

# Low GWP 냉매를 적용한 해수열 히트펌프의 성능해석 The Performance Analysis of Sea Water Heat Pump applied Low GWP Refrigerants

임승택\* · 김현주\*\* · 이호생\*\*\*†

Seung-Taek Lim\*, Hyeon-Ju Kim\*\* and Ho-Saeng Lee\*\*\*†

(Received 27 July 2016, Revision received 14 October 2016, Accepted 17 October 2016)

**Abstract:** In this study, the seawater Heat Pump System using seawater with temperature of annual domestic conditions (0°C to 25°C) is designed in order to compare its performance against the Heat Pump using unused heat of seawater. As a potential replacement for current refrigerants that exacerbate global warming and ozone depletion, a Low GWP refrigerant's performance is analyzed. The basic water to water Heat Pump system is chosen and three commercial refrigerants - R134a, R410a, R32 - are used to compare against new Low GWP refrigerant R1234ze. When seawater with temperature of 25°C is used, the performance change showed maximal increase in COP, 38.3%. low GWP refrigerant R1234ze, showed great performance characteristics reach to 5.242 and Existing commercial refrigerant, R134a showed only less than 0.03 performance difference against R1234ze. The study confirms notable performance of R1234ze refrigerant through simulation as environmentally friendly refrigerant for domestic seawater Heat Pump.

**Key Words :** Heat Pump, Coefficient of Performance, Global Warming Potential, Ozone Depletion Potential, Working Fluid

## 1. 서 론

국제 유가 상승 및 지구 환경 오염의 결과 세계적으로 석유 에너지 사용을 감축하는 추세이며, 대체 에너지인 신재생에너지의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 특별히 폐열 회수에 대한 연구가 거듭되면서 기존에 사용하지 않았던 미활용 열원의 재활용 기술이 석유에너지 대체에 일환으

로 자리 잡을 것으로 예상된다.

해수 및 지하수, 하천수 등의 중저온의 천연 미활용 열에너지는 히트펌프와 같은 냉난방장치를 통하여 고온과 저온의 열에너지로 전환이 가능하며, 산업폐열 및 온배수 등의 고온 미활용 열에너지는 직접 난방을 하거나 유기랭킨사이클을 이용하여 발전하는 등의 활용이 가능하다.

우리나라와 같이 3면이 바다로 된 지리적 특성

\*\*\*† 이호생 : 선박해양플랜트연구소

E-mail : hslee@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5021

\*임승택 : 선박해양플랜트연구소

\*\*김현주 : 선박해양플랜트연구소

\*\*\*† Ho-Saeng Lee(corresponding author) : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering.

E-mail : hslee@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5021

\*Seung-Taek Lim : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering.

\*\*Hyeon-Ju Kim : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering.

Table 1 Heat source and utilization

Source	Form	Way to use
River water	Water	Heat pump heat source. Cooling water etc.
Sea water	Water	Heat pump heat source. Cooling water etc.
Ground Water	Water	Heat pump heat source. Cooling water etc.
Sewage Treatment Plant	Water	Heat pump heat source.
	Gas	Generate, Heat source
Incineration of waste heat	Hot gas	Steam Heat recovery, Generate, Heat source
	Warm Water	Heat pump heat source. Direct use
Subway	Air	Heat pump heat source.
Electric Substations	Cooling water & oil	Heat pump heat source. Direct use
Factory waste heat	Hot gas	Steam Heat recovery, Generate, Heat source
	Warm Water	Heat pump heat source. Direct use
	LNG Cold heat	Generate, Liquefied air etc.
Power plant	Warm Water	Heat pump heat source. Direct use

과 기존의 시설물을 최대한 활용하여 우리 특성에 적합한 미활용에너지를 활용할 수 있는 기술 개발과 이를 위한 제도, 정책적인 검토와 아울러 기술 개발의 전략을 수립하여 추진하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸인 반도국가로서, 전국의 해안도시 7개 지역을 해수 이용 가능 지역으로 선정해서 조사한 결과, 해수열에너지의 부존량은 약 27,155 Tcal/year이며, 이용가능 열량은 히트펌프 이용의 경우 난방은 12,528 Tcal/year, 냉방은 7,757 Tcal/year로 총 20,285 Tcal/year로 산출되었다.<sup>1)</sup>

본 논문은 국내 해수 온도변화를 적용한 해수 히트펌프의 최적화를 위한 기초 시뮬레이션 연구로서 적용 냉매를 선정하고 공급열량에 따른 성능평가 시뮬레이션을 수행하였다. 냉매의 선정을 위하여 기존 히트펌프에 적용되고 있는 냉매와 신 냉매와의 물리적 성질을 비교하였으며, 해수온도를 10℃에서 25℃까지 2.5℃의 온도변화를 적용하여 성능변화를 비교하였다.

## 2. 시뮬레이션 해석

### 2.1 냉매의 선정

기존 공기 또는 해수 히트펌프의 경우 R410a, R134a 등이 냉매로서 적용되고 있다. 하지만 현재 사용되고 있는 냉매의 경우 대부분 GWP (Global warming potential) 수준이 1,000 이상의 높은 지구 온난화지수를 나타내어 유럽은 2018년까지 그 사용이 제한되고 있다.<sup>2)</sup> 이와 같은 국제적 사용 제한이 국내에도 적용되어 냉동고조 분야에서 작동 유체의 선정이 변화되고 있으며, 동일 성능의 Low GWP 냉매의 개발과 적용이 연구되고 있다.<sup>3)</sup> 그 밖에 냉매의 성질로 밀도, 증발 잠열, 비열, 임계 온도, 열전도율, 응축 압력 등이 선정에 중요한 요인

Table 2 Properties of Refrigerants

	R410a	R134a	R32	R1234ze
Normal Boiling Point (K)	227.7	247.1	221.5	254.0
Mass Density (kg/m <sup>3</sup> )	39.83	16.85	24.99	13.68
Critical Point Temperature (K)	344.5	374.2	351.26	382
Specific heat (kJ/kgmole-k)	66.85	86.65	48.38	98.37
Conductivity (W/m-K)	0.01162	0.01165	0.01053	0.0197
Safety Group	A1	A1	A2	A2
GWP	1980	1430	670	7
ODP	0	0	0	0

이 된다. 본 논문에서는 시스템 설계에 앞서 다양한 냉매를 선정하고 시뮬레이션에 적용하여 최적의 해수 히트펌프 냉매를 시스템에 적용할 것이다.

냉매의 선정은 기존 히트펌프에 사용된 R410a, R134a, R32 냉매와 신 냉매인 R1234ze를 비교하였다. R1234ze는 기존 R134a 냉매의 대체 냉매로서 ODP는 0이며, GWP는 7로 상용 냉매인 암모니아에 비해 인체에 해롭지 않다는 장점이 있고, R22에 비해 친환경적이라는 장점을 가진다. 유럽을 중심으로 소형 냉동기의 대체 냉매로서 연구가 진행되고 있으며, 해수 히트펌프의 Low GWP 냉매 선정을 위해 이번 시뮬레이션에 적용되었다.<sup>4)</sup> 각 냉매의 물리적 성질과 GWP 지수는 위의 Table 2와 같다.

R1234ze 냉매의 경우 환경성과 안전성을 제외한 총 5가지 물리적 성질 중에서 3가지 성질이 가장 우수한 것으로 확인되었다. 특히 시스템 성능과 밀접하게 연관된 열전도율 및 비열의 물리적 성질이 다른 냉매와 비교하여 최대 87% 이상의 높은 열전도율과 104% 이상의 높은 비열 값을 확인하였다.

## 2.2 시스템 설계

### 2.2.1 히트펌프 사이클 설계

앞서 선정된 냉매를 이용하여 물대물 히트펌프 사이클을 설계하였다. 히트펌프의 기본 구성요소는 크게 네 가지로 구성되는데, 기화된 냉매를 압축하는 압축기와, 열교환을 하는 응축기와 증발기, 냉매를 팽창 감압하는 팽창밸브로 구성된다.

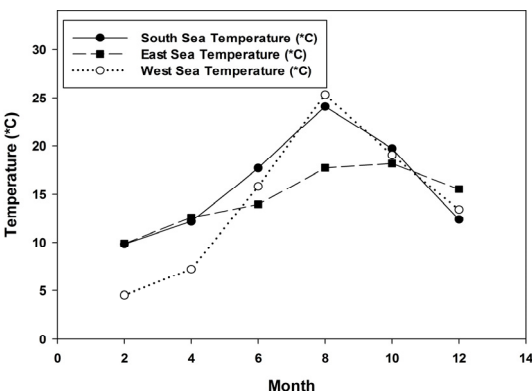


Fig. 1 Monthly change of Domestic Sea Temperature

해수 온도변화에 따른 시스템성능을 확인하기 위해 해수 온도를 10°C에서 25°C까지 2.5°C의 온도변화를 적용하여 히트펌프의 성능을 확인하였다.

이와 같은 온도 조건은 2015년 국내 해안 10m 수심에서의 계절 변화에 따른 온도변화를 적용한 것으로 연중 2월에 9.8°C의 최저 온도와 8월 24.1°C의 최고온도를 적용하여 성능을 비교하였다. 국내 해안의 계절 변화에 따른 온도변화 그래프는 Fig. 1과 같다. 그 밖에 시스템의 조건을 동일하게 하기 위하여 열원 공급 온도를 난방 및 온수 생산을 위한 60°C로 하였으며, 응축기에서의 온도차는 5°C를 적용하여 설계하였다. 응축기와 증발기에서의 압력차는 0 kPa로 가정하였으며, 압축기 효율은 80%를 동일하게 적용하였다. 열원유량은 1,500 kg/h로 가정하여 9 kW급 히트펌프 시스템을 설계하였다.

시뮬레이션 해석 방법으로는 공정설계프로그램인 AspenTech HYSYS(V8.8)프로그램을 이용하였다. HYSYS는 열역학적 사이클 모사에 필요한 상태 값을 정확하게 계산할 수 있다는 장점이 있기 때문에 이번 연구에서 사용하게 되었다. 시뮬레이션에 사용한 상태방정식으로는 Peng-Robinson방정식을 사용하였으며, Peng-Robinson방정식은 열해석에서 가장 널리 사용하는 상태 방정식으로 식 (1)과 같다. 여기서 P는 압력(pressure), R은 기체상수, T는 온도(temperature), V는 부피(volume), 그리고 a,b는 각각 상수를 의미하는데 이는 식 (2), (3), (4)와 같다.

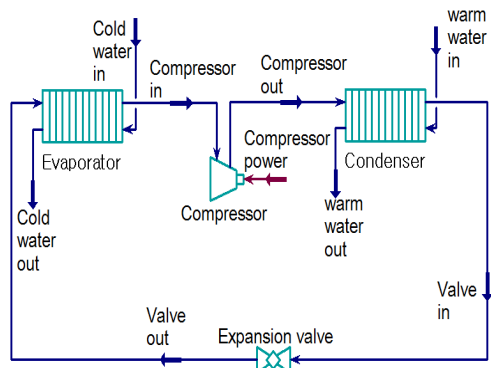


Fig. 2 Schematic of Basic heat pump cycle

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b) + b(V-b)} \quad (1)$$

$$a = a_c \alpha \quad (2)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (4)$$

$$COP = \frac{Q_H}{W_C} \quad (5)$$

히트펌프의 성능계수(COP: Coefficient of Performance)의 산출은 압축기 소요동력(Wc) 분에 응축열량(QH)으로서 식 (5)와 같다.

Fig. 2는 히트펌프의 기본 구성을 나타내며, Table 3은 시뮬레이션의 해석을 위한 조건을 나타낸다.

### 3. 시뮬레이션 해석결과 및 고찰

#### 3.1.1 냉매별 성능 특성

상용 냉매 및 신 냉매를 적용한 해수열원 히트펌프의 성능은 해수 온도 변화가 10℃에서 25℃로 상승하면서 점차 증가하는 것을 확인하였다. 냉매의 종류에 따라 R410a는 최대 4.508의 COP를 나타내었으며, 동일 조건에서 압축기는 최저 소요동력인 2.016 kW를 기록하였다. 반면, R1234ze 냉매를 적용하였을 경우 25℃ 해수 온도의 경우 최대 COP인 5.242와 최저 소요 동력인 1.733 kW를 나타내었다.

Table 3 Simulated condition

Parameter	Value
Heating capacity (kW)	9
Heating water supply (℃)	60
ΔT <sub>c</sub> , Condenser water temperature difference (℃)	5
Sea water inlet temperature (℃)	10 ~ 25
ΔT <sub>E</sub> , Evaporator water temperature difference (℃)	3
Pinch point temperature (℃)	1.5
Heating water mass flow rate (kg/h)	1,500
Refrigerants	R-134a, R-410a, R-1234ze, R-32
ΔP <sub>HX</sub> , Heat exchanger pressure difference (kPa)	0
Isentropic compressor efficiency (%)	80

각 냉매의 종류에 따른 히트펌프 최대 성능 변화 및 소요 동력의 변화는 Fig. 3과 같이 R1234ze가 가장 높은 값을 보이며, 성능감소는 R134a, R32, R410a 순으로 나타났다.

각 냉매의 압축기 최대 압력은 R32 냉매에서 3,800 kPa의 최고 압력을 확인하였으며, R410a는 3,640 kPa, R134a는 1,735 kPa, R1234ze는 1,320kPa로 동일 운전 조건에서 가장 작은 압축기 출구 압력을 확인하였다. 해수 온도가 10℃에서 25℃로 변화하였을 때의 히트펌프 성능 및 압축기 소요 동력에 대한 값은 Table 4와 같다.

Table 4 Analysis data by Refrigerants

	Temperature at 10℃			Temperature at 25℃		
	Comp' Power (kW)	COP	Refrigerant mass flow rate (kg/h)	Comp' Power (kW)	COP	Refrigerant mass flow rate (kg/h)
R410a	2.808	3.236	208.6	2.016	4.508	226.9
R134a	2.473	3.675	215.3	1.738	5.228	220.7
R32	2.580	3.522	123.5	1.844	4.928	135.4
R1234ze	2.481	3.663	236.2	1.733	5.242	238.4
Average	2.585	3.524	195.9	1.832	4.976	205.35

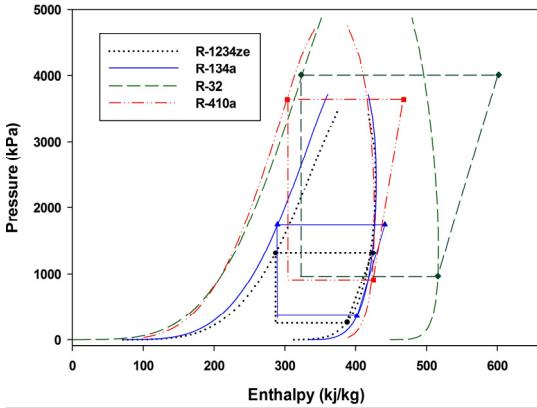


Fig. 3 P-h diagram of Refrigerants at 10°C Sea Temperature

Fig. 3은 각 냉매의 10°C 해수 온도조건에서의 P-h 선도를 나타낸 것으로, R32 냉매의 경우 응축기에서의 엔탈피 변화가 가장 큰 241 kJ/kg으로 나타났으나 압축기의 엔탈피 차 또한 49 kJ/kg으로 높아 전체 COP가 감소하였다. 반면 R1234ze는 가장 적은 응축기 엔탈피 변화량인 137.2 kJ/kg을 보였으나 가장 적은 압축기 엔탈피차인 26.2 kJ/kg을 나타내어 COP가 가장 높게 기록되었다.

각 냉매의 해수 온도에 따른 냉매 유량변화는 Fig. 4와 같으며, R1234ze는 0.92%의 가장 적은 유량 변화를 보였고, R410a 냉매는 가장 높은 8.8%의 유량증가를 보였다.

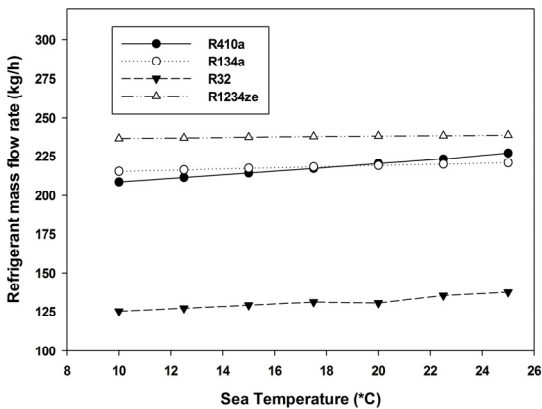


Fig. 4 Mass flow rate of Refrigerants by Annual Sea Temperature

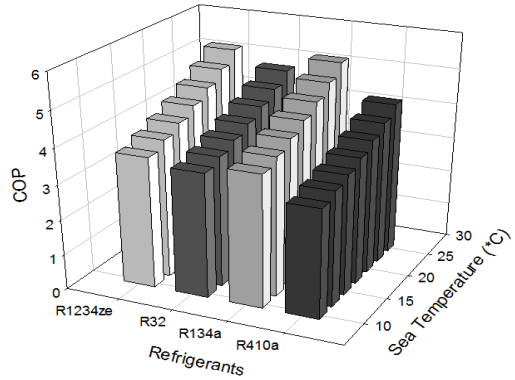


Fig. 5 COP Changes of Refrigerants by Annual Sea Temperature

### 3.1.2 해수온도에 따른 성능 특성

해수 온도가 10°C에서 25°C로 변화하였을 때의 히트펌프 성능의 경우, 25°C일 때의 히트펌프 성능은 10°C에 비해 평균 약 38.3% 증가하였다.

냉매의 종류와 해수 온도에 따른 COP변화는 Fig. 5와 같이 25°C의 해수온도조건에서 신 냉매인 R1234ze냉매가 가장 높게 나타내었으며, 기존 R134a와 비교하여 해수 온도 변화에 따른 COP변화가 유사한 것을 확인하였다.

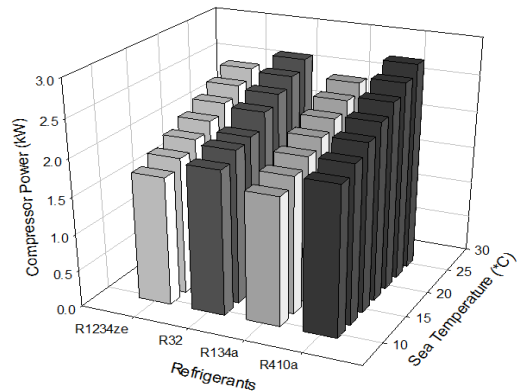


Fig. 6 Compressor Power Changes of Refrigerants by Annual Sea Temperature

또한 압축기 소요 동력의 변화도 해수 온도가 10°C에서 25°C로 증가하면서 평균 0.753 kW의 소요 동력이 감소하였으며, R410a 냉매에서 가장 큰

출력차인 0.792 kW의 감소를 보였다. 각 냉매의 해수 온도에 따른 압축기 소요동력 변화는 Fig. 6과 같다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 해수온도 변화에 따른 60℃의 열원 공급을 위한 히트펌프의 성능 변화와 최적의 온도 조건을 구하였으며, Low GWP 냉매인 R1234ze, R32와 기존 상용 냉매인 R134a, R410a와의 효율을 비교하였다.

1. 해수 최고온도인 25℃의 경우 10℃의 해수온도와 비교하여 증발 온도와 압력이 증가하므로 시스템효율 증가를 나타내었으며, R1234ze 냉매의 경우 최대 COP인 5.242를 기록하였다.

2. 동일 해수온도 조건에서 냉매 간의 성능 변화는 신 냉매인 R1234ze가 가장 높은 COP를 기록하였으며, R134a 냉매와 비교하여 최대 성능차가 0.03 이하의 근소한 차이를 보였다. 그 밖에 R32와 R410 순으로 냉매 성능이 높게 나타났다. 향후 GWP로 인한 냉매 규정이 강화될 경우 Low GWP 냉매인 R1234ze가 동일 성능의 적용 가능한 대체 냉매로 예상된다.

3. 냉매의 종류에 따른 히트펌프 성능 변화는 기존 냉매인 R410a를 R1234ze로 대체할 경우 최대 14%의 상승을 보였으며, 10℃의 R410a와 비교하여 25℃의 R1234ze는 38.3% COP 상승률을 나타내었다.

4. 따라서 위의 결론으로부터, Low GWP 냉매의 해수열을 이용한 히트펌프의 적용은 여름철 25℃의 수온에서 가장 높은 COP를 나타내는 것과 R134a의 대체 냉매인 R1234ze 냉매의 성능을 확인하였다. 위와 같은 결론은 Low GWP 냉매를 이용한 해수히트펌프의 보급에 기초연구자료로 활용될 것으로 예상된다.

#### 후 기

본 연구결과는 선박해양플랜트연구소가 지원하는 “해수-미활용열 이용 온도차발전 및 담수화 기초성능평가 기반구축” 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

#### References

1. C. Oh, Y. U. Lee and J. H. Ji, 2011, "Current Status and Future Prospects on Research of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) and Air-Conditioning System", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, pp. 154-159.
2. T. J. Lee, K. B. Kim, S. W. Lee and G. H. Lee, 2011, "Development of Performance Analysis Program and the Study of Substitution Refrigerant R1234yf for Vehicle Refrigerant Compressor", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 11, pp. 699-704.
3. A. Alabdulkarem, R. Eldeeb, Y. H. Hwang, V. Aute and R. Rademacher, 2015, "Testing, simulation and soft-optimization of R410A low-GWP alternatives in heat pump system", International Journal of Refrigeration, Vol. 60, pp. 106-117.
4. Z. Jankovic, J. S. Atienza and J. A. M. Suarez, 2015, "Thermodynamic and heat transfer analyses for R1234yf and R1234ze(E) as drop-in replacements for R134a in a small power refrigerating system", Applied Thermal Engineering, Vol. 80, No. 5, pp. 42-52.