

120°C 스팀 생성을 위한 100 kW급 히트펌프의 실험적 연구

Experimental Study on Heating Performance Characteristic of 100 kW Heat Pump to Generate 120°C Steam

왕은석(Eunseok Wang), 나선익(Sun-Ik Na), 이길봉(Gilbong Lee), 백영진(Young-Jin Baik),
이영수(Young-Soo Lee), 이범준(Beomjoon Lee)[†]

한국에너지기술연구원 열에너지시스템연구실

Thermal Energy System Lab, Korea Institute of Energy Research(KIER), Daejeon, 34129, Korea

(Received November 27, 2017; revision received December 20, 2017; Accepted: December 21, 2017)

Abstract Recently, the development of a heat pump technology to recover process waste heat and to generate steam of 120°C or higher required for industrial processes, has attracted attention. The research of conventional heat pump utilizing the available energy is used primarily for air conditioning, and the production temperature is about 60°C, so it is difficult to utilize it for industrial use. Therefore, in this study, we developed a steam heat pump (SGHP) which recovers the waste heat of process and generates steam at 120°C. The low-pressure refrigerant R245fa, considered to be an eco-friendly refrigerant, has been selected as the refrigerant for SGHP in this study since its Ozone Depletion Potential (ODP) is zero and the Global Warming Potential (GWP) is relatively low. A flash tank functioning as a phase separator was installed in the rear stage of the condenser, and the saturated water of high temperature was decompressed to generate steam. It was started at the initial temperature of 70°C, and it was confirmed that 120°C steam was produced after the system stabilized. We have conducted experiments by modifying the system, and ultimately achieved a heating capacity of 101.4 kW and a COP of 3.05.

Key words Steam(증기), Heat pump(열펌프), Waste heat(폐열), Flash tank(플래쉬 탱크)

[†] Corresponding author, E-mail: beomjoon.lee@kier.re.kr

기호설명

COP	: 히트펌프 성능계수	ODP	: 오존파괴지수(Ozone Depletion Potential)
GWP	: 지구온난화지수(Global Warming Potential)	SGHP	: 스팀히트펌프(Steam Generation Heat Pump)
IHX	: 내부열교환기(Internal Heat Exchanger)	TOE	: 석유환산톤(Ton of Oil Equivalent)

1. 연구배경 및 목적

프랑스 파리에서 열린 제 21차 국제기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 파리협정이 채택됨으로써 우리나라도 온실가스를 감축해야할 의무를 지게 되었다. 이에 따라 우리나라 정부는 2016년 12월 기후변화대응 기본계획 및 2030 국가온실가스 감축 기본 로드맵을 확정하고, 산업분야에서 56.4백만톤 CO²를 절감하는 것을 목표로 설정하였다. 이에 따라 산업분야의 에너지 효율 향상을 위한 기술개발의 필요성이 대두되었다.

산업 공정의 다양한 열원 중에서 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 120°C 이하의 열원이 가장 많이 사용되는 것으로 보고되었다.^(1, 2) 한편 폐열의 경우, Fig. 2에서 나타난 바와 같이 60~99°C의 폐열량이 국내 산업폐열 총 추정량(약 385,100 TOE)의 56.3%에 해당하며 반 수 이상을 차지하고 있다.⁽³⁾ 그렇지만 배출허용기준에 의거하여 공정

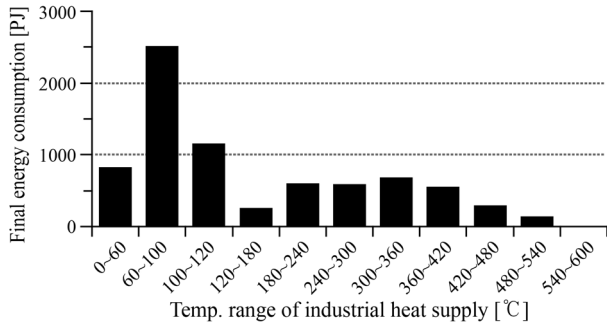


Fig. 1 Demand heat ratio according to the heating media temperature of industries in EU-27.

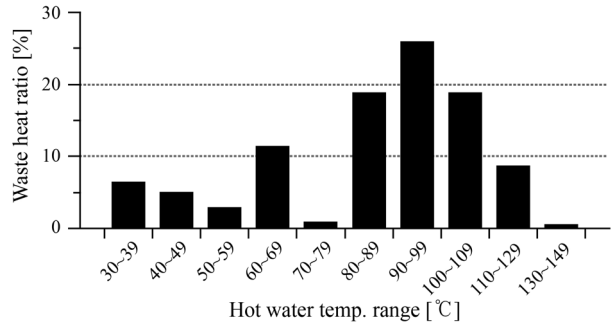


Fig. 2 Waste heat ratio according to hot water temperature in Korea industry.

폐수는 40℃ 이하로 배출되어야 하므로 냉각탑으로 많은 양의 에너지를 방출하고 있는 실정이며, 에너지 회수 기술 개발 필요성이 요구되고 있다. 이러한 대내외적 요구에 부응할 수 있는 기술로써 풍부한 60~99℃의 공정 폐열을 회수하여 산업공정에서 필요로 하는 120℃ 이상의 스팀을 생산할 수 있는 히트펌프 기술이 주목받고 있다.

기존 미활용에너지를 활용한 히트펌프 연구는 주로 공조를 목적으로 히트펌프의 생산온도가 60℃ 정도이므로, 산업용으로 활용되기에 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 공정수의 폐열을 회수하여 120℃의 스팀을 생산하는 스팀히트펌프(SGHP) 개발을 목적으로 두 가지 목표를 설정하고 수행하였다. 첫째, 냉매와 압축기를 선정하고 플래쉬탱크(Flash-tank), 열교환기 등을 설계하여 120℃ 스팀생산을 목표로 하였다. 둘째, 제작된 히트펌프의 성능 개선을 위해 실험시스템을 수정하여 최적화된 시스템을 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 냉매 선정

스팀히트펌프(SGHP)에 적용 가능한 냉매를 선정하기 위하여 Table 1⁽⁴⁾과 같이 비교하였다. 냉매는 스팀 온도(120℃) 이상에서 이상상태(2-phase) 열전달이 가능한 동시에 인화성과 독성이 없고 환경유해성(ODP, GWP)이 낮아야 한다는 점을 선정 기준으로 하였다.

SGHP 냉매 후보들 중 임계점이 본 연구에서 요구하는 응축온도(120℃ 이상)보다 낮은 냉매는 선정하지 않았다. 만약 이러한 임계점이 낮은 냉매를 SGHP에 적용할 경우, 스팀 생산 시 필요 이상으로 높은 압축기 토출 압력과 온도를 요구⁽⁵⁾하여 고압설계가 필요하게 된다. 또한 고온운전을 위한 압축기 개발이 선행되어야 하며, 임계점 부근에서 냉매 특성이 급격히 변화하여 시스템을 안정적으로 제어하는 기술이 개발되어야 한다.

Table 1 Comparison properties of refrigerants

	Critical temp. [°C]	Critical pressure [MPa]	ODP*	GWP*	Toxicity/Flammability
R245fa	154.0	3.65	0	1030	- / -
R134a	101.1	4.06	0	1430	- / -
R744	31.0	7.38	0	1	- / -
R1234yf	94.7	3.38	0	4	- / Flammable
R1234ze(E)	109.4	3.64	0	6	- / Flammable
R1234ze(E)	153.7	3.97	0	< 10	- / Flammable
R245ca	174.4	3.93	0	693	- / Flammable
R365mfc	186.9	3.27	0	794	Toxic / Flammable

* ODP(Ozone Depletion Potential), ** GWP(Global Warming Potential).

이러한 이유로 임계점이 낮은 기존 히트펌프에서 주로 사용되는 냉매인 R134a나 자연냉매인 R744는 SGHP 냉매로 선정하지 않았다. 인화성과 독성이 존재하는 R1234 계열, R245ca, R365mfc는 시스템 안전성을 고려해 선정 대상에서 제외하였다.

최종적으로 오존층 파괴지수(ODP)가 0이고 지구온난화지수(GWP)가 상대적으로 낮아 친환경 냉매라 평가 받는 저압냉매인 R245fa를 본 연구의 SGHP용 냉매로 선정하였다.

2.2 실험 장치

본 연구에서 120°C 스팀 생산을 위해 구성한 SGHP는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 압축기와 모터, 오일쿨러 등을 하단부에 설치하고 전기 패널과 열교환기를 상단부에 설치한 구조로 제작하였다. 실험을 위한 SGHP 시스템은 Fig. 4에 나타난 바와 같이, 열원부, 히트펌프부, 증기생성부로 구성된다.

해당 SGHP는 증발기에서 외부 열원을 통해 에너지를 흡수한 저온·저압의 냉매가 압축기를 거쳐 고온·고압이 되고 응축기를 통해 외부로 에너지를 방출한다. 응축된 액상 냉매는 팽창변을 지나며 압력과 온도가 낮아지고 다시 증발기로 순환하게 되는 증기 압축 사이클을 형성한다. 낮은 열원온도로 인해 커지는 압축비를 줄이기 위해 추가적인 열원 공급 없이 냉매를 가열하기 위한 방안으로 증발기와 압축기 사이에 내부열교환기(IHX)를 적용하였다.

SGHP의 압축기는 작동 냉매와 냉각오일 온도를 고려하여 개방형 스크류 압축기를 선정하였다. SGHP의 냉매로 선정된 R245fa는 운전대역을 고려하면 포화압 특성이 R134a와 유사하다. 따라서 상용화된 R134a용 압축기에 R245fa를 적용하여, SGHP의 압축기 출구조건을 현실화할 수 있었다. 본 실험에 앞서, 선정된 압축기에 R245fa를 적용하여 1,000시간 성능테스트를 수행하였다.⁽⁶⁾ 그 결과, 압축기의 입구 온도 80°C, 입구 압력 7 bar 내에서 인버터 제어를 통해 75% 부하 운전으로 하는 초기기동 제어전략을 수립하고 오일탄화 등 여타 문제가 발생하지 않음을 확인하였다. SGHP의 열교환기는 쉘브론 각도(Chevron angle)가 30도인 전열판을 적용하여 제작한 브레이징 판형 열교환기(BPHE)를 적용하였다. 증발기와 응축기의 외측 크기는 322 mm×739 mm이며 적용되어 있는 전열판의 수는 증발기는 62장, 응축기는 50장이 사용되었다. 내부열교환기의 전열 면적은 4.26 m²이며 총 40장의 전열판이 적용되어져있다. SGHP의 팽창밸브(EEV)는 일반적인 냉동공조용 히트펌프에 사용되는 팽창밸브보다 고온고압 영역에서 작동이 가능한 ICM Valve를 선정하였다. 고온용 전자팽창밸브(ICM valve)와 컨트롤러를 사용하여, 증발기측 과열도를 제어하였다. 응축기 내부에서 이상상태(2-phase) 열전달이 될 경우, 막비 등으로 인하여 열전달율이 오히려 낮아질 수 있으며 열교환기 부피가 커질 수 있다는 단점이 있다. 이를 회피하기 위해 순환수를 가압시켜 응축기에 공급해 열교환 후, 응축기 후단에 위치한 플래쉬탱크에서 플래싱(flashing)되어 스팀을 생산하게끔 구성하였다.

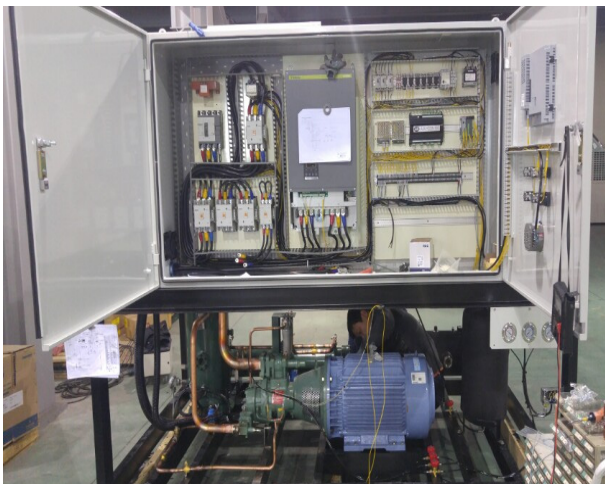
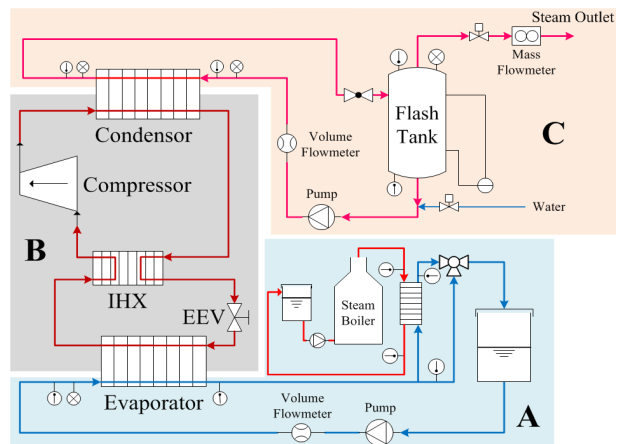


Fig. 3 Front view of the 100 kW SGHP.



(A : HeatSource, B : HeatPump, C : SteamGeneration)

Fig. 4 The schematic diagram of the SGHP system.

Table 2 Specification of SGHP

Unit	Specification	
Compressor	45 kW, Screw, Open type	
Heat exchanger	Evaporator	322 mm×739 mm 62 plates, Brazed type
	Condenser	322 mm×739 mm 50 plates, Brazed type
	IHX	4.26 m ² , 40 plates, Brazed type
Expansion valve	Temperature range : -60~120℃, Motorized type	

플래쉬탱크는 상분리기(phase separator) 역할을 하며, 응축기 후단에 설치되어 순환하는 고온 포화수를 감압시켜 스팀을 발생시키는 장치이다. 플래쉬탱크의 용량은 150 L이며 운전 중 스팀의 생성과 보충수의 보급이 안정적으로 유지되는지 확인하기 위해서 차압식 수위계와 가시창을 설치하였다. 생성된 스팀 양을 확인하기 위해 스팀 배출구에 질량유량계를 설치하였다.

펌프내부에서 발생하는 공동현상(cavitation)을 억제하기 위하여 흡입양정을 높였으며, 손실수두를 줄이기 위해 순환펌프를 플래쉬탱크 하단부에 수직방향으로 설치하였다. 플래쉬탱크 스팀 토출 배관에 전자제어밸브를 설치하고, 전자제어밸브의 개도율을 조절하여 플래쉬탱크 내부 압력을 일정하도록 제어하였다.

공정폐열을 모사할 수 있도록 LNG보일러와 전열기기로 구성된 별도의 열원시스템을 구성하였다. 이를 이용해 실험 중에는 열원수 온도를 일정하게 제어하였다. 시스템의 온도와 압력은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 각 부분에 열전대(T-type)와 압력센서를 설치하여 측정하였으며, 유량은 증발기 측과 응축기 측으로 나누어 전자기유량계(Electromagnetic Flowmeter)로 측정하였다. 데이터로거를 통해 5초 간격으로 데이터를 취득하였다.

2.3 실험 방법

SGHP 기동 전, 열원시스템을 먼저 가동하여 응축기와 증발기의 2차측 순환수 온도를 70℃ 이상으로 승온시켰다. 또한 유분리기의 오일 온도를 60℃로 가열한 후, 인버터 운전으로 압축기를 기동하였다. 응축온도가 상승하고 플래쉬탱크 내부 증기압력이 충분히 높아지면, 플래쉬탱크 스팀 토출배관의 밸브를 열어 Fig. 5와 같이 스팀을 생산하였다. 응축기 전후단의 고온 포화수 온도와 플래쉬탱크 상단에서 측정된 스팀 온도의 시간에 대한 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 응축기 및 증발기의 입·출구측 관내에 삽입된 온도 센서(PT 100Ω)를 통해 온도를 측정하였으며 플래쉬탱크 상단측의 온도 센서(PT 100Ω)를 통해 탱크 내에서 플래싱 되어 배출되기 전 스팀 온도를 측정하였다. 초기 70℃에서 기동하여 시스템이 안정화된 후, 120℃ 스팀이 발생하는 것을 확인하였다.

가열 열량은 식(1)과 같이 구하였으며 성능계수인 COP는 식(2)를 통해 구하였다. 여기서 A_w 는 히트펌프의 압축기를 구동하는데 사용한 소요 동력을 의미한다.

$$Q_{cond} = \dot{m} \times C_p (T_{cond.o} - T_{cond.i}) \tag{1}$$

$$COP = Q_{cond} / A_w \tag{2}$$



Fig. 5 State of steam generation.

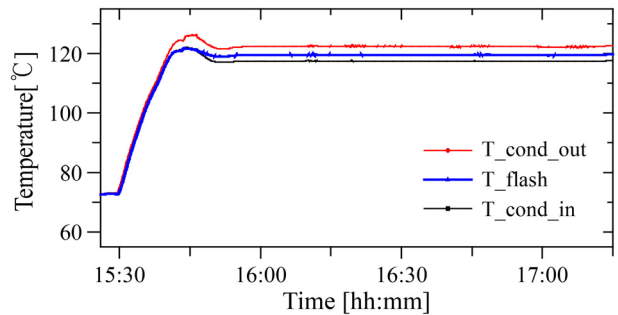


Fig. 6 The temperature variation of system.

3. 시스템 최적화

120℃의 스팀 생산을 확인한 실험은 증발기 입구 온도 70℃, 인버터 60 Hz로 압축기를 구동한 조건으로 수행하였다. 상기 조건 하에서 SGHP의 가열 열량은 74.44 kW, 성능계수(COP)는 2.29였다. 이를 SGHP 시스템의 초기 상태(Initial condition)라 두고, 가열 열량과 COP의 향상을 목표로 Table 3과 같이 순차적으로 시스템을 수정하여 성능실험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 3 및 Fig. 7~Fig. 8에 정리하여 나타내었다.

응축온도가 고정된 상황에서 압축비가 작을수록 압축기 소비동력이 작아져 시스템의 COP에 유리하다. 낮은 열원온도는 증발온도 상승에 한계가 있다. 또한 증발온도가 낮으면 요구하는 응축온도를 위한 압축비가 커져야 하므로 이는 시스템의 성능 악화를 야기시킨다. 낮은 증발온도라 할지라도 압축비를 줄이기 위한 방법은 압축기 전단에서 추가적인 가열을 하는 것이다. 이를 위해 내부열교환기(IHX)를 적용하였다.

초기버전 보다 열교환량의 증가를 위해 Plate를 더 적층한 IHX로 교체하였고, 증가한 열교환기의 체적량에 따라 냉매양을 보충하였다. 초기버전에서 19.68 kW를 나타내던 내부열교환량이 IHX를 교체한 B버전에서 23.5 kW로 증가하였다. 이를 통해 B버전의 가열 열량은 74.4 kW에서 90.7 kW으로 16.3 kW(21%) 증가 하였고, COP는 2.29에서 2.73으로 19% 증가하였다.

SGHP 시스템 외부로 유출되는 열량을 최소화하기 위하여 증발기, 응축기, IHX, 배관뿐만 아니라 유분리기, Receiver를 단열하였다. 그 결과 순환하는 냉매의 온도는 유분리기에서 0.7℃, Receiver에서 1.1℃의 온도 감소가 이루어졌고, C버전의 가열 열량과 COP는 초기버전 대비 각각 6.4%, 7.3% 증가하였다.

추가적인 성능 향상을 위해 압축기측 오일 순환량을 제어하였다. 압축기의 오일 흡입 측에 밸브를 추가로 설치하여 밸브의 개도 조절을 통해 순환량을 제어하였다. 오일이 일정 수준 이하로 공급되면 압축기 기동이

Table 3 Step of SGHP Optimization

Optimization	Step	A	B	C	C*	C**	C***	D	E	F	G
Initial Condition		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
IHX replacement & add the refrigerant			○	○	○	○	○	○	○	○	○
Oil-seperator & Receiver insulation				○	○	○	○	○	○	○	○
Oil-cooler circulation					○	○	○				
Oil circulation control						○	○				
Liquid injection							○				
Compressor insulation								○	○	○	○
EKC driven optimization									○	○	○
Steam pressure optimization										○	○
Flashing regulator optimization											○
Heating Capacity(kW)		74.44	90.75	96.57	92.90	92.54	93.59	99.05	98.98	99.45	101.4
COP		2.29	2.73	2.93	2.90	2.89	2.87	2.90	2.96	2.99	3.05

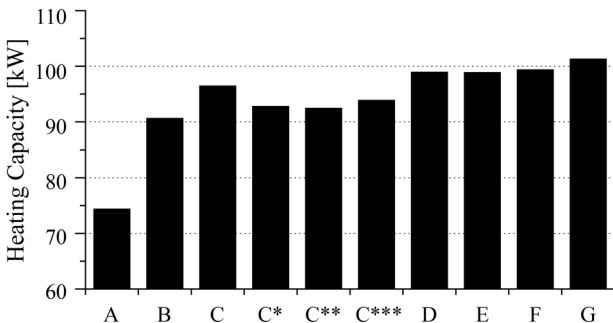


Fig. 7 Heating Capacity of the SGHP according to optimization.

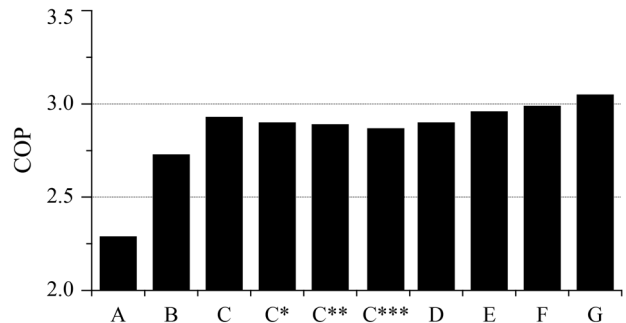


Fig. 8 COP of the SGHP according to the optimization.

중단 되는데 정상 순환할 때와 기동이 중단 될 때 오일의 순환량의 차이가 크지 않았다. 압축기 스크류의 작동에 따른 오일량의 순환만 이루어져 이에 대한 성능 측면의 영향은 미비하였다.

Liquid-injection 도입으로 가열 열량은 소폭 상승 하였다. 하지만 응축기 출구 단에서 냉매 중 일부를 압축기 쪽으로 보내기 때문에 압축기가 일을 더 하게 되므로 압축일이 증가하게 되고 결과적으로 COP는 감소하였다. 성능 측면에서 감소하였던 C^* 와 성능변화가 미비하였던 C^{**} , C^{***} 는 제외시키고 추가 성능 향상을 위해 압축기 외부 또한 단열을 하였다. 단열로 인해 토출온도는 2.8℃ 상승하였으며 추가적으로 2.5 kW의 가열 열량을 얻을 수 있었다.

수동 조작으로 조절하던 팽창 밸브의 개도율을 지정된 과열도 세팅으로 EEV 밸브가 제어 되도록 과열도 컨트롤러의 자동 제어를 도입하였다. 흡입압은 0.2 bar 상승하였고 토출압은 0.2 bar 감소하여 COP 2% 증가 효과를 얻었다.

120℃보다 높은 스팀 온도를 120℃에 근접하여 일정하게 유지되도록 스팀 밸브 컨트롤러의 제어 값 최적화를 진행 하였다. 냉매 사이클 측면에서는 고압이 소폭 감소하게 되고, 결국에는 고압의 감소 효과로 인해서 열량이 증가하고 COP가 증가하였다.

플래쉬 탱크로 유입되는 응축수 유로에 설치된 감압 밸브의 개도를 조절하여 120℃ 스팀이 생성 되는 범위 내에서 압력의 최적화와 스팀펌프의 유량을 소폭 향상시킴으로써 최종적으로 가열 열량 101.4 kW, COP 3.05를 달성하였다.

4. 결 론

본 연구는 산업공정에서 배출되는 80℃ 이하의 폐열을 회수하여 120℃ 스팀을 생산하는 스팀히트펌프(SGHP) 개발을 목표로 연구를 수행하였고 최적화를 진행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 플래쉬탱크(Flash-tank), 내부열교환기 등으로 구성된 스팀히트펌프 시스템을 설계하여, 실험을 통해 열원 온도 70℃조건 하에서 120℃ 스팀 생산을 확인하였다.
- (2) 시스템의 성능 향상을 위해 초기 내부열교환기에 비해 Plate 수가 증가한 내부열교환기를 적용함으로써 Pressure drop에 대한 영향이 감소하였고 온도 차이가 초기 내부열교환기에 비해 커졌다. 그에 따른 가열 열량은 74.4 kW에서 21% 증가한 90.7 kW, COP는 2.29에서 19% 증가한 2.73으로 성능이 향상되었다.
- (3) 최적화 과정에서 진행한 SGHP의 각 컴포넌트들에 대한 단열은 외부로 발열되는 열량을 감소시킴으로써 가열 열량은 8.3 kW 증가하였다.

상기의 최적화 과정을 통해 최종적으로 스팀히트펌프의 성능이 가열 열량 101.4 kW, COP 3.05인 것을 확인하였다.

후 기

This work was jointly supported by the Energy Efficiency & Resources Core Technology Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 20132010101780) and Development Program of the Korea Institute of Energy Research (KIER B6-2411).

References

1. IEA/HPP Annex 35 Application of Industrial Heat Pump Task 1 Report, 2011.
2. Kuder, K., 2010, Technology orientated analysis of the emission reduction potentials in the industrial sector in the EU-27, in : International Energy Workshop (IEW), Stockholm, Sweden.
3. Park, I. H., Park J. T., and Yoo, S. Y., 2002, An Investigation Study on Fact of Waste Heat of Domestic Industry,

Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 811-817.

4. Calm, J. M. and Hourahan, G. C., 2011, Physical, Safety, and Environmental Data for Current and Alternative Refrigerants, Refrigeration for sustainable development (proceedings of the 23rd international congress of refrigeration (ICR 2011, Prague, Czech Republic), International Institute of Refrigeration (IIR/IIF), Paris, France, Paper 915.
5. Jeon, D. S., Kim, J. Y., and Kim, Y. L., 2014, Examination of Heat Pump Cycle for Steam Production up to 120°C. Conference of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea(SAREK), pp. 363-366.
6. Oh, S. H., Lee, G. B., Lee, B. J., Ra, H. S., Cho, J. H., Baik, Y. J., and Lee, Y. S., 2016, A Study on Reliability Evaluation Test of Compressor for High Temperature Heat-Pump Based on Gas Bypass Cycle, KSME, srping annual conference, pp. 326-327.