

## 대용량 전기추진시스템 설계를 위한 제어알고리즘 개발

오진석<sup>†</sup> · 정성영<sup>1</sup> · 공영경<sup>2</sup> · 빈재구<sup>2</sup> · 김한호<sup>3</sup>

(원고접수일 : 2009년 10월 8일, 원고수정일 : 2009년 11월 13일, 심사완료일 : 2009년 11월 25일)

### Control Algorithm Development for Design of Cooling System in High-power Propulsion Motor

Jin-Seok Oh<sup>†</sup> · Sung-Young Jung<sup>1</sup> · Yeong-Kyung Kong<sup>2</sup> · Jae-Goo Bin<sup>2</sup> · Han-Ho Kim<sup>3</sup>

**요약 :** 본 논문에서는 에너지 절감 기능을 포함한 대용량 전기추진모터용 냉각 시스템을 제안한다. 기존 시스템에서 청수, 해수 펌프 속도는 일정하며, 냉각수의 과냉각을 방지하기 위해 3-way valve으로 열교환기에 들어가는 유량을 제어하였다. 그리하여 외부 해수 온도의 변화와 관계없이 펌프의 전력 사용량은 일정하였다. 제안된 시스템은 외부 해수 온도에 따라 청수, 해수 펌프의 속도를 인버터로 제어하여 3-Way valve를 최소한으로 동작하도록 함으로써 에너지 손실을 방지한다. 본 연구에서는 제안한 시스템의 효율성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

**주제어 :** 청수냉각체계, 에너지 절약 시스템, C 모드, 최적냉각체계, 시뮬레이션

**Abstract:** In this paper, a cooling system of high-power propulsion motor with Energy Saving System(ESS) is described. Normally, the cooling system for ship consists of fresh water pump, sea water pump, 3-way valve and cooler. In the cooling system, F.W(Fresh Water) and S.W(Sea Water) pump is operated on rated rpm, and the 3-way valve is controlled for preventing over-cooling. So, the consumption power of pump's motor is changed according to a sea water temperature. In the proposed cooling system, F.W. pump and S.W pump is controlled by inverter, and it is can be reduced the consumption power. Also, it is proved with simulation.

**Key words:** Fresh Water Cooling System, Energy Saving System, Cooling Mode, Optimization of Cooling system, Simulation

### 1. 서 론

선박의 추진체계는 다양하게 발전하고 있다. 상선의 경우는 전기추진을 적용한 사례가 적지만, 여객선 및 군함 등의 특수선박에는 전기추진시스템 활용이 증가하고 있다. 본 연구는 특수선박에 활용되는 대용량 전기추진시스템에 적합한 냉각시스템

을 제안 및 설계하는 것을 목표로 하고 있다.

현재 전기 추진시스템은 6MW급 이상의 대용량 추진전동기가 실용화되고 있으며, 이러한 전동기의 냉각시스템은 2차 냉각 계통을 갖춘 수냉식 냉각체계를 갖추고 있다.

본 연구에서는 냉각시스템을 구성하고 있는 펌

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계공학부, E-mail:ojs@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4283)

1 한국해양대학교 메카트로닉스

2 국방과학연구소

3 (주)효성중공업연구소

프, 밸브 등을 효과적으로 제어 및 관리하여 최적의 성능을 발휘할 수 있도록 제어시스템을 설계하는 것을 연구목적으로 한다. 이를 위하여 선박의 운전모드, 구성체계, 온도특성, 압력특성 등을 반영한 냉각체계설계제어시스템을 설계한다. 설계한 냉각설계제어시스템을 LabVIEW로 시뮬레이션을 수행하여 설계결과를 분석하고자 한다.

## 2. 전기추진시스템

전기추진 선박은 발전기, 추진전동기, 축계, 추진기로 구성된다. 추진전동기는 선박의 종류에 따라 설치조건 및 요구조건이 다르기 때문에 적합한 사양을 선정해야 한다. 본 연구에서는 대용량(6MW급 이상) 추진전동기를 탑재하는 선박의 전기추진시스템을 대상으로 연구를 수행한다. Figure 1은 일반적으로 사용되는 전기추진시스템 계통도이다.

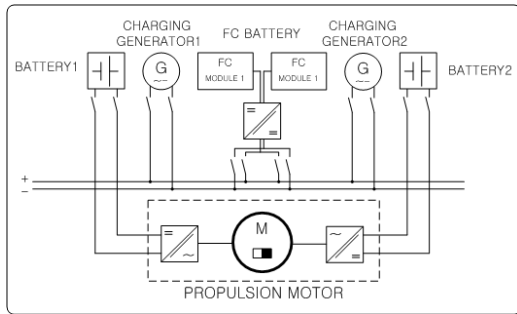


Figure 1: Diagram of electric propulsion

전기추진 선박 중에서 6MW급 이상의 대용량 추진전동기를 탑재한 전기추진시스템의 냉각체계는 1차 냉각인 해수냉각시스템과 2차 냉각인 청수냉각시스템으로 구성한다. 이러한 2단계 냉각계를 효율적으로 제어관리하기 위하여 펌프 및 밸브의 능동적인 제어알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 대용량 추진전동기에 적합한 제어알고리즘을 제안하고, 이를 이용한 시뮬레이션을 수행하여 냉각용 제어알고리즘의 신뢰성을 검증하고자 한다. Figure 2는 대용량 전기추진선박의 이중냉각 시스템을 나타낸 것이다.

냉각시스템은 제어요구조건에 따라 구성체계 및 알고리즘이 달라진다. 일반적으로 냉각시스템은 해

수펌프, 청수펌프, 3-Way 밸브 및 제어시스템으로 구성된다. 2차 냉각 계통을 갖춘 수냉식 냉각체계에서는 1차 냉각계통인 해수펌프와 3-Way 밸브를 실시간을 제어할 수 있는 제어알고리즘을 구축한다. 이러한 알고리즘에는 에너지절감기법인 ESS(Energy Saving System) 알고리즘을 효과적으로 적용할 수 있다. 그러나 대용량 추진전동기가 운용되는 특수한 선박의 경우 2차 냉각계통 구성요소인 청수펌프와 3-Way 밸브를 원하는 목적에 맞게 제어, 관리할 수 있는 알고리즘을 구축해야 한다.

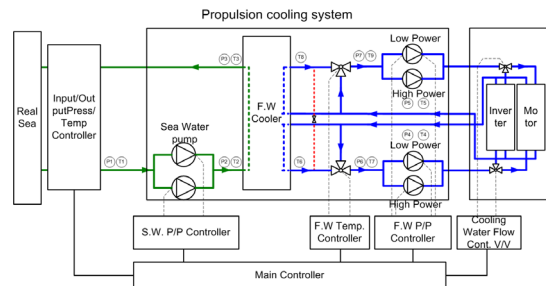


Figure 2: Double cooling system

## 3. 냉각시스템 설계

### 3.1 운항특성

대용량 추진전동기를 탑재하여 운용하는 전기추진선박의 운항특성은 다양한 모드가 있지만 5가지 운항모드를 정리하여 냉각시스템 설계에 반영하고자 한다. Table 1은 운항모드를 나타낸 것이다.

Table 1: Operation mode

Mode	RPM	Remarks
Low Speed	0~25%	-
Middle Speed	25~60%	-
High Speed	60~100%	-
Redundancy	-	Fail (One side P/P)
Reduced	-	Fail (Heat Exchange)

Table 1에 정리된 운항모드를 만족하기 위하여 Figure 3에 도시한 그림 및 식(1), (2), (3)을 기반으로 펌프의 운항특성을 고려하여 냉각알고리즘을

Figure 4와 같이 구축하였다. 냉각알고리즘은 에너지 활용의 유연성을 확보할 수 있는 ESS 알고리즘 적용 가능성에 대하여도 연구를 병행하고자 한다.

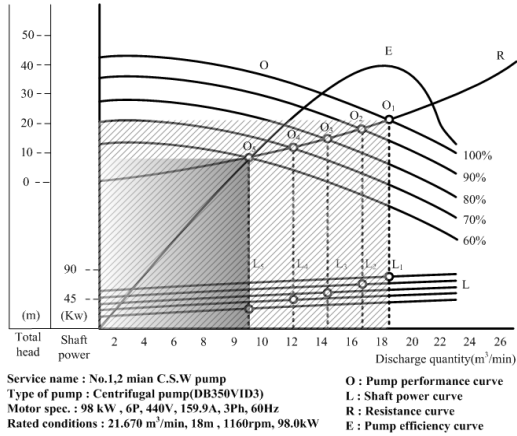


Figure 3: Curve of pump efficiency

다음 Figure 3은 원심 펌프(냉각용 해수펌프)의 회전수를 조절했을 때의 펌프 축동력의 변화를 보여주는 그림이다. R은 선박의 냉각용 해수펌프의 배관 계통에 의한 저항 곡선으로서, 전양정을 0~10m 까지 변화 시킨다면 펌프의 토출량은 0~26m<sup>3</sup>/min로 변화 한다. 펌프의 성능곡선 O와 저항 곡선의 교점에서 펌프는 운전된다. 펌프의 회전수를 정격 회전수의 100%~60%까지 조절 하였을 때 펌프의 운전점은 O<sub>1</sub>에서 O<sub>5</sub>로 변하며 이에 따라 축동력은 L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub>로 변화하게 된다. 관련 수식은 다음과 같다.

$$\frac{\dot{Q}}{Q} = \frac{\dot{n}}{n} \times \left(\frac{\dot{D}}{D}\right)^3 \quad (1)$$

$$\frac{\dot{H}}{H} = \left(\frac{\dot{n}}{n}\right)^2 \times \left(\frac{\dot{D}}{D}\right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{\dot{L}}{L} = \frac{\dot{Q} \times \dot{H} \times \eta_p}{Q \times H \times \eta_p} = \left(\frac{\dot{n}}{n}\right)^3 \times \left(\frac{\dot{D}}{D}\right)^5 \times \left(\frac{\eta_p}{\eta_p}\right) \quad (3)$$

여기서 Q는 펌프 토출량, n는 펌프 회전수, D는 회전자의 외경, L는 펌프 소요 동력, H는 펌프의 양정, η<sub>p</sub>는 펌프의 효율을 나타낸다.

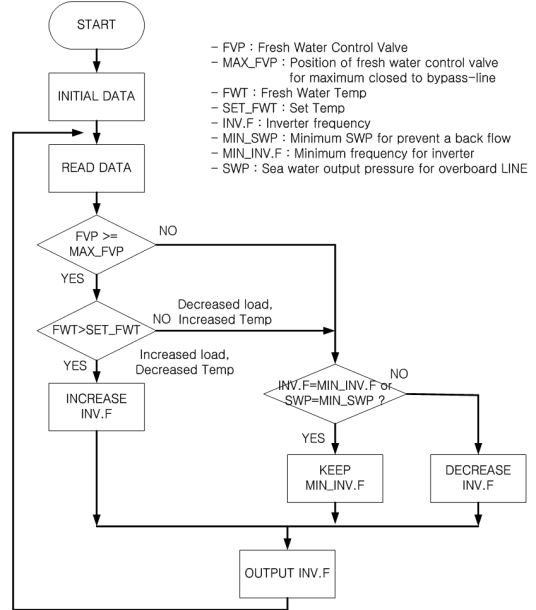


Figure 4: Cooling system algorithm

### 3.2 시스템 구성

냉각 알고리즘을 효율적으로 수행하기 위하여 냉각시스템은 전기추진선박의 특성에 적합하게 구성해야 하며, 동시에 소모전력이 적은 구조로 구성되어야 한다. 현재 일반적으로 사용되는 전기추진시스템에서 냉각시스템은 Tabel 2와 같은 항목으로 구성한다.

Table 2: Control contents in cooling system

	EA	Target	Operation range
S.W P/P	4	First Cooling	60~100% (Max.RPM)
F.W P/P	4	Second Cooling	Set Point
3-Way V/V(F.W)	4	Optimization Temp.	0~90℃

Table 2에 언급한 것과 같이 전기추진선박의 냉각을 효율적으로 수행하기 위하여 운용해야할 기기는 해수펌프, 청수펌프, 밸브 등이 있다. 본 연구에서는 전기추진선박의 운항상태에 따라 자동적으로 제어관리하기 위하여 Figure 2에 도시한 제어시스템 및 제어프로그램을 개발하였다.

### 4. 시뮬레이션 모델링

수중체용 냉각시스템을 실용화하기 위해서는 반드시 적용실험을 수행해야 한다. 적용실험은 실제 조건과 유사하게 진행해야 함으로 비용 측면에서 문제가 많다. 이를 극복하기 위하여 우선 시뮬레이션을 통하여 최적시스템을 설계한 후에 다음 단계로 축소모형의 실험장치를 구축하여 적용실험을 수행하고자 한다.

본 연구에서는 Figure 2, 3, 4를 기반으로 LabVIEW를 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 최적 냉각시스템을 설계한다. Figure 6과 Figure 7은 시뮬레이션 구성도와 시뮬레이션 프로그램을 나타낸다.

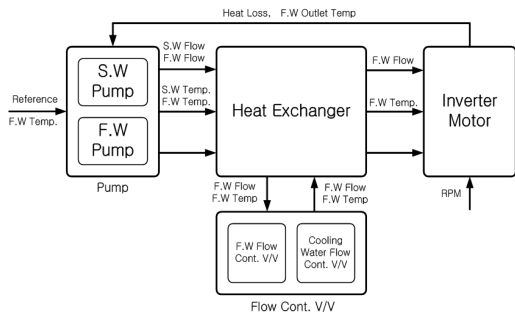


Figure 5: Block diagram of cooling System

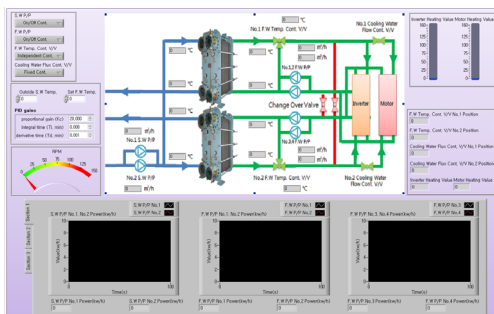


Figure 6: Simulation program for cooling system

선택할 수 있는 제어 조건은 청수펌프, 해수펌프, 청수 유량 제어 밸브, 냉각 부하 유량 제어 밸브 총 4개가 있으며, 전동기의 속도에 따라 다양한 조건들로 제어함으로써 냉각 시스템 최적점을 찾아낸다.

다음 Table 3은 시뮬레이션에 사용된 펌프 및 열교환기에 대한 특성표를 나타낸 것이다.

Table 3: Specification table in simulation

Name	Value
No.1 F.W Pump	0.85kW, 8m <sup>3</sup> /h
No.2 F.W Pump	7.5kW, 23m <sup>3</sup> /h
No.3 F.W Pump	0.85kW, 8m <sup>3</sup> /h
No.4 F.W Pump	7.5kW, 23m <sup>3</sup> /h
No.1 S.W Pump	3kW, 20m <sup>3</sup> /h
No.2 S.W Pump	3kW, 20m <sup>3</sup> /h
Heat Exchanger (UAs)	28
Outlet S.W Temp.	30°C
Set Inlet F.W Temp.	37°C
Set Outlet F.W Temp.	47°C

청수펌프의 경우 전동기 RPM이 낮을때 사용하는 저출력 펌프 No.1, No.3와 전동기 RPM이 높을때 사용하는 고출력 펌프 No.2, No.4로 나뉜다. 열교환기의 크기 및 재질에 의해 결정되는 값인 UAs는 28을 사용하였고, 외부 해수 온도 30°C, 모터 입구측 37°C, 출구측 47°C로 설정하였다.

다음 Table 4는 해수펌프, 청수펌프, 3-Way 밸브의 운전 조건에 대해 정리한 것이다.

Table 4: Condition of control point

S.W P/P	On/Off	Step	Non-step
F.W P/P	On/Off	Step	Non-step
F.W Flow Cont. V/V	Fixed	Variable	-
Cooling Water Flow Cont. V/V	Fixed	Variable	-

### 5. 시뮬레이션 결과

Table 3과 Table 4의 데이터를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 조건은 전동기 속도 0~150(RPM)으로 변화해가면서 해수, 청수 펌프를 각각 On/Off, Step, Non-step으로 제어하여 펌프의 전력 소모량과 청수, 해수 유량, 그리고 설정 온도에 대한 열교환기 출구측 청수 온도의 분포도를 확인하였다.

그 결과 해수 펌프 Non-step 제어의 경우 On/Off 제어 대비 85.9%, Step 제어 대비 60.2%, 청수 펌프 Non-step 제어의 경우 On/Off 제어 대비 39.6%, Step 제어 대비 30.4%로 높은 소비 전력 저감 특성을 가지는 것을

확인하였다. 설정 온도에 대한 추종 온도의 오차를 나타내는 온도 분포도 또한 Non-step 제어 시 더 빠르게 낮아짐을 확인하였다.

다음 Figure 7, 8, 9는 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

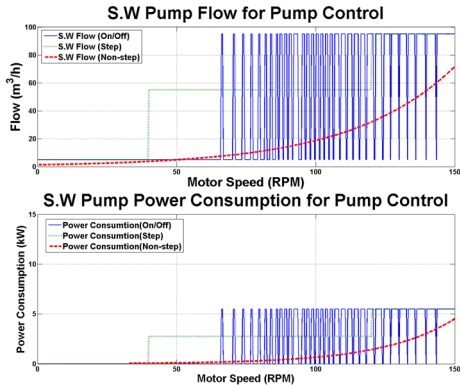


Figure 7: S.W Pump power consumption and flow by motor speed (pump control)

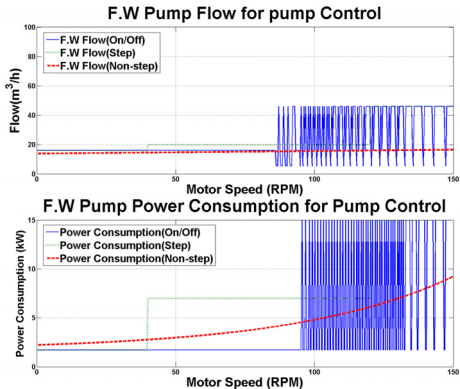


Figure 8: F.W pump power consumption and flow by motor speed (pump control)

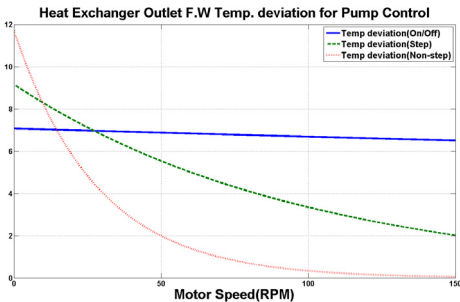


Figure 9: F.W temp. deviation by motor speed (pump control)

다음은 펌프는 Non-step 제어, 냉각 유량 제어 밸브 Variable 상태에서 청수 유량 제어 밸브의 제어 조건인 Fixed, Variable를 시뮬레이션하였다. 다음 Figure 10, 11, 12는 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

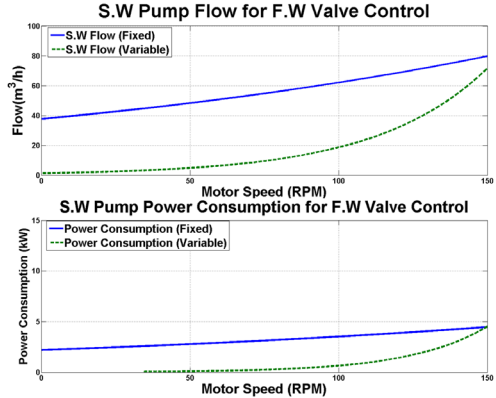


Figure 10: S.W pump power consumption and flow by motor speed (F.W valve control)

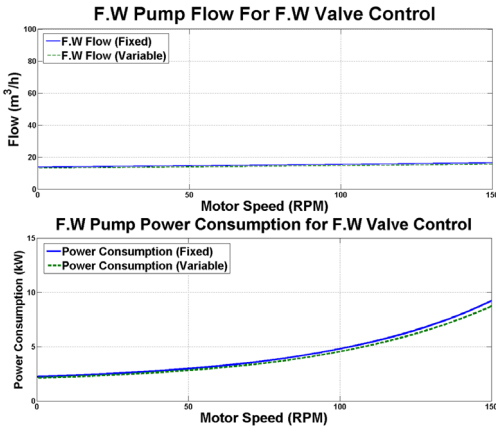


Figure 11: F.W pump power consumption and flow by motor speed (F.W valve control)

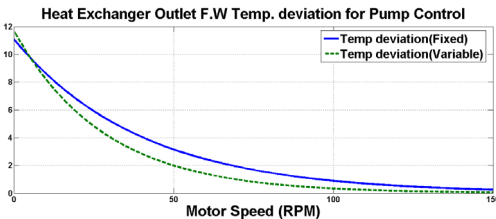


Figure 12: F.W temp. deviation by motor speed (F.W valve control)

시뮬레이션 결과 해수펌프의 경우, 청수 유량 제어 밸브를 Variable로 제어했을때, Fixed 제어 대비 전력 24.4%, 청수펌프 101% 으로 청수펌프는 약간 증가하였으나, 해수펌프의 소비 전력이 매우 낮아짐을 확인 할 수 있다. 온도 분포도 또한 Variable 제어 시 Fixed 제어에 비해 낮게 나타남을 확인하였다. 다음 Figure 13은 ESS 알고리즘을 적용한 청수 펌프와 해수 펌프의 전력 소모량을 100%라 했을때, On/Off 제어와 Step 제어 시 전력량을 나타낸 것이며, Figure 14는 청수 온도 분포도를 RPM에 따라 나타낸 것이다.

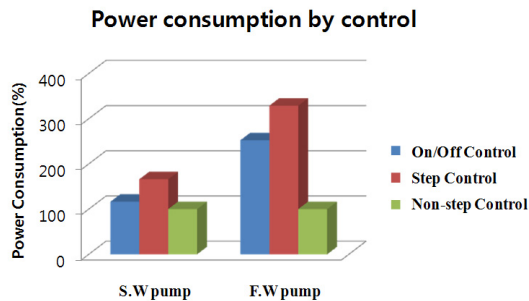


Figure 13: Power consumption by control

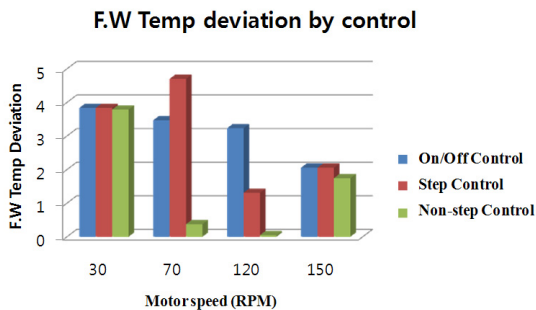


Figure 13: F.W Temp deviation by control

## 6. 결 론

본 연구는 대용량 추진동기를 탑재하여 운용하는 전기추진선박의 냉각시스템 및 알고리즘에 대해 분석하고, 그에 따른 펌프 및 밸브에 ESS (Energy Saving System) 알고리즘을 포함한 능동적인 제어 알고리즘을 제안하였으며, LabVIEW 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그

결과, 전기추진체계에 적절한 냉각 시스템 제어 알고리즘을 구성하였으며, ESS (Energy Saving System) 알고리즘을 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우를 비교하여, ESS (Energy Saving System)의 효율성을 입증하였다.

본 연구에서 제안한 냉각 시스템은 차후 실제 전기추진시스템에 적용하여 실제 시스템에서 발생할 수 있는 문제점에 대해 개선하는 연구가 계속되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 수중운동체기술특화연구센터 사업으로 수행된 연구결과임.

본 연구는 (주)효성중공업의 지원으로 수행된 연구결과임.

## 참고문헌

- [1] M. LACHI, N.EL WAKIL and JPADET, "The Time constant of double pipe and ne pass shell-and-tube heat exchangers in the case of varying fluid flow rates", hf. .I. Hear Mars Trmsfer. vol. 40, no. 9, pp. 2067-2079, 1997.
- [2] Ji-Young Lee,Heui-Han Yoo, Yun-Hyung kim,Jin-Seok Oh, "A study on the energy saving method by controlling capacity of sea water pump in central cooling system for vessel", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 31, no. 5, pp. 592-598, 2007.
- [3] Jin-Seok Oh, Young-Kyu Lim, "A study on the method of energy saving in a marine cooling system", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 29, no. 5, pp. 587-592, 2005.
- [4] S. Lazarkiewicz and A. T. Trokolanski, Impeller pumps, PERGAMON PRESS, 1965.

## 저 자 소 개



### 오진석(吳珍錫)

1960년 3월생. 한국해양대 졸업.공학박사, 일본 큐슈대학 대학원 수료(공학박사),1983년~1986년 영국 ZODIAC 선박회사엔지니어. 1989년~1992년 국방과학연구소 연구원. 1992년~1996년 양산대학 교수, 1996년~현재 한국해양대 교수. 2001년~2002년 영국 CARDIFF 대학 교환 교수, 2002년~2009년 중소기업산업협력단 단장, 2004년~2006년 한국마린엔지니어링학회 기획이사, 2001년~2006년 영국 K.O.Tech. 컨설턴트, 2005년~2006년 부·울 산학연 협의회 회장, 2009년~현재 산학연 ETRS 센터 소장, 2009년~2011년 선박전자기계공학부장



### 정성영(鄭星泳)

1985년 4월생. 2008년 한국해양대학교 선박전자기계공학부 제어시스템 전공(공학사), 현재 동 대학원 석사과정



### 공영경(孔泳卿)

1956년 5월 1일생. 1979년 홍익대 전기공학과 졸업. 1986년 부산대 대학원 졸업(석사). 1994년 한국해양대 대학원 졸업(공학) 현재 국방과학연구소 책임연구원.



### 빈재구(貧在久)

1973년 3월 2일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 졸업(석사). 2007년 동대학원 졸업(공학). 현재 국방과학연구소 선임연구원.



### 김한호(金漢湖)

1973년 8월생. 2000년 성균관 대학교 졸업 공학사. 2002년 연세대학교 졸업 공학석사(기계공학, 열유체 전공) 2007년 동대학원 졸업(공학). 현재 (주)효성중공업연구소 기반기술팀 책임연구원