

고속전철 제동시스템의 HILS

HILS of the Braking System of a High Speed Train

황원주, 강철구
(Won-Ju Hwang and Chul-Goo Kang)

Abstracts : Korea High Speed Train (KHST) is supposed to run up to 350 km/h, in which the braking system has a crucial role for the safety of the train. In the design step of the braking system, it's very hard to acquire information data for design guidelines. A HILS (Hardware-In-the-Loop Simulation) system can be used to get design data which could simulate the braking system of the real train in real-time. In this paper, a HILS system for the braking system of the KHST is partially developed and studied. For simplicity, two cars are modelled including car dynamics, brake blending algorithms, pneumatic actuator dynamics, the models of each braking devices, adhesive coefficients, and soon. Real-time braking time, distance, and other design parameters are simulated using a DSP board and C language which shows the validity of the proposed method.

Keywords : HILS, train brake system, high speed train, real-time simulation

I. 서론

철도는 한 국가내 여러 분야 기술의 집약체로서 통합시스템 기술이 필요하다. 현재 우리나라에서는 국책 사업의 하나로 한국형 고속전철 개발에 박차를 가하고 있다[1]. 한국형 고속전철은 350km/h의 속력을 목표로 하고 있다. 고속전철은 일시에 많은 생명을 실어나르는 수단이기 때문에 높은 안정성과 신뢰성이 필요하며, 따라서 고속전철의 제동장치는 매우 중요하다고 할 수 있다. 하지만 이 분야의 기술은 몇몇 선진국 만이 보유하고 있고 대외적으로 공개하고 있지 않기 때문에 기술 개발에 많은 어려움이 있다.

본 논문에서는 고속전철 제동시스템의 설계 가이드라인을 제시하고 설계 데이터를 획득할 수 있는 HILS (hardware-in-the-loop simulation) 시스템을 개발하고자 한다. HILS의 방법은 동적 시스템의 일부를 동역학식으로 대체한 뒤 빠른 연산 칩과 타이머 인터럽트를 이용하여 실시간으로 모의실험하는 것이다. 본 고속전철 제동시스템의 HILS는 DS1102 전용 DSP보드의 빠른 연산기능 및 타이머 기능을 활용하여 제동시스템을 실제 고속전철에 설치하지 않고도 실제와 근사한 제동시스템의 실험데이터를 얻을 수 있는 실시간 모의실험 시스템으로서, 제동거리와 제동시간 등의 설계 파라미터들을 얻을 수 있다.

II. HILS 시스템의 구성

접수일자 : 2000. 9. 7., 수정완료 : 2001. 1. 31.

황원주 : 한국철도 기술연구원(hwj2002@netian.com)

강철구 : 건국대학교 기계항공공학부(cgkang@konkuk.ac.kr)

※ 본 연구는 1999년 한국학술진흥재단 학술연구비(과제번호: 1998-001-E00213)에 의하여 연구되었습니다. 자료를 제공해준 유진기공 이남진군에게, 그리고 본 연구를 도와준 김춘원, 정재봉군에게 감사를 드립니다.

1. HILS의 개요

HILS는 동특성을 가진 시스템의 일부분을 DSP로 대체하여 실시간으로 시뮬레이션을 수행하는 시스템을 말한다[2]. 다시 말하면 HILS는 동특성을 가진 특정 하드웨어를 동역학적으로 모델링하여 입출력 신호를 실시간으로 계산함으로써, 전체 시스템 입장에서 보면 마치 그곳에 실제 특정 하드웨어가 있는 것처럼 느끼게 하는 것이다. 예를 들어 자동차의 ECU (Electronic Control Unit)는 돌발적인 위험상황에 대한 실차 시험을 반복적으로 수행하기 힘들기 때문에, ECU만 실제 하드웨어를 사용하고 나머지 자동차 부분은 모두 동역학적 모델을 실시간 시뮬레이션 함으로써 HILS를 구축할 수 있다[3].

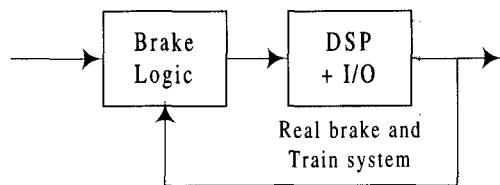


그림 1. 고속전철 제동시스템의 HILS.

Fig. 1. HILS for a brake system of a high speed train.

본 논문에서는 고속전철 제동 로직을 모의시험하기 위하여 고속전철의 모든 기계적 부분을 동역학적 모델로 대체한 후 이를 실시간 시뮬레이션 함으로써 HILS 시스템을 구성한다. 제동 시스템에 필요한 제동제어 로직을 실차 시험할 수 없는 상황에서 실차와 유사한 작동을 시뮬레이션으로 만들어 냄으로써 제동 로직을 시험할 수 있게 한다. 이러한 HILS는 고성능의 DSP (Digital Signal Processor) 칩의 개발에 따라 실시간 데이터 처리 및 제어가 가능해지면서 급속히 발전하게 되었다. 우리나라에서는 80년대 초반까지만 해도 HILS에 대한 인식이 별로 없었다. 그러나, 점차 HILS의

유용성이 확인되기 시작하고, HILS를 이용한 좋은 결과들이 나오기 시작하면서 이에 대한 관심이 높아지고 있다[4]. 그림 1은 고속전철 제동시스템에 HILS를 어떻게 적용시켰는지 나타내어 주는 개념도이다. 여기서, 기준입력신호는 고속전철의 속력이며, 출력신호는 제동력이다.

2. 프로그래밍과 사용자 인터페이스

온라인 상에서의 시뮬레이션 프로그래밍은 TI C 컴파일러로 한다. TI C 컴파일러도 ANSI C에 근거하고 있다[5]. 하지만, 실시간으로 DSP에서 구현되어야 하므로 프로그램에 약간의 변환을 해주어야 한다. 그림 2는 DSP_CIT tool시스템을 보여주고 있다. TI C 컴파일러를 이용하여 컴파일하면 오브젝트 파일(MON)이 생성된다. 이 파일을 DSP에 다운로딩의 과정을 거쳐 연산을 수행하며, 오실로스코프처럼 신호를 볼 수 있는 TRACE 프로그램으로 데이터를 실시간으로 확인, 저장할 수 있다. HILS의 방법을 사용하기 위해서 본 연구에서는 dSPACE (digital Signal Processing And Control Engineering)사에서 제공되는 DS1102 보드 (TMS 320C31 DSP chip 내장)를 사용한다. dSPACE 시스템은 TI C Compiler, Trace, Cockpit 등으로 이루어져 있다[5].

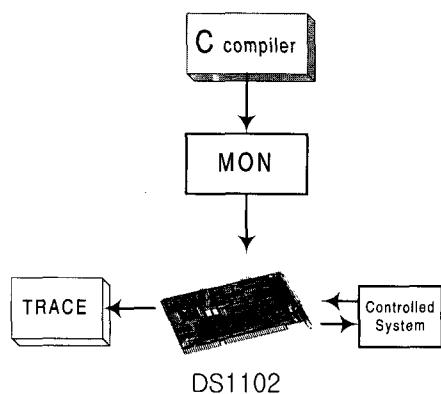


그림 2. DSP-CITpro 시스템.

Fig. 2. DSP-CITpro system.

3. 고속전철과 HILS

많은 생명을 고속으로 실어나르는 고속전철의 안전을 위하여 브레이크 시스템은 매우 중요하다. 이러한 고속전철 제동시스템을 개발할 때 실차시험에 의한 데이터 획득은 전체 차량이 제작되기 전에는 어려우며, 따라서 지금과 같이 기술도입이 어려운 상황에서 설계 가이드 라인을 정하기가 쉽지가 않다. 또한 실차 주행 시험은 최종적으로 수행되어야 하지만 주행상태가 운전자에 의해 크게 좌우되어 일관된 조건에서의 실험수행과 결과 비교가 어려울 수 있다. HILS의 방법은 실차 시험이 수행되기 어려운 상황에서 실제시험과 비슷한 환경으로 모의시험할 수 있다는 장점이 있다.

HILS의 방법은 실험실이라는 제한된 공간 내에서

다양한 주행 조건 및 일관된 시험 조건하에서의 시험과 위험 돌발 상황과 같은 극한 상황에서의 시험 수행이 가능하며, 이와 같은 시험을 손쉽게 반복적으로 수행가능하기 때문에 대상 시스템의 개발 기간을 단축시킬 수 있다. 즉 복잡한 고속전철 시스템을 실차에서 시험할 수 없는 상황에서 HILS의 방법은 모의 시험을 통해 설계 가이드라인을 얻게 한다. 그림 3은 차체와 브레이크 시스템을 수학적으로 모델링한 다음 DSP_cit 툴을 이용하여 시뮬레이션을 수행하는 HILS의 방법을 보여주고 있다.

본 논문에서는 선행연구로서 많은 부분의 동특성을 단순화하였으며, 차량 동역학 모델은 다물체 동역학 (multi-body dynamics)을 이용한 순수 이론적 전차량을 모델링하였으나, 모의실험에서는 2량의 차량이 상호작용하고 있다고 가정하였다. 브레이크 시스템은 시정수와 시간지연을 갖는 1차 시스템으로 가정하여 모델링하였다[6].

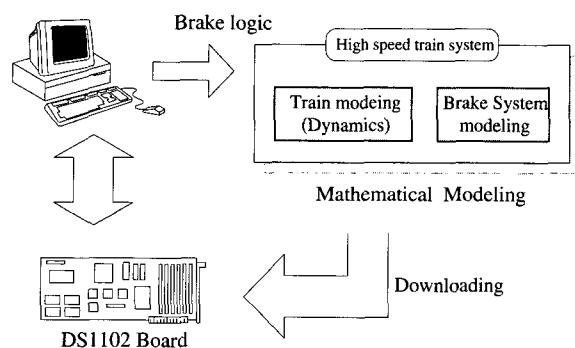


그림 3. 고속전철과 HILS.

Fig. 3. High speed train and HILS.

III. 차량 모델링

1. 차량 구성

한국형 고속전철 차량 시스템은 20량을 1편성으로 한다. 차량 시스템은 동력차(구동차, Power Car) 2대, 동력객차(Motor Car) 4대, 그리고 14대의 객차(부수차, Trailer Car)로 구성되어져 있다. 그림 3은 고속전철의 대차(bogie)에 대한 그림이다.

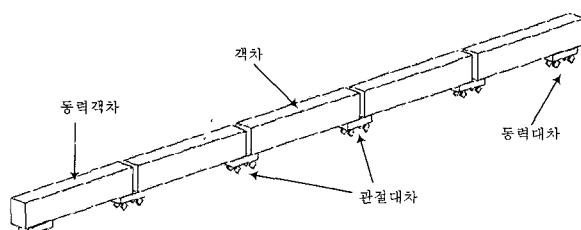


그림 4. 고속전철의 대차.

Fig. 4. Bogies of the high speed train.

2. 차량 모델링

HILS에 있어서는 동역학 모델의 정확성이 중요하다. 본 논문의 고속전철 모델은 대차와 차체를 하나로 보았으며, 차체와 차체, 바퀴와 차체는 스프링과 댐퍼로 연결되어 있다고 가정하였다. 그림 5는 차량 모델을 보여주고 있다.

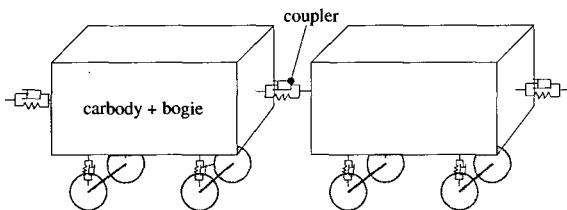


그림 5. 차량 모델.

Fig. 5. Train models.

각 차체는 3차원 강체운동(6자유도 운동)을 하지만 본 시뮬레이션에서는 차량의 2차원 운동만을 고려해, 차체의 진행방향과 수직방향에서의 병진운동과 차체의 무게중심에 대한 회전운동만을 고려하기로 한다. 각 차체(car body) 대한 자유물체도는 아래 그림 6과 같다. 그림에서 x방향이 차량의 진행방향이다.

바퀴와 차체에 대한 동역학식은 다음과 같이 기술할 수 있다. 4차 Runge-Kutta 방법으로 시뮬레이션 하기 위하여 운동방정식을 상태방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{M_b} [F_{c[n]} - F_{c[n+1]} - F_{sf} - F_{sr} - F_r] \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{M_b} [N_{br} + N_{bf} - W_b] \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= \frac{1}{I_b} \left[-(F_{sr} + F_{sf})h_1 + (N_{bf} - N_{br}) \times \frac{b}{2} \right. \\ &\quad \left. + (F_{c[n]} - F_{c[n+1]}) \times h_2 + \tau_f + \tau_r \right] \\ \dot{x}_7 &= \frac{1}{I_w} [\tau_f - rF_{af}] \\ \dot{x}_8 &= \frac{1}{I_w} [\tau_r - rF_{ar}]\end{aligned}$$

여기서 $F_{c[n]}$ 은 연결기사이의 반력, F_{sf} , F_{sr} 은 바퀴축에 수평방향으로 작용하는 힘, F_r 은 공기에 의한 주행저항력, N_{br} , N_{bf} 는 바퀴축에 작용하는 수직반력, W_b 는 차체의 자중, τ_f , τ_r 은 바퀴에 작용하는 제동토크, F_{af} , F_{ar} 은 바퀴와 레일의 접착력이다. 여기서, 하침자 r , f 는 각각 rear wheel, front wheel을 의미한다. M_b 는 차체의 질량, I_b 는 차체의 무게중심에 대한 관성모멘트,

I_w 는 회전중심에 대한 바퀴의 관성모멘트이다. h_1 은 바퀴축에서 차체무게중심까지의 거리, h_2 는 연결기와 차체무게중심까지의 거리이고, b 는 앞뒤 바퀴축간의 거리, r 은 바퀴의 반지름이다. 상태변수 x_1 은 수평방향변위, x_3 은 수직방향변위, x_5 는 차체의 각변위, x_7 은 앞바퀴의 각속도, x_8 은 뒷바퀴의 각속도를 나타낸다.

위의 식을 벡터형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}_n = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{x}_n, \tau_n), n = 1, 2, \dots, 7$$

여기서, $\mathbf{x}_n = [x_1, x_2, \dots, x_8]$ 은 n 번째 차량에 대한 상태벡터이고, τ_n 은 n 번째 차량에서 발생되는 앞뒤 바퀴의 제동토크 입력벡터이다. n 이 7인 것은 시험차량이 7량으로 구성되어 있기 때문이다. 이 상태방정식으로부터 n 번째 차량은 앞뒤 차량의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

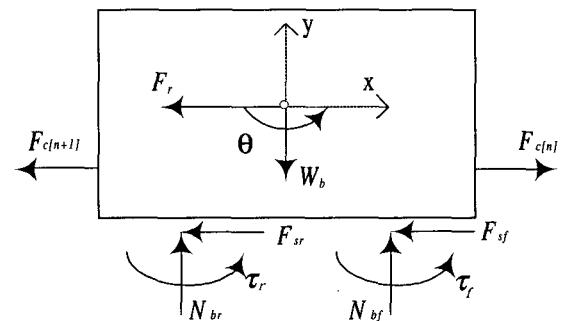


그림 6. 차체의 자유물체도.

Fig. 6. Free body diagram of car bodies.

IV. 제동시스템 구성 및 모델링

제동장치의 구성은 다음과 같다. KHST에서는 회생제동, 저항제동, 마찰제동, 와전류제동 장치가 사용되고 있다. 그림 7과 같이 모터대차에는 답면제동장치 16개(축당 2개, 4개의 Motor bogie × 2축)와 저항제동장치(저항기 8개)가 있으며, 관절대차에는 디스크제동장치(축당 3개, 총 90개의 디스크)와 와전류제동장치(전자석 24개)가 장착되어 있다[7].

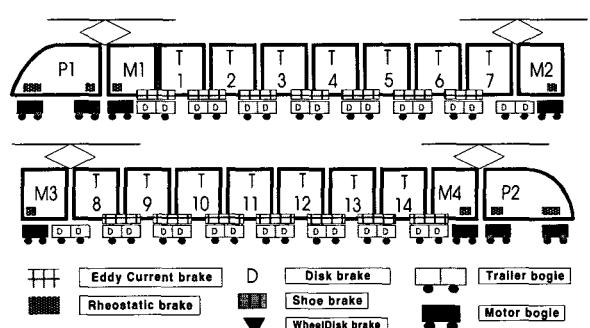


그림 7. KHST 제동시스템 구성도.

Fig. 7. Configuration of the braking system of KHST.

1. 제동시스템 모델링

운전자의 제동지령에 대한 차륜의 제동토크를 구하기 위하여 제동시스템의 모델링을 수행한다. 고속전철의 제동은 마찰제동과 전기제동을 적절히 분배하여 최적의 에너지 효율과 안전성을 얻는다. 일반적으로 저속에서는 마찰제동이 주가 되고, 고속에서는 전기제동이 주가 된다. 각 제동장치 제어기 설계를 위해 제동장치의 모델을 시간지연이 있는 1차 시스템으로 가정하여 차량 제동시스템을 모델링한다. 차량 제동시스템의 모델 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 브레이크 장치의 시스템 사양(단위: 초).
Table 1. Specification of braking units (unit: sec).

	준비시간	지연시간	시정수
회생제동	0.05	0.3	0.2
와전류제동	3	0.3	0.2
디스크제동	1	0.15	0.6
답면제동	1	0.15	0.6

이를 나타낸 전달함수식은 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{k_p e^{-Ls}}{1 + \tau s}$$

이 식을 z 변환 하면,

$$G(z) = \frac{b_1 z + b_2}{z(z - p)}$$

여기서, $p = e^{-T/\tau}$, $b_1 = k_p(1 - pd)$, $b_2 = k_p(d - 1)$, $d = e^{L/\tau}$ 이며, T는 샘플링 시간(sampling time), τ 는 시정수(time constant), L은 시간 지연(time delay)이다. 그림 8은 모델링된 제동장치로부터 나온 제동력을 보여주고 있다.

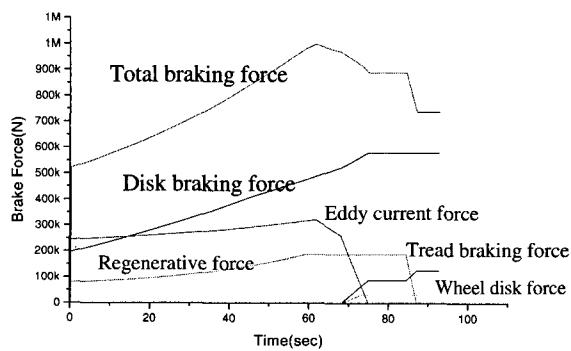


그림 8. 모델링된 제동장치로부터 나온 제동력 선도.
Fig. 8. The braking force diagram from the model.

2. 고속전철 시스템의 HILS

고속전철 제동시스템의 HILS에서는 제동로직에 의해 속도에 따른 적절한 제동력분배가 이루어지며, 차

체 동특성과 몇 가지 가정에 의해 모델링된 제동시스템을 통해 실시간으로 시뮬레이션이 수행된다. 전체적인 흐름도는 그림 9와 같다. 여기서, T_d 는 각 차량별로 분배된 제동지령을, T는 각 차량에서 발생된 실제 제동력을 나타내고, v는 각 차량의 속력을 나타낸다.

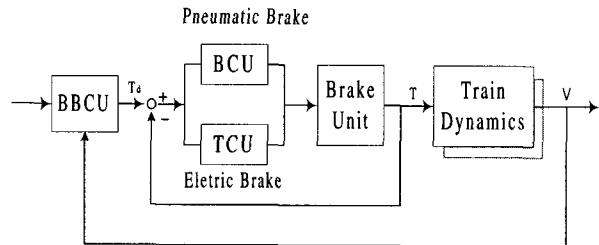


그림 9. 고속전철 제동시스템에 대한 전체적인 흐름도.
Fig. 9. The flow chart of the braking system of the high speed train.

V. 시뮬레이션

1. 제동블렌딩에 의한 시뮬레이션

우선 각 차량의 동특성과 차량간의 상호작용을 무시하여 20량 차량을 하나의 질량으로 보고, 여기에 블랜딩된 총 발생 제동력이 작용한다고 단순화 한 다음 dSPACE 보드에서 실시간 시뮬레이션한 결과는 다음과 같다. 각 제동장치제어기와 회생제동을 위한 가선의 상태를 정상이라 가정하여 제동성능 시뮬레이션을 수행하였다. 실시간으로 시뮬레이션 했을 때, 그림 10과 같이 제동시간은 84초이고 제동거리는 4314m이다.

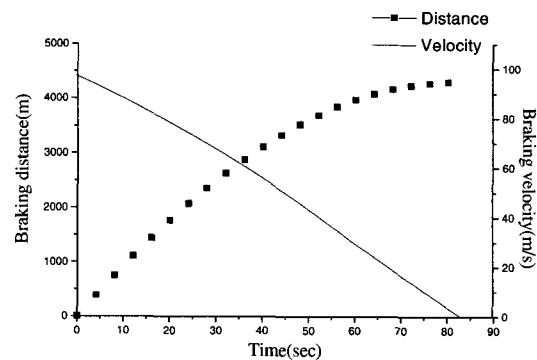


그림 10. 제동블렌딩에 의한 속도와 제동거리.
Fig. 10. The velocity and braking distance by braking blending.

2. 차량간에 동역학을 고려한 시뮬레이션

각 차량의 동특성을 고려하기 위하여 먼저 한 차량만 있다고 가정하여 이에 대한 실시간 시뮬레이션을 수행하였다. 차량은 차체와 대차로 구성되어 있다고 하고, 대차와 차량은 스프링과 감쇠기로 연결되어 있다고 하였다.

회생제동을 위한 가선은 정상이라고 하고, 제동장치

는 모두 정상이라고 한다. 이 때 사용된 제동장치는 단면제동, 회생제동장치이다. 이 경우의 시뮬레이션 결과는 그림 11과 같이 제동시간 42초, 제동거리 2130m이다. 말단 제동장치에서의 샘플링 시간은 본 시스템의 응답속도와 본인의 경험에 의하여 10msec로 하였다.

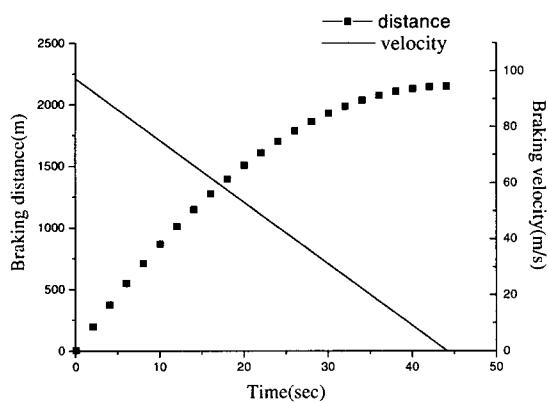


그림 11. 한 차량 만에 대한 제동거리와 속도.

Fig. 11. The braking distance and velocity of one car.

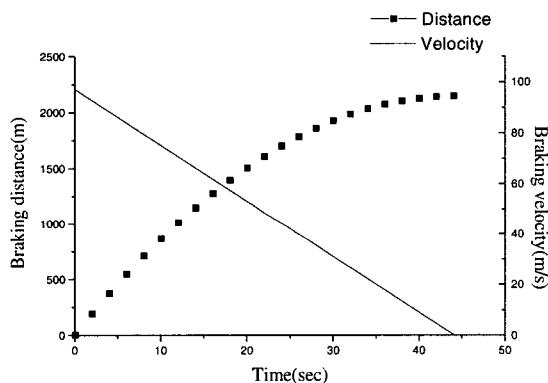


그림 12. 두 차량에 대한 제동거리와 속도.

Fig. 12. The braking distance and velocity of two cars.

차량간의 상호작용을 시뮬레이션하기 위하여 위의 모델로 된 두 차량만을 가진 고속전철이 상호작용하면서 제동이 일어난다고 가정하고 실시간 시뮬레이션을 수행하였다. 차량 사이는 스프링과 감쇠기로 연결되어 있다고 가정하였다. 회생제동을 위한 가선은 정상이라고 하고, 제동장치는 모두 정상이라고 가정하였다. 이 때에도 사용된 제동장치는 단면제동, 회생제동장치이다. 실시간 시뮬레이션 결과는 그림 12와 같이 제동시

간 44초, 제동거리 2147m가 나왔다. 그림 11과 그림 12의 결과는 구성된 시스템의 작동여부를 보여주기 위한 것으로서, 한량 또는 두량 만의 경우이기 때문에, 즉 동력차 또는 동력차와 동력객차 만의 운행상황에서의 제동이기 때문에 20량의 운행결과와는 다를 수 밖에 없다.

VI. 결론

본 논문에서는 실차 시험을 대신할 한국형 고속전철 제동시스템의 HILS를 소개하고 실시간 시뮬레이션 시스템을 구현하였다. 차체동특성을 수학적으로 모델링을 하였으며, 브레이크 장치는 시간지연과 시정수를 가지는 1차 시스템으로 모델링하였다. 브레이크 장치에는 속도에 따라 적절한 제동력을 분배할 수 있도록 브레이크 블렌딩 알고리듬을 적용하였다. 이러한 모델과 알고리듬을 DSP_CITpro 툴을 사용하여 구현하였으며, DSP의 빠른 연산기능과 타이머 인터럽트 루틴을 적용하였고 샘플링 타임을 10ms로 하여 고속으로 주행하는 열차의 실시간 시뮬레이션에 가깝게 하였다.

시뮬레이션 결과 두 차량만으로 구성된 철도차량으로 차량동역학을 고려한 실시간 시뮬레이션을 수행했을 때 초기속도 350km/h에서 제동시간은 44초이었고, 제동거리는 2147m이었다. 앞으로 전체 20량 차량의 동역학을 고려하고, 각 제동장치의 더 정확한 모델을 이용한 실시간 시뮬레이션이 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 정경렬, “차량시스템 개념설계 및 평가기술개발,” G7 고속전철기술개발사업 2차년도 연구성과 보고회, pp. 59-86, 1998.
- [2] H. Hanselmann, “Hardware-in-the-loop simulation as a standard approach for development, customization, and production test,” SAE International Congress, Detroit, USA, 1993.
- [3] 황성호, “HILS의 필요성 및 연구동향,” 제어·자동화·시스템공학회지, 5권, 5호, pp. 18-27, 1999.
- [4] 김성훈, “제어기 및 기계부 개발을 위한 HILS 시스템의 응용과 발전동향,” 제어·자동화·시스템공학회지, 5권 5호, pp. 8-14, 1999.
- [5] dSPACE GmbH, dSPACE User's Guide, 1996.
- [6] 이남진, 강철구, 곽수태, “철도차량 동역학 모델을 이용한 접착력 시뮬레이션,” 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 1767-1770, 1999.
- [7] 유진기공산업(주), G7 고속전철 제동시스템 개발 1단계 보고서, 1999.



황 원 주

1995년 건국대학교 기계설계학과(공학사). 2000년 건국대학교 기계공학과(공학석사). 2000년~현재 한국철도기술연구원. 관심분야는 제어 및 동역학.



강 철 구

1959년 1월 15일생. 1981년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1985년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1989년 미국 University of California, Berkeley 기계공학과 박사(Ph. D).

1990년~현재 건국대학교 기계공학과 조교수, 부교수, 교수. 관심분야는 운동제어, 힘센서, 전철제동시스템, 메카트로닉스 등.