

선박폐열회수시스템을 위한 외향반경류형 터빈 기본 설계 Preliminary Design of the Radial Outflow Turbine for Waste Heat Recovery System on Vessels

서종범* · 문정현* · 이호생** · 김현주***†
Jong-Beom Seo*, Jung-Hyun Moon*, Ho-Saeng Lee**
and Hyeon-Ju Kim***†

(Received 15 October 2020, Revision received 3 December 2020, Accepted 3 December 2020)

Abstract : Based on the IMO 2020 Regulation and EEDI Phase 3, international demand for eco-friendly ships is growing. The waste heat recovery system on vessels has a potential to reduce CO₂ emissions of 5 to 10% while improving engine efficiency. This study aims to design ORC (Organic Rankine Cycle) and radial outflow turbine for the waste heat recovery system using exhaust gas in vessels. A designed cycle is simple ORC using R245fa as a working fluid. 1D turbine design utilizes Euler’s turbomachinery equation, specific speed, specific diameter and commercial software. Once the initial model of the ROT (Radial Outflow Turbine) was designed, a case study was conducted by different numbers of stage. For a case study, we chose a 5-stage ROT and analyzed its design and off-design performances using rotational speed, inlet total pressure and temperature. The designed 5-stage ROT has the power output of 480.9 kW and total-to-static efficiency of 86.8% at the design point. The off-design performance can be a preliminary guidance to operate an ROT in practice.

Key Words : Waste heat recovery, Radial outflow turbine, Preliminary design, R245fa

— 기 호 설 명 —

N_s : 비속도	D : 직경 [mm]
	D_r : 직경 비
	D_s : 비직경
	C : 절대속도 [m/s]

*** 김현주(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4986-8914)
: 책임연구원, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터
E-mail : hyeonju@kriso.re.kr, Tel : 042-866-3701
*서종범(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9827-4717) : 선임
기술원, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터
*문정현(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5247-1029) : 기술
원, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터
**이호생(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3042-5889) : 책임
연구원, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터

*** Hyeon-Ju Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4986-8914)
: Principal Researcher, Seawater Energy Plant Research Center,
Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering.
E-mail : hyeonju@kriso.re.kr, Tel : 042-866-3701
*Jong-Beom Seo(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9827-4717)
: Senior Engineer, Seawater Energy Plant Research Center,
Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering.
*Jung-Hyun Moon(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5247-1029)
: Senior Engineer, Seawater Energy Plant Research Center,
Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering.
**Ho-Saeng Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3042-5889)
: Principal Researcher, Seawater Energy Plant Research Center,
Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering.

- h : 엔탈피 [kJ/kg]
- U : 선속도 [m/s]
- N_{stage} : 단 수
- Q : 체적 유량 [m³/s]
- r : 반지름 [mm]
- s : 피치 길이 [mm]
- c_t : 코드 길이 [mm]

그리스 문자

- α : 절대 각도 [degree]
- η : 효율
- v : 속도비
- ϕ : 유량계수
- ψ : 부하계수
- ω : 회전수 [RPM]
- Λ : 반동도

하첨자

- 0 : stagnation state
- m : meridional component
- min : minimum
- max : maximum
- in : inlet
- s : isentropic
- out : outlet
- tt : total to total
- ts : total to static
- θ : tangential component

1. 서 론

최근 국제해사기구(IMO) 2020 황산화물 규제와 IMO의 해양환경보호위원회(MEPC) 회의에서는 2015년부터 5년 주기로 온실가스를 10%를 감축하는 EEDI(Energy efficiency design index) 규제의 Phase 3(2030년까지 30% 감축)을 조기 적용을 검토하는 등으로 인해 친환경 선박에 대한 국제적 요구가 증가하고 있고, 이를 위한 조선 업계의 대

응이 필요한 상황이다. Bouman 등¹⁾은 CO₂ 배출량 감소의 잠재력을 선체 설계, 전력 및 추진 시스템, 대체 연료, 대체에너지자원, 운영으로 구분하여 제시하였다. 선체 설계 부분에서는 선박 크기가 약 5~30% CO₂ 감축 잠재력을 가지고, 대체연료에서는 약 50~78%의 감축 잠재력을 가지는 바이오 연료가 가장 잠재력이 클 것으로 나타났다. 폐열 회수시스템(WHRS, Waste heat recovery system)은 약 5~10%의 CO₂ 배출 감소 잠재량을 가지고 있고, 세계 폐열회수 시스템 시장의 지속적인 성장과 아직 상용화 및 시장 개발이 완전히 이루어지지 않은 점, 다양한 활용처가 존재하는 것을 고려하면 미래 시장의 가치가 상당하다.

특히, 선박에 적용하는 폐열회수시스템의 경우에는 엔진 냉각수(85°C)를 이용하도록 일본 MHI-MME가 개발한 125 kW 장치가 선박에 최초로 적용되었고, 미국의 Access Energy가 125 kW급(130°C 열원 적용) 상용 모듈을 판매하고 있다. 국내에서는 대우조선해양에서 WHRS를 선박에 적용하였다.

외향반경류형 터빈(ROT)은 작동유체가 축방향으로 들어가 원주방향으로 나가는 형식의 터빈으로 이탈리아의 Exergy 社가 지열발전에 적용한 사례²⁾가 있다. ROT는 반경류형 터빈이지만 다단(multi-stage) 구성에 유리하고, 순수한 효율, 단일 디스크에 다단 구성, 다중 압력 적용 등의 장점을 갖는다. 다단 구성 시에 축류 터빈과 비교 할 경우, 각 단에서 일어나는 엔탈피 강하가 축류터빈은 일정한 반면, ROT는 직경의 증가로 인해 엔탈피 강하가 증가하여 축류 터빈보다 적은 단 수 구성에 유리한 장점을 가진다.

랭킨사이클을 이용한 터빈 기본 설계는 주로 스팀 터빈³⁾이나 1단 내향반경류터빈(radial inflow turbine) 등에 대해 이루어지고 있다. 성능해석 관련 연구도 마찬가지로 조수용 등⁴⁾의 연구와 같이 내향반경류터빈이 주를 이루고 있다. ROT에 관한 연구는 아직까지 소수만 보고되고 있다. Doğu 등⁵⁾은 150 kW 출력을 갖는 8단 ROT를 설계하고, labyrinth 설을 적용한 Tip clearance 변화에 따른 성능 해석을 수행하였다. 기본 형상 설계 결과(각 단 지름, 깃 높이, 깃 수, 반동도 등)와 CFD를 이

용하여 성능 해석을 수행하고 결과를 보고하였다. Kim 등⁶⁾은 설계 이론 및 알고리즘을 제시하고, 이를 이용한 설계 결과를 제시하였다. 설계결과는 CFD 해석을 통해 성능 해석하였고, 부하 계수, 유량 계수, 속도비 등을 이용하여 성능을 평가하였다. Zanellato, L 등⁷⁾은 ROT를 2개의 플랜트에 설치하여 실험적으로 성능을 보고하였다. 플랜트는 터키에 Exergy 社가 설치하였고, 실험 방법, 설치된 장비 및 장치와 두 플랜트의 ROT 출력을 측정값을 이용하여 도시하였다. 각 플랜트는 평균 12,694 kW와 2,828 kW의 출력을 나타냈고, 이 때 표준편차는 각각 36.08 kW와 3.9 kW이다.

본 연구에서는 선박의 엔진 배기열, 냉각수, 보일러 등에서 버려지는 열을 회수하여 선박 효율을 증가시키는 폐열회수 시스템용 외향반경류형 터빈 설계를 수행하였다. 선박의 폐열원을 분석 및 기본 사이클 설계를 수행하고, 사이클 조건에 부합하는 외향반경류형 터빈의 설계 및 성능 해석을 수행하였다.

2. 사이클 설계

선박폐열발전을 적용할 수 있는 대표적인 선박은 컨테이너선, 유조선, LNG선, 벌크화물선 등이 있고, 이와 같은 선박에서 발생하는 폐열원은 배기가스(메인 엔진, 발전기, 보일러 및 소각기), 냉각수(메인 엔진, 발전기), 보일러 응축기, 각종 오일 및 공랭식 냉각기 등이 있다. 이 중 주요 가용 열원은 엔진 배기가스 및 엔진 냉각수이다. 엔진 배기가스는 약 200℃ 이상의 고온으로 일반적으로 이코노마이저(economizer)를 이용하여 열교환을 통해 증기를 생산한 후 배출되고, 엔진 냉각수는 40~50℃로 엔진의 냉각유로로 유입되어 엔진을 냉각 후 약 80~90℃로 배출된다.

본 연구의 폐열원은 MAN B&W의 CEAS 엔진 계산에 따라 12,000TEU 컨테이너선에 적용되는 14S90ME 타입의 엔진 폐열을 사용하였다. 열원인 배기가스는 200℃에서 열교환 후 150℃로 656,100 kg/h의 유량으로 배출 되는 조건으로 사용하였다.

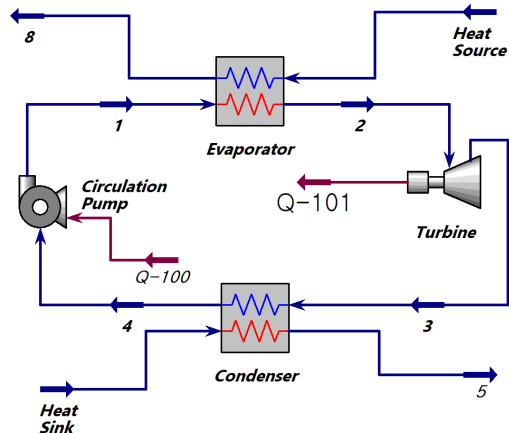


Fig. 1 Schematic of the simple ORC cycle

Table 3 Parameters for cycle design

Parameter	Value	Unit
Efficiency of turbine	75	%
Efficiency of pump	75	%
Temperature of heat source	200	℃
Temperature heat sink	30	℃
Minimal Pinch point for condenser	4	℃

사이클은 단순 ORC 사이클(Fig. 1)로 설계하였고, 설계 조건은 Table 1과 같다. 여러 열원 중 배기가스만 이용하는 조건으로 설계하였고, R245fa, R1233zd, R1234ze(z) 냉매를 고려하였다. 각 냉매별 설계 결과는 Table 2에서 보는 바와 같다. R245fa는 높은 지구온난화지수(GWP)를 가져 기후변화협약에 따라 순차적으로 퇴출될 예정이지만, Dry gas의 특성으로 인해 기존의 많은 WHRS에 사용된 이력을 가지고 있다. 그러므로 기본 설계 단계에서는 기존의 설계 및 제작된 터빈과 성능 및 형상 비교하는데 유용하다. 또한 GWP가 낮은 R1234ze(z)와 같은 냉매를 이용한 설계는 R245fa 냉매용 ROT 설계 후에 진행하는 것이 적합할 것으로 판단되므로, 본 연구의 작동유체는 R245fa로 선정하였다.

3. 외향반경류형 터빈 기본 설계

외향반경류형 터빈은 아직까지 널리 사용되는 터빈이 아니며, 설계 방법과 성능 해석 및 실험을 통한 데이터가 현저히 부족한 상태이다. 그러나 다단 구성에 적합하고, 축류 터빈에 비해 동일 엔탈피 차이에서 적은 수의 단을 구성할 수 있으며, 각기둥 형상(prismatic)의 깃으로 제작비 절감 등의 장점이 있다. 그리고 터빈 로터의 팁 속도로 인해 수백메가와트 급의 가스터빈과 경쟁하는 것은 무리가 있지만, 수백 킬로와트에서 수십 메가와트 영역에서 경쟁력이 높을 것으로 보인다.

일반적으로 반경류형 터빈의 기본 형상은 비속도(식 (1)⁸⁾와 비직경(식 (2)⁸⁾ 해석을 통해 도출한다. 정제 엔탈피와 출구 유량이 주어지면 실험 데이터를 기반으로 한 도표를 토대로 초기 회전수를 추정할 수 있지만, 아직 ROT 실험 결과가 적어 관련 맵이 보고되지 않고 있다. 그래서 본 연구의 터빈 회전수는 50 hz 발전기에 직접 적용이 가능하도록 3,000 rpm으로 선택하였다. 초기 평균 직경(D_{mean})은 문헌의 정보⁶⁾를 참조하여 약 400 mm로 결정하였다. 반동도는 반동터빈으로 설계하기 위한 0.5를 사용하였다. 결정된 회전수와 초기 반경, 터빈 입출구 조건, 그리고 계산식 (식 (3))⁹⁾을 이용하여 초기 단 수는 7단으로 결정하였다 (Table 3).

이렇게 결정된 초기설계 값을 이용하여 상용프로그램인 Axstream을 이용하여 기본 형상 설계를 하였다.

$$N_s = \frac{\omega \sqrt{Q_{out}}}{\Delta h_0^{3/4}} \quad (1)$$

$$D_s = \frac{D \Delta h_0^{1/4}}{\sqrt{Q_{out}}} \quad (2)$$

$$\omega r_{mean} = U = \sqrt{\frac{\Delta h_{0s}}{2(1-\Lambda)N_{stage}}} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{C_{m,out}}{U_{in}} \quad (4)$$

$$\psi = \frac{C_{\theta,in}}{U_{in}} \quad (5)$$

$$v = \frac{U}{C_s}, C_s = \sqrt{\frac{U^2}{\Delta h_0}} \quad (6)$$

$$\eta_{ts} = \frac{\Delta h_0}{1/2 C_s^2} = 2 \frac{\Delta h_0}{U^2} \left(\frac{U}{C}\right)^2 = 2\psi v^2 \quad (7)$$

Table 4 Turbine design conditions

Working fluid	R245fa	R1233zd	R1234ze(z)
Power(kW)	424.2	482.6	480.8
Mass flow rate(kg/s)	17.22	17.02	15.89
Turbine inlet pressure(kPa)	1257	1044	1359
Turbine inlet temperature(°C)	100	100	100
Turbine outlet pressure(kPa)	218	188.5	256
Turbine outlet temperature(°C)	59.06	53.36	49.65
Pressure ratio	5.768	5.536	5.309
Rotational speed(RPM)	3,000		

Table 4 Initial design result

Parameter	Value	Unit
Mean diameter	400	mm
Number of stage	7	-
Averaged flow coefficient	0.38	-
Averaged loading coefficient	0.83	-
Averaged velocity ratio	0.70	-
Averaged reaction	0.48	-

Table 5 Comparison of stage specifications

	5 stage (Case 1)	6 stage (Case 2)	7 stage (Case 3)	8 stage (Case 4)	9 stage (Case 5)
Power[kW]	480.90	484.80	489.95	492.11	494.93
η_{tt}	0.8679	0.8680	0.8829	0.8856	0.8898
C_l [mm]	22.2~17	161~131	133~144	11.8~13	9~10.6
D_{mean} [m]	0.3869	0.3639	0.4160	0.3780	0.3703
D_r	2.0851	2.0218	1.9040	2.1182	1.9316
D_{min} [m]	0.2508	0.2408	0.2865	0.2424	0.2526
D_{max} [m]	0.5229	0.4869	0.5455	0.5135	0.4880
H_{min} [m]	0.0133	0.0155	0.0113	0.0125	0.0113
H_{max} [m]	0.0343	0.0430	0.0328	0.0366	0.0328
ϕ_{avg}	0.3983	0.3709	0.3774	0.4208	0.4224
ψ_{avg}	1.2048	1.2716	0.8277	0.8824	0.8446
v_{avg}	0.5861	0.5660	0.7016	0.6756	0.6909
Λ_{avg}	0.4849	0.4667	0.4771	0.4676	0.4667

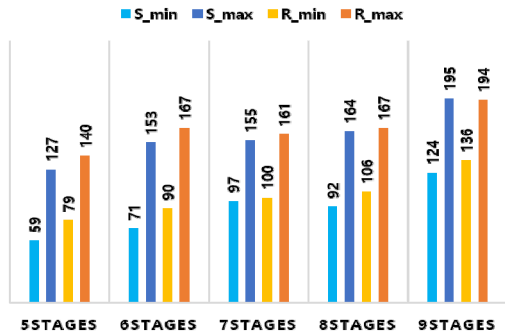


Fig. 2 Minimum and maximum number of blades distribution

설정된 초기 단 수(number of stage)의 적정성을 확인하기 위하여 5단에서 9단까지의 ROT에 대해 케이스 분석을 수행하였다. 단 수 변화에 따른 Total-to-total 효율, 지름, 깃 높이, 스테이지 평균 유량 계수 등을 비교하였고, Table 4에서 보는 것과 같다. 5단에서 9단으로 단이 증가함에 따라 효율은 미소하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. ROT의 단 수 변화에 따른 성능은 Maksiuta 등⁹⁾의 연구에서도 보고되었는데, 이 문헌에서는 CAT G6312 엔진 배기가스를 활용한 폐열회수 시스템용 초입계영역의 ROT와 저압영역의 ROT로 두

터빈을 설계하였다. 설계된 ROT의 3~10단의 Total-to-static 효율을 비교하여 단 수가 증가함에 따라 효율이 증가하지만 특정 단 수 이상에서는 포화되는 특성을 보고하였다.

평균 반경은 약 0.36 m에서 0.41 m로 6단 ROT가 가장 작은 지름, 7단 ROT가 가장 큰 지름을 갖도록 설계되었다. 모든 ROT는 동일 크기에서 단 수가 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 약 2.0 정도의 직경비율(D_r)을 갖도록 설계되었다.

각 케이스 중 로터 깃의 최대 선속도는 85.69 m/s로 최대 직경이 가장 큰 7단 ROT의 마지막 단에서 발생하는데, 출구에서의 음속인 140.01 m/s에 비해 충분히 작다.

각 케이스는 모두 약 1.34의 Solidity(c_l/s)를 갖고, 이에 따른 깃 수는 Fig. 2에서 보는 것과 같다. 9단 ROT가 124~195 개의 노즐과 로터 모두 최대 깃 개수를 가지며, 5단 ROT는 54~148 개로 가장 적은 깃 개수를 갖는다. 6~8단 ROT는 비교적 유사한 깃 개수를 갖도록 설계되었다. 9단의 ROT (case 5)는 케이스 중 최대 단 수와 최대 194 개의 많은 깃 수를 가지므로 깃과 깃이 부착되는 디스크 사이에서 높은 응력이 작용할 수 있다. 깃 높이의 경우에는, Case1부터 Case3까지는 최소 깃 높이와 최대 깃 높이가 비슷하다가 Case4와 Case5에서 최대 깃 높이가 증가하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3).

각 케이스의 공력 성능을 분석하기 위해 다음 변수들을 활용하였다. Flow coefficient(식 (4)⁸⁾,

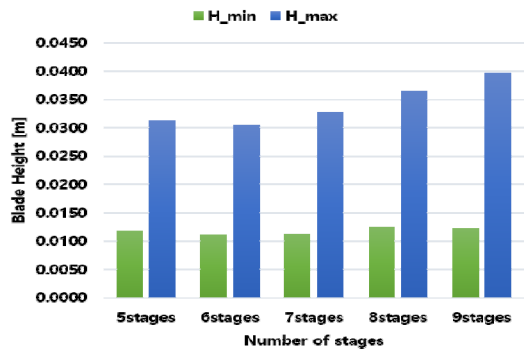


Fig. 3 Comparison of minimum and maximum blade height

kPa~3,000 kPa까지 변경하여 성능을 예측하였다. 결과는 Fig. 7(a)에서 보는 것과 같이 등고선 형태로 나타내었고, 빗금 친 부분은 해석이 수렴하지 않은 영역이다. 출력은 온도보다는 압력에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 설계된 5단 ROT는 1,750 kPa, 120°C 에서는 약 850 kW까지 출력을 가질 수 있다. 한편, 입구 압력과 온도가 달라짐에 따라 입구의 엔탈피가 변하여 출력이 변동하는데, 엔탈피 차이가 변하기 때문에 출력이 높다고 반드시 효율이 높다고 볼 수 없다. Fig. 7(b)는 입구 온도와 압력 조건 변경한 탈설계점에서 효율을 나타낸다. 약 900 kPa에서 1,500 kPa 구간에서는 약 84.5%의 상대적으로 높은 효율을 나타내지만 그 외의 영역에서는 효율이 감소하는 것을 확인할

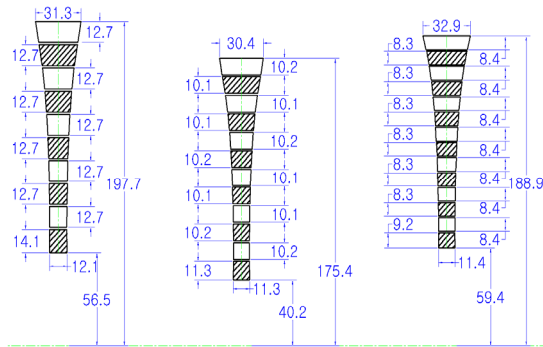


Fig. 5 Meridional dimension of designed ROT(5 stages : left, 6 stages : middle, 7 stages : right)

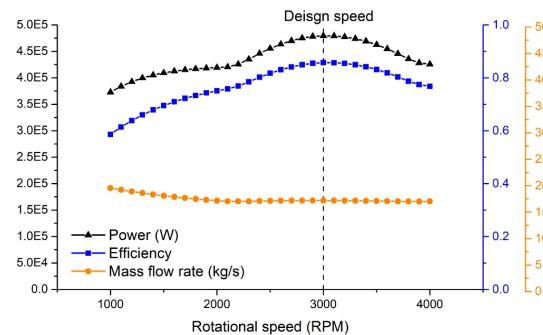
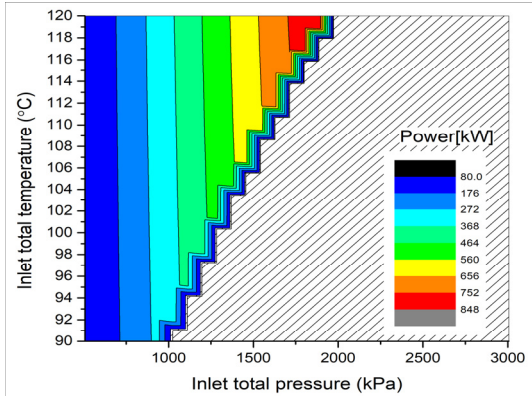
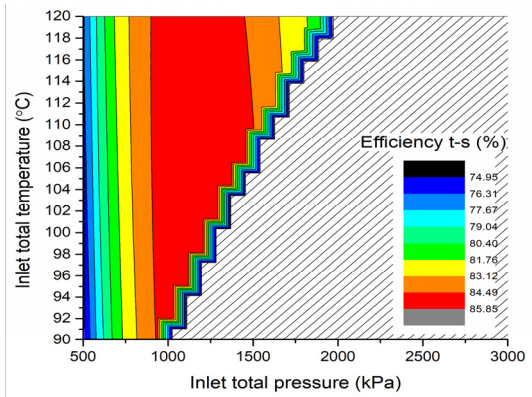


Fig. 6 Off-design performance at different rotational speed



(a) Power contour in off-design conditions



(b) efficiency contour in off-design conditions

Fig. 7 Performance contour of 5 stage ROT in off-design condition by the inlet total pressure and temperature

수 있다. 결론적으로, 약 입구 압력이 900~1500 kPa이고 가열도가 확보될 경우 터빈의 효율은 적절히 확보할 수 있으나, 출력은 340~660 kW까지 크게 변동할 수 있다. 본 성능을 예측함으로써 상세 설계 단계의 CFD 해석 결과와 비교 검증에 활용할 수 있고, 실제 운전 시 터빈의 거동 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 ORC 사이클에서 적용될 수 있지만 설계관련 연구가 많이 보고되지 않은 외향

반경류형 터빈(ROT)에 대하여 설계 및 1차원 성능 예측을 수행하였다. 설계 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) ORC 시스템을 활용한 선박 폐열발전에 적용할 수 있도록 외향반경류형 터빈을 설계하였다. 14S90ME 엔진 배기가스를 열원으로 해수를 열침으로 사용하였다.

2) 작동유체는 R245fa로 약 424 kW 출력을 갖는 단순 ORC 형태의 사이클을 설계하였고, 터빈 입출구 조건을 설계 기본 조건으로 사용하였다.

3) 비속도, 비직경, 반동도, 부하계수, 유량계수 등의 식을 활용하여 1차원 기본 설계를 수행하였고, 케이스 비교를 통해 설계점에서 약 480 kW 출력을 갖는 5단의 ROT를 형상을 도출하였다.

4) 5단 ROT의 탈설계점에서 성능 예측 결과를 제시하였고, 터빈 입구 조건이 1750 kPa, 120°C 일 때 약 850 kW의 최대 출력을 나타내었다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “중-고온 온도차발전 시스템용 외향반경류터빈 기본 설계”에 의해 수행되었습니다.(PES3750)

Author contributions

J. B. Seo; Conceptualization, Writing-original draft, Investigation, Methodology. Writing-review & editing. J. H. Moon; Data curation, Formal analysis. H. S. Lee; Writing-review & editing. H. J. Kim; Supervision.

References

1. E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Riialand and A. H. Strømman, 2017, "State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping-a review", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 52, pp. 408-421. (<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>)
2. C. Spadacini, L. Centemeri, M. Danieli, D. Rizzi and L. Xodo, 2015, "Geothermal energy exploitation with the organic radial outflow turbine", In *Proceedings World Geothermal Congress*, pp. 1-6.
3. S. Y. Cho, B. S. Choi and H. S. Lim, 2019, "A Study of Basic Configuration Design Technology of 7 MW Class Steam Turbine", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 37-46. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2019.23.2.037>)
4. S. Y. Cho, B. S. Choi and H. S. Lim, 2019, "Optimal Off-Design Point Operation on a Two-Stages Radial Turbines for Organic Rankine Cycle", *Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 20-29. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2019.23.5.020>)
5. Y. Doğu, İ. Günaydın, Z. Kılıçaslan, T. İleri and S. Soğancı, 2018, "Design and cfd analysis of a 150kw 8-stage orc-rot (organic rankine cycle-radial outflow turbine) and performance degradation due to blade tip clearance of labyrinth seal", In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 51043, p. V003T28A004. (<https://doi.org/10.1115/GT2018-75612>)
6. Kim, J. S. and D. Y. Kim, 2020, "Preliminary Design and Off-Design Analysis of a Radial Outflow Turbine for Organic Rankine Cycles", *Energies*, Vol. 13, No. 8, p. 2118. (<https://doi.org/10.3390/en13082118>)
7. L. Zanellato, M. Astolfi, A. Serafino, D. Rizzi, and E. Macchi, 2020, "Field performance evaluation of geothermal ORC power plants with a focus on radial outflow turbines", *Renewable Energy*, Vol. 147, pp. 2896-2904. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.068>)
8. H. Moustapha, M. F. Zelesky, N. C. Baines and D. Japikse, 2003, *Axial and radial turbines* (Vol. 2). White River Junction, VT: Concepts NREC.
9. D. Maksiuta, L. Moroz, M. Burlaka and Y.

- Govoruschenko, 2017, "Study on applicability of radial-outflow turbine type for 3 MW WHR organic Rankine cycle", Energy Procedia, Vol. 129, pp. 293-300.
(<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.156>)
10. H. Chen and N. C. Baines, 1994, "The aerodynamic loading of radial and mixed-flow turbines", International journal of mechanical sciences, Vol. 36, No. 1, pp. 63-79.
([https://doi.org/10.1016/0020-7403\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0020-7403(94)90007-8))
11. S. F. Smith, 1965, "A simple correlation of turbine efficiency", The Aeronautical Journal, Vol. 69, Issue 655, pp. 467-470.
(<https://doi.org/10.1017/S0001924000059108>)