Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 27, No. 4 (2015), pp.179-186
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2015.27.4.179

인버터시스템 적용 지역난방 시스템의 2차측 공급수 온도 제어방안에 따른 에너지사용량 실증 비교

Actual Energy Consumption Analysis of Temperature Control Strategies for Secondary Side Hot Water District Heating System with an Inverter

조성환(Sung-Hwan Cho)[1], **홍성기**(Seong-Ki Hong)[2†]
[1]전주대학교 기계자동차공학과, [2]전주대학교 대학원
[1]*Department of Mechanical and Automotive Engineering , Jeonju University, Jeoniu, 560-759, Korea*
[2]*Graduate School, Jeonju University, Jeonju, 560-759, Korea*

(Received September 24, 2013; revision received November 3, 2014; Accepted: January 12, 2015)

Abstract In this study, the actual energy consumption of the secondary side District Heating System (DHS) with different hot water supply temperature control methods is compared. The two methods are Outdoor Temperature Reset Control and Outdoor Temperature Predictive Control. While Outdoor Temperature Reset Control has been widely used for energy savings of the secondary side system, the results show that the Outdoor Temperature Predictive Control method saves more energy. In general, the Outdoor Temperature Predictive Control method lowers the supply temperature of hot water, and it reduces standby losses and increases the overall heat transfer value of heated spaces due to more flow into the space. During actual energy consumption monitoring, the Outdoor Temperature predictive Control method saves about 6.6% of energy when compared to the Outdoor Temperature Reset Control method. Also, it is found that at partial load condition, such as during daytime, the fluctuation of hot water supply temperature with Outdoor Temperature Reset Control is more severe than that with Outdoor Temperature Predictive Control. Thus, it proves that Outdoor Temperature Predictive Control is more stable even at partial load conditions.

Key words District heating system(지역난방 시스템), Outdoor temperature reset control(외기온 보상제어), Outdoor temperature predictive control(외기온 예측제어), Energy savings(에너지 절약)

† Corresponding author, E-mail: *baobab612@naver.com*

기호설명

C_p : 정압비열 [kJ/kg ℃]
$\dot{m}$: 유량 [ℓ/m]
T : 온도 [℃]
$\dot{Q}$: 열전달량 [kW]

하첨자

low : 최소
$high$: 최대
s : 공급측
pre : 예측

1. 서 론

제3차 집단에너지 공급기본 계획[(1)]에 의하면 2013년 경에는 국내 총 주택 수 1,558만호 중 254만호에 달하는 주택에 지역난방을 공급하려는 계획을 가지고 있고, 이는 16.3%에 달한다. 이렇게 공동주택에 냉난방 에너지를 공급하는 지역난방 시스템은 지역난방 공급자와 지역난방 수용자 측으로 나누어지는 데 지역난방 공급자 측면에서의 에너지 절감 방안 및 최적화 시스템에 대해서는 많은 연구가 이루어졌으며 또한 계속적으로 연구가 진행되고 있는 상황이다. 그러나 이에 비해 실제 사용세대 즉 지역난방 수용자 측에서 냉난방 및 급탕 에너지를 절감하고자 하는 연구는 적극적으로 진행되지 않았던 것이 사실이다.

지역난방 시스템 사용 집단에너지의 2차측 열공급 및 에너지 절감을 연구하는 데 있어서 필요한 제어 인자를 함수로 표한하면 아래와 같이 식(1)로 표현할 수 있다.

$$Q = f(mc_p, \triangle T) \tag{1}$$

ⓒ SAREK

where,
Q : 열량
mc_p : 유량
$\triangle T$: 공급온도와 환수온도의 차이

상기의 식(1)에서 에너지 절감을 위해 제어 인자가 미치는 영향에 대해 연구한 사람은 Friedlander와 Cho 등이다. Friedlander et al.[2]은 외기온도와 난방 공급온도 사이에 선형관계가 있음을 착안하여 외기온도에 선형적 역비례로 공급수의 온도를 제어하는 외기온 보상제어(Outdoor Temperature Reset Control, OTRC) 방안을 제안했으며, Cho et al.[3]은 난방 당일의 외기온을 예측하고, 예측된 외기온에 따른 난방부하의 형태를 예측하여 최종적으로 공급온도를 결정하는 제어방법(Outdoor Temperature Predictive Control, OTPC)을 연구하여왔다.

한국지역난방공사를 비롯한 SH공사 등 국내의 지역난방 공급 사업자들은 2차측 열원설비 및 난방제어 방법에 대하여 나름의 관리를 하고 있으며, 이들이 범용적으로 사용하는 방안이 외기온 보상제어 방안이다.

본 연구에서 2차측 열공급의 효율성을 보다 향상시키기 위하여 지역난방 집단에너지 사용 공동주택 실증단지에서 범용적으로 사용되고 있는 공급수 온도 제어방법인 외기온 보상제어 방안과 외기온 예측 방안을 활용하여 2차측 공급수 온도를 각각 제어하였을 때 열부하 패턴, 에너지사용량 및 그 외의 변화에 대해 실증 데이터를 활용하여 비교 분석해 보았다.

이러한 비교 분석을 통하여 인번터시스템으로 온수를 공급하는 실증세대에서 외기온 보상 제어와 외기온 예측제어의 에너지 효율의 차이를 확인하고, 그 이유를 규명하고자 한다.

2. 실증단지 및 실증실험

2.1 실증단지

Fig. 1은 본 연구를 위하여 활용된 공동주택의 전경을 보여주고 있다. 본 실증단지는 서울시 노원구 중계동에 위치하고 있으며, 지하 1층, 지상 15층, 8개동, 568세대의 규모로 준공일이 1993년 7월인 지역난방 사용 아파트이다. 연면적은 95,848.65 ㎡이고, 세대별 평형은 138.6 ㎡이 주를 이루고 있다.

실증단지는 지역난방 열원을 사용한 난방설비, 난방환수를 이용한 예열 급탕설비, 부스터 펌프 급수식 급수설비 및 압축기 부착형 팽창탱크 등의 기계설비를 갖추고 있다. 그리고, 차압에 의해 제어되는 인버터시스템과 난방 및 급탕 설비의 열교환기 2차측 출구 온도 제어로 이루어지는 자동제어시스템을 갖추고 열량을 2차측 수용자 측에 사용용도별로 공급하고 있다. Fig. 2는 실증단지의 난방시스템에 대한 개략도를 보여주고 있다. 지역난방 시스템은 보편적으로 공급관과 환수관 사이에 차압밸브(Differential Pressure Valve, DPV)를 설치하여 공급관과 환수관 사이의 압력차를 어느 정도 일정하게 조절하고, 또한 자동 바이패스(By-Pass) 기능으로 사용하고 있다. 그러나, 본 실증단지는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 차압에 의한 인버터시스템을 사용하고 있는 것이 특징이다. 이는 인버터시스템에 의한 배송압력을 조절하여 공급관과 환수관 사이이의 압력을 어느 정도 일정하게 유지하고, 난방수 수송펌프의 동력을 절감시킬 목적으로 사용하고 있는 시스템이다.

Fig. 1 Apartment complex for experiment.

또한, 본 실증단지에서는 1기의 열교환기에서 4개동의 난방수를 공급하고 있으며, 2기의 열교환기로 아파트 8개동의 난방수를 공급하는 시스템으로 이루어 져 있다. Table 1과 Table 2는 각각의 열교환기와 펌프의 사양을 나타내고 있다.

2.2 실증실험

본 실증단지 실험에서 1차측 공급온도는 약 100℃로 SH 지역난방에서 공급하고 있는 공급온도를 그대로 사용하였으며, 2차측 공급온도는 외기온 보상제어방법과 외기온 예측 제어방법을 병행하여 사용하였다. 본 실험에서 에너지소비형태에 관한 환경조건이 외기온도와 568세대의 사용자의 난방형태 등에 따라 매일 매일 다르기 때문에 두 가지 제어방법의 비교실험을 위한 객관성 확보가 쉽지 않았다. 처음에는 대한민국의 기온이 삼한사온 현상을 띄기 때문에 7일씩 교차제어를 시행하려 하였으나, 실제로 적용하여 실험을 실시한바 동절기(2012년 12월~1213년 2월)의 외기온도의 변화가 삼한사온과는 다른 형태의 기온을 보여, 자료의 객관성 확보가 어렵다고 판단하였다. 결과적으로 본 실증실험에서는 외기온 보상제어방법과 외기온 예측제어방법의 비교 객관성을 위해 1일 교차제어를 실행하였다. 즉 오전 9시를 기준으로 하루는 외기보상제어방법을 다

ⓒ SAREK

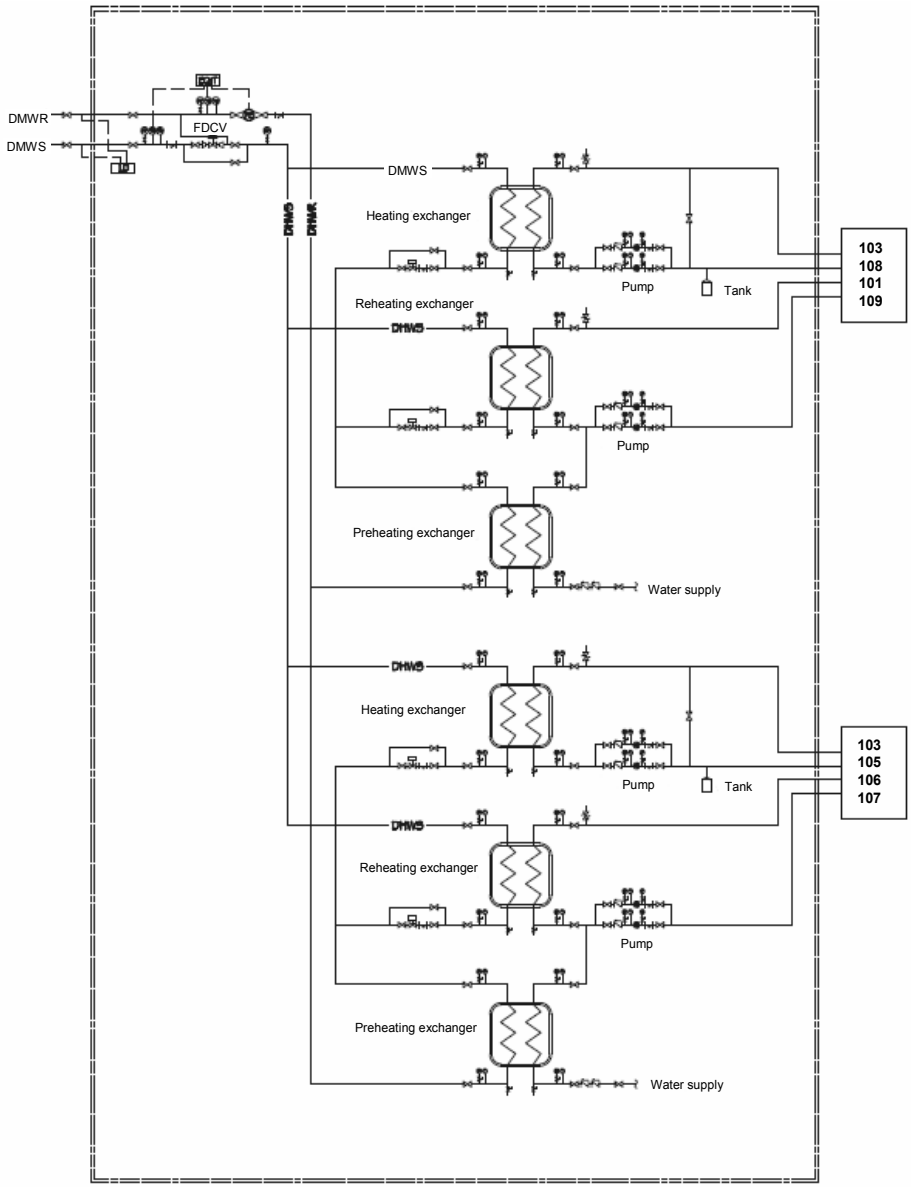

Fig. 2 Layout of District heating system.

Table 1 Summary of heat exchangers

Item	Form	Note (Mcal/h)	Use
HE-1	Plate Type	1,900	Heating
HE-2	Plate Type	1,300	Heating

Table 2 Summary of pumps

Item	Form	Head (M)	Flow Rate (LPM)	Power (kW)
P-1	Volute	25.3	2500	15
P-2	Volute	29.5	1500	11

른 하루는 외기온 예측제어방법을 사용하여 번갈아가며 실험을 계속하였다. 본 연구에 사용된 측정 데이터는 외기온도의 변화가 비교적 상사한 1월 17일에서 2월 26일까지 약 40일간의 데이터이다.

2.2.1 외기온 보상제어(Outdoor Temperature Reset Control, OTRC)

본 실증실험에 지역난방 사용 2차측 난방 공급수 온도 설정을 제어하기 위한 방법으로 사용된 외기온 보상

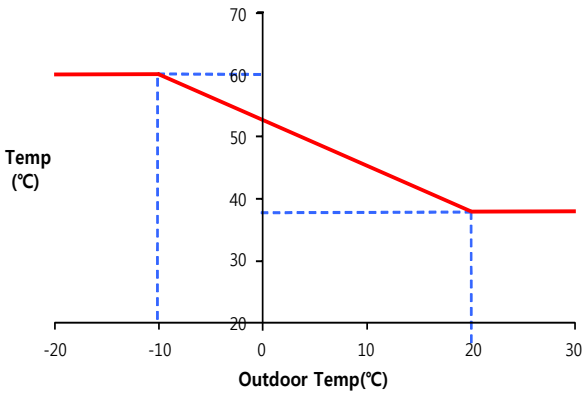

Fig. 3 Outdoor temperature reset control.

제어란 기상청에서 예보된 하루의 시간별 외기온도의 변화에 따라서 실내로 공급되는 난방공급수의 온도를 비례적으로 변화시키는 제어법을 말하며, 실증단지 외부의 백엽상에 설치된 온도계에서 받아진 외기온도측정 값에 따라 난방 공급온도가 비례적으로 변화되도록 하였다.

Fig. 3에서 보이는 바와 같이 X축의 외기온의 변화에 따라 Y축의 난방 공급온도 사이의 역비례 관계를 나타내고 있다. 또한 이 방법은 지역난방 2차측 난방 공급수 온도 설정을 위해 보편적으로 사용되고 있는 제어방법이다.

2.2.2 외기온 예측(Outdoor Tempaerature Predictive Control, OTPC)

난방 공급수 온도설정을 위해 제안된 외기온 예측제어란 일반적으로 실내에 전달되는 열량이 구조체의 축열현상에 의하여 지연되는 시간을 고려한 후 정확하게 실내에 맞는 적정한 열량을 예측된 외기온도에 의해 미리 계산하여 공급함으로써 열손실을 최소화시킬 수 있는 제어방법이 될 것이며, 이러한 외기예측상관 식은 식(2)와 같다.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_s - T_r) \tag{2}$$

where,

T_s : 난방수 공급온도

T_r : 난방수 환수온도

또한, 예보된 기상 데이터의 최고(t_{high}) 및 최저(t_{low}) 외기온도를 이용한 24시간 외기온 예측온도는 식(3)으로부터 도출할 수 있다.

$$at(t \le t_{low}) \;\; T_o = T_v - T_d \cdot \cos\left[\frac{\pi \cdot (t - t_{low})}{24 - (t_{high} - t_{low})}\right]$$
$$at(t_{low} < t \le t_{high}) \;\; T_o = T_v - T_d \cdot \cos\left[\frac{\pi \cdot (t - t_{low})}{(t_{high} - t_{low})}\right]$$
$$at(t_{high} < t) \;\; T_o = T_v - T_d \cdot \cos\left[\frac{\pi \cdot (t - t_{high})}{24 - (t_{high} - t_{low})}\right]$$
$$T_v = (T_{high} + T_{low})/2, \;\; T_d = (T_{high} - T_{low})/2 \tag{3}$$

where,

t : 현재 외기 온도

T_o : 예측 온도

T_{high} : 외기온 최고온도

T_{low} : 외기온 최저온도

식(3)으로부터 외기온도의 변화 기울기를 측정하여 예측공급열량을 도출한다.

$$at\,\theta = \frac{T_2 - T_1}{\Delta t} \tag{4}$$
$$\text{if}\,\theta > 0,\; q_{pre} = -\theta \cdot \eta \cdot q$$
$$\text{if}\,\theta < 0,\; q_{pre} = \theta \cdot \eta \cdot q$$

where,

$\eta =$ Proportional Factor

$\Delta t =$ Time Delay

T_1 : 현재의 외기온도

T_2 : Δt 시간 이후의 외기온도

식(4)로부터 도출된 외기온의 기울기가 0보다 큰 경우 외기온의 상승함을 예측하게 되고 그에 따른 예측공급열량이 도출되며, 0보다 작은 경우 외기온의 하강함을 예측하게 됨으로서 식(4)를 이용할 수 있다. 따라서, 예측된 공급열량을 통해 공급온도를 결정하는 것에 있어 식(5)를 이용하여 새롭게 설정된 공급온도 T_s에 따른 열교환기 1차측 온도제어밸브(Temperature Control Valve, TCV)의 개도를 조절하여 공급수 온도를 조절한다.

$$T_s = T_r + \frac{q_{pre}}{\dot{m} \cdot C_p} \tag{5}$$

where,

q_{pre} : 예측열량

$T_s =$ 공급온도

$T_r =$ 환수온도

ⓒ SAREK

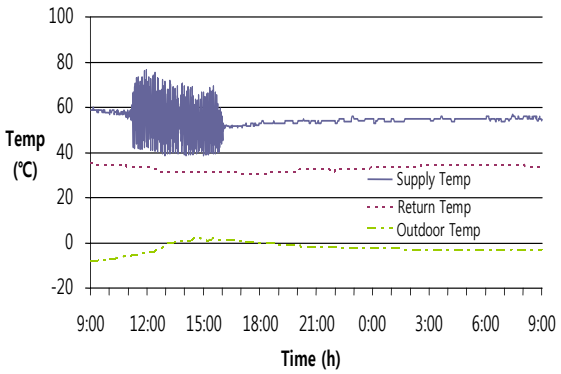

Fig. 4 Supply, return and outdoor temp. variation of OTRC.

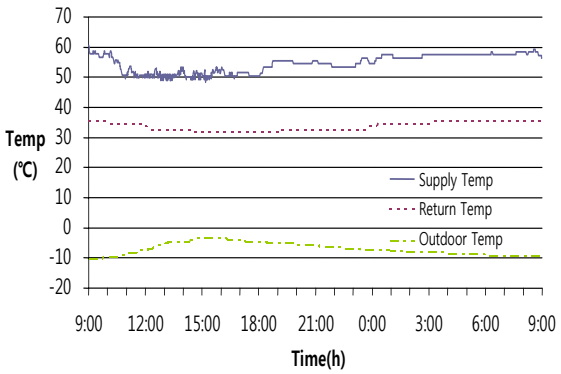

Fig. 5 Supply, return and outdoor temp. variation of OTPC.

3. 실험결과 및 분석

Fig. 4는 현 실증단지에 적용되고 있고, 일반적으로 지역난방 공급수의 온도를 제어하는 외기온 보상제어 시, 하루 동안의 공급온도, 환수온도 및 외기온도의 변화를 그래프로 나타내고 있다. 공급온도의 변화를 보면 부하가 낮은 주간 시간대에 공급온도의 불규칙적인 헌팅(Hunting)이 많아짐을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 제어방법이 유량을 고려하지 않고 공급수의 온도만을 제어하기 때문에 나타나는 현상이다. Fig. 5는 외기온 예측제어방법의 경우를 보여주고 있는데 유량을 고려하는 제어 알고리즘으로 구성되었기 때문에 공급온도의 헌팅이 현격히 줄어드는 모습을 보여주고 있다.

이러한 지역난방 2차측 난방 공급수의 제어방법에 따른 공급수 온도의 헌팅 발생은 일주일 동안 외기온 예측제어(초기 3일)와 외기온 보상제어(잔여 4일)를 실시한 결과를 보여주는 Fig. 6에 더욱 명확한 차이를 보임을 확인할 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 외기온 보상제어와 외기온 예측제

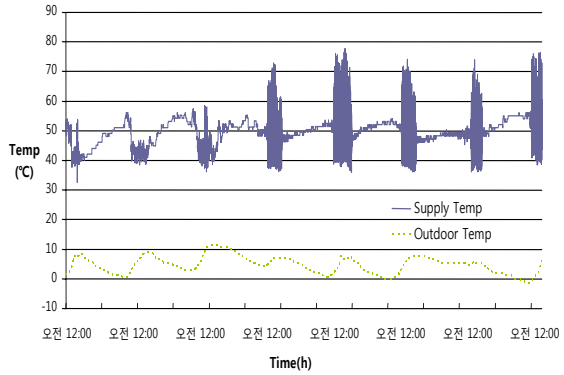

Fig. 6 Supply and outdoor temp. variation of OTPC vs. OTRC.

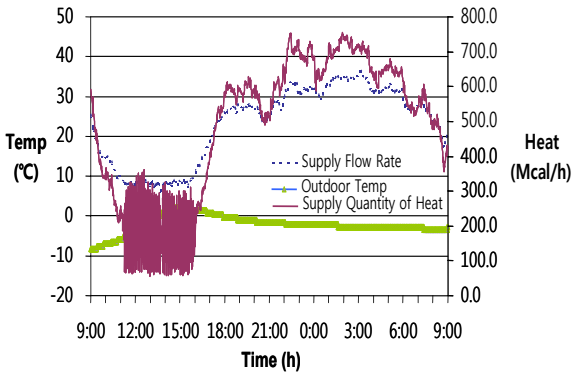

Fig. 7 Daily energy consumption pattern of OTRC.

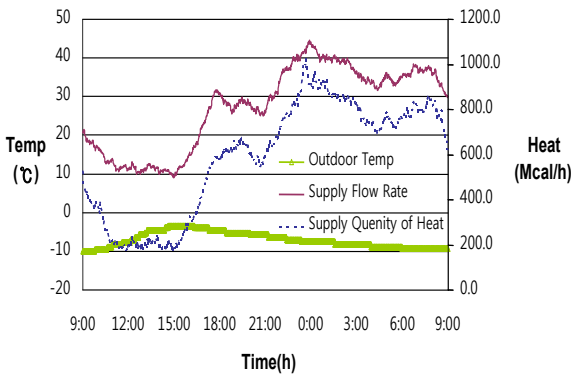

Fig. 8 Daily energy consumption pattern of OTPC.

어에 따라 제어된 하루 동안의 2차측 공급열량을 보여주고 있다. 그림에서 보이듯, 저부하대(주간) 공급수 온도의 불안정한 헌팅 현상이 2차측 공급열량에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

이는 공급수 온도의 헌팅이 2차측 공급 열량의 손실을 발생시킨다는 것이다. 또한 과도한 헌팅현상은 열교환기 및 구동기 등의 기구적 결함을 초래하거나 수명을

단축시킬 수 있다는 것이다.

Fig. 7과 Fig. 8의 비교를 통해 알 수 있는 또 하나의 주지할만한 사실은 세대의 에너지사용이 일반적으로 오후 6시부터 시작되며 오후 9시부터 본격적으로 진행된다는 것이다. 또한 오전 9시부터 에너지사용이 현격히 줄어든다는 것이다. 이러한 부하형태에 대한 파악은 추 후 부하를 예측하여 열공급의 제어를 통한 스마트컨트롤의 기본이 되겠다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 보이듯, 외기온 예측제어의 경우 공급수의 온도가 낮아짐에 따라 유량이 증가한다는 사실이다. 공급수 온도의 저하는 배관 및 Standby 손실을 줄여 에너지를 절감하며 유량의 증가 또한 세대 난방 시스템의 전반적인 열전달 효율을 향상시켜 에너지를 절감한다는 것이다. Fig. 9는 Fig. 6의 상황에서 에너지 사용량을 표현하는 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 외기온 예측제어가 외기온 보상제어보다 적은 에너지를 사용한다는 것을 재확인할 수 있었다.

Fig. 10은 외기온 보상제어와 외기온 예측제어를 실행하였을 때 1차측 중온수에 나타나는 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보이듯 외기온 예측제어의 경우가 중온수 시스템의 차온을 증가시키고 있다. 이는 외기온 예측제어가 보다 효율적으로 1차측 중온수를 활용하고 있다는 것이다. Table 3은 이를 정리한 것으로써, 열교환기 1차측 중온수의 공급온도와 환수온도의 온도차를 비교해보면 약 5.3℃의 차온이 증가됨을 보여주고 있다.

각각의 제어방식에 따른 에너지사용량을 평가하기 위해 본 연구에 사용된 측정 데이터는 외기온도의 변화가 비교적 상사한 1월 17일에서 2월 26일까지 약 40일간에 걸쳐 측정된 데이터이다. Fig. 11과 Fig. 12는 외기온 보상제어와 외기온 예측제어에 의해 공급수의 온도를 제어한 40일간의 온도데이터를 시간당 평균을 구하고, 그 값을 40일 동안의 데이터를 모아 회귀분석(Regression Analysis)으로 정리하였다.[4]

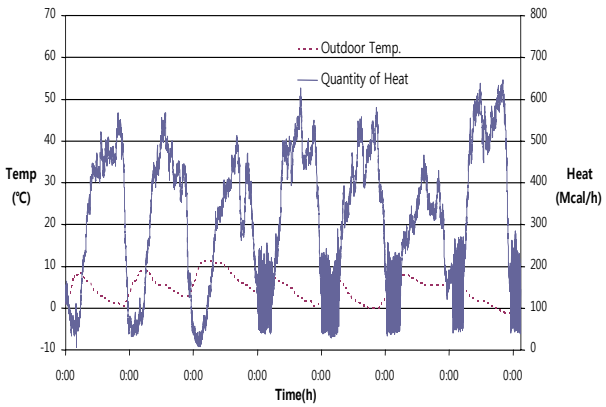

Fig. 9 Energy consumption : OTPC vs. OTRC.

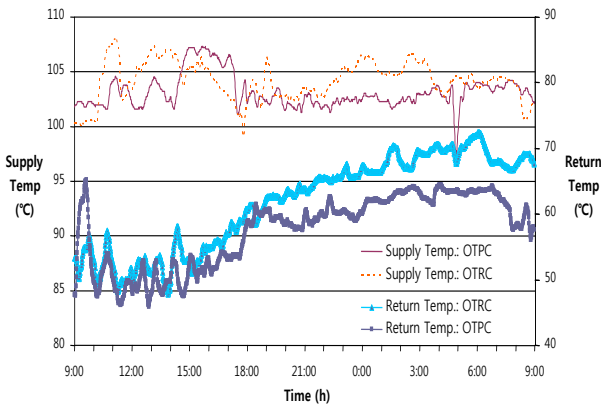

Fig. 10 Supply and return temp. changes : OTPC vs. OTRC.

Table 3 Supply and return temp. changes : OTPC vs. OTRC

Control	Sup. Temp (℃)	Ret. Temp (℃)	Diff. (℃)	Change (℃)
OTRC	103.1	61.8	41.8	5.3
OTPC	104.2	57.6	46.6	

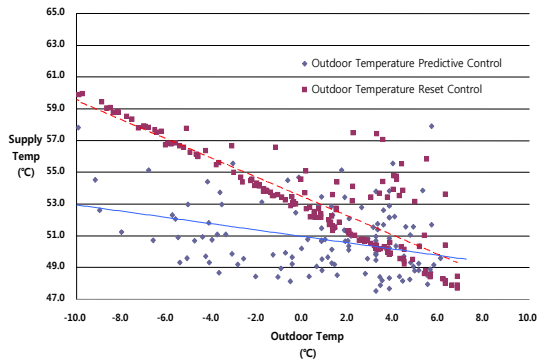

Fig. 11 Supply temp. regression : daytime.

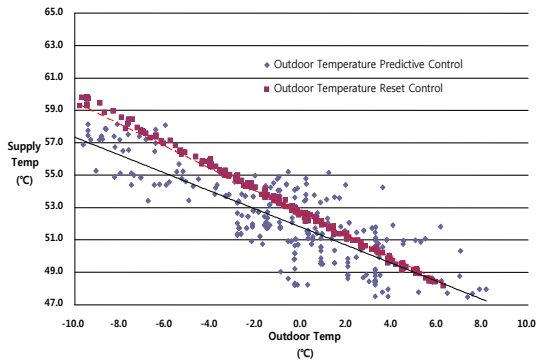

Fig. 12 Supply temp. regression : nighttime.

ⓒ SAREK

Table 4 Energy saving rate

	Control Method	Sup. Temp (℃)	Energy (Mcal/h)	Savings (%)
Daytime	OTRC	53.2	273.6	10
	OTPC	50.8	240.8	
Nighttime	OTRC	53.9	593.8	4
	OTPC	52.5	571.0	

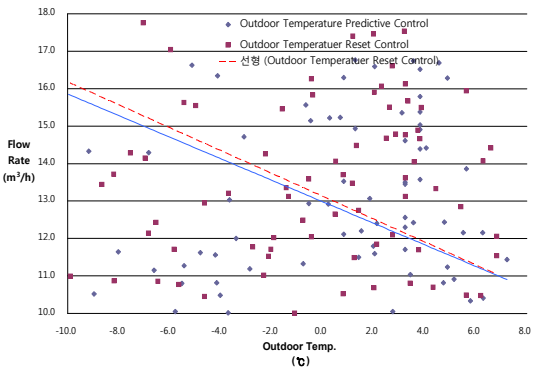

Fig. 13 Supply flow rate. regression : daytime.

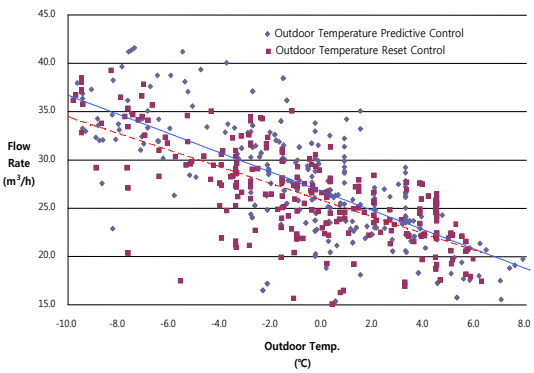

Fig. 14 Supply flow rate. regression : nighttime.

전체적인 추세에서 알 수 있듯이, 각각의 제어방식에 따른 공급온도의 차이는 명확하게 보인다. 또한 그 평균값은 Table 4에 정리되어 있다. Fig. 11과 Fig. 12로 각각 분리 한 것은 외기온도가 낮과 밤에 따라 차이가 존재하고, 공급온도 또한 세대의 필요에 따라 적지 않은 차이를 보이기 때문에 정확한 비교 분석을 위해 구분된 것이다. 또한, 공급수의 온도는 낮과 밤을 비교할 때 더욱 큰 차이를 보인다

Fig. 13과 Fig. 14는 외기온 보상제어와 외기온 예측제어 방법에 따른 측정기간 동안의 2차측 공급유량의 변화를 회귀분석(Regression Analysis)한 결과이다. Fig. 13과 Fig. 14에서 볼 수 있듯이, 주간시간 동안에는 사용유량이 외기온 보상제어가 많으나 야간시간 동안에

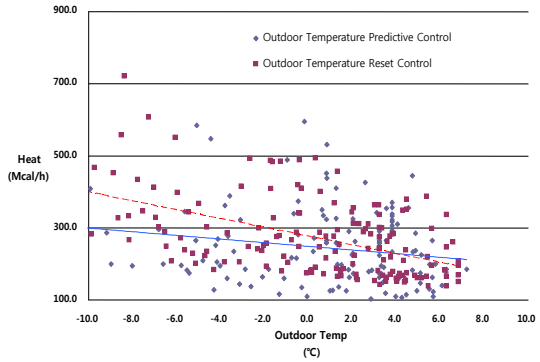

Fig. 15 Energy consumption regression : daytime.

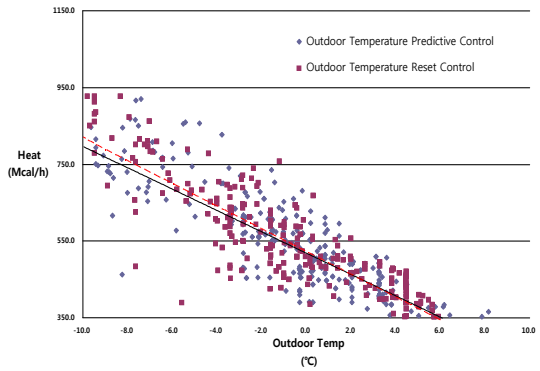

Fig. 16 Energy consumption regression : nighttime.

는 사용유량이 역전되어 외기온 예측제어가 많음을 확인할 수 있다. 이는 주간시간 동안에는 외기온 예측제어로 난방 공급수를 제어했을 때 공급온도 및 사용유량이 적어 결과적으로 에너지 공급을 줄인다는 것을 보여주는 것으로 판단된다. 또, 야간시간 동안에는 외기온 예측제어로 난방 공급수를 제어하였을 때 낮은 공급온도를 보완하여 사용 유량을 증가시킴으로써 충분한 열량을 공급하고 있다는 것을 보여주는 자료라고 판단된다.

Fig. 15과 Fig. 16는 각각의 제어방법에 따른 측정기간 동안의 에너지 사용량을 회귀분석(Regression Analysis)한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 외기온 보상제어의 경우가 측정기간 동안 에너지를 더 많이 사용하였다는 사실을 확인하였고, 특히 주간 시간 동안에 다양한 에너지 손실이 많았음을 확인할 수 있었다.

Table 4는 외기온 보상제어와 외기온 예측제어에 의해 측정기간 중 2차측 공급수 온도, 에너지 사용량 및 에너지절감량을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 주간의 에너지절감량이 야간의 에너지절감량 보다 크다는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 외기온 보상제어의 경우 주간시간대에 필요 이상의 높은 공급수 온도로 인하여 배관시스템의 대기손실(Standby Loss)이 크기

때문이라 사료된다. 따라서, 측정기간 동안의 에너지 절감량은 약 6.6%이었다. 그리고 측정기간 동안의 평균 외기온도는 외기온 보상제어의 경우는 -1.8℃ 그리고 외기온 예측제어의 경우는 -1.9℃이었다.

4. 결 론

본 연구에서는 집단에너지 사용 공동주택에서 일반적으로 사용되고 있는 외기온 보상제어와 외기온 예측제어 방법을 적용하여 실증단지의 2차측 공급수 온도를 제어하였을 때 보이는 에너지사용 패턴, 에너지사용량 및 그 외의 변수에 대해 비교 분석해 보았다. 본 실증실험으로 파악된 결과는 아래와 같다.

1) 전주대학교 에너지기술개발사업단에서 제안한 외기온 예측제어 방법을 적용하였을 때, 2차측 공급온도가 실증기간 동안 낮시간 평균 2.4℃ 낮아지고, 밤시간 평균 1.4℃ 낮아지는 현상이 나타났다.
2) 외기온 예측제어 방법을 적용하여 1월 17일에서 2월 26일까지 약 40일간 실증실험을 진행하였을 때 외기온 예측제어 방법이 외기온 보상제어 방법에 비해 낮시간 평균 32.8 Mcal/h 적게 소모하고, 밤시간 평균 22.8 Mcal/h 적게 소모하는 것으로 나타났다.
3) 따라서, 외기온 예측제어 방법으로 2차측 공급수 온도를 제어하였을 경우, 배관시스템 수송손실[5] 및 대기손실(Standby Loss)[6]의 감소와 유량 증가에 따른 열전달 효율의 상승에 따른 에너지의 효율적 이용에 의해 총 난방 사용에너지의 약 6.6%를 절감할 수 있었다.
4) 인버터시스템으로 온수를 공급하는 본 실증세대에서는 원활한 온수 공급을 위해 인버터 출력을 최저 20～30 Hz 이상에서 상시 작동하도록 하고 있었으며, 이러한 저 유량 일 때 난방수의 온도제어 시 인버터 시스템으로 온도를 제어하여도 헌팅(Hunting)이 발생됨을 확인할 수 있었다. 이때 발생하는 온도의 헌팅을 잡기 위해서 저압에서 작동하는 작은 차압조절밸브를 사용하는 것이 효율적으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20122010100060).

References

1. KEMCO, 2012, 2012 District Energy Use Handbook, Korea Energy Management Corporation.
2. Friedlander, M., 1986, Premium Heating with Radiant Slabs, Solar Age.
3. Cho, S. H., 2012, An Optimal Predictive Control Strategy for Radiant Floor District Heating Systems: Simulation and Experimental Study, SAGE.
4. Choi, S., 1996, Heat Transfer for Commercial Underground Building, The University of Colorado.
5. Jeong, G., 2011, Economic Assessment on the Heat Loss of the Heating Pipes by Using LCC Analysis in Apartment Complex-Focused on the Piping Insulations, Architectural Institute of Korea, Vol. 27, No. 272, pp. 275-282
6. Cho, H., 2013, Exergy analysis and optimization of district heating system considering heat loss in the pipeline.

ⓒ SAREK