

세라믹 코팅 고에너지 제동 디스크의 트라이볼로지적 특성

이희성[†] · 강부병[‡]

한국철도기술연구원

Tribological Characteristics of Ceramic Coated High Power Brake Discs

Hisung Lee[†] and Bu-Byoung Kang[‡]

Korea Railroad Research Institute

Abstract – Three different kinds of brake discs including two coated brake discs and one steel disc were tested under the same experimental conditions on a reduced scale braking test bench. A braking test bench was specially designed to analyse thermo-mechanical and frictional behaviors of two types of brake with different sizes in stop and hold braking modes. Plasma spray coating technique was also used to coat the discs with ceramic powder. During the test four commercial brake pads were coupled with discs. Ceramic coated discs showed good stability in friction coefficient at high speed and high energy braking conditions. But they caused large wear loss of pad mass compared with the steel disc. It was shown that thermal barrier effect in ceramic coated discs adjusted the thermal partition between pad and disc. For a steel disc, it showed fluctuating friction coefficient at high speed but small wear loss of pad mass compared with ceramic coated discs.

Key words – ceramic coated brake disc, thermal barrier effect, friction coefficient, wear loss.

1. 서 론

현재 전 세계적인 기존선 고속화의 추세속에서 철도 차량도 고속화가 급속하게 진행되고 있다. 이에 따라 새로 개발되는 고속차량에 고속 및 고에너지용 고성능 마찰재 및 제동장치를 개발하여 적용해야 함은 필수적이다. 실제로 350 km/h 이상의 속도로 주행하는 고속차량을 비상제동 시키는 것은 매우 가혹한 사용조건이고 엄청난 고에너지(≈ 20 MJ)가 디스크와 패드의 마찰면을 통해서 외부로 방출된다. 이때 방출된 열에너지로 인해서 디스크와 패드는 고온상태에서 높은 제동압력을 받게 된다. 이에 따라 고온에서 안정된 열적성능, 내마멸성, 마찰성능을 가지고, 내구성도 있어, 유지보수비용을 감소시킬 수 있는 고성능 마찰재의 개발이 선행되어야 한다. 이러한 신소재로서 고려되고 있는 것이 카본 및

세라믹계 소재이다[1].

본 논문에서 시험대상으로 하는 세라믹은 내마멸성과 내열충격성 등은 우수하지만, 취성이 강해 낮은 파괴인성치를 갖고 있어 충격에 약하고 가공하기 어려운 단점도 있다. 이러한 단점을 보완하고자 금속계 기지에 세라믹계 소재를 두껍게 코팅하는 플라즈마 코팅방법이 사용된다[2]. 세라믹 코팅은 마찰면의 높은 온도에 견딜 수 있고, 낮은 열전도성에 의해 축방향으로의 열전달을 차단하는 열차단 효과(thermal barrier effect)로 인해 디스크 기지의 온도를 낮추어 준다[3,4]. 따라서 금속계 디스크에서 주로 발생하는 소성변형과 국부적인 고온발생에 의한 용착현상의 가능성을 감소시켜서, 고온에서도 안정된 마찰성능 및 마멸량 감소를 기대할 수 있다. 반면에 세라믹 코팅의 높은 디스크 표면 경도와 패드 방향으로의 열전달 증가로 인해 패드는 더욱 가혹한 상태에 놓이게 되므로 제동디스크의 트라이볼로지적 특성을 분석할 때에는 패드의 현상도 반드시 함께 분석되어야 한다.

[†]책임저자 : leehs@krii.re.kr

[‡]주저자 : bbkang@krii.re.kr

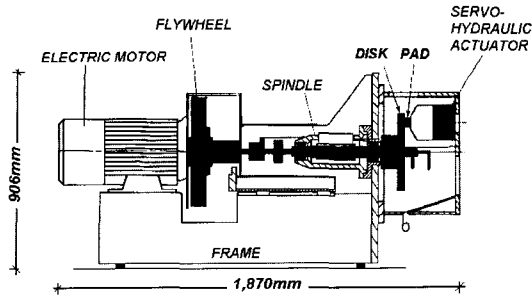


Fig. 1. Schematic diagram of a reduced scale braking test bench.

본 논문에서는 플라즈마 코팅 기법에 의해 제조된 세라믹 코팅 제동디스크 및 스틸 제동디스크와 다양한 소결패드를 조합시켜 2가지 제동조건(정지제동, 억제제동) 상태에서, 소형제동시험기를 사용하여 마찰성능, 온도특성, 질량마멸량 등의 트라이블로지적 특성을 고찰하고자 한다.

2. 시 험

2-1. 시험장치

본 시험에 사용된 소형제동시험기를 Fig. 1에 나타내었다. 시험기는 마찰토크에 따라 주축의 회전 각가속도를 조정해서 관성 모우멘트를 모의 제어하여 제동 에너지를 조정하는 효과를 낼 수 있도록 구성되었으며, 각각의 센서로부터 신호를 입력받아 주축의 회전 속도, 제동압력 및 제동 토크 등을 제어 할 수 있다.

2-2. 시험편

본 시험에 사용된 제동 디스크와 패드의 주요 제원은 Table 1, Table 2에 제시되어 있다. 제동시험에 사

Table 1. Dimensions of brake discs

	Disc 1	Disc 2
Inner diameter(mm)	85	85
Outer diameter(mm)	345	265
Thickness(mm)	20	11.5

Table 2. Dimensions of commercial brake pads

Commercial pad	Diameter (mm)	Length (mm)
A type	40	24
B type	40	21
C type	40	24
D type	40	21

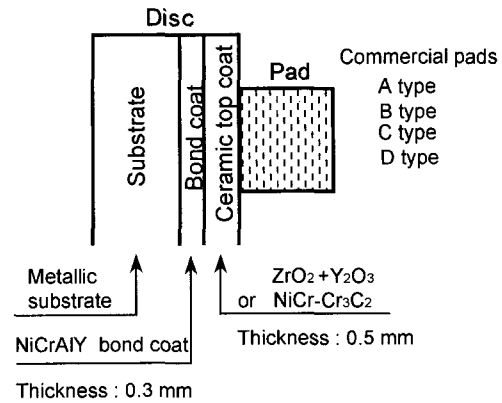


Fig. 2. Cross-section of the disc and the commercial pads.

용된 제동디스크 시험편은 세라믹계 코팅 디스크(NiCr-Cr₃C₂ 코팅 디스크, ZrO₂+Y₂O₃ 코팅 디스크)와 현재 고속 차량에 사용되는 스틸계 디스크(28CDV5)로 구성되어 있다. 또한, 패드의 시험편은 현재 고속차량에 사용되는 상용소결패드(A, B, C, D types)를 이용하였다. 본 시험에 사용된 코팅 디스크 및 상용패드의 단면은 Fig. 2에, 세라믹 코팅 디스크 및 상용패드의 화학적 성분 및 코팅분말의 특성은 Table 3과 4에 나타내었다.

2-3. 시험방법

제동시험은 서로 다른 디스크/패드의 조합에 대해

Table 3. Materials for brake discs and pads test

DISCS		
Name	Metal substrate	Coating materials
NiCr-Cr ₃ C ₂ (Cermet)	S38C	Cr ₃ C ₂ :75%
	C:0.35%~0.41% Mn:0.60%~0.90%	NiCr:25%
ZrO ₂ +Y ₂ O ₃ (Zirconia)	S38C	ZrO ₂ :85%
	C:0.35%~0.41% Mn:0.60%~0.90%	Y ₂ O ₃ :8%
28CDV5	C:0.28%, Cr:1.25% Mo<1%, V<1%	No coating bulk steel disc
PADS		
Name	Materials	
A type	bronze, graphite silica, alumina	
B type	sintered copper	
C type	Cu-Fe-Sn	
D type	Fe-Cu	

Table 4. Properties of coating powders of ceramic coated brake discs

Coating powders	Grain size (μm)	Coating thickness (mm)	Roughness (μm) Ra/Rp
Top coating	NiCr-Cr ₃ C ₂	45	2.98/19.5
	ZrO ₂ +Y ₂ O ₃	35	3.88/27.4
	Al ₂ O ₃	22~45	7.65/40.6
Bond coating	NiCrAlY	45	0.3

R_a : average surface roughness of coated disc

R_p : peak surface roughness of coated disc

Table 5. Braking test procedure for Disc 1

Test step	Braking type	Train speed (km/h)	Contact speed (m/s)	Normal load (N)	Torque (Nm)
1	Low Speed Stop Braking	30	4.5	600	666
		80	12		
		120	18		
		160	24		
		200	30		
2	High Speed Stop Braking	250	37.5	600	666
		300	45		
		330	49.5		
3	Hold Braking*	350	52.5	666	25
		300	45		

Braking time* : 60sec

Table 5와 Table 6에 나타난 것과 같은 시험조건 및 절차에 따라 시험하였다. 제동시험은 비상정지상태를 시험하는 정지제동시험과 급구배 구간에서 제동상태를 시험하는 억제제동시험으로 구분하였다. 정지제동시험에서는 속도와 패드의 수직압력을 변화시키며 시험하였고, 억제제동시험에서는 일정한 토크하에서 속도를 변화시키거나 일정한 속도하에서 토크를 변화시켜서 각 조건에 따른 제동성능의 변화를 비교하였다. 토크는 주축상에 설치된 토크미터를 사용하여 측정하였고, 제동압력은 패드 후면에 설치된 유압 실린더에 의해 제어되었으며, 패드 및 디스크의 온도는 K형 열전대를 사용하여 측정하였다.

온도측정위치는 Fig. 3에 나타나며, 디스크의 온도는 주축에 연결된 슬립링과 브러쉬로 부터 센서의 신호를

Table 6. Braking test procedure for Disc 2

Test step	Braking type	Train speed (km/h)	Contact speed (m/s)	Normal load (N)	Torque (Nm)
1	Low Speed Stop Braking	30	4.5	200	666
		80	12		
		120	18		
		160	24		
		200	30		
2	Hold Braking*	60	9	600	21.9
		120	18		
		160	24		
3	Hold Braking*	200	30	600	12
		140	21		
		17	21.9		
4	High Speed Stop Braking	250	37.5	666	25
		300	45		
5	High Energy Hold Braking**	140	21	666	21.9
		300	45		

Braking time* : 60 sec, Braking time** : 300 sec

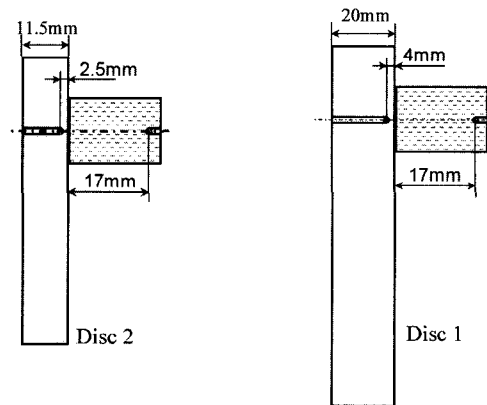


Fig. 3. Temperature measurement positions in the discs and pad.

받아서 측정된다. 마찰특성에 가장 크게 영향을 미치는 온도는 마찰면 온도이지만 마찰면 온도측정은 시험

장치의 구조와 고온에 의한 열전대의 파손을 막기 위해서, 본 논문에서는 디스크 모재와 패드 후면의 온도를 측정하였다. 즉, 디스크의 온도는 디스크 후면에서부터 코팅층에 결함을 발생시키지 않을 정도의 깊이까지 드릴 구멍을 뚫어 모재의 온도를 측정하였고, 패드의 온도도 패드의 후면에 구멍을 뚫어 측정하였다. 패드의 마멸량은 패드의 질량 감소량을 측정하여 결정하였다. 모든 시험 전에 디스크와 패드의 접촉면을 길들여서, 안정화된 상태가 될 때까지 디스크 및 패드 표면을 저속, 저압상태에서 서서히 접촉시켰다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. 열적 특성

Fig. 4는 C형 패드와 3개의 서로 다른 디스크와의 조합들을 시험한 결과로서 억제제동시의 디스크와 패드의 온도변화를 나타내고 있다. 패드와 디스크의 온도차이는 지르코니아 코팅 디스크의 경우가 가장 크고 스틸 디스크의 경우가 가장 작은 것으로 나타났다. 이는 지르코니아 코팅의 열차단 효과가 크기 때문이다. 열차단 효과는 세라믹 코팅층의 다공질 조직으로 인해 열전달계수가 작아서 나타나는 현상이다[4]. 지르코니아 디스크의 경우 많은 양의 열이 패드 쪽으로 전달되어 패드 쪽의 온도가 높아진 반면, 스틸 디스크의 경우 패드 쪽의 온도가 낮은 것을 알 수 있다. 이는 마찰에 의해 발생한 많은 양의 열이 스틸 디스크 쪽으로 전달되고 있기 때문이다. 제동시험중에 디스크나 패드의 온도는 계속 증가하고 있으며, 최고온도는 제동이 끝날 때에 도달하였다.

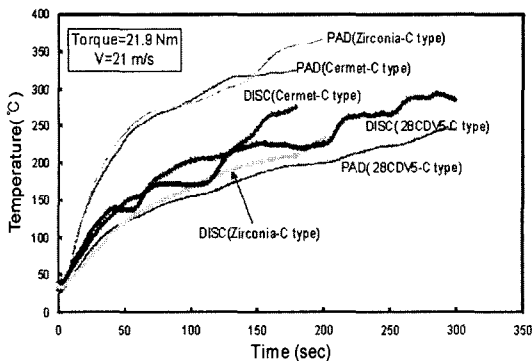


Fig. 4. Temperature evolution of the Disc 2 and the C type pads during the hold braking test.

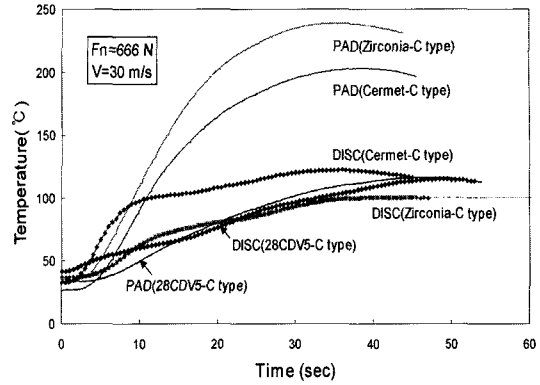


Fig. 5. Temperature evolution of the Disc 2 and the C type pads during the stop braking test.

Fig. 5는 정지제동시의 온도변화를 보여주는데, 역시 지르코니아 디스크가 가장 큰 열차단 효과를 보여주고 있다. 이때 최고온도는 제동 진행 중에 도달했다가 제동이 끝나가면서 감소하였다. 또한 온도가 미세하게 동요하는 것은 제동중의 마찰상태가 안정적이지 못하여 발생한 것이다[5].

3-2. 마찰계수

3-2-1. 억제제동

Fig. 6과 Fig. 7은 서밋 디스크-B형 패드과 지르코니아 디스크-B형 패드, 28CDV5 디스크-B형 패드의 3가지 조합의 경우에 수행한 억제제동 시험결과로서 Table 6의 2단계와 3단계에 나타난 각각의 접촉속도와 토크에서 계산된 마찰에너지와 최고온도 및 평균마찰계수 사이의 관계를 나타내었다. Fig. 6의 최고온도는

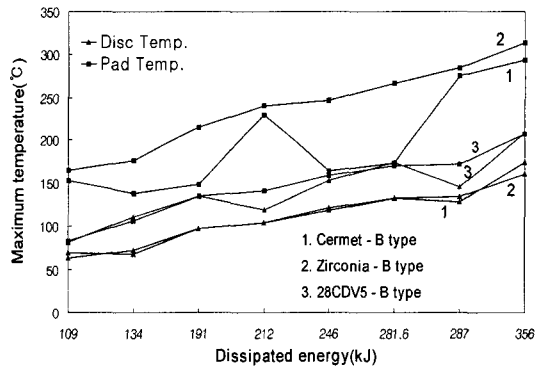


Fig. 6. Dissipated energy vs maximum temperature : hold braking test with B type pad and Disc 2.

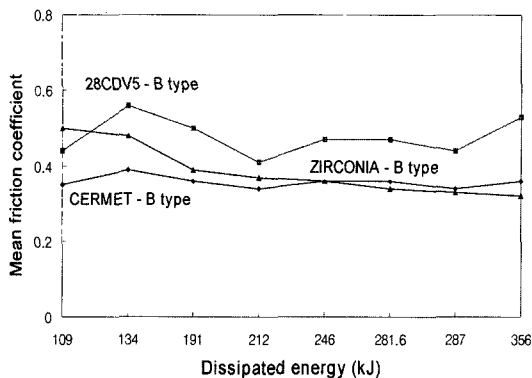


Fig. 7. Dissipated energy vs mean friction coefficient : hold braking test with B type pad and Disc 2.

Fig. 4에서와 같이 제동과정중에 디스크와 패드에서 측정된 온도중의 최고온도이며, Fig. 7의 평균마찰계수는 Fig. 8에서와 같이 각 제동조건에서 제동중의 마찰계수의 변화값을 시간 평균한 값이다.

Fig. 6에서와 같이 디스크와 패드의 온도는 마찰에너지에 비례하여 증가하고, 디스크와 패드사이의 온도차이는 마찰에너지의 증가에 대하여 대체로 일정한 값을 가지고 있다. 온도차이는 스틸 디스크의 경우가 가장 작고 서멧, 지르코니아 순으로 나타나 지르코니아 디스크가 가장 큰 열차단 효과를 가지고 있다. 서멧 디스크-B형 패드의 경우 패드의 온도가 급변하고 있는데 측정시 열전대의 접촉에 이상이 있었던 것으로 판단된다. 대체로 지르코니아 디스크-B형 패드 경우보다 패드의 온도가 낮은 경향을 보이고 있다. Fig. 7의 평균마찰계수와 관련해서 서멧 디스크-B형 패드와 지르코니아 디스크-B형 패드의 경우가 속도와 마찰토크 변화에 대한 영향이 적어 제동시 발산되는 마찰에너지에 대해서 안정된 값을 보였다.

Fig. 8과 Fig. 9에는 디스크와 패드 양쪽에 상당한 열부하가 가해지도록 상대적으로 긴 시간인 3~5분 동안 역제동 시험을 한 결과로서 세라믹계 디스크와 스틸계 디스크의 시간에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. 고에너지 제동에서는 세라믹 디스크가 확실히 안정된 값을 보여주고 있는데 그 중에서도 지르코니아 디스크-B형 패드, 서멧 디스크-B형 패드, 지르코니아 디스크-C형 패드 등이 고에너지 제동에서 아주 안정된 마찰성능을 나타내었다. 스틸 디스크의 경우에는 마찰성능이 안정적이지는 않지만 C형 패드, B형 패드와의 조합은 고에너지 제동에서 실용화의 가능성을 보여주고 있다.

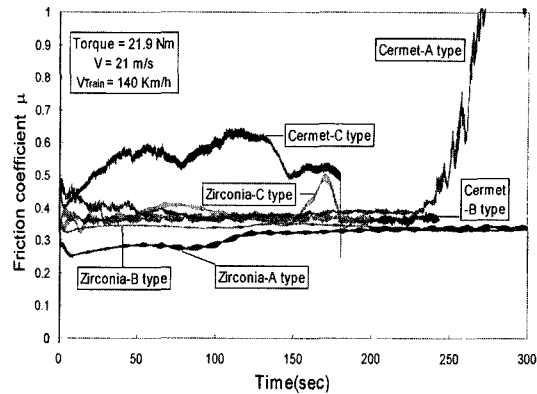


Fig. 8. Friction coefficient evolution during the hold braking test with ceramic coated Disc 2.

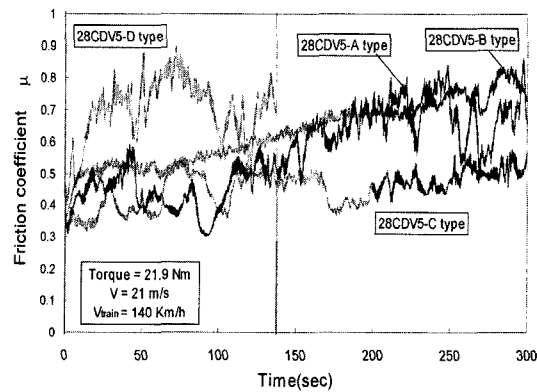


Fig. 9. Friction coefficient evolution during the hold braking test with steel(28CDV5) Disc 2.

Fig. 9에서 28CDV5 디스크-D형 패드의 경우는 시험시 극히 불안정한 결과를 보여 130초에서 중지하였다.

3-2-2. 정지제동

Fig. 10에는 B형 패드와 조합한 스틸 디스크와 서멧 코팅 디스크의 정지제동시의 초기 접촉속도에 따른 마찰계수를 나타내었다. 서멧 디스크의 경우 매우 안정된 마찰계수를 보여주었으며 대체로 압력이 높아질수록 마찰계수가 작아졌다.

Fig. 11에는 C형 패드와 조합한 3종류의 디스크에 대하여 주축의 접촉선속도가 30 m/s(회전속도 2604 rpm), 제동력 666 N(제동압력 0.53 MPa)인 경우에 정지제동시 마찰계수의 변화를 나타내었다. 서멧 디스크의 경우 제동초기부터 끝까지 비교적 안정한 마찰계수를 보이지만 스틸 디스크와 지르코니아 디스크의 경우는 정지하면서 마찰계수가 증가하는 루스터 테일링

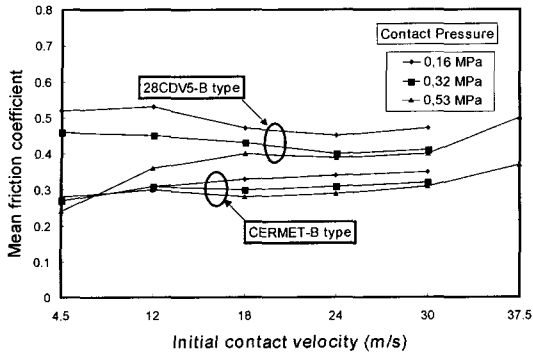


Fig. 10. Mean friction coefficient vs initial contact speed : stop braking test with B type and Disc 2.

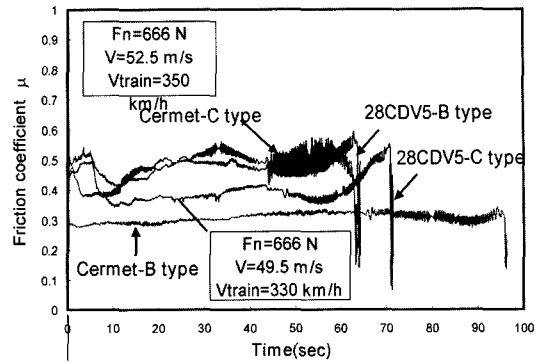


Fig. 12. Friction coefficient evolution during the stop braking test with Disc 1.

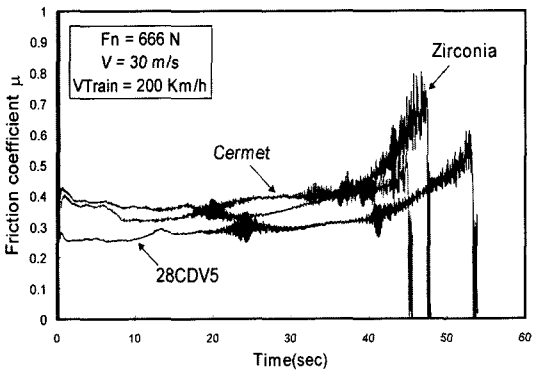


Fig. 11. Friction coefficient evolution during the stop braking test with C type pad and Disc 2.

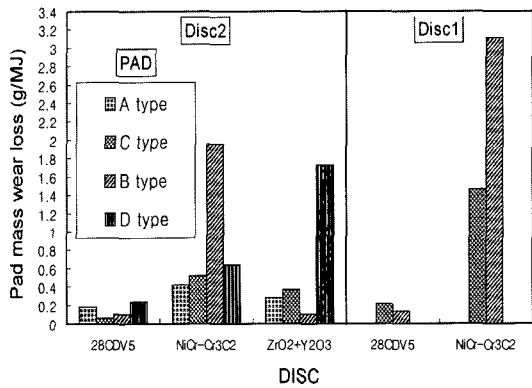


Fig. 13. Normalized wear loss of pad mass of the braking pairs after finishing all braking test steps.

(rooster tailing) 현상을 보였다. 정지제동 초기에는 3 종류의 디스크가 모두 비슷한 경향을 보이지만 제동이 끝나가면서 감속되어 저속이 되었을 때 지르코니아 디스크와 스틸 디스크의 경우는 마찰계수가 급증하고 서밋 디스크의 경우는 약간만 증가하고 있다.

Fig. 12는 고속에서의 정지제동 시험결과를 나타내는데, 서밋 디스크와 B형 패드의 조합이 마찰계수에 있어서 가장 안정된 값을 보이고 있다. 시험결과에 의하면 제동초기에는 마찰계수가 높았다가 점차적으로 마찰계수가 작아지면서 안정한 상태를 보이고, 제동이 끝나갈수록 루스터 테일링 효과가 나타나면서 다시 상승하는 경향을 보여주고 있다. 이와같은 마찰계수의 변동은 제동시 접촉면의 마모입자가 마찰막을 형성하여 마찰계수가 작아졌다가, 제동이 끝나갈수록 마찰막의 파손 및 마모입자로 인해서 다시 커지는 것으로 판단된다. 루스터 테일링 효과는 서밋 디스크보다 스틸 디스크의 경우가 더 크게 나타났다.

3-3. 마멸량 비교

Fig. 13은 모든 제동시험이 끝난 뒤 각 디스크-패드 조합에 대하여 패드의 총 마멸량을 나타낸 것으로 마멸량은 Table 5와 Table 6의 제동시험절차에 따른 각 단계별제동(정지제동, 억제제동)이 끝난 후 패드의 질량을 측정하여 각 단위 에너지당 패드의 마멸량을 합산하여 막대그래프로 표시하였다. 이때 Disc 2와 시험한 패드의 마멸량은 스틸 디스크쪽이 가장 적고, 그 다음이 지르코니아 디스크, 서밋 디스크 순이었다. Disc 1의 경우도 Disc 2와 같이 경향은 동일하나, 그 크기에 있어서는 Disc 1의 경우가 1.5배 정도 더 컸다. 그 이유는 Table 5에 나타난 것과 같이 Disc 1의 경우가 시험시 제동압력이 높고, 고속에서 시험한 결과가 포함되어 있기 때문이다.

Fig. 7과 Fig. 12에서 알 수 있듯이 서밋 디스크-B형 패드 조합의 경우 마찰계수는 다른 경우에 비해 가

장 안정된 값을 보였지만, 마멸면에서는 Fig. 13과 같이 B형 패드의 마멸량이 가장 큰 것으로 나타났다. 이것은 경도가 높고 상대 마찰제에 대해 공격성이 높은 메탈계 원소를 포함하고 있는 서밋 디스크가 B형 패드 표면을 마멸시키고 마멸입자는 산화막을 생성하기 전에 마찰면으로부터 배출되어 마찰면의 상태가 항상 균일한 조건이기 때문으로 판단된다. 스틸 디스크의 경우 마멸에 가장 크게 영향을 미치는 요인이 마찰면의 온도라는 것은 잘 알려져 있다[6,7]. 본 시험에서도 스틸 디스크는 고에너지 제동인 고속의 정지제동일수록, 그리고 고에너지의 열부하가 걸리는 역제동의 경우는 단위 에너지당 마멸량이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 Fig. 13에서 알 수 있는 것처럼 다른 디스크와 비교하였을 때는 가장 작은 단위 에너지당 마멸량을 보이고 있다.

A형 패드는 모든 디스크에 대해 질량 마멸량이 다른 패드에 비해 변동량이 적으나, 시험중 패드의 마찰면에 1 mm 두께 정도의 경도가 높은 표면층이 생성되어 국부적으로 표면에서 떨어지거나 큰 편상 모양으로 떨어져 나가 내구성에 문제가 있었다. 또한 마찰면에 심한 변화가 일어날 때는 Fig. 8의 서밋디스크-A형 패드시험결과와 같이 마찰계수의 변동폭이 크고 불안정하였다. 또한, D형 패드는 Fig. 13에서와 같이 모든 디스크에 대해 마멸량이 크고, Fig. 9에서와 같이 마찰계수가 불안정하고 급변하였다.

본 시험에 사용된 4종류의 패드는 동성분을 주성분으로 철, 흑연, 실리카, 알루미늄 등이 마찰조절제로서 첨가되어 있다. 패드 입자의 크기를 보면 B형, C형, D형 패드의 입자들이, 흑연 성분이 큰 입자로 분포된 A형 패드보다 더 미세하였다. 이때 입자의 크기가 미세한 B형, C형 패드 등의 경우에 마찰계수는 보다 더 안정된 상태를 나타내었고, 시험 후 패드의 육안 관찰에서 내구성도 양호하게 나타났다.

4. 결 론

시험을 통해서 얻은 마찰특성, 열적특성, 패드의 질량마멸량 등의 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 플라즈마 코팅 제동 디스크는 열차단 효과로 인해 주축방향으로의 열전달을 감소시켜 고속에서 안정된 마찰성능을 보였으나 패드의 마멸량은 스틸 디스크에 비해 증가하였다.

(2) 지르코니아 디스크는 열차단 측면에서는 서밋 디스크보다 큰 효과가 있어 디스크 쪽의 온도와 패드 쪽의 온도차이가 가장 컸다. 세라믹 코팅의 열차단 효과는 디스크와 패드의 열부하 분담율을 조절하는데 이용될 수 있다.

(3) 일반적으로 저속에서는 스틸 디스크와 세라믹 디스크가 다같이 안정된 마찰계수를 보였지만, 고속제동 시험에서는 세라믹 디스크가 스틸 디스크보다 안정된 성능을 나타내었다. 특히, 서밋 디스크와 지르코니아 디스크가 B형 패드나 C형 패드와 조합을 이루었을 때, 서밋 디스크-B형 패드, 지르코니아 디스크-B형 패드, 서밋 디스크-C형 패드, 지르코니아 디스크-C형 패드 순으로 안정된 마찰성능을 보였다.

(4) 서밋 디스크는 마찰계수의 안정성 측면에서는 우수하나 패드의 마멸량이 지르코니아 디스크와 비교하여 많았다. 지르코니아 디스크는 패드의 마멸량이 적고 고에너지 제동시 마찰계수의 안정성도 높았다. 세라믹 디스크는 패드 쪽의 열부하가 높아져 패드의 마멸이 증가하므로, 이에 따라 향후 새로운 소재의 패드가 개발되면 더 안정된 트라이볼로지적 특성을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. M. Watremez, J. P. Bricout, B. Marguet and J. Oudin, "Friction, Temperature and Wear Analysis for Ceramic Coated Brake Discs," *Journal of Tribology*, Vol. 118, pp. 457-465, 1996.
2. K. N. Strafford, "Surface Engineering Processes and Application," *Technomic Publication*, pp. 3-17, 1995.
3. D. Chuanxian, H. Bingtang, L. Huiling, "Plasma Sprayed Wear Resistant Ceramic and Cermet Coating Materials," *Thin Solid Films*, 118, pp. 485-493, 1984.
4. W. Yinglong, J. Yuansheng, W. Shizhu, "The Analysis of the Friction and Wear Mechanisms of Plasma-sprayed Ceramic Coatings at 450°C," *Wear*, 128, pp. 265-276, 1988.
5. P. Dufrenoy, D. Weichert, "Prediction of Railway Disc Brake Temperatures Taking the Bearing Surface Variations Into Account," *Proc. Instn. Mech. Engrs.* Vol. 209, pp. 67-76, 1995.
6. J. Yang, R. S. Cowan, W. O. Winer, "Prediction of Failure Transitions in Sliding Contacts by a Thermo-mechanical Wear Model," *Journal of Tribology*, Vol. 115, pp. 432-438, 1993.
7. H. Youssef, "Advanced Technology in Disc Brake : Considerations on Friction Mechanism," *Journ es d'Etude SFM*, 1991.