

고속전철 제동장치 개념설계에 관한 연구

강 도현* · 김 용주* · 곽 수태**

*한국전기연구소 고속전철사업그룹 **유진전기공업(주)

Conceptual Design of Braking System in High-Speed Train

Do Hyun Kang* · Yong Joo Kim* · Soo Tae Kwak**

*KERI High Speed Railways Project Group. **Jujin Electric. Co., LTD.

Abstract

To achieve adequate brake performance in high-speed trains the brake system should :

- offer high reliability and high availability,
- permit deceleration of the train with as little wear as possible, and
- display good control characteristics with, if possible, infinitely variable control of the braking effort.

For these reasons, high-speed train is to be equipped with three different and largely independent brake system :

- a regenerative brake with regenerative feedback in the driven cars,
- a linear eddy-current brake in the nondriven cars and
- a pneumatic disc brake in all cars.

This paper describes the conceptual design of braking system for Korea High Speed Train with the maximum speed of 350km/h

1. 서 론

일반적으로 고속열차의 제동 system의 조건은 높은 신뢰성과 이용성을 가지고, 가능한 마찰부분을 줄이면서 필요한 감속도를 얻고, 또한 제어성이 좋아야 한다.

종래의 열차 제동에는 운동 에너지를 마찰열로 변환하는 마찰제동방식을 널리 상용하였으나 고속화됨에 따라 마찰부분을 최소화하기 위해 전기제동 방식 즉, 회생제동, 와전류 제동이 최신 열차 제동 system에 채택되고 있다. 따라서 본 연구는 이상의 고속열차 제동 system 조건을 만족하면서, 1996년 후반기부터 범부처적인 G7사업으로 수행중인 속도 350km/h급 한국형 고속전철 제동 system의 개념설계를 제시하고자 한다.

2. 열차의 제동방식

2.1 제동 원리

현재 열차에서 사용 중인 제동방식은 다음과 같이 크게 4가지로 분류되는데 이들의 특징은 다음과 같다.

마찰제동 : 제륜자를 차륜 또는 차축에 설치된 디스크에 압착시 이의 마찰력을 이용하여 제동력을 얻는 방식으로 그 제동력의 크기는 차륜과 레일간의 접착계수에 의해 제한이 된다.

회생제동 : 제동시에 견인전동기를 발전기와 같은 역할을 하도록 하여 전기자의 역토오크를 이용하여 제동력을 얻는 방식으로 이 발전된 에너지를 저항기열로 발산하는 방식과 전차선을 통해 변전소 또는 다른 차량에 회기시키는 방식이 있다.

와전류제동 : 레일의 상부에 접촉하지 않고, 6 ~ 7mm의 높이에 설치된 전자석에 전류를 흘릴 때 레일에서 유도되는 와전류에 의해 제동력이 발생한다. 접착계수에 영향을 받지 않고 제동력을 발생하나 레일에 온도상승을 초래한다.

레일제동 : 전자석을 레일의 상부 헤드에 마찰시 발생하는 제동력을 이용하는데 주로 비상시 제동으로 제한되어 있다.

열차의 제동거리와 안전성을 확보하기 위해 이들의 제동방식은 서로 독립적으로 동작되며, 최적의 제동 system을 얻기위해 서로 다른 이들의 제동력을 분담시킨다. 가장 이상적인 제동은 모션에 에너지를 회기시키는 회생 제동이지만 일반적으로 충분한 제동력을 얻지 못하므로 다른 제동방식(마찰제동 혹은 와전류 제동)과 혼합한다.

2.2. 바퀴에 의한 제동력(추진력)

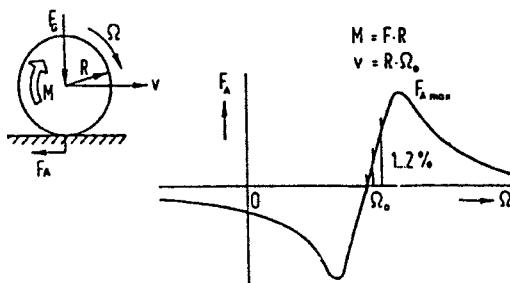


그림 1. 바퀴에서 힘전달 및 미끄럼 현상

마찰제동과 회생제동은 바퀴에서 전달되는데 이들의 힘전달은 다음과 같다. 그림 1과 같이 축중 F_G 가 작용하고 회전속도 Ω 로 바퀴가 회전할 때 추진력은 F_A 이고 회전 모멘트는 M 이다.

이 경우 열차의 속도는 v 로 운전하고 있는데 바퀴에서 슬립은 다음과 같다.

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad \dots \dots \dots (1)$$

최대 추진력 F_{Amax} 는 일반 철도 차량관련 선로에서는 μ 이 2~3%일 때 발생한다. 차량이 운행시 항상 미끄럼 현상 즉 S 를 가지고 있으며, F_{Amax} 이상 힘이 전달되지 않는다. 즉 최대 전달가능한 추진력은 다음 식(2)과 같이 된다.

$$F_{Amax} = \mu \cdot F_G \quad \dots \dots \dots (2)$$

물론 점착계수 μ 는 rail의 표면 조건, 형상에 의해서 결정된다.

이상의 경우는 제동시도 같은 개념으로 제동력이 전달된다.

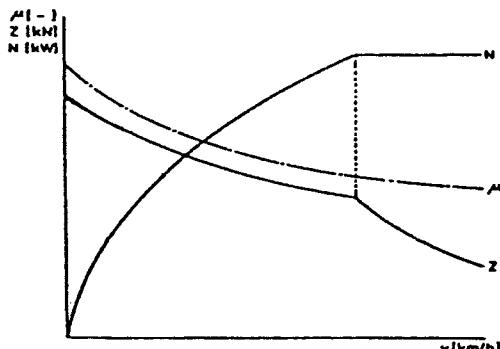


그림 2. 점착계수 μ , 견인력(제동력) Z , 출력특성 N

그림 2에서 점착계수, 차량에서 요구되는 견인력(제동력) 및 출력특성을 나타내고 있는데 열차의 가감속 조건에 의해서 결정된다. 운행 특성 결정 시 저속영역에서는 한계 점착 계수를 이용하고 고속에서는 점착계수의 여유를 가진다. 즉 고속영역에서는 바퀴의 마모 때문에 가능한 적은 slip에서 운전하고 있다.

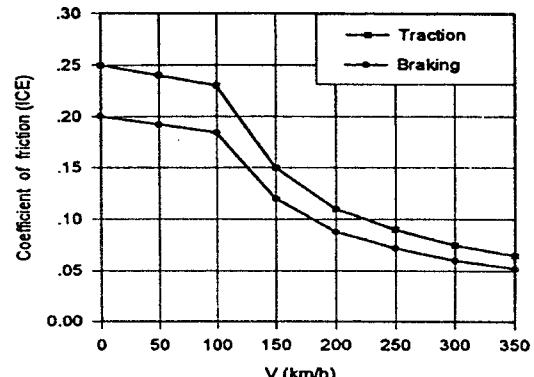


그림 3. ICE1에서의 추진 및 제동시 이용점착 계수

그림 3은 ICE1에서의 추진 및 제동시 이용점착계수를 나타내고 있는데 추진시 점착계수가 크고, 저속에서는 0.2 이상, 350km/h 속도에서 각각 0.07 혹은 0.05의 이용점착계수를 가지고 있다.

2.3 비접촉 제동(와전류 제동)

레일제동은 접촉식으로 주로 비상제동시 사용하므로 본 연구에서는 고려않고, 비접촉 제동(와전류 제동)을 언급한다.

비접촉 제동장치는 그림 4와 같이 차량이 v 의 속도로 운전시 rail에서 유도되는 와전류에 의해서 제동력이 발생하므로 점착계수에 영향을 받지않고, 직접 제동력이 발생하나 열차의 운동에너지는 rail에 열을 발생시키므로 온도상승을 초래한다.

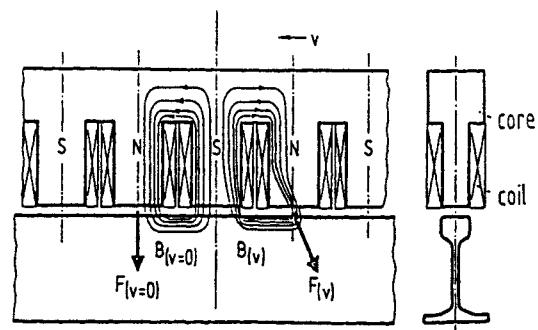


그림 4. 와전류 제동원리

한편 그림 5는 ICE 와 전류 제동장치의 속도에 따른 제동력을 나타내고 있는데 속도범위 50 ~ 100 km/h에서 가장 큰 제동력을 나타내며 제동력은 전자석 여자전류에 의존하며 이때 전자석 무게는 약 250 kg이다. 개념설계시 설계의 여유를 고려하여 단위 길이당 제동력을 7[kN/m]로 산정한다.

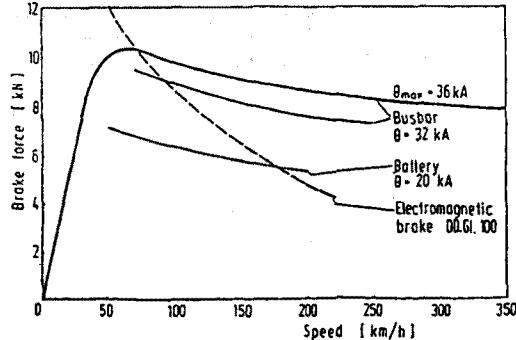


그림 5. 와전류 제동장치의 속도-제동력 특성

3. 제동 System 개념설계

제동 System 설계시 주어진 사양은 다음 표 1과 같다.

표 1. 주어진 고속전철 사양

사 양	
최고속도	350 km/h
차량 중량	770 ton
축중	17 ton
동력 방식	동력 집중식
전동기 형식	유도전동기
전동기 수	12개

3.1 주행저항에 의한 제동력

주행저항은 차량의 무게, 형상, 속도 등에 영향을 받는데 TGV-Korea의 경우 다음 식 (3)과 같이 주어진다.

$$R = 462 + 6.26v + 0.0856v^2[\text{daN}] \quad \dots \quad (3)$$

여기서 v의 단위는 km/h이다.

3.2 회생제동 제동력

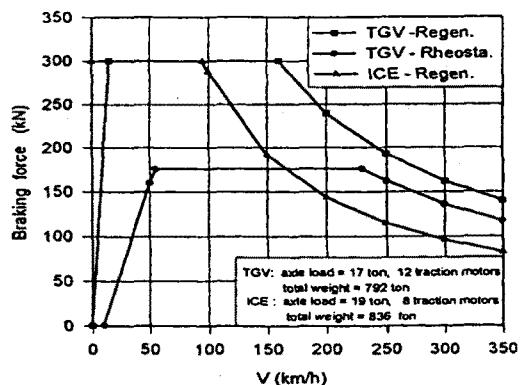


그림 6. ICE 및 회생 제동력

그림 6은 현재 운행 중인 동력집중식 고속전철의 회생제동 특성을 나타내고 있는데 TGV는 동기전동기 ICE는 유도전동기를 사용하고 있다. TGV는 모션 전원에 사고가 발생했을 때 회생에너지 rheostatic에서 소비시켜 제동력을 발생시키고 있다. 이상의 자료를 종합하여 한국형 고속전철(VHSR)에 축중 17 ton, 전동기 12개, ICE 점착계수를 고려할 때 예상되는 회생 제동력은 다음 그림 7과 같다.

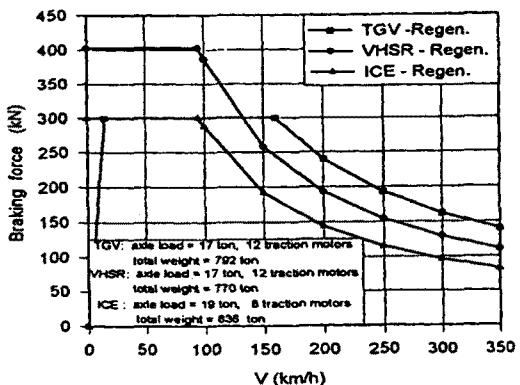


그림 7. 한국형 고속전철(VHSR)의 회생 제동력

3.3 제동력 분담 계산

최신 고속전철에서는 마찰제동을 줄이고, 전기제동을 채택하고 있는데, ICE에서는 회생제동력, 와전류 제동력을 주 제동력으로 채택하고 있으며, disk에 의한 마찰 제동은 비상시 혹은 저속 50km 이하에서 사용하고 있다. 최신 ICE 제동 system을 기본 model로 할 때 제동력 분담은 다음과 같다.

3.3.1 주행저항에 의한 제동력

식 (3)에서 평균 제동력
= 50kN (감속도 = 0.07m/sec^2)

3.3.2 와전류 제동장치에 의한 제동력

- ICE(880ton, 300km/h)의 와전류 제동장치에서 분단 감속도는 0.2m/sec^2 로 가정하면 평균 제동력은 176kN으로 계산 됨.
- VHSR에서 평균 제동력 176kN을 고려하면 감속도 = 0.22m/sec^2
- 와전류 제동장치 전자식 숫자 = 25개

3.3.3 회생 제동력

- 전동기 1대의 회생력 = $17,000\text{kg(축중)} \times 9.8 \times 0.132(\text{평균 점착계수}) = 22\text{kN}$
- 총 회생력 = $12 \times 22\text{kN} = 264\text{kN}$
- 감속도 = 0.34m/sec^2

3.3.4 제동력 분담

이상의 제동력 분담을 고려하면 여러 속도 범위에서 다소 제동력 분담의 차이가 있지만, 전체 제동 system 설계시 개념은 과악할 수 있으며, 요약하면 다음 표 2와 같다.

표 2. 제동 특성

	감 속 도 [m/sec ²]	제 동 력 [kN]	비 고
주행 저항	0.07	50kN	
와전류 제동	0.22	167kN	전자식 25개
회생 제동	0.34	264kN	전동기 12대
감속도 = $0.63[\text{m/sec}^2]$			
제동력 = 481[kN]			
감속시간 = 154[초]			
감속거리 = 7,470[m]			

속도에 따른 제동력 분담크기를 다음 그림 8과 같이 제안한다. 그림 7의 회생제동력을 마찰을 줄이기 위하여 가능한 최대로 이용하고, 고속 범위에서는 와전류 제동장치를 저속의 범위에서는 Disk 제동장치로 제동력을 분담하도록 설계하였다.

4. 결 론

본 연구는 한국형 고속전철 제동 system 개념 설계시 국외 최신 고속전철 제동 system을 비교 검토하여 마찰제동을 줄이고, 전기제동을 주로 이용하는 제동 system의 안을 제시하고 있다.

제동력의 분담은 회생제동력을 가능한 많이 이용하고, 비접촉 제동장치(와전류 제동장치)를 이용하게 설계되었으며, 마찰 제동장치는 50km/h 속도 미만과 비상시 혹은 모선의 고장에 의해 회생제동력이 작동치 않을 때 사용한다.

본 연구에서는 차량의 속도 350[km/h], 중량 770[ton] 일 때, 제동감속도는 $0.63[\text{m/sec}^2]$, 감속시간 154[초], 감속거리 7,470[m]로 제안한다.

앞으로 각 제동 system의 구성방안, 각 주어진 제동력의 구현 등 상세설계에 임하고, 동력 분산식인 경우 제동 system의 장단점을 비교분석 할 필요가 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 고속전철 공단, 고속철도 핸드북, 1993
- [2] W.O.Martisen, ICE High-tech on rails, Hestra-Verlag, 1996
- [3] U. Kroeger, Prinzip, Entwicklung und Konstruktion der liearen Wirbelstrombremsen, ZEV-Glas, Ann. 109(1985) Nr. 9 Septemper.

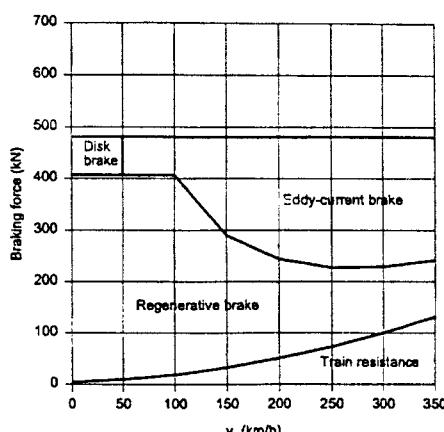


그림 8. 속도에 따른 제동력 분담