

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 25, No. 3, 2005

표면 열전달율의 복사·대류성분 분리와 비정상 열부하 계산에 관한 연구

김영탁*, 최창호**

*Yamauchi Planning Inc.(山内設計室) 주임연구원 공학박사(kimyongtag@hotmail.com)

**광운대학교 건축공학과 조교수 공학박사(choi1967@kw.ac.kr)

A Study on the Radiation and Convection Component Separated from Surface Combined Heat Transfer Coefficient on Dynamic Heat Load Simulation

Kim, Young-Tag*, Choi, Chang-Ho**

*Yamauchi Planning Inc.(kimyongtag@hotmail.com)

**Dept. of Architecture, Kangwon University(choi1967@kw.ac.kr)

Abstract

The purpose of this paper was to analyze the influence of radiation and convection component separated from surface heat combined transfer coefficient on dynamic Heat load simulation. In general, it was not considered the mutual radiation of walls that heat load simulation calculated by surface combined heat transfer coefficient. In order to solve this problem, we had developed new simulation program to calculate radiation heat transfer and convection heat transfer respectively, and verified the influence of radiation component with this new program, in indoor heat transfer process.

Keywords : 표면 열전달율(Surface Combined Heat Transfer Coefficient), 복사 열전달율(Radiation Heat Transfer Coefficient), 대류 열전달율(Convection Heat Transfer Coefficient), 열회로망(Thermal Network), 열부하 계산(Heat Load Simulation)

1. 서론

1.1 연구의 목적

열·환기 회로망에 의한 다수실(Multi-Room)

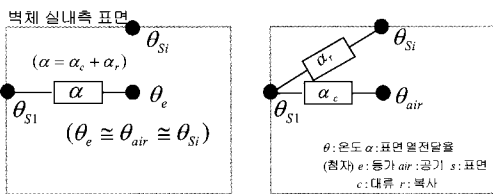
비정상 열부하 계산에 있어서 벽체(벽, 바닥, 천정) 표면에서의 열전달은 열회로망(thermal network) 형성이 용이한 표면 열전달율(=대류 열전달율+복사 열전달율)을 이용하는데 지금도 널리 사용되

는 계산 방법중의 하나이다.

그러나 이 방법은 주위 벽체로부터 전달되는 복사전열을 상세히 계산하기에는 한계를 가지고 있다. 왜냐하면 표면 열전달율을 이용하여 계산된 실온은 공기 온도 그 자체가 아니라 등가온도(그림 1)이고, 주위 표면온도의 영향까지 포함된 작용온도(Operative Temperature)에 가깝기 때문이다. 특히 실내 공기온도와 주위 벽체와의 온도차가 크거나, 벽체 상호간의 온도차(예를 들면 바닥난방시의 바닥과 벽사이의 온도차)가 클 경우에는 복사의 영향을 제대로 평가하기가 곤란하다.

따라서 바닥난방과 같은 복사 영향을 무시할 수 없는 열부하 및 실온(공기온도)을 계산할 경우 표면 열전달율은 대류성분과 복사성분으로 분리해서 계산해야 한다.

이번에 개발하여 소개하는 열부하·실온예측 프로그램(이하, SimHeat: Simulation Program for Heat Load 라고 함)은 실내의 표면 열전달율을 대류 열전달율과 복사 열전달율로 분리해서 계산하는 다수설 비정상 열부하 계산 프로그램이며, 본 논문에서는 표면 열전달율을 이용한 경우와 대류성분과 복사성분으로 분리한 경우를 계산하여 표면 열전달율의 대류·복사 분리가 열부하 및 실온 등에 미치는 영향에 관해서 비교 검토하고자 한다.



<표면 열전달율의 대류·복사 결합> <표면 열전달율의 대류·복사분리>

그림 1. 벽체 표면에서의 전열경로

2. 열부하 및 실온예측 프로그램 SimHeat의 개발

2.1 개요

SimHeat는 건물을 열·환기 회로망으로 모델

화하여, 각 절점(node)의 온도, 습도, 현열부하, 잠열부하, 열류, 환기량 등을 해석하기 위해 개발된 프로그램(그림 2)이다. 열·환기 회로망에 의한 건물의 열부하 해석에는 이미 많은 프로그램들(TRNSYS, SMASH, NETS 등)이 개발되어 있지만, 이들 프로그램과 비교할 때 SimHeat는 다음과 같은 특징이 있다.

(1) 풍압·온도차에 의한 환기(통풍)회로망과의 連成

건물 외부의 풍압계수와 창호의 유량계수·설치위치·개폐율 등을 고려한 환기 회로망을 구축하여 풍압·온도차에 의한 자연 환기량을 계산할 수 있다.

(2) 열전달율의 복사·대류성분 분리

공간뿐만 아니라, 벽체내부의 임의 위치에 온도 설정이 가능하므로 온돌과 같은 복사 난방을 계산할 수 있다. 이를 위해 실내측 표면 열전달율을 대류 열전달율과 복사 열전달율로 분리하고 있다. 이 때 복사흡수계수는 공간을 둘러싼 각 벽체¹⁾의 표면적과 공간 전표면적과의 비로 근사하였다.

(3) 벽체의 분할

열회로망을 구축할 때, 공간을 둘러싼 벽체의 분할 수를 계산 정밀도와 계산 속도의 밸런스를 고려하여 자유롭게 설정할 수 있다.

(4) 지하실의 계산

지하공간의 해석이 가능하다(단, 1차원적 해석).

(5) 일사차폐율의 상세계산 및 축열 구조체의 계산

직달일사의 입사량을 보다 상세히 계산하도록 고려하였다. 이를 위해 창을 격자(mesh) 분할하

1) 본 논문에서 사용하는 벽체란 공간을 구성하는 면을 의미하며, 외벽, 내벽, 바닥, 천정, 지붕 등을 가리킨다.

였고, 각 격자점에서 태양 위치를 향한 방향벡터가 주위 벽체, 처마, 인동, 차양 등의 외부 구조물에 차단되는가를 판정하여 입사량을 계산하였다. 또한 동일한 알고리즘을 열용량이 큰 축열체에도 적용할 수 있다.

이들 특징 중 본 연구에서는 상기 (2)의 요소가 건물의 열부하, 실온 등에 미치는 영향을 주로 검토하고자 한다.

2.2 열·환기(통풍) 회로망 구축방법

(1) 열회로망의 구축

열회로망은 절점간의 전열 경로를 의미하며, 절점간의 온도차와 열회로망의 열저항값에 따라서 열류량이 결정된다. 특히, 온도 절점은 공간과 벽체표면에 설정할 수 있으면, 건물의 열해석시 대표적인 위치(절점간의 1차원적 전열계산)로 취급

된다(그림 3). 또한 각각의 절점에는 부위별 단면구성 데이터와 공간 데이터에 근거하여 열용량 등의 열적 특성치를 입력한다.

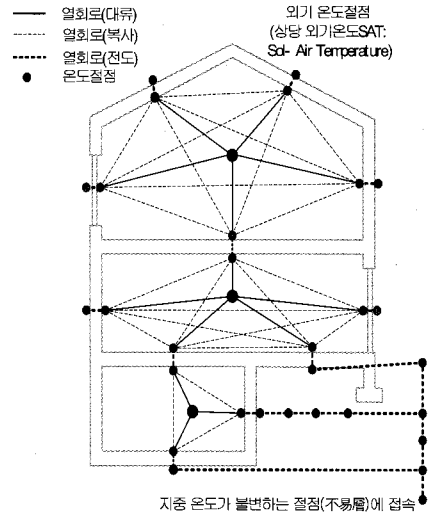


그림 3. 열회로망에 의한 건물의 모델화

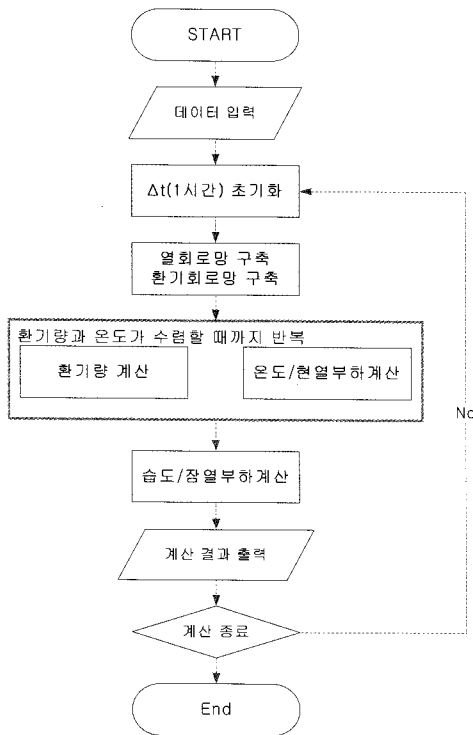


그림 2. 계산의 흐름도

(가) 벽체(벽·바닥·천정·지붕)의 열회로망 벽체는 그림 4와 같이 열회로망으로서 모델화한다. 즉, 열전도·대류 열전달회로와, 복사 열전달회로를 분리하여 구축한다. 이 때, 일반부의 벽체 분할은 절점간의 열저항값이 균등하게 분할되는 위치로 산정한다.

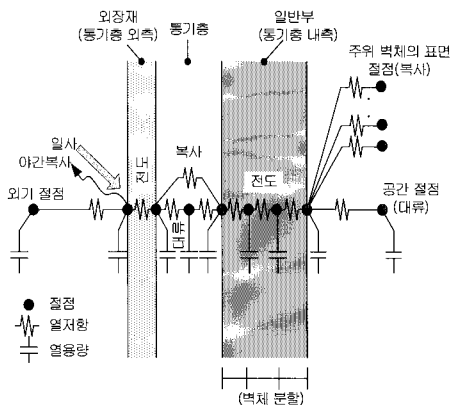


그림 4. 벽체의 열회로망(통기층이 있는 경우)

여기서 실내측 전열경로를 좀더 자세히 설명하면, 그림 5와 같은 열회로망을 구축할 수 있다.

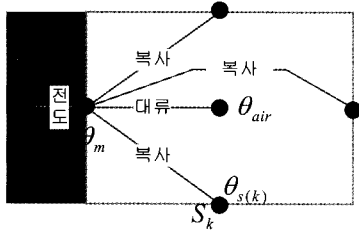


그림 5. 벽체표면에서의 열회로망

$$\frac{\rho c}{\Delta t} (\theta_m - \theta_m^*) dV = k_{m-1,m} (\theta_{m-1} - \theta_m) S \quad (1)$$

$$- \alpha_c (\theta_m - \theta_{air}) S - \sum_k \alpha_r (\theta_m - g_{mk} \theta_{s(k)}) S$$

$$g_{mk} = S_k / \sum S_k \quad (2)$$

- ρ : 밀도 [kg/m³]
- c : 비열 [J/kgK]
- Δt : 계산 시간간격 [h]
- θ : 온도 [K] (θ^* : Δt 이전의 온도)
- V : 체적 [m³]
- k : 열관류율 [W/m²K]
- S : 표면적 [m²]
- α : 표면 열전달율 [W/m²K]
- g : 복사흡수계수 [-]
- m : 계산 대상 절점
- k : m 에 접속되는 상대방 열회로망 절점
- c : 표면 열전달율의 대류성분
- r : 표면 열전달율의 복사성분

(나) 창호의 열회로망

창호의 열회로망은 양측 표면 열용량을 무시하여 구축한다. 또한 창문에서의 일사량은 창문을 통과하여 실내 공간 절점 및 벽체 표면 절점으로

입사하는 열량으로서 취급한다.

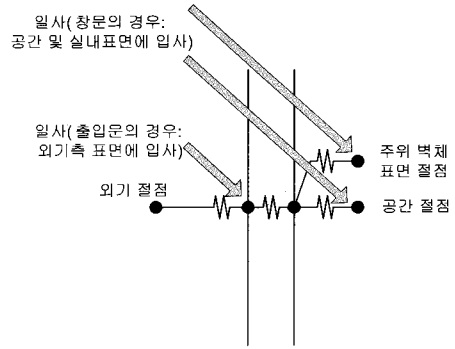


그림 6. 창호의 열회로망

(2) 환기(통풍) 회로망 구축

환기회로란 공간간의 압력차에 의해 통과하는 공기량(통풍량)을 정의한 개념이다. 공간에 유입하는 공기량과 유출하는 공기량이 동등하게 되는 점을 이용하여 각 공간(압력절점)의 압력과 공간간의 환기량을 계산한다. 따라서 환기에 관련된 절점은 환기(통풍) 회로망을 별도로 구축하여 열·환기 회로망을 연성하여 해석한다.

계산은 수식(3)의 연립방정식을 Newton-Raphson법으로 해를 구한다.

$$q_i (P_1, \dots, P_n) + \frac{\partial q_i}{\partial P_1} \delta P_1 + \dots + \frac{\partial q_i}{\partial P_n} \delta P_n = 0 \quad (3)$$

q_i : 공간의 풍량수지 [m³/h],

P_i : 공간의 압력 [Pa]

2.3 온도 및 현열부하의 계산

앞에서 구축한 열회로망을 근거하여, 최종적으로 각 온도절점에 대해서 수식(4)와 같이 연립방정식을 세우고, SOR법으로 방정식의 해를 구한다.

$$\frac{C_i}{\Delta t} (T_i - T_i^*) = \sum_j \frac{1}{R_{ij}} (T_{j(t)} - T_i) A_{ij} \quad (4)$$

$$+ \sum_m C_a Q_{k(m),i} T_{k(m)} + \sum_n C_a Q_{a,k(n)} T_n + S_i$$

- C : 절점 열용량(J/K)
- Δt : 계산 시간간격[h]
- T : 온도[K] (T^* : Δt 이전의 온도)
- R : 열저항[m²K/W]
- C_a : 공기의 열용량[J/m³K]
- Q : 환기(통풍)량[m³/h]
- S : 발열량[J/h]
- i : 열·환기회로망 계산 대상 절점
- j : i 에 접속되는 상대방 열회로망 절점
- $k(m)$: i 에 유입되는 환기·통풍의 상대방 절점 (m : 유입 상대방 절점 수)
- $k(n)$: i 에서 유출되는 환기·통풍의 상대방 절점 (n : 유출 상대방 절점 수)

2.4 습도 및 잠열부하의 계산

공간내의 습도는 환기(통풍) 및 수증기 발생량을 고려한 절대습도 평형 방정식으로부터 산출한다. 열회로·망에서 도출된 연립방정식과 같이 각 공간 절점 간에 있어서 수식 (5)와 같은 연립방정식이 성립되며, SOR법으로 방정식의 해를 구한다. 단, 벽체와 공간과의 습기 전달은 고려하지 않는다.

$$\frac{C_i}{\Delta t} (X_i - X_i^*) = \sum_m r\rho Q_{k(m),i} X_{k(m)} + \sum_m r\rho Q_{i,k(n)} X_i + J_i \quad (5)$$

- C : 절점 잠열용량[J/(g/kg(DA))]
 - Δt : 계산 시간간격[h]
 - X : 절대습도[g/kg(DA)]
 - r : 증발잠열[J/g]
 - ρ : 건조공기의 밀도[kg(DA)/m³]
 - Q : 환기(통풍)량[m³/h]
 - J : 잠열 발생량[J/h]
- (참자: 수식 4 참조)

3. 검토 방법

표면 열전달율을 이용한 다수실 동적 열부하 계산 프로그램 중 일본에서 가장 많이 사용되는 것 중에 하나가 SMASH이다. 이 프로그램은 필자가 소속된 연구실에서 개발된 것으로 일본의 차세대 에너지 절약 기준²⁾ 입안시 성능평가 기준의 토대가 된 프로그램이며, 많은 연구자에 의하여 검증되어 왔다.

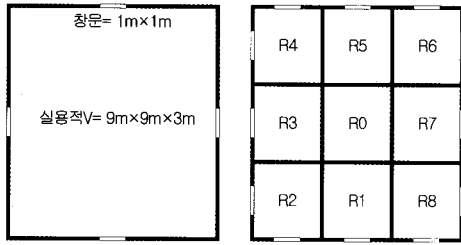
먼저, 동일한 조건(표면 열전달율(대류+복사)을 이용하여 계산하는 조건으로 이하 「 α 결합」이라고 함)에서 SMASH와 SimHeat를 비교평가(Benchmark Test)하여, SimHeat의 계산 정밀도를 검증한다. 다음으로, SimHeat만을 이용하여 대류·복사성분을 분리해서 계산(이하, 「 α 분리」라고 함)하고, α 결합의 경우와 α 분리의 경우에서, 열부하 및 실온·벽체표면온도를 비교 검토한다.

검토 대상모델로는 간단한 형태의 단실 계산모델, 다수실 계산모델을 작성하고, 실제 주택에 가까운 모델로서는 일본 건축학회에서 제안된 「표준문제」³⁾를 계산 대상으로 한다. 모델의 구조 및 단열 사양은 목조 주택의 충전 단열(일본 차세대 에너지절약 기준준거)이고, 공조는 에어컨(대류식 냉난방)을 이용한다(표 1, 그림 1).

표 1. 계산 개요

	CASE1(단실)		CASE2(다수실)		CASE3(표준문제)	
	A. α 결합	B. α 분리	A. α 결합	B. α 분리	A. α 결합	B. α 분리
구분	A의 α 결합이란 표면 열전달율에 의한 계산, B의 α 분리란 표면 열전달율을 대류 열전달율과 복사 열전달율로 분리한 계산을 말함.					
기상조건	동경 표준 기상데이터					
구조사양	목조 주택의 충전단열 (열적 단열경계: 벽, 천정, 바닥)					
단열사양	차세대 에너지 절약 기준(사양기준)					
계산조건	상기 기준의 제시조건			일본학회 조건		
공조조건	전실 24시간 연속냉난방			부분냉난방		

2) (財)建築環境・省エネルギー機構(2002年), 次世代省エネルギー基準の解説
 3) 宇多川 光弘(1985), 標準問題の提案(住宅用標準問題), 熱シンポジウム15回, 日本建築學會



(a) CASE1(단실 계산모델) (b) CASE2(다수실 계산모델)

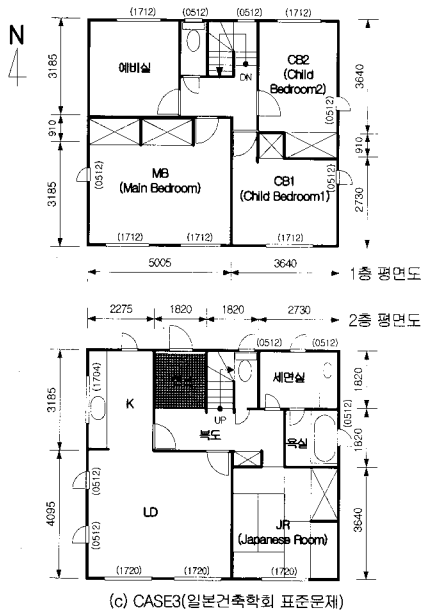
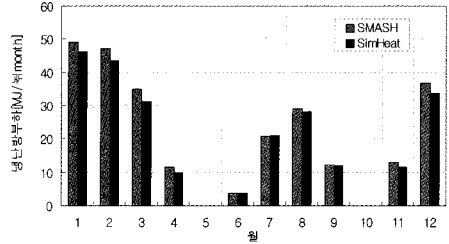


그림 7. 계산모델

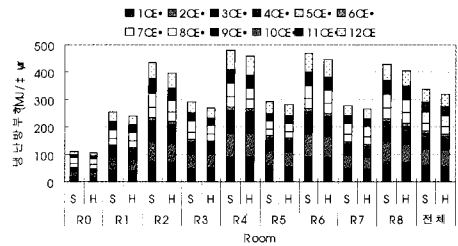
4. SimHeat의 정밀도 검증 (BMT: Bench Mark Test)

여기서는 SimHeat의 계산 정밀도를 검증한다. 이를 위해, 표면 열전달율을 대류·복사성분으로 분리하지 않은 동일 조건하에서 SMASH와 SimHeat의 계산 결과를 비교한다(CASE1과 CASE2). 계산 결과는 그림 8, 9와 같다. 먼저 냉난방 부하를 비교하면, 단실 모델(그림 8. (a))에 있어서도 다수실 모델(그림 8. (b))에 있어서도 SMASH와 비교하여 약 5%의 차이 밖에 보이지 않았다. 또한, 단실 모델에서의 벽체 표면온도는 연간 시간 평균 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 정도의 차이 밖에 보이지

않았으며(그림 9), SMASH와 SimHeat는 매우 잘 일치하고 있다는 것을 보여주고 있다.



(a) CASE1A(단실 모델)



(b) CASE2A(다수실 모델)

(S: SMASH, H: SimHeat)

그림 8. CASE1A, CASE2A의 냉난방부하

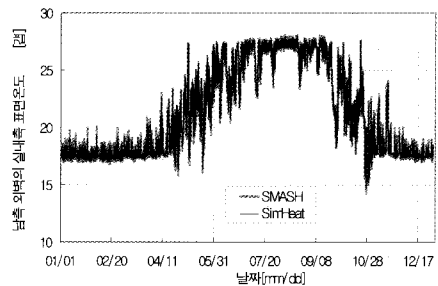
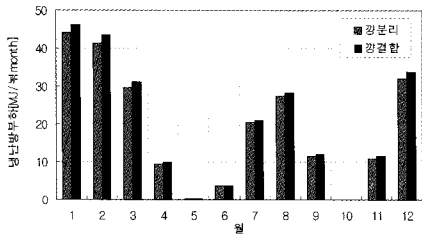


그림 9. CASE1A(단실 모델)의 연간 벽체 표면온도 변화

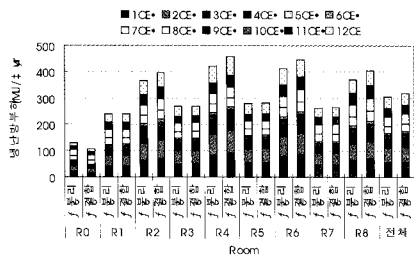
5. α 결합과 α 분리시의 비교검토

5.1 냉난방부하 비교

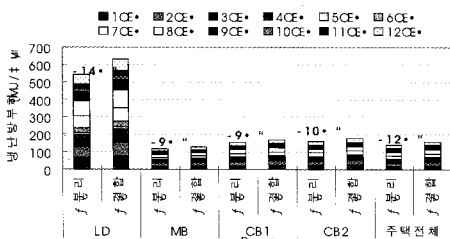
앞에서는 SimHeat의 계산 정밀도에 문제가 없다는 것을 SMASH와 비교하여 검증하였다. 여기서는 SimHeat만을 사용하여 α 결합과 α 분리시의 냉난방 부하를 비교 검토한다.



(a) CASE1(단실 모델)
(CASE1A:α결합, CASE1B:α분리)



(b) CASE2(다수실 모델)
(CASE2A:α결합, CASE2B:α분리)



(c) CASE3(표준 문제)
(LD:거실, MB:침실, CB:어린이실)
그림 10. CASE1, CASE2, CASE3의 냉난방부하

CASE1의 단실 모델에 있어서 계산 결과는 그림 10.(a)와 같다. 난방기간과 냉방기간으로 나누어 보았을 때 전자가 분리 기준으로 -5%정도, 후자가 약 -2.5%의 냉난방 부하의 차이가 보인다. 이는 벽체 상호간의 복사 전열에 기인한 것으로 복사 전열만큼의 부하가 감소된 것을 의미한다.

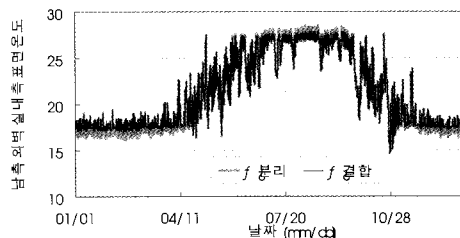
CASE2의 다수실 모델에 있어서 R1·R3·R5·R7과 R2·R4·R6·R8과의 연간 냉난방 부하는 α분리가 α결합에 비하여 9%정도 작게 계산되었다(그림 10. (b)). 이것은 외기에 접하는 외벽과 창면적이 2배 정도 차이가 나기 때문이다. 즉,

계산대상으로 하는 외벽의 절점과 주위 벽체와의 온도차가 크기 때문에 온도차만큼의 복사 전열량이 발생하는 것이다. 한편 내벽만으로 구성된 R0의 냉난방 부하는 19%의 큰 차이가 보였다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 R0의 내벽 표면온도와 주위 실과의 온도차가 벽체마다 다르기 때문이다.

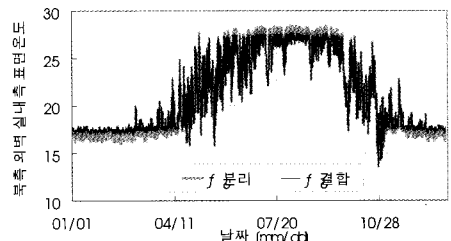
CASE3의 일본 건축학회 표준문제는 계산 조건이 24시간 연속 냉난방이 아니라 거실자의 재실 여부에 따른 부분 냉난방이다. 이 경우의 열부하량은 CASE2의 다수실 모델과 비슷한 10%전후의 차이가 보인다.(그림 10.(c)).

5.2 실온 및 벽체 표면온도 비교

24시간 연속 냉난방시의 벽체 표면 온도는 CASE1(단실 모델)과 CASE2(다수실 모델)의 결과가 비슷한 양상을 보인다. 즉, α분리 기준으로 난방기간 동안에는 α결합에 비해서 -0.5℃정도, 냉방기간에는 +0.3℃정도의 차이가 보인다.(그림 11. (a) (b))



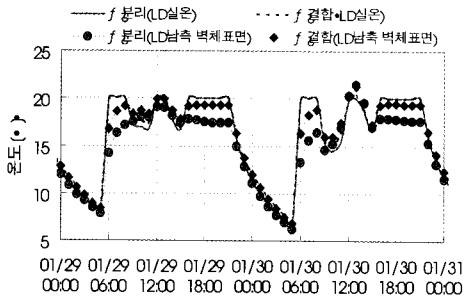
(a) CASE1(단실 모델)



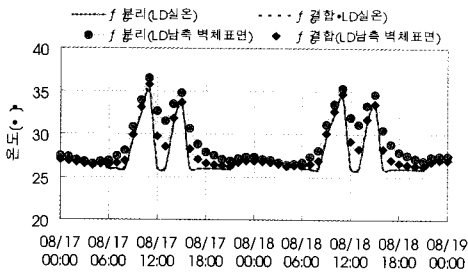
(b) CASE2(다수실 모델)
(R4의 북측외벽 실내측 표면온도)

그림 11. CASE1, CASE2의 연간 벽체 표면온도 변화

한편, 부분 냉난방(CASE3)의 경우에는 벽체 표면온도가 α 분리 기준으로 난방운전 중에는 α 결합에 비해서 -2°C 정도, 냉방운전 중에는 $+0.5\sim+1^{\circ}\text{C}$ 정도이고, 24시간 연속 냉난방에 비해 큰 차이가 보인다.(그림 12. (a), (b)~그림 13.)



(a) CASE3(난방기간)



(b) CASE3(냉방기간)

그림 12. CASE3의 냉난방기간 중 실온과 벽체표면온도

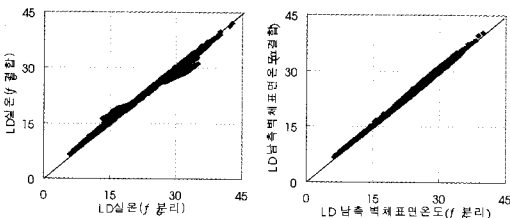


그림 13. α 결합과 α 분리의 온도 상관관계

5.3 고찰

24시간 연속 운전의 경우(CASE1, 2)와 재실자 스케줄에 따른 부분난방(CASE3) 사이에 2~4배 정도의 벽체 표면온도 차이가 보이고 있

는데 그 이유는 다음과 같다.

α 결합은 실온이 주위 벽체 표면온도와 동등하다는 전제(그림 1)하에 정수의 표면 열전달율을 사용하고 있다. 이 경우 계산 대상벽체가 주위 벽체로부터 받는 복사의 영향은 주위 벽체 표면온도와 실온과의 차이만큼 더 계산되고 난방중의 벽체 표면온도는 실제 표면온도보다 높게 계산되고 있다고 할 수 있다.

특히, 이러한 현상은 24시간 냉난방보다는 부분난방에서 현저하게 나타난다. 왜냐하면 전지는 항상 일정 실온을 유지하고 있기 때문에 벽체표면온도가 단열재 외측의 외기조건에 일시적인 영향을 받지 않기 때문이고, 후자는 냉난방의 운전 유무에 따라 외기의 영향을 크게 받아 냉난방 중의 실온이 목표온도를 유지한다 하여도 공간을 구성하는 주위의 모든 벽체가 일정 표면온도에 도달하는 데는 어느 정도의 시간을 필요로 하기 때문이다. 또한 부분난방이라도, 벽체의 열용량이 큰 RC조 주택에서 온돌과 같은 바닥난방을 할 경우 이러한 현상은 더욱 더 크게 나타날 것이라 사료된다.

이와 같이 표면 열전달율을 이용할 경우의 열부하량은 실내 공기온도를 냉난방 설정온도로 유지하기 위한 냉난방 부하량에 벽체 표면온도의 상승분이 가미되기 때문에, 실제 열부하량보다 크게 계산될 우려가 있고, 실온 또한 실제의 공기온도라기 보다는 주위 벽체의 영향이 가미된 온도(실제 공기온도와 작용온도 사이의 온도)라 할 수 있다. 따라서 보다 정미한 냉난방부하와 실온을 계산하기 위해서는 본 논문에서 제시하는 바와 같이, 표면에서의 열전달율을 대류성분과 복사성분으로 분리해서 계산해야 한다.

6. 결 론

본 논문은 실내측 전열계산에 이용되는 표면 열전달율의 대류·복사성분 분리가 다수실 비정상

열부하 계산에 미치는 영향을 검토하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 다수실 비정상 열부하 및 실온을 계산할 수 있는 프로그램(SimHeat)을 개발하였다. 계산 프로그램은 열·환기 회로망을 구축하여 계산하는 절점간의 1차원 해석이고, 실내측 전열계산은 표면 열전달율을 대류·복사성분으로 분리하였다.
- 2) SimHeat의 계산 정밀도를 검증하기 위하여 기존의 열부하계산 프로그램 SMASH와 비교 테스트(Bench Mark Test)를 하였다. 계산조건은 표면 열전달율을 대류·복사성분으로 분리한 경우와 분리하지 않는 경우를 비교 평가하였고, 냉난방 설비는 대류식 냉난방기구인 에어컨으로 설정하였다. 그 결과, 연간 냉난방 부하는 5%정도, 벽체 표면온도는 평균 ± 0.2 정도의 차이 밖에 보이지 않았고, SimHeat의 계산 정밀도는 매우 양호한 것으로 판명되었다.
- 3) 표면 열전달율을 대류·복사성분으로 분리한 경우와, 분리하지 않은 경우를 비교 평가하였다. 그 결과, 냉난방부하의 경우, 대류·복사성분의 분리 기준으로, 단실(CASE1)에서 -5%, 다수실(CASE2, CASE3)에서 -10%정도의 차이가 보였다.
한편, 벽체 표면온도는, 24시간 연속 냉난방(CASE1, CASE2)의 경우, 난방기간에 -0.5°C 정도, 냉방기간에 $+0.3^{\circ}\text{C}$ 정도의 차이가 보였고, 거주자의 재실 여부에 따른 부분난방(CASE3)의 경우, 난방기간에 -2°C , 냉방기간에 $+0.5^{\circ}\text{C} \sim +1^{\circ}\text{C}$ 정도의 차이가 보였다.
- 4) 다수실 비정상 열부하계산에서, 표면 열전달율을 대류·복사성분으로 분리하지 않고 사용하면, 계산된 열부하량은 실제 부하량보다 과대평가되며, 실온 또한 공기온도로서 취급하기는 어렵다는 것을 검증하였다.

따라서 정미한 냉난방부하와 실온을 계산하기 위해서는 표면에서의 열전달율을 대류 성분과 복사성분으로 분리해서 계산해야 한다는 것을 제안하였다.

후 기

본 논문은 광운대학교 교내연구지원으로 수행함.

참 고 문 헌

1. 宮島 賢一·金 榮卓·坂本 雄三, 建築環境シミュレーション用CAD及びCADと連携した熱・換氣回路網連成プログラムの開發 その1 全体システム概要とプログラムの特徴, 日本建築學會大會學術講演梗概集, D2, 2005年
2. 金 榮卓·宮島 賢一·坂本 雄三, 建築環境シミュレーション用CAD及びCADと連携した熱・換氣回路網連成プログラムの開發 その2 總合熱傳達率の放射・流分離が熱負荷に及ぼす影響, 日本建築學會大會學術講演梗概集, D2, 2005年
3. 松尾 陽, 新建築學体系10(環境物理), 彰國社, 2.熱(P 31-103), 1984年
4. 『SMASH for Windows Ver.2ユーザーマニュアル』(住宅用熱負荷計算プログラム), (財)建築環境·省エネルギー機構, 2004年
5. TRNSYS(TRANSIENT SIMULATION), <http://evl.cstb.fr/>
6. NETS(熱・換氣回路網モデル計算プログラム:Thermal and Airflow Network Simulation Program), <http://www.nets-club.com/shimlab/nett.html>
7. 笹本·加藤·村上·小林·大森, 室内温熱環境制御に用いる放射熱分配係數CRI(R)の開發, 日本建築學會環境系論文集, No.590, P23-28, 2005年4月