

CV-NCM 주철재 제동디스크의 성능 검증을 위한 다이내모 시험연구 Dynamo Test Research for Performance Verification of CV-NCM Cast Iron Brake Disk

길형균* 고태환** 조동현*** 한성호**
Gil, Hyeong Gyeun Ko, Tae Whan Cho, Dong Hyun Han, Seong Ho

ABSTRACT

The study is to analyze dynamo test results for various commercial pads in order to verify the performance of brake disk with CV-NCM cast iron. The developed brake disk will apply to 200 km/h tilting trains that is being developed as one part of project for speed-up on Korean existing railroad. The test program is made out suitably for braking condition and performance of test equipment by referring UIC 541-3. Two kinds of resin pad and one kind of foreign sintered pad suitable for 200 km/h trains are used as various commercial pad for the dynamo test. The data acquisition for the maximum and smallest temperature, hot spot, etc. on disk and pad is performed by using the thermocouples and thermal imaging cameras.

From this research, we obtained braking characteristics between CV-NCM cast iron disk and pad of various material and will be utilized usefully as basis data of performance optimization of developing sintered pad.

1. 서론

기존선 속도향상 프로젝트의 일환으로 개발되고 있는 200 km/h급 틸팅열차(tilting train)는 기계적방식의 기초제동장치와 전기적 방식의 회생제동을 공용하도록 설계되어 있다. 인버터 기술의 발전과 함께 시작된 회생제동 방식은 열차의 감속 시 생성된 전기적 에너지를 전차선로로 귀환하여 재활용할 뿐만 아니라 열차의 속도를 가능한 한 낮은 영역으로 감속시킴으로써 기초제동장치의 역할을 최소화한다. 따라서 두 제동 방식의 알맞은 조합은 소비에너지 및 기초제동장치의 내구성 측면에서 유리하다. 하지만 아직까지 회생제동만으로는 열차를 정지시킬 수 없으며 회생제동 고장(fail)시에 단독적으로 쾌적하면서도 안전한 열차운행을 보장해야 하기 때문에 기초제동장치의 성능이 반드시 확보되어 있어야 한다.

본 연구에서는 200 km/h급 틸팅열차용으로 개발된 CV-NCM 주철재 제동디스크의 성능을 검증하기 위하여 수행하였던 다양한 상용 패드와의 다이내모 시험 결과를 분석하고자 한다. 이러한 시험 결과들을 현재 개발 중에 있는 소결패드의 성능 최적화를 위한 기초자료로서 활용될 것이다.

* 길형균, 비회원, 한국철도기술연구원, 시스템 엔지니어링팀

E-mail : hggil@krri.re.kr

TEL : (031)460-5662 FAX : (031)460-5699

** 한국철도기술연구원

*** 유진기공(주)

2. CV-NCM 주철재 제동디스크

2.1 제동디스크의 기계적 특성

제동디스크의 개발사양은 다음과 같다.

재질	CV-NCM 저합금주철	설계속도	200 km/h
직경	Φ 660 mm	최대운행속도	180 km/h
무게	93.2 kg	최대 감속도	1.11 m/s ²
평균마찰계수	0.4	제동에너지	10.6 MJ

제동 디스크는 회주철(grey cast iron)계에 비하여 인장강도 등의 특성에서 유리한 NCM 저합금주철 계에 마그네슘(Mg)을 소량 첨가하여 제작하였다. 개발이 완료된 차축 및 차륜 디스크의 실물사진을 그림 1과 그림 2에 각각 도시하였다. 그림 1에서 사각 표시는 열전대 삽입 위치를 나타낸다.



그림 1 CV-NCM 주철재 축 디스크



그림 2. CV-NCM 주철재 차륜디스크

일반적으로 NCM 저합금주철은 마찰특성이 안정한 반면 열균열문제를 보완해야 하며, CV흑연주철은 편상흑연주철에 가까운 열전도 특성을 보유하면서도 구상흑연주철에 근접한 강도를 갖는 것으로 알려져 있다. CV-NCM 제동디스크는 첨가된 마그네슘에 의해 NCM 저합금주철 조직의 흑연입자모양을 구상화하여 ASTM type-I의 편상조직에서 애벌레(CV:compacted vermicular)모양 즉 ASTM type-III의 흑연형상으로 변화된 흑연조직을 갖는다. 이러한 흑연형상의 변화는 NCM계에 비하여 향상된 기계적 특성들을 나타낸다. 표 1에 그 결과를 나타내었다.

표 1 시제품의 기계적 특성

구분	항복점(N/mm ²)	인장강도(N/mm ²)	경도(HB)	연신율(%)	비고
NCM	300 이상	300 이상	210-280		
측정치	320~350	320~350	220~260	0.4	
CV-NCM	230 이상	350 이상	180~240	1	공시재 1-inch, Y-Block
측정치	374~378	461~471	208	3	

2.2 제동디스크의 성분 및 조직

그림 3과 그림 4는 CV-NCM 제동디스크의 조직사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 흑연의 모양이 애벌레와 같이 양 끝이 둥근 형태를 취하고 있음을 확인할 수 있다.

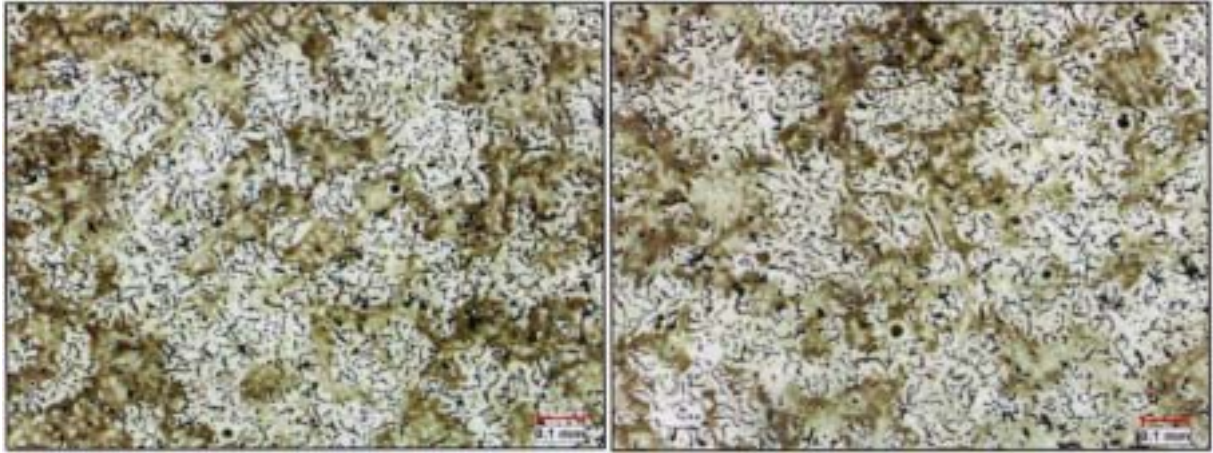


그림 3 시편 1의 조직사진

그림 4 시편 2의 조직사진

표 2는 제동디스크 조직의 기준사양 및 측정값을 나타낸다. 표에서 보는 바와 같이 개발된 디스크의 CV화율은 약 90 %로 나타났다. 일반적으로 마그네슘의 함량이 0.014 % 이하일 경우 편상의 흑연 입자모양이 나타나고, 0.025 % 이상인 경우에는 흑연형상이 구상화되어 열전도 특성을 악화시킬 수 있다. 개발된 제동디스크의 마그네슘 함량은 성분분석 결과 0.016%로 앞서의 허용기준을 만족시키고 있다.

표 2 제동디스크 조직

CV-NCM	기준사양	측정값	비고
CV화율	70 % 이상	89.4~91.4 %	공시재 (1-inch Y-Block)
Ferrite분율	70 % 이하	40~45 %	
흑연구상화율		25~26 %	

3. 다이내모 시험

3.1 시험용 패드

CV-NCM 디스크의 성능을 검증하기 위하여 200 km/h급 열차에 적용할 수 있는 외국산 상용 패드 레진계 2종과 판형 소결패드(이하 소결패드) 1종을 선정하여 다이내모 시험을 수행하였다. 그림 5에서 그림 7은 시험에 사용된 패드의 실물사진으로 원 표시는 열전대 부착위치를 나타낸다. UIC 541-3에서 권장하는 주강(cast steel)대 소결패드의 평균마찰계수는 140km/h 이내의 속도에서는 0.31~0.41이고, 200 km/h에서는 0.27~0.39이다.



그림 5 레진1 시험패드



그림 6 레진2 시험패드

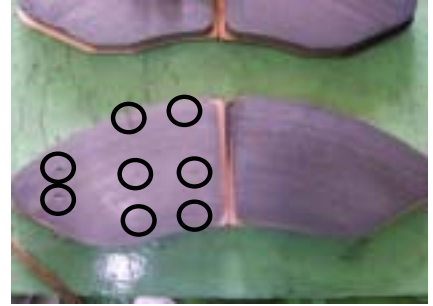


그림 7 외국산 소결패드

3.2 시험장비

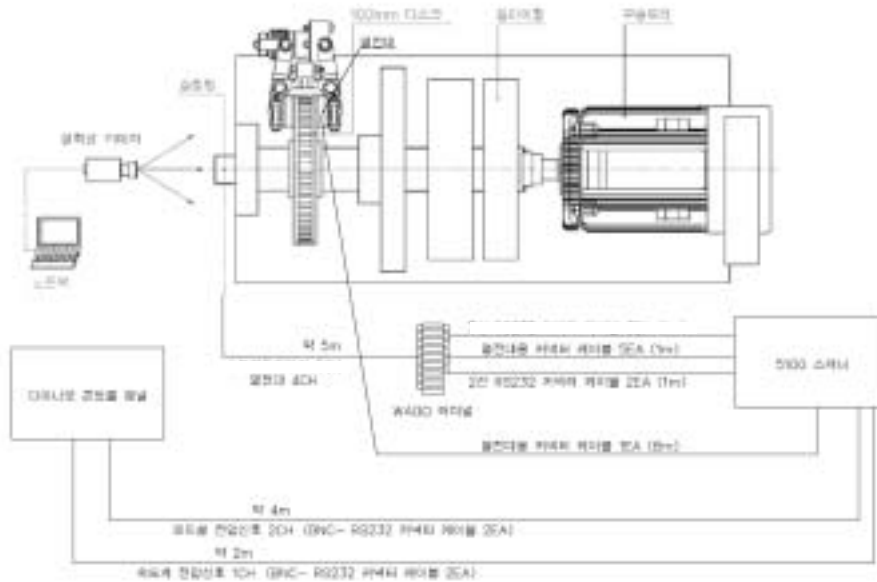


그림 8 다이نام로 시험장치의 개략도

그림 8의 다이نام로 시험장치는 관성모멘트 $40 \sim 220 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$, 최대 회전속도 1700 rpm(211 km/h)의 성능을 갖는다. 디스크온도는 그림 1과 같이 디스크 반경방향으로 in, center, out으로 구분하여 마찰면으로부터 깊이 1mm 위치에 센서를 삽입하여 최소 3점에서 측정하고, 패드의 온도는 그림 6과 그림 7에 표시한 바와 같이 온도센서를 삽입하여 검출한다. 그리고 디스크의 속도, 마찰토크 및 압부력은 다이نام로 시험기의 제어장치에서 출력을 받아 스캐너에 저장하였다. 특히 디스크 마찰면의 순간 온도분포를 측정하기 위하여 열화상 카메라를 사용하였다.

3.3 다이نام로 시험용 프로그램

다이نام로 시험용 프로그램은 UIC 541-3에서 제시하고 있는 200km/h급 소결패드 용 시험프로그램을 참조하여 시험장비의 성능 및 환경적 요건 등을 고려하여 표 3과 같이 작성하였다. 또한 시험장치의 제약에 따라 건조(dry)조건에서 수행하였다.

표 3 다이내모 시험 프로그램

Test Program (Vmax=200km/h) Disc : $\phi 660$ Mass per disc : 7.3 ton				
Braking No.	Speed km/h	Braking Force kN	Initial Temp. $^{\circ}\text{C}$	Remarks
0.1 ~ 0.X	60	17.4	20 ~ 100	정지 제동,패드 마모면 70% 이상
1 10	160	12.7	50 ~ 60	정지제동, 건조상태, 각 스텝마다 강제냉각, 초기온도 50~60 $^{\circ}\text{C}$.
2 11	180			
3 12	200	12.7		
4 13	160	6.3		
5 14	180			
6 15	200	6.3		
7 16	160	17.4		
8 17	180			
9 18	200	17.4		

3.4 시험결과

3.4.1 제동디스크 온도분포

비상제동조건(180 km/h, 17.4 kN)에서의 디스크 순간 표면 온도분포를 그림 9에서 그림 11에 나타내었다. 그림 9와 그림 10의 레진계 2종 패드는 제동 작용 시 비교적 균일한 온도분포를 나타내고 있으며 최대 순간온도는 약 400 $^{\circ}\text{C}$ 이내로 안정적이다. 반면에 그림 11의 소결패드는 디스크 표면에 붉은 띠(band)를 형성하며 순간 최대온도는 약 665 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였다. 디스크에 부착한 열전대의 온도는 전반적으로 순간 표면온도에 비해 약 100~300 $^{\circ}\text{C}$ 정도 낮게 나타났다.

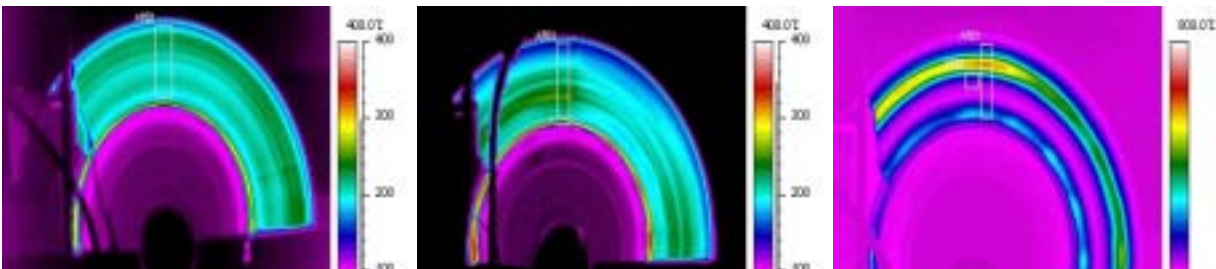


그림 9 레진 1 온도분포

그림 10 레진 2 온도분포

그림 11 소결패드 온도분포

3.4.2 패드 온도비

패드의 온도비는 각 제동 시 측정된 최소온도 대비 최대온도 값이다. 그림에서 레진 1은 최대값이 2.0이며, 레진 2는 1.5를 나타내고 있다. 반면에 소결패드는 2.1 ~ 4.6으로 큰 변동 폭을 나타내고 있다. 이것은 제동 작용이 특정 위치에 집중되고 있음을 의미하며 장시간 제동 작용 시 제동디스크의 균열이나 변형 등의 원인이 될 수 있을 것이다.

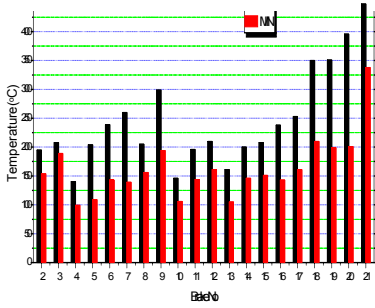


그림 12 레진 1 패드온도 비

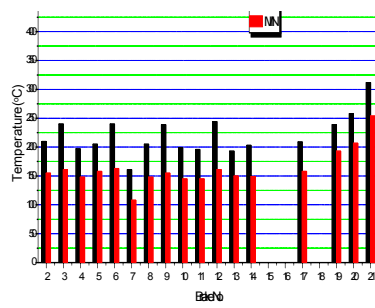


그림 13 레진 2 패드온도 비

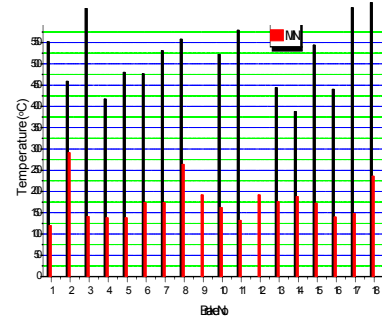


그림 14 소결 패드온도 비

3.4.3 평균마찰계수

그림에서 점선은 UIC 541-3에서 권장하는 평균마찰계수의 상한 및 하한 값이다. 그림에서 레진계 2 종은 UIC 기준을 만족시키지만 소결패드는 압부력이 클수록 값이 낮아지는 특성을 보이고 있다. 텀팅열차의 평균 마찰계수 0.34~0.42 범위를 고려할 때 세 경우 모두 다소 낮게 나타났다.

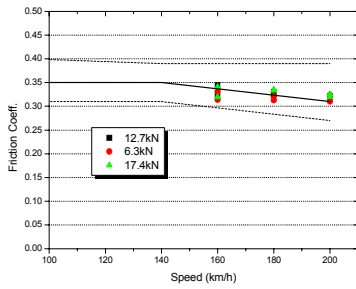


그림 15 레진 1 평균마찰계수

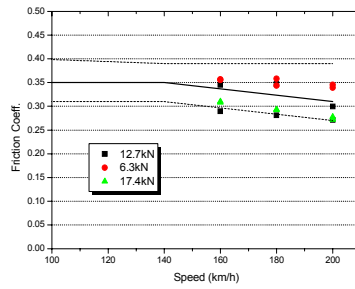


그림 16 레진 2 평균마찰계수

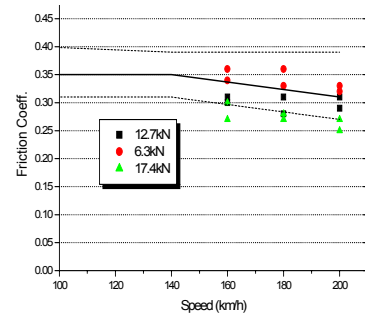


그림 17 소결패드 평균마찰계수

3.4.4 순간마찰계수

그림에서 레진 1은 UIC 권장 범위내에서 안정성을 유지하고 있는 반면 레진 2와 소결패드는 권장범위 하한을 벗어나 변화하고 있다. 마찰계수 안정성을 계산하여 정량화하면 레진 1은 83.8 %, 레진 2는 74.2 %, 소결패드는 81.2 %로 나타났다. 한편 레진 1의 경우 온도분포나 마찰계수의 안정성 측면에서 다른 제품에 비해 우수하지만 마모량(분진)은 상대적으로 높게 나타났다. 베드인(bedded-in) 이후 시험이 종료되는 시점에서 총 마모량을 계량한 결과 704 g 으로 레진 2의 149 g, 소결 패드의 95 g에 비해 4~7배 높다.

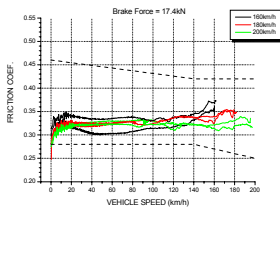


그림 18 레진 1 순간마찰계수

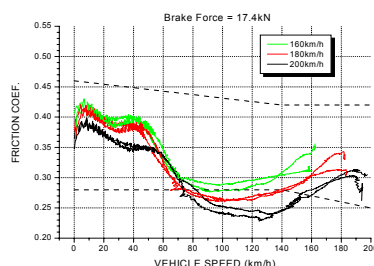


그림 19 레진 2 순간마찰계수

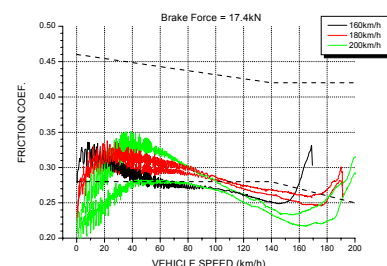


그림 20 소결 순간마찰계수

다이내모 시험 결과 세 패드 모두에서 정지소음은 발생되지 않았으며 또한 마찰 작용에 의한 디스크 표면의 균열(crack)이나 긁힘(groove) 등의 흔적도 나타나지 않았다. 따라서 시험에 사용된 3종의 상용 패드는 모두 CV-NCM 주철재 제동디스크에 대한 공격성이 미약하다고 판단할 수 있다. 하지만 소결 패드의 경우 제동 작용 시 발생하는 높은 열은 장기간 사용 시 디스크 손상의 주요 원인으로 작용할 수 있기 때문에 이에 대한 추가적인 검증이 요구된다.

4. 결론

200 km/h 급 틸팅열차 용으로 개발된 CV-NCM 주철재 제동디스크의 성능을 다양한 상용 패드를 적용하여 다이내모 시험을 실시하여 확인하였다. 그 결과로서 다음의 결론을 얻었다.

1) 평균 마찰계수의 값은 200 km/h 급 레진 계열은 UIC 기준을 만족시키고 있는 반면 소결패드는 압부력이 증가하면서 하한 값을 벗어나는 제동특성을 나타내었다. 마찰계수의 안정성 측면에서 레진계열은 제품에 따라 큰 차이가 있음을 확인하였다. 한편 소결패드는 비교적 안정적으로 나타났다.

2) 레진계 패드는 최고온도 및 온도분포가 양호하여 열에 대한 디스크의 영향이 극히 작을 것이다. 특히 레진 2는 온도비의 변화 폭이 균일하여 이상적인 접촉상태를 유지하고 있는 것으로 판단된다. 하지만 상대적으로 많은 마모량은 유지보수 측면에서 불리하다.

3) 소결패드는 마찰표면의 온도가 높고, 온도분포 또한 특정 위치에 집중되어 열점이 발생한다. 이것은 디스크의 균열이나 변형의 주요 원인이 될 수 있다. 반면에 정지소음이 없으면서도 마모량이 작고 마찰계수가 안정적인 장점을 갖는다.

향후 UIC 541-3에 제시되어 있는 전체 프로그램에 대하여 제동조건 및 시험환경 등을 고려하여 작성한 전 과정의 시험용 프로그램을 적용하여 소결패드에 대한 제동디스크의 성능을 검증하고자 한다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(1996), 철도차량의 제동성능 향상에 관한 연구
2. 한국철도기술연구원(2005), 제동시스템 실용기술 개발
3. 방희장(2001), “고온에서 사용되는 구상흑연 주철”, 한국주조공학회
4. 정종덕 외 4(2005), “제동 디스크 라이닝의 비교시험 연구”
5. 이영민 외 5, 제동디스크 소재의 강도평가
6. 김석삼 외 2(1998), 고성능 금속마찰재의 트라이볼로지적 특성, 한국윤활학회지