철도차량장치의 점착력 추정에 의한 Anti-Slip 제어

Anti-Slip Control by Adhesion Effort Estimation of Railway Vehicle

김길동[1], 이호용[2], 안태기[3], 홍재성[4], 한석윤[5], 전기영[6]

Gil-Dong Kim, Ho-Yong Lee, Tae-Ki Ahn, Jai-Sung Hong, Suk-Youn Han, Kee-Young Jeon

Keywords : *re-adhesion(재점착), adhesive effort(점착력), slip phenomena(공전현상), tractive effort(견인력)*

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 감소시킬 수 있는 제어와 마찰력에 의한 견인력 전달 제한치인 최대 점착력을 충분히 활용할 수 있는 견인력 제어방법인 재점착 제어에 관심이 집중되고 있다.

1980년대 초기의 재점착 제어는 마찰력의 변화에 의해 발생하는 공전의 제거 및 발생 방지를 위한 방법이 제시 되었다. 최대견인력을 전달할 수 있는 최대 점착력의 공전속도를 미리 설정하여 이 속도를 기준으로 공전속도를 제어하는 방법으로, 기준 공전속도 이상의 공전이 발생하면 구동력을 미리 계산된 패턴에 의해 감소 시켰다가가 재점착을 검지하면 다시 원상태로 회복시키는 방법이다. 그러나 구동력이 최대점착력에 비해 상당히 작게 제어됨으로 견인력 손실이 많이 발생하는 단점이 있다.

일반적으로, 철도차량은 레일과 바퀴사이의 마찰력으로서 견인력을 전달한다. 그러므로 점착력 이상의 구동력은 공전(slip)을 발생시킨다. 점착력은 전동차의 무게와 레일-바퀴 간의 점착력계수의 함수로 정의 되어진다. 점착력계수의 특성은 레일위의 습기, 먼지, 기름등과 같은 레일과 바퀴 사이의 조건에 크게 영향을 받는다. 점착력계수가 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

1 정회원, 철도기술연구원, 책임연구원
2. 정회원, 철도기술연구원, 주임연구원
3. 정회원, 철도기술연구원, 선임연구원
4. 정회원, 철도기술연구원, 선임연구원
5. 정회원, 철도기술연구원, 책임연구원
6. 비회원, 명지대학교 전기공학과 대학원, 박사과정 수료

점착력계수를 필요로 하는데, 점착력계수를 검출 할 수 있는 방법이 없다.[1]-[2]
그러므로 본 논문에서는 최대 견인력 제어를 위해서 부하 토크 외란 관측기를 통하여 점착력계수를 추정한다. 추정한 점착력계수의 미분치를 PI 토크 제어하여, 추정된 점착력이 최대점착력에서 유지되도록 전동기를 토크 제어하는 Anti-slip제어 알고리즘을 제안한다.[4]

부하 토크 외란 관측기는 회전자의 위치 정보와 토크 전류의 정보를 이용 하여 부하 외란토크를 추정하고, 부하 외란 토크에 철도차량 상수를 이용하여 점착력계수를 추정한다. 또한 부하토크 외란관측기는 구조가 간단하며, 시스템의 외란 및 각종 제어이득, 시스템의 상수 변화에 대해서도 견실한 견인력 제어 특성을 가지고 있다. 이와같은 제어 알고리즘을 구현하기 위하여 1C4M(1-Controller 4-Motor) 축소형 철도차량시스템을 이용하여 제안된 알고리즘을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다. 또한 실제 철도차량시스템의 경우 선로 표면의 상태 변화 및 차량속도의 가감에 따른 공전속도에 대한 점착력의 관계를 축소형 철도차량시스템으로 구현하여, 실제 철도차량시스템의 경우와 비교 분석하여 최대 견인력제어가 되도록 하였다.

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.

Fig 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.[5]-[6]

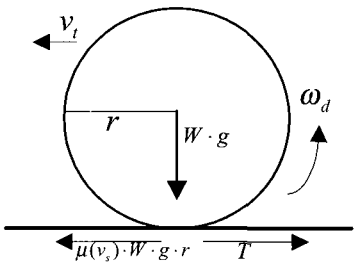

Fig. 1 Adhesion characteristics between wheel and rail

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

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

$$F_{AE} = \mu(v_s) \cdot W \cdot g \quad (2)$$

$$v_s = v_d - v_t \quad (3)$$

여기서, v_t는 전동차의 속도, v_s는 슬립속도, v_d는 바퀴의 속도, ω_d는 바퀴의 선속도, $\mu(v_s)$ 는 레일-바퀴간의 점착력계수이다. W는 전동차의 무게, M은 바퀴에 가해지는 무게, J는 바퀴의 전체 관성모멘트, T는 바퀴의 구동토크, $F_d(v_t)$는 전동차의 주행저항, g는 중력가속도, r은 바퀴의 반지름이다.
바퀴와 전동기 사이의 수식은 식 (4)~(6)에 의해 표현된다. 식 (4)~(6)을 식 (2)에 대입하면, 식 (2)는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$v_d = \omega_d \cdot r \quad (4)$$

$$M_j = J / r^2 \quad (5)$$

$$F_t = T / r \quad (6)$$

$$M_j \cdot \frac{d}{dt} v_d = F_t - \mu(v_s) \cdot W \cdot g \quad (7)$$

바퀴-전동기 사이의 또 다른 관계식은 식 (8), (9), (10)과 같이 표현한다. 여기서, T_m 은 전동기의 토크,

w_m은 전동기의 회전각속도, J_m은 전동기의 관성모먼트, R_g는 기어비이다.

$$T = T_m \cdot R_g \tag{8}$$

$$\omega_m = R_g \cdot \omega_d \tag{9}$$

식 (1)~(9)의 수식으로부터 전동차의 바퀴와 전동기 사이의 관계식이 성립한다.

2.2 점착력계수 추정 시스템

식 (10), (11)은 일반적인 전동기의 토크 방정식으로서 전동기의 회전각속도에 대한 일차 미분방정식의 형태로 표현된다. T_L은 전동기의 부하 외란 토크이며, 외란 관측기에 의해서 추정한다. 최근에는 고성능 토크제어가 가능하므로, 부하 외란 관측기는 산업 현장의 드라이브 시스템에서 널리 이용되고 있다.[7]

$$J_m \frac{d}{dt}\omega_m = T_m - T_L \tag{10}$$

$$J_m \frac{d}{dt}\omega_m = K_T i_T - T_L \tag{11}$$

식 (8), (9)을 식 (2)에 대입하면, 식 (12)와 같은 수식을 얻을 수 있다. 식 (12), (13)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_L을 추정하기 위하여 다음과 같은 부하 토크외란 관측기을 적용한다.

$$J_m \frac{d}{dt}\omega_m = T_m - \frac{1}{R_g}\mu(v_s)\cdot W\cdot g\cdot r \tag{12}$$

$$T_L = \frac{1}{R_g}\mu(v_s)\cdot W\cdot g\cdot r \tag{13}$$

실제 시스템에서 관측 주기는 T_L의 변화에 비하여 충분히 짧기 때문에 관측기의 디자인을 간소화하기 위해서, 이것은 다음과 같은 가정이 가능하다.

$$\frac{dT_L}{dt} = 0 \tag{14}$$

식 (11)과 (14)을 토대로, 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} \frac{K_T}{J_m} \\ 0 \end{pmatrix} u$$
$$y = (1 \quad 0)\, x \tag{15}$$

여기에서, $x = (\omega_m, T_L)^T$, $u = i_T$, $y = \omega_m$이다

식 (15)의 상태 방정식을 고피나스방식을 이용하여 관측하면, 부하외란토크 $\hat{T}_L$을 식 (16)과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{T}_L = \frac{1}{1+\frac{J_m}{G}s}(K_T i_T - sJ_m\omega_m)$$
$$= \frac{1}{1+\frac{J_m}{G}s} T_L \tag{16}$$

여기에서, $\frac{J_m}{G}$는 관측기 시정수 있다.

DSP를 이용하는 실제 신호처리에서, 식 (16)의 부하토크 관측기는 차분 방정식으로 변화시켜야 한다. 이를 위하여, 이산 제어시스템에서 알려진 고피나스 방법을 사용하면 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{T}_L(i) = \zeta(i) + G\omega_m(i)$$
$$\zeta(i+1) = \hat{A}\zeta(i) + \hat{K}\omega_m(i) + \hat{B}i_T(i) \tag{17}$$

여기에서,

$\hat{A} = 1 + GT_{obs}/J_m$ $\quad T_{obs}$:observer period

$\hat{B} = -GK_T/J_m T_{obs}$ $\quad i$:observer sampling point

$\hat{K} = G^2 T_{obs}/J_m$ $\quad G$:observer error gain

식 (16)에서 보이는 것과 같이 구성된 외란 관측기에 의해서 부하외란토크를 추정할 수 있다. 또한, 레일-바퀴 사이의 점착력계수 $\mu(v_s)$는 식 (18)에서 처

럼 부하외란토크 $\hat{T}_L$을 사용하여 계산된다. 식(19)는 점착력계수 $\mu(v_s)$의 미분치를 나타낸다.

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{T}_L \tag{18}$$

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{d\mu(v_s)}{dt} = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \dot{\hat{T}}_L \tag{19}$$

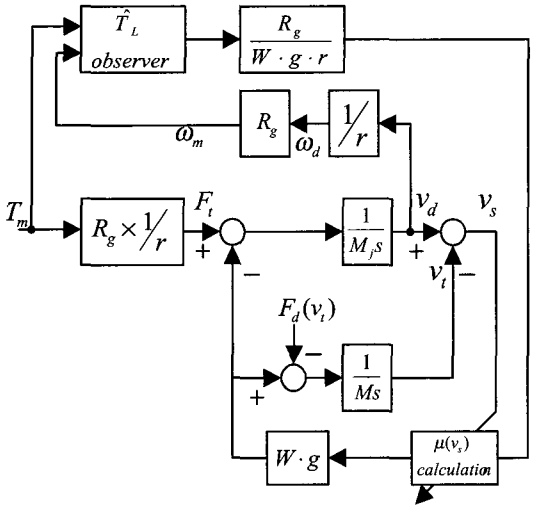

Fig. 2 Block diagram of Coefficient of adhesion estimation

Fig 2는 식 (1)~(19)의 수식으로 부터의 전동차의 공전현상과 제안된 부하토크외란관측기에 의한 점착력계수의 추정 블록도를 나타낸다.

2.3 Anti-Slip 제어 시스템

일반적으로, 점착력 $\mu(v_s)Wg$ 와 공전속도 v_s간의 특성 곡선은 Fig 3과 같이 표현된다. 점착력의 최대값을 최대점착력이라 하고, 최대점착력계수 $\mu(v_s)_{\max}$의 상태에서 생긴다. 전동차의 구동토크 T_m이 최대점착력을 넘으면, 전동기는 공전이 발생한다.

Anti-slip 제어는 최대 점착력에 일치하는 구동 토크를 유지 하도록 제어 한다. Fig 3에서처럼 최대점착력은 점착력과 공전속도 사이의 최대점착계수 $\mu(v_s)_{\max}$의 조건에서 발생된다. 점착력이 최대값이 되었을 때, 점착력계수 $\mu(v_s)$ 또한 최대값이 된다.

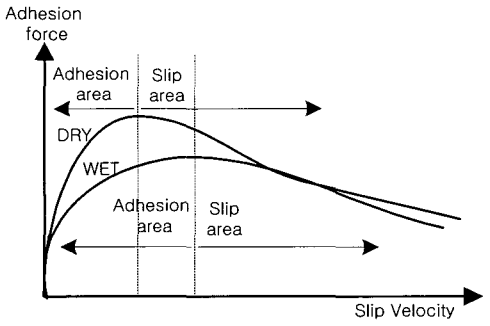

Fig. 3 Characteristics curve between adhesion effort and slip velocity

결국, 식 (20)의 관계에서 구동 토크 T_m은 최대점착력에서 구동하게 된다. 일반적으로, 전동차의 공전속도 v_s는 매우 작고, 변화량 또한 매우 작다. 그러므로, 본 논문은 식 (21)의 조건 방정식으로부터 최대점착력을 추정한다.

$$\frac{d\mu}{dv_s} = \frac{\frac{d\mu}{dt}}{\frac{dv_s}{dt}} = \frac{d\mu}{dt} \cdot \frac{dt}{dv_s} \tag{20}$$

$$\frac{d\mu}{dt} = 0 \tag{21}$$

Fig 4, 5는 그림 2의 점착력계수 추정블록도, 그림 3의 점착력과 공전속도사이의 특성곡선 그리고 식(21)을 이용하여 모델링한 시뮬레이션 파형을 나타낸다.

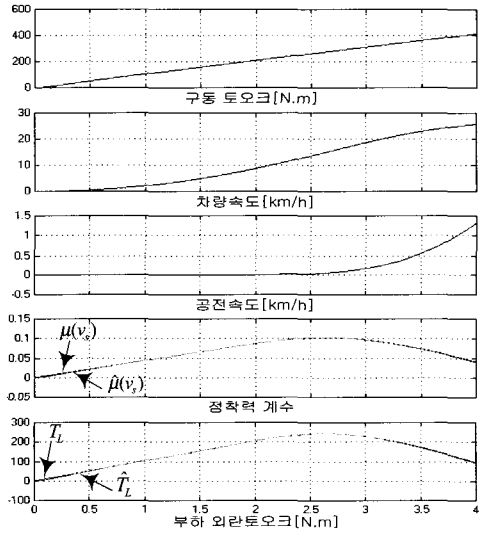

Fig. 4 In case of non Anti-slip PI torque control

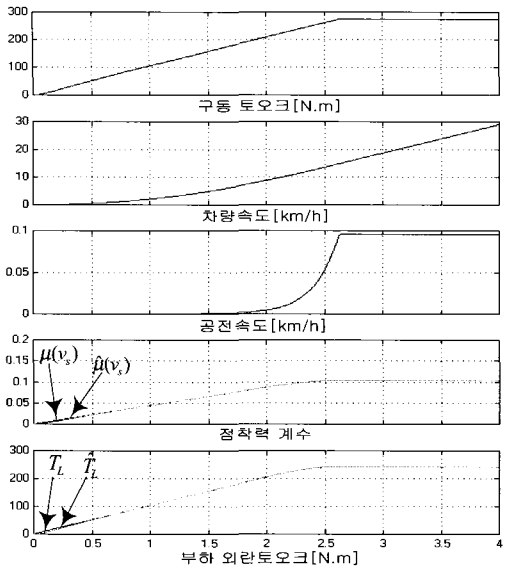

Fig. 5. In case of Anti-slip PI torque control

전동차 운전시, 부하 외란 관측기에 의한 부하외란토크 추정치 $\hat{T}_L$이 실제 부하외란토크 T_L을 정확히 추정함을 알 수 있고, 점착력계수 추정치 $\hat{\mu}(v_s)$가 실제 점착력계수 $\mu(v_s)$를 정확히 추정함을 확인할 수 있었다. 그러므로 추정한 점착력계수 $\hat{\mu}(v_s)$를 이용하여 Anti-slip제어를 구현하였다.

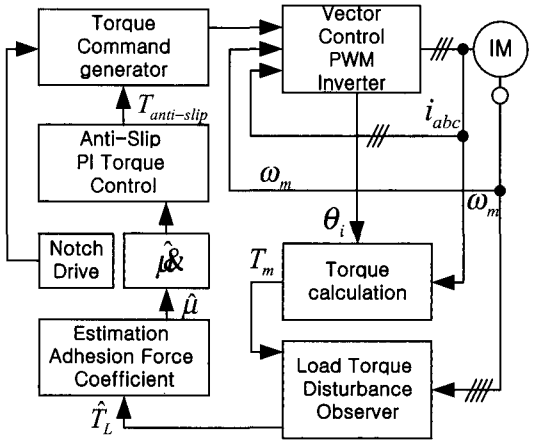

Fig. 6 Anti-slip PI torque control system with Load torque disturbance observer

Fig 6은 부하토크 외란관측기을 이용한 Anti-slip PI토크 제어시스템의 전체제어블록도를 나타낸다. 점착력계수를 추정하기 위한 부하외란토크는 각 전동기별로 연산하여 평균값을 이용하였고, 부하외란토크는 견인전동기 4대의 전동기 속도 평균값을 이용하여 추정하였다. 또한 점착력계수의 미분치는 노이즈에 강인한 미분관측기를 구성하여 사용하였다.

Notch 운전시, 레일-바퀴사이의 점착력계수와 공전속도 사이의 관계에서, 점착력계수 미분치의 기울기가 0이 아닌 경우의 Anti-slip PI토크지령치 $T_{anti-slip}$는 식 (22)와 같다.

$$T_{anti-slip} = (K_P + \frac{K_I}{s}) \cdot s\,\hat{\mu}(v_s)$$

$$= K_P \cdot \hat{\mu}(v_s) + K_I \cdot \hat{\mu}(v_s) \qquad (22)$$

식 (22)에서, Anti-slip PI토크지령치 $T_{anti-slip}$의 PI 게인 K_P, K_I는 Fig 3의 점착력과 공전속도사이의 특성곡선에서 점착력계수의 미분치 기울기가 양이 되면, $T_{anti-slip}$지령치를 최대점착력이 되는 최적공전속도로 증가시키고, 점착력계수의 미분치 기울기가 음이 되면, $T_{anti-slip}$지령치를 최대 점착력이 되는 최적공전속도로 감소시킨다.

3. 시뮬레이션

실제 점착력계수에 대한 추정 점착력의 특성을 확인하고, 점착력계수 변화시 Anti-slip 제어의 특성을 확인하기 위해서 철도차량 시스템의 점착력계수 추정 블록도와 점착력과 공전속도사이 특성 곡선인 Fig 2, 3을 이용하여 Fig 7과 같이 모델링하여 시뮬레이션 하였다. Table 1은 시뮬레이션에 사용한 파라메터를 나타낸다.

Table 1 Parameter of simulation

전동기 파라메터			
출 력	30[kW]	R_r	0.23[Ω]
정격 전압	380[V]	L_s	50.26[mH]
정격 P , f	4극 , 60[Hz]	L_r	52.103[mH]
정격회전수	1750[RPM]	L_m	50.26[mH]
R_s	0.18[Ω]	J_m	0.35[kg · m²]

Fig 7, 8은 non Anti-slip제어와 Anti-slip제어 경우의 차량속도, 점착력, 견인전동기의 상전류파형을 나

타낸다. 전동차 기동 4초후에 공전이 발생하면, non Anti-slip제어 경우에는 공전속도 증가에 의한 점착력과 차량속도의 감소를 확인할 수 있었고, Anti-slip제어 경우에는 점착력과 차량속도가 non Anti-slip제어 경우와 비교하여 점착력의 감소율이 적었고, 차량속도의 증가 기울기가 현저히 상승함을 확인 하였다.

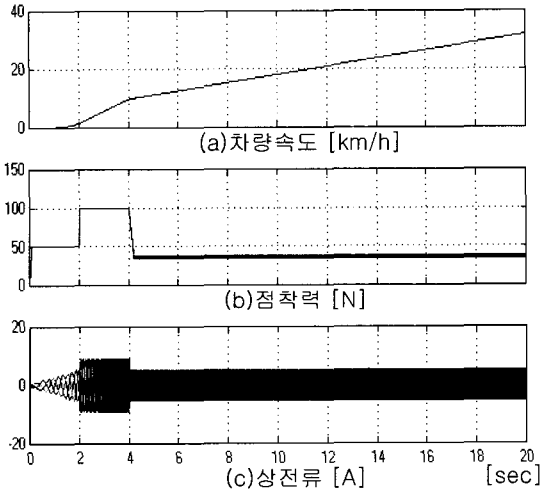

Fig. 7 In case of non Anti-slip PI torque control

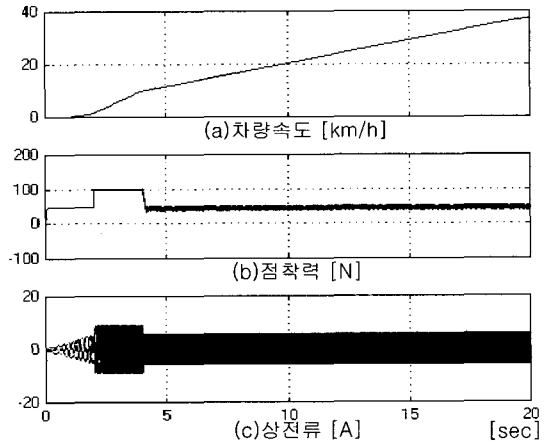

Fig. 8 In case of Anti-slip PI torque control

4. 실험 결과

Fig 9는 전체시스템블록도를 나타내고 있다. 하나의 인버터로 네 대의 유도전동기가 연결되어 1C4M 에 의해 구동되는 한 개의 바퀴에 대하여 모델링하여 실험하였다. 제어알고리즘을 구현하기 위해서 TMS320-VC33 DSP를 이용하였고, PWM 출력과 4개의 전동기 속도, 1개의 관성체 속도를 검출하여 사용하기 위하여 ALTERA사의 EP1KQC208-2를 사용하였다. 유도전동기의 벡터제어방법은 회전자 자속기준 벡터제어를 이용하였으며, 전류제어루프는 200[uS]마다 동작되도록 하였으며, 속도제어루프는 5[mS]마다 제어되도록 하였다.

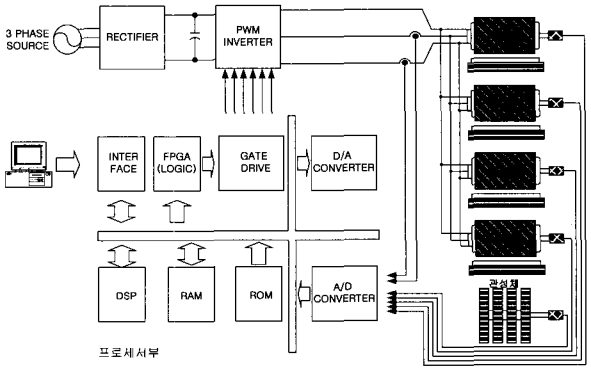

Fig. 9 Block diagram of full system

Fig 10은 1C4M 축소형 철도차량장치의 공전실험장치이다. 축소형 철도차량장치에서 큰 원반은 선로를 나타내고, 4개의 전동기는 철도차량 견인용 전동기를 나타내고, 전동기에 연결된 작은 원반은 차량바퀴를 축소 시킨 장치이다. 수직항력을 측정하기 위하여 로드셀을 취부하였고, 레버는 수직항력의 크기를 조절하는 장치이다. 관성체는 레일을 축소 시킨 장치이고, 열차 하중에 해당하는 축소 관성체이다.

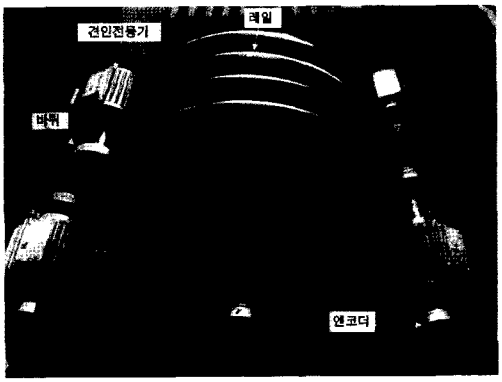

Fig. 10 Minimized model of railway vehicle

실험 조건으로는, 초기 기동시 견인력 요구치의 증가에 따라 전동기 구동력과 바퀴속도가 증가하게 된다. 발생된 구동력에 대해 추정 점착력도 증가한다. 이러한 견인력 제어상태에서 각각의 바퀴와 레일사이에 물을 주입하여 마찰력을 감소시켰다. 그로 인해 바퀴는 비안정적인 공전속도를 가지게 되며, 견인력 제어는 비안정 영역에서 수행된다. 그러나 점착력의 감소를 추정한 점착력과 공전요소 제어에 의해 전동기 구동력이 빠르게 감소됨으로써, 바퀴의 공전속도는 비안정적인 공전상태에서 안정된 공전상태로 회복 제어된다. Fig 11은 notch1과 2로 기동토크를 주다가 물을 계속하여 주입한 경우의 점착력과, 공전속도, 차량속도, 상전류 파형을 나타내고 있다. 이 경우에는 non Anti-slip PI토크제어 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입한 후 대공전이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 차량속도의 증가 기울기가 현저히 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 실제 철도차량 시스템에서는 수직항력이 상당히 크기 때문에 이와 같은 대공전은 발생하지 않지만, 축소형 철도차량 장치에서는 수직항력이 약하고 전동기의 원반과 레일 마찰면의 마찰력이 약하므로 대공전이 발생한다. Fig 12는 Fig 11과 같은 경우로써, 이 경우에는 Anti-slip PI토크 제어 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입하여도 Anti-slip PI토크 제어에 의하여 공전이 거의 발생하지 않고, 재점착이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 11의 경우와 비교하여 차량속도의 증가기울기가 현저히 상승함을 확인할 수 있고, 점착력의 감소가 적음을 알 수 있다.

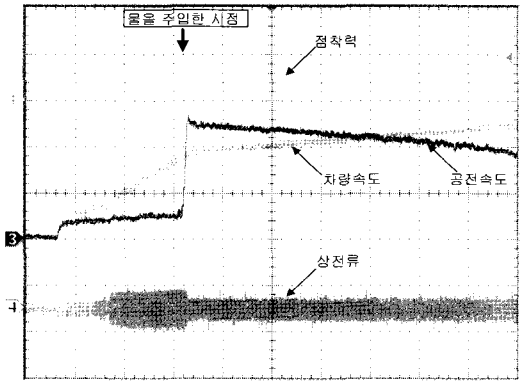

Fig. 11 Waveform of non anti-slip control
1 점착력[100N/Div] 2 차량속도[10km/h/Div]
3 공전속도[1km/h/Div] 4 상전류[20A/Div] T/D:[2s]

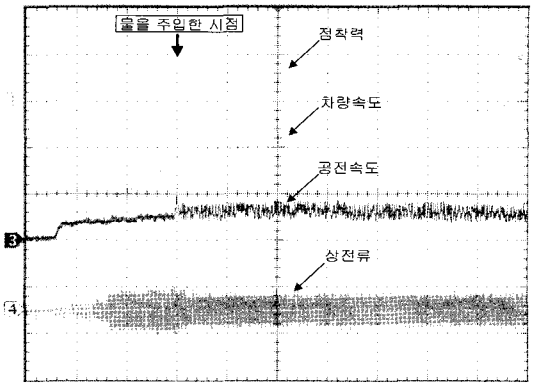

Fig. 12 Waveform of anti-slip control
1 점착력[100N/Div] 2 차량속도[10km/h/Div]
3 공전속도[1km/h/Div] 4 상전류[20A/Div] T/D:[2s]

Fig 13과 14는 notch1과 2로 기동토크를 주다가 물을 계속하여 주입한 후 물의 주입을 차단한 경우의 점착력과, 공전속도, 차량속도, 상전류파형을 나타낸다. Fig 13은 non Anti-slip PI토크제어 경우이고, Fig 14는 Anti-slip PI토크제어의 경우이다. 마찰력이 견인력 요구치보다 작은 상태에서의 재점착 제어 특성을 검토하기 위해, 한 시점에서 물을 주입한 후에 물의 주입을 차단함으로써, 물을 주입한 시점에서 감소된 마찰력이 계속해서 감소상태를 유지하도록 하였다. 이 경우 추정된 점착력에 의해 전동기 구동력은 안정적으로 제어된다. 또한 공전속도는 0.7[km/h]정도를 유지하고 있다. 이는 최적 공전속도와 거의 일치한다. 그러므로 견인력은 최대점착력에서 제어 되고 있음을 알 수 있었다.

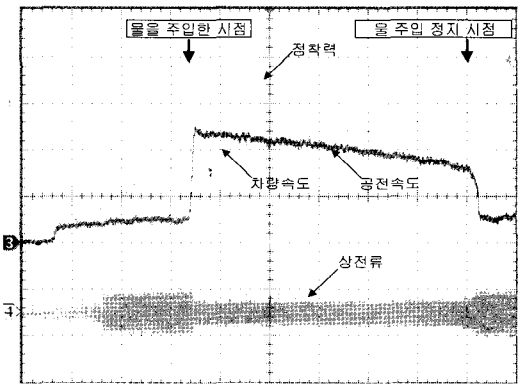

Fig. 13 Waveform of non anti-slip control
1 점착력[100N/Div] 2 차량속도[10km/h/Div]
3 공전속도[1km/h/Div] 4 상전류[20A/Div] T/D:[2s]

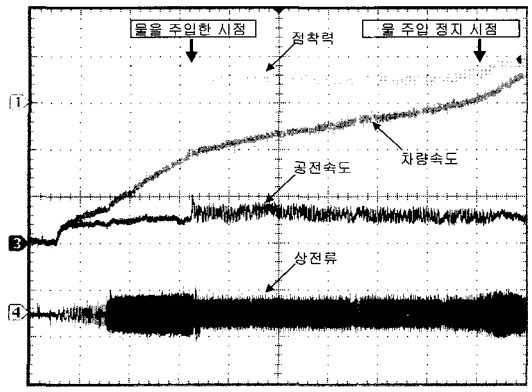

Fig. 14 Waveform of anti-slip control

1 점착력[100N/Div] 2 차량속도[10km/h/Div]
3 공전속도[1km/h/Div] 4 상전류[20A/Div] T/D:[2s]

5. 결 론

본 논문에서는 부하토크외란 관측기를 구성하여 점착력계수를 추정하고, 추정한 점착력계수의 미분치를 PI 토크 제어하여 다음과 같은 결론를 얻었다.

[1] 바퀴와 레일사이의 실제 점착력계수를 부하 토크 외란 관측기를 통하여 실시간으로 추정하고, 추정된 점착력계수를 이용하여 최대점착력에서 동작하도록 하였다.

[2] 부하 토크외란 관측기를 통하여 상태변수인 점착력계수를 추정하므로 시스템의 외란 및 파라메터 설정에 대하여 안정적인 제어가 되도록 하였다.

[3] 공전속도에 의한 점착력계수가 변화한 후에도 구동력과 차량속도는 일정한 가속 제어가 가능하도록 하였다.

[4] 축소형 견인전동기 특성 해석에 의한 1C4M 병렬 운전의 특성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] H. Ueda, K. Nagai, " The Prospects and Problems of Speed_up on Intercity Railway Lines in Japan-In Comparison with European High Speed Trains," (STECH) Coference Record, Vol. 1, pp.13~18, November, 1993

[2] S. Senini, F.Flinders, W. Oghanna, " Dynamic Simulation of Wheel-Rail Interaction for Locomative Traction studies," AESM/IEEE Joint Railroad Conf. Rec, pp.27~34, May, 1993

[3] Yoshki Ishikawa, Atsuo Kawamura, "Maximum Adhesive force Control in Super High-Speed Train" PCC-Nagaoka'97 ,pp.951-954, 1997

[4] M.Iwahori, R.Inoue, "Anti-Slip Control of VVVF Inverterrived EMUs",STECH, Vol.2, pp.255-260 November, 1993

[5] T. Watanabe, M. Ogasa, S. Ohe, " Improvement of Reahesive Characteristics of Electric Motor Vehicles," STECH Conf. Rec., Vol. 2, pp.243~247, November, 1993

[6] 고종선, "외란관측기와 파라미터 보상기를 이용한 PMSM의 정밀 위치제어," 전력전자하계학술대회논문집, pp. 285~288, 2002

[7] 김길동, "벡터제어 유도전동기를 이용한 축소형 관성 시뮬레이터," 전력전자학회 논문지 제7권 제1호, pp.74~80, 2002