

# HILS 기반의 수중체 냉각 시스템 개선

정성영<sup>1</sup>·오진석<sup>2,†</sup>  
수중운동체 특화연구센터<sup>1</sup>  
한국해양대학교 기관공학부<sup>2</sup>

## Improvement of Submarine Cooling System using HILS Simulation

Sung-Young Jung<sup>1</sup>·Jin-Seok Oh<sup>2,†</sup>  
Underwater Vehicle Research Center<sup>1</sup>  
Division of Marine Engineering, Korea Maritime University<sup>2</sup>

### Abstract

Owing to rapid development of power device and inverters, most of submarines adopt an electric propulsion system. Although PMPM(Permanent Magnet Propulsion Motor) propulsion system has relatively higher power, energy conversion efficiency and smaller volume than engine propulsion system, it also produces large amount of heat due to current flowing inside motor coils and change of magnetic field induced by iron core. The produced heat in stator and inverter largely affects motor efficiency and bearing lubrication and causes thermal aging while the system is on operation. So, we analyze the existing cooling system and submarine ESS (Energy Saving System) cooling system whose power consumption is reduced. HILS(Hardware In the Loop System) technique is used for the modelling of the submarine cooling system. To confirm the ESS cooling system characteristic, HILS is simulated using LabVIEW with hardware. As a result, the ESS cooling system has the characteristic of better temperature stability and less power consumption than the existing one.

**Keywords** : Submarin(수중함), HILS(Hardware in the Loops), Cooling system(냉각시스템), ESS(Energy Saving System), LabVIEW(랩뷰)

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 산업 및 문화교류가 커짐에 따라 운송기기 및 산업기기가 대형화되고 있다. 특히, 수중체의 경우 관광 자원 및 지하 자원 개발 등 다양한 용도로 활용되고 있으며, 해저 자원 매장 가능성과 육상 자원의 고갈로 인해 이러한 장비의 가치는 더욱 증가하고 있다. 이와 같은 세계 환경에 대응하고, 수중체에 관한 국가 기술의 우위를 점유하기 위해서는 미래형 수중체의 국내개발이 필수적이다.

이러한 수중체는 운항목적을 만족하기 위하여 다양한 추진시스템이 적용되고 있다. 대부분 수중체의 추진시스템은 설치공간의 유연성, 디젤과 가스터빈을 연동하는 추진시스템에 비하여 낮은 소음과 진동 특성, 직결 기계식 추진시스템에 비하여 높은 에너지 효율 등의 장점을 가지고 있는 대용량 추진 전동기를 이용한 전기추진시스템을 사용한다. 수중체용 전기추진시스템 구성은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 전력을 발생하는 발전기, 발전기 전력을 보관하는 축전지, 비상시 전력시스템인 연료전지 등으로 구성된다. 생성된 전력은 인버터를 이용하여 추진전동기의 속도를 제어하게 된다.

그러나, 높은 전력사용으로 인한 발열량은 인버터 및 각종 제

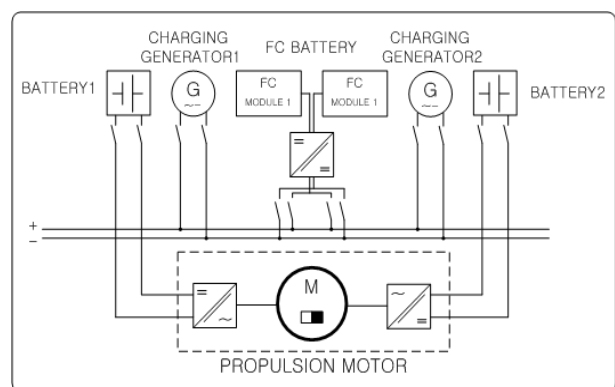


Fig. 1 Configuration of propulsion system

어의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 발열 문제를 해결하기 위하여 안정적이고, 수중체에 최적화된 냉각 시스템이 필요하다 (Kim, et al., 2005; Oh, et al., 2008; Oh, et al., 2010).

수중체에 최적화된 냉각 시스템을 개발하는데 있어서 그 시험을 위한 환경을 갖추는데 많은 시간과 연구비 투자 및 위험부담이 요구된다. 이러한 경우 대부분 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션기법을 선택함으로써 보다 경제적이며, 효과적인 연구 개발과 성능 확인이 가능하다. 최근에는 기존의 소프트웨어만으로 구현

된 시뮬레이션 루프에 개발하고자 하는 시스템을 실제 하드웨어로 대체하는 HILS(Hardware In the Loop Simulation)가 각광받고 있다 (Lee, et al., 2004).

본 연구에서는 전기추진시스템을 탑재한 수중체의 냉각 시스템에 수중체용 ESS 제어 알고리즘을 적용하여 냉각 시스템 최적화를 진행하고, HILS를 이용하여 제안하는 냉각 시스템의 신뢰성 및 안정성을 분석하였다.

## 2. 수중체 냉각 구조

일반적으로 수중체 냉각 시스템은 추진전동기의 고정자와 인버터에서 발생한 열을 청수(F.W)로 냉각한 후, 해수(S.W)를 이용하여 청수를 다시 냉각하는 중앙집중식 냉각 시스템으로 운용된다. 이 과정에서 운용상의 안전성을 확보하기 위해, 2대 이상의 해수 및 청수 펌프가 구성되어 있다 (Oh & Lim, 2004).

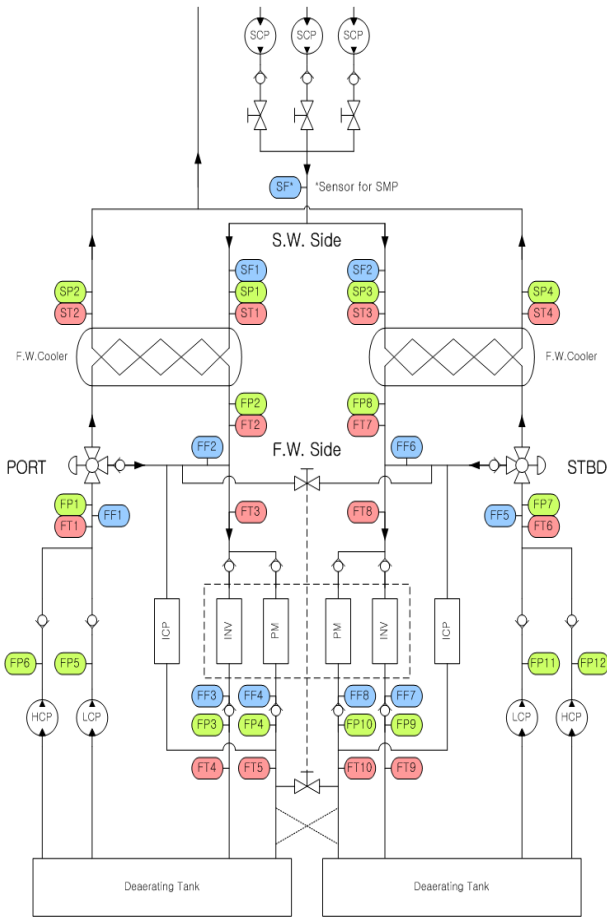


Fig. 2 Submarine cooling system

Fig. 2는 수중함에 사용되고 있는 이중 냉각 시스템을 나타내고 있다. 일반 선박에서 이중 냉각 구조를 사용하는 경우는 없으나, 육상의 원자력 발전 분야나 제트엔진 관련 분야의 냉각 시스템에서 이중 냉각 시스템이 일부 사용되고 있다. 이중 냉각 시스템은 구성이 복잡하다는 단점을 가지나, 외부 환경 변화에 대한

시스템 안정성이 높으며, 열원부에서 열을 균일하게 전달 할 수 있다는 장점을 가진다.

또한 선박에서 주로 사용되는 단일 냉각 시스템에서 냉각 시스템 펌프나 열교환기에 고장이 발생하는 경우 운항을 정지해야 하지만, 이중 냉각 시스템에서는 한쪽 냉각 시스템에서 고장이 발생하더라도 Change over valve를 이용하여 남은 냉각 시스템만으로 운항이 가능하도록 동작할 수 있는 장점을 가진다.

## 3. 수중체 냉각 알고리즘

### 3.1 기존 수중체 냉각 알고리즘

기존의 수중체 냉각 알고리즘은 수중체의 RPM에 따라 운전모드를 저속, 중속, 고속 운전모드, 특수한 상황에 대비하기 위한 Redundancy, Reduced 운전모드로 나뉜다. 해수 및 청수 펌프는 수중함의 운전모드에 따라 펌프를 다단으로 제어하거나, On/Off 한다. 다음 Table 1은 기존 냉각 시스템에서 사용되는 운전모드에 따른 해수 및 청수 펌프의 동작을 나타낸 것이다.

Table 1 Operation mode by propulsion motor RPM

Operation modes	Fresh water pump	Sea water pump
Low	Circulation pump	Off (Primary circulation sea water)
Middle	Fresh water pump (Low)	No.1 Sea water pump
High	Fresh water pump (High)	No.1, No.2 Sea water pump
Redundancy	Fresh water pump (High)	No.1, No.2 Sea water pump
Reduced	Fresh water pump (High)	Off (Primary circulation sea water)

수중체의 운전모드가 저속인 경우 해수 펌프는 구동하지 않고, 기본 순환 해수(해수 펌프를 구동하지 않아도 흐르는 해수)만 흐르게 되며, 청수는 순환펌프만 구동하게 된다. 운전모드 중속에서는 No.1 해수 펌프가 구동하며, 청수 펌프는 저출력으로 구동한다. 운전모드 고속에서는 No.1, No.2 해수 펌프 모두 구동하며, 청수 펌프도 고출력으로 구동하여, 고정자와 인버터를 냉각한다.

운전모드 중 Redundancy는 수중체의 안정성을 고려한 알고리즘으로써, 이중 구조의 청수 냉각 시스템 중 한쪽의 청수 냉각기나 펌프를 구동하지 못하는 경우 Change Over Valve(Coupling Valve)를 이용하여 한쪽의 청수 냉각기와 펌프로 양쪽의 냉각 시스템을 모두 구동한다. 이때 해수, 청수 펌프 모두 고출력으로 구동한다.

Reduced mode는 전동기의 열원에서 발생하는 열량이 극히 미미하여, 청수 냉각기를 사용할 필요가 없는 경우 청수 자체의

순환만으로 고정자와 인버터를 냉각한다. 해수 펌프는 동작하지 않으며, 청수 펌프는 고출력으로 구동한다.

이때 청수의 온도를 일정하게 유지하기 위해 청수 온도 제어 밸브(3-way valve)를 이용하여 청수 냉각기로 들어가는 청수 유량을 제어한다.

### 3.2 Energy Saving System(ESS)를 적용한 수중체 냉각 알고리즘

기존의 수중체 냉각 알고리즘의 경우 같은 운전모드일 때 발열량, 외부 환경(외부 해수 온도, 외기 온도)이 변화해도 펌프는 일정한 출력으로 동작하기 때문에 과냉각이 발생할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 청수 냉각기에 들어가는 유량을 제어하는데 이와 같은 방법에는 1)Valve on/off 제어, 2)Throttle 제어, 3)By-pass 제어, 4)청수 펌프용 인버터 제어의 4가지 방법이 사용된다.

수중체에는 신뢰성과 청수 펌프용 인버터 제어 기술의 문제 때문에 선박에서 사용해왔던 By-pass를 이용한 유량 제어 방법을 적용한 냉각 시스템이 탑재되었다. 이러한 By-pass를 이용한 청수 유량 제어의 경우, 청수 펌프에서 사용하는 전력 소모량을 분석하면, 청수 온도 제어 밸브를 통해 Bypass되는 유량을 유지하기 위해 사용되는 청수 펌프의 전력 소모량만큼 전력을 낭비하게 된다. 그러나 최근 인버터 제어 기술의 수준이 높아짐에 따라 청수 펌프용 인버터를 이용하여 청수 펌프 RPM을 제어하고, 그에 따라 청수 냉각기로 들어가는 청수 유량을 제어함으로써 모터의 발열부인 고정자와 인버터 입구측 청수 온도를 일정하게 유지하는 ESS를 적용한 수중체 냉각 알고리즘의 구축이 가능해졌다.

ESS를 적용한 수중체 냉각 알고리즘은 운전모드의 특성, 이중 구조 냉각 시스템 특성, 추진 전동기의 운전모드별 조건을 반영하여 설계해야 한다. Fig. 3은 제어 알고리즘의 구조를 나타낸 것이다.

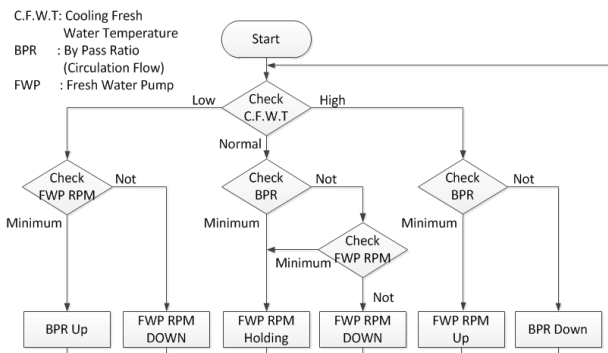


Fig. 3 Cooling system for ESS control algorithm

## 4. HILS 구축을 위한 모델링

### 4.1 HILS

수중체용 냉각 시스템의 실험은 청수 펌프의 유량 변화에 따른

청수 온도 변화에 대한 데이터를 확보해야 한다. 실제 수중체용 냉각 시스템에 적용하여 반복실험을 진행하는 경우, 1회 실험당 5시간 이상의 시간이 소요되며, 반복실험을 하기 위하여 청수 온도를 초기 상태로 일정하게 유지하는데 하루의 시간이 소요된다. 또한 청수 온도 변화는 전동기 구동시 고정자와 인버터의 안정성에 큰 영향을 미침으로 외부 환경을 극한의 상황으로 가정하고 실험하는 것은 매우 위험하기 때문에, 항상 주의를 기울여야 하는 어려움을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 동일한 조건으로 반복실험이 가능하며, 실험의 효율성을 향상시킬 수 있는 HILS를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

본 시뮬레이션은 냉각 알고리즘을 제어하기 위한 제어기(Controller)와 전동기의 냉각 시스템(HILS)을 모델링하기 위하여 니사의 cRIO제품을 이용하였다.

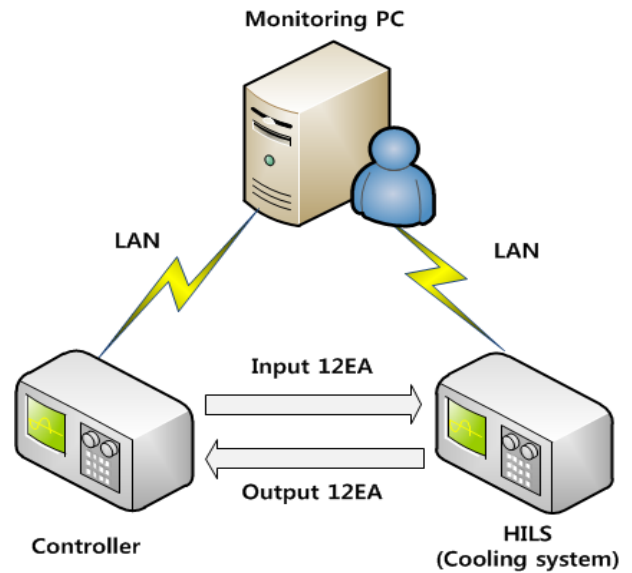


Fig. 4 HILS of the cooling system

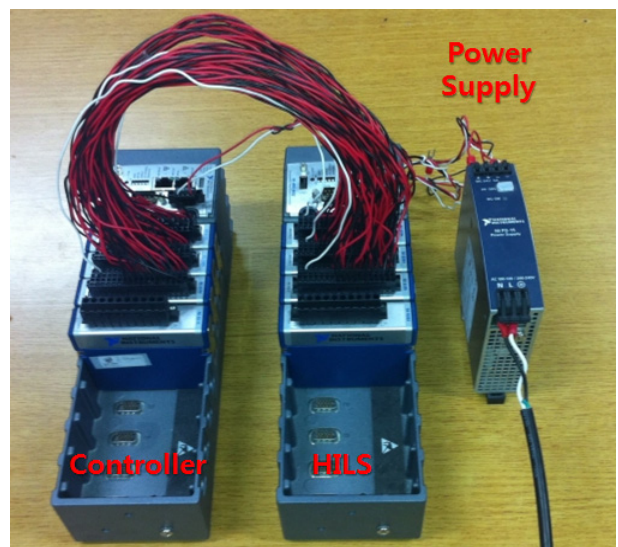


Fig. 5 HILS hardware

NI사의 cRIO는 외부 환경 제어, 데이터 수집 및 분석을 위한 임베디드 컨트롤 및 수집 시스템으로써 측정 및 제어하고자 하는 대상에 따라 I/O 새시를 다양하게 선택함으로써 시스템에 따른 유연성이 뛰어나며, 높은 수행능력과 안정성, 신뢰성을 가지고 있는 장비이다. 실제 개발하고 있는 수중체용 냉각 시스템에도 동일한 제품을 사용하여 구축할 예정이다.

또한, 기타 환경 데이터 설정과 데이터 수집을 위하여 컴퓨터와 연결하였다. 다음 Fig. 4는 수중체 냉각 시스템용 HILS의 구성을, Fig. 5는 HILS의 하드웨어를 나타내고 있다.

## 4.2 HILS의 모델링

### 4.2.1 냉각 시스템용 HILS의 SW 구축

청수 펌프에 의해 발생한 청수 유량은 청수 온도 제어 밸브의 개도에 따라 청수 냉각기로 들어가는 청수 유량과 Bypass되는 청수 유량이 결정된다. 청수 냉각기로 들어간 청수는 해수에 의해 냉각되어 청수 온도 제어 밸브에서 Bypass된 청수와 섞이게 된다. 이 청수는 냉각 유량 제어 밸브를 통해 발열부(전동기, 인버터)의 발열량에 따라 분배된다. 발열부에서 열을 흡수한 청수는 다시 청수 펌프로 돌아오게 된다. 이와 같은 냉각 시스템을 HILS로 구축하기 위하여 NI사의 cRIO와 LabVIEW를 이용하였다.

시뮬레이션 툴로 활용된 LabVIEW는 NI에서 제공하는 그래픽 기반의 프로그램 제작 툴로써, 프로그래밍 및 디버깅에 소모되는 시간을 단축시킬 수 있으며 데이터를 수집하여 UI(User Interface)에 직관적으로 표시하기 때문에 측정 및 컨트롤 어플리케이션 분야에서 많이 사용되고 있다.

HILS에서 제어기는 시뮬레이션 후 실제 수중체 냉각 시스템에 바로 연결하여 테스트 할 수 있도록 구성해야 하기 때문에 실제 수중체 냉각 시스템 제어기와 동일한 cRIO를 선택하였으며, 그에 따라 cRIO용 FPGA, RT에 프로그래밍을 진행하였다.

다음 Fig. 6은 LabVIEW로 구성한 수중체용 이중 냉각 시스템 프로그램 코드이며, Fig. 7은 수중체용 이중 냉각 시스템의 LabVIEW 블록 다이어그램이다.

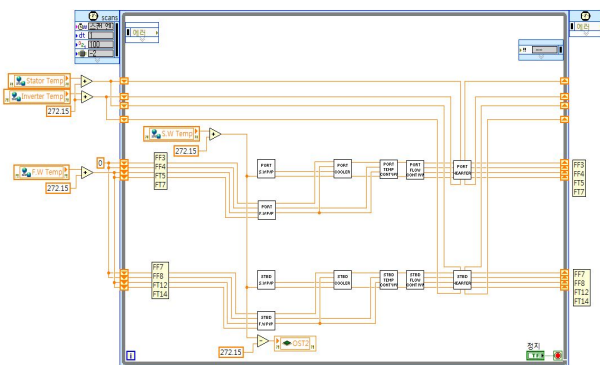


Fig. 6 Program code for double cooling system (LabVIEW)

### 4.2.2 냉각 시스템용 HILS 수학적 모델링(청수 냉각기)

청수 냉각기의 수학적 모델링은 LMTD(Log Mean Temperature Difference)와  $\epsilon$ -NTU(Effectiveness Number of Heat Transfer Unit)가 있다. LMTD에 의한 청수 냉각기의 해석은 모든 출입구 온도를 알 때 편리함으로, 안정된 상황에서 청수 냉각기를 설계할 때 널리 쓰인다. 그러나, 청수 냉각기의 성능을 알고 있거나 또는 적어도 산정할 수 있지만 청수 냉각기의 출구측의 유체의 온도는 모르는 경우, LMTD는 매우 많은 반복 계산을 통해서 출구측 유체의 온도를 계산할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해  $\epsilon$ -NTU를 사용한다 (M.LACHI, N.EL WAKIL & JPADET, 1997; You, 1998).

$\epsilon$ -NTU은 청수 냉각기의 입출구 온도의 관계를 위해 열전달률에 대하여 유용성( $\epsilon$ )을 도입한다. 청수 냉각기 유용성은 가능한 최대열교환율에 대하여 주어진 청수 냉각기의 실제 열전달률과의 비로 정의된다.

최대 열교환율을 갖는 청수 냉각기는 무한한 열전달면을 가진다고 가정하여 구할 수 있다. 청수 냉각기에서 외부의 열손실이 없다면  $\dot{m}_h c_{pc} < \dot{m}_h c_{ph}$  일 때 저온유체의 출구온도가 고온유체의 입구온도와 같고;  $\dot{m}_h c_{ph} < \dot{m}_c c_{pc}$  일 때는 고온 유체의 출구온도와 저온 유체의 입구 온도는 같다. 즉 청수 냉각기 유용성은 실제의 열전달률과 에너지 보존 법칙에 의해 완전히 열전달이 되는 최대 열전달률과의 비로 결정된다 (M.LACHI, N.EL WAKIL & JPADET, 1997).

$$\epsilon = \frac{C_h(T_{hin} - T_{hout})}{C_{min}(T_{hin} - T_{cin})} = \frac{C_c(T_{cout} - T_{cin})}{C_{min}(T_{hin} - T_{cin})} \quad (1)$$

여기서  $C_{min}$ 은  $\dot{m}_h c_{ph}$ 와  $\dot{m}_c c_{pc}$  중에서 크기가 작은 쪽이다. 청수 냉각기의 유용성을 알면 열전달률은 수식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$q = \epsilon C_{min}(T_{hin} - T_{cin}) \quad (2)$$

수식 (2)를 수식 (1)을 이용하여 정리하면 수식 (3)과 같이 된다.

$$\epsilon C_{min}(T_{hin} - T_{cin}) = C_h(T_{hin} - T_{hout}) = C_c(T_{cout} - T_{cin}) \quad (3)$$

수식 (2)를 정리하여 수식 (3)의 유용성 관계식으로 대체하면 수식 (4)와 같다.

$$\ln \left[ 1 - \epsilon \left( \frac{C_{min}}{C_h} + \frac{C_{min}}{C_c} \right) \right] = - \left( \frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_h} \right) UA \quad (4)$$

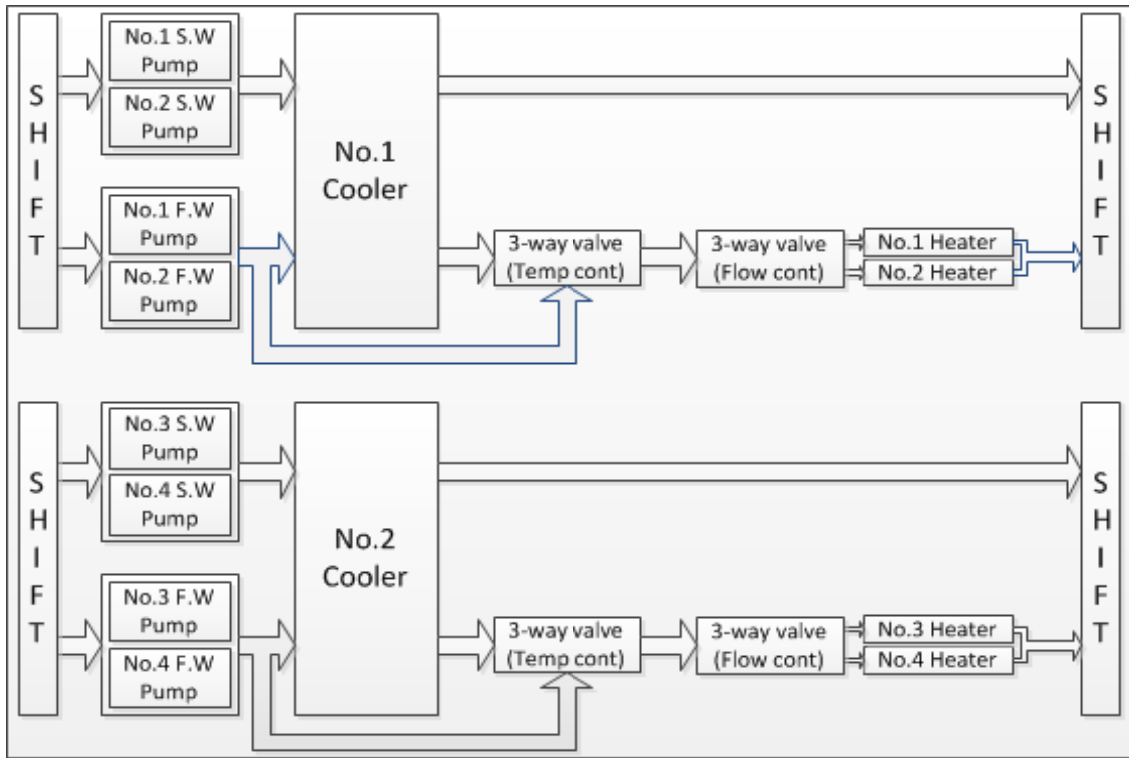


Fig. 7 Block diagram for double cooling system

수식 (5)를  $\epsilon$ 에 관하여 정리하면 수식 (5)와 같다.

$$\epsilon = \frac{1 - e^{-[1 + (C_{min}/C_{max})]UA/C_{min}}}{1 + (C_{min}/C_{max})} \quad (5)$$

앞에서의 유도과정은 주어진 유동배열에 대한 유용성을 두 개의 무차원 변수, 즉 열용량 비  $C_{min}/C_{max}$  와 최소 열용량에 대한 총비  $UA/C_{min}$  로 나타낼 수 있음을 보여준다. 두 변수 가운데 후자를 열전달단위수(Numer of heat Transfer Units)또는  $NTU$ 라고 부른다. 이때  $UA$ 는 청수 냉각기의 하드웨어적 특성을 나타내며, 우리나라에서 제작되는 대부분의 냉각기는 설계 프로그램에 의해 결정되기 때문에 설계된 청수 냉각기의  $NTU$ 는 실험데이터를 분석하여 선정한다.

#### 4.2.3 냉각 시스템용 HILS 수학적 모델링(발열부)

대용량 추진 전동기를 이용한 수중체용 전기추진시스템은 추진 전동기의 RPM에 따라 고정자와 인버터에서 열이 발생한다. 전동기 외부로 복사, 전도에 의한 열손실이 없다고 가정하면, 고정자와 인버터에서 발생한 열의 일부는 청수가 가져가고, 나머지 일부는 고정자와 인버터의 온도를 높이는데 사용된다. 이때 발열부에서부터 청수로의 열전달량은 열전달계수  $R$ 과 발열부의 온도와 청수의 온도의 차에 의해 결정된다. 또한 발생한 열중 청수가 가져가지 않은 열량은 고정자와 인버터의 온도를 높이게 되는데,

이때 고정자와 인버터의 비열에 따라 온도 상승 곡선의 기울기가 결정된다.

다음 식 (6)은 청수가 가져가는 발열량을 나타내며, 식 (7)은 발열부의 온도 상승을 나타낸다.

$$Q_{cooler} = (T_H - T_{cin})/R \quad (6)$$

$$T_H = Q_{return}/c'm + T_H' \quad (7)$$

$Q_{cooler}$ 는 발열부로부터 청수가 가져가는 발열량을 나타내며,  $T_H$ 는 발열부 온도를 뜻한다.  $Q_{return}$ 은 발열부에 남아있는 열량이며,  $c'$ 는 발열부 비열,  $m$ 은 발열부 질량,  $T_H'$ 는 온도가 증가하기 전 발열부 온도이다.

고정자와 인버터의 발열량은 전동기의 회전속도 즉, 수중체의 추진 속도와 비례한다. 국내에서 연구 수행중인 수중체용 추진 전동기는 최고 회전 속도 150RPM, 최대 출력 6~7MW급으로 예상되며, 열해석 시뮬레이션 결과 다음 Table 2와 같이 예상된다.

이와 같은 불연속적인 데이터를 이용하여 냉각 시스템을 시뮬레이션하기 위해서는 데이터에 대한 수식화과정이 필요하므로, 회귀분석법을 이용한다 (Lim, 2007). Table 2의 데이터를 식 (8)과 같은 5차 다항식으로 수식화하면 Table 3으로 나타낸다.

$$y = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f \quad (8)$$



Table 2 The heat loss data in the motor & inverter

Motor speed [RPM]	Stator losses [kW]	Inverter losses [kW]
0	0	0
10	2	1
20	4	4
30	7	7
40	11	11
50	15	17
60	21	22
70	29	29
80	40	37
90	53	46
100	67	56
110	83	68
120	101	82
130	120	99
140	140	118
150	160	140

Table 3 The coefficients using regression analysis

Coefficients	Motor (stator)	Inverter
<i>a</i>	-0.0000000001	-0.0000000008
<i>b</i>	-0.0000003944	0.0000004937
<i>c</i>	0.0001283565	-0.0000722171
<i>d</i>	-0.0048816689	0.0082332599
<i>e</i>	0.2757337454	0.0420113937
<i>f</i>	-0.1702793945	-0.009287967

### 5. HILS를 이용한 냉각 시뮬레이션

4장에서 구한 열전달 방정식과 제어를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 일반적으로 수중체의 냉각 시스템은 외부 해수 온도 32°C까지 안정적으로 운항이 가능하도록 설계되어 있다. 다음 Fig. 8은 한국 근해와 공해상의 온도 분포를 계절에 따라 나타내고 있다.

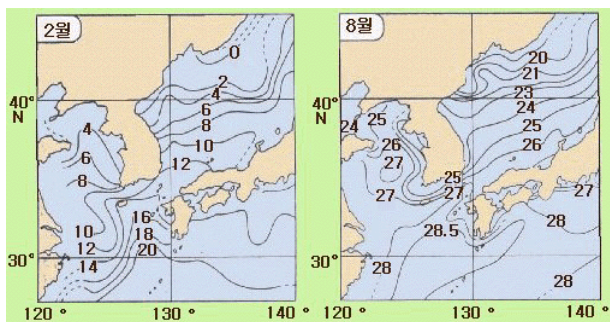


Fig. 8 Temperature distribution of sea water around Korea

본 시뮬레이션은 가장 해수 온도가 높은 시기인 8월의 남해에서 운항시간 24시간을 기준으로 기존 냉각 알고리즘과 제안하는 ESS 냉각 알고리즘의 펌프 전력 소모량과 고정자, 인버터의 온도 안정성을 분석하였다.

온도 안정성(*Temp Deviation*)은 기준 온도(*Set Temp*) 대비 실제 온도(*Real Temp*)의 오차율을 뜻하며, 이때 기준 온도는 실제 온도의 평균값으로 한다. 온도 안정성이 높을수록 시간에 따른 온도의 변화가 크게 나타났음을 예상 할 수 있다. 온도 안정성은 수식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Temp\ Deviation(^{\circ}C / count) = \tag{9}$$

$$\frac{\sum |Set\ Temp - Real\ Temp|}{Sampling\ Data}$$

다음 Fig. 9는 시뮬레이션 환경 조건인 수중함의 RPM 변화를 나타낸 그래프이다. 총 24시간 운항을 기준으로 시뮬레이션을 진행하였다.

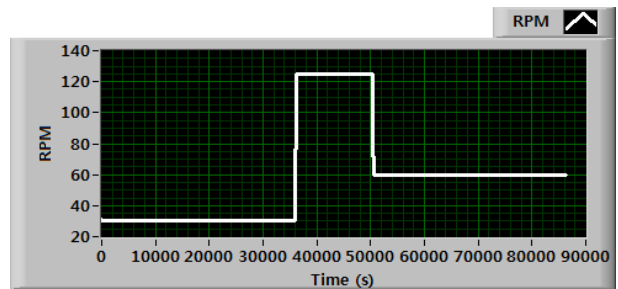


Fig. 9 Submarine propulsion motor RPM by time

시뮬레이션에서 수중체는 24시간중 0~10시 30RPM(저속), 10~14시 125RPM(고속), 그리고 14~24시까지 60RPM(중속)으로 운항하는 조건으로 기존의 냉각 시스템과 제안하는 냉각 시스템을 각각 시뮬레이션하였다.

기존의 냉각 시스템에서 시간에 따른 청수 유량, 청수 펌프 전력 소모량, 고정자, 인버터의 온도 변화는 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12에 나타나고 있으며, 제안하는 냉각 시스템에서 시간에 따른 청수 유량, 청수 펌프 전력 소모량, 고정자, 인버터의 온도 변화는 Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15에 나타나고 있다.

시뮬레이션 결과 두 경우 모두 고정자와 인버터의 온도는 기준치 이하로 유지되었다.

청수 펌프의 전력 소모량을 비교해 보면, 기존의 냉각 시스템에서는 청수 펌프는 추진 전동기의 RPM에 따라 3단계로 일정하게 동작하는 상태에서 온도 제어용 3-way valve를 제어함으로써 청수 펌프의 전력 소모량이 제안하는 ESS 냉각 시스템에 비해 다소 높게 나타났다.

그러나, ESS 냉각 시스템에서는 추진전동기의 RPM과 관계없이 고정자와 인버터의 청수 온도를 기준으로 제어했기 때문에 펌프 전력소모량이 기존 냉각 시스템보다 낮게 나타남을 확인할 수 있다.

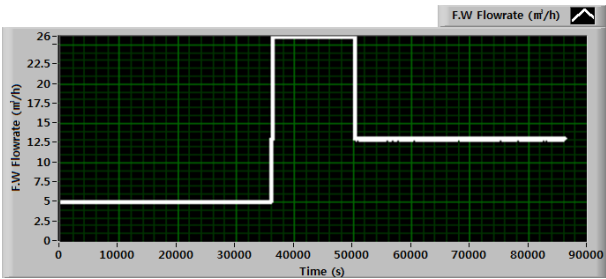


Fig. 10 F.W flowrate (Non-ESS)

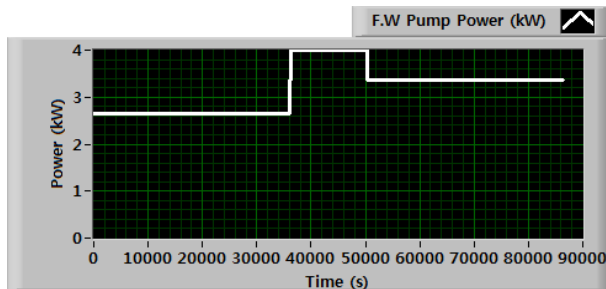


Fig. 11 F.W pump power (Non-ESS)

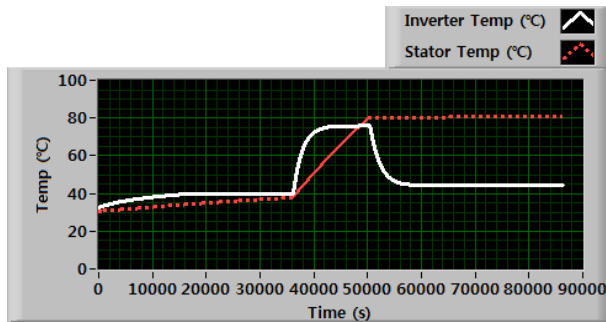


Fig. 12 Stator, inverter temp (Non-ESS)

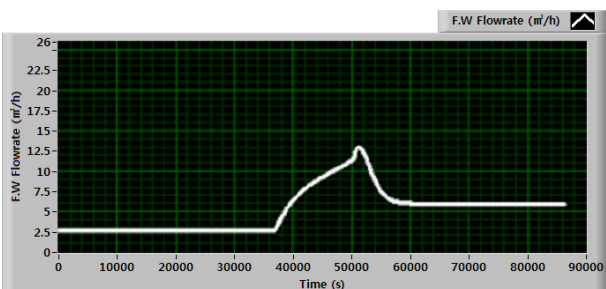


Fig. 13 F.W flowrate (ESS)

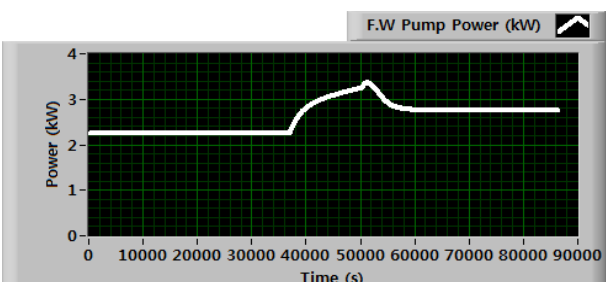


Fig. 14 F.W pump power (ESS)

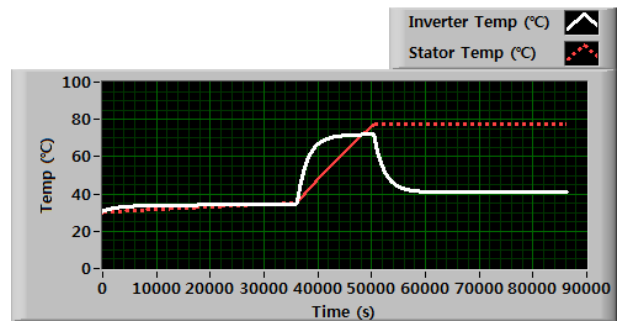


Fig. 15 Stator, inverter temp (ESS)

다음 Fig. 16, Fig. 17은 24시간동안 소모된 청수 펌프 전력 총 소모량과 고정자와 인버터의 온도 안정성을 나타낸다.

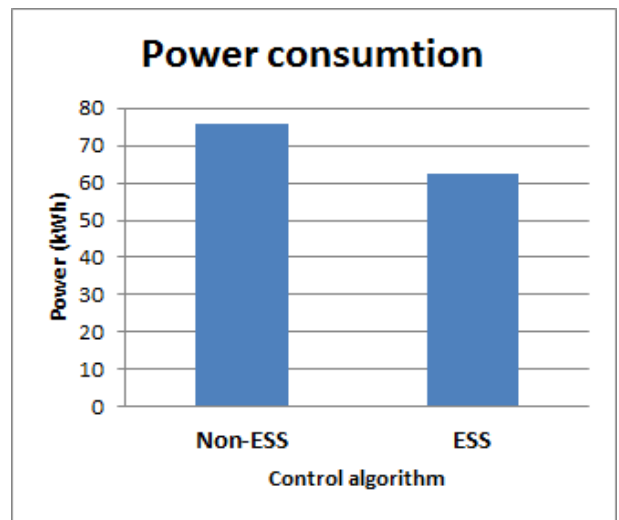


Fig. 16 F.W Pump power consumption

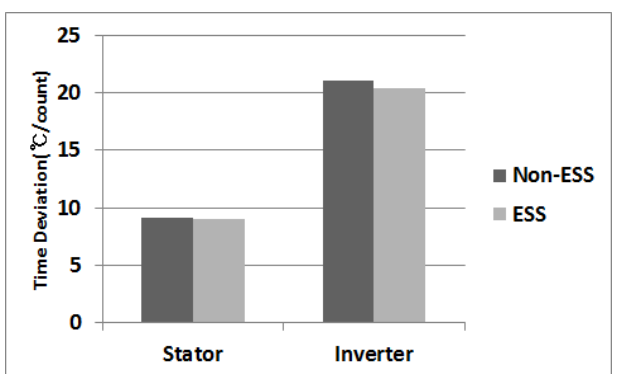


Fig. 17 Stator, inverter temp deviation

24시간동안 시뮬레이션 결과, 동일한 시뮬레이션 환경에서 기존 냉각 시스템의 청수 펌프 총 전력 소모량은 75.85kWh이며, 온도 안정성은 고정자 9.08329(°C/count), 인버터 21.0234(°C/count)로 나타났다. 그에 비해 ESS 냉각 시스템의 청수 펌프 총 전력 소모량은 62.19kWh, 온도 안정성은 고정자 8.98575(°C/count), 인버터 20.3197(°C/count)로 나타남을 확인하였다.

## 6. 결론

본 연구는 기존의 수중체용 냉각 시스템과 제안하는 수중체용 냉각 시스템에 대하여 HILS를 기반으로 시뮬레이션을 진행하고, 새로운 냉각 알고리즘의 효율, 안정성에 대하여 분석하였다.

시뮬레이션 결과 ESS 냉각 시스템은 기존 냉각 시스템에 비하여 전력 소모량 18% 감소를 확인하였으며, 온도의 안정성 또한 고정자 1%, 인버터 3.34% 향상되었음을 확인하였다.

본 연구에서 진행한 냉각 시스템 및 시뮬레이션 결과를 바탕으로 차후 개발되는 전기 추진 시스템에 적용하기 위해 실제 전동기 냉각 시스템을 구축하여 실험하는 추가적인 연구가 진행되어야 한다.

## 후기

본 연구는 수중운동체기술특화연구센터 사업으로 수행됨. 본 연구는 (주)효성중공업의 지원으로 수행됨.

## 참고 문헌

Kim, D.S. et al., 2005. A Study on Revolving Characteristics According to Stator Shape in 5MW Class Brushless DC Motor for Ship Propulsion. In: The Korean Institute of Electrical Engineers, *Electrical Machinery and Energy Conversion System Society*, Republic of Korea, 20–22 October 2005.

Lee, H.S. et al., 2004. Development of Digital Governor by HILS System for a Small Diesel Engine. In: The Korean Society for Power System Engineering, *The 2004 Autumn Conference*, Republic of Korea, 28–29 May 2004, pp.40–45.

Lim, J.S., 2007. *MATLAB 7 by Lim Jong-soo*. Republic of Korea.

M.LACHI, N.EL WAKIL & JPADET, 1997. The Time Constant of Double Pipe and One Pass Shell-and-Tube Heat Exchangers in the Case of Varying Fluid Flow Rates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(9), pp.2067–2079.

Oh, J.S. & Lim, M.K., 2004. A Study on the Method of Energy Saving in a Marine Cooling System. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 29(5), pp.127–132.

Oh, J.S. Jo, K.J. Kwak, J.H. & Lee, J.Y., 2008. Analysis & Design of Cooling System for Electric Propulsion System. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 32(4), pp.596–602.

Oh, J.S. et al., 2010. Control Algorithm Development for Design of Cooling System in High-power Propulsion Motor. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 34(1), pp.195–201.

You, J.S., 1998. *A Study on Design Program for a Multipass Plate Heat Exchanger with  $\epsilon$ -NTU method*. M.D. Seoul: Konkuk University.

