

견인능력 향상을 위한 추정점착력을 이용한 점착제어기법에 관한 연구

論 文
48B-12-6

A Study on the Adhesion Control using the Estimated Adhesion for Improving Traction Performance

徐 光 德*
(Kwang-Duk Seo)

Abstract - This paper is focused on the adhesion control method to improve traction efficiency using the estimated adhesion for railway propulsion system. Recently, the wheel slippery is frequently occurred due to light weight of train and power increasement of traction parts. This phenomenon occurs a traction loss and a poor ride comport. Therefore, the adhesion control which is able to prevent the slippery and to control the traction on a maximum adhesion is absolutely needed. This paper introduces typical methods for adhesion control and proposes two novel adhesion methods using the estimated adhesion.

Key Words : Adhesion control, Maximum adhesion, Traction, Traction efficiency, Wheel slippery

1. 서 론

최근 높은 편의성으로 인해 철도차량에 대한 수요가 급증함에 따라 신규노선 증설과 더불어 차량의 운송효율 증대가 요구되고 있다. 따라서 경량화·고효율화·시스템의 자동화 등에 관한 연구와 동력차 편성의 최적화로 견인능력을 향상시키기 위한 연구가 많이 수행되고 있다.

그런데 이러한 연구 결과로 새로운 견인력 제어방법이 필요하게 되었다. 바퀴와 레일 사이의 마찰력은 줄어들고, 견인부의 동력은 증가함에 따라, 성능설계 견인력과 마찰력은 보다 근접하게 되어 공전 발생확률이 높아졌기 때문이다. 공전은 승차감을 감소시키고 견인력의 손실을 유발하기 때문에 차량 성능을 극히 저하시키게 된다. 따라서 바퀴의 공전이 없이 마찰력을 최대한 활용하여 견인력을 제어할 수 있는 점착제어 방법이 절대적으로 필요하게 되었다[1].

본 논문에서는 최대 점착력 지점에서 견인력을 안정하게 제어할 수 있는 견인력 제어방법으로, 바퀴와 레일사이의 점착력을 추정하여 사용하는 점착제어 방법을 제시한다.

2. 점착력 특성

철도차량의 동력전달 시스템은 그림 1과 같이 구성된다. 견인전동기에서 발생된 토크 T_M 은 감속기어와 축을 통해 바퀴에 전달된다. 바퀴에 전달된 토크 T_{WD} 는 식(1)의 관계에 의해 법선력 F_{WD} 로 변환되고, 차량에 반작용력을 발생시킨다. 이 반작용력에 의해 차량은 움직이며, 이 힘을 점착

력 F_{AE} 라 한다. 이 반작용력의 최대 크기는 마찰력이 된다.

$$F_W = \frac{T_W}{R_w} = \frac{GR}{R_w} \times T_M \quad (1)$$

여기서 GR 은 기어 변속비, R_w 는 바퀴 반경이다.

2.1 마찰계수의 특성

바퀴와 레일 사이의 마찰력은 식(2)와 같이 마찰계수 μ_f 와 축하중 W 의 곱으로 표현된다. 이때 마찰계수는 식(3)과 같이 바퀴와 레일이 서로 고착상태를 유지한 상태의 마찰계수인 정마찰계수 μ_s 와, 바퀴와 레일이 고착상태를 잃고 미끄러짐으로써 상대속도가 발생된 경우의 마찰계수인 동마찰계수 μ_d 의 곱으로 표현된다.

$$F_F = \mu_f \times W \quad (2)$$

$$\mu_f = \mu_s \times \mu_d = \mu_s \times (1 - \rho_d V_s) \quad (3)$$

여기서, ρ_d 는 공전속도에 대한 감소기율기이다.

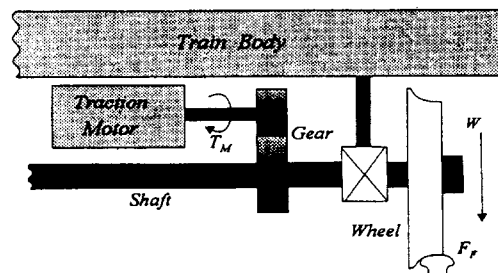


그림 1 동력전달 시스템의 구성
Fig. 1 Construction of traction parts.

* 正 會 員 : 現代重工業 機電研究所 責任研究員 · 工博
接受日字 : 1999年 9月 16日
最終完了 : 1999年 11月 18日

마찰계수는 바퀴와 레일 사이의 상대속도인 공전속도가 없는 경우에는 μ_s 와 같으며, 공전속도가 존재할 경우에는 ρ_d 의 기울기로 감소한다. 이때, ρ_d 의 크기는 공전속도에 따라 변하는데 공전속도가 5~6km/h 이후로는 다소 작아진다. 그런데 정마찰계수도 바퀴가 회전하여 레일과의 접촉면이 변함에 따라 바퀴속도 즉, 차량속도가 증가함에 따라 감소하는 특성을 가진다[1][2].

정마찰계수 특성은 견인력을 확보하기 위한 축하중 설계에 중요한 요소가 되며, 동마찰계수는 점착제어 특성설계에 중요한 자료가 된다.

2.2 점착력 특성

그림 2는 공전속도 V_s 에 대한 점착력 F_{AE} 의 특성을 보인 것이다. 편의상 모든 힘은 식(1)의 관계에 의해 바퀴축으로 환산한 토크 성분으로 표현한다.

점착동작 영역은 식(4)에서 표현한 것처럼 바퀴 토크 T_{WD} 의 기울기에 대한 점착력 T_{AE} 의 기울기 부호에 따라 안정영역(stable region)과 불안정영역(unstable region)으로 구분된다. 점착력의 기울기가 0인 B동작점은 최대 점착력점으로써 마찰력점이며, 두 동작영역의 경계가 된다.

안정영역인 A점에서는, 바퀴 동력에 비례하여 점착력과 공전속도가 증감된다. 이때의 공전속도는 바퀴와 레일의 재질 특성에 의한 것으로, 회전력에 의해 수축된 바퀴와 반작용력에 의해 팽창된 레일이 서로 맞물려 돌기 때문에 나타나는 것이다. 이 속도를 크립 혹은 크립속도(creep speed)라 하며, 크립속도의 최고점은 일반적으로 0.3km/h~1.2km/h 정도이다. 안정영역을 크립속도 영역이라고도 한다.

$$\begin{aligned} \text{안정영역} : \frac{dT_{WD}}{dt} > 0 &\Rightarrow \frac{dV_s}{dt} > 0, \frac{dT_{AE}}{dt} > 0 \\ \text{비안정영역} : \frac{dT_{WD}}{dt} > 0 &\Rightarrow \frac{dV_s}{dt} > 0, \frac{dT_{AE}}{dt} < 0 \quad (4) \\ \text{최대점착력점} : \frac{dT_{AE}}{dt} &\approx 0 \end{aligned}$$

비안정영역의 동작은 동작점 C에서와 같이 바퀴의 동력이 마찰력보다 큰 경우에 발생된다. 이 영역에서는 바퀴는 점착상태를 잃고 미끄러지게 되며, 발생된 공전은 점착력을 감소시켜 공전을 더욱 가속시키게 되는 극히 불안정한 비가역적인 동작을 가진다. 따라서 이 영역이 발생되면 바퀴의 가속력인 T_{WS} 를 음으로 하여 바퀴가 레일에 재점착되도록 바퀴동력을 점착력 이하로 감소시켜야 한다. 이러한 일련의 조치를 점착제어라 한다.

3. 기존의 점착제어기법

점착제어기법은 바퀴와 레일 사이의 마찰력이 습기·먼지 등 이물질에 의해 제어 요구 견인력보다 작아진 경우, 공전을 일으키지 않고 전달가능한 최대 점착력인 마찰력으로 견인력을 제어하기 위한 것이다. 바퀴가 공전하게 되면 승차감 저하는 물론 점착력이 감소하여 견인력 손실이 발생한다. 따라서 바퀴의 공전을 억제하면서 점착력을 향상시키기

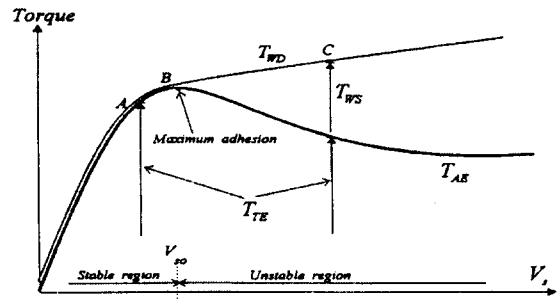


그림 2 공전속도에 대한 점착력 특성곡선
Fig. 2 Adhesion characteristics curve between wheel and rail

위한 연구가 많이 수행되어 왔는데, 이는 크게 3가지로 구분할 수 있다. 공전억제에 우선한 공전검지 및 패턴에 의한 제어와, 크립속도 특성을 이용한 크립속도제어 그리고 공전속도 궤환제어가 그것이다. 그림 3에서 그림 6은 이들에 대한 제어 블록도를 간단히 보인 것이다.

3.1 공전검지 및 패턴에 의한 점착제어

이 방법은 초기에 공전 제어를 주목적으로 연구되었는데, 그림 3과 같이 공전검지가 선행되어야 하며, 공전을 검지하면 주어진 재점착력 패턴 T_{RD}^* 를 감소시켜 점착제어를 수행한다. 점착제어후 공전이 소멸되어 재점착이 검지되면 T_{RD}^* 를 회복시켜 전동기 토크를 제어치로 회복시킨다.

그림 4는 재점착력 패턴들을 보인 것이다. T_{RD}^* 의 최대 감소치는 식(5)와 같이 공전속도 V_s 와 공전가속도 α_s 에 비례이득을 곱한 값으로 설정한다.

$$T_{RDM}^* = K_v V_s + K_a \alpha_s \quad (5)$$

이 방법은 점착력의 변화값에 대한 고려없이 토크를 감소·회복하기 때문에 T_{RDM}^* 를 과다하게 제어하게 되고, 재

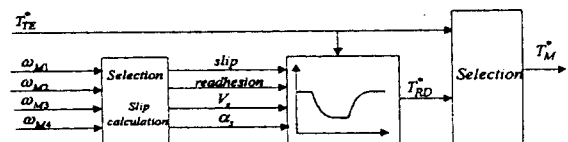


그림 3 공전검지 및 패턴에 의한 점착제어
Fig. 3 Adhesion control with slip detection and pattern

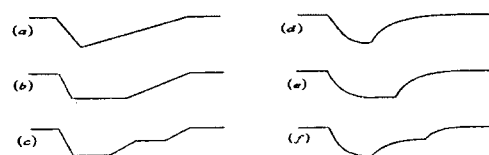


그림 4 재점착력 발생 패턴
Fig. 4 Pattern of re-adhesion effort

공전이 빈번하게 발생함에 따라 승차감 저하·견인력의 손실 및 견인력의 리플을 많이 발생하게 된다[3].

이러한 문제를 줄이기 위해 재점착력 패턴은 (a) → (f)로 향상시켜 왔다. (f)는 점착력 감소함수인 지수함수를 도입하고, 재공전을 줄이기 위해 토오크를 2단계로 회복한 것이다.

3.2 크립속도제어에 의한 점착제어

그림 2의 점착력 특성 곡선에서, 최대 점착력 점은 일정한 크립속도(공전속도) V_{∞} 를 가진다. 따라서 공전속도를 V_{∞} 로 제어한다면 견인력은 항상 최대점착력 점에서 제어된다. 이러한 점착제어를 크립속도 제어라고 한다[4-5].

그러나 일반적으로 V_{∞} 는 0.3~수km/h 정도로 작고 일정치 않으며, 마찰력의 크기에 따라서도 달라진다. 뿐만 아니라 공전속도제어를 위해 필요한 차량속도와 바퀴속도에는 60ppr 정도의 극히 낮은 정밀도의 엔코더 사용으로 인해 오차가 많다. 따라서 이 방법은 균일한 제어특성을 얻기가 어렵다. 환경에 따라 변하는 V_{∞} 점을 찾기 위한 방법, 속도 오차를 줄이거나 속도 정보를 사용하지 않는 방법에 대한 연구가 계속적으로 진행되고 있다.

3.3 공전속도 궤환에 의한 점착제어

이 방법은 크립속도 제어와 패턴 제어의 특성을 모두 갖고 그림 6과 같이 간단히 구현된다. 재점착력을 공전속도 V_s 에 비례이득 K 를 곱하여 계산한다. 이것은 재점착력 크기가 공전속도에 비례 제어됨에 따라, 마찰력이 변화할 때 V_{∞} 도 변화하는 순시적인 점착력 특성을 활용할 수 있다[5][6]. 그러나 V_{∞} 와 공전속도 관계, 점착력과 공전속도와의 관계가 비선형적이어서 이득 K 를 구하기가 어렵다.

이 방법은 바퀴의 기계적 시정수에 해당되는 제어지연이 있으며, 완전 점착을 위해서는 공전속도를 지연시켜 사용해야 한다. 따라서 과도상태시의 점착제어특성이 우수하지 못하다.

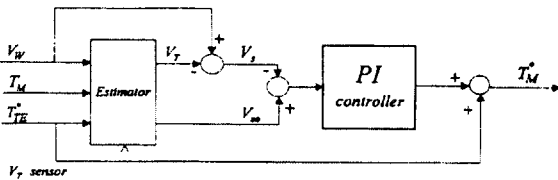


그림 5 크립속도제어에 의한 점착제어
Fig. 5 Adhesion control with creep speed control

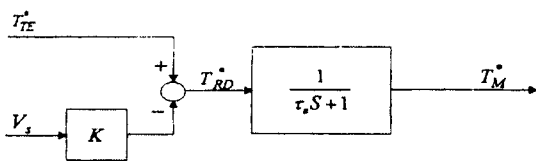


그림 6 공전속도 궤환에 의한 점착제어
Fig. 6 Adhesion control with slip speed feedback

4. 점착력 추정에 의한 점착제어

앞에서 서술한 점착제어 방법들은 모두 바퀴와 레일사이의 실질적인 점착력에 대한 고려없이 간접적인 방법으로 최대점착력점에서의 견인력 제어를 수행하고자 하였다. 따라서 바퀴와 레일사이의 점착환경 변화, 차량속도 및 전동기 속도의 취득오차에 대해 일정한 점착특성을 얻기가 어렵다. 실제 국내 지하철의 경우 전동기의 속도는 60ppr의 엔코더로부터 계산되며, 차량속도는 200ppr이하의 엔코더로부터 계산되고 50ms~100ms 주기로 추진장치에 전달된다. 따라서 이러한 속도정보를 순시 점착제어에 활용하기는 어렵다.

본 논문에서는 실시간으로 바퀴와 레일사이의 점착력을 추정하고, 이를 점착제어에 활용하는 방법을 제시한다. 이것은 성능 최대화를 위한 순시견인력 제어방법과 용이한 구현과 안정된 제어를 위한 패턴을 혼합한 제어방법으로써 2가지의 응용방법을 갖는다.

4.1 점착력 추정방법[7]

그림 1의 동력전달 시스템은 그림 7과 같이 2관성계로 모델링될 수 있다. 전동기, 변속기, 축 그리고 바퀴를 J_1 인 하나의 질량계로 모델링하고, 차체를 등가 질량계인 J_T 로 나타내었다. 이때 점착력 T_{AE} 는 J_1 에 대한 부하토크 τ_L 과 같은 성분이 된다. 견인부의 시스템 방정식은 식(6)와 같으며 식 (7)과 같이 점착력에 대한 식으로 나타 낼 수 있다.

$$T_M = J_1 \frac{d\omega_M}{dt} + B_1 \omega_M + \tau_L \quad (6)$$

$$T_M = J_1 \frac{d\omega_M}{dt} + B_1 \omega_M + T_{AE} \quad (7)$$

여기서 B_1 은 견인부의 마찰상수이다.

이로부터 점착력과 전동기의 순시속도를 상태변수로 하여 상태방정식을 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

이 때 $\frac{dT_{AE}}{dt} = 0$ 라 가정한다.

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A_c X(t) + B_c U(t) \\ Y(t) &= C_c X(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$X(t) = \begin{bmatrix} \omega_M(t) \\ T_{AE}(t) \end{bmatrix}, \quad U(t) = T_M(t)$$

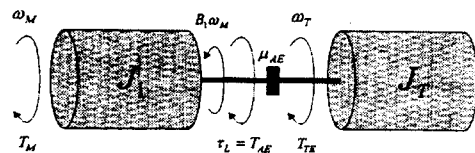


그림 7 동력전달 시스템의 등가모델
Fig. 7 Equivalent model of traction parts

$$A_c = \begin{bmatrix} \frac{-B_1}{J_1} & -\frac{1}{J_1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} \\ 0 \end{bmatrix}, C_c = [1 \ 0]$$

전동기 속도와 각종 측정신호에는 오차와 많은 외란 성분이 있다. 따라서 점착력 추정을 위해 외란에 강인한 특성을 보이는 상태추정기인 칼만필터를 점착력 추정기로 사용한다. 시스템의 모델링 오차와 외란을 포함한 시스템방정식은 식(9)와 같이 표현되며, 외란에 대한 공분산 행렬은 식(10)과 같이 주어진다.

$$\dot{X}(t) = A_c X(t) + B_c U(t) + \varepsilon(t) \tag{9}$$

$$Y(t) = C_c X(t) + \theta(t) \tag{9}$$

$$R_o = r_{11}, \quad Q_o = \begin{bmatrix} q_{00} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix} \tag{10}$$

r_{11} 은 전동기 속도센서의 외란에 대한 분산치를 나타내며, q_{11} 은 입력잡음 및 해석상 무시된 성분에 대한 분산치이며, q_{22} 는 점착력 모델링 오차에 대한 분산치이다. 그런데 칼만 필터의 설계변수인 이 값들은 실제 시스템에서 정확히 알기는 어렵다. 따라서 이들은 시행착오를 거쳐 선정되게 되는데, 어느 정도 크기를 짐작할 수 있는 R_o 를 적절히 선택한 후 원하는 수렴특성을 갖는 Q_o 를 찾게 된다. 본 논문에서는 r_{11} 은 4, q_{11} 은 0.01, q_{22} 는 10000으로 선정하였다.

4.2 추정점착력을 이용한 순시 견인력 제어(방법1)

그림 8은 추정 점착력에 의한 순시 견인력 제어기법을 보인 것이다. 이는 추정된 점착력을 점착제어의 주요소로 사용하며, 마찰력 급변시의 점착특성 향상을 위하여 공전요소 에 의한 제어를 보조적으로 사용한다. 이 두가지 성분의 합에 의해 토오크는 순시적으로 제어된다.

주 제어부에 대한 점착 제어치 T_{RDB}^* 는 식(11)과 같다. 이것은 정상상태의 견인력 제어치로써 점착력과 등가관성 J_1 을 가속하기 위한 토오크 T_{acc}^* 로 구성된다.

$$T_{RDB}^* = \hat{T}_{AE} + T_{acc}^* = \hat{T}_{AE} + J_1 \alpha_T^* \tag{11}$$

이때 α_T^* 는 차량의 가속도 요구치이다.

주 제어부만의 제어로는 점착력 추정지연과 감속력 부족으로 인해 마찰력 급변과 같은 과도상태시 제어특성이 떨어질 수 있다. 따라서 과도상태 응답특성 향상을 위해 공전성분을 부가하여 제어한다.

보조제어를 위해 사용하는 공전성분은 과도상태에서 주로 사용되므로 제어를 위한 성분의 추정은 용이하다. 공전가속도성분 $\hat{\alpha}_s$ 는 전동기 가속도 $\hat{\alpha}_M$ 의 고조파 성분으로 계산한다. 공전속도성분 $\hat{\omega}_s$ 는 $\hat{\alpha}_s$ 를 적분하고 구하고, 입력된 전동기속도를 이용해서 보정한다. 이 성분에 의한 보조제어부의 재점착력 제어치 T_{RDF}^* 는 식(12)와 같으며, 최종 점착력 제어치는 식(13)과 같이 표현된다.

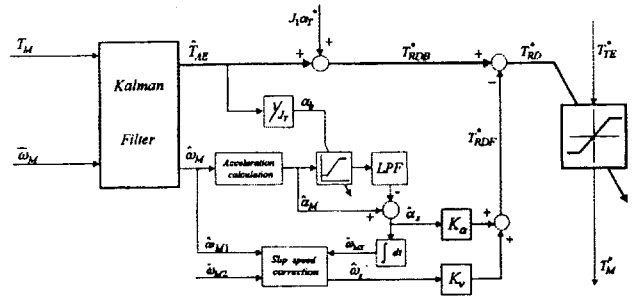


그림 8 추정점착력을 이용한 순시견인력 제어 블록도
Fig. 8 Block diagram of instantaneous traction using estimated adhesion effort

$$T_{RDF}^* = (K_a \hat{\alpha}_s + K_v \hat{\omega}_s) \tag{12}$$

$$T_{RD}^* = (\hat{T}_{ae} + J_1 \alpha_T^*) - (K_a \hat{\alpha}_s + K_v \hat{\omega}_s) \tag{13}$$

여기서 K_a, K_v 는 비례상수이다.

식(13)에 의한 점착제어는 과도상태 제어특성이 우수하며 최대 점착력점에서 견인력 제어가 가능하게 한다. 점착력의 변화상태가 제어치에 순시적으로 보상됨으로서 별도의 공전점 및 회복제어가 필요치 않는다[7].

이 방법은 공전속도와 점착력 실험식을 제어에 직접 사용하지 않기 때문에 시스템의 환경변화 및 외란에 대해 매우 안정된 점착제어 특성을 보인다. 실제 차량에 적용시에는 50ms~100ms마다 통신에 의해 입력되는 차량속도를 공전요소와 추정된 차량가속도를 보정하는데 사용할 수 있다.

4.3 추정점착력과 패턴을 이용한 점착제어(방법2)

이 방법은 기존의 패턴제어에 추정점착력을 활용하여 점착제어 성능을 향상시킨 것이다. 그림 4의 (f)와 같은 기존의 패턴에서, 재점착력의 감소·증가 크기를 추정점착력에 의해 결정함으로써 재공전의 발생빈도를 줄이고 견인력의 손실을 감소시켜 최대점착력을 이용할 수 있도록 하였다.

점착력은 전동기의 최대속도와 토오크로부터 계산하고, 패턴을 제어하기 위한 제어치 T_{RDR}^* 은 식(14)와 같이 구한다. 공전발생시 패턴의 최소감소치는 T_{RDR}^* 의 최소가 되며, 점착검지후 1차 회복치는 추정점착력인 \hat{T}_{AE} 로 제어한다.

마찰력이 감소한 경우, 요구된 T_M^* 는 T_{RD}^* 에 의해 제한되어진다. 1차 회복후 재공전이 발생되지 않으면 원래의 토

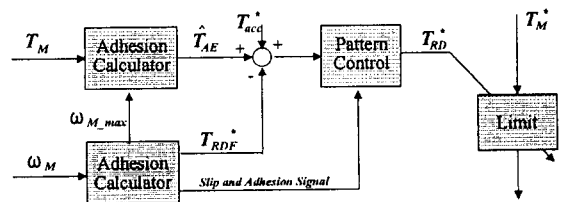


그림 9 추정점착력과 패턴을 이용한 제어블록도
Fig. 9 Block diagram of control using estimated adhesion and pattern

오크 요구치로 2차 회복한다.

$$T_{RDR}^* = (\hat{T}_{AE} + J_1 \alpha_T^*) - (K_a \hat{\alpha}_s + K_v \hat{\omega}_s) \quad (14)$$

그림 9는 추정점착력과 패턴을 이용한 점착제어 블럭도를 보인 것이다. 이 방법은 대부분의 제어요소를 추정점착력을 이용하기 때문에 점착제어를 반복해서 수행하더라도 견인력의 손실이 적다. 따라서 공전 및 활주 감지를 민감하게 하여 순시견인력 제어특성과 유사한 안정된 견인력제어를 수행할 수 있다[8].

이 방법은 방법1보다는 견인력 제어특성이 다소 떨어지지만 간단히 구현되며 안정된 동작을 가질 수 있다. 따라서 환경이 열악한 기존의 차량에 쉽게 적용하여 우수한 점착효과를 얻을 수 있다. 이 방법에서는 점착력 추정에 간단한 지연필터를 이용할 수도 있다.

5. 실험 결과

제시한 2가지의 점착제어기법에 대해 수행된 실험 결과를 보인다. 방법1은 그림 10에 보이는 접촉면에 의해 동력이 전달되는 모의관성부하를 이용하였으며, 방법2는 실제 차량을 이용하여 실험하였다. 실험방법이 서로 다른 것은 개발3 시기에 차이가 있기 때문이다.

먼저 방법1에 대한 시험결과를 살펴본다. 그림 11은 모의관성부하의 접촉면간의 점착력 특성을 시험한 결과를 보인 것이다. 전동기의 토오크를 증가시켜 공전을 발생시켰다. 이 장치는 공전속도가 0.5~0.7km/h정도에서 최대 점착력이 나타나며, 약 5km/h에서 기울기가 변화하는 특성을 갖는다.

그림 12는 가속중 접촉면에 물을 주입하여 마찰력을 감소한 경우 점착제어가 수행되는 특성을 보인 것이다. 마찰력이 감소됨에 따라 공전속도가 증가하고 점착력이 감소한다. 이때 공전속도는 전동기 토오크가 감소된 추정점착력을 따라 제어됨으로써 약 0.6km/h로써 거의 일정히 유지되며, 견인력은 최대 점착력점 부근에서 제어됨을 확인할 수 있다. 이는 시험장치의 점착력 특성으로부터 확인할 수 있다. 접촉면에 수분이 제거되어 마찰력이 회복된 경우, 공전속도가 감소되고 추정점착력이 증가하여 전동기 토오크는 자연스럽게 회복하게 된다.

다음은 방법 2에 의한 점착제어 시험결과를 보인다. 시험은 '95년 (구)현대정공 창원공장에서 실시하였으며, 일산선 차량을 1M1T편성으로 구성하여 진행하였다. 그림 13은 시험차량을 보인 것이다. 점착시험은 일정 구간의 레일면에 비닐입자등 이물질이 많이 존재하였고 궤도조건이 열악함에 따라 별도의 이물질 주입없이 자연스럽게 진행되었다. 이구간에서는 그림 14에서 보이는 것처럼 정격인 4N로 가속시 모두 바퀴의 미끄럼이 발생하였다. 3N 운전시에는 미끄럼이 발생하지 않았다.

그림 14는 점착제어없이 4N로 운전하였을 때 바퀴가 미끄러진 현상을 보인 것이다. 전동기의 미끄럼 속도가 증가함에 따라 전동기 전류는 감소한다. 이때 슬립과파수는 포화되어 있다. 바퀴는 레일의 점착특성이 회복됨에 따라 재점착한다. 그런데 여전히 전류가 증가되지 않는 것은 다른 바퀴도 미끄러지고 있기 때문이다.

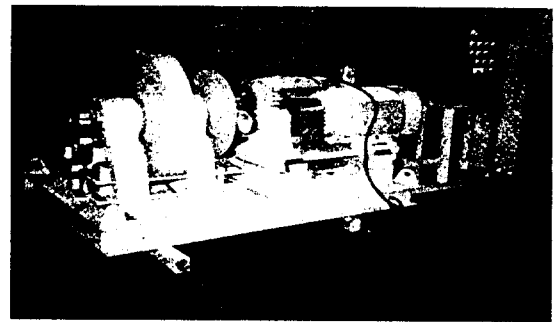


그림 10 점착력 시험을 위한 모의관성부하
Fig. 10 Inertia load for Adhesion test

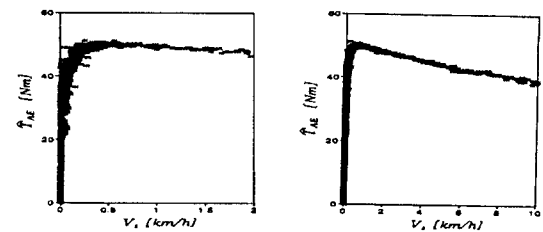


그림 11 모의관성장치의 점착력 특성
Fig. 11 Adhesion characteristics of inertia load

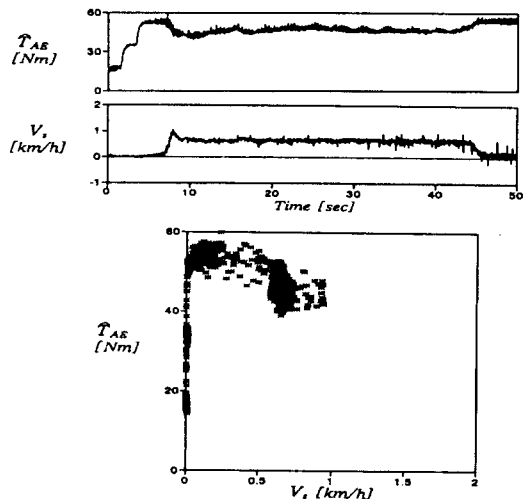


그림 12 마찰력 감소시 점착제어 특성 (방법1)
Fig. 12 Adhesion control under decreasing friction (method1)

그림 15는 점착제어(방법2)를 수행한 경우의 견인력 제어 특성을 보인 것이다. 그림 14에 대한 시험과 같은 날, 동일 궤도에서 시험을 수행하였다. 그림에서 보듯이 바퀴는 미끄럼없이 우수하게 점착 제어되고 있음을 확인할 수 있다. 견인력 요구치에는 2차 지수에 의한 제어치 감소분이 보인다. 이 제어는 점착력에 근거한 것으로써 최소의 견인력 감소분으로 안정된 점착제어를 보인다. 이때 전류 실효성분의 변화가 더욱 큰 것은 레일 조인트 부분의 순시 마찰력 감소로 인한 것이다.

점착력 특성시험과 많은 실험을 통해 제어특성을 검증하

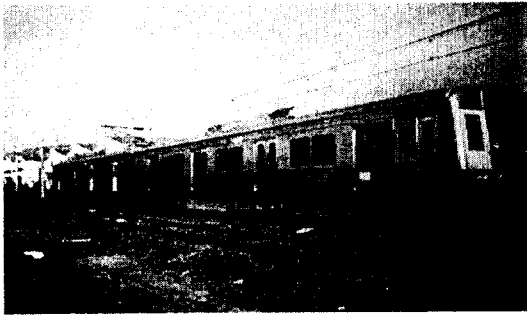


그림 13 현차시험 차량 ('95)
Fig. 13 Train for trial test ('95)

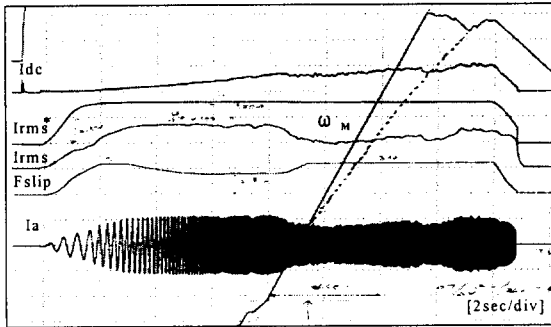


그림 14 현차시험차량의 공전발생 시험
Fig. 14 Slip test for trial test train

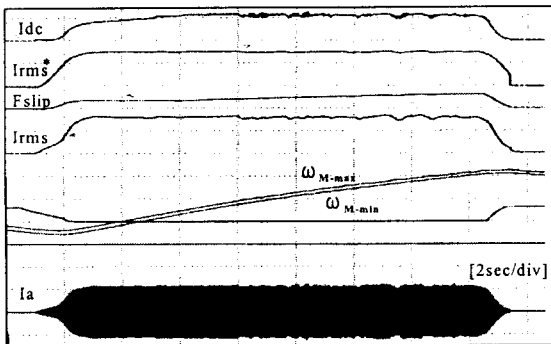


그림 15 점착제어 특성 (방법 2)
Fig. 15 Adhesion control performance (method 2)

여야 하지만 차량 손상의 이유로 더 이상 실험을 수행할 수 없었다. 그러나 이 방법과 유사한 것을 신칸센에 적용하여 시험한 결과, 기존의 그림4 (c)패턴을 이용하던 방법에 비해 이용점착계수를 40% 이상 향상시킬 수 있었다는 논문이 '99년 일본학회에 발표된 바 있어, 간접적으로 방법2의 우수성을 입증할 수 있다[9].

7. 결 론

본 논문에서는 추정점착력을 이용하여 최대점착력점에서 건인력 제어를 할 수 있는 점착력 제어기법을 2가지 제시하였다. 이 방법들은 오차와 외란이 많은 차량속도와 점착력 특성 자료를 직접 사용하지 않고 점착력 제어를 수행하기

때문에 안정된 특성을 가질 수 있다.

차후, 제시한 방법들은 현차시험을 통해 성능을 재 입증할 예정이며, 그 결과는 국책사업으로 수행중인 고속전철의 추진장치용 점착제어방법으로 활용 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 油谷 浩助, "Inverter 制御車の 空轉滑走制御," 電氣車の科學, 1月號, pp. 11~16, 1991.
- [2] 홍용기, "철도차량의 점착력에 관한 연구," 고속전철 Symposium 논문집, pp. 343~367, 1993.
- [3] 保川 忍, 大江 普太郎, "Inverter 制御車輛の再粘着制御," Rail Road Review, Vol. 1, pp. 29~34, 12, 1991.
- [4] Andresen, E.C., "Digital Simulation of an Inverter-fed Induction Motor Locomotive Drive with Wheel Creep Control," Dissertation, Technosche Hochschul Darmstat, 1987.
- [5] I. Yasuoka, T. Henmi, Y. Nakazawa, I. Aoyama, "Improvement of Re-adhesion for Commuter Trains with Vector Control Traction Inverter," Proc. PCC-Nagaoka '97, pp. 51~56, 1997.
- [6] T. Watanabe, M. Ogasa, S. Ohe, "Improvement of Readhesive Characteristics of Electric Motor Vehicles," STECH Conf. Rec., Vol. 2, pp. 243~247, 1993. 11.
- [7] K. D. Seo, S. K. Sul, "A High Performance Readhesive Control with Adhesive Effort Estimation," in Proc. of PCIM Conf. Mass Transit System Compatibility, pp. 380~390, 9, 1994.
- [8] 서광덕, 김두식, 정기찬, 김남해, "추정 점착력과 2차 지수함수에 의한 전동차량의 점착력 제어장치 및 그 방법," 대한민국 특허등록번호 제151944호, 1998.
- [9] T. Watanabe, A. Yamanaka, T. Hariyama, S. Nakamura, "Anti-slip Readhesion Control with Presumed Adhesion Force," T.IEE Japan, Vol. 119, No. 2, 1999.

저 자 소 개



서 광 덕 (徐 光 德)

1964년 2월 22일생. 1986년 부산대 전기공학과 졸업(학사). 1989년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 서울대 대학원 졸업(공학). 1991년~현재 현대중공업 기전연구소 산업전자연구실 책임연구원
Tel : 0331-289-5166

Fax : 0331-289-5027

Email : kdseo@hhi.co.kr