

## 활주방지장치 HILS 시스템을 위한 차륜 궤도 접촉 모델 연구 Study on wheel rail contact model for HILS of wheel slide protection system

이남진\*, 강철구\*\*†, 이원상\*

Nam-Jin Lee\*, Chul-Goo Kang\*\*†, Won-Sang Lee\*

**Abstract** WSP(wheel slide protection) system shall be verified through lots of test results of railway vehicle on field at various running environment because WSP system is essential component for vehicle safety. But a new component or new developed subsystem is not easy to be tested on the real field test of railway vehicle in the view of risk management and test cost, particularly for components for brake system. And therefore HILS(hardware-in-loop simulation) of WSP with vehicle dynamic is considered as the solution. A railway vehicle in HILS is to be realized as real-time simulation and the wheel rail contact model shall be included on vehicle model, which can generate creep force similar to actual force. To make accurate contact forces the contact model shall represent the effects of a size of contact patch, contamination of contact surface and running speed, as input parameters. On this study the contact model for HILS for WSP system is to be realized as real-time vehicle simulation, which can represent phenomena of sliding at braking on contaminated rail. Then predefined running scenario will be simulated and the results are to be reviewed for validation of contact model.

**Keywords** : WSP, HILS, wheel rail contact, pneumatic brake system

**초 록** 철도차량의 활주방지장치는 철도차량의 안전성에 직접적인 관련이 있는 장치로서, 개발 및 검증 과정에서 다양한 환경에 대한 차량 시험이 뒷받침되어야 한다. 하지만, 대상체인 철도차량의 특성상 검증되지 않은 개발단계의 핵심부품의 차량시험은 비용적인 측면과 시험의 위험성으로 제한적이며, 그에 대한 보완책으로 철도차량 활주방지시스템의 HILS 시스템이 제안되고 있다. 활주방지장치 HILS에서의 활주현상을 위해 정확한 차륜 궤도 접촉 모델이 필수적이며, 이 모델은 궤도의 접촉형상, 표면오염, 운행속도 등의 변수를 인자로 사용한다. 본 연구에서는 활주방지장치 HILS시스템 구현을 위해 철도차량의 동역학 모델과 궤도 오염조건 및 차량의 상태에 따른 차륜 궤도간 점착 특성을 반영할 수 있는 접촉 모델을 구현하여, 주행 시나리오에 따라 차량 활주 현상을 실시간 시뮬레이션으로 운행하여, 작성한 차량 및 차륜 궤도 접촉 모델의 적합성을 검증하고자 한다.

**주요어** : 활주방지장치, HILS, 차륜궤도 접촉, 공압제동시스템

† 교신저자: 건국대학교 공과대학 기계공학과 (cgkang@konkuk.ac.kr)

\* 현대로템(주) R&D 센터 주행장치개발팀

\*\* 건국대학교 공과대학 기계공학과

## 1. 서론

철도차량의 특성상 검증되지 않은 개발단계의 핵심부품의 차량시험은 비용적인 측면과 시험의 위험성으로 제한적이며, 그에 대한 해결책으로 철도차량 활주방지시스템의 HILS 시스템이 제안되고 있다. 활주방지장치 HILS 구성을 위해 정확한 차륜 궤도 접촉 모델이 필수적이며, 이 모델은 궤도의 접촉형상, 표면오염, 운행속도 등을 표현할 수 있는 변수를 인자로 사용하여 실제 환경을 반영할 수 있어야 한다. 이를 위해 철도차량 제동장치 및 접촉 모델에 대해서는 다양한 해석적 방식으로의 연구가 진행되고 있으며<sup>[1]~[4]</sup>, 실제 제동시스템의 구성품을 포함한 HILS 관련된 연구도 계속되고 있다<sup>[5]~[6]</sup>. 본 연구는 2장에서 적용할 차륜-궤도 접촉 이론을 기술하고, 3장에서 HILS 구성을 위한 전체 HILS 구성과 각 구성품의 모델을 개략적으로 소개한다. 4장에서 제동에 의한 차륜 활주 차량에 대한 주행 거동을 실시간 시뮬레이션을 수행하여, WSP 시스템의 작동 구현과 작용한 접촉 모델 결과에 대해 검토하고자 한다.

## 2. 차륜 궤도 접촉 모델

차륜-궤도 접촉 현상은 차량의 활주 현상을 구현을 위한 기본 요소이며, 정확한 시뮬레이션 결과를 도출하기 위해 접촉현상에 대해 실제 차량과 가능한 동일하게 구현할 수 있어야 한다. 차륜-궤도 접촉 모델은 이론적인 접근과 함께 다양한 차량의 시험치를 이용한 연구가 진행되었고, 본 연구에서는 참고문헌[4]에서 제안하는 수식을 바탕으로 진행하였다.

적용한 차륜 궤도 접촉 모델은 주행방향 크립력만 고려하여, 낮은 크립에서 크립과 크립력이 선형적으로 증가하고 최대 크립력을 지나서는 크립이 증가함에 따라 감소하는 특성이 반영되었다. 차륜-궤도간 접촉부위의 주행방향, 횡방향 치수를  $a$ ,  $b$ 라고 정의하고, Hertz 접촉이론에 따라 수력력이 분포된다고 가정했을 경우, 발생하는 크립력은 식(1)과 같이 표현된다.<sup>[4]</sup>

$$F = \frac{2 \cdot \mu \cdot Q}{\pi} \left( \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2} + \arctan \varepsilon \right) \quad (1)$$

여기서,  $Q$ 는 윤중이며,  $\varepsilon$ 는 접촉영역에서의 크립력 선형적으로 증가한다고 가정했을 때의 기울기이다.  $\varepsilon$ 는 식(2)와 같이 표현될 수 있으며,  $C$ 는 접촉전단탄성 비례상수이다.<sup>[4]</sup>

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \cdot \frac{C \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b}{Q \cdot \mu} \quad (2)$$

식(1), (2)는 일반차량 주행을 위한 주행방향 크립력 식이며, 아래의 변형된 식(3), (4)를 이용하여 활주 현상을 구현할 수 있는 접촉모델을 만든다. 차륜과 궤도의 환경 조건을 반영하기 위해 5개의 추가 변수를 정의한다.<sup>[4]</sup>

$$\mu = \mu_0 \cdot [(1 - A) \cdot e^{-B \cdot w} + A] \quad (3)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 최대 점착계수이며,  $w$ 는 크립속도,  $B$ 는 점착계수 지수감소 변수,  $A$ 는 최대 마찰계수대 무한크립시 마찰계수와의 비이다. 수정된 크립력은 식(1)에서 점착영역 감소계수  $k_A$ 와 슬립영역 감소계수  $k_B$ 를 추가하여, 실제 차량의 크립력을 표현할 수 있도록 하였다.<sup>[4]</sup>

$$F = \frac{2 \cdot \mu \cdot Q}{\pi} \left( \frac{k_A \cdot \varepsilon}{1 + (k_A \cdot \varepsilon)^2} + \arctan(k_s \cdot \varepsilon) \right) \quad (4)$$

Fig.1에서 식(3)(4)를 이용해, 5개의 변수  $A, B, \mu_0, k_A, k_B$ 를 지정하여 크립-크립력 선도를 작성하였으며, 지정한 환경변수에 대한 크립력의 영향을 확인 할 수 있다.

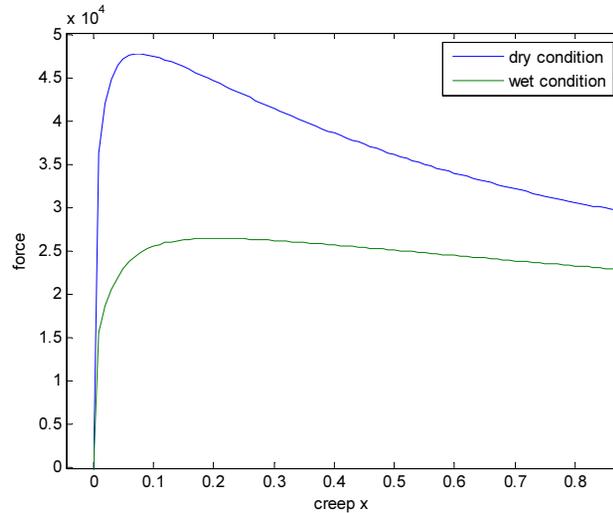


Fig.1 Example of creep force vs. creep between dry and wet condition

### 3. HILS 구성 및 구성요소

#### 3.1 철도차량 활주장치 HILS 구성

철도차량 활주장치용 HILS 시스템의 구성은 크게 차량과 제동시스템으로 구분할 수 있다. 차량 궤도 접촉을 포함한 차량 동특성은 실시간 시뮬레이션으로 구현하고, ECU와 공압 제동 작용장치, 제동 밸리퍼를 실제 하드웨어로 구현한다. 이러한 구성은 향후 제동관련 부품을 본 HILS 시스템과 결합하여 실제 차량 작동 환경과 동일한 인터페이스를 제공할 수 있다. Fig.2은 상기 제안하는 HILS의 구성을 보여준다. 본 논문에서는 실제 하드웨어 제작 전 전체 구성품을 수학적 모델로 표현해 전체를 실시간 시뮬레이션을 수행하여, 제안된 구성의 타당성과 차량 및 접촉 모델을 검증하는데 초점을 둔다.

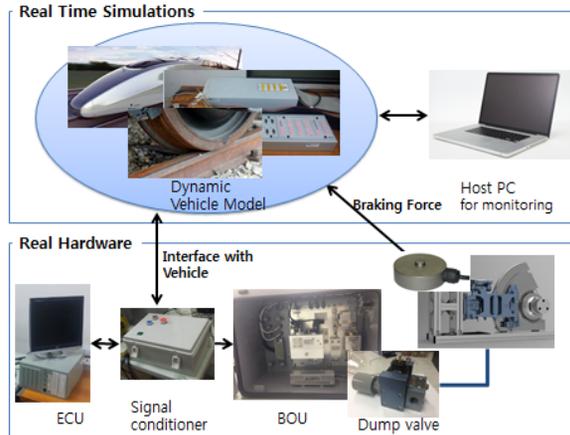


Fig. 2 Configuration of brake HILS system

### 3.2 차량 모델 및 제동 장치 모델

대상 차량은 1량으로 전동차로 가정하고, 드라이브 동역학 측면의 거동에 초점을 두어 2D로 단순화 하였다. 1대의 차체, 2대의 대차, 4개의 윤축인 전동차로 구성하였고, 차륜의 수직변위를 궤도에 항상 접촉하는 것으로 가정하여, 차량 모델은 17 자유도를 갖는다. 그 개략도는 Fig.3과 같다.

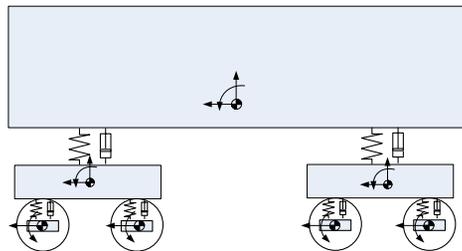


Fig. 3 Schematic of vehicle dynamic model

HILS 시스템에 적용 될 제동시스템의 구성품으로 전공변환(EP)밸브, 중개밸브, 덤프밸브, 제동캘리퍼가 있다. EP밸브와 중개밸브의 수학적 모델은 시간지연이 있는 1차 전달함수로 가정하였고, 덤프밸브는 실린더 체적과 공급 공압과 실린더 압력의 차를 고려한 오리피스식을 적용하였다. 그리고, 제동실린더는 실린더 내 공압에 대한 단순 산술식으로 표현하였다.

### 3.3 제동 및 활주방지 알고리즘

제동제어기는 운전자의 지령과 승객 중량 정보를 이용해 요구되는 제동압력을 연산하고, 적절한 보정을 통해 EP 밸브 압력제어를 수행토록 하였다. 본 알고리즘은 기존 전동차의 제동 제어 알고리즘을 그대로 본 시뮬레이션에 맞게 반영하였으며, Fig.4는 제동제어기 알고리즘의 흐름도를 보여준다.

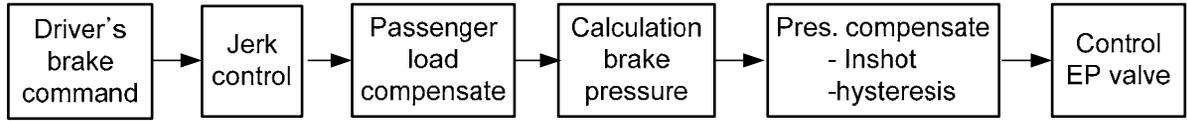


Fig. 4 Flow chart of brake control algorithm

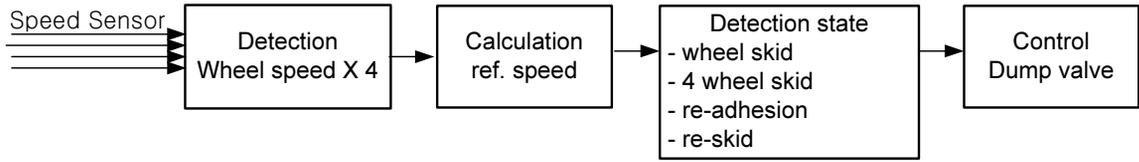


Fig. 5 Flow chart of WSP control algorithm

활주방지 알고리즘은 1량 4축의 차속속도와 측정된 차속속도를 근거로 차량 참고속도를 연산하고, 참고속도를 포함한 5개의 속도를 근거로 각 윤축의 상태를 활주 상태를 평가한다. 평가된 윤축은 활주 상태에 따라 덤프밸브 제어를 통해 제동실린더 내부 압력을 제어토록 한다. 활주방지 알고리즘은 일반적인 전동차에 적용되고 있는 알고리즘을 차량 및 제동 구성품에 맞게 구성하였으며, 그 대략적인 흐름은 Fig.5와 같다.

#### 4. 차량 활주 실시간 시뮬레이션

앞 장에서 기술한 접촉모델을 포함한 차량 모델, 제동부품 그리고, 제동/활주방지 알고리즘으로 실시간 시뮬레이션을 수행한다. 모델링과 알고리즘은 Mat lab/Simulink로 모델링하고, dSPACE board를 이용해 실시간 시뮬레이션을 수행하였다. dSPACE 모니터링 프로그램인 ControlDesk(ver.3.7.4)를 이용해 운전석과 같이 UI를 구성하였으며, Fig.6 은 UI와 실시간 시뮬레이션 수행결과의 한 예를 보여 주고 있다.

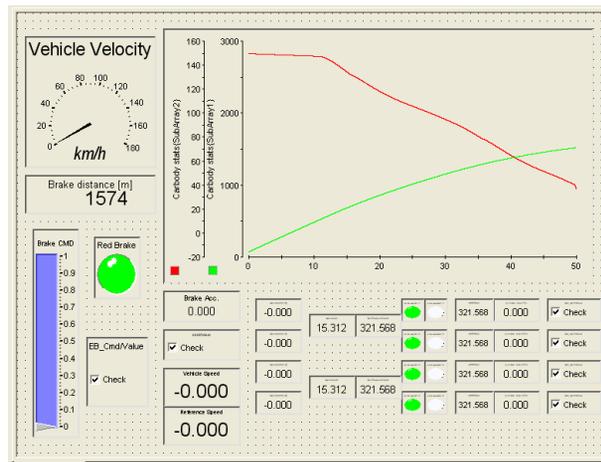


Fig. 6 UI for real-time interface between driver and vehicle model

차량 활주주행 시뮬레이션은 150km/h의 속도로 건조조건인 100mm의 궤도를 주행하던 전동차 1량이 비상제동상태에서 초기 주행 100mm 지점부터 습윤조건인 100mm의 궤도로 진입한 상황에 대한 시나리오 정의하고, 시뮬레이션을 통해 적절한 활주 현상 발생과 WSP 작동을 확인하였다. Fig.7은

시뮬레이션 결과를 보여준다. 각각의 윤축이 순차적으로 활주가 발생하고, 발생한 윤축에서 활주방지알고리즘이 덤프밸브를 작동하여, 활주방지기능의 수행을 확인 할 수 있다.

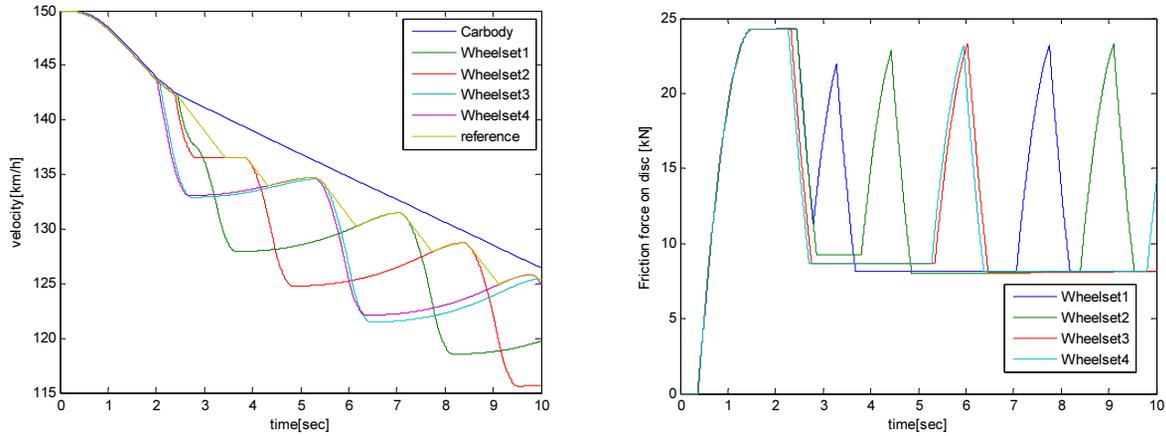


Fig. 7 Simulation results of wheel slide and WSP operation

## 5. 결론

철도차량 활주 HILS 구성을 시스템 구성을 정의하고, 차륜 궤도 접촉 모델과 차량 모델, 제동장치, 제동 및 활주방지 알고리즘을 시뮬레이션으로 구현하였다. 구현된 모델의 실시간 시뮬레이션을 위해 dSPACE 보드를 사용하였으며, 시뮬레이션을 통해 구현된 제동 및 활주 현상, 그리고 활주 방지를 위한 WSP의 기능을 확인 할 수 있었다.

향후 본 연구를 바탕으로 제동시스템을 구성한 HILS 시스템 구축 예정이며, 이를 통해 차량 시험 이전에 제동장치 및 WSP 알고리즘의 사전 검증으로 활용할 예정이다.

## 참고문헌

- [1] C.G. Kang, 2007, "Analysis of the Braking System of the Korean High-Speed Train using Real-time Simulation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 6.
- [2] C.G. Kang, 2008, "Simulation on creep forces action on the wheel of a rolling stock," *Proc. Of ICCAS*, Seoul, Korea
- [3] N.J Lee, C.G. Kang, 2002, "Brake Force Simulation of a High Speed Train Using a Dynamic Model," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 8, No. 1 (in Koearn)
- [4] O Polach, "Creep forces in simulation of traction vehicle running of adhesion limit." *Whea* 258, (2005): 992-1000.
- [5] Pugi, L., M. Malvezzi, A. Tarasconi, A. Palazzolo, G. Cocci and M. Violani. "Hil Simulation of Wsp Systems on Mi-6 Test Rig." *Vehicle System Dynamics* 44, no. sup1 (2006): 843-852.
- [6] C.G. Kang, et al. "Real-time simulations of a railroad brake system using a dSPACE board." *ICCAS-SICE*, 2009. IEEE, 2009.