

건식온돌시스템의 전열특성 및 방열성능에 관한 이론적 분석

장 용 성^{*†}, 유 기 형^{*}, 조 동 우^{*}

^{*}한국건설기술연구원 건축·도시환경연구실

Theoretical Analysis on Heat Transfer Characteristics and Heat Flux Performance in Ondol Systems of Dried Type

Yong-Sung Jang^{*†}, Ki-Hyung Yu^{*}, Dong-Woo Cho^{*}

ABSTRACT: This study aims to evaluate theoretically heat transfer characteristics and heat flux performance in ondol system of dried type is composed of panel of ceramics to improve of thermal conductivity and fin to expand heat. To this end, we analyzed effect of design factors(temperature of hot water, set temperature of room and thermal conductivity of finishing materials) in ondol system of dried type by heat transfer analysis.

The main results of this study are summarized as follows; The deviation of heat flux and temperature was reduced by heat expansion from fin decreasing heat loss generated in air layer. The temperature and heat flux in upper finishing materials surface linearly increased according to temperature increment of hot water, but the temperature distribution in upper surface was assessed uneven. The greater heat resistance value of upper finishing materials, the deviation of maximum temperature and minimum temperature was decreased. Also, we suggested a basic design data about ondol system of dried type through an analysis of simulation results on heat transfer characteristics and heat flux performance.

Key words: Heat transfer characteristics, Heat flux performance, Ondol system of dried type

1. 서론

우리나라 주거건물의 전통적인 난방방식은 온돌을 이용한 복사난방으로 공동주택에서는 온돌구조의 개념을 적용한 바닥 복사 난방방식이 주를 이루고 있다. 온돌은 열을 저장할 수 있을 뿐만 아니라 다른 난방방식과 달리 열원이 주거공간과 분리되었다는 점, 바닥 복사난방 방식을 이용하고 있기 때문에 실의 온도 성층화가 거의 없고 인체의 피부에 저온 복사열을 방출하여 실내의 재실자에게도 비교적 양호한 감각을 준다는

점에서 우수한 난방방식이며, 한국인 고유의 독특한 생활문화를 형성하는데 많은 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 그러나 국내 주거용 건물에 적용되고 있는 습식온돌 공법의 복잡한 공정과 기포 콘크리트 및 모르타르의 양생과정 등에 소요되는 시간은 공기단축의 저해요인으로 작용하고 있다. 또한 습식온돌시스템은 온수공급배관의 변경과 보수가 어렵고, 실내공간의 변화 및 리모델링에 용이하지 못하다. 최근에는 거주자 생활방식의 변화에 따라 주거공간을 자유롭게 변화시킬 수 있는 가변형 주택이 실현되고 있고, 장수명화 집합주택, 리모델링 및 개보수가 용이한 주택 등 새로운 개념의 주택에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 시대적 상황에 적절히 대응하기 위해서는 건축부재의 부품화, 규격화 및 건식화가 필

† Corresponding author

Tel : +82-31-910-0285 ; Fax : +82-31-910-0361

E-mail address : jangys0718@empal.com

요하며, 온돌바닥도 종래의 습식온돌시스템에서 점진적으로 건식온돌시스템으로의 전환이 요구되고 있다.

건식온돌시스템에 대해서는 국내에서도 80년대 후반부터 지속적으로 연구되어 왔으나 경제성 저하 등의 이유로 주거용 건물에 적용되지는 못하였다. 그러나 최근 주거용 건물의 초고층화에 따른 구조체의 하중경감, 층고저감, 건물의 장수명화, 친환경 및 에너지절약, 공정의 단순화 및 자재 표준화 등의 관점에서 건식온돌시스템의 필요성 및 적용 가능성이 크게 증대되고 있다. 그러나 건식온돌시스템의 성능평가 및 설계자료 등에 대한 기술적 자료 및 연구는 부족한 실정이다.

그러므로, 본 연구에서는 연속난방 조건하에서 온수온도, 실내설정온도 및 바닥마감재 열전도율 등의 설계변수가 건식온돌시스템의 전열 및 방열 성능에 미치는 영향을 이론해석을 통해 분석하고자 하며, 평가결과에 준하여 건식온돌시스템에 대한 기초 설계자료를 제시하고자 한다.

2. 건식온돌시스템의 해석모델

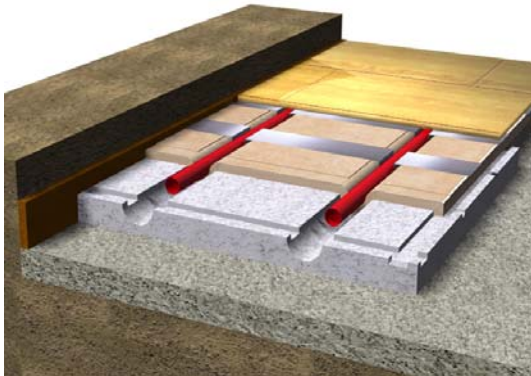


Fig. 1 Section of ondol system

건식온돌시스템의 단면구조는 Fig. 1에서와 같이 상부의 바닥마감재, 전열 및 방열성능을 향상시키기 위한 도기 재질의 패널과 알루미늄 재질의 핀, 온수배관의 열원 및 하부의 콘크리트 구조체를 통한 열손실을 감소시키기 위한 단열재로 구성되어 있으며, 핀의 설치면적은 건식온돌시스템 단위면적의 1/3 정도를 차지하고 있다.

Fig. 1에서 온수배관과 패널, 온수배관과 핀, 핀과 패널 사이의 공기층은 밀폐공간으로 가열면과 비가열면에 접하는 유체의 회전으로 자연대류

가 발생하며, 이로 인해 열전달을 촉진시키게 된다. 밀폐공간 내부의 자연대류 유동은 식(1)의 Rayleigh 수에 따라 층류와 난류로 구분되며, 식(2)에서와 같이 열전도도가 $k \cdot Nu$ 인 유체와 동일하게 거동한다.

$$Ra_d = Gr_d \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_h - T_c)}{\nu \cdot \alpha} \quad \text{식(1)}$$

$$k_{eff} = k \cdot Nu \quad \text{식(2)}$$

Fig. 2는 건식온돌시스템의 계산모델을 나타낸 것으로 좌표축의 설정은 수평방향을 x 축, 수직방향을 y 축으로 하였으며, 온돌시스템에서의 열전달 현상을 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- 1) 온수 유동방향과 평행한 온수관 사이의 온도변화는 무시한다.
- 2) 온수배관의 표면온도는 온수온도와 동일하며, 온수배관의 단면이 갖는 열용량은 무시한다.
- 3) 온돌시스템에서 온도변화에 따른 각종 재료의 물성치는 일정하다.
- 4) 실내의 설정온도는 공급된 열량에 관계없이 일정하다.
- 5) 밀폐공간에서 밀도의 변화를 제외한 유체의 특성은 온도와 무관하다(Boussinesq model).
- 6) 밀폐공간의 유동은 2차원이며 비압축성, 정상상태 층류이다.

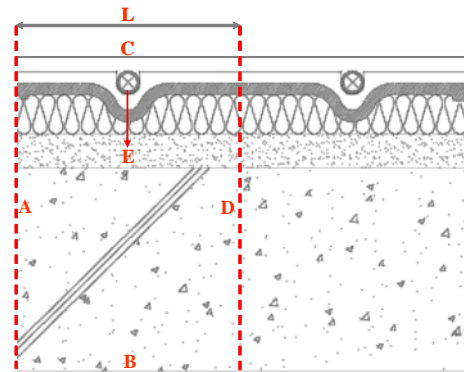


Fig. 2 Numerical model

건식온돌시스템에서의 열전달 현상을 지배하는

방정식은 정상상태 2차원 열유동 방정식으로, 식 (3)~식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{식(3)}$$

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad \text{식(4)}$$

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \rho \beta (T - T_{ref}) \quad \text{식(5)}$$

$$\rho C \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad \text{식(6)}$$

식(3)~식(6)의 지배방정식을 해석하기 위한 경계조건은 식(7)~식(10)과 같다.

· A 및 D 면에서

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{식(7)}$$

· B 및 C 면에서

$$\frac{\partial T}{\partial y} = (h_c + h_r)(T - T_r) = \alpha_i (T - T_r) \quad \text{식(8)}$$

· E 면에서

$$T = T_f \quad \text{식(9)}$$

· 열전도계수가 다른 구성재료의 경계면에서

$$k_i \frac{\partial T}{\partial x} = k_j \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{식(10)}$$

식(8)에서 h_c 와 h_r 은 각각 대류열전달 및 복사열전달 계수로서 그 합은 실내 총열전달 계수 α_i 와 동일하다. 본 연구에서는 계산식의 단순화를 위해서 상부 및 하부 마감재면에서 일정한 표면열전달 계수를 적용하였다.

3. 이론해석

Fig. 2와 같은 불규칙적인 경계형태를 갖는 건식온돌시스템 모델의 격자설정을 위하여 직교좌

표계를 사용하였으며, 유체의 회전운동에 의해 자연대류가 발생하는 밀폐공간에 대해서는 격자를 조밀하게 배치함으로써 계산오차를 줄이고자 하였다. 식(7)~식(10)의 경계조건을 갖는 식(3)~식(6)의 지배방정식의 수치해석을 위해 유한체적법(finite volume method)에 의한 음해법(implicit)으로 이산화하였으며, 이를 일반화된 식으로 표현하면 식(11)과 같다.

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad \text{식(11)}$$

식(11)의 이산화방정식은 삼중대각행렬해법(TDMA)에 의한 선순법으로 반복계산하였으며, 해의 발산을 막고 수렴을 촉진하기 위해 하향완화(under relaxation) 계수를 이용하였다. 식(12)와 식(13)에서 RES는 이산화방정식의 잔차(residual)를, TERM은 이산화방정식의 모든 항들 중 최대항을 나타낸다.

$$\frac{|RES|_{u,v}}{|TERM|_{u,v}} = \epsilon < 10^{-4} \quad \text{식(12)}$$

$$\frac{|RES|_T}{|TERM|_T} = \epsilon < 10^{-8} \quad \text{식(13)}$$

4. 결과분석 및 평가

건식온돌시스템의 설계 및 운전조건의 설정을 위해 필수적으로 요구되는 온수배관의 배관길이에 따른 실내 총방열량, 바닥표면의 온도분포 및 출구의 온수온도는 마감재와 축열재의 재질 및 두께, 온수배관의 관경 및 배관간격, 온수공급온도 및 실내설정온도 등의 설계변수 조합에 따라 상이하게 된다. 본 연구에서는 온수공급온도, 바닥 마감재의 재질, 실내설정온도 등의 설계변수 조합에 따른 건식온돌시스템의 방열성능을 평가하였다. 온수배관의 관경은 20mm, 배관간격은 200mm, 축열재는 도기재질의 패널로 제한하였으며, 운전조건은 연속난방 상태 만을 고려하였다.

건식온돌시스템의 전열 및 방열성능 해석을 위한 건식온돌시스템 구성재료의 열적 물성치 및 설계변수 제원은 Table 1과 Table 2와 같다.

Fig. 3은 건식온돌시스템의 상부 마감재면에서 핀이 설치된 부분과 핀이 설치되지 않은 부분의

방열량 분포를 비교한 것으로, 건식온돌시스템의 전열 및 방열 성능에 상당한 영향을 미치는 공기층 부분에 대해서만 분석한 것이다.

온수배관 직상부와 공기층에 의해 0.15L 만큼 떨어진 곳에서의 방열량 및 온도편차는 핀이 설치된 부분의 경우 13.8W/m², 1.2℃, 핀이 설치되지 않은 부분의 경우 22.0W/m², 2.0℃인 것으로 평가되었다. 또한 Fig. 4 및 Fig. 5에 의하면 핀의 열확산에 의해 공기층에서 발생하는 자연대류에 의한 열손실을 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 공기층의 열손실 감소 및 핀에 의한 열확산 방안 등은 건식온돌시스템에서 중요한 설계 요소가 될 것으로 판단된다.

Table 1. Heat property value of materials consisting ondol system of dried type

		Density [kg/m ³]	Heat capacity [kJ/kgK]	Heat conductivity [W/mK]	Thickness [mm]
Finishing materials	Wood	600	2,000	0.1	10
	Tile	2,400	1,100	1.3	10
	Vinyl	1,500	1,000	0.25	5
AL plate		2,700	890	203.6	0.5
Panel		2,400	1,100	1.28	10
Insulation		30	1,600	0.037	35
Mortar		2,000	840	1.4	30
Concrete		2,200	920	1.6	180
Hot water pipe		940	1,200	0.377	2

Table 2. Specification of design variables

Design variables	Specification
Finishing materials	Wood, Tile, Vinyl
Hot water supply temperature[℃]	35, 40, 45, 50, 55, 60
Set temperature of room[℃]	20, 22, 24

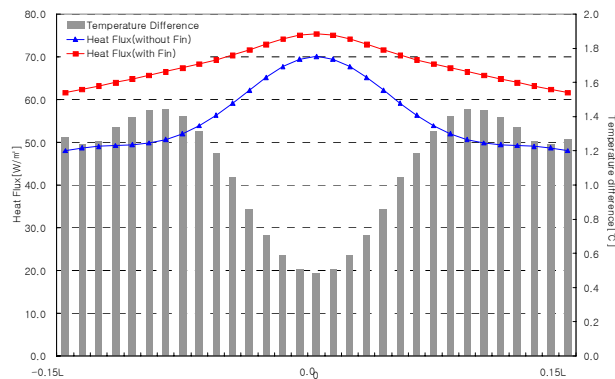
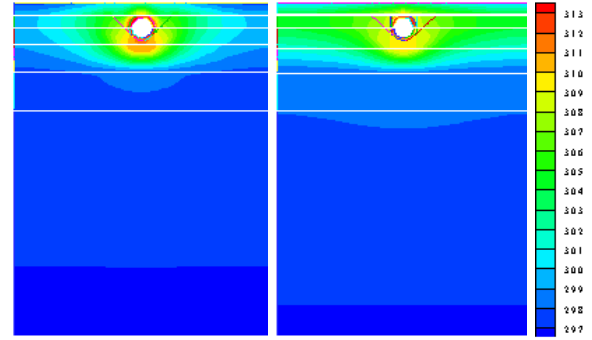
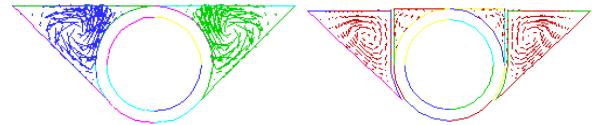


Fig. 3 Heat flux of air layer according to existence of fin(Finishing material-wood)



(a) In case of no fin (b) In case fin exists

Fig. 4 Temperature distribution of section(Finishing material-wood, hot water temperature-40℃, set temperature-22℃)



(a) In case of no fin (b) In case fin exists

Fig. 5 Velocity distribution in air layer(Finishing material-wood, hot water temperature-40℃, set temperature-22℃)

건식온돌시스템의 총방열량 및 상부 마감재면의 평균온도는 핀 설치부분과 미 설치 부분의 면적 가중치로 나타낼 수 있으며, 산출식은 식(14) 및 식(15)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{total} = \frac{2 \times Q_{without-fin} + Q_{with-fin}}{3} \quad \text{식(14)}$$

$$T_{average} = \frac{2 \times T_{without-fin} + T_{with-fin}}{3} \quad \text{식(15)}$$

Fig. 6과 Fig. 7에 의하면 온수온도 증가에 따른 상부 마감재 면의 평균온도 및 방열량은 대체로 선형적인 증가 추세를 나타내고 있는 것으로 평가되었다. 그러나 상부 마감재 표면에서의 온도 및 방열량 분포는 온수배관 직상부가 중간부에 비해 상대적으로 더욱 큰 증가폭을 나타내며, 온수공급온도가 증가할수록 점차 불균일한 온도 분포를 형성하는 것으로 나타났다. 온수공급온도가 35℃일 때 두 지점 사이의 온도차는 2.5℃에서 60℃일 때는 6.5℃까지 증가하는 것으로 산출

되었으며, 온수공급온도는 실내공간에 거주하는 재실자의 열적 쾌적감을 고려하여 설정되어야 하는 설계변수로 평가되었다.

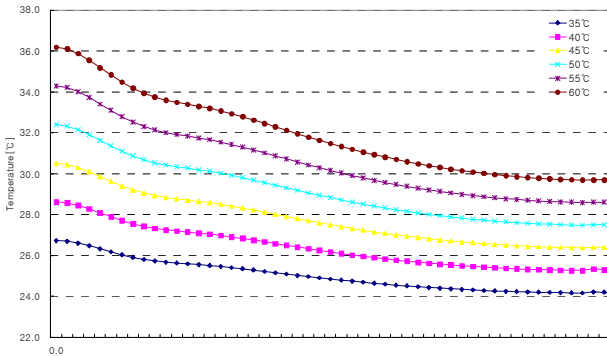


Fig. 6 Surface temperature distribution(Finishing material-wood, set temperature-22°C)

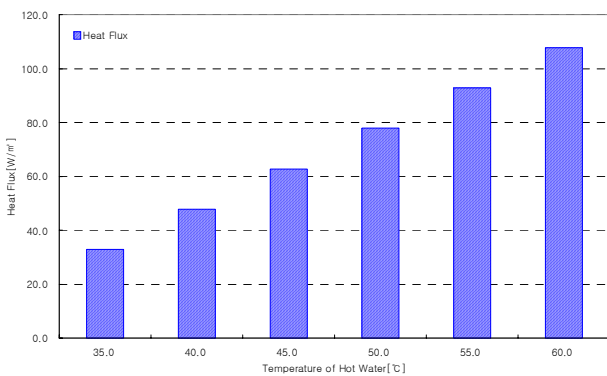


Fig. 7 Heat flux distribution(Finishing material-wood, set temperature-22°C)

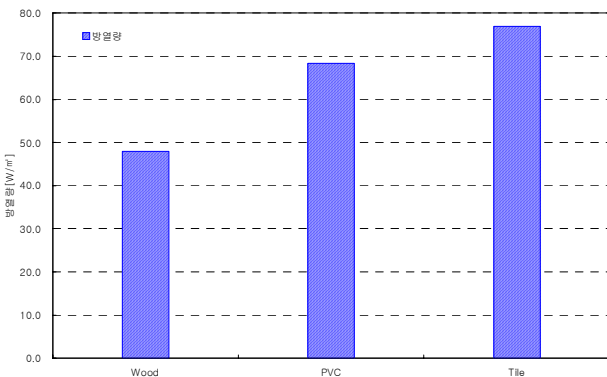


Fig. 8 Heat flux(Hot water temperature-40°C, set temperature-22°C)

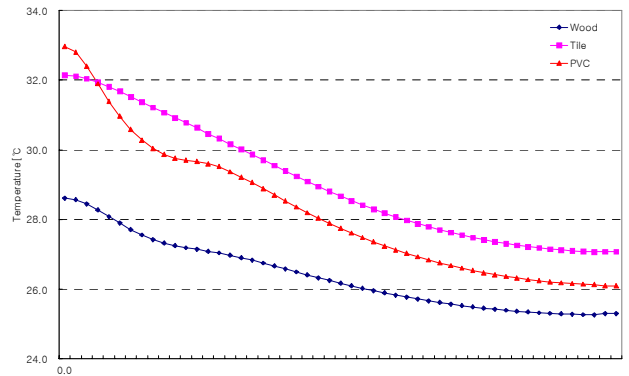


Fig. 9 Surface temperature distribution(Hot water temperature-40°C, set temperature-22°C)

Fig. 8은 상부 마감재 유형에 따른 평균 방열량을 나타낸 것으로 온돌마루, 비닐 및 타일의 열저항은 Table 1에 의하면 각각 0.1m²K/W, 0.02m²K/W, 0.008m²K/W이다. Fig. 8에 의하면 상부 마감재 면의 열저항이 작을수록 마감재면에서 실내공간으로의 열전달 효과가 상승하여 방열량 또한 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 상부 마감재의 열저항이 크더라도 마감재의 두께가 얇은 경우, Fig. 9에서와 같이 온수배관 직상부 및 인접한 주변에서의 평균 온도 및 방열량은 증가하는 것으로 평가되었다.

Table 3. Design data according to the types of finishing material(wood)

Hot water temp. [°C]	Set temp. [°C]	Design data				
		Upper heat flux [W/m ²]	Bottom heat flux [W/m ²]	Avg. temp. [°C]	Max. temp. [°C]	Min. temp. [°C]
35	20	45.3	9.3	24.2	25.8	22.6
	22	38.5	8.0	25.5	27.0	24.1
	24	31.7	6.6	26.9	28.3	25.6
40	20	58.8	12.1	25.4	27.7	23.1
	22	52.0	10.8	26.8	29.0	24.6
	24	45.2	9.4	28.1	30.1	26.1
45	20	72.3	14.9	26.6	29.7	23.7
	22	65.5	13.5	28.0	30.9	25.2
	24	58.6	11.9	29.4	32.1	26.7
50	20	85.9	17.7	27.9	31.6	24.2
	22	79.0	16.3	29.2	32.8	25.7
	24	72.2	14.5	30.6	34.0	27.3
55	20	99.4	20.4	29.1	33.6	24.8
	22	92.6	19.1	30.5	34.7	26.0
	24	85.8	17.3	31.8	36.0	27.8
60	20	112.9	23.4	30.3	35.4	25.3
	22	106.1	21.4	31.7	36.7	26.8
	24	99.3	20.1	33.1	37.9	28.4

Table 4. Design data according to the types of finishing material(tile)

Hot water temp. [°C]	Set temp. [°C]	Design data				
		Upper heat flux [W/m ²]	Bottom heat flux [W/m ²]	Avg. temp. [°C]	Max. temp. [°C]	Min. temp. [°C]
35	20	65.8	7.5	26.0	28.1	23.9
	22	55.9	6.4	27.1	29.0	25.2
	24	46.3	5.4	28.3	29.9	26.5
40	20	88.8	10.0	28.0	31.0	25.1
	22	79.3	9.0	29.2	31.8	26.5
	24	69.8	7.9	30.4	32.7	27.9
45	20	112.3	12.6	30.3	33.8	26.4
	22	102.8	11.6	31.4	34.7	27.9
	24	93.4	10.6	32.6	35.6	29.4
50	20	135.9	15.2	32.4	36.6	28.0
	22	126.5	14.2	33.6	37.5	29.4
	24	116.9	12.7	34.7	38.3	30.8
55	20	159.6	17.7	34.6	39.5	29.5
	22	150.0	16.7	35.7	40.4	30.9
	24	140.5	15.3	36.9	41.2	32.3
60	20	183.2	20.4	36.8	42.3	30.9
	22	173.6	19.3	37.9	43.2	32.2
	24	164.1	17.9	39.1	44.0	33.7

Table 5. Design data according to the types of finishing material(vinyl)

Hot water temp. [°C]	Set temp. [°C]	Design data				
		Upper heat flux [W/m ²]	Bottom heat flux [W/m ²]	Avg. temp. [°C]	Max. temp. [°C]	Min. temp. [°C]
35	20	58.6	7.4	25.4	29.0	23.0
	22	49.8	6.3	26.6	29.8	24.4
	24	34.5	5.3	27.8	30.6	25.9
40	20	79.2	9.9	27.2	32.1	24.0
	22	70.7	8.8	28.5	32.9	25.5
	24	62.3	7.8	29.7	33.6	27.0
45	20	100.4	12.4	29.2	35.2	25.1
	22	91.8	11.4	30.4	35.9	26.7
	24	83.4	10.3	31.6	36.7	28.2
50	20	121.5	14.9	31.1	38.2	26.3
	22	113.0	13.9	32.3	39.0	27.8
	24	104.4	12.7	33.6	39.8	29.3
55	20	142.7	17.5	33.0	41.3	27.5
	22	134.2	16.5	34.2	42.1	29.0
	24	125.6	15.1	35.5	42.9	30.5
60	20	163.9	20.0	35.0	43.4	28.7
	22	155.4	19.0	36.2	45.2	30.2
	24	146.8	17.6	37.4	45.9	31.7

Table 3~Table 5는 상부 마감재 유형에 따른 건식온돌시스템의 기초 설계데이터를 작성한 것으로, 온수공급온도가 증가할수록, 마감재의 열저항이 작을수록 방열량 및 평균 온도는 증가하는 것으로 나타났으며, 최고온도와 최저온도 사이의

편차는 마감재의 열전도율에 따라 다소 차이는 있으나 3.0°C~7.0°C에 분포하는 것으로 평가되었다. 최고온도와 최저온도의 편차는 실내의 불균일한 온도분포를 초래함으로써 재실자에게 불쾌감을 주는 요소가 될 수 있다. 따라서 건식온돌시스템의 설계시 재실자에게 쾌적한 주거환경을 제공하기 위해서는 마감재 열전도율 및 열저항에 따라 온수공급온도 및 실내설정온도 등에 대한 제한이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 연속난방에 의한 정상상태 조건 하에서 온수공급온도, 실내설정온도 및 마감재 열전도율 등의 설계변수가 건식온돌시스템의 열 성능에 미치는 영향을 수치 열전달 해석을 통해 비교·분석하였다. 이를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 핀에 의한 열확산에 의해 공기층에서 발생하는 열저항을 줄임으로써 방열량 및 온도편차를 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

2) 온수공급온도 상승에 따라 상부 마감재 면의 표면온도 및 방열량은 선형적으로 증가하나, 온수배관 직상부와 중간부 사이의 온도편차 또한 커짐으로써 불균일한 표면온도분포를 초래하는 것으로 평가되었다.

3) 상부마감재의 열저항이 클수록 온수배관 직상부와 중간부 사이의 최고온도와 최저온도 편차는 감소하는 것으로 평가되었다.

4) 설계변수 조합에 따른 건식온돌시스템의 전열 및 방열성능 시뮬레이션 결과를 분석함으로써 기초 설계데이터를 제시하였다.

참고문헌

1. S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Homosphere Publishing Corp., Washington D. C., 1980.
2. S. V. Patankar, Computational of Conduction and Duct Flow Heat Transfer, Innovative Research Inc., 1991.
3. W. M. Kays and M. E. Crawford, Convective Heat and Mass Transfer, 3th, McGraw-Hill, 1993.