

휠-레일 점착 퍼지 모델에 의한
고속전철의 주행 시뮬레이션에 관한 연구

김문섭, 김동우, 신두진, 허옥열
인하대학교 전기공학과

Simulation for High Speed Trains
with Wheel - Rail Fuzzy Adhesion model

Moon Sup Kim, Dong Woo Kim, Doo Jin Shin, Uk Youl Huh
Department of Electrical Engineering, INHA University

Abstract - This paper describes a fuzzy identification model for slip - adhesion curve of High - Speed trains. The model has fuzzy inputs corresponding to rail condition and crisp inputs for train. Nonlinear function is obtained by using fuzzy outputs. Finally slip - adhesion curve is given by the function. First, Results are presented of slip - adhesion curves under the influence of changing rail condition. Second, Dynamic moving simulation by proposed fuzzy slip - adhesion model is presented. Simulation results show fine characteristics.

1. 서 론

차량 시스템 분야에서 제기되는 많은 비선형 요소 중 바퀴와 지면 사이의 관계에 의한 차량의 견인 역학은, 공통적이면서도 전체 차량 시스템에 주된 영향을 미치는 문제로 대두되어왔다. 이러한 바퀴와 지면의 물리학은 비록 자동차 산업이 형성된 이래로 지속적으로 연구되어져 온 학문이지만, 최근 산업의 발달과 더불어 나날이 발전하고 있는 진보된 차량 시스템에서 그 중요성이 재인식되고 있다. AGV(Automated Guided Vehicle) 경로 추종시의 슬립 보상이나 자동차의 TCS(Traction Control System) 최적화와 같은 분야와 특히 고속 전철과 같이 고속성과 안정성의 보장이 동시에 요구되어지는 차량 시스템에서는 반드시 고려되어져 할 요소로 주목받고 있다. 국내에서도 국책사업으로 추진하여 관련기술의 습득과 개발에 힘쓰고 있는 고속 전철 사업은 그 기술의 활용범위와 파급효과가 지대한 만큼 선발국가에서의 기술이전이 기피되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 이러한 의미에서, 그 대상을 현재 개발 중인 한국형 고속 전철로 하여 바퀴와 레일사이의 비선형 특성을 고려한 전체 열차의 주행을 시뮬레이션하고, 시뮬레이터 개발을 통한 시스템 검증이나 견인제어 혹은 제점착 제어시 활용이 가능하게 하고자 한다. 하지만 언급한 바와 같이 이러한 비선형 모델에서 오는 한계로 인하여 정확한 수치를 얻기 위해서는 다량의 계산량과 시간 지연이 요구되어지며, 또한 알려지지 않은 요소에 의한 주행 중 환경변화까지 고려한다는 것은 현실적으로 불가능하게 여겨진다. 따라서 이러한 문제를 해결하고 실제에 적용하기 위해서, 먼저 전체 고속 전철의 동력차와 동력객차의 MBU(Motor Block Unit)내의 견인 전동기에 의한 동력 발생 및 전달 부분과 객차를 포함한 전 열차를 대상으로한 차량 운동 부분으로 구분하여 모델링하고, 다시 근사한 외부환경의 상태 지식만을 가지고 적용이 가능한 바퀴와 레일사이의 퍼지 점착 모델을 제안하고, 최종적으로 임의의 조건이 주어진 상태에서 전체 주행 시뮬레이션을 수행한 후, 바퀴와 레일 사이의 상태에 의해 주도되는 주행 특성에 대해서 논하고, 그 결과에 대한 분석이 따른다. 아울러 개선되어야 할 요소와 향후 나아갈 연구 방향을 제시한다.

2. 본 론

2.1 고속 전철 모델링

2.1.1 동력 발생 및 전달 모델

철도 차량의 동력은 동력차와 동력 객차의 MBU 내 견인 전동기에 의해서 발생하는 회전력이 기계적으로 결합된 차축과 바퀴를 통하여 레일과 접촉하여 점착력을 얻음으로써 발생하게 된다. 전체 한 편성 8대의 MBU 내의 16개의 견인 전동기 중 한 개의 전동기, 구동 차축, 그리고 바퀴와 지면의 관계를 그림1과 같이 간략화하여 모델링한 후 일반적인 전동기에 대한 2차식으로 수식전개가 가능하다.

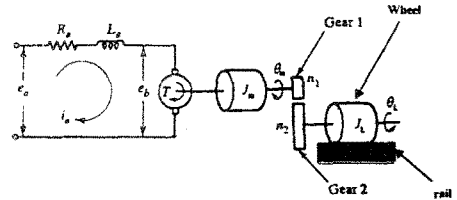


그림 1

2.1.2 차량 운동 모델

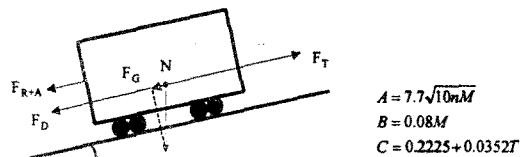


그림 2

전체 차량을 강체로 보고, 주행 중 진행 방향성분으로 차량 운동에 크게 영향을 미치는 힘의 요소들을 그림2와 같이 고려하였다. 먼저 생성된 견인력과, 구배에 의해서 발생하는 감속력 혹은 가속력, 제동장치에 의한 제동력, 주행 중에 요구되는 구름 저항력과 공기 저항력 등으로 구분하여 다음과 같이 운동방정식을 전개한다.

Wheel dynamics equation

$$F_T = M \frac{d^2 X}{dt^2} + F_{R-A} + F_G + F_D$$

$$= M \frac{d^2 X}{dt^2} + \left(A + B \frac{dX}{dt} + C \left(\frac{dX}{dt} \right)^2 \right) + Mg \sin \delta + F_D$$

M은 열차의 중량, n은 축수, T는 동력객차를 포함한 객차의 수

2.2 점착 이론 고찰

2.2.1 슬립(Slip)

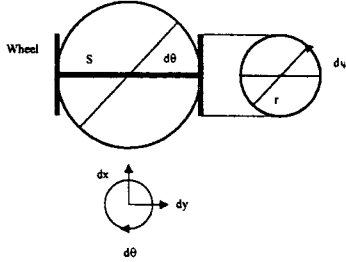


그림3 기하학적 슬립 모델

바퀴와 레일의 강성의 차이라는 물리적 특성에 의해서 필연적으로 바퀴의 속도와 실제 차체의 속도 사이에는 상대적인 속도차이가 발생하게 되며, 그림3의 기하학적 슬립 모델을 통하여 다음과 같이 슬립식을 얻는다.

$$\epsilon_s = \frac{rd\psi \cos(d\theta) - dx + sd\theta \cos(d\theta)}{rd\psi \cos(d\theta)} = \frac{rd\psi - dL}{rd\psi} = \frac{ar - V_r}{ar} = \frac{V_r - V_t}{V_r} \quad \text{in traction}$$

$$\epsilon_s = \frac{dx - sd\theta \cos(d\theta) - rd\psi \cos(d\theta)}{dx - sd\theta \cos(d\theta)} = \frac{dL - rd\psi}{dL} = \frac{V_t - ar}{V_t} = \frac{V_t - V_r}{V_t} \quad \text{in braking}$$

여기서 차축 자체의 회전 슬립을 극소값으로 가정하고, dL을 다음과 같이 정의하였다.

$$\cos(d\theta) \cong 1, \quad dL = dx - sd\theta$$

Vt는 열차속도, Vr은 바퀴 선속도

2.2.2 점착력(Adhesion effort)

차량 시스템에서 점착이란 서로 다른 물체간 표면의 맞물림으로 서로에게 힘을 전달할 수 있는 상태를 말하며, 바퀴와 레일간에 점착력의 크기는 외부 환경에 따라 변화하는 점착계수와 축중의 크기에 비례하므로 다음과 같은 표현이 가능하다. 그러한 점착력은 견인 전동기에 대한 부하토크(점착토크)로 작용하게 되며, 전체 차량에 대해서는 견인력으로 나타내게 된다.

$$F_T = \mu \times M \times g$$

2.3 퍼지 점착 모델

점착 특성 모델링 절차는 먼저 표준이 되는 점착 특성 값을 경험적으로 검증된 자료를 통하여 얻고, 그러한 자료를 이용하여 퍼지 변수를 정하고, 퍼지 규칙을 생성한다. 그 다음 곡선의 파라미터를 식별하고, 다시 미지 변수값을 산출하여 비선형 함수를 결정한다.

2.3.1 경험적 점착 특성값과 퍼지 규칙 생성

표1은 경험적으로 얻어진 자료이며, 이 자료를 바탕으

Rail condition	Maximum adhesion coefficient	Slip at max adhesion coefficient	Adhesion coefficient at slip 0.4						
				X	O	OV	W	W	D
Dry	0.315	0.09	0.245	NS	S1	CE	CE	CE	B1
Dry & Sand	0.407	0.045	0.275		S1	CE	B4	B2	B1
Water	0.251	0.15	0.2355		S1	CE	CE	CE	CE
Water & Sand	0.28	0.025	0.193	S	CE	B1	B1	B2	B2
Oil	0.22	0.055	0.21		S2	S2	S3	S2	S1
Oil & Sand	0.273	0.032	0.2345	CE	S1	S2	CE	B2	

표1

표2

로 퍼지 변수를 선정하여 생성된 퍼지 규칙 기반(rule base)이 표2이다. 퍼지 입력변수(전건부)를 rail condition, sand의 유무에 대하여 X와 Y로 두었고, 퍼지 출력 변수(후건부)를 최대 점착 계수값, 최대 점착계수가 발생하는 슬립의 값, 정상상태(슬립 0.4이상)에서의 점착 계수값에 대하여 A, B, C로 선정하였다.

2.3.2 퍼지 추론 시스템

퍼지 논리는 알려진 바와 같이 전문가의 경험을 바탕으로 자연 언어에 기초하여, 구조의 알 수 없는 변화 또는 불확실성을 갖는 시스템의 경우에 적용하기 적합하므로 rail condition에 대한 언어적 소량의 정보만을 가지고, 슬립 점착 특성 곡선의 파라미터를 식별하기 위한 방법으로 적절하며 본 논문에서 사용한 퍼지 시스템은 fuzzifier로 Gaussian과 Triangular를 사용하였고, Mamdani's minimum implication을 이용한 Minimum inference engine을 사용하였다. 또한 defuzzifier로는 Centroid method를 사용하였다.

2.3.3 최종 슬립 - 점착 특성 함수

제안하는 기본 함수의 형태와 미분한 형태는 다음과 같다.

$$y = \frac{x}{ax^2 + bx + c} \quad y' = \frac{(ax^2 + bx + c) - x(2ax + b)}{(ax^2 + bx + c)^2}$$

퍼지 출력값 A, B, C를 이용하여 미지 변수 a, b, c를 산출하면

$$c = \frac{A\left(\frac{1}{B} - \frac{1}{C}\right)}{\left(2 - \frac{A}{4} - \frac{4}{A}\right)} \quad a = \frac{c}{A^2} \quad b = -4a - \frac{c}{4} + \frac{1}{C}$$

기본 함수 형태에 위의 미지 변수를 대입하여 다음과 같은 최종 함수의 식을 얻는다.

$$y = x \left[\frac{\left(\frac{1}{B} - \frac{1}{C}\right)}{A\left(2 - \frac{A}{4} - \frac{4}{A}\right)} x^2 + \frac{4\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{B}\right)}{A\left(2 - \frac{A}{4} - \frac{4}{A}\right)} + \frac{A\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{B}\right)}{4\left(2 - \frac{A}{4} - \frac{4}{A}\right)} + \frac{1}{C} \right] x + \frac{A\left(\frac{1}{B} - \frac{1}{C}\right)}{\left(2 - \frac{A}{4} - \frac{4}{A}\right)}$$

2.4 시뮬레이션 결과

2.4.1 제안된 퍼지 모델에 의한 특성 곡선

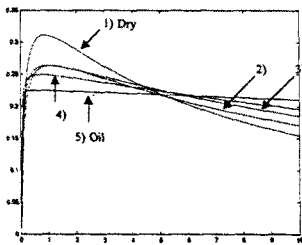
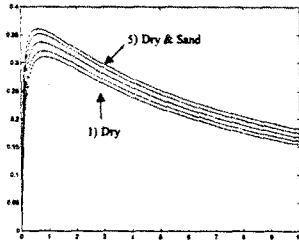
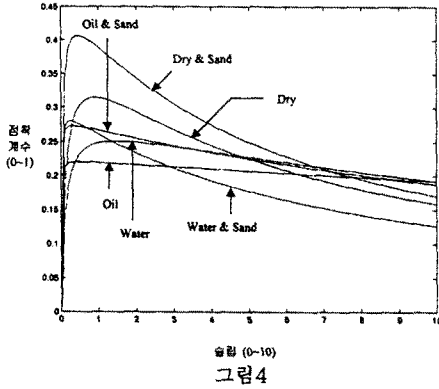
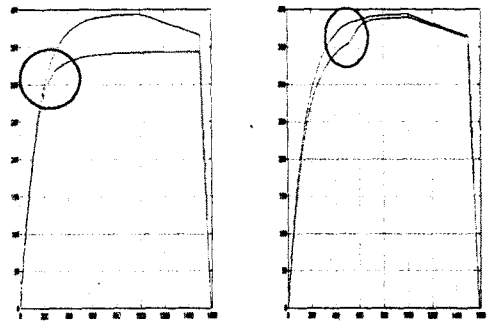
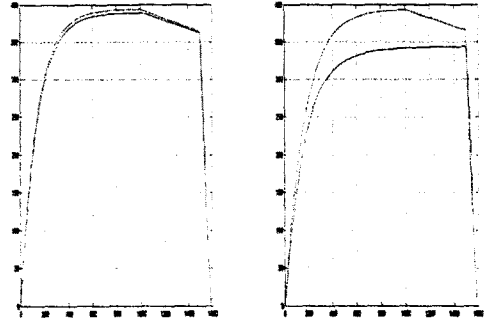


그림 4는 제안된 모델을 사용하여 각 rail condition에 대한 대표 상대시 슬립-점착 특성 곡선을 나타내고 있다 또한 그림 5와 그림 6은 한 상태에서 다른 상태로의 연속적인 변화과정을 나타낸 것이다. (1→2→3→4→5)

2.4.2 주행 시뮬레이션 결과

주행 schedule은 견인전동기에 의한 정상 가속 구간 역행모드가 0~1000초까지, 차체의 관성만으로 주행하는 타행모드가 1000~1500초까지, 그리고 제동력 분담에 의해 정상 감속하는 회생모드가 1500초~약 1600초, 전체 1600초로 설정하였고, 또한 순수한 rail condition 변화에 따른 주행 결과의 변화를 보고자, 다른 외부 요소들의 파라미터값은 정상적인 상태를 가정하고 시뮬레이션 하였다. 그림 7과 8에서 위의 곡선이 바뀌 선속도, 밀의 곡선이 열차 속도이며, 그림 8(a)는 유출된 기름에 의해 견인력 저하 특성을, (b)는 살포된 모래에

의해 견인력을 회복하는 특성을 나타냄을 알 수 있다.



3. 결 론

본 논문에서는 기존의 lookup table 형태의 단순한 모델에서 벗어나, 더 실제 가까우면서 다량의 데이터 베이스 구축 없이 연속적인 특성 곡선 생성이 가능하며 퍼지를 이용하여 시뮬레이션 중 특성 곡선 자체의 연속적인 변화를 용이하게 얻을 수 있는 새로운 슬립-점착 모델을 제안하였다. 또한 제안한 모델을 이용하여 주행 중 rail condition의 변화에 따른 고속 전철 주행 특성을 시뮬레이션하여 바람직한 결과가 생성됨을 보였다. 나아가 향후 과제로는 회전 슬립을 고려하여 더 높은 자유도를 갖는 차량 시스템으로의 확장 적용과 열차 시뮬레이터 개발, 재점착 제어 혹은 안티 슬라이드 제어 기술등에 활용할 수 있는 방법 연구등이 요구되어진다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Higashi and G. J. Klir, "Identification of fuzzy relation systems", IEEE Trans. Syst., Man, Cyber., vol SMC-14, pp. 349-355, 1984
- [2] L. R. Ray, "Nonlinear Tire Force Estimation and Road Friction Identification: Simulation and Experiments", Automatica, vol. 33, No. 10, pp. 1819-1833, 1997
- [3] V. K. Garg, R.V. Dukkupati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic press, 1984