

한국형 틸팅열차의 기계적 제동 동특성에 대한 실시간 시뮬레이션

김 호 연[†] · 강 철 구^{*}

(2009년 7월 9일 접수, 2009년 8월 24일 수정, 2009년 8월 24일 심사완료)

Real-time Simulation for Dynamic Characteristics of Mechanical Braking of the Korean Tilting Train

Ho-Yeon Kim and Chul-Goo Kang

Key Words : Braking Characteristics(제동 동특성), Train Brake System(철도제동시스템), HILS System(HILS 시스템), Real-time Simulation(실시간 시뮬레이션), Anti-skid Control(활주방지제어)

Abstract

The Korean tilting train called Hanvit 200 was launched recently in Korea to improve train speed up to 200 km/h at conventional lines. In this paper, we propose a HILS system for simulations of mechanical braking of the Hanvit 200 train using actual ASCU, actual dump valves, Simulink, dSPACE board, and ControlDesk software. In the proposed HILS system, dynamics of wheelsets, bogies and car body, brake force generation, creep force generations are realized via mathematical models, and anti-skid logic is realized using actual components. The validity of the proposed HILS system is demonstrated via comparing results of real-time and off-line simulations.

1. 서 론

철도는 현재 우리나라 녹색성장의 한 축으로서 중요성이 높아지고 있으나, 철도차량의 제동시스템에 대한 연구는 부족한 실정이다. 철도차량의 제동시스템은 철도의 안전과 직결될 뿐 아니라 운용의 경제성에도 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다.

2008년 11월 처음으로 공개된 KTX-II는 87%의 부품 국산화율을 이루었고, 2015년에는 95%의 국산화율을 목표로 하고 있는데, KTX-II에서

눈에 띄는 점은 바로 절반으로 감소한 제동거리이다. 제동기술은 철도 기술 중에서도 안전과 관련되는 중요한 기술이면서도, 매우 까다롭고 어려운 기술이라고 할 수 있다. 철도 시스템의 특성상 실제 주행중인 시스템을 가지고 다양한 상황에서의 실차 제동시험을 수행한다는 것은 쉽지 않은 일이다.⁽¹⁾

이러한 문제점을 극복하기 위하여 주행시험기(roller-rig)⁽²⁾를 이용하여 실차시험을 대체하고 있다. 하지만 주행시험기를 구축하는 것은 많은 비용과 넓은 장소를 필요로 한다. 따라서 더 쉽게 실차시험을 대체하는 한 방안으로서 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)를 이용하는 연구들이 이루어지고 있다.⁽³⁻⁵⁾

본 논문에서는 기존선의 고속화⁽⁶⁾를 위해 개발되고 있는 한국형 틸팅열차 한빛 200⁽⁷⁾에 대하여, 차체와 대차를 포함하는 철도차량의 동특성, BOU(Brake Operation Unit), 기계적 제동장치의 특

[이 논문은 2009년도 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2009. 5. 21-22., BEXCO) 발표논문임]

[†] 책임저자, 회원, 건국대학교 대학원 기계공학과

E-mail : khy9936@naver.com

TEL : (02)450-3473 FAX : (02)447-5886

* 건국대학교 기계공학부

성을 수학적으로 모사하여, dSPACE 사의 DS1104 로 구현하고, ASCU(Anti-Skid Control Unit)와 덤프 밸브(dump valve)는 실제 요소를 사용하는 HILS 시스템을 제안하고, 기계적 제동시스템에 대한 실시간 시뮬레이션 연구를 수행하고자 한다. 시뮬레이션 모델은 DS1104 와 호환성이 좋은 Mathwork 사의 Simulink 와 Real-Time Workshop 을 이용하여 구현한다.

2 절에서는 한국형 틸팅차량인 한빛 200(Fig. 1 참조)의 동역학 모델링, 3 절에서는 시뮬레이션 모델, 4 절에서는 실시간 시뮬레이션 환경, 5 절에서는 비 실시간과 실시간 시뮬레이션 결과를 비교, 분석한 내용에 대하여 기술하고, 6 절에서 결론을 기술한다.

2. 한빛 200 차량의 동역학 모델링

본 절에서는 기계적 제동시스템을 해석하기 위하여, 한빛 200 틸팅차량의 2 차원(2D; 2 dimensional) 모델을 고려한다. 즉, 차량을 차체(carbody), 대차(bogie), 윤축(wheelset)의 조합으로 보고, 각각에 대한 전후운동, 상하운동 그리고 피치운동의 평면운동을 고려한다. 차량의 진행방향을 x , 지면에 수직인 아래쪽 방향을 z , 그리고 피치운동을 θ 로 둔다.

차량 모델링은 차체(carbody), 2 차 현가장치(에어 스프링, 요 댐퍼, 트랙션 링크), 앞대차(front bogie), 뒤대차(rear bogie), 1 차 현가장치, 윤축(wheelset)으로 나누어 수행하였다. 각 구성요소의 제원과 파라미터는 한빛 200 틸팅차량의 구동차를 기준으로 추출하였다.^(8,9)

본 논문에서는 틸팅차량의 한 차량에 대해 모델링을 수행하고, 한 차량에 대한 제동과정을 시뮬레이션한다. 이는 각 차량간 제동 동특성이 유사하다는데 근거를 두고 있다. 차량 동역학 모델링



Fig. 1 Hanvit 200 tilting train

은 차량 구성품을 크게 차체, 대차, 윤축으로 나누고, 각각에 대한 자유물체도를 그린다음 뉴턴의 운동법칙을 적용하여 구하였다.

Fig. 2 는 차체의 자유물체도를 나타내고 있다. 그림에서 하첨자 cb 는 carbody, as 는 air spring, yd 는 yaw damper, L 은 left, R 은 right 을 의미한다.

Fig. 3 은 앞대차의 자유물체도이다. 아래 그림에서 bg 는 bogie, fb 는 front bogie, rb 는 rear bogie, ps 는 primary suspension 을 의미한다.

또한 뒤대차의 자유물체도는 하첨자 fb 대신에 rb 로, ws1 대신에 ws3, ws2 대신에 ws4 로 대체하고, 차체의 피치운동 θ 에 의해 아래쪽으로 더 내려가는 대신 위쪽으로 들리도록 하면 된다.

차체와 대차에 대한 구체적인 운동방정식은 참고문헌^(10,11)을 참조하기 바란다.

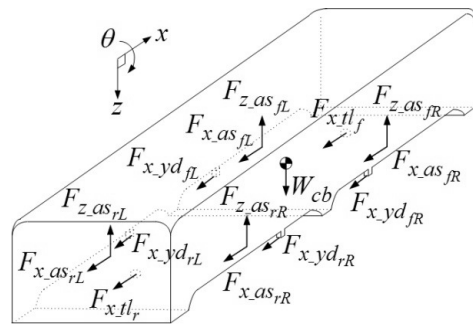
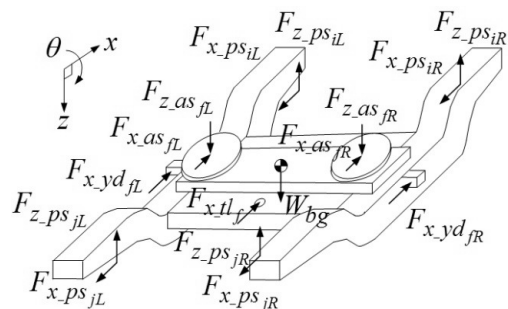


Fig. 2 Free body diagram of the carbody



($i=1, j=2$) or ($i=3, j=4$)
Subscript r instead of f for rear bogie

Fig. 3 Free body diagram of the bogie

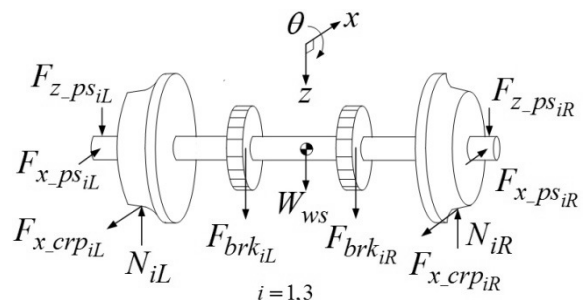


Fig. 4 Free body diagram of the wheelsets

Fig. 4는 윤축의 자유물체도이다. 아래 그림에서 ws는 wheelset, brk는 brake, crp는 creepage를 의미한다.

구동대차 윤축은 휠 디스크제동을 하고 있기 때문에 구동대차 윤축의 자유물체도는 Fig. 4에서 디스크를 없애고 F_{brk} 를 바퀴에 두고, 1,3과 2,4를 바꾸어 주면 된다. 따라서 첫 번째 윤축에 대한 운동방정식을 아래와 같이 얻을 수 있다. 두 번째, 세 번째, 네 번째 윤축에 대한 운동방정식은 하첨자 1 대신에 2, 3, 4를 대체하고, 두 번째와 네 번째 윤축의 수직방향 운동 중 F_{brk} 의 부호를 바꾸어 주면 된다.

제동 시에 중요한 윤축 부분의 운동방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 m_{ws} \ddot{x}_{ws1} &= 2\{k_{x_ps}(x_{fb} - x_{ws1}) \\
 &+ c_{x_ps}(\dot{x}_{fb} - \dot{x}_{ws1})\} - 2F_{x_crp1} \\
 N_1 &= \{k_{z_ps}(z_{fb} + l_2\theta_{fb}) \\
 &+ c_{z_ps}(\dot{z}_{fb} + l_2\dot{\theta}_{fb})\} + F_{brk1} + 0.5m_{ws}g \\
 I_{ws} \ddot{\theta}_{ws1} &= 2r_{wh}F_{x_crp1} - 2r_{disk}F_{brk1}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 N_1 은 바퀴 하나에 작용하는 반력이다. 그리고 N_2, N_4 에서는 $l_2\theta_{fb}$ 대신에 각각 $-l_2\theta_{fb}$, $-l_2\theta_{rb}$ 로 바뀌어야 한다.

3. 한빛 200 차량의 Simulink 모델

본 절에서는 Simulink를 이용하여 2절에서 도출된 동역학 모델을 아래 Fig. 5와 같은 차량 시뮬레이션 모델로 구현하였다. 시뮬레이션 모델 검증의 수월성과 차후의 확장성을 고려하여 한량의 차량의 모델에는 각각의 구성요소 별로 하나씩의 Sub-system으로 구성하였다.

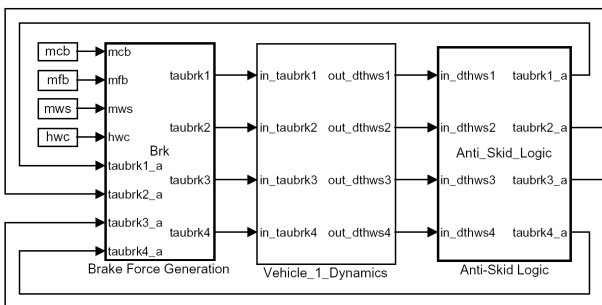


Fig. 5 Vehicle simulation model

특히 본 논문은 제동 동특성을 위한 시뮬레이션이기 때문에 Fig. 6과 같이 제동력을 인가해 주는 부분이 시뮬레이션을 진행해 나가는 부분에서 중요한 요소이다. 차량의 제동은 바퀴와 레일 사이의 점착력(adhesion force) 또는 크립력(creep force)에 기인하고, 크립력은 바퀴의 원주속도와 바퀴중심의 선속도의 차이로부터 발생하는 크리피지(creepage)의 함수이다.

위와 같이 비 실시간 상황에서 시뮬레이션 모델이 완성되면, 이 모델을 기반으로 MATLAB에서 제공하는 Real-Time Workshop Toolbox를 이용하여 Fig. 7과 같이 모델을 수정하여 컴파일하고, DS1104의 ADC/DAC를 이용하여 제동력을 입출력으로 받아 실시간 시뮬레이션을 수행한다. 이 과정에서 dSPACE에서 제공하는 Simulink block을 이용한다. 이때 생성되는 *.sdf 파일을 dSPACE에서 제공하는 ControlDesk를 이용하여 Target board인 DS1104에 다운로드 한다.

4. 실시간 시뮬레이션 환경

Fig. 8은 한빛 200 차량 한대에 대한 기계적 제동시스템의 구성을 보여주고 있다. 앞 뒤 대차는 각각의 BOU와 덤프밸브를 장착하고 있다.

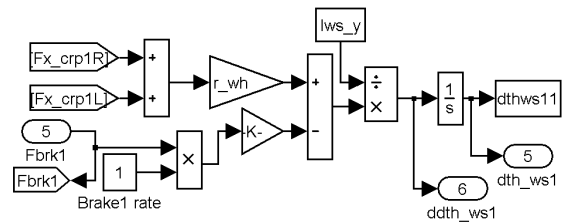


Fig. 6 Simulation model of a wheelset

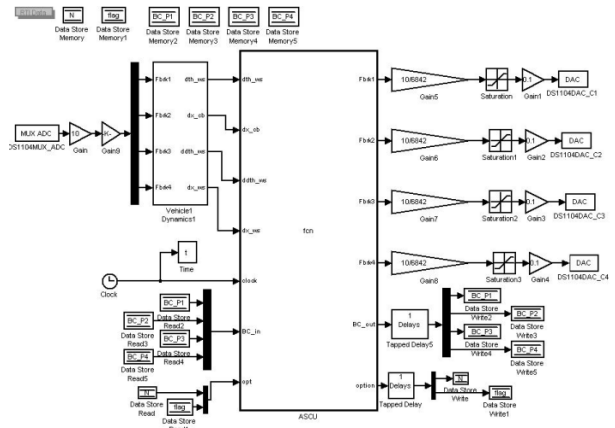


Fig. 7 Simulink model used for Real-Time Workshop

각 대차는 윤축 2 개를 담당하고 있는데, 각 윤축의 속도신호는 차량당 1 개 설치된 ASCU 로 되먹임 되어 활주를 검지(detection)하게 된다.

이 구성을 바탕으로 본 연구에서는 Fig. 9 와 같은 HILS 시스템 구성을 제안한다.

이 제안은 차량의 동역학 모델이 다운로드 되어 실행될 실시간 시뮬레이션이 가능한 DS1104 보드를 탑재한 컴퓨터, 실제차량에 장착되어 있는 활주방지제어장치(ASCU), 외부 신호를 입출력 하기 위한 범용 I/O 보드로 구성되어 있다.

본 논문에서의 목적은 HILS 시스템 구성이 가능한 실시간 시뮬레이션이 목적이므로 HILS 시스템의 전 부분을 이용하여 실험을 진행 하지는 않았고, ASCU 와 덤프밸브 신호를 PC 에서 구현한 실시간 시뮬레이션을 수행하였다.

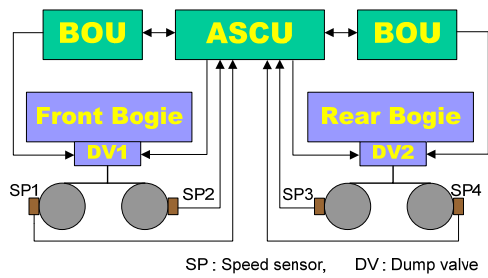


Fig. 8 Brake system configuration of a car

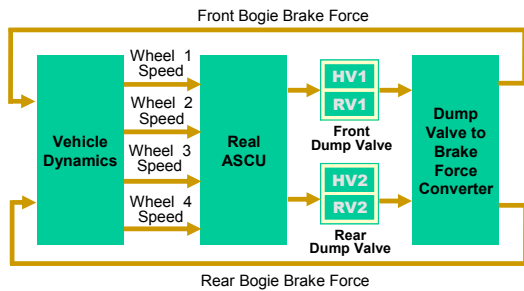


Fig. 9 Conceptual configuration of the HILS system



Fig. 10 Proposed HILS system

실제 하드웨어 부분도 모듈화로 이루어져 있기 때문에 진행중인 하드웨어 구성에 바로 연결하여 실험할 수 있는 상황에서의 실시간 시뮬레이션을 수행하였다.

5. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션의 목적은 3 절에서 구성한 시뮬레이션 모델을 가지고, 정상제동인 경우에 발생하는 동적 거동을 차체의 선속도, 윤축의 원주속도, 활주 발생시 활주방지 제어로직이 동작하는 경우의 첫번째 윤축의 원주속도를 실시간/비 실시간에서 실행해 보면서, 각각의 상황에서의 결과를 비교해 보는 것이다. 시뮬레이션 모델을 비교, 검증하면서 중요한 요소 중 하나인 샘플링 시간은 각각의 실시간/비 실시간 상황에서의 동일한 환경을 구축하기 위하여 0.2 ms 로 동일 하게 하였다.

5.1 비 실시간 시뮬레이션 결과

비 실시간 시뮬레이션에서는 Simulink 를 이용하여 구현한 Fig. 5 의 시뮬레이션 모델을 이용하여 Fig. 11~13 의 결과를 얻었다.

Fig. 11 은 한빛 200 차량 한 대를 초기속도 50 km/h, 제동력 6 kN 으로 제동되고 있는 차체의 선속도를 나타내고 있다.

Fig. 12 위와 동일한 상황에서 4 개의 윤축 원주속도를 나타내고 있다.

Fig. 13 은 윤축의 원주속도가 되먹임 되어 기계적 제동력이 속도 및 활주발생 상태에 따라 변하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 이 결과는 비 실시간에서 초기속도 100 km/h 이고, 첫번째 윤축이 20~100 m 사이에서 활주(점착계수가 기존값의 5%로 감소)가 발생한 경우이다. 구체적인 활주방지로직에 대해서는 참고문헌^(11,12)을 참조하기 바란다.

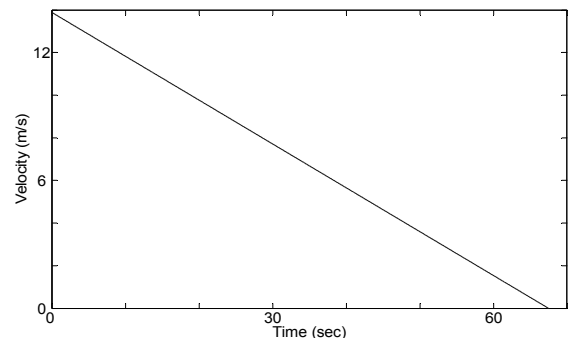


Fig. 11 Off-line simulation for carbody velocity

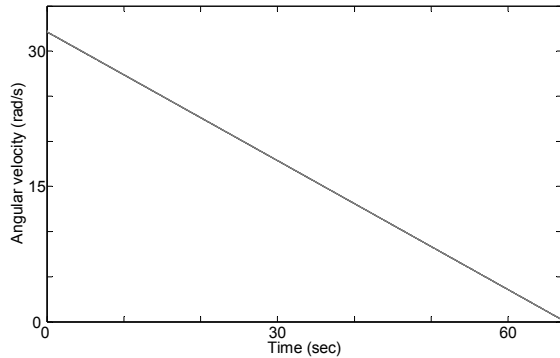


Fig. 12 Off-line simulations for 4 wheelsets angular velocities

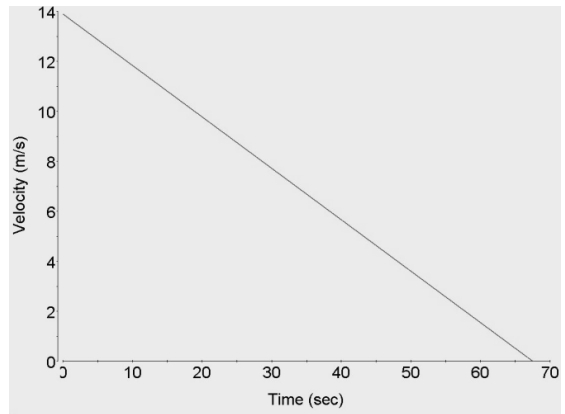


Fig. 15 Real-time simulation for carbody velocity

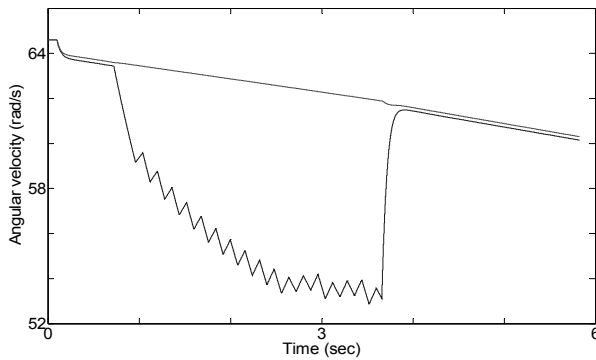


Fig. 13 Off-line simulation when skid occurred at the 1st wheelset angular velocity

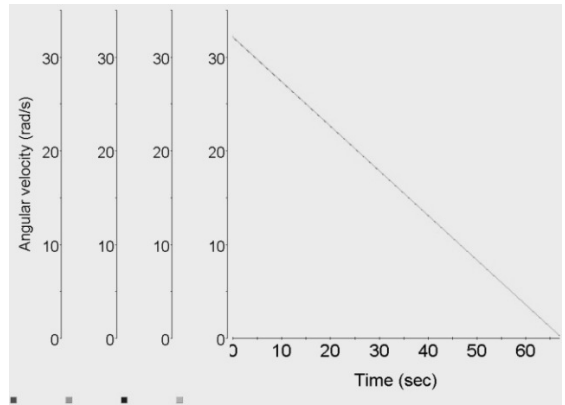


Fig. 16 Real-time simulations for 4 wheelsets angular velocities

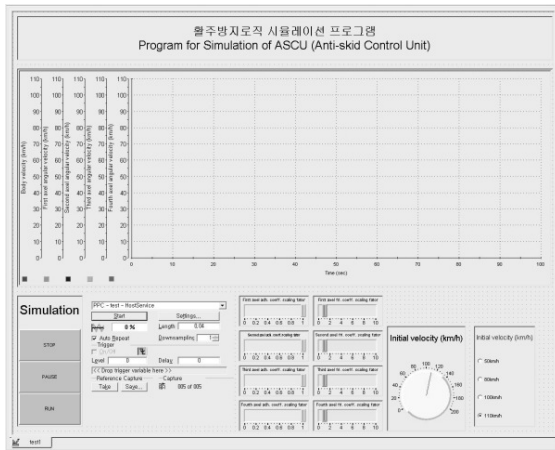


Fig. 14 GUI screen using ControlDesk

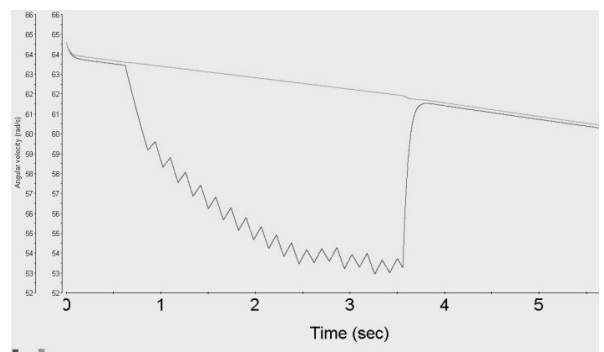


Fig. 17 Real-time simulation when skid occurred at the 1st wheelset angular velocity

5.2 실시간 시뮬레이션 결과

실시간 시뮬레이션은 기존의 검증작업을 거친 비 실시간 시뮬레이션 모델을 HILS 시스템의 모델로 사용하기 위한 검증작업이 필요하다.⁽⁹⁾

실시간 시뮬레이션은 Fig. 7의 Real-Time Workshop을 이용한 실시간 시뮬레이션 모델을 이용하여 수행되었고, 그 결과는 Fig. 15~17과 같다.

위의 실시간 시뮬레이션 수행을 위하여 ControlDesk를 이용한 Fig. 14와 같이 GUI (Graphical User Interface) 프로그램을 구성하였다. 이 GUI의 구

성은 시뮬레이션의 결과를 볼 수 있는 plot 부분과 파라미터를 사용자가 원하는 값으로 셋팅 할 수 있는 파라미터 부분으로 나누어져 있다.

Fig. 15~16 은 Fig. 11 과 동일한 상황에서 HILS 시스템을 사용하여 실시간 시뮬레이션을 한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 17 은 Fig. 13 과 동일한 상황에서 HILS 시스템을 사용하여 실시간 시뮬레이션을 한 결과를 보여주고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 한빛 200 틸팅차량의 제동 동특성을 파악하기 위한 실시간 시뮬레이션 모델을 구현하고, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 한빛 200 의 기계적 제동시스템을 분석하고, 실제 차량에 장착되어 있는 활주방지제어장치와 덤프밸브를 포함한 HILS 시스템 구성을 제안하였다.

(2) 기존에 검증된 비 실시간 시뮬레이션 모델을 MATLAB 에서 제공하는 Real-Time Workshop Toolbox 를 이용하여 실시간 시뮬레이션 모델로 구현하였다.

(3) 위의 실시간 시뮬레이션 모델을 기반으로 dSPACE 사의 ControlDesk 를 이용하여 GUI 프로그램을 구현하고, DS1104 에 다운로드하여 실험한 결과를 비 실시간 시뮬레이션 결과와 비교 분석함으로써 타당성을 입증하였다.

차후에는 검증된 실시간 시뮬레이션 모델을 이용하여 ASCU 와 덤프밸브가 포함된 HILS 시스템을 시험하고 진보된 활주방지로직을 개발하여 실차 실험을 위한 교두보를 마련하는 것이 필요하다.

후 기

이 논문은 2009 학년도 건국대학교의 연구년지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Kim, H.-Y., Kang, C.-G., Lee, N.-J., Kim, M.-S. and Goo, B.-C., 2008, "Train Vehicle Simulation for a HILS System of Air Brake," *Proc. of Spring Annual Meeting of Korea Society for Railway*, pp. 857~862.
- (2) Shin, G.-B., Goo, J.-S., Lee, D.-B. and Lee, E.-G., 2008, "A Study on Conceptual Design and Dynamic Model of High-Speed Roller Rig for Maintenances," *J. of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 2, pp. 145~150.
- (3) Kang, Chul-Goo, 2007, "Analysis of the Braking System of the Korean High-Speed Train Using Real-Time Simulations," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No.7, pp.1048~1057.
- (4) Pugi, L., Rinchi, M., Malvezzi, M. and Cocci, G., 2005, "A Multipurpose Platform for HIL Testing of Safe Relevant Railway Subsystem," *Proc. of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 282~288.
- (5) Lee, D.-M., Lee, Y.-S. and Ji, J.-K., 2007, "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Using MATLAB/SIMULINK and dSPACE DS1104," *Journal of the Korean Academic Industrial Society*, Vol.8, No. 2, pp. 212~218.
- (6) Park, Y.-G., Eum, K.-Y., Choi, J.-Y. and Sung, D.-Y., 2007, "Stability Evaluation of Track on Conventional Line According to Traveling Tilting Train," *J. of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 6, pp. 701~708.
- (7) Advanced Materials Tilting Train System Research Corps., 2009, <http://www.hanvit200.com>.
- (8) Kim, J.-S. and Kim, N.-P., 2005, "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.
- (9) KRRI, 2005, Practical Technology Development for the Tilting System, *Annual Report*, MOCT.
- (10) Kang, C.-G., Kim, H.-Y. and Goo, B.-C., 2008, "2D Modeling and Brake System Simulation of a Train," *Proc. of Autumn Annual Meeting of Korea Society for Railway*, pp. 811~816.
- (11) Kang, C.-G., Kim, H.-Y., Kim, M.-S. and Goo, B.-C., 2009, "Anti-Skid Control System Analysis of a Tilting Train," *Trans. of the KSME A*, Vol. 33, No. 2, pp. 169~178.
- (12) Kang, C.-G., Kim, H.-Y., Lee, N.-J., Kim, M.-S. and Goo, B.-C., 2009, "Creepage Model Analysis for a Tilting Train," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 232~242.