외부 공기속도 변화에 따른 소결마찰재와 디스크간 마찰특성

이종성[†] · 이희성^{*}

서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과

Influence of External Air Velocity for Tribological Characteristics between Sintered Friction Material and Disk

Jong Seong Lee[†] and Hi Sung Lee^{*}

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

(Received February 12, 2012; Revised July 28, 2012; Accepted August 19, 2012)

Abstract – Cu-matrix sintered brake pads and low-alloy heat-resistant steel are commonly applied to basic brake systems in high-energy moving machines. In this research, we analyzed the tribological characteristics to determine the influence of the air velocity between the disk and pad. At a low brake pressure with airflow, the friction stability was decreased as a result of the lack of tribofilm formation at the disk surface. However, there were no significant changes in the friction coefficient under any of the test conditions. The wear rates of the friction materials were decreased with an increase in the airflow velocity. As a result, the airflow velocity influenced the friction stability, as well as the wear rate of the friction materials and disk, but not the friction coefficient.

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

1. 서 론

높은 운동에너지를 가지는 철도차량의 기초제동장치는 마찰재와 제동디스크간의 마찰력을 기반으로 한다[1-3].

대표적인 마찰재인 금속계 소결마찰재(Metallic Sintered Friction Material)는 동합금 또는 철합금을 기지(Matrix)로 하여 세라믹, 윤활제등 10여종의 성분을 포함하는 복합재료이다. 최근에는 동합금 기지의 금속계 소결마찰재를 주로 사용하지만, 보다

높은 제동력 확보를 위해서는 아직까지 철합금 기지의 금속계 소결마찰재를 사용하는 경우도 있다.

제동디스크는 적용되는 에너지수준, 경제성에 따라 다른 재질의 디스크가 사용된다. 철도에 적용되는 제

동디스크는 비교적 분담하는 에너지가 낮으면 주철(Casting Iron)재 디스크를 사용하며, 분담하는 에너지가 높으면 저합금 내열강(Low-alloyed Heat Resistance Steel)을 주조(Steel Casting) 혹은 단조(Forging Steel)로 디스크를 제조하여 사용한다. 주철디스크의 경우에도 내열성 향상을 위해 Ni, Mo등을 첨가하여 제조하기도 하며, 주강이나, 단강의 경우에도 합금을 첨가하여 내열성, 내크랙성을 높이려는 노력이 진행되고 있다[4-7].

이에 마찰재와 제동디스크로 구성된 기계식 제동시스템의 대표적인 형태가 동계 소결마찰재와 저합금내열강 제동디스크이며, 이에 대한 마찰특성 연구는 폭 넓지는 않지만, 산업계를 중심으로 진행되고 있다.

그런데 동계 소결마찰재와 제동디스크 상호간의 마찰특성은 대부분 마찰시험기(Friction Tester)나 다이 나모시험기(Dynamometer)를 이용한 시험적 연구로

[†]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	0.4	0.5	≤	≤	≤	1.3	0.6	0.20
~0.31	~0.7	~0.9	0.025	0.025	0.40	~1.6	~0.9	~0.40

Table 2. Mechanical Properties of the disk

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

Fig. 1. Brake disc for test.

이루어지지만, 이러한 시험이 실제 운송기기의 제동 환경을 반영하지 못하는 경우가 많아 산업적으로 적용하기에는 어려움이 있다. 시험환경과 실제 환경과의 대표적인 차이는 제동시 마찰재와 제동디스크 사이의 공기유동이다. 즉 철도차량이 제동시 마찰재와 제동디스크 사이에는 속도변화에 따른 외부공기의 유동이 형성되며 이러한 공기유동은 마찰특성에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 실제 제동조건과 유사 조건을 형성하기 위해 제동시 마찰재와 제동디스크 사이에 인위적으로 공기유동을 제공함으로써 공기속도에 따른 동계 소결마찰재와 내열강 제동디스크간의 마찰특성을 고찰하고자 하였다.

2. 시험방법

2-1. 시험편

2-1-1. 제동디스크

본 연구에 사용된 제동디스크는 철도차량에 사용되

Table 3. Chemical compositions of friction material

Matrix		Friction Modifier		Lubricant		etc
Cu	Fe	Si	Al	Gr	Ca	
55~65	10~20	3~8	3~8	6~15	-	5~10

Table 4. Mechanical Properties of friction material

경도 (HRR)	밀도 (g/cm ³)	전단강도 (kgf/mm ²)
115	5.2	3.2

Fig. 2. Brake pad for test. **Fig. 3. Microstructure of friction material.**

는 저합금 내열강을 기계가공 후 조질처리(Quenching & Tempering) 하고 연마하여 제작하였다. 디스크의 화학성분을 Table 1에, 물성은 Table 2에 나타내었다. 디스크의 형상은 Fig. 1에 나타내었고, 크기는 외경 110 mm, 두께 10 mm이다.

2-1-2. 마찰시편

본 연구에 사용한 마찰시편은 현재 철도차량에 적용

Fig. 4. Lab-Scale Dynamometer.

Fig. 5. Schematic of scale dynamo tester.

되고 있는 동계 소결마찰재로, Table 3에 마찰재 조성을 Table 4에 기초물성을 나타내었다.

Fig 2는 마찰시편의 형상을 나타내었고, Fig. 3은 마찰재시편의 광학현미경(Optical Microscope) 사진이다. 마찰시편은 35×16×8(두께)로 제작하였다.

2-2. 시험장치

마찰특성 평가는 소형 다이내모 시험기(Lab-Scale Dynamometer)를 이용하여 수행하였다.(Fig. 4) Fig. 5는 그 시험기의 개략도를 나타내었다.

본 시험기는 제동디스크를 요구하는 속도로 회전시킨 후 마찰시편에 압력을 가하여 이때 발생하는 토크, 회전속도, 제동압력 등을 실시간으로 측정할 수 있으며, 측정된 데이터는 컴퓨터에 의해 자동으로 분석, 저장 및 프린터 출력이 가능한 구조이다. 특히 본 연구에서는 제동시마다 제동디스크와 마찰재 사이에 일정 속도의 공기를 공급하여 공기속도에 따른 마찰특성을 연구하였다.

Table 5. Test program for scale dynamo tester

	Braking Pressure (MPa)	유체 속도 (m/s)	Speed (m/s)	Stop No
1		0		
2	0.2	4.0		150
3		8.0		
4		0		
5	0.6	4.0	8	150
6		8.0		
7		0		
8	1.0	4.0		150
9		8.0		

2-3. 시험방법

2-3-1. 제동시험조건

본 연구에서는 일정압력으로 마찰시편을 제동디스크에 압착시켜 마찰특성을 평가하는 압력모드를 적용하였다. 시험에 사용된 관성질량은 0.095 kgf·m·s², 마찰반경은 0.044 m, 브레이크 패드의 면적은 5.6 cm²이며, 마찰시편의 선속도는 8 m/sec로 고정하고, 시험 압력은 0.2, 0.6, 1.0 MPa로 변화를 주어 각 압력조건에서 150회 제동을 실시하였다. 시험에 앞서 디스크와 마찰재의 접촉을 균일하게 할 목적으로 갈아 맞춤(Bedding)을 실시하였다. 갈아 맞춤은 마찰면이 70% 이상 확보되도록 하였다.

공기를 마찰재와 디스크 사이에 공급하기 위해 제동시 공기를 규정된 속도로 분사하였다. 공기는 면적이 5.6 mm²인 관을 통해 4 m/s, 8 m/s의 속도가 되도록 공급하였다.

2-3-2. 평가 항목

마찰특성은 150회의 평균마찰계수와 평균마찰계수 안정성으로 나타내었다.

마찰계수 안정성(Stability)은 제동시 마찰계수의 변화를 평가하는 항목으로 제동시 순간마찰계수의 변화가 평균마찰계수에서 벗어난 정도를 나타낸다. 마찰계수 안정성을 아래 식으로 나타내어진다.

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

단, μ_s : 마찰계수 안정성

μ_{ave} : 평균 마찰계수

Fig. 6. Friction coefficient with applied pressure.

Fig. 7. Friction coefficient stability with applied pressure.

$\mu_{\max}$: 최고 마찰계수

$\mu_{\min}$: 최저 마찰계수

마찰시편의 마모량 평가는 실험 전 후의 무게차를 측정하여 나타내었다.

제동시험후 제동디스크의 표면상태는 표면조도계(Roughness tester)로 마모트랙을 측정하여 Ra(중심선 평균조도) 값과 Ry(최대높이 거칠기)값으로 산출하였다. 또한 XRD를 이용하여 마찰면의 성상을 판단하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. 마찰계수와 마찰계수 안정성

Fig 6은 공기속도에 따른 150회 제동의 평균마찰계수를 나타내었다. 고압(1.0 MPa)에서는 비교적 낮은 마찰계수를 가지며, 공기속도에 따른 마찰계수 변화는 거의 없다. 반면 0.6 MPa에서는 공기속도에 따라 마찰계수가 낮아지는 경향을 보이며, 0.2 MPa에서는 공기속

Fig. 8. Friction specimen wear with applied pressure.

도가 8 m/s에서 다시 마찰계수가 높아졌다.

제동압력이 높을 경우는 마찰시편과 제동디스크사이의 마찰면이 외부공기에 의해 거의 영향을 받지 않지만, 제동압력이 낮은 경우는 공기속도에 따라 마찰면이 영향을 받아 변화하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 공기속도에 따른 150회 제동의 마찰계수 안정성을 나타내었다. 제동압력이 0.6 MPa, 1.0 MPa에서는 공기속도에 따른 뚜렷한 변화가 없지만, 제동압력이 0.2 MPa의 경우는 공기속도에 따라 마찰계수 안정성이 낮아지는 것으로 관찰되었다.

Figs. 9~10은 각 시험조건에서 시험 후 제동디스크와 마찰시편의 표면을 나타낸 것으로 제동압력이 낮고(0.2 MPa) 제동시 마찰면에 공기를 가하면 제동디스크면은 비교적 초기 색상을 유지하며, 마찰시편의 표면도 산화피막의 형성 없이 최초 색상인 붉은색을 나타내고 있다. 즉, 마찰시편 표면에 산화피막이 형성하지 않은 상태의 경우 마찰계수 안정성은 낮아지는 것을 나타냈다.

앞선 연구[8]에서 마찰시편에 형성된 산화피막은 완전한 순수 Fe산화물(Fe Oxide)이 아닌 Fe와 Cu가 혼재된 산화물로 존재해도 마찰계수 안정성에는 영향이 없는 것으로 확인되었다.

3-2. 마찰시편 마모량 및 제동디스크 마찰표면

Fig. 8은 마찰시편의 마모량을 나타내었다. 제동압력이 증가할수록 마모량이 증가하고, 공기속도가 증가할수록 마모량은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 두 가지로 해석이 가능하다. 먼저 공기유입에 의해 마찰시편 및 제동디스크의 온도가 낮아졌고, 이에 따라 주변온도가 낮아져 마모량이 감소할 수 있다.

Table 6. Surface conditions after test

Specimen		Ra(μm)	Ry(μm)
Air Flow (m/s)	Braking Pressure (MPa)		
0	0.2	1.3	18
	0.6	2.3	28
	1.0	1.4	21
4	0.2	2.2	36
	0.6	2.2	42
	1.0	3.0	50
8	0.2	1.2	20
	0.6	2.7	27
	1.0	2.4	48

다른 연구자들에 의하면 온도가 증가하면 마모량은 증가하다가, 일정온도 이상에서는 마모량이 오히려 감소하는 것으로 알려져 있다[9-11]. 이러한 현상은 마찰 표면에 형성되는 산화물의 영향으로 설명되고 있다. 즉, 마찰면에 Fe_2O_3 가 형성되면 온도(속도)증가에 따라 마모량은 증가하다가, 온도(속도)가 더 상승하여 마찰면에 Fe_3O_4 가 형성되면 급격히 마모속도가 감소하며, 다시 온

도(속도)가 증가하여 마찰면에 FeO 가 형성되면 마모량이 증가하는 것으로 알려져 있다. Fig. 11의 XRD스펙트럼에서 보듯이 공기속도에 따라 마찰시편과 제동디스크 표면에 형성되는 산화물의 성상을 달라지며, 특히 낮은 제동압력(0.2 MPa)에서 공기의 유입이 되면 제동디스크면에서 산화피막의 형성되지 않지만, 마모량은 낮아지는 것으로 나타나 앞선 산화피막의 성상에 따른 마모경향과는 일치하지 않는 결과를 나타내었다.

또 다른 설명은 공기유동에 의해 마찰시편과 제동디스크의 마찰면에 마모분(Debris)이 제거되어 마모분의 의한 3상(Three-body) 마모가 없게 되므로 마모량은 감소하는 것으로 판단된다. 마모분의 경우 주로 산화물로써 높은 경도를 가지고 이러한 마모분은 마찰면에서 연삭마모를 발생시켜 마모량을 증가시킨다. 그런데 공기유입으로 인해 마모분이 마찰면에서 제거되면 마모분에 의한 연삭작용이 없어지므로 마모량은 감소한 것으로 판단된다.

따라서 마찰시편과 제동디스크의 마모는 산화피막 성상의 영향보다는 산화마모분의 영향이 지배적인 것으로 판단할 수 있다.

Table 6은 제동디스크의 시험후 조도를 측정된 결과를 나타내었다. 공기 유입이 없는 경우가 공기유입이

Fig. 9. Morphology of disk after test(No Air, Air flow = 4 m/s, 8 m/s).

Fig. 10. Morphology of friction material after test(No Air, Air flow = 4 m/s, 8 m/s).

있는 경우보다 비교적 낮은 R_a 값과 R_y 값은 가졌다. 이것은 Fig. 9에서 보듯이 상대재인 마찰시편의 표면 상태와도 일치하며, 마찰면에서 공기유입에 의해 마모분이 탈락하면 오히려 제동디스크 표면이 거칠게 되는 것으로 판단된다. 따라서 정상마모분의 경우 그 크기가 2~3미크론 수준으로 제동디스크면에서 연삭재로 작용하여 디스크 조도를 개선하는 것으로 판단된다.

공기속도가 4 m/s의 경우가 오히려 8 m/s보다 더 높은 R_y 값을 가지는데, 명확한 원인은 추가적인 연구가 필요하다.

공기유입이 없고 제동압력이 1.0MPa의 경우 오히려 낮은 제동압력에서 보다 R_a , R_y 값이 낮은 것으로 나타났는데, 이것은 높은 제동압력으로 제동온도가 높게 되고 이에 따라 마찰면에서 미세 마모분에 의한 연삭이 더욱 쉽게 되기 때문으로 추정된다.

공기속도가 8 m/s, 0.2 MPa에서 제동디스크 마찰면에 산화피막의 형성은 없지만, 조도는 상대적으로 좋게 확인되었다.

3-3. 마찰면 분석

Fig. 9는 마찰시험 완료 후의 제동디스크 형상을 나

타내었다. 제동압력이 증가할수록 제동디스크의 마찰면에는 검은 산화물(Black oxide)이 형성되어 검은 색을 띄고 있다. 공기속도가 증가할수록 마찰면은 밝은 색으로 나타나고 있다.

Fig. 10은 마찰시험 완료 후의 마찰시편의 표면상태를 나타내고 있다. 공기유입이 없는 경우는 제동 압력에 관계없이 마찰면에 검은 산화물이 형성되어 있지만, 공기 유입이 있는 경우는 붉은색과 검은색상을 띄고 있고, 이러한 마찰시편의 색상은 마찰계수 안정성에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 특히제동압력이 0.2 MPa의 경우는 거의 동합금 색상을 나타내고 있다.

Fig. 11(a)는 공기유입이 없는 조건의 제동디스크 마찰트랙을 Fig. 11(b)는 마찰시편의 마찰면을 XRD로 분석한 결과이다. 디스크의 경우 모든 제동압력에서 Fe_2O_3 피크가 검출되며, 제동압력이 높을수록 Fe_2O_3 피크가 높아진다. 또한 0.6 MPa와 1.0 MPa에서는 Fe_3O_4 피크도 검출되는데 이것은 마찰면의 온도가 0.2 MPa에 비해 높았기 때문으로 0.2 MPa는 마찰면의 온도는 350°C 이하이며, 0.6 MPa와 1.0 MPa에서는 400°C 이상인 것이 마찰면의 산화물의 정상으로 확인된다.

마찰제시의 마찰면에서는 모든 조건에서 Fe_2O_3 피크

Fig. 11. XRD Spectrum of disks and friction materials.

와 Fe_3O_4 피크가 동시에 검출되면 동일 압력조건에서 디스크에 비해 Fe_3O_4 피크가 높다. 이것은 제동디스크와 마찰시편간의 마찰면에서 마찰시편에 더 높은 온도가 유입되었다는 의미하는 것으로 디스크 높은 질량으로 인해 마찰열이 쉽게 전도되기 때문으로 판단된다.

Fig. 11(b)는 공기속도가 4 m/s인 조건에서 제동디스크 마찰트랙을 Fig. 11(e)는 마찰시편의 마찰면의 XRD분석 결과이다. 공기 유동이 없는 경우와 비교할 때 디스크에서는 Fe_3O_4 피크는 발견되지 않고 Fe_2O_3 피크도 상당히 낮게 나타난다. 이것은 공기유입에 의해 마찰면의 온도가 낮아진 것에 기인한 것으로 판단된다.

그러나 마찰시편에서는 공기 유입이 있는 경우와 공기유입이 없는 경우 검출되는 피크의 차이는 없는 것

으로 나타났다. 제동시 마찰시편의 온도측정결과에서도 공기 유입에 따른 마찰시편의 온도차이는 없는 것으로 나타났다.

Fig. 11(c)는 공기속도가 8m/s인 조건의 제동디스크 마찰트랙을 Fig. 11(f)는 마찰시편의 마찰면이 XRD분석 결과이다. 디스크에서는 거의 철산화물이 검출되지 않고 있으며 마찰시편에서는 Fe_2O_3 와 Fe_3O_4 산화물이 동시에 검출되지만, 다른 두 조건에 비해 낮은 피크를 나타내어 마찰면의 온도가 낮았음을 의미한다.

4. 결 론

외부공기 속도변화가 내열강 디스크와 금속계 소결

마찰재간의 마찰특성에 미치는 영향을 소형관성시험기를 사용하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 제동압력이 높은 경우 외부 공기속도에 따른 마찰계수의 변화는 없지만, 제동압력이 낮은 경우는 공기속도에 따른 변화를 나타내었다. 또한 저압에서 공기유입이 있으면 마찰계수 안정성은 낮아졌다. 이러한 원인은 마찰면에 형성된 산화피막을 영향인 것으로 판단된다.

2. 외부 공기속도 변화가 있는 경우 마찰시편의 마모량은 감소하였으며, 이는 마찰면에 형성된 산화피막의 영향보다는 마모분에 의한 연삭작용이 소결마찰재와 내열강 제동디스크간 주된 마모메카니즘인 것으로 추정되어 진다.

3. 제동디스크 마찰표면에 형성된 산화물은 제동압력과 공기속도에 따라 Fe_2O_3 와 Fe_3O_4 가 형성되나, 제동압력이 낮고 공기유입이 있는 경우는 마찰면에 산화피막이 형성되지 않고 이 경우 마찰계수 안정성이 낮아진다. 마찰재의 마찰표면에는 모든 조건에서 Fe_2O_3 와 Fe_3O_4 가 형성되었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Amderson, A.E., ASM Handbook, 10th ed, Vol. 18, pp. 569-577, Friction, Lubrication, and Wear Tech-

nology, ASM International, Materials park, OH, 1992.

2. Jacko, M.G. and Lee, S.K., "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology," 4thed, 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. 김형균, 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, Properties and selection, American Society for Metal.

7. 김상호, 이희성, "철도차량용 제동디스크의 트라이볼로지 특성연구," *윤활학회지*, 제23권, 제1호, pp.19-28, 2007.

8. 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.

9. T.F.J. Quinn, Review of Oxidational Wear. Part 1: The Origins of Oxidational Wear *Tribo. Int.*, 16 pp. 257-270, 1983.

10. A. Iwabuchi "The Role of Oxide Particles in the Fretting Wear of Mild Steel," *Wear*, Vol. 151, pp. 301-311, 1991.

11. 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.