

제동 디스크 설계를 위한 고려 인자 고찰

Factors Affecting the Design of Brake Disc

김정국*
Kim, Jeongguk

구병춘**
Goo, Byeong-Choon

권성태***
Kwon, Sung-Tae

ABSTRACT

The brake system of railway plays an important role to enhance the speed of train, and the brake disc is one of major components relating to frictional braking. The performance enhancement of brake disc directly affects the braking performance of train. It is required to understand and investigate the factors need to be considered for the development of new brake disc with improved materials and performance. In this study, through the literature reviews of previous study, several factors including thermal crack phenomena, friction coefficient, materials and durability of disc, temperature characteristics, etc., were introduced for the design of improved brake disc. Moreover, based on the review results, the design direction of new brake disc was suggested. Eventually, a new brake disc with improved performance would be developed based on this investigation.

1. 서 론

철도의 고속화는 제동장치의 성능에 직접적으로 관계되는데, 철도의 안전한 운행을 위해서는 기동 및 가속 등의 제어장치와 함께 열차를 안전하고 정확하게 정차시키고, 감속 또는 정지시키는 제동장치의 역할이 중요해지기 때문이다. 철도차량의 고속화가 진행됨에 따라 정위치 정지, 신속성, 승차감 등과 관련된 제동장치의 역할이 더욱 강조되고 있다. 따라서 차량의 안전성과 승차감 향상을 위한 최적의 제동 시스템 제어기술의 확보와 안전성과 내구성을 겸비한 제동시스템의 설계, 제작 및 성능시험, 유지보수 관리 기술개발이 중요하다.

철도차량에 주로 사용되고 있는 제동방식으로는 차륜과 레일사이의 접촉력을 이용한 답면 브레이크(Tread Brake) 및 디스크 브레이크(Disc Brake), 유압실린더에 의한 유체 동력식 브레이크(Hydrokinetic Brake), 가감 저항식 브레이크(Rheostatic Brake), 회생 브레이크(Regenerative Brake), 전자기 브레이크(Magnetic Brake) 및 선형 와전류 브레이크(Linear Eddy Current Brake) 등이 이용되고 있다. 일반적으로 제동장치에 관련된 기술은 시스템 설계 및 통합 기술, 제동장치의 성능해석 및 시험 및 평가기술, 디스크나 패드 등과 같은 재료 관련 요소기술 등으로 분류될 수 있다.

제동장치와 관련한 세계각국의 현재 연구현황을 살펴보면, 열차의 고속화와 함께 제동성능의 향상, 부품의 경량화 그리고 안전성 확보를 위한 제동기술 연구가 행해지고 있으며, 제동성, 신뢰성 및 내구성 등의 특성을 모두 충족시키는 제동시스템과 요소 부품에 대한 설계, 해석 및 신뢰성 있는 시험평가 등 제동과 관련된 제반기술의 확보를 위한 연구가 진행되고 있다.

* 한국철도기술연구원 철도시험인증연구센터, 정희원

E-mail : jkim@krri.re.kr

TEL : (031)460-5518 FAX : (031)460-5539

** 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부, 정희원

*** 한국철도기술연구원 철도시험인증연구센터, 정희원

또한, 고속화에 따른 디스크 열부하로 인한 문제점을 해결하기 위해 고속 영역에서 사용될 수 있는 내열변형성, 내마모성 및 내열 균열성이 우수한 재질의 개발과 경량 디스크의 형상개발 등에 대한 연구를 비롯하여, 차륜과 레일간의 점착력을 증대시키는 증점착 기술연구, 고성능 차륜활주제어 장치 개발, 비점착 레일 제동의 적용연구가 진행되고 있다. 제동력 향상을 위해 알루미늄 합금 복합재료와 카본 복합재 그리고 세라믹 등을 이용한 신소재 디스크의 개발에 관한 연구도 지속되고 있다.

제동장치와 관련한 국내의 연구현황을 보면, 다양한 방면에서 심도있는 연구를 거듭하고 있지만, 위에서 언급한 선진국의 현황과 비교할 때 미흡한 실정이라 볼 수 있다. 또한 제동디스크의 경우, 현재 새마을, 무궁화 열차의 제동 시스템에서 제기되고 있는 제동 디스크의 열크랙 발생 및 진전에 대한 문제는 유지보수, 안전성, 고속화 측면에서 현재 가장 문제가 되고 있는 것 중의 하나이나 국내의 경우 그동안 이 분야에 대한 연구가 매우 미진하였다. 그래서 본 논문에서는 오늘날 국내의 새마을, 무궁화 열차에 사용되는 디스크를 대상으로 하여 열크랙의 생성 및 진전현상을 방지할 수 있는 기술의 개발과 이로 인해 차량의 고속화에 필요한 핵심기술을 확보하기 위한 선행연구로서 최근의 연구결과 및 기술자료를 분석하여 열크랙 방지를 위한 제동 디스크 설계시 고려되어야 할 인자들에 대한 소개를 제공하고자 한다.

2. 본 문

제동디스크의 성능향상은 제동성능에 직접적으로 영향을 미치게 되며, 기존의 재질과 성능을 보강한 제동디스크의 개발을 위해 고려되어야 할 인자들에 대한 이해와 고찰이 요구된다. 본 연구에서는 기존 연구결과의 리뷰를 통해 향상된 성능의 제동 디스크 설계를 위해 열크랙현상, 마찰계수, 디스크의 재질, 마찰재의 재질, 디스크의 내구성, 마찰성능, 온도특성, 마멸량 등과 같은 고려해야 할 인자들에 대해 소개하고 이에 대한 검토를 통하여 제동디스크 설계에 참고정보를 제공하고자 한다.

2.1 제동력 및 점착력

철도차량의 제동장치는 차량의 제동력 이외에 차륜과 레일간의 점착력 등이 고려 되어야 한다. 만약 제동력이 점착력보다 클 경우, 차륜이 구르지 않게 되어 미끄러지는 스키딩(skidding) 현상이 발생하게 되며, 이때 차륜과 레일간은 슬라이딩 마모가 발생하여 표면 찰상과 극심한 마모를 수반하게 된다. 그러므로, 제동력은 점착력을 초과하여서는 안되며, 점착력을 초과하게 되면, 결국 차륜의 레일 접촉면이 평평하게 깎여 나감으로 인해 차량 운전중 차륜에 의한 진동이 발생되어 승차감 저하의 원인이 된다. 그러나, 점착력 만의 관점으로 보면 이러한 미끄러짐 현상이 전혀 없는 것보다는 약간 있는 경우가 제동력이 좋다는 의견도 있다. 일반적으로 차륜에 제동을 가한 상태에서는 차륜과 제륜자 사이의 제동력 B, 차륜답면과 레일간의 점착력 F는 다음과 같다.

$$B = f \times P, \text{ and } F = \mu \times W(kg)$$

여기서 μ : 차륜답면과 레일의 점착계수

W : 제동 차륜상의 중량

f : 제륜자와 차륜의 마찰계수

제동력이 점착력보다 큰 경우 차륜은 회전하지 않고 활주(skid)해서 제동효과를 떨어뜨리고, 또한 차륜답면에 찰상(flat)을 일으킨다. 따라서 제동력은 점착력과 같거나 그 이하가 되어야 한다.

$$f \times P \leq \mu \times W \quad \therefore \frac{P}{W} \leq \frac{\mu}{f}$$

여기서 제륜자 압력 P와 제동 차륜상의 중량 W와의 비율 P/W를 제동률이라고 한다.

일반적으로, 제동률은 제륵자와 차륵과의 마찰계수, 차륵담면과 레일과의 점착계수에 의해 결정되고, 양자 모두 온도, 습도 등에 따라 변화하므로 일정하지 않다. 제동률은 전기기관차에서 약 60~85%, 전동차에서는 약 80~95%, 부수차에서는 약 90% 정도이다.

2.2 마찰재 및 마찰계수

라이닝은 합성재 또는 그 이상의 성능을 갖는 재질로 제작되어야 하고 마찰계수는 UIC 541-3(Brakes-Disc Brakes and Disc Brake Pads General Conditions Governing Bench Tests)을 만족하여야 한다. 일반적인 마찰재와 마찰계수에 관한 주요 사항은 표1에서 나타난 바와 같다.

표1. UIC 541-3의 주요내용

항목	주요 내용
평균마찰계수	라이닝 : 0.35 ± 허용범위
상대재 디스크 온도	375°C 이하
압부력	4~11 kN (마찰면적 200 cm ² 일 때)
제동디스크와 차륵의 초기 시험온도	20~220°C
온도측정위치	마찰표면으로부터 1 mm 깊이에서 6곳 이상
마찰재 초기마찰면	마찰면의 70%까지 갈아맞춤 실시
라이닝과 디스크 사이의 간격	제동완해위치에서 3~4 mm
습기조건시험	25l/hr의 물을 뿌리면서 시험, 습기조건에서의 마찰계수는 건조시 마찰계수에서 ±15%이하로 변해야 함
제동거리 측정	S ₁ : 제동작용순간부터 정지까지의 거리측정 S ₂ : 압부력이 95%되는 순간부터 정지까지의 거리 측정
마모량 기준	전체시험에 대해 2.0 cm ³ /kWh (200 km/h용 라이닝)

일반적으로 마찰재는 고온에서 충분한 강도, 높은 비열 및 열전도성, 마찰계수의 안전성 및 내마모성 등의 특성이 요구된다. 본 논문에서는 제동디스크의 열현상에 관한 분야를 주로 취급하므로 마찰재에 관한 자세한 내용은 피하기로 한다.

2.3 마찰 디스크 재료

자동차나 중저속 철도차량용 마찰디스크는 주로 회주철이 이용되고 있으며, 일부에서 구상흑연 주철 등을 사용하고 있다. 고속전철의 경우 단조된 내열강이나 탄소강에 주철을 클래딩(cladding)한 것 등이 사용되는데, 이는 패드와 같이 마찰 접촉시 발생하는 마찰열에 견디도록 하기 위함이다.

현재 국내에서 개발되어 시험운행중인 틸팅차량용 디스크에는 주철재를 이용하는데 이는 주철재 내부에 존재하는 미끄럼 특성을 잘 나타내는 카본의 존재 때문이다. 비록 내열강보다 열적 특성은 떨어지나 소재 내부에 존재하는 카본으로 인해 마찰계수의 안정성 측면에서 가장 우수한 디스크 소재가 주철재 디스크이다. 또한 제조 공정이 복잡한 형상의 디스크 제작을 용이하게 하며 디스크 내부 통기성 확보를 위하여 다양한 형태의 브리지를 만들 수 있다는 장점이 있다. 문제점으로는 마찰 표면의 헤어크랙의 발생과 마모현상을 들 수 있는데, 이는 주로 패드와 디스크의 마찰 접촉시 국부적인 핫스팟(hot spot)에 의하여 발생된 조직변태로 부피 변화가 수반되고, 이것이 결국 내부 응력의 변화를 야기시켜 크랙으로 진전하게 된다. 발생된 헤어크랙은 점차 발전되어 궁극적으로 디스크 전체의 균열을 일으키는데, 주철재 디스크의 경우 일반 강재나 단조 강재에 비해 이러한 현상이 자주 나타난다고 보고되었다.

한편 마찰시 발생하는 마찰열은 디스크나 패드에서 발산을 하여야 하는데, 특히 디스크에서 빠른 열 발산이 가능하도록 하는 것이 바람직하다. 디스크의 냉각핀을 삽입한다든지 냉각핀의 구조를 적절하게 조절하는 연구가 진행되고 있으며, 단조강으로 제작된 경우는 디스크의 냉각핀 사용이 불가능함으로 내열성이 우수한 강재의 사용이 요구된다. 국내의 객차용 브레이크 디스크에 대한 규정에서는 디스크가 지녀야할 조건은 다음으로 요약되고 있다. 디스크는 품질이 균일하고 사용상 유해한 블로우 홀 흠 등의 결함이 없어야 하며, 디스크는 제동시 발생하는 마찰열을 신속히 소산 시킬 수 있고 제동시 발생하는 마찰에 의한 재료의 균열을 방지할 수 있는 구조로 되어야 한다.

2.4 제동디스크 재질 및 실용 현황

고속 차량에 이용되는 제동디스크는 열크랙의 발생 및 진전에 의한 파괴로 인해 디스크의 수명이 단축되는 현상이 보고되고 있다. 일반적으로 페라이트 주철이 이용되지만 고온강도의 증진을 위해 Ni-Cr-Mo 저합금 주철이 이용되기도 한다. 강도향상을 목적으로 내열강이 이용되기도 하지만 소성변형의 증가로 인해 마찰재의 편마모 현상이 증대되는 단점을 지니기도 한다.

새마을호 열차의 경우 디스크 재료는 강도, 열손상에 대한 저항성 등의 이유로 회주철이 사용되었으나 구미에서는 일본과 같은 모양의 주철이 디스크의 주류를 이루고 있다. 일본의 일부 신간선에서는 강계 디스크도 사용되고 있다. 강계 디스크 중에서도 단조강 디스크는 냉각효과에 영향을 미치는 방열면적에 따라 fin을 부착한다.

영국 및 일본을 중심으로 디스크의 균열문제를 해결하기 위해 CV흑연주철(Compacted Vermicular Graphite Iron)이 실용화되고 있으며 영국 국철에서는 고속열차에서 CV흑연주철 디스크를 채용하여 약 30만 km 주행시험하고 균열발생이 일어나지 않음을 확인한 바 있다. 프랑스의 TGV에서는 현재 일부 주철 디스크가 이용되고 있으며, 우리나라의 KTX에는 단조강 디스크가 채용되어 사용중에 있다. 독일과 일본 등에서는 경량화와 내마모성이 좋은 알루미늄 디스크를 개발중에 있다.

2.5 마찰열에 의한 열크랙 현상

디스크 브레이크는 고속의 미끄럼 마찰로 인해 급격한 온도상승이 유발되며 특히 반복적인 급제동시 마찰 표면과 외부에 발생하는 온도차에 의해 수축과 팽창이 반복되어 핫스팟(hot spot)과 같은 국부적 고온부의 형성으로 인해 주행중 열적 저더(thermal judder)라 불리는 심각한 진동을 유발하며 디스크 표면에 미세한 크랙과 열변형을 발생시키게 된다. 디스크의 제동 성능에 직접적인 영향을 주는 주요인자 중의 하나인 마찰열은 미끄럼 마찰면의 온도상승을 가져오고, 마찰면의 접촉상태에 따라서 접촉면에 마찰온도가 집중되면서 열팽창이 국부적으로 진행되어 스파이크 압력이 발생하고 궁극적으로는 마멸로 이어지는 열탄성 마멸이 발생된다. 이러한 디스크 마찰표면에서 발생하는 마찰열 크랙이나 마멸문제와 관련된 진동이나 소음 등의 문제를 해결하기 위한 기초연구가 필요한 실정이다.

마찰제동 디스크가 가혹한 하중조건 하에서 미끄러진 마찰을 할 경우 국부적인 고온이 발생하고 결과적으로 접촉 표면 근처에 초과적인 마찰열을 생성, 열 생성과 기계적 하중의 복합 작용으로 인해 브레이크 표면에는 수많은 균열이 자주 발견됨이 보고되었고, 운동 마찰열을 고려한 디스크 접촉표면에서의 열 균열을 해석한 결과 열균열 발생 부위는 접촉 표면의 끝단을 따라 이동하고 이는 마찰의 증가로 인해 디스크의 열균열이 지배됨이 확인 되었다.

2.6 열크랙 현상의 연구동향 및 연구방향

제동디스크 열균열 현상 및 그 방지기술은 자동차용 제동장치를 중심으로 연구가 시작되어 최근에는 철도분야에서도 다양한 연구결과가 발표되고 있다. 우선, 디스크 열균열 현상을 규명하기 위해 유한요소법을 통한 고속 전철용 브레이크 디스크의 열탄성 동적거동 해석, 철도 차량용 제동디스크의 피로수명 평가, 철도 차량용 Ventilated brake disk 열화평가, FFT-FEM을 이용한 자동차용 디스크 브레이크 열 해석, 고속전철용 세라믹 코팅 제동디스크 마찰특성 연구 및 철도차량용 제동 디스크-라이닝의 열유동 해석 등의 연구가 진행되었으며, 디스크 소재개발 및 설계기술 분야에서는 내열균열성이 우수한 브레

이크 디스크용 편상흑연주철 개발 및 내열 균열성을 향상시킨 철도차량용 브레이크 디스크 개발에 관한 연구가 진행된 바 있다.

일본의 경우 높은 열 피로강도를 지닌 트럭용 디스크 브레이크 로터 개발 및 브레이크 디스크의 파괴 해석 및 소재 개량에 관한 연구 결과가 있었고, 미국에서는 디스크 브레이크 소재의 실험실 시험을 통한 마모 입자 특성 및 형태 규명, 디스크 브레이크 소재의 기존품 및 개발품에 대한 마찰 실험을 통한 마모입자 발생 특성 연구, Ford 자동차의 디스크 브레이크에서 패드/캘리퍼 강성, 패드 두께 및 패드 길이가 열적 불안정성에 미치는 영향 연구, 디스크 브레이크에서의 열 균열 연구가 수행되었다.

제동디스크와 관련된 특허로는 철도차량의 차륜제동장치, 반력식 디스크 브레이크 등의 제동디스크 형상 및 체결방법에 관한 내용과 차량의 제동 작동기능 균일, 제동 작동성능 향상 등을 위해 디스크 플레이트 산화막 제거구조 등 디스크 재료에 관한 특허, 그리고 제동디스크의 성능을 개선하기 위해 제동디스크 표면 온도 등을 정하는 등 제동디스크 시험방법에 관한 내용의 특허들이 출원되고 있다. 또한 제동디스크와 더불어 철도차량용 소결 합금재 제동 마찰재 소재 개발, 제동 마찰재 교환 시기 인지 방법 등 마찰재에 관한 특허들이 출원되고 있다.

3. 결론 및 향후 연구방향

본 논문에서는 오늘날 국내의 새마을, 무궁화 열차에 사용되는 디스크에서 주로 발생되고 있는 열크랙의 생성 및 진전현상을 방지할 수 있는 기술의 개발과 이로 인해 차량의 고속화에 필요한 핵심기술을 확보하기 위한 선행연구로서 최근의 연구결과 및 기술자료를 분석하여 열크랙 방지를 위한 제동 디스크 설계시 고려되어야 할 인자들에 대해 소개 되었다. 내열성이 큰 디스크의 개발은 재료, 열피로, 마찰재와 디스크의 접촉 등 여러 문제가 결합된 고난도의 기술을 요구하며, 이로 인해 고려되어야 할 인자들은 열크랙 현상의 규명 및 파괴 메카니즘 확인, 마찰계수, 디스크의 재질, 마찰재의 재질, 디스크의 내구성, 마찰성능, 온도특성, 마멸량 등의 인자들을 들 수 있었고 이들에 대한 기초 자료가 제공되었다.

향후 디스크 개발을 위한 연구를 위해서는 우선 바람직한 디스크 재료의 조성을 선택하여 실험실적 규모의 다양한 실험이 요구되는데, 이를 위해서는 적외선 카메라 또는 다양한 비파괴 평가 기술을 이용한 열크랙의 감지 및 모니터링, 실험적인 열크랙 현상의 규명 등에 대한 연구가 필요하며, 디스크 재질의 선택에 있어서는 기존의 디스크 재질에 Thermal Spray Coating 등의 기술을 이용한 표면을 변화(Surface Modification)시켜 마찰력을 개선시키는 연구 등도 필요하다.

참고문헌

1. 제동시스템 개발 연구보고서(2002년), 철도청.
2. 제동장치 실용화 기술개발 연구보고서(2003년), 철도청.
3. 제동시스템 실용기술개발 보고서(2005년), 건설교통부.
4. 철도기술백서(2002년), 철도청/한국철도기술연구원.
5. 김종겸, 박창욱, 전기철도공학, 웅보출판사.
6. UIC 541-3(Brakes-Disc Brakes and Disc Brake Pads General Conditions Governing Bench Tests), 2004.
7. 객차용 브레이크 디스크(철도 2240-2407라), 한국철도공사
8. 박경식, 강성웅, 조정환, 이희성 (2005), 텀팅차량용 제동 디스크의 트라이볼로지 특성 연구, 한국철도학회 논문집.
9. 김청균, 조승현, 1998, “고속 전철에서 디스크 브레이크의 열거동에 관한 유한요소해석”, 한국윤활학회지, Vol. 14, No. 1, pp. 28-36.

10. 이일권, 김청균, 1999, “고속용 디스크 브레이크의 열탄성 마멸거동에 관한 유한요소해석”, 한국윤활학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 291-296.
11. 김청균, 조승현, 2000, “고속전철용 디스크-패드 브레이크의 동적거동 특성에 관한 유한요소 해석”, 한국윤활학회지, Vol. 16, No. 2, pp. 99-105.
12. S.S. Kim et al., 1995, "An Analysis on Surface Cracking Due to Thermomechanical Loading," 한국윤활학회지, Vol. 11, No. 5, pp. 172-176.
13. 석창성 外, 2006, “철도 차량용 제동디스크의 피로수명평가”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 373-374.
14. 위우택 外, 2006, “철도 차량용 Ventilated brake disk의 열화평가”, 한국정밀공학회 설계 및 재료 부문 추계학술대회논문집, pp. 93-96.
15. 최지훈 外, 2001, “FFT-FEM을 이용한 자동차용 디스크 브레이크의 열 해석”, 대한기계학회논문집 A권, Vol. 25, No. 8, pp. 1253-1260.
16. 강부병 外, 1998, “고속전철용 세라믹 코팅 제동디스크의 마찰특성 연구”, 대한기계학회논문집 A권, Vol. 22, No. 5, pp. 821-833.
17. 남성원, 조장형, 1999, “철도차량용 제동 디스크-라이닝의 열유동 해석”, 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 93-98.
18. 이규홍, 2003, “내열균열성이 우수한 브레이크 디스크용 편상흑연주철” 특허출원번호 10-2003-0047249.
19. 최학희, 1998, “철도차량용 브레이크디스크”, 특허출원번호 10-1998-0063100.
20. Junichiro Yamabe et al., 2002, "Development of disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength", JSAE Review, Vol. 23, pp. 105-112.
21. Haruo Sakamoto et al., 2005, "Fracture Analysis and Material Improvement of Brake Discs", JSME International Journal Series A, Vol. 48, No. 4, pp. 458-464.
22. Mohsen Mosleh et al., 2004, "Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials", Wear, Vol. 256, pp. 1128-1134.
23. Peter J. Blau et al., 2003, "Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials", Wear, Vol. 255, pp. 1261-1269.
24. Dale L. Hartsock, James W. Fash, 2000, "Effect of Pad/Caliper Stiffness, Pad Thickness, and Pad Length on Thermoelastic Instability in Disk Brakes", Journal of Tribology, Vol. 122, pp. 511-518.
25. Thomas J. Mackin et al., 2000, "Thermal cracking in disc brakes", Engineering Failure Analysis, Vol. 9, pp. 63-76.