전자부품연구원 중소기업전문교육(**'02.1.21**)

Brushless Permanent Magnet dc motor

BLDC Motor 설계기술 및 연구사례

기술 교육 자료
(2001. 1. 22)

창원대학교 전기공학과
강 규 홍

목 차

I. BLDC Motor 개요

II. BLDC Motor 설계 및 적용사례

III. Dynamic 특성 해석

IV. Cogging Torque 저감

V. 불가역 감자를 고려한 설계

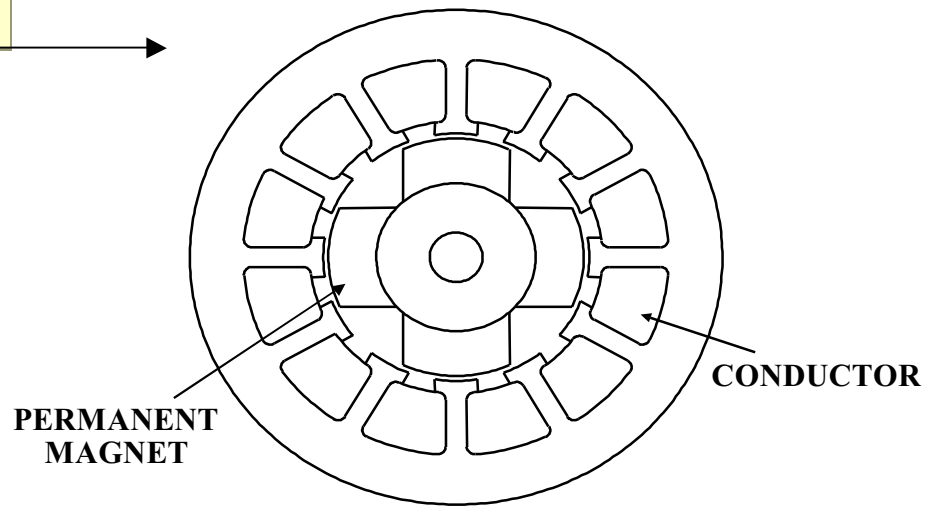
Appendix. 부하특성을 고려한 Direct-drive 전동기 특성

I. BLDC Motor 개요

1.1 브러시리스 전동기란 ?

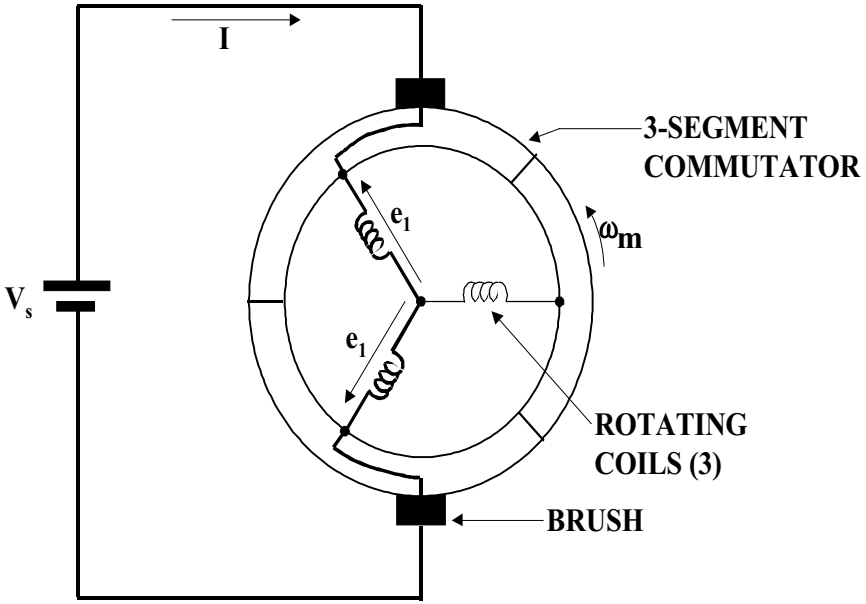
- DC전동기나 동기기의 기계적인 정류장치 혹은 슬립링 ⇨ 전자스위치
- 회전 계자형(영구자석)
- 구동방식 ⇨ BLDC, BLAC
- 회전자 위치 검출 ⇨ 홀센서 or 광센서

브러시리스 **DC** 전동기의 구조

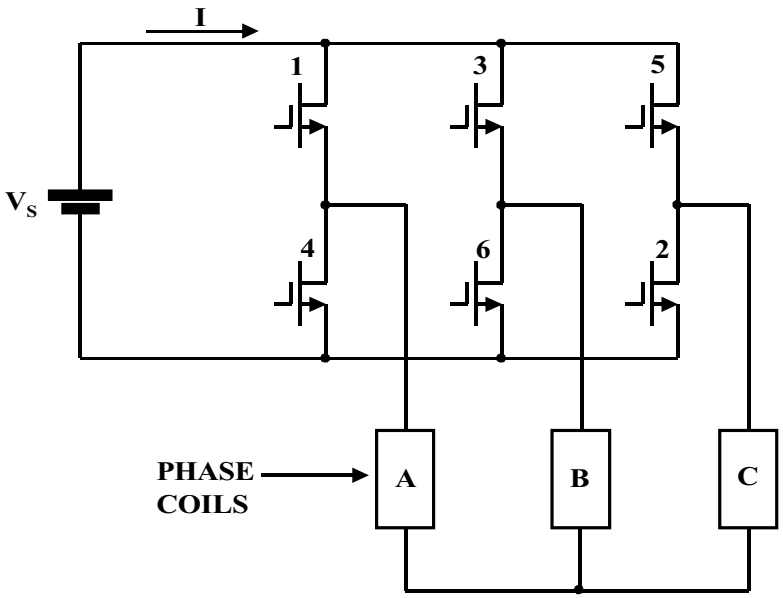


1.1.1 정류(Commutation)

가. 정류장치 비교



2개의 브러시와 **3**개의 정류자편을 갖는 **DC** 전동기의 단면



3상 **BLDC** 전동기에 사용되는 스위칭 소자를 이용한 구동회로

1.1.2 DC Motor와 BLDC Motor의 비교

항목	일반 직류모터	BLDC 모터
기본 구조	• 회전전기자형	• 회전계자형
회전자 위치 검출	• 브러시의 기계적인 위치	• 위치 검출 소자 및 Logic 회로
정류방법	• 브러시와 정류자의 접촉에 의한 기계적인 스위칭	•반도체 소자를 이용한 전자 스위칭
역회전 방법	• 단자전압의 극성 변경	• 스위칭 순서의 변경
특징	• 대응성 및 제어성이 우수 • 정기적인 보수 필요 • 전기 기계적인 잡음 발생 • 브러시/정류자 사용으로 고속운전 불가능 • 외형이 크고 구조 복잡	• 장기간 사용가능 • 보수 불필요 • 전기 기계적인 잡음 없음 • 고속운전 가능 • 소형화, 박형화가 가능

1.1.3 구동방식에 따른 비교

브러시레스 DC 전동기(BLDC M/T)

- DC전동기 : 전기자 극성 절환은 정류기나 브러시에 의해 수행
- BLDC M/T : 회전자(영구자석)의 자극 위치를 검출하여 동기로 스위칭하는 전력 변환 소자에 의해 수행
- 구형파 구동: 역기전력은 보통 구형파 또는 사다리꼴 형태
- 동작 특성 : 타여자 직류 전동기와 거의 동일

브러시레스 AC 전동기(BLAC M/T)

- 동기전동기 : DC전동기 보다는 권선형 회전자를 가진 동기전동기와 유사
- BLDC M/T : 회전자(영구자석)의 자극 위치를 검출하여 동기로 스위칭하는 전력 변환 소자에 의해 수행
- 정현파 구동 : 역기전력은 정현파=>분포권 시행
- 동작 특성 : 유도전동기 혹은 동기 전동기의 회전자계와 유사

1.2 브러시리스 전동기의 분류

가. 브러시레스 전동기의 종류

□자기 회로

-Radial gap type
-Axial gap type(Pancake motors) : VCR, CD Player, Flopp disc driver,...

□구　　조

-Interior rotor type(내전형) : • Torque/Inertia비가 큼
• 가감속 운전이 필요한 부하
• 방열 유리, 권선비용 증가
• 고속운전시 마그넷 비산 방지

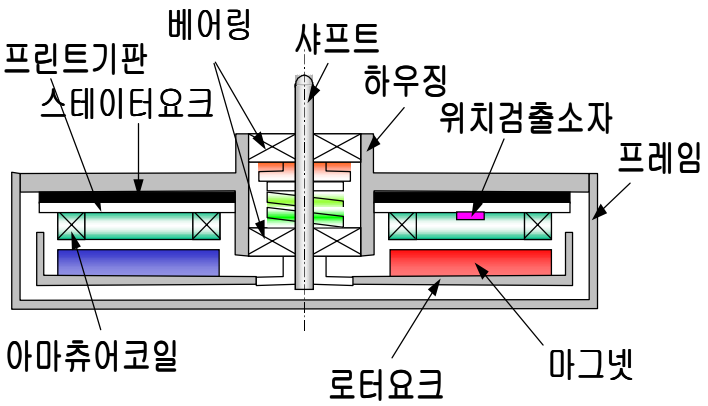
-Exterior rotor type(외전형) : • Rotor의 Inertial가 큼
• 정속운전에 유리,Rotor의 balancing
• 베어링 수를 줄일 수 있다.

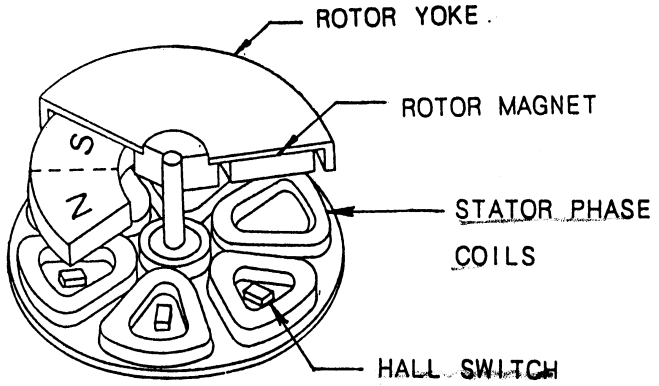
-Slotless type : • 고속운전에 유리
• 코깅토크가 없다.

나. Controller Type

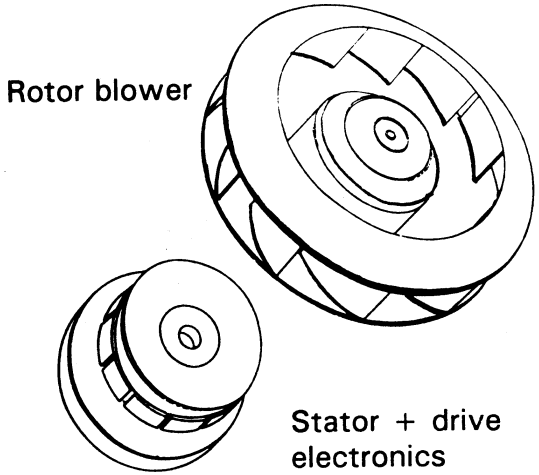
-Sine wave 구동 : Brushless AC Motor
-Square wave 구동 : Brushless DC Motor

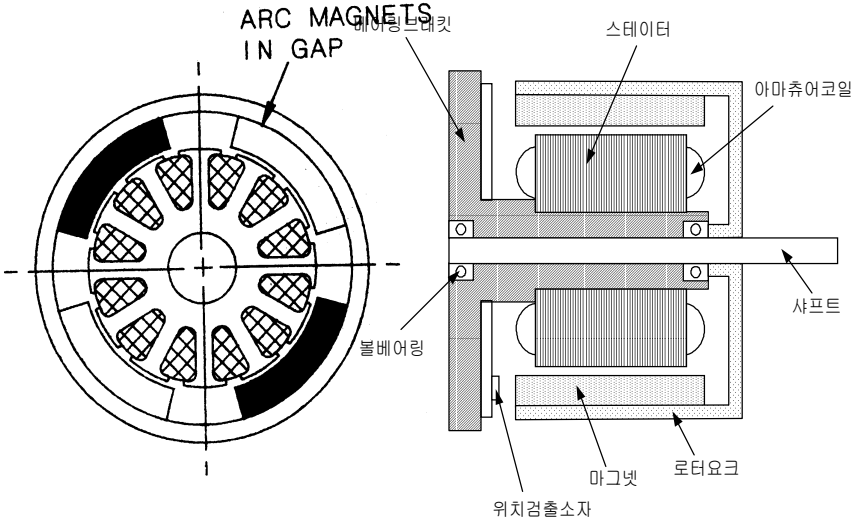
다. Axial-gap Type motor



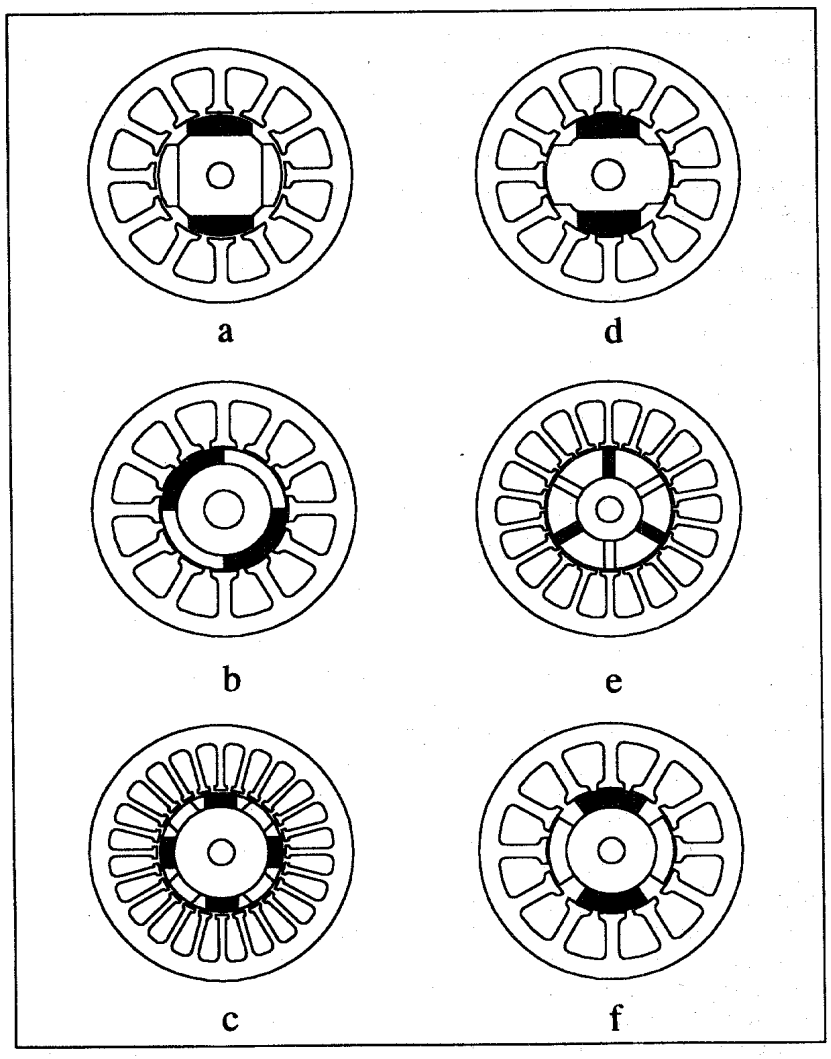


마. 외전형 전동기 구조

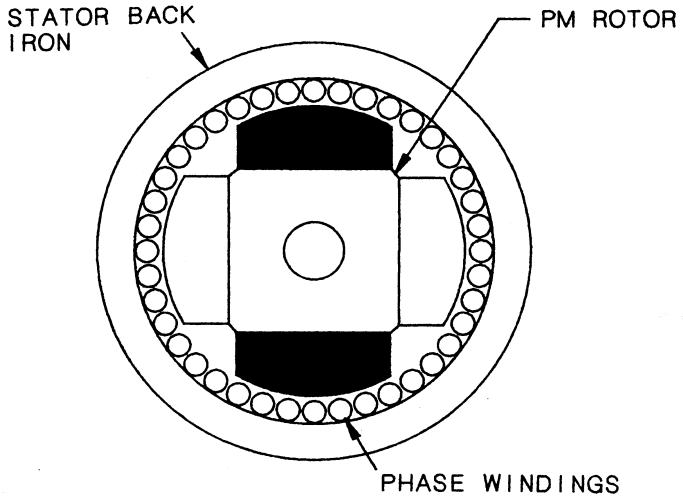




라. 내전형 전동기 구조

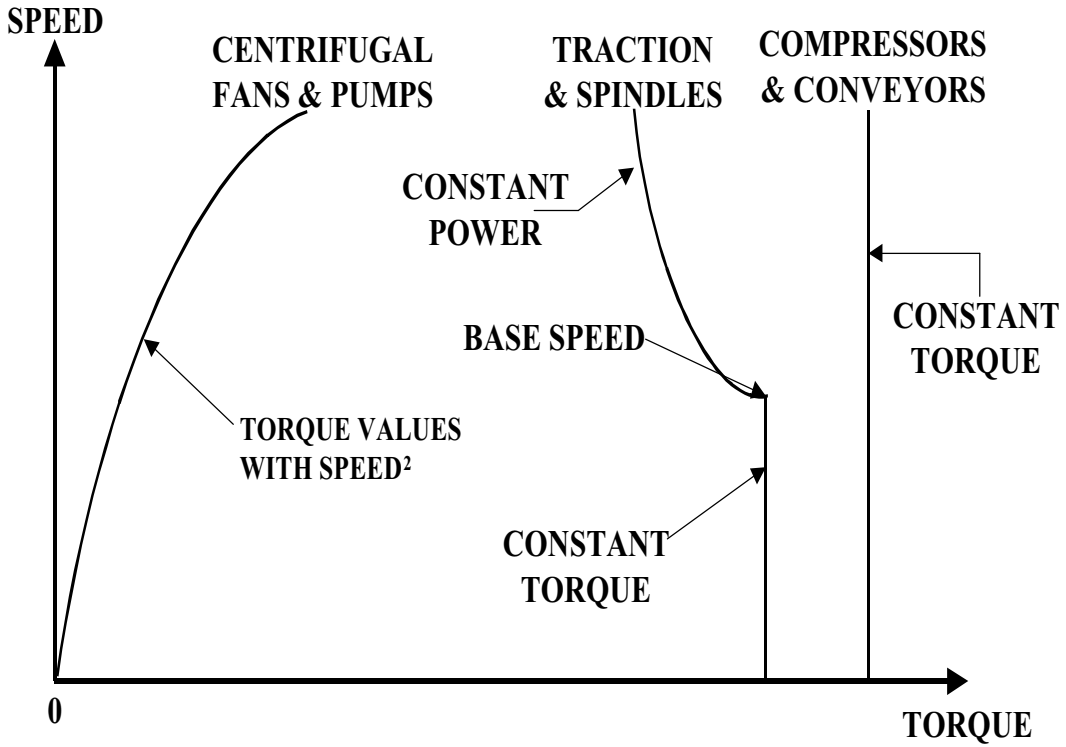


바. Slotless type 전동기 구조



1.3 부하 특성

- BLDC 모터의 동작 특성 이해 –→ `speed vs torque` 곡선을 이용

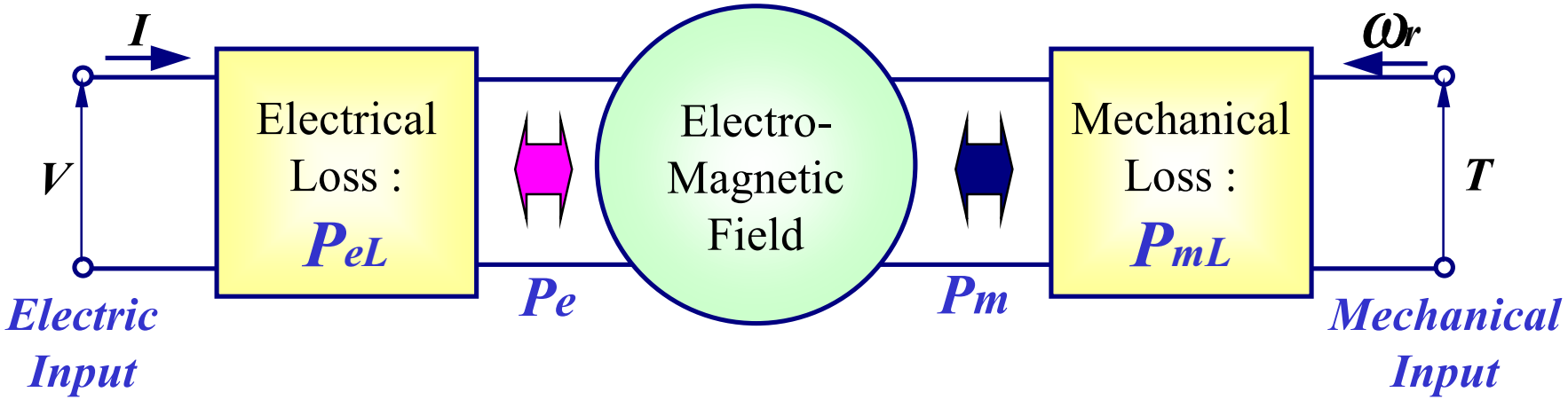


각종 부하에 대한 대표적인 속도/토크 특성

1.4 영구자석 전동기 특성

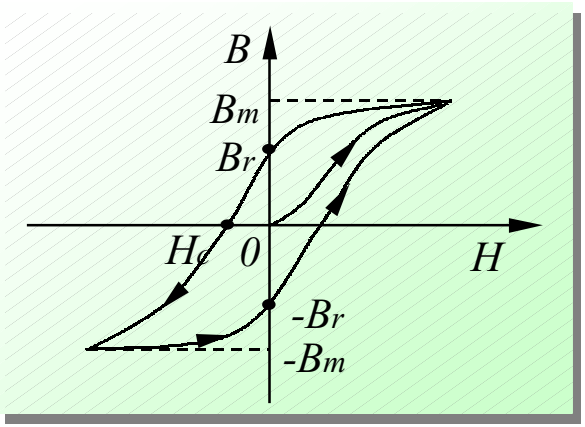
1.4.1 자기회로 특성

가. 전기적•기계적 에너지 상호 변환



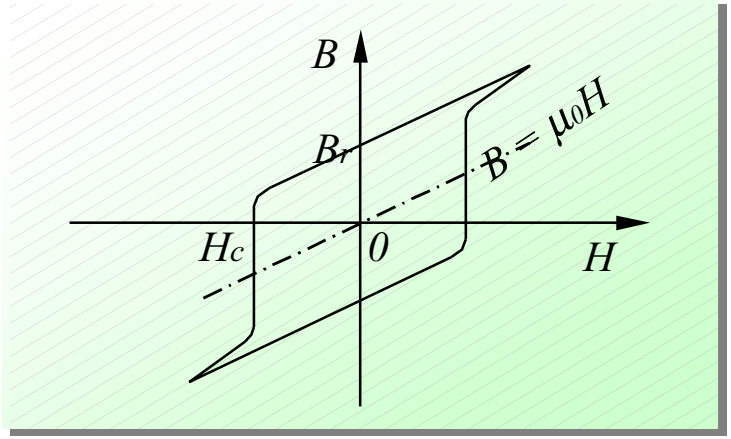
전기적•기계적 에너지 상호 변환 자화특성곡선

나. 자화 특성 곡선

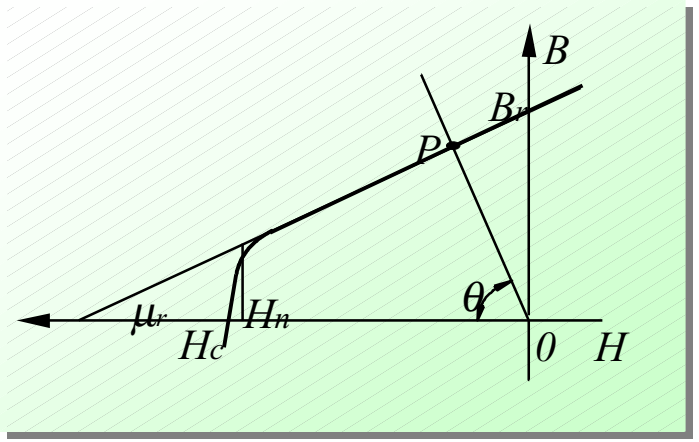


B_m : 포화자속밀도[T]
B_r : 잔류자속밀도[T]
H : 단위길이당 기자력[A/m]
H_c : 보자력[A/m]

(a) 강자성체의 자화곡선



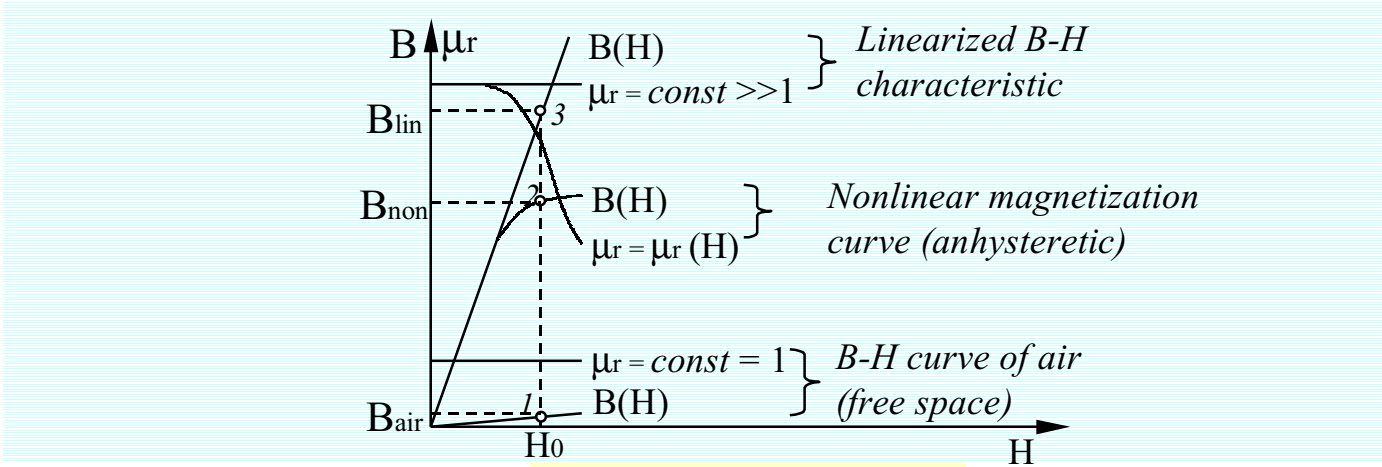
(b) 영구자석의 자화곡선



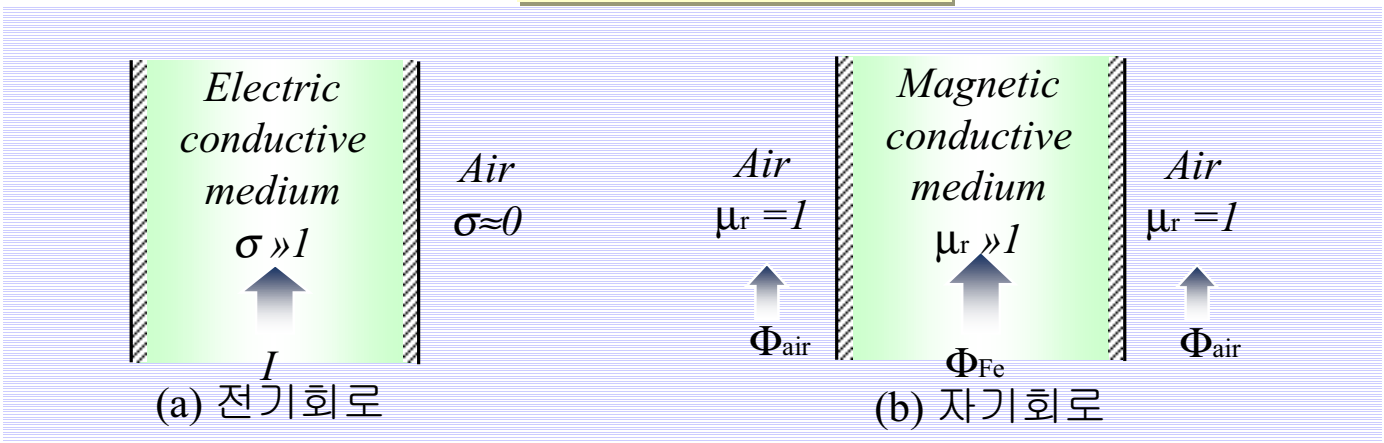
(c) 영구자석의 감자곡선

자화특성곡선

다. 전기 및 자기회로의 비교



자화곡선과 비투자율



전기회로와 자기회로의 비교

라. 전기회로와 자기회로의 상사성

전 기 회 로			자 기 회 로		
명 칭	기 호	단 위	명 칭	기 호	단 위
기전력	E	V	기자력	ωI	$A(AT)$
전 류	I	A	자 속	Φ	Wb
전류밀도	J	A/m^2	자속밀도	B	T
전기저항	Re	Ω	전기저항	Rm	A/Wb
도전율	σ	S/m	도전율	μ	H/m
$E = I \times R_e$			$F = \omega I = \Phi \times R_m$		

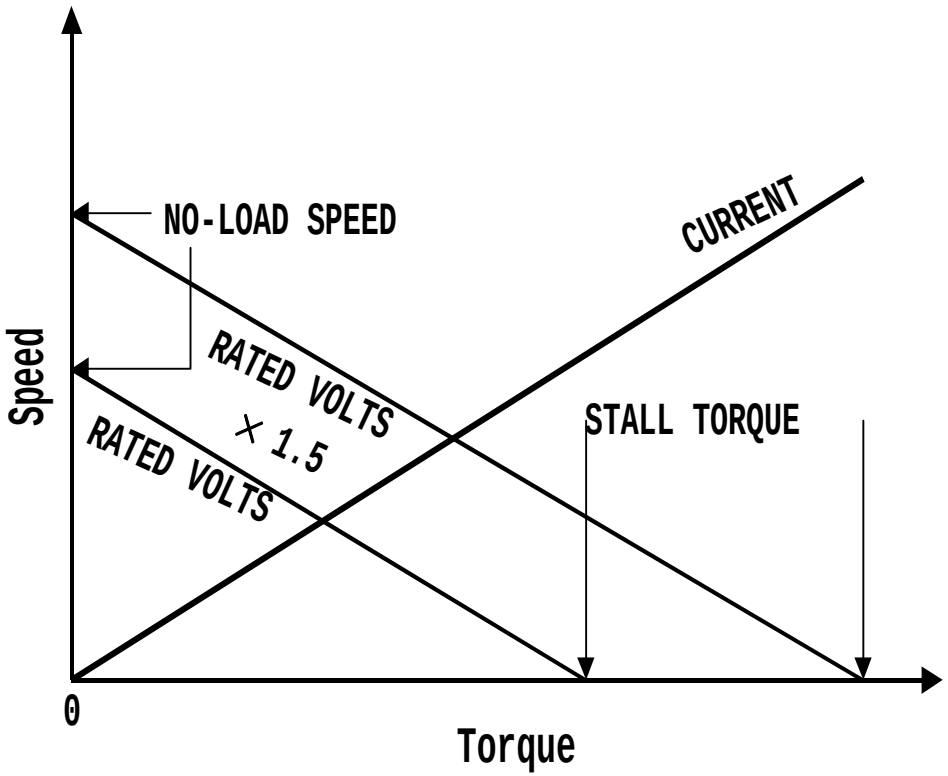
1.4.2 영구자석 전동기 특성

가. 영구자석 직류 전동기의 기본식

- $V_f = I_f R_f$
- $V_a = E_a + I_a R_a$
- $E_a = \frac{P}{a} Z \Phi \frac{N}{60} = k_e \Phi \omega_r$ $\quad k_e = \frac{PZ}{2\pi a}$
- $T = \frac{Z}{2\pi} \frac{P}{a} \Phi I_a = k_t \Phi I_a$ $\quad k_t = \frac{PZ}{2\pi a}$

Ea : 유기기전력,	P : 극수,	Z : 전체 전기자 도체수
Φ : 1극의 자속[Wb]	N : 회전수[rpm] ,	ke : 역기전력 상수 ,
a : 병렬회로수,	ωr : 전기자 회전각속도	

나. 영구자석 직류 전동기의 특성



영구자석 전동기 속도/토크 특성 곡선

- $V_a = k_e \Phi \omega_r + I_a R_a$

$$\omega_r = \frac{V_a - I_a R_a}{k_e \Phi} [rad/\sec]$$

- $P_{out} = \omega_r T = \omega_r k_t \Phi I_a$
$= E_a I_a \ [W]$

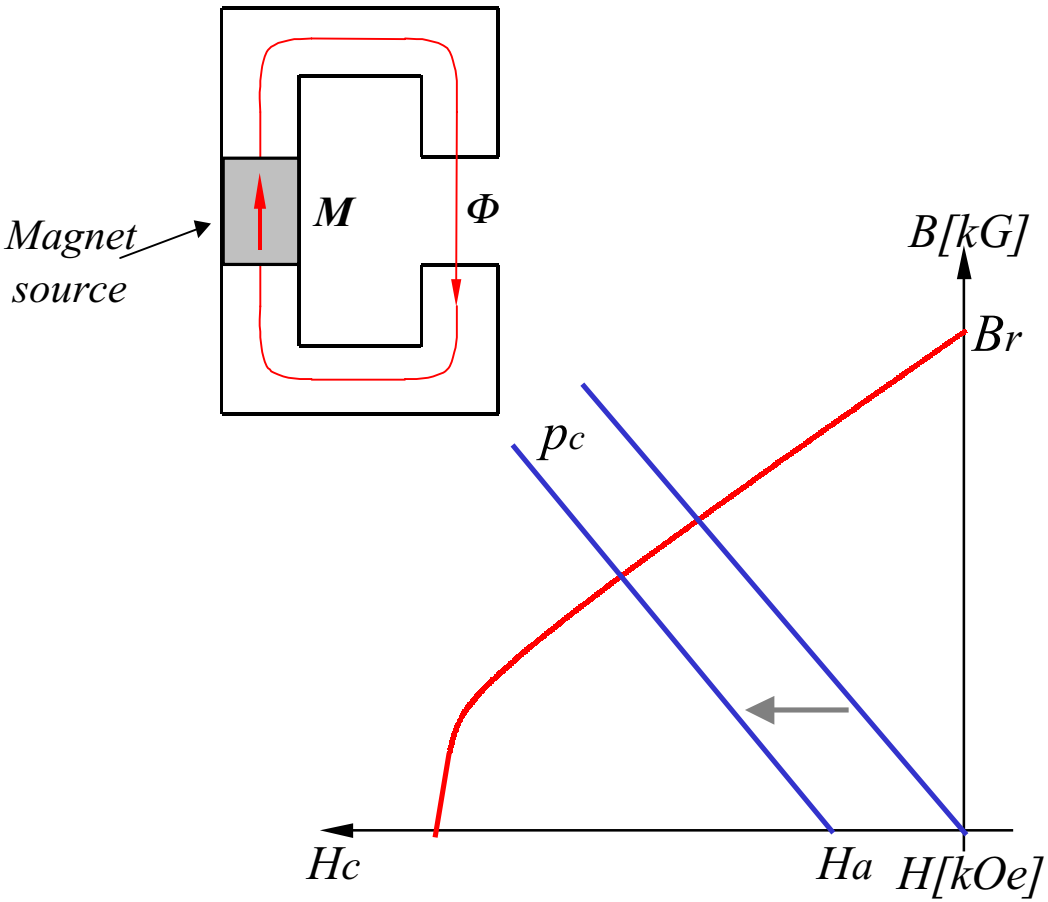
- 절대 무부하 속도

$$\omega_{abs} = \frac{V_a}{k_e \Phi} [rad/\sec]$$

- 기동전류 : $I_s = \frac{V_a}{R_a} [A]$

- 기동토크 : $T_s = k_t \Phi I_s \ [Nm]$

다. 영구자석의 동작점



영구자석의 감자 곡선

Ampere's Circuital Law

$$H_m l_m + H_g l_g + H_c l_c = 0$$

$$H_m l_m / H_g l_g = f$$

$$H_m = -f \frac{l_g}{l_m} H_g$$

Flux Continuity

$$B_m A_m = B_g A_g + \Phi_l$$

$$B \quad A \quad / B_g A_g = \sigma$$

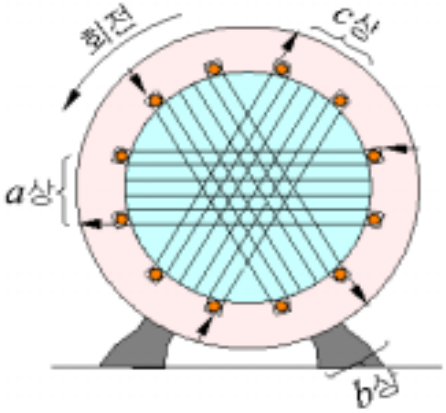
$$B \quad = \sigma \frac{g}{} B_g$$

Operating Point

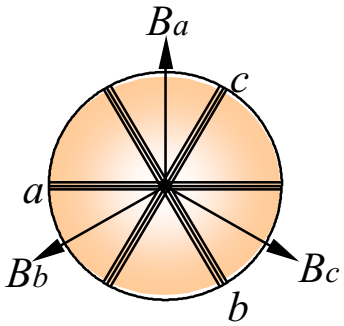
$$\frac{B_m}{H_m} = -\frac{\sigma}{f} \frac{A_g}{A_m} \frac{l_m}{l_g} = p_c$$

1.5 BLDC Motor 동작원리

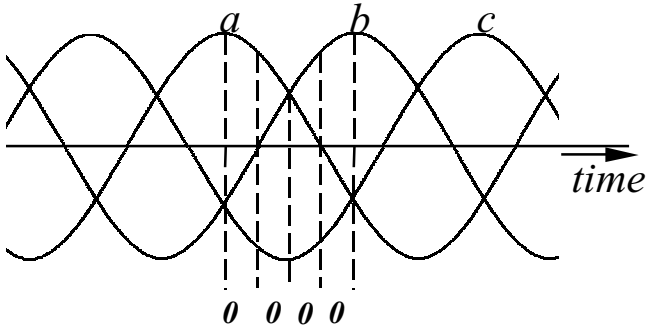
회전 자계



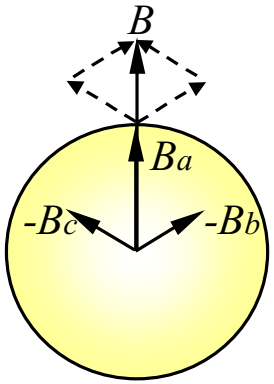
(a) 유도전동기의 구조



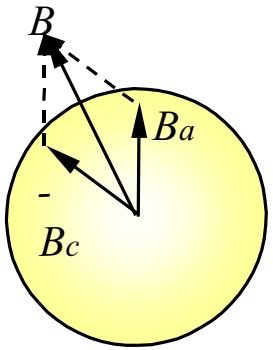
(b) 3상교류에 의한 자계



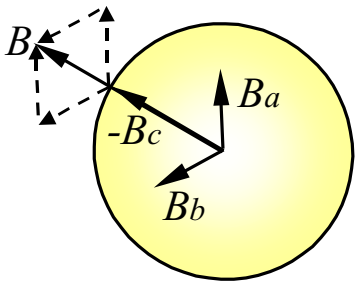
(c) 시간에 대한 3상교류전류



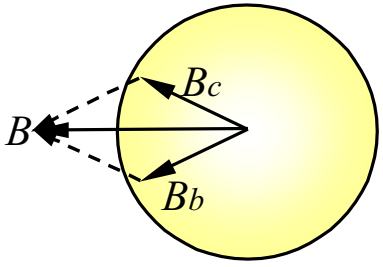
(d-1) θ = 0º



(d-2) θ = 30º



(d-3) θ = 60º



(d-4) θ = 90º

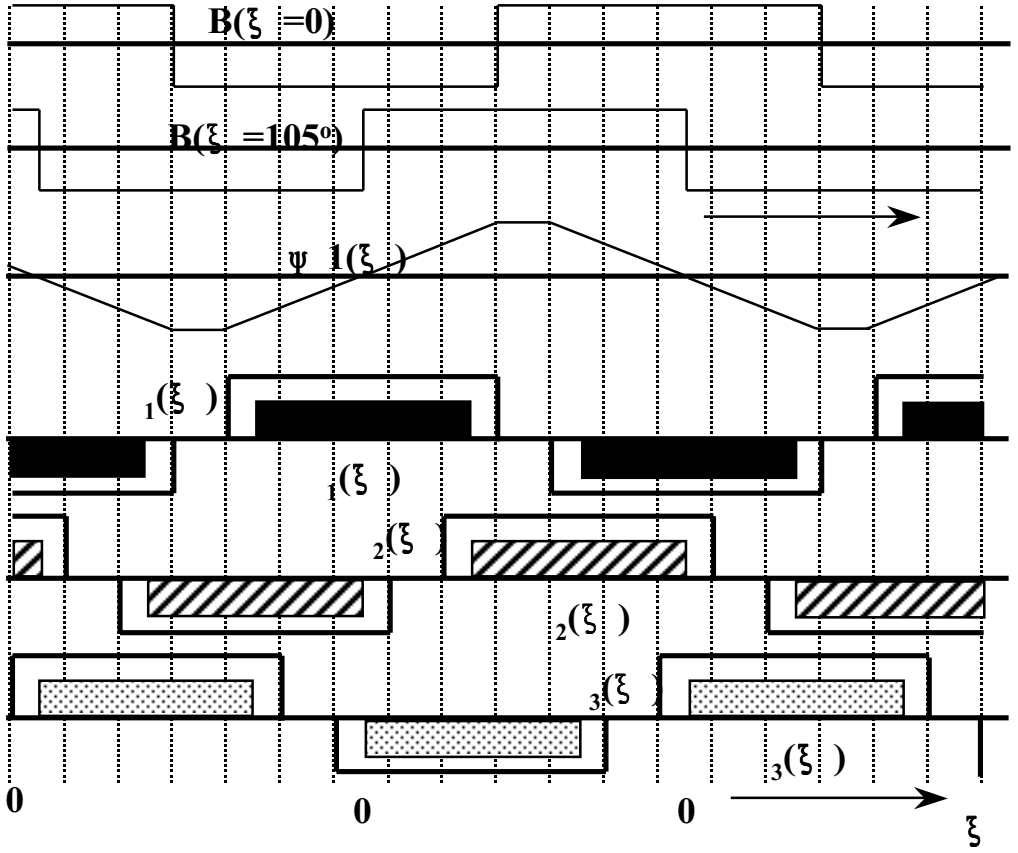
1.5.1 Basic Concept of BLDC Motor

가. Flux Linkage and BEMF

$$\Psi \quad) = \qquad \cdot \phi \quad)$$

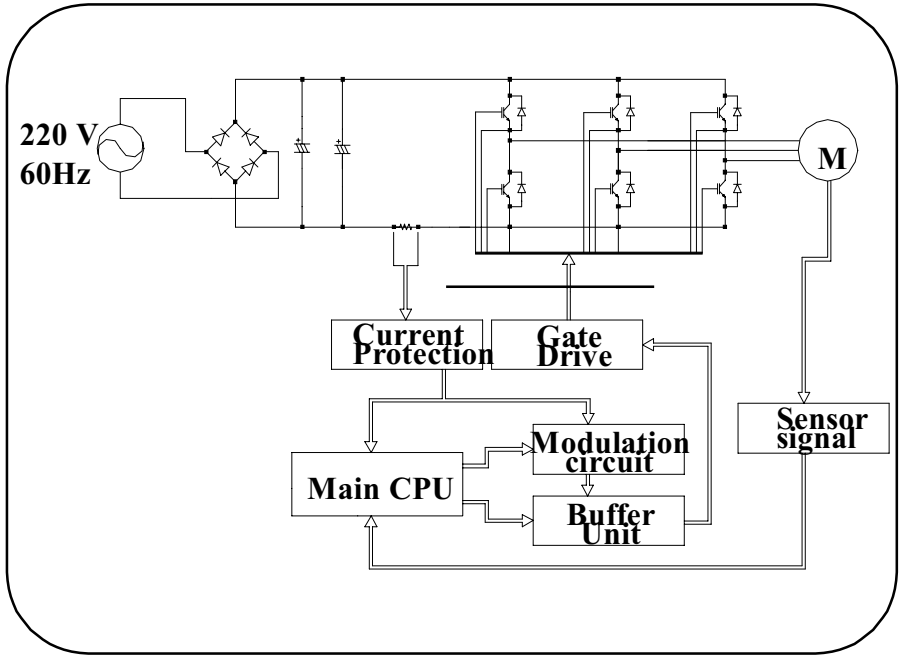
$$= \qquad \cdot \int_{\theta}^{\theta\ 2} \quad _{g} \quad \theta)\, d\theta$$

$$= \frac{d\Psi}{d} = \frac{d\Psi}{d\theta} \times \frac{d\theta}{d} = \omega_m \frac{d\Psi}{d\theta}$$

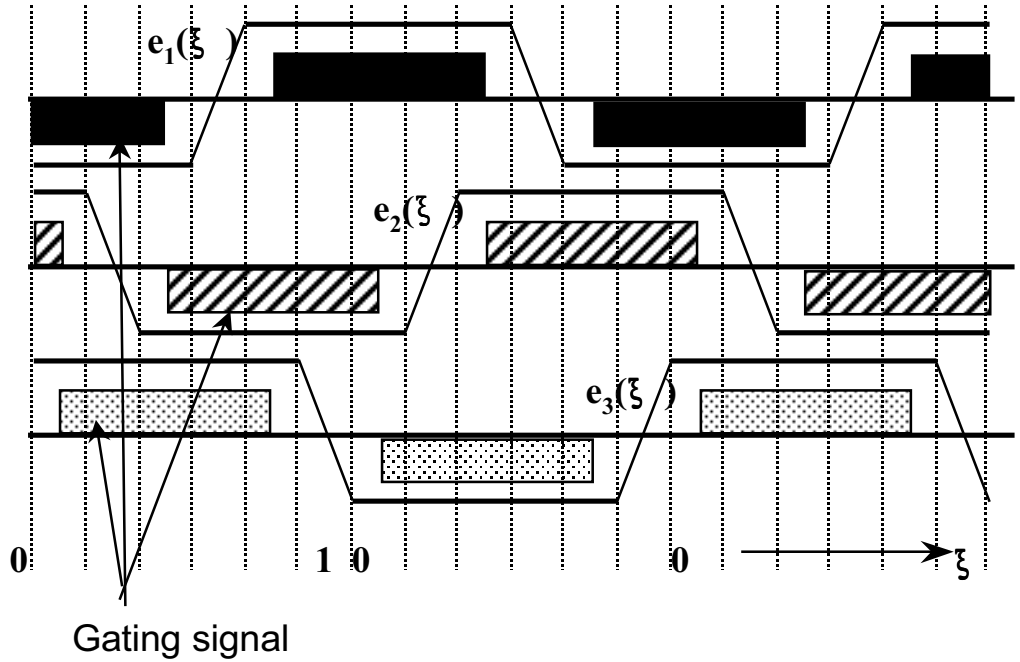


*실제로 로 .

1.5.2 구동원리

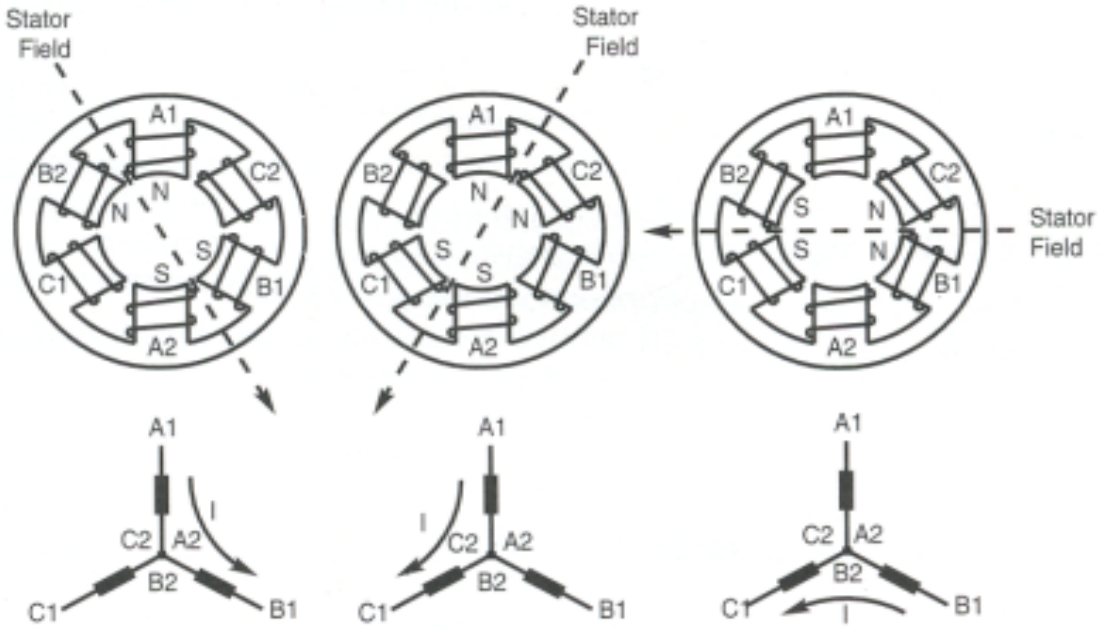


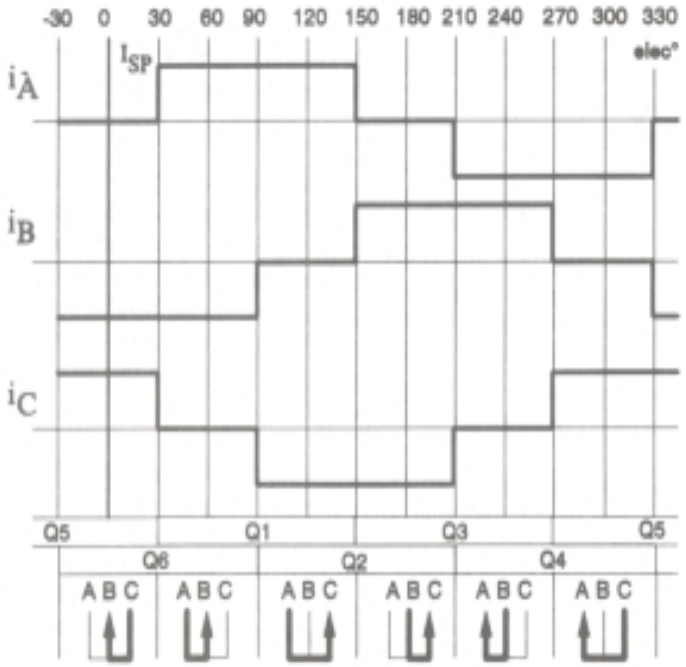
Block diagram of Drive System



Phase EMF & Gating signal

가. Six-Step 120° 도통형 여자방식

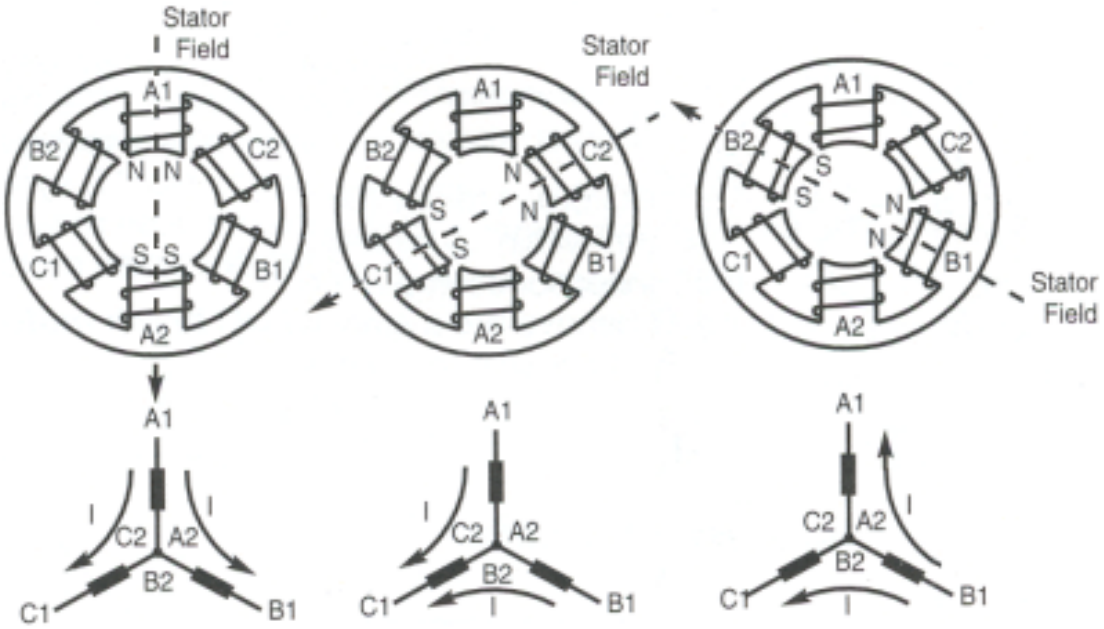


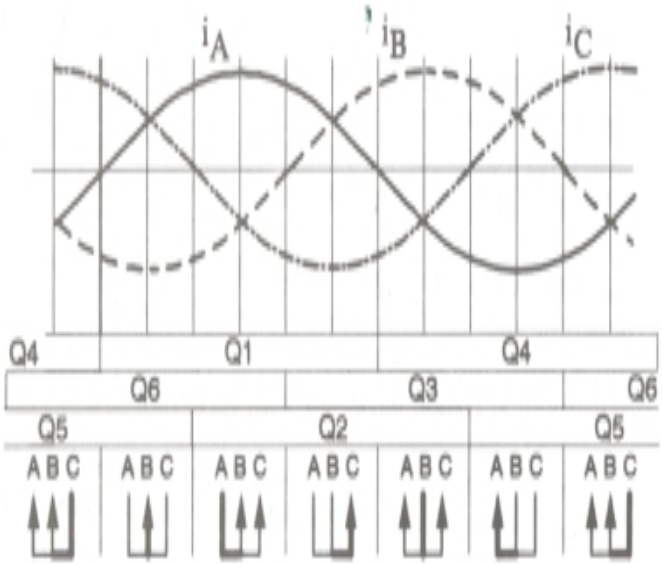


(구형파 구동의 선간 전압 파형)

- 120° 도통형은 180° 도통형에 비해서 토크를 최대로 이용할 수 없다.
- 데드타임 (Dead time)등의 제어가 용의한 장점
- 기동시 및 원칩 방식에서 많이 사용

나. Six-Step 180° 도통형 여자방식



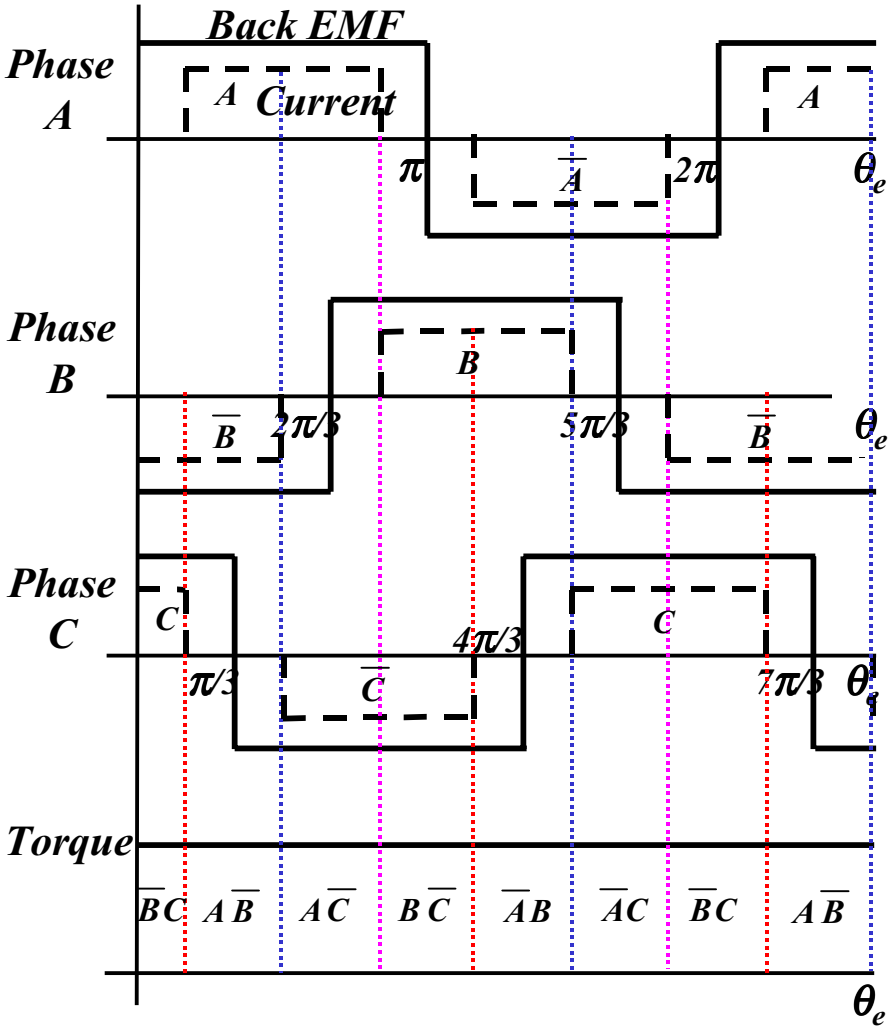


(정형파 구동의 선간 전압 파형)

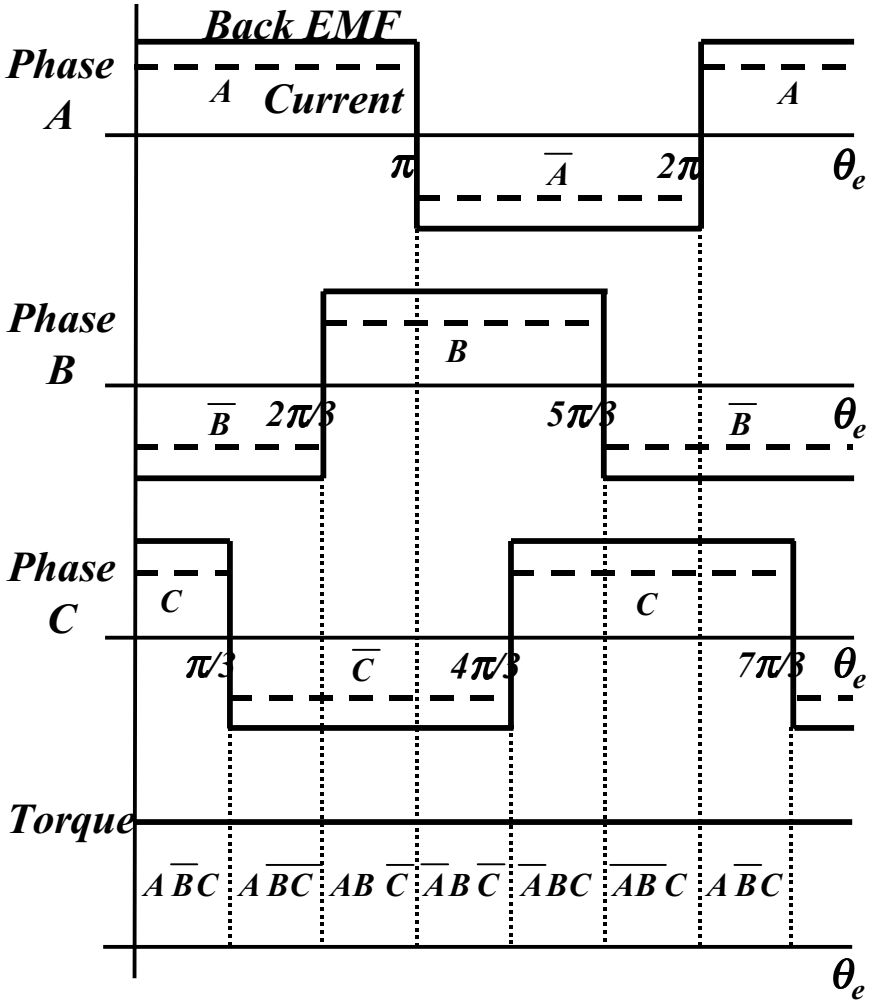
- 180° 도통형은 120° 도통형에 비해서 토크를 최대로 이용할 수 있다.
- 데드타임 (Dead time)회로를 필요로 한다.
- 일반적으로 프로세서와 함께 사용한다.

다. 구동방식에 따른 토크 파형 비교

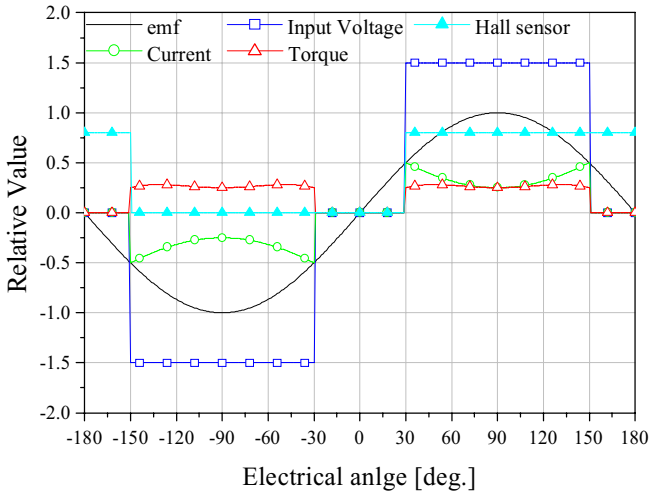
3상 bi-polar 구동방식 (120도 통전)

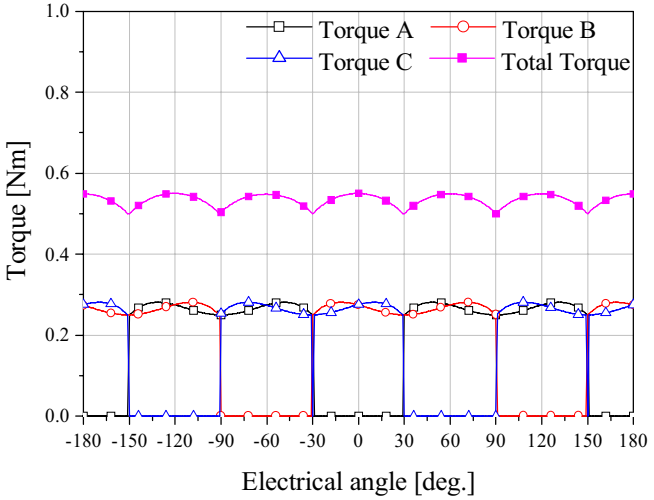


3상 bi-polar 구동방식 (180도 통전)

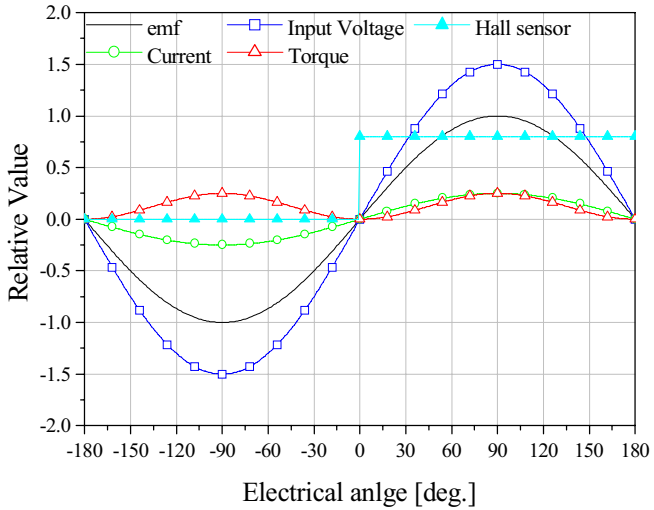


구형파 구동

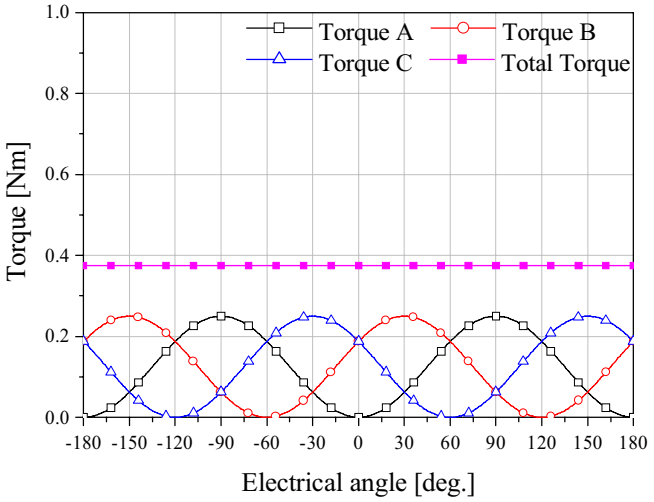




정현파 구동

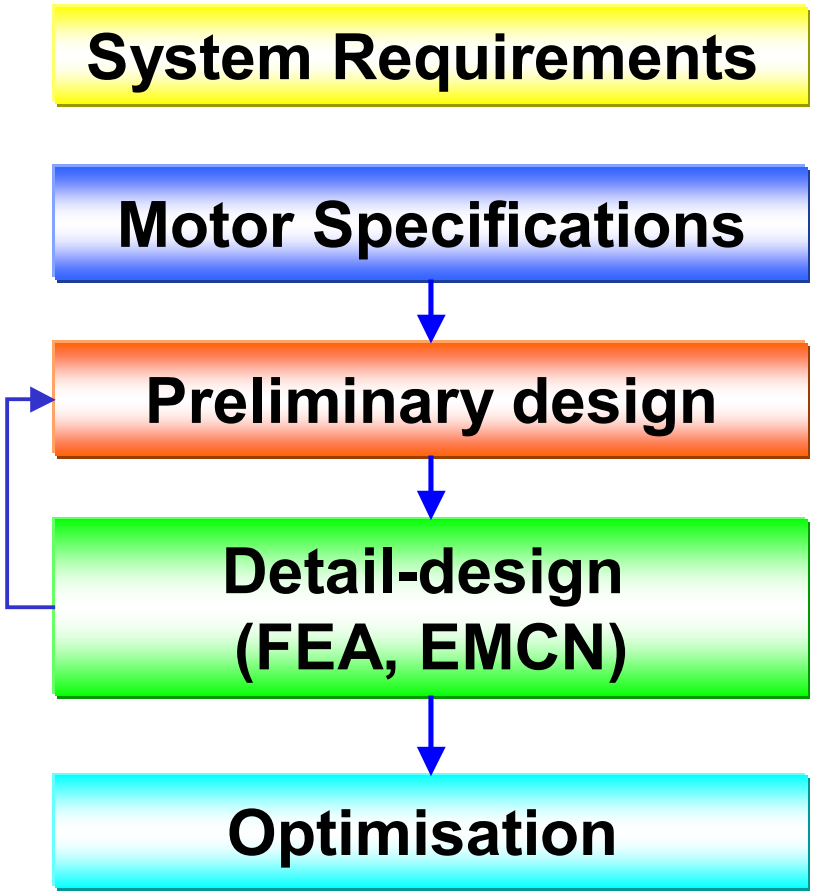


(1상에 대한 전류, 전압 파형)



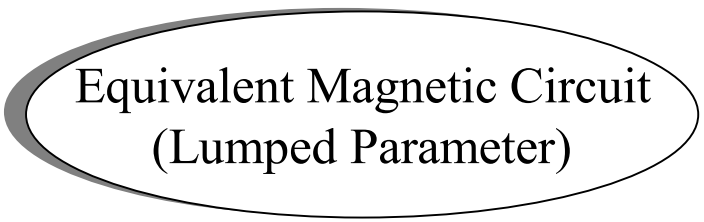
(토크 파형)

2.1 concept of design process

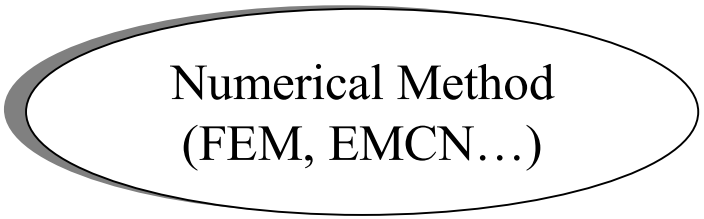


<전동기의 설계>

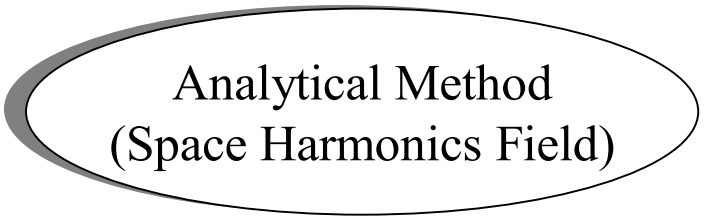
가. 자기회로 설계 및 해석



- 경험적인 요소가 많이 존재
- 자계의 분포특성을 고려할 수 없다.
- 포화 및 누설 등의 비선형 특성이 고려 안됨

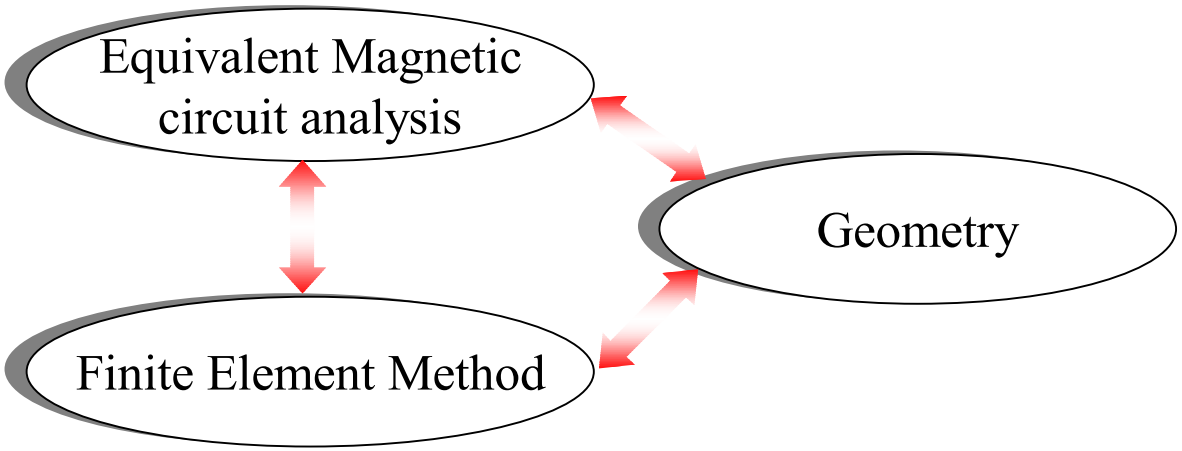


- 해석 결과의 신뢰성은 우수.
- 선처리 및 후처리 등의 시간적인 제약



- 자계의 분포특성 해석이 가능.
- 형상 및 제원의 변화에 빠르게 대응.

현재의 전동기 설계법 → - 시행 착오적인 반복
- 설계 및 해석 시간의 증가



Analytical Method → 제원 변화에 따른 설계의 유연성
기하학적인 형상변화 용이

Magnetic Field Analysis
Space Harmonics Field analysis ⟷ *Construction of Motor*

Case 1. 장하분배법에 의한 기본설계 (Lumped parameters)

요구 사항 결정

회전자 구조 결정

회전자 설계와 극 당 자속 수 결정

자석 사양 결정

극 수 결정

고정자 슬롯 수와 상수 결정

고정자의 외각치수 결정

기본적인 외각치수 결정

공극 길이와 자기 장하 결정

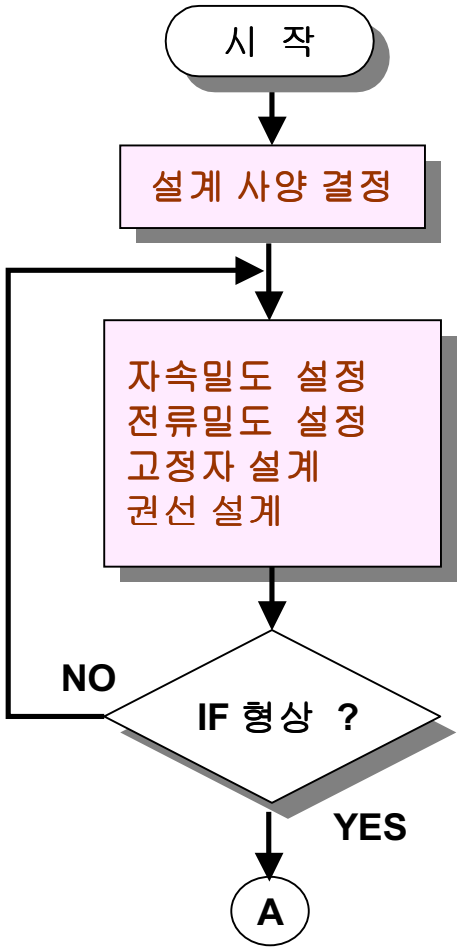
도체 수와 코일 당 Turn수 결정

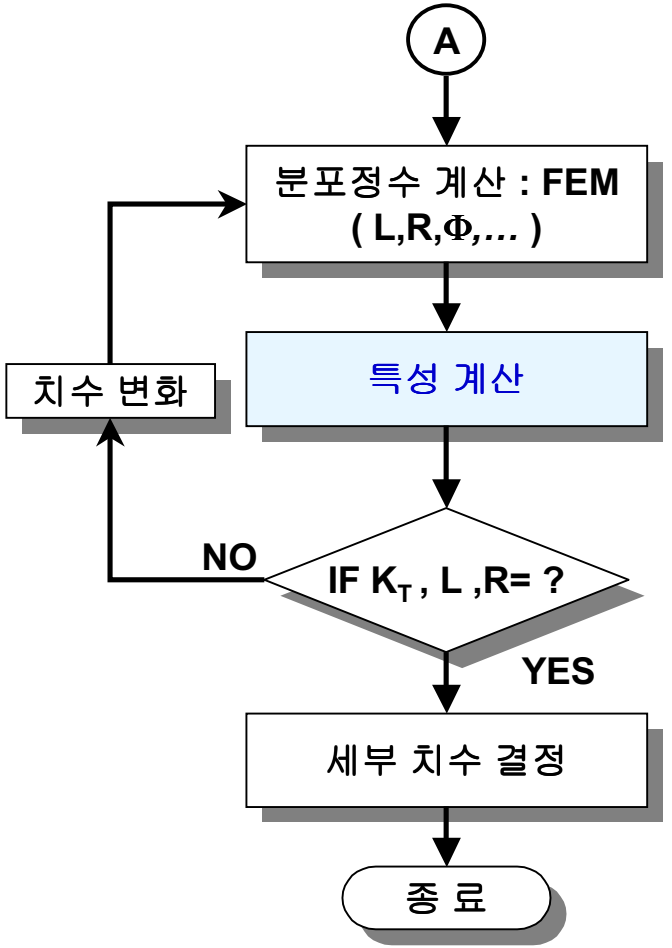
권선직경과 상당 인덕턴스 계산

성능의 산출

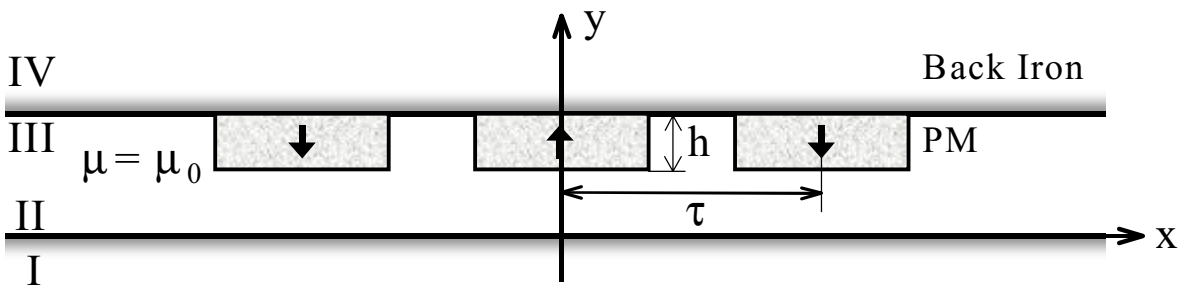
영구자석의 감자 고려

요구사양 만족 시까지 설계 수정 반복

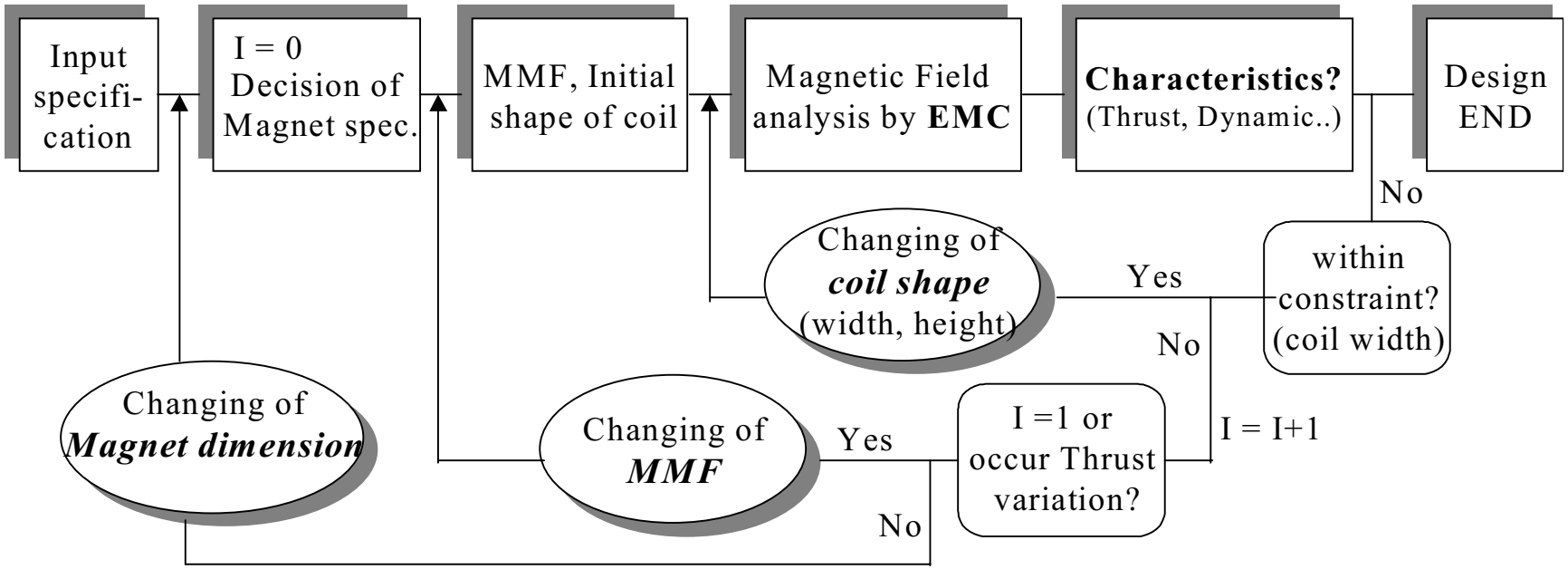




Case 2. 공간고조파해석(Space Harmonics Field analysis)을 이용한 기본설계



Magnets distribution.



2.2 설계시 고려사항

가. 회전자 구조 결정

- 원주대향형(radial air-gap type)
- 평면대향형(axial air-gap type)

나. 상수 결정

- 권선 이용율
- 상수에 따른 토크 리플
- 스위칭 소자수
- 센서 수

다. 극수 결정

- 영구자석 재질과 Grade
- 회전자의 속도
- 회전자와 자석의 기계적 조립
- 전동기 형태 (inner rotor, outer rotor, axial air gap)
- 요구 관성(영구자석의 종류마다 밀도가 많이 다름)

라. 슬롯수 결정

- Cogging torque
- Commutation connection
- Minimum slots between pole tips
- Manufacturing cost
- Output per Unit Volume
- No. of phase

2.3 적용사례(1)

가. Equivalent Magnetic Circuit

IPM Motor

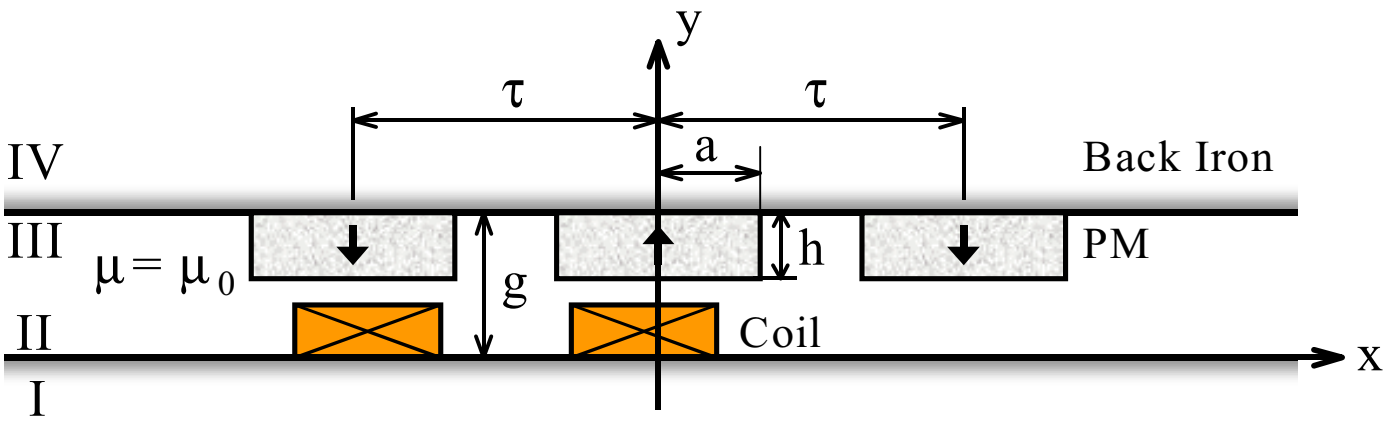
(a) 고정자 철심 및 권선 조립

(b) 회전자 형상 및 shaft 결합

나. Analytical Method (Space Harmonics Field Analysis)

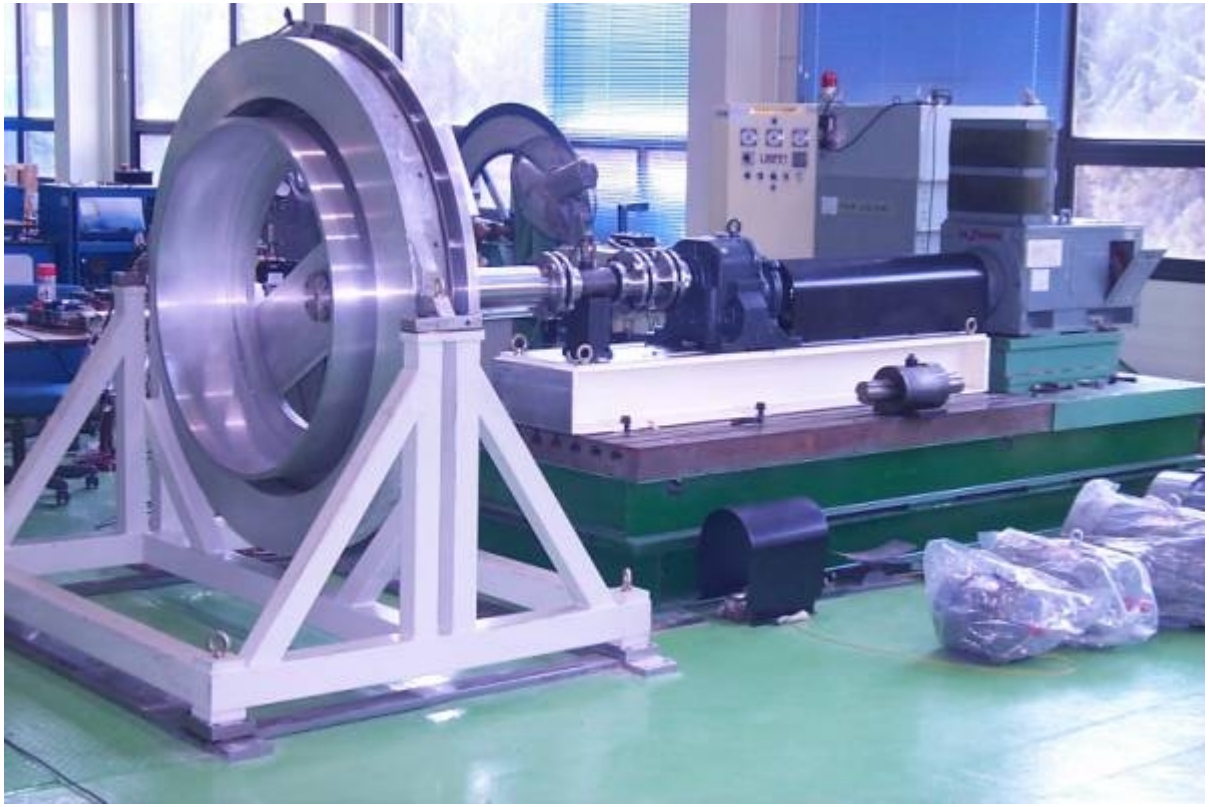
Air-core type Linear BLDC Motor

- Analysis model ➡ In order to Space Harmonics Field analysis



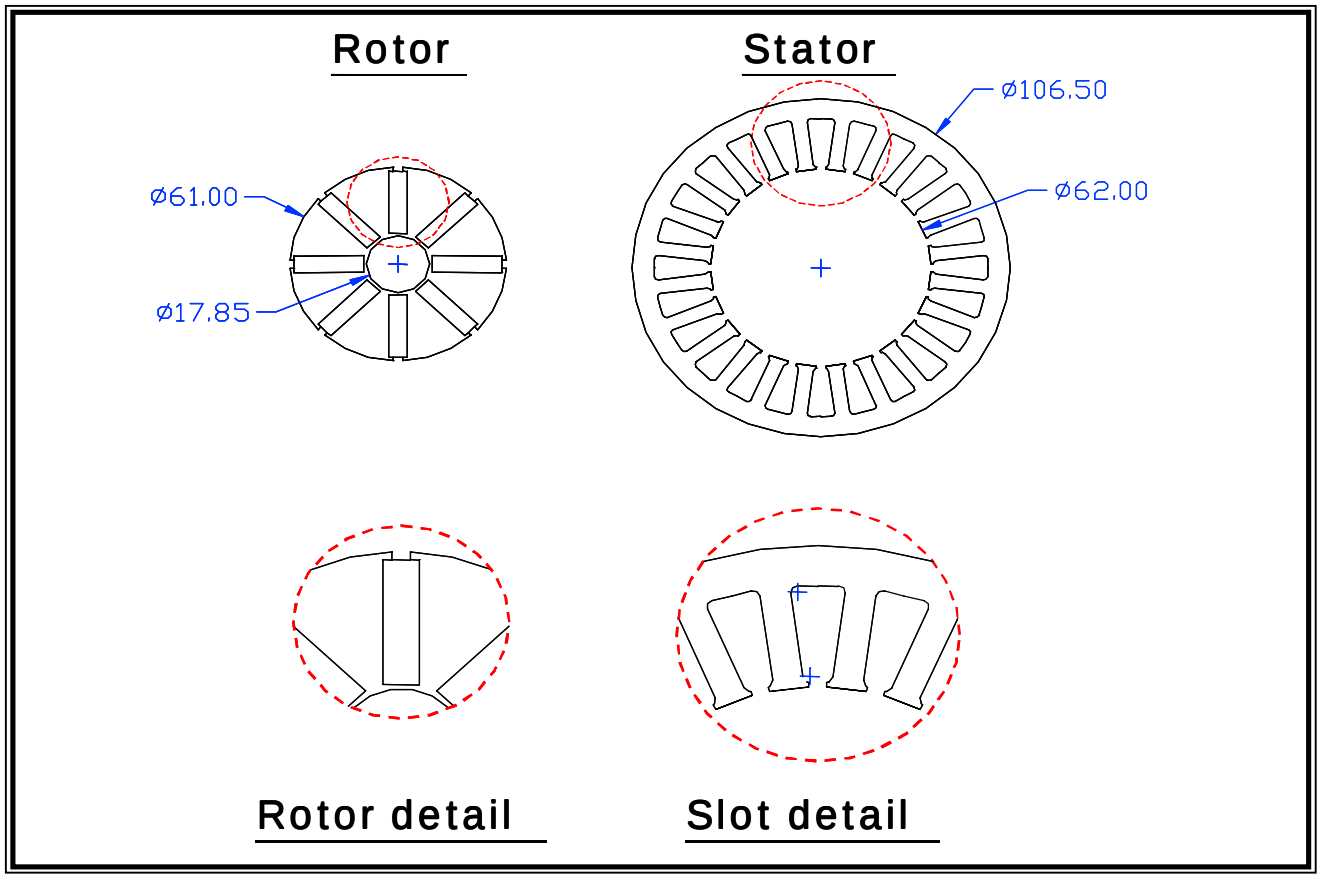
- The system structure of air core type PM linear brushless motor.

Direct-drive Ring type Slotless PM Motor



2.4 적용사례(2) – Spoke type BLDC Motor

해석모델의 제원

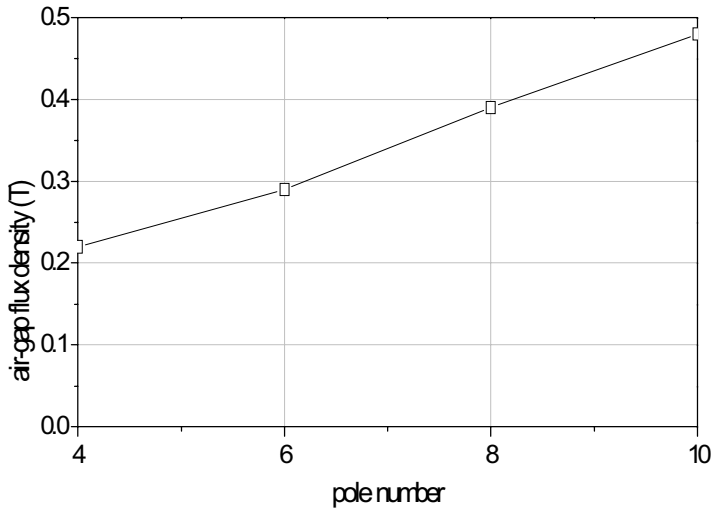


영구자석 : 페라이트(잔류자속밀도 0.4T), 철심재질 : M19(S10)

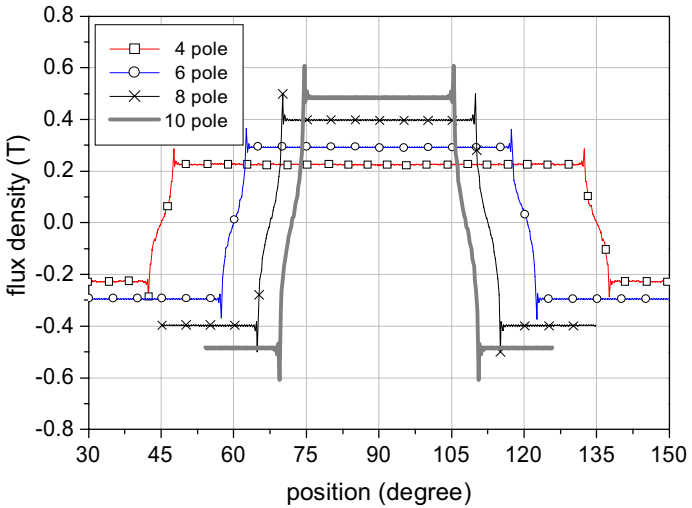
해석결과

해석조건 : 고정자는 평활철심으로 가정. 영구자석만 여자한 경우의 공극자속밀도 특성

항 목	평균자속밀도 [T]	일정 자속밀도 영역 [mdeg-edeg]	극간격[mdeg]
4극	0.22	82.91 – 165.82	90
6극	0.29	52.81 – 158.46	60
8극	0.39	37.41 – 149.64	45
10극	0.48	29.41 – 176.46	30



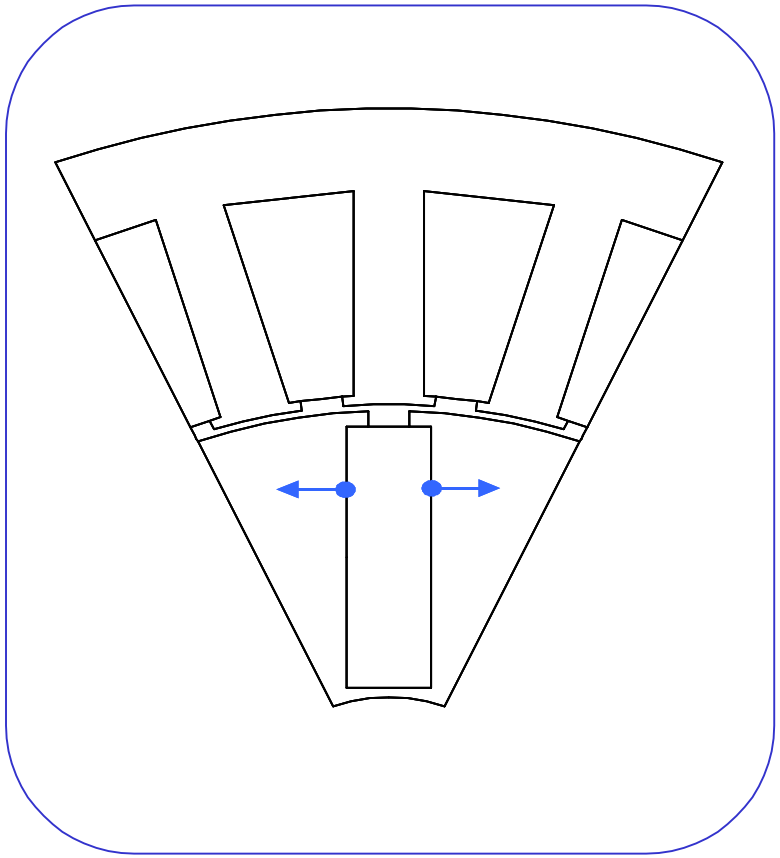
극수에 따른 평균 공극자속밀도

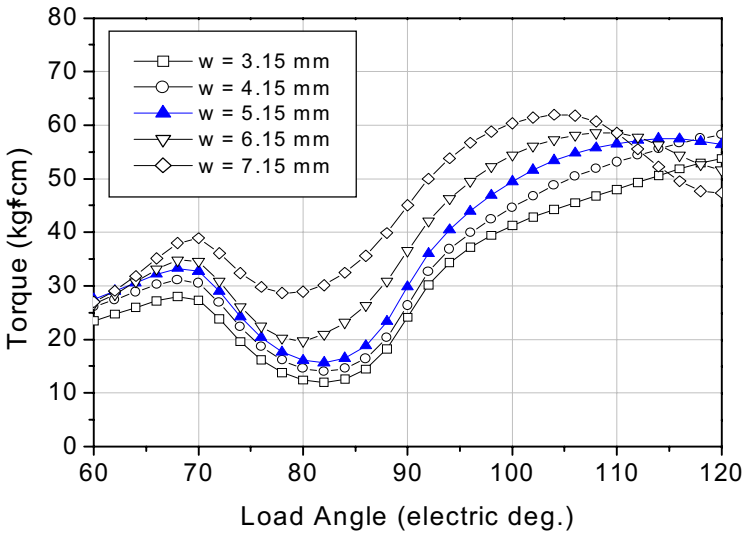


극수에 따른 공극자속밀도 분포

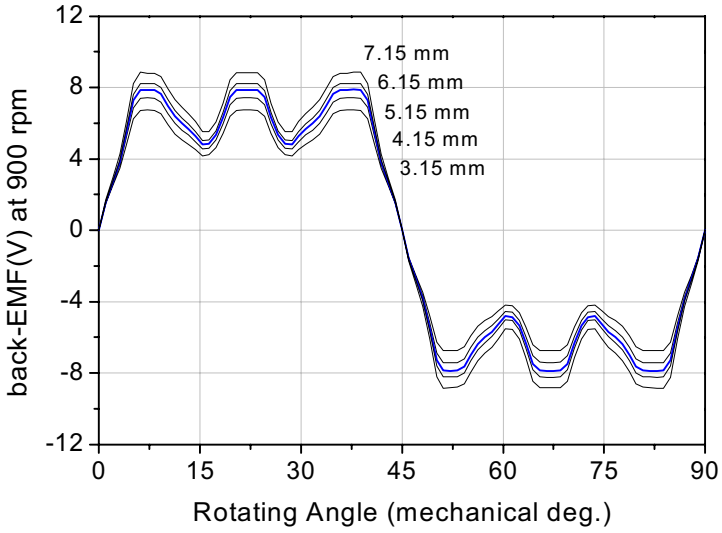
가. 설계 파라미터 변화에 따른 특성

영구자석 폭에 따른 특성



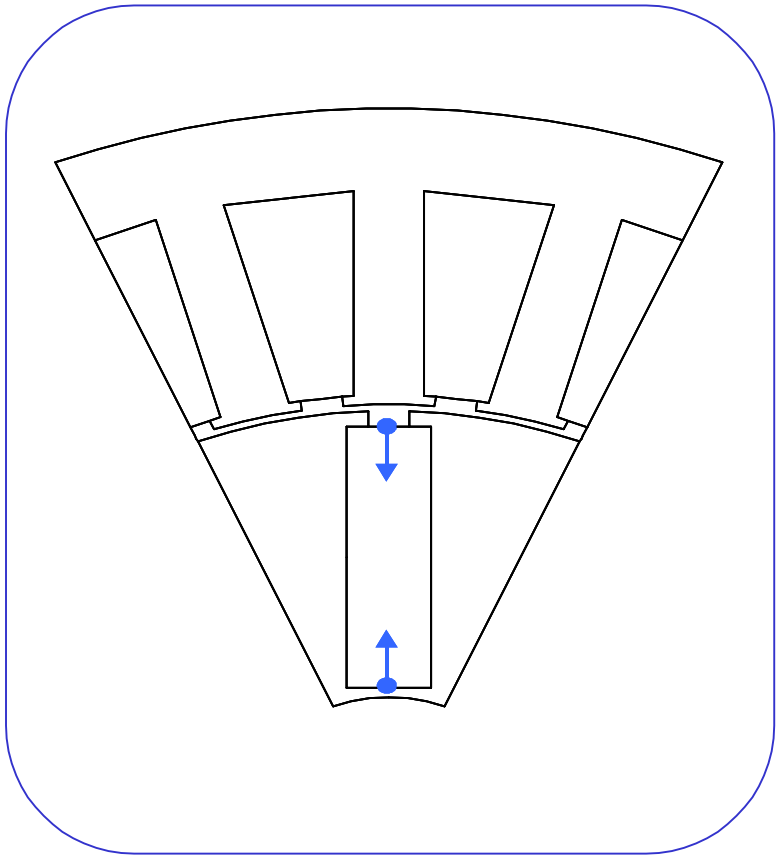


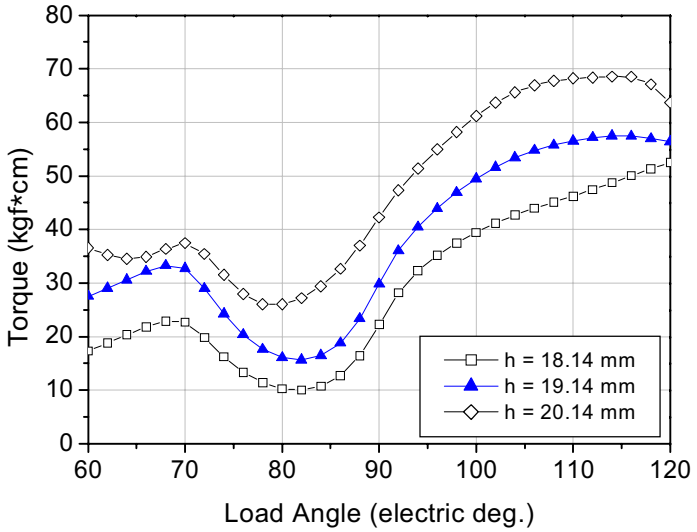
영구자석 폭에 따른 토크



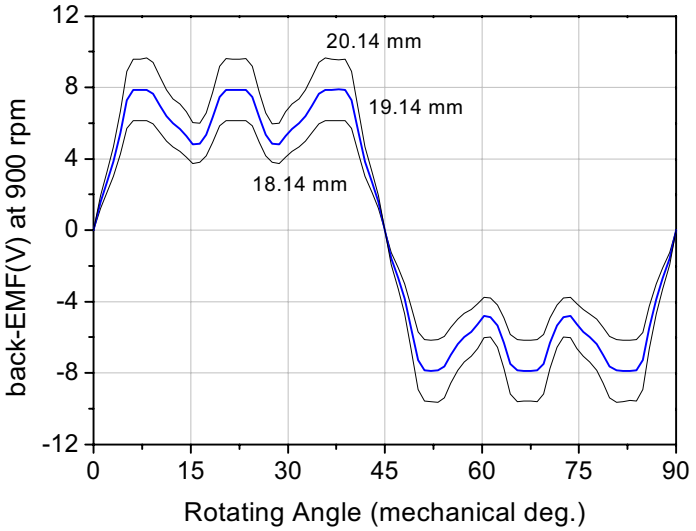
영구자석 폭에 따른 역기전력

영구자석 높이에 따른 특성



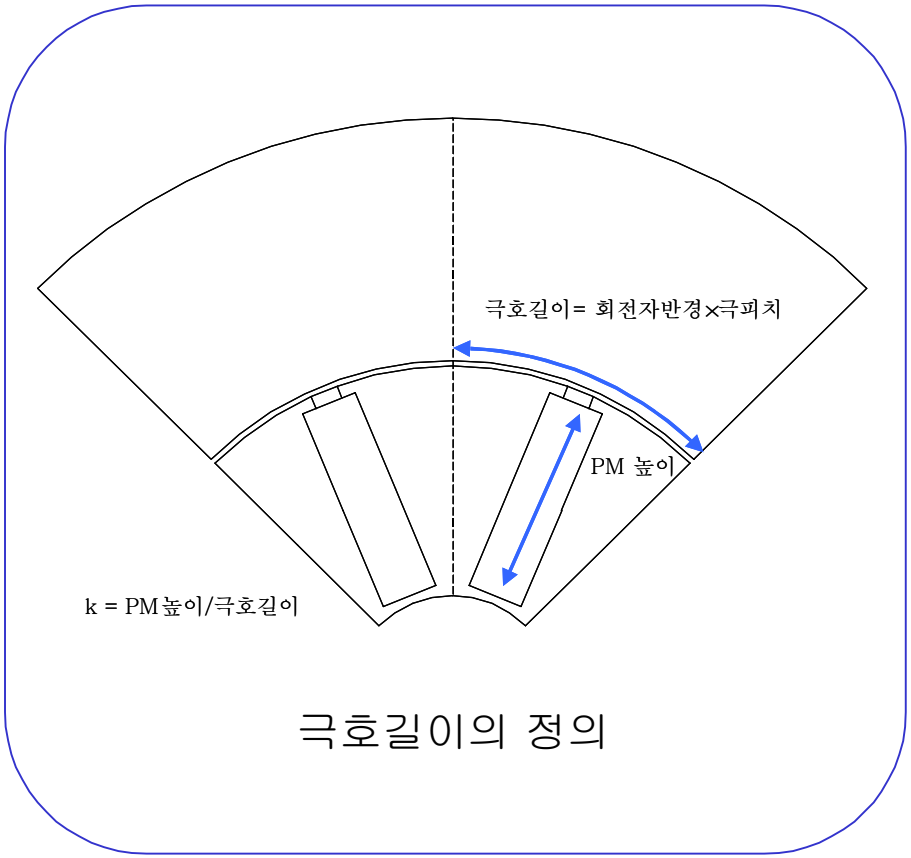


영구자석 높이에 따른 토크



영구자석 높이에 따른 역기전력

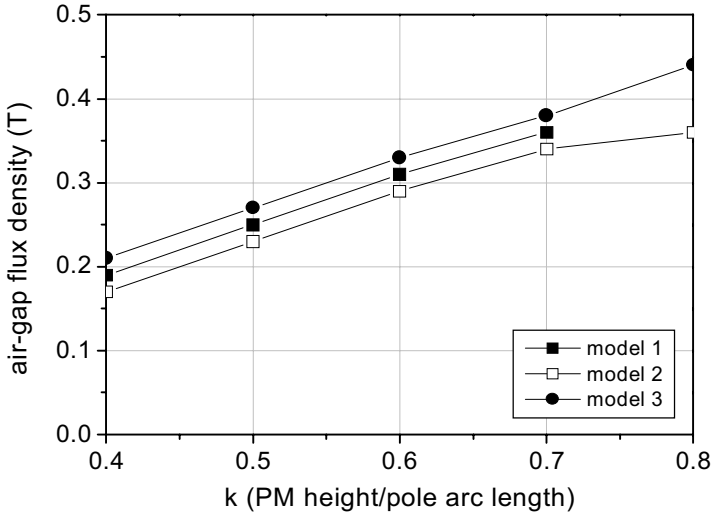
PM 높이 / 극호길이 비에 따른 특성



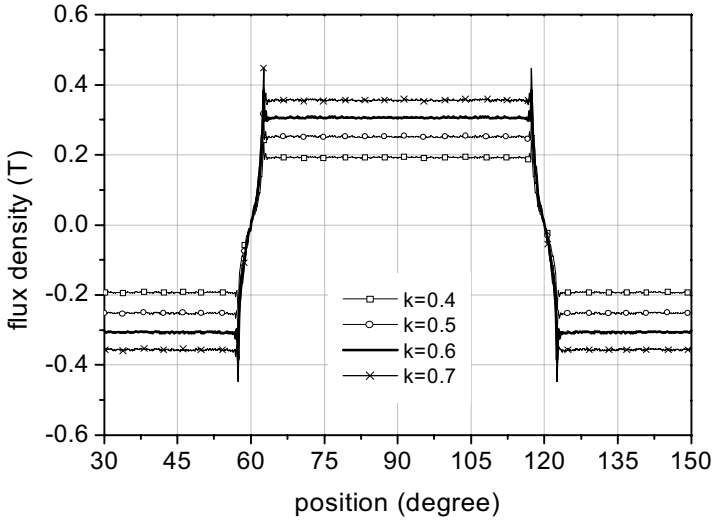
극호길이의 정의

해석 모델의 치수

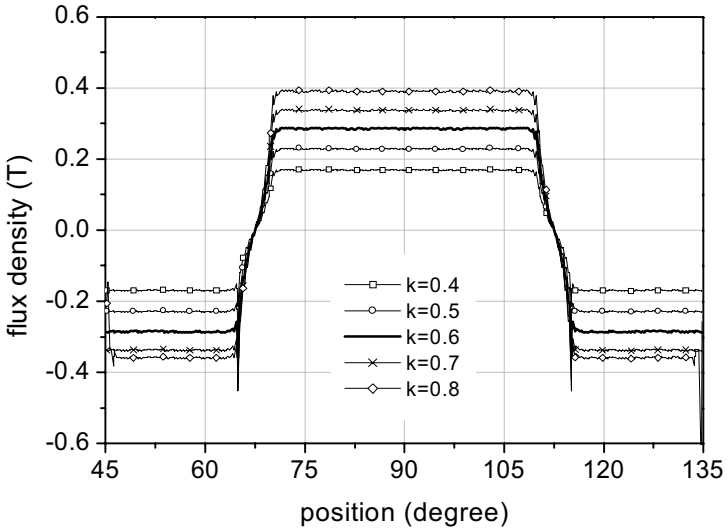
		model 1	model 2	model 3
극수 / 공극 / 회전자 직경		6극 / 0.5mm / 61mm	8극 / 0.5mm / 61mm	6극 / 0.5mm / 80mm
극호 길이		31.68	23.94	41.89
PM 높이	k=0.4	12.772	9.580	16.758
	k=0.5	15.840	11.975	20.947
	k=0.6	19.010	14.370	25.136
	k=0.7	22.176	16.765	29.323
	k=0.8	-	19.160	33.512



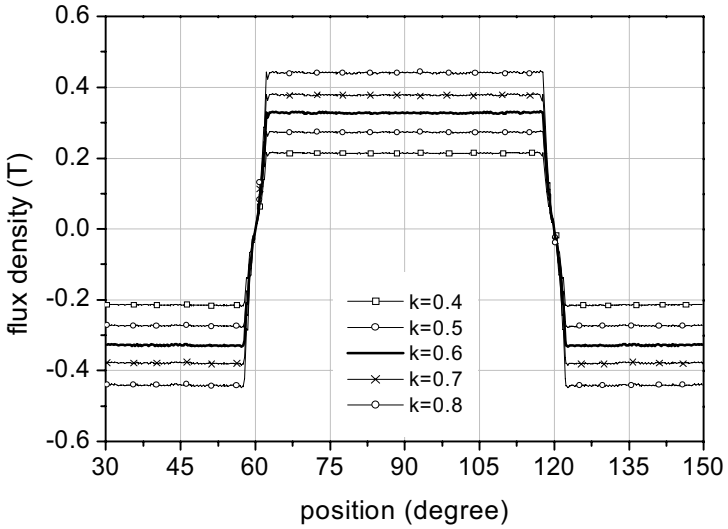
k값에 따른 평균 공극자속밀도



model 1의 공극자속밀도 분포



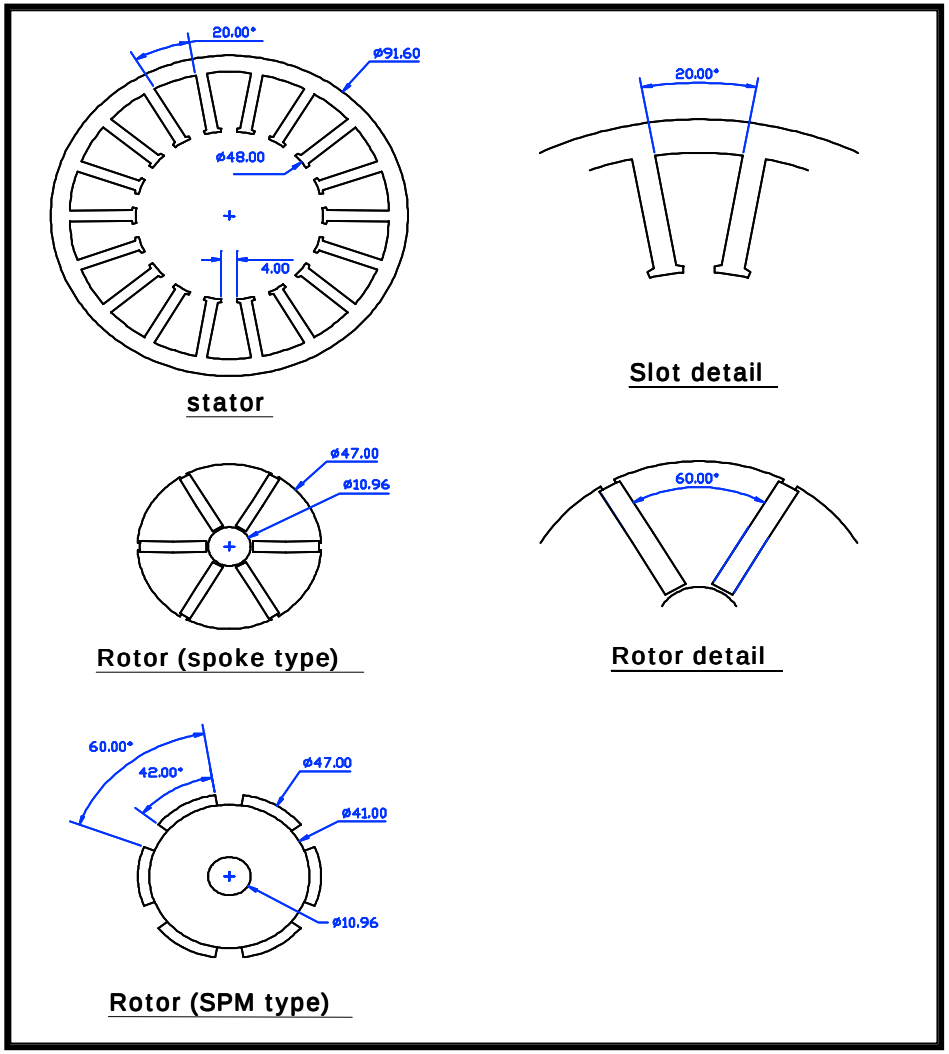
model 2의 공극자속밀도 분포



model 3의 공극자속밀도 분포

나. SPM type과 Spoke type BLDC Motor 특성비교

해석모델의 제원



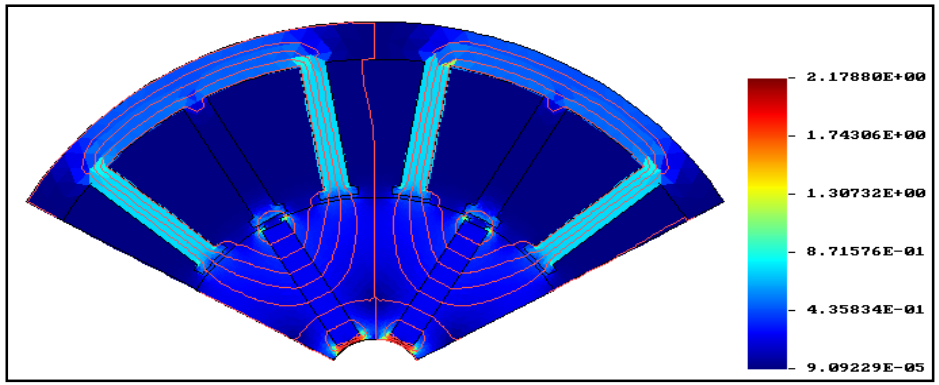
model 1
: spoke type

model 2
: spoke type
(semi-closed slot ;
slot opening = 2mm)

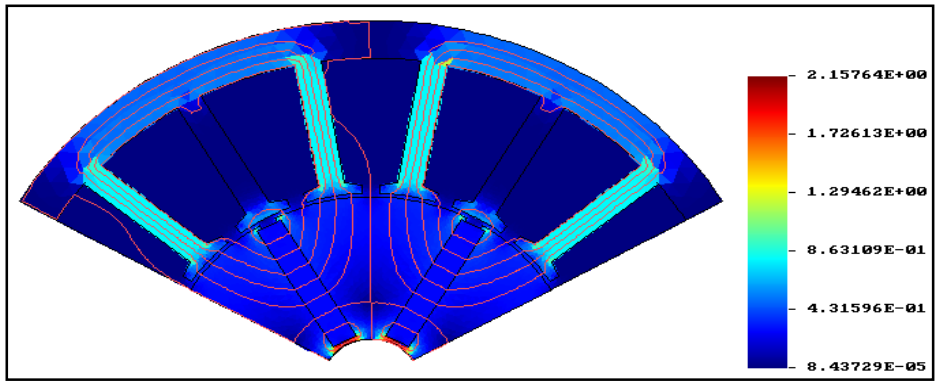
model 3
: SPM type

* 영구자석의 체적은 모두 동일

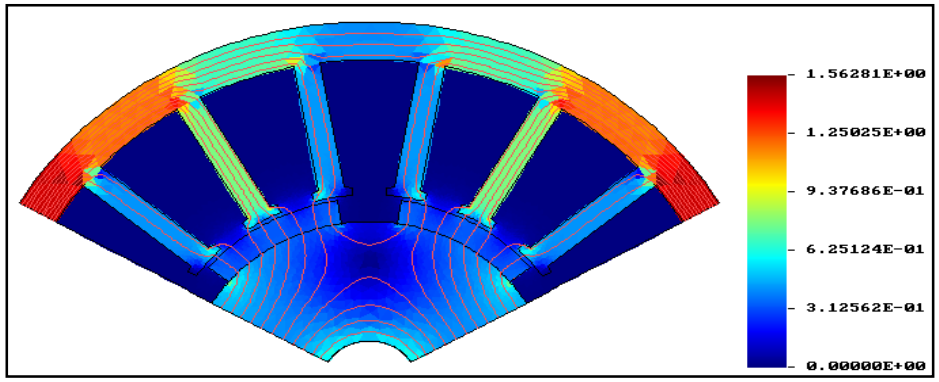
해석결과



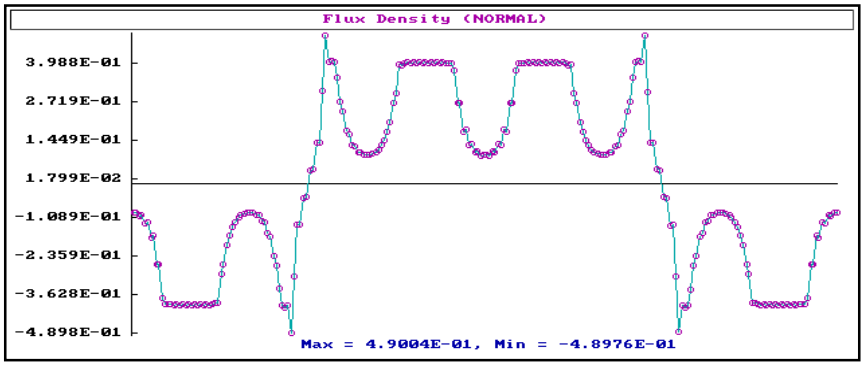
model 1의
등퍼텐셜 분포도



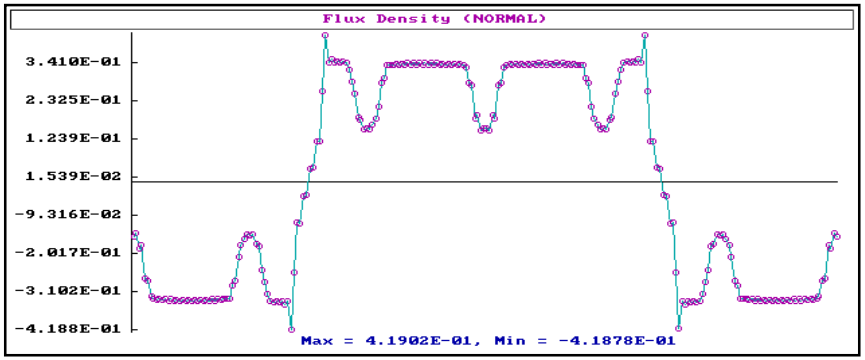
model 2의
등퍼텐셜 분포도



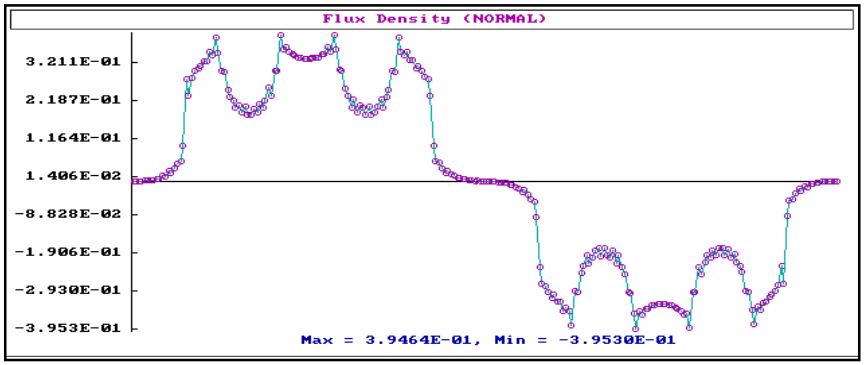
model 3의
등퍼텐셜 분포도



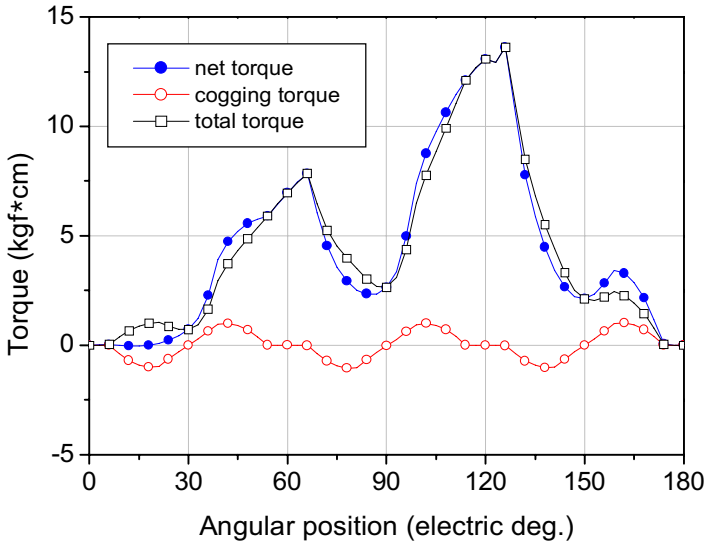
model 1의
공극자속밀도 분포



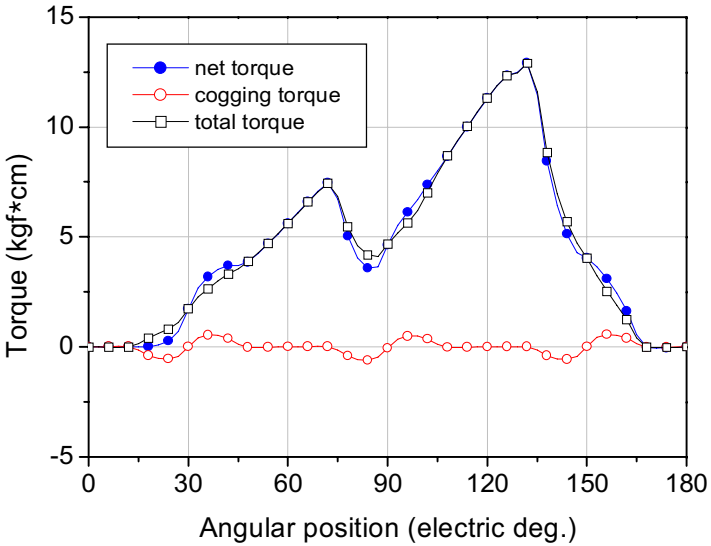
model 2의
공극자속밀도 분포



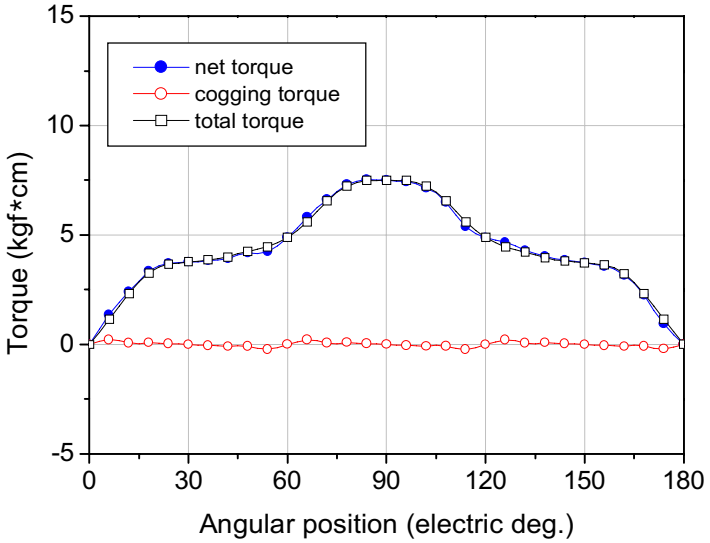
model 3의
공극자속밀도 분포



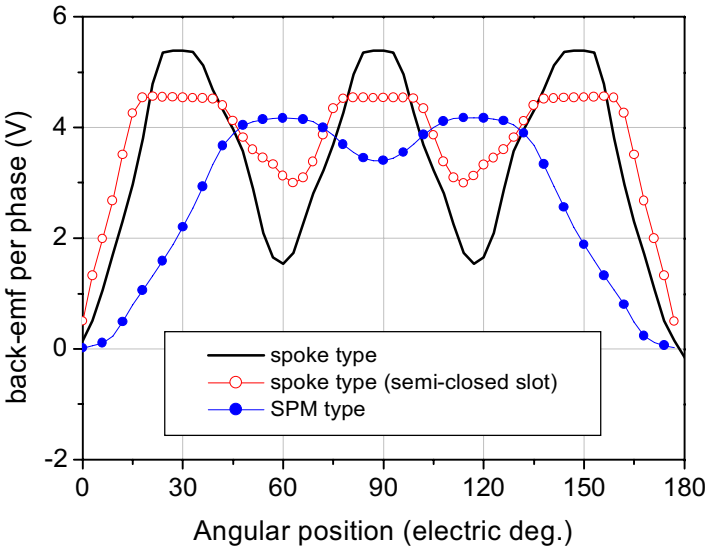
model 1의 토크특성



model 2의 토크특성



model 3의 토크특성

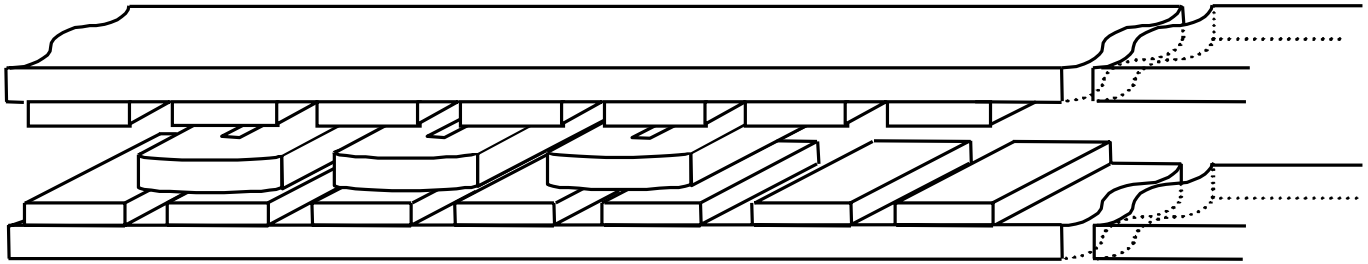


각 모델의 역기전력 특성

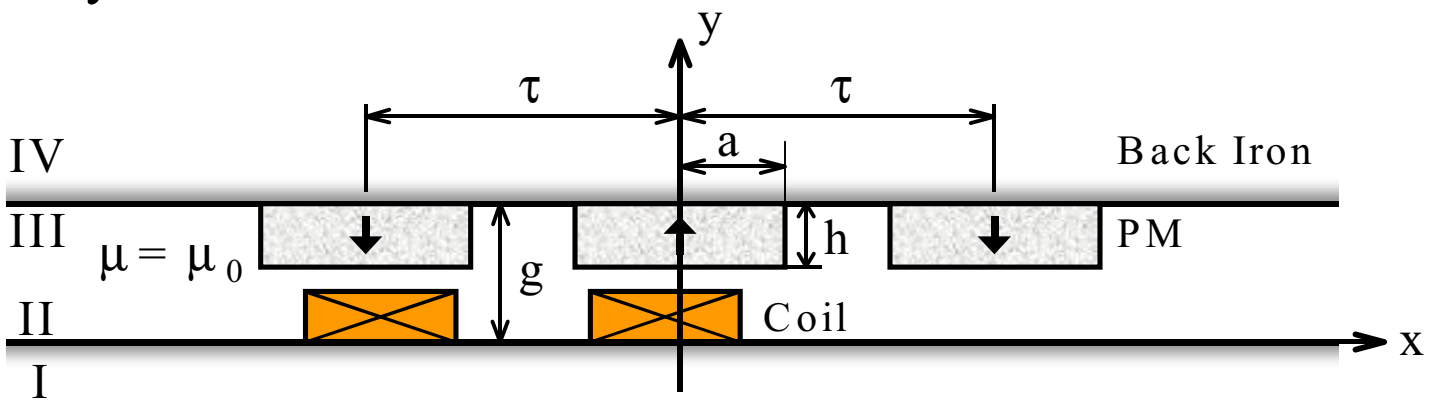
2.6 적용사례(4) – Air core type Linear BLDC Motor

해석모델

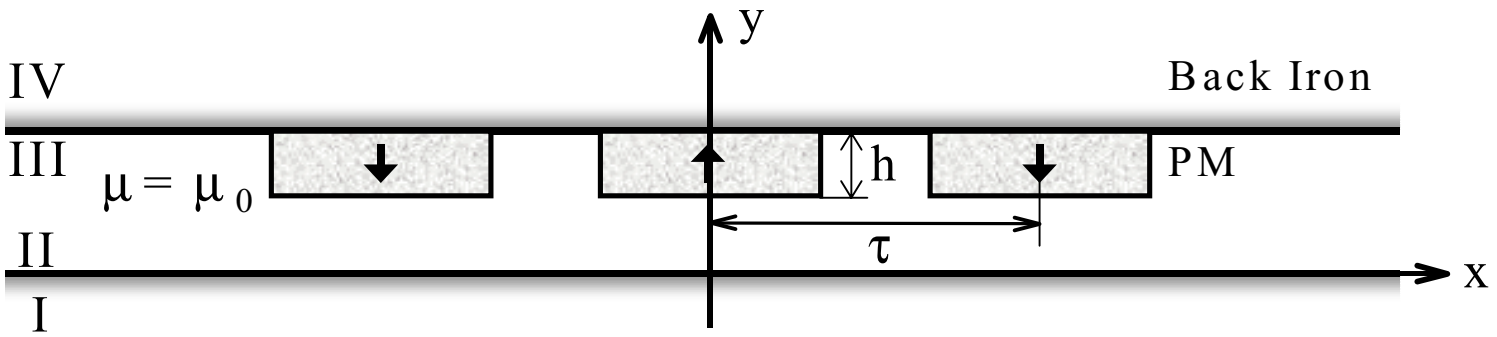
- Motor topology ➡ Air-core type PM linear Motor



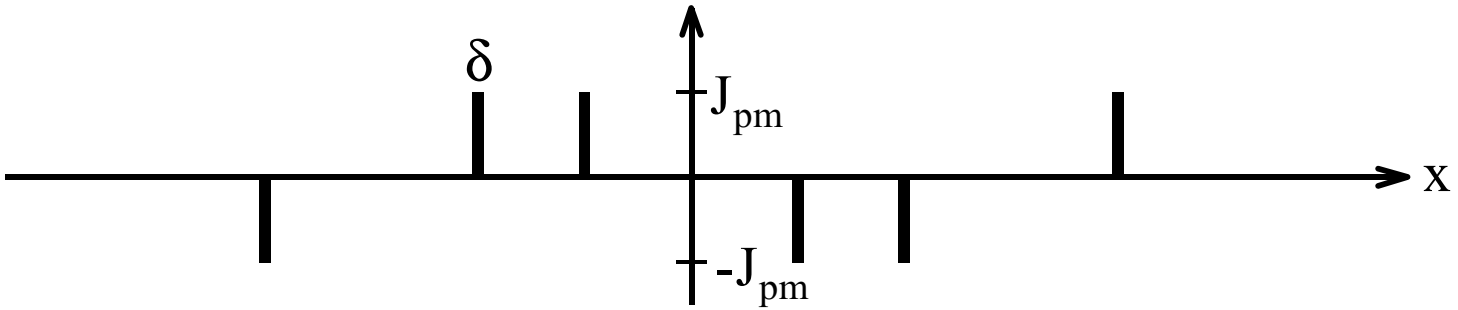
- Analysis model ➡ In order to Space Harmonics Field analysis



Magnetic field by EMC.



Magnets distribution.



Equivalent Magnetizing Current (EMC) of magnets.

- Governing equations of each region.

$$\frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial y^2} = -\mu_0 \, J_p(x) \qquad \text{Region III}$$

- Magnetic Field induced by EMC

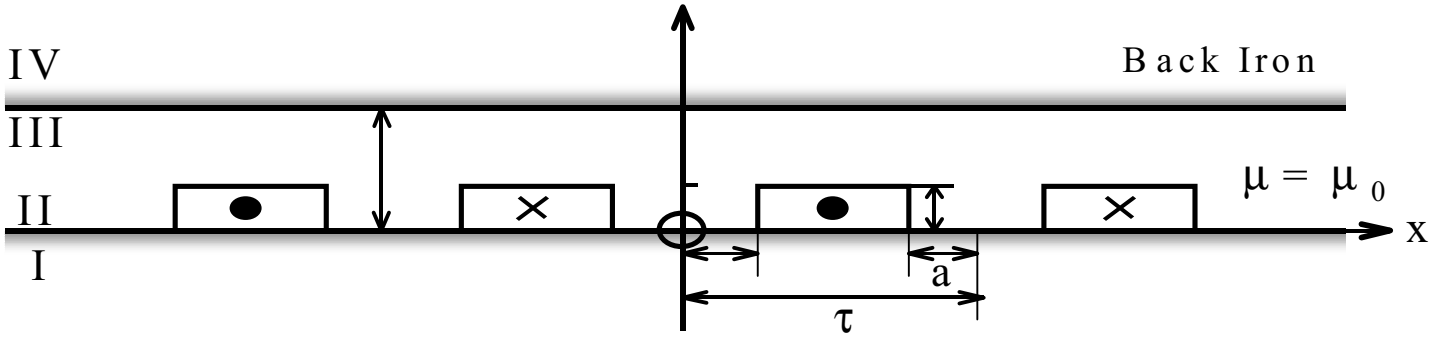
$$\begin{matrix} x \\ II \end{matrix} = \frac{\mu_0}{} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sin(nk)}{\sin(nk)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nk}} - \frac{e^{nk}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{n}{nk} \cdot \sin(nkx)$$

$$\begin{matrix} y \\ II \end{matrix} = -\frac{\mu_0}{} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sin(nk)}{\sin(nk)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nk}} + \frac{e^{nk}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{n}{nk} \cdot s \quad (nkx)$$

$$b_{pn} = \frac{4J_{pm}}{n\pi} [\cos(nka) - \cos nk(a+\delta)] \qquad J \quad (x) = \sum_{=1,3}^{\infty} b \quad \cdot \sin(nkx)$$

- δ is the arbitrary value which approaches zero.
- J_{pm} is current density of PM.

Magnetic field by armature current.



Arbitrary current model.

Governing equations of each region.

$$\frac{\partial^2 A(x)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x)}{\partial} = 0 \qquad \text{Region I, III, IV}$$

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J(x) \qquad \text{Region II}$$

A is the z-axis component of magnetic vector potential.

J is armature current density.

Magnetic field induced by armature current .

$$B_{II}^{X} = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nk(g - h))}{\sinh(nkg)} \right) \sinh(nky) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \sin(nkx) \quad \Rightarrow \quad b_n = \frac{4J_0}{n\pi}$$

$$B_{II}^{y} = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(- \frac{\sinh(nk(-))}{\sinh(nk)} \cos(nk) \right) \cdot \frac{n}{nk} \cdot \sin(nkx) \qquad k = \frac{\pi}{\tau}$$

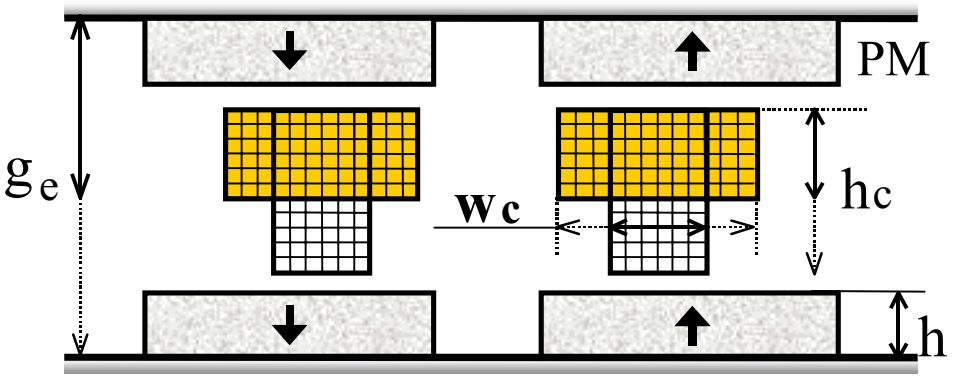
$$B = \frac{\mu}{2} \sum_{n=}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nk}} - \frac{e^{nk}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \sin(nkx)$$

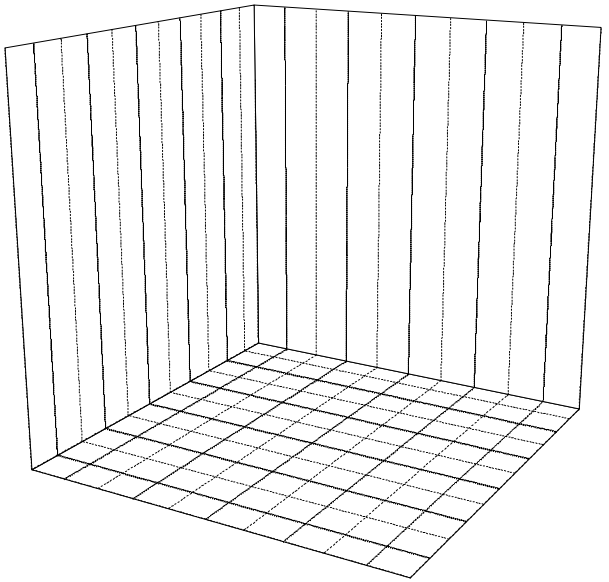
$$B_{III}^{y} = -\frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nk}} + \frac{e^{nk}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \cos(nkx)$$

The resultant magnetic field

Superposition of the magnetic field caused by EMC and armature current.

Shape design of coil area





The shape variation of winding coil area.

The flux density of each subdivision regions is computed by the Space Harmonics Field analysis of EMC

The generated thrust would be varied in spite of the constant MMF.