

아트리움 공간에서 화재발생시 복사열전달의 영향 분석 Effects of Radiation Heat Transfer on the Fire in an Atrium

윤경범 · 장희철 · 김태국*†

Kyung-Beom Yoon · Hee-Chul Chang · Tae-Kuk Kim*†

중앙대학교 기계공학부 대학원, *중앙대학교 기계공학부
(2007. 12. 3. 접수/2007. 12. 14. 채택)

요 약

본 연구는 아트리움 방호공간에서 화재발생시 복사열전달의 유무에 따른 유동장 및 온도분포의 예측을 목적으로 수치해석을 수행하였다. 화재모델로 Field 모델을 사용하였으며 난류 모델로 SIMPLE 알고리즘이 적용된 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 복사열전달 해석에 필요한 복사물성치의 계산은 속도를 단축하며 정확성을 유지하는 WSGGM-RG를 사용하였다. 난류유동장과 복사열전달의 계산은 자체 개발된 CCRHT-3D 프로그램을 사용하였다. 해석결과에 의하면 화재지점을 제외하고 아트리움의 천장부가 높은 온도분포로 나타났다. 유동과 온도의 분포가 출입문 방향으로 편향되고 화재의 위치에서 아트리움의 천장과 벽에 가까워질수록 온도가 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 천장 스프링클러헤드의 작동 시점을 예측하는데 복사열의 영향이 크다는 것을 의미하게 된다.

ABSTRACT

The purpose of this study is focussed on the numerical predictions of temperature distribution by radiation heat transfer in atrium fire using the field fire model and the CCRHT-3D code. This code uses standard k-ε turbulent model with SIMPLE algorithm and weighted sum of gray gases model regrouping(WSGGM-RG). The WSGGM-RG calculates radiative properties on the reduced computational loads while reserving the accuracy. The numerical results show that lower temperature distributions on the wall and the top ceiling wall can be obtained by considering radiative heat transfer. The temperature on the top ceiling wall can be an important parameter in predicting the operating condition of the sprinkler head.

Keywords : Atrium, CCRHT-3D, Radiative heat transfer, Standard k-ε Model, WSGGM-RG

1. 서 론

화재발생시 고온의 가스 및 공기가 상승해 천장에 설치된 스프링클러헤드는 온도를 감지하고 작동을 하여 화재진압과 피난대책에 중요한 요소로 작용하고 있다. 그러나 아트리움과 같이 천장이 높은 건물 내에서 화재발생시 화재로 인해 뜨거워진 가스가 천장에 도달하기 전에 스프링클러헤드의 작동온도에 미치지 못하여 피난대책에 결정적인 문제를 야기한다. 건물의 벽이 화염의 온도보다 낮은 경우 복사열전달을 고려하면 가스의 온도는 큰 폭으로 하강하게 된다. 그러나 이에 대한 영향을 간과하고 있으며 적절한 과학적 설계가이

드는 거의 없으며, 현재 국내외에서 많이 사용되는 상용 프로그램에서도 복사열전달의 영향을 무시하거나 온도와 화학조성에 대해 일정비로 고려하여 시뮬레이션 한다. 화재발생시 고온의 열에 의해 복사열전달이 이루어지지만 화재와 복사열전달과의 상관관계에 대한 연구는 아직 미비하다.

쇼핑센터, 아케이드, 스포츠 센터, 체육관, 전시관, 창고 등 아트리움 공간구조는 일반 건축물의 공간 형태가 아니다. 불규칙한 형태를 갖는 아트리움 건물은 화재발생시 소방설비의 설계가 어렵고 실제 크기와 동일한 실험적인 연구는 경제적으로 비효율적이기 때문에 화재 모델을 사용한 시뮬레이션을 통해 중요한 물리적 요소들을 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻³⁾

일반적으로 아트리움 화재를 시뮬레이션하기 위해

사용되는 모델은 Zone 모델과 Field 모델로 구분할 수 있다. Duong⁴⁾은 plume 방정식을 적절하게 선택하여 아트리움 형태의 화재의 시뮬레이션에 Zone 모델을 적용하였다. CFD(Computation Fluid Dynamics)의 급속한 발전에 따라 Field 모델도 지속적인 발전이 있었으며 국부적인 유동의 속도벡터와 온도 분포를 예측할 수 있게 되었다. 최근에 이러한 Field 모델을 이용하여 아트리움 화재에 대해 Chow⁵⁾는 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 수치해석하였다.

화재는 뜨거워진 gas와 대기의 밀도차이에 의한 점성의 영향보다 관성에 의한 영향이 지배적이게 된다. 이러한 난류를 모사하는 모델로 표준 k-ε 모델⁶⁾이 널리 사용된다. 일반적으로, 고층건물이나 아트리움 화재의 경우 열에 의한 대류의 난류 현상을 모사하기 때문에 연료의 산화 연소 과정의 시뮬레이션 없이 열적 소스만을 취급하여 화재를 모사한다.⁷⁾

복사열전달은 파장, 온도, 압력 및 복사에너지의 통과거리 등에 따라 현저한 변화를 보이며, 파장에 따른 변화가 가장 크게 나타난다. 시스템에서 생성되는 연소가스 중 복사열전달에 영향을 미치는 주된 참여 매체인 CO₂, H₂O 등은 파장에 따라서 복사물성이 심하게 변화하는 비회색 성질을 지니고 있기 때문에 비회색 가스의 복사물성 해석은 매우 중요하다. 가스의 복사물성치를 모델링하는 방법으로는 파장의 해상도에 따라 선별법, 밴드모델 및 총괄 스펙트럼 모델로 구별할 수 있으며, 이 중 총괄 스펙트럼 모델은 파장에 따라 변화가 없는 복사물성치를 이용하여 복사특성을 나타내는 방법이다. 비교적 간단하며 높은 정확도를 보이는 회색가스가중합법(Weighted Sum of Gray Gases Model, WSGGM)은 여러 개의 회색가스의 가중합으로 총괄 방사율을 모델링하는 방법이다.⁸⁾ 또한 Park⁹⁾은 회색가스가중합법을 비슷한 흡수계수의 크기에 따라 사용되는 회색가스들을 지정된 수의 그룹으로 재조합하여 정확성을 유지하며 시간을 단축시킨 회색가스가중합법 재조합(Weighted Sum of Gray Gases Model-Regrouping, WSGGM-RG)을 제안하였다.

본 연구는 간단한 구조의 아트리움 내부에서 화재발생시 복사열전달의 유무에 따른 영향을 예측을 위해 중앙대학교 에너지시스템 연구실에서 개발한 CCRHT-3D 코드를 이용하여 비교분석 하였다. CCRHT-3D는 상용코드 FLUENT v.6.2.12와 유동장과 온도장을 비교하여 매우 유사한 결과를 보인 바 있다.¹⁰⁾ CCRHT-3D는 난류 유동장을 모사하기 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용한 표준 k-ε 모델을 사용하였으며, 구분종좌표법(Discrete Ordinates Method, DOM)에 WSGGM-RG를

적용하여 복사열전달을 해석한다.

2. 이론적 배경

2.1 보존방정식

여러 가지 보존방정식들은 다음과 같은 일반형으로 표현할 수가 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot \vec{J}_\phi = S_\phi \quad (1)$$

여기서, S_φ는 생성항, \vec{J}_ϕ 는 물리량 φ의 플럭스를 나타내며 대류에 의한 플럭스 및 확산에 의한 플럭스의 합으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \vec{J}_\phi &= \rho \vec{V}\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \\ &= \vec{F}\phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\vec{F} = \rho \vec{V}$ 는 질량유속을 나타낸다.

따라서 여러 가지 물리량의 보존방정식들을 식 (1) 및 (2)와 비교하면 다음의 Table 1과 같이 정리될 수가 있다.

여기서, μ_e는 유효점성계수, g는 중력가속도, ρ는 밀도, u_i는 속도, p는 압력을 나타낸다. 유효점성계수는 μ_e = μ + μ_t와 같이 정의되며, 여기서 μ는 유체의 점성계수를 그리고 μ_t는 난류점성계수로서 μ_t = C_μρk²/ε와 같이 정의된다. 또한 G_k는 난류 운동에너지의 생성항, G_b는 부력항을 나타내며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_k &= \mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ G_b &= \frac{\mu_e}{\sigma_k} g \left(\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

난류 모델 상수들을 Table 2에 정리되어 있다.

Table 1. Summary of the conservation equations

φ	Γ _φ	S _φ
u _i	μ _e	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g$
h	μ _e /σ _h	$-\nabla \cdot q_r + \bar{\Phi}$
k	μ _e /σ _k	G _k + G _b + ρε
ε	μ _e /σ _ε	$C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3} C_b) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$

Table 2. Standard turbulent model coefficients

C_μ	σ_k	σ_h	σ_ϵ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$
0.09	1.0	0.7	1.3	1.44	1.92	$\tanh\left \frac{u_j}{u_i}\right $

2.2 비회색 복사가스 열전달

2.2.1 구분중좌표법(DOM)

DOM은 고려하고자하는 격자에서의 복사강도와 경계에서의 복사강도를 고려하여 복사강도를 구하는 방법이다. DOM은 복사강도의 방향에 관한 함수 관계를 완화시키기 위하여 임의의 방향(μ_m, η_m, ξ_m)을 중심으로 각 도구역 범위 내($\mu_m \pm d\mu_m/2, \eta_m \pm d\eta_m/2, \xi_m \pm d\xi_m/2$)의 평균복사강도 $I_m(\vec{r})$ 을 사용하여 복사열전달 방정식을 표시하고, 복사생성항 S_m 에 나타나는 각도에 대한 적분항은 위치 \vec{r} 에서 모든 각도구역의 평균복사강도를 고려한 합이다.

복사열전달 방정식을 공간좌표 x - y - z 내에 위치한 반지름이 1인 구면을 M 개의 각도구역으로 나누어 고려할 때, 즉 $m = 1, 2, \dots, M$ 에 대하여 다음과 같은 S-N 근사식(M 개의 연립편미분 방정식)으로 나타낼 수 있다.¹¹⁻¹³⁾

$$\left[\mu_m \frac{\partial}{\partial x} + \eta_m \frac{\partial}{\partial y} + \xi_m \frac{\partial}{\partial z} + \beta(x, y, z) \right] I_m(x, y, z) = S_m(x, y, z) \quad (4)$$

여기서, S_m 은 m 번째 각도에 대한 복사생성항이며, 총 각도구역 수 M 은 S-N 법의 차수 N 과 3차원인 경우에 $M = N(N+2)$ 인 관계가 있다. 복사강도의 생성항에 포함된 각도에 대한 적분은 Gaussian 적분법을 이용하여 m 번째 각도구역에 대한 가중치(weighting function)를 적용한다.

2.2.2 혼합가스의 WSGGM-RG

CO_2 - H_2O 혼합가스에서 각각의 좁은 밴드 통과율은 상관되어 있지 않다는 것이 널리 인지되어 있다.^{14,15)} 혼합가스의 통과율은 각각의 가스의 좁은 밴드 통과율의 곱으로 나타낼 수 있으며,¹⁶⁾ CO_2 - H_2O 혼합가스에 대한 통과율의 회색가중합 표현은 다음과 같다.^{9,17)}

$$\overline{\tau}_{\text{mix}}(\eta) = \overline{\tau}_{\text{CO}_2}(\eta) \cdot \overline{\tau}_{\text{H}_2\text{O}}(\eta) \quad (5)$$

$$\overline{\tau}_{\text{mix}}(\eta) = \sum_{ic=1}^{M_{\text{CO}_2}} \sum_{ih=1}^{M_{\text{H}_2\text{O}}} W_{ic, \text{CO}_2}(\eta) \times W_{ih, \text{H}_2\text{O}}(\eta) e^{-(\kappa_{ic, \text{CO}_2} + \kappa_{ih, \text{H}_2\text{O}})} \quad (6)$$

여기서 $W_i(\eta)$ 는 i 번째 회색가스의 파장별 가중치이

며, M 은 단일가스(CO_2 및 H_2O)의 회색가스의 수이고, κ_i 는 i 번째 회색가스의 흡수계수를 나타낸다. 또한 식 (5)에서 보인 좁은 밴드 통과율은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\overline{\tau}_{\text{mix}}(\eta) = \sum_{i=1}^{M_{\text{mix}}} W_{i, \text{mix}}(\eta) e^{-\kappa_{i, \text{mix}} L} \quad (7)$$

총괄 가중치는 혼합가스의 파장별 가중치의 플랑크 평균 형태로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_{\text{mix}} = \frac{\sum_{\eta} W_{\text{mix}}(\eta) \Delta\eta}{\sum_{\eta} I_b(\eta) \Delta\eta} \quad (8)$$

여기서 $\Delta\eta$ 는 좁은 밴드모델의 밴드두께를 나타낸다. 본 연구에서는 정확한 결과를 보이는 Kim과 Song¹⁸⁾이 제안한 흡수계수를 이용하여 혼합가스의 흡수계수를 다음과 같이 표현하였다.

$$\kappa_{\text{mix}} = \kappa_{i0, \text{CO}_2} \frac{e^{-\alpha_{i, \text{CO}_2} T}}{T^2} P X_{\text{CO}_2} + \kappa_{i0, \text{H}_2\text{O}} \frac{e^{-\alpha_{i, \text{H}_2\text{O}} T}}{T^2} P X_{\text{H}_2\text{O}} \quad (9)$$

여기서 κ_{i0} , α_i 는 i 번째 회색가스의 모델링 상수를 나타내며 P , T , X 는 각각 압력, 온도, 몰분율을 나타낸다.

좁은 밴드 회색가스가중합법을 이용하여 연소 혼합가스의 복사물성을 나타내기 위해서는 많은 수의 회색가스가 필요하다. Park과 Kim⁹⁾은 정확도를 유지하며 컴퓨터 계산 시간을 줄이기 위하여 회색가스 재조합을 제안하였다. 이 방법은 비슷한 크기를 갖는 회색가스의 흡수계수를 그룹으로 나누어서 고려하는 방법이다. 재조합된 번째 그룹의 파장별 가중치는 그룹에 속하여 있는 모든 가중치를 합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{i, \text{new}}(\eta) = \sum_{j=1}^{N_i} W_{j, \text{mix}}(\eta) \quad (10)$$

여기서 N_i 는 i 번째 그룹에 속하게 되는 회색가스의 수를 나타내며 하첨자 new는 재조합 과정 이후의 값을 나타내고 있다.

i 번째 그룹의 흡수계수 $\kappa_{i, \text{new}}$ 는 플랑크평균 형태의 흡수계수를 이용함으로 구할 수 있다. 플랑크평균 흡수계수는 평균될 흡수계수를 각각에 해당하는 흑체에너지로 가중합한 값을 해당하는 온도에서의 전체 흑체 에너지로 나눈 값으로 표현된다. 이 개념을 회색가스 가중합법에 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{i, new} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} K_{j, mix} W_{j, mix}}{W_{i, new}} \quad (11)$$

2.3 Plume 이론

열 방생률에 대한 무차원 변수는 다음과 같이 정의한다.¹⁹⁾

$$Q_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_{p\infty} T_\infty (gD)^{1/2} D^2} \quad (12)$$

여기서, ρ_∞ 는 1.211 kg/m^3 , T_∞ 는 290K , \dot{Q} 는 열발생률(heat release rate, [kW]), $C_{p\infty}$ 는 1.0068 kJ/kgK , g 는 9.813 m/s^2 , D 는 풀화재의 특성길이를 나타낸다.

열발생률 \dot{Q} 와 풀의 특성길이 D 에 의한 화염높이 Z_f 은 다음과 같다.

$$Q_D^* < 1.0; Z_{f1} = 3.3 Q_D^{*2/3} D$$

$$Q_D^* > 1.0; Z_{f1} = 3.3 Q_D^{*2/5} D \quad (13)$$

풀화재 가상화염 높이, ΔZ_f 는 다음 식으로 정의된다.

$$\Delta Z_f = 1.02D - 0.083 \dot{Q}^{2/5} \quad (14)$$

위에서 구해진 화염의 높이에 따른 질량플럭스 \dot{m}_z 는 다음과 같다.

$$\dot{m}_z = 0.071 \dot{Q}^{1/3} (Z + \Delta Z_f)$$

$$[1 + 0.026 \dot{Q}^{2/3} (Z + \Delta Z_f)^{-5/3}] \quad (15)$$

화염높이 Z 의 수직 상승속도 v 는 다음과 같다.¹⁹⁾

$$v = C_v \left(\frac{g \dot{Q}}{C_p \rho_\infty T_\infty} \right)^{1/3} (Z + \Delta Z_f)^{-1/3} \quad (16)$$

여기서 C_v 는 3.4이다.

화염 상부에서의 온도 T_{zf} 는 열발생률 \dot{Q} 와 질량플럭스 \dot{m}_z 에 의해 다음과 같이 간단한 에너지 균형식으로부터 구해진다.

$$T_{zf} = T_\infty + \frac{\dot{Q}}{C_p \dot{m}_z} \quad (17)$$

이상에서 얻어진 속도 v 와 T_{zf} 를 화재로 인한 열방출의 입력 조건으로 사용한다.

3. 화재시물레이션

3.1 해석대상 개요

본 연구에서 고려한 아트리움 해석대상 공간은 10 m(x)

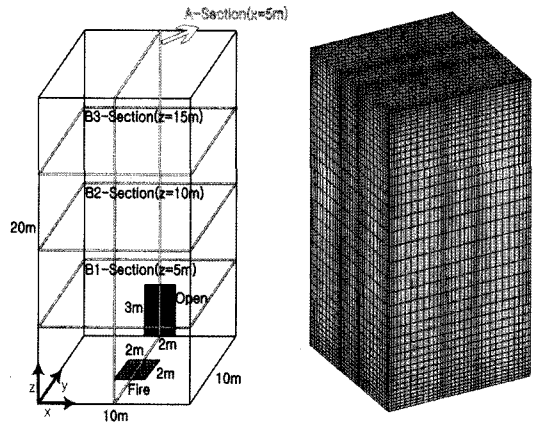


Figure 1. Geometric of atrium and computational grid of system.

× 10 m(y) × 20 m(z)로 체적은 2,000 m³이다. 화재위치는 바닥의 중앙에 2 m(x) × 2 m(y)의 크기이며, 출입문은 한쪽 면에 2 m(x) × 3 m(z)로 중앙에 위치하며, 나머지 면은 벽으로 고려하였다. 이에 대한 기하학적인 모양을 Figure 1에 나타내었다.

3.2 컴퓨터 모델링 및 수치해석 조건

SIMPLE 알고리즘을 이용한 난류 모델로 표준 k-ε 모델을 사용하였으며, Plume이론을 이용하여 2 MW의 열방출율을 화재의 입력조건으로 적용하였다. 벽의 온도는 상온(20°C)으로 유지되는 것으로 하였다. 구분종좌표법(DOM)에 WSGGM-RG를 적용하여 복사열전달을 계산하였다. 화재시물레이션을 위하여 사용된 프로그램은 CCRHT-3D 코드를 이용하였다. 격자 구성은 약 56,000개로 생성하였으며, 속도의 변동이 심한 화재위치와 출구 주변은 정확한 계산을 위해 격자를 조밀하게 구성하였고 Figure 1에 격자계를 보여주고 있다.

4. 결과 및 고찰

화재발생시 복사열전달의 고려 유무에 따른 영향을 분석하기 위해 B1-Section(z=5 m), B2-Section(z=10 m), B3-Section(z=15 m) 및 A-Section(x=5 m)에서 유동과 온도분포를 나타내었다.

4.1 유동장의 분포

유동장의 분포는 복사열전달의 유무에 따라 큰 차이가 없으며 A-Section(x=5 m)에서의 속도벡터를 Figure 2에 나타내었다. 화재로 인해 발생한 유동은 상승하여

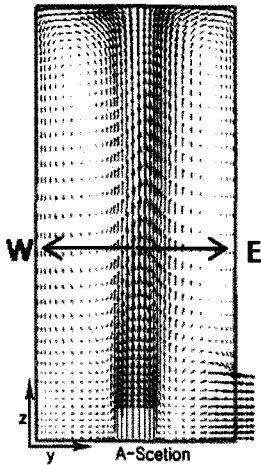


Figure 2. Velocity vector distribution at 5 m from the side wall (A-Section).

아트리움의 천장에 도달 후 천장을 타고 확산되며 측면의 벽에 의하여 바닥으로 하강하는 것을 볼 수 있다. 또한 화염에서 천장의 상부로 갈수록 출입문이 있는 벽면으로 유동이 편향되는 것을 확인할 수 있다. 이는 화재를 기준으로 E 쪽의 유동은 아트리움의 천장에서 하강한 후 출입문으로 배출되지만 화재를 기준으로 W 쪽은 아트리움의 천장에서 하강 후 화재지점의 유속에 의하여 유동을 출입문방향으로 밀면서 다시 천장으로 상승하기 때문이다(Figure 2 참조).

4.2 온도분포 비교

Figure 3은 A-Section(x=5 m)에서 복사열전달 유무에 따른 온도분포 결과를 나타내었다. 화재에서 발생한 열에 의한 온도분포는 화재지점을 제외한 공간에서 대류의 영향으로 아트리움의 바닥에서 천장으로 올라갈수록 상승하는 경향을 보였다. 또한 화재의 위치에서 천장과 벽에 가까울수록 온도분포가 낮아지는 것으로 나타났다. 복사열전달은 상온(20℃)으로 유지되는 벽과의 열전달에 의해 화재와 벽 사이의 온도를 떨어뜨렸다. 복사열전달을 고려한 경우 복사열전달을 고려하지 않은 경우에 비해 화재지점을 제외하고 전체적으로 낮은 온도분포를 보이며 특히 측면 벽과 천장 근처로 갈수록 복사열전달의 유무에 따른 온도차는 더 큰 것으로 나타났다.

복사열전달의 유무에 따라 높이 5 m, 10 m, 15 m에서의 온도분포 단면 및 그래프를 Figure 4와 Figure 5에 각각 나타내었다. 각 높이에서 온도분포와 최고온도의 위치가 출구 방향으로 치우쳐진 것을 확인할 수

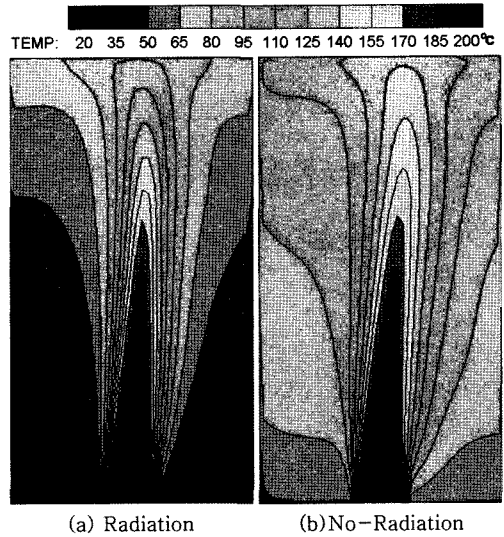


Figure 3. Temperature contours at 5 m from the side wall (A-Section).

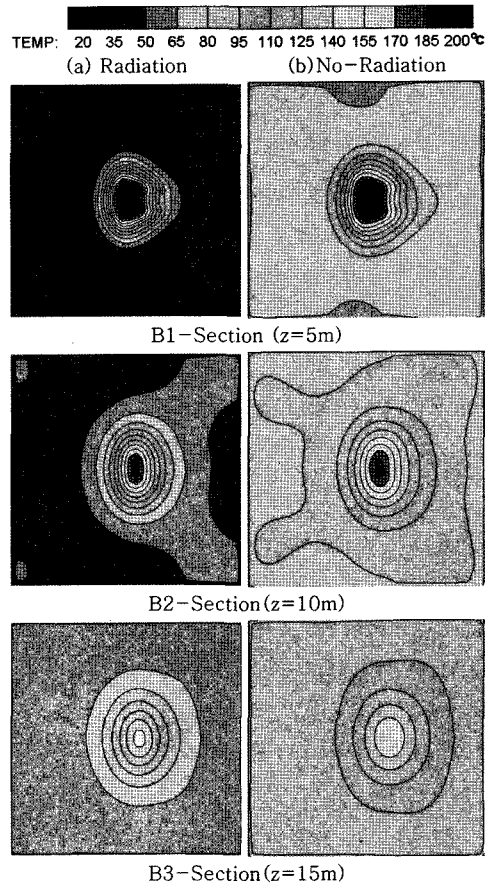


Figure 4. Temperature contours at 5 m, 10 m and 15 m above the atrium floor.

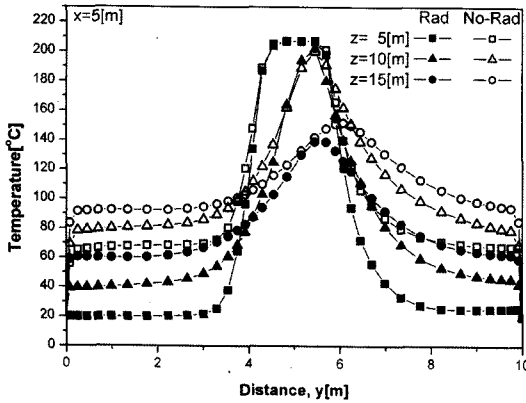


Figure 5. Temperature distribution at 5 m, 10 m and 15 m above the atrium floor.

있으며 바닥면에서 천장으로 올라갈수록 최고온도가 나타나는 위치의 출입문이 위치한 방향으로 편향되는 경향을 나타내었다. 복사열전달 고려유무에 따라 비교 높이에서 평균 14~16%의 온도 차이를 보이며 천장에 가까워질수록 복사열전달의 고려유무에 따라 온도 차이가 커짐을 확인할 수 있었다. 따라서 화재에서 멀어지고 벽에 가까울수록 복사열전달의 영향이 큰 것을 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 화재가 발생한 아트리움을 대상으로 수치 해석을 통해 복사열전달에 따른 온도분포의 예측을 수행하였다. 중앙대학교 에너지시스템 연구실에서 개발된 CCRHT-3D 프로그램을 사용하여 난류 유동과 복사열전달을 계산하였다. 유동장은 SIMPLE 알고리즘이 적용된 표준 k-ε 난류모델을 사용하여 모사하였고 복사열전달 방정식에 필요한 복사물성치는 정확성을 유지하며 계산시간을 단축시킨 WSGGM-RG를 사용하여 계산하였다. Field 모델을 적용하여 화재에 의한 유속과 온도를 산출하였으며 온도분포의 결과를 높이 5 m, 10 m, 15 m에서 분석하였다. 아트리움 내의 유동과 온도의 분포가 출입문이 있는 벽면으로 편향되는 결과를 나타냈다. 화재의 위치에서 아트리움의 천장과 벽으로 갈수록 낮은 온도분포를 나타냈으며, 상온(20 °C)을 유지하고 있는 아트리움의 벽면 근처에서 복사열전달 고려 유무에 따른 온도분포는 복사열전달을 고려한 경우 낮아지는 경향을 보였다. 따라서 화재발생시 천장에 설치된 스프링클러헤드의 작동시점을 예측하기 위해 복사열전달이 고려되어야 한다.

감사의 글

본 논문은 “2003년도 중앙대학교 학술연구비 지원”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 지문학, 이병곤, 정래혁, “성능기반 화재모델(FDS)을 이용한 원전 방화지역 화재위험 분석조건에 대한 민감도 해석”, 한국화재소방학회논문지, Vol.21, No.2, pp.98-104(2007).
2. 박용환, 조합형, “복합상영관에서의 화재조건에 따른 초기화재 거동해석”, 한국화재소방학회논문지, Vol.21, No.1, pp.1-6(2007).
3. 지문학, 이병곤, “원전 화재방호구역의 화재위험 분석을 위한 FDS 적용성”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 20, No.4, pp.13-18(2006).
4. D.Q. Duong, “The Accuracy of Computer Fire Models: Some Comparison with Experimental Data from Australia”, Fire Safety Journal, Vol.16, pp.415-413(1990).
5. W.K.A. Chow, “Comparison of the Use of Fire Zone and Field Models for Simulating Atrium Smoke-filling Process”, Fire Safety Journal, Vol. 25, pp.337-353(1995).
6. D.B. Spalding, “Mixing and Chemical Reactions in Steady Confined Turbulent Flame”, pp.649, Proc. 13th Int. Symp. on Combustion(1971).
7. 정진용, 유홍선, 김성찬, “PISO알고리즘을 이용한 세 가지 형태의 아트리움 공간에서 화재발생시 연기거동에 대한 수치해석적 연구”, 한국화재소방학회지, Vol.13, No.33, pp.21-30(1999).
8. H.C. Hotel and A.F. Sarofim, “Radiative Transfer”, McGraw-Hill, New York(1967).
9. 박원희, 김태국, “이산화탄소-수증기 혼합가스에 대한 파장별 회색가스가중합법에서 회색가스재조합에 대한 연구”, 기계학회논문집 B권, Vol.27, No.2, pp.227-235(2003).
10. 김태국, 윤경범, 민동호, 장희철, 김진수, “당량비변화에 따른 복사특성이 3차원 난류 연소에 미치는 영향 연구”, pp.79-85, 한국연소학회 제33회 KOSCO Symposium 논문집(2006년도 추계) (2006).
11. B.G. Carlson and K.D. Lathrop, “Transport Theory The Method of Discrete -Drdinates”, Computing Methods in Reactor Physics, pp.165-266, edited by H. Greenspan, C. N. Kelber and D. Okrent, Gordon and Breach, New York(1968).
12. E.E. Lewis and Miler, W.F. Jr., “Computational Methods of Neutron Transport”, John Wiley and Sons Publishing Co., N.Y.(1984).

13. T.K. Kim, "Radiation and Combined Mode Heat Transfer Analyses in Absorbing, Emitting, and Mie-Anisotropic Scattering Media Using the S-N Discrete Ordinates Method", Ph. D Thesis, University of Minnesota(1990).
14. R.M. Goody, R. West, L. Chen, and D. Chrisp, "The Correlated-k Method for Radiation Calculations in Non-homogeneous Atmospheres, J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol.42, No.6, pp.539-550(1989).
15. A.A. Lacis and V. Oinas, "A Description of the Correlated-k Distribution Method for Modeling Nongray Gaseous Absorption, Thermal Emission, and Multiple Scattering in Vertically Inhomogeneous Atmospheres", Journal of Geophysical Research, Vol.96, No.D5, pp.9027-9063(1991).
16. M.F. Modest, "Radiative Heat Transfer", McGraw-Hill(1993).
17. W.H. Park and T.K. Kim, "Development of the WSGGM Using a Gray Gas Regrouping Technique for the Radiative Solution within a 3-D Enclosure Filled with Nonuniform Gas Mixtures", JSME International Part B, Vol.48, No.2, pp.310-315 (2005).
18. O.J. Kim and T.H. Song, "Implementation of the Weighted Sum of Gray Gases Model to a Narrow Band: Application and Validity", Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals, Vol.30, No.4, pp.453-468(1996).
19. G. Cox, "Combustion Fundamentals of Fire", ACADEMIC PRESS(1995).