

함정 추진디젤기관의 고효율 해수냉각시스템에 관한 연구

강병수¹ · 임용수² · 조관준[†]

(Received October 21, 2014 ; Revised April 21, 2015 ; Accepted May 8, 2015)

A Study of the High Efficiency Sea Water Cooling System for the Propulsion Diesel Engine of Warships

Byoung-Soo Kang¹ · Young-Soo Lim² · Kwan-Jun Jo[†]

요약: 최근 대두되는 선박배기가스 저감 등의 환경정책으로 인하여 에너지의 효율적 이용에 관심이 증가하고 있다. 본 논문에서는 함정의 에너지 효율 향상을 위하여 사용 부하에 따라 해수펌프를 제어하는 고효율 해수냉각시스템을 제안한다. 본 논문에서는 제안하는 시스템의 효과를 알아보기 위하여 추진 디젤기관의 냉각시스템을 모델링 하고 함정 운항 특성을 고려한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 제안한 고효율 해수냉각시스템이 기존 해수냉각시스템에 비하여 약 53%의 에너지 절감효과가 있었다. 본 연구 결과는 향후 함정 추진 디젤기관의 해수냉각시스템의 성능 향상에 유용한 자료로 활용될 수 있다.

주제어: 해수냉각시스템, 디젤엔진, 시뮬레이션, 에너지 효율

Abstract: Recently, there has been increasing interest in the efficient use of energy due to policies related to the reduction of greenhouse gas. This paper suggests a highly efficient sea water cooling system for the load-dependent control of a seawater pump depending on the load, to improve energy efficiency of the warship. This study models the propulsion diesel engine and simulation reflecting the characteristics of the warship operation state that checked the performance of high efficiency sea water cooling system. The simulation results revealed the cooling system of high efficiency with energy savings of approximately 53% compared to the existing cooling systems. These results can be used to improve the performance of the cooling system of the warship propulsion diesel engine in the future.

Keywords: Sea water cooling system, Diesel engine, Simulation, Energy efficiency

1. 서론

오늘날 에너지 절감과 효율 향상의 문제는 모든 산업 분야에서 주요 관심사항이다. 특히 대형 선박의 경우 연료유 저감을 위한 엔진의 효율향상과 시스템의 개선을 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 그러나 디젤엔진 시스템의 에너지 효율향상은 한계에 도달해 있다 [1][2].

함정은 전투임무를 수행해야 하기 때문에 탑재되는 시스템은 경제적 운용보다는 안정성을 더 중요하게 취급하고 있다. 그러나 최근에는 해군 함정이 대형화되고 엔진의 출력이 증가함에 따라 연료유 소비의 증가로 인하여 함정 유지비용이 급격히 상승하고 있다 [3]-[6].

함정 추진 디젤기관의 냉각시스템은 해수펌프를 사용하

여 전체 기관시스템을 냉각하는 구조이며, 해수펌프를 직접 제어하기 보다는 열교환기로 공급되는 해수 유량을 3-Way 밸브를 통하여 제어하는 방식을 사용하고 있다. 기존의 냉각방식은 해수온도가 낮거나 디젤기관의 냉각부하가 적더라도 냉각시스템을 운용하는 해수펌프의 소요되는 동력의 양은 변화하지 않는다.

본 논문에서는 함정 디젤기관의 사용부하에 따라 해수펌프를 제어하는 고효율 해수 냉각시스템을 제안하고자 한다. 고효율 해수냉각시스템의 적용 효과를 알아보기 위하여 디젤기관의 냉각시스템을 수학적으로 모델링하고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 동일한 환경과 운항 조건에서 기존 해수냉각시스템과 고효율 해수냉각시스템의 효과를 비교하였다.

[†]Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5623-0097>): The 2nd Busan Team, Defence Agency for Technology and Quality, 1000, Bangeojinsunwhan-doro, Dong-gu, Ulsan 682-792, Korea, E-mail: jkj@dtaq.re.kr, Tel: 052-202-0981

1 The 1st Busan Team, Defence Agency for Technology and Quality, E-mail: kangbsoo@dtaq.re.kr, Tel: 051-750-2513

2 The 2nd Busan Team, Defence Agency for Technology and Quality, E-mail: ysulim@naver.com, Tel: 052-202-0068

2. 추진 디젤기관의 해수냉각시스템

2.1 기존 추진 디젤기관의 해수냉각시스템

함정 추진 디젤기관의 냉각부하는 함정 추진속도에 따라 비례한다. Figure 1은 해군에서 가장 많이 적용되고 있는 디젤추진기관인 MTU 디젤엔진의 해수냉각시스템의 구조를 나타낸 것이다[7].

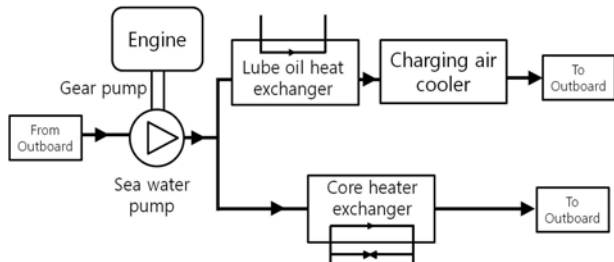


Figure 1: A structure of the cooling system for a diesel engine

해수공급펌프는 엔진 구동축에 연동된 기어펌프 구조이다. 엔진은 추진속도에 비례하여 냉각부하가 증가하게 되므로 냉각시스템의 설계는 해수온도가 가장 높은 온도에서 엔진의 최대부하를 감당할 수 있도록 설계되어 있다.

2.2 추진 디젤기관의 고효율 해수냉각시스템

디젤기관에 대한 출력은 일반적으로 ISO 3046에 따라 정의되며 이때 해수온도는 통상 32℃를 기초로 설계 및 시험되고 있다[8]. 그러나 적도지역을 제외한 일반적인 해역의 경우 해수온도는 32℃ 보다 낮으므로 실제 해수온도와 설계치와의 차이에 따라 그만큼 냉각되는 열부하의 온도차가 커지면서 냉각되는 열량이 증가하게 된다.

기존 함정 추진 디젤기관의 해수펌프는 엔진 속도의 변화에 따라 펌프의 속도가 변화되므로 해수의 유량 변화는 오직 엔진 부하량에만 영향을 받도록 되어 있다. 그러나 추진 디젤기관의 고효율 해수냉각시스템은 청수온도 및 유허유 온도, 흡입공기 온도에 따라 해수펌프의 속도를 제어하는 시스템이다. 따라서 해수온도가 낮아짐에 따라 증가하는 냉각량 만큼 해수유량을 감소시키면 해수펌프에서 소모되는 전력소모량은 줄어들게 될 것이다.

Figure 2는 제안하는 함정 추진 디젤기관의 고효율 냉각시스템을 나타낸 것이다. 제어시스템은 각 부분의 열원을 바탕으로 해수 펌프의 속도를 제어하도록 구성되어 있다.

Figure 3은 제어알고리즘을 나타낸 것이다. 제어알고리즘에서 제어의 순서는 엔진의 열부하량과 비열등을 고려하여 부하에 따라 온도의 변화가 크게 발생하는 유허유 온도, 흡입공기 온도, 청수 온도 순서이다. 해수펌프의 속도제어는 기준 속도를 제어알고리즘에서 계산하고 PID 제어를 통하여 속도를 제어하도록 하였다. 제어알고리즘은 유허유, 흡입공기, 청수의 온도를 모두 만족하는 범위에서 해수 펌프의 속도를 감소시키며 해수펌프를 최소 운전 속도 이하로 구동되지 않도록 하였다.

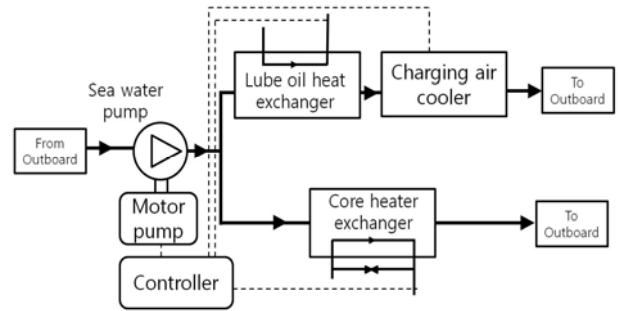


Figure 2: A structure of the high efficiency cooling system for a diesel engine

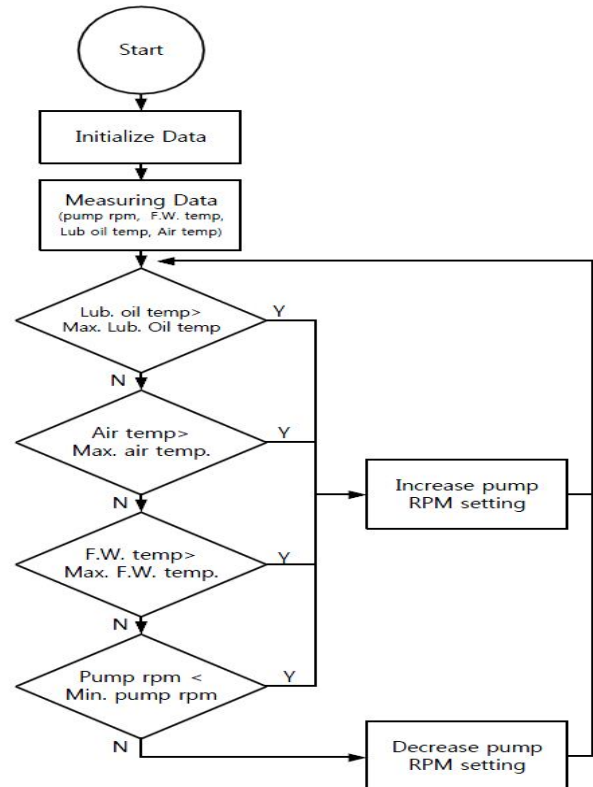


Figure 3: A control algorithm of high efficiency cooling system

고효율 해수냉각시스템의 제어목표는 디젤엔진의 운용 부하에 따라 최소 해수유량을 공급함으로써 해수펌프 구동에 소요되는 전력량을 최적화하여 냉각시스템의 에너지 효율을 높이고자 하였다.

3. 시뮬레이션

3.1 해수냉각시스템 모델링

추진 디젤기관에서 해수냉각시스템의 모델은 크게 열교환기, 해수펌프, 냉각열원으로 구분할 수 있다. 시뮬레이션 모델에서의 유체는 배관내 압력손실 및 관로 저항이 없는 이상적인 유체로 가정하였다. 또한 열교환기의 열교환 효율은 해수유량 변화에 따라 변화하지만 시뮬레이션에서는 고정값으로 각 부분에서 발생하는 열량이 모두 해수로 전

달되는 것으로 가정하였다.

3.1.1 열교환기 모델

열교환기의 구조는 복잡한 형태이지만 단순화하여 살펴 보면 Figure 4와 같다.

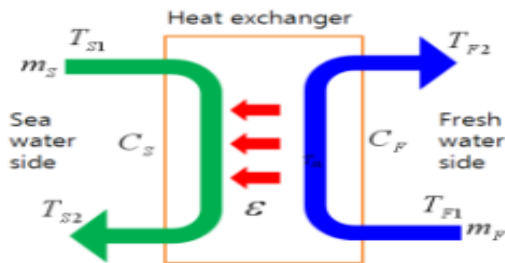


Figure 4: Heat exchanger model of fresh water

해수 유량 m_s , 해수 입구온도 T_{s1} , 해수 출구온도 T_{s2} , 해수 비열 C_s , 청수 유량 m_f , 청수 입구온도 T_{f1} , 청수 출구 온도 T_{f2} , 청수 비열 C_f 이다. 열교환기가 외부와의 열교환은 미비함으로 이를 무시하면 식 (1)과 같이 정의 할 수 있다[1][2].

$$Q_h = m_s C_s (T_{s1} - T_{s2}) = m_f C_f (T_{f2} - T_{f1}) \quad (1)$$

열교환기의 열교환 효율은 일정하고 1차측에서 발생하는 열량이 모두 2차측으로 전달된다고 가정하여 모델을 구성 하였다. 청수측의 온도는 열원에서 발생하는 열량을 모두 해수측으로 전달되기 때문에 일정하게 유지되고 해수측의 온도는 전달되는 열량에 따라 온도가 상승하게 된다.

윤활유와 흡입공기도 청수의 열교환기와 같이 열원에서 발생하는 열량을 모두 해수로 전달한다고 가정하면 식 (2)와 같다[1][2]. Q_{Lo} 는 윤활유 냉각기에서의 발열량, Q_{air} 는 흡입공기의 발열량, T_{s3} 는 윤활유 냉각기의 해수 입구온도, T_{s4} 는 윤활유 냉각기 해수 출구온도이면서 흡입공기 냉각기 해수 입구온도, T_{s5} 는 흡입공기 냉각기 해수 출구온도를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} Q_{Lo} &= m_{s1} C_c (T_{s4} - T_{s3}) \\ Q_{air} &= m_{s1} C_c (T_{s5} - T_{s4}) \end{aligned} \quad (2)$$

3.1.2 해수펌프 모델

일반적으로 함정 추진 디젤기관에서 사용하는 해수펌프는 원심펌프이므로 상사법칙을 적용하면 동력비는 식 (3)과 같다. 이때 유량 Q 에 대한 회전수는 n , 회전차 직경은 D , 동력은 P , 양정은 H , 펌프 효율은 η_p 이고 변화량은 첨두점으로 표현하였다.

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

식 (3)에서 회전수와 유량, 동력은 비례관계에 있는 것을

알 수 있다. 시뮬레이션 모델에서 양정과 펌프의 효율은 회전수에 의하여 변화하지만 일정하다고 가정하였다.

3.1.3 냉각열원 모델

추진 디젤기관의 냉각열원 모델은 해군에서 가장 많이 사용하고 있는 MTU 디젤엔진의 설계값을 사용하였다. Table 1은 MTU 디젤엔진의 해수 냉각유량 및 발생열량을 나타낸 것이다[7]. 엔진에서 발생하는 발열량은 엔진 속도에 선형적으로 변화한다고 가정하였다. 또한 기존 해수냉각시스템의 기어구동 해수펌프 유량은 디젤엔진의 속도에 비례하여 변화하는 것으로 가정하였다.

Table 1: Design values of the cooling system for a diesel engine (MTU12V1163TB83)

Item	Value
Raw water pump: flow rate	220~180 [m ³ /h]
Raw water : flow rate	100~80 [m ³ /h]
flow rate through intercooler	120~100 [m ³ /h]
Heat dissipated by engine coolant	1410 [kW]
Charge-air and oil heat dissipation	2050 [kW]
radiation and convection heat engine	85 [kW]
Coolant temperature	32 [°C]

3.2 시뮬레이션 환경

디젤기관의 해수냉각시스템은 기본적으로 해수 온도 3 2°C를 기준으로 하여 최대유량으로 열 부하를 감당할 수 있도록 구성된다.

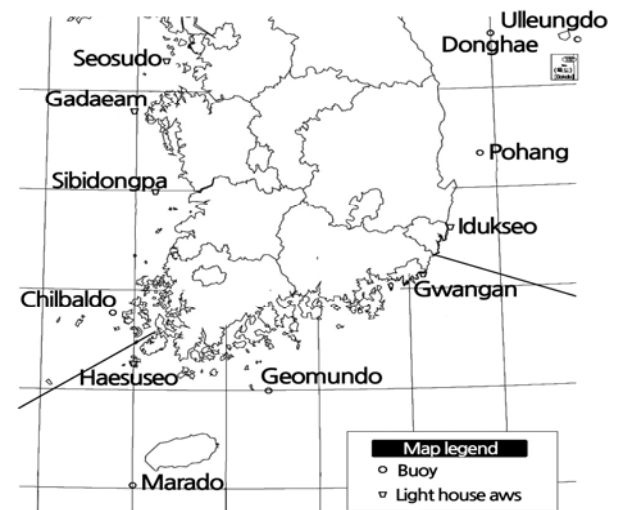


Figure 5: Measuring points of sea water temperature

Figure 5는 우리나라 해역에서 기상청이 측정하는 월별 해수 온도 측정 위치를 나타낸 것이고, Figure 6은 각 측정 위치에서의 해수 온도를 나타낸 것이다. 한국 근해의 해수 온도는 32°C 보다 낮은 범위에서 형성되며 계절에 따라 크게 변화함을 알 수 있다[7].

함정 추진 디젤기관의 열부하는 함정의 추진속도에 따라 변화하게 된다. 함정의 속도가 증가하게 되면 추진 디젤기관의 발열량이 커지게 되며 엔진을 냉각해야 하는 냉각수량도 그 만큼 증가하게 된다.

Figure 7은 연간 함정의 운항속도에 따른 시간 비율을 속도별로 나타낸 것으로 함정은 0~30%의 운용속도에서 전체 운용시간의 약 56%로 운용되는 것을 알 수 있다[3]-[5].

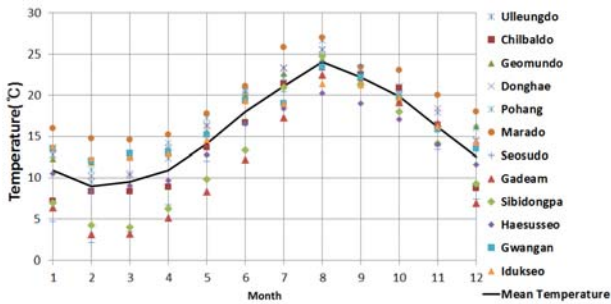


Figure 6: The graph of monthly sea water temperature (2012)

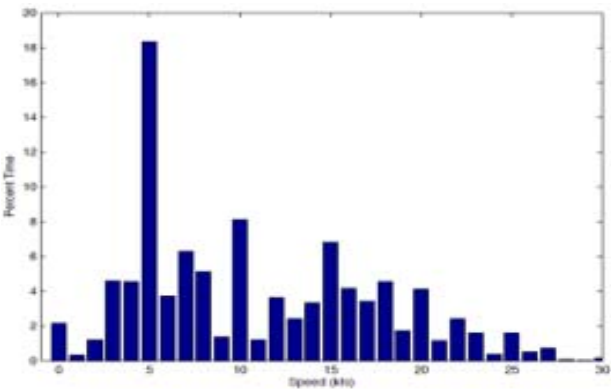


Figure 7: Percent time of propulsion speed (DDG-51)

3.3 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션 프로그램은 LabVIEW를 이용하여 각 시스템을 모델링 하였다. 시뮬레이션은 동일한 환경과 함운용 조건에서 기존의 추진 디젤기관 해수냉각시스템과 제안하는 추진 디젤기관의 고효율 해수냉각시스템에서 각각 소모되는 해수펌프의 동력량 차이를 나타내고자 하였다. Figure 8은 시뮬레이션 프로그램의 사용자 인터페이스이고, Figure 9는 프로그램 내부를 나타낸 것이다.

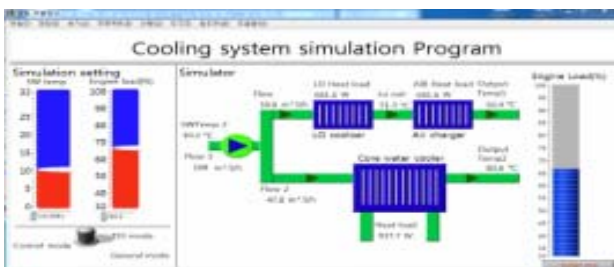


Figure 8 : The front panel of cooling simulation program

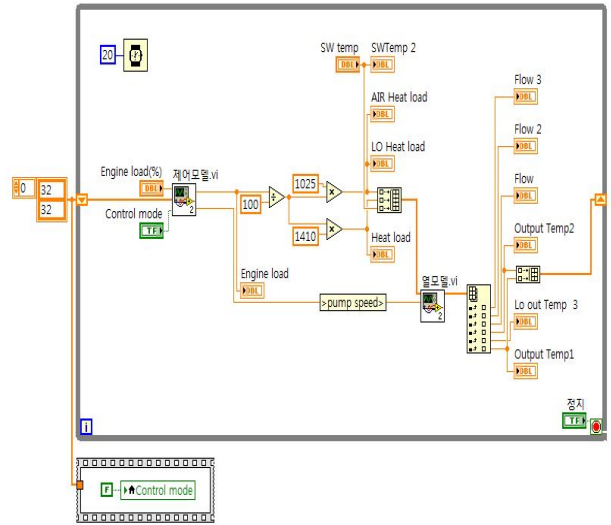


Figure 9 : The front panel of cooling simulation program

기존 해수냉각시스템과 고효율 해수냉각시스템에서 해수온도 및 열부하율에 따른 해수 유량을 나타내면 Figure 10과 같다. 기존 냉각시스템은 일정속도 범위에서 추진 디젤엔진 속도에 비례하여 유량을 제어하지만, 고효율 해수 냉각시스템은 해수의 온도 및 발생열량에 따라 유량을 제어한다. Figure 10에서 보면 고효율 해수냉각시스템이 기존 해수냉각시스템에 비하여 해수유량이 상당히 적은 것을 알 수 있다.

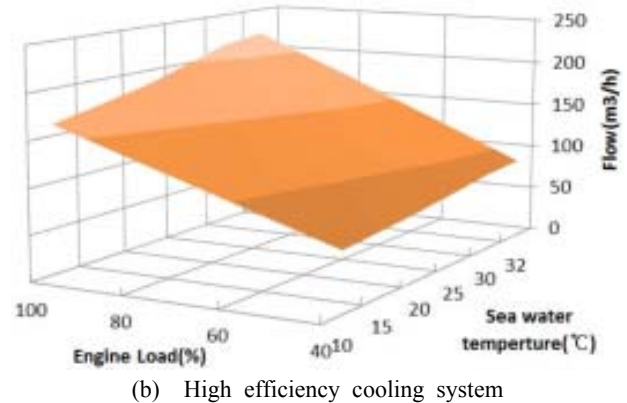
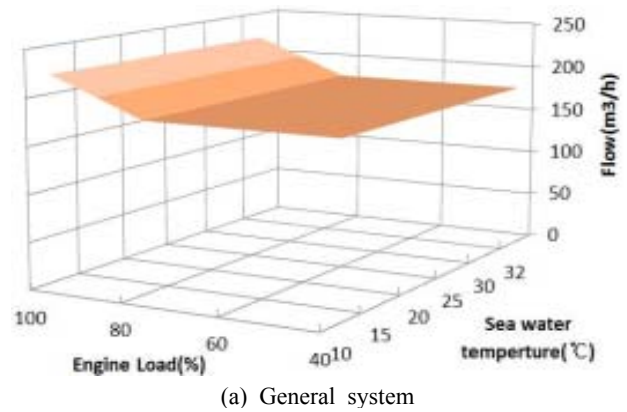


Figure 10: Flow rates of cooling system

Figure 10의 결과를 함 운용조건과 한국 근해의 해수온도 변화를 고려하여 해수펌프의 전력소모량을 나타내면 Figure 11와 같다. 기존시스템과 고효율 해수냉각시스템을 비교하였을 때 고속에서는 차이가 없지만 저속에서는 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다.

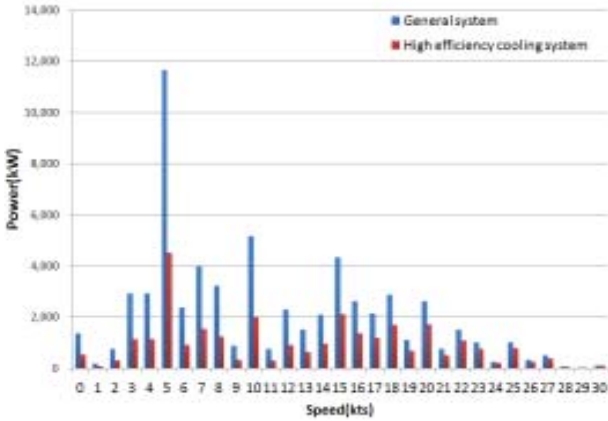


Figure 11: A graph of the monthly power consumption

식 (4)는 펌프에서 소모되는 전력소모량을 나타낸 것이다[1][2]. 각 월별 속도에 따른 해수유량을 $Q(m, s)$, 속도별 운영 시간을 T_s , 펌프의 동력 변환 계수를 k , 펌프의 연간 전력소비량을 P_y 로 표현하였다. 이때 양정은 펌프의 유량과 무관하게 일정하다고 가정하였다.

$$P_y(kWh) = \sum_{s=1}^{30} \left(\sum_{m=1}^{12} (T_s \times Q(m, s)) \right) \times k \quad (4)$$

식 (4)를 통하여 펌프에서 소비되는 전력량을 계산하여 시간당 전력 소비량으로 환산하면 기존 해수냉각시스템은 시간당 7.27kWh이고, 고효율 해수냉각시스템은 시간당 3.3kWh이다. 따라서 시뮬레이션 상에서 고효율 냉각시스템이 기존 시스템에 비하여 53.6%의 전력 저감효과를 갖는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 추진 디젤기관의 고효율 해수냉각시스템을 제안하였다. 고효율 해수냉각시스템은 해수 온도와 엔진 부하에 따른 해수펌프의 유량을 제어하는 시스템이다. 본 시스템의 특성을 분석하기 위하여 수학적으로 디젤엔진의 해수냉각계통을 모델링하고 한국근해의 해수 온도와 함정의 운항 특성을 고려하여 시뮬레이션을 수행한 결과 고효율 해수냉각시스템이 기존 시스템에 비하여 약 53.6% 정도 전력이 저감되는 것을 확인하였다. 통상 함정에는 2대 또는 4대의 추진 디젤기관이 탑재되는 것을 고려할 때 고효율 해수냉각시스템의 경제성은 매우 클 것으로 판단된다.

향후에 고효율 해수 냉각시스템을 실제함정에 적용하기 위하여 소규모 냉각플랜트 시험이 추가적으로 필요하며,

시험데이터를 바탕으로 제어알고리즘 및 효율성에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

References

- [1] J. S. Oh and M. K. 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 (in Korean).
- [2] Y. H. Kim, S. Y. Bae, S. Y. Jung, and J. S. Oh. "Study on the electric energy saving system in marine cooling system," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 8, pp. 1157-1163, 2008 (in Korean).
- [3] T. McCoy, J. Z. N. W. Johanson, F. A. Puhn, and T. W. Martin, "Hybrid electric drive for DDG-51 class destroyers," American Society of Naval Engineers Journal, vol. 119, no. 2, pp. 83-91, 2007.
- [4] D. Alexander, T. Lo, J. Bravo, and Y. Fleytman, "Integrated main reduction gears for hybrid drive surface ship application," Proceedings of Electric Ship Technologies Symposium (2011 IEEE), pp.345-352, 2011.4.
- [5] D. McMullen and T. Dalton, "Hybrid electric drive-enhancing energy security," Proceedings of Maritime System and Technologies Americas conference, 2011.
- [6] F. T. Willett, G. Reed, and G. Castles, "Economic benefits of hybrid drive propulsion for DDG-51 class ships," Proceedings of ASME Turbo Expo 2008 vol. 7, pp. 377-385, 2008.
- [7] STX Engine, STX-MTU Diesel Engine (12V 1163TB83) Working Drawing, Korea, 2010.
- [8] Korea Meteorological Administration, Monthly Report of marine data, 2012, http://www.kma.go.kr/repository/sfc/pdf/marine_mon_201203.pdf Accessed April 10, 2014.