

영구자석 회전기 착자기술

정연호, 강도현 / 한국전기연구원

개요

최근, 희토류계 원소를 이용한 영구자석(NdFeB, SmCo5)의 개발로 인해 영구자석 여자 동기전동기를 비롯하여 영구자석을 응용한 전동기의 개발이 급격하게 증가되고 있다. 희토류계 영구자석은 높은 잔류 자속밀도(1.2[T정도])를 가지므로 회전기의 회전자에 응용하면 전동기의 부피와 무게가 줄어 들게되며, 회전자에서의 손실이 줄어들어 효율을 높일 수 있고 출력을 증대시킬 수 있다.

그러나, 영구자석 회전기의 생산공정에서 영구자석을 회전자에 붙이려면 큰 반발력 및 흡인력으로 인해 영구자석의 조립작업이 매우 어렵고, 작업자에게 위험한 작업환경을 조성하며, 고속 영구자석 회전기의 경우에는 조립 후 기계적인 밸런싱 처리문제 등 생산효율의 저하요인이 되어 해결해야할 문제점으로 지적되고 있다. 이러한 문제는 영구자석 회전기의 개발용량이 중대형화됨에 따라 더욱 심화될 전망이다.

이러한 문제점을 해결하는 한가지 대안으로서 착자되지 않은 자석을 회전자에 부착한 후 회전자 조립체를 전체로 착자시키면 자석을 보다 용이하게 취급할 수 있으며, 초고속 및 중대형 영구자석 회전기의 개발에서 영구자석 부착에 따른 회전체의 구조적인 문제점을 해결할 수 있다. 또한, 영구자석의 유통과정에서는 신용카드, 시계 등과 같은 물품에 영향을 주거나 심지어 파손시킬 우려가 있고, 항공기나 선박 등의 항해장비에 영향을 주기 때문에 특수한 취급을 받고 있어 추가비용

이 높아지므로, 영구자석 회전기의 대량생산 단계에서는 영구자석 회전자의 착자요크 개발과 착자시스템의 구축이 요구된다.

본 고에서는 영구자석 회전기의 착자와 관련하여 착자요크의 개발과 착자시스템 구축에 필요한 요소에 관해 다루고자 한다. 특히, 높은 외부자계의 발생에 유리하여 최근에 일반적으로 사용되는 콘덴서 방전을 이용한 착자시스템과 에너지 밀도가 높은 희토류 계열의 영구자석을 중심으로 기술하고자 한다.

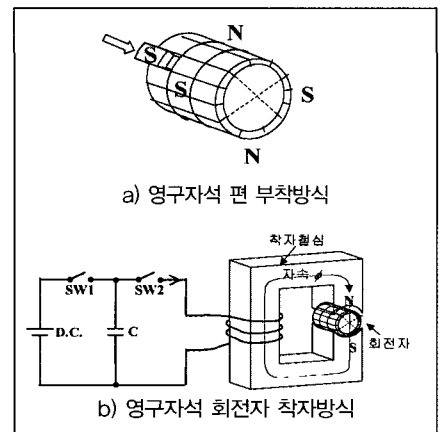


그림 1 영구자석회전자 조립방법

영구자석의 착자

영구자석 착자의 개요

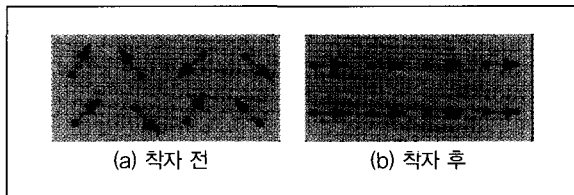
착자란, 원자자석(Atomic magnet)들을 일정한 방향으로 정렬시키는 것이다. 자성체 내의 원자자석들은 착자시키기 전에는 무질서하게 배열되어 있어 자력선이 외부로 방출되지 못하는 상태로 존재하다가 외부에서

강한 자계(착자계)를 인가하면 이 원자자석들은 외부자계와 평행하게 정렬되어 외부로 자력선을 방출할 수 있는 구조로 변하게 된다.

이와 같이 자성체의 외부에서 강한 자계를 걸어 원자자석들의 자극을 일정한 방향으로 정렬시키는 것을 착자(着磁, magnetization)라고 하는데, 착자하는 방법으로 보통 직류전류를 코일에 충분히 크게 흘려 강한 자계를 만들고 그 자계 내에 자성체를 넣어 착자시키는 방법이 있다.

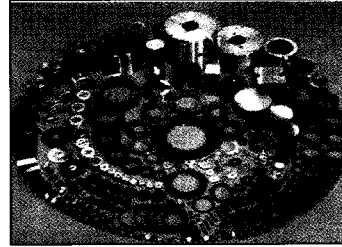
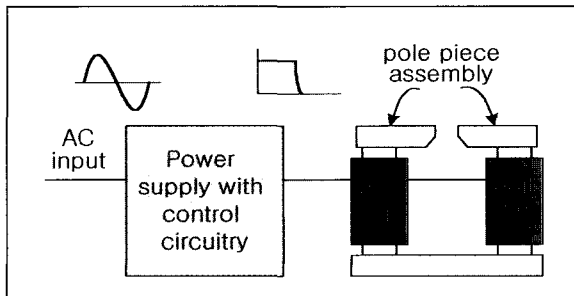
그러나 이 방법으로는 에너지 밀도가 작은 페라이트 계열이나 플라스틱 종류 등의 소형 영구자석은 착자시킬 수 있으나, 에너지 밀도가 큰 희토류 계열 및 대형 영구자석, 또는 자석이 부착된 회전자 집합체의 착자에는 적합하지 않다.

영구자석을 착자시키기 위해서는 영구자석이 갖는 보자력의 3~4배 정도의 외부자계를 인가해야 한다. 희토류계 영구자석의 자기특성에 따르면 고유의 잔류자속 밀도와 보자력을 얻기 위해서는 자석 내부에 대략 2000~3500 [kA/m]의 외부 자계가 필요하다. 따라서, 자석내부에는 자속밀도가 대략 3~5 [T](peak)까지 상승하게 되며, 착자하는 동안에는 매우 높은 자기포화 회로가 형성된다. 이와같은 큰 외부 자계를 발생시키기



(a) 착자 전

(b) 착자 후



희토류계 영구자석의 다양한 형태

위해서는 높은 전류 피크치가 요구되며, 이때의 전류 피크치는 콘덴서 방전을 이용한 착자시스템에서 임펄스 형태로 얻을 수 있다.

영구자석의 착자조건

희토류계 자성물질은 외부자계와 온도에 대해 높은 저항을 가지고, 페라이트 계열보다 높은 에너지 밀도를 나타내며, 희토류계 영구자석중 실용자석 재료로는 NdFeB와 SmCo, 계열이 가장 널리 보급되어 있다. 그림 5는 영구자석의 재질에 따른 감자특성을 나타낸다. 희토류계가 페라이트계 보다 약 3배 정도의 높은 잔류자속밀도를 가지며, 보자력 또한 높은 것을 알 수 있다. 그림 6은 여러 가지 외부 자계(magnetizing field) H_m 에 따른 SmCo, 자석류의 자화곡선을 나타낸다. 그림 6을 참고하면 SmCo, 자석류는 포화 자속밀도에 도달하기 위해 대략 $H_m \geq 1000$ [kA/m]가 필요하다.

일반적으로 NdFeB와 SmCo,과 같은 자석류에서는 요구되는 착자계의 peak값이 포화 자속밀도에 의해서 결정된다. 영구자석을 착자시키기 위해 필요한 외부 자계의 크기는 자석재질이 갖는 에너지 밀도, 보자력, 포화 자속밀도 등에 따라 달라지며, 이러한 자석재질에 따라 외부에서 인가하는 착자계의 크기를 결정해야 한다. 표 1은 영구자석 제조사의 자료를 참고하여 작성한 영구자석의 재질에 따라 요구되는 외부 착자력을 나타낸다.

착자시킬 자석류를 이방성으로 선정하면 보다 높은 잔류 자속밀도를 얻을 수 있다. 따라서, 이방성 자석류에서는 착자계의 이방성축에 평행한 성분이 표 1에 언급된 조건을 만족해야 한다.

콘덴서 방전 착자시스템

콘덴서 방전 착자기

콘덴서 방전을 이용한 착자시스템은 그림 7과 같이

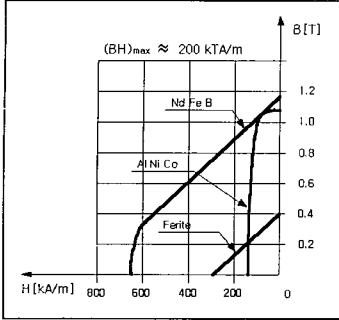


그림 5 영구자석의 감자곡선

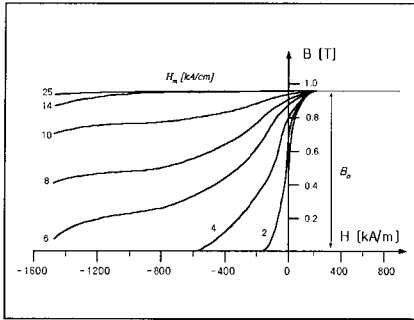


그림 6 SmCo5의 자화곡선

콘덴서 뱅크를 포함하는 급전장치, thyristor Th로 구성되는 방전 및 차단장치, 순환 다이오드 D와 착자권선으로 구성되는 착자장치로 구분할 수 있다. Thyristor Th는 콘덴서에 충전된 전기 에너지의 방전 및 차단을 수행하는 스위치로서 기계적인 스위치로 대체가 가능하다. Thyristor가 ON될 때 콘덴서에 충전된 전압의 방전이 시작되고, 착자기 권선에 전류가 인가된다. 이때 전류파형은 착자기 권선의 회로정수에 의해 감쇄진동 또는 지수함수 형태를 나타내며, 그림 7과 같이 순환다이오드를 사용하는 경우에는 지수함수 형태가 된다.

영구자석의 착자에는 “지수함수 형태의 전류 임펄스” 이외에 “정현파 전류 임펄스” 방전 회로가 이용될 수 있다. 이때 정현파의 반주기에 남아있는 에너지는 착자기 권선의 외부에 저항을 연결하여 소비시킨다. 전류의 피크치 계산이나 철심요크를 포함한 착자기 권선

표 1 영구자석의 재질에 따라 요구되는 착자력

Material	Coercivity(Hc)		Required Magnetizing Force	
	Oersteds	kA/m	Oersteds	kA/m
Alnico 2	580	46.2	2500	198.9
Alnico 5	650	51.7	3000	238.7
Alnico 8	1650	131.3	8000	636.6
Ceramic 1	1850	147.2	10000	795.8
Ceramic 5	2400	191	10000	795.8
Ceramic 8	2950	234.8	12000	954.9
SmCo	4500~	358.1~	20k~	1591.6~
	12000	954.9	100k	7957.8
NdFeB	3500~	278.5~	20k~	1591.6~
	13000	1035.5	45k	3581

의 설계에서 착자를 위해 요구되는 전류는 피크값만 고려되므로, 두 임펄스 전류의 형태에 대한 차이점은 거의 없다.

현재 제품으로 시판되는 콘덴서 방전 착자기의 용량은 대략 50[kJ]급이 최대치로서 영구자석 편 및 소형 영구자석 회전자의 착자에 이용되고 있으며, 이러한 착자전원에는 전기에너지의 충·방전 및 차단에 필요한 제어장치와 방전되는 전압 및 전류를 측정하는 계측장치가 포함되어 있다. 보다

대용량으로는 한국전기연구원에서 중대형 영구자석 회전자를 착자시키기 위해 연구개발 목적으로 구축한 착자시스템이 있다.

한국전기연구원에서 구축한 콘덴서 방전 착자시스템은 최대 방전에너지가 1,815[kJ]로서, 최대 전압 11[kV], 150[μF]의 콘덴서가 200개의 병렬구조로 되어 있다. 병렬구조이기 때문에 필요한 출력에너지에 부합되는 용량으로 재구성이 가능하다. 전기에너지의 충전 및 방전은 Thyristor를 대체하여 대용량 차단기로 구성되어 있으며, 충방전되는 전압·전류의 계측시스템과 10[T]까지 발생하는 자속밀도를 순시적으로 측정할 수 있는 Hall probe를 갖추고 있다.

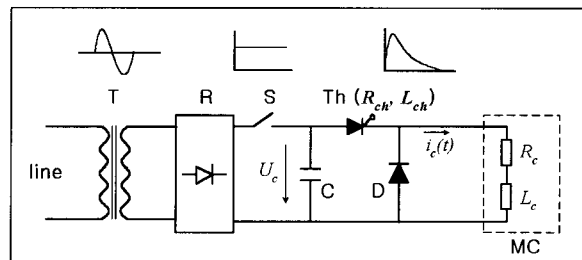


그림 7 콘덴서 방전을 이용한 착자시스템 (T : 변압기, R : 정류기, S : 급전 스위치, C : 콘덴서 뱅크, Th : thyristor, D : 순환 다이오드, MC : 착자기)

착자요크

현재 이용되는 착자요크(Magne-tizing fixture)는 영구자석 편을 착자하기 위한 구조와 영구자석 회전자를 전체로 착자하기 위한 구조로 되어 있으며, 착자요크의

표 2 콘덴서 방전 착자기의 용량 비교

	전기 연구원	Walker Scientific (독일)	Oersted Technology (미국)	동양자기 공업 (일본)
충전 전압 [kV]	11	2	0.8	1.35
커패시턴스 [mF]	30	25	100	20
출력 에너지 [kJ]	1,815	50	32	18

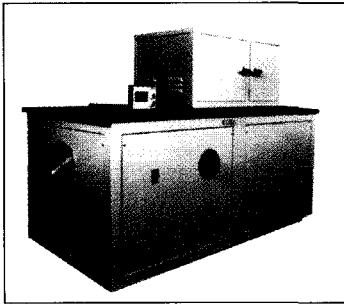


그림 8 상용 착자기

그림 8 상용 착자기를 한국전기연구원에서 개발하였다. 이 착자요크는 2극용 표면부착형 영구자석 회전자를 착자시키기 위한 용도로서 그림 13과 같은 내부구조를 가지며, 착자요크의 내경 158[mm], 길이 200[mm]로 되어 있다. 착자요크의 용량은 전자기력에 의한 구조적인 문제를 고려하여 최대 10[kV], 20[kA]를 권선에 인가할 수 있으며, 권선수를 고려하면 기자력의 최대치는 1,400[kAT]가 인가된다. 한국전기연구원은 이를 이용하여 외경 153[mm], 길이 200[mm], 영구자석의 두께 9.3[mm]의 동기전동기용 회전자를 착자하였다. 현재까지 조사된 착자용 영구자석 회전자의 크기를 비교하여 표3에 나타내었다.

중대형 영구자석 회전자를 전채로 착자시키기 위해서는 매우 높은 외부자계가 필요하며, 이에 따라 고전압, 대전류가 착자요크의 권선에 인가된다. 따라서, 착

형태는 착자하기 위한 영구자석 및 영구자석 회전자의 극수와 형태에 따라 결정된다.

최근에 대용량 착자요크를 한국전기연구원에서 개발하였다. 이 착자요크는 2극용 표면부착형 영구자석 회전자를 착자시키기 위한 용도로서 그림 13과 같은 내부구조를 가지며, 착자요크의 내경 158[mm],

길이 200[mm]로 되어 있다. 착자요크의 용량은 전자기력에 의한 구조적인 문제를 고려하여 최대 10[kV], 20[kA]를 권선에 인가할 수 있으며, 권선수를 고려하면 기자력의 최대치는 1,400[kAT]가 인가된다. 한국전기연구원은 이를 이용하여 외경 153[mm], 길이 200[mm], 영구자석의 두께 9.3[mm]의 동기전동기용 회전자를 착자하였다. 현재까지 조사된 착자용 영구자석 회전자의 크기를 비교하여 표3에 나타내었다.

중대형 영구자석 회전자를 전채로 착자시키기 위해서는 매우 높은 외부자계가 필요하며, 이에 따라 고전압, 대전류가 착자요크의 권선에 인가된다. 따라서, 착

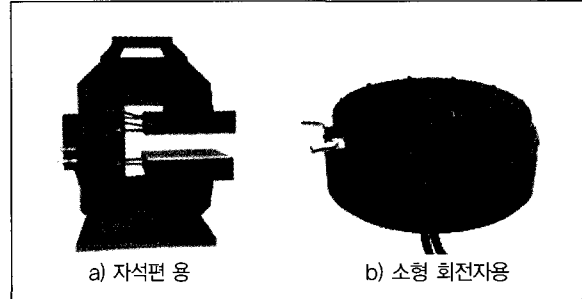


그림 11 착자요크의 형태

자요크의 설계는 고평화 자기장치의 설계로서 전기적, 기계적 측면과 열적인 측면을 고려하여 전기회로설계, 자기회로설계, 절연설계, 전자기해석, 열해석 등이 요구된다. 이와 관련하여 착자요크를 설계할 때 고려해야 하는 사항을 몇가지로 분류할 수 있다.

(1) 착자기와 결합된 착자요크는 자석을 적당한 방향으로 포화시킬 수 있도록 충분한 강도의 자계를 발생해야 한다. 이방성 자석의 경우에는 기준 착자방향에 대해 약간의 편차를 나타내는 외부 자계에 큰 문제를 갖지 않지만, 등방성 재질의 경우에는 착자방향에 매우 영향을 많이 받는다. 그리고, 자석 내부에서 자구(magnet domains)는 매우 짧은 시간(10^{-8} ~ 10^{-9} [sec] 정도)에 외부자계의 방향으로 정렬된다. 하지만, 착자요크의 철심과 자석 내부, 기타 착자요크의 구조물에서 발생하는 와전류를 고려하여 외부 자계는 상대적으로 길게 유지해야 한다.

(2) 착자요크에는 착자하는 동안 영구자석 회전자에 기계적인 스트레스가 없도록 단단히 고정할 수 있는 장치가 필요하다. 또한, 착자대상을 착자요크에 탈·착할 때 손상

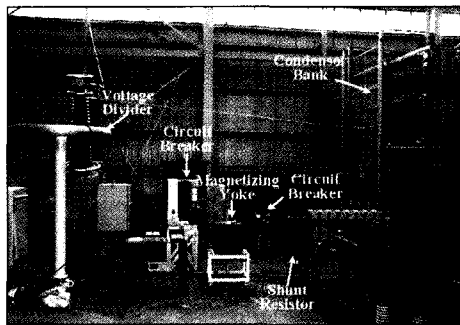


그림 9 한국전기연구원의 착자시스템 설비

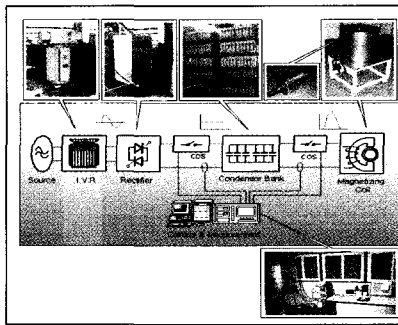


그림 10 착자시스템 구성도(한국전기연구원)

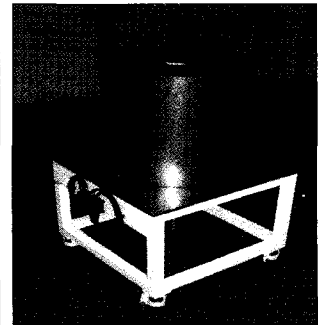


그림 12 한국전기연구원의 착자요크

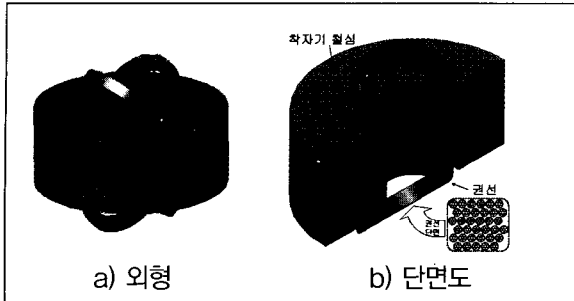


그림 13 2극용 착자요크의 내부구조

표 3 착자된 영구자석 회전자

	전기 연구원	Siemens (독일)	Capstone (캐나다)	Honeywell (미국)
회전자 외경 [mm]	153	88.6	28	61.6
회전자 길이 [mm]	200	76	100	192
영구자석 두께 [mm]	9.3	3.4	14	22.8

을 주거나 파손하지 않도록 구조를 설계해야 한다.

(3) 착자요크의 권선이 기계적인 스트레스에 충분한 강도를 갖도록 처리해야 한다. 고밀도 에너지를 갖는 자석을 착자하기 위해서는 착자과정에서 전류 피크치로 인한 매우 큰 전자기력이 발생한다. 따라서, 이를 고려하여 권선의 지지구조를 설계해야 하며, 특히 오버행은 단단히 고정할 수 있는 구조로 되어야 한다.

(4) 착자요크는 권선과 권선 사이, 권선과 철심 또는 외함사이에서 절연파괴가 발생하지 않도록 절연설계가 필요하다. 착자에 필요한 전기에너지가 일정하다면 콘덴서의 커패시턴스가 작아질 경우 충전전압이 상승한다. 또한 큰 치수의 영구자석 회전자를 착자하기 위해서는 착자요크의 권선에 고전압이 인가되기 때문에 절연상태를 고려해야 한다. 그리고, 권선의 절연은 급격한 온도상승에도 관련되며, 온도상승이 매우 클 경우에 절연파괴가 발생할 수 있다.

(5) 착자요크의 구조는 착자하는 동안에 갑자기 발생할 수 있는 위험요소로부터 시험자나 주변의 장비를 보호할 수 있도록 설계되어야 한다. 자석은 표면에 보이지 않는 내부 결함을 가질 수 있기 때문에 착자과정에

서 스트레스를 받아 조각나거나 파손되어 착자요크 외부로 튀어나올 수 있다. 또한 착자요크의 권선에서 갑작스런 열 발생으로 작업자나 영구자석에 영향을 주지 않도록 해야 하며, 착자요크 외부로 자계가 누설되어 다른 금속물체를 흡입하지 않도록 해야 한다.

이상에서 착자기를 설계할 때 고려해야 할 사항에 대해 검토하였으며, 착자요크의 자기회로설계, 그리고 권선의 저항, 인덕턴스, 콘덴서로 구성되는 착자시스템의 전기회로에 대해 해석적인 설계방법을 소개하고자 한다.

콘덴서 방전 착자기의 설계

착자 시스템의 전기회로

콘덴서를 이용한 착자 시스템의 전기회로 해석은 비교적 간단하다. 저항, 인덕턴스, 그리고 콘덴서로 구성되는 직렬회로의 과도현상 이론으로 착자 시스템의 전기회로에서 발생하는 임펄스 전류의 해석이 가능하다. 회로정수를 R, L 그리고, C 로 가정하면, 시간 t 에 대한 전류 i 의 변화는 다음의 방정식이 성립한다.

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = 0 \quad (1)$$

이 방정식의 해는 회로조건에 따라 다르지만, 대전류가 흐르도록 설계된 착자기 권선의 저항은 매우 작아야 유리하므로 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 의 조건에 의해 전류파형은 감쇄진동이 된다.

착자기의 철심은 전류 최대치의 약 10%를 초과하면 크게 포화된다. 그리고, 코일의 인덕턴스는 포화되었을 때 전류상승에 크게 변화하지 않는다. 따라서, 착자기 권선의 인덕턴스 L_c 를 단순히 상수로 고려하여 방전전류를 계산한다. 이러한 가정에 의해 그림 7의 착자 시스템에서 발생하는 착자 전류는 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 의 경우 식 (2)로 표현된다.

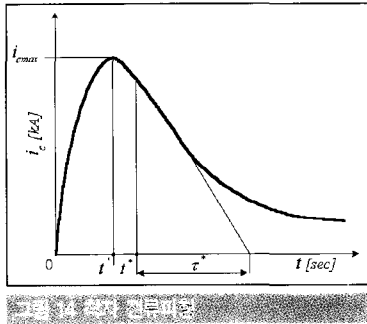
$$i_c(t) = \frac{U_c}{\omega L} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin \omega t \quad (2)$$

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

순환 다이오드를 고려하면, $0 \leq t \leq t^*$ 구간에서는 식 (2)와 동일하게 표현되며, $t^* < t < \infty$ 구간에서는

$$i_c(t) = i_c(t^*) \cdot e^{-\frac{t-t^*}{\tau}} \quad (3)$$

이다.



순환 다이오드를 고려하지 않으면, 전구간에서 착자전류의 변화는 식 (2)와 같으며, 감쇄진동을 나타낸다. 영구자석의 착자에서는 감쇄진동의

파형에서 초기 반파를 이용하며, 방전 전류의 초기 반파에 대한 최대치와 그 때의 시간은 각각 식 (4)과 식 (5)로 표현된다.

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

$$t' = \frac{\tan^{-1}(\omega \tau)}{\omega} < t^* \quad (5)$$

착자요크 권선의 회로정수

착자기의 권선은 높은 자계를 발생시키도록 설계되어야 하기 때문에 높은 기자력이 요구된다. R_c 와 R_{ch} , 그리고 L_{ch} 를 무시하면, 이론적인 최대 퍼크전류는 식 (6)으로 단순화 될 수 있다.

$$i_{c \max, th} = U_c \sqrt{\frac{C}{L_c}} \quad (6)$$

착자기 권선에서 발생하는 기자력의 최대치는 쌍극수 p , 병렬회로수 a , 극당 권선수 N_p , 퍼미언스계수 λ_c 를 고려하면 식 (7)로 정리된다.

$$i_{c \max, th} \cdot N_p = U_c \cdot \sqrt{\frac{a^2 C}{\mu_0 2p \lambda_c}} \quad (7)$$

기자력이 일정할 경우 전류와 권선수는 반비례의 관계를 갖는다. 따라서, 착자에 필요한 기자력이 결정되

면 전류의 크기와 권선수의 적절한 선정이 요구되며, 이에 따라 권선의 저항과 인덕턴스가 변화된다. 권선수가 증가하면 전류의 최대치가 발생하는 시간 t' 도 증가된다. 이때, 일부분의 전기에너지는 저항손실로 소비되어 착자에너지와 전류의 최대치를 감소시킨다.

$(i_{c \max} / i_{c \max, th})$ 의 비율은 전기시스템에서 자기시스템으로 에너지변환의 효율을 나타낸다. 표 4에는 이 비율에 대한 저항 R_c 의 영향을 나타낸 것으로 이때 R_{ch} , L_{ch} 는 무시하고, $\omega \sqrt{L_c C}$ 로 가정한다. 이에 따르면 저항이 최소화되어야 하며, 짧은 상승시간을 갖는 높은 전류 최대치를 발생하도록 주어진 슬롯 단면적에 대해 작은 권선수를 선택해야 한다.

착자기의 자기회로

착자기의 철심요크에 의해 자기경로를 결정하는 것이 가능하며, 비록 자기적인 포화는 매우 크지만 1차원적인 단순한 방법으로 자속밀도의 계산식을 유도할 수 있다. 철심요크가 없는 공심형 착자기의 자기경로는 이 방법으로 표현될 수 없으며, 그러한 경우에 수치해석 방법이 요구된다.

그림 15에 착자요크의 기본형태를 나타내었다. 착자기의 철심은 최대치 전류의 약 10%를 초과하면 크게 포화되기 때문에 적층 철심의 B-H곡선은

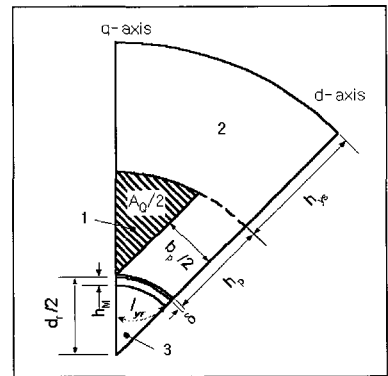


그림 15 착자요크의 형태 (1:권선, 2:착자기 철심, 3:영구자석 회로자)

표 4 착자 전류에 대한 저항의 영향

R_c/L_c	"large"	"medium"	"small"
$\omega \tau$	1	0.5	10	50	100
$\frac{i_{c \max}}{i_{c \max, th}}$	0.32	0.57	0.86	0.97	0.98

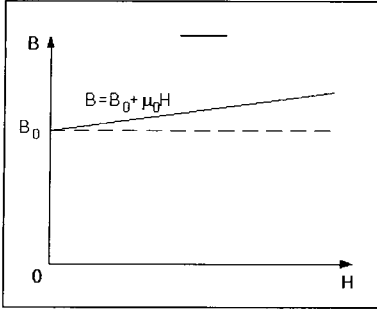


그림 16 포화를 고려한 B-H 곡선의 단순화

그림 16과 같이 B_{0Fe} (철심의 포화자속 밀도)로 단순화시킬 수 있다. 같은 방법으로 자석의 자화곡선은 B_{0m} (포화자속 밀도)로 단

순화할 수 있다.

자석 내에서 arc방향을 따라 분포된 자속밀도 B_{mr} 의 반경방향 성분과 이에 대응하는 자계의 세기 H_{mr} 은 자석의 이방성축과 평행하게 위치하며, 분포는 준-포물선을 나타낸다. 그러므로, 권선(q축)에 가까이 놓여있는 자석을 충분히 착자시키기 위해서는 자극 주변(d축)에 위치한 자석 내의 자계 최대값을 상당히 상승시켜야 한다. 따라서, 자극축에 위치한 자석 내에서 자속밀도의 임의 최대값 $\hat{B}_{mr} = \hat{B}_m$ 을 발생시키는데 필요한 기자력을 계산하기 위해 암페어의 법칙이 사용될 수 있다.

자기회로는 철심요크와 자석을 포함한 회전자를 따라 1차원 자기경로로 표현되며, 이 방법은 전기기기의 해석적인 계산에서 사용된다. 착자 요크의 높이(h_{ys})는 보통 요크내에서 자속밀도의 값이 철심의 포화자속밀도(약 2T)이하가 되도록 충분히 커야 한다. 이에 따라 요크를 자화시키기 위한 기자력은 요구되지 않으며, 자화에너지는 생략된다.

$$i_{c \max} \cdot N_p = H_{yr} l_{yr} + H_M h_M + H_\delta \delta + H_p h_p \quad (8)$$

여기서,

l_{yr} : 회전자 요크에서 자기경로 길이

h_M : 영구자석의 두께

δ : 공극

h_p : 자극 높이

$l_{Fe\sigma}, l_{Fe\tau}$: 착자철심과 회전자 길이

철심의 적층에 의해 발생하는 철심의 점적율은 높은 포화로 인해 무시될 수 있다. 따라서, 착자요크 권선의 인덕턴스 $L_{c,Fe}$ 는 자기포화를 고려하여 회전자 철심, 자석, 공극 그리고, 착자기 자극에 저장된 자기 에너지로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$L_{c,Fe} = \frac{2}{(i_{c \max})^2} (W_{m,yr} + W_{m,M} + W_{m,\delta} + W_{m,p}) \quad (9)$$

슬롯의 누설자속에 의해 저장되는 자기에너지는 $L_{c,Fe}$ 에 비해서 무시할만 하지만, 권선의 오버행에 저장되는 자기에너지는 높은 전류가 흐르므로 고려해야 한다. 전기기기에서 사용하는 권선 오버행의 누설자속($L_{c,\sigma}$) 계산방법을 여기서도 사용할 수 있다. 따라서, 착자요크의 전체 인덕턴스는 $L_c = L_{c,Fe} + L_{c,\sigma}$ 과 같다.

맺음말

중대형 및 초고속 영구자석 회전기의 개발에서 영구자석 회전자의 착자기술은 요소기술로 분류될 수 있으며, 이러한 착자기술에는 전기회로설계, 자기회로설계, 절연설계, 전자력해석, 열해석, 그리고 구조해석 등이 포함된다. 영구자석 회전기의 생산단계에서 생산단가나 작업효율을 높이기 위한 측면에서 보면 영구자석 회전을 전제로 착자하기 위한 착자시스템은 필수적이다.

日經産業新聞 특집 21세기의 신기술·신시장 조사에서 2020년 신기술의 세계 시장 200위중 초고속 전동기를 필요로 하는 기술은 14개 제품에 시장규모는 816조에 달하는 것으로 보고되어 있다. 이와 더불어 영구자석 회전을 착자시킬 착자장치의 시장규모도 커질 것으로 예상된다.

[참고 문헌]

- [1] "Method of Magnetizing Permanent Magnets", Oersted Technology Corp., 2000.
- [2] "Magnet Processing-Selecting the Right Equipment", Advancing the Science of Magnetics, Walker Scientific Inc., Rockdale St., Worcester, MA 01606
- [3] "The Analysis of a Magnetizing Fixture for a Multipole NdFeB Magnet", JK Lee, IEEE Trans. on Magnetics, vol24, p2166-2171, 1988.
- [4] "Permanent Magnets and their Application", R. Parker and R. Studders, Wiley, 1962.
- [5] "Magnet Design Manual", Hitachi metal america, LTD.
- [6] "Design of coils for magnetizing rotors with surface rare earth permanent magnets", A. Binder, ELECTRICAL ENGINEERING, 78, pp.449-454, 1995
- [7] "Selten-Erd-Dayermagnet-werkstoffe VACODYM, VACOMAX", Vacuumschmelze GmbH, 1993.
- [8] "초고속 회전기 설계이론", 한국전기연구원, 2002.