

## 축소형 철도차량장치의 점착력 추정에 의한 Anti-Slip 제어

전기영\*, 이승환\*\*, 강승욱\*\*\*, 오봉환<sup>§</sup>, 이훈구<sup>§§</sup>, 김용주<sup>§§§</sup>, 한경희\*  
\*명지대학교, \*\*대덕대학, \*\*\*가톨릭상지대학, <sup>§</sup>명지전문대학,  
<sup>§§</sup>용인송담대학, <sup>§§§</sup>동양공업전문대학

### Anti-Slip Control By Adhesion Effort Estimation Of Minimized Railway Vehicle

K.Y. Jeon\*, S.H. Lee\*\*, B.H. Oh\*\*\*, S.W. Kang<sup>§</sup>, H.G. Lee<sup>§§</sup>, Y.J. Kim<sup>§§§</sup>, and K.H. Han\*  
\*Myongji Univ. , \*\*Taedok College, \*\*\*Catholic Sangji College ,  
<sup>§</sup>Myongji College , <sup>§§</sup>Yong-in Songdam College <sup>§§§</sup>Dongyang Tech. College

#### ABSTRACT

In electric motor coaches, the rolling stocks move by the adhesive effort between rail and driving wheel. Generally, the adhesive effort is defined by the function of both the weight of electric motor coach and the adhesive effort between rails and driving wheel. The characteristics of adhesive effort is strongly affected by the conditions between rails and driving wheel. When the adhesive effort decreases suddenly, the electric motor coach has slip phenomena. This paper proposes a re-adhesion control algorithm which uses the maximum adhesive effort by instantaneous estimation of adhesion force using load torque disturbance observer. Based on this estimated adhesive effort, the re-adhesion control is performed to obtain the maximum transfer of the tractive effort.

#### 1. 서 론

철도차량시스템의 운송능력 증대를 위한 가감속 운전 성능향상과 고속화를 위해서는, 견인 전동기의 동력 발생 성능의 향상과 더불어, 공전을 빠르게 감소 시킬 수 있는 제어와 마찰력에 의한 견인력 전달 제한치인 최대 점착력을 충분히 활용할 수 있는 견인력 제어방법이 절대적으로 필요하다. 그러므로 최근에는 이러한 제어를 수행하는 재점착 제어에 관심이 집중되고 있다. 철도차량은 레일과 바퀴사이의 마찰로서 견인력을 전달하므로 점착력 이상의 구동력은 공전(slip)을 발생시킨다. 일반적으로, 점착력은 전동차의 무게와 레일-바퀴 간의 점착력 계수의 함수로 정의 되어진다. 점착력 계수의 특성은 레

일위의 습기, 먼지, 기름 등과 같은 레일과 바퀴 사이의 조건에 크게 영향을 받는다. 점착력 계수가 갑자기 감소하면 점착력 이상의 구동력으로 공전이 발생한다. 공전이 발생하면, 점착력을 저하시켜 견인능력을 감소시키고, 기계적 손상 및 소음을 유발시킨다. 그러므로 공전을 방지하기 위해서는 마찰력에 의한 견인력 제한치인 최대점착력을 충분히 활용할 수 있는 견인력제어 방법이 필요하다. 그러나 이와 같은 견인력 제어를 위해서는 점착력 계수를 필요로 하는데, 점착력 계수를 검출 할 수 있는 방법이 없다.

그러므로 본 논문에서는 최대 견인력 제어를 위해서 부하 토크 외란 관측기를 통하여 점착력 계수를 추정한다. 추정한 점착력 계수의 미분치를 PI 토크 제어하여, 추정된 점착력이 최대점착력에서 유지되도록 전동기 토크 제어하는 Anti-slip제어 알고리즘을 제안한다.<sup>[1]-[2]</sup>

#### 2. 철도 차량시스템의 모델링

##### 2.1 전동차의 공전(Slip)현상

전기철도차량 시스템은 일반적으로 5M5T(5 Motor Cars and 5 Trailer Cars)로 구성된다. 본 논문에서는 전동차의 견인력 제어 시스템을 모델링하고, Anti-slip 제어시스템을 구성하였다. 전동차는 바퀴-레일간의 점착력에 의해 견인력이 발생하기 때문에, 점착력 이상의 구동력은 공전을 발생시킨다. 공전이 발생하면, 바퀴와 레일사이의 점착력이 감소하여 견인력은 현저히 감소하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 실제 시스템의 경우와 같은 전동차의 공전현상을 분석하기 위해서 1C4M에 의해 구동되는 축소형 철도차량시스템에 대하여 모델링 하였다. 그림 1은 바퀴와 레일사이의 점착특성의 관계를 나타낸 것이다. 견인전동기에서 발생한 구동력은 기어와 차축을

통하여 차량바퀴에 전달된다. 전달된 견인전동기의 구동력은 차량바퀴와 레일사이의 점착력에 의해 차량에 전달된다. 전동차의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)은 전동차의 견인력에 대한 동작을 나타내고, 식 (2)는 전동차 바퀴 동작을 나타낸다. 식 (2)에서  $\mu(v_s)Wgr$ 은 레일-바퀴간의 점착력  $\mu(v_s)Wg$  와 상응하는 바퀴의 토크이다.

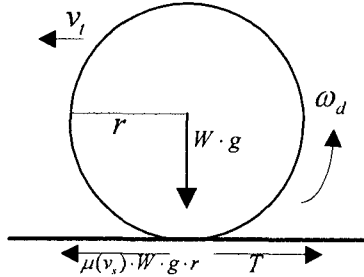


그림 1 레일-바퀴사이의 점착특성  
Fig. 1 Adhesion characteristics between wheel and rail

$$M \cdot \frac{d}{dt} v_t = \mu(v_s) \cdot W \cdot g - F_d(v_t) \quad (1)$$

$$J \cdot \frac{d}{dt} \omega_d = T - \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (2)$$

$$F_{AE} = \mu(v_s) \cdot W \cdot g \quad (3)$$

$$v_s = v_d - v_t \quad (4)$$

여기서,  $v_t$ 는 전동차의 속도,  $v_s$ 는 슬립속도,  $v_d$ 는 바퀴의 속도,  $\omega_d$ 는 바퀴의 선속도,  $\mu(v_s)$ 는 레일-바퀴간의 점착력 계수이다.  $W$ 는 전동차의 무게,  $M$ 은 바퀴에 가해지는 무게,  $J$ 는 바퀴의 전체 관성모멘트,  $T$ 는 바퀴의 구동토크,  $F_d(v_t)$ 는 전동차의 주행저항,  $g$ 는 중력가속도,  $r$ 은 바퀴의 반지름이다.

## 2.2 점착력 계수 추정 시스템

식 (4), (5)는 일반적인 전동기의 토크 방정식으로서 전동기의 회전각속도에 대한 일차 미분방정식의 형태로 표현된다.  $T_L$ 은 전동기의 부하 외란 토크이며, 외란 관측기에 의해서 추정한다.  $\omega_m$ 은 견인전동기의 속도이며,  $K_T$ 는 토크상수이다. 최근에는 고성능 토크제어가 가능하므로, 부하 외란 관측기는 산업 현장의 드라이브 시스템에서 널리 이용되고 있다.

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - T_L \quad (4)$$

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = K_T i_T - T_L \quad (5)$$

바퀴-전동기 사이의 관계식을 식 (2)에 대입하면, 식

(6)과 같은 수식을 얻을 수 있다. 식 (6), (7)에서와 같이  $\frac{1}{R_g} \mu(v_s) Wgr$ 은 전동기의 외란토크로서, 레일-바퀴간의 점착토크에 상응하는 전동기의 부하 토크가 된다. 그러므로, 부하 토크  $T_L$ 을 추정하기 위하여 다음과 같은 부하 토크외란 관측기를 적용한다.

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (6)$$

$$T_L = \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (7)$$

부하토크외란 관측기에 의해 부하토크를 구하면 식 (8)과 같고, 추정 점착계수는 식 (9)와 같고, 추정 점착계수의 미분치는 식 (10)과 같다.

$$\hat{T}_L = \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} (K_T i_T - s J_m \omega_m) = \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} T_L \quad (8)$$

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{T}_L \quad (9)$$

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{d\mu(v_s)}{dt} = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{T}_L \quad (10)$$

## 2.3 Anti-Slip 제어 시스템

일반적으로, 점착력  $\mu(v_s)Wg$ 와 공전속도  $v_s$ 간의 특성곡선은 그림 2와 같이 표현된다. 점착력의 최대값을 최대점착력이라 하고, 최대점착력계수  $\mu(v_s)_{\max}$ 의 상태에서 생긴다. 전동차의 구동토크  $T$ 가 최대점착력을 넘으면, 전동기는 공전이 발생한다. Anti-Slip 제어는 최대점착력에 일치하는 구동 토크를 유지 하도록 제어 한다.

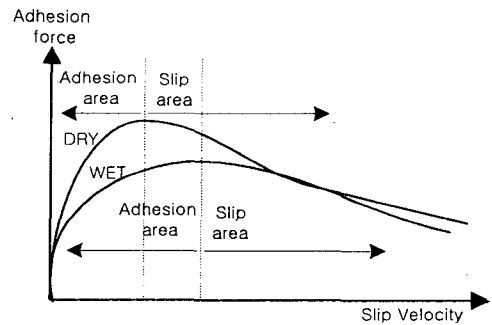


그림 2 점착력과 공전속도 사이의 특성곡선  
Fig. 2 Characteristics curve between adhesion effort and slip velocity

그림 2에서처럼 최대점착력은 점착력과 공전속도 사이의 최대점착계수  $\mu(v_s)_{\max}$ 의 조건에서 발생된다. 점착력이 최대값이 되었을 때, 점착력계수  $\mu(v_s)$  또한 최대

값이 된다. 결국, 식 (11)의 관계에서 구동 토크  $T_m$ 은 최대점착력에서 구동하게 된다. 일반적으로, 전동차의 공전속도  $v_s$ 는 매우 작고, 변화량 또한 매우 작다. 그러므로, 본 논문은 식 (12)의 조건 방정식으로부터 최대점착력을 추정한다.

$$\frac{d\mu}{dv_s} = \frac{d\mu/dt}{dv_s/dt} = \frac{d\mu}{dt} \cdot \frac{dt}{dv_s} \quad (11)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = 0 \quad (12)$$

그림 3은 부하토크 외란관측기를 이용한 Anti-slip PI 토크제어시스템의 전체블록도를 나타낸다. PWM 인버터를 이용한 벡터제어 시스템에 의해 구동하는 유도전동기는 빠른 토크 응답을 얻을 수 있다. 그러므로 그림 4와 같이 부하토크 외란 관측기에 의해 추정된 점착력 계수  $\hat{\mu}(v_s)$ 의 미분값을 PI 토크 제어한 Anti-slip 제어는 최대 점착력과 같은 구동 토크를 유지하므로 항상 최대 견인력으로 동작할 수 있다.

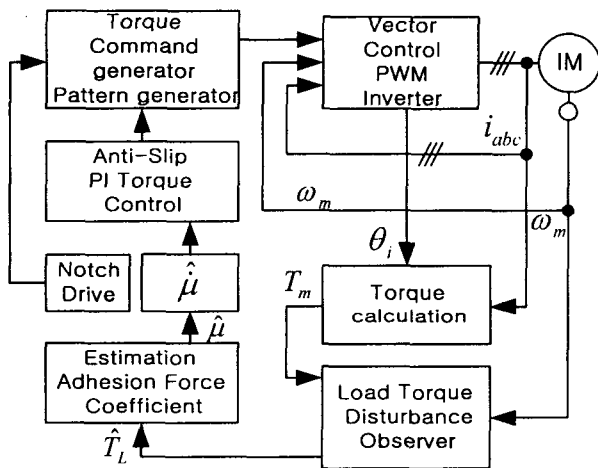


그림 3 부하토크 외란 관측기를 이용한 Anti-slip PI토크제어 시스템  
Fig. 3 Anti-slip PI torque control system with Load torque disturbance observer

### 3. 시뮬레이션

실제 점착력 계수에 대한 추정 점착력의 특성을 확인하고, 점착력 계수 변화시 Anti-slip 제어의 특성을 확인하기 위해서 철도차량 시스템과 점착력 계수 추정 블록도를 그림 3과 같이 모델링하여 시뮬레이션 하였다.

그림 4는 전동차 운전시, 부하 외란 관측기에 의한 점착력 계수 추정치  $\hat{\mu}(v_s)$ 가 실제 점착력 계수  $\mu(v_s)$ 를 정확히 추정함을 나타낸다. 그러나, Anti-slip 제어를 하지 않았으므로 공전발생시, 공전속도가 계속 증가함을 확인할 수 있다. 그림 5는 공전발생시, 점착력 계수의 변

화에도 불구하고, 추정된 점착력 계수  $\hat{\mu}(v_s)$ 의 미분값을 PI 토크 제어한 Anti-slip 제어에 의하여 공전속도가 증가하지 않음을 확인할 수 있다. 또한, 구동 토크와 차량 속도의 변화가 일정한 것을 확인할 수 있다.

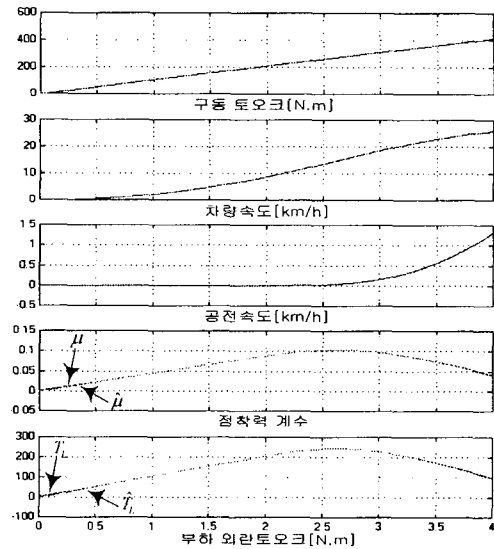


그림 4 Anti-Slip PI 토크 제어를 하지 않은 경우  
Fig. 4 In case of non anti-slip PI torque control

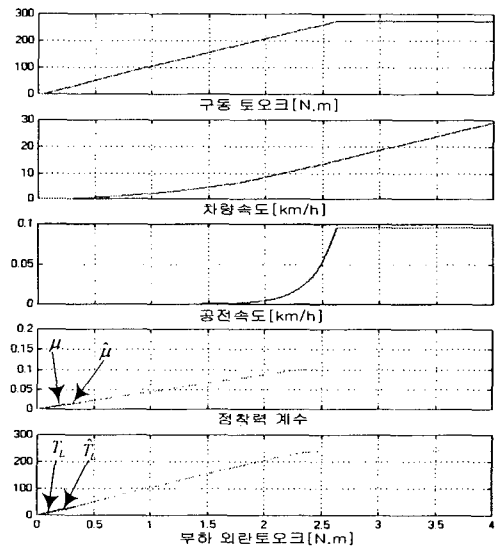


그림 5 Anti-Slip PI 토크 제어를 한 경우  
Fig. 5. In case of Anti-Slip PI torque control

### 4. 실험 결과

그림 6은 전체시스템블록도를 나타내고 있다. 하나의 인버터로 네 대의 유도전동기가 연결되어 IC4M (1-Controller 4-Motor)에 의해 구동되는 한 개의 바퀴에 대하여 모델링하여 실험하였다.

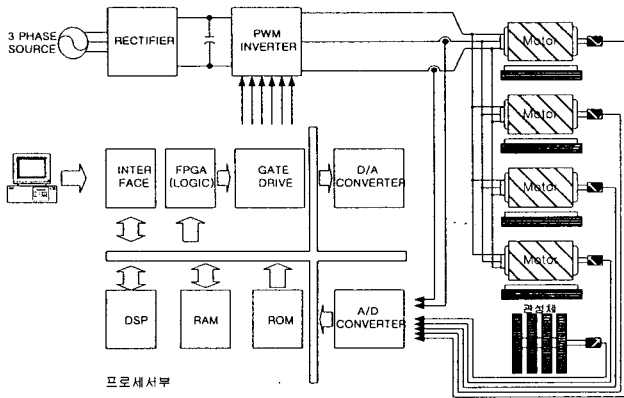


그림 6 전체시스템 블록도  
Fig. 6 Block diagram of full system

그림 7은 1C4M 축소형 철도차량장치의 공전실험장치이다. 축소형 철도차량장치에서 큰 원반은 선로를 나타내고, 4개의 전동기는 철도차량 견인용 전동기를 나타내고, 전동기에 연결된 작은 원반은 차량바퀴를 축소시킨 장치이다.

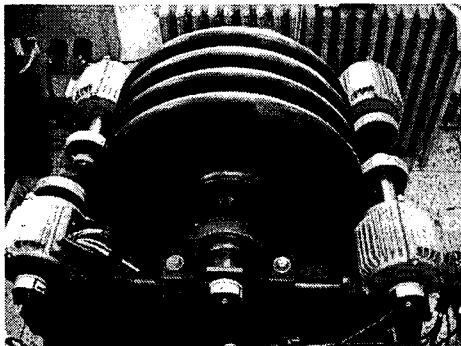


그림 7 축소형 철도차량장치  
Fig. 7 Minimized model of railway vehicle

그림 8, 9는 notch1과 2로 기동토크를 주다가 물을 계속하여 주입한 후 물의 주입을 차단한 경우의 점착력, 공전속도, 차량속도, 상전류 파형을 나타내고 있다.

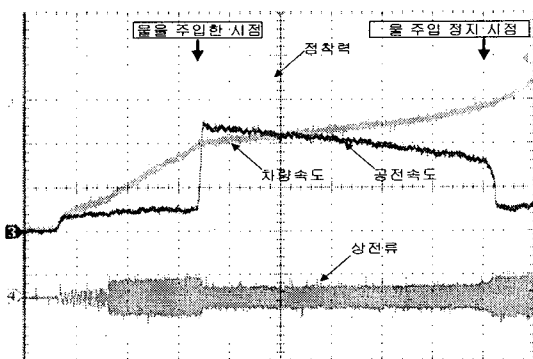


그림 8 Anti-slip 제어를 하지 않은 경우의 파형  
Fig. 8 Wave form of non anti-slip control  
①점착력[100N/Div] ②차량속도[20km/h/Div]  
③공전속도[1km/h/Div] ④상전류[20A/Div] T/D: [2s]

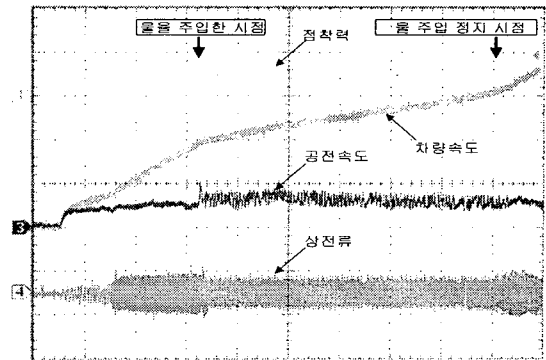


그림 9 Anti-slip 제어를 한 경우의 파형  
Fig. 9 Waveform of anti-slip control  
①점착력[100N/Div] ②차량속도[20km/h/Div]  
③공전속도[1km/h/Div] ④상전류[20A/Div] T/D: [2s]

그림 8은 Anti-slip PI토크제어를 하지 않은 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입한 후 대공전이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 9는 Anti-Slip PI토크제어를 한 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입하여도 Anti-Slip PI토크제어에 의하여 공전이 거의 발생하지 않고, 재점착이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 8의 경우와 비교하여 차량속도의 증가가 현저히 상승함을 확인할 수 있고, 점착력의 감소도 적음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 부하토크외란 관측기를 구성하여 점착력계수를 추정하고, 추정한 점착력계수의 미분치를 PI토크 제어하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 바퀴와 레일사이의 실제 점착력 계수를 부하 토크 외란 관측기를 통하여 실시간으로 추정하고, 추정된 점착력 계수를 통하여 점착력을 추정하여 최대 견인력 제어가 가능함을 확인 하였다.
- [2] 관측기를 통하여 상태변수인 점착력 계수를 추정하므로 시스템의 외란 및 파라미터 설정에 대하여 안정적인 제어가 됨을 확인 하였다.
- [3] 공전속도에 의한 점착력 계수의 변화에도 불구하고 구동 토크와 차량속도는 일정한 가속 제어가 가능하였다.
- [4] 견인전동기 특성 해석에 의한 1C4M 병렬운전의 특성을 확인할 수 있었다

## 참 고 문 헌

- [1] Kiyoshi Ohishi, Ken Nakano, Ichiro Miyashita and Shinobu Yasukawa, "Anti-Slip Control of Electric Motor Coach using Adhesion Force Coefficient Estimator Based on Disturbance Observer", JIASC 98, Vol. 1, pp. 229-234, 1998.
- [2] 서광덕, "점착력 추정에 의한 고능률 재점착제어", 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp. 13-28, 1995