

선박용 중앙냉각시스템의 해수 펌프 용량조절에 따른 에너지 절감 기법에 관한 연구

이지영* · 유희한** · 김연형*** · 오진석 †

(원고접수일 : 2007년 5월 2일, 심사완료일 : 2007년 7월 19일)

A Study on the Energy Saving Method by controlling Capacity of Sea Water Pump in Central Cooling System for Vessel

Ji-Young Lee* · Heui-Han Yoo** · Yun-Hyung kim*** · Jin-Seok Oh†

Abstract : The fuel charge is getting higher in navigation cost. Therefore, shipowners try to find the method for reducing oil consumption. ESS(Energy Saving System) is one of the method. ESS is the system consisted with two inverters, ESS control unit and monitoring system. Two inverters control two main sea water cooling pumps. In the ESS control Unit, the control algorithm finds optimized point to decrease a power consumption of main sea water cooling pumps. Monitoring system observes ESS not to work improperly. ESS is experimented in the laboratory with real condition and analyzed in every view. After experiment, the result of the experiment shows that the control algorithm works correctly and safely. ESS has a plan to be operated in the ship soon. In that case, additional devices are needed to connect ESS with cooling system of the vessel. So the development of addition device is needed and being studied.

Key words : ESS(Energy Saving System), Inverter(인버터), ESS control unit(ESS 제어 장치), Monitoring system(감시장치), Main sea water cooling pump(메인 해수펌프)

기호설명

Q : 유량 (m^3/min)
 H : 양정 (m)
 N : 회전속도(RPM)
 L : 축동력 (kW)

1. 서 론

국제 유가가 계속 상승함에 따라 선박을 보다 경제적으로 운항하기 위해서 연료비 절감의 필요성이 더욱 절실해지고 있다. 따라서 현재 선박의 기관 시스템을 보다 효율적으로 개선하여 연료비를 절감

† 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계 교수), E-mail: ojs@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4283

* cardiff university the manufacturing engineering

** 한국해양대학교 선박전자기계 교수

*** 한국해양대학교 메카트로닉스 공학부

할 수 있다면 이는 선박의 경제성 향상에 큰 도움이 될 것이다.

본 논문은 선박 중앙냉각시스템의 해수 펌프 RPM 변화를 통해 에너지 절감의 효과를 노릴 수 있는 방법을 설명하고, 이러한 시스템(이하 ESS)의 하드웨어, 소프트웨어를 구축하여 실험한 후 결과를 제시하였다.

2. 선박의 중앙냉각 시스템과 에너지 절감 가능성

2.1 3-way valve에 의한 에너지 절감

선박의 중앙 냉각시스템은 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 중앙의 냉각기에서 해수를 이용하여 청수를 냉각하고, 냉각된 청수는 다시 주거나 각종 보조 기기를 냉각하고 있다. Fig. 1의 좌측의 해수 펌프는 항상 최대속도로 운전되고 있으며 우측하단의 3-way valve를 사용하여 청수온도를 유지하고 있다.

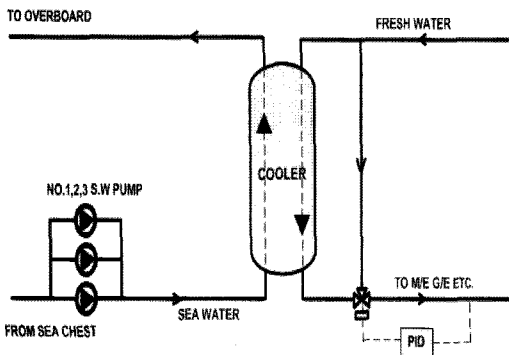


Fig. 1 Central cooling system of the ship

하지만 ESS는 펌프 속도를 조절함으로써 해수의 유량을 조절한다. 이에 따라 과도한 청수 냉각을 막을 수 있으며, 온도 조절을 위해 3-way valve에 의해 by-pass되는 청수 유량을 최소화할 수 있으므로 낭비되는 에너지를 줄일 수 있다¹⁾.

2.2 해수온도 변화에 따른 에너지 절감

해수온도가 낮아져 요구되는 해수유량이 점차적

으로 줄어들어도 중앙 냉각기에서 충분한 열 교환 기능을 수행할 수 있다. (1)의 식을 보면 알 수 있듯이, 교환되는 열량이 Q 라 한다면 Δt (온도차)가 커지면 G (해수 유량 변화)는 작아져도 원하는 만큼의 Q 를 얻을 수 있다.

$$Q = \Delta G \cdot c \cdot \Delta t \tag{1}$$

Q : C.F.W.C에서 교환되는 열량(kcal)

ΔG : 해수 유량 변화(kg)

c : 비열(kcal/kg °c)

Δt : 1차냉각수와 2차냉각수의 온도차(°c)

Fig. 2는 S사 5500TEU급 컨테이너선에 탑재된 중앙 냉각기(Central Cooler) 1대분 당 해수 유입 온도변화에 따른 필요 해수유량 (설계 유량 : 866m³/hr, 설계 온도: 32°C)을 보여주는 그림이다. 해수 온도가 낮아짐에 따라 필요해수 유량이 감소하고 있다.

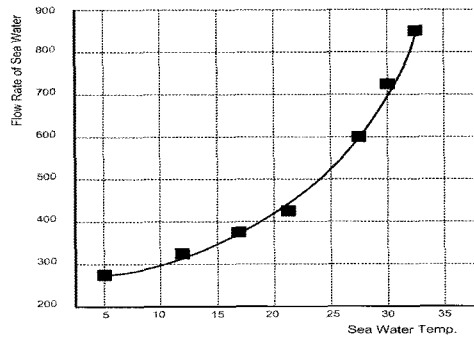


Fig. 2 Variation of seawater flow rate with sea water Temperature

3. ESS의 원리

3.1 비속도

펌프 회전차의 상사성 또는 펌프 특성 및 형식의 결정 등에 대하여 설명하는 경우에 이용되는 값으로 비속도(N_s)가 있다. 회전차의 형상 치수 등을 결정하는 요소는 펌프 전양정(H), 토출량(Q), 회

전속도(N)의 세 가지가 있으며 비속도(N_s)는 이들 세 가지 요소로 다음의 식에서 계산된다^[2].

$$N_s = \frac{N \times Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (2)$$

3.2 상사법칙

펌프의 회전속도를 N_0 에서 N_1 으로 변화시킨 경우의 필요 흡입 수두($NPSH_{re}$), 유량(Q), 양정(H), 동력(L)은 다음의 과정을 통하여 얻을 수 있다^[2].

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{N_1}{N_0} \quad (3)$$

$$\frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{N_1}{N_0}\right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{N_1}{N_0}\right)^3 \quad (5)$$

Fig. 3은 해수 펌프의 속도 변화에 따른 펌프 성능의 변화를 나타낸다. 송수관의 저항곡선을 R이라고 하고 펌프 스피드를 N_1 에서 N_5 까지 변화 시키면 운전점은 A에서 E로 변화 하고, 이때의 동력은 L_1 에서 L_5 로 변화 한다. 또한 유량은 Q_1 에서 Q_5 로 변화하게 된다^[2].

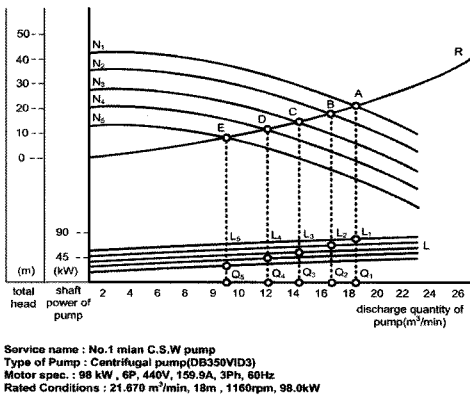


Fig. 3 Performance curves of pump with various speed of Pump

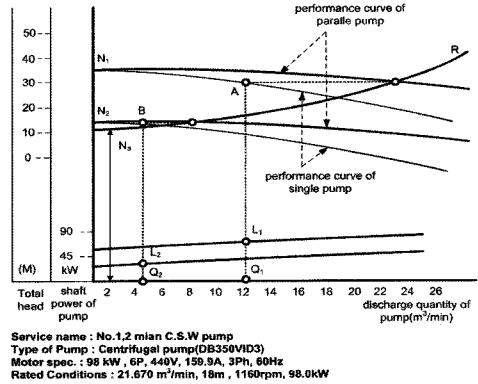


Fig. 4 Performance curves of pump with various speed of parallel pump

ESS의 적용 대상인 5500TEU 컨테이너 선박(중양 냉각 시스템을 갖춘 선박)에서는 총 3대의 해수 펌프 중 2대를 병렬 운전하여 교대로 운전한다. 송수관에 따른 저항 곡선을 R이라 한다면, 이때의 단독 펌프 운전 점은 Fig. 4의 A이며 펌프의 속도를 변화 시킨다면 B점 까지 펌프의 속도를 낮출 수 있고, 축동력은 L_1 에서 L_2 까지 절감된다.

4. ESS의 구성

4.1 하드웨어 구성

일반적인 상선의 중앙 냉각 시스템의 해수 펌프는 시퀀스 구동을 하고 있다. 하지만 ESS는 해수 펌프의 속도를 제어하기 위해 인버터를 탑재하고, 인버터의 제어를 위해 ESS Control Unit을 탑재한다. ESS Control Unit은 각종 온도와 압력 신호를 받아 이를 해석하여 결과적으로 중앙 냉각시스템의 청수 온도를 조절 하게 된다. Fig. 5는 ESS를 탑재한 상선의 중앙 냉각 시스템을 보여주고 있다.

ESS Control Unit으로 입력되는 신호는 Table 1 과 같다. 실제로 ESS Control Unit의 알고리즘상 필요한 신호는 청수온도(H), 해수펌프 출구 압력(A), 3-way valve 개도(G)이다. 청수 온도(H)는 제어할 청수 온도의 현재 상태를 모니터링 하기 위해 필요하며, 해수 펌프 출구 압력은 시스템 최소 압력을 설정 및 모니터링을 위해 필요

하며, 3-way valve의 궤도는 ESS의 효율을 높이기 위해 필요하다. 그 밖의 신호는 실험의 신뢰성을 높이기 위해 실험용으로 검출한 신호로서 냉각기를 통과하는 유체의 유량과, 교환되는 열량 등을 확인하기 위해 사용되었다.

mode, 알람 등을 확인 할 수 있으며 하부에는 펌프의 속도, 효율 등을 확인 할 수 있게 하였다. 모니터링 화면은 ESS를 보다 효율적이고 간편하게 운전할 수 있도록 꾸며져 있다.

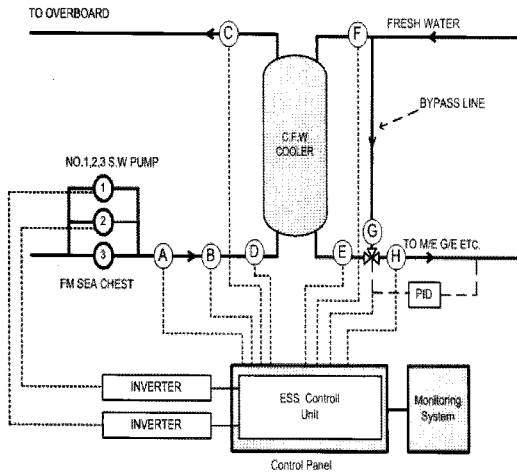


Fig. 5 Central cooling system with ESS

Table 1 Signals on ESS control unit

신호 설명	위치	신호 종류	기타
해수 온도	B	4-20mA	실험용
해수 온도(쿨러 입구)	D	4-20mA	실험용
해수 온도(쿨러 출구)	C	4-20mA	실험용
청수 온도(쿨러 입구)	F	4-20mA	실험용
청수 온도(쿨러 출구)	E	4-20mA	실험용
청수 온도 (3-way valve이후)	H	4-20mA	제어용
해수펌프 출구 압력	A	4-20mA	제어용
3-way valve 궤도	G	4-20mA	제어용

4.2 소프트웨어 구성

4.2.1 모니터링 화면

Fig. 6은 모니터링 메인 화면으로서 선박의 중앙 냉각 시스템을 한눈에 알아 볼 수 있도록 하고 있다. 중앙에는 선박의 중앙 냉각 시스템상의 온도 압력 등을 볼 수 있게 하였고, 우측에는 ESS의

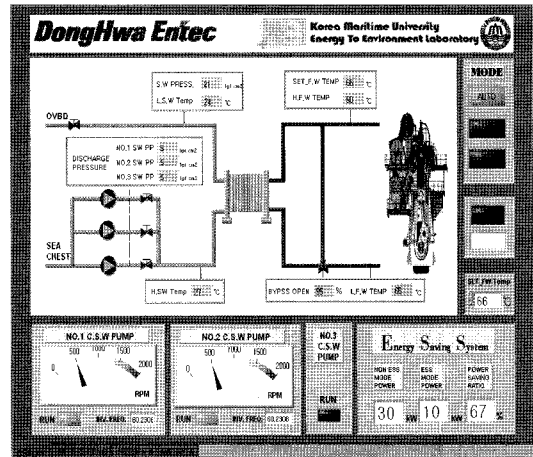


Fig. 6 Main monitoring screen of ESS

Fig. 7은 중앙 냉각 시스템의 상태를 기록하는 화면이다. 중앙냉각 시스템의 현재 상태를 기록하고 축적 하며, 이를 통해 과거의 data를 확인할 수 있으며 그 데이터를 바탕으로 앞으로의 상태를 예측하고 예측 가능한 사고를 미연에 예방할 수 있도록 하고 있다. 또한 ESS의 작동상태를 실시간을 확인하여 오작동 여부를 손쉽게 판단 할 수 있다.

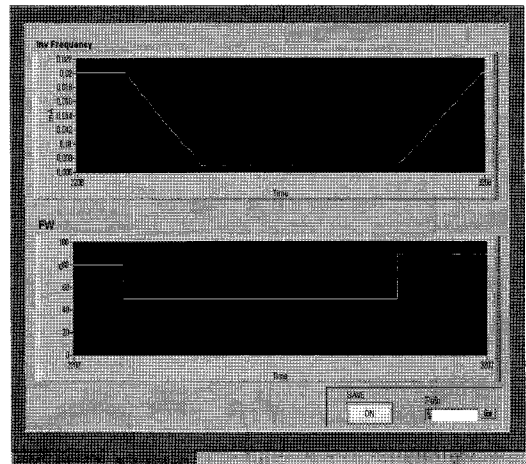


Fig. 7 Data displaying screen of ESS

4.2.2 ESS 제어 알고리즘

선박의 중앙 냉각시스템의 해수 펌프의 속도를 조절기 위해서는 효율적이며, 안전하고 신뢰성 있는 알고리즘이 선행되어야 할 것이다.

ESS의 알고리즘은 첫 번째, '어떤 방법으로 설계되어야 보다 효율적으로 에너지를 절감할 수 있는가'를 고려하여야 한다. ESS의 설계 목적이 에너지 절감에 따른 운항비 절감에 있기 때문이다. 두 번째, '어떤 방법으로 설계하여야 보다 안전하게 설계할 수 있는가'를 고려하여야 한다. 잘못된 알고리즘은 선박 기기의 냉각 불량으로 인한 운항정지 더 나아가 인명사고까지 이어 질 수 있기 때문이다. 따라서 ESS의 알고리즘은 단순히 중앙 냉각 시스템의 효율을 높이는 것뿐만 아니라, 선박의 안전을 신중하게 고려하여 설계 되어야 할 것이다.

Fig. 8은 ESS의 알고리즘을 설명하는 Flowchart를 보여주고 있다. 3-way valve의 궤도와 청수 온도를 파악하여 해수펌프의 속도를 제어하고 있으며, 펌프의 압력 강하로 인한 해수 역류를 방지하기 위해서 최소 압력을 설정하여 그 압력 이하로는 펌프의 속도가 줄어들지 않도록 하고 있다. 언급한 최소 해수 압력이란 배의 구조에 따라 다르기 때문에 ESS를 탑재할 때 알맞은 최소 압력을 결정해야 할 것이다.

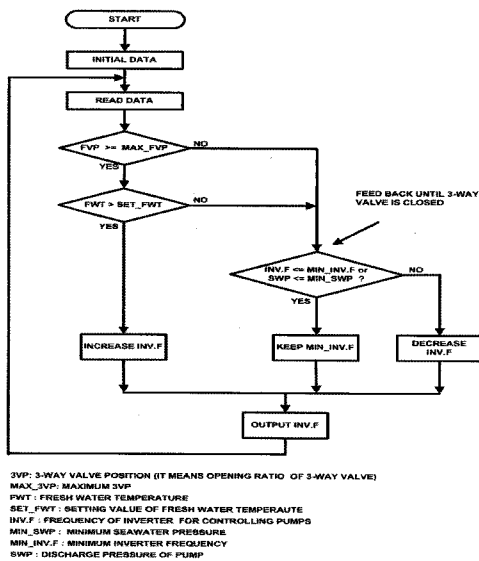
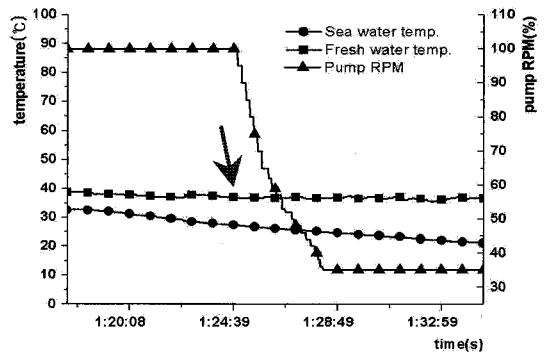


Fig. 8 Flowchart for control algorithm

Flowchart의 initial data부에서 시스템의 설정 값들을 세팅한 후 현재 시스템의 데이터를 읽어온다. 3-way valve의 궤도를 파악한 후 3-way valve의 궤도가 10%로 이상 열려 있을 경우(프로그램 세팅 값) 해수 압력과, 인버터 설정 최소 펌프 속도의 값을 고려하여 펌프의 속도를 낮추게 된다. 그러면 청수 온도 유지를 위해 3-way valve의 위치가 10%이하로 감소하게 된다. 3-way valve의 궤도가 10% 이하 일 경우, 청수 온도의 변화에 따라 인버터가 능동적으로 해수 펌프의 속도를 변화시켜 청수 온도를 일정하게 유지하게 된다.

4. 실험 및 고찰

ESS의 성능과 효과를 실험을 통해 검증하였다. 실험을 위하여 1차 냉각수(이하 해수)를 사용하여 2차 냉각수(이하 청수)를 냉각 하는 시스템으로서, 2대의 펌프를 이용하였다. 첫 번째 실험은 해수 온도를 32도에서 21도 까지 냉각시킴에 따른 청수 온도의 상태와 펌프 속도 변화를 관찰하였다. Fig. 9의 1:24:39초에서 청수온도가 37도(세팅 온도) 이하로 낮아지기 시작하였으며, 이에 따라 청수온도의 상승을 위해 해수 펌프의 RPM은 낮아지기 시작하였다. 1:28:49에서 해수 펌프의 RPM은 35%까지 감소되었다.(Fig. 9) 해수펌프의 속도 변화에 따라 축동력의 절감은 상사 법칙과 실험 결과에 따라 약 40%까지 절감 되는 것을 확인하였다.



Motor spec.: 3.7kW(84%), 4P, 380V, 7.8A, 3Ph, 60Hz
 Rated conditions : 0.5 m³/min, 18m, 1750rpm

Fig. 9 Graph of pump speed and F.W.T as S.W.T is decreasing

Fig. 10은 해수온도를 21℃에서 32℃로 증가시킨 경우의 청수 온도와 펌프 속도의 변화를 보여주고 있다. 약 6:43:00초에서 청수온도가 37도(세팅 온도)이상으로 높아지기 시작하였으며, 이에 따라 청수온도를 낮추기 위해 해수 펌프의 RPM은 높이기 시작하였다. 약 6:49:00 에서 해수 펌프의 RPM은 100%까지 상승 하였다.

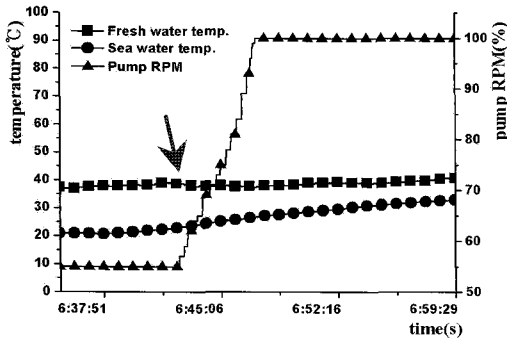


Fig. 10 Graph of pump speed and F.W.T as S.W.T is increasing

Fig. 11은 펌프 속도 감소에 따른 해수 압력과 3-way valve의 변화를 보여주고 있다. 해수 압력이 1.0 kg/cm² 이하로 감소하게 되면 펌프의 속도를 더 이상 낮출 수 없도록 프로그램에서 제한을 두

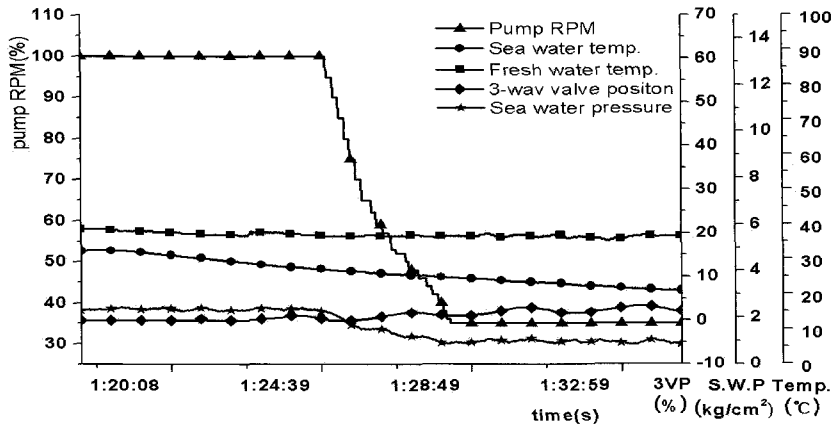
었기 때문에 펌프의 속도는 35%이하로 감소하지 않는다. 따라서 청수 온도 유지를 위해 3-way valve가 서서히 열리고 있다. 결과적으로 ESS는 3-way valve를 충분히 활용하면서 펌프의 속도를 제어하여 선박의 중앙 냉각시스템이 최적의 효율을 갖도록 하고 있다. Table 2는 실험 결과의 일부를 표로 나타낸 것이다. 펌프 회전수가 감소함에 따라 모터의 동력 소비는 줄어들고 있으며 1:32:59초에 약 40%의 에너지 절감이 이루어지고 있는 것을 알 수 있다.

Table 2 Results of experiment

시간(s)	펌프 회전수 (RPM)	모터 입력 전압 (V)	모터 입력 전류 (A)	모터 소비 동력 (kW)	모터 동력 소비율 (%)
1:20:08	1750	380	6.62	4.36	99.1
1:24:39	1750	380	6.68	4.39	99.7
1:26:49	962.5	380	4.54	2.98	67.7
1:32:59	612.5	380	3.92	2.58	58.6

5. 결 론

ESS를 설계, 제작, 실험한 결과 40%이상의 에너지 절감을 확인하고 입증할 수 있었다. 하지만



(3-way Valve position : 100% (bypass : full open), 0% (bypass : full close))

Fig. 11 Graph of pump speed, 3-way valve position and S.W.P

ESS를 상용화하고자 한다면 실제 선박에 적용하는 것이 하나의 문제가 될 수 있다. 차후 이러한 점을 보강하여 설계하여야 할 것이다. 실제 선박에 적용하는 것이 안전하고, ESS가 효율적이라는 것이 상용화 단계에서 입증된다면 신조선박에 ESS를 연동 없이 탑재하여 연동에 의한 설치비 절감을 가져올 수 있을 것이다.

본 연구가 비단 선박의 에너지 절감뿐만 아니라 기타 온도, 압력 등을 제어 하는 시스템에 적용한다면 동일한 효과를 가져 올 것이라 사료되며, 적극 응용한다면 에너지 절감에 큰 도움이 될 것이다.

참고문헌

- [1] 오진석, 임명규, "선박 냉각시스템의 에너지 절감기법에 관한 연구", 한국해양대학교, 마린엔지니어링 학회, 2004, pp.1~2
- [2] 효성펌프편람, 효성EBARA주식회사, 정문출판사, 1996, pp47~64



김연형(金淵亨)

1979년생, 2003년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2003년~2004년 KSS해운 근무, 2004년~2006년 범진해운 근무, 2006년~현재 한국해양대학교 메카트로닉스 공학부 석사과정



오진석(吳珍錫)

1960년 3월 21일생. 한국해양대 졸업.공학박사 영국ZODIAC 선박회사 엔지니어. 1989년~1992년 국방과학연구소 연구원. 1992년~1996년 양산대 전임강사, 조교수, 학과장. 1996년~현재 한국해양대 전임강사, 조교수, 부교수, 교수. 2001년~2002년 영국 CARDIFF대학 교환교수. 2002년~현재 산학연컨소시엄 사업단장. 2002년~2004년 한국마린엔지니어링학회 편집위원. 2002년~현재 한국산학연논문집 편집위원. 2003년~2006 영국 K.O.Tech 연구원, 2005년~2006년 부·울 산학연 협의회 회장

저 자 소 개



이지영(李智英)

1977년 5월생. 2002년 한국해양대학교 운항시스템공학부 기관과정 졸업. 2002년~2004년 한국해양대학교 대학원 졸업. 2004년~현재 cardiff university the manufacturing engineering 박사과정



유희한(柳熙漢)

1956년 1월생. 1979년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1987년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사). 1997년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(박사). 1982~1989년 한국기계연구소 선임연구원. 1991~1998년 포항공대 가속기 연구소 선임연구원. 1998~현재 한국해양대학교 해사대학 선박전자기계공학부 부교수