

고속제동 설계인자와 제동력의 수치계산에 관한 연구

A study on the Design Factor for the High-speed Brake and

Numerical Analysis of Braking Force

°최경진*

송문석**

신유정***

Choi, Kyung-Jin Song, Mun-Suk Shin You-Jung

ABSTRACT

Since the braking system of rolling stock is directly linked to its safety, ensuring reliability of braking system and evaluation of performance of it are very important. To develop the performance of braking system, it is required advanced technology and gradually various factors in the field test result

This study is designed to analyze various factors about braking force in rolling stock, also, by comparing braking force of KTX with that of high speed train. The study suggests to establish a method of computation of braking force suitable for high speed train having a lot of trouble in calculating braking distance by diversification of patterns of braking system such as the train of speed up and introduction of electric and pneumatic braking system..

1. 서론

고속철도는 최고속도 300km/h의 영업운전을 통하여 많은 여객을 신속하고 안전하게 수송하는 강점을 가진다. 교통수단으로서 저비용 에너지와 주행 안전성은 매우 안정적 장점에 있지만 한편으로 레일과 바퀴의 낮은 점착 특성으로 인하여 감속 제동 제어에서 난이한 핵심 인자이며 차량설계에 제한성을 두게 된다. 제동제어의 역할은 열차를 정상 운행중에 목표지점에 안정적으로 정지시키는 것과 돌발 상황이 발생하면 급히 정지하기 위한 것이다. 고속철도 KTX의 제동제어는 전기 발전 제동 방식인 회생 제동과 저항 제동을 사용하고 기계 제동 방식으로 동력차의 답면 제동과 객차의 디스크 제동을 사용하고 있다. 열차의 운동에너지 $E=1/2 MV^2$ 을 전기와 열에너지로 바꾸어 열차를 멈추게 하고 있다.

동력차는 회생 제동과 저항 제동 및 차륜에 답면 제동을 가지고 있으며, 객차는 디스크 제동만 사용되고 있다. KTX 고속철도는 프랑스 TGV의 제동 방식에서 신기술인 회생 제동을 도입함으로써 에너지 절약형의 기술을 채택하였으며, 전기 제동의 제동력을 이용하여 보다 안정적인 감속 제어가 가능하게 되었다. KTX의 열차제동거리는 300km/h에서 평균감속도는 1.04m/s²이상으로 하고 비상제동거리는 3,500m의 를 목표로 하고 있다. 최근 영업 운행에 의한 정상적인 감속 제동시 정지하기 직전에 공기 제동을 사용하면 마찰음이 발생하는 사례가 있고, 공기 제동의 제동 원력을 높인후 제동력이 증가하여 점착력과 비교 분석을 통하여 제현상을 규명할 필요가 있다.

본 연구는 동력차, 동력객차 및 객차로 편성된 고속철도의 제동력과 점착력을 수치계산하고 비교 분석을 통하여 제동시의 안정성을 검토하고, 분담 제동력을 영향을 규명하며, 기존선 운행속도인 150 km/h에서의 제동력에 대해서 제동성능을 안정화하는 방안을 제시하고자 하는 데 그 목적이 있다.

* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

** 한국철도대학 교수, 정회원

*** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

2. 고속철도의 제동력

2.1 고속철도 제동장치 특징 비교

국내는 2004년 4월 개통한 이래 영업운행에서 안정적인 상업 운영을 하고 있지만 외국의 제동시스템과의 비교 분석을 통하여 앞으로도 지속적인 신뢰성과 안전성을 분석할 필요가 있다. 특히, 기존철인 대구-부산과, 서대전-목포 구간을 운행하므로써 가감속의 패턴이 저속도에서 많이 일어나고 있으므로 국내 상업 운전 전로의 조건을 고려하여 접근할 필요가 있는 것이다.

외국의 고속철도 제동장치와 KTX를 비교하면 표 1과 같으며, 표 2는 TGV-PSE의 에너지 분담율을 보여주고 있다. KTX는 TGV-A의 차량 제동을 포함하여 회생 제동을 추가하여 제동력을 분담하고 있으며, 기계 제동은 동력 대차는 달면, 객차는 디스크 제동이 사용되고 있다.

표 1. Brake system of high speed train

	ICE	TGV-A	KTX	
Speed(km/h)	250	300	300	
Train(car) PC/TC	2/14	2/10	2+(1/2)*16-2	
Weight(ton)	800	485	773.8	
Brake system	PC+ PTC	Regeneration W-disk	Rheostatic Tread	Regeneration Rheostatic Tread brake
	TC	Disk brake (3ea/axle)	Disk brake (4ea/axle)	disk brake (4ea/axle)
	etc.	Eddy current Electromagnet	-	-

KTX는 TGV-A를 차량의 제반사항을 기본으로 하였지만 도입 단계에서 20량 편성으로 장대화하였으며, 열차편성은 동력차 2량, 동력 객차 2량, 객차 16량으로 총 20량으로 열차 중량은 공차 시 692톤이고 만차 시에는 773.8톤이다. 총 6대차의 12대 모터로 구성되어 있으며, 주행저항 $R = 458 + 6.15V + 0.0856V^2$ (daN)이다.

제동장치로 운전실에 제동제어 펌프, 동력대차 및 객차 제동제어 관밸브로 이루어지며, 모든 제동은 ATC 또는 운전자의 운전실 신호에 의해 작동된다. 제어는 전기신호 또는 주 제동관의 압력 변화로 제어되며 동력대차의 마찰제동은 비상제동과 계발전 제동이 불가능할 때 작동한다. 정상정기, 비상정지, 주차정지, 미끄럼 방지를 위한 기능이 추가되어 있으며 전기 및 기계 제동장치가 자동 조합되어, 상용 및 비상제동시 전기제동이 우선하도록 되어있다.

전기제동과 기계제동의 조합은 전기제동의 1/6과 객차대차 한 대의 마찰제동이 가장발생 시에도 사용 만제동과 비상제동이 가능해야 한다. 또한, 객차의 마찰 제동은 동력 대차의 전기제동과 함께 어떠한 고속철도 노선 위치나 기상 조건에서도 최대 속도 300km/h + 10% (330 km/h)로부터 공주 시간, 안전여유, ATC 특성 등을 감안하면서 영구 손상없이 차량을 안전거리 이내에 정지시키도록 하였다.

표 2. Energy distribution rate of emergency brake of the TGV-PSE

Brake Type	Energy Dissipation(%)	Energy Dissipation/Train/Stop (106 kg · s)
Rheostatic	36.3	42.9
Disc	39.7	47.0
Tread	16.5	19.5
T-resistance	7.5	8.8
Total	100.0	118.2

표 3. Train physical data of TGV-K

Parameter	Value
Train	
○ Formation	2 Power car(4M) + 2 Motorized Trailer(2M) + 16 Intermediate Trailer
○ Empty weight	692 tons
○ Full seated weight	773.8(771.2) tons
○ Seat (1st class quantity)	192
○ Seat (2nd class quantity)	808
○ Rolling resistance	$R = 458 + 6.15V + 0.0856V^2$ (daN)
Bogies	
○ Quantity	23 set
○ No. axles	46 ca(powe axles 12ca)
○ Wheel diameter	920 mm(wear band 35mm)

객차의 제동은 주 제동관의 압력 변화에 의해 항상 작동하며 열차 저항이 없을 경우 그림 1에서와 같이 감속속도 1.04m/s로 300km/h로부터 완전 동작하는데 걸리는 시간은 약 80초이며, 제동거리는 약 3,300m로 하였다.

기개 제동은 동력 대차 6대에 전기와 담면 제동이 함께 사용되며, 객차 17대에는 그림 2에서 보는바와 같이 축당 4개의 디스크 브레이크와 소결합금 마찰재 페드를 이용하고 있는데 마찰재의 수명동안 페드와 디스크 사이의 간격은 자동 조정되며 제동시 이상 소음(squealing)과 불쾌한 냄새 발생이 없어야 한다. 마찰 제동 장치의 일부를 주차 제동 기능으로 활용하여 만차하중 열차에서 2.5% 기운기의 주차가 가능하며 모든 동력 대차 제동 유닛에 조립된 스프링 하중 실린더에 의해 작동된다.

KTX 편성 열차의 총중량은 771.2Ton 으로서 비상제동거리의 기준은 회생 및 저항 제동에서 최대 속도 300km/h에서 3,500m로 하고 있다. 선로조건은 직선과 평탄선로이고 기후는 건조한 상태를 나타낸다.

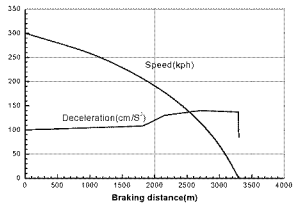


그림 1 Distance and deceleration

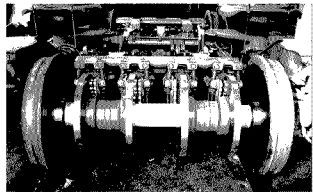


그림 2 Disk brake of a axle on the trailer car

2.2 KTX 제동장치별 제동력 계산

제동력은 캘리퍼 압부력(P)과 패드의 마찰계수(μ)의 곱으로 계산하며, KTX 고속열도의 동력 대차와 동력 객차의 압편 제동과 객차의 디스크 제동력을 대차당으로 계산하기 위하여 기계 제동의 제동력에 영향을 미치는 공기 압력의 수치를 정리한 결과는 표 4와 같다. 기계 제동의 속도와 제동력의 변동의 관계에서 동력 대차의 제동은 제동력 변화 적용속도가 200kph이고 제동력은 200kph이상에서 대차당 20.4KN이다, 객차 제동력의 변환 속도는 같으나, 제동력은 215kph이상에서 34KN으로 적용되고 있다. 속도별 분석한 결과는 그림 3과 같다.

전기 제동은 동력 대차에 적용되어 회생 제동은 최고 50KN, 저항제동력은 최고 29.16KN으로서 그림 4와 같고, 동력대차의 전기 및 기계 제동을 합하면 그림 5와 같으며, 대차당 최대 제동력 제한치인 50KN 이내에 들고 있다.

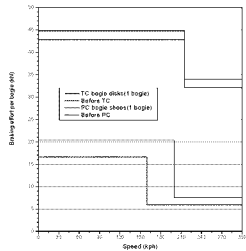


그림 3. Brake force of air brake system

표 4 Braking force of 1 bogie set

Bogie	Exchange of velocity (kph)	Exchange of air pressure (bar)	Braking force			
			Before		After	
			Unit(KN)	Bogie(KN)	Unit(KN)	Bogie(KN)
PC	V<160	3.0 → 3.6	4.15/cylinder	16.6	5.1	20.4
	V>160	1.33 → 1.6	1.475/cylinder	5.9	1.875	7.5
	Exchange of velocity(kph)		160		200	
TC	V<215	3.6 → 3.8	5.35/disk	42.8	5.64	44.8
	V>215	2.9 → 3.05	4.01/disk	32.1	4.26	34

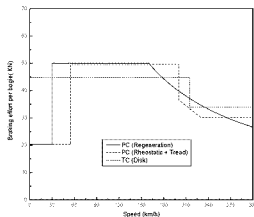


그림 4. Braking force of kind of cars

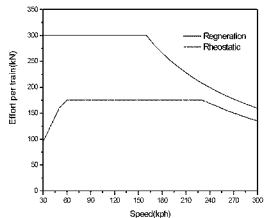


그림 5. Electric braking force of train

2.3 제동성능의 제반 평가 분석

고속철도에서 제동 방식은 정상속도에서의 감속 조건과 비상상황에서의 급제동으로 구분할 수 있으므로 비상상황의 제동거리는 설계 목표에 충실하게 비상제동거리를 충족하여야 한다.

비상제동시에 평균감속도 1.04m/s², 최대 비상제동거리를 3,500m로 하고 있다. TGV-K 도입 당시 제반 환경조건을 고려하여 3,300m를 목표로했으나, 20량의 장대편성에 대한 국내 고속철도 건설용 시험선에서 측정한 열차제동거리 품질평가(QT: Quality test)와 수치 계산을 정리한 결과는 그림 6과 같다. 공기 제동력을 변동시킨 이후의 시험결과로서 최종 제동은 3,342m로 3,323m로 나타나고 있으며, 3,500m이내 들고있다.

기계 제동의 제동통의 원력과 기초제동장치인 레바기구의 전달력은 마찰재의 마찰계수에 의해 운동에너지가 마찰열로 변화하게되는 것으로 열발생은 필연적이다. 이러한 열발생에 대하여 담면 제동은 차륜과 제동 슈의 열적 악영향을 최소화해야 하며, 디스크 제동에서도 디스크와 패드의 마찰특성을 유지하면서 열적 안정성을 확보해야 한다. KTX는 단조강에 동계 소결제 패드를 사용하고 있고, 디스크는 속당 4개, 대차당 8개보 하여 마찰면적을 확대하고 있다.

최근 기준선 시운전 시험 결과를 보면 객차 대차당 공기 제동력은 제동 실린더 스프링 반력 1.65kN, 단면적은 412cm², 캔티피의 비 0.93과 측정 공기압력 3.8bar, 평균 마찰계수를 0.35~0.45로 가정하면 35.66~45.84kN으로 계산된다. 이는 평균마찰계수는 UIC541-4에 의하면 압부력에 따라 다르게 정의하고 있으며, KTX의 평균마찰계수는 실물 다이내모 실험에 의해 검증이 필요하다.

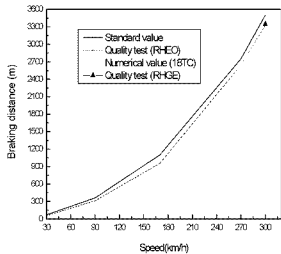


그림 6 Emergency braking distance

3. 점착력 계산 및 제동력의 한계 분석

점착력은 차량 증류별 점착 증량(W)과 점착계수($\mu_{adhesion}$)의 곱으로 계산되며, 점착계수는 실험식에 의하지만 현실적으로는 기후 조건에 의한 영향을 많이 받게되므로 실험식과 각국의 실험조건에 의하여 약간의 차이가 있다. 국내에서는 고속철도에 대한 점착계수 실험식이 없으므로 점착계수 계산식은 TGV-K에 적용하는 식으로 하였다. 점착력을 계산하기 위하여 차중별 증량을 분석하였으며, 동력 대차와 객차 대차의 증량이 다르므로 각각 적용하고 동적용 증감소는 15%로 적용하여 수치계산하였다.

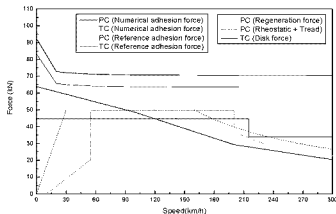


그림 7. Comparison of braking and adhesion force for rolling stock

차종별 점착력과 제동력의 수치계산 결과를 비교하면 그림 7과 같으며, 동력 대차 및 객차 대차의 경우 비슷한 경향을 보이고 있으며, 속도 120kph 이상으로 가면 점착력을 약간 벗어나는 경향으로 나타나고 있다. 수치계산이며, 점착계수가 국내 적용 조건에 적합하다고 할 수 없고, 차량의 점착중량을 빈차 조건으로 계산하였으므로 승객과 급수 및 부속품 등의 영향으로 약간 점착력이 높아지면 달라질 것으로 보인다. 다만, 제동력을 증가시켜 제동거리 단축과 감속도를 높이기 위하여는 점착력을 높이는 설계방안을 충분히 고려해야 하며 국내 선로와의 점착계수 실험식을 정립할 필요가 있다.

4. 결론

고속철도의 안전확보를 위하여 제동력에 영향을 미치는 제동장치별 제동력을 수치계산으로 검토하였으며, 특히 TGV-A의 차량과 TGV-K 도입차량은 장대편성하여 제동력 변동이 있으며, 변동이후의 점착력과 상관관계에 의한 점착한계 검토, 전기 및 공기 제동의 협조관계에서 분담력을 분석한 결과는 제동력의 증가에도 차량마다 50KN이내임을 확인하였다. 점착력과의 비교에서 공차조건으로 계산한 결과는 120kph이상의 속도에서는 점착력을 넘는 경향이 보이므로, 점착중량과 점착계수 실험식의 연구에 의하여 충분한 검토가 필요하다.

제동력에서 기계 제동력의 증가는 전기 제동의 우선 적용으로 배분력을 적절히 협조하도록 설계되어 있으나, 공기제동에 의한 마찰 제동이 디스크에 압부력을 증가하면 압부력에 의한 마찰의 안정성과 마찰재의 특성 변화에 대하여 향후 공기 제동의 영향인자 및 전기 제동과의 분담력에 대한 정밀한 고찰이 필요함을 알게 되었다.

참고문헌

1. 김완두, 함동호, 고속전철의 제동장치 기술개발, 대한기계학회지, 제34권, 제6호, pp.446 ~ 453, 1994
2. 김완두, 고속전철의 제동시스템 기술현황, 기계와 재료, 제 6권 3호, pp. 61 ~ 68, 1994
3. 최강윤외, 고속철도 시험 및 시운전보고서-차량분야-, pp. 61 ~ 63, 2004. 6
4. UIC 541-3 4th, Brakes, Disc brakes and disc brake pads, 93.1.7
5. Technical specification brake pad for disc, GEC ALSTOM, pp. 1 ~ 7, 27-jun-95