

선외기용 5HP급 전동 추진시스템의 효율 개선 방안에 관한 고찰

이성형¹ · 조원영¹ · 김병국[†] · 김현우² · 강민수²

(원고접수일 : 2012년 2월 3일, 원고수정일: 2012년 4월 17일, 심사완료일 : 2012년 4월 23일)

A Study on the Method for Efficiency Improvement of 5HP Electric Thrusting System for Outboard Motor

Sung-Hyung Lee¹ · Won-Young Jo¹ · Byong-Kuk Kim[†] · Hyen-Woo Kim² · Min-Su Kang²

요약 : 본 논문에서는 선외기에 적용되는 5HP급 전동 추진시스템의 효율 개선 방안에 대해 고찰하였다. 추진시스템의 핵심 부품인 전동기 및 프로펠러의 최적 효율 개선 모델을 제안하고 시제품 제작을 통하여 개선 모델의 특성을 검증하였다. 또한 실장착 시험을 통해 기존 추진시스템 대비 20% 이상의 효율 개선 효과를 입증하였다.

주제어 : 선외기, 전동 추진시스템, 효율 개선

Abstract: This paper introduces the method for efficiency improvement of 5HP electric thrusting system for outboard motor. The most efficient model of motor and propeller is suggested and verifying its performance through the prototype model. Also, We show improvement of 20% compared to existing system through the equipped test.

Key words: Electric Outboard Motor, BLDC Motor Thrusting System, Efficiency Improvement

1. 서 론

최근 세계적으로 선박 대기 오염, 온실가스 배출 규제 등 해양 관련 규제가 강화되어가고 있으며, 특히, 유럽(RCD 94/25/EC)과 미국(EPA)의 경우 엔진으로부터 배출되는 NOx, PM, CO 등 대기 오염 물질에 대해 점점 더 강화된 환경규제 조건이 적용되고 있다. 2009년 국내의 선외기 보급률은 소형선박의 90% 이상을 차지할 만큼 수요기반이 높으나 다량의 불연소산화물이 해수와 대기 중으로 방출되어 해양환경에 주된 오염원이 되고 있다. 따라서 대기 오염물질의 발생을 줄이고 높은 연료효율을 갖는 친환경 추진시스템으로의 전환이 절실히 요구되고 있다[1].

이에 대한 대책으로 국내외적으로 전동 추진시

스템의 수요가 점차 증가하고 있으며 제품 또한 다양화되고 있다. 그러나 전동 추진시스템의 경우 전원 공급이 배터리로만 이루어지기 때문에 배터리 용량에 따른 가용시간 및 거리에 한계를 가지게 된다. 따라서 동일한 배터리 용량에서 선외기의 일충전 거리는 추진시스템의 효율에 따라 좌우된다.

본 논문에서는 이러한 추진시스템의 일충전 거리를 증가시키기 위한 방안으로 추진시스템의 효율 개선 방향을 고찰하고 시제품 제작 및 실장착 시험을 통한 제안 모델의 개선 효과를 입증하고자 한다.

2. 전동 추진시스템

2.1 전동 추진시스템의 구성

전동 추진시스템의 구성은 Figure 1과 같다. 주요

† 교신저자(브이제엠, E-mail:byongkuk@daum.net, Tel: 055-328-3918)

1 브이제엠(VGM)

2 중소기업연구원

부품으로는 제어기를 포함한 컨트롤 박스와 샤프트, 추진 모터 및 프로펠러 등으로 구성된다. 여기서 추진시스템의 효율에 영향을 미치는 요소로는 추진 모터, 제어기, 프로펠러 등이다.

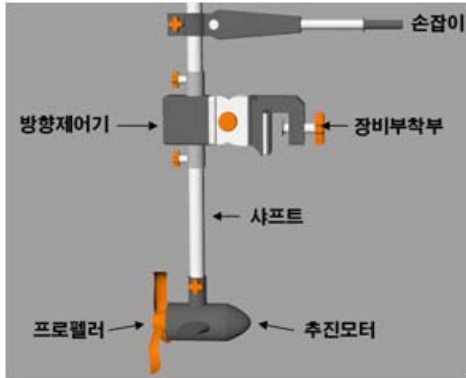


Figure 1: Composition of thrusting system

본 논문에서는 추진시스템의 효율에 직접 영향을 미치는 핵심 요소인 추진 모터, 제어기, 프로펠러에 대한 최적 제안 모델을 제시하고자 한다.

2.2 추진 모터

추진시스템에 적용 가능한 모터로는 DC전동기, 유도전동기, 동기전동기 등을 들 수 있다. 기존의 모터보트용 전동 추진시스템에는 DC모터가 사용되고 있다. DC모터의 경우 제어성에서 우수한 특성을 보이나 모터 자체의 효율이 낮고 기계적 접촉부인 Brush로 인하여 전류 용량에 대한 한계는 물론 노이즈 발생, 유지 보수적 측면에서 단점을 가진다.

유도전동기의 경우 기계적 강도 및 내구성은 뛰어나지만 효율이 낮고 제어가 힘든 단점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 DC모터가 가지는 우수한 제어성과 브러시의 제거로 인한 노이즈 제거, 기계적 강도와 내구성 향상, 특히 영구자석의 사용으로 인한 고효율 구현이 가능한 영구자석형 동기전동기인 BLDC(Brushless Direct Current)모터를 적용하고자 한다. 제안 모터의 용량은 5HP급으로 하며 목표 효율은 90% 이상으로 설계하도록 한다.

2.3 제어기

본 논문에서는 추진 모터로 BLDC모터를 적용하였으며 BLDC모터의 특성상 기본적으로 제어기가 필요하기 때문에 추진시스템의 제어부와 모터 제어부를 일체화하여 구성하기로 한다. 제어기 용량은 5HP, 효율은 95%이상으로 한다.

Table 1은 효율을 기준으로 한 적용 모터별 일충전당 개선량을 보이고 있다. 기존 적용되고 있는 DC모터에 비해 제안 모델을 적용할 경우 일충전 거리가 28% 증가할 것으로 예상된다.

Table 1: Comparison of efficiency classified by the types of propulsion motor

구 분	DC모터	유도모터	BLDC모터
모 터	70	80	90
제어기	95	95	95
종합효율[%]	66.5	76	85.5
1충전당 개선량	1	1.15	1.28

2.4 프로펠러

선박을 움직이기 위한 핵심 부품은 모터이다. 하지만 모터 못지않게 모터에서 나온 동력을 실행할 부품도 매우 중요하다. 선박이 전동기의 힘을 이용해 거친 파도를 가로 지르며 운항할 수 있도록 하는 부품이 바로 프로펠러이다.

프로펠러는 모터에서 구동축을 통해 전달된 힘을 회전시켜 선박을 움직이는 역할을 한다. 항공기에 사용되는 프로펠러가 기압을 이용한다면, 본 연구에서의 선박에 쓰이는 프로펠러는 수압을 통해 선박을 추진시킨다는 점에서 차이가 있다. 모터와 연결된 축계를 통해 전달된 동력을 물과 작용해 추력으로 변화시켜 주기 때문에 프로펠러는 모터와 밀접한 관계를 가진다.

본 논문에서는 모터 추력에 맞추어 최적의 프로펠러 설계를 통한 모델을 제안한다.

3. 추진 모터 및 제어기 설계

3.1 BLDC모터 구동원리

BLDC모터의 구동원리는 회전자의 위치를 알 수 있는 위치센서를 이용하여 회전자 자극의 위치를

검출하여 전류를 각 상에 흘려주면 이 전류와 계자 자속의 상호작용으로 토크가 발생하게 된다. 위치 센서로는 홀센서나 광트랜지스터가 이용되며 본문에서는 홀센서를 이용하였다.

일반적으로 BLDC모터는 계자자속의 위치에 따라 3상중 2상에 전류를 흘려주는 3상 2여자방식으로 구동된다. 회전자의 전기적 1회전시 전류의 도통구간은 6회 나타난다. 전류파형은 전기적으로 60°마다 반복되므로 임의의 한 구간을 해석하면 전구간에 적용할 수 있다.

BLDC모터의 일반적 토크식은 다음과 같다.

$$T_c = \frac{1}{\omega_e}(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (1)$$

3.2 BLDC모터 설계[2]

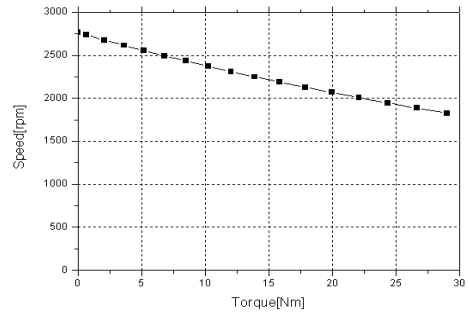
모터의 설계 사양을 Table 2에 나타내었다. 모터의 형태는 inner rotor이며 출력은 3.7KW (5HP), 정격속도 2000[rpm], 정격전압은 DC 36[V]이다.

Table 2: Design Specification

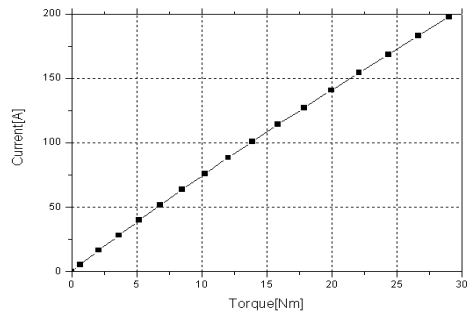
항 목		치 수	
전기적 사양	정격 출력	3.7 [KW]	
	정격 전압	DC 36 [V]	
	정격 속도	2000 [RPM]	
	정격 효율	90 [%]	
기계적 사양	극 수	8 [극]	
	영구자석	네오디움(NdFeB)	
	고정자	외경	140 [mm]
		내경	81 [mm]
		적층길이	80 [mm]
	회전자	외경	79 [mm]
내경		27 [mm]	
적층길이		80 [mm]	

또한 본 연구에 적용하고자 하는 추진시스템의 특성상 수중에서 사용되므로 수분 및 염분에 대한 고려가 기구적으로 반영되어야하며 방수등급 IPX8을 만족하도록 설계하도록 하였다. 또한 하우징의 재질은 염분 등 부식성을 고려하여 폴리아세탈을 적용하였다.

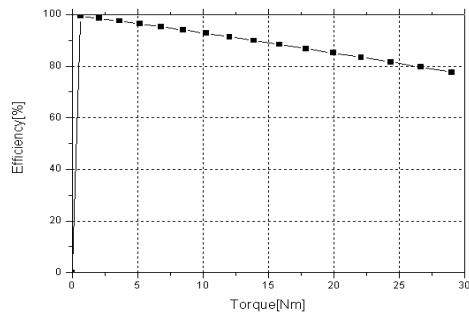
Figure 2는 설계 사양에 따른 등가회로법을 통한 모터 설계 결과로 기본적인 NT (Speed- Torque), IT(Current-Torque) 곡선 및 효율(Efficiency) 곡선을 나타내었다. 해석 결과 정격 토크(20Nm)영역에서 모터 효율은 92%임을 알 수 있다.



(a) NT Curve



(b) IT Curve



(c) Efficiency Curve

Figure 2: Result of simulation

Figure 3은 제안 모델의 정격 출력에서의 유한요소해석 결과를 나타내고 있다. 사용 프로그램은 Maxwell 2D를 사용하였다. (a)에서 자속의 모습을

선도로 나타내고 있으며 (b)에서 그 세기 및 포화의 정도를 나타내고 있다. 철심의 포화됨이 없이 8극의 적절한 자속분포가 나타나고 있다.

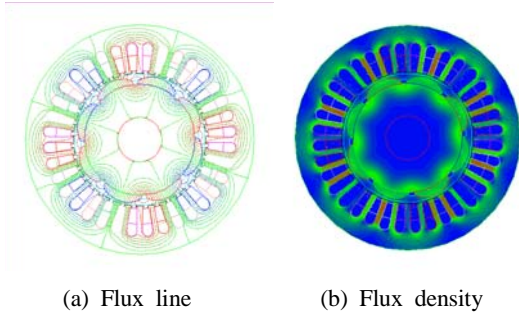


Figure 3: Finite element analysis

3.3 제어기 설계

Figure 4는 추진 모터를 구동하기 위한 제어기의 블록 다이어그램을 나타낸다. 추진 모터의 용량이 5HP으로 정격전압 36[V]가 인가될 때 정격 부하 상태에서 120[A]의 대전류가 흐르게 된다. 따라서 제어기의 효율을 높이기 위하여 전류 부담을 분할하기 위한 FET 병렬 구동 방식을 적용하였다. 또한 스위칭 손실 저감을 위하여 PWM 캐리어 주파수를 가청 영역 한계치인 15.4KHz로 설정하였다.

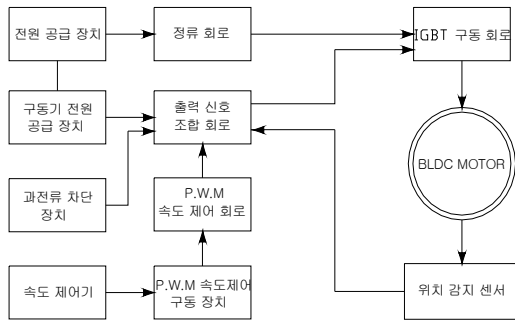


Figure 4: Block circuit diagram

Figure 5는 전동기의 유한요소해석 과정에서 필요한 외부 회로도를 나타내고 있다. 실제 구동알고리즘과 같은 3상 2여자 방식으로 6 step 구동을 하기 위한 회로를 구성하였다.

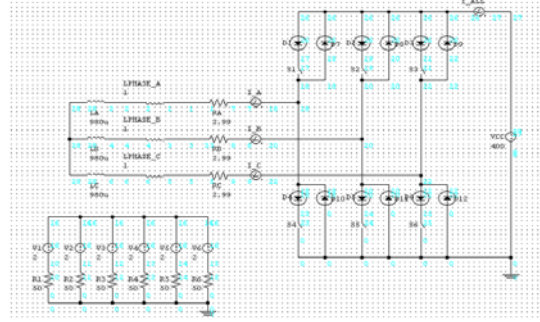


Figure 5: Schematic for external circuit coupling

3.4 프로펠러 설계

해양레저 선박을 포함하는 중소형선박 프로펠러의 경우, 조직적인 계열의 도표를 이용하는 설계방법이 신속한 설계를 할 수 있으며 성능추정이 용이하다는 관점에서 많이 이용되고 있다. 따라서 우리나라 대부분의 중소조선소나 프로펠러 제작회사에서도 이러한 설계도표에 의존하여 프로펠러를 설계하고 있다.

본 연구에서도 NACA-계열 프로펠러의 단독구동 시험결과를 가지고, 회귀해석법 및 최적화 기법을 사용하여 최적 프로펠러를 설계하는 과정을 채택하였다. Figure 6은 프로펠러 설계 순서를 나타낸다.

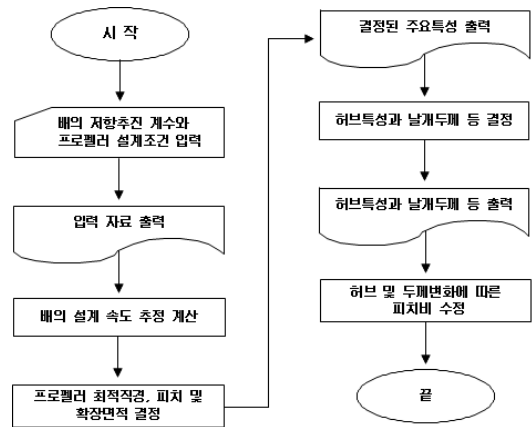


Figure 6: Flow chart of the propeller design

유동해석을 위하여서는 임펠러 작동 시 선체가 전진하므로 입구에는 유속 조건, 출구에는 압력 조건을 가정하였으며, 옆면은 수면 내부로 가정하여

symmetry 조건을 적용하였다[3]. 그리고 작동유체가 회전영역인 임펠러와 고정영역인 외부 유체 사이에 물리량이 전달될 수 있도록 Interface를 설치하여 계산을 수행하였다.

임펠러의 회전 속도는 1,000rpm~3,000rpm까지 500rpm씩 증가시키면서 임펠러의 압력분포 및 주위의 유동형태를 확인하였다.

Figure 7은 유동해석을 위한 경계조건을 나타낸다.

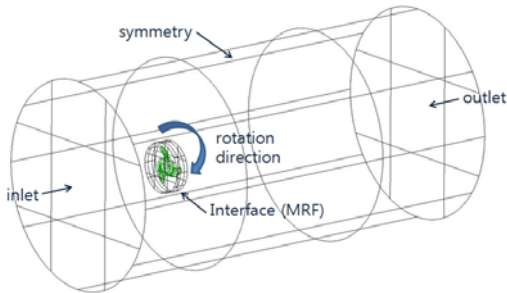


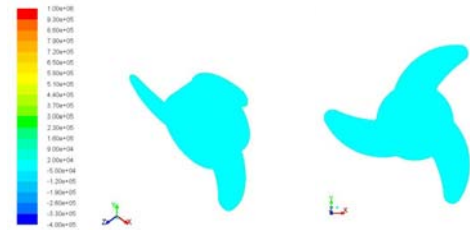
Figure 7: Flow simulation boundary condition

Figure 8은 유동해석 결과 임펠러 표면에 가해지는 전압(total pressure)분포를 나타내고 있다. 유체는 임펠러를 통과하면서 유체의 압력과 유속이 크게 변하므로, 정압(static pressure)과 동압(dynamic pressure)의 합으로 이루어진 전압으로 임펠러 표면의 압력 분포를 확인 하고자 한다.

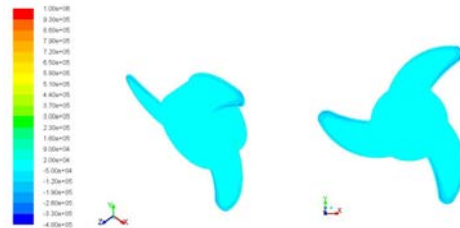
Figure 8의 a)에서와 같이 1,000rpm에서는 임펠러 압력면 전체에 대해 부압이 거의 발생하지 않고 유체가 잘 밀려나가는 것을 볼 수 있으나, b)와 같이 2,000rpm 이상에는 임펠러 팁 부분에서 유동박리에 의한 부압을 확인할 수 있다. 따라서 회전수가 증가할수록 부압 영역이 커지는 것을 알 수 있다. 임펠러 압력면에서 부압 영역이 발생하면 임펠러 앞뒤면의 유동 속도차가 감소하여 임펠러 효율이 떨어지게 된다. 하지만 임펠러와 같은 회전체에서는 필연적으로 발생하는 손실이며, 정격 영역인 2000rpm 에서는 블레이드 면적 대비 유동박리 영역이 미소함을 알 수 있다.

또한 회전수가 증가할수록 작동유체가 받는 원심력은 증가하기 때문에 임펠러 표면에서의 압력

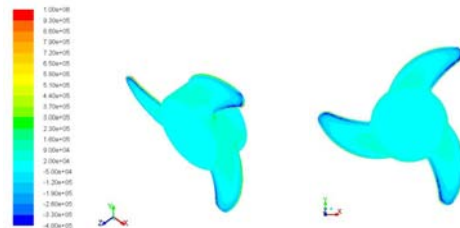
분포는 증가됨을 확인할 수 있으며, 원심력을 가장 많이 받는 블레이드 끝단 부분에서 압력분포가 가장 높은 것을 알 수 있었다. 따라서 실제 임펠러 회전 시 원심력에 대한 응력분포는 이 부분에서 가장 크게 발생할 것으로 판단되며, 변형량 또한 가장 크게 발생될 것으로 예상된다. 그리고 임펠러 표면의 최대 전압력 값은 한계 회전수인 3,000rpm에서 약 1.04[MPa]이다.



a) 1,000rpm impeller total pressure (Pa)



b) 2,000rpm impeller total pressure (Pa)



c) 3,000rpm impeller total pressure (Pa)

Figure 8: Total pressure distribution act on impeller surface

4. 시제품 제작

4.1 BLDC모터 제작

Figure 9는 등가회로해석과 유한요소해석의 결과 및 기계구조적 조건을 바탕으로 제작된 모터의 회

전자 및 고정자의 모습을 나타내고 있다. 회전자는 마그넷의 기계적 안정성을 고려하여 에폭시 재질의 몰딩 처리하였다. 고정자는 염수에 따른 부식성을 고려하여 폴리아세탈로 제작된 프레임 내부에 장착되었다.



(a) Rotor (b) Stator



(c) Motor assembly

Figure 9: Prototype of propulsion motor

4.2 제어기 제작

Figure 10은 추진시스템을 구동하기 위한 드라이브의 모습을 나타내고 있다. 추진 모터의 속도 조절과 전진, 후진이 가능하도록 제작하였다.



Figure 10: Controller assembly

4.3 프로펠러 제작

Figure 11은 본 논문에서 해석 결과를 바탕으로 제작된 프로펠러를 나타낸다. 재질은 폴리아세탈을 적용하였다.



Figure 11: Propeller

4.4 시제품 완성품 조립

Figure 12는 추진 시스템의 시제품을 나타낸다.



Figure 12: Total assembly

5. 특성 시험

5.1 모터 부하시험

추진 모터의 성능 시험을 위하여 공인인증기관인 경남테크노파크 정밀기기센터에 의뢰하여 다이내모 시험을 수행하였다. Figure 13은 성능시험 장치 구성을 나타내었고 시험 결과를 Figure 14에 나타내었다. 정격출력에서의 모터 효율은 91%로 목표 효율 90%를 달성하였다. 제어기의 효율은 96%로 목표 효율 95%를 달성하였다.

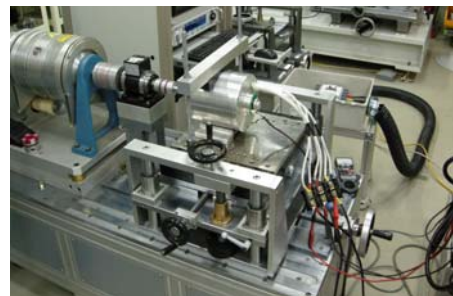


Figure 13: Motor experiment

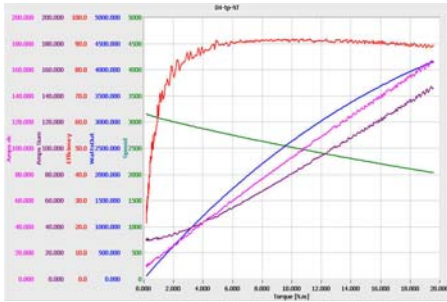


Figure 14: Result of dynamo test



Figure 16: Trusting system experiment

5.2 방수 시험

추진 시스템의 안전성 확보를 위하여 Figure 15와 같이 공인인증기관인 한국조선기자재연구원(KOMERI)에 의뢰하여 방수시험을 수행하였다.



Figure 15: Waterproof test

5.3 실장착 시험

제작된 시제품을 실제 보트에 장착하여 해상에서 시험하는 모습을 Figure 16에 나타내었다. 보트 무게는 100[kg], 배터리 및 시제품 무게는 80[kg], 시험자 1명이 직접 탑승하여 시운전을 수행하였다. 배터리 용량은 12[V], 100[Ah] 3개를 직렬 연결하여 36[V]로 공급하였다. 시운전 결과 일충전 거리는 동일 조건에서 기존 제품의 경우 보트 속도 8km/h에서 40km에 도달하였으나 시제품의 경우 8km/h에서 55km에 도달하여 기존 시스템에 비해 일충전 거리가 30% 이상 증가하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 선외기용 5HP급 전동 추진시스템의 효율 개선 방향에 대해 고찰하였다. 효율 개선을 통하여 동일 배터리 용량 사용시 일충전 거리를 20% 이상 증가시키는 것을 목표로 하였다. 시스템의 고효율 구현을 위하여 BLDC모터를 적용하였으며 요구 추력을 바탕으로 최적 프로펠러를 설계하였다. 설계 결과를 바탕으로 시제품 제작 및 시험을 통하여 설계의 타당성을 입증하였다. 추가적으로 프로펠러의 효율을 측정할 수 있는 시험 장치 구성 및 특성 시험을 통한 프로펠러 설계의 타당성 검증이 요구된다.

후 기

본 연구는 제품안전기술기반조성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- [1] 최형식, 소명옥, 박한일, “300W급 BLDC모터 기반의 수중추진체 개발”, 한국마린엔지니어링학회지, vol.34, no.8, pp.1128-1134, 2010.
- [2] 정태영, 정석권, “축전지 전원을 사용한 소형선박 추진용 BLDC모터의 전력변환방식에 따른 효율 및 성능 추정,” 한국동력기계공학회지, 제 14권, 제1호, pp. 27-33, 2010.
- [3] 조승현, 빈재구, 조수익, 최철, “선박 추진 장치를 위한 저속영역에서 최대토크를 가지는 고효율 BLDC 모터의 설계, 전력전자학회 논문집, 제9권, 제2호, pp.112-118, 2004.

저 자 소 개



이성형(李成衡)

2008년 동아대학교 전기공학과 (공학사),
2010년 동아대학교 전기공학과(공학석
사), 현재 VGM 연구원. 관심분야: 전기기
기 설계



조원영(曹元榮)

2005년 동아대학교 전기공학과 (공학사),
2007년 동아대학교 전기공학과(공학석
사), 현재 VGM 연구원. 관심분야: 전기기
기 설계



김병국(金炳國)

2000년 부경대학교 전기공학과 (공학사),
2005년 동아대학교 전기공학과(공학석
사), 2008년 동아대학교 전기공학과(공학
박사수료), 현재 VGM 대표. 관심분야: 전
기기기 설계



김헌우(金憲佑)

1999년 부산대학교 조선해양공학과(공학
사), 2003년 부산대학교 조선해양공학과
(공학석사), 2009년 부산대학교 조선해양
공학과(공학박사 수료), 현재 중소조선연
구원(책임연구원), 관심분야: 조선공학, 용
접, 해양레저장비, 구조안전성 모니터링



강민수(姜民秀)

2008년 부산대학교 조선해양공학과(공학
석사). 2007-현재 중소조선연구원(선임연
구원), 관심분야 : 복합소재, 구조, 피로,
해양레저장비