동적 모델에 의한 고속전철의 제동력 시뮬레이션

Brake Force Simulation of a High Speed Train Using a Dynamic Model

이 남 진, 강 철 구
(Nam-Jin Lee and Chul-Goo Kang)

Abstract : The brake system of a high speed train has a crucial role for the safety of the train. To develop a safe brake system of the high speed train, it is necessary to understand the braking principle and phenomena of the total brake system and its subsystems. In this paper, we have suggested a mathematical model which includes car dynamics, interactions between cars, adhesive forces, brake blending algorithm, and the dynamics of each brake devices. Also, we have proposed a ready-time compensation algorithm of eddy-current brake system and a brake control logic on electric-pneumatic blending. A simulation study has shown the proposed models and algorithms are effective on the braking of the train.

Keywords : adhesive force, brake system, train dynamic model, BBCU(brake blending control unit), BCU(brake control unit), skid

I. 서론

고속철도차량 개발의 가장 우선되는 목표는 고속화이다. 하지만, 목표로 하는 고속화는 그 전제로 철저하게 검증된 안전을 바탕으로 해야 한다. 고속 주행시에 운전자가 원할 때, 안전하게, 안정된 거리 내에서, 그리고 발생할 수 있는 모든 상황에 대해 열차는 안전하게 멈출 수 있도록 설계되어야 한다.

안전하고 적절한 제동인가를 위해서는 제동장치와 제동장치간, 제동장치와 차량간, 차량과 운전자간의 유기적인 상호관계를 이해하고, 적절한 대응을 할 수 있도록 제어기를 설계해야 하며, 이것은 실제 주행 시험을 통해 그 성능을 검증 받아야 한다. 하지만, 철도 차량 시스템의 실험 규모나 비용, 그리고 실제 주행시험에 있을 수 있는 안전사고 등의 문제로 시험만으로 그 제동시스템의 안전성과 성능을 검증하기엔 많은 어려움이 있다. 따라서 실제 주행 시험에 앞서 실제주행을 검증할 수 있는 적절한 시스템의 모델링이 필수적이다.

차량의 모델링은 사용 목적에 따라 다양한 형태로 단순화하여 제시되었고, 제시한 모델링을 바탕으로 차량 제어기 설계 연구가 진행된 바 있고[1]-[3], 철도차량 제어 시스템의 지능화에 발맞추어 보다 정밀한 제동현상을 구현하는 모델링을 제안한 연구와[4][5], 현실성 있는 차량 제어기의 설계를 위해 HILS(hardware in the loop system)를 적용한 연구가 진행되었다[6].

본 연구에서는 철도차량의 주행과 제동장치의 거동에 대한 모델을 제안하고, 와전류제동 Ready Time 보상알고리듬과 가상전공블렌딩 기능을 포함한 제동제어로직을 제안하여, 이를 직선궤도구간에 대한 시뮬레이션 연구를 통해 작동가능성을 연구하고, 그 타당성을 보이고자 한다. 열차가 곡선구간을 운행할 때는 주행 특성이 달라지고, 곡선주행저항이 발생하여, 전체 제동거리 및 제동 안정성에도 영향을 미치지만, 본 연구에서는 일차적으로 제동시스템 개발에 필요한 제동특성을 해석하기 위하여 직선구간의 운행으로 제한한다.

접수일자 : 2001. 3. 30., 수정완료 : 2001. 10. 8.
이남진 : 유진기공산업(주)(njlee@yujinltd.co.kr)
강철구 : 건국대학교 기계공학과(cgkang@konkuk.ac.kr)
※ 본 논문은 1998년 한국학술진흥재단 학술연구비(과제번호: 1998-001-E00213)에 의하여 연구되었습니다.

II. 차량의 동역학 모델

본 연구에서 철도차량 시스템은 상호 연동 하에 있는 여러 개의 차량이 모여 전체 시스템을 구성하고 있다고 가정하고, 각 차량에 대해서 그림 1과 같이 차체의 수평, 수직, 피치방향의 운동만을 고려한다.

각 차량과 차량 사이 바퀴와 차체 사이에는 스프링-댐퍼가 설치되어 있다고 가정한다. 전체 시스템에 들어오는 입력 값은 운전자의 제동지령을 받아 회전축에서 발생하는 제동토크이고, 시스템의 출력 값은 차량 중심부의 수직, 수평, 피치운동과 바퀴의 각속도이다.

수직운동, 진행방향의 수평운동, 피치운동에 대한 운동방정식을 구하기 위하여, 그림 1의 모델을 다음과 같이 차체와 바퀴로 나누어 생각한다.

1. 바퀴에 대한 동역학 모델

그림 2(a)와 같이 바퀴가 제동토크를 받으면서 레일 위를 굴러갈 때 바퀴에 작용하는 외력은 그림 2(b)와 같다. 여기서 τ는 제동장치에 의하여 발생되는 제동토크이고, F는 바

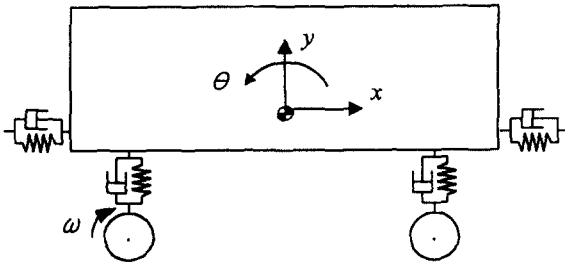


그림 1. 차량 모델의 개념도.
Fig. 1. Schematics of the train model.

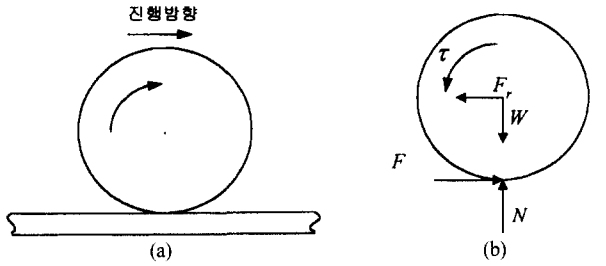


그림 2. (a) 레일 위를 구르는 바퀴, (b) 휠셋의 자유물체도.
Fig. 2. (a) Wheel rolling on the rail, (b) Free body diagram of the wheel set.

퀴와 레일 사이에 작용하는 점착력이다. F_r은 차체와 바퀴 사이에 작용하는 반력이고, W는 차체와 바퀴의 자중과 차체의 관성력을 포함한 수직방향의 하중이다. N은 레일이 바퀴에 가하는 반력이다.

바퀴의 회전중심에 대하여 뉴턴의 법칙을 적용하면 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$M_w\ddot{x} = F - F_r \tag{1}$$

$$0 = N - W \tag{2}$$

$$I_w\dot{\omega} = \tau - r\times F \tag{3}$$

여기서, M_w, I_w는 각각 바퀴의 질량과 관성모멘트이고, r, ω는 각각 바퀴의 반지름과 각속도이다. 시뮬레이션을 단순화시키기 위해 바퀴는 레일에서 미끄러질 수는 있어도, 레일에서 떨어지지 않는다고 가정한다. 또 차량의 진행방향에서 차체에 대한 바퀴의 상대운동은 없다고 가정한다.

2. 차체에 대한 모델링

n번째 차체의 자유 물체도는 그림 3과 같다. 이 그림에서 $F_c[n]$은 n번째 차량과 n-1번째 차량의 연결기가 받는 힘이다. F_{resist}는 차체가 받는 주행저항력이고, 양 바퀴의 축에 작용하는 세 힘들은 그림 3에서 보았던 힘과 작용-반작용의 관계에 있는 힘이다. 여기서 아래첨자 b는 뒷바퀴를 의미하고, 아래첨자 f는 앞바퀴를 의미한다. y는 평형상태로부터 측정되는 값이다.

이 자유물체도로부터 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

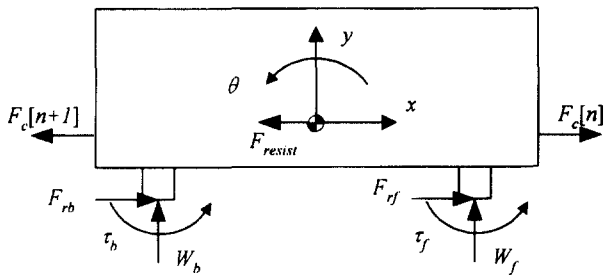


그림 3. n번째 차량의 자유물체도.
Fig. 3. Free body diagram of n-th car body.

$$M_t\ddot{x} = F_c[n] - F_c[n+1] + F_{rf} + F_{rb} - F_{resist} \tag{4}$$

$$M_t\ddot{y} = -W_b - W_f \tag{5}$$

$$\begin{aligned} I_t\ddot{\theta} = {} & (F_{rb}+F_{rf})\times h + (W_f - W_b)\times b/2 \\ & + (F_c[n] - F_c[n+1])\times h' + (\tau_f + \tau_b) \end{aligned} \tag{6}$$

여기서,

$$\begin{aligned} F_C[n] &= -K_c\times(x_n - x_{n+1}) - C_c\times(\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1}) \\ W_b &= -K_b\times(y - \frac{b}{2}\times\theta) - C_b\times(\dot{y} - \frac{b}{2}\times\dot{\theta}) + W_{sb} \\ W_f &= -K_b\times(y + \frac{b}{2}\times\theta) - C_b\times(\dot{y} + \frac{b}{2}\times\dot{\theta}) + W_{sf} \end{aligned}$$

위 식에서 x_n, x_{n-1}은 각각 n번째, n-1번째 차량의 진행방향 변위이다. M_t와 I_t는 차체의 질량과 회전관성모멘트이고, K_b와 C_b는 보기(bogie)의 스프링상수와 감쇠계수, K_c와 C_c는 연결기의 스프링상수와 감쇠계수이다. h는 바퀴 중심에서 차체 무게중심까지의 수직거리이고, b는 양 바퀴사이의 거리, h'는 연결기에서 차체 무게중심까지의 수직거리이다. W_s는 평형상태의 축하중이다.

3. 주행저항력

주행저항력은 크게 기계저항과 속도저항으로 나뉜다. 기계저항은 주로 기계부의 마찰 및 충격에 의한 저항과 차축과 베어링간 마찰저항, 그리고 차륜과 레일간의 구름저항으로 구성되어 있으며, 속도저항은 공기저항과 동요에 의한 저항으로 이루어진다. 주행저항력은 이론식으로 보다는 실험으로부터 얻어진다.

본 논문에서는 아래와 같은 주행저항 F_{resist}을 사용한다[7].

$$\begin{aligned} F_{resist} = {} & 0.77\sqrt{10mM} + 0.008MV + \\ & (0.0225 + 0.00352T)V^2 \quad [daN] \end{aligned} \tag{7}$$

여기서, m은 차륜의 수, M은 열차의 총 중량(ton), V는 차량속력(km/h), T는 객차 수이다.

4. 제동 점착력

제동 점착력은 레일과 바퀴 사이의 마찰력으로, 추진과 제동시 이를 이용하여 원하는 속도를 만든다. 최대 점착력은 접촉면이 받는 수직 하중과 레일의 상태, 차량의 속도 등 여러 인자에 영향을 받는다. 최대 점착력을 넘는 제동토크나 추진토크가 들어오면 바퀴는 미끄러지며, 이러한 미끄러짐은 제동력을 저하하고, 레일과 바퀴의 수명을 단축시키고, 승차감에 악영향을 미치며, 최악의 상황에는 차량의 탈선을 유도하기도 한다. 따라서 미끄러짐은 제동과 추진 제어시 항상 염두에 두어야 할 부분이다.

본 논문에서 사용할 점착계수의 실험식은 아래와 같다[7].

$$\begin{aligned} \mu_{s_{wet}} &= \frac{13.6}{V+85} \quad (\text{습윤시}) \\ \mu_{s_{dry}} &= \frac{27.2}{V+85} \quad (\text{건조시}) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, μ_s는 점착계수이며, wet과 dry는 레일 상태에 대한 아래첨자이다.

5. 상태방정식

앞에서 두 개의 바퀴와 하나의 차체에 대한 9개의 운동방정식을 구했다. 이 운동방정식을 시뮬레이션하기 위하여 미분방정식을 상태방정식 형태로 표현한다. 상태변수를 다음과 같이 정의한다.

$$x_0 = x \quad x_1 = \dot{x}$$
$$x_2 = y \quad x_3 = \dot{y}$$
$$x_4 = \theta \quad x_5 = \dot{\theta}$$
$$x_6 = \omega_f \quad x_7 = \omega_b$$

여기서 각 변수들의 값은 SI 단위로 표현한 값이다. 그러면 (1)에서 (6)으로부터 n번째 차량에 대하여 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

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

여기서, $\mathbf{x}_n=[x_1, x_2, \cdots, x_8]$은 n번째 차량에 대한 상태벡터이고, τ_n은 n번째 차량에서 발생되는 제동토크이다. 이 상태방정식으로부터 n번째 차량은 앞 뒤 차량의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

위 상태방정식에서 두 개의 정해지지 않은 점착력 F_f F_b가 있다. 이 점착력은 바퀴와 레일의 미끄러짐 여부에 따라 다른 식을 적용하여 방정식을 구한다. 레일과 바퀴의 상대속도가 0이면, 정지 점착계수가 적용되고, 그 점착력의 크기는 차량의 속도와 바퀴의 속도에 대한 식 $\dot{x} = r\dot{\theta} \times \omega$를 방정식에 추가하여 상태방정식을 풀고, 상대속도가 0이 아닌 경우에는 운동 점착계수가 적용되고, 그때의 점착력은 $F = \mu_d \times W$를 이용하여 점착력을 구하여 상태방정식을 푼다. 여기서 μ_d는 미끄럼상태의 점착계수이고, 차량당 2개의 바퀴에 대해 각각 적용한다.

III. 고속전철 제동시스템

1. 고속전철의 제동시스템 개요

현재 한국에서 개발되고 있는 한국형 고속전철(Korea High Speed Train)은 20량을 기본 편성으로 하고 있고, 주행을 위한 전기 동력원이 양끝과 중앙에 집중되어 있는 동력 집중식 차량이다. 각 차량간의 기본 통신은 WTB(wire train bus)를 활용해 네트워크를 구성하고, 제동지령은 WTB와 인통선을 통한 이중지령방식을 채택하고 있다.

WTB를 통해 차량에 있는 모든 마이크로프로세서들은 네트워크를 통해 중앙제어기와 통신이 가능하고, 이를 이용해 KHST는 보다 지능적인 제동 제어가 가능하게 됨에 따라, 별도의 제동제어장치 BBCU(Brake Blending Control Unit)를 두고 있다. BBCU는 운전자의 지령과 차량에 대한 실시간 정보를 바탕으로 매순간 가장 적절한 제동지령을 각각의 제동제어기에게 제동지령을 송신한다.

BBCU가 제어하는 제동장치의 종류는 크게 전기제동장치와 공기제동장치로 나뉘고, 전기제동에는 회생제동장치, 저항제동장치, 와전류 제동장치가 있고, 공기제동에는 디스크 제동장치, 답면 제동장치, 휠디스크 제동장치가 있고, 각 장치별 특성과 그를 반영한 모델링을 아래와 같이 제시한다.

2. 제동시스템

2.1 전기 제동장치

회생/저항 제동은 모터가 있는 동력대차에서 사용하는 제동방식으로 모터를 발전기로 활용하는 방식이다. 인버터를 통해 생성된 전기를 가선으로 보내느냐, 자체 저항으로 태우느냐에 따라 회생제동, 저항제동으로 구분된다. 열차의 운동에너지를 재활용하는 측면에서 회생제동을 우선적으로 활용하고, 가선의 상태가 불안하여 회생제동의 사용이 힘들 때 저항제동으로 전환한다. 저항제동의 용량은 저항기의 발열용량에 따라 제한되며, KHST에서는 저항제동기의 저항기 용량이 회생제동의 60% 정도로 설정되어 있다.

차량의 회생/저항/와전류 제동장치의 시스템 전기 개념도는 그림 4와 같다.

그림 4의 개념도에서 보는 바와 같이, 모터에서 발생하는 차량의 운동에너지는 가선, 저항기, 와전류 제동장치에서 소비할 수 있고, 와전류 제동장치의 전원은 인버터를 통한 회생전기와 컨버터를 통한 가선전기 모두 가능하다.

인버터에서 발전할 수 있는 속도는 이론적으로 0km/h 이상에서 가능하나, 실제 20km/h 이상에서 발전 능력이 있고, 그에 따라 회생/저항 제동은 그 속도에 대해 사용이 제한된다.

와전류 제동장치(eddy current brake)는 비접촉 제동방식으로 레일에 7mm 정도의 간격을 두고 접근했을 때, 전자석과 레일간의 생성되는 자력선이 레일의 와전류에 의해 비대칭적으로 형성되고, 이때 자력선의 에너지 레벨 최소화하는 방향으로 힘이 작용하는데, 이를 이용한 제동이다. 제동력은 전자석에 흐르는 전류량과 열차의 속도의 함수로 표현되며, 저속에서 급격하게 증가하는 흡입력으로 인해 저속에서 사용하지 않도록 하고 있다.

2.2 공기제동장치

일반적인 공기제동 장치는 차량에서 공급되는 공기압을 이용해 마찰재를 압착시켜 이때 발생하는 마찰력으로 제동력을 발생한다. 이것은 고전적이면서도 가장 신뢰할 수 있는 제동방식이지만, 기계적 마찰을 이용하기 때문에 제동시 발생하는 소음과 열, 그리고 유지보수성이 전기 제동에 비해 취약하다.

결과적으로 고속영역에서 전기제동이 적합하다면, 공기제동은 저속영역에서 적합하다고 할 수 있다.

공기제동의 종류는 디스크/답면/휠디스크 제동이 있고, 적용 공간 유무에 따라 적절한 제동장치를 부착한다. 운전자의 지령과 그에 해당하는 공압을 생성하기까지 절차는 그림 5와 같다.

공기제어기의 중앙연산장치인 제동전자제어장치(ECU; electronic control unit)는 제동지령, 하중, 차량속도 신호를

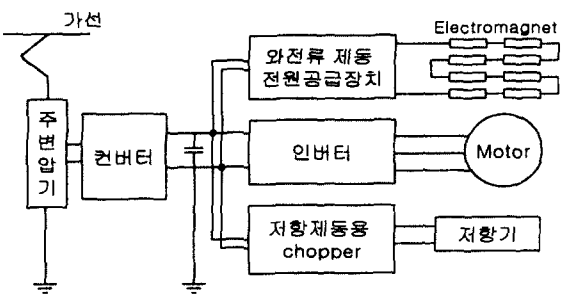


그림 4. 전기제동 개념도.
Fig. 4. Schematics of electric brake systems.

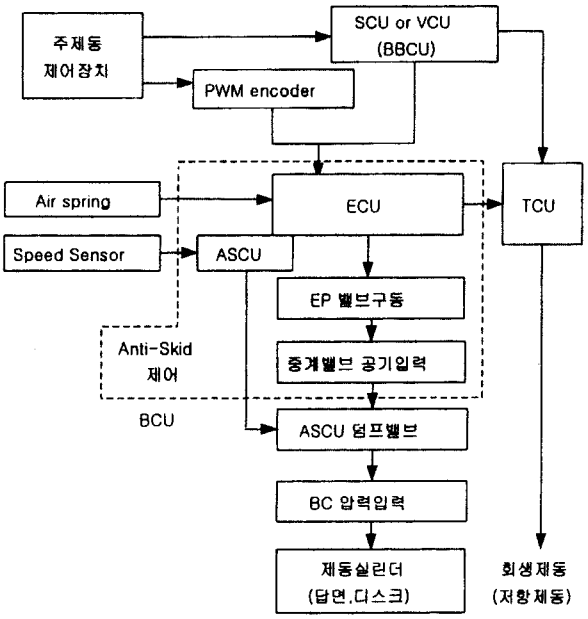


그림 5. BCU와 공기제동장치 개념도.
Fig. 5. Schematics of the BCU and air brake system.

입력으로 하고, 여기서 연산된 전기 신호를 공기압으로 변환하는 EP밸브를 거쳐 중계밸브를 통해 공기량을 확보하여, 실린더로 유입된다. 모터보기에 부착된 제동작용장치(BCU; brake control unit)는 회생/저항제동과 연계를 위해 TCU (traction control unit)와 통신이 필요하다.

2.3 제동장치 모델링

열차에 있는 다양하고, 많은 제동시스템을 상위 레벨에서 관리하기 위해 각 제동시스템에 대한 모델링이 필요하다. 각 제동장치 제어기 설계를 위해 다음의 가정을 통하여, 차량 제동시스템을 모델링한다.

가정 : ① 제동제어기와 제동장치를 지연시간이 있는 1차 시스템으로 가정하고, 최초 지령에 대해 초기 기동을 위한 준비시간을 갖는다.

② 공기제동은 0.15초의 지연시간과 0.6초의 시정수를 가진다.

③ 전기제동은 0.3초의 시간 지연과 0.2초의 시정수를 가진다.

④ 공기제동은 인쇼트압을 고려하여 제동력이 나오기까지 1초의 준비시간을 가진다.

⑤ 와전류제동은 제동장치의 하강시간을 위해 3초의 준비시간을 가진다.

⑥ 회생제동은 0.05초의 준비시간을 가진다.

위의 가정을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 제동장치별 시스템 사양.
Table 1. The specification of brake systems.

제동의 종류	준비시간	지연시간	시정수
회생/저항제동	0.05	0.3	0.2
와전류 제동	3	0.3	0.2
디스크/답면 제동	1	0.15	0.6

IV. 제동제어논리

1. ECU 제동제어로직

제동전자제어장치(ECU)는 제동작용장치(BCU) 안에 장착되고 마이크로프로세서에 의한 디지털계산을 수행한다. ECU는 BBCU에서 연산한 제동력 지령을 받거나, 인통선을 통해 운전자 PWM 제동지령 신호를 입력받는다.

ECU의 기능은 제동력 블렌딩, 제동패턴발생, 저크제어, 인쇼트제어 그리고, 작용압력제어를 수행하고, 발생 제동력의 관측이 어려운 관계로 제동력에 대해 개루프 제어를 적용한다. 개루프 제동제어 알고리듬은 현재 지하철에서 사용하고 있는 방법으로 제어 알고리듬이 단순하여 구현이 용이하지만, 시스템의 외란에 약한 단점이 있다.

ECU에서 적용하는 개루프제어는 EPL밸브의 선형성에 의존하여, 이미 예측되고 있는 시스템의 비선형적인 인자들에 대한 보정 기능을 가진다. 비선형적인 현상은 크게 EPL밸브의 히스테리시스와 제동장치의 스프링 반발력에 의한 인쇼트(inshot)가 있다. 제어기는 이 두 현상을 위해 BC압력 히스테리시스 보정회로와 인쇼트 기능(inshot function)을 첨가시킨다.

인쇼트 기능은 제동용 공기 실린더에 부착된 스프링 반력에 대한 보정으로 공기압 연산에서 오프셋 값으로 처리하여 공기압을 생성한다.

인쇼트 기능으로 공기제동은 보다 빠른 제동력 응답이 가능하며, 전기제동과 제동력이 교차할 때 유연한 블렌딩을 돕는다. 그림 6은 그에 대한 다이어그램이다.

2. BBUC 제동제어로직

2.1 전체 제동패턴 발생

SCU(supervisory control unit)로부터 받은 PWM신호는 가속도에 대한 신호이다. 동일한 PWM신호도 차량의 속도에 따라 다른 가속도를 나타내는데, 그 이유는 속도의 함수로 표현되는 점착계수에 바탕을 두기 때문이다. 현재의 차량속도와 PWM신호를 이용하여 차량 가속도를 구하고, SCU을 통해 받은 각 대차의 하중신호를 받아 전체 제동력을 계산한다.

$$F_{total} = F_a(\dot{x}, CMD_{driver}) \times \Sigma M_{axle} \tag{9}$$

여기서, F_{total}은 전체 제동력, F_a는 차량 감속도 함수, ΣM_{axle}은 전체 총하중, 즉 차량 전체 중량, CMD_{driver}는 운전자 지령를 의미한다.

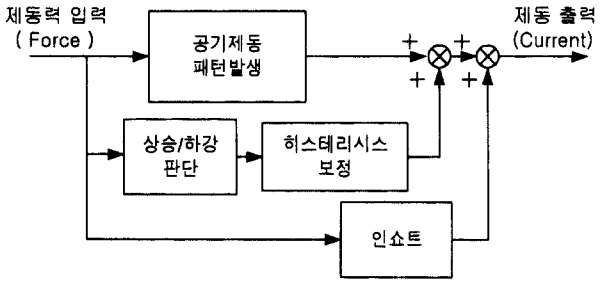


그림 6. 인쇼트, 히스테리시스보정 다이어그램.
Fig. 6. BCU diagram for inshot and hysteresis compensation.

2.2 저크(jerk) 제어

승차감을 위해 일정 한도 이상의 시간당 가속도 변화(즉, jerk)를 방지할 필요가 있다. 기존의 지하철의 경우 $0.8\,m/s^3$ 이상의 저크는 발생하지 않도록 하고 있으므로[7], 본 연구에서도 이 값을 저크제어의 한계값으로 사용한다. 저크제어는 저크가 정해진 한계값을 넘지 않도록 제동력을 제어하는 것이다. 저크제어를 하기 위해 매 순간 유효제동력을 피드백 받아 한계 제동력(저크의 한계값에 해당하는)과 비교한다. 즉,

$$\frac{F_{total}-\Sigma F_{effort}}{\Sigma M_{axle}} \le \Delta Time \times 0.8 m/s^3 \qquad (10)$$

여기서, ΣF_{effort}는 실제 발생한 제동력, $\Delta Time$는 샘플링시간이다. 전체 제동력 F_{total}과 제동장치로부터 되먹임된 ΣF_{effort}는 (10)을 만족해야 하므로, (10)을 만족하지 않을 경우 전체 제동력을 재설정하여, 제동력의 변화가 기준 설정치를 넘지 않게 한다.

2.3 제동력 분배

전체 제동력계산과 저크제어를 한 제동력은 에너지 효율과 제동장치의 특성을 고려하여 회생제동, 와전류제동, 디스크제동, 답면제동 순으로 제동력을 분배된다. 분배할 때 각 제동장치의 작동여부를 판별하여 작동하지 않는 제동장치에 대해서는 제동력을 분배하지 않는다. 모두 정상적으로 작동한다고 가정할 때 그림 7과 같은 제동력 분포를 나타낸다.

분배할 때 각 제동 제어기의 상태를 피드백하여 작동의 오류가 있거나, 회생제동과 같이 가선의 영향으로 제동 능력의 변화가 있으면 이를 제동력 분배에 고려한다.

2.4 와전류 제동 Ready Time 보상 알고리듬

와전류제동장치는 평상시 부수대차에 부착되어 있고, 제동시 설정 속도 이상에서 공기압을 이용하여 레일과 6~7 mm 간격이 되도록 내린다. 이러한 이유로 와전류제동은 다른 제동장치에 비해 비교적 긴 준비시간이 요구되고, 이것은 제동초기에 제동의 응답속도를 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 이를 보상하여 와전류제동보다 우선 순위는 떨어지지만, 준비시간이 짧은 디스크제동을 이용하여 차량 제동응답

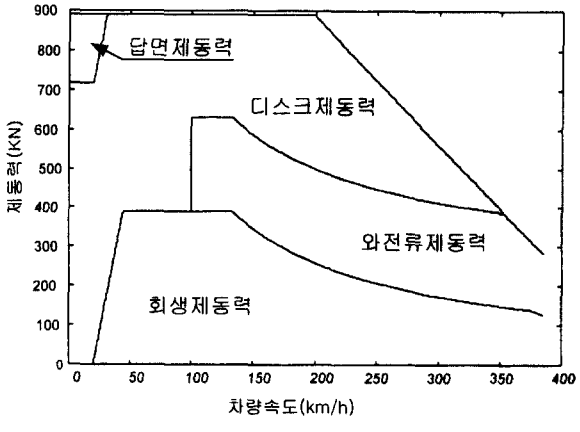


그림 7. 속도에 따른 제동력 분배.

Fig. 7. Brake force distribution according to the train velocity.

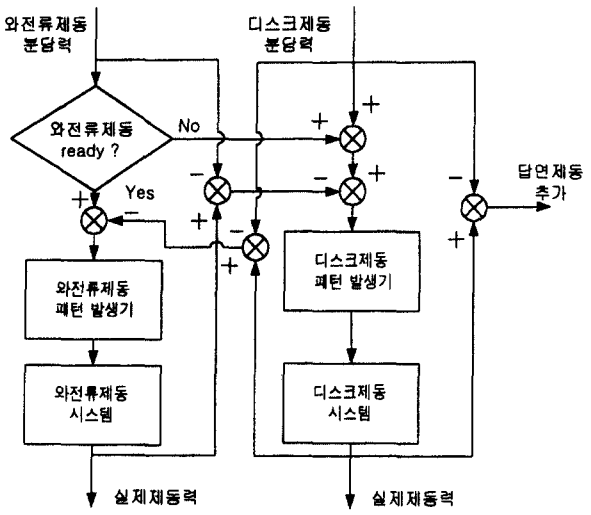


그림 8. 와전류 Ready Time 보상 알고리듬.

Fig. 8. Schematics of a ready-time compensation algorithm of the ECB.

속도를 높이는 알고리듬을 그림 8과 같이 제안한다.

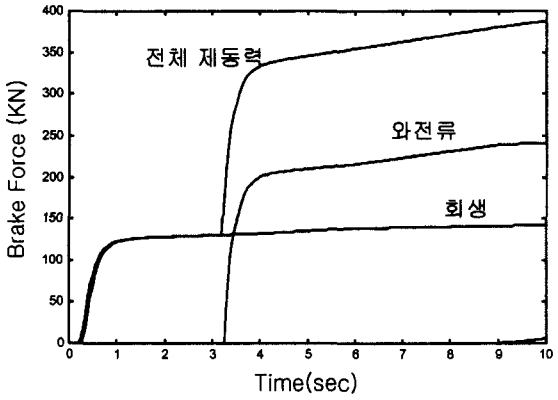
와전류제동 준비시간은 미리 실험적으로 측정 가능한 값이기 때문에 이 시간만큼 앞당겨 제동지령을 줌으로써 보상을 시켜줄 수 있다. 그런데 이러한 방식으로 보상을 시킬 경우, 디스크제동력선도와 와전류제동력선도가 교차될 즈음에서, 두 제동시스템의 응답속도의 차이로 충격력이 예상된다. 이를 해결하기 위해 디스크제동력의 최대치 이후 감소시에, 감소율을 둔화시킴(디스크-와전류제동 교차알고리듬)으로써 충격력을 줄일 수 있다. 여기서 제안한 이러한 과정을 본 논문의 시뮬레이션 모델과 결부시켜 시뮬레이션 한 결과는 그림 9와 같다.

그림 9(a)는 그림 7에서 제시한 제동력 분배 알고리듬만을 고려한 시뮬레이션 결과이다. 급격한 전체제동력의 변화와 느린 응답속도를 볼 수 있다. 그림 9(b)는 승차감 향상을 위한 위 2.2절의 저크제어와 제동력 분배 알고리듬을 적용한 결과이다. 급격한 제동력 변화는 해결되지만 와전류제동 준비시간으로 인한 응답지연을 여전해 볼 수 있다. 그림 9(c)는 이러한 응답지연을 방지하기 위하여 와전류제동 준비시간 보상 알고리듬을 구현한 결과를 보여주고 있다. 그림 9(d)는 디스크제동력의 최대치 이후 감소율을 둔화시킨 결과를 보여주고 있다. 이 결과로부터 비교적 빠른 응답특성과 부드러운 전체 제동력특성을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

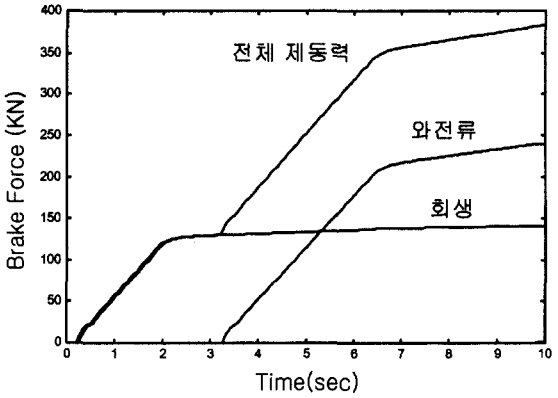
2.5 가상 전공블렌딩 기능

그림 7에서 알 수 있듯이 전기제동은 고속에서 공기제동은 저속에서 주로 사용된다. 따라서, 열차는 속도가 줄어감에 따라 전기제동에서 공기제동으로 발생하는 제동력을 전환해야한다. 이때 전환하는 과정에서 응답속도의 차이로 인해 그림 10(c)에서 보는 것처럼 전체 제동력의 충격이 예상된다. 이러한 제동력의 충격은 승차감을 떨어뜨리기 때문에 이것을 보안하기 위한 가상 전공블렌딩을 제안한다.

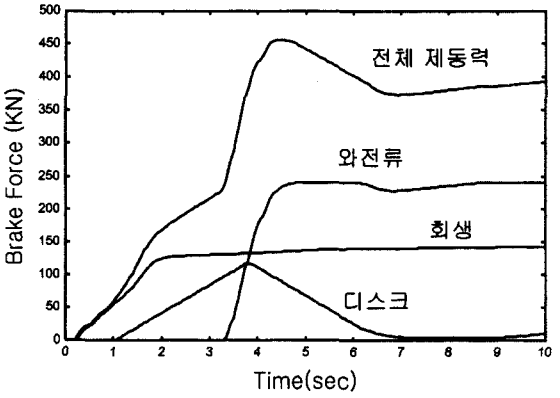
그림 10은 회생제동 가상 전공블렌딩을 수행한 것과 적용하지 않은 결과를 비교한 것이다. 그림 10(a)에서 보는 것과 같은 가상신호를 발생시켜 되먹임에 활용했을 때, 디스



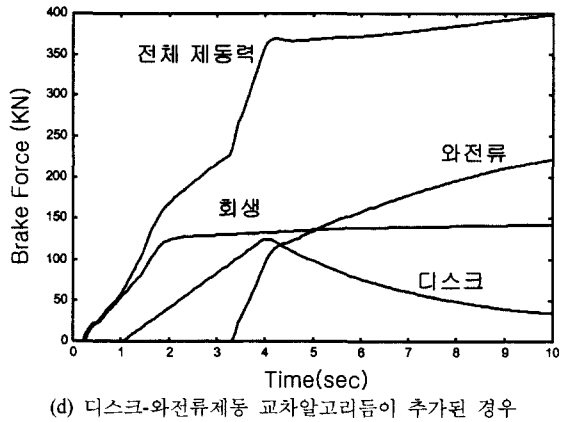
(a) 제동력분배 알고리듬만 사용된 경우



(b) 저크제어 알고리듬이 추가된 경우



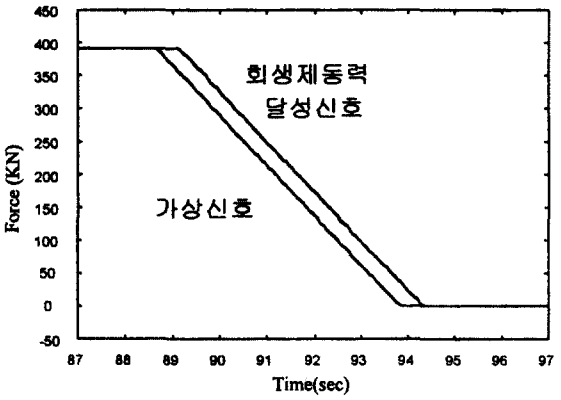
(c) 와전류제동 준비시간 보상 알고리듬이 추가된 경우



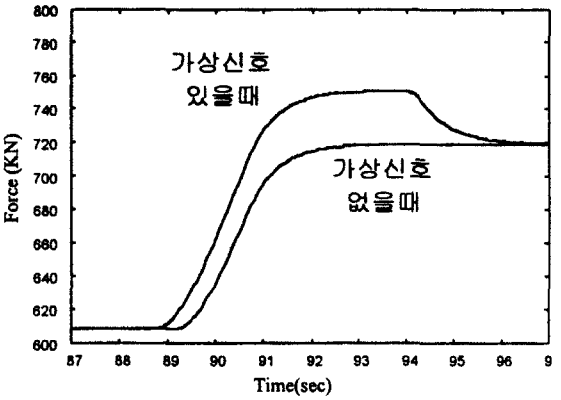
(d) 디스크-와전류제동 교차알고리듬이 추가된 경우

그림 9. 와전류 Ready Time 보상 알고리듬 구현.

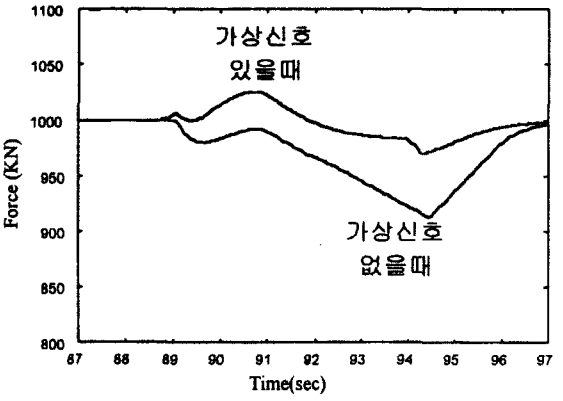
Fig. 9. Implementation of the ready-time compensation algorithm of the ECB.



(a)



(b)



(c)

그림 10. 회생제동 가상전공블렌딩 알고리듬 구현.

Fig. 10. A virtual electric-pneumatic blending algorithm.

크 제동력의 변화는 그림 10(b)와 같고, 결과적으로 전체제동력은 그림 10(c)와 같이 향상된 성능이 나타남을 알 수 있다.

V. 시뮬레이션

본 논문에서는 표 2와 같은 사양을 가진 철도차량 시스템에 대하여 제동성능을 시뮬레이션 한다.

시뮬레이션 대상 차량은 맨 앞과 맨 뒤에 설치된 동력차(power car)와, 그 안쪽으로 두 량의 동력객차, 그리고 안쪽에 4량의 객차로 구성된 전체 7량의 열차시스템(KHST의 시험차량)이다.

위에서 선정한 철도차량의 제동성능을 시뮬레이션하기 위하여 초기 속도 250 km/h로 달리던 열차에 운전자의 제동

표 2. 열차 사양.
Table 2. The specification of train.

N_m	6	Axle number of motor car
N_t	8	Axle number of trailer car
M_m	17×10^3	*[kg]*
M_t	15.2×10^3	*[Kg]*
K_C	7.0×10^6	*[N/m]*
C_C	2.03×10^5	*[Ns/m]*
K_b	3.5×10^5	*[N/m]*
C_b	2.0×10^4	*[Ns/m]*

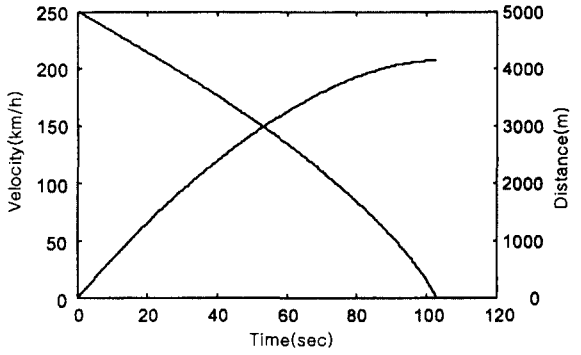


그림 11. 제동거리와 제동속도.
Fig. 11. Brake distance and brake velocity.

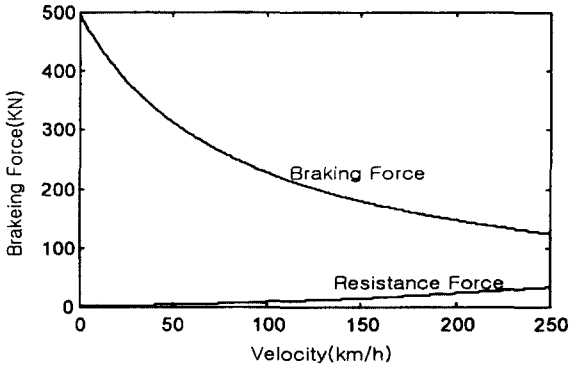


그림 12. 제동력과 주행저항력.
Fig. 12. Brake force and resistance force.

지령이 주어졌을 때의 상황을 실행한다. 레일의 상태는 건조상태라 가정한다.

제동토크는 습윤 점착계수에 대한 한계 점착력까지 발생시킨다고 가정한다. 열차의 맨 앞 차량에 대하여 그림 11은 제동거리와 제동속도, 그림 12는 점착력과 주행저항력을 시뮬레이션한 결과를 보여 주고 있다.

축하중의 변화에 따른 미끄러짐 현상을 알아보기 위하여 다음과 같은 상황을 가정한다. 습윤상태의 레일 위에, 제동력을 습윤상태의 최대 점착력보다 조금 낮게 인가한다. 정상상태에서는 최대 점착력보다 낮게 제동력이 인가되었기 때문에 미끄러짐 현상이 발생하지 않으나, 주행시 축하중의 변화로 인해 바퀴와 레일 사이에 미끄러짐이 발생할 수 있다. 미끄러짐이 발생하는 시점에서 제동력을 풀면 다시 바퀴와 레일 사이의 미끄러짐은 사라지게 된다. 열차의 주행

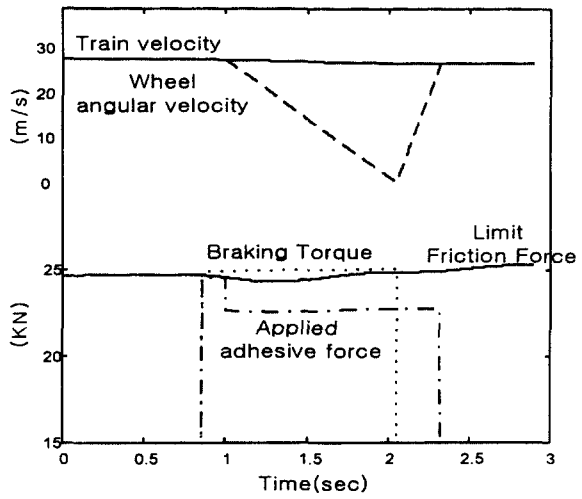


그림 13. 바퀴의 미끄러짐 시뮬레이션.
Fig. 13. A skid simulation of wheels.

에서 이러한 미끄러짐을 방지하는 제어를 Anti-skid 제어라 하고, 그림 13은 이러한 상황을 구현한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

그림 13에서 바퀴에 제동력이 가해지면 차체는 모멘트를 받고, 그로 인해 후륜의 축하중이 변한다. 축하중이 변함에 따라 작용하는 점착력은 한계 점착력을 넘게 되고, 바퀴에서 미끄러짐이 발생하는 것을 볼 수 있다. 제동력이 사라진 후에 미끄러짐이 사라지고 다시 후륜이 차량의 속도를 따라감을 알 수 있다.

끝으로 앞에서 언급한 KHST의 전체적인 제동성능을 파악하기 위하여 다음과 같은 가정하에 제동속도와 제동거리, 제동력 분배, 발생된 제동력, 제어장치의 일부 고장에 대한 제동성능 등을 모의 시험하였다. 초기속도를 385km/h, 운전자의 제동지령을 90%라고 하고, 회생제동이 정상적으로 작동하도록 가선의 상태가 정상이라고 가정하였고, 주행 시뮬레이션의 단순화를 위해 바람이 없는 직선 평탄 선로로 가정한다. 그리고 제동시작 후 30초가 되는 순간 와전류 제동 고장신호를 임의로 발생하여, 고장에 대한 제동성능을 확인한다.

시뮬레이션 결과 제동시간은 98초이고 제동거리는 5960

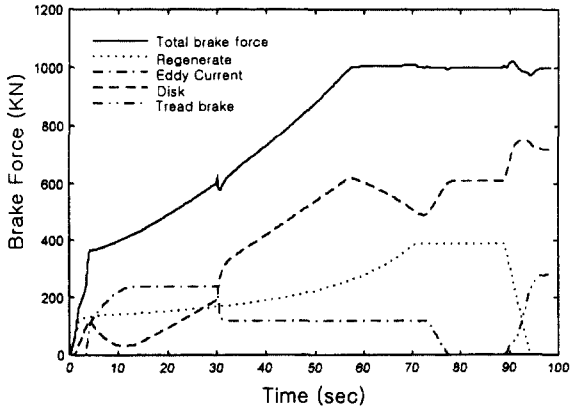


그림 14. 고장상황에 대한 제동력 시뮬레이션.
Fig. 14. Brake system simulation for fault condition.

m를 보여주었다. 그림 14는 제동시간동안 제동장치별 제동력 블렌딩의 결과를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 지금까지 언급된 제어 로직들의 성능을 한 눈에 볼 수 있다.

전체 제동력 선도는 제동패턴 발생로직이 차량의 상태와 운전자의 지령에 따라 적절한 제동력 패턴이 발생됨을 보여주며, 초기 제동지령 발생 후 저크제어와 와전류 제동 Ready Time 보상 알고리듬을 통해 보다 부드러운 제동력 상승을 유도하고 있음을 볼 수 있다.

제동후 30초 부근에 발생한 임의의 와전류 제동 고장에 대해, 차량전체의 원활한 제어 성능을 보이고 있으며, 그 결과 전체 제동력은 고장 전후로 일정하게 유지함을 알 수 있고, 회생제동과 와전류 제동이 소멸하는 70초와 90초 구간에 가상전공블랜딩 기능이 정상적으로 작동하여 원활한 블렌딩을 수행함을 볼 수 있다.

VI. 결론

철도차량의 제동시스템을 개발하기 위해서는 철도차량의 동역학을 고려한 제동성능을 예측하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 열차의 각 차량을 3 자유도 운동으로 모델링한 후 7차량으로 구성된 열차의 제동성능을 시뮬레이션 할 수 있는 알고리듬을 개발하였다.

철도차량의 주행과 제동장치의 거동에 대한 모델을 제안하고, 와전류제동 Ready Time 보상알고리듬과 가상전공블렌딩 기능을 포함한 제동제어로직을 제안하여, 이를 시뮬레이션 연구를 통해 제동기간 동안 원하는 제동력 패턴을 얻을 수 있음을 보였다. 시뮬레이션에서 제동력에 따른 제동거리와 제동시간, 제동에 따른 축하중의 변화와 점착한계력, 점착한계력의 변화에 따른 바퀴의 미끄러짐 현상을 볼 수 있었다.

본 연구의 의의는 제시된 결과보다 제동 제어기 개발의 방법적 측면에 그 예를 보였다는 것에 있고, 앞으로의 연구 방향은 향후에 진행될 G7 한국형 고속전철 개발 사업에 진행에 따라 시험과 그 결과에 대한 보완 연구가 진행될 것이다.

참고문헌

[1] K. Y. Wong and M. M. Bayoumi, "Self-tunning control of multilocomotive-powered long freight train," *IFAC Control in Transportation System*, pp. 25-31, 1983.

[2] S. Yasunobu, S. Miyamoto, and H. Ihara, "Fuzzy control for automatic train operation system," *IFAC Control in Transportation System*, pp. 23-39, 1983.

[3] Takehiko Fujioka and Haruo Ymada, "Preview control of active suspendsion for railway vehicles," *Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division*, vol. 58, pp. 149-156, 1996.

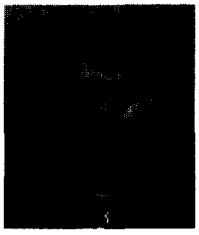
[4] 이남진, 강철구, 곽수태, "철도차량 동역학 모델을 이용한 점착력 시뮬레이션," 한국제동제어학술회의 논문집, vol. 2, pp. 1767-1770, 1998.

[5] 이남진,"한국형 고속전철의 제동시스템과 제동제어 알고리듬," 건국대학교 석사학위 논문, 1999.

[6] 원주, 강철구, "고속전철 제동시스템의 HILS," 제어 · 자동화 · 시스템공학논문지, 제7권, 제5호, 2001.

[7] 유진기공산업 등, 제동시스템 엔지니어링 기술개발 4차년도 보고서, 건설교통부 · 산업자원부 · 과학기술부, 2000.

[8] 이종득, 철도공학, 노해출판사, 1997.



이 남 진

1973년생. 1996년 건국대학교 기계공학과(공학사). 1999년 건국대학교 기계공학과(공학석사). 1999년~현재 유진기공산업㈜ 연구원. 관심분야는 와전류 제동장치, 고속전철 제동제어 등.

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 지능로봇, 운동제어, 힘센서, 전철제동시스템, 메카트로닉스 등.