

복사열전달을 고려한 고층아파트 연속난방 열공급제어 시뮬레이션

Simulation of Heat Supply Control of Continuous Heating System of Multistoried Apartment in Consideration of Radiation Heat Transfer

최영돈*, 홍진관**, 윤종호***, 이남호***
Y. D. Choi, J. K. Hong, J. H. Yoon, N. H. Lee

Key words : Thermostat(써모스타트), Continuous Heating System(연속난방시스템), Pipe Network(배관망), Thermal Performance Simulation(열성능 시뮬레이션), Radiation Heat Transfer(복사열전달), Equivalence Heat Resistance-Capacity Method(등가열저항열용량법)

Abstract

Thermal performance of pipe network of continuous heating system controlled by thermostat and flow control valve was simulated in consideration of radiation heat transfer and solved by linear analysis method. Thermal performance of real apartment building with radiant floor heating system was simulated by equivalence heat resistance-capacity method. This method enables to simulate the unsteady variation of temperature or each element of building. Heat transfer characteristics of each element were also investigated.

1. 서 론

연속난방방식은 각세대 내의 실내 설정온도에 따라 써모스타트나 자동온도 조절밸브 등을 이용하여 자동적으로 설정온도를 유지하기 위해 부하에 따라 난방을 연속적으로 공급제어하는 방식이므로 실내 열환경 수준이 향상되고 세대 사용자가 직접 난방에너지양을 조절할 수 있으며 발전소의 폐열을 이용할 수 있기 때문에 에너지 절약적 측면과 환경오염방지 측면에서 바람직한 난방방식이라 할 수 있어 이 방식을 적용하는 아파트가 점차 늘어나고 있는 추세이다. 2차측 설계(열교환기부터 아파트

단지내 설비)에 있어서 우리나라는 온수온돌방식을 채택하고 있기 때문에 대부분이 대류방식인 외국의 지역난방방식 기술의 직접적용이 곤란하며 연속난방방식의 온돌 구조체의 구성이나 배관망 제어방식등 각종 요소에 대한 새로운 기준 설정이 필요하다. 본 연구에서는 연속공급 및 제어방식의 아파트 동단위 건물의 열해석이 가능한 전산해석 프로그램을 실내복사 열전달을 고려하여 작성하였다.

본 연구에서 주로 고찰하고자 하는 것은 아파트 난방공간에서의 복사열전달을 포함한 열성능 및 온수배관망의 열성능이며 이를 위해서 배관망 해석에는 수렴이 빠른 선형해석법과 건물 각 구조체의 비정상 열전달 효과를 고려하기 위해서 등가열저항열용량해석법을 도입하였고 이들을 복합하여 연

* 고려대학교 기계공학과
** 경원대학교 건축설비학과
*** 에너지기술연구소

속난방열공급시스템 전체의 열성능을 시뮬레이션 하였다.

2. 대상 아파트 건축사양

이 아파트의 온수배관망 구역 방법은 한 열을 1층, 2~4층, 5~9층 및 10~15층의 4구역으로 나누어서 1층, 2~4층은 상향식으로 하여 별도의 환수관을 설치하고 5~9층 및 10~15층은 하향식으로 하여 하나의 환수관으로 온수를 환수하고 있다. 써머스타트를 부착한 아파트의 연속난방시스템에서 써머스타트의 작동에 따른 각 세대 구성체의 온도변화를 예측하는 시뮬레이션을 수행할 때 써머스타트가 꺼지는 경우 그 세대로 온수가 공급되지 않는다고 가정하였고 그에 따라 각 구성체의 온도가 내려가 실내 공기온도가 어느 온도 이하가 되면 써머스타트가 다시 켜져 온수가 재공급된다고 하였으며 그 총유량을 펌프의 성능곡선과 매칭시키는 해석을 하였다. 실내구성체 온도변화 해석은 1분에 한번씩 하였고 유량을 계산하기 위한 배관망 해석은 10분에 한번씩 하였다.

3. 실내의 해석모형

열성능시뮬레이션을 할 대상아파트 각세대는 26평형이며 그 온수 배관도는 Fig.1과 같고 방바닥 단면도는 Fig.2와 같다. 온수관은 급수헤더에서 나누어져 거실과 방을 통과한 후 회수헤더로 모인다.

각 관의 길이는 대략적으로 비슷하여 본 해석에서는 5개의 80m 온수관이 설치되어 있다고 가정하였다. 온수관은 외경 $\phi 20$ 인 엑셀관이다. 엑셀관의 설치 위치는 Fig.2에서와 같이 미장몰타르 직하에 있다. 방바닥 최하단부의 스티로폼은 1층

에만 설치되어 있고 2~15층에는 설치되어 있지 않다.

본 해석에서 주요 연구대상으로 한 것은 실내에서의 열유동율을 정확히 해석하여 열부하 계산을 정확히 하는데 두었다. 그러기 위해서 실내 각 벽 사이의 복사열전달을 해석하여야 한다. Fig.1로 주어진 단위세대 난방배관망과 방의 배치도는 열부

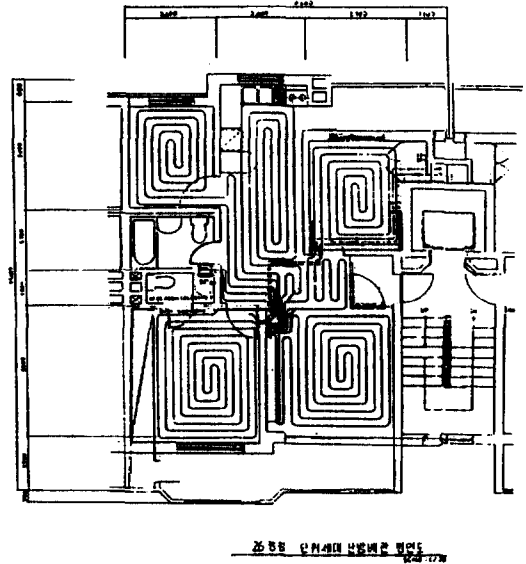


Fig.1 Plan view of pipe network of a household in tested apartment.

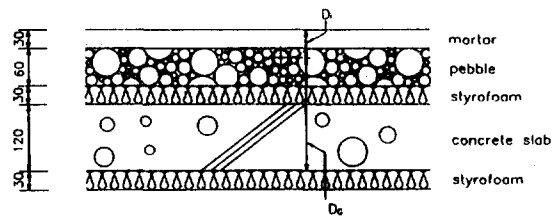


Fig.2 Sectional view of a floor of tested apartment.

Table 1 Specification of test apartment.

Floors	Columns	number of zone of pipe network
15	8	1st zone 1 floor(upward return pipe)
		2nd zone 2-4 floor(upward return pipe)
		3rd zone 5-9 floor(downward return pipe)
		4th zone 10-15 floor(downward return pipe)
Total 120 households		

하의 비정상 해석을 위해서 복잡한 형태를 가지므로 본 연구에서는 Fig.3과 같이 간략화한 모형으로 만들어 해석하였다.

건물내부는 실내, 베란다, 복도의 3구역으로 나누었으며 실내는 다시 6개의 방으로 나누었다. 방 #6과 방 #2는 그 경계선을 정하기가 어렵기 때문에 Fig.3의 점선에서와 같이 각 방이 중복되게 설치하였다. 이는 각 방의 형태를 직육면체형으로 하므로써 복사 열전달 해석을 편리하게 하기 위해서이다. 그러나 이와 같이 한 영역을 중복적으로 분할하게 되면 해석결과에 오차가 생기는데 그 크기가

전체 열성능해석에 큰 영향을 주지 않으리라 생각하여 이와 같은 방법을 택하였다.

실내는 6개의 방으로 나누었으나 각 방의 공기 온도는 같다고 가정하였고 단지 각 벽체의 온도가 다르다고 가정하였다. 이는 각 방 사이의 문이 열려져 있어서 공기가 서로 통하여 같게 된 경우를 뜻한다. 실제로 각 방의 공기온도가 서로 다를 수 있으나 각 방의 온도를 다르게 설정할 경우 각 세대별로 8개의 난방구역이 설정되어 120세대가 있는 아파트 한동에 설정해야할 난방구역수는 960개가 되어 전산시간이 너무많이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 건물내부를 실내, 베란다, 복도 3구역으로 나누어 실내공기 온도와 베란다공기 온도는 다르게 설정하고 복도의 공기온도는 실내와 외기 온도의 평균값으로 가정하여 실제해석에서 복도를 제외시켰다. 이 경우 아파트 1동에서의 난방구역은 240개가 된다. 이 정도의 난방구역의 수에 대해서는 대형 전산기를 사용하는 경우 해석이 가능하다.

각 방에서 실내공기온도는 같다 하더라도 벽체의 온도는 각기 다르기 때문에 벽체에서 벽체로 복사열전달이 일어난다. 복사열전달 해석을 위해서 실내의 벽체를 13개 벽체로 나누어 해석하였으며 13개로 나누어진 벽체의 대표온도는 방번호에 관계없이 같다고 가정하였다. Table 2는 방번호와 벽체의 번호를 나타낸다.

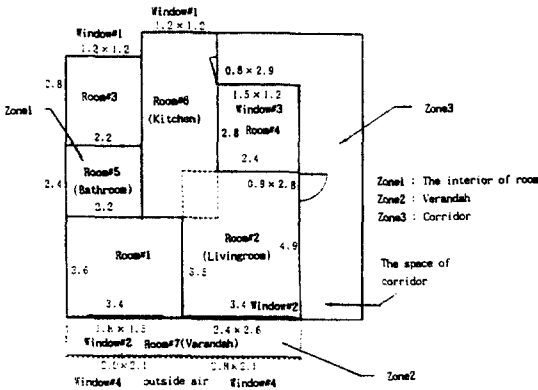


Fig.3 Plan view of indoor space.

Table 2 Element number and wall area, heat capacitance.

number	items	area(m ²)	heat capacity C _p (J/°C)
1	방바닥	54.92	6.29×10 ⁶
2	천 정	54.92	1.18×10 ⁷
3	간벽(실내)	137.96	2.88×10 ⁷
4	창문 1(외기와 접촉함)	2.88	3.92×10 ⁴
5	창문 2(베란다와 접촉함)	10.54	1.44×10 ⁵
6	창문 3(복도와 접촉함)	1.8	2.45×10 ⁴
7	벽 1(외기와 접한 벽)	9.88	3.16×10 ⁶
8	벽 2(베란다와 접한 벽)	9.18	2.94×10 ⁶
9	벽 3(복도와 접한 벽)	23.43	7.49×10 ⁶
10	문	4.93	7.38×10 ⁴
11	창문 4(베란다와 외기사이의 창)	10.08	6.87×10 ⁴
12	벽 4(베란다와 외기사이의 벽)	9.64	3.08×10 ⁶
13	간벽(베란다)	23.3	1.33×10 ⁶

4. 에너지방정식의 해석

건물의 비정상 에너지해석을 위해서는 일반적으로 유한차분법이나 응답계수법이 사용되어 왔다. 그러나 이 방법은 단독주택이나 연립주택등 소규모 주택의 에너지해석에는 적합하나 대규모 아파트의 비정상 에너지해석에 사용할 경우 전산시간이 너무 많이 소요되어 적합하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 벽체를 2개의 열저항과 1점에 묻쳐있는 열용량(thermal capacitance)으로 대체하여 등가회로로 만들어 해석하기 때문에 정확성이 타방법에 비해 많이 떨어지지 않으며 전산시간이 적게 들어 대규모 아파트의 전산해석에 적합한 등가열저항-열용량법¹⁾을 사용하였다.

전산해석을 간편하게 하기 위하여 해석 대상 아파트의 각 구성체를 Table 2에서와 같이 방바닥, 천정, 간벽(실내), 창문1, 창문2, 창문3, 창문4, 벽1, 벽2, 벽3, 벽4, 문, 간벽(베란다)등의 13개의 열용량점으로 구성하였으며 방바닥의 경우 온수관을 기준으로 온수관 중심 윗쪽 부분의 방바닥을 방바닥 1로 아래쪽 부분을 방바닥 2로 나누고 여기에 실내 공기를 포함하여 총 15개의 열용량점에 대한 에너지 평형방정식을 세워 이를 연립으로 적분하여 비정상 에너지해석을 수행하였다.

Fig.4는 아파트 각 세대 실내부의 구성체를 등가 열용량-열저항법을 사용하여 해석하기 위해서 등가회로화 한 것이며 Fig.5는 베란다부의 등가회로를 나타낸 것이다. 이 그림에서 T_w 는 베란다는의 공기 온도이고 T_g 는 복도의 공기온도이며 각 부분의 등가온도는 T_{b1} , T_{b2} , T_c , T_{rw} , T_{win1} , T_{win2} , T_{win3} , T_{win4} , T_{w1} , T_{w2} , T_{w3} , T_{w4} , T_{door} , T_{rvw} 및 T_{ra} 이며, 이들은 각각 방바닥1, 방바닥2, 천정, 실내와 접하는 간벽, 창문1, 창문2, 창문3, 창문4, 벽1, 벽2, 벽3, 벽4, 문, 베란다와 접하는 간벽 및 실내공기의 등가온도를 나타낸다.

Fig.4와 Fig.5에서 h_a , h_b , h_c , h_f , h_g , h_{w1} , h_{w2} , h_{win} 및 h_{door} 는 각 구성체 벽면의 열전달계수를 R_{wi} , R_{w2} 등은 각 구성체벽면의 전도열저항을 나타내며, $C_{p1} M_{b1}$, $C_{p2} M_{b2}$, $C_{pc} M_c$, $C_{prw} M_{rw}$, $C_{pwin1} M_{win1}$, $C_{pw1} M_{w1}$, $C_{pdoor} M_{door}$, $C_{prvw} M_{rvw}$ 및 $C_{pra} M_{ra}$ 는 각 구성체의 열용량을 나타낸다.

Fig.4와 Fig.5의 등가회로에 표시한 15개 구성체의

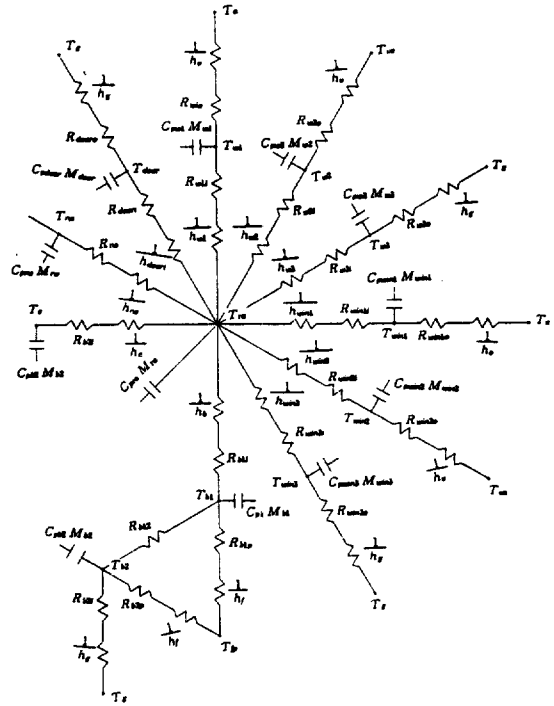


Fig.4 Equivalence circuit of indoor space constructed by equivalence heat resistance and heat capacity method.

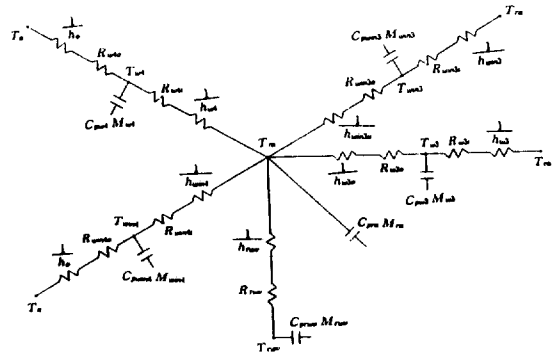


Fig.5 Equivalence circuit of veranda constructed by equivalence heat resistance and heat capacity method.

열용량점에 대한 에너지해석을 위한 지배방정식은 최등¹⁾이 모형 온수온돌주택의 열성능해석에서 적용했던 방법과 방정식이 거의 동일하므로 자세한 것은 이를 참조하기 바란다.

5. 태양열복사율의 계산

난방계절에 아파트의 난방부하 계산시 태양열 복사의 영향을 정확히 고려하는 것은 대단히 중요하다. 태양열 복사는 아파트 설치지역의 위도, 열성능 해석시의 달과 일차, 그 날의 일기, 아파트 설치의 방위, 아파트 동간의 간격, 아파트의 폭과 높이, 창문의 투과율과 흡수율 및 창문의 넓이등 대단히 많은 인자들에 의해서 영향을 받는다. 따라서 태양열 복사의 영향을 고려할 때 가능한 이런 인자들이 모두 고려되는 것이 가장 바람직하다. 본 해석에서는 이러한 모든 인자들이 가능한 정확히 고려되도록 하였다.

5.1 겉보기 태양시의 계산

우리들이 사용하고 있는 지역표준시(local standard time : LST)와 겉보기 태양시(apparent solar time : AST)은 서로 다르며 그 사이의 관계는 다음과 같다.

$$AST = LST + ET + 4(LSM - LON) \quad (1)$$

여기서 ET=균시차

LSM=지역 표준시의 경도

LON=지역의 경도

이다. 식 (1)에서 시간의 변화는 분으로 계산된다.

5.2 태양열복사율의 계산

지구상의 어떤 표면에 도달하는 태양열복사율(I_i)는 직달일사율(I_{DN})와 천공확산 일사율(I_d)으로 이루어진다.

표면에의 태양열복사의 입사각을 θ 라 하면

$$I_i = I_{DN} \cos\theta + I_d + I_r \quad (2)$$

이다. 식 (2)의 우변을 계산하는 방법은 다음과 같다.

(1) 태양각의 계산

태양열 복사의 입사각 θ 를 계산하는 과정은 다음과 같다.

$$\sin\beta = \cos L \cos\delta \cos H + \sin L \sin\delta \quad (3)$$

$$\cos\phi = (\sin\beta \sin L - \sin\delta) / (\cos\beta \cos L) \quad (4)$$

식 (3), 식 (4)에서

β =태양의 고도

ϕ =정남으로 부터의 태양의 방위각

L =지역의 위도

δ =일적위

H =시간각

이며 시간각 H 는

$$H = 0.25(\text{태양정오시로 부터 시간(분)}) \quad (5)$$

이다. 태양열 복사의 입사각 θ 는 다음과 같이 계산한다.

$$\cos\theta = \cos\theta \cos\gamma \sin\Sigma + \sin\beta \cos\Sigma \quad (6)$$

여기서 Σ 는 수평면으로 부터의 입사면의 경사각으로 수평면의 경우 0° , 수직면의 경우 90° 이다.

(2) 직달일사율의 계산

궤정한 날 직달일사율 I_{DN} 은

$$I_{DN} = \frac{A}{\exp(B/\sin\beta)} \quad (7)$$

로 계산한다. 이 식에서 계수 A, B는 ASHARE 자료를 참고하였다.⁹⁾

(3) 천공확산일사율과 지표면반사일사율의 계산
천공확산일사율과 지표면반사일사율은 다음과 같이 계산한다.

수평면인 경우

$$I_d = C I_{DN} \quad (8)$$

수직면인 경우

$$I_d = (CY + 0.5\rho_g(C + \sin\beta)) I_{DN} \quad (9)$$

여기서 Y 는

$$\begin{aligned} \cos\theta > -0.2 \text{이면} \\ Y = 0.55 + 0.437\cos\theta + 0.313\cos^2\theta \end{aligned} \quad (10)$$

기타의 경우는

$$Y = 0.45 \quad (11)$$

식 (33)에서 ρ_x 는 지표면의 반사율로 ASHARE 자료를 참고하였다.³⁾

(4) 창문의 투과율과 흡수율의 계산
태양열복사율 중 창문에서 흡수한 율과 투과한 율은 다음과 같이 계산한다.

$$\text{투과율} = I_D \sum_{j=0}^5 t_j \cos^j\theta + I_a 2 \sum_{j=0}^5 t_j / (j+2) \quad (12)$$

$$\text{흡수율} = I_D \sum_{j=0}^5 a_j \cos^j\theta + I_a 2 \sum_{j=0}^5 a_j / (j+2) \quad (13)$$

6. 실내벽체 사이의 복사율 계산

6.1 형상계수의 계산

실내 각 벽체 사이의 복사열전달을 계산하기 위해서는 형상계수를 계산해야 한다. Fig.6에서 떨어져 있는 면적 A_1, A_2 의 두 벽체 사이의 형상계수는⁴⁾

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (14)$$

본 연구에서 면적 A_1, A_2 인 2개 벽체 사이의 관계를 Fig.7과 같이 4개의 형상으로 나누어 각각의 형상에 대해 형상계수 F_{12} 를 계산하였으며 형상 (1)과 형상 (2)는 해석적으로 유도된 식을 사용하였으며 형상 (3)과 형상 (4)의 형상계수는 해석적으로 유도된 식이 너무 복잡하여 식 (14)를 수치적분하여 계산하였으며 이 형상계수의 적분을 위한 부프로그램을 작성하였다.

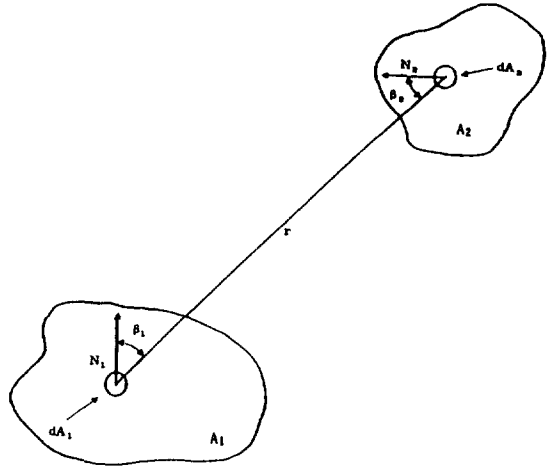


Fig.6 Shape angle of surface of area A1 and A2.

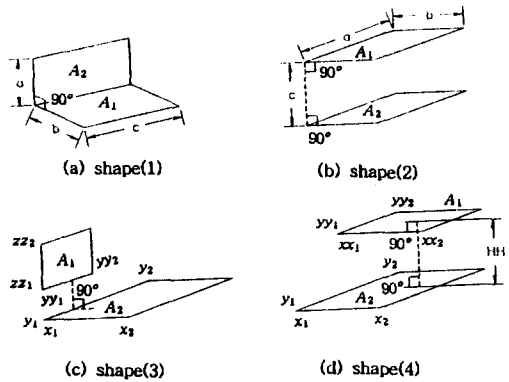


Fig.7 Classification of shape between walls.

6.2 열방사율 계산을 위한 행렬 해법⁵⁾

Fig.10과 같이 n 개의 표면으로 이루어진 밀폐공간이 있다고 하자. 각 표면에서 복사에 의한 열방사율은

$$J_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + \sigma_i H_i \quad (15)$$

로 나타내어진다. 이 식에서 ϵ_i 는 i 면의 방사율이고 H_i 는 i 면에 복사열 입사율이며 σ_i 는 입사된 복사열중 반사되는 비율을 나타낸다.

$$H = \sum_{j=1}^n J_j (\tau_{ij} F_{ji}) + \sigma T_g^4 \sum_{j=1}^n \epsilon_j F_{ji} \quad (16)$$

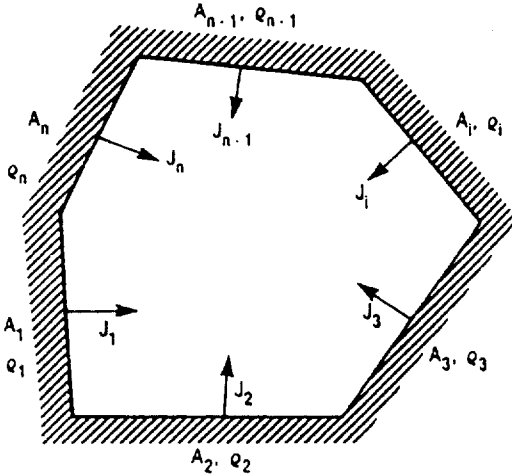


Fig.8 A general n-surface enclosure with absorbing-emitting gas.

이다. 이 식에서 τ_{ij} 는 방사된 열량 중 가스에서의 투과율을 나타내고 ϵ_{ij} 는 가스의 열방사율을 나타낸다. 일반적으로 공기인 경우 τ_{ij} 는 $i \neq j$ 인 경우 1로 간주하고 ϵ_{ij} 는 0으로 간주한다. 그러나 τ_{ij} 는 0이다.

식 (40)를 전개하면

$$\begin{aligned} a_{11}J_1 + a_{12}J_2 + a_{13}J_3 + \dots + a_{1n}J_n + a_{1n+1}J_{n+1} + K_1 &= 0 \\ a_{21}J_1 + a_{22}J_2 + a_{23}J_3 + \dots + a_{2n}J_n + a_{2n+1}J_{n+1} + K_2 &= 0 \\ &\vdots \\ a_nJ_1 + a_nJ_2 + a_nJ_3 + \dots + a_nJ_n + a_{n+1}J_{n+1} + K_n &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

행열 계수 a_{ij} 는

$$\begin{aligned} a_{11} &= \tau_{11}F_{11} - 1/\rho_1 \\ a_{22} &= \tau_{22}F_{22} - 1/\rho_2 \quad a_{nn} = \tau_{nn}F_{nn} - 1/\rho_n \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} a_{12} &= \tau_{12}F_{12} \\ a_{13} &= \tau_{13}F_{13} \quad a_{nn} = \tau_{nn}F_{nn} - 1 \end{aligned} \quad (19)$$

$$a_{1n+1} = \sum_{j=1}^n \epsilon_{ij} F_{ij} \quad a_{m+1} = \sum_{j=1}^n \epsilon_{mj} F_{mj} \quad (20)$$

$$J_{n+1} = \sigma T_g^4 \quad (21)$$

그러나 $\tau_{ij} = 0$, $\tau_{ij}(i \neq j) = 1$ 및 $\epsilon_{ij} = 0$ 을 가정할 경우

$$\begin{aligned} a_{11} &= -1/\rho_1 \\ a_{22} &= -1/\rho_2 \quad a_{nn} = -1/\rho_n \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} a_{12} &= F_{12} \\ a_{13} &= F_{13} \quad a_{nn-1} = F_{nn-1} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} a_{1n+1} &= 0 \\ a_{2n+1} &= 0 \\ &\vdots \\ a_{nn+1} &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

이 된다.

식 (17)을 연립으로 풀어서 J_i 가 계산되면 면 i 에서 실제로 방출되는 열량은

$$Q_i = A_i \left(\frac{\epsilon}{\rho} \right)_i \left(\sigma T_i^4 - \left(\frac{1 - \rho_i}{\epsilon_i} \right) J_i \right) \quad (25)$$

로 계산된다. 회색체인 경우 $1 - \rho_i = \epsilon_i$ 가 되지만 일반적인 벽체는 회색체가 아니므로 $1 - \rho_i = \epsilon_i$ 의 가정을 사용할 수 없어서 식 (25)를 그대로 사용해야 한다. 식 (17)을 행렬식으로 나타내면

$$AJ = K \quad (26)$$

이므로

$$J = A^{-1}K \quad (27)$$

가 된다. 행열 A 의 요소는 모두 형상계수 F_{ij} 만의 함수이다. 형상계수는 방의 형상이 정해지면 고정되므로 단지 한번만 계산하면 된다. 그러나 K 는 벽체 표면온도의 함수이므로 시간에 따라서 실내온도와 벽체온도가 변하면 K 도 따라 변한다. 그러므로 식 (26)를 풀 때 Gauss Elimination법이나 Gauss Jordan법을 쓸 경우 매시간 마다 식 (26)을 풀어야 되어 계산시간이 많이 든다. 그러나 행열 A 가 시간의 함수가 아니고 방의 형상만의 함수라는 것을 주지하여 먼저 A 의 역행열 A^{-1} 을 계산하여 둔 후 실내온도의 변화에 따라 K 가 변하면 식 (27)에 의해서 단지 A^{-1} 와 K 를 곱해주어 J 를 계산하면 계산시간을 대단히 감축시킬 수 있다. 따라서 본

연구에서는 식 (26)의 연립방정식의 해법에서 역행열 해법을 사용하였다.

7. 배관망 해석 시뮬레이션

아파트의 열성능을 해석하기 위해서는 방바닥의 열전도해석, 실내의 복사열전달과 대류열전달해석, 벽체의 비정상 열전도 해석 및 태양열 복사율의 계산과 아울러 배관망에서의 유량의 변화에 대한 해석을 해야 한다.

7.1 배관망 해법

본 해석에서 배관망 해석법으로 사용한 방법은 정점방정식과 회로방정식을 연립하여 푸는 선형해석법을⁶⁾ 사용하였다. 선형해석법은 다른 해법에 비해서 해의 수렴성이 크고 계산시간이 적게 든다.

배관 관내부에서 발생하는 부력의 영향을 계산하기 위해서 Euler 방정식으로 부터 회로 방정식을 얻는다. 이때 주손실과 국부손실을 관계식⁸⁻¹⁰⁾으로 만들어 사용한다.

7.2 펌프의 성능해석

배관망내 열유동 해석용 시뮬레이션을 위해서는 펌프의 성능을 양정-유량곡선식으로 나타내야 한다. 펌프의 설계점에서 양정과 유량을 H_m 및 Q_m 이라 하면 이 점은 펌프의 효율이 가장 큰 점(BEP)이다.

Fig.9는 펌프의 양정-유량곡선을 나타낸다. 유량이 0일때의 수두는 일반적으로 $1.2H_m$ 이고 수두-유량곡선을 2차 포물선으로 나타내면⁷⁾

$$H = H_m(1.2 - 0.2q^2) \tag{28}$$

이 된다. 여기서 q 는 Q/Q_m 을 나타낸다. 일반적으로 펌프의 효율은

$$\eta = \eta_m(-1.167q^2 + 2.167q) \tag{29}$$

펌프의 구동에 필요한 동력은

$$P = \frac{\rho H Q}{\eta} = \frac{\rho H_m Q_m}{\eta_m} \left(\frac{1.2 - 0.2q^2}{2.167 - 1.167q} \right) \tag{30}$$

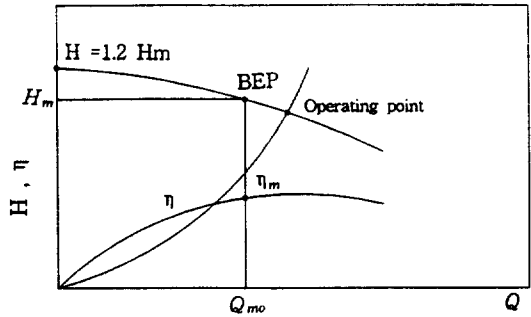


Fig.9 Head-flowrate curve of pump.

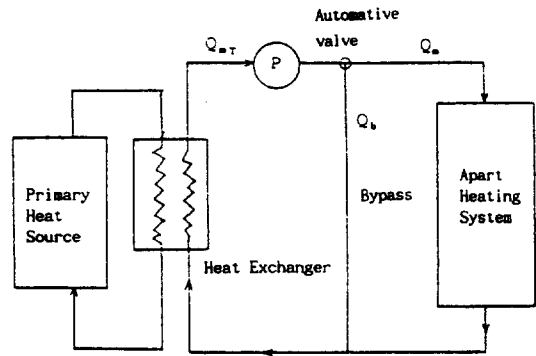


Fig.10 Flow circuit of continuous heating system.

이다. 실제 펌프가 운전되는 점은 펌프의 양정-유량곡선과 온수배관망 시스템의 부하곡선이 만나는 점이다.

운전점이 BEP에 가까울수록 펌프용량의 선정이 잘 된 것이다.

7.3 펌프의 유량제어 해석

본 연구에서 펌프에는 Fig.10과 같이 바이패스가 달려 있어 아파트 난방시스템의 부하에 따라 자동조절되어 항상 최적점에서 운전된다고 가정한다. 즉 펌프에는 항상 BEP의 유량이 흐른다고 가정하고 아파트난방에 사용되는 유량은 바이패스 된다고 가정한다.

펌프의 유량 Q_{mT} 는 아파트로 흐르는 유량 Q_m 과 바이패스 유량 Q_b 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{mT} = Q_m + Q_b \tag{31}$$

Q_{mT} 가 가능한 BEP인 Q_{mo} 에 가깝게 운전되도록 제어되어야 할 것이다. 이와 같이 펌프제어 과정이 프로그램에 반영되어야 하며 이를 정확히 시뮬레이션하는 것은 어려운 과제중의 하나이다. 본 연구에서는 먼저 각 세대에 대해서 각 구성체의 온도변화를 계산하기 위해서 부프로그램 ROOMT를 부른다. 이 프로그램에서 실내공기 온도가 일정온도 이상이면 써모스타트가 끊어지고 일정온도 이하이면 써모스타트가 켜지게 되어 있다.

써모스타트가 켜진 세대는 $ARRR(iPN)$ 이 0이고 써모스타트가 꺼진 세대는 $ARRR(iPN)$ 이 1이되어 부프로그램을 나온다. 다음에 $ARRR(iPN)$ 이 1인 집세대의 수를 그 총수를 NAR 이라 하면 먼저

$$Q_m = Q_{mo} \frac{NAR}{NART} \tag{32}$$

으로 가정한다. 여기서 $NART$ 는 총세대의 수로서 120세대이다.

아파트로의 총유입유량을 식 (32)에 의해 계산하여 대입하고 아파트 배관망해석을 통해 각 세대로 분배되는 유량을 계산하고 총손실수두 H 를 계산한다. H 가 계산되면 식 (28)에 의해서 펌프에 흐르는 유량 Q_{mT} 가 계산되면 이를 Q_{mo} 와 평균하여

$$Q_{mT} = \frac{1}{2} (Q_{mT} + Q_{mo}) \tag{33}$$

Q_{mT} 를 다시 계산한후 아파트로 공급되는 유량을 다음과 같이 수정한다.

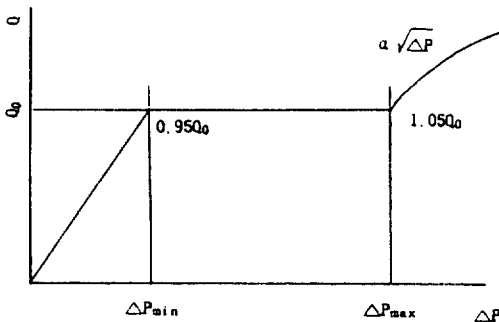


Fig.11 Flowrate-pressure difference curve of automatic flow control valve.

$$Q_m = Q_{mT} \frac{Q_{mT}}{Q_{mo}} \tag{34}$$

이와 같은 방법을 쓰면 써모스타트가 자주 작동하더라도 비교적 정확하고 빠르게 펌프의 유량을 추적할 수 있을 것이다.

7.4 자동정유량조절밸브의 특성해석

열전달이 있는 배관방 시스템의 유량을 조절하기 위해서 자동정유량조절밸브를 부착할 경우에는 시스템의 전산해석을 위해서 자동정유량밸브의 특성(유량과 압력차와의 관계)을 수식으로 나타내는 것이 중요하다. Fig.11은 자동정유량조절밸브에서 밸브양단의 압력차 ΔP 와 유량과 관계를 나타내는 일반적인 특성곡선이다.

일반적으로 밸브의 사양에는 Q_0 , ΔP_{min} 및 ΔP_{max} 가 주어져 있다. 본 연구에서는 이 값들을 이용하여 Q 와 P 와의 관계식을 아래와 같이 유도했다.⁸

1) $\Delta P < \Delta P_{min}$ 일 때

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{0.95 \Delta P_{min}}{\gamma} \frac{Q}{Q_0} \tag{35}$$

2) $P_{min} \leq P \leq P_{max}$ 일 때

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\Delta P_{max} - \Delta P_{min}}{0.1 Q_0 \gamma}$$

$$\left(Q - Q_0 \left(0.95 - \frac{0.1 \Delta P_{min}}{\Delta P_{max} - \Delta P_{min}} \right) \right) \tag{36}$$

3) $P > P_{max}$ 일 때

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\Delta P_{max}}{\gamma} \left(\frac{Q}{1.05 Q_0} \right)^2 \tag{37}$$

8. 해석결과 및 고찰

Fig.12~Fig.13은 외기온도 0°C인 경우 연속난방시 열성능해석결과로서 복사열전달을 고려하지 않았을 때와 고려할 때 새벽 0시부터 익일 0시까지

24시간동안 시간 증가에 따른 아파트 한동 120세대의 전체온수유량과 써모스타트가 열린 갯수의 변화를 나타낸 것이다. 복사를 고려하였을 경우와 고려하지 않은 두 경우 모두 앞절에서 설명한 바와 같이 아파트 난방시스템의 온수공급펌프에 바이패스라인을 설치하고 유량을 펌프가 최적인진상태에서 작동하게 하여 유량을 자동제어하기 때문에 써모스타트가 열린 갯수에 따른 유량의 변화가 서로 비례하여 써모스타트가 자주 작동하더라도 비교적 정확하고 빨리 펌프의 유량을 추적할 수 있음을

알 수 있다. 또한 복사열전달을 고려하였을 경우가 써모스타트의 열린 갯수가 상대적으로 증가함을 알 수 있는데 그 이유는 바닥복사에 의해서 외기와 접해 있는 벽체온도 상승으로 열손실이 커져서 실내온도를 일정하게 유지시키기 위해서 공급되어야 할 총에너지량이 증가되기 때문으로 판단된다.

Fig.14~Fig.16은 외기온도 10°C, 복사열전달이 있을 때 써모스타트의 비례대(Proportional Band)를 기준치 1°C에서 0.5°C와 0.1°C로 변화시키면서 온수유량제어를 할 경우 아파트 1동 전체를 열성능

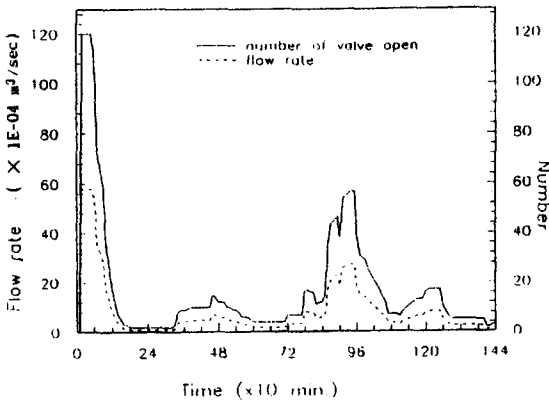


Fig.12 Flow rate and number of valve open with respect to time(AMBIENT TEMPERATURE = 0°C)

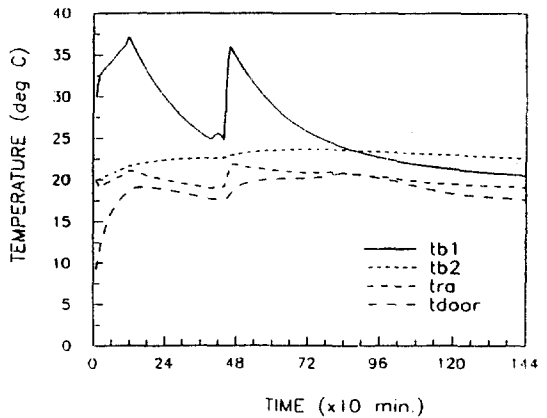


Fig.14 Comparison of temperatures on 7th floor (AMBIENT TEMPERATURE = 10°C with consideration of Radiation, PROPORTIONAL BAND = 1.0°C)

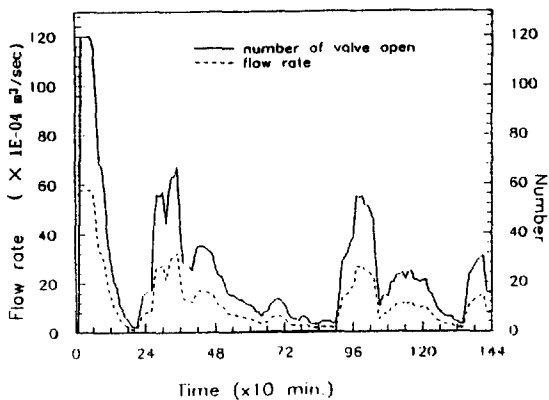


Fig.13 Flow rate and number of valve open with respect to time(AMBIENT TEMPERATURE = 0°C with consideration of Radiation)

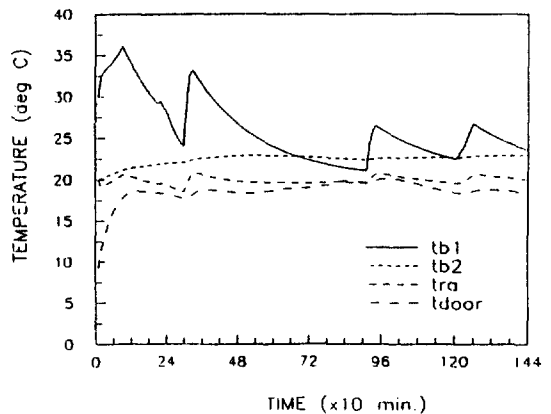


Fig.15 Comparison of temperatures on 7th floor (AMBIENT TEMPERATURE = 10°C with consideration of Radiation, PROPORTIONAL BAND = 0.5°C)

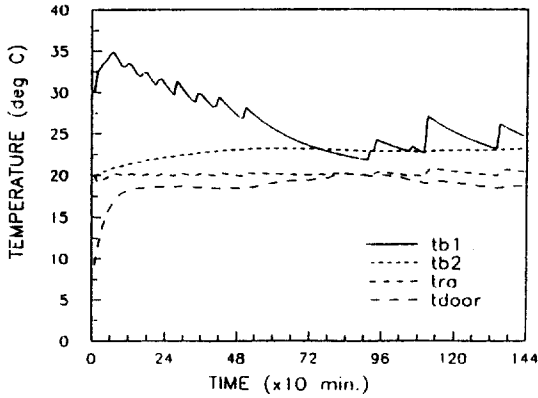


Fig.16 Comparison of temperatures on 7th floor (AMBIENT TEMPERATURE=10°C: with consideration of Radiation, PROPORTIONAL BAND=0.1°C)

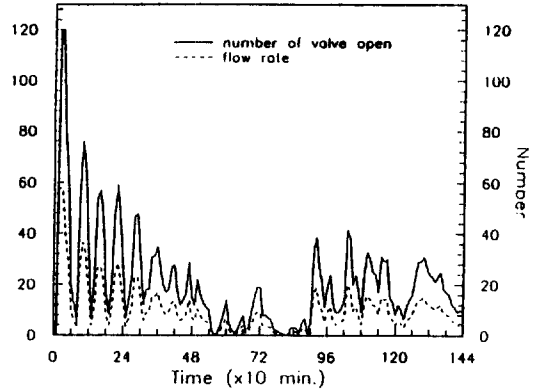


Fig.18 Flow rate and number of valve open with respect to time (AMBIENT TEMPERATURE=10°C with consideration of RADIATION, PROPORTIONAL BAND=0.1°C)

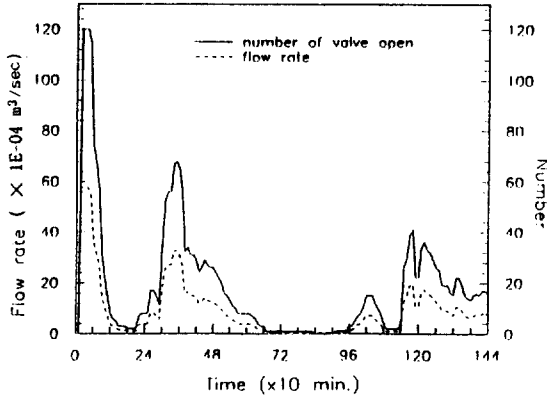


Fig.17 Flow rate and number of valve open with respect to time (AMBIENT TEMPERATURE=10°C with consideration of RADIATION, PROPORTIONAL BAND=1.0°C)

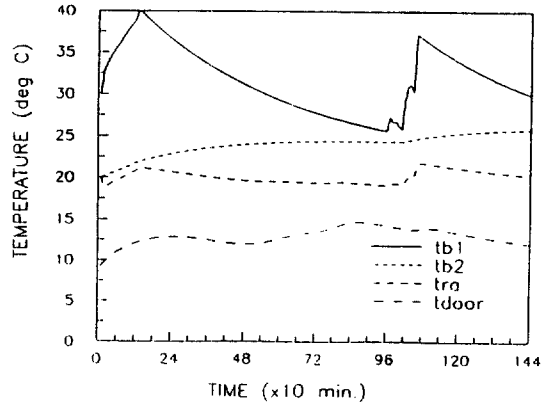


Fig.19 Comparison of temperatures on 7th floor (AMBIENT TEMPERATURE=0°C).

해석한 결과로써 1열 7층 1세대를 기준으로 세대의 방바닥 온도(T_{b1}), 천정온도(T_{t2}), 실내공기온도(T_m), 실내문온도(T_{door})의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. 써모스타트의 감도가 작아질수록 방바닥의 온도변화 진폭은 최대 12°C에서 2~3°C로 감소하고 실내공기 온도는 설정된 제어치 20°C에 거의 접근함을 알 수 있어 감도가 작아질수록 온수열공급제어 특성이 우수함을 알 수 있고 거주자의 실내 열환경 수준이 향상되리라 예상된다. 그러나 이때 방바닥온도의 최대진폭은 4~5°C 정도로서 실내공기온도 변화에 비해서 상당히 큰 값을 알 수 있으므로 연속난방시 방바닥온도를 표준온도로

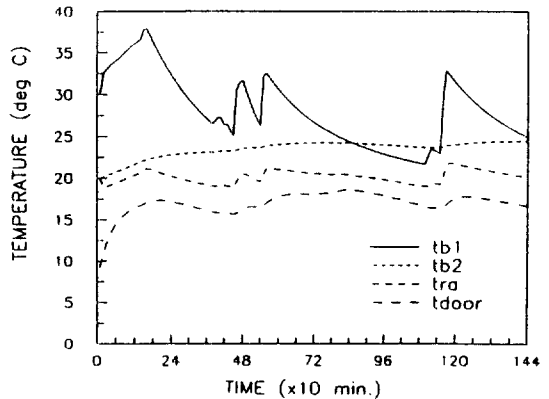


Fig.20 Comparison of temperatures on 7th floor ((AMBIENT TEMPERATURE=0°C with consideration of RADIATION)).

하여 열공급 제어를 하는 것이 더욱더 바람직할 것으로 생각되며 이에 대한 추가적인 연구가 요망된다.

Fig.17~Fig.18은 외기온도 10°C, 복사열전달이 있을 때 써모스타트의 비례대(Proportional Band)가 기준치 1°C일 경우와 0.1°C인 경우에서 온수유량 제어를 할 경우 아파트 1동 전체를 흐르는 온수 유량과 열린 써모스타트의 개수를 난방시간의 경과에 따라 도시한 것이다. 써모스타트의 감도가 작아질수록 유량변동 및 써모스타트 개폐의 주기가 짧아지고 감도가 0.1°C일 때 균일한 특정치에 거의 도달함을 알 수 있어 감도가 작아질수록 온수열 공급제어 특성이 우수함을 알 수 있고 거주자의 실내 열환경 수준이 향상되리라 예상된다.

Fig.19~Fig.20는 외기온도가 0°C일때 복사열전달을 고려하지 않았을 때와 고려할 때 기준으로 잡은 7층 한세대 내의 방바닥온도(T_{b1}), 천정온도(T_{c2}), 실내온도(T_{m}), 실내문온도(T_{door})의 시간의 경과에 따른 온도변화를 도시한 것으로 복사열전달을 고려할 경우 바닥온도 변화의 주기가 다소 짧아지며 그 진폭이 11°C에서 9°C정도로 감소하여 실내패 감도 측면에서 실내열환경이 다소 향상됨을 알 수 있다.

Fig.21~Fig.22는 앞의 Fig.19~Fig.20에서와 같은 조건에서 3질의 Table 2에서 지정된 외기와 접하는 창온도(T_{win1})와 베란다와 접하는 창온도(T_{win2})와 복도와 접하는 창온도(T_{win3}) 및 베란다와 외기 사이의 창온도(T_{win4})에 대하여 새벽 0시부터 익일 0시까지 24시간 동안의 변화를 도시하였다. 여기서 복사열전달을 고려했을 때 외기와 접하는 창온도(T_{win1})가 고려하지 않을 때의 창온도에 비해서 3°C정도가 높은 것을 알 수 있다. 베란다에 접하는 창온도(T_{win2})와 베란다와 외기사이의 창온도(T_{win4})가 복사열전달이 있는 경우 태양일사량에 의한 복사에 의해서 오전 8시부터 오후 3시까지 최대 5~6°C정도 증가함을 보여준다.

Fig.23~Fig.24는 대기온도 10°C, 세대내에 자동정유량조절밸브를 부착한 경우 복사열전달을 고려하지 않았을 때와 하였을 때에 대해 열공급제어 해석을 수행한 경우 Table 2에서 지정된 외기와 접한 벽온도(T_{w1})와 베란다와 접한 벽온도(T_{w2}), 복도와 접한 벽온도(T_{w3}) 및 베란다와 외기 사이의

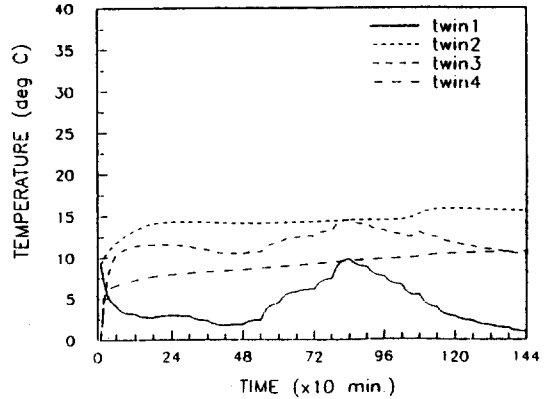


Fig.21 Comparison of temperatures on 7th floor (AMBIENT TEMPERATURE=0°C).

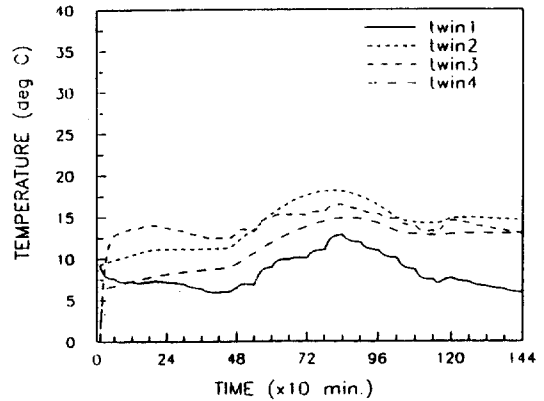


Fig.22 Comparison of temperatures on 7th floor (AMBIENT TEMPERATURE=0°C with consideration of RADIATION).

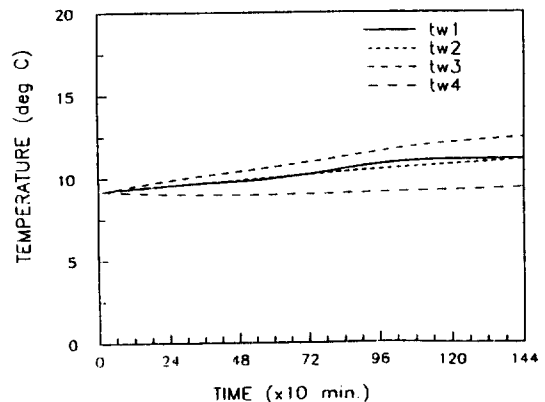


Fig.23 Comparison of temperatures on 7th floor (AMBIENT TEMPERATURE=10°C with CONSTANT FLOWRATE BALANCING VALVE).

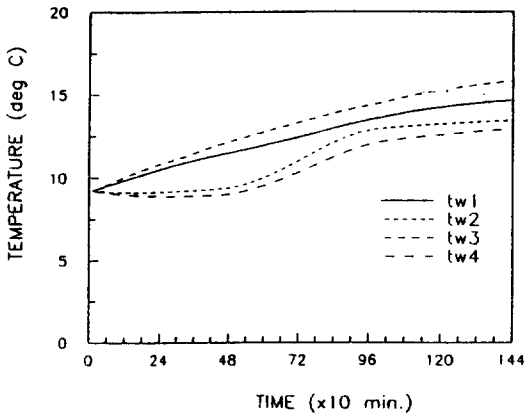


Fig.24 Comparison of temperatures on 7th floor (AMBIENT TEMPERATURE=10°C with RADIATION, CONSTANT FLOWRATE BALANCING VALVE).

벽온도(T_{w4})의 변화를 시간의 경과에 따라 도시한 것이다. 앞서 설명한 창문의 경우와 마찬가지로 베란다와 접한 벽온도(T_{w2})와 베란다와 외기 사이의 벽온도(T_{w4})가 오전 8시에서 오후 4시에 걸쳐 6°C정도 완만하게 상승함을 보여주는데 그 이유는 본 해석에서 고려된 태양일사량이 구조체에 흡수되어 온도가 상승되기 때문으로 판단된다.

Fig.25는 외기온도 변화에 따른 방바닥 표면에서 방열되는 열량 중 대류열전달율과, 복사열전달율의 변화를 나탄낸다. 외기온도가 상승함에 따라 두 열전달율이 모두 감소한다. 그런데 복사열전달율의 경우가 더 급속히 감소 된다. 외기온도가 10°C에서는 대류열전달율과 복사열전달율의 크기가 거의 같았으나 외기온도가 -10°C로 감소하면 복사열전달율이 더 커진다. 외기온도가 낮을수록 복사열전달율이 차지하는 비율이 커지는 것은 외기온도가 낮아지면 방바닥에서 방출되는 열량이 많아져 방바닥 표면온도가 높아지고 외기온도가 낮아질 때 벽체온도는 상대적으로 낮으므로 복사열전달이 활발하여져서 복사열전달율의 비율이 증가한 것으로 판단된다.

외기온도가 증가할수록 복사열전달과 대류열전달이 거의 같은 수준을 유지하는 것은 외기온도가 증가할수록 외기온도가 낮을 때에 비해서 방바닥 표면온도가 22-25°C로 상대적으로 낮게 유지되었기 때문으로 판단된다. 외기온도의 상승에 따라

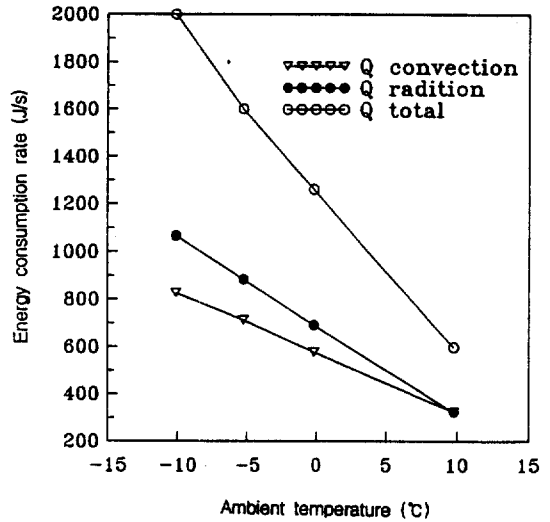


Fig.25 The variation of convection and radiation heat transfer rate with respect to ambient temperature.

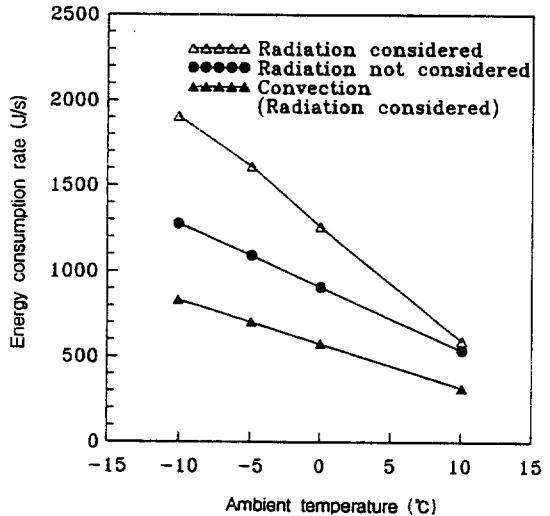


Fig.26 The variation of energy consumption rate with and without consideration of radiation heat transfer.

총열량투입율에 대한 복사열전달율의 비율이 감소하는 현상은 아파트 난방에서 실내간벽이 열전달현상에 지대한 영향을 미치기 때문으로 생각된다. 아파트 난방에서 간벽의 표면적은 다른 전열면적보다 매우 크다. 따라서 일단 방바닥에서 복사열이 방출되면 이 중 대부분이 간벽에 흡수되었다가 서서히 대류에 의해서 실내로 방출된다. 이러한

간벽의 복사열 축열효과는 에너지의 큰 절약효과를 나타내고 또 간벽 표면온도가 외기와 접하는 벽체 표면온도보다 높아서 방바닥으로 부터의 복사열 전달을 감축시키는 역할을 하기도 한다. 즉 간벽의 주요효과는 (1) 방바닥의 복사열전달율을 감소시키는 효과, (2) 복사열전달된 열이 벽의 전도를 통해 직접 외기로 전달되지 않고 다시 실내공기로 대류열전달시키는 효과를 생각할 수 있고 이는 모두 에너지절약에 큰 기여를 한다.

Fig.26은 복사열전달을 고려할 때와 고려하지 않을 때 총열량투입율의 외기온도에 따른 변화를 나타낸다. ●표시는 실내 열복사를 고려하지 않았을 경우의 총열량투입율이며 △는 실내 열복사를 고려했을 때의 총열량투입율을 나타낸다. ●와 △표를 비교하면 실내 열복사 열전달을 고려하지 않으면 총열투입율이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 실내의 복사 열전달은 아파트 실내온도를 일정온도로 유지하는데 소요되는 총열투입량을 크게 증가시킨다고 할 수 있다. 그러나 복사열전달을 고려하지 않게 되면 방바닥과 마주 보는 벽면온도가 내려가서 실내공기에서 벽체를 통한 대류열전달을 증가시키게 된다. 따라서 복사열전달이 난방에 기

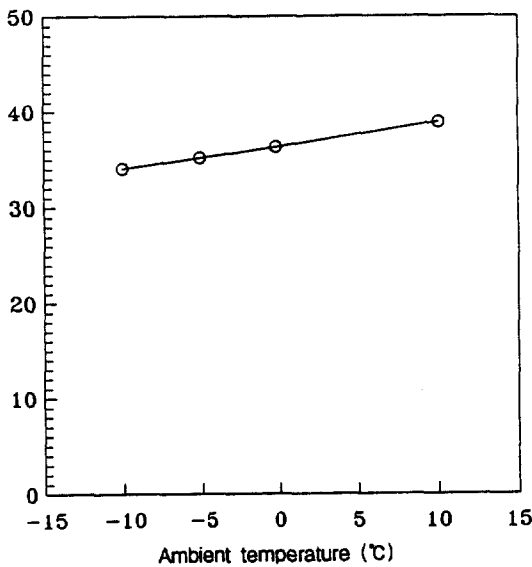


Fig.27 The ratio of radiation heat transfer contributed to heating with respect to ambient temperature.

여하는 부분은 위의 대류열전달을 감소시키는 효과로 나타난다고 할 수 있으나 총 열투입율은 Fig.26에서와 같이 실내복사를 고려한 경우 훨씬 크게 된다. ▲표시는 실내복사열 고려시 대류열전달 성분에 의한 열투입율을 나타내는 것이다. 방바닥에서 실내공기 혹은 벽체로 열전달되는 총 열량중 복사열전달이 실제 난방에 기여한 비율을 계산하여 도시하면 Fig.27과 같다. 실내난방에 기여한 복사열전달율은 외기온도가 상승하면 약간 증가하는 경향을 가진다.

9. 결 론

이상과 같이 아파트 한동에 대해서 실내복사열 전달을 고려하고 써모스타트 및 자동유량조절밸브로 제어되는 연속난방시스템에 대한 열성능 시뮬레이션을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 복사열전달을 고려하지 않았을 때에 비해서 고려한 경우가 바닥복사에 의한 영향으로 외기와 접해 있는 벽체온도의 상승으로 열손실이 커져서 써모스타트가 on-off되는 횟수는 증가되며 유량의 변화도 커짐을 알 수 있다.

2) 써모스타트 감도 변화에 따른 방바닥온도와 실내온도 변화를 보면 감도가 작아질수록 방바닥온도는 최대진폭이 12°C에서 5°C로 감소하고, 실내온도는 설정된 제어치 20°C에 거의 접근하고 있어 감도가 작아질수록 열공급 제어특성이 우수해짐을 알 수 있다.

3) 외기온도가 낮아질수록 방바닥에서 방출되는 열량이 증가하고 방바닥 표면온도가 높아져 복사열전달량이 증가하며 총열량 소비량도 증가함을 알 수 있으며 외기온도 변화에 따른 복사열전달이 난방에 기여한 비율은 대개 34~39% 정도임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구소의 연구비 지원으로 수행된 것이며 지원에 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 최영돈, 윤종호, 홍진관, 이남호, 강대호, 1993, “복사열전달율을 고려한 모형 온수온돌 주택 열성능 시뮬레이션”, 공기조화 냉동공학회 논문집 제5권 4호, p.295-305.
2. J.P Holman, “Heat Transfer”, 6th ed., Mcgraw-Hill Book Company, Inc, NewYork.
3. ASHRAE Handbook, 1989, Fundamentals Ch.27
4. W.M. Rohsenow, J. Hartnett, E. Ganic, 1985, “Handbook, of Heat Transfer Fundamentals”, Mcgraw-Hill.
5. F. Incropera, D. Dewitt, 1985, “Introduction to Heat Transfer”, John Wiley and Sons.
6. D.J. Wood, C.O.A Charles, 1972, “Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory Civil Engineers, p.1157-1170.
7. Karassik, L.J., W.C Krutzch, J.P. Messina and W.H. Fraser, 1986, “Pump Handbook”, 2nd ed., Mcgraw-hill Book Company, Inc, New York.
8. 민만기 외 다수, 1989, “공동주택 온수배관 시스템의 적정난방 열공급 기술개발, 에너지 관리공단 89 연-4.
9. 홍진관, 최영돈, 강대호, 윤종호, 민만기, 1991, “써모스타트에 의한 고층아파트 열공급제어 시뮬레이션” 공기조화 냉동공학회 창립20주년 기념 학술대회, p.304-310.
10. 오정무 등, 1980, “아파트 난방시스템의 효율개선에 관한 연구”, 한국동력자원연구소 연구보고서, KE-90-31.