

고속전철용 와전류제동장치 구동에 관한 연구

류홍제, 우명호, 김종수, 강경호*, 강도현, 임근희
 한국전기연구소 전력전자부, *창원대학교 전기공학부

A Study on Eddy Current Brake For a High-speed Railway Train

Hong-Je Ryoo, Myung-Ho Woo, Jong-soo Kim, Kyung-Ho Kang*, Do-Hyun Kang, Geun-Hie Rim
 KERI, Power Electronics Div.*E.E Changwon National University

Abstract - Recently, the eddy current braking system has an advantage as the high speed railway train is developed. Because it is independent on wheel-rail coefficient of adhesion and it can be used in adverse weather conditions by reason of non-acting on wheels. In this paper we designed down-scaled eddy current brake model and developed control algorithm to generate constant braking torque. Our algorithm is verified through experiments to generate constant torque.

길이 $l_{mag} = 0.12[m]$ 로 두면 전자석의 폭 $P_b = 0.065[m]$ 로 된다.

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

그림 4는 전류에 따른 제동력과 흡인력으로 정격 9A를 흘렸을 경우 제동력은 속도 40[km/h]부근에서 최대 값 약 350[N]을, 흡인력은 속도 0[km/h]에서 약 5.6[kN]을 발생시키고 있으며 고속시 흡인력 값은 현저하게 줄어들고 있다.

한편, 그림 5는 설계 전자석의 형상과 치수를 나타내고 있다.

1. 서 론

선진국을 중심으로 한 고속전철기술 개발의 발전으로 최대 운행속도가 높아 짐에 따라 비상제동 및 상용제동시에 비접촉 제동장치인 와전류 제동시스템의 적용이 늘어가고 있다.[1-3]

와전류 제동장치는 회생제동이나 디스크 제동과 같이 열차의 휠에 작용하지 않으므로 비접촉제동장치라고도 하며 휠과 레일 사이의 접촉계수를 이용하지 않으므로, 날씨등의 영향도 받지 않는다.

본 논문에서는 한국형 고속전철 시스템에 적용하기 위한 와전류제동시스템의 타당성을 검증하기 위해 20kW급의 축소 와전류제동장치를 설계하였다. 설계된 와전류제동장치의 전자석 기본형상에 대한 제동력과 흡인력을 2차원 유한 요소법으로 해석하였다.

제작된 와전류제동장치는 실험을 통해 제동력을 측정하고 전 속도 영역에 대해 일정한 제동력을 발생시킬 수 있도록 제어 알고리즘을 구성하고 실험을 통해 이를 확인하였다.

실험결과 제작된 와전류제동장치 축소모델로부터 실시 시스템에 와전류제동장치가 효과적으로 적용가능하며 제시된 알고리즘 역시 약간의 보완작업을 거쳐 실시 시스템에 적용가능함이 확인되었다.

2. 와전류제동장치 축소모델 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 힘을 발생시키는 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} 를 2차원 유한요소법으로 해석한 결과이다.

그림 3은 계산에 사용된 자성재료 ST37의 자기포화 곡선이고 flywheel의 도전율은 1.6×10^6 으로 계산하였다. 그림 2의 속도 300km/h에서 제동력 밀도는 $F_{bd} = 20,000 [N/m^2]$ 로 나타나있다.

제동력 F_b 를 300N으로 설계시 요구되는 전자석의 표면적과 제동력은 다음 식(2)로 된다. 여기서 전자석의

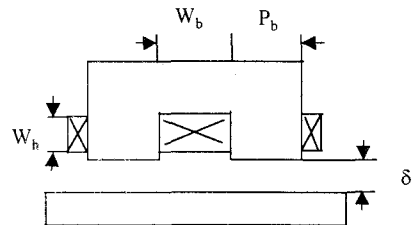


그림 1. 전자석의 기본 설계 모델

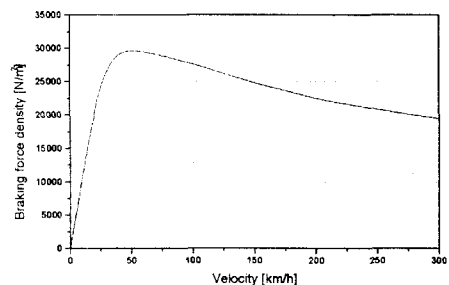


그림 2. 단위면적당 제동력밀도

($\delta = 8[mm]$, 기자력 = 12,000(AT))

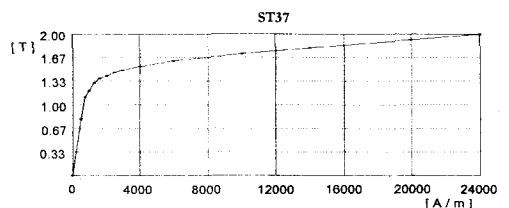
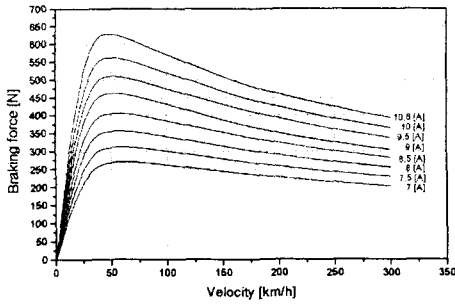
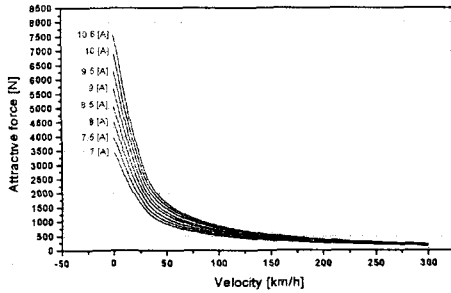


그림 3. ST37의 자기포화특성 곡선

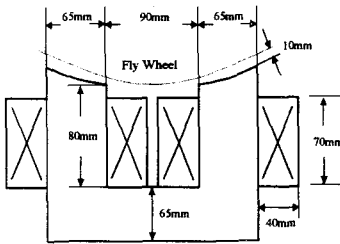


(a) 제동력

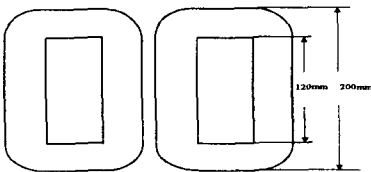


(b) 흡인력

그림 4. 전류에 대한 제동력과 흡인력변화



(a) 정면도



(b) 평면도

그림 5. 설계 전자석 형상 및 치수

3. 실험장치 구성

표 1에 설계사양으로 제작된 와전류마그네틱의 사양을 나타내었다. 그림 6은 와전류제동장치 축소모델을 실험하기 위한 실험장치이다. 본 논문에서는 플라이휠을 구성하여 유도전동기를 사용하여 고속으로 회전시킨후 와전류제동장치에 의해 플라이휠을 제동시킬수 있도록 구성하였다. 플라이휠은 지름 885mm로 설계하여 1800rpm의 속도로 회전시 플라이휠 표면의 선속도가 300km/h가

발생하도록 제작하였다. 제동력 및 흡인력은 3개의 로드셀(load cell)을 설치하여 측정가능하도록 하여 실제 발생된 제동력 및 흡인력을 확인할 수 있도록 구성하였다.

4. 정토표 제어 및 실험결과

제작된 와전류제동장치의 속도에 대한 제동력곡선을 측정하여 그림 7에 나타내었다. 2차원 유한 요소로 해석한 결과와는 조금 상이하나, 대체로 설계된 사양대로 제동력이 발생하는 것으로 측정되었다.

와전류제동장치의 효과적인 제어를 위해 본 논문에는 정토표를 발생시키기 위한 속도에 대한 전류지령치곡선을 계산하였다. 그림 7의 속도-토크 곡선으로부터 전 속도범위에 대해 정격토크 300N을 발생시키기 위한 전류지령치를 그림 8에 나타내었다.

그림 9는 와전류제동장치의 제어블럭도이다. 토표 지령치에 대해 속도에 따른 전류지령치를 발생시키고 이에 따라 효과를 구동하여 와전류제동장치에 흐르는 전류를 제어하여 전 속도영역에 대해 일정한 정격토크가 발생되도록 하였다. 시속 50km/h이하의 속도에서는 흡인력이 크므로 제어는 50km/h 이상의 속도에서만 실시하였다.

표 1. 제작된 전자석 사양

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 5.5*2[A]
전류밀도 J	4.5[A/mm ²]	
점적률 k	0.714	
권선단 면적 S_{cu}	0.8[mm ²]	
권선 저항 R	5.5[Ω]	
정격 전압 V	50[V]	
인덕턴스 L	1.5[H]	
소비전력 P	441[W]	

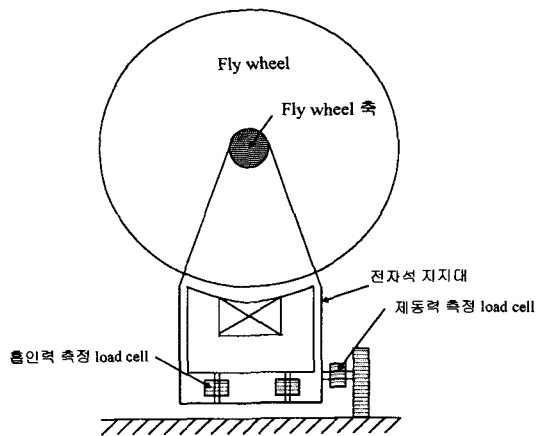


그림 6. 실험장치 구성

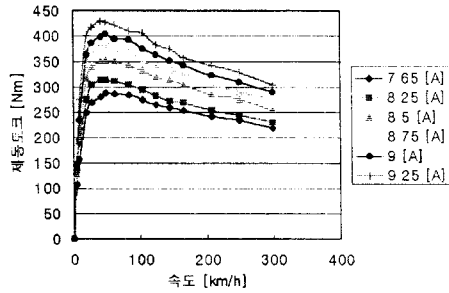
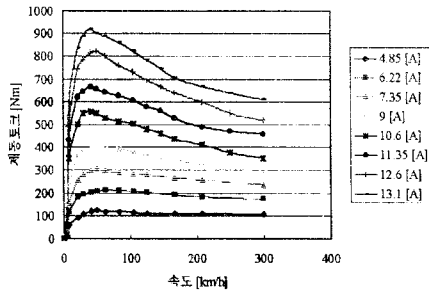


그림 7. 제작된 와전류제동장치 특성 곡선

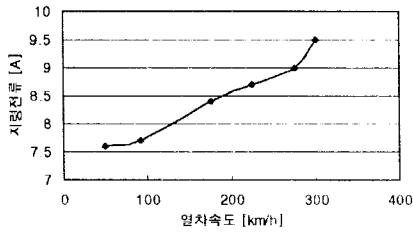


그림 8. 정격토크를 발생시키기 위한 전류지령치

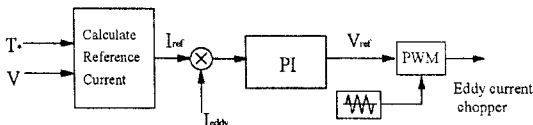


그림 9. 와전류제동장치 제어 블럭도

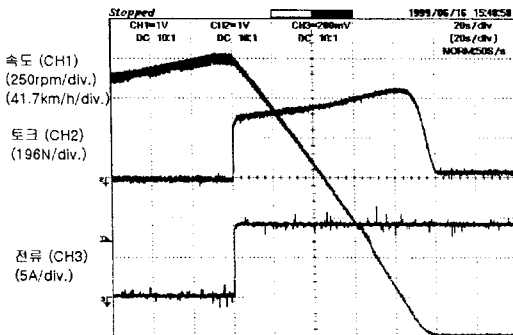


그림 10. 정격전류 인가시 속도에 대한 토크특성

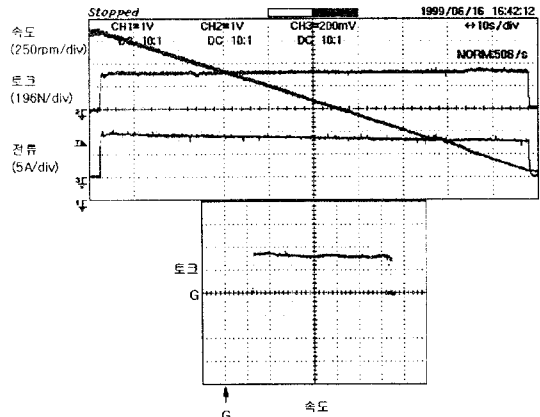


그림 11. 와전류제동장치의 속도, 전류, 제동력

그림 10은 정격 전류 9A를 흘린 경우 플라이휠의 속도 1800rpm(300km/h)에서 정지시까지의 전류 및 제동 토크를 나타내었다. 전류를 일정하게 제어해 주어도 제동토크는 속도가 감소함에 따라 점차 증가하다가 저속 영역에서 급격히 감소함을 알 수 있다.

그림 11은 정격 300N의 토크를 지령치로 시속 50km/h이상의 전속도영역에서 일정하게 토크가 발생하도록 전류제어를 한 실험결과이다. 그림 11의 위 그림은 플라이휠의 속도와 와전류 제동장치의 전류 및 발생 토크를 나타내며 아래는 속도를 X축, 토크를 Y축으로 한 리사주 파형이다. 그림에서 전 속도영역에 대해 300N의 일정한 토크가 발생됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 고속전철 시스템에 사용하기 위한 와전류제동장치의 설계 및 정토크 제어 알고리즘에 대해 연구하였다. 와전류제동장치는 고속전철 모의 시험장치용으로 설계되어 유한요소법에 의해 제동력 및 흡인력을 계산하고, 전자석의 형상을 설계하였으며 prototype의 축속 와전류 제동장치를 제작하였다.

제작된 와전류 제동장치로부터 실험을 통해 실제 제동력곡선을 추출하였으며, 전 속도에 대해 일정한 제동토크를 발생하기 위한 제어 알고리즘을 제시하였다. 제시된 제어알고리즘은 실험을 통하여 확인되었으며 이는 대용량 실시시스템에도 단위면적을 고려하여 확대 적용 가능하다.

본 논문의 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되는 고속전철기술개발사업에 의해 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] "비접촉 제동시스템 개발 1차년도 보고서", 한국전기연구소, 1997, 11.
- [2] Hans Herrman, *ICE High-tech on rails 3rd Edition*, Hestra-Verlag 1996.
- [3] 강도현, 박수태, 홍정표, 강경호, "고속전철 추진 Simulator용 와전류 제동장치 설계", 대한전기학회 학계 학술대회, 1998.