한국철도학회논문집
제8권 제3호 2005년 ▌pp. 216-221

철도차량의 Anti-Slip 제어 및 속도센서리스 벡터제어

Anti-Slip Control and Speed Sensor-less Vector Control of the Railway Vehicle

김길동† · 조정민*
Gil-Dong Kim · Jeong-Min Jho

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 based on disturbance observer and sensor-less vector control. The numerical simulation and experimental results point out that the proposed re-adhesion control system has the desired driving wheel torque response for the tested bogie system of electric coach. Based on this estimated adhesive effort, the re-adhesion control is performed to obtain the maximum transfer of the tractive effort.

Keywords : Electric motor coaches, Adhesive effort, Sensor-less vector control

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 제어방법이 절대적으로 필요하다. 그러므로 최근에는 이러한 제어를 수행하는 재점착 제어에 관심이 집중되고 있다. 철도차량은 레일과 바퀴 사이의 마찰로서 견인력을 전달하므로 점착력 이상의 구동력은 공전(slip)을 발생시킨다. 일반적으로, 점착력은 전동차의 무게와 레일-바퀴 간의 점착력 계수의 함수로 정의되어진다. 점착력 계수의 특성은 레일위의 습기, 먼지, 기름등과 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.

기존의 재점착 제어알고리즘은 견인력을 최대로 전달할 수 있도록 미리 공전속도를 설정하여 제어하는 방법이 있으나 최대점착력이 되는 최적공전속도가 변하기 때문에 정확하게 최대 점착력을 이용할 수 없다. 최근에는 퍼지논리 제어를 이용한 재점착제어가 연구되어지고 있으나 이러한 방법역시 최대점착력이 되는 최적공전속도를 미리 설정한 퍼지소속함수를 가지고는 점착력 이용률을 증대시킬 수 없다. 또한, 기존의 부하관측기를 통해 차량바퀴와 선로 사이의 점착력을 추정하여, 최대점착력에서 견인력을 제어하는 방식은 컴퓨터 시뮬레이션 수준에 머물러 있을 뿐 실험적으로 검증되지 않고 있어, 본 논문에서는 실험을 통하여 제어방법의 타당성을 입증하고자 한다.

본 논문에서는 최대 견인력 제어를 위해서 속도센서리스 벡터제어와 부하 토크 외란 관측기를 통하여 점착력 계수를 추정한다. 추정한 점착력 계수의 미분치를 PI 토크 제어하여, 추정된 점착력이 최대점착력에서 유지되도록 전동기를 토크 제어하는 Anti-slip제어 알고리즘을 제안한다[1-3].

점착력 계수를 추정하기 위해서는 전압, 전류값 뿐만 아니라 자속이나 속도정보가 필수적이다. 따라서 전동기의 회전속도를 정확하게 검출할 수 있는 속도센서가 필요하게

† 책임저자 : 명지대학교 전기공학과 박사과정
* 비회원, 한국기계연구원

된다. 그러나 속도검출을 위해 속도센서를 부착하는 것은 철도차량에 있어서 여러 가지 면에서 단점을 가지고 있다[4]. 대표적으로 전동차 운전시, 레일의 노면상태나 구배등 여러 환경조건에 의하여 철도차량에 부착된 견인전동기의 속도센서가 기계적인 진동에 의해 정확한 정보를 얻을 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 속도센서 없는 센서리스 구동방식[5]에 의한 부하 토크 외란 관측기를 설계하여, 부하 외란 토크를 추정하고, 부하 외란 토크에 철도차량 상수를 이용하여 점착력 계수를 추정한다. 이와 같은 제어 알고리즘을 구현하기 위하여 부하분담 및 슬립현상에 대하여 제어가 용이한 1C1M(1-Controller 1-Motor) 철도모의장치를 이용하여 제안된 알고리즘을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다. 또한 실제 철도차량시스템의 경우 선로 표면의 상태 변화 및 차량속도의 가감에 따른 공전속도에 대한 점착력의 관계를 축소형 철도모의장치를 이용하여 구현하였다.

2. 철도 차량시스템의 모델링

2.1 전동차의 공전(Slip)현상

그림 1은 바퀴와 레일사이의 점착특성의 관계를 나타낸 것이다. 그림 1과 같이 바퀴구동력 T의 발생에 따라 바퀴와 레일 사이에는 마찰력에 의한 접선력 F_{AE}가 반대방향으로 작용한다. 이 힘을 점착력이라 하는데, 차체에 전달되는 견인력 특성을 결정한다. 전동차의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)은 전동차의 견인력에 대한 동작을 나타내고, 식 (2)은 전동차 바퀴 동작을 나타낸다. 식 (2)에서 $\mu(v_s)Wgr$은 레일-바퀴간의 점착력 $\mu(v_s)Wg$ 와 상응하는 바퀴의 토크 T_{AE}이다. 식 (3), (4)는 점착력과 공전속도의 수식을 나타낸다.

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

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

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

$$v_s=v_d-v_t \tag{4}$$

여기서, v_t는 전동차의 속도, v_s는 슬립속도, v_d는 바퀴의 속도, ω_d는 바퀴의 선속도, $\mu(v_s)$ 는 레일-바퀴간의 점착력 계수이다. 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.

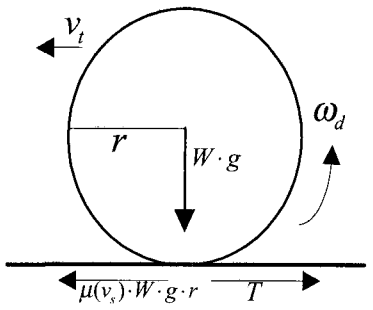


그림 1. 레일-바퀴사이의 점착특성

2.2 속도추정기[5]

유도전동기 속도 센서리스 벡터제어 시스템의 구동을 위해 고정자 전류와 폐루프 적분방식의 자속 보상기로 추정한 자속 값을 이용하여 회전자 속도를 구하면 식 (5)와 같다.

$$\hat{\omega}_m=\frac{(\lambda^s_{ds-F}-L_s\,i^s_{ds})\,p\,\lambda^s_{qr}-(\lambda^s_{qs-F}-L_s\,i^s_{qs})\,p\,\lambda^s_{dr}}{(\lambda^s_{ds-F}-L_s\,i^s_{ds})\,\lambda^s_{dr}+(\lambda^s_{qs-F}-L_s\,i^s_{qs})\,\lambda^s_{qr}} \tag{5}$$

2.3 점착력 계수 추정 알고리즘

식 (6)은 일반적인 전동기의 토크 방정식으로서 전동기의 회전각속도에 대한 일차 미분방정식의 형태로 표현된다. 식 (7)은 전동기의 토크성분을 토크전류와 상수의 곱 형태로 표시한 수식이다. T_L은 전동기의 부하 외란 토크이며, 외란 관측기에 의해서 추정한다. ω_m은 견인전동기의 속도이며, K_T는 토크상수이다.

$$J_m\frac{d}{dt}\omega_m=T_m-T_L \tag{6}$$

$$J_m\frac{d}{dt}\omega_m=K_T\,i_T-T_L \tag{7}$$

식 (6), (7)을 식 (2)에 대입하면, 식 (8)과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$J_m\frac{d}{dt}\omega_m=T_m-\frac{1}{R_g}\mu(v_s)\cdot W\cdot g\cdot r \tag{8}$$

$$T_L=\frac{1}{R_g}\mu(v_s)\cdot W\cdot g\cdot r \tag{9}$$

실제 시스템에서 관측 주기는 T_L의 변화에 비하여 충분히 짧기 때문에 관측기의 디자인을 간소화하기 위해서, 이것은 다음과 같은 가정이 가능하다[6].

$$\frac{dT_L}{dt}=0 \tag{10}$$

식 (7)과 (10)를 토대로, 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}=\begin{pmatrix}0 & -\frac{1}{J_m}\\ 0 & 0\end{pmatrix}x+\begin{pmatrix}\frac{K_T}{J_m}\\ 0\end{pmatrix}u$$
$$y=(1 \quad 0)x \tag{11}$$

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

상태 방정식에 따라서, 이것은 고피나스 디자인 방식을 이용하여 관측기에 의해 추정될 수 있다[7].

$$\hat{T}_L=\frac{1}{1+\frac{J_m}{G}s}(K_T i_T - sJ_m\omega_m)$$
$$=\frac{1}{1+\frac{J_m}{G}s}T_L \tag{12}$$

여기서, $\frac{J_m}{G}$ 는 관측기 시정수 있다.

DSP를 이용하는 실제 신호처리에서, 식 (12)의 부하토크 관측기는 차분 방정식으로 변화시켜야 한다. 이를 위하여, 이산 제어시스템에서 알려진 고피나스 방법을 사용하면 식 (13)과 같이 표현할 수 있다[8,9].

$$\hat{T}_L(i)=\zeta(i)+G\omega_m(i)$$
$$\zeta(i+1)=\hat{A}\zeta(i)+\hat{K}\omega_m(i)+\hat{B}i_T(i) \tag{13}$$

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

G는 제어기 모델출력, 부하외란토크 T_L 과 직접 관측이 가능한 ω_m 의 추정오차를 고려한 관측기 에러 이득을 나타낸다. 식 (12)에서 보이는 것과 같이 구성된 외란 관측기에 의해서 외란 토크를 추정할 수 있다. 또한, 레일-바퀴 사이의 점착력계수의 추정치 $\hat{\mu}(v_s)$는 식 (14)에서처럼 외란토크의 추정치 $\hat{T_L}$을 사용하여 계산된다. 식 (15)은 점착력계수의 추정치 $\hat{\mu}(v_s)$의 미분치를 나타낸다.

$$\hat{\mu}(v_s)=\frac{R_g}{W\cdot g\cdot r}\hat{T_L} \tag{14}$$

$$\hat{\mu}(v_s)=\frac{d\mu(v_s)}{dt}=\frac{R_g}{W\cdot g\cdot r}\hat{T_L}' \tag{15}$$

2.4 Anti-Slip 제어 알고리즘

일반적으로, 점착력 $\mu(v_s)Wg$와 공전속도 v_s간의 특성곡선은 그림 2와 같이 표현된다. 점착력의 최대 값을 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. 그림 3에서처럼 최대점착력은 점착력과 공전속도 사이의 기울기가 "0"인 최대점착계수 $\mu(v_s)_{\max}$의 조건에서 발생된다. 점착력이 최대 값이 되었을 때, 점착력계수 $\mu(v_s)$ 또한 최대 값이 된다.

결국, 식 (16)의 관계에서 구동 토크 T_m은 최대점착력에서 구동하게 된다. 일반적으로, 전동차의 공전속도 v_s는 매우 작고, 변화량 또한 매우 작다. 그러므로 본 논문은 식 (17)의 조건 방정식으로부터 최대점착력을 추정한다.

$$\frac{d\mu}{dv_s}=\frac{d\mu/dt}{dv_s/dt}=\frac{d\mu}{dt}\cdot\frac{dt}{dv_s} \tag{16}$$

$$\frac{d\mu}{dt}=0 \tag{17}$$

그림 3은 부하토크 외란관측기를 이용한 Anti-slip PI토크 제어시스템의 전체제어블록도를 나타낸다. 속도센서리스벡터제어에 의하여 견인전동기의 속도를 추정하고, 추정한 속도의 정보를 이용하여, 부하 외란 토크를 순시적으로 추정한다. 순시적으로 추정한 부하 외란 토크에 철도차량 상수를 이용하여 점착력 계수를 추정한다. 또한, 점착력 계수의 미분치는 노이즈에 강인한 미분관측기를 구성하여 사용하였다.

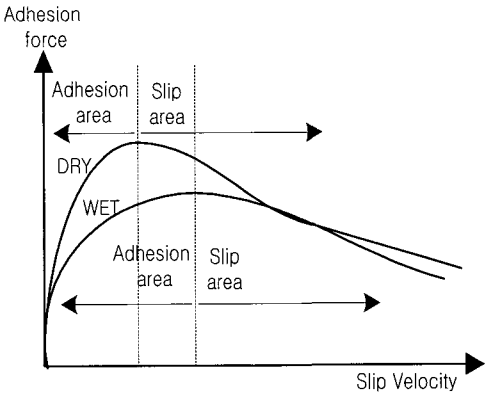


그림 2. 점착력과 공전속도 사이의 특성곡선

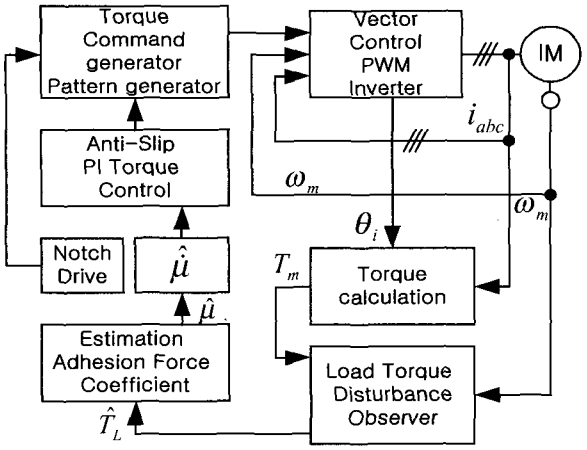


그림 3. 부하토크외란관측기를 이용한 Anti-slip 토크제어

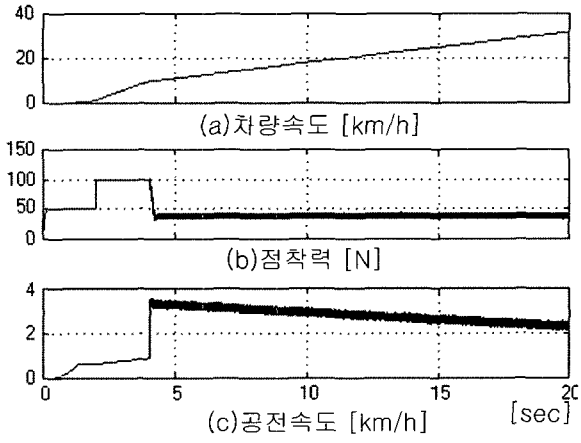


그림 4. Anti-Slip PI 토크 제어를 하지 않은 경우

Notch 운전시, 레일-바퀴사이의 점착력계수와 공전속도 사이의 관계에서, 점착력계수 미분치의 기울기가 0이 아닌 경우의 Anti-slip PI토크 지령치 $T_{anti-slip}$는 식 (18)과 같다.

$$T_{anti-slip} = (K_P + \frac{K_I}{s}) \cdot s\,\hat{\mu}(v_s)$$
$$= K_P \cdot \hat{\mu}(v_s) + K_I \cdot \hat{\mu}(v_s) \qquad (18)$$

식 (18)에서, Anti-slip PI토크 지령치 $T_{anti-slip}$의 PI게인 K_P는 그림2의 점착력과 공전속도사이의 특성곡선에서 점착력계수의 미분치 기울기가 양이 되면, $T_{anti-slip}$지령치를 최대점착력이 되는 최적공전속도로 증가시키고, 점착력계수의 미분치기울기가 음이 되면, $T_{anti-slip}$지령치를 최대점착력이 되는 최적공전속도로 감소시킨다.

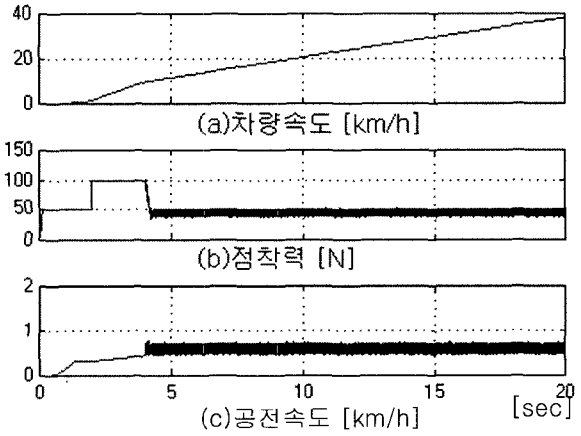


그림 5. Anti-Slip PI 토크 제어를 한 경우

3. 시뮬레이션

그림 4, 5는 non Anti-slip제어와 Anti-slip제어 경우의 차량속도, 점착력, 공전속도를 나타낸다. 전동차 기동 4초 후에 공전이 발생하면, Anti-slip제어를 하지 않는 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.

4. 실험 결과

그림 6은 전체시스템블록도를 나타내고 있다. 시스템 구성은 1C1M 에 의해 구동되는 한 개의 바퀴에 대하여 모델링하여 실험하였다. 제어알고리즘을 구현하기 위해서 TMS-320 -VC33 DSP를 이용하였고, PWM 출력과 4개의 전동기

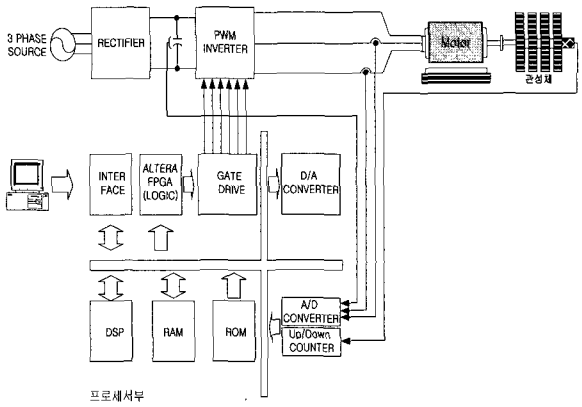


그림 6. 전체시스템 블록도

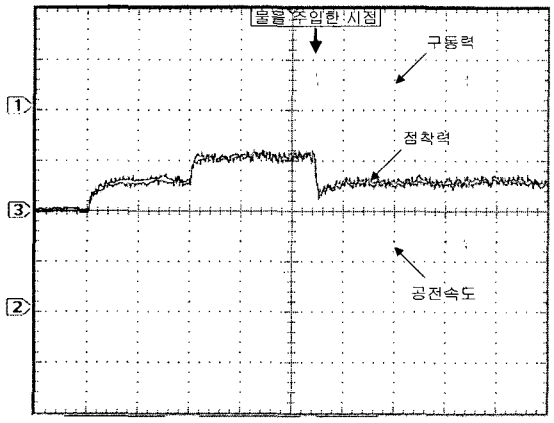
속도, 1개의 관성체 속도를 검출하여 사용하기 위하여 ALTERA사의 EP1KQC208-2를 사용하였다. 유도전동기의 벡터제어방법은 회전자 자속기준 벡터제어를 이용하였으며,

전류제어루프는 200[uS]마다 동작되도록 하였으며, 속도제어루프는 5[mS]마다 제어되도록 하였다.

실험 조건으로는, 초기 기동시 견인력 요구치의 증가에 따라 전동기 구동력과 바퀴속도가 증가하게 된다. 발생된 구동력에 대해 추정 점착력도 증가한다. 이러한 견인력 제어상태에서 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.

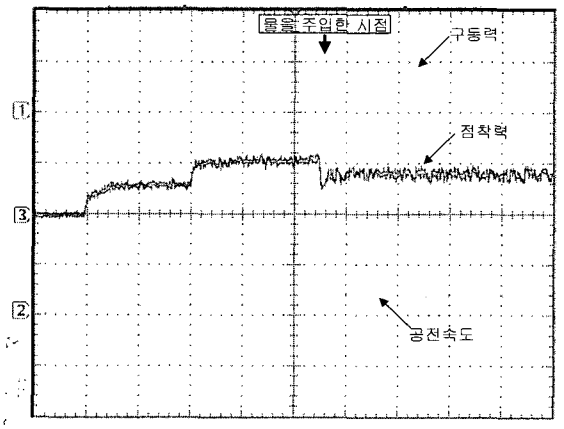
그림 7은 notch1과 2로 기동토크를 주다가 물을 계속하여 주입한 경우의 구동력, 점착력, 공전속도의 파형을 나타내고 있다. 이 경우에는 Anti-slip PI토크제어를 하지 않은 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입한 후 대공전이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 실제 철도차량시스템에서는 수직항력이 상당히 크기 때문에 이와 같은 대공전은 발생하지 않지만, 축소형 철도차량 장치에서는 수직항력이 약하고 전동기의 원반과 레일 마찰면의 마찰력이 약하므로 대공전이 발생한다.

그림 8은 Anti-Slip PI토크 제어를 한 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입하여도 Anti-Slip PI토크 제어에 의하여 공전이 거의 발생하지 않고, 재점착이 이루어지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 그림 9는 Anti-slip PI토크제어를 하지 않은 경우로써, 그림 10의 Anti-Slip PI토크 제어를 한 경우와 비교하여 차량속도의 증가기울기가 현저히 감소



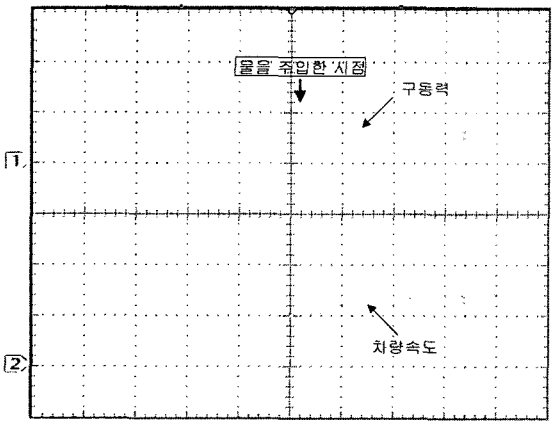
□구동력[100N/Div] □공전속도[2km/h/Div]
□점착력[100N/Div] T/D:[2s]

그림 7. Anti-slip 제어를 하지 않은 경우의 파형



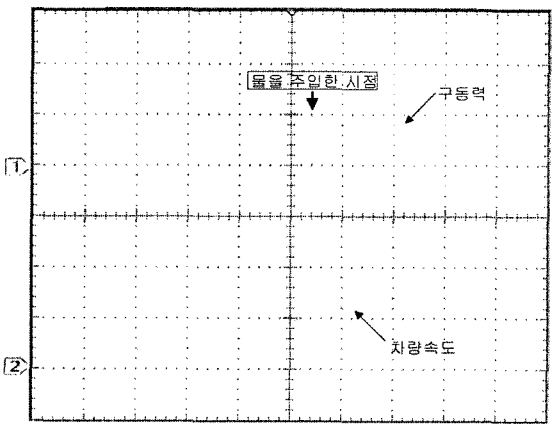
□구동력[100N/Div] □공전속도[2km/h/Div]
□점착력[100N/Div] T/D:[2s]

그림 8. Anti-slip 제어를 한 경우의 파형



□구동력[100N/Div] □차량속도[20km/h/Div] T/D:[2s]

그림 9. Anti-slip 제어를 하지 않은 경우의 파형



□구동력[100N/Div] □차량속도[20km/h/Div] T/D:[2s]

그림 10. Anti-slip 제어를 한 경우의 파형

함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 속도센서리스벡터제어를 이용한 부하토크 외란 관측기를 구성하여 점착력계수를 추정하고, 추정한 점착력계수의 미분치를 PI토크 제어하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 바퀴와 레일사이의 실제 점착력 계수를 부하 토크외란 관측기를 통하여 실시간으로 추정하고, 추정된 점착력 계수를 통하여 점착력을 추정하여 최대 견인력 제어가 가능함을 확인 하였다.
(2) 속도센서리스벡터제어를 적용함으로써, 레일의 노면상태나 구배등 여러 환경조건에 대해서도 정확한 속도정보를 얻을 수 있었다.
(3) 공전속도에 의한 점착력 계수의 변화에도 불구하고 구동 토크와 차량속도는 일정한 가속 제어가 가능 하였다.
(4) 실험결과들로부터 슬립현상 발생시 구동토크에 있어서 10%의 향상되었다.

참 고 문 헌

1. 전기영, "부하토크외란관측기을 이용한 1C-4M 축소형 철도차량 장치의 점착력추정에 의한 Anti-slip제어", 전력전자학회논문지, 제8권 4호,
2. 서광덕, "점착력 추정에 의한 고능률 재점착제어", 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp.13-28, 1995
3. 홍용기, "철도차량의 점착력에 관한 연구," 고속철도 Symposium 논문집, pp.343-367, 1993
4. T. Hata, H. Kanehare, G. Iijima, Y. Nishi, "Anti-Slip Control fo VVVF Inverter Drived EMUs,"
5. Hirokazu Tajima and Yoichi Hori, "Speed sensorless field-orientation control of the induction machine," IEEE Trans. Indus. Appli., vol.29. pp.175-180, January/February 1993
6. S.M.Bozic, Digital and Kalman Filtering, Edward Arnold, 1979
7. Y. Hori, "Implemwntation of Discrete Time Flux Observer for Induction Machine and Its Sensitivity Reduction to Machine Parameter Variation", JIEE Trans, Vol. 108-D No. 7, pp.665-671, 1998
8. Andresen, E.C., "Digital Simulation of an Inverter-fed Induction Motor Locomotive Drive with Wheel Creep Control," Dissertation, Technische Hochschl Darmstat, 1987
9. Makoto IWASAKI, Nobuyuki MATSUI, "DSP-Based High Performance Speed Control Systems of Vector Control IM with Load Torque Observer," in Proc. of Tokyo-IPEC, 1990

부 록

표 A. 축소모형의 시스템 기본사양

시스템 사양	규 격		
유도전동기	0.75[kW], 4극, 정격토크:4.1[Nm]		
작은 원판의 직경	0.12[m]	두께	0.0025[m]
큰 원판의 직경	0.6[m]	두께	0.018[m]
축의 직경	0.2[m]	총길이	0.3[m]