

# 펌프용 소형 BLDC 모터의 원가절감을 고려한 회전자 최적화 설계

## Optimized Design of Rotor Considering Cost-Reduction of Small BLDC Motor for the Water Pump

김 회 천\* · 정 태 옥†  
(Hoe-Cheon Kim · Tae-Uk Jung)

**Abstract** - In the present study, a BLDC motor for a pump in which a neodymium PM is replaced with a Ferrite PM has been developed in preparation for the cost increase and to ensure the stability of the resource supply. One of the currently used motors for pumps is a BLDC motor having an interior PM wherein a rare-earth PM is adopted. However, a BLDC motor for a pump is designed to have large airgap because of the use of a waterproof insulator according to its structural characteristics, and therefore, a SPM structure is suitable. Hence, an SPM BLDC motor in which a Ferrite PM is used is designed. Nevertheless, the use of Ferrite instead of rare-earth materials causes a deterioration in the performance of the electric motor, such as a decrease in the BEMF and the maximum power of the motor and the irreversible demagnetization of the PM. In order to mitigate such disadvantages, an optimized design of the BLDC motor is developed by changing each design parameter and by improving the electromagnetism structure.

**Key Words** : BLDC (brushless DC) motor, Ferrite, Rare-earth, Water pump

### 1. 서 론

최근 에너지 측면에서 사회적 관심과 영향이 커짐에 따라 회전자에 영구자석을 채용한 BLDC 모터의 사용이 증가하고 있다. 또한 고효율 및 고성능 BLDC 모터의 개발이 가능했던 가장 큰 원인은 매우 높은 자속밀도를 지닌 희토류의 가격 안정성과 경제성이 확보되었기 때문이다.

그러나 최근 희토류가 90% 이상 산출되는 중국정부의 수출통제정책방침으로 가격급등과 자원수급 및 불균형 문제를 유발시키고 있다[1]. 이러한 희토류의 가격이 상승하는 시점에서 희토류의 사용량 저감을 위한 모터설계와 희토류 원소의 대체 가능한 소재개발 등의 연구가 많이 진행되고 있다. 하지만 새로운 소재가 개발되기 전까지의 기간은 알 수 없다[2][3]. 본 연구에서는 희토류 영구자석을 사용한 펌프용 BLDC 모터를 경제성이 우수한 페라이트(Ferrite) 영구자석으로 대체하여 동일한 성능을 가지는 펌프용 BLDC 모터를 개발하고자 한다[4]. 페라이트 자석은 희토류 자석에 비해 잔류자속밀도가 낮으나 보자력 특성이 우수하다. 그리고 가격이 저렴하고 온도에 대한 안정성이 뛰어난 장점을 가지고 있다.

현재 사용되는 펌프용 모터는 희토류 영구자석을 채용한 IPM (Interior permanent magnet) 형태의 BLDC 모터이다. 하지만 펌프용 BLDC 모터는 구조특성상 방수 인슐레이터 사용으로 공극이 크게 설계되어 있으므로 SPM 형태의 구조

가 적합하다. 또한 SPM (Surface permanent magnet) 형태는 속도제어 및 위치제어에 악영향을 미치고 진동 및 소음의 원인을 발생시키는 코강토크의 측면에서 IPM 형태의 모터보다 작게 발생하는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 페라이트 영구자석을 사용한 SPM 형태의 BLDC 모터를 설계하였으며, 기존의 펌프용 BLDC 모터의 고정자 형상은 동일한 조건으로 설계를 진행하였다. 하지만 희토류 대신 페라이트 사용은 모터의 역기전력 감소, 최대출력 저하, 영구자석의 불가역감자 등 모터의 성능을 저하시키는 현상이 발생하게 된다[4][5]. 이와 같은 단점의 개선을 통하여 대체 가능한 BLDC 모터 설계를 진행하였다. 또한 페라이트 영구자석의 감자에 대한 안전을 고려하여 최소두께를 산정하였으며, 주요 설계인자로 정의하였다. 이와 같은, 설계 진행은 신뢰성이 우수한 유한요소해석법 (FEA : finite element analysis)을 활용하여 실험계획법 (DOE : design of experiments)과 표면반응기법 (RSM : response surface analysis)을 이용한 최적화 방법에 관한 연구를 진행하였다. DOE 결과에서 추출된 실험점으로 RSM을 구하는 수행을 FEA를 통하여 설계변수들의 조합을 찾아내고 최적화된 모델의 최종적인 결과를 도출하였다. 도출된 BLDC 모터는 기존의 BLDC 모터와 출력특성 결과를 비교분석하였으며, 영구자석 감자안정성 관별해석을 진행하여 모터의 신뢰성을 검증하였다.

### 2. 기존의 BLDC 모터분석 및 설계진행

#### 2.1 기존의 펌프용 BLDC 모터

현재 사용된 펌프용 BLDC 모터는 영구자석 희토류가 사용된 IPM 형태의 20[W]급 모터이며, 권선은 집중권 방식으로 집중권의 대표적 조합비인 6극 9슬롯으로 구성되어 있

\* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam Univ., Korea  
† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam Univ., Korea  
E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr  
Received : November 1, 2012; Accepted : March 21, 2013

다. 또한 회로류 영구자석을 채용하면서 높은 잔류자속밀도 때문에 코깁토크 및 토크리플이 증가함으로 이를 저감하기 위해 노치 (Notch) 기법 적용과 자속장벽을 제거한 회전자 구조를 가진다. 그림 1은 현재 사용된 BLDC 모터를 나타내고 있으며, 표 1은 기본 사양 특성을 나타내고 있다. 여기서, 고정자 형상은 제안한 BLDC 모터와 동일하게 사용된다.



그림 1 현재 사용되고 있는 펌프용 BLDC 모터  
Fig. 1 BLDC motor for conventional pump

표 1 BLDC 모터의 설계사양

Table 1 The specification of conventional BLDC motor

Part	Item	Value	Unit
Rated Spec.	Rated Speed	3600	[rpm]
	Rated current	1.52	[A]
	Rated Torque	0.054	[Nm]
	Rated Output	20	[W]
Stator	Outer Dia.	58.07	[mm]
	Inner Dia.	30.4	[mm]
	Stack length	5	[mm]
Rotor	Outer Dia.	27.4	[mm]
	Stack length	5	[mm]
Air gap		1.5	[mm]
Turns		128	turn
Pole / Slot / Winding		6 / 9 / Concentrated	
PM		NdFeB38	

2.2 BLDC 모터 설계진행

본 논문에서 제안된 모터는 페라이트를 사용한 SPM 형태의 BLDC 모터이며, 기존의 펌프용 IPM 형태의 모터와 달리 릴럭턴스 토크를 사용하지 않고 마그네틱 토크만을 사용하는 모터이다. 회로류 영구자석에서 페라이트 영구자석으로 대체한 SPM 형태의 회전자 설계가 특징을 가진다. 그림 2와 같은 설계순서로 본 논문에서 제안한 펌프용 BLDC 모터 설계를 진행하였다. 그리고 제안한 회전자 설계에서 기존에 사용된 회로류 영구자석을 대체한 페라이트 영구자석 재질을 선정하였다. 표 2는 본 논문에서 선정한 페라이트 영구자석과 기존 모터에 사용된 회로류 영구자석을 비교

한 특성을 보여주고 있다. 철심 재질은 기존과 동일한 특성의 무방향성 규소강판을 사용하였다.

BLDC 모터의 설계 진행을 위해 FEA를 이용하였으며, FEA에서 도출된 특성결과는 그 해의 오차가 크지 않다고 하여 설계의 근거자료로 이용되고 있다. 이러한 FEA를 활용으로 기존의 IPM 모델의 전자기 구조를 분석하였으며, 제안한 BLDC 모터의 설계를 진행하였다. 그림 3은 FEA를 시행하기 위해 기존의 IPM 모터와 제안한 SPM 모터의 모델링 형상을 나타낸 것이다. 이와 같이 구성된 FEA 모델링을 활용하여 DOE에 따라 해석 진행과 결과를 도출하였다.

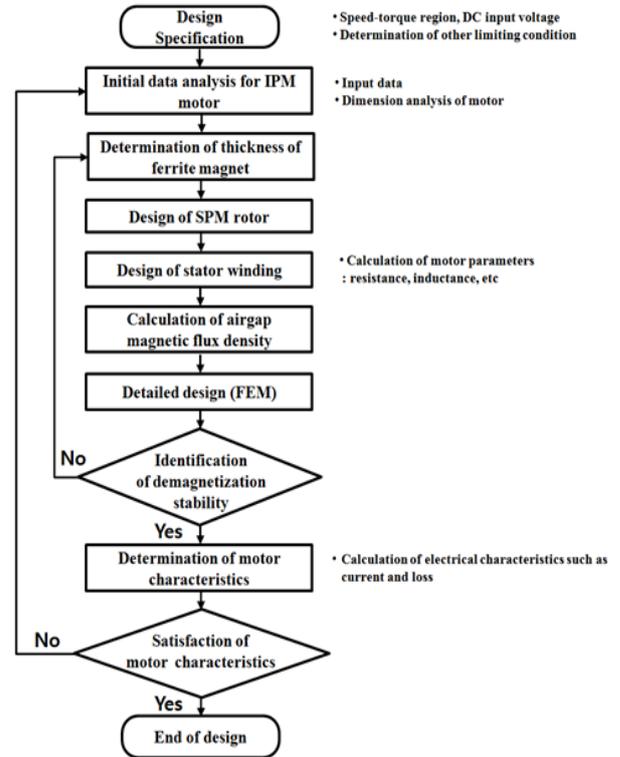


그림 2 제안한 BLDC 모터의 설계를 위한 플로우 차트  
Fig. 2 Flow chart for design of proposed BLDC motor

표 2 BLDC 모터에 사용된 재질의 특성

Table 2 Characteristics of material used the BLDC motor

Employed material		
Magn et	Neodium	NdFeB38H
		Br : 1.21 ~ 1.25 [T]
	-Hc : ≥ 899 [kA/m]	
Ferrite	NMF-7BE	
	Br : 0.41~0.43 [T]	
		-Hc : 286~326 [kA/m]
Steel sheet	50A1300(S60)	
	Non-oriented silicon steel sheet	
	Density : 7.9 [g/cm <sup>2</sup> ]	
	Sheet thickness 0.5 mm	

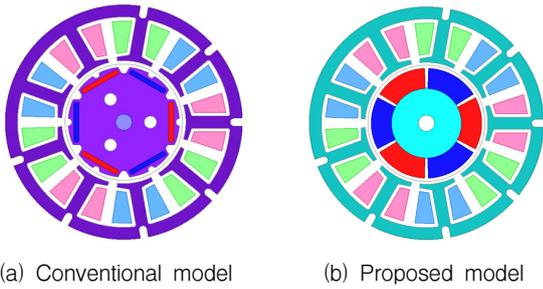


그림 3 BLDC 모터의 FEA 모델링  
Fig. 3 2D FEA modeling of BLDC motor

2.3 영구자석 최소 두께산출

페라이트 경우 대략 4~10[mm] 정도이며, 회토류의 경우 페라이트의 1/3정도이다. 감자에 대한 안전을 고려하고, 모터권선에 흐를 수 있는 최대전류로부터 발생하는 자계에 견딜 수 있는 이상으로 설정하여 최종적으로 결정해야 한다. 그러므로, 본 논문에서 제안한 BLDC 모터는 기존의 회토류를 사용한 모터의 감자특성 근거로 그 이상으로 설계를 진행해야한다.

굴곡점 감자계를  $H_m$ , 고정자 전류에 의한 회전자 표면의 기자력을  $F_m$ 이라 하면 감자 안전 조건은,  $U_m + F_m \leq H_m \cdot l_m$  이다.

$$F_m = \frac{7\pi}{12\alpha} N_t i_s \quad (i_s \text{는 감자 전류}) \quad (1)$$

$$U_m = \frac{\Phi_r - \Phi_l}{P_m + P_g}, \quad P_m = \frac{\mu_0 \mu_r A_m}{l_m} \quad (2)$$

$$P_g = \frac{\mu_0}{g} \cdot 2\alpha \cdot r_s \cdot L_r \quad (3)$$

여기서  $U_m$  영구자석 포텐셜,  $P_m$ 은 영구자석 퍼미언스,  $P_g$  공극 퍼미언스,  $A_m$ 은 영구자석 단면적,  $l_m$ 은 자화방향 길이,  $g$ 는 공극 길이,  $2\alpha$ 는 영구자석의 극호각,  $r_s$ 는 영구자석 내반경,  $L_r$ 는 회전자 축방향 길이를 나타낸다.

IPM BLDC 모터의 회토류 영구자석 두께는 1.2[mm]이며, 감자전류는 약 13[A]이다. 이와 같이 페라이트의 감자전류를 동일한 두께는 약 3.5[mm]이다. 하지만 역기전력과 출력특성을 고려한 최적두께를 결정하여야 한다. 그러므로 페라이트 영구자석의 최소두께를 3.5[mm]로 정하였으며, 최대두께를 5[mm]로 정하여 최적화 설계를 진행하였다.

3. 제안한 BLDC 모터 최적화

3.1 실험계획법 및 최적화 설계

제안한 BLDC 모터를 최적화 설계를 진행하기 위해 실험 계획법을 이용하였으며, 표 3은 기존의 BLDC 모터의 성능에 대응하기 위한 중요한 설계 변수의 인자를 나타내고 있다. 그리고 인자들을 4개의 수준으로 정하였다. 정해진 설계 인자와 수준에 대한 실험계획법에 따라 FEA를 활용하여 해석을 진행하였으며, 각 해석결과를 도출하였다.

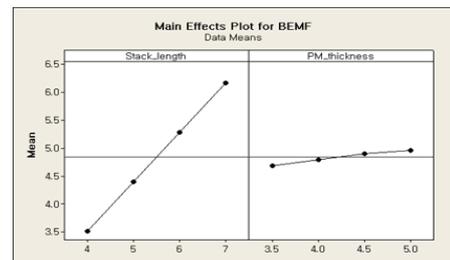
그림 4는 설계 인자로 FEA에 의해 도출된 역기전력, 토크, 효율에 미치는 영향도와 그 경향을 나타내고 있다. 역기

전력, 토크, 효율은 적층 인자에 큰 영향을 미치는 경향이 나타나고 있으며, 역기전력과 효율은 적층이 높을수록 증가하는 특성을 확인할 수 있다. 영구자석의 두께는 두꺼울수록 증가하며, 5[mm]에서 역기전력과 효율이 높은 경향이 나타난다.

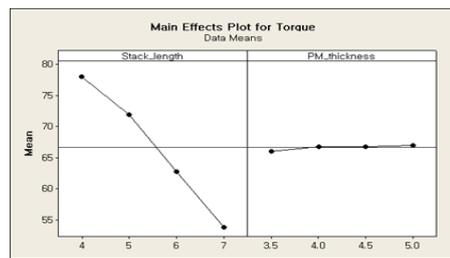
표 3 실험계획법의 설계 인자와 수준

Table 3 Design factor and design level of the DOE

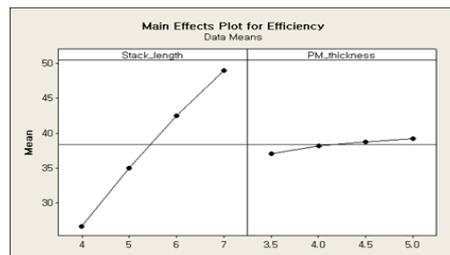
Design level \ Design Factor	1	2	3	4
Stack_length [mm]	4	5	6	7
PM_thickness [mm]	3.5	4	4.5	5



(a) Main effects plot for BEMF



(b) Main effects plot for Torque



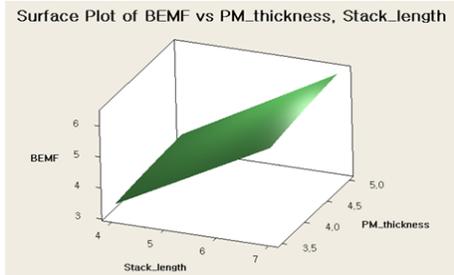
(c) Main effects plot for efficiency

그림 4 설계 인자들의 경향분석

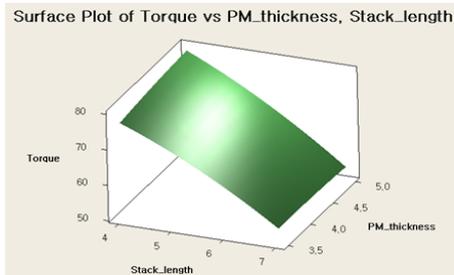
Fig. 4 Tendency analysis of the design factors

그림 5는 인자의 각 수준에서 추정치들을 3차원 공간에 나타내며, 어떤 평면이나 곡면 상에 있는 점들이 되므로 이 면상의 최대점을 찾아 최적조건으로 하였다. 실험결과의 추정치들을 지나는 면을 반응표면이라 하며, 그 결과의 각 표면도를 보여준다. 여기서 역기전력과 효율은 적층과 영구자석 두께가 클수록 상승하는 결과를 표면도로 확인할 수 있다. 또한 토크는 각 적층별 영구자석이 5[mm]의 경우에 표면도 높은 결과를 확인할 수 있다.

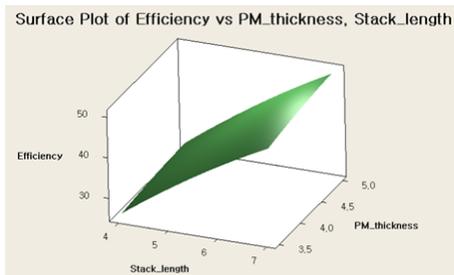
각 표면도 분석결과와 근거로 최적화 설계 결과의 도출은 MINITAB에서 지원하는 반응표면 최적화 루틴을 이용하여 그림 6과 같은 결과가 도출되었으며, 최적화 조건은 적층 6[mm], 페라이트 영구자석 두께는 5[mm]이라는 최적조건 결과가 도출되었다.



(a) RS of BEMF



(b) RS of Torque



(c) RS of Efficiency

그림 5 반응 표면도 결과

Fig. 5 Result of the response surface (RS)

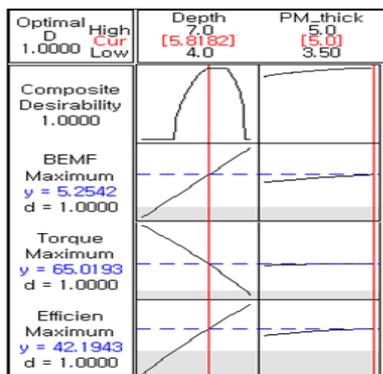


그림 6 반응표면 최적화 루틴 결과

Fig. 6 Results of the response surface

### 3.2 제안한 펌프용 BLDC 모터의 파라미터

본 논문에서 제안한 모터는 기존의 모터와 동일한 결선구조와 슬롯/극수 조합을 가지지만, 공극, 턴수 및 선경, 점적율과 같은 설계 파라미터들은 변경되었다. 제안한 회전자는 본디드 페라이트 사용으로 방수 인슐레이터가 제거됨에 따라 공극구조의 활용성이 증가하였으며 0.5mm를 더 활용할 수 있게 되었다. 또한 기존의 모터보다 점적율의 사용을 높일 수 있으므로 코일의 선경을 증가시켰다. 또한 FEA로 도출된 자계분포특성 해석결과에 의해 역기전력 상수, 인덕턴스, 저항 등 파라미터를 산출하였다. 표 4는 기존의 모터와 제안된 BLDC 모터의 파라미터 결과를 나타냈다.

표 4 BLDC 모터 설계 파라미터

Table 4 Design parameter of BLDC motor

Item	Value		Unit
	conventional	proposed	
No. of Pole	6		-
No. of Slot	9		-
Coil pitch	1		-
Parallel Branches	1		-
Airgap	1.5	1	[mm]
Stack length	5	6	[mm]
Turns	128	135	-
coil Ø	0.35	0.45	[mm]
Fill factor	26	43.7	[%]
Phase Resistor	2.23	1.67	[Ω]
Phase Inductance	0.025	0.0235	[mH]
Ke (Kt)	0.0015	0.0015	-

## 4. 제안한 BLDC 모터의 특성

### 4.1 역기전력 특성결과

희토류를 사용한 기존의 BLDC 모터의 역기전력에 비해 본 논문에서 제안된 페라이트로 대체한 SPM BLDC 모터의 역기전력은 희토류 자석에 비해 잔류자속밀도가 약 3배 작기 때문에 역기전력 저하가 발생한다. 하지만 최적 영구자석 두께설계와 점적율을 변경하여 이를 개선하였다. 그림 7은 역기전력 결과를 보여주고 있다. 또한 역기전력의 전교조파 왜율 (THD)를 분석하였다.

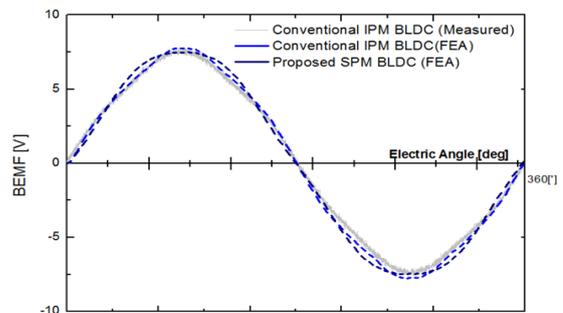


그림 7 제안한 BLDC 모터의 역기전력 결과 비교

Fig. 7 BEMF waveform comparison of the proposed ferrite motor with conventional motor

THD 값이 작으면 고조파 성분이 작아 정현파에 가까운 파형이다. 기존의 모델과 제안한 모델의 최대값은 비슷하지만 THD는 기존의 모델이 12[%], 제안한 모델이 4.3[%]로 제안한 모델이 정현파에 더 가깝다. 이에 고조파 손실과 토크리플이 작아 제어성이 우수할 것으로 사료된다.

4.2 부하운전 특성결과

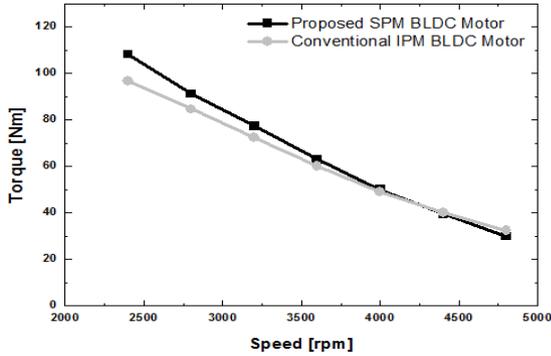


그림 8 제안한 BLDC 모터의 N-T 커브 특성결과 비교  
Fig. 8 N-T motor curve comparison of the proposed ferrite motor with conventional motor

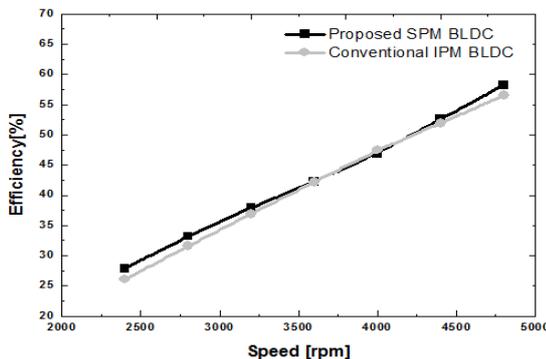


그림 9 제안한 BLDC 모터의 효율결과 비교  
Fig. 9 Efficiency comparison of the proposed ferrite motor with conventional motor

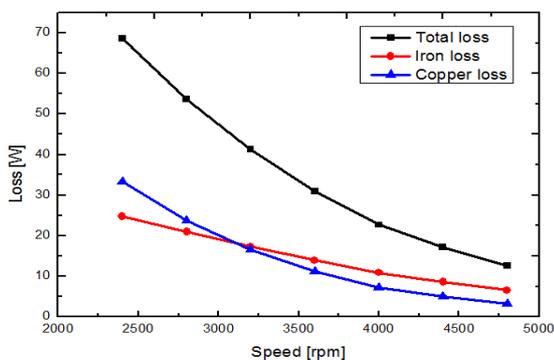


그림 10 제안한 BLDC 모터의 손실분리 FEA 결과  
Fig. 10 FEA result of loss characteristics of the proposed BLDC motor

본 논문에서 제안한 BLDC 모터는 기존의 BLDC 모터를 대체하여 사용하기 위해서 동일한 출력 능력을 가지는 모터 성능을 만족해야한다. 이러한 특성을 확인하기 위해 제안된 BLDC 모터의 출력 S-T 커브특성을 도출하였으며, 기존의 모터와 비교하여 특성결과를 그림 8에 나타냈다. 정격속도 3600[rpm]에서 기존의 모터와 설계모터의 토크는 각각 0.06[Nm], 0.061 [Nm]이다. 기존에 희토류를 사용한 IPM 형태의 BLDC 모터와 같이 요구하는 부하특성 능력이 동일한 커브결과를 확인할 수 있으며, 기존의 희토류 모터를 대체 가능한 모터가 설계되었다. 또한 효율적인 측면에서도 기존의 모터와 동일한 특성을 나타남을 그림 9에서 확인할 수 있으며, FEA 해석결과에 따른 손실 특성을 그림 10에서 결과를 확인할 수 있다. 그리고 표 5는 기존의 모터와 제안한 모터의 성능 사양결과를 나타냈다.

표 5 출력결과 특성 비교

Table 5 Comparison of Output characteristics

	Unit	Conventional IPM	Proposed SPM
Input Voltage	[V]	12	
Speed	[rpm]	3600	
Current	[A]	1.5	1.48
Torque	[mNm]	60	60.4
Output	[W]	22.6	23
Efficiency	[%]	42.1	42.27
Torque ripple	[%]	12.2	9
Current density	[A/mm <sup>2</sup> ]	14	9.3

4.3 토크리플 특성결과

그림 12는 제안된 모델과 기존의 모델의 토크성분을 나타낸 것이며, 제시된 특성은 정격운전시 발생하는 토크리플 현상이다. 토크리플은 역기전력 및 상 전류에 함유된 고조파 성분과 관련이 깊다.

일반적으로 영구자석 모터 설계시, 모터 입력전류는 정현적이라 가정되므로, A상 전류에 대해 수식으로 표현하면 식 (4)과 같다[7].

$$i_a(\theta) = I_1 \cos(\theta) \tag{4}$$

여기서  $I_1$ 은 상 전류의 기본파 성분 크기이다. 고조파가 함유된 A상 역기전력 역시 식(5)과 같이 표현될 수 있다.

$$E_a(\theta) = E_1 \cos(\theta) + \sum_{n=3, odd}^{\infty} E_n \cos(n\theta) \tag{5}$$

식(4) 및 (5)로부터 영구자석 모터의 토크는 식(6)으로 계산될 수 있다.

$$T = E_a(\theta) i_a(\theta) + E_a(\theta - 2\pi/3) i_a(\theta - 2\pi/3) + E_a(\theta + 2\pi/3) i_a(\theta + 2\pi/3) \quad (6)$$

$$= \frac{3}{2} E_1 I_1 \frac{1}{2} \sum_{n=3, \text{odd}}^{\infty} E_n I_n \left[ 1 + 2 \cos\left\{ (n+1) \frac{2\pi}{3} \right\} \right] E_s \{(n \pm 1)\theta\}$$

식(6)에서 우변 첫 번째 항은 전자기 토크를 나타내고, 두 번째 항은 토크리플을 나타낸다. 토크리플은 역기전력에 함유된 고조파 성분과 관련이 깊음을 알 수 있는데, 만약  $n=6q \mp 1$  경우(여기서 q는 정수) 즉, 역기전력의 고조파 성분 n이 3의 배수가 아닌 홀수이면, 식(6)의  $[1 + 2\cos\{(n \pm 1)2\pi/3\}]$  성분이 3이 되므로, 토크리플 성분이 존재하게 되며, 리플성분의 크기는 역기전력 고조파 성분의 크기에 비례하는 관계를 가진다[7][9]. 본 논문에서 제안한 모터의 역기전력 THD 성분은 기존의 모터에 비해 7.7[%] 낮으며 정현적인 역기전력 파형을 나타냄으로 토크리플 역시 3.2[%]로 저감되는 FEA 결과를 그림 11에서 확인할 수 있다.

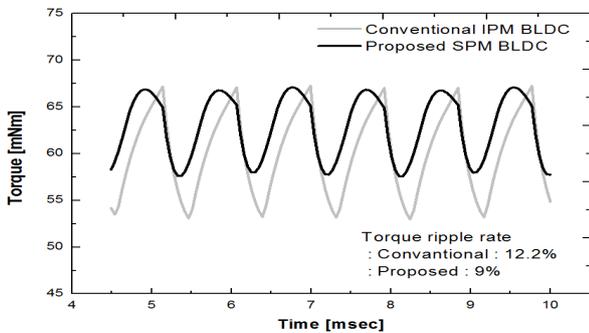


그림 11 제안한 BLDC 모터의 정격 토크리플 결과  
Fig. 11 Rated torque ripple comparison of the proposed Ferrite motor with conventional motor

#### 4.4 감자특성 해석

영구자석 감자는 크게 온도에 의한 감자와 전자기 반작용 자계에 의한 감자로 구분되며, 감자 해석시 이 둘을 모두 고려해야만 한다. 외부자계의 영향으로 감자곡선의 굴곡점(knee point)를 지나게 되면 영구자석 원래의 동작점으로 회복되지 못하는 불가역 감자가 발생하게 된다. 두 번째로 동작 온도가 변화하게 되면 동일한 퍼미언스 계수를 갖고 있는 자기회로의 동작점도 변화하게 된다. 그러므로 영구자석 감자해석은 설계단계에서 반드시 수행되어야만 한다[8].

그림 12는 영구자석의 감자해석을 위한 흐름도이다[9]. 먼저, BLDC 모터의 최대운전온도 및 최대전류를 선정해야 한다. 본 논문에서 감자 특성은 펌프 시스템상 내부 온도가 100°C 이하이고 100°C 이상 상승하지 않기 때문에 최고 사용온도를 100°C로 최대전류는 12 [A]로 선정하였다. 그림 13에서 제시된 바와 같이, 유효요소법에 의해 계산된 부하하시 공극자속밀도로부터 공극선을 그리고, 전자기 전류에 의한 외부자계도 계산 후 공극선에 평행한 부하선을 표시한다. 결과적으로 부하선이 감자곡선의 굴곡점 위로 위치하므로, 불가역 감자가 발생하지 않음을 알 수 있다[9][10]. 그림 14는 제시된 최대 조건과 같이 진행한 FEA 결과를 자속밀도 분포로 나타냈다.

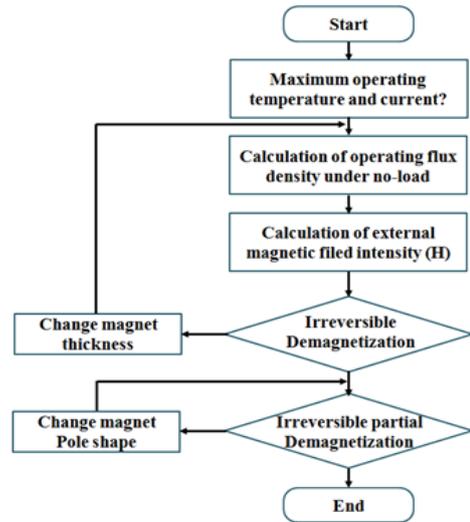


그림 12 영구자석 감자해석 흐름도  
Fig. 12 Flow-chart for demagnetization analysis of permanent magnets

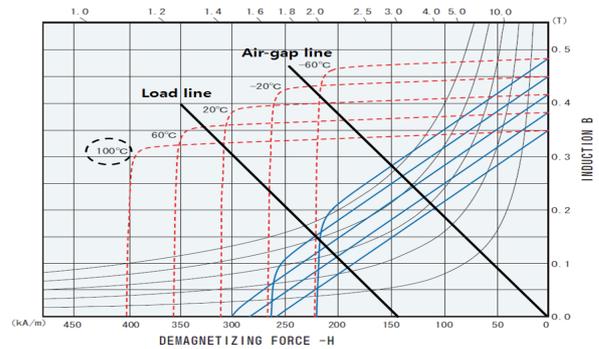


그림 13 영구자석 감자해석 결과  
Fig. 13 Permanent magnet demagnetization analysis results

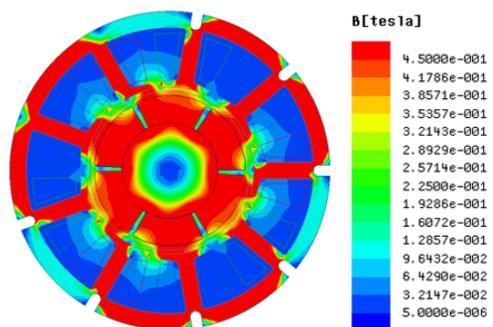


그림 14 영구자석 감자특성 FEA 결과  
Fig. 14 FEA results of permanent magnet demagnetization

#### 4.5 제안한 BLDC 모터의 원가절감 효과

본 논문에서 제안한 BLDC 모터의 원가절감 효과는 기존에 제작된 IPM BLDC 모터의 생산비용을 기준으로 사용된 코일, 코어, 영구자석에 대한 백분율로 환산하여 효과를 비교하였다. 표 6에 원자재 비용별 효과예상 결과를 나타냈다. 설계된 결과에서 희토류 영구자석 보다 페라이트 영구자석

의 체적은 증가했지만 비용적인 측면에서는 페라이트 영구자석의 원자재 가격이 10배 이상 매우 우수하기 때문에 경제성을 확보할 수 있다. 코일 사용량은 증가하지만, 본디드 페라이트를 사용한 회전자로 인하여 코어 사용량을 약 15[%] 줄임으로 전체적인 비용의 경제성을 28.8[%]를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

**표 6** 원가절감 효과 분석

**Table 6** Production reduction effect of proposed BLDC motor

Item	Conventional IPM	Proposed SPM
Total [%]	100	71.2
Copper[%]	16.4	22.6
Iron [%]	36.4	21.5
PM [%]	47.2	32

### 5. 결 론

본 논문에서는 회토티 영구자석의 자원 수급문제를 해결하기 위해 회토티 영구자석을 사용하고 있는 펌프용 BLDC 모터의 회전자를 링형 본디드 페라이트 영구자석으로 대체하는 연구를 진행하였다. 회토티 영구자석에서 페라이트 영구자석을 채용한 회전자로 대체하기 위한 주요설계 조건인 출력특성과 영구자석의 감자 안정성을 만족하며, 대체 가능한 설계결과를 도출하였다. 본 논문의 결과로 펌프모터의 대량생산 체제에서 생산비용 절감과 원자재 공급의 안정성 확보로 경제성이 우수한 BLDC 모터를 양산할 수 있을 것으로 사료된다.

### References

[1] H. J. Kim, S. M. Kim, "Rare Earth Dispute and Trend in Development of NdFeB Anisotropic Bonded Magnets", Journal of the Korean magnetism society, v.22 no.3, pp.109-115, 2012

[2] J. G. Lee, J. H. Yu, H. J. Kim and T. S. Jang , "Trend in Research and Development Related to Motors and Permanent Magnets for Solving Rare-earth Resources Problem", Journal of the Korean Magnetism Society, Vol 22, No 2, April, 2012

[3] Jung-Pil Yang, "The Current Status and Future Outlook of the Bonded Rare-earth Magnet", Journal of the Korean Magnetism Society, Vol 21, No 4, August 2011

[4] Jung-Goo Lee, Youn-Kyoung Baek, Ji-Hun Yu and Chul-Jin Choi, "Trend in Research and Development Related to Lean Heavy Rare-earth Permanent Magnets for Next-generation Motors", J. Kor. Powd. Met. Inst., Vol. 19, No. 2, 2012

[5] Su-Jin Lee, Sung-II Kim, Jung-Pyo Hong, Byoung-Young Song, Jong Won Park, "Characteristic Analysis of the Water Pump Motor considering Polar

Anisotropic Ferrite Bonded Magnet", Electrical Machines and Systems(ICEMS), pp1242-1245, Oct. 2010

[6] Byeong-woo Kim, Hyun-dock Cho, Do-hee Lee, "Characteristic Analysis of BLDC Motor for Vehicle Compressor Based on High Voltage", Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, v.16 no.3, pp.44-51, 2008

[7] Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", The Writers' Collective, 2003.

[8] S. Zeze, T. Todaka, and M. Enokizono, "Improvement of Rotor Structure of Concentrated Surface Permanent Magnet Synchronous Motor", Electrical Machines and Systems(ICEMS), pp1-6, Nov., 2009

[9] Jang-Young Choi, Hyung-II Park, Seok-Myeong Jang and Sung-Ho Lee, "Design and Analysis of Surface-Mounted PM Motor of Compressor for Electric Vehicles Applications according to Slot/Pole Combinations", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, v.60 no.10, pp.1846-1857, 2011

[10] Masayuki Sanada, Yukinori Inoue and Shigeo Morimoto, "Rotor Structure for Reducing Demagnetization of Magnet in a PMASynRM with Ferrite Permanent Magnet and its Characteristics", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, pp.4189-4194, Sept. 2011

### 저 자 소 개



#### 김희천 (金會千)

1985년 4월 10일생. 2010년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (055)249-2628

E-mail : backas1000@naver.com



#### 정태욱 (鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대학교 전기공학 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학 졸업(박사). 1996~2006년 LG전자 DAC연구소 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임 연구원. 2007년~현재 경남대학교 전기공학과 조교수.

Tel : (055)249-2628

E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr