

화력발전소 폐열에 따른 작동유체별 액-증기 이젝터를 적용한 1MW급 ORC의 성능 분석

Performance Analysis of 1MW Organic Rankine Cycle with Liquid-Vapor Ejector using Effluent from Power Plant

김현욱* · 윤정인**† · 손창효**

Hyeon-Uk Kim*, Jung-In Yoon**† and Chang-Hyo Son**

(접수일 : 2014년 11월 10일, 수정일 : 2014년 11월 28일, 채택확정 : 2014년 11월 28일)

Abstract: In this paper, suitable working fluid of 1MW Organic Rankine Cycle(ORC) with liquid-vapor ejector using effluent from power plant is selected. The results of comparison performance of 5 refrigerants are as follows; R600a, R134a, R1270, R236fa, R235fa. The operating parameters considered in this study include the condensation capacity evaporation capacity and efficiency. As a result of comparison of basic ORC system and with liquid-vapor ejector, with ORC system presents the higher system efficiency since the ejector makes the turbine outlet pressure lower than condensation pressure through its pressure recovery. Also, this ejector ORC system is advantageous in miniaturizing the size of components owing to decrease of evaporation capacity and condensation capacity.

Key Words : Organic Rankine Cycle(ORC), Liquid-Vapor Ejector, Working Fluid, Power Plant Effluent

1. 서 론

우리나라는 에너지 수입에 절대적으로 의존하고 있는 국가중 하나로, 특히 여름철 냉방기기의 수요 증가에 따른 전력 피크로 인해 그 문제는 심각한 수준에 이르고 있다. 이웃 일본의 원자력발전 안전사고에 따른 원전 거부반응이 국내 각지에서 일어나고 있어 앞으로의 전력 공급 계획에 상당한 차질이 예상되고 있어 전력 수급에 대한

재검토가 필요한 시점에 이르고 있다.

유럽을 중심으로한 신재생 에너지 선진국에서는 이미 다양한 신재생에너지에 관심과 투자를 이루어 지고 있다.¹⁾ 이중 미국과 일본, 인도 등에서는 해양에너지를 통한 발전에 눈을 돌려 이미 실증화 단계까지 이르고 있다. 우리나라에서는 한국해양과학기술원을 중심으로 다각적인 각도에서 연구가 진행중이다.²⁻⁴⁾ 즉, 고효율 발전 사이클, 심해수 취수 특성, 각 고효율 터빈개발, 시스템 안전

**† 윤정인(교신저자) : 부경대 냉동공조공학과

E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

*김현욱 : 부경대 냉동공조공학과 대학원

**손창효 : 부경대 냉동공조공학과

**† Jung-In Yoon(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.

E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

*Hyeon-Uk Kim : Graduate school of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.

**Chang-Hyo Son : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.

화 기술 등 다양하게 진행 중이다.

유기랭킨사이클(Organic Rankine Cycle, ORC)은 고온의 열원이 있는 곳이나, 해양 담수플랜트 및 발전용으로 사용되고 있다. 이 사이클은 작동유체를 바꿔 저온의 열을 이용하는 사이클로, 기존의 랭킨사이클이 터빈이나 팽창기의 작동을 위해 증기를 만들 때 높은 온도를 필요로 했던 것과는 달리 끓는점이 낮은 작동유체를 사용하기 때문에 낮은 온도에서의 구동이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 남해 화력발전소에서 배출되는 폐열의 월별 데이터를 기준으로 개선된 유기랭킨사이클을 설계하였다. 화력발전소의 폐열은 연중 일정하게 높은 수온을 얻을 수 있으며, 버려지는 폐열을 2차 유체로 사용한다는 점에서 그 이용가치를 높일 수 있다는 장점이 있다.⁵⁾

지금까지 발표된 종래 연구를 살펴보면, Yoon 등은 유기랭킨사이클에 R134a를 적용하여 증발기 2차 유체로서 화력발전소에서 버려지는 35℃의 온배수를 이용하는 경우와 25℃의 해양 표층수를 이용하는 경우의 사이클 특성을 과열도, 과냉각도, 터빈효율, 펌프효율 등에 따라 서로 비교하였다. 그 결과, 화력발전소의 온배수를 이용하는 것이 해양의 표층수를 적용한 것에 비해 시스템 효율이 약 87%이상 높게 나타났다.³⁾

Ulli 등은 ORC에 5종의 혼합작동유체 특성을 파악하고 사이클에 적용하여 온도별 사이클 효율을 분석하였다. 그 결과, Butylbenzene 혼합작동유체의 효율이 가장 높게 나타났다.⁶⁾

Athanasios 등⁷⁾, Shengjun 등⁸⁾은 ORC를 설계하고 증발온도의 변화에 따른 시스템 효율 비교 및 발전사이클에 최적화된 작동유체를 찾고자 하였다.

Hunga 등⁹⁾은 ORC에 작동유체에 대한 물성치 분석과 시스템 성능비교, 온도 변화에 따른 효율을 비교하였다. 그 결과 단일냉매인 R11이 가장 높은 효율을 나타내었으며 터빈효율이 증가함에 따라 사이클 효율이 상승함을 밝혔다.

이상의 종래 연구를 정리해보면 기존의 시스템들이 발전소 폐열회수를 통한 발전방식과 심층의 해수를 저온부 2차 유체로 사용하였던 것과 달리 본 연구에서는 표층수를 저온부 2차 유체로 사용

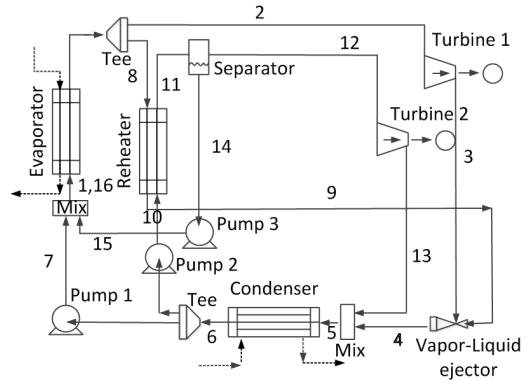


Fig. 1 Schematics of ORC with liquid-vapor ejector

하여 심층수를 끌어올리는 펌프의 동력 및 위험 부담을 줄일 수 있도록 하였다.

본 연구는 HYSYS 프로그램¹⁰⁾을 이용하여 남해 화력발전소에서 배출되는 온배수의 온도와 표층수의 온도 데이터를 다양한 냉매에 대하여 적용하였다. 또한 이를 통해 선별된 최적의 냉매를 기본ORC와 성능비교를 통해 시스템에 영향을 미치는 변수와 인자들에 대해 알아보았다.

2. ORC 특성

2.1 액-증기 이젝터를 적용한 ORC

Fig. 1은 본 연구에 사용된 액-증기 이젝터를 적용한 ORC의 장치도를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 액-증기 이젝터를 적용한 ORC는 기본 ORC에 재열기, 병렬터빈, 혼합기, 분배기, 기액분리기, 액-증기 이젝터 등이 추가된 시스템이다.

본 사이클은 증발기, 응축기, 터빈, 펌프를 통과하는 기본 사이클의 원리가 적용되며, 증발기 출구의 분배기를 통해 유량이 분배되어 터빈1을 거친 저온저압의 증기와, 열교환기를 통과하며 증기에서 액으로 상변화 된 냉매액이 이젝터에서 혼합된 뒤 압력이 소폭 상승되어 응축기로 유입된다.

그 후 펌프에 의해 증발기로 유입되어 사이클이 완성된다. 즉, 액-증기 이젝터를 적용한 ORC의 특징은 증발기 출구의 분배기로 유입되는 유량에

Table 1 Analysis conditions of ORC with liquid-vapor ejector

Variable	Value
Gross power of turbine (MW)	1
Turbine inlet vapour fraction	1
Turbine efficiency (%)	80
Pump efficiency (%)	65
Heat exchanger LMTD (°C)	3.5
Cooling source temperature difference across condenser (°C)	7
Heat source temperature difference across evaporator (°C)	10
Heat source and cooling source pressure drop (kPa)	50
Pressure drop of working fluid (kPa)	10

따라 병렬 터빈의 출력과 이젝터의 성능이 달라진다. 또한 이젝터에서의 압력 상승분만큼 터빈에서 응축압력 이하까지 일을 할 수 있으므로 터빈의 출력을 증대시켜 효율을 증가시킨다.

2.2 운전조건

본 연구에서 사용된 액-증기 이젝터를 적용한

Table 2 Monthly outlet temperature of power plant

Month	Heat source temperature(°C)	Cooling source temperature(°C)
1	74	8
2	74	8
3	75	11
4	75	14
5	76	18
6	76	21
7	76	23
8	76	24
9	77	25
10	76	21
11	75	16
12	75	11
Average	75	17

ORC의 해석을 위해 공정 설계프로그램인 AspenTech HYSYS 프로그램을 사용하였고 시뮬레이션에 사용한 상태방정식은 Peng-Robinson 방정식을 사용하였다.

Table 2에서는 연간 화력발전소에서 나오는 폐열의 온도와 표층수의 온도를 월 별로 정리하였다. 화력발전소에서 나오는 고온의 배수는 연중 거의 일정한 온도 분포를 보였으나 표층수는 겨울과 여름 계절에 의한 영향을 받아 온도의 차이가 나타났다.

3. 최적의 냉매 선정

3.1 냉매 선정

본 연구에서는 액-증기 이젝터를 적용한 ORC 발전시스템에 가장 적합한 냉매를 선정하기 위해 ORC 발전시스템에 사용되는 냉매들 중 열특성이 뛰어난 R134a, R600a, R236fa, R235fa,의 5종의 냉매를 선별하였다. 5종의 냉매에 대하여 순수발전량 및 필요냉매량 등을 비교하여 최적의 냉매를 선정하였다.

3.2 냉매별 순수발전량 및 냉매필요량

Fig. 2와 3은 화력발전소의 월별 온도 기준에 따른 시스템의 순수발전량과 필요냉매량을 나타

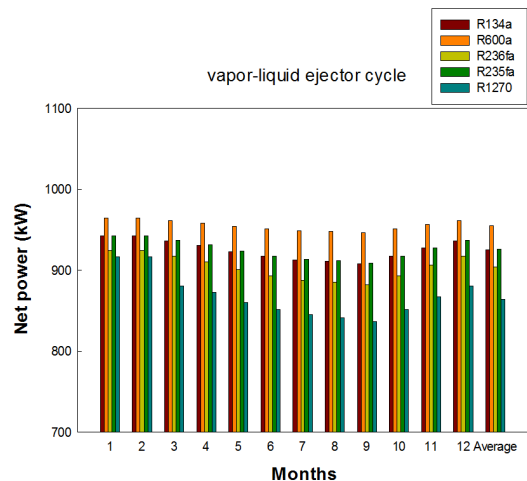


Fig. 2 Monthly Comparison of net power

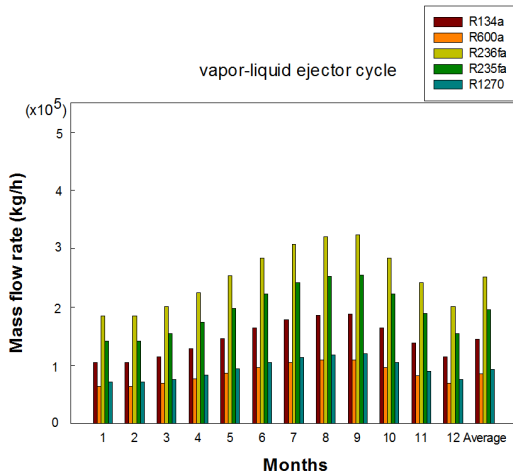


Fig. 3 Monthly Comparison of mass flow rate

낸 것이다. 터빈의 출력을 1MW로 고정시켰기 때문에 순수발전량은 연간 일정한 경향을 보였으며 그래프에서 5가지의 냉매가 각각 다른 순수발전량을 보인 이유는 각 냉매별로 열특성이 다르므로 같은 시스템이라도 냉매별로 유입되는 유량이 다르기 때문에 펌프 소요동력이 각각 달라 본 그래프와 같은 결과가 나타났다. 따라서, R600a가 가장 적은 유량으로 1 MW의 출력을 낼 수 있으며, 냉매별 필요냉매량에 영향을 받는 펌프 소요동력이 가장 작아 R600a의 순수발전량이 가장 높았다.

4. 사이클별 성능비교

선정된 냉매를 증기-액 이젝터를 적용한 ORC와 기본ORC에 적용하여 시스템의 성능을 분석하였다. 4장에서 수행된 성능분석 결과는 2장에서 나타낸 사이클 운전조건과 화력발전소의 폐열 데이터를 동일하게 사용하였다.

4.1 사이클별 시스템효율 비교

Fig. 4는 기본ORC와 액-증기 이젝터를 적용한 ORC의 월별 효율을 나타낸 것이다. 전반적으로 액-증기 이젝터를 적용한 ORC가 기본ORC보다

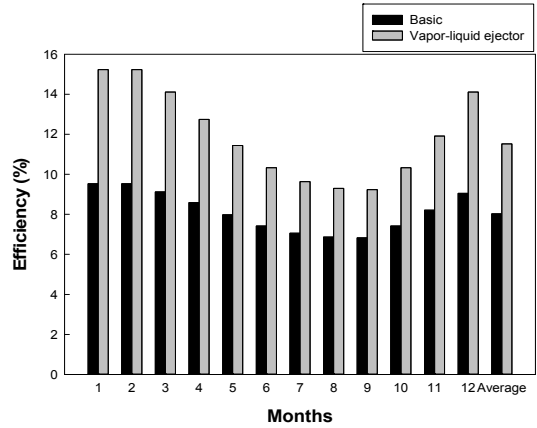


Fig. 4 Monthly Comparison of efficiency

효율이 높은 경향을 보였다. 또한 표층수의 온도 변화에 따라 계절별로 표층수의 온도가 높은 여름에는 효율이 낮았고 겨울에는 비교적 높은 효율을 보였다. 기본ORC는 표층수의 온도가 가장 낮은 1월과 2월에 9.8%로 가장 높은 효율을 나타내었다. 또한 표층수의 온도가 가장 높았던 9월에 7.06%로 가장 낮은 효율을 나타내었고 연간 평균 효율은 8.27%이다. 액-증기 이젝터를 적용한 ORC는 표층수의 온도가 가장 낮은 1, 2월에 14.84%로 가장 높은 효율을 나타내었고, 표층수의 온도가 가장 높은 9월에 9.34%로 가장 낮은 효율을 나타내었다.

액-증기 이젝터를 적용한 ORC가 기본ORC보다 효율이 높은 이유는 이젝터로 인해 추가동력 없이 응축기로 유입되기전 압력회복이 가능함에 따라 같은 유량이라도 더 많은 터빈의 출력을 생산해 낼 수 있다. 즉, 같은 터빈발전량을 나타낼 때, 증기-액 이젝터를 적용한 ORC가 기본ORC 대비 더 적은 유량으로 사이클을 구동할 수 있다는 것이며 이는 더 적은 펌프일량과 증발열량으로도 같은 출력을 낼 수 있음을 나타낸다.

4.2 증발열량 및 응축열량

Fig. 5와 6은 기본ORC와 액-증기 이젝터를 적용한 ORC의 월별 증발열량 및 응축열량을 비교한 그래프이다. 증발열량의 경우 효율과 반비례 관계로 같은 터빈발전량을 나타낼 때 증발열량이

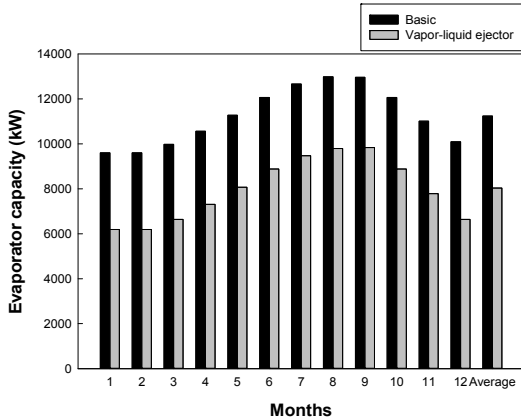


Fig. 5 Monthly Comparison of evaporator capacity

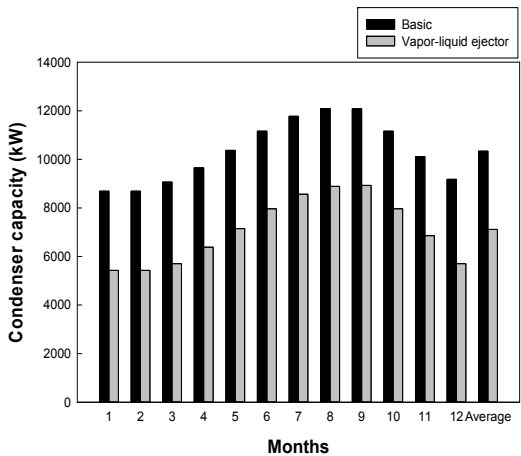


Fig. 6 Monthly Comparison of net power of condenser capacity

적을수록 효율이 높게 나타난다. 증발열량의 경우 액-증기 이젝터 ORC가 기본ORC보다 낮은 경향을 보였다. 이는 액-증기 이젝터를 적용한 ORC와 기본ORC를 비교했을 때 같은 터빈 발전량을 나타낼 때 더 적은 유량을 사용하므로 증발기로 유입되는 유량이 더 적기 때문이다. 액-증기 이젝터의 최저 증발열량은 1월의 경우 6,500kW, 기본ORC는 동월에 9,694kW로 최저 증발열량을 나타내었다. 또한, 증발열량 및 응축열량은 열교환기의 사이즈와 비례하기 때문에 증발 및 응축열량이 가장 적은 겨울철에 열교환기 사이즈를 소형화 하는데 가장 유리하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 화력발전소의 폐열에 따른 액-증기 이젝터를 적용한 ORC에 가장 적합한 냉매를 선정하고, 이를 기본 ORC와 성능 비교를 통해 화력발전소 폐열이 대체에너지로서 가능성을 판단하였고, 액-증기 이젝터를 적용한 ORC의 우수성을 확인하고자 하였다.

비교된 5가지의 냉매 중 순수발전량, 필요냉매량 등 시스템적 측면을 고려하였을 때 R600a가 순수발전량이 가장 높고, 필요냉매량이 가장 적은 경향이 나타났다. 따라서 본 연구에서는 R600a가 가장 적합한 냉매로 선정되었다.

월별 발전소의 폐열 및 표층수 데이터를 기준으로 하여 선정된 냉매를 각각 기본ORC와 액-증기 이젝터를 적용한 ORC를 나타내었을 때, 폐열과 표층수의 온도차가 가장 크게 나는 1월과 2월에 가장 효율이 높았으며 반면에 온도차가 가장 적게 나는 9월에 가장 낮은 효율이 나타났다. 기본ORC와 액-증기 이젝터를 적용한 ORC의 비교 결과, 이젝터에서의 압력 상승에 따라 터빈에서 응축압력 이하까지 출력을 낼 수 있는 증기-액 이젝터를 적용한 ORC가 효율이 더 높았다. 또한 증기-액 이젝터를 적용한 ORC가 증발 및 응축열량의 감소로 인해 구성기기의 사이즈를 소형화 하는데 유리하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2014년)에 의하여 연구되었음

References

1. R. Rayegan and Y. X. Tao, 2011, "A Procedure to Select Working Fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs)," Renewable Energy, vol. 36, No. 2, pp. 659-670.
2. J.I. Yoon, C.H. Son, S.M. Baek, H.J. Kim, H.S. Lee, 2014, "Efficiency Comparison of

- Subcritical OTEC Power Cycle using Various Working Fluids". Heat and Mass Transfer Vol. 50, pp.985-996
3. J. I. Yoon, S. M. Baek, C. H. Son, H. J. Kim and H. S. Lee, 2012, "Performance Comparison of R134a Organic Rankine Cycle (ORC) Using Hot Wastewater and Surface Seawater" The Korean Society of Marine Engineering. vol. 36, No. 6, pp. 768-773.
 4. J. I. Yoon, C. H. Son, S. M. Baek, H. J. Kim, H. S. Lee, 2014, "Performance characteristics of a High-efficiency R717 OTEC Power Cycle" Applied Thermal Engineering, Vol. 72, pp. 304-308.
 5. H. J. Kim, H. S. Lee and D. H. Jung, 2010, "Analysis of 1MW closed OTEC cycle using thermal effluent and waste heat," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, No. 4, pp. 470-476.
 6. D. Ulli and B. Dieter, 2007, "Fluid Selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in Biomass Power and Heat Plants" Applied Thermal Engineering, vol. 27, No. 1, pp. 223-228.
 7. I. Athanasios, B. Papadopoulou, M. Stijepovic and P. Linke, 2010, "On the Systematic Design and Selection of Optimal Working Fluids for Organic Rankine Cycles". Applied Thermal Engineering vol. 30, No. 6, pp. 760-769.
 8. Z. Shengjun, W. Huaixin, and G. Tao, 2011, "Performance Comparison and Parametric Optimization of the Subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and the Transcritical Power Cycle System for Low-temperature Geothermal Power Generation" Applied Energy, vol. 88, No. 8, pp. 2740-2754
 9. T. C. Hunga, S. K. Wanga, C. H. Kuob, B. S. Peic and K. F. Tsaid, 2013, "A Study of Organic Working Fluids on System Efficiency of an ORC Using Low-grade Energy Sources", Journal of the Korea Society for Power system Engineering, Vol. 35, No. 3, pp. 1403-1411
 10. HYSYS V_8.0 Aspentech. Inc.