

선박 추진 장치를 위한 저속영역에서 최대토크를 가지는 고효율 BLDC 모터의 설계

曹承鉉[†], 賈在久^{*}, 曹洙億^{**}, 崔 哲^{***}, 金喆禹^{****}

The Design of High-power BLDC Motor with Maximum Torque at Low Speed for Ship Propulsion

Seung-Hyun Cho, Jae-Goo Bin, Su-Eog Cho, Cheol Choi, and Cheul-U Kim

요 약

본 논문은 선박 추진 장치를 위한 저속 영역에서 최대 토크를 내는 대용량 BLDCM(Brushless DC motor)의 설계에 관한 연구이다. 기존의 추진 장치용 모터는 직류기 및 권선형 유도 전동기 등을 사용함으로써 인하여 유지 보수가 필요하였다. 본 논문에서는 유지 보수가 필요 없고 저속에서 큰 토크를 발생 할 수 있는 BLDCM 설계를 하였다. 설계시 출력 리플 및 진동, 소음을 유발 하는 코깅 토크 저감을 고려하기 위해 설계변수로 공극길이와 자극 각 등을 취하여 이의 변화에 대한 최저 코깅 토크를 가지는 최적형상을 구하고, 전동기 특성을 FEM과 Maxwell stress tensor법을 이용하여 해석하였다. 최저의 코깅 토크를 가지며 저속영역에서 최대 토크를 발생 할 수 있는 선박 추진 장치용 SPM type의 BLDCM을 설계하였다.

ABSTRACT

Recently, development of rare earth permanent magnet with the high remanence, high coercivity allows the design of brushless motors with very high efficiency over a wide speed range. Cogging torque is produced in a permanent magnet by magnetic attraction between the rotor mounted permanent magnet and the stator teeth. It is an undesired effect that contributes to output ripple, vibration, and noise of machine. This cogging torque can be reduced by variation of magnet arc length, airgap length, magnet thickness, shifting the magnetic pole and varying the radial shoe depth and etc. In this paper, some airgap length and magnet arc that reduce cogging torque are found by finite element method(FEM) and Maxwell stress tensor method. The SPM(Surface Permanent Magnet) type of high-power Brushless DC (BLDC) motor is optimized as a sample model.

Key Words : BLDCM, Cogging torque, Ship propulsion, FEM, Maxwell stress tensor method

1. 서 론

[†] 교신저자 : 학생회원, 부산대 전기공학과 석사과정

E-mail : jopye@pusan.ac.kr

* 정회원, 국방과학연구소 연구원

** 정회원, OTIS-LG 전력전자팀 과장

*** 정회원, OTIS-LG 서보R&D팀 부장

**** 정회원, 부산대 전자전기통신공학부 교수

접수일자 : 2003. 8. 26 1차 심사 : 2003. 10. 6

2차 심사 : 2003. 11. 5 심사완료일 : 2003. 11. 14

근래에 들어 고성능 영구자석 재료의 개발로 인하여 넓은 속도 영역에서 높은 효율을 가지는 회토티 영구자석 전동기가 산업현장에 널리 보급되고 있다. 이는 정기적인 보수, 점검이 필요 없고 높은 효율과 출력 밀도를 가진다는 장점을 가진다. 선박 추진 장치 분야

에서는 수십년 동안 사용되어 오던 기계적인 추진 장치 분야에서 전기적 추진 장치 분야로 변화되고 있으며 전기적 추진 장치 분야에서 기존의 직류기 및 권선형 유도 전동기를 대신하여 저속에서 큰 토크를 발생 할 수 있고 유지 보수가 필요 없는 영구 자석 동기 전동기로의 대체 연구가 활발하다^[1-3]. 선박 추진을 위한 일반적인 속도-토크 특성은 그림 1과 같다^[4].

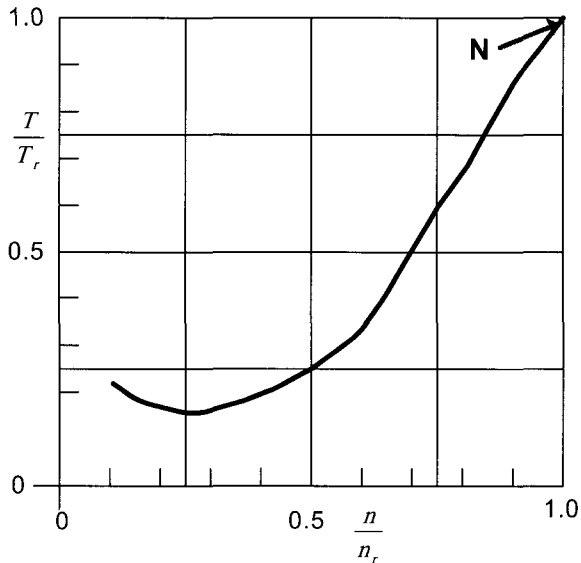


그림 1 선박 추진에 대한 일반적인 토크-속도 특성
Fig. 1 Typical torque-speed characteristic for ship propulsion

여기서, n_r 은 정격속도, T_r 은 정격토크를 가리킨다. 드라이버는 정격비 N point에서 만나도록 고효율을 가지게 설계되어야 하며, 모터 설계 시 N point의 속도에서 최고출력을 가질 수 있도록 고려하여 설계되도록 해야 한다. 그리고 저속에서의 코깅 토크는 소음 및 진동으로 심각한 영향을 초래 할 수 있으므로 초기 설계모델의 선정 시부터 이를 고려한 설계 모델을 선정한다. 일반적으로 코깅 토크는 회전자 영구 자석 PM (Permanent magnet)과 고정자의 슬롯 구조 사이의 상호 작용에서 발생된다^[5].

따라서 본 논문에서는 선박 추진 장치용 영구 자석 동기 전동기의 설계 시부터 맥동 토크 및 소음 진동을 일으키는 코깅 토크를 저감한 영구자석형 BLDCM (Brushless DC motor)을 설계 하고자 초기 모델을 선정, 이후 설계변수 2가지(자극각, 공극길이)를 선정하여 설계변수 변화에 따른 코깅 토크 변화를 관찰한다^[6]. 이의 결과에 따라 최저의 토크를 발생하는 선

박 추진용 대용량 동기 전동기의 최적형상을 설계하고, 설계된 BLDC 전동기의 특성을 2차원 유한요소 해석방법과 Maxwell stress tensor 법을 이용하여 해석하였다.

2. 본 론

2.1 해석 이론 및 지배 방정식

자기장에서 토크를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$df = (J \times B) dv \quad [N/m^3] \quad (1)$$

여기서 f 는 자기력 밀도, J 는 전류밀도, B 는 자속 밀도이다. 맥스웰 방정식을 이용하면 식(1)은 식(2)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} df &= (\nabla \times H) \times B dv \\ &= \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times B) \times B dv \quad (2) \end{aligned}$$

따라서, 자기장에서 체적 V 인 물체에 작용하는 전자력 F 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F &= \int_v df \quad dv \\ &= \frac{1}{\mu_0} \int_v (\nabla \times B) \times B \quad dv \quad (3) \end{aligned}$$

토크 식은

$$\begin{aligned} dT &= (r \times df) \quad dv \\ T &= \int_v (r \times df) \quad dv \\ &= \int_v \frac{1}{\mu_0} r \times [(\nabla \times B) \times B] \quad dv \quad (5) \end{aligned}$$

다음과 같이 정의되는 맥스웰 스트레스 텐스 (Maxwell stress tensor)법에 의해서 토크 식의 체적적분은 물체를 포함하고 있는 임의의 표면에 대한 면적분으로 변환되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{1}{\mu_0} \left[\int_s B(B \cdot n) ds - \int_s \frac{1}{2} B^2 n ds \right] \quad (6)$$

$$T = \int_v (r \times df) dv = \oint_s (r \times P) ds \quad (7)$$

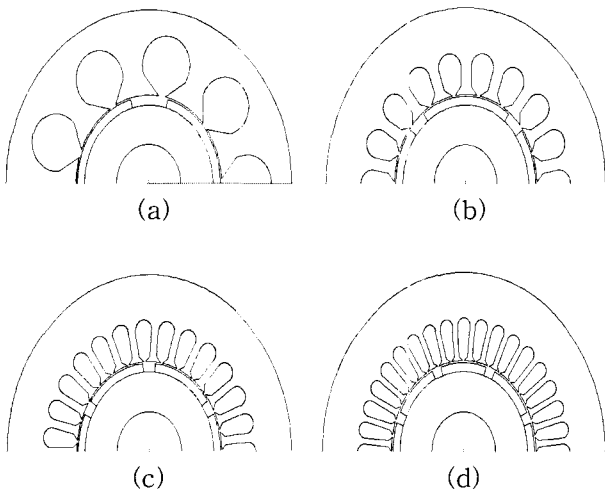
여기서, n은 표면에 대한 단위 수직 벡터를 나타낸다.

2.2 설계모델

2.2.1 설계모델의 극수와 슬롯수 결정

Cogging torque는 회전자 표면의 영구자석 PM (Permanent Magnet)과 슬롯(Slotted iron) 구조 사이의 상호 작용에서 발생하며 공극이 일정하지 않은 거의 모든 영구자석 모터들에서 명백히 발생함을 알 수 있다. 저속에서의 코깅 토크는 소음 및 진동으로 심각한 영향을 초래 할 수 있으므로 초기 설계 모델의 선정시부터 이를 고려한 설계 모델을 선정한다.

일반적으로 코깅 토크의 주파수는 전동기의 고정자 슬롯수와 회전자 극수의 최소공배수에 의해 영향을 받는다. 주파수가 높으면 상대적으로 진폭은 줄어들어 코깅 토크의 영향은 줄어들게 된다. 극수와 슬롯수 결정시 경험상 극당 슬롯수비가 4.5일때 고조파 함유율이 가장 작게 나타나는 것을 고려하여 초기 모델 선정시 극당 4.5개의 슬롯수를 가지는 극수와 슬롯수를 변화시킨 해석 모델을 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 코



(a) 2극 9슬롯 (b) 4극 18슬롯
 (c) 6극 27슬롯 (d) 8극 36슬롯
 (a) 2poles 9slots (b) 4poles 18slots
 (c) 6poles 27slots (d) 8poles 36slots

그림 2 해석 모델
 Fig. 2 Sample models

깅 토크 해석 모델의 코깅 토크 주파수를 보면 표 1과 같다. 표 1에서 슬롯수와 극수와의 최소공배수를 가지는 모델들을 살펴본 결과 극당 슬롯수비가 4.5로 같을 때 8극 36슬롯을 가지는 모델의 경우에 최대공약수가 72로서 주파수가 높은 것을 알 수 있다. 주파수가 높음에 따라 진폭이 줄어들어 코깅 토크의 영향은 줄어들게 되므로 따라서, 회전자 8극 고정자 36슬롯을 가지는 전동기를 초기 모델로 선정하였다^[7].

표 1 모델의 코깅토크 주파수
 Table 1 Cogging torque frequency of models

해석 모델	2극 9슬롯	4극 18슬롯	6극 27슬롯	8극 36슬롯
코깅토크 주파수	18	36	54	72

2.2.2 회전자 형태 결정

회전자의 형태로는 내부 로터형과 외부 로터형이 있으며, 여기서는 선박 추진 장치를 위한 저속에서 큰 토크를 내는 모터를 설계하기 위한 것이므로 여기서는 저속에서 큰 토크를 내며, 제작이 용이한 내부 로터형을 취하고 회전자의 형상이 SPM (Surface Permanent Magnet) type일 때와 Inset type일 때의 토크 곡형을 구하여 비교 분석한다.

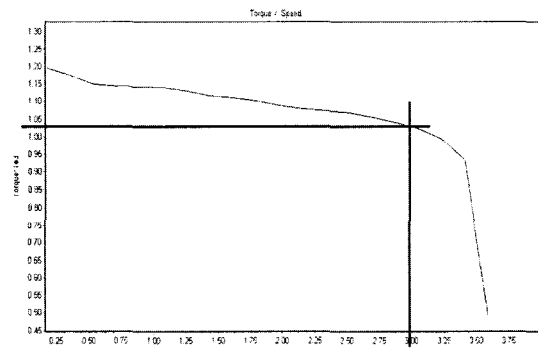


그림 3 SPM type일때 토크곡선
 Fig. 3 Torque curve of SPM type

이를 분석하여 최고 토크를 내기 위한 회전자 형태를 결정한다. 비교시 각각 총 슬롯수와 회전자 극수를 같게 하며, 또한 회전자와 슬롯의 길이, 공극을 같게 놓은 후 자석의 착자 상태를 바꾸어 각각의 type일 때의 토크를 비교 분석하였다.

그림 3은 SPM type일 때의 토크 곡선을 나타내었다. SPM type일 때의 최대 토크는 1205[Nm]이며 300[rpm]일 때의 토크는 1025[Nm]임을 알 수 있다. 그림 4는 Inset type일 때의 토크 곡선을 나타내었다. Inset type일 때 최대 토크는 1082[Nm]임을 알 수 있으며 300[rpm]일 때 토크는 985[Nm]임을 알 수 있다. 각 그림들에서 보면 회전자 형상이 SPM type일 때 토크가 큰 것을 알 수가 있다. 정격속도 300[rpm] 일 때

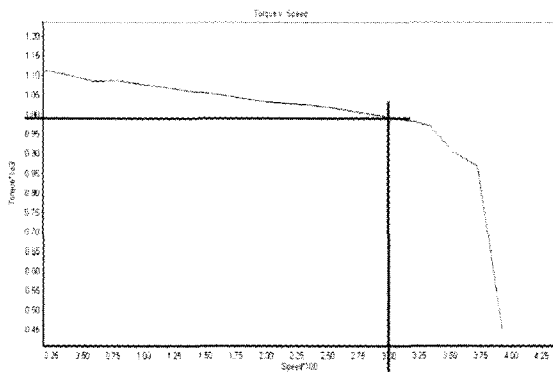


그림 4 Inset type일때의 토크파형
Fig. 4 Torque curve of Inset type

표 2 초기설계모델의 제원
Table 2 Parameter of first design model

Rated output	300 [kW]
Rated speed	300 [rpm]
Terminal voltage	1000 [V _{dc}]
Rated torque	1000 [Nm]
Number of phases	3
Number of poles	8
Number of stator slots	36
Turn/ph	60
Magnet thickness	21 [mm]
remanence	1.194 [Tesla]
K _T	26 [Nm/A]

SPM type 이 1000[Nm] 이상으로 Inset type보다 더 큰 토크를 발생함을 알 수 있다.

따라서 회전자 형태는 SPM type의 회전자 형태를 결정하여 설계를 시작하였다.

2.2.3 설계제원 및 흐름도

표 2와 같이 초기모델의 설계 제원을 나타내었다. 표 2에서 주어진 것과 같은 설계 제원을 가지고 그림 5에 나타난 것과 같은 설계 흐름도를 따라 주어진 설계변수에 의해 설계된 최적형상이 최초 설계된 성능에 만족하는지를 FEM을 이용하여 검증하여 설계 모델의 최적형상을 구한다.

2.3 FEM을 이용한 회전자 형상변화에 따른 코깅 토크 저감

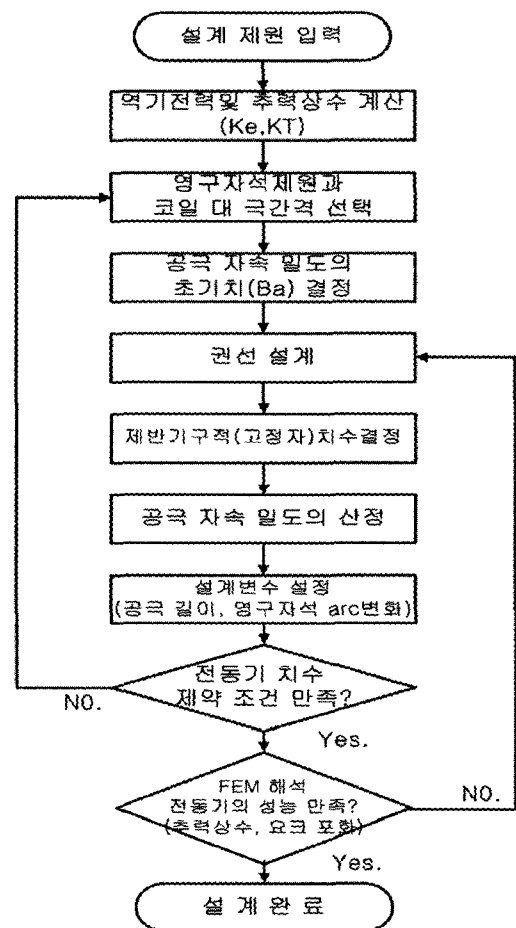


그림 5 BLDCM의 설계 흐름도
Fig. 5 Design chart of BLDCM

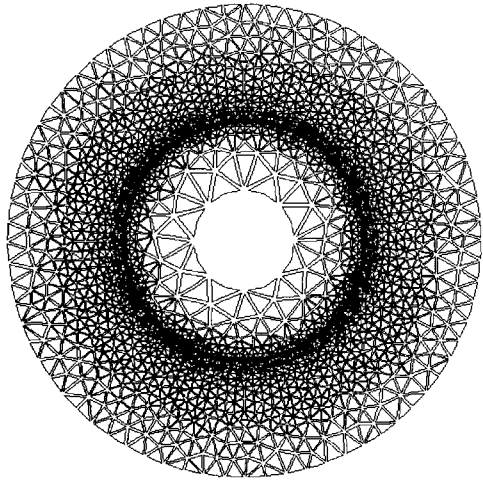


그림 6 해석모델의 삼각요소 분할도
Fig. 6 Finite element meshes using triangles for the initial model

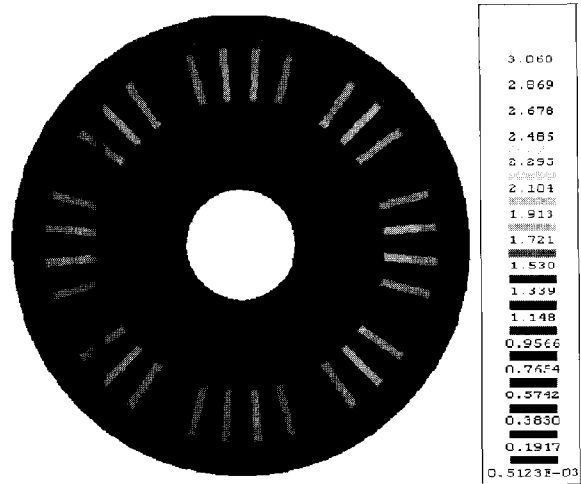


그림 8 해석모델의 자속 밀도 분포도
Fig. 8 Flux density distribution for the initial model

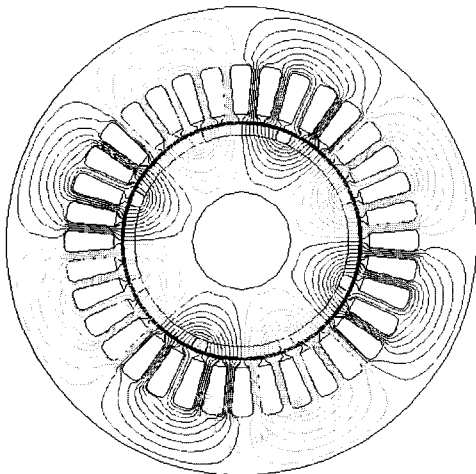


그림 7 FEM에 의한 등자속선도
Fig. 7 Equi-flux lines at the initial rotor position

FEM (Finite element method) 해석을 통해 전동기의 성능이 만족하는지를 확인하여 최적 모델의 설계형상을 구한다. 그림 6과 그림 7은 최적모델의 고정자의 슬롯과 회전자극에 따른 삼각요소 분할도와 등자속선 분포를 각각 나타내었다. 그림 8은 해석 모델의 자속 밀도 분포를 나타낸 그림이다. 여기서 보면 치끝부분과 요크 부분의 자속 밀도는 1.7[Tesla]와 1.2[Tesla]이하를 만족함을 알 수 있다. 위의 제원과 같이 정해진 36slots 8pole SPM type 의 초기모델을 이용하여 코깅 토크 저감을 위한 자극각과 공극 길이

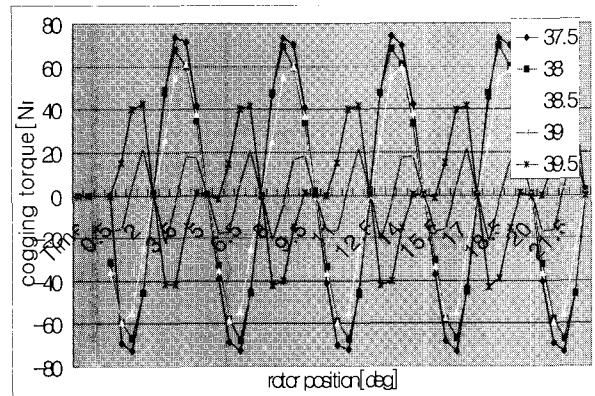


그림 9 자극각 변경에 따른 코깅 토크
Fig. 9 Cogging torque for variation of magnet arc

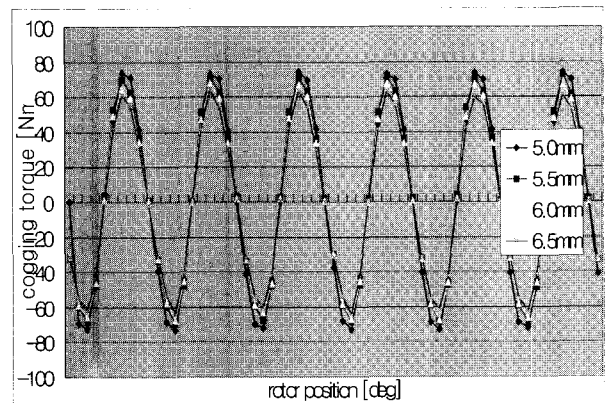


그림 10 해석 모델의 공극 변화에 따른 코깅 토크
Fig. 10 Cogging torque for variation of air-gap length in the initial model

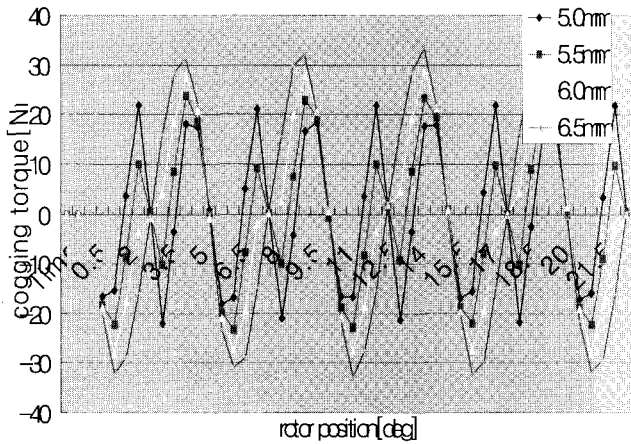


그림 11 자극각 39°인 경우, 공극 변경에 따른 코깅 토크
Fig. 11 Cogging torque for variation of air-gap length, in case of magnet arc 39°

두 가지의 설계변수를 취하고, 이를 변화 시켜가면서 나타나는 코깅 토크를 살펴보았다. 회전자 자석의 자극 각을 37.5[°]에서 0.5[°]씩 증가하여 39.5[°]까지 증가하였을 때 얻은 코깅 토크 결과를 그림 9에 나타내었다.

그림 9에서 보면 변화시킨 자극각이 39[°], 공극 5.0 [mm]일 때 코깅 토크 값(22.55943[Nm])이 가장 적게 나타남을 알 수 있다. 코깅 토크는 계자 자석과 전기자 슬롯 구조 사이의 상호 작용으로 인하여 공극에 쌓인 자기 에너지가 회전자의 이동과 함께 생기는 것이므로, 공극이 증가하면 자기저항의 크기가 증가하여 유효 자속량이 적어진다. 코깅 토크는 자속량의 감소만큼 줄어들게 된다. 초기 해석 모델의 공극 길이를 5[mm]에서 0.5[mm]씩 증가시켜서 6.5[mm]까지 증가하여 나타낸 코깅 토크 파형을 그림 10에 도시하였다.

그림 10에서보면 자극각 37.5[°], 공극 6.5[mm]일 때 코깅 토크 값(63.35319[Nm])이 가장 적게 나타남을 알 수 있다. 여기서 보면 위의 이론처럼 코깅 토크 파형이 조금씩 감소됨을 알 수 있다. 그리고, 그림 9에서 얻은 결과인 코깅 토크가 가장 작은 자극각이 39[°]일 때를 기준으로 공극의 길이를 조정하여 코깅 토크 저감에 대하여 살펴보았다. 공극 길이를 변화하여 나타난 코깅 토크 파형을 그림 11에 도시하였다. 그림 11에서 보면 자극각 39[°], 공극 5[mm] 일 때 코깅 토크 값 (22.55943 [Nm])이 가장 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 위의 이론과 맞지 않게 되는데 자극각과 공극 길이에 따라서 최저의 코깅 토크 발생이 되는 점이 다름을 알 수 있다. 이 두가지 변수에서의 코깅 토크를 조합하

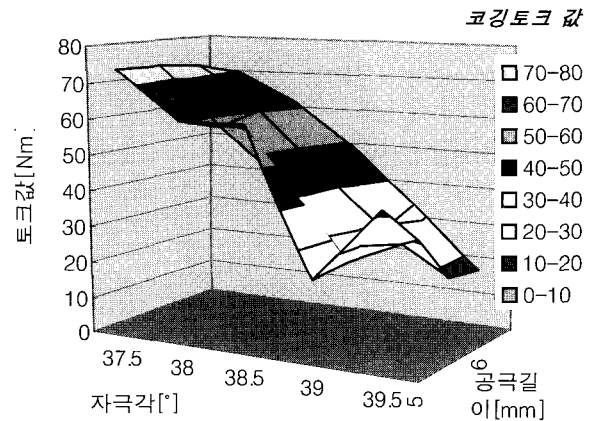


그림 12 자극각과 공극변경에 따른 코깅 토크 값
Fig. 12 Cogging torque for variation of air-gap length and magnet arc

표 3 설계변수에 따른 코깅 토크 값

Table 3 Cogging torque value for design parameter

공극 [mm]	자극각 [°]				
	37.5	38	38.5	39	39.5
5	74.13607	60.97532	60.98568	22.55943	42.53086
5.5	72.8742	57.35934	43.44194	23.80875	31.70685
6	66.64393	60.04787	44.70591	29.08713	16.11769
6.5	63.35319	61.53319	48.81057	33.34659	17.8378

여 나타낸 것을 그림 12에 나타내었다. 이에 따른 각각의 최대 코깅 토크 값을 표 3에 나타내었다. 앞서 각 설계 변수 변화에 따른 코깅 토크 최저 값들은 그림 9와 그림 11에서 자극각 39[°], 공극 5[mm]일 때 코깅 토크 값 22.55[Nm]와 그림 10에서의 자극각 37.5[°], 공극 6.5[mm]일 때 코깅 토크 값은 63.35[Nm]임을 알 수 있다. 하지만, 두가지 변수들을 조합하여 얻은 결과 표 3에서 보면 자극각 39.5[°], 공극 6[mm] 일 때의 코깅 토크 값(16.1176[Nm])이 더 작게 나옴을 알 수 있다. 따라서 자극각이 39.5[°], 공극 길이 6[mm]일 때를 취하여 그림 5의 설계 흐름도를 만족하는 코깅 토크 값이 최저인 최적 형상을 얻어 선박 추진 장치용 BLDCM을 설계하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 선박 추진 장치용으로 저속 영역에서 운전하는 대용량 모터를 설계하였다. 코깅 토크의 영향으로 인하여 발생하는 진동 및 소음의 영향을 줄이고자 초기모델 선정 시부터 slots/pole비등을 고려 초기 모델을 선정하였다. 코깅 토크 저감을 위하여 설계변수 2가지를 선택, 토크 값과 추력 상수 값이 크게 변화하지 않는 범위 내에서 설계 변수의 적절한 변화에 의해 최저의 코깅 토크를 발생하는 회전자의 형상을 설계하여, 최저 코깅 토크를 가지며 저속영역에서 고출력을 가지는 1000[Vdc], 300[kW], 300[rpm]급인 3상 8극 36 슬롯을 가지는 BLDCM을 설계하였다. 전자장 해석으로 이를 해석 검증하였다.

본 논문에서 설계되어진 최저의 코깅 토크를 가지며 저속영역에서 큰 토크를 가지는 선박 추진 장치용 BLDCM(Brushless DC motor)은 기존의 직류기 및 권선형 유도 전동기를 대신하여 유지 보수가 필요 없이 선박 추진 장치를 위한 전기 추진 장치용 전동기로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. S. Parker "The Electric Warship [electric pro-pulsion], *Electrical Machines and Drives*, 1997 International Conference on. Publ. No. 444, pp. 319~325, 1997.
- [2] Jacek F. Gieras Mitchell Wing "Permanent Magnet Motor Technology design and applications", *Marcel Dekker*, 1997.
- [3] J. R. Hendershot Jr. & T. J. E Miller "Design of Brussless Permanent-Magnet Motor", *Magna Physics & Oxford*, 1994.
- [4] H. Bausch, "Large Power Variable Speed a.c. Machines with Permanent Magnets", *Electr. Energy Conf.*, Adelaide, Australia, pp. 265~271. 1987.
- [5] S. M. Hwang "Various design techniques to reduce cogging torque by controlling energy variation in permanent magnet motors", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, No. 4, pp. 2806~2809, Jul. 2001.
- [6] M. Benarous, "The effect of the distribution of the magnetisation in brushless DC machines on cogging torques", *Electrical Machines and Drives*, 1999. *International Conference on. Publ. No. 468* pp. 151~153, 1999.
- [7] H. S. Cho "Effect of pole to slot number ratio on back-EMF constant of BLDC motor with nonoverlapping stator winding" *International Conference IEMD '99*, pp. 54~56, May. 1999.

저 자 소 개



조승현(曹承鉉)

1975년 12월 2일생. 2002년 부경대 공대 전기공학과 졸업. 2002년~현재 부산대 대학원 전기공학과 석사과정.



빈재구(賓在久)

1973년 3월 2일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 국방과학연구소 연구원.



조수억(曹洙億)

1965년 3월20일생. 1993년 2월 부산대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 동 대학원 박사과정. 현재 OTIS-LG 전력전자팀 과장.



최철(崔哲)

1963년 11월 3일생. 1987년 중앙대 전기공학과 졸업. 1994년 경남대 전자공학과 졸업(석사). 1998년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 박사수로. 1987년~1999년 LG산전 창원공장 주차설비제어 개발팀장. 1999년~현재 OTIS-LG 서버R&D팀 부장.



김철우(金喆禹)

1942년 12월 5일생. 1969년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대 전자공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경공업대 전기전자공학과 객원 교수. 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 공대 전자전기통신공학부 교수. 당 학회 자문위원.