한국해양환경 · 에너지학회지
Journal of the Korean Society
for Marine Environment and Energy
Vol. 17, No. 2. pp. 116-121, May 2014

http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2014.17.2.116
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

해양지열발전용 다단재열재생사이클 성능해석

이호생 · 차상원 · 정영권 · 김현주†
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해수플랜트연구센터

Performance Analysis on the Multi Stage Reheater Regeneration Cycle for Ocean Geothermal Power Generation

Ho Saeng Lee, Sang Won Cha, Young Kwon Jung and Hyeon Ju Kim†
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Seawater Utilization Plant Research Center, Gangwon-do 219-821, Korea

요 약

지열수를 온열원으로 사용하고, 해양심층수를 열침으로 사용하는 바이너리(binary) 지열 발전시스템은 기존 지열 발전시스템의 효율을 증대하기 위한 재열과정과 터빈출력을 향상시키기 위한 다단과정을 각각 또는 복합적으로 적용하여 다단재열재생사이클의 성능개선을 검토하였다. 사이클종류는 다단재열사이클(Multi Stage reheater cycle; MS), 다단재열재생사이클(Multi stage reheater regeneration cycle; MSR)이 있다. 작동유체는 R134a, R245fa를 적용하였으며 온열원의 온도가 65 ºC, 75 ºC, 85 ºC 열침은 5 ºC를 적용하여 기본해석을 수행하였다. 본 논문에서는 온열원변화, 작동유체의 종류, 사이클의 종류에 따른 해양지열발전용 다단재열재생사이클의 출력 및 효율을 높이기 위한 해석을 수행하였다. 이를 열역학적 사이클로 모사하기 위한 상용 프로그램인 Aspen HYSYS(V8.0)를 이용하여 해석을 진행 하였다. 작동유체는 R245fa가 R134a보다 우수한 성능을 보였으며, 온열원의 변화와 각각의 사이클 종류에 따라 적절한 작동유체가 있음을 확인 할 수 있었다. 사이클의 출력 및 효율은 각각 MS사이클과 MSR사이클에서 좋은 성능을 나타냈다.

Abstract – In order to study the improvement of the multi stage regeneration cycles, muti-stage processes were applied to the cycles, respectively or together. The kinds of the cycles are multi stage reheater cycle (MS) and multi stage reheater regeneration cycle (MSR). Working fluid used was R134a and R245fa. Temperature of the heat source was 65 ºC, 75 ºC, and 85 ºC, and temperature of the heat sink was 5 ºC. Optimization simulation was conducted for improving the gross power and efficiency with multi stage reheater regeneration cycle for ocean thermal energy conversion(OTEC) with changing of a heat source, kind of the working fluid, and type of the cycle. Performance analysis of the various components was simulated by using the Aspen HYSYS for analysis of the thermodynamic cycle. R245fa shows better performance than R134a. This paper showed the most suitable working fluid with changing of a heat source and the kinds of working cycle. Compared to each other, MS showed better performance at gross power and MSR showed higher cycle efficiency.

Keywords: Ocean Geothermal Power Generation(해양지열발전), Multi-staged Reheater Regeneration Cycle(다단재열재생사이클), Deep ocean water(심층수)

1. 서 론

지열은 인류가 가지고 있는 가장 오래된 에너지 자원 중 하나이며, 전 세계적으로 그 이용이 증대하고 있지만 우리나라에서는 그 중요성이 상대적으로 낮게 평가되어 왔다. 전 세계에서 지열 발전을 통한 전기 생산이 증가하고 있으며, 미국, 필리핀, 멕시코, 일본 등이 이 분야를 주도하고 있다(임효재 등[2009]). 지열발전 전체 용량 규모는 계속 성장세를 보이고 있고, 작동유체를 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

†Corresponding author: hyeonju@kriso.re.kr

서 100 kWe에서 100 MWe급까지 다양하고, 미국은 2050년 미국 기저부하의 10%를 EGS(Enhanced geothermal system)지열발전이 담당할 수 있을 것으로 예측하는 등(MIT[2006]) 전 세계 시장은 크게 확대 될 것이다. 국내에서는 1980년대부터 지열유량 등에 대한 연구를 시작하였고, 약 지하 3 km에서는 약 44~110 ℃의 온도분포를 보이고 있다. 지열발전을 위한 지열자원의 온도 범위와 각 방식별 발전량을 비교해보면(임효재 등[2009]) 국내 여건에 맞는 방식은 바이너리 사이클 방식으로 ORC(Organic Rankine Cycle)을 적용한 플랜트가 적합하기 때문에 이에 따른 연구가 필요한 실정이다. 이런 유기랭킨 사이클을 이용한 연구는 국내에서도 있어 왔지만(이세균 등[2008]) 여전히 부족한 실정이며 지속적인 연구가 필요한 시점이다(차상원 등[2013]).

한편, 지열발전 사이클 구성을 위해 응축기에 공랭식이 아닌 해양심층수를 이용한다면 사이클 효율을 크게 상승시킬 수 있을 것이다. 해양심층수를 이용하는 기술 중 하나인 해양온도차발전은 표층수와 심층수의 온도차를 이용해 암모니아 등의 작동유체로 터빈을 돌려 발전하는 방식으로 특히 동해는 지형적으로 수심이 깊어서 비교적 해안에서 근거리에 심층수가 존재하는 유리한 조건을 가지고 있으며, 해안으로부터 5~10 km 내외에 심층수의 획득이 가능한 장점을 보유하고 있다(이호생 등[2011]).

기존의 바이너리 방식의 지열발전은 응축기 내의 작동유체의 냉각 및 응축을 공랭식으로 주로 사용이 되고 있으며, 여름철의 경우 대기온도가 높기 때문에 응축기로 공급되는 냉각수의 온도가 올라가게 되므로 지열수와의 온도차가 줄어들어 발전효율이 크게 떨어지게 된다. 따라서 이 냉각수를 공랭식이 아닌 해양심층수를 이용하게 된다면 기존의 냉각수를 사용했을 때 보다 좀 더 효과적으로 작동유체를 냉각 및 응축시킬 수 있기 때문에 사이클 효율을 기대할 수 있다(Ho-Saeng Lee, *et al.*[2011]).

본 논문에서는 바이너리 지열 발전시스템에서 기화용 온수를 온열원으로, 해양심층수를 열침으로 사용하여 사이클을 구성하였다. 또한 기존의 바이너리 지열 발전시스템의 사이클 효율을 증가시키기 위해 다단과정, 재생과정 및 재열과정을 적용한 다단재열재생사이클에 대한 해석을 수행하였다. 본 논문에서는 성능 향상을 위한 다단재열재생사이클로 다단재열사이클과 다단재열재생사이클을 제시하여 성능 해석을 수행하였다. 또한, 기화용 온수의 온열원의 온도를 65 ℃, 75 ℃, 85 ℃로 변화시켜 해석하였고, 작동유체는 기존의 지열발전에 주로 사용되고 있는 R134a, R245fa를 적용하였다. 이는 기존에 사용되고 있는 작동유체이므로 비교검토가 쉬우며, 실험 및 상용화에 용이 하다는 점이다.

2. 사이클 해석

2.1 해양지열발전사이클

해양지열발전 사이클은 기존의 바이너리방식의 지열발전에 응축열원을 해양심층수를 적용한 발전 방식을 말한다. Fig. 1은 바이너리사이클 발전(binary cycle power plant)의 개념도를 나타내고 있다.

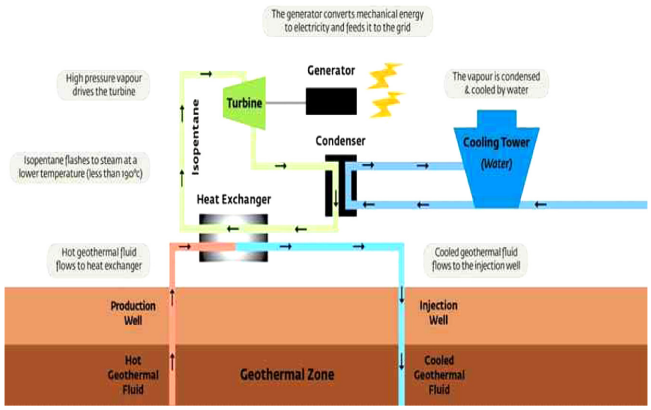

Fig. 1. Binary cycle power plant with cooling tower.

지하에서 공급되는 지열온열원은 100 ℃ 미만의 온열원(hot water)이 공급하게 된다. 이 열원으로는 터빈을 직접 구동 시킬 수 없기 때문에 여기에 ORC를 적용하여 작동유체인 냉매가 지열열원을 얻어 증기로 증발하여 터빈을 구동시켜 전력을 얻게 된다. 이때 터빈을 지난 작동유체가 응축을 해야 되는데, 응축열원으로는 냉각탑을 이용하여 냉각을 시키게 된다. 하지만 이 사이클의 큰 단점으로는 냉각탑의 응축열원이 일정하지 않다는 단점이 있다. 즉, 여름철에는 대기가 뜨겁기 때문에 냉각탑의 응축열원이 높아져 전체적인 사이클의 효율이 낮아지게 되므로 기존의 바이너리방식의 지열발전은 계절의 영향이 냉각탑의 성능에 큰 영향을 미치게 되어 전체적인 사이클 성능에도 많은 영향을 준다.

따라서 기존의 냉각탑 문제를 해결하기 위해 응축열원으로 해양심층수를 적용하는 방안을 고안하였다. Fig. 2는 해양심층수를 적용한 해양지열발전 사이클의 모습을 나타내고 있다. 기존의 바이너리 발전 사이클에 비해 응축열원으로 해양심층수를 적용하였고, 해양심층수의 장점은 계절에 영향을 받지 않고 연간 4 ℃의 응축열원을 일정하게 공급할 수 있다. 또한, 기존의 냉각탑보다 더 낮은 응축열원을 공급할 수 있기 때문에 바이너리 사이클의 출력 및 효율을 상승시킬 수 있다는 장점 또한 존재한다. 따라서 이러한 장점을 가진 해양지열발전사이클에 대해 시뮬레이션 해석을 통한 다양한 성능해

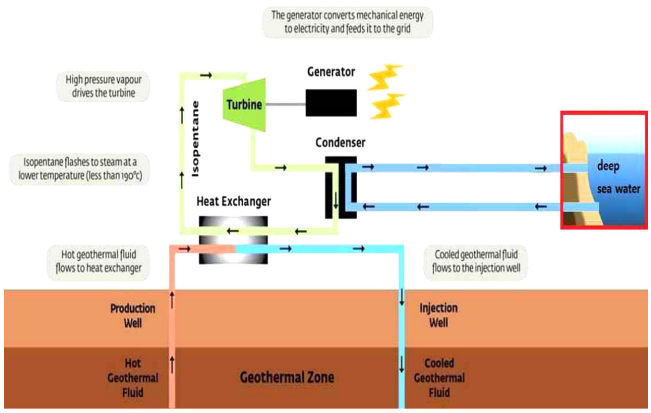

Fig. 2. Binary cycle power plant with deep sea water.

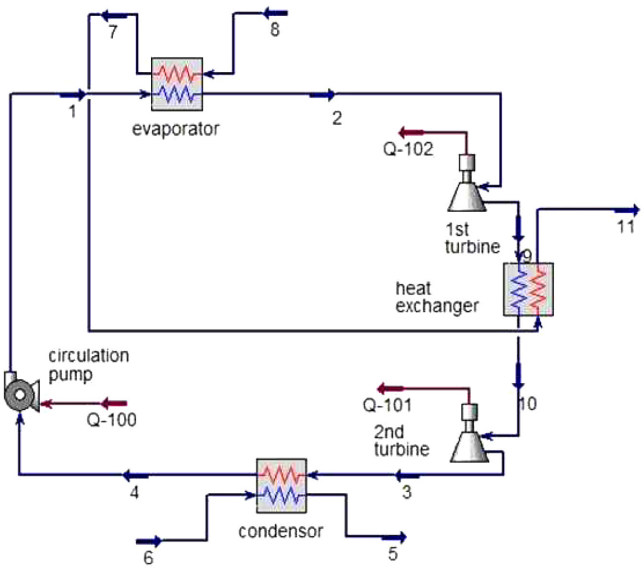

Fig. 3. Schematic of the Multi Stage Reheater Cycle (MS).

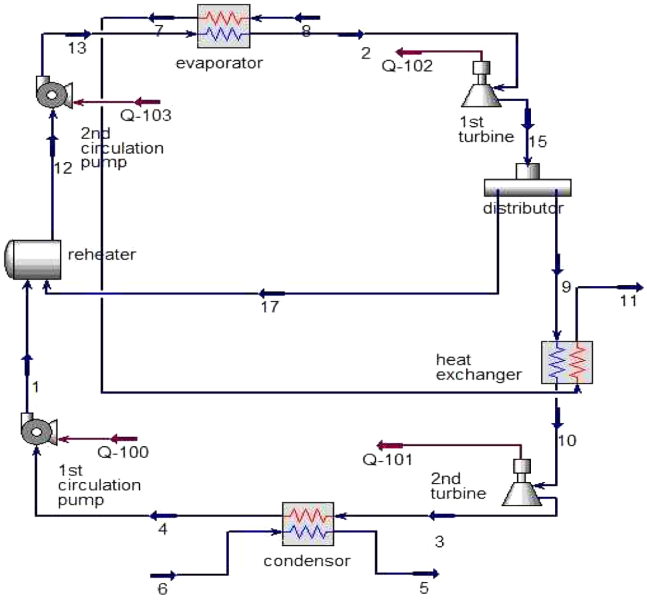

Fig. 4. Schematic of the Multi Stage Reheater Regeneration Cycle (MSR).

석을 진행하였다.

2.2 다단재열재생사이클

본 논문에서는 해양지열발전 사이클의 출력 및 효율을 높이기 위하여 다단재열재생사이클을 고안하였다. 다단재열재생사이클에는 다양한 종류가 있는데 본 논문에서는 다단재열사이클, 다단재열재생사이클을 고안하여 제시하였다.

Fig. 3은 다단재열사이클을 보여준다. 펌프를 통해 작동유체가 증발기로 들어가고, 증발기를 거친 작동유체는 1st 터빈을 통과하여 전력을 얻는다. 터빈을 통과한 작동유체는 증발기를 통과한 온열원과 열교환을 통해 추가적인 열에너지를 얻어 2nd 터빈을 거쳐 전력을 추가적으로 얻게 된다. 그리고 터빈을 통과한 작동유체는 열침과 열교환을 하여 응축되어 다시 펌프로 보내진다. 위의 사이클은 기존의 ORC에 비해 온열원을 버리지 않고 재사용하여 사이클 성능을 높일 수 있다는 장점이 있다.

Fig. 4는 다단재열재생사이클에 대해 설명하고 있다. 이 사이클은 기존의 다단재열사이클에서 1st 터빈을 거친 작동유체에 재생사이클을 추가한 것이다. 1st 터빈을 지난 작동유체는 분배기를 통하여 일부는 2nd 터빈으로 공급되고, 일부는 1st 순환펌프를 통과한 작동유체와 재가열기에서 만나게 된다. 그래서 작동유체가 증발기에 들어가기 전에 예열을 하여 증발기의 용량이 작아지는 장점이 있다. 증발기의 용량이 작아지면 전체적인 사이클의 효율 또한 높아지게 된다. 이 사이클을 구성할 때에 재가열기에 분배되는 작동유체의 양은 2nd 순환펌프로 가기 전 작동유체가 기체상태가 되지 않는 범위 내에서 순환되는 양으로 결정하였다.

2.3 시뮬레이션 해석조건

시뮬레이션 해석 방법으로는 기본적인 유기랭킨사이클을 해석하기 위해 공정설계프로그램인 Aspentech HYSYS(V.8.0)프로그램을 이용하였다. HYSYS는 열역학적 사이클 모사에 필요한 상태값을 정확하게 계산할 수 있다는 장점이 있기 때문에 이번 연구에서 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 상태방정식으로는 식 (1)과 같은 Peng-Robinson방정식을 사용하였다. Peng-Robinson방정식은 열해석에서 주로 사용하는 상태 방정식 중 하나이며 다음과 같다. 여기서 P는 압력(pressure), R은 기체상수, T는 온도(temperature), V는 부피(volume), 그리고 a,b는 각 각 상수를 의미하는데 이는 식 (2), (3)과 같다. 해석조건은 기존의 ORC사이클에서 R245fa를 적용하였을 때에 200 kW를 얻을 수 있는 조건을 해석하였고, 이를 바탕으로 온열원 및 냉열원의 유량조건을 동일하게 적용하여 해석을 진행하였다. 작동유체는 현재 지열발전에 널리 사용되고 있는 R134a, R245fa를 적용하였다. 온열원의 온도는 65 ℃, 75 ℃, 85 ℃의 조건으로 해석을 진행하였으며, 각각의 효율 및 해석조건으로는 아래의 Table 1과 같이 해석을 진행하였다. 시뮬레이션 해석결과 값을 바탕으로 사이클의 효율은 펌프소요동력을 고려하지 않았으며 식 (4)와 같이 계산하였다.

Table 1. Simulated condition

Parameter	Value
Cycle type	Basic, MS, MSR
Warm water inlet temperature (℃)	65, 75, 85
Warm water ΔT(inlet and outlet) (℃)	10
Cold water inlet temperature (℃)	5
Heat source and sink of a flow rate ratio	1:1
Isentropic turbine efficiency (%)	80
Isentropic pump efficiency (%)	65
generation efficiency (%)	90
working fluid	R134a, R245fa

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

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

$$b = 0.07780\frac{RT_C}{P_C} \quad (3)$$

$$\eta_{cycle} = \frac{W_t}{Q} \quad (4)$$

W_t = 터빈출력, Q = 사이클 내에 투입된 총열량

3. 시뮬레이션 해석결과 및 고찰

3.1 R245fa를 적용한 해양지열발전 사이클

선행해석으로 R245fa를 기존의 밀폐사이클에서 온열원 75 ℃, 열침 5℃의 조건으로 200 kW의 출력을 얻게 되는 사이클에 대한 해석을 수행하였다. 이때의 작동유체의 유량은 9.495 kg/s를 나타냈으며, 열원 및 열침의 유량은 34.69 kg/s로 해석되었다. 이 결과를 바탕으로 나머지 MS, MSR사이클에 같은 유량 조건을 적용하여 그에 따른 시뮬레이션 해석 결과를 비교분석 하였다.

Fig. 5는 사이클의 종류에 따른 출력 및 사이클 효율을 나타낸다. 출력의 경우 기본사이클에 비해 MS 및 MSR 사이클 모두 우수한 성능을 나타내고 있다. 이는 기본사이클과는 달리 해양지열발전 사이클에 다단과정을 적용함으로써, 버려지는 열원을 재사용하여 출력을 얻게 됨으로 기본사이클에 비해 높은 성능을 나타내고 있다. 가장 높은 출력값을 나타내는 것은 MS로 254.22 kW이며 기존대비 약 21% 향상되는 결과를 확인 할 수 있었다. 사이클 효율에서도 기본사이클에 비해 모두 높은 성능을 나타내고 있다. MSR의 경우 재생과정을 추가함으로써 열교환기의 용량을 줄이게 되는 효과로 인해 출력은 다소 감소하였지만 그에 비해 들어가는 열용량이 작아짐으로써 사이클 효율이 가장 높은 값을 나타내었다. 이때의 사이클 효율은 13.06%로써, 기본사이클에 비해 약 27% 향상되었다.

Fig. 6은 사이클의 종류에 따른 증발기의 용량을 나타내고 있다. MS가 기본사이클에 비해 투입되는 열용량이 조금 높은데, 이는 사이클의 특성에서 알 수 있듯이 버려지는 열원을 한 번 더 사용하기 때문에 그에 따른 투입되는 열용량이 약간 높게 나오는 것을 확인 할 수 있다. 또한 MSR은 사이클 특성에서 알 수 있듯이 재생과정을 추가한 사이클로써, 전체적인 증발기의 용량이 작아지게 되는 현상을 확인 할 수 있었다. 위의 시뮬레이션 해석을 바탕으로 R134a, R245fa를 적용하여 온열원의 변화에 따른 사이클의 특성에 대해 시뮬레이션 해석을 수행하였다.

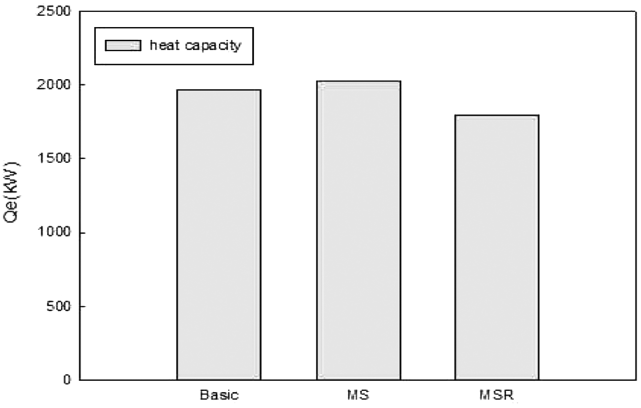

Fig. 6. Heat capacity of the cycles (R245fa).

3.2 다양한 조건에 따른 해양지열발전사이클의 성능특성

3.2.1 작동유체 및 온열원 변화에 따른 기본사이클 해석

위의 시뮬레이션 해석을 바탕으로 기본 사이클에서 온열원의 변화에 따른 작동유체의 특성에 대한 결과를 분석해 보았고, Fig. 7과 8은 온열원 변화에 따른 사이클 출력 및 효율을 나타내고 있다. 온열원이 증가함에 따라 작동유체와 상관없이 사이클 출력 및 효율은 증가하였고, R245fa가 R134a에 비해 높은 값을 나타내었다. 온열원이 85 ℃일 때 R245fa 사이클 출력 및 효율은 236.9 kW, 11.88%로 해석되었다.

3.2.2 온열원 및 사이클 종류에 따른 성능해석

사이클 종류 및 온열원 변화에 따른 해양지열발전사이클의 성능

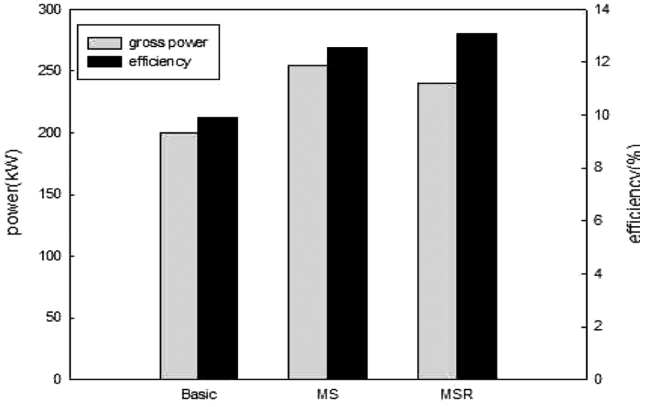

Fig. 5. Simulation results of the gross power and cycle efficiency (R245fa).

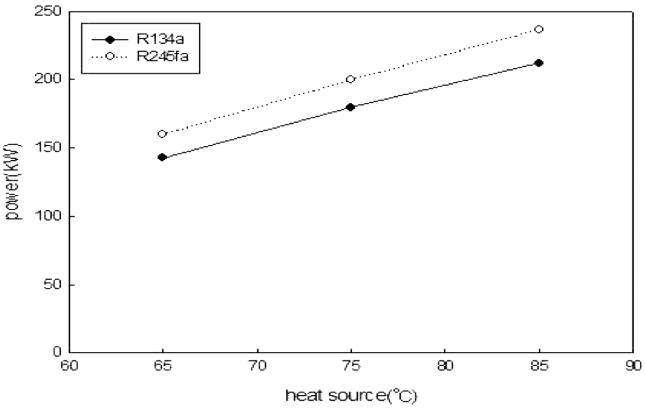

Fig. 7. Gross power with working fluids (basic cycle).

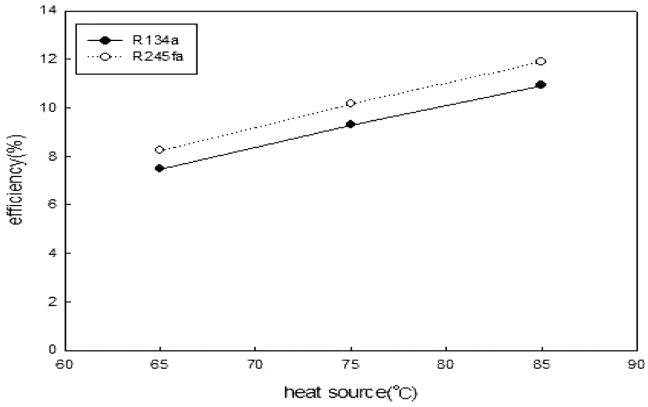

Fig. 8. Cycle efficiency with working fluids (basic cycle).

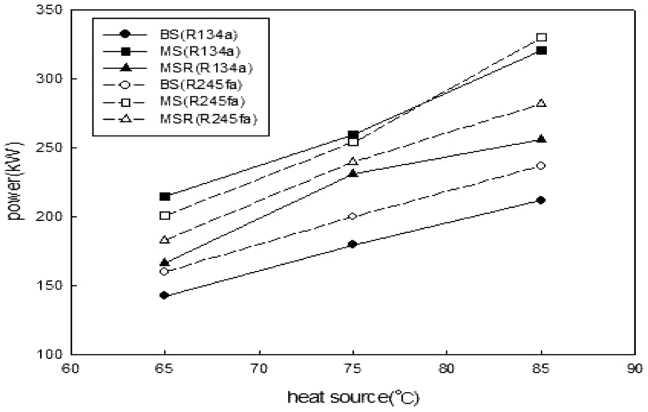

Fig. 9. Results of the gross power with working cycles (R134a, R245fa).

특성에 대해 시뮬레이션 해석을 진행하였다. Fig. 9는 온열원 변화에 따른 사이클의 출력을 보여주고 있다. 사이클의 종류와 상관없이 온열원이 상승할수록 사이클의 출력이 상승하는 것을 확인 할 수 있다. 기본사이클보다 다단재열재생사이클이 높은 성능을 나타내고 있다. MS와 MSR를 비교했을 때에 MS가 MSR보다 높은 성능을 보여주고 있다. 출력이 가장 높은 85℃열원에서 R245fa를 적용하였을 때 MS가 MSR보다 17%의 높은 성능을 보였다. MS가 높은 출력을 보이는 이유로 MS는 다단터빈으로 구성하여 버려지는 열원을 재사용함으로써 출력이 상승되었으며, MSR은 사이클에 재생과정을 포함시킴으로써 2단터빈으로 유입되는 냉매의 유량이 작아져 MS보다 출력이 낮게 나타나고 있다.

Fig. 10은 온열원 변화에 따른 사이클 효율을 나타내고 있다. 사이클 효율도 마찬가지로 기본사이클에 비해 해양지열발전사이클이 높은 성능을 나타내었다. 그리고 사이클의 효율을 높이는 목적으로 고안된 MSR이 높은 성능을 나타내는데, 이는 터빈의 출력은 낮지만 열교환기의 용량을 감소시킴으로써 전체적인 사이클의 효율이 상승하는 경향을 보이고 있다.

이 특성이 가장 잘 나타난 열원의 온도가 75 ℃ 이상의 영역에서 MSR(R245fa)가 높은 효율을 보이고 있다. 75 ℃ 이하의 영역에서는 MS(R134a)가 오히려 효율이 높은데, 이는 열교환기 용량은 MSR이 작지만 Fig. 9에서 알 수 있듯이 MS(R134a)의 출력이 가장 높은

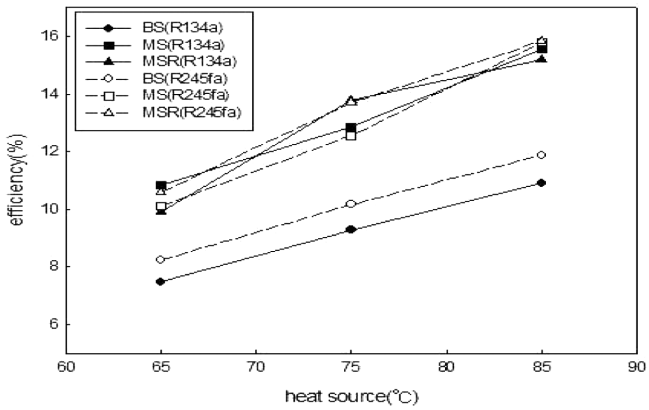

Fig. 10. Results of the cycle efficiency with working cycles (R134a, R245fa).

값을 얻게 됨으로써 효율이 제일 높은 값을 나타냈다. 따라서 MSR의 사이클 효율향상을 위해서는 75 ℃ 이상의 온열원에서 R245fa를 적용하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 지열수를 온열원으로 사용하고, 해양심층수를 열침으로 사용하는 바이너리 지열 발전시스템의 기존 지열 발전시스템의 효율을 증대하기 위한 재열과정과 터빈출력을 향상시키기 위한 다단과정을 각각 또는 복합적으로 적용한 다단재열재생사이클에 대한 시뮬레이션 해석을 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

(1) 기본사이클에 비해 다단재열랭킨사이클이 높은 성능을 나타냈으며, 기존대비 출력은 28%, 효율은 27% 상승함을 확인 할 수 있었다.

(2) 다단재열재생사이클에서 사이클출력은 MS(R245fa)가 가장 높은 성능을 나타냈으며, 온열원의 온도가 높을수록 출력이 크게 상승하였고, 이때의 출력은 330 kW를 나타냈다.

(3) 다단재열재생사이클에서 사이클효율은 MSR(R245fa)이 가장 높은 효율을 나타냈으며, 85 ℃ 열원에서 15.83%의 사이클 효율을 나타냈다.

(4) 해양지열발전사이클에 다단재열재생사이클을 적용할 때에 사이클 효율향상을 위해서는 75 ℃ 이상의 온열원에서 R245fa냉매를 적용하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 해양수산부에서 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발” 성과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

References

[1] Lee, H.-S., Kim, H.-J., Jung, D.-H., Moon, D.-S., Nihous, G. C., 2011, “Performance Analysis of Ocean Geothermal Power Gen-

eraton Cycle with Generator", International Offshore and Polar Engineering Conference, 493-498.

[2] MIT, 2006, The Future of Geothermal Energy

[3] Lee, S.-K. and Woo, J.-S., 2008, "A Study of Geothermal Power Production with Flashed Steam System", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 28, No. 5, 1-7

[4] Lee, H.-S., Jung, D.-H., Hong, S.-W. and Kim, H.-J., 2011, "Performance Analysis of Closed-type OTEC Cycle using Waste Heat", The Korea Society for Marine Environment and Energy, Vol. 25, No. 1, 80-84.

[5] Lim, H.-J., 2009, "Survey of Geothermal Air Conditioning and Geothermal generation plant", Vol. 58, No. 9, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 39-44.

[6] Lim, H.-J., Kwon, J.-T., Kim, G.-S., Chang, K.-C., 2009, "A Feasibility Study on Geothermal Power Plant in Korea", The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 39-44.

[7] Cha, S.-W., Lee, H.-S., Jung, D.-H., Kim, H.-J., 2013, "Performance Analysis for Ocean Geothermal Power Generation using Multi-staged Rankine Cycle on Heat Source Temperature", The Korea Society for Marine Environment and Energy, 3026~3030.

2014년 2월 24일 원고접수
2014년 4월 14일 심사수정일자
2014년 4월 15일 게재확정일자