

전기기와 자성재료

홍 정 표 / 한양대학교 공과대학 자동차공학과, 교수
 허 진 / 전자부품연구원(책임연구원), 박사
 차 상 윤, 하 경 호 / 포스코 기술연구소 전기강판연구그룹

서 론

최근 산업 시스템이 기능과 요구성능이 다양해지고 에너지 절감 요구가 높아짐에 따라 구동원으로 사용하는 전기기는 고효율, 고효율 및 고속화되어 가는 추세이다.

자기에너지를 매개로 하여 전기 에너지를 기계 에너지로 상호 변환하는 전자에너지변환기인 전기기는 영구자석 및 자성 소재의 개발과 전력전자 기술 및 신뢰성 높은 해석/설계 기법을 바탕으로 하여 효율 향상, 대용량화, 소형 경량화 등에서 확실한 진전이 이루어지고 있다.

B.C.600년경에 그리스의 철학자인 탈레스(Thales)가 천연자석(loadstone)이라 불리우는 영구자석에 대하여 처음으로 언급하였으며, 이 천연자석이 마그네시아(Magnesia)라는 지방에서 발견되었기 때문에 magnes라고 불리웠다. 최초로 영구자석을 컴퍼스에 이용하기 시작한 이후 1600년경에 길버트(Gilbert)가 영구자석을 이용하여 흡인력을 키우기 위한 전자기시스템에 적용하였다.

근래에 들어와서는 외부에 별도의 전기적 입력이 없이 자계를 확보할 수 있는 영구자석의 용도가 폭

발적으로 증가하고 있다.

또한, 고성능의 전기기를 설계하기 위해서는 효율적인 자기회로 구성과 더불어 구동특성과 사용환경을 고려한 적합한 자성재료의 선택과 자기회로 설계과 관련한 요소기술이 필요하다.

본 고에서는 전자에너지변환의 기본개념과 영구자석의 동작특성 및 전기강판이 가지는 자성 및 기계적 특성을 소개하였다.

그림 1에서와 같이 자기에너지를 매개로 하여 전기 에너지를 기계 에너지로 변환(전동기)하거나 기계 에너지를 전기에너지로 변환(발전기)하는 기계와 자기에너지를 매개로 하여 전기에너지의 형태 변환(변압기)을 하는 기구로 나누어지며 이를 일괄하여

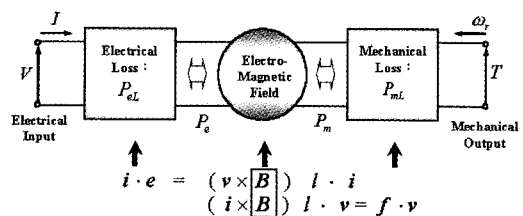


그림1 전기-기계 시스템

전자에너지 변환기기 또는 전기기기라고 한다. 이러한 전기기기는 에너지 변환기기로서의 측면뿐만 아니라 에너지 제어기기의 측면도 강조되어 서보기기라는 새로운 단어를 탄생시키게 되었다.

전기기기의 역사는 100여년에 이르러 사용 재료, 설계 및 해석, 제어면에서도 괄목할 만한 발전을 이루었다. 최근, 고에너지밀도의 회로류자석의 개발은 전기기기의 고효율, 단위체적당 출력, 동특성 등

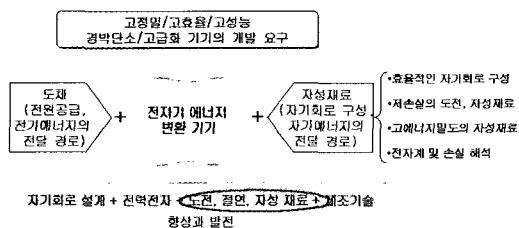


그림2 전기기기의 구성요소

을 개선시켜 그 적용 범위를 넓혔으며 용도에 부합하는 새로운 구조의 특수 기기 출현을 앞당겼다.

이러한 전기기기의 동작 원리, 특성해석 및 설계 등을 수행하기 위하여 전자기의 기초이론, 자기회로의 기초 이론과 영구자석의 종류 및 그 동작 특성과 전기장판에 대하여 소개하였다.

전자기 기초 이론

맥스웰 방정식

맥스웰(Maxwell) 방정식은 전자기 현상을 규정하는 기본식으로서 미분형으로 나타내면 다음과 같다[1].

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

여기서, \vec{H} 는 자계의 세기[A/m], \vec{B} 는 자속밀도[T], \vec{E} 는 전기계의 세기[V/m], \vec{D} 는 전속밀도[C/m²], \vec{J} 는 전류밀도[A/m²], ρ_v 는 자유전하의 체적밀도[C/m³]이다.

위의 맥스웰 방정식으로부터 전자기적 현상의 지배방정식을 유도하게 된다.

플레밍의 법칙

플레밍의 법칙에는 기전력에 대한 오른손 법칙과 전자기력에 관한 왼손법칙이 있다.

플레밍의 오른손 법칙

그림 3과 같이 자속밀도 B[T]가 균일한 자계 중에 길이 l인 도체가 자계에 수직인 방향으로 v[m/s]의 속도로 이동하고 있을 때 도체에 기전력이 유도되며 이 때 유도되는 기전력(electromotive force, EMF)

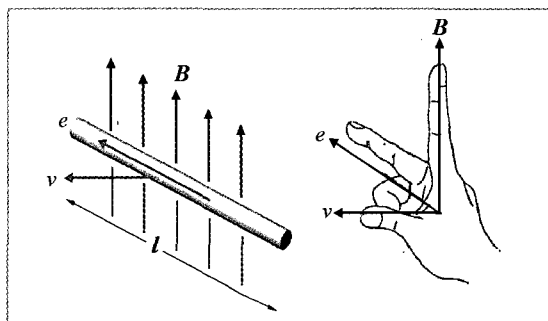


그림 3 플레밍의 오른손 법칙

[V]는 다음과 같다.

$$e = (v \times B)l \quad (5)$$

플레밍의 왼손 법칙

그림 4에서 자속밀도 B[T]가 균일한 자계중에 길이 l인 도체에 전류 i가 흐를 때 이 도체에 작용하는 전자기력 f[N]은 다음과 같다. 이 플레밍의 왼손 법칙

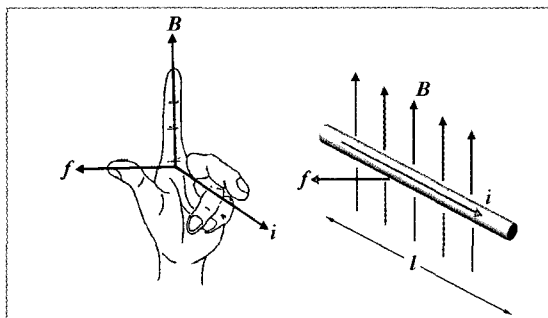


그림 4 플레밍의 왼손 법칙

은 전동기의 동작원리를 설명해주는 법칙이 된다.

$$f = (i \times B)l \quad (6)$$

전자유도현상

그림 5(a)와 같이 영구자석을 움직이거나 그림 5(b)와 같이 2차 코일의 전기회로를 스위칭하여 코일에 쇠교하는 자속을 변화시키면 1차코일에 전압이 발생하게 된다. 이때 발생하는 전압은 쇠교자속의 시간변화에 비례하게되며, 기전력이 유도되는 현상을 전자유도현상이라고 한다.

이 실험으로부터 파라데이는 하나의 회로에 전자유도에 의해서 생기는 기전력은 이 회로에 쇠교하는

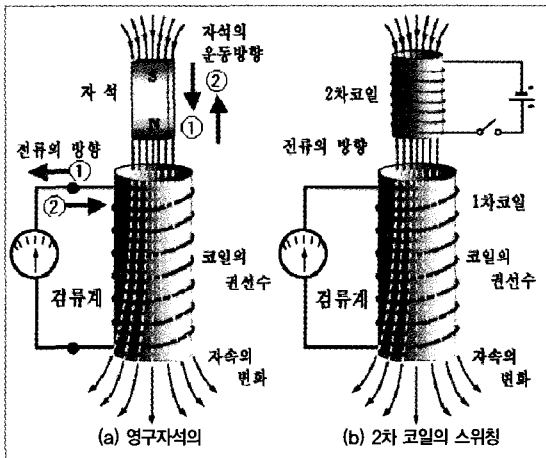


그림 5 전자유도현상

자속수의 변화에 비례한다는 결론을 내렸으며 이것을 파라데이 법칙이라고 한다.

파라데이에 의한 전자유도현상의 발견에 이어 렌츠(Lenz)는 자유운동에 의해 생기는 유도기전력은 자속의 변화를 발행하는 방향으로 일어난다는 렌츠의 법칙을 분명히 했다[1].

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

**자기회로기초 이론
자화곡선**

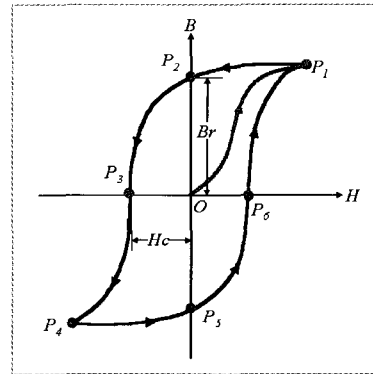


그림 6 강자성체의 자화곡선

자화되어 있지 않은 철과 같은 강자성체에 코일을 감아서 전류를 흘려 자화시키면 자계의 세기 H는 코일에 흐르는 전류에 비례해서 증가하며 그림 6에서와 같이 자속밀도 B는 곡선 OP₁을 따라서 P₁에 도달한다.

강자성체 내의 자속밀도 B는 어느 지점까지는 자계의 세기 H에 비례해서 증가하나, 입력이 증가하여 H가 커지면 H와 B의 관계를 나타내는 자화곡선은 그림 6에서처럼 포화된다. 이것을 자기 포화 곡선(magnetic saturation curve)이라 한다[2].

이와 같이 강자성체의 자화는, B, H 간에 비례성이 없을 뿐만 아니라 히스테리시스(hysteresis) 현상을 나타낸다. 즉, H가 감소하면, 자속밀도 B는 OP₁을 따르지 않고 P₁P₂의 궤적을 따라 변화하며, 외부에서 가해주는 자계를 제거하여도 자속밀도는 B_r이 되며 이것은 잔류 자기(residual magnetism)라 한다. 또한 초기 자화 방향과 반대로 자화하면 자속밀도는 감소하고, H의 크기가 H_c가 되면 자속밀도가 0이 되며 이때의 H_c를 보자력(coercive force)이라 한다. 이와 같이 자계의 세기를 증감해서 나타나는 한 사이클의 B-H곡선을 히스테리시스 곡선(hysteresis loop)이라 한다.

그림 7은 자기재료의 히스테리시스 곡선의 예인데, 보자력 H_c와 잔류자속밀도 B_r이 큰 재질은 영구자석에 적합하고, 보자력 H_c가 작은 것은 전자석과 전자기기의 철심 재료에 적합하다.

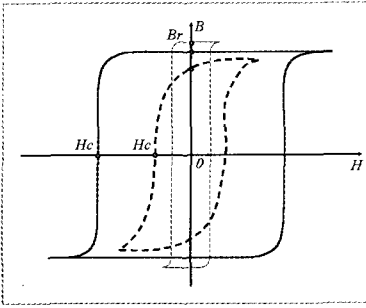


그림 7 강자성체의 히스테리시스 곡선

자기회로

자성체를 이용한 전기기기에서, 자성체 각 부분의 자속을 구하는 방법으로 전기회로에서 전류를 구하는 방법과 유사하게 회로를 구성하여 구하게 되고 이 회로를 자기회로 (magnetic circuit)라고 한다.

그림 8과 같이 단면적 $A[m^2]$, 자로의 길이 $l[m]$, 권선수 N 인 권선에 전류 I 가 흐르고 있을 때 자성체 내의 자계의 세기 $H[A/m]$ 는 식 (8)과 같다.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI = Hl \quad (8)$$

또한, 자계의 세기 H 와 자속밀도 $B[T]$ 의 관계는 식 (9)와 같다.

$$B = \mu H \quad (9)$$

따라서, 솔레노이드 철심의 단면적 A 에 대하여 자속밀도가 균일하다고 가정하면 자속은 식 (10)과 같이 주어진다.

$$\Phi = BS = \mu HA = \frac{NI}{l} \mu A \quad (10)$$

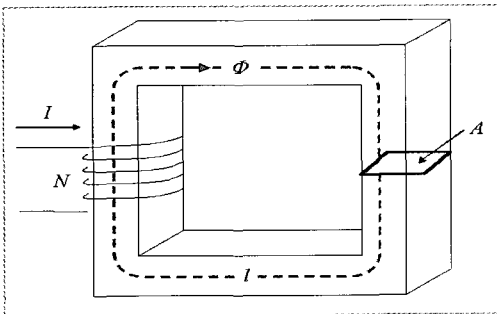


그림 8 강자성 철심

전기회로와 자기회로의 유사성

식 (10)의 NI 를 기자력(magnetomotive force, MMF) $F[A]$, $l/\mu A$ 를 자기저항(reluctance) $R_m[At/Wb]$ 이라 놓으면 식 (10)은 식 (11)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Phi = \frac{NI}{R_m} = \frac{F}{R_m} \quad (11)$$

이 식에서 자기저항 또는 릴럭턴스 R_m 은 기자력과 전체 자속의 비를 나타낸다.

식 (11)은 전기회로에서 전류 I 를 나타내는 식 (12)의 옴(Ohm) 법칙과 유사하므로 자기회로의 옴 법칙 또는 기자력 평형의 법칙이라고 한다.

$$I = \frac{V}{R} \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)에서 Φ 는 자기회로에서 자속(magnetic flux) 또는 자속, I 는 전기회로에서 전류(electric flux) 또는 전류를 나타낸다.

또한, 전기회로에 있어서 도전율(electric conductivity)이 인 선형균일등방성재료의 단면적이 A 이고 길이가 l 일 때 전기저항은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{l}{\sigma A} \quad (13)$$

이와 유사하게 자기회로에 있어서도 투자율(magnetic conductivity)이 인 선형균일등방성 자성체가 단면적이 A , 길이 l 을 가진다면 전체 자기저항은 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (14)$$

이와 같이 두 회로의 유사성을 이용하여 자기회로를 전기회로와 같은 방법으로 취급할 수 있다.

표 1 자기회로와 전기회로의 유사성

전기회로			자기회로		
명칭	기호	단위	명칭	기호	단위
기전력	E	V	기자력	F	A(AT)
전류	I	A	자속	Φ	Wb
전류밀도	J	A/m ²	자속밀도	B	T
전기저항	R	Ω	자기저항	R_m	A/Wb
도전율	σ	S/m	투자율	μ	H/m
Ohm의 법칙	$I = \frac{E}{R}$		Ohm의 법칙	$\Phi = \frac{F}{R_m}$	

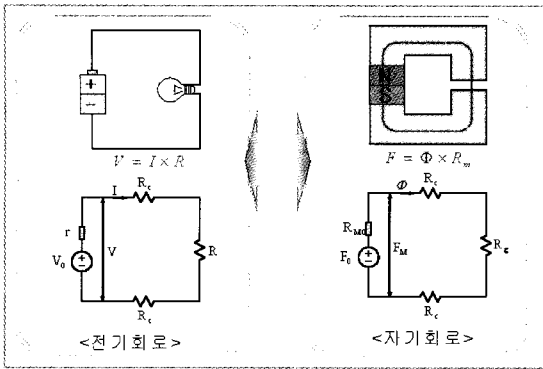


그림 9 전기회로와 자기회로

전기회로와 자기회로의 차이점

전기도전을 σ 는 선형으로 취급하여도 큰 무리가 없으나, 투자율 μ 는 강자성체의 포화현상으로 인하여 비선형성을 갖는다.

전기회로에서는 공기와 전도체 또는 저항체의 도전율의 비가 아주 크기 때문에 외연전속(fringing flux)이나 누설전속(leakage flux)가 크게 문제가 되지 않는다. 그러나, 자기회로에서는 철심의 비투자

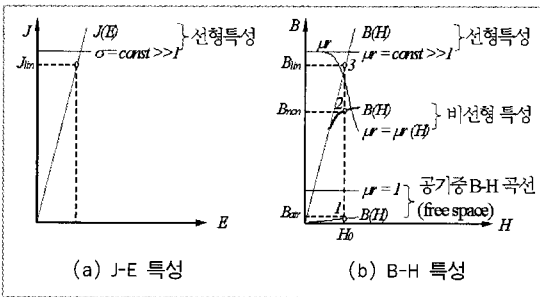


그림 10 전자기 회로에서 계의 세기와 밀도와의 관계

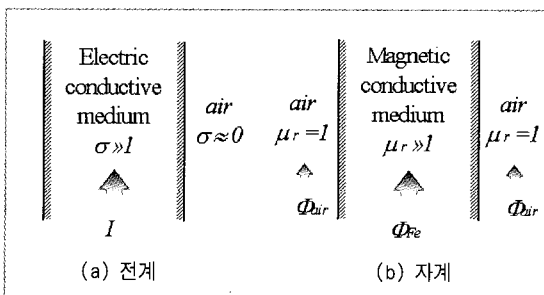


그림 11 전자기회로에서 전류와 자속의 비교

율이 공기에 비하여 약 10^3 정도로 전기회로에서 양도체와 절연체의 도전율 비인 10^{15} 에 비하면 매우 작으므로 자기회로에서 자성체를 통과하는 주자속 외에 누설자속이 존재한다.

자기회로에 저장되는 에너지

전기기로서 중요한 역할을 하는 발전기와 전동기는 공극에 저장된 자기에너지를 매개로 하여 전기·기계에너지의 변환이 이루어진다.

그림 12와 같은 공극이 있는 철심에 코일을 감은 리액터의 단자에 전압 v 를 인가한 경우, 전기입력은 코일의 저항을 무시한 경우 자기에너지로서 리액터 내에 저장된다.

코일에 흐르는 전류를 i , 총쇄교자속을 λ 라고 하면, 미소시간 동안 전원으로로부터 공급된 에너지 dW_e 는 식 (15)와 같이 된다.

$$dW_e = i v dt = i \frac{d\lambda}{dt} dt = i d\lambda \quad (15)$$

손실을 무시하면 전원으로로부터 공급된 전기에너지는 자기에너지로 저장되므로 자기에너지의 증가분을 dW_m 라 하면, 리액터에 저장된 총 자기에너지 W_m 는 식 (16)과 같이 된다.

$$W_m = \int dW_m = \int dW_e = \int_0^\lambda i d\lambda \quad (16)$$

식 (16)으로부터 자기저장에너지(magnetic stored energy)는 그림 13에서 면적 $oabo$ 가 된다.

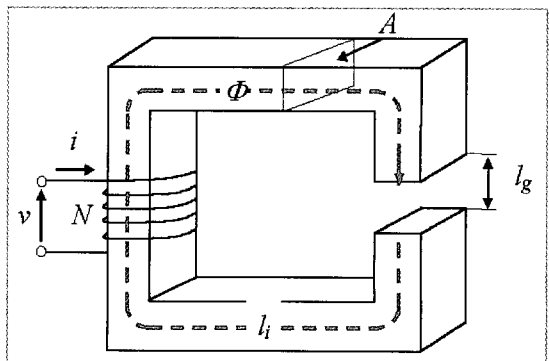


그림 12 공극을 갖는 리액터

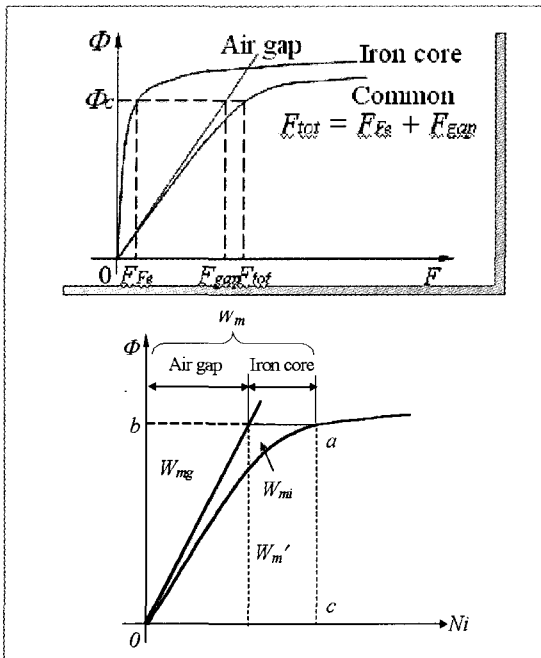


그림 13 자기저장에너지

또한, 그림에서 면적 $oabo$ 를 자기수반에너지 W_m' 라고 하며 자기회로의 성질이 비선형인 경우는 W_m 과 W_m' 는 다른 값이 된다.

그림(13)에서 W_{mg} 는 리액터의 공극에 저장되는 자기에너지이며, W_{mi} 는 철심에 저장되는 에너지이다.

여기서, l_g 가 l_i 에 비해 작다고 하더라도 철심의 투자율이 매우 큰 값을 가지기 때문에 자기에너지의 대부분이 공극에 저장됨을 알 수 있다.

영구자석의 종류 및 동작특성

영구자석의 히스테레시스 루프 중에서 2사분면을 감자특성곡선이라 부르며, 각종 영구자석의 특성이 이 감자특성곡선으로 판단하게 된다.

● 포화자속밀도(B_{sat})

: 자석 내부의 모든 자기모멘트가 외부에서 인가한 자계의 방향으로 정렬되었을 때의 자속밀도.

● 잔류자속밀도(B_r)

: 자석 내부의 자계강도가 '0'이 되었을 때의 자

속밀도.

잔류자속밀도가 높으면 외부 자기회로에 더 높은 공극자속밀도를 만들 수 있다.

● 보자력(H_c)

: 자석 내부의 자속밀도가 '0'이 되었을 때의 감자계의 세기.

보자력이 큰 영구자석은 외부의 감자계에 영향을 덜 받는다.

● 리코일 투자율(μ_{rec})

: 감자특성곡선 상의 자속밀도와 자계강도의 비.

$$\mu_{rec} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

● 최대 에너지 적(BH_{max})

: 영구자석의 단위체적당 자기에너지.

영구자석의 종류

근래에 들어 각종 에너지변환기에서 이용하고 있는 영구자석들은 대략 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 세라믹(Ferrite) 영구자석
 - : 바리움 페라이트 $BaO \times 6Fe_2O_3$
 - 스트론튬 페라이트 $SrO \times 6Fe_2O_3$
- 희토류(Rare-earth) 영구자석
 - : 사마리움-코발트 $SmCo$
 - 네오디움 $NdFeB$
- 알리코(Alnico) 영구자석
- 응용자석 : 고무자석, 플라스틱 자석

1950년대에 개발된 페라이트 영구자석은 알리코 영구자석에 비해 높은 보자력을 가지고 있지만 잔류자속밀도가 낮다. 다른 영구자석에 비해 가격이 저렴하며 높은 전기저항을 갖고 있기 때문에 영구자석 내에서의 와전류손이 적다는 장점을 갖고 있다. 희토류 영구자석 중 SmCo는 잔류자속밀도, 보자력 및 에너지적이 높고 선형적인 감자곡선과 낮은 온도계수를 가진다는 장점이 있다. NdFeB는 SmCo보다 높은 잔류자속밀도와 보자력 특성을 가지는 장점이 있는 반면 온도 조건에 취약하다는 단점을 가진다.

알리코 영구자석의 주요 장점은 잔류자속밀도가

높고 온도계수가 낮다는 것이다. 그러나, 보자력이 매우 낮고 감자곡선은 비선형성을 나타내어 착자 및 감자가 쉽게 일어나게 된다.

각 영구자석의 대표적인 감자특성을 그림 14에 나타내었다.

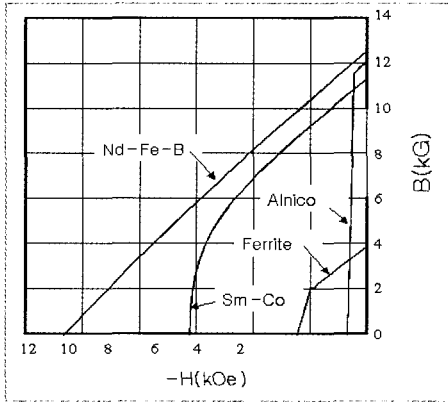


그림 14 각종 영구자석의 감자특성곡선

영구자석의 온도 특성

영구자석의 잔류자속밀도 및 보자력은 외부온도에 따라 변하게 되며 식 (17), (18)에 나타내었으며 자석의 종류에 따라 보자력과 잔류자속밀도에 대한 온도 계수를 표 2에 나타내었다.

$$B_r(t) = B_r[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (17)$$

$$H_r(t) = H_r[1 + \beta(t - t_0)] \quad (18)$$

여기서, B_r 및 H_r 은 상온 20[°C]에서의 값을 나타낸다.

표 2 각종 영구자석의 온도계수

종류	잔류자속 밀도 온도 계수 α [%/°C]	보자력 온도계수 β [%/°C]	Curie 온도[°C]	최대동작 온도[°C]	비고
NdFeB	-0.13	-0.6	310	140	고온불가역
SmCo	-0.045	-0.25	720	250	고온불가역
Alnico	-0.02	+0.01	830	500	저온불가역
Ferrite	-0.20	+0.40	450	300	저온불가역

영구자석의 동작점

영구자석을 포함하는 자기회로가 구성되면 영구자석을 고려한 퍼미언스는 0과 무한대 사이의 값을

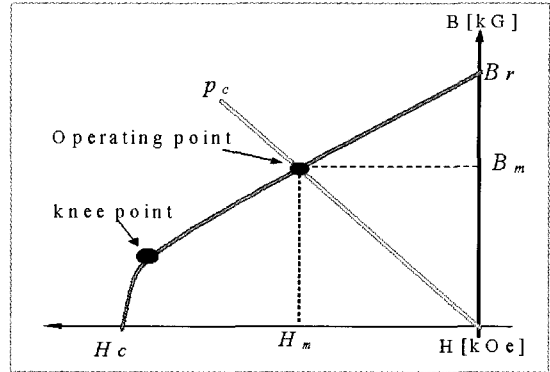


그림 15 영구자석의 동작점

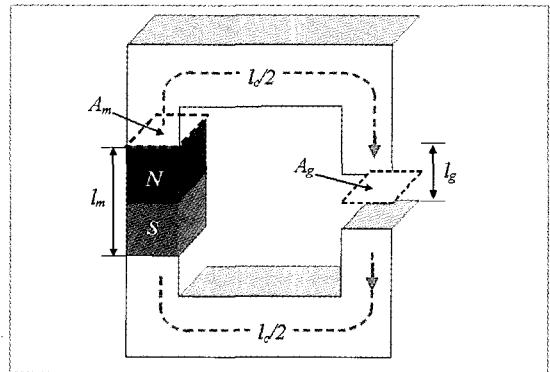


그림 16 자기회로

가지며 그 동작점은 그림 15에서와 같이 2사분면의 감자곡선 상에 놓이게 된다.

해석상의 편의를 위하여 자기회로의 자속밀도 및 자계가 균일하고, 그 단면적 및 길이도 일정하며 자성체의 자기특성도 선형, 즉 투자율이 일정하다고 가정하자.

자기회로에서 암페어(Ampere)의 주회 법칙으로부터 자로에서의 기자력은 식(19)와 같으며 식(20)과 같이 정의되는 기자력 손실 계수 f 를 고려하여 식 (21)과 같이 쓸 수 있다.

$$H_m l_m + H_c l_c + H_g l_g = 0 \quad (19)$$

$$H_m l_m / H_g l_g = f \quad (20)$$

$$H_m = -f \frac{l_g}{l_m} H_g \quad (21)$$

한편, 영구자석을 가지는 자기회로에서 자속의 연

속조건으로부터 식(22)를 유도 할 수 있으며 식(23)의 자속의 누설 계수 σ_l 을 고려하여 식 (24)와 같이 표현 할 수 있다.

$$B_m A_m = B_g A_g + \Phi_l \quad (22)$$

$$B_m A_m / B_g A_g = \sigma_l \quad (23)$$

$$B_m = \sigma_l \frac{A_g}{A_m} H_g \quad (24)$$

이상의 식 (21)과 (24)로부터 영구자석의 동작점을 결정하기 위한 퍼미언스계수를 구하면 식 (25)와 같다.

$$\frac{B_m}{H_m} = - \frac{\sigma_l}{f} \frac{A_g}{A_m} \frac{l_m}{l_g} = p_c \quad (25)$$

식(25)와 영구자석의 감자특성곡선의 교차점이 주어진 자기회로 상태에서 영구자석의 동작점이 된다. 즉, 감자특성곡선과 처미언스계수의 교차점 B_m 이 영구자석 내부의 자속밀도가 된다. 한편, 동작점 자속 밀도가 구해지면 식(24)를 이용하여 공극자속밀도를 계산할 수 있다. 그러나 실제 전기기기에서는 자기 포화현상을 고려한 기자력손실계수나 누설계수의 산정이 어렵기 때문에 유한요소해석과 같은 수치해석적 기법을 이용하게 된다.

한편, 영구자석의 동작점은 동일한 퍼미언스계수 값을 갖는다 하더라도 외부에서 인가되는 반작용자계나 동작온도에 따라 동작점이 달라지게 된다.

영구자석의 동작점 변화

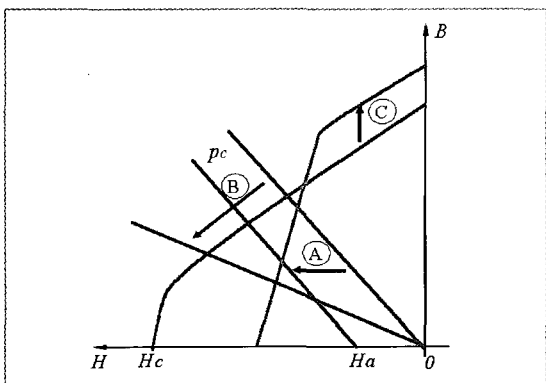


그림 17 영구자석의 동작점 변화

외부자계의 인가

외부 반작용 기자력에 의한 증자 또는 감자 자계가 인가되면 영구자석의 동작점은 그림 17의 A와 같이 경로를 따른다.

즉, 영구자석의 퍼미언스 계수는 동일하게 유지되면서 외부자계의 증자 또는 감자에 따라 좌우로 평행 이동하게 된다. 그리고, 이 외부자계의 영향으로 인하여 감자곡선의 굴곡점 (knee point)를 지나게 되면 영구자석 원래의 동작점으로 회복되지 못하는 불가역 감자가 발생하게 된다.

외부의 전기회로에서 영구자석에 가해지는 반작용 기자력을 고려하면 영구자석 동작점은 식(27)과 같이 결정된다. 증자계가 작용할 때에는 식(27)의 H_a 의 부호가 반대가 된다.

$$H_a = \frac{N \cdot I_a}{l_m} [A/m] \Rightarrow \frac{4\pi}{10^3} H_a [Oe] \quad (26)$$

$$B_m = \frac{p_c}{p_c + \mu_{rec}} \cdot (B_r - \mu_{rec} H_a) \quad (27)$$

$$H_m = -B_m / p_c - H_a$$

퍼미언스 계수의 변화

영구자석 전동기의 회전자를 고정자와 분리한 경우와 같이 어떤 원인에 의해 퍼미언스계수가 변화하면 그림 17의 B경로를 따라 동작점이 변화한다.

동작온도의 변화

세라믹(Ferrite)계열 영구자석의 경우 잔류자속밀도의 온도계수가 -0.2%/C이며, 보자력에 대한 온도계수가 +0.4%/C이다. 따라서, 주변온도가 120°C가 된다면, 잔류자속밀도는 상온(20°C)에 비해 잔류자속밀도가 20% 상승하게 되며, 보자력은 반대로 40% 감소하기 때문에 그림 17의 C와 같이 감자특성곡선이 변하게 되어 동일한 자기회로 상태에서도 동작점이 변하게 된다.

영구자석의 불가역감자

그림 18에서 온도변화에 의한 영구자석 감자특성

곡선변화를 대상으로 불가역감자가 발생하는 과정을 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

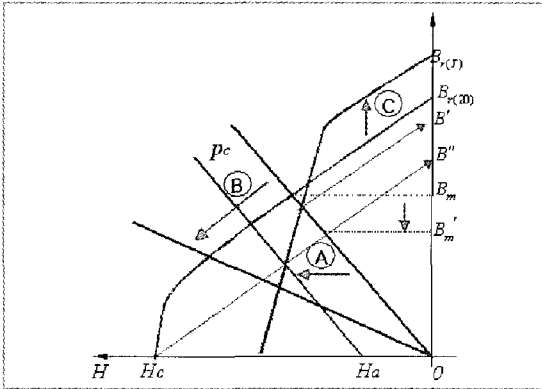


그림 18 영구자석의 불가역감자

상온상태(20℃)에서 주변온도가(T℃)로 변화하여 잔류자속밀도가 $B_{r(20)}$ 에서 $B_{r(T)}$ 로 감자특성이 변하면 페리언스계수가 동일하더라도 영구자석의 동작점이 이미 굴곡점을 지나치게 되면 불가역감자가 발생하게 된다. 이 경우, T℃상태의 감자특성곡선과 페리언스계수가 교차하는 지점으로부터 리코일라인과 평행하게 직선을 그어 B' 을 결정할 수 있으며, 이제 온도가 상온으로 회복되면 잔류자속밀도는 $B_{r(20)}$ 에서 B''으로 변하여 불가역 감자가 발생한다.

이상의 변화를 식으로 나타내면 식(28)과 같다.

$$\frac{B'}{B_{r(T)}} = \frac{B''}{B_{r(20)}} \quad (28)$$

전기강판의 종류 및 특성

전기기기는 전원을 공급하는 도체와 도체를 취부할 수 있는 기구부의 구조로 구성되고, 각 구성 요소는 전기에너지와 자기에너지를 전달하는 경로의 역할을 하게 된다. 후자의 자기에너지 변환 능력은 효율적인 자기회로를 구성뿐만 아니라 자료를 구성하는 소재에 의해서 결정되므로 자성재료의 자기적 특성은 기기의 성능에 중요한 영향을 미친다.

따라서, 손실을 최소화할 수 있는 효율적인 자기회로 구성과 더불어 자기회로의 포화상태, 손실분

포, 구동특성, 사용환경, 가공성을 고려한 자성재료의 선택이 중요하다. 최근에는 이러한 자기적 기계적 요구특성을 만족할 수 있는 저철손고자속, 고장력박형 및 고가공성 등의 다양한 성능을 가지는 고품질 전기강판이 개발되고 있다 [4]. 또한, 소재의 성능을 극대화하여 사용하기 위해서는 전기강판을 이용한 제품의 제조 공정중 각 단계에서 발생하는 소재의 자성열화를 최소화하고 가공성을 향상시킬 수 있는 요소 기술이 필요하다. 그러나, 국내 전기기기 제조업체 및 설계자들은 소재에 관한 제반 정보의 이해와 소재와 연계한 제품 적용 요소기술이 부족한 실정이다.

본 고에서는 전기강판이 가지는 전자기 및 기계적 특성, 제조 공정과 에너지 변환과정에서 발생하는 철손 증가요인을 기술하였으며, 그리고 상이한 자성 특성을 가진 여러 강종에 대한 전동기의 구동특성과 효율분포에 대하여 설명하였다. 전기강판은 전동기, 변압기와 같은 에너지변환기기에서 중요한 기능 재료로써, 전기강판이 최적의 상태에서 효율적으로 사용될 수 있도록 전기강판 일반에 관한 내용을 주로 다루었다.

전기강판의 분류

전기강판은 크게 방향성전기강판(Grain Oriented)과 무방향성전기강판(Non Oriented)으로 분류할 수 있다. 방향성 전기강판은 철에 Si 3~3.3%를 첨가하여 결정방향을 압연방향으로 일정하게 배열시킴으로써 압연방향으로 우수한 자기적 특성을 가지도록 한 제품이며, 변압기나 리액터와 같은 정지기에 사용된다. 한편, 무방향성 전기강판은 결정방향이 모든 방향으로 고르게 분포 되어 자성이 균일하도록 만든 제품으로 회전기에 주로 적용된다.

자기이력곡선과 철손

철손은 전기강판의 특성을 나타내는 가장 중요한 척도로서 철심의 자화 과정에서 발생하는 에너지 손실로 이력손실(Hysteresis loss)과 와전류손실(Eddy current loss)로 구성된다. 전자는 결정방위, 강판의

기술 동향

순도, 내부 응력 등에 의해 좌우되고, 후자는 전기비저항, 판의 두께, 판의 장력, 자구의 크기 등에 좌우된다.

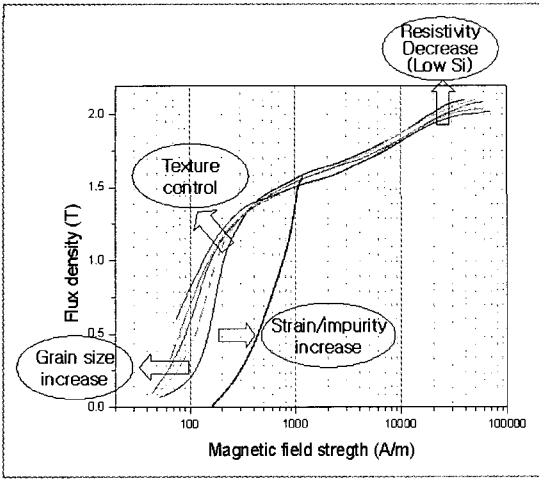


그림 19 자화곡선과 주요한 재료인자

한편, 와전류손실에는 자구의 형상에 따른 이상 와전류손실(Anomalous loss)이 최근 자구이론이나 자구관찰의 발전으로 밝혀지고 있다. 특히, 방향성 전기강판에서는 전체 철손의 50% 정도를 차지하고 있다. 철손의 각 항목은 수식 (29)와 같이 표현할 수 있으며, 주파수 사이클당 철손을 그림 20에 나타내었다 [8, 9]. 표 3은 철손에 미치는 주요인자와 저감 방법을 요약한 것이다.

$$W = W_h + W_e + W_a = k_h B^n f + k_e B^2 f^2 + k_a B^{1.5} f^{1.5} \quad (29)$$

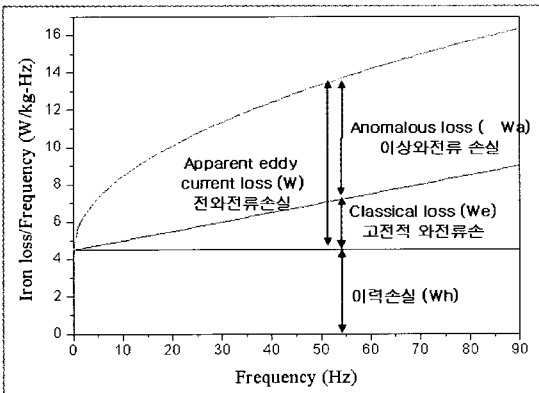


그림 20 철손의 구성과 주파수 한 주기당 손실

표 3 철손 제어인자와 방법

철손 성분	지배인자	저감방법
이력손실	불순물 결정립계 표면조도	고순도화 결정방위집적도 개선 응력감소
와전류손실	전기저항 판의 두께 판의 장력 자구의 크기	성분조성(Si첨가) 박물화 표면피막 레이저조사

자성과 기계적 특성

전기강판의 성분에서 Si와 Al은 비저항을 증가시킴으로써 철손을 감소시키는 역할을 하며, Mn, Cu도 비저항을 증가시키는 원소이며 필요에 따라 첨가되기도 한다. Si의 함유량이 증가할수록 철손은 감소하게 되며 철손이 낮을수록 고급제품으로 분류하고 있으나, 그림 21과 같이 철손이 낮아지면 자속밀도가 낮아지는 문제점이 있다. 또한 그림 22에서 Si의 증가는 기계적 강도를 증가시켜 타발을 어렵게 한다

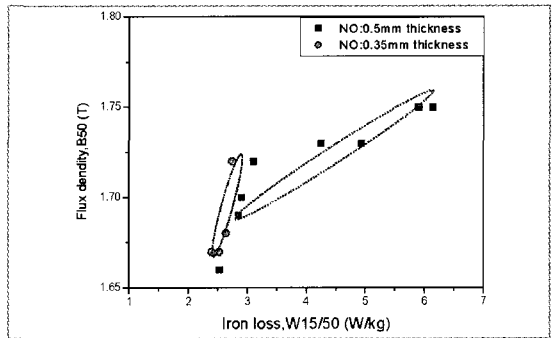


그림 21 자속밀도와 철손과의 관계(무방향성 전기강판)

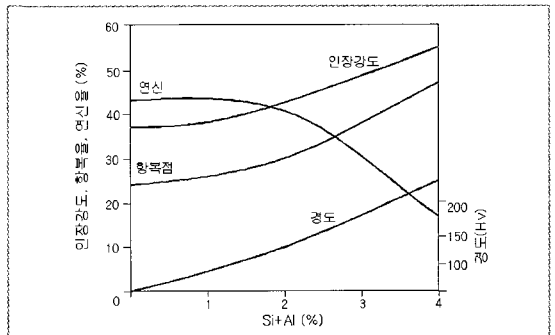


그림 22 Si함유량에 따른 기계적 특성

특성, 가공성을 고려한 자성재료의 선택이 중요하며, 최근에는 저철손고자속, 고장력박형, 고토크 및 고가공 등의 성능을 가지는 다양한 특성을 가지는 전기강판이 개발되고 있다.

R방향과 C방향의 자성차이

무방향성 전기강판은 이상적으로 모든 방향으로 자성이 균일한 등방성 재질이 좋으나 실제로는 자성 편차를 가진다. 그림 23과 같이 압연방향(R)은 압연 직각 방향(C)보다 자속밀도가 높고 철손은 낮다.

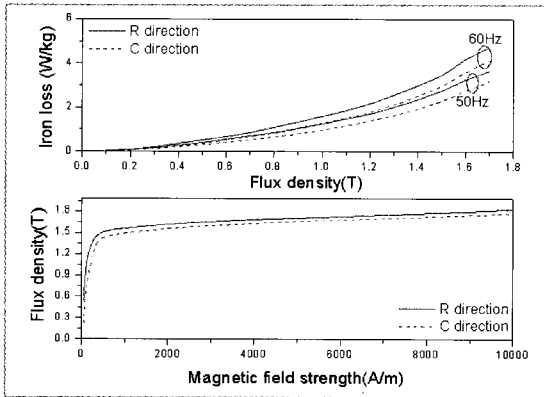


그림 23 자기이력곡선과 철손의 R/C 자성편차

그림 24는 전기강판의 등급별 R/C 자성차이를 비교한 것으로 고급강종일수록 철손과 자속밀도의 자성차이가 더욱 커진다.

그림 25는 압연방향을 기준으로 각도 변경에 따른

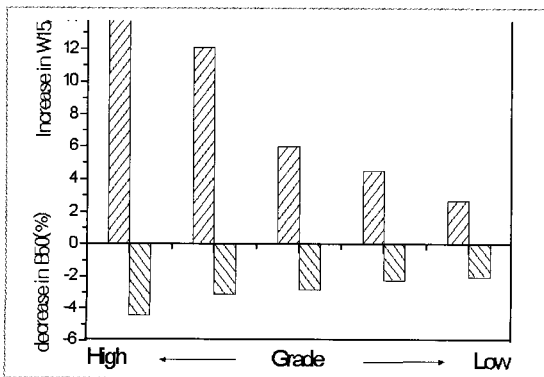


그림 24 강종별 R/C 자성편차

각 위치에서 철손의 변화를 측정한 것으로, 철손은 위치의 함수로 비선형적 특성을 가지고 있으며 28°에서 철손이 가장 크다. 압연방향(90°)과 압연직각 방향(0°)에서 두 철손의 평균은 2.98[W/kg]이며, 0~90°사이의 평균 철손 3.13[W/kg]와는 큰 차이를 가진다.

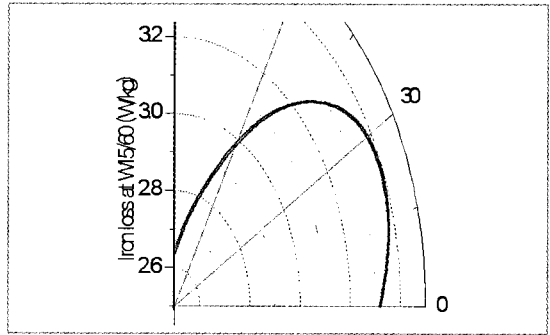


그림 25 전기강판 위치별 철손의 변화

가공에 의한 자성특성 변화

전기강판에서 전단이나 굽힘등에 의한 소성변형은 자성을 열화시킨다. 그림 26에서 전단에 의한 변형량 증가로 철손이 크게 열화되고 열화율은 전단방향에 따라 다른데 이는 강판의 집합조직에 기인하며 고급강종 일수록 자성의 열화가 더 심하다. 전기강판 전단으로 열화된 자성은 응력제거 열처리(Stress Relief Annealing)를 통하여 자성을 향상시킬 수 있으며, 특히 고주파에서 자성 향상이 크다.

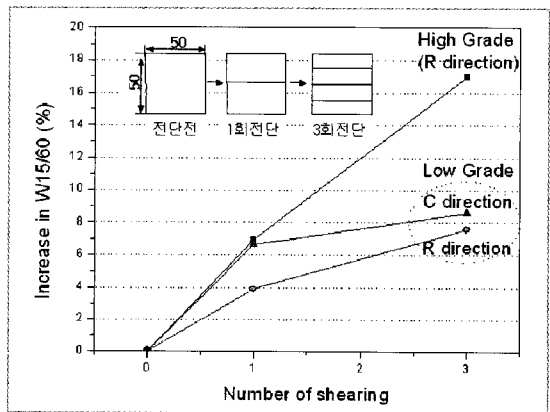


그림 26 전단횟수에 따른 철손의 변화

철손의 증가 요인

전기강판 소재에서 철손이 증가하는 원인은 철심 제조공정과 에너지 변환 과정에서 코아 내부의 자계분포에 의한 손실로 크게 분류할 수 있다. 그림 25는 전동기의 제조공정으로 강판

절단, 타발, 용접, 조립등의 과정을 거치는 중에 내부 응력의 증가로 자성이 나빠진다. 그림 27은 전기 기기에 전원 투입으로 운전중 코아 내부에서 손실이 증가하는 원인을 그림으로 나타낸 것이다 [7].

- Time harmonic: 입력전원에 고조파 함유.
- Flux superposition: 고정자와 회전자에 기인한 자계 중첩
- Flux distribution: 코아 내부 자계의 변화
- Short circuit: 적층시 절연 파괴에 의한 층간 단락
- Temperature: 발열에 의한 자성특성 저하
- Stress/Strain: 볼팅 또는 하우징 결합에 의한 응력 증가
- Space harmonic: 치 슬롯 구조에 의한 고조파 발생

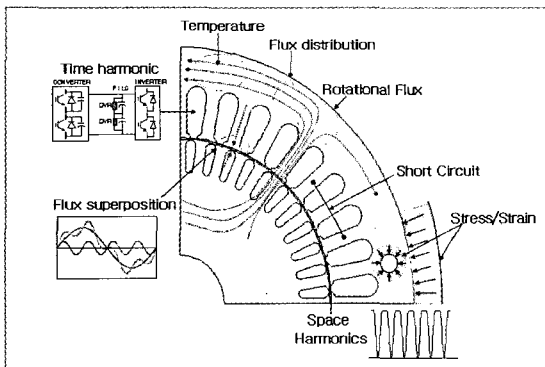


그림 27 코아 내부에서 손실 발생 원인

그림 28은 전동기 운전중 고정자 내부에서 변화하는 자계의 거동을 설명한 것으로, 치의 다리와 고정자 요크에서는 교번자계의 분포를 가지며 요크와 치가 접한 부분과 치의 끝단에서는 회전자계가 발생한다. 치 끝단과 요크와 치가 접한 부분에서는 자계의 회전과 왜형 때문에 다른 부분에 비하여 철손 발생이 크다 [11-13].

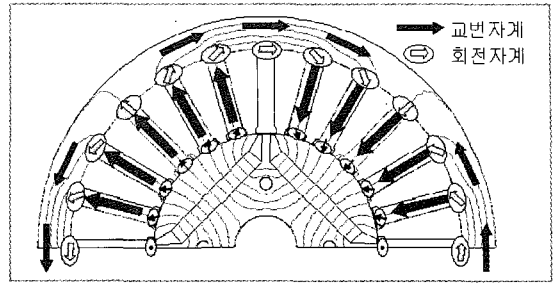


그림 28 코아 내부에서 손실 발생 원인

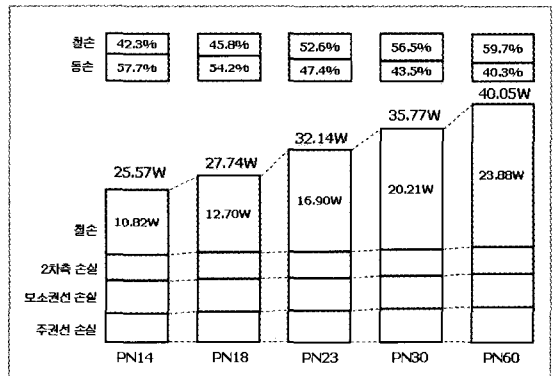


그림 29 단상유도전동기에서 강종별 손실분포 비교

결론

우수한 성능의 전자기 시스템을 개발하기 위해서는 전자기 현상을 기초로한 자기회로 설계와 같은 전기적 요소기술뿐만 아니라 영구자석과 전기강판을 포함한 자성재료와 관련된 요소기술 또한 중요하다.

전기기기의 성능 및 특성은 영구자석의 성능과 밀접한 관계를 갖고 있으며 특히, 전기기기의 성능을 저하시킬 수 있는 영구자석의 불가역 감자 특성을 고려하기 위하여 전기자 권선의 반작용 자계, 공극의 길이, 사용 환경의 온도 등은 전기기기의 설계에 반드시 고려되어야 한다. 또한, 전기기기에서 전기강판 소재는 자기에너지 전달 경로로써 중요한 역할을 담당하지만, 손실, 발열, 진동 소음 등의 부정적 부산물을 동반하기도 한다.

국내에서는 소재에 관한 연구와 전기기기의 제조 및 설계에 관한 연구가 이원화되어 진행되어 오고 있다. 따라서, 자성재료 분야와 이를 이용하는 응용

기기 분야의 상호 협력으로 자성특성에서부터 가공에 이르기까지 성능을 만족하는 고기능 고성능의 제품 개발이 유기적으로 이루어질 수 있도록 상호협력이 요구된다.

참고문헌

1. David K. Cheng, Fundamentals of Engineering Electromagnetics, Addison Wesley.
2. Mulukutla S. Sarma, Electric Machines, PWS Publishing Company.
3. Jacek F. Gieras, Mitchell Wing, Permanent Magnet Motor Thechnology, Marcel Dekker, Inc..
4. M. Kohno, K. Senda, Y. Hayakawa, □Electrical Steels Having Excellent Punchability for Compact and High-Functional Automotive Electrical Components□, 川崎製鐵技報, Vol. 35, pp.1-6, 2003.
5. K. sadahiro, M. Ishida, A. Honda, □Material Properties and Applications of High-Frequency Thin Electrical Steel Sheets □HiFreqs□ with Superior Magnetic Properties and Workability□, 川崎製鐵技報, Vol. 35, pp.7-10, 2003.
6. A. Honda et al., "Efficiency of Model Induction Motor Using Various Non-Oriented Electrical Steels", Journal of Material Science Technology, Vol. 16, No. 2, pp.238-248, 2000.
7. M. Yabumoto, C. Kaido, T. Wakisaka and T. Kubota, □Electrical Steel Sheet for Traction Motor of Hybrid/Electric Vehicles□, 新日鐵技報, Vol. 378, pp. 51-54, 2003.
8. Y. Chen and P. Pillay, "An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux density Excitation", IEEE 37th IAS Annual Meeting., Vol. 2 , pp.759-766, 2002.
9. B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, 1972.
10. わかる電氣鋼板,, 新日本製鐵, 電氣鋼板技術部編
11. Nick Stranges, Raymod D. Findlay, □ Measurement of Rotational Iron Losses in Electrical Sheet□, IEEE Trans. on Magn., Vol. 36, No. 5, Sep. 2000.
12. H. Nam, K. H. Ha, J. J. Lee, J. P. Hong, and G. H. Kang, □A Study on Iron Loss Analysis Method Considering the Harmonics of the Flux Density Waveform Using Iron Loss Curves Tested on Epstein Samples□, IEEE Magn., Vol. 39, No. 3, May 2003.
13. 홍정표 외 4인 "등가회로법과 수치해석의 결합에 의한 콘덴서 구동형 단상 유도전동기의 회로정수 산정 및 특성해석", 대한전기학회 논문지, Vol. 49, No 11, pp. 720-728, 2000.