

## 철도차량의 종방향 통합해석모델 검토 및 개발

곽재호\*, 최경진\*, 신유정\*

(\*한국철도기술연구원 차량기계연구본부)

### Analytical Model Development of Longitudinal Railway Vehicle

Jaeho Kwak\*, Kyungjin Choi\*, and Yujeong Shin\* (\*Korea Railroad Research Institute)

#### ABSTRACT

An integrated analytical model which should have essential dynamics on the longitudinal railway vehicle is developed. The model consists of translational movement, rotational movement, brake actuator, adhesion force between rail and wheel, and brake friction force between wheel and pad. Thus, during the deceleration for stopping, a feedback controller controlling the brake cylinder pressure is designed to improve ride quality and to release friction problems. Through the developed model, the feasibility of controlling the cylinder pressure is verified for the better performances during braking.

**Key Words** : Longitudinal Railway Vehicle Dynamics (종방향 철도차량 동역학), Adhesion Coefficient (점착력), Slip Velocity (슬립속도), Friction Coefficient (마찰계수), Deceleration Controller (감속제어기)

#### 1. 서론

열차의 수송능력을 더욱 더 증대시키기 위한 장거리 열차의 고속화와 도시철도의 배차간격 단축화는 필수적으로 철도차량의 추진 및 제동장치의 성능향상을 요구한다. 아울러 이러한 장치들의 성능을 극대화하고 승객 및 차량의 안전성을 확보하기 위해서는 가감속 구간에서의 휠과 레일사이의 마찰력(점착력) 뿐만 아니라 휠(또는 디스크)과 브레이크 패드사이의 마찰력의 확보 및 제어가 가장 중요한 인자로 대두되고 있다. 하지만 차량에서의 마찰력은 기본적으로 강한 비선형성을 가지고 있을 뿐만 아니라 기후조건, 마찰재의 종류 및 차량의 상태(하중, 구동속도) 등 외부인자에 매우 민감하게 변화한다. 따라서 가감속구간에서는 운전자의 감지능력만으로는 최적의 운전조건을 얻기에는 한계가 있으므로, 구동시 점착력제어, 제동시 슬립제어, 제동변환시 협조제어, 정차시 정위치제어 등 여러 부가적인 자동제어 기능들이 개발되고 있다[1-4].

이러한 부가적 기능들을 종합설계하고 성능을 극대화 하기 위해서는 차량 종방향의 동적특성과 외부인자들을 통합하여 예측할 수 있는 상세한 수학적 해석모델이 필요하다. 하지만 대부분의 철도

차량의 동역학적 모델은 선형해석을 용이하게 하기 위해 차량속도를 일정하게 하여 횡방향 및 수직방향에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 이는 주로 현가 장치의 설계 및 해석이나 회전시 탈선을 예방하기 위한 목적으로 이용되고 있다. 또는, 슬립에 대한 기준식이 없어 실험으로 대체하거나 아니면 간단한 경험식으로 대체되고 있다[4-7].

따라서, 본 논문은 차량 한축모델을 이용한 기본적인 종방향 통합모델 개발을 목적으로 한다. 이는 종방향 차량모델, 구동기 모델, 제동기 모델, 점착력 모델 그리고 마찰력 모델로 이루어진다. 그리고 개발된 통합모델을 이용하여 제동시 감속구간에서 여러 인자들의 변화를 해석함으로써 관리되어야 할 인자들을 도출한다. 또한, 이를 바탕으로 감속기 제어를 설계함으로써 급격한 비선형적 변동을 줄여 정차시 승차감 향상 및 마찰재 보호할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

아울러 장기적으로는, 개발된 모델을 기초로 새로운 구동 및 제동제어 시스템 설계 및 사전 검증에 이용할 예정이며, 운영예정인 400 [km/h] 고속다이나모를 통해 한국형 고속열차용 관련실험식들을 도출할 예정이다.

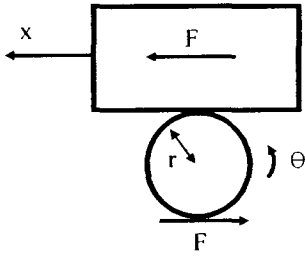


Fig. 1: One axis train model.

## 2. 차량의 한축모델링

차량의 횡방향과 수직방향의 운동을 무시하면 그림 2.1 과 같이 모든 축이 동일하다는 가정하에서 한 축의 해석만으로 종방향의 운동을 구현할 수 있다[5]. 또한, 본 논문에서는 해석의 간편화를 위해 차량이 직진 그리고 평평한 선로를 달리다고 가정한다.

### 2.1 구동모터 및 휠의 회전운동

일반적으로 전동차의 구동은 모터 및 기어박스를 통해 구동 토크가 전달된다[3]. 본 논문에서는 직접구동방식의 전동차로 가정하여 상대적으로 빠른 주파수영역에서 작동하는 모터축과 바퀴축의 상대운동을 무시함으로써 다음과 같은 운동방정식을 유도하였다.

$$J\ddot{\theta} = T_e - Fr - B\dot{\theta} \quad (1)$$

여기서  $J$ 는 모터, 휠 그리고 축의 관성모멘트,  $T_e$ 는 모터의 토크,  $F$ 는 점착력,  $r$ 은 휠의 회전유효반경,  $B$ 는 휠의 속도에 따른 마찰계수이다.

### 2.2 전동차의 직진운동

그림 2.1 에서 같이 한축에 작용하는 전동차의 질량을 이용하여 다음과 같은 직진운동에 해당하는 운동방정식을 구할 수 있다.

$$M\ddot{x} = F - C_a\dot{x}^2 \quad (2)$$

여기서  $M$ 은 한축에 작용하는 전동차의 질량이고  $C_a$ 는 차량속도의 자승에 비례하는 공기저항 계수이다.

### 2.3 점착력

점착력계수는 속도, 하중, 휠과 레일의 프로파일, 레일의 오염도, 날씨 등에 따라 변화하므로 여러 종류의 실험식이 존재한다[6, 7]. 본 논문에서의

하중이 일정하다고 가정하여 다음과 같은 점착력식을 이용한다.

$$F = \mu_w Mg \quad (3)$$

여기서  $\mu_w$ 는 휠과 레일사이의 점착계수,  $M$ 은 차량의 수직 하중,  $g$ 는 중력 가속도이다. 여기서 점착력 계수는 아래와 같이 슬립속도의 함수로 정의된다[5].

$$\mu_w = c * \exp(-a * s) - d * \exp(-b * s) \quad (4)$$

여기서 파라미터  $a$ ,  $b$ ,  $c$  와  $d$ 는 레일의 표면조건에 따른 상수이며,  $s$ 는 슬립속도로서 식 (5)와 같이 휠의 회전속도와 차량의 직진속도의 차로 정의된다.

$$s = \dot{\theta}r - \dot{x} \quad (5)$$

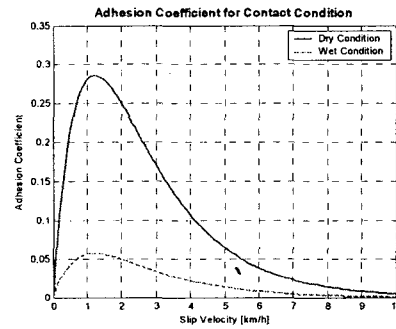


Fig. 2: Adhesion coefficient.

그림 2는 기후조건과 슬립속도에 따른 점착력계수를 나타내며 식 (4)와 (5)를 이용하여 계산된 값이다. 이는 일반적으로 알려진 특성을 잘 만족하고 있다.

## 3. 제동기 모델링

본 논문에서 담면 제동기로 가정하여 제동토크 크 회전반경과 휠의 운동 회전반경이 같다고 가정하였다.

### 3.1 공기제동기의 동특성

공기압을 이용한 제동기의 동특성은 유체역학 이론을 바탕으로 오리피스식을 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 압력의 입/출력 관점에서 1 차 시정수와 시간지연 함수를 이용하여 아래와 같은 전달함수로 단순화 하였다.

$$G_{RC}(s) = \frac{1}{Ts+1} e^{-Ls} \quad (0 \leq T \leq T_{max}) \quad (6)$$

여기서 시정수  $\tau$ 는 압력조건에 따라 변화하지만, 시간지연  $L$ 은 관로의 길이가 일정하다고 가정하여 상수로 취급하였다.

### 3.2 제동토크 및 마찰계수

제동토크  $T_b$ 는 식 (7) 같이 공기실린더를 통한 압부력  $F_b$ , 휠디스크와 패드사이의 마찰계수  $\mu_b$ 와 휠의 접촉반경  $r$ 로 정의되어진다.

$$T_b = \mu_b r F_b \quad (7)$$

브레이크 패드와 휠간의 마찰계수는 제동기의 압력 상승, 속도의 증가 및 제동시간의 경과 등에 따라 감소한다고 알려져 있으며, 정지 직전에는 급격히 증가하여 평균치의 1.5-2.0 배로 된다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되고 있는 주철재 브레이크 패드와 휠간의 마찰계수  $\mu_b$ 를 구하기 위해 다음과 같이 가장 큰 변동인자인 속도의 함수로 구해진 실험식을 이용하였다.

$$\mu_b = C \frac{1+0.01V}{1+0.05V} \quad (8)$$

여기서,  $C$ 는 기후조건에 따른 상수 (맑을 때: 0.4, 우천시: 0.30, 표준값: 0.32)이고,  $V$  [km/h]는 열차속도이다. 그림 3은 기후조건 및 속도에 따른 마찰계수의 변화를 나타내며 정지 직전에 가장 높은 값을 나타내고 있다. 이는 일반적인 성질을 잘 나타내고 있으며, 본 논문에서는 맑은 날씨를 가정하여 적용하였다.

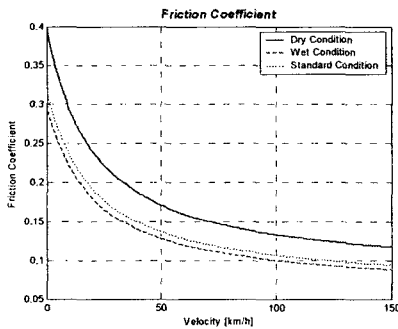


Fig. 3: Friction coefficient.

## 4 감속제어기 설계 및 고찰

일반적인 국내의 전동차들은 정차시 운전자들의 수동운전에 의존한다. 본 장에서는 기계제동만을 작동한 경우 운전자가 제동기의 압력을 일정하게 유지하며 오픈루프 상태에서 감속하여

정차하는 경우를 가정하였다. 그리고 분해능이 좋은 휠속도 센서가 설치되었다고 가정하여, 미분된 휠감속도를 이용하여 PI 제어를 통한 서보밸브제어를 구성하였다. 이는 정차시 승차감 확보, 차량의 안정성 증대 및 마찰재를 보호할 수 있는 장점이 있다.

제동기의 압력밸브를 구동하여 압력을 제어하기 위해 식 (9)와 같이 PI 제어를 구성하였다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (9)$$

여기서  $K_p$ 는 비례제어게인  $K_i$ 는 적분제어게인이다.

그림 4와 5는 정차를 위해 제동기의 압력을 일정하게 유지하는 경우이고 그림 6과 7은 PI 제어를 통해 감속도를 일정하게 유지하는 경우이다.

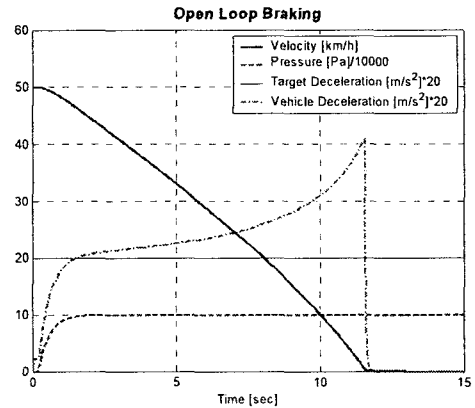


Fig. 4: Velocity, deceleration, and pressure for open loop.

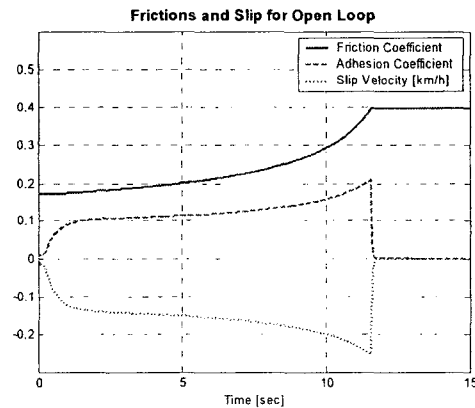


Fig. 5: Friction coefficient, adhesion coefficient, and slip velocity for open loop.

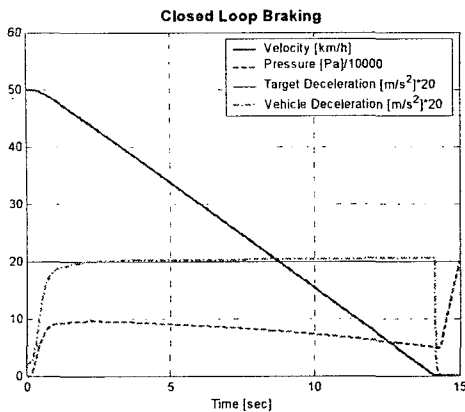


Fig. 6: Velocity, deceleration, and pressure for closed loop.

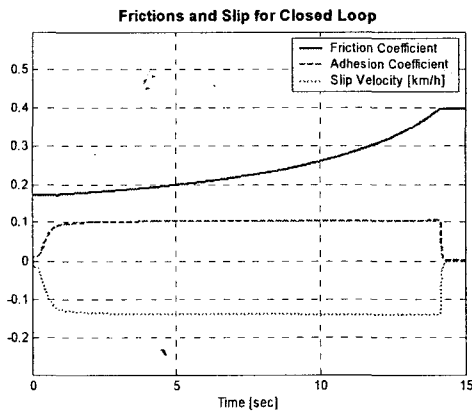


Fig. 7: Friction coefficient, adhesion coefficient, and slip velocity for closed loop.

그림 4 와 같이 압력을 일정하게 유지하는 오픈루프 제어의 경우 차량속도가 감소함에 따라 감속도는 급격하게 증가한다. 이는 그림 5 에서와 같이 마찰력이 급격하게 증가함으로써 제동압력이 일정하더라도 제동토크가 급격하게 증가하기 때문이다. 또한 식 (5)로 정의된 슬립속도도 2 배이상 변화시키는데, 이는 레일과 휠 사이의 슬립을 증가시키는 것을 의미한다.

그림 6 과 같이 감속도를 이용하여 압력을 제어하는 경우 차량속도가 감소하더라도 감속도가 일정하게 유지된다. 이는 그림 7 에서의 마찰력이 증가하더라도 압력을 제어하므로 점착력과 슬립속도도 일정하게 유지된다.

따라서, 감속도제어기를 이용하여 제동압력을 제어하는 경우 감속도, 슬립속도, 점착력을 일정하게 유지하는 것이 가능하므로 승차감의 향상, 마찰재의 보호 및 제동소음의 저감 등을 꾀할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 철도차량의 한축 모델을 이용하여 열차의 가감속 동특성을 예측할 수 있는 통합모델을 개발하였다. 특히, 감속제어기 설계를 통한 제동압력의 제어를 통해 정차시 일정한 감속도를 유지하고 아울러 점착력 및 슬립속도를 일정하게 유지함으로써 승차감의 향상, 마찰재의 보호 및 제동소음 저감을 꾀할 수 있음을 나타내었다.

## 6. 향후 연구계획

차후 좀 더 정밀한 동적모델 개발을 위해

- 구동계 (모터 및 기어박스)의 상세모델링 및 전기제동알고리즘 구현,
- 공기압 이론을 이용한 제동장치의 상세모델,
- 전기제동 및 기계제동의 협조제어기 개발,
- 고속다이내믹을 이용한 마찰식 및 점착력식 개발,
- 파라미터 및 조건 변동에 따른 고급제어기 설계등을 수행할 계획이다. 또한 통합모델을 이용하여 가감속 구간에서의 운전성능 향상을 위한 새로운 구동 및 제동시스템 개발에도 활용할 예정이다.

## 참고문헌

1. K. Matsuoka, K. Kondoh, and H. Hata, "Development of Wheel-Mounted Direct Drive Traction Motor," WCRR, 1997.
2. N. Kumagai, T. Obara, I. Hasegawa, H. Yasuda, and S. Uchida, "Development of Brake Systems for Speedup on Shinkansen and Conventional Lines," RTRI, Vol. 38, No. 4, 1997.
3. D. Frylmark and S. Johnsson, "Automatic Slip Control for Railway Vehicles," Master Thesis 2003, Linkoping University.
4. M. Nankyo, "A Study of Vehicle Deceleration Control by Pneumatic Brake," RTRI Report, Vol. 17, No. 4, 2003.
5. Y. Takaoka and A. Kawamura, "Disturbance Observer Based Adhesion Control for Shinkansen", Proceedings of AMC, pp.169-174, Nagoya, Japan, 2000.
6. W. Zhang, J. Chen, X. Wu, and X. Jin, "Wheel/rail Adhesion and Analysis by using Full Scale Roller Rig," WEAR, Vol. 253, pp. 82-88, 2002.
7. O. Polach, "Creep Forces in Simulation of Traction Vehicles Running on Adhesion Limit," WEAR, Vol. 258, pp. 992-1000, 2005.