

냉열원 온도 변화에 따른 다단재열랭킨사이클의 성능해석

The Performance Analysis of Multi Stage Reheater Organic Rankine Cycle According to Heat Sink Temperature Change

이호생*† · 임승택** · 김현주***

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

(Received 29 December 2015, Revision received 15 January 2016, Accepted 15 January 2016)

Abstract: In this study, the simulation for performance comparison between basic single stage organic rankine cycle, multi stage reheater cycle and multi stage reheater & recuperator cycle was carried out. The multi stage reheater cycle and multi stage reheater & recuperator cycle was designed to improve the efficiency for organic rankine cycle using heat source from industrial waste heat and heat sink from deep ocean water. R245fa was selected as a refrigerant for the cycle and system efficiencies were simulated by the variation of the heat sink temperature and the cycle classification. Performance characteristics were simulated by using the Aspen HYSYS. It was confirmed that the system efficiency was decreased by the increase of heat sink temperature. These results can be considered to be applied as geo-ocean thermal energy conversion in where plenty of geothermal or ocean thermal resource exist.

Key Words : Ocean Thermal Energy Conversion, Multi Stage Reheater Cycle, Multi Stage Reheater & Recuperator Cycle, Heat Sink

1. 서 론

화석연료의 사용으로 인한 자원고갈과 환경과 괴는 현재 인류가 풀어야 할 중대한 숙제가 되고 있다. 이 두 가지 문제를 해결하기 위한 방안으로 신재생에너지를 개발하는 것이 선진국을 중심으로 연구가 진행되고 있다. 그 중 해양온도차에너지는 지속적으로 사용 가능한 청정 에너지원으

로서, 해양온도차에너지원의 잠재적 에너지용량은 무려 1조1천억 킬로와트(kW)에 달한다. 이것은 2000년 기준 전 세계 전력요구량에 100배에 달한다.¹⁾

또한 해양심층수는 전력생산 뿐 아니라 해수 담수화 및 자원 추출 등 다양한 개발이 가능하다는 점에서 미래의 중요 자원으로 각광받고 있다. 우리나라의 동해는 지형적으로 수심이 깊어서 비

*† 이호생(교신저자) : 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

교적 해안에서 근거리에서 심층수가 존재하는 유리한 조건을 가지고 있으며, 해안으로부터 5~10km 내외에 심층수의 획득이 가능한 장점을 보유하고 있다.²⁾

국내에서도 초기에는 청정성, 안정성, 부영양성, 미네랄성 등의 해양심층수 특성을 활용한 고품질 생수, 식품, 농·수산업 등 주로 산업적 용도로 활용되었으나, 최근에는 해양심층수의 저온성을 이용한 신재생 에너지원으로 활용하기 위한 기술개발에 집중하고 있다. 해양온도차발전의 개발을 위한 연구가 지난 2007년 이후 꾸준히 진행되고 있지만, 겨울철 해수온도차가 낮아진다는 환경적 요인 때문에 국내적용에 한계가 있다. 이와 같은 이유로 다양한 온열원을 이용한 온도차 발전이 연구되고 있으며, 김남진 등은 원자력 온배수를 이용한 해양온도차 발전사이클의 해석을 수행하였고³⁾ 이호생 등은 지열을 이용한 바이너리 GeO₂TEC의 성능해석을 통하여 우수한 성능을 확인하였다.⁴⁾

본 논문은 산업폐열 및 지열 등의 고온 열원을 사용하고 해양심층수를 열침으로 사용하는 HOTE₂C의 최적화를 위한 기초 시뮬레이션 연구로서 작동유체를 선정하고 다단계열사이클, 다단계열재생사이클의 시스템 고효율과 고풍력을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 작동유체의 선정을 위하여 기존 OTEC에 적용되고 있는 냉매와 새롭게 연구되고 있는 냉매와의 물리적 성질을 비교하였으며, 다단계열사이클을 설계하고 열침온도를 1℃에서 7℃까지 2℃의 온도변화를 적용하여 단단사이클과의 성능변화를 비교하였다.

2. 시뮬레이션 해석방법

2.1 작동유체 선정

해양지열발전은 기존 해양온도차 발전에 비해 높은 열원을 사용할 수 있다. 높은 온도의 열원의 사용에 따라 적용 가능한 작동유체의 선정도 달라지며, 작동유체의 선정은 시스템 효율에 적용된다. 기존 해양온도차 발전의 작동유체로는 암모니아(R717), R134a, 또는 R32 등이 순수 작동유체로 적용되고 있으며, 암모니아와 물의 혼합 냉매를 이용하는 사이클 연구도 진행되고 있다. 하지만 고온의 열원에 이와 같은 작동 유체를 적용할 경우, 전체 시스템압력이 상승하게 되고 터빈 입출구의 압력비가 상승하여 시스템 손실이 발생한다. 시스템 압력은 냉매의 끓는점에 따라 변화하므로 상온에서 높은 끓는점을 갖는 냉매가 고온도차 발전에 합당하다. 그 밖에 냉매의 밀도, 증발 잠열, 비열, 임계 온도, 열전도율, 응축 압력이 냉매의 선정에 중요한 요인이 된다.⁵⁾ 본 논문에서는 시스템 설계에 앞서 예상되는 냉매를 선정하고 냉매 선정요인을 적용하여 적절한 고온도차 발전용 냉매를 시스템에 적용할 것이다. 그중 비열, 열전도율, 증발 잠열은 증발온도인 70℃에서의 값을 나타내었으며, 응축압력은 응축온도인 5℃에서의 최저압력을 비교하였다.

냉매의 선정은 기존 OTEC에 사용된 R717, R134a, R32 냉매와 새롭게 ORC에 적용되어지고 있는 R245fa를 비교하였다. R245fa작동유체의 ODP는 0이며, GWP는 950정도로 기존에 많이 적용되는 암모니아에 비해 인체에 해롭지 않다는

Table 1 Properties of Refrigerants

	Ammonia(R717)	R134a	R32	R245fa
Normal Boiling Point (K)	239.8	247.1	221.5	288.3
Vapor Density (kg/m ³)	27.66	121.8	214.2	35.538
Critical Point Temperature (K)	405.4	374.2	351.26	427.16
Specific heat (kJ/kgmole-k)	37.9	98.11	48.33	132.4
Conductivity (W/m-K)	0.03254	0.01624	0.01742	0.01704
Latent heat (kJ/kg)	927.46	121.34	115.7	158.99
Saturated pressure (bar)	5.1	3.5	9.5	0.7

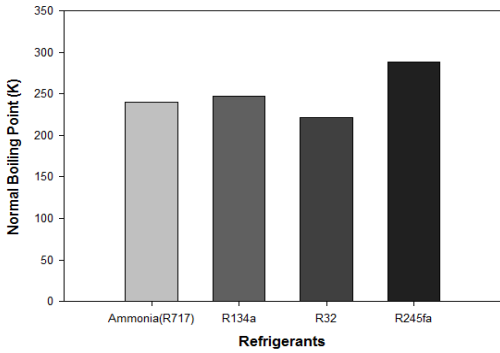


Fig. 1 The characteristic of Normal Boiling Point according to Working fluids

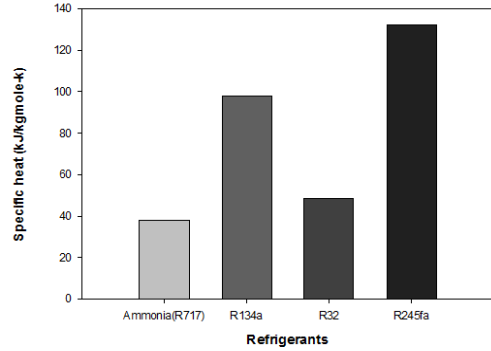


Fig. 3 The characteristic of Specific Heat according to Working fluids

장점이 있고, R22에 비해 친환경적이라는 장점을 가진 작동유체로서 이번 시뮬레이션에 적용되었다. 각 냉매의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

유기랭킨사이클에 적용되어질 냉매를 비교해본 결과, R245fa 냉매의 경우 총 7가지 물리적 성질 중에서 4가지 성질이 가장 우수한 것으로 확인되었다. 또한 증발 잠열 및 열전도율에서도 상대적으로 우수한 물리적 성질을 나타내어 70°C의 증발 온도와 5°C의 응축온도의 열원에서 가장 적합한 것으로 확인하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 각각의 작동유체의 끓는점과 임계온도를 나타내고 있으며, Fig. 3과 Fig. 4는 각각 열원온도 70°C와 열침온도 5°C에서의 냉매 비열과 응축압력을 나타내고 있다.

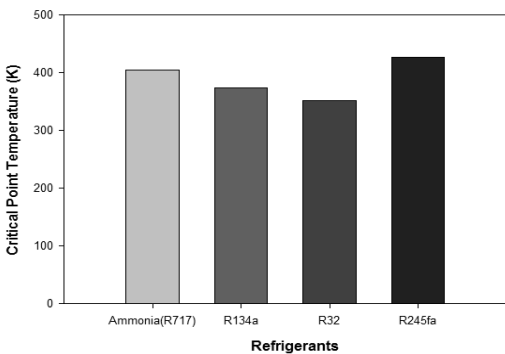


Fig. 2 The characteristic of Critical Point Temperature according to Working fluids

2.2 시스템 설계

1) 기본 HOTEK 설계

앞서 선정된 R245fa 냉매를 이용하여 기본 HOTEK을 설계하였다. HOTEK의 기본 구성요소는 크게 4가지로 나타낼 수 있는데, 발전을 주관하는 터빈과 열교환을 하는 응축기와 증발기, 냉매를 순환하는 펌프로 구성된다. 열침온도에 따른 시스템성능을 확인하기 위하여 열침 온도를 1°C, 3°C, 5°C, 7°C로 상승하며 성능을 확인하였다.

이와 같은 열침 온도는 현재 동해상의 해수 수심에 따른 온도변화를 적용하여 수심 500m 이하의 심층수온도가 연중 1°C 내외를 유지하므로 2°C

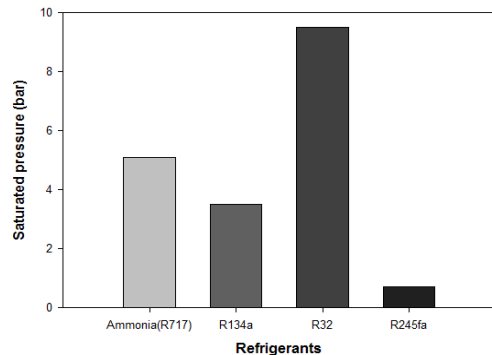


Fig. 4 The characteristic of Saturation Pressure according to Working fluids

Table 2 Simulated condition

Parameter	Value
HOTEC Gross power (kW)	200
Heat source inlet temperature (°C)	70
Heat source delta temperature (°C)	10
Heat sink inlet temperature (°C)	3, 5, 7
Heat sink delta temperature (°C)	5
Pinch point temperature (°C)	5
Over heat temperature (°C)	10
Heat source inlet pressure (kPa)	150
Heat sink inlet pressure (kPa)	150
Isentropic turbine efficiency (%)	85
Isentropic pump efficiency (%)	75
Refrigerants mass flow rate (kg/s)	open

온도변화를 가정하여 7°C까지의 성능을 비교하였다. 그 밖에 시스템의 조건을 동일하게 하기 위하여 열원 공급 온도를 70°C로 하였으며, 터빈 입구의 냉매 과열도를 10°C로 설계하였다. 응축기와 증발기에서의 Pinch point는 최저 설계 값인 5°C를 적용하였다. 이를 통하여 얻게 된 증발기 출구 압력은 422kPa가 되며, 응축기 입구의 압력은 열침온도에 따라 변화한다. 동일 출력에 따른 냉매량변화를 비교하였으며, 열교환기에서의 압력 강하는 유체와 상관없이 10kPa로 설계하였다.

시뮬레이션 해석 방법으로는 기본적인 유기랭킨사이클을 해석하기 위해 공정설계프로그램인 AspenTech HYSYS(V8.0)프로그램을 이용하였다. HYSYS는 열역학적 사이클 모사에 필요한 상태 값을 정확하게 계산할 수 있다는 장점이 있기 때문에 이번 연구에서 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 상태방정식으로는 Peng-Robinson방정식을 사용하였다. Peng-Robinson방정식은 열해석에서 가장 널리 사용하는 상태 방정식이며 다음과 같다. 여기서 P는 압력(pressure), R은 기체상수, T는 온도(temperature), V는 부피(volume), 그리고 a, b는 각각 상수를 의미하는데 이는 식 (2), (3)과 같다.

Table 2는 시뮬레이션 해석 조건을 나타낸다. 펌프와 터빈의 기계효율은 각각 75%와 85%로 설계하였다. Fig. 5는 HOTEC의 기본 구성을 나타낸다.

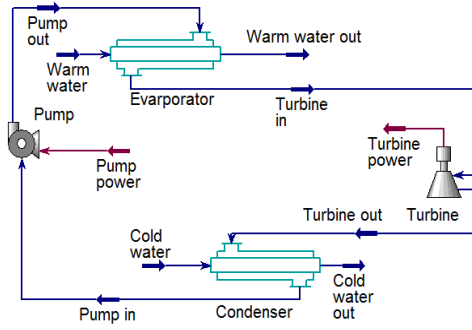


Fig. 5 Schematic of the Basic HOTEC

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

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

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

2) 다단재열사이클 설계

기존 HOTEC은 온도차가 적어 스팀 ORC에 비해 효율이 매우 낮게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 사이클의 변형을 적용하여 기존 HOTEC과의 성능을 비교하였다. Fig. 6은 다단재열사이클을 나타낸다. 다단으로 구성된 터빈 중 1st터빈을 통과한 냉매를 재열기를 이용하여 가열 후 다시 2nd터빈을 통과한다. 1st터빈을 통과한 냉매는 재열기에서 과열되어 2nd터빈에 들어간다. 재열기를 통과하는 냉매의 압력변화는 없다고 가정하였으며, 터빈의 출력은 각각 100kW로 기본 HOTEC 사이클과 동일하게 설계하였다. 2nd터빈의 출구 압력을 동일하게 설계하여 재열기의 성능에 따른 냉매량의 변화를 통하여 시스템 성능을 확인하였다.

3) 다단재열재생사이클 설계

Fig. 7은 다단재열재생사이클을 나타낸다. 다단재열사이클과 마찬가지로 다단으로 연결된 터빈의 1st터빈을 통과한 냉매를 재열기를 이용하여 가열 후 2nd로 들어간다. 하지만 재생사이클은

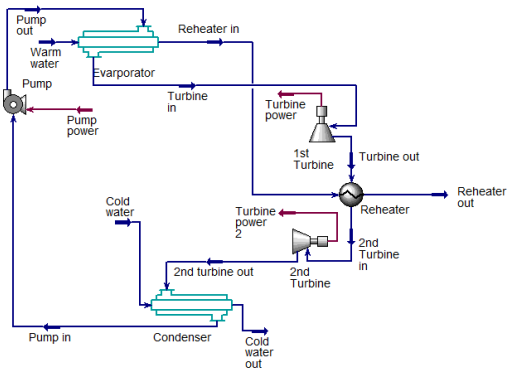


Fig. 6 Schematic of the Multi Stage Reheater Cycle

2nd터빈을 통과한 냉매를 냉매 펌프를 통과한 냉매와 열교환하여 열을 회수한다.

다단재열재생사이클도 재열사이클과 동일하게 1st터빈과 2nd터빈의 출력을 각각 100kW로 설계하였으며, 다단 터빈의 최종 압력강하는 기본 HOTECS 사이클의 터빈 출구 압력과 같게 설계하였다. 이 때 1st터빈의 압력강하를 이용하여, 재열기와 재생기의 압력강하는 없다고 가정하였으며, 재열기를 통과한 냉매의 온도는 68°C로 하였다.

재생기의 총괄열전달계수(UA)는 30000kcal/h°C로 설계하였다. 그 밖에 열교환기의 압력차와 터빈과 펌프의 효율, Pinch Point 등의 설계 인자는 기본 사이클과 동일하게 설계하였다.

3. 시뮬레이션 해석결과 및 고찰

1) 기본 HOTECS 설계 해석

R245fa 냉매를 사용하는 기본 HOTECS의 열침 온도 변화에 따른 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 열침 온도가 1°C에서 7°C로 상승하면서 시스템 효율은 9.955%에서 8.76%로 1.195% 하락하였다. 열침 온도가 상승하므로 열교환기 내의 응축압력은 85.5kPa에서 108.8kPa로 상승하였고 이로 인하여 응축기를 통과한 냉매의 온도가 상승하게 되었다. 또한 동일 200kW의 출력을 유지하기 위하여 냉매량이 7.84kg/s에서 9.203kg/s로 상승하게 되었으며, 냉매량의 상승은 열원과 열침의 공급 수량의 증가의 원인이 되었다.

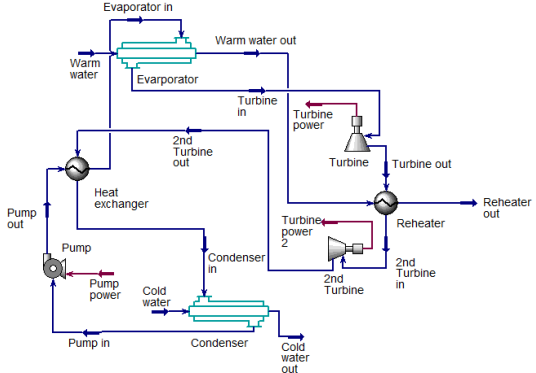


Fig. 7 Schematic of the Multi Stage Reheater & Recuperator Cycle

냉매 펌프의 출력 변화도 1°C에서 2.66kW의 동력을 소모하는 펌프가 7°C에서 2.952kW로 0.292kW의 동력 증가를 나타냈으며 약 11.0%의 증가율을 나타내었다.

냉매량의 증가와 증발열량, 응축열량의 증가에 따라서 공급되는 열원과 열침의 공급량도 증가하게 되었다. 1°C를 기준으로 열원과 열침은 각각 45.72kg/s와 82.64kg/s의 유량을 나타내었는데 온도가 7°C까지 상승하면서 각각 51.98kg/s와 95.08kg/s로 유량증가를 확인하였다. 이와 같은 결과는 전체 시스템을 설계할 경우 열원과 열침을 공급하는 펌프의 동력을 상승시키게 되어 효율감소를 야기한다.

2) 다단사이클 설계 해석

다단재열사이클과 다단재열재생사이클을 설계하고 열침 온도변화에 따른 성능을 해석하였다. 기존 단단 HOTECS의 열침 온도를 1°C에서 7°C로 2°C의 단계로 상승하였을 경우 냉매량이 7.84kg/s에서 9.20kg/s로 증가하는 것을 확인하였다. 다단재열사이클의 경우는 온도변화에 따라 7.67kg/s에서 9.03kg/s의 증가를 보이고 있으며, 다단재열재생사이클도 동일한 유량변화를 나타내었다. 다단재열사이클의 온도에 따른 냉매량 감소는 1°C의 열침온도에서 2.17%로 가장 높았으며, 7°C에서 1.85%의 감소를 나타내어 상대적 저온에서의 감소량이 높은 것을 확인하였다.

냉원원 온도 변화에 따른 다단계열랭킨사이클의 성능해석

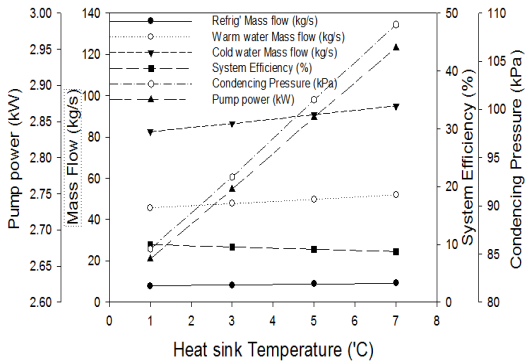


Fig. 8 The characteristic of Basic HOTEK Cycle according to Heat sink Temperature

동일한 냉매량에 따른 출력의 변화로 나타낼 경우, 1°C의 열침에서 7.67kg/s의 냉매량으로 단단사이클은 100kW, 다단계열과 다단계생체열은 104.4kW로 4.4%의 출력 증가를 나타내었으며, 온도변화에 따라 7°C에서 103.7kW로 3.7%의 효율 증가로 0.7%의 감소함을 확인하였다.

열원과 열침의 유량 또한 열침온도에 따른 유량 증가를 확인할 수 있다. 단단사이클의 경우 1°C의 열침온도에서 45.72kg/s의 열원과 82.64kg/s의 열침 유량을 나타내었으며, 다단계열의 경우는 44.75kg/s의 열원과 83.83kg/s의 열침유량을 나타내었고, 다단계열재생의 경우 41.31kg/s와 76.92kg/s의 열원과 열침을 나타내었다. 다단계열사이클은 단단사이클에 비해 열침유량이 1.19kg/s 높게 나타내고 있는데 2nd터빈을 통과한 냉매의 과열도가 기본사이클에 비해 높기 때문에 냉매의 엔탈피증가에 따른 열침 유량의 증가를 야기하였다. 다단계열재생사이클은 환열기를 사용하여 냉매간의 열교환을 하므로 응축하는 냉매의 엔탈피와 증발하는 냉매의 엔탈피간의 에너지 변화를 가져온다. 이를 통하여 열원과 열침의 유량의 감소를 유발한다.

Fig. 9는 열침온도에 따른 단단, 다단계열, 다단계생체열사이클의 유량변화를 나타낸다. 다단계열재생사이클은 열침 온도에 따른 냉매, 열침, 열원 유량이 가장 적은 것을 확인할 수 있었다. 단단사이클의 열침온도에 따른 효율변화는 1°C의

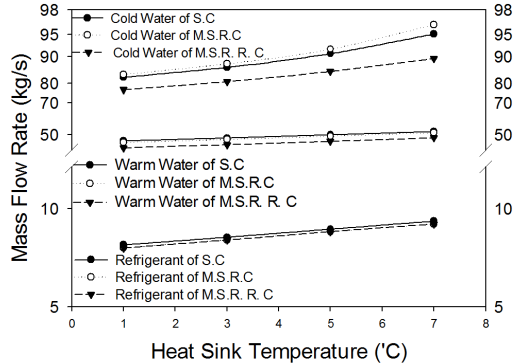


Fig. 9 Mass Flow of the Cycles by Heat Sink Temperature.

열침 온도에서 9.95%의 사이클 효율을 확인하였다. 다단계열과 다단계생체열사이클은 1°C의 열침 온도에서 각각 9.828%와 10.62%의 사이클 효율을 나타내었다.

다단계열사이클은 재열기를 통하여 열원수의 열을 회수하므로 공급 열량이 증가한다. 따라서 동일한 출력의 경우 효율이 감소한다. 하지만 다단계생체열사이클의 경우 냉매간의 열교환은 열원과 열침의 유량을 감소하여 전체 시스템 효율을 증가시킨다. Fig. 10은 열침온도변화에 따른 단단, 다단계열, 다단계생체열사이클의 시스템 효율변화를 나타내고 있다.

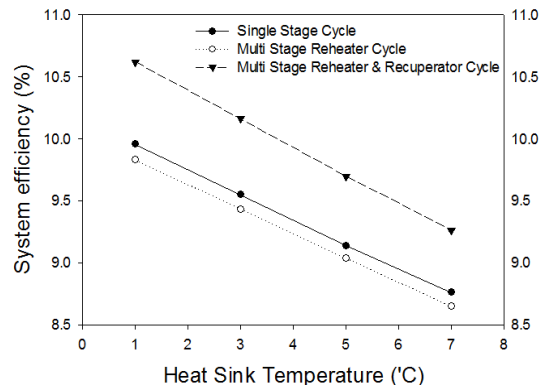


Fig. 10 System efficiency of the Cycles by Heat Sink Temperature.

4. 결 론

본 연구에서는 산업폐열 및 지열 등 고온 열원을 사용하고, 해양심층수를 열침으로 사용하는 해양온도차발전의 효율증대를 위한 다단계열사이클과 다단계열재생사이클의 시뮬레이션을 수행하였으며, 단단 사이클의 성능과 비교하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 열침온도가 최저온도인 1°C의 경우 7°C의 열침온도와 비교하여 열교환기 응축압력이 감소하므로 터빈 출력이 상승하게 되고 총 시스템 효율은 증가하였으며, 1°C의 열침을 사용하는 다단계열재생사이클의 경우 최대 효율인 10.62%를 기록하였다.

(2) 동일 출력에서 다단계열재생사이클은 7.67kg/s의 최소 냉매량을 기록하였으며, 열침과 열원의 유량 또한 가장 적은 41.31kg/s와 76.92kg/s를 기록하였다. 다단계열사이클의 경우 재열기에서 열을 회수하여 터빈 출력이 상승하게 되며, 동일 출력에서는 냉매 유량이 감소하였다. 다단계열사이클은 재생기에서 터빈 출구와 증발기 입구 냉매간의 열교환을 하여 증발기와 응축기에서의 공급 열량이 감소하였으며, 열원과 열침 유량의 감소를 나타내었다.

(3) 각 사이클은 열침 온도를 1°C에서 7°C로 증가하면서 시뮬레이션을 수행한 결과 시스템 효율과 총 출력이 감소하였으며, 냉매량 및 열원과 열침 유량은 증가하는 것을 확인하였다. 다단계열재생사이클을 사용하고 열침온도가 1°C의 시뮬레이션 결과는 단단사이클을 사용하고 7°C의 열침을 사용한 시뮬레이션 결과와 비교하여 최대 17.5%의 효율 증가와 16.7%의 냉매유량 감소를 확인하였다.

후 기

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

References

1. H. J. Kim, D. H. Jung, D. S. Moon, W. Y. Oh, G. C. Nihous and L. A. Vega, 2009, “Development and Utilization Prospects of Ocean Thermal Energy Conversion system,” Proc. of Annual Meeting of Korean Society of Ocean Engineers.
2. H. S. Lee, D. H. Jung, S. W. Hong and H. J. Kim, 2011, “Performance Analysis of Closed-Type OTEC Cycle using Waste Heat”, Journal of the Korean Society of Ocean Engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 80-84.
3. N. J. Kim, Y. H. Jun and J. B. Kim, 2007, “Cycle Simulation on OTEC System using the Condenser Effluent from Nuclear Power Plant”, The Korean Solar Energy Society, Vol. 27, No. 3, pp. 37-44.
4. S. W. Cha, H. S. Lee, Albert. S. Kim, and H. J. Kim, 2014, “Basic Analysis of Multi Geothermal Cycle Plants”, The Korean Society for marine Environment and Energy, Vol. 1, No. 1, pp. 165-170.
5. B. Saadatfar, R. Fakhrai and T. Fransson, 2013, “Waste heat recovery Organic Rankine cycles in sustainable energy conversion: A state of the art review”, JMES, Vol. 1 Issue 1.