

최대점착력 추정을 이용한 철도차량의 재점착 제어 성능 개선

論 文
49B-1-6

Improvement of Re-adhesion Control Performance on Railway Electric Vehicle using Estimation of Maximum Adhesive Effort

金 佑 錫* · 金 容 錫** · 姜 俊 求*** · 薛 承 基§
(Woo-Seok Kim · Yong-Seok Kim · Jun-Koo Kang · Seung-Ki Sul)

Abstract - In this paper, an improved re-adhesion control scheme is proposed for 1C4M railway traction system. It is well known that the coefficient of adhesion between wheel and rail has a maximum value at a certain slip velocity. In the proposed scheme, adhesive effort is estimated by a full-order observer and the driving torque of motor is controlled to get maximum adhesive effort. The re-adhesion control simulator is designed to verify the proposed re-adhesion control algorithm. The simulation results and experimental results are presented.

Key Words : Full-order observer, Maximum adhesive effort, Re-adhesion control simulator

1. 서 론

철도차량은 대부분 1C4M(1-Controller 4-Motors) 구동 구조를 가지고 있다. 1C4M은 하나의 인버터로 네 대의 전동기를 병렬 구동한다. 이러한 1C4M 시스템은 경제적인 측면에서 장점이 있는 반면, 제어가 어렵다는 단점이 있다.

차량바퀴의 공전(Slip)현상은 바퀴와 선로 사이의 점착력이 갑자기 떨어질 때 흔히 발생한다. 공전은 바퀴와 선로 표면의 마모, 기어 톱니의 손상 및 부품수명 단축 등의 원인이 된다. 또한 공전은 차량의 견인력을 크게 감소시킨다. 최근의 철도차량은 고속화 및 경량화 되고 있기 때문에, 공전이 발생할 가능성은 더욱 커지고 있다. 재점착 제어의 목적은 바퀴와 선로 사이의 공전방지는 물론, 견인력을 최대로 이용하는 데 있다.

기존의 재점착 제어는 공전현상을 완화시킬 수는 있었지만 점착력을 최대로 이용할 수 없었다[1-4]. 따라서 재점착 제어의 성능이 떨어진다. 최근 관측기를 이용한 재점착 제어알고리즘이 제시되고 있다[5-6]. 그러나 이들 논문은 컴퓨터 시뮬레이션만을 수행하였기 때문에 알고리즘의 실질적인 성능을 확인할 수 없었다.

본 논문에서는 공전방지는 물론, 점착력을 최대로 이용할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다. 일반적으로, 일정한 환경하에서의 점착계수는 특정한 공전속도에 대해 하나의 최대점을 갖고 있다. 제안된 재점착 제어에서는 전차원 관측기를 통해 점착력을 추정하고, 이렇게 추정된 점착력이 최대점착력에서 유지되도록 전동기 토크를 제어한다. 제안된 제어알고

리즘을 평가하기 위하여 먼저 Matlab의 Simulink를 통해 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 1C4M 철도차량 시스템의 축소모형을 설계·제작하여, 실험을 통해 제안한 제어알고리즘의 실제 차량 적용시의 성능을 예측하여 본다.

2. 본 론

2.1 철도차량 견인시스템의 모델링

2.1.1 철도차량 견인시스템의 수학적 모델링

견인전동기에서 발생한 구동력은 변속기어와 축을 통하여 차량바퀴에 전달되고, 이렇게 전달된 구동력은 차량바퀴와 선로 사이의 점착력에 의해 차체에 전달된다. 이 때 차체에 전달된 힘이 견인력으로써 작용한다. 변속기어는 감속기어를 사용하는데, 이는 견인전동기에서 발생한 구동력을 증대시켜 차량바퀴에 전달한다. 그림1은 차량바퀴와 선로 사이의 관계를 나타낸 것이다.

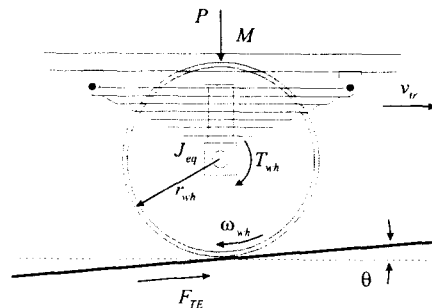


그림 1 차량바퀴와 선로 사이의 관계
Fig. 1 Relation between wheel and rail

$$(T_{wh} = T_M \cdot R_g, \quad \omega_{wh} = \frac{\omega_M}{R_g})$$

* 準 會 員 : 서울大 電氣工學部 碩士

** 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程

*** 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 卒業 · 工博

§ 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 1月 25日

最終完了 : 1999年 12月 16日

철도차량 견인시스템은 전동기의 토크방정식과 차량의 운동방정식으로 표현할 수 있다. 그리고 이들 두 방정식은 차량바퀴와 선로 사이의 점착력에 의해서 분리할 수 있다. 즉, 점착력은 전동기에서는 부하토크로서 취급되고, 차량에서는 견인력으로 취급된다. 따라서 전동기에서의 부하토크의 크기와 차량에서의 견인력의 크기는 같다고 볼 수 있다.

전동기의 토크방정식은 전동기의 회전각속도에 대한 일차미분방정식으로 표현된다. 여기서, 전동기 토크방정식의 간단한 해석을 위하여 축의 강성에 의한 영향, 기어의 백래쉬(Backlash) 현상 및 차량바퀴와 선로 사이의 탄성에 의한 수축력 및 마찰에 의한 손실은 고려하지 않는다.

$$T_M = J_{eq} \frac{d\omega_M}{dt} + F_{AE} \frac{r_{wh}}{R_g} + B \cdot \omega_M \quad (1)$$

- 여기서, T_M : 전동기 토크 [$N \cdot m$],
- F_{AE} : 점착력 [N],
- ω_M : 전동기 회전각속도 [rad/sec],
- J_{eq} : 전동기 한 대당 등가관성 [$kg \cdot m^2$],
- B : 마찰계수 [$kg \cdot m^2/sec$],
- r_{wh} : 차량바퀴의 반경 [m],
- R_g : 전동기와 바퀴 사이의 기어비이다.

그리고 차량의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M \frac{dv_{tr}}{dt} = F_{TE} - R_t(v_{tr}) - Mg \cdot \sin \theta \quad (2)$$

- 여기서, v_{tr} : 차량속도 [m/sec],
- F_{TE} : 견인력 [N], ($F_{TE} = F_{AE}$),
- R_t : 차량운동에 대한 저항력 [N],
- M : 차량질량 [kg],
- g : 중력가속도 [m/sec^2],
- θ : 선로의 기울기 [$kg \cdot m^2/sec$]이다.

전동기에서 발생한 구동력이 차량의 견인력으로써 전달되기 위해서는 차량바퀴와 선로 사이의 점착특성이 중요하다. 점착계수는 차량바퀴와 선로 사이의 여러 환경조건에 따라 민감하게 변하는데, 이러한 점착계수는 최대점착력의 상한값을 결정한다. 말하자면 최대점착력은 점착계수와 접촉면에서의 수직항력과 곱에 비례한다.

$$F_{AE} \leq \mu \cdot W = \mu \cdot Mg \quad (3)$$

- 여기서, W : 차량의 무게 [$kg \cdot m/sec^2$],
- μ : 점착계수이다.

그리고 공전속도는 바퀴의 선속도와 차량속도 사이의 상대속도 즉, 차(差)로써 정의한다. 일반적으로 가속시에는 바퀴의 선속도가 차량속도보다 높고, 감속시에는 차량속도가 바퀴의 선속도보다 높다.

$$v_{sl} = |\omega_{wh} \cdot r_{wh} - v_{tr}| = \left| \frac{\omega_M \cdot r_{wh}}{R_g} - v_{tr} \right| \quad (4)$$

점착력은 차량바퀴의 공전속도 뿐만 아니라, 차량바퀴와 선로의 재질 특성, 접촉면의 상태 및 주변환경에 따라서 크게 영향받는다. 일반적으로 선로표면이 건조한 경우와 젖은 경우의 공전속도에 대한 점착계수의 관계는 그림2와 같다.

각각의 상태에서, 점착계수는 공전속도에 따라 크립속도

(Creep)영역, 공전속도 영역 및 최대점착력 영역으로 나누어진다. 크립속도 영역은 차량바퀴 및 선로가 탄력적인 변형상태를 유지하는 영역으로서, 전동기 구동력을 증가시킴에 따라 점착력도 증가하기 때문에 안정적으로 운전된다. 반면, 공전속도 영역은 전동기 구동력이 바퀴와 선로 사이의 마찰력보다 크기 때문에 접촉면에서 점착상태를 잃는 영역으로서, 바퀴와 선로 등의 손상이 발생하고 제어가 불안정해진다. 그리고 크립속도 영역과 공전속도 영역 사이에는 최대점착력 영역이 존재하게 되는데, 이 영역에서 견인력 이용률을 극대화할 수 있다.

그림3은 철도차량 견인시스템을 모델링한 블록도이다.

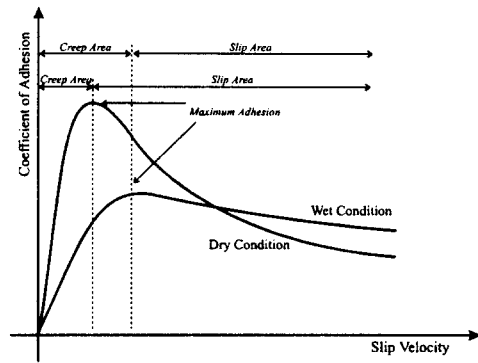


그림 2 공전속도와 점착계수의 관계

Fig. 2 Relation between coefficient of adhesion and slip velocity

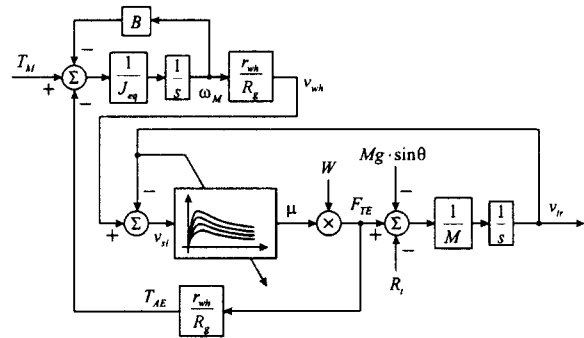


그림 3 철도차량 견인시스템의 모델 블록도

Fig. 3 Block diagram for modeling of railway traction system

2.1.2 축소모형의 설계 및 제작

국내의 철도차량 시스템은 5M5T(5 Motor Cars and 5 Trailer Cars)로 구성된다. 하나의 전동기 차량에는 4대의 전동기가 부착되어 있으므로, 결국 하나의 철도차량 시스템은 전부 20대의 전동기로 구성된다. 각 전동기는 정격토크 1100 [$N \cdot m$], 정격 출력 240 [kW]이고, 전동기 한 대당 감당하는 차량의 등가관성은 93.66 [$kg \cdot m^2$]이다.

축소모형을 설계하기 위하여 전동기 한 대당 감당하는 등가관성, 차량 무게에 의한 접촉면에서의 수직항력, 정격출력은 일정한 비율로 축소한다. 그리고 전동기 회전속도에 대한 바퀴 선속도의 비는 같도록 설계한다. 축소모형에 사용된 전동기는 정격토크 4.1 [$N \cdot m$], 정격출력 0.75 [kW]이다. 그리

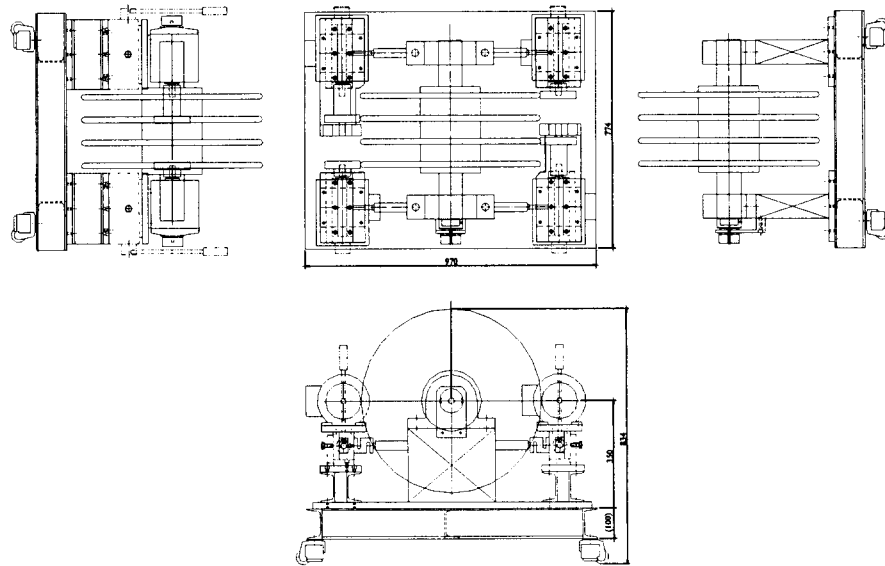


그림 4 1C4M 축소모형의 설계도면
Fig. 4 Draft of 1C4M miniature

표 1 철도차량 시스템과 축소모형의 사양 비교
Table 1 Comparison between specs of real traction system and those of miniature

	철도차량	축소모형	비교
정격출력 [kW]	240	0.75	320:1
등가관성 [$kg \cdot m^2$]	93.66	0.3	312:1
바퀴 선속도	0.364	0.377	0.97:1
수직항력 [N]	152000	400	380:1

전동기에 연결된 작은 원반은 차량바퀴를 각각 모델링한 것이다. 그리고 인코더(Encoder)는 회전속도를 계산하기 위해, 로드셀(Loadcell)은 큰 원반과 작은 원반 사이의 수직항력을 측정하기 위해, 레버(Lever)는 수직항력을 조절하기 위해 각각 사용된다.

특히 작은 수직항력 하에서도 실제 시스템과 유사한 점착 특성을 만들기 위해 작은 원반 둘레에는 우레탄(Urethane)으로 둘러싼다. 이는 실제 시스템에 비해 수 백배 축소된 수직항력 하에서도 탄성변형에 의한 점착특성을 산출하기 위해서이다.

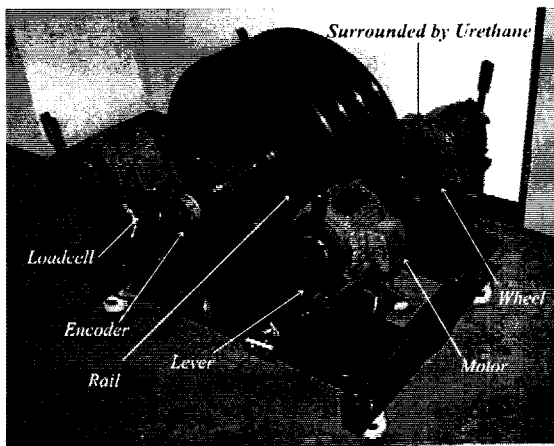


그림 5 1C4M 철도차량의 공전 실험용 축소모형
Fig. 5 Miniature for sliding experiment on 1C4M railway system

고 전동기 한 대당 감당하는 등가관성은 $0.3 [kg \cdot m^2]$ 이다.

표1은 철도차량과 축소모형의 사양을 비교한 것이다.

그림4는 축소모형 설계도면이고, 그림5는 1C4M 철도차량 시스템의 공전 실험을 위한 축소모형 사진이다.

축소모형에서 큰 원반은 선로를, 전동기는 견인전동기를,

2.2 기존의 재점착 제어

2.2.1 공전검지 및 패턴에 의한 재점착 제어[1]

공전검지 및 패턴에 의한 재점착 제어는, 공전 발생시 재점착력을 발생시키기 위해 구동력을 미리 설정한 감소 패턴에 따라 줄인 후 재점착을 검지하면 구동력을 원상태로 회복하는 방법이다. 이 방법은 구동력을 다소 과도하게 감소시키기 때문에 견인력의 손실이 많이 발생한다. 또한 재점착 검지 후의 구동력 회복 시에도 마찰력의 상태와 관계없이 구동력을 회복시키므로 마찰력이 계속 감소되어 있는 경우에는 항상 재(再)공전이 발생한다. 그리고 이러한 재점착 제어는 공전검지 및 재점착 검지에 의해 수행되므로 검지 지연 및 검지 오차 등이 재점착 제어특성에 민감한 영향을 준다.

그림6은 구동력 감소 및 회복 패턴의 몇 가지 예이다.

2.2.2 퍼지논리를 이용한 재점착 제어[2-4]

퍼지논리(Fuzzy Logic) 제어는 불확실한 시스템을 다루기에 적당하다. 그런데 차량바퀴와 선로 사이의 점착력은 외부 환경에 따라 비선형적인 특성을 가지기 때문에, 퍼지논리를

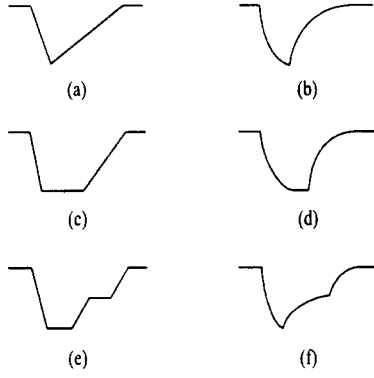


그림 6 구동력 감소 및 회복 패턴의 예
 Fig. 6 Examples of reduction and recovery pattern of driving force

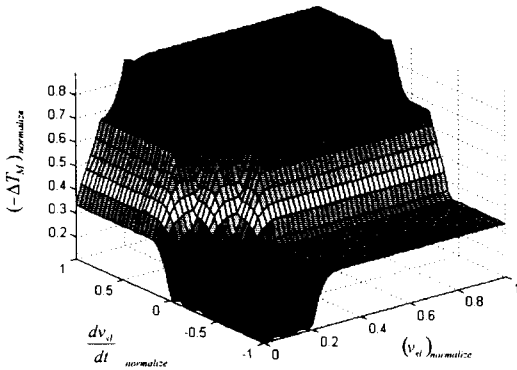


그림 7 퍼지논리의 입·출력관계의 예
 Fig. 7 An example of relation between input and output in fuzzy logic

이용한 재점착 제어는 점착력을 안정적으로 제어하는 데 효과적이다.

일반적으로 공전속도에 대한 점착력의 관계는 선로표면의 상태에 따라 일정하지 않다. 또한 최대점착력이 되는 공전속도 크기도 선로표면의 상태에 따라 다르게 나타난다. 그러므로 견인력의 손실을 최소화하기 위해서는 외부환경이 변함에 따라 소속함수(Membership Function)의 형태 및 이득을 연속적으로 변경해야 한다. 결국 퍼지논리 제어를 통해 전동기 구동력을 항상 최대점착력에서 제어하는 것은 불가능하다.

그림7은 퍼지논리의 입·출력관계이다. 여기서 입력은 공전속도와 공전가속도이고, 출력은 구동력의 감소분이다.

2.3 제안된 재점착제어

2.3.1 관측기에 의한 점착력의 추정

점착력을 직접 측정하는 것은 거의 불가능하다. 그런데 최대점착력에서 전동기 구동력을 제어하기 위해서는 점착력에 대한 정보가 필요하다. 전동기의 토크방정식으로부터 알 수 있듯이, 점착력은 전동기 입장에서 보면 부하토크로서 취급된다. 따라서 전동기 출력토크에 대한 전동기 회전자의 위치

정보를 통해 전차원 관측기를 구성하고 상태변수인 점착력을 추정한다.

$\frac{dF_{AE}}{dt} = 0$ 이라고 가정하고 전차원 관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_M \\ \hat{\omega}_M \\ \hat{F}_{AE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J_{eq}} & -\frac{r_{wh}}{J_{eq} \cdot R_g} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_M \\ \hat{\omega}_M \\ \hat{F}_{AE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_{eq}} \\ 0 \end{bmatrix} T_M + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} [\theta_M - \hat{\theta}_M] \quad (5)$$

식(5)로부터 전달함수의 특성방정식을 구한다.

$$s^3 + \left(k_1 + \frac{B}{J_{eq}}\right)s^2 + \left(k_2 + \frac{k_1 B}{J_{eq}}\right)s - \frac{k_3 r_{wh}}{J_{eq} R_g} = 0 \quad (6)$$

버터워스(Butterworth) 3차 필터식을 이용하여 외란에 강한 관측기를 설계한다.

$$s^3 + 2\omega_n s^2 + 2\omega_n^2 s + \omega_n^3 = 0 \quad (7)$$

따라서 $[k_1 \ k_2 \ k_3]$ 은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\omega_n - \frac{B}{J_{eq}} \\ 2\omega_n^2 - \frac{B}{J_{eq}} k_1 \\ -\frac{J_{eq} R_g}{r_{wh}} \omega_n^3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.3.2 최대점착력에서의 구동력 제어

일반적으로 공전속도에 대한 점착계수는 하나의 최대점이 존재한다. 따라서 $\frac{dF_{AE}}{dv_{sl}} = 0$ 관계를 통해 최대점착력을 구할 수 있다.

공전속도에 대한 점착력의 미분은 다음과 같다.

$$\frac{dF_{AE}}{dv_{sl}} = \frac{dF_{AE}}{dt} / \frac{dv_{sl}}{dt} \quad (9)$$

그런데 위치센서[Encoder]의 정밀도가 낮기 때문에 계산된 속도는 정확도가 떨어질 뿐만 아니라, 이러한 속도로부터 구한 공전속도 미분치는 잡음에 극히 민감하게 된다. 따라서 최대점착력은 공전속도에 대한 점착력의 미분치가 0인 부분을 구하는 것이므로, 식(9)의 분자인 점착력의 시간 미분치가 0인 부분을 구하는 것이 유리하다.

점착력 미분치로부터 공전속도 지령치를 계산하면 다음과 같다.

$$(v_{sl}^{k+1})_{ref} = (v_{sl}^k)_{ref} + \alpha \frac{dF_{AE}^k}{dt} \quad (10)$$

여기서, α 는 양의 상수값으로 설정한다. 이는 공전속도가 최적공전속도보다 작으면 점착력 미분치가 양이 되어 공전속도 지령치를 최적공전속도 쪽으로 증가시키고, 역(逆)으로 공전속도가 최적공전속도보다 크면 점착력 미분치가 음이 되어 공전속도 지령치를 최적공전속도 쪽으로 감소시킨다.

식(4)의 관계에서 알 수 있듯이, 공전속도 지령치로부터

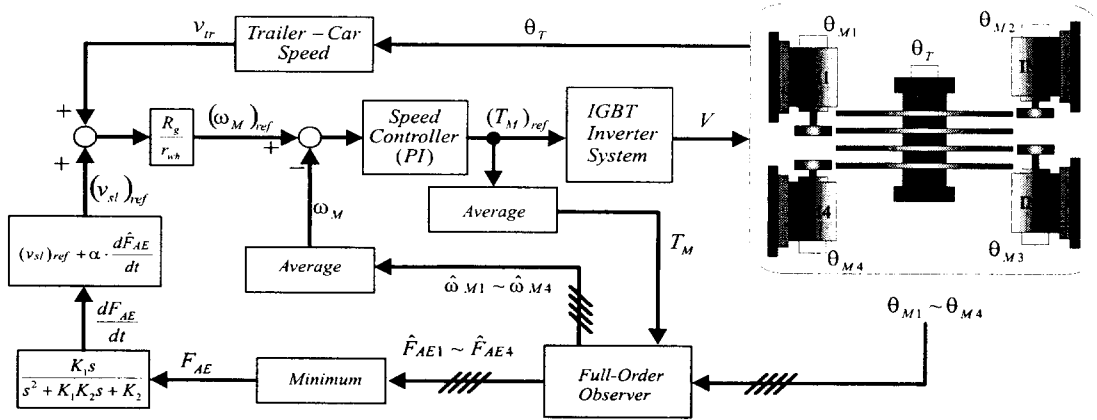


그림 8 제안된 재점착 제어의 제어 블록도.

Fig. 8 Block diagram of proposed re-adhesion control algorithm

전동기 회전속도 지령치를 계산한다.

$$(\omega_M)_{ref} = \frac{R_g}{r_{wh}} [v_{tr} + (v_{sl}^{k+1})_{ref}] \quad (11)$$

그리고 전동기 회전속도 지령치를 PI 제어함으로써 전동기 토크 지령치를 구한다.

그림8은 제안된 재점착 제어 블록도이다. 네 대의 전동기를 모두 최대점착력 근처의 크립속도 영역에서 안정적으로 제어하기 위하여 최소의 점착력을 기준으로 재점착 제어를 한다. 또한 1C4M 시스템의 제어가 안정적으로 유지되도록 평균적인 속도를 통한 평균적인 전동기 토크 지령치를 계산하여 사용한다.

2.4 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위해 몇가지 가정을 한다. 첫째, 전동기 토크는 순시적으로 제어 가능하다. 둘째, 공전속도에 대한 바퀴와 선로 사이의 점착계수는 그림2와 같다. 선로표면이 건조한 경우에는 0.8 [km/h] 근방에서, 젖은 경우에는 1.2 [km/h] 근방에서 최대점착력이 나타난다. 셋째, 차량은 처음 10초 동안 건조한 선로 위를, 다음 10초 동안 젖은 선로 위를, 그리고 마지막 10초 동안 다시 건조한 선로 위를 달린다.

2.4.1 공전검지 및 패턴에 의한 재점착 제어

그림9는 공전검지 및 패턴에 의한 재점착 제어의 시뮬레이션 결과이다. 전동기 구동력의 감소 및 회복은 모두 직선적으로 수행하였다. 차량이 젖은 선로 위를 달리고 있을 때, 재공전 현상의 발생에 의해 재점착 제어가 반복됨을 알 수 있다. 따라서 전동기 출력토크의 증감으로 인해 견인력에 큰 리플(Ripple)이 발생한다.

2.4.2 퍼지논리를 이용한 재점착 제어

그림10은 퍼지논리를 이용한 재점착 제어의 시뮬레이션 결과이다. 여기서 퍼지논리의 입출력 관계는 그림7과 같이 가

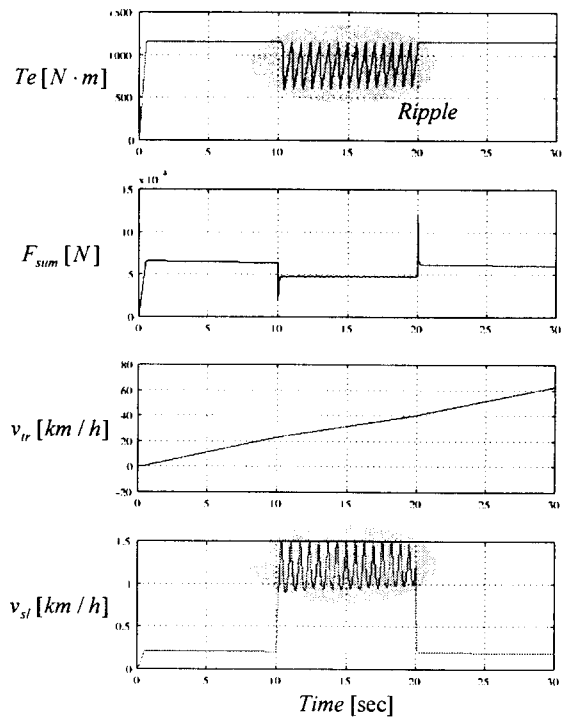


그림 9 패턴에 의한 재점착 제어 시뮬레이션 결과.

(위로부터 전동기 토크, 점착력합, 차량속도, 공전속도)

Fig. 9 Simulation result from re-adhesion control by pattern (From top, motor torque, adhesive effort sum, train speed and slip velocity)

정하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 선로표면의 급격한 상태변화에 대해서도 안정적인 재점착 제어가 이루어진다. 그러나 소속함수는 환경변화에 관계없이 일정하므로, 환경이 변화함에 따라 항상 최대점착력을 이용하는 것은 불가능하다.

2.4.3 제안된 재점착 제어

그림11은 제안된 재점착 제어의 시뮬레이션 결과이다. 차량이

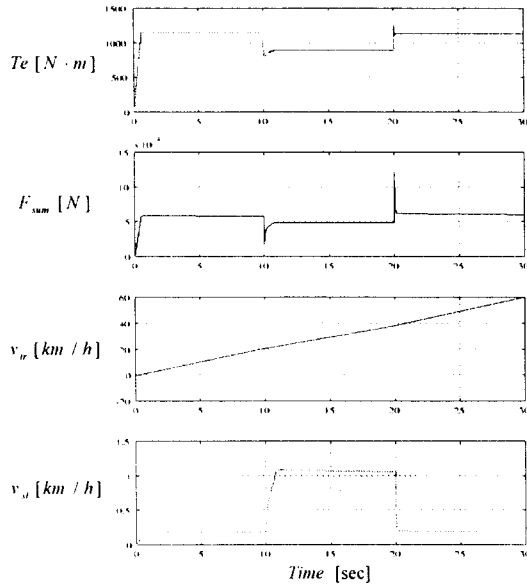


그림 10 퍼지논리 재점착 제어 시뮬레이션 결과
(위로부터 전동기 토크, 점착력합, 차량속도, 공전속도)
Fig. 10 Simulation result from re-adhesion control by fuzzy
(From top, motor torque, adhesive effort sum, train speed and slip velocity)

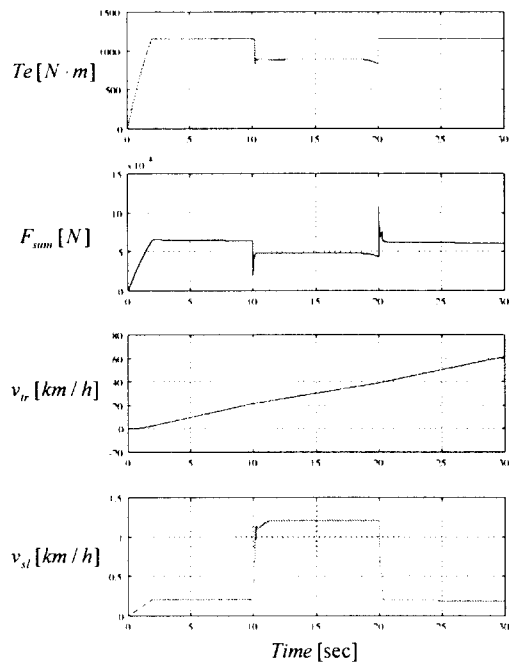


그림 11 제안된 재점착 제어 시뮬레이션 결과.
(위로부터 전동기 토크, 점착력합, 차량속도, 공전속도)
Fig. 11 Simulation result from proposed re-adhesion control
(From top, motor torque, adhesive effort sum, train speed and slip velocity)

젖은 선로 위를 달릴 때, 최대점착력 근처에서 전동기 출력토크가 제어된다. 따라서 점착력 이용률을 극대화할 수 있다. 일반적으로 건조한 상태에서 차량바퀴와 선로 사이의 점착력

은 충분히 크기 때문에, 정격토크를 가하여도 공전은 발생하지 않는다. 그런데 제안된 제어기법은 식(10), 식(11)에서 알 수 있듯이, α 값에 의존하여 토크 지령치를 증감시킨다. 만약 α 를 크게 설정한다면 초기에 빠른 가속특성을 얻을 수 있지만, 재점착 제어 시에는 토크 지령치의 커다란 변동에 의해 리플(Ripple)이 발생한다. 반면 α 값이 작으면 초기에 가속이 느리다. 따라서 α 값을 적절히 잡아야 한다(Trade-off).

2.5 실험결과

그림12는 1C4M 재점착 제어 실험장치이다. 하나의 인버터에 네 대의 유도전동기가 병렬 연결된다. 그리고 전동기는 벡터 제어한다.

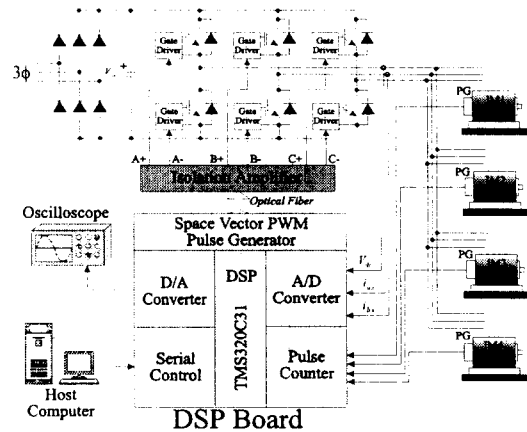


그림 12 1C4M 재점착 제어 실험장치
Fig. 12 Experimental setup for 1C4M re-adhesion control

2.5.1 점착특성

일반적으로, 점착특성은 공전속도에 대한 점착계수의 관계로 구해진다. 그런데 점착계수는 점착력에서 수직항력을 나눈 값으로 정의되므로 공전속도에 대한 점착력의 관계를 구함으로써 점착특성을 파악할 수 있다.

차량바퀴와 선로를 실제 시스템과 동일한 철강재질로 모델링한 경우, 축소모형의 점착특성은 실제 시스템과 전혀 다르다. 이는 축소모형에서는 차량바퀴와 선로가 탄성변형을 유지하는 크립속도 영역이 존재하지 않기 때문이다. 실제 시스템에서 바퀴와 선로 사이의 수직항력은 수십 뉴턴(N)에 이르기 때문에, 비록 철강의 강도가 매우 높다 하더라도 바퀴와 선로는 탄성변형을 할 수 있지만, 축소모형에서의 수직항력은 실제에 비해 수백분의 일 정도로 작으므로 탄성변형을 할 수 없다. 따라서 실제 철도차량 시스템과 유사한 점착특성을 획득하기 위해서 축소된 수직항력 하에서도 탄성변형을 할 수 있도록 바퀴에 우레탄(Urethane)을 둘러싼다.

그림13은 건조한 상태에서의 점착특성 실험결과이다. 건조한 경우에는 최대점착력이 나타나지 않았다. 전동기 구동력이 증가하여 공전속도가 증가함에도 불구하고 점착력은 여전히 증가하는 현상을 보였다. 차량속도가 증가함에 따라 동일한 크기의 전동기 토크에 대해 점착력은 점점 작아졌다. 이러한 건조한 상태의 점착특성은 실제시스템과 다르다.

그림14는 젖은 상태에서의 점착특성의 실험결과이다. 젖은

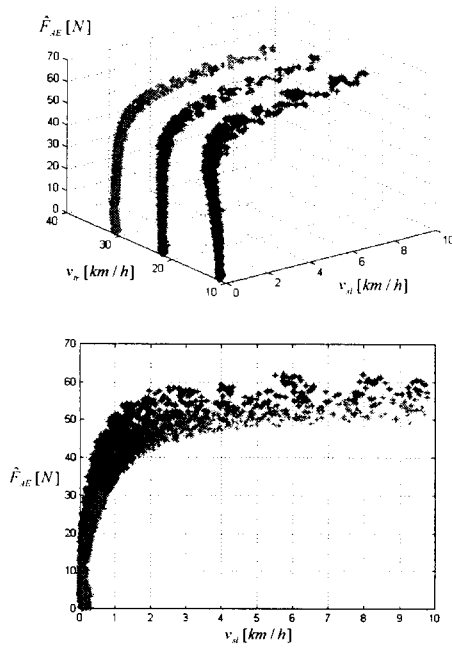


그림 13. 건조한 상태에서의 점착특성 실험결과
(위: 공전속도 및 차량속도에 대한 점착력의 관계,
아래는 공전속도에 대한 점착력의 관계)
Fig. 13 Experimental result of adhesion characteristics on dry condition
(Top : slip velocity, train speed and adhesive effort
Bottom : slip velocity vs. adhesive effort)

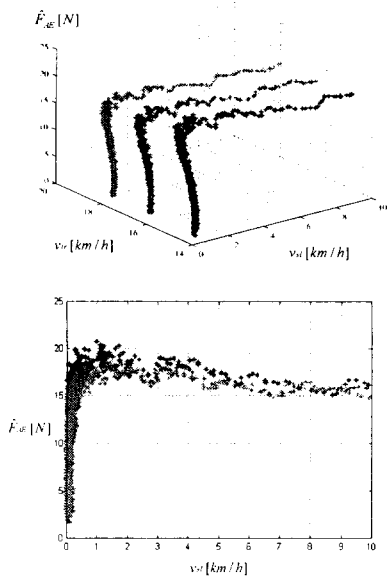


그림 14. 젖은 상태에서의 점착특성 실험결과
(위: 공전속도 및 차량속도에 대한 점착력의 관계,
아래는 공전속도에 대한 점착력의 관계)
Fig. 14 Experimental result of adhesion characteristics on wet condition
(Top : slip velocity, train speed and adhesive effort
Bottom : slip velocity vs. adhesive effort)

경우에는 공전속도 1 [km/h] 근방에서 최대점착력이 나타났다. 차량속도가 증가함에 따라 최대점착력 및 그 때의 최적 공전속도는 점점 감소하였다. 이러한 것은 상태에서의 점착 특성은 실제 시스템과 유사하다. 비록 건조한 상태에서의 점착 특성은 실제 시스템과 다르지만 재점착 제어는 점착력이 작은 상태에서 특히 필요하기 때문에, 축소모형을 통해 재점착 제어알고리즘을 검증하는 것은 효과적이다.

2.5.2 제안된 재점착 제어알고리즘 실험

본 논문에서 제안한 1C4M 재점착 제어알고리즘은 그림8과 같다. 각 바퀴에서의 점착력을 추정한 후, 그 중 최소의 점착력을 나타내는 전동기의 출력토크를 최대점착력 근처에서 제어한다.

그림15는 제안한 1C4M 재점착 제어알고리즘을 적용한 실험결과이다. 시스템은 처음에 건조한 상태를 유지하다가, 4초 후 젖은 상태로 변화한다. 건조한 상태에서 전동기는 정격토크를 출력한다. 전동기 구동력은 정격으로 유지됨에도 불구하고 공전속도는 점점 증가하였다. 이는 차량속도가 증가함에 따라 점착력이 점점 감소하기 때문이다. 상태가 급격히 변화한 경우, 점착력은 빠르게 최대점착력을 추정하였다. 젖은 상태에서 전동기 구동력은 최대점착력 근처에서 제어되었다. 전동기 출력토크는 서서히 감소하는데, 이는 차량속도가 증가함에 따라 최대점착력 및 그 때의 최적공전속도는 점점 감소하기 때문이다.

3. 결 론

3.1 실험검토 및 결론

본 논문에서는 전차원 관측기를 구성하여 점착력을 추정하고, 추정된 점착력을 이용하여 전동기 구동력을 최대점착력에서 제어하는 재점착 제어알고리즘을 제안하였다. 제어알고리즘을 평가하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고, 실제 철도차량 시스템에 적용 시의 성능을 예측, 평가하기 위해 축소모형은 설계·제작하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 제안된 재점착 제어알고리즘은 기존 알고리즘보다 우수한 재점착 제어 및 점착력 이용률을 보였다.

축소모형의 점착특성을 실제 시스템과 비교하기 위해 선로 표면의 상태 변화 및 차량속도에 따른 공전속도에 대한 점착력의 관계를 조사하였다. 바퀴와 선로를 실제 시스템과 동일한 절강재질로 제작한 경우, 축소모형의 점착특성은 실제 시스템과 전혀 달랐다. 이는 바퀴와 선로가 탄성변형을 유지하는 크립속도 영역이 존재하지 않기 때문이다. 실제와 유사한 점착특성을 획득하기 위해 탄력성 있는 우레탄(Urethane)을 바퀴에 부착하여 축소모형을 보완·변경했다. 건조한 상태의 점착특성은 실제와 달랐지만, 젖은 상태의 점착특성은 실제와 유사하였다. 그런데 재점착 제어는 점착력이 작은 젖은 상태에서 특히 필요하기 때문에, 이러한 축소모형을 통해 재점착 제어알고리즘을 검증하는 것은 효과적이다.

제안된 1C4M 재점착 제어알고리즘 검증 실험 결과, 공전의 연속적인 방지는 물론, 점착력 이용률이 향상되었다. 특히

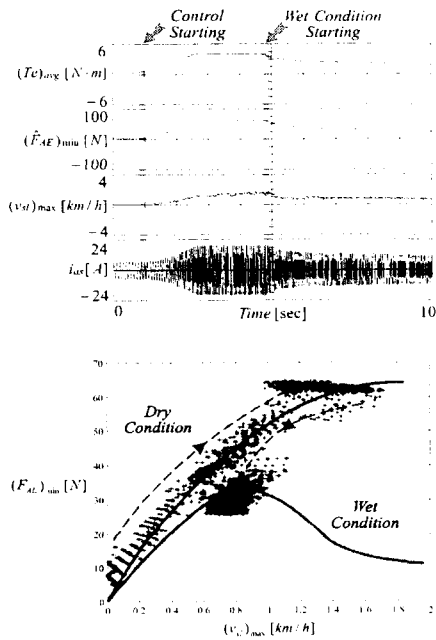


그림 15. 제안된 1C4M 재점착 제어 실험결과
 (위는 전동기 토크, 점착력, 공전속도 및 상전류, 아래는 공전속도에 대한 점착력 관계의 변화 추이)
Fig. 15 Experimental result from proposed re-adhesion control for 1C4M system
 (Top : average motor torque, minimum adhesive effort, maximum slip velocity and a phase current Bottom : transition of slip velocity and adhesive effort)

젖은 상태에서는 최대점착력을 추정하여 공전 없이 점착력 이용률을 극대화할 수 있었다.

3.2 향후과제

첫째, 모든 환경에서 실제 시스템과 유사한 점착특성을 나타내는 축소모형을 설계하기 위하여 바퀴와 선로 사이의 접촉상태에 관한 보다 많은 고찰이 필요하다. 둘째, 제안된 재점착 제어알고리즘에 대한 안정도 및 실용화에 관한 연구가 필요하다.

감사의 글

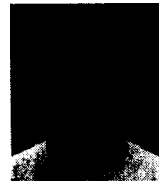
본 연구는 1998년도 LG산전의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부서에 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] 서광덕, "점착력 추정에 의한 고능률 재점착제어", 서울대학교 대학원 공학박사학위논문, pp.50-56, 1994년 11월
 [2] R. J. Hill and J.-F. de la Vssiere, "A Fuzzy Wheel-Rail Adhesion Model for Rail Traction", EPE97, Vol.3, pp.416-419, 1997
 [3] Sumiko Kita, Masayoshi Kumano, and Takahiro Kikuchi, "Development of Fuzzy Adhesive Control System", JIASC 95, Vol.2, pp.269-272, 1995

[4] F. Brondolo, P. Ferrari, M. Marchesoni, and L. Puglisi, "Optimised Fuzzy Algorithm to Control Adhesion Conditions during Strategy in AC Drives for Traction Applications", EPE97, Vol.2, pp.426-431, 1997
 [5] Yoshiki Ishikawa and Atsuo Kawamura, "Maximum Adhesive Force Control in Super High-Speed Train", PCC-Nagaoka97, pp.951-954, 1997
 [6] 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

저 자 소 개



김 우 석(金 佑 錫)
 1973년 4월 11일생. 1997년 서울대 전기공학부 졸업. 1999년 석사학위 취득. 현재 페어차일드 코리아 반도체 근무



김 용 석(金 容 錫)
 1969년 9월 25일생. 1996년 서울대 전기공학부 졸업(학사). 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학부 박사과정
 Tel : 032-680-1335
 E-mail : kwoos@fairchildsemi.co.kr



강 준 구(姜 俊 求)
 1963년 5월 4일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~93년 LG산전 중앙연구소 연구원. 1993~97년 동 연구소 선임연구원. 1999년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 현재 일본 Yaskawa Electric 연구소 근무



설 승 기(薛 承 基)
 1958년 3월 25일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~1988년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 객원 연구원. 현재 서울대 공대 전기공학부 부교수
 Tel : 880-7243, Fax : 878-1452
 E-mail : sulsk@plaza.eepel.snu.ac.kr