

고속전철용 트랙제동 및 와전류제동장치 기술동향

Technology development trend of the track brake and eddy current brake for high speed train

최권희* 장대성** 김철근** 한동인*** 전영욱****

Choi, Kweon-hee, Chang, Dae-sung, Kim, Chul-keun, Han, Dong-in, Jeon, young-wook

ABSTRACT

Most of the train brakes depends on friction between wheels and tracks. This requires braking force reduced in order not to cause wheel slides since the friction decreases as the train speed increases and consequently results in extension of braking distance. The braking system called 'Linear eddy current brake' or simply 'Eddy current brake' is a braking system for making a brake independent from friction, which consists in creating electromagnet by coiling around shoes attached to bogies; having the shoes above the tracks approached to the tracks upon acknowledgement of a braking command; and authorizing braking force that is irrelevant to friction through magnetic repulsion between electromagnet attached to the tracks and train set by the use of the electromagnet's magnet field characteristics. An electromagnetic attraction braking system that consists in pressing pole shoes attached to bogies against the tracks by using electromagnet's attraction force is called 'Electromagnetic track brake' or simply 'Track brake'.

This paper has been prepared in purpose of studying technological tendencies of the eddy current brake and the track brake so that it can be utilized as fundamental data for commissioning Korean high-speed trains with the eddy current brake hereafter.

1. 서론

열차의 제동시스템은 대부분 차륜과 선로 간의 접촉력에 의존하고 있다. 이것은 열차의 속도가 증가하면 접촉력이 감소하기 때문에 차륜의 활주를 발생시키지 않기 위해 제동력을 줄여야 하고, 그 결과 제동거리가 늘어나게 된다. 접촉력에 의존하지 않는 제동시스템을 만들기 위해 대차에 부착된 슈(shoe)에 코일을 감아 전자석을 만든 후, 제동 명령이 인가되면, 레일 상부의 슈가 레일로 접근하고, 전자석의 자기장 성질을 이용하여 레일과 차량에 부착되어 있는 전자석 사이의 자기반발작용(magnetic repulsion)으로 접촉력과 무관하게 제동력을 인가하는 제동방식을 선형와전류제동(linear eddy current brake) 또는 간단하게 와전류제동이라 하며, 전자석의 흡입력(attraction force)을 이용하여 대차에 부착된 폴-슈(pole shoe)를 레일에 밀어붙이는 전자흡착식 제동방식을 전자기레일제동(electromagnetic track brake) 또는 간단하게 레일제동(track brake)이라 한다.

본 논문은 이러한 레일제동 및 와전류제동장치의 기술동향과 향후, 한국형 고속열차의 와전류제동장치 시운전시험의 기초 자료로 활용하기 위해 기술한다.

* (주)로템 기술연구소 선임연구원

** (주)로템 기술연구소 책임연구원

*** (주)로템 기술연구소 수석연구원

**** 유진전기공업(주) 책임연구원

2. 본문

2.1. 제동시스템 연구동향

철도차량은 승객과 화물의 안전수송을 최우선으로 하기 때문에 필요에 따라서 감속 또는 정지시키는 제동장치의 역할은 매우 중요하다. 철도차량의 고속화가 진행됨에 따라 정위치 정지, 신속성, 승차감 등과 관련된 제동장치의 역할이 더욱 강조되고 있다. 따라서 차량의 안전성과 승차감 향상을 위한 최적의 제동시스템 제어기술의 확보와 안전성과 내구성을 겸비한 제동시스템의 설계, 제작 및 성능시험, 유지보수관리 기술개발이 중요하다.

철도차량에 주로 사용되고 있는 제동방식으로는 답면제동(tread brake), 디스크제동(disc brake), 유체동력식제동(hydrokinetic brake), 저항제동(rheostatic brake), 회생제동(regenerative brake), 전자기레일제동(electromagnetic track brake) 및 선형와전류(linear eddy current brake) 등이 있다. 제동시스템에 관련된 기술은 시스템 설계 및 통합 기술, 제동성능 해석 및 시험/평가기술, 재료관련 요소기술 등으로 분류된다.

열차의 고속화와 함께 금후의 제동시스템 연구동향은 제동성능 향상, 부품의 경량화 그리고 안전성 확보를 위한 제동기술연구를 수행하고 있다. 제동성, 신뢰성 및 내구성 등의 특성을 모두 충족시키는 제동시스템과 요소 부품에 대한 설계, 해석 및 신뢰성 있는 시험평가 등 제동과 관련된 제반기술 등이 연주 중에 있다.

일본 철도는 철도종합기술연구소(RTRI)에서 제동장치의 연구개발을 왔으며 500kph급의 고속용 실물 제동시험기(Brake Dynamometer) 보유하고 실험연구를 지속적으로 수행하고 있다. 또한 고속차량용 제동장치를 개발하여 최고속도와 열차밀도를 높이고 높은 감속을 실현하고 있다. 제동시에는 유용한 제동력을 작용하도록 기법과 높은 속도의 제동에도 내구성이 있는 제동 디스크를 개발하고 있다. 자기부상 철도에 대한 상용 브레이크는 전력 회생제동이지만, 실패할 경우 긴급 제동으로 지상의 전기 제동과 차상의 기계 제동의 협조에 의한 '지상·차상 협조 제동'과 차상의 기계 제동에 의한 '차상 단독 제동'의 2단계로 구성되고, 전기 제동은 발전 제동, 코일 단락 제동이 있으며, 차상의 기계 제동은, 공력 제동, 차륜 디스크 제동, 주행로 마찰 제동이 있다.

공력제동(空力制動)은 제동명령이 인가되면 차체상부에 반원 판을 세우는 것으로 공력저항을 증대시켜 제동력을 얻는 것이다. 공력제동장치는 마찰열과 마모가 없기 때문에 신뢰성, 유지관리가 쉽고, 공기저항이 속도의 자승에 비례하여 크므로 고속철도 및 자기부상철도와 같이 고속에서 유효한 제동기술이다. 실제로 지난 2005년 3월, 일본 국철 JR히가시니혼이 개발한 '고속기술'이라는 뜻의 '패스텍(FASTECH)' 열차(신간선 8량)는 세계에서 가장 빠른 360km/h(영업운전속도)의 속도에서 비상제동이 체결되었을 경우에 차체의 14곳에서 반원 판의 공력 판이 솟아나와 4km의 비상제동거리를 갖도록 설계되었다. 이는 종전에 운행하고 있는 신간선이 275km/h에서 비상제동을 체결했을 때의 거리이다.

유럽에서 영국은 BR 철도연구소가 AEA로 개편이후 소규모로 컨설팅에 주력하고, Westinghouse Brakes사가 세계적인 모델인 공기제동의 K형, P4a형의 기술을 보유하였으나 1997년부터 시작된 철도 부품산업의 생산력 집중화로 독일 Knorr-Bremse에 합병되었다. 독일은 DB의 Minden 시험소에 300km/h급 제동시험기 2대 등 실험장비를 보유하고 있으며, 제동시스템의 단위기술로는 BSI, BECORIT, JURID사가 고성능 마찰재를 생산, KNORR가 제동시스템 전문기업으로, KE형 모델로 세계적인 기술로 독점적이다. 프랑스는 SNCF Vitry에 500km/h급의 제동시험기를 독자 개발하여 연구개발 및 품질인증하고 있으며, 사브와브코(SABWABCO), 카본로렌이 고속철도에서 경량철도에 이르기까지 제동시스템 및 부품기술을 확보하고 있다. 사브와브코, 카본로렌은 KTX 고속철도 차량의 제동시스템 및 부품을 대부분 공급하였다.

2.2. 레일제동장치

2.2.1. 레일제동의 개념

전자석의 흡입력(attraction force)을 이용하여 대차에 부착된 폴-슈(pole shoe)를 레일에 밀어 붙이는 전자흡착식 제동방식을 전자기레일제동(electromagnetic track brake) 또는 간단하게 레일 제동(track brake)이라 한다. 열차가 일정한 감속률에 도달하기 위해, 공기제동은 차륜과 레일간의 마찰력과 독립적인 제동설비에 의해 자주 백업되어야 하는데, 레일제동은 이러한 문제점을 극복하기 위해 사용되는 것으로서 다음과 같은 이점이 있다.

- 레일의 점착계수와 무관하게 동작한다.
- 차륜과 레일간의 마찰력을 향상시킨다.
- 제동을 신속하게 가속화시킨다.
- 비상제동 및 상용제동에 적합하다.

몇몇 철도규정(UIC 541-06, UIC 546)에서는 차륜과 레일 간 점착력에 의존하지 않는 비상용 예비제동장치를 요구하거나 권고하고 있다. 이러한 이유 때문에 레일제동은 가장 일반적인 대차장치로 사용되고 있으며, 적용차종은 노면전차(tram car)나 160km/h 이상의 고속차량에 사용되는 것으로서 독일의 ICE1과 ICE2, 일본의 8000계에서 비상제동시에 사용하고 있다.

2.2.2. 레일제동의 구성 및 동작원리

레일제동의 외형 구성은 그림 1과 같으며, 대차에 취부되는 제동마크네트(brake magnetic)는 그림 2와 같이 3가지 방식이 있다. (a)는 160km/h 이상의 고속선로에서 주로 사용하는 방식으로 대차 프레임(bogie frame)에 액추레이터(actuator)를 설치한 high suspension position이고, (b)는 대중교통수단에 적용하기 위해 대차프레임에 제동마크네트를 직접 취부한 middle suspension position이며, (c)는 대중교통수단에 적용하기 위해 제동마크네트를 저널베어링에 설치한 low suspension position로 분류된다.

그리고 마그네트를 만드는 방법은 코일을 사용하여 전기적으로 여자(energization)하는 방식과 영구자석을 사용하는 방법으로 구분된다. 특히 영구자석을 사용하는 레일제동은 주차제동(parking brake)에 사용될 수 있다.

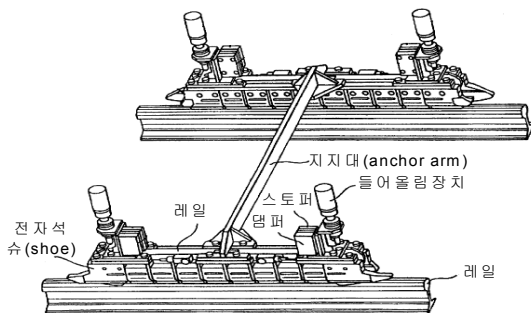
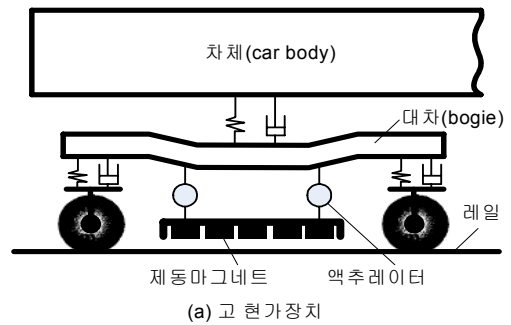
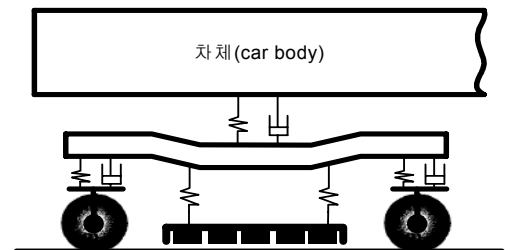


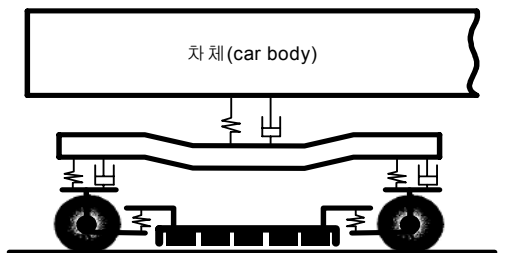
그림 1 레일제동 구성 및 동작



(a) 고 현가장치



(b) 중 현가장치



(c) 저 현가장치

그림 2 레일제동 마그네트 취부 방법

2.3. 와전류제동장치

2.3.1. 와전류제동의 개념

열차의 제동시스템은 대부분 차륜과 선로 간의 접촉력에 의존하고 있다. 이것은 열차의 속도가 증가하면 접촉력이 감소하기 때문에 차륜의 활주를 발생시키지 않기 위해 제동력을 줄여야 하고, 그 결과 제동거리가 늘어나게 된다. 접촉력에 의존하지 않는 제동시스템을 만들기 위해 대차(bogie)에 부착된 슈(shoe)에 코일을 감아 전자석을 만든 후, 제동 명령이 인가되면, 레일 상부의 슈가 레일로 접근(약 6~10mm정도의 공극)하고, 전자석의 자기장 성질을 이용하여 레일과 차량에 부착되어 있는 전자석 사이의 자기반발작용(magnetic repulsion)이나 흡인력(attraction force)으로 접촉력과 무관하게 제동력을 인가하는 제동방식을 선형와전류제동(linear eddy current brake) 또는 간단하게 와전류제동이라 한다.

2.3.2. 와전류제동제동장치의 구성 및 동작원리

신간선의 경우, 초기에는 선로 상부에서 생성된 와전류의 자기반발작용을 이용하여 제동력을 발생시켰으나, 이 방식은 와전류가 레일을 가열시켜 구부러질 정도로 위험하기 때문에 사용되지 못하고, 이후 그림 3과 같이 와전류와 마찰력을 이용한 제동시스템이 이 문제를 해결하게 되었다. 이 장치는 대차의 하부에 자기장을 형성할 수 있도록 N극과 S극을 연속적으로 배열하고, 배터리 전압과 초퍼장치를 이용하여 열차 진행의 반대방향으로 와전류를 생성하여 제동력을 얻고 있다.

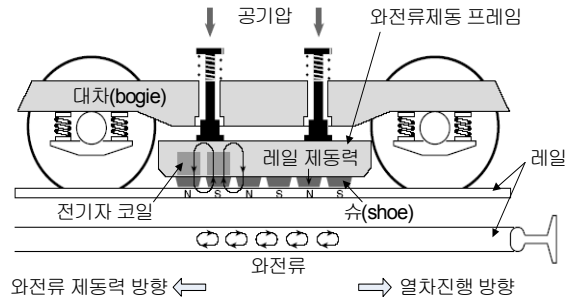


그림 3 와전류제동장치의 구성 및 동작

그림 3에는 상세하게 표시되어 있지 않지만, 슈(shoe)가 부착된 와전류제동 프레임은 물리적으로 링크, 스톱퍼, 실린더 및 댐퍼에 의해 대차와 결합된다. 와전류제동 프레임은 제동완해 상태에서는 실린더에 의해 대차 프레임에 고정되고, 제동체결 상태에서는 하강하여 스톱퍼와 링크에 의해 고정된다. 또 수직 방향의 힘과 수평 방향의 힘은 스톱퍼에 의해 구속되고, 주행방향의 힘, 즉 제동력은 링크에 의해 대차에 전달된다. 그리고 댐퍼는 프레임에 작용하는 진동을 흡수하여, 스톱퍼와 와전류제동 프레임에 미치는 충격을 최소화하고, 시스템의 공진현상을 막는다. 전기적으로는 제동력을 발생하는 전자석과 전자석에 전원을 공급하는 전원공급장치, 제동에 대한 연산과 전원공급장치에 지령을 내리는 와전류제동제어장치, 그리고 전자석 코일과 레일의 공극을 유지하고 제동력과 흡인력을 대차로 전달하는 구조물로 구성된다.

2.3.3. 와전류제동장치 설계시 고려사항

와전류제동은 비접촉제동으로 기계적 마모는 일으키지 않으나, 레일과 상하방향의 흡인력을 동반하게 되므로, 차량의 동적거동(dynamic behavior) 해석뿐만 아니라 유도전류에 의한 레일의 온도 상승 등을 고려해야 한다. 연구결과에 따르면, 동적거동을 억제하는 댐퍼(damper)는 0.1MN/m 수준으로 설계되는 것이 타당하며, 이때 최대 처짐은 5mm 정도, 연직 상방향으로는 3mm의 변위가 발생하는 것으로 보고 되고 있다.

또한 열차 통과시 6~8℃의 레일 온도가 상승하여 레일에 변형을 일으키거나 신호통신용 지상자 등에 영향을 주기도 한다. 고속철도는 기본적으로 레일의 뒤틀립이나 수축에 강한 장대레일을

사용하고 있지만, 여름철 한 낮의 대기온도가 30℃를 넘는 경우에는 레일온도가 대기온도보다 10~20℃ 가량 높게 나타나기 때문에, 레일의 실제온도는 50℃가 넘게 된다. KTX의 경우, 레일온도가 55℃를 넘으면 열차의 속도를 230km/h이하로 낮추고, 60℃를 넘어서면 70km/h이하로 서행운전을 하며, 64℃를 넘을 경우에는 열차운행을 중지하도록 규정되어 있다. 따라서 열차의 운전시각과 여름철 레일 온도 상승에 따른 문제점 등은 여전히 연구 과제로 제시된다.

그리고 와전류제동장치의 핵심부품인 전자석 설계시 고려사항은 다음과 같다.

- 높은 온도상승에 견딜 것.
(ICE3는 초기 100초 동안 230℃까지 온도상승)
- 과열검지 장치를 설치할 것.
- 절연상태가 양호할 것.
- 열전달이 가능한 한 용이할 것
- 차량의 외부에 설치되므로 완벽한 방수구조를 갖추어야 할 것.
- 외부충격에 의해 절연파손이 일어나지 않을 것.
- 잔류자기가 적을 것.

세계적으로 와전류제동장치는 독일의 Knorr-Bremse사와 일본의 도요텐끼사가 꾸준한 연구실적을 보이고 있으며, 우리나라에서도 한국형고속열차의 시제차(7량)에 대차당 최대 제동력은 28kN(상용: 25kN), 흡인력은 최대 140kN(상용: 20kN)으로 설계 제작되어 설치되어 있다.

3. 결론

레일제동과 와전류제동은 차륜과 레일 간 점착력에 의존하지 않기 때문에 향후 제동장치를 대체할 수 있는 장치로 부각되고 있다. 특히 노면전차(tram car)나 160km/h 이상의 고속차량에 적용되는 경향이 많이 나타나고 있다.

참고문헌

- [1] 최경진, 고속철도 제동제어 기술과 연구동향, 한국철도기술, 2005,1
- [2] 日 세계최고 빠른 신칸센 개발, 주행사험, 연합뉴스, 2005.3.10
- [3] 고속철도기술개발사업, 제동시스템 개발, 4차년도 연차보고서, 유진기공산업(주), 2000.10
- [4] Seok-Myeong Jang, Characteristic Analysis of Eddy-Current Brake System Using the Linear Halbach Array, IEEE Trans. on Magn., Vol. 38, pp. 2994-2996, Sep. 2002.
- [5] 新幹線 Technology "0계에서부터 800계 구주신칸선의 고속차량기술", 山海堂, 2004.
- [6] 고속철도연구회 편저, "신칸선 고속철도기술의 스펙테", 山海堂, 2003.10.

URLs

- [1] Knorr-Bremse, <http://www.knorr-bremse.com/>
- [2] 해외고속철도차량 기술동향, <http://www.irail.net>
- [3] Japanese Railway Technology today, <http://www.jrtr.net/technology.html>

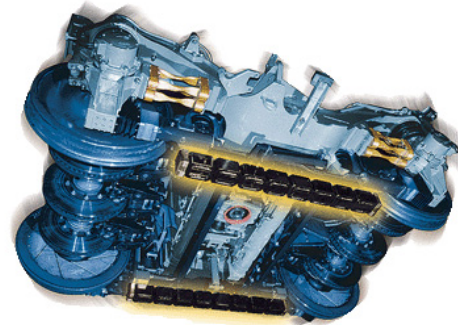
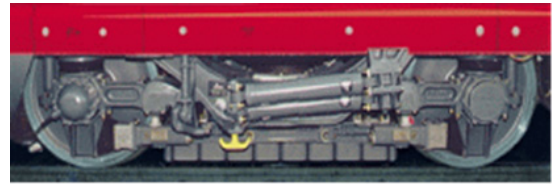


그림 4 와전류제동장치가 부착된 ICE 대차
(자료출처: Knorr-Bremse사)