

지열 히트 펌프시스템용 터보 압축기 개발

박 준 영[†]·박 무 룡*·최 상 규**·윤 의 수*·황 순 찬*

Development of the Turbo Compressor for a Geothermal Heat-Pump System

JunYoung Park, MooRyong Park, SangGu Choi, EuiSoo Yoon
and SoonChan Hwang

Key Words: Turbomachinery(터보기계), Centrifugal Compressor(원심 압축기), Geothermal Heat Pump(지열 히트 펌프)

Abstract

A centrifugal compressor for geothermal heat pump system using R134a as working fluid has been developed. The centrifugal compressor consists of an impeller with splitters, two vaneless diffuser, a low solidity vaned diffuser and a volute. In this compressor, diffuser blade angles are controlled to satisfy both heating and cooling conditions. A aerodynamic design was done by applying the repeating design procedure including a meanline design, a 3D geometry generation and fluid dynamic calculation. In this paper, design and performance prediction results of the compressor are presented.

기호설명

Pr : Total pressure ratio

\dot{m} : Mass flow rate [kg/s]

P_o : Total pressure [Pa]

T_o : Total temperature [K]

η : Efficiency

1. 서 론

지열 히트 펌프 시스템은 열전달 매체인 냉매의 잠열을 이용하는 시스템으로 냉매가 압축, 응축, 팽창, 증발하는 열역학적 사이클에 대표적 대체 에너지원의 하나인 지열을 활용하여 건물의 난방, 또는 냉방을 수행, 쾌적한 주거환경을 제공하는 에너지 직소비형 공조기기이다. 일반적으로 히트펌프 시스템의 핵심 부품인 압축기는 소형(30RT 이하)의 경우 왕복동식, 로터리식, 스크롤식이 사용되고 중형(30RT 이상 200RT 이하)의

† 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

E-mail : jypark@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7395 FAX : (042)868-7335

* 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

** 한국기계연구원 첨단산업기술연구부

Table 1 Design Requirement

	냉방조건	난방조건 (설계점)
Working Fluid	R134a	
\dot{m} (kg/s)	1.13	0.947
P_{o1} (Pa)	315000	227000
T_{o1} (K)	285	276.2
Pr	3.16	6.13
η	80	73
RPM		70000

경우에는 스크루식이 주로 사용된다.

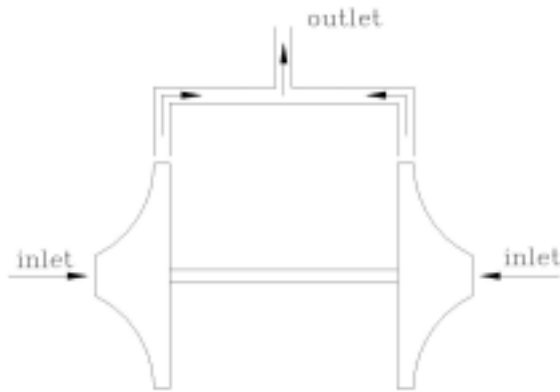


Fig. 1 Compressor configuration

본 연구에서 개발하고자 하는 50RT급 히트펌프의 경우 스크루 또는 왕복동식의 압축기를 채택하는 것이 일반적이나 현재의 스크루나 왕복동 압축기는 구조상 난방 및 냉방 부하의 계절적 변화에 능동적으로 대처할 수 없을 뿐만 아니라 본 연구에서 목표로 하는 oil-free운전을 실현하기 위해서는 왕복동 압축기의 경우에는 기술개발이 불가능하며 스크루 압축기의 경우에도 상당한 난이도의 기술개발이 필요하다. 현재 oil-free 스크루형 압축기는 작동유체가 공기인 경우에만 개발되어 있으며, 스크루 압축기의 고효율화를 위해서는 매우 높은 가공 정밀도를 요하게 되므로 제작단가 및 유지부수 비용이 증가한다. 이에 비해 터보형 냉매 압축기는 냉매를 윤활제로 하는 가스 베어링과 가스베어링으로 지지되어 저온, 저압의 가스 냉매를 압축시키는 고속의 1단 원심형 임펠러 및 원심 임펠러 구동을 위한 시스템 내장

Table 2 1D Design and analysis results

	냉방조건	난방조건 (설계점)
\dot{m} (kg/s)	0.565	0.4735
RPM	59600	70000
Pr	3.196	6.139
η	80.84	78.8
Specific speed	0.598	0.534
Impeller exit blade angle(deg)	45	
Impeller exit width(mm)	2	
Impeller blade number	9+9	
Diffuser inlet blade angle	71	67
Diffuser exit blade angle	77	63

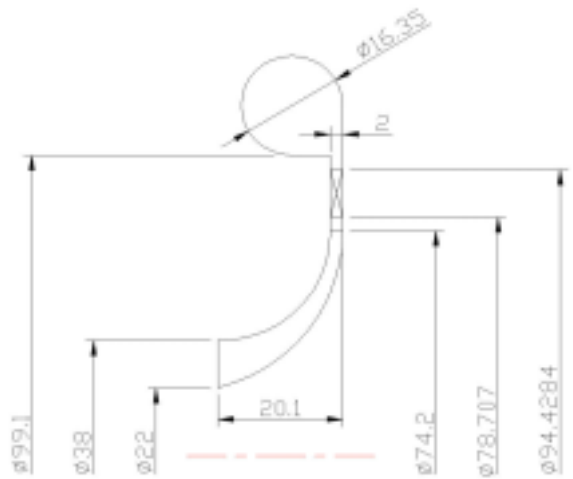


Fig. 2 Geometric configuration in meridional plane

형 고효율 전동기로 구성된 시스템이다. 이와 같은 터보 압축기는 기존에 사용되고 있는 용적형 압축기에 비해 고효율이며, 가공 정밀도가 낮고 부품수가 작아 제작 단가, 유지 보수 비용이 상대적으로 낮고 또한 냉매의 팽창시에 소모되는 에너지를 부분적으로 회수 할 수 있는 터빈을 활용하여 에너지의 절감을 도모할 수 있다.

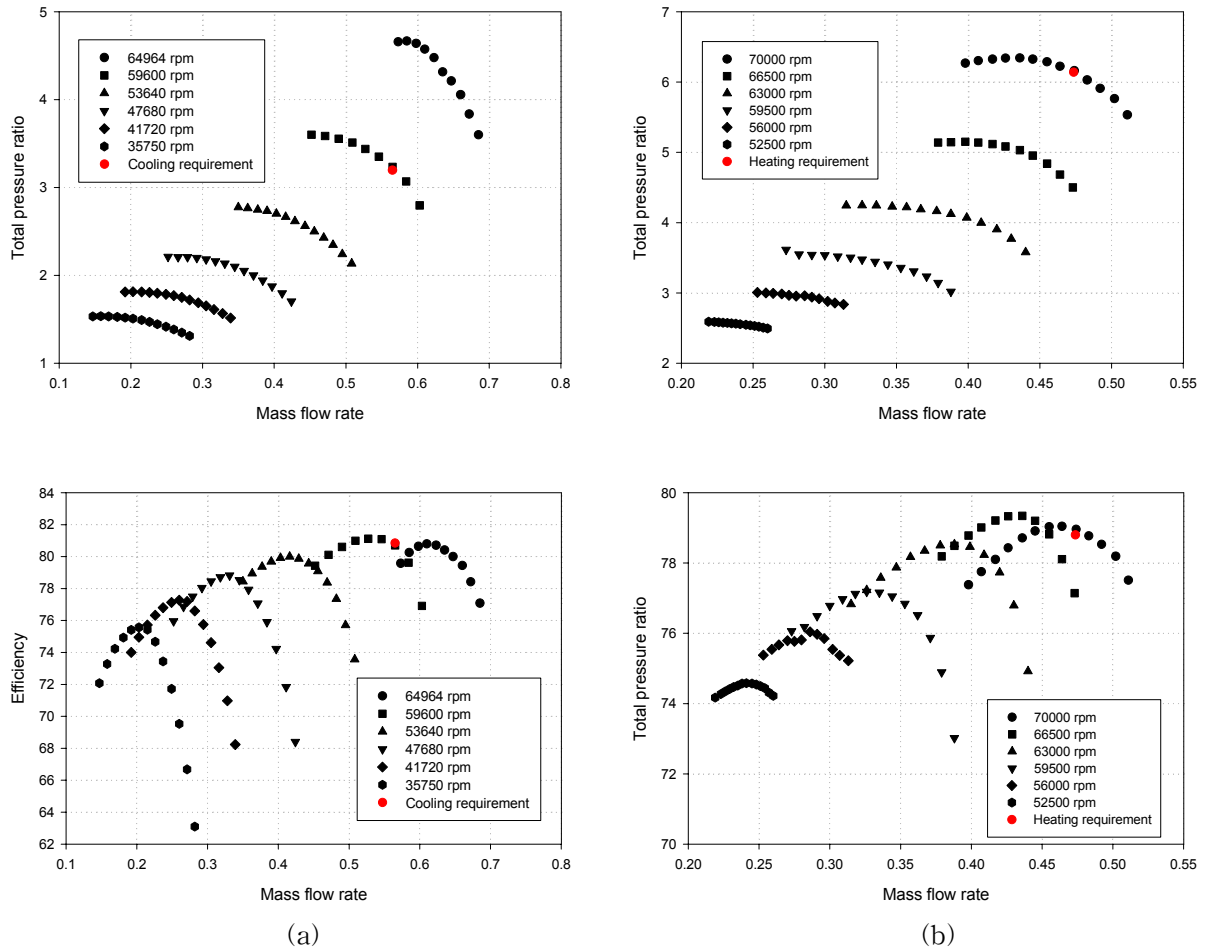


Fig. 3 Predicted Performance map by one-dimensional analysis; (a) at cooling condition (b) at heating condition

국내에서는 R134a와 같은 실제 가스를 작동유체로 하는 원심 압축기의 관련 연구가 공기용 원심 압축기에 비해 거의 수행되지 않은 상태이며, 최근에 와서 냉동기용 터보 압축기에 관한 연구⁽¹⁾⁽²⁾가 조금씩 이루어지고 있다. 본 연구에서는 R134a를 냉매로 하는 지열 히트 펌프 시스템용 냉매 압축기의 설계 및 성능해석 과정에 대하여 언급하고 그 결과를 제시하고자 한다.

2. 원심 압축기 설계 사양

지열 히트펌프 시스템에 대한 여러 번의 사이클 설계 및 해석과정을 통하여 압축기 사양이 결정되었으며 Table 1은 결정된 설계사양을 보여준다. 개발중인 지열 히트펌프 시스템은 냉방과 난

방이 한대의 터보 압축기로 운전되므로 압축기 측면에서는 냉방과 난방 각각에 대한 기본 운전 조건이 필요하다. 지열 히트 펌프 시스템은 냉방 모드에 비하여 난방모드에서의 운전시간이 상대적으로 많으므로 난방모드에서의 운전 조건을 터보 압축기의 기본 설계점으로 설정하였으며 냉방 조건은 탈 설계 운전을 통해 만족하도록 하였다. 특히, 전체 시스템 싸이즈를 최소화하고 가스 베어링의 효율을 높이기 위해 난방조건에서 압축기의 설계 회전수를 70,000 rpm으로 고정하였다.

3. 1차원 공력 설계

Table 1에 제시된 설계조건을 토대로 NREC의 PREDIG 프로그램을 이용하여 1차원 공력설계를

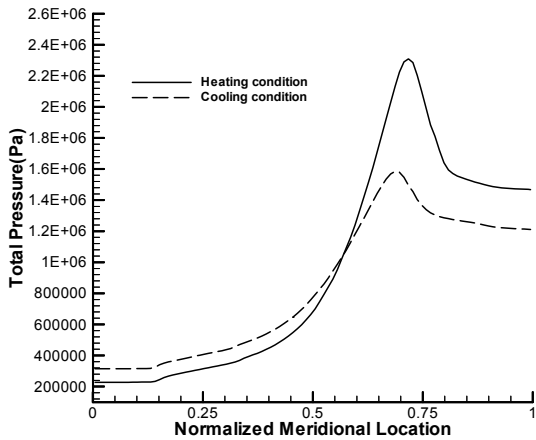


Fig. 4 Meridional averaged total pressure from inlet to outlet

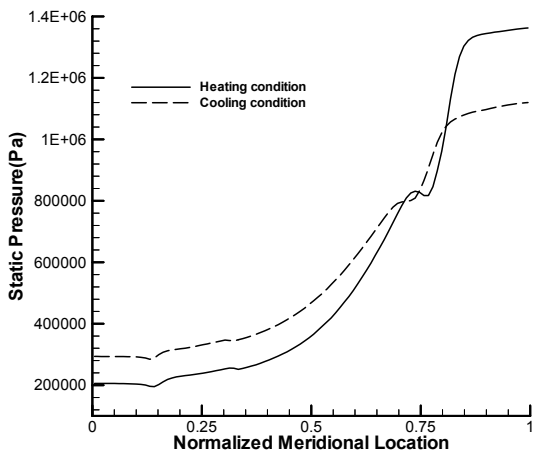


Fig. 5 Meridional averaged static pressure from inlet to outlet

수행하였다. 이때 작동유체가 공기인 경우에는 압력, 온도에 따른 밀도, 엔탈피, 엔트로피 등의 물성치를 구하기 위하여 이상기체 상태 방정식을 이용하나 본 연구에서 사용하는 R134a 냉매는 이상기체 상태 방정식을 사용할 수 없다. 그러므로 본 연구에서의 1차원 공력설계에서는 Martin-Hou 방정식을 이용하여 실제기체의 물성치를 구하였다. 또한, Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 축추력 문제를 해결하기 위해 한 축에 두개의 임펠러를 설치하여 운전하도록 하였다. 이때 각 임펠러에는 설계 유량의 절반에 해당하는 양이 흐르게 된다. 압축기의 효율을 높이기 위해

Table 3 Comparison of predicted performance

	Heating condition		Cooling condition	
	\dot{m}	Pr	\dot{m}	Pr
1차원 성능 해석	0.473	6.396	0.565	3.369
3차원 성능 해석	0.474	6.374	0.564	3.804

임펠러 쉬라우드 입구에서 상대마하수가 최소가 되도록 입구에서의 팁 반경을 결정하였으며, 가능한 넓은 운전범위와 높은 효율을 확보하기 위해 베인 디퓨저 중에서 cascade 형 디퓨저를 채택하였다. 그러나, 임펠러와 디퓨저 형상의 변화 없이 냉방과 난방운전 조건을 동시에 만족하기는 불가능하므로 본 연구에서는 디퓨저 블레이드각을 조절하여 두 운전조건을 만족하도록 하였다. Fig. 2는 1차원 설계를 통하여 얻어진 자오면상에서 압축기의 형상을 보여준다. Table 2는 1차원 설계 및 해석을 통해 얻어진 결과를 보여주며 난방과 냉방 각 기본 운전 조건을 만족하고 있음을 보여준다. Fig. 3은 이상의 과정을 통하여 얻은 압축기의 난방과 냉방 각 운전모드에서의 탈설계 성능예측곡선도이며 충분히 안정적인 운전영역을 확보함을 확인 할 수 있다.

4. 3차원 형상설계 및 성능예측

본 연구에서는 AEA사의 Bladegen⁽³⁾을 이용하여 임펠러와 디퓨저의 형상설계를 수행하고 설계된 임펠러와 디퓨저의 설계 건전성을 평가하기 위해 터보기계 유동해석 전용 상용 소프트웨어인 TASCflow⁽⁴⁾를 사용하여 3차원 점성 압축성 유동해석을 수행하였다. 이때 실제 기체를 냉매로 사용할 경우 물성치 고려의 문제점을 해결하기 위해 R134a의 물성치는 NIST의 물성치 프로그램인 REFPROP v7.0⁽⁵⁾을 사용하여 구하였다.

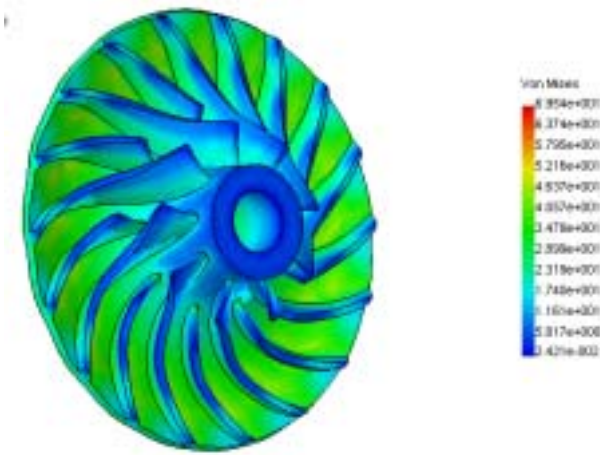


Fig. 6 Von Mises 응력분포

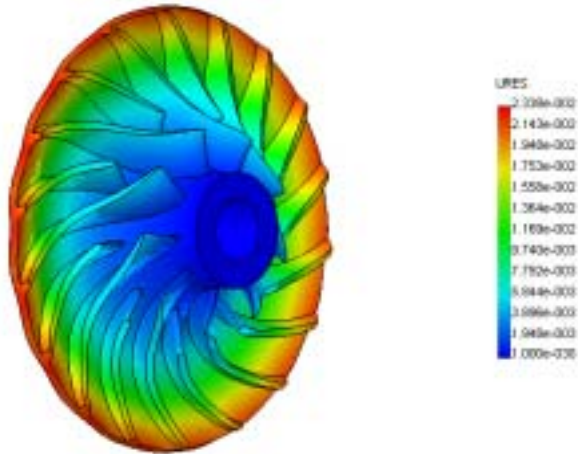


Fig. 7 변위량 분포

H-형태 정렬 격자계를 사용하였고, 사용된 격자 수는 임펠러, 디퓨저 각각 60000개, 30000개 이며 난류유동을 계산하기 위해 k-e RNG모델을 사용하였다. 경계조건으로 임펠러 입구에서 전압과 전온도를 고정하였으며 출구에서는 정압을 고정하였다. 임펠러와 디퓨저사이의 경계면은 혼합면 기법을 이용하여 처리하였다.

Fig. 4는 난방과 냉방조건에서 임펠러 입구에서 디퓨저 출구까지 피치방향으로 평균한 전압분포를 보여준다. 임펠러 통로에서 전압의 고른 상승이 나타나며 임펠러 출구부근에서 주유동과 후류의 혼합에 의한 전압 손실이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나, 전반적으로 설계 의도대로 임펠러 통로 내부에서 전압 상승이 원활하게 이루어짐을 확인할 수 있다. Fig. 5는 동일한 조건에서의 정압분포를 보여준다. 임펠러 입구에서

디퓨저 출구에까지 정압상승이 원만하게 이루어짐을 확인할 수 있다. 임펠러와 디퓨저에 대한 3차원 성능해석 결과가 Table 3에 제시 되어있다. 난방조건에서의 1차원 설계결과와 3차원 설계결과는 거의 일치하나 탈설계점인 냉방조건에서는 3차원 해석결과가 1차원 설계결과보다 많이 큼을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 1 차원 탈설계 해석의 부정확성에 기인하는 것으로 판단되며 회전수를 낮추는 것으로 실제 냉방운전 조건을 맞출 수 있을 것으로 판단된다.

5. 구조 해석

Solid Edge를 사용하여 임펠러에서의 응력해석을 수행하였다. Fig.6과 7은 Von Mises의 응력과 변위 분포를 보여준다. 여기에서 온도에 의한 열변형은 고려되지 않은 상태이며, 회전에 의한 원심력만 고려하였다. 가능한 무게를 가볍게 하기 위해 임펠러의 소재는 알루미늄 7075-T6을 선정하였다. 해석결과 안전율은 7.26, 최대 변위는 0.023mm이며 임펠러의 팁 부위가 앞쪽으로 숙여지는 변형 행태를 보이고 있다. 임펠러의 온도분포가 적용되면 이러한 현상은 좀 더 크게 나타날 것이나 전체적으로 안전 운전 범위를 벗어나지 않을 것으로 판단된다.

6. 결 론

R134a를 냉매로 하는 지열 히트펌프용 터보압축기를 설계하였다. 디퓨저 블레이드 각을 조절하여 한대의 터보 압축기로 난방과 냉방을 수행할 수 있도록 하였다. 설계된 압축기의 성능이 설계요구사항을 잘 만족함을 확인하였으며 설계된 임펠러와 디퓨저는 고속모터 및 가스베어링과 함께 밀폐형 압축기 시스템을 구성하게 되며 향후 성능시험을 통하여 성능을 확인할 예정이다.

참고문헌

(1) k.Y Lee, Y.S Choi and W. J Park, 2003, "Numerical Study on Tip Clearance Effect on Performance Characteristics of a Centrifugal

- Compressor for R134a Turbo-Chiller,” Proceeding of the KFMA Annual Meeting 2003, pp. 451-456.
- (2) Y. D Lee, J. J Jeong, H. K Lee, P. H Yoon and K. Y Kim, 200, “Development of the Centrifugal Compressor for a R134a Turbo-Chiller; Part 1 : Design of the Centrifugal Compressor,” Journal of Fluid Machinery, Vol.3, No. 4, pp. 44-51.
- (3) AEA Technology Engineering Software Inc., CFX-Bladegen, Version 4.1.
- (4) AEA Technology Engineering Software Inc., CFX-TASCflow, Version 2.11.1.
- (5) NIST, National Institute of Standards Technology, U.S.A.,REFPROP v7.0.