

소형선박 선외기용 전기동력 시스템 연구

박주식*·원준희*
*(주)LGM

A Study on Electric Power Propulsion System for Small Ship Outboard

Joo-Sik Park* · Jun-Hee Won*
*LGM co., ltd

Abstract

Recently, the outboard engine system of internal combustion engine is widely used in the field of small ship propulsion. However, the internal combustion engine has serious problems of energy depletion and environmental problems, so electric propulsion methods are being studied.

In this paper, we have developed important motors and controllers of electric propulsion system for small marine outboard motors. The motor design was performed through the motor characteristics analysis method, and the 30Kw system was developed through the BEMF processing circuit and the power conversion circuit by the embedded microprocessor.

This study was carried out through government supported projects and achieved quantitative targets through accredited institutions.

Keywords : BLDC motor, Inverter, BEMF, Outboard, Embedded microprocessor

1. 서론

최근 내연기관 엔진의 효율성과 환경적인 문제로 이를 대체할 다양한 동력원에 대한 연구가 진행되고 있다. 화석연료를 사용하는 엔진을 대신해 모터를 이용한 다양한 운송수단으로 전기 자동차, 오토바이, 농기계, 드론에 이르기까지 모든 운송수단에 전기 동력화가 개발되어지고 있다.

이에 소형 선박의 추진기관인 선외기 또한 향후 수 년 안에 전기 동력화가 이루어질 것으로 본다. 앞으로는 화석연료의 고갈과 고유가 및 탄소배출권을 포함한 환경문제로 해양 관련 부분에서도 규제가 강화되어 가고 있어 NOx, CO2 등 대기 오염 물질에 대해 강화된 환경규제 조건이 제정 및 시행되어 지고 있으며, 각 국

가별로 정부의 정책과 더불어 관련 연구가 활발히 진행하고 있다.

따라서, 소형선박용 선외기의 전기추진시스템을 구성하는 BLDC모터와 모터제어기를 개발하여 소형선박에 적합한 전기추진용 선외기를 개발함으로써 내연기관 선외기의 단점을 보완할 수 있는 소형선박의 추진기관 시장이 변화하고 있다.

2. 이론적 고찰

2.1 국내 현황

국내의 선외기 기술동향을 보면 현재 국내에서는 전기 동력 선외기에 대한 시장 형성이 활발하지 못하고 있지만 향후 화석연료의 고갈 및 환경 보호에 대한 관

†This study was researched by the Ministry of Trade Industry and Energy of SMB Corporation, Supporting at Global Professional Technology Development Project (Project No. 10048831).

†Corresponding Author : Joo sik Park, LGM co., , ltd, , E-mail: g971170@hanmail.net

Received October 20, 2017; Revision Received November 11, 2017; Accepted December 11, 2017.

심이 증가함에 따라 2~3년 내에 그린 에너지에 대한 수요가 급증할 것으로 예상된다. 소형선박은 운영 방법에 따라 레저용, 어선용, 공익 및 연구선 등 다양한 사용 환경과 다양한 연령대에서 사용되고 있지만 대부분은 내연 기관 선외기로서 매연, 진동 및 소음으로 인한 해양 생태계의 오염에 대한 개선이 지속적으로 요구되어 왔음으로 전기 동력 선외기에 대한 시장의 요구는 충분히 성숙되어 있다고 볼 수 있다.

내연기관은 구조적으로 복잡하고 많은 부품으로 구성되어 있어 고장발생요인이 높고, 유지비용이 많이 발생하며, 안전사고로 인한 사회간접 손실이 발생된다. 이에 전기 추진 시스템은 모터, 제어기, 배터리의 요소 기술의 발전으로 고장발생 요인이 적으며, 본 연구에서 개발한 BLDC모터와 제어기를 통해 선외기의 소형화와 경량화에 따른 고출력, 고효율이 가능하여 향후 소형선박의 내연기관 선외기를 전기추진 선외기로 대체할 수 있다.



[Figure 1] Export/Import Status of Outboard

[Figure 1]은 국내선박 시장에 있어 1960~1970년 대부터 수입이 진행되어 내연기관 선외기는 해양 레저 산업에 있어서도 여전히 해외 선진업체에서 선점하고 있으며, 우리나라는 거의 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 내연기관 선외기에 대한 독자적인 기술이 확보되지 않은 현 상황에서 친환경 트렌드에 따른 전기 추진 선외기 기술개발은 지난 수 십년간 수입에 의존한 선외기 시장 또는 수입대체는 물론 수출을 통한 세계 시장 선점을 위하여 관련기술 개발이 요구된다.

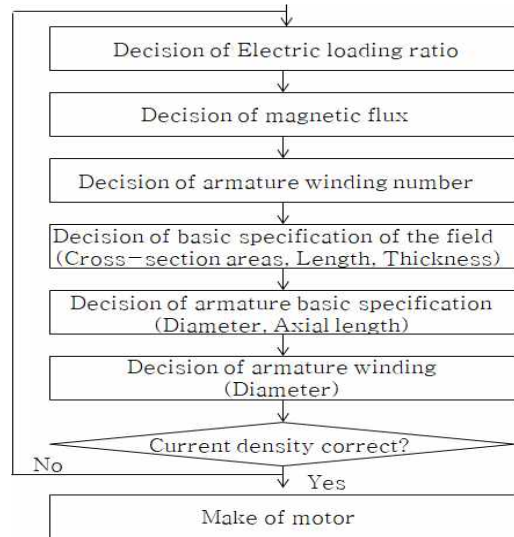
2.2 전기추진 시스템 설계

소형선박용 선외기에 장착되는 구동모터 및 제어기는 일반 상용 전원이 아닌 배터리를 동력으로 하기 때문에 소형 경량화 및 고효율의 구조를 가져야 하며 제어의 안정성이 요구된다. 선외기의 경우 주행중에 물의 저항을 이겨내고 선박의 운행을 위해서는 중저속 고

토크의 모터제어가 필요하며, 선박의 크기와 무게에 대한 제한과 배터리 적재 용량의 제한 등의 많은 한계사항을 가지고 있으므로 모터 출력 증가를 최소화 하면서 운전 조건에 따라 요구되는 제어가 필요하다[2].

2.2.1 BLDC 모터 설계

본 연구에서는 BLDC모터를 설계하는데 다음과 같은 이론에 따라 하였다. BLDC모터는 영구자석이 사용되기 때문에 <Figure 2>, <Table 1>과 같이 모터설계를 하였으며, 먼저 자기장하비 결정이 필요하다.



[Figure 2] BLDC motor design flow

<Table 1> BLDC motor design parameter

Continuos of RPM	N (rpm)
Noload of RPM	NO (rpm)
Voltage of phase	Vt
Continuos of torque	τ [Nm]
Noload loss torque	τ_0 [Nm]
Low temperature limit	t [°C]
Phase number	m
Pole number	2p
Pole length	l_g
Slot number of iron	S_n
Current flux density	B_r
Force of coercive	H_c

BLDC 모터의 장하비를 M이라 하고, 전자속 및 전 암페어 도체수와의 비를 나타내며, 식(1)은 상(phase) 수 m에 대해 M을 얻을 수 있다. M은 전동기 설계에서 모터 크기를 좌우한다. 장하비를 크게 하면 철량이

많은 모터가 되고 작게 하면 동량이 많은 모터가 된다.

$$M = \frac{2p\Phi_g}{2mk_m w I} = \frac{p\Phi_g}{mk_w w I} \quad (1)$$

자속결정은 BLDC모터의 식(2)의 발생토크와 장하비에 의해서 식(3)이 된다.

$$\tau + \tau_0 = K_r I = \left(\frac{m}{2}\right) \times \sqrt{2} p k_w w \Phi_g I \quad (2)$$

$$\Phi_g = \frac{3.72}{p} \sqrt{M(\tau + \tau_0)} \quad (3)$$

전기자 권선수 결정은 구속시의 토크(식 4), 무부하시의 회전속도(식 5), 권선계수($k_w=0.85\sim0.97$)와 슬롯수에 따라서 식(6)을 통해 식(7)에서 권수가 결정된다.

$$\tau_s = \frac{\tau N_0}{N_0 - N} \quad (4)$$

$$N_t = N_0 \frac{\tau_s + \tau_0}{\tau_s} \quad (5)$$

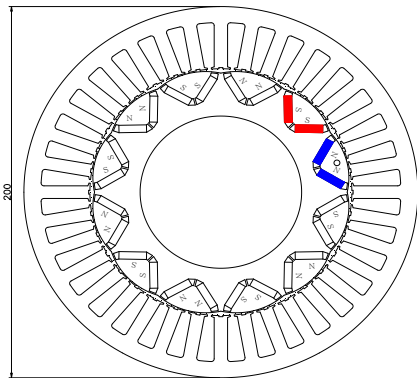
$$W_c = \frac{W}{S_n/m} \quad (6)$$

$$W = (S_n/m) \times W_c \quad (7)$$

자속에 관계되는 계수 k_m 을 가정하면 식(8)에서 자석 평균단면적을 얻게 된다.

$$a_m = \frac{\Phi_g}{k_m B_r}, \quad k_m = 0.7 \sim 0.8 \quad (8)$$

영구자석의 자화방향 두께는 영구자석의 동작점이 결정되고, 전기자 권선 결정은 전기자 저항비와 실효저항에 의해 동선의 단면적을 구할 수 있고, 점적률을 고려하여 슬롯 면적을 결정한다.

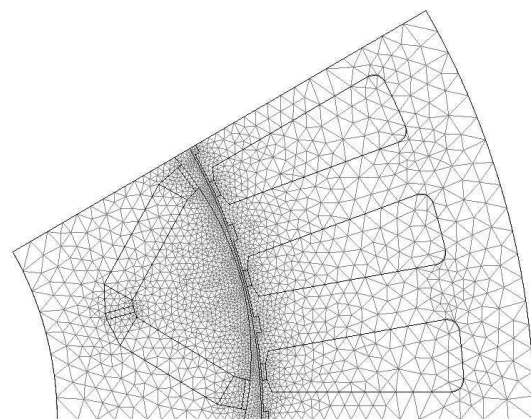


[Figure 3] Design of motor structure

이러한 설계를 통해서 모터의 소형화와 출력 30Kw를 만족하기 위해 ND-42SH급 재질특성으로부터 $B_r=1.2T$, 비투자율은 1.05의 영구자석을 적용한 IPM 형태로 하였으며, [Figure 3]과 <Table 2>에서와 같이 권선배치와 축 방향길이는 120mm이며, 3상 36슬롯, 12pole로 극당 슬롯수와 단층권 형태의 권선 피치는 각각 3으로 하였다.

<Table 2> IPM motor winding specification

Item	Unit	Value
Winding/slot		17
Circuit number		6
Layer/slot		1
Serial turn number/phase		17
Pitch of coil		3
Cross section areas/conductor	mm ²	17.00
Areas of conductor/slot	mm ²	56.00
Drop rate (Copper areas)	%	43.55
End_coil length	mm	65.4
Resistance of coil (20°C)	ohm	0.00671
Resistance of coil (75°C)	ohm	0.00797



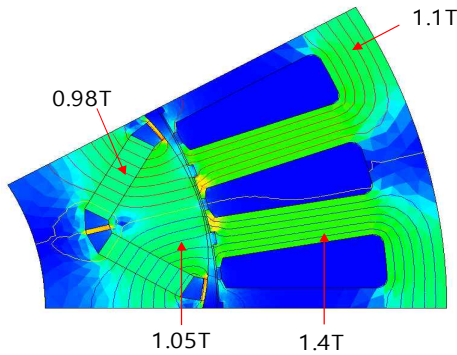
[Figure 4] IPM motor interpretation area

설계된 철심은 S18급으로 [Figure 4], [Figure 5]는 설계 모터의 해석영역과 특성을 나타냈다. Full포화되었을 경우 2T까지 가능하고 일반적인 손실을 고려하여 최대자속밀도는 1.8T로 하였다. [Figure 6]은 자속

밀도 해석결과이다.



[Figure 5] Magnetic flux density



[Figure 6] Magnetic flux density analysis result

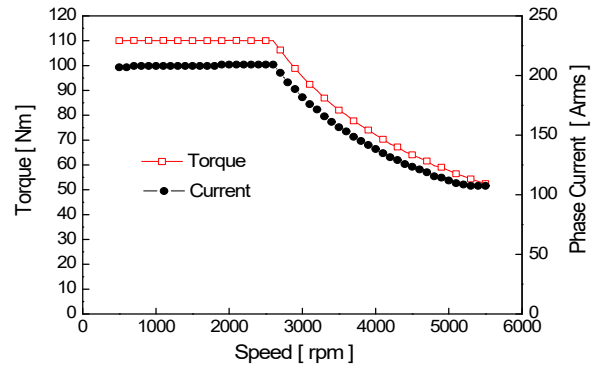
[Figure 7]은 제어기의 전류측정용 션트(Shunt) 저항 용량선정 하기 위한 모터의 역기전력(BEMF) 측정 화면과 [Figure 8]은 토크와 전류간의 변화를 측정하여 d-q축 등가회로를 이용하여 운전특성해석을 하였다[1].



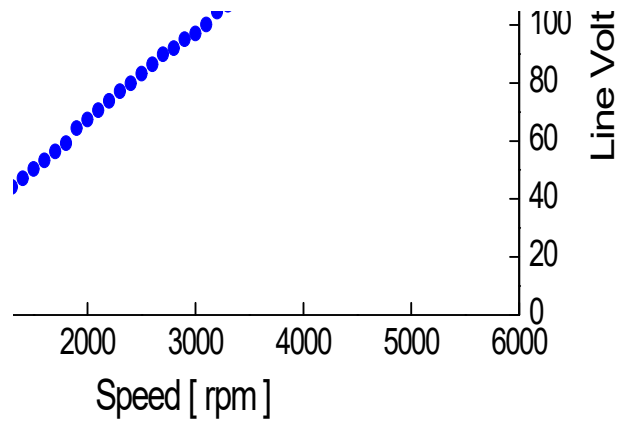
[Figure 7] BEMF measurement of motor

DC280V를 입력하여 전류 위상각 0° 에서 인덕턴스는 0.130mH로 산정되었다. 2800rpm이상에서 토크가

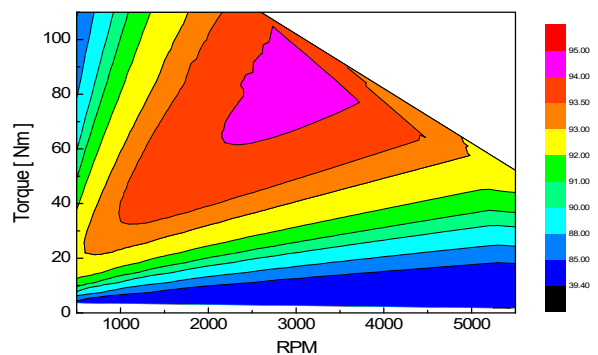
감소하였고, 5300rpm까지 전류도 동일하게 토크에 비례하여 감소하였다. 이것은 약계자(Field Weakening) 제어가 요구되지만, 입력전압은 DC280V로 하여 10%의 전압을 drop을 고려하였기 때문에 5500rpm까지는 약계자 제어를 하지 않아도 되고, 속도향상 효과를 얻을 수 있다. [Figure 9]의 효율분석에서는 2800rpm 구간에서 최대효율이 나타났으며, 효율은 88~95% 수준으로 나타났다[3].



[Figure 8] Torque and current of 30Kw operation



[Figure 9] Efficiency of 30Kw operation



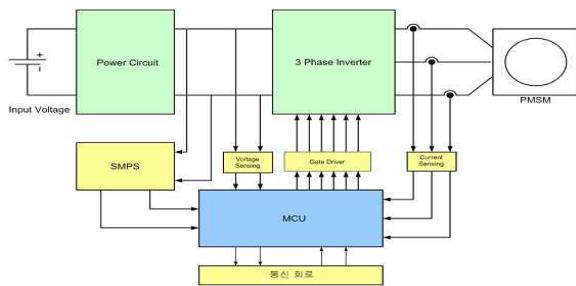
[Figure 10] Efficiency Characteristics map of

Driving Section

[Figure 10]은 구동 rpm구간에서의 효율특성을 분석한 map을 나타내었다. 최대 효율은 95%이상으로 나타났고, 1500~3500rpm구간에 넓게 나타나고, 5000rpm이상에서도 85%이상의 모터 운전이 가능하였다.

2.2.2 모터 제어기 설계

BLDC모터의 제어기는 [Figure 11]에서와 같이 배터리를 사용하는 특성을 고려하여 에너지 효율 향상에 주안점을 두고 개발하고자 한다.



[Figure 11] BLDC motor controller diagram

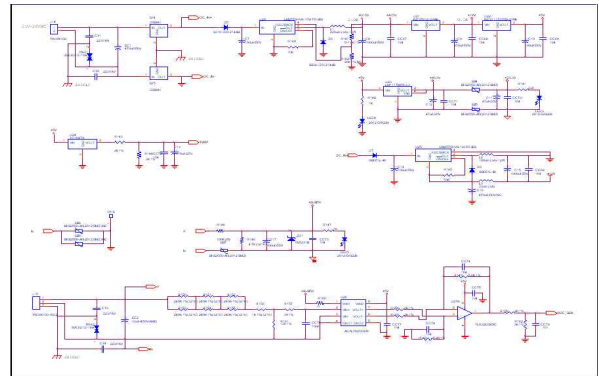
본 연구에서 개발하고자 하는 모터 제어기는 크게 세 부분으로 나누어 볼 수 있다. [Figure 12]의 전력 변환 소자의 경우 효율적인 모터제어를 위해 IGBT를 사용하였다. 모터에 공급하는 고전압/대전류 처리를 위해 IGBT(FS800R07A2E3: Infineon사)를 이용하여 모터의 전류를 제어하여 속도를 제어하기 위한 전력변환부, [Figure 13]에서 제어기의 전체 연산 및 제어를 담당하는 제어부(b), 제어부와 주변회로의 전원을 공급하기 위한 SMPS부(a)로 볼 수 있다.



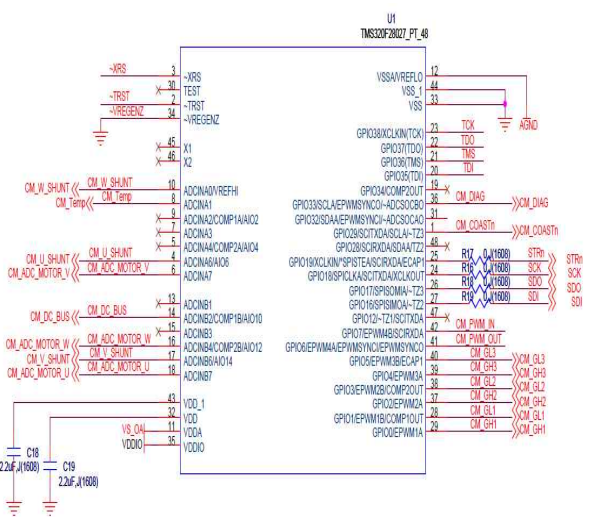
[Figure 12] IGBT of motor control

본 연구에서는 [Figure 13]의 (b)는 마이크로 프로세서(MCU)를 TI제품인 TMS320F28027을 사용하였다. 역기전력에 의한 로터위치에 따른 전력변환부의 PWM제어를 위해서는 고속의 수치계산이 필요하기 때문에 32bit급의 저전력 MCU가 필요하기 때문이다. 외

부와 통신하기 위한 시리얼관련 포트와 자체 온도측정이 가능하며, 로터의 고속회전제어를 위하여 고속의 클럭 타이머(PWM)로 구성하였다[5].



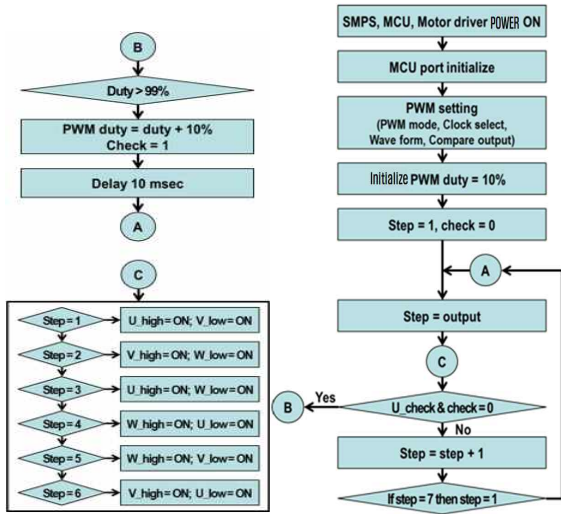
(a) SMPS part



(b) controller part

[Figure 13] Circuit diagram of motor controller

[Figure 14]는 MCU에 BLDC모터의 속도제어를 위한 알고리즘이며, 프로그램 코딩은 TI사의 CCS-V5을 통해 개발하였다[4].



[Figure 14] 6step motor control algorithm

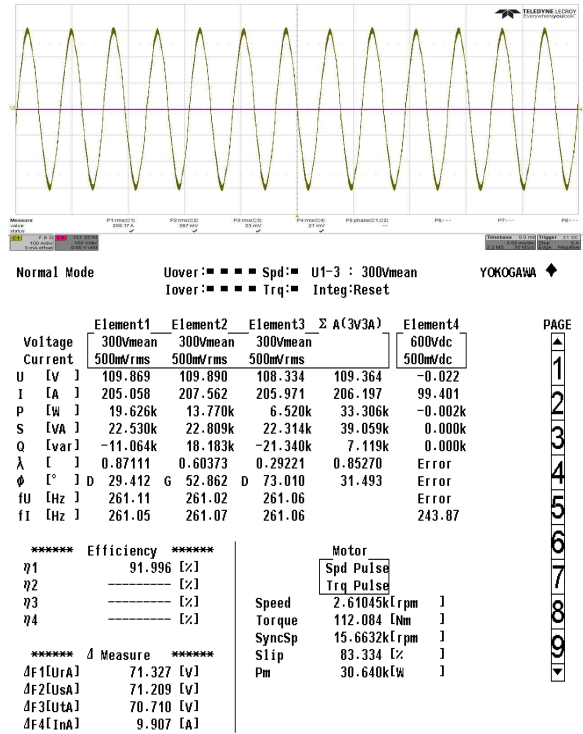
<Table 3>은 [Figure 14]의 'C' 루틴의 제어순서를 IGBT 각 소자에 전원공급 순서를 나타내었으며, 모터내의 로터가 시계방향으로 회전하게 되며, 'PWM duty'에서는 IGBT에 공급하는 전류량과 'Delay'는 로터의 회전속도를 제어하게 된다. <Table 3>의 step순서를 반대로 진행하면 시계 반대방향으로 로터가 회전하게 된다.

<Table 3> 6step control of IGBT

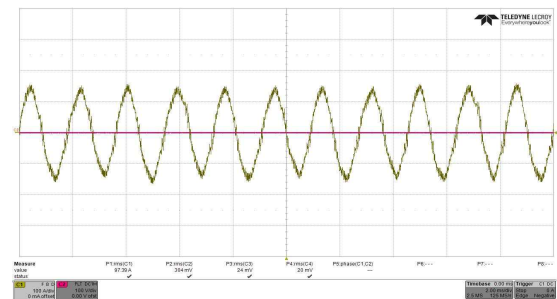
step	U_high	U_low	V_high	V_low	W_high	W_low
1	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
2	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON
3	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
4	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF
5	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
6	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF

3. 실험 및 고찰

전체적인 전기추진 시스템의 효율을 검증하기 위해 한국화학융합시험연구원 에 시험의뢰하여 소형선박에 활용할 수 있는 선외기 장착을 위한 평가시험을 하였다. [Figure 15]는 전자부품연구원에 보유하고 있는 TOKOGAWA 3200E의 전력분석기를 통한 시험장비로 2600rpm과 5500rpm에서의 토크 전류파형을 측정 한 것이다.



(a) 2600rpm/112Nm power meter



(b) 5500rpm/52Nm power meter

[Figure 15] 2600/5500rpm power compare result

[Figure 8]과 [Figure 9]에서 모터의 최적 토크의 속도는 2800rpm이었으나 제어를 통해 측정한 결과로서는 2200rpm의 결과를 얻었다. 전체 모터제어 시

스택의 효율이 낮게 나타났다. 이는 전력변환소자의 전류손실을 막기 위한 방열구조 및 능동적 제어를 통해 최적값을 요구하게 된다.

[Figure 16]은 본 연구에서 제작한 모터와 제어기를 기존의 내연기관 선외기에서 내연기관을 제거하고 장착한 그림을 나타내었다. 개발목표에서 제시하였듯이 선박이라는 특성 때문에 소형화와 경량화를 고려하고, 한정된 전원인 배터리를 사용하기 때문에 효율을 높이기 위한 모터설계와 제어기의 저전력 회로설계와 제어 알고리즘을 하나의 전기추진 시스템이다.



[Figure 16] Assembly BLDC motor & controller of outboard

4. 결론

본 연구에서는 소형선박의 추진장치에 많이 적용되고 있는 선외기의 동력발생장치를 내연기관에서 모터 시스템으로 바꾸기 위해 선박특성에 최적인 소형, 경량화와 고효율의 출력을 낼 수 있는 BLDC모터와 제어기를 개발하였다.

30kW용량의 모터설계과정과 제어기설계 및 프로그램 개발을 통해 소형선박용 전기추진 시스템을 개발하였다. 제 3 장의 모터와 제어기를 통한 시험을 통한 분석결과 제어기 알고리즘에 의한 손실과 물리적(온도, 소음, 진동)인 원인의 손실이 발생하였다. 이는 IGBT 내부저항이 작은 것을 선정하면 효율을 어느 정도 올릴 수 있으나 가격이 높은 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 선외기의 기어비 변경이나 선박의 프로펠러 피치를 변경하는 방법으로 선박운항의 효율을 보완하는 방법을 고려할 수 있다.

개발한 모터와 제어기는 같은 용량의 40 마력급의

내연기관 선외기의 구조보다 단순하며, 무게가 줄었기 때문에 전기추진 시스템은 기존의 내연기관에서의 고장발생이 적으며, 환경오염의 발생이 없는 것이 특징이다. 따라서 유지보수비용, 소음, 진동이 작고 연료비용이 절감되어 향후 소형선박에 대체 및 신규선박에 많이 사용되어 질것으로 본다.

향후에는 배터리의 운영시스템과 모터제어시스템을 통합하여 선박의 안전성과 경제성을 높일 수 있는 연구가 필요하겠다.

5. References

- [1] Cho S-H., Bin J-G., Cho S-E., Choi C. and Kim C-U.(2004), "The Design of high-power BLDC Motor with Maximum Torque at Low Speed for Ship Propulsion" , The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, 9(2):112-118.
- [2] Choi, H-S., So, M-O., Park, H-I., Park W-G., Jang H-Y. and Hong S-Y. (2010), "Development of Underwater Thrusting System Driven by 300W Class BLDC Motor" , Journal of the Korean Society of Marine Engineering,34(8):1128-1134.
- [3] Jeong, T-Y. and Jeong, S-K. (2010) "Efficiency Comparison according to Power Conversion Method and Performance Estimation for Battery Source BLDC Motor Propulsion System of Small Ships" , Journal of the Korea society for power system engineering, 14(1):27-33.
- [4] Park J-S., Park S-J., Jeong H-G. and Park H-J.(2015), "A Fuzzy system for constant speed control of fan motors" , The Korean Institute of Industrial Engineering spring conference, 3695-3698.

저자 소개

원준희



세종대학교 항공우주공학 학사,
한성대학교 융합기술학 석사, 현
재 (주)LGM대표이사.
관심분야 : 전기추진시스템(자동
차, 선박), 친환경 운송시스템,
융복합시스템 설계 등.

박주식



인천대학교 산업공학과 학사, 석
사, 명지대학교 산업공학과 박사,
Biostatistics of North TEXAS
University(Post-Doc.), 관심
분야 : 설비관리 및 모니터링,
신뢰성(피지) 응용,
Microprocessor Interface분야,
DBMS 등.