

제동시 점착력과 제동력의 관계에 대한 고찰

Discussion of the relationship between adhesion force and braking force in slip condition

김영국* 김석원** 목진용** 김기환**
Kim, Young Guk Kim, Seog Won Mok, Jin Yong Kim, Ki Hwan

ABSTRACT

The brake system of train must possess the large braking effort in order to stop the train safely within the limited traveling distance. But, the excessive braking effort has been deteriorated the ride comfort due to high level of deceleration and jerk, and sometimes occurred the skid, because the applied braking force exceeds the allowable adhesive force. This skid causes not only to increase the stopping distance but also to deteriorate the safety of train and damage the rail surface by wheel flat.

In the present paper, the braking force for disc brake of Korea High Speed Train (HSR350x) was measured through on-line test and the adhesion force was estimated by using the analytic model in the skid condition. Also, we have discussed the relationship between the actual disc brake force and the adhesion force in real skid condition.

1. 서론

철도차량은 레일 위를 주행하므로 차륜과 레일간의 금속접촉에 따른 마찰계수가 작아서 제동거리가 자동차와 비교하여 매우 길다. 따라서, 철도차량의 제동장치는 정상적인 운행에서 승객이 불편해 하지 않도록 열차를 원하는 위치에 정지시키거나 요구하는 속도로 감속시킬 수 있어야 할 뿐만 아니라 돌발적으로 발생하는 사태에 대해 열차가 최단거리 이내에서 신속히 정지할 수 있도록 큰 제동력이 확보되어 있어야 한다. 그러나, 철도차량이 짧은 제동거리를 확보하기 위해 너무 큰 제동력을 갖는 경우에는 열차의 감속도가 너무 크게 되거나 급격한 제동력의 변화로 인한 큰 저크(Jerk)가 발생하여 승객이 불편함을 느낄 뿐만 아니라 제동력이 레일과 차륜간의 점착력보다 큰 경우에는 차륜이 활주하게 된다. 차륜의 활주는 열차의 제동거리를 늘리는 원인이 되며, 차륜의 손상을 초래하여 열차의 주행안전성과 주행안정성의 저하, 레일 손상 등의 문제를 발생시키게 되어 열차가 운행할 수 없는 상태에 까지 이르게 된다. 따라서, 차륜의 활주가 발생하지 않는 상태로 열차를 정지시키거나 감속시키기 위해서는 철도차량은 차륜과 레일간의 점착특성을 고려하여 제동장치의 제동력을 제어해야 한다[1-6].

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

E-mail : ygkim@krri.re.kr

TEL : (031)460-5612 FAX : (031)460-5649

** 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

본 논문에서는 한국형 고속열차(HSR350x)의 디스크 제동장치에 대해 제동력을 측정하였고, 이 측정 데이터를 활용하여 디스크 제동장치가 활주 제어상태에서의 점착력을 역학모델을 이용하여 추정하고 그들의 관계에 대해 고찰하였다.

2. 철도차량의 제동시스템 및 활주 방지장치

2.1 제동시스템 종류 및 구성

일반적으로 고속철도 차량의 제동은 전기 제동과 기계 제동으로 분류되어 있으며, 이들을 적절히 조합시켜 원하는 제동거리를 확보하고 있다. 전기 제동은 기계적인 접촉이 없는 비접촉 제동방식으로 회생제동, 저항제동, 와전류 제동 등으로 분류된다. 회생 제동은 동력대차에 설치된 전동기가 제동 시에 발전기의 역할을 하여 잉여 전기에너지를 생산하고 이 전기에너지를 가선으로 보내어 다른 열차의 추진에 사용하도록 하는 방식이며, 저항제동은 생산된 잉여 에너지를 차량에 설치된 주저항기에서 열로 발산시켜 에너지를 소비하는 방식이고 와전류제동은 대차에 설치된 전자석을 이용하여 레일과 전자석의 자기력을 이용하여 제동하는 방식이다. 또한, 기계 제동은 기계적인 마찰력을 이용하는 제동 방식으로 디스크 제동, 휠-디스크제동 및 답면 제동으로 세분화시킬 수 있다. 한국형 고속열차 시제열차에는 전기제동장치와 기계제동장치가 설치되어 있으며, 이들 제동장치를 조합하여 필요한 제동력을 발휘하도록 되어 있다[1, 7, 8]. 전기제동장치는 고속 영역에서 주로 사용하도록 되어 있으며, 기계제동장치는 마찰패드 마모, 온도상승에 따른 패드의 마찰계수 저하 등을 방지하기 위하여 저속영역에서 사용하도록 제동장치들이 블렌딩(blending)을 하도록 설정되어 있다. Fig. 1은 객차대차에 설치되어 있는 기계제동장치의 1개인 디스크 제동장치를 나타낸 것으로 공기압력에 의해 작동하는 제동실린더와 링크로 연결된 마찰패드가 차륜에 설치된 디스크를 잡아 정지시키는 구조로 되어 있다.

2.2 활주 방지장치

열차의 제동시 제동장치의 제동력이 점착력보다 크게 되면 차륜과 레일 사이에서 차륜의 활주가 발생하여 차륜의 찰상이 발생하거나 열차 운행 제어가 불안정한 상황에 이른다. 이를 방지하기 위하여 철도 차량에는 활주 방지장치가 설치되어 있다. 디스크 제동장치가 설치된 한국형 고속열차 시제차량의 객차대차에 설치된 활주 방지장치는 활주 방지제어장치, 활주 방지밸브(덤프밸브) 및 4개의 속도 센서로 이루어져 있다. 차축에 설치되어 있는 속도센서를 이용하여 해당 대차의 2개 차축과 인접대차의 2개 차축으로부터 속도를 측정 후, 이들 속도를 이용하여 기준속도를 산출한다. 활주 방지장치는 각 차축의 속도와 산출된 기준속도를 비교하여 활주발생 판단 기준을 초과하게 되면 활주로 판단하여 활주방지밸브를 작동하도록 되어있다. 만일 차륜의 활주가 발생하면 활주가 발생한 대차의 제동장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 제동실린더의 압력을 강제적으로 감소시켜 제동력을 작게 하고 재점착이 이루어진 후 제동실린더의 압력을 서서히 증가시켜 초기에 설정된 제동력을 발휘할 수 있도록 설계되어있다.

3. 활주현상 모델링 및 Case study

3.1. 활주현상 모델링

일반적으로 건조상태와 같이 차륜과 레일이 양호한 경우에는 제동장치의 제동력이 차륜과 레일 사이의 최대 점착력보다 작기 때문에 활주현상이 발생하지 않지만, 강우, 강설, 안개 등 기후조건의 변화로 차륜과 레일이 젖은 상태가 되면 제동장치의 제동력이 최대 점착력을 초과하여 활주현상이 발생하게 된다. Fig. 3은 활주현상을 모델링하기 위해 사용된 휠, 디스크 제동장치 및 레일에 대한 역학모델로 1개 윤축에 작용하는 하중들의 관계를 나타내고 있다. Fig. 4는 해당 윤축의 제동력이 최대점착력을 초과할 때, 윤축의 활주가 발생하고 활주방지 장치가 작동하여 재점착이 이루어져 윤축이 정상적으로 작동하게 되는 동안의 열차속도에 대한 점착력과 제동력의 변화를 개념적으로 나타낸 것이다. I 영역은 윤축의 활주가 발생함 없이 디스크 제동장치가 정상적으로 작동하는 영역이고 II 영역은 디스크 제동장치의 제동

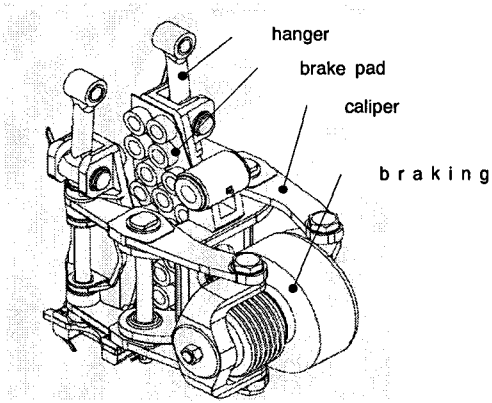


Fig. 1. Disc brake unit assembly

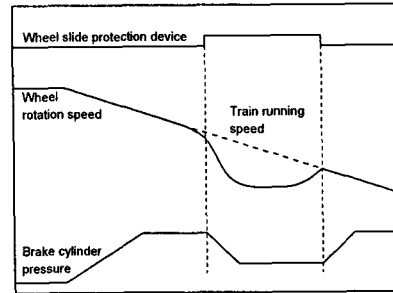


Fig. 2 Variation of train speed and brake pressure on the condition of anti-slide control

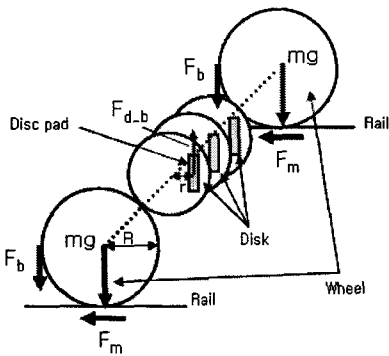


Fig. 3. Dynamic model for wheel, disc brake and rail

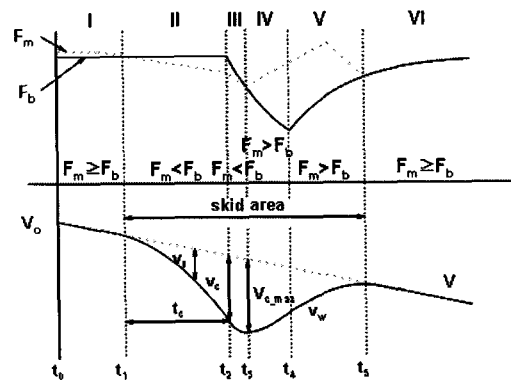


Fig. 4. Schematic diagram for adhesion force and brake force according to train speed

력이 최대 점착력을 초과하여 활주가 발생하는 영역이며, III 영역은 활주속도가 활주검지 기준을 초과하여 활주방지 장치가 작동되어 제동 실린더의 압력을 강제적으로 감소시켜 제동력을 낮추는 영역이다. IV 영역은 재점착은 시작되었으나, 확실하게 차륜과 레일이 재점착되도록 일정시간 동안 제동 실린더 압력을 계속적으로 하강시키는 영역이고 V 영역은 재점착 상태에서 제동 실린더의 압력을 상승시켜 제동력을 증가시키는 영역이며, VI영역은 재점착이 완료된 후 I 영역과 같이 제동장치가 정상적으로 작동하는 영역이다.

개념적으로 나타낸 Fig. 4의 활주제어 상태에서 각 영역에서 제동력과 점착력에 따른 열차의 속도와 차륜의 속도 및 활주속도의 관계에 대한 이해가 필요하다. 열차의 속도는 식 (1)과 같이 열차의 작용하는 감속도에 의해 결정되며, 열차의 속도(V)와 차륜의 속도(v_w) 및 활주속도(v_s)의 관계는 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$V = V_o - \beta t \quad (1)$$

$$v_w = V - v_s \quad (2)$$

여기서, β : 차량 감속도, t : 실제의 제동 작동 후 현재 상태까지 걸린 시간

제동력, 점착력 및 차륜의 활주속도(v_s)는 다음과 같다.

[I , VI영역]

$$F_b = K_1 - K_2 \quad (3)$$

$$v_s = 0$$

여기서, K_1, K_2 : 디스크 제동장치 및 차륜의 제원으로 결정된 상수

[II영역]

$$F_b = K_1 - K_2 \quad (4)$$

$$v_s = \frac{(K_1 - K_2 - F_{m_2})R^2}{I} t$$

여기서, F_{m_2} : II영역의 점착력

[III영역]

$$F_b = K_3 e^{-\frac{t}{T_1}} - K_2 \quad (5)$$

$$v_s = v_c + \frac{R^2 K_3 T_1}{I} (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) - \frac{(K_2 + F_{m_3})R^2}{I} t$$

여기서, T_1 : 압력감소 시정수, v_c : 활주감지 속도차, R : 차륜 반경, K_3 : 디스크 제동장치, 차륜의 제원 및 압력곡선으로부터 결정된 상수, F_{m_3} : III영역의 점착력

[IV영역]

$$F_b = K_3 e^{-\frac{(T+t)}{T_1}} - K_2 \quad (6)$$

$$v_s = v_{s-\max} + \frac{R^2 K_3 T_1}{I} \left[1 - e^{-\frac{(T+t)}{T_1}} \right] - \frac{(K_2 + F_{m_4})R^2}{I} t$$

여기서, T : III영역의 소요시간, $v_{s-\max}$: 최대 활주속도, F_{m_4} : IV영역의 점착력

[V영역]

$$F_b = K_6 - K_5 e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (7)$$

$$v_s = v_{s_4} + \frac{K_5 R^2 T_2}{I} (e^{-\frac{t}{T_2}} - 1) + \frac{(K_6 - F_{m_5})R^2}{I} t$$

여기서, T_2 : 압력 증가 시정수, v_{s_4} : IV영역 종료시점의 활주속도, K_5, K_6 : 디스크 제동장치, 차륜의 제원 및 압력곡선으로부터 결정된 상수, F_{m_5} : V영역의 점착력

3.2 시험계측 시스템

Fig. 5는 본 연구를 위해 사용된 계측시스템의 구성도이며, Fig. 6은 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 저장되도록 되어 있다[1, 2, 9, 10].

3.3 Case study

앞 절에서의 활주현상 모델링을 실제의 활주현상에 적용하기 위해서 다음 조건을 가정하였다.

(1) 활주가 일어나기 시작하는 II영역에서는 점착력이 1차식으로 변화하며, 수식전개를 편리하게 하기 위해 II영역의 점착력을 식 (8)과 같도록 정의한다.

$$F_{m_2} = F_{m_1} - \frac{2\alpha t}{R} \quad (8)$$

여기서, α : 점착력 저하계수($= \frac{I v_c}{R t_c^2}$), v_c : 활주감지 속도차, t_c : 활주시작에서 감지까지 걸린 시간

상수, F_{m_1} : I 영역 종료점에서의 점착력

(2) 활주속도가 최대가 되는 지점에서 점착력이 제동력이 일치한다.

(3) I 영역과 VI영역은 제동력과 점착력이 일치한다.

(4) III영역과 V영역의 점착력은 1차식이거나 기울기가 다른 1차식의 조합으로 구성한다.

활주현상 해석을 위한 입력 자료는 디스크 제동장치와 차륜의 제원과 관련한 입력 자료와 시운전시험을 통해 획득해야 하는 입력 자료로 구분된다. 전자의 경우에는 차륜반경, 디스크반경, 링크비, 윤축당 디스크 수, 윤축의 회전관성모멘트, 제동실린더 단면적 및 스프링 반력 등으로 이들은 설계 데이터로부터 획득하였으며, 후자의 경우는 디스크와 패드의 마찰력, 제동압력 시정수, 윤축에 걸리는 상당질량, 활주검지 시간 및 속도 등으로 시운전시험을 통해 획득하였다. Fig. 7은 한국형 고속열차의 디스크 제동장치가 실제 활주 제어를 행한 실제 예로 Fig. 4에서 개념적으로 설명한 활주 제어방식과 동일하며, 정상적인 활주 제어가 일어난 경우이다. Fig. 8은 디스크와 패드 사이의 마찰계수를 나타낸 것으로 이 마찰계수는 시운전 시험에서 별도의 마찰력 시험을 통해 획득하였다[10, 11]. 제동압력 하강 시정수와 상승 시정수는 Fig. 7에서 III, VI영역과 V, IV영역의 제동압력 시험데이터로부터, 윤축에 걸리는 상당질량은 Fig. 7에서 I 영역의 윤축 속도와 제동압력 시험데이터로부터, 활주검지 시간 및 속도는 Fig. 7에서 II 영역의 윤축 속도로부터 구하였다.

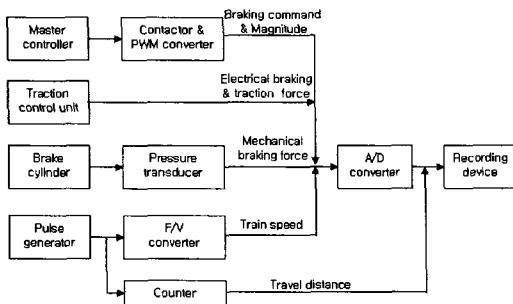


Fig. 5. Schematic diagram of measuring system

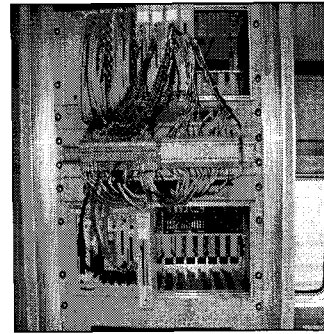


Fig. 6. Experimental set-up of measuring system

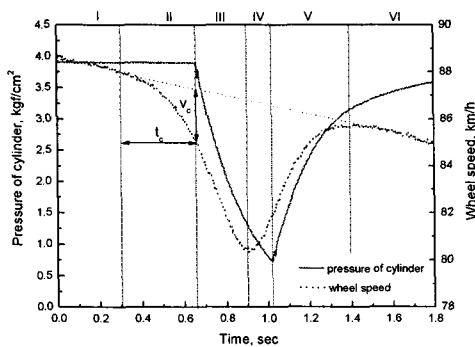


Fig. 7. Example of real slip control for disc brake

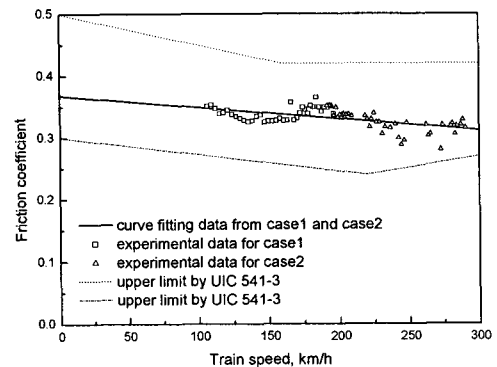


Fig. 8. Friction coefficients between disc and pad

Fig 9는 Fig. 7에 나타난 예제에 대해 활주현상 모델의 해석과 실제 활주 제어 상태의 계측 결과를 비교한 것이다. (a)에서 제동압력의 시뮬레이션 결과는 회귀곡선으로 구해진 압력 상승 및 하강 시정수를 이용하여 구한 결과로 모든 영역에서 제동압력의 계측결과와 잘 일치한다. (b)는 열차의 속도와 윤축의 속도에 대한 해석결과와 계측결과를 나타내며, (c)는 열차의 속도와 윤축의 속도에 대한 차이인 윤축의 슬립속도를 나타낸다. (c)에서 보는 바와 같이 점착 시작점인 휠의 최대 슬립속도에서 해석한 경우가 측정된 경우 보다 약 0.01초가 지연되고 있으며, 이 때 슬립속도 차이는 0.23 km/h(해석: 6.23 km/h, 계측: 6.46 km/h)이다. (d)는 각 영역에 대한 점착력을 나타낸 것으로 이 점착력과 식 (2) ~ 식 (8)를 사용하여 윤축의 슬립속도를 구하였다.

예제에서 본 바와 같이 활주현상에 대한 해석결과와 실제 계측결과가 거의 유사한 경향을 갖고 있으므로 이러한 결과는 가정한 점착력이 타당하다는 것을 말해 준다. 철도차량의 제동시 점착력은 활주가 발생하기 이전까지는 제동력보다 크며, 활주가 발생하여 활주속도가 최대가 되기 전까지는 제동력보다 작고 그 이후에는 다시 제동력보다 커져 재점착이 이루어지게 된다.

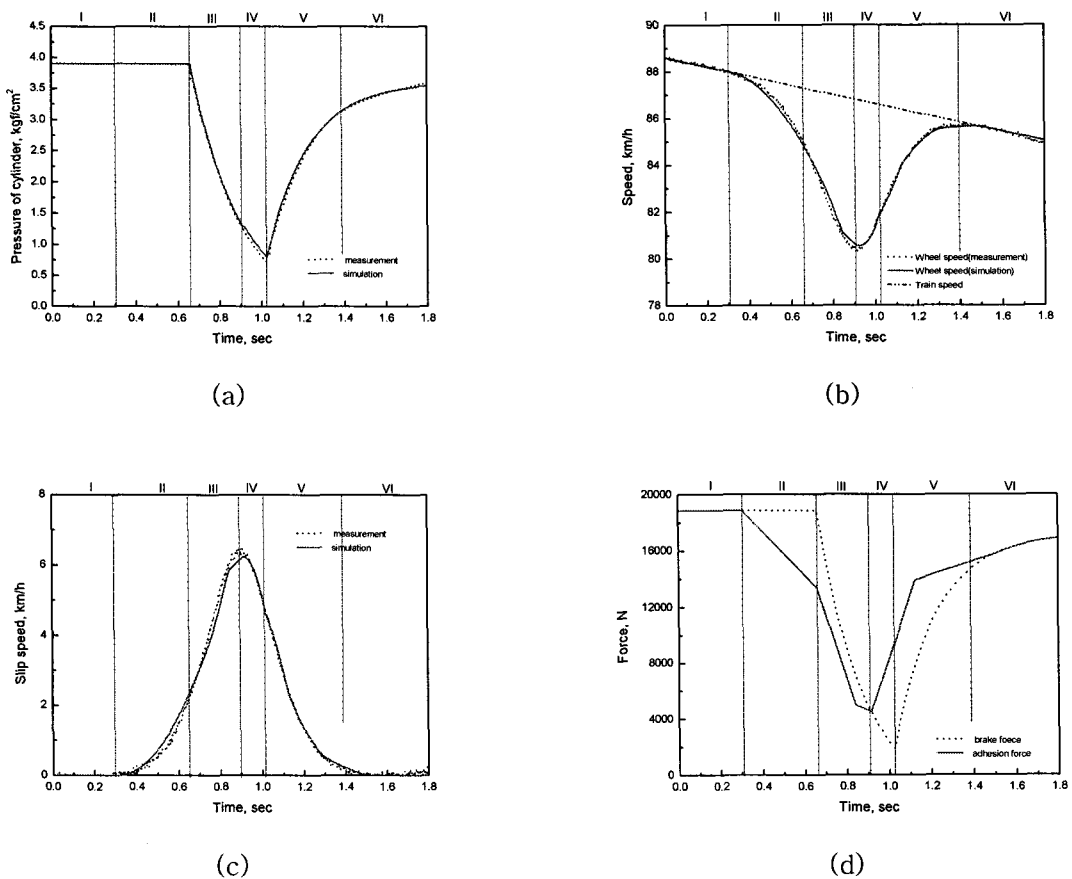


Fig. 9. Case1, (a) brake pressure, (b) wheel speed and train speed, (c) slip speed, (d) brake force and adhesion force

4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 디스크 제동장치를 갖는 철도차량의 활주 현상을 해석할 수 있는 모델링 방법을 제안하고 실제발생한 활주현상과 비교 고찰하였다.
- (2) 철도차량의 제동시 점착력은 활주가 발생하기 이전까지는 제동력보다 크며, 활주가 발생하여 활주속도가 최대가 되기 전까지는 제동력보다 작고 그 이후에는 다시 제동력보다 커져 재점착이 이루어지게 된다.

(3) 향후 여러 가지의 활주현상에 대한 Case study를 통해 제안한 방법에 대한 검증연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영국 등, (2006.), “가속도/감속도를 이용한 열차 견인력/제동력 추정방법에 대한 고찰,” 한국철도학회논문집, 제9권, 제6호, 한국철도학회, pp. 682-688.
2. 김영국 등, (2007), “고속철도 차량의 제동성능 해석에 대한 실험적 검증,” 한국센서학회논문집, 제16권, 제1호, 한국센서, pp. 68-76.
3. Uchida, S., et al., (2001), "Adhesion Force and Skid Control at Braking(Japanese)", RTRT report, vol. 15, no. 5, pp. 1-6.
4. Uchida, S., et al., (2000), "Appropriate Brake Control Based on Adhesion Characteristics(Japanese)", RTRT report, vol. 14, no. 5, pp. 5-10.
5. Yamazaki H., (2001), "Wheel Slip Prevention Control using Nonlinear Robust Control Theory (Japanese)", RTRI REPORT, vol. 19, no. 5, pp. 45-50.
6. Uchida, S., et al., (1993), “Brake Control for Speedup of Shinkansen EMU based on the Effective Use of Adhesion (Japanese)”, RTRI Report, Vol. 7, No. 3, pp. 41-48.
7. G7 고속전철 시제차량 기본사양, 한국철도기술연구원, 1998.
8. G7 고속전철 기술개발사업 Control System Specification, (주)로템, 2001.
9. 김석원 등, “고속철도 시운전시험 및 평가용 측정시스템 개발 (I)-하드웨어”, 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 168-173, 2002/
10. 김석원 등, (2006), “한국형 고속열차의 디스크-패드 마찰계수 측정에 관한 연구,” 한국철도학회 논문집, 제9권, 제6호, 한국철도학회, pp. 677-681.
11. International Union of Railways, (2005), UIC Code 541-05