

# 열원조건 분석 통한 흡수식 히트펌프 적용 열에너지 네트워크의 에너지 절감 예측

## A Study on the Energy Reduction of a Heating Network Through the Application of an Absorption Heat Pump

나선익(Sun-Ik Na), 이영수(Young-Soo Lee), 백영진(Young-Jin Baik), 이길봉(Gilbong Lee)<sup>†</sup>

한국에너지기술연구원 열에너지시스템연구실

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

(Received February 9, 2017; revision received March 6, 2017; Accepted: March 20, 2017)

**Abstract** At the 21<sup>st</sup> Conference of the Parties (COP) of the United Nations Climate change Conference, representatives of the 195 member countries reached an agreement requiring all participating countries, including Korea, to establish proactive measures to fight climate change. Under this vision, energy network technologies are deemed as a key site of research towards meeting this goal. Herein, the headquarters of the Korea Institute of Energy Research (KIER) is a worthy site for carrying out energy network technology research insofar as it contains various heat sources. To prepare for this research, a study was conducted analyzing the heat sources at KIER based on measured data. The study also consisted of developing simulation models to predict the amount of energy savings that could be derived by replacing an absorption chiller/heater with an absorption heat pump during winter seasons. In our simulation results, we observed a primary energy saving ratio of 65~72% based on the water temperature from the heat source of a coal power plant.

**Key words** Absorption(흡수식), Heat Pump(열펌프), Waste heat(폐열), Power plant(발전소)

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: [giblee@kier.re.kr](mailto:giblee@kier.re.kr)

### 기호설명

$h$	: 엔탈피 [kJ/kg]
$\dot{m}$	: 질량유량 [kg/s]
$P$	: 압력 [kPa]
$Q$	: 열량 [kW]
$T$	: 온도 [°C]
$UA$	: 총괄 열전달계수와 전열면적의 곱 [kW/°C]
$x$	: 냉매(H <sub>2</sub> O)의 건도 [-]
$\zeta$	: 용액(solution)의 LiBr 농도 [%]
$\phi$	: 에너지 절감율 [%]

### 하첨자

A	: 흡수기(absorber)
ab	: 흡수제(absorbent)
ACH	: 흡수식 냉온수기(Absorption chiller-heater)
AHP	: 흡수식 히트펌프(Absorption heat pump)
C	: 응축기(condenser)
E	: 증발기(evaporator)
G	: 재생기(generator)
h	: 난방(heating)
pr	: 1차 에너지(primary energy)
ref	: 냉매(refrigerant)
SHX	: 중간열교환기(solution heat exchanger)

## 1. 서론

2015년 12월에 프랑스 파리에서 개최된 제21차 유엔 기후변화협약당사국총회에서는 195개 참가국 모두

온실가스 감축활동을 하여 지구 평균기온 상승을 2°C 이하로 억제하자라는 ‘파리협정(Paris Agreement)’을 맺었다. 기존 교토의정서(Kyoto protocol)는 일부 선진국들만 감축 의무를 가졌지만, 이번 협정에 의해 우리나라도 온실가스 감축 의무를 지게 되었다. 이에 따라 우리 정부는 제1차 기후변화대응 기본계획과 2030 국가온실가스 감축 기본로드맵을 확정하며, 2030년 배출전망치(BAU) 대비 37% 수준으로 감축목표를 제시하였다. 감축목표를 달성하기 위하여 에너지 자립섬, 친환경에너지 타운, 발전소 온배수열 활용, 수요자원 거래시장 등 에너지 신산업을 적극 육성해 나갈 계획이다.<sup>(1)</sup> 위와 같은 에너지 신산업에서는 에너지 부하와 공급설비들을 유기적으로 연계하는 기술이 필요하게 된다. 이러한 기술적 해결책중 하나로 열에너지 네트워크 기술이 주목받고 있다.<sup>(2)</sup> 열에너지 네트워크 기술은 적용하고자 하는 커뮤니티에 존재하는 여러 열원 및 수요처를 상호 유기적으로 연결하고 통합 운영하여, 에너지 생산과 소비의 시간적, 공간적 불일치(mismatching)를 해소하고, 미활용에너지를 적극 이용함으로써 열에너지 효율 향상을 꾀하는 기술이다.

열에너지 네트워크 기술은 유럽을 중심으로 개발 및 실증이 활발하게 이루어지고 있다. 유럽연합은 도시 지역을 중심으로 지역난방을 장려하고, 교외 지역에서는 재생 가능한 열에너지 사용을 권고하는 등 열에너지 네트워크 기술을 보급 확대해 나가는 계획을 가지고 열에너지 로드맵<sup>(3)</sup>을 발표하였다. 또한 50~70°C의 온수로 지역난방을 하는 4세대 집단에너지(LTDH, low temperature district heating)<sup>(4)</sup>를 실증하면서, 생산온도가 낮아 활용하지 못하던 신재생에너지원들을 네트워크에 연계하는 기술을 연구하고 있다. 예를 들어 핀란드 헬싱키의 경우, 도시 전역에 1,350 km에 달하는 열 배관망을 구축하고 대규모 열병합발전소에서 대부분의 열에너지를 공급하며 히트펌프와 축열조 등을 활용하는 열에너지 네트워크를 구성해 운영 중이다. 덴마크의 경우, 코펜하겐과 트라이앵글 지역에 9개 지방자치단체가 설립한 공기업이 161 km의 광역망을 구축 및 운영하고 있으며, Sonderby와 Lystrup 지역에서는 2000년대 후반부터 LTDH 시스템을 실증하고 있다.

우리나라의 경우, 한국지역난방공사를 중심으로 외곽 지역의 미활용에너지를 집단에너지 사업자에게 공급한다는 취지로 수도권 그린히트 사업에 대한 연구를 진행하였다. 그렇지만 그 연구 결과 중, 열공급량과 열수요 값에 대한 신뢰성 논란이 일어났다.<sup>(5)</sup> 이는 최적의 열에너지 네트워크를 구성하기 위해서는 기술을 적용하고자 하는 커뮤니티에서 생산되고 소비되는 에너지를 정확히 파악하는 것이 중요함을 시사하고 있다. 따라서 본 연구에서는 열에너지 네트워크 기술을 적용하고자 하는 커뮤니티의 실측 데이터를 확보하여 열에너지 공급과 수요패턴을 분석한 후, 이를 기반으로 열에너지 네트워크 구성안을 제시하고 그 구성안의 에너지 절감효과를 살펴보았다.

## 2. 에너지원 분석을 통한 방안도출

### 2.1 설비 현황 및 관련 데이터 확보

다양한 열원과 수요처가 존재하는 대전 소재의 연구원을 열에너지 네트워크 기술 적용 커뮤니티로 선정하고, 해당 커뮤니티에 존재하는 에너지원들에 대한 분석을 선행하였다. 열원설비들의 용량과 연료 종류, 작동 조건 및 특성을 각 건물별로 조사하여 파악하였다. 현재 해당 커뮤니티의 열원설비는 Table 1에 나타난 바와 같이 흡수식 냉온수기(ACH), 압축식 히트펌프(EHP), 지열히트펌프(GSHP) 등이 존재한다. 그 중 가장 큰 용량의

Table 1 State of heating system in KIER

Building no.	Equipment	unit	Total heating capacity[kW]
E1	EHP	6	603
E3	Flue tube-smoke boiler	1	559
N1	GSHP	2	210
N2	GSHP	2	210
N3	EHP	3	36
	GSHP	2	208
N4	Absorption chiller/heater	1	353
	GSHP	1	140
W1	EHP	8	735
	GSHP	2	177
W2	Absorption chiller/heater	2	4,924

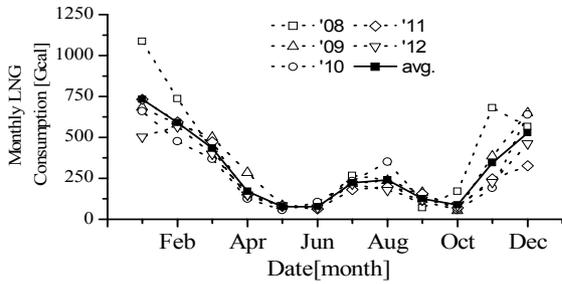


Fig. 1 Monthly LNG consumption of KIER.

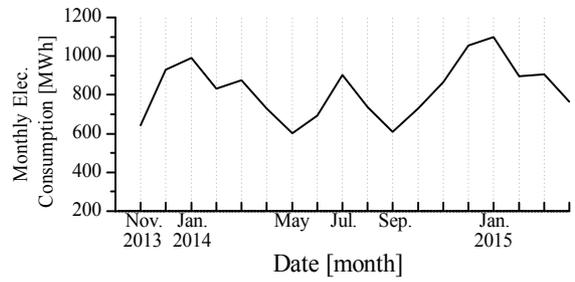


Fig. 2 Monthly electricity consumption of KIER.

단일설비는 중앙냉난방 목적으로 운영중인 흡수식 냉온수기이다. 이 흡수식 냉온수기는 해당 커뮤니티의 중심부에 위치한 설비동(W2, heat distribute center)에 700 RT급 2기가 위치하고 있으며, LNG를 연료로 가동한다. 흡수식 냉온수기에서 생산된 온수 혹은 냉수는 각 건물들(E1, N1, N2, N3, W1)과 연결되어 있는 수배관으로 중앙공급하고 있다. 나머지 건물들(E3, N4)은 난방설비를 자체 운용하였다.

설비들의 특성을 파악하기 위하여 각 설비에 부착되어 있던 센서들의 아날로그 데이터들을 통합관리 할 필요성이 대두되어, EMS(energy management system)를 구축하고 각 센서들을 디지털 신호로 변환 및 통신하여 통합DB를 만들었다. 또한 웹기반 인터페이스를 개발하여 DB에 축적된 데이터들을 사용자들이 필요에 따라 열람 및 파일형태로 저장이 가능하도록 하였다.

해당 커뮤니티의 월별 가스사용량을 나타낸 Fig. 1에서 알 수 있듯 해당 커뮤니티의 겨울철 LNG 소비가 많았다. 이는 해당 커뮤니티의 열원설비가 LNG를 소비하여 난방부하를 감당하고 있음을 알 수 있다. 한편, 전기에너지 소비량은 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 겨울철 난방기간 동안 첨두부하가 발생하는 것으로 나타났다. 상기 해당 사이트의 전력 및 가스 소비 데이터를 통해 겨울철 난방부하를 흡수식 냉온수기로 모두 감당하지 못하고 EHP나 전열설비를 추가 활용하여, 겨울철 전력첨두부하를 발생하는 것으로 보였다.

겨울철 첨두부하 전력단가는 봄·가을철 전력단가보다 최대 3배 정도 고가인 점과 전력용량 증설 비용 등 겨울철에 발생하는 첨두부하를 저감할 필요성이 대두되었다. 이를 위해 전열기기 사용을 억제하거나 전기 에너지가 아닌 다른 연료로 가동하는 열원설비로 대체 활용하는 열에너지 네트워크 방안을 지향하였다.

## 2.2 미활용에너지 부존량 분석

해당 사이트에는 연구 목적으로 발전용량 2 MW<sub>e</sub>급 석탄화력발전소가 독립적으로 운용 중이며, 석탄보일러 용량은 10 MW<sub>th</sub>급으로 다른 열원설비에 비하여 월등히 크다. 따라서 우선적으로 석탄화력발전소에 대해 미활용 에너지 부존량을 산출하였다. 이를 위해 석탄화력발전소 제어를 목적으로 기 설치된 센서들의 값을 EMS로 전송할 수 있도록 통신 작업을 수행하였으며, 터빈 입출구 상태값, 발전량, 복수온도 등 데이터들을 DB에 저장하였고 이를 이용하여 미활용에너지 부존량을 산출하였다. 해당 석탄화력발전소는 최대연속정격출력(MCR)에 따라 발전량을 조절하며, 이에 따라 발전 복수열량도 상이하였다. 겨울철 석탄화력발전소 복수 온도(냉각탑 유입수 온도)는 35℃에서 40℃에 분포하였다. 또한 발전 복수열량은 MCR을 100%로 가동할 경우 6,392 kW<sub>th</sub>, 60%일 경우 3,835 kW<sub>th</sub>가 발생되며, 냉각탑을 통해 대기로 방출되고 있었다. 이는 산술적으로 해당 사이트에 운영 중인 중앙난방설비의 1기 용량보다 많은 열량이다.

## 2.3 열에너지 네트워크 방안 도출

앞서 기술한 분석들을 종합하여, 해당 커뮤니티의 열에너지 네트워크 설계 시 요구되는 조건 두 가지를 도출하였다. 첫째, 전력 소비량을 증가시키지 않고 난방열량을 생산할 수 있어야 한다는 점과 둘째, 미활용에너지를 적극 활용한다는 점이다. 상기 두 가지 조건 중 첫 번째 조건을 만족할 수 있도록, 전력 소비량을 더욱 증가시킬 수 있는 전기히트펌프(EHP)나 전열(電熱)장비는 고려 대상에서 제외하였고, LNG를 연료로 구동하는 설비를 지향하였다. 이러한 난방설비로는 보일러, 흡수식 냉온수기, 1중 흡수식 히트펌프와 2중 흡수식 히트펌프(heat

transformer)가 있으며, 미활용에너지를 활용한다는 두 번째 조건을 만족할 수 있는 설비는 1종 흡수식 히트펌프와 2종 흡수식 히트펌프이다. 그 중 2종 흡수식 히트펌프는 1종에 비해 성적계수가 낮을뿐더러 요구되는 열원온도(약 60°C 이상)가 석탄화력발전소의 배열 온도(약 30~40°C)보다 높기 때문에 적용하기 어려울 것으로 보였다.

따라서 Fig. 3과 같이 석탄화력발전소의 배열을 활용하면서 LNG를 연료로 난방열을 생산할 수 있도록 1종 흡수식 히트펌프를 도입한 구성안을 도출하였다. 발전소의 폐열이 부족하거나 난방부하가 클 경우, 기존 흡수식 냉온수기를 병렬 구동할 수 있도록 구성하였다. 흡수식 히트펌프의 구동열원을 Fig. 3의 점선으로 표기한 것처럼 발전소의 터빈 중압스팀을 추가해 공급하는 방법도 있으나, 터빈에 공급되는 증기의 유량이 감소분에 비해 전기 출력량은 더 크게 저감되는 단점<sup>(6)</sup>이 있어, 본 연구에서는 흡수식 히트펌프의 구동열원을 보일러에서 흡수식 히트펌프의 재생기로 공급하는 시스템을 구성하였다.

기존 흡수식 냉온수기는 LNG를 직접 연소하여 난방열을 생산하기 때문에 난방효율이 외부 인자들에 의해 크게 변화하지 않는 반면, 흡수식 히트펌프의 난방효율은 열에너지 네트워크에서 서로 연계된 설비들의 운전 패턴과 특성들이 변함에 따라 변동할 수 있으며, 소비하는 연료량도 상이할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실측한 데이터들을 기반으로, 다양한 열원과 부하 조건에 따른 흡수식 히트펌프의 LNG 사용량을 계산하여 알고 있는 흡수식 냉온수기의 LNG 사용량과 비교를 통하여 에너지 저감효과를 보고자 한다.

### 3. 시스템 모델링 및 시뮬레이션

#### 3.1 시스템 개요

LNG를 연소하여 난방온수를 직접 가열하는 흡수식 냉온수기와 달리, 제1종 흡수식 히트펌프는 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 중저온의 미활용에너지를 회수하여 온수를 생산하는 설비이다. 미활용에너지를 활용하는 흡수식 히트펌프의 연구는 시뮬레이션 연구를 중심으로 진행되었다. Baik et al.<sup>(7)</sup>은 50°C의 염색폐수열원을 이용하여 염색공정에 재이용 가능하도록 90°C 이상의 공정수를 생산하는 증기압축식/흡수식 하이브리드 히트펌프 시스템을 시뮬레이션을 진행하였으며, Lee et al.<sup>(8)</sup>은 연간 안정된 수온을 갖는 하수처리수를 이용하여 냉난방을 하는 1중효용과 2중효용을 조합한 2단 사이클에 대한 시뮬레이션을 수행한 바 있다. Kim<sup>(9)</sup>은 17°C의 저온 하수열을 회수하여 50°C의 온수를 70°C로 승온시키는 2중효용 2단 흡수식 히트펌프를 모델링하였다. Yun<sup>(10)</sup>은 선박 엔진의 폐열원을 활용하여 전력을 사용하지 않고 난방을 할 수 있는 냉각시스템 성능을 분석하였다. 문헌연구를 참고해, 중저온의 미활용에너지를 회수하는 1종 흡수식 히트펌프를 모델링하였다.

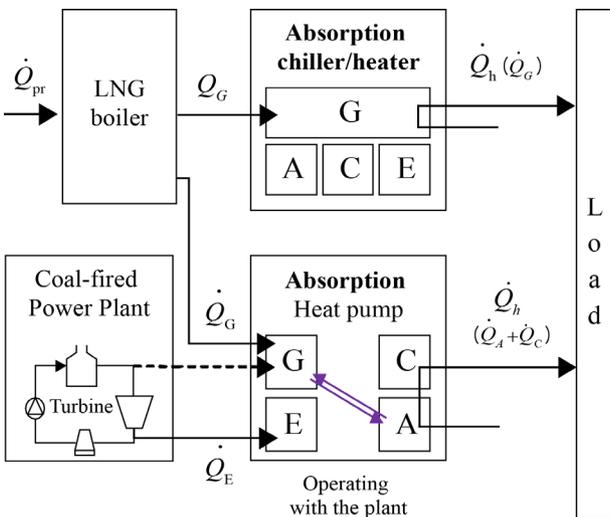


Fig. 3 Thermal energy flow diagrams of an absorption chiller/heater and an absorption heat pump for heating.

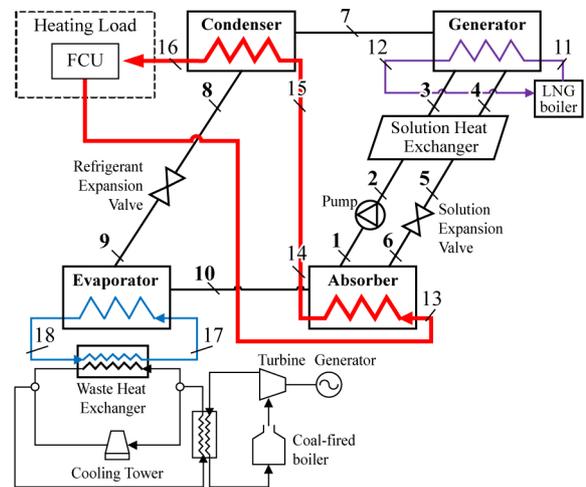


Fig. 4 The schematic diagram of the absorption heat-pump system which is recovering the waste heat from the coal-fired power plant as a heat source.

### 3.2 시스템 모델링

해당 사이트에 존재하는 중온(약 35~40℃)의 미활용에너지를 회수하여 60℃ 정도의 난방용 온수를 생산하는 것이 목적으로, 제1종 물-리튬브로마이드(H<sub>2</sub>O-LiBr) 흡수식 히트펌프로 선정하고 기본적인 일중효용 시스템을 해석모델로 구축하였다. 제1종 흡수식 히트펌프의 주요 요소는 흡수기, 발생기, 응축기, 증발기, 중간열교환기(SHX, Solution Heat Exchanger)와 같은 열교환기들로서, 석탄화력발전의 복수열을 증발열원으로 활용하는 시스템의 개략도를 Fig. 4와 같이 나타내었다.

본 연구에 고려한 흡수식 히트펌프의 난방효과는 Fig. 4의 굵은 선으로 표현한 것과 같이 냉각수(coolant)가 흡수기(absorber)와 응축기를 거치면서 냉매증기 및 혼합용액(solution)과 열교환을 통해 얻는다. 흡수식 히트펌프의 사이클은 다음과 같이 구성된다. 흡수기에서 냉매(H<sub>2</sub>O)가 흡수제(LiBr)에 흡수되어 농용액(strong solution)이 형성(10-1 과정, 6-1 과정)되면서 발생하는 흡수열은 냉각수와 열교환(13-14 과정)하여 냉각수의 온도를 상승시킨다. 온도가 상승한 냉각수는 응축기로 공급한다. 흡수기에서 농용액은 냉각수와 열교환 후, 펌프를 통해 승압(1-2 과정)된 후 중간열교환기를 거쳐 재생기로 향한다. 재생기에서는 외부열원을 공급받아 냉매는 증기형태로 응축기로 향하고(3-7 과정), 흡수제는 희용액(weak solution)이 되어(3-4 과정) 중간열교환기에서 농용액과 열교환(4-5 과정)을 한 후, 용액 팽창장치를 통해 감압(5-6 과정)된다. 재생기에서 증기상태로 이송된 냉매는 응축기에서 냉각수와 열교환(7-8 과정)을 통해 응축되어 포화액 상태로 된다. 그 과정에서 냉각수는 또 다시 온도가 상승(15-16 과정)하게 되어, 흡수식 히트펌프가 목표로 하는 온수가 생산된다. 액상태의 냉매는 팽창장치를 거치면서 단열팽창을 하고, 증발기로 향한다. 증발기에는 냉매는 석탄화력발전소의 복수열을 회수하여서 증발(9-10 과정)되어 포화증기 형태로 다시 흡수기로 유입됨으로써 흡수식 히트펌프의 사이클이 형성된다.

시스템 시뮬레이션을 위하여 문헌연구<sup>(11-15)</sup>를 통하여, 시스템을 이루는 열교환기의 UA 값과 유량 값과 같은 입력 조건들 Table 2와 같이 선정하였으며, 질량보존식, 에너지보존식, 물질보존식(species balance)을 적용하여 각 구성요소를 모델링하였다. 시뮬레이션의 단순화를 위하여 다음의 가정을 적용하였다.

- 시스템의 각 요소기에서 열역학적 평형(steady)상태이다.
- 시스템의 각 요소기 및 배관에서 열손실 및 압력손실은 무시한다.
- 팽창장치의 전후 과정은 등엔탈피 과정(isenthalpic process)이다.
- 펌프의 전후 과정은 등엔트로피 과정(isentropic process)이다.
- 응축기 출구의 냉매는 건도가 0인 포화액(saturated liquid;  $x = 0$ )이고, 증발기 출구의 냉매는 건도가 1인 포화증기(saturated vapor;  $x = 1$ )이다.
- 흡수제는 응축기와 증발기로 유입되지 않는다.
- 시스템 위치에 따른 냉매와 흡수제의 운동에너지와 위치에너지의 변화는 무시한다.

열교환기의 열전달계산 시 널리 사용되는 LMTD(log mean temperature difference) 방법은 열교환기를 통과하는 고온과 저온 유체 사이의 지수적인 감소를 반영한 평균 온도차와 정수화된 열전달계수 그리고 전열면적을 곱함으로써 열전달량을 용이하게 산출할 수 있다는 장점이 있다. 실제 상변화가 일어나는 응축기와 증발기의

Table 2 Input parameters

Item	Value[kW/℃]	Item	Value[kg/s]	Item	Value[℃]
$UA_A$	305.0	$\dot{m}_A$	40.5	$T_{A,in} (T_{13})$	30.0
$UA_G$	230.0	$\dot{m}_G$	20.0	$T_{G,in} (T_{11})$	130.0
$UA_C$	138.3	$\dot{m}_C$	40.5	$T_{C,in} (T_{15})$	$= T_{A,out}$
$UA_E$	270.0	$\dot{m}_E$	34.7	$T_{E,in} (T_{17})$	38.0
$UA_{SHX}$	0.1	$\dot{m}_1$	4.5		

Table 3 Simulation results of the absorption heat pump cycle shown in Fig. 4.

$i$	$T_i$ [°C]	$P_i$ [kPa]	$h_i$ [kg/s]	$m_i$ [kg/s]	$\zeta_i$ [%]
1	37.1	2.53	74.7	*4.5000	44.68
2	37.1	30.06	74.7	4.5000	44.68
3	37.8	30.06	76.3	4.5000	44.68
4	109.3	30.06	242.7	3.5887	56.03
5	108.3	30.06	240.7	3.5887	56.03
6	58.8	2.53	240.7	3.5887	56.03
7	89.5	30.06	2664.2	0.9113	
8	69.2	30.06	289.5	0.9113	
9	21.3	2.53	289.5	0.9113	
10	21.3	2.53	2539.5	0.9113	
11	*130.0		546.4	*20.0	
12	96.8		405.7		
13	*30.0		125.8	*40.5	
14	46.8		195.9		
15	46.8		195.9	*40.5	
16	59.6		249.4		
17	*38.0		159.2	*34.7	
18	23.9		100.1		

경우, 열교환기 내부 위치에 따라 온도차나 열전달계수가 달라지므로, 이를 고려하여 응축기와 증발기를 등엔탈피 구간으로 나눠서 계산하였다. 모델링에서 초기값 설정이 중요하므로 참고문헌<sup>(12)</sup>의 설계조건들을 참조하여, Table 1에 나타난 바와 같이 모델링의 입력 변수로 설정하였다. 주어진 입력 변수에 따라, 흡수식 히트펌프의 고온과 저압, 회용액과 농용액의 LiBr 농도가 종속적으로 계산되며, 각 열교환기의 열량과 토출온도 그리고 COP가 산출된다.

계산 과정은 다음과 같다. 용액과 냉매의 유량, 흡수제의 농도, 고압과 저압 그리고 응축기 냉각수 출구온도 및 증발기 냉수 출구온도를 적정한 값으로 초기 가정을 한다. 그 후 초기 조건하에 주어진 응축기 냉각수 입구 온도와 냉각수 유량을 통해 응축열량을 구하며, 주어진 냉수 입구온도와 냉수 유량을 통해 증발열량을 산출한다. 응축기와 증발기에서 상변화가 일어나는 것을 고려하여, 등 엔탈피 간격으로 나누어 각 부분의 LMTD와 UA를 계산한 후 합산한다. 모델링에서 산출된 UA와 주어진 UA 값을 비교하고, 오차범위 내에 들어올 때까지 Newton-Raphson 방법<sup>(16)</sup>으로 가정 값들을 재가정하고, 위의 계산을 반복한다. 이를 통해 흡수식 히트펌프의 저압, 고압, 농용액과 회용액의 LiBr 농도와 각 열교환기의 열교환량이 결정되고, 식(1)에 의해 흡수식 히트펌프의 성능계수(COP)가 산출된다.

$$COP = \frac{\dot{Q}_A + \dot{Q}_C}{\dot{Q}_G} \quad (1)$$

이 해석모델을 검증하고자, 참고문헌<sup>(12)</sup>의 설계조건들을 해당 모델에 동일하게 적용하고 계산한 석탄화력 발전소 복수열원의 온도( $T_{E,in}$ )에 따른 흡수식 히트펌프의 COP와 생산열량을 Fig. 5와 같이 참고문헌<sup>(12)</sup>의 결과와 비교하여 나타내었다. Table 3에 나타난 특정 온도 조건( $T_{E,in} = 38^\circ\text{C}$ )에서 해당 모델의 계산한 상태량과 참고문헌의 값과 비교한 결과, 냉수, 냉각수, 온수 출구온도가 모두 오차율 3% 이내에서 일치하고 COP는 0.35% 오차율을 보였다.

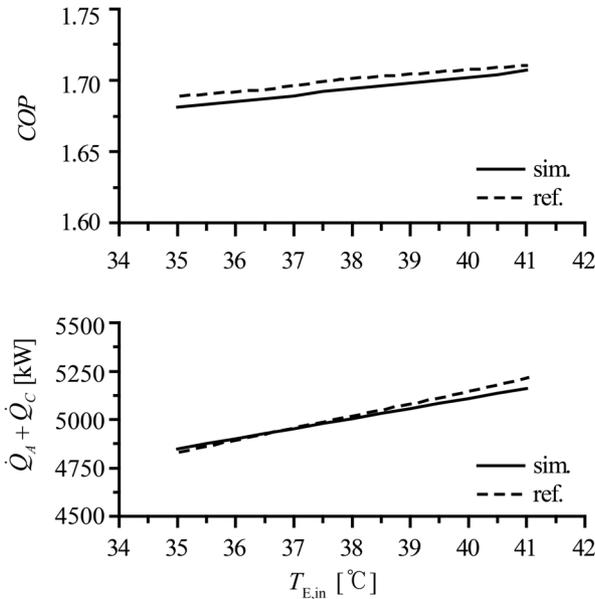


Fig. 5 Comparison of the COP and heating capacity of simulation results and reference data according change in the  $T_{E,in}$ .

### 3.3 시뮬레이션 조건

앞서 개발한 흡수식 히트펌프의 모델을 활용한 시뮬레이션에 적용한 열원과 부하 조건은 다음과 같다. 흡수식 히트펌프 열원은 석탄화력발전소의 배열을 회수하게 되므로, Fig. 6과 같이 실측한 석탄화력발전소의 복수 온도 데이터 중 Fig. 7과 같이 일별로 나눠서 사용하였다. 겨울철 석탄화력발전소 냉각탑 입구온도는 시간에 따라 변동이 있으나, 35~40°C 범위 내에서 운전되었다. 한편 부하 조건은 겨울철 흡수식 냉온수기가 생산한 난방 열량과 동일하게 흡수식 히트펌프 모델이 생산한다는 조건을 부여하고, 2016년 11월 21일부터 25일까지의 5일간 부하 조건을 선정하였다. 겨울철 흡수식 냉온수기의 생산열량은 급수 및 환수 헤더에 온도센서와 초음파 유량계를 설치하여 Fig. 8과 같이 계측한 온도와 유량으로 산출하였으며, 이 때 소비한 LNG는 운전 시작과 종료 시점에 측정하여 일일 누적값으로 계측하였다. 다시 말해, 실측 데이터를 기반으로 앞서 개발한 흡수식 히트펌프의 모델에 적용하는 열원과 부하 패턴은 각각 5개씩 선정하고, Fig. 9에 나타내었다. 열원은 시간에 따라 큰 변화가 없는데 반해 부하는 오전 7~9시에 최대치가 발생하고 시간이 지나면서 줄어드는 패턴을 보였다. 이는 저녁시간 동안 차가워진 공간과 순환수를 승온시키기 위해 연속운전을 하다가, 공급수가 설정온도(50°C) 근처에 다다르면 온오프 제어에 의해 설비의 가동 유무가 결정되기 때문이다.

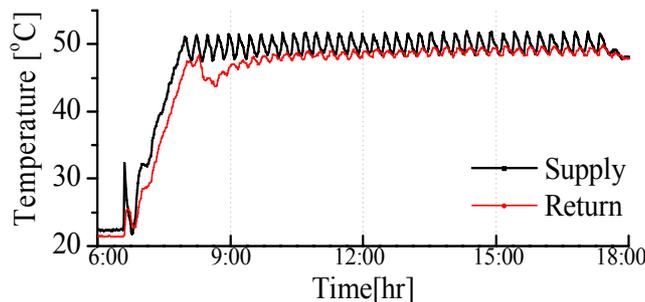


Fig. 8 Supply and return water temperature of the absorption chiller/heater on Nov. 21, 2016.

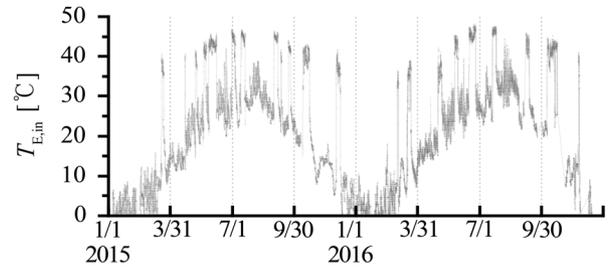


Fig. 6 The water temperature of the cooling tower inlet of the coal-fired power plant during recent 2 years.

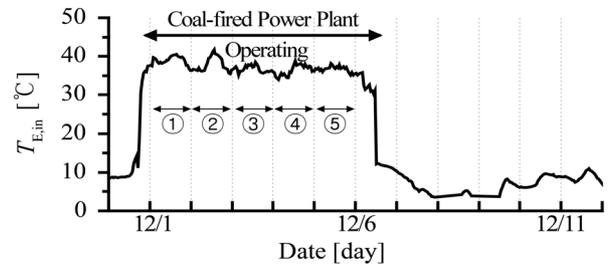


Fig. 7 The  $T_{E,in}$  during specific days in 2015 winter season.

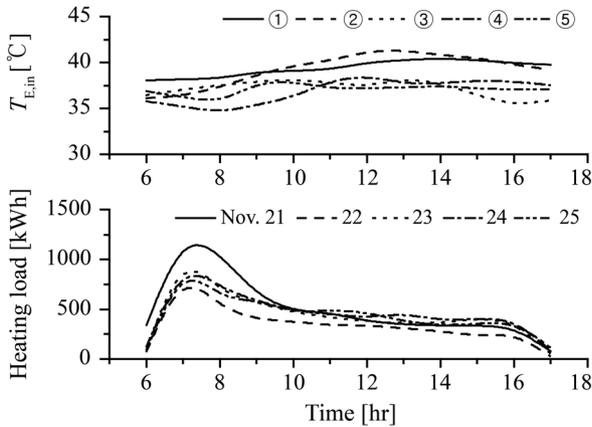


Fig. 9 Heat source temperature of the absorption heat pump and heating loads which are measured according to in working hours.

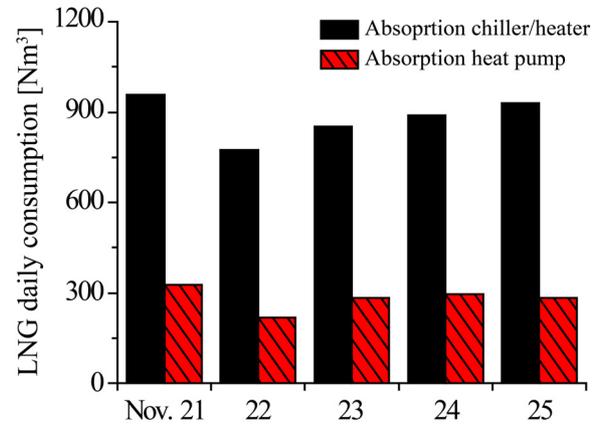


Fig. 10 Comparison LNG consumption between measured the absorption chiller/heater and simulated the absorption heat pump.

Table 4 Comparison of LNG consumption between the absorption chiller/heater and the absorption heat pump

LNG [Nm <sup>3</sup> ]	Absorption heat pump(sim.)						Absorption chiller/heater (mea.)
	Pattern of heat source temperature						
	①	②	③	④	⑤	avg.	
Nov.21	326.54	326.88	327.91	328.82	328.34	326.54	959
Nov.22	217.53	217.67	218.51	219.01	218.76	217.53	774
Nov.23	282.37	282.55	283.68	284.29	283.97	282.37	853
Nov.24	295.38	295.52	296.77	297.38	297.07	295.38	889
Nov.25	282.94	283.07	284.28	284.83	284.55	282.94	930

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

각 열원 및 부하 조건에 따른 흡수식 히트펌프의 정적 시뮬레이션을 통해 LNG 소비량을 계산하여 Table 3에 정리하였다. 예를 들어, 11월 21일 부하패턴에서 흡수식 냉온수기의 일일 LNG 소비량은 959 Nm<sup>3</sup>이며, 동일한 열량을 흡수식 히트펌프가 생산하기 위해서는 열원조건 A에서 326.54 Nm<sup>3</sup>의 LNG가 소비될 것으로 계산되었다. LNG의 저위발열량(LHV) 9,393 kcal/Nm<sup>3</sup>으로 LNG 소비량을 환산하였다. Table 4에서 나타난 바와 같이, 모든 부하 조건에 대하여 열원 조건에 따른 흡수식 히트펌프의 LNG 소비량의 표준 편차가 1 이하로 계산되었다. 이는 열원의 온도가 5°C 범위 내에서 변화하여도 LNG 소비량에 영향은 미비하고 그 원인은 흡수식 히트펌프 모델의 성능이 열원 변화에 따른 성능 변화율이 적기 때문이다. 이러한 이유로 5가지 열원 조건의 평균값을 취하여 그 값을 해당 부하 조건의 흡수식 히트펌프 LNG 소비량으로 보고 실제 흡수식 냉온수기가 소비한 일일 LNG 값과 비교하여 Fig. 10과 같이 나타내었다. 그 결과, 흡수식 냉온수기를 흡수식 히트펌프로 대체하였을 경우, LNG는 65~72% 범위 내에서 절감되는 것으로 산출되었다.

본 연구는 난방부하의 변동에 따른 흡수식 히트펌프의 부분운전은 고려하지 않은 점과 시스템의 운전제어 방법, 열용량, 열손실 등을 고려한 동적 시뮬레이션이 아니라는 점에서 한계를 가진다. 또한 석탄화력발전소 연간 운전율, 냉방운전 등 설비운용 전략과 이에 따른 해석도 추가 연구가 되어야 할 것으로 사료된다.

#### 5. 결 론

본 연구는 열에너지 네트워크 실증 연구에 앞서, 해당 커뮤니티의 설비 현황과 실측 데이터를 통해 해당

커뮤니티의 열에너지 네트워크 설계 시 요구되는 조건 두 가지를 도출하였다. 첫째, 전력 소비량을 증가시키지 않고 난방열량을 생산할 수 있어야 한다는 점과 둘째, 해당 사이트에 풍부하게 존재하는 미활용에너지를 적극 활용한다는 점이다. 상기 두 조건을 만족하기 위하여, 기 운영 중인 흡수식 냉온수기를 제안하는 흡수식 히트펌프로 대체하여 난방열을 중앙공급하는 열에너지 네트워크 방안을 도출하였다. 이 방안의 타당성을 가늠하기 위하여, 흡수식 히트펌프의 수치해석 모델을 개발 및 검증하고, 열원 및 부하 조건에 따른 연료(LNG) 절감율을 정적 시뮬레이션을 통해 계산하였다. 그 결과, 주어진 조건 하에서 LNG 소비량은 65~72% 범위 내에서 절감되는 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호 : 20132010101780).

## References

1. Office for Government Policy Coordination(OPC) of Republic of Korea, 2016, 2030 Climate Change Roadmap for Greenhouse Gas Reduction, p. 15.
2. Korean Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), 2016, Clean Energy Technology Roadmap of Energy R&D Investment Portfolio for the Post Climate Change Agreement, ISBN 979-11-86234-10-5, pp. 36-94.
3. The STRATEGO project, 2015, Low-carbon heating and cooling strategies for Europe-2050 Heat Roadmap Europe.
4. Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., and Mathiesen, B. V., 2014, 4th Generation District Heating(4GDH) : Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems, Energy, Vol. 68, pp. 1-11.
5. Jin, S. J., 2016, Definition and Application of the Concept of Distributed Heat Energy : Focusing on the Green Heat Project, Journal of Environmental Policy and Administration, Vol. 24, No. 3, pp. 131-160.
6. Park, B. C., Lee, S. H., and Kim, T. H., 2014, Analysis on the Performance Test Results of Heat Pump for the Closed Cooling Water Heat Recovery on Combined Thermal Power Plant, Proceeding of The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 304-305.
7. Baik, Y. J., Park, S. Y., Chang, K. C., and Ra, H. S., 2004, Simulation of Compression/Absorption Hybrid Heat Pump System using Industrial Wastewater Heat Source, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 1117-1125.
8. Lee, Y. H., Shin, H. J., and Choi, G. G., 1999, Simulation of a Two-stage Absorption Heat Pump Cycle using Treated Sewage, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 422-430.
9. Kim, N. H., 2015, Simulation of a Double Effect Double Stage Absorption Heat Pump for Usage of a Low Temperature Waste Heat, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 16, No. 11, pp. 7736-7744.
10. Yun, S. K., 2016, Performance analysis of a cooling system with refrigerant in a marine absorption refrigerator, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 40, No. 4, pp. 282-287.
11. Karng, S. W., Kang, B. H., Jeong S., and Lee, C. S., 1996, Computer Simulation of an Absorption Heat Pump for Recovering Low Grade Waste Heat, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 187-197.
12. Kim, G. J., 1996, Application study of Type- I absorption heat pump for recovering industrial waste heat, The Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea, Presentation material, pp. 133-152.

13. Kim, D. S., 2007, Solar Absorption Cooling, Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
14. Anders Holten and Lars Housbak-Jensen, 2013, Development of an Absorption Chiller-Utilizing Waste Heat from an Indirect Methanol Fuel Cell System, Master thesis, Aalborg University, Aalborg, Denmark.
15. Muhumuza, R., 2010, Modeling, Implementation and Simulation of a Single-Effect Absorption Chiller in MERIT, Master thesis, University of Strathclyde, Glasgow, UK.
16. EES(Engineering Equation Solver), F-Charts Software.