

고속전철의 제동시스템에 관한 연구

김석원*, 한영재*, 목진용*, 김종영*
*한국철도기술연구원

A Study on Braking System of High-Speed Train

Seog-Won Kim*, Young-Jae Han*, Jin-Yong Mok*, Jong-Young Kim*
*Korea Railroad Research Institute

Abstract - 경부고속전철에서 사용되는 제동시스템의 성능 및 특성을 종합적이고 효율적으로 확인하기 위하여 차량 내에 상시 계측시스템을 구축하였으며, 차량의 제동과 관련된 측정과 평가는 경부고속전철이 상업 운행을 하는 차량이므로 구성품의 변경을 가져오지 않는 범위 내에서 수행하였다. 경부고속전철의 차량 내에 설치된 계측장비와 LabVIEW로 개발된 계측프로그램을 이용하여 제동관련 데이터를 실시간으로 감시하고 측정하였다. 또한 차후에 분석프로그램을 통해 제동시스템의 성능 및 특성을 알아보기 위해 시운전 시험 중에 제동관련 데이터를 실시간으로 저장하였다. 본 논문은 경부고속전철의 전기제동에 대한 설계치와 실측치를 서로 비교하였으며, 이에 제동시스템의 성능을 정확하게 확인하고 검증할 수 있었다.

1. 서 론

철도 차량은 여러 가지 기술의 종합체로서 안전성, 정시성, 신뢰성 등이 요구되는 운송 수단으로 시험을 통한 요구 성능에 대한 만족 여부를 확인하여야 한다. 특히, 제동성능은 다른 성능과 비교하여 인적, 물적인 손상을 초래할 수 있는 중요한 성능이라 할 수 있다. 이러한 제동 성능 중에서 가장 중요한 항목은 주행중인 열차를 원하는 위치에 멈추게 하는 것이다. 필요한 제동거리의 확보를 위해 검토되어야 하는 사항은 열차의 제동시 충분한 제동력의 확보이며, 이를 위해 제동력의 설계치에 대한 검증이 필요하다.

제동 성능은 요구되는 제동거리와 제동시간에 대한 평가가 우선적으로 수행되어야 하며, 요구되는 제동시간 및 제동거리의 만족 여부는 제동 체결 후 정지까지의 주행거리와 주행시간으로 평가된다. 일반적으로 고속철도 차량의 제동 장치는 전기제동, 기계제동 및 와전류제동의 조합으로 구성되며, 이들 각각이 설계시에 고려된 정상적인 성능을 발휘하여야 정상적인 제동이 가능하다.

현재 최고 주행속도가 300km/h로 많은 최첨단 기술들이 총동원되어 있는 경부고속전철(KTX)는 서울-부산 간 상업 운행 중에 있다. 따라서 경부고속전철은 승객의 안전과 신뢰를 위해 계획된 속도 및 시간에 따라 운행해야 하며, 필요에 따라 감속할 필요가 있다. 또한 승객이 하차하는 역이나 비상시에 완전한 제동 성능을 발휘하여 신속하게 정해진 위치에 정착할 수 있어야 한다.

따라서 경부고속철도에서 사용되는 제동시스템의 성능 및 특성을 종합적이고 효율적으로 확인하기 위해 차량 내에 상시 계측시스템을 구축하였으며, 고속철도 차량의 제동관련 전기신호를 계측하고 분석하기 위하여 LabVIEW로 개발된 시험 및 분석프로그램을 사용하였다. 본 논문에서는 제동거리, 제동시간, 감속도와 제동력 등에 대하여 시운전 시험을 통해 측정된 전기제동장치에 의한 제동력과 설계치를 서로 비교, 분석하여 경부고속전철 전기제동시스템의 성능 및 특성을 확인할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 제동시스템

철도 차량의 제동시스템은 일반적으로 전기제동장치와 기계제동장치로 구분되고, 전기제동에는 회생제동, 저항제동과 와전류 제동장치 등이 있으며, 기계제동은 공압을 이용한 제동으로 디스크제동, 담면제동과 휠 디스크제동 등이 있다. 철도차량에 사용되는 제동시스템은 철도 차량의 종류와 운행속도에 따라 차이가 있다. 일반적으로 철도차량의 운행속도와 운행조건에 따라 제동시스템의 조합이 결정된다.

경부고속철도 차량은 300km/h로 운행하는 전기철도로서 제동시스템은 전기제동장치로 회생제동과 저항제동장치를 사용하고, 기계제동장치로는 디스크제동과 담면제동장치를 사용하여 구성되어 있다. 경부고속전철의 대표적인 전기제동 방식에는 견인전동기를 발전기로 동작시켜서 얻어지는 에너지를 저항기에서 열로 발산시켜 제동력을 얻는 저항제동과 그 에너지를 가선을 통해 변전소 또는 다른 열차에 회기시켜 제동력을 얻는 회생제동이 있다. 다음의 표 1은 경부고속전철 차량의 편성 및 특성을 보여주고 있다.

표 1. 차량의 편성 및 특성

차량편성	PC+MT+16T+MT+PC
승차인원	1,000
주행저항식	$R=458+6.15V+0.0856V^2$ [daN]
열차중량	773,760 [kg]
견인전동기	12 × 1,130 [kW]
열차 총출력	13,560 [kW]
기어 효율	0.975

경부고속전철에 사용되는 전동기는 정격용량이 1,130 kW인 3상 6극 동기전동기가 사용되고 있다. 차량의 제동력을 구하기 위해 테스트 카드에서 출력되는 인버터의 전압, 전류를 이용하여 Motor Block(이하 MB) 1대에 대한 제동력을 계산하면 다음과 같다.

$$EFFORT_{MB} = \frac{|UOND1_v + UOND2_v|}{VITEM_{mb}} \times MIC_A \times \eta_f \times \frac{3.6}{1000}$$

$$EFFORT_{TOTAL} = 6 \times EFFORT_{MB,KN}$$

UOND1,2: 인버터1, 2의 전압 [V]

MIC : 인버터 전류 [A]

VITEM : 반마모 상태에서의 차속속도 [km/h]

η_f : 견인 또는 제동시의 추진시스템 효율

경부고속전철의 전기제동과 관련된 제동력과 제동거리, 제동시간을 확인하기 위해 시뮬레이션을 통해 얻은 설계치를 이용하여 실제 시운전 시험에서 얻은 실측치와 비교, 분석하였다.

그림 1은 경부고속전철 전기제동력의 설계값을 나타내고 있으며, 가선전압이 19kV~29kV일 경우에는 전동기에 의한 회생제동을 사용하고 저항제동은 가선조건에 관계없이 사용하고 있다. 저항제동력은 230km/h에서 56 kN/h 부근까지는 175kN을 가지고 있고, 회생제동력은 160km/h에서 16km/h까지는 300kN을 가지는 것으로 설계되었다. 회생제동은 상용제동시 사용되고 저항제동은 비상제동시 사용하도록 구성되어 있으며, 비상제동시 디스크 제동력이 상용제동에 비하여 크게 작용하도록 설계되어 있다. 따라서, 디스크 제동력을 포함하여 전기제동 종류에 따른 제동거리를 계산한 결과를 나타내면 그림 2와 같다. 제동 초기속도 300km/h에서 정지까지의 제동거리는 회생제동과 디스크제동을 사용한 상용제동의 경우 3,049m이며, 저항제동과 디스크제동을 사용한 비상제동의 경우는 3,090m로 나타났다.

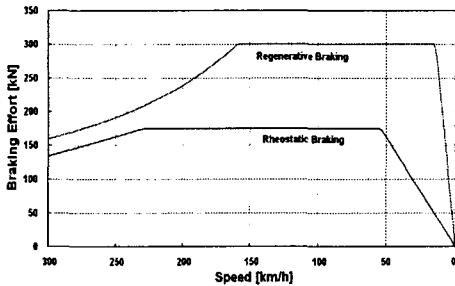


그림 1. 전기제동력 설계치

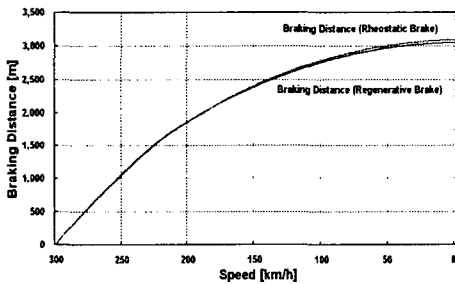


그림 2. 제동거리 설계치

2.2 계측시스템

경부고속철도 차량의 견인 및 제동과 관련된 성능과 신뢰성을 확인하기 위한 계측장비는 크게 데이터 수집 및 저장 장치와 신호조정 장치로 나누어지고 그 사양은 각각 표 2와 표 3과 같다.

표 2. 데이터 수집 및 저장 장치

Portable DAQ System	- CPU : P4 2.0 - RAM : 256 DDR - OS : WIN2000
DAQ Card	- 32 DI / 64 SE - 12-Bit Resolution - 1.25 MS/S - 2 Counter/Timer
Digital I/O Card	- 24Ch Input/Output

표 3. 신호조정 장치

속도측정용 Conditioner	- Input : 0~5 KHz - Output : 0~5 V
차량신호측정용 Conditioner	- Input : ±10 V - Output : ±5 V

또한 계측시스템으로 얻어지는 견인제동 관련 데이터는 백업하고 차후에 그 데이터를 분석하기 위해 별도의 백업 장비도 갖추고 있다.

경부고속철도차량에 설치된 계측시스템은 견인제동과 관련된 32채널의 신호를 입력받고 있다. 그 중에 9채널은 차량에 직접 센서를 설치하여 측정하고 있으며 나머지 23채널은 경부고속철도차량의 MB와 연결된 테스트 카드를 통하여 시험데이터를 획득하고 있다. 그림 3의 (a)는 경부고속철도차량에 설치된 계측장비의 외형을 보여주고 있고, 그림 3의 (b)는 경부고속철도차량으로부터 신호를 입력받는 테스트 카드가 MB의 제어대에 장착되어 신호를 측정하는 모습을 보여주고 있다.

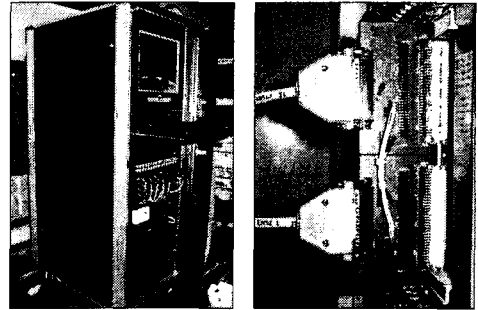


그림 3. (a) 계측 장비, (b) 테스트 카드

2.3 시험결과

그림 4와 그림 5는 각각 MB 6대를 기동하면서 VCB를 차단하여 저항제동과 디스크 제동을 이용한 경우의 제동거리와 제동시간을 실측한 자료이다. 제동거리 설계치와 실측치는 각각 3,090m와 3,362m로 나타났고, 제동시간의 설계치와 실측치는 각각 71.91초와 74.14초로 확인되었다.

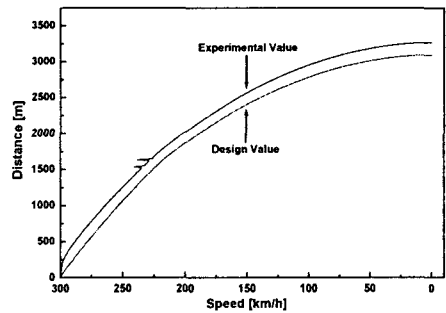


그림 4. 저항제동시의 제동거리

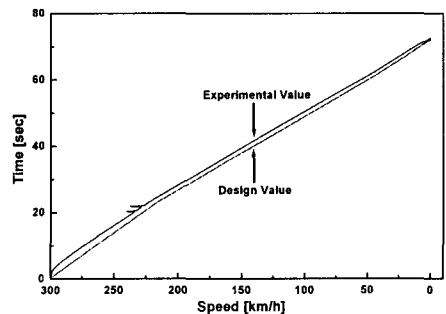


그림 5. 저항제동시의 제동시간

그림 6과 그림 7은 회생제동과 디스크제동을 이용하

는 경우의 제동거리와 제동시간을 측정된 결과이다. 제동거리의 설계치와 실측치는 각각 3,049m와 2,919m로 나타났고, 제동시간의 설계치와 실측치는 각각 70.02초와 64.07초로 확인되었다.

제동거리와 제동시간에서 실측치와 설계치가 차이를 보이는 것은 설계치의 경우에는 선로상의 구배와 곡선을 고려하지 않고 평지에서의 제동거리와 제동시간을 계산하였으나 실측치는 선로의 사정으로 인해 모든 시험을 평지에서 수행할 수 없었고, 설계치는 승객 1,000명이 탑승한 것을 전제로 계산하였으나 실측시에는 시험인원 외에는 거의 탑승하지 않았기 때문에 약간의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

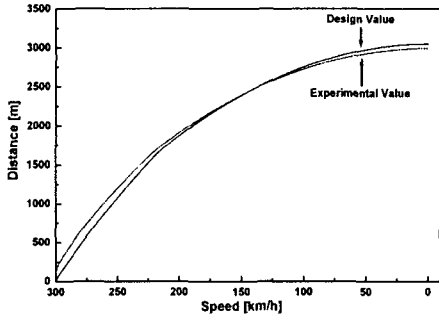


그림 6. 회생제동시의 제동거리

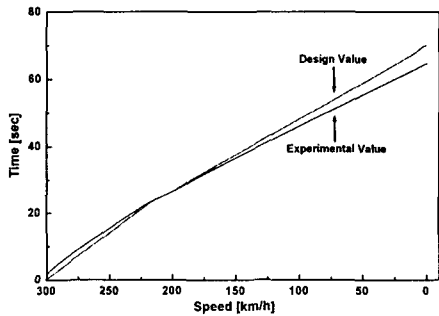


그림 7. 회생제동시의 제동시간

그림 8과 그림 9는 경부고속전철에서 MB 6대를 기동하면서 각각 저항제동력과 회생제동력에 대한 설계치와 실측치를 서로 비교한 결과이다. 저항제동력의 실측치는 약 234km/h부터 168kN을 유지하다가 55km/h부터 7km/h까지 거의 선형적으로 저항제동력이 떨어지는 것을 확인하였고, 회생제동력의 실측치는 156km/h부터 22km/h까지 약 287kN을 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

저항제동력과 회생제동력에서 실측치가 설계치와 차이가 있는 것은 실제 전동기의 제어 및 차량 전체에 대한 제동 성능 관점에서 차량이 정지하기 직전의 저속에서는 전기제동보다 공기제동의 효율이 높기 때문에 이를 이용하고 공기제동과 전기제동의 혼합제동 과정에서 전체 제동 성능의 효율성을 높이기 위하여 조정된 것으로 판단된다. 또한, 차량전체의 전기제동력은 MB 6대가 독립적으로 작용하기 때문에 6대 모두에 대한 전기제동력을 측정하여 총 제동력을 구하여야 하나, 실측치는 1대의 MB에서 측정하여 MB의 수를 곱하였기 때문에 나타난 차이일 수도 있는 것으로 판단된다.

또한 초기에 두 값의 차이가 발생한 것은 전기제동력을 이용할 때, 제동지령이 발생한 뒤에 바로 전기제동력이 투입되는 것이 아니라, 여러 경로를 거치면서 약간의 시간이 경과한 뒤, 전기제동력이 실제로 발생하기 때문에 일어난 현상으로 보여진다.

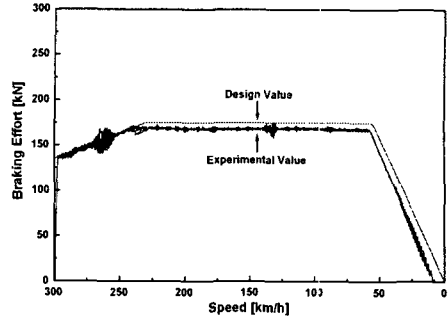


그림 8. 저항제동력(MB 6대)

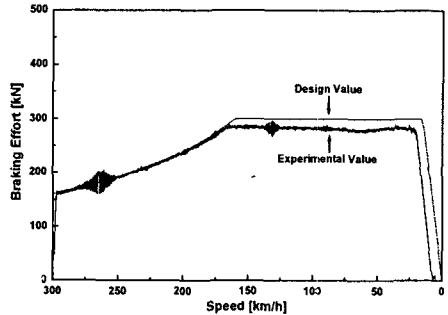


그림 9. 회생제동력(MB 6대)

3. 결 론

경부고속전철에서 전기제동시스템은 승객의 안전과 편의에 영향을 미치는 전장품들 중에 하나로, 제동시스템의 성능 및 특성을 종합적으로 확인하기 위해 상시계측 시스템을 구성하였으며, 시운전 시험시 계측시스템을 통해 얻은 제동관련 시험 데이터를 계측 및 분석프로그램을 이용하여 전기제동시스템의 저항제동과 회생제동시의 실측값을 설계값과 비교하여 분석하였다. 향후에는 설계상의 조건과 시운전 시험조건을 통일하여 경부고속전철의 전체적인 제동시스템의 성능 및 특성을 분석할 예정이다.

감사의 글

본 내용은 건설교통부에서 시행한 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김석원, 한영재, 김영국, 박찬경, 최강운, 김종영, "KTX 견인, 제동성능용 계측시스템 구축", 한국철도학회 추계학술대회, 2003.
- [2] 김석원, 한영재, 최강운, 박찬경, 김종영, 오병일, 최성균, "견인제동 계측시스템 개발(1) 소프트웨어", 한국센서학회 추계학술대회, 2003.
- [3] 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발, 고속전철기술개발사업연차보고서(2001), 건교부, 산자부, 과기처.
- [4] 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발, 고속전철기술개발사업연차보고서(2002), 건교부, 산자부, 과기처.