

활주방지로직 시험장치에 대한 연구[§]

김 호 연* · 강 철 구**†

* 건국대학교 기계공학부

Study on Experimental Equipment for Anti-Skid Control Logic Test

Ho-Yeon Kim* and Chul-Goo Kang**†

* School of Mechanical Engineering, Konkuk Univ.,

(Received June 16, 2010 ; Revised November 10, 2010 ; Accepted November 15, 2010)

Key Words: Braking Characteristics(제동 동특성), Train Brake System(철도제동시스템), HILS System(HILS 시스템), Anti-Skid Control(활주방지제어)

초록: 철도차량에서 활주방지제어장치를 포함한 제동 시스템을 이해하는 것은 안전과 철도차량의 운영을 위하여 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 실제 철도차량에 장착되어 있는 활주방지제어장치와 동역학 모델이 포함되어 있는 HILS 시스템을 이용하여 한빛 200의 활주현상을 해석하였다. 활주를 발생시키기 위해 Simulink를 이용하여 프로그램 하였고, 결과를 확인하기 위한 GUI 프로그램은 dSPACE사에서 제공하는 ControlDesk를 이용하였다.

Abstract: To maintain the safety and efficiency of railroad vehicles, it is important to understand the working of the brake system with anti-skid control unit (ASCU) for rolling stocks. In this paper, a HILS (Hardware In-the Loop Simulations) system with ASCU hardware (for logic) and a DSP board (for dynamics) is developed to analyze skidding of the Hanvit-200 train during the process of braking. Experimental results are presented for the case that the skid on one of the four wheels is artificially generated using a Simulink model. A convenient GUI is prepared using ControlDesk of dSPACE.

1. 서론

최근 세계적으로 저 탄소 녹색성장을 권장하고 있는 가운데 코레일(KORAIL)도 2015년까지 에너지 비용과 이산화탄소 배출 비용 등을 절감하겠다고 하는 내용으로 'ECO-RAIL 2015' 비전을 선포했다. 이를 위하여 코레일은 총2,180량의 친환경 전기철도차량을 도입할 예정이며, 전기기관차(EL) 159량, 간선형 준고속 전동차(EMU) 518량, KTX-II 550량으로 구성되어 있다.⁽¹⁾ 하지만 아직까지는 전기기관차는 연구 중이며, 기존의 차량을 좀 더 효율적으로 사용하여야 한다. 특히 그 중 제동 시스템에 대한 연구는 매우 중요하지만, 연구 실정이 미비하다. Fig. 1은 최근에 연구된 철도차량(서울지하철 4호선 기준; 2004년~2009년)의 고장빈도이

다. 이를 보면 제동 시스템이 전체의 17.6%를 차지하고 있다. 주회로를 제외 하면 두 번째로 많은 비중이다. 또한 제동 시에 발생하는 활주(skid)현상에 의해 찰상(flat)현상이 일어나고 있는 것에 대한 연구도 많이 진행되고 있다.^(2,3) 이와 같이 제동 시스템은 철도 기술 중에서도 안전과 관련되는 중요한 기술이면서도, 매우 까다롭고 어려운 기술이라고 할 수 있다. 철도시스템의 특설상 실제 시스템을 가지고 다양한 환경에서의 제동 실험을 수행한다는 것은 쉽지 않은 일이다.⁽⁴⁾

이러한 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 다양한 연구가 이루어졌다. 김호연 등은 한빛200의 철도차량 시뮬레이션을 하였고,⁽⁴⁾ 강철구 등은 철도차량의 활주방지시스템을 시뮬레이션 연구하였다.⁽⁵⁾ 이를 기반으로 김호연 등은 한국형 틸팅열차의 기계적 제동 동특성에 대한 실시간 시뮬레이션을 수행하였다.⁽⁶⁾

HILS(Hardware In-the Loop Simulations) 시스템은 실제 시스템을 구현하기 이전에 시스템을 검증하고 실험하기 위하여 많은 시스템에서 사용되고

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계 학술대회 (2010. 6. 3.-4., 광주광역시) 발표논문임.

† Corresponding Author, cgkang@konkuk.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

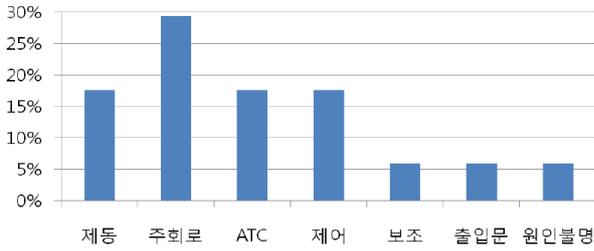


Fig. 1 Failure rate of each unit

있다. 특히 실제시스템을 제작하기에 많은 예산과 인력이 드는 산업분야에서 중요한 기술이다.⁽⁷⁾

본 논문에서는 위의 연구들을 기반으로 철도차량의 동역학 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 확인하기 위하여 실제 차량에 장착되어 있는 활주방지제어장치(ASCU; Anti-Skid Control Unit)을 포함한 HILS 시스템을 구축 하였다. 이를 위해 2절에서는 활주방지제어시스템을 분석하고, 3절에서는 실제 HILS 시스템에서 사용될 실시간 시뮬레이션 동역학 모델을 제시하고, 4절에서는 실제 활주방지제어장치가 포함된 HILS 시스템을 구축한다. 마지막으로 5절에서는 실험 결과를 제시한다.

2. 활주방지제어시스템 분석

본 논문에서는 현재 한국철도기술연구원 신소재틸팅열차시스템 연구단에서 개발 중인 한국형 틸팅열차인 한빛200의 활주방지제어시스템을 기반으로 하는 HILS 시스템을 구현 하기 위하여 제원을 분석하였다. 실제 차량에는 아래의 Fig. 2와 같이 장착 되어 있으며, 철도 차량과 차량 사이 커플러 뒤쪽의 실내공간에 장착되어 있다. 활주방지제어는 차량 한량당 한 개의 활주방지제어장치, 두 개의 덤프밸브(dump valve)와 네 개의 속도센서로 구성되어있다. 네 개의 차축의 각속도들은 속도센서에 의해 감지된다. 각 센서는 펄스신호를 발생하고, 활주방지제어장치는 네 개의 차축속도의 변화률(감속도의 변화률)을 계산하여, 각 대차의 덤프밸브를 제어한다.⁽⁸⁾ 활주방지제어장치는 크게 제어부와 구동부로 이루어져 있으며, 제어부에서는 속도신호를 연산하고, 구동부에서 덤프밸브를 동작시킨다. 그 시스템의 블록다이어그램은 아래의 Fig. 3과 같다.

먼저 본 차량에서 사용되는 활주방지제어장치의 정확한 동작을 확인하기 위하여, 본 제품의 제작사에서 실험하는 임의의 활주상황의 분석 내용을 참고하였다.⁽⁹⁾ 하나의 경우를 예를 들면, dSPACE 보드 프로그래밍을 통하여 아래의 Fig. 4



Fig. 2 Actual ASCU

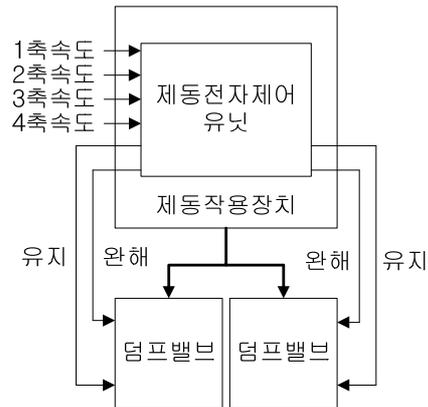


Fig. 3 Diagram of the ASCU system

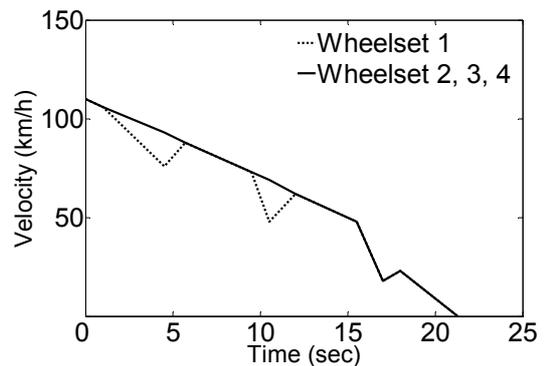


Fig. 4 Test mode for skid states

와 같은 신호를 모사하였다. Fig. 4의 앞부분은 첫 번째 윤축(wheelset)이 두 번의 활주를 일으키는 상황이고, 뒷부분은 모든 축이 활주를 일으키는 상황을 나타낸다.

3. HILS 시스템 구현을 위한 실시간 시뮬레이션 동역학모델

HILS 시스템 구현을 위한 실시간 시뮬레이션 동역학모델을 구현 하기 위해서는 크게 차량 동역학부분과 실시간 시뮬레이션이 가능한 DSP보드(DS1104 사용)와의 입, 출력 부분으로 구성된다.

그 중 차량 동역학모델을 구축하기 위하여 톨팅 차량의 2 차원(2D; 2 dimensional) 모델을 고려하였다. 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.^(5,6) 그러면 차체의 진행방향 동역학모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 m_{cb} \ddot{x}_{cb} = & -2\{k_{x_{as}}(x_{cb} - x_{fb}) + c_{x_{as}}(\dot{x}_{cb} - \dot{x}_{fb})\} \\
 & -2\{k_{x_{as}}(x_{cb} - x_{rb}) + c_{x_{as}}(\dot{x}_{cb} - \dot{x}_{rb})\} \\
 & -2\{c_{x_{yd}}(\dot{x}_{cb} - \dot{x}_{fb}) + c_{x_{yd}}(\dot{x}_{cb} - \dot{x}_{rb})\} \\
 & -\{k_{x_{tl}}(x_{cb} - x_{fb}) + k_{x_{tl}}(x_{cb} - x_{rb})\}
 \end{aligned}$$

여기서 m 은 질량, k 는 스프링상수, c 는 점성마찰계수를 나타내고, 하첨자 cb 는 carbody, fb 는 front bogie, rb 는 rear bogie, as 는 air spring, yd 는 yaw damper, tl 은 traction link를 의미한다.

차체의 수직방향과 피치방향 동역학모델, 대차의 진행방향, 수직방향, 피치방향 동역학 모델, 그리고 윤축의 진행방향, 수직방향, 피치방향 동역학 모델은 참고논문^(5,6)을 참조하기 바란다.

DSP 보드와의 입·출력을 위해서는 DSP보드의 제작사인 dSPACE에서 제공되는 Block을 사용한다.

Fig. 5은 활주방지제어장치를 포함하지 않은 상태에서의 실시간 시뮬레이션 모델이다. 차량의 동역학 모델은 실시간 시뮬레이션이 가능한 DSP보드에 다운로드하고, 각각의 제동력을 DAC (Digital Analog Converter)와 ADC (Analog Digital Converter)를 이용하여 입·출력하여 실시간 시뮬레이션 모델을 구성하였다.

Fig. 6은 실제 활주방지제어장치와 연결하기 위하여 차량의 동역학모델을 하나의 subsystem 으로 만들고, DSP 보드의 출력을 위하여 DS1104 블록을 사용하였다. 실제 철도차량의 속도센서에서는 각속도를 인식하므로, 실제와 같이 각속도를 출력했다. 하지만 활주방지제어장치는 주파수로 입력을 받기 때문에 각속도를 선속도로 변환하고, 이에 9.705를 곱하여 주파수 값으로 출력해 준다.⁽⁸⁾

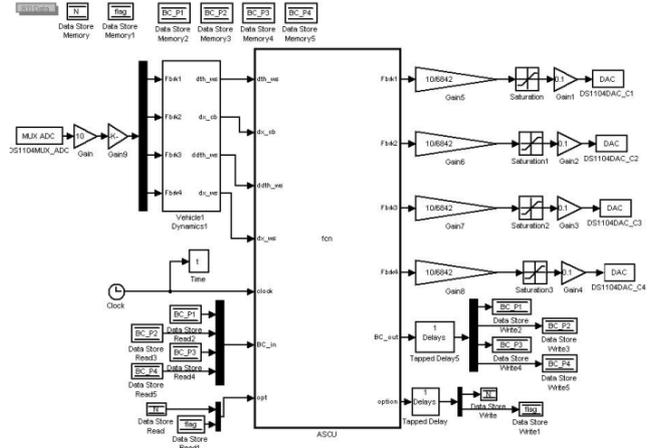


Fig. 5 Simulink model used for Real-Time Workshop

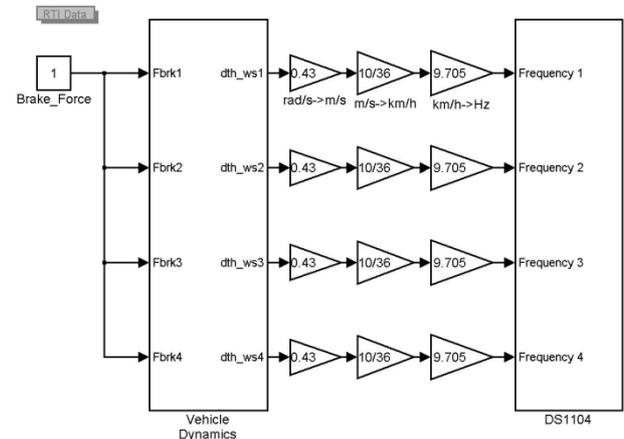


Fig. 6 Simulink model used for Real-Time Workshop

4. HILS 시스템

3절에서 구성한 시뮬레이션 모델(Fig. 6참고)과 실제차량에 장착된 활주방지제어장치를 연결하여 HILS 시스템을 구현하려고 한다. 이를 위해 Fig. 7과 같이 실제 HILS 시스템을 구축하기 위한 개략도이다. 하지만 HILS 시스템을 구현하는 과정은 크게 네 가지로 나눌 수 있다. 먼저 속도센서에서 들어 오는 윤축의 각속도를 대신해서 생성해주는 각속도 생성 부분과 이 신호와 활주방지제어장치의 전압레벨이 맞지 않기 때문에 필요한 승압회로, 실제 차량에 장착되어 있는 활주방지제어장치, 제동력을 조절 하기 위한 덤프밸브의 출력부분이다. 위의 네 가지 과정을 결합하기 위해서는 각각의 장비에서 요구 하는 입력 전압의 레벨이 일치해야 한다. 그러한 작업을 하기 위하여 Fig. 8과 같이 정리하였다.

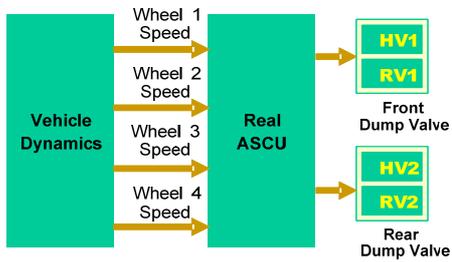


Fig. 7 Conceptual configuration of the HILS system

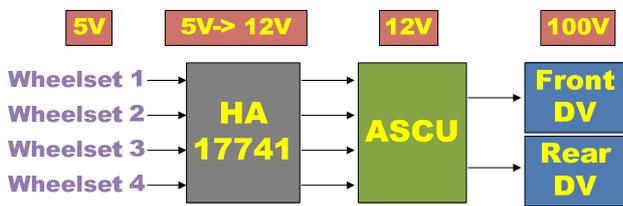


Fig. 8 Voltage-level of HILS system

본 논문에서는 Fig. 9 와 같이 실제 시스템을 구성하였다. 하지만 본 논문에서는 덤프밸브의 출력 신호를 감지하는 대신 덤프밸브의 지령신호를 이용하였다. 덤프밸브의 지령신호는 ASCU의 전면 LED패널을 가지고 확인하였다. 특히 DSP보드의 각속도 생성부분과 활주방지제어장치 부분의 전압 레벨을 맞추기 위하여 Fig. 10 과 같이 간단한 회로 시뮬레이션을 거쳐 Fig. 11 과 같은 결과를 얻었다. 여기서 x축은 시간(sec)을 나타내고, y축은 전압(V)을 나타낸다. 이 회로의 출력은 다시 승압 회로를 거쳐 실제 시스템에 사용된다.

5. 모의실험 결과

3절에서 구현한 실시간 시뮬레이션 모델을 이용하여, 4절에서 HILS 시스템을 구축하였다. 실제 활주방지제어장치는 여섯 개의 LED로 상태를 표시한다. 맨 위의 LED는 현재 활주가 발생하였는지를 보여준다. 그 다음 네 개의 LED는 각각의 윤축을 나타낸다. 마지막 LED는 비정상적으로 동작하였을 경우를 나타내 준다.

활주가 발생하면 먼저 배기모드로 들어가서 제동공기압을 배기시킨 후, 원하는 감속도로 복귀되면서 회복모드로 돌아온다. 장비 앞의 LED 표시창에는 배기모드일 때는 적색, 회복모드일 때는 녹색의 불이 들어온다.



Fig. 9 Actual HILS system

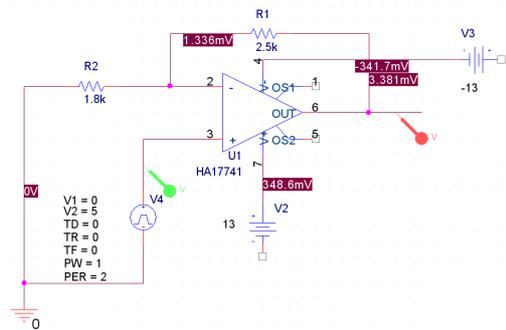


Fig. 10 Circuit of boost the voltage

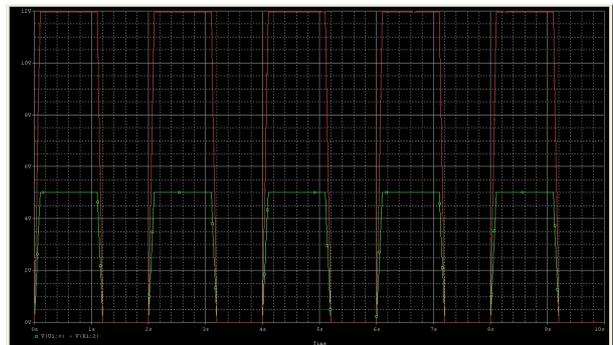


Fig. 11 Results of Circuit simulations

프로그램 구동부분은 DSP보드에서 제공되는 GUI프로그램인 ControlDesk를 이용하여 Fig. 12, 14, 16을 구현하였다. 본 프로그램은 프로그램의 동작 여부를 결정하는 버튼부분과 프로그램 상태창, 각각의 윤축의 선속도를 나타내는 부분으로 이루어져 있다. 이를 이용하여 세가지 모드에서의 시뮬레이션을 아래와 같이 수행하였다.

첫번째 모드는 첫번째 윤축의 이동거리가 20~50m사이에서 점착계수를 10%로 감소시켜 활주를 발생시킨 상태이다(Fig. 12 참조). 이때 LED창의 상태는 활주가 발생하였을 때 맨 위의 LED는 활주를 감지하여 적색을 나타내고 활주가 일어난

첫번째 윤축의 LED가 배기 모드인 적색을 나타내고 재점착이 일어나면 회복모드인 녹색불이 들어온다. 구체적인 상황은 아래의 Fig. 13 과 같다. Fig. 12 에서 x축은 시간을(sec), y축은 왼쪽부터 1~4 윤축의 선속도(km/h)를 나타낸다.

두 번째 모드에서는 서로 다른 두 윤축에서 같은 조건의 활주가 발생하였을 경우에 정상적으로 동작이 되는지를 확인하기 위하여 윤축의 이동거리가 20~50m 사이에서 첫번째 윤축과 세번째 윤축의 점착계수를 10%로 감소시켜 활주를 발생시킨 상태이다(Fig. 14 참조). 이때 LED 창외의 상태는 먼저 활주가 발생한 두번째 윤축이 배기모드가 되어 적색이 들어오고 그 후 첫번째 윤축에 적색이 들어왔다. 그런 다음 먼저 재점착이 일어나는 첫번째 윤축이 회복모드가 되어 녹색불이 들어온다. 그 후 두번째 윤축에도 적색불이 들어온다. 두 윤축은 같은 조건에서 활주가 발생하였기 때문에 같은 시기에 LED 창외의 변화가 일어났다. 이에 따른 구체적 상황은 아래의 Fig. 15 와 같다. Fig. 14 에서 x 축은 시간을(sec), y 축은 왼쪽부터 1~4 윤축의 선속도(km/h)를 나타낸다.

세 번째 모드에서는 서로 다른 두 윤축에서 다른 조건의 활주가 발생 하였을 경우에 정상적으로 동작이 되는지를 확인 하기 위하여 윤축의 이동거리가 20~50m 사이에서 첫번째 윤축은 점착계수를 10%로 감소시키고 두번째 윤축은 점착계수를 5%로 감소시키고 활주를 발생시킨 상태이다(Fig. 16 참조). 이때 LED 창외의 상태는 먼저 활주가 발생한 두번째 윤축이 배기모드가 되어 적색이 들어오고 그 후 첫번째 윤축에 적색이 들어왔다. 그런 다음 먼저 재점착이 일어나는 첫번째 윤축이 회복모드가 되어 녹색불이 들어온다. 그 후 두번째 윤축에도 적색불이 들어온다. 두 윤축은 같은 조건에서 활주가 발생하였기 때문에 같은 시기에 LED 창외의 변화가 일어났다. 이에 따른 구체적 상황은 아래의 Fig. 17 과 같다. 위의 내용과 같이 Fig. 17에서는 첫번째 윤축이 먼저 회복이 되는 특징을 정확히 판단해 내는 부분까지 시뮬레이션에서 확인할 수 있다.

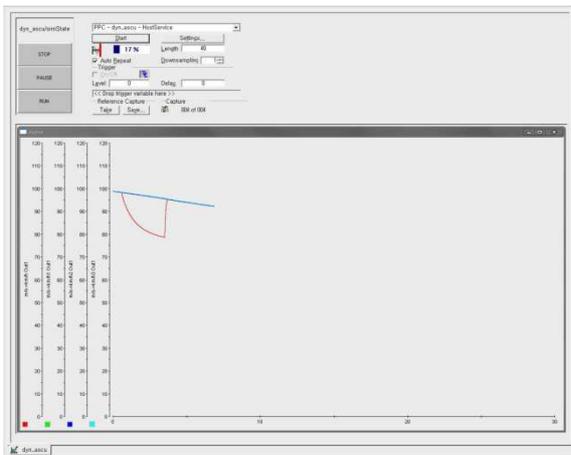


Fig. 12 GUI screen of the case 1

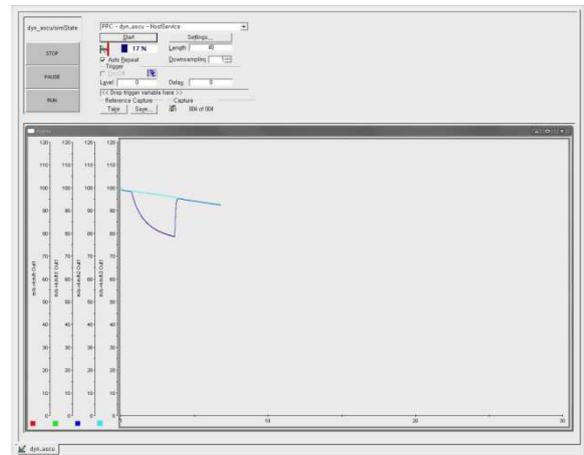


Fig. 14 GUI screen of the case 2

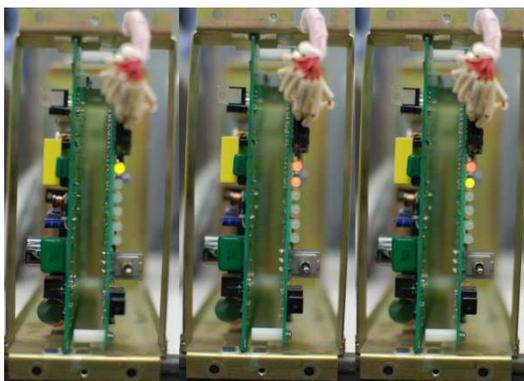


Fig. 13 LED panels for the case 1

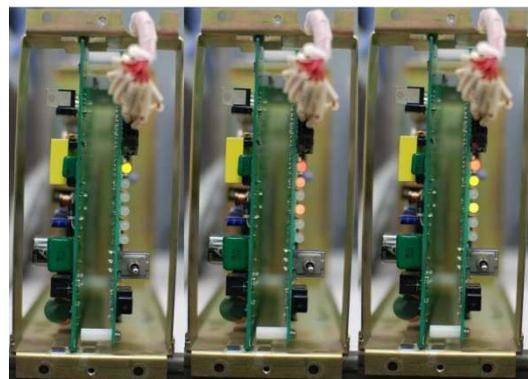


Fig. 15 LED panels for the case 2

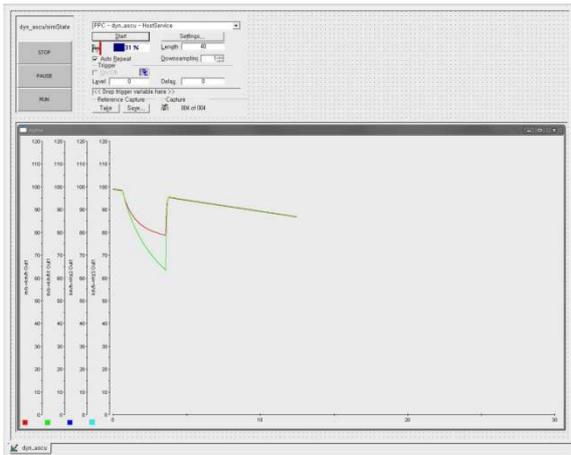


Fig. 16 GUI screen of the case 3

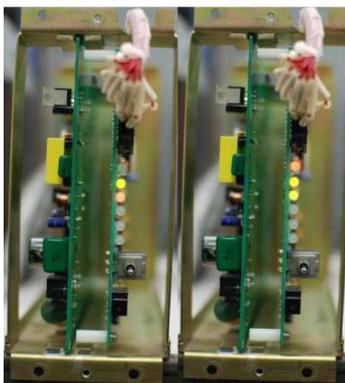
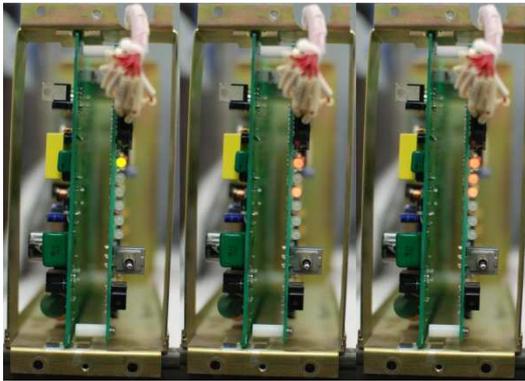


Fig. 17 LED panels for the case 3

6. 결 론

본 논문에서는 실제 철도 차량에 장착되어 있는 활주방지제어장치를 포함한 HILS 시스템을 구축하였다. 본 논문의 결과는 다음과 같다.

(1) 한국형 틸팅차량의 실제 장착상태를 고찰하고, 활주방지제어시스템을 분석하였다.

(2) 동역학 모델을 포함한 실시간 시뮬레이션 모델을 구축하고, 이를 이용하여, HILS 시스템을 구축하기 위하여 DSP 보드에 다운로드하여 실험하였다.

(3) 활주방지제어장치와 실시간 시뮬레이션모델을 이용하여, HILS 시스템을 제안하고, 구축하였다.

(4) 실제상황에서 일어날 수 있는 세가지 모드를 예측하여, 구현한 HILS 시스템을 검증하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) KORAIL, 2008, http://news.korail.com/main/php/search_list.php?pg=6&skkey=ECO-RAIL.
- (2) Jergeus, J., Odenmarck, C., Lunden, R., Sotkovszki and P., Karlsson, 1999, "Full-Scale Railway Wheel Flat Experiments," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F, Journal of rail and Rapid Transit*, Vol. 213, No. 1, pp.1~13.
- (3) Jergeus, J., 1998, "Martensite Formation and Residual Stresses Around Railway Wheel Flats Stresses Around Railway Wheel Flats," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 212, No.1, pp. 69~79.
- (4) 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," *Proceedings of Korea Society For Railway Spring Annual Meeting*, pp. 857-862.
- (5) Kang, C. G., Kim, H. Y., Kim, M. S. and Goo, B. C., 2009, "Anti-skid Control System Analysis of a Tilting Train," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 33, No. 2, pp. 169~178.
- (6) Kim, H. Y. and Kang, C. G., 2009, "Real-time Simulation for Dynamic Characteristics of Mechanical Braking of the Korean Tilting Train," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 33, No. 11, pp. 1294~1299.
- (7) Huang, S. and Tan, K. K., 2010, "Hardware-in-the-Loop Simulation for the Development of an Experimental Linear Drive," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 4, pp. 1167~1174.
- (8) YUJIN ELECTRIC LTD, 2004, "Anti-Skid Control Unit"
- (9) Kim, H. Y., Kang, C. G. and Goo, B. C., 2010, "Study on a Brake HILS system of a Rolling Stock Including ASCU," *ICROS Annual Conference*, pp. 62-65.