한국동력기계공학회지 제18권 제5호 pp. 88-93 2014년 10월 (ISSN 1226-7813)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2014.18.5.088
Vol. 18, No. 5, pp. 88-93, October 2014

증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차발전 시스템의 성능 특성
Performance Characteristics of OTEC(Ocean Thermal Energy Conversion) Power Cycle with Vapor-Liquid Ejector

윤정인* · 손창효**† · 김현욱*** · 하수정*** · 이호생**** · 김현주****
Jung-In Yoon*, Chang-Hyo Son**† , Hyeon-Uk Kim***, Soo-Jung Ha***, Ho-Saeng Lee**** and Hyun-Ju Kim****

(접수일 : 2014년 5월 1일, 수정일 : 2014년 6월 10일, 채택확정 : 2014년 6월 10일)

Abstract: In this paper, the performance analysis of condensation and evaporation capacity, turbine work and efficiency of the OTEC power system using vapor-liquid Ejector is presented to offer the basic design data for the operating parameters of the system. The working fluid used in this system is CO_2. The operating parameters considered in this study include the vapor quality at heat exchanger outlet, pressure ratio of ejector and inlet pressure of low turbine, mass flow ratio of separator at condenser outlet. The main results were summarized as follows. The efficiency of the OTEC power cycle has an enormous effect on the mass flow ratio of separator at condenser outlet. With a thorough grasp of these effects, it is possible to design the OTEC power cycle proposed in this study.

Key Words : CO_2, High-efficiency, Ocean Thermal Energy Conversion Power System, Vapor-Liquid Ejector

— 기 호 설 명 —

Pmp : Motive Pressure (kPa)
Psp : Suction Pressure (kPa)
Pdp : Discharge Pressure (kPa)
Pr : Pressure ratio
Qe : Evaporator capacity (kW)
Qc : Condenser capacity (kW)
Wt : Tubine work (kW)
Wp : Pump work (kW)
P : Pressure
V : Volume

**† 손창효(교신저자) : 부경대 냉동공조공학과
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180
*윤정인 : 부경대 냉동공조공학과
***김현욱, 하수정 : 부경대 냉동공조공학과 대학원
****이호생, 김현주 : 한국해양과학기술원 해양심층수연구센터

**† 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.
***Hyeon-Uk Kim, Soo-Jung Ha : Graduate School of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.
****Ho-Saeng Lee, Hyun-Ju Kim : Korea Institute of Oceans Science and Technology.

R : Gas constant
T : Temperature
a, b : Parameter
n_{otec} : OTEC efficiency

1. 서 론

해양온도차발전(Ocean Thermal Energy Conversion, 이하 OTEC)은 해양의 표층수와 심층수의 온도차를 이용하여 전력을 생산하는 기술로 시스템의 기본원리는 일반 발전소 원리와 동일하다. 그러나 기존의 발전소는 화석연료를 사용하여 수백 ℃의 온도 차이를 발생시켜 시스템을 가동하는 반면에 해양온도차 발전시스템은 20℃ 내외의 온도차를 이용하여 시스템을 가동하는 방법으로 기존 화석연료를 전혀 소비하지 않는다는 장점이 있다. 또한 무한한 해양에너지를 사용하기 때문에 별도의 에너지 저장 시스템이 필요 없으며, 시스템 자체가 안전하며 환경친화적인 장점을 가지고 있다.[1,2] 또한, 해양온도차 발전시스템에서 필요로 하는 것은 표층수와 심층수의 온도차로서 이는 바다 환경에 깨끗한 에너지로서 무궁무진하게 활용할 수 있다.[3] 그러나 해양온도차 발전은 전술한 바와 같이, 표층수와 심층수의 20℃내외의 온도차로서 작은 온도차에서 동력을 생산하기 때문에 다른 신재생에너지에 비해 시스템 효율이 낮은 단점을 가지고 있다. 그리하여 국·내외 관련 연구자들은 이를 보완하고자 연구를 진행하고 있다. 본 연구에서는 사이클 효율향상방안으로 증기-액 이젝터를 적용하였다. 증기-액 이젝터는 분출부(Discharge), 흡입부(Suction), 작동부(Motive)로 나뉘어지며, 작동부로 유입되는 고압 유체와 흡입부로 유입되는 저압 유체가 이젝터로 유입된다. 유입된 뒤 압축과 팽창과정을 거쳐 분출부로 분출되며 이때 압력은 흡입부로 유입된 저압 유체의 압력보다 승압된 상태가 된다. 따라서, 이젝터는 추가적인 동력없이 압력을 승압시킬 수 있는 장치이다. 종래연구를 살펴보면, Li 등[4]은 OTEC 발전시스템의 효율 향상 방안으로 이젝터를 적용하여 Basic 사이클과 터빈출력 및 시스템효율을 비교하였다. 그 결과, 이젝터를 적용함으로써 터빈출력 및 시스템효율이 증가함을 나타내었다.

Athanasios 등[5]은 해양온도차 발전사이클을 설계하고 이를 통해 발전사이클에 최적화된 작동유체를 찾고자 하였다. 이상의 종래연구를 살펴보면, 해양온도차발전의 경제성 향상을 위해서는 작동유체 및 사이클 개선을 통해 시스템 효율을 향상시켜야 한다. 그러나 국내에서는 해양온도차(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) 발전사이클에 대한 시뮬레이션 등을 수행한 바 있으나, 여전히 해양온도차발전 사이클 효율 향상 방안에 대한 연구는 극히 제한적이다.[6]

따라서 본 연구에서는 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차발전 사이클을 제안하고 HYSYS 상용프로그램[7]를 이용하여 성능분석을 통해 시스템효율이 향상됨을 나타내었고 그에 따른 최고 효율을 나타내는 최적의 운전조건을 제시하고자 한다.

2. 사이클 성능 해석

2.1 OTEC 사이클의 장치도

Fig. 1과 2는 본 연구에서 제안한 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전사이클의 장치도 및 P(압력)-h(엔탈피) 선도를 각각 나타낸 것이다.

본 사이클은 기본 폐쇄형 OTEC 발전사이클에 효율향상 방안으로 재열기, 병렬터빈, 혼합기, 분배기, 기액분리기, 증기-액 이젝터가 추가된 시스템이다. 본 사이클의 작동원리는 증발기, 응축기, 터빈, 펌프를 통과하는 기본 사이클 원리에 증발기 출구에 분배기(상태 2, 8)를 적용함으로써 작동유체 유량을 분배하여 터빈 1을 거친 저온저압의 증기(상태 3)와 열교환기에서 열교환된 냉매액(상태 9)이 이젝터에서 가압작용(상태 4)을 한 후 펌프(상태 6)에 의해 증발기로 유입(상태 1, 16)되어 사이클이 완성된다. 전술한 바와 같이 본 논문에서 제안한 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차발전 사이클의 특징은 증발기 출구에 분배기를 적용(상태 2, 8)하여 각각의 병렬터빈(상태 3, 13)과 고온고압의 냉매액(상태 9)이 이젝터로 유입되어 터빈 1의 출구압력을 응축압력이하로 감소시켜

터빈 1의 출력 일량을 증대시켜서 본 해양온도차 발전시스템의 효율을 증가시킨다.

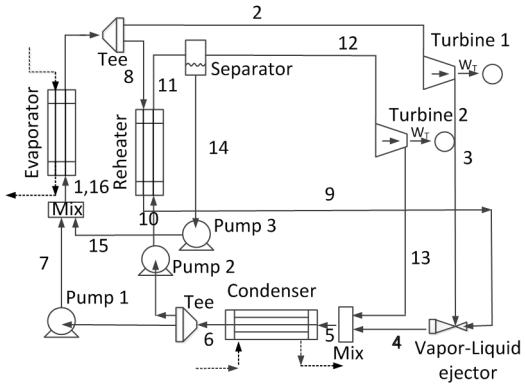

Fig. 1 Schematics of OTEC power cycle with vapor-liquid ejector

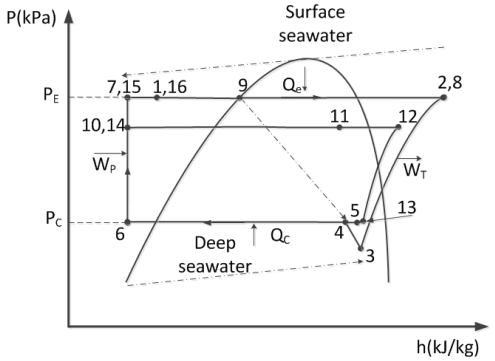

Fig. 2 P-h diagram of OTEC power system with vapor-liquid ejector

2.2 OTEC 사이클의 성능분석

증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전 사이클의 성능 분석에 필요한 식들은 다음과 같다. 우선, 시뮬레이션 해석 방법으로는 증기-액 이젝터 사이클을 해석하기 위해 공정 설계프로그램인 Aspentech HYSYS9) 프로그램을 이용하였다.

HYSYS는 열역학적 사이클 모사에 필요한 상태 값을 정확하게 계산할 수 있다는 장점이 있기 때문에 본 연구에서 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 상태방정식으로는 Peng-Robinsos 방정식을 사용하였다. Peng-Robinsos 방정식은 열해석에서 가장 널리 사용하는 상태 방정식이며 다음과 같다.

Table 1 Analysis conditions of OTEC power cycle

Variable	Value
Gross power of Turbine (kW)	20
Inlet temperature of surface water (℃)	26
Inlet temperature of deep water (℃)	5
Isentropic efficiency of turbine (%)	80[8)]
Efficiency of working fluid of pump (%)	65[8)]
Heat exchanger LMTD (℃)	3.5
Temperature difference of deep water (℃)	5.8
Temperature difference of surface water (℃)	3
Working fluid of pressure drop (kPa)	10

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

해양온도차발전 시스템의 효율은 아래의 식(2)로 계산한다.

$$\eta_{otec} = \frac{W}{Q_e} \quad (2)$$

여기서, Q_e는 증발열량을 나타낸 것이고, W는 전체일량을 나타내 것으로, 터빈 1과 터빈 2의 터빈일량(W_t)에서 펌프일량(W_p)을 뺀 값이다.

$$W = W_t - W_p \quad (3)$$

Table 1에는 본 연구에서 사용되는 해양온도차 발전 시스템의 성능 분석 범위를 나타낸 것이다. Table 1의 성능 분석범위는 해양온도차 발전 시스템의 일반적인 운전조건이다. 터빈출력은 20 kW로 고정하여 분석하였다. 그리고, 표층수와 심층수의 입·출구온도, 증발기 출구온도를 고정하였다. 터빈 1과 터빈 2의 기계효율은 80%, 냉매펌프의 기계효율은 65%로 설정하였다. 또한, 증발기 및 응축기 내 대수평균온도차(LMTD)는 3.5℃를 설정하였다. 모든 열교환기 내 작동유체 측의 압력강하는 10 kPa, 해수측 압력강하는 50 kPa로 하였다. 그리고 본 연구에 적용한 작동유체는 자연냉매인

CO_2 냉매를 적용하여 분석하였다.

Table 1의 분석조건으로부터 계산한 결과값을 이용하여 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전 시스템의 증발열량, 응축열량, 터빈일량, 시스템효율에 영향을 미치는 이젝터 압력비 변화, 열교환기 출구건도, 저단터빈 입구압력 변화, 증발기 출구 분배기 유량 변화 등의 인자들에 대해서 살펴보고자 하였다. 이젝터의 압력비 Pr(pressure ratio)은 아래의 식으로 계산하였다.

$$P_r = \frac{p_{mp} - p_{sp}}{p_{dp} - p_{sp}} \quad (4)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이젝터 압력비 변화에 따른 영향

Fig. 3은 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전사이클의 증기-액 이젝터 압력비 변화에 따른 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 터빈일량, 효율을 나타낸 것이다. 여기서, 이젝터 압력비는 증기-액 이젝터의 출구(Discharge)로 배출되는 압력회복율을 나타낸 것으로, Discharge(분출부) 압력에서 Suction(흡입부) 압력을 뺀 것에 Motive(작동부) 압력에서 Suction(흡입부) 압력을 나눈 값이다. 이 식으로부터 압력회복율이 높다는 것은 증기-액 이젝터의 성능이 우수하다는 것을 의미한다. Fig. 3에서 이젝터 압력비가 감소할수록 증발 및 응축열량은 일정한 반면 터빈일량과 시스템 효율은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 압력비가 감소함에 따라 이젝터 출구의 Discharge Pressure은 감소하게 되고 그에 따른 압력회복이 낮아지기 때문이다. 본 사이클의 압력비가 가장 높은 값인 1/6일 때, 시스템 효율은 2.249%로 가장 높게 나타났다. 따라서 이후의 해양온도차 발전사이클의 성능 분석에는 이젝터 압력비를 1/6로 고정하여 분석하였다.

3.2 열교환기 출구건도 변화에 따른 영향

해양온도차 발전 사이클의 효율은 전술한 바와 같이, 전체일량(터빈일량-펌프일량)에서 증발열량을 나눈 값이다. 이 식으로부터 해양온도차 발전사이클은 크게 터빈일량의 증대와 증발열량의 감소로 인해 효율이 향상된다. 따라서, 본 논문에서는 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전사이클 내 터빈 2로 유입되는 증기량 변화에 따른 성능 특성을 파악하기 위해서 열교환기 출구건도를 조절하였다. Fig. 4는 열교환기 출구건도 변화에 따른 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 터빈일량, 효율을 나타낸 것이다. 그 결과, 열교환기 출구건도가 감소할수록 증발 및 응축열량은 증가하고, 터빈출력은 거의 일정하며, 사이클 효율은 소폭 감소한다. 이는 열교환기 출구에 증기량이 감소할수록 기액분리기에서 분리되어 증발기로 유입되는 고온의 냉매액량이 증가하여 증

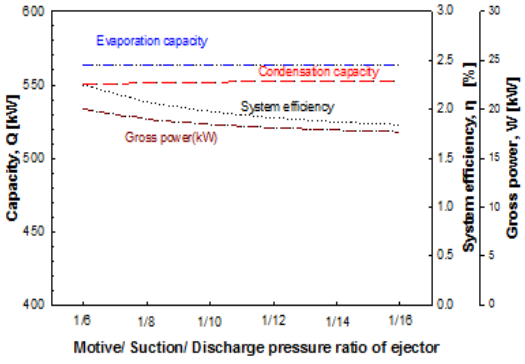

Fig. 3: Performance characteristics of OTEC power cycle with pressure ratio of ejector

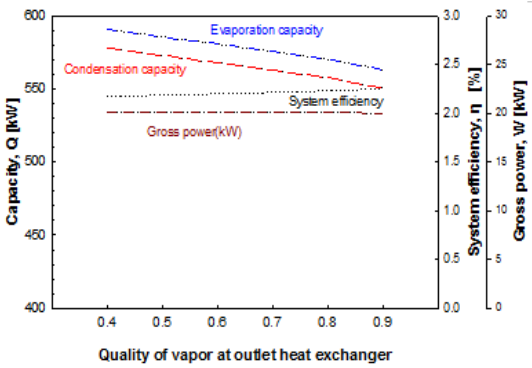

Fig. 4: Performance characteristics of OTEC power cycle with quality of vapor at outlet heat exchanger

발기 출·입구의 온도차를 줄여 증발열량이 감소하여야 한다. 하지만 증발기로 유입되는 냉매유량도 증가하여 냉매유량이 증발열량에 미치는 영향이 더 크기 때문에 냉매 증기량이 감소할수록 증발열량은 증가하게 된다. 따라서 위의 결과로부터, 열교환기 출구건도는 증가할수록 증발열량이 감소하기 때문에 해양온도차 발전사이클의 효율은 증가하는 것을 알 수 있다.

3.3 저단터빈 입구압력 변화에 따른 영향

본 논문에서 제안한 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전사이클은 병렬터빈을 적용함으로써, 기본 해양온도차 발전사이클과 다르게 3개의 압력이 존재한다. 즉, 고단과 저단압력은 본 사이클의 조건에 따라 결정되지만 중간압력은 그렇지 않다. 따라서, 해양온도차 발전사이클의 최고 효율을 나타내는 최적의 터빈출력을 결정하기 위해 Fig. 5를 통해 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전사이클의 저단터빈 입구압력 변화에 따른 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 터빈일량, 효율을 살펴보았다.

그 결과, 중간압력을 5,000 kPa부터 5,800 kPa까지 100 kPa까지 증가시켰을 때, Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 열량, 일량, 효율 등의 변화는 크지 않다. 하지만, 수치상으로 확인한 바에 의하면, 중간압력이 증가할수록 사이클 효율은 증가하여 중간압력이 5,800kPa일 때 최고효율을 나타내었다. 이는 중간압력 상승으로 터빈 2의 엔탈피차가 증가하여 사이클 효율이 상승하였다.

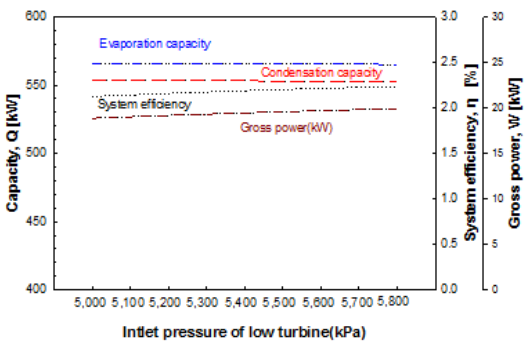

Fig. 5: Performance characteristics of OTEC power cycle with inlet pressure of low turbine

3.4 응축기출구 분배기 유량변화에 따른 영향

본 논문에서 제안한 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전사이클은 병렬터빈을 적용하여 응축기출구에서 분배기를 통해 터빈 1과 터빈 2로 유입되는 작동유체의 유량을 조절하여 사이클이 구동된다. 따라서 응축기출구에 유량변화를 통해 본 시스템에 미치는 영향을 파악하고자 한다. Fig. 4는 응축기출구 분배기 유량변화에 따른 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 터빈일량, 효율을 나타낸 것이다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 응축열량은 터빈 1로 유입되는 유량이 증가할수록 기액분리기에서 배출되는 액의 양이 증가하여 응축기로 유입되는 유량의 감소로 인해 응축열량은 감소하였다. 증발열량은 응축기출구 분배기 유량변화에 영향을 받지 않기 때문에 일정한 값을 보였으며, 터빈 1로 유입되는 유량이 증가할수록 이젝터의 가압기능이 우수해져 이로 인해 터빈출력이 증가하고 사이클 효율도 상승하였다.

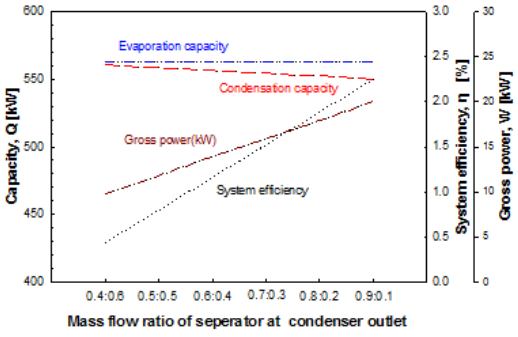

Fig. 6: Performance characteristics of OTEC power cycle with mass flow ratio of separator at condenser outlet

4. 결 론

본 논문에서 제안하는 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전사이클의 증발열량, 응축열량, 터빈일량, 시스템효율에 영향을 미치는 이젝터 압

력비 변화, 열교환기 출구 건도, 저단터빈 입구압력변화, 응축기출구 분배기 유량변화 등의 인자들에 대해서 Table 1의 운전조건에서 살펴보았고 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 우선, 증기-액 이젝터를 적용한 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 터빈일량, 효율은 이젝터 압력비 변화, 열교환기 출구 건도 변화, 저단터빈 입구압력 변화, 응축기출구 분배기 유량 변화 등에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 그리고, Table 1의 운전조건에서 최적의 조건을 적용하였을 때 해양온도차 발전사이클의 효율은 2.249로 가장 높게 나타났다.

향후, 본 논문에서 제안하는 해양온도차 발전사이클을 실제 제품화시키기 위해서는, 이젝터의 성능에 따라 사이클 효율 변화가 크기 때문에, 이젝터의 세밀한 성능 분석에 대한 추가 연구를 통해 정확한 설계자료를 확보하는 것이 대단히 중요하리라 판단된다.

후 기

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

Reference

1. J. I. Yoon, S. M. Baek and C. H. Son, 2012, "Power System for Ocean Thermal Energy Conversion," The Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, No. 2, pp. 217-223.
2. J. I. Yoon, C. H. Son, J. H. Jeong, B. H. Ye, H. J. Kim and H, S. Lee, 2013, "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. 1, pp. 64-68.
3. J. I. Yoon, S. M. Baek and C. H. Son, 2012, "Performance Characteristic of R744 OTEC Power Cycle with Operation Parameters", Journal of the Korea Society of Marine Engineering, vol. 36, No. 5, pp. 10-14.
4. Xinguo. Li, Cuicui. Zhao, and Xiaochen. Hu, 2012, "Thermodynamic analysis of Orhanic Rankine Cycle with Ejector" Energy 42 pp. 342-349.
5. Athanasios I. Papadopoulosa, B, Mirko stijepovicc and Patrick Linkec, "On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles", 2010, Applied Thermal Engineering 30, pp. 760-769.
6. Ahmad Etemadi, Arash Emdadi, Orang AsefAfshar and Yunus Emami, 2011, "Electricity Generation by the Ocean Thermal Energy," Energy Procedia 12, pp. 936-943.
7. H. S. Lee, H. J Kim, D. G Kang and D. S Jung, 2012, "Thermodynamic performance of R32/R152a mixture for water source heat pumps", Elsevier, Vol. 40, Issue 1, pp. 100-106.
8. Vega, L. A. 2002, "Ocean Thermal Energy Conversion Primer", vol. 36, no4, pp. 25-35.
9. HYSYS V_8.0 Aspentech. Inc.