[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 15. No. 2, 1995

잠열 축열-바이오 세라믹 온돌의 난방 특성(Ⅱ)

-이론적 분석을 중심으로-

송현갑* · 유영선**

* 충북대학교 농업기계공학과
** 충북대학교 지역개발연구소

Floor Heating Characteristics of Latent Heat Storage-Bioceramic Ondol(Ⅱ)

-Focused on Theoretical Analysis-

Song, Hyun-Kap* · Ryou, Young-Sun**

* *Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chung-Buk National University*
** *Research Institute of Regional Development, Chung-Buk National University*

요 약

국내의 주택난방은 온수 순환 파이프를 매설한 시멘트 온돌이 대부분을 차지하고 있으며, 현재와 같은 형태의 파이프 매설식 온돌은 열매자체의 축열성이 없기 때문에 빈번한 난방열의 공급으로 인하여 경제성과 쾌적도의 측면에서 불리하고, 또한 매설식이기 때문에 고장시의 수리가 불편하다는 문제점을 안고 있다. 따라서 축열형 조립식 형태의 온돌에 관한 연구가 최근에 이루어 지고 있으나, 실용화를 위해서는 보다 더 조직적이며 체계적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

현재 이용되고 있는 매설식 온수 순환 온돌의 단점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 잠열축열재와 바이오세라믹을 이용한 조립식 온돌을 설계 · 제작하였으며, 온돌을 설치한 난방공간의 열전달 특성을 열평형 이론을 적용하여 해석하였다.

Abstract

Korean traditional Ondol with the sensible heat storage medium has been for a long time used as residential heating system, in these days the concrete Ondol without the heat storage medium was realized as the heating system in the private houses and the apartments. This floor heating system is good for our health. But the concrete Ondol is not desirable for the energy saving and for the maintenance of comfortable room temperature because the heat storage medium is not employed in the concrete Ondol. And as the hot water circulating pipes are buried under the concrete floor, the concrete Ondol system has some kind of problems to be improved. Therefore the new type of Ondol system was developed in this study. And the new Ondol was consisted of latent heat storage material as heat storage medium with a great heat capacity and bioceramics as medium to maintain comfortable room temperature. In this study, the heat transfer characteristics of latent heat storage-bioceramic Ondol was analyzed theoretically.

Ⅰ. 서 론

현재 이용되고 있는 매설식 시멘트 온돌은 열이용 측면에서 비효율적이며, 시공이 불편하고, 유지 및 보수가 어렵기 때문에 보다 나은 형태의 온돌이 개발·이용되어야 한다는 것은 주지의 사실이다. 그리고 새로운 형태의 온돌은 축열성, 시공의 간편성, 유지 및 보수의 용이성, 경량화 및 경제성, 인체 공학적 유익성 등의 다양한 기능이 추가되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 새로운 형태의 다기능 온돌을 개발할 목적으로 잠열축열재를 이용하여 온돌에 보다 적극적인 축열기능을 부여하였고, 온돌을 판넬형 조립식으로 제작하여 시공 및 유지보수가 용이하도록 하였으며, 또한 바이오세라믹을 온돌판넬에 압착시켜 인체에 유익한 것으로 알려진 원적외선을 방출하도록 하였다.

이와 같이 연구개발한 잠열축열-바이오세라믹 온돌의 구성 및 실험적 난방특성 분석은 본 연구(Ⅰ)에서 상세히 설명하였으며, 본 논문은 온돌 난방 공간의 열특성을 이론적으로 분석하고자 하였다.

잠열축열형 온돌 시스템에서 열저장 및 열전달 과정을 정리하면 다음과 같다(그림 1 참고).

① 온수 순환에 의하여 가열된 파이프의 열이 온돌에 전달되고,
② 잠열과 현열형태로 온돌내에 저장됨과 동시에 온돌바닥을 통하여 온돌 난방 공간으로 대류와 복사열 전달의 형태로 방열되며,
③ 방출된 열은 실내공기에 전달되고, 일부는 벽과 창문을 통하여 외부로 손실된다.

이와 같은 열전달 현상을 열평형 이론에 근거하여 분석하였으며, 본 연구(Ⅰ)에서 수행한 실험결과와 비교·분석하여 이론분석 결과를 검증하였다.

Ⅱ. 잠열축열-바이오세라믹 온돌의 열형평

온돌에 공급된 난방열은 잠열 및 현열의 형태로 축열·이용되며, 일부는 외부로 손실된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$q_T = q_{SHS} + q_{PCM} + q_{HL} \quad \cdots\cdots(1)$$

여기서,

q_T : Total energy supplied in Ondol (kcal/hr)

q_{SHS} : Sensible heat stored in Ondol pannel(kcal/hr)

q_{PCM} : Total heat stored in PCM(kcal/hr)

q_{HL} : Heat loss(kcal/hr)

1. 현열과 잠열축열(q_{THS})

온돌은 현열축열재와 잠열축열재로 구성되었으며, 온돌에 축열되는 현열 및 잠열은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$q_{THS} = q_{SHS} + q_{PCM}$$
$$= q_{SHS} + q_{PCMS} + q_{LH} + q_{PCML} \quad \cdots\cdots(2)$$

여기서,

q_{PCMS} : Sensible heat storage of solid PCM

q_{LH} : Latent heat storage during phase transition

q_{PCML} : Sensible heat storage of liqulid PCM

식 (2)에서 q_{SHS}는 온돌현열재에 저장되는 열량으로 식 (3)과 같이 표현되고, q_{PCMS}는 잠열축열재가 상변화되기 전까지 고상에서의 현열축열량으로서 식 (4)와 같이 쓸 수 있으며, q_{LH}는 相變化가 일어나는 동안의 잠열량으로 식 (5)와 같고, 식 (6)에서 q_{PCML}은 잠열축열재의 액상현열축열량을 나타낸 것이다.

$$q_{SHS} = M_{SHS} Cp_{SHS} \sum_{i=1}^{nf} \Delta T_i \quad \cdots\cdots(3)$$

$$q_{PCMS} = M_{PCMS} Cp_S \sum_{i=1}^{ns} \Delta T_i^S \quad \cdots\cdots(4)$$

$$q_{LH} = M_{LH} \sum_{j=ns}^{nsl} (\lambda_j + \lambda_{j-1}) \Delta LH \quad \cdots\cdots(5)$$

$$q_{PCML} = M_{PCML} Cp_L \sum_{j=nl}^{nf} \Delta T_j^L \quad \cdots\cdots(6)$$

여기서,

i, j : Time interval

nf : Number of total time intervals during heating process

nl : Number of total time intervals in liquid PCM

ns : Number of total time intervals in solid PCM

nsl : Number of total time intervals under phase transition

Cp_{SHS} : Specific heat of sensible heat storage material

Cp_L : Specific heat of liquid PCM

Cp_S : Specific heat of solid PCM

Δ LH: Latent heat of PCM

M_{SHS} : Mass of sensible heat storage material

M_{PCMS}: Mass of solid PCM

M_{PCML}: Mass of liquid PCM

M_{LH} : Mass of PCM under phase transition

λ : Fraction of phase changed mass

2. 난방열 및 열손실

온돌에 공급된 난방열은 전도열전달에 의하여 올돌표면에 도달하고, 다시 온돌표면으로부터 복사 및 대류열전달에 의하여 벽체와 실내공기로 전달된다. 즉, 온돌표면으로부터 방출된 열은 실내공기에 저장되어 난방에 이용된 후 벽과 창 그리고 문을 통하여 손실된다.

이와 같은 열흐름을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$q_{ond}=q_{rad}+q_{cov}=q_{air}+q_{cod,\,w}+q_{vent}=q_L \cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

여기서,

q_{ond} : Conduction heat transfer of Ondol(kcal/hr)

q_{rad} : Radiation heat transfer from Ondol surface(kcal/hr)

q_{cov} : Convection heat transfer from Ondol surface(kcal/hr)

q_{air} : Enthalpy of room air(kcal/hr)

$q_{cod,\,w}$: Conduction heat transfer from room wall(kcal/hr)

q_{vent} : Ventilation heat transfer between room space and the exterior (kcal/hr)

q_L : Heat loss from room(kcal/hr)

식 (7)에서 보는 바와 같이 복사와 대류열전달에 의하여 난방에 공급된 열에너지는 일정시간 후에는 결국 손실열량이 된다.

(1) 복사열전달(q_{rad})

식 (7)에서 복사열전달항인 q_{rad}는 그림 1과 같이 열저항 회로망(thermal resistance network)으로 가시화하여 복사열량을 산정할 수 있으며, 또한 난방공간을 이루고 있는 실내 각 면들에 대한 온돌표면의 흡수계수를 고려하여 복사열량을 해석할 수 있다. 이를 정리하며 다음과 같다.

① 열저항 회로망에 의한 해석

온돌표면으로부터의 복사열량을 해석하기 위하여 천정과 측면벽간에 이루어지는 복사열전달 현상을 열저항 회로망을 통하여 가시화하면 그림 1과 같이 되며, 복사열전달 회로망을 근거로 온돌표면으로부터 천정으로 손실되는 복사열전달량을 수식으로 정리하면 다음과 같다. 여기서, 측면벽은 같은 재료와 같은 온도를 갖게 되므로 4개의 측면벽을 1개면으로 가정하였다.

$$q_{1-2(rad)}=\frac{\sigma(T_1^4-T_2^4)}{R_1+\dfrac{1}{\dfrac{1}{R_{1-2}}+\dfrac{1}{R_{1-3}+R_{2-3}}}+R_2} \cdots(8)$$

여기서,

$q_{1-2(rad)}$: Radiation heat transfer from Ondol surface

$R_1=\dfrac{1-\varepsilon_1}{A_1\varepsilon_1}$: Surface resistance of Ondol

$R_2=\dfrac{1-\varepsilon_2}{A_2\varepsilon_2}$: Surface resistance of ceiling

$R_{1-2}=\dfrac{1}{A_1F_{1-2}}$: Space resistance between Ondol surface and ceiling

$R_{1-3}=\dfrac{1}{A_1F_{1-3}}$: Space resistance between Ondol surface and surrounding wall

$R_{2-3}=\dfrac{1}{A_2F_{2-3}}$: Space resistance between ceiling and surrounding wall

$\sigma=5.67\times10^{-8}\,W/m^2k^4$: Stefan-Boltzmann Constant

T_1 : Ondol surface temperature(K)

T_2 : Ceiling temperature(K)

A_1 : Ondol surface area(m^2)

A_2 : Ceiling area(m^2)

ε_1 : Emissivity of Ondol surface(0.85)

ε_2 : Emissivity of ceiling(0.70)

F_{1-2} : Shape factor between Ondol surface and ceiling(0.2)

F_{1-3} : Shape factor between Ondol surface and surrounding wall(0.8)

F_{2-3} : Shape factor bewtween ceiling and surrounding wall(0.8)

식 (8)중에 R를 A, F, ε로 구체화 된 관계를 대입하고 정리하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{q_{1-2(rad)}}{A_1}=\frac{\sigma(T_1^4-T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1}+\frac{A_1^2(F_{1-2}F_{2-3}+F_{1-2}F_{2-3})}{A_1^2F_{1-2}F_{1-3}F_{2-3}+F_{1-3}+F_{2-3}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \quad \cdots\cdots(9)$$

식 (9)에 방사율과 형태계수를 대입하여 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{q_{1-2(rad)}}{A_1}=\frac{\sigma(T_1^4-T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1}+\frac{0.8A_1^2}{0.128A_1^2+1.6}+0.43} \quad \cdots(10)$$

② 흡수계수(Absorption factor) 개념 도입에 의한 해석

6개면으로 구성된 난방공간에서 온돌표면의 순방사 열량은 온돌표면 이외의 다른 면으로부터 되돌아 오는 복사와 반사에너지를 고려하므로서 얻어진다. 이때 여러 면의 방사율과 면과 면사이 상호간의 형태계수(shape factor)에 의하여 이루어지는 계수를 온돌표면의 흡수계수(absorption factor)라 하며, 이 개념을 도입하여 온돌표면의 복사에너지를 정리하면 다음과 같다.

$$q_{(1-2)rad}=\varepsilon_1\cdot\sigma\cdot T_1^4\cdot A_1-\sum_{i=1}^{n}B_{1i}\cdot\varepsilon_i\cdot\sigma\cdot T_i\cdot A_i \quad \cdots\cdots(11)$$

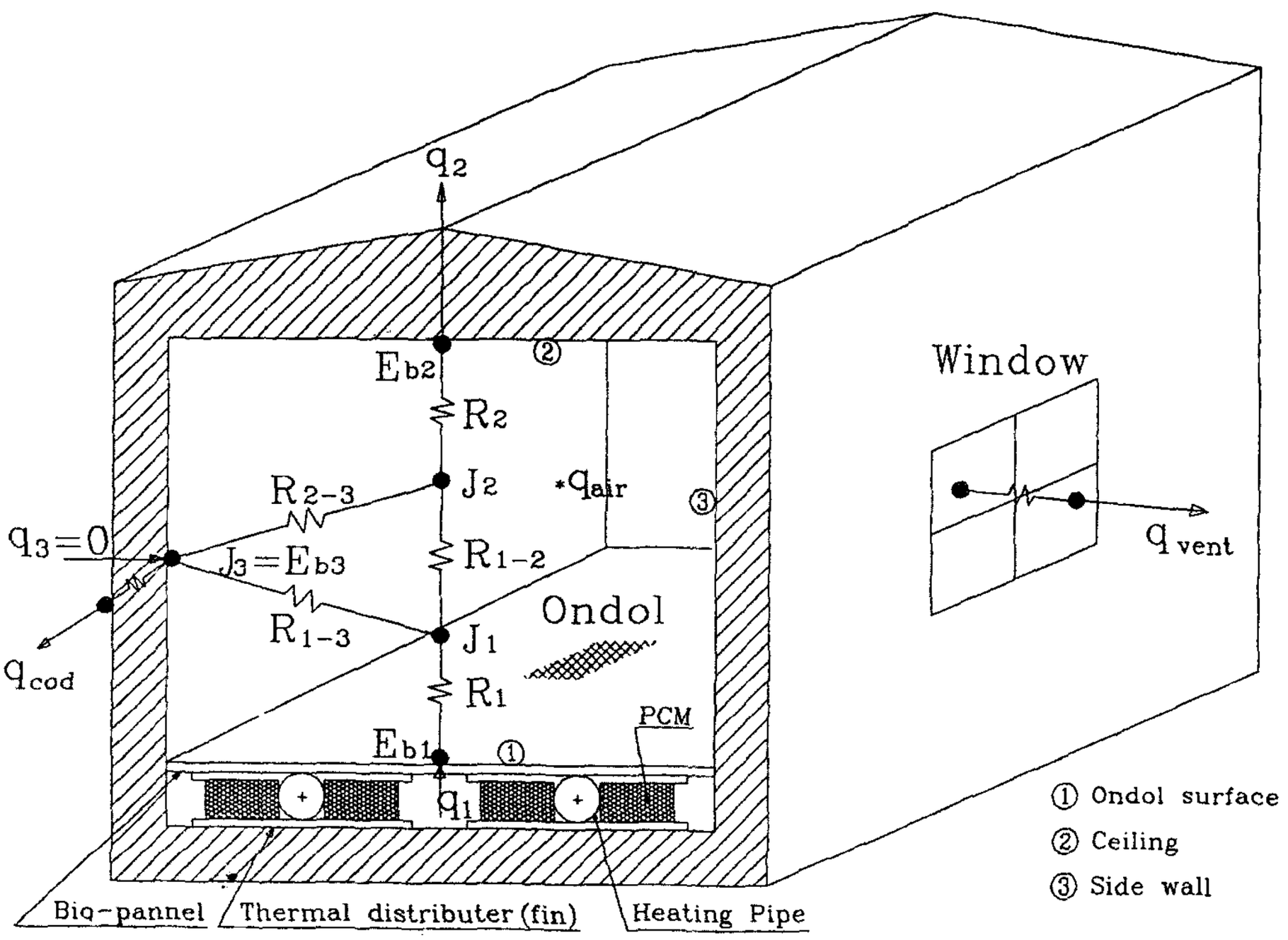

Fig. 1 Configuration of latent heat storage type ONDOL system and the radiation resistance network.

식 (11)에서 흡수계수는 $\sum_{i=1}^{n} B_{ij}=1$, $B_{ij} \cdot \varepsilon_i \cdot A_i=B_{ji} \cdot \varepsilon_j \cdot A_j$의 관계를 가지며, 이를 식 (11)에 대입하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{q_{(1-2)rad}}{A_i}=\varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4-\sum_{i=1}^{n} B_{1i} \cdot \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4$$

$$\varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4-MRT_1^4) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

여기서,

B_{1i} : Absorption factor of Ondol surface on i surface

MRT_1 : Mean radiation temperature(K) in Ondol room

식 (12)에서 다음 관계가 성립한다.

$$MRT_1^4=\sum_{i=1}^{n} B_{1i} \cdot T_i^4 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

식 (13)에서 MRT_1은 온돌표면에 대한 나머지면의 평균복사온도로 흑구온도계를 이용하여 측정가능하며 이렇게 하므로서 흡수계수항, $\sum_{i=1}^{n} B_{1i} \cdot T_i^4$을 실험적 방법으로 쉽게 구할 수 있다.

흑구온도계를 사용할 때 MRT_1의 계산식은 다음과 같다.

$$MRT_1=t_g+2.37\sqrt{V}(t_g-t_a) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

여기서,

t_g : Temperature in black sphere(℃)

t_a : Dry bulb temperature in room space (℃)

V: Air velocity in room space(m/sec)

(2) 대류열전달(q_{cov})

식 (7)에서 대류열전달항인 q_{cov}는 Newton의 냉각법칙에 의하여 다음과 같이 표시된다. 바닥 난방에서 일어나는 대류열전달은 특수한 경우를 제외하고는 자연대류로 나타난다.

$$\frac{q_{cov}}{A_1}=h_1(t_1-t_a) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

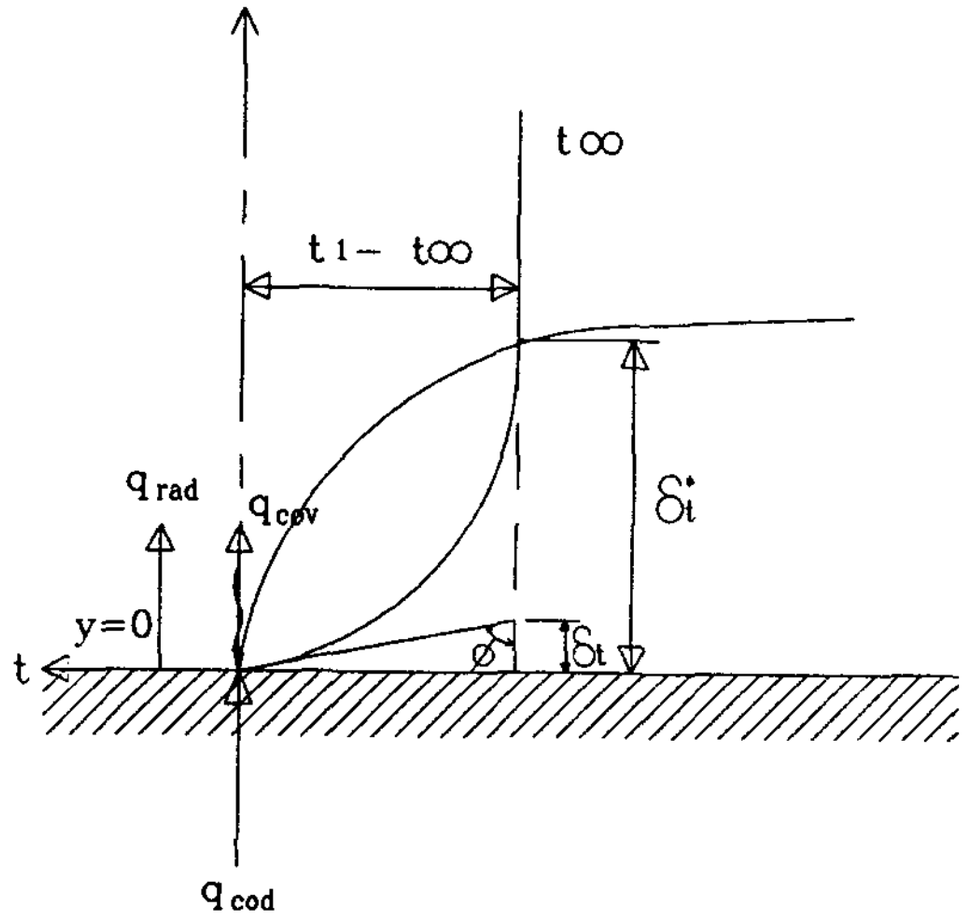

Fig. 2 Thermal boundary layer on the ONDOL surface.

① 실험적 방법에 의한 자연대류 열전달 계수(h_1) 해석

온돌표면에서는 공기 유속의 "zero(0)"에 접근하므로 대류열전달이 이 지점에서는 정체공기의 전도열전달로 시작되며, 다음과 같이 표시할 수 있다(그림 2참고).

$$\frac{q_{cov}}{A_1}=k_{air}\left(\frac{\partial_t}{\partial_y}\right)_{y=0}=h_1(t_1-t_x) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

식 (16)으로부터 대류전달계수, h_1은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$h_1=\frac{k_{air}}{(t_1-t_x)}\left(\frac{\partial_t}{\partial_y}\right)_{y=0} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

식 (17)에서 $\frac{\partial_t}{\partial_y}$는 온돌표면에서부터 온도경계층까지 측정한 공기 온도 변화에 대한 회귀방정식을 구하여 미분하므로서 간단하게 구할 수 있다.

식 (17)을 보다 간단히 표현하면 다음과 같다(그림 2참고).

$$h_1=\frac{k_{air}}{(t_1-t_x)}\frac{(t_1-t_x)}{\delta_t}=\frac{k_{air}}{\delta_t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

여기서,

q_{cov} = Convection heat transfer(kcal/hr)

A_t = Ondol surface area(m^2)

t_1 = Ondol surface temperature(℃)

t_a = Room air temperature(℃)

t_x = Air temperature of thermal boundary layer(℃)

h_1 = Convection coefficient(kcal/hr · m^2 · ℃)

k_{air} = Conduction coefficient of air(kcal/hr · m · ℃)

$$=0.0207\times\frac{(1+t)}{(t+273.15)}$$

δ_t^* = Thickness of thermal boundary layer(m)

δ_t = Thickness of thermal boundary layer(m) to the first derivative

② 이론식에 의한 자연대류 열전달 계수(h_1)의 해석

온도분포가 균일한 온돌표면에 대한 자연대류 열전달 계수를 해석하기 위하여 McAdams에 의하여 제시된 평균 Nusselt수를 적용하면 다음과 같다.

$$Nu=\frac{h_1L}{k_{air}}=C(Gr\cdot Pr)^n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(19)$$

$$Gr=\frac{g\cdot\beta(t_1-t_x)L^3}{\nu^2}\ \text{(Grashof number)}$$

$$Pr=\frac{\nu}{\alpha}\ \text{(Prandtl number)}$$

식 (19)에서 Gr과 Pr을 대입하고, h_1에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$h_1=\frac{k_{air}}{L}\cdot C\left(\frac{g\cdot\beta(t_1-t_x)L^3}{\nu\alpha}\right)^n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(20)$$

여기서,

ν : Kinetic viscosity(m^2/sec)

α : Thermal diffusivity(m^2/sec)

L : Characteristic length(m)

$$=\frac{Area}{Perimeter}=0.225m$$

β : Volumetric coefficient of expansion

$$=\frac{1}{T_f}\left(\frac{1}{K}\right)$$

$$T_f=\frac{t_1+t_x}{2}(K)$$

온도가 균일한 수평평판에서의 자연 대류에 대한 상수, C와 지수, n은 다음과 같다.

$$C=0.27,\ n=\frac{1}{4}$$

그리고 T_f=300K일때 공기 물성치는 다음과 같다.

k_{air} = 0.02624

ν = 16.84×10^{-6} m^2/sec

α = 0.2216×10^{-4} m^2/sec

β = 3.3×10^{-3}

식 (20)의 위에서 제시한 물성치를 대입하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$h_1=0.9934(t_1-t_x)^{\frac{1}{4}}\ (W/m^2K)$$

$$=0.8556(t_1-t_x)^{\frac{1}{4}}\ (kcal/hr\,m^2K) \quad \cdots\cdots\cdots(21)$$

그러므로 대류열전달량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{q_{cov}}{A_1}=h_1(t_1-t_x)=0.8556(t_1-t_x)^{\frac{5}{4}} \quad \cdots\cdots\cdots(22)$$

이상과 같이 복사열전달식과 대류열전달식을 정리하므로서 식(7)은 구체적으로 다음과 같이 쓸수 있다.

$$q_L = q_{rad} + q_{cov}$$

$$\frac{q_L}{A_1} = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - MRT_1^4) + \frac{k_{air}}{L} \cdot C\left(\frac{g \cdot \beta(t_1 - t_\infty)L^3}{\nu\alpha}\right)^n$$

$$= \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - MRT_1^4) + 0.8556(t_1 - t_\infty)^{\frac{5}{4}} \quad \cdots\cdots(23)$$

여기서, $\sigma = 4.883 \times 10^{-8}$ (kcal/hr m² K⁴)

Ⅲ. 결과 및 고찰

온돌내부에 난방열이 공급되면, 전도열전달에 의하여 온돌표면에 전달되고, 표면으로부터의 복사와 대류열전달의 형태로 난방공간에 전달된다. 이와 같은 난방열흐름을 분석·요약하면 다음과 같다.

1. 온돌표면으로부터의 복사열전달

온돌표면 복사열 전달을 이론적으로 분석하기 위하여 그림 1과 같이 복사 열저항 회로망을 구성하였으며, 이를 근거로 이론식(9)를 유도한 후 천정면 방사율, $\varepsilon_2 = 0.7$과 방사면간의 형태계수, $F_{1-2} = 0.2$와 $F_{1-3} = 0.8$을 결정하므로서 온돌표면 방사율과 온도만의 함수관계를 갖는 방사에너지에 관한 간단한 식(10)을 얻을 수 있었다. 식(10) 중 온돌표면 방사율 $\varepsilon_1 = 0.85$은 판재의 재료와 색도를 고려하여 정하였다.

그리고 온돌표면 복사열전달을 실험적으로 분석하기 위하여 본 연구(Ⅰ)의 그림 6, 7와 같은 실험장치를 구성하였으며, 이 실험장치에서 보는 바와 같이 흑구온도계로 기준면에 대한 주위 벽면의 평균복사온도, MRT를 측정하여 식 (12)에 대입하므로서 복사열전달량을 구할 수 있도록 하였다.

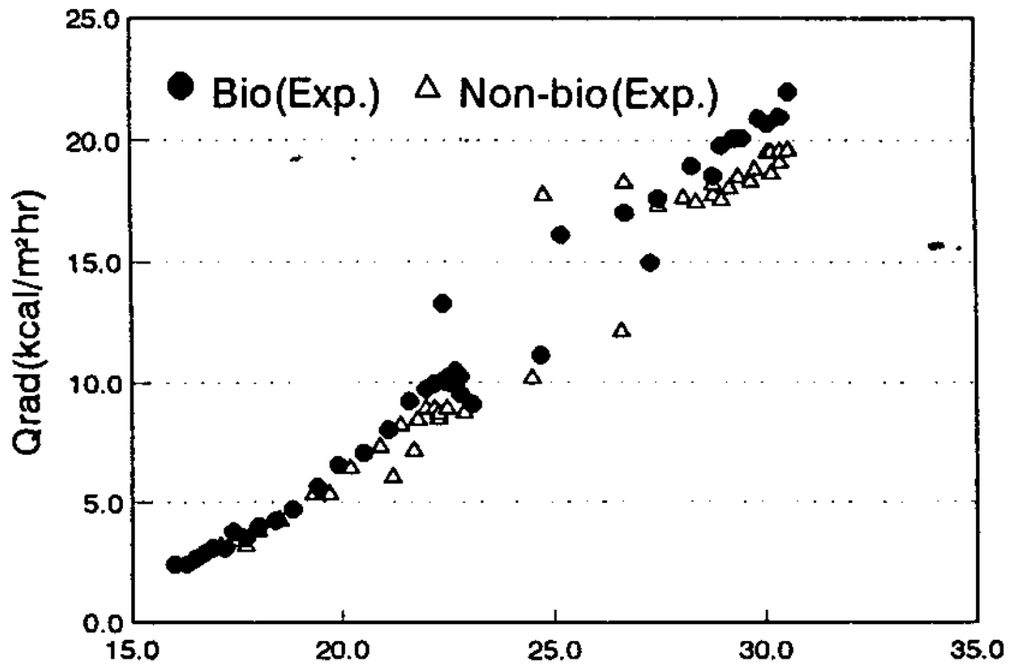

Fig. 3 Bioceramics effect on the radiation heat transfer of Ondol surface.
where, T_1 : Ondol surface temperature(℃)

그림 3은 온돌표면 판재에 Bioceramic을 처리한 경우와 처리하지 않은 경우의 복사열전달의 이론 및 실험적 분석결과이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 Bioceramic을 처리한 경우의 복사열전달량이 처리하지 않은 경우보다 1~2kcal/m² hr 정도 큰 값을 보였으며, 온돌표면온도 T_1이 클수록 그 차이가 점점 커지는 경향을 보였다.

이와 같은 현상은 Bioceramic이 방사하는 원적외선의 복사에너지가 온도가 높을수록 그 밀도가 커지기 때문인 것으로 판단된다.

2. 온돌표면으로부터의 대류열전달

온돌표면에서 대류열전달의 이론분석은 식 (19), (20)과 같이 대류열전달계수, h_1을 Nusselt수, Grashof수와 Prandtl수에 의하여 정리하고, 수평평판에서의 자연대류에 알맞는 상수와 공기의 물성치를 대입하므로서 식 (20)을 식 (21)과 같이 간단하게 정리할 수 있었으며, 이상과 같이 정리된 대류열전달계수, h_1를 이용하여 단위면적당 대류열전달량을 식 (22)과

같이 정리할 수 있었다.

온돌표면 대류열전달의 이론분석 결과를 실험적으로 증명하기 위하여 본 연구 (Ⅰ)의 그림 6에서 보는 바와 같이 온도경계층 측정을 위한 온도측점을 온돌바닥에 설치하였다. 이와 같은 간단한 실험장치로 온돌표면에서 온도경계층까지의 온도변화를 측정하여 식 (17) 혹은 식 (18)에 대입하므로서 대류열전달계수, h_1을 구할 수 있도록 하였다.

그림 4에서 실선은 온돌표면과 경계층의 온도차에 따른 대류열전달계수, h_1에 대한 이론치를, 흑색원형마크는 실험치를 나타내고 있으며, 점선은 대류열전달량의 이론치를, 삼각형은 대류열전달량의 실험치를 나타내고 있다.

그림 4에서 보는 바와 같이 대류열전달계수의 이론치와 실험치는 약간의 차이를 보이고 있으나, h_1이 1.0에서 1.5(kcal/m² hr ℃) 사이에 있는 것으로 나타났으며, 대류열전달량은

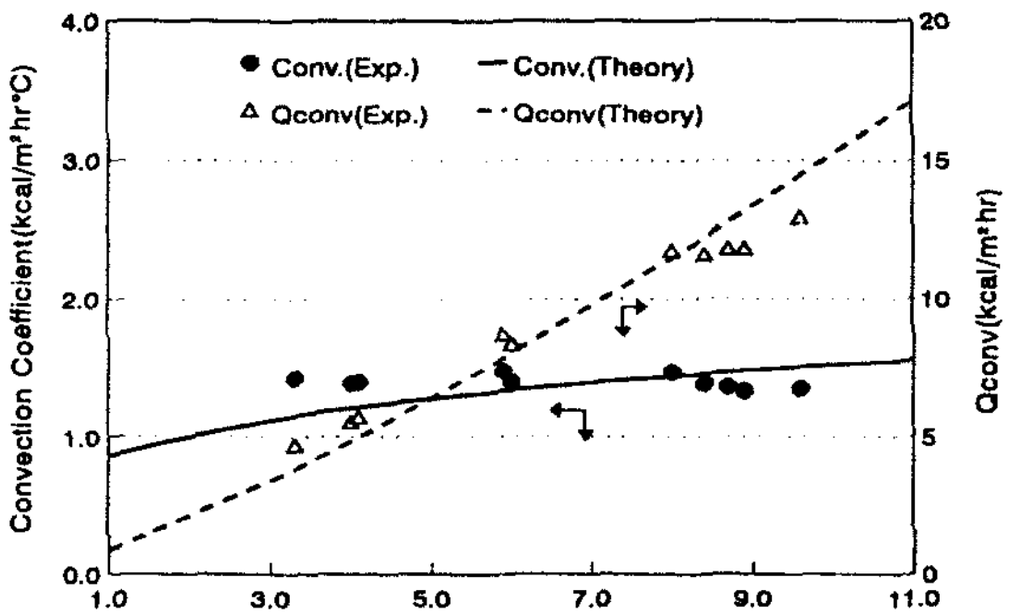

Fig. 4 Covection coefficient and convection heat transfer on Ondol room space.
where, T_1 : Ondol surface temperature(℃)
T_∞ : Air temperature of thermal boundary layer(℃)

온도차($T_1 - T_x$)가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하였으며, 이론치와 실험치는 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3. 온돌난방에서의 대류와 복사열전달 비교

온돌에 가한 열은 온돌표면까지 전도에 의하여 전달되고, 전달된 열은 다시 대류와 복사에 의하여 난방공간에 공급된다. 그림 5에서 총열전달량에 대한 대류와 복사열전달의 비를 Bioceramic을 처리한 경우와 처리하지 않은 경우를 구별하여 온돌표면온도대별로 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 온돌표면 온도대가 비교적 낮은 14~22℃에서는 Bioceramic을 처리한 경우와 처리하지 않은 경우의 복사와 대류열전달비는 65 : 35%였고, 표면온도대가 비교적 높은 22~30℃에서는 Bioceramic을 처리한 경우에는 복사와 대류열전달비가 75 : 25%로 복사열전달비가 다른 경우보다 크게 나타났으며, 같은 온도대에서 Bioceramic을 처리하지 않은 경우에는 복사와 대류열전달비가 71 : 29%로 나타나 Bioceramics 처리가 복사열전달을 촉진하고 있음을 보여주었다.

이와 같은 현상은 Bioceramic이 장파원적외선을 방사하여 복사열전달량을 증가시키기 때문이며, 또한 장파복사열전달은 온돌난방공간의 상하온도차를 줄이기 때문에 방안 분위기를 쾌적하게 할 뿐만 아니라 온돌표면에서 방사되는 원적외선은 인체건강에 좋은 영향을 주게 된다.

지금까지 알려진 바에 의하면 이상흑체의 방사열파장, $\lambda_n = \frac{2989}{T}$ (μm)로 상온 300K에서 $\lambda_n = 9.66\mu$m이다.

그런데 우리 나라(韓國) 주택의 바닥난방에 많이 사용되고 있는 콘크리트 재료는 색상이

gray이므로 파장 $\lambda_m = 1.5 \sim 2.5\mu m$ 범위에서 가장 많은 방사열을 갖게 되므로 인체건강에 좋은 5~15μm의 파장보다는 단파이다. 본 연구에서는 건강에 좋은 장파(6~15μm) 복사열을 얻기 위하여 Bioceramic을 온돌상판에 처리하여 실험하였다.(그림 5 참고).

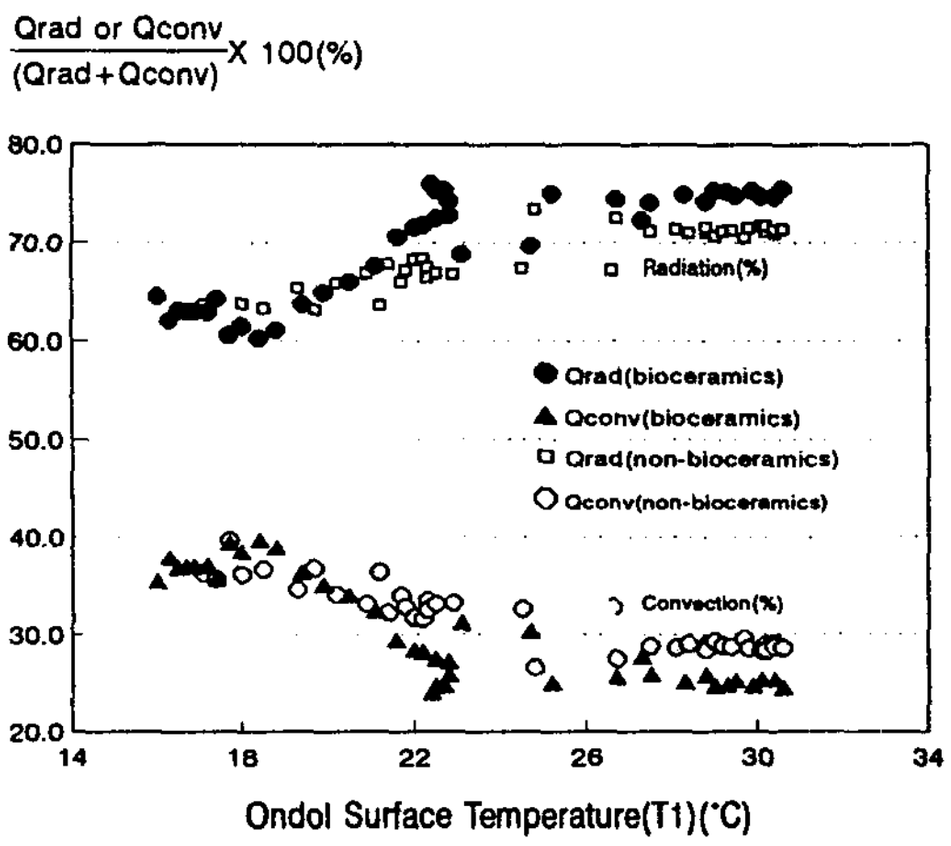

Fig. 5 The ratio of radiation and convection heat transfer to the total heat transfer in the latent heat storage Ondol with and without bioceramic layer.

4. 난방공간의 수직온도분포

그림 6은 바닥난방과 공간난방의 수직 공기층 온도를 난방공간의 높이에 따라 나타낸 수직실온분포곡선이다. 여기서 바닥난방의 경우는 본 연구결과이고 공간난방 경우의 자료는 문헌을 참고하였다.

그림 6에서와 같이 바닥 난방의 경우에는 바닥면에서의 공기온도경계층 두께가 5~7cm였으며, 천정면에서의 공기온도경계층은 7~8cm였고, 나머지 수직공간온도는 거의 일정한 온도수준을 유지하였다. 이에 대하여 공간난방의 경우에는 공기온도경계측의 기울기가 바닥 난방의 경우와 반대방향으로 나타났으며, 온도경계층 두께도 40~45cm로 바닥 난방의 경우보다 수직공간온도변화가 크게 나타났다. 이와 같은 현상은 그림 5에서 보는 바와 같이 바닥 난방의 경우에는 대류열전달보다 복사열전달이 크고, 공간난방의 경우에는 구조적으로 대류열전달이 복사열전달보다 크기 때문인 것으로 판단되었다.

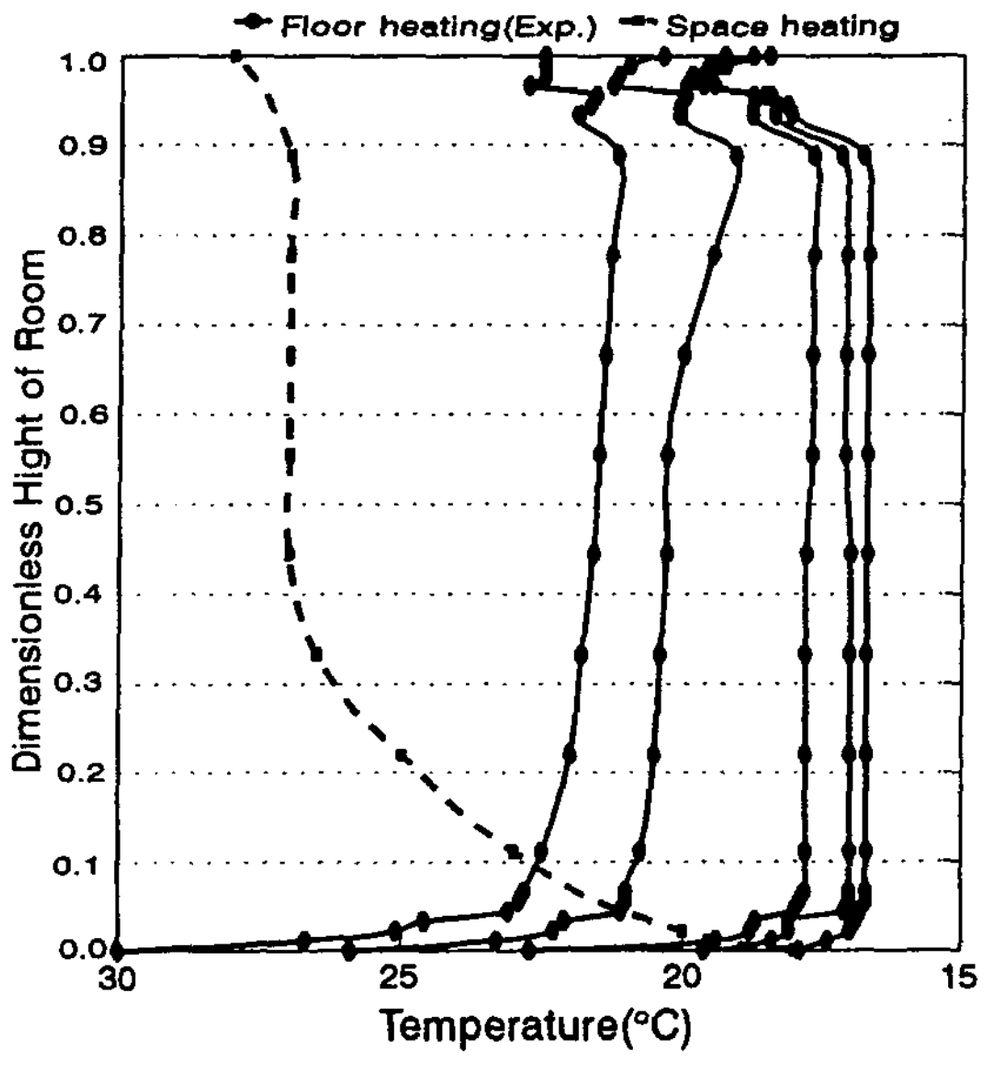

Fig. 6 Vertical room air temperature distribution profile in case of floor and space heating system.

이상과 같은 결과에서 공간난방의 경우에는 바닥면 온도보다 실온이 높고, 공기층별온도가 일정하지 않았으나, 바닥난방의 경우에는 바닥면온도가 실온보다 높고, 수직방향의 공기층온도가 큰 변화없이 일정하였으며, 이는 "足溫頭寒"이라는 인체건강에 알맞는 조건으로 바닥 난방이 공간난방보다 바람직한 난방법임을 알 수 있었다. 바닥 난방에서는 복사열전달이 총열전달의 60~80%(그림 5참고)

를 차지하므로 복사열파장이 인체에 주는 영향을 고려하여야 하기 때문에 본 연구에서는 인체건강에 좋은 원적외선(장파)을 방사하는 바이오세라믹을 온돌바닥에 처리하여 장파방사를 증가시키려 하였다.

Ⅳ. 결 론

현재 이용되고 있는 매설식 온수 순환 온돌의 단점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 잠열축열재와 바이오세라믹을 이용한 조립식 온돌을 설계·제작하였으며, 온돌을 설치한 난방공간의 열전달 특성을 열평형 이론을 적용하여 해석하였다. 또한, 잠열축열－바이오세라믹 온돌의 열특성을 이론적으로 해석한 결과를 검증하기 위하여 본 연구 (Ⅰ)에서 수행한 실험결과와 비교분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 잠열축열－바이오세라믹 온돌의 복사 및 대류열전달, 그리고 열평형식을 정리하면 다음과 같다.

· 복사열전달 :

$$\frac{q_{1-2(rad)}}{A_1}=\frac{\sigma(T_1^4-T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1}+\frac{0.8A_1^2}{0.128A_1^2+1.6}+0.43}$$

· 대류열전달 :

$$\frac{q_{conv}}{A_1}=0.8556(t_1-t_\infty)^{\frac{5}{4}}$$

· 흡수계수의 도입에 의한 열형평식 :

$$\frac{q_L}{A_1}=\varepsilon_1\cdot\sigma\cdot(T_1^4-MRT_1^4)+0.8556(t_1-t_\infty)^{\frac{5}{4}}$$

2. 복사 및 대류열전달의 이론해석 결과는 실험결과와 잘 일치하였으며, 복사열전달량은 바이오세라믹 온돌이 일반온돌보다 1.0～2.0kcal/m² hr 크게 나타났고, 대류열전달계수는 1.0～1.5kcal/m² hr ℃로 분석되었다.

3. 바이오세라믹 온돌과 일반온돌의 복사와 대류열전달비는 각각 75 : 25(%), 71 : 29(%)로서 바이오세라믹에서 방출되는 장파원적외선의 효과가 입증되었다.

4. 잠열축열－바이오세라믹 온돌을 이용한 바닥 난방(Floor heating)과 공간난방(Space Heating)의 실내 공기온도 분포를 분석한 결과 바닥 난방에서는 온도경계층의 두께가 얇고, 온도경계층을 제외한 난방공간의 수직온도분포가 거의 일정하였으나, 공간난방에서는 온도경계층의 두께가 바닥 난방보다 7배이상 컸으며, 수직온도분포의 변화도 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적 기초 연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며, 귀재단의 지원에 감사드립니다.(한국과학재단 : KOSEF 90－0600－03)

참고문헌

1. R.H. Tull, "ASHARE Program on Energy Requirements for Heating and Cooling", ASHARE JOURNAL, pp. 44～46, April 1968.
2. D.Y.S. Lou, "Solidification Process in a Glauber Salt Mixture", pp. 115～122.
3. George A. Lane, Ph. D., "Solar Heat Storage : Latent Heat Materials", Vol. I, pp. 7～8, 1983.

4. T. KUSUDA, "Thermal Response Factors for Multi-Layer Structures of Various Heat Conduction Systems", pp. 247~266, 1969.
5. W.M. Suh, "Modeling of Greenhouse Equipped with a Solar Rocked System and with Carbon Dioxide Enrichment", A Dissertation, pp. 113~128, 1986.
6. A.A. Ghoneim, S.A. Klein, J.A. Duffie, "Analysis of collector-storage building wall using phase-change materials", Solar Energy, Vol. 47(3), 1991.
7. 안병욱 외 2인, "溫突바닥面의 對流熱傳達率에 관한 硏究", 大韓建築學會, 學術發表論文集, Vol. 8(2), 1988.
8. 김철주 외 1인 역, 熱傳達, 희중당, pp. 271~304, 1992.
9. F. Kreith, "Transmission de la chaleur et thermodynamque", masson et Cie, pp. 266~328, 1967.

Floor Heating Characteristics of Latent Heat Storage-Bioceramic Ondol(Ⅱ)

-Focused on Theoretical Analysis-

Song, Hyun-Kap* · Ryou, Young-Sun**

* *Dept. of Agricultural Machinery Engineering, CHung-Buk National University*

** *Research Institute of Regional Development, CHung-Buk National University*

Abstract

Korean traditional Ondol with the sensible heat storage medium has been for a long time used as residential heating system, in these days the concrete Ondol without the heat storage medium was realized as the heating system in the private houses and the apartments. This floor heating system is good for our health. But the concrete Ondol is not desirable for the energy saving and for the maintenance of comfortable room temperature because the heat storage medium is not employed in the concrete Ondol. And as the hot water circulating pipes are buried under the concrete floor, the concrete Ondol system has some kind of problems to be improved. Therefore the new type of Ondol system was developed in this study. And the new Ondol was consisted of latent heat storage material as heat storage medium with a great heat capacity and bioceramics as medium to maintain comfortable room temperature. In this study, the heat transfer characteristics of latent heat storage-bioceramic Ondol was analyzed theoretically.