

특 집

고속전철 비접촉 와전류 제동장치 개발

강도현 · 김용주

(한국전기연구소 고속전철사업그룹)

1. 서론

일반적으로 고속열차의 제동 system의 조건은 높은 신뢰성과 이용성을 가지고, 가능한 마찰부분을 줄이면서 필요한 감속도를 얻고, 또한 제어성이 좋아야 한다. 이상의 조건을 만족시키기 위하여 회생제동, 와전류 제동(비접촉 제동), 접촉식 제동을 서로 독립적으로 혹은 서로 연관시켜 열차 제동 system에 채택하고 있다.

선진 고속전철의 최신 제동장치를 비교 검토하면 독일 ICE 1 차량은 동력집중식으로 0.5 m/s²의 감속도를 얻고 있으나 1999년 상업운전 예정인 ICE 2.2 차량은 동력분산식으로 설계되어 0.7 m/s²의 감속도를 얻고 있다. ICE 2.2의 제동시스템은 500 kW급 전동기에서 발생하는 회생제동력과 전자석을 이용한 비접촉 제동력을 주된 제동력으로 이용하고 있다.

프랑스 TGV의 경우 회생제동력, 접촉제동력을 사용하고 있으며, 1996년부터 TGV-Nord 선로에서 전자석을 이용한 비접촉 제동장치를 시험하고 있다.

일본 JR-500의 경우 모든 축에서 추진력과 회생제동에 의한 제동력을 전달하고 있으며, 저속에서 단지 회생제동만으로 약 0.75 m/s²의 매우 큰 감속도를 얻고 고속에서도 약 0.45 m/s²의 감속도를 얻고 있다. 이상의 선진 고속전철의 제동 system을 비교검토하면, 1996년 후반기부터 범부처적인 G7사업으로 수행중인 속도 350 km/h급 한국형 고속전철 개발에 비접촉 제동 system이 필요하므로 이의 개념설계를 제시하고자 한다.

ICE 고속전철에서 주로 비접촉 제동장치의 시험, 적용성 여부를 계속적으로 연구해왔으며 실용화에 근접하고 있으므로 본 장에서는 ICE 고속전철의 제동시스템을 검토하고자 한다.

표 1 경부고속 입찰 ICE 고속전철 사양

구 분	사 양
최고 운행 속도	300km/h
차량 중량	836 ton
축중	19 ton
동력방식	동력 집중식
전동기 형식	유도전동기(1250kw×8대)
제동형식	회생제동 + 와전류제동 + 마찰제동

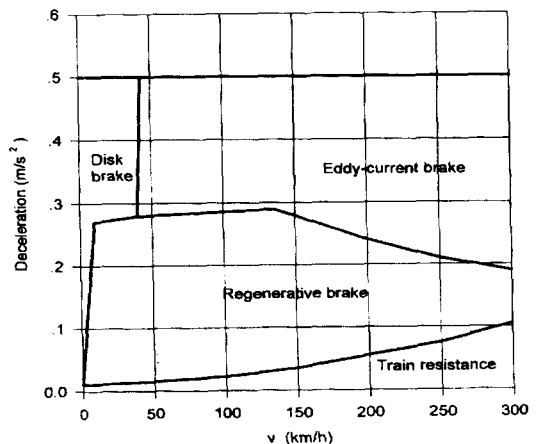


그림 1 ICE1의 제동 분담력

2. ICE 고속전철의 제동방식

표 1은 Siemens가 경부구간 고속전철 구간에 제안한 입찰서 사양으로 와전류 제동장치를 선택사양으로 제시하고 있으며, 그림 1에서 제동 분담력을 검토하면 가능한 회생제동에서 많은 제동력을 분담하고 고속에서 비접촉 와전류 제동을 채택하고자 함을 알 수 있다.

ICE 에서는 새로운 차량으로 ICE 2.2(ICE 3)를 제안하고 있는데 이것의 사양은 다음과 같다.

표 2 ICE 2.2 고속전철 사양

구 분	사 양
최고 운행 속도	330km/h
축중	15 ton
동력방식	동력 분산식
전동기 형식	유도전동기(500kw×16대)
제동형식	회생제동 + 와전류제동 + 마찰제동

ICE 2.2는 동력 분산식으로 축중이 19ton에서 15ton으로 감소되고, 500kW급 전동기를 채택하고 있다.

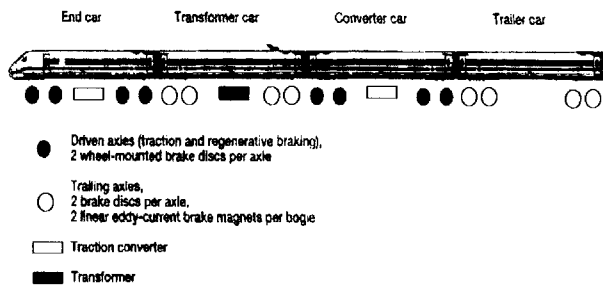


그림 2 ICE 2.2의 차량 형태

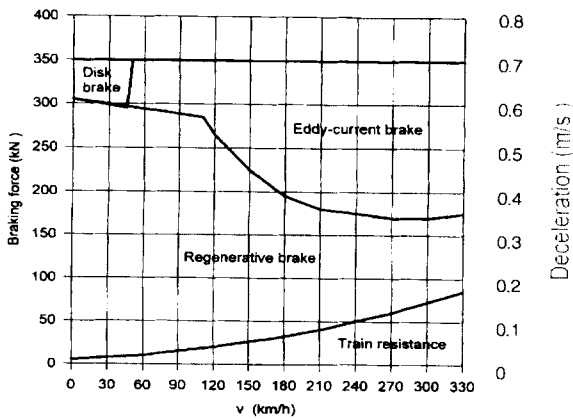
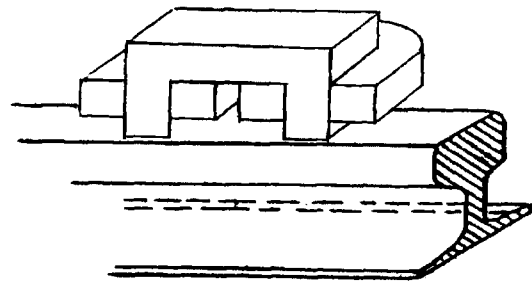


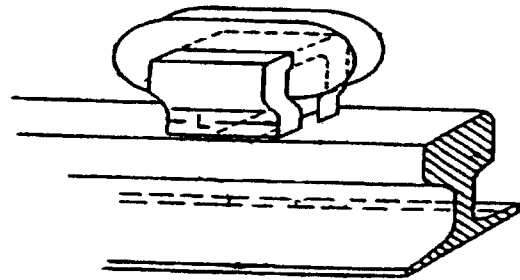
그림 3 ICE2.2의 제동 분담력

그림 2는 ICE 2.2의 차량형태로 전동기로 구동되지 않는 보기에 좌우 2개의 와전류 제동장치를 채택하고 있어서 총 16개의 전자석을 사용하고 있다. 그림 3에서 ICE 2.2의 제동 감속도를 검토하면 ICE 1의 제안 감속도가 0.5 m/s²에 비해서 ICE 2.2는 0.7 m/s² (제동력 350kN)으로 제동능력이 현저히 향상됨을 알 수 있다.

3. 전자석 설계 및 제동력 계산



a) 종축형 전자석



b) 횡축형 전자석

그림 4 전자석의 기본 형태

그림 4는 전자석의 기본형태를 나타내고 있는데 레일은 UIC 규격에 따라 헤드의 폭 74.3 mm, 높이 51 mm로 정했다. 그림 a)와 b)는 종축형 전자석과 횡축형 전자석을 나타내고 있는데 종축형 전자석은 전류의 방향이 진행방향에 대해 직각이고, 횡축형 전자석은 전류의 방향과 열차의 진행방향이 일치한다. 종축형 전자석은 다수의 코일단 부분이 필요하고 횡축형 전자석은 전 후 2개의 코일단 부분이 필요하므로 횡축형 전자석의 코일 손실을 줄일 수 있는 이점이 있다. 그러나 횡축형 전자석이 좁은 rail 폭 위에서 누설을 줄이기 위해 극간의 간격을 유지해야 하므로 종축형 전자석에 비해 적

은 제동력을 발생시킨다. 이상과 같은 이유에서 Knorr Bremse 에서도 종축형 전자석을 채택하고 있다.

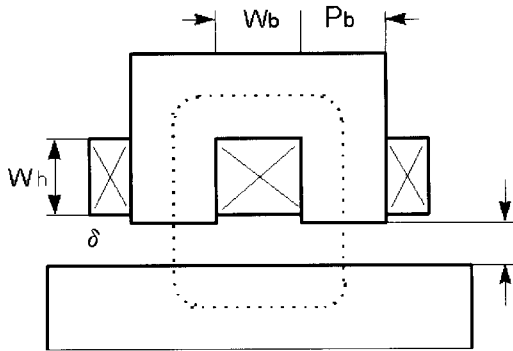


그림 5 전자석 설계 기본 모델

그림 5의 설계 기본 모델에서 공극, 철심, rail에서 필요한 기자력 NI는 암페어의 법칙에서 다음과 같다.

$$\int H \cdot dl = NI \tag{1}$$

여기서 공극의 자기 저항이 크므로 기자력이 공극에 소요된다고 가정하면 자계 H는 다음과 같다.

$$H = \frac{NI}{2\delta} \tag{2}$$

자계 H와 자속밀도 B와의 관계에서

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{NI}{2\delta} \tag{3}$$

얻을 수 있다.

따라서 필요기자력 NI는 식 (4)와 같이 주어진다.

$$NI = k \frac{2\delta B}{\mu_0} \tag{4}$$

여기서 k는 철심과 rail에서 필요한 기자력과 누설을 고려한 설계상수로 약 2정도 값을 취하고, 철의 포화를 고려하여 자속밀도 B를 약 1.5(T) 정도 값을 정하고, 공극길이 $\delta = 7$ mm로 하면 기자력 NI는 약 33,600(AT)이 된다.

이 경우 필요한 코일 창의 면적은 다음과 같다.

$$W_b W_h = \frac{NI}{J(\text{전류밀도}) \times \text{점적율}} \tag{5}$$

전류밀도 $J = 8.57 \text{ A/mm}^2$, 점적율을 0.8로 정하면, 코일 창의 면적은 $4,900 \text{ mm}^2$ 이 되며 $W_b = 35 \text{ mm}$ 로 정하면 $W_h = 140 \text{ mm}$ 가 된다.

전자석의 자극을 그림 6과 같이 6개로 정할 경우 한개의 자석길이는 약 180 mm로 제동장치의 길이는 1,080 mm이나 기계적인 부착여유를 고려하여 전체 제동장치 길이는 1,190 mm로 설계하였다.

또한 한 개의 자석길이가 180 mm인 경우 pole 폭 $P_b = 72.5 \text{ mm}$ 로 정하였다. 전자석의 높이는 $W_h + P_b$ 로 표시되나, 본 모델에서는 210 mm로 정하였다. 전자석의 폭은 coil의 폭 35 mm와 철심의 폭 100 mm를 고려하여 135 mm로 선정했다. 이때 전자석 무게는 약 250 kg이다.

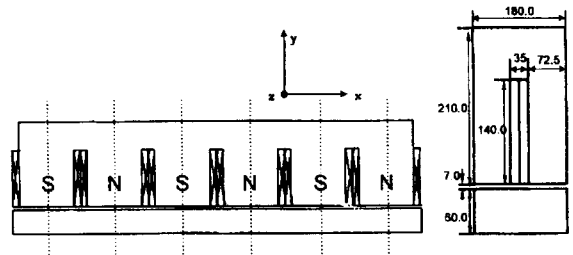
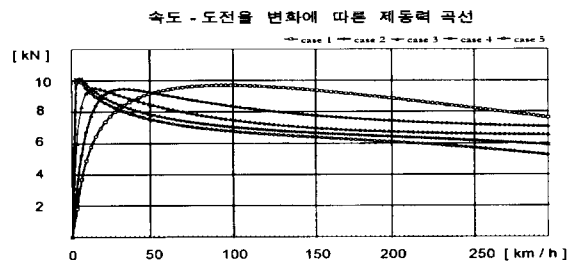
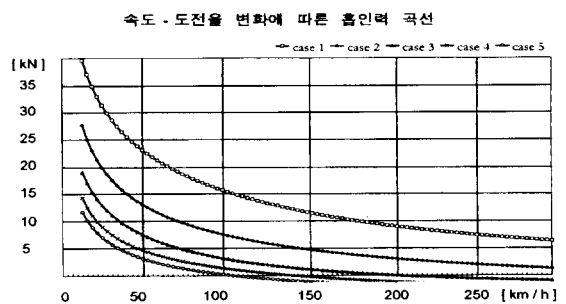


그림 6 외전류 제동장치의 개념설계 치수

그림 6의 외전류 제동장치의 기본설계 치수는 앞으로 최적화 설계시 치수가 변경될 것이다. 전자석과 rail의 재료는 일



(a) 제동력 특성



(b) 흡인력 특성

그림 7 ST37의 자기포화특성 곡선

반강판 ST37 을 사용하였고 이의 자기포화 특성은 그림 7과 같다.

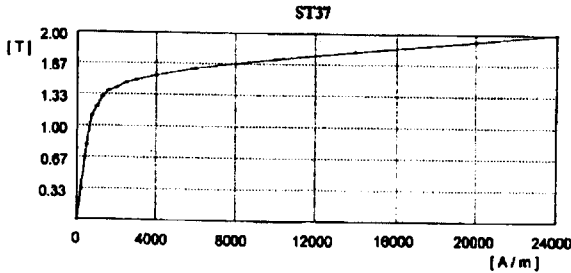


그림 8 속도 변화에 따른 제동력, 흡인력 특성

그림 8에서는 전자석의 기자력을 33,600A, 공극의 길이 7mm, 레일의 도전율을 다르게 주고, 속도변화에 따른 제동력과 전자석과 레일의 흡인력 변화를 유한요소 해석법으로 계산한 결과이다. 해석범위는 정지상태에서 시속 300 km까지를 검토하였으며, 2차원 유한요소법으로 제동특성을 해석하였다. Z방향 레일의 유효폭을 75mm로 하였으며, 제동력은 Maxwell 응력법을 이용하여 계산하였다. 레일의 도전율은 온도와 선로 상태에 따라 변하므로 다음과 같이 5가지 경우로 설정하였다.

- case 1 : 레일의 도전율 = $1.57 \times 10^6 \Omega/m$
- ◇ case 2 : 레일의 도전율 = $3.92 \times 10^6 \Omega/m$
- × case 3 : 레일의 도전율 = $7.83 \times 10^6 \Omega/m$
- △ case 4 : 레일의 도전율 = $1.17 \times 10^7 \Omega/m$
- case 5 : 레일의 도전율 = $1.60 \times 10^7 \Omega/m$

그림 8에서 (a)는 제동력이며, (b)는 흡인력을 나타내고 있으며 속도에 따른 제동력의 최대치가 레일의 도전율이 증가할수록 저속영역으로 이동하는 비례추이현상을 나타내고 있다.

극당기자력이 33,600A일 때, 단위길이당 제동력의 최대치는 약 9.5 kN/m 정도이며, 레일의 도전율이 커질수록 속도에 따른 제동력의 저감현상이 커지는 수하특성을 나타내고 있다.

레일과 전자석 사이의 흡인력은 case 1과 case 2의 경우에는 300 km/h까지 음의 값(반발력)이 나타나지 않았지만 case 3의 경우 215 km/h, case 4의 경우 140 km/h, case 5의 경우 115 km/h부터 반발력으로 작용하고 있다. 이상의 해석결과를 검토하여 개념설계시 설계의 여유를 고려하여 단위 길이당 제동력을 7.5 kN/m로 산정한다.

4. 비접촉 제동력 분담 설계

한국형 고속전철 개발연구를 수행하기 위해 주어진 사양을 요약하면 표 3과 같다.

표 3 한국형 고속전철 사양

구 분	사 양
최고 속도	350 km/h
중 량	630 ton 이하
편 성	16량(2P+2M+12T)
운전시격 상 용 시	3분
평균감속	$0.58m/s^2$
비상시 평균 감속	$1.2m/s^2$

ICE 2.2의 와전류 제동장치에 의한 제동력 분담은 그림 3에서 최소 50 km/h에서, 최대 330 km/h까지 약 160 kN인데, 이 제동력 값은 레일의 온도상승을 고려한 최대 값으로 추측되므로 본 연구의 속도 350 km/h급 고속전철의 경우 약 150 kN을 분담시킨다. 따라서 와전류 제동장치에서 분담 감속도 = $150 \text{ kN}/630\text{ton} = 0.24 \text{ m/sec}^2$ 이고 자석 1개의 평균 제동력 7.5 kN인 경우 20개의 전자석이 필요하다.

5. 결 론

본 연구는 한국형 고속전철 비접촉 제동 system 개념 설계 시 선진 고속전철 제동 system을 비교 검토하여 비접촉 제동 system의 역할을 규명하였고 전자석의 기본모델을 제안했다. 또한 유한요소법에 의한 전자계 시스템 해석 결과를 바탕으로 전자석의 제동력과 흡인력을 계산하였다.

앞으로 전자석의 경량화, 비접촉 제동 system 성능향상을 위한 최적설계를 수행하고 실험에 의한 설계의 검증이 이루어져야 할 것이다. 또한 비접촉 제동장치의 실용화를 위해 전원장치 설계, 신호 system에 대한 영향분석 및 비접촉 제동 장치 작동시 rail의 온도상승을 분석해야 할 것이다.

참고 문헌

- [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.
- [4] 강도현외 2인, 고속전철 제동장치 개념설계에 관한 연구, 1997, 대한전기학회 하계학술대회.
- [5] 조영식외 4인, 전자유도 브레이크의 동특성 및 열해석, 1997, 대한 전기학회 전기기기 연구회, 추계 학술대회
- [6] 비접촉 제동시스템 개발, 1997, 한국전기연구소.

〈 저 자 소 개 〉



강도현

1958년 9월 12일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 한국전기연구소 입소. 1996년 독일 Braunschweig 대학 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 선임연구원.



김용주

1953년 11월 12일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1984년 미국 R.P.I. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979~1988년 한국전기연구소 책임연구원. 1988~1995년 한국전기연구소 전력기기 연구실장. 1995~현재 한국전기연구소 고속전철사업 그룹장.