

Thermal Analysis and Test of Eddy-Current Braker for High-Speed Train

鄭壽鎭* · 姜道鉉** · 具大鉉** · 金東熙*** · 方德濟§

(Soo-Jin Jung · Do-Hyun Kang · Dae-Hyun Koo · Dong-Hee Kim · Deok-Je Bang)

Abstract - When a high-speed train reduces its operating velocity while decelerating from a maximum of 350 to 50 [km/h], the train applies eddy-current brakes, which results in a deceleration time of approximately 3minutes. Therefore, a high current is utilized in order to obtain a large braking force. Consequently, the temperature of the electromagnet and rail increases significantly.

In this paper, The thermal characteristics on a single magnet pole with convection heat transfer coefficient are simulated by using 2D-FEM. To verify the analysis results, the computed temperatures are compared with the experimentally measured temperature at stationary state. Furthermore, transient-state thermal analysis is performed to predict the magnet temperatures as the train is decelerating.

Key Words : High-speed train, Eddy-current braker, Convection heat transfer coefficient, 2D-FEM

1. 서 론

현대의 고도화된 산업이 발전함에 따라 인간 편의를 위한 고속의 운송수단이 발달되고 있다. 고속전철의 경우 고속화됨에 따라 안정된 제동력의 확보가 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 고속전철의 제동 시스템은 높은 신뢰성과 이용성을 가지고 가능한 마찰부분을 줄이면서 필요한 제동력을 얻고 또한, 제어성이 좋은 제동장치의 개발이 요구된다. 종래의 열차제동에는 운동에너지를 마찰열로 변환하는 마찰제동방식을 이용하였으나 고속화됨에 따라 마찰부분을 최소화하기 위한 전기제동방식 즉, 회생제동과 와전류 제동이 선진 고속전철(독일 ICE)의 최신 열차제동으로 채택되고 있다^[1]. 특히 와전류 제동방식의 경우 속도가 높아짐에 따라 매우 크고 안정된 제동력을 확보할 수 있으며 비접촉 방식으로 레일과의 접촉계수의 변화에 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 와전류 제동장치는 직류로 여자되는 전자석과 레일로 구성되며, 도전율을 가지고 있는 레일과 전자석의 상대운동에 의해 레일에 유도되어 흐르는 와전류가 제동력으로 작용하게 된다^[1,2]. 즉, 열차의 기계적인 운동에너지를 레일에 유기되어 흐르는 전기적인 에너지로 소모된다.

와전류 제동장치는 단시간에 큰 제동력을 확보하기 위해 높은 전류를 인가시켜야 하므로 전자석과 레일의 온도상승을 초래하게 된다. 그러므로, 와전류 제동장치의 마그네트에 대한 열특성 검토와 열차가 레일을 지날 때 온도상승 예측이 요구된다.

고속전철이 와전류 제동장치에 의한 제동을 할 경우 속도가 최대속도 350[km/h]에서 작동하여 50[km/h]정도로 감속할 때 까지이며, 이 때의 제동시간은 약 3분 가량 소요되므로 열차의 제동에 따른 전자석의 온도상승이 초래된다. 따라서, 본 논문에서는 와전류 제동장치 온도특성을 평가하기 위하여 전자석 1극분에 대한 정상상태 온도해석을 수행하여 실제 제작된 시제품의 실험치와 비교하였다. 또한, 열차속도가 350[km/h]에서 감속하여 50[km/h]에 이르는 3분간의 시간에 따른 과도상태 온도해석과 열차속도 감속에 따른 과도상태 온도해석을 수행하였으며, 정지상태의 실험결과와 비교함으로써 온도특성의 타당성을 검토하였다.

2. 와전류 제동장치의 구조 및 사양

그림 1은 설계된 고속전철용 와전류 제동장치의 구조도이며 전자석 윗부분의 Frame이 열차의 바퀴 사이에 부착된다. 표 1은 제동장치의 설계사양을 나타내고 있다. 공극, 철심 및 레일에 필요한 기자력(NI)은 암페어 법칙을 적용하였으며, 공극의 자기저항이 크므로 기자력이 공극에 소요된다고 가정하여 필요한 기자력을 산정하였다.

$$\int H \cdot dl = NI \quad (1)$$

* 準 會 員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 博士課程
 ** 正 會 員 : 韓國電氣硏究員 Mechatronics그룹 工學博士
 *** 正 會 員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 § 正 會 員 : (주) 신성이엔지 FAS 사업부 개발팀
 接受日字 : 2002年 9月 11日
 最終完了 : 2003年 3月 28日

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{NI}{2\delta} \quad (2)$$

여기서, H 는 자계, B 는 자속밀도, δ 는 공극, 그리고 μ_0 는 진공의 투자율이다.

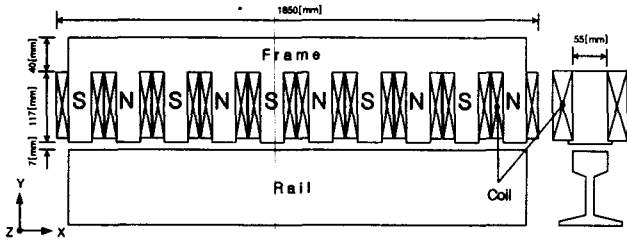


그림 1. 와전류 제동장치의 구조
Fig. 1. Structure of Eddy Current Braker (ECB)

표 1. 와전류 제동장치 설계결과
Table. 1. Design result of the ECB

항 목		설 계 값
기자력	NI	32,000 [AT]
1기분 제동장치 길이	L	1,850 [mm]
극 수	p	10 [극]
자속밀도	B	1.5 [T]
코어의 축 방향 길이	L_v	116 [mm]
코어의 폭	L_w	55 [mm]
공극	δ	7 [mm]
전자석의 높이	h	117 [mm]
프레임 두께	T_f	40 [mm]
코일 턴 수	t	160 [turn]
코일 저항	R	1.62 [Ω]
점적율	k	0.6

3. 온도 해석조건 및 모델링

온도해석시 제동장치를 구성하는 각 부분의 재질별 고유한 열물리적 물성치와 대류열전달계수 등의 해석조건이 적용되어야 하며, 이러한 자료가 신뢰성이 있어야 한다. 이러한 값들은 운전조건에 따라 다양하게 변화되므로 실제조건과 근사하도록 정확히 결정되어야 보다 신뢰성 있는 해석값을 얻을 수 있다. 그러나 권선 및 절연체의 재질이 복잡적으로 구성된 경우 실제와 동일하게 해석모델을 구성하기에는 많은 어려움이 있게 된다. 따라서, 본 논문에서는 권선의 피복과 에폭시 사이에 존재하는 미세한 공기층은 정확히 알 수가 없지만 진공함침을 하였기 때문에 공기층의 존재는 무시하고 온도해석을 수행하였다.

열전도에 대한 1차원적 Fourier 법칙은 일반적으로 식 (3)과 같이 알려져 있으며, 3차원 직각좌표계의 일반적인 열 방

정식은 식 (4)와 같다. 정상상태의 조건에서는 에너지 저장량의 변화가 없으므로 식 (4)의 우변은 0이 된다.^[3-5]

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q} = \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, q_x'' 는 체적당 발생열량 [W/m^3], k 는 열전도를 [$W/m^2 \cdot C$], $\rho \cdot c_p$ 는 체적 열용량 [$J/m^3 \cdot C$]이다. 그리고 대류 열전달이 존재하는 표면에 대한 경계조건은 식 (5)와 같다.

$$k \frac{dT}{dx} = h \cdot A \cdot \frac{(T_s - T_\infty)}{dx} \quad (5)$$

여기서, h 는 대류 열전달계수 [$W/m^2 \cdot C$], A 는 표면적 [m^2], T_s 는 제동장치 전자석 표면온도 [C], T_∞ 는 주위온도 [C], 그리고 $\rho \cdot c_p$ 는 체적 열용량 [$J/m^3 \cdot C$]이다.

제동장치의 전자석이 열적 평형상태인 정상상태에 도달하기까지 소요되는 시간은 전자석을 구성하고 있는 각 재질의 체적 열용량에 직접적으로 관계되고, 체적 열용량이 클수록 정상상태에 도달하기까지 소요되는 시간이 길어지게 된다.

코일에서 발생한 손실은 와전류 제동장치의 온도상승에 영향을 미치게 되며 이때의 코일손실은 코일의 저항에 의한 주울 열로 식 (6)과 같다.^[6]

$$P_{coil} = \rho \int_v J^2 dV [W] \quad (6)$$

여기서, ρ 는 코일의 저항율, J 는 코일의 전류밀도, V 는 코일의 체적이다. 본 논문에서는 전자석의 온도특성을 파악하기 위해 시작품을 제작하여 그림 2의 d_1 과 d_2 지점에 각각 T-type 열전대를 설치하고, 다점온도 측정장치(YEW HR1300)를 사용하여 전자석의 포화시점까지 온도를 측정하였다. 포화상태에서 측정된 표면온도와 인가된 열량으로 대류열전달계수를 산정한 후 그림 2의 등가해석 모델과 재질의 열 물리적 특성치를 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에는 범용 2차원 유한요소해석(2D-FEA) 프로그램인 Flux-2d를 이용하였으며, 이때 포화상태의 전자석 표면 온도 분포는 동일하다고 가정하였다. 표 2는 온도해석을 하기 위한 각 재질의 열 물리적 특성 및 조건을 나타내며, 그림 3에는 본 연구의 대상인 제동장치 전자석 1극에 대한 시작품을 나타낸다.

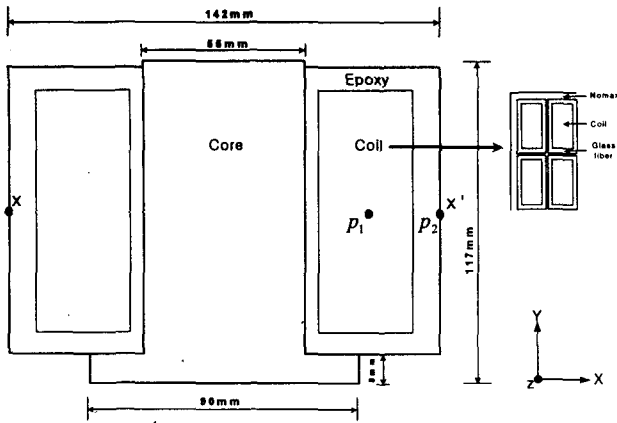


그림 2. 제동장치 전자석의 등가 해석모델
Fig. 2. Analysis model of ECB magnet

표 2. 제동장치의 열해석 조건
Table. 2. Temperature analysis condition of the ECB

구 분	Coil	Core	절연물		
			Epoxy	Nomax	Glass Fiber
열전도율 [W/m °C]	384	73	0.2	0.105	1.4
열용량 [J/m³ °C]	3,731,500	3,569,000	1,320	2,240,000	1,550,000
주변온도[°C]	20				
대류열전달계수 [W/m² °C]	20				

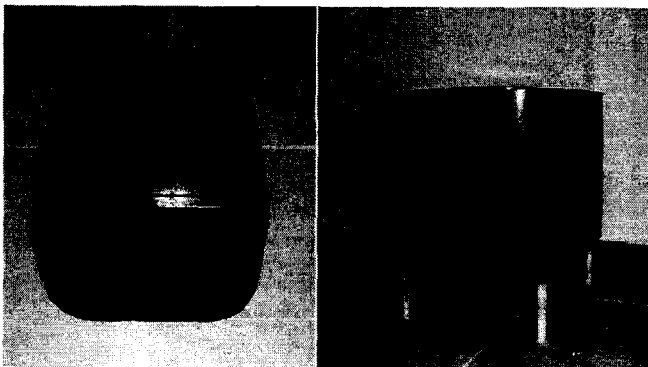


그림 3. 제동장치의 전자석 시제품 (1극 분)
Fig. 3. Electromagnet prototype of the ECB (1 pole)

4. 정상상태 온도해석 및 실험

전자석의 온도상승 실험을 수행하기 위한 구성도를 그림 4에 나타내었다. 전자석의 정상상태 온도특성을 파악하기 위하여 입력전류 20[A]와 25[A]에 대한 열원 19[W]와 28[W]를 전자석에 일정하게 공급하여 온도 포화실험을 수행하였다. 이때, 20[A]에서 $\theta_1=132[^\circ\text{C}]$, $\theta_2=90[^\circ\text{C}]$ 이며,

25[A]에서 $\theta_1=216[^\circ\text{C}]$, $\theta_2=150[^\circ\text{C}]$ 로 측정되었다. 또한, 그림 2의 해석모델과 표 2의 해석조건을 적용하여 $x-x'$ 사이의 정상상태 온도분포 해석을 수행한 결과 20[A]에서 $\theta_1=135[^\circ\text{C}]$, $\theta_2=92[^\circ\text{C}]$, 25[A]에서 $\theta_1=222[^\circ\text{C}]$, $\theta_2=150[^\circ\text{C}]$ 정도로써 실험과 약 3[°C] 정도의 오차를 나타내며 잘 일치함을 알 수 있었다. 그림 5는 정상상태 해석을 수행한 온도분포이다.

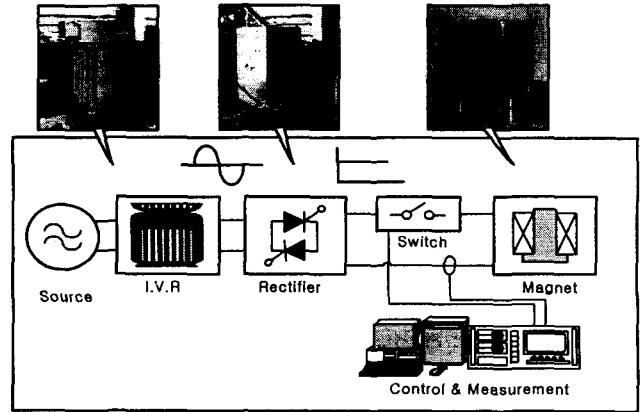


그림 4. 제동장치 전자석 실험 구성도
Fig. 4. Test system of Eddy current magnet

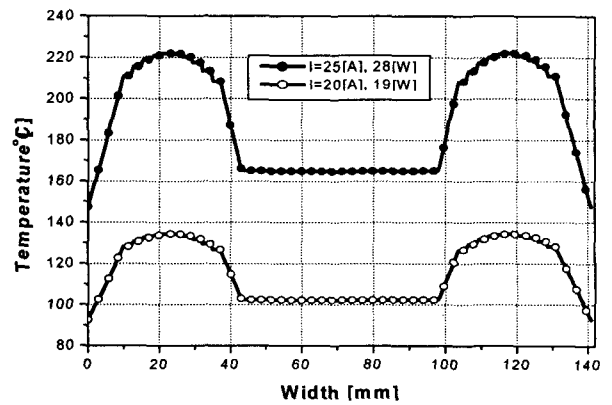


그림 5. 정상상태 온도분포 해석 (입력=일정)
Fig. 5. Analysis of steady-state temperature (P=constant)

해석의 타당성을 검증하기 위하여, 실험시 전자석의 시간 변화에 따른 온도상승 추이와 온도 특성해석시의 추이를 비교하여 그림 6에 나타내었다. 해석시의 열저항 상승에 따른 입력 P[W]는 일정하게 공급된다고 가정하였기 때문에, 실험에서도 입력을 일정하게 공급하기 위하여 정전류원 전원공급장치를 사용하였으며 온도상승에 따른 열저항 변화분 만큼의 전압을 자동조절 하였다. 그림 6에서, 입력전류 20[A]와 25[A]가 인가되는 경우의 과도상태 부분에서 약간의 오차를 나타내지만 온도상승 기울기는 잘 일치하여 포화지점에서는 거의 동일함을 알 수 있다.

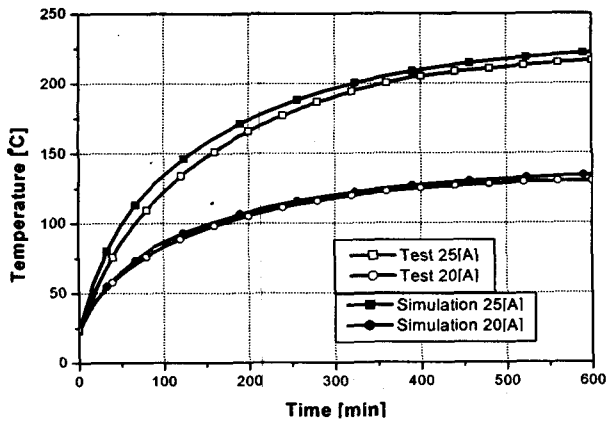


그림 6. 온도실험 및 해석 곡선 비교 (\dot{p}_1) (입력=일정)
 Fig. 6. Compare of thermal test and analysis curve
 (\dot{p}_1) (P=constant)

5. 속도에 따른 과도상태 온도해석

와전류 제동장치는 부가적인 냉각장치가 없는 자연냉각의 형태로써 열차속도가 최고 350[km/h]에서 50[km/h]까지 감속할 때 발생하는 강제대류만으로 시스템을 냉각하게 된다. 따라서 강제대류 열전달계수는 열차속도에 의해 결정되며 식 (7)과 같이 표현할 수 있다^[7].

$$h = 6.4 v^{0.75} [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad (7)$$

여기서, v 는 열차의 속도[m/s]이며, 식(7)을 이용하여 속도변화에 따른 대류열전달계수를 산정한 결과를 그림 7에 나타내었다.

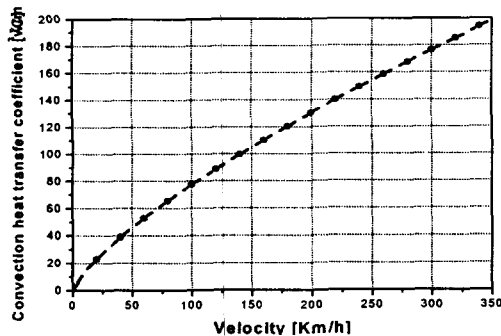


그림 7. 속도에 따른 대류 열전달계수
 Fig. 7. Convection heat transfer coefficient vs. velocity

제동장치 전자식에 흐르는 전기 에너지는 코일의 저항으로 인해 열 에너지 형태로 소모되며, 실제 전자식의 코일에 열이 발생하는 시간은 제동장치가 작동할 때이다. 즉, 열차가 350[km/h]의 속도에서 제동장치가 작동하여 50[km/h]의

속도까지 떨어질 때 까지이며, 이때 걸리는 약 3분의 시간 동안에 코일의 온도는 상승하게 된다. 따라서, 열차 감속에 따른 전자식 각 부분의 온도상승 예측이 요구된다.

속도가 0(정지상태)일 때, 제동장치가 작동하는 180[sec]동안의 코일온도 상승을 정격전류 100[A]에서 해석을 수행한 후 실험결과와 비교하여 그림 8에 나타내었다. 이때, 온도상승 해석값은 약 125[°C]이며, 최대온도를 발생하는 ρ_1 점에 설치된 열전대 실험값은 약 120[°C]로써 약 5[°C]정도의 오차범위에서 비슷하게 나타났다. 따라서 본 논문에서는 열차 정지시(속도 0)의 과도상태 온도해석과 실험을 통한 검증을 바탕으로 속도 변화에 따른 강제대류열전달계수를 적용하여 열차속도 변화에 따른 제동장치 전자식의 온도상승을 예측하고자 하였다.

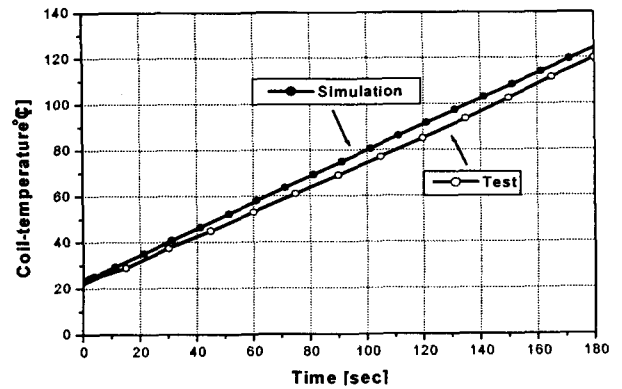


그림 8.-실험 및 해석비교 (정격전류 인가시)
 Fig. 8. Compare of analysis and test

상기 결과를 바탕으로 열차가 운전 중 제동을 가할 경우, 감속되는 속도에 따라 변화하는 전자식 각 부분의 온도상승을 예측하기 위하여 열차의 감속도는 선형이라 가정하여 열차감속에 따른 온도해석을 수행하였다. 정격전류 100[A]인 가시 제동장치가 작동하는 180[sec]동안 열차의 속도는 350[km/h]에서 50[km/h]로 감속하게 되며 이때, 식 (7)을 적용하여 열차속도변화에 따른 표면대류열전달계수를 고려한 과도상태 해석을 수행하여 코일부분, 코어부분, 그리고 Epoxy부분의 온도 변화를 그림 9에 나타내었다. 표면대류열전달계수의 변화에 따라 코일에서 발생하는 최대온도는 약 122[°C]로써 열차정지시의 해석 및 실험값과 5[°C]정도의 차이를 보이며 비슷하게 나타났으며, Epoxy와 Core의 온도는 약 52[°C]와 약 26[°C]정도로 나타났다. 전자식 각 재질이 가지는 체적열용량과 전도열전달계수에 따라 온도상승 특성은 달라지게 된다.

5. 결 론

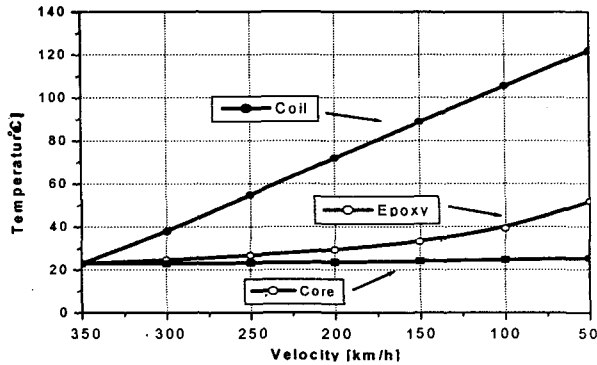


그림 9. 열차 감속에 따른 과도상태 온도해석 (100[A])
 Fig. 9. Transient state temperature analysis vs. decelerating

그림 10에는 열차정지상태의 대류열전달계수 ($h=20 [W/m^2\text{°C}]$)와 속도가 350[km/h]에서 50[km/h]로 감속할 때 각각의 속도에서 식 (7)을 이용하여 산정한 표면대류열전달 계수 ($h=200\sim46 [W/m^2\text{°C}]$)를 적용하여 코일의 온도상승 특성을 해석한 결과를 비교하여 나타내었다.

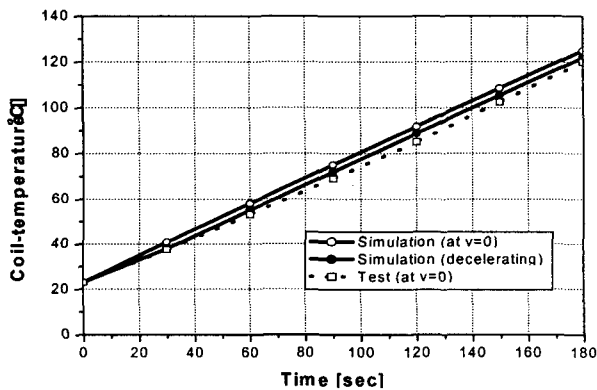


그림 10. 열차정지상태 및 감속시 코일의 온도특성
 Fig. 10. Coil temperature characteristics of stop-state and decelerating

이 경우, 열차가 정지된 상태에서 코일부분의 최고온도상승은 125[°C]이고 제동을 가하여 감속하는 경우 코일부분의 최대온도상승은 122[°C]로써 약 3[°C]정도의 차이를 나타낸다. 따라서, 열차속도가 350[km/h]에서 50[km/h]로 감속되는 3분 동안 코일에서 발생하는 열원은 열차정지시의 표면대류열전달계수 조건과 열차감속에 의한 대류열전달계수 조건에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한, 열차 정지시 해석과 실험 사이에서 나타난 코일부분의 온도오차를 적용하면 열차속도가 350[km/h]에서 50[km/h]로 감속되는 3분 동안 코일에서 발생하는 최대온도는 약 117[°C]로 예측된다.

본 논문에서는 고속전철용 와전류 제동장치의 전자석을 2차원 유한요소법을 적용하여 온도특성해석을 수행하였다. 또한, 시작품을 제작하여 온도특성실험을 수행함으로써 특성해석의 타당성을 검증하였으며, 와전류제동을 가하여 열차감속에 따른 전자석 각 부분의 온도상승을 예측하였다.

10시간 동안 전자석을 정상상태 실험 및 해석을 수행한 결과 약 5[°C]정도의 오차가 발생함을 알 수 있었다. 또한, 열차정지 상태에서 정격전류를 3분 동안 인가한 경우 과도상태 해석값(약 125[°C])과 실험값(약 120[°C])사이에는 약 5[°C]정도의 오차가 발생함으로써 온도해석의 타당성을 입증하였다. 또한, 열차가 최대속도 350[km/h]로 운전 중 와전류제동을 가하여 50[km/h]까지 감속할 수 있는 실험장비의 제작이 불가능하여, 속도가 350[km/h]에서 50[km/h]로 감속할 때 각각의 속도에서 산정한 표면대류열전달 계수를 적용하여 속도 감속에 따른 과도해석을 감속시간(3분)동안 수행한 후 전자석 각 부분의 온도를 예측하였다.

열차속도 변화에 따른 표면대류열전달 계수를 적용하여 열차가 감속하는 제동시간(3분)동안의 과도상태 해석을 수행하여 온도를 예측한 결과, 코일에서 발생하는 최대온도는 약 117[°C]로써 열차정지시의 실험값 120[°C]와는 약 3[°C]정도의 차이가 나타남을 알 수 있다. 따라서, 속도가 350[km/h]에서 50[km/h]로 감속할 때 까지 표면대류열전달은 코일온도 상승에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 시작기를 제작하여 실험을 수행한 제동장치 전자석은 180[°C]인 H종 절연재질을 사용하므로, 외부의 부가적인 냉각장치가 없이 고속주행을 하는 열차속도에 의한 공기냉각 효과만으로도 온도에 의한 절연내력에는 문제가 없는 것으로 사료된다. 제동장치의 극한 온도실험을 한 결과 전자석의 한계온도는 약 230[°C] 정도로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] 정수진, 김동희, 강도현 "고속전철 와전류 제동장치의 마그네트 열해석" 대한전기학회 2001 춘계학술대회 논문집 4.19-21, pp 397-400
- [2] 조영식, 강길환, 홍정표, 김규탁, 강도현, "전자유도 브레이크의 동특성 및 열해석", 비접촉제동시스템 1차년도 연차보고서 한국전기연구원, pp55-57, 1997.11.
- [3] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [4] J. P. Holman, "Heat transfer", 7th ed., MxGraw-Hill Book Co., 1990
- [5] 구대현 "원자로 냉각제 순환펌프용 유도전동기의 컨센실을 고려한 특성해석, 설계 및 제작" 2001. 동아대학교 대학원 전기공학과 박사학위논문

- [6] K. H. Ha, J. P. Hong, G. T. Kim, J. Lee, D. H. Kang, "A study of the design for touch free linear eddy current brake", IEEE, Trans. on Magnetics. vol.35, 1999.
- [7] 한국전기연구원 "비접촉 제동시스템 개발" 2차년도 연차 보고서. pp266, 1998. 10.
- [8] P. J. Wang and S. J. Chiueh, "Analysis of eddy-current brakes for high speed railway", IEEE, Trans. on Magnetics, vol. 34, pp.1237-1239, 1998
- [9] J. Lee, Y. D. Chun, "The performance of eddy current brake for the high speed trains", IEEE, proceedings of CEFC'98, pp.203, 1998

저 자 소 개



정수진(鄭壽鎭)

1974년 9월 25일생. 2002년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 영남대 대학원 전기공학과 박사과정. 2000. 11~2003. 4. 현재 한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹 연구원.

Tel : 055-280-1427

Fax : 055-280-1547

E-mail : jsj1105@hanmail.net



김동희(金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe대학 졸업(박사). 1987년~1989년 한국전기연구소 전력전자 연구부장. 현재 영남대 공대 전기·전자공학부 교수.

Tel : 053-850-2488

Fax : 053-813-8230

E-mail : dohkim@ynuucc.yeungnam.ac.kr



강도현(姜道鉉)

1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년~1989 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년~1996년 독일 Braunschweig대 졸업(박사). 1989년~현재 한국전기연구원 책임연구원(산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹장)

Tel : 0551-280-1480

Fax : 0551-280-1547

e-mail : dhkang@keri.re.kr



방덕제(方德濟)

1971년 5월 17일 생. 1996년 부경대 공대 기계설계공학과 졸업. 1998년 부경대 대학원 냉동공학과 졸업(석사). 1998년~2000년 한국전기연구원 연구원(Mechatronics연구그룹). 현재 (주)신성이엔지 FAS사업본부 개발팀.

Tel : 055-280-1427

Fax : 055-280-1547

E-mail : djbang@shinsung.co.kr



구대현(具大鉉)

1963년 9월 21일 생. 1989년 한양대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동아대학교 전기공학과 졸업(박사)

1991년 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 Mechatronics연구그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1486

Fax : 055-280-1547

e-mail : dhk371@keri.re.kr