

# Anti-slip 제어 알고리즘을 이용한 점착력 추정에 관한 연구

## A Study of Adhesive Effect Estimation using Anti-slip Control Algorithm

김길동\*      안태기\*\*      이우동\*\*      이호용\*\*\*      박서영\*\*\*\*  
Kim, Gil-Dong    Ahn, Tae-Ki    Lee, Woo-Dong    Lee, Ho-Yong    Park, Seo-Young

### 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. 서론

일반적으로, 철도차량은 레일과 바퀴사이의 마찰력으로서 견인력을 전달한다. 점착력은 전동차의 무게와 레일-바퀴간의 점착력계수의 함수로 정의되어진다. 점착력계수의 특성은 레일위의 습기, 먼지, 기름 등과 같은 레일과 바퀴 사이의 조건에 크게 영향을 받는다. 점착력계수가 갑자기 감소하면 점착력 이상의 구동력으로 공전(slip)이 발생한다. 공전이 발생하면, 점착력을 저하시켜 견인능력을 감소시키고, 기계적 손상 및 소음을 유발시킨다. 이러한 공전을 방지하기 위해 마찰력에 의한 견인력 제한치인 최대 점착력을 충분히 활용할 수 있는 견인력제어 방법이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 최대 견인력 제어를 위해서 부하 토크 외란 관측기를 적용하여 점착력계수를 추정하며, 추정된 점착력계수의 미분치를 PI 토크 제어하여 추정된 점착력이 최대 점착력에서 유지되도록 토크 제어하는 Anti-slip 제어 알고리즘을 제안한다.

이와같은 제안된 알고리즘은 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다. 또한 실제 철도차량시스템의 경우 선로 표면의 상태 변화 및 차량속도의 가감에 따른 공전속도에 대한 점착력의 관계를 축소형 철도차량시스템으로 구현함으로써, 실제 철도차량시스템과의 비교 분석을 통해 최대 견인력제어가 가능하도록 하였다.

## 2. Anti-slip 제어 알고리즘의 구성

### 2.1 점착력계수 추정 분석

식 (1), (2)는 일반적인 전동기의 토크 방정식으로서 전동기의 회전각속도에 대한 일차 미분방정식의 형태로 표현된다.  $T_L$ 은 전동기의 부하 외란 토크이다.

\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\*\* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

\*\*\*\* 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - T_L \quad (1) \quad J_m \frac{d}{dt} \omega_m = K_T i_T - T_L \quad (2)$$

$\frac{1}{R_g} \mu(v_s) W g r$  은 전동기의 외란토크로서, 레일-바퀴간의 점착토크에 상응하는 전동기의 부하 토크가 된다.

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (3) \quad T_L = \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (4)$$

$$\frac{dT_L}{dt} = 0 \quad (5) \quad \mathcal{T}_L = \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} (K_T i_T - s J_m \omega_m) = \frac{1}{1 + \frac{J_m}{G} s} T_L \quad \left( \frac{J_m}{G} : \text{관측기 시정수} \right) \quad (6)$$

식 (6)에서 보이는 것과 같이 구성된 외란 관측기에 의해서 부하 외란 토크를 추정할 수 있다. 또한, 레일-바퀴 사이의 점착력계수  $\mu(v_s)$ 는 식 (7)에서처럼 부하 외란 토크  $\mathcal{T}_L$ 를 사용하여 계산된다. 식(8)은 점착력계수  $\mu(v_s)$ 의 미분치를 나타낸다.

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \mathcal{T}_L \quad (7) \quad \hat{\dot{\mu}}(v_s) = \frac{d\mu(v_s)}{dt} = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{\mathcal{T}}_L \quad (8)$$

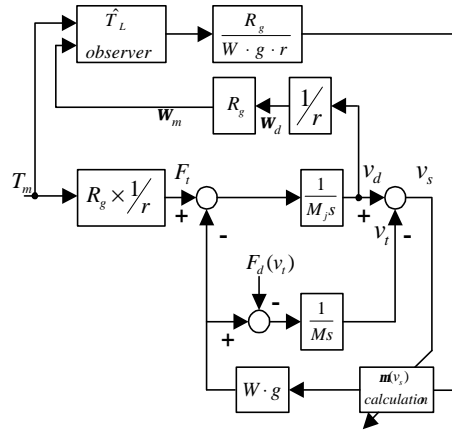


그림1. 점착력계수의 추정 블록도

그림1은 식 (1)~(8)의 수식으로부터의 전동차의 공전현상과 제안된 부하 토크 외란 관측기에 의한 점착력계수의 추정 블록도를 나타낸다.

## 2.2 Anti-Slip 제어 시스템 분석

점착력  $\mu(v_s) W g$  와 공전속도  $v_s$ 간의 특성 곡선은 그림2와 같이 표현된다. 점착력의 최대값을 최대 점착력이라 하고, 최대 점착력계수  $\mu(v_s)_{\max}$ 의 상태에서 발생한다.

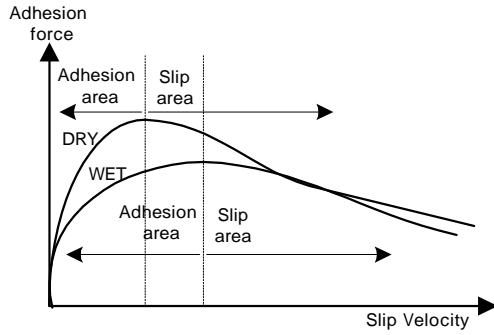


그림2. 점착력과 공전속도간의 특성 곡선

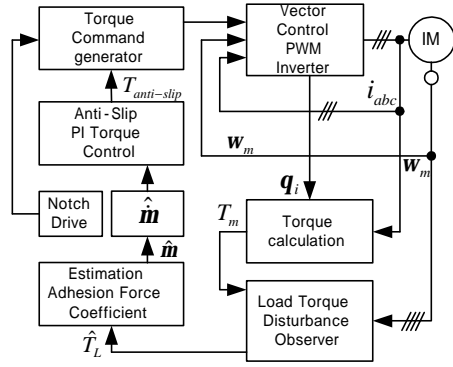


그림3. Anti-Slip PI 토크 제어 시스템의 제어 블록도

그림2에서처럼 최대 점착력은 점착력과 공전속도 사이의 최대 점착계수  $\mu(v_s)_{max}$  의 조건에서 발생된다. 점착력이 최대값이 되었을 때, 점착력계수  $\mu(v_s)$  또한 최대값이 된다.

$$\frac{d\mu}{dv_s} = \frac{\frac{d\mu}{dt}}{\frac{dv_s}{dt}} = \frac{d\mu}{dt} \cdot \frac{dt}{dv_s} \quad (9) \quad \frac{d\mu}{dt} = 0 \quad (10)$$

전동차 운전시, 부하 외란 관측기에 의한 부하 외란 토크 추정치  $\hat{T}_L$ 이 실제 부하 외란 토크  $T_L$ 을 정확히 추정함을 알 수 있고, 점착력계수 추정치  $\hat{\mu}(v_s)$ 가 실제 점착력계수  $\mu(v_s)$ 를 정확히 추정함을 확인할 수 있다. 그러므로 추정한 점착력계수  $\hat{\mu}(v_s)$ 를 이용하여 Anti-slip 제어를 구현하였다. 따라서 식 (9)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 (10)의 조건 방정식으로부터 최대점착력을 추정한다.

그림3은 부하토크 외란관측기를 이용한 Anti-slip PI토크 제어시스템의 전체 제어 블록도를 나타낸다. 점착력계수를 추정하기 위한 부하 외란 토크는 각 전동기별로 연산하여 평균값을 이용하였고, 부하 외란 토크는 견인전동기 4대의 전동기 속도 평균값을 이용하여 추정하였다. 또한 점착력계수의 미분치는 노이즈에 강인한 미분관측기를 구성하여 사용하였다.

### 3. 시뮬레이션 분석

그림4, 5는 non Anti-slip제어와 Anti-slip제어 경우의 차량속도, 점착력, 견인전동기의 상전류파형을 나타낸 것이다. 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 확인하였다.

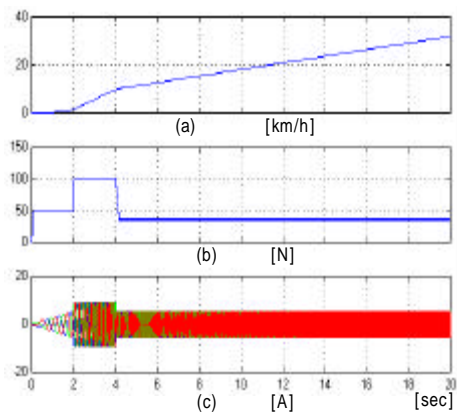


그림4. Non Anti-slip PI 토크 제어의 상 전류 파형

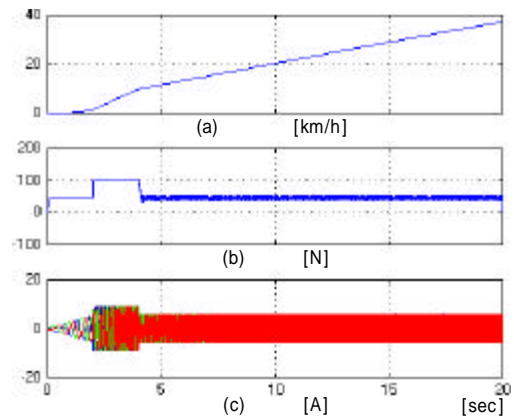


그림5. Anti-slip PI 토크 제어의 상 전류 파형

#### 4. 실험 결과 및 고찰

그림6은 전체 시스템 블록도를 나타내고 있다. 하나의 인버터로 4대의 유도전동기가 연결되어 1C4M에 의해 구동되는 1개의 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.

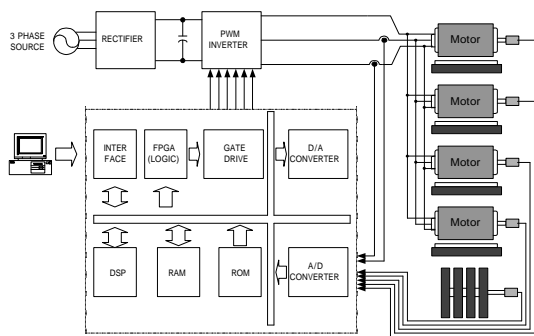


그림6. 전체 시스템 블록도

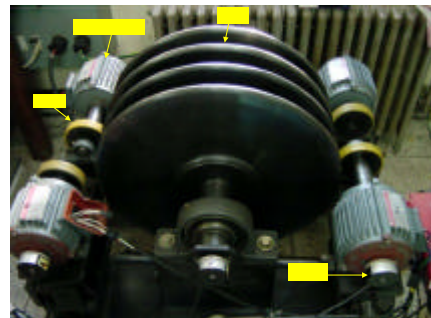


그림7. 철도차량의 공전실험장치

그림7은 1C4M 축소형 철도차량장치의 공전실험장치이다. 그림8은 notch1과 2로 기동토크를 주다가 물을 계속하여 주입한 경우의 점착력과 공전속도, 차량속도, 상전류 파형을 나타내고 있다. 그림9의 경우에는 Anti-slip PI토크 제어 경우로써, 정상상태로 운전하다가 물을 주입하여도 Anti-slip PI토크 제어에 의하여 공전이 거의 발생하지 않고, 재점착이 이루어지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 그림8의 경우와 비교하여 차량속도의 증가기울기가 현저히 상승함을 확인할 수 있고, 점착력의 감소가 적음을 알 수 있다.

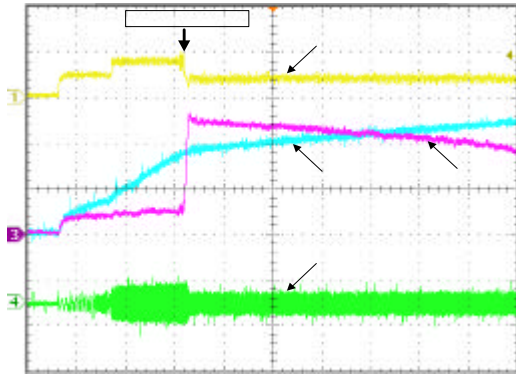


그림8. 물주입후 Non Anti-Slip 제어 파형  
 점착력: 100N/Div, 차량속도 : 10km/h/Div  
 공전속도: 1km/h/Div, 상전류: 20A/Div T/D:[2s]

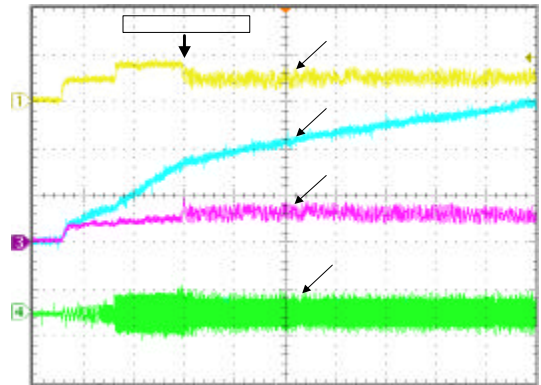


그림9. 계속 물주입시 Anti-Slip 제어 파형  
 점착력: 100N/Div, 차량속도 : 10km/h/Div  
 공전속도 : 1km/h/Div, 상전류: 20A/Div T/D:[2s]

그림10, 11은 notch1과 2로 기동토크를 주다가 물을 계속하여 주입한 후 물의 주입을 차단한 경우의 점착력과 공전속도, 차량속도, 상전류 파형을 나타낸다. 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. 또한 공전속도는 0.7[km/h]정도를 유지하고 있다. 이는 최적 공전속도와 거의 일치하며, 견인력은 최대 점착력에서 제어되고 있음을 알 수 있었다.

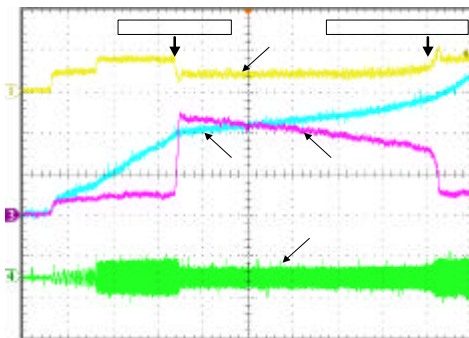


그림10. 물주입~물정지 시점까지의  
 Non Anti-slip 제어 파형  
 점착력 : 100N/Div, 차량속도 : 10km/h/Div  
 공전속도: 1km/h/Div, 상전류: 20A/Div T/D:[2s]

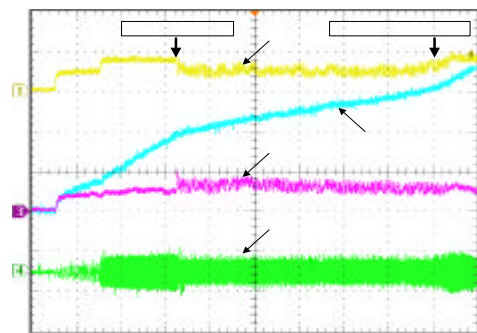


그림11. 물주입~물정지 시점까지의  
 Anti-Slip 제어 파형  
 점착력 : 100N/Div 차량속도: 10km/h/Div  
 공전속도: 1km/h/Div 상전류: 20A/Div T/D:[2s]

## 5. 결론

본 논문에서는 부하 토크 외란 관측기를 구성하여 점착력계수를 추정하고, 추정된 점착력계수의 미분치를 PI 토크 제어하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 바퀴와 레일사이의 실제 점착력계수를 부하 토크 외란 관측기를 통하여 실시간으로 추정하고, 추정된 점착력계수를 이용하여 최대 점착력에서 동작하도록 하였다.
2. 부하 토크 외란 관측기를 통하여 상태변수인 점착력계수를 추정하므로 시스템의 외란 및 파라메트 설정에 대하여 안정적인 제어가 되도록 하였으며, 공전속도에 의한 점착력계수가 변화한 후에도 구동력과 차량속도는 일정한 가속제어가 가능하도록 하였다.
3. 축소형 견인전동기 특성 해석에 의한 IC4M 병렬운전의 특성을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

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) Conference Record, Vol. 1, pp.13~18, November, 1993
2. S. Senini, F. Flinders, W. Oghanna, "Dynamic Simulation of Wheel-Rail Interaction for Locomotive 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 Inverterived 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