

고속전철 와전류 제동장치의 마그네트 열해석

정수진*, 김동희*, 강도현**
 (*영남대학교, **한국전기연구원)

Thermal analysis of High speed train Eddy current brake system

S.J.JUNG*, D.H.KIM*, D.H.KANG**
 (*Yeungnam University, **K.E.R.I.)

Abstract - In eddy-current brake system(BS), high current may flow for increase of braking force within a short time. Therefore, the estimation of thermal characteristics for BS is required.

In this paper, the thermal characteristics of eddy-current brake for the Korean high speed train are analyzed by using 2-dimensional Finite Element Method (2D-FEM) and measured.

1. 서 론

고속전철의 속도가 고속화됨에 따라 안정된 제동력의 확보가 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 기존 기계식 제동장치(디스크 방식등)는 그 사용가능 열차속도에 제한이 있기 때문에 고속시 주 제동력 분담방식으로 회생제동이나 와전류 제동방식이 주로 사용되고 있다. 특히, 와전류 방식의 경우 속도가 높아짐에 따라 매우 크고 안정된 제동력을 확보할 수 있으며, 비접촉 방식으로 레일과의 접촉계수의 변화에 영향을 받지 않는다는 장점을 가지고 있다^[2]. 그러나, 단시간에 큰 제동력을 확보하기 위해 높은 전류를 인가시켜야 하므로 와전류 제동장치의 마그네트에 대한 열특성 검토가 요구된다.

본 논문에서는 고속전철 와전류 제동장치의 마그네트 온도상승을 2차원 유한요소법을 적용하여 정상상태 해석과 과도상태 해석을 수행하고, 제작된 시제품의 온도상승 실험을 함으로써 최종적으로 시험모델을 대상으로 해석결과와 실험결과를 비교함으로써 해석의 타당성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 정상상태 온도해석

2.1.1 정상상태 열전도 및 열원

전자석에서는 권선에서 발생하는 저항열 때문에 온도가 상승하게 되는데 전자석 내의 온도분포[T]는 에너지 방정식에 의해서 다음 식(2.1)과 같이 된다^[1,5].

$$\nabla \cdot K \nabla T + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서, K : 열전도도(W/m·C),

\dot{q} : 체적내 발열밀도 (W/m³),

ρc : 열용량(W·S/C·m³)이다.

식(2.1)을 풀기 위한 경계조건은 전자석의 표면에서 열류가 일정하므로 식(2.2)를 유도할 수 있으며, 정상상태 온도해석을 하기 위해서는 식(2.1)의 내부에너지 변화량인 우변을 영으로 두면 된다.

$$K \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0 \dots\dots\dots (2.2)$$

여기서, n : 표면에서 단위 법선 벡터
 h : 표면열전달 계수(W/m²·C)
 T₀ : 외기 온도(C)

또한, 코일에서 발생한 손실은 와전류 제동장치의 온도상승에 영향을 미치게 되며 이때의 코일손실은 코일의 저항에 의한 주유효열로 식(2.3)과 같다.^[3]

$$P_{coil} = \rho \int_V J^2 dV [W] \dots\dots\dots (2.3)$$

여기서, ρ : 코일의 저항율,
 J : 코일의 전류밀도,
 V : 코일의 체적이다.

Coil에서 발생하는 손실(heat source)은 식(2.3)를 사용하여 결정하였으며, 각 재료에 대한 열전도율, 열용량 등 제동장치의 해석조건을 표 2.1과 같다.

2.1.2 열전달 계수의 산정

대류 열 전달 계수는 열차속도에 의해 결정되며, 식(2.4)와 같이 표현할 수 있다.^[1]

$$h = 6.4 v^{0.75} [W/m^2 \cdot K] \dots\dots\dots (2.4)$$

여기서, v는 열차의 속도이고 단위는 (m/s)이다.

열 전달 계수는 대류와 복사에 의한 계수의 합으로 일반적으로 전자석이 정지시 자연대류에 의한 열 전달 계수 값 7(W/m²·C)와 복사에 의한 열전달 계수 값 4(W/m²·C)로 되어 있으며, 5(m/sec)의 속력으로 운행시 전체 열전달 계수가 20(W/m²·C), 20(m/sec)인 경우 100(W/m²·C)로 알려져 있다. 열차의 속도변화에 따른 강제대류 열전달 계수는 식(2.4)를 이용하였으며, 제동장치의 마그네트에 적용하여 속도변화에 따른 해석을 수행하였다.^[1]

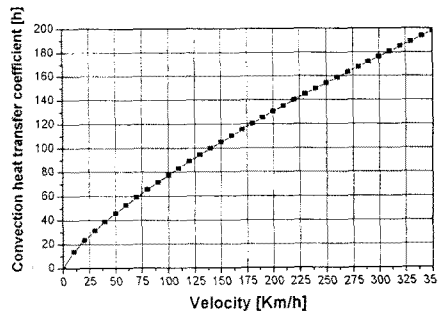


그림 2.1 속도에 따른 대류 열 전달계수 [W/m²·K]

2.1.3 해석조건 및 모델링

표 2.1은 전자석 재료의 열전도도 및 표면 열전달 계수의 사양을 나타내고 있고, 본 연구에서 정상상태 열해석을 수행한 와전류 제동장치의 실제 전자석 모델은 그림 2.2에 나타내었으며, 표 2.1의 사양이 적용된 해석 등가모델을 그림 2.3에 나타내었다.

표 2.1 제동장치의 열해석 조건

구분	coil	core	접연물 (Epoxy)
열전도율 [W/m ² C]	384	73	0.5
열용량 [J/m ³ C]	3,731,500	3,569,000	2,380,000
주위온도 (C)	20		
대류열전달계수 [W/m ² C]	11		

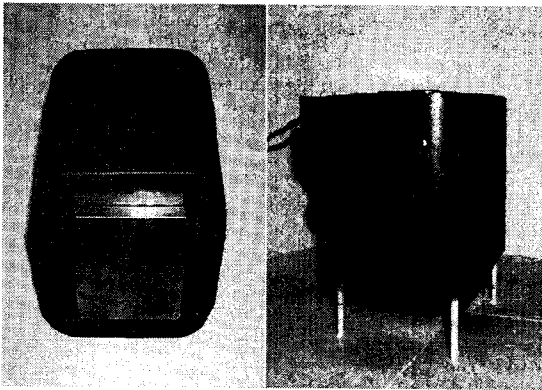


그림 2.2 와전류 제동장치 전자석 시제품

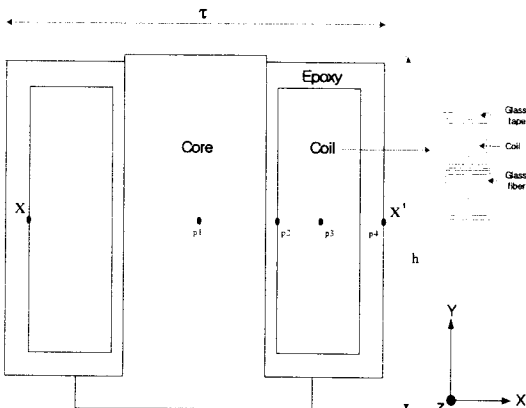


그림 2.3 와전류 제동장치 전자석 해석 등가모델 (평면형태)

2.2 열해석 시뮬레이션

와전류 제동장치의 전자석에 인가되는 정격전류는 100[A]이나 정상상태에서는 매우 온도가 높기 때문에 정전류 15[A], 20[A], 25[A]를 인가하였을 경우 2차원 정상상태 열해석을 그림 2.4에 나타내고 있으며, 이때의 과도상태 해석은 그림 2.5에 나타내었다.

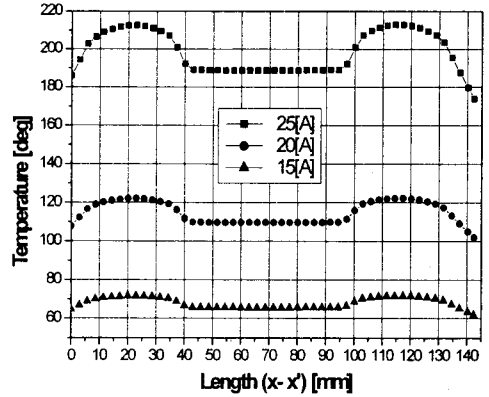
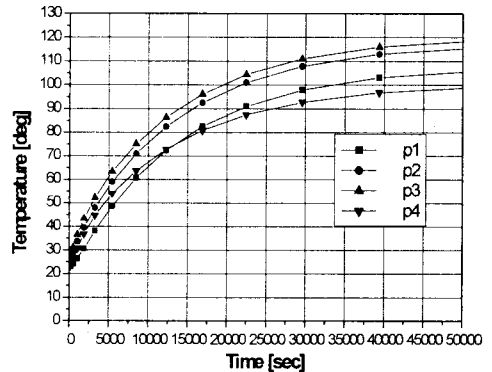
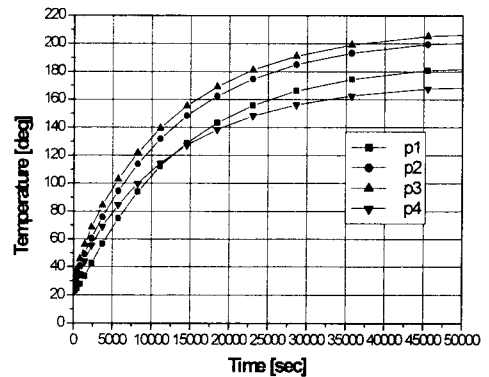


그림 2.4 전류에 따른 정상상태 열해석



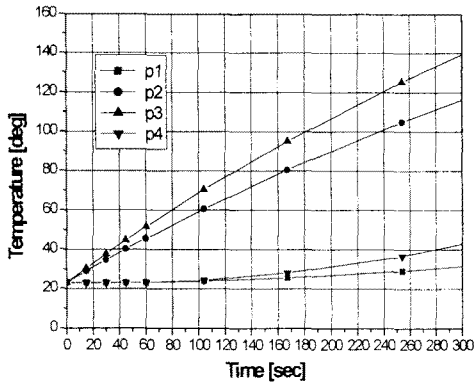
(a) 전류 20[A]인 경우



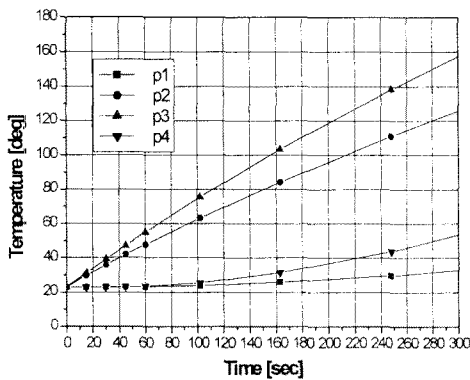
(b) 전류 25[A]인 경우

그림 2.5 과도상태 열해석 (potential)

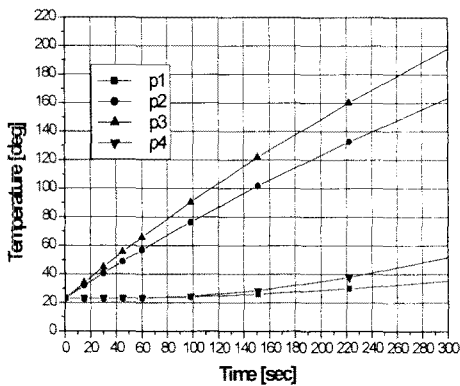
전자석에 흐르는 전기 에너지의 일부는 코일의 저항으로 인해 열 에너지 형태로 소모된다. 실제 전자석의 코일에 열이 발생하는 시간은 제동장치가 동작될 때이다. 즉, 열차가 350(km/h)의 속도에서 제동장치가 동작하여 50(km/h)의 속도까지 떨어질때 까지이며, 이때 걸리는 약 3분여의 시간동안에 코일의 온도는 상승한다. 그래서, 180(sec)의 시간동안에 코일의 온도가 어느 정도까지 상승하는지를 과도해석 하였다.



(a) 전류 90[A] 인가한 경우



(b) 전류 100[A] 인가한 경우



(c) 전류 110[A] 인가한 경우

그림 2.6 전류에 따른 열해석 시뮬레이션 (potential p1, p2, p3, p4)

그림 2.7은 정격전류 100[A]와 $\pm 10\%$ 의 90[A], 100[A]의 전류를 마그네트에 인가 할 경우를 나타내고 있다. 그림 2.7에서 coil에서 발생한 열의 변화는 급격하지만, core와 epoxy부분에서는 coil에서 발생한 열의 전달이 완전한 것을 알 수 있다.

2.2.1 속도에 따른 과도상태 온도해석

열차가 350[km/h]의 속도에서 제동장치가 동작하여

50[km/h]의 속도까지 떨어질 때 까지 제동을 가할 경우 속도에 따른 공기 냉각이 일어나게 되므로 식(2.4)을 적용하여 속도에 따른 온도해석을 정격전류 100[A]를 3분간 인가하여 p4점에서 해석한 결과를 그림 2.9에 나타내었다. 속도의 증가에 따라 p4점의 온도가 낮아짐을 볼 수 있는데, 이것은 coil에서 발생한 열이 속도가 증가함에 따라 외부로의 유출이 많아지게 되므로 마그네트의 온도는 낮아짐을 알 수 있다.

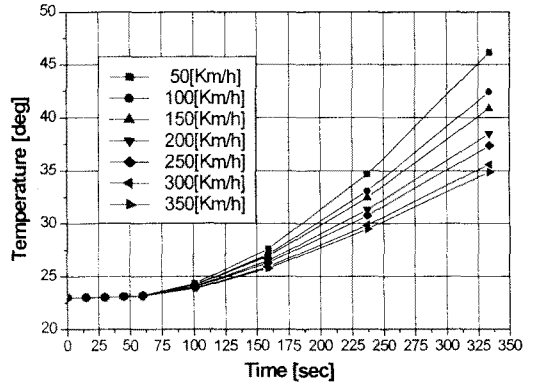


그림 2.7 속도에 따른 과도상태 열해석(100[A])
(a)50km (b)100km (c)150km (d)200km
(e)250km (f)300km (g)350km

2.3 온도시험

그림 2.8은 표 2.2의 조건으로 15[A], 20[A], 25[A]의 전류를 인가하여 10시간 실험한 결과를 나타내고 있고, 그림 2.9는 시뮬레이션과 실험과정의 비교를 나타내고 있다. 그림 2.10에서는 90[A], 100[A], 110[A]의 전류를 인가하여 5분간 실험한 결과를 나타내고 있다. 그림 2.5와 그림 2.6에서 시뮬레이션 해석한 결과와 실험 결과와의 온도상승 오차가 약 $10\% \pm 2\%$ 이내에서 나타나며, 실험상황과 조건에 따른 오차로 사료된다.

표 2.2 제동장치의 실험조건

구 분	전류 [A]	전류인가시간 [s]
(a)	90 [A]	300[s]
(b)	100 [A]	300[s]
(c)	110 [A]	300[s]
주위온도 [°C]	23	
대류열전달계수 [W/m ² °C]	11	

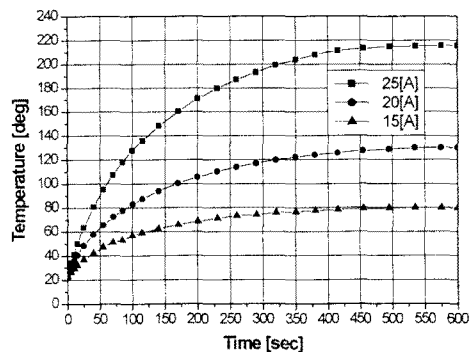
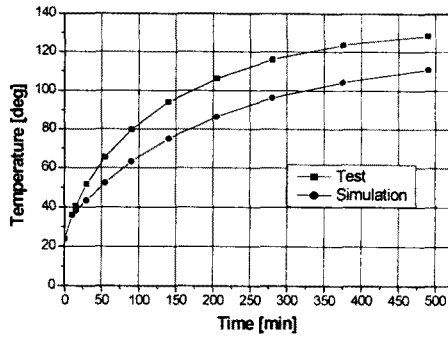
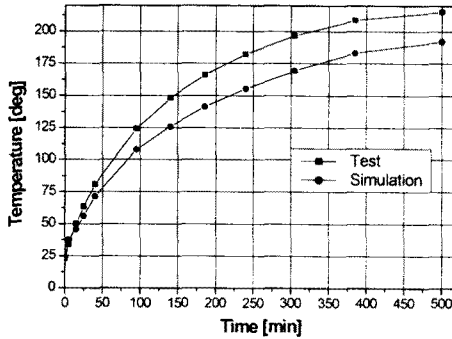


그림 2.8 전류에 따른 실험 과정(15,20,25[A]의 경우) (potential p3)

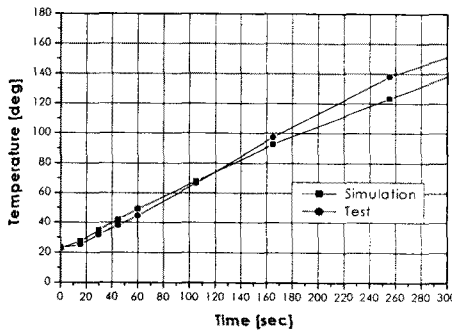


(b) 전류 20(A) 인가한 경우

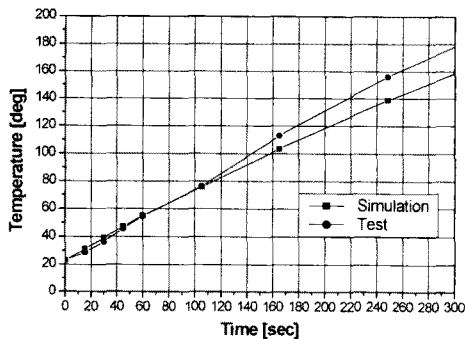


(a) 전류 25(A) 인가한 경우

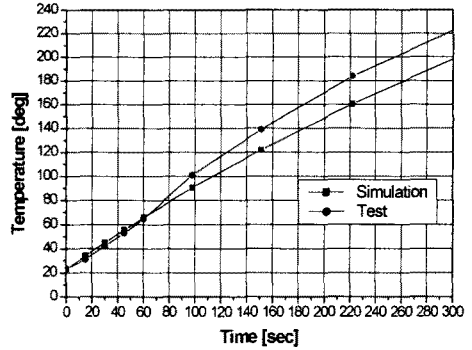
그림 2.9 온도 시뮬레이션 및 실험파형 비교 (20,25(A)의 경우) (potential p3)



(a) 전류 90(A) 인가한 경우



(b) 전류 100(A) 인가한 경우



(c) 전류 110(A) 인가한 경우

그림 2.10 온도 시뮬레이션 및 실험파형 비교 (90,100,110(A)의 경우) (potential p3)

3. 결 론

본 논문에서는 와전류 제동장치의 전체모델의 10극중 1극의 모델만으로 온도해석을 수행한 후 제작하여 실험을 실시하였다. 온도해석을 위한 물질상수 값을 전자석에 주어진 값을 사용하였다. 실험과정에서 와전류 제동장치 마그네트의 한계온도는 약 250° C 정도로 나타났으며, 해석 결과는 각 전류 상황에서 오차율 약 10% 이내에서 타당성을 검증하였고, 정격전류에서 뿐만 아니라 전류 120(A)까지는 주유열에 의해 발생하는 열이 180(sec)동안에는 마그네트에 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

본 논문에서 제시한 해석과 실험을 바탕으로 하여 10극의 전체 모델을 대상으로 하여 해석을 수행할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 비접촉제동시스템 1차년도 연차보고서, 한국전기연구원, 1997.11.
- [2] 비접촉제동시스템 2차년도 연차보고서, 한국전기연구원, 1998.11.
- [3] 비접촉제동시스템 3차년도 연차보고서, 한국전기연구원, 1999.11.
- [4] 조영식, 강길환, 홍정표, 김규탁, 강도현, "전자유도 브레이크의 동특성 및 열해석", 비접촉제동시스템 1차년도 연차보고서 한국전기연구원, pp55-57, 1997.11.
- [5] F.Kreith, M.S.Bohn, "Principles of Heat Transfer", 문건당, 1996