한국형 고속전철의 기계 제동력 측정 방법
Measurement of Mechanical Braking Force for KHST

김석원* 김영국* 박찬경*
Seogwon Kim Youngguk Kim Chankyoung Park

ABSTRACT

Korean high speed train (KHST) has adopted a combined electric/ mechanic (friction) braking system. Electric brakes are consist of rheostatic brake, regenerative brake and eddy current brake and mechanical brakes are composed of disc brake, wheel disc brake and tread brake. In this paper, we introduce the braking performance test and the measuring method of mechanical brake. And disc brake performance has been reviewed by the experimental method. The on-line test of KHST has been carried out up to 260 km/h and proved that the disc braking capacity of KHST is sufficient.

1. 서 론

철도차량은 여러 가지 기술의 종합체로서 안전성, 정시성, 신뢰성 등이 요구되는 운송수단이므로 여러 가지의 성능들을 갖고 있다. 특히, 제동 성능은 다른 성능과 비교하여 인적, 물적인 손상을 초래할 수 있는 중요한 성능이라 할 수 있다. 이러한 제동 성능 중 가장 중요한 항목은 주행중인 열차를 원하는 위치에 멈추게 하는 것이다. 필요한 제동거리의 확보를 위하여 검토되어야 하는 사항은 주행 중인 열차의 제동시 충분한 제동력의 확보이며, 제동성능의 설계에 대한 성능검증이 필요하다.

본 내용에서는 국가에서 전략적으로 추진한 선도기술개발(G7)사업 중의 하나인 고속전철기술개발사업에서 개발된 최고운행속도 350km/h의 한국형 고속전철시스템에 대하여 본선시운전 시험항목중의 하나인 제동성능시험 수행을 위한 전반적인 시험계측 방법을 소개하고, 특히 기계제동력 측정을 위하여 구성한 계측센서, 설치 위치 및 측정 결과에 대하여 기술한다.

지금까지 국내에서 수행한 제동력 측정 방법은 직접적인 측정 방법이 아니라 제동시간, 제동거리, 속도 등을 측정하여 제동력을 계산하는 간접적인 방법을 주로 사용하였으나, G7 개발열차의 본선 시운전시험 과정에서는 제동 중에 작용하는 압부력과 제동력을 동시에 직접적인 방법으로 측정하여 제동 과정에서의 패드와 제동디스크 사이의 마찰계수 변화 경향을 파악할 수 있었다.

2. 제동시스템 및 시험계측시스템 구성

2.1 제동장치 구성

G7 고속전철 시제열차는 그림 1에서 보는 바와 같이 7량 1편성이며, 제동시스템은 전기제동, 기계제동 및 와전류제동으로 구성된다. 이들 제동장치는 각 대차에 설치되어 있으며 전체 제동력은 설정된 제동패턴에 따라 각 제동장치별로 블랜딩하여 전체제동력을 확보하도록 구성되어 있다.

1. 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

각 제동장치별 설치위치는 표 1과 같으며, 제동방법(상용제동, 비상제동)에 따라 요구되는 전체 제동력은 차이가 있으며, 속도별로 각 제동장치에 대한 제동력의 설정된 제동 블랜딩 패턴은 그림 2와 같이 정의된다.

표 1. 대차별 제동장치

대차번호		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	합계
기계제동	답면제동	4	4							4	4	16
	휠디스크제동			2					2			4
	축디스크제동				6	6	6	6				24
와전류제동					1	1	1	1				4
전기제동		2	2	2					2	2	2	12

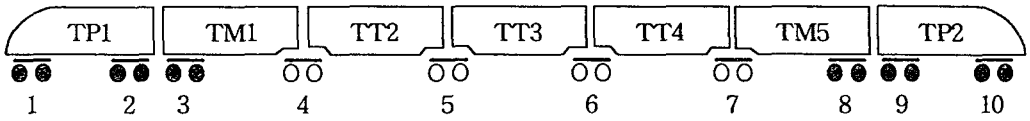


그림 1. 시제열차 차량배치 및 대차번호

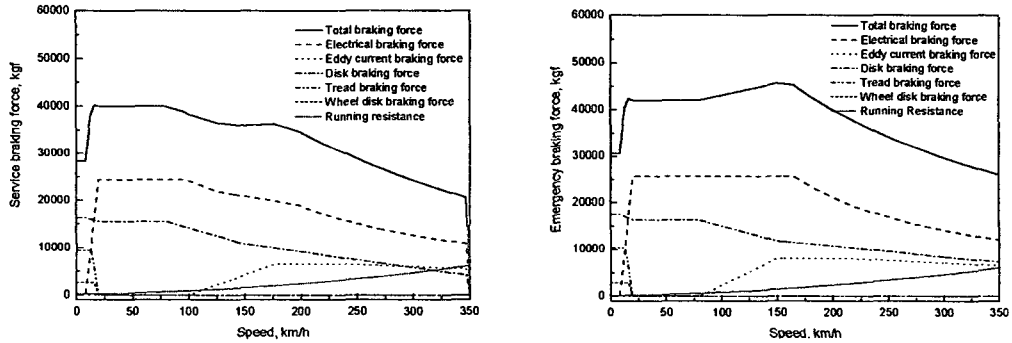


그림 2. 상용 및 비상제동에 대한 제동력 블랜딩 곡선

2.2 제동성능시험측정 시스템

제동성능을 확인하기 위한 시험항목은 제동거리, 제동시간 등 제동과 관련된 기본사항과 각 제동 구성품에 대한 개별성능을 확인하기 위한 사항으로 구성된다. 이들 항목에 대한 측정을 종합적으로 확인하기 위하여 개발열차에 설치된 제동시험 측정시스템의 구성도는 그림 3과 같다. 세부 계측을 위해 압력계, 스트레인게이지, 가속도계, 온도측정용 비접촉센서 및 Thermocouple 등의 센서를 설치하였으며, 차량에서 제동시스템으로 전달되는 제동지령신호 및 제동력 크기 신호(PWM % 신호)를 측정하기 위한 센서도 설치하였다. 세부 측정항목 및 설치 위치는 표 2와 같다.

제동거리, 제동시간 등은 제동지령신호와 차축에 설치된 속도센서의 Pulse를 이용하여 측정이 가능하며, 제동장치의 온도 및 가속도 등도 범용 센서를 이용하여 측정이 가능하다. 또한 전체 제동력은 직접 측정하는 것이 어렵기 때문에 현재는 차량의 주행속도 곡선 즉, 제동거리, 열차속도을 이용하여 추정한 것을 사용하고 있으나 실제적으로는 직접 센서를 사용하여 각 제동장치의 개별 제동력의 측정되어야 한다. G7 개발열차는 전기제동, 와전류제동 및 기계제동의 3가지 제동시스템으로 구성되어 있어 이들 각각에 대한 제동력을 별도로 측정하여야 할 필요성이 있다. 전기제동력은 전압, 전류를 이용하는 방법과 동력전달축에 스트레인게이지를 설치하여 토오크를 측정하였으며, 와전류제동력은 와전류 제동 프레임에 작용하는 흡인력과 제동력을 측정하도록 계측장치를 구성하였다.

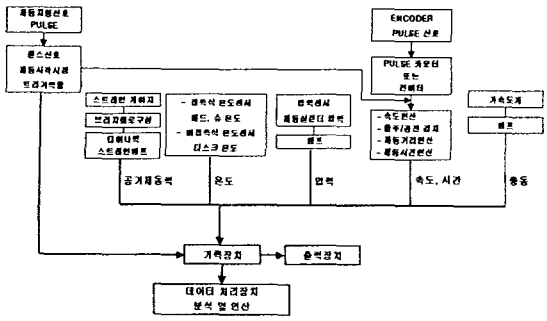


그림 3. 제동성능 측정 구성도

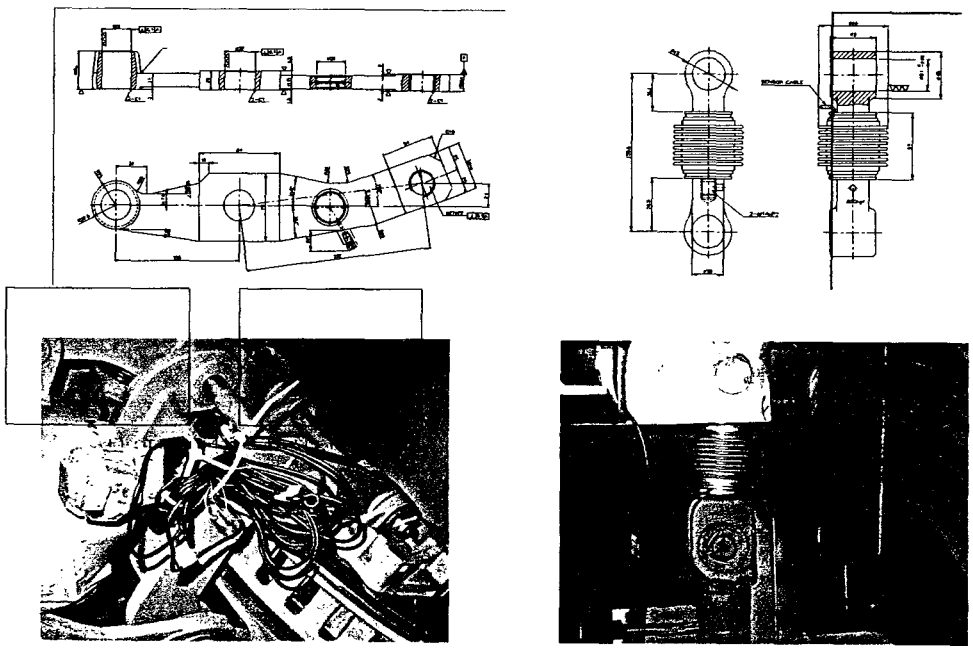
표 2. 제동성능 측정항목 및 설치위치

측정항목	설치위치	수량
제동지령	Cab Cubicle	1
제동 PWM	Cab Cubicle	1
차축속도	WS41,42,51,52	4
제동실린더압력	4, 5, 8, 9번 대차	4
압부력	4, 5, 8번 대차	3
제동력	4, 5, 8번 대차	3
디스크 온도	4, 5, 8번 대차	3
패드온도	4, 5, 8번 대차	3
와전류제동력	5번대차	1
진행가속도	TP1, 2 및 TT3	3

2.3 기계제동력 측정 센서 및 계측시스템

지금까지 기계제동력을 측정하는 방법은 각 제동장치만을 작동하여 각각의 제동장치에 대한 제동력을 측정, 계산하였으며, 일부에서는 제동실린더의 압력에 따라 작용하는 압부력만을 측정하여 시험실에서 측정한 마찰계수를 적용하여 제동력을 산정하였다. G7 개발열차에서 운행 중에 기계제동력을 측정하기 위하여 캘리퍼와 행거에 작용하는 하중을 직접 측정하도록 별도의 센서를 제작하여 개발열차에 설치하여 압부력과 제동력을 직접 측정하였다. 센서는 실제 설치되는 캘리퍼와 행거 부위에 스트레인게이지를 설치하여 작용하는 하중을 측정하도록 구성하였으며, 이를 위한 제작도면 및 실제 개발열차에 설치한 모습은 그림 4 와 같으며, 캘리퍼에 작용하는 압부력은 공기실린더의 압력이 5.5bar 일 때 1,213kg이다.

센서는 Full Bridge 스트레인게이지를 설치하였으며, 온도, 먼지, 습기 등의 외부 환경에 보호하기 위하여 금속판 및 금속 주름판으로 밀봉을 하였다. 실제 차량에 설치하기 전에 하중 방향에 따라 단계적인 정적 하중을 가하여 보정을 하였다.



제동성능 측정을 위한 계측시스템은 한국형 고속전철 본선 시운전시험계측시스템의 일부로 구성되어 있으며, 각 계측 모듈에서 측정된 데이터가 Network을 통하여 별도로 구성된 제동성능 모니터링 모듈로 전송되어 시운전시험 중에 온라인으로 계측 데이터와 이를 이용한 계산 항목(제동초속도, 제동거리, 제동시간 등)을 온라인으로 모니터링 하도록 구성하였다. 그림 5는 시험계측시스템의 설치 모습이며, 그림 6은 제동성능 모니터링 모듈의 측정화면을 나타내고 있다.

그림 5 및 그림 6에서와 같이 3개의 위치에서 측정된 기계제동력은 제동성능 모니터링 모듈에서 차량 전체에 대한 제동력을 연산하여 현시된다. 또한 압부력과 제동력을 측정한 결과를 이용하여 제동 디스크와 패드 사이의 마찰계수를 환산하여 실제 차량에서의 제동상태에서 마찰계수의 변화에 대한 분석이 가능하다.

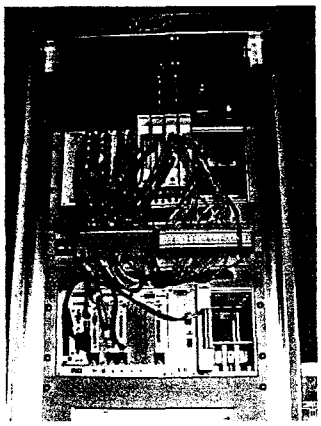


그림 5. 시운전시험계측시스템

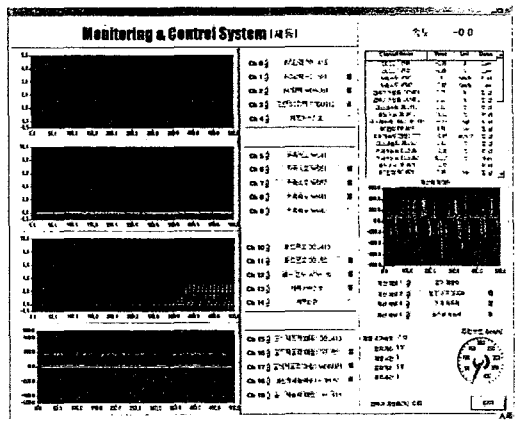


그림 6. 제동 모니터링 화면

3. 기계제동력 계측 결과

한국형 고속전철에 대한 본선 시운전시험은 현재 최고속도 260km/h 까지 완료한 상태이며, 계속적인 증속시험을 수행하고 있다. 기계제동력 특성을 확인하기 위하여 제동실린더 압력, 캘리퍼 압부력 및 디스크 제동력을 측정하였으며, 그림 7은 170km/h 속도에서 정지할 때까지의 제동실린더 압력을 나타낸다.

그림 8은 그림 7의 실제 측정된 제동실린더 압력을 이용하여 계산된 캘리퍼 압부력과 실제 측정된 캘리퍼 압부력이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 기계제동력 측정을 위하여 별도로 제작하여 설치한 캘리퍼에 작용하는 압부력은 제동실린더에 작용하는 압력을 이용하여 계산한 값과 일치함을 알 수 있다.

그림 9는 1개 디스크의 한 면에 작용하는 제동력을 나타낸 것이며, 이 제동력은 270kgf ~ 400kgf 범위로서, 전체 제동 블랜딩 패턴에서 정의된 170km/h 속도에서 정지시 까지 1개 디스크의 한 면에 작용하는 제동력의 범위 210kgf ~ 320kgf를 상회하는 것을 알 수 있다. 이는 제동 블랜딩 패턴을 결정할 때 안전을 위하여 실험실에서 측정된 디스크와 패드 사이의 마찰계수의 최소값을 사용하였기 때문으로 판단된다.

실제 차량 주행 과정에서 측정된 압부력과 제동력을 이용하여 산정한 마찰계수 곡선은 그림 10과 같으며, 170km/h 속도에서 약 0.4 정도이며, 속도가 낮아짐에 따라 증가하여 정지시에는 약 0.6까지 증가함을 알 수 있다. 이는 시험실에서 시험한 마찰계수 값은 170km/h에서 0.39 ~ 0.4 범위이며, 300km/h에서는 약 0.32 ~ 0.35 정도임을 고려하면 적절한 값인 것으로 판단된다.

그림 11은 제동 과정에서 차축에서 활주 발생하는 경우에 대한 차축에서의 주행속도를 나타내며, 이 경우 제동실린더 압력 변화에 따른 압부력의 계산치와 측정치를 나타낸 것이 그림 12이다. 그림 11에서 휠 셀 41과 42는 동일한 대차의 전후축으로 이 휠 셀 41과 42의 속도차이는 차축이

활주함을 나타내는 현상이며, 활주가 발생하면 덤프밸브가 작동하여 디스크의 제동력을 감소시켜 활주를 방지하도록 제동시스템이 설계되어 있다. 그림 12에서 보는 바와 같이 차축에서 활주가 발생하는 경우 제동실린더 압력은 덤프밸브의 작동에 의하여 감압되며 이에 따른 압부력의 변화가 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

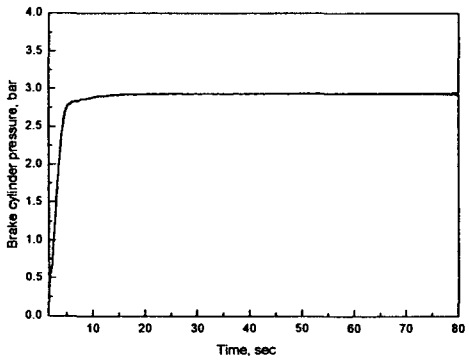


그림 7. 제동실린더 압력

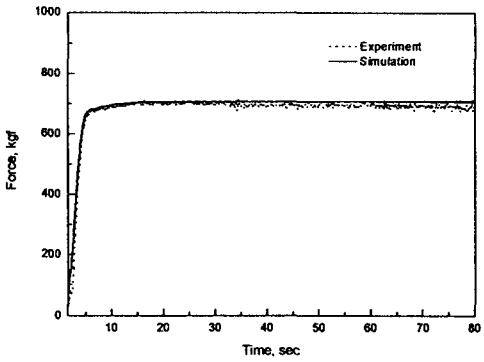


그림 8. 캘리퍼에 작용하는 압부력

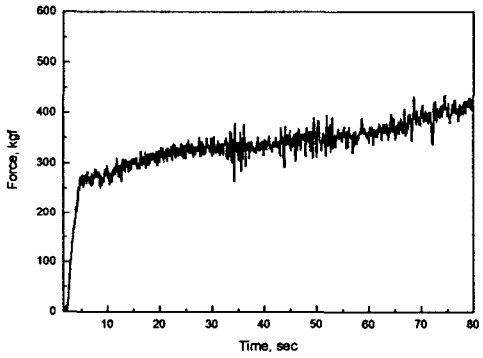


그림 9. 1개 디스크의 한 면에 작용하는 제동력

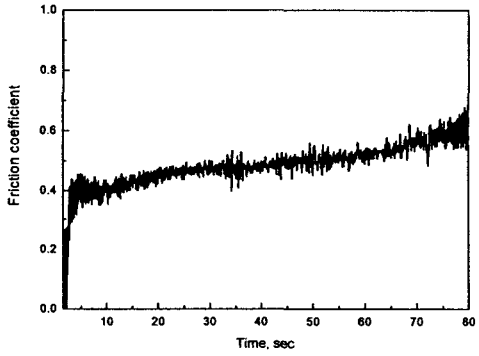


그림 10. 마찰계수

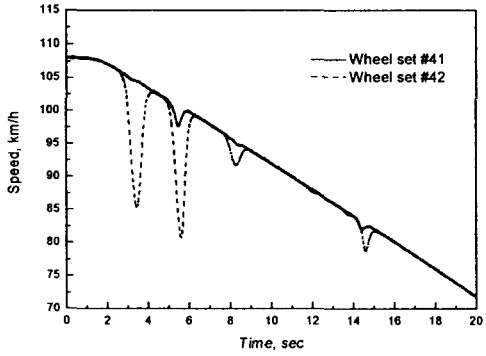


그림 11. 차축속도 변화

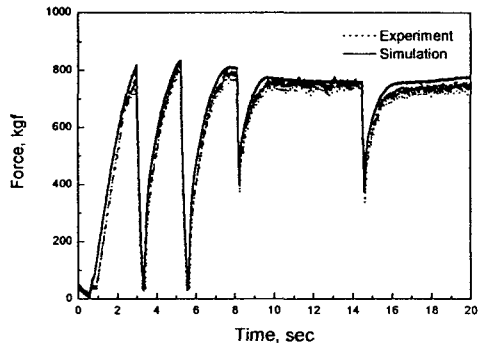


그림 12. 캘리퍼에 작용하는 압부력 변화

4. 결론

한국형 고속전철의 제동시스템에 대한 성능을 확인하기 위하여 개발열차에 각종 센서와 계측시스템을 설치하여 제동거리, 제동시간 등 제동성능에 대한 시험을 경부고속철도 시운전시험 구간에서 수행중이다.

제동성능의 주요성능인 기계제동력을 차량 주행중에 온라인으로 직접 측정하기 위하여 제동 캘리퍼와 행거에 스트레인게이지를 부착하여 별도의 센서로 제작하여 차량에 설치하여, 작용하는 압부력과 제동력을 측정하였다. 측정 결과 캘리퍼에 작용하는 압부력은 제동실린더에 작용하는 압력에 의한 계산치와 일치하며 압력변화에 따른 추종성이 양호함을 알 수 있었다.

행거에 작용하는 기계제동력을 차량 운행 과정에서 계속적으로 측정하여 실제차량에 작용하는 기계제동력을 실시간으로 측정하였으며, 이를 이용하여 제동 디스크와 패드 사이의 마찰계수를 산정할 수 있었다. 계산된 마찰계수는 시험실에서 측정한 값과 비교하여 차이가 없음을 알 수 있었다. 그러나, 시험실에서의 조건과 실제 차량 주행 조건은 다르므로 이에 따른 검토를 계속 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

제동장치에서의 온도변화, 각 속도에서의 제동 및 제동 지령치에 대한 조건 등에 대한 시험계측 데이터 및 보다 고속에서의 제동조건에 대한 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 내용은 건설교통부에서 시행하는 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참고문헌

1. 고속전철시스템 기본사양, 1998. 3, 한국철도기술연구원
2. G7 고속전철 시제차량 기본사양, 2001. 9. 한국생산기술연구원
3. G7 고속전철 기술개발사업 Control System Specification, 2001. 4, 한국철도차량(주)
4. 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발, 고속전철기술개발사업연차보고서(1996~2001), 건교부, 산자부, 과기부
5. 제동시스템 개발, 고속전철기술개발사업연차보고서(1996~2001), 건교부, 산자부, 과기부
6. Internation Standard IEC 1133, 1992. 11, IEC
7. JIS E6004, 1992, 일본공업규격
8. UIC 610, International Union of Railways