

가속도/감속도를 이용한 열차 견인력/제동력 추정방법에 대한 고찰

Study on the Deduction of Traction/Braking Forces for the Train from Acceleration/Deceleration

김영국[†] · 김석원* · 김기환* · 목진용*

Young-Guk Kim · Seog-Won Kim · Ki-Hwan Kim · Jin-Yong Mok

Abstract

In this paper, a method which can deduce the traction force or the braking force from the acceleration or the deceleration of the train, has been suggested. In the case of Korean high speed train (HSR-350x), the traction force and the braking forces have been obtained by using this method. It is proven that the proposed method is a very good tool in estimating the traction force or the braking force when the train starts or stops. Also, these forces can be used to calculate friction coefficients of mechanical brakes and the transmission efficiency of the traction system.

Keywords : Resistance(주행저항), Traction(견인), Braking(제동), Gradient resistance(구배저항), Korean high speed train(한국형 고속열차, HSR-350x), Traction force(견인력), Braking force(제동력), Friction coefficient(마찰계수)

1. 서론

철도차량은 기계, 전기, 전자, 제어, 통신 등의 기술과 여러 가지 시스템이 종합적으로 결합된 결정체로 각 시스템의 성능 검증을 통한 안전성과 신뢰성 확보가 필요하다. 특히 열차의 안전한 출발과 제동, 정속 주행 등을 위한 견인성과 제동성능의 검증이 반드시 수행되어야 하며, 이를 위해서는 견인장치의 견인력과 제동장치의 제동력을 측정하여 열차의 견인성능과 제동성능을 평가 하여야 한다[1-3]. 그러나, 철도차량은 큰 중량에 의한 큰 관성력, 차체/대차 및 대차/차륜간의 상대적인 큰 움직임, 복잡한 동력 전달 구조 등 철도차량 자체가 갖는 요인과 자갈 비산, 먼지, 비, 눈 등의 철도 주변의 환경 요인이 결합되어 있기 때문에 철도차량에서 동력전달 계통의 견인력과 제동력을 직접적으로 측정하기는 쉽지 않은 일이다. 자동차의 경우에는 차륜에 설치하여 직접적으로 차륜에 걸리는 토크를 측정할 수 있는 전용 토크 센서가 상업적으로 판매되고 있기 때문에 쉽게 자동차 차륜에 걸리는 견인력과 제동력을 측정하는 것이 가능하다. 철도

차량에서는 차륜에 걸리는 견인력과 제동력을 스트레인게이지, 텔레메트리(Telemetry)를 이용한 전용 측정 장비를 제작하여 측정하고 있으나, 가격이 고가이고 장비 보정 등이 어려움과 갖고 있다.

본 논문에서는 철도차량의 차륜에 작용되는 견인장치의 견인력과 각종 제동장치의 제동력을 전용 측정 장비에 의해 직접적으로 측정하지 않고 열차의 견인시 및 제동시에 발생하는 열차 가속도 및 감속도를 이용하여 간접적으로 견인력과 제동력을 추정하는 방법을 제안하고 이 방법을 국가의 전략적 연구사업으로 추진된 고속철도기술개발사업의 결과물인 한국형 고속열차에 적용하여 견인력과 제동력을 추정하였다.

2. 한국형 고속열차의 견인시스템 및 제동시스템

한국형고속열차 시제열차(HSR 350x)의 편성은 Fig. 1에 서와 보는 바와 같이 동력차 2량(TP1, TP2), 동력객차 2량(TM1, TM5) 및 객차 3량(TT2, TT3, TT4) 등 총 7량으로 구성되어 있다. 대차는 동력차, 동력객차, 객차를 각각 지지하는 동력 대차 4대(BM1, BM2, BM9, BM10), 동력객차 대차 2대(BM3, BM8), 객차대차 4대(BT4~BT7)로 총 10대이며, 이들은 각각 2개의 윤축에 의해 지지되고 있다[4,5].

† 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단
E-mail : ygkim@krii.re.kr
TEL : (031)460-5612 FAX : (031)460-5649

* 한국철도기술연구원

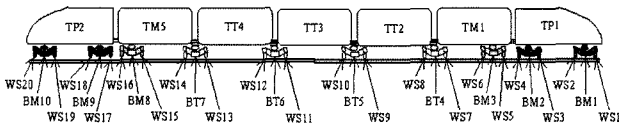


Fig. 1. Configuration of Korean high speed train(HSR 350x).

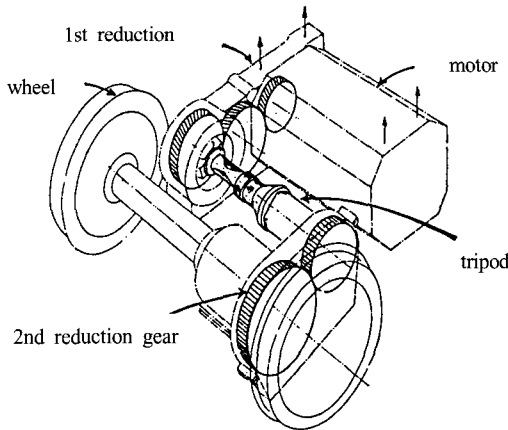


Fig. 2. Traction system of HSR 350x.

동력대차에는 Fig. 2와 같이 2개의 견인장치와 4개의 담면 제동장치, 동력객차 대차에는 동력대차와 동일한 형태의 2개의 견인장치와 2개의 휠디스크 제동장치가, 객차 대차에는 Fig. 3과 같은 디스크 제동장치 6개가 설치되어 있다. 동력대차 및 동력객차 대차에 설치되어 있는 견인장치는 견인시에는 모터로 작동하여 열차를 추진시키며, 제동시에는 발전기로 작동하여 열차를 제동시키는 전기제동장치의 역할을 하게 된다. Fig. 4는 견인시와 제동시에 열차 진행방향으로 작용하는 차륜과 레일 사이의 각종 힘들로 인해 발생한 가속도를 열차 속도에 따라 나타낸 것으로 차량에서 요구되는 감속도 내에서 열차를 안전하게 출발 및 정지할 수 있는 성능이 확보되도록 제동장치들을 적절히 조합하여 전체 시스템이 구성되어 있다[4-6].

3. 열차 견인력 및 제동력

3.1 열차 가속도/감속도와 견인력/제동력의 관계

열차에 견인력이 작용하면 열차는 가속되는 반면에 열차에 제동력이 작용하면 열차는 감속하게 된다. 열차에 작용하는 견인력과 가속도, 제동력과 감속도는 열차 진행방향에 대해 뉴턴(Newton)의 운동방정식을 적용하면 식 (1)과 식 (2)와 같은 관계식을 얻을 수 있다[2].

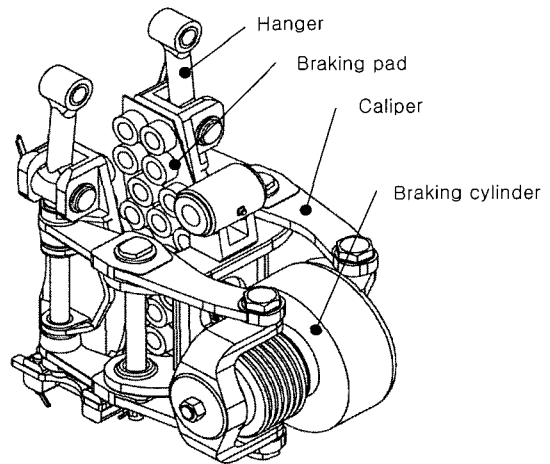


Fig. 3. Disc brake unit assembly

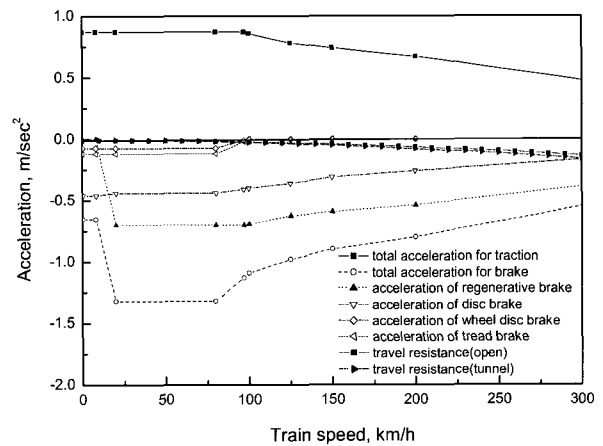


Fig. 4. Accelerations according to traction and braking

□ 견인시

$$F = ma = F_t - R - mg \sin \theta$$

$$F_t = ma + R + mg \sin \theta \quad (1)$$

□ 제동시

$$F = ma = -F_b - R - mg \sin \theta$$

$$F_b = -ma - R - mg \sin \theta \quad (2)$$

여기서, F 는 열차의 관성력, m 은 열차 질량, F_t 는 열차의 견인력, F_b 는 열차의 제동력, R 은 열차의 주행저항이며, θ 는 선로구배로써 +는 상구배, -는 하구배를 각각 나타낸다. 또한, a 는 열차의 가속도와 감속도를 나타내는 데, +는 열차 가속도이고 -는 열차 감속도를 의미한다.

3.2 구배 및 주행저항이 열차 가속도/감속도에 미치는 영향 분석

일반적으로 선로 구배와 주행저항은 식 (1)과 식 (2)와 같이 열차를 가속시키거나 감속을 시키게 된다. 본 논문에서 열차의 가속도와 감속도로부터 견인력과 제동력을 추정하기 위해 Fig. 5와 같이 경부고속선로의 KP 22~KP 145 구간에서 수행된 시운전 시험 데이터의 일부를 사용하였다. 이 구간은 선로 구배가 -15~18‰이고 터널이 21개가 설치되어 있다. 이 구간의 선로 구배에 의한 열차 가속도 효과는 Fig. 5의 하단 그래프에 변화로 표현되어 있으며, 터널의 효과는 주행저항에 포함되어 열차의 가속도에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 주행저항은 식(3)과 같이 데이비스(Davis)가 제안한 식으로 표현할 수 있으며, 본 논문에서는 한국형 고속열차의 타행시험을 통해 얻어진 시험 데이터를 활용하여 개활지와 터널에 대해 별도의 주행저항을 구하여 사용하였[2], 주행저항이 열차에 미치는 감속도를 Fig. 4에 나타내었다.

$$R = a + bV + cV^2 \quad [daN] \quad (3)$$

여기서, V는 열차의 주행속도[km/h], a, b, c는 타행시험을 통해 얻어진 데이터로부터 얻어진 계수이다.

이러한 구배저항과 주행저항이 열차의 가속과 감속에 미치는 영향의 정도를 견인장치의 견인력과 제동장치의 제동력과 비교를 통해 정량적으로 파악해 보면 구배저항과 주행저항이 열차의 가속과 감속에 미치는 영향의 중요성을 이해할 수 있다. 그 한 예로 주행속도 300km/h로 견인시에 견인장치에 의해 열차에 작용되는 가속도는 0.48m/sec²이며, 이 구간에서의 최대 구배 가속도는 0.18m/sec², 주행저항 감속도는 0.16m/sec²,(터널)/0.13m/sec²(개활지)으로 견인장치의 가속도의 27~37.5%에 해당한다. 또 다른 예로 주행속도 300km/h에서 제동시에 디스크 제동장치에 의해 열차에 작용되는 감속도는 0.18m/sec² 정도로 최대 구배 가속도 및 주행저항 감속도와 비슷한 수준이다. 따라서, 열차의 견인시 및 제동시에 발생하는 열차 가속도 및 감속도를 이용한 견인력과 제동력을 추정시 구배저항 및 주행저항을 적절히 고려해야 할 것이다.

3.3 계측시스템

Fig. 6은 본 연구에 사용된 계측시스템의 구성도이며, Fig. 7은 계측시스템이 한국형 고속열차에 실제 설치된 모습이다. 열차에 설치된 압력센서, 펄스발생기 등의 센서 신호와 제동/견인, PWM 등의 차량신호가 계측시스템으로 입력되며, 이 입력 신호로부터 열차의 주행속도, 이동거리, 제동/견인 여부, 각 제동장치의 작동여부 등을 확인하여 입력신호와 함께 저장된다.

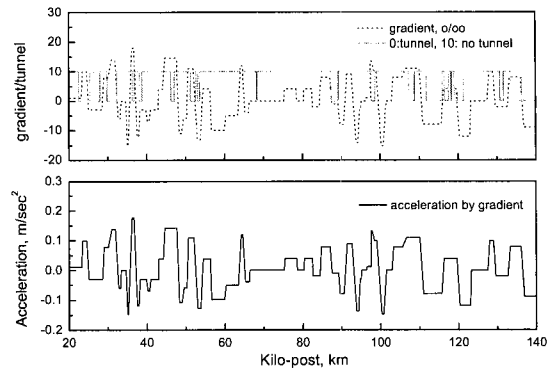


Fig. 5. Gradients, tunnel signal and gradient accelerations

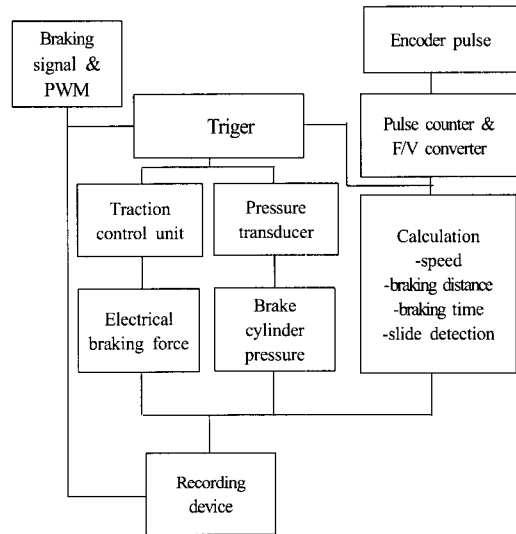


Fig. 6. Schematic diagram of measuring system

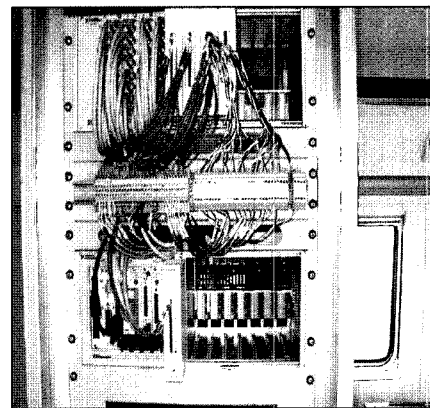


Fig. 7. Experimental set-up of measuring system

Fig. 8은 시운전 시험에서 실제 계측된 예로 타행 주행시 열차의 주행속도로부터 구해진 열차의 가속도와 구배 가속도를 나타낸 것이다. 그림에서 열차의 가속도와 구배 가속도는 임의의 열차 위치에서 거의 동일한 형태를 갖으며, 이는 계산에

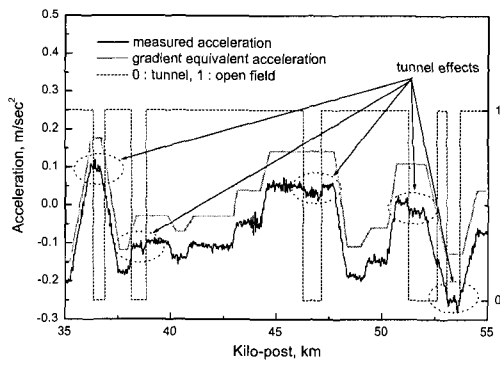


Fig. 8. Measuring example

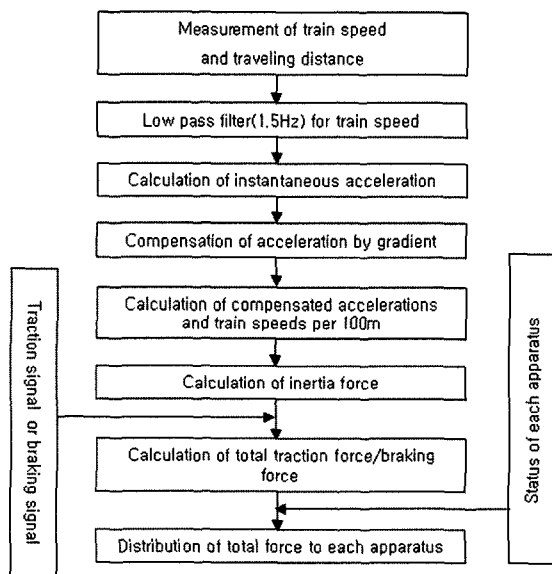


Fig. 9. Flowchart of estimation for traction/braking force of train

사용된 선로의 구간 구배 정보가 정확하다는 것을 말해준다. 또한, 터널 구간에서 열차의 가속도가 개활지보다 작은 값을 나타내며, 이는 터널의 주행저항이 개활지의 주행저항보다 크다는 사실을 입증하는 것이다.

4. 열차의 견인력 및 제동력 추정

Fig. 9는 열차의 가속도/감속도를 이용하여 열차에 작용하는 견인력/제동력을 추정하는 흐름도이다. 열차 주행속도와 주행거리 데이터를 계측시스템으로부터 측정된 후 측정된 열차 주행속도를 1.5Hz 저주파 통과 필터(low-pass filter)로 필터링한다. 이는 500Hz로 측정된 속도신호를 미분하여 가속도 신호로 변환하는 과정에서 발생하는 고주파 성분에 의한 오차를 줄여 주기 위해 사용하였다. 이 필터링된 열차 주행속

Table 1. Cases for estimation studies

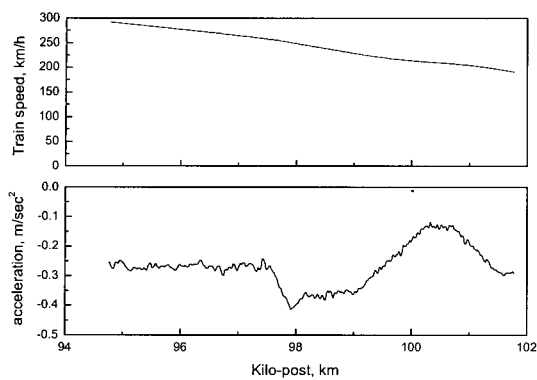
Case	Train speed (km/h)	Train condition	PWM (%)	
1	300 - 180	Braking	Disk	100
2	200 - 110		Disk	100
3	200 - 90		Disk, Wheel disk, Tread	100
4	300 - 100		Electrical, Disk	100
5	0 - 300	Traction	100	

도로부터 열차의 관성력에 의해 발생하는 가속도를 구하고 구배와 주행저항 효과에 대해 보정을 한 후에 100m 간격으로 가속도와 주행속도를 구한다. 이 가속도를 이용하여 열차의 관성력을 계산한 후 운전실의 열차 추진/제동 운전제어기(Mas. con.)에서 전달된 견인과 제동 확인 신호로 열차의 구동상태를 확인하여 그에 따른 전체 견인력 또는 전체 제동력을 구한다. 이 전체 견인력과 제동력을 견인장치와 제동장치의 작동상태에 따라 각 장치들에 분배하여 견인력과 제동력을 구한다.

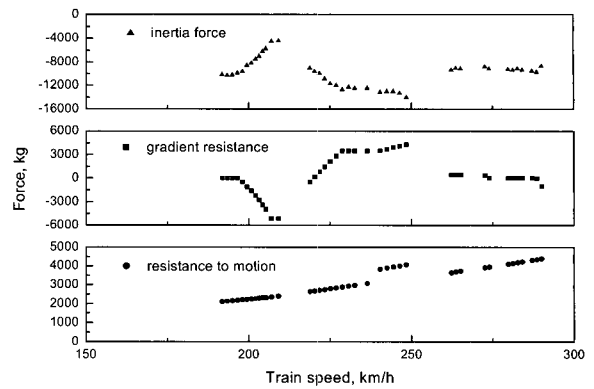
Table 1은 열차의 가속도/감속도를 이용하여 견인장치와 제동장치가 열차에 작용하는 견인력/제동력을 추정하기 위해 사용된 실례를 정리한 것으로 최대 하중 상태(PWM 100%)에서 견인조건 1가지 경우와 제동 조건 4가지 경우에 대해 견인력/제동력을 추정하였다.

Fig. 10은 Fig. 9의 흐름도에 따라 제동력을 구하기 위해 필요한 case1의 측정데이터 및 제동력의 추정 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10(a) 상단 그래프는 측정된 열차 주행속도로 열차가 300km/h에서 180km/h로 제동되고 있음을 보여주고 있으며, 하단 그래프는 측정 주행속도를 미분해서 얻어진 순간 가속도로 열차의 관성력을 계산하는 데 사용된다. Fig. 10(b)는 관성력, 구배저항 및 주행저항을 나타내는데 구배저항과 주행저항은 최대 관성력의 31~35%를 차지하고 있다. Fig. 10(c)는 차륜과 레일에 작용하는 전체 제동력을, Fig. 10(d)는 전체 제동력을 제동장치 종류별로 제동력을 분배한 것으로 Table 1에서 언급한 바와 같이 디스크 제동장치만으로 제동하고 있음을 알 수 있다. case1과 case2는 동일한 제동조건(디스크 제동장치만 사용)으로 제동을 한 경우이므로 case2의 제동력 추정결과의 설명은 생략하였지만 Fig. 10과 유사한 형태의 제동력 추정결과를 갖는다.

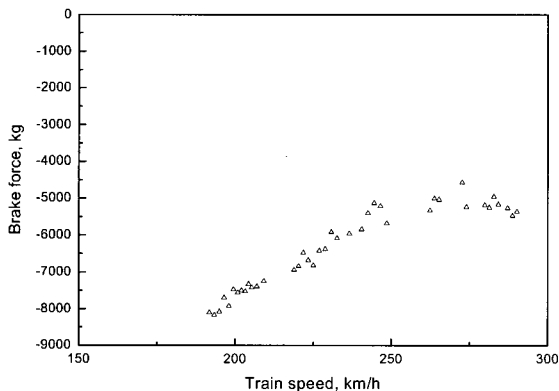
Fig. 11은 한국형 고속열차에 사용된 제동 패드의 마찰계수를 나타낸 것이다. case1과 case2의 디스크 제동장치의 제동력과 제동실린더에 의해 발생하는 제동 수직력을 이용하여 계산한 결과이다. 한국형 고속열차는 디스크 및 휠 디스크 제동장치에 동일한 제동 패드를 사용하고 있기 때문에 이 결과를



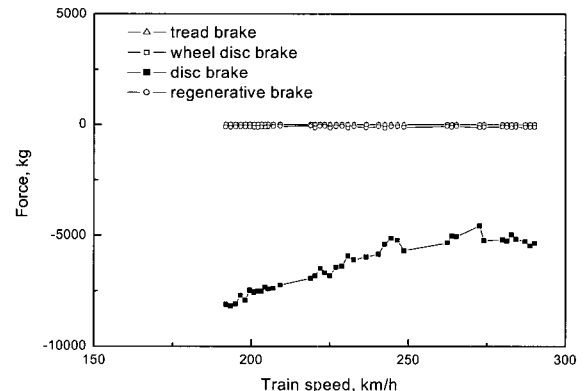
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10. Case1, (a) measured train speed and acceleration, (b) inertia force, gradient force and motion resistance, (c) total brake force, (d) brake forces by each braking system

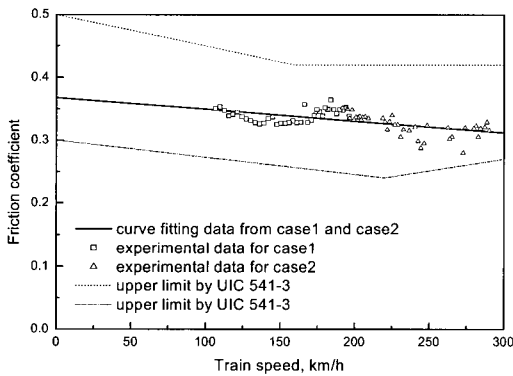
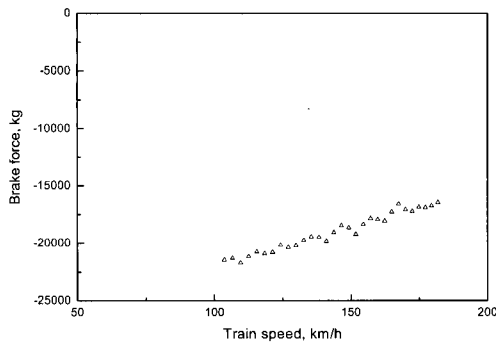


Fig. 11. Friction coefficient of disc

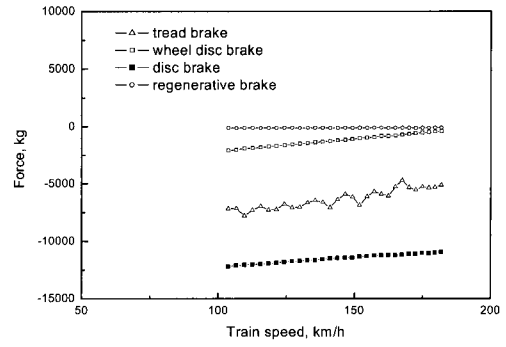
휠 디스크 제동장치에 적용해도 된다. 그림에서 제동패드의 마찰계수는 0.31~0.37 정도로 UIC에서 요구하는 범위 내에 존재하고[7] 열차속도가 감소함에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 다이내마 시험기를 이용하여 측정된 마찰계수보다는 작지만 열차속도에 따른 변화 경향은 거의 일치한다[8].

Fig. 12와 Fig 13은 case3과 case4에 대한 제동력을 추정한 결과를 나타낸 것이다. case3은 Fig. 12에서 보인 바와 같이 디스크, 휠 디스크 및 답면 제동장치에 의해 열차의 제동이 이루어지고 있으며, 제동력은 디스크, 답면 및 휠디스크 제동장치 순서로 작다. case4는 전기(회생)와 디스크 제동장치에 의해 열차가 제동되고 있으며, 제동력은 전기제동이 디스크 제동보다 약 평균 12% 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 case 5에 대해 견인력을 추정한 결과를 나타낸 것으로 열차가 정지 상태에서 출발하여 주행속도 300km/h 까지 도달하는 경우이다. Fig. 14(a)에서 최대 관성력은 약 16,000kg이며, 구배저항과 주행저항은 최대 관성력의 25~34% 정도를 차지하고 있다. Fig. 14(b)는 차륜과 레일에 작용하는 견인력을 나타내며, 견인력은 견인모터의 성능[4,5]과 거의 동일한 형태로 열차의 속도가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 견인모터의 성능곡선을 알 수 있으면 견인력 추정 결과는 Fig. 2와 같은 견인 시스템의 동력전달장치(감속기 등)의 전달효율을 구하는 데 유용하게 활용할 수 있다.

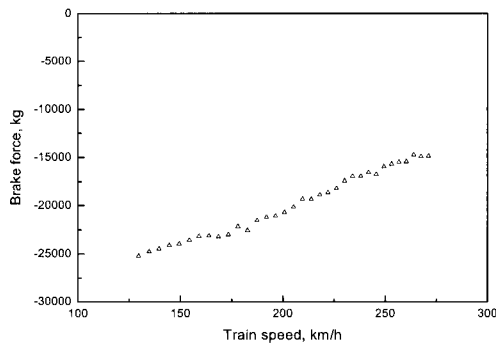


(a)

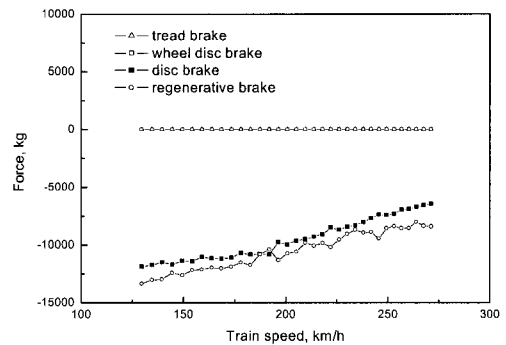


(b)

Fig. 12. Case3, (a) total brake force, (b) brake forces by each braking system

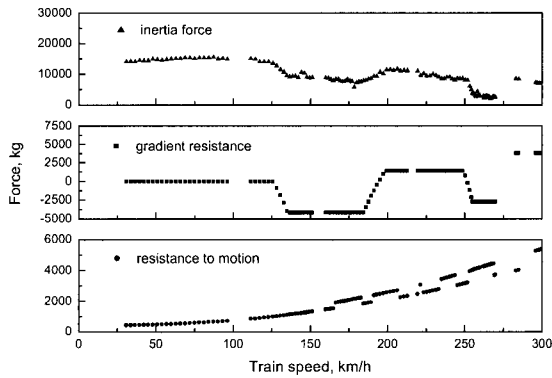


(a)

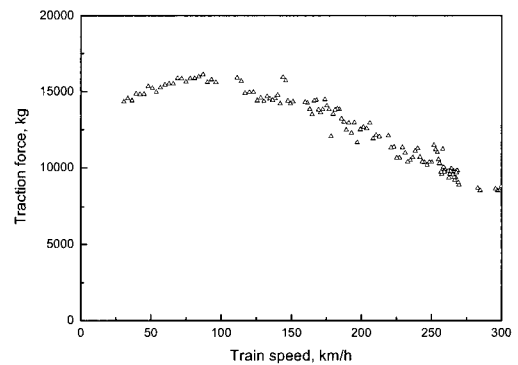


(b)

Fig. 13. Case4, (a) total brake force, (b) brake forces by each braking system



(a)



(b)

Fig. 14. Case5, (a) inertia force, gradient force and motion resistance, (b) total traction forces

5. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 열차의 견인시 및 제동시에 발생하는 열차 가속도 및 감속도를 이용하여 간접적으로 견인력과 제동력을 추정하는 방법을 제안하고, 이를 한국형 고속열차에 적용하여 열차에 작용하는 견인력과 제동력을 추정하였다.

(2) 실제 선로에서 구배저항과 주행저항이 열차의 가속과 감속에 미치는 영향의 정도를 한국형 고속열차의 견인/제동 성능을 이용하여 정량적으로 파악해 보았으며, 이들은 300km/h로 견인시최대 견인력의 27~37.5%, 주행속도 300km/h에서 제동시 디스크 제동력과 거의 동일한 수준임을 확인하였다.

(3) 추정된 제동력을 이용하여 한국형 고속열차에 사용된 제동 패드의 마찰계수를 구하였으며, 이 마찰계수는 UIC에서

요구하는 범위 내에 존재하고 다이내모 시험기를 이용하여 측정된 마찰계수보다는 작지만 열차 주행속도에 따른 변화 경향은 거의 일치한다. 또한, 추정 견인력은 견인모터의 성능곡선을 아는 경우에 견인 시스템의 동력전달장치(감속기 등)의 전달효율을 구하는 데 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김영국, 김석원, 박찬경, 김기환, 목진용, “시운전 시험을 통한 한국형고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가,” 한국철도학회논문집, 제6권, 제4호, 한국철도학회, pp.332-338, 2003.
2. 김영국, 권혁빈, 김석원, 박태원, “한국형 고속열차의 주행저항 평가,” 한국철도학회논문집, 제8권, 제5호, 한국철도학회, pp. 332-338, 2005.
3. International Standard IEC 1133, IEC, 1992.
4. G7 고속전철 시제차량 기본사양, 한국철도기술연구원, 1998.
5. G7 고속전철 기술개발사업 Control System Specification, (주)로템, 2001.
6. 제동시스템 개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서, 건교부/산자부/과기부, 1996-2001.
7. UIC Leaflet 541-3, Brakes-Disc brakes and their application-General conditions for the approval of brake pads, 5th edition, 2004.
8. 김기열, 김상호, 김유신, 이범주, 김석원, “고속 철도 차량용 소결 마찰재료 개발,” 춘계학술대회 논문집, pp.315-321, 한국철도학회, 2004.