



급액가열기를 적용한 이젝터-펌프 온도차 발전시스템의 성능분석

Performance Analysis of Ejector-Pump Thermal Energy Conversion System Applying Feed Liquid Heater

윤정인* · 손창효* · 문춘근*** · 이호생**** · 문정현**** · 김현주**** · 이광석**†
 Jung-In Yoon*, Chang-Hyo Son*, Choon-Geun Moon***,
 Ho-Saeng Lee****, Jung-Hyun Moon****, Hyeon-Ju Kim****
 and Kwang-Seok Lee**†

(Received 10 July 2018, Revision received 03 August 2018, Accepted 03 August 2018)

Abstract: Ocean thermal energy conversion(OTEC) system using surface seawater and deep seawater is a eco-friendly system with infinite energy source. However temperature difference between the surface seawater and the deep seawater is average 20°C, so it has lower system efficiency than other electric generation ways. In related study of OTEC system, they utilize unused heat source such as wasted heat from power plant or combustion engine of ship to enlarge the temperature difference. Moreover, as aspect to transform the cycle, Ejector-Pump is applied. The way using ejector-pump can enlarge turbine expansion ratio by pressure recovery effect of the ejector. In this study, performance analysis of the ejector-pump system applying FLH(Feed Liquid Heater) was carried out with respect to ejector entrainment ratio and working fluid. Selected working fluids are R245fa, R245ca, R113, R123, R141b, R142b, R227ea. The FLH is the way to reduce evaporator heat capacity by injection of vapor from turbine middle pressure to middle pressure of pumping process. As a result, system efficiency presented improvement by 13.26% when applying R245fa as working fluid with ejector entrainment ratio of 0.2.

Key Words : OTEC, Ejector, Feed liquid heater, ORC

— 기 호 설 명 —

Q	: 열량 [kW]	T	: 온도 [°C]
W	: 동력, 발전량 [kW]	G	: 냉매순환량 [kg/s]
		h	: 엔탈피 [kJ/kg]
		m	: 질량 유량 [kg/s]

**† 이광석(교신저자) : 부경대학교 대학원
 E-mail : suwe1862@gmail.com, Tel : 051-629-6180
 *윤정인, 손창효 : 부경대학교 냉동공조공학과
 ***문춘근 : 주식회사 대일
 ****이호생, 문정현, 김현주 : 선박해양플랜트연구소 해수
 플랜트연구센터

**† Kwang-Seok Lee(corresponding author) : Graduate school,
 Pukyong National University.
 E-mail : suwe1862@gmail.com, Tel : 051-629-6180
 *Jung-In Yoon, Chang-Hyo Son : Department of Refrigeration
 and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National
 University.
 ***Choon-Geun Moon : Daeil Coporation, Busan, South Korea
 ****Ho-Saeng Lee, Jung-Hyun Moon, Hyeon-Ju Kim : Korea
 Research Institute of Ships & Ocean Engineering.

v : 체적 유량 [m^3/s]
 P : 압력 [bar]

그리스 문자

ω : 이젝터 유량비 [-]
 η : 시스템 효율 [%]

하첨자

i : 입구
 o : 출구
 H.S : 열원
 e, Eva : 증발기
 t : 터빈
 p : 펌프
 cp : 순환 펌프
 mp : 모티브 펌프
 motive : 이젝터 모티브
 suction : 이젝터 흡입
 discharge : 이젝터 토출

1. 서 론

해양의 심층수와 표층수를 이용한 해양온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) 시스템은 펌프의 동력만으로 전력 생산이 가능한 친환경 발전시스템이며, 연중 비교적 일정한 온도차를 가지기 때문에 지속적이고 안정적인 전력 생산이 가능하다. 하지만 고가의 해수용 열교환기와 심층수 취수 비용은 해양온도차발전의 상용화를 저해하는 요소로 꼽히며, 특히 20℃ 내외의 표층수와 심층수의 온도차는 타 발전방식 대비 낮은 시스템 효율의 주된 원인이 된다.

종래의 유기랭킨사이클 연구에서는 산업용 폐열, 발전소 폐열 등 다양한 미활용 열원을 이용하여 폐열회수의 초기 목적 달성과 동시에 ORC 시스템의 효율 향상에 관한 연구가 이루어져 왔다.

Alison Auld et al.¹⁾은 내연기관의 폐열, 노후된 유전에서 발생하는 폐열, 산업 공정에서의 폐열까

지 3가지 미활용 열원을 적용한 ORC 시스템의 성능 분석을 7종의 작동 유체에 대하여 실시하였다. 내연기관에서 발생하는 폐열은 300℃ 이상의 엔진 배기 가스로부터 얻을 수 있으며, 노후된 유전은 지속적인 원유 시추 시 유전 내의 압력이 낮아지며 이를 유지하기 위해 유전 내로 물을 주입한다. 이때 물과 섞여서 시추되는 원유의 온도는 70~150℃에 달한다. 산업 공정에서 발생하는 폐열은 시멘트나 섬유 제조 공정 등의 화학 공정에서 140℃의 스팀 형태로 얻을 수 있다.

종래의 ORC 연구에서는 주어진 온도 조건에서 최적의 작동 유체를 선정하기 위한 연구도 이루어져 왔다.

Li²⁾는 T-s 선도 상에 도식되는 작동 유체의 포화기체 선의 구배가 터빈의 팽창과정에서 과열도에 끼치는 영향을 분석하였다. R11 냉매는 포화기체 선이 Vertical 형태로 Isentropic fluid에 속한다. 반면에 R22 냉매의 경우 중형의 포화선을 보이며 이러한 포화선을 가지는 냉매를 Wet fluid에 속한다. Dry fluid의 경우 포화기체 선이 Positive의 경향을 보이며, 이러한 유체는 터빈 출구에서 기체의 상을 유지하며 토출된다. 이를 바탕으로 Isentropic fluid와 dry fluid 위주의 14종의 냉매 R113, R123, SES36, R245fa, R600, R236ea, R236fa, RC318, R227ea, n-heptane, cyclohexane, toluene, Ethylbenzene, Butene을 선정하여, 액서지 효율 및 재생기 적용 사이클의 냉매 적용성을 분석하였다.

또한 Park et al.³⁾은 기본 유기랭킨사이클과 재생기, 급액가열기(Feed Liquid Heater, FLH)를 적용한 사이클을 비교하여 분석을 실시하였다. 작동유체로는 R113, R123, R245ca, R245fa, isobutane, R227ea, R134a로 7종의 냉매를 선정하였으며, T-h 선도에 도식되는 사이클 선도에서 터빈 출구부터 포화기체 선까지 R245ca 냉매의 엔탈피 차가 가장 크게 나타났다. 즉 R245ca 적용 시 재생기에서 회수 가능한 열이 가장 크기 때문에 성능 향상의 효과가 가장 크다는 것을 의미한다. 결과적으로, 기본 ORC에서 R113, R123, R245ca, R245fa 순으로 효율이 우수하였으며, 급액가열기 적용 시 중간 압력에 따라 시스템의 효율이 달라져 최적의

압력이 존재함을 확인하였다.

이젝터-펌프를 적용한 ORC 시스템에서는 터빈 출구 측 유체를 이젝터의 흡입 측으로 유입시켜, 이젝터의 모티브 유체에 의한 흡입 측 압력강하를 통해 터빈 전·후단의 압력차 증대를 기대할 수 있다.

Yoon et al.⁴⁾은 이젝터-펌프를 적용한 해수온도차발전시스템의 작동 유체 및 이젝터의 유입비에 따른 사이클 성능 분석을 실시하였다. 그 결과 이젝터유입비 상승 시 터빈 발전량과 증발열량이 증가하였으며, 두 증가분의 대소에 의해 시스템 효율은 유입비 0.2~0.3 구간에서 최대값을 보였다. 이는 이젝터의 유입비 증가에 따라 승압비는 점차 감소하나 터빈을 통과하는 유체의 순환량이 증가하기 때문에 비체적에 의한 두 값의 증가분 대소가 발생한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 이젝터-펌프를 적용한 온도차발전사이클에서 75℃의 미활용 열원을 적용하였으며, 급액가열기를 통해 시스템의 효율 향상을 꾀하고자 한다. 따라서 이러한 시스템을 구성하여 작동 유체 및 이젝터 유입비를 변수로 시스템 성능 변화를 분석하였다.

2. 급액가열기 적용 EP-OTEC 시스템

2.1 해양온도차 발전시스템

Fig. 1은 해양의 심층수와 표층수를 이용한 해양온도차 발전시스템의 개략도이다. 심층수의 온도는 평균 5℃로, 응축기로 유입되어 작동 유체를 응축시키는 냉각수 역할을 한다. 열원의 온도는 미활용 열원을 적용하였을 때 75℃로 가정하였으며, 펌프에 의해 이송된 작동 유체가 증발기에서 열원과 열교환을 통해 증발이 이루어진다. 기화된 유체는 터빈을 구동한 후 응축기로 다시 유입됨으로써 사이클을 순환한다.

2.2 이젝터-펌프 온도차발전 시스템

Fig. 2는 이젝터-펌프를 적용한 EP-OTEC 시스템의 개략도이다. 이젝터의 모티브 유체는 노즐을 통과하면서 흡입 측 유체를 견인하여 혼합관을 지나 토출된다. 토출된 2상의 유체는 응축기에서

응축되어 분기된다. 이젝터-펌프의 적용은 모티브 펌프의 추가적인 동력이 소요되는 반면, 터빈 출구 측 유체를 이젝터의 흡입 측으로 유입함으로써 터빈 출구 압력이 강하되어 터빈의 입출구 압력차가 증대되는 효과가 있다. Fig. 3은 EP-OTEC 장치의 P-h선도를 나타낸다.

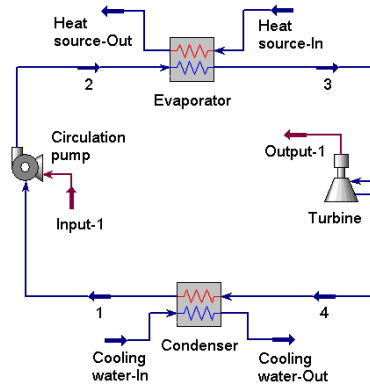


Fig. 1 Schematic of basic ORC system

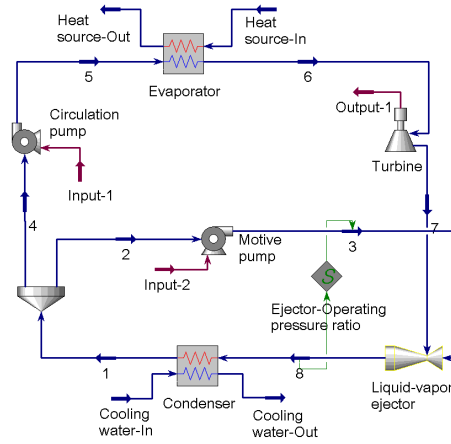


Fig. 2 Schematic of EP-OTEC system⁴⁾

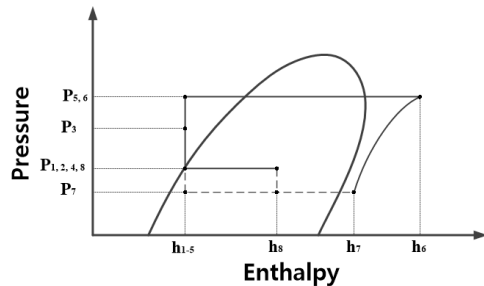


Fig. 3 P-h diagram of EP-OTEC cycle⁴⁾

2.3 급액가열기 적용 이젝터-펌프 시스템

Fig. 4는 급액가열기를 적용한 이젝터-펌프 시스템의 개략도이다. 터빈의 중간 압력에서 기체 냉매 일부를 바이패스하여 펌프 가압과정의 중간 압력으로 분사한다. 분사된 기체 냉매는 저온의 냉매액과 만나 응축이 일어나며, 이 때 유체의 응축열을 이용하여 냉매액을 가열한다. 분기된 기체 냉매의 유량에 따라 혼합된 냉매액의 온도가 변화하기 때문에, 2차 펌프 입구에서 과냉각도 2℃가 유지되도록 유량을 설정하였다. 이 때 중압의 기체 냉매에 의한 과냉각도의 감소만큼 증발기에서 열원으로부터 얻는 열량을 줄일 수 있다.

Fig. 5는 급액가열기를 적용한 이젝터-펌프 온도차발전시스템의 P-h선도를 나타낸다.

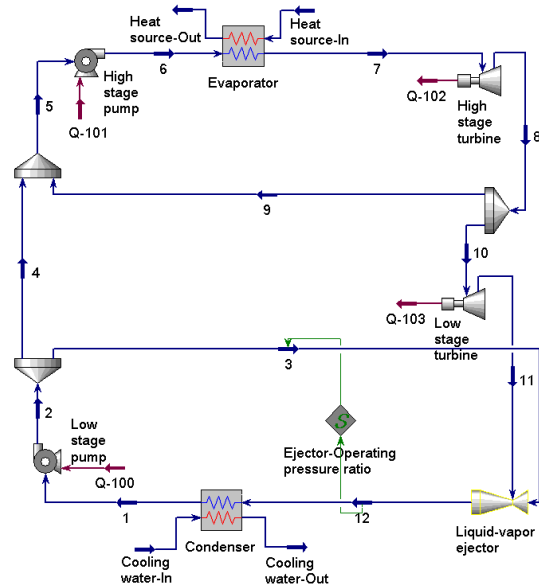


Fig. 4 Schematic of EP-OTEC applying FLH system

3. 분석조건 및 계산식

3.1 시뮬레이션 분석조건

본 연구에서 실시된 분석은 Aspen tech 사의 Aspen HYSYS V8.6⁵⁾을 이용하여 실시하였다. Table 1은 분석에 사용된 분석조건을 보여준다.

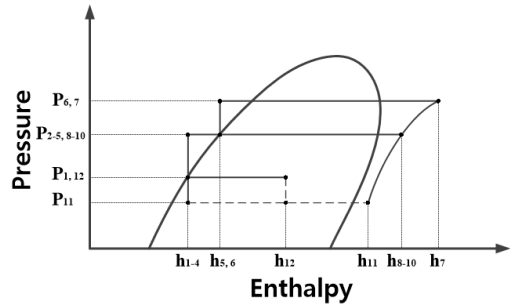


Fig. 5 P-h diagram of EP-OTEC with FLH

5℃의 열침 온도는 수심 200~1,000m에 해당하는 심층수를 취수한 평균 온도를 가정하였다. 75℃의 열원 온도는 미활용 열원을 적용하였다. 미활용 열원은 발전소의 폐열과 선박에 사용되는 내연기관의 냉각수 회수 온도, 배기가스 등을 전제하였다. 발전소의 배압터빈에서 발생하는 고온의 스팀은 120℃ 정도로 열병합발전의 경우 배출된 스팀의 열을 회수하여 75℃의 온도로 난방 또는 급탕에 사용된다. 선박 엔진의 경우 엔진 냉각수의 회수 온도는 70~100℃ 정도에 해당한다. 열원수가 유입되는 증발기의 입출구 온도차는 10℃로 가정하여 냉매 측 증발 온도는 65℃로 두었다.

이젝터의 유입비와 압력회복률은 이젝터의 내부 형상에 따라 상이한 결과를 보인다. 이젝터를 적용한 유기랭킨사이클의 종래연구에서는 실험적 결과를 제시한 연구가 현재까지 미흡한 실정이다. 현재까지 제시된 종래연구의 실험결과에 따르면 이젝터의 유입비는 체적유량비를 기준으로 50 내외의 비슷한 결과가 나타났으며, 이 중 가장 우수한 체적유량비 값을 보인 종래연구⁶⁾의 이젝터 성능을 전제로 분석을 실시하였다.

분석에 사용된 작동 유체는 종래의 ORC 연구와 2상 이젝터 적용 사이클 연구에서 언급된 냉매 중 Dry fluid 또는 Isentropic fluid에 해당하며, 임계온도가 증발 온도 65℃보다 높은 냉매 7종을 선정하였다. 선정된 냉매는 R245fa, R245ca, R113, R123, R141b, R142b, R227ea이며, 본 분석에서는 냉매별 사이클 성능을 비교하기 위해 규제 대상 냉매도 포함하였다.

Table 1 Analysis conditions

Parameter	Value	Unit
Heat source temperature	75	°C
Heat sink temperature	5	°C
Heat source capacity	200	kW
Heat exchanger LMTD	3.5	°C
Ejector operating pressure ratio	2.54	-
Ejector pressure recovery ratio at 57.81 volume flow ratio	1.2	-
Turbine efficiency	85	%
Pump efficiency	85	%

3.2 계산식

본 연구에서 일정한 용량(Qe)의 열원으로부터 작동 유체와 이젝터의 유량비(ω)에 따라 터빈 발전량(W_t), 펌프 동력(W_{cp} , W_{mp}), 시스템 효율(η)을 분석하였다.

증발기의 열원수 입구 온도와 냉매의 증발 온도가 주어졌을 때, 열원수의 출구온도는 식 (1)~(3)의 대수평균온도차를 통해 구할 수 있다.

$$\Delta T_1 = T_{H.S,i} - T_{Eva,o} \quad (1)$$

$$\Delta T_2 = T_{H.S,o} - T_{Eva,i} \quad (2)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad (3)$$

터빈의 발전량은 식 (4)와 같이 터빈 입·출구의 엔탈피 차와 냉매순환량을 통해 구할 수 있다.

$$W_t = G \times (h_{t,i} - h_{t,o}) \quad (4)$$

순환 펌프와 모터브 펌프의 소요동력은 식 (5)와 같다.

$$W_{cp,mp} = G \times (h_{p,o} - h_{p,i}) \quad (5)$$

따라서 시스템 효율은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{W_t - (W_{cp} + W_{mp})}{Q_e} \quad (6)$$

식 (7)~(10)은 이젝터의 질량 유량비와 체적 유량비, 구동압력비 그리고 압력회복률을 구하는데 사용되었다.

$$\omega = \frac{m_{suction}}{m_{motive}} \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{v_{suction}}{v_{motive}} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{P_{motive}}{P_{discharge}} \quad (9)$$

$$\theta = \frac{P_{discharge}}{P_{suction}} \quad (10)$$

4. 분석결과 및 고찰

Fig. 6은 75°C의 열원 온도와 5°C의 열침 온도 조건에서 작동 유체에 따른 기본 ORC 시스템의 효율을 나타낸다. 200 kW용량의 열원이 일정하게 공급될 때 냉매에 따른 기본 ORC의 시스템 효율은 R245fa 적용 시 11.39%로 가장 높게 나타났다. 터빈 발전량 비교 시 R245fa, R142b순으로 높은 값을 보였다.

Fig. 7은 기본 ORC 사이클에서 이젝터와 펌프를 추가하여 터빈 발전량을 증대시키고, 이를 통한 시스템 효율의 향상을 확인하기 위해 가장 높은 기본 ORC 시스템 효율을 보인 R245fa 냉매값과 비교하였다. 200 kW로 일정한 증발 열량이 주어졌을 때, 이젝터의 모터브 유체와 흡입 유체의 질량 유량비와 냉매에 따라 시스템 효율을 분석한 결과는 다음과 같다. 유량비 0.1에서 0.4까지에서는 R245fa 냉매의 시스템 효율이 가장 높게 나타나며, 0.4에서 1.0까지의 범위에서는 R142b의 시스템 효율이 더 높게 나타났다. 이는 이젝터의

유량비가 증가하면 이젝터의 압력회복율은 낮아지며, 흡입 측 압력이 증가하게 된다. 본 분석에서는 증발기에 투입되는 열원의 열량을 고정하였기 때문에 이젝터 유량비는 모터브 유체의 유량을 조절하여 분석하였다. 따라서 이젝터의 유량비 증가 시 이젝터 모터브 유체의 유량은 감소하고 터빈의 입출구 압력차도 감소하게 된다. 유량비의 증가에 의한 모터브 펌프의 소요 동력 감소분과 압력차의 감소로 인한 터빈 발전량의 감소분의 대소 비교에 따라 시스템 효율 변화가 나타난다. 터빈의 발전량과 펌프 소요동력은 유체의 밀도와 관련이 있으며, Fig. 7의 결과를 통해 유량비 0.4 이상에서는 R142b의 기상의 비체적이 R245fa보다 작고, 액체상태의 비체적이 크다는 점이 원인으로 사료된다.

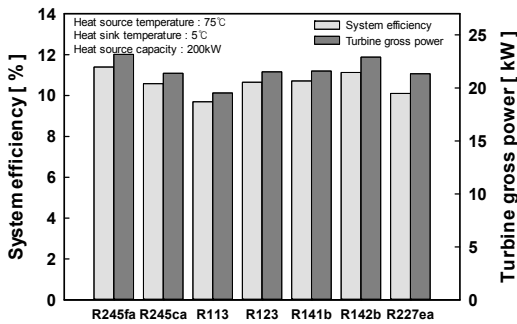


Fig. 6 Basic ORC system efficiency with respect to working fluids

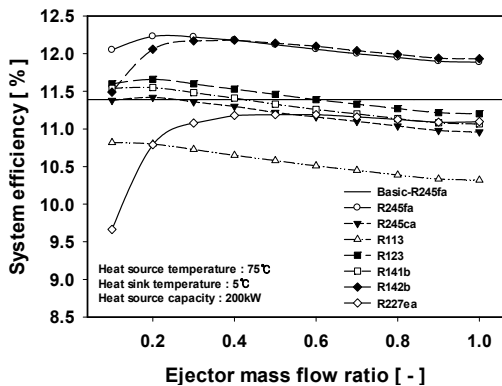


Fig. 7 System efficiency of EP-OTEC cycle with regard to working fluids and ejector mass flow ratio

Fig. 8에서는 이젝터-펌프 온도차발전시스템에서 급액가열기를 적용하였을 때 냉매와 이젝터 유량에 따른 시스템 효율을 분석한 결과이다. 터빈의 중간압력은 이젝터의 모터브 압력과 동일하게 응축압력의 2.54배로 두었다. 이때 0.1~0.2의 유량비에서는 R245fa가 가장 높게 나타났지만, 0.3 이상의 유량비에서는 R142b의 시스템 효율이 가장 높게 나타났다. 반면에, R113 냉매의 경우 0.4 이상의 질량 유량비에서 R245fa를 적용한 기본 ORC 효율보다 낮게 나타났다.

Fig. 9는 R245fa를 적용한 기본 ORC 사이클, EP-OTEC 사이클, 급액가열기를 적용한 EP-OTEC 사이클의 유량비에 따른 시스템 효율을 보여준다. R245fa 냉매의 경우 고단 터빈 출구의 상이 터빈 효율 85%에서 액증기 상태로 토출된다. 이는 고단 터빈 입구에서 과열도를 주어 해소해야 하며, 과열도는 증발열량의 증가를 의미하기 때문에 시스템 효율에는 부정적인 영향을 끼친다. 분석 결과 터빈 입구 측 과열도는 최소 8.98°C가 요구되었다. 반면 시스템 효율은 최대 12.9%로 EP-OTEC 사이클보다 높은 시스템 효율을 보였다. 이는 급액가열기를 적용함으로써 감소되는 증발열량이 과열도에 필요한 열량보다 크기 때문에 시스템 효율은 오히려 상승하는 것으로 사료된다.

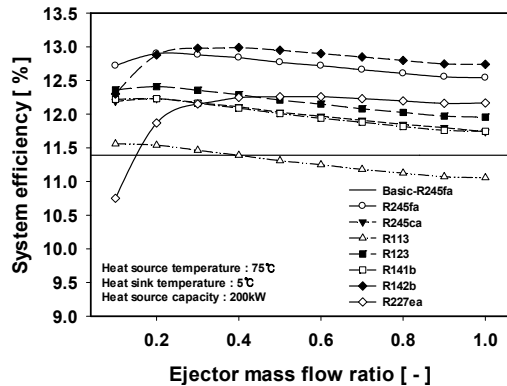


Fig. 8 System efficiency of EP-OTEC applying FLH with respect to working fluids and ejector mass flow ratio

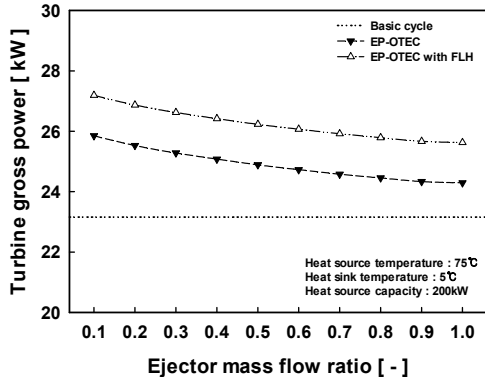


Fig. 9 System efficiency comparison among basic ORC, EP-OTEC and EP-OTEC applying FLH with respect to ejector mass flow ratio

5. 결 론

본 논문에서는 7종의 작동유체와 급액가열기를 적용한 이젝터-펌프 온도차발전 시스템의 이젝터 질량 유량비에 따른 사이클 성능 분석을 실시하였으며, 이에 대한 주요 결과는 다음과 같다.

1) 선정된 7종의 작동유체 중 R245fa 적용 시 가장 높은 기본 ORC 효율을 보였으며, R113 적용 시 가장 낮은 시스템 효율을 보였다.

2) 이젝터-펌프를 적용한 온도차발전시스템에서 유량비 0.1~0.4의 구간에서는 R245fa 냉매를 적용한 시스템 효율이 가장 높게 나타났으나, 0.4 이상의 유량비에서 R142b 냉매 적용 시 가장 높게 나타났다. 이는 유체의 액체와 기체 밀도와 관련이 있는 것으로 사료된다.

3) 급액가열기를 적용한 이젝터-펌프 온도차발전시스템에서 R245fa 냉매 적용 시 고단 터빈 입구 측 과열도가 8.98℃ 요구되며, 급액가열기를 적용한 사이클 효율이 EP-OTEC 효율보다 전체적으로 상승한 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인

“해수-미활용열 이용 온도차발전 및 담수화 기초 성능평가 기반구축(3/3)”에 의해 수행되었습니다 (PES9290).

References

1. A. Auld, A. Berson and S. Hogg, 2013, "Organic Rankine cycles in waste heat recovery: a comparative study", International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol. 8, pp. 9-18. (DOI:10.1093/ijlct/ctt033)
2. G. Li, 2016, "Organic Rankine cycle performance evaluation and thermoeconomic assessment with various applications part I: Energy and exergy performance evaluation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 53, pp. 477-499. (DOI:10.1016/j.rser.2015.08.066)
3. C. Y. Park, W. K. Hong and J. M. Kim, 2011, "Thermodynamic Efficiencies of Organic Rankine Cycles with a Feed Liquid Heater or Regenerator", Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 10, pp. 662-669.
4. J. I. Yoon, S. H. Seol, C. H. Son, K. H. Choi, Y. B. Kim, H. S. Lee, H. J. Kim and J. H. Moon, 2016, "Performance Analysis of Ejector-Pump Thermal Energy Conversion System Using Various Working Fluids", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 87-92. (DOI:10.9726/kspse.2016.20.6.087)
5. AspenTech, Aspen HYSYS V8.9.
6. N. B. Sag, H. K. Ersoy, A. Hepbasli and H. S. Halkaci, 2015, "Energetic and exergetic comparison of basic and ejector expander refrigeration systems operating under the same external conditions and cooling capacities", Energy Conversion and Management, Vol. 90, pp. 184-194. (DOI:10.1016/j.enconman.2014.11.023)