

선형 영구자석 Halbach 배열을 이용한 와전류 제동장치

*장석명, *차상도, *정상섭, *류동완, **박승찬
*충남대학교 **동양대학교

Linear Permanent Magnet Halbach Array Type Eddy Current Braker

*S. M. Jang, *S. D. Cha, *S. S. Jeong, *D. W. Ryu, **S. C. Park
*Chungnam National Uni. **Dong Yang Uni.

Abstract - Brake system using eddy current is adequate to obtain safe braking force in high speed transportation system and electric vehicle etc. In this paper, we propose the new type eddy current braker using Halbach array, which compared with the conventional permanent magnet array.

The airgap flux density of Halbach array is higher 25% then conventional array, therefore we can predict that braking force is much large 1.56 times then conventional array.

1. 서 론

고속으로 운전하는 차량의 제동방식으로는 크게 마찰 제동방식과 비마찰 제동방식인 전기제동방식으로 구분된다. 마찰제동 방식은 제동시 제동장치 부분으로 열과 분진이 발생하고 마찰계수에 영향을 받기 때문에 신뢰성 있는 제동력을 얻는데 한계가 있다. 따라서 최근 고속으로 운전되는 전철에는 마찰제동방식과 전기제동방식을 채택해 제동력을 분담시키고 있다. 그 예로, 독일의 ICE에서는 회생제동력과 와전류 제동력을 주제동력으로 채택하고 있으며 마찰제동은 저속(50km/h 이하)에서 또는 비상시에 사용하고 있다[1][2].

와전류 제동은 자계를 발생시키는 전자석이나 영구자석이 속도 v 로 움직이면, 자속밀도의 변화에 의해 유도되는 와전류로부터 제동력을 얻는다. 제동력은 대차와 레일의 상대속도, 대차와 레일 사이의 공극 자속밀도, 레일의 도전율 등에 비례하여 발생한다.

그런데 자계를 발생시키기 위해 기존에 제안된 방법은 전자석과 영구자석을 이용한 방식이 있다. 전자석 제동장치의 형태는 여자를 위한 전원이 필요하기 때문에 이러한 단점을 보완하기 위하여 영구자석을 이용하면 시스템을 가볍고 간단하게 만들 수 있다. 그러나 영구자석은 낮은 자속밀도 때문에 큰 제동력을 얻기가 어려워 높은 자속밀도를 얻기 위한 연구가 필요하다. 높은 자속밀도를 얻기 위한 방안으로 영구자석의 같은 극 사이에 철심을 넣는 형태(이하 일반 배열이라 칭함)가 제안되었다[1][2][3].

본 논문에서는 강한 자속밀도를 발생시키기 위해 영구자석 Halbach 배열을 이용한 와전류 제동장치를 제안한다. 그리고 일반 배열과 그 특성을 비교 하고자 한다. 비교 특성을 해석하기 위하여 실험용 크기의 제동장치 모델을 선정해 전자장 수치해석 기법 중에서 주로 사용되는 FEM을 사용하여 새로운 형태의 영구자석 배열의 장점을 서술하고자 한다.

2. 와전류 제동기와 Halbach 배열의 특성

2.1 영구자석형 와전류 제동기의 종류

그림 1은 영구자석을 이용한 제동장치의 기본구조를 나타낸다. 고속 운전 중에 제동력을 얻기 위해 그림에

서 PM으로 표현된 부분을 레일과 근접시켜 레일에 와전류를 유도시킨다.

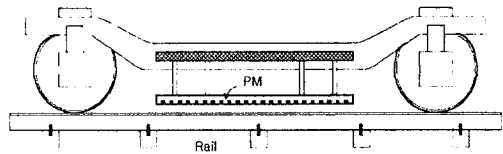


그림 1 제동장치의 개념도

현재 상용화되고 있는 자계 발생장치인 전자석 형태의 단점을 보완하기 위하여 그림 2와 같이 영구자석을 이용한 와전류 제동장치가 제안되었다. 비교적 높은 자속밀도를 얻기 위해 영구자석과 영구자석 사이에 철심을 삽입한 형태로, 전원장치를 제거할 수 있어 제동시스템을 경량화·간략화 할 수 있다.

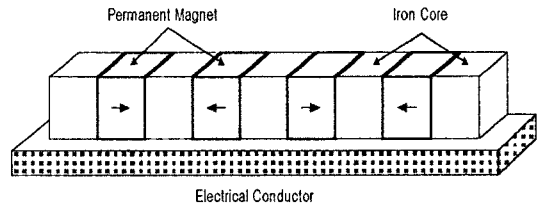


그림 2 영구자석 일반 배열 형태

그림 3은 Halbach 배열의 장점을 이용하여 체적 당 일반 배열 보다 높은 자속밀도를 얻을 수 있는 형태의 와전류 제동장치를 나타낸다.

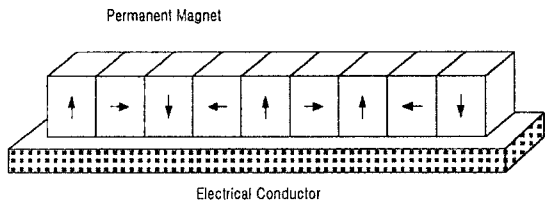


그림 3 Halbach 배열 형태

2.2 Halbach 배열

Halbach 배열은 1979년 Klaus Halbach이 처음 제안한 것으로, 여러 개의 영구자석편을 적절히 조합하여 필요한 자계를 얻는 배열을 말한다. Halbach 배열의 기본 개념은 자화벡터 방향을 축에 따라 연속적으로 회전시켜 자화시키므로써, 필요한 형태의 자계 분포를 얻는 것이다. 그림 4(a)와 같이 자화벡터가 영구자석의 배열을 따라 연속적으로 회전하게 되면, Halbach

배열의 위쪽 면에서는 자계가 거의 발생하지 않지만 아래쪽 면의 자계의 세기는 매우 강하고 정현적으로 분포된다. 하지만 실제 제작 상 자화벡터를 연속적으로 회전시켜 그림과 같은 자극배치를 하는 것이 불가능하므로, 이를 실제 전기기기에 응용하기 위해서는 그림 4(b)와 같이 몇 개의 영구자석편으로 나누어 화살표 방향으로 자화를 시킨 다음 각각의 영구자석편을 일정한 회전 자화벡터 각도로 이루어 질 수 있도록 조립을 한다.

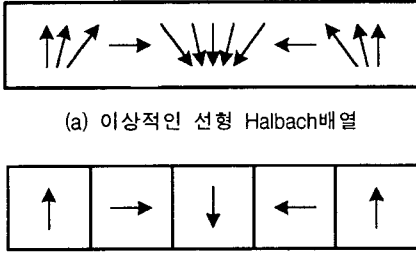


그림 4 선형 Halbach 배열의 개념도

2.3 와전류에 의한 제동력

와전류에 의한 제동력은 대차 속도의 크기에 따라 다양하게 발생한다. 그림 5와 같이 Halbach 배열이 고속 v 로 움직일 때 제동력으로 변환되는 에너지 비율은 식 (1)과 같다.

$$P = \frac{p}{16\pi} \frac{g^2}{r} \sqrt{\frac{2v\sigma\mu}{r}} B_1^2 \quad (1)$$

여기서, p 는 극쌍수, g 는 제동장치와 레일 사이의 공극, r 는 극피치, v 는 제동장치의 속도, σ 와 μ 는 각각 레일의 도전율, 투자율을 나타낸다. B_1 은 1극에서 최대 자속 밀도를 나타낸다.

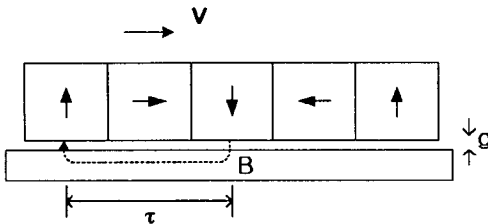


그림 5 와전류 발생 원리

3. 일반 배열과 Halbach 배열의 비교

3.1 특성 비교를 위한 해석 모델 선정

일반 배열형과 Halbach 배열형의 특성을 비교하기 위해서 그림 6과 같이 실험용 크기의 영구자석 1편의 폭 w 를 25(mm)로 정하고 두께 t 는 그림 6을 토대로 선정했다.

그림 7은 폭이 일정할 때 두께에 따른 공극 자속밀도를 유한요소 해석을 통하여 얻은 결과이다. 폭 w 와 두께 t 의 비가 25/40인 지점에서 자속밀도의 증가가 완만한 결과를 가지고 효율적인 설계를 위해 모델의 길이를 40(mm)로 선정했다.

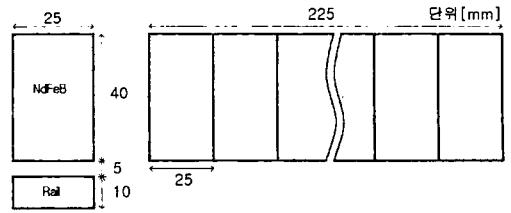


그림 6 실험용 크기의 Halbach 배열의 제원

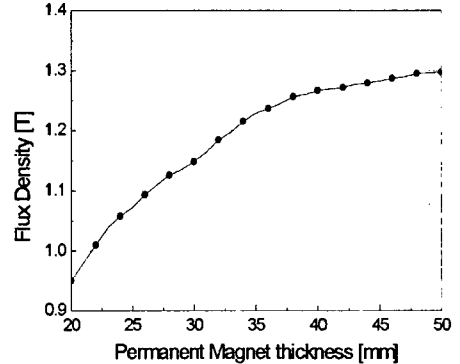
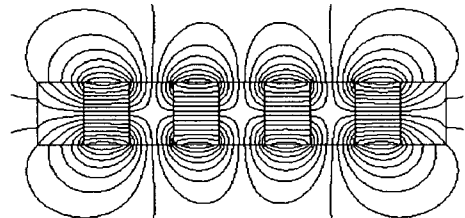


그림 7 $w = 25$ 일 때 t 에 따른 공극 자속밀도

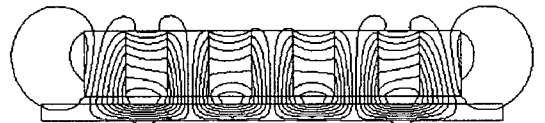
일반 배열의 영구자석 제작은 Halbach 배열의 영구자석 제작과 동일하게 선정했다. 일반 배열의 철심 제작은 자속의 값을 포화치에 가깝도록 선정하면 체적이 작아지고 상대적으로 전체 길이와 무게를 줄일 수 있지만, 힘을 발생시키는 유효 자극 면적이 작아지는 단점이 있다. 또한, 특성 비교를 수월하게 하기 위해서 철심 제작을 영구자석 제작과 동일하게 선정했다.

3.2 두 모델의 특성 비교

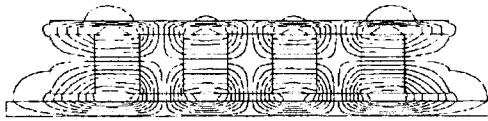
두 모델의 신뢰성 있는 결과를 위해 FEM을 이용하여 두 모델의 자속밀도 분포를 해석했다. 그림 8(a)는 일반 배열의 자속밀도 분포를 나타낸다. 그림 8(b)와 같이 배열이 2차측 레일과 근접할 때 영구자석 사이의 철심에 자속이 집중되어 공극에서 높은 자속 밀도를 얻을 수 있다. 그림 8(c)에서 보여주는 것과 같이 차체에 근접되어 있을 때, 차체쪽으로 누설자속이 많아진다. 그러나 Halbach 배열의 경우는 그림 9와 같이 공극 쪽으로만 자속을 집중시킬 수가 있기 때문에 차체 쪽으로의 자속의 누설이 거의 없어서 제동 효과가 양호해진다.



(a) 영구자석과 철심을 조합한 형태



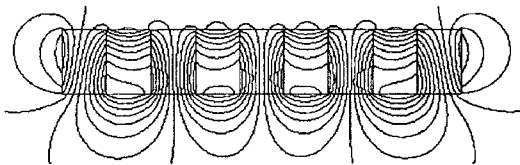
(b) 2차측에 레일이 있을 때



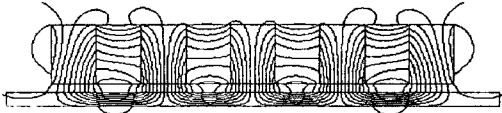
(c) 제동장치가 차체와 근접해 있을 때
그림 8 일반 배열형의 자속분포

그림 9(a)는 Halbach 배열의 자속 밀도분포를 나타낸다. 영구자석의 착자 방향에 따라 그림과 같이 한쪽 방향으로만 자속 밀도분포를 얻을 수 있다. 또한 Halbach 배열도 그림 9(b)와 같이 레일이 있을 때 공극에서 높은 자속 밀도가 된다.

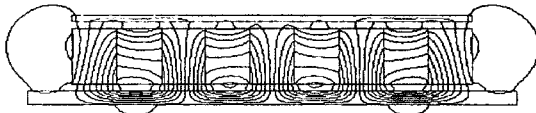
그림 9(c)는 Halbach 배열의 제동장치가 차체에 근접해 있을 때의 자속밀도 분포를 해석한 것이다. 차체 쪽으로의 누설 자속이 적기 때문에 일반배열에 비해 흡인력이 작다. 차체와 레일 사이의 유효면적이 크기 때문에 제동장치의 규모를 크게 할 수 있다.



(a) Halbach 배열 형태



(b) 2차축에 레일이 있을 때



(c) 제동장치와 차체가 근접해 있을 때
그림 9 Halbach 배열의 자속 분포

제동장치와 레일 사이를 10[mm]로 이격 했을 때, 거리에 따른 일반 배열과 Halbach 배열의 공극 자속밀도 분포는 그림 10과 같다. Halbach 배열의 최대 공극 자속밀도가 일반배열의 경우보다 약 25% 정도 크고 양쪽 단부에서 자속밀도의 감소가 현저히 작음을 알 수 있다.

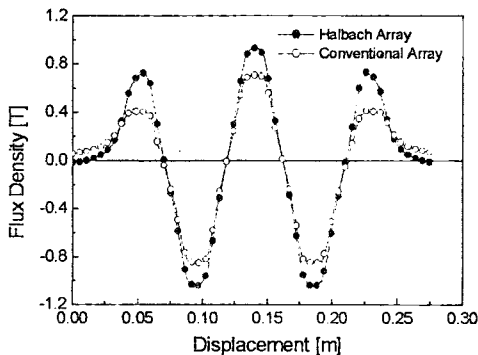


그림 10 공극 자속밀도 비교

두 모델의 특성을 비교하기 위해 극쌍수와 극피치를 동일하게 선정했다. 그리고 두 모델이 같은 속도 v 로 이동한다고 가정할 때, 기타 제원이 동일하므로, 이 때 발생하는 제동력은 공극 자속밀도에만 의존한다.

그림 11은 두 모델의 속도에 따른 제동력을 비교한 것이다.

Halbach 배열의 자속밀도가 일반 배열보다 약 25% 정도 크기 때문에 제동력은 약 1.56배정도 크게 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

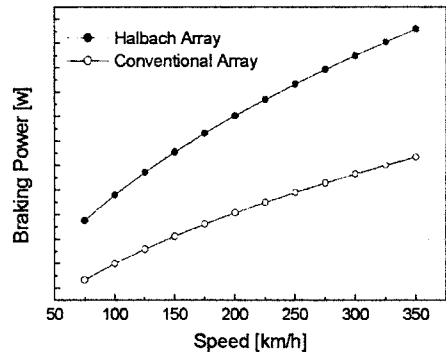


그림 11 속도에 따른 제동력

4. 결 론

와전류 제동장치에 영구자석을 이용하기 위해서는 공극에서 높은 자속밀도를 필요로 한다. 이런 목적을 위해 일반 배열형이 제안되었고 Halbach 배열을 이용한 제동장치를 제안했다. 본 논문에서는 두 가지 모델의 자기적 특성을 해석하여 좀 더 높은 자속 밀도를 얻을 수 있는 Halbach 배열의 장점을 제시했다. 두 비교 모델을 선정할 때 배열의 전체 길이를 기준으로 했기 때문에 일반배열형 보다는 Halbach 배열형에 영구 자석을 더 많이 사용했다. 그러므로 두 모델을 경제적인 면을 고려해 볼 때는 Halbach 배열 제동장치가 비경제적이다. 하지만 전체 고속 운전 시스템에서 영구자석 비용이 차지하는 부분이 작고 다른 장점들이 있기 때문에 Halbach 배열을 이용한 제동장치가 와전류 제동 장치에 유용하다고 본다.

(참 고 문 헌)

- (1) 강도현, 조기현, "비접촉 제동 시스템 개발", 발명신고서, 1998
- (2) 강도현, 김용주, 박수태, "고속전철 제동장치 개념설계에 관한 연구", 하계학술대회 논문집, A권, pp 342-345
- (3) 하경호, 홍정표, 김규택, 강도현, "비접촉 와전류 제동기의 설계에 관한 연구", 전기학회논문지, 제49B권 제2호, pp 77-84, 2000
- (4) 장석명, 서진호, 정상섭, 최상규, "영구자석 Halbach 배열을 이용한 초고속 모터용 계지시스템의 구성과 특성 해석", 전기학회논문지, 제48B권 제4호, pp 152-160, 1999
- (5) K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear Instruments and Methods, 169, pp 1-10, 1980
- (6) Jiri Lammeraner and Milos Staffl, "Eddy Currents.", HIFFE BOOKS LTD., LONDON.