

한국형 틸팅열차용 Flexible 소결 브레이크 패드 적용 연구

Application of Flexible Sintered Brake Pad for TTX

구성모† 이동균* 고태환** 나종태*** 김상호***
Seong-Mo Ku Dong-Kyun Lee Tae-Hwan Ko Jong-Tae Na Sang-Ho Kim

ABSTRACT

Metallic sintered brake pads are often applied to Mid/High Speed Train due to its high strength and thermal characteristics. Because of its imbalance contact between discs and pads can greatly influence the life span, one sided wear, discs attack/crack and threat the safety of the train during operation.

In this research, we analyzed pressure/temperature distribution between brake pads and disks. Analyzed data had been verified and modified to conduct further tests of Flexible brake pads with small/full-scale dynamo test. Flexible brake pads were installed to TTX train to conduct further tests to identify the differences between Rigid brake pads and Flexible brake pads.

In result, Flexible brake pads showed outstanding disk thermal stability, one sided wear, noise and life of pad than rigid brake pad.

1. 서 론

한국의 중/고속철도는 2004년 4월 KTX(Korea Train eXpress) 도입 이후, 꾸준한 연구개발로 200 km/h급 TTX(Tilting Train eXpress), 350km/h급 KTX-II(산천)까지, 비약적인 발전을 이루고 있으며 제동분야 역시 많은 발전이 이루어졌다.

고속철도에서 제동장치는 비상시뿐만 아니라 상시로 사용해야 하는 중요 부품이다. 고속철도의 제동장치는 크게 전기제동과 기계제동으로 나뉘어져 있으며 전기제동은 전동기를 발전기로 사용하고 이때 발생하는 잉여에너지를 다른 열차에 보내는 회생제동과 그 잉여에너지를 차량내 주저항기에서 열로 발산시켜 제동력을 발생시키는 저항제동으로 구분되며 기계제동은 기계적인 마찰력을 이용하는 제동 방식으로 디스크제동, 휠-디스크제동, 답면제동으로 세분화된다.¹⁾ 두 제동시스템은 속도나 상황별로 혼합(blending, 블렌딩)하

여 사용되며 고속구간에서는 전기제동을 주로 사용하나 저속구간에서는 기계제동 의존도가 높아지고 비상제동시에는 기계제동으로만 제동하는 경우도 있다.

철도차량의 기계제동 장치는 저속용의 경우는 유기계 패드를 사용하는 반면 고강도, 내열균열 특성이 요구되는 고속철도는 금속계 소결 패드를 사용한다.²⁾

금속계 소결 패드는 높은 열전도성을 가져 마찰면에서 발생한 열을 마찰재가 흡수·방출해 줌으로써 디스크의 열적 부담을 줄여 과도한 열응력, 표면 연화에 의한 소성 유동의 발생 등을 억제하는 것³⁾으로 알려져 있지만 고속철도의 실제 사용 조건에서는 브레이크 패드의 마찰면과 디스크간의 불균일 접촉에 의한 과도한 마찰열 발생으로 디스크나 패드에 열변형이 발생하게 되고, 그로 인해 디스크 균열(crack)과 같은 소성변형이 발생하기도 한다. 이러한 현상은 디스크나 브레이크 패드의 수명감소를 야기해 추가적인 비용이 발생하게 되며 고속철도 차량의 안전에도 악영향을 줄 수 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 제동시 마찰재와 디스크의 안정적인 접촉을 유지할 수 있는 패드 설계에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 중 하나가 마찰재와 백플레이트(back

† 비회원, ㈜다윈프릭션, 연구소
E-mail : textversion@dawinf.co.kr
TEL : (032)821-4621 FAX : (032)821-4623

* 비회원, 유진기공산업(주),
정회원, 철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단

*** 비회원, ㈜다윈프릭션, 연구소

*** 정회원, ㈜다윈프릭션, 연구소

plate)가 고정되어 있어서 불균일 접촉이 쉬운 리지드(rigid) 브레이크 패드의 단점을 보완하고자 개발된 플렉서블(flexible) 브레이크 패드이다. 플렉서블 브레이크 패드는 마찰재가 백 플레이트에 고정되어 있지 않아 접촉면의 형상에 따라 마찰재의 접촉면이 유동적으로 변할 수 있는 타입의 패드를 뜻하며 해외에서는 상용화되어 적용중이지만 국내 적용은 미비한 실정이다.

본 연구는 플렉서블 브레이크 패드의 TTX 및 고속철도 적용가능성을 확보하기 위하여, 소결브레이크 패드의 마찰재 결속방식에 따른 브레이크 패드/디스크 접촉압력 및 온도분포 해석을 실시한 후 플렉서블 브레이크 패드를 설계해 full-scale 제동 시험을 통해 온도변화를 측정 수행, 마찰특성 및 내구성 그리고 열특성을 검증하였으며 끝으로 시험 운용중인 TTX에 시험 장착해 리지드 브레이크 패드와 디스크 공격성/균열 여부, 브레이크 패드의 마모량/편마모등의 특성을 비교하여 플렉서블 브레이크 패드의 적용 연구를 수행했다.

2. 디스크와 브레이크 패드 해석 및 결과

표 1은 해석에 사용된 디스크와 브레이크 패드의 물성치이며 열변형 해석 모델링과 해석은 MSC Patran/Nastran 2005를 사용했다.

2.1 디스크의 열변형 해석

고속철도 제동시 디스크의 열변형에 의한 코닝각을 해석하고자 열변형 유한요소해석을 수행했다. 디스크내 온도차를 100℃로 설정하였다.

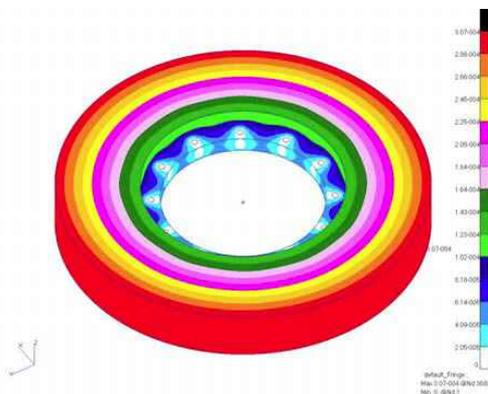


그림1. 열변형 해석 결과.

표 1. 해석 적용된 디스크/브레이크 패드 물성

Material	Disk	Brake Pad		Friction Parts
		Back Plate	Friction Material	
	Steel	Steel	Composites	Spring
Young' Modulus (GPa)	210	210	105	0.21
Possion's Ratio	0.3	0.3	0.25	0.3
Density (kg/m ³)	7,800	7,800	5,250	7,200
Conductivity (W/m-K)	42	42	30	-
Specific Heat (J/kg-K)	452	452	1610	-
Expansion Coeff. (10 ⁻⁵ /℃)	1.2	1.2	1.2	-

표 2. 코닝각 및 외각 변형량

Disk	Coning Angle(°)	Deflection(μm)
Base	3.94×10 ⁻⁴	2.2

그림1은 디스크의 열변형 해석 결과로 최외각의 변형량이 가장 많은 것으로 나타났다. 또한 표 2는 코닝각 계산 결과와 그때 디스크 최외각 변위량 계산치다. 100℃의 온도 구배로 발생한 코닝각의 크기는 3.94×10⁻⁴로 매우 작았고 그에 따른 디스크 최외각 변위량도 2.2μm로 매우 낮아 제동시 열발생으로 인한 디스크 코닝각의 영향은 고려하지 않기로 했다.

2.2 디스크/브레이크 패드 압력 분포 해석

브레이크 패드는 리지드 타입과 플렉서블 타입으로 구분하였고 가압량은 10kN으로 설정했다. 그림2는 브레이크 패드의 유한요소해석 중 압력이 가해지는 위치를 가시화시킨 것으로 빨간색 부분 이외에는 체결 부품 등으로 인해 직접 압력이 가해지지 않는다.

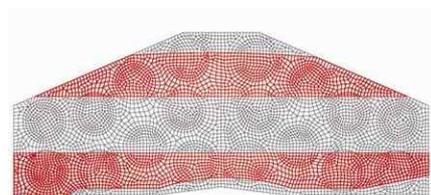


그림2. 가압시 압력 위치.

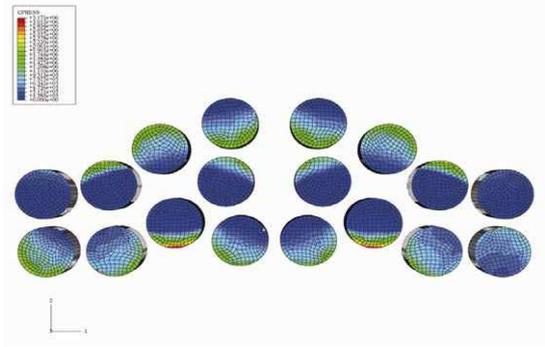


그림3. 리지드 브레이크 패드의 압력 분포.

그림3은 리지드 브레이크 패드의 압력 분포 해석 결과다. 가압시 위치에 따라 압력이 집중되어 있으며 양쪽 끝에 있는 마찰재는 압력이 거의 가해지지 않았다.

그림4는 백플레이트 소성 변형에 대한 해석 결과이며 압력 불균일로 뒤틀림이 발생하여 소성 변형되었다. 이상의 해석에서 나타나는 마찰재 압력 불균일은 가압시 압력 위치 불균일과 백 플레이트 뒤틀림에 의한 것으로 예상된다.

그림5는 플렉서블 브레이크 패드의 압력 분포 해석 결과로 리지드 브레이크 패드에 비해 전체적으로 고른 압력분포를 보이고 있다. 다만 리지드 브레이크 패드와 마찬가지로 양쪽 끝에는 여전히 낮은 압력이 인가됐다.



그림4. 백플레이트 소성변형 해석 결과.

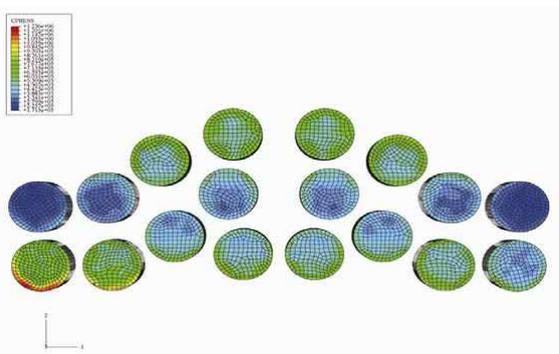


그림5. 플렉서블 브레이크 패드의 압력 분포.



그림6. 열섬 시험 종료된 시편:
(a) 리지드 타입, (b) 플렉서블 타입.

3. 제동/현차 시험 및 결과

해석에서 나타난 플렉서블 브레이크 패드의 열적 특성 개선 효과를 실험적으로 규명하기 위해 열섬시험, full-scale 제동 시험, 현차 적용시험을 수행했다.

3.1 열섬시험

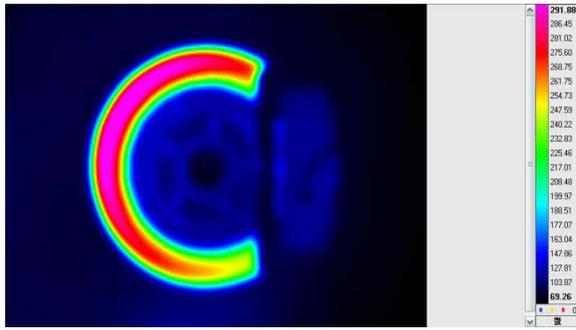
열섬시험은 가압량 2bar, 속도는 열섬이 일어나는 임계속도까지 진행했다. 각 속도별로 열화상 카메라를 사용해 열섬 여부를 확인했으며 그림6은 실험 종료된 열섬 시험편이다.

표 3은 열섬 시험 결과로 리지드 타입은 600rpm에서부터 열섬 현상이 발생해 시험을 종료한 반면 플렉서블 타입은 2,100rpm에서도 열섬 현상이 발생하지 않았다. 열섬 시험 결과, 해석시 예상되었던 플렉서블 브레이크 패드의 열안정성을 확인할 수 있었다.

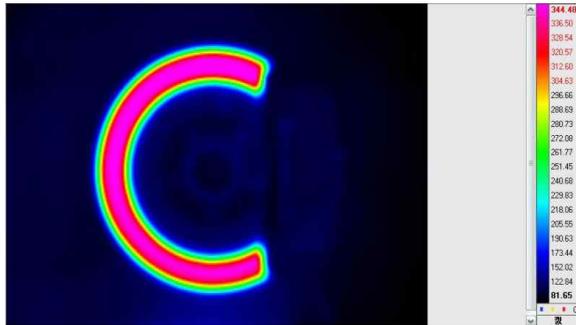
그림7은 열섬시험 열화상 촬영 결과이다. 600rpm 회전시 리지드형의 촬영 결과, 그림7(a)와 같이 디스크의 온도 분포가 일정하지 고르지 못해 열섬 현상이 관찰된 반면, 2,100rpm 회전시 플렉서블 타입 촬영 결과, 그림 7(b)와 같이 디스크 전체에 고른 온도 분포를 보인다.

표 3. 열섬 시험 결과 요약

시편 구분	압력	열섬 현상 시점
리지드 타입	2bar	600rpm
플렉서블 타입		2,100rpm 이상



(a)



(b)

그림7. 열점시험 열화상 촬영 결과;

(a) 리지드 타입, 600rpm

(b) 플렉서블 타입, 2,100rpm.



그림8. 제작된 플렉서블 브레이크 패드

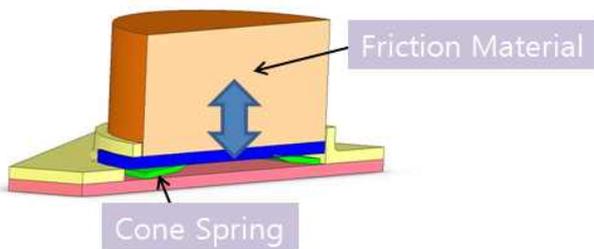
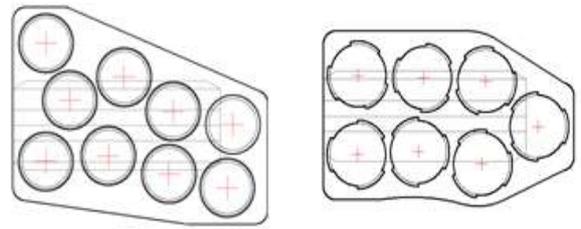


그림9. 플렉서블 브레이크 패드 단면 3차원 모델링.



(a)

(b)

그림10. 시험품 개략도;

(a) 리지드 타입, (b) 플렉서블 타입.

3.2 플렉서블 브레이크 패드 제작

Full-scale 제동 시험 및 현차 적용시험을 위해 플렉서블 브레이크 패드를 설계/제작했다. 그림8은 본 연구에서 설계/제작된 플렉서블 브레이크 패드로 마찰재가 백플레이트에 개별적으로 걸쳐 있는 형태로 제작되어 유동성을 이루고자 했다.

그림9는 플렉서블 브레이크 패드의 단면 3차원 모델링으로 마찰재와 백플레이트 사이에 원뿔형 스프링을 적용하여 제동시 마찰재가 각각 디스크의 형상에 따라 유동성을 지녀, 화살표 방향으로 압축/복귀하면서 디스크와 균일한 접촉을 이룰 수 있도록 설계되었다.

그림10은 리지드 브레이크 패드와 본 연구에서 개발된 플렉서블 브레이크 패드의 개략도이다. 디스크의 외/내경에 따라 마찰재를 배치한 기본적인 형상은 유사하나 마찰재의 개수, 배치 및 크기는 다르다.

3.3 Full-scale 제동 시험 중 온도 측정 결과

그림11은 full-scale 제동 시험 중, 디스크 6개 지점의 온도 측정 결과이다. 제동압력은 16, 31, 46kN으로 설정했다. 플렉서블 브레이크 패드의 경우, 최저/최고 온도차가 16kN의 경우 172℃, 31kN은 213℃, 46kN은 148℃로 측정되었으며 평균 온도차가 178℃였다. 반면 리지드 브레이크 패드의 경우, 최저/최고 온도차가 16kN은 303℃, 31kN은 433℃, 46kN은 445℃로 측정되었고 평균 온도차는 394℃로 플렉서블 브레이크 패드의 온도차보다 2배 이상 높았다. 이로써 플렉서블 브레이크 패드의 열안정성 향상을 확인할 수 있었다.

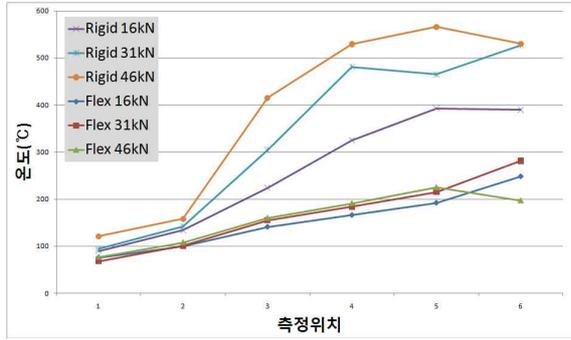


그림 11. Full-scale 제동 시험 중 브레이크 패드 온도 분포

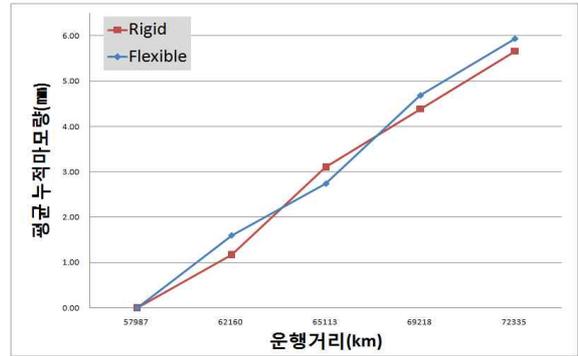


그림 13. 리지드/플렉서블 브레이크 패드 평균 누적마모량

3.4 현차 적용시험

현차 적용시험은 현재까지 규명된 플렉서블 브레이크 패드의 열안정성 향상 효과를 확고히 하고자 수행되었다. 평가 항목은 마찰재 마모/편마모 평가, 디스크 열화 여부 비교 평가였고 적용된 시험 차량은 현재 시험운행중인 TTX로 이루어졌다.

그림 12는 TTX의 대차구성 개략도이다. 1편성은 6개의 차량으로 이루어졌고 각 차량마다 2개의 대차가 장착되어 있다. 1~4번/9~12번 대차는 휠-디스크(Wheel disk) 제동방식, 5~8번 대차는 축-디스크(Axle disk) 제동방식이다. 하나의 대차에는 4개의 제동 디스크가 있으며, 8조의 브레이크 패드가 장착된다.

표 4는 현차시험에 적용된 브레이크 패드의 개요이다. 패드의 구분은 ① 리지드 브레이크 패드와 ② 플렉서블 브레이크 패드, 그리고 ③ 유기계 브레이크 패드이었다.

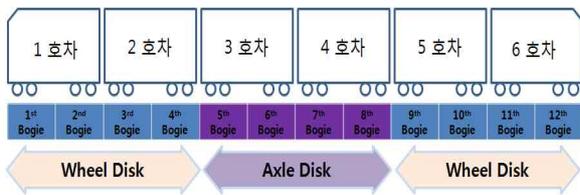


그림 12. TTX 대차구성 개략도

표 4. TTX 현차 적용시험 개요

제품 구분	분석 항목
리지드 브레이크 패드	마모량/편마모량, 디스크 공격성
플렉서블 브레이크 패드	
유기계 패드	

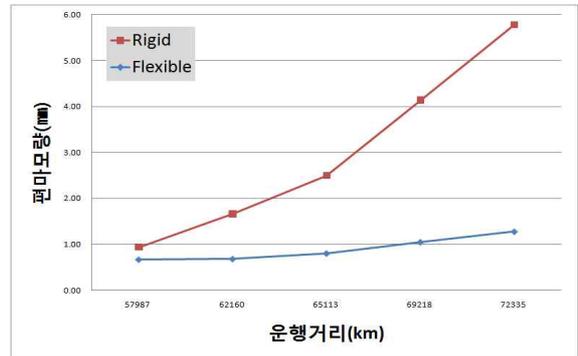


그림 14. 리지드/플렉서블 브레이크 패드 편마모량

3.4.1 마모량/편마모량 측정 및 결과

그림 13은 리지드 브레이크 패드와 플렉서블 브레이크 패드의 마모량 그래프이다. 측정 운행거리는 초기 57,987km에서 72,335km까지 총 14,348km였다. 최종마모량은 리지드가 5.66mm, 플렉서블이 5.94mm로 동등했다.

그림 14는 그림 13의 시험품에 대한 편마모량 측정 결과다. 리지드의 편마모량은 5.78mm인 반면, 플렉서블은 1.28mm로 리지드 브레이크 패드가 약 4.5배 정도 높은 편마모량을 보였다. 이는 다른 시험 결과와 같이, 플렉서블 브레이크 패드의 열안정성을 보여주는 것이다.

그림 15는 유기계 브레이크 패드와 플렉서블 브레이크 패드의 마모량 비교 그래프이다. 측정 운행거리는 73,304km에서 86,325km까지, 총 13,021km였다. 유기계는 13.43mm가 마모된 반면, 플렉서블의 경우 5.43mm로 40% 수준이었다. 플렉서블 브레이크 패드의 수명이 유기계 브레이크 패드에 비해 두 배 이상일 것으로 예상된다.

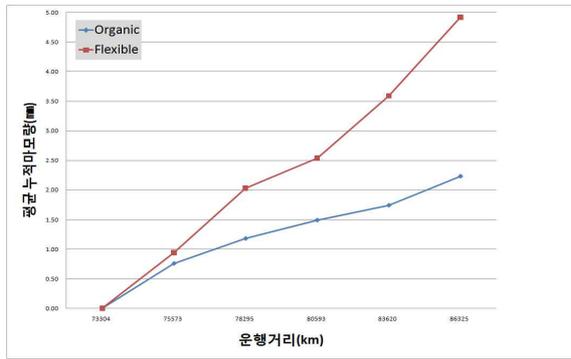


그림15. 플레서블/유기계 브레이크 패드 마모량



그림16. 리지드/플레서블 브레이크 패드 장착 축-디스크; (a) 리지드, (b) 플레서블

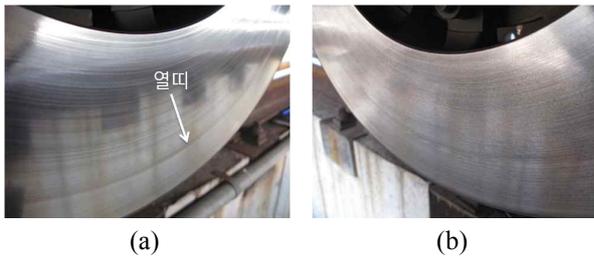


그림17. 플레서블/유기계 패드 장착 축-디스크; (a) 유기계, (b) 플레서블

3.4.2 디스크 공격성 평가

디스크 공격성은 정량적 분석이 힘들어 육안검사를 통해 실시했다.

그림16은 현차 적용시험 중인 축-디스크이다. 그림 16(a)는 리지드 브레이크 패드가 장착된 디스크이며 많은 크랙이 발생했다. 반면 그림 16(b)는 플레서블 브레이크 패드가 장착된 축-디스크이며 디스크 열화없이 안정적인 마찰면을 보여, 플레서블 브레이크 패드의 열안정성을 입증한다.

그림17은 유기계 브레이크 패드와 플레서블 브레이크 패드를 장착/시험했던 디스크이다. 유기계 브레이크 패드를 장착했던 디스크의 경우에는 그

림18(a)와 같이 열띠가 발생하였다. 이와 같은 현상은 유기계 브레이크 패드의 낮은 열전도도로 인해 디스크에 많은 열이 전달되면서 발생하는 것으로 보인다. 반면 플레서블 브레이크 패드의 경우, 열띠나 크랙과 같은 디스크 열화없이 균일한 마찰면을 보여 그림17의 비교와 마찬가지로 플레서블 브레이크 패드의 우수한 열적 특성을 보여준다.

4. 결론

본 연구는 플레서블 브레이크 패드의 TTX 적용 가능성을 검증/확보하고자, 제동시 접촉압력 등의 해석 및 실험을 통해 플레서블 브레이크 패드 설계하고 리지드 브레이크 패드와 특성을 비교/평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 리지드 브레이크 패드와 플레서블 브레이크 패드의 압력 분포 해석 결과, 플레서블이 리지드에 비해 상대적으로 높은 열안정성이 예상됐다.

2. 열섬 시험결과, 리지드 브레이크 패드는 600rpm에서 열섬이 발생한 반면 플레서블 브레이크 패드는 전 실험 구간에서 열섬 현상이 발생하지 않아 해석에서 예상됐던 높은 열안정성을 확인했다.

3. Full-scale 제동 시험 중 디스크 온도 측정 결과, 리지드 브레이크 패드의 최고/최저 온도차는 평균 394℃인 반면, 플레서블 브레이크 패드는 178℃로 플레서블 브레이크 패드의 높은 열안정성을 확인했다.

4. 현차 적용시험 중 리지드 브레이크 패드와 플레서블 브레이크 패드의 마모량/편마모량 측정 비교 결과, 마모량은 비슷했으나 편마모량은 리지드 브레이크 패드가 5.78mm인 반면 플레서블 브레이크 패드는 1.28mm로 4.5배 가량 차이가 났다.

5. 현차 적용시험 중 유기계 브레이크 패드와 플레서블 브레이크 패드의 마모량 측정 비교 결과, 유기계 브레이크 패드가 2배 정도 높았다.

6. 현차 적용시험 중 디스크 공격성 분석 결과,

리지드/유기계 브레이크 패드 장착 디스크는 열띠나 크랙과 같은 디스크 열화가 발생한 반면, 플래서블 브레이크 패드 장착 디스크는 안정적인 마찰면 형상을 보였다.

참고문헌

1. 이성호, 김영국, 김석원, 박진배, “고속철도 차량의 제동성능해석 및 검증,” 한국소음진동공학회 2006년 춘계학술대회논문집 pp.982-987, 2006.
2. 길형균, 고태환, 조동현, 한성호, 서승일, “NCM-CV 주철 제동디스크와 다양한 패드의 적합성 평가,” 한국철도학회논문집, 10권, 3호, pp.251-256, 2007.
3. 김석삼, 김재호, 안효준, “고성능 금속마찰재의 트라이볼로지적 특성,” 한국윤활학회지, 14권, 1호, pp.45-53, 1998