

R32를 이용한 100kW급 해양온도차발전용 반경류터빈의 설계

김도엽¹ · 김유택[†]

(Received June 17, 2014 ; Revised September 11, 2014 ; Accepted October 27, 2014)

Design of a 100kW-class radial inflow turbine for ocean thermal energy conversion using R32

Do-Yeop Kim¹ · You Taek Kim[†]

요약: 해양온도차발전은 해양의 따뜻한 표층수와 차가운 심층수의 온도차를 발전에 이용하는 전도유망한 기술이다. 지속 가능한 온도차를 이용하여 온실가스감축기술로서 활용할 수 있다는 장점을 가지는 반면, 시스템의 효율이 낮다는 단점을 가진다. 해양온도차발전의 낮은 시스템 효율을 개선하기 위해서는 성능이 우수한 터빈의 설계 및 개발기술의 확보가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 R32를 이용한 100kW급 해양온도차발전용 반경류터빈을 설계하였으며, CFD 해석을 통해 설계한 터빈의 성능을 검증하였다. CFD 해석결과를 참고하여 설계한 반경류터빈의 형상을 수정하였으며 이러한 과정을 반복하여 설계요구조건에 적합한 해양온도차발전용 반경류터빈의 최종 형상을 도출하였다.

주제어: 반경류터빈, 해양온도차발전, 유기랭킨사이클

Abstract: Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) which uses the temperature difference between warm surface sea-water and cold deep sea-water to produce electric power is the promising technology. OTEC is able to be utilized as the CO₂ reducing technology by using the consistent temperature differential, while the system efficiency is very low. Thus, the design and development of a efficient turbine is essential to improve the system efficiency for OTEC. In this study, a 100kW-class radial inflow turbine using R32 was designed for OTEC and this turbine's performance was estimated by analysis of CFD. According as the simulation results, turbine's geometry was corrected. The radial inflow turbine satisfying the requirements is designed by the repeated attempts.

Keywords: Radial inflow turbine, Ocean thermal energy conversion, Organic rankine cycle

1. 서론

해양온도차발전은 해양의 따뜻한 표층수와 차가운 심층수의 온도차를 발전에 이용하는 기술로서 지속가능한 청정 에너지를 이용하며 온실가스감축기술로 이용할 수 있다는 장점을 가지는 반면, 표층수와 심층수의 온도차가 약 20°C에 불과하여 시스템 효율이 매우 낮다는 단점을 가진다. 이에 따라 해양온도차발전의 시스템 효율 향상을 위해서 다양한 연구가 진행되고 있다.

Yoon et al. [1]은 단일냉매 15종과 혼합냉매 16종을 이용한 20kW급 해양온도차발전 사이클의 성능을 분석하였으며 이로부터 단일냉매로는 R32가 가장 효율적인 면에서 유리하다는 결론을 얻었다. Lee et al. [2]는 기본 밀폐형 해양온도차발전 사이클에 재생기, 재열기 및 터빈 2기를 추가 적용하여 사이클 효율을 6.5% 향상할 수 있음을 보인 바 있

다. 이와 같은 상기의 연구들은 터빈의 단열효율이 80% 이상임을 전제하고 있다. 즉, 해양온도차발전용 시스템 효율 향상을 위해서는 성능이 보장된 터빈의 개발이 선행되어야 한다.

해양온도차발전용 터빈으로는 축류터빈과 반경류터빈이 주로 이용되고 있으나, 국내의 경우 제작이 용이하며 소형화 장점을 가지는 반경류터빈을 해양온도차발전용 터빈으로 선정하는 연구사례가 많다. 국내의 해양온도차발전용 반경류터빈의 연구 사례를 살펴보면, Nguyen et al. [3]은 R134를 이용한 5kW급 해양온도차발전용 반경류터빈을 설계하였으며 노즐의 개수를 조정하여 효율향상을 도모할 수 있음을 보였다. Han et al. [4]은 작동유체로 R22와 R32를 선정하고 20kW급 해양온도차발전용 반경류터빈을 설계하였다. 이때 Concepts NREC사의 Rital 프로그램을 반경류터빈의 설계에 사용하였으며 노즐의 각도를 조정하여 설계목

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9662-2175>): Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: kimyt@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4258

¹ Department of Marine System Engineering, Graduate School of Korea Maritime and Ocean University, E-mail: doyeop@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4862

표치를 달성한 터빈 형상을 도출하였다. Kim et al. [5]은 유기랭킨사이클용 반경류터빈의 예비설계프로그램인 RTDM V2.1을 개발하고 이를 이용하여 해양온도차발전용 반경류터빈을 설계한 바 있으며, 질량유량을 조정하여 터빈의 설계목표치를 달성할 수 있음을 보인 바 있다.

본 연구에서는 상기의 연구와 같이, 해양온도차발전용 터빈으로 반경류터빈을 선정하고 일반적인 해양온도차발전의 운전조건으로부터 작동유체로 선정한 R32와 기본적인 밀폐사이클을 이용하여 100kW급 반경류터빈에 대한 공력설계를 수행하였다. 이때 반경류터빈의 공력설계에는 Kim et al. [5]에 의해 개발된 반경류터빈의 예비설계프로그램인 RTDM V2.1을 사용하였으며, 설계한 터빈의 형상은 CFD 해석을 통해 그 성능을 검증하였다.

2. Turbine의 설계

터빈의 설계에 앞서 해양온도차발전의 작동시스템과 작동유체는 각각 기본적인 밀폐사이클과 R32로 선정하였다. 여기서 기본적인 밀폐사이클의 개념도는 Figure 1과 같다. 이러한 가정과 해양온도차발전의 일반적인 운전조건으로부터 설계대상인 터빈의 운전조건은 Table 1과 같이 선정하였다.

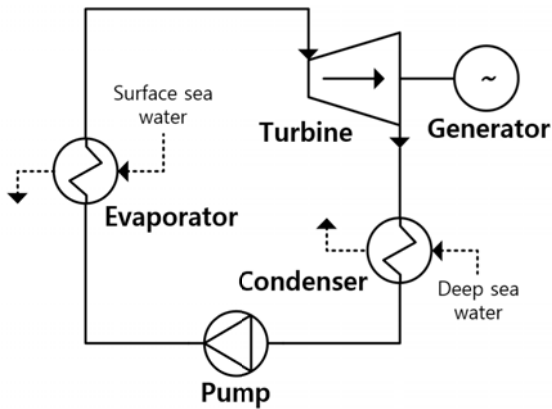


Figure 1: Schematic diagram of basic closed cycle

2.1 로터 설계

본 연구에서는 C.Baines et al. [6]와 A.Whitfield et al. [7]의 설계기법을 바탕으로 개발된 RTDM V2.1을 사용하여 로터에 대한 공력설계를 시행하였다. 이때 로터 회전수는 적합한 반경류터빈의 형상이 설계될 수 있도록 선정되어야 하며, 본 연구에서는 로터 회전수를 12,000 RPM으로 선정하였다. 반경류터빈의 로터에 대한 주요 제원은 Table 2와 같으며, 로터 깃의 개수는 20개이다. Table 2에서 사용된 용어는 Figure 2에서 정의한 바와 같다.

Table 1: Working conditions for the turbine

Working conditions	Value
Total temperature of turbine inlet [K]	300
Static pressure of turbine outlet [MPa]	0.98

Table 2: Main dimensions for the rotor

Parameters	Value
d4 [mm]	175.6
b4 [mm]	13.9
R5s [mm]	59.7
R5s[mm]	26.3
Zr [mm]	50.1

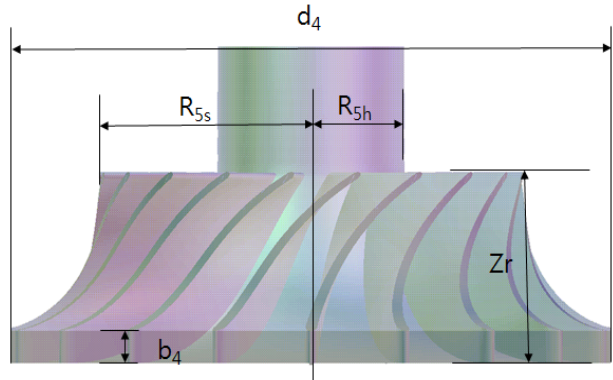


Figure 2: Nomenclature of the rotor

Table 3: Main dimensions for the stator

Parameters	Value
Pipe of volute inlet	Sch80 150A
Radius of nozzle inlet [mm]	139.9
Radius of nozzle outlet [mm]	99.9
Interspace size [mm]	12.1

2.2 스테이터 설계

반경류터빈의 스테이터는 볼류트, 노즐, 인터스페이스, 디퓨저로 정의된다. 본 연구에서는 디퓨저의 설계는 제외하기로 하고 그 외의 스테이터 설계에는 로터의 설계와 마찬가지로 RTDM V2.1을 이용하였다. RTDM V2.1은 볼류트와 인터스페이스의 설계에 각각 Tabooff et al. [8]의 볼류트 설계모델과 Watanabe[9]의 실험식을 채택하고 있다. 또

한, 초킹을 방지하기 위한 A.M.Venturas et al. [10]의 제안에 따라 RTDM V2.1에서 노즐 길의 개수는 로터 길의 개수와 동일하게 선정된다. RTDM V2.1에 의해 결정된 반경류터빈의 스테이터에 대한 주요제원은 Table 3과 같다.

3. 수치해석

3.1 3차원 형상 구현과 격자형성

RTDM V2.1을 이용한 공력설계로부터 결정된 터빈의 각부 제원(Table 2 & 3)을 바탕으로 로터 및 노즐의 형상은 BladeGen Ver.13.0으로 3차원 형상화하였고 볼류트는 Catia V5R19로 구현하였다. 안정적인 수치해석을 위해 로터 출구 측에 샤프트 캡(Shaft Cap)을 포함하는 일종의 출구 파이프를 형성하는 것이 안정적인 수치해석에 도움이 되므로 Catia V5R19를 사용하여 이 공간을 형성하였다. 이때 샤프트 캡의 형상에 대한 설계모델이 없으므로 샤프트 캡의 형상은 임의로 작성하였다. Figure 3는 설계한 해양온도차발전용 반경류터빈에 대한 3차원 형상을 구현한 그림이다.

구현한 3차원 형상을 이용하여 Table 4와 같이 격자계를 형성하였다. Table 4에서 보인 바와 같이 터빈의 각부에 생성한 격자수는 격자의존성에 대한 점검을 수행하여 최종적으로 확정된 격자수이다. 격자생성에는 노즐과 로터 도메인의 경우 TurboGrid Ver.13.0을 사용하였고 볼류트 도메인은 Ansys Meshing Ver.13.0, 그리고 출구 파이프 관련 도메인은 ICEM CFD Ver.13.0를 이용하였다.

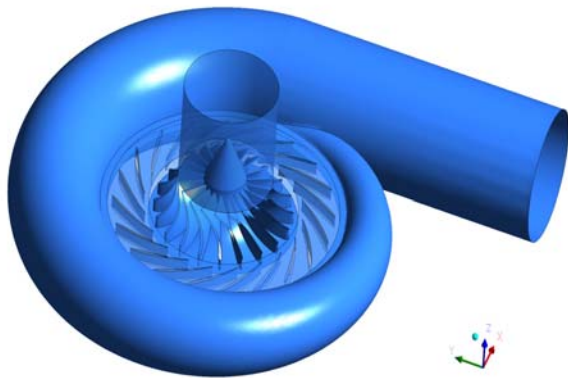


Figure 3: Overall Geometry of the radial-inflow turbine

Table 4: Mesh information of each domains

Domains	Mesh type	Mesh element Number
Volute	Tetra. & Prism	815,987
Nozzle	Hexa.	2,928,600
Rotor	Hexa.	2,761,880
Out-pipe	Hexa.	436,480

3.2 수치해석

수치해석에는 Ansys CFX Ver.13.0을 이용하였다. 경계 조건은 Table 5와 같으며 이것은 설계조건과 동일하다. 로터 도메인의 회전수는 설계조건과 동일하게 12,000 RPM이며, Ansys CFX modeling guide의 제안에 따라 산업용 터보기기의 유동해석에 적합한 난류모델인 SST 모델을 수치해석에 사용하였다. 또한 수치해석에 있어 사용한 상태 방정식은 실제기체방정식인 Aungier's Redlich Kwong 방정식이다.

Table 5: Boundary Conditions

Boundary condition		Value
Inlet	Total pressure [MPa]	1.35
	Total temperature [K]	280.46
Outlet	Mass flow rate [kg/s]	10.13

3.3 수치해석의 결과

설계조건과 수치해석의 결과를 비교·검토하여 적합한 반경류터빈의 설계가 이루어졌는지 확인할 수 있다. 설계조건과 수치해석결과를 비교한 것은 Table 6과 같다.

Table 6을 살펴보면 해석결과는 본 연구에서 설계한 반경류터빈의 설계조건에 매우 근사함을 알 수 있다. 그러나 설계한 반경류터빈의 출력 및 출구조건이 목표한 설계조건에 다소 미치지 못함으로 터빈의 형상을 개선할 필요가 있다.

Table 6: Comparison between design conditions and simulation results

Parameter	Design condition	Simulation results
Absolute Velocity at rotor inlet [m/s]	99.37	93.95
Static press. at turbine exit [MPa]	0.98	1.02
Static temp. at turbine exit [K]	281.71	282.67
Total press. at turbine exit [MPa]	1.00	1.05
Total temp. at turbine exit [K]	283.15	283.99
Power [kW]	100.00	96.49

4. 터빈 형상의 수정

4.1 설계목표 달성 전략

일반적으로 설계된 터빈은 상기와 같이 CFD를 통해 성능

을 예측하며, 그 결과가 설계조건을 충족하지 못할 때 터빈의 형상을 수정할 필요가 있다. 이때 전회의 CFD 해석결과를 참고하여 설계목표 달성을 위한 전략을 수립하여야 한다.

상기의 Table 6에서 보인 바와 같이 설계단계에서 터빈 로터 입구에 필요한 작동유체의 절대속도는 99.37 m/s이나, 수치해석결과에서 로터 입구의 절대속도는 93.95 m/s에 불과하였다. 이에 따라 로터 입구에 필요한 절대속도를 확보하기 위한 전략이 필요하다.

로터 입구에 필요한 절대속도를 추가적으로 확보하기 위한 조치로는 로터 입구측 면적을 줄이는 방법이 유효하다. 이러한 조치를 위해 설계자가 선정할 수 있는 방법은 다음과 같다. (1) Nguyen et al. [3]과 같이 노즐 길의 개수를 추가하는 방법 (2) 노즐의 두께를 증가하는 방법 (3) 로터의 높이를 줄이는 방법이다. 상기의 첫 번째와 두 번째 방법은 조밀한 노즐의 배치로 인해 제작상의 어려움을 야기할 수 있다. 반면, 마지막 방법을 선택할 경우 로터의 입구 높이를 줄임으로 인해 로터뿐만 아니라 인터스페이스, 노즐, 볼류트의 제원이 다소 변경되어 설계 및 유동해석에 비교적 많은 시간과 인력이 요구된다. 그러나 이 방법은 제작상의 어려움을 발생시키지 않으므로 본 연구에서는 마지막 방법을 로터 입구에 필요한 절대속도를 확보하기 위한 조치로 선택하였다.

4.2 수치해석 및 결과

상기의 설계목표를 달성하기 위한 전략에 따라 로터의 입구높이를 줄이면서 수치해석을 수행하였으며 그 결과가 설계목표에 도달할 때까지 이 과정을 반복적으로 수행하였다. 이에 따라 로터의 입구높이는 13.9 mm에서 13.0 mm로 변경되었다.

이 과정으로 도출된 최종 터빈형상을 바탕으로 격자계를 형성하였으며, 이 때 격자의 의존성 점검을 실시하여 최종 격자계는 최초의 격자계보다 조밀해졌다. 최종 격자계는 Table 7과 같이 형성하였다.

수치해석은 전술한 바와 동일하게 수행하였으며, 그 결과는 Table 8과 같다. Table 8에서 보인 바와 같이 수정한 터빈은 최초에 설계된 터빈보다 설계목표치에 더욱 근사하다. 다소 설계목표치에 부족한 부분은 정압부분이나, 그 오차 범위가 크지 않다. 이러한 오차의 범위는 실제기체를 다루는 터빈의 수치해석에서 만족스러운 것으로 사료된다.

Table 7: Final mesh information of each domains

Domains	Mesh type	Mesh element Number
Volute	Tetra. & Prism	944,867
Nozzle	Hexa.	3,812,400
Rotor	Hexa.	3,839,040
Out-pipe	Hexa.	436,480

로터 입구의 높이를 줄이는 조치로부터 가장 유의해야 할 점은 초킹의 발생여부이다. Figure 2과 Figure 3은 최종 터빈의 수치해석결과로부터 스테이터와 로터 영역에서의 절대속도에 대한 마하수를 나타낸 것이다. 초킹이 발생하는 영역이 없을 뿐만 아니라 전 방위각에 걸쳐 균일한 마하수 분포를 나타내고 있다. 이것은 반경류터빈의 설계가 적합하게 이루어졌음을 의미한다.

Table 8: Comparison between design conditions and final simulation results

Parameter	Design condition	Simulation results
Absolute Velocity at rotor inlet [m/s]	99.37	99.72
Static press. at turbine exit [MPa]	0.98	1.01
Static temp. at turbine exit [K]	281.71	281.73
Total press. at turbine exit [MPa]	1.00	1.03
Total temp. at turbine exit [K]	283.15	283.01
Power [kW]	100.00	102.59

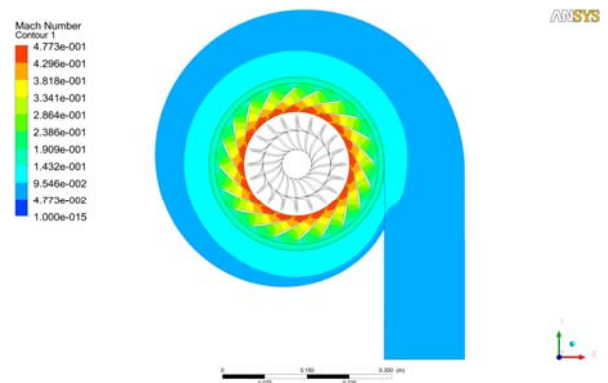


Figure 4: Distribution of Mach number at the stator

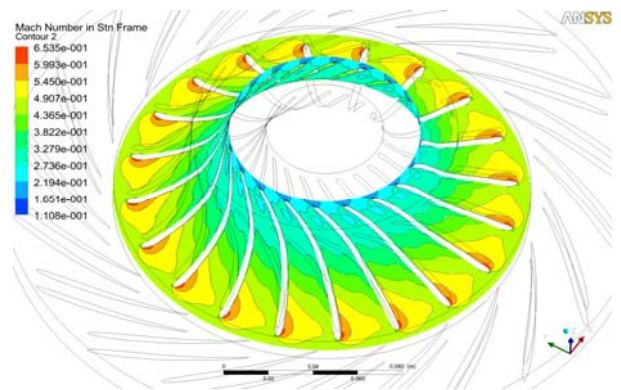


Figure 5: Distribution of Mach number at the rotor

4. 결 론

본 연구에서는 R32를 이용한 100kW급 해양온도차발전용 반경류터빈에 대한 공력설계를 수행하였다. 이때 공력설계에 사용한 설계프로그램은 RTDM V2.1이다. 설계한 반경류터빈은 CFD를 이용하여 설계의 유효성을 검증할 수 있었다.

RTDM V2.1은 증기 및 가스터빈을 대상으로 수립된 다수의 설계모델을 바탕으로 개발되었으나 본 연구에서 보인 바와 같이 유기냉매를 작동유체로 채택하는 유기랭킨사이클용 반경류터빈의 설계에도 유효하였다.

그러나 설계한 반경류터빈의 형상은 수정을 통해 개선의 여지가 있었으며, 본 연구에서는 전회의 CFD 해석결과를 바탕으로 로터 입구측의 높이를 조정하는 조치를 취하였다. 이러한 조치를 통해 설계목표치에 더욱 근사한 반경류터빈의 최종 형상을 도출할 수 있었다.

향후 실험을 통해 본 연구에서 사용한 RTDM V2.1의 정확성과 CFD 해석기법이 실제로 유효한지 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP, OTEC 발전용 신개념 저온작동유체 및 반경류터빈의 기술개발, No.20133030000110)의 지원으로 이루어진 성과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- [1] J. I. Yoon, B. H. Ye, and J. H. Heo, "Performance analysis of 20kW OTEC power cycle using various working fluid," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 8, pp. 836-842, 2013 (in Korean).
- [2] H. S. Lee, H. J. Kim, and D. H. Jung, "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 (in Korean).
- [3] N. van Hap and G. S. Lee, "Design and analysis of a radial turbine for ocean thermal energy conversion," *Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 2013, no. 12, pp. 4046-4050, 2013.
- [4] S. J. Han and J. M. Soo, "20kW turbine development for OTEC system," *Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 2011, no. 10, pp. 3050-3053, 2011 (in Korean).
- [5] D. Y. Kim and Y. T. Kim, "The development of a preliminary designing program for ORC radial inflow turbines and the design of the radial inflow turbines for the OTEC.," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 276-284, 2014

(in Korean).

- [6] H. Moustapha and N. C. Baines, *Axial and Radial Turbines: Concepts* NREC, 2003.
- [7] A. Whitfield and N. C. Baines, *Design of Radial Turbomachines: Longman Scientific & Technical*, 1990.
- [8] W. Tabakoff and Y. Sheoran, "Flow measurements in a turbine scroll," *Transaction American Society of Mechanical Engineers Journal of Fluid Engineering*, vol. 102, no. 3, pp. 290-296, 1980.
- [9] I. Watanabe, I. Ariga, and T. Mashimo, "Effect of dimensional parameters of impellers on performance characteristics of a radial inflow turbine," *Transaction American Society of Mechanical Engineers Journal of Engineering for Power*, vol. 93, no. 1, pp. 81-102, 1971.
- [10] A. Carlos, M. Ventura, and A. Jacobs, "Preliminary design and performance estimation of radial inflow turbines: An automated approach," *Transaction American Society of Mechanical Engineers Journal of Fluids Engineering*, vol. 134, no. 3, pp. 0311021.1-13, 2012.