차세대전동차 대차단위 제동시스템 알고리즘에 관한 연구
A Study on Algorithm of Bogie Unit Braking System

김길동* 이한민** 박성환***
Kim, Gil Dong Lee, Han Min Park, Sung Hwan

ABSTRACT

In the braking process of rolling stocks, the equivalent braking force is applied to the all bogies. However, the load applied to the front and rear bogie are different in the actual commercial traveling. In the case, since the different slip situation is occurred in each bogie, it is essential to use the independent anti-slip control per bogie unit in order to reduce the loss of braking force. In this paper, the algorithm about bogie unit braking is proposed and verified.

1. 서론

대차단위 제동시스템은 각 대차에 인가되는 서로 다른 하중에 능동적으로 대응하기 위하여 각 대차당 브레이크 제어장치를 배치하여 제동 응답성을 향상시킨 새로운 방식의 제동시스템으로, 기존 제동시스템에 비하여 제동시간이 단축되는 우수한 제동성능을 나타낸다. 승객의 편중과 제동 시 발생하는 수직하중변화로 인해서 차량의 앞, 뒤 대차에 인가되는 하중이 다르게 적용될 수 있으며, 각 대차에 인가되는 하중변화에 능동적으로 대응하는 효과가 있다. 대차단위 제동시스템은 앞, 뒤 대차 각각에 제어기를 사용하여 제동장치를 제어한다. 또한, 하나의 제어기가 고장을 일으켰을 때, 주변의 다른 제어기가 Fail-safe 할 수 있는 매우 신뢰성 높은 신개념의 제동시스템이다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 대차단위 제동시스템의 적용을 위한 제어알고리즘 연구를 수행한다.

2. 철도차량 제동시스템의 불확실성

철도차량 공기압 시스템은 공기의 압축성으로 인한 비선형성 및 실제 점착계수의 추정 시 발생하는 외란 및 잡음의 영향과 레일 조건의 변화, 철도차량 시스템의 파라미터인 차량의 하중, 제동 캘리퍼의 탄성변형 및 제동 디스크와 패드 사이의 온도 상승 및 제동 디스크의 마모 및 이물질 유입에 의한 마찰력의 변동, 제동 시스템의 제동자와 제동륜의 마찰계수 변동 등의 철도차량 제동 시스템의 불확실성 및 외란의 영향을 고려하였을 때, 강인 제어 기법이 사용되어야 한다. 본 연구에서는 대차단위 제동시스템의 활주방지 제어를 위한 적응슬라이딩모드 제어기의 적용을 제안하였다.

나. 적응슬라이딩모드 제어

(1) 최대점착력 제어를 위한 제동알고리즘 설계

최대점착력 제어를 위해 적응슬라이딩모드 제어를 제안하며, 하중변화 및 외란에 대한 강인성 확보와 시스템 파라미터의 변동에 대한 적응을 기대할 수 있다. 그림 1은 적응슬라이딩모드 제어의 블록다이어그램을 나타낸다.

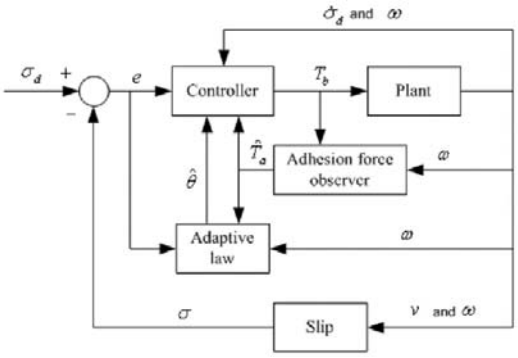

그림 1. 적응슬라이딩모드 제어의 블록 다이아그램

슬라이딩모드 제어법칙은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{T}_b = \frac{J}{r}\left\{\dot{\sigma}_d + \left(\frac{1}{rM_n} + \frac{r}{J}\right)T_m - \frac{rB_n}{J}\omega + \hat{\theta}^T\phi + pe\right\} + Ds + Ksgn(s) \quad (1)$$

추정된 브레이크 토크에 대한 식을 통해 식 (2)를 유도할 수 있다.

$$\dot{V} = -Ds^2 - Ksgn(s) + \tilde{\theta}^T\left(s\phi - \frac{1}{k}\dot{\hat{\theta}}\right) \quad (2)$$

식 (2)에서 리아푸노프 안정도를 만족하는 갱신법칙을 식 (3)과 같이 유도할 수 있다.

$$\dot{\hat{\theta}} = ks\phi \quad (3)$$

(2) 시뮬레이션을 통한 적응슬라이딩모드 제동알고리즘의 검증

설계된 적응 슬라이딩 모드 제동알고리즘을 적용하고 차체, 휠 동역학 모델식, 공기압 제동 시스템의 동역학 모델식과 하중 및 초기속도의 영향을 고려한 점착력 모델식인 빔모델식을 이용하여 철도차량의 제동성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

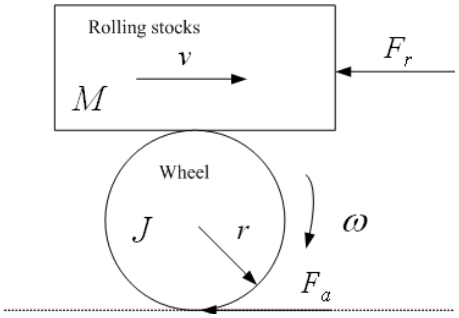

그림 2. 1/4 철도차량 모델

본 절은 기존의 PI제어기법에 대한 적응 슬라이딩 모드 제어기법의 우수성 검증이 목표이기 때문에 철도차량의 차체 및 바퀴에 대한 수학적 모델식은 그림 2에 나타낸 바와 같이 간단한 1/4차량 모델식을 고려하였다.

그림 2에 나타낸 1/4 철도차량의 동역학 모델식과 바퀴의 동역학 모델식은 식 (4)와 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$M\dot{v} = -F_a - F_r \quad (4)$$

$$J\dot{\omega} = T_a - T_b - T_d \quad (5)$$

$T_a = rF_a$와 $T_b = rF$ (F는 제동력) 그리고 T_d는 각각 점착 토크, 제동 토크, 외란 토크를 나타낸다. 또한, J와 r은 바퀴의 관성과 반경을 나타내고 M과 F_r은 철도차량의 질량과 주행저항을 나타낸다. 일반적으로 주행저항력은 이론식보다는 실험에 근거하여 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{ar} = 0.77\sqrt{mM} + 0.008Mv + (0.0225 + 0.00352T)v^2 \tag{6}$$

한편, 본 과제에서는 식 (4) 및 식 (5)에서 F_a로 표현되는 점착력에 대한 모델식으로 식 (7)의 하중 및 제동 초기속도를 고려한 빔 모델식을 사용하였다.

$$F_a = \frac{1}{2}C_x\lambda w l_h^2 + \frac{n+1}{n}\frac{2^n F_z \mu_d}{l^{n+1}}\left[\left(\frac{l}{2}\right)^n (l - l_h) - \frac{1}{n+1}\left\{\left(\frac{l}{2}\right)^{n+1} - \left(l_h - \frac{l}{2}\right)^{n+1}\right\}\right] \tag{7}$$

철도차량의 제동성능을 검증하기 하기 위하여 초기 속도 100 km/h로 달리던 차량에 제동력을 인가한 것으로 가정하였다. 실차 실험과 가장 근접한 환경을 고려하기 위하여 주행 저항과 제동 시 발생하는 수직 하중변화, 레일의 상태변화를 고려하였다. 특히 레일의 상태가 건조 상태에서 습윤 상태로 변화하는 경우를 컴퓨터 시뮬레이션에 반영하였다. 즉, 레일 조건은 25초에서 건조 상태에서 습윤 상태로 변화하고, 습윤 상태의 점착계수 값은 건조 상태의 최대 점착계수 값에서 50%감소하는 조건으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 하중은 25초에서 1.5배로 증가하는 것으로 가정하였다.

그림 3 적응슬라이딩모드 제어와 PI 제어를 이용한 열차와 바퀴의 속도

그림 4 적응슬라이딩모드 제어와 PI 제어를 이용한 제동 거리

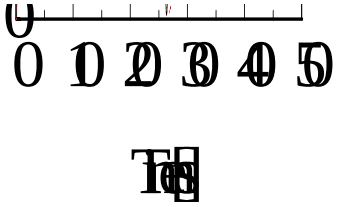

그림 5 적응슬라이딩모드 제어와 PI 제어를 이용한 제동 토크

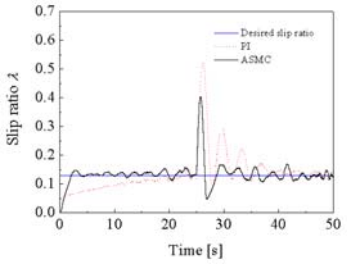

그림 6 적응슬라이딩모드 제어와 PI 제어를 이용한 슬립률 추종성능

적응슬라이딩모드 제어알고리즘의 우수성을 증명하기 위해 PI 제어와 적응슬라이딩모드 제어를 이용한 활주방지 제어결과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 그림 3은 적응슬라이딩모드 제어와 PI 제어를 이용한 경우 각각에 대한 열차와 바퀴의 속도를 나타낸다. 그림 3, 4에 나타낸 바와 같이 PI 제어에서 5km/h로 감속하는데 소요되는 제동시간은 약 58.6초, 제동거리는 약 671m인 반면 적응슬라이딩모드 제어에서는 제동시간은 약 53.2초 소요되고, 제동거리는 약 560m이다.

그림 5는 적응슬라이딩모드 제어와 PI 제어 시 제동토크를 나타낸다. 제동시간 동안 소비되는 제동에너지는 그림 5의 제동토크를 나타내는 그래프 아래 면적을 시간에 대해 적분하여 계산할 수 있으며 PI 제어의 경우 1.74×10^{7}N□m이고, 적응슬라이딩모드 제어의 경우는 1.68×10^{7}N□m이다. 따라서 활주방지제어에 적응슬라이딩모드 제어를 사용하면 비교적 적은 제동 에너지 소비로 제동 시간과 거리를 효율적으로 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한 적응슬라이딩모드 제어는 그림 6에 나타낸 바와 같이 기준 슬립률 추종성능을 고려할 때도 효과적이다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 철도차량 제동시스템의 불확실성에 대해 PI 제어는 기준 슬립률을 추종하지 못하는데 반해 적응슬라이딩모드 제어는 슬립률을 설정된 기준 슬립률 근처에서 유지함을 확인할 수 있다.

(3) 대차단위 제동시스템에 대한 적응슬라이딩모드 제동알고리즘의 적용

차체, 바퀴의 동역학 모델식과 공기압 제동 시스템의 동역학 모델식 및 하중과 제동초기속도를 동시에 고려한 빔 모델식을 이용하고 제안한 적응슬라이딩 모드 제동알고리즘을 적용하여 차량단위 제동시스템 및 대차단위 제동시스템에 대한 철도차량의 제동성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 비교하였다. 철도차량의 제동성능을 검증하기 하기 위하여 초기 속도 100 km/h로 달리던 차량에 제동력을 인가한 것으로 가정하였다. 실차 실험과 가장 근접한 환경을 고려하기 위하여 주행 저항과 제동 시 발생하는 수직 하중변화, 레일의 상태의 변화를 고려하였다. 특히 레일의 상태가 건조한 상태에서 습윤상태로 변화하는 상황을 컴퓨터 시뮬레이션에 반영하였다. 즉, 레일 조건은 20초에서 건조한 상태에서 습윤상태로 변화하고, 습윤상태의 점착계수는 건조한 상태의 최대 점착계수의 50%감소하는 조건으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

(가) 차량단위 제동시스템

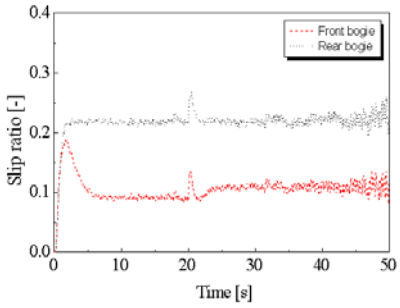

그림 7 차량단위 제어를 통한 앞/뒤 대차의 기준 슬립률 추정성능

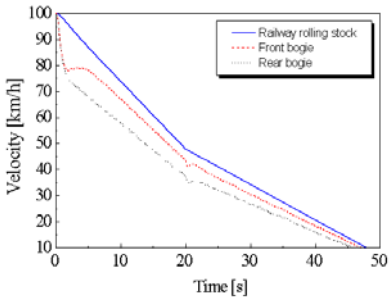

그림 8 차량단위 제어를 통한 철도차량의 제동성능(감속시간)

그림 7은 차량단위 제어를 이용하여 앞, 뒤 대차의 슬립률 제어를 한 결과이다. 목표 슬립률은 앞쪽 대차는 0.18이고 뒤쪽 대차는 0.21이다. 뒤쪽 대차는 최대 점착력을 유지할 수 있도록 슬립률 추종이 만족스럽게 이루어지나 앞쪽 대차는 목표 슬립률을 만족시키지 못하는 것을 알 수 있다. 이러한 목표 슬립률을 만족시키지 못하는 경우 최대 제동력을 얻을 수 없는 결과를 가져온다. 그림 8은 차량단위 활주방지 제어를 수행한 결과를 나타낸다. 그림 38에서 철도차량의 속도가 10 km/h까지 감속하는데 걸리는 제동시간은약 47초가 소요됨을 확인할 수 있다. 또한, 10 km/h로 감속되는 시점까지의 제동거리는 약 640m 인 것을 그림 9에서 확인 할 수 있다.

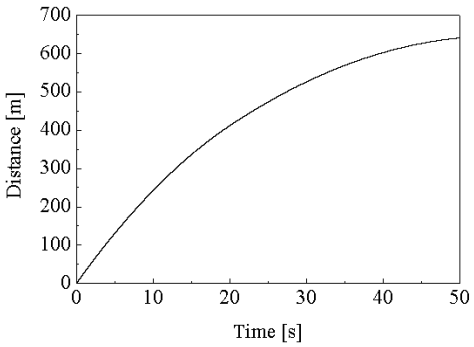

그림 9. 차량단위 제어를 통한 철도차량의 제동성능(제동거리)

(나) 대차단위 제동시스템

그림 10은 대차단위 제어를 이용하여 각 대차 별로 활주방지 최대 점착력 제어를 수행한 결과이다. 대차단위 제어 시스템을 적용한 결과 각 대차 별로 목표 슬립률 성공적으로 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 11에 나타낸 바와 같이 차량의 속도가 10 km/h까지 감속하는데 소요되는 제동시간은 43초 이다. 또한, 그림 12에 나타낸 바와 같이 제동거리는 10 km/h로 감속되는 시점까지 약 591m 이다.

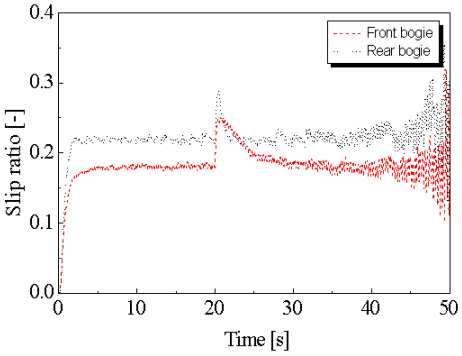

그림 10. 대차단위 제어를 통한 앞/뒤 대차의 기준 슬립률 추정성능

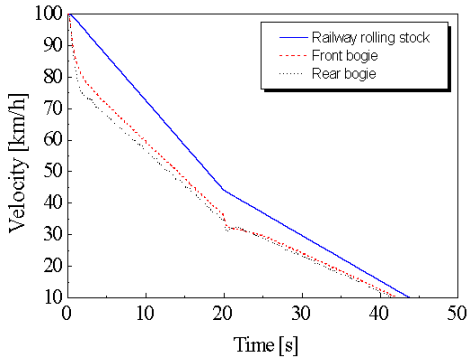

그림 11. 대차단위 제어를 이용한 철도차량의 제동성능(감속시간)

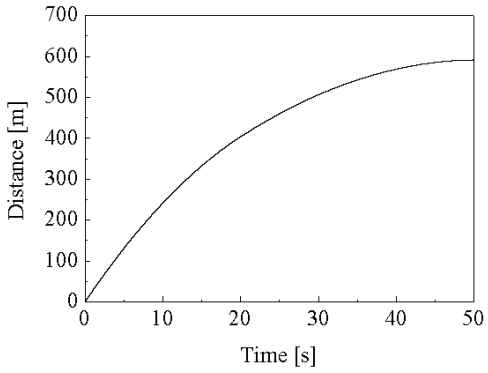

그림 12. 대차단위 제어를 이용한 철도차량의 제동성능(제동거리)

6. 결론

대차단위 제동시스템은 대차 별로 활주방지 최대 점착력 제어를 수행할 수 있으므로 기존의 철도차량 제동방식인 차량단위 제동방식보다 제동시간 단축 및 이에 따른 제동거리를 단축시킬 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보였다. 차량단위, 대차단위 제어의 제동특성을 비교하기 위하여 빔 모델을 이용하여 초기속도와 하중변동을 동시에 고려하였고, 철도차량의 차체, 휠 동역학 모델식 및 공기압 제동 시스템의 동역학 모델식을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 적응 슬라이딩 모드 제어기를 이용하면 철도차량 제동시스템의 불확실성 및 파라미터 변동에도 강인한 활주 방지 제어를 수행할 수 있으며 대차단위 제동이 차량단위 제동보다 제동성능이 우수함을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Tomoki Watanabe and Michihiro Yamashita, "Basic study of anti-slip control without speed sensor for multiple motor drive of electric railway vehicles," Proceedings of the Power Conversion Conference, Vol. 3, April, 2002, pp. 1026~1032.

[2] Satoshi, Kadowaki, Kiyoshi, Ohishi, Shinobu Yasukawa, Takashi Sano., "Anti-skid Re-adhesion control Based on Disturbance observer considering Air brake for electric commuter train," Advanced Motion Control, 2004. The 8th IEEE International Workshop Advanced Motion Control, March, 2004, pp. 607 ~ 612.

[3] Shirai, S., "Adhesion Phenomena at High-Speed Range and Performance of an Improved Slip-dectector," Quarterly Reports, Railway Technical Research Institute, Vol. 18, No. 4, 1977, pp. 189~190.