

증기-증기 이젝터를 적용한 OTEC 시스템 성능의 수치적 분석

The numerical analysis of performance of OTEC system with vapor-vapor ejector

윤정인* · 손창효*† · 예병효** · 하수정** · 최인수*** · 이호생**** · 김현주****

Jung-In Yoon*, Chang-Hyo Son*†, Byung-Hyo Ye**, Ha-Soo Jeong**,
In-Soo Choi***, Ho-Saeng Lee**** and Hyeon-Ju Kim****

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

Abstract : In this paper, the Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) with vapor-vapor ejector is proposed newly. At this OTEC system, a vapor-vapor ejector is installed at inlet of condenser. The vapor-vapor ejector plays a very important role in increasing of the production work of low-stage turbine throughout the decrement of outlet pressure of ejector. The performance analysis is conducted for optimizing the system with HYSYS program. The procedure of performance analysis consists of outlet pressure of high turbine, the mass ratio of working fluid at separator, total working fluid rate, and nozzle diameters of vapor-vapor ejector. The main results is summarized as follows. The nozzle diameter is most important thing in this study. When each nozzle diameter of vapor-vapor ejector is 10 mm, the efficiency of OTEC system with vapor-vapor ejector shows the highest value. So it is necessary to set the optimized nozzle diameters of vapor-vapor ejector for achieving the high efficiency OTEC power system.

Key Words : 해양온도차 발전시스템(Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC)), 성능(Performance), 증기-증기 이젝터 (Vapro-vapor ejector), 증발열량(Evaporation capacity), 성능분석(Performance analysis)

*† 손창효(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-621-6180

*윤정인 : 부경대학교 냉동공조공학과

**예병효, 하수정 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

***최인수 : 동명대학교

****이호생, 김현주 : 한국해양과학기술원 해수플랜트연구센터 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.

**Byoung-Hyo Ye, Su-Jeong Ha : Graduate school of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.

***In-Soo Choi : Tongmyong University.

****Hyun-Ju Kim, Ho-Saeng Lee : Korea Institute of Oceans Science and Technology, Seawater Utilization Plant Research Center

1. 서 론

최근 급격한 산업발전으로 인해 화석연료사용이 증가함에 따라 지구온난화 및 환경오염이 심각해지고 있다. 이와 같은 문제의 해결방안은 신재생에너지원의 사용이며, 그중에는 해양온도차발전(OTEC)이 있다. 해양온도차발전시스템은 바닷물의 고온 측에 해당하는 표층수와 저온 측에 해당하는 심층수를 이용하여 전력을 생산하는 시스템으로써, 친환경적이며, 주·야 상관없이 전력을 생산할 수 있다.¹⁾ 하지만 해양온도차 발전시스템은 다른 신재생에너지 시스템에 비해 효율이 다소 낮다. 따라서 해양온도차 발전시스템의 효율을 높이기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

지금까지 발표된 해양온도차 발전시스템의 종래연구를 살펴보면, 우선 Kang 등은 재생식 해양온도차 발전시스템을 제안한 후, 고온의 온배수를 이용하여 증발기 열량을 감소시켜 발전시스템의 효율을 상승시키는 연구를 하였다.²⁾

Yoon 등은 기존의 해양온도차 발전시스템의 저효율의 원인인 낮은 증발온도를 상승시키기 위해 온배수를 적용하여 발전시스템의 효율을 상승시키는 연구를 하였다.³⁾ 또한 R717 용 고효율 해양온도차 발전시스템에 대한 엑서지 효율에 대한 분석을 진행하였다.⁴⁾

또한 Lee 등은 다단터빈, 재열기 등을 적용하여 발전시스템의 효율을 높이는 연구하였다.⁵⁾

따라서, 본 연구에서는 우선 해양온도차 발전시스템의 효율을 향상시키기 위해서, 증기-증기 이젝터⁶⁻⁷⁾를 해양온도차 발전시스템에 적용하였다. 그런 후, 이 발전시스템의 최적화를 위해서, 해양온도차 발전시스템의 성능에 영향을 미치는 변수 즉, 고단터빈 출구압력,

분배기 유량비, 증기-증기 이젝터의 노즐구경, 작동유체 유량 등을 시뮬레이션 프로그램인 HYSYS⁸⁾를 이용하여 변화시켜가면서 해양온도차 발전시스템의 성능 특성을 수치 해석적으로 파악하였다.

2. 증기-증기 이젝터용 OTEC 시스템

그림 1은 증기-증기 이젝터를 적용한 고효율 해양온도차 발전시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 본 시스템은 증발기, 응축기, 다단터빈, 분리기, 증기-증기

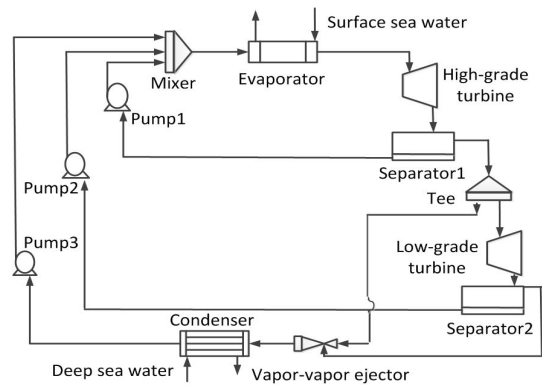


Fig. 1 Schematics of OTEC system using vapor-vapor ejector proposed in this study.

이젝터, 다단펌프, 혼합기 등으로 구성되어 있다. 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템의 작동유체 흐름을 살펴보면, 우선 증발기를 통과한 작동유체는 고온·고압의 증기 상태로 고단터빈으로 유입 후, 팽창되어 액-증기 상태가 된다. 팽창된 액과 증기를 각각 분리하기 위해서 고단터빈의 출구부분에 기액분리기를 설치하였다. 기액분리기 1에서 분리된 액은 펌프 1로 유입되고, 증기는 분배기에 의해 유량이 분배되어 각각 저단터빈과 증기-증기 이젝터의 Motive로 유입된다. 저단

터빈을 통과한 고온의 증기는 저온의 액-증기 상태가 되어 기액분리기 2로 유입되며, 액은 펌프 2로 유입되고, 증기는 증기-증기 이젝터의 Suction으로 유입된다. 증기-증기 이젝터로 유입된 기는 이젝터 내부에서 압축과 팽창 과정을 거쳐 이젝터의 Discharge로 나오게 된다. 이후 응축기에서 액화되어 펌프 3으로 유입된다. 펌프 1-3에 증발압력까지 가압된 액은 혼합기에서 혼합되어 증발기를 통과된다.

3. 증기-증기 이젝터

증기-증기 이젝터는 작동부(Motive), 흡입부(Suction), 분출부(Discharge)로 크게 나뉜다. Motive 측에서 유입된 유체는 노즐(Nozzle)을 통과한 후 Motive core로 분출된다. 이때 Motive 측 유체의 속도는 증가하며, 압력은 감소한다. Suction 측의 유체는 증기-증기 이젝터 내부로 유입되며, 유입된 Suction 측 유체는 노즐을 통과한 Motive 측 유체와 혼합(Mixing)된다. 혼합유체는 증기-증기 이젝터의 내부에서 압축 및 팽창과정을 거친 이후, 분출구(Diffuser)를 통해 분출된다.

4. 시스템 성능 분석

증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템을 최적화시키기 위해 성능 분석을 하였다. 성능 분석에 필요한 변수로는 이젝터 출구 쪽 압력에 영향을 주는 고단터빈의 출구 압력, 이젝터의 흡입 유량비, 이젝터의 구경비 등이 있다. 성능분석에 사용된 작동유체는 R32이며, R32에 대한 물성치는 표 1과 같다.

성능분석을 위한 초기조건으로는 터빈출력량은 20kW, 표층수 입구와 출구 측 온도는 각각 26°C, 23°C이며, 심층수 입구와 출구측 온

도는 5°C, 10.8°C이다. 발전시스템에 적용한 터빈, 펌프의 효율은 각각 80%, 65%이다. 그리고 열교환기 내부의 LMTD는 3.5°C이며, 열교환기의 압력강하는 해수 측 50kPa, 작동 유체 측 10kPa이다. 그리고 증기-증기 이젝터의 Motive/Suction/Discharge 구경은 각각 50/50/50 (mm)이며, Motive/Suction로 흡입되는 유량 비율은 0.5/0.5이다. 증기-증기 이젝터의 초기 조건을 제외한 사항은 미국 및 일본 등의 선진국에서 개발하는 사용 중인 해양온도차 발전시스템의 일반적인 운전조건과 동일하다. 본 시스템의 성능분석의 순서는 다음과 같다. 우선 그림 1에서 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템의 고단터빈 출구압력을 변화시켜가며 분석하였다. 적정고단터빈의 출구압력은 터빈의 생산일량을 증대시키기

Table 1 : Physical Properties of R32 Refrigerant

Variable	Value
Refrigerant	R32
Chemical Formula	CH ₂ F ₂
Molecular Mass	52.02
Boiling Temperature. at 101.325kPa(°C)	-51.8
Freezing Point(°C)	-136
Critical Temperature(°C)	78.4
Critical Pressure(kPa)	5830
Critical Volume(L/kg)	2.326

때문이다. 적정 고단터빈의 출구압력을 설정한 이후 분배기의 유량비를 조절한다. 분배기를 통해 증기-증기 이젝터의 Motive와 저단터빈으로 유량이 분리되어 유입된다. 적절한 유량비는 이젝터의 성능을 개선하기 때문이다. 적정 유량비가 결정된 이후 증기-증기 이젝터의 노즐 구경을 변화시켜서 최적의 노즐 구경을 선정한다. 마지막으로 증기-증기 이젝

터블 적용한 해양온도차 발전시스템에 유입되는 전체 작동유체 유량을 변화시켜서 성능을 분석하였다.

4.1 고단터빈의 출구압력 변화

증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템의 고단터빈 출구압력을 변화시켜 고단·저단터빈의 일량 및 전체 일량을 분석하였다. 고단터빈의 출구압력범위는 kPa~1,500 kPa이다. 표 1의 조건에 적합한 R32용 해양온도차 발전시스템의 증발압력은 1,532 kPa이며, 응축압력은 1,196 kPa이기 때문에 중간압력인 1,200 kPa에서 1,500 kPa까지 분석하였다. 그림 2는 고단터빈의 출구압력에 따른 전체터빈의 일량을 나타낸 것이다.

고단터빈의 출구압력을 1,200 kPa에서 1,500 kPa까지 20 kPa씩 변화시켰을 경우 고단터빈의

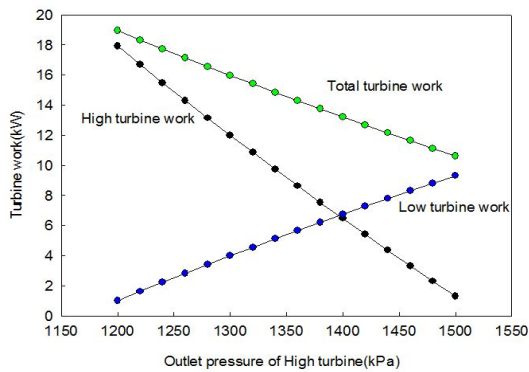


Fig 2 Turbine work with respect to outlet pressure of high Turbine

출구압력이 1,200 kPa일 때, 전체터빈의 일량이 가장 높았다. 1,200 kPa에서 압력이 상승할 경우, 전체터빈의 일량은 감소하는 경향을 보였다. 따라서 분석 가능한 압력범위 내에서 최적의 고단터빈의 출구압력은 1,200 kPa이다.

4.2 분배기의 유량비 변화

증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템에서 고단터빈 이후에 설치된 분배기를 이용하여 이젝터의 Suction와 Motive로 유입되는 작동유체의 유량을 조절하였다. 증기-증기 이젝터의 Motive와 Suction 측은 압력이 일정한 상태에서 분배기의 유량비(Suction/Motive)를 0.1의 비율로 변화시켰을 때, Discharge의 압력은 그림 3와 같이 나타났다. 그림 3은 분배기 유량 비의 변화에 따른 압력변화 그래프로, 증기-증기 이젝터로 유입되는 유량의 비율이 0.5/0.5(Suction/Motive)일 때, 이젝터의 Discharge의 압력이 가장 높게 나타났다.

Discharge 측은 압력이 가장 높다는 의미는 이젝터의 성능이 가장 우수한 상태를 나타내는 것이다.

결론적으로 증기-증기 이젝터로 유입되는 유량비가 0.5/0.5(Suction/Motive)일 때가 최적 유량비이다.

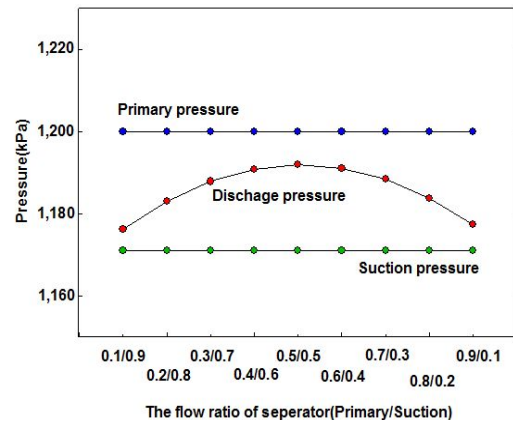


Fig 3 The pressure of ejector with respect to the flow ratio of separator

4.3 이젝터의 노즐구경크기 변화

해양온도차 발전시스템에 적용한 증기-증기이젝터의 Suction, Motive, Discharge의 노

즐구경의 크기를 변화하여 이젝터의 성능을 분석하였다. 증기-증기 이젝터 내부의 Suction, Motive, Discharge의 초기 노즐구경을 각각 10 mm에서 10 mm씩 증가시켜 100 mm까지 변화시켰다. 그림 4은 상용프로그램인HYSYS 내의 증기-증기 이젝터의 노즐구경 크기를 변화에 따른 증기-증기 이젝터의 Discharge 압력과 Suction 압력 변화를 나타낸 그림이다.

Suction, Motive, Discharge의 노즐구경의

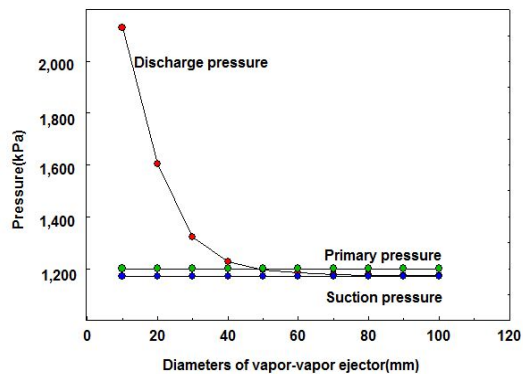


Fig 4 the pressure of ejector with respect to variation of vapor-vapor ejector diameters

크기가 초기 구경크기 10mm에서 10 mm씩 늘어날수록 이젝터의 Discharge 압력과 Suction 측의 압력차가 줄어들었다. 따라서 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템에서 고단터빈의 출구압력과 분배기를 통한 유량비가 일정하다는 조건하에서 증기-증기 이젝터의 노즐구경의 크기를 줄일수록 이젝터의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

4.4 시스템 전체유량 변화

그림 5은 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템에 투입된 전체 작동유체 유량 변화에 따른 증기-증기 이젝터의 Discharge 측 압력과 Suction 측 압력을 나타낸 것이다.

동일한 증기-증기 이젝터의 노즐 구경크기에서 작동유체의 유량을 8,700 kg/h에서 10,000 kg/h까지 100 kg/h씩 변화시켜가면서 분석한 결과 작동유체의 유량이 증가할수록 이젝터의 Discharge 압력이 상승하였다. 즉, 작동유체의 유량이 클수록 이젝터의 Discharge 측의 압력과 Suction 측의 압력의 차이가 증가하며, 이는 이젝터에서 가압하는 능력의 향상을 의미한다. 따라서,

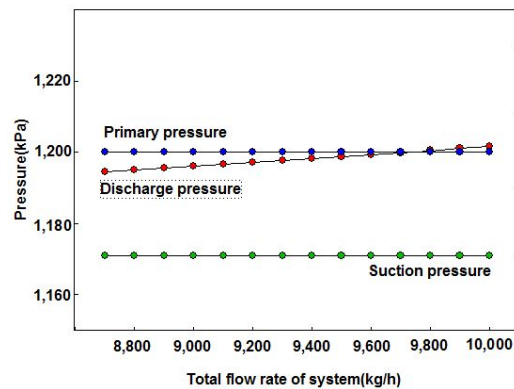


Fig 5 The pressure of ejector with respect to total flow ratio of working fluid of system

시스템 내부의 작동유체의 유량이 클수록 증기-증기 이젝터의 성능은 높아지는 것으로, 판단되어지므로, 적정 작동유체 유량이 시스템 효율 및 증기-증기 이젝터의 성능에 중요요소를 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 증기-증기 이젝터를 적용한 해양온도차 발전시스템의 성능 분석을 하였다.

표 1의 조건에서 최적의 고단터빈의 출구압력은 1,200kPa, 분배기의 유량비는 0.5/0.5이다. 또한 증기-증기 이젝터의 노즐 구경 크기는 10/10/10 (Motive/Suction/Discharge) (mm)

일 때, 가장 이젝터의 성능이 우수하였다. 마지막으로 이젝터의 구경크기를 일정하게 하고, 발전시스템의 작동유체유량을 증가시킬 때, 이젝터의 성능이 소폭 상승하였다. 결론적으로 증기-증기 이젝터의 성능에 가장 크게 미치는 요소는 이젝터 내부의 노즐 구경이며, 이젝터의 노즐구경을 변화시켰을 때, 이젝터의 Discharge 측 압력이 가장 크게 변화하였다. 최적의 이젝터 노즐 구경을 설정한 해양온도차 발전시스템은 기본 해양온도차 발전시스템에 비해 효율이 크게 상승할 것으로 사료된다.

후 기

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

Reference

1. Yoon. J. I., Son. C. H., Ye. B. H., Heo. J. H., Kim. H. J. and Lee. H. S., Performance analysis of 20kW OTEC Power cycle using various working fluids, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 8, pp. 829~835, 2013
2. Kang. Y. Y. et al., A Study on Regenerative OTEC System using the Condenser Effluent of Uljin Nuclear Power Plant, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 7, pp. 591~597, 2012
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 Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 103~108, 2013
4. Yoon. J. I., Son, C. H., Kim, H. U., Yang D. I.,

- Kim. H. J., Lee. H. S., Exergy analysis of R717 high-efficiency OTEC power cycle for the efficiency and pressure drop in main components, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 36, No. 8, pp. 1036~1042, 2012
5. Lee. H. S., et al., A Study on the Improvement for Cycle Efficiency of Closed-type OTEC, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No. 1, pp. 46~52, 2011
6. Yoon. J. I., et al., Performance Characteristic of the CO₂ OTEC Power cycle applying the ejector, the Korea Society for Marine Environment and Energy, pp 285~285, 2013
7. Xinguo Li, et al., Thermodynamic analysis of Organic Rankine Cycle with Ejector, Vol. 42, No. 1, pp. 342~349, 2012
8. Aspen HYSYS. Version 8.0, Aspen Technology Inc, 2013