

습냉매를 적용한 증기-증기 이젝터용 OTEC 시스템의 성능비교

The performance comparison of vapor-vapor ejector OTEC system using wet refrigerants

윤정인* · 손창효*† · 김영복** · 예병효*** · 하수정*** · 이호생**** · 김현주****
Jung-In Yoon*, Chang-Hyo Son*†, Young-Bok Kim**, Byung-Hyo-Ye***, Su-Jeong
Ha***, Ho-Saeng Lee****, Hyeon-Ju Kim****

(Submit date : 2014. 4. 28., Judgment date : 2014. 5. 3., Publication decide date : 2014. 7. 18.)

Abstract : In this paper, OTEC(Ocean Thermal Energy Conversion) system with vapor-vapor ejector is newly proposed. And 6 wet refrigerants are applied into the proposed OTEC system for performance comparison. The results of comparison performance are as follows. In the view of system efficiency, R32/R744(90:10) has the highest efficiency among the 6 refrigerants. In case of evaporation capacity, pump work and mass flow rate of working fluid, R744, R717 and R717 is lowest value, respectively. As this results, the vapor-vapor ejector is able to increase the efficiency of system. And It is necessary to select the optimized working fluid considering environmental and economic factors.

Key Words : 해양온도차 발전시스템(Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC)), 효율(Efficiency), 증기-증기 이젝터(Vapor-vapor ejector), 작동유체(Working fluid), 성능 비교(Performance comparison), 습냉매(Wet refrigerant)

*† 손창효(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-621-6180
*윤정인 : 부경대학교 냉동공조공학과
**김영복 : 부경대학교 기계시스템공학과
***예병효, 하수정 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원
****이호생, 김현주 : 한국해양과학기술원 해수플랜트연구
센터 해양플랜트연구부

***† Chang-Hyo Son(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180
*Jung-In Yoon : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University
**Young-Bok Kim : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong University
***Byung-Hyo Ye, Su-Jeong Ha : Graduate school of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University
****Hyeon-Ju Kim, Ho-Saeng Lee : Korea Institute of Oceans Science and Technology, Seawater Utilization Plant Research Center

기 호 설 명

- η_{th} : 시스템효율 (%)
 Q : 열량 (kW)
 W : 일량 (kW)

하첨자

- e : 증발기
 T : 터빈
 P : 펌프

1. 서 론

최근 화석연료 사용의 감축을 위한 방안으로 신재생에너지원에 대한 관심이 증가하고 있으며, 신재생에너지원 중에는 해양에너지를 이용한 해양온도차 발전시스템(OTEC)이 있다. 해양온도차 발전시스템은 표층수와 심층수의 약 20 °C의 온도차를 이용하여 전력을 생산하는 시스템으로써, 친환경적이며 주·야구별 없이 전력을 생산할 수 있어서 많은 연구자들로부터 주목을 받고 있다. 국내의 적용 사례로는 우선 국내 동해안의 발전소 부근에 'C-OTEC'을 설치하여, 발전소로부터 배출되는 폐열을 이용한 OTEC 실증화 사업을 진행 중이다. 폐열 등의 열원을 이용하지 않는 경우에는 다른 방안을 통해서 시스템의 효율을 개선해야 하며, 그에 대한 연구는 계속해서 진행 중이다.

국내·외로 연구 중인 부분 중에 하나는 해양온도차 발전시스템에 적용할 최적의 작동유체 선정이다.

작동유체 선정과 관련된 해양온도차 발전시스템의 종래연구를 살펴보면, 우선 Yoon 등은 새롭게 제안된 해양온도차 발전시스템에 단일 작동유체 15종, 혼합작동유체 16종을 적용하

여 발전시스템의 성능 분석과 비교를 통해서 최적의 작동유체를 선정하였다.¹⁾

또한 임계점 이하에서 다양한 작동유체와 과열도, 과냉도, 증발온도, 응축온도 등의 조건을 변화시켜가며, 작동유체 별 성능비교를 하였다.²⁾

또한 온배수를 이용한 해양온도차 발전시스템에 혼합작동유체를 적용하여 성능특성에 대해서 연구하였다.³⁾

Hung 등은 6개의 단일작동유체를 선정하고, 각 작동유체의 물성치에 대해 정리하였으며, 작동유체가 유기랭킨사이클(ORC)에 미치는 영향에 대해 분석하였다.⁴⁾

Papadopoulos 등은 ORC의 최적화된 작동유체를 찾는 과정에서 시스템 효율뿐만 아니라 오존과괴지수(ODP), 지구온난화지수(GWP)등을 도입하였다.⁵⁾

이상의 종래연구는 다양한 작동유체를 해양온도차 발전시스템에 적용하여 성능 분석 및 비교에 관한 내용이다. 특히 해양온도차 발전시스템에 적용할 작동유체의 조건은 환경적으로 안정하고 경제성이 있으며, 시스템 효율이 높아야 한다고 서술하였다.

본 연구에서는 시뮬레이션 프로그램인 HYSYS⁶⁾를 이용하여 기존의 종래연구에서 적용된 작동유체 뿐만 아니라, 새롭게 제안하는 작동유체를 증기-증기 이젝터용 해양온도차 발전시스템에 적용하여 성능 비교를 하였다. 이를 통해 증기-증기 이젝터의 적용가능성 및 최적의 작동유체 선정방식에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 제안된 OTEC 시스템 소개

2.1 증기-증기 이젝터용 OTEC 시스템

그림 1은 증기-증기 이젝터를 적용한 해양

온도차 발전시스템이다. 제안된 해양온도차 발전시스템과 기본 폐쇄형 해양온도차 발전시스템의 차이는 터빈을 고단터빈과 저단터빈으로

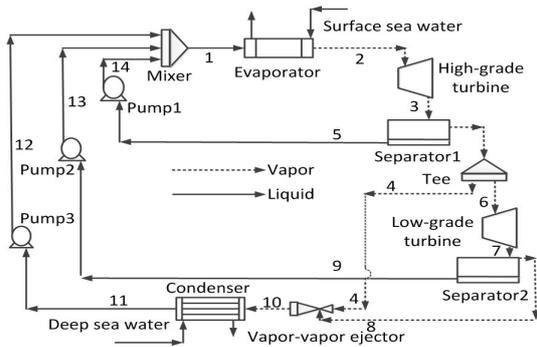


Fig 1. Schematics of OTEC system using vapor-vapor ejector proposed in this study.

Table 1. Wet working fluids applied into OTEC system

Working fluid	Chemical formula	ODP	GWP
R744	CO ₂	-	1
R32	CH ₂ F ₂	0	650
R717	NH ₃	0	-
R152a	CHF ₂ CH ₃	0	120
R744/R32 (90:10)	-	-	-
R744/R32 (10:90)	-	-	-

나누어 구성하고, 응축기 입구에 증기-증기 이젝터를 설치하여 전체 터빈발전량을 증가시킨 점이다. 또한 터빈을 통과한 고온의 액-증기는 터빈 출구에 설치한 기액분리기를 통해 액과 증기로 분리한 후 고온의 액을 증발압력까지 가압하여 증발기 입구 측 온도를 상승시킴으로써 증발열량을 감소시킨다.

2.2 작동유체 종류

본 연구에서는 표 1에서 나타낸 것처럼 단

일작동유체 4종과 혼합작동유체 2종을 선정하였다. 단일작동유체는 R744, R32, R717, R152a으로 Wet 계열 작동유체이다. 혼합작동유체는 R744와 R32를 10:90, 90:10의 질량비율로 혼합하였다. 그림 1은 작동유체별 오존파괴지수(ODP)와 지구온난화지수(GWP)를 표기한 것으로 GWP가 가장 낮은 작동유체는 R744이며, 가장 높은 작동유체는 R32이다. 그리고 ODP는 단일작동유체 4종 모두 0에 가깝다. GWP와 ODP의 수치가 적을수록 환경적으로 무해하며 해양온도차 발전시스템에 적용하는데 적합한 작동유체이다.

3. 작동유체 별 성능 비교

본 연구에서는 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템에 단일작동유체 4종, 혼합작동유체 2종을 적용하여 작동유체별 성능 비교를 하였다. 표 2에서 제시한 조건하에서 최적화과정이 필요하다. 최적화 과정 중 첫 번째는 그림 1의 해양온도차 발전시스템의 고

Table 2 : The analysis condition of proposed OTEC system using vapor-vapor ejector

Variable	Value
Gross power of turbine (kW)	20
Inlet temperature of deep water (°C)	5
Temperature difference of deep water (°C)	5.8
Inlet temperature of surface water (°C)	26
Temperature difference of surface water (°C)	3
Isentropic efficiency of turbine (%)	80
Efficiency of working fluid pump (%)	65
Heat exchanger LMTD (°C)	3.5
Pressure drop in heat exchanger (Working fluids/ water) (kPa)	10/50
Initial diameter of ejector (primary/Suction/Discharge) (mm)	50/50/50
Initial mass flow ratio of separator	0.5/0.5

단터빈 출구압력을 조정한다. 최적의 고단터빈의 출구압력은 전체 터빈발전량을 상승시킨다. 두 번째는 고단터빈을 통과한 작동유체는 분배기를 통해 각각 저단터빈과 증기-증기 이젝터의 작동부로 유입되는 유량비를 조절한다. 분배기를 통한 적절한 유량비는 저단터빈의 발전량을 상승시킨다. 마지막으로 증기-증기 이젝터의 노즐구경을 조절하여 시스템 최적화를 이룬다.

최적화 과정을 거친 후 성능 비교를 하였으며, 성능 비교항목은 다음과 같다. 항목은 시스템효율, 전체일량, 증발열량, 응축열량, 작동유체유량이며, 각 항목에서 최적의 작동유체를 선정하였다. 또한 기본 폐쇄형 해양온도차 발전시스템과 본 연구에서 제안하는 해양온도차 발전시스템의 효율을 서로 비교하였다.

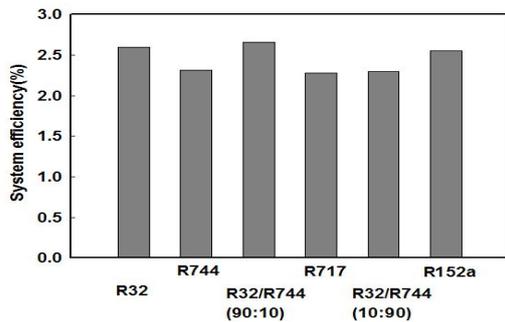


Fig 3. The system efficiency

3.1 시스템 효율 비교

그림 3은 표 1에서 제시한 작동유체별 최적화된 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템의 효율을 나타낸 것이다. 본 연구에서 적용한 해양온도차 발전시스템의 효율식은 식 (1)과 같다. 그리고 시스템 효율에서 전체 일량은 식 (2)로부터 구한다.

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_e} \quad (1)$$

$$W = W_T - W_p \quad (2)$$

그림 3에서 알 수 있듯이 시스템 효율이 가장 높은 작동유체는 R32/R744(90:10)로 2.66%이고 가장 낮은 작동유체는 R717로 2.28%이다. 작동유체별 시스템 효율이 다른 이유는 표 2의 조건 하에서 전체 터빈발전량이 20kW로 일정하며, 전체 터빈발전량 20kW를 만족하기 위한 펌프 소비동력, 증발열량, 필요 작동유체유량이 서로 다르기 때문이다.

3.2 증발열량와 응축열량 비교

그림 4는 표 1에서 제시한 작동유체별 증기-

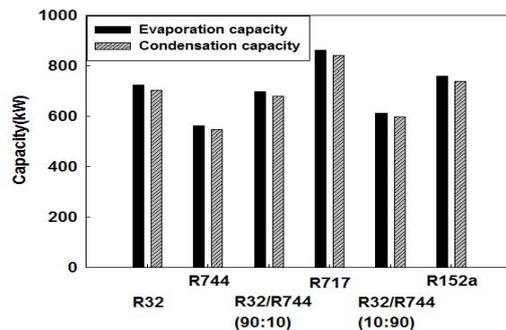


Fig 4. The evaporation and condensation capacity

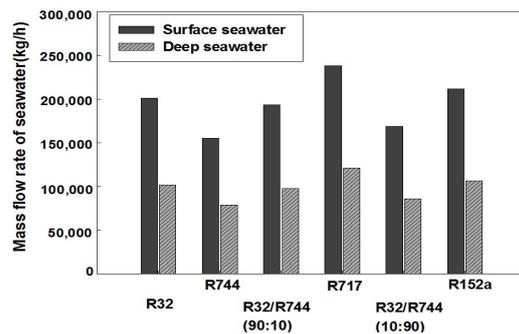


Fig 5. The mass flow rate of seawater

증기 이젝터를 설치한 해양온도차 발전시스템의 증발열량과 응축열량을 나타낸 것이다. 전

체 터빈발전량 20kW 고정 시, 증발열량과 응축열량이 가장 큰 작동유체는 R717로 각각 861.5kW, 841.9kW이었다. 반면 가장 작은 작동유체는 R744로 증발열량과 응축열량이 각각 561.6kW, 548.3kW이었다. R717의 증발열량은 R744에 비해 약 1.4배 크다.

그림 5는 각 작동유체별 필요한 표층수와 심층수의 유량을 나타낸 것이다. 표 2의 조건에서 보면, 증발기와 응축기의 입·출구 측의 온도 차이가 동일하기 때문에, 증발열량과 응축열량이 클수록 표층수와 심층수의 유량이 크다. 우선 가장 많은 표층수와 심층수를 필요로 하는 작동유체는 R717로, 약 24,000kg/h로 초당 6kg의 표층수를 필요로 한다. 이에 반해 R744는 15,000kg/h으로 초당 4.2kg의 표층수를 필요하다.

결과적으로, 증발기 및 응축기의 크기와 표층수 및 심층수의 필요유량은 비례하며, 열교환기와 표층수 및 심층수 필요유량 측면에서 R744가 가장 적합한 작동유체임을 알 수 있다.

3.3 펌프 소비동력 비교

그림 1의 발전시스템에서 작동유체의 펌프는 총 3개로, 각각의 펌프는 증발압력 이하의 압력에서 증발압력까지 상승시키는 역할을 한다. 그림 6은 각 작동유체별 전체 펌프 소비동력이다. 펌프 소비동력은 다음 식 (3)과 같이 구한다.

$$W_p = W_{p1} + W_{p2} + W_{p3} \quad (3)$$

식 (2)로부터 펌프 소비동력이 적을수록 전체 일량이 증가하며, 발전시스템의 효율은 상승하게 된다. 따라서 펌프 소비동력 측면에서 가장 적합한 작동유체는 펌프 소비동력이 가장 적게 드는 R717이며, 부적합한 작동유체는 R744이다. 작동유체별 펌프 소비동력의 차이가 발생하는 이유는 증발압력과 응축압력간 압력 차이와

전체 터빈발전량 20kW를 생산하기 위해 필요한 작동유체 유량이 서로 다르기 때문이다.

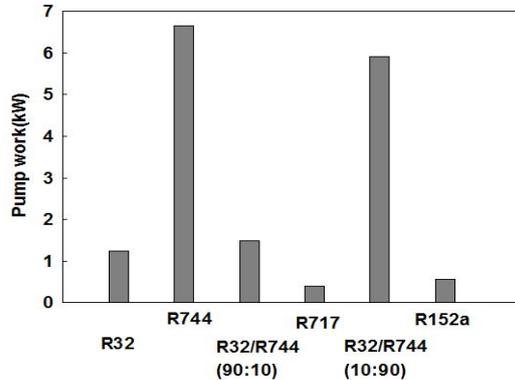


Fig 6. The pump work

3.4 작동유체 유량 비교

그림 7은 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템에서 전체 터빈발전량을 20kW로 생산하기 위해 필요한 작동유체의 유량을 나타낸 것이다. 그림 7에서 R717이 가장 적은 작동유체의 유량을 필요로 했다. 반대로 R744가 가장 많은 작동유체의 유량을 필요로 했으며, R744의 수치는 R717보다 약 6배 높다. 필요 작동유체 유량은 발전시스템의 증발열량, 펌프 소비동력 등에 큰 영향을 미치는 요소로써, 발전시스템 내부의 작동유체의 유량이 적을수록 발전시스템의 경제적인 측면에서 적합하다.

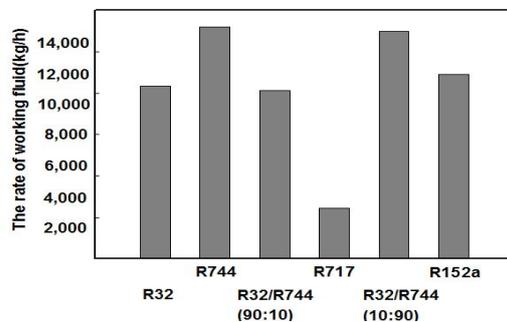


Fig 7. The mass flow rate of working fluids

따라서 전체 터빈발전량 20kW를 생산하기 위해 필요한 작동유체 유량이 가장 적게 소요되는 R717이 가장 적합한 작동유체이다.

4. 결 론

본 연구는 해양온도차 발전시스템의 효율을 개선하기 위한 방안 중 하나로 응축기 입구 측에 증기-증기 이젝터를 적용하였다. 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템에 6가지 작동유체를 적용하여 작동유체별 성능비교를 하였으며, 결과는 다음과 같다.

작동유체별 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템의 효율을 비교한 결과, 가장 우수한 작동유체는 R32/R744 (90:10)이다.

증발열량 및 응축열량의 경우 필요한 표층수와 심층수의 유량과 비례하였으며, 이 부분에서 가장 적합한 작동유체는 동일한 20kW의 터빈 발전량을 생산하는데 필요한 증발열량, 응축열량, 표층수 그리고 심층수의 유량이 가장 적게 소요되는 R744이다.

동일한 터빈 발전량을 생산하는데 필요한 펌프의 소요동력 및 필요작동유체 유량의 경우에는 R717이 나머지 작동유체에 비해서 아주 적게 필요로 하였으며, 따라서 적합한 작동유체는 R717이다.

6종의 작동유체 중에서 시스템 효율은 R32/R744 (90:10)가 가장 높았으나, ODP 및 GWP 등 환경적인 요소와 초기 비용 등을 고려한다면 R744 또는 R717이 최적의 작동유체라 사료된다.

후 기

본 연구는 국토해양부가 지원하는 ‘해양심층수의 에너지 이용 기술 개발’ 결과임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

Reference

1. Yoon. J. I, Ye. B. H, Heo. J. H, Kim. H. J and Lee. H. S, Performance analysis of 20 kW OTEC power cycle using various working fluids, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 8, pp. 836~842, 2013
2. Yoon. J. I, Son. C. H, Baek. S. M, Kim. H. J, Lee. H. S, Efficiency comparison of subcritical OTEC power cycle using various working fluids, Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, No.7, pp. 985~996, 2014
3. Yoon. J. I, Son. C. H, Ye. B. H, Heo. J. H, Kim. H. J and Lee. H. S, Performance Characteristics of a Mixed Refrigerant OTEC Power Cycle Using Hot Waste Water, Journal of the Korea Society for Power system Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 103~108, 2013
4. T. C. Hunga, S. K. Wanga, C. H. Kuob, B. S. Peic, K. F. Tsaid, 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, 2013
5. Athanasios I. Papadopoulos, Mirko stijepovic, Patrick Linke, On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles, Applied Thermal Engineering 30, pp. 760~769, 2010
6. Aspen HYSYS. Version 8.0, Aspen Technology Inc, 2014