

수중체 전기추진시스템용 냉각체계 설계에 관한 연구

† 오진석 · 정성영*

† 한국해양대학교 기관공학부 교수, *수중운동체 특화연구센터 보조연구원

A Study on the cooling system design for electric propulsion system in submarine

†Jin-Seok, Oh, Sung-Young, Jung*

† Professor, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

* Underwater Vehicle Research Center, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 본 논문은 수중체용 냉각 시스템에 관하여 분석하고, 수중체에 최적화된 냉각 제어 알고리즘에 관하여 연구하였다. 수중체용 대용량 추진 전동기는 동손 및 철손으로 인해 발생하는 고열로부터 전동기를 안정적으로 보호하기 위해 청수를 이용한 냉각 시스템이 사용된다. 이 냉각 시스템은 전동기의 온도를 유지하기 위해 외부 환경 및 전동기의 회전수 유지시간에 따라 해수 및 청수 펌프 RPM을 조절한다. 본 논문에서는 제안하는 냉각 시스템의 검증을 위한 시뮬레이션 프로그램을 구성하였으며, 다양한 제어 기법을 적용하여 냉각 수행 능력을 검증하였다. 그 결과 제안하는 냉각 알고리즘은 열적 안정성과 효율이 기존 냉각 알고리즘에 비해 높음을 확인하였다.

핵심용어 : 수중체, 냉각 시스템, 랩뷰, 시뮬레이션, 에너지 절감 시스템

Abstract : In this paper, we analyze the current submarine cooling system and study control algorithms for cooling system. Cooling system are installed in the submarine propulsion motor to protect the motor from high-temperature by iron loss and copper loss. The cooling system control the sea water and fresh water pump RPM to keep the motor temperature stable by external environment and motor RPM holding time. The cooling system simulation program is made for checking the cooling performance, and simulation is performed with various control strategy. The results with proposed cooling algorithm is shown to improve the thermal stability and efficiency of cooling system.

Key words : Submarine, Cooling system, LabVIEW, Simulation, ESS(Energy Saving System)

1. 서 론

최근 전력 소자 및 인버터의 발달이 가속화됨에 따라, 대부분의 수중체용 추진 시스템은 전기추진시스템을 사용한다. 이러한 전기추진시스템은 출력, 진동 및 소음, 공간적 효율 측면에서 이점을 가지고 있지만, 전동기 권선부의 코일에 흐르는 전류에 의한 동손, 철심에 의하여 자계가 변화하기 때문에 발생하는 철손에 의해 많은 열이 발생한다. 발생된 열은 전동기의 효율과 베어링의 윤활에 큰 영향을 주어 운전 시 뿐만 아니라 정지 시의 열적 노화를 유발하여 모터 성능에 악영향을 미친다. 또한, 권선부의 온도가 10℃ 높아짐에 따라 전동기 절연부의 수명은 약 1/2로 감소하기 때문에 전동기 냉각 시스템 및 전동기 내 열관리는 모터의 수명을 결정하는 매우 중요한 요소이다.

그러나, 이러한 냉각 시스템은 대부분 경험에 의존하여 설계 및 제어되고 있으며, 최적화된 수중체용 냉각 시스템에 대한 연구는 매우 미비한 상황이다.

본 연구에서는 수중체 전기추진시스템의 운용특성을 고려

한 냉각 시스템 최적화 방안에 대하여 연구하고, 그 결과를 기술하고자 한다. 이를 위하여 수중체의 냉각구조와 추진 전동기의 운전모드를 분석하고, 수중체에 최적화된 냉각 시스템용 알고리즘을 제안한다.

2. 수중체 냉각 시스템

2.1 냉각 시스템의 구성

일반적으로 수중체 냉각 시스템은 추진전동기 및 인버터에서 발생한 열을 청수로 냉각한 후 해수를 이용하여 청수를 냉각하는 중앙집중식 냉각 방식을 사용한다. 이 과정에 운용상의 안전성을 확보하기 위하여, 2대 이상의 해수 및 청수 펌프를 활용하여 냉각 시스템을 운용한다. 특히, 청수계통은 수중체 운전상태를 고려하여 용량이 다른 청수펌프 2대를 적절히 활용하여 냉각 시스템을 관리한다. 본 연구에서는 냉각구조를 분석하고 이를 기반으로 운전모드를 고려하여 냉각 시스템 제어 알고리즘을 설계하였다. Fig. 1은 이중 냉각 구조로 구축된

† 대표 저자, 교신저자 : 종신회원, ojs@hhu.ac.kr 051)410-4283

* 연회원, whswo85@hhu.ac.kr 051)410-4866

수중체의 냉각 시스템이다.

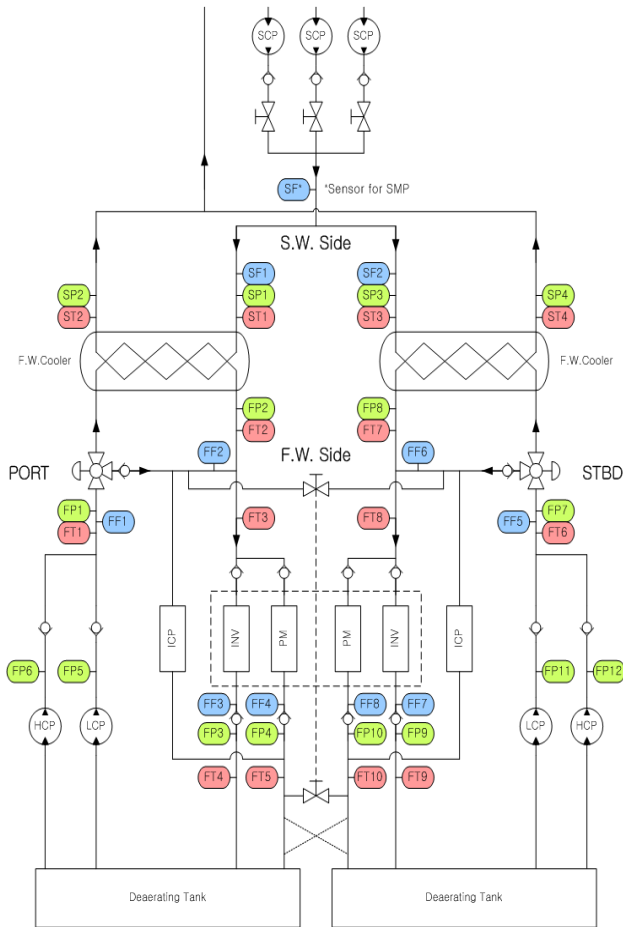


Fig. 1 Submarine cooling system

일반 선박에서 이중 냉각 구조를 사용하는 경우는 거의 없으나, 육상의 원자력 관련 분야나 제트엔진 관련 분야의 냉각 시스템에 이중 냉각을 사용하는 경우가 일부 확인되고 있다. 이러한 분야에 이중 냉각을 사용하는 주된 이유는 냉각 시스템 안정성 확보이다. 각각 분리된 두 개의 냉각 회로는 단일 냉각 구조에서 발생하는 냉각 부하의 온도 상승 폭을 줄일 수 있으며, 온도 분포의 변화 폭도 줄일 수 있다. 또한 이중 냉각 구조에서는 단일 냉각 구조와 동일한 유량을 냉각 부하에 흘려주더라도 보다 많은 온도 감소 효과를 확인할 수 있다. 즉, 단일 냉각 구조에 비하여 시스템 구성이 복잡한 단점이 있지만, 보다 높은 냉각 성능 및 안정성을 확보할 수 있다.

수중체에 적합한 냉각 시스템은 냉각 성능뿐만 아니라 설치 공간적인 문제 및 전력 소비 문제 등도 고려하여야 한다. 이중 냉각 구조에서는 냉각 펌프의 수가 두 배로 늘어나지만, 용량이 작고, 전력 소비 및 소음 등의 문제에서도 큰 차이가 없기 때문에 단일 냉각 구조보다 이중 냉각 구조를 적용할 때에 보다 효과적인 것을 예상할 수 있다.

다음 Table 1은 기존 수중체에서 사용되는 냉각 시스템 제어 알고리즘에 관하여 정리한 것이다.

Table 1 Operating mode in motor RPM

운전 모드	청수 펌프		해수 펌프	
	Type	Flow	Type	Flow
저속	청수 펌프 (저출력)	5m ³ /h	함내 기본 순환 해수	5m ³ /h
중속	청수 펌프 (고출력)	25m ³ /h	No.1 해수 펌프	45m ³ /h
고속	청수 펌프 (고출력)	25m ³ /h	No.1, No.2 해수 펌프	90m ³ /h

Table 1과 같이 기존 냉각 시스템 제어 알고리즘은 수중체의 RPM에 따라 해수 및 청수 펌프를 On/Off 또는 단단으로 제어(Step 제어)함으로써 냉각 시스템에 필요한 청수와 해수 유량을 제어하며, 과냉각을 방지하기 위해 독립적으로 제어되는 타입의 3-way valve(By-pass valve)를 이용하여 냉각 부하에 따라 발열부로 가는 청수 유량을 제어한다.

그러나 이와 같은 제어 기법은 외부 해수 온도 변화, 발열부의 냉각 부하 변화에 따라 최적화되어 제어하지 않기 때문에 전력 소모량이 증가하고, 발열부 온도 또한 일정하게 제어되지 않는 문제점이 발생한다.

2.2 냉각 알고리즘 설계

냉각 알고리즘의 설계는 운전모드의 특성, 이중 구조 냉각 시스템 특성, 추진 전동기의 운전모드별 조건이 반영되어야 한다. Fig. 2는 제안하는 제어 알고리즘을 플로우 차트로 나타낸 것이다.

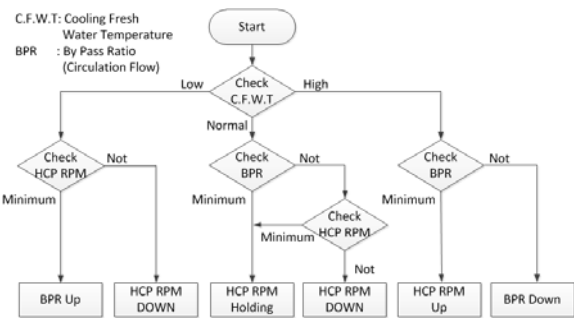


Fig. 2 ESS Control algorithm

제안하는 제어 알고리즘은 발열부 출구측 설정 청수 온도를 기준으로 현재 청수 온도를 비교하여 청수 고출력 펌프(HCP : High power Cooling Pump), 청수 저출력 펌프(LCP : Low power Cooling Pump), 해수 펌프의 RPM과 3-way valve(By-pass valve)의 개도를 조절하여, 펌프에서의 전력 소비량을 최소화한다.

이때 청수 고출력 펌프와 해수 펌프는 인버터를 이용하여 제어함으로써(Non-step 제어) 기존의 On/Off 제어보다 더 정밀하게 제어하도록 하였다. 또한, 외부 환경 변화(외부 해수 온도, 외부 해수 압력)에 따라 적절하게 대응함으로써, 온도에 대한 안정성을 확보한다. 이와 같은 알고리즘을 ESS(Energy

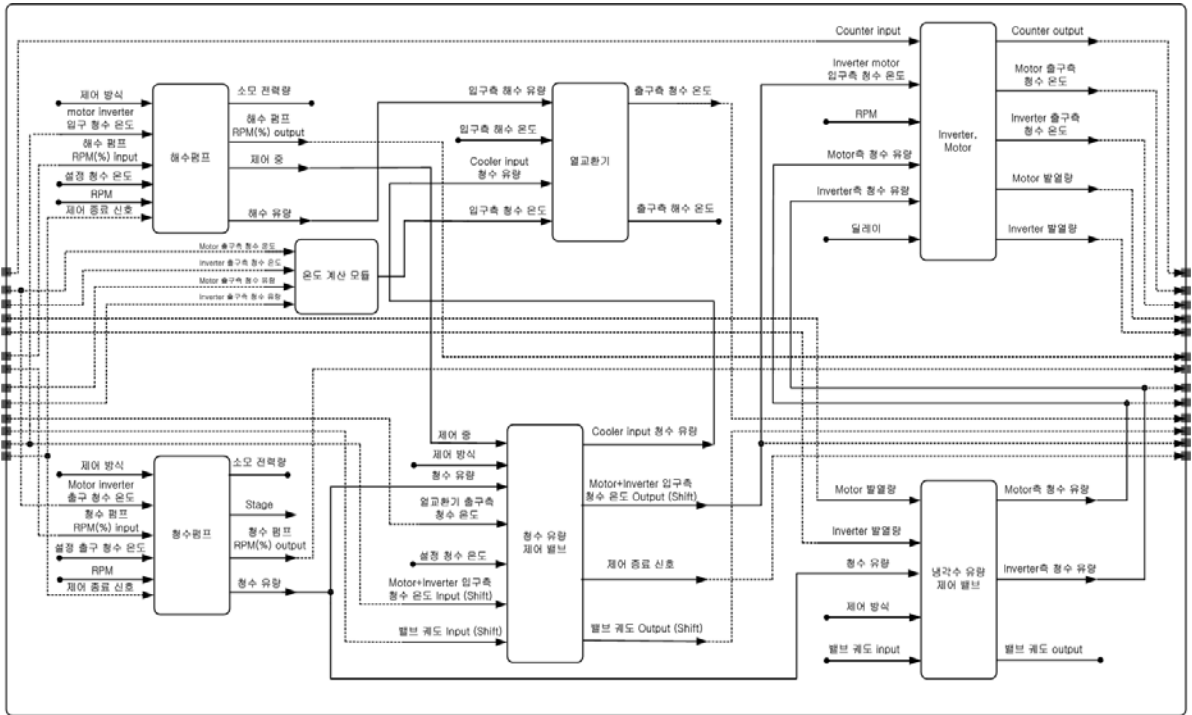


Fig. 3 Block diagram of cooling system simulation

Saving System) 알고리즘이라 한다.

2.3 냉각 시스템 시뮬레이션 모델링

수중체용 냉각 시스템 시뮬레이션의 모델링은 해수 펌프, 청수 펌프, 청수 냉각기, 전동기, 청수 온도 제어 밸브, 냉각수 유량 제어 밸브 총 6개의 모듈로 구성되며, 각 모듈은 상호 데이터 전달 및 사용자의 선택에 의한 제어 알고리즘에 따라 적절한 결과를 도출한다. 다음 Fig. 3은 냉각 시스템 시뮬레이션 블록 다이어그램을 나타낸다.

2.3.1 해수 및 청수 펌프

펌프는 제어 기법, 입구측 청수 온도, 청수 설정 온도, 청수 냉각기 출구측 청수 온도, 수중체 RPM을 입력으로 받아서 내부 알고리즘에 따라 청수 유량, 해수 유량, 그리고 각 펌프의 사용 전력량을 출력으로 내게 된다. 다음 Fig. 4는 펌프 블록 다이어그램을 나타낸다.

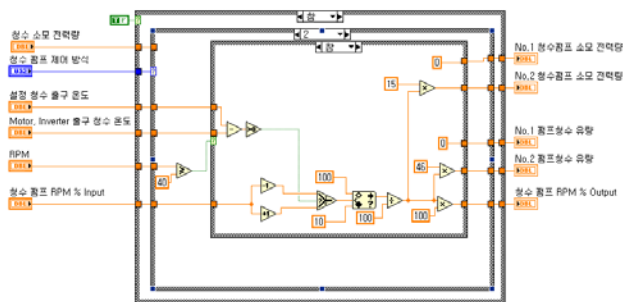


Fig. 4 Block diagram of pump

2.3.2 청수 냉각기

청수 냉각기의 모델링 기법은 LMTD법과 ϵ -NTU법이 있다. LMTD법은 청수 냉각기를 설계할 때 주로 사용되나, 청수 냉각기의 입출구 유체 온도를 모르는 경우는 ϵ -NTU법이 주로 사용된다. 다음 식 (1)은 ϵ -NTU법에서 열 전달률을, 식 (2)는 ϵ 를 나타내고 있다.

$$q = \epsilon C_{\min} (T_{hin} - T_{cin}) \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{1 - e^{-[1 + C_{\min}/C_{\max}]UA/C_{\min}}}{1 + (C_{\min}/C_{\max})} \quad (2)$$

위 수식과 청수, 해수 온도 등 입력 조건을 고려하여 LabVIEW를 이용하여 모델링을 진행하였다. 다음 Fig. 5는 청수 냉각기 블록 다이어그램이다.



Fig. 5 Block diagram of F.W cooler

2.3.3 전동기

전동기의 발열부는 크게 고정자(Stator)와 인버터(Inverter)로 나뉜다. 전동기 발열부의 발열량은 수중체 RPM에 따라 변

화하며, 6MW급 전동기의 실험결과 데이터를 바탕으로 프로 그래를 구성하였다.

실제 실험결과 데이터는 불연속적인 데이터임으로 냉각 시 스템을 모델링하기 위해서는 데이터에 대한 수식화 과정이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 최소 자승법을 이용한 Curve fitting을 진행하여 다음 수식과 같이 4차 다항식으로 나타내었다.

다음 수식 (3)은 수중체 RPM에 따른 고정자(Stator)와 인버터(Inverter)의 발열량을 나타내고 있다.

$$y = p1x^4 + p2x^3 + p3x^2 + p4x + p5 \quad (3)$$

고정자(Stator)와 인버터(Inverter) 발열량 계산 시의 파라미터 값은 각각 수식 (4), 수식 (5)와 같다.

$$p1 = 2.388e-007 \quad p2 = -4.2034e-005 \quad p3 = 0.0066802 \quad (4)$$

$$p4 = 0.072528 \quad p5 = 0.050641$$

$$p1 = -5.3356e-007 \quad p2 = 0.00016397 \quad p3 = -0.0081039 \quad (5)$$

$$p4 = 0.38487 \quad p5 = -0.93895$$

수식 (3), (4), (5)를 이용하여 수중체 RPM에 따른 고정자(Stator)와 인버터(Inverter)의 발열량을 모델링하였다. 다음 그림 Fig. 6은 고정자(Stator)와 인버터(Inverter)의 블록 다이어그램을 나타낸다.

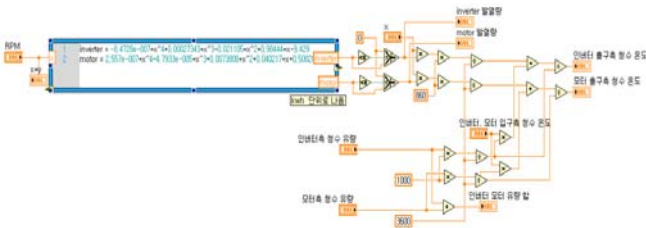


Fig. 6 Block diagram of inverter and motor

2.3.4 청수 온도 제어 밸브

청수 온도 제어 밸브는 사용자가 설정한 청수온도를 추종하기 위해 청수 냉각기로 들어가는 유량을 제어하는 3-way valve로써 ESS 알고리즘의 가장 중요한 역할을 수행하는 시스템이다. 다음 Fig. 7은 청수 온도 제어 밸브의 위치를 나타내고 있다.

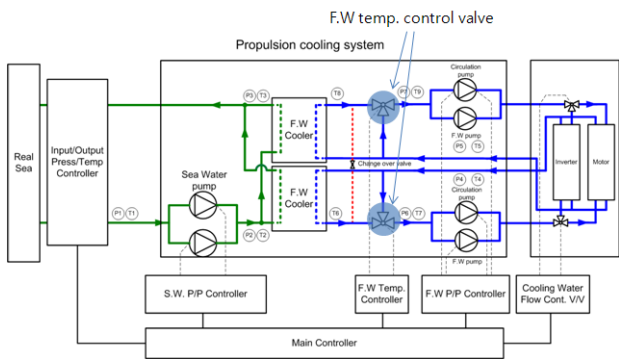


Fig. 7 F.W temperature control valve

다음 Fig. 8은 청수 온도 제어 밸브의 제어 알고리즘을 나타낸 것이다.

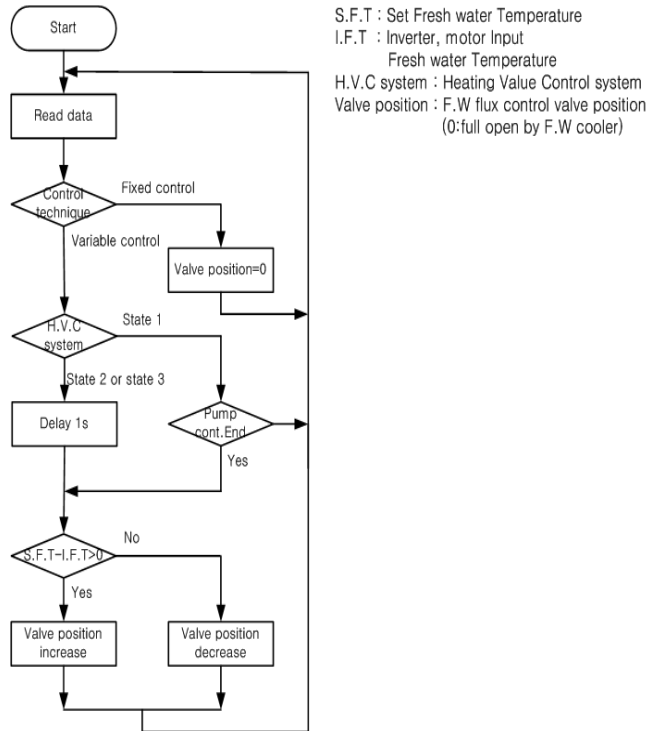


Fig. 8 F.W temperature control valve algorithm

Fig. 8의 알고리즘을 바탕으로 청수 온도 제어 밸브의 모델링을 진행하였다. Fig. 9는 청수 온도 제어 밸브의 블록 다이어그램을 나타내고 있다.

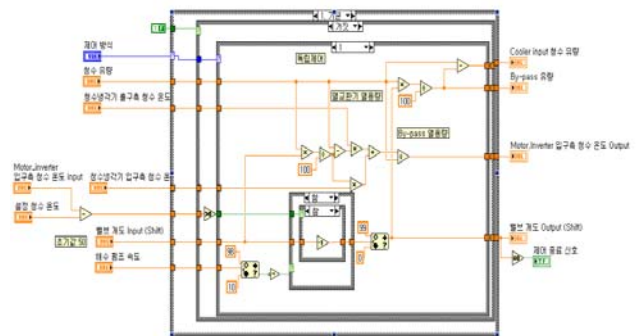


Fig. 9 Block diagram of F.W temperature control valve

2.3.5 냉각수 유량 제어 밸브

냉각수 유량 제어 밸브는 인버터(Inverter)와 전동기(Stator)에 들어가는 냉각수 유량의 비를 제어하는 3-Way valve이다. 동일한 RPM에서 인버터와 전동기의 발열량은 동일하지 않기 때문에 발열량 비에 따라 냉각수 유량 제어 밸브의 개도를 조절함으로써 냉각수 유량을 최적화한다. 다음 Fig. 10은 냉각수 유량 제어 밸브의 위치를, Fig. 11은 냉각수 유량 제어 밸브 다이어그램을 나타낸다.

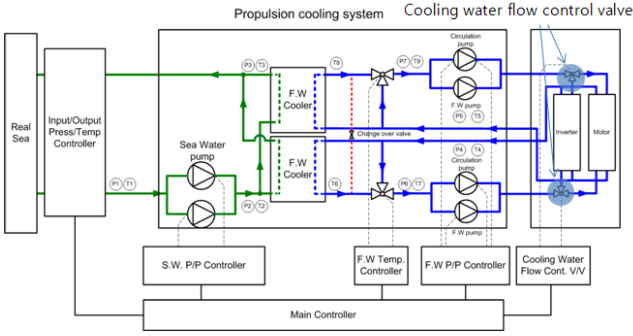


Fig. 10 Cooling water flow control valve

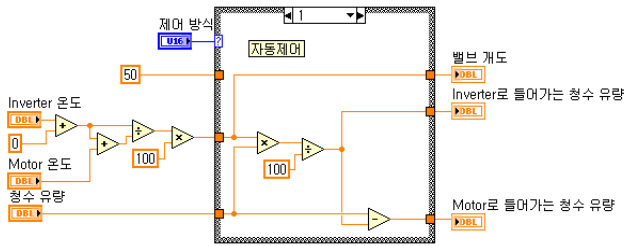


Fig. 11 Block diagram of cooling water flow control valve

3. 시뮬레이션 및 고찰

제안한 알고리즘을 기반으로 설계한 냉각 시스템의 특성을 파악하기 위하여 실제 예측되는 발열량을 효과적으로 냉각할 수 있는 능력을 평가하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 12는 시뮬레이션 제어 화면이다.

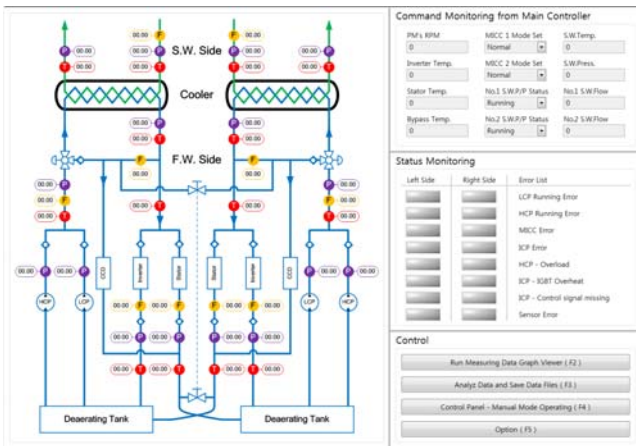


Fig. 12 Simulation program

수중체용 냉각 시스템에 관한 최근 연구 현황은 청수 펌프를 인버터로 제어하는 경우 냉각 효율 향상에 집중되어 있다. 그러나 실제 수중체의 경우 해수 펌프의 용량은 청수 펌프의 몇 배 크기이며, 전력 소비량 또한 이와 비례하여 커진다.

이와 같은 점을 고려하였을 때, 청수, 해수 펌프에 모두 인버터를 이용하여 제어하는 경우 전력 소비량을 감소시킬 수

있을 것으로 예상된다.

본 논문에서는 수중체 냉각 시스템용 ESS 제어 알고리즘을 청수 펌프만 적용한 경우와 청수, 해수 펌프에 모두 적용한 경우 청수, 해수의 필요 유량과 펌프에서의 전력 소비량을 비교하였다. 다음 Table 2는 몇가지 경우에 따른 외부 환경 조건을 정리한 것이다.

Table 2 Experiment case by external condition

Control Algorithm(P/P)	No.	S.W.T	Environmental Condition
S.W Step F.W Non-step (Case1)	1	10℃	S.W Flux - 5~95m ³ /h
	2	20℃	
	3	30℃	
S.W Non-step F.W Non-step (Case2)	4	10℃	F.W Temp - 35~37℃
	5	20℃	
	6	30℃	

시뮬레이션 중에 수중체의 발열부 냉각수(청수) 온도는 35~37℃로 모두 안정화되도록 제어하였다.

다음 그림은 각 시뮬레이션 결과, 유체의 유량과 펌프의 전력 소비량을 그래프로 나타낸 것이다.

그림 13-(a),(b),(c)는 외부 해수 온도 10℃, 20℃, 30℃일 때, 청수 펌프 Non-step 제어(ESS 제어 알고리즘), 해수 펌프 Step 제어(기존 제어 알고리즘)를 적용한 시뮬레이션 결과이다. 청수 펌프는 인버터를 이용하여 Non-step으로 청수 온도에 따라 유량을 적절하게 제어하고 있으며, 해수 펌프는 주기 관의 회전수에 따라 Step으로 유량을 제어하고 있다.

그림 13-(d),(e),(f)은 No.1,2,3과 동일한 외부조건에서 청수 펌프 Non-step 제어, 해수 펌프 Non-step 제어를 적용한 결과이다.

그림 13-(a),(b),(c)와 비교했을 때, 외부 해수 온도 10℃, 20℃에서는 해수 펌프 전력 소모량이 급감하였으며, 외부 해수 온도 30℃에서도 일부 고속 구간을 제외한 나머지 전 구간에서 전력 소모량이 감소하였음을 확인할 수 있다.

그림 13-(a),(b),(c)을 Case1(청수 펌프에 제어 알고리즘 적용), 그림 13-(d),(e),(f)를 Case2(청수, 해수 펌프에 제어 알고리즘 적용)라고 했을 때 소비전력 절감율은 식 (4)와 같이 나타난다.

$$k = \frac{P_{case1} - P_{case2}}{P_{case1}} \times 100 \quad (4)$$

P_{case1} 은 Case1의 전력 소모량을, P_{case2} 는 Case2의 전력 소모량을 뜻하며, k 는 소비전력 절감율이다.

다음 Fig. 14는 RPM과 외부 해수 온도 변화에 따른 소비전력 절감율을 나타낸 것이다.

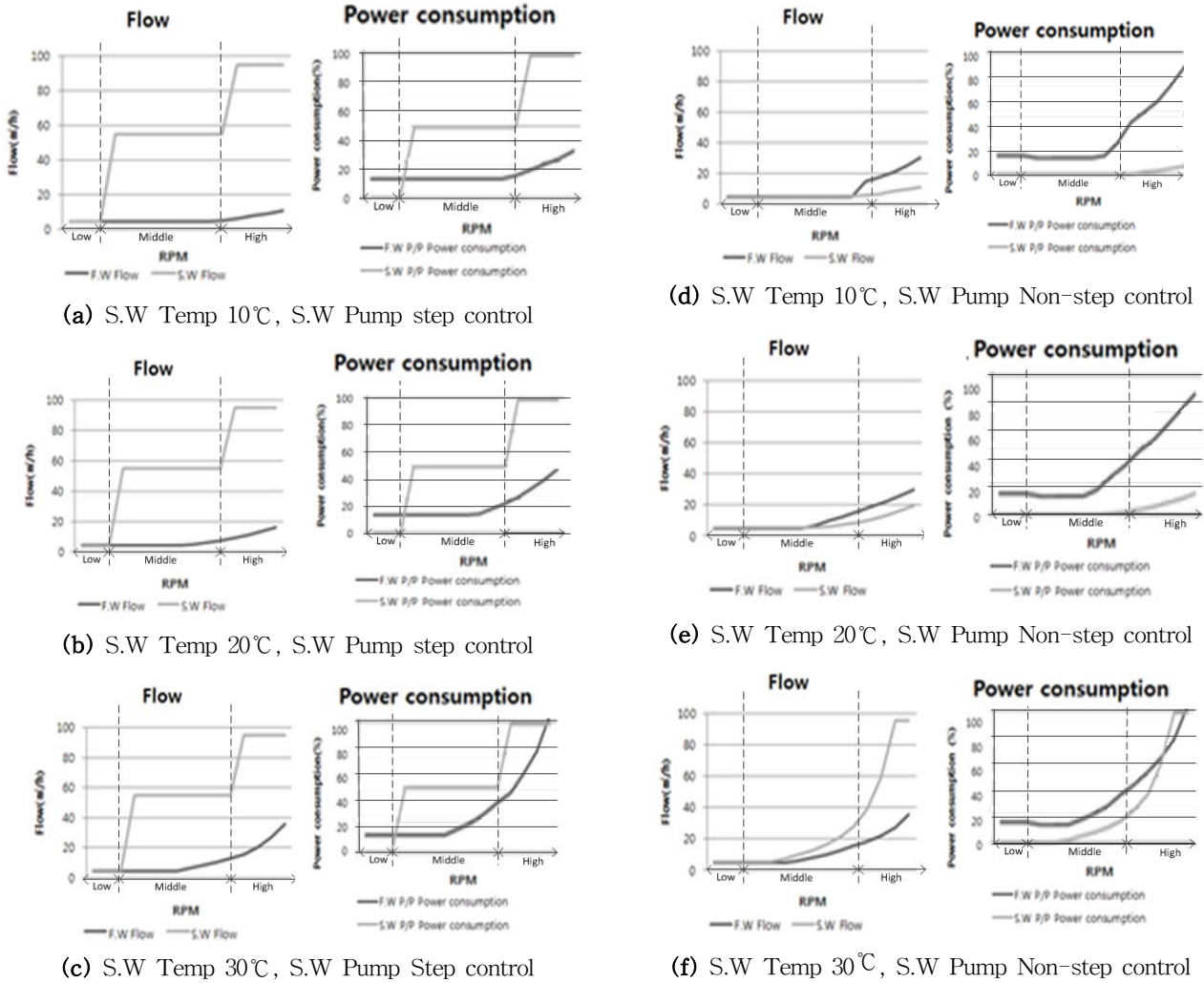


Fig. 13 Flow and power consumption in simulation

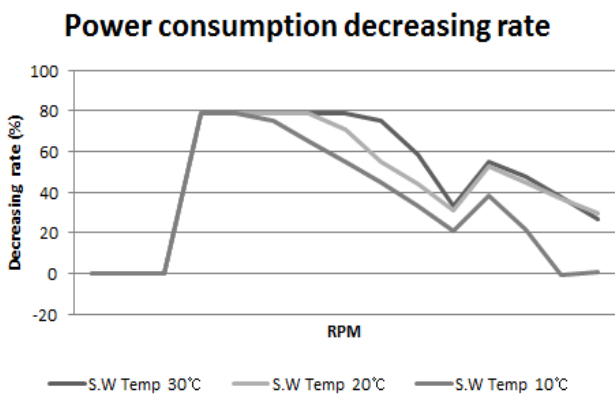


Fig. 14 Power consumption reduction by RPM and S.W Temp

수중체 저속 구간에서는 Case1과 Case2의 전력 소비량은 동일하다. 수중체의 추진전동기를 냉각하기 위해서는 최소한의 유량을 흘려줘야 하기 때문이다. 그러나, 중속 및 고속 구간에는 Case1보다 Case2의 전력 소모량이 낮게 나타남을 확

인할 수 있다.

ESS 알고리즘을 해수펌프에 적용한 Case2의 경우 해수 온도 10°C와 20°C에서 해수유량보다 청수유량이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 청수 펌프에 비해 해수 펌프의 용량이 훨씬 크고, 전력소모량도 많기 때문에 ESS 알고리즘 제어 알고리즘은 청수 유량을 먼저 증가시키고, 이후에 해수 유량을 증가시키기 때문이다. Case2의 해수 온도 30°C의 그래프에서는 청수 유량을 최대한으로 유지해도 발열부 온도를 유지할 수 없기 때문에 해수 유량을 증가시켜서 냉각하는 현상이 나타나고 있다.

Case2의 해수 온도 10°C와 20°C에 비해 30°C에서 전력 소모량이 크게 증가하는 이유는 같은 해수, 청수 유량이 흐르고 있을 때 해수 온도와 설정 온도간의 차가 줄어들수록 열교환량이 기하급수적으로 감소하기 때문이다. 그 결과, 냉각기에서 청수에서 해수로의 열 전달량이 감소하게 되고, 그에 따라 ESS 알고리즘을 적용한 냉각 시스템에서는 해수의 유량을 증가시켜서 청수 온도를 일정하게 유지하도록 한다.

이러한 시뮬레이션 결과는 기존의 제어 알고리즘에서 해수

펌프가 과다 사용되고 있으며, 해수 펌프에 Non-step 제어를 적용함으로써 수중체 냉각 시스템의 전력 소모량을 대폭 감소시킬 수 있음을 예상할 수 있다.

그러나 실제 냉각 시스템의 경우, 수중체 내부 관 길이 및 관내 저항에 의해 펌프 RPM에 따른 유량이 정확하게 비례하지 않기 때문에 실제 펌프 RPM은 일정 값 이하로 낮출 수 없다는 점을 고려하면 실제 전력 절감율은 낮아질 것으로 예상된다.

4. 결 론

실제 수중체 냉각계통과 시뮬레이션은 냉각 청수유량 및 운용조건에서 많은 차이점이 발생한다. 이러한 차이점을 극복할 수 있도록 시뮬레이션 프로그램을 구성하고, 제어 알고리즘을 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다. 수행결과 Case2의 경우 Case1에 비하여 저속 모드에서는 전력 소비량이 동일하나, 중속 및 고속모드에서는 외부 환경에 따라, 전력 소비량이 최대 80%까지 감소함을 알 수 있으며, 실제 수중체 운항과정에서 예측되는 발열량을 충분히 관리할 수 있는 특성을 보이고 있다.

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

참 고 문 헌

- [1] Lazarkiewicz, S, Troskolanski, A. t(1965). "Impeller pumps", PERGAMON PRESS
- [2] LACHI, M. WAKIL N.EL and J.PADET(1997) "The Time constant of double pipe and one pass shell-and-tube heat exchangers in the case of varying fluid flow rates", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 40, No. 9, pp. 2067-2079
- [3] Lee, J.Y, Yoo, H.H, Kim Y.H, Oh, J.S(2007), "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
- [4] Lee, J.W, Lee, J.S and B, W.K(2006), "Performance improvement of A Suspension-Seat Controller Using HILS", The Korean Society of Mechanical Engineers

- [5] Lee, H.S., An, C.M, Jung C.Y, Chun, Y.H, Choi, B.K and Jung, Y.G(2004), "Development of digital governor by HILS system for a small diesel engine", The Korean Society for Power System Engineering, Daejon, Republic of Korea

원고접수일 : 2011년 5월 25일

심사완료일 : 2012년 2월 23일

원고채택일 : 2012년 2월 24일