

A Study on High Performance Readhesive Control with Adhesive Effort Estimation

徐 光 德*·薛 承 基**
(Kwang-Duk Seo·Seung-Ki Sul)

Abstract—In this paper, a new readhesive control method is proposed for high performance traction drive. The adhesive effort is instantaneously estimated without the train velocity information and the readhesive effort is controlled according to adhesive effort when slip occurs. The proposed method is verified by digital simulation and experimental results based on a system composed with 200kW GTO inverter, two 50kW traction motors and a large inertia load.

Key Words : Readhesive control(재점착 제어), Adhesive Effort(점착력)

1. 서 론

산업의 발달과 생활권의 확대는 도심내 및 도심간에 대해 편리한 운송 수단을 필요로 하게 되었으며, 대규모의 운송 능력과 정확한 운송 시간을 가진 철도의 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 제한된 운행 선로를 가지는 철도는 이러한 수요의 증가로 인해 점차 운송 능력의 한계에 부딪히게 되었으며, 운송 능력의 향상을 위한 연구가 다방면으로 이루어지고 있다[1][2].

기존의 운송 선로에 대해 철도차량 운송 능력의 향상을 위해서는 차량의 가속 능력 향상 및 고속화가 필수적이며 이에 대한 연구 방안으로 견인 선동력 발생 부분(전동부)의 전력 밀도를 높이는 것이 있으며, 이와 함께 전동부에서 발생될 수 있는 전동력을 최대한 차량의 견인력으로 활용하는 것이 있다[3][4].

전동부에 대한 연구로는 전력전자 관련 기술의 향상 및 전기 기기 제작 기술의 발달과 더불어 많은 연구가 진행되어 왔으며, 기존의 직류 전동기 방식을 교류 전동기 방식으로 대체함으

로서 유지 보수성의 향상은 물론 단위 무게에 대한 발생 동력 크기를 향상시켰다. 이로 인해 동력 차량의 경량화가 가능하여졌고 축당 단위 무게를 줄임으로서 시스템의 운영 효율을 높였다. 이러한 동력부의 단위 무게당 동력 크기 향상으로 차체의 최대 전달 견인력 한계가 동력 장치에 의해 나타나는 운전 영역은 줄어들게 되었으며 상대적으로 레일과 바퀴 사이의 마찰력 크기에 의해 제한되어지는 운전 영역이 많이 나타나게 되었다. 그 결과 환경에 따라 순시적으로 변화하는 마찰력 크기에 대응하여 차체에 전달되는 견인력을 최대로 하기 위한 전동력 제어 방법에 대해 관심이 집중 되었으며 최근 많은 연구가 진행되고 있다.

바퀴와 레일 사이의 마찰력은 마찰계수와 하중의 곱으로 표현되며 마찰계수는 바퀴와 레일 사이의 표면 조건에 따라 설정되는 정 마찰계수와 바퀴와 차체 사이의 상대 속도 크기(空轉 속도)에 의해 나타나는 동마찰계수로 나뉘어 진다. 마찰계수의 정상 상태의 값은 정 마찰계수에 의해 나타나며 동 마찰계수의 발생에 따라 감소하는 특성을 가진다. 그러므로 환경 변화에 대해서 바퀴가 공전하지 않고 차량 속도와 같을 경우에 마찰력은 최대가 되며 전동부가 차체에 전달할 수 있는 견인력의 크기(점착력)도 최대가 될 수 있다. 그런데 실제 운행시 터널 속이나 강설, 강

*正 會 員 : 現代重工業(株) 重電機 技術研究所 先任 研究員

**正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 助教授·工博

接受日字 : 1994年 5月 12日

1 次修正 : 1994年 6月 28日

우 등과 같은 조건에 의해 정마찰계수는 줄어들게 되어 마찰력이 전동부의 전동력보다 적어지는 경우가 빈번하게 발생하게 되므로써 바퀴는 공전 하게되고 그것은 마찰력을 저하시키게 된다. 이로 인해 바퀴와 레일 사이의 마찰력은 최대 이용 마찰력인 정마찰력보다 훨씬 적게 되며 차체에 전달되는 견인력도 줄어들어 차량의 가속 능력은 저하되게 된다. 또한 발생된 공전은 바퀴의 면을 손상(찰상)시켜 차량 성능을 저하할 뿐만 아니라 소음및 차량 진동을 발생하여 승차감을 저하시키게 된다[5-7]. 그러므로 차량의 견인 능력 및 운행 성능의 향상을 위해 순시적으로 변하는 마찰력의 상태에 따라 전동기의 구동력을 적절히 제어 하므로써 공전 발생을 억제하여 견인력 손실을 적게 할 수 있는 전동력 제어(재점착 제어)가 필요하게 된다. 최대 마찰력을 유효하게 사용하기 위한 이러한 재점착 제어는 네가지의 항목에 대해 병행해서 연구되어지고 있다.

첫째, 공전이 발생한 경우 재점착을 위해 전동력을 감소시키는 크기와 방법에 대한 것이다. 공전시 전동력을 큰 크기로 감소시키면 완벽한 재점착이 된다. 그러나 이 상태는 차량의 견인력도 크게 줄어들게 되므로 빈번한 재점착 제어의 수행시 차량의 가속속력은 매우 저하하게 된다[6]. 그러므로 최적의 재점착력을 발생하기 위해 공전속도 및 가속도로부터 계산된 패턴, 시정수 및 크기에 의해 전동력을 감소 제어하는 방법이 연구되고 있으며 복수 운전 견인 전동기의 토크 차이로부터 계산되어진 크기로 제어하는 방법이 연구되고 있다[5][7][11]. 그러나 전자의 경우는 제어 정보인 공전속도를 계산하기 위해 차량의 절대속도가 필요하게 되지만 차량 속도를 정확히 얻기가 어려워 계산된 공전속도는 오차를 가지게 되어 전반적인 제어 특성을 저하시키게 된다. 후자의 경우는 차량의 속도 취득 없이 제어가 수행되나 제어 정보를 얻기 위해선 전동기별 토크 차이가 생겨야 하며 토크의 차이에 대한 공전속도를 적게 하기 위해 정격 슬립 주파수가 적은 특수 전동기를 사용하여야 한다[7][11]. 또한 재점착력의 계산시 전동기의 상수가 필요하게 되므로 전동기 상수 변동에 대해서도 민감한 특성 변화를 보이게 된다.

둘째, 전동력을 감소하여 재점착을 수행한 후, 마찰력 회복 상태에 따라 전동력을 회복시키는 방법이다. 재점착 제어후 마찰력이 회복되었지만 전동력을 감소된 값으로 유지한다면 비효율적이

다. 그런데 재점착 제어후 마찰력 상태의 정보 없이 전동력을 회복시키거나 회복 기율기가 급하다면 마찰력이 회복되지 않은 경우 재공전이 발생하기 쉬우며 이로 인해 반복되는 재점착 제어는 견인력 감소 및 차간 진동 등을 발생시켜 차량의 운행 성능을 저하시킨다. 이로 인해 단순히 일차함수의 기율기로 전동력을 회복시키던 방법에서 지수함수로 증가시키는 방법으로 연구되었으며[6], 재공전의 확률을 더욱 낮추기 위해 재점착 상태 정보로부터 감소 수정되어진 제어치 까지만 상승한 후 재공전이 발생하지 않으면 원래의 제어치 까지 상승시키는 두 차례에 걸친 회복 방법이 연구되었다[5][11]. 셋째, 정확하고 빠른 공전 검지 방법에 대한 것이다. 공전 검지의 지연은 공전 크기의 과다함을 가져와 견인력의 저하및 바퀴의 손상을 가져오며, 민감한 검지는 빈번한 재점착력의 발생으로 전체적으로 견인력의 저하를 가져온다. 넷째, 견인력 제어 특성 향상을 위한 인버터와 견인 전동기의 운전및 제어 방법에 관한 연구이다.

위와 같은 부분에 대한 성능 향상을 위해 현대제어이론의 적용과 더불어 새로운 제어기의 구성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고 고속연산과 정밀 계산을 위해 DSP의 적용이 증가하고 있다. 차량의 절대속도 정보를 필요로 하는 제어기에서는 정확한 차량 속도를 얻기 위해 고정도의 속도 센서 방법에 대한 연구도 수행되고 있다.

본 연구는 유효한 최대 점착력을 이용하여 견인력을 제어하기 위한 고성능 재점착 제어에 관한 것이다. 고속의 DSP TMS320C31을 사용, 차량 속도의 정보 없이 점착력을 실시한 추정하여 최적의 재점착력 발생 및 견인력 회복 알고리즘을 구현하므로써 견인 능력의 향상을 기한다. 제시된 제어기의 우수한 성능은 디지털 시뮬레이션과 실험을 통해 입증한다. 시험 설비는 실제 시스템과 동일한 조건에서 시험이 가능하도록 하기 위해 200kVA의 GTO인버터와 50kW 견인 전동기 2대를 설계, 제작하였으며, 차량 시스템은 동력 차의 1/25 크기의 관성 부하처럼 등가 모델링하여 제작하였으며 견인력 전달 구조를 실제 시스템과 동등하게 구성하여 가속속 시험은 물론 마찰력 변화에 의한 공전 시험도 가능하도록 구성하였다.

2. 시스템 해석 및 점착력 추정

철도차량은 바퀴와 레일 사이의 마찰력에 의

해 견인력을 전달받게 된다. 이때 마찰에 의해 전달되는 견인력을 점착력이라 한다. 공전속도에 대한 점착력 특성은 그림 1처럼 전동부의 전동력 증대와 함께 점착력이 증가하여 견인력도 증가하는 안정 영역과 전동력의 증대에 따라 점착력이 감소하여 견인력이 감소하는 불안정 영역으로 나타난다. 안정 영역에서의 공전속도는 바퀴와 레일 재질의 탄성으로 인해 접촉면에서 바퀴가 수축되어 회전하므로서 생기는 차이 속도인 Creep속도로써 이 경우는 완전한 점착성을 가지고 있으며 전동력을 모두 견인력으로 전달할 수 있게 한다. 하지만 불안정 영역에서의 공전속도는 마찰계수를 더욱 저하시키는 작용을 한다. 안정 영역과 불안정 영역의 경계인 최대 점착력을 가지는 부분에서 전동력을 제어하면 최대 견인력을 전달할 수 있다. 그러나 이 지점의 동작은 미소한 환경의 변화에도 쉽게 불안정 영역으로 접어들 수 있기 때문에 과도상태시 적은 공전속도에 대해 재빨리 최대 점착력 동작 점을 회복하여 최대 견인력 제어를 할 수 있는 고응답 특성의 전동력 제어가 필요하게 된다.

이러한 점착 제어의 동작은 그림 1에서 설명되어진다. 마찰계수 μ_1 의 상태에서 A점에서 전동력 제어가 수행되는 가운데 마찰계수가 μ_2 로 줄어든 경우 바퀴에는 견인력과 마찰력의 차이만큼 공전력이 발생하여 견인 전동기의 전동력과 점착력이 일치한 C지점까지 공전하게 된다. 이 점에서의 전달 견인력은 μ_2 곡선에서의 최대 점착력 이용 점인 B지점보다 적어지게 된다.

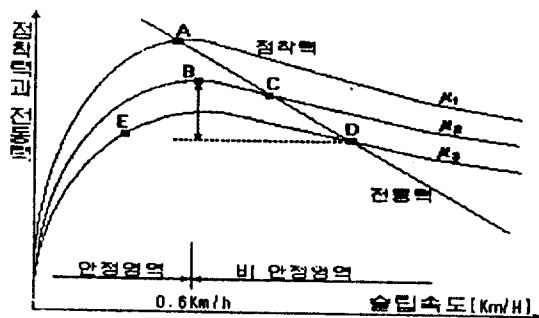


그림 1 공전속도에 따른 점착력특성
Fig. 1 Characteristic of adhesive effort with slip speed

C점에서의 지속적인 동작은 바퀴와 레일 면을 평활화시켜 마찰계수를 점차적으로 μ_3 로 떨어뜨리게 되며 공전은 D점으로 더욱 가속되고 점착력도 더욱 줄어들게 된다. 그러므로 C점에서의 공전이 발생할 경우 전동력을 점착력보다 적게 하여 바퀴에 마찰력을 작용시킴으로서 공전속도를 제거하여 점착성을 회복한 E점으로의 전동력의 제어가 수행되어야 하며 계속적으로 최대 점착력 지점인 B점으로 견인력을 회복하는 제어와 초기의 동작 점인 A점으로의 견인력 회복을 위한 제어가 수행되어지게 된다. 이와 같은 동작에서 견인력으로 전달되는 점착력은 전동기의 토크 곡선에 대해 바퀴의 동작점을 설정하게 되므로 바퀴와 견인 전동기부의 부하 전동력으로 나타난다는 것을 알 수 있다. 그러므로 점착력의 형태는 바퀴 후단의 부하 전동력의 계산에 의해 추정되어 짐을 알 수 있다. 바퀴와 레일 사이의 점착력을 추정하기 위해 견인 전동기-변속 기어-축-바퀴-레일-차체로 구성되어진 그림 2-a)의 견인력 전달 시스템은 그림 2-b)와 같이 2질량계로 등가 모델링 되어진다. 견인 전동기-변속 기어-축-바퀴의 등가 스프링 계수는 매우 크므로 하나의 질량계 J_1 으로 나타낼 수 있고 차체는 바퀴의 반경과 같은 관성 질량계 J_2 로 표현할 수 있다. 두 관성체의 토크 전달 특성은 부하 시스템인 J_2 의 변화나 속도 변화에 의해 나타나는 것이 아니라 전달 토크 함수인 마찰력에 의해 나타나며 J_1 은 J_2 의 상태에 무관하게 전달 토크인 마찰력의 크기에 의해 가속도가

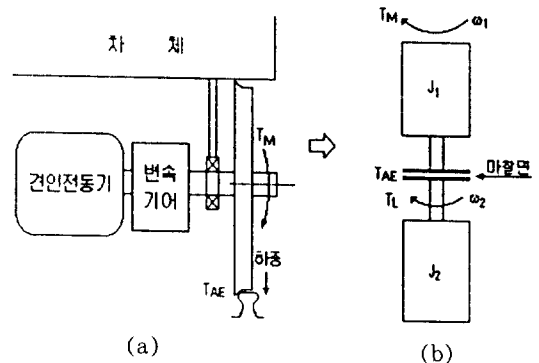


그림 2 차량시스템의 동력부 구조(a) 및 등가모델(b)
Fig. 2 Scheme of traction part(a) and equivalent model(b)

결정되어 진다. 그러므로 단순하게 견인 전동기-변속 기어-축-바퀴가 등가 모델링 된 J_1 에 대한 부하 토크 T_L 을 계산하므로써 바퀴와 레일 사이의 점착력 T_{AF} 의 크기를 정확하게 추정할 수 있다. 차체의 등가 관성은 승객에 의해 수시로 달라지지만 J_1 은 제작시 고정되어 지므로 정확한 실제치 및 실험치를 알 수 있다. 등가 견인력 전달 수식은 식(1)과 같이 나타낸다. 여기서 ω_1 은 바퀴의 속도, ω_2 는 차체의 속도, T_M 은 전동력을 나타낸다.

$$T_M = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + T_L$$

$$= J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + T_{AF} \quad (1)$$

위와 같이 등가 관성 J_1 의 부하 토크로 나타나는 점착력을 구하는 관계는 전동기 속도의 미분 항목을 포함하게 된다. 이 항은 연속적이며 정확한 전동기 속도의 취득이 없으면 불안정 항목으로 나타나게 된다. 그러나 실제 전동차량에서는 취부환경의 취약함으로 고정도급 속도 엔코더(encoder)를 사용하지 못하고 2상 60pulse/revolution 정도의 자기형 엔코더를 사용하기 때문에 저속시 빠른 시간내에 정확한 속도 정보와 미분 정보를 알기가 어렵다. 이로 인해 미분기의 구현을 순수 미분을 하지 않고 저역필터 함수를 사용하여 점착력을 추정하도록 하였으며 지연함수를 이용한 점착력 추정 관계는 식(2)와 같다. 이 경우 τ 는 필터 대역 주파수를 결정하는 점착력 추정 상수이며, 적은 값일수록 빠른 추종 특성을 보이므로 전동력의 리플 및 평균속도의 센서 오차를 차단할 수 있는 범위 내에서 적게 설정한다.

$$T_{AF} = \frac{1}{(1+\tau S)} (T_M - J_1 S \omega_1)$$

$$= \frac{1}{(1+\tau S)} (T_M + \frac{J_1}{\tau} \omega_1) - \frac{J_1}{\tau} \omega_1 \quad (2)$$

위와 같이 추정된 점착력 T_{AF} 는 전동력이 마찰력보다 적은 상태에서는 전동력이 모두 견인력으로 전달되므로 전동력과 같은 값을 가지며 마찰력이 적은 상태 즉, 공전의 가속 및 감속시에는 마찰력과 같은 값을 가진다.

3. 재점착 제어

차량의 절대속도에 의해 공전속도를 계산하며 그 양에 의해 전적으로 재점착 제어를 수행하는 대부분의 제어 방식은 속도 취득 오차 및 지연, 제어 이득 선정 등에 의해 민감하게 제어 특성이 달라지며 또한 공전 및 재점착 검지 시점 설정에 의해서도 견인력 제어 효율이 달라지게 된다.

본 연구에서는 차량 속도의 정보 없이 전동기의 속도 및 전류, 전압 정보만으로 공전량을 계산하여 공전을 검지하고 바퀴와 레일의 점착 상태를 나타내는 추정 점착력을 근거로 하여 최적의 재점착력 발생과 회복을 제어하므로써 견인력 제어 특성을 향상시키며, 공전속도량에 의한 제어 크기는 재점착 속도를 결정하는 부수적인 제어를 위해 사용되어 진다.

이러한 제어기는 그림 3에 나타낸 바와 같이 공전과 재점착 검지부, 재점착력 제어부, 전동력 회복부로 이루어지며 그림 4처럼 재점착 동작이 수행된다.

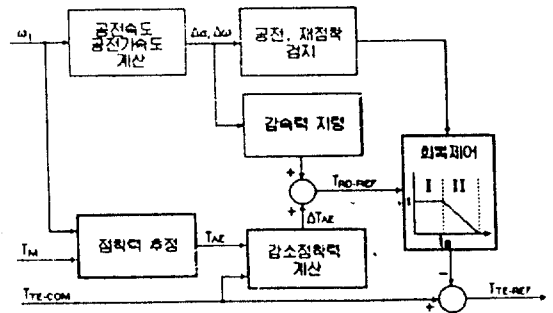


그림 3 재점착 제어기의 구성도
Fig. 3 Block diagram of readhesion controller

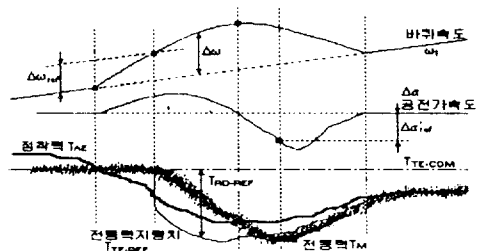


그림 4 재점착제어 동작형태
Fig. 4 Operation of readhesive control

먼저 재점착력 제어부는 그림 3에서 보이는 것처럼 식(2)에 의해 추정된 점착력에 의해 제어하는 부분과 공전속도 및 가속도에 의해 제어되는 부분으로 구성된다. 공전 발생시 점착력과 같은 크기의 전동력은 공전 가속력을 제거하므로써 공전의 확대를 방지하며 점착력보다 적은 전동력은 공전을 감소시키게 된다. 그러므로 공전시 점착력을 추정하여 정상 상태에 비해 감소 점착력 ΔT_{AF} 를 계산하므로써 제어된 재점착력은 최적의 기본 제어량이 됨을 알 수 있다. 그러나 ΔT_{AF} 에 해당되는 재점착 지령치는 감속력이 적기 때문에 완전 재점착을 수행하지 못하는 경우가 생길 수 있으므로 공전의 감속을 제어할 수 있는 재점착력을 부과한다. 부과적인 양은 공전속도 $\Delta\omega$ 로 부터 계산되어 지며 급속한 공전시 빠른 재점착력 발생을 위해 공전 가속도 $\Delta\alpha$ 에 의한 제어량도 포함되어 진다. 그러나 추정된 점착력에 의해 제어된 양이 최적으로 공전을 억제하므로 $\Delta\omega$, $\Delta\alpha$ 에 의한 제어량은 견인력의 손실이 적도록 하기 위해 공전이 줄어드는 한도 내에서 적게 설정하는 것이 좋다. 재점착력 혹은 재점착력 지령치 T_{RD-REF} 는 식(3)과 같이 나타난다. K_a , K_v 는 공전에 대한 감속도의 이득이다.

$$T_{RD-REF} = \Delta T_{AF} + K_v \Delta\omega + K_a \Delta\alpha \quad (3)$$

그림 4에 보이듯이 공전이 검지된 B지점부터 재점착력은 식(3)에 의해 제어되기 시작하며 일정한 값으로 고정되어 유지됨이 없이 완전 재점착이 될 때까지 전동력의 제어 지연 및 공전 상태변수의 변화 등에 대해 순시적으로 계산되어 최적으로 제어된다. 순시 제어된 재점착력은 안정된 재점착이 수행되게 하고 견인력 손실을 최소화 할 수 있다. 공전 가속도가 음이 되면 식(3)의 셋째 항은 영이 된다.

제어 및 공전 검지를 위한 공전 가속도는 전동기의 가속도로부터 대역 통과 필터를 통해 구해진다. 공전 가속도는 차량의 가속도 a_{train} 에 비해 매우 크기 때문에 대역 통과 성분은 공전 가속도로서 유효하게 나타난다. 공전속도는 부분 공전과 전체 공전에 대해 정확한 값을 얻기 위해 전동기간의 차이 속도와 공전 가속도의 적분 양을 합하여 사용한다.

다음으로 공전 및 재점착 검지에 관한 부분

이다. 제시한 재점착 제어는 그림 4에서 처럼 견인력의 손실이 적으므로 시스템의 안정을 위해 공전은 가능한 한 빨리 검지 할 수 있도록 제어한다. 그러나 너무 민감한 공전의 검지는 미세한 부분 공전에 대해서도 재점착 제어가 수행되므로 복수대의 견인 전동기 구동 방식에서는 좋은 방법이 되지 못한다. 미소 부분 공전에 대해서는 다른 전동기로 유입되는 전동력이 적으므로 재점착 제어를 하지 않고 공전량이 커지거나 지속 시간이 길 때 제어가 수행되도록 한다. 그러므로 공전속도의 검지 기준치 $\Delta\omega_{ref}$ 는 공전 제한치 내에서 충분히 크게 설정하고 가속도 검지 기준치 $\Delta\alpha_{ref}$ 는 낮게 설정하므로써 고속 및 대공전에 대해선 빠른 제어, 미소 공전에 대해서는 재점착 제어를 유보하도록 하여 전반적으로 견인력의 손실을 적게 한다. 공전의 검지는 공전 가속도 $\Delta\alpha$ 및 공전 속도 $\Delta\omega$ 가 설정된 $\Delta\alpha_{ref}$ 와 $\Delta\omega_{ref}$ 보다 커지면 그림 4의 B점처럼 공전이 검지 되고 재점착 제어는 시작된다. 재점착 검지는 D점과 같이 공전속도가 감속하고 있는 구간 내에서 검지되어 지며 완전한 재점착의 검지는 아니다. 바퀴가 재점착 될 수 있다고 판단할 수 있는 가속도 기준치 $\Delta\alpha'_{ref}$ 보다 적어질 때 재점착은 검지 되어 진다. 본 제어기에서는 그림 4에 나타난 바와 같이 공전이 감속되고 있는 중에도 순시적으로 재점착력이 제어되므로써 앞에서 설명한 기존의 제어 방식[6]과는 달리 재점착 검지 시점은 점착력 발생과 무관하며 단지 전동력의 회복 시점 판단에만 사용된다.

공전 검지 방법 $\Rightarrow \Delta\alpha \geq \Delta\alpha_{ref}, \Delta\omega \geq \Delta\omega_{ref}$

재점착 검지 방법 $\Rightarrow \Delta\alpha \leq \Delta\alpha'_{ref}$

마지막으로 재점착 검지 후 전동력 회복 제어 부분에 대해 살펴보면, 재점착이 검지 될 때까지 재점착력을 일정치로 유지하던 기존의 제어기와는 달리 전동력이 추정 점착력에 의해 순시적으로 제어되므로써 점착력의 회복과 더불어 1차 회복은 저절로 이루어진다. 그러므로 기존 방식의 2차 회복에 해당되는 회복 제어만 수행되며 원래의 전동력 지령치 T_{TF-COM} 에 대해 회복 제어가 수행되어 진다. 회복은 그림 3에서 보이는 것처럼 재점착 검지 후 완전 재점착이 될 정도의 시간이 지난 t_0 시점인 II구간

부터 ΔT_{TF} 만을 가지는 T_{RD-REF} 를 선형적으로 감소하므로써 전동력 지령치 T_{RD-REF} 를 T_{TF-COM} 까지 증가시킨다.

4. 시뮬레이션

실제 점착력에 대한 점착력의 추정 특성을 확인하고 정 마찰계수 변화시 재점착 제어의 특성을 확인하기 위해 차량 시스템과 마찰력 특성을 그림 1과 그림 2처럼 모델링 하여 디지털 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션은 재점착 제어성을 확인하기 위해 점착계수(점착력/하중) 0.16정도에 해당되는 전동력을 제어하는 가운데 마찰계수가 0.17에서 0.14로 급변한 경우에 대해 행해 졌으며 제어 상수인 공전 검지 기준치 $\Delta\alpha_{ref}$ 를 변화시켜 그에 따른 재점착 제어성을 살펴보았다.

그림 5는 재점착 제어가 수행되는 특성을 보

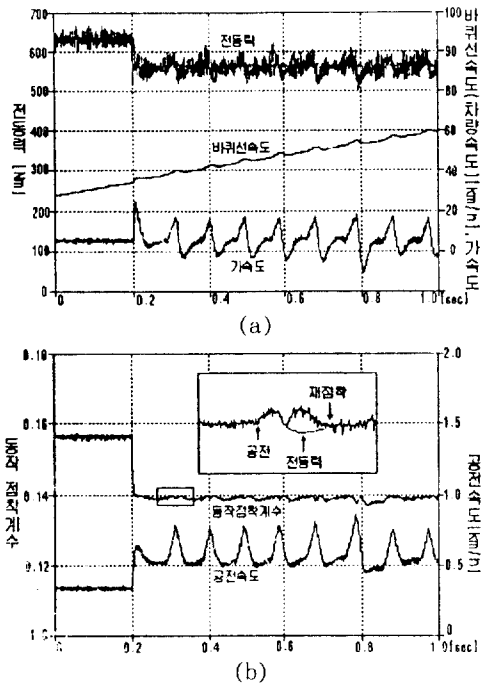


그림 5 마찰력저하시 재점착제어특성(마찰계수 0.17⇒0.14, $\Delta\alpha_{ref} : 3\alpha_{train}$)

Fig. 5 Readhesive characteristics with friction sudden change (friction coefficient 0.17⇒0.14, $\Delta\alpha_{ref} : 3\alpha_{train}$)

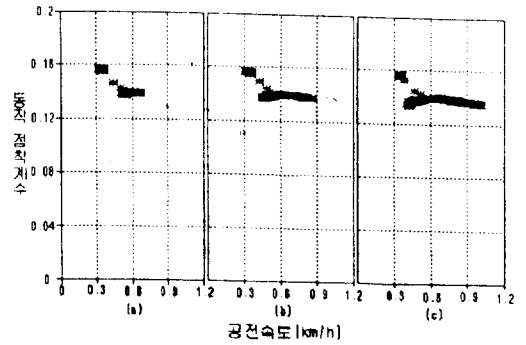


그림 6 공전가속도 검지기준치 변화에 따른 공전속도및 동작점착계수 특성

(a) $\Delta\alpha_{ref} : 2\alpha_{train}$ (b) $\Delta\alpha_{ref} : 3\alpha_{train}$
(c) $\Delta\alpha_{ref} : 4\alpha_{train}$

Fig. 6 Characteristics of slip speed and operation adhesion coefficient with slip acceleration detection margin change

(a) $\Delta\alpha_{ref} : 2\alpha_{train}$ (b) $\Delta\alpha_{ref} : 3\alpha_{train}$
(c) $\Delta\alpha_{ref} : 4\alpha_{train}$

인다. a)는 전동력과 바퀴 가속도 및 차량 속도와 같은 바퀴 선속도를 나타낸다. 바퀴 선속도는 실제의 6.31배 되어 진 값이다. b)는 동작 점착계수와 공전속도를 표시한다. $\Delta\alpha_{ref}$ 는 전동기 가속도의 저주와 성분으로 추정된 차량 가속도 α_{train} 에 대해 3배로 설정하였다. $\Delta\omega_{ref}$ 는 공전속도의 제어 희망치인 $1km/h$ 를 넘지 않도록 하기 위해 $1km/h$ 로 설정하였다. 감속 제어 이득 $K\alpha$, $K\omega$ 은 감속력이 전동력의 5%이내에서 발생되도록 각각 0.5과 10이내에서 제어하며 점착력 추정 상수 τ 는 $5msec$ 로 설정하였다.

그림 5에 보인 바와 같이 0.2sec시점에서 마찰력의 저하로 인해 바퀴는 가속하기 시작하고 공전 속도는 증가된다. 공전 가속도의 검지에 의해 재점착 제어가 즉시 수행되게 되며 전동력은 추정 점착력을 기준으로 $\Delta\omega$, $\Delta\alpha$ 에 의한 감속력과 함께 재점착력을 발생한다. 이로 인해 그림 5 b)에 나타나듯 공전속도는 재빨리 감소되고 점착력은 다시 회복됨을 알 수 있다. 그리고 재점착 후 원래의 전동력 지령치를 회복하기 위한 제어가 수행되나 마찰계수가 회복되지 않음으로서 재공전이 발생되고 재점착 제어는 다시 수행된다. 재점착 제어는 약 100 msec의 주기로 반복되고 있으며 이 주기는 회

표 1 실험장치의 사양

Table 1 Specification of experimental equipments.

구분	정 격	비 고
GTO 인버터	DC750V / AC580V, 200kVA 0-180Hz	TMS320C31 DSP사용 비동기 및 동기모드 스위칭
견인전동기	440V, 50kW, 60Hz, 1722rpm Max: 5400rpm	4극 $L_m=0.006722[H]$ $R_s=0.0287, L_s=0.007179$ $R_r=0.0364, L_r=0.007007$
관성부하	Max speed: 1350rpm 변속비: 1/4	주관성 : $GD^2/4=275kgm^2$ 보조관성2: $12.3kgm^2$ 보조관성1: $0.06kgm^2$ 공전 및 구배 저항시험 가능

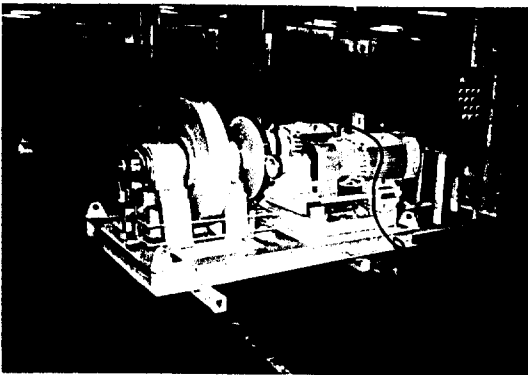


사진 1 관성부하의 외관도
Photo 1 Outlines of inertia load

복 기울기 설정에 의해 결정된다. 대개 10량 편성 기준시 차량의 공전 주파수가 0.9-0.35 Hz에서 형성되므로 견인력의 리플을 형성하는 재점착 제어의 반복 주기가 이 영역에서 나타나지 않도록 기울기를 선정해야 한다. 그림 5의 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 1km/h 이내의 적은 공간속도와 적은 점착력 저하를 가지며 최대 점착력 부근에서 안정적인 견인력 제어 동작을 하는 재점착 제어 특성을 볼 수 있다. 그림 6은 $\Delta\alpha_{ref}$ 를 변화하여 제어성을 비교한 경우로서 공전속도의 크기와 감소된 마찰 계수 0.14의 최대 점착계수점에 대한 동작 점착계수를 용이하게 관찰하기 위해 공전속도에 대해 동작 점착계수를 표시하였다. $\Delta\alpha_{ref}$ 가 α_{train} 의 4배로 높게 설정된 c) 경우 동작 점착계수

는 최대 점착계수 부근에서 다소 멀어지는 동작이 보이고 있으며 $\Delta\alpha_{ref}$ 가 2배로 적게 설정된 a) 경우에는 미소 공전과 함께 최대 점착력 부근에서 안정적인 동작이 나타남을 알 수 있다. 이로부터 제시된 제어기는 공전 검지 기준치가 과대하게 설정되지 않은 모든 경우 공전 속도는 1km/h 이내로 제어되며 점착계수의 이용률도 90% 이상이 됨을 확인할 수 있다.

5. 실험 결과

마찰력 부하의 특성상 시뮬레이션 결과만으로 제어 특성을 입증하기가 곤란하므로 실제 철도차량 시스템과 동등한 부하 조건을 가지는 시험 설비를 만들어 실험으로도 제어성을 입증하려 한다. 시험용 전력 장치로서 200kVA급 GTO인버터와 50kW 견인 전동기 2대를 설계, 제작하였다. 또한 차량 부하는 가감속 시험 및 공전 시험을 위해 사진 1에 나타난 바와 같은 마찰면을 갖는 등가 관성 부하로 모델링 하여 제작하였다. 시험 장치의 구성 사양은 표 1과 같다.

관성 부하의 구성은 그림 7과 같다. 실험의 정확성을 위해 실제 차량의 전동력 전달 구조와 동등하게 구성하였으며 보조 관성체 사이의 마찰 특성도 유사하게 얻기 위해 바퀴와 같은 재질을 사용하였다. 동력 전달은 전동기-보조 관성체1(바퀴)-마찰면-보조 관성체2(레일)-주 관성체(차체)로 이루어진다. 마찰력 변동 시험은 전동기와 보조 관성체1이 실려 있는 베드를 보조 관성체2의 법선 방향으로 차량 하중 처럼 힘을 가하는 유압 장치를 조절하므로써 마찰계수의 변동 효과를 얻을 수 있지만 일정

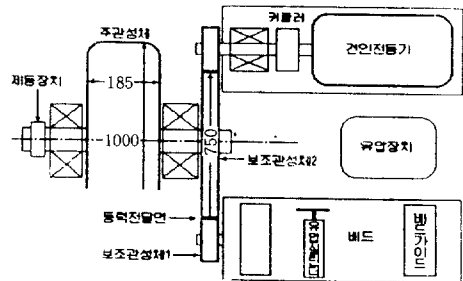


그림 7 관성부하의 구조도
Fig. 7 Construction of Inertia load

한 유압 상태에서 두 마찰면에 물과 모래를 주입하므로써 직접 마찰계수를 변동하여 실제 환경과 동일하게 시험하였다. 실험은 용이한 공전 시험을 위해 전동력이 큰 정 토크 영역에서 주로 행하였으며 부분 공전시에 양호한 특성은 전체 공전시에도 양호하게 나타나므로 1대의 부분 공전에 대해 수행되어 졌다.

그림 8은 제어기가 없는 상태에서 공전 시험을 한 결과이며 바퀴 선속도, 공전 가속도, 전동력, 추정 점착력과 전동기 전류를 보인다. 점착력 추정 특성과 공전 특성 시험을 위해 일정 전동력 제어 상태인 A시점에서 두 마찰면에 물을 주입하여 공전을 발생시켰으며 시험 중과대 공전으로 인한 찰상이 발생하여 B시점에서 모래를 주입하여 재점착 시켰다. 물의 주입시 마찰계수의 저하로 점착성이 줄어들어 공전이 발생하고 점착력은 줄어들게 된다. 이 경우 제어를 위한 추정 점착력은 공전의 정도에 따라 실제 점착력을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 공전의 발생시 공전 가속력에 해당하는 양만큼 추정 점착력은 줄어들며 재점착 시에는 마찰력에 의해 공전이 소멸되므로 추정 점착력은 회복 점착력을 나타낸다. 이 경우의 추정된 점착력으로부터 마찰력의 회복 상태 정보를 얻을 수 있다.

그림 9와 10은 제시된 재점착 제어기를 수행한 상태에서 공전 시험을 한 결과이다. 정상상태 운전시 A시점에서 물을 주입하여 마찰계수를 저하시켰으며 마찰력 회복은 회전에 의해 물이 제거되면서 저절로 이루어 졌다. 재점착의 반

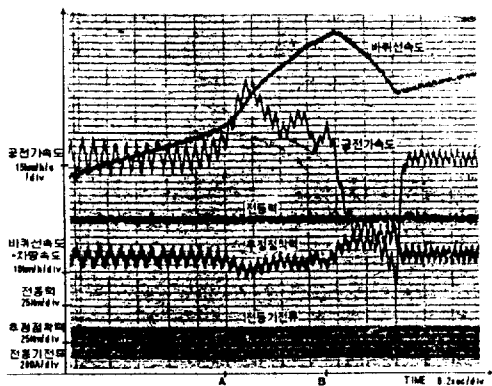


그림 8 물과 모래의 주입에 의한 공전시험
Fig. 8 Slip test with water and sand

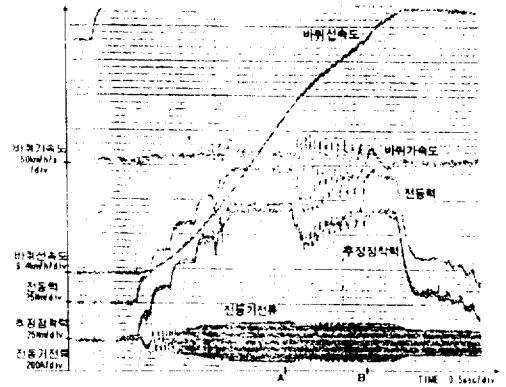


그림 9 물주입시 재점착시험 ($\Delta\alpha_{ref} : 3\alpha_{train}$)
Fig. 9 Readhesion test with water ($\Delta\alpha_{ref} : 3\alpha_{train}$)

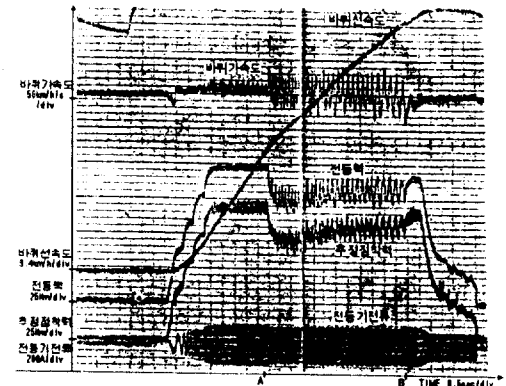


그림 10 물주입시 재점착 시험 ($\Delta\alpha_{ref} : 2\alpha_{train}$)
Fig. 10 Readhesion test with water ($\Delta\alpha_{ref} : 2\alpha_{train}$)

복 제어와 함께 증가되는 추정 점착력은 마찰력의 회복 상태를 보여준다. 먼저 그림 9는 $\Delta\alpha_{ref}$ 를 α_{train} 의 3배로 하여 $\Delta\alpha_{ref}$ 는 $1km/h$ 로 하였다. K_a 는 0.5, K_r 는 10으로 하며, 재점착 후 회복 주기는 $250msec$ 근처가 되도록 하였다. 이 경우 추정된 점착력에 의해 $1km/h$ 이하의 공전속도로써 재점착 제어가 안정적으로 수행되고 있음을 알 수 있다. 또한 마찰력의 회복에 따른 전동력의 회복도 매우 양호하게 나타나고 있다. 재점착 제어가 반복 수행 중인 기간에서의 주 관성체의 평균 가속력인 $6.02km/h/s$ 는 전동력이 모두 전달되었을 때의 희망 가속력인 $6.3km/h/s$ 의 95%정도의 높은 점착 특성을 보이고 있다. 희망 가속력은 전동력의 평균값과 관성 값으로부터 계산한 값이다. 공전

이 생기지 않은 경우에 정토크영역에서 가속력은 7.5km/h/s 로 나타난다.

그림 10은 Δa_{res} 를 a_{train} 의 2배로 하며, 그림 9에 비해 점착 속도를 빠르게 하기 위해 K_a 는 1, K_v 는 15로 하며 회복 주기는 150msec 로 한 경우이다. 이 경우 소한 공전속도와 함께 매우 안정된 특성을 얻을 수 있었다. 재점착 제어의 수행 중 주 관성체의 평균 가속력은 6.15km/h/s 로 나타나며 희망 가속력인 6.4km/h/s 의 96% 정도로 우수한 점착 제어 특성을 보인다. 그러나 그림 10에서 볼 수 있듯이 점착 제어를 위한 감속력 제어 비율의 증가로 전동력의 리플이 다소 증가함을 알 수 있으며 빠른 회복 제어로 인해 재점착의 가속력이 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 이 두 경우에 대해 보듯이 공전 검지 기준치의 변화와 공전속도 및 가속도 제어의 이득에 큰 차이없이 점착 특성은 90%이상으로 우수하게 나타남을 알 수 있다.

6. 결 론

제시된 재점착 제어는 공전 발생시 차량의 속도 정보 없이 추정된 점착력에 의해 최적의 재점착력 제어를 수행하므로써 적은 공전량 및 적은 견인력 손실을 보이며 최적의 전동력 회복 특성을 가진다. 그러므로 최대 점착력 지점에서의 동작이 가능하여 최대 점착력의 유효 이용율을 높여 차량의 견인 특성을 향상시켰다. 추정된 점착력에 근거하여 기본 재점착력을 발생하므로써 공전속도등과 관련된 요소오차에 대해서도 안정된 특성을 보이고 빈번한 재점착 제어의 실행에 대해서도 적은 견인력 손실을 가지는 우수한 특성을 보이고 있다. 이는 시뮬레이션과 실제 차량 시스템을 등가 모델링한 시험 설비로부터 실험을 통해 입증하였으며, 실험 결과 공전속도는 1km/h 이내로 제어되며 최대 점착계수의 이용률은 90%이상의 높은 값으로 나타났다.

참 고 문 헌

[1] Heinisch, R, "High Speed Train in Germany", Rail International(Brussels), Vol.6-7, pp.23-28, 1992
 [2] Ono, J., "Increased Speed of railways", Japan Train Operation Association, March 1987

[3] Anders L., "Current Plans for High Speed Railway Lines in Sweden", International Conf. of Speed Up Technology(STECH), Vol.1, pp.245-248, November, 1993
 [4] Yagi, Eiji, "Efforts on Speedup of the Shinkansen Using WIN350", JREA, Vol. 36, No.5, pp.9-12, May 1993,(in Japanese)
 [5] M.Iwahori, R.Inoue, "Anti-Slip Control of VVVF Inverter Driven EMUs", STECH, Vol. 2, pp.255-260 November, 1993
 [6] H.Yoshikawa, M.Iwahori, "Nex AC Traction Drive System with Transistor VVVF Inverter", PESC, pp.291-297, May, 1991
 [7] Andresen, E.C., "Digital Simulation of an Inverter Fed Induction Motor Locomotive Drive with Wheel Creep Control", Technische Hochschule Darmstadt, 1993
 [8] T.Watanabe, M.Ogasa, "Studies on Readhesive Characteristics with the Difference of Motor Excitation Method and Various Elements on Velocity Detection", National conv. rec. IEEJ, pp.5-10, 1991(in Japanese)
 [9] T.Watanabe., "Improvement of Readhesive Characteristics of Electric Motor Vehicles", STECH, Vol.2, pp.243-247, 1993
 [10] T.Watanabe, "Precise Detection of Train Velocity", National conv. rec. IEEJ-IAS, pp.12, 1989(in Japanese)
 [11] T.Kikuchi, "3-Level/IGBT Inverter Propulsion control System", STECH, Vol.2, pp.249-254, 1993

저 자 소 개



서광덕(徐光德)

1964년 2월 22일생. 1986년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 현대중공업 기술연구소 선임연구원 및 서울대 대학원 전기공학과 박사과정.

설승기(薛承基)

전기학회 논문지 제43권 1호 참조