

차량 견인특성모델링 및 점착력 추정

변운섭, 김민수, 목재균, 김영철**
 철도연, 충북대**

Adhesion Estimation and Modeling on Traction Characteristic of Vehicle

Yeun-Sub Byun, Min-Soo Kim, Jei-kyun Mok, Young-Chol Kim**
 Korea Railroad Research Institute, Chungbuk National Univ**

Abstract - In this paper, we propose the mathematical model for the vehicle system and the observer for adhesion force. To model the dynamic properties of vehicle system, we have considered two fundamental parts. The first part is the motion equations for vehicle based on Newton's second law. The second part is the torque dynamics of the traction motor. These parts are affected by outer conditions such as adhesive coefficient, running resistance and gradient resistance. The each parts are presented by the numerical formula. From two equations, we get the observer on adhesion force. Simulation results show that the proposed observer have the good performance compared with the normal observer.

1. 서 론

본 논문에서는 수정된 차량시스템을 모델링하였다. 모델식테 근거하여 점착력 추정기를 제시하였다. 차량모델은 차량운동특성부와 구동장치의 견인특성부로 구분 하였다[1]. 차량의 운동특성부는 차량의 무게, 바퀴와 마찰면(노면 또는 레일)의 공전 속도에 따른 점착특성, 견인력 및 저항력을 포함하여 모델링하였다. 특히 점착특성은 차량이 실제 운행 중에 접할 수 있는 다양한 마찰특성을 모델링하고 순시적으로 변경할 수 있도록 하였다. 또한 차량의 주행에 대한 저항으로는 주행저항과 구배저항을 포함하도록 구성하였다. 차량은 가속과 감속중에 공전과 활주가 발생하고 이들은 휠과 레일사이의 점착력에 영향을 받는다. 점착력은 차량의 점착제어 및 공전속도 제어시 중요한 변수이지만 점착력은 실시간 직접측정이 불가능하며 추정하기 또한 쉽지 않은 변수이다. 본 논문에서는 주행저항에 영향을 받지 않고 점착력을 수정하는 방법을 제시한다.

2. 본 론

2.1 차량견인시스템 모델

그림 1은 바퀴, 접촉면, 전동기, 기어 등으로 구성되는 차량의 견인부의 구동력전달 구조이다. 전동기에서 발생된 토크는 변속기어를 통해 바퀴로 전달되고, 바퀴로 전달된 구동력은 바퀴와 마찰면사이의 점착계수와 바퀴에 수직으로 가해지는 차체의 무게의 곱에 비례하는 점착력에 의하여 차량의 견인력으로 작용한다. 견인력에 반하는 힘으로는 크게 주행저항과 구배저항을 고려할 수 있다. 이 구조에서 점착력은 차량운동방정식(1)의 견인력으로 작용하고, 전동기운동방식(2)에서는 부하로써 작용한다. 차량의 운동방정식은 견인력(F_{TE})과 그에 대한 총저항력(F_R)의 평형관계로 주어진다[1].

$$M \frac{dv_{tr}}{dt} = F_{TE} - F_R \quad (1)$$

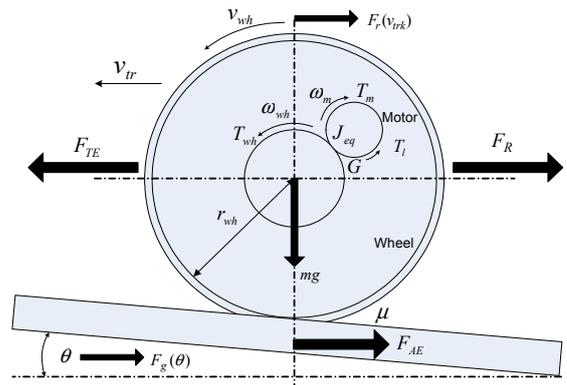
$$F_R = F_r(v_{trk}) + F_g(\theta) \quad (2)$$

차량의 총저항력(F_R)은 주행저항(F_r), 구배저항(F_g) 등을 고려할 수 있다.

전동기의 토크방정식은 구동토크(T_m)과 그에 걸리는 부하(T_l)의 평형관계로 주어진다.

$$J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_l \quad (3)$$

$$T_l = (F_{AE} + F_R) \cdot \frac{r_{wh}}{G} \quad (4)$$



〈그림 1〉 동력바퀴의 운동특성도

$$|F_{TE}| = |F_{AE}| \leq mg \cdot \mu(v_{sl}) \quad (5)$$

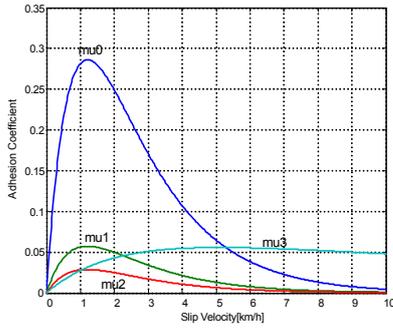
여기서 전동기의 부하(T_l)는 노면(또는 레일)과 바퀴사이의 점착력(F_{AE})과 저항력(F_R)의 합이 바퀴반경(r_{wh})에 곱으로 부하토크 [Nm]가 되고 다시 기어비(G)에 반비례하여 전동기의 총 부하로 전달된다. 차량의 견인력(F_{TE})은 노면과 구동바퀴의 접촉면에서 발생한다. 식(5)는 접촉면에서 점착력(F_{AE}) 및 점착계수($\mu(v_{sl})$)의 관계이며 점착계수는 공전속도(v_{sl})에 관련된다.

2.2 차량 점착특성과 점착계수 모델

점착 특성은 기후에 따른 건조상태, 습도분포, 나 이물질의 도포된 상태 즉 비온후 수분의 상태나 결빙, 오일, 낙엽, 직물, 흙 등 이물질의 오염에 의해 일시적이거나 변경될 수 있다. 이런 점착특성의 실질적인 측정은 매우 어려우나 그간의 여러 실험이나 측정 또는 추정자료로부터 일반적으로 점착력은 공전속도(v_{sl})에 대해 그림 2와 같은 관계가 있다고 알려져 있다. 여기서 공전속도는 식(6)과 같이 바퀴선속도(v_{wh})와 차량속도(v_{tr})의 차로 정의한다.

$$v_{sl} = v_{wh} - v_{tr} = \omega_m \cdot r_{wh} / G - v_{tr} \quad (6)$$

차량의 속도는 견인전동기나 제동장치에 무관한 바퀴의 회전속도로 대체할 수 있고 바퀴의 속도는 견인전동기에 의해 구동력을 받는 바퀴의 회전속도를 활용할 수 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 점착계수는 공전속도에 대해 크게 두 부분으로 나누어진다. 공전속도 증가에 따라 점착계수가 증가하는 안정 동작영역과 공전속도 증가에 따라 점착계수가 감소하는 불안정 동작영역이 있다[2].



〈그림 2〉 상태별 점착계수특성

그림 5는 수식(7)를 적용하여 그린 그래프이다. 각 상수 a, b, c, d는 레일조건에 따라 다양하게 설계될 수 있다[2].

$$\mu = a \cdot \exp^{-b \cdot v_{sl}} - c \cdot \exp^{-d \cdot v_{sl}} \quad (7)$$

2.3 차량점착특성 추정

기존의 차량 점착력 추정 종래에는 식(3) 전동기 모델식을 구성하고 이로부터 식(9)와 같이 점착력을 추정하는 식으로 구성하였다[3].

$$T_i = T_m - J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} \quad (8)$$

$$\hat{F}_{AE} = \left[T_m - J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} \right] \frac{r_{wh}}{G} \quad (9)$$

식(1)부터 식(4)에서 볼 수 있는 것처럼 모델식에 주행저항(구배, 곡선, 공기저항 등)이 고려된다. 이들 저항들은 실시간 계측하기 어렵기 때문에 이들 특성을 모델링하여 사용하는데 이 또한 쉽지 않은 문제이다. 따라서 이들 저항 특성이 고려되지 않으면 이들 저항이 작용되는 구배영역, 또는 고속영역에서 점착력 추정에 큰오차를 발생하게 된다.

식(4)의 차량 운동방정식으로 부터 차량에 미치는 총저항력에 대한 식으로 정리하면

$$F_R = F_{TE} - M \frac{dv_{tr}}{dt} \quad (10)$$

식(10)을 식(1)에 대입하여 정리하면 식(11)과 같이 정리되고

$$J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - \left(F_{AE} + F_{TE} - M \frac{dv_{tr}}{dt} \right) \cdot \frac{r_{wh}}{G} \quad (11)$$

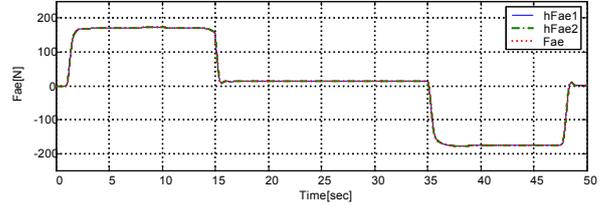
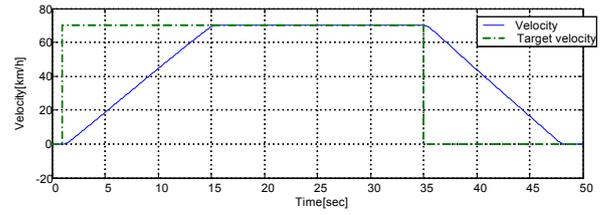
식(11)을 점착력(F_{AE})을 우변으로 하는 식으로 정리하면 식(12)와 같이 정리된다.

$$\hat{F}_{AE} \cong \left(T_m + M \frac{r_{wh}}{G} \frac{dv_{tr}}{dt} - J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} \right) \cdot \frac{G}{2r_{wh}} \quad (12)$$

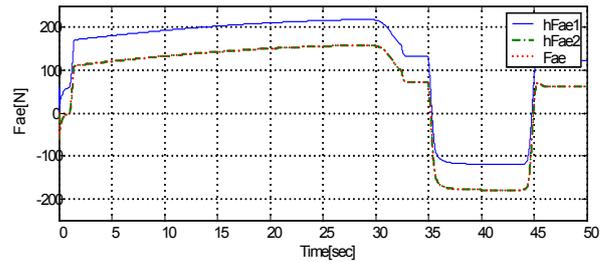
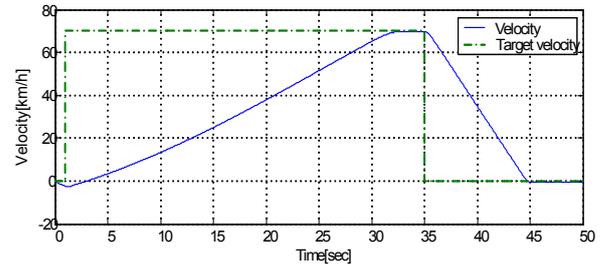
결국 점착력의 추정식에는 주행저항관계식이 보이지는 않지만 이들은 차량운동특성식으로 전환되어 수식 내에 적용되어있다. 이들 식의 구성요소는 모두 측정 가능한 요소들로 구성되어있다.

2.4 추정 시뮬레이션 결과

기존의 점착력 추정식은 전동기의 부하관점에서 표현한다. 그 결과 주행저항에 대한 영향을 고려할 수 없다. 그림 3은 구배저항이 없는 조건에서 점착력 추정결과로 기존의 추정기의 결과나 제시된 추정기의 결과가 동일하게 일치된다. 그림 4는 구배 조건을 고려한 점착력 추정결과로 기존의 추정기는 의 추정결과(hFae1)은 실제 점착력(Fae)과 오차를 보이고 있다 반면 제시된 추정기의 결과(hFae2)는 실제 점착력(Fae)과 일치하는 결과를 준다.



〈그림 3〉 구배 0° 조건 점착력 추정



〈그림 4〉 구배 3° 조건 점착력 추정

3. 결 론

점착력의 추정은 점착제어 등에 필수적이며 이에 대한 정확한 정보는 차량제어성능을 좌우한다. 점착력은 차량의 추진 및 제동에 중요한 요소이지만 실시간 추정이 어려운 변수이다. 본 논문에서는 차량모델과 모델식에 근거한 점착력 추정식을 제시하였다. 제시된 추정식은 주행저항 값의 변동에 영향 없이 점착력을 추정할 수 있다.

감사의 글

본연구는 2009년도 건설교통부의 국가교통핵심기술사업(R&D/03-대중 11) 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 변운섭, 김영철, “주행특성을 고려한 차량 견인시스템 모델링” 전기학회 논문지 56-11-12, pp.1955-1961, 2007
- [2] Yosuke Takaoka, Atsuo Kawamura, "Disturbance Observer Based Adhesion Control for Sinkansen", AMC2000-NAGOYA, 2000 pp.169-174
- [3] Atsuo Kawamura, Keilchi Takeuchi, Takemasa Furuya, Yosuke Takaoka, Kantaro Yoshimoto and Meifen Cao "Measurement of the Tractive Force and the New Adhesion Control by the Newly Developed Tractive Force Measurement Equipment", PCC-Osaka, 2002 pp.829-884