퍼지 모델 기반 제어기를 이용한 안티 스키드 시스템의 설계
Design an Anti-Skid System using Fuzzy Model-Based Controller

이성호* 김영국** 김석원** 박진배***
Lee, Sung ho Kim, Young Guk Kim Seog Won Park, Jin Bae

ABSTRACT

In general, the wheel-skid prevention of braking system is very important in modern railway applications. This is because wheel-skid can lead to an increase in noise and vibration from wheels with flat points, as well as an increased braking distance. However conventional anti-skid control has problems because wheel adhension and skid characteristics are very difficult nonlinear systems and time consuming to accurately model. In this paper, we design a fuzzy controller using a model of relation between ahdension and braking force, we show that anti-skid fuzzy controller has a very good performance, performing better than the previous conventional controller.

---

1. 서 론

현재 철도 차량의 속도 증가 기술의 발전으로 현재 300km/h의 속도로 주행하는 고속전철의 시대가 보편화되었다. 고속전철의 운행속도 증가로 인해 주어진 거리 이내에서 열차를 안전하게 정지시키거나 원하는 속도로 감속하여야 하는 제동성능은 매우 중요한 항목이 되었다. 특히 제동시 휠과 레일사이에서 발생하는 활주현상은 소음과 진동의 원인이 되며 휠과 레일에 치명적인 손상을 초래할 뿐만 아니라 제동거리에도 영향을 미친다. 이와 같이 활주현상은 열차의 제동성능을 저하하는 요인이 되며 보다 활주예방을 위하여 효율적인 제어방법이 요구된다. 활주현상을 해석하기 위해서는 점착력과 제동력의 관계가 우선적으로 수행되어야 한다. 하지만 이는 매우 복잡하고 비선형이며 시변적인 특성을 가져 정확한 수학적인 모델을 구성하는데 어려운 부분이 많다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 문제점을 해결하기 위해 시스템의 정성적 지식을 활용하여 제어시스템을 설계할 수 있는 퍼지논리제어(FLC)를 이용하여 활주현상을 제어하는 방법을 소개한다. 먼저 활주현상이 발생할 때 변화하는 점착력의 특성을 가정하여 제동력과 점착력의 역학모델을 이용한 시뮬레이터를 개발하고 이를 국내 기술로 설계/제작된 한국형고속전철(HSR350x)에 적용시켜 시뮬레이션 결과와 시운전 시험 측정결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 다음으로 언어적인 룰에 의하여 제동실린더 압력을 변화하도록 설계된 퍼지논리제어(FLC)를 시뮬레이터에 적용하여 효율적으로 활주현상을 예방하고 제동성능과 제동거리에 미치는 영향을 살펴본다.

---

* 이성호, 비회원, 연세대학교대학원 전기전자공학과
E-mail : sshlee@krri.re.kr
TEL : (031)460-5603 FAX : (031)460-5649
** 김영국, 한국철도기술연구원 책임연구원
** 김석원, 한국철도기술연구원 책임연구원
*** 박진배, 연세대학교 교수

2. 활주 현상

2.1 활주현상역학모델

건조 상태와 같이 휠/레일 표면상태가 양호하고 최대의 점착력이 제동력에 비해 충분히 큰 경우에는 앞에서 설명한 바와 같이 점착력은 미소 미끄럼 영역에서 이용되기 때문에 감속도는 부하된 제동력으로 결정된다. 그런데 강우시나 다른 레일의 상태에 따라 점착력은 저하할 수 있으며 제동력이 최대점착력을 상회하여 활주가 발생하게 되며 점착력이 감속도에 한계를 준다. 제동력이 최대 점착력을 상회하여 활주가 발생되는 순간부터 정상속도로 회복 때의 제동력, 점착력 및 속도 관계를 fig2.1에 개념적으로 나타내었다. 다음으로 위 그림을 기초로 하여 각 영역에서의 제동력과 점착력의 특성 변화를 바탕으로 역학모델을 설계하였다.

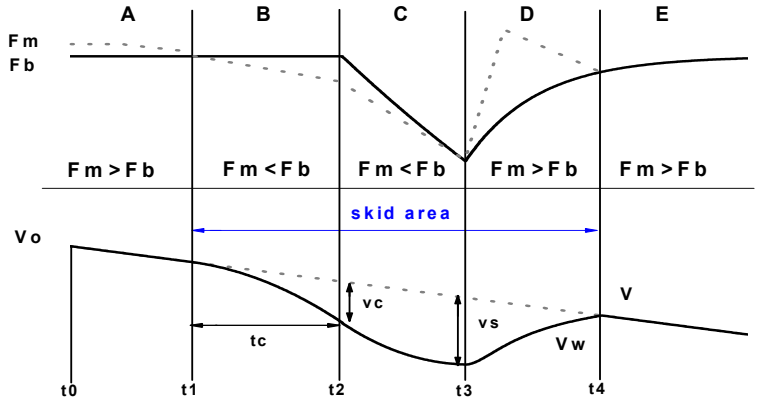


Fig.1 Relation of adhesion force and braking force during skid

Fig.1은 활주가 발생하여 회복될 때까지의 속도변화를 각 영역별로 나누어 나타내었고 영역별 활수속도는 제동력과 점착력의 관계를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

<영역 A>

$$v=v_{t_o}-\left(\frac{K_1-K_2}{m}\right)t \quad , \quad K_1,K_2 : \text{constant} \qquad (2.3)$$

<영역 B>

$F_m>F_b$서는 가 되어 휠과 레일사이 거시 미끄럼이 발생하기 시작하며 속도는 다음과 같다.

$$v_s=\frac{\alpha R}{I}t^2 \quad , \quad \alpha : \text{점착력감소계수} \qquad (2.6)$$

< 영역 C >

영역 B의 압력은 하강하며 속도는 다음과 같다.

$$P=P_0e^{-\frac{t}{T_1}} \quad , \quad v_s=v_c+\frac{R^2K_3T_1}{I}(1-e^{-\frac{t}{T_1}})-\frac{(K_2+F_{m_3})R^2}{I}t \quad , \quad K_3 : \text{constant} \qquad (2.8)$$

< 영역 D >

$$v_s=v_{s-\max}-\frac{K_5R^2T_2}{I}(1-e^{-\frac{t}{T_2}})+\frac{(K_4+K_5-K_2-F_{m_4})R^2}{I}t \quad , \quad K_4,K_5 : \text{constant} \qquad (2.10)$$

< 영역 E >

미끄럼의 회복과 제동력의 상승으로 활주속도차 v_s는 0이 되어 활주현상은 사라지고 제동력과 활주속도는 초기 압력 k로 감속하는 속도와 같아진다.

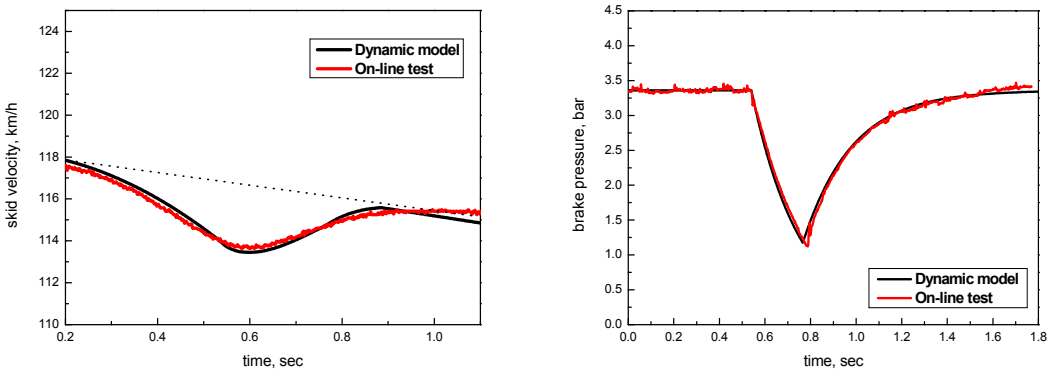
$$v_w = v = v_{t_o} - \left(\frac{K_1 - K_2}{m}\right) \times (t_a + t_b + t_c + t_d) \qquad (2.11)$$

2.2 시험 데이타와 역학모델의 비교

각 영역별로 활주속도를 제동력과 점착력의 역학모델을 통해 시뮬레이션 한 결과와 실차의 시운전 시험 데이터를 비교하여 fig.2에 나타내었다. 그리고 각 영역에 대한 시간과 영역 경계점에서의 속도를 비교한 결과를 table 2.1에 나타내었다. 각 영역별로 점착력 패턴은 일정하지 않고 변하는 값으로 가정하였다. 영역 A에서는 점착력이 제동력보다 큰 값을 유지하다 t_1에서 $F_m = F_b$ 가 되어 활주가 시작되고 영역 B에서 점착력은 제동력보다 작은 값을 가지게 된다. 영역 C에서 활주속도는 활주검지 속도차 이내로 되어서 압력은 하강하고 제동력과 점착력이 같아지는 지점에서 활주속도의 감속도는 0이 된다. t_3에서 압력을 상승하지 않고 일정속도까지 활주속도가 회복될 때까지 계속 압력을 배기시킨 다음 상승하는 케이스임을 알 수 있다. 영역 A~C 까지 소요된 시간과 경계점에서 속도는 on-line test 결과와 dynamic model의 차이가 거의 없어 역학모델이 검증됨을 확인 할 수 있다.

table 1 Comparison values of on-line test and dynamic model

	t_a	t_c	t_d	t_f	v_{t_0}	$v_w - v_c$	$v_{s-\max}$
on-line test	0.114	0.54	0.602	1.134	119.7	2.88	3.12
dynamic model	0.118	0.54	0.592	0.896	119	2.94	3.24



(a) (b)

fig.2 Relation of adhesion force and braking force during skid

3. 퍼지논리제어 기반 안티스키드 시스템

3.1 FLC 설계

위에서 설명한 실제 차량에서 사용되는 활주방지장치를 기초로 Fuzzy Logic controller(FLC)를 이용한 제어기의 control unit의 brock diagram을 그림 fig.3에 나타내었다. 네 개의 차축의 센서로부터 얻은 속도 신호 V_1, V_2, V_3, V_4를 받아서 기준속도를 계산하고 차축과의 속도차이에 활주발생여부를 판단하여 브레이크 압력을 제어한다. 활주검지속도차를 계산하기 위한 기준 속도는 아래와 같은 방법으로 정의하여 계산한다.

1) 열차 견인 시에는 네 개의 차축의 최소값을 기준속도로 정한다.
2) 열차 제동 시에는 네 개의 차축의 최대값을 기준속도로 정한다.

위와 같이 정의 된 기준속도와 다른 차축들과의 속도차이와 감속도로부터 활주가 발생여부를 예측하여 브레이크실린더의 압력을 제어할 수 있게 된다. 예로 열차가 제동 시 제동력보다 점착력이 더 커질 경우에 해당 차축의 휠 회전속도는 다른 차축에 비해 감소하게 되고 활주속도의 차 ∇V 는 증가하게 된다. 또한 감속도의 비율도 증가하게 되고 활주가 발생하고 브레이크 실린더의 압력을 배기시켜 활주현상을 해소한다. 이와 같이 센서로부터 ∇V와 β의 변화량을 측정하여 활주를 검지하고 브레이크실린더의 압력을 제어하기 위해서 FLC 방법을 이용한다. 입력과 출력은 two-input one output 의 형태로 정의하며 FLC 의 제어방법은 언어적 형태의 IF-THEN type의 룰을 적용한다. 룰의 전제가 되는 부분은 퍼지논리제어기의 입력의 언어적 변수를 포함하고 후자의 룰은 제어가 취하는 출력의 언어적 변수를 포함한다. 이러한 언어적 변수의 값은 소속함수에 의해 정의된 퍼지 집합의 형태로 표현된다.

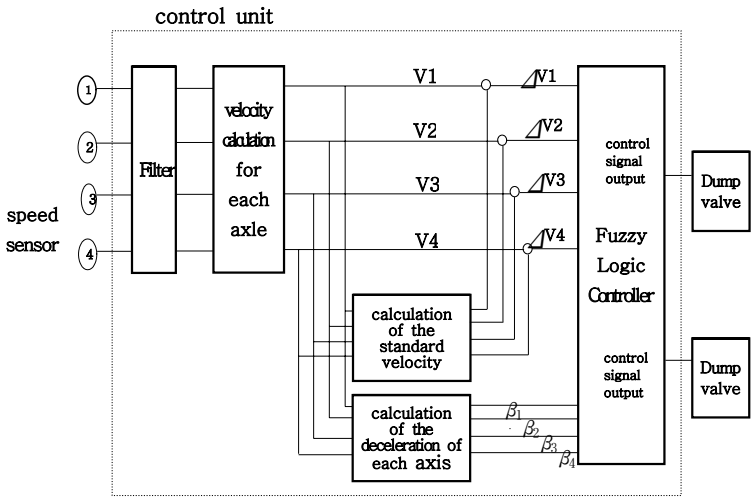


fig.3 Block diagram of control unit

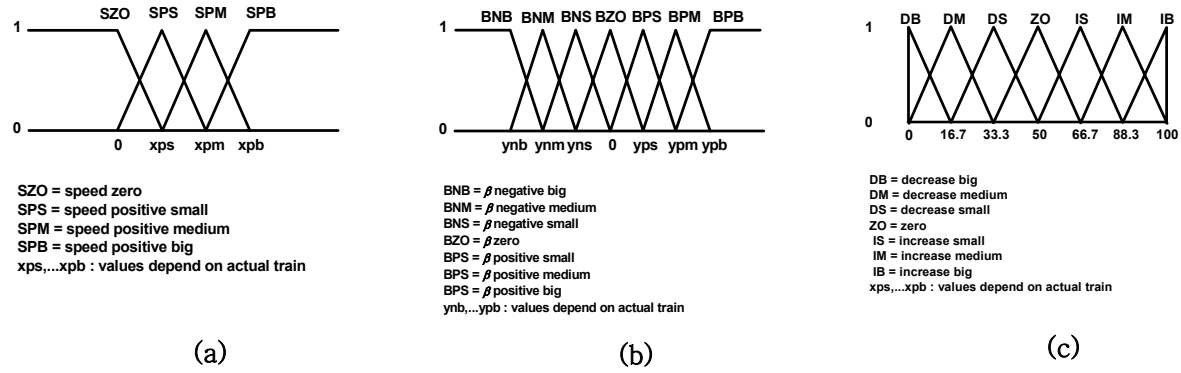


fig.4 input and output membership function
(a)velocity (b)deceleration (c)brake pressure

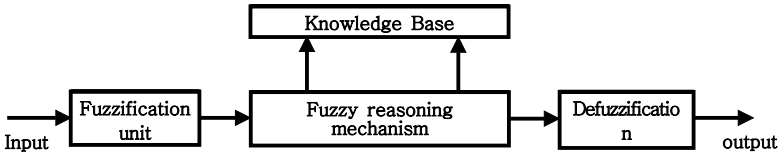


fig.5 fuzzy logic controller block diagram

제안된 FLC 시스템의 입력과 출력에 관한 퍼지 집합의 소속함수를 그림 fig.4에 나타내었다. 소속함수는 각각 영역에서 Triangular shapes 형태로 하였으며 그 결과로 fuzzification 과 defuzzification 과정에서 계산을 간단하게 하였다. 각 영역별로 단계적인 출력값을 가지기 위해 각 소속함수들은 다른 overlap을 가지게 구성하였다. 출력인 활주상태는 0에서 100까지 범위의 수학적 값으로 출력되며 이는 목표 압력의 퍼센트로 정의하여 브레이크 압력을 제어한다. 활주가 발생한 후 속도와 감속도 변화에 따른 활주방지 FLC 시스템의 구조를 fig3.3에 나타내었다. 활주방지 FLC 시스템의 입력은 ∇V와 β로 각각 정의되고 출력은 브레이크실린더의 압력을 감소, 유지, 상승하는 조건을 만족하는 Dump valve의 동작 시간을 정해주는 활주상태로 표현하였다. 추론방법은 비교적 계산방법이 간단한 max-min 추론방법을 사용하였으며 Defuzzification Interface는 center of gravity 방법을 사용하였다.

$$y^* = \frac{\int_{\nabla} y \cdot m_{B'}(y)dy}{m_{B'}(y)dy} \qquad (2.12)$$

3.2 시뮬레이션

fig.6에 활주방지 FLC와 실차 시운전 시험데이타를 비교하였다. 2장에서 설정한 각 영역의 경계점에서의 점착력을 추론할 수 있으므로 감속도가 0이 되는 지점은 제동력과 점착력이 같아지는 지점이며 재활주가 발생하지 않는 이상 활주속도가 회복시에는 점착력이 제동력보다 큰 값을 유지한다. 따라서 활주방지 FLC는 센서로부터 속도와 감속도를 입력으로 rule-base에 따라서 출력의 브레이크 압력을 단계적으로 제어하는 형태를 보인다.

이에 비해 on-line test 결과는 제동력과 점착력이 같아지는 경계점에서도 계속 하강하여 제동력이 작아지며 활주속도는 열차의 관성력에 의해서 자연 점착이 되며 안정속도이내의 값이 되면 압력을 상승시키는 패턴을 보인다. 이러한 제어방법은 제동력의 손실을 가져와 제동거리에도 영향을 미치게 된다. fig.7는 두 가지 제어방법에서 일어나는 제동력의 손실을 보여준다.

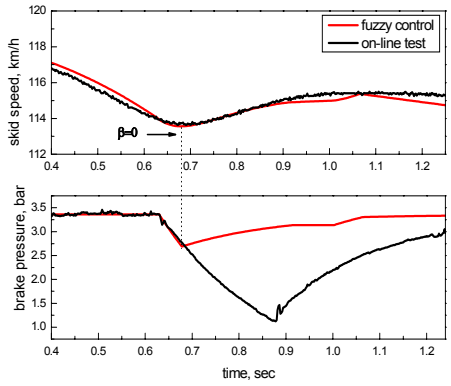


fig.6 comparison of anti skid FLC and on-line test

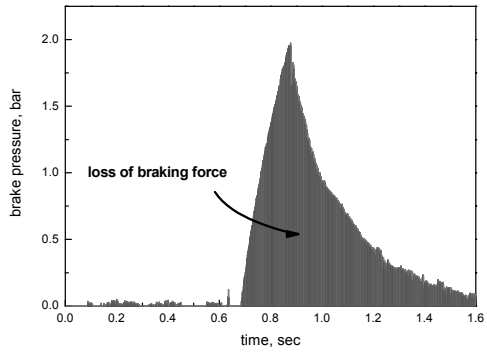


fig.7 loss of braking force

5. 결 론

본 논문에서는 철도 차량의 제동성능의 특성에 대하여 살펴보고 활주발생시 제동력과 점착력의 역학 모델을 제시하였으며 경계점에서 추정된 점착력을 이용하여 활지방지 FLC를 적용하여 제동력의 손실을 줄이는 제어기를 설계하였다. 2장에서 제동력과 점착력의 역학 모델에 기초한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 활주발생시 각 영역에서 대략적인 점착력의 추정이 가능한 것을 보였다. 3장에서 비선형성이 강한 시스템에서 시스템의 정성적 지식을 기초로 한 활주방지 FLC를 설계하였고 4장에서는 FLC 시뮬레이션 결과와 실차의 시험 데이타의 결과를 통하여 활주방지 FLC가 제동력의 손실을 줄일 수 있는 결과를 보였다.

참고문헌

1."Adhesion force between rail and wheel in wheel slipping in railway rolling stocks and its effective use,hasegawa I, norimichi K, yamazaki H, Japanese Machinery Association

2."Electric motor drives and control", Sen P.C ,IEEE Trans vol37,no6, pp562-575

3."Comparative study of Proportional-integral, slidign mode and fuzzy logic controllers for power conberters", IEEE conf. Rec. pp1651-1665

4."Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller, part 1",C.C.Lee IEEE Trans, Man and Cybernetics, vol 20, pp419-435

5."Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller, part 2",C.C.Lee, IEEE Trans, Man and Cybernetics, vol 20, pp419-435

6.“A Fuzzy Logic Based Anti-Skid Control System for Railway Applications", 1988, second international conference on knowledge-based intelligent electronic system

7."New anti-skid control system applying fuzzy control technique", Shiomi.S, STECH Cnof.Record pp218-222

8."Adhesion force and skid control at braking", Seigo UCHIDA, RTRI REPORT vol. 15,no 5

9."Appropriate brake control based on adhesion characteristics" Seigo UCHIDA, RTRI REPORT vol. 14,no 5