

초고속 영구자석 회전기의 회전자 착자기 설계 및 해석

정수진*, 강도현**, 김동희*, 정연호**
 영남대학교*, 한국전기연구원**

Design and Analysis of Magnetizing Machine for High Speed Permanent Machines

Soo Jin Jung*, Do Hyun Kang**, Dong Hee Kim*, Yeon Ho Jeong**
 Yeungnam University*, K.E.R.I**

Abstract - In Case of High speed PM machines with surface-mounted magnet, A rare-earth PM with high remanence flux density is used on the rotor. Therefore, It is very difficult to adhesion and assemble PM on the surface of rotor, because of very repulsive force between magnets. So, for solving this problem, rotor with surface-mounted magnet is wholly magnetized after mounting magnetic-material on the surface.

In this paper, In order to Magnetize rotor with surface-mounted PM, magnetizing machine is designed, analyzed and simulated for large PM machines using the 1dimensional analytical method and 2dimensional finite element method. (2d-FEM).

1. 서 론

최근 회토티계 원소(NdFeB, SmCo5)를 이용한 영구자석의 개발로 인해 영구자석 회전기의 사용이 증가되고 있다. 그 중 초고속 영구자석 회전기의 개발 및 생산기술이 급격하게 발전되고 있다. 회토티계 영구자석은 높은 잔류 자속밀도(1.2[T]정도)를 가지므로 회전기의 회전자에 착자하여 사용하면 전동기의 부피와 무게가 줄어들게되며, 회전자에서의 손실이 줄어들어 효율을 높일 수 있고 출력을 증대시킬 수 있다⁽¹⁾. 그러나 초고속 영구자석 회전기의 경우 높은 잔류 자속밀도를 가지는 회토티계 영구자석을 사용하므로 영구자석의 부착 및 조립이 해결되어야할 문제점으로 지적되고 있으며, 영구자석의 자화방향이 arc방향으로 배열됨에 따라 수직방향의 배열에 비해 공극 자속밀도의 공간 고조파가 많이 함유되어 손실을 증가시키는 요인이 되고 있다. 따라서, 이러한 문제점을 보완할 한가지 대안으로 착자되지 않은 자석을 회전자에 미리 조립한 후 회전자 전체를 착자시키면 수직방향 착자로 인한 공간고조파의 저감효과와 반발력으로 인한 조립의 문제점을 해결할 수 있다.

영구자석(NdFeB, SmCo5)을 포화점까지 착자시키기 위해서는 매우 큰 자계가 요구된다. 따라서 큰 peak 전류가 필요하게 되므로 Capacitor - Bank에서 임펄스 전류의 형태로 전원을 공급받는다. 영구자석의 자기특성에 따르면 설계치의 잔류자속 밀도와 보자력을 얻기 위해서는 자석 내부에 대략 2000~3500 [kA/m]의 자계가 요구된다. 따라서, 자석내부에는 자속밀도가 대략 4-6T(peak 값)까지 상승하게 되며, 착자하는 동안에는 매우 높은 자기포화 회로가 형성된다⁽³⁾. 본 논문은 200[kW] 30,000[rpm]용 초고속 영구자석 회전자를 대상으로 영구자석과 회전자를 일체로 착자시킬 대형 영구자석 착자기의 자기회로 및 전기회로를 1차원 해석적인 방법으로 설계하였으며, 2차원 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션 해석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 NdFeB와 SmCo5의 관련이론

회토티계 자성물질은 외부자계와 온도에 대해 높은 저항을 가지며, 페라이트계보다 높은 에너지 밀도를 가진

다⁽¹⁾. 회토티계 영구자석 중 실용자석 재료로는 NdFeB와 SmCo5계열이 가장 적당하며, 본 논문에서도 자성재료 NdFeB와 SmCo5계열에 대해 기술한다. 그림 1은 각 영구자석 간의 감자특성을 나타내며, 그림 2는 회토티계 영구자석 SmCo5에 대한 여러 피크 착자계 H_m 에 따른 착자 특성곡선을 나타내고 있다. 자성재료의 특성에 따라 잔류 자속밀도 최대값은 어느 일정한 자계 이상을 인가하여도 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 회토티계 영구자석류에서는 B_0 가 필요한 Hm의 피크값을 결정한다.

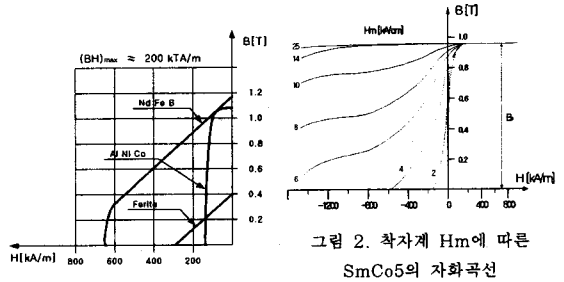


그림 1. 영구자석 감자곡선

제조업체(Walker scientific inc.)의 자료를 참고한 자성물질들에 대한 보자력과 착자하기 위해 실제 요구되는 자계 강도를 표 1에 나타내었다.

표 1. 실제 각 자성물질들의 비교

Material	보 자 력	요구되는 착자계 강도
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

2.2. 착자에 사용되는 회전자의 구조

착자기의 기본적인 형태와 크기는 영구자석 회전자의 사양에 의해 결정된다. 따라서 영구자석 회전자의 파라메타가 요구된다. 영구자석 재료는 일반적으로 접착제를 사용하여 회전자 표면에 부착시킨다. 그러나, 초고속 회전기의 경우 원심력에 의해 영구자석이 이탈하는 현상이 생기므로 회전자에 Can을 사용한다.

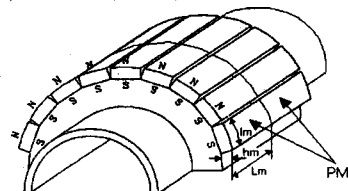


그림 3. 200[kW]급 회전자의 구조

그림 3에서 200[kW], 30,000[rpm]의 초고속 회전기의 회전자 부분을 나타내고 있으며, 표 2는 회전자의 파라메타를 나타내고 있다.

표 2. 회전자 파라메타

Parameter	Value
출력	200 [kW]
회전자 극수	2
정격 속도	30,000 [rpm]
회전자 길이	200 [mm]
회전자 외경	153 [mm]
영구자석 높이	8 [mm]

2.3 착자 시스템

착자를 하기 위해 구성된 전기회로는 변압기와 정류기 및 S1 부분의 급전장치와 Thyristor, Capacitor의 방전장치, 그리고 Diode와 Magnetizing coil(Rc, Lc)로 구성되는 착자장치로 구성되었다. Th가 도통되면 커패시터는 방전이 시작되고 착자코일에 임펄스 전류가 인가된다. 그림 4에는 임펄스 전류로 착자하기 위한 착자 시스템을 나타내고 있다. 이 회로에서 착자 종료 후 자석의 잔류 자속밀도에 기인하여 착자코일 내에 저장된 소량의 에너지를 제외한 전체 전기에너지는 저항 Rc와 Rch에 의해 열로써 소비된다.

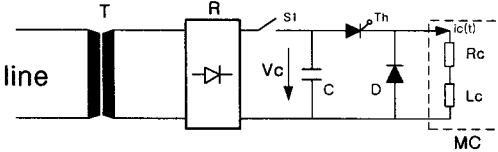


그림 4. 콘덴서 방전에 의한 착자 회로

T : transformer, R : rectifier, S1: loading switch,

C : capacitor bank , Th : thyristor, D : free-wheeling diode,

MC : magnetizing coil

3. 착자 시스템의 해석적인 계산방법

3.1 자기회로의 해석이론 및 방법

착자용 코일의 정수 R_c , L_c 는 해석적인 방법으로 결정할 수 있으며 그림 5와 같이 착자의 착자요크를 간단하게 설계함으로써 자기 경로를 결정할 수 있다. 비록 자기적인 포화는 매우 크지만 1차원적인 해석 방법으로 자속밀도를 유도하였고, 요크 부분은 높은 포화가 일어나므로 적층 철심의 B-H곡선을 그림 6과 같이 단순화시킬 수 있다.^[3]

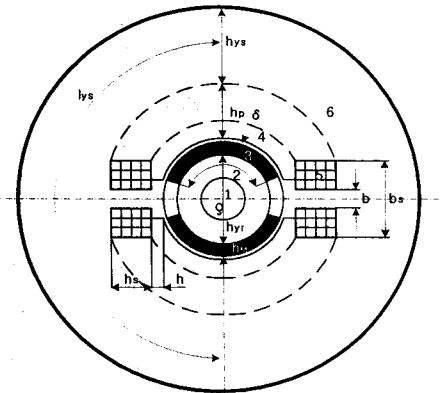


그림 6. 착자기 형상 및 착자 코일

1 : rotor's shaft, 2 : rotor's yoke, 3 : PM,

4 : pole's yoke 5 : pole's cole 6 : stator's yoke

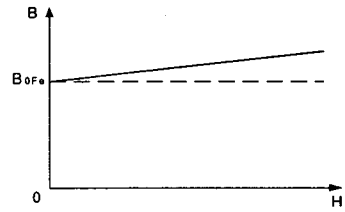


그림 6. 고정자 철심의 포화 B-H곡선

착자요크의 높이는 일반적으로 착자요크 내에서의 자속 밀도 값이 2T이하가 되도록 충분히 크게 설계한다.^[3]

자극 축에 위치한 자석내에서 자속밀도의 임의의 최대 값 $B_{Mr} = B_M$ 라 가정하고 암페어의 법칙을 적용하여 착자에 필요한 기자력을 계산하였다.

$$i_c \cdot N_p = H_{yr} l_{yr} + H_M h_M + H_\delta \delta + H_p h_p \quad (1)$$

여기서, H_{yr} : 회전자에 요구되는 자계 l_{yr} : 회전자의 자기경로

H_M : 영구자석에 요구되는 자계 h_M : 영구자석의 높이

H_δ : 공극에 요구되는 자계 δ : 공극

H_p : 자극축에 요구되는 자계 h_p : 자극 축의 높이

착자요크 내부의 포화된 인덕턴스 $L_{c,Fe}$ 는 자기회로 내에 저장된 자기 에너지로부터 계산될 수 있다. (회전자 철심, 자석, 공극 그리고, 고정자 자극) 그러므로, 자기 회로의 전체 에너지를 계산할 수 있다.

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

여기서, W_{yr} : 회전자의 에너지

W_M : 영구자석의 에너지

W_δ : 공극의 에너지

W_p : 착자요크의 에너지

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

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

$$L_c = L_{c,Fe} + L_{c,\sigma} \quad (4)$$

3.2 전기회로의 계산방법

그림 4의 전기회로는 지수함수 임펄스 전류와 정현파 임펄스 전류의 방전회로가 이용될 수 있다. 착자코일의 설계에 있어서 착자를 위해 요구되는 전류는 피크지만 고려할 수 있다. 따라서 두 임펄스 전류 형태에 대한 차이점은 없다. 그림 5에 일반적인 지수함수 임펄스 전류 파형을 나타내었다.

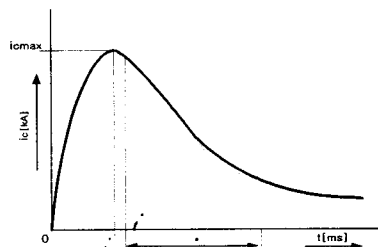


그림 7. 착자 전류의 전형적인 형태

착자 요크는 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 지수함수 임펄스 전류는 $4L \geq CR^2$ 경우 식(5)-(7)로 표현하였다⁽³⁾.

$$i_c(t) = \frac{V_c}{\omega L} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin \omega t \quad 0 \leq t \leq t^* \quad (5)$$

$$i_c(t) = i_c(t^*) \cdot e^{-\frac{t-t^*}{\tau}} \quad t^* < t \leq \infty \quad (6)$$

여기서, $\tau = \frac{2L}{R}$ $\tau' = \frac{L_c}{R_c}$ $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{\tau^2}}$

$$L = L_c + L_{ca} \quad R = R_c + R_{ca}$$

$$t^* = (\pi - \tan^{-1}(\omega\tau)) \cdot \frac{1}{\omega}$$

$$i_{cmax} = i_c(t^*) = \frac{V_c}{\omega L} \cdot e^{-\frac{t^*}{\tau}} \cdot \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \quad (7)$$

여기서, $t = \frac{\tan^{-1}(\omega\tau)}{\omega} < t^*$

3.3 coil parameters R_c 의 산정

R_c 는 권수에 따라 적절하게 고려되어야 하기 때문에 극당 슬롯 단면적이 A_Q 이고, 도선 1개의 단면적이 A_{cu} 라면,

$$A_{cu} = \frac{k_Q A_Q}{2N_p} \quad (15)$$

여기서, k_Q 는 slot space factor이다.

$$R_c = \frac{2p(l_{Fe} + l_{ov})}{\sigma k_Q A_Q} \cdot \frac{N_p^2}{a^2} \quad (16)$$

여기서, σ : 코일의 도전율, l_{Fe} : 계철 축방향 길이

l_{ov} : 코일 overhang의 길이 a : 병렬 회로수

권수가 증가하면 저항이 증가되고, 이에 따라서 peak 전류가 발생하는 시간 t^* 도 증가된다. 이때, 일부분의 W_{el} 는 저항손실로 소비되어 착자에너지와 peak 전류를 감소시킨다.

4. 착자기 시뮬레이션 해석

1차원 해석적인 방법을 적용하여 설계한 2극 착자기를 그림 8과 같이 1/4모델을 대상으로 유한요소 해석을 통한 시뮬레이션을 수행하였다. (Flux-2d를 이용) 표 4에는 자기회로의 1차원 해석적인 방법에 의해 구해진 파라메타들을 나타내고 있으며, 표 5에는 전기회로 해석에 의한 시스템의 파라메타들을 나타내고 있다.

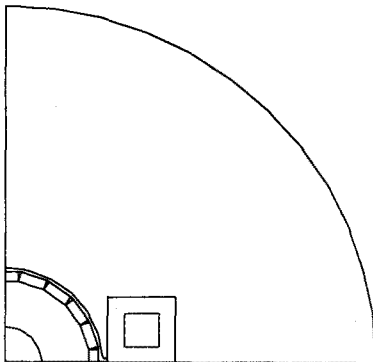


그림 8. 착자기 해석모델 (1/4모델)

표 4. 자기회로 계산에 의한 파라메타

mmf	739611.8678[AT]
i_{cmax}	10428.74097[A]
W	46231.87545
$L_{c,Fe}$	0.850173856[mH]
$L_{c,\delta}$	1.088649[mH]
$R_{c,Fe}$	0.023705[Ω]
$R_{c,oc}$	0.0476255[Ω]

표 5. 전기회로 시스템 파라메타

i_{cmax}	10262.78693[A]
τ	42.785769[ms]
τ^*	27.180839[ms]
W	461.2058906
t^*	3.515414[ms]
t	3.296245[ms]

시뮬레이션을 수행한 Flux-line과 Flux-density 분포를 그림 9와 그림 10에 나타내었다.

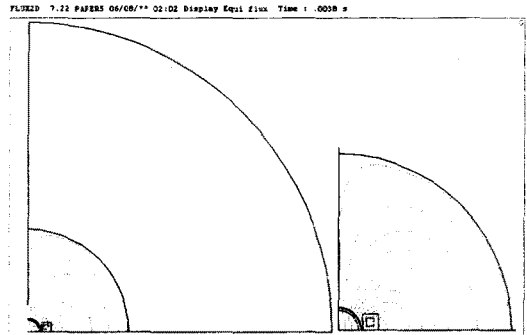


그림 9. 착자기의 Flux-Line

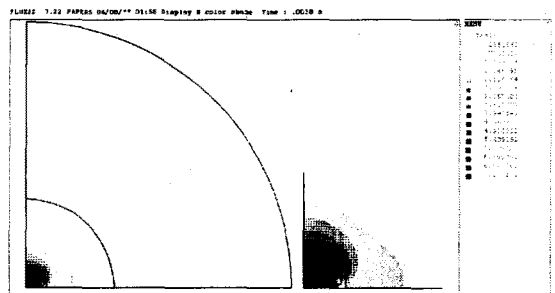


그림 10. 착자기의 자속밀도 분포

그림 11은 시간에 따른 전류 파형과 그림 12는 영구자석에 유기되는 수직방향의 자속밀도를 arc 방향을 따라 3부분 (68.5mm:안쪽, 72.5mm:중간, 76.5mm:바깥쪽)으로 해석한 결과를 나타내며, 72.5mm에서 자속밀도 4[T]이상 부분이 68.1%, 그리고 3[T]이상 부분은 78.1%정도로 나타났다. 그림 13은 영구자석 각 부분에서의 착자계를 나타내며, 영구자석의 76.5mm에서 유기되는 착자계 1600(kA/m)이상 부분은 85.55%정도로 나타났다.

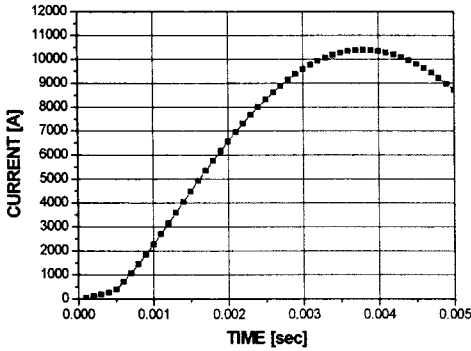


그림 11. 시간에 따른 전류 과형

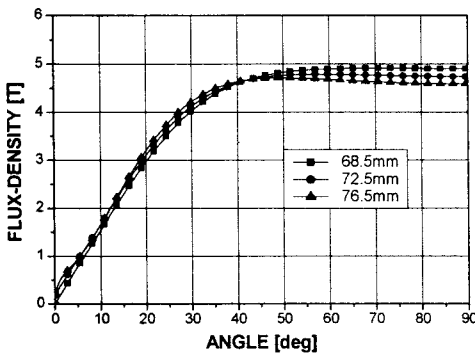


그림 12. 영구자석 부분의 각 arc에 따른 자속밀도

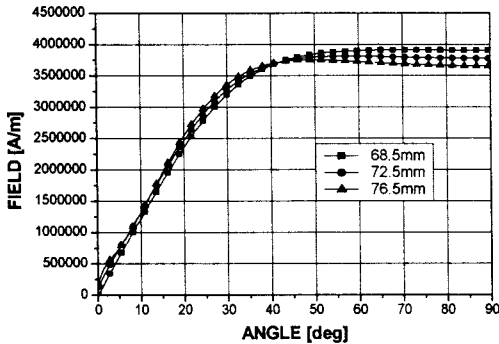


그림 13. 영구자석에 인가되는 착자계

표 6. Flux-2d의 해석결과

mmf	i_{cmax}	t	B
723822.43[AT]	10387.48[A]	3.8[mS]	3-5[T]

3. 결론

1차원 해석적인 방법을 적용하여 영구자석의 내부에 자속 밀도가 최대 5(T)가 유지되도록 착자기를 설계하였으며, 이에 따른 유한요소해석 결과는 약 4.92(T) 정도로 나타났다. 제조업체의 자료에 의하면 재질이 NdFeB인 영구자석이 포화 잔류 자속밀도를 갖기 위해서는 1600 [kA/m]이상의 자계에 노출되어야 한다. 그림12의 영구자석에 인가된 착자계의 분포를 검토하면

약 85.55[%]의 범위에서 포화 잔류 자속밀도를 얻을 것으로 예측되며, 권선측에 부착된 영구자석을 완전히 착자시키기 위해서는 더 많은 기자력이 요구되므로 입력 전압을 증가시키거나 Capacitor bank의 용량을 증가시킬 필요가 있다.

본 논문은 영구자석 회전기의 용량이 200(kW), 30000 [rpm]인 회전자를 대상으로 착자기를 설계·해석하였으며, 향후 실험을 통하여 설계된 착자기의 신뢰성을 검토할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1]D.H.Kang, Y.H.Jeong "Development of High Speed PM Synchronous Machines", ISIM'2000 Proceedings, 4-7 Oct., 2000, Changwon, Korea.
- [2]A.Hamler ,B.Kreca, B. Hribernik "Impact of Magnetization of PMs on Cogging Torque of a Brushless Motor", ICEM'94 Proceedings, Paris, 1994.
- [3]A. Binder: Design of Coils for Magnetizing Rotors Surface Rare Earth Permanent Magnets , ELECTRICAL ENGINEERING, 78, 1995
- [4] 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.
- [5]D.H.Kang, P.Curiac, Ju Lee : "An Axial Flux Interior PM Synchronous Machine", International Conference on Electrical Machines - ICEM' 2000 Proceedings, 4-6 Sept., 2000, Helsinki, Finland.
- [6]Walker Scientific Inc. : "Magnet Processing Selecting the Right Equipment" in Advancing the Science of Magnetics, <http://www.walkerscientific.com/articles/index.html>