

공압모델이 포함된 철도차량 제동 ASCU 시뮬레이션 Simulations for an ASCU of a Train Brake including a Pneumatic Model

김호연 · 강철구

Ho-Yeon Kim and Chul-Goo Kang

Key Words: ASCU(활주방지제어장치), Brake System(제동시스템), Rolling Stock(철도차량), Pneumatic Model(공압모델)

Abstract: Wheel skids may occur during train operations due to low adhesion at the wheel-rail contact point abnormally, and the skids, in turn, result in flats appearing on the wheels, which affect safety and ride comfort significantly. Thus, anti-skid control has a crucial role for safe braking and prevention from flats that could cause a disastrous train accident. This paper presents simulation studies on an anti-skid control unit (ASCU) with a brake system of a rolling stock including a pneumatic model for brake power supply and dump valve operation.

1. 서론

100여년의 철도 역사를 가진 우리나라는 수도권과 대도시의 전철망과 전국을 연결하는 국철망을 가지고 있으며, 육상교통의 선진화와 효율화를 위하여, KTX, KTX II 및 틸팅차량 기술개발을 수행하고 있고, 다양한 도심 경전철 사업을 계획하고 있다.

철도가 고속화됨에 따라 안전성과 신뢰성을 확보하기 위한 제동시스템이 중요하게 인식되고 있으나, 철도차량의 제동시스템에 대한 국내기술은 미비한 실정이다.

철도차량의 제동시스템은 여러 가지 제동방식 사이의 제동력 분담, 각 제동시스템의 설계와 해석, 제동제어 로직(응하중제어, 응속도제어, 활주방지제어 등)과 마이크로 프로세서를 이용한 일렉트로닉스의 개발 등의 첨단 과학 기술 분야의 연구개발을 필요로 한다¹⁾. 이러한 제동시스템을 개발할 때 어려운 점은 제동시스템을 실차에 부

착하여 실험 데이터를 획득하기가 어렵다는 것이다.

실차에 부착하여 실험을 수행하기 위해서는 시험선로 및 시험용 철도차량이 갖추어져야 할 뿐만 아니라, 설사 갖추어진다고 할지라도 많은 위험과 비용 부담이 따른다²⁾.

본 논문에서는 한국형 틸팅차량³⁾ 제동시스템의 활주방지제어장치(anti-skid control unit; ASCU) 작동을 시뮬레이션할 수 있는 공압모델이 포함된 시뮬레이션 모듈에 대해 기술하고, Simulink를 이용한 시뮬레이션 결과를 분석한다. 실제 차량 운행 상황을 유사하게 모사하기 위하여, 차량 동특성을 dSPACE 보드를 이용한 실시간으로 구현한다.

2절에서는 틸팅차량의 동역학 모델을 포함한 시뮬레이션 모듈에 대하여, 3절에서는 제동시스템의 공압모델과 ASCU에 대하여 기술하고, 4절에서는 시뮬레이션 결과를 기술한다. 5절에서 결론을 맺는다.

2. 시뮬레이션 모듈

철도차량의 제동시스템과 ASCU의 작동을 시뮬레이션하기 위하여 Fig. 1과 같은 시뮬레이션 모듈을 구성하였다. 운행 중인 철도차량의 윤축 속도를 ASCU에 넘겨주면 ASCU는 활주를 검지하

접수일: 2010년 6월 1일

김호연(발표자): 건국대학교 기계공학과 대학원

E-mail: khy9936@naver.com, Tel: 02-450-3473

강철구: 건국대학교 기계공학부

여 상황에 맞는 덤프밸브 신호를 생성하고 이 신호에 따라 제동력이 윤축에 가해지게 된다. 이 제동력에 의해 차량의 운행속도가 영향을 받게 된다. 본 논문에서 대상으로 삼은 철도차량은 한국형 틸팅차량인 한빛200이다.

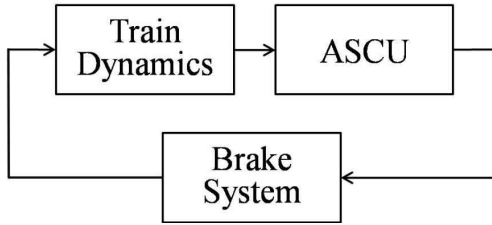


Fig. 1 Schematics of the simulation module

차량 동특성을 나타내기 위하여 철도차량 한량을 차체(carbody), 2차 현가장치(에어 스프링, 요댐퍼, 트랙션 링크), 앞대차(front bogie), 뒤대차(rear bogie), 1차 현가장치, 윤축(wheelset)으로 나누어 모델링을 수행하였다. 차량 모델링에 사용되는 각 구성요소의 제원과 파라미터는 한빛200 구동차를 기준으로 추출하였다³⁻⁴⁾.

Fig. 2는 대차의 자유물체도를 보여주고 있다. 이 자유물체도로부터 앞대차의 운동방정식을 유도하면 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 m_{bg} \ddot{x}_{fb} &= 2\{k_{x_as}(x_{cb} - x_{fb}) + c_{x_as}(\dot{x}_{cb} - \dot{x}_{fb})\} \\
 &+ 2c_{x_yd}(\dot{x}_{cb} - \dot{x}_{fb}) + k_{x_tl}(x_{cb} - x_{fb}) \\
 &- 2\{k_{x_ps}(x_{fb} - x_{ws1}) + c_{x_ps}(\dot{x}_{fb} - \dot{x}_{ws1})\} \\
 &- 2\{k_{x_ps}(x_{fb} - x_{ws2}) + c_{x_ps}(\dot{x}_{fb} - \dot{x}_{ws2})\} \\
 m_{bg} \ddot{z}_{fb} &= 2\{k_{z_as}(z_{cb} + l_1\theta_{cb} - z_{fb}) + c_{z_as}(\dot{z}_{cb} \\
 &+ l_1\dot{\theta}_{cb} - \dot{z}_{fb})\} + m_{bg}g - 2\{(k_{z_ps}(z_{fb} + l_2\theta_{fb}) \\
 &+ c_{z_ps}(\dot{z}_{fb} + l_2\dot{\theta}_{fb})) - 2\{k_{z_ps}(z_{fb} - l_2\theta_{fb}) \\
 &+ c_{z_ps}(\dot{z}_{fb} - l_2\dot{\theta}_{fb})\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{bg} \ddot{\theta}_{fb} &= 2\{k_{x_as}(x_{cb} - x_{fb}) + c_{x_as}(\dot{x}_{cb} - \dot{x}_{fb})\}h_5 \\
 &- 2\{k_{x_ps}(x_{fb} - x_{ws1}) + c_{x_ps}(\dot{x}_{fb} - \dot{x}_{ws1})\}h_6 \\
 &- 2\{k_{x_ps}(x_{fb} - x_{ws2}) + c_{x_ps}(\dot{x}_{fb} - \dot{x}_{ws2})\}h_6 \\
 &- 2\{k_{z_ps}(z_{fb} + l_2\theta_{fb}) + c_{z_ps}(\dot{z}_{fb} + l_2\dot{\theta}_{fb})\}l_2 \\
 &+ 2\{k_{z_ps}(z_{fb} - l_2\theta_{fb}) + c_{z_ps}(\dot{z}_{fb} - l_2\dot{\theta}_{fb})\}l_2 \\
 &+ 2c_{x_yd}(\dot{x}_{cb} - \dot{x}_{fb})h_4 + k_{x_tl}(x_{cb} - x_{fb})h_7
 \end{aligned}$$

이 논문에서 하첨자 cb는 carbody, bg는 bogie, fb는 front bogie, rb는 rear bogie, ws는

wheelset, as는 air spring, ps는 primary suspension, yd는 yaw damper, brk는 brake, crp는 creepage, L은 left, R은 right을 의미한다.

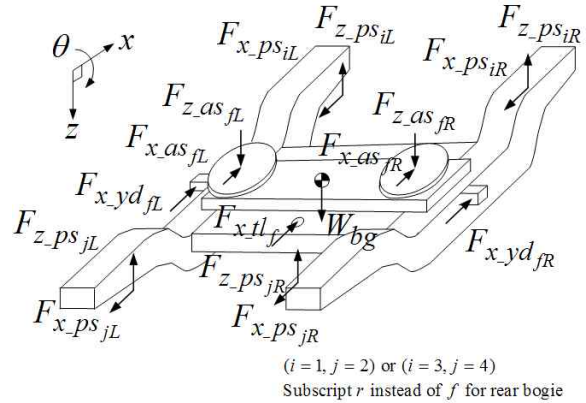


Fig. 2 Free body diagram of the bogie

뒤대차를 포함한 차량 전체에 대한 운동방정식은 참고문헌⁵⁾을 참고하기 바란다.

3. 공압모델과 ASCU

철도차량의 공압시스템은 대체로 유사하게 구성 되어 있다. 한빛 200의 공압 흐름은 Fig. 3과 같이 간략하게 나타낼 수 있다. ASCU에서 4 윤축의 속도로부터 활주상황을 판단하고, 이 상황에 따라 덤프밸브 구동신호를 덤프밸브로 보내주면, 이에 따라 덤프밸브가 작동하여 공압을 제동실린더로 보내주게 된다. 즉, ASCU에서 전기제동신호로 덤프밸브를 제어하면, 이에 따라 제동실린더가 작동하여 상황에 맞는 제동을 하게 된다.

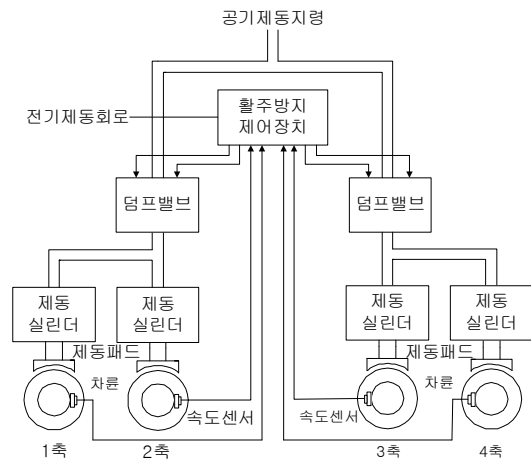


Fig. 3 Pneumatic pressure flow of the mechanical brake system

제동패드에 작용하는 제동력은 식 (2)와 같이 나타 낼 수 있다. 즉, BC (Brake Cylinder)압이 P 일 때, 윤축 디스크에 작용하는 마찰력 F_{brk} 는 다음과 같이 주어진다.

$$F_{brk} = \mu \left(PA_p - F_{spring} \frac{P}{P_{max}} \right) \times l_r \times \eta \quad (2)$$

여기서 μ 는 디스크와 캘리퍼 사이의 평균마찰 계수, A_p 는 피스톤의 유효단면적, F_{spring} 은 BC의 평균스프링력, l_r 은 레버비, η 는 제동효율을 나타낸다.

식 (2)에서 BC 압 P 는 복잡한 동특성에 의해 결정되지만, 본 논문에서는 제동시스템의 전체적인 작동을 파악하기 위하여 공압모델을 단순화하였다. 제동지령이 들어오면, 공압밸브가 열리면서 BC에 공압이 발생하게 되는데 근사적으로 시간지연이 있는 일차시스템으로 모델링 할 수 있다. Fig. 4는 실제 한국철도기술연구원에서 한빛200의 순수공기제동만을 이용하여 제동 하였을 경우, BC압력 실험결과이다⁶⁾. 본 논문에서는 다양한 경우에 대한 이 실험 결과로부터 근사적으로 시정수와 지연시간을 추출하여, 식 (3)과 같은 근사적 공압 모델을 제시한다. 식 (3)에서 $U(s)$ 는 밸브열림신호이고, $P(s)$ 는 BC 압력이다.

$$\frac{P(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (3)$$

여기서 K 는 BC압의 정상상태값을 나타내고, L 은 시간지연을, 그리고 T 는 시정수를 나타낸다. 본 논문에서 기존 경험에 의해 L 은 0.16초로 가정한다. 그리고 덤프밸브의 PWM신호에서 듀티사이클이 100%이면 T 는 0.6초, 75%이면 0.8초, 25%이면 2.4초로 둔다.

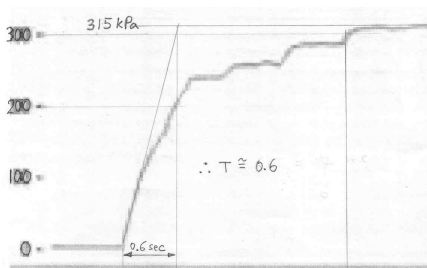


Fig. 4 Experimental BC pressure when 100% valve-open-signal is inputted in actual

brake test

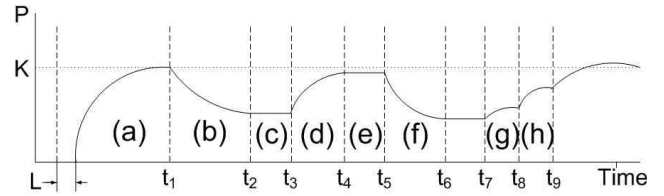


Fig. 5 Typical BC pressure pattern during skid

활주가 발생하였을 경우 전형적인 BC압의 패턴은 Fig. 5와 같고, 이 패턴에서 각 구간의 공압모델을 다음 식 (4)와 같이 주어질 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{구간(a): } P(t) &= K(1 - e^{-\frac{t}{T}}), t \leq t_1, T = 0.6s \\ \text{구간(b): } P(t) &= P(t_1) - P(t_1)(1 - e^{-\frac{t-t_1}{T}}), \\ & t_1 < t \leq t_2, T = 0.6s \\ \text{구간(c): } P(t) &= P(t_2), t_2 < t \leq t_3, T = 0.6s \\ \text{구간(d): } P(t) &= P(t_3) + [K - P(t_3)]P(t_1)(1 - e^{-\frac{t-t_3}{T}}), \\ & t_3 < t \leq t_4, T = 2.4s \\ \text{구간(e): } P(t) &= P(t_4), t_4 < t \leq t_5, T = 2.4s \quad (4) \\ \text{구간(f): } P(t) &= P(t_5) - P(t_5)(1 - e^{-\frac{t-t_5}{T}}), \\ & t_5 < t \leq t_6, T = 0.6s \\ \text{구간(g): } P(t) &= P(t_7) + [K - P(t_7)]P(t_1)(1 - e^{-\frac{t-t_7}{T}}) \\ & t_7 < t \leq t_8, T = 2.4s \\ \text{구간(h): } P(t) &= P(t_8) + [K - P(t_8)](1 - e^{-\frac{t-t_8}{T}}) \\ & t_8 < t \leq t_9, T = 0.8s \end{aligned}$$

다음으로 활주방지제어로직에 대한 모듈은 Fig. 6과 같이 정의한다. 활주방지제어로직에서 활주를 감지하는 방법은 속도차 감지 방법과 가속도 감지 방법으로 관찰되며, 이 두 방법은 동시에 적용되어 어느 한 가지라도 해당되면 해당차축은 활주로 판단된다. 속도차 감지 방법은 측정한 차축 속도를 이용하여 가상 차축속도($V_{nominal}$)를 생성하고, 가상 차축속도 대비 일정 속도차이(ΔV_a)가 나면, 해당 차축을 활주로 판단한다.

가속도 감지 방법은 각 바퀴의 속도를 이용하여 각 바퀴의 가속도를 연산하고, 연산된 가속도가 설정된 가속도값(a_s)를 넘고 차축속도가 가상차축 속도와 정해진 값(ΔV_s) 이상으로 차이가 나면 활주로 간주한다.

가속도 감지에서 4차축 가속도 모두가 동시에 활주가 나는 경우에 대한 별도의 판단기준을 가진다. 즉, 모든 차축의 활주는 비정상적인 신호가 일정시간(5초) 이상 지속될 때로 설정한다.

활주검지 후 덤프밸브를 이용해 활주방지제어를 하여 제동력을 감소시켰을 때, 활주된 차축은 속도를 되찾아 재점착이 된다. 이때 차단된 제동력은 신속히 복귀를 시켜 운전자가 원하는 제동거리를 확보하여야 한다. 이를 위해 활주방지제어기는 재점착이 시작되는 시점을 감지하여 제동력을 재투입하여야 하는 시점을 잡는다. 재점착 감지는 회복 각가속도가 일정 수치(α_{1} , α_{2}) 이상으로 나타나면 재점착으로 감지한다.

재점착 복귀시 재점착 감지 신호가 발생하더라도 바퀴와 레일의 점착력은 불안한 상황이다. 따라서, 재점착 감지 신호 후 제동력을 증가시켰을 때, 다시 활주가 발생할 여지가 많은 관계로 재활주 감지 기준(α_{rs})을 기존 활주 감지 기준(α_s)보다 엄격히 설정하여 관리한다.

활주가 일어난 차축의 속도와 기준속도와의 속도차가 설정치(ΔV_{adh}) 보다 작아진 것을 감지한다. 이러한 상태를 차축의 완전 재점착으로 판단하고, 활주 검출 신호를 종료한다.

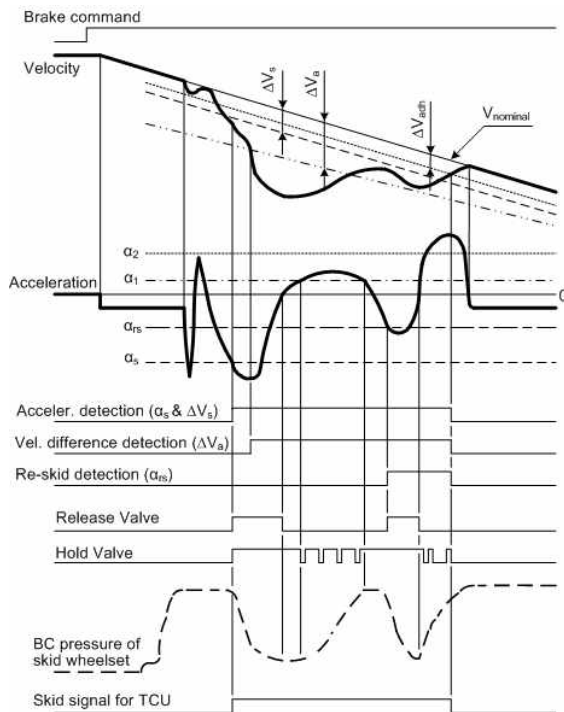


Fig. 6 Operation of the anti-skid control logic

4. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션은 2절에서 유도한 동역학 모델식과 3절에서 모델링한 공압모델, 활주방지 제어로직을 기반으로 수행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 수학적 구현과 결과를 분석하기에 용이한, MATHWORK 사의 Simulink를 사용하여 프로그램 하였다. Fig. 7은 시뮬레이션 모델의 개략도이다. 이 모델은 크게 왼쪽 부분의 차량 동역학 모델 부분과 공압모델, 활주방지 제어로직이 구현되어있는 오른쪽 부분으로 이루어져 있다. 차량 동역학모델에서 계산된 각각의 윤축의 원주속도와 원주가속도를 활주방지 제어로직부분에서 입력받아 연산하여 각각의 윤축에 전달 될 제동력이 계산되어 다시 차량동역학 모델로 입력된다.

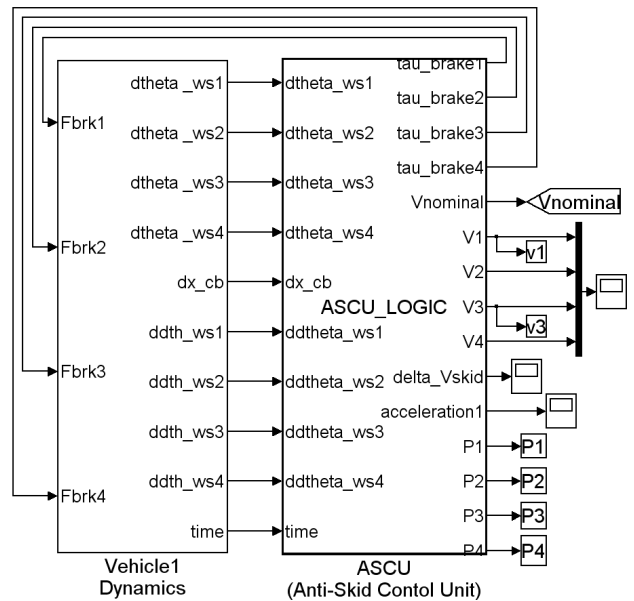


Fig. 7 Simulation model

위의 시뮬레이션 모델을 이용하여 활주상황을 모사하여 아래와 같은 시뮬레이션 결과를 확인했다. 먼저 첫 번째 윤축의 활주 상황을 모사하기 위하여 차량의 초기속도 50km/h에서 최대제동압력 315kPa일 때, 윤축의 이동거리 100~200m 사이에서 첫 번째 윤축의 점착계수를 6~10% 사이로 변화시켰다. 이 때 활주가 발생한 첫 번째 윤축의 원주속도의 그림은 Fig. 8과 같다. 점착계수가 점차 작아지면 활주가 발생되고, 위에서 모델링한 활주방지제어 로직이 동작된다. 그러면 BC 압력의 회복 패턴이 다양하게 변화하면서 재점착이 되는 것을 확인할 수 있다.

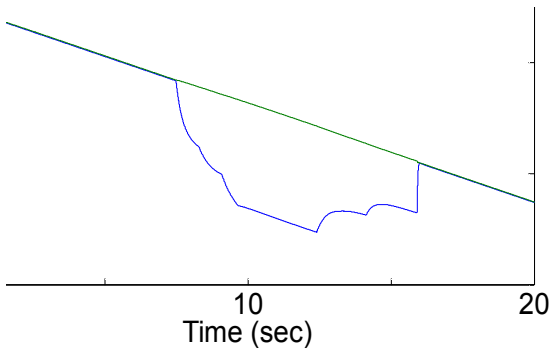


Fig. 8 Velocity profiles of four wheels

- 2005.
- 4) KRRI, "Practical Technology Development for the Tilting System", Annual Report, MOCT, 2005.
- 5) 강철구, 김호연, 김민수, 구병춘, "틸팅차량의 활주방지 제어시스템 해석", 대한기계학회논문집 A권, 제33권, 제2호, pp. 169-178, 2009.
- 6) 건설 교통부, "제동장치 실용 기술개발 최종 연구보고서", 연구보고서, 2007.

5. 결론

본 논문에서는 공압모델이 포함된 철도차량 제동 ASCU 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문의 결론은 아래와 같다.

- (1) 철도차량 제동 ASCU 시뮬레이션을 위해 차량 동역학모델, ASCU, 제동시스템의 모듈을 구현하였다.
- (2) 공압모델을 동역학모델에 추가하여 공압 특성이 제동시스템의 작동에 영향을 미치게 하였다.
- (3) 각각의 모듈을 시뮬레이션 모델로 구축하여 실제 상황과 유사한 환경에 대해 모의 실험하였다.

후기

이 연구는 교육과학기술부 기초연구 일반연구자 기본연구사업의 지원(과제번호: 2009-0073953)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) A.H. Wickens, "Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics: Guidance and Stability", Swets & Zeitlinger Publishers, 2003.
- 2) C.F. Bonnet, "Practical Railway Engineering, 2nd ed.", Imperial College Press, 2005.
- 3) J. S. Kim, and N. P. Kim, "A Study on a Dynamic Modeling for the Development of the Tilting Train Simulator", Trans. of the KSME A, Vol. 29, No. 9, pp. 1183-1190,