

위치변화에 따른 영구자석을 이용한 와전류 제동기의 제동특성

하경호* , 김영균* , 홍정표* , 김규탁* , 강도현**
 *창원대학교, **한국전기연구소 전기자동차 및 전동기 응용팀

Braking Characteristic of the Eddy-Current Brake with Permanent Magnet Considering Structure Around

K. H. Ha*, Y. K. Kim, J. P. Hong*, G. T. Kim*, D. H. Kang**
 *Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ., **KERI

Abstract - This paper describes the braking performances considering the structures around for the eddy-current brake excited by permanent magnet. As the magnet is excited by permanent magnet, the braking force of this system interferes with the progress of a moving train in normal time. Therefore, it is necessary to determine the reasonable position of eddy current brake from rail. In this paper, the braking force according to the distance from the rail is analyzed by using 2-dimensional finite element method considering the surrounding structure of train.

본 논문에서는 영구자석 와전류 제동기가 열차의 하부에 장착된 경우 열차의 하부 철판을 고려한 영구자석 와전류 제동기의 제동력을 해석하고 열차가 정상시 주행할 때 이 제동기의 제동력이 열차의 고속 주행에 영향을 주지 않도록 제동기의 적당한 위치를 취부가능한 영역범위에서 검토하였다.

1. 서 론

2. 해석 이론

2.1 해석대상

레일과의 마찰에 의해서 제동하는 마찰 제동기는 접촉 계수 때문에 고속 주행하는 열차의 제동 장치로 사용하기에는 부적절하다. 이 때문에 레일에 직접 마찰하지 않고 제어가 용이한 제동력을 얻을 수 있는 비접촉 와전류 제동기의 필요성이 높아지고 있으며 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4]. 비접촉 와전류 제동기는 직류전원 여자 전자석을 사용한 비접촉 와전류 제동장치와 영구자석 여자를 사용한 비접촉 와전류 제동장치가 있다[1-3].

열차가 주행할 때 영구자석 제동기가 위치 할 적당한 위치를 결정하기 위한 주위 구조물과 해석 모델의 배치는 그림 1과 같다. 흡입력을 줄이고 최대 제동 성능을 가지는 영구자석 여자의 와전류 제동기를 그림 1과 같이 설계하였다[2]. 극수 및 영구자석 자화 방향쪽 그리고 치 끝단부에서 영구자석의 감자 영향을 고려하여 설계된 최종 설계치수를 표 1에 요약하여 나타내었다.

열차의 하부 밑판에도 부자율을 가지는 플레이트가 있어 영구자석 제동기의 누설자속에 의한 자기회로가 형성되는 것을 고려하였다. 따라서 그림 1과 같이 열차의 하부 밑판을 영구자석 제동기 위 부분에 모델링하고 유한

표 1 영구자석 제동기의 제원

종 류	치 수	종 류	치 수
극 수	8	공 극 [mm]	7
s_c [mm]	50	극간격 [mm]	135
b [mm]	210	적층폭 [mm]	90
c [mm]	42.5	잔류자속밀도	1.15(T)
레일/코아재질	ST37	레일프로파일	UIC 60

직류전원으로 여자되는 전자석을 사용한 제동기는 제동장치가 작동하기 위하여 권선과 권선에 전류를 흘리기 위한 전자석 전원의 제어용 구동 드라이브를 필요로 하므로 시스템이 복잡해지고, 높은 제동력을 얻기 위해서는 많은 전류를 흘려야 하므로 권선의 온도 상승과 절연 등의 문제점이 야기된다. 반면에 영구자석을 여자전원으로 사용하는 경우, 영구자석에 의해 자속을 집중시킬 수 있으므로 높은 제동력을 얻고, 코일 여자의 전자석처럼 여자 에너지가 필요 없으므로 에너지를 절감할 수 있으며 열차의 무정전 상태에서도 사용이 가능하게 되어 안전도의 신뢰성이 높다. 또한 전원 여자방식에 귀속되는 부가 장치들을 제거함으로써 시스템을 경량화 및 간략화할 수 있는 이점이 있다[3]. 그러나 영구자석을 사용한 와전류 제동기는 상시 여자되어 있는 상태이므로 영구자석에 의해서 주위 환경에 주고받는 영향을 고려해야만 한다. 즉, 영구자석을 사용한 비접촉 와전류제기가 열차에 장착될 경우 주위 통신 및 신호에 미치는 영향, 열차 운행중 제동력으로 작용, 레일 주위의 철가루 부착에 의한 마모와 제동 성능저하, 레일의 온도상승에 의한 감자 및 와전류에 의한 감자 등이 문제점으로 지적되고 있다.

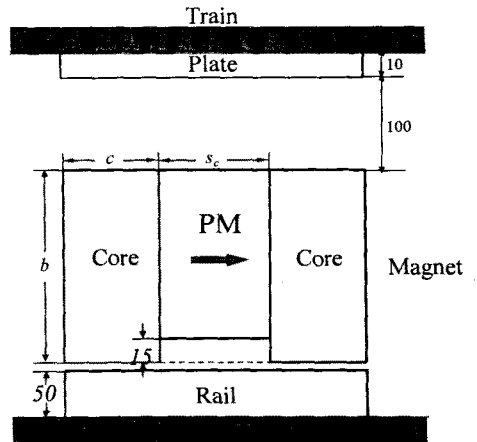


그림 1 와전류제동기의 해석 모델

특히, 이와 같은 영구자석 와전류 제동기가 상시 여자되어 있으므로 열차가 고속 주행할 때에는 오히려 열차의 주행에 방해하는 요인으로 작용한다. 그러므로 영구자석을 여자로 사용하는 와전류 제동기의 고속 열차 제동 시스템은 열차가 정상시 운행 할 때, 이 와전류 제동기의 제동력이 미치지 않도록 레일로부터 충분히 이격되어야 하며 열차가 제동을 필요로 할 때 충분한 제동력을 발휘하도록 레일과 일정한 공극을 유지하는 구조로 구성되어야 한다.

요소법을 이용하여 주행시에 제동기의 제동력에 미치는 영향을 분석하였다. 영구자석 제동기와 레일과의 간격을 10[mm]간격으로 80[mm]까지 올려가며 제동기의 제동력을 해석하였다. 영구자석 제동기의 유한요소해석은 단위 효과를 무시하고 자기적인 대칭을 고려하여 1/4만 해석하였다.

2.2 제동 특성 해석

2.2.1 유한요소해석

해석모델은 영구자석으로 여자되고 있기 때문에 변압기 기전력을 고려할 필요가 없다. 따라서 영구자석 와전류 제동기의 해석모델의 유한요소해석을 위한 특성방정식은 맥스웰 전자 방정식 및 보조 방정식으로부터 다음 식과 같이 유도된다.

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

레일은 x 방향으로 v_x 의 속도로 이동하고 있으며 영구자석의 자화 방향은 x방향이고 J_m 은 영구자석의 등가 자화전류를 나타내며 벡터 포텐셜 A 는 z 방향 성분을 나타낸다.

2.2.2 동특성 해석

질량 m 을 갖고 있는 열차가 추진용 전동기에 의해 일정한 속도로 움직이고 있을 때, 레일과 영구자석 와전류 제동기의 상대운동에 의해 레일에 유기되어 흐르는 와전류로부터 열차에는 F_d 의 제동력이 작용하게 된다.

초기 동작속도 v_0 에서 제동기가 작동하여 열차가 최종 감속되는 속도 v 까지 도달하는데 걸리는 감속 시간 t 와 감속도 a 를 식 (2)와 식 (3)으로부터 각각 계산할 수 있다.

$$t = -m \int_{v=v_0}^{v=v} \frac{1}{F_d(v)} dv \quad (2)$$

$$a = \frac{v_0 - v}{t} \quad (3)$$

본 해석모델에서는 와전류 제동기의 초기 동작속도가 350 [km/h]에서 최종적으로 50 [km/h]까지 작동하는 것으로 보았으며 객차 1량의 무게는 30 [t]으로 두었다.

2.3 유효 적층폭 계산

2.3.1 특성 방정식

레일은 곡면의 형상을 가지고 영구자석을 사용한 제동기와의 적층폭이 다르므로 자체는 프린팅현상과 단위효과에 의해서 자기저항이 불균일 하게된다. 그러므로 2차원 해석 결과의 정확도를 높이기 위해 3차원 해석을 고려한 효율적인 유효적층폭 해석 방법이 필요하다. 본 논문에서는 기자력은 일정하고 유효 적층폭이 변화할 때 이것을 공극 퍼미언스의 변화로 나타낼 수 있는 자기 스칼라포텐셜(magnetic scalar potential)을 계변수로 하여 유한요소 해석을 통하여 보정한 자기적 유효적층폭을 산출하였다. 자기 스칼라포텐셜 Ω 를 정의하여 맥스웰 방정식으로부터 자기 스칼라포텐셜 Ω 를 가지는 지배 방정식은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \Omega) = 0 \quad (4)$$

2.3.2 유효적층폭 산출

자기 스칼라포텐셜을 계변수로 가지는 유한요소해석 결과로부터 단위 길이당 공극자속 Φ 와 자기저장에너지 W_m 을 구한다. 선형 해석인 경우 자기저항 R 은 식 (5)와 같이 자속과 저장에너지로 표현할 수 있으며 공극에서의 단면적과 공극의 길이로 표현되는 수식과 같다.

$$R = \frac{g}{S_{eff} \mu_0} = \frac{2W_m}{\Phi^2} \quad (5)$$

여기서 S_{eff} 는 유효단면적, g 는 기계적 공극이다. 따라서 유효적층폭은 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$l_{eff} = \frac{g \Phi^2}{2W_m \mu_0} \quad (6)$$

3. 해석 결과 및 검토

3.1 영구자석 와전류제동기의 제반 성능 및 저원

코일여자 방식의 와전류제동기 전자석의 치수를 기반으로 비슷한 제동성능을 가지도록 설계된 영구자석 와전류제동기의 속도에 따른 제동 및 흡입력 특성은 그림 2와 같다. 그림 1처럼 제동기 상부에 플레이트가 있는 경우와 없는 경우를 비교한 그래프이다. 공극 7[mm]로 열차 제동시 제동기가 플레이트로부터 충분히 이격된 위치이므로 제동특성에는 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 표 2는 영구자석 여자 와전류제동기의 사양 및 제동 특성을 나타내며 레일에 유기되는 와류에 의한 감자특성을 고려하여 영구자석의 위치를 치 끝단부에서 15[mm]을 옮겼으며 이를 고려하여 영구자석의 재질을 선정하였다.

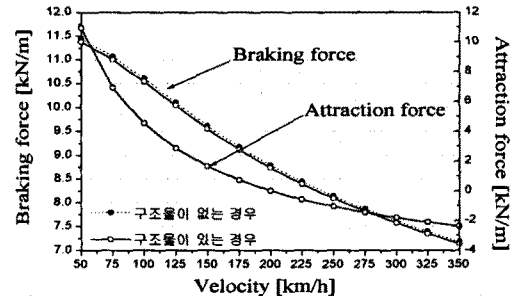


그림 2 최종 설계된 제동기의 제동특성

표 2. 영구자석 여자 와전류제동기의 사양 및 제동특성

구분	형상치수	구분	제동특성
극 수	8	평균제동력 [kN/m]	8.95
극간격 [mm]	135	평균흡입력 [kN/m]	1.34
적층폭 [mm]	90	유효적층폭 [mm]	71.3
공극 g [mm]	7	감속도 [m/sec ²]	0.291
s_c [mm]	50	총단위무게 [kg/m]	141.6
b [mm]	210	단위 무게당 평균 제동력 [kN/kg]	0.06
c [mm]	42.5	단위 무게당 평균 흡입력 [kN/kg]	0.009
철심 재질	ST37	치 끝단부에서의 영구자석위치 e [mm]	15
관류자속 밀도[T]	1.15	영구자석 재질	Neomax -30SH

3.2 제동기의 위치에 따른 유효 적층폭 계산

레일폭이 74.3[mm]인 UIC60 레일은 곡면의 형상을 가지고 영구자석을 사용한 제동기와와의 적층폭이 다르므로 자계는 프린팅현상과 단부효과에 의해서 자기저항이 불균일 하게된다. 따라서 제동기가 레일로부터 이격되는 거리 각 거리에 대해서 레일과 제동기의 기계적적층폭 사이의 자계현상을 해석하여 산정된 유효적층폭을 계산한 결과를 표 3에 나타내었다. 기계적 적층폭 90[mm] 보다 작은 수치를 나타낸다.

3.3 제동기의 위치에 따른 제동력

그림 3은 열차의 하부 밑판을 고려하지 않고 영구자석 와전류 제동기의 제동력을 해석한 결과를 나타낸다. 영구자석 제동기가 레일로부터 멀어 질수록 제동력은 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 제동기는 열차의 하부 밑판의 아래 부분에 장착되므로 제동특성 해석시에 제동기의 주위의 구조물을 고려하여 제동특성을 해석하는 것이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

표 3 위치에 따른 유효적층폭

제동기 위치 [mm]	유효적층폭 [mm]
30	83.8538
40	85.2930
50	86.1912
60	86.8031
70	87.2454
80	87.5805

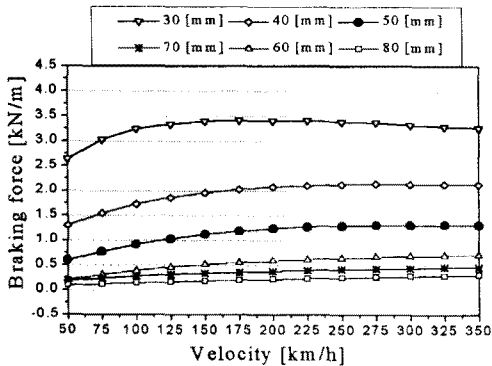


그림 3 열차의 구조물을 고려하지 않은 경우 제동력

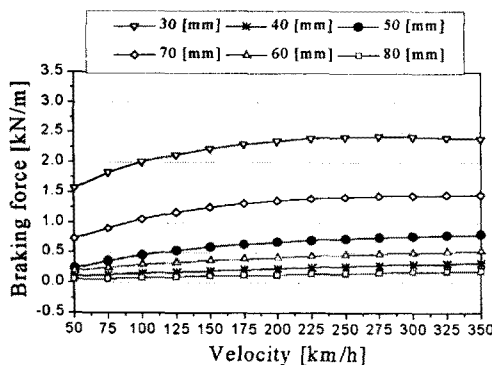


그림 4 열차의 구조물을 고려한 경우 제동력

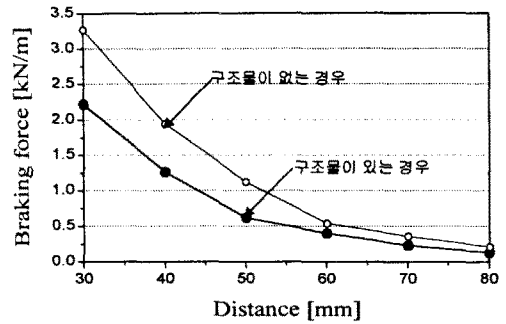


그림 5 레일로부터 이격거리에 따른 평균 제동력 변화

따라서, 그림 4에 열차의 하부 구조물을 고려하여 계산한 제동력을 나타내었다. 그림 3과 동일한 양상의 결과를 보인다. 위 그림 3과 4에 나타난 결과를 보면 영구자석 제동기가 레일로부터 30[mm] 떨어져있을 때 열차의 구조물을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 제동력은 약 1[kN/m]정도의 차이를 나타낸다. 이는 제동기가 열차 쪽으로 접근할수록 영구자석의 누설자속의 쇄교량이 증가하기 때문에 이다. 이 두 경우를 그림 5에 평균 제동력을 산출하여 비교하였다. 두 경우의 평균제동력은 제동기와 레일사이가 멀어질수록 차이는 현저하게 감소하는 양상을 보인다. 위 제동력 해석 결과로부터 제동기와 레일의 거리가 멀어 질수록 제동력의 영향은 감소하지만 열차 하부의 구조상 한계를 고려하여 영구자석 제동기의 치부 위치는 50[mm]로 결정할 경우 열차 주행시 작용하는 제동력은 0.6 [kN]이다.

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 사용하여 고속 전철동 대형 고속 추진 시스템의 영구 자석을 사용한 와전류 제동기 제동장치의 제동 특성을 분석하였다. 그리고 영구자석 제동기가 장착될 열차의 구조물을 고려하여 제동력을 산출하고 이것으로부터 열차가 정상 운행시에 제동기가 열차의 주행을 방해하지 않도록 적절한 장착 위치를 결정하였다. 따라서, 영구자석을 사용한 와전류 제동기의 제동특성을 해석할 경우 주위 구조물과의 영향을 고려한 해석이 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국전기연구소, 비접촉 제동 시스템 개발 1, 2차년 보고서, 1997~1998
- [2] 홍정표의 4 "극수변화에 따른 비접촉 와전류 제동기의 제동특성", 대한전기학회 추계학술대회, pp. 91~93, 1998.
- [3] 홍정표의 4 "영구자석을 이용한 와전류 제동기의 제동 특성해석 연구", 대한전기학회 전기기기연구회 춘계학술대회, pp.31~33, 1999.
- [4] P. J. Wang and S. J. Chiueh, "Analysis of eddy-current brakes for high speed railway", IEE Tran. on magnetic, Vol. 34, No. 4, 1237~1239, 1998