

열펌프를 이용한 온돌 난방 시스템[†]
- 열펌프와 석유보일러와의 소요에너지 비교 -

Ondol Heating System Using Heat Pump
- Comparison of Energy Consumption between the Heat Pump and
the Oil Boiler -

김 현 철* 송 현 갑*

H. C. Kim H. K. Song

ABSTRACT

In these days, we are faced to a couple of difficult problems, the one is the unstable price of the energy due to the shortage of fossil fuel resources and the other is the serious environmental pollution from the excessive consumption of fossil fuel.

In order to save the thermal energy for the house heating, in this study the heat pump using the natural thermal energy resources was provided for Ondol heating and the thermal energy consumption of the heat pump was compared to that of oil boiler.

The results could be summarized as follows:

1. In the Ondol room, the temperature difference between the Ondol surface and room air was about 5~10℃ in accordance with the ambient temperature.
2. The Ondol room heating efficiency of the heat pump with compressor of 2PS was the highest at the water flow rate of 200 l/h.
3. The energy saving rate of the heat pump to the oil boiler for heating the Ondol system was 19.3%.
4. The Ondol heating cost of the heat pump was less 20.6% than that of oil boiler when oil price was 478 won/l.

주요용어 (Key Words) : 열펌프(Heat pump), 에너지(Energy), 온돌 시스템(Ondol system), 화석연료(Fossil fuel), 보일러(Boiler)

1. 서 론

농어촌 및 도시 주택을 포함한 건물 냉난방의 소비 에너지는 우리 나라 전 산업에서 소비하고 있는 총 에너지 소비량의 23.8%(송, 1998)을 차지하고 있다.

건축물의 냉난방에 사용되는 에너지의 절약은 건축물, 냉난방기 그리고 운전제어 등의 3요소가 지배한

다. 이중에서 냉난방용 열 공급장치에 대한 관심은 선진외국에서 뿐만 아니라 우리 나라에서도 매우 높다.

현재 난방용 기기로 가장 널리 보급되어 있는 것은 화석에너지(석유, 천연가스 등)를 사용하는 온풍기와 보일러이며, 이들 난방기는 연소과정에서 많은 공해물질들을 배출하여 대기오염을 일으키고 있다. 따라서 화석에너지 절약과 공해방지를 위한 대체에너

[†] 본 연구는 한국과학재단 산학 협력 연구과제 연구비지원으로 수행된 결과의 일부임.

* 충북대학교 농과대학 농업기계공학과

지의 개발은 중요한 연구과제이며, 자연에너지 의존도를 높이는 하나의 방법으로 열펌프가 연구되고 있다.

이 연구에서는 자연에너지를 이용하는 열펌프의 온돌 난방 특성을 실험적으로 분석함과 동시에 석유보일러와 에너지 소비량 및 난방 비용을 비교 분석하므로써 온돌난방용 열펌프의 실용화 촉진을 위한 기초자료를 제공하려 하였다.

2. 이론 분석

가. 열펌프의 응축기에서의 열평형

$$\dot{Q}_{cd} = W_r + \dot{Q}_{eva} = \dot{Q}_w \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{Q}_{cd} = \dot{G}_o h_{lg} (x_{out} - x_{in} = \dot{G}_o (h_2 - h_4)$$

$$\dot{Q}_w = \dot{m} C_{p_w} (T_{w,out} - T_{w,in})$$

where,

\dot{Q}_{cd} : Heat transfer by condenser(kcal/hr)

\dot{G}_o : Refrigerant mass flow rate(kg/hr)

h_{lg} : Enthalpy of refrigerant(liquid→vapor)(kcal/hr)

h_2 : Enthalpy refrigerant compressed by compressor(kcal/hr)

h_4 : Refrigerant enthalpy at condenser outlet (kcal/hr)

x_{in} : Quality of refrigerant at condenser inlet(%)

x_{out} : Quality of refrigerant at condenser outlet(%)

W_r : Real power of heat pump compressor (ps or kW)

\dot{Q}_{eva} : Absorbed heat by evaporator(kcal/hr)

C_{p_w} : Specific heat of water(kcal/kg℃)

\dot{m} : Water mass flow rate(kg/hr)

$T_{w,in}$: Water temperature at condenser inlet(℃)

$T_{w,out}$: Water temperature at condenser outlet(℃)

\dot{Q}_w : Heat gain from condenser(kcal/hr)

나. 열펌프와 석유보일러의 소모 에너지와 소모 비용에 관한 이론 분석

(1) 열펌프와 석유보일러의 에너지 소비량 분석

$$Q_{H,E} = 860 \sum_{i=1}^8 E_{E_i} h_i \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_{OB,E} = 8600 \sum_{i=1}^8 F_{E_i} h_i \dots\dots\dots (3)$$

(2) 열펌프와 석유보일러의 에너지 비용 분석

$$E_{H,cost} = P_E E_E \sum_{i=1}^8 h_i \dots\dots\dots (4)$$

$$E_{OB,cost} = P_{oil} F_E \sum_{i=1}^8 h_i \dots\dots\dots (5)$$

where,

$Q_{H,E}$: Accumulation energy consumption of heat pump for 8 hours during the night (kcal)

$Q_{OB,E}$: Accumulation energy of oil boiler for 8 hours during the night (kcal)

E_E : Power consumption of heat pump (kW)

F_E : Fuel consumption of oil boiler (ℓ)

$E_{H,cost}$: Accumulation energy cost of heat pump for 8 hours during the night (won)

$E_{OB,cost}$: Accumulation energy cost of oil boiler for 8 hours during the night (won)

P_E : Power rate(won/kWh, 390won/kWh in nov. 1998)

P_{oil} : Oil price(won/ℓ, 478won/ℓ in nov. 1998)

h : Ondol heating time(hr)

3. 재료 및 방법

본 실험에서는 온돌난방공간을 구성하고 공기-물 열펌프와 석유보일러의 온돌 난방 특성을 분석함과 동시에 두 난방 시스템에 관한 경제성을 분석하고자 하였다.

3평 크기의 난방공간에서의 난방부하는 이론적(손 등, 1989)으로 2,343.95kcal/h임을 분석 예측하였으며, 이에 맞는 규모의 열펌프와 석유보일러를 설치하였다.

가. 실험 장치

온돌난방시스템은 열펌프 시스템 또는 석유보일러를 사용할 수 있도록 구성하였으며, 그 구성은 그림 1과 같이 하였다. 온돌방의 온도를 측정하기 위하여 각 방마다 18개의 T type thermocouple을 설치하여 hybridrecorder(8H10, San-ei)를 사용하여 5분 간격으로 측정하였다.

가건물의 최대난방부하(충북 청주) 2,343.95kcal/h의 열에너지를 공급하는데 적절한 2마력 규모의 열펌프를 설치하였으며, 석유보일러의 경우에도 난방

열펌프를 이용한 온돌 난방 시스템

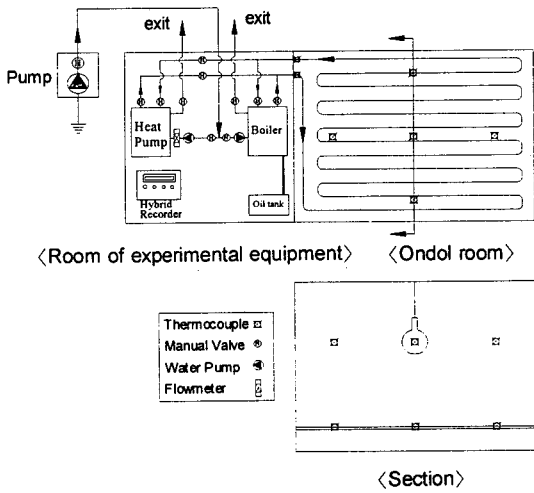


Fig. 1 The circuit of hot water pipe in the Ondol room and the experimental apparatus.

부하를 충분히 감당할 수 있는 9,000kcal/h의 용량을 가진 보일러를 선정하여 설치하였다. 건물의 총면적은 30m²이고, 실험용 방의 면적은 10.4m²(길이 3.7m, 폭 2.8m, 높이 2.2m)이었다.

(1) 열펌프 시스템

이 실험에 사용된 공기 대 물 열펌프시스템에서 압축기는 밀폐형 왕복식 2마력이고, 응축기는 2중관형 물 순환식을 사용하였다. 증발기의 형태는 직렬이며, 태양 복사에너지를 받을 수 있도록 정남향으로 건물의 지붕에 설치하였다. 팽창밸브는 온도 조절식 팽창밸브(TEV, thermostatic expansion valve)를 사용하였다.

측정장치는 열펌프 주요 구성요소의 입·출구 온도, 물 온도, 그리고 외기온도를 측정하기 위하여 10개의 T type thermocouple를 설치하여 기록계(hybrid recorder)를 통하여 자동 기록되게 하였다. 또한 유량계(Keitskl.4, Genauig)를 물 회로 선상에 설치하였으며, 증발기의 입·출구에 sight glass를 설치하여 냉매의 상변화 상태를 관찰할 수 있게 하였다.

이 연구에 사용된 '공기 대 물 열펌프'의 회로도 는 그림 2와 같다.

그리고 냉매는 R₂₂(CHClF₂, monochlorodifluoromethane)를 사용하였으며, 냉매를 주입할 때는 저울

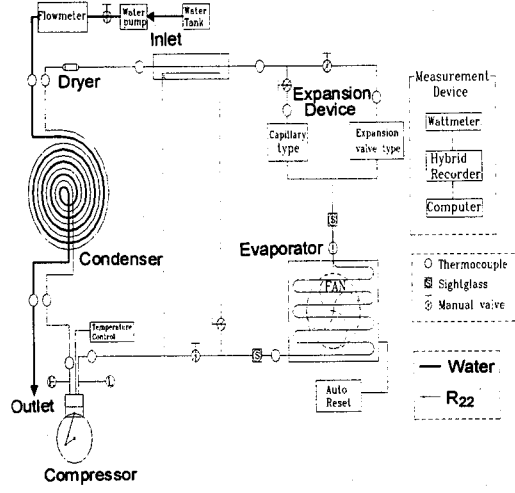


Fig. 2 Heat pump circuit and experimental apparatus.

Table 1 Detail of the tested heat pump system

Items	Compressor Capacity	Mode	Working Fluid
System		Heating Mode (Air to Water)	R ₂₂

을 사용하여 냉매의 주입량을 측정하였다.

이 실험에 사용된 열펌프시스템의 형태와 크기는 표 1과 같다.

(2) 석유보일러

본 실험에 사용된 석유보일러는 시중에 시판되고 있는 가정용 석유보일러(KDB-91SA, 경동보일러)를 사용하였으며, 연료탱크의 용량은 200 l 였다.

이 실험에 사용한 석유보일러의 형태와 규격은 표 2와 같고, 구성도는 그림 3과 같다.

나. 실험방법

그림 2와 같이 구성된 열펌프에서 주요 구성 요소(압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기)의 각 입·출구에 온도센서를 설치하여 각 부위의 온도를 측정하였다. 또한 물의 유량, 냉매의 압력(평형압력, 토출·

Table 2 Specifications of the tested oil boiler

Item	Specifications
Heating power(kcal/h)	9,000
Utilization	Heating and supply hot water
Fuel as energy source	lamp oil, light oil
Heating area(m ²)	59.4
Heat transfer area	0.59
Rate of fuel consumption	2.0
Heating efficiency(%)	88.5 ~ 89.5
Efficiency of hot water supply	87.5 ~ 88.5
Electric source for the oil boiler(V/Hz)	220/60
External dimension (W×L×H, mm)	302×500×764

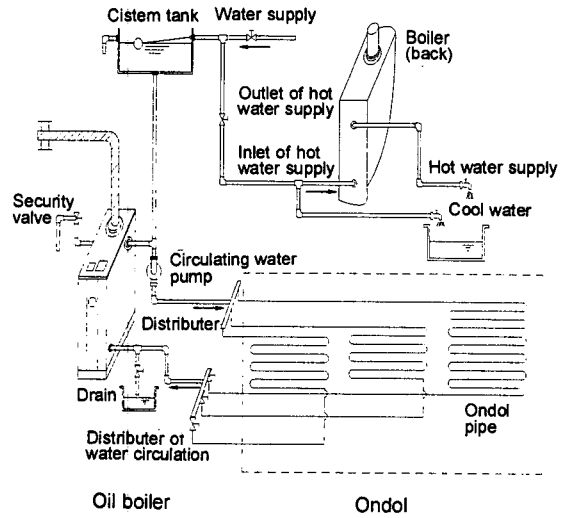


Fig. 3 Circuit of oil boiler and the hot water Ondol pipe.

Table 3 Experimental variables and measuring items for the performance test of heat pump

Variable		Measurement	
Items	Treatment	Items	Range
• Ambient air temperature(℃)	-10~20	• Condenser outlet temperature of heat transfer fluid (℃)	30~70
• Condenser inlet temperature of heat transfer fluid (℃)	8~50	• Suction pressure in the heat pump circuit (kg/cm ²)	1.5~5.0
• Water flow rate in the heat pump circuit (ℓ/h)	100~300	• Discharge pressure in the heat pump circuit (kg/cm ²)	10~26
		• Electric power consumption (W)	1000~2500

Table 4 Experimental variables and measuring items for the test of oil boiler

Variable		Measurement	
Items	Treatment	Items	Range
• Ambient air temperature (℃)	-10~20	• Fuel consumption rate (ℓ/h)	0.5~2
• Inlet water temperature into the boiler (℃)	8~50	• Outlet water temperature from the oil boiler (℃)	30~70
• Water flow rate in the oil boiler circuit (ℓ/h)	100~300		

흡입압력) 그리고 압축기의 소모전력을 외기온과 응축기로 들어가는 냉각수의 유량변화에 따라 측정하여 개방회로에서 열펌프 자체 성능을 분석하였고, 난방열을 공급하는 열펌프에서는 열전달 매체(물)가

폐회로를 형성하므로 열펌프의 성능을 폐회로에서도 측정·분석하였다.

열펌프와 석유보일러의 성능 분석을 위한 측정항목과 이에 대한 측정범위를 표 3과 표 4에 나타내었다.

온돌난방공간의 열적 특성을 분석하기 위하여, 그림 1에서 보는 바와 같이 온돌난방공간에 설치되어 있는 Thermocouple을 통하여 난방 공간의 온도분포를 측정·분석하였고, 열펌프와 석유보일러의 에너지 소비량과 실내온도가 설정온도에 이를 때까지의 에너지 소비량을 측정하기 위하여 열펌프에는 전력계(VIP SYSTEM 3, ELCONTROL)를 설치하였으며, 석유보일러에는 연료탱크에 설치된 연료 게이지를 이용하여 석유보일러의 에너지 소비량을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 열흡수 매체(물)의 입·출구 온도차와 유량이 열펌프의 발열량에 미치는 영향

열흡수 매체(물)의 응축기에서의 입·출구 온도차와 유량이 폐회로에서 열펌프의 발열량에 미치는 영향을 그림 4에 나타내었다.

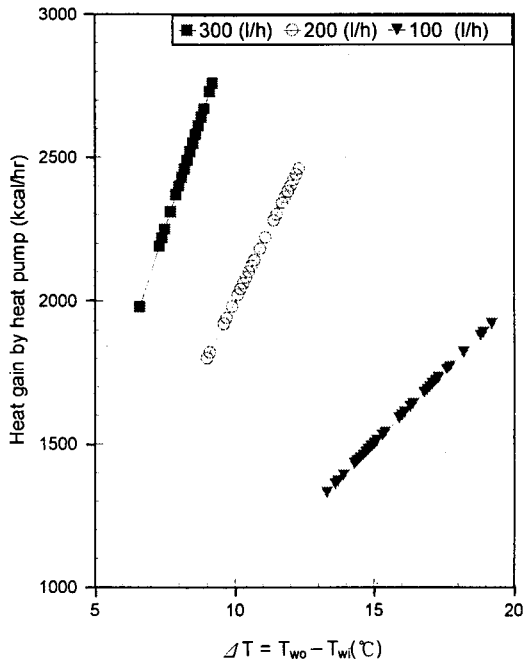


Fig. 4 Effect of inlet and outlet water temperature difference in condenser on heat gained by the heat pump in accordance with water flow rate in case of close loop.

이 그림에서 보는 바와 같이 열흡수 매체의 입·출구 온도차($\Delta T = T_{wo} - T_{wi}$)가 5°C에서 20°C까지 증가함에 따라 흡수열량은 직선적으로 증가하는 경향을 보였으며, 유량이 적을수록 열흡수 매체의 입·출구 온도차는 큰 반면에 방열량은 적다는 것을 알 수 있었다.

응축기에서 흡수되는 열량은 유량 300 l/h에서 가장 컸으며, 200 l/h, 100 l/h 순이었다.

나. 유량별 열흡수 매체(물)의 입·출구 온도차가 온돌 바닥 온도에 미치는 영향

그림 5는 열흡수 매체(물)의 응축기 입·출구 온도차가 온돌바닥 온도에 미치는 영향을 유량별로 분류하여 나타낸 것이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 유량이 300 l/h인 경우 입·출구 온도차가 8°C일 때 바닥 온도는 34°C로 가장 높은 온도를 보였고, 유량 200 l/h에서는 입·

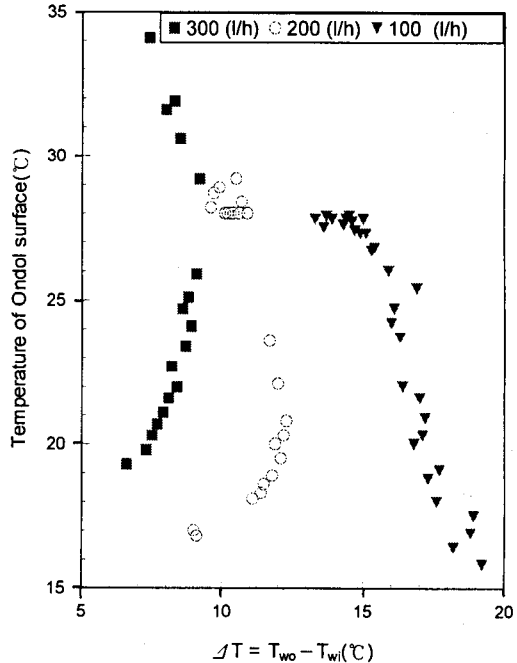


Fig. 5 Effect of inlet and outlet water temperature difference on the temperature of Ondol surface in accordance with water flow rate.

출구 온도차가 10℃일 때 바닥온도가 29℃로 가장 높게 나타났으며, 유량 100 l/h인 경우에는 입·출구 온도차가 15℃일 때 바닥온도가 28℃로 가장 높은 온도가 나타났다. 또한 열흡수 매체의 입·출구 온도차가 작을수록 온돌 바닥 온도가 높고, 클수록 낮아지는 경향을 알 수 있었다.

다. 온돌 난방 공간에서의 바닥과 실내온도 분포 비교

그림 6은 온돌난방 공간에서의 바닥과 실내 온도 분포를 나타낸 결과이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 온돌 순환 열매체인 물의 온도를 평균 50℃로 한 경우 온돌 바닥의 온도는 평균 24℃ 정도이고 실내 공기 온도는 평균 15.5℃를 나타내고 있다. 온돌 바닥 온도와 실내 공기 온도와의 차는 평균 8.5℃이며, 바닥온도와 순환 열매체 온도와의 차는 26℃이고, 실내 공기 온도와 순환 열매체와의 온도차는 34.5℃로 나타났다. 그리고 순환 열매체의 입·출구 온도차가 클수록 바닥온도와 실내 공기 온도와의 차이가 적었다.

라. 열흡수 매체의 입·출구 온도차와 유량이 압축기의 소비전력에 미치는 영향

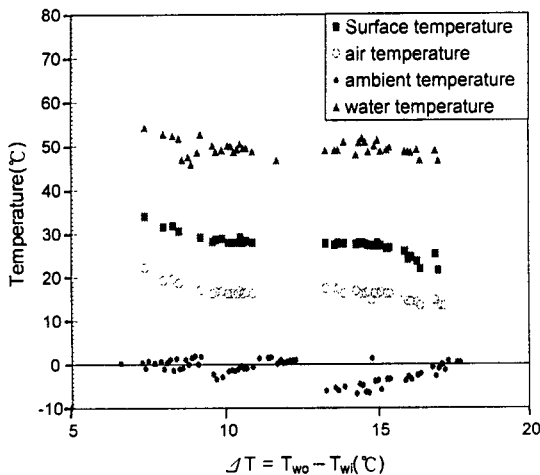


Fig. 6 Comparison among the Ondol surface temperature, air temperature in the Ondol room and circulating water temperature.

그림 7은 열펌프가 작동하는 동안 압축기가 소모하는 전력을 열매체(물)의 유량과 입·출구 온도차로 나타낸 실험 결과이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 압축기 전력은 열흡수매체의 유량에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

유량 300 l/h에서 압축기 전력은 2.0±0.2kW로 가장 크게 나타났으나, 유량이 적을수록 압축기 전력이 적었으며 그 변화폭도 적었다. 또한 유량이 적을수록 압축기의 전력이 감소하지만 응축기의 입·출구 온도차는 증가하였다.

마. 열흡수 매체의 유량이 열펌프의 소모전력에 미치는 영향

그림 8은 온돌 바닥온도가 15℃에서 30℃까지 상승하는 동안 시간이 지남에 따른 열펌프의 누적전력

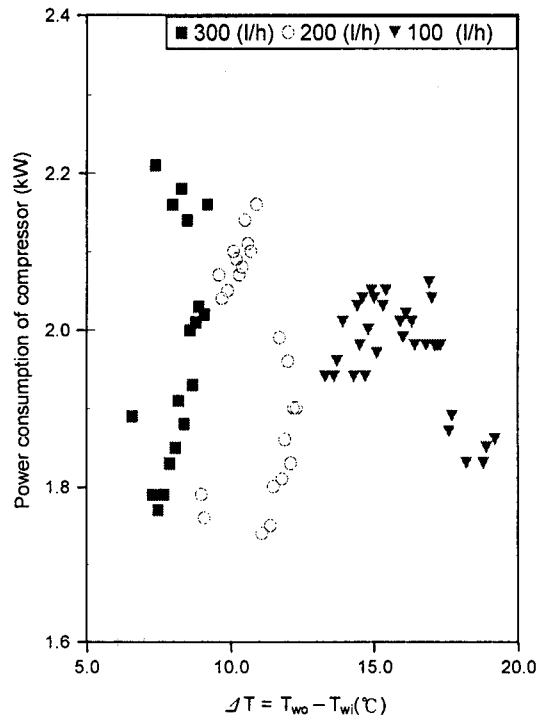


Fig. 7 Effect of inlet and outlet water temperature difference on the power consumption of compressor in accordance with water flow rate.

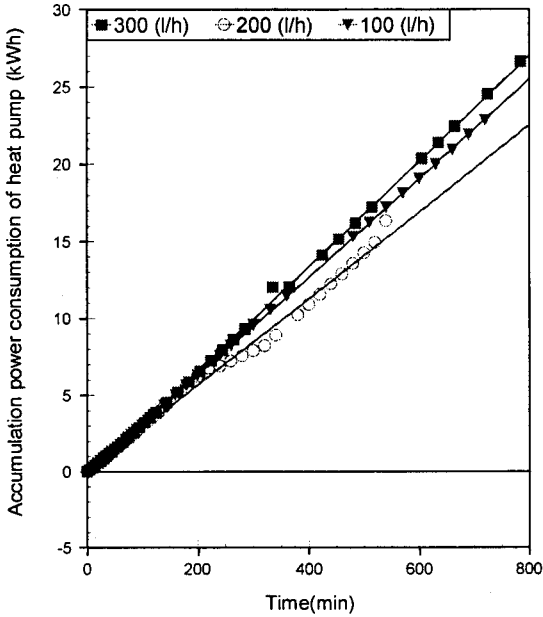


Fig. 8 Comparison of power consumption of heat pump in accordance with water flow rate.

소모량을 (2)식에 의하여 유량별로 비교한 결과이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 열펌프의 누적 전력 소모량은 직선적으로 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 150분까지는 유량별로 뚜렷한 차이를 나타내지 않았으나 200분 이후로는 유량 200 l/h에서의 누적 전력 소모량이 유량 100 l/h와 300 l/h의 경우보다 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 경과 시간 400분에서 유량 200 l/h가 유량 100, 300 l/h보다 전력 소모량이 1~2kWh 적게 나타나고 있다. 이것으로 보아 2PS 열펌프의 경우 전력 소모량 감소를 위하여 유량을 200 l/h로 유지하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다.

바. 열펌프와 석유보일러의 에너지 소비량과 비용의 비교 분석

석유보일러에 대한 열펌프의 경제성을 실험 분석한 결과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다.

먼저 그림 9는 외기온이 0~-3℃일 때 온돌에 공급된 열매체의 온도를 40℃로 유지한 경우 시간에

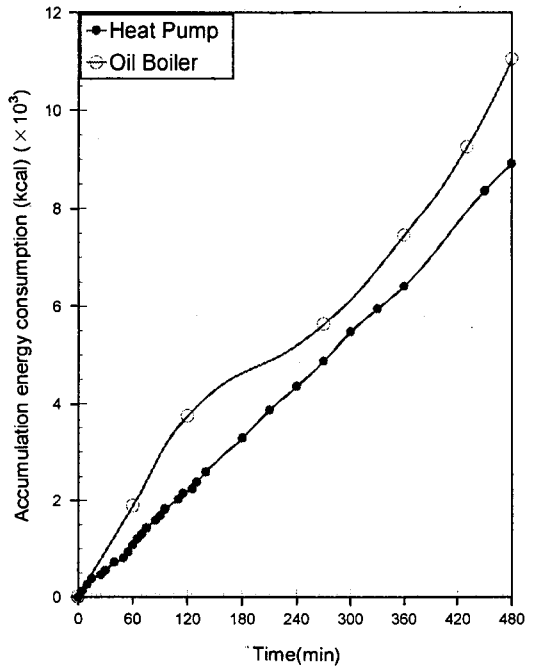


Fig. 9 Comparison of cumulative energy consumption of the heat pump to the oil boiler.

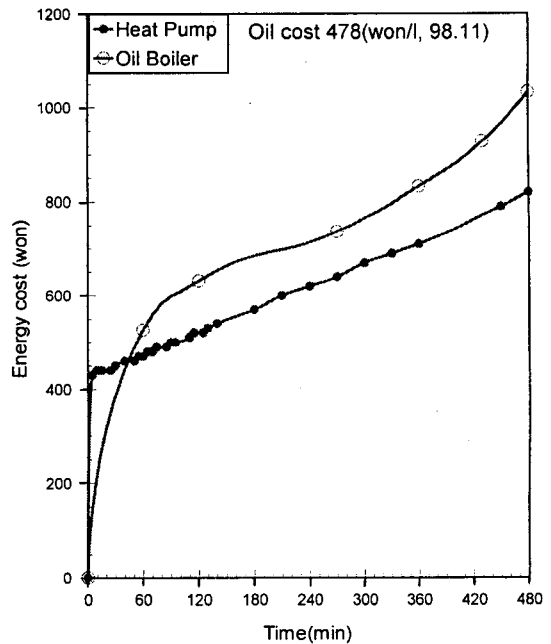


Fig. 10 Comparison of cumulative cost of the heat pump to the oil boiler.

다른 에너지 소비량을 (2)식과 (3)식에 의하여 분석한 결과이다. 그림 9에서 보는 바와 같이 석유보일러와 열펌프는 두 경우 모두 시간에 따른 누적 열에너지는 비례적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 경과 시간 120분에서 열펌프의 누적 소비열량은 약 2,150kcal/m²을 나타내고 있고, 열펌프와 석유보일러의 소모 열량 차이는 약 1.7배 정도로 석유보일러에서 더 많이 소모하는 것으로 나타났다.

그림 10은 열펌프와 석유보일러의 에너지 비용(원)을 (4)식과 (5)식에 의하여 분석한 결과이다.

그림 10에서 보는 바와 같이 경과 시간 50분까지는 열펌프의 에너지 비용이 높게 나타났으나, 석유보일러는 열에너지 비용이 시간에 따라 증가율이 큰 데 반하여 열펌프의 에너지 소비 비용은 완만한 증가율을 보이고 있으며, 120분에서의 두 난방기 간의 에너지 비용 차이는 약 110원/m² 정도로 석유보일러가 더 많은 비용이 드는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과로 보아 가동 초기에서는 열펌프가 석유보일러에 비해 에너지 소비가 컸으나 시간이 경과할수록 에너지 소비량이 적어지므로 에너지 비용 측면에서나 에너지 소모 차원에서 열펌프가 석유보일러보다 19~20% 에너지 절약과 비용 절약 효과가 있었으나, 석유에너지 가격 변동에 따라 에너지 비용의 절약 효과는 유동적인 것이 특성이다.

5. 요약 및 결론

이 시대에 살고 있는 우리는 에너지에 관한 두 가지 어려운 문제에 직면하고 있다. 그 하나는 화석 에너지 부족에 의한 가격의 불안정이고, 다른 하나는 화석에너지에 의한 심각한 환경오염 문제이다. 이에 대응하여 본 연구에서는 자연상태에 풍부하게 잠재되어 있는 저온 열에너지(대기 중 열에너지, 바닷물, 강물, 지하수, 지중열, 태양열)를 유용 에너지 수준으로 고온화 하여 가격이 저렴한 무공해의 열에너지를 공급할 수 있는 열펌프 시스템을 온돌난방에 이용하기 위하여 열펌프의 성능을 분석하였고, 온돌난방에 열펌프와 석유보일러를 사용하였을 때 두 시스템간의 소요에너지 및 난방비용을 각각 측정, 비교·분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 온돌 난방 공간에서 바닥온도와 실내 공기 온

도차는 9℃이었고, 바닥온도와 순환 열매체 온도와의 차는 26℃이었으며, 실온과 순환 열매체 온도와의 차는 34.5℃로 나타났다.

2. 온돌 난방에서 열펌프(2ps)의 소모전력은 순환 열매체 유량 200 l/h에서 가장 적었다.

3. 석유보일러에 대한 열펌프의 난방 에너지 절약 효과는 19.3%로 분석되었다.

4. 석유보일러에 대한 열펌프의 난방 비용 절약 효과는 석유가격이 478원/l 인 경우 20.6%로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김민수. 1991. 혼합냉매의 열역학적 물성치 및 열펌프에의 응용. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
2. 김민수, 원성필, 김동섭, 노승탁. 1990. 혼합냉매를 사용한 열펌프의 성능 해석 (1). 공기조화냉동공학 논문집 2(2).
3. 김태원. 1997. 증발기 나관 면적에 따른 히트펌프 성능분석. 충북대학교 대학원 석사학위논문.
4. 서문호, 이기준. 1978. 바닥을 加熱한 室內에서의 自然對流에 관한 數値模寫. 化學工學 16(3): 201-212.
5. 서중직. 1990. 數値解析에 의한 溫水溫突의 熱性能 研究. 大韓建築學會誌 6(4):177-184.
6. 성순경. 1997. 난방설비. 세진사. 26-43.
7. 손장열 외 2인. 1989. 바닥면의 방열량 산정 방법에 관한 연구. 공기조화. 냉동공학논문집 1(2):173-181.
8. 송현갑, 유영선, 박종길. 1996. 자연 에너지를 이용한 온실 난방 시스템 개발. 한국농업기계학회 1996년 학술발표대회 논문집.
9. 안병욱 외 2인. 1988. 溫突바닥면의 對流熱傳達率에 관한 研究. 大韓建築學會 學術發表論文集 8(2).
10. 이진중. 1997. 저온측과 고온측 냉매간 열교환이 히트펌프의 성능특성에 미치는 영향. 충북대학교 대학원 석사학위 논문.
11. 송현갑. 1998. 농업용 에너지의 효율적 이용과 대체에너지 개발. 농업기계화연구소 심포지엄.