

## 20 kW EP-OTEC 터빈 공력 설계

서종범\* · 한상조\*†

### 20 kW Turbine Aerodynamic Design for EP-OTEC System

Jongbeom Seo\*, Sang Jo Han\*†

Key Words : EP-OTEC(이젝터펌프 해양온도차), Ejector(이젝터), Turbine(터빈), ORC(유기랭킨사이클)

#### ABSTRACT

In the present study, 20 kW turbine for OTEC with a ejector and a motive pump is designed and performance prediction is implemented by means of CFD. The meridional analysis for initial geometry and CFD for detail design are used to design the turbine. This turbine has about 90.9% efficiency and 28.47 kW power at 15,000 rpm and pressure ratio of 1.53. Homogeneous mixture model is used because two phase flow can be occurred in the turbine. Performance evaluation is carried out and then results are presented by plotting of power, mass flow rate and efficiency as varying pressure ratio and rotational speed.

#### 1. 서 론

OTEC (Ocean thermal energy conversion)은 해양심층수와 표층수의 온도차를 ORC (Organic Rankine cycle) 발전 시스템의 저온열원과 고온 열원으로 사용하여 발전하는 시스템으로, 현대에 각광 받고 있는 신재생에너지 발전 중 하나이다. Nihous, G. C.<sup>(1)</sup>와 Krishnakumar Rajagopalan<sup>(2)</sup>은 OGCM (Ocean general circulation model)을 이용하여 분석한 결과 OTEC을 통해 생산해 낼 수 있는 에너지는 약 30TW에 달할 것으로 평가하고 있는 만큼 태양광, 풍력 등과 더불어 최근 주목을 받고 있다. ORC는 기존에는 주로 공장에서 버려지는 열을 회수하는 시스템으로 사용되거나 선박에서 배출되는 열에너지를 회수<sup>(3)</sup>하는 방향으로 사용되어 왔는데, Bertrand F. Tehanche 등<sup>(4)</sup>은 ORC의 원리, 적용 분야, ORC 연구에 의해 새롭게 생겨날 기회, 앞으로 극복해나가야 할 문제점 등에 대해 연구를 수행하였고, 이를 OTEC 시스템에도 적용하여 적도 부근의 섬들의 발전 문제를 해결해 줄 수 있는 하나의 해결책으로 보고 있다. 그리고 Haruo Uehara 등<sup>(5)</sup>은 필리핀 지역에 설치할 수 있는 5 MW급 onland type과 25 MW floating type OTEC 발전소를 제안하기도 했다. 그러나 적용 가능 지역이 적도 부근의 표층수

온도가 상대적으로 높은 지역으로 제한되거나, 시스템 효율이 낮은 단점을 가지고 있는데, Paul J.T. Straatman 등<sup>(6)</sup>은 기존의 OTEC에 STE (Solar thermal electricity)를 추가하여 온도차의 극대화를 통한 약 12%의 효율이 향상된 hybrid OTEC을 제안하였다. Paola Bombarda 등<sup>(7)</sup>은 OTEC발전에 여러 개의 ORC를 적용하여 단일 ORC 대비 약 30%의 효율을 증대시킬 수 있는 시스템을 제안하였다. Nam jin Kim 등<sup>(8)</sup>은 다양한 냉매의 OTEC 성능 분석 및 핵 발전소의 버려지는 열에 OTEC 시스템을 적용할 경우 바닷물을 이용할 때 보다 2% 정도 향상된 효율을 보인다고 보고했다. 이와 같이 OTEC의 단점을 해결하고자 하는 연구들이 활발히 진행되고 있다.

ORC 시스템 및 OTEC은 작동유체의 영향도 크게 받는데, Ulli Drescher<sup>(9)</sup> 등은 바이오매스와 화력 발전에 ORC를 적용할 때 적절한 냉매에 대한 연구를 수행하였고, S.K. Wang 등<sup>(10)</sup>은 dry 냉매와 wet 냉매의 비교 연구를 수행하였다. Jung-In Yoon 등<sup>(11)</sup>은 R717, R404a, R245fa, R744 등의 냉매를 OTEC에 적용했을 때를 비교 분석을 하여, 독성과 인화성을 제외하면 R717이 가장 적합하다고 보고했다. Min-Hsiung Yang 등<sup>(12)</sup>의 연구 또한 다섯 개의 냉매에 대해 비교 연구를 수행하였는데, 이 연구에서도 R717이 가장 우수한

\* 서울과학기술대학교(Seoultech)

† 교신저자, E-mail : sjhan@snut.ac.kr

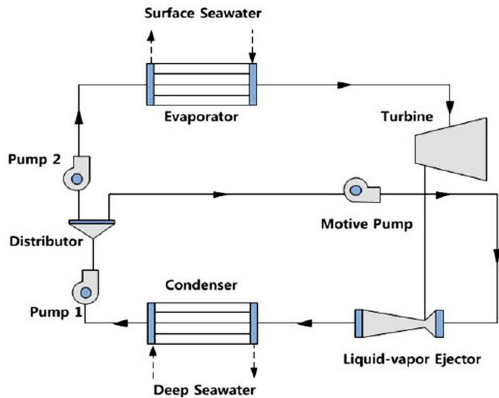


Fig. 1 Configuration of EP-OTEC

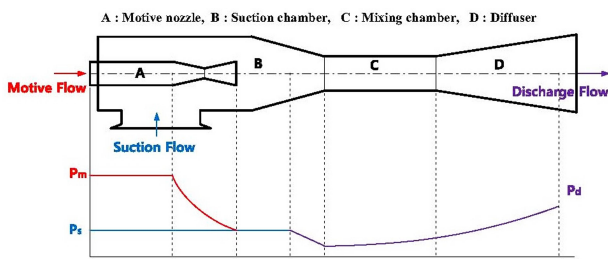


Fig. 2 Internal structure of the liquid-vapor ejector<sup>(14)</sup>

결과를 나타냈다. Samuel M. Sami<sup>(13)</sup>은 약 10개의 냉매에 대해 열원의 온도에 따라 ORC의 효율과 냉매들의 GWP (Global warming potential)를 비교하였다.

본 연구의 EP-OTEC (Ejector pump ocean thermal energy conversion) 시스템은 Jung-In Yoon 등<sup>(14)</sup>의 연구에서 제안된 사이클이며, 이 시스템에 적합한 터빈 설계 및 CFD를 이용하여 터빈의 설계점과 탈설계점 조건에서 성능을 예측하였다.

## 2. 시스템 개요

### 2.1 EP-OTEC

EP-OTEC은 기본 OTEC 사이클에 ejector와 motive pump를 추가하여 사이클의 효율을 향상시켰고, 구성은 Fig. 1에서 확인 할 수 있다. Jung-In Yoon 등<sup>(14)</sup>의 연구에 따르면, 이 사이클에서 ejector (Fig. 2)는 터빈 출구단의 압력을 감소시켜 터빈의 출력이 상승하여 전체 시스템 효율의 상승으로 이어진다. 효율은 기본 OTEC 시스템 대비 약 16%가 증가되었다.

터빈 설계 조건은 사이클 분석 결과에 따라 Table 1에서 보는 것과 같다. 설계 조건은 포화점 근처로(522 kPa 압력에서 포화 온도는 293.5 K) 설계를 수행할 때, 2상유동이나 상변화가 발생할 수 있으므로 유의해야 한다.

Table 1 Design conditions of EP-OTEC turbine

Parameter	Value
Working fluid	R152a
Mass flow rate [kg/s]	1.98
Turbine inlet total pressure [kPa]	522
Turbine inlet temperature [K]	294
Turbine outlet total pressure [kPa]	340.4
Expansion ratio	1.53

Table 2 Comparison of refrigerants<sup>(15)</sup>

Refrigerant	R134a	R152a	R32
Saturated pressure[kPa] at 294 K	586.9	526.4	1509.6
Ozone depletion potential	0	0	0
Global warming potential	1300	120	650
Flammability	None	Low	Low
Toxicity	Low	Low	Low

### 2.2 작동유체

작동유체는 터빈 작동 조건, 인화성, 독성, 가격 등에 따라 선정하게 되는데, Jung-In Yoon<sup>(14)</sup> 등의 연구에 따르면 EP-OTEC 시스템은 R32/R152a(혼합비 87:13)의 혼합냉매를 사용할 때 가장 높은 효율을 갖는다. 시스템효율은 약 2.76%(혼합냉매)와 약 2.54%(R152a)로 터빈 효율에 주는 영향은 무시할 수 있을 것으로 보이고, 혼합냉매의 열역학 모델은 정확도가 낮은 점을 감안하여 단일 냉매 R152a를 작동유체로 선정하였다. Table 2는 3가지 냉매를 비교한 표로, R134a는 공급이 용이하고 가격, 독성 및 인화성에서 장점을 갖지만 GWP가 매우 높다. R32는 터빈 설계점인 294 K에서 높은 포화압력을 갖는 장점이 있지만, R152a에 비해 상대적으로 비싸고 높은 GWP를 갖는다. R152a는 인화성과 독성 부분에서 R32와 비슷한 특성을 가지고 있으면서, GWP는 낮고 가격 또한 저렴하다. EP-OTEC 시스템은 기존의 시스템에서 pump와 ejector가 추가되어 시스템 구성 비용이 증가하였기 때문에 비용에 대한 부담을 감소시킬 필요가 있다. 그래서 R32에 비해 저렴한 R152a가 경제성 측면에서 합리적이라고 할 수 있다. 그러나 294 K에서 포화압력이 낮고, 터빈 운전 조건이 포화점 근처이므로 운전 시 이를 유의해야 하며, 특정 조건에서 인화성을 가진다는 단점이 있다.

### 3. 자오면 기본 설계

본 연구의 터빈은 회전속도를 15,000 rpm으로 고정하고, radial type 터빈으로 설계를 진행하였다. 자오면 설계프로그램을 이용하여 터빈의 초기 형상을 얻었고, 설계자원 절약을 위해 volute는 CFD에서 0.7%의 전압력 손실로 대체하였다.

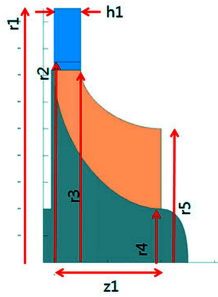


Fig. 3 Meridional view of turbine

Table 3 Initial and optimized turbine parameters

Parameter		Preliminary design		Detail design
		initial	optimized	final
Nozzle	h	20	10	13
	r1	91	97	91
	r2	73	80	74
Rotor	r3	68	76	72
	r4	21	21	25
	r5	40	45	45
	z1	48	45	50
Number of nozzle blades		15	15	15
Number of rotor blades		10	10	10
Power [kW]		29.7	27.0	28.5
Rotational speed [RPM]		15000	15000	15000
Specific speed		0.531	0.465	0.474
Mass flow rate [kg/s]		2.33	1.98	2.66
Efficiency		0.83	0.89	0.91

Fig. 3와 Table 3는 기본 형상과 1차원 최적화 후의 터빈 자오면 형상 및 파라미터들을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 보는 것과 같이 초기 형상의 터빈 입구에서의 alpha 각은 79.9도로 큰 편이고, 반동도(Degree of reaction)는 약 0.3으로 낮다. 최적화 된 형상의 터빈 입구의 alpha 각은 73도, 반동도는 약 0.5이며 속도 삼각형은 Fig. 5와 같다. 최적화는 터빈 입구의 alpha 각이나 반동도 등을 고려하여 수행하고, Chen, H 등<sup>(16)</sup>의 efficiency map (Fig. 6)과 비교하였다. Fig. 6은 loading coefficient ( $\psi$ )와 flow coefficient ( $\phi$ )에 따른 터빈의 효율 측정값을 나타낸 것으로,  $\psi$ 와  $\phi$ 는 식 (1), (2)와 같다.  $C_{\theta,\in}$ 은 rotor 입구에서 절대속도의 선속도 방향 성분이며, U는 rotor 입구의 선속도,  $C_{m,out}$ 은 rotor 출구에서 절대속도의 자오면 방향 성분이다.

$$\psi = C_{\theta,in} / U \quad (1)$$

$$\phi = C_{m,out} / U \quad (2)$$

초기 형상의  $\psi$ 값은 1.40이고,  $\phi$ 값은 0.40이다.  $\psi$ 값은

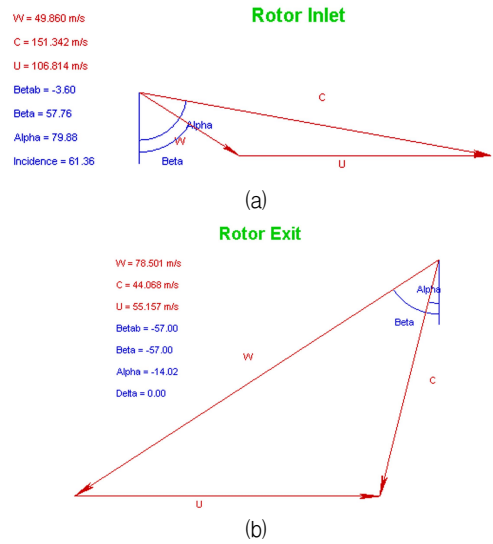


Fig. 4 Velocity triangle of initial design (a) rotor inlet (b) rotor outlet

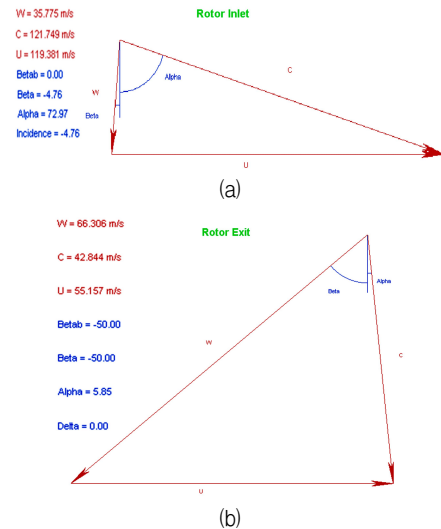


Fig. 5 Velocity triangle of optimized design (a) rotor inlet (b) rotor outlet

rotor 입구에서 alpha 각을 변경하여 조정하였다.  $\phi$ 값은 rotor 출구에서 alpha나 beta 각도를 변경하여 조정할 수 있지만, 이 값들은 rotor 입구의 값들과 연관성이 있어 변경에 제한이 있다. 그래서 회전속도는 고정되어 있으므로, 로터의 지름을 변경하여 선속도 U와  $\phi$ 를 변경하였다. 최종적으로 Fig. 6에서 보는 것과 같이 약 83% 효율을 가질 것으로 예상되는 지점(▲)의 형상을 얻었다. 이 때의 형상정보가 Table. 3의 optimized 열에 있으며,  $\psi$ 와  $\phi$  값은 각각 0.98, 0.36을 갖는다. Fig. 6에서 가장 높은 효율은  $\psi$ 가 0.92,  $\phi$ 가 0.25 정도 일 때 기대할 수 있으나,  $\phi$ 를 변경함에 따라 터빈의 크기가 더 커져야 할 것으로 예상된다. 이는 제작비용, 무게 등의 증가로 이어지므로 이를 기본설계의 최적화 형상으로 선정하였다.

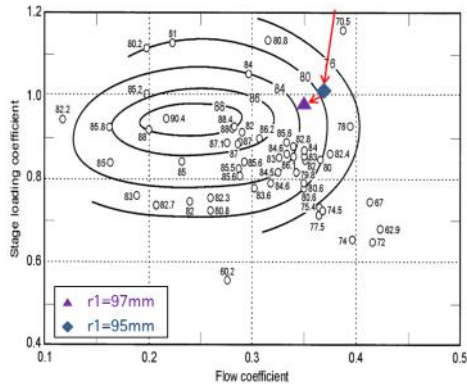


Fig. 6 Measured efficiency by loading and flow coefficient<sup>(16)</sup>

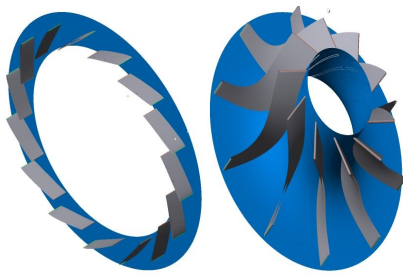


Fig. 7 Designed nozzle (left), rotor (right)

## 4. 상세설계 및 성능평가

### 4.1 상세설계

1차원 자오면 설계는 출력, 효율 등의 예측을 신속하게 할 수 있는 장점과 동시에 경계층, 3차원 유동 박리 현상 등을 고려하지 못하는 한계를 가진다. 그러므로 제작된 터빈을 이용한 실험을 수행하기 전에 CFD 해석 이용하여 상세설계 및 성능 예측 등의 검증 과정이 필요하다.

터빈의 CFD 해석은 크게 정상·비정상 상태 해석과 노즐과 로터의 1개 세트 해석, 전체 세트 해석으로 나눌 수 있다. 비정상 상태로 해석하는 것이 더 정확하지만 계산에 소모되는 resource가 높아 periodic 경계조건을 이용하여 1개의 세트에 대해 정상상태 해석을 진행하였다. 실제 설계된 터빈 노즐의 날개 개수는 15개, 로터는 10개이다(Fig. 7). 격자는 약 100만개의 hexahedral 격자를 사용하여 해석을 수행하였고, shroud에 0.2 mm의 tip clearance를 적용하였다. 작동 유체는 R152a vapor와 R152a homogeneous mixture를 사용하였고, 난류 모델은 SST를 사용하였다. 이와 같은 조건에서 Table 3의 optimized parameter들을 초기형상으로 해석을 수행하였다. 그리고 nozzle과 rotor의 parameter들을 변경하여 반복적으로 해석을 수행하고, 이 결과들을 반영하여 상세설계를 진행해서 최종적으로 Table 3의 final열의 데이터를 얻었다. 최종 터빈 형상의 직경은 91 mm로 한상조

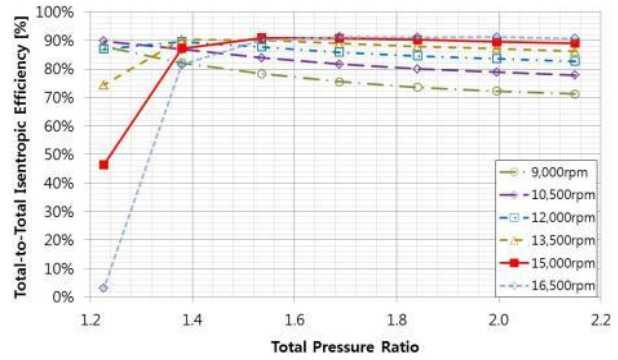


Fig. 8 Efficiency vs. pressure ratio by inlet pressure variation

등<sup>(17)</sup>의 선행 연구의 터빈 직경(74 mm)과 비교해보면 상대적으로 조금 크다고 할 수 있으나, 냉매와 질량유량 등을 고려했을 때 적절한 크기라고 판단된다.

### 4.2 Off-design 성능 평가

Off-design 성능 평가는 회전수와 팽창비 변화에 따른 출력, 질량유량과 효율을 이용해 평가하였다. 특히 EP-OTEC은 ejector를 이용하여 터빈 출구의 압력을 감소시켜 효율 향상을 도모하는 점을 고려해서 팽창비 변경 시에 터빈 출구의 압력 변화에 따른 성능 평가도 수행되었다. 성능 평가는 설계 회전수인 15,000 rpm을 기준으로 60%~110%까지 회전수를 변경하고, 터빈의 출구 압력은 고정하고 입구 압력을 10%씩 변화시켜(417 kPa~730.8 kPa) 수행하였다. 이후 터빈의 입구 압력을 고정하고 출구압력만 10%씩 변화시켜(170.2 kPa~408 kPa) 해석을 수행하였다.

#### 4.2.1 터빈 입구압력 변화에 따른 성능

Fig. 8은 출구압력은 고정하고 입구압력과 회전속도만 변화시켜 계산한 결과로, CFD 결과의 축동력( $W_{shaft}$ )을 Refprop 프로그램을 이용하여 얻은 등엔트로피 과정의 입구와 출구에서 엔탈피 차이( $h_{in} - h_{s,out}$ )로 나누어 total-to-total isentropic efficiency( $\eta_t$ )를 계산하였다(식 3).  $P_{t,in}$ 은 입구 전압력,  $P_{t,out}$ 은 출구 전압력으로 압력비는  $P_{t,in}/P_{t,out}$ 이다. 설계점(압력비가 1.53)에서 가장 높은 효율인 90.9%를 갖는 것으로 나타났다.

$$\eta_t = \frac{W_{shaft}}{h_{in} - h_{s,out}} \quad (3)$$

효율은 기계적인 마찰 손실과 2상 유동의 모델 등에 의한 손실이 적절하게 반영되지 않아 높게 나온 것으로 보인다. 입구압력이 증가함에 따라(팽창비가 증가) 효율은 조금 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 9~10은 같은 조건에서 질량유량의

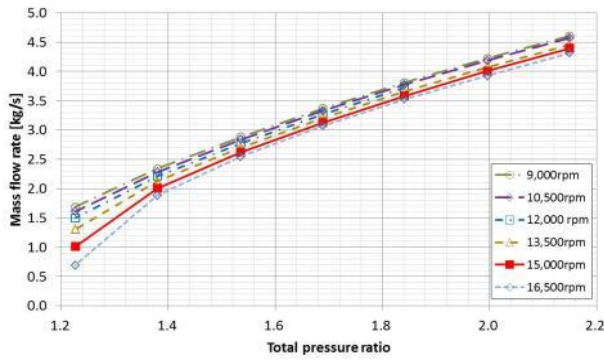


Fig. 9 Mass flow rate vs. pressure ratio by inlet pressure variation

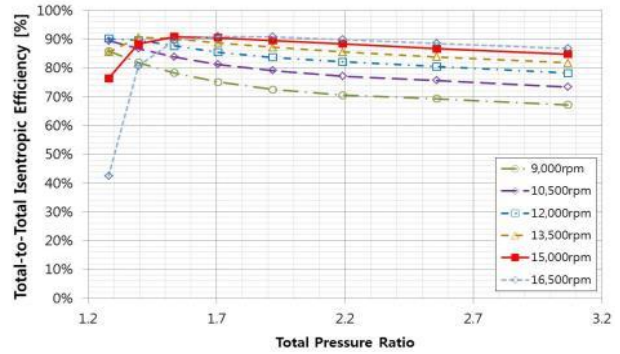


Fig. 11 Efficiency vs. pressure ratio by outlet pressure variation

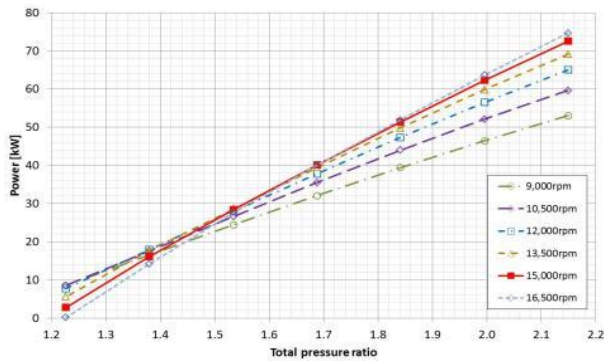


Fig. 10 Power vs. pressure ratio by inlet pressure ratio

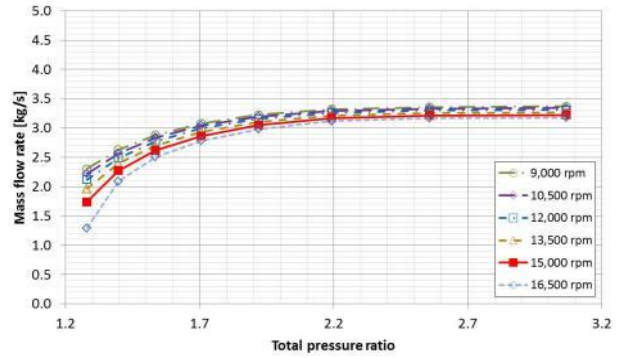


Fig. 12 Mass flow rate vs. pressure ratio by outlet pressure variation

변화와 출력 변화를 나타낸 것으로 입구압력이 증가함에 따라 질량유량과 출력 모두 증가하는 것을 알 수 있다. 팽창비가 1.4 보다 낮아질 경우에는 Fig. 8에서 보는 것과 같이 팽창비가 증가할 때보다 급격하게 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 15,000 rpm과 16,500 rpm의 빠른 회전수에서 더 큰 감소율을 보인다. Off-design 조건에서는 설계된 속도 삼각형과 다른 형상으로 변화하게 되고, 이에 따라서 효율이 감소하는 것은 자명한 일이다. 이러한 조건에서 시스템을 운영할 경우에는 터빈뿐만 아니라 전체 시스템에 큰 무리가 되므로 피하는 것이 좋으며, 특히 고속·저팽창비 때 시스템 부하가 더 크다. 그러므로 이 시스템을 운영할 때에는 저속에서 충분히 팽창비를 확보한 다음 회전속도를 증가시키는 운전이 안전할 것으로 보인다.

#### 4.2.2 터빈 출구압력 변경에 따른 성능 평가

Fig. 11~13은 Fig. 8~10의 압력 조건을 제외하고 모두 동일한 조건에서 입구압력 대신 출구압력을 변경하여 얻은 결과이다. Fig. 11과 Fig. 8의 압력비가 약 1.2일 때를 비교해보면 출구압력을 변경하는 경우(Fig. 11)가 더 효율이 높게 나타난다. 이는 같은 팽창비와 회전속도더라도 출구압력을 조정할 때가 조금 더 안정적인을 나타낸다. Fig. 12에서 팽창비가 약 2.2 일 때부터 질량유량이 거의 증가하지 않는 것은 R152a가 갖는 낮은 음속(설계점에서 186.4 m/s)으로 낮은 팽창비

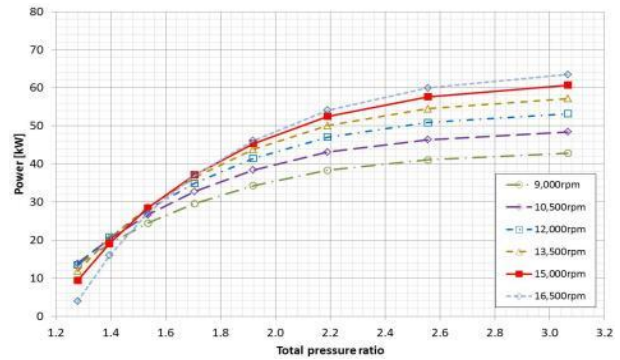


Fig. 13 Power vs. pressure ratio by outlet pressure variation

에서 초킹(Choking)이 발생하기 때문이다. 이에 따라 Fig. 13의 출력의 증가율(기울기)이 감소하는 것으로 나타난다.

## 5. 결론

본 연구는 EP-OTEC 시스템에 사용되는 터빈 설계 및 설계점과 탈설계점에서 성능 평가를 수행하였고, 이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 작동 유체를 R152a로 사용하는 EP-OTEC 시스템용 터빈으로 팽창비는 약 1.53, 회전수는 15,000 rpm로 2상 유동을 고려하여 설계하였다.

- 2) 자오면 기본 설계를 통해 3차원 CFD 해석을 위한 터빈의 기본 형상을 설계하였고, 이를 Chen, H.(16)등의 연구의 loading, flow coefficient 맵을 이용하여 성능을 예측 및 1차원 최적화를 수행하였다.
- 3) 기본 설계 결과를 이용하여 3차원 CFD 해석을 수행하였고, 결과를 반영하여 터빈 형상 값들을 조정하는 과정을 반복하여 상세설계 및 설계 최적화를 수행하였다. 이를 통해 최종 형상 데이터를 얻었으며, off-design 성능 평가를 실시하였다.
- 4) Off-design 성능 평가는 터빈의 회전속도, 팽창비를 변화시키면서 수행하였고, 높은 회전수에서 낮은 팽창비를 가질 경우 효율이 크게 감소할 것으로 예상된다. 낮은 압력비에서 입구 압력만 변화시킬 때와 출구 압력만 변화시킬 때 모두 효율이 낮아지는 결과를 얻었으나, 입구 압력을 변화시켰을 때 상대적으로 더 낮은 효율을 나타내었다. 이러한 결과는 rotor에서 유동 박리현상에 의한 것으로 터빈 및 전체 시스템에 큰 부하를 줄 것으로 예상되어 시스템 운전 시 피해야 할 구간으로 보인다.
- 5) CFD 결과에서 입구 조건이 포화점 근처임에도 불구하고 출구의 유체의 상은 과열 증기로 나타나는데, 이는 입구와 출구 면에서의 평균값이 결과로 나타는 것으로부터 기인하는 것으로, 터빈 내에서 액체 분율은 약 2%이내 일 것으로 예상된다.

## 후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임이다.(2013R1A1A1061156)

## References

- (1) Nihous, G. C., 2007, "A preliminary assessment of ocean thermal energy conversion resources," *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 129, No.1, pp. 10~17.
- (2) Rajagopalan, K. and Nihous, G. C., 2013, "Estimates of global Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) resources using an ocean general circulation model," *Renewable Energy*, Vol. 50, pp. 532~540.
- (3) Oh, C. and Song, Y. U., 2012, "A Optimization of the ORC for Ship's Power Generation System," *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 36, No. 5, pp. 349~355.
- (4) Tchanche, B. F., Lounis, P., Petrisans, M., and Ramenah, H., 2013, "Organic Rankine cycle systems Principles, opportunities and challenges. In *Microelectronics (ICM)*," 2013 25th International Conference on IEEE. pp. 1~4.
- (5) Uehara, H., Dilao, C. O., and Nakaoka, T., 1988, "Conceptual design of ocean thermal energy conversion (OTEC) power plants in the Philippines," *Solar energy*, Vol. 41, No. 5, pp. 431~441.
- (6) Straatman, P. J. and van Sark, W. G., 2008, "A new hybrid ocean thermal energy conversion - Offshore solar pond (OTEC - OSP) design: A cost optimization approach," *Solar Energy*, Vol. 82, No. 6, pp. 520~527.
- (7) Bombarda, P., Invernizzi, C., and Gaia, M., 2013, "Performance analysis of OTEC plants with multilevel organic Rankine cycle and solar hybridization." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 135, No. 4, 042302.
- (8) Kim, N. J., Ng, K. C., and Chun, W., 2009, "Using the condenser effluent from a nuclear power plant for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 10, pp. 1008~1013.
- (9) Drescher, U. and Brüggemann, D., 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.
- (10) Wang, S. K. and Hung, T. C., 2010, "Renewable energy from the sea-organic Rankine Cycle using ocean thermal energy conversion. In *Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies (ESD)*," 2010 Proceedings of the International Conference on IEEE. pp. 1~8
- (11) Yoon, J. I., Son, C. H., Baek, S. M., Kim, H. J., and Lee, H. S., 2014, "Efficiency comparison of subcritical OTEC power cycle using various working fluids," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 7, pp 985~996.
- (12) Yang, M. H. and Yeh, R. H., 2014, "Analysis of optimization in an OTEC plant using organic Rankine cycle," *Renewable Energy*, Vol. 68, pp. 25~34.
- (13) Sami, S. M., 2012, "ORC for low temperature power generation with low GWP refrigerants," *International Journal of Ambient Energy*, Vol.33, No. 1, pp. 2~8.
- (14) Yoon, J. I., Son, C. H., Seol, S. H., Kim, H. U., Ha, S. J., Jung, S. H., ... and Lee, H. S., 2015, "Performance analysis of OTEC power cycle with a liquid - vapor ejector using R32/R152a," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 11, pp. 1597~1605.
- (15) R134a, R152a, R32 MSDS available at <https://www.airgas.com/>, ODP, GWP available at [http://www.engineeringtoolbox.com/Refrigerants-Environment-Properties-d\\_1220.html](http://www.engineeringtoolbox.com/Refrigerants-Environment-Properties-d_1220.html)
- (16) Chen, H. and Baines, N. C., 1994, "The aerodynamic loading of radial and mixed-flow turbines," *International journal of mechanical sciences*, Vol. 36, No. 1, pp. 63~79.
- (17) Han, S. J. and Seo, J. B., 2014, "20 kW Turbine development for OTEC system," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 17, No. 6, pp. 39~43.