

NCM-CV 주철 제동디스크와 다양한 패드의 적합성 평가

Compatibility Evaluation between NCM-CV Cast Iron Brake Disk and Various Pads

길형균[†] · 고태환* · 조동현** · 한성호* · 서승일*

Hyeong-Gyeun Gil · Tae-Whan Ko · Dong-Hyun Cho · Seong-Ho Han · Sung-Il Seo

Abstract

The research analyzed dynamo test results to evaluate compatibility between brake disk made of NCM-CV cast iron and various pads. The dynamo test was executed with one kind of resin pad and three kinds of sintered pads suitable for 200 km/h trains according to a program which refers to UIC 541-3. The thermocouples were established in specific location in order to measure the temperature of disk and pads. In addition, the thermal imaging camera was used for capturing the instantaneous thermal characteristic of disk. The research results may be utilized to use as basis data of pad development for NCM-CV brake disk hereafter.

Keywords : NCM, Dynamo test, Compatibility, Hot spot, Tilting train, Thermal imaging cameras
저합금주철, 다이내모시험, 적합성, 열점, 틸팅열차, 열화상카메라

1. 서론

최근 철도차량의 고속화에 따라 제동방식은 기존의 마찰 제동방식에 전기적 제동방식을 겸용하여 사용하는 것이 일반적인 추세이다. 전기적 방식의 대표적인 예는 회생제동방식으로 추진 전동기의 발전원리를 이용하여 열차의 속도를 감속시킨다[1]. 하지만 저속영역에서는 회생제동이 현저히 감소될 뿐만 아니라 회생제동이 실패(fail)할 경우 순수하게 마찰제동만으로 열차를 안전하게 운영해야 한다. 따라서 마찰제동장치는 회생제동과는 별도로 최고설계속도에서 요구되는 제동 성능을 발휘할 수 있도록 설계되어야 한다.

마찰제동장치의 성능은 디스크와 패드사이의 마찰특성으로부터 결정되며 이에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다[2-5]. 일반적으로 저속용으로는 경제성 측면에서 주철(cast iron)계 디스크와 수지(resin)계 패드가 사용되는 반면 고강도, 내열균열 특성 등이 요구되는 고속열차에서는 주로 강(steel)계 디스크와 소결(sintered)패드를 사용한다. 이에 반해 200 km/h급 틸팅열차(tilting train)는 흑연형상이 CV(compact-

vermicular)화된 저합금주철(이하 NCM-CV)을 디스크 소재로 사용한다. 여기서 CV는 흑연모양이 애벌레와 유사하여 붙여진 명칭으로 편상(flake)흑연주철에 근접한 열전도도 특성을 보유하면서 구상흑연주철에 가까운 강도특성을 나타내는 것으로 알려져 있다[6]. 따라서 중고속용 주철계 NCM-CV 디스크를 사용하기 위하여 비상제동거리를 만족시키면서 제동특성이 안정적인 최적의 패드를 선정하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 200 km/h급 철도차량용으로 개발된 다양한 형식의 제동패드를 다이내모(dynamo) 시험을 통하여 제동디스크와 적합성을 평가하고, 향후 제동패드 개발의 기초 자료로써 활용하고자 한다.

2. 시험장치 및 시제품

2.1 다이내모 시험장치

본 시험에 사용된 그림 1의 다이내모 시험장치는 관성모멘트 $40 \sim 220 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$, 최대 회전속도 1700 rpm(211 km/h)의 성능을 갖는다. 디스크 속도, 마찰토크 및 제동력의 자료는 이 시험기의 제어장치로부터 출력 받아 스캐너에 저장한다. 또한 디스크 및 패드에는 열전대(thermocouple)를 설치하여 온도를 검출하고, 열화상 카메라로부터 디스크 표면의 순간온도 및 온도분포를 촬영할 수 있도록 장치를 구성하였

[†] 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 시스템엔지니어링팀
E-mail : hggil@krii.re.kr
TEL : (031)460-5662 FAX : (031)460-5699
* 한국철도기술연구원
** (주)유진기공

다. 열화상 카메라는 flir systems사의 ThermoCAM S60 모델로 ± 2℃의 측정 정확도를 갖는다.

2.2 NCM-CV 제동 디스크

제동디스크의 개발사양은 다음의 표 1과 같다.

NCM-CV 제동디스크는 회주철(grey cast iron)에 비하여 인장강도 등 기계적 특성이 우수한 NCM주철에 소량의 마그네슘(Mg)을 첨가하여 제작한다. 첨가된 마그네슘은 NCM주철 조직 내의 편상(flake) 흑연모양을 애벌레 모양(CV)으로 변화시켜 ASTM type-III의 흑연모양을 형성한다.

일반적으로 마그네슘의 함량이 0.014 %이하이면 편상(flake)의 흑연모양이 나타나고, 0.025 % 이상이면 모양이 구상화되어 열전도 특성을 악화시킬 수 있다[7]. 분석결과 마그네슘 함량은 0.016 %로 허용범위를 만족시키며 흑연의 CV화율은 약 90 %로 나타났다. 이러한 결과는 NCM주철 디스크가 갖는 열균열(crack) 문제를 어느 정도 해소시킬 수 있을 것이다.

NCM-CV 제동디스크의 조직 내 흑연형상을 그림 2에 나타내었으며 또한 기계적 특성 값에 대한 사양 및 측정값들을 표 2에 요약하였다.

2.3 시험용 패드

시험용 패드는 200 km/h급 열차에 사용할 수 있는 수지(resin)계 패드와 판형(plate) 소결패드, 스투드(stud)형 소결패드 및 플렉시블(flexible)형 소결패드를 사용하였다. 여기서 플렉시블 소결패드는 스투드형 패드와 동일한 마찰재를 사용한 것으로 스투드 배치 및 고정방식이 상이한 특징을 갖는다. 그림 3은 시험에 사용된 패드들의 실물사진으로 원 표시부분은 열전대 부착위치를 나타낸다.

Table 1. Specification of brake disk with NCM-CV cast iron

재질	NCM주철	설계속도	200 km/h
직경	Φ660 mm	운행속도	180 km/h
무게	93.2 kg	최대감속도	1.11 m/s ²
형식	2분할형	제동에너지	10.6 MJ

Table 2. Mechanical properties of NCM-CV cast iron

구분	항복점 (N/mm ²)	인장강도 (N/mm ²)	경도 (HB)	연신율(%)	비고
NCM	310	346~365	256~265	0.4	공시재 1-inch, Y-Block
CV-NCM	230 이상	350 이상	180~240	1	
측정치	374~378	461~471	208	3	

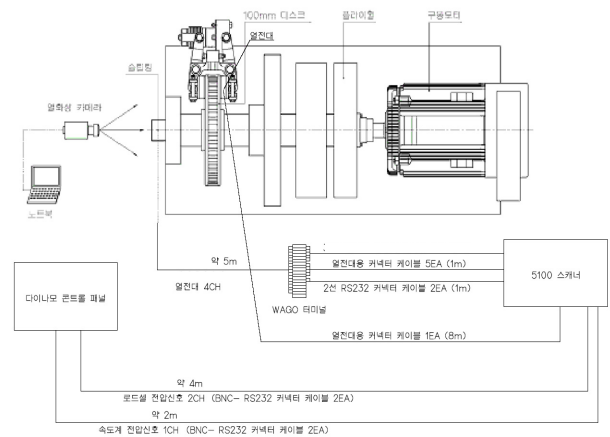


Fig. 1. Dynamo test equipment block diagram

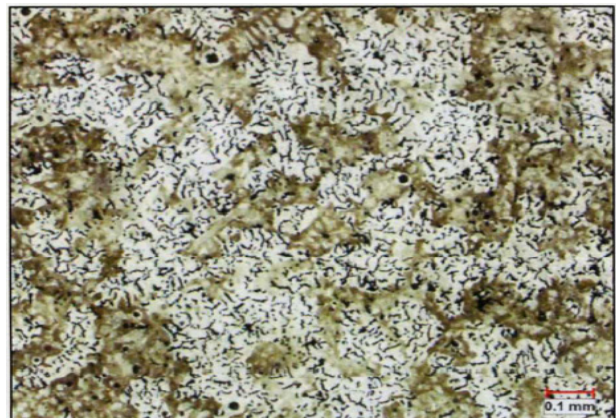
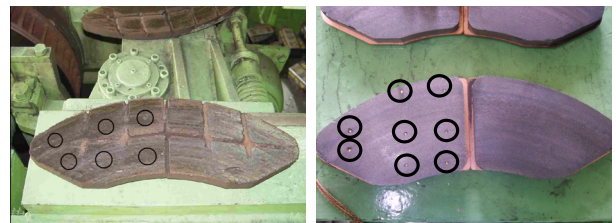


Fig. 2. Graphite form of NCM-CV cast iron



(a) Resin pad

(b) Plate type sintered pad



(c) Stud type sintered pad

(d) Flexible type sintered pad

Fig. 3. The variety of pads for dynamo test

2.4 시험용 프로그램

다이나모 시험용 프로그램은 UIC541-3에서 제시하고 있는 프로그램을 참조하여 시험장비의 성능, 적용차량의 제동특성 및 환경적 요건 등을 고려하여 표 3과 같이 작성하였다.

3. 다이나모 시험 결과

디스크 표면의 순간온도는 열화상 카메라를 사용하여 실시간으로 관측하였으며, 3개의 열전대를 디스크 반경방향으로 설치하여 디스크 온도를 측정하였다. 이때 열전대 설치개소는 보조적인 측정이기 때문에 UIC 기준보다는 적은 개수이다. 그리고 본 연구에서의 비상제동조건은 탈팅열차의 비상제동거리 1400 m를 만족시키는 초기속도 180 km/h, 제동디스크 1면당 제동력 17.4 kN이다.

3.1 디스크 온도

각 시험용 패드에 대하여 열화상 카메라를 통해 얻은 데이터는 제동력 17.4 kN 작용 시 초기속도 180 km/h 및 200 km/h에 대한 2차 시험결과를 예시하였다. 열화상 정보를 관찰한 결과 초기 길들이기(bedded-in)를 거쳐 2차 시험이 완료되는 동안 디스크 표면의 온도분포는 점차적으로 낮아지고 안정화되었다.

그림 4의 수지계 패드는 순간 최대 표면온도가 369℃~482℃ 범위를 나타낸 반면 열전대온도는 210℃~311℃ 값을 기

록함으로써 시험용 패드 중 가장 우수한 온도특성을 나타냈다.

그림 5는 판형 소결패드의 시험결과를 나타낸다. 1차 시험에서의 최대 온도가 제동력 17.4 kN, 200 km/h 초기속도에서 665℃를 기록한 반면 2차 시험에서는 591℃로 낮게 나타났다. 이때의 열전대 온도는 400℃ 이하로 나타났다. 판형 소결 패드는 타 소결패드에 비해 상대적으로 많은 분진이 발생했다. 이러한 이유로 표면온도에 비해 열전대온도가 낮게 나타난 것으로 파악된다.

그림 6은 스테드형 소결패드의 열화상 데이터이다. 비상제동조건에서 표면온도는 600℃ 이상으로 나타났으며 200 km/h에서는 최대 715℃까지 상승하였다. 이때의 열전대 온도 또한 587.9℃로 높게 나타났으며 열점(hot spot)현상이 관찰되

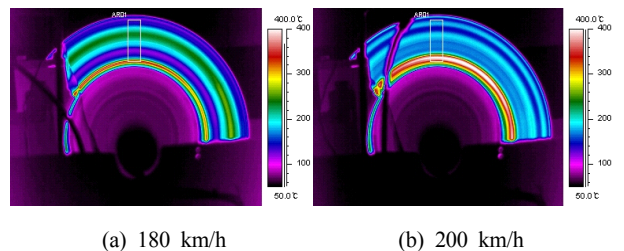


Fig. 4. Instantaneous surface temperature of resin pad

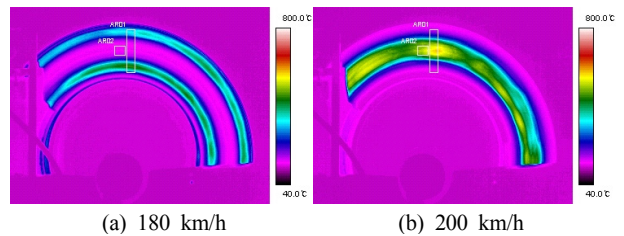


Fig. 5. Instantaneous surface temperature of plate type sintered pad

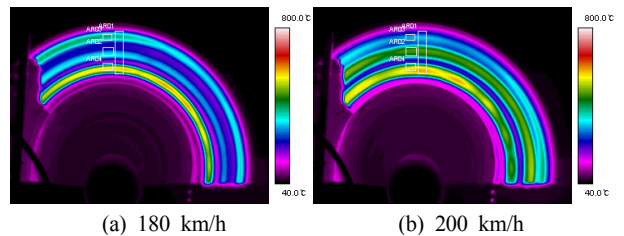


Fig. 6. Instantaneous surface temperature of stud type sintered pad

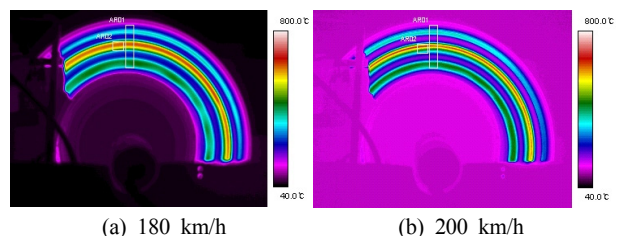


Fig. 7. Instantaneous surface temperature of flexible type sintered pad

Table 3. Program for dynamo test

Test Program (Vmax=200km/h)				
Disc : φ660				
Mass per disc : 7.3t				
Pad : 수지계 패드 1종, 소결패드 3종				
Braking No.	Speed	Braking Force	Initial Temp.	Remarks
	km/h	kN	℃	
0.1 ~ 0.X	60	17.4	20~ 100	정지 제동, 패드 마모면 70% 이상
1	10	12.7	50~60	정지제동, 건조상태, 각 스텝 냉각제동, No.1에서는 초기온도 20~30℃ 허용.
2	11	12.7		
3	12	12.7		
4	13	6.3		
5	14	6.3		
6	15	6.3		
7	16	17.4		
8	17	17.4		
9	18	17.4		

었다. 이러한 온도특성은 디스크 재질이 주철이라는 점을 고려할 때 장기간 사용 시 열에 의한 디스크 손상의 주요 원인으로 작용할 수 있다[8].

그림 7은 플렉시블 패드의 디스크 표면 온도분포를 나타낸다. 순간 최대 표면온도는 670 °C로 초기속도 및 제동력에 상관없이 일반적으로 디스크 중심 위치에서 발생하였다. 이때의 열전대에 의한 디스크 기지의 최대 온도는 약 476 °C로 스테드형에 비해 크게 낮아졌다. 스테드 재질이 동일하다는 사실에 기초하여 이러한 결과는 플렉시블 타입을 적용함으로써 열에 의한 문제를 어느 정도 개선할 수 있음을 보여 준다.

그림 6과 7의 마찰 작용면을 자세히 관찰해 보면 디스크 표면에 3줄의 동심원을 공통적으로 확인할 수 있다. 이것은 스테드 배열에 기인한 것으로 판단되며 장기간 사용 시 디스크 표면에 홈(groove)을 생성시켜 디스크 수명을 단축시킬 수 있기 때문에 스테드의 재배치가 요구된다.

그림 8은 열화상 카메라에 의한 디스크 표면온도의 1, 2차 시험결과를 평균하여 나타낸 그래프이고, 그림 9는 열전대에 의한 디스크 기지온도의 평균값을 나타낸 그래프이다. 그림 8에서 기호 P부분은 스테드형 패드의 온도 측정 중 측정한계를 벗어난 경우를 표시한 것으로 그림 9의 열전대 결과로부터 유추하면 플렉시블 패드의 값과 유사하거나 상회할 것으로 예상된다. 그리고 제동력 6.3 kN의 경우 플렉시블 패드에 대한 디스크 기지온도는 스테드형 패드에 비해 높게 나타난 반면 디스크 표면의 최고온도는 낮은 값을 보이고 있다. 이 또한 스테드의 유연특성의 효과로써 디스크와 패드사이의 유효 접촉 면적이 증가하여 나타난 결과로 파악된다.

시험 전반에 걸쳐 소결패드는 패드형식과는 무관하게 디스크 표면온도가 높게 나타났으며 부분적으로 열점현상이 관찰되었다. 따라서 장기간 사용 시 열에 의한 손상이 발생될 수 있기 때문에 이에 대한 추가적인 검증이 필요하다.

3.2 패드 온도

열전대를 사용하여 측정한 패드의 최대 온도 및 온도 비(최대/최소)를 그림 10에 나타내었다. 그림에서 수평막대는 왼쪽 축의 최대온도, 수직막대는 오른쪽 축의 온도비를 표시한다. 그림에서 보는 바와 같이 소결재 패드들은 모두 600 °C 이상의 최대온도를 나타내고 있다. 한편 온도비의 값은 판형 및 스테드형 소결패드의 경우 4.8, 4.9의 값을 각각 나타낸 반면 수지패드와 플렉시블 소결패드는 약 2.0 정도로 낮게 나타났다. 수지패드의 경우 실험 중 많은 분진이 발생한 것으로 보아 마모를 통하여 열에너지를 방출시키고 있는 것으로 파악된다. 반면 플렉시블 패드의 경우에는 스테드의 유연특성에 의한 영향으로써 실제 마찰작용 면적이 증가되어 나타난 결

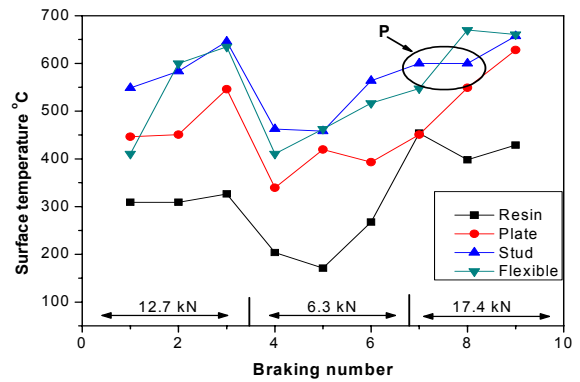


Fig. 8. Average values of instantaneous disk surface temperature using thermal imaging cameras

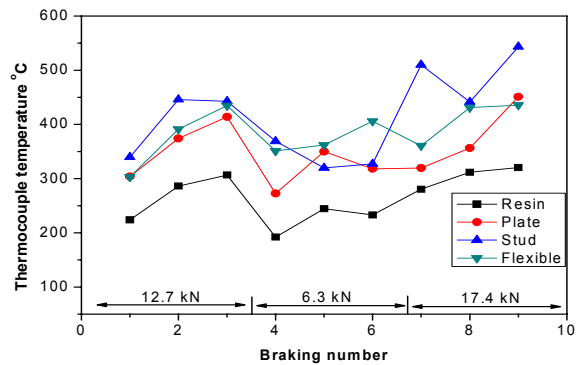


Fig. 9. Average values of disk base temperature by thermocouples

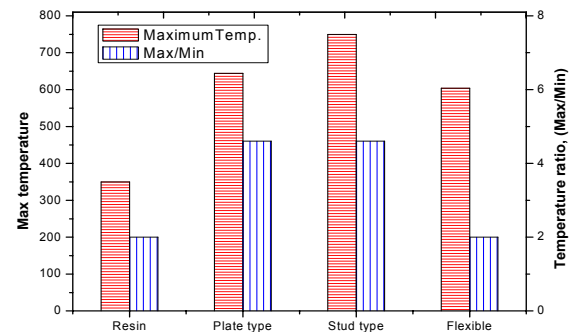


Fig. 10. Pad maximum temperature and temperature ratio (max/min)

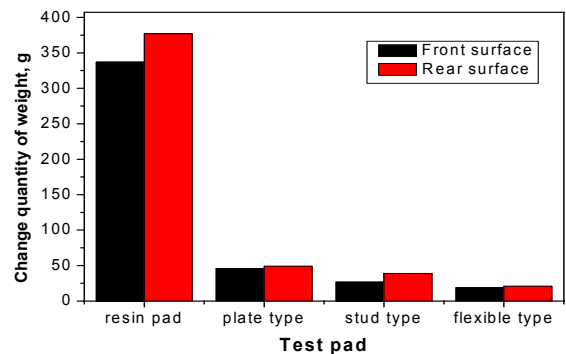


Fig. 11. The change quantity of weight for test pad

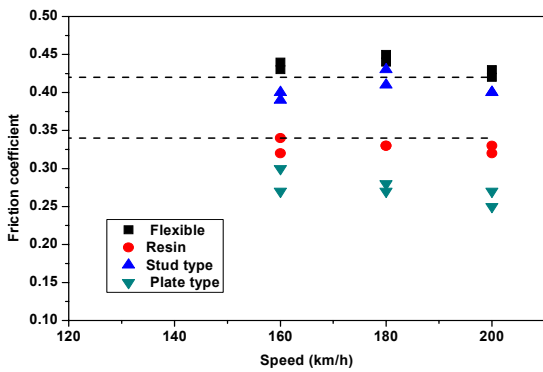


Fig. 12. Average coefficient of friction

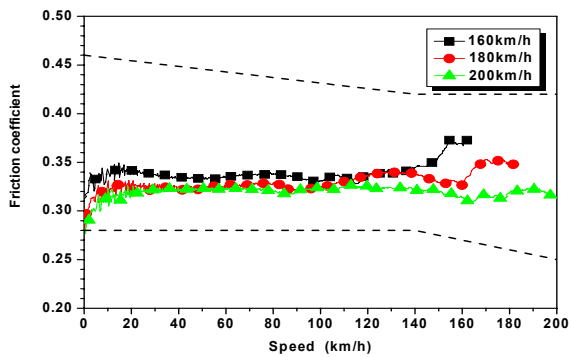


Fig. 13. Instantaneous friction coefficient of resin pad

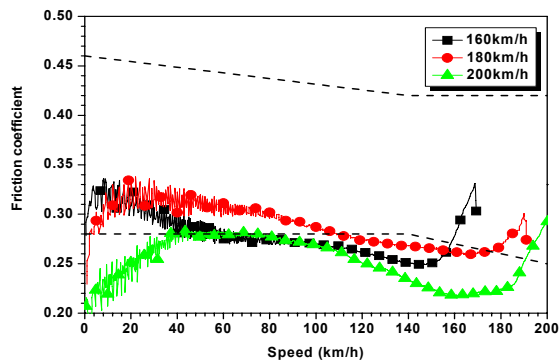


Fig. 14. Instantaneous friction coefficient of plate type

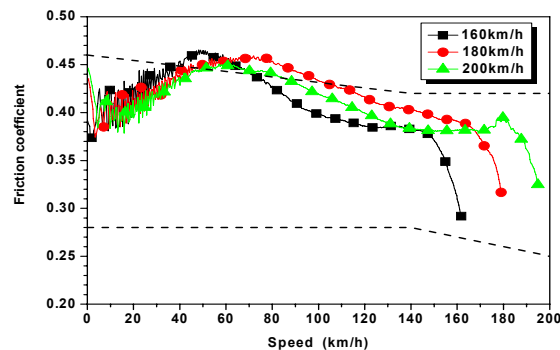


Fig. 15. Instantaneous friction coefficient of stud type

과로 분석된다[9].

그림 11은 시험 완료 후 각 패드의 마모량을 그래프로 표현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 플렉시블 패드의 경우 스타드형 패드에 비해 마모량이 크게 작아졌음을 확인할 수 있다.

3.3 평균마찰계수

평균마찰계수의 평가범위는 비상제동조건에서 제동거리 1400 m를 확보할 수 있으며, 점착한계를 벗어나지 않는 값으로 $\mu = 0.34 \sim 0.42$ 이다. 그림 12에서 보는 바와 같이 수지 패드와 판형 소결패드들은 하한 경계보다 낮게 나타났다. 한편으로 스타드형 소결패드는 대부분 상한 경계 이내로 기준을 만족시키는 반면 플렉시블 패드는 상한의 경계를 초과하고 있다. 이것은 제동력이 일정한 상태에서 실제 마찰 단면적의 증가로 인한 영향으로 판단된다.

3.4 순간마찰계수

그림 13에서 그림 16는 제동력 17.4 kN에 대한 초기속도 별 순간마찰계수의 거동특성을 나타낸 그래프이다. 그림에서 점선은 UIC 541-3에서 권장하는 주강(cast steel)대 소결패드의 순간마찰계수 허용범위로서 이를 평가의 기준으로 인용한다. 그림에서 보는 바와 같이 UIC 기준을 만족시키는 패드는 그림 13의 수지패드뿐이다.

그림 14의 판형 소결패드는 하한 경계에서 주로 거동하는 반면 그림 15의 스타드형 소결패드는 상한 경계에서 거동한다. 한편 그림 16의 플렉시블 소결패드는 약 80 km/h대를 중심으로 순간마찰계수의 변동 폭이 크게 증가하였다. 그리고 전체적으로 곡선의 형태(shape)가 매우 유사한 반면 그 변화율은 플렉시블 패드가 보다 선형적임을 확인할 수 있다.

마찰계수 안정성(μ_s)은 다음 식에 의하여 정량적인 값을 계산할 수 있다[7].

$$\mu_s = [\mu_{ave} - (\mu_{max} - \mu_{min}) \times 0.5] \times (100/\mu_{ave}) \quad (1)$$

여기서, μ_{ave} : 평균 마찰계수

μ_{max} : 최대 마찰계수

μ_{min} : 최소 마찰계수

μ_s 의 값이 100 %인 경우는 이상적인 마찰재로서 계산 결과 수지패드는 83.8 %, 판형 소결패드는 81.2 %, 스타드형 소결패드는 84.8 %로 나타난 반면 플렉시블 소결패드는 71 %로 상대적으로 마찰계수 안정성이 낮게 나타났다.

그림 17은 수지패드의 초기 디스크 온도가 높은 경우의 응답특성을 확인하기 위하여 초기온도를 120 °C로 설정하여

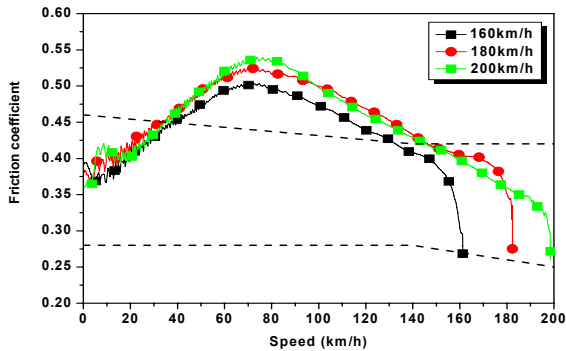


Fig. 16. Instantaneous friction coefficient of flexible

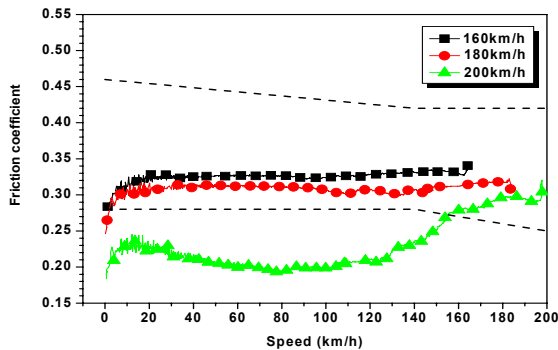


Fig. 17. Instantaneous friction coefficient of resin pad with 17.4 kN and initial temperature 120 °C

17.4 kN의 제동력에 대한 추가시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기속도 200 km/h의 경우에 순간마찰계수가 0.2 대로 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

NCM-CV주철 제동디스크와 다양한 형식의 패드사이의 다이나모 시험결과로부터 다음의 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 수지패드는 디스크 및 패드의 온도특성이 우수하고 마찰계수의 안정성 측면에서 매우 양호하였다. 반면 초기온도가 높은 경우 마찰계수가 크게 낮아지는 문제를 나타내었다.
- (2) 판형 소결패드는 온도 특성이 양호하고 마찰계수는 안정적이지만 평균마찰계수가 너무 낮게 나타났다.
- (3) 스티드형 소결패드는 평균마찰계수와 마찰계수 안정성 측면에서 우수한 반면 디스크 최대온도가 높고 온도비 또

한 크게 나타났다. 그리고 디스크 표면의 마찰작용선이 고정적이기 때문에 장기간 사용 시 디스크손상의 주요 원인으로 작용할 수 있다.

- (4) 플렉시블 소결패드는 스티드형 패드에 비해 온도특성이 개선되었으며 마모량이 작은 장점이 있는 반면에 평균마찰계수 값이 증가하였으며 또한 마찰계수 안정성이 크게 저하되는 것으로 나타났다.
- (5) 본 시험동안 디스크 표면의 손상은 발생되지 않았다. 하지만 소결패드의 경우 높은 온도특성을 나타내기 때문에 UIC 541-3 전체 프로그램 또는 별도의 내구성 평가 프로그램에 대한 추가시험이 요구된다.

후 기

본 연구는 기존선 속도향상 실용기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 그리고 (주) 유진기공 및 (주) S&T 브레이크에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 백남옥 외3인(1997), 철도차량총서, pp.43-62.
2. 이종형, 최병호, 김정(1997), “동계 소결마찰재 개발에 관한 연구”, 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제1호, 대한기계학회, pp.83-92.
3. 김석삼, 김재호, 안효준(1998), “고성능 금속마찰재의 트라이볼로지적 특성”, 한국윤활학회지, 제14권, 제1호, 한국윤활학회, pp.45-53.
4. 김청균, 이일권(1999), “디스크 브레이크의 마찰열 접촉거동에 관한 트라이볼로지적 연구”, 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제10호, 대한기계학회, pp.1845-1852.
5. 김재훈(2005), “철도차량용 제동디스크의 온도변화 측정 및 물성치 변화에 관한 연구(I)”, 한국철도학회 논문집, 제8권, 제3호, 한국철도공학회, pp.222-227.
6. 한국철도기술연구원(1996), 철도차량의 제동성능 향상에 관한 연구, pp.134-165.
7. 한국철도기술연구원(2005), 제동시스템 실용기술 개발 보고서.
8. 방희장(1992), “고온에서 사용되는 구상흑연주철”, 한국주조공학회지, 제12권, 제2호, 한국주조공학회, pp.102-107.
9. H. S. Qi and A. J. Day(2007), “Investigation of disc/pad interface temperatures in friction braking”, WEAR 262, pp.505-513.

(2007년 4월 15일 논문접수, 2007년 5월 30일 심사완료)