한국동력기계공학회지 제20권 제2호 pp. 79-84 2016년 4월 ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2016.20.2.079
Vol. 20, No. 2, pp. 79-84, April 2016

작동유체에 따른 온도차발전사이클의 성능 해석
Performance Analysis of Ocean Thermal Energy Conversion on Working Fluid Classification

이호생* · 문정현**† · 김현주*
Ho-Saeng Lee*, Jung-Hyun Moon**† and Hyeon-Ju Kim*

(Received 24 March 2016, Revision received 5 April 2016, Accepted 5 April 2016)

Abstract: The thermodynamic performance of ocean thermal energy conversion with 1 kg/s geothermal water flow rate as a heat source was evaluated to obtain the basic data for the optimal design of cycle with respect to the classification of the working fluid. The basic thermodynamic model for cycle is rankine cycle and the geothermal water and deep seawater were adapted for the heat source of evaporator and condenser, respectively.

R245fa, R134a are better to use as a working fluid than others in view of the use of geothermal water. It is important to select the proper working fluid to operate the ocean thermal energy conversion. So, this paper can be used as the basic data for the design of ocean thermal energy conversion with geothermal water and deep seawater.

Key Words : Deep seawater, Ocean thermal energy conversion, Geothermal water, Rankine cycle

1. 서 론

오늘날 화석연료의 사용과 기술의 급속한 발전으로 인한 산업화는 인류의 삶의 질을 크게 개선하여 왔지만, 사용 가능한 화석연료의 고갈에 따른 에너지 위기 및 지구 환경에 대한 문제점 등으로 인해 기존 에너지 자원을 대체할 수 있는 신재생에너지에 대한 관심이 날로 증대되고 있다. 이런 신재생에너지 중 지열, 해양에너지, 태양열 등은 별도의 연소 과정 없이 온도차를 이용해 전기를 생산할 수 있다.[1)]

특히, 지열은 인류가 가지고 있는 가장 오래된 에너지 자원 중 하나이며, 현재 전 세계적으로 그 이용이 증대하고 있지만 우리나라에서는 그 중요성이 상대적으로 낮게 평가되어 왔다. 최근 들어서 열펌프를 이용한 냉난방에 지열 사용하고 있지만, 외국의 경우 지열발전에도 폭넓게 사용되고 있다.

현재 전 세계에서 지열 발전을 통한 전기 생산이 증가하고 있으며, 미국, 필리핀, 멕시코, 이탈리아, 인도네시아, 일본 등이 이 분야를 주도하고 있다.[2)]

**† 문정현(교신저자) : 선박해양플랜트연구소
E-mail : moonjh@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5028
*이호생, 김현주 : 선박해양플랜트연구소

**† Jung-Hyun Moon(corresponding author) : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering
E-mail : moonjh@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5028
*Ho-Saeng Lee, Hyeon-Ju Kim : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

지열발전 전체 용량 규모는 계속 성장세를 보이고 있고, 작동 유체를 사용하는 바이너리 지열발전 방식의 플랜트 수가 많은 비중을 차지하고 있어 지열발전이 더 이상 고온의 지열자원을 가지고 있는 국가에서만 보급될 수 있는 분야가 아니라는 것을 뒷받침하고 있고, 미국 등을 중심으로 한 바이너리 사이클을 적용한 저온 지열발전이 활성화 되면서 국내에서도 지열발전 가능성을 엿보고 있다. 지열발전 플랜트의 규모는 국가별 혹은 각 지역별 지열자원 분포 특성과 발전 요구량에 따라 100 kWe에서 100 MWe급까지 다양하고, 미국은 2050년 미국 기저부하의 10%인 약 100,000 MWe를 EGS(Enhanced geothermal system) 지열 발전이 담당할 수 있을 것으로 예측하는 등[3] 전 세계 시장은 크게 확대될 것이다.

국내에는 1980년대부터 지열류량 등에 대한 연구를 시작하였고, 약 3 km 지하에서는 약 44~110℃의 온도분포를 보이고 있고 경상도 남북부, 강원도 중부 등 몇 군데에서 높은 지중 온도를 나타냈다.[4]

하지만, 우리나라는 비화산지대이고 지중온도가 외국에 비해 높지 않고, 3 km 이상에서는 지하대수층이 거의 존재하지 않아 지열발전을 위해 저온 지열발전을 도입할 수밖에 없는 실정이다. 지열 발전을 위한 지열자원의 온도 범위와 각 방식별 발전량을 비교해보면[5] 국내 여건에 맞는 방식은 바이너리 사이클 발전으로 ORC(Organic rankine cycle) 플랜트가 적합하므로 이에 적합한 지열발전 플랜트 선정 및 연구가 필요하다. 특히, 경북 포항 등지에서는 지온 증가율이 40℃/km까지 이르므로 향후 우리나라에서도 차세대 저온 지열발전을 기대할 수도 있을 것으로 보고되고 있다.[6] 이런 유기 랭킨 사이클 이용한 연구는 국내에서도 있어 왔지만[7-9] 여전히 부족한 실정이며 지속적인 연구가 필요한 시점이다.

한편, 지열발전 사이클 구성을 위해 응축기에 사용할 기존의 냉각수 대신 해양심층수를 이용한다면 사이클 효율을 크게 상승할 것이다. 해양심층수의 이용 중 해양온도차발전은 표층수와 심층수의 온도차를 이용하여 암모니아 등의 작동유체로 터빈을 돌려 발전하는 방식으로 조력이나 파력 발전과 같은 시스템에 비해 해상요소에 별로 영향을 받지 않고 전력 생산이 가능하다. 국내에서는 동해에 해양온도차발전에 적합한 해수온도차를 가지는 것으로 밝혀졌고[10], 특히 동해는 지형적으로 수심이 깊어서 비교적 해안에서 근거리에 심층수가 존재하는 유리한 조건을 가지고 있으며, 해안으로부터 5~10 km 내외에서 심층수의 획득이 가능한 장점을 보유하고 있다.[11]

따라서 본 연구에서는 지열수를 열원으로 하고 심층수를 열침으로 하는 온도차발전 사이클을 모사하여 지열수 및 심층수 공급 온도에 따른 사이클 성능을 비교하고, 또한 사이클 성능 향상을 위해 재생기를 부착한 사이클의 성능을 비교·분석하고자 한다.

2. 온도차발전 사이클

2.1 온도차발전 사이클

지열수 및 심층수를 이용한 온도차발전 사이클은 기본적인 랭킨 사이클로 구성되어 있고, 그 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 기본적인 랭킨 사이클은 기화기, 터빈, 응축기 및 펌프로 구성되어 있고 이들 구성기기가 서로 파이프라인으로 연결되어 작동되는데, 온도차 발전을 위한 랭킨 사이클의 기본 원리는 일반 발전의 원리와 동일하다.

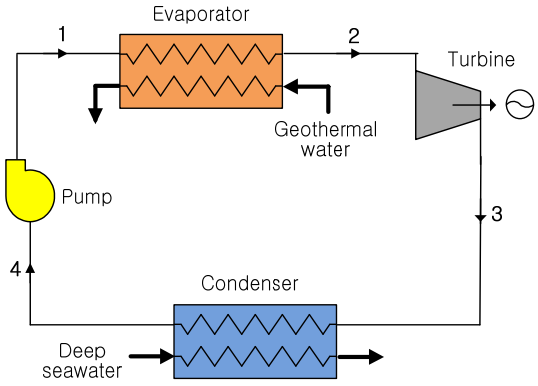

Fig. 1 Diagram of ocean thermal energy conversion

발전 중 랭킨 사이클로 구성되는 바이너리 방식은 지열수와 심층수 사이의 온도차를 이용해 비등점이 낮은 작동유체를 표층수로 증발시킨 뒤 그 압력차를 이용해 터빈에서 발전하는 것으로, 고온의 열원에서 저온의 열원으로 열이 흘러 들어가 터빈을 구동시켜 전력을 생산하는 방법이다. 작동유체는 기화기에서 고온의 지열수와 열교환하여 증발하여 과열증기 상태가 되어 터빈으로 유입된다. 작동유체 증기는 터빈 가동 후 응축기로 유입되어 저온의 심층수와 열교환하여 응축되면서 과냉 상태가 되어 펌프에 의해 승압되어 다시 기화기로 유입된다.

Fig. 2는 온도차발전 사이클의 T-s선도를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 기화기는 가열, 상변화, 과열 구간의 3 구간으로, 응축기는 상변화 및 과냉의 2 구간으로 설정하였고, 터빈 및 펌프는 각각 이상적인 등엔트로피과정으로 가정하였다. 또한, 외부와의 열교환 및 열교환기 내에서의 압력강하는 무시하였다.

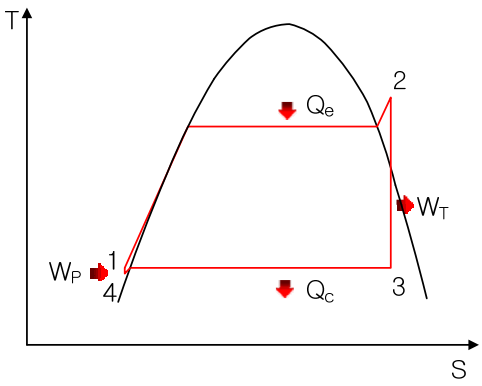

Fig. 2 T-s diagram of geothermal power cycle

온도차발전 사이클을 모사하기 위해 EES (Engineering Equation Solver) 프로그램을 이용하였고, 기본적인 랭킨 사이클을 설계하여 시뮬레이션에 이용하였다. EES는 증기동력사이클 및 냉동사이클 등 열역학적 사이클 모사에 필요한 상태값을 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있어 이번 사이클 시뮬레이션에 사용하였다.

Table 1은 사이클 모사를 위한 조건을 나타내고 있다. Table 1에서와 같이 지열수를 이용한 지열발전 사이클 모사를 위해 자연냉매인 프로판, 암모니아를 비롯하여 R22, R134a, R245fa를 적용하여 지열수를 80～100℃, 냉각수를 5～25℃로 변화시켜 사이클 성능을 비교·분석하였다.

Table 1 Simulated condition

Parameter	Value
Geothermal flow rate (kg/s)	1
Geothermal temperature (℃)	84
Cold seawater temperature (℃)	5
Isentropic turbine efficiency (%)	85
Isentropic pump efficiency (%)	85
Working fluid	R245fa, etc

2.2 사이클 분석 및 계산식

Fig. 2와 같은 온도차발전 사이클에서 얻어지는 열량인 기화기 열량 Q_e [W]는 아래 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$Q_e = m_r(h_2 - h_1) \tag{1}$$

여기서, m_r은 작동유체 순환량 [kg/s]를 나타내며 h_1과 h_2는 각각 기화기 입·출구 엔탈피 [kJ/kg]을 나타낸다.

터빈에서 발생하는 동력 W_T [W]는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$W_T = m_r(h_2 - h_3) \tag{2}$$

여기서, h_2와 h_3은 각각 터빈 입·출구 엔탈피 [kJ/kg]를 나타낸다.

사이클에서 제거되는 열량을 나타내는 응축열량 Q_c [W]는 아래 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$Q_c = m_r(h_3 - h_4) \tag{3}$$

여기서, h_3과 h_4는 각각 응축기 입·출구 엔탈피 [kJ/kg]을 나타낸다.

또한 펌프 동력 W_P [kW]는 식 (4)로 계산되어진다.

$$W_P = m_r(h_1 - h_4) \tag{4}$$

사이클에서 발생되는 순수동력 W_{net} [W]은 아래 식 (5)로 계산된다.

$$W_{net} = W_T - W_P \tag{5}$$

사이클 효율 η [%]은 얻어지는 열량에 대한 순수동력의 비를 나타내므로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_e} \tag{6}$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 지열수 84℃, 심층수 5℃에서 작동유체별 기화기 압력 및 온도를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 붉은 점으로 표시한 기화기 내 작동유체의 증발온도는 비슷한 수치를 나타내었지만, 그 증발온도에 따른 증발압력은 R245fa의 저압용 냉매들은 약 370 kPa를 나타내었고, R134a는 1100 kPa, 암모니아, R-22, 프로판 등은 약 1500 kPa 등을 나타내었다. 지열수 온도가 더 올라가게 되면 기화기 내 포화조건은 더욱 상승할 것이므로 고압에 따른 설계가 이루어져야 할 것이다.

Fig. 4는 각 작동유체를 적용하여 사이클 발전출력이 최대일 때, 작동 유체별 작동 유체 순환량을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 암모니아가 가장 작은 순환량을 나타내었고, 탄화수소계, HFC계 냉매 순으로 나타내었다. 즉, 자연 냉매는 우수한 열역학적 물성치로 인해 비슷한 용량 대비 적은 냉매 순환량이 필요함을 알 수 있다.

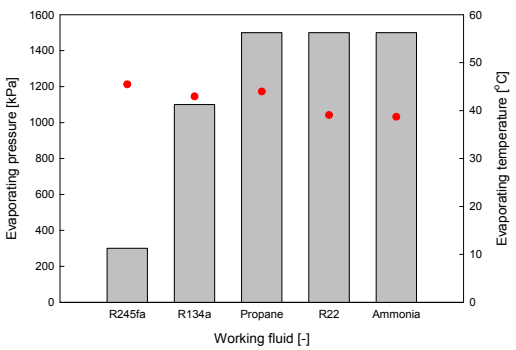

Fig. 3 Evaporating conditions on working fluid

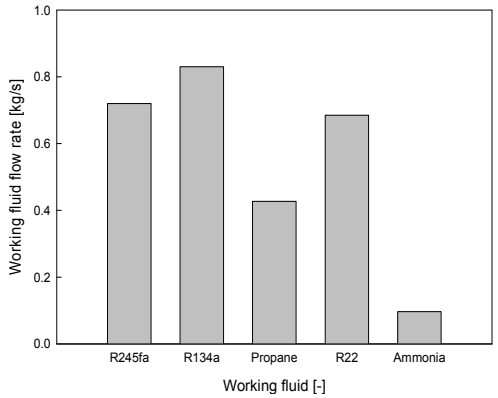

Fig. 4 Flow rate of on working fluid classification

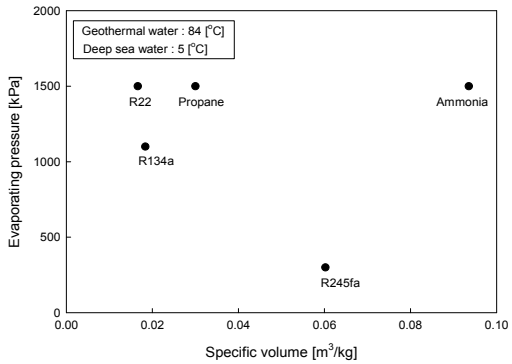

Fig. 5 Comparison of thermodynamic properties

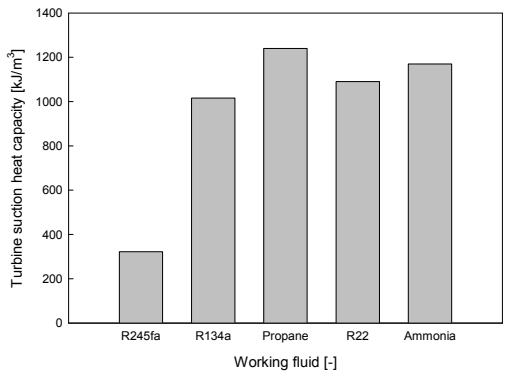

Fig. 6 Turbine suction heat capacity on working fluid

Fig. 5는 각 작동유체의 증발압력과 비체적을 나타내고, Fig. 6은 터빈 흡열량을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 증기압이 낮고 비체적이 큰 R245fa의 경우 주요 장치의 크기가 커지는 단점이

있다.

Fig. 6의 터빈 흡열량에서도 보이듯이 가장 작은 값을 보여서 터빈 크기가 상대적으로 커지게 될 것이다. R245fa의 경우 낮은 증기압으로 고온의 지열수에 대한 장점은 있지만 장치가 상대적으로 커지게 될 것이다. 반면 증기압이 높고 비체적이 작은 R22의 경우 R245fa에 비해 주요 장치를 작게 설계할 수 있을 것이다. 오른쪽 흡열량에서 보더라도 R245fa에 비해 큰 값을 나타내었다. 프로판의 경우 높은 증기압 및 높은 터빈 흡열량을 가지면서 우수한 열역학적 물성치로 인해 효율 또한 높게 나타났다.

Table 2와 3은 응축기용 열침 온도변화에 따른 R245fa, R134a, propane의 각각 사이클 효율 및 발전출력을 나타내고 있다. 응축기 열침 온도가 20℃인 경우는 기존 지열발전 방식을 나타내고, 5℃일 경우는 심층수를 이용하는 경우이다. 표에서와 같이 기존 지열발전용 냉각수 20℃의 경우에 비해 심층수 5℃ 사용시 효율 및 발전출력면에서 프로판이 가장 상승치가 크게 나타났다. R134a의 경우 발전효율 면에서 심층수 사용에 대한 효과가 가장 작게 나타났다.

Table 2 Efficiency on Heat sink water temperature

η (%)	Heat sink water temperature (℃)		
	20	5	%
R245fa	6	7.385	18.7
R134a	6.203	7.458	16.8
R290	6.147	7.679	20.0

Table 3 Net power on Heat sink water temperature

P_{net_max} (kW)	Heat sink water temperature (℃)		
	20	5	%
R245fa	8.283	11.75	29.5
R134a	8.061	12.65	36.2
R290	8.026	12.68	36.7

Table 4는 지열수 84℃, 심층수 5℃에서 사이클 총출력 50 kW에 대한 작동유체별 필요 지열수량을 나타내고 있다. 총출력 50 kW급 해양지열발전의 필요 지열수량은 프로판이 가장 작은 값을 나타내었다.

Table 4 Geothermal water flow rate on working fluid

Woring fluid	Flow rate	
	kg/s	ton/day
R245fa	4.23	365.5
R22	4.2	362.9
R134a	3.82	330
Ammonia	5.7	492.5
Propane	3.72	321.4

4. 결 론

작동유체 종류에 따른 지열수 및 심층수를 이용한 온도차발전 사이클을 모사하여 성능을 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

지열수(85℃ 이상) 및 심층수(5℃ 이하)를 이용한 바이너리 방식의 지열 해양 발전에 있어서 작동유체에 대해서 다음과 같이 정리할 수 있다.

열교환기 등 주요 구성 기기의 콤펙트화를 위해서는 R22, Propane, Ammonia 등이 유리할 것으로 보인다.

지열수 및 심층수 이용에 대한 효과에 대해서는 R134a, Propane 등이 유리할 것으로 보인다.

사이클 효율 측면에서는 R245fa, Propane, Ammonia 등이 유리할 것으로 보인다.

고온 지열수 사용에 따른 사이클 압력 측면에서는 R245fa, R134a가 유리할 것으로 보인다.

가연성 및 독성 등 작동유체 안정성 측면에서는 R245fa, R134a, R22가 유리할 것으로 보이고, 지구온난화지수 측면에서는 R245fa, Ammonia, Propane가 유리할 것으로 보인다.

따라서 지열수와 심층수를 이용한 온도차발전 사이클 설계를 위한 적정한 작동유체 선정이 중요하고, R134a 및 R245fa 등의 작동유체와

propane, ammonia 등의 작동유체의 단점을 보완하기 위한 혼합 작동유체의 개발도 필요할 것이다.

후 기

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

References

1. Y. J. Baek and K. C. Jang, 2008, “Power Generation Technology of Geothermal and Low Temperature”, Korea Journal of Geothermal Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 32-38
2. H. J. Lim, 2009, “Domestic and International Status of Geothermal Heating and Cooling & Geothermal Power Generation”, The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58, No. 9, pp. 18-22
3. MIT, 2006, “The Future of Geothermal Energy"
4. K. C. Chang, 2009, “Status and Prospect of Domestic and International Geothermal Power Generation”, The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58, No. 9, pp. 30-36
5. H. J. Lim, J. T. Kwon, G. S. Kim and K. C. Chang, 2009, “A Feasibility Study on Geothermal Power Plant in Korea”, The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, pp. 39-44
6. Y. H. Song and E. Y. Ahn, 2005, “Analysis on the Current Status of World Geothermal Energy Resources Utilization and the Future Prospect”, The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 42, No. 4, pp. 287-296
7. S. K. Lee and J. S. Woo, 2008, “A Study of Geothermal Power Production with Flashed Steam System”, The Korean Solar Energy Society, Vol. 28, No. 5, pp. 1-7
8. Y. J. Baek, M. S. Kim, K. C. Chang, H. K. Yoon, Y. S. Lee and H. S. Ra, 2009, “Analysis of HFC-245fa Organic Rankine Cycle for Geothermal Power Generation”, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 5, No. 1
9. Y. J. Baek, M. S. Kim, K. C. Chang, Y. S. Lee, S. Y. Park and H. S. Ra, 2008, “Simulation of the Kalina cycle for a Geothermal Power Generation”, The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, pp. 782-787
10. Korea Power Company, 1989, “A Study on the Development of Ocean Thermal Energy conversion and Wave Power Generation System”, Technical report, KRC-89G-T10
11. H. S. Lee, H. J. Kim and J. I. Yoon, “Heating, Cooling Heat Pump System Using Deep Seawater”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 21-25