

# 실증운전을 통한 배가스 열회수 히트펌프 시스템의 성능 분석

## Analysis of Performance of Heat Pump System with Flue Gas Heat Recovery through Field Test

이승호(Seung-Ho Lee)<sup>1</sup>, 이길봉(Gil-Bong Lee)<sup>2</sup>, 이영수(Young-Soo Lee)<sup>2\*</sup>, 박상일(Sang-Il Park)<sup>2</sup>,  
고창복(Chang-Bok Ko)<sup>2</sup>, 백영진(Young-Jin Baik)<sup>2</sup>, 이관수(Kwan-Soo Lee)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 기계공학부, <sup>2</sup>한국에너지기술연구원 효율소재연구본부

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Republic of Korea

<sup>2</sup>Energy Efficiency and Material Research Division, Korea Institute of Energy Research,  
Daejeon, 305-343, Republic of Korea

(Received August 9, 2013; revision received October 22, 2013; Accepted: October 24, 2013)

**Abstract** A field test of a 70 kW heat pump system with flue gas heat recovery was performed by an experiment at the Korea Institute of Energy Research. The flue gas is exhausted from a 320 RT absorption chiller-heater in the heating season. Using this flue gas, source water of the heat pump is heated by a condensed-type heat exchanger in the chimney. The operating characteristics of the heat recovery heat pump system were analyzed. Based on the results of the experiments, operating maps were obtained, and an optimum operating range is suggested, in which the return and heat source water temperature are 51°C and 31°C, respectively. Additionally, economic analysis of this system was conducted and about 50% energy cost savings can be expected in the heating season.

**Key words** Condensing heat recovery(응축열회수), Flue gas(배가스), Heat recovery system(열회수 시스템), Latent heat(잠열), Condensation(응축)

\* Corresponding author, E-mail: yslee@kier.re.kr

### 기호설명

$COP_H$  : 난방성능계수  
 $Q_{cond}$  : 응축(난방)열량 [kW]  
 $Q_{evap}$  : 증발열량 [kW]  
 $T$  : 온도 [°C]  
 $\dot{V}$  : 유량 [m<sup>3</sup>/h]  
 $W$  : 소비전력 [kW]

source : 열원수  
flue : 배가스  
vol : 체적

### 그리스 문자

$\eta$  : 효율

### 하첨자

ad : 단열  
m : 기계  
comp : 압축기  
heating : 보일러  
gen : 발전  
return : 환수

## 1. 서론

산업체 및 열병합발전 시설에서는 보일러를 이용하여 고온의 산업용 공정수를 생산한다. 보일러에서는 수증기를 포함한 250°C 이하의 중저온 배가스가 다량으로 배출되며, 보일러 열손실의 대부분은 배가스에 의해 발생한다. 그러므로 많은 산업체에서는 배가스 열을 85~90°C까지 회수하여 보일러 급수를 예열하거나 공기를 예열하는 방법으로 폐열을 회수하고 있다. 또한 천연가스를 연료로 사용하는 경우 황 같은 부식 성분이 적어 저온의 열수요가 많은 산업체에서는 백연이 발생하지 않는 최저수준인 60°C까지 회수하여 사용하기도 한다.<sup>(1, 2)</sup> 그러나 여전히 많은 에너지가 버려지고 있으며, 배가스에 포함된 수증기의 응축잠열까지

회수하여 배가스의 온도를 35~55℃까지 내리면 열회수 효과를 더 높일 수 있다.

도시가스의 주성분인 메탄(CH<sub>4</sub>)을 연소시킬 경우 발생하는 수분발생량은 메탄 1m<sup>3</sup>당 약 1.61 kg이다. 그러므로 연소생성물 중의 수분을 전부 응축시켜 잠열을 회수하게 되면 연료 1 m<sup>3</sup>당 약 868 kcal의 열량을 추가적으로 회수할 수 있다.<sup>(3)</sup> 여기서 배가스에 포함된 수증기 응축 온도는 과잉공기비에 따라 50~60℃에서 형성된다.<sup>(4)</sup>

즉, 응축잠열까지 회수할 경우 그렇지 않은 경우보다 많은 열량을 회수할 수 있으나 온도가 낮아 직접 사용할 수 없기 때문에 효과적인 이용을 위해 히트펌프를 조합하여 사용할 수 있다. Lee<sup>(5)</sup>는 스웨덴 Umea 지역 소각로의 지역난방 시스템에 배가스 열회수 히트펌프 시스템을 적용한 사례를 소개하였다. 이 보고서 따르면 배가스의 응축잠열을 회수하여 소각로 총합 에너지효율을 94%에서 107%로 향상시켰다고 보고했다. 이 시스템은 배가스 열을 이용하여 열원수를 34.2℃ 정도로 생산하고 약 50℃의 지역난방 환수(Return water)를 약 60℃까지 승온시켜 19 MW의 열량을 공급하고 있다. 국내에서는 현재까지 다양한 히트펌프 연구가 수행되어 왔지만 열병합이나 산업공정 등에서 효율적인 운전을 위한 배가스 열회수 조합기술 및 이를 적용한 연구사례가 부족한 실정이다.

에너지관리공단<sup>(6)</sup>에 따르면 국내에 설치된 산업/난방용 보일러는 약 4만여 대다. 또한 유류나 천연가스, 석탄 등을 사용하는 열병합발전 설비도 2,760 MW에 달하는 것으로 알려져 있다. 이런 시설을 통해 버려지는 에너지를 효과적으로 이용하기 위해서는 배가스 열

회수 히트펌프 시스템의 기술 연구 및 개발 그리고 실증을 통한 검증이 요구된다.

본 논문에서는 한국에너지기술연구원에 운전되고 있는 흡수식 냉온수기(320 RT)에서 난방시 발생하는 배가스 열을 회수하여 열원으로 사용하는 열회수 히트펌프(70 kW급)의 성능을 분석하고, 이를 바탕으로 에너지 절감효과를 분석하였다.

## 2. 배가스 열회수 히트펌프 시스템의 구성

Fig. 1은 본 연구원에 설치된 배가스 열회수 히트펌프 시스템의 개략도이다.

흡수식 냉온수기는 LNG를 연료로 사용하여 난방온수를 생산한다. 이때 배출되는 배가스 일부를 송풍기를 이용하여 우회(by-pass)시켜 응축열교환기에서 열을 회수하여 히트펌프에 사용되는 열원수를 가열한다.

흡수식 냉온수기로부터 연구원 곳곳으로 분배된 난방수는 온도가 낮아져서 다시 흡수식 냉온수기로 회수된다. 이 난방수 일부는 우회시켜 히트펌프를 이용하여 가열한 후 흡수식 냉온수기로 재순환시킨다.

### 2.1 배가스 응축열회수 열교환기 시스템 구성

배가스 응축열교환기의 경우 응축수에 의해 발생하는 부식현상에 대한 문제가 제기될 수 있다. LNG를 사용하는 경우 배가스에 포함된 염소가스가 부식의 주요한 원인이 되지만 그 영향이 적어 스테인레스강을 전열관 재료로 사용하면 이 문제를 해결할 수 있다. 또한 LNG 배가스에는 유황성분이 거의 없어 본 연구

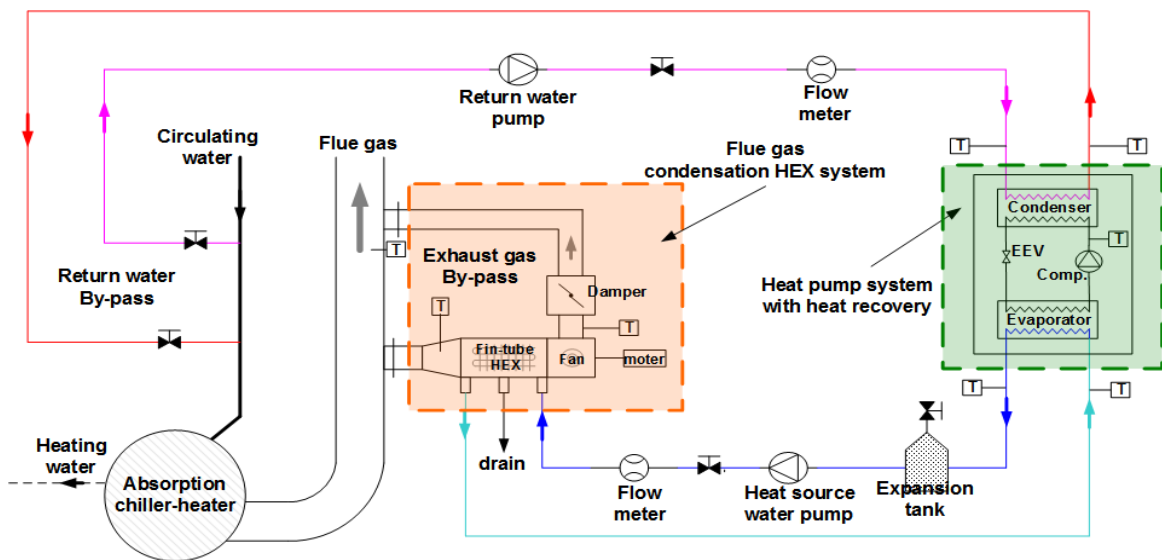


Fig. 1 Schematic diagram of heat pump system with flue gas heat recovery.

원의 시스템과 같이 170°C~180°C의 배가스가 열교환기를 지나 30°C 정도로 배출되더라도 저온부식에 대해 문제가 되지 않는다.<sup>(7, 8)</sup>

이런 이유로 배가스 응축열 회수를 위해 스테인리스 재질의 핀튜브 열교환기를 사용하였다. 핀튜브의 외경은 19 mm, 핀의 외경은 39 mm, 핀튜브 간격은 40 mm, 핀밀도는 8 개/inch, 핀튜브 유로는 480 mm×480 mm, 핀튜브의 배열수는 10열이다. 배가스의 일부를 우회시키기 위해 사용된 송풍기 사양은 주파수 60 Hz에서 소비전력이 485 W, 풍량이 960 m<sup>3</sup>/h, 풍압이 79 mmAq이다.

### 2.2 열회수 히트펌프 시스템 구성

이 시스템은 정상상태에서 증발기 출구 온도가 약 25°C이고 응축기 출구 온도가 약 70°C이다. Table 1에 이러한 운전조건을 고려하여 냉매에 따른 시스템의 성능을 Refprop에서 제공하는 물성치를 이용하여 분석하였다. 이때 과냉/과열도는 5°C, 효율은 각각  $\eta_{ad} = 0.92$ ,  $\eta_m = 0.85$ ,  $\eta_{comp} = 0.9$ 로 가정하였다. R245fa의 경우 COP<sub>H</sub>는 높으나 ORC 발전용으로 검토 중인 냉매이고, R32와 R407c은 COP<sub>H</sub>가 낮아 제외하였다. R134a는 효율이 높고 시중에 널리 사용되고 공급이 용이하므로 운전냉매로 선정하였다.

압축기는 예상 운전 조건에서의 제조사 간 제품 성능을 비교하여 개방형 왕복동식 압축기인 Bitzer open-type Model 4H.2Y로 선정하였다. 고온의 작동온도에 대응하기 위해 냉동유로 Bitzer BSE55(Flash point = 270°C) 오일을 채택하였다. 증발기 및 응축기로 사용되는 열교환기는 SWEP사의 브레이징 타입의 판형 열교환기로 선정하였다. 팽창밸브는 자식 팽창밸브(EEV)인 Emerson사의 model EX6를 선정하였다. Table 2는 히트펌프 구성요소의 제원을 나타낸다.

### 2.3 데이터 처리 시스템 구성

시스템 각 부분의 온도를 측정하기 위해 열전대(T-

Table 2 Specifications of heat pump system

Unit	Specification
Compressor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Model : Bitzer 4H.2Y</li> <li>Capacity : 30 kW</li> <li>Refrigerant : R134a</li> </ul>
Evaporator	<ul style="list-style-type: none"> <li>Type : Brazed type</li> <li>Heat load : 59.5 kW</li> </ul>
Condenser	<ul style="list-style-type: none"> <li>Type : Brazed type</li> <li>Heat load : 81.3 kW</li> </ul>
Expansion valve	<ul style="list-style-type: none"> <li>Model : Emerson EX6</li> </ul>

type class 1, -40~350°C, ±0.5°C)를 사용하였다. 유량은 Toshiba 전자기유량계(±0.5%)로 체적유량을 측정하였다. 데이터로거는 Yokogawa사의 MW-100을 사용하였고, TCP/IP 통신으로 LabVIEW 프로그램을 이용하여 데이터를 화면에 표시하고 저장하였다. 현장의 가동상태를 바로 확인하기 위해 데이터 수집주기는 3초로 하였다.

제어반에서 압력이나 온도에 관련된 알람, 전기적 문제에 의한 알람을 통해 시스템을 보호할 수 있도록 다수의 인터록으로 보완하였다.

### 3. 열회수 히트펌프 시스템 실험방법

본 연구의 실증실험기간은 2012년 12월부터 2013년 3월까지이다. 연구원 난방시 흡수식 냉온수기가 작동되는 시간인 오전 6시경부터 오후 4시경까지 데이터 수집을 하였다. 시스템의 운전경향은 난방기간 동안 비슷하나, 그 중에 오전, 오후에 운전되는 경향이 뚜렷하고 분석 데이터로도 사용한 2013년 1월 24일의 운전데이터를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 흡수식 냉온수기가 새벽에 작동 시작 후 안정되기까지 약 2~3시간정도 필요하다. 그 후 오전에는 환수 온도가 안정적인 반면에 난방부하가 적어지는 낮 시간에는 환수 온도가 상승하는 것이 특징이다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이 오전에 30분 이상 안정된 상태에서 데이터를 수집하여 열

Table 1 Calculation of heat pump cycle performance

Refrigerant	COP <sub>H</sub>	Q <sub>cond</sub> [kJ/kg]	Q <sub>cond, vol</sub> <sup>*</sup> [kJ/m <sup>3</sup> ]	Pressure ratio	Pressure[kPa]		GWP <sup>**</sup>
					High	Low	
R134a	3.793	145.08	4,289.9	3.611	2,262	626.6	1,430
R245fa	4.131	164.87	1,284.9	4.797	659.9	137.6	1,030
R32	3.46	235.27	10,063	3.245	5,194	1,601	675
R407C	3.387	147.74	5,884.3	3.538	3,404	962.2	1,774

\* Heating capacity per volume.

\*\* GWP : Global Warming Potential, Wikipedia, List of refrigerants.

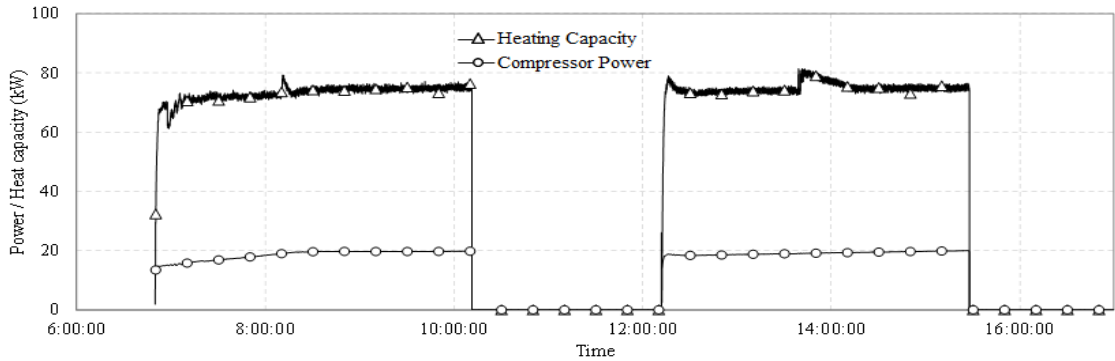


Fig. 2 The daily variation of heat recovery system temperatures on Jan. 24, 2013.

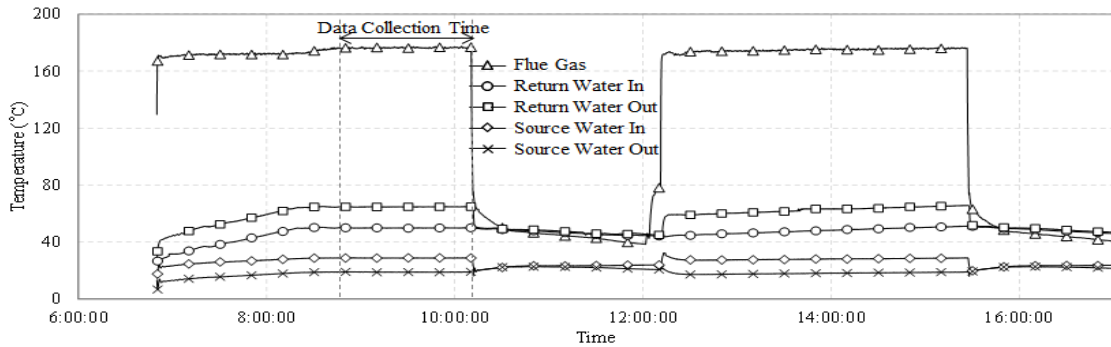


Fig. 3 The daily variation of power and heat capacity of system on Jan. 24, 2013.

회수 히트펌프의 성능을 분석하였다. Table 3에 2013년 1월 24일 하루 운전데이터의 평균값을 나타냈다. 오전, 오후 작동시간 각 평균을 구하고 하루 평균을 계산하였다.

#### 4. 실증 실험결과

##### 4.1 열회수 히트펌프의 성능특성

Fig. 4와 Fig. 5는 환수 온도가 49.7°C이고 환수 및 열원수의 유량이 각각 4 m<sup>3</sup>/h일 때, 송풍기 회전수(이하 회전수)에 따른 변화를 나타낸다. 회전수가 10 Hz씩

Table 3 Average of the data on Jan. 24, 2013.

T <sub>return</sub>	T <sub>source</sub>	V <sub>return</sub>
46.5°C	27.8°C	4.39 m <sup>3</sup> /h
V <sub>source</sub>	T <sub>flue</sub>	Q <sub>cond</sub>
4.51 m <sup>3</sup> /h	174.2°C	73.7 kW
W <sub>comp</sub>	COP <sub>H</sub>	Running time
18.8 kW	3.9	6.62 hours

증가할 때마다 열원수 온도가 24°C에서 32°C까지 4°C씩 증가했다. 회전수 40 Hz일 때, COP<sub>H</sub>는 약 3.5였다. 이때 회전수를 10 Hz씩 증가시키면 COP<sub>H</sub> 각각 2.9%, 4.2% 증가했다. 난방열량은 40 Hz 일 때, 63.1 kW에서 회전수가 10 Hz씩 증가하면 각각 5.0%, 7.2% 증가했다. 회전수가 증가하면 증발 온도가 상승하고 냉매의 비체적이 감소하며 질량유량이 증가하게 된다. 이에 따라 난방열량이 증가하고 COP<sub>H</sub>도 증가하게 된다. 소비전력도 각각 17.95 kW에서 2.0%, 2.8%씩 증가하지만 난방열량의 증가폭이 크므로 COP<sub>H</sub>가 상승함을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 환수 온도가 51°C, 열원수 온도가 28.5°C이고 열원수 유량이 4 m<sup>3</sup>/h일 때, 환수 유량에 따른 변화를 나타낸다. 환수 유량이 3 m<sup>3</sup>/h에서 5 m<sup>3</sup>/h까지 1 m<sup>3</sup>/h씩 증가하면 COP<sub>H</sub>는 8.9%, 13.1%가 증가하고 난방열량은 59.0 kW에서 각각 6.6%, 8.0%가 증가했다. 소비전력은 18.9 kW에서 2.1%, 4.6%씩 감소했다. 각각의 경우 응축기 출구 온도가 약 67.9°C, 64.3°C, 61.5°C로 낮아졌다. 환수 유량이 증가하면 응축기 출구온도가 감소하며 응축 온도도 낮아지게 된다. 그리고 압축기 토출가스온도가 낮아지고 압축비가 감소하며 냉매 순환량이 증가하게 된다. 냉매순환량의 증가하므로 난방열량이 증가하고, 토출가스가 낮아지면서 소비전력

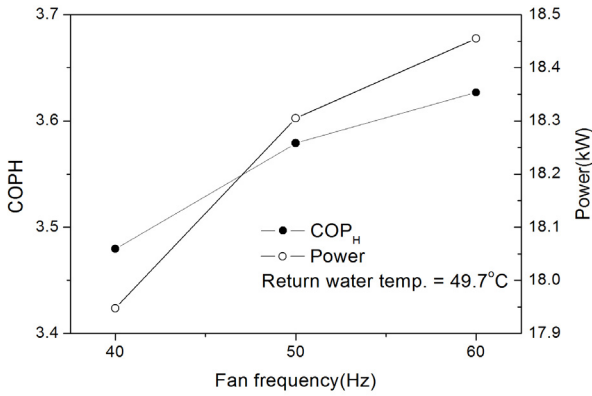


Fig. 4 COP<sub>H</sub> and power vs. fan frequency.

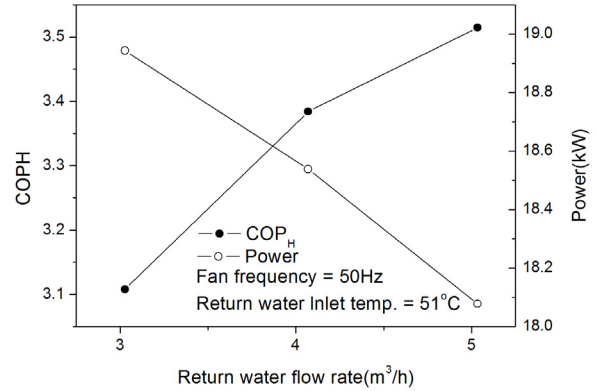


Fig. 6 COP<sub>H</sub> and power vs. return water flow rate.

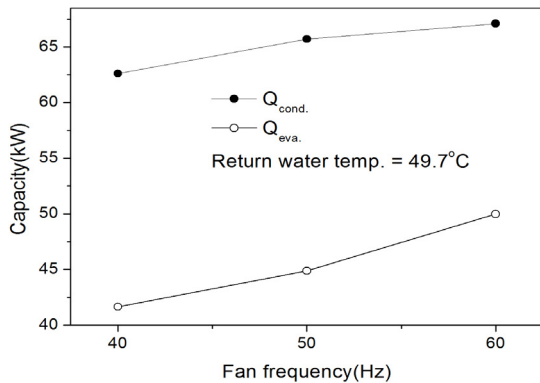


Fig. 5 Q<sub>cond.</sub> and Q<sub>eva.</sub> vs. fan frequency.

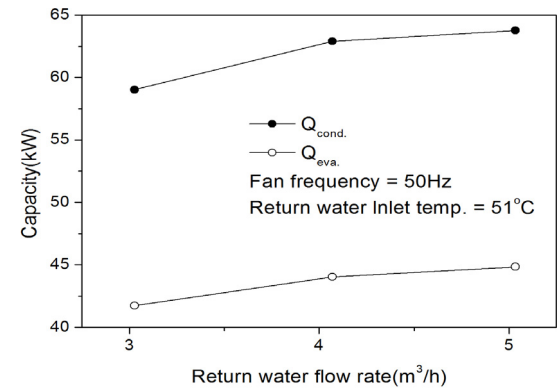


Fig. 7 Q<sub>cond.</sub> and Q<sub>eva.</sub> vs. return water flow rate.

이 감소하므로 COP<sub>H</sub>는 상승하게 된다.

#### 4.2 열회수 히트펌프의 최적운전 맵 분석

실증실험기간동안 수집한 데이터를 이용해 환수 및 열원수 유량이 4 m³/h인 데이터를 정리했다. 이 경우 환수 온도가 49°C~54°C, 열원수 온도가 24°C~34°C 범위에 형성되었다. 이 데이터를 OriginPro 8 프로그램을 이용하여 Fig. 8에 나타난 환수 및 열원수 온도에 대한 난방열량 및 COP<sub>H</sub> 운전 맵을 작성하였다. 열원수 온도가 약 31°C, 환수 온도가 약 51°C 근방에서 최적운전 점이 형성되는 것을 확인했다.

환수 온도가 52°C 이상이 되면 난방열량 및 COP<sub>H</sub>가 감소한다. 환수 온도가 증가하면 응축 온도가 증가하고 압축비가 증가한다. 이는 난방능력을 떨어뜨리고 소비전력이 증가시켜 COP<sub>H</sub>가 감소하게 된다. 환수 온도가 52°C를 초과하면 열원수 온도가 증가해도 난방능력 및 COP<sub>H</sub>가 감소한다. 그러므로 이 시스템의 경우 환수 온도를 52°C 이하로 유지하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

#### 4.3 열회수 히트펌프의 경제성 분석

한국에너지기술연구원은 산업용(을) 고압 A 선택Ⅱ요금을 사용하고 있다. 해당 전기요금 기준은 시간별, 계절별로 구별되어 있고, 한국전력공사에서 제공하는 전기요금 기준표<sup>(9)</sup>의 겨울철(11~2월) 시간별 요금을 적용하였다. 기본요금은 8,050 원/kW로 고압전력의 경우 최근 7개월간 피크부하를 곱해 월 기준으로 청구된다. 이것을 고려하기 위해 한 달을 30일로 하고, 하루 기본 요금을 8,050 원/kW÷30일 = 268 원/kW로 계산하여 히트펌프의 하루소비전력을 곱해 히트펌프 시스템이 차지하는 기본요금을 고려하였다. 전기요금은 전력량에 전력량요금을 곱해 계산하고 기본요금을 더해 계산하였다. 가스요금은 한국가스공사(2012. 7. 1부터)<sup>(10)</sup>에서 제공하는 열량별 가스요금을 적용했다. 산업용 가스요금은 18.2 원/MJ(65.51 원/kWh)이다.

Table 4은 2013년 1월 21일부터 25일까지 일주일간 운전한 데이터로 작성한 경제성 분석내용이다. 일주일간 34.4시간 가동하면서 히트펌프 및 환수, 열원수 펌프와 송풍기를 작동하기 위해 사용한 전력량은 792.9

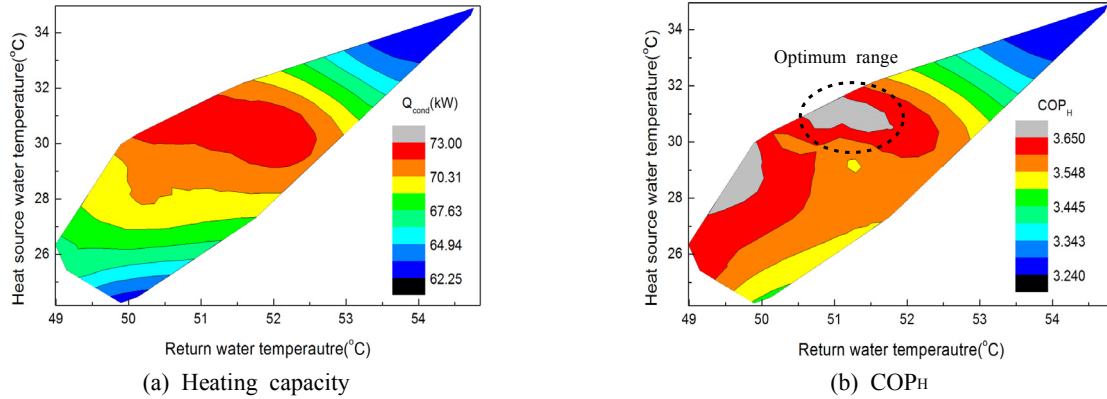


Fig. 8  $Q_{cond}$  and COP maps according to return and heat source water temperature.

Table 4 Analysis of economy of heat recovery heat pump system in heating operation

Date	1/21	1/22	1/23	1/24	1/25	Average		
Operating time(hr)	8.5	6.3	6.2	6.6	6.8	6.9		
Electric power consumption(kWh)	198.8	151.1	141.5	149.5	152	158.6		
Heat capacity(kWh)	659.1	492.2	456.6	487.8	494.1	518		
COP <sub>H</sub>	3.3	3.3	3.2	3.3	3.3	3.3		
Gas fee (₩)	Direct heating ( $\eta_{heating}$ )	0.75	57,569	42,992	39,886	42,610	43,157	45,243
		0.8①	53,971	40,305	37,393	39,947	40,460	42,415
		0.85	50,796	37,934	35,193	37,597	38,080	39,920
Electronic fee(using heat pump, ₩)②		26,110	20,386	19,722	19,842	19,987	21,209	
Cost saving(₩) ①-②		27,861	19,919	17,671	20,105	20,472	21,206	

kWh이고 이를 통해 생산한 난방열량은 총 2,589.8 kWh이다. 흡수식냉온수기의 난방 효율을  $\eta_{heating} = 0.8$ 이라 했을 때, 히트펌프에서 얻는 난방열량을 흡수식냉온수기를 이용해 공급하려면 212,076원의 가스비가 요구된다. 하지만 히트펌프를 사용하면 같은 열량을 생산할 경우 106,047원의 전기세가 예상되므로 일주일 사용에 대해 106,029원(약 50%)의 비용이 절감될 수 있을 것으로 분석된다.

이를 바탕으로 연구원에 대해 전체 난방운전시의 경제성분석을 수행하였다. 난방기간은 12월부터 3월 중순까지 15주(75일), 하루 난방시간은 6시간이라 가정했다. Table 4에서 일주일 평균 COP<sub>H</sub> = 3.3이고, 평균 소비전력이 23 kW이므로 난방기간 동안 10,350 kWh의 전력을 사용하여 34,155 kWh의 난방열량을 생산하고, 연간 약 135만 원(약 48%)의 비용절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 한국에너지기술연구원 냉난방 장비인

320 RT 흡수식 냉온수기에서 난방시 발생하는 배가스의 열을 회수하여 열원으로 사용하는 70 kW급 열회수 히트펌프 시스템에 대한 실증운전성능을 분석하였고 그 결과는 다음과 같다.

(1) 열회수 히트펌프의 열원수 온도가 24°C에서 32°C로 30% 증가할 경우 난방열량은 7.2%, COP<sub>H</sub>는 4.2%가 증가했다. 또한 환수 유량이 3 m<sup>3</sup>/h에서 5 m<sup>3</sup>/h로 증가할 경우 난방열량은 8%, COP<sub>H</sub>는 13.1% 증가한다.

(2) 열원수 및 환수 온도에 대한 성능맵 분석 결과 환수 온도가 51°C, 열원수 온도가 31°C 부근에서 최적의 운전점이 존재했다.

(3) 실증실험데이터를 기반으로 경제성 분석을 수행하였으며, 그 결과 배가스 열회수 히트펌프 사용 시 약 50%의 비용 절감이 기대되고 이를 통해 연 135만 원 정도 비용절감이 예상된다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다(B3-2431-05).

## Reference

1. Cho, H. W., 1998, Condensing gas boilers with condensation latent heat recovery : Energy efficiency is higher than normal boiler, Ondol heating system, Korea Boiler Engineering Association, Vol. 59, pp. 76-79.
2. Technology Diffusion Division of Korea Institute of Energy Research, 2003, Energy-saving technology trends(2003. 6), Vol. 30, pp. 109-145.
3. Lim, B. I., 2005, Understanding of the condensing gas boiler, The energy equipment magazine, Korea Energy Information Center, Vol. 2005-08, pp. 152-163.
4. KOGAS : Customer Support, [http://www.kogas.or.kr/kogas\\_kr/html/customer/customer\\_10\\_content.jsp](http://www.kogas.or.kr/kogas_kr/html/customer/customer_10_content.jsp).
5. Lee, Y. S., 2012, Heat pump system with condensed heat recovery of flue gas and heat pump supply status, The magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigeration Engineering of Korea, Vol. 41, No. 9, pp. 56-62.
6. Korea Energy Management Corporation, 2012, Handbook of Energy and Economic Statistics in Korea.
7. Morten, B. B. and Henrik L., 2007, Large-Scale Heat Pumps in Sustainable Energy Systems : System and Project Perspectives, Thermal Science, Vol. 11, No. 3, pp. 143-152.
8. Park, S. I., 2009, Technology of condensed heat recovery of boiler flue gas, The magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigeration Engineering of Korea, Vol. 38, No. 2, pp. 36-40.
9. Korea Electronic Power Corporation, 2012, KEPCO in Brief.
10. Korea Gas Corporation, 2012, City gas heat system explanation document.