

차세대전동차 대차단위 제동시스템 점착력 모델링에 관한 연구

김길동, 이한민, 박성환
 한국철도기술연구원, 한국철도기술연구원, 부산대학교

A Study on Adhesion Force Modeling of Bogie Unit Braking of Advanced EMU

Gildong Kim, Hanmin Lee Sunghwan Park
 KRRI, KRRI, Pusan National Univ.

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 mathematical modeling about bogie unit braking is proposed and verified.

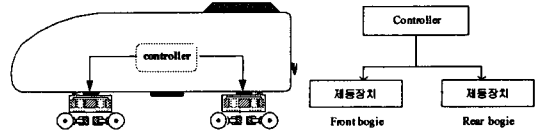


그림 1. 차량단위 제동시스템의 계략도

대차단위 제동시스템의 그림 2와 같이 앞, 뒤 대차 각각에 제어를 사용하여 앞, 뒤 대차의 제동장치를 제어함으로써 양쪽 대차 모두 최대점착력을 확보할 수 있도록 슬립률 제어를 수행할 수 있다. 또 하나의 제어기가 고장을 일으켰을 때, 주변의 다른 제어기가 페일세이프(fail-safe)할 수 있는 장점을 가지므로 철도차량 제동시스템의 안전성을 향상시킨다. 따라서 대차단위 제동시스템을 철도차량의 제동시스템으로 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

1. 서 론

대차단위 제동시스템은 각 대차에 인가되는 서로 다른 하중에 능동적으로 대응하기 위하여 각 대차 당 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 제어를 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 제동에 대하여 모델링을 수행하고 이를 검증하는 연구를 수행한다.

2. 제동시스템 비교

차량단위 제동시스템은 그림 1에 나타낸 바와 같이 하나의 제어기로 앞, 뒤 대차의 제동장치를 제어함으로써 차량에 필요한 제동력을 발생시킨다. 하중변동이나 점착계수의 변화가 없다고 가정하면 하나의 제어기로 앞, 뒤 대차 모두 최대 점착력을 유지할 수 있는 슬립률 제어가 가능하지만 실제로는 승객의 편중이나 제동 시 차량에 인가되는 수직하중 변동으로 점착력 특성이 달라질 수 있다. 이러한 상황에서는 하나의 제어기를 사용하여 양쪽 대차 모두 최대 점착력을 확보할 수 있는 슬립률 제어를 수행할 수 없다.

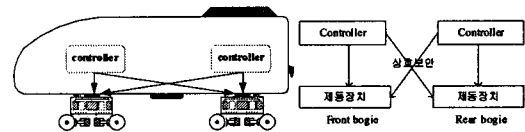


그림 2. 대차단위 제동시스템의 계략도

3. 대차단위 제동시스템 수학적 모델링

자동차의 점착력 모델링에 사용되는 빔 모델과 일반적 인 마찰이론을 철도차량의 점착력 시스템에 적용하여 마찰의 동적거동을 표현할 수 있는 다이내믹 모델을 이용하여 전 슬립영역에 대해 제동점착력과 슬립률 간의 관계를 표현할 수 있는 점착력의 수학적 모델링을 수행하였다. 철도차량의 점착력은 바퀴와 레일 사이의 마찰력으로 정의되며 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$F_a = \mu(\lambda)N \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{v - r\omega}{v} \tag{2}$$

여기서, F_a 는 점착력, $\mu(\lambda)$ 는 점착계수, λ 는 슬립률, N 은 수직하중, v 는 철도차량의 속도이고, ω 와 r 은 각각 바퀴의 각속도와 반경을 나타낸다. 점착력은 식 (1)과 같이 점착계수의 변화에 따라 변하고, 점착계수는 슬립률, 레일 환경, 수직하중 및 초기 제동속도에 영향을 받는다. 일반적으로는 슬립률이 0.1에서 0.3 사이에 있을 때 점착계수가 최대값을 가진다.

가. 제동 초기속도를 고려한 점착력 모델

(1) 빔 모델 (beam model)

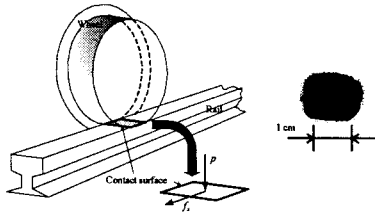


그림 3. 바퀴와 레일 사이의 간략화된 접촉 모델

빔 모델은 자동차에서 주로 적용되고 있는 모델식으로 전 슬립 영역에 대하여 점착력을 표현 할 수 있는 식이다. 그림 3에 나타난 바와 같이, 바퀴와 레일 사이의 접촉면의 형상은 직사각형 형상으로 간략화 될 수 있다. 그림 4는 빔 모델에서 접촉면에서의 바퀴와 레일 사이에 접하는 압력을 나타낸다.

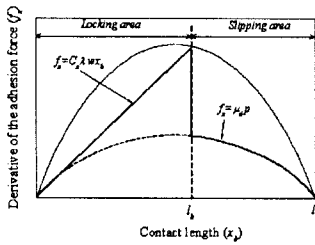


그림 4. 바퀴와 레일의 접촉면에서의 수직하중 계수 분포

그림 4에 나타난 접촉면에서의 압력분포에 대해 바퀴와 레일사이의 점착력은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$F_a = \frac{1}{2} C_x \lambda w l^2 \left(1 - \frac{K_x \lambda}{3 \mu_{\max} N} \right)^2 + \frac{1}{2} K_x \lambda - \frac{3}{2} N a (v - r \omega) - \frac{1}{2} \mu_{\max} N \left\{ 1 - 3 \frac{N a (v - r \omega)}{K_x \lambda} \right\} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{2 K_x \lambda}{3 \mu_{\max} N} \right)^3 \right\} \quad (3)$$

그림 5는 빔 모델을 이용하여 초기 제동속도 변화에 대한 점착계수의 변화를 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과를 나타낸다. 그림 15에 나타난 바와 같이, 빔 모델은 초기 제동속도에 대한 점착력 계수의 변화를 표현할 수 있다.

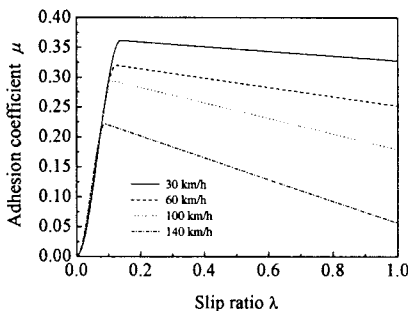


그림 5. 빔 모델을 이용한 초기 제동속도에 따른 점착계수

(2) 다이내믹 모델 (Dynamic model)

다이내믹 모델은 마찰이론을 이용한 것으로 그림 16에 나타난 바와 같이 바퀴와 레일 사이의 접촉면을 수많은 강모로 고려한 모델이다.

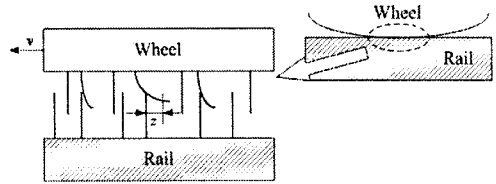


그림 6. 바퀴와 레일 사이의 강모 모델

강모에 대한 스트레스-스트레인(stress-strain) 관계를 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dF_a}{dx} = \alpha \{ 1 - h(\sigma) F_a \} \quad (4)$$

여기서, F_a 는 점착력, α 는 점착력 계수, x 와 σ 는 슬립 거리와 속도이다. 강모가 평균적으로 휘는 정도는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$h(\sigma) = \frac{\beta}{\gamma - \sigma} \quad (5)$$

여기서, β 와 γ 는 양의 튜닝 파라미터이다. 파라미터 α 는 점착력 모델에서 슬립영역의 시작점을 조절할 수 있는 파라미터이며, β 와 γ 는 슬라이딩 영역의 기울기와 최대점착계수의 크기를 조절할 수 있는 파라미터이다. 강모가 평균적으로 휘는 정도를 내부 상태 z 로 정의하면, 점착력 F_a 를 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_a = \alpha z \quad (6)$$

식 (4)에서 체인룰(chain-rule)을 이용하면 점착력의 길이에 대한 미분을 식 (7)과 같이 시간에 대한 미분으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dF_a}{dt} = \frac{dF_a}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dF_a}{dx} \sigma = \alpha \{ 1 - h(\sigma) F_a \} \sigma = \alpha \frac{dz}{dt} \quad (7)$$

식 (6), (7)로부터 내부 상태 z 를 유도해 내면 식 (8)과 같다.

$$\dot{z} = \sigma \{ 1 - h(\sigma) F_a \} = \sigma \{ 1 - \alpha h(\sigma) z \} \quad (8)$$

그림 7은 다이내믹 모델을 이용하여 초기 제동속도 변화에 대한 점착계수의 변화를 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과를 나타낸다. 그림 17에 나타난 바와 같이, 다이내믹 모델은 초기 제동속도에 대한 점착력 계수의 변화를 표현할 수 있다.

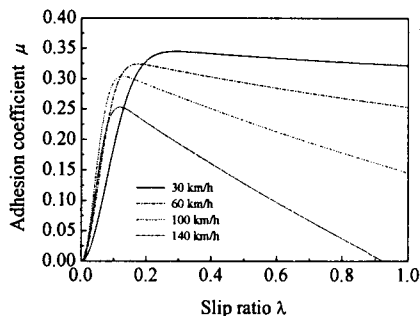


그림 7. 다이내믹 모델을 이용한 초기 제동속도에 따른 점착계수

(3) 실험 및 시뮬레이션을 통한 점착력 모델의 증명

점착력 모델식을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 점착력 시뮬레이션 결과를 도출하기 위한 철도차량의 파라미터는 일본 JR 실차 파라미터를 사용하였다. 그림 8~11은 각각 초기 제동속도 140 km/h, 100 km/h, 60 km/h 그리고 30 km/h 일 경우에 슬립률과 초기 제동속도에 따른 점착 계수의 실험 및 앞서 제시한 두가지 점착력 모델을 사용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 8~11에서 Δ 는 최대 점착 계수, \circ 는 평균 점착 계수, \times 는 최소 점착 계수를 의미한다. 또한 점선과 실선은 각각 빔 모델과 다이내믹 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과이다. 그림 8~11에 나타난 바와 같이 실험에 의해 도출된 점착 계수값의 최대치와 최소치사이에는 다소 큰 차이를 나타낸다. 그러나 점착 계수의 평균값은 두 가지 점착력 모델중 다이내믹 모델이 시뮬레이션 결과와 좀더 일치하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있다.

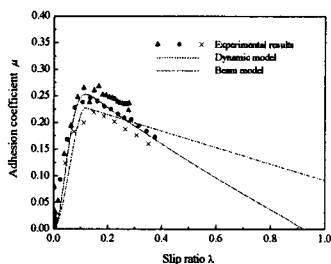


그림 8. 초기 제동 속도에 따른 점착계수 실험 및 시뮬레이션 결과 (초기 제동 속도 $v_0 = 140$ km/h)

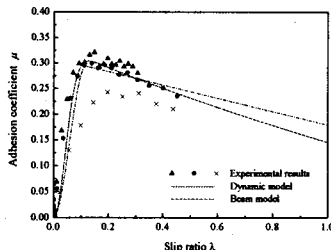


그림 9. 초기 제동 속도에 따른 점착계수 실험 및 시뮬레이션 결과 (초기 제동 속도 $v_0 = 100$ km/h)

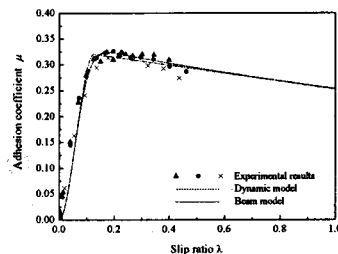


그림 10. 초기 제동 속도에 따른 점착계수 실험 및 시뮬레이션 결과 (초기 제동 속도 $v_0 = 60$ km/h)

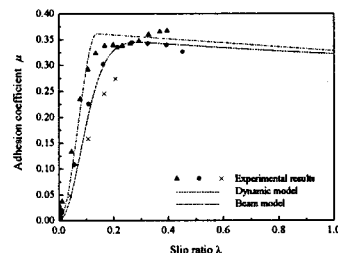


그림 11. 초기 제동 속도에 따른 점착계수 실험 및 시뮬레이션 결과 (초기 제동 속도 $v_0 = 30$ km/h)

4. 결 론

빔 모델은 점착력에 대한 동역학을 고려하지 않고, 단순히 철도차량 바퀴와 레일사이 접촉면에서의 압력 분포를 이용한 모델식이다. 이에 반해 다이내믹 모델은 철도차량의 바퀴와 레일간의 접촉면을 수많은 강모로 이루어졌다는 가정하에 강모의 동적거동을 해석한 모델식으로 점착력에 대한 동역학을 고려하나 모델이다. 초기 제동속도에 따른 점착계수 실험 데이터를 이용하여 본 과제에서 제시한 두 가지 모델의 타당성을 검증한 결과, 그림 8~11에 나타난 바와 같이 다이내믹 모델이 실제 점착력 실험 데이터와 유사함을 확인할 수 있다.

[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-detect or," Quarterly Reports, Railway Technical Research Institute, Vol. 18, No. 4, 1977, pp. 189~190.