플렉서블 타입 소결 브레이크 패드의 적용 연구

김성권 · 김상호 · 권석진 · 이희성[†]

서울과학기술대학교 철도전문대학원

Application of Flexible-Type Sintered Brake Pads

SoungKwon Kim, SangHo Kim, SeokJin Kwon and Hi Sung Lee[†]

Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology

(Received September 14, 2010; Revised December 15, 2010; Accepted December 28, 2010)

Abstract – Metallic sintered brake pads are often applied to mid/high speed train due to their high strength and thermal characteristics. 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 high speed 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 wear rate than rigid brake pad.

Keywords – sintered brake pad(소결 브레이크 패드), rigid pad(리지드 패드), wear(마멸), flexible pad(플렉서블 패드), contact(접촉), hot spot(열점), disk attack(디스크 공격)

1. 서 론

한국의 중/고속철도는 2004년 4월 KTX(Korea Train eXpress) 도입 이후, 꾸준한 연구개발로 200 km/h급 TTX(Tilting Train eXpress), 350 km/h급 KTX-II(산천)에 이르기까지 비약적인 발전이 되었고, 제동분야 역시 성과를 나타내고 있다. 고속철도에서 제동장치는 상시로 사용되며, 비상시에도 필요한 제동거리를 확보해야 하는 안정부품이다. 고속철도의 제동장치는 크게 전기제동과 기계제동으로 나뉘어져 있으며 전기제동은 전동기를 발전기로 사용하고 이 때 발생하는 잉여에너지를 다른 열차에 보내는 회생제동과 그 잉여에너지를 차량 내 주저항기에서 열로 발산시켜 제동력을 발생시키는 저항제동으로 구분되며 기계제동은 기계적인 마찰력을 이용하는 제동 방식으로 디스크제동, 휠-디스크제동, 담면제동으로 세분화된다[1]. 두 제동시스템은 속도나 상

황별로 혼합(blending, 블렌딩)하여 사용되나, 비상제동 시에는 기계제동으로만 제동거리를 확보해야 한다.

일반 철도차량의 기계제동 장치에서 유기계 패드를 사용하는 반면 고강도, 내열균열 특성이 요구되는 고속철도는 금속계 소결 패드를 사용한다[2].

금속계 소결 패드는 높은 열전도성을 가져 마찰면에서 발생한 열을 마찰재가 흡수방출해 줄으로써 디스크의 열적 부담을 줄여 과도한 열응력, 표면 연화에 의한 소성 유동의 발생 등을 억제하는 것³⁾으로 알려져 있지만 고속철도의 실제 사용조건에서는 브레이크 패드의 마찰면과 제동디스크간의 불균일 접촉으로 인해 국부적으로 과도한 마찰열이 발생하여 디스크나 패드에 열변형이 발생하게 되고, 그로 인해 디스크 균열(crack)과 같은 소성변형이 발생하기도 한다[5-7]. 이러한 현상은 제동디스크와 브레이크 패드의 수명을 감소시켜 추가적인 비용이 발생하게 되고 고속철도 차량의 안전에도 악영향을 줄 수 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 제동

[†]주저자 · 책임저자 : hslee@snut.ac.kr

시 마찰재와 디스크의 안정적인 접촉을 유지할 수 있는 브레이크 패드에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 중 하나가 플렉서블 타입(Flexible Type)의 브레이크 패드이다.

플렉서블 브레이크 패드는 마찰재가 백플레이트(back plate)에 고정된 기존의 리지드(Rigid) 타입의 브레이크 패드와는 달리, 디스크 접촉면의 형상에 따라 마찰재가 유동적으로 변할 수 있도록 고안된 형태의 브레이크 패드를 의미한다.

본 연구는 플렉서블 브레이크 패드의 고속철도 적용 가능성을 목적으로 기존의 브레이크 패드와 플렉서블 패드의 브레이크 패드/디스크 접촉압력 및 온도분포 해석을 실시하고, 플렉서블 브레이크 패드의 제동 시험을 통해 온도분포 변화와 마찰특성 및 내구성 그리고 열특성을 검증하였으며, 끝으로 시험 차량에 장착해 리지드 브레이크 패드와 디스크 공격성/균열 여부, 브레이크 패드의 마모량/면마모등의 특성을 비교하는 연구를 수행했다.

2. 시험방법

2-1. 열변형 및 압력분포 해석

2-1-1. 디스크의 열변형 해석

고속철도 제동시 디스크의 열변형에 의한 코닝각을 확인하고자 열변형 유한요소해석을 수행했다.

Table 1은 해석에 사용된 디스크와 브레이크 패드의 물성치이다. 디스크는 Cr-Mo-V 저합금 내열강을 백플

Table 1. Chemical properties of disk and brake pad for analysis[4]

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 /°C)	1.2	1.2	1.2	-

Fig. 1. Pressure position at braking.

레이트는 탄소강 소재를 적용하였다. 디스크내 온도차는 100°C로 설정하였고, 열변형 해석 모델링과 해석은 MSC Patran/Nastran 2005를 사용했다.

2-1-2. 디스크/브레이크 패드 압력 분포 해석

리지드 타입과 플렉서블 타입의 브레이크 패드를 대상으로 제동시 마찰면과 백플레이트의 압력분포를 유한요소 해석을 수행하였다. 가압량은 일반적인 제동조건인 10 kN으로 설정했다. Fig. 1은 브레이크 패드의 유한요소해석 중 압력이 가해지는 위치를 가시화시킨 것으로 빨간색 부분 이외에는 체결 부품 등으로 인해 직접 압력이 가해지지 않는다.

2-2. 시험

유한요소 해석에서 나타난 플렉서블 브레이크 패드의 접촉특성 효과를 실험적으로 규명하기 위해 열점시험, 제동시험, 현차적용시험을 수행했다.

2-2-1. 열점(Hot Spot)시험

열점시험은 2 bar로 가압한 조건에서 열점이 발생하는 임계속도를 확인하는 방법으로 시험을 진행했다. 각 속도별로 열화상 카메라를 사용해 열점 여부를 확인했으며 Fig. 2는 실험을 위해 제작한 시험편이다. 리지드 타입은 마찰재를 백플레이트에 확산접합법으로 직접 접합한 방식으로 제작하였고, 플렉서블 타입은 백플레이트와 마찰재 사이에 콘 스프링을 적용하여 제동압력

(a) Rigid pad

(b) Flexible pad

Fig. 2. Specimen after hot spot test.

을 큰 스프링이 감당하도록 제작하였다.

2-2-2. 제동시험

제동시험에서는 벤틸레이트(Ventilated) 형태의 주철 디스크의 양 마찰면에 각각 3개의 열전대를 마찰면에서 1 mm 깊이에 장착하여 제동시 디스크의 온도를 측정하였다. 제동압력은 16, 31, 46 kN으로 설정했다.

2-2-3. 현차 적용시험

현차 적용시험은 현재까지 규명된 플렉서블 브레이크 패드의 열안정성 향상 효과를 실증하고자 현차 시험운행중인 TTX에 장착하여 수행되었다. 평가 항목은 마찰재 마모량, 편마모량 및 디스크 열화 여부이며, 기존패드와 비교 평가하였다.

마모량은 시험전후 각 마찰재의 두께변화를 평균하여 평가하였으며, 편마모량은 각 마찰재의 중심부를 측정하여 최대높이와 최소높이의 편차로 평가하였다. 마찰재에 작용하는 제동압력이 불균일할 때는 편마모량이 증가하게 된다.

Fig. 3은 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.

Fig. 3. Schematic of TTX bogies configuration.

Fig. 4. Flexible sintered brake pad for test.

Fig. 5. 3D modeling of flexible brake pad.

Fig. 6. Schematic of test specimen.

2-2-4. 플렉서블 브레이크 패드 제작

제동 시험 및 현차 적용시험을 위해 플렉서블 브레이크 패드를 설계/제작했다. Fig. 4는 본 연구에서 설계/제작된 플렉서블 브레이크 패드로 마찰재가 백플레이트에 스터드(Stud) 형태로 결합되어 있는 형태로 제작하였다.

Fig. 5는 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.

Fig. 6은 리지드 브레이크 패드와 본 연구에서 개발된 플렉서블 브레이크 패드의 개략도이다. 디스크의 외/내경에 따라 마찰재를 배치한 기본적인 형상은 유사하나 마찰재의 개수, 배치 및 크기는 차이가 있다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. 디스크의 열변형 해석 결과

Fig. 7은 디스크의 열변형 해석 결과로 최외각의 변형량이 가장 많은 것으로 나타났다. 또한 Table 2는

Fig. 7. Result of heat strain analysis.

Table 2. Cone angle and strain of outside

Disk	Coning Angle(°)	Deflection(μm)
Base	3.94×10^{-4}	2.2

코닝각 계산 결과와 그때 디스크 최외각 변위량 계산치다. 100°C의 온도 구배로 발생한 코닝각의 크기는 3.94×10^{-4} 매우 작았고 그에 따른 디스크 최외각 변위량도 2.2 μm로 제동시 열발생으로 인한 디스크 코닝각의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

3-2. 디스크/브레이크 패드 압력 분포 해석

Fig. 8은 리지드 브레이크 패드의 압력 분포 해석 결과다. 가압시 위치에 따라 압력이 집중되어 있으며 양쪽 끝에 있는 마찰재는 압력이 거의 가해지지 않았다.

Fig. 9는 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.

Fig. 10은 플렉서블 브레이크 패드의 압력 분포 해석 결과로 리지드 브레이크 패드에 비해 전체적으로 고른

Fig. 8. Pressure distribution of rigid brake pad.

Fig. 9. Result of strain analysis for back plate.

Fig. 10. Pressure distribution of flexible brake pad.

압력분포를 보이고 있다. 다만 리지드 브레이크 패드와 마찬가지로 양쪽 끝에는 여전히 낮은 압력이 인가됐다.

3-3. 열섬 시험결과

Table 3은 열섬 시험 결과로 리지드 타입은 600 rpm에서 부터 열섬 현상이 발생해 시험을 종료한 반면 플렉서블 타입은 2,100 rpm에서도 열섬 현상이 발생하지 않았다. 열섬시험 결과, 해석시 예상되었던 플렉서블 브레이크 패드의 접촉 안정성을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 열섬시험 열화상 촬영 결과를 나타내었다. 리지드 타입의 촬영 결과로 600 rpm에서 열섬 현상(Fig. 11(a))이 관찰된 반면, 플렉서블 타입의 경우에는 2,100 rpm에서도 디스크 전체에 고른 온도 분포를 보여준다(Fig. 11(b)).

Table 3. Summary of hot spot test results

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

(a) Rigid pad (600rpm)

(b) Flexible pad (2,100rpm)

Fig. 11. Results of thermal imaging for hot spot test.

Fig. 12. Temperature distribution of disk at braking.

3-4. 제동 시험 중 온도측정 결과

Fig. 12는 제동시험 결과로 플렉서블 브레이크 패드의 경우, 최저/최고 온도차가 16 kN의 경우 172°C, 31 kN은 213°C, 46 kN은 148°C로 측정되었으며 평균 온도차가 178°C였다. 반면 리지드 브레이크 패드의 경우, 최저/최고 온도차가 16 kN은 303°C, 31 kN은 433°C, 46 kN은 445°C로 측정되었고 평균 온도차는 394°C로 플렉서블 브레이크 패드의 온도차보다 2배 이상 높았

다. 이는 플렉서블 브레이크 패드는 제동시 디스크 전체 마찰면에 고르게 제동압력이 분포하고 있음을 확인시켜 준다.

3-5. 현차시험 결과

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

Fig. 14는 Fig. 13의 시험품에 대한 편마모량 측정 결과다. 리지드의 편마모량은 5.78 mm인 반면, 플렉서블은 1.28 mm로 리지드 브레이크 패드가 약 4.5배 정도 높은 편마모량을 보였다. 이처럼 브레이크 패드의 편마모량이 적다는 것은 브레이크 패드의 마찰면이 더

Fig. 13. Accumulate wear of brake pad (Field test).

Fig. 14. Accumulate sided wear of brake pad (Field test).

Fig. 15. Brake disk after field test..

스크에 균일하게 접촉되었음을 의미한다. 이는 유한요소해석 결과와는 일치하며, 플렉서블 브레이크 패드가 디스크에 대한 열안정성이 높음을 보여준다.

디스크 공격성은 정량적 분석이 힘들어 육안검사를 통해 실시했다.

Fig. 15는 현차 적용시험 중인 축-디스크이다. Fig. 15(a)는 리지드 브레이크 패드가 장착된 디스크로 마찰면에서 많은 열크랙이 발생했다. 열크랙은 제동시 브레이크 패드가 디스크면에 국부적으로 접촉될 때 발생하며, 이러한 결과는 Fig. 14의 편마모량이 많은 것과 일치하는 시험 결과이다.

반면 Fig. 15(b)는 플렉서블 브레이크 패드가 장착된 축-디스크로 열크랙 없는 안정적인 마찰면을 나타내는데, 이러한 결과는 플렉서블 브레이크 패드가 디스크 마찰면에 균일하게 접촉함에 따라 마찰열의발산이 디스크 전면을 통해 이루어진 결과이며, Fig. 14의 편마모량이 적은 결과와 일치한다.

4. 결 론

본 연구는 플렉서블 브레이크 패드의 고속철도에 적

용가능성을 검증/확보하고자, 제동시 접촉압력 등의 해석 및 실험을 통해 플렉서블 브레이크 패드 설계하고 리지드 브레이크 패드와 특성을 비교/평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 리지드 브레이크 패드와 플렉서블 브레이크 패드의 압력 분포 해석 결과와 열섬시험 결과, 리지드 브레이크 패드는 600 rpm에서 열섬이 발생한 반면 플렉서블 브레이크 패드는 전 실험 구간에서 열섬 현상이 발생하지 않아 해석에서 예상됐던 높은 열안정성을 확인했다.

2. 제동 시험 중 디스크 온도 측정 결과, 리지드 브레이크 패드의 최고/최저 온도차는 평균 394°C인 반면, 플렉서블 브레이크 패드는 178°C로 플렉서블 브레이크 패드의 높은 열안정성을 확인했다.

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

4. 현차 적용시험 중 디스크 공격성 분석 결과, 리지드 브레이크 패드 장착 디스크는 열피나 크랙과 같은 디스크 열화가 발생한 반면, 플렉서블 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*, 제10권, 제3호, pp. 251-256, 2007.
3. 김석삼, 김재호, 안효준, “고성능 금속마찰재의 트라이볼로지적 특성,” *한국윤활학회지*, 제14권, 제1호, pp. 45-53, 1998.
4. Metal Handbook 1 “Properties and selection,” American Society for Metal.
5. 김상호, 이희성, “철도차량용 제동디스크의 트라이볼로지 특성연구,” *한국윤활학회지*, 제23권, 제1호, pp. 19-28, 2007.
6. 김기열, 김상호 외2명, “고속전철용 제동 시스템에 적용되는 마찰재료,” *대한 금속학회 회보*, 제11권, 제2호, pp. 134-143, 1998.
7. 정동윤, 김기열, 조정환, “B4C첨가에 따른 동계 소결 합금 마찰재의 마찰특성 변화에 관한 연구,” 제12권, 제3호, pp. 48-54, 1996.