

주방조리기에서 발생하는 화염전파의 수치적 해석

이동호 · 권용일* · 조정훈

인천대학교 안전공학과 · *신홍대학 건축설비과

1. 서론

주방연소기의 사용 부주의로 인한 화재는 일반주택 및 다량의 열원을 사용하는 음식점등에서 발생가능성이 가장 높다. 한편, 화재발생으로 인한 사망자의 80%는 연소가스에 의한 질식으로 사망하게 된다. 주방에 설치된 연소기 상부에는 일반적으로 배열, 제습 및 그리스제거 목적으로 주방후드를 설치되고 있으나 화재를 대비한 복합기능설비로 고안되어 있지 않다. 주방 연소기에서 발화된 화재는 연소기의 자체 열 부력에 의해 주방 상부로 상승하는 현상이 나타나며 주방에 설치된 후드에 의해 화재발생물질은 1차적으로 배연되지만 주방후드에 설치된 환기구는 조리 시 환기의 목적으로 이용됨에 따라 화재 시 충분한 배연성능은 기대되기 어렵다. 따라서, 화재시 연소발생물질의 대부분은 실내로 유입되는 현상을 나타낸다. 이러한 현상은 화재강도가 증가함에 따라 두드러지게 나타난다.

본 연구는 주방을 대상으로 화재 발생 시 오염물질의 전파거동현상을 분석하고 실제 사용되고 있는 Range hood의 설계풍량으로 배연특성 및 실내로의 연소가스전파의 정성적인 현상을 수치적 방법을 통해 평가한다.

2. 지배방정식 및 경계조건

2.1 지배방정식

화재발생물질의 전파거동은 연속방정식, 운동량방정식, 엔탈피, 혼합분율(mixture fraction) 및 연료질량분율(mass fraction of fuel)의 함수로 나타나며, 각 방정식은 Table1에 표현된 계수를 적용하여 식(1)의 일반형 미분방정식으로 표현된다. 본 해석에서는 점성소산은 무시하였고 공간내의 유체는 압축성으로 고려하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \partial \phi) + S_\phi \quad (1)$$

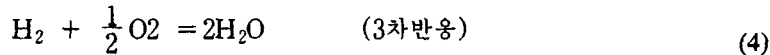
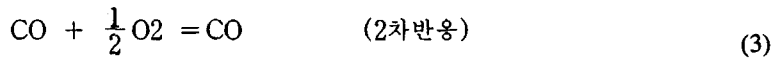
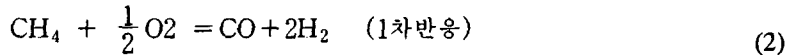
방정식	Φ	Γ_Φ	S_Φ
연속	1	0	0
운동량	u_i	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) + g_i$
엔탈피	h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	S_h
난류운동에너지	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_k + G_B + \rho \epsilon$
난류에너지소산율	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} [(G_k + G_B)(1 + C_3 R_f) C_1 - C_2 \rho \epsilon]$
혼합분율	f	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_f}$	0
화학종	m_i	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{m_i}}$	S_i

Table 1 Effective exchange coefficients and source terms for Φ of equation 1

여기서, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $\sigma_f=1.0$, $\sigma_m=1.0$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $C_\mu=0.09$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad G_B = -g\beta \frac{\mu_t}{\sigma_f} \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{1}{\rho}$$

본 연구에서 사용된 난류방정식은 벽함수를 이용하는 고레이놀즈방법을 이용하여 계산하였다. 여기서, 화학종을 해석할 때, 첨자 i 는 연료, 산소, 질소, 연소생성물질이며 연료의 질량분율식을 제외한 S_i 는 0이 된다. 연료의 질량분율을 평가할 때, S_i 는 연료의 난류연소과정에서 화학반응속도를 의미하는 반응율이다. 본 화재전과현상을 해석하기 위한 연소물질은 메탄(CH_4)으로 가정하였으며 화학반응은 다음과 같다. 본 해석시 연소가스성분의 연소발생은 확산화염으로 가정하였다.



시간당 체적당 변화되는 화학종의 농도변화를 나타내는 반응율은 Spalding에 의해 제안된 eddy break up(EBU)모델을 사용하였다.

$$S_i = -C \cdot \min[m_{fu}, sm_{ox}] \cdot \frac{\epsilon}{k} \quad (5)$$

식(2)에서 사용된 sm_{ox} 는 2차 반응인 경우, 식(3)과 같이 표현된다.

$$sm_{ox} = m_{fu} m_{ox} / (m_{fu1} s_1 + m_{fu2} s_2) \quad (6)$$

여기서, C는 비례상수이며 s_1, s_2 는 공연비를 나타낸다. 연소시 식(2)-식(4)과정의 화학반응 중, 1800K이상의 높은 온도에서 질소산화물인 NO가 다량 발생함에 따라 혈중 헤모글로빈과 결합하여 산소결핍현상을 발생시킨다. NO의 생성률은 확산 Zeldovitch 기구 반응에 의한 것으로 식(7)을 적용하였다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{4f}k_{f0}[N_2][O_2]^{1/2} \quad (7)$$

(7)식에서 k_{4f} 는 $6.63 \times 10^7 \exp(-37765/T)$, k_{f0} 는 생성평형상수로서 JANAF에서 온도의 함수로 제안된 메탄의 평형상수곡선을 이용하여 구하였다.

2.2 경계조건

화재에 의해 발생된 화염 및 연소 발생물질의 전파과정을 분석하기 위해 본 해석에 적용한 모델을 Table.2와 Fig.1에 나타낸다.

dimension	5.0(W)m × 7.0(L)m × 2.5(H)m
fire location	X=3.5m, Y=1.0m, Z=0.05m
fire area	0.4m × 0.4m
heat release rate	0.01MW
air volume of hood	6, 8, 10 CMM

Table.2 Calculation conditions

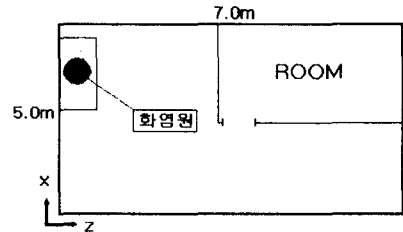


Fig.1 Room compartment

2.3 수치해석방법

유동 및 연소방정식을 계산하기 위해 $45 \times 36 \times 50$ 의 격자수를 가진 비균일 격자계를 구성하고 검사체적법을 이용하여 계산을 수행하였다.

운동량방정식의 압력항은 SIMPLEST 알고리즘을 사용하였으며 연소해석법은 7gas 법을 적용하였다. 연소해석에서 반응에 필요한 계수는 Chemkin의 자료를 활용하였다. 고온화재발생물질에서 발생하는 복사열전달현상은 무시하였다. 또한 수렴을 향상시키기 위하여 하향이완계수를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도분포

Range hood에서 제연을 위해 처리하는 풍량의 변화에 따른 화재발생물질과 화염의 최대온도분포는 배연풍량 증가에 따라 미소하게 감소하는 현상을 나타내고 있다. 또한 최대 온도는 화염보다는 화학반응열량이 크고 정체영역에서 많은 농도를 차지하는 화재발생물질(CO_2)에 의해 현저히 증가되는 현상을 나타내고 있다.

Range hood에서 발생된 plume은 hood 입구의 필터부분과 충돌하여 hood에서 충분히 배출되지 못한 연소물질들은 천장으로 상승하여 실내공간으로 전파되고 천장면 부

근에서 연소물질의 경계층이 형성된다. Fig.2는 $z=0.5\text{m}$, $y=1.5\text{m}$ 인 경우, x 축의 거리 증가에 따른 온도분포를 나타낸다. 이 값은 Range hood의 풍량값이 증가함에 따라 미소하게 감소하는 현상을 나타낸다. 이는 배연풍량이 증가함에 따라 천장 상부면에서 발생하는 오염발생물질의 경계층이 미소하게 감소하여 오염물질의 농도가 낮아지기 때문이다. 또한 화염 중심에서의 온도는 일정하며, 6CMM인 경우, 벽면 근처 1m 지점에서 589°C 의 최고온도를 나타내고, 8CMM의 경우, 533°C , 10CMM에서는 383°C 로 나타났다.

Fig.3에서는 화재 지역에서 약 1.0m 이격 지점의 온도분포를 나타낸다. 화재 발생물질이 벽을 타고 이동을 하면서 화재발생물질의 경계층은 두껍게 형성되므로 화재발생물질의 농도가 증가된 벽쪽이 높은 온도를 나타낸다. Fig.4와 5는 화염 중심에서 높이 1.5m, 2.0m 경우 z 방향으로 온도 분포를 나타내며 높이가 증가함에 따라 온도가 상승한다. 1.5m 높이의 경우, 화염원 주변을 중심으로 높은 온도분포를 나타내며, 2.0m 높이의 경우 벽을 따라 형성된 고온의 발생물질은 높은 온도를 유지하고 있는 특성을 나타낸다. 이는 plume이 천장을 타고 방쪽의 벽과 충돌하면서 벽체부근에서 화재발생물질의 정체농도가 증가하기 때문이며 약 2000°C 의 고온 영역을 발생하게 된다.

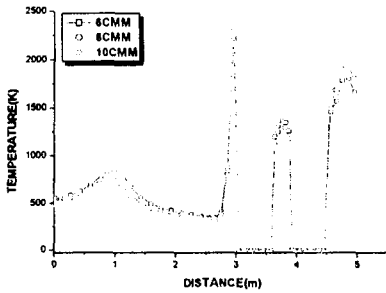


Fig.2 Temperature distributions
($z=0.5\text{m}$, $y=1.5\text{m}$)

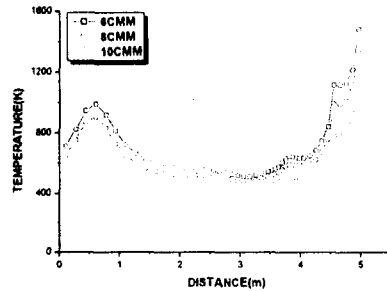


Fig.3 Temperature distributions
($z=1.0\text{m}$, $y=1.5\text{m}$)

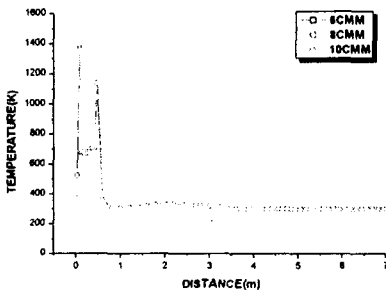


Fig.4 Temperature distributions
($x=3.7\text{m}$, $y=1.5\text{m}$)

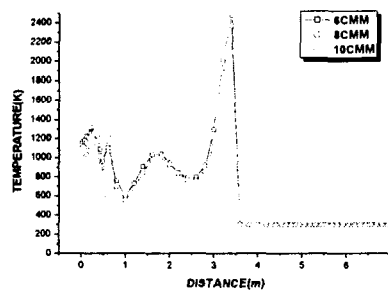


Fig.5 Temperature distributions
($x=3.7\text{m}$, $y=2.0\text{m}$)

3.2 CO분포

화재 시 발생되어 인체에 유해가스로 작용하는 CO는 화염면의 경계면에서 생성되는 것이 일반적인 특징이다. Fig.6과 7은 CO의 농도를 나타낸다. 약 1.5m의 높이에서는 화염구간을 중심으로 분포하며, 다른 지역으로의 전파특성은 나타나지 않는다. 그러나, 천장의 높이방향으로 상승 할 수록 CO의 최대농도는 감소하는 경향을 나타내며 또한, 전파 영역은 증가하는 현상을 나타낸다. 특히, 배연풍량 6CMM의 경우, 화염원에서 2m 이격거리에서도 500ppm의 높은 농도값을 나타낸다. 이는 밀폐된 실에서 발생한 확산연소 시 완전연소에 필요한 공연비가 낮기 때문이므로 인해 인체에 유해한 CO가스를 제거하기 위한 적극적인 소화장비가 요구된다.

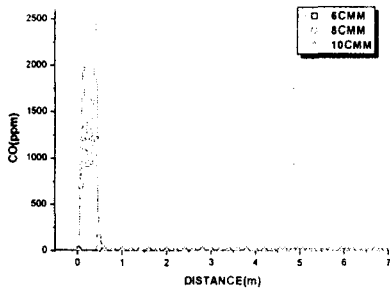


Fig.6 CO concentration (x=3.7m, y=1.5m)

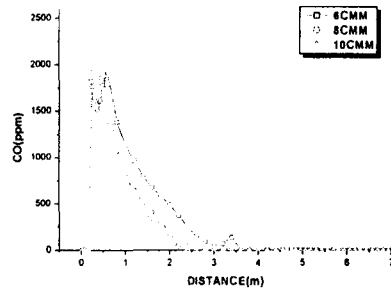


Fig.7 CO concentration(x=3.7m, y=2.4m)

3.2 NO분포

NO는 고온의 화재물질에 포함되어져 있는 질소성분이 산소성분과 결합하여 발생되는 물질이다.

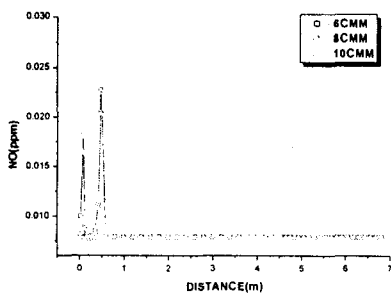


Fig.8 NO concentration(y=1.5)

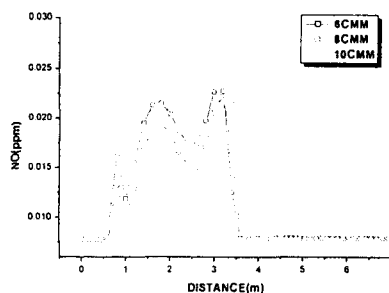


Fig.9 NO concentration(y=2.0m)

Fig.8과 Fig.9는 NO의 발생량을 나타낸다. 그러나 NO의 발생량은 최고 0.02 ppm~0.025ppm으로 노동위생상 시간 가중평균(TWA)의 25ppm보다 현저히 작은 값을 나타내고 있다. 이는 주택과 같이 밀폐된 실에서 화재가 발생되면 화재 시 발생된 질소산화물과 반응될 산소량이 극히 부족함에 기인한다.

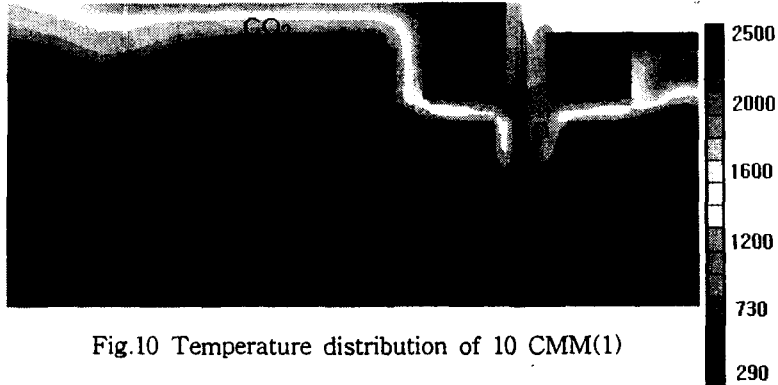


Fig.10 Temperature distribution of 10 CMM(1)



Fig.11 Temperature distribution of 10 CMM(2)

4. 결 론

주방용 조리기에서 메탄 연소에 의해 발생된 화재 발생물질을 Range hood를 통하여 제거시킬 때, 화재발생물질의 거동을 hood의 풍량을 변화시켜 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 화재발생물질과 화염의 최대온도는 각각 2200°C, 1380°C로 나타났다.
2. Range hood에서 처리하는 배연풍량이 증가함에 따라 화염의 온도는 40°C 감소하며 화재발생물질의 온도는 최대 200°C 감소하였다.
3. 보다 큰 발열량의 화재 발생 시 기존에 설치된 후드를 이용하는 경우 CO발생농도가 현저히 높아짐으로서 인명 피해의 가능성이 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Jones, W.W., 1981, "A review of compartment fire models", U.S. National Bureau of Standard, NBSIR 83-2884.
2. Bjorn Karlsson, James G. Quintiere, 1999, "Enclosure Fire Dynamics"