

열펌프 - 잠열축열 온돌 시스템 연구

A Study on the Heat Pump-Latent Heat Storage Type Ondol System

송현갑 박문수
정회원 정회원
H. K. Song M. S. Park

SUMMARY

The Ondol system using both air-to-water heat pump and PCM(Phase Change Material) was constructed, and the effects of ambient air temperature on COP(Coefficient of Performance) of heat pump, the amount of heat supplied to the Ondol in the heating process, the heat storage in the PCM and the variation of Ondol room temperature were analyzed.

The results from this study could be summarized as follows:

1. The COP of the heat pump (3 PS) was in proportion to the ambient air temperature.
2. When the ambient air temperature was varied between -10°C and -7°C , the air temperature in the Ondol room was maintained between 16°C and 22°C . As the results, it was certified that the heat pump-latent heat storage type Ondol system could be a comfortable residential heating system in the winter.
3. The maximum radiation and convection heat transfer from Ondol surface was $206.2 \text{ kJ/m}^2\text{hr}$ and $82.6 \text{ kJ/m}^2\text{hr}$ respectively. As the results, it could be confirmed that the radiation was major heat transfer mechanism for the Ondol room heating.

Keywords : Ondol, Heat pump, Phase Change Material(PCM), Radiation heat transfer, Convection heat transfer.

1. 서 론

우리 나라 주택 난방은 화석에너지를 연료로 하는 보일러가 주종이며, 이로 인한 환경오염문제가 심각한 실정이다. 특히, 우리 나라는 화석에너지 자원을 수입에 의존하기 때문에 유가 변동에 따른 수급이 원활하지 않을 때는 가격의 변동폭이 심하여 가계에 미치는 영향이 크기 때문에 에너지 절감차원에서 새로운 난방시스템의 개발이 절실하

다.

본 연구에서는 열펌프⁽¹⁾로 난방열을 공급하고 잠열축열재에 공급된 난방열 일부를 저장하여 온돌바닥 온도를 일정한 수준으로 유지함으로써 쾌적한 온돌 난방환경을 얻을 수 있는 새로운 주택 난방 시스템을 구성하였으며, 혹한기의 외기온이 열펌프 성능과 온돌방 온도에 미치는 영향을 분석하여 새로 구성한 난방시스템의 실용화 가능성을 검증하였다.

This study was supported by the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF). The article was submitted for publication in June 2001, reviewed in June 2001, and approved for publication by the editorial board of KSAM in August 2001. The authors are Hyun Kap Song, Professor, and Mun soo Park, Research Assistant, Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea. The corresponding author is Hyun Kap Song, Professor, Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea. E-mail: <hksong@chungbuk.ac.kr>.

2. 이론 분석

가. 열펌프의 성능계수(COP)

열펌프의 성능은 투입한 기계적 일량에 대한 응축기에서의 발생열량과의 비이며 (1)식과 같이 표현할 수 있다.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Cond.}}{\dot{Q}_{Comp.}} = \frac{\dot{Q}_{water}}{\dot{Q}_{Comp.}} \quad (1)$$

나. 온돌시스템의 열평형

공급된 열은 온돌시스템에 저장(잠열 및 현열형태)·이용되며, 일부는 복사와 대류로 온돌방 공간에 공급되는데 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{PCM} + \dot{Q}_{rad.} + \dot{Q}_{conv.} + \dot{Q}_{Loss} \quad (2)$$

\dot{Q}_{Loss} 는 온돌바닥으로 나가는 전도 열전달에 의한 손실열량이며, 저장, 복사, 대류열량에 비하여 작은 수준의 열량이다.⁽³⁾

\dot{Q}_{PCM} 은 잠열축열체에 저장되는 축열량이며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{m}_w C_{pw} (T_{wo} - T_{wi}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{PCM} = \frac{m}{\Delta t} a_m \Delta h_m + \frac{m}{\Delta t} \int_{T_1}^{T_m} c_{ps} dT + \frac{m}{\Delta t} \int_{T_m}^{T_2} c_{pl} dT \quad (4)$$

$\dot{Q}_{rad.}$ 는 여러 면의 방사율과 면과 면사이 상호간의 형상계수(Shape factor)를 고려하여 계산된다. 흑구 온도계에 의하여 측정된 온도를 이용하여 온돌바닥면 복사에너지 분석모델을 정리하면 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$\dot{Q}_{rad.} = \frac{\epsilon \sigma A_f}{\Delta t} \sum_{i=1}^n (T_i^4 - MRT_i^4) \quad (5)$$

$$\text{단, } MRT_i = T_g + 2.37\sqrt{V}(T_g - T_a)$$

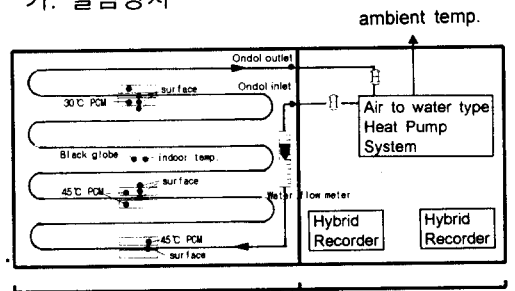
본 연구에서 잠열재를 온돌의 축열매체로 사용함으로써 온돌바닥 온도가 일정하게 유지되었으며, 이 경우 균일 온도의 바닥면에 대한 자연대류 열전달 계수와 대류열전달은 다음과 같이 정리할 수 있다.⁽⁶⁾

$$h = 0.8556(T_i - T_\infty)^{1/4}$$

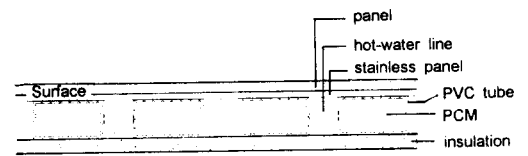
$$\dot{Q}_{conv.} = 0.8556 A_f (T_i - T_\infty)^{5/4} \quad (6)$$

3. 실험 장치 및 방법

가. 실험장치



(a) The hot water circuit of Ondol



(b) The cross section of Ondol floor

Fig. 1 Ondol system and experimental apparatus.

Table 1 Thermophysical properties of PCM

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Specific heat (kJ/kg°C)		Thermal conductivity (W/m°C)	
			Solid	Liquid	Solid	Liquid
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	29	195.77	3.101	3.465	0.544	0.811
CH ₃ COONa · 3H ₂ O	43	235.51	2.132	3.469	0.524	0.792

Table 2 Specification of Ondol space and water circuit pipe

Item	Ondol space	Ondol pipe
Dimension (m)	3.7(L)×2.8(W) ×2.3(H)	D _{out} = 0.19 Total length =48 PVC(XL)

그림 1은 공기-물형 3마력 열펌프를 이용한 잠열축열 온돌의 온수 순환 회로와 온돌바닥의 단면을 나타내고 있다. 여기서 잠열 축열재의 열특성은 표 1과 같고, 온돌방은 단열 판넬로 된 콘테이너로서 공간 및 파이프의 치수는 표 2와 같다.

열펌프에 의하여 가열된 온수가 온수순환 파이프에 순환되도록 직렬로 연결하였으며, 온수순환 파이프를 중심으로 잠열축열 튜브를 설치하여 잉여 난방열이 저장되도록 하였다.

온돌바닥의 온도변화를 측정하기 위하여 그림 1(a)와 같이 주요 부위에 14개의 열전대를 설치하였고, 특히 열펌프를 중심으로 온수 입·출구에 2개, 그리고 외기온을 측정하기 위해서 1개의 열전대를 설치하였으며, 온돌방 중앙부에 높이 1.2m에 후구 온도를 설치하여 복사열전달을 측정 분석할 수 있도록 하였다.

나. 실험 방법

열펌프 성능분석을 위하여 개방계(open loop)에서 외기온 변화에 따라 공기-물형 열펌프의 용축기에 의하여 방출되는 열량은 가열된 유량을 150, 200, 300 l/h 변화시켜 가며 측정 분석하였고, 소비 전력은 wattmeter (VIP system3. Elcontrol, Italy)로 측정하여 열펌프의 COP를 정확하게 분석할 수 있도록 하였다.

온돌난방 실험은 열공급을 간단 없이 연속적으로 난방을 실시하여 열전대(K, T type)로 30분마다 각 지점의 온도변화를 측정 분석하여 열펌프-잠열축열 온돌난방 시스템의 난방 특성을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 외기온에 따른 압축기내 냉매의 정적 압력 변화

그림 2는 외기온이 -10~15℃로 변할 때 정지

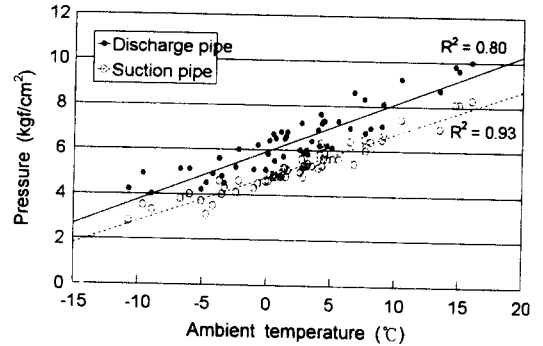


Fig. 2 Variation of static pressure of heat pump circuit with the ambient air temperature.

상태에서 열펌프의 토출 및 흡입부위 회로내 냉매 압력변화를 나타낸 것이다.

장시간 열펌프를 작동한 후 정지시키고 3~5시간 지났을 때의 저압과 고압의 압력변화를 외기온도에 따라 측정한 결과 그림 2와 같이 외기온이 상승함에 따라 증가하였으나 토출과 흡입압력은 평형을 이루지 못하였으며, 고압(Discharge pressure)과 저압(Suction pressure) 차는 외기온이 -10℃에서 1.0kg/cm²이었고, 외기온이 15℃에서는 그 차이가 1.5 kg/cm²로 나타났다. 열펌프의 정지 상태에서 고압과 저압이 평형을 이루지 못한 것은 회로내에 자동밸브 때문이며, 외기온이 상승함에 따라 냉매 비체적이 증가하기 때문에 정적 고압과 저압이 증가하는 것으로 판단된다. 이와 같은 정지압력과 외기온과의 관계를 고려하여 적정량의 냉매를 주입하여야 할 것으로 사료된다.

나. 외기온이 열펌프의 COP에 미치는 영향

그림 3은 외기온 변화와 열매체인 물의 유량 변화가 열펌프 COP에 미친 영향을 나타내는 결과이다. 외기온이 -10~15℃로 변할 때 COP는 2.0에서 3.35 수준으로 변화하였으며, 같은 외기온에서 유량이 많을수록 COP가 높게 나타났다.

다. 온돌난방 온수온도가 실온에 미치는 영향

그림 4는 외기온이 -10~-2℃로 변할 때 온돌난방 시스템의 주요 부위 온도변화를 나타낸 것이다.

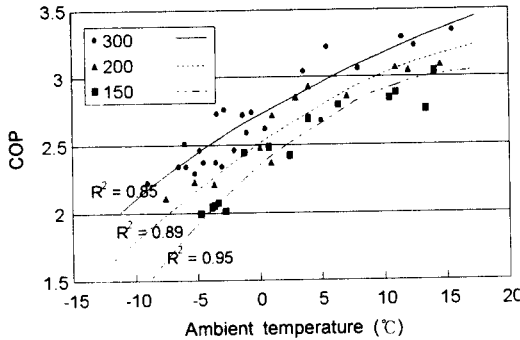


Fig. 3 Effect of water flow rate on the COP with the ambient air temperature.

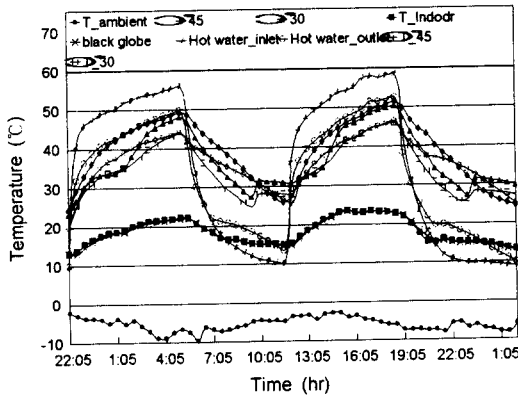


Fig. 4 Variation of indoor air, surface and PCM temperature with hot water temperature during Ondol heating.

순환수를 30℃에서 60℃의 온수로 가열하여 공급할 때 온돌 축열 매체로 이용한 45℃ PCM의 온도가 48℃까지 상승했으나 온수 공급을 중단할 때 뚜렷한 잠열구간이 나타나지 않았다. 그러나 다시 온수를 46℃에서 61℃로 가열하여 공급할 때 45℃ PCM이 52℃까지 상승하여 뚜렷한 잠열구간이 나타난 것으로 보아 PCM 자체의 온도가 50℃ 이상으로 상승할 때까지 가열하여야 상변화가 일어나는 잠열구간이 나타나게 됨을 알 수 있었다. 61℃까지 가열된 온수를 공급한 후 열공급을 중단할 때 45℃ 잠열축열재의 잠열구간이 뚜렷하게 나타났고 이때 외기온의 상승요인으로 인하여 실내 온도는 12~28℃까지 상승하였다.

가열과정에서 외기온이 -10~-7℃일 때 실온은 16~22℃이었으며, 외기온이 0~5℃인 경우 가

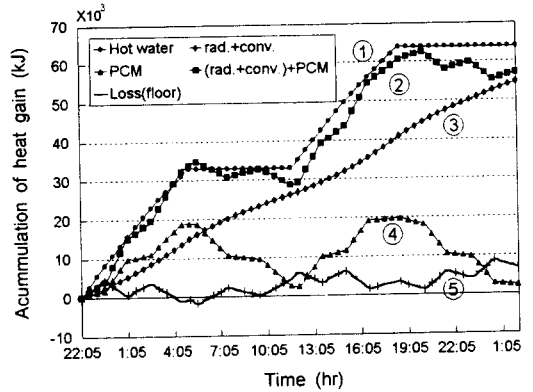


Fig. 5 Accumulation of heat supply, storage and loss for 28 hours of Ondol heating.

열과정에서의 실온은 22~29℃까지 상승하는 결과를 보였다.

라. 온돌난방의 적산(積算) 열량 분석

그림 5는 열펌프에 의하여 공급된 온수순환 잠열축열 온돌의 적산 난방열을 (2)~(6)식과 실험 결과를 연계하여 분석한 결과를 나타내고 있다.

이 그림에서 곡선 ①은 열펌프로 온수에 공급된 열량을 (3)식에 난방시간을 적산하여 시간대별로 나타낸 난방열량이며, 곡선③은 (5)식과 (6)식으로 분석한 적산대류와 복사열의 합을 나타내고 있다. 그리고 곡선④는 실험에서 얻은 잠열축열재의 온도변화를 근거로 잠열재에 저장된 열량을 (4)식으로 분석한 난방 시간대별로 나타낸 적산 잠열 축열량이며, 곡선②는 대류, 복사, 잠열 축열량의 합을 나타내고 있다.

곡선⑤는 열펌프에 의하여 공급된 적산 열량에서 난방소요열량인 대류와 복사열과 잠열 축열량을 제외한 난방시간에 따른 적산 손실 열량이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 열펌프에 의하여 14.5가열시간동안 63,900kJ의 난방열이 공급되었으며, 54,700kJ의 열이 대류와 복사열전달에 의한 난방에 이용되었고, 나머지 열량은 저장 또는 손실된 것으로 나타났다.

마. 온돌난방에서의 대류와 복사열전달량 비교

그림 6은 온돌난방에서의 복사와 대류열전달량

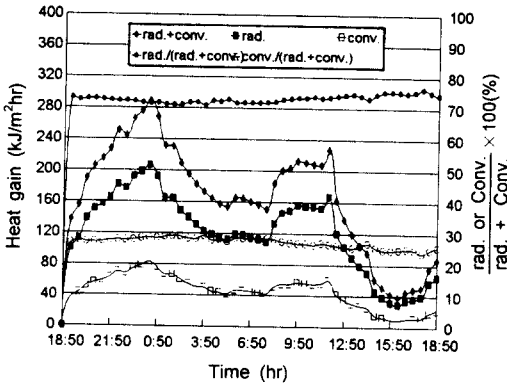


Fig. 6 Comparison of radiation and convection heat transfer in the Ondol room.

을 비교한 것이다.

온돌공간의 열전달량은 실내 온도, 바닥 온도 및 흑구 온도를 측정 분석하여 그림 6에 나타내었다. 난방시 실내 온도와 흑구 온도변화를 (4)식에 대입하여 복사 열전달량을 분석하였으며, 대류 열전달량은 (5)식으로 분석하였다. 공기 유동 속도는 밀폐된 공간에서의 자연 대류에 의해서 일어나므로 대략 0.1m/s로 매우 작았다.

그림 6에서 보는바와 같이 복사 열전달량은 난방부하와 마찬가지로 가열이 끝나는 지점에서 제일 높게 나타났으며, 이는 바닥온도와 실내의 흑구 온도차가 커지기 때문이고 대류 열전달량도 바닥온도와 실내 온도의 차가 커지기 때문에 같은 경향을 보이고 있다. 최대 복사 열전달량은 206.2 kJ/m²hr이고 최대 대류 열전달량은 82.6 kJ/m²hr로 복사열전달량이 대류 열전달량보다 2.5배정도 크게 나타났다. 정오를 지나면서 복사와 대류 열전달량이 갑자기 감소하는 경향을 볼 수 있으며, 이는 온돌바닥 온도는 크게 변하지 않았으나, 외기 온 상승과 태양의 복사열로 실내 온도가 상승하여 바닥온도와 실내공기온도차가 적기 때문으로 판단 된다.

복사와 대류열에 의한 전 난방 열량에 대한 복사열전달의 비율이 71.45%이었고 대류열전달의 비가 28.55%를 차지하므로써 온돌난방은 복사열전달이 주도하는 난방이라 할 수 있다.

5. 결 론

화석에너지 절약과 환경 오염을 줄이기 위하여

공기-물형 열펌프로 난방열을 공급하고 잠열축열재를 축열매체로 이용한 온돌 난방 시스템을 구성하였으며, 외기온에 따른 열펌프의 성능과 온돌 난방시 공급열량, 잠열축열량의 복사·대류 열전달량 및 실내 온도의 변화를 분석함으로써 열펌프-잠열축열형 온돌난방 특성을 다음과 같이 구명할 수 있었다.

1) 외기온이 10~15℃로 변할 때 열펌프의 COP는 2.0에서 3.35 수준으로 변화였다.

2) 외기온이 -10~-7℃일 때 가열과정에서 실온은 16℃~22℃로 유지할 수 있었으며, 외기온이 0~5℃인 경우 가열과정에서의 실온은 22~29℃까지 상승하였다.

3) 외기온이 -11~5℃일 때 잠열축열형 온돌난방의 최대 복사열전달량은 206.2 kJ/cm²·hr이었고 최대 대류 열전달량은 82.6 kJ/cm²·hr로 분석되었으며, 전체 열전달에 대한 복사 열전달이 차지하는 비는 71.45%이었고, 대류 열전달이 차지하는 비가 28.55%로 온돌난방은 복사난방임이 입증되었다.

Nomenclature

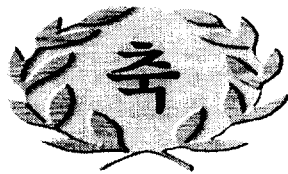
- A_f = Ondol surface area (m²)
- a_m = melting fraction of PCM
- COP = Coefficient of performance of heat pump.
- c_p = Specific heat at constant pressure (kcal/kg·℃)
- h = Convection heat transfer coefficient (kcal/m²·K)
- Δh_m = Latent heat of PCM(kcal/kg)
- MRT_i = Mean radiant temperature (℃)
- m = PCM mass (kg)
- $\dot{Q}_{Comp.}$ = Power consumption of heat pump compressor (kcal/hr)
- $\dot{Q}_{Cond.}$ = Heat gain from condenser of heat pump (kcal/hr)
- $\dot{Q}_{conv.}$ = Convection heat transfer (kcal/hr)
- \dot{Q}_{PCM} = Heat storage and release of PCM (kcal/hr)
- $\dot{Q}_{rad.}$ = Radiation heat transfer (kcal/hr)
- \dot{Q}_{Total} = Total heat gain (kcal/hr)

- \dot{Q}_{water} = Heat gain from the water condenser of heat pump (kcal/hr)
 T_a = Indoor temperature (°C)
 T_{∞} = Thermal boundary layer temperature in the Ondol room.
 T_g = Temperature of black globe (°C)
 T_i = Surface temperature of the Ondol floor (°C)
 T_m = Melting temperature of PCM (°C)
 V = Air velocity (m/s)
 Δt = Time interval (hr)
 σ = Stefan-Boltzmann constant (5.67×10^{-8} W/m² · k4)
 ϵ = Emissivity

- Pump Systems", John Wiley & Sons.
 2. Lane, G. A. 1983. "Solar heat storage: Latent heat materials - volume I: background and scientific principles", CRC press.
 3. Leigh, S. B. and C. R. MacCluer. 1994. "A comparative study of proportional flux-modulation and various types of temperature-modulation approaches for radiant floor-heating system control", ASHRAE symposia, pp. 1040-1053.
 4. Scalct, S., D. Banu, D. Hawes, J. Paris, F. Haghghata and D. Feldman. 1996. "Full scale thermal testing of latent heat storage in willboard", Solar Energy Materials and Solar Cell, pp. 49-61.
 5. 손장열, 박제영, 안병욱, 신용태. 1988. "온수온돌 난방공간의 열부하 해석에 관한 연구", 대한건축학회지, 4권 2호 통권 16호, pp. 163-171.
 6. 송현갑, 김영복, 최홍림. 1993. "잠열재를 이용한 축열형 온돌시스템 개발", 한국과학재단.

참 고 문 헌

1. Harry J. Sauer, JR. Ronald and H. Howell, "Heat



학 위 취 득

성 명 : 이 시 민
 생 년 월 일 : 1964년 9월 16일
 취 득 학 위 명 : 농 학 박 사
 학 위 수 여 대 학 : 경 북 대 학 교
 학 위 취 득 년 월 일 : 2001년 8월 25일
 학 위 논 문 : 스터링기관용 재생기에 관한 실험적 연구