

고속전철용 와전류제동장치의 설계 및 정토크 제어에 관한 연구

論 文

48B-11-4

A Study On the Design and Constant Torque Control of the Eddy Current Brake For a High-speed Railway Train

柳泓齊*·姜璟皓**·禹明豪*·金鍾洙*·姜道鉉*·林根熙*

(Hong-Je Ryoo · Kyung-Ho Kang · Myung-Ho Woo · Jong-soo Kim · Do-Hyun Kang · Geun-Hie Rim)

Abstract - The introduction of the eddy current braking(ECB) system in HSRT(high speed railway train) is known to be advantageous, in that the system is independent on wheel-rail adhesion coefficient which is greatly affected by weather condition. It also minimize the maintenance of the brake system and does not require any additional electric energy because it is powered from the regenerated power at the time of the braking.

In this study, the braking and attraction forces of the ECB are simulated by 2-D FEM and are experimentally verified on a down-scaled prototype. A control algorithm of the ECB is proposed to generate constant braking torque using linear variation of the reference current according to speed. Experimental results shows that the constant torque is generated over all operating speed region by developed control algorithm.

Key Words : Eddy current brake, Constant torque, Braking force, Attraction force

1. 서 론

선진국을 중심으로 한 고속전철기술 개발의 발전으로 최대 운행속도가 높아짐에 따라 비상제동 및 상용제동시에 비접촉 제동장치인 와전류 제동시스템의 적용이 늘어가고 있다[1-3]. 와전류 제동장치는 전자석의 원리를 이용하여 제동력이 레일에 직접 작용하며 회생제동이나 디스크 제동과 같이 열차의 휠에 작용하지 않으므로 비접촉제동장치라고도 하며 휠과 레일 사이의 접촉계수를 이용하지 않으므로, 날씨의 영향도 받지 않는다[1-2]. 이미 서구 유럽에서는 와전류 제동장치를 장착한 고속전철 시스템이 개발되어 운행 단계에 있으며, 국내에서도 한국형 고속전철 개발에 와전류 제동장치를 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다[2-4].

본 논문에서는 한국형 고속전철 시스템에 적용하기 위한 와전류 제동시스템의 타당성을 검증하기 위해 속도 300[km/h]에서 약 300[N]의 제동력을 발생시킬 수 있는 와전류제동장치 축소모델을 설계하였으며 설계된 와전류제동장치의 전자석 기본형상에 대한 제동력과 흡인력을 2차원 유한요소법으로 해석하고 이로부터 와전류제동장치 축소모델을 제작하였다.

와전류제동장치는 일정전류를 인가하는 경우 속도에 따라 제동력이 변하게 되며 원하는 토크를 발생시키기 위하여 미

리 계산된 속도에 따른 전류지령값을 look-up table 형식으로 저장한 후 속도에 따라 필요한 전류지령치를 발생시키는 형태로 이루어졌다. 본 논문에서는 이를 개선하기 위해 전 속도 영역에 대해 일정한 제동력을 발생시킬 수 있도록 전류지령치를 선형화시켜 간단한 정토크 제어 알고리즘을 구성하고 실험을 통해 이를 확인하였다. 실험결과 제작된 와전류제동장치 축소모델로부터 실 시스템에 효과적으로 적용가능하며 제시된 알고리즘 역시 약간의 보완작업을 거쳐 실 시스템에 적용 가능성이 확인되었다.

2. 와전류제동장치 축소모델 설계

2.1 전자석 기본형상 설계

그림 1은 전자석의 2차원 기본 설계 모델로 전자석 자극 폭 P_b , 공극 δ , 권선 창의 높이 W_h , 폭 W_b , 전자석의 길이는 l_{mag} 로 표시되고, 이 때 전자석에서 힘이 발생하는 단면적 S_{mag} 는 다음과 같다

$$S_{mag} = 2P_b l_{mag} [m^2] \quad (1)$$

그림 2는 공극 $\delta = 8[mm]$, 기자력 $NI = 12,000 [AT]$ 일 때 속도에 대한 자극 단위 면적당 제동력 F_{bd} 을 2차원 유한요소법으로 해석한 결과이다.

*正 會 員 : 韓國電氣研究所 産業電氣研究團

**準 會 員 : 昌原大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 1999年 6月 28日

最終完了 : 1999年 9月 27日

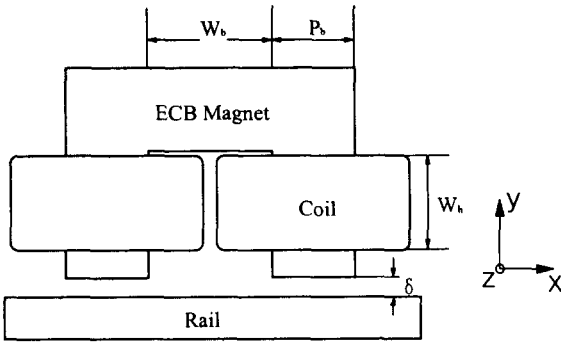


그림 1 전자석의 기본 설계 모델
Fig. 1 Basic Model of eddy current brake magnet

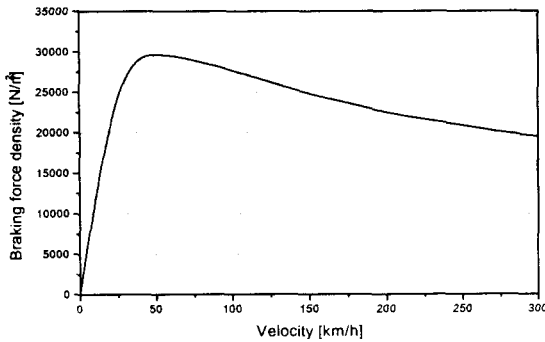


그림 2 단위면적당 제동력밀도
($\delta = 8[\text{mm}]$, 기자력(MMF) = 12,000(AT))
Fig. 2 Braking force density per unit area
($\delta = 8[\text{mm}]$, MMF = 12,000(AT))

위 그림 2에서 제동력 밀도는 속도에 따라 증가하였다가 50[km/h]근방부터 속도가 증가함에 따라 서서히 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 제동력이 그림 1의 x축 공극자속밀도 B_x 와 y축 공극자속밀도 B_y 의 곱으로 표현되는데 B_x 는 50 [km/h]근방까지 증가하였다가 이후 일정하게 유지되므로 저속영역에서는 B_x 의 영향에 따라 제동력 역시 50[km/h]의 속도까지 급격히 증가하게 되나 B_y 는 열차의 속도가 증가할수록 와전류에 의해 발생된 역자계에 의하여 점차로 감소하게 되며 이로 인해 50[km/h]이상의 고속영역에서는 제동력 또한 속도의 증가에 따라 감소하는 양상을 띠기 때문이다.

그림 3은 계산에 사용된 자성재료 ST37의 자기포화곡선이고 플라이휠의 도전율은 $1.6 \times 10^6 [1/(\Omega \cdot \text{m})]$ 으로 계산하였다. 제동력 F_b 를 300[N]으로 설계시 요구되는 전자석의 표면적과 제동력은 식(2)로부터 계산 가능하며, 여기서 전자석의 길이 $l_{\text{mag}} = 0.12[\text{m}]$ 로 두면 전자석의 폭 $P_b = 0.065[\text{m}]$ 로 된다. 이 경우 제동용량 P_{br} 은 식 (3)으로 계산되며 시속 300 [km/h]에서 25[kW]가 된다.

$$F_b = F_{bd} S_{\text{mag}} = F_{bd} 2P_b l_{\text{mag}} \quad (2)$$

$$P_{br} = F_b \cdot V \quad (3)$$

그림 4는 설계 전자석의 제동력과 흡인력을 2차원 유한요소법으로 해석하기 위한 요소분할도이다. 그림 5는 열차 속도 300[km/h]에서 설계전자석의 자속분포도이다.

그림 6은 입력전류 변화에 대한 제동력과 흡인력을 2차원 유한 요소법으로 해석한 결과이다. 입력전류가 9[A]인 경우 제동력은 속도 40[km/h]부근에서 최대값 약 450[N]을 속도 300[km/h]에서 약 300[N]을 발생시키며, 흡인력은 속도 0[km/h]일때 약 5.6[kN]에서 시속 50[km/h]의 영역까지 급속히 감소한 후 서서히 줄어들며, 고속시 흡인력 값은 저속에 비해 상대적으로 아주 작음을 알 수 있다.

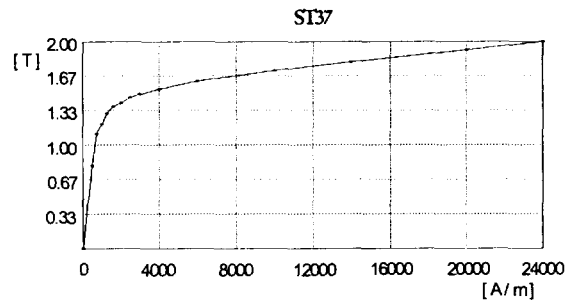


그림 3 ST37의 자기포화특성 곡선
Fig. 3 B-H curve of ST37

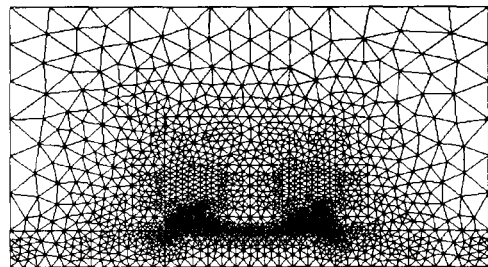


그림 4 설계 전자석의 요소분할도
Fig. 4 Mesh generation of designed magnet

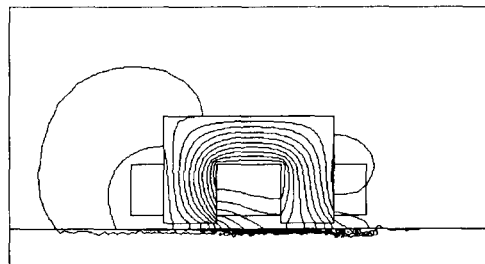
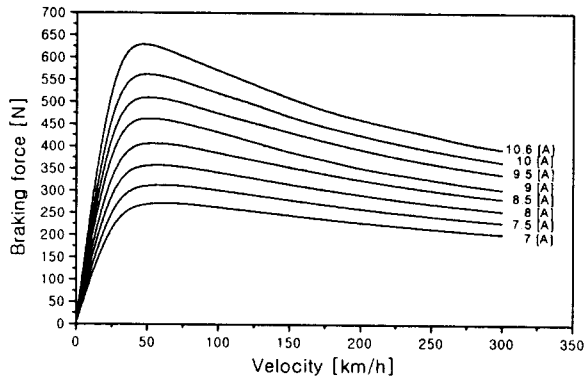
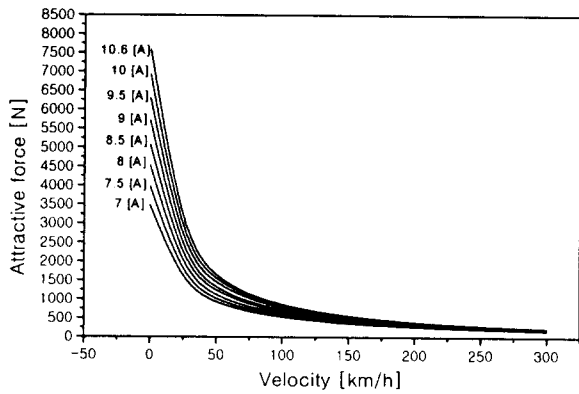


그림 5 설계 전자석의 자속분포도 (300[km/h]시)
Fig. 5 Flux pattern of designed magnet (300[km/h])



(a) 제동력
(a) Braking force



(b) 흡인력
(b) Attraction force

그림 6 전류에 대한 제동력과 흡인력 변화
Fig. 6 Braking force and attraction force according to the current

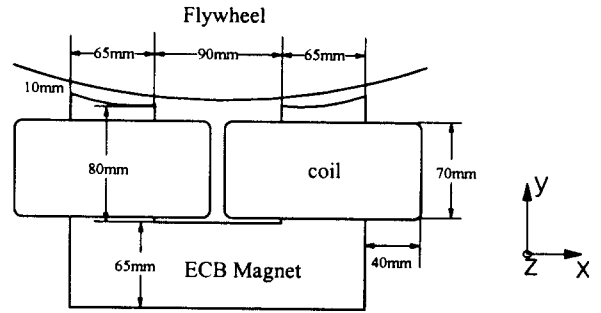
2.2. 권선 설계

그림 2에서 필요한 기자력 $NI=12,000$ [AT]이고(여기서 권선수 N , 전류 I , 전류밀도 J [A/m^2], 점적율을 k 라고 두면 필요한 코일 창의 면적은 다음 식 (4)와 같다.

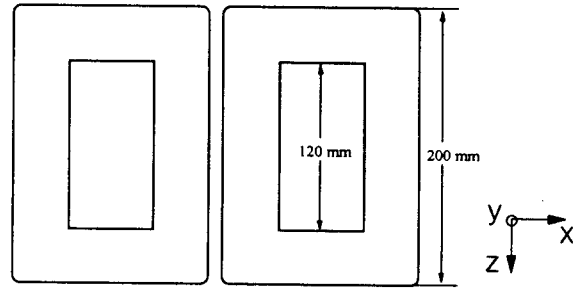
$$W_b W_h = \frac{NI}{J \cdot k} \quad (4)$$

여기서 전류밀도 $J = 3$ [A/mm^2], 점적율 $k=0.714$ 로 정할 경우, 코일창의 면적은 $5,600[mm^2]$ 이 되므로 창의 여유를 고려하여 $W_b=90[mm]$, $W_h=70[mm]$ 로 설계하였다. 권선의 1회 평균길이 l_{coil} 는 전자석 자극 폭 P_b 와 전자석 길이 l_{mag} 에서 약 $0.5[m]$ 가 되며, 단면적 $1[mm^2]$ 의 권선을 사용할 경우 권선수는 최대 4,000회가 된다. 그러나 코일의 온도상승에 따른 문제점을 방지하기 위해 점적율을 47.5 [%]로 낮추어 $1,330 \times 2$ 회의 코일로 여유있게 제작하였다.

그림 5는 설계 전자석의 형상과 치수를 나타내고 있다.



(a) 정면도
(a) Front view



(b) 평면도
(b) Level view

그림 7 설계 전자석 형상 및 치수
Fig. 7 The configuration and size of the prototype magnet

3. 실험장치 구성

표 1은 설계제작된 와전류제동장치 축소모델의 사양을 나타내고 있다. 그림 6은 와전류제동장치 축소모델의 실험장치이다. 본 논문에서는 플라이휠을 제작하여 10마력급 유도전동기 4대를 사용하여 고속으로 회전시킨 후 와전류제동장치에 의해 플라이휠을 제동시킬 수 있도록 구성하였다[5]. 플라이휠은 지름 885[mm], 관성계수 249 [$kg \cdot m^2$]로 설계하여 1,800[rpm]의 속도로 회전시 플라이휠 표면적의 속도가 300[km/h], 이때의 에너지는 약 4,420[kJ]이 되도록 제작하였고 유도전동기와 플라이휠의 회전속도 비는 2:1로 설계하였다. 제동력 및 흡인력은 3개의 로드셀(load cell)을 설치하여 측정 가능하도록 구성하여 실제 발생된 제동력 및 흡인력을 확인할 수 있도록 구성하였다.

4. 정토크 제어알고리즘

제작된 와전류제동장치의 속도에 대한 제동력곡선을 측정하여 그림 9에 나타내었다. 대체로 설계된 사양대로 제동력이 발생하는 것으로 측정되었으나 2차원 유한 요소로 해석한 결과보다는 전체적으로 제동력이 약간 적게 나왔으며, 이는 전자석 및 레일 형상을 직선으로 가정하였고, 3차원이 아닌 2차원 모델로 해석하였기 때문이다.

표 1 제작된 전자석 사양

Table 1 Specification of the prototype magnet

	사양	비고
전자석 자극폭 P_b	0.065[m]	
전자석 길이 l_{mag}	0.12[m]	
권선창 높이 W_h	0.07[m]	
권선창 폭 W_b	0.09[m]	
공극 δ	0.01[m]	
기자력 NI	12,000[AT]	권선수 1333회 전류 4.5×2[A]
전류밀도 J	4.5[A/mm ²]	
점적률 k	0.714	
권선단 면적 S_{cu}	1[mm ²]	∅0.8 [mm] × 2
권선 저항 R	5.5[Ω]	
정격 전압 V	50[V]	
인덕턴스 L	180[mH]	
소비전력 P	441[W]	

와전류제동장치의 효과적인 제어를 위해 본 논문에는 정토크를 발생시키기 위한 속도에 대한 전류지령치곡선을 계산하였다. 그림 10의 속도-토크 곡선으로부터 전 속도범위에 대해 정격토크 300[N]을 발생시키기 위한 전류지령치는 그림 8의 (a)와 같고 이로부터 선형화된 전류지령치를 식(5)과 같이 계산하였으며 이를 그림 8의 (b)에 나타내었다.

$$I_{ref} = \begin{cases} 0 & (0 < S < 50) \\ 7.7 + 0.006 \times (S - 50) & (S > 50) \end{cases} \quad (5)$$

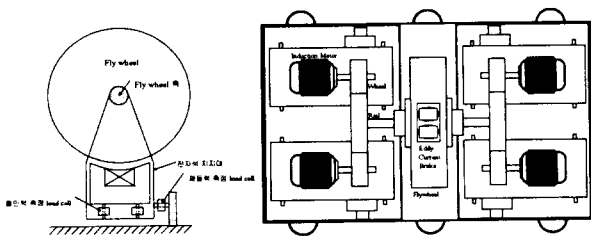


그림 8 실험장치 구성
Fig. 8 Experimental setup

그림 11은 와전류제동장치의 구동장치 및 제어블럭도이다. 토크 지령치에 대해 플라이휠의 속도로부터 플라이휠의 표면 이동 속도를 계산하고 이에 따른 전류지령치를 추종하도록 쇼퍼를 구동하여 와전류제동장치에 전 속도영역에 대해 일정한 정격토크가 발생되도록 하였다. 와전류제동장치의 구동은 시속 50[km/h]이하의 속도에서는 흡인력이 크므로 제어는 최고 시속으로부터 50[km/h]이상의 속도에서만 실시하였다.

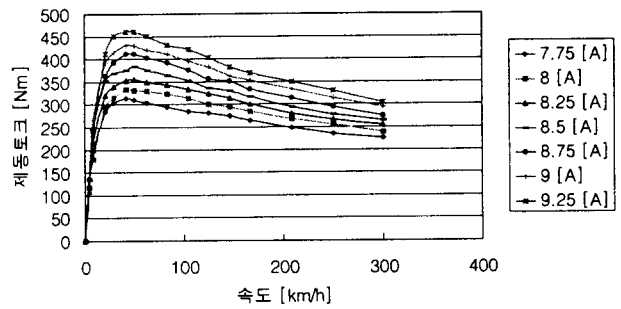
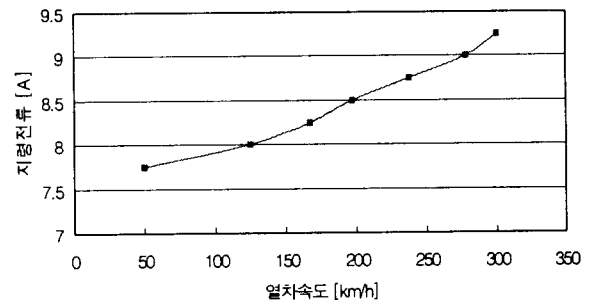
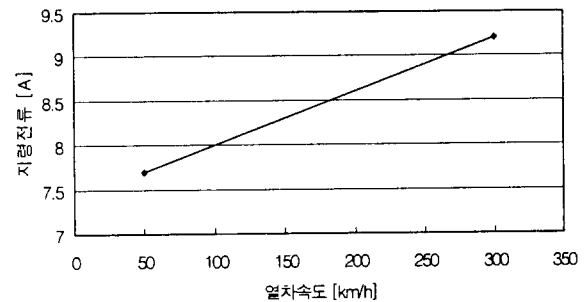


그림 9 제작된 와전류제동장치 특성 곡선
Fig. 9 The characteristic curve of the prototype eddy current brake



(a) 전류지령치
(a) Current reference



(b) 선형화된 전류지령치
(b) Linearized current reference

그림 10 정격토크를 발생시키기 위한 전류지령치
Fig. 10 Current reference to generate constant torque

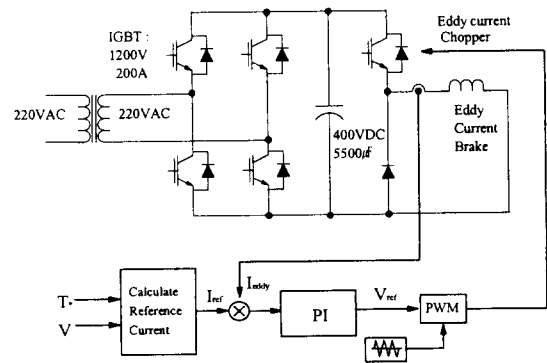


그림 11 와전류제동장치 제어 블럭도
Fig. 11 Block diagram of the eddy current brake control system

5. 실험결과

그림 12는 정격 전류 9A를 흘린 경우 플라이휠의 속도 1800[rpm] (300[km/h])에서 정지시까지의 전류 및 제동 토크를 나타내었다. 전류를 일정하게 제어해 주어도 제동토크는 속도가 감소함에 따라 점차 증가하다가 저속영역에서 급격히 감소함을 알 수 있다.

그림 13은 정격 300[N]의 토크를 지령치로 정토크가 발생하도록 전류제어를 한 실험결과로 위 그림은 플라이휠의 속도와 와전류 제동장치의 전류 및 발생 토크를 나타내며 아래는 속도를 X축, 토크를 Y축으로 한 리사주 파형이다. 그림에서 선형화된 전류지령치만으로도 전 전속도영역에 대해 약 300[N]의 일정한 토크가 발생됨을 알 수 있다.

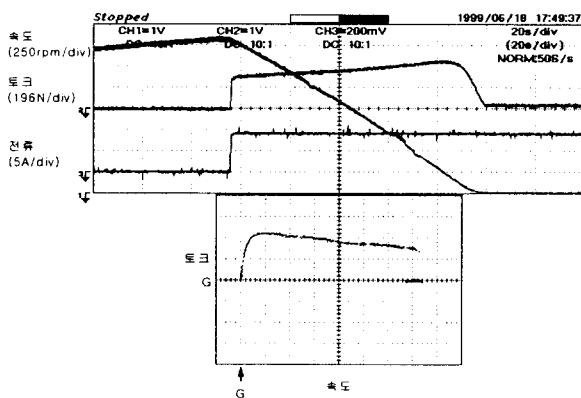


그림 12 정격전류 인가시 속도, 전류, 제동력
Fig. 12 Speed, current and braking force using constant current control

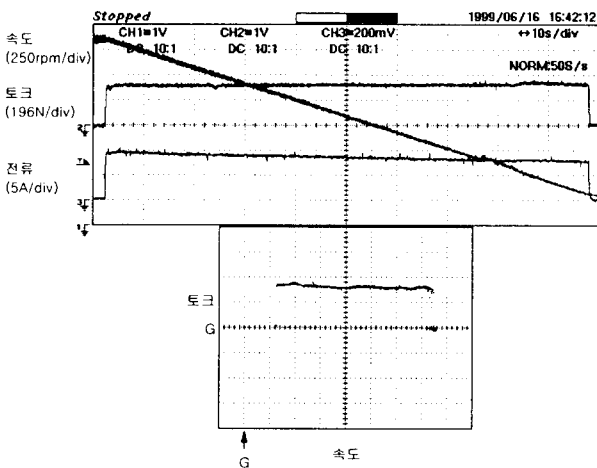


그림 13 정토크 제어시의 속도, 전류, 제동력
Fig. 13 Speed, current and braking force using constant torque control

6. 결 론

본 논문에서는 고속전철 시스템에 사용하기 위한 와전류 제동장치의 설계 및 정토크 제어 알고리즘에 대해 연구하였다. 와전류 제동장치는 고속전철 모의 시험용으로 설계되어

유한요소법에 의해 제동력 및 흡인력을 계산하고, 전자석의 형상을 설계하였으며 prototype의 축소 와전류 제동장치를 제작하였다.

제작된 와전류 제동장치로부터 실험을 통해 실제 제동력 곡선을 추출하였으며, 전 속도에 대해 일정한 제동 토크를 발생하기 위하여 look-up table을 사용하지 않고 전류지령치를 속도에 따라 선형적으로 변화하도록 하여 간편하게 제어할 수 있는 제어 알고리즘을 제시하였다. 제시된 제어알고리즘은 실험을 통하여 검증되었고 이는 대용량 실시스템에도 확대 적용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 1999년도 산업자원부·건설교통부·과학기술부의 지원에 의하여 이루어진 G7(선도기술개발사업)과제 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Hans Herrman, ICE High-tech on rails 3rd Edition, Hestra-Verlag, 1996.
- [2] 강도현 외, 비접촉 제동시스템 개발 1차년도 보고서, 한국전기연구소, 1997, 11.
- [3] 임근희 외, 추진시스템 엔지니어링 기술 개발 2차년도 보고서, 한국전기연구소, 1998, 10.
- [4] 강도현, 박수태, 홍정표, 강경호, "고속전철 추진 Simulator용 와전류 제동장치 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(A), pp. 390-392, 1998, 7.
- [5] 류홍제 외 5인, "고속전철 추진시뮬레이터 설계", 대한전기학회 전력전자연구회 춘계 학술 발표회 논문집, pp. 133-136, 1998, 4.

저 자 소 개



류 홍 제 (柳 泓 齊)

1969년 3월 4일생. 1991년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월~현재 한국전기연구소 전력전자연구부 산업전기연구단

Tel : (0551) 280-1455

Fax : (0551) 280-1406

E-mail : hjryoo@keri.re.kr



강 경 호(姜 璟 皓)

1976년 11월 18일 생. 1976년 창원대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (0551) 279-7519

E-mail : khmr@hanmail.net



우 명 호(禹 明 豪)

1966년 3월 1일 생. 1990년 2월 광운대 전기공학과 졸업(학사). 1992년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1998년 8월~1999년 10월 한국전기연구소 산업전기연구단 위촉연구원. 1999년 11월 - 현재

KIST 지능제어연구센터 Post-Doc.

Tel : (0551) 280-1496, Fax : (0551) 280-1406

김 종 수(金 鍾 洙)

전기학회논문지 제48B권 제9호 참조

Tel : (0551) 280-1453, Fax : (0551) 280-1406

E-mail : jskim@keri.re.kr



강 도 현(姜 道 鉉)

1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년~1989 동 대학교 전기공학과 석사 졸업. 1992년~1996년 독일 Braunschweig대 박사 졸업. 1989~현재 한국전기연구소 선임연구원(산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹 그룹장)

Tel : (0551) 280-1480, Fax : (0551) 280-1488

E-mail : dhkang@keri.re.kr

임 근 희(林 根 熙)

전기학회논문지 제48B권 제9호 참조

Tel : (0551) 280-1450, Fax : (0551) 280-1406

E-mail : ghrim@keri.re.kr