한국마린엔지니어링학회지 제36권 제8호, pp. 1030~1035, 2012. 11(ISSN 2234-8352 Online) / (ISSN 2234-7925 Print)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.8.1030

암모니아 작동유체를 이용한 해수온도차발전용 8kW급 구심터빈의 설계 및 CFD 성능해석

모장오[1] · 차상원[2] · 김유택† · 임태우[3] · 이영호[4]

(원고접수일 : 2012년 8월 1일, 원고수정일 : 2012년 10월 26일, 심사완료일 : 2012년 11월 23일)

CFD Performance Analysis and Design of a 8kW Class Radial Inflow Turbine for Ocean Thermal Energy Conversion Using a Working Fluid of Ammonia

Jang-Oh Mo[1] · Sang-Won Cha[2] · You-Taek Kim† · Tae-Woo Lim[3] · Young-Ho Lee[4]

요 약 : 본 연구에서는 OTEC에 적용가능한 구심터빈을 대상으로 암모니아를 적용하여 8kW급 구심터빈의 설계 및 CFD 해석을 수행하였다. 구심터빈은 스크롤 케이싱, 18개의 베인노즐, 13개의 로터 블레이드로 구성된다. 질량유량과 입구온도는 0.5kg/s와 25℃이며, 가변회전수 12,000 ~ 36,000 rpm 범위내에서 9가지 조건에 대해 해석을 수행하였다. 회전수 변화에 따른 해석결과, 설계회전수 24,000 rpm에서 최대효율점을 보였으며, 이때 최고효율은 88.66 %, 출력은 8.52kW이다. 향후, 팽창비가 1.4~1.5 정도의 범위를 갖도록 최적설계 과정을 통한 연구가 필요하다. 본 연구를 통해 분석된 해석결과는 다양한 작동유체 조건에서 목표출력에 해당하는 구심터빈의 최적 설계파라미터 구성을 위한 설계자료로 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

주제어 : 해수온도차발전, 구심터빈, 터빈효율, 전산유체역학, 암모니아 작동유체

Abstract: In this research, we analysed design and CFD analysis of an inflow radial turbine for OTEC with an output power of 8kW using an working fluid of ammonia. The inflow radial turbine consists of scroll casing, vain nozzle with 18 blade numbers and rotor blade with 13 blade numbers. Mass flow rate, and inlet temperature are 0.5kg/s and 25℃ respectively, and variable rotational speeds were applied between 12,000 and 36,000 with 3,000 rpm intervals. As the results according to the rotational speeds, the designed speed is 24,000 rpm where maximum efficiency exists. The maximum efficiency and output power are 88.66% and 8.52kW, respectively. Through this study, we expect that the analysed results will be used as the design material for the composition of the turbine optimal design parameters corresponding to the target output power under various working material conditions.

Key words: OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion), Radial turbine, Turbine Efficiency, CFD(Computational Fluid Dynamics), Inflow, working fluid of ammonia

1. 서 론

해양온도차발전(Ocean Thermal Energy Conversion: OTEC)은 수심에 따른 바닷물의 표층수와 심층수의 온도차를 이용하여 비등점이 낮은 작동유체를 증발시켜 터빈을 구동하여 전력을 얻고 다시 작동유체를 응축하는 방식으로 발전하는 방식이다.

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail: kimyt@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4258)
1.호주 University of Adelaide 방문연구원 E-mail: leglong97@hanmail.net, Tel: 070-4001-6182
2.한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 E-mail: musicmaker0722@gmail.com, Tel: 051-410-4862
3.한국해양대학교 기관공학부 E-mail: kyunlim@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4256
4.한국해양대학교 기계에너지시스템공학부 E-mail: lyh@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4293

OTEC 발전 시스템의 원리는 일반 화력 발전소와 원자력 발전소의 가동 원리와 동일하다. 즉, 고온의 열원에서 저온의 열원으로 열이 흘러 들어가 터빈을 구동시켜 전력을 생산하는 방법이다. 그러나 기존의 발전소는 재생이 불가능한 화석연료를 사용하여 수백도의 온도차를 발생시켜 플랜트를 가동하는 반면에 OTEC 발전은 20℃ 내외의 온도차를 이용하여 플랜트를 가동하는 방법으로 기존 화석연료를 전혀 소비하지 않는다는 장점이 있다[1]. 그러나, 이러한 장점에도 불구하고 선진국에 비해 우리나라는 해양온도차 에너지 이용기술 개발이 체계적으로 이루어지지 않아 기술개발이 절실한 실정이다.

구심터빈은 축류터빈에 비하여 그 사용 범위가 넓지는 않으나 소형이며, 구조가 간단하고 큰 압력비에서 작동되는 등의 장점으로 인하여 근래 내연기관의 출력증대를 위한 과급기의 구동원으로 많이 사용되고 있다. 그리고 과급기에서는 엔진 회전수에 따라 배기가스 유량이 크게 변화하게 되며, 이러한 유동조건에서의 효율적인 작동을 위하여 로터와 스크롤 케이싱 사이에 가변 안내깃을 설치하는 예가 많이 있다[2-4].

일반적으로 구심터빈은 로터, 베인노즐, 스크롤 케이싱의 3가지 요소로 구성되며, 그 중 하나인 베인노즐은 작동유체를 가속시키고 로터입구에서 설계된 입사각으로 분사되도록 하는 것이 주된 목적이다. 스크롤 케이싱 또한 타원형 형태의 구조와 입구에서 출구로 갈수록 단면적이 작아지는 형상으로 인해 유체를 가속시키고 선회류를 발생시키지만, 높은 압력비로 작동되는 소형 구심터빈의 경우에는 효율을 높이기 위해서 베인노즐의 사용이 필수적이다[5].

Maki와 Mori[6]는 직선베인, 오목베인, 볼록베인의 서로 다른 3가지 베인형상을 가진 구심터빈에 대하여 압력측정과 유동가시화 등의 실험적 연구를 수행하였으며, Reichert와 Simon[7]은 베인노즐 주위의 유동장과 노즐형상을 개선하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. 또한 모 등[8-9]은 선박폐열 발전시스템 구성을 위해 비교적 열사이클 구성이 간단한 이상랭킨사이클을 시스템 모델로 구성한 후, 100kW급 구심터빈 설계 및 내부유동 특성 그리고 베인노즐 각도변화에 따른 효율특성 파악을 위한 CFD 해석을 수행하였다. 김경호[10]는 저온의 열원을 효율적으로 활용하기 위한 유기랭킨사이클에서 여러 가지 작동유체 경우에 대한 열역학적 거동을 다양한 관점에서 해석하였다. 하지만, 열역학적 성질들을 비교하는데만 한정되었으며, CFD 해석으로의 확장은 한계를 보였다.

따라서, 본 연구에서는 OTEC 시스템에 적용하도록 암모니아 작동유체를 이용한 8kW급 구심터빈의 설계 및 CFD 해석기법을 적용하여 구심터빈 최적화를 위한 설계자료를 확보하고자 한다. 또한 증기가 아닌 암모니아라는 다른 작동유체를 이용한 CFD 해석이라는 측면에서 의미가 있으며, 분석된 CFD 결과는 목표출력용 구심터빈의 최적 설계 파라미터 구성을 위한 설계자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

2. OTEC 사이클 해석

2.1 암모니아 작동유체의 선정

유기랭킨사이클(Organic Ranking Cycle) 발전시스템은 기존의 랭킨 사이클과 달리 저온의 열원을 이용할 수 있는 동력기관으로 랭킨 사이클의 작동유체인 물과 비교하여 비등점이 낮고 저온도에서 증기압이 훨씬 낮은 유체를 선택하여야 한다. 암모니아는 물리적 조성으로 질소 하나와 수소 3개로 이루어진 수소결합 물질이다. 이 물질의 특징은 물에 잘 녹고 열역학적 성질이 우수하다는 점이다. 하지만, 단점으로는 부식성이 강하며, 철과 만나서 강한 부식을 일으킨다. 그리고 인체에 해로워서 관리 및 이동이 까다롭게 되고, 상온에서 가연성이 상대적으로 강하여 관리가 필요하다. **Table 1**은 암모니아 열역학적 물성치를 나타내고 있다. 암모니아가 포화온도 25℃에서 증발하기 위한 포화압력은 1003kPa임을 알 수 있으며, 포화온도가 증가할수록 포화압력도 증가함을 알 수 있다. **Table 2**는 25℃ 1000kPa 기준에서 steam, R134a, 암모니아의 3가지 물성치을 비교하여 나타낸 표이다. 암모니아 밀도는 steam 보다는 무거운 반면에, R134a보다는 가벼움을 알 수 있다. 또한 암모니아 열전도계수는

steam과 R134a보다는 아주 우수하다는 것을 알 수 있다. 이 특성은 향후 시스템을 좀 더 단순화하는 데 유리할 것으로 판단된다.

Table 1: Thermodynamic property of ammonia

포화온도 (℃)	포화압력 (kPa)	밀도 (kg/m^3)	음속 (m/s)
5	516	4.11	402.2
10	615	4.87	403.2
15	728	5.72	404.1
20	857	6.70	404.6
25	1003	7.81	404.9

Table 2: Comparison of property for each working fluid (25℃, 1000kPa)

	unit	steam	R134a	NH_3
음속	m/s	426.6	144.3	404.9
밀도	kg/m^3	0.023	32.3	7.81
열전도계수	w/m-k	0.0186	0.0138	0.0262

2.2 HYSYS를 이용한 OTEC 사이클 해석

Aspen Hysys는 시스템 공정설계에 유용하며, 다양한 온도, 압력, 유량변화 등에 따른 시스템의 정특성 및 동특성을 정확하게 예측할 수 있는 프로그램이다[11]. 본 연구에서는 8kW급 OTEC 시스템에 적용 가능한 증기사이클 중 비교적 열사이클 구성이 간단한 이상랭킨사이클을 HYSYS 프로그램을 이용하여 설계하였으며, **Figure 1**에 나타내었다. 본 시스템은 펌프, 증발기, 터빈, 응축기의 4가지 요소로 구성되며, 작동유체는 암모니아로 선정하였다. 또한 열대해역에서 해면의 표층수 온도는 흔히 20℃가 넘으며, 해면으로부터 400~1000m 정도 깊이의 심층수 온도는 4℃로 거의 일정하다. 따라서, 본 연구에서는 표층수와 심층수의 온도를 각각 25℃와 5℃로 정의하여 OTEC 사이클 해석을 수행하였다. 이를 통해 터빈의 작동조건이 결정되며, 이 값들은 CFD 성능평가의 경계조건으로 적용된다. 터빈의 전 후단에서의 작동조건들을 **Table 3**에 나타내었다.

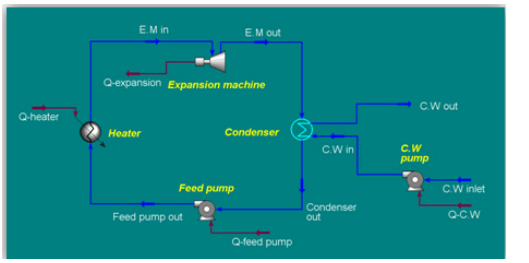

Figure 1: Design of OTEC system using HYSYS

Table 3: Working condition of the radial inflow turbine for OTEC

작동유체	암모니아
효율 (%)	75
출력 (kW)	8.3
터빈입구압력 (kPa)	990
터빈출구압력 (kPa)	510
터빈입구온도 (℃)	25
터빈출구온도 (℃)	5
콘덴서 입구온도 (℃)	5
콘덴서 출구온도 (℃)	4.4
콘덴서 입구압력 (kPa)	510
콘덴서 출구구압력 (kPa)	500

3. 구심터빈 기본설계

본 연구에서는 OTEC에 적용가능한 8kW급 구심터빈을 대상으로 공기역학적 반복설계를 통하여 기본설계를 완성하였다. 로터의 기본설계 형상을 **Figure 2**에 나타내었다. 로터는 13개의 블레이드로 구성되며, 반경방향으로 유입된 작동유체는 블레이드에 의해 에너지가 추출되면서 수직방향으로 90° 방향전환을 하면서 토출되는데, 이때 발생되는 유동손실을 최소화하기 위해서는 로터의 기하하적인 3차원 설계가 중요하다. 또한 입구에서 출구로 갈수록 블레이드에 의한 에너지 추출에 의해 작동유체가 팽창되므로, 출구로 갈수록 자오면 면적이 증가되도록 설계하는 것이 중요하다. 로터의 외경과 내경은 각각 138mm, 127mm 이며, 로터와 베인노즐의 블레이드 수는 각각 13개와 18개로 설정하였다.

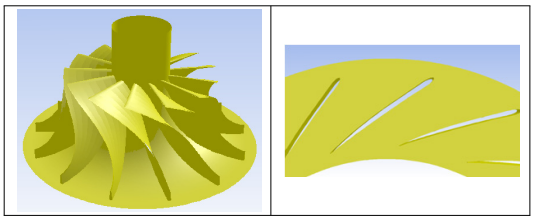

Figure 2: Shape of a vain nozzle and rotor

베인노즐은 작동유체를 가속시키면서 동시에 임의의 유동각을 발생시킨다. 이를 통한 작동유체는 로터입구에서 설계된 입사각으로 로터블레이드를 향해 입사하면서 높은 에너지를 전달하게 된다. 따라서 유동손실을 최소화하고 로터의 효율을 극대화하기 위해서는 로터블레이드 입사각에 대응하는 최적의 베인노즐의 출구각 설정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 베인노즐 출구각을 64.5°로 설정하였다. 이는 로터입구로 유입되는 절대속도와 로터회전에 의한 원주속도에 의해 상대속도가 결정이 되며, 이 때 발생되는 상대유동각은 로터의 효율을 결정하는데 중요한 인자로 작용하게 된다.

4. 수치해석 방법

4.1 구심터빈 해석격자

로터와 베인노즐의 해석격자를 **Figure 3**에 나타내었다. 일반적으로 유체기계에 대한 CFD 정상상태 해석에 있어서, 회전영역과 정지영역이 혼합하여 존재하는 경우 MRF(Multiple Reference Frame) 해석기법을 적용하여 정상상태로 수행을 하게 된다. 또한 해석의 수렴성을 높이기 위해 약 215만개 정도의 직육면체의 전체격자를 구성하였으며, 각각의 블레이드 표면에서 수직방향으로 프리즘 격자를 구성하여 박리나 재순환 등의 유동현상을 잘 구현될 수 있도록 하였다.

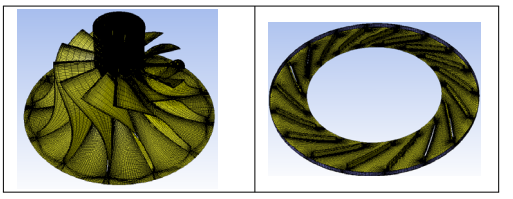

Figure 3: Hexahedral grid configuration of a rotor with 13 blades and vane nozzle with 18 blades

4.2 구심터빈 해석조건

표층수 온도는 25℃로 가정하였으며, 설계유량 0.5kg/s, 회전속도는 12,000rpm에서 36,000rpm까지 3,000rpm 간격으로 9가지 해석을 수행하였다. 벽면근처의 특성을 잘 예측하는 SST $k-\omega$ 모델을 적용하였다 [12]. **Table 4**에 해석조건을 정리하여 나타내었다.

Table 4: Analysis condition applied for CFD

Inlet total temperature [℃]	25
Design flow rate [kg/s]	0.5
Variable rotational speed [rpm]	12,000 ~ 36,000
Exit Angles of Vane nozzle (°)	64.5
Turbulent Intensity(%)	5
Specific Heat	piecewise-polynomial

4.3 이상기체 모델의 적용

이상기체 방정식은 상대적으로 낮은 압력과 높은 온도에 있는 증기상의 순수 물질들의 거동에 대한 모델이다. 온도가 증가함에 따라서, 그리고 분자량이 감소함에 따라 이상기체 상태방정식의 정확성은 향상된다. 일반적으로 기체의 압력이 임계압력보다 낮고, 온도가 임계온도보다 훨씬 높을 때 그 거동은 이상기체의 거동에 가깝다. 또한, 본 연구에서의 터빈 전후단에서의 작동조건이 실제기체에 가까운 상태가 아니므로, 해석의 편리성과 해의 수렴성을 위해 이상기체방정식을 적용하여 해석을 수행하였다.

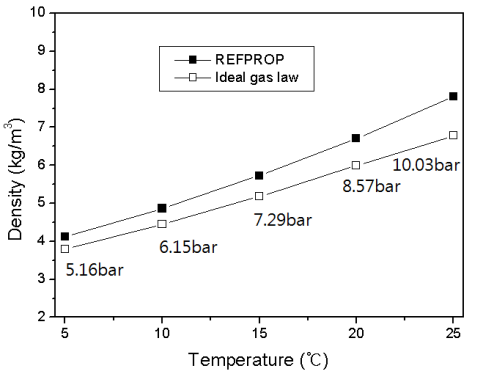

Figure 4: Comparison of densities using ideal gas law and REFPROP

Figure 4는 이상기체방정식과 NIST standard reference database에서 제공하는 REFPROP 프로그램을 적용하여 포화온도 및 포화압력에 따른 밀도 값을 비교하였다. 포화온도와 포화압력이 높을수록 오차가 커짐을 알 수 있으며, 이상기체방정식에 의한 평균오차는 약 10%정도이다.

5. CFD에 의한 해석결과

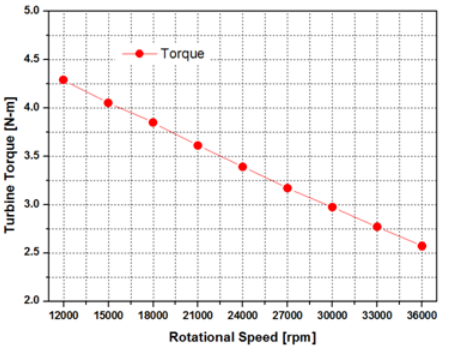

Figure 5: Effect of rotational speed to turbine torque

Figure 5는 터빈토크에 대한 회전수 효과를 나타내고 있다. 회전수가 12,000rpm에서 36,000rpm까지 3,000rpm씩 증가함에 따라 터빈토크는 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

Figure 6은 회전수 변화에 따른 효율과 출력 그래프를 나타내고 있다. 회전수가 증가함에 따라 효율곡선은 점점 증가하다가, 회전수가 24,000rpm 일 때 최대효율점을 보이고 다시 하강하는 특성을 보이고 있다. 이 회전수에서 최대효율과 출력은 88.6%, 8.52kW이다. 반면에 설계회전수 24,000rpm 이후에 출력은 효율이 감소함에도 불구하고 점점 증가하는 특성을 보이는데, 그 이유는 터빈입구 압력이 점점 증가하기 때문이다. 결국 은 최대효율은 최소의 에너지를 투입하여 최대 출력을 보이는 지점에서 나타난다.

Figure 7은 회전수 변화에 따른 터빈 입구와 출구의 전온도 그래프를 나타내고 있다. 최적 회전수 24,000 rpm에서 온도차는 8.2℃를 보이고 있으며, 회전수가 증가함에 따라 온도차는 점점 커짐을 알 수 있다. 또한 계산결과 이 설계점에서 팽창비는 1.2 정도의 값이 나왔다. 일반적으로 일반적으로 팽창비가 1.9 정도에서 초킹이[13] 발생한다고 알려져 있으므로, 본 계산에서 수행한 연구결과는 초킹이 발생하지 않을 것으로 사료된다.

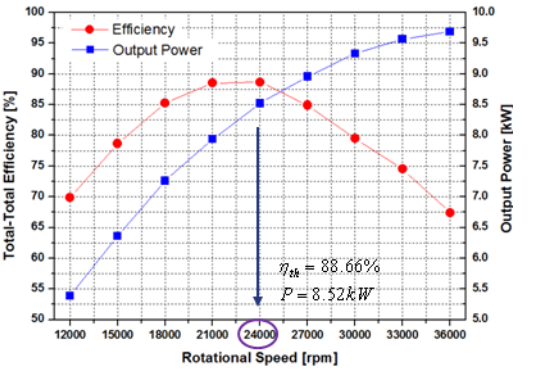

Figure 6: Effect of rotational speeds to efficiency and output power

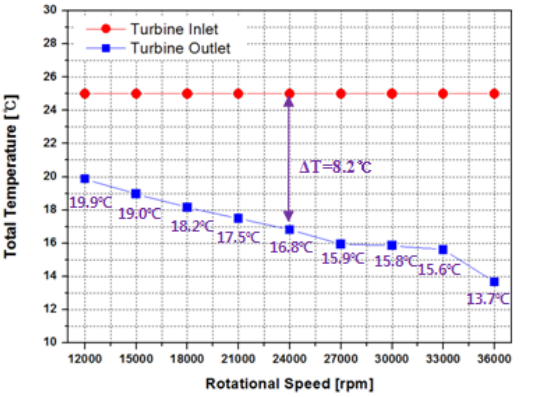

Figure 7: Effect of rotational speeds to total temperature at inlet and outlet of turbine

6. 결 론

본 연구에서는 OTEC 시스템에 적용가능한 8kW급 구심터빈를 대상으로 암모니아 작동유체를 적용하여 구심터빈의 성능을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 구심터빈 해석조건 선정을 위해 HYSYS를 사용하여, OTEC 사이클 해석이 수행되었으며, 이 조건은 CFD 성능평가를 위한 입력조건으로 적용되었다.

(2) 회전수 변화에 따른 해석결과, 설계회전수

24,000 rpm에서 최대효율점을 보였으며, 이때 최고 효율은 88.66 kW, 출력은 8.52kW이다.

(3) 최적설계점에서 터빈 전후단의 팽창비는 1.2 이며, 이는 초킹이 발생하는 지점인 1.9이하의 범위이다.

(4) 본 연구를 통해 분석된 해석결과는 다양한 작동조건하에서 목표출력에 해당하는 구심터빈의 최적 설계파라미터 구성을 위한 설계자료로 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP, 해수온도차발전(OTEC) 효율향상을 위한 작동유체 선정과 요소기술 개발) (No.2010T100101102) 및 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력양성 사업의 연구결과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Inha University, Performance an analysis and Optimization of OTEC Power Plant, Ministry of Science and Technology, 2000 (in Korean).

[2] Kee-Soo Han, Kwang-Ho, Kim, “Off - design performance analysis of radial inflow turbines with of without variable area guide vane.”The korean society of mechanical engineers. vol 15. no. 6 , pp. 2171~2180. 1991.

[3] R. T. C. Harman, Gas Turbine Engineering, The MacMillan Press LTD, 1981

[4] R. K. Turton, Principles of Turbomachinery. E. and F. N. Spon LTD. 1984

[5] A. Simpson, S. W. T. Spence, D. W. Artt and G. McCullough, “Experimental and numerical investigation of varying stator design parameters for a radial turbine”. Journal of America Science Mechanical Engineering Turbo Expo pp. 8-11, 2006.

[6] H. Maki and Y. Mori, “On the study of flow through an impeller of mixed and inward-flow radial turbines.” Bulletin of The Japan Society of Mechanical Engineers , vol. 16, no. 91. pp.81-92. 1973.

[7] A. Reichert and H. Simon, Numerical Investigations on The Optimum Design of Radial Inflow Turbine Guide Vanes. International Gas Turbine and Aeroengine Congress, ASME Paper:94-GT-61.

[8] Jang-Oh Mo, You-Taek Kim, Mann-Eung Kim, Cheol Oh, Jeong-Hwan Kim, Young-Ho Lee, “Performance analysis by CFD and aerodynamic design of 100kW class radial turbine using waste heat from ship.” The Korean Society of Marine Engineering. vol. 25, no. 2, pp. 175-182, 2011.

[9] Jang-Oh Mo, You-Taek Kim, Cheol Oh, Young-Ho Lee, “Influence of pwerformance and internal flow of a radial inflow turbine with variation of vane nozzle exit angles.” The Korean Society of Marine Engineering. vol. 35, no. 6, pp. 757-764, 2011.

[10] Kyoung-Hoon Kim, “Study of working fluids on thermodynamic performanceof organic rankine cycle (ORC).” Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society. vol. 22, no. 2, pp. 223-231, 2011.

[11] A. S. Dave, Jong-Min Lee, Young-Goo Yeo, Sang-Choel Lee, Sung-Young Moon, Process Design using the HYSYS. 2008., Korea

[12] ANSYS FLUENT Theory Guide.

[13] C. A. M Venture, P. A. Jacobs, A. S. Rowlands, P. Petrie-Repar and E. Sauret, “Preliminary design and performance estimation of radiaul inflow turbines.” An Automated Approach, Journal of Fluids Engineering. vol. 134, pp. 031102.01-13, 2012.