

A Study on the Design of Touch Free Eddy-Current Brake

河京鎬* · 洪正杓** · 金奎卓*** · 姜道鉉§

(Kyung-Ho Ha · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim · Do-Hyun Kang)

Abstract - This paper deals with the design of a touch free eddy-current brake for high speed transportation systems by using 2-dimensional Finite Element Method (2-D FEM). The eddy current brake systems have to be equipped with maximum braking force and deceleration at the given volume or mass, high braking force at small rate, attraction forces as small as possible and stable construction. The parameters, such as the number of pole, electric ampere-turns and slot width have influence on these braking characteristics. For the magnet to satisfy above-mentioned performance in high speed, the braking performance according to variation of the parameters are analyzed by the 2-D FEM. In addition, the magnet stack width is determined from equivalent stack width that is calculated by solution of the field with scalar potential. From these results, the magnet of optimized configuration with maximum braking force and minimum attraction force is designed by the process of detail design.

Key Words : Touch free eddy-current brake, Braking force, Deceleration and Optimized configuration

1. 서 론

일반적으로 고속으로 운전되고 있는 열차의 제동시스템은 높은 이용성과 신뢰성을 가지고 고속운전영역에서 가능한 기계적인 마찰을 줄이면서 필요한 감속도를 얻을 수 있어야 하며, 제어성이 좋아야 한다[1-5]. 종래의 열차 제동에는 열차의 기계적인 운동에너지를 마찰에너지로 변환하는 마찰제동 방식을 널리 이용하여 왔으나 열차가 고속화됨에 따라 마찰에서 발생하는 소음, 분진, 기계적인 마모 등과 같은 환경적인 문제가 대두됨에 따라 비접촉 제동방식인 전기제동방식 즉, 회생제동이나 와전류 제동방식이 최근 열차제동시스템에 채택되고 있다. 또한 열차의 제동거리와 안전성을 확보하기 위해 이들의 제동방식은 서로 독립적으로 동작되며 최적의 제동 시스템을 얻기 위해 다른 제동방식과 혼합하여 제동력을 분담시킨다[2-5].

고속전철등 대형 추진시스템의 비접촉 제동장치에 이용되는 와전류제동기는 DC로 여자되는 전자석과 리액션 레일로 구성되어 있으며, 도전율을 갖고 있는 리액션 레일과 전자석의 상대운동에 의해 리액션 레일에 유도되어 흐르는 와전류가 제동력으로 작용하게 된다[6,7]. 즉, 열차의 기계적인 운동에너지가 리액션 레일에 유기되어 흐르는 전기적인 에너지로

소모된다. 속도변화에 따른 와전류제동기의 제동특성은 전자석과 리액션 레일의 상대속도뿐 아니라 전원 측으로부터 전자석에 공급되는 전자석의 기자력, 전자석의 기계적인 치수, 리액션 레일의 구조 및 레일의 도전율 등에 따라 크게 달라지게 된다. 따라서 와전류제동기를 설계하기 위해서는 각종 파라미터 변화에 - 극수, 기자력, 적층폭, 무게, 제동력, 흡인력, 감속도, 도전율, 온도특성, 전자석의 치수변화, 전자석 창폭의 단면적 그리고 공극 등 - 따른 제반 특성변화를 분석하는 것이 필요하다[1-13].

본 논문에서는 비접촉 제동장치의 개념설계된 전자석을 대상으로 제동특성을 최대화하기 위하여 파라미터의 변화가 제동력의 제반 특성에 미치는 영향을 분석하였으며 이 해석 결과를 바탕으로 와전류 제동기의 제동능력 향상을 위한 전자석의 치수를 결정하였다.

극수의 변화에 따른 최적의 코일창폭을 결정하기 위해 기본설계된 제동기를 대상으로 코일창폭/극간격비를 결정하였으며 외부입력전원의 상태에 따라 극수의 변화가 제동특성에 미치는 영향을 분석하여 극수를 결정하였다. 즉 기자력이 일정한 경우와 전류밀도가 일정한 경우에 대하여 극수 변화에 따라 전자석을 재설계하고 제동특성을 분석하였다. 정량적으로 분석된 결과로부터 우수한 제동력과 감속도를 가지며 열차에 유효하중으로 작용하는 흡인력을 최소화 할 수 있는 전자석을 설계하였다.

와전류 제동기의 제동력 특성을 해석하기 위하여 전자장 수치해석기법 중에서 보편적으로 적용되고 있는 2차원 유한요소법을 이용하였으며, 3차원적인 전자기 현상을 고려한 제동력을 산출하기 위하여 자기 스칼라포텐셜을 계변수로 하는 2차원 유한요소해석을 통하여 유효적층폭을 계산함으로써 효율적이고 신뢰성 높은 해석결과를 얻을 수 있도록 하였다.

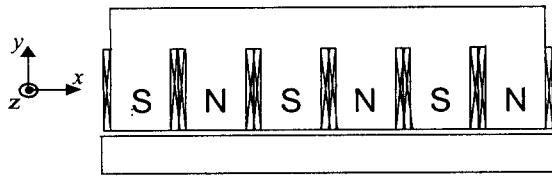
* 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 博士課程
 ** 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 助教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 副教授 · 工博
 § 正 會 員 : 韓國電氣研究所 Mechatronics 연구그룹 그룹장
 接受日字 : 1999年 1月 25日
 最終完了 : 2000年 1月 11日

2. 해석이론

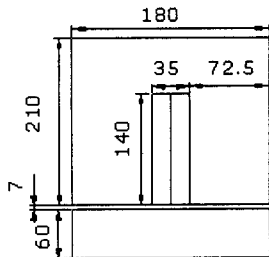
2.1 해석 모델

개념설계된 와전류제동기의 기본 해석모델은 그림 1(a)와 같으며 그림 1(b)는 1극분의 치수이다. 전자석은 직류전류로 여자되고 있으며, 자기적 대칭성을 고려하여 1극만을 해석대상으로 비선형 해석하였으며 단부효과를 무시하였다. 본 해석모델의 와전류제동기는 초기속도 350 (km/h)에서 50 (km/h)까지 작동하며 기본 설계된 와전류제동장치의 감속도는 0.308 (m/sec²), 제동 시간은 270초이고 전자석의 전체 길이는 1080 (mm)로 해석모델의 제원은 표 1과 같다.

와전류제동기의 해석모델에 제동특성을 산출하기 위한 전자기해석을 적용하는데 있어서 다음과 같은 가정을 두었다. 첫째, 여자전류와 자기 벡터포텐셜은 z 방향성분만 갖는다. 둘째, 해석영역은 준 정상상태이므로 변위전류는 무시한다. 셋째, 전자석은 x 축으로만 이동한다. 넷째, 재질은 등방성이고 균일하다.



(a) 6극 와전류 제동장치의 전체 모양



(b) 해석모델

그림 1 와전류 제동기의 기본 해석모델

Fig. 1 Magnet structure of eddy-current brake system with 6 poles

표 1 6극 기본 모델의 제원

Table 1 Specification of initial model with 6 poles

극 수	6	전자석 적층폭	75 (mm)
슬롯당 기자력	33600 (A)	극 간격	180 (mm)
코일 창 단면적	4900 (mm ²)	레일 profile	UIC60
공극길이	7.0 (mm)	자성재질 (레일, 전자석)	ST37

* UIC60: 레일폭이 74.3 (mm), 높이 51 (mm)

2.2 제동특성 해석

2.2.1 제동력 및 흡인력 계산

해석모델은 직류로 여자되고 있기 때문에 변압기 기전력을 고려할 필요가 없다. 따라서 와전류 제동기 해석모델의 유한요소해석을 위한 지배방정식은 맥스웰 전자방정식 및 보조방정식으로부터 자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 계변수로 하는 특성방정식을 유도하면 식 (1)과 같다.

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

여기서, \vec{J}_o 는 전자석의 여자전류밀도, \vec{B} 는 자속밀도, \vec{v} 는 주행속도, μ 는 투자율, σ 는 레일의 도전율이다.

전자석은 x 방향으로 v_x 의 속도로 이동하고 있다고 보고 다시 정리하여 쓰면 식 (2)와 같다[4-8].

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

체적 V인 물체에 작용하는 힘은 그 물체의 표면 S에 작용하는 맥스웰 응력 \vec{P} 의 면적분과 같다. 한 요소 내에서 발생한 P_x, P_y 의 각방향 성분을 적분경로 l에 대해 작용하는 힘의 x성분인 제동력 F_d 와 y 성분인 수직력 F_n 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_d = \frac{1}{2\mu_0} \int_l w_{eff} (B_x^2 - B_y^2) n_x - 2n_y B_x B_y dl \quad (3)$$

$$F_n = \frac{1}{2\mu_0} \int_l w_{eff} (B_y^2 - B_x^2) n_y - 2n_x B_x B_y dl$$

여기서, n_x, n_y 는 외향 단위 법선 벡터이며 w_{eff} 는 자기적 유효 적층폭이다.

2.2.2 동특성 해석

그림 2와 같이 m이라는 질량을 갖고있는 열차가 추진용 전동기에 의해 일정한 속도로 추진되고 있을 때, 와전류제동기가 작동하게 되면 레일과 전자석의 상대운동으로부터 레일에 유기되어 흐르는 와전류에 의해 열차에는 F_d 의 제동력이 작용하게 된다. 와전류제동기가 동작하면 열차는 감속되기 시작한다

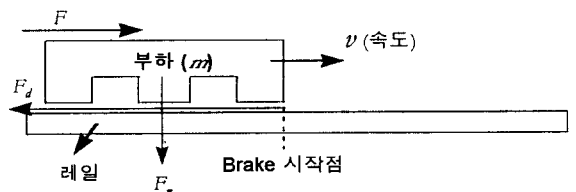


그림 2 동특성 해석모델

Fig. 2 Model to analyze dynamic characteristic

제동력은 속도의 함수이고 와전류제동기가 동작하고 있을 때의 운동방정식은 다음 식 (4)와 같다.

$$-F_d(v) = m a = m \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

여기서, $F_d(v)$ 는 와전류제동기의 제동력, m 은 열차의 무게, a 는 열차의 가속도, v 는 열차의 속도이다.

식 (4)에서 와전류 비접촉 제동기가 초기 동작하는 속도 v_0 에서 이 비접촉 제동기에 의해 최종적으로 열차가 제동되는 속도 v 까지 도달하는데 걸리는 감속 시간 t 는 식 (4)를 정리하여 시간에 대하여 적분하면 식 (5)와 같으며 식 (6)으로 감속도를 계산할 수 있다.

$$t = -m \int_{v_0}^v \frac{1}{F_d(v)} dv + t_0 \quad (5)$$

$$a = \frac{v_0 - v}{t - t_0} \quad (6)$$

여기서, 와전류제동기가 동작하기 시작하는 초기시간 t_0 는 "0"이며 그때의 열차속도 v_0 는 350 (km/h)이다.

제동력은 유한요소해석으로부터 구하였으며 본 해석모델에 있어서 와전류 제동기의 초기 속도는 350 (km/h)에서 50 (km/h)까지 제동기가 작동하는 것으로 보았다. 또한 제동특성 해석시 차체의 공기저항 및 마찰저항은 무시하였으며 동특성을 해석하기 위하여 제동기 1대당 분담된 열차의 무게는 30 (t)으로 놓고 해석하였다[5].

2.3 유효적층폭 계산

자기 스칼라포텐셜 Ω 를 정의하여 맥스웰 방정식으로부터 자기 스칼라포텐셜 Ω 를 가지는 지배 방정식은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다[14].

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \Omega) = 0 \quad (7)$$

따라서 2차원 해석 영역에서 자기 스칼라포텐셜을 계변수로 가지는 특성방정식은 식 (8)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\mu \frac{\partial \Omega}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial \Omega}{\partial y}) = 0 \quad (8)$$

자기 스칼라포텐셜을 계변수로 가지는 유한요소해석 결과로부터 단위 길이당 공극 자속 Φ 와 공극에 저장된 에너지 W_m 은 각각 식 (9)와 식 (10)으로부터 구할 수 있다.

$$\Phi = S \cdot B = w \cdot l \cdot B = w \cdot \mu \cdot H \quad (9)$$

$$W_m = \int_V [\int_B \vec{H} \cdot d\vec{B}] dV \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2\mu_0} \int_V [\int_B \frac{1}{\mu_r} dB^2] dV$$

여기서, S 는 단면적, w 는 기계적 적층폭, V 는 공극에서 요소를 나타낸다.

유한요소 해석으로부터 산출된 자속량과 공극에 저장된 에너지를 이용한 공극에서의 자기저항은 식 (11)과 같다.

$$R = \frac{g}{S_{eff} \mu_0} = \frac{2 W_m}{\Phi^2} \quad (11)$$

여기서, $S_{eff} = 1 \times w_{eff}$ 는 유효단면적, g 는 기계적 공극이다.

따라서 유효적층폭은 식 (12)와 같이 정리하여 전자기적 유효적층폭을 구할 수 있다.

$$w_{eff} = \frac{g \Phi^2}{2 W_m \mu_0} \quad (12)$$

3. 비접촉 와전류 제동기의 특성

3.1 해석 과정

와전류 제동기의 해석과정은 그림 3과 같으며 그림 4는 와전류 제동기의 모형과 치수에 대응하는 변수를 표기하였다. 다음의 3가지 경우에 대하여 파라미터 변화에 따라 전자석의 치수를 재 설정하고 설계된 치수로부터 유한요소해석을 통하여 제동성능에 미치는 영향을 분석하였다. 제동력과 흡인력은 속도의 함수이므로 평균값을 취하여 비교하였다. 정량적으로 분석된 해석결과로부터 와전류 제동시스템의 특성을 만족하는 전자석의 최적형상을 결정하였다.

- 첫째, 전자석이 6극일 때 코일창폭/극간격비(S_c/τ) 변화
- 둘째, 전류밀도가 일정한 경우 극수 변화
- 셋째, 기자력이 일정한 경우 극수 변화

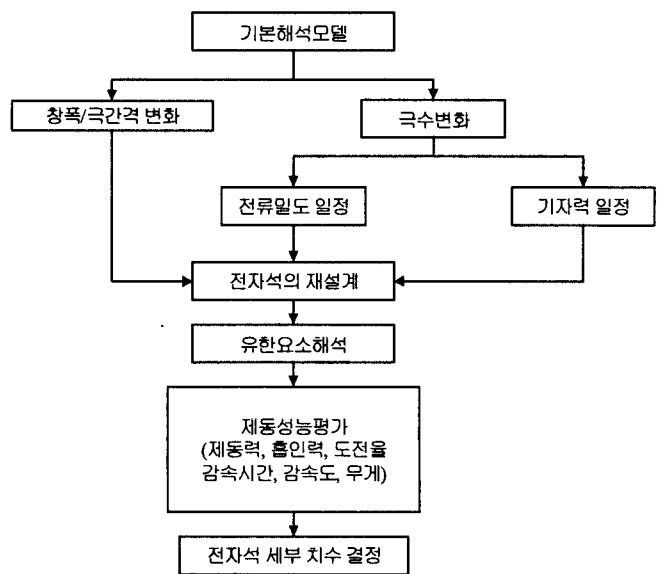


그림 3 해석 과정
Fig. 3 Analysis procedure

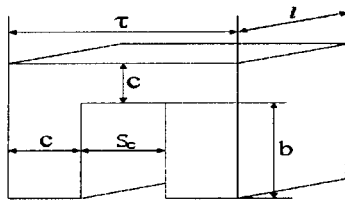


그림 4 1극분 모형도
Fig. 4 Geometry for 1-pole

3.2 유효적층폭

그림 5와 같은 레일의 구조에 전자석이 위치하므로 프린징 현상에 의하여 유효 단면적이 증가하기 때문에 자기적 공극이 바뀌므로 2차원 해석으로는 정확한 제동력의 값을 얻을 수 없다.

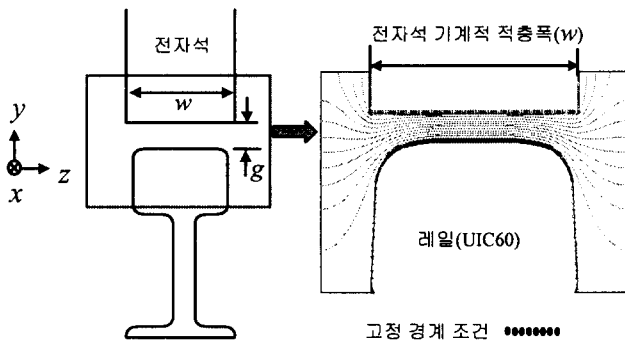
그러나, 상이한 적층폭을 가지고 불균일한 공극에서의 퍼미언스 변화를 보정한 자기적 유효적층폭의 계산식 (12)를 수행하여 식 (3)의 2차원 제동력 해석 결과에 유효적층폭을 곱함으로써 근사 해석 결과를 얻을 수 있다.

그림 5는 스칼라포텐셜을 계변수로 사용한 유한요소 해석을 수행으로부터 얻은 등포텐셜 분포를 나타낸 것이다. 그림의 해석영역에서 전자석의 유효적층폭을 산출하기 위하여 레일 선상에 "0", 전자석에 "100"의 고정경계 조건을 부여하여 선형 해석하였다. 그림 6은 UIC60 레일 profile을 대상으로 하여 전자석의 적층폭에 따른 유효 적층폭 변화를 도시하였으며 이 결과로부터 유효한 적층폭의 범위를 결정하였다.

전자석의 기계적 적층폭이 변화할 때 110 (mm)까지는 선형적으로 유효적층폭이 증가하나 이상의 수치에서는 포화된 특성을 가진다. 따라서 UIC60 레일에서 전자석의 적층폭은 전자석의 무게도 줄이고 제동력도 키울 수 있는 110 (mm)이 내로 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.3 코일창폭 변경에 따른 제동특성

표 2에 6극 기본 해석모델을 대상으로 코일창폭/극간격비 (S_c/τ)에 따른 1극분 전자석의 치수를 요약하여 나타내었으며 코일창폭(S_c)의 변화에도 코일단면적을 일정하도록 코일 창 깊이와 전자석의 치폭을 결정하였다.



(a) 해석 모델 (b) 해석영역과 경계조건
그림 5 유효적층폭 계산을 위한 등포텐셜 분포도
Fig. 5 Equi-potential line to calculate equivalent stack length

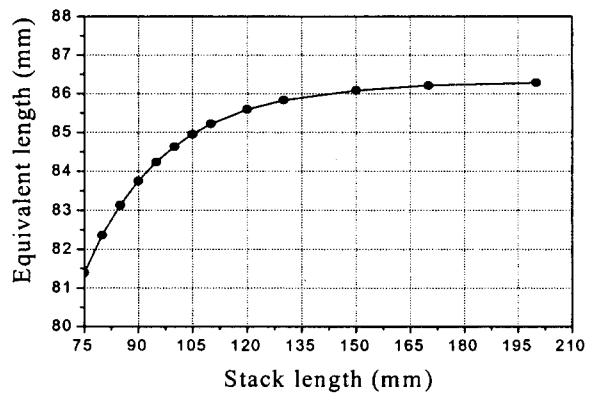


그림 6 적층폭 변화에 따른 유효적층폭 변화
Fig. 6 The variation of equivalent length with mechanical stack length

표 2 코일창폭/극간격 변화에 따른 전자석 치수

Table 2 Magnet dimension according to slot width/pole pitch ratio

항 목	코일창폭/극간격 (S_c/τ)						
	0.139	0.153	0.167	0.194	0.222	0.250	0.278
코일창폭	25.0	27.5	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
코일창폭 깊이	196.0	178.0	163.0	140.0	122.5	109.0	98.0
치폭 1/2	77.5	76.3	75.0	72.5	70.0	67.5	65.0
코일창 단면적 (mm^2)	4900	4900	4900	4900	4900	4900	4900
슬롯당 기자력 (A)	33600	33600	33600	33600	33600	33600	33600

그림 8에서 S_c/τ 가 증가하면 평균 제동력은 증가하다가 S_c/τ 가 0.194에서 9.415 (kN/m)를 정점으로 다시 감소하는 반면 열차의 바퀴에 유효부하로 작용하는 흡인력은 감소하는 경향을 보인다. 그림 9에서 감속도는 흡인력과 동일한 양상을 나타내며 $S_c/\tau=0.194$ 에서 최대 감속도 0.308 (m/sec^2)을 가지며 이때 감속시간은 270.3 (sec)이다.

이상의 내용으로부터 제동성능이 우수하고 부하로 작용하는 흡인력이 작게 작용하는 코일창폭/극간격비 (S_c/τ)는 0.194가 가장 적합한 치수임을 알 수 있다.

그림 7은 S_c/τ 가 0.196인 1극분 모델을 대상으로 주기경계조건을 부여하여 주행속도 350 (km/h)일 때 유한요소 해석으로부터 얻은 등포텐셜분포를 나타낸 것이다.

3.4 극수변화에 따른 특성해석

코일창폭이 제동특성에 미치는 영향분석의 결과로부터 우수한 제동성능을 가지는 $S_c/\tau=0.194$ 로 고정하고, 극수를 변화시켜가며 와전류 비접촉 제동기 제동특성을 해석하였다. 극수가 바뀌게 되면 전자석의 치수를 변경하여야 한다.

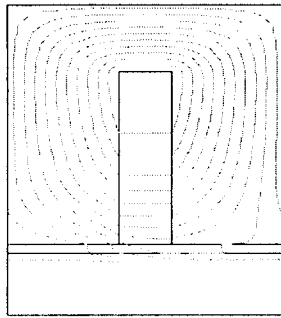


그림 7 $S_c/\tau = 0.194$ 모델에서 등포텐셜 분포도
 Fig. 7 Equipotential distribution for $S_c/\tau = 0.194$ model

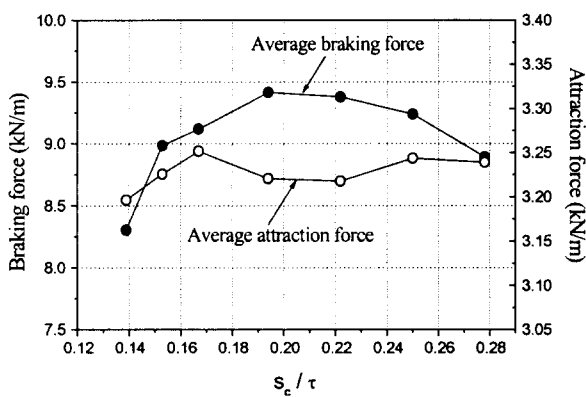


그림 8 S_c/τ 변화에 따른 평균 제동력 및 흡인력 변화
 Fig. 8 Average braking and attraction force with S_c/τ

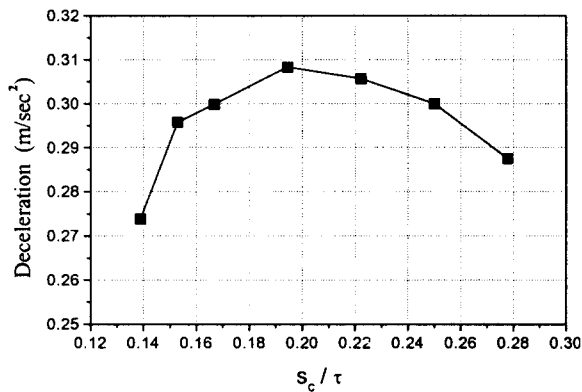


그림 9 S_c/τ 변화에 따른 감속도 변화
 Fig. 9 The variation of deceleration with S_c/τ

즉 전자석의 취부 가능한 전체 길이는 1080 (mm)로 일정하므로 6극의 치수를 기준으로 하여 극수에 따라 각 부분의 치수를 식 (13)과 같이 비례적으로 계산하면 된다. 극수변화에 따른 전자석의 치수를 표 3에 요약하였다.

$$J' = J \times \frac{P}{P'} \quad (A) \quad (13.a)$$

$$\tau' = \tau \times \frac{P}{P'} \quad (mm) \quad (13.b)$$

$$\sigma' = \frac{k_{70}}{1+k} \quad (\text{G/m}) \quad (13.c)$$

$$\left(k = \frac{2 \cdot \tau^2}{\pi^2 \cdot b_s \cdot d_s}, k_{70} = 8 \times 10^6 \quad (\text{G/m}) \right)$$

$$c' = \frac{(\tau' - S_c')}{2} \quad (mm) \quad (13.d)$$

$$S_c' = S_c \times \frac{P}{P'} \quad (mm) \quad (13.e)$$

$$A_c' = A_c \times \frac{P}{P'} \quad (mm^2) \quad \text{또는}$$

$$A_c' = S_c' \times b \quad (mm^2) \quad (13.f)$$

여기서, 극수가 P' 일 때 각각 1극당 기자력 J' , 극간격 τ' , 레일의 도전율 σ' , 전자석 치폭의 1/2 길이 c' , 코일창 폭 S_c' , 코일창 단면적 A_c' 을 각각 나타낸다. 그리고 b_s 와 d_s 는 각각 레일헤드의 폭, current flow 폭이며 P 는 기준모델인 6극이 된다.

표 3 극수변화에 따른 전자석의 치수

Table 3 Magnet dimension with the various pole number

항 목	4극	6극	8극	10극
코일 창폭	52.5	35.0	26.3	21.0
코일 창폭 깊이	140.0	140.0	140.0	140.0
치폭 1/2	108.8	72.5	54.4	43.5
극간격	270.0	180.0	135.0	108.0
코일창 단면적 (mm^2)	7350	4900	3675	2940
레일 도전율 $\times 10^6$ (G/m)	0.78	1.57	2.42	3.23
전류밀도가 일정한 경우				
전류밀도 (A/mm^2)	6.857	6.857	6.857	6.857
슬롯당 기자력 (A)	50400	33600	25200	20160
기자력이 일정한 경우				
전류밀도 (A/mm^2)	4.571	6.857	9.173	11.429
슬롯당 기자력 (A)	33600	33600	33600	33600

3.4.1 전류 밀도가 일정한 경우

극수마다 슬롯의 단면적이 다르므로 기본모델 6극과 동일한 전류밀도가 되기 위해서는 턴수를 조정하면 된다. 즉, 각 극수에 입력되는 전류는 일정하므로 극수가 작을 수록 턴수가 증가하는 것으로 전류밀도는 $6.857 (A/mm^2)$ 으로 일정하다.

그림 10에서 전류 밀도를 일정하게 두고 제동특성을 해석한 결과 극수가 작을수록 평균제동력과 평균흡인력이 크게 나타난다.

4극일 때 평균 감속도는 0.398, 8극일 때 평균 감속도는 0.243으로써 4극이 8극보다 제동성능이 약 1.6배정도 우수하다. 그러나 4극일 때 평균 흡인력은 6.43 (kN/m)로서 8극의 평균 흡인력 2.05 (kN/m)와 비교하면 약 3.1배의 하중이 열차의 바퀴에 작용하게 된다. 따라서, 극수의 감소는 제동력을

증가시키나 그림 11에서와 같이 전자석 무게의 증가와 함께 흡인력의 증가로 차체에 하중을 증가시키는 단점이 있다. 그러므로 전자석의 무게와 흡인력의 무게를 산출하여 무게를 고려한 제동력의 분석이 필요하다.

단위무게당 평균제동력은 평균제동력에 전자석의 무게(코아+코일)와 흡인력을 합하여 나눈 것으로 그림 12에 도시하였으며, 전자석 전체 극수의 단위 무게당 제동력은 극수가 증가할수록 제동력이 크게 나타난다.

이상의 결과로부터 극수가 작으면 제동력이 우수하여 감속도는 좋아지는 반면 흡인력과 전자석 무게의 증가로 단위 무게당 제동력이 작아지게되므로 차체 하중의 부담을 덜고 감속도를 증가하기 위해서는 6극 또는 8극이 적당할 것으로 판단된다.

3.4.2 기자력이 일정한 경우

코일창 단면적이 바뀔때 따라 동일 기자력 33600 (A)를 확보하기 위하여 외부 전원에서부터 공급되는 전류가 바뀌는 것이다. 이때 전자석의 치수는 전류밀도가 일정한 경우와 동일한 방법으로 표 3과 같이 결정할 수 있다.

그림 10에서 평균제동력은 포물선 양상을 가지고 8극에서 평균제동력이 가장 뛰어나며, 평균흡인력은 극수가 증가할수록 작아지므로 4극에서 흡인력이 크게 나타난다. 이 결과는 전류 밀도를 일정하게 두고 제동특성을 해석한 결과와 상이한 제동특성의 변화 양상을 보인다. 또한 입력 전류의 증가로 전류밀도가 일정한 경우보다 평균 제동력은 크고 흡인력은 작은 수치를 보이고 있다.

그림 10에서 유효하중으로 작용하는 흡인력은 극수의 증가에 따라 감소하는 추이를 보이고 그림 11에서 전자석 무게도 감소하므로 단위 무게당 발생하는 평균제동력은 그림 12와 같이 증가한다. 그러나 10극은 8극보다 단위 무게당 제동력은 좋으나 감속도와 감속시간이 작으므로 8극이 적당할 것으로 사료된다.

전류밀도가 일정한 8극에서 평균 제동력 7.40 (kN/m), 평균 흡인력 2.05 (kN/m)를 가진다. 그러나 기자력이 일정한 8극에 있어서 평균 제동력 10.09 (kN/m), 평균 흡인력 1.72 (kN/m)로써 두 결과를 비교해 보면 기자력이 일정한 8극의 전자석이 우수한 제동 성능뿐만 아니라 흡인력에 의한 하중의 부담을 줄일 수 있을 것이다.

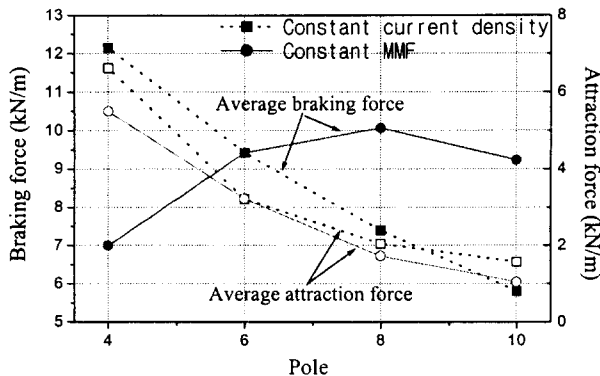


그림 10 극수 변화에 따른 평균 제동력과 평균 흡인력
Fig. 10 Average braking and attraction force against the number of pole

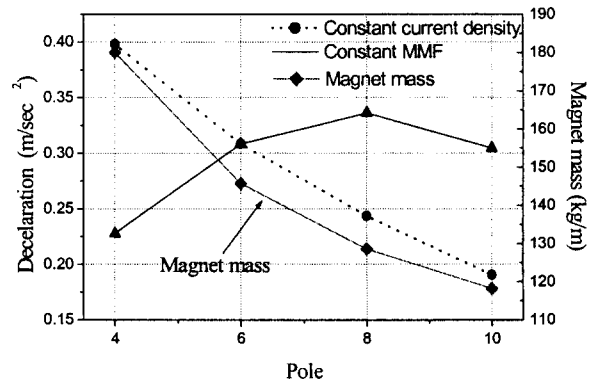


그림 11 감속도 및 무게변화
Fig. 11 Mass and deceleration versus the number of pole

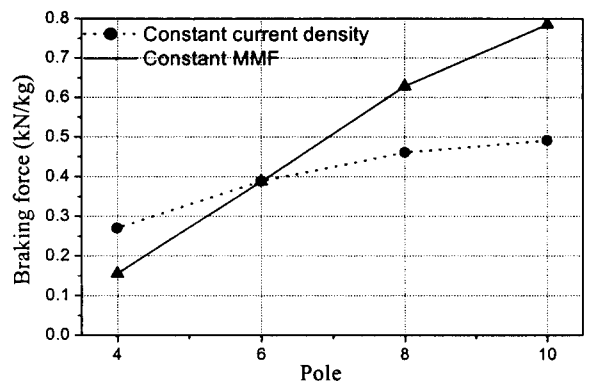


그림 12 단위 무게당 평균 제동력
Fig. 12 Average braking force per unit mass versus the number of pole

4. 전자석의 최적형상

지금까지 기술된 파라미터 변화에 따른 제동특성 해석결과로부터 우수한 제동특성을 가지고 흡인력을 줄일 수 있는 비접촉 와전류제동 장치의 전자석 치수를 결정할 수 있다.

6극을 대상으로 코일창폭 변화에서 S_c/τ 가 0.196에서 제동력이 크게 나타났다. 그러나 코일창폭의 변화는 임의 값을 설정하여 해석한 결과이므로 최적의 치수라고 할 수 없다.

따라서 그림 6에 해석된 제동력의 해석 데이터를 보간한 결과 S_c/τ 가 0.206에서 최대제동력을 가진다. 극수는 8극일 때 기자력이 일정한 외부 입력전원의 상태에서 제동 성능이 가장 우수하였으며 평균 흡인력 또한 전류가 일정한 경우보다 작았다.적층폭 증가에 따른 전자석의 무게의 증가와 전자석의 설치 환경을 고려하여 전자석의 기계적 적층폭을 90 (mm)로 설정하였다.

종합 검토된 결과로부터 산출된 와전류제동기의 전자석치수와 제동특성을 표 4에 나타내었으며 그림 13에 도면화하였다. 그림 14는 최적 형상을 가지는 전자석의 속도에 따른 제동력과 흡인력변화를 나타낸 결과이다.

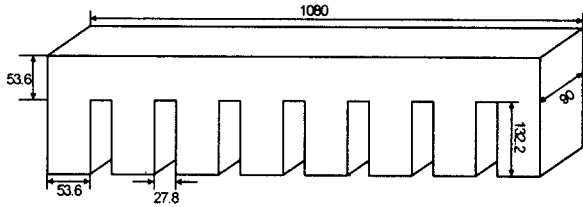


그림 13 최적 형상의 와전류 제동기의 구조 및 치수
 Fig. 13 Configuration and dimension of optimized magnet

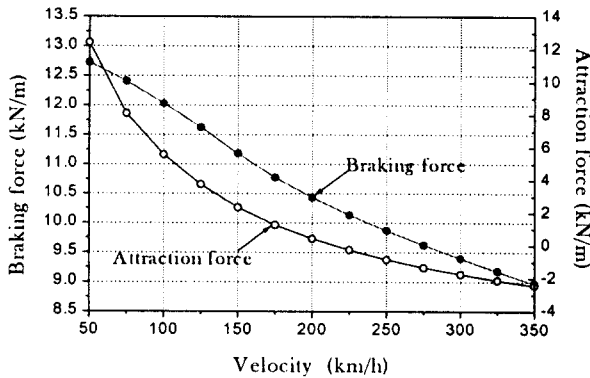


그림 14 최적형상을 가지는 제동기의 특성 곡선
 Fig. 14 Characteristics curve of eddy-current brake with optimal magnet according to velocity

5. 결 론

본 논문에서는 고속전철과 같은 대형 추진시스템에 사용하기 위하여 기본 설계된 비접촉 와전류 제동장치를 대상으로 전자장 수치해석을 이용한 상세 설계 방법을 제시하였으며 이로부터 우수한 제동특성을 가지며 흡인력을 줄일 수 있는 전자석을 설계하였다.

최적형상의 전자석의 치수를 결정하기 위하여 파라미터 변화에 따라 전자석을 재 설계하고, 2차원 유한요소법을 사용하여 제반 제동특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석함으로써 제동 성능을 향상할 수 있는 치수를 결정하였다. 또한 3차원 전자기 현상을 고려한 제동력을 산출하기 위하여 자기 스칼라포텐셜을 계변수로 하는 2차원 유한요소해석을 통하여 유효적층폭을 계산함으로써 효율적이고 신뢰성 높은 해석결과를 얻었다.

파라미터 변화가 제동특성에 미치는 영향에 대하여 종합 검토한 고찰 결과로부터 최종 설계된 8극 전자석의 모델은 슬롯당 기자력이 33600 (A)일 때 0.420 (m/sec²)의 감속도와 10.640 (kN/m)의 제동력, 1.932 (kN/m)의 흡인력으로 기본 설계된 6극 제동기보다 우수한 제동특성을 얻을 수 있었으며 열차의 차체에 유효하중으로 작용하는 흡인력과 전자석의 무게를 줄임으로서 경량화 하였다.

대형 추진시스템의 개발과 더불어 비접촉 제동시스템이 최근 연구됨에 따라 만족된 사양의 제동특성을 가지는 전자석을 설계하고 제반 제동특성을 분석할 수 있는 기술을 확보함으로써 기술경쟁력을 도모하고 비접촉 와전류 제동기의 설계 자료로 활용 할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] G. Gagarin and U. Kroger, "Eddy-current magnetic track brakes for high-speed trains," *IEEE Trans. Industry Applications*, CH23994-4, pp. 95-99, 1987.
- [2] 강도현, 김용주, 박수태, "고속전철 제동장치 개념설계에 관한연구," 대한전기학회 창립 50주년 하계학술 대회 논문집, Vol. A, pp. 37-39, 1997.
- [3] P. J. Wang and S. J. Chiueh, "Analysis of eddy-current brakes for high speed railway," *IEEE Trans. on Magnetic*, Vol. 34, No. 4, pp. 1237-1239, 1998.
- [4] Ju Lee and Yon-Do Chun, "The performance of eddy current brake for the high speed trains," *IEEE CEF98'*, pp. 203, 1998
- [5] "비접촉 제동시스템 개발 1,2차년도 보고서," 한국전기연구소, 1978.
- [6] 홍정표 외 4, "전자유도 브레이크의 동특성 및 열해석," 대한전기학회 전기기기연구회 추계학술대회, pp. 77-79, 1997.
- [7] I. Boldae and S. A. Nasar, *Linear motor electromagnetic system*, John Wiley & Sons, 1985.
- [8] 임달호, 권병일, 홍정표, 허진, "상전도 흡인부상시스템에서 속도에 의한 제어특성의 변화 고찰," 대한전기학회 논문지, Vol. 44, No. 11, 1995.
- [9] 강도현, 박수태, 홍정표, 강경호, "고속전철 추진 Simulator용 제동장치 설계," 대한전기학회 하계학술대회, pp. 134-136, 1998
- [10] M. Fujita *et al.*, "3-Dimensional electromagnetic analysis and design of an eddy-current rail brake system," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol 34, pp. 3548-3551, 1998.
- [11] K. Venkataratnam and M. S. Abdul Kadir, "Normalized force-speed curves of eddy current brakes with ferromagnetic loss drums," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 5, pp. 656-663, 1984.
- [12] J. H. Wouterse, "Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles," *IEE Proc.-B*, Vol 138, No.4, pp.153-158, 1991
- [13] J. Bignon and J. C. Sabonnadiere, "Finite element analysis of electromagnetic brake," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 19, pp. 2632-2634, 1983.
- [14] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992.

저 자 소 개



하 경 호 (河 京 鎬)

1972년 5월 19일생. 1997년 창원대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자제어 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 0551-279-7519

E-mail: haroom@netian.com



김 규 탁 (金 奎 卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수. 1996년~1997년 일본 早稲田大 客員研究員



홍 정 표 (洪 正 杓)

1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1996년 한양대 산업과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수



강 도 현 (姜 道 鉉)

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

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

E-mail : dhkang@keri.re.kr