수와 평균 마찰계수 안정성으로 나타내었다.

마찰계수 안정성(Stability)은 제동시 마찰계수의 변화를 평가하는 항목으로 제동시 순간마찰계수의 변화가 평균마찰계수에서 벗어난 정도를 나타낸다. 마찰계수 안정성을 아래식으로 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 시험 전 후의 중량차를 측정 한 후 이를 나타내거나, 에너지당 마모부피로도 평가하였다.

Fig. 5. Friction coefficient with Inertial mass.

제동시험 후 제동디스크의 표면상태는 표면조도계(Roughness Tester)로 마모트랙을 측정하여 Ra(중심선 평균조도) 값과 Ry(최대높이 거칠기)값으로 산출하였다. 또한 XRD를 이용하여 마찰면의 성상을 분석하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. 마찰계수와 마찰계수 안정성

각각의 관성에서 제동속도에 따른 평균마찰계수를 Fig. 5에 나타내었다.

관성이 0.065 kgf·m·s²에서는 0.398의 평균마찰계수를 관성이 0.095 kgf·m·s²에서는 0.366의 평균마찰계수를 관성이 0.125 kgf·m·s²에서는 0.340의 평균 마찰계수를 나타내어 관성이 증가하면 모든 속도에서 평균 마찰계수는 낮아졌다.

0.125kgf·m·s²에서의 평균마찰계수는 0.065kgf·m·s²에서 평균마찰계수 대비 17% 낮은 값을 가진다.

즉, 상기의 결과는 동일한 공기제동 시스템에서도 관성에 따른 마찰계수의 차이가 17% 발생하며 이에 따라 설계관성이 디스크의 수량을 결정하는 주요한 설계요인이 됨을 의미한다.

관성의 증가에 따라 마찰계수가 낮아지는 것은 제동에너지가 높아 마찰면에서 많은 열이 발생하고 이에 따라 마찰면에 형성되는 산화피막의 영향으로 판단된다.

Table. 7에는 관성과 속도에 따른 제동에너지를 나타내었다. 제동에너지가 가장 낮은 0.065kgf·m·s², 13.9m/s 조건과 제동에너지가 가장 높은 0.125kgf·m·s², 25.0m/s 조건에서의 제동에너지는 약 4.5배 차이가 났다.

Table 7. Kinetic energy & estimated disk temperature

	관성 (kgf·m·s²)	선속도 (m/s)	운동에너지 (J)	디스크예측 온도(°C)
1	0.065	13.9	11,052	75
		19.4	21,662	123
		25.0	35,810	187
2	0.095	13.9	13,362	86
		19.4	26,189	130
		25.0	43,293	221
3	0.125	13.9	15,327	94
		19.4	30,041	161
		25.0	49,660	250

Fig. 6 Friction coefficient stability with Inertial mass.

또한, 이러한 제동에너지가 전량 마찰열로 전환되며 제동디스크가 열흡수체(Heat Sink Mass)로 작용한다면 제동디스크 온도는 최소 75°C에서 최대 250°C까지 변화하는 것으로 계산되었다. 하지만 이러한 온도는 디스크 전체의 온도를 의미하며 실제마찰면의 접촉온도(Contact Temperature)보다는 120~150°C 낮다는 연구결과[10]에 따르면 마찰면의 최대온도는 370~400°C로 예측되어 진다.

$$E_{brake} = -\rho c_p V \Delta T = -m_{fric} \cdot c_p \Delta T$$

E_{brake} : 브레이크제동에너지

ρ : 마찰부품의 밀도 (steel: 7,840 kg/m³)

C_p : 마찰부품의 비열 (steel: 460 J/kg·K²)

V : 마찰부품의 부피 (m³)

Fig. 7. Wear as expressed weight loss.

Fig. 8. Wear as expressed volume loss per energy.

ΔT : 온도변화 (K)

m : 마찰부품의 질량 (kg)

각 관성에서 속도에 따른 평균마찰계수의 변화는 비교적 적은 것으로 나타났다. 속도에 따른 마찰계수의 변화폭이 적은 것은 설정된 속도조건의 폭이 비교적 적는데 기인한 것으로 분석하였다.

Fig. 6은 각 관성에서 속도에 따른 마찰계수 안정성을 나타내었다. 관성이 증가할 수록, 속도가 증가할 수록 마찰계수 안정성은 낮아지는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 에너지가 높아질 수록 마찰면에서의 기계

Table 8. Surface roughness of brake disc

	Ra(μm)	Ry(μm)
시험전	0.0441	3.397
0.065kgf·m·s²	1.969	13.685
0.095kgf·m·s²	2.224	17.336
0.125kgf·m·s²	3.247	23.781

Fig. 9. Surface profile of brake disk(a,b,c,d).

(a) : 시험전 (b) : 0.065kgf·m·s²

(c) : 0.095kgf·m·s² (d) 0.125kgf·m·s²

적인 불안정성이 증가하기 때문으로 추정된다.

3-2. 마찰시편 마모량과 제동디스크 표면변화

Fig. 7은 각각의 관성에서 속도별 마모량을 시험전 후 증량차로 나타내었다. 모든 속도에서 관성이 높을 수록 마모량은 많은 것으로 나타났다.

Fig. 8은 각각의 관성에서 속도별 마모량을 에너지당 부피로 나타낸 것이다. 이러한 마모량 평가 방식은 UIC(유럽철도연합)규격에서도 채택하고 있는 방식이다.

동일속도에서 관성이 높을수록 마모량이 증가하는 것은 증량변화로 마모량을 평가한 Fig. 7과 동일한 결과를 나타내지만, 동일 관성에 속도에 따른 마모량은 감소하는 경향을 보여주고 있다. 제동이 운동에너지를 열에너지로 변환하는 과정이라고 할 때 운동에너지에 따른 마모량의 변화는 없는 것이 이상적이라 할 수 있다. 그러나 이처럼 속도가 증가함에 따라 에너지당 마모량이 감소하는 것은 마찰면에서 물성이나 성상의 변화에 따라 마모속도가 변화하였음을

Fig. 10. Morphology of friction material after test.

Fig. 11. Surface morphology of brake disk after test.

의미한다.

Table 8은 제동디스크의 시험전후 조도를 측정한 결과를 나타내었다. Ra값과 Ry값은 Fig. 9에서 보듯이 관성이 증가함에 따라 디스크의 표면조도도 거칠어짐을 확인할 수 있다.

3-3. 마찰면 분석

Fig. 10은 마찰시험 완료 후의 마찰시편의 형상을 나타내었다. 관성과 속도가 증가할수록 마찰시편의 마찰면에 검은 산화물(Black Oxide)이 형성되어 검은 색을 띄고 있다.

관성과 제동속도가 낮은 경우는 마찰면이 거칠며 고속(25.0 m/s)에서는 관성이 높아짐에 따라 고밀도의 산화피막(Glaze Layer) 형성이 증가하고 있다. 이는 높은

Fig. 12. XRD pattern of friction material surface after test.

Fig. 13. XRD pattern of disk surface after test.

제동에너지에 기인한 것으로 분석된다. 실제 마찰면의 온도는 관성 0.125 kgf·m·s² 속도 25 m/s에서 380°C로 측정되어 윤활성이 뛰어난 Fe₂O₃ 산화물이 형성이 용이한 것으로 예측되었다.

Fig. 11은 마찰시험 완료 후의 제동디스크의 표면상태를 나타내고 있다. 마찰시편과 마찬가지로 관성과 속도가 증가할수록 마찰면에 검은 산화물이 형성되어 있다.

Fig. 12는 시험이 완료된 마찰재의 표면을 XRD로 분석한 결과이다. 모든 조건에서 Fe₂O₃ 피크가 검출되

었으며, 특히 관성이 높을 수록 Fe_2O_3 피크도 높아진다. 이러한 피크의 검출은 마찰면에서 온도가 350°C 까지 상승하였지만 400°C 이상으로는 상승하지 않았음을 보여주는 근거가 된다.

또한 이러한 산화물이 마찰면에 형성됨으로써 에너지당 마모부피가 적어지는 것으로 판단된다.

Fig. 13은 시험이 완료된 후 디스크 표면을 XRD로 분석한 결과이다. 모든 조건에서 Fe_2O_3 피크가 관찰된다. 이러한 결과는 Table 7에서 예측한 디스크의 온도와 일치한다.

4. 결 론

관성에 따른 내열강 디스크와 금속계 소결 마찰재간의 마찰특성에 미치는 영향을 소형 다이내모시험기를 사용하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 평균마찰계수는 관성증가에 따라 17% 낮은 값을 나타내었고, 제동에너지에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

2. 마찰시편의 마모량을 시험전후 중량차이로 나타낼 때는 속도와 관성이 증가함에 따라 증가하였지만, 에너지당 마모부피로 나타내면 동일관성에서 속도증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 제동에너지증가에 따른 마찰면의 성상의 변화에 의한 것으로 판단된다.

3. 제동디스크의 표면거칠기는 마찰시편과는 달리관성이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 이는 제동시스템 설계시 디스크 수명은 관성에 따라 직접적인 영향을 받는 것을 의미한다.

4. 제동디스크와 마찰시편의 마찰표면에 형성된 산화물은 주로 Fe_2O_3 로 마찰면의 온도가 $350\sim 400^\circ\text{C}$ 까지 상승했고, 이러한 산화피막이 마찰특성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 실제 공기제동 시스템을 설계시 관성에 따른 마찰계수, 마모량의 변화 폭이 크기 때문에 이를 반영한 설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비(일부) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Amderson, A.E, ASM handbook, 10th, vol. 18, pp. 569-577, Friction, lubrication, and wear technology, A,S,M international, materials park, OH, 1992.
2. Jacko, M.G and Lee, S.K, Kirk-othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4th, Vol. 4, pp. 523-536, Wiley, 1992.
3. 이성호, 김영국, 김석원, 박진배, “고속철도 차량의 제동성능해석 및 검증,” *한국소음진동공학회 2006년 춘계학술대회논문집*, pp. 982-987, 2006.
4. 길형균, 고태환, 조동현, 한성호, 서승일, “NCM-CV 주철 제동디스크와 다양한 패드의 적합성 평가,” *한국철도학회논문집*, 제10권, 제3호, pp. 251-256, 2007.
5. 김석삼, 김재호, 안효준, “고성능 금속마찰재의 트라이볼로지적 특성,” *한국윤활학회지*, 제14권, 제1호, pp. 45-53, 1998.
6. Metal handbook 1, prpperties and selection, american society for metal.
7. 김상호, 이희성, “철도차량용 제동디스크의 트라이볼로지 특성연구,” *한국윤활학회지*, 제23권, 제1호, pp.19-28, 2007.
8. 김기열, 김상호 외2명, “고속전철용 제동 시스템에 적용되는 마찰재료,” *대한금속학회지*, 제11권, 제2호, pp.134-143, 1998.
9. 정동윤, 김기열, 조정환, “B4C첨가에 따른 동계 소결합금 마찰재의 마찰특성 변화에 관한 연구,” 제12권, 제3호, pp.48-54, 1996.
10. T.F.J. Quinn, Review of Oxidational Wear. part 1: The Origins of Oxidational Wear Tribol. Int., Vol. 16 pp.257-270, 1983.
11. A. Iwabuchi “The Role of Oxide Particles in the Fretting Wear of Mild Steel,” *Wear*, Vol. 151, pp. 301-311, 1991.
12. A. Iwabuchi, H. Kubosawa and K. Hori, “The Effect of Oxide Particles Supplied at the Interface before Sliding on the Severe-mild Wear Transition,” *Wear*, vol. 128, pp. 123-137, 1988.