

## Brushless DC motor 의 설계 Parameter 분석 기법에 관한 연구

맹경호\*, 박창순  
한국기술교육대학교 정보기술공학부

### A study on Analysis Technique of Design Parameters for Brushless DC motor

Kyung-Ho Maeng\*, Chang-Soon Park  
School of Information Technology, Korea University of Technology and Education

**Abstract** - Recently, it is increasing to use more Brushless DC Motor with high energy density permanent magnet and semiconductor control unit for complementing the mechanical defect of Brushed DC Motors. For designing of BLDC Motors are required complex parameters like as rated characteristic, Geometries, B-H curve of magnet and steel materials, winding factor, etc. Moreover, design and manufacturing are difficult because of additional control circuits.

Generally, Design parameters are gotten by analysis of Motor which is used. And the design parameters are used to design a new motor. But getting the design parameters through the eyes and experience is limited and it takes a long time.

In this paper a method is proposed to efficiently analyze motor design parameters through the No load and Load Test, Back EMF Test, Simulation Analysis and Patent Analysis Method for existing BLDC Motor for a cooling Fan in Vehicle.

### 1. 서 론

최근 DC Motor의 Brush에 의한 기계적인 단점을 보완하면서 반 영구적인 반도체소자와 에너지 밀도가 높은 영구자석을 이용한 Brushless DC Motor의 수요가 증가하고 있다.

이러한 BLDC Motor는 정격 특성 및 외형, Magnet 및 Steel 재질, 권선계수 등의 복잡한 Parameter로 구성되어 있으며, 제어회로가 부착되어 있어 설계와 제작에 어려움이 있다.

이러한 문제를 개선하기 위하여 일반적으로 기존의 사용되고 있는 Motor를 분석하여 parameter를 얻는 방법이 새로운 Model을 설계하는데 많이 사용되고 있으나, Parameter 분석 시 육안과 실험을 통하여 파악하는데 한계가 있고 분석시간 또한 많이 소요된다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 사용되고 있는 Motor를 이용하여 Load test, No load Test, Back EMF test, 시뮬레이션을 통한 해석 그리고 특허를 분석하여 Motor 설계 Parameter를 효과적으로 얻는 방법을 제안하였다.

## 2. BLDC Motor의 분석

### 2.1 Motor 분석 방식

Motor에 대한 Parameter 분석을 위하여 [그림1]과 같이 분석 과정을 통하여 설계 parameter를 결정하였다.

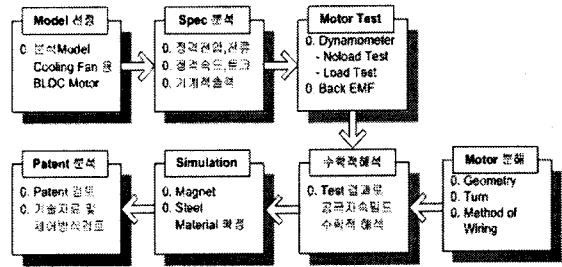


그림 1 Motor 분석을 위한 Block Diagram

### 2.2.1 BLDC Motor Spec 분석

분석하고자 하는 BLDC Motor의 정격과 기본Spec은 [표1]과 같다.

TYPE	외전형	최대입력	250[w]
극수	4[pole]	최대출력	180[w]
슬롯수	6[slot]	정격속도	2800[rpm]
입력전압	DC 12[V]	정격토크	5.10[kg·cm]
정격전류	20[A]	모터중량	1.2[kg]

표 1 BLDC Motor의 정격 및 기본 Spec

### 2.2.2 BLDC Motor Test

Motor에 대한 특성을 파악하기 위하여 Dynamometer 및 dynamometer S/W를 이용하여 Load Test[그림2] 및 No load Test[그림3], Back EMF[그림4]에 대한 실험을 하였으며 결과는 아래와 같다.

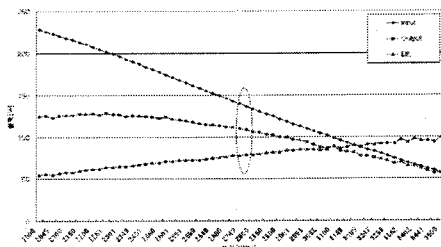


그림 2 BLDC Motor 의 Load Test 결과

Load Test 결과 정격 2800[rpm]에서 Torque 는 3.68[kg.cm], 효율은 79%로 나타났으며, 2375[rpm]에서 Torque 는 5.12[kg.cm], 효율은 67%로 측정되었다.

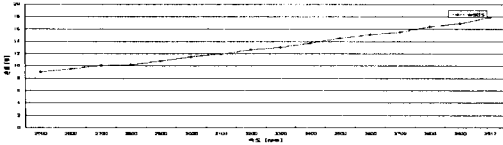


그림 3 BLDC Motor의 no load Test 결과

No load Test 결과 정격 2800[rpm]에서 무부하 손실은 10.18[W]로 측정되었다.

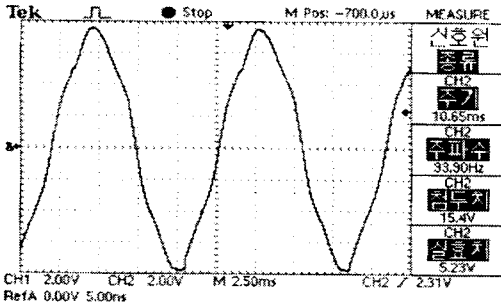


그림 4 BLDC Motor 의 Back EMF Test 결과

Back EMF Test 결과 정격 2800[rpm]에서 선간전압은 5.23[V]로 측정되었다.

### 2.2.2 BLDC Motor 분해 및 분석

Motor를 분해하여 Geometry 및 권선 Parameter를 측정(VernierCalipers)하였으며 결과는 [표2]와 같다.

Parameter	Value
Rotor outer Diameter	84.5[mm]
Stator outer Diameter	67.7[mm]
Air gap	1.4[mm]
Length of Magnet	5.2[mm]
Wire Table[AWG]	AWG17[coil]. Dia 1.156[mm]
Number of winding	30[Turn]
Connection type	Delta(Δ) Connection.

표 2 Geometry 및 권선 Parameter

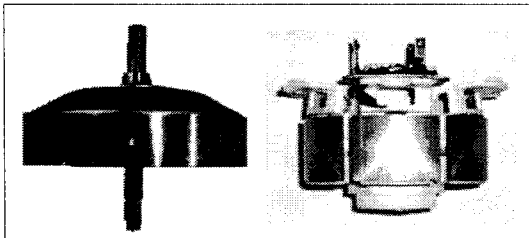


그림 1 분석에 사용된 BLDC motor

Magnet 및 Steel Material에 관한 자료는 분해 자체로는 해석이 불가능하므로 수식을 이용하여 공극자속밀도를 계산하고, 계산결과를 시뮬레이션에 적용하여 극당자속을 파악할 수 있다.

### 2.2.3. 수학적 Modeling

수식(1)과 Back EMF Test 결과를 이용하여 공극자

속밀도를 계산하고 계산결과를 이용하여 Magnet의 재질 및 공극자속밀도를 결정한다. 결과값에 따라 Magnet을 선정하여 시뮬레이션 해석시간을 단축시킬 수 있다.[2]~[4]

① 1상에 대한 유기기전력

$$E = \sqrt{2} \pi f k_w \omega \phi_g [V]$$

# 정격회전수 2800[rpm]  $f = 93.33 [Hz]$

# 권선계수  $k_w = 0.8660$

# Turn수 = 30 [turn]

# 상당 Series Turn수 = 60[turn]

# Back EMF = 5.23[V]

② 극당 발생자속

$$\phi_g = \frac{E}{\sqrt{2} \pi f k_w} = \frac{5.23}{\sqrt{2} \pi \times 93.33 \times 0.8660 \times 60} = 2.428 \times 10^{-4} [wb]$$

③ Pole Pitch

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_i}{2p} = \frac{\pi \cdot 69.7}{4} = 54.74 \quad [mm]$$

$$l = 26.2 \quad [mm]$$

④ 공극자속밀도

$$B_g = \frac{\phi_g}{\tau_p \cdot l} = \frac{2.428 \times 10^{-4}}{54.74 \times 10^{-3} \times 26.2 \times 10^{-3}} = 0.1693 [T]$$

### 2.2.4. Simulation 해석

Motor 자체해석 S/W(Flux2D)와 설계 S/W를 이용하여 Magnet 및 Steel 재질을 파악하였다.

사용한 Motor설계 S/W는 재질에 대한 Data Base가 잘 구성되어 있으며, 해석시간이 타 프로그램에 비하여 짧으므로 Magnet 및 Steel의 재질을 변경하면서 1차적으로 재질의 사용범위를 빠르게 결정할 수 있다.

2.2.3절에서 계산한 공극자속밀도에 대하여 시뮬레이션 해석결과와 비슷한 값을 가지는 Magnet을 선정한다. 해석 Model에 대하여 시뮬레이션 시 가공에 따라 일반적으로 5~10%정도 효율이 낮으므로 Load Test 결과를 이용 5%정도 높은 Material로 선정하였다.

선정범위	TDK Magnet 특성		
	Residual Flux Density(Br)	Recoil Permeability(μrec)	Coercive force H <sub>CB</sub> (kOe)
TDK FB5N	4.4±0.1[kG]	1.05 to 1.10	2.85±0.15
TDK FB5B	4.2±0.1[kG]	1.05 to 1.10	3.30±0.15
TDK FB4A	4.1±0.1[kG]	1.10 to 1.20	2.20±0.20
TDK FB4B	4.0±0.1[kG]	1.05 to 1.10	3.20±0.10

표 3 Magnet Material 자료

Magnet		Steel	
선정범위	공극자속밀도 ( $B_g$ )	선정범위	Iron Loss
TDK FB5N	0.1781[T]	S18	9.8[W]
TDK FB5B	0.1776[T]	S20	12.6[W]
TDK FB4A	0.1745[T]	S23	14.2[W]
TDK FB4B	0.1749[T]	S30	15.8[W]

표 4 Motorpro를 이용한 시뮬레이션 해석결과

[표3]은 수식결과와 Motor설계 S/W를 이용하여 1차적으로 선정된 Magnet Material 자료이며 [표4]는 Motor 설계 프로그램을 이용한 해석결과이다.

좀더 정확한 재질파악을 위하여 자계해석 S/W를 이용하여 Motor설계 S/W에서 선정된 자료를 근거로 해석하였다.

Material		해석결과	
Magnet	Steel	공극자속밀도 ( $B_g$ )	Back-EMF
TDK FB5N	S18	0.1789[T]	5.45[V]
TDK FB5B	S18	0.1767[T]	5.39[V]
TDK FB4A	S18	0.1744[T]	5.32[V]
TDK FB4B	S18	0.1754[T]	5.33[V]

표 5 자계해석 S/W 이용한 시뮬레이션 해석결과

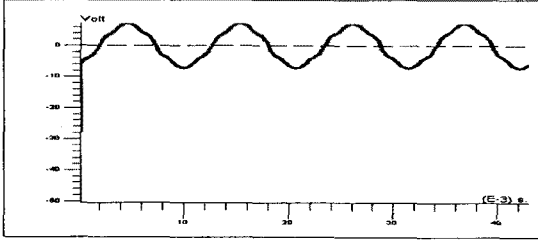


그림 5 자계해석 S/W의 Back-EMF (FB5B)

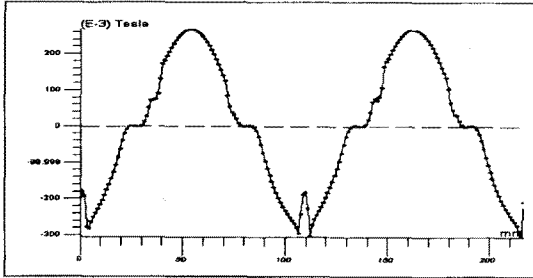


그림 6 자계해석 S/W의 공극자속밀도분포(FB5B)

[표5]는 자계해석 S/W 결과이며, [그림6]은 Back EMF, [그림7]은 공극자속밀도 분포 그래프이다. 해석결과 실제 모델과 가장 가까운 효율과 특성을 가지는 Magnet은 TDK\_FB5B, Steel 은 S18로 나타났다.

### 2.2.5 Patent 분석

분석된 BLDC motor는 8가지 정도의 Patent가 등록되어 있었다. Patent를 분석함으로써 제어회로에 대한 구성 방식 및 보호회로에 대한 분석이 가능하다. Patent를 이용하면 Motor Geometry 분석 시에도 용이하나, 본 논문에서는 분석시간 단축을 위하여 제어회로부분만 해석하였다.[5]

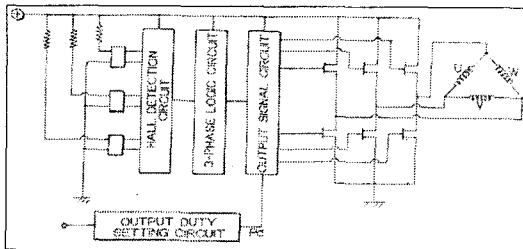


그림 7 Patent 분석을 통한 제어회로

#### ① 제어회로

- 3상 Delta( $\Delta$ )구동방식으로 상단 도통각은 180°임.
- 삼각파와 기준전압과의 비교방식을 통한 PWM 신호를 이용하여 Soft 기동 방식이 적용되었음.

#### ② 보호회로

- FET소자의 열화를 막기 위한 전원차단장치 (납의 용융점을 이용한 열화방지회로)
- 방열판의 정전기로 인한 소자파괴를 막기위한 설계

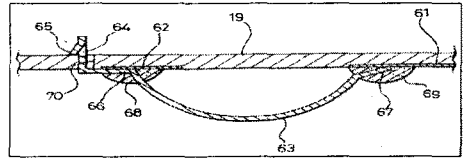


그림 8 Patent 분석을 통한 열화방지회로

## 3. 결 론

본 논문에서는 기존의 자동차 Fan용 BLDC Motor에 대하여 실험 및 시뮬레이션 해석, Patent 분석방식을 통하여 Motor 설계 Parameter를 효과적으로 분석하는 방법을 연구하였다. [표7]에서 보는 바와 같이 분석결과 실제 제작에 사용된 Parameter와 분석결과 자료가 거의 일치함을 알 수 있었다. Magnet의 경우 해석Model과 분석결과에서 재질에 차이를 보이지만 잔류자속밀도의 차이에 따른 Back EMF에 대하여 약간의 차이를 가질 뿐 Motor 특성에 큰 영향은 없었다.

Parameter	실제 파라메터	분석된 파라메터
Rotor outer Diameter	85[mm]	84.5[mm]
Stator outer Diameter	68[mm]	67.7[mm]
Wire Table[AWG]	AWG17[coil]	AWG17[coil]
Turn	30	30
Magnet	TDK_FB5N	TDK_FB5B
Steel	S18	S18
Wire Connections	Delta( $\Delta$ )	Delta( $\Delta$ )
Switching Angle	180°	180°
Back-EMF	5.5[V]	5.39[V]

표 7 최종 분석결과(Parameter 비교)

따라서 Data base 구성이 잘 되어있는 Motor설계S/W와 해석에 따른 Data 검증에 용이한 자계해석S/W를 이용함으로써 설계 Parameter의 정밀한 분석이 가능하고, 분석시간 또한 단축시킬 수 있음을 증명하였다. 또한 Patent를 분석하여 구동회로의 제어방식 및 특성 파악이 가능함을 보였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 안영일, 박창순, "자동차 cooling fan용 고효율 BLDC모터의 효율 개선에 관한 연구" 대한전기학회 학술대회 논문지, 2003.
- [2] 大川光吉 著, 원종수 역 "페라이트 자석회전기의 설계", 동일 출판사, 1995.
- [3] J.R Hendershot Jr, Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Clarendon Press, 1994.
- [4] 백수현, "소형모터설계편람", 세화출판사, 1988.
- [5] 김상욱, 김보열, "MPB BLDC 전동기의 제어기 개발", 대한 전기학회 논문지, 50P-3-3, 2001.
- [6] Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent-Magnet Motor Design", McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [7] Nasar, S.A, "Permanent Magnet, Reluctance, and Self-Synchronous Motors", Boca Raton : CRC, 1993.
- [8] Thomas J. Sokira and Wolfgang Jaffe, "Brushless DC Motors - Electronic Commutation and Controls", TAB Books Inc, 1989.
- [9] 설승기, "전기기기 제어론", 브레인코리아, 2002.