

유도전동기를 이용한 열차의 공전활주 모의 시험기

변운섭, 김민수, 이영훈, 김영철*
 철도연, **충북대

The slip & slide simulator for train using induction motors

Yeun-Sub Byun, Min-Soo Kim, Young-hoon Lee, Young-Choi Kim
 Korea Railroad Research Institute, Chungbuk National Univ

Abstract - In electric motor coaches, when the adhesion force between rail and driving wheel decreases suddenly, the electric motor coach has slip phenomena. The characteristics of adhesion force coefficient is strongly affected by the conditions between rails and driving wheels, such as moisture, dust, and oil on the rails and so on. This paper proposes the simulation system for slip & slide test using virtual train. We can easily research the adhesion characteristics and adhesion control method with this equipment under the sudden variation of the adhesion force coefficient.

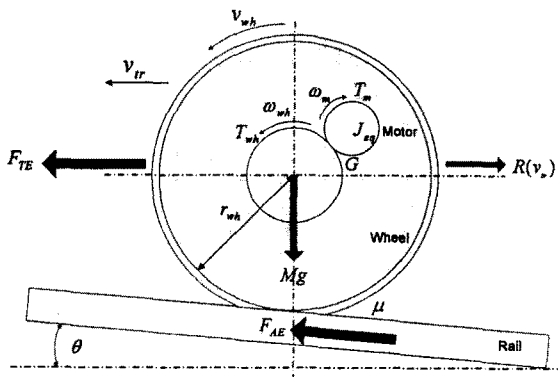
1. 서 론

바퀴식 구동장치를 이용하여 추진하는 차량(자동차, 철도 등)은 추진 및 제동시 필연적으로 차량바퀴와 마찰면(지면 또는 철로) 사이에 공전 및 활주 현상이 발생한다. 이런 현상은 마찰면 사이의 최대 점착력 이상의 구동력이 가해지면 과도한 공전이 발생하고 최대 점착력 이하의 제동력에서는 과도한 활주현상이 발생한다. 이러한 과도한 공전이나 활주현상은 구동시스템의 제어특성을 불안정하게 만들고 접촉부위의 비정상적인 마모를 형성한다. 또한 이런 현상은 자동차에서는 자동차의 전복이나 회전을 일으켜 차량사고의 직접적인 원인을 제공하며 시스템의 안전성 및 경제성에 큰 영향을 끼친다. 철도차량에서는 철로와 바퀴의 과도한 손상으로 유지보수 비용을 증가시킨다. 뿐만 아니라 시스템이 보유하고 있는 최대토크의 성능을 발휘하지 못하게 된다. 이러한 물리적인 특성을 분석하고 불리한 특성을 극복하며 차량의 효율을 높이기 위한 연구를 위해 공전 및 활주특성을 모의할 수 있는 장치가 개발되어 활용되고 있다. 기존의 모의장치들은 노면과 타이어 또는 레일과 열차바퀴의 점착특성을 모의하기 위한 원형회전체와 바퀴를 모의하는 회전바퀴로 구성하여 서로의 마찰회전을 통하여 점착특성을 모의하고 시험하고 있다. 이러한 기계적 마찰을 이용하지 않고 프로그램으로 처리된 가상물체와 전동기를 연결하여 모의시험기를 구성함으로써 기존 방식의 단점을 제거하고 다양한 점착특성을 순차적으로 모의할 수 있는 공전활주 모의시험장치 제시한다.

2. 본 론

2.1 철도차량 구동시스템 모델링

유도전동기에서 발생된 구동력은 변속기와 축을 통해 바퀴에 전달되고, 바퀴에 전달된 구동력은 바퀴와 레일사이의 점착계수와 바퀴에 수직으로 가해지는 차량의 무게의 곱에 비례하는 점착력에 의하여 차체에 견인력으로 작용한다.



〈그림 1〉 전동기/차륜/레일사이의 관계

바퀴의 점착력 및 토크 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M \frac{dv_{ir}}{dt} = F_{TE} - R(v_{ir}) - Mg \sin \theta \quad (1)$$

전동기의 토크방정식은 다음과 같다.

$$T_m = J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} + F_{AE} \frac{r_{wh}}{G} + B\omega_m \quad (2)$$

견인력 전달구조에서 차체와 견인력 발생부분은 바퀴와 레일의 점착력 특성에 의해서 분리할 수 있다. 즉 두 부분의 연결 요소인 점착력을 전동기 구동력(T_m)에 대한 부하로 취급함으로써 전동기 토크 방정식은 차체의 운동방정식에 무관하게 해석할 수 있다[1].

여기서, M : 전동기 한 개가 담당하는 차량 질량 [kg],
 g : 중력가속도 [kgm/sec²], W : 차량의 무게 Mg
 F_{AE} : 바퀴와 레일 사이의 점착력 [N]
 v_{ir} : 차량속도 [m/sec], v_{wh} : 차륜 선속도 [m/sec],
 $R(v_{ir})$: 주행 저항력 [N], θ : 레일의 경사도
 T_m : 전동기 토크 [Nm],
 ω_m : 전동기 기계적인 회전각속도 [rad/sec],
 ω_{wh} : 차륜의 기계적인 회전각속도 [rad/sec],
 J_{eq} : 축으로 환산한 등가관성 [kgm²],
 B : 회전 마찰계수 [kgm/sec], r_{wh} : 바퀴의 반경 [m],
 G : 변속기어비이다.

$$\text{주행 저항 } R(v_{ir}) = 0.0359 \cdot v_{ir} + 0.000745 \cdot v_{ir}^2 \quad (3)$$

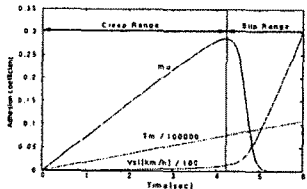
여기서 차량속도 v_{ir} 는 [km/h] 단위를 취한다.

2.2 점착특성

차륜과 레일사이의 점착 특성은 기후에 따른 건조상태, 습도분포, 나 이물질의 도포된 상태 즉 비온후 수분의 상태나 결빙, 오일, 낙엽, 직물, 흙 등 이물질의 오염에 의해 일시적이거나 변화될 수 있다. 이 들 조건별 평균 마찰계수는 표 1과 같이 주어진다[2].

〈표 1〉 조건별 평균마찰계수

레일면의 상태	점착계수
건조하고 맑을 경우	0.25 ~ 0.30
습한 경우	0.18 ~ 0.20
서리가 내린 경우	0.15 ~ 0.18
눈이 내렸을 경우	0.15
기름기가 있는 경우	0.10
낙엽이 있는 경우	0.08



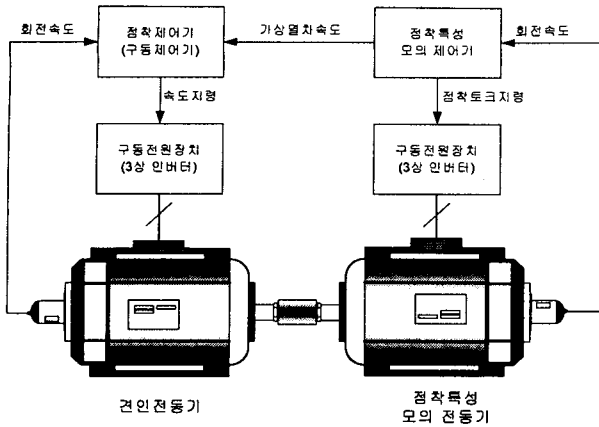
〈그림 2〉 토크대 점착특성

이런 점착특성의 실질적인 측정은 매우 어려우나 그간의 여러 실험이나 측정 또는 추정자료로부터 일반적으로 점착력은 그림2와 같은 관계가 있다[3].

2.3 공전활주 모의시험기

2.3.1 모의시험기 구성

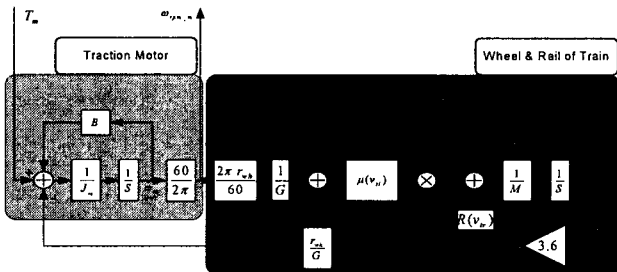
그림 3은 전기적인 공전활주 모의시험장치로 두 대의 전동기를 직렬로 연결하여 구성되며 각 전동기를 구동하기위한 구동전원부와 전동기의 토크를 제어하기 위한 각 제어기로 구성된다. 두 전동기중 견인전동기 제어부는 차량의 견인전동기를 모의하며 추진력을 발생시킨다. 우측 점착특성모의 전동기 제어부는 열차의 운행특성 및 환경조건을 고려하여 노면(레일)과 바퀴(열차의 휠) 사이의 점착력을 모의하는 부분으로 차량의 부하역할을 수행하는데, 이 부하는 점착특성 모의 전동기의 토크이다.



〈그림 3〉 공전할주 모의시험기 구성도

2.3.2 구동 시스템 제어구조

토크의 생성은 점착특성모의 제어기에서 발생하며, 실제 전동기의 속도 ω_{pm-m} 를 입력받아 차량의 운동방정식에 근거하여 요구되는 점착토크지령 T_{AE} 을 발생시킨다. 여기서 T_m 은 견인전동기의 토크지령, T_{AE} 는 점착력모의 토크지령, ω_{pm-u} 는 가상의 열차속도를 회전속도로 환산한 값이다.



〈그림 4〉 전동차 구동시스템 모델링 블록도

2.3.3 축소시스템 모델링

〈표 2〉 유도전동기 사양 및 상수

항목	철도차량	축소모델
정격출력	200[kW]	0.75[kW]
정격전압 (V_{rate})	1100[V]	230/400[V]
정격전류	130[A]	6.1/3.4[A]
정격주파수 (f_{rate})	66.5[Hz]	50[Hz]
정격속도	1945[rpm]	1435[rpm]
정격토크	1150[N·m]	5[N·m]
극수 (P)	4극	4극
모터관성 (J_m)	0.3[kg·m ²]	0.0024[kg·m ²]

실제 전동차 대비 시뮬레이터가 부담해야 하는 파라메타의 설정하기 위한 시뮬레이터 전동기가 부담하는 하중은 철도차량의 전동기당 분담 중량을 토크축소비로 환산한 값 사용

$27[\text{ton}]/1626 = 16.6[\text{kg}]$
 축중 등가 관성량을 결정하기 위해 운동에너지보존법칙을 적용하면

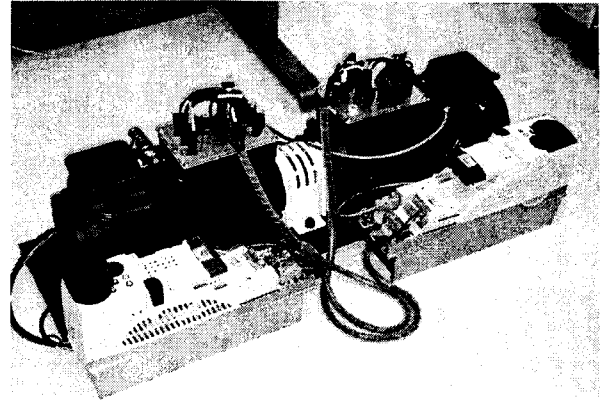
$\frac{1}{2}mv_{wh}^2 = \frac{1}{2}J_{eq}\omega_m^2$ 여기서 차량의 선속도 $v_{wh} = \omega_m \frac{r_{wh}}{G}$ 이므로 시뮬레이터에서의 축중 등가관성은

$$J_{eq} = m \left(\frac{r_{wh}}{G} \right)^2 = 10 \left(\frac{0.41}{5} \right)^2 = 0.0672[\text{kg} \cdot \text{m}^2] \text{으로 설정된다.}$$

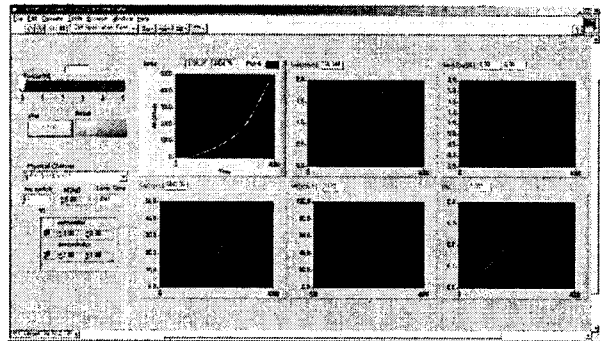
2.3.4 모의시험기 제어시스템

제어시스템은 NI의 PXI 8186 Embedded controller에 탑재된 Motion controller PXI 7350, Multifunction I/O 6040E를 입출력장치로 사용하고 유도전동기는 LEROY SOMER LSMV80L, 인버터는 Control Techniques의 SP1202을 사용하였다. 사용된 프로그램은 NI의 LabVIEW를 이용하여 프로그램 되었다. 이렇게 구성된 시뮬레이

터의 모의 성능을 확인하기 위하여 그림 2에서와 같이 일정기율기로 증가하는 토크지령을 가하고 점착특성, 슬립변화율, 열차의 속도 전동기 회전속도 등을 관측하였다. 이 결과가 그림 6에 보여진다. 그림 2에서의 토크대 점착특성의 변화를 동일하게 모의할 수 있다.



〈그림 5〉 제작된 공전할주 모의시험기



〈그림 6〉 점착특성 모의시험

3. 결 론

철도차량의 견인력은 전동기에 의해 구동되는 차륜과 레일사이의 점착력에 의해 발생된다. 최근 견인효율향상 및 전력에너지 효율적운용을 위해 차체는 경량화 하는 반면 견인부의 발생동력은 오히려 증대되었다. 따라서 공전발생의 빈도는 훨씬 높아졌다. 점착특성상 구동차륜의 구동력이나 제동차륜의 제동력이 점착력 최대치를 상회하게 되면 차륜과 레일사이에서 과도한 공전이나 활주현상이 일어나게 되는데 이렇게 발생한 과도한 공전 및 활주는 바퀴와 레일의 기계적 손상, 소음 및 차량의 진동을 유발시켜 승차감을 떨어뜨린다. 뿐만 아니라 제동시 정지거리를 증가시킨다. 더욱 중요한 점은 점착력의 저하에 의해 차량의 견인능력을 저하시킨다. 따라서 공전이나 활주가 발생했을 경우 그 공전 및 활주를 최소화하여 점착되도록 재점착 제어를 구성하거나 차륜과 레일사이에서 모래 등을 살포하여 점착력을 회복하는 등의 노력을 하여야 한다.

본 시뮬레이터는 철도차량의 운행특성(구배저항, 곡선저항, 열차중량 제동특성 등) 뿐만 아니라 철도의 설비, 결빙, 습도분포 등의 다양한 환경조건에서의 점착특성을 모의할 수 있다. 또한 활주영역의 확장에 있어서 일반 자동차에 있어서 도로노면과 타이어 간의 다양한 점착특성도 모의 시험장치에서 모의 가능하며 순시적인 점착특성의 변경이 가능하다. 이 모의장치를 통하여 열차의 재점착 제어성능 향상을 위한 연구뿐만 아니라 제동특성 시험 및 안전성 향상에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] W-S.Kim, Y-S.Kim, J-K.Kang, and S-K.Sul. "Electro-mechanical re-adhesion control simulator for inverter-driven railway electric vehicle", Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference, 2:1026-1032, 1999
- [2] 백남욱, 강경수, 김효식, 강부병. "철도차량 총서", 기전연구소, p49, 1997
- [3] Kiyoshi Ohishi, Yasuaki Ogawa, "Adhesion Control for Electric Motor Coach Based on Force Control Using Disturbance Observer", AMC2000-NAGOYA, , 323-328, 2000
- [4] Takeo Furuya, Yasushi Toyoda and Yoichi Hori. "Implementation of Advanced Adhesion Control for Electric Vehicle", AMC'96-MIE, 430-435, 1996