

복사열전달을 고려한 모형 온수온돌 주택 열성능 시뮬레이션 Simulation of the Thermal Performance on an Ondol House with Hot Water Heating in Consideration of Radiation Heat Transfer

최영돈*, 윤종호**, 홍진관***, 이남호**, 강대호**
Y. D. Choi, J. H. Yoon, J. K. Hong, N. H. Lee, D. H. Kang

Key words : Model House(모형 주택), Radiant Heat Transfer(복사열 전달), Equivalence Thermal Resistance(등가열저항)

Abstract

Thermal performance of test cell of model hot water Ondol house was simulated by equivalence heat resistance and heat capacity method. In this method wall was replaced by two equivalence and one heat capacity. This method enables to simulate the variation of temperature of each element of model house. The effect of pipe diameter, pitch of pipe and with or without consideration of inter-radiation between wall surfaces on the energy consumption rate were investigated. Results show that radiations between the ground surface of room and wall surfaces contribute to the heating of room air by reducing the convection heat loss through the wall surfaces.

기호설명

A : 판표면적, 공기질량이 0일 때 태양열일사율	l_i : 관중심과 방바닥면 사이의 평균거리
B : 대기흡수계수	M : 전열체의 질량
C_p : 비열	\dot{Q}_N : 열유속
D_i : 관중심과 방표면과의 거리	q : 열유속
D_g : 관중심과 지표면 사이의 거리	R : 열저항, 관의 반경
F_{ij} : i 면과 j 면의 형상계수	T : 온도
H : 시간각	U : 등가열전달계수
I_{ti} : 복사열일사율	X, Y, Z : 직교 좌표계
I_a : 천공일사율	그리스 문자
I_{DN} : 직달일사율	β : 태양의 고도
I_r : 반사일사율	γ : 태양 방위각
I_t : 총일사율	δ : 일직위
J_i : i 면의 복사열방사율	Φ : 정남으로 부터의 방위각
k : 흙의 열전도계수	θ : 태양열 복사의 방위각
L : 지역의 위도	σ : Stefan-Boltzmann 상수
l_g : 관중심과 지표면 사이의 평균거리	ϵ_{ij} : i 면에서 j 면으로의 복사열방사율
	ρ : i 면에서의 반사율
	하첨자
	a : 공기
	b : 방바닥
	b_1 : 방바닥 1

*고려대학교 기계공학과

**한국에너지기술 연구소

***경원대학교 건축설비학과

- b_2 : 방바닥 2
- c : 천정
- door : 문
- f : 물
- g : 지면
- i : 입구
- o : 출구
- s_r : 태양열복사
- r : 복사열전달
- r_a : 실내공기
- r_w : 간벽
- w_1 : 벽 1
- w_2 : 벽 2
- win : 창문

1. 서 론

본 연구에서는 아파트 구조의 축소모형인 모형 건물을 이용하여 실내환경에 직접적인 영향을 미치는 온수온돌바닥시스템과 복사난방 단위공간 만을 대상으로 적용이론식 및 개발된 프로그램의 타당성의 검증을 위해서 열성능 실험결과와 비교하였다.

강대호등⁽¹⁾의 연구에서 이미 모형건물(Test Cell)을 대상으로 실내 열환경과 온수온돌 시스템의 열성능 특성을 실험하고, 개발된 부프로그램(subroutine)들을 시뮬레이션하여 각종 온수온돌 시스템의 변수인자 간 상호특성을 분석한 바 있다. 그러나 이 연구에서는 복사난방공간의 주요 영향인자인 복사열전달에 대한 고려가 포함되지 않았기 때문에 모형건물 전체의 절대적인 열성능 평가 보다는 변수인자 상호 간의 비교평가에 초점을 맞추었다.

따라서 본 연구에서는 이미 개발된 부프로그램의 이론식을 보완하여 실내공간의 복사열전달 영향의 고려, 태양복사열의 고려 및 지중 열손실량의 정확한 전산해석 등을 추가로 실시하고 유한체적법에 의한 온수온돌 구조체의 상세해석 부프로그램과 단위복사난방공간(Test Cell) 해석 부프로그램을 결합시킴으로써 정확한 에너지소비율까지도 평가할 수 있도록 프로그램의 정밀도를 개선하였다.

2. 모형건물의 열성능 시뮬레이션

연속난방아파트시스템의 열공급 및 실내온도 변

화를 예측하기 위한 시뮬레이션을 위해서는 각 세대 별의 해석을 해야 하는데 전체시스템의 해석은 많은 시간이 요구되기 때문에 이 해석에 앞서 모형 건물의 연속난방시스템을 해석하여 각 구조의 변화와 운전상태의 변화가 실내환경의 에너지 사용량의 변화에 미치는 영향을 자세히 조사해 볼 필요가 있다.

2.1 모형건물(Test Cell)의 구조

본 연구의 열성능 실험에 사용된 모형건물(Test Cell)은 1987년 우리나라 아파트의 난방방식 개선을 위한 실험연구 목적으로 건립된 것으로 건물계획의 기본구성은 주공아파트의 일반적인 건축사양을 기준한 3.0m 규모의 BOX형 축소모형으로 시공된 정남향 건물 2동이다. 따라서 건물구조는 육중한 중량구조이며 난방은 온수온돌에 의한 바닥난방 방식으로 별도의 기계실에 2Kw 급의 전기보일러 및 온수순환펌프가 설치되어 있다. 작동은 각 모형건물 내벽에 설치된 써모스탯이 온수순환 펌프와 연결되어 온수의 공급과 중단을 조절하고 보일러에 설치된 써모스탯에 의해 보일러의 설정온도를 조절하게 되어 있다.

Fig. 1~Fig. 3은 모형건물의 평면도, 정면도 및 온수온돌 바닥판의 구조를 나타낸다. 온수온돌의 구조는 일반적으로 아파트에 적용되고 있는 형태를 적용하였으며 지중으로의 열손실을 줄이기 위해 바닥슬래브 하부에 500 mm의 단열재를 추가로 설치하였다.

Fig. 4는 모형건물 2동 및 기계실의 배치도와 배관도를 보여주고 있다. 기계실 쪽에 위치한 모형건물 A의 온돌판 배관은 병렬방식을 적용하였으며

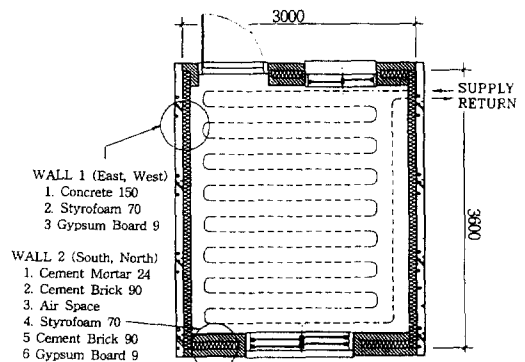


Fig.1 Plan view of test cell

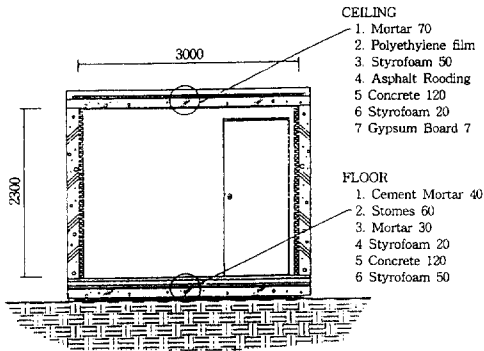


Fig. 2 Front view of test cell

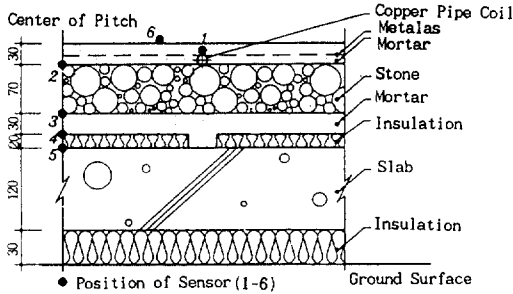


Fig. 3 Sectional view of floor of test cell

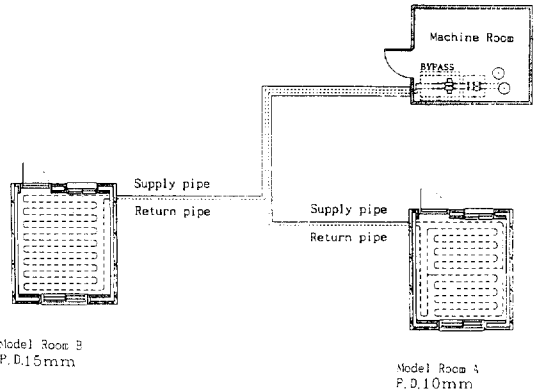


Fig. 4 Schematic diagram of heating pipe network and a plot plan of test cell

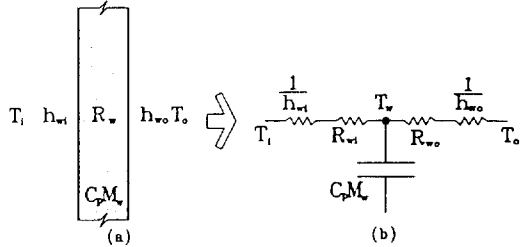


Fig. 5 Equivalence circuit of wall

서측의 모형건물 B는 직렬배관방식으로 구성하였다. 배관경의 차이에 따른 열성능을 측정하기 위해 건물 A의 병렬배관 부위는 10mm 동관을 설치하였으며 그 외의 모든 배관은 15mm 동관을 사용하였다. 기계실로부터 모형건물까지의 모든 배관은 동일조건을 유지하기 위해 전체배관의 마찰손실을 고려하여 등가길이 가 같도록 조절하였다.

건물의 비정상 에너지해석을 위해서는 일반적으로 유한차분법이나 응답계수법이 사용되어 왔다. 그러나 이 방법은 단독주택이나 연립주택 등 소규모 주택의 에너지해석에는 적합하나 대규모 아파트의 비정상 에너지해석에 사용할 경우 전산시간이 너무 많이 소요되어 적합하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 정확성이 많이 떨어지지 않으며 전산시간이 적게 들어 대규모 아파트의 전산해석에 적합한 등가열저항-열용량법⁽²⁾을 개발하여 사용하였다.

이 방법에서는 하나의 벽체를 2개의 열저항과 1점에 뭉쳐 있는 열용량(thermal capacitance)으로 대체하여 등가회로로 만들어 해석하게 된다.

Fig.5는 전도열저항이 R_w 이고 열용량이 $C_p M_w$ 인

벽체를 등가회로로 변화시킨 그림이다. 여기에서 전 열용량이 1점에 뭉쳐있는 점을 어떻게 잡느냐가 문제인데 본 연구에서는 내벽쪽과 외벽쪽의 전도열저항이 서로 같은점을 택하여

$$R_{wi} = R_{wo} = \frac{R_w}{2} \quad (1)$$

으로 할 경우 실제 벽체를 가장 잘 나타낸 것으로 생각되고 전산해석도 간편하므로 이러한 방법을 택하였다. Fig.5에서 T_w 는 전 열용량이 뭉쳐진 점에서의 온도이다.

모형건물의 전산시뮬레이션을 간편하게 하기 위해서 모형건물 각 구성체를 천정, 창문, 문, 벽 1, 벽 2, 간벽, 바닥 1, 바닥 2, 및 실내공기의 9개 부분으로 나누고 각부분의 등가온도를 T_c , T_{win} , T_{door} , T_{w1} , T_{w2} , T_{rw} , T_{d1} , T_{d2} , 및 T_{ra} 라 하였다. 여기서 벽 1이란 창문과 문이 없는 양측벽을 나타내고 벽 2는 창문과 문이 달린 벽을 나타내며 방바닥 1은 온수관을 기준으로 온수관 중심 윗쪽 부분의 방바닥을 나타내고 방바닥 2는 온수관 중심 아랫쪽의 방바닥을 나타낸다. 모형주택을 등가회로

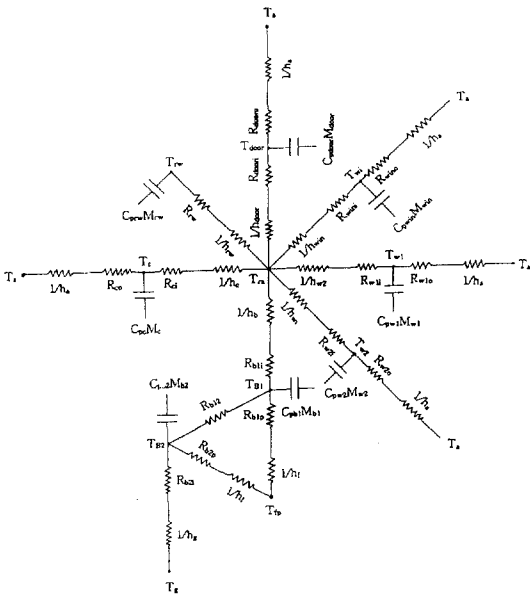


Fig.6 Equivalence circuit of test cell constructed by equivalence heat resistance and heat capacity method.

화 하면 Fig.6과 같다.

Fig.6에서 $h_a, h_b, h_g, h_{w1}, h_{w2}, h_{win}, h_{door}, h_c,$ 및 h_f 는 각 구성체 벽면의 열전달계수를 나타내고 $C_{pc}M_c, C_{pra}M_{ra}, C_{prw}M_{rw}, C_{pdoor}M_{door}, C_{pwin}M_{win}, C_{pw1}M_{w1}, C_{pw2}M_{w2}, C_{pb1}M_{b1},$ 및 $C_{pb2}M_{b2}$ 는 각 구성체의 열용량을 나타낸다.

각 열용량점에 대해 열평형방정식을 세우면 다음과 같다.

방바닥1

$$C_{pb1}M_{b1} \frac{\partial T_{b1}}{\partial t} = \dot{Q}_{p1} - \dot{Q}_{b1} + A_b U_{b12} (T_{b2} - T_{b1}) + \dot{Q}_{rb1} \quad (2)$$

여기서 \dot{Q}_{p1} 은 온수로부터 방바닥 1으로의 전열율로

$$\dot{Q}_{p1} = (\bar{T}_{fp} - T_{b1}) A_p U_{p1} \quad (3)$$

으로 계산한다 여기서 \bar{T}_{fp} 는 온수의 평균온도이고 A_p 는 온수관의 총전열면적이고 U_{p1} 은 온수와 방바닥 1과의 등가열전달계수로

$$U_{p1} = \frac{1}{1/h_f + R_{b1p}} \quad (4)$$

로 계산한다. 식(4)에서 R_{b1p} 은 방바닥 1(온수관의 윗부분)의 등가열저항으로 유한체적벽에 의한 전산

해석으로 그 값을 계산한다. 식(2)에서 \dot{Q}_{b1} 은 방바닥 1에서 실내공기로의 전열율로

$$\dot{Q}_{b1} = (T_{b1} - T_{ra}) A_p U_{b1} \quad (5)$$

으로 계산되며

$$U_{b1} = \frac{1}{\frac{R_1}{1_t h_b} + R_{b1i}} \quad (6)$$

으로 계산한다. 식(6)에서의 1_t 는 관중심과 방바닥면 사이의 평균거리로

$$1_t = \frac{\pi}{2} D_i \quad (7)$$

로 계산한다⁽³⁾. 식(2)에서 A_b 는 방바닥 면적이고, U_{b12} 는 방바닥 1과 방바닥 2 사이의 등가열전달계수이며 \dot{Q}_{rb1} 은 방바닥표면에서 각 벽체로의 복사에 의한 순열방사율로 입사율과 방사율의 차를 나타낸다. \dot{Q}_{rb1} 을 계산하기 위해서 실내 각 벽체 사이의 복사열전달을 해석하였다.

방바닥 2

방바닥 2는 온수코일 중심선을 기준으로 아래쪽 바닥을 말한다.

방바닥 2의 열평형방정식은

$$C_{pb2}M_{b2} \frac{\partial T_{b2}}{\partial t} = \dot{Q}_{p2} - \dot{Q}_{b2} + A_b U_{b12} (T_{b1} - T_{b2}) - \dot{Q}_{rb2} \quad (8)$$

이 식에서 \dot{Q}_{p2} 는 온수로부터 방바닥 2로의 전열율로

$$\dot{Q}_{p2} = (\bar{T}_{fp} - T_{b2}) A_p U_{p2} \quad (9)$$

로 계산된다. 온수관의 총전열면적은

$$A_p = 2\pi R_1 L_p \quad (10)$$

로 계산되고 온수와 방바닥 2 사이의 등가열전달계수 U_{p2} 는

$$U_{p2} = \frac{1}{\frac{1}{h_f} + R_{b2p}} \quad (11)$$

로 계산하고 이 식에서 R_{b2p} 는 전산열전도해석에서 계산한다. 식(10)에서 R_1 은 내반경이고 L_p 는 관의 길이이다. \dot{Q}_{b2} 는 방바닥 2에서 지하 땅속 혹은 아래층으로의 전열율로

$$\dot{Q}_{b2} = (T_{b2} - T_g) A_p U_{b2} \quad (12)$$

로 계산하며 이 식에서 T_g 는 땅속의 등가평균온도이거나 아래층 실내공기 온도이다. U_{b2} 는

$$U_{b2} = \frac{1}{\frac{R_1}{1_g h_g} + R_{b2i}} \quad (13)$$

로 계산한다. 이 식에서 R_{b2i} 는 방바닥 2에서 지하

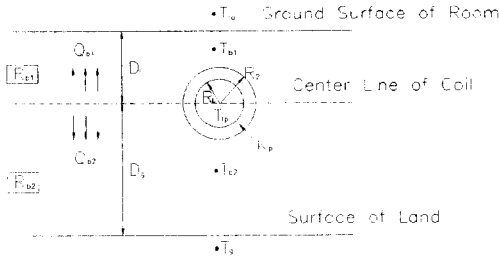


Fig. 7 Sectional view of floor

바닥면까지의 등가열저항으로 전산열전도해석에서 계산하고 l_g 는 관중심에서 지하 바닥면까지의 평균 거리로

$$l_g = \frac{\pi}{2} D_g \quad (14)$$

로 계산되며 h_g 는 지하바닥면과 흙 사이의 열전달 계수이다.

실내공기

$$C_{pra} M_{ra} \frac{\partial T_{ra}}{\partial t} = \dot{Q}_{b1} - \dot{Q}_{w1i} - \dot{Q}_{w2i} - \dot{Q}_{ci} - \dot{Q}_{wini} - \dot{Q}_{doori} - \dot{Q}_{rwi} \quad (15)$$

식 (15)에서 \dot{Q}_{w1i} 과 \dot{Q}_{w2i} 는 실내공기와 벽 1과 벽 2 사이의 전열율이고 \dot{Q}_{ci} 는 실내공기와 천정 사이의 전열율이며 \dot{Q}_{wini} 는 실내공기와 창문 사이의 전열율이고 \dot{Q}_{doori} 는 실내공기와 문 사이의 전열율이며 \dot{Q}_{rwi} 는 실내공기와 간벽 사이의 전열율로 각각 다음의 식으로 계산된다.

$$\dot{Q}_{w1i} = \frac{1}{\frac{1}{h_{w1}} + R_{w1i}} A_{w1} (T_{ra} - T_{w1}) \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{w2i} = \frac{1}{\frac{1}{h_{w2}} + R_{w2i}} A_{w2} (T_{ra} - T_{w2}) \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{ci} = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + R_{ci}} A_c (T_{ra} - T_c) \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{wini} = \frac{1}{\frac{1}{h_{win}} + R_{wini}} A_{win} (T_{ra} - T_{win}) \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{doori} = \frac{1}{\frac{1}{h_{door}} + R_{doori}} A_{door} (T_{ra} - T_{door}) \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{rwi} = \frac{1}{\frac{1}{h_{rw}} + R_{rwi}} A_{rw} (T_{ra} - T_{rw}) \quad (21)$$

식 (15)~식 (21)에서 A_{w1} , A_{w2} , A_c , A_{win} 및 A_{rw} 는 각 구성체의 전열면적이다.

천정

$$C_{pc} M_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \dot{Q}_{ci} - \dot{Q}_{co} - \dot{Q}_{cr} + \dot{Q}_{csr} \quad (22)$$

이 식에서 \dot{Q}_{co} 는 천정과 외기와의 전열율로

$$\dot{Q}_{co} = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_{co}} A_c (T_c - T_a) \quad (23)$$

식 (22)에서 \dot{Q}_{csr} 는 태양열복사에 의해 옥상면에 입사된 열량 중 구조체에 흡수된 열량을 나타내고 \dot{Q}_{cr} 은 천정면에서 다른 벽체로의 복사에 의한 순 방열량(net emitted radiation heat flowrate)을 나타낸다. 이 값의 계산은 뒤에 설명할 실내의 복사 열전달에서 설명하기로 한다.

창문

창문은 외기와 접한 창으로 열평형방정식을 세우면 다음과 같다.

$$C_{pwin} M_{win} \frac{\partial T_{win}}{\partial t} = \dot{Q}_{wini} - \dot{Q}_{wino} - \dot{Q}_{winr} \quad (24)$$

이 식에서 \dot{Q}_{wino} 은 창문과 외기와의 전열율로

$$\dot{Q}_{wino} = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_{wino}} A_{win} (T_{win} - T_a) \quad (25)$$

이고 \dot{Q}_{winr} 은 실내 각 벽체 사이의 복사에 의한 열 방출율을 나타낸다.

벽 1

$$C_{pw1} M_{w1} \frac{\partial T_{w1}}{\partial t} = \dot{Q}_{w1i} - \dot{Q}_{w1o} - \dot{Q}_{w1r} \quad (26)$$

이 식에서 \dot{Q}_{w1o} 은 벽 1과 외기 사이의 전열율로

$$\dot{Q}_{w1o} = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_{w1o}} A_{w1} (T_{w1} - T_a) \quad (27)$$

로 계산하고 \dot{Q}_{w1r} 은 실내 벽체들 사이의 복사열전달에 의한 벽 1의 방열율을 나타낸다.

벽 2

$$C_{pw2} M_{w2} \frac{\partial T_{w2}}{\partial t} = \dot{Q}_{w2i} - \dot{Q}_{w2o} - \dot{Q}_{w2r} \quad (28)$$

이 식에서 \dot{Q}_{w2o} 는 벽 2와 외기와의 전열율로

$$\dot{Q}_{w2o} = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_{w2o}} A_{w2} (T_{w2} - T_a) \quad (29)$$

식 (28)에서 \dot{Q}_{w2r} 은 벽체들 사이의 복사열전달에 의한 벽 2의 방열율로 태양열 복사의 영향도 고려되었다.

문

문의 열평형방정식은 다음과 같다.

$$C_{pdoor} M_{door} \frac{\partial T_{door}}{\partial t} = \dot{Q}_{doori} - \dot{Q}_{dooro} - \dot{Q}_{doorr} \quad (30)$$

이 식에서 \dot{Q}_{dooro} 는 문에서 외기로의 전열율로

$$\dot{Q}_{dooro} = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_{dooro}} A_{door} (T_{door} - T_a) \quad (31)$$

\dot{Q}_{doorr} 은 실내 벽체들 사이의 복사열전달에 의한 문에서 실내 벽체로의 순방열량이다.

2.2 태양열 복사율의 계산

난방 계절에 아파트의 난방부하 계산시 태양열 복사의 영향을 정확히 고려하는 것은 대단히 중요하다. 태양열 복사는 아파트 설치지역의 위도, 열 성능해석 시의 달과 일짜, 그날의 일기, 아파트 설치의 방위, 아파트 동간의 간격, 아파트의 폭과 높이, 창문의 투과율과 흡수율 및 창문의 넓이 등 대단히 많은 인자들에 의해서 영향을 받는다. 따라서 태양열 복사의 영향을 고려할 때 가능한 이러한 인자들이 모두 고려되는 것이 가장 바람직하다. 본 연구에서 이러한 모든 인자들이 가능한 정확히 고려되는 일반적인 전산해석 프로그램을 작성하려 하였다. 태양열 복사량의 계산과정은 다음과 같다.

(1) 겉보기태양시의 계산

우리들이 사용하고 있는 지역표준시(Local Standard Time, LST)와 겉보기태양시(Apparent Solar Time, AST)은 서로 다르며 그 사이의 관계는 다음과 같다.

$$AST = LST + ET + 4(LSM - LON) \quad (32)$$

여기서 ET=시간방정식(분)

LSM=지역표준시의 경도

LON=지역의 경도

이다. 식(32)에서 시간의 변화는 분으로 계산한다.

(2) 태양열복사율의 계산

지구상의 어떤 표면에 도달하는 태양열복사율(I_t)는 직달일사율(I_{DN})과 천공확산일사율(I_d)과 지표면반사일사율(I_r)로 이루어진다. 표면에서의 태양열 복사의 입사각을 θ 라 하면

$$I_t = I_{DN} \cos \theta + I_d + I_r \quad (33)$$

이다. 식(33)의 우변을 계산하는 방법은 다음과 같다.

(i) 태양각의 계산

태양열 복사의 입사각 θ 를 계산하는 과정은 다음과 같다.

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (34)$$

$$\cos \phi = (\sin \beta \sin L - \sin \delta) / (\cos \beta \cos L) \quad (35)$$

식 (34), (35)에서

β =태양의 고도

ϕ =정남으로 부터의 태양의 방위각

L =지역의 위도

δ =태양의 경사각

H =시간각

이며 시간각 H 는

$$H = 0.25(\text{태양 정오시로 부터의 시간(분)}) \quad (36)$$

이다. 태양열 복사의 입사각 θ 는 다음과 같이 계산한다.

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (37)$$

여기서 Σ 는 수평면으로 부터의 입사면의 경사각으로 수평면인 경우 0° , 수직면인 경우 90° 이다.

(ii) 직달일사율의 계산

쾌청한 날 직달일사율, I_{DN} 은

$$I_{DN} = \frac{A}{\exp(B/\sin \beta)} \quad (38)$$

로 계산한다.

(iii) 천공확산일사율과 지표면반사일사율의 계산
천공확산일사율과 지표면반사일사율은 다음과 같이 계산한다.

수평면인 경우

$$I_d = C I_{DN} \quad (39)$$

수직면인 경우

$$I_d = [CY + 0.5\rho_g(C + \sin \beta)] I_{DN} \quad (40)$$

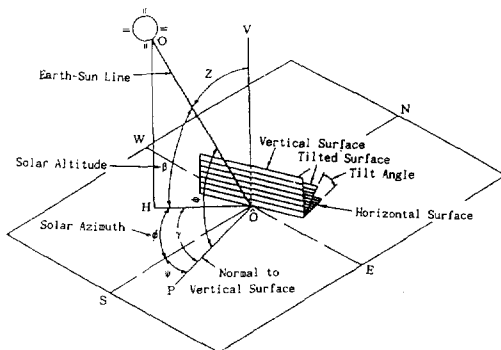


Fig.8 Solar angles for vertical and horizontal surfaces.

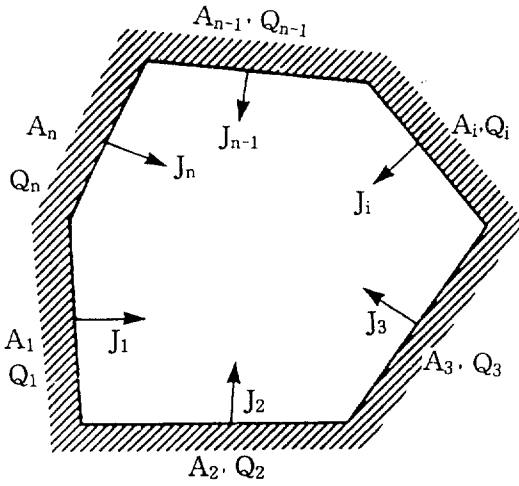


Fig.9 General n-surface enclosure

여기서 Y 는

$$\cos \theta > -0.2 \text{ 이면} \\ Y = 0.55 + 0.437 \cos \theta + 0.313 \cos^2 \theta \quad (41)$$

기타의 경우는

$$Y = 0.45 \quad (42)$$

이다.

식 (40)에서 ρ_g 는 지표면의 반사율이다.

2.3 실내 벽체 사이의 복사열 계산⁽⁵⁾

Fig. 9와 같이 n 개의 표면으로 이루어진 밀폐공간이 있다고 하자. 각 표면에서 복사에 의한 열방사율은

$$J_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + \rho_i H_i \quad (43)$$

로 나타내어 진다. 이 식에서 ϵ_i 는 i 면의 방사율이고 H_i 는 i 면에 복사열입사율이며 ρ_i 는 입사된 복사열 중 반사되는 비율을 나타낸다.

한편

$$H_i = \sum_{j=1}^n J_j (\overline{\tau_{ij}} F_{ij}) + \sigma T_g^4 \sum_{j=1}^n \overline{\epsilon_{ij}} F_{ij} \quad (44)$$

이다. 이 식에서 $\overline{\tau_{ij}}$ 는 방사된 열량 중 가스에서의 투과율을 나타내고 $\overline{\epsilon_{ij}}$ 는 가스의 열방사율을 나타낸다. 일반적으로 공기인 경우 $\overline{\tau_{ij}}$ 는 $i \neq j$ 인 경우 1로 간주하고 $\overline{\epsilon_{ij}}$ 는 0으로 간주한다. 그러나 $\overline{\tau_{ii}}$ 는 0이다.

식(44)를 전개하면

$$a_{11}J_1 + a_{12}J_2 + a_{13}J_3 + \dots + a_{1n}J_n + a_{1n+1}J_{n+1} + K_1 = 0 \\ a_{21}J_1 + a_{22}J_2 + a_{23}J_3 + \dots + a_{2n}J_n + a_{2n+1}J_{n+1}$$

$$+ K_2 = 0$$

⋮

$$a_{n1}J_1 + a_{n2}J_2 + a_{n3}J_3 + \dots + a_{nn}J_n + a_{nn+1}J_{n+1} + K_n = 0 \quad (45)$$

식 (45)를 연립으로 풀어서 J_i 가 계산되면 i 에서 실제로 방출되는 열량은

$$Q = A_i (\epsilon_i / \rho_i) [\rho_i T_i^4 - ((1 - \rho_i) / (\epsilon_i)) J_i] \quad (46)$$

으로 계산한다.

2.4 방바닥면과 지하 흙 사이의 열전달계수 계산

방바닥과 지하 흙 사이의 열전달계수를 정확히 구하기 위해서는 방바닥과 지하 사이의 온도분포 해석이 필요하다. 방바닥과 흙 사이의 구성체는 각 위치에 따라서 온도분포가 다르기 때문에 에너지방정식을 직접 해석해야 가장 합리적으로 열전달계수를 구할 수 있다. 본 연구에서는 이를 위하여 정상상태에서의 에너지방정식을 이산화(discretization)하여 계산하는 유한체적법을 사용하는 전산해석을 시도하였다.

(1) 해석모형 및 격자계

온도분포 해석을 위한 방바닥 형상은 Fig.10과 같다. 방바닥은 균일한 열유속을 갖는 부분과 공기와 직접 접촉해 있는 2부분으로 나누어지며 지하로는 충분한 길이를 갖는 흙으로 구성되어 있다. 유한체적법⁽⁶⁾에 의거하여 계산을 용이하게 할 수 있도록 계산공간을 Fig.11과 같이 가정하였으며 X, Y, Z 각 좌표계에서의 경계면은 열유속이 거의 0이 되도록 충분한 길이를 선정하였다.

(2) 지배방정식 및 경계조건

온도분포 해석을 위한 정상상태에서의 지배방정식은 다음과 같다.

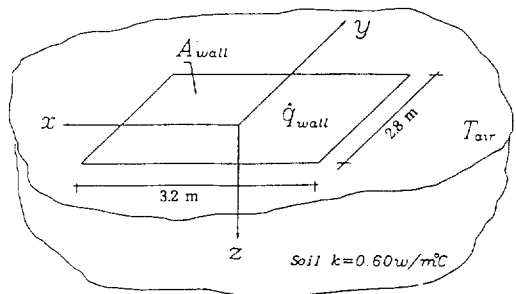


Fig.10 Real space

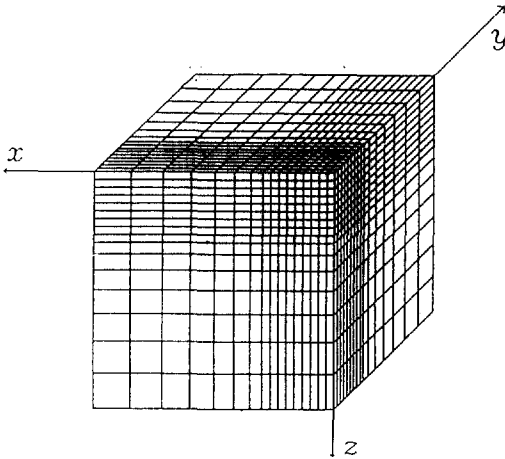


Fig.11 Computational space

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(k\frac{\partial T}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Y}\left(k\frac{\partial T}{\partial Y}\right) + \frac{\partial}{\partial Z}\left(k\frac{\partial T}{\partial Z}\right) = 0 \quad (47)$$

여기서 k 는 방바닥 밑에 있는 흙의 열전달계수이며 본 계산에 사용한 값은 $0.60(W/m^{\circ}C)$ 의 일정한 값이었다.

전산해석에 사용한 경계조건은

- 수평면 중 열유속이 출입하는 부분 : $\dot{q} = 0$
- 수평면 중 열유속이 없이 공기와 접한 부분 : $T = T_{air}$
- 그 밖의 계산 경계면 : $\dot{q} = 0$

이었다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 해석프로그램의 검증

Fig.12는 모형주택을 대상으로 3단계 열성능실험을 행했던 1992년 1월 14일부터 1월 28일까지 실내온도를 $20^{\circ}C$ 로 제어하기 위하여 일평균 외기온도, 일사량, 유속 등의 변화 및 날짜에 따른 관에서의 총열량투입율에 대한 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다.

Fig.12에서 첫날인 14일을 제외하고는 실험결과와 해석결과가 거의 같은 경향으로 잘 일치되고 있음을 보여주고 있다. 1월 15일 부터는 전산해석의 결과는 모형주택B의 실험결과와 경향을 잘 추종하고 있어서 본 연구에서 개발한 모형주택 열성능 프로그램의 정확성을 나타내주고 있다. 그러나 날짜

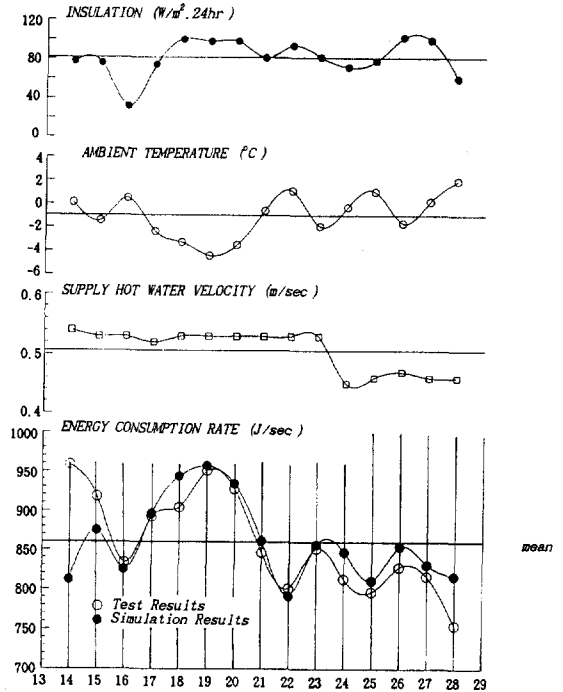


Fig.12 Comparison of total heat supply (Test Cell B)

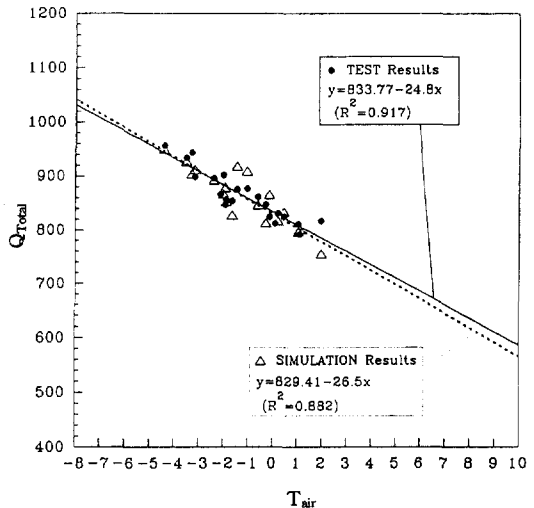


Fig.13 Energy consumption rate with respect to ambient temperature (Test Cell B)

의 변화에 따라서 약간의 차이를 나타내는 것은 본 연구에서 오차발생 요인으로 추정되는 1) 실내벽면의 자연대류 열전달계수, 2) 흙의 열전달계수, 3) 실내표면의 복사열 반사계수, 4) 일사량에 따른 패청도계수 (cloud factor), 5) 침입공기량 등의 부정

확한 설정에 기인되었다고 생각된다.

Fig.13에 외기온도 변화에 대한 에너지소비율의 실험 및 해석결과를 산포도 형태로 도시한 후 각기 선형회기분석을 실시하여 회기식을 도출하였다. 분석결과 실험값 및 시뮬레이션값 모두가 강한 선형성을 나타내며 실험에 대한 회기식의 결정계수가 0.917, 해석의 경우가 0.882로 도출되 회기식 또한 선형성이 큰 것으로 판명되었다. 따라서 모형건물의 에너지소비량은 외기온도의 강하에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있으며 본 연구의 프로그램의 정확도를 다시 한번 입증하였다.

3.2 온수온돌시스템 인자에 따른 열성능특성 분석

모형건물을 대상으로 프로그램의 검증실험을 한 결과 실험치와 해석치가 상당히 근접함으로써 제작된 프로그램의 정확성이 입증되었다. 따라서 본 절에서는 모형건물 열성능해석 프로그램을 이용하여 온수, 온돌 시스템의 각종원자를 변화시키며 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에 이용된 외기자료는 1월 중의 실측한 자료를 입력하여 사용하였으며 변수 시뮬레이션에 기준이 되는 운전조건 및 구성체의 기준값은 다음과 같다.

- 공급온수 온도 : 49°C
- 모형건물 : 모형건물 B(관경 $\phi=15\text{mm}$ 의 직렬 배관방식)
- 마감물탈층 두께 : 0.03m
- 슬래브 하부 단열재 두께 : 0.05m
- 배관길이(코일피치) : 41.8m(피치=20cm)
- 공급온수유속 : 0.4m/sec
- 복사열의 고려 유무 : 복사열의 고려

Fig.14와 Fig.15는 온수공급온도를 40°C, 49°C, 60°C 및 70°C로 변화시킬 경우 10mm 동관을 병렬로 배치한 모형주택 A와, 15mm 동관을 직렬로 배치한 모형주택 B에서의 총열투입율의 날짜에 따른 변화를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 공급온수의 온도가 높을수록 약간씩 에너지가 더 소비됨을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 볼 때 온수 공급온도의 차이에 따른 에너지소비율의 변화는 매우 미약하며 따라서 공급온도는 모형건물의 에너지 소비에 직접적인 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그리고 배관방식 및 관경을 달리한 모형건물 A와 B의 총열투입율에 큰 차이가 없는 것은 관경 및 배관방식도 총열투입율에 큰 영향을 미치지 않

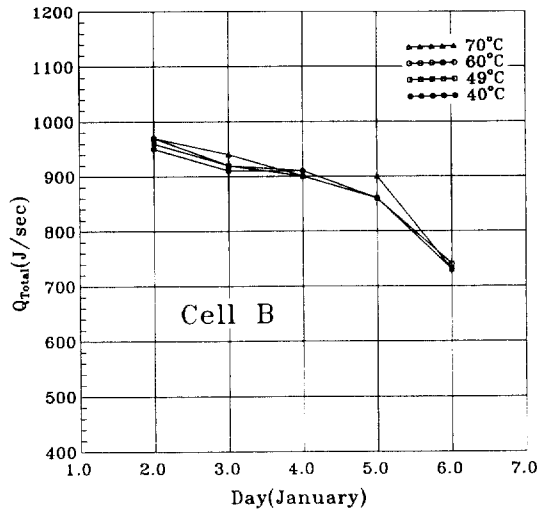


Fig.14 Total heat supply with respect to hot water supply temperature (Test Cell A).

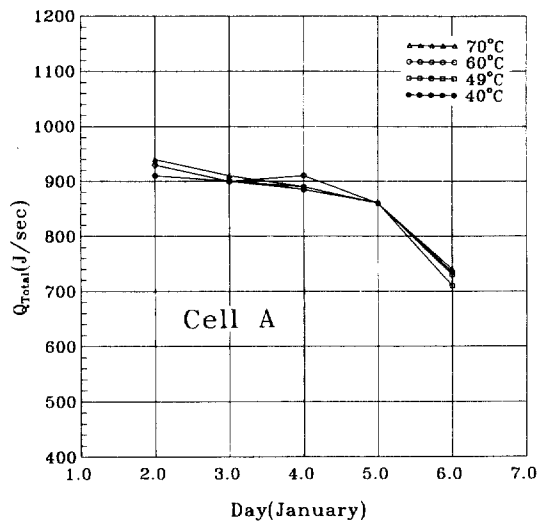


Fig.15 Total heat supply with respect to hot water supply temperature (Test Cell B)

음을 알 수 있다.

Fig.16은 온수공급온도를 기준변수값으로 일정하게 했을 때 온수관의 총배관길이(코일피치)의 변화에 따른 총열투입율의 변화를 나타낸다. 이 그림에 의하면 온수관의 길이가 길어질수록 즉 코일피치가 작아질수록 열량총투입율이 감소하여 에너지 절약 면에서 유리함을 알 수 있으며 외기온도가 낮아짐에 따라 그 차이는 더 커진다. 특히 피치가 15cm

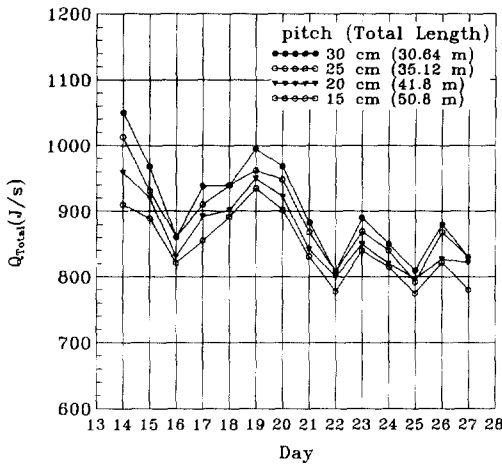


Fig.16 Total heat supply with variation of total pipe length (Test Cell B).

인 경우는 외기온도의 변화에 관계 없이 상대적으로 가장 낮은 소비율을 보이고 있으나 20cm와 25 cm의 경우는 외기온도의 상승에 따라 그 차이가 줄어들음을 알 수 있다. 또한 특이한 점은 시뮬레이션을 시작한 첫날에는 온수관 길이가 총열투입율에 미치는 영향이 더 크고 날씨가 지날수록 그 차이가 감소함을 알 수 있다. 이는 비평형열전달이 일어날 때 일수록 온수관 길이가 긴 경우 에너지 절약효과가 크다는 것을 나타낸다. 따라서 평형열전달에 가까운 연속난방방식에서도 온수관 길이의 증가가 에너지 절약효과를 나타내고 비평형열전달이 큰 간헐난방 방식에서는 그효과가 더 크다는 것을 나타낸다.

Fig.17은 외기 평균온도를 인위적으로 변화시킬 때 각 열전달율의 변화를 나타내고 있다. 외기 평균온도가 -10°C 에서 $+5^{\circ}\text{C}$ 까지 변화에 따라 방바닥에서 자연대류에 의한 실내공기로의 열전달율은 약 $334(\text{J}/\text{sec})$ 에서 $156(\text{J}/\text{sec})$ 으로 감소함을 알 수 있다. 그러나 복사열전달율은 이보다 훨씬 커서 약 $878(\text{J}/\text{sec})$ 에서 $474(\text{J}/\text{sec})$ 로 감소한다. Fig.18에 의하면 방바닥 복사열전달율의 비율(1번선)은 자연대류열전달율보다 커서 총실내열투입의 약 70% 정도를 차지함을 알 수 있다. 이 결과는 과거의 연구결과들과 좀 상이하게 보여진다. 그러나 Fig.17의 열전달율은 열이 방바닥을 떠날 때 어떤 형태로 떠나느냐를 나타내지 바닥을 떠난 열이 모두 난방에 사용되었다는 것을 의미하는 것은 아니

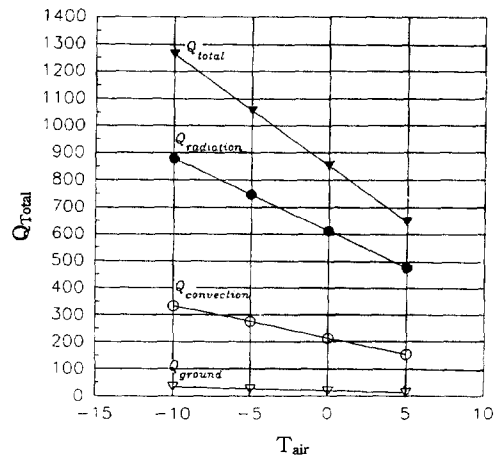


Fig.17 Radiant heat transfer rate and convection heat transfer rate of floor with respect to ambient air temperature (Test Cell B).

다. 그러나 Fig.17이 의미하는 것은 열이 방바닥을 떠날 때 약 70% 정도는 복사의 형태로 떠난다는 것을 의미하며 이것이 온돌난방을 복사난방이라고 부르게 된 주된 이유라고 생각된다.

자연대류 열전달로 방바닥에서 실내공기로 전달된 열량은 모두 실내의 난방작용에 소요된다. 그러나 복사의 형태로 떠난 열은 직접 실내공기온도를 가열하는데 소요되지 않고 복사열전달이 없는 경우보다 벽체 표면온도를 더 많이 상승시킨다. 이 벽체 표면온도의 상승은 실내공기로 부터 벽체로의 대류열전달을 억제하게 된다. 따라서 온돌난방에서 복사열전달이 난방에 기여하는 효과는 직접 실내공기온도를 가열하는데 있는 것이 아니고 실내벽체 표면온도를 상승시킴으로써 자연대류 열손실을 감소시키는 역할을 한다. 그러나 실내 공기온도를 일정하게 유지할 때 벽체와 외기 사이의 온도차가 크게 되면 벽에서의 열전도를 증가시켜 외부로의 열손실율도 증가된다. 이와같은 열손실은 복사열전달의 영향 때문에 생긴 것이다.

따라서 순수하게 난방작용에 투입된 열량 중에서 복사열전달이 차지하는 비율은 Fig.18의 1번선과 같이 많지 않으며 앞에 기술한 바와 같이 실질적으로 복사열전달이 난방에 기여한 양을 계산하여 도시하면 Fig.18의 2번선과 같다. 외기평균온도가 -10°C 인 경우 복사열전달이 난방에 기여하는 비율은 약 43% 정도이고 외기온도가 5°C 로 증가하면 이 비율이 53% 정도로 증가하여 외기 평균온도가 어느

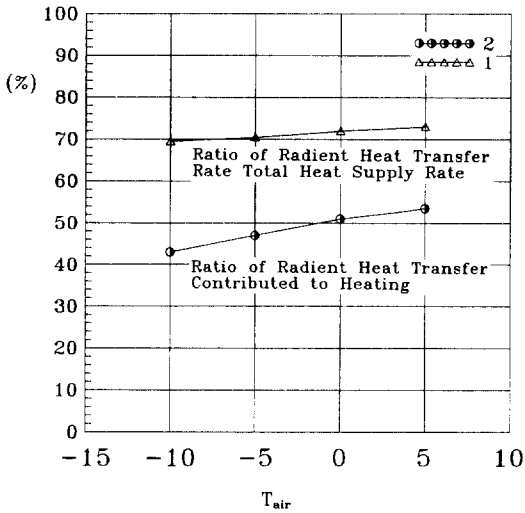


Fig.18 Ratio of radiant heat transfer rate to total heat supply rate.

정도까지 증가할수록 복사열전달이 난방에 기여하는 비율이 증가됨을 알 수 있다.

4. 결 론

바닥복사난방방식인 온수온돌에 의해 난방되는 모형건물 실내공간의 열전달 특성을 분석해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가열면인 방바닥에서 복사와 대류의 열전달 비율은 약 7 : 3으로 복사의 비율이 상당히 큰 부분을 차지하며 외기온도가 어느 정도까지 상승할수록 그 차이는 커지게 된다. 그러나 실지로 이 양이 모두 난방에 이용되는 것은 아니며 방바닥에서 복사에 의해 벽체로 전달된 열은 벽체의 표면온도를 상승시켜 대류에 의해 외기로 손실되는 열손실을 억제하는 역할로 난방에 기여하지만 그

일부는 난방에 기여하지 못하고 외부로 손실된다. 따라서 복사가 실지로 난방에 기여한 비율을 산정해 보면 외기온도에 따라 43%~53% 정도로 복사와 대류가 거의 비슷한 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

(2) 실내온도를 일정하게 유지하는 조건하에서 바닥면을 가열하는 바닥복사난방방식과 실내공기를 직접 가열하는 대류난방방식의 에너지소비율을 비교하면 바닥복사난방방식의 에너지 소비율이 더 크다. 따라서 바닥복사난방방식은 에너지 절약적 측면에서 불리한 것으로 나타났다. 이는 복사에 의해 외기와 접해 있는 벽체온도가 상승되어 열손실이 커지기 때문이며, 외기에 접한 벽체의 비율이 커질수록 그 차이는 커지게 된다.

참고문헌

1. 강대호, 1990, "아파트 난방시스템의 효율 개선에 관한 연구", 한국에너지기술연구소 연구보고서.
2. Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P. and Garic, E. N., 1985, Heat Transfer in Building, Handbook of Heat Transfer Application, McGraw Hill Co., 9 : 33~9 : 42.
3. Holman, J. P., 1986, "Heat Transfer", 6th Ed., McGraw Hill Co., pp. 71~81.
4. ASHRAE Handbook, Fundamentals, Fenestration, 27.1~27.42, 1985.
5. Frank, P.E., Kreith, 1984, Data Books Heat Transfer, Genium Publishing Corporation. Section 505.3~505.7.
6. Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill Co.