

극수변화에 따른 비접촉 와전류 제동기의 제동 특성

하 경 호*, 김영균*, 홍 정 표*, 김 규 탁*, 강 도 현**
 *창원대학교, **한국전기연구소

The Braking Performance of Touch Free Linear Eddy Current Brake According to The number of Poles

Kyung-Ho Ha*, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong*, Gyu-Tak Kim*, Do-Hyun Kang**
 *Changwon Nat'l Univ., **KERI

Abstract - This paper describes the braking performance of the eddy current brake for high speed trains according to the number of poles. The eddy current brake systems have to be equipped with the maximum braking force and deceleration in the given volume or mass, high braking force rate, as small normal forces as possible and stable construction. The parameters, such as the number of poles, electric ampere turns, slot width have influence on the braking force characteristics. In this paper, the effect of braking performance from the variation of the number poles is calculated by using FEM, the number of the pole which makes the maximum braking force is proposed.

1. 서 론

고속으로 운전되는 대형 추진시스템의 설계기술의 향상과 개발로 열차가 고속화됨에 따라 바퀴와 레일의 조건 혹은 기상상태에 따라 변화하는 점착계수에 영향을 받지 않고, 제어가 용이한 제동력을 얻을 수 있는 비접촉 와전류 제동기의 필요성이 높아지고 있다. 그러나 열차 제동시스템의 개발에 따른 정확한 해석 및 상세 설계 기술이 미흡한 실정이다[1].

고속으로 운전되고 있는 열차의 제동시스템은 고속운전영역에서 가능한 기계적 마찰을 줄이면서 필요한 감속도를 얻기 위하여 비접촉 제동방식인 전기제동방식 즉, 회생제동이나 와전류제동방식이 최신 열차제동시스템에 채택되고 있다. 와전류제동기는 DC로 여자되는 전자석과 레일로 구성되어 있으며, 도전율을 갖고 있는 레일과 전자석의 상대운동에 의해 레일에 유도되어 흐르는 와전류가 제동력으로 작용하게 된다. 즉, 열차의 기계적인 운동에너지가 리액션레일에 유기되어 흐르는 전기적인 에너지로 소모된다.

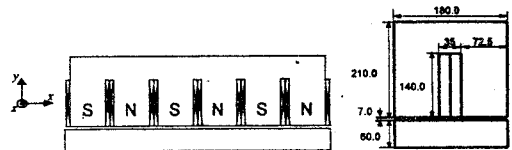
이러한 특성의 비접촉 와전류 제동기의 속도변화에 따른 제동특성이 레일의 상대속도뿐 아니라 전원측으로 전자석에 공급되는 전자석의 기자력, 전자석의 기계적인 치수, 리액션 레일의 구조 및 레일의 도전율 등에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 비접촉 와전류 제동기를 설계하기 위해서는 각종 파라메타 변화에 - 극수, 기자력, 적층폭, 무게, 제동력, 흡인력, 감속도, 도전율, 온도특성, 전자석의 치수변화, 공극등 - 따른 제동 특성변화를 분석하는 것이 필요하다[2,3].

본 논문에서는 비접촉 와전류제동기를 대상으로 공급되는 기자력에 따라 극수의 변화가 제동기의 제반 특성에 미치는 영향을 유한요소법을 사용하여 분석하였으며 제동기의 세부 치수 결정방법을 검토하였다. 또한 3차원을 고려한 제동력을 산출하기 위하여 자기 스칼라포텐셜을 계변수로 하는 2차원 유한요소해석을 통하여 유효적층폭을 계산함으로써 효율적이고 신뢰성 높은 해석결과를 얻을 수 있도록 하였다.

2. 해석 이론

2.1 해석대상

와전류제동기의 기본적인 해석대상은 그림 2.1과 같으며 그림 2.1(b)는 기본 설계된 1극분의 치수이다. 전자석은 직류전자석로 여자되고 있으며, 단부효과를 무시하고 자기적 대칭성을 고려하여 1극만을 해석대상으로 하였다. 기본 설계된 와전류제동장치의 감속도는 0.308 (m/sec²)이고 일반적인 제원은 표. 2.1과 같다.



(a) 6극 와전류 제동장치의 모양 (b) 해석모델

그림 2.1 와전류제동기의 단면도

표 2.1 기본 설계 사양 [mm]

레일, 전자석 재질	ST37	전자석 적층폭	75
기자력	33,600 [A]	극 간격	180
코일장 단면적	4900 [mm ²]	레일 profile	UIC 60
극 수	6	공극 길이	7.0

2.2 제동특성해석

2.2.1 유한요소해석(3)

해석모델은 직류로 여자되고 있기 때문에 변압기 기전력을 고려할 필요가 없다. 따라서 와전류 제동기의 해석모델의 유한요소해석을 위한 지배방정식은 Maxwell 전자방정식 및 보조방정식으로 부터 자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 계변수로 하는 특성방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \sigma (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

레일은 x 방향으로 v_x 의 속도로 이동하고 있다고 보고 다시 정리하여 쓰면 식 (2)와 같다.

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right] + J_0 - \sigma v_x \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

여기서 인가전류 J_0 와 자기벡터포텐셜 A 는 z 방향 성분을 나타낸다.

2.1.2 동특성 해석

그림 2.2와 같이 m이라는 질량을 갖고있는 열차가 추진용 전동기에 의해 일정한 속도로 추진되고 있을 때, 와전류제동기가 작동하게 되면 레일과 전자석의 상대운

동에 의해 레일에 유기되어 흐르는 와전류에 의해 열차에는 F_d 의 제동력이 작용하게 된다.

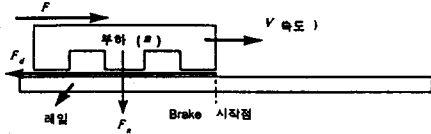


그림 2.2 동특성 해석모델

제동력은 속도의 함수이고 와전류제동기가 동작하고 있을 때의 운동방정식은 다음 식 (3)과 같다.

$$-F_d(v) = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

여기서, $F_d(v)$ 는 와전류제동기의 제동력, m 은 열차의 무게, a 는 열차의 가속도, v 는 열차의 속도이다. 식 (3)을 시간에 대하여 적분하면 비접촉 제동기가 초기 동작하는 속도 v_0 에서 최종적으로 열차가 제동되는 속도 v 까지 도달하는데 걸리는 감속 시간 t 와 감속도 a 를 각각 식 (4), (5)로부터 계산할 수 있다.

$$t = -m \int_{v_0}^v \frac{1}{F_d(v)} dv \quad (4)$$

$$a = \frac{v_0 - v}{t} \quad (5)$$

본 해석모델의 와전류제동기는 초기속도 350(km/h)에서 50(km/h)까지 작동하는 것으로 보았다.

2.2 유효적층폭 계산(4)

2.2.1 특성방정식

일반적으로 공극을 갖고있는 전자석에 의한 자계는 프런트현상과 단부효과에 의해 공극의 유효단면적이 증가하기 때문에 자기적 유효적층폭이 바뀌므로 정확한 제동력의 값을 얻을 수 없다. 따라서, 기자력은 일정하고 유효적층폭이 변화할 때에 이를 공극 퍼미언스의 변화로 나타낼 수 있는 자기 스칼라포텐셜(magnetic scalar potential)을 계변수로하여 유한요소 해석하면 보정된 자기적 유효적층폭을 구할 수 있다.

자기 스칼라포텐셜 Ω 를 정의하여 맥스웰 방정식으로 부터 자기 스칼라포텐셜 Ω 를 가지는 지배 방정식은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \Omega) = 0 \quad (6)$$

2.2.2 유효적층폭 산출

자기 스칼라포텐셜을 계변수로 가지는 유한 요소해석 결과로부터 단위길이당 공극자속 ϕ 와 저장에너지 W_m 은 각각 식 (7)과 (8)로부터 구할 수 있다.

$$\phi = S \cdot B = w \cdot l \cdot B = w \cdot \mu \cdot H \quad (7)$$

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} \int_V \left[\int_B \frac{1}{\mu_r} dB^2 \right] dV \quad (8)$$

여기서 w 는 실제 적층폭, μ 는 철심의 투자율이다. V 는 해석 영역의 모든 요소를 나타낸다.

선형 해석인 경우 자기저항 R 은 식 (7)의 자속과 식 (8)로부터 구한 저장에너지로 표현할 수 있다.

$$R = \frac{g}{S_{eff} \mu_0} = \frac{2 W_m}{\phi^2} \quad (9)$$

여기서 S_{eff} 는 유효단면적, g 는 기계적 공극이다. 따라서 유효적층폭은 식 (10)과 같이 정리 할 수 있다.

$$l_{eff} = \frac{g \phi^2}{2 W_m \mu_0} \quad (10)$$

3. 해석 결과 및 검토

3.1 전류밀도가 일정한 경우 극수변화

극수가 바뀔 때 따라 파라메타가 변화하므로 그림 2.1의 6극 기본 해석 모델을 기준으로 극수에 따라 치수를 비례적으로 증가 또는 감소하게 된다. 각 극수에 입력되는 전류는 일정하며 극수에 따라 턴수가 증가하는 것으로 전류밀도는 6.857(A/mm²)으로 일정하게 된다.

표 3.1은 6극을 기준으로 극수변화에 따른 전자석의 치수와 파라메타 변화를 산정하여 나타내었다. 여기서, $F, r, \sigma, c, Sc, Ac, b, \delta$ 는 각각 1극당 기자력, 극간격, 레일의 도전율, 제동기의 치폭의 1/2, 코일창 폭, 코일창 단면적을, 슬롯 깊이 그리고 전류밀도를 나타낸다. 그림 3.1에서 극수가 증가할수록 평균제동력과 흡인력이 감소하는 경향을 보이며 그림 3.2에서 4극일 때 평균감속도는 0.398(m/sec²)로 우수한 제동성능을 가진다. 그러나 극수가 감소함에 따라 흡인력과 전자석 무게의 증가로 차체의 하중을 증가시키므로 무게를 고려한 단위무게당 평균제동력이 필요하다. 이의 결과를 그림 3.3에 도시하였으며 극수가 클수록 단위무게당 제동력 성능이 우수함을 알 수 있다.

3.2 기자력이 일정한 경우 극수변화

전류밀도가 일정한 경우와 동일한 방법으로 6극 모델을 기준으로 극수변화에 따라 전자석의 치수가 결정되며 극수변화에 따라 기자력을 33600(A)로 일정하게 두고 제동기의 제동특성을 해석하였다. 즉, 코일창 단면적이 바뀔 때 따라 동일 기자력을 확보하기 위하여 외부 전원으로부터 공급되는 전류가 바뀌는 것이다.

기자력이 일정한 경우의 제동성능은 그림 3.1과 같이 극수 증가에 따라 평균 제동력은 포물선을 그리며 8극에서 최대 10.09(kN/m)의 평균제동력을 가진다. 이때 감속도는 그림 3.4에서 0.336(m/sec²)이다. 반면에 차체의 바퀴에 하중으로 작용하는 흡인력은 극수가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 이런 양상들은 전류밀도가 일정한 제동기의 제동성능과는 상이한 특성을 나타내고 있다. 또한 극수가 증가할수록 무게와 흡인력의 감소로 단위 무게당 제동력이 우수하며 8극과 10극은 비슷한 단위무게당 제동력을 가진다.

기자력이 일정한 제동기는 8극과 10극에서 우수한 제동 성능을 가지며 흡인력 또한 작은 값을 나타낸다.

3.3 유효적층폭

6극인 와전류 비접촉 제동기의 기본 해석모델을 대상으로 유효적층폭 범위를 산정하고 적층폭 변화에 따른 비접촉 제동기의 특성을 해석하였다.

공극이 7(mm)이며 레일폭이 74.3(mm)인 UIC60 레일 profile을 대상으로 하여 전자석의 적층폭에 따른 유효적층폭의 변화를 그림 3.5에 나타내었다. 전자석의 기계적 적층폭이 변화할 때 110(mm)까지는 거의 직선적으로 변화하고 이상의 수치에서는 포화된 특성을 가진다. 즉 제동력 또한 전자석 적층폭의 증가에 선형적으로 증가하지 않고 110(mm)이상에서는 일정한 제동력의 특성을 가진다. 따라서 레일폭이 74.3(mm)인 경우에 전자석의 무게도 0줄이고 제동력도 키울 수 있는 110(mm)이

내로 설계하는 것이 바람직하다.

표 3.1 극수변화에 따른 전자석의 치수 [mm]

항목	4극	6극	8극	10극	
치수	S_c	52.5	35	21	26.25
	b	140	140	140	140
	c	108.75	72.5	54.375	43.5
r	270	180	135	108	
A_c [mm ²]	7,350	4,900	3,675	2,940	
σ [1/Ωm]	0.78×10^9	1.57×10^9	2.42×10^9	3.23×10^9	
전류밀도가 일정한 경우					
ξ [A/mm]	6.857	6.857	6.857	6.857	
F [A]	50,400	33,600	25,200	20,160	
기자력이 일정한 경우					
ξ [A/mm]	4.571	6.857	9.173	11.429	
F [A]	33,600	33,600	33,600	33,600	

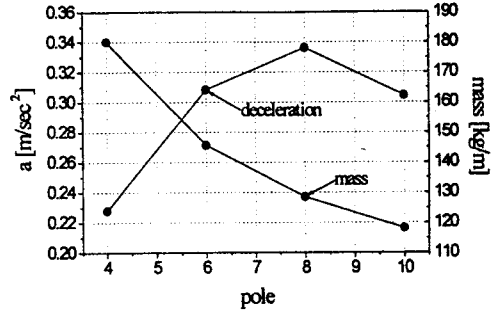


그림 3.4 감속도 및 무게 변화(기자력 일정)

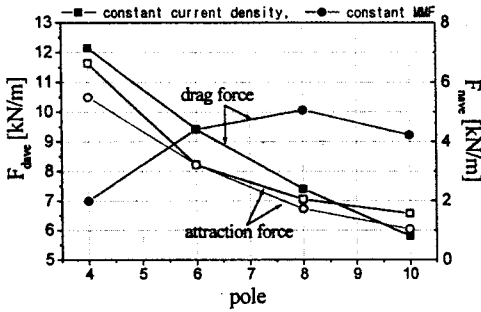


그림 3.1 극수변화에 따른 평균 제동력과 평균 출력력

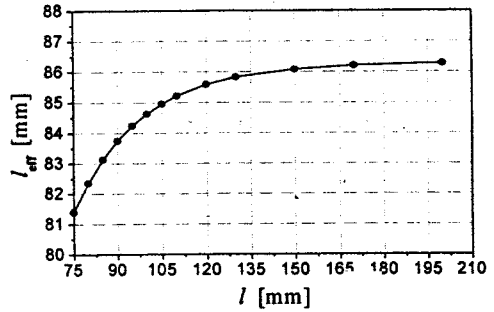


그림 3.5 전자석 적층폭 변화에 따른 유효적층폭 변화

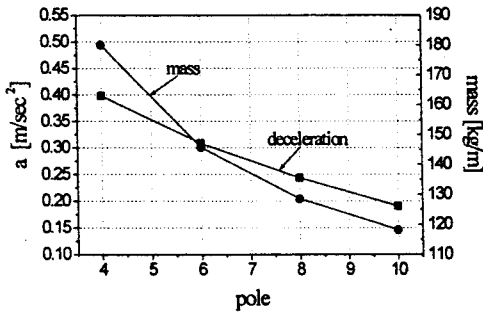


그림 3.2 감속도 및 무게변화(전류밀도 일정)

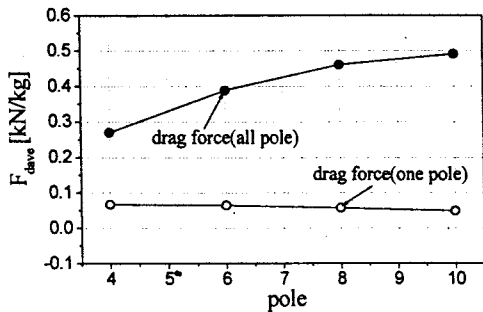


그림 3.3 단위 무게당 평균 제동력(전류밀도 일정)

4. 결 론

본 논문에서는 고속전철용 대형 추진시스템의 비접속 와전류제동장치의 기본 설계된 제동기를 대상으로 극수 변화에 따라 전자계 해석을 통하여 제동특성을 분석하고 스칼라 포텐셜을 사용하여 유효적층폭을 산정하였다. 전자석의 전류밀도가 일정한 경우에 극수가 작을수록 제동력이 우수하나 무게와 흡입력을 고려하여 극수가 증가하는 것이 적당하고, 기자력이 일정한 경우에는 8극에서 제동력과 감속도가 우수하며 흡입력 또한 작게 나타났다. 전자석의 적층폭 110(mm)까지는 유효적층폭이 직선적으로 변화하므로 이 범위 내에서 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

제동력이 레일의 열로 변화하여 선로의 온도를 초래하므로 온도특성해석이 계속 검토되어야 할 것이다.

본 논문에서 기술된 내용은 와전류 제동기의 설계 및 특성해석의 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] P. J. Wang and S. J. Chiueh, "Analysis of eddy-current brakes for high speed railway", IEEE Tran. on magnetic, Vol. 34, No. 4, pp. 1237-1239, 1998.
- [2] Ju Lee and Yon-Do Chun, "The performance of eddy current brake for the high speed trains", IEEE CEFC 98', pp. 203, 1998
- [3] 홍정표 외 4, "전자유도 브레이크의 동특성 및 열해석", 대한전기학회 전기기기연구회 추계학술대회, pp. 77-79, 1997.
- [4] 홍정표 외 4, "자성예저를 사용한 유도전동기의 특성해석", 대한전기학회 하계학술대회, 1994.