# 아트리움 공간의 수직공기온도분포 계산을 위한 수학모형의 작성

박 종 수†, 안 병 욱*
인하공업전문대학 건축과, *충청대학 건축학부

# Mathematical Modeling for Calculating the Vertical Air Temperature Distribution in an Atrium Space

Jong-Soo Park†, Byung-Wook Ahn*
*Department of Architecture, Inha Technical College, Incheon 402-752, Korea*
**Department of Architectural Engineering, Chung Cheong College, Chungwon 363-792, Korea*

*(Received April 8, 2003; revision received April 29, 2003)*

**ABSTRACT**: This study aims to propose a simplified mathematical model for calculating vertical air temperature distribution in a four-sided atrium.

In the first stage of the mathematical modeling, the computer model combined zonal model and solar radiation model using Monte Carlo method and Ray tracing technique went through a computer simulation with architectural variables applied to a four-sided atrium in summer. In the next stage, Curve Expert, a computer program that gets the most suitable solution according to the least squares method, is used to analyze the results of the computer simulation and to derive the mathematical model.

The accuracy of the mathematical model was evaluated through a comparison of calculation results from a mathematical model and computer simulation. In this validation step using the least square method, the R2 value of the Zones 1, 2 and 3 showed higher than 0.945. Zone 4 has an R2 value of 0.911, lower than the previous three zones. However the relative error was below 0.5%, which is considered very small.

**Key words**: Atrium(아트리움), Vertical air temperature distribution(수직공기온도분포), Mathematical model(수학모형), Computer simulation(컴퓨터시뮬레이션)

## 기 호 설 명

$A$ : 호름면적 [$m^2$]
$A_B$ : 존의 수평 바닥면적 [$m^2$]
$ACH$ : 환기횟수 [회/h]
$C_B$ : 존간의 열이동계수 [$W/m^2 \cdot K$]
$C_d$ : 틈새의 유출계수
$C_{pc}$ : 풍압계수
$cpr$ : 공기의 용적비열 [$Wh/m^2 \cdot K$]
$g$ : 중력가속도 [$m/s^2$]
$h$ : 관찰점 높이 [m]
$H$ : 높이 [m]
$h_{NPL}$ : 중립대 높이 [m]
$HT$ : 열관류에 의한 영향도

† Corresponding author
Tel.: +82-32-870-2256; fax: +82-32-870-2512
*E-mail address*: jspark@inhatc.ac.kr

$IR$ : 자연환기량에 의한 영향도
$K$ : 열관류율 [W/m$^2$ · K]
$L$ : 길이 [m]
$M$ : 열용량 [Wh/K]
$NT_{(zone\ n/zone\ 4)}$ : 존 4에 대한 존 1의 공기온도비
$P_w$ : 바람에 의한 압력 [Pa]
$\Delta P$ : 틈새 사이의 압력차 [Pa]
$\Delta P_s$ : 굴뚝효과에 의한 압력 차이 [Pa]
$q_c$ : 대류열량 [W]
$q_{CD}$ : 관류열량 [W]
$q_o$ : 외표면 전열량 [W]
$q_r$ : 복사열량 [W]
$Qin_{jk}$ : 합성된 하강기류(벽면류)중 존 $j$에 유입되는 풍량 [m$^3$/h]
$Qout_{jk}$ : 벽면 $i$에서 발생한 하강기류(벽면류)의 유출풍량 [m$^3$/h]
$Qr_j$ : 합성된 하강기류의 존간의 경계면을 통한 이동풍량 [m$^3$/h]
$Qventil_{jk}$ : 침기에 의한 자연환기량 [m$^3$/h]
$SF$ : Shape Factor
$Sol_{in}$ : 내표면 태양복사열량 [W]
$ST$ : 태양복사에 의한 영향도
$t$ : 시간 [h]
$T$ : 온도 [K]
$Th_n$ : 높이에 따른 온도기울기
$Tm_{jk}$ : 존에 유입되는 공기 평균온도 [K]
$Tout$ : 유입되는 외기온도 [K]
$T^P$ : 현재온도 [K]
$T^{P+1}$ : 미래온도 [K]
$Tr$ : 태양복사투과율 [%]
$TV$ : 통합변수
$T_{zone\ n}$ : 존 $n$의 공기온도
$V$ : 풍속 [m/s]
$\Delta V$ : 체적요소 [m$^3$]
$W$ : 폭 [m]
$WI$ : Well Index

## 그리스 문자

$\rho$ : 공기밀도 [kg/m$^3$]

## 하첨자

$i$ : 구조체 내부 절점
$in$ : 실내
$j, n$ : 수직 존 번호(1~5)
$k$ : 바닥, 천장을 포함하는 벽면 번호

## 1. 서 론

아트리움을 도입한 건물은 아트리움의 공간적 특성에 따른 문화적, 경제적, 기능적 이익들과 함께 시각적인 감동과 신선함을 제공한다. 이러한 아트리움이 갖추어야 할 가장 기본적인 기능 중의 하나는 아트리움 공간 및 인접한 모건물의 열환경을 조절함으로써 에너지를 절약하고 쾌적한 환경을 조성하는 것이다.

아트리움은 열환경적인 측면에서 바닥면적에 비해 천장고가 높기 때문에 수직적으로 공기온도의 편차가 크고 공간의 규모는 크지만 거주공간이 대부분 바닥 근처로 한정되어 있다. 또한 하계에는 태양복사의 유입 등으로 아트리움 공간의 상층부가 과열되어 인접한 모건물의 열부하로 작용하는 특징을 갖고 있으며, 중간기에는 개구부 및 침기의 정도에 따라 아트리움 공간의 열환경이 변화되기 때문에 디자인적인 수법에 의한 적절한 자연환기시스템의 채택이 요구되어진다.

이러한 이유로 설계자들이 아트리움을 갖는 건물의 쾌적한 실내 열환경 조절과 에너지 절약적인 설계를 할 수 있도록 도움을 주기 위해서는 아트리움 공간의 수직적인 공기온도분포를 예측할 수 있는 분석도구가 필요하다.

아트리움 공간의 수직공기온도분포를 예측하기 위한 분석도구들은 크게 초기평가와 설계발전을 위한 단순모델과 설계의 타당성과 문제해결을 위한 상세모델로 구분되어 연구가 진행되어져 왔다. 단순모델은 구조체의 열전달과 존(zone) 모델을 연성시킨 비정상 계산모델[4]이 기초가 되어 연구의 발전이 이루어져 왔다. 국내의 경우는 Togari et al.의 연구[4]에서 발표된 존 모델에 자연환기모델을 접목한 수직공기온도분포 해석모델[12]이 제안되었고, 이 모델은 몬테카를로법과 광선추적기법을 이용하는 태양복사 해석모델이 접목되어 태양복사가 아트리움 공간 및 모건물에 미치는 열적 영향을 보다 상세히 예측할 수 있는 열환경

해석모델[9]로 발전되어져 왔다.

상세모델은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)과 축소모형 실험을 이용하는 모델로서 공간의 온도 및 기류분포 등을 상세히 예측하는 것이 필요할 때 유용한 것으로 평가되고 있으나, 긴 계산시간 및 막대한 비용소요 등의 문제점을 안고 있다. 상세모델 중 전산유체역학은 아트리움과 같은 대공간의 특성을 반영하기 위해 난류식에서 부력의 영향을 고려하는 연구[1] 등을 근간으로 하여 대류-복사연성 해석방법을 적용하여 기류 및 온열감을 상세히 예측하는 연구[2] 등이 진행되어져 왔으며, 전산유체역학의 효율적인 경계조건 설정을 위해 에너지 시뮬레이션 프로그램과 연계하여 실내 열환경을 평가하는 연구[3]들도 최근 많이 진행되고 있다.

그러나 일반 설계자들이 위와같은 해석적 방법들을 적용한 모델들을 사용하여 아트리움 공간의 수직적인 공기온도분포를 예측하고, 그 결과를 설계에 반영하는 데에는 많은 전문지식과 시간을 필요로 한다.

따라서 본 연구에서는 아트리움의 열환경을 예측하기 위해 존 모델과 몬테카를로법 및 광선추적기법을 이용하는 태양복사모델을 접목하여 개발된 단순모델을 사용하여 하계조건의 중정형 아트리움에서 729가지의 건축적 조건을 중심으로 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하고, 시뮬레이션 결과인 아트리움 공간의 수직공기온도분포를 일반 설계자들이 손쉽게 산출할 수 있는 수학 모형으로 작성하여 중정형 아트리움의 열환경 설계시 평가도구로서 이용될 수 있도록 하였다.

## 2. 컴퓨터 모델 이론

컴퓨터 모델은 아트리움 공간의 수직공기온도분포를 예측하기 위해 자연환기를 포함하는 존 모델과 아트리움 공간 내의 정량적인 태양 단파복사열량분포를 예측할 수 있는 태양복사모델[9]이 접목되어 작성되었다.

### 2.1 태양복사모델

아트리움 공간으로 유입된 태양 단파복사열량의 정확한 분포를 예측하기 위해서는 확률론적인 몬테카를로법[8]과 광자가 운동하는 방향과 크기를 백터화시키고 이것의 경로를 추적하여 복잡한 기하학적 형태를 갖는 창호를 통해 내부로 유입되는 태양복사열량과 내부에서의 상호반사에 의한 계산대상면의 태양복사열량을 정확하게 예측할 수 있는 광선추적기법을 적용하였다.

표면에서 반사되는 태양광선의 방향은 몬테카를로법에 의해서 발생되는 광자에 의해 결정된다. 몬테카를로법에서 광자를 발생하기 위해서는 선형 합동적 방법(Linear Congruential Method)[7]을 사용하였다. 선형 합동적 방법으로 균일한 확률분포를 갖는 광자 발생기를 만들고, 원하는 확률분포를 갖도록 변환시키기 위해서는 역변환방법(Inverse Transformation Method)을 사용하였다.

### 2.2 자연환기모델

자연환기에 의한 개구부에서의 환기량은 식(1)과 같다.

$$Qvent_{jk} = C_d \cdot A_{jk} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad (1)$$

여기서 개구부나 틈새 사이의 압력차는 환기의 추진력이 된다. 압력차는 바람과 굴뚝효과(Stack Effect)에 의해 발생한다.

풍압

$$P_{w_{jk}} = 0.5 \cdot \rho \cdot C_{pc_{jk}} \cdot V^2 \qquad (2)$$

굴뚝효과에 의한 압력차

$$\Delta P_s = \rho_i \cdot g \cdot (h - h_{NPL}) \cdot \frac{(T_{in} - Tout)}{Tout} \qquad (3)$$

이와 같이 각 개구부의 위치와 면적, 공간 내의 온도 및 풍속 및 풍향을 알면 각 개구부에서의 공기의 유입 및 유출량을 구할 수 있다.

### 2.3 존 모델

아트리움 공간의 수직공기온도를 계산하기 위한 경계조건으로 이용되는 실내측 표면온도를 계산하기 위한 구조체 내표면 열평형방정식은 식

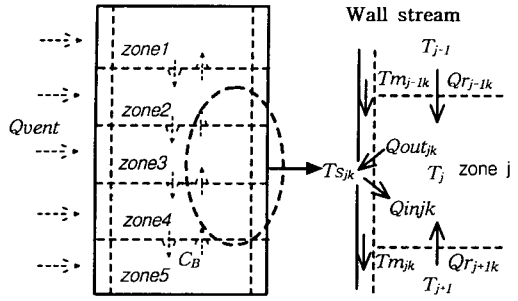



Fig. 1 Schematic of the air movement models.

(4)와 같다.

$$M_{structure\,1jk} \cdot \frac{dT_{1jk}}{dt} = q_{c\,1jk} + q_{r\,1jk} + Sol_{in\,1jk} + q_{CD\,1jk} \quad (4)$$

구조체 내부 열평형방정식은 식(5)와 같다.

$$M_{structure\,ijk} \cdot \frac{dT_{ijk}}{dt} = \rho \cdot C \cdot \Delta V_{ijk} \cdot \frac{T_{ijk}^{P+1} - T_{ijk}^{P}}{\Delta t} \quad (5)$$

구조체 외표면 열평형방정식은 식(6)과 같다.

$$M_{structure\,ijk} \cdot \frac{dT_{ijk}}{dt} = q_{o\,ijk} - q_{CD\,ijk} \quad (6)$$

식(4)~(6)의 방정식들의 이산화를 위해서는 유한차분법을 이용하였다. 아트리움 공간의 수직공기온도분포 해석이론은 Togari et al.의 연구[4]에서 제안된 존 모델의 연구결과를 기초로 하였다. Fig. 1은 존에서의 공기이동모델의 개념을 나타낸 것이다.

존 간의 풍량평형식은 식(7)과 같다.

$$\sum_{k=1}^{NK} (Qin_{jk} - Qout_{jk} + Qvent_{jk}) + Qr_{j+1} - Qr_j = 0 \quad (7)$$

존 간의 열 평형식은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} M_j \frac{dT_j}{dt} = & \sum_{k=1}^{NK} cpr \cdot Qin_{jk} \cdot (Tm_{jk} - T_j) \\ & + cpr \cdot Qr_{j+1} \cdot (T_{j+1} - T_j), \; [Qr_{j+1} > 0] \\ & + cpr \cdot Qr_j \cdot (T_{j-1} - T_j), \; [Qr_j > 0] \\ & + C_B \cdot A_B \cdot \{(T_{j+1} - T_j) + (T_{j-1} - T_j)\} \\ & + cpr \cdot Qvent_{jk} \cdot (Tout - T_j), \; [Qvent_{jk} > 0] \end{aligned} \quad (8)$$

## 3. 컴퓨터 시뮬레이션

중정형 아트리움 공간의 높이에 따른 존별 공기온도값을 평가대상 인자로 설정하고, 공간형태 및 천창의 물성, 자연환기에 의한 환기횟수를 평가영향 인자로 하여, 하계조건의 서울지역을 대상으로 Fig. 2와 같이 총 729가지의 경우에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 공간형태와 관련되는 변수는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 길이(L), 폭(W), 높이(H)로 설정하였다. 길이(L), 폭(W), 높이(H)의 값들은 국내·외 중정형 아트리움 건물의 건축사례[10] 및 연구[5]를 조사하고 바닥면적 및 공간체적 등을 고려하여 최소, 최대치를 결정하였다. 천창의 형태는 시뮬레이션의 경우의 수 및 데이터의 일반성을 갖기 위해 천창의 형태를 평면적인 형태로 고정하였다. 외부기상조건이 천창을 통해 중정형 아트리움의 수직공기온도분포에 영향을 미치는 정도는 크게 천창의 태

| region | | × | season | | × | configuration | | | × | skylight | | | × | | | = |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | L [m] | W [m] | H [m] | | Solar radiation transmittance [%] | Thermal transmittance [W/m²K] | Natural ventilation rate [ACH] | | | | |
| seoul | | | summer | | | 10 | 10 | 10 | | 10 | 1.5 | 0.5 | | | | |
| | | | | | | 15 | 15 | 15 | | 40 | 2.5 | 3.0 | | | | |
| | | | | | | 20 | 20 | 20 | | 70 | 3.5 | 6.0 | | | | |
| [1] | | × | [1] | | × | [27] | | | × | [9] | | | × | [3] | | = [729] |

Fig. 2 Matrix of simulation cases.

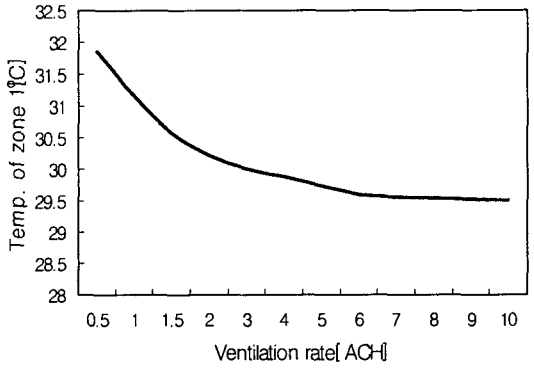



Fig. 3 Preliminary simulation to determine the ventilation rate.

양복사투과율과 열관류율에 의해 지배를 받는다. 본 연구에서는 시뮬레이션에 필요한 천창의 태양복사투과율과 열관류율을 결정하기 위해 유리의 종류별 열적물성[11]을 조사하였으며, 그 값을 최소치와 최대치 범위 내에서 각각 3단계로 구분하였다.

본 연구에서는 자연환기에 따른 침기량의 범위를 설정하고자 예비 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 평가대상이 되는 아트리움의 평균적인 공간체적과 천창물성값을 갖는 경우에 대해 대표적으로 실시되었으며, 이때 자연환기에 의한 침기량은 0.5~10.0 ACH 범위에 대해 12가지 경우를 검토를 하였다. Fig. 3은 자연환기에 의한 침기량 범위를 결정하기 위한 예비 시뮬레이션 결과의 일부이다. 침기량은 0.5 ACH에서 3.0 ACH까지는 아트리움 공간 상부에서 급격한 온도하강을 보였으나, 3.0 ACH가 넘어서면서 완만히 하강하다 6.0 ACH 부근 이후부터는 온도하강이 거의 이루어지지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 시뮬레이션에서 평가영향 인자로서 적용되는 자연환기에 의한 침기량은 0.5~6.0 ACH의 범위 내에서, 0.5 ACH, 3.0 ACH, 6.0 ACH인 3가지 경우에 대해 검토를 실시하였다. 단, 침기량은 0.5 ACH를 기준하여 건물의 전체 표면적에 균등하게 침기면적을 부여하고, 0.5 ACH 이상의 침기량을 갖는 경우에 대해서는 천창의 개구에 의해 침기량이 증가하는 것으로 가정하였다.

컴퓨터 시뮬레이션은 하계조건의 서울지역의 중정형 아트리움을 대상건물로 하였으며, 서울지방의 하계 기상데이터는 Table 1과 같은 냉방설계를 위한 최대부하계산자료를 이용하였다. 아트리움의 방위는 길이(L) 방향이 남북향에 면하는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션 대상이 되는 아트리움 공간은 거주역 냉방이 이루어지고 있다고 가정하여, 거주역 높이에 해당되는 3.0 m 높이까지의 존은 냉방설계온도인 26℃로 고정하였으며, 인근실의 온도 역시 공조시간대에는 냉방설계온도인 26℃, 비공조시간대에는 28℃로 설정하였다.

Table 1 Weather data and time schedule for computer simulation

| Time [h] | Outdoor air temp. [℃] | Direct solar radiation [W/m$^2$] | Diffuse solar radiation [W/m$^2$] | Wind velocity [m/s] | Air temp. of adjoined room [℃] |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 25.9 | 0 | 0 | 2.33 | 28.0 |
| 1 | 25.7 | 0 | 0 | 2.11 | 28.0 |
| 2 | 25.4 | 0 | 0 | 1.57 | 28.0 |
| 3 | 25.1 | 0 | 0 | 1.37 | 28.0 |
| 4 | 24.8 | 0 | 0 | 1.16 | 28.0 |
| 5 | 24.6 | 0 | 0 | 1.39 | 28.0 |
| 6 | 24.6 | 53 | 40 | 1.21 | 28.0 |
| 7 | 24.9 | 399 | 89 | 1.74 | 27.5 |
| 8 | 25.6 | 578 | 115 | 1.59 | 27.0 |
| 9 | 26.6 | 672 | 132 | 2.19 | 26.0 |
| 10 | 27.6 | 726 | 144 | 3.19 | 26.0 |
| 11 | 28.7 | 757 | 151 | 3.30 | 26.0 |
| 12 | 29.7 | 771 | 155 | 4.17 | 26.0 |
| 13 | 30.4 | 773 | 155 | 4.43 | 26.0 |
| 14 | 31.0 | 762 | 153 | 4.71 | 26.0 |
| 15 | 31.1 | 736 | 146 | 3.93 | 26.0 |
| 16 | 31.2 | 690 | 136 | 4.34 | 26.0 |
| 17 | 30.7 | 609 | 120 | 4.20 | 26.0 |
| 18 | 30.0 | 462 | 98 | 3.59 | 26.0 |
| 19 | 28.9 | 161 | 58 | 3.23 | 28.0 |
| 20 | 27.9 | 0 | 0 | 2.19 | 28.0 |
| 21 | 27.0 | 0 | 0 | 1.89 | 28.0 |
| 22 | 26.3 | 0 | 0 | 1.33 | 28.0 |
| 23 | 26.0 | 0 | 0 | 1.11 | 28.0 |

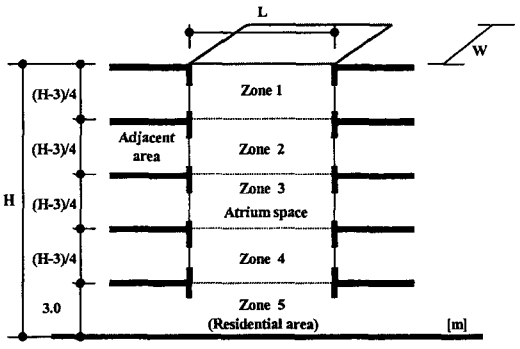



Fig. 4 Space configuration of simulated atrium.

Fig. 4에 컴퓨터 시뮬레이션의 평가대상이 되는 중정형 아트리움의 공간구성도를 표현하였다. 아트리움 공간에서 외기측에 면한 부분은 천장면으로 천창으로 구성되어 있으며, 인접공간에 면하는 내벽은 각 층별로 50%가 유리창으로 구성되어 있는 것으로 가정하였다. 천창의 경우는 전체 면적의 90%가 유리로 구성된다. 공간은 5개의 수직적인 존으로 분할되며, 최하부 존은 거주역 냉방을 실시하는 것으로 가정하여 시뮬레이션 전체 경우에 대해 높이를 3.0 m로 고정하였으며, 나머지 4개의 수직 존들의 높이는 전체 건물 높이에서 3.0 m를 뺀 값을 기준으로 균등하게 4등분하여 적용하였다.

## 4. 수학모형

### 4.1 수학모형의 작성

수학모형을 작성하기 위해 아트리움의 열환경에 영향을 주는 인자들과 태양단파복사강도 및 수직공기온도분포와의 관계를 설명할 수 있는 다양한 수학식들이 검토되었으며, 최종 선택된 수학식에 적용되어지는 계수는 상용 프로그램인 Curve Expert를 이용하여 산출하였다.

수직공기온도분포를 예측하기 위한 수학모형을 작성하기 위해 먼저, 중정형 아트리움의 공간형태를 대표하는 변수인 Baker et al.의 연구[6]에서 제안된 식(9)와 같은 $WI$(Well Index)를 이용하여 식(10)과 같이 Shape Factor( $SF$ )라는 변수를 정의하였다.

$$\text{Well Index}(WI) = \frac{H(W+L)}{2WL} \tag{9}$$

$$\text{Shape Factor}(SF) = \frac{H(W+L)}{WL} \tag{10}$$

컴퓨터 시뮬레이션 결과에 따르면 아트리움의 공기온도에 영향을 주는 인자는 크게 천창을 통한 관류열량, 자연환기량, 태양복사투과량을 나눌 수 있다. 한편, 이러한 인자들이 아트리움 내부의 수직공기온도분포에 미치는 영향은 아트리움 공간형태에 따라 달라지게 되므로 식(10)의 Shape Factor( $SF$ )를 이용하여 각 인자가 아트리움 공간의 실내 수직공기온도분포에 미치는 영향을 나타내는 지수를 다음과 같이 설정하였다.

열관류에 의한 영향은 식(11)로 정의할 수 있다.

$$HT = \frac{SF^{a1} \cdot K^{b1}}{H^{c1}} \tag{11}$$

자연환기량에 의한 영향은 식(12)로 정의할 수 있다.

$$IR = SF^{d1} \cdot \left(\frac{ACH}{H}\right)^{e1} \tag{12}$$

상기 식(12)에서 $SF^{d1}$은 분석을 통하여 1에 근사한 값을 갖는 것으로 판정됨에 따라 식(12)는 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$IR = \left(\frac{ACH}{H}\right)^{e1'} \tag{13}$$

태양복사투과율에 의한 영향은 식(14)로 정의할 수 있다.

$$ST = \frac{SF^{f1} \cdot (T\tau/100)^{g1}}{H^{h1}} \tag{14}$$

하계에 아트리움 공간의 온도는 상기의 3가지 인자 중 태양복사투과율과 열관류율이 증가하면 상승하고, 환기량이 증가하면 외기온의 영향으로 아트리움 공간의 공기온도가 외기온에 접근할 때까지 점차 하강된다는 가정 하에 상기의 3가지 변수를 결합하여 통합변수 $TV$를 식(15)와 같이 정의할 수 있다.

$$TV = \frac{HT \cdot ST}{IR} = \frac{[(W+L)/WL]^{a2} \cdot K^{b2} \cdot T\tau^{c2}}{H^{d2} \cdot ACH^{e2}} \tag{15}$$

수직공기온도분포를 도출하기 위해 컴퓨터 모델은 최하부 존인 거주역이 냉방설계온도인 26℃로 설정되어 있기 때문에 존 1~존 4까지에 대해서만 적용이 되도록 작성을 하였다. 수직공기온도분포를 예측하기 위한 모형식의 도출과정은 다음과 같다.

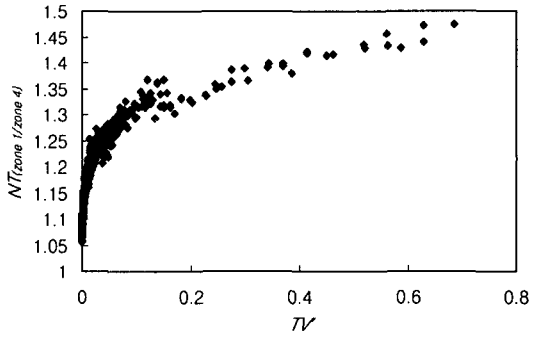



Fig. 5 Relationship between $TV'$ and $NT_{(zone1/zone4)}$.

첫번째 단계에서 존 4의 온도인 $T_{zone4}$를 산출한다. 존 4의 온도인 $T_{zone4}$와 $TV$의 관계는 수학적 모형인 Harris model을 적용하여 식(16)과 같이 정의될 수 있다.

$$T_{zone4} = \frac{1}{A_2 + B_2 \cdot TV^{c4}} \tag{16}$$

식(16)에서 $TV^{c4}$는 존 4의 온도예측에 사용되는 $TV$값으로, 식(17)로 표현되어질 수 있다.

$$TV = \frac{[(W+L)/WL]^{a3} \cdot K^{b3} \cdot Tr^{c3}}{H^{d3} \cdot ACH^{e3}} \tag{17}$$

식(17)에서 계수 $a3$, $b3$, $c3$, $d3$, $e3$, $A_2$, $B_2$는 모델식의 적합도를 최대화할 수 있는 계수들로서 모형의 결정계수가 최대가 되는 조건에서 구해진다. 두번째 단계에서는 존 4의 공기온도에 대한 존 1의 공기온도 비율인 $NT_{(zone1/zone4)}(=T_{zone1}/T_{zone4})$를 산출한다. $NT_{(zone1/zone4)}$를 구하는 방법은 존 4의 온도를 구하는 방법과 동일하다. Fig. 5는 존 4의 무차원 공기온도 $NT_{(zone1/zone4)}$와 $TV'$과의 관계를 식(18)과 같은 Harris model로 정의하기 위해 나타낸 그림이다. 여기서 $TV'$은 존 4에 대한 존 1의 상대적인 온도인 $NT_{(zone1/zone4)}$를 구하기 위해 적용되는 $TV$값이다.

$$NT_{(zone1/zone4)} = \frac{1}{A'_2 + B'_2 \cdot TV'} \tag{18}$$

$$TV' = \frac{[(W+L)/WL]^{a3'} \cdot K^{b3'} \cdot Tr^{c3'}}{H^{d3'} \cdot ACH^{e3'}} \tag{19}$$

식(19)에서 $a3'$, $b3'$, $c3'$, $d3'$, $e3'$, $A_2'$, $B_2'$ 역시 모델식의 적합도를 최대화할 수 있는 계수들로서 모형의 결정계수가 최대로 되는 조건에서 구해진다.

세번째 단계에서는 존 1~존 3의 공기온도를 산출하기 위해 각 존들의 높이에 따른 온도 기울기를 식(20)과 같은 함수로 정의한다. 여기서 높이에 따른 온도 기울기란 존 1의 중심점 온도를 1로 하고, 존 4의 중심점 온도를 0으로 하였을 경우의 무차원화된 각 존의 상대적인 온도를 말한다.

$$Th_n = A_3 \cdot H_z^2 + B_3 \cdot H_z + C_3 \tag{20}$$

$$H_z = \frac{(H-3) \cdot (9-2n)}{8+3} \tag{21}$$

여기서, $H_z$은 각 존의 실제 중심점 높이이고, $H$는 평가대상 아트리움의 전체 높이이며, $n$은 존의 번호를 의미한다. 계수 $A_3$, $B_3$, $C_3$는 다음과 같이 표현되며 얻어진 계수값들은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Coefficients in the function of temperature intensity by height

| $a4$ | $b4$ | $a5$ | $b5$ | $a6$ | $b6$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 3.63 | −2.10 | −3.47 | −1.27 | 0.78 | −0.41 |

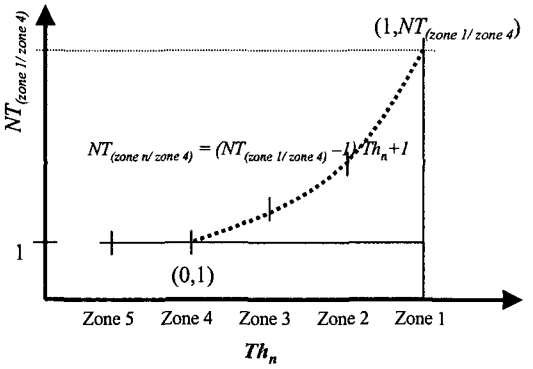



Fig. 6 Relationship between $Th_n$ and $NT_{(zone1/zone4)}$.

$$A_3 = a4 \cdot H^{b4},\ B_3 = a5 \cdot H^{b5},\ C_3 = a6 \cdot H^{b6}$$

네번째 단계에서는 존들의 무차원 높이에 따른 무차원 수직공기온도 그래프인 Fig. 6에서 두 점 $(0, 1)$과 $(1, NT_{(zone\,1/zone\,4)})$를 이용하여 다음과 같은 식(22)에서 존 4에 대한 존 1~존 3의 무차원 공기온도를 산출한다.

$$NT_{(zone\,n/zone\,4)} = (NT_{(zone\,1/zone\,4)} - 1) \cdot Th_n + 1 \quad (22)$$

마지막 단계에서는 식(16)에서 구해진 존 4의 온도인 $T_{zone\,4}$와 식(22)의 존 1~존 3의 무차원 공기온도를 이용하여 존 1~존 3의 실제온도를 식(23)과 같이 산출한다.

$$\begin{aligned} T_{zone\,n} &= T_{zone\,4} \cdot [(NT_{(zone\,1/zone\,4)} - 1) \cdot Th_n + 1] \\ &= T_{zone\,4} \cdot NT_{(zone\,n/zone\,4)} \end{aligned} \quad (23)$$

상기의 식들에서 구해지는 계수 $a3$, $b3$, $c3$, $c4$, $d3$, $e3$, $A_2$, $B_2$, $a3'$, $b3'$, $c3'$, $c4'$, $d3'$, $e3'$, $A_2'$, $B_2'$는 시간에 따라 변화되는 값이다.

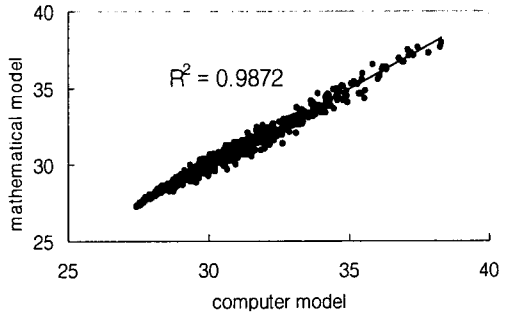
### 4.2 수학모형의 검증

작성된 수학모형을 검증을 위해 12시에 대해서 수학모형에 의한 예측결과를 산출하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과와 비교를 실시하였다.

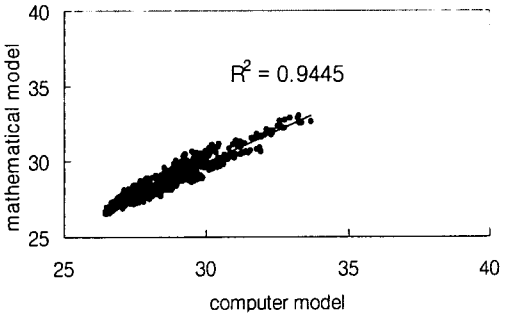
결정계수($R^2$)를 이용한 높이에 따른 존들에서의 검증결과는 Fig. 7에 나타내었다. 검증결과, 존 1~존 3의 $R^2$는 0.945 이상의 값들을 갖는 것으로 나타났고, 존 4의 경우에는 0.911로 다소 낮게 나타났으나, 절대값의 비교인 상대오차를 산출해 본 결과 오차는 0.5% 미만으로 매우 작게 나타났다. 따라서 수직공기온도분포값을 예측하기 위해 작성된 수학모형의 신뢰도는 높다고 판단된다.

## 5. 결 론

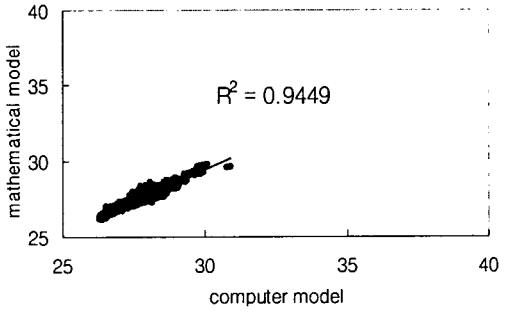
본 연구에서는 아트리움 공간의 열환경 분포의 예측이 가능한 컴퓨터 모델을 이용하여 하계조건



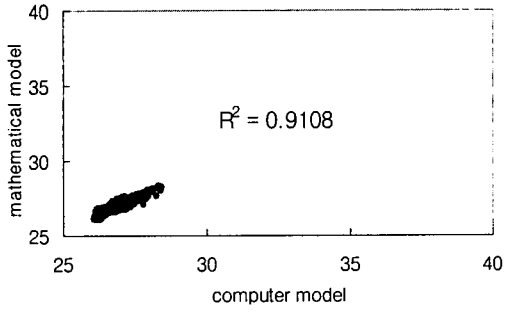

(a) Zone 1




(b) Zone 2




(c) Zone 3




(d) Zone 4

Fig. 7 Results of validation for vertical air temperature in each zone [℃].

Table 3

| Time | $T_{zone4}$ | | | | | | | $NT_{(zone1/zone4)}$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [h] | $a3$ | $b3$ | $c3$ | $d3$ | $e3$ | $A_2$ | $B_2$ | $a3'$ | $b3'$ | $c3'$ | $d3'$ | $e3'$ | $A_2'$ | $B_2'$ |
| 09 | −1.19 | 0.55 | 1.65 | 2.99 | 0.74 | 0.039 | 0.006 | −0.66 | 3.40 | 1.10 | 3.90 | 0.80 | 1.136 | −0.340 |
| 12 | 0.37 | 0.90 | 1.40 | 2.70 | 0.70 | 0.040 | −0.006 | −1.13 | 5.00 | 0.75 | 3.63 | 1.13 | 1.067 | −0.295 |
| 15 | −0.55 | 1.00 | 1.40 | 2.70 | 0.70 | 0.039 | −0.006 | −0.87 | 5.00 | 1.00 | 3.87 | 1.19 | 1.047 | −0.292 |

의 서울지역의 중정형 아트리움에서 건축적인 조건들을 중심으로 729가지 경우의 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하고, 시뮬레이션 결과인 아트리움 공간의 수직공기온도분포를 일반 설계자들이 손쉽게 산출할 수 있는 수학모형으로 작성하면서 다음과 같은 연구결론을 얻었다.

(1) 중정형 아트리움 공간에서 자연환기량의 적정범위는 3.0~6.0 ACH로 나타났으며, 6.0 ACH 이상에서는 자연환기에 의한 아트리움 공간의 공기온도 하강효과가 매우 적은 것으로 평가되었다.

(2) 하계조건의 서울지역의 중정형 아트리움 공간에서 수직공기온도분포값을 계산하기 위해 작성한 수학모형식은 다음과 같다.

$$T_{zone\,n} = T_{zone4} \cdot NT_{(zone\,n/zone4)}$$

(3) 결정계수에 의한 적합도를 이용하여 작성한 수학모형을 검증한 결과, 존 1~존 3의 $R^2$는 0.945 이상의 값들을 갖는 것으로 나타났고, 존 4의 경우에는 0.911로 다소 낮게 나타났으나, 절대값의 비교인 상대오차를 산출해 본 결과 오차는 0.5% 미만으로 매우 작게 나타났다.

(4) 하계조건의 서울지방에서 중정형 아트리움 공간의 수직공기온도분포값들은 수학모형 식(16)~(21)에 Table 3의 계수값들과 건물 입력자료들을 대입하여 산출이 가능하다.

## 후 기

본 연구는 2002년도 인하공업전문대학 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Chen, Q., Moser, A. and Huber, A., 1990, Prediction of buoyant turbulent flow by a low-Reynolds-number k-model, ASHRAE Transaction, Vol. 96, Pt. 1, pp. 564-573.
2. Murakami, S., Kato, S. and Nakagawa, H., 1991, Numerical prediction of horizontal non-isothermal 3-d jet in Room based on the k-$\varepsilon$ model, ASHRAE Transactions, Vol. 97, Pt. 1, pp. 96-105.
3. Srebric, J., Chen, Q. and Glicksman, L. R., 2000, A coupled airflow-and-energy simulation program for indoor thermal environment studies, ASHRAE Transactions, 106 (1), pp. 465-476.
4. Togari, S., Arai, Y. and Miura, K., 1993, A simplified model for predicting vertical temperature distribution in a large space, ASHRAE Transactions, 99 (1), pp. 88-99.
5. Hiroshi Yoshino, Kuniaki Ito and Ken Aozasa, 1995, Trend in thermal environmental design of atrium biuldings in Japan, ASHRAE Transactions Symposia; SD-95-6-3, pp. 858-865.
6. Baker, Fanchiotti, and Steemers, 1993, Daylighting in Architecture, a European Reference Book, London: James & James.
7. Lehmer, D. H., 1951, On Large-Scale Digital Calculating Machinery, Harvard Univ. Press.
8. Neumann, J. V., Forsythe, G. E., Germond, H. H. and Householder, A. S., 1945, Monte Carlo Methods, NBS App. Math, Series 12.
9. Park, J. S., Kim, Y. I., Ahn, B. W. and Sohn, J. Y., 2001, Prediction of vertical sol-air temperature distribution to evaluate the load of adjacent rooms to atrium space, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 17, No. 5, pp. 185-195.

10. Kim, J. T., 1988, Comprehension of atrium, The Magazine of the Korea Refrigerating and Air Conditioning Technology Association, 15 (1), pp. 36-50.
11. HanGlass, 1999, Performance Data.
12. Kim, Y. I., 1994, A Study on the Thermal Environment Planning of an Atrium Utilizing a Temperature Distribution Model, Ph.D. thesis, Seoul Univ., Seoul, Korea.