



# 제로에너지 공동주택에서 바닥복사난방패널의 방열량 설계 기준 평가

임재한\*

이화여자대학교 건축도시시스템공학과 교수

## Evaluation on the Design Guideline of Thermal Output in Radiant Floor Heating Panel for Zero-Energy Apartment Building in Korea

Lim, Jae-Han\*

Professor, Department of Architectural and Urban Systems Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

\*Corresponding author: Lim, Jae-Han, Tel: +82-2-3277-6874, E-mail: limit0@ewha.ac.kr

### ABSTRACT

This study aims to analyze the thermal output and downward heat losses according to the pipe pitch of the floor heating panels for the design of a radiant floor heating system in a zero-energy apartment to compare the design heating load in zero-energy apartment housing unit. The thermal output and downward heat losses were analyzed according to the pipe pitches, flooring and pipe materials by using the universal single power function method in ISO 11855-2. The results showed that the heating load could be removed even if the pipe pitch of the existing radiant floor heating system is changed to around 350 mm as the thermal insulation and airtightness in the zero-energy apartment building has been greatly improved. The thermal output in individual heating was about 30% higher than that of district heating. In addition, it was found that it was necessary to consider the thermal resistance of flooring materials for the design of the radiant floor heating panel because it would affect the thermal output through the room air. When the lowerest floor was exposed to the outside air, downward heat losses greatly increased, so it would be necessary to increase the outside thermal insulation thickness for the energy saving during heating operation.

**주요어 :** 방열량, 하부 열손실, 배관 피치, ISO 표준설계, 바닥복사난방, 제로에너지 공동주택

**Keywords:** Thermal output, Downward heat loss, Pipe pitch, ISO standard design, Radiant floor heating, Zero-energy apartment building

### OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2022 August, 16(4): 296-307  
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20220026>

pISSN : 1976-6483  
eISSN : 2586-0666

**Received:** July 29, 2022  
**Revised:** August 9, 2022  
**Accepted:** August 13, 2022

© 2022 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 서론

최근 정부에서는 단계적인 국가 온실가스 배출 저감을 위해 2025년 이후 제로에너지 공동주택인증을 의무화하였다(Jeong et al., 2021). 이와 관련되어 정부에서는 공동주택에서 구조체 및 창호 등의 단열기준을 상향 조정해 오고 있다. 이로 인해 기존 공동주택에 비해 최근 지

어지는 신축 공동주택에서는 최대 난방부하가 크게 줄어들고 있음에도 불구하고, 공동주택의 연간 에너지 소비량에 큰 영향을 미치는 바닥복사난방시스템에 대한 설계 기준에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 ISO를 중심으로 복사냉난방시스템에 대한 표준화가 이뤄지고 있음에도 불구하고(Lim and Kim, 2016), 국내에서는 이전부터 시공되어 왔던 바닥난방 설계 기준이 별다른 검토없이 유지되고 있다.

일반적으로 바닥복사난방 패널에서 방열량은 바닥 패널의 구조 및 온수온도, 설정실온 조건에 따라 달라진다. 즉 배관 종류, 배관 피치, 단열재 종류, 단열재 두께, 마감재 종류, 마감재 두께, 모르타층 두께, 열전도판 설치 여부, 공급온수온도 및 환수온도, 설정실온 등 다양한 인자에 의해 영향을 받는다. 국내 제로에너지 공동주택과 같이 건물의 난방부하가 줄어드는 경우, 바닥난방패널에서 요구되는 설계 방열량도 낮아지게 된다. 그러므로 바닥마감재 유형별로 바닥복사난방패널에 대한 적정 설계 기준 검토가 필요하다. 아울러 개별난방 보일러나 지역난방에서 공급되는 온수온도의 운전조건에 대한 설계조건에 대한 검토도 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 제로에너지 공동주택에서 바닥복사난방패널의 설계 조건에 대한 개선 방안을 제시하는 것을 연구목표로 설정하였다. 이를 위해 국내 바닥복사난방시스템의 설계 현황 및 ISO 표준 설계 방법을 조사 분석하고, ISO 표준 설계 방법에 따라 바닥복사난방 패널의 배관 피치 등 설계 조건에 따라 방열량 및 하부 열손실량을 평가하였다.

## 바닥복사난방시스템의 설계 방법

### 국내 바닥복사난방시스템의 설계 현황

국내 공동주택에서 온수온돌 바닥복사난방시스템은 개별세대의 보일러나 기계실의 지역난방 열교환기와 같은 열원, 세대별 온수분배기, 제어기, 그리고 배관이 매설된 바닥패널로 구성된다. 국내 온돌설치 기준에 따르면 일반적으로 국내의 온수온돌은 바탕층, 단열층, 채움층, 배관층 및 마감층으로 구성된다(MOLIT, 2015). 바탕층은 보통 건물의 바닥 슬래브를 의미한다. 단열층은 배관 하부로 열손실을 줄이기 위해 배관층과 바탕층 사이에 설치하고, 채움층은 습식 바닥패널의 높이 조정, 차음성능 향상, 보조적인 단열 기능 등을 위해 일반적으로 배관층과 단열층 사이에 경량기포 콘크리트를 많이 사용하고 있다. 배관층은 단열층 또는 채움층 위에 배관을 설치하는 것으로서 일반적으로 모르타를 타설하여 배관을 보호하고 상부 마감층으로 열을 전달하게 된다. 마감층은 배관층 위에 강화마루나 리놀륨 장판, 대리석 등 최종 마감재를 설치하는 것으로서 실내 환경 및 입주자의 선호도에 따라서 설계 조건이 달라지게 된다. 최근에는 입주자간 층간소음 문제가 대두되면서 단열층과 채움층의 재료 및 구조, 두께에 따라 다양한 형태의 바닥난방 구조가 제안되고 있다. 이에 국내 건설회사에서는 층간소음을 저감하고 단열성능을 개선하며 바닥구조체의 두께를 줄이기 위해 경량기포 콘크리트 타설 없이 완충재 및 단열재 위에 배관을 바로 설치하고 모르타를 타설한 뒤 바닥 마감재를 시공하고 있다.

국내에서 바닥복사난방의 바닥패널설계는 공동주택 평면 설계안을 바탕으로 온수분배기에서 분기되는 매설 배관의 길이가 대략 100~120 m 범위로 유지되도록 분기 배관을 계획하고, 세대별 또는 실별 난방부하 조건에 따라 분기 배관 구획별로 설계 난방 유량을 조정하게

된다. 일반적으로 배관 제조업체에서는 배관 종류 및 관경별로 배관 피치에 따라 방열량의 추정치(배관 피치가 200 mm인 경우, 대략  $100 \text{ W/m}^2$ )를 제시하고 있으며, 국내에서 판매되는 보일러 내부 온수 순환 펌프의 양정을 감안하여 온수분배기에서 분기되는 배관 길이를 최대 120 m 이내로 제한하고 있다. 배관 피치는 평면구성에 따라 다소 차이는 있지만, 대부분 침실은 200 mm, 거실이나 주방은 230~250 mm로 비슷한 상황이다. 반면 ISO 표준방법에 따르면 설계자가 실별로 난방부하에 대응하도록 배관 종류, 배관 피치, 단열재 종류 및 두께, 공급온수온도 등 다양한 설계 조건에 따라 방열량을 산정하고, 실별로 배관 길이를 결정한 뒤 적절한 배관 분기방법을 평면 설계도에 반영하게 된다. 그리고 공급온수온도 및 유량, 배관의 마찰손실 등을 종합적으로 고려하여 열원이나 온수순환펌프 등의 장비를 선정하게 된다.

제로에너지 공동주택 인증과 관련하여 구조체나 창호의 단열 설계 기준이 강화되었음에도 불구하고, 난방설비와 관련된 보일러 용량이나 바닥패널 설계 조건은 동일하게 설계되고 있다. 세대별 또는 실별 난방 부하가 크게 줄어들었음에도 보일러나 바닥패널의 설계조건이 동일하게 유지되고 있기 때문에, 실제 재실자가 거주하는 상황에서는 실온이 과열되거나 보일러가 저부하 운전으로 빈번하게 작동함으로써 세대 내 난방에너지 절감에 큰 효과를 보지 못하고 있다. 그러므로 제로에너지 공동주택 인증과 관련하여 각 세대별, 그리고 실별 요구되는 난방부하에 대응할 수 있도록 바닥 패널의 배관 피치에 대한 기준이 마련될 필요가 있다. 또한 공동주택의 난방에너지 효율 개선을 위해서는 보일러 등 열원에서의 설계 및 운전 조건을 개선해 나갈 필요가 있다. 본 연구에서는 ISO 표준에 의한 바닥복사난방의 설계 방법을 살펴보고, 이에 따라 국내 제로에너지 공동주택의 다양한 마감재 유형 및 단열재 종류에 따라 배관 종류, 배관 관경, 배관 피치를 달리하여 바닥패널에서 설계 방열량을 산출함으로써 적절한 배관 피치 설계 기준을 제시하였다.

### ISO 표준에 의한 바닥복사난방패널의 방열량 산정 방법

일반적으로 바닥복사난방시스템에서 바닥패널의 설계 방열량은 식 (1)과 같이 바닥패널 표면온도와 실내 작용온도(OT, operative temperature)에 따라 달라진다(ISO, 2021).

$$q = 8.92(T_{s,m} - T_i)^{1.1}, \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

여기서,  $q$ 는 바닥패널의 설계 방열량,  $T_{s,m}$ 는 패널의 평균표면온도, 그리고  $T_i$ 는 실내 설정 온도이다. 8.92의 값은 일반적으로 표면의 열전달계수로서 대류 열전달계수와 복사열전달계수를 함께 고려한 것이다. 보통 실내 표면온도가 15~30°C인 경우 복사열전달계수를  $5.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 로 가정할 수 있다. 대류열전달계수는 바닥이나 천장, 벽체 등 복사패널의 설치위치나 기류속도 등에 따라서 다르게 나타난다.

유럽이나 미국 등지에서는 복사냉난방시스템의 표준적인 설계 방법을 마련하여 건물의 부하특성을 고려한 설계가 이뤄지고 있다. ISO에서는 EN 표준, ASHRAE 표준 및 국내외 연구 결과를 토대로 복사냉난방시스템의 설계 및 시공, 제어를 위한 표준을 제/개정해 왔다(ISO, 2021). 국내에서는 ISO 표준에 기반하여 본 학회에서 온수 온돌 바닥복사난방의 설계 방열량

산정 방법에 대한 표준을 제정한 바 있다(KIAEBS, 2015). 본 학회의 표준에 따르면 온수온돌 바닥복사난방시스템의 다양한 바닥 패널 유형별로 설계 방열량을 산정하기 위해 멱함수계산법(universal single power function method)이나 열저항계산법(thermal resistance method)에 따른 단순계산방법과 유한차분법(FDM) 및 유한요소법(FEM)에 따른 시뮬레이션 해석 방법을 제시하고 있다. 국내 공동주택에서 적용되는 온수온돌 바닥난방패널에서 방열량은 멱함수계산법에 의한 계산 방법에 의해 해석이 가능하다. 그러므로 본 연구에서는 멱함수계산법의 이론을 살펴보고 이를 활용하여 다양한 설계 변수별로 바닥 패널의 설계 방열량을 산정하였다.

ISO 표준에 따르면 바닥복사난방패널에서 방열량은 식 (2)와 같이 배관 피치, 배관 위 레이어의 두께 및 열전도율, 마감재의 열전도저항, 배관 외경 등 설계조건에 따라서 간단한 멱함수(power function)의 곱으로 표현될 수 있다. 그리고 식 (3)과 같이 패널표면의 방열량은 난방 공급 온수온도와 환수온도, 실온의 대수평균온수온도차( $\Delta T_H$ , LMTD, log mean temperature difference)에 따라 달라진다.

$$q = B \cdot \prod_i a_i^{m_i} \cdot \Delta T_H = B \cdot a_B \cdot a_W^{m_W} \cdot a_U^{m_U} \cdot a_D^{m_D} \cdot \Delta T_H, W/m^2 \quad (2)$$

$$\Delta T_H = \frac{T_V - T_R}{\ln \frac{T_V - T_i}{T_R - T_i}} \quad (3)$$

여기서,  $T_V$ 는 공급온수온도,  $T_R$ 는 환수온도,  $T_i$ 는 설정실온이다.  $a_B$ 는 패널 마감 열저항변수로서 바닥표면열전달계수( $\alpha$ ), 바닥마감재의 열전도저항( $R_{\lambda, B}$ ), 모르터층의 열전도율( $\lambda_E$ )에 따라 식 (4)와 같이 계산한다.  $a_W$ 는 배관피치 변수로서 바닥마감재의 열전도저항( $R_{\lambda, B}$ )에 따라 Table 1을 참고하여 계산한다.  $a_U$ 는 바닥마감재 변수로서 배관피치(W), 바닥마감재의 열전도저항( $R_{\lambda, B}$ )에 따라 Table 2를 참고하여 계산한다.  $a_D$ 는 배관 외경 변수로서 배관 피치(W), 바닥마감재의 열전도저항( $R_{\lambda, B}$ )에 따라 Table 3을 참고하여 계산한다.  $a_W$ 의 지수  $m_W$ ,  $a_U$ 의 지수  $m_U$ ,  $a_D$ 의 지수  $m_D$ 는 각각 식 (5)~(7)로 계산한다. B값은 배관 열전도율과 두께를 각각  $\lambda_{R,0} = 0.35 W/mK$ ,  $s_{R,0} = 0.002 m$  인 조건에서 배관 내 난류 유동 조건( $\alpha_{turb} = 2200 W/m^2 K$ )으로 가정하여  $B_0 = 6.7 W/m^2 K$ 로 가정되며, 배관 두께와 열전도율이 달라지는 경우에는 식 (8)을 이용하여 재산정된다.

$$a_B = \frac{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_{u,0}}{\lambda_{u,0}}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_{u,0}}{\lambda_E} + R_{\lambda, B}} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ 는 바닥표면열전달계수로서  $10.8 W/m^2 K$ ,  $\lambda_{u,0}$ 는 배관 상부 열확산층(모르터층)의 열전도율로  $1 W/mK$ ,  $s_{u,0}$ 는 배관 상부 레이어의 두께로  $0.045 m$ 로 가정된다. 그리고  $R_{\lambda, B}$ 는 바닥마감재의 열전도저항,  $\lambda_E$ 는 모르터층의 열전도율이다.

$$m_W = 1 - \frac{W}{0.075} \quad (5)$$

$$m_U = 100(0.045 - s_u) \quad (6)$$

$$m_D = 250(D - 0.020) \quad (7)$$

여기서,  $W$ 는 배관 피치이고,  $s_u$ 는 배관 상부 모르타층의 두께,  $D$ 는 배관 피복을 포함하는 배관 외경이다.

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{B_0} + \frac{1.1}{\pi} \cdot \prod_i a_i^{m_i} \cdot W \cdot \left[ \frac{1}{2\lambda_R} \ln\left(\frac{d_a}{d_a - 2s_R}\right) - \frac{1}{2\lambda_{R,0}} \ln\left(\frac{d_a}{d_a - 2s_{R,0}}\right) \right] \quad (8)$$

여기서,  $\lambda_R$ 은 배관의 열전도율이고,  $s_R$ 은 배관 두께,  $d_a$ 는 배관 외경이다.

식 (4)~(8)은  $0.065 \text{ m} < s_u \leq s_u^*$ 인 조건에서 유효하게 사용될 수 있으며, 열전달계수  $K_H$ 를 식 (9)와 같이 정의할 수 있다. 배관 피치가 0.2 m 이하인 경우,  $s_u^* = 0.1 \text{ m}$ 이고, 배관 피치가 0.2 m 이상 0.375 m 이하인 경우  $s_u^* = 0.5 \text{ W}$ , 배관 피치가 0.375 m 이상인 경우  $s_u^* = W$ 로 가정한다.

$$K_H = B \cdot \prod_i a_i^{m_i} = B \cdot a_B \cdot a_W^{m_W} \cdot a_U^{m_U} \cdot a_D^{m_D} \quad (9)$$

만약  $s_u > s_u^*$ 인 경우에는 다음의 식 (10)을 이용하여  $K_H$ 를 구할 수 있다.

$$K_H = \frac{1}{\frac{1}{K_{H, s_u = s_u^*}} + \frac{s_u - s_u^*}{\lambda_E}} \quad (10)$$

여기서  $K_{H, s_u = s_u^*}$ 는 배관 상부 모르타층의 두께가  $s_u^*$ 인 경우 식 (9)에 따라 계산된  $K_H$ 값을 의미한다.

배관 피치가 0.375 m 이상인 경우에는 방열량을 식 (11)과 같이 계산한다.

$$q = q_{0.375} \cdot \frac{0.375}{W} \quad (11)$$

여기서  $q_{0.375}$ 는 배관 피치가 0.375 m인 경우 계산된 방열량이다.

패널 하부 공간으로 열손실은 식 (12)와 같이 배관층을 기준으로 상부로의 열전달저항과 하부로의 열전달저항, 설정 실온(또는 인접 공간의 공기온도)에 따라 계산한다.

$$q_{loss} = \frac{1}{R_{dn}} (R_{up} \cdot q + T_i - T_{dn}) \quad (12)$$

여기서,  $q_{loss}$ 는 패널 하부공간으로 열손실,  $R_{dn}$ 는 배관층 하부 열전달저항,  $R_{up}$ 는 배관층 상부 열전달저항,  $T_i$ 는 설정 실온,  $T_{dn}$ 는 복사난방패널 하부공간의 공기온도이다.

**Table 1.** Pipe spacing factor  $a_W$

$R_{\lambda,B} (m^2K/W)$	$a_W$
0	1.23
0.05	1.188
0.10	1.156
0.15	1.134

**Table 2.** Covering factor  $a_U$

W (m)	$R_{\lambda,B} (m^2K/W)$			
	0	0.05	0.10	0.15
0.05	1.069	1.056	1.043	1.037
0.075	1.066	1.053	1.041	1.035
0.1	1.063	1.050	1.039	1.0335
0.15	1.057	1.046	1.035	1.0305
0.2	1.051	1.041	1.0315	1.0275
0.225	1.048	1.038	1.0295	1.026
0.3	1.0395	1.031	1.024	1.021
0.375	1.030	1.0221	1.0181	1.015

**Table 3.** Pipe external diameter factor  $a_D$

W (m)	$R_{\lambda,B} (m^2K/W)$			
	0	0.05	0.10	0.15
0.05	1.013	1.013	1.012	1.011
0.075	1.021	1.019	1.016	1.014
0.1	1.029	1.025	1.022	1.018
0.15	1.040	1.034	1.029	1.024
0.2	1.046	1.040	1.035	1.030
0.225	1.049	1.043	1.038	1.033
0.3	1.053	1.049	1.044	1.039
0.375	1.056	1.051	1.046	1.042

### 방열량 해석 조건

본 연구에서는 최근 국내 건설사의 공동주택 기준층 바닥난방패널 설계 조건에 감안하여 콘크리트 슬래브(210 mm) 상부에 층간소음 저감을 위한 완충재(PP board 20 mm)와 EPS 단열재(40 mm)를 시공한 후, 배관을 일정 간격으로 고정하고 시멘트 모르타르(50 mm)를 타설하고 지정 마감재를 시공하는 것으로 가정하였다. 기준층의 천장 마감은 30 mm 두께의 목재를

에 석고보드(10 mm)가 고정되어 중간에 공기층(30 mm)이 있는 것으로 가정하였다. 그리고 최하층의 경우에는 콘크리트 슬래브 하부에 PF 단열재(20 mm)를 추가 설치하는 것으로 하였다. 본 연구에서 배관 피치는 200 mm부터 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm의 총 5가지 대안에 대한 방열량 평가를 진행하였다. 그리고 일반적으로 국내에서 사용되는 바닥 마감재의 종류에 따라 리놀륨 타일(2 mm)과 목재 강화마루(8 mm), 자기질 타일(13 mm), 대리석(20 mm)을 대상으로 방열량을 비교평가하였다. 배관 종류는 기존 국내외에서 널리 사용되는 PB배관, PP배관, PE-X배관, PE-RT배관을 비교 대상으로 하였으며, 별도의 피복없이 배관 외경 20 mm, 배관 두께 2 mm로 가정하여 산출하였다. Table 4와 같이 각 재료별 치수 및 물성치는 설정하였다. Table 5와 같이 개별난방의 경우, 보일러의 공급온수온도 60°C, 환수온도 45°C로 가정하였으며, 지역난방의 경우 공급온수온도 50°C, 환수온도 40°C로 가정하였다(KDHC, 2020). 난방공간 실온은 22°C로 가정하였으며, 아래층에서도 동일하게 22°C로 가정하였다. 최하층의 아래층은 비난방 공간으로 외기에 직접 면하는 경우에는 -11°C, 지하주차장에 면하는 경우에는 10°C로 가정하였다.

**Table 4.** Input data of radiant panel layers for thermal output calculation

Layers	Materials	Thickness (m)	Thermal conductivity (W/m.K)	Thermal resistance (m <sup>2</sup> K/W)
Flooring	PVC linoleum tile	0.002	0.25	0.008
	Wooden flooring	0.008	0.13	0.062
	Porcelain tile	0.013	1.5	0.009
	Marble	0.020	2.8	0.007
Thermal diffusion	Cement mortar	0.040	1.2	0.033
Pipe	PB pipe / PP pipe	$d_a=0.2$	0.22	0.009
	PE-X pipe/ PE-RT pipe	( $s_R=0.002$ )	0.35	0.006
Thermal insulation (Sound insulation)	EPS board	0.040	0.031	1.290
	PF board	0.020	0.035	0.571
	PP board	0.020	0.056	0.357
Concrete structure		0.210	1.6	0.131
Ceiling	Air cavity	0.030	-	0.086
	Gypsum board	0.010	0.22	0.045

**Table 5.** Input data of heat sources and boundary conditions for thermal output calculation

Categories		Temperature (°C)	
Heat source	Individual Boiler	Supply water temperature	60
		Return water temperature	45
	District heating	Supply water temperature	50
		Return water temperature	40
Boundary conditions	Air temperature in heated room (general floor)		22
	Adjacent air temperature in lowest floor (parking garage)		10
	Adjacent air temperature in lowest floor (outdoor)		-11

## 방열량 해석 결과 및 토의

### 배관 피치에 따른 방열량 비교

본 연구에서는 공동주택의 바닥패널의 배관 피치를 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm의 총 5가지 대안에 대해 표면에서의 설계 방열량과 하부로의 열손실량을 산정하였다. 그리고 바닥 마감재는 목재 강화마루(8 mm)로, 배관 재료는 PB 배관으로 동일하게 가정하였다. Figure 1과 같이 배관 피치가 기존 200 mm인 경우, 개별난방과 지역난방에서 바닥 표면의 설계 방열량이 각각  $93.5 \text{ W/m}^2$ ,  $70.8 \text{ W/m}^2$ 로 나타났다. 반면 배관 피치가 증가할수록 설계 방열량은 지속적으로 감소하여 배관피치가 400 mm일 경우, 개별난방은  $53.5 \text{ W/m}^2$ , 지역난방은  $40.6 \text{ W/m}^2$ 로 나타났다. 국내 에너지절약설계기준 변경에 따라 난방부하가 크게 줄어들고 있으며, 현행 난방부하 설계 기준에서도  $50 \text{ W/m}^2$ 내외로 나타나고 있다(KDHC, 2020). 기존 선행연구에서도 현재 국내 에너지 절약기준에 따른 공동주택의 최대 난방부하는  $50 \text{ W/m}^2$  이내로 나타났으며(Koo et al., 2012), 향후 정부의 제로에너지 공동주택 인증 정책 및 에너지 절감 기술 보급을 통해 공동주택의 난방 부하가 패시브하우스 수준인  $15 \text{ W/m}^2$  이내로 낮아질 수 있을 것으로 나타났다(Lim et al., 2014). 이러한 추세를 감안하면 향후 신축 공동주택에서는 바닥난방의 배관 피치를 대략 350 mm내외로 늘리는 것이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 공동주택의 입주자의 난방 패턴이나 바닥복사난방시스템의 열원 및 제어시스템의 운영 방식에 따라서 주로 간헐적인 난방운전이 이뤄지는 경우에는 난방 운전 초기 갑작스런 부하에 대응하기 위한 보완이 필요할 것이다. Figure 2와 같이 배관 피치를 늘리는 경우, 방열량도 줄어들지만 바닥 패널의 하부 공간으로 열손실량도 줄어드는 것을 알 수 있다. 하부로 열손실량은 기준층에서는 방열량의 대략 10% 정도로 나타난 반면, 최하층에서는 외기에 직접 노출된 경우 방열량의 대략 40% 정도로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 기준층에 비해 최하층은 단열재를 외부에 시공하더라도 열손실량이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 외기에 직접 노출되는 경우에는 지하주차장보다 더 많은 열손실이 발생하고 있다. 공급온수온도가 상대적으로 높은 개별난방의 경우, 지역난방보다 다소 열손실량이 크게 나타났다.

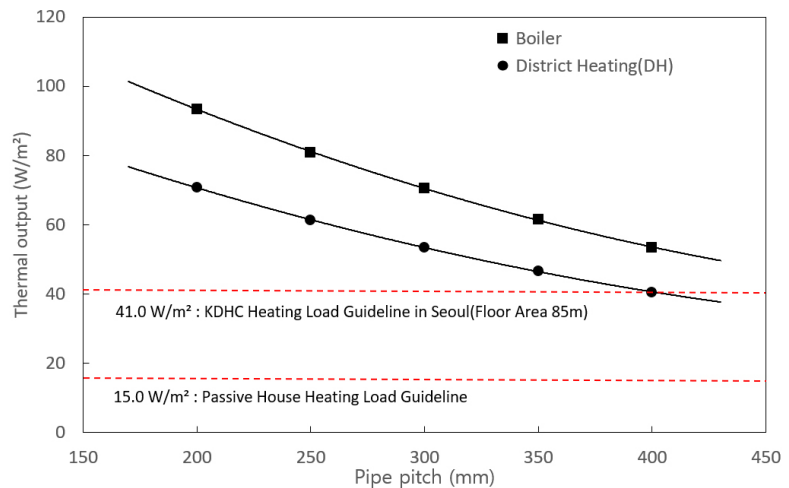


Figure 1. Thermal output according to the pipe pitch



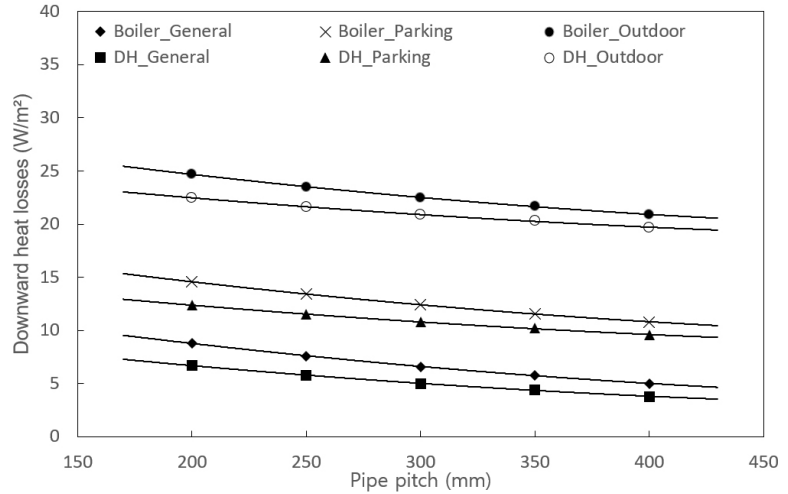


Figure 2. Downward heat losses according to the pipe pitch

### 바닥 마감재의 열저항에 따른 방열량 비교

바닥 마감재로 사용되고 있는 리놀륨 타일(2 mm)과 목재 강화마루(8 mm), 자기질 타일(13 mm), 대리석(20 mm)의 열저항은 Table 2와 같이 각각 0.008, 0.062, 0.009, 0.007로 나타났다. 바닥 마감재의 열저항에 따른 방열량을 비교하기 위해 배관 피치는 400 mm로 하고 배관 재료는 PB배관으로 동일하게 가정하였다. Figure 3과 같이 기준층에서 개별난방과 지역

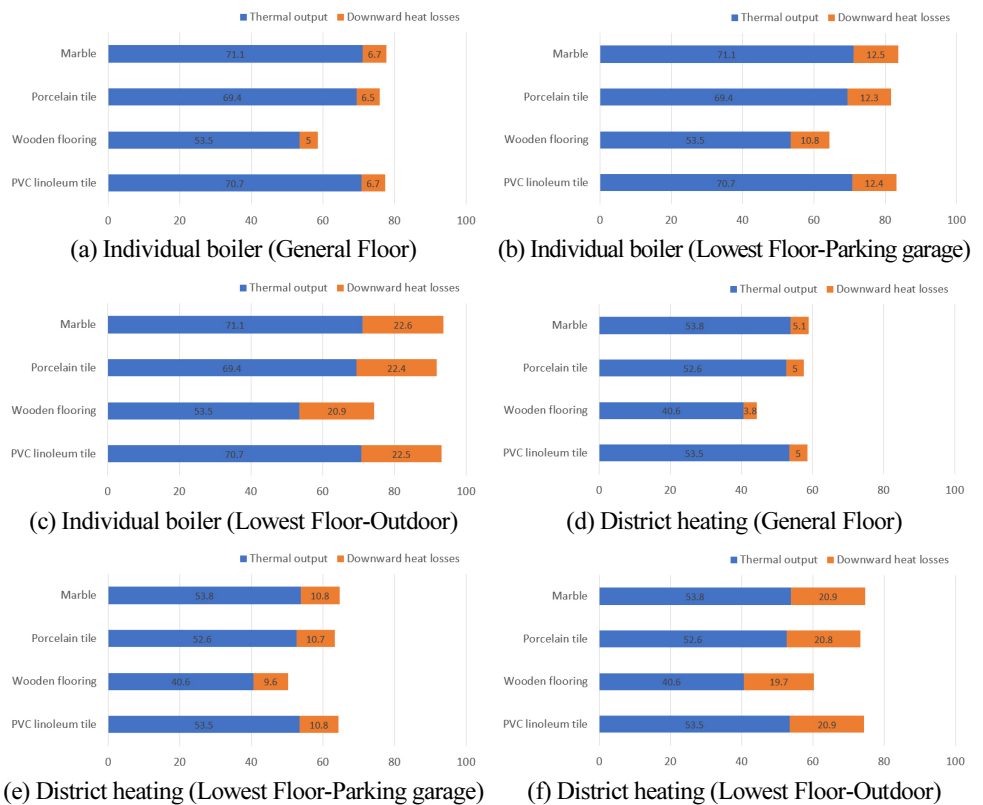


Figure 3. Thermal output and downward heat losses according to the flooring materials

난방에서 목재 강화마루의 경우 방열량이 각각  $53.5 \text{ W/m}^2$ ,  $40.6 \text{ W/m}^2$ 인 반면, 다른 유형에 서는 각각  $70 \text{ W/m}^2$ 내외,  $53 \text{ W/m}^2$ 내외로 나타났다. 목재 강화마루의 경우, 열전도율이 상 대적으로 낮기 때문에 상부 바닥표면에서의 방열량이 다소 낮게 나타났다. 일반적으로 공동 주택의 세대에서 보일러나 제어기 사양은 동일하지만, 입주자의 선호도에 따라서 바닥 마감 재를 지정하기 때문에, 이로 인해 세대별로 실제 난방 운영과정에서 방열 특성이 다르게 나타 날 수 있을 것으로 판단된다. 또한 최근 층간 소음 문제로 인해 세대별로 바닥 마감재 위에 별 도로 층간소음 저감용 매트를 사용하는 경우에는 방열량이 크게 달라질 수 있을 것이다.

### 배관의 종류에 따른 방열량 비교

본 연구에서는 배관의 종류에 따른 방열량을 비교하기 위해 바닥 마감재는 목재 강화마루 (8 mm)로 동일하게 가정하였으며, PB배관, PP배관, PE-X배관, PE-RT배관을 비교 대상으 로 하였다. 다만 ISO 표준(ISO, 2021)을 참고하여 배관의 열전도율은 PB배관과 PP배관이 동 일하고, PE-X배관과 PE-RT배관이 동일한 것으로 가정하였다. 그리고 별도의 배관 피복없이 배관 외경 20 mm, 배관 두께 2 mm, 배관 피치 400 mm로 가정하였다. Table 6과 같이 개별난 방의 경우 방열량이 PB배관과 PP배관에서  $53.5 \text{ W/m}^2$ , PE-X배관과 PE-RT배관에서  $56.5 \text{ W/m}^2$ 로 나타났으며, 지역난방의 경우 각각  $40.6 \text{ W/m}^2$ ,  $42.8 \text{ W/m}^2$ 로 나타나 배관의 열전 도율이 클수록 상대적으로 방열량이 크게 나타난다.

**Table 6.** Thermal output and downward heat losses according to the pipe materials

Heat source	Input parameters			Thermal output ( $\text{W/m}^2$ )	Downward heat losses ( $\text{W/m}^2$ )	
	Floors	Adjacent space	Pipe material			
Individual Boiler	General floor	Heated room	PB or PP	53.5	5	
			PE-X or PE-RT	56.5	5.3	
	Lowest floor	Parking garage	PB or PP	53.5	10.8	
			PE-X or PE-RT	56.5	11.1	
		Outdoor	PB or PP	53.5	20.9	
			PE-X or PE-RT	56.5	21.2	
	District heating	General floor	Heated room	PB or PP	40.6	3.8
				PE-X or PE-RT	42.8	4
Lowest floor		Parking garage	PB or PP	40.6	9.6	
			PE-X or PE-RT	42.8	9.8	
		Outdoor	PB or PP	40.6	19.7	
			PE-X or PE-RT	42.8	19.9	

### 방열량 해석 결과에 대한 토의

본 연구에서는 바닥복사난방시스템의 방열량 해석을 위해 ISO 표준 계산방법 가운데서 덕 함수법에 의한 단순계산법을 이용하였다. 이 계산 방법은 바닥복사난방시스템의 설계를 위 해 표면의 방열량을 산정하기 위한 것으로 기존 FEM해석 방법에 따라 도출된 변수들의 함수

를 1차원적으로 계산하고 있다. 최근 사회적인 층간소음문제로 인해 다양한 완충재가 적용되고 있으며, 재료 및 형상, 크기 등이 다양하게 개발되고 있다. 본 연구에서는 이러한 완충재의 형상으로 인한 중공층, 지지구조물에 의한 전도열전달 등 복잡한 열전달 특성을 반영하지 않았다. 이러한 복잡한 바닥패널 구조를 반영하고 재실자의 온열쾌적을 평가하기 위해서는 FDM 또는 FEM방식의 정상상태 전열해석 프로그램을 이용하여 바닥표면온도 분포 분석이 향후 연구에서 이뤄져야 할 것으로 판단된다. 또한 ISO 표준에 의한 방열량 설계 방법은 정상상태를 기준으로 산출되기 때문에, 실제 재실자 거주환경 조건에서 바닥복사난방시스템을 간헐적으로 운전하는 경우 동적 해석을 통해 설계 기준에 대한 제어 및 운영조건에 따른 반응 시간을 평가하는 것이 필요하다.

국내에서 주거건물에 온수온돌난방이 보급되면서 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 2005년 이후에는 국내 전문가들이 주도적으로 참여하여 바닥복사냉난방시스템의 설계, 시공, 제어에 관련된 ISO 국제 표준을 제정/개정해 오고 있다. 더불어 바닥복사난방시스템의 설계 방법에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Shin, 2008; Jeong et al., 2011; Lee et al., 2011) 그럼에도 불구하고 국내에서는 복사난방설계에 대한 기준이 제도적으로 정립되지 못하고 있다. 향후 제로에너지 공동주택의 확대 보급을 위해서는 건물의 부하 특성을 고려한 복사난방시스템의 설계가 체계적으로 수행되어야 할 것이다.

## 결론

본 연구에서는 제로에너지 공동주택에서 바닥복사난방시스템의 설계를 위해 ISO 표준 설계 방법을 이용하여 바닥난방패널의 배관 피치 간격에 따른 방열량 특성을 분석하고 바닥마감재 및 배관의 종류에 따라서 방열량 특성을 분석하였다. 제로에너지 공동주택에서 구조체나 창호의 단열 및 기밀성능이 크게 개선됨으로써 기존 바닥난방패널의 배관 피치를 350 mm 내외로 변경하더라도 난방 부하 제거가 가능할 것으로 예상된다. 온수 공급온도가 높은 개별 난방의 경우, 지역난방에 비해 방열량이 30%가량 높게 나타났다. 그리고 바닥마감재의 종류에 따라 열저항이 달라지기 때문에 재료별 특성 및 두께를 고려한 바닥난방패널 설계가 필요한 것으로 나타났다. 아울러 최하층 바닥 슬래브가 외기에 노출된 경우, 패널 하부로의 열손실이 크게 증가하기 때문에 슬래브의 하부 단열보강이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 향후 다양한 바닥패널의 재료 및 구조를 고려하고 바닥표면 온도 분포에 따른 온열쾌적 조건을 평가하기 위해서는 정상상태 전열해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션 해석에 관한 후속 연구가 이루어져야 한다.

## 후기

이 논문은 이화여자대학교 2022년도 학술연구지원사업의 일환으로 수행된 연구입니다. 본 연구 진행에 도움을 준 홍세린 학생에게 감사를 표합니다.

## References

1. Jeong, C.H., Oh, H.W., Lee, Y.J., Yeo, M.S., Kim, K.W. (2011). Comparison Between Design Methods of Floor Panel for Radiant Floor Heating and Cooling System. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 5(1), 52-61.
2. Jeong, Y.S., Cho, S.H., Mun, S.H., Ji, C.Y. (2021). Scenario to Reduce Greenhouse Gas Emissions in Building Sector towards the goal of Carbon Neutrality by 2050. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 37(10), 189-197.
3. Lee, Y.J., Jeong, C.H., Yeo, M.S., Kim, K.W. (2011). Design of the Radiant Floor Heating Panel Considering Heating Load of Residential Building. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 27(9), 101-106.
4. Lim, J.H., Kim, K.W. (2016). ISO 11855 - The international Standard on the Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems. *REHVA Journal*, 53(1), 46-53.
5. Lim, J.H., Kim, S.I., Song, S.Y. (2014). Improvement of Design Criteria in Heating and Cooling Equipment According to the Consolidation of Design Standard for Energy Saving in Apartment Buildings of Korea. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 34(3), 89-97.
6. Koo, B.K., Lee, H.H., Yoon, S.M., Lim, J.H., Song, S.Y. (2012). A Study on the Design Guidelines with Radiant Floor Heating at Apartment Housing Unit of District Heating. *Korean Solar Energy Society 2012 Fall Conference Proceeding*, 251-256.
7. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems (KIAEBS)*. (2015). Determination of the design heating capacity of hydronic radiant floor heating system (Ondol).
8. Korea District Heating Corp (KDHC). (2020). Thermal Energy Use Guideline.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2015). Ondol installation guideline.
10. Shin, M.S. (2008). Design of a Radiant Floor Heating Panel Considering the Upper Heat Output and the Floor Surface Temperature. Master's thesis. Seoul National University, Korea.
11. ISO. (2021). ISO 11855-2 Building environment design-Embedded radiant heating and cooling systems-Part 2: Determination of the design heating and cooling capacity.