

엔진 폐열을 이용한 소형담수화장치의 실험적 연구 Experimental Study of a Small Desalination Device Using Engine Waste Heat

이임경(Imkyeong Lee), 고희수(Gwang Soo Ko)*, 박윤철(Youn Cheol Park)**†

제주대학교 기계공학전공 석사과정, *제주대학교 연구원, **제주대학교 기계공학전공 교수
Graduate Student, Major of Mechanical Engineering, Faculty of Applied Energy System, Jeju National University, 102 Jejudaeahak-ro, 63243, Korea

*Researcher, Industry-Academic Cooperation Foundation, Jeju National University, 102 Jejudaeahak-ro, 63243, Korea

**Professor, Major of Mechanical Engineering, Jeju National University, 102 Jejudaeahak-ro, 63243, Korea

Abstract

Desalination has the advantage of being easy to supply water resources. However most desalination devices are developed mainly for large plants and it is not common to use desalination system for a small fishing ship. More than 50% of the input fuel energy of the small shipbuilding's engine is wasted without reused in a ship, and it is necessary to improving the fuel efficiency of the small fishing ship. In this study, a desalination device using waste heat from engine of the ships was developed. As results, it was found that if the condensing chamber uses a fan to circulate the water vapor, the freshwater production was up to 40.0% higher, and the freshwater production efficiency was up to 30.1% increased when the fan was operated.

Key words: Desalination(담수화), Seawater(해수), Waste heat(폐열), Small shipbuilding(소형선박), Vacuum(진공), Heat exchanger(열교환기)

†Corresponding author

E-mail: ycpark@jejunu.ac.kr

접수일: 2022년 2월 10일; 심사일: 1차:2022년 2월 21일, 2차:2022년 2월 28일; 채택일: 2022년 2월 28일

기호 설명

W : 진공펌프 소비동력 [kW]

Q : 공급열량 [kW]

D : 담수화 생산량 [L/h]

그리스 문자

η : 담수생산효율 [L/kWh]

η_{th} : 담수생산열효율 [L/kWh]

1. 서 론

담수화란 해수 내 염분을 포함한 용해물질을 제거하는 것으로 순도 높은 담수(생활용수, 음용수 및 공업용수 등)를 얻어내는 일련의 수 처리 과정을 말한다. 해수담수화는 빗물이나 지하수 등을 이용한 다른 담수화 방법들에 비해 해수를 담수화하기 때문에 수자원의 공급이 매우 용이하다[1].

담수화는 크게 해수의 상변화를 이용하는 방법과 분리막에 여과를 시키는 방법으로 구분할 수 있다. 상변화를 이용하는 방법에는 해수를 끓인 뒤 생기는 증기를 응축시키는 방식인 증발법(Distillation)에는 다중효용법(Multiple Effect Distillation), 다단프레쉬법(Multi-Stage Flash Distillation), 냉동법(Freezing Process) 및 기체를 단열 압축하여 기체의 압력과 온도의 상승으로 인해 고온에서 응축하는 원리를 이용한 증기압축법(Vapor Compression Distillation)이 있다. 분리막의 여과를 이용하는 방법은 삼투현상을 역으로 이용하여 해수를 반투막(Semi-permeable Membrane)에 통과시키는 역삼투법(Reverse Osmosis, RO)외에도 전기투석법(Electrodialysis) 및 정삼투법(Forward Osmosis) 등이 있다[2]. 그러나 분리막을 통과하는 해수의 전처리와 필요하며, 분리막이 오염될 경우 담수생산이 안 된다는 문제점이 있다. 또한, 대부분의 담수화 방법들은 대용량 담수화 플랜트 위주로 발전되어져 소형 담수화 플랜트의 적용이 어렵고, 선박 및 해상플랜트용 조수기의 경우 선진국에 비해 부족한 기술축적으로 대부분 수입에 의존하기 때문에 수입대체를 위한 국내 기술의 개발 또한 중요하다[3,4].

본 연구는 선박엔진의 냉각을 위해 수냉식 워터재킷을 이용할 때 회수되는 폐열을 이용하여 해수를 증발시키고, 생성된 수증기를 송풍팬을 통하여 수증기 냉각기에 공급하여 담수를 획득하는 담수화 장치의 성능개선을 위한 연구를 수행하였다. 이때 수증기 냉각기는 선박 외부의 해수를 열교환기에 유입시켜 냉각효과를 얻도록 하였으며, 기존의 증발식 담수화 장치의 열효율이 매우 낮은 문제점을 해결하여 폐열의 활용효율을 높이며, 선박의 식수 해결에도 큰 도움을 줄 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 해양조업 시 필수적인 식수구매로 인한 경상비를 줄일 수 있고, 출항할 때 담수적재를 줄여 어선의 무게를 감소시켜 연료비 절감효과를 기대할 수 있다. 본 논문에서는 송풍팬의 운전 여부에 따라 폐열의 열원 온도, 해수의 양 및 초기압력을 달리했을 때 나타나는 담수생산 효율, 담수생산 열효율 및 담수 생산량에 관하여 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 소형선박의 엔진폐열을 활용한 소형담수화 장치를 제작하였다. 전체적인 구조는 Fig.1의 개략도와 같으며, 두께는 4 mm, 가로, 세로, 높이의 길이는 각각 3,000 mm, 3,000 mm, 4,000 mm이며, 해수용량은 36 L인 진공 챔버를 제작하였다. 제작된 소형담수화장치의 형상은 Fig. 2 및 Table 1과 같다.

해수와 열교환하는 폐열 열교환기는 나관식의 열교환기 형상으로 하였고, 해수에서 증발한 수증기를 응축시키기 위한 응축열교환기는 췌에 의해서 수증기의 유동이 발생함에 따라 흰(Fin Tube)을 부착한 열교환기(Fin Tube) 형상으로 제작하였다. 열교환기의 용량은 LMTD와 ϵ -NTU을 이용하여 설계를 진행하였다[5].

본 연구의 담수생산 효율은 소비동력에 대한 담수생산량으로 식 (1)과 같으며, 이 때 열효율은 공급열량에 대한 담수생산량으로 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$\eta = \frac{D}{W} \quad (1)$$

$$\eta_{th} = \frac{D}{Q} \quad (2)$$

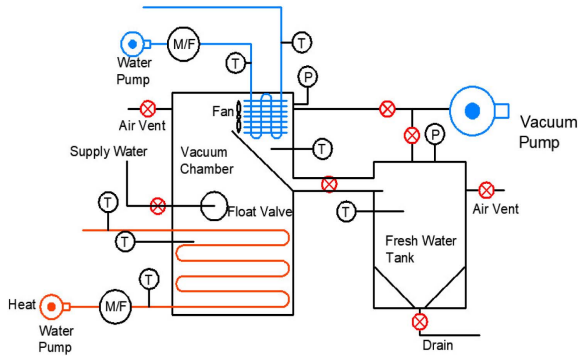


Fig. 1. Schematic diagram of small desalination device



Fig. 2. Small desalination device

Table 1. Specification of the small desalination device

Component		Specification
Temperature	Type	T-type
	Range	-200 ~ 400°C
	Accuracy	± 2%
Pressure	Pressure Range (Absolute)	0 ~ 25 PSI
	Accuracy	± 0.13%
Mass flow rate	Range	3 ~ 20 LPM
	Accuracy	± 1% FS
Power meter	Bandwidth	DC 0.5 ~ 300 kHz
	Accuracy	± 0.1%
Vacuum pump	CFM	6
	RPM	1,725

2.2 진공압력 유지시간 및 예열실험

소형담수화장치의 진공압력 유지시간을 확인하기 위한 실험을 진행하였으며, Fig. 3은 시간에 따른 소형담수화장치 내부 진공압력의 변화를 나타낸 그래프이다. 진공압력 유지시간은 진공펌프를 운전하여 소형담수화장치 내부 압력을 600 mbar까지 낮춘 후 대기 압력까지 압력이 상승하는데 걸리는 시간을 측정하였으며, 총 1시간 44분 동안 진공압력을 유지하였으나, 소형담수화장치 내부 진공압력 유지 경향은 처음 진공펌프가 운전된 후 약 10분간 소형담수화장치 내부 압력이 급격하게 상승하다 약 10분 이후부터는 압력 상승폭이 감소하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4(a)는 시간에 따른 소형담수화장치 내부의 해수온도 변화를 나타낸 그래프이며, Fig. 4(b)는 시간에 따른 예열열량의 변화를 나타낸 그래프이다. 소형담수화장치 내부의 해수온도가 가열된 뒤 온도가 유지되기 시작하는 시점인 정상상태로 운전되기 전에 필요한 예열(Pre-Heat)실험을 위해서 소형담수화장치의 해수 양을 25 L, 27 L 및 30 L로 채운 후 폐열 열교환기로 흐르는 고온수의 온도가 80°C인 상태에서 소형담수화장치의 예열열량을 측정하였다. 실험을 통해 소형담수화장치 내부의 해수온도는 정상상태에 도달하기 위해서는 25 L 용량의 물은 3.482 kW의 열량이 필요하며, 27 L 용량의 물은 3.354 kW의 열량이 필요하

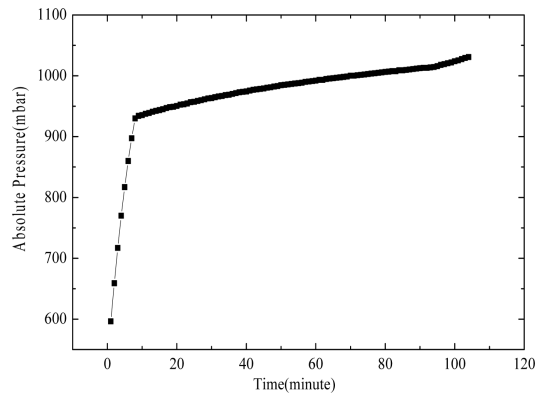


Fig. 3. Changes of vacuum pressure inside small desalination device according to time

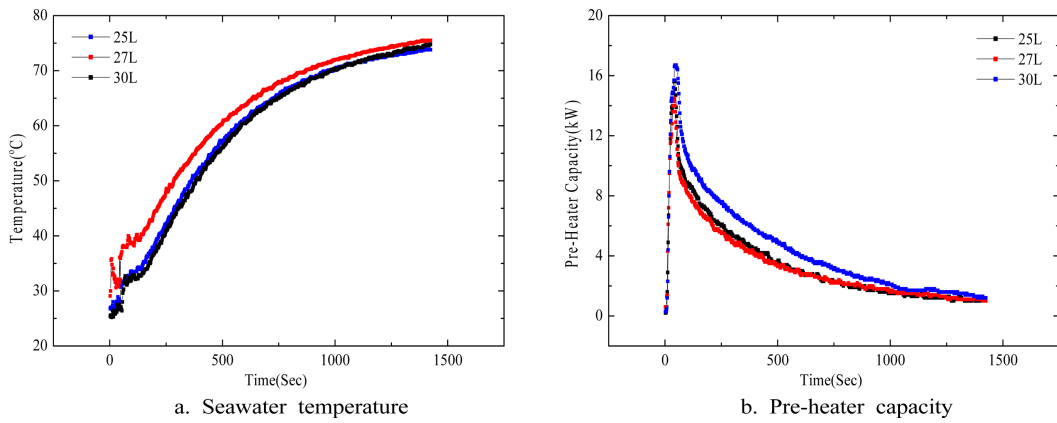


Fig. 4. Changes of small desalination device according to the amount of seawater

고, 30 L 용량의 물은 4.422 kW의 열량이 필요한 것을 알 수 있었다.

담수화장치의 초기압력을 400 mbar, 500 mbar, 600 mbar, 700 mbar 및 800 mbar로 변화시켰을 때의 시간에 따른 소형담수화장치의 내부 압력 변화를 나타낸 그래프는 Fig. 5와 같다. 실험을 통해 초기압력이 낮을수록 진공펌프의 운전시간은 길어지지만 운전 사이클은 짧아진다는 것을 알 수 있고, 초기압력이 높을

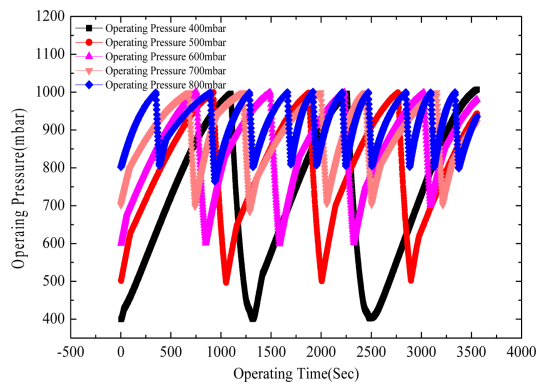


Fig. 5. Internal pressure change of small desalination device according to time

Table 2. Test conditions

Heat source temperature of waste heat (°C)	Amount of seawater (L)	Initial pressure (mbar)	Fan operation
80	25	400	ON/OFF
		500	
		600	
		700	
		800	
	27	400	
		500	
		600	
		700	
		800	
	30	400	
		500	
		600	
		700	
		800	

수록 진공펌프 운전시간은 짧아지지만, 운전 사이클은 자주 발생한다.

2.3 실험조건

소형담수화장치 내부에 해수 양을 25 L, 27 L 및 30 L로 채운 후 소형담수화장치의 내부 초기 운전압력을 400 mbar, 500 mbar, 600 mbar, 700 mbar 및 800 mbar의 경우에 대해서 담수화 생산량을 측정하였으며, 담수화장치 내부에 설치한 송풍 팬(Fan)에 따른 담수화 생산량의 효과를 알아보기 위해서 동일한 조건에서 송풍팬을 운전한 경우와 정지한 경우의 비교실험도 진행하였다. 성능실험의 경우 소형담수화장치를 1시간 동안 운전하여 담수화 생산량을 측정하였다. 운전모드별 실험조건을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

3. 실험결과

개발된 소형담수화장치의 성능을 평가하기 위하여 상기의 실험조건에서 진공 챔버내에 설치한 수증기의 순환용 팬의 운전유무에 따른 담수화 시스템의 담수효율과 에너지 사용량 등을 평가하였다.

3.1 송풍팬을 운전할 때 담수장치의 성능

Fig. 6은 송풍팬을 운전하였을 때 소형담수화장치 내부의 초기압력을 변화시켰을 때의 해수용량에 따른 각각의 변화를 그래프로 나타내었다. Fig. 6(a)은 해수용량 변화에 따른 담수화장치에 공급되는 고온수의 증발열량 변화를 나타낸 것으로써, 해수용량이 25 L이고, 초기압력이 가장 낮은 400 mbar일 때의 공급되는 열량은 1.18 kW이며, 초기압력이 800 mbar인 경우에는 0.851 kW의 열량이 해수로 공급되었음을 알 수 있다. Fig. 6(b)은 해수용량 변화에 따른 담수화장치에서 발생된수증기를 응축시키기 위해 공급되는 냉각수의 응축열량 변화를 나타낸 그래프이다. 해수용량이 25 L이고, 초기압력이 가장 낮은 400 mbar일 때의

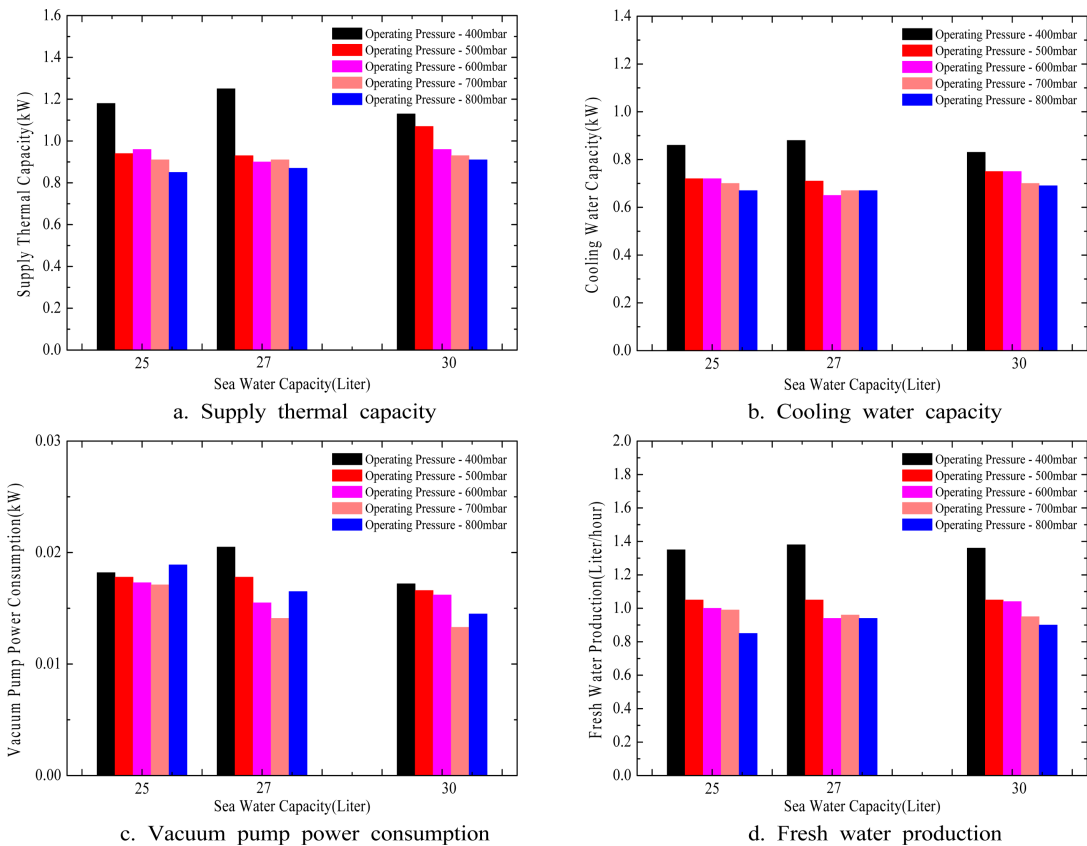


Fig. 6. Changes according to internal pressure of the small desalination device when the fan is operation

공급되는 냉각수의 응축열량은 0.86 kW이며, 초기압력이 800 mbar인 경우에는 0.673 kW의 냉각수가 수증기를 응축시켜 담수화를 생산하기 위해서 공급되었다. Fig. 6(c)은 해수용량 변화에 따른 진공펌프 운전 시의 진공펌프 소비동력을 나타낸 것으로서, 해수용량이 25 L이고, 초기압력이 가장 낮은 400 mbar일 때의 진공펌프 소비동력은 0.0182 kW이며, 초기압력이 800 mbar인 경우에는 0.0189 kW로 나타났으며, 해수의 양이 27 L 및 30 L의 경우의 해수담수화장치의 진공펌프에서 소비되는 동력은 최대 0.0205 kW에서 최소 0.0133 kW로 나타났다. 소형담수화장치의 초기압력을 변화시켜 운전을 한 결과 해수담수화장치내의 초기압력이 변화하더라도 진공펌프에서 소비되는 동력은 크게 변화되지 않음을 알 수 있다. Fig. 6(d)은 해수용량 변화에 따른 담수 생산량을 나타낸 것으로서, 모든 운전조건에서 초기압력이 가장 낮은 400 mbar에서 담수 생산량이 가장 많이 생산되었으며, 이는 소형담수화장치에 공급되는 고온수의 온도가 80°C이고, 해수의 온도가 이보다 낮은 75°C일 때 소형담수화장치의 내부 압력이 진공압력이 됨에 따라 해수의 끓는점에 도달하여 수증기의 발생량이 증가하기 때문이라 예측되었다.

3.2 송풍팬을 정지하였을 경우의 담수화 장치의 운전성능

Fig. 7은 송풍팬을 정지하였을 때 소형담수화장치 내부의 초기압력을 변화시켰을 때의 해수용량에 따른 각각의 변화를 그래프로 나타내었다. Fig. 7(a)은 해수용량 변화에 따른 담수화장치에 공급되는 열량변화를 나타낸 것으로서, 해수용량이 25 L이고, 초기압력이 가장 낮은 400 mbar일 때의 공급되는 열량은 0.967

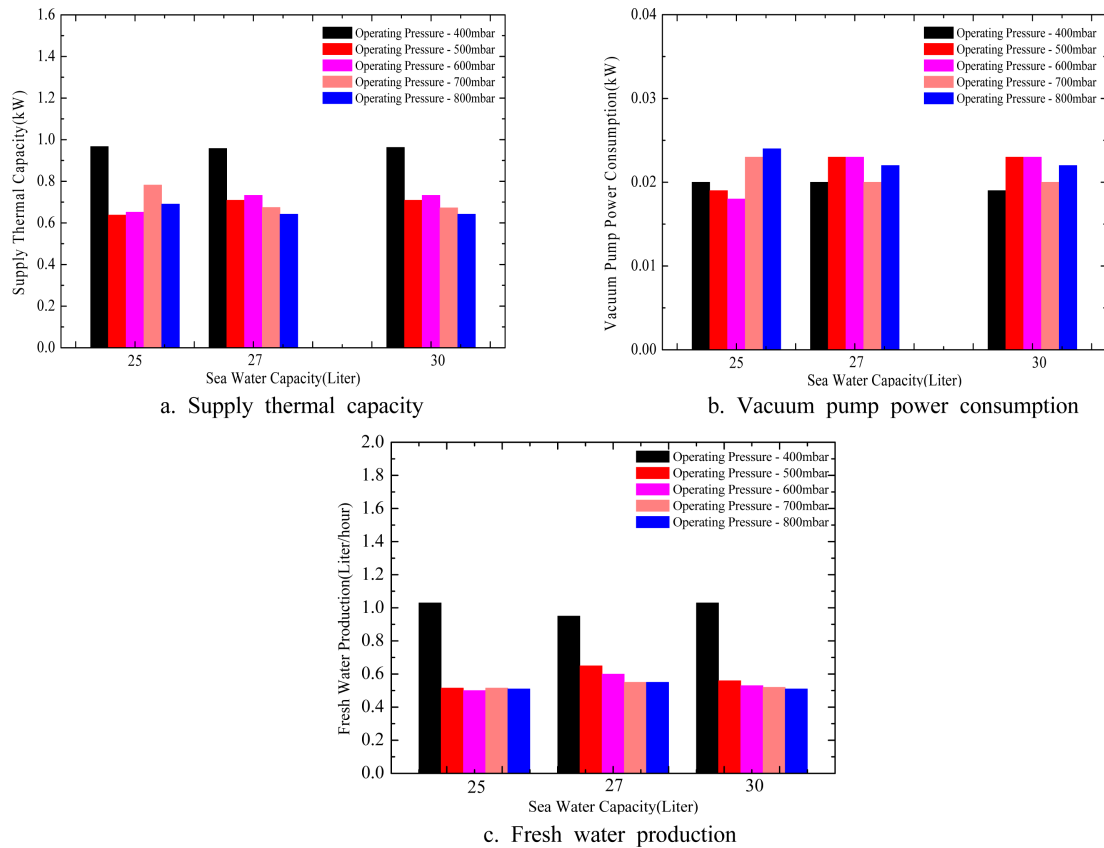


Fig. 7. Changes according to internal pressure of the small desalination device when the fan is stopped

kW이며, 초기압력이 800 mbar인 경우에는 0.691 kW의 열량이 해수로 공급되었음을 알 수 있었다. Fig. 7(b)은 해수용량 변화에 따른 진공펌프 운전시의 진공펌프 소비동력을 나타낸 것으로써, 해수용량이 25 L이고, 초기압력이 가장 낮은 400 mbar일 때의 진공펌프 소비동력은 0.02 kW이며, 초기압력이 800 mbar인 경우에는 0.019 kW로 나타났으며, 해수의 양이 27 L 및 30 L의 경우의 해수담수화장치의 진공펌프에서 소비되는 동력은 최대 0.023 kW에서 최소 0.02 kW로 나타났다. 소형담수화장치의 초기압력을 변화시켜 운전한 결과 해수담수화장치내의 초기압력이 변화하더라도 진공펌프에서 소비되는 동력은 크게 변화되지 않음을 알 수 있었다. Fig. 7(c)은 해수용량 변화에 따른 담수 생산량을 나타낸 것으로써, 모든 운전조건에서 초기압력이 가장 낮은 400 mbar에서 담수 생산량이 가장 많이 생산되었으며, 이는 소형담수화장치에 공급되는 고온수의 온도가 80°C이고, 해수의 온도가 이보다 낮은 75°C일 때 소형담수화장치의 내부 압력이 진공압력이 됨에 따라 해수의 끓는점에 도달하여 수증기의 발생량이 증가하기 때문이라 예측되었다. 다만, 소형담수화장치의 원활한 수증기 응축을 위해 설치한 송풍팬이 정지됨에 따라 담수화 생산량은 송풍팬이 운전할 때 보다 최소 23%~최대 51% 정도 감소한 것을 알 수 있었다.

해수의 충전량에 관하여 25 L, 27 L 및 30 L로 충전하였을 경우 여러 가지 실험조건을 변경시켰으나 담수생산량에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타나 담수생산량은 진공압력과 공급열량에 좌우됨을 알 수 있다. 또한 해수용량에 따른 담수생산량도 송풍팬의 작동유무에 따른 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형선박의 엔진에서 버려지는 폐열을 활용한 소형담수화장치의 담수화 효율개선을 위한 연구를 수행하여, 진공 챔버내의 수증기의 냉각성능을 향상시키기 위하여 설치한 송풍팬의 운전 여부에 따라 폐열의 열원 온도, 해수의 양 및 초기압력을 달리했을 때 담수의 생산량을 실험적으로 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 송풍팬을 운전하였을 경우, 초기압력이 400 mbar일 때의 동력투입에 대한 담수생산량을 나타내는 담수생산효율은 해수용량이 25 L, 27 L 및 30 L일 때 각각 74.24 L/kWh, 67.45 L/kWh 및 78.96 L/kWh로 초기압력이 500 mbar, 600 mbar, 700 mbar 및 800 mbar 일 때 보다 400 mbar 일 경우가 가장 높게 나타났으며, 송풍팬을 정지하였을 경우에 비해 최대 44% 높게 나타났다. 담수생산 효율을 높이기 위해서는 초기압력이 변하더라도 진공펌프의 소비동력은 크게 변하지 않기 때문에 송풍팬 운전과 같은 방법을 통해 담수화 생산량을 높인다면 담수생산 효율을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 공급된 열량에 대한 담수생산량을 나타내는 열효율을 시스템의 압력을 400 mbar, 500 mbar, 600 mbar, 700 mbar 및 800 mbar로 변화시키고, 해수의 투입량을 25 L, 27 L 및 30 L로 변화시켰을 경우에 송풍팬을 운전하여 측정하였다. 실험결과 가장 낮은 초기압력 400 mbar일 때 각각의 해수투입량에 대하여 1.14 L/kWh, 1.11 L/kWh 및 1.2 L/kWh로 다른 초기압력에 대비하여 가장 높은 열효율을 나타냈으며, 송풍팬을 정지하였을 경우에 비하여 최대 24% 높게 나타났다.

(3) 송풍팬을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우에 있어서 담수 생산량을 비교하면 팬을 사용할 경우에 송풍팬에 의하여 해수에서 발생된 수증기를 응축열교환기로 이송시켜 담수화를 더 원활하게 시키기 때문에 담수 생산량이 최대 40.0% 높게 나타났으며, 효율은 송풍팬을 정지했을 경우에 비해 최대 30.1% 높게 나타났다.

후 기

이 논문은 2021학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

References

1. Park, C. W., Kang, H., Jung, D., Cha, J., and Kim D., 2013, Design and Evaluation of Portable Forward Osmosis Desalination Device, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, Vol. 37, No. 3, pp. 301-305.
2. Ko, E. O., Moon, J. D., and Park, J. M., 2010, Status-of-arts of Desalination Technology, MEMBRANE JOURNAL, Vol. 20, No. 3, pp. 185-196.
3. Park, C. D., Lim, B. J., and Tanaka, H., 2010, Development of Seawater Distiller utilizing Waste Heat of Portable Electric Generators, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, Vol. 34, No. 6, pp. 607-613.
4. Kim, B. D., Song, C. S., Kim, K. K., Kim, J. H., and Kim, Y. M., 1994, A Development Study on the Evaporation Type Large Fresh Water Generator, Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 18, No. 4, pp. 355-366.
5. Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., and Dewitt, D. P., 2017, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, eighth ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 646.