

평등자계 형성을 전자석 자극 구조에 관한 연구

Magnetic Pole Structure of Electro-Magnet for Forming Uniform Magnetic Field

김정태*, 이승면*, 조현준**, 김훈년**

(Jeong-Tae Kim*, Seung-Myeon Lee*, Hyeon-Joon Cho**, Hoon-Nyeon Kim**)

Abstract

In this study, the ellipsoidal cap type magnetic pole structure was proposed for the electro-magnet in B-H curve tracer. From the simulation for the electro-magnet without specimen, the area of effective uniform field(99% range for the central field value) was considerably increased in case of the newly proposed ellipsoidal cap type magnetic pole than that of the conventional simple-inclined cap type magnetic pole. Also, through the simulation for the electro-magnet with permanent magnet specimen(NaFe30), the optimal positions of the magnetic field measurement sensor(Hall sensor) were found out in each case and the errors were decreased in case of the newly proposed ellipsoidal cap type magnetic pole.

Key Words : B-H curve tracer, ellipsoidal type magnetic pole, effective uniform field, sensor position

1. 서 론

B-H 커브 트레이서는 강자성체(영구자석) 및 연자성체(코어/철심)와 같은 자성재료의 자기적 특성(보자력, 잔류 자속밀도 및 투자율과 동작점 등)인 자기이력곡선(B-H 히스테리시스 곡선)을 고정밀도로 자동 측정할 수 있는 계측장비로서, 자성재료의 특성 파악에 필수적인 장비이다. B-H 커브 트레이서는 자속(B) 측정부분, 자계(H) 측정부분, 전자석 부분, 연산/제어 부분, 구동용 S/W 부분 등으로 구성되며, 전자석을 이용하여 외부 자계(H)를 인가하면서 자성재료의 특성인 자속(B)를 측정하여 컴퓨터에서 분석하게 된다.

이 중, 전자석은 J 코일 또는 B 코일과 같은 자

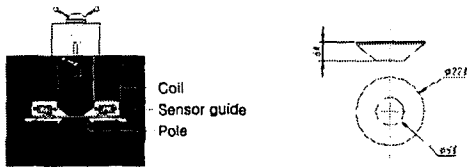
속 측정용 센서나 홀 센서와 같은 자계 측정용 센서가 시편과 함께 장착되는 곳으로, B-H 커브 트레이서의 정밀도를 높이는 데 가장 기본이 되는 부분이다. 특히, 자성체 측정용 전자석에서 자계의 균일한 정도가 $\pm 1\%$ 이내인 유효 평등자계의 범위(자극중심부 자계 99% 범위)는 자성체 측정의 정밀도를 향상시키는데 매우 중요하다. 즉, B 코일이나 J 코일을 이용하여 자성체의 자속을 측정할 때 피측정체가 균일한 자계 내에 위치하여야 오차 발생을 줄일 수 있다. 또한, B-H 커브를 측정하기 위한 H 측정용 센서도 이 균일한 자계 내에 위치하여야 측정된 H와 B와의 상관성을 오차가 작도록 정확히 파악할 수 있게 된다. 보통 H 측정 센서는 자석으로부터 10~20 mm 정도 떨어진 곳에 위치한다. 따라서, 만일 단면적이 큰 자성체를 측정할 경우 결국 H 측정 센서까지 유효 평등자계 범위 내에 들어가기 위해 커다란 면적의 자극이 필요하게 된다.[1]

이러한 전자석의 자극 형태에 대해 지금까지 그

* 대전대학교 전기공학과
(경기도 포천군 포천읍 선단리 산 11-1)
Fax: 031-535-3579
E-mail : jtkim@road.daejin.ac.kr
** (주)SCMI

림 1과 같이 기존의 경사면 모서리를 갖는 자극이 아무런 문제 제기 없이 사용되어 왔다. 그러나, 같은 자극 반경을 갖더라도 모서리의 형태에 따라 공극의 자계분포가 달라지고 이에 따라 유효 평등자계의 범위가 달라질 수 있다는 점을 고려할 때, 이 부분에 대한 개선이 가능하리라 생각된다.

따라서, 본 연구에서는 자극의 형태를 달리하였을 경우 유효 평등자계의 범위가 어떻게 달라지는지 알아보기 위하여, 기존 경사면 모서리 형태의 자극 구조와 새로운 타원 경사면 모서리 형태의 자극 구조에 대해 영구자석의 유무, 인가전류의 크기 및 자극간 거리에 따른 자계 분포를 시뮬레이션하였다.



(a) 전자석 (b) 기존 자극 사이즈
그림 1. 전자석 및 기존 자극의 형태

2. 시뮬레이션 조건

일반적인 B-H 커브 트레이서의 경우로 시뮬레이션 조건을 정하였다. 전자석의 코어는 순철로 적용하였고, 코일의 권선수는 그림 1에서 위 부분과 아랫부분을 합쳐 총 966회로 하였다. 자극간 거리는 보통 0 ~ 60 mm, 전자석의 입력 전류는 0 ~ 60 A 로 가변 가능하므로, 자극간 거리는 10 ~ 60 mm까지 10 mm씩, 전류는 10 ~ 60 A 까지 10A씩 가변하여 시뮬레이션을 수행하였다. 기타 시뮬레이션에서 사용되는 각 물질의 제원을 표 1에 나타내었다. 여기서, 자성체는 전자석에 영구자석이 존재하는 경우에 대한 해석을 위한 것으로 가장 극단적인 경우로서 강한 영구자석인 NdFe30의 희토류계 자석을 적용하였다.

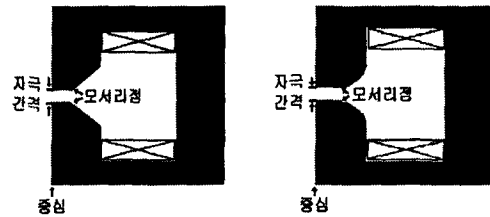
한편 전자석의 형태에 대한 모델링은 그림 2와 같이 적용하였다. 본 연구에서는 Maxwell EM2D인 2차원 해석 프로그램을 사용하였기 때문에, 그림 2와 같이 모델링하고 축 중심으로 360도 회전시켜 해석하였다. 실제로 이러한 형상의 전자석은 존재하지 않으나 자극 부분만이 관심사이므로 해석에는 전혀 문제되지 않았다.

그림 2에 나타낸 바와 같이 기존의 경사 모서리

형태의 자극과 타원 모서리 형태의 자극에 대해 비교하였다. 이때, 자극면의 반지름은 45 mm 였으며, 타원 모서리의 경우 그림의 $x = 65$ mm, $y = 45$ mm 이었다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 재료의 제원

	코일	코어	자성체
	Copper	Steel_1008	NdFe30
비투자율	0.999991	비선형 물질	1.044573
도전율 [S/m]	5.8e+007	2e+6	6.25e+5
보자력(Hc) [A/m]	0	0	-8.38e+5
잔류자속밀도 (Br) [T]	0	0	1.1
자화(Mp) [A/m]	0	0	875352.188



(a) 경사 모서리 자극 (b) 타원 모서리 자극
그림 2. 전자석 형상에 대한 모델링

3. 결과 및 고찰

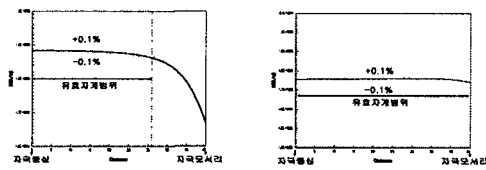
3.1 영구자석 시편이 없는 경우

전자석 공극에 측정대상 시편이 없이 자극만 존재하는 경우, 기존의 경사 모서리 자극과 새로운 타원 모서리 자극에 대한 자계 분포의 예로 자극간 거리 20mm, 전류 30A 인가시에 대해 그림 3과 같이 나타냈다.

표 2에 이러한 데이터를 종합하여 나타내었다. 즉, 여러 자극간 거리와 여러 인가 전류에 따른 유효 평등자계의 범위를 나타내고 있다. 표에서도 알 수 있는 바와 같이 유효 평등자계의 범위가 상당히 증가한 것을 볼 수 있다. 자극간 거리가 10 mm인 경우에는 경사모서리인 경우에도 평등자계가 잘 형성되어 큰 차이가 나지 않지만, 거리가 멀어져 불평등 자계가 심해지는 20 mm 이상의 거리

에서는 상당한 차이를 나타내고 있다. 이로써, 새로운 타원 모서리 자극이 평등자계의 범위를 넓히는데 매우 효과적인 것으로 파악되었다.

한편, 표 2에서 보면 중심자계는 경사 모서리에 비해 타원모서리의 경우가 약간 작게 발생되고 있다. 이것은 경사모서리 자극의 경우 꺾이는 점에서의 극부적인 자계 집중으로 인해 전체적인 자계 상승이 발생되었기 때문으로 판단된다.



a) 기존 경사 모서리 자극 (b) 새로운 타원 모서리 자극
그림 3. 영구자석 시편이 없는 경우 자계 해석

표 2. 두 자극 형태에 따른 유효 평등자계 범위

자극 간 거리	전류 [A]	경사 모서리 자극		타원 모서리 자극		유효 범위 증가 율 [%]
		중심 자계 [kA/m]	유효 평등자계 범위 (반지름) [mm]	중심 자계 [kA/m]	유효 평등자계 범위 (반지름) [mm]	
10 mm	20	2,038	42.0	1,929	45.0	7
	40	2,205	43.0	2,041	45.0	5
	60	2,280	43.5	2,098	45.0	3
20 mm	20	1,700	30.0	1,583	44.5	48
	40	1,960	31.0	1,823	45.0	45
	60	2,055	33.5	1,908	45.0	34
40 mm	20	944	27.5	924	37.0	35
	40	1,495	24.0	1,362	37.0	54
	60	1,669	21.5	1,531	38.5	79
60 mm	20	629	19.5	626	29.0	49
	40	1,133	18.5	1,063	29.5	59
	60	1,334	18.0	1,235	29.5	64

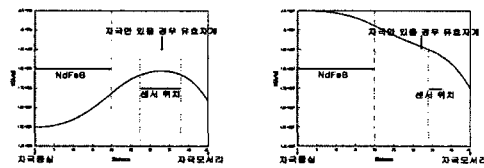
3.2. 영구자석 시편이 있는 경우

높이 10 ~ 60 mm, 반지름 20 mm인 원통형 영구자석인 NdFe30 회토류계 자석을 전자식 자극에 설치하고 전류를 인가할 때, 공극에 형성되는 자계에 대해 자석의 자화방향과 외부 인가자계가 같은 경우와 반대의 경우에 대해 시뮬레이션하였다. 이러한 해석은 영구자석으로 인해 주위 자계의 왜곡이 발생하므로 어느 정도의 오차가 있는지 그리고 어느 위치가 오차를 가장 줄일 수 있는 센서 설치

의 최적 위치인지를 파악하기 위한 것이다. 아울러, 새로운 타원모서리 자극의 경우 기존 경사모서리 자극에 비해 오차를 효과적으로 줄일 수 있는지에 대해서도 비교 검토하였다.

(1) 경사 모서리 자극의 경우

그림 4는 경사모서리 자극의 경우 자석의 자화방향과 외부 자계의 방향이 같을 때와 반대일 때의 자계해석의 한 예(자석의 높이 20mm, 전류 30A 인가)를 나타낸 것이다.



(a) 자석의 자화방향과 외부 자계방향이 같을 때 (b) 자석의 자화방향과 외부 자계방향이 반대일 때
그림 4. 경사모서리 자극에 영구자석이 있을 때의 자계해석(자석의 높이20mm, 전류30A인가)

표 3은 경사모서리 자극에 영구자석이 있을 때의 자계해석 결과이다. 자극간 거리 10 mm인 경우 오차가 거의 없이 나타나 현실적인 경우인 20 [A] 일 때 최적 센서의 위치는 41 mm 정도로 나타났지만, 20 mm 이상의 경우에는 거리가 커질수록 오차가 크게 발생하고 최적 센서의 위치도 중심축 쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 표 중에 “< 20”은 자석의 반경이 20 mm 이지만 이보다 안쪽 즉 자석 내부에 센서의 설치 위치가 나타나는 것으로 계산되지만 실제로 자석 내부에 센서를 설치할 수 없으므로 20 mm로 표시한 것이다. 이에 따라, 센서의 최적 위치는 자극간 거리 20 mm의 경우 36 mm, 거리 40 mm의 경우 27 mm, 거리 60 mm의 경우 21 mm 정도인 것으로 나타나, 자석의 높이에 따라 센서의 위치도 달라지는 것이 좋은 것을 알 수 있다.

(2) 타원 모서리 자극의 경우

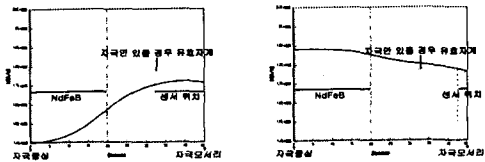
그림 5는 타원모서리 자극의 경우 자석의 자화방향과 외부 자계의 방향이 같을 때와 반대일 때의 자계해석의 한 예(자석의 높이 20mm, 전류 30A 인가)를 나타낸 것이다.

아울러, 표 4에 타원모서리 자극에 영구자석이 있을 경우의 해석결과를 나타내었다. 우선 경사모서리 자극의 경우인 표 3과 비교할 때 자성체 자화방향과 외부 인가 자계의 방향이 같은 경우 중

심자계와의 오차가 상당히 줄어든 것을 알 수 있다. 특히 자극간 거리가 커질수록 오차개선이 더욱 좋아지고 있다.

표 3. 경사모서리 자극에 영구자석 있을 때의 결과

자극간 거리 [mm]	인기전류 [A]	자성체 자화 방향과 자계 방향이 같을 때			반대일 때			센서의 최적 위치		
		최대 자계 [kA/m]	중심 자계와의 오차 [%]	센서 위치	중심 자계 [kA/m]	센서 위치		min	max	
						min	max			
10	20	2,020	0.9	31.0	41.0	2,480	40.5	43.5	40.5	41.0
	40	2,210	-0.2	32.0	42.0	2,660	42.0	43.5	42.0	42.0
	60	2,290	-0.4	31.5	42.0	2,750	42.5	44.0	42.5	42.5
20	20	1,615	5.0	26.5	37.5	1,735	31.5	36.0	31.5	36.0
	40	1,865	4.8	28.0	38.5	2,210	34.0	38.0	34.0	38.0
	60	1,970	4.1	28.5	38.5	2,340	35.0	39.0	35.0	38.5
40	20	931	1.4	< 20	30.5	946	< 20	27.0	20.0	27.0
	40	1,410	5.7	< 20	33.5	1,530	21.0	30.0	21.0	30.0
	60	1,545	7.4	< 20	37.0	1,740	25.5	31.0	25.5	31.0
60	20	627	0.3	< 20	21.0	630	< 20	22.0	20.0	21.0
	40	1,100	2.9	< 20	27.0	1,145	< 20	25.0	20.0	25.0
	60	1,274	4.5	< 20	27.0	1,356	< 20	26.0	20.0	26.0



(a) 자석의 자화방향과 외부 자계 방향이 같을 때 (b) 자석의 자화방향과 외부 자계 방향이 반대일 때
 그림 5. 타원모서리 자극에 영구자석이 있을 때의 자계 해석(자석의 높이 20mm, 전류 30A 인가)

또한, 센서의 최적 위치는 자극간 거리가 커질수록 최적 센서의 위치가 중심축 쪽으로 이동하는 것은 경사모서리의 경우와 같지만 이동 정도는 그 보다는 작은 것으로 나타났다. 거리 10 mm인 경우 최적 위치는 45 mm 정도이며, 거리 20 mm의 경우 43 mm, 거리 40 mm의 경우 39 mm, 거리 60 mm의 경우 30 mm 정도인 것으로 나타났다. 따라서, 새로운 타원모서리는 기존의 경사모서리에 비해 자계 측정의 오차도 줄이면서 효과적인 자극 구조임을 알 수 있었다.

표 4. 타원모서리 자극에 영구자석 있을 때의 결과

자극간 거리 [mm]	인기전류 [A]	자성체 자화 방향과 자계 방향이 같을 때				반대일 때			센서의 최적 위치	
		최대 자계 [kA/m]	중심 자계와의 오차 [%]	센서 위치		중심 자계 [kA/m]	센서 위치		min	max
				min	max		min	max		
10	20	1,950	-1.1	32.5	45.0	2,310	44.5	51.0	44.5	45.0
	40	2,080	-1.9	32.5	39.0	2,485	50.5	51.5	39.0	50.5
	60	2,150	-2.5	30.5	37.0	2,545	51.0	52.0	37.0	51.0
20	20	1,560	1.5	30.0	45.0	1,633	42.0	55.0	42.0	45.0
	40	1,790	1.8	33.0	45.5	2,005	44.5	52.0	44.5	45.5
	60	1,885	1.2	33.5	45.0	2,150	42.5	50.0	42.5	45.0
40	20	928	-0.4	< 20	42.0	940	35.0	44.5	35.0	42.0
	40	1,323	2.8	20.0	44.0	1,378	20.0	42.0	20.0	42.0
	60	1,481	3.3	24.5	44.0	1,559	28.5	42.0	28.5	42.0
60	20	625	0.2	< 20	29.0	627	30.5	46.0	29.0	30.5
	40	1,042	2.0	< 20	35.0	1,076	< 20	37.0	20.0	33.5
	60	1,204	2.6	< 20	37.0	1,251	< 20	37.5	20.0	37.0

4. 결론

B-H Curve Tracer용 전자석의 경사모서리 및 타원모서리 자극에 대해 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 영구자석이 없는 경우의 시뮬레이션에서 새로운 타원 모서리 자극이 기존 경사모서리 자극에 비해 유효 평동자계의 범위를 넓히는데 매우 효과적인 것으로 파악되었다.

둘째, 자석이 있는 경우의 시뮬레이션을 통해 센서의 최적 설치 위치를 파악하였으며, 새로운 타원 모서리 자극이 기존 경사모서리 자극에 비해 측정 오차가 상당히 개선되었음을 알 수 있었다.

따라서, 본 연구에서 제안하는 타원 모서리 형태의 자극이 매우 효과적인 것으로 판단된다. 향후, 보다 약한 자석에서의 최적 센서 위치 및 오차 파악과 실제 실험을 통한 검증 등을 통해 타원모서리 자극을 적용하고자 한다.

참고 문헌

- [1]金子秀夫 외, "영구자석의 개발/재료의 설계 및 자기회로의 해석/설계 응용기술", 일본 총연기술센터