



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

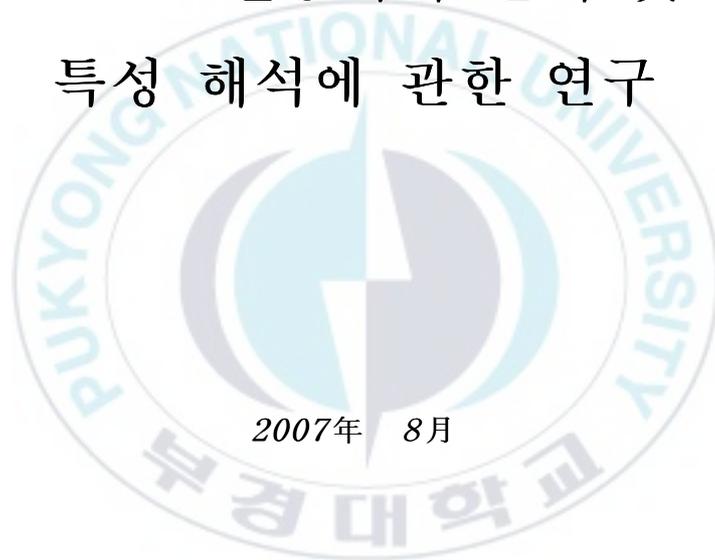
저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

BLDC 전동기의 설계 및
특성 해석에 관한 연구



2007年 8月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

朴 廷 哲

工學碩士學位論文

BLDC 전동기의 설계 및
특성 해석에 관한 연구



指導教授 朴 瀚 錫

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2007年 8月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

朴 廷 哲

이 論文을 朴廷哲의 碩士學位
論文으로 認准함

2007年 6月



목 차

ABSTRACT	ii
1. 서 론	1
2. 기본 이론	2
2.1 BLDC 모터의 기본구조	2
2.2 BLDC 모터의 회전원리	3
2.3 BLDC 모터의 설계	9
3. BLDC 전동기 특성 해석	13
3.1 유한요소법 개요	13
3.2 유한요소해석 정식화	16
4. 해석결과 및 고찰	20
5. 결 론	30
참 고 문 헌	31

*A Study on the Design and Characteristics
Analysis of a Brushless DC Motor*

Jung-Chul Park

Department of Electrical Engineering Graduate School
Pukyong National University

Abstract

In general, because the brushless DC motor has a high power out and could be small size, light weight with magnets and development of a electronic technology use of that have been important. Especially, because a core type brushless DC motor with a silicon steel has a simple shape and its manufacture process is very easy mass production is possible.

This paper describes the characteristics analysis of the brushless DC motor by using the commercial finite element method. The basic design is done by the commercial software(Ansoft RM Exprt) and the characteristic analysis of the brushless DC motor is done by Maxwell software.

We can get design data and characteristics curve of the brushless DC motor from the design software. The design software can change the design data to the analysis model for finite element analysis.

The cogging torque and back e.m.f characteristics are obtained from the finite element analysis.

제 1장 서 론

최근의 멀티미디어 기기를 포함한 정밀 메카니즘은 고 성능, 저 가격화로 급격하게 변화하고 있음에 따라 이들 기기의 핵심 구동원으로 사용되어지는 모터의 특성은 이러한 응용기기의 특성을 좌우하는 중요 요인으로 대우되고 있다. 특히, CD-ROM, VCR, FDD, HDD, CAM CORDER 등 멀티미디어 기기의 정밀 메카니즘에 사용되는 구동용 모터는 정보의 대용량화에 따라 고속화, 소형화, 고 에너지 밀도화를 요구하고 있고, 회전속도의 초정밀 제어특성이 요구되고 있음에 따라 영구자석을 가지는 BLDC 모터의 수요는 급증하고 있다.

일반적으로 BLDC 모터는 고성능 영구자석을 사용하여 고효율을 얻을 수 있어 소형, 경량화가 가능하며, 제어기술 및 반도체 기술의 발전으로 인한 정밀 제어가 가능함으로 그 중요도는 매우 커지고 있다. 특히, 규소 강판을 가지는 Core Type의 BLDC 모터는 구조가 간단하고 제조공정이 단순하여 대량생산이 용이하다.

본 논문에서는 BLDC 전동기의 특성 해석에 대하여 고찰한다. 상용 프로그램인 Rmxpert를 사용하여 기본설계를 하고 특성 해석을 위하여 Maxwell 상용 유한요소 해석 프로그램을 사용한다. 일정한 속도로 회전하는 BLDC 전동기의 코깅 토크 특성 및 역기전력 특성 결과를 통하여 해석의 정확성을 확인한다.

제 2장 기본 이론

2.1 BLDC 전동기의 기본 구조

일반적인 DC 전동기들은 전기자 권선이 회전자에 계자가 고정자에 위치한다. 이러한 구조의 BLDC 전동기는 제작이 매우 어렵기 때문에 BLDC 전동기의 구조는 그림 2.1 과 같이 영구자석형 동기 전동기의 형태와 유사하다. 전기자 권선은 고정자에 위치하고, 회전자는 하나 이상의 영구자석으로 구성된다. BLDC 전동기의 권선은 교류 전동기의 권선과 유사하다.

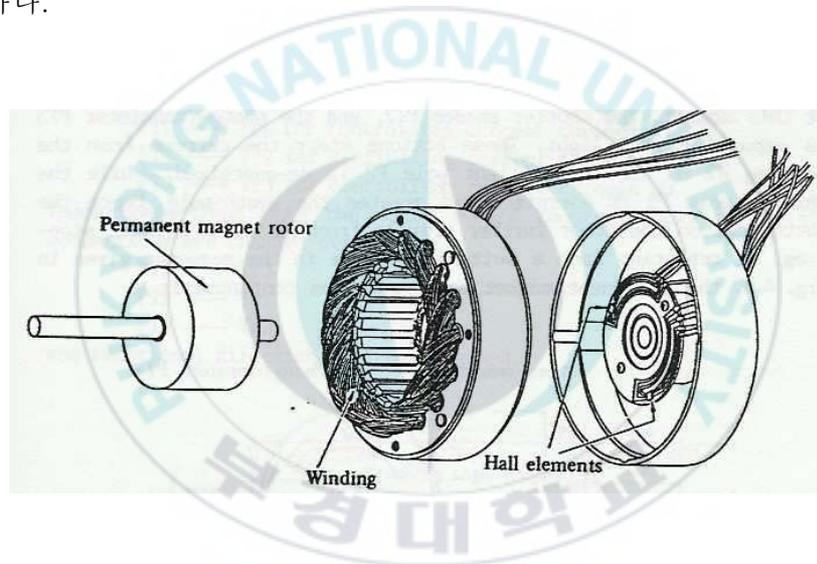


그림 2.1 BLDC 전동기의 구성

Fig. 2.1 Composition of BLDC motor

2.2 BLDC 전동기의 회전원리

일반적으로 3상 BLDC 전동기는 구동전압의 형태에 따라 정현파 구동형과 구형파 구동형 두 가지로 분류할 수 있다. 구형파 구동 BLDC 전동기는 정현파 구동형에 비하여 스위칭 방식이 비교적 간단하고 저가의 정류소가 및 센서류를 이용한 경제적인 운영 시스템을 가질 수 있다. 따라서 본 절에서는 3상 구형파 구동형 BLDC 전동기를 대상으로 토크 발생원리 및 구동원리를 알아본다.

2.2.1 토크 발생원리

아래의 그림 2.2는 4극 6슬롯 120° 구형파 전압 구동 BLDC 전동기의 토크 발생원리도를 나타낸다. 운전 시 상향 두상이 여자 됨을 나타내며 영구자석의 극성을 기준으로 회전하는 위치에 따라 각 상의 여자 순서도를 이용하여 토크를 발생시킴을 알 수 있다.

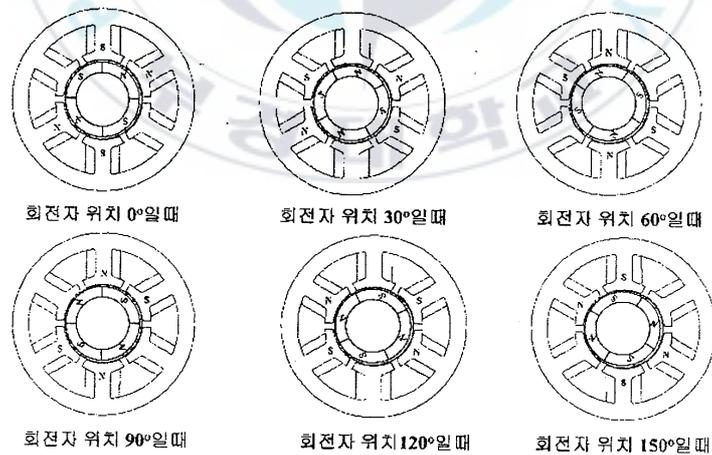


그림 2.2 토크 발생 원리도

Fig. 2.2 Torque production mechanism

2.2.2 회전 원리

그림 2.3은 3상 bipolar 구동되는 BLDC 전동기를 나타낸다. 균일한 간격으로 위치한 위치센서인 photo transistor 를 이용하여 회전자의 위치 정보를 컨트롤러에 전송함으로써 스위칭 패턴에 따른 회전자의 회전을 가질 수 있다. 그림에서 revolving shutter가 축과 같이 물려있으므로 광 소자들은 revolving shutter에 의해서 빛에 노출되기도 하고 되지 않기도 한다. 광 소자 PT1, PT4 그리고 PT5가 빛에 노출되어 있으므로 전류는 Tr1, Tr4 그리고 Tr5를 통해서 흐르게 되고 단자 U와 W는 전압 E를 가지며, 단자 V는 0 전압을 갖는다.

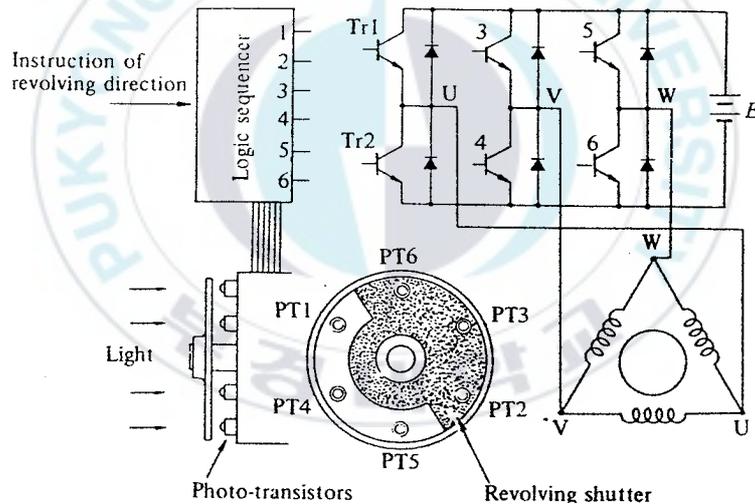


그림 2.3 3상 bipolar 구동 BLDC 전동기

Fig. 2.3 3 phase bipolar driven BLDC motor

이러한 상태에서 전류는 그림 2.4와 같이 단자 U에서 V를 통해서 흐르고, 다른 전류는 W에서 V로 흐르게 된다. 이 그림에서 굵은 화살표는 각 상에서 흐르는 전류에 의해서 발생하는 기자력의 방향을 나타낸다. 그리고 중간에 위치한 화살표는 고정자에서 발생하는 합성 자계의 방향을 나타낸다. 회전자는 그림과 같이 고정자의 자계 방향과 90° 되는 자속을 발생하도록 위치한다. 이와 같은 상태에서 회전자에 시계 방향의 토크가 발생한다.

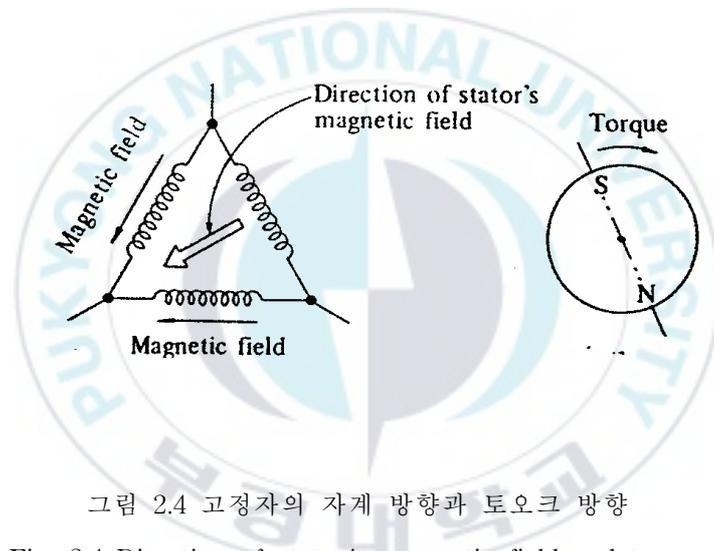


그림 2.4 고정자의 자계 방향과 토크 방향
 Fig. 2.4 Direction of stator's magnetic field and torque

회전자가 30°를 회전한 후, 광 소자 PT5가 OFF 가 되고 PT6가 ON이 된다. 이것은 고정자의 자극을 시계 방향으로 60°를 회전하게 하는 결과를 가져온다. 따라서 회전자의 S극이 가까이 오게 될 때 고정자의 S극은 연속적인 시계 방향의 회전을 발생하기 위하여 더 멀어지게 된다. 광 소자의 회전과 ON-OFF 과정을 그림 2.5에 나타내었다. 역방향으로 회전을 시키기 위해서는 광소자가 빛에 노출이 되지 않았을 경우 ON을 시켜주면 된다.

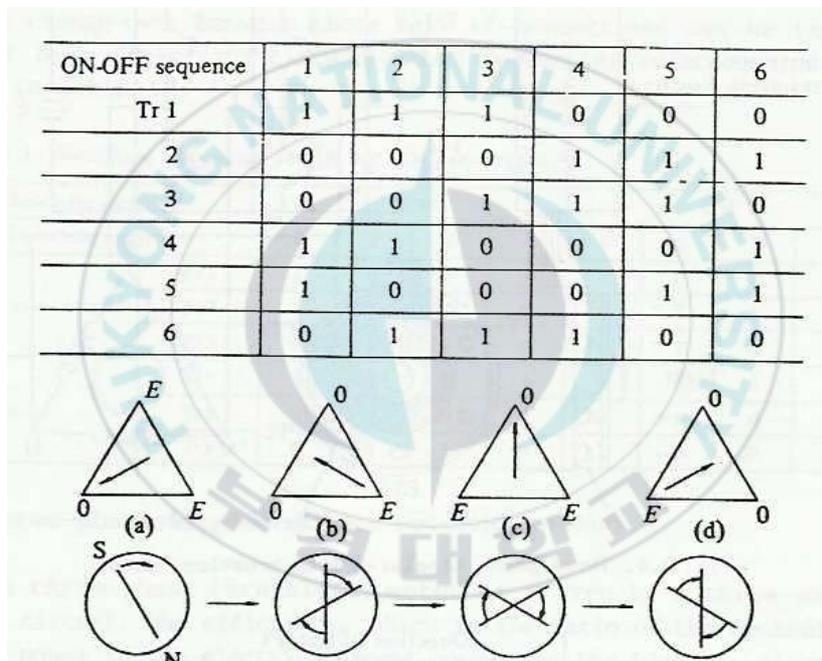


그림 2.5 고정자 자계와 회전자의 시계 방향 회전

Fig. 2.5 Colckwise revolution of the stator's magnetic field and rotor

2.3 BLDC 전동기의 설계

1) 상수 선정

BLDC 전동기의 상수를 선택하는데 고려하여야 할 것은 권선 이용률, 스위칭 소자수, 상수에 따른 토오크 리플 그리고 센서 수 등이다. 표 1에서 보는 바와 같이 상수가 증가하면 권선의 이용률이 증가하고 토오크 리플이 감소하지만 스위칭 소자수와 위치 센서 수가 증가하므로 가격이 비싸지는 단점이 있다.

표 1 상수에 따른 BLDC 전동기의 비교

상수	권선 이용률 %	스위칭 소자 수	Torque Ripple %
1	50	2	100
2	50	4 or 8	30
3	67	6 or 3	15
4	75	8	10
6	83	12	7
12	92	24	3

2) 극수 선정

극수의 선정은 여러 가지 변수에 의하여 결정되지만 설계시 고려해야 할 중요한 것은 다음과 같다.

- 1) 영구자석 재료 및 등급
- 2) BLDC 전동기의 형태(외전형, 내전형 등)
- 3) 회전자와 영구자석의 기계적인 부착
- 4) 회전 속도 및 관성 모멘트

극수는 고정자 철손과 스위칭으로 인한 손실의 저감 그리고 정류 주파수의 제한으로 최대 회전수의 역수에 비례하여 정해진다. 일반적으로 고속회전 전동기에서는 2, 4극 전동기를 우선으로 하며, 저속회전에서 토크 변동이 적은 모터는 극수를 되도록 많이 선정하여야 한다. 또한 극수를 증가시키면 회전자 요오크의 두께를 얇게 할 수 있는 반면에 극수를 증가시키면 전동기의 크기를 줄일 수 있다.

극수의 선정에 영향을 미치는 중요한 점은 가격이다. 예를 들면 Bonded magnet 인 경우에는 magnet를 자화 시키는데 극수의 많고 적음에 관계가 없으나 Samarium cobalt를 사용한 Arc 또는 Block magnet 의 경우 극수가 증가하면 자화비용이 증가한다. 일반적으로 BLDC 전동기에서는 6, 8극이 많이 사용되며 특히 4극이 가장 많이 사용되고 있다.

3) 슬롯수 선정

아래의 표 2-표 7은 BLDC 전동기의 상수에 따른 슬롯수와 극수의 조합관계를 나타내며, BLDC 전동기의 슬롯수를 선정하기 위해서는 다음의 특성을 고려하여야 한다.

- 1) Cogging torque
- 2) Manufacturing cost
- 3) Commutation connection
- 4) Output per unit volume
- 5) Minimum slots between pole tips

표 2 2상 전동기의 슬롯수/극수 조합

슬롯수	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
극수	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	6	10	4	6	4	6	4	6	4	6	4
			6	14	6	10	8	10	6	10	6
			10		10	18	10	14	10	14	8
			12		18	22	12	22	12	18	10
			14		20		14	26	14		12
							20	30	26		14
							22		28		18
							24		30		20
							26		34		30
							28				34
											36
											38
											40
											42

표 3 3상 전동기의 슬롯수/극수 조합

슬롯수	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
극수	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
			6	8	10	6	8	8	6	10	8	6	8	8	6	8
			8	10		8	14	10	8	20	10	8	10	10	8	10
			12	18		12	16	16	10	22	14	10	14	14	10	14
						14		20	12	26	20	12	16	16	12	16
						16			18		22	14	26	26	14	20
									20		26	16	28	28	16	32
									22		28	22	32	32	20	34
									24			24	34	34	28	38
												26			30	40
												28			32	
												30			34	
												32			38	
															40	

표 4 4상 전동기의 슬롯수/극수 조합

슬롯수	8	16	24	32	40	48
극수	2	2	2	2	2	2
	4	4	6	4	6	4
		6	10	6	10	6
		10	18	8	14	10
		12		10	26	12
		14		12	30	14
				14	34	18
				20		20
				22		30

표 5 5상 전동기의 슬롯수/극수 조합

슬롯 수	5	10	15	20	25	30	35	40	45
극수	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		6	6	6	6	6	6	6	6
		8	12	8	8	8	8	8	8
				12	10	12	12	12	12
				14	16	18	14	14	14
				16	18	22	22	24	16
					20	24	24	26	18

표 6 6상 전동기의 슬롯수/극수 조합

슬롯수	12	24	36
극수	2	2	2
	10	4	6
		10	10
		20	14
			22
			26
			30

표 7 코깅 토크 저감을 위한 3상 BLDC 전동기의 슬롯수/극수 조합

0.75		1.125		1.5	
slot	극수	slot	극수	slot	극수
3	4	9	8	3	2
6	8	18	16	6	4
9	12	36	32	9	6
12	16			12	8
15	20			15	10
18	24			18	12
21	28			21	14
24	32			24	16
2.25		3		3.75	
slot	극수	slot	극수	slot	극수
9	4	6	2	15	4
18	8	12	4	30	8
27	12	18	6	45	12
		24	8		
		30	10		
		36	12		
4.5		5.25		6	
slot	극수	slot	극수	slot	극수
9	2	21	4	12	2
18	4	42	8	24	4
27	6			36	6
36	8			48	8

제 3 장 BLDC 전동기의 특성 해석

3.1 유한요소법 개요

자연현상에 대한 수식적 표현은 계변수에 의해 특성화되는 경계치를 가지는 연속치 문제로서 볼 수 있으며 이는 계 전체를 지배하는 편미분 방정식으로 표현된다. 따라서 이와 같은 편미분 방정식을 만족하는 해를 구하면 그 해의 분포함수를 알 수 있다.

편미분 방정식의 해를 구하는 방법으로 계를 집중적인 정수로 보는 해석적인 방법과 분포계로 보는 수치해석적인 방법으로 나눌 수 있다. 해석적인 방법으로는 변수분리법이나 푸리에 급수에 기반을 둔 공간고조파법 등이 있으며 이를 이용하여 계의 지배방정식을 풀기 위해서는 많은 가정을 수반하여야 해석이 가능하므로 해의 정밀도가 낮고 모델에 따라서 해석식이 달라지므로 범용성에 제약을 가지고 있다. 반면에 수치해석적인 방법은 이러한 연속치 문제를 유한개의 이산 값을 가지는 대수방정식 문제로 치환하여 푸는 방법으로써 해석적 방법에 의해 해의 정밀도와 범용성 면에서 우수한 장점을 가지고 있으며 최근 컴퓨터의 급속한 발달로 고속화, 대용량화, 저가격화가 실현되어 점차 관심이 증대되고 있다.

수치해석적인 방법으로는 여러 가지 있으나 해석모델의 복잡한 형상 및 재질의 비선형성 등을 처리하기가 비교적 용이한 유한요소법이 많이 사용되고 있다. 유한요소법은 1950대 항공기의 기체강도를 계산하기 위한 구조역학 분야에 처음 도입되어 그 후 토목, 조선공학 등의 분야로 널리 확산되어 이용되었으며 특히 전기공학 관련 분야에서는 1960년대 후반부터 1970년대를 거쳐 지금까지 가장 널리 사용되고 있다.

유한요소법은 그 명칭에서 알 수 있듯이 대상물체 또는 영역을 유한한 크기를 갖는 부분영역(요소)으로 나누고, 각 영역에 대해 원래의 미분방

정식으로부터 변분원리 또는 가중잔차법 등과 같은 방법을 이용하여 근사화시켜 얻어진 관계식을 개개의 요소에 적용하여 전 영역에 대한 유한개의 방정식을 구하고 이것의 미지수를 구하는 방법이다.

유한요소법을 이용하여 편미분방정식을 정식화하는 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있는데 그 하나는 변분법으로서 임의의 포텐셜 분포를 가정할 때 실제의 자연현상으로 존재하는 분포는 포텐셜 에너지가 최소로 되도록 한다는 자연법칙을 이용하는 방법이고, 또 하나는 Galerkin법으로서 계에서 에너지 범함수의 구성이 불가능한 경우에 그 계의 지배방정식을 구하면 가중잔차법의 원리에 의해 형상함수를 가중함수로 하여 근사해를 구할 수 있다.

1.1 유한요소법의 해석수준

유한요소법을 전기기기의 해석에 적용할 경우 전처리, 유한요소정식화, 풀이, 후처리의 순서로 이루어지며 각 단계를 설명하면 아래와 같다.

해석문제의 정의 : 해석하고자 하는 현상에 대해 정의를 하고 그 계의 지배방정식을 유도한다. 이때에 해석방법(차원, 재료의 취급 및 구동함수 등)을 결정한다.

전처리 : 해석문제가 정의되고 해석대상을 유한개의 영역으로 분할(요소분할 : Preprocess)한다. 이때 분할하는 요소의 종류는 시험함수와 각 절점의 자유도에 의해 결정된다. 일반적으로 2차원의 경우 3절점의 3각형 요소가 이용되고 3차원의 경우 8절점 6면체 요소가 많이 사용되고 있다. 요소의 절점이나 자유도에는 여러 가지 조합이 있을 수 있으나 일반적으로는 1차원 요소를 사용하고 요소수를 늘리는 것이 해의 정확도면에서 유리한 것으로 알려져 있다.

유한요소 정식화 : 요소의 형태를 정의하고 요소분할을 한 다음 각 요소에 대하여 요소방정식을 유도하여야 한다. 이때에 요소방정식은 변분원리 또는 가중잔차법을 사용하여 각 절점에 대한 선형 대수방정식을 유도하게 되는데 이것을 유한요소 정식화라고 한다. 각 요소방정식이 얻어진 후 각 요소방정식을 합하여 계전체에 대한 계 방정식을 유도한게 된다. 이때 얻어진 방정식은 미분방정식에서 선형대수 방정식으로 변환되기 때문에 컴퓨터를 사용하여 쉽게 해를 구할 수 있게 된다.

후처리 : 유한요소 해석결과 얻어진 결과는 보통 미지수가 포텐셜이므로 여기서 바로 물리적인 의미를 도출해 내는 것은 어렵다. 따라서 구해진 포텐셜을 이용하여 물리적인 의미가 있는 다른 양을 계산하거나 또는 물리적인 의미가 있는 양들을 시각적으로 그래프 처리를 하는 과정을 후처리 과정이라고 한다. 자계해석에서 주로 얻고자 하는 물리적인 양은 자속밀도, 인덕턴스, 전자력이고 그래픽적으로 유용한 정보는 자속분포, 자속밀도 분포 및 힘 밀도 등이다.

3.2 유한 요소 해석 정식화

BLDC 전동기를 2차원 유한요소 해석을 하기 위한 Maxwell 및 보조 방정식은 다음과 같다.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_o + \vec{J}_e \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (3.4)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.5)$$

$$\vec{M} = \chi \vec{H} + \vec{M}_r \quad (3.6)$$

여기서, \vec{H} : 자계의 세기 [A/m],

\vec{E} : 전기장의 세기 [V/m],

\vec{B} : 자속 밀도 [Wb/m²],

\vec{J}_o : 권선 전류 밀도 [A/m²],

\vec{J}_e : 유도전류 밀도 [A/m²],

\vec{v} : 도체의 이동속도 [m/sec],

μ : 재료의 투자율 [H/m],

σ : 2차측 도체의 등가 도전률 [moh/m].

\vec{M} : 자화량, χ 는 자화율, \vec{M}_r 은 잔류 자화량.

식(3.5)를 식(3.2)에 대입하여 정리하고 $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ 의 관계를 이용

하여 식(3.2)를 \vec{H} 에 대해 정리하면 식 (3.7)과 같다.

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu}(\vec{\nabla} \times \vec{A}) - \frac{1}{\mu_r} \vec{M}_r \quad (3.7)$$

식(3.7)을 식(3.1)에 대입하여 정리하면 다음식과 같다.

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J}_o + \vec{J}_e + \vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu_r} \vec{M}_r \quad (3.8)$$

이동 좌표계를 사용하면, 식(3.3)의 속도항이 없으므로, 2차 도체판에 유기되는 기전력 \vec{E} 는 식(3.9)과 같이 표현된다.

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (3.9)$$

전동기가 1차 철심의 적층방향으로 무한하다고 가정하면, 앞에서 전제 한 가정과 같이 자기벡터 포텐셜 \vec{A} 와 전류밀도 \vec{J} 는 z 축 방향으로만 존재하게 된다. 또한, 잔류자화량 \vec{M}_r 이 x, y 성분만 존재한다고 보면 식(3.10)과 같은 자기벡터 포텐셜을 이용한 해석영역의 2계 편미분 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = -J_o \\ + \sigma \frac{dA_z}{dt} - \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial M_{rx}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

해석영역 각각의 요소에 대하여 자기벡터 포텐셜 A^e 를 1차 형상함수 N_{ie} 로 근사화 해서 가중잔차법을 위한 가중함수 N_{je} 를 도입하고 Galerkin법을 이용하여 잔차를 전영역에 대해서 적분하여 잔차를 영으로 하기 위해 각 요소에 대해 정식화하면 다음과 같은 식으로 전개된다.

$$\begin{aligned}
 & \int_{s^e} \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) A_{ie} dx dy \\
 & - \int_{s^e} \frac{1}{\mu_r} \left(M_{rx}^e \frac{\partial N_{je}}{\partial y} - M_{ry}^e \frac{\partial N_{je}}{\partial x} \right) dx dy \quad (3.11) \\
 & - \int_{s^e} J_{\sigma} N_{je} dx dy - \sigma \frac{d}{dt} \int_{s^e} \sum_{i=1}^3 N_{ie} N_{je} A_{ie} dx dy = 0 \\
 & \quad (j = 1, 2, 3)
 \end{aligned}$$

식 (3.11)의 요소방정식을 전요소에 대하여 조립하면, 식 (3.12)와 같은 각절점에 대한 자기벡터 포텐셜과 각 상전류에 대한 선형연립방정식을 얻게 된다.

$$[[S] - [C]] \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} [[T] [0]] \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} = [G] \quad (3.12)$$

여기서 [S] 는 절점의 위치와 투자율에 관계된 계수행렬, [C] 는 강제전류밀도의 계수행렬, [T] 는 와전류밀도의 계수행렬, [G] 는 등가 자화전류밀도에 해당되는 구동 행렬을 나타낸다. 식 (3.12)은 방정식의 수보다 미지수가 3개(각 상전류에 해당) 더 많은 형태이므로 해를 구하기 위하여 다음에서 기술하는 각상에 대한 전압 방정식과 결합되어 진다.

각 절점의 자기벡터 포텐셜 $[A]$ 와 각 상의 권선에 흐르는 전류 \vec{I} 를 미지수로 하는 식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] & -[C] \\ [0] & [R] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [Z] & [0] \\ l_{stk}[C]^T & [L_o] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{G\} \\ \{V\} \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

식 (3.13)의 시간미분항을 후퇴차분법을 이용하여 처리하여 식을 정리하면 식(3.14)와 같은 회로방정식을 고려한 전체 시스템 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] + \frac{[Z]}{\Delta t} & -[C] \\ -[C]^T & -\frac{[L_o] + \Delta t [R]}{l_{stk}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} \frac{[Z]}{\Delta t} & [0] \\ -[C]^T & -\frac{[L_o]}{l_{stk}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}_t + \begin{Bmatrix} \{G\} \\ \frac{\Delta t}{l_{stk}} \{V\} \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (3.14)$$

제 4 장 해석 결과 및 고찰

본 논문에서는 BLDC 전동기의 설계를 위하여 상용 프로그램인 Rmxprt를 사용하고, Maxwell 상용 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 특성을 해석 한다

상용 설계 프로그램인 Rmxprt는 설계하고자 하는 전동기의 고정자, 권선, 회전자 그리고 축의 순으로 원하는 설계값을 대입하게 되면 기본 설계를 해주며, 자기 등가회로법을 사용하여 특성해석을 해 주는 프로그램이다. 본 논문에서 설계하고자 하는 BLDC 전동기의 설계제원은 상수 : 3, 출력 :56[W], 정격전압 : 310[V], 극수 : 8, 슬롯 수 : 12, 정격 속도 : 2050[RPM] 이다. 그림 4.1은 BLDC 전동기 설계를 위한 입력 창이다.

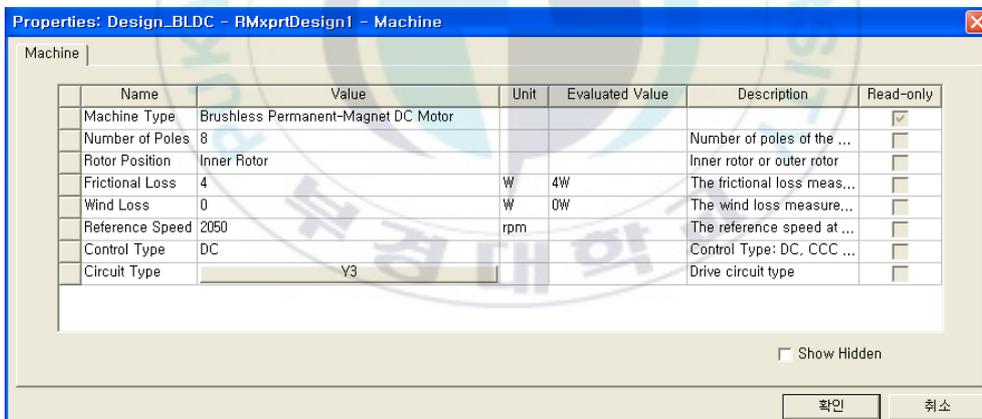


그림 4.1 BLDC 설계 입력창
Fig. 4.1 Input window for BLDC motor

그림 4.2는 고정자에 감기는 전기자 권선에 대한 입력창을 나타낸다. 전 기각도에 따른 트리거 펄스는 120도이며 트랜지스터 및 다이오드에 의 한 전압 강하를 2[V]로 정한다. 그림 4.3은 고정자 설계를 위한 입력창이 며 축 방향 길이는 11[mm]이며, 고정자 슬롯의 형상도 결정할 수 있다. 또한 고정자의 재료의 특성도 입력할 수 있다.

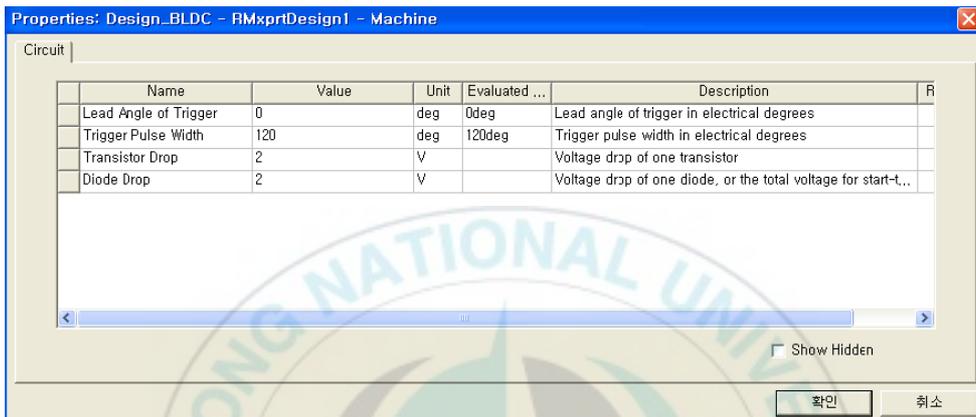


그림 4.2 고정자 권선 설계 입력창

Fig. 4.2 Input window for stator winding design



그림 4.3 고정자 형상 설계 입력창

Fig. 4.3 Input window for stator design

그림 4.4는 그림 4.3에서 결정한 고정자 슬롯의 설계를 위한 입력창이다. 고정자 슬롯에 대한 자료 중에서 그림과 같은 슬롯을 선택하였으며 각 변수에 대한 값을 입력할 수 있다.

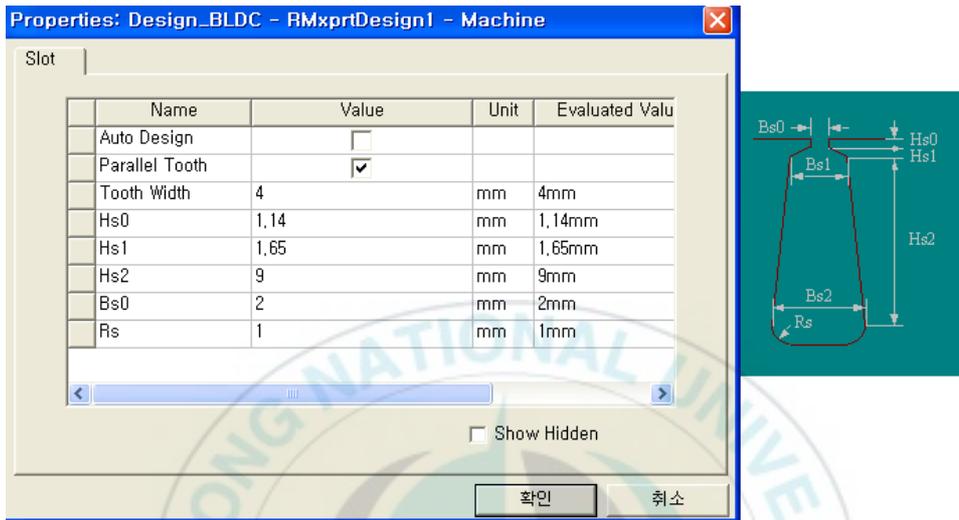


그림 4.4 고정자 슬롯 설계 입력창

Fig. 4.4 Input window for stator slot design

그림 4.5는 고정자 권선의 상세 설계를 위한 입력창이다. 그림 4.2를 기준 값으로 하여 권선의 연결, 병렬 회로수, 권선수, 피복 두께, 권선 직경 등을 입력할 수 있다. 오른쪽 그림은 입력에 따른 고정자 권선의 배치를 자동적으로 보여주고 있다. 그림 4.6은 회전자 형상 설계를 위한 입력창이다. 회전자 재료의 특성을 입력할 수 있으며 영구자석의 모양도 결정할 수 있다.

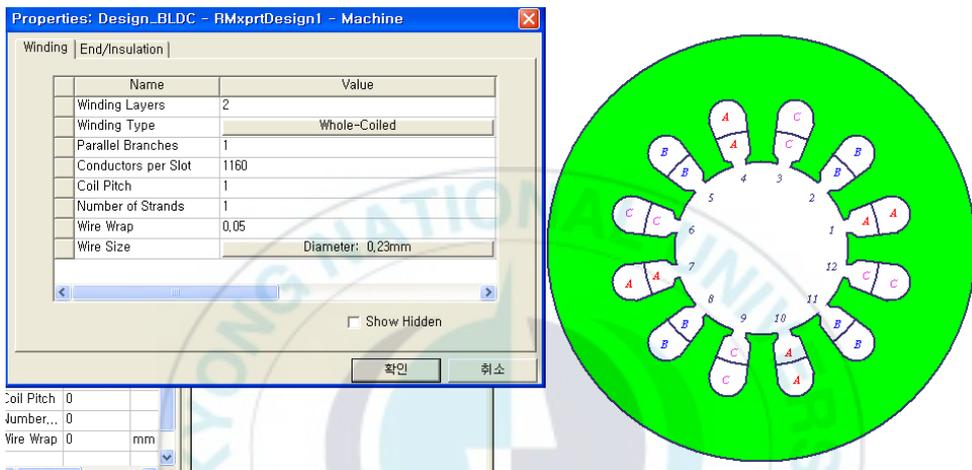


그림 4.5 고정자 권선 상세 설계 입력창

Fig. 4.5 Input window for detailed stator winding design

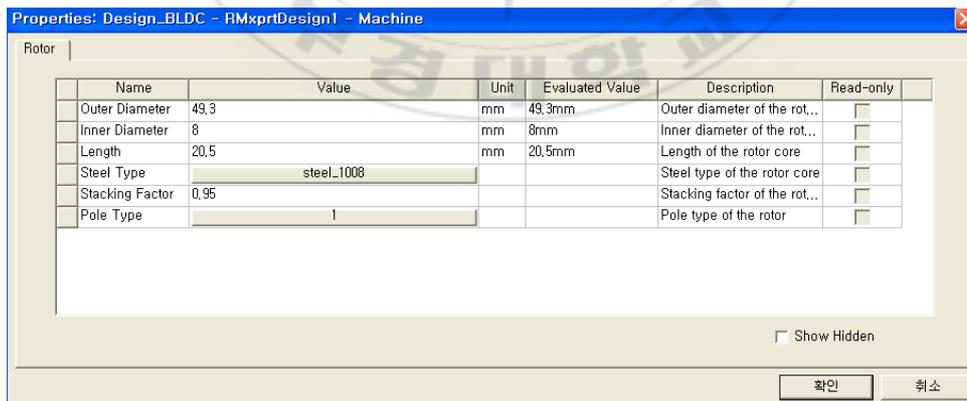


그림 4.6 회전자 형상 설계 입력창

Fig. 4.6 Input window for rotor design

그림 4.7은 회전자에 부착되는 영구자석의 형상 설계를 위한 입력창이다. 영구 자석 재료의 특성을 입력 할 수 있을 뿐만 아니라 영구자석의 두께도 입력할 수 있다. 그림 4.8은 해석을 위한 입력 조건을 위한 창을 나타낸다.

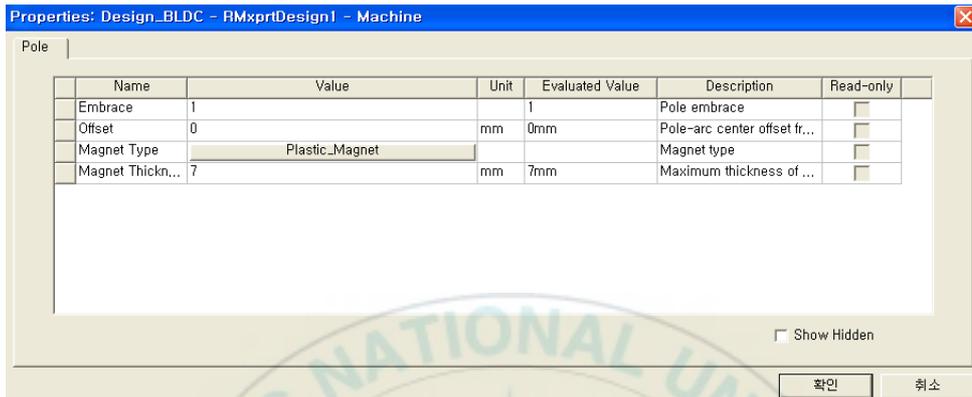


그림 4.7 영구자석 형상 설계 입력창

Fig. 4.7 Input window for permanent magnet design

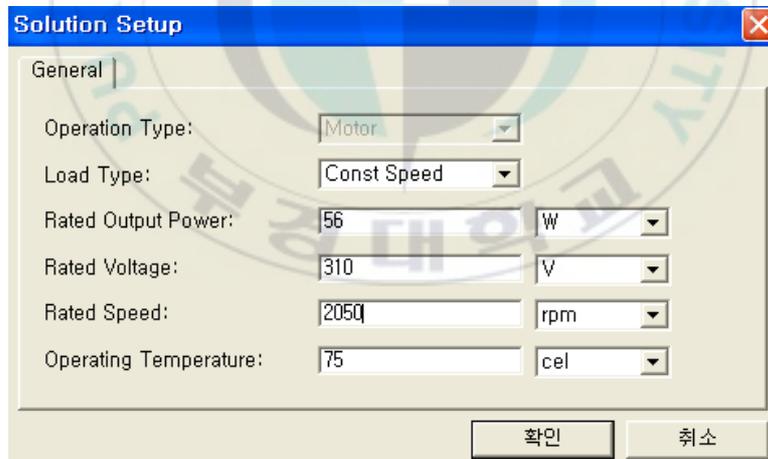


그림 4.8 해석 조건 입력창

Fig. 4.8 Input window for analysis setup

그림 4.9는 해석 조건을 이용해서 해석한 결과를 나타낸다. 일반적인 설계 자료뿐만 아니라 무부하에 따른 해석 결과, 전부하에 따른 해석 결과도 함께 주어진다. 그림 4.10은 설계 결과에 따라 자기 등가회로 해석을 행한 특성 곡선을 보여준다. 그림 4.10 (a)는 3상 전류, (b)는 속도에 따른 효율을 나타낸다.

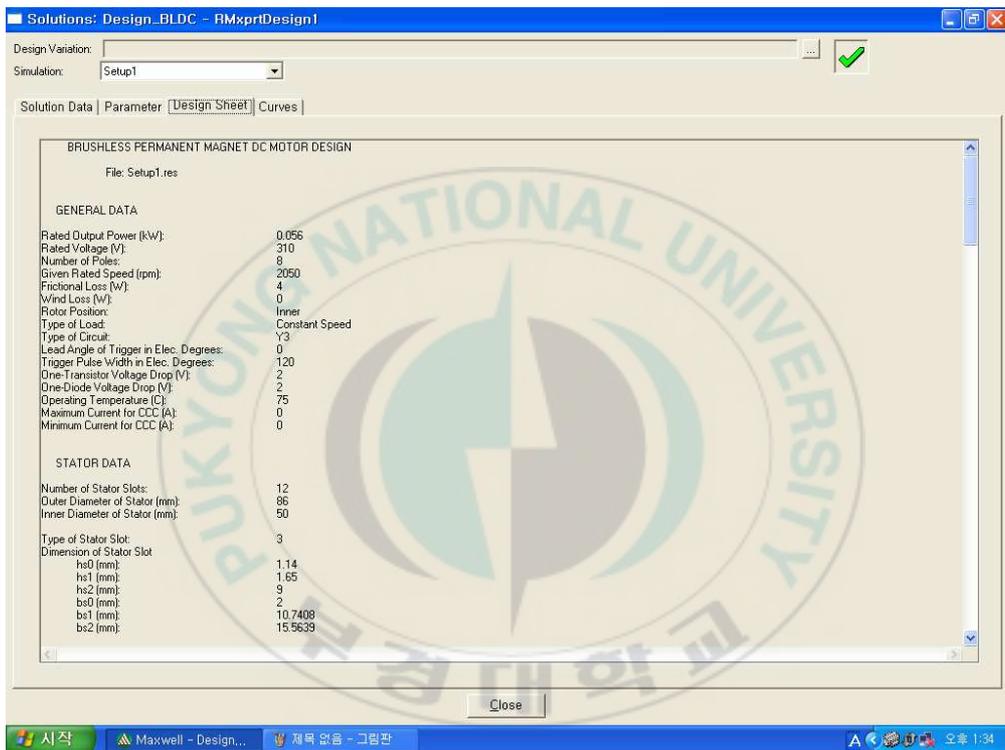
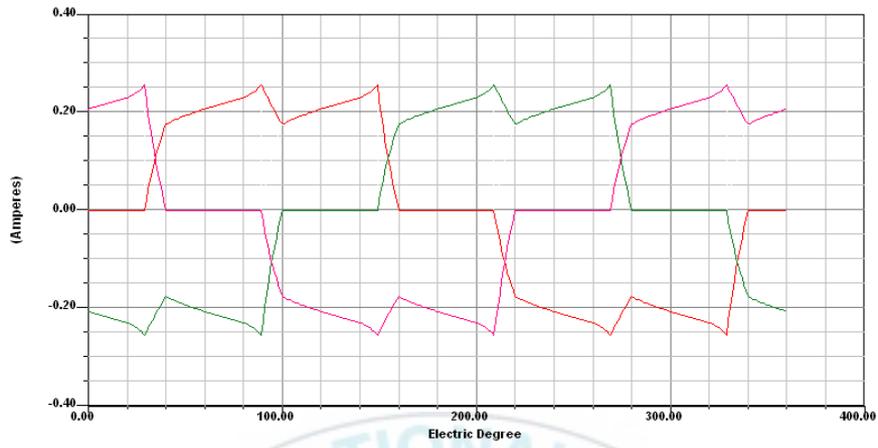
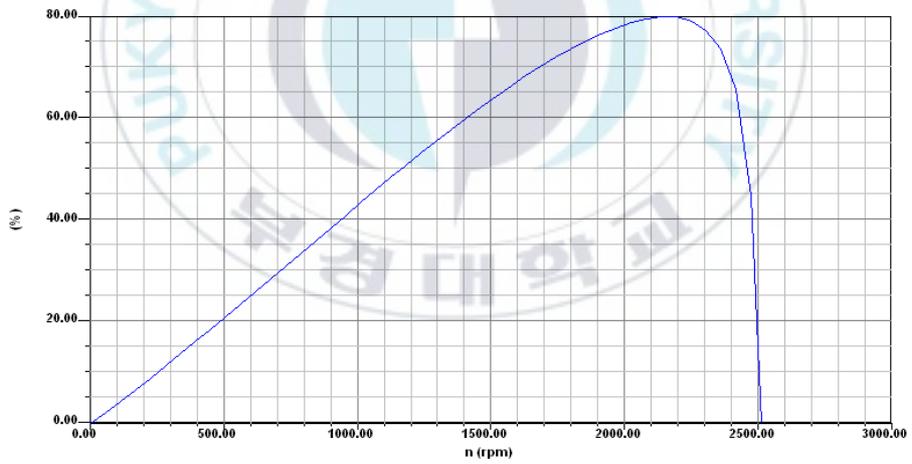


그림 4.9 설계 결과

Fig. 4.9 Window for design data



(a) 3상 전류



(b) 속도에 따른 효율

그림 4.10 특성 곡선

Fig. 4.10 Characteristics figure

그림 4.11은 설계된 BLDC 전동기를 보여준다. 설계 프로그램을 이용하면 일정한 설계 자료를 변화시키면서 특성을 알아볼 수 있다. 영구자석의 두께를 5[mm]에서 9[mm]로 권선수를 1140에서 1180으로 변화시켜가면서 특성을 해석한 결과가 그림 4.12에 나타나 있다.

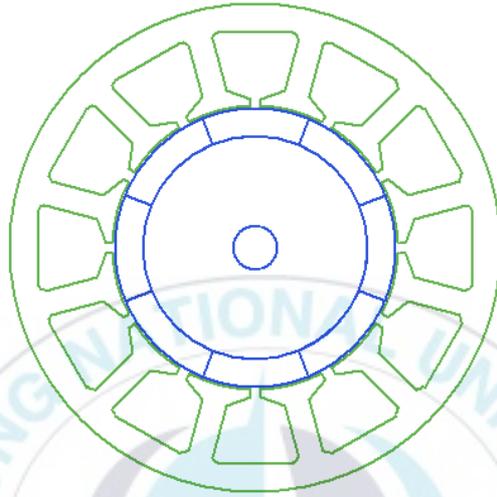


그림 4.11 설계된 BLDC 전동기
Fig. 4.11 Designed BLDC motor

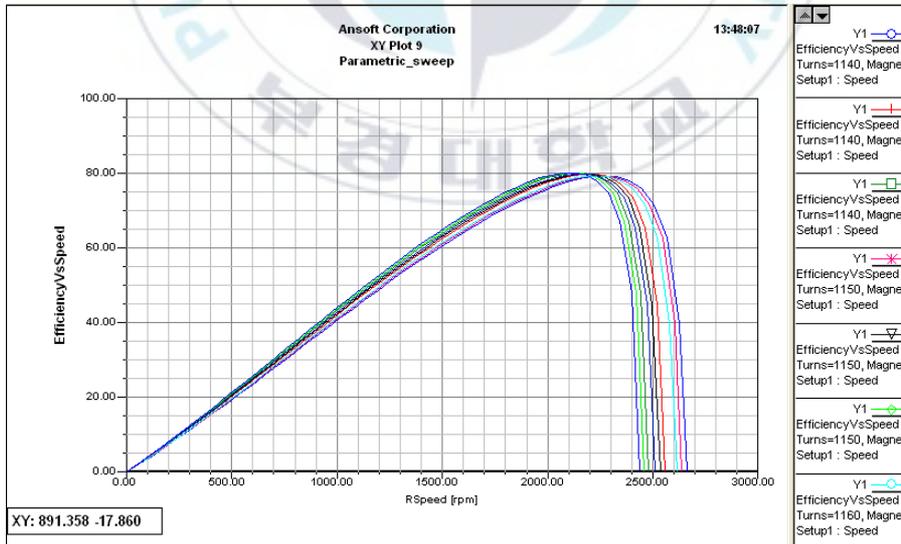


그림 4.12 설계 변수에 따른 특성 곡선
Fig. 4.12 Characteristics figure with variation of design parameter

그림 4.13은 설계 프로그램에서 얻은 자료를 유한요소 해석을 위한 자료로 변환한 후 이차원 유한요소 해석을 위한 입력창을 나타낸다. 유한요소 해석은 3.1에서 나타낸 것과 같이 전처리, 유한요소 정식화 그리고 후처리로 이루어져 있다. 먼저 solver를 Transient로 바꾼 후 전처리 과정(각 재료에 대한 특성 부여, 경계조건 및 소스 입력, 요소 분할)을 행하면 그림의 왼쪽에 보는 것과 같이 체크 표시가 나타난다. 유한요소 정식화는 프로그램에서 이미 이루어져 있으므로 해석을 시행하면 된다.

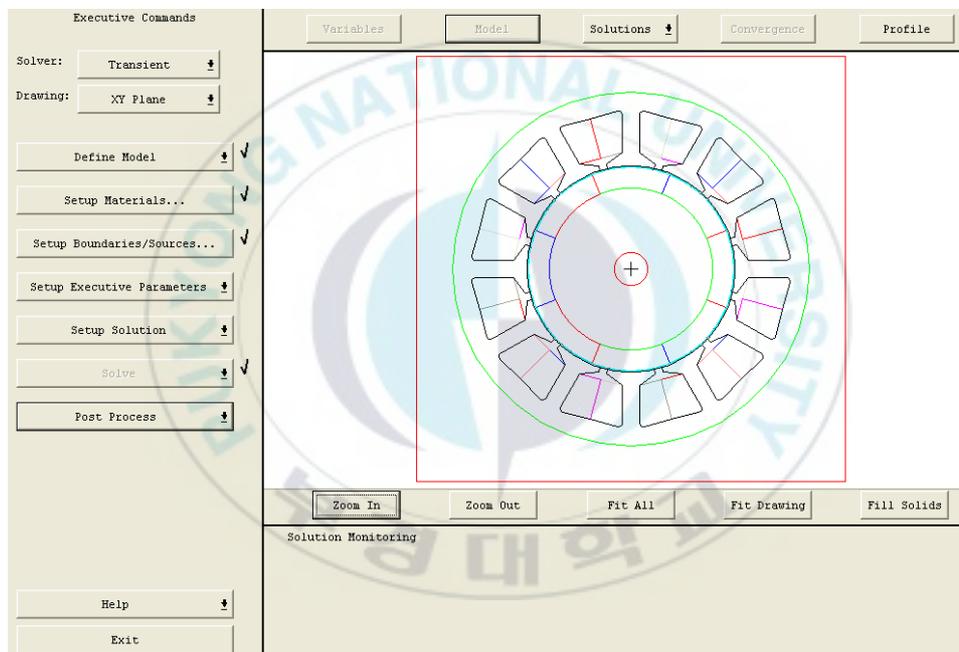
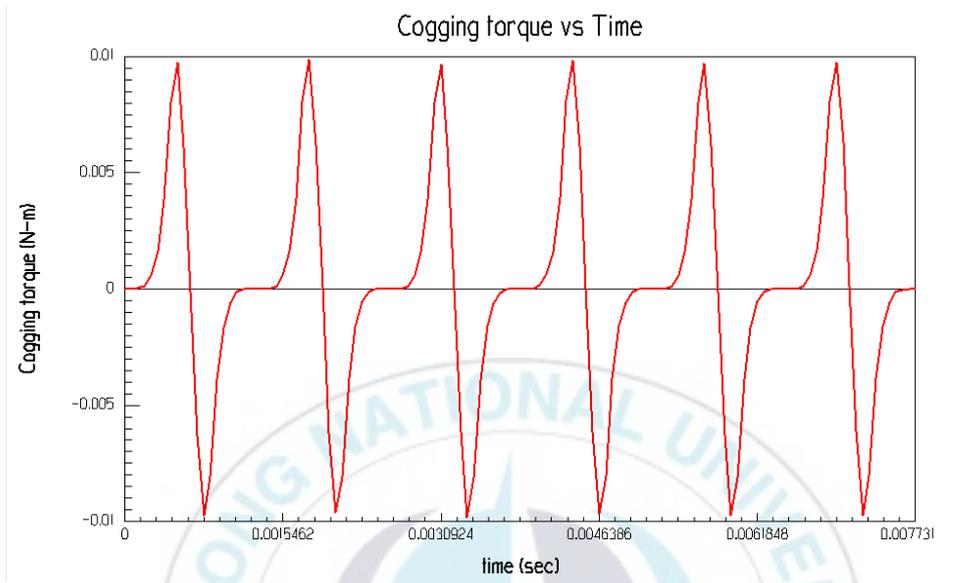
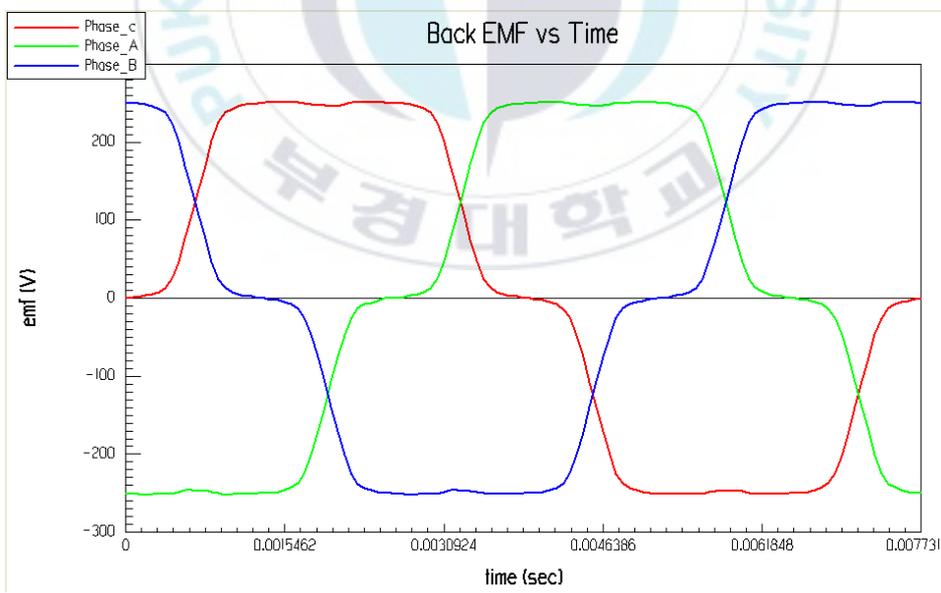


그림 4.13 2차원 유한요소 해석을 위한 창
 Fig. 4.13 Window for 2D finite element analysis

그림 4.14는 일정속도 (1490[rpm])으로 90° 회전하였을 때 발생하는 코깅 토크 와 역기전력 파형을 보여주며 해석의 결과로부터 해석의 정확성을 확인할 수 있다.



(a) 코깅 토크



(b) 역기전력

그림 4.14 유한요소 해석 결과

Fig. 4.14 Finite element analysis results

5. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기의 특성 해석에 대하여 고찰하였다. 상용 프로그램인 Rmxpert를 사용하여 기본설계를 하였고 특성 해석을 위하여 Maxwell 상용 유한요소 해석 프로그램을 사용하였다. 유한 요소 해석 결과인 BLDC 전동기의 코깁 토크 특성 및 역기전력 특성 결과로부터 정확한 특성 해석이 이루어 졌음을 알 수 있었다. BLDC 전동기의 설계 및 특성 해석을 행한 경험을 바탕으로 다른 전동기의 설계 및 3차원 유한 요소 특성 해석도 가능할 것이라고 생각된다.



참고문헌

- [1] "DC motors speed controls servo systems" 6-1-6-34, ELECTROCRAFT CORPORATION, q997
- [2] Takashi Kenjo, Shigenobu Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", Electronics Publishing Company, Tokyo
- [3] R. A. Ashen, H. R. Bolton, "Performance and design of a brushless DC torque motor", IEE Con, No. 136, pp. 27-30, 1976.
- [4] James R. Ireland, "Ceramic permanent magnet motors", Electrical and design and application, McGraw-Hill, 1968.
- [5] C.K.Taft, R.G.Gauthier, "Brushless motor torque speed-curves", IMCS, Urbana, [1]. pp. 73-89
- [6] C. K. Taft, H.D.Chai, "A parametric model for brushless DC motor", IMCS, 1987.
- [7] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992
- [8] Y.D.Yao, D.R.Huang, J.C.Wang, S.J.Wang, T.F.Ying, D.Y.Chiang, "Study of a High Efficiency and Low Cogging Torque Spindle Motor" IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 2, pp. 465-467, March 1998.
- [9] Der-Ray Huang, Tai-Fa Ying, Shyh-Jier Wang, and Chi-mou Zhou, "Cogging Torque Reduction of a Single-Phase Brushless DC Motor" IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 4, pp. 2075-2077, July 1998.

감사의 글

지난 5학기는 매순간이 항상 새롭고 소중한 배움과의 만남의 시간이었습니다. 또한 숨 가쁘게 달려온 십여 년의 시간들과 쳇바퀴 같은 안일한 일상 속에서 학문에 대한 진지함과 전공분야에 대한 열정과 또 다른 자아발견을 일깨워준 고마운 시간이었습니다.

직장생활과 학문을 닦아야 하는 어려움에도 불구하고 논문의 결실을 맺기까지 무지한 저에게 해박한 지식과 세심한 배려로 지도편달을 해주신 지도교수이신 박한석 교수님과 많은 조언과 격려를 아끼지 않았던 배종일, 우경일 교수님을 비롯한 전기공학과 교수님들께 감사의 말씀을 올립니다.

연로한 연세에도 불구하고 저에게 무한한 사랑과 보살핌을 아끼지 않았던 저의 어머니와 언제나 옆에서 저를 볼보아준 누나 내외, 형님 내외, 그리고 적지 않은 나이에 시작한 학업에 몰두할 수 있게 물심양면으로 내조해 준 나의 아내 김도순, 세 자녀 지선 수진 지수에게도 사랑한다고 전하고 싶습니다.

회사의 발전을 위해 전력 질주 할 수 있게 도와준 (주)정엔지니어링 임채홍 전무님 이하 임직원 여러분, (주)신도시 엔지니어링 대표이사이신 박찬실 사장님을 비롯한 임직원 여러분, 또한 전기기기연구실의 박형범 선배님을 비롯한 선후배님들에게도 감사의 마음을 전해드립니다.

이번이 마지막이라는 생각을 버리고 평생 학문을 닦는다는 배움의 정신과 연구의 신념으로 노력하는 사회의 일원이 되겠습니다.

끝으로 다시 한 번 더 박한석 교수님께 깊이 감사드리며 모든 지인들의 가정에 행복과 사랑이 가득하시길 빌겠습니다.

2007. 6.

박 정 철