

영구자석형 횡축형 전동기의 착자기 설계 및 해석

정수진 · 강도현 · 정연호 · 김동희
(영남대학교 · 한국전기연구원)

Design and Analysis of Magnetizer for PM type Transverse Flux-motor

(S J-Jung · D H-Kang · Y H-Jeong · D H-Kim)

Abstract - This paper describes the magnetizer design of highly saturated magnetic circuit by high external field. The magnetizer is loaded by a capacitor bank with impulse currents to reach high magnetic flux-density(typically 5[T]). Magnetizing current come out from magnetizing system is simulated by analytic method and transient FEM, also field distributions of the magnetizer are analyzed.

1. 서론

높은 잔류자속밀도와 에너지 밀도를 가지는 희토류계 원소(SmCo, NdFeB)를 이용한 영구자석의 개발로 인해 회전기 및 선형기 등 여러 전기기기의 사용이 증가되고 있다. 그 중 영구자석 여자 횡자속 전동기의 경우 추력 밀도를 증가시키기 위해 밀력턴스형 횡자속 전동기의 고정자 및 이동자에 영구자석을 삽입한 형태로 영구자석이 공극에서 자계를 집중시킴으로써 높은 공극 자속밀도를 얻을 수 있다. 따라서 이동자에 삽입되는 영구자석의 착자기 요구된다.

착자하는 방법으로써 일반적으로 직류전류를 착자기의 권선에 충분히 크게 흘려 강한 외부자계를 만들고, 그 자계 내에 자성체를 넣어 착자시키는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법은 에너지 밀도가 작은 페라이트 계열이나 플라스틱류 등의 소형 영구자석은 착자시킬 수 있으나, 에너지 밀도가 큰 희토류 계열 및 대형 영구자석의 착자에는 적합하지 않다. 에너지 밀도가 높은 희토류 계열의 영구자석이 고유의 잔류자속밀도를 가지기 위해서는 매우 큰 외부 자계가 요구되며, 높은 침투치 전류가 필요하게 되므로 이를 착자하기 위한 착자기는 콘덴서 뱅크를 이용한 임펄스 전류의 형태로 전원을 공급받게 된다. 희토류계 영구자석의 자기특성에 따르면 NdFeB 계열의 경우 고유의 잔류자속밀도와 보자력을 얻기 위해서는 자석 내부에 대략 2500[kA/m] 이상의 착자계가 요구되며, 자석내부의 자속밀도의 최대치는 대략 3~5[T] 까지 상승하게 되어 착자하는 동안에는 매우 높은 자기 포화회로가 형성된다^[1,2].

본 논문에서는 1차원 해석적 방법으로 착자기를 기본 설계하였으며, FEM을 이용한 상세설계를 하여 해석적 방법과 비교 검토하였다. 또한 FEM을 이용한 자기적 특성을 해석하였다.

2. 영구자석의 착자조건

희토류계 영구자석은 외부자계의 온도에 대해 높은 저항을 가지며, 페라이트계보다 높은 에너지 밀도를 가진다. 희토류계 영구자석 중 실용자석 재료로는 NdFeB와 SmCo5계열이 가장 적합하며, 본 논문은 NdFeB계열에 대해 기술한다. 그림 1은 각 영구자석 간의 감자특성을 나타내었다. 착자를 시행하는 동안 자석내부는 포화자속 밀도($B_0=1.2T$)에 도달하게 되며, 이때의 자계값은 $H_m \geq 2000[kA/m]$ 가 필요하게 된다. 자성재료의 특성에 따라

잔류 자속밀도 최대값은 어느 일정한 자계 이상을 인가 하여도 크게 변화하지 않으므로 적당한 착자계를 인가해야 하며 희토류계 영구자석류에서는 잔류자속밀도(B_0)가 필요한 착자계(H_m)의 피크값을 결정하게 된다.

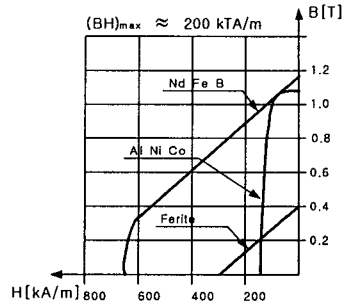


그림 1. 자성물질의 감자특성 곡선
Fig 1. The demagnetization characteristics shape for some hard magnetic materials.

착자기의 기본적인 구조는 영구자석 및 이동자의 형태와 크기에 의해 결정되므로 이동자 및 영구자석의 사양이 요구된다. 이동자를 soild형태로 영구자석과 일체로 착자할 경우는 착자전류에 의해 유기되는 와전류를 고려하여야 한다. 따라서 착자를 하기 위한 전기 시스템에서의 시정수와 커패시터 뱅크등의 적절한 선정이 요구된다. 그림 2는 영구자석형 횡자속 선형전동기의 이동자 부분과 영구자석의 사양을 나타내고 있다.

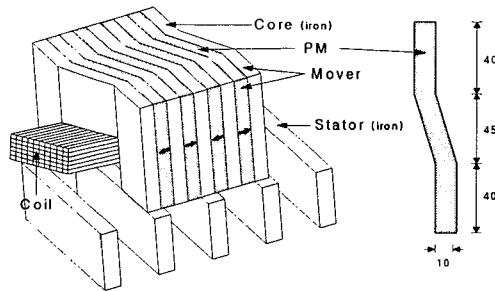


그림 2. 영구자석 및 이동자 형상
Fig 2. Shape of PM & Mover

영구자석을 착자시키기 위해 필요한 외부 자계의 크기는 자석재질이 갖는 에너지 밀도, 보자력, 포화 자속밀도 등에 따라 달라지며, 이러한 자석재질에 따라 외부에서 인가하는 착자계의 크기가 결정된다. 표 1에는 영구자석 제조사의 자료를 참고하여 작성한 실제 요구되는 각 자성 물질들의 보자력 및 자계강도를 나타내었다^[6]. 또한, 착자

시킬 자석류를 이방성으로 선정하면 보다 높은 잔류 자속 밀도를 얻을 수 있다.

표 1. 실제 각 자성물질들의 비교

Table 1. Compare of each actual magnetic materials

Material	보 자력 (H_c) [A/m]	요구되는 착자계 (H_m) [A/m]
AlNiCo	46,000 ~ 130,000	200,000 ~ 640,000
Ceramic	150,000 ~ 240,000	800,000 ~ 960,000
SmCo5	360,000 ~ 960,000	1,600,000 ~ 8,000,000
NdFeB	280,000 ~ 1,000,000	1,600,000 ~ 3,600,000

3. 착자시스템 및 해석이론

착자를 하기 위한 전기회로는 변압기, 정류기 및 스위치1 부분의 충전부분과 스위치2, 콘덴서의 방전부분, 그리고 착자코일(R_c, L_c)로 이루어진 착자기부분으로 구성되어져 있다. S_2 가 도통되면 커패시터는 방전이 시작되고 착자코일에 임펄스 형태의 전류가 인가된다. 이 회로는 착자 종료 후 자석의 잔류 자속밀도에 따른 착자코일 내에 저장된 소량의 에너지를 제외한 전체 전기에너지는 착자코일 저항(R_c)과 선로저항(R_{ch})에 의해 열로써 소비된다. 그림 3에는 임펄스 전류로 착자기 위한 착자 시스템을 나타내고 있다.

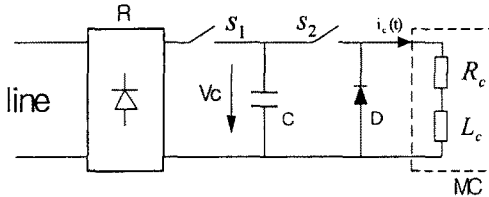


그림 3. 콘덴서 방전에 의한 착자 회로

Fig 3. Magnetizing circuit according to condenser discharging
T : transformer, R : rectifier, S1: loading switch, C : capacitor bank, S2 : discharging switch, MC : magnetizing coil

3.1 자기회로의 해석이론 및 방법

착자용 코일의 경우 R_c, L_c 는 해석적인 방법으로 결정할 수 있으며 그림 5와 같이 착자기의 착자요크를 간단하게 설계함으로써 자기 경로를 결정할 수 있다. 비록 자기적인 포화는 매우 크지만 1차원적인 해석 방법으로 자속밀도를 유도하였고, 철심 부분은 높은 포화가 일어나므로 적층 철심의 B-H곡선을 그림 4와 같이 단순화시킬 수 있다.

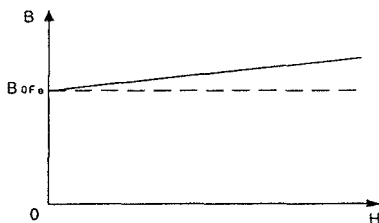


그림 4. 고정자 철심의 포화 B-H곡선

Fig 4. Saturation B-H curve of iron core

자극 축에 위치한 자석내에서 자속밀도의 임의의 최대값

$B_{my} = B_m$ 을 발생시키는데 필요한 기자력을 계산하기 위해 암페어의 법칙($\oint H \cdot dl = NI$)을 적용하였으며 착자철심의 높이는 일반적으로 철심이 포화되지 않게 하기 위하여 내부의 자속밀도 값을 2[T]이하가 되도록 충분히 크게 설계 해야한다.

$$i_c \cdot N_p = H_m h_m + H_g \delta + H_p h_p \quad (1)$$

여기서, l_{yr} 은 이동자의 자기경로, h_m 은 영구자석의 높이, δ 은 공극 그리고 h_p 는 자극의 높이이며, 착자전류에 의해 착자기 철심은 고포화 상태가 되므로 착자기 권선의 인덕턴스는 전류의 변화에 대해 일정한 값을 가진다.

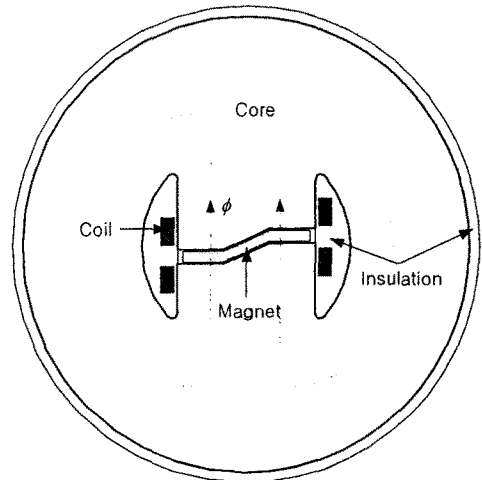


그림 5. 착자기의 형상

Fig 5. Shape of the magnetizer

따라서 포화된 인덕턴스($L_{c,Fe}$)는 상수로 취급할 수 있으며 저장된 자기 에너지는 식(2)와 같이 계산될 수 있다.^[2]

$$L_{c,Fe} = \frac{2}{(i_c)^2} \cdot (W_{m,m} + W_{m,\delta} + W_{m,p}) \quad (2)$$

슬롯의 누설자속에 의해 저장되는 자기에너지는 철심 부분의 인덕턴스($L_{c,Fe}$)에 비해서 무시할 수 있지만, 권선의 overhang에 의해 발생되어 저장되는 자기에너지는 높은 전류가 흐르므로 고려되어야 한다. 자기 누설 퍼미언스(λ_g)는 주로 권선 overhang의 형태에 의해서 결정되며 일반적으로 0.2~0.25정도이다.^[3]

$$L_{c,\sigma} = \mu_o \cdot 2p \cdot \left(\frac{2N_p}{a}\right)^2 \cdot l_{ov} \cdot \lambda_g \quad (3)$$

3.2 전기회로의 해석

그림 3의 전기회로에서 피크전류의 계산이나 착자코일의 설계에 있어서 착자를 위해 요구되는 전류는 피크치만 고려할 수 있으므로 지수함수 임펄스 전류와 정현파 임펄스 전류의 방전회로가 이용될 수 있다. 두 방전회로에 대한 차이는 없으며 본 논문에서는 정현파 임펄스 전류를 이용하였다. 착자 철심은 피크 전류의 약 10%를 초과하면 크게 포화되며, 코일의 인덕턴스는 포화되었을 때 전류상승에 크게 변화하지 않는다. 따라서, L_c 를 단순히 상수로 고려하여 방전전류를 계산하였으며, 이러한 가정에 의해 임펄스 전류는 $4L \geq CR^2$ 인 경우 식(4)로 표현하였다.^[1,2,3]

$$i_{c, peak} = \frac{V_c}{\omega L} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \quad (4)$$

R_c 는 권수에 따라 적절하게 고려되어야 하기 때문에 극당 슬롯 단면적이 A_Q 라면,

$$R_c = \frac{8p(l_{Fe} + l_{ov})}{\sigma k_Q A_Q} \cdot \frac{N_p^2}{a^2} \quad (5)$$

여기서, k_Q 는 점적율, σ 는 코일의 도전율, l_{Fe} 는 착자 철심 축방향 길이, l_{ov} 는 코일 overhang의 길이, a 는 병렬 회로수이다. 권수가 증가하면 저항이 증가되고, 이에 따라서 peak 전류가 발생하는 시간 t' 도 증가된다. 이때, 일부분의 W_e 는 저항손실로 소비되어 착자에너지와 peak 전류를 감소시킨다.

4. 착자기 설계 및 해석결과

해석적 방법 및 FEM을 적용하여 설계한 착자기의 사양을 표 2에 나타내었다. 이때 착자기 외경은 착자요크의 포화자속밀도 2[T]이하의 값에서 적절히 산정하였다.

표 2. 착자기 설계 결과

Table 2. Design result of the magnetizer

착자기 외경	M_d	440[mm]
착자기 축방향 길이	l_z	85[mm]
쌍극 수	p	1
영구자석 두께	h_m	10[mm]
영구자석 축방향 길이	l_r	75[mm]
공극	δ	2[mm]
극당 코일 턴수	N_p	33[turn]
Overhang 길이	l_{ov}	329[mm]
점적율	k	0.24
Overhang 인덕턴스	$L_{c, \delta}$	0.59505[mH]
철심내부 인덕턴스	$L_{c, Fe}$	0.23754[mH]
코일저항	R_c	0.121381[Ω]

그림 6은 피크전류가 발생하는 시점에서의 착자기 전체 자속밀도를 나타내고있다.

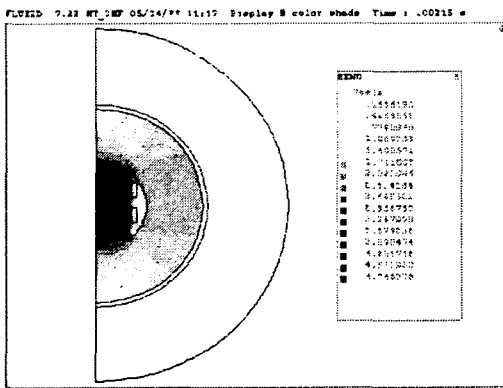


그림 6. 착자기 자속밀도 (최대전류 인가시)

Fig 6. The magnetizer flux-density (at peak-current)

그림 7과 표 3에서 나타낸 것과 같이 콘덴서 설비용량에 따라 피크전류의 발생시점이 달라지게 된다. 따라서

영구자석을 포함한 원통형 회전자 및 solid 형태의 이동자의 착자시에는 발생하는 와전류에 의한 감자를 고려하여 적절한 커패시터 बैं크의 산정이 요구된다. 그림 6은 콘덴서 방전에 의한 임펄스 전류를 나타내고있다.

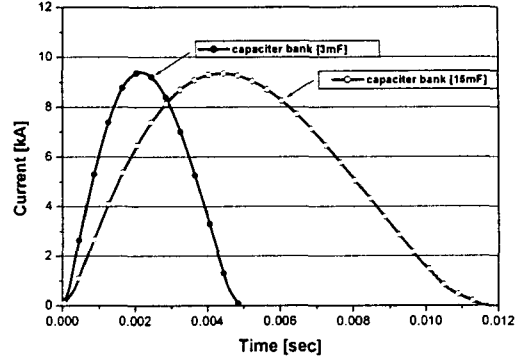


그림 7. 입력전류 형상

Fig 7. Shape of input current

표 3은 착자기 해석결과로써 커패시터 बैं크를 3[mF]과 15[mF]인 경우에 대하여 FEM 해석을 수행한 결과를 해석적 방법과 비교하여 나타내었다.

표 3. 착자기 해석결과

Table 3. Analysis result of the magnetizer

(1) 커패시터 बैं크가 3[mF]인 경우

	V_c	i_{max}	t'	B_m	C
Analytical	5.7[kV]	9[kA]	2.31[ms]	5[T]	3[mF]
Simulation	5.7[kV]	9.4[kA]	2.15[ms]	3.8[T]	3[mF]

(2) 커패시터 बैं크가 15[mF]인 경우

	V_c	i_{max}	t'	B_m	C
Analytical	3[kV]	9[kA]	4.74[ms]	5[T]	15[mF]
Simulation	3[kV]	9.4[kA]	4.45[ms]	3.8[T]	15[mF]

그림 8과 그림 9에는 영구자석 중간 부분에서 해석한 자속밀도와 착자계이며 수직방향 성분만을 나타내었다.

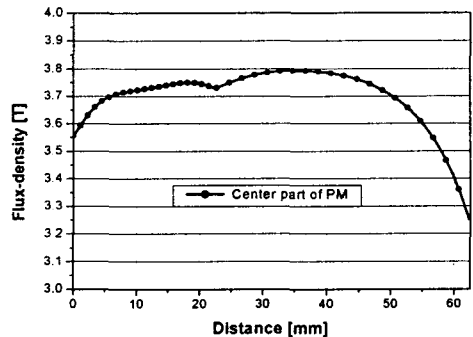


그림 8. 영구자석 부분의 자속밀도

Fig 8. Flux-density of the PM

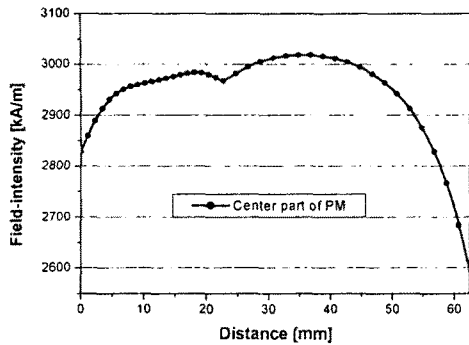


그림 9. 영구자석 부분의 착자계 세기
 Fig 9. Field-intensity of the PM

3. 결 론

본 논문에서는 횡축형 선형 전동기의 영구자석을 착자하기 위한 착자기 및 전기회로 설계에 대해 기술하였다. 착자 코일은 높은 잔류자속 밀도를 발생시키기 위해 임펄스 전류의 형태로 커패시터 뱅크에서 전원을 공급 받으며, 이때 영구자석에서 발생하는 자속밀도가 약 5[T] 정도가 되도록 해석적 방법과 FEM을 이용하여 설계·해석 하였다. 또한 커패시터 뱅크를 3[mF]과 15[mF] 경우에 대해 해석을 수행하여 전류의 형태 분석하였다. 해석결과 착자요크 부분의 정확한 자기경로 산정이 불가능하여 요크는 포화되지 않는다고 가정하였다. 따라서 요구되는 최대 자속밀도 5[T]는 만족되지 않게 된다. 그러나 자속밀도 3[T]이상 자계 2500[kA/m]이상이므로 영구자석 착자조건은 만족함을 알 수 있었다

(참 고 문 헌)

- [1]정수진,강도현,김동희,정연호 "초고속 영구자석 회전기의 회전자 착자기 설계 및 해석" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B,586-589, 2001.7.18-20
- [2]A. Binder "Design of Coils for Magnetizing Rotors Surface Rare Earth Permanent Magnets", ELECTRICAL ENGINEERING, 78, 1995
- [3] D.H.Kang, Y.H.Jeong, S.J.Jung, D.H.Kim, P.Curiac "Design of Inductors for Magnetizing High Speed Rotors with PMs on surface" KIEE EMECS 2001' Spring Annual Conference, 19-21 April, Jeju, Korea.
- [4]D.H.Kang, Y.H.Jeong "Development of High Speed PM Synchronous Machines", ISIM'2000 Proceedings, 4-7 Oct., 2000, Changwon, Korea.
- [5]정수진,강도현,정연호,김동희 " 초고속 영구자석형 동기 회전기 기본설계 및 착자에 관한 연구" 대한전기학회 추계학술대회 전기기기 및 에너지변환 시스템학회 논문집. pp 42-46. 2001.10.26-27
- [6]Walker Scientific Inc. "Magnet Processing-Selecting the Right Equipment" in Advancing the Science of Magnetics, <http://www.walkerscientific.com/artcles/index.html>