

조명기구를 통한 내부획득열 추정을 위한 고단열실 및 조명기구의 열적 모델링

(Thermal Modeling of Quasi-Adiabatic Room and Lighting Fixture for Estimation of Internal Heat Gain by Luminaires)

박혜리* · 최은혁 · 이광식**

(Herie Park · Eun-Hyeok Choi · Kwang-Sik Lee)

Abstract

In order to reduce energy consumption and greenhouse gas emission in building domain, thermal insulation of building is being enhanced. In a well insulated and tightened environment, internal heat gain caused by solar radiation, luminaires, electronic appliances and metabolism can be more important to thermal condition of building. This paper presents mathematical/physical models of quasi-adiabatic room and lighting fixtures using heat balance equation and thermal-electric analogy to quantify and modelize the heat gain due to luminaires. Experimental results are used to identify thermal parameters of theoretical models. And simulation results of models using Matlab/Simulink are conducted to verify the models and to investigate the thermal effect of lighting fixtures into quasi-adiabatic room.

Key Words : Internal Heat Gain by luminaires, Heat Balance Equation, Thermal-Electric Analogy

1. 서 론

1.1 연구의 배경

자원고갈과 기후변화를 야기하는 에너지 소비에 대한 범세계적 관심은 국내외 의정서 체결, 규정 및 법규 제정, 관련기술 개발을 유도하고 있다. 에너지원으로

부터 공급되는 최종 에너지의 소비는 산업부문, 수송 부문, 가정/상업부문, 공공/기타부문에서 이루어지고 있는데, 각 부문을 아우르는 건축물에서의 에너지 소비 절감 및 온실가스 배출 감축을 위한 노력이 절대적으로 필요한 실정이다[1-2]. 이러한 노력의 일환으로써 우리나라는 친환경건축물 인증제도, 온실가스·에너지 목표제, 건축물 에너지 소비 총량제 등을 시행하고 있으며, 2020년 국가 온실가스 배출 전망치의 30[%]를 감축시키는 것을 목표로 하여 건축물 부문에 26.9[%]의 감축목표를 할당하였다[3-4].

건축물의 에너지 소비 및 온실가스 배출 절감을 위해서 건축물 외피의 단열 및 기밀성 강화, 축열 이용, 자연 환기, 태양광/복사에너지를 이용한 자연 채

* 주저자 : 영남대학교 및 Univ. of Cergy-Pontoise
전기공학과 박사과정

** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
Tel : 053-810-3953, Fax : 053-810-4767

E-mail : kslee@yu.ac.kr

접수일자 : 2011년 12월 27일

1차심사 : 2012년 1월 5일

심사완료 : 2012년 3월 19일

광 및 난방, 미기후 특징에 따른 신재생에너지 설비, 고효율 냉난방기기·전기설비·전자제품 사용, 건물 에너지관리 프로그램의 사용 등을 권장할 수 있으며, 이 가운데 특히 단열 조치는 국토해양부 고시 제2010-1031호 건축물의 에너지 절약 설계 기준 해설서에 건축부문 설계 시 의무사항으로 명시되어 있다[5].

건축물의 단열 및 기밀성을 강화함으로써, 건축물 외피를 통한 열손실을 줄이는 효과를 얻을 수 있는데, 이를 통해 냉난방 설비 사용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 건축물 내부에서 자연적으로 얻을 수 있는 태양복사열, 조명 및 전자제품의 발열, 인체열과 같은 내부 획득열(internal heat gain)을 무시할 수 없는 난방 에너지원으로 사용할 수 있게 된다[6-10]. 단열 및 기밀성 강화를 위한 소재 및 설계 기술에 관한 연구는 건축학 분야에서 활발하게 이루어지고 있으나, 내부획득열의 구체적 산정 및 이용을 위해서는 조명 및 전자제품의 발열량에 관한 전기공학적인 접근 및 연구가 필요한 시기라고 사료된다.

1.2 연구의 목적 및 방법

본 논문은 고단열 건축물 내부에서 획득할 수 있는 태양복사열, 조명기구 및 전자제품의 발열, 인체열 가운데, 조명의 발열이 건축물 내부 온도 변화에 미치는 열적인 영향을 연구하는 것을 목적으로 한다.

이를 위해서 먼저 열평형식과 열-전기 아날로지(thermal-electric analogy)를 이용하여 단일실(single-zone)로 된 고단열 건축물을 수학적/물리적으로 모델링하고, 단일실의 열적 파라미터를 추정하는 방법을 제안한다. 다음으로 조명기구를 수학적/물리적으로 모델링하고, 조명기구의 재료를 근거로 열적 파라미터를 구한다. 설계된 두 시스템을 커플링한 모델을 제시하고, 모델의 검증에 위해 실험 및 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션을 시행하여 결과를 비교한다. 본 연구의 결과는 다양한 종류의 조명기구 및 전자제품의 발열이 고단열 건축물 내에 미치는 열적인 영향을 규명하는데 있어 기초자료로 활용될 것을 기대한다.

2. 건축물의 모델링

2.1 수학적 모델링

그림 1과 같이 단일실(single-zone)로 이뤄진 고단열 건축물(이하 고단열실) 내에 전력 $P(t)[W]$ 를 소비하는 조명기구/전자제품이 있을 때, 실내의 에너지는 식 (1)의 에너지 보존 법칙에 의해 보존되며[11], 식 (2)~(3)으로부터 열평형식(식 (4))을 유도할 수 있다.

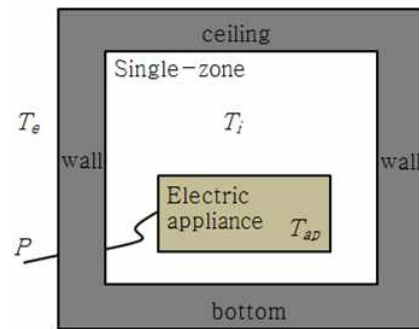


그림 1. 전력원을 가진 단일실의 개념도
Fig. 1. Concept of single-zone with electric power source

$$\Delta U_{zone} = \delta Q_{zone} - \delta W_{zone} \quad (1)$$

$$\frac{dU_{zone}(t)}{dt} = C_{th} \frac{dT_i(t)}{dt} = P(t) - \Phi_{st}(t) \quad (2)$$

$$\Phi_{st}(t) = \frac{1}{R_{th}}(T_i(t) - T_e(t)) \quad (3)$$

$$C_{th} \frac{dT_i(t)}{dt} = P(t) - \frac{1}{R_{th}}(T_i(t) - T_e(t)) \quad (4)$$

여기서 ΔU_{zone} 은 고단열실 내의 에너지 증감분[J], δQ_{zone} 은 실내의 열량 증감분[J], δW_{zone} 은 실내가 한 일의 증감분[J]이고, C_{th} 는 실 전체의 등가 열용량[J/K], $T_i(t)$ 는 실내온도[K], $P(t)$ 는 조명기구에 공급되어 열류로 변환되는 전력[W], $\Phi_{st}(t)$ 는 건축물 구조체를 드나드는 열류[W], R_{th} 는 실 전체의 등가 열저항[K/W], $T_e(t)$ 는 실외온도[K]이다. 식 (4)로부터 실내온도 $T_i(t)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_i(t) = (T_e(t) + R_{th}P(t)) - (T_e(t) - T_i(0) + R_{th}P(t))e^{-t/\tau} \quad (5)$$

여기서 τ 는 실의 시정수(time constant)[sec]로서, R_{th} 와 C_{th} 의 곱으로 표현된다. 식 (5)의 $T_i(t)$ 는 조명기구의 ON/OFF 제어를 통해 실내로 공급되는 $P(t)$ 의 상태에 따라 아래와 같이 다시 표현될 수 있다.

$$T_{i,P(t)=0}(t) = T_i(0)e^{-t/\tau} + (T_e(t) + R_{th}P(t))(1 - e^{-t/\tau}) \quad (6)$$

$$T_{i,P(t)=0}(t) = T_e(t) + (T_{i0} - T_e(t))e^{-t/\tau} \quad (7)$$

여기서 $T_{i,P(t)=0}(t)$ 와 $T_{i,P(t)=0}(t)$ 는 각각 조명기구가 ON/OFF인 상태의 $T_i(t)$ 를 말하며, T_{i0} 는 전력이 차단되는 순간을 $t=t'$ 이라고 했을 때의 $T_i(t')$ 를 말한다.

2.2 물리적 모델링

이상의 수학적 모델과 열-전기 아날로지(thermal-electric analogy)를 이용하면 전력소비원을 가진 고단 열실의 물리적 모델을 구성할 수 있다[10,12-14].

표 1. 열-전기 아날로지
Table 1. Thermal-electric analogy

	Thermal		Electrical	
	parameter	unit	parameter	unit
ANALOGY	Temperature T	[K]	Voltage V	[V]
	Heat flow ϕ	[W], [J/s]	Current I	[A], [C/s]
EQUIVALENT	Conductivity k	[W/ K · mm]	Conductivity σ	[A/ V · mm]
	Stored heat Q	[J]	Stored charge q	[C]
	Thermal resistance R_{th}	[K/W]	Electrical resistance R_{elec}	[Ω], [V/A]
	Thermal capacitance C_{th}	[J/K]	Electrical capacitance C_{elec}	[F], [C/V]

열-전기 아날로지는 열시스템과 전기시스템의 유사 특성을 이용하여 각 요소를 등가적으로 나타내는 방법이다. 표 1은 이 두 시스템의 소스 및 요소의 파라미터와 그 단위를 대칭적으로 보여준다. 열시스템의 온도 및 열류는 각각 전기시스템의 전압원, 전류원과 대응되고, 열시스템의 열전도도, 축열량, 열저항, 열용량은 전기시스템의 전기전도도, 축적전하, 전기저항, 전기용량으로 각각 표현된다.

이를 이용하여 고단열실 모델을 간단한 1차 집중정수 회로로 나타내기 위한 가정은 다음과 같다.

- 1) 초기의 실내외온도는 동일하다 ($T_i(0) = T_e(0)$).
- 2) 실내온도는 실내 공기온도의 공간적 평균치로서, 실내 구성품 및 공기의 온도, 실의 구조체의 온도를 따로 구분하지 않고, 모두 실내 공기온도와 같다고 본다(well-mixed model).
- 3) 실의 열저항 및 열용량은 실 전체의 글로벌 파라미터(global parameters)로서, 실의 구성요소 및 구조체 재료에 따른 파라미터로 따로 구분하지 않는다.
- 4) 전력소비원(조명기구/전자제품)으로부터 공급되는 열류 이외에 태양복사, 인체, 환기에 의해 발생하는 추가적인 내부획득열 및 창문, 문, 환기시스템, 열교 등을 통한 열손실은 고려하지 않는다.

열-전기 아날로지와 위의 가정을 토대로 식 (4)를 전기회로에 대칭시키면, 하나의 전류원 $P(t)$ 와 하나의 전압원 $T_e(t)$, 집중정수 소자 R_{th} , C_{th} 로 구성된 물리적 모델을 얻을 수 있다.

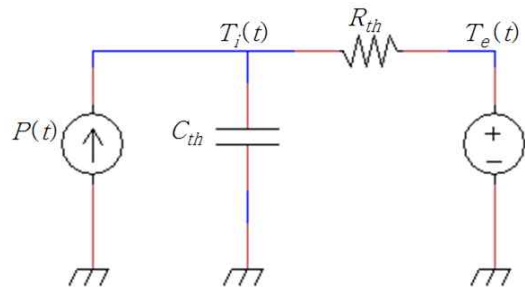


그림 2. 전력소비원을 가진 단일실의 열-전기 등가회로
Fig. 2. Thermal-electric equivalent circuit of single-zone

그림 2는 전력소비원을 가진 고단열실을 상기의 과정을 따라 구성한 열-전기 등가회로이다. 실내의 전력소비원에 의해 소비되는 $P(t)$ 는 Joule효과에 의해 열류로 변환되어 즉시 실내로 공급된다는 가정(전력소비원의 열적 특성 무시) 하에 그 중 일부는 먼저 실 전체의 열용량 C_{th} 의 물리적 값에 의해 실내에 열을 축적하는 것에 사용되고, 나머지는 실내외의 온도차 ($T_i(t) - T_e(t)$)에 의해 실 구조체 열저항 R_{th} 의 물리적 값에 따라 구조체를 드나들게 된다. 이때 전기회로에서 적용되는 키르히호프의 전류법칙은 열회로에서도 적용된다. 즉 전력소비원으로부터 Joule열로 변환되어 실내에 공급되는 열류는 실내에 열을 축적하기위해 흐르는 열류와 실내외 온도차에 의해 구조체를 드나드는 열류의 총합과 동일하다.

2.3 모델의 파라미터 산정

시스템을 모델링하는 방법으로는 세 가지가 있다[15]. 자연법칙과 이상적 시스템 요소를 가지고 수치적으로 시스템의 행동을 묘사할 수 있도록 하는 White-box 모델링, 고려해야 하는 변수가 많고 이상적인 물리법칙에 의해 묘사하기에는 복잡하여, 실험과 추정과정에 의존하여서 파라미터를 정의해야하는 Black-box 모델링, 그리고 물리법칙에 따라 모델링할 수는 있으나, 파라미터의 값이 불분명하여 다른 방법을 통해서 그 값을 추정해야하는 Gray-box 모델링이 있다. Gray-box 모델링은 White-box 모델링과 Black-box 모델링을 조합시킨 모델링 방법이다.

2.1~2.2절에서 제시한 실의 모델은 Gray-box 모델로서, 물리 법칙을 따르며 실험에 의해 직접 측정 가능한 파라미터 $T_i(t)$, $T_e(t)$, $P(t)$ 를 가지고 있으나, 측정을 통해서나 재료의 특성에 의해 쉽게 그 값을 구할 수 없는 글로벌 파라미터인 R_{th} 와 C_{th} 를 가지고 있다.

R_{th} 와 C_{th} 의 값은 열평형식으로부터 계산할 수 있다. 고단열실의 전력소비원에 공급되는 전력은 Joule효과와 조명기구의 복사에 의해 즉시 열류로 변환된다는

가정 하에, 전력(열류)이 공급된 경우와 차단된 경우의 $T_i(t)$ 는 식 (6)~(7)과 같다. 조명기구/가전제품을 통해 소비되는 전력이 열류로 변환되어 계속해서 실내로 공급된다면, 일정시간이 흐른 후 $T_i(t)$ 는 정상상태(steady-state)에 이르게 된다. 식 (6)을 정상상태에서 전개하면 아래와 같이 R_{th} 의 값을 계산할 수 있다.

$$T_i(t) = T_e(t) + R_{th}P(t) \tag{8}$$

$$R_{th} = \frac{T_i(t) - T_e(t)}{P(t)} \tag{9}$$

그런데 $T_i(t)$ 와 $T_e(t)$, $P(t)$ 는 시간에 따라 변하기 때문에 정상상태에서의 이들 각각의 평균치를 취하여, R_{th} 를 다시 구하면 식 (10)과 같다.

$$R_{th} \approx \overline{R_{th}} = \frac{\overline{T_i} - \overline{T_e}}{\overline{P}} \tag{10}$$

여기서 바(bar)는 각 파라미터의 평균치를 말한다. 실제로 R_{th} 는 식 (11)~(12)와 같이 단일실의 실내 대류 열저항 R_{ic} [K/W], 구조체 열저항 R_w [K/W], 실외 대류 열저항 R_{ec} [K/W]를 포함한다. 하지만, 본 논문에서는 모델의 간편성을 위하여 2.2절의 가정에서 기술한 바, 각각의 파라미터를 구별하지 않고, R_{th} 라는 실 전체의 등가 열저항, 즉 글로벌 파라미터만을 고려한다.

$$R_{th} = R_{ic} + R_w + R_{ec} \tag{11}$$

$$R_{ic} = \frac{1}{h_{ic}A}, R_w = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i A}, R_{ec} = \frac{1}{h_{ec}A} \tag{12}$$

여기서 A는 실의 총면적[m²], h_{ic} , h_{ec} 는 실 내·외부의 대류열전달 계수[W/m²·K]이고, λ_i , e_i , n 은 실 구조체의 재료가 동일한 면적의 복합층(multi-layer)으로 이루어져 있을 경우, 각각 i 번째 재료층의 열전도도 [W/m·K], i 번째 재료층의 두께[m] 및 재료층의 총 개수이다.

다음으로 C_{th} 는 고단열실의 열적 특성인 시정수 τ 로부터 구할 수 있다. R_{th} 와 C_{th} 의 곱으로 표현되는 τ 는

전력소비원을 통해 공급되는 전력(열류)이 차단되는 시점에서부터 시작되는 $T_i(t)$ 의 지수함수적 감쇠곡선으로부터 추정한다. 식 (7)을 τ 에 대하여 전개하면,

$$\tau = \frac{t}{\ln\left(\frac{T_{io} - T_e(t)}{T_i(t) - T_e(t)}\right)} \quad (13)$$

이다. 여기서 계산범위는 전력이 차단되는 시점부터 $T_i(t) > T_e(t)$ 인 시점까지로 제한한다. 이 식을 따르면, $T_e(t)$ 는 시간에 따라 변동할 뿐만 아니라 데이터 취득 과정에서 노이즈를 포함하게 되므로, 계산되는 τ 또한 시간에 따라 변동함을 알 수 있다.

이러한 물리적 오차를 보상하고, 적합한 τ 를 구하기 위해 최소자승법(Least squares method)을 이용할 수 있다. 즉 전력(열류) 차단 이후의 $T_i(t)$ 를 0~1 사이의 값으로 정규화(normalization)한 $y_{normalized}(t)$ 와 임의의 τ 에 따라 생성된 지수함수적 감쇠함수인 $y_{generated}(t)$ 를 비교하여, 이 둘의 오차의 제곱의 합인 S 가 최소가 되는 τ 를 찾는다. S 는 아래식과 같이 표현된다.

$$S = \sum_{j=1}^m (y_{normalized,j} - y_{generated,j})^2 \quad (14)$$

여기서 j 는 데이터의 순번(1~ m)으로서, 전력(열류) 차단 직후로부터 $T_i(t) > T_e(t)$ 인 시점까지의 데이터를 대상으로 한다. m 은 해당 데이터의 개수이다. 이상의 방법에 의해 구한 τ 와 R_{th} 를 이용하여 C_{th} 를 얻을 수 있다. 참고로 이 C_{th} 는 R_{th} 와 마찬가지로 실의 글로벌 파라미터로서, 실제로 실내 공기, 실내 구성품 및 실 구조체의 각 재료의 열용량을 모두 포함하는 등가 열용량이다.

본 장에서는 고단열실 내의 전력소비원(조명기구/전자제품)으로 공급되는 전력이 열류로 변환되어 실내로 즉시 공급된다고 가정 한 후, 고단열실을 수학적/물리적으로 모델링하고 그 파라미터를 구하는 방법에 관하여 서술하였다. 다음 장에서는 실내의 전력소비원을 조명기구로 한정하고, 조명기구의 열적 특성을

수학적/물리적으로 모델링하고자 한다.

3. 조명기구의 모델링

3.1 수학적 모델링

그림 1의 전력소비원이 전력 $P(t)$ 를 소비하는 조명기구(lighting fixture, 편의상 lamp라고 표기함[16])라고 한다면, 상술한 고단열실의 경우와 같이 조명기구의 내부 에너지는 보존된다(식 (15) 참고). 이를 시간에 대하여 미분하면 식 (16)과 같다.

$$\Delta U_{lamp} = \delta Q_{lamp} - \delta W_{lamp} \quad (15)$$

$$\frac{dU_{lamp}(t)}{dt} = C_{lamp} \frac{dT_{lamp}(t)}{dt} = P(t) + \Phi_{lamp}(t) \quad (16)$$

여기서 ΔU_{lamp} 는 조명기구 내의 에너지 증감분[J], δQ_{lamp} 는 기구 내의 열량 증감분[J], δW_{lamp} 는 기구가 한 일의 증감분[J]이고, C_{lamp} 는 조명기구의 등가 열용량[J/K], $T_{lamp}(t)$ 는 조명기구의 온도[K], $\Phi_{lamp}(t)$ 는 조명기구와 실내의 온도차에 의해 흐르는 열류[W]이다. 일반적으로 열류는 전도, 대류, 복사라는 세 가지 열전달 메커니즘에 따라 흐르게 되는데[11], 조명기구의 경우, 대부분의 열에너지가 복사에 의해서 실내로 전달된다. 따라서 본 논문에서는 전도와 대류에 의한 열전달은 무시하고, 복사에 의한 열류인 $\Phi_{lamp,rad}(t)$ 만을 고려한다. $\Phi_{lamp}(t)$ 를 다시 표현하면 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_{lamp}(t) &= \Phi_{lamp,rad}(t) \\ &= \varepsilon_{lamp} \sigma S_{lamp} (T_{lamp}^4(t) - T_i^4(t)) \\ &= \frac{1}{R_{lamp,rad}} (T_{lamp}(t) - T_i(t)) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 ε_{lamp} 은 조명기구의 방사율이고, σ 는 Stephan-Boltzmann 상수(=5.6704×10⁻⁸[W/m²·K⁴]), S_{lamp} [m²]는 조명기구의 넓이다. 그리고 $R_{lamp,rad}$ 는 조명기구의 복사 열저항 파라미터이며, 편의상 R_{lamp} 라

고 부르기로 한다. 그 값은,

$$R_{lamp} = R_{lamp,rad} \quad (18)$$

$$= \frac{1}{\varepsilon_{lamp} \sigma S_{lamp} (T_{lamp}^2(t) + T_i^2(t)) (T_{lamp}(t) + T_i(t))}$$

와 같이 정의된다. 이상의 식 (16)~(18)을 정리하면, 아래와 같이 조명기구의 수학적 모델을 얻을 수 있다.

$$C_{lamp} \frac{dT_{lamp}(t)}{dt} = P(t) - \frac{1}{R_{lamp}} (T_{lamp}(t) - T_i(t)) \quad (19)$$

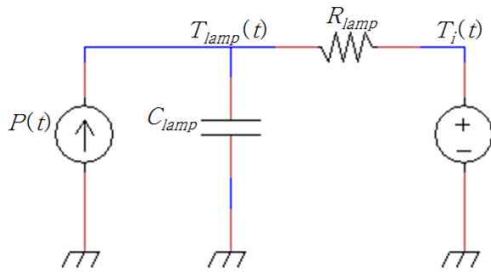


그림 3. 조명기구의 열-전기 등가회로
Fig. 3. Thermal-electric equivalent circuit of lighting fixture

3.2 물리적 모델링

3.1절에서 유도한 수학적 모델과 2.2절에서 소개한 열-전기 아날로지(thermal-electric analogy)를 이용하면 조명기구를 물리적인 모델로써 표현 가능하다.

그림 3은 조명기구의 열-전기 등가회로로서, 고단열실의 경우처럼 하나의 전류원 $P(t)$, 하나의 전압원 $T_i(t)$ 와 집중정수 소자 R_{lamp} , C_{lamp} 로 구성되어 있다. 조명기구를 통해 소비되는 $P(t)$ 는 Joule효과에 의해 즉시 열류로 변환되어 일부는 조명기구의 열용량 C_{lamp} 의 물리적 허용범위 내에서 열로 축적되고, 나머지는 기구와 실내의 온도차이 ($T_{sp}(t) - T_i(t)$)에 따라 복사 열전달을 통해 기구와 실내 공간 사이를 드나든다.

3.3 모델의 파라미터 산정

앞서 2.3절에서는 ‘실의 열저항 및 열용량은 실 전체

의 글로벌 파라미터로서, 실의 구성요소 및 구조체 재료에 따른 파라미터로 따로 구분하지 않는다.’라는 가정 하에, 고단열실 모델의 열-전기 등가파라미터 R_{th} , C_{th} 를 열평형방정식을 이용하여 추정하는 방법을 소개하였다. 조명기구의 경우에는 고단열실 모델과 달리 지정된 조명 기구를 구성하는 재료 물성 및 구조, 실내 공간의 방사율 및 면적을 통해 계산할 수 있다.

먼저 R_{lamp} 는 식 (18)로부터 구할 수 있다. 조명기구의 전력공급 상태가 ON 또는 OFF로 변화되면 $T_{lamp}(t)$ 가 정상상태에 이르기까지의 시간 동안에 기구의 열적 특성 및 소비전력의 크기에 따라 $T_{lamp}(t)$ 는 큰 폭으로 변동될 수 있으며, 온도 데이터는 측정상의 노이즈로 인한 오차를 포함하므로 정상상태에서도 작은 변동을 지속한다. 그런데 $T_{lamp}(t)$ 와 $T_i(t)$ 는 절대온도로 표현되는 특성상, 분모에 있는 온도(세자리수 이상)의 세제곱항의 변동은 실제적으로 R_{lamp} 에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 또한 T_{lamp} 가 정상상태에 이르기까지의 시간은 조명기구의 열적 특성(시정수)에 따라 다르겠지만, 수초 또는 수분 내에 이루어지기 때문에 R_{lamp} 를 가변치로 보지 않고, T_{lamp} 가 정상상태에 있는 동안의 값을 평균한 값으로 정하여도 그 오차 범위가 크지 않음을 예상할 수 있다.

다음으로 C_{lamp} 는 조명기구를 구성하는 각 부분의 전체 등가 열용량이다. 일반적으로 전등 내부 전극 및 내부 가스, 전등과 덮개 사이의 공기의 각각의 물성에 따른 열용량은 전등 덮개의 열용량에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으므로 본 논문에서는 전등 덮개의 열용량만을 고려하기로 하여 C_{lamp} 를 아래식과 같이 계산한다.

$$C_{lamp} = \rho_{lamp} c_{lamp} V_{lamp} \quad (20)$$

여기서 ρ_{lamp} 는 전등 덮개 재료의 밀도[kg/m^3], c_{lamp} 는 덮개 재료의 비열[$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$], V_{lamp} 는 덮개 재료의 부피[m^3]이다.

4. 건축물과 조명기구의 커플링 모델

2, 3장에서는 열평형식과 열-전기 아날로지를 이용

하여 고단열실과 조명기구를 수학적/물리적으로 모델링하는 방법을 살펴보았다. 본 장에서는 이 모델들을 바탕으로 하여 고단열실과 조명기구의 각각의 열적 특성을 모두 포함하는 커플링 모델(coupling model)을 소개하고자 한다.

4.1 수학적 모델링

그림 1과 같이 고단열실 내에 조명기구가 있을 때, 조명기구에 의해 소비되는 전력은 Joule효과에 의해 즉시 열류로 변환된다. 이 열류는 식 (4), (19)의 열평형식에서 보여지는 것과 같이 먼저 조명기구의 열적 특성과 기구와 실내의 온도 차이에 따라 흐르게 되고, 조명기구를 통해 공급되어진 이 열류는 다시, 고단열실의 열적 특성과 실내외의 기온차이에 따라 흐르게 된다. 즉 이를 정리하면 아래와 같다.

$$C_{th} \frac{dT_i(t)}{dt} = C_{lamp} \frac{dT_{lamp}(t)}{dt} - \frac{1}{R_{lamp}} (T_{lamp}(t) - T_i(t)) - \frac{1}{R_{th}} (T_i(t) - T_e(t)) \quad (21)$$

식 (21)은 건축물과 조명기구의 열적 특성이 커플링된 모델의 열평형식이다. 만일, 고단열실 내에 조명기구가 q 개가 있다면, 이에 대한 열평형식은,

$$C_{th} \frac{dT_i(t)}{dt} = \sum_{k=1}^q C_{lamp,k} \frac{dT_{lamp,k}(t)}{dt} - \sum_{k=1}^q \frac{1}{R_{lamp,k}} (T_{lamp,k}(t) - T_i(t)) - \frac{1}{R_{th}} (T_i(t) - T_e(t)) \quad (22)$$

로 확장될 수 있다. 여기서 k 는 조명기구의 순번(1~ q 개)이고, $T_{lamp,k}$, $C_{lamp,k}$, $R_{lamp,k}$ 는 각각 k 번째 조명기구의 온도, 열용량, 열저항이다.

4.2 물리적 모델링

식 (21)~(22)와 열-전기 아날로지를 이용하면, 건축물과 조명기구가 커플링된 모델을 물리적으로 표현할 수 있다.

그림 4는 복수(q) 개의 조명기구, 곧 전력 $P_l(t)$,

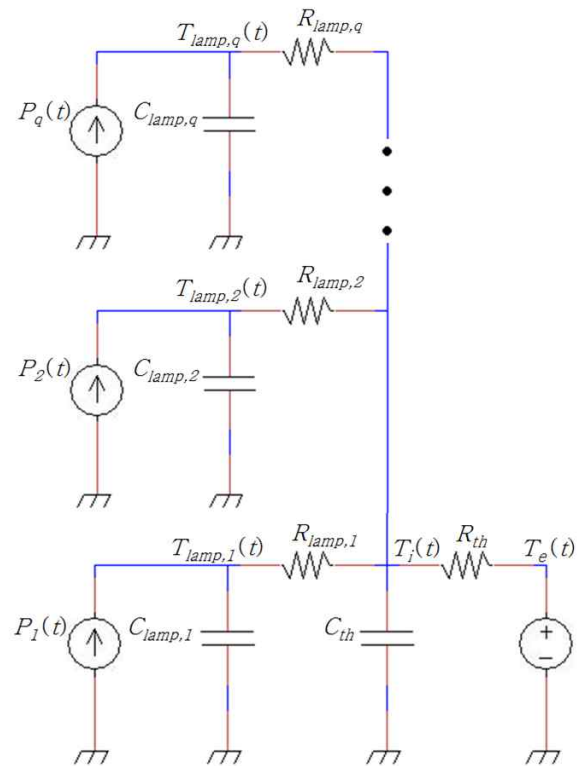


그림 4. 커플링 모델의 열-전기 등가회로
Fig. 4. Thermal-electric equivalent circuit of coupling model

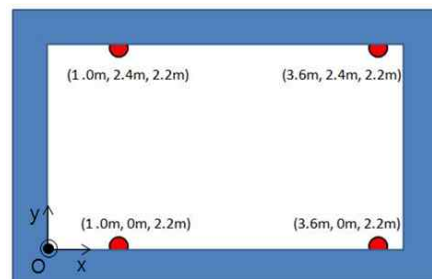


그림 5. 조명기구의 설치위치
Fig. 5. Position of lighting fixtures

조명기구를 통한 내부획득열 추정을 위한 고단열실 및 조명기구의 열적 모델링

$P_2(t), \dots, P_q(t)$ 를 소모하는 각각의 조명기구로부터 열을 공급받는 고단열실의 열-전기 등가모델이다. 각 조명기구가 소비하는 전력은 열류로 변환되어 열류원으로 표현되고, 이 때 발생된 열은, $T_{lamp,i}(t), T_{lamp,j}(t), \dots, T_{lamp,q}(t) > T_i(t) > T_e(t)$ 인 경우, 각 조명기구의 열용량 $C_{lamp,1}, C_{lamp,2}, \dots, C_{lamp,q}$ 에 따라 일부는 먼저 기구에 축적되고, 나머지는 기구의 열저항 $R_{lamp,1}, R_{lamp,2}, \dots, R_{lamp,q}$ 을 따라 실내로 유출된다. 이는 곧 실내에 유입되는 열로서, R_{th}, C_{th} 의 특성에 따라 일부는 실내에 축적되고, 나머지는 실외로 유출된다.

5. 실험 및 고찰

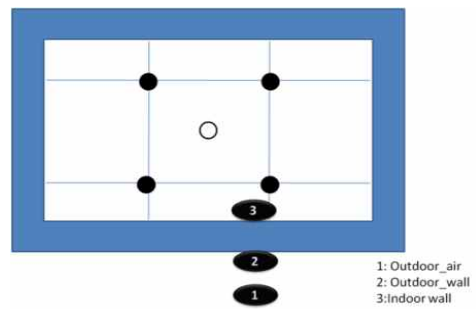
본 장에서는 고단열 건축물 내에서 조명기구가 실내에 미치는 열적인 영향에 대한 검증 연구를 위한 실험 장치 및 방법을 소개하고, 이를 통해 얻게 된 실험결과를 제안한 모델의 시뮬레이션 결과와 비교한다.

5.1 실험 장치 및 방법

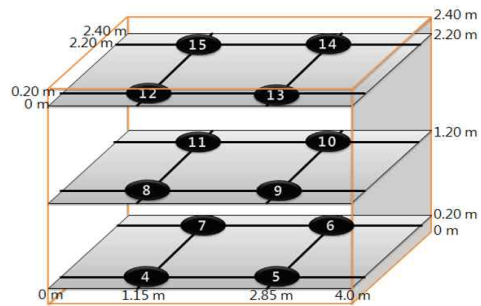
실험은 Cergy-Pontoise대학교의 실험동 내에 위치한 고단열 단일실(quasi-adiabatic single-zone)에서 이루어졌다. 실의 크기는 $4 \times 2.4 \times 4$ [m³]이고, 벽면은 12[mm] 두께의 복합 단열재로 되어있으며, 0.9×1.9 [m²] 크기의 문이 있다. 실내의 온·습도를 자동으로 조절할 수 있는 장치도 갖추어져 있으나 본 실험에서는 사용하지 않았다.

실내에는 4개의 조명기구가 그림 5와 같이 실의 측면 상부에 설치되어 있어 실험에 사용되었다. 조명기구는 각각 하나의 백열전등과 하나의 전등 덮개로 이루어져 있으며, 4개의 전등 중 2개는 60[W]의 전력을, 나머지 2개는 75[W]의 전력을 소비한다. 즉 ON 상태에서 4개의 조명기구가 소비하는 총 전력은 270[W]이다. 백열등의 덮개는 내·외경이 각각 85×10^{-3} [m], 90×10^{-3} [m], 높이가 60×10^{-3} [m], 두께가 5×10^{-3} [m]인 원통형의 유리로 되어있다. 스위치를 이용하여 조명의 ON/OFF 상태를 제어할 수 있으며, 조명기구로 공급된 전기에너지는 Joule열로 변환되어 실내의 열 환경(thermal condition)에 영향을 미치게 된다.

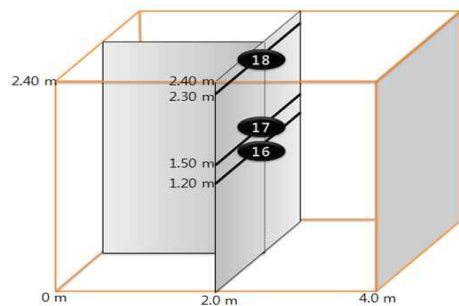
조명기구의 ON/OFF 시 실내·외의 온도데이터를 수집하고 저장하기 위해서 18개의 K-type 전열대(thermocouple)와 Agilent사의 데이터 수집장치 및 컴퓨터를 실내외에 별도로 설치하였다. 그림 6은 실험에 사용한 전열대의 배치를 나타낸다. 먼저 그림 6 (a)와 같이 2개의 전열대(no.1~2)를 실외에 설치하였는데 이는 실외의 공기온도($T_o(t)$)와 실외 벽면온도를 측정하기 위함이다. 그리고 1개의 전열대(no.3)를 실내 벽면의 온도를 측정하기 위해 실내 벽면에 설치하였다.



(a) no.1~3



(b) no.4~15



(c) no.16~18

그림 6. 전열대 설치위치
Fig. 6. Position of thermocouples

다음으로 그림 6 (b)와 같이 12개의 전열대(no.4~15)를 실내의 0.20, 1.20, 2.20[m] 높이에 각 4개씩 정렬하여 배치시켰다. 이는 실내의 온도를 측정하기 위함이며, 이들을 통하여 얻어진 데이터를 평균한 값을 실내온도 $T_i(t)$ 로 사용하였다. 또한, 그림 6 (c)와 같이 3개의 전열대(no.16~18)를 추가로 실의 중앙 1.20, 1.5, 2.30[m] 높이에 배치시켰는데, 이는 $T_i(t)$ 의 보조데이터를 얻고자 함이다.

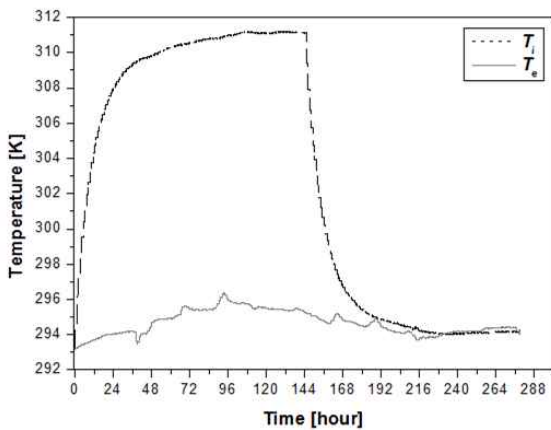


그림 7. 조명기구 ON/OFF 시의 실내·외 온도변화
Fig. 7. Trends of internal and external temperatures

실험은 278시간(약 11일)동안 실시하였는데, 처음 144시간 동안은 4개의 조명기구를 ON시킨 상태로, 나머지 약 134시간 동안은 조명기구를 OFF시킨 상태에서 1분 간격으로 실내·외 온도를 측정하여 수집하였다.

5.2 실험 결과

그림 7은 측정된 $T_i(t)$ 와 $T_e(t)$ 의 결과이다. 조명기구가 270[W]의 전력 $P(t)$ 를 소모하는 처음 144시간 동안은 고단열실 내로 유입되는 열류의 영향으로 $T_i(t)$ 가 상승함을 알 수 있다. 이 과정에서 $T_i(t)$ 는 스텝입력 $P(t)$ 에 대한 응답으로서, 과도상태(transient-state)를 지나 정상상태(steady-state)에 이르게 되는데, 이때 2.3절에서 언급한 바와 같이, 고단열실의 열저항 파라미터 R_{th} 를 계산할 수 있다.

조명기구가 OFF되는 144시간 이후부터는 실내에

공급되는 열류가 차단되므로 $T_i(t)$ 가 지수함수적으로 하락하게 된다. 이러한 $T_i(t)$ 의 하강곡선으로부터 고단열실의 열용량 파라미터 C_{th} 를 추정할 수 있는데, 이때, C_{th} 추정을 위해 사용하는 $T_i(t)$ 와 $T_e(t)$ 는 2.3절에서 기술한 바와 같이 $P(t)$ 의 공급이 차단되는 시간부터 $T_i(t) > T_e(t)$ 인 시간까지의 데이터로 제한한다.

부가적으로, $T_i(t)$ 가 상승/하강함에 따라 $T_e(t)$ 도 상승/하강하는 경향을 보이는데, 이는 실내외의 온도차이에 의해 열류가 실 구조체를 통해 실외로 유출되어 $T_e(t)$ 에 영향을 미치기 때문이다. 또한 $T_e(t)$ 데이터 상에는 $T_i(t)$ 와 상관없이 나타나는 국부적인 온도의 상승과 하락도 몇 차례 존재하는데, 이는 실외가 밀폐된 공간이 아니므로, 사람의 통행, 기기사용, 외부기후 변동 등과 같은 열적인 외란이 $T_e(t)$ 에 직접적인 영향을 미치기 때문이다.

그래프를 통해 추정된 고단열실의 열적 파라미터 R_{th} , C_{th} 와 실 구조체 벽면의 넓이 및 방사율, 조명기구의 물성 등으로부터 구한 조명기구의 열적 파라미터 R_{lamp} , C_{lamp} 는 각각 $R_{th}=57.8 \times 10^{-3} [K/W]$, $C_{th}=654 \times 10^3 [J/K]$, $R_{lamp}=2.9 \times 10^{-3} [K/W]$, $C_{lamp}=170 [J/K]$ 이다.

5.3 시뮬레이션 결과

실험을 통하여 얻어진 모델의 파라미터 값을 2~4장에서 제안한 모델에 적용시킨 후, Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 위한 블록 다이어그램의 구성은 그림 8과 같다.

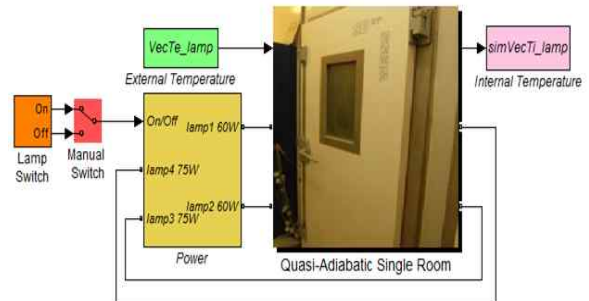


그림 8. 시뮬레이션을 위한 블록 다이어그램
Fig. 8. Simulation block diagram

실외온도 및 조명기구를 통해 실내로 공급되는 전력은 시뮬레이션 시 필요한 입력 데이터인데, 이는 실험과 동일한 시간 하의 동일한 수치로 주어졌다. 즉 실외온도는 실험으로부터 수집한 데이터를 사용하였고, 전력은 실험에서와 같은 ON/OFF 시간을 준수하여 ON 상태에서 총 270[W]의 전력을 조명기구를 통해 실내로 공급해 주었다.

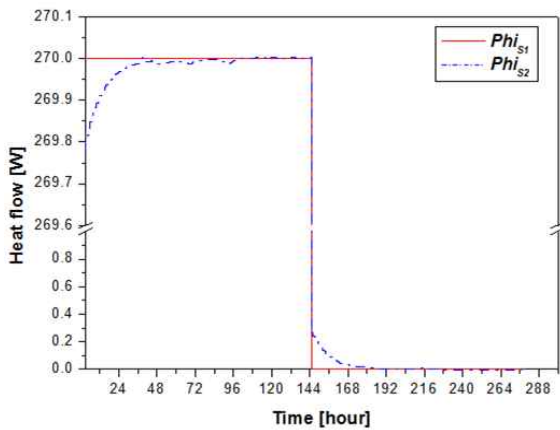


그림 9. 조명기구에 의해 실내로 유입되는 열류
Fig. 9. Trends of heat flow into the room by lighting fixtures

이상의 조건을 토대로 시뮬레이션은 두 종류로 시행하였다. 시뮬레이션 1은 고단열 건축물의 열적 파라미터 및 모델의 적합성을 판별하기 위해서 조명기구의 열적 파라미터를 고려하지 않고, 조명기구를 통해 공급된 전력이 고단열실 내에 즉시 열류로 변환되어 공급된다는 가정 하에 진행하였다. 그리고 시뮬레이션 2는 조명기구의 열적 특성에 의해 실내로 공급되는 내부획득열이 실내에 미치는 영향을 알아보기 위해서 고단열실 내의 조명기구의 열적 파라미터를 고려하여 진행하였다.

그림 9는 조명기구를 통해 고단열실 내로 유입되는 열류(Φ , ϕ)를 보여준다. $\Phi_{S1}(t)$ 는 시뮬레이션 1의 가정에 따라, 조명기구가 소비하는 전력 그대로가 실내로 유입되는 경우로서, $\Phi_{S1}(t)=P(t)$ 이다. 두 번째로 $\Phi_{S2}(t)$ 는 조명기구의 열적 특성에 따라 실내로 유입되는 열류이며, $P(t)$ 로부터 열의 일부가 조명기구에 축적된 후에 남은 열이 조명기구와 실내의 온도차에

의해 실내로 유입됨을 알 수 있다. 그리고 조명기구를 OFF시키면 시뮬레이션 1의 경우에는 실내로 공급되는 열류 또한 바로 차단이 되지만, 시뮬레이션 2의 경우에는 기구에 축적되어있던 열이 실내로 점차적으로 유입되어짐을 확인할 수 있다.

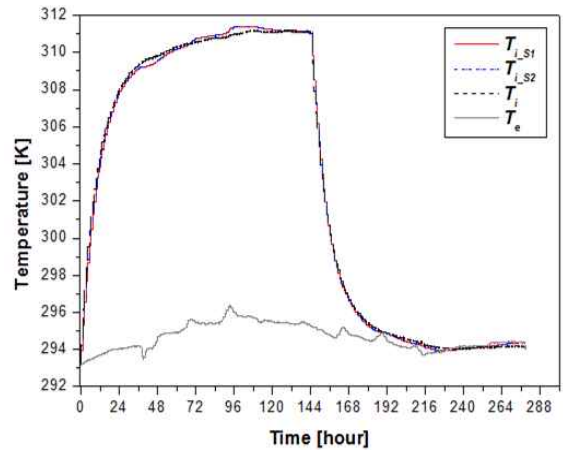


그림 10. 실험 및 시뮬레이션 통한 실내온도 결과 비교
Fig. 10. Internal temperature comparison between measurement and simulation

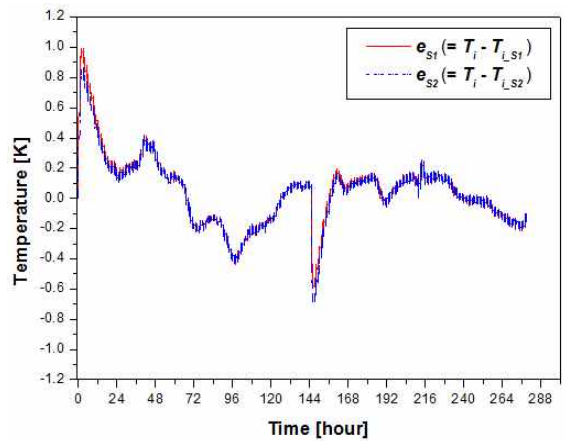


그림 11. 실험 및 시뮬레이션 상의 실내온도 오차
Fig. 11. Errors of simulated internal temperatures

그림 10은 시뮬레이션 1, 2를 통해 얻게 된 결과인 실내온도 $T_{LS1}(t)$ 와 실내온도 $T_{LS2}(t)$ 를 실험결과 $T_i(t)$, $T_e(t)$ 와 비교한 그래프이고, 그림 11은 $T_{LS1}(t)$, $T_{LS2}(t)$ 의 $T_i(t)$ 에 대한 오차 $e_{LS1}(t) (=T_i(t)-T_{LS1}(t))$, $e_{LS2}(t) (=T_i(t)-T_{LS2}(t))$ 를 나타낸 그래프이다. 이상의

두 그래프로부터, $T_{LSI}(t)$ 는 $\pm 1[\text{K}]$ 범위 내에서, $T_{LS2}(t)$ 는 $\pm 0.8[\text{K}]$ 범위 내에서 $T_i(t)$ 와 거의 일치하는 경향을 보임을 알 수 있다. $T_{LSI}(t)$ 에 대한 $T_{LS2}(t)$, $T_{LS2}(t)$ 의 비율은 모두 평균 99[%]에 달한다. 이로써 시뮬레이션 결과에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터 R_{th} , C_{th} 를 실제 고단열실에 근사하게 추정하였음을 알 수 있다. 그래프에서 동일하게 나타나는 오차는, 먼저 $T_e(t)$ 의 변동에 의한 것인데, 두 모델의 경우 실제 고단열실보다 $T_e(t)$ 의 변동에 대하여 더 민감하게 반응함을 확인할 수 있다. 이는 고단열실 모델링 시 복합 재료로 구성된 단열 구조체 및 실내 구성품, 실내의 공기를 하나의 R_{th} 와 하나의 C_{th} 로 간단하게 표현하는 것에서 기인한 것으로 보여진다. 이러한 오차는 모델을 복합 열저항 및 복합 열용량으로 나타낼 경우, 필터링(filtering)효과에 의해서 $T_e(t)$ 에 포함된 외란으로 인한 영향을 저감시킬 수 있을 것으로 예상된다. 두 번째로 조명기구를 ON/OFF시킨 후의 과도상태에서 나타나는 공통적인 오차를 확인할 수 있다. 이는 모델을 간소화시킴으로써, 모사할 수 없는 시스템의 복잡한 동적 특성이 있기 때문으로 보여진다. 가까운 예로서 고단열실만을 모델링하여 시뮬레이션한 결과의 오차 $e_{LSI}(t)$ 는 조명기구의 열적 특성까지 고려하여 커플링한 모델의 오차 $e_{LS2}(t)$ 보다 최대 15.5[%] 가량 크다. 즉 커플링모델에서는 상술한 바와 같이 조명기구의 열적 특성을 고려해줌으로써 실제 고단열실에 공급되는 열류를 더욱 근사하게 추정할 수 있기 때문에 과도상태에서의 오차가 감소한 것이다. 따라서 고단열실 및 조명기구를 더욱 세부적으로 모델링한다면 실제 동적 특성에 더 가까운 결과를 얻을 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 논문은 고단열 건축물 내부에서 획득할 수 있는 태양복사열, 조명기구 및 전자제품의 발열, 인체열 가운데, 조명의 발열이 건축물 내부의 온도 변화에 미치는 열적인 영향을 연구하는 것을 목적으로 한다.

이를 위해서 먼저 열평형식과 열-전기 아날로지를 이용하여 단일실로 된 고단열 건축물과 조명기구를 각각 수학적/물리적으로 모델링하였다. 다음으로 이

두 모델의 열적 파라미터를 추정하는 방법을 제시하였으며, 실험과 조명기구의 물성을 근거로 각각의 열저항 및 열용량을 구하였다. 그 후 조명기구를 통하여 실내로 유입되는 열류 및 그로 인한 온도 변화를 추정하기 위하여, 앞서 설계된 두 모델을 커플링한 모델을 제안하였다. 마지막으로, 산정한 파라미터를 모델에 적용시킨 후 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 시행하였다. 그 결과를 정리하면 아래와 같다.

- 1) 열류 : 전력원으로부터 발생한 열이 조명기구를 통해 고단열실 내로 유입될 경우, 열의 일부가 먼저 조명기구에 축적되고, 남은 열이 조명기구와 실내의 온도차에 의해 실내로 유입된다. 전력을 차단한 후에도 조명기구로부터 열류가 실내로 유입되는데, 이는 앞서 조명기구에 축적되어있던 열이 방출되는 것이다. 조명기구에 축적되는 열의 양은 조명기구의 열적 특성과 직접적인 연관이 있으며, 본 연구에서는 조명기구의 열용량이 고단열실의 열용량에 비해 무시할 정도로 작기 때문에 조명기구의 열적 특성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 간의 열류 차가 $\pm 0.4 [\text{W}]$ 로 미비하다. 그러나 이를 에너지로 환산한다면, 그 영향은 좀 더 크다고 볼 수 있겠다.
- 2) 실내온도 : 조명기구의 영향을 고려하지 않은 경우와 이를 고려한 경우, 실험 결과에 대한 시뮬레이션 결과의 오차는 각각 $\pm 1[\text{K}]$, $\pm 0.8[\text{K}]$ 의 범위 안에 있으며, 두 경우 모두 실제 온도와 평균 99[%]의 일치도를 보인다. 이로써 모델의 파라미터를 실제에 근사하게 추정하였음을 알 수 있다. 두 경우에서 동일하게 나타난 오차의 원인은 고단열실의 모델을 1R1C회로로써 간단하게 모델링한 것에 기인한 것으로 보인다. 이로 인해 모델이 실외온도의 변화에 민감하게 반응할 뿐만 아니라, 복잡한 시스템의 동적 특성을 간과하게 되는 것이다. 조명기구의 모델을 포함한 경우, 그렇지 않은 모델보다 오차가 최대 15.5[%] 가량 적다. 이는 조명기구의 열적 특성을 고려함으로써 실제 고단열실에 공급되는 열류를 더욱 근사하게 추정할 수 있기 때문에 온도에 있어서도 오차가 감소하는 것으로 보인다.

이로써 제안한 모델과 파라미터의 적합성을 판별하였고, 조명기구의 열적 특성이 고단열실의 실내 온도에 미치는 영향을 알아보았다.

향후 조명기구뿐만 아니라 다양한 전자제품에 의한 건축물 내부획득열의 세부적인 모델링, 실내온도 및 실내쾌적감에 가시적인 영향을 주는 조명기구/전자제품의 열적 파라미터의 문턱 수치에 관한 연구가 부가적으로 필요할 것이다. 나아가 이러한 모델의 정확성을 높여서 건축물 에너지 시뮬레이션에 적용시킨다면, 건축물의 냉난방 수요를 예측하고 컨트롤 하는 것에 유용한 자료가 될 것이다. 또한 조명기구의 열적 특성과 광량에 대한 분석이 동시에 이뤄진다면, 경제성을 고려한 건축물의 에너지 효율화에 기여할 수 있으리라 사료된다.

References

[1] "Yearbook of energy statistics", Korea Energy Economics Institute, pp.20-21, 220-221, 2010.
 [2] Lee, Seung-Eon, "Technology and policy goals for zero energy buildings", Korea Institute of Construction Technology, vol.54(2), pp.52-58, 2010.
 [3] V. Badescu, B. Sicre, "Renewable energy for passive house heating: Part I. Building description, Energy and Buildings, vol.35(11), pp.1077-1084, 2003.
 [4] S. ABarakat, D. M. Sander, "The utilization of internal heat gains", ASHRAE Transactions, vol.92(1A), pp.103-114, 1986.
 [5] H. Park, M. Ruellan, A. Bouvet, E. Monmasson, R. Bennacer, "Thermal parameter identification of simplified building model with electric appliance", in Proc. IEEE EPCU, pp.1-6, 2011.
 [6] A. Bejan, "Heat Transfer", Ch.1, Johan Wiley & Sons, Inc, 1993.
 [7] G. Hudson, C. P. Underwood, "A simple building modeling procedure for Matlab/Simulink", Proceedings of Building Simulation, International IBPSA conference, pp.777-783, 1999.

[8] C. Ghiaus, I. Hazyuk, "Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings", Energy and Buildings, vol.42, pp.1248-1258, 2010.
 [9] J. H. Kämpf, D. Robinson, "A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows", Energy and Buildings, vol.39, pp.445-453, 2007.
 [10] P. P. J. van den Bosch, A. C. van der Klauw, "Modeling, Identification and Simulation of Dynamical Systems", Ch. 2, CRC Press, 1994.
 [11] A. Chel, G. N. Tiwari, "Thermal performance and embodied energy analysis of a passive house - Case study of vault roof mud-house in India", Applied Energy, vol.86(10), pp.1956-1969, 2009.

◆ 저자소개 ◆



박혜리 (朴惠利)

1984년 8월 14일생. 2006년 Univ. of Cergy-Pontoise 전기공학과 졸업. 2007년 영남대 전기공학과 졸업. 2009년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 및 Univ. of Cergy-Pontoise 전기공학과 박사과정.



최은혁 (崔殷赫)

1977년 2월 19일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 2005년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 영남대학교 전기공학과 겸임교수.



이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전고전압연구회 간사장 역임. 한국조명전기설비학회 편수위원장·부회장·회장 역임. 현재 영남대학교 전기공학과 교수.