

200kW급 ORC용 터빈 개발[§]

임형수^{*†} · 최범석^{*} · 박무룡^{*} · 박준영^{*} · 유일수^{*} · 서정민^{*} · 황순찬^{*} · 윤의수^{*} · 한상조^{**}

* 한국기계연구원, ** 서울과학기술대학교

200kW Turbine Development for Organic Rankine Cycle System

Hyung-Soo Lim^{*}, Bum-Seog Choi^{*}, Moo-Ryong Park^{*}, Jun-Young Park^{*}, Il-Su Yoo^{*},
Jeong-Min Seo^{*}, Soon-Chan Hwang^{*}, Eui-Soo Yoon^{*} and Sang-jo Han^{**}

^{*} Dept. of Extreme Energy Systems, Korea Institute of Machinery & Materials, Korea

^{**} Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

(Received May 31, 2013 ; Revised June 10, 2013 ; Accepted June 10, 2013)

Key Words: Organic Rankine Cycle(유기 랭킨 사이클), Turbine(터빈), Renewable Energy(재생 에너지), Refrigerant(냉매), Cycle Analysis(사이클 해석)

초록: 본 논문은 산업현장에서 발생하는 폐열원을 이용하여 200kW의 발전을 하기위한 터빈의 개발에 관한 전반적인 과정이 제시되었다. 유기 랭킨 사이클에 적용되는 터빈은 세계적으로도 개발이 활발히 진행되고 있는 단계이며, 시장 성장에 관한 잠재성이 크다. 따라서 국내의 연구기관에서도 많은 관심을 가지고 연구가 진행되고 있지만 상품 개발까지는 아직 도달하지 못하고 있는 상황이다. 본 논문에서는 유기 랭킨 사이클에서 작동하는 200kW급 터빈을 개발 하는데, 사이클 해석을 바탕으로 비속도 분석, mean line 해석, 3차원 해석 과정이 설명되었다. 그리고 해석 결과를 바탕으로 터빈 요소 부품을 제작하였고, 회전체 안정성 시험 및 성능시험을 수행하였다. 터빈 개발은 세계적으로도 활발히 이루어지지만 개발 과정과 단계에 대한 사항은 기업 비밀이란 이유로 공개 되지 않는 실정이다. 본 논문은 유기 랭킨 사이클용 터빈의 개발에 있어 어떠한 과정과 단계로 진행되는지 참고가 될 수 있을 것이다.

Abstract: This paper presents the process of turbine development for Organic Rankine Cycle(ORC) system. Development of turbine for ORC system is hot issue in the electric generation market due to the characteristic of organic refrigerant which the evaporate temperature is lower than general refrigerant. Recently, the industry have an interest about ORC turbine development in Korea, and they presented numerous research results. In developing the turbine, several processes can be considered. However, there was few document about ORC turbine development because of the trade secret. This paper can be used as a reference in developing ORC turbine.

1. 서론

산업현장이나 자연환경에서 발생하는 폐열을 재활용하기 위해 많은 기관에서 활용방안에 관한 연구를 수행 하고 있다. 폐열을 이용하여 전기를 발생시키는 연구는 에너지 활용도가 가장 높기 때문에 연구의 집중이 되고 있다. 폐열로부터 에너지를 얻기 위해 랭킨 사이클이 적용되는데, 사용되는 냉매 특성상 증발과 응축이 기존의 냉매보다 낮은 온도 대역에서 가능한 유기 냉매를 이용한 랭킨 사이클 연구가 진행 되고 있다. 여기서 유기 냉매를 이용한 랭킨 사이클을 유기 랭킨 사이클(Organic rankin cycle)이라고 한다. ORC 용 터빈에 관해서 몇몇 해외 기관에서 제품을 출시하여 판매하고 있지만 제품의 다양성이나 적용성 면에서 개선해야 할 부분이 많다. 국내에서 ORC 시스템 특성에 관한 연구는 Kang,⁽¹⁾ Eom,⁽²⁾

§ 이 논문은 대한기계학회 플랜트부문 2013년도 춘계학술강연회(2013. 6. 4.-5., 한국수자원공사 교육원) 발표논문임.

† Corresponding Author, limbo999@kimm.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

Kim⁽³⁾ 등이 연구를 수행하였으며, ORC 시스템의 특성에 영향을 미치는 인자에 대한 연구와 제어 방법에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 Yu,⁽⁴⁾ Han⁽⁵⁾ 등은 ORC 용 터빈의 설계에 관한 연구 결과를 제시하였으며, Shin⁽⁶⁾은 ORC 용 스크롤 팽창기에 대한 성능 특성을 실험적으로 수행하였다. 이러한 연구결과를 통하여 국내의 ORC 시스템과 주요 구성품에 대한 연구 수준을 확인할 수 있었지만, 수백 kW 급 용량의 터빈 개발에 관한 연구는 극히 드문 실정이다. 국외에도 수백 kW 급 ORC 시스템과 터빈에 관하여 Ormat Technologies Inc., Barber-Nichols Inc., Infinity turbine 등의 업체가 존재하지만, 터빈 개발에 관한 자세한 연구 결과나 절차에 대해서는 기업 비밀로써 공개를 하지 않는다. 본 논문에서는 ORC 시스템에 맞는 터빈을 개발하는데 있어, 기업에서 공개를 하지 않는 연구 개발 방향에 관한 사항과 주요 결과를 제시함으로써 차기 터빈 개발을 하는데 있어 중요한 참고가 될 수 있도록 하였다.

2. 터빈 설계

ORC용 터빈을 설계하는데 있어, 우선적으로 진행되어야 될 사항은 터빈의 작동 조건을 정하는 것이다. ORC 시스템은 폐열원으로부터 열에너지를 공급받는데, 폐열원 특성에 따라 터빈의 작동 조건이 결정된다. 따라서 폐열원 즉 열원을 공급받을 수 있는 곳에 대한 분석이 필요하며 이를 바탕으로 ORC 시스템에 대한 전체적인 사이클 해석이 수행되어야 한다. Fig. 1은 폐열원의 특성을 바탕으로 수행된 열역학적 사이클 해석 결과이다. 사이클 해석 결과를 바탕으로 ORC 사이클의 주요 구성품인 터빈, 펌프, 증발기, 응축기의 사양과 작동 조건이 결정된다. Table 1에는 사이클 분석을 바탕으로 결정된 터빈 전/후단의 운전 조건이 도시되었다. 본 연구에서는 200kW의 출력을 위해 7.2 kg/s의 R245fa 냉매 순환이 필요하며, 9.5의 팽창비를 만족시키는 터빈 설계가 필요하다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 이용하여 터빈 개념설계가 수행되었고 비속도, 비직경 분석을 통해 터빈 종류, 직경, 회전수, 단수, 출력 등에 관한 기본 특성을 파악하였다. 비속도와 회전수를 고려하여 원심형 터빈으로 결정하고, 터빈 입/출구의 팽창비가 9.5로써 단단으로 구현하기에는 초음속 터빈이 요구되기 때문에 2단으로 나눔으로써 단당 팽창비를 줄이고 아음속 터빈으로 결정하였다. 참고로 작동 유체인 R245fa 인 경우, 100°C에서 110m/s가 마하수 1이 된다. 즉 유기 냉매 특성상 낮은 속도에서 초킹이 쉽게 발생할 수 있기 때문에 2단 설계가 이루어 졌다. 비속도 및 비직경 분석은 Moustapha⁽⁷⁾나 Dixon⁽⁸⁾ 등 터보기계 관련 자료에서 확인할 수 있다. 개념설계 결과를 바탕으로 mean line 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 Concept NREC社의 Rital이란 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다. Rital은 mean line에 대한 공력학적 해석을 수행하는 프로그램으로써, 냉매의 물성치를 NIST property를 이용하여 계산에 연계시킴으로서 실제 냉매조건에 대한 해석이 가능하다. 그리고 Mean line에 대해 각 부분의 속도, 압력, 온도 등 세부 물성치를 알 수 있다. 3차원 해석은 아니

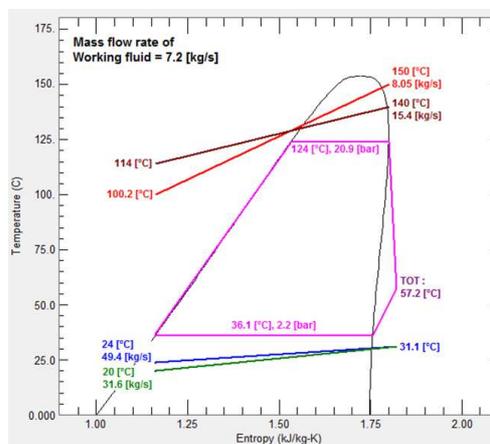


Fig. 1 ORC thermal cycle analysis

Table 1 Working condition of turbine

작동 유체	R245fa	-
순환 유량	7.2	kg/s
입구 전온도	124	℃
입구 전압력	20.9	bar
출구 전압력	2.2	bar
출력	236	kW
회전속도	15,000	rpm

Table 2 Mean line analysis result of 1st and 2nd stage nozzle and rotor

1st stage				2nd stage			
Nozzle		Rotor		Nozzle		Rotor	
r2	108 mm	r4s	79.5 mm	r2	117 mm	r4s	89 mm
b2	5.5 mm	r4h	79.5 mm	b2	17 mm	r4h	17 mm
r3	83.5 mm	r5s	42.5 mm	r3	94 mm	r5s	66 mm
b3	5.5 mm	r5h	29 mm	b3	17 mm	r5h	40.5 mm
Inlet angle	71°	Inlet angle	0°	Inlet angle	63°	Inlet angle	0°
Exit angle	73.95°	Exit angle	-45°	Exit angle	77.6°	Exit angle	-45°

(r : radius [mm], b : axial length [mm])

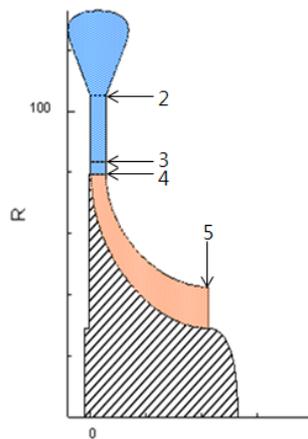


Fig. 2 Schematic of 1st stage

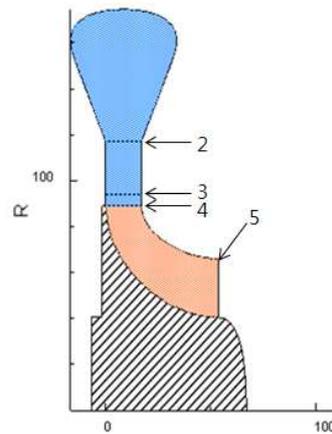


Fig. 3 Schematic of 2nd stage

지만 간단한 설정과 빠른 계산 속도로 터빈 상태를 전반적으로 알 수 있다. 즉, 복잡한 터빈 형상에 대한 3차원 상세 해석을 수행하기 전에 운전 및 탈운전 조건에서의 터빈 조건을 파악하는데 유용하게 사용된다. Fig. 2와 Fig. 3은 mean line 해석 결과로 얻은 1단, 2단 볼류트, 노즐, 로터의 형상을 나타낸다. 초킹 발생을 고려하여 1단과 2단 설계가 이루어 졌으며 Table 2에 1단과 2단에 대한 상세 치수가 도시되었다. 1단과 2단 모두 노즐과 로터 날개 수는 각각 15개와 10개 이다.

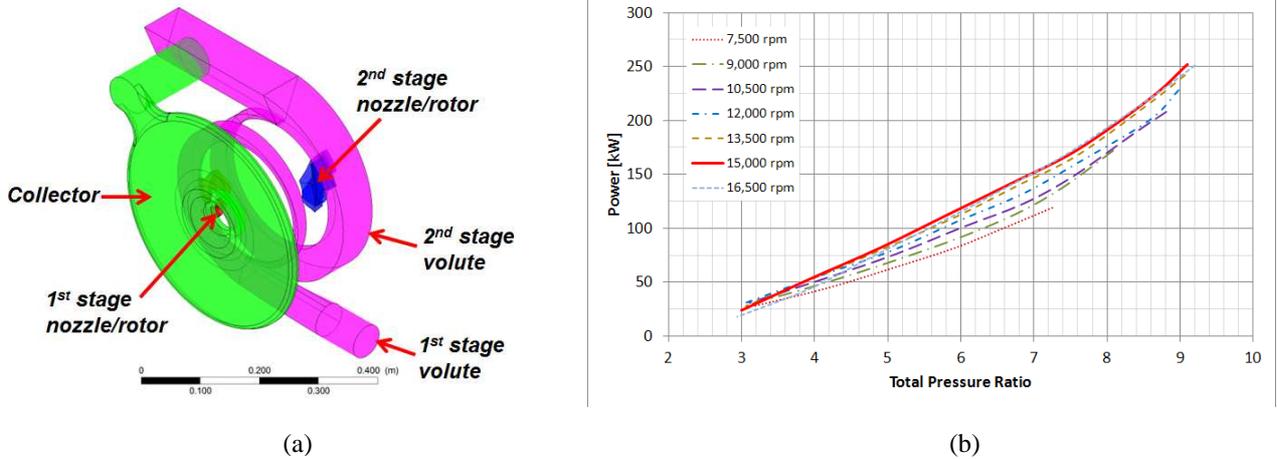


Fig. 4 Full domain CFD calculation : (a) Calculation domain, (b) CFD result about the relation between total pressure ratio vs. Power

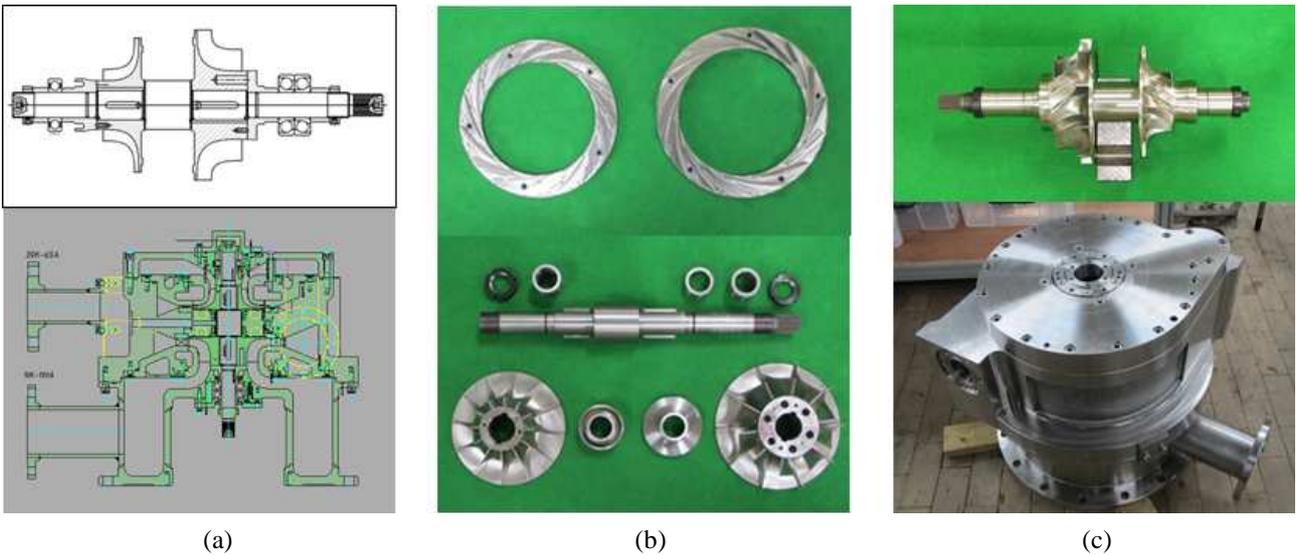


Fig. 5 Turbine components : (a) Drawing, (b) Component parts, (c) Component assembly

개발하려는 터빈이 2단 터빈이기 때문에, 1단과 2단에 대한 로터 배치를 고려해야 한다. 일반적으로 return channel layout과 back to back layout 이 있다. Return channel layout 은 두 개의 로터가 return channel을 통해 같은 방향으로 배치가 된 것이 특징인데, 축력의 작용 방향이 같은 방향이기 때문에 축력을 감안하여 축이 수직으로 설치가 된다. Back to back layout 은 두 로터가 등을 마주보고 설치된다. 축력이 서로 반대방향으로 작용하여 서로 상쇄될 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 back to back layout 으로 2단 로터를 배치시켰다.

Mean line 해석 결과와 2단 로터의 배치 선정을 바탕으로 수치해석이 진행되었다. 본 연구에서는 ANSYS CFX 14.0을 이용하여 수치해석을 진행하였다. 우선 1단과 2단에 대해 수치해석을 각각 수행하여 주어진 로터 형상과 운전 조건에서 mean line 해석 결과와 비교를 하였고, 내부 유동장을 분석하여 계산 결과에 대한 확인을 수행하였다. 이후 전체 영역에 대한 수치해석을 수행하였다. Fig. 4는 수치해석이 수행된 계산 영역과 형상을 나타낸다. 1단, 2단의 볼류트, 컬렉터가 있으며 수렴성과 수렴 시간을 고려하여 1단, 2단 로터 날개는 각각 1개씩 사용하였다. Fig. 4(a)는 계산시 적용된 격자를 나타낸다. 볼류트, 노즐, 로터는 헥사 메시를 적용하였으며, 1단 로터 출구 부분의 컬렉터는 tetra 메시를 사용하였다. 총 격자수는 140만개이며, 노즐과 로터는 rotational periodic condition을 적용하였다. 입/출구 조건은 사이

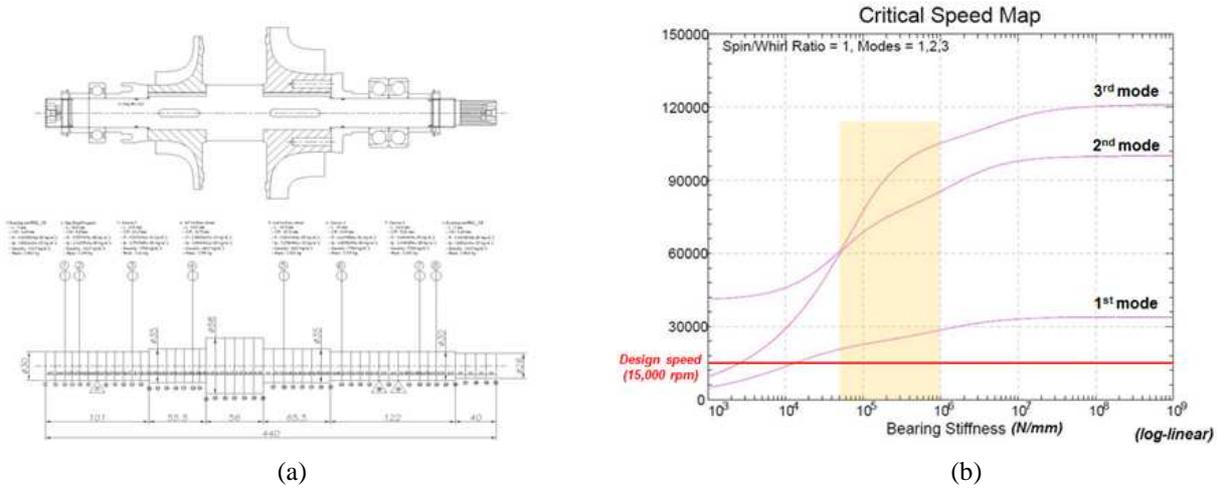


Fig. 6 Rotor dynamic analysis : (a) FE model, (b) Critical speed map

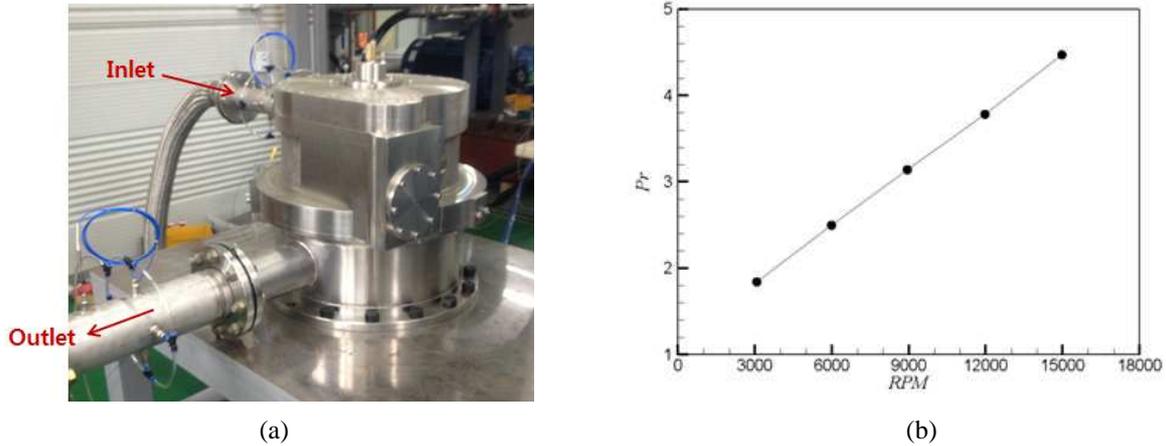


Fig. 7 Turbine performance test : (a) Performance test setup, (b) RPM vs Pr

클 해석 결과를 입력하였다. Fig. 4(b)는 팽창비에 따른 터빈 출력을 여러 회전수에 대해 나타낸 것이다. 정격속도인 경우 팽창비 9에서 250 kW의 출력이 계산되었다. 수치해석을 이용하여 다양한 결과를 얻을 수 있었고, 이를 바탕으로 유동 특성 및 유체역학적 형상 결함 등을 판단할 수 있었다.

3. 터빈 부품 제작 및 회전 특성 분석

본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 터빈 부품을 설계하고 제작하였다. Fig. 5(a)는 터빈 설계도를 나타낸다. 1단, 2단 로터 회전 계와 전체 터빈이 도시되었다. Fig. 5(b)는 설계도를 바탕으로 제작된 요소 부품을 나타낸다. 그리고 Fig. 5(c)는 요소 부품을 조립한 로터계와 터빈 장치이다. 단품별 치수와 조립 후 각부분의 치수를 측정하여 제작된 부품이 도면의 허용오차를 만족하는지 확인하였다. 1단, 2단 로터를 포함한 축계는 15,000 rpm으로 회전시 베어링 강성에 따른 임계 속도구간의 존재 여부를 알아야 하며, 진동 또한 허용 수준을 만족해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 6에 도시된 바와 같이 로터를 포함한 축계에 대한 로터 동특성 해석을 수행하였다. Fig. 6(a)와 같은 설정에 대해 Fig. 6(b)와 같은 임계 속도 맵을 얻을 수 있었으며, 정격 속도에서 베어링 강성이 $5 \times 10^4 \sim 10^6$ N/mm 인 베어링 적용시 1, 2, 3차 모드를 피할 수 있다는 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 로터의 동특성 분석을 바탕으로 로터를 정격속도인 15,000 rpm 으로 회전시키고 이때의 진동을 측정하여 적절성 여부를 확인하였다. 로터는 고압의 압축공기를 터빈에 공급하여 회전을 시켰으며 이때의 터빈 진동을 측정하였는데, 결과적으로 정격속도에

Table 3 Pretest result of ORC turbine

Resistor [Ω]	RPM	V _{rms}	A	Power [kW]	Pr
6	3,072	109.34	10.77	2.03	1.84
	5,979	217.38	21.31	8.02	2.5
	8,948	323.09	31.57	17.66	3.14
	11,969	429.53	41.83	31.09	3.78
	14,975	532.54	51.6	47.56	4.47

서 0.04mm/s 의 진동이 측정되었다. 이는 터보기계 진동 허용 수준인 3mm/s 미만을 만족시키는 수치이기 때문에 적절한 수치이며, 이 결과로 로터 동특성에 대한 안정성을 확인할 수 있었다.

4. 터빈 성능 시험

제작된 터빈에 대하여 예비 터빈 성능 시험을 수행하였다. Fig. 7(a)와 같이 고압의 압축공기를 터빈 입구에 공급하여 터빈을 회전 시키고 이때 터빈 입/출구의 온도와 압력으로 효율등 주요 출력값을 얻을 수 있었다. 그리고 Fig 7(b)와 같이 회전수에 따른 팽창비를 실험적으로 확인할 수 있었는데, 도시된 바와 같이 선형적인 관계가 있는 것을 확인하였다. 도시된 결과의 조건은 6Ω의 저항을 준 조건에서 3,000rpm 단위로 15,000rpm 까지 상승시켰을 때의 입/출구 정압비의 비 변화이다. 15,000 rpm 조건에서 최대 4.47의 압력비를 얻을 수 있었다. Table 3 에는 예비 시험시 측정된 주요 수치를 도시하였다.

5. 결론

본 논문은 유기 랭킨 사이클을 이용한 폐열 회수 시스템에 사용되는 200kW 터빈 개발에 관한 전반적인 연구 과정을 소개함으로써, 터빈 개발을 하기 위한 연구 절차를 제시하였다. 터빈이 적용될 작동 환경에 대한 사이클 해석 결과를 바탕으로 비속도/비직경 분석, mean line 해석, 1단 2단 로터 배치 선정, 단단 및 다단에 대한 3차원 수치해석, 부품 제작 및 제품 검토, 조립성 검토, 임계 속도 분석, 회전 안정성 분석, 터빈 성능 시험에 이르기 까지 터빈 개발에 필요한 중요 사항을 순서대로 전개하고 주요 결과를 제시하였다. ORC용 터빈 개발이 주요 화두로 부각되고 있는 시점에서, 본 논문에서 소개된 연구 절차가 차기 ORC용 터빈 개발을 하는데 있어, 성공적인 개발을 위한 연구 방향을 제시할 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 ‘저온 랭킨사이클을 이용한 중소형 폐열 회수 열병합발전시스템 개발’의 결과임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kang, S. H. and Chung, D. H., 2010, "Study on the Operation Characteristics and Efficiency of Organic Rankine Cycle," *Proc. of the KSME*, pp. 3732~3738.
- (2) Eom, H. S., Yoon, C. S., Kim, Y. M., Shin, D. G. and Kim, C. G., 2012, "Experimental Study on the Operating Characteristics of Organic Rankine Cycle," *Proc. of the SAREK*, pp. 1023~1028.
- (3) Kim, K.-H., Han, C.-H. and Kim, G.-M., 2011, "Study on Organic Rankine Cycle for Maximum Power

- Extraction from Low Temperature Energy Source," *J. of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 31, No. 3, pp. 73~79.
- (4) Yu, J. S., Kim, H. J., Kim, W. Y. and Kim, H. J., 2010, "Design of Scroll Expander for Waste Heat Recovery Using Organic Rankine Cycle," *Proc. of SAREK*, pp. 558~562.
- (5) Han, S. J., Seo, J. M., Choi, B. S. and Park, J. Y., 2011, "20kW Turbine Development for OTEC System," *Proc. of KSME*, pp. 3050~3053.
- (6) Shin, D. G., Kim, Y. M. and Kim, C. G., 2011, "Operating Characteristics of a Scroll Expander Used in Organic Rankine Cycle," *Trans. of the SAREK*, Vol. 23, No. 12, pp. 776~781.
- (7) Moustapha, H., Zelesky, M. F., Baines, N. C. and Japikse, D., 2003, *Axial and Radial Turbines*, Concepts NREC.
- (8) Dixon, S. L., 1998, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, Butterworth heinemann.