

## 복사난방패널 방열량실험의 제어오차요인 분석

# Analysis of Control Error Factors of a Thermal Output Experiment for Radiant Heating Panels

신대욱<sup>1</sup>

Shin Dae-Uk<sup>1</sup>

(Received November 1, 2018 / Revised November 13, 2018 / Accepted December 6, 2018)

### ABSTRACT

As a radiant heating panel gets more popularity, the need to study on evaluation method of thermal output of the panel also becomes increasing. Generally, the chamber using method is applied to evaluate the thermal output through an experiment. However, the chamber using method cannot be used due to the limitations on space and cost. EN1264 addresses the test equipment to evaluate the thermal output by using simpler experimental setup, and introduces application method in detail. However, there is not enough description of control methods to meet the experiment condition, and it is difficult to meet this when practical experiment. Therefore, this paper analysed the control error factors of when the thermal output experiment is performed. When EN1264 method is applied to evaluate the thermal output of the radiant floor heating panel, the error factor which is caused by the characteristic of test equipment cannot be removed by the control methods of chamber using method. In addition, the error factor can be occurred at the element which is located out of the control system. These possible error factors are defined as the characteristic error factors.

Key words : 복사난방(Radiant Heating), 방열량실험(Thermal Output Experiment), EN1264, 제어오차요인(Control Error Factor)

## 1. 서론

### 1.1. 연구배경과 목적

복사난방은 고대로부터 한국을 중심으로 존재하였으며, 1950년대에 건물 난방의 형태로서 널리 활용되고 있다 (Robert et al., 2010; Robert et al., 2011). 바닥 복사 난방 시스템 중 난방 패널의 열성능으로는 단열성능, 방열특성, 표면 온도 분포가 있으며(이도현 등 2002), 이중 입수 온도와 방열량의 관계를 나타내는 방열특성은 실의 난방부하를 제거하기 위한 바닥 난방 패널의 가장 기본적인 성능이다(신미수, 2008). 방열특성은 패널이 어떤 특징을 가진 실에 적합한지 판단하는 근거이다. 예를 들면, 간헐적으로 사용되는 공간에는 방열이 빨리 이루어지는 것이 좋으므로, 배관상부에서 바닥표면까지 축열이 적으며, 열저항 또한 적은 건식 패널을 사용하는 것이 좋다. 이때는 40℃ 정도의 난방수를 사용한다. 반대로 연속적으로 긴 시간 이용되는 공간에는 목표 방열량에 늦게 도달하더라도 오랫동안 그 열기가 유지되는 것이 좋으므로, 배관상부에서 바닥표면까지의 축열이 크고 그 열저항 또한 큰 반건식이나 습식 패널을 사용하는 것이 좋다. 이

때는 60℃ 정도의 난방수를 적용해야 난방이 가능하다.

단, 상기 기술한 난방수 입수온도에 대한 수치는 주로 경험으로부터 도출된 것이며, 난방부하를 제거하기 위한 에너지보다 과도한 에너지를 사용하는 경우가 발생할 수 있다. 이와 같은 현상을 막기 위해서는 체계적인 패널 방열특성에 대한 평가가 행해져야한다.

패널 방열특성의 평가는 방열량을 평가함으로써 이루어지는데, 계산식을 이용하는 방법(시뮬레이션 포함)과 실험을 하는 방법이 있다. 계산식을 이용하는 방법으로는 ASHRAE(2012), EN1264(Comite' Europe'en de Normalisation (CEN), 2011), Nordtest(Nordic, 2001)에서 제안한 방법이 있다. 이를 이용하면 손쉽게 방열량을 계산할 수 있으나, 두께, 저항 값 등 상세한 입력값이 필요하며, 적용할 수 있는 패널의 종류가 한정되어 있다. 또한 불확실한 요소들이 많은 경우에 이를 적용하기 곤란하다. 예를 들면, 열저항이 균일하지 않거나, 두께가 얇고 경량일 때 단열 성능을 유지하기 위해 등장한 복잡한 단면구조를 가진 패널에 대해서는 계산법을 이용한 평가가 어렵다. 이에 반해 실험은 모든 복사난방패널에 대해 직접적이고 정확하게 방열량을 평가할 수 있다.

1) 주저자, 한국건설생활환경시험연구원 주임연구원, 공학박사, (ukdae85@kcl.re.kr)

실험은 주로 열환경 챔버를 이용하여 진행된다. 두 개의 챔버 중 하나는 실을 모사하고 다른 하나는 외부환경이나 주변 실을 모사(climate box(Allard et al., 1978), pre-room(Nagano and Mochida, 2004)등)한다. 이 방식은 실제 환경을 그대로 모사할 수 있어 정확한 결과를 낼 수 있으며, 정확한 실험을 위해 다양한 제어법이 제안(김오봉, 2002; 이진영, 1999; 임재한, 2001; 최정민, 2007; Cho and Zaheer-uddin, 2003)되고 비교 평가(여명석, 1998; 여명석, 김광우, 1999; Lim et al., 2006; Ryu et al., 2004)되었다.

하지만 챔버를 이용하는 방식은 비용이 많이 소요되며 공간 활용 측면에서도 불리하다. 이를 대신하여 EN1264에서 제시한 간략한 실험 장치를 이용할 수 있다. 외부 챔버 대신 Cooling plate를 활용하여 외부부하를 모사하고, 실내의 복사와 대류열전달을 합관 등의 열전달층을 이용하여 전도열전달로 모사한다. 즉, 챔버 실험에 비해 설비가 간단하고 경제적이면서도 실제와 유사한 실험이 가능하다.

EN1264의 실험법을 통해 방열량을 평가할 시에는, 최고 방열량에 대한 조건을 맞춰줄 필요가 있다. EN1264에서 제시한 실험 조건으로서 최고 방열량은 100 W/m<sup>2</sup>이며, 이는 바닥온도와 실내온도차가 9 °C일 때의 방열량이다. 이에 따라 실온 20°C, 바닥온도 29°C로 설정하여 그 조건이 유지될 때를 기준으로 방열 특성 곡선을 구한다. Weitzmann(2005)은 EN1264를 활용하여 실험을 진행하였으나, 기준에서 제시한 설정온도를 정확히 만족시키기는 어렵다고 말하고 있다. 또한 실제의 결과도 오차 범위를 벗어나 있다. 이렇게 제어가 용이하지 않은 원인으로, 챔버법의 제어 전략을 EN1264 실험법에 그대로 적용한 것을 들 수 있다. 챔버법이 일반적으로 사용되고 많은 연구가 이루어졌지만, 그 제어 전략을 실험체의 특성이 달라 제어 양상 또한 다르다고 판단되는 EN1264 실험법에 바로 적용하기에는 한계가 있을 것으로 보인다.

이에 본 연구에서는, EN 1264의 실험법을 통한 복사 난방 패널 방열량 평가 실험 시, 제어에서 발생할 수 있는 오차 요인을 도출하는 것을 목표로 한다.

### 1.2. 연구방법 및 범위

본 연구의 목적을 달성하기 위하여 우선 EN1264에서 제시한 복사 난방패널 방열량 평가의 실험적 방법에 대해 고찰하여 실험체의 특징, 실험 조건, 측정법, 분석 및 평가방법을 분석하였다. 또한 기존 문헌을 통해 자동제어이론을 살펴보고 챔버법에 이용할 수 있는 실제 복사 난방 시스템의 제어방법을 고찰하여 제어의 이론적 근간을 마련하였다. 다음으로 EN1264을 이용한 본격적인 실험을 위해 제시한 실험 조건을 유지하는데 방해가 되는 일반적인 오차 요인들을 살펴보았다. 특히 본 실험법을 이용하여 실험할 때 발생할 수 있는 고유한 오차 요인들을 도출하였다.

## 2. 기존 문헌 고찰

### 2.1. EN1264

#### 2.1.1. 실험체

EN1264에서 제시한 기본적인 실험체(Test equipment)의 단면은 다음 Fig. 1과 같다.

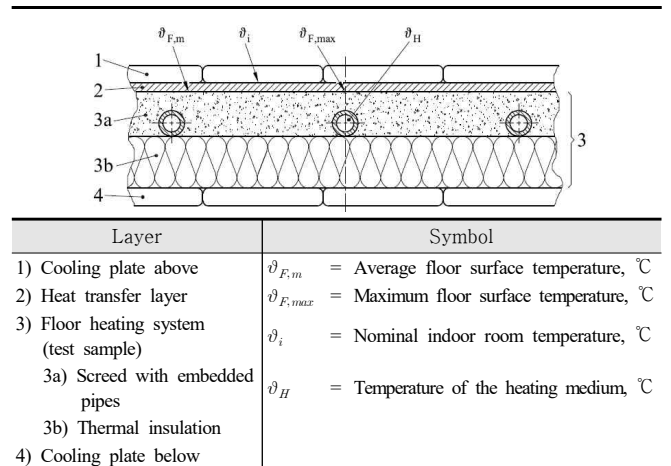


Fig. 1. Test equipment in EN1264

각 구성층의 상세는 다음과 같다.

#### (1) Cooling plate

상부와 하부에 두어 실의 부하를 모사한다. 상부 Cooling plate는 패널이 위치한 실의 부하를, 하부 Cooling plate는 패널이 위치한 실의 아래층 실이나 지중 등 열이 손실될 수 있는 부분을 모사한다. 내부에는 물이 이동할 수 있는 경로가 있으며, 평면은 1,000mm x 1,000mm 이상으로 제작한다. EN1264에 제시된 Cooling plate의 형상은 Fig. 2와 같다.

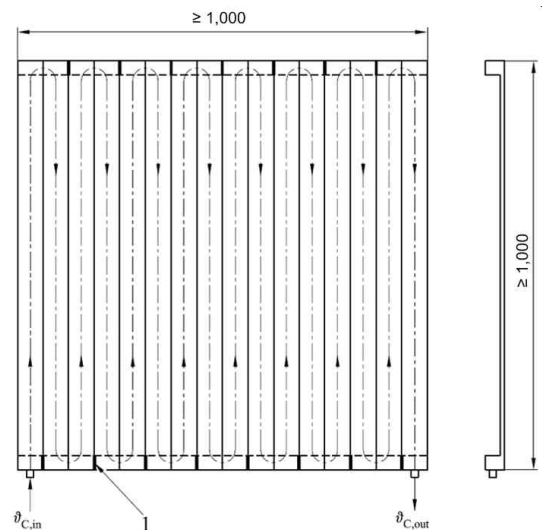


Fig. 2. Cooling plate

(2) 열전달층(Heat transfer layer)

바닥과 주변의 대류, 복사 열교환을 전도로 모사하여 하나의 층으로 나타낸 부분이다. 열전달층의 저항( $R$ )은 대류, 복사 열교환을 합한  $(0.0926 \pm 0.01) \text{ m}^2\text{C/W}$ 으로 한다.

(3) 패널

일반적으로 사용되는 여러 가지 시편, 즉, 습식, 건식 등의 패널을 적용한다. 패널과 그 하부(슬래브나 부가적인 단열재 등)를 모사하는 단열재로 이루어진다.

2.1.2. 실험 조건

(1) Cooling plate와 패널의 설정표면온도

EN1264에서는 그 실험 조건을 Cooling plate이 설정 표면온도가 유지하고 패널은 설정 바닥 최고 온도를 유지할 때로 정의한다. 각각의 설정 표면온도는 다음과 같은 과정에 의해 결정되었다.

EN1264에서 패널의 방열량은 식(1)으로 계산한다.

$$q = K_H \cdot \Delta\vartheta_H \tag{1}$$

여기서,

- $q$  : 바닥 난방 패널의 방열량,  $\text{W/m}^2$
- $K_H$  : 상당 열투과 계수,  $\text{W/m}^2\text{C}$
- $\Delta\vartheta_H$  : 관내 난방수 온도( $\vartheta_H$ )와 상부 Cooling plate 표면온도( $\vartheta_i$ )의 차( $=\vartheta_H - \vartheta_i$ ),  $^{\circ}\text{C}$

$\Delta\vartheta_H$ 를 구할 때  $\vartheta_H$ 를 측정할 필요가 있는데, 이는 본래 관내를 직접 측정해야 한다. 하지만 관내에 센서를 설치하는 데에는 어려움이 따르므로, EN1264에서는  $\Delta\vartheta_H$ 를 식(2)와 같이 입출수 온도와 실내 온도를 이용한 대수평균온도차 식을 사용한다.

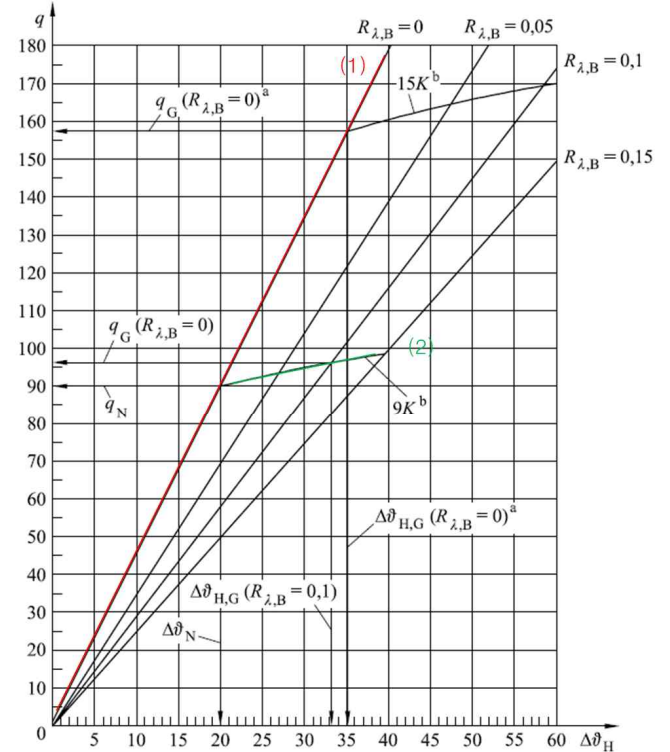
$$\Delta\vartheta_H = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{\vartheta_R - \vartheta_i}} \tag{2}$$

여기서,

- $\Delta\vartheta_H$  : 관내 난방수 온도( $\vartheta_H$ )와 상부 Cooling plate 표면온도( $\vartheta_i$ )의 차( $=\vartheta_H - \vartheta_i$ ),  $^{\circ}\text{C}$
- $\vartheta_V$  : 바닥난방 패널 입수 온도,  $^{\circ}\text{C}$
- $\vartheta_R$  : 바닥난방 패널 출수 온도,  $^{\circ}\text{C}$
- $\vartheta_i$  : Cooling plate 표면 온도 (실온 모사),  $^{\circ}\text{C}$

EN1264에서는 방열특성을 평가하기 위한 결과물로 위의 식에 따른 characteristic curve, 즉, 방열 특성 그래프를 제시

하며, 이는 Fig. 3에 나타난다. 가로축은  $\Delta\vartheta_H$ , 즉, 배관 내 난방수 온도와 상부 Cooling plate 표면 온도(실내온도를 모사함)의 차이이고, 세로축은 그 때의 방열량  $q$ 값이다. 즉, ‘일정  $\Delta\vartheta_H$ ’ 일 때의 방열량  $q$ 를 평가하여, 그 때 기율기  $K_H$ 를 구할 수 있다. 즉,  $K_H$ 는 해당 패널의 방열특성을 보여준다.



(1) Characteristic curve for test condition  
(2) Limit curve for occupied space

Fig. 3. Characteristic curve

방열량  $q$ 는  $\Delta\vartheta_H$ 에 의해 비례적으로 변화하며,  $\Delta\vartheta_H$ 가 어떤 값이 되면  $q$ 는 나타난다. 즉, 기율기  $K_H$ 를 구하는 것은 어떤 경우에서든 가능하다. 하지만 실험을 위해서는 아래에 제시한 내용을 고려하여 ‘일정  $\Delta\vartheta_H$ ’의 기준을 세울 필요가 있다.

- 1)  $\Delta\vartheta_H$ 가 낮아 방열량이 작을 때 실험을 실시하면, 그 기율기에서 오차가 커질 수 있다. 즉, 방열량 될 수 있으면 많은 상태에서 실험하는 것이 유리하다.
- 2) 방열량이 가장 큰 부분(예를 들면, 배관 직상부)에서도 기준에서 명시된 바닥 난방 패널의 최대 허용 방열량 ( $q_{G,max}$ )을 넘지 않아야 한다. 이는 인체에의 영향, 패널 재료의 변형 등을 고려한 값으로서, 유럽에서는 그 값을 재실 공간(Occupied area) 및 욕실 혹은 유사 공간(Bathroom and similar)에서는  $100 \text{ W/m}^2$ , 주변부(Peripheral zone)에서는  $175 \text{ W/m}^2$ 으로 지정하고 있다.

즉, 방열량이 가장 큰 부분에서 바닥 난방 패널의 최대 허용 방열량( $q_{G,max}$ )이 나올 때 방열량 실험을 하는 것이 유리하다는 결론이 나온다. EN1264에서는 바닥 마감이 되어 있지 않은 상태(no flooring,  $R_{\lambda,B}=0$ )에서 패널의 방열량이 가장 큰 부분의 방열량이 바닥난방 패널의 최대 허용 방열량( $q_{G,max}$ )인 상황이 실험 조건에 적합하다. 이는 [그림 3]의 (1) characteristic과 (2) 한계 방열량의 교점에 해당한다. 바닥난방 패널의 최대 허용 방열량은 식(3)으로 구할 수 있다.

$$q = 8.92(\vartheta_{fr} - \vartheta_i)^{1.1} \quad (3)$$

여기서,

- $q$  : 바닥난방 패널의 방열량,  $W/m^2$
- $\vartheta_{fr}$  : 바닥난방 패널의 바닥표면온도,  $^{\circ}C$
- $\vartheta_i$  : Cooling plate 표면 온도 (실온 모사),  $^{\circ}C$

위의 식의 변수 중  $\vartheta_{fr}$ 에 패널의 방열량이 가장 큰 부분의 온도인 바닥난방 패널 표면 최고 온도( $\vartheta_{F,max}$ )를 넣으면 바닥난방 패널의 최대 허용 방열량( $q_{G,max}$ )을 구할 수 있다. 재실 공간(Occupied area)에서의 최대 방열량을 예로 들어보면, 설정 실온( $\vartheta_i$ )을 임의로 겨울철 실내 상한온도인  $20^{\circ}C$ 로 설정했을 때 최고 바닥표면온도( $\vartheta_{F,max}$ )가  $29^{\circ}C$ 가 되면, 한계 방열량  $100W/m^2$ 를 만족한다.

이를 통해 재실 공간(Occupied area), 욕실 혹은 유사 공간(Bathroom and similar), 주변부(Peripheral zone)에 대해 EN1264에서 지정한 정상상태에서의 표면온도는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Set surface temperature ( $R_{\lambda,B}=0$ )

	Maximum floor surface temperature, $\vartheta_{F,max}$ ( $^{\circ}C$ )	Nominal indoor room temperature, $\vartheta_i$ ( $^{\circ}C$ )	Limit heat flow density, $q_{G,max}$ ( $W/m^2$ )
Occupied area	29	20	100
Bathroom and similar	33	24	100
Peripheral area	35	20	175

(2) Cooling plate와 패널의 공급-환수 온도차

시스템의 안정성을 고려하여 EN1264에서 지정한 정상상태에서의 Cooling plate와 패널의 입출수온도차는 다음 Table 2와 같다.

Table 2. Set temperature difference

Floor heating system	Cooling plate
$\vartheta_V - \vartheta_R \leq 0.5^{\circ}C$	$\vartheta_{C,out} - \vartheta_{C,in} \leq 0.3^{\circ}C$

2.1.3. 측정

(1) Cooling plate

표면온도 측정에 대해서는 EN1264에서 자세히 다루지 않는다. 하지만 공급-환수 온도차가 적기 때문에, 위치에 관계없이 거의 일정하다고 볼 수 있으므로, Weitzmann(2005)은 수 개소에서 측정 후 평균을 내는 방식을 이용하였다. 공급온도와 환수온도는 해당 부분에서 수온센서를 이용하여 측정한다.

(2) 패널

표면온도 측정 부분은 Fig. 4와 같다.

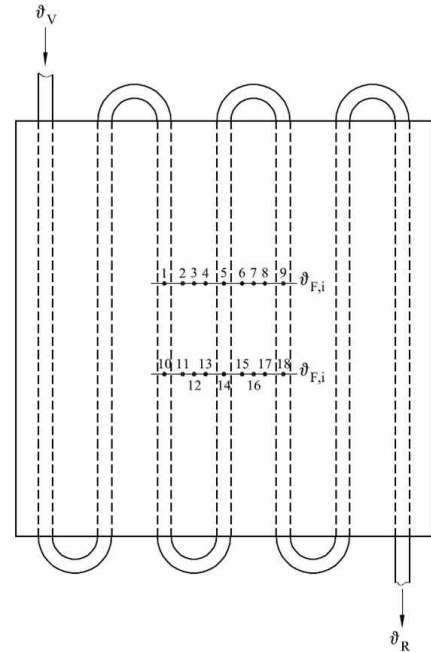


Fig. 4. Measuring point of panel

$\vartheta_i$ 를 각각 측정하여 아래의 식(4), 식(5)을 이용하여 바닥난방 패널 표면 평균 온도( $\vartheta_{F,m}$ )와 바닥난방 패널 표면 최고 온도( $\vartheta_{F,max}$ )를 계산한다.

$$\vartheta_{F,m} = \left( \sum_2^8 \vartheta_{F,i} + \sum_{11}^{17} \vartheta_{F,i} + \frac{\vartheta_{F,1} + \vartheta_{F,9} + \vartheta_{F,10} + \vartheta_{F,18}}{2} \right) / 16 \quad (4)$$

$$\vartheta_{F,max} = \frac{\vartheta_{F,5} + \vartheta_{F,14}}{2} \quad (5)$$

여기서,

- $\vartheta_{F,m}$  : 바닥난방 패널 표면 평균 온도,  $^{\circ}C$
- $\vartheta_{F,i}$  : 바닥난방 패널 표면 지점( $i$ ) 온도,  $^{\circ}C$
- $\vartheta_{F,max}$  : 바닥난방 패널 표면 최고 온도,  $^{\circ}C$

공급온도와 환수온도는 Cooling plate와 마찬가지로 해당 부분에서 수온센서를 이용하여 측정한다.

2.1.4. 분석 및 평가

실험 조건에 부합하는 상태가 되면, 구하고자 하는 characteristic curve의 기울기는 다음 식(6)과 같다.

$$K_{H,N} = \frac{q_N}{\Delta\vartheta_N} \quad (6)$$

여기서,

- $K_{H,N}$  : 실험 조건 상태의 상당 열투과 계수,  $W/m^2\text{°C}$
- $q_N$  : 실험 조건 상태의  $q_G$ ,  $W/m^2$
- $\Delta\vartheta_N$  : 실험 조건 상태의  $\Delta\vartheta_{H,G}$ ,  $\text{°C}$

$q_N$ 은 다음의 식(7)으로 구할 수 있다.

$$q_N = 8.92(\vartheta_{F,m} - \vartheta_i)^{1.1} \quad (7)$$

여기서,

- $q_N$  : 실험 조건 상태의  $q_G$ ,  $W/m^2$
- $\vartheta_{F,m}$  : 바닥난방 패널 표면 평균 온도,  $\text{°C}$
- $\vartheta_i$  : Cooling plate 표면 온도 (실온 모사),  $\text{°C}$

$\Delta\vartheta_N$ 은 실험 조건이 만족 되었을 때,  $\Delta\vartheta_N = \Delta\vartheta_H$ 를 만족하므로, 식(8)을 사용하여 구한다.

$$\Delta\vartheta_N = \left( \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{\vartheta_R - \vartheta_i}} \right)_N \quad (8)$$

여기서,

- $\Delta\vartheta_N$  : 실험 조건 상태의  $\Delta\vartheta_{H,G}$ ,  $\text{°C}$
- $\vartheta_V$  : 바닥난방 패널 입수 온도,  $\text{°C}$
- $\vartheta_R$  : 바닥난방 패널 출수 온도,  $\text{°C}$
- $\vartheta_i$  : Cooling plate 표면 온도 (실온 모사),  $\text{°C}$

실험 조건에 부합하는 상태는 바닥마감이 없는 상태 ( $R_{\lambda,B}=0$ )지만, 현실적으로는 바닥마감이 있을 때의 상태를 고려해야 한다. 하지만 여러 가지 바닥마감에 대해 모두 실험을 수행하기는 어려운 것이 사실이다. 이를 위해 EN1264에서는  $R_{\lambda,B}=1.5$  상태의 실험을 추가로 수행한 후,  $R_{\lambda,B}=0$  상태의 결과와  $R_{\lambda,B}=1.5$  상태의 결과를 이용하여 다른 바닥마감 ( $R_{\lambda,B}$ )을 가진 경우에도 수식으로 계산할 수 있도록 하였다.  $R_{\lambda,B}=1.5$  상태에 대해서도  $R_{\lambda,B}=0$  경우와 마찬가지로 아래의 식(9)을 통해 characteristic curve의 기울기( $K'_H$ )를 구한다.

$$K'_H = \frac{q'_G}{\Delta\vartheta'_{H,G}} \quad (9)$$

여기서,

- $K'_H$  :  $R_{\lambda,B}=1.5$  상태의 상당 열투과 계수,  $W/m^2\text{°C}$
- $q'_G$  :  $R_{\lambda,B}=1.5$  상태의  $q_G$ ,  $W/m^2$
- $\Delta\vartheta'_{H,G}$  :  $R_{\lambda,B}=1.5$  상태의  $\Delta\vartheta_{H,G}$ ,  $\text{°C}$

위의 내용을 이용해 임의의  $R_{\lambda,B}$ 에서  $K_H$ 을 구하는 식은 식(10)과 같다.

$$K_H(R_{\lambda,B}) = \frac{K_{H,N}}{1 + \frac{R_{\lambda,B}}{R'_{\lambda,B}} \left( \frac{K_{H,N}}{K'_H} - 1 \right)} \quad (10)$$

여기서,

- $K_H$  : 상당 열투과 계수,  $W/m^2\text{°C}$
- $K_{H,N}$  : 실험 조건 상태의 상당 열투과 계수,  $W/m^2\text{°C}$
- $K'_H$  :  $R_{\lambda,B}=1.5$  상태의 상당 열투과 계수,  $W/m^2\text{°C}$
- $R_{\lambda,B}$  : 바닥마감재 열저항,  $\text{°C/W}$
- $R'_{\lambda,B}$  :  $R_{\lambda,B}=1.5$  바닥마감재 열저항(=1.5),  $\text{°C/W}$

그리고 임의의  $R_{\lambda,B}$ 에서의  $\Delta\vartheta_{H,G}$ 는 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\vartheta_{H,G} = \varphi \cdot \frac{q'_G \cdot \Delta\vartheta_N - q_N \Delta\vartheta'_{H,G}}{K_H \cdot (\Delta\vartheta_N - \Delta\vartheta'_{H,G}) - q_N + q'_G} \quad (11)$$

여기서,

- $K_H$  : 상당 열투과 계수,  $W/m^2\text{°C}$
- $\varphi$  :  $= \left[ \frac{\vartheta_{F,max} - \vartheta_i}{\Delta\vartheta_o} \right]^{1.1}$ , 이 때,  $\Delta\vartheta_o = 9$
- $q'_G$  :  $R_{\lambda,B}=1.5$  상태의  $q_G$ ,  $W/m^2$
- $q_N$  : 실험 조건 상태의  $q_G$ ,  $W/m^2$
- $\Delta\vartheta_{H,G}$  : 관내 난방수와 상부 Cooling plate 표면온도의 최대온도차,  $\text{°C}$
- $\Delta\vartheta_N$  : 실험 조건 상태의  $\Delta\vartheta_H$ ,  $\text{°C}$
- $\Delta\vartheta'_{H,G}$  :  $R_{\lambda,B}=1.5$  상태의  $\Delta\vartheta_{H,G}$ ,  $\text{°C}$

2.2 복사 난방시스템의 제어

제어시스템(control system)은 크게 제어의 목적, 제어시스템의 구성요소, 결과 혹은 출력으로 나누어 볼 수 있으며, 이 세 요소들 사이의 기본적인 관계는 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 기술적인 용어로, 목적은 입력 혹은 동작신호(actuating

signal)  $u$ 를 의미하며, 결과는 출력 혹은 제어변수(controlled variable)  $y$ 라고도 부른다.

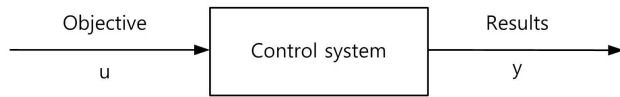


Fig. 5. Basic component of control system

제어시스템으로 나오는 신호를 제어장치에서 어떻게 처리하는가에 따라 다시 개루프(open loop)와 폐루프(closed loop) 제어 시스템으로 구분할 수 있다.4) 이중 폐루프 제어 시스템은 Fig. 6과 같이 참조점에서의 출력  $y$ 는 피드백 되어 기준 입력인 제어의 목적과 비교되고, 이 둘의 차에 비례하는 동작신호가 편차를 줄이도록 시스템을 통하여 보내어 더 정확한 제어를 수행할 수 있다. 다른 말로는 피드백 제어시스템(feed back control system)이라고도 한다.

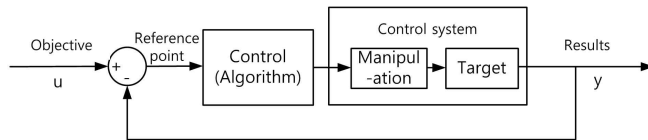


Fig. 6. Control system (Closed loop)

제어동작은 크게 2위치(On/Off), 다위치, 비례(P) 제어, 비례-적분(PI) 제어, 비례-적분-미분(PID) 제어 순으로 정확도와 효율성이 증가한다. 온돌 바닥 표면에서의 방열량은 식 (12)와 같이 공급 유량과 공급 온수 온도에 의해 결정된다. 그러므로 실제 복사 난방 시스템의 제어 방법은 Table 3과 같이 공급 유량 제어와 공급 온도 제어로 분류할 수 있다. 공급 유량 제어를 적용하기 위해서는 개폐식 밸브나 2방 밸브가 필요하고, 공급 온도 제어를 적용하기 위해서는 3방 밸브나 4방 밸브가 필요하다. 대개의 경우 난방에서는 일정 유량 조건에서 혼합밸브를 사용하여 온수온도를 연속적으로 변화시켜 제어하는 온수 온도제어는 개폐식 밸브를 사용하여 유량을 조절하는 온수 유량제어에 비해 제어성능이 우수하여 외국에서 보편적으로 사용되고 있다.

$$Q = \dot{m} c_p (\vartheta_V - \vartheta_R) \quad (12)$$

여기서,

- $Q$  : 바닥난방 패널의 전체 방열량, W
- $\dot{m}$  : 공급 유량, kg/s
- $c$  : 비열, J/kg°C
- $\vartheta_V$  : 바닥난방 패널 입수 온도, °C
- $\vartheta_R$  : 바닥난방 패널 출수 온도, °C

Table 3. Control method of radiant floor heating

Variable	Control method	Control equipment
Flow ( $\dot{m}$ )	On/Off control	On/Off valve
	Variable flow control	2-way valve
Temperature ( $\vartheta_V - \vartheta_R$ )	Water temperature control	3-way valve 4-way valve

공급 유량 제어의 경우, 대부분 개폐식 제어이나, 변유량 제어 또한 늘어나는 추세이다. 단, 변유량 제어는 온수인 경우 공급 온도가 높을수록 저유량 범위에서 공급 빈도가 증가하므로 밸브 작동의 빈도도 증가하지만, 일반적으로 밸브는 저유량 범위에서 제어 성능이 떨어지므로 적절한 온수 온도 공급이 중요하다. 또한 변유량 펌프를 사용하지 않는 경우 펌프 동력 손실도 증가하므로 제어 성능이 떨어진다.

공급 온도 제어는 개폐식 제어와 비교하여 실온 유지 성능에 있어서는 유리하지만, 혼합 밸브와 외기보상 제어기 등의 설치로 초기 투자비가 증가하는 단점이 있다.

본 연구는 실험실에서 이루어지므로 실제 현장에서 생각해야 하는 부차적인 요소, 즉, 경제성이나 제어의 복잡성과 같은 것들은 고려하지 않고, 정확한 제어를 통해 올바른 실험 결과를 도출하는 것이 목표이다. 이를 위해 실제에서 제어성이 좋은 것으로 판명되는 3방 밸브를 이용한 공급 온도 제어를 택한다. 또한 제어하려는 목표에 따라 바닥온도, 혹은 실온을 피드백하는 제어가 필요할 것으로 판단된다.

본 실험체를 이용하면 Cooling plate 표면 온도를 외기온도에 상당하여 조절이 가능하다. 만일 Cooling plate내의 냉수 온도를 변화 시키는 제어가 개입될 때는 위의 패널 제어와 같은 맥락에서 공급 냉수 온도 제어를 실시한다.

### 3. 제어오차요인 분석

본 장에서는 EN1264에서 제시한 실험 구성을 분석하여 고정할 변수와 변화 가능한 변수(제어 변수)를 도출하였다. 그리고 본 실험 구성을 이용한 실험에서 존재할 가능성이 있는 오차 요인을 분석하였다.

#### 3.1. 실험 구성 분석

실험 구성은 제어 블록다이어그램으로 나타낼 수 있다. 피드백 제어 시스템5)을 이용하는 가정 하에 EN1264에서 제시한 실험 구성에는 제어 구성 요소에 조절부(제어 알고리즘), 조작부(3방 밸브), 제어 대상(Cooling plate, 패널), 수조, 검출

5) 출력이 피드백 되어 기준입력인 제어의 목적과 비교되고, 이 둘의 차에 비례하는 동작신호가 편차를 줄이도록 시스템을 통하여 보내어 더 정확한 제어를 수행하는 시스템.

4) Ogata Katsuhiko. Modern Control Engineering 4th edit. Prentice Hall. 2002. pp. 6-7.

부가 있고, 매개변수에는 제어 목표 표면 온도, 현재 표면 온도, 수조 출수 온도, 수조 출수 유량, 공급 온도, 공급 유량, 밸브 개도가 있다. 이를 토대로 작성한 제어 블록다이어그램을 살펴보면 Fig. 7과 같다.

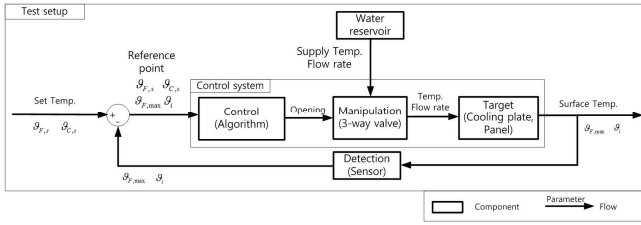


Fig. 7. Control block diagram

각 매개변수들과 제어 구성 요소는 제어인자인 입력변수, 제어변수, 조절변수로 분리된다. 입력변수는 제어 알고리즘에서 출력값을 내기 위해 필요한 측정값 혹은 입력값으로 1 개 이상의 값이 제어연산을 위해 사용되며, 제어변수는 제어 목적을 달성하기 위한 설정 값이 되는 변수이다. 그리고 조절 변수는 제어변수를 설정 값으로 유지하기 위해 실제 조절하는 대상의 변수이다.6)

이 실험의 구성 요소 및 매개변수 중 고정시킬 것과 제어 시 사용하기 위해 변화시킬 부분들, 즉, 제어변수에 대한 결정이 이루어 질 필요가 있다. 이를 확인하기 위해서 먼저 입력 변수, 제어 변수, 조절변수에 각 매개변수를 대입시키고, 여기에 해당하는 구성 요소를 대입한 후, 제어변수에 해당하는 매개변수와 구성요소를 결정하는 것이 필요하다.

매개변수 중 입력변수에는, 목표 표면 온도, 수조 출수 온도, 수조 출수 유량, 공급 온도, 공급 유량, 현재 표면 온도가 있다. 이중 ‘목표 표면 온도’와 ‘현재 표면 온도’의 편차를 도출하므로 이 둘을 제어변수로 설정한다. 조절변수에는 밸브 개도 및 공급 온도가 있다.

각 매개변수 당 해당하는 구성 요소는 다음과 같다. 먼저 입력 변수에 해당하는 매개변수는 입력하는 값이거나 측정하는 값이므로, 제어에 관련이 없는 수조 및 측정을 위한 검출 부가 해당하며, 이들은 제어와 직접 관련이 없으므로 고정할 수 있다. 제어 변수에 해당하는 매개변수인 현재 표면 온도는 피드백을 받아 동작 신호를 내보내야 하므로 조절부, 즉, 제어 알고리즘이 그 구성요소에 해당하고, 제어 대상에서 그 제어 변수가 변화하므로, 제어 대상, 즉 Cooling plate와 패널이 그 구성요소가 된다. 이는 실험 조건을 만들기 위해 변화를 줄 수 있는 구성요소로 판단된다. 마지막으로 조절변수인 밸브 개도 및 공급 온도는 조작부에 입력되고 출력되는 값으로서, 앞서 2장에서 3방 밸브를 활용한 공급 온도 제어로 결정하였다.

각 제어 인자를 그에 해당하는 매개변수 및 구성요소에 따라 분류하면 Table 4로 나타낼 수 있다.

Table 4. Classification of control factors

Control factor	Parameter variable		Relative component
Input variable	Fixed	Target surface Temp. Water reservoir outlet Temp. Water reservoir flow rate Supply flow rate	Water reservoir Detection(Sensor)
	Variable	Supply Temp. Surface Temp.	
Control variable	Target Surface Temp. Surface Temp.		Control(Algorithm) Target(Cooling plate, Panel)
Manipulated variable	Valve opening Supply Temp.		Manipulation(3-way valve)

### 3.3. 제어 목표 설정

제어의 개념적인 목표는 EN1264에서 지정한 실험 조건 상태를 만드는 것이다. 구체적인 목표는 2.1.2. 절에서 다루었듯이, 건물 내부에서의 위치 별 허용 방열량에 따라 결정되는 목표 표면 온도를 정확하게 맞추고, 동시에 안정성을 고려하여 결정되는 입출수온도차를 허용 범위 내로 맞추는 것이다. 이 때 건물 내부에서의 위치는 재실공간, 욕실 및 유사공간, 외주부로 나뉜다.

본 연구에서는 건물 내부의 위치 중 재실 공간(Occupied area)에서의 실험 조건을 만드는 것으로 한정한다. 가장 일반적인 공간인 재실 공간을 대상으로 실험하여 목표를 달성한다면, 다른 위치에 대한 실험도 제어 목표 값만 바꾸어 진행할 수 있을 것이라 판단된다. 제어 대상은 상부 Cooling plate와 패널이며, 각각의 표면 온도 및 입출수온도차를 포함하는 제어 목표는 Table 5와 같다.

Table 5. Control set point ( $R_{A,B} = 0$ )

Cooling plate above		Floor heating system	
$\vartheta_i$ (°C)	$\vartheta_{C,out} - \vartheta_{C,in}$ (°C)	$\vartheta_{F,max}$ (°C)	$\vartheta_V - \vartheta_R$ (°C)
$20 \pm 0.5$	$< 0.3$	29	$< 0.5$

하부 Cooling plate는 기존 Weitzmann의 기존 연구7)에서도 제어가 용이한 것으로 나타났다. 이는 패널과 단열재로 분리되어 있어 10%정도의 열만이 유입되어 그 열적 거동이 독립적이라 판단할 수 있어, 오차 요인의 제거가 용이하기 때문인 것으로 보인다. 이에 따라 상부 Cooling plate와 패널에 존재하는 오차 요인들을 해결하면 하부 Cooling plate 자체, 혹은 패널과의 관계에서 생기는 오차 요인도 해결할 수 있을

6) 여명석, op.cit.

7) Weitzmann Peter, Svendsen Svend, op.cit.

것으로 보아 본 연구에서 이에 대한 분석은 제외하였다.

### 3.4. 오차 요인 분석

오차 요인을 포함한 구성요소들은 크게 제어 시스템 내부와 외부에 있는 것으로 나눌 수 있다. 제어 시스템 내부에 위치하면 제어 알고리즘의 직접적인 영향을 받을 수 있으므로 그 오차 요인들의 제거가 용이하고, 외부에 위치하면 직접적인 영향을 받지 않아 오차 요인들의 제거가 어렵다.

오차 요인 제거가 용이하다고 판단되는 제어 시스템 내부에 위치한 요소에는 조절부, 조작부, 제어대상이 있다. 먼저 조절부는 일반적으로 알고리즘 자체를 의미하기도 하지만, 이 알고리즘을 실행시키는 기계적인 요소에 오류가 있을 시에 오차가 발생할 수도 있다. 그리고 조작부에서는 주로 밸브가 사용되는데, 유량에 따른 시스템 내의 압력 손실비(Authority)에 의해 그 특성이 달라질 수 있어 그에 따른 오차가 발생할 수 있다. 제어 대상에서는 제어 대상 자체의 특성이나 제어 대상간의 열교환 양상에 따라 오차가 발생할 수 있다. 이런 오차 요인들의 대부분은 제어 시스템 내부에 위치해 있으므로 대부분 PID 알고리즘을 이용한 피드백 제어 시스템에 의해 상쇄가 가능하다. 하지만 위의 오차 요인 중에는 피드백 제어 시스템으로도 상쇄가 되지 않는 오차 요인들이 존재한다. 이들은 제어 시스템 외부에 위치한 오차 요인과 마찬가지로 그 제어가 어렵다.

오차 요인 제거가 어렵다고 판단되는 제어 시스템 외에 위치한 요소에는 수조와 검출부가 있다. 먼저 수조는 용량 부족 등의 내부적 문제 및 외기온, 일사 등의 오차 요인이 있을 수 있다. 그리고 검출부, 즉, 센서에는 자체적으로 오차범위가 존재하며, 센서의 재질이 금속인 경우가 많아 표면과 마찰 저항이 생길 수 있으며, 부가적으로 공기 저항 등의 오차 요인도 존재할 수 있다.

본 연구에서는, 제어 시스템 외부의 오차 요인들과 제어 시스템 내부의 제거가 어려운 오차 요인들을 ‘특성 오차 요인’으로 정의한다. 제어 시스템 외부의 오차 요인들은 차치하더라도, 제어 시스템 내부에 존재하는 특성 오차 요인은 EN1264의 실험법이 챔버를 이용한 실험법과 달리 특성화된 실험체, 즉, 제어 대상을 사용함에 따라 발생한다. EN1264의 실험법을 사용하기 위해서는 이 특성 오차 요인을 파악하고 제거할 수 있는 제어를 적용해야 한다. 각 특성 오차 요인의 발생점을 제어 시스템의 위치에 따라 나누어 자세히 살펴보면 다음과 같다.

#### (1) 제어 시스템 내부

제어 시스템 내부에서는 제어 대상의 특성에 의해 제어 대상간의 관계나 제어 대상 자체의 특성이 특성 오차 요인을 발생시킬 수 있다. 이 중 제어 대상간의 관계로 인해 발생할

수 있는 오차 요인은 Cooling plate와 패널간의 열교환 양상이 있으며, 대상 자체의 특성에 의한 오차 요인으로는 Cooling plate 내 냉방수의 긴 체류시간이 있다.

#### (1-1) Cooling plate와 패널간의 열교환 양상

상부 Cooling plate와 패널 사이에는 열전달층만이 존재하므로, 하부 Cooling plate로의 열전달에 비해 많은 열전달이 일어난다. 실제로도 EN1264에서는 패널에서 하부 Cooling plate의 열전달을 10%로 한정한다. 즉, 측면 손실 등의 열손실량을 차치한다면 90%의 열전달이 패널에서 상부 Cooling plate로 이루어진다는 것이며, 이에 따라 둘의 열교환 양상도 상호 의존적으로 즉각적일 수 있다. 예를 들면 Cooling plate의 온도 변화 양상이 패널의 온도 변화 양상에 영향을 미칠 수 있다는 것이고, 반대로, 패널의 온도 변화 양상 또한 Cooling plate의 온도 변화 양상에 또한 영향을 미칠 수 있다는 것이다.

이 때, 제어가 개입되면 이 오차 요인은 더 증폭될 수 있다. 두 제어 대상이 열적 완충층으로 작용하는 공기가 없이 가운데 열전달층만을 두고 위치해 있으므로, 한 제어 대상의 제어 양상이 다른 제어 대상의 제어 양상에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 예를 들면, Cooling plate는 자신의 온도를 계속 20°C로 맞추려 끊임없이 자신의 표면 온도를 피드백 하여 제어 하지만, 별개로 제어되고 있는 패널 표면 온도의 영향을 받아 계속 변화할 가능성이 있다는 것을 들 수 있다. 제어는 제어 대상 각각 온도를 맞추기 위해 이루어진다면, 제어에 따라 Cooling plate와 패널의 온도 변화 양상 차이가 클 경우, 서로의 영향을 받아 발산해 버릴 가능성이 있다. 이 때, 제어 목표 중 패널 표면 온도를 달성하는데 어려움이 있을 수 있다. 이런 상호 의존적인 열교환에 의한 표면 온도 간섭은 열적 완충층으로서 공기가 있는 챔버식의 열교환 양상과 다르므로 하나의 특성 오차 요인이 될 수 있으며, 제어를 통해 이를 제거할 필요가 있다.

#### (1-2) Cooling plate 내 냉방수의 긴 체류시간

Cooling plate의 표면의 온도를 균일하게 만들기 위해서는 내부를 가득 채울 만큼의 충분한 양의 냉방수가 필요하다. 이는 전체적으로 균일한 방열량을 내기 위함이며, 입출수 온도차가 작으면 내부 냉방수 온도의 기울기도 작으므로 표면 온도도 균일하게 유지될 수 있다. EN1264에서는 최소 1,000 mm x 1,000 mm의 평면을 가진 Cooling plate가 필요하며, 내부에 냉방수가 가득 찬 상태로 유지되어야 한다. 기준에는 그 두께가 정해지지는 않지만, 만약 0.02 m의 두께만 가진다고 하더라도 0.02 m<sup>3</sup>의 냉방수가 Cooling plate의 내부에 머물게 된다. 이는 0.8 kg/s의 유량이 흐른다고 가정하면 25초 후이나 입수된 냉방수가 출수된다는 것을 뜻한다.



Cooling plate를 제어하지 않고 냉방수를 일정하게 보내면 서 계산을 통해 도출한 공급수 온도로 표면온도를 맞춘다는 가정을 하면 Cooling plate 내의 냉방수 양은 문제되지 않는다. 하지만 여러 가지 오차 요인들과 외란에 의해 Cooling plate의 표면 온도가 제어 목표에 부합하지 않는 상황이 올 수 있으므로, 적절한 제어를 개입시키는 것이 해결 방법이 될 수 있다. 하지만 이 때, 조작부로 작용하는 밸브의 개도가 변하면 입수 온도에 변화가 생기게 되고, 냉방수의 부피가 크고 입출수 간의 거리가 멀기 때문에 냉방수의 체류 시간이 길기 때문에 순간적으로 입출수온도차가 크게 날 가능성이 있다.

실제로는 입수된 물 자체가 출수될 때의 온도를 측정하는 것이 옳겠지만, 정상상태가 되었다고 가정하였을 때는 입수 온도와 출수온도가 유지되므로 같은 시간에서의 차이를 도출하면 된다는 가정 하에 EN1264의 입출수온도차 조건이 주어진다. 하지만 제어가 개입된다면 정상상태를 이루더라도 이를 유지하기 위해 밸브의 개도 변화가 지속적으로 달라진다. 이 때 개도 변화가 급격하면 입출수온도차는 순간적으로 더 심해진다. 현재 EN1264의 기준에서는 정상상태를 가정한다는 것이 문제가 된다. 그러므로 본 실험을 위해서는 정상상태를 만드는 것이 중요하고, 제어가 일어나 지속적인 정상상태가 불가능한 경우에도 입출수온도차가 제어 목표를 벗어나지 않는 범위 내로 유지할 수 있도록 제어할 필요가 있다.

(2) 제어 시스템 외부

제어시스템 외부에 있는 요소들, 즉, 수조나 검출부 부분에서의 오류가 특성 오차 요인이 될 수 있다. 이 둘은 펌프 시스템의 영향을 받지 않기 때문에 오차가 있어도 직접 제어는 불가능하다. 여기서 검출부는 자체적으로 오차 범위가 있으며, 설치 등의 문제로 오차가 발생할 수 있지만, 측정 자체에서의 문제도 있고 더 정밀한 것으로 하드웨어를 바꾸는 것을 가정하여 본 연구에서는 고려하지 않는다.

(3) 수조의 부정확한 자체 제어 및 용량 부족

수조 자체에서 부정확한 제어가 이루어지는 경우에 입수 온도가 흔들릴 수 있다. 수조 내부온도가 일정하게 유지 되지 못한 채 제어에 의해 계속 변동할 경우, 그 출수온도도 계속 변한다. 이렇게 출수된 물이 밸브를 거쳐 공급된다면 제어의 양상도 복잡해져 결국 발산할 가능성이 있다.

또한 요구 용량에 비해 현재의 용량이 부족할 때 입수 온도가 흔들릴 수 있다. 제어가 정밀하게 잘 이루어지더라도 용량 부족에 따라 출수될 때마다 제어되면 지속적으로 수조 내부 온도가 변화한다. 이 경우에 패널 입수 온도가 갑자기 증가하거나 감소할 경우에는 입출수온도차 또한 갑자기 변동할 수 있다.

물론 수조도 더 정밀한 제어를 하고 용량이 충분한 것으로 하드웨어적 교체가 가능하지만, 교체가 검출부인 센서에 비해 제약조건이 많이 따른다. 그러므로 하드웨어적인 교체를 하지 않고도 이 오차 요인을 제거할 수 있는 방안을 고려할 필요가 있다.

지금까지 도출된 세 종류의 특성 오차 요인을 각각의 발생 위치와 그 요인들이 미치는 영향, 또한 이들의 영향을 받는 제어 목표를 살펴보면 Table 6와 같다.

Table 6. Characteristic error factors

Characteristic error factors	Heat transfer between Panel and Cooling plate	Long residence time of chilled water in cooling plate	Inaccurate self-control of the water reservoir and lack of capacity
Location	Inside of control system		Outside of control system
Effect	Surface temperature interference	Increase the Supply/return temperature difference when instantaneous intake temperature change occurs	Unstable water inlet temperature
Affected Control Objectives	Target surface Temp.	Supply/return temperature difference	

4. 결론

본 논문에서는 기존 비용과 공간적인 소모가 큰 챔버식 실험을 대체할 수 있는 실험법으로 EN1264에서 제안한 실험법과 이와 관련된 자동제어이론을 고찰하였다. 또한 위의 고찰을 바탕으로 하여 제어 방식의 기본 방향을 설정하였으며, EN1264 실험 구성을 이용한 실험 시 발생할 수 있는 오차 요인들을 분석하였다. 본 논문의 내용은 아래와 같이 요약할 수 있다.

- (1) 복사난방의 일반적인 실험법으로 사용되는 챔버법의 비용, 공간상 불리함의 대안으로서 EN1264의 실험법을 제시하고, 기준에 기술된 구체적인 실험체, 실험 조건, 측정, 분석 및 평가 방법에 대해 살펴보았다. 또한 EN1264의 실험법을 적용할 때 적합한 제어법을 도출하기 위해 기본적인 자동제어이론과 현장에서 사용되는 복사 난방시스템의 제어방법을 고찰하였다.
- (2) EN1264에서 제안한 실험법을 토대로 한 실험 구성을 제어 블록다이어그램을 통해 구성하고, 실험 구성 내의 매개변수와 구성 요소들을 제어 인자에 따라 분류하였다. 이후 제어 변수를 구분하고 이에 해당하는 매

개변수로 제어 참조점을 정의하였고, 구성 요소로 제어 알고리즘, 제어 대상을 정의하였다.

- (3) 실험 시 제어 목표 달성을 어렵게 만드는 오차 요인들을 분석하고, 제어 시스템의 외부에 위치한 구성 요소들에 존재 가능한 오차 요인과 제어 시스템 내부에 위치하지만 챔버법과 다른 실험체의 특징에 의해 제어가 어려운 오차 요인들을 특성 오차 요인으로 정의하였다. 이들 특성 오차 요인으로 목표 표면 온도에 영향을 미치는 Cooling plate와 패널간의 열교환 양상, 입출수 온도차에 영향을 미치는 Cooling plate 내 냉방수의 긴 체류시간 및 수조의 부정확한 자체 제어 및 용량 부족을 도출하였다.

### 참고문헌

1. Robert B, Olesen B.W and Kim K.W. (2010), "History of radiant heating and cooling systems, Part 1", ASHRAE Journal, 52:40~47.
2. Robert B, Olesen B.W and Kim K.W. (2010), "History of radiant heating and cooling systems, Part 2". ASHRAE Journal, 52:50~55.
3. 이도현, 전명훈, 최진만(2002), "공동주택의 건식온돌시스템의 요구성능에 관한 고찰", 「대한건축학회 학술발표대회논문집」, 451~454.
4. 신미수(2008), 「방열량과 바닥표면온도를 고려한 바닥난방 패널 설계에 관한 연구」, 석사학위논문, 서울대학교.
5. ASHRAE. 『ASHRAE System and Equipment Handbook Ch.6 Panel Heating and Cooling』 . 2012.
6. Comité Europeen de Normalisation (CEN) (2011), Water based surface embedded heating and cooling systems—Part 2: floor heating: prove methods for the determination of the thermal output using calculation and test methods. CEN: Brussels.
7. Nordic (2001), Floor heating systems: Design and type testing of waterborne heat systems for lightweight structures. NT VVS127, Nordtest.
8. Allard F, Brau J, Inard C, Pallier J.M (1978), "Thermal experiments of full-scale dwelling cells in artificial climatic conditions", Energy and Buildings, 10:49~58.
9. Nagano K, Mochida T (2004), "Experiments on thermal environmental design of ceiling radiant cooling for supine human subjects", Building and Environment, 39:267~275.
10. 김오봉(2002), 「공동주택의 바닥복사 난방시스템의 적정 제어방식에 관한 실험적 연구」, 석사학위논문, 서울대학교.
11. 이진영(1999), 「공동주택 온돌난방 공간에서의 예측제어에 관한 연구」, 석사학위논문, 서울대학교.
12. 임재한(2001), 「공동 주택의 온돌을 이용한 바닥복사난방의 결로 방지 제어에 관한 연구」, 석사학위논문, 서울대학교.
13. 최정민(2007), 「온수온돌 바닥복사 난방시스템의 외기보상제어 방안에 관한 연구」, 석사학위논문, 서울대학교.
14. Cho S.H, Zaheer-uddin M. (2003), "Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems", Energy Conversion and Management, 44:1333~1342.
15. 여명석(1998), 「공동주택 온돌난방 시스템의 가열면 분할제어에 관한 연구」, 박사학위논문, 서울대학교.
16. 여명석, 김광우(1999), "공동주택 온수온돌 바닥복사 난방 시스템의 제어방법에 관한 연구", 「대한건축학회 논문집」, 15:119~126.
17. Lim J.H., Jo J.H., Kim Y.Y., Yeo M.So, Kim K.W.(2006), "Application of the control methods for radiant floor cooling system in residential buildings", Building and Environment, 41:60~73.
18. Ryu S.R., Lim J.H., Yeo M.S., Kim K.W.(2004), "A Study on the Control Methods for Radiant Floor Heating and Cooling System in Residential Building", ASHRAE Transactions, 110, Part 2:106 ~116.
19. Weitzmann P. and Svendsen S.(2005), "Method for calculating thermal properties of lightweight floor heating panels based on an experimental setup", International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, 3:1~15.
20. Ogata K.(2002), 『Modern Control Engineering』 , 4th edit. Prentice Hall