

세라믹 코팅 고에너지 제동 디스크의 마찰특성 연구

Experimental Analysis of Ceramic Coated High Power Brake Discs

강 부 병, 이 회 성

한국철도기술연구원

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. Braking test bench was specially designed to analyse thermo-mechanical and frictional behaviors of two sizes of brake discs in stop and hold braking modes. And Plasma spray coating technique was used to coat ceramic powder on the discs. In the test four commercial brake pads were coupled with discs. Ceramic coated discs had shown good stability in friction coefficient at high speed and high energy braking conditions. But they caused large pad mass wear loss 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 had shown fluctuating friction coefficient at high speed but a little pad mass wear loss compared with ceramic coated discs.

Key Words : high speed train, ceramic coated brake disc, thermal barrier effect, friction coefficient, mass wear loss

1. 서론

최근 철도차량의 고출력화 및 고속화에 따라 사용조건이 더욱 가혹하게 됨에 따라 새로운 고속용, 고에너지용 마찰재 개발과 제동장치의 개발이 필요하게 되었다. 고속차량이 350km/h로 운행하다가 비상제동을 할 경

우에는 제동디스크당 약 20MJ에 해당하는 고에너지가 디스크와 패드의 마찰면을 통해서 열에너지로 방출하게 됨으로 해서 디스크와 패드는 고온상태에서 높은 제동압력을 받게된다. 이에 따라서 고온에서 안정된 열적 성능, 내마멸성, 마찰성능을 가지고 내구성이

있어 유지·보수 비용을 줄일 수 있는 고성능 마찰재의 개발이 선행되어야 한다. 이러한 재료로서 고려되고 있는 것이 카본 소재와 세라믹계 소재이다.⁽¹⁾

본 연구에서는 세라믹계 소재를 실험대상으로 삼았다. 세라믹은 높은 내마멸성과 내열충격성등을 지니고 있지만 취성이 강해 낮은 파괴인성치를 갖고 있어 충격에 약하고 가공하기 어려운 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 보완하고자 금속계 기지에 세라믹계 소재를 두껍게 코팅하는 플라즈마 코팅방법이 사용된다.⁽²⁾

세라믹코팅은 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 브레이크 디스크에서 주로 발생하는 소성변형 및 국부적인 고온발생에 의한 용착현상의 가능성을 줄여 고온에서도 안정된 마찰성능을 갖고 마멸량을 감소시켜 줄 것으로 생각된다. 반면에 세라믹 코팅의 높은 디스크 표면 경도와 패드쪽으로의 열전달 증가로 인해 패드는 더욱 가혹한 상태에 놓이게 될 것이므로 제동디스크의 마찰특성을 분석할 때에는 패드 쪽의 현상도 반드시 함께 분석되어야 한다.

본 연구에는 플라즈마 코팅 기법에 의해 제조된 세라믹 코팅 제동디스크 및 현재 TGV에서 사용되는 스틸계 제동디스크와 상용 소결패드를 두 가지 제동조건 즉, 정지제동(stop braking) 상태와 억제제동(hold braking) 상태에서 실험하였다. 이러한 목적을 위해 특별히 제작된 소형 제동실험기에서

실험하여 마찰성능, 온도특성, 질량마멸량 등 트라이볼로지적 특성을 연구하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 실험편

본 실험은 Fig.1과 같은 소형 제동 실험장치를 사용하는데 마찰토크에 따라 주축의 회전 각속도를 조절해서 관성 모우멘트를 모의 제어하여 제동에너지를 조정하는 효과를 낼 수 있도록 구성되었으며 각각의 센서로부터 신호를 입력받아 주축의 회전속도, 제동압력 및 제동 토크등을 제어 할 수 있다.

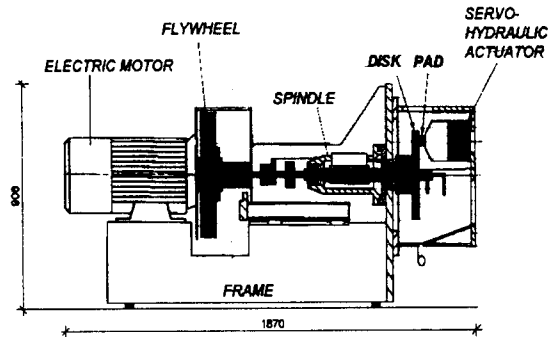


Fig. 1 A schematic diagram of a reduced scale brake test bench

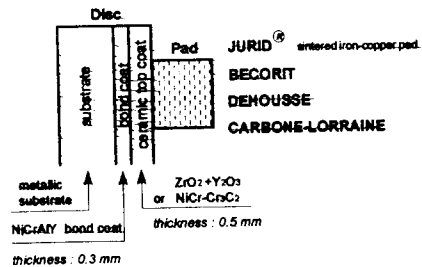


Fig. 2 The cross-section of the disc and the commercial pads

실험에 사용된 제동디스크와 패드의 주요 제원은 Table 1, Table 2에 제시되어 있으며 제동시험에 사용된 제동디스크 시험편은 세라믹 코팅 디스크(NiCr-Cr₃C₂ 코팅 디스크, ZrO₂+Y₂O₃ 코팅 디스크)와 현재 TGV 차량에 사용되는 스틸제 디스크(28CDV5)로 구성되어 있으며 패드의 시험편은 TGV 고속차량에 사용되는 상용패드인 Becorit, Dehousse, Jurid, Carbone Lorraine사의 소결패드를 이용하였다. 본실험에 사용된 코팅 디스크의 단면은 Fig.2에 세라믹 코팅 디스크에 사용된 코팅의 성분 및 제원은 Table 3과 4에 나타내었다.

2.2 실험방법

제동실험은 서로 다른 디스크-패드의 조합에 대해 Table 5와 Table 6에 나타낸 것과 같은 실험조건과 실험절차에 따라 실험하였다. 제동실험은 긴급 정지상태를 실험하는 정지제동 실험과 급구배 지역에서의 제동상태를 실험하는 억제제동 실험을 수행하였다. 정지제동 실험에서는 속도와 패드의 수직압력을 바꾸어 가며 실험하였고, 억제제동 실험에서는 일정한 토크하에서 속도를 변화시키거나 일정한 속도하에서 토크를 변화시켜서 각 조건변화에 따른 제동성능의 변화를 비교하였다. 토크는 주축상에 설치된 토크미터에 의해 측정하였고 제동압력은 패드 뒷부분에 설치된 유압 실린더에 의해 발생되도록 하였으며 패드의 온도와 디스크의 온도는 K형 열전대를 이용하여 측정하였다. 온도의 측정위치를 Fig. 3에 나타내었다. 마찰특성에

가장 크게 영향을 미치는 온도는 마찰면의 온도이지만 마찰면 온도측정은 실제적으로 많은 어려움이 있어 본 연구에서는 디스크 모재와 패드 뒷부분의 온도를 측정하였다. 디스크의 온도는 마찰면이 아닌 뒷면으로부터 코팅층에 결함을 발생시키지 않을 정도의 깊이까지 드릴 구멍을 뚫어 모재의 온도를 측정하였고 패드의 온도는 실험장치의 구조와 고온에 의한 열전대의 파손을 막기 위해 패드의 뒷부분에 구멍을 뚫어 측정하였다. 디스크의 온도는 주축에 연결된 슬립링과 브러시를 통하여 신호를 받았다. 패드의 마멸량은 패드의 질량감소량을 측정하여 결정하였다. 모든 실험전에는 디스크와 패드의 접촉이 안정한 상태가 될 때까지 저속, 저압상태에서 표면을 서서히 접촉시켰다.

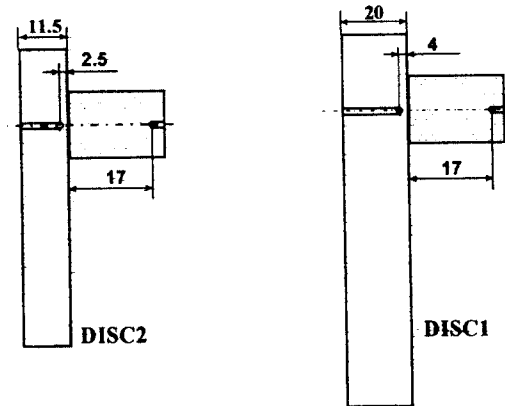


Fig. 3 Temperature measurement positions in the disc and pad

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열적특성

Fig. 4에는 드후스 패드와 세 개의 서로

다른 디스크와의 조합들을 실험한 결과로서 억제제동시의 디스크와 패드의 온도변화를 나타내었다. 패드와 디스크의 온도차이는 지르코니아 코팅 디스크($ZrO_2+Y_2O_3$)의 경우가 가장 크고 스틸 디스크(28CDV5)의 경우가 가장 작은 것으로 나타났다. 이는 지르코니아 코팅의 열차단 효과가 크기 때문이다. 열차단 효과는 세라믹 코팅층의 다공질 조직으로 인해 열전달계수가 작아서 나타나는 현상으로 알려져 있다. 지르코니아 디스크의 경우 많은 양의 열이 패드쪽으로 전달되어 패드쪽의 온도가 높아진 반면 스틸 디스크의 경우 패드쪽의 온도가 낮은 것을 알 수 있는데 마찰에 의해 발생된 많은 양의 열이 스틸 디스크쪽으로 전달되고 있음을 알 수 있다.

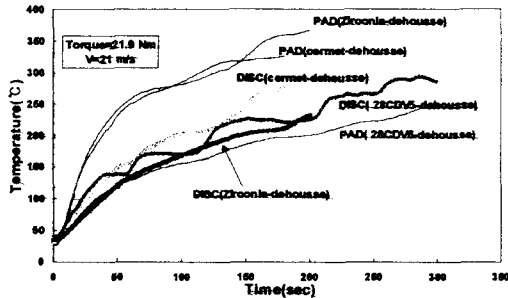


Fig. 4 Temperature evolution of the discs(disc2) and the dehusse pads during the hold braking test

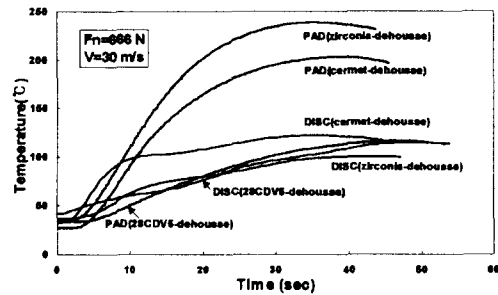


Fig. 5 Temperature evolution of the discs(disc2) and the dehusse pads during the stop braking test

제동실험중 디스크나 패드의 온도가 모두 단조로이 증가하고 있음을 알 수 있다. 최고온도는 제동이 끝날 때 도달한다

Fig. 5에는 정지제동시의 온도변화를 보여 준다. 역시 지르코니아 디스크가 큰 열차단 효과를 보여주고 있다. 정지제동의 경우는 최고 온도가 제동 진행중에 도달했다가 제동이 끝나가면서 감소한다. Fig. 4에서와 같이 온도가 부드럽게 변동하는 것은 제동중 마찰상태가 안정적이지 못하여 발생한 것으로 보인다.

3.2 마찰계수

3.2.1 억제제동의 경우

Fig. 6과 Fig. 7에는 각각 써미트-베코리와 지르코니아-베코리, 28CDV5-베코리 조합의 경우 수행한 억제제동 실험결과로서 Table 6의 스텝2와 스텝3에 나타난 각각의 접촉속도와 토크에서 계산된 마찰에너지와 최고온도, 평균마찰계수 사이의 관계를 나타내었다. Fig. 6의 최고온도는 Fig. 4에서와 같이 제동과정중 패드와 디스크에서 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, 패드와 디스크사이의 온도차는 마찰에너지의 증가에 대하여 대체로 일정한 값을 가지고 있는 것을 볼 수 있는데 그 크기는 스틸 디스크의

경우가 가장 작고 지르코니아, 써미트 순으로 나타나 지르코니아 디스크가 가장 큰 열 차단 효과를 가지고 있음을 알 수 있다. 써미트-베코리의 경우 패드의 온도가 급변하고 있는데 측정시 열전대의 접촉에 이상이 있었던 것으로 생각된다. 대체로 지르코니아-베코리 경우보다 패드의 온도가 낮은 경향을 보이고 있다. 억제제동의 경우 Fig. 7에서와 같이 마찰계수 측면에서는 써미트-베코리와 지르코니아-베코리의 경우가 속도와 마찰토크 변화에 대한 영향이 적어 제동시 발산되는 마찰에너지에 대해서 안정된 값을 보였다.

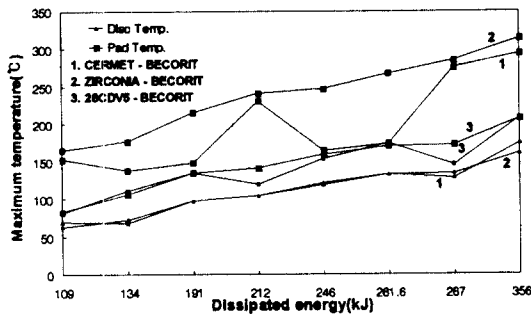


Fig. 6 Dissipated energy vs maximum temperature : hold braking test with Becorit pad and disc2

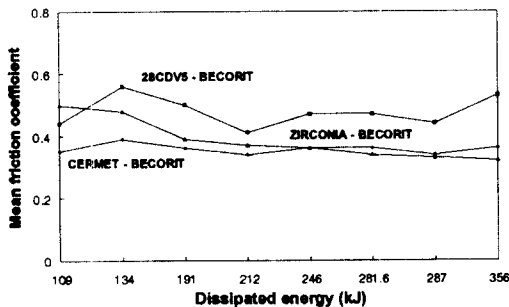


Fig. 7 Dissipated energy vs mean friction coefficient : hold braking test with Becorit pad and disc2

Fig. 8과 Fig. 9에는 패드와 디스크 양쪽에 상당한 열부하가 걸릴 수 있도록 상대적으로 긴 3~5분 동안 억제제동 실험을 한 결과로

서 세라믹계열 디스크와 스틸계 디스크의 마찰계수를 나타내었다. 고에너지 제동에서는 세라믹계열의 디스크가 확실히 안정된 값을 보여주고 있는데 그 중에서도 지르코니아-베코리, 써미트-베코리, 지르코니아-드후스 등이 고에너지 제동에서 아주 안정된 마찰 성능을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 스틸 디스크의 경우에는 마찰성능이 안정적이지는 않지만 드후스 패드, 베코리 패드와의 조합은 고에너지 제동에서 실용의 가능성을 보여주고 있다. Fig. 9에서 28CDV5-Jurid의 경우는 실험시 극히 불안정한 결과를 보여 130 sec에서 중지하였다.

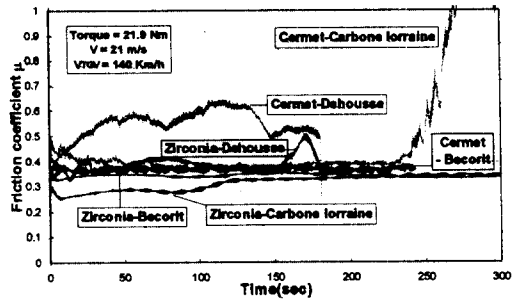


Fig. 8 Friction coefficient evolution during the hold braking test with ceramic coated discs(disc2)

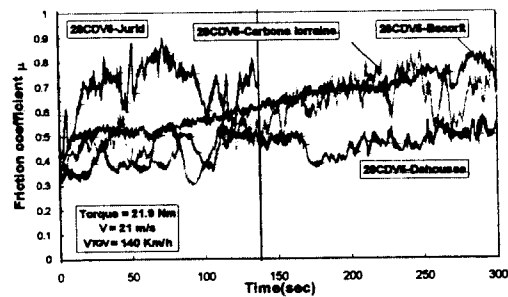


Fig. 9 Friction coefficient evolution during the hold braking test with 28CDV5 discs(disc2)

3.2.2 정지제동의 경우

Fig. 10에는 베코리 패드를 상대로 한 스틸 디스크와 써미트 코팅 디스크의 정지제동시의 초기 접촉속도에 따른 마찰계수를 나타내었다. 써미트 디스크의 경우 매우 안정된 마찰계수를 보여주었으며 대체로 압력이 높아질수록 작은 마찰계수를 보였다.

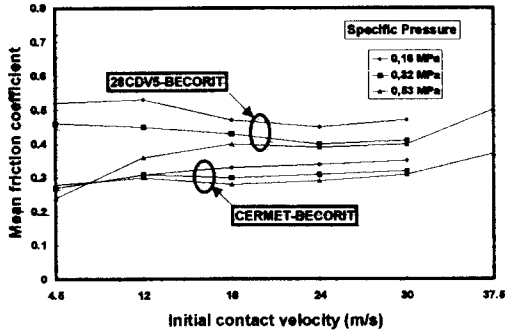


Fig. 10 Mean friction coefficient vs initial contact speed : stop braking test with Becorit pad and disc2

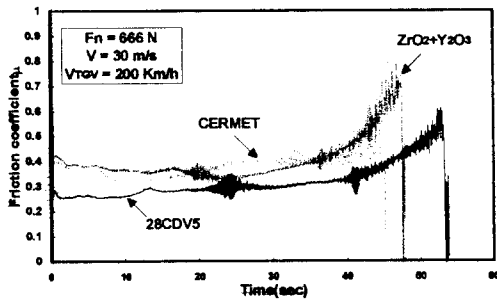


Fig. 11 Friction coefficient evolution during the stop braking test with Dehousse pad and disc2

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

아 디스크의 경우는 정지하면서 마찰계수가 증가하는 루스터 테일링(rooster tailing) 현상을 보였다. 정지제동 초기에는 세 개의 디스크가 모두 비슷한 경향을 보이지만 제동이 끝나가면서 감속되어 저속이 되었을 때 지르코니아 디스크와 스틸 디스크의 경우는 마찰계수가 급증하고 써미트 디스크의 경우는 약간만 증가하고 있다. 써미트 디스크의 경우는 Fig. 13에서 알 수 있듯이 패드의 마멸량이 큰데 마찰면이 제동중 큰 변화를 겪기 전에 표면마모가 일어나는 반면 지르코니아 디스크와 스틸 디스크는 제동중 마찰열에 의한 마찰면 표면층의 상태 변화가 커서 감속중 디스크와 패드의 단락(stick-slip) 현상이 크게 발생하게 되는것으로 생각된다.

Fig. 12는 고속에서의 디스크1의 정지제동 실험결과를 보여주고 있다. 써미트 디스크와 베코리 패드의 조합이 마찰계수에 있어서는 가장 안정된 값을 보이지만 Fig. 13에 나타난 결과에서 알 수 있듯이 마멸면에서는 가장 큰 패드 질량 마멸량을 나타내므로 유지·보수 측면에서 적당하지 않은 것으로 나타났다. 고속의 정지제동 실험결과를 보면 마찰초기에는 마찰계수가 높았다가 점차적으로 마찰계수가 작아지면서 안정한 상태를 보이고, 마찰후기로 갈수록 루스터테일링 효과가 나타나면서 다시 상승하는 경향을 보여주었다. 마찰계수의 변동은 제동시 표면에 마모입자가 마찰막을 형성하면서 작아졌다가 마찰후기로 가면서 마찰막의 변화와 마모입자로 인해 다시 커지는 것으로 생각된다. 루스터 테일링 효과는 써미트 디스크보다 스틸 디스크의 경우가 더 크게 나타났다.

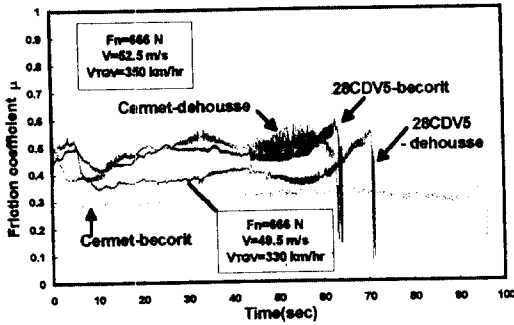


Fig. 12 Friction coefficient evolution during the stop braking test with disc1

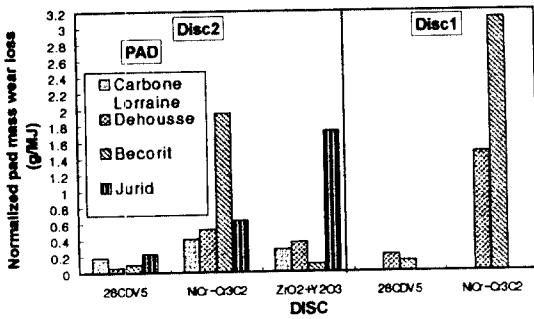


Fig. 13 Normalized pad mass wear loss of the braking pairs after finishing all braking test steps

3.3 마멸량의 비교

Fig. 13은 각 디스크-패드 조합에 대하여 모든 제동실험이 끝난 뒤 패드의 총 마멸량을 나타낸 것으로 마멸량은 Table 5와 Table 6에 나타낸 실험 과정중의 각 스텝(정지제동, 억제제동)이 끝난 후 패드의 질량을 측정하여 각 단위 에너지당 패드의 마멸량을 계산한 뒤 합산하여 막대 그래프로 나타내었다. 그림에서와 같이 디스크2와 실험한 패드의 마멸량은 스틸 디스크쪽이 가장 적고, 그 다음이 지르코니아 디스크, 써미트 디스크 순이었다. 디스크1의 경우도 디스크2와 경향이 동일하게 나타났는데 그 값에 있어서는

디스크1의 경우가 1.5배 정도 더 컸다. 그 이유는 Table 5에 나타낸 것과 같이 디스크1의 경우 실험시 제동압력이 높고, 고속에서 실험한 결과가 포함되어 있기 때문으로 생각된다.

Fig. 7과 Fig. 12에서 알 수 있듯이 써미트 디스크-베코리 패드 조합의 경우 마찰계수는 다른 경우에 비해 가장 안정된 값을 보였지만 패드의 마멸이 상당히 큰 것으로 나타났다. 이것은 경도가 높고 상대 마찰재에 대해 공격성이 높은 메탈계 원소를 포함하고 있는 써미트 코팅 디스크가 베코리 패드 표면을 마멸시키고 마멸입자는 산화막을 생성하기 전에 마찰면으로부터 배출되어 마찰면의 상태가 항상 균일한 조건을 지니게 되기 때문인 것으로 판단된다. 스틸 디스크의 경우 마멸에 가장 크게 영향을 미치는 요인이 마찰면의 온도라는 것은 잘 알려져 있다.⁽⁵⁾ 본 실험에서도 스틸 디스크는 고에너지 제동인 고속의 정지제동일수록 그리고 고에너지의 열부하가 걸리는 억제제동의 경우 단위 에너지당 마멸량이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 Fig. 13에서 알 수 있는 것처럼 다른 디스크와 비교하였을 때는 가장 작은 단위 에너지당 마멸량을 보였다.

카본로레인(carbone lorraine) 패드는 모든 디스크에 대해 질량 마멸량이 다른 패드에 비해 변동이 적으나 실험중 패드의 마찰 표면에 1 mm정도의 두껍고 경도가 높은 표면층이 생겨 국부적으로 표면에서 떨어지거나 큰 편상 모양으로 떨어져 나가 내구성에 문제가 있었다. 또한 마찰면에 심한 변화가 일어날 때는 Fig. 8의 써미트-카본로레인 실험

결과와 같이 마찰계수의 변동폭이 크고 불안정하였다.

주리드 패드는 Fig. 13에서와 같이 모든 디스크에 대해 마멸량이 크고, Fig. 9에서와 같이 마찰계수가 불안정하고 급변하였다.

상용패드는 소모성 부품으로서 상업성이 높아 제작기술 및 성분등이 제작사 등에 의해 적극 보호되고 있다. 본 실험에 사용된 패드는 동성분을 주성분으로 Table 3에서와 같이 철, 흑연, 실리카, 알루미늄등이 마찰조절제로서 첨가되어 있다. 패드의 단면을 살펴보면 전체적으로 모든 패드가 구성 원소들의 입자가 고르게 분포되어 있으나 입자의 크기를 보면 드후스 패드, 베코리 패드, 주리드 패드의 입자가 카본로레인사 패드보다 더 미세하였다. 카본로레인 패드는 흑연 성분이 큰 입자로 분포되어 있었다. 입자의 크기가 미세한 드후스 패드와 베코리 패드등이 마찰계수가 더 안정하였고 실험후 패드의 육안 관찰에서도 내구성이 양호하게 나타났다. 마찰재 원료의 성분 및 조직, 제조과정에서의 소결압력, 소결온도등과 마찰성능, 마멸과의 관계는 양질의 마찰 소결재 개발을 위해서 중요한 부분으로 앞으로 많은 연구와 노력이 필요한 분야이다.

4. 결론

본 연구에서는 플라즈마 코팅 기법에 의해 제조된 세라믹 코팅 제동디스크와 상용 소결재 패드를 특별히 제작된 소형 제동시험기에서 실험하여 마찰특성, 열적특성, 패드의 질량마멸량 등에 대하여 연구하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

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

(2) 지르코니아 디스크는 열차단 측면에서는 써미트 디스크보다 큰 효과가 있어 디스크쪽의 온도와 패드쪽의 온도차이가 가장 컸다. 세라믹 코팅의 열차단 효과는 디스크와 패드의 열부하 분담율을 조절하는데 이용될 수 있음을 보여 주었다.

(3) 일반적으로 저속에서는 스틸 디스크와 세라믹계 디스크가 다같이 안정된 마찰계수를 보였지만 고속 제동실험에서는 세라믹계열의 디스크가 스틸 디스크보다 안정된 성능을 보였는데 특히 써미트 디스크와 지르코니아 디스크가 드후스 패드나 베코리사의 패드와 조합을 이루었을 때, 써미트 디스크-베코리 패드, 지르코니아 디스크-베코리 패드, 써미트 디스크-드후스 패드, 지르코니아 디스크-드후스 패드 순으로 안정된 마찰성능을 보였다.

(4) 써미트 디스크는 마찰계수의 안정성 측면에서는 우수하나 패드의 마멸량이 지르코니아 디스크와 비교하여 많았고 지르코니아 디스크는 패드의 마멸량이 적고 고에너지 제동시 마찰계수의 안정성도 높았다. 세라믹계열의 디스크는 패드 쪽의 열부하가 높아져 패드의 마멸이 증가하므로 앞으로 새로운 소재의 패드가 연구개발 되면 더 안정된 성능을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

(5) 스틸계 디스크는 마찰의 안정성 면에서는 떨어지나 패드의 마멸 면에서 우수하여

기존의 스틸계 재료를 보완하여 350 km/h용으로 사용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

참고문헌

1. M. Watremez, J. P. Bricout, B. Marguet and J. Oudin, 1996, "Friction, Temperature and Wear Analysis for Ceramic Coated Brake Discs", Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 457~465.
2. K. N. Strafford, 1995, Surface Engineering Processes and Application, Technomic publication, pp. 3~17.
3. D. Chuanxian, H. Bingtang, L. Huiling, 1984, "Plasma sprayed wear resistant ceramic and cermet coating materials", Thin solid films, 118, pp. 485~493.
4. W. Yinglong, J. Yuansheng, W. Shizhu, 1988, "The analysis of the friction and wear mechanisms of plasma-sprayed ceramic coatings at 450℃", wear, 128, pp. 265~276.
5. H. Youssef, 1991, "Advanced Technology in Disc Brake : Considerations on friction mechanism", Journées d'Etude SFM.

Table 1. Size of brake discs

	Disc1	Disc2
Inner diameter(mm)	85	85
outer diameter(mm)	345	265
Thickness (mm)	20	11.5

Table 2. Size of brake pads

pad	Diameter (mm)	Length (mm)
CARBONE LORRAINE(G35)	40	24
BECORIT(BM40)	40	21
DEHOUSSE(GMD)	40	24
JURID(721)	40	21

Table 3. Materials for tested brake discs and pads

DISC			PAD	
Name	Metal substrate	Coating materials	Name	Materials
NiCr-Cr ₃ C ₂ (Cermet)	S38C C :0.35%~0.41% Mn :0.60%~0.90%	Cr ₃ C ₂ : 75% NiCr: 25%	CARBONE LORRAINE(G35)	bronze, graphite silica, alumina
ZrO ₂ +Y ₂ O ₃ (Zirconia)	S38C C :0.35%~0.41% Mn :0.60%~0.90%	ZrO ₂ : 85% Y ₂ O ₃ : 8%	BECORIT(BM40)	sintered copper
28CDV5	C:0.28%, Cr:1.25% Mo<1%, V<1%	no coating bulk steel disc	DEHOUSSE(GMD)	Cu-Fe-Sn
			JURID(JURID721)	Fe-Cu

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

Coating Powders		Grain size (μm)	Coating Thickness (mm)	Roughness (μm) Ra / Rp*
Top coating	NiCr -Cr ₃ C ₂	45	0.5	2.98/19.5
	ZrO ₂ +Y ₂ O ₃	35	0.5	3.88/27.4
	Al ₂ O ₃	22~45	0.5	7.65/40.6
Bond coating	NiCrAlY	45	0.3	

* Ra : average surface roughness of coating disc

Rp : peak surface roughness of coating disc

Table 5. Braking test procedure for disc1

TEST STEP	BRAKING TYPE	TGV SPEED (km/h)	CONTACT SPEED (m/s)	NORMAL LOAD (N)	TORQUE (Nm)
1	LOW SPEED STOP BRAKING	30	4.5	600	
		80	12		
		120	18		
		160	24	666	
		200	30		
2	HIGH SPEED STOP BRAKING	250	37.5	600	
		300	45		
		330	49.5	666	
		350	52.5		
3	HOLD BRAKING	300	45		25

* Braking time : 60 sec

Table 6. Braking test procedure for disc2

TEST STEP	BRAKING TYPE	TGV SPEED (km/h)	CONTACT SPEED (m/s)	NORMAL LOAD (N)	TORQUE (Nm)
1	LOW SPEED STOP BRAKING	30	4.5	200	
		80	12		
		120	18	400	
		160	24		
		200	30	666	
2	HOLD BRAKING*	60	9		21.9
		120	18		
		160	24		
		200	30		
3	HOLD BRAKING*	140	21		12
					17
					21.9
					25
4	HIGH SPEED STOP BRAKING	250	37.5	600	
				666	
5	HIGH ENERGY HOLD BRAKING**	140	21		21.9

* Braking time : 60 sec

** Braking time : 300 sec