

수치해석적 방법을 이용한 비등온 고농도 연무의 배기량 산정에 관한 연구

임석채 · 장혁상[†] · 하지수*

영남대학교 건설환경공학부 · *계명대학교 에너지환경과학과

(2007년 10월 19일 접수, 2008년 4월 23일 채택)

The Numerical Study on the Ventilation of Non-isothermal Concentrated Fume

Seok-chai Lim · Hyuksang Chang[†] · Jisoo Ha*

School of Civil and Environmental Engineering, Yeungnam University

*Department of Energy and Environmental Science, Keimyung University

ABSTRACT : The experimental study with the prototype provides more acceptable data than the others. But there are so many limited conditions to perform the experimental study with the prototype. So the theoretical similitude with the scaled model and the numerical study with the CFD method have been chosen alternatively to analysis the fume movement. In this study, the ventilation was estimated from the results of the numerical study based on the experimental results as the boundary conditions. The grid A and B were same size and shape with the models which was used in the experimental study and consisted with 163,839, 122,965 cells respectively. The height of the fume layer was estimated form the mole fraction of fume components and the ventilation was determined by the velocity and temperature of the fume. The results of this study showed that the fume movements estimated from the numerical study are enough to apply to the prototype if there are proper heat loss correction factors. The numerical study is easier to change study conditions and faster to get results from the study than the experimental study. So if we find some proper heat loss correction factors, it's possible to execute the various and advanced study with the numerical study.

Key Words : Fume Movement, Scaled Model Experiment, Numerical Study, Application

요약 : 연무거동을 해석하는 방법 중에서 실물을 이용한 실험방법이 가장 믿을 수 있는 자료를 제공하지만 여러 가지 제한사항들로 인해 축소모델실험을 이용한 상사방법이나 CFD(computational fluid dynamics)를 이용한 수치해석적 방법이 대안으로 채택되고 있다. 본 연구는 연무거동을 수치해석적 방법으로 예측하여 연층의 높이에 따른 배기량을 산정하고자 했다. 수치해석에 사용된 격자는 축소실험에서 사용된 모델 A, B와 동일한 크기 및 형상을 가진다. 배기량은 수치해석으로 예측된 연소생성물들의 몰비를 이용하여 연층의 높이를 예측하고 그때의 배기가스 온도 및 유속으로 산정되었다. 수치해석 결과, 벽면 열손실 및 복사효과를 고려하여 예측된 배기량이 축소모델 실험결과의 표준편차 범위 내에 존재하였지만 에너지 방출량이 증가할수록 예측된 연무의 온도가 실험과 많은 차이를 보였고 비교적 열손실에 의한 영향이 적은 모델 B를 이용한 계산결과에서는 연무의 거동이 실험결과와 유사한 패턴을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 열손실을 보정할 적절한 보정계수를 구할 수 있다면 배기량 산정에 관한 다양한 후속연구를 수치해석적 방법을 이용해 진행할 수 있을 것이라 사료된다.

주제어 : 연무거동, 축소모델 실험, 수치해석적 방법, 실물 적용

1. 서론

반밀폐형 공간이란 외부의 유체유동과 격리된 밀폐형 공간에서 인위적인 환기설비나 공간 일부의 개방으로 인해 공간 내부와 외부 사이에 물질전달과 에너지전달이 일어날 수 있는 공간을 말하며, ‘다중이용시설 등의 실내공기질관리법’의 적용대상인 다중이용시설과 산업환기의 대상인 사업장 등이 여기에 해당한다. 반밀폐형 공간을 활용하기 위해서는 구조적인 안전뿐만 아니라 보건위생학적인 안전의 확보 또한 중요하며, 이를 위해서는 내부의 공기가 쾌적한 상태로 유지되어야 한다. 반밀폐형 공간은 구조적

인 특성상 자연적인 환기가 어려우므로 내부 공기를 쾌적한 상태로 유지하기 위해서는 적절한 환기설비가 설치 및 관리되어야 한다.⁶⁾

환기설비를 적절히 설치 및 운영하기 위해서는 오염원 주변의 희석공기량을 고려한 정확한 배기량을 산정하는 것이 무엇보다 중요하다. 오염물질의 농도가 낮으면서 등은 상태인 일반적인 경우에는 ACGIH(american conference of governmental industrial hygienists)에서 발행된 Industrial ventilation과 같은 지침서를 이용하여 배기량을 산정할 수 있지만 비등온 고농도의 연무(fume)를 제어해야 하는 특수한 경우에는 배기량 산정에 어려움이 있다.⁵⁾

본 연구에서 연무란 유해하거나 독성을 가지는 모든 가스와 연기를 뜻하는 것으로 대기환경분야에서 일반적으로 사용되는 연무보다 포괄적인 의미로 사용하였다.²⁾ 반밀폐

[†] Corresponding author

E-mail: hschang@yu.ac.kr

Tel: 053-810-2547

Fax: 053-811-5288

형 공간에서 비등온 고농도의 연무가 발생하는 경우는 용해도가 가동되는 주물공장 작업장에서 주물이 장입될 때, 다중이용시설에서 화재가 발생할 때 등이 있다. 발생하는 연무를 제어하기 위해서는 추가적으로 작용하는 부력과 확산 등의 영향을 고려해줘야 하는데, 이런 고려 없이 단순히 환기시스템을 구성하게 되면, 적절한 배기가 이루어지지 않아 공간 내에 거주 또는 체류하는 사람들이 고온과 높은 농도의 오염물질에 노출되어 급성피해를 받을 수 있다.^{1,4)}

적절한 배기량을 산정하기 위해서는 연무의 거동에 대한 정보를 확보하여야 하며 이러한 자료들은 실험적 방법이나 수치해석적 방법을 통해 얻어진다. 물리 현상에 관한 가장 믿을 수 있는 정보는 실험을 통해 얻어진 실험결과이다. 하지만 실험비용과 실험공간 확보, 안전상의 문제 등 여러 가지 제한사항으로 인해 일반적으로 축소모델을 이용한 상사방법이나 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법이 대안으로 채택되고 있다. 축소모델실험은 수치해석보다 정확한 정보를 제공하지만 모델변경에 제한사항이 존재하기 때문에 다양한 실험에 적용되지 못한다는 단점을 가지고 있다. 반면 수치해석은 모델의 경계조건만 확보된다면 실험적 방법보다 예측이 용이하다. 하지만 경계조건 설정을 위한 자료 확보가 어려우며 계산결과에 대한 오차도 고려해야 한다.³⁾

본 연구는 축소모델 실험결과를 경계조건으로 하여 수치해석적 방법으로 연무의 거동을 예측하고 예측된 결과를 실험결과와 비교하여 실물적용 가능성을 검토하고자 했다. 실물적용 가능 여부를 판단하기 위해서는 객관적인 판단기준이 필요하다. 이미 선행 연구에서 축소모델을 이용한 실험결과가 Froude 상사를 통해 실물에 적용될 수 있음이 밝혀졌으므로 동일한 방법으로 추가 실험을 하여 실물적용 가능여부를 판단할 기준을 만들고 기준에 의거해 수치해석결과와 실험결과를 비교하고자 했다. 검토결과 수치해석적 방법으로 예측된 결과가 실물적용에 무리가 없다면, 다양한 실험조건에 대한 후속연구를 수치해석적 방법을 이용해 진행할 수 있을 것이라 사료된다.

2. 수치해석결과의 타당성 평가를 위한 실험

선행된 연구에서 기하학적 상사를 가지는 축소모델을 이용한 실험결과가 서로 상사성을 이루는 것으로 확인되었다.⁵⁾ 이것은 실물과 기하학적으로 상사를 가지는 축소모델에서의 실험결과가 Froude 상사를 통해 실물에 적용될 수 있음을 나타낸다. 축소모델과 실물간의 상사가 확인되었으므로, 수치해석을 통해 예측된 연무의 거동이 실물에 적용될 수 있는지 판단하기 위해서는 수치해석결과와 축소모델 실험결과를 비교하여 서로 개연성이 있는지를 검토해야 한다. 수치해석결과와 축소모델 실험결과를 비교하기 위해서는 객관적인 판단기준이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 위한 경계조건 확보와 수치해석결

과와 실험결과를 비교하기 위한 기준설정을 위해 선행연구⁵⁾와 동일한 실험방법으로 추가실험을 수행하였다.

Table 1은 각각의 모델에 대한 추가실험 결과 중 모델 높이에 따른 연무의 온도분포를 나타낸 것이고 Table 2는 실험을 통해 계산된 연무의 배기량을 질량 기준으로 나타낸 것이다. 측정된 온도자료는 열전대 비드의 복사로 인한 열손실을 보정하여 나타냈다. Fig. 1은 높이에 따른 연무의 온도분포를 각 실험별로 시각화하여 표준편차와 함께 나타낸 것이다. 이론값은 실제 실험에서 발생하는 벽면을 통한 열손실이나 연무와 벽면에 의한 복사효과가 고려되지 않았기 수치해석적 기법으로 연무의 거동을 예측할 때 벽면을 통한 열손실과 복사효과를 고려하지 않으면 Zukoski plume 방정식에 의한 이론값과 유사할 것이고 열손실과 복사효과를 고려한 경우에는 축소모델을 이용한 실험결과와 유사하게 나타날 것으로 예상되었다. 그리고 벽면을 통한 열손실과 복사를 고려한 수치해석결과가 축소모델 실험결과의 표준편차 내에 존재한다면 수치해석적으로 예측된 연무의 거동은 실물 적용에 있어 큰 무리가 없다고 본다.

3. 수치해석 공간 및 제원

3.1. 수치해석 공간

수치해석 공간은 내부용적이 1 m³(1 m × 1 m × 1 m)인 모델 A와 내부용적이 0.125 m³(0.5 m × 0.5 m × 0.5 m)인

Table 1. Temperature distribution with respect to height

Model A			Model B		
H (m)	T (°C)		H (m)	T (°C)	
	z* = 0.4	z* = 0.8		z* = 0.4	z* = 0.8
0.1	36.3 ± 1.3	32.8 ± 1.5	0.05	36.8 ± 1.3	30.5 ± 1.3
0.2	46.3 ± 3.8	38.8 ± 1.9	0.10	45.5 ± 3.7	35.3 ± 1.5
0.3	57.0 ± 7.7	43.3 ± 2.1	0.15	50.8 ± 4.3	41.5 ± 1.3
0.4	76.5 ± 11.8	46.0 ± 2.2	0.20	54.0 ± 2.9	43.0 ± 1.8
0.5	95.5 ± 10.1	55.5 ± 1.0	0.25	63.3 ± 3.8	49.3 ± 2.1
0.6	120.3 ± 11.1	65.3 ± 3.3	0.30	104.3 ± 13.5	55.3 ± 2.2
0.7	130.8 ± 13.9	82.0 ± 4.1	0.35	133.5 ± 8.7	63.0 ± 1.6
0.8	159.0 ± 9.9	92.0 ± 4.8	0.40	152.8 ± 17.0	104.0 ± 19.4
0.9	188.0 ± 16.5	115.8 ± 9.1	0.45	136.3 ± 17.0	103.3 ± 15.4

H : model height, z* : non-dimensional fume layer height

Table 2. Non-dimensional mass flow rate ($\bar{Q} = 0.0087$)

Model	z*	\dot{m} (kg/s)	dotm*
A (H = 1 m)	0.4	$2.6 \times 10^{-2} \pm 1.4 \times 10^{-4}$	$6.9 \times 10^{-3} \pm 3.7 \times 10^{-5}$
	0.8	$7.4 \times 10^{-2} \pm 4.5 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-2} \pm 1.2 \times 10^{-4}$
B (H = 0.5 m)	0.4	$1.0 \times 10^{-2} \pm 6.9 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-2} \pm 1.0 \times 10^{-4}$
	0.8	$1.9 \times 10^{-2} \pm 8.3 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-2} \pm 1.2 \times 10^{-4}$

H : model height, z* : non-dimensional fume layer height, \dot{m} : mass flow rate, dotm* : non-dimensional mass flow rate

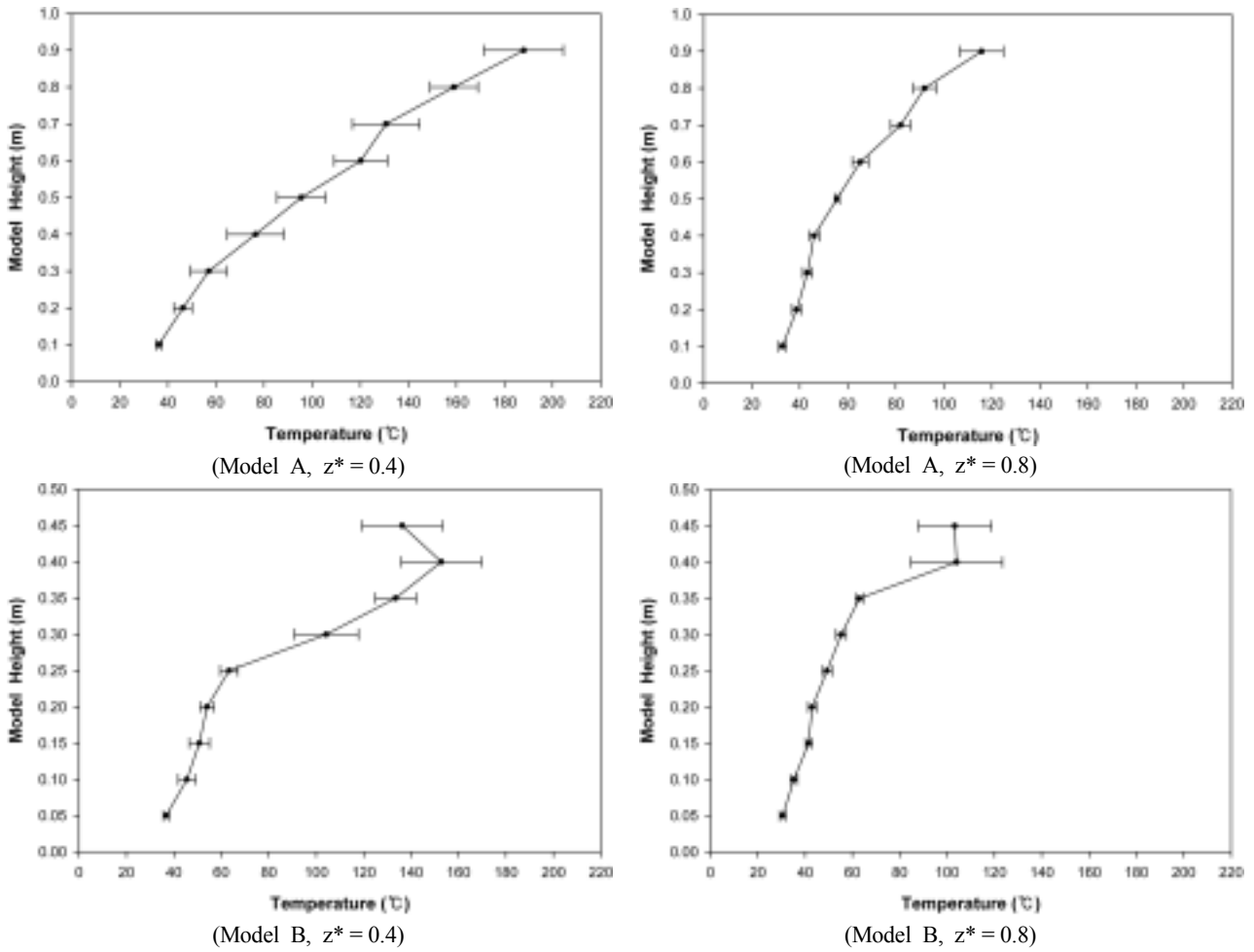


Fig. 1. Temperature distribution with respect to height.

모델 B로 축소실험에 사용된 모델과 동일한 크기 및 형상을 가진다. Fig. 2는 수치해석에서 사용된 축소모델을 보여주는 그림이다. 수치해석에 사용된 축소모델의 내부 바닥 중심에는 연무를 발생시키기 위해 mass-flow inlet을 지정하여 에너지원인 n-heptane이 공급될 수 있도록 하였고

바닥의 나머지 면적에는 연소에 필요한 외부공기가 유입될 수 있도록 velocity-inlet을 마련하였다. 모델의 내부 천장에는 배연시 연무의 유동교란을 예방하고 원활한 배기가 이루어 질 수 있도록 모델별로 각각 직경 30 mm와 20 mm의 홀을 만들었고 각각의 홀을 통해 연무가 배연될 수

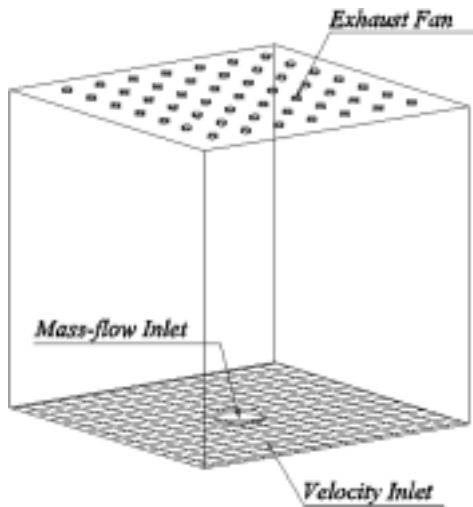


Fig. 2. The schematic diagram of the computation domain.

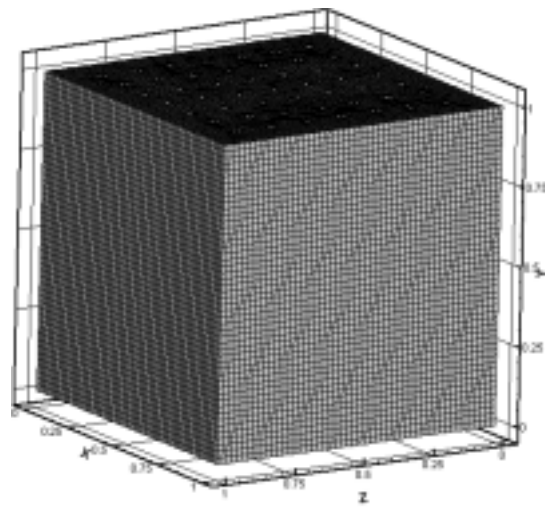


Fig. 3. The grid of the computation domain.

있도록 exhaust-fan을 지정하였다. 홀과 velocity-inlet, mass-flow inlet을 제외한 나머지 면들은 wall로 설정하여 연무가 외부로 유출되지 않도록 하였다. Fig. 3은 축소모델을 기준으로 생성된 격자를 보여주는 그림이다. 모델 A와 모델 B는 각각 163,839개, 122,965개의 격자로 구성되었다.

3.2. 경계조건 및 해석방법

Table 3은 선행된 실험 자료로부터 결정된 각각의 모델에 대한 경계조건을 나타낸 것이다. mass-flow inlet은 연무를 생성하기 위해 n-heptane이 연소되는 곳이다. 연료공급량은 선행실험에서 제시된 발열량을 고려하여 산정했다. 그리고 실험에서 측정된 배기량 자료를 이용하여 velocity-inlet의 유입속도와 exhaust-fan의 배기압력을 결정하였다. 벽면으로부터 손실되는 열을 고려하기 위해서 추가실험에서 구해진 벽면온도를 기준으로 적절한 열플럭스가 적용되었다. 각 모델에 적용된 열손실량은 Table 4에 표시하였다.

에너지와 복사에 대한 방정식의 잔차(residual)가 10^{-6} 미만, 나머지 방정식의 잔차가 10^{-3} 미만일 때를 수렴기준으로 정하여 반복계산을 수행한다. 모든 방정식에 대해 하양이완법(under-relaxation method)을 사용하여 수렴을 유도했다. 하양이완법은 반복과 반복사이에 종속변수 값의 변화를 느리게 하는 방법으로 비선형 문제에 대단히 유용하다.³⁾

반복계산으로부터 구해진 연무는 연소생성물들(CO₂, H₂O, CO, H₂, O₂, N₂ 등)의 몰비(mole fraction)로서 정의된다. 연소에 의해 발생하는 연무는 크게 눈에 보이지 않는 가스상(gas phase)과 눈에 보이는 입자상(particle phase)으로 구성되며, 입자상은 다양한 입경을 가지는 액적이나 고체상 입자들로 이루어진다. 연무의 가스상 중 특히 많은 부분을 차지하는 CO₂는 독성이 없지만 상대적으로 농도가 높은 경우(O₂ 농도 15% 미만에서 CO₂ 농도 5% 초과) 질식효과를 가지며 과호흡(hyperventilation)을 유발하므로 독성가스 및 다른 질식성 가스의 흡입량을 증가시킨다. 그리고 대부분의 입자상들은 자극성 물질이 포함된 가스상이 용해되거나 흡착된 액적이나 고체상 물질이다.⁴⁾ 본 연구에서는 연소생성물 중 가장 많은 부분을 차지하면서 유해성을 가지는 CO₂의 농도를 연무의 농도로 대표하여 나타내었다. 그리고 수치해석에서 입자상 물질의 생성에 대한 계산이 용이하지 않으므로 연무의 시각적인 효과를 고려하기 위해 H₂O의 농도를 연무의 농도에 포함시켰다.

연층이 형성되는 구간을 판단하기 위해 모델의 체적높이에 따른 연무농도 변화를 시각화하여 연무농도의 변화가 심한 곳을 연층 생성 지점으로 판단했다. 연무의 농도분포가 중력방향인 Y축에 대해 축대칭(axisymmetric)이라 가정하고 연무의 농도 및 온도 분포를 대표할 수 있는 모델 중앙에서 Y축방향의 단면을 시각화 구간으로 정한다. 그리고 화원에 의한 영향과 벽면에 의한 영향을 최소화하기 위해 중앙단면의 벽면으로부터 화원과 벽면 사이 거리의

1/10에 해당하는 곳을 연무의 농도자료 추출 지점으로 한다.

Table 3. The boundary conditions

	Model A (H=1.0 m)		Model B (H=0.5 m)	
	Z*=0.4	Z*=0.8	Z*=0.4	Z*=0.8
Mass-flow inlet(kg/s)	2.2×10^{-4}	2.2×10^{-4}	3.8×10^{-5}	3.8×10^{-5}
Velocity-inlet(m/s)	2.0×10^{-2}	5.9×10^{-2}	3.3×10^{-2}	6.3×10^{-2}
Exhaust-fan(Pa)	-3.7×10^{-1}	-2.5×10^0	-2.5×10^{-1}	-8.0×10^{-1}

Table 4. Heat loss from the wall(T₂ = 25°C)

Model	z*	T ₂ *(°C)	ΔT(K)	h ₃ (W/m ² · K)	q(kW)
A (1 m × 1 m × 1 m)	0.4	49	24	3.92	0.38
	0.8	37	12	3.06	0.15
B (0.5 m × 0.5 m × 0.5 m)	0.4	41	16	3.39	0.05
	0.8	36	11	2.96	0.03

4. 수치해석 결과 및 고찰

4.1. 벽면열손실 및 복사효과를 고려한 경우

실제 실험에서는 벽면을 통한 열손실과 벽면과 연무에 의한 복사효과가 존재한다. 하지만 Zukoski plume으로 계산된 이론계산결과는 실제 실험에서 발생하는 열손실과 복사효과를 고려하지 않는다. 따라서 벽면을 통한 열손실 및 복사효과를 고려한 수치해석 결과는 축소실험 결과와 유사하게 나타날 것으로 예상된다. Fig. 4, 5는 벽면 열손실 및 복사효과를 고려하여 수치해석된 연무의 온도 및 농도 분포를 나타낸다. 각 모델에서 z*=0.4, z*=0.8 부근에서 연무의 농도변화가 급격히 상승하는 것을 살펴볼 수 있다. 이것은 해당 높이에서 연층이 생성되는 것을 간접적으로 보여주는 것이다. 그리고 연무의 온도 및 농도 분포는 배기량이 증가할수록 Y축에 대한 대칭현상이 뚜렷하게 나타났다.

수치해석을 통해 얻어진 연무의 온도는 축소모델 실험 결과에서 구해진 값보다 비교적 높게 예측되었다. 이것은 실제 실험에서 발생하는 열손실이 벽면 온도와 주위 온도차를 이용해 구해진 열손실량 보다 크기 때문이다. 수치해석에서는 수치해석 공간을 둘러싸고 있는 모델의 벽면에 의한 열 손실만을 고려했다. 하지만 실제 축소모델 실험에서는 천정에 설치된 양철 후드가 많은 양의 열을 외부로 손실시키고 모델 자체도 완전한 밀봉상태가 아니기 때문에 모델 이음새 부분에서 외부 공기와 접촉하여 열손실이 발생할 가능성이 있다.

4.2. 벽면열손실 및 복사효과를 고려하지 않은 경우

지하공간에서 발생하는 화재와 같이 반밀폐형 공간에서 발생하는 연무는 축소실험과 달리 벽면을 통한 열손실이 거의 없다. 벽면을 통한 열손실은 축소모델 실험과정에서 발생하는 부가적인 실험조건이므로, 벽면열손실과 복사효과를 고려하지 않고 수치해석된 결과는 Zukoski plume 방

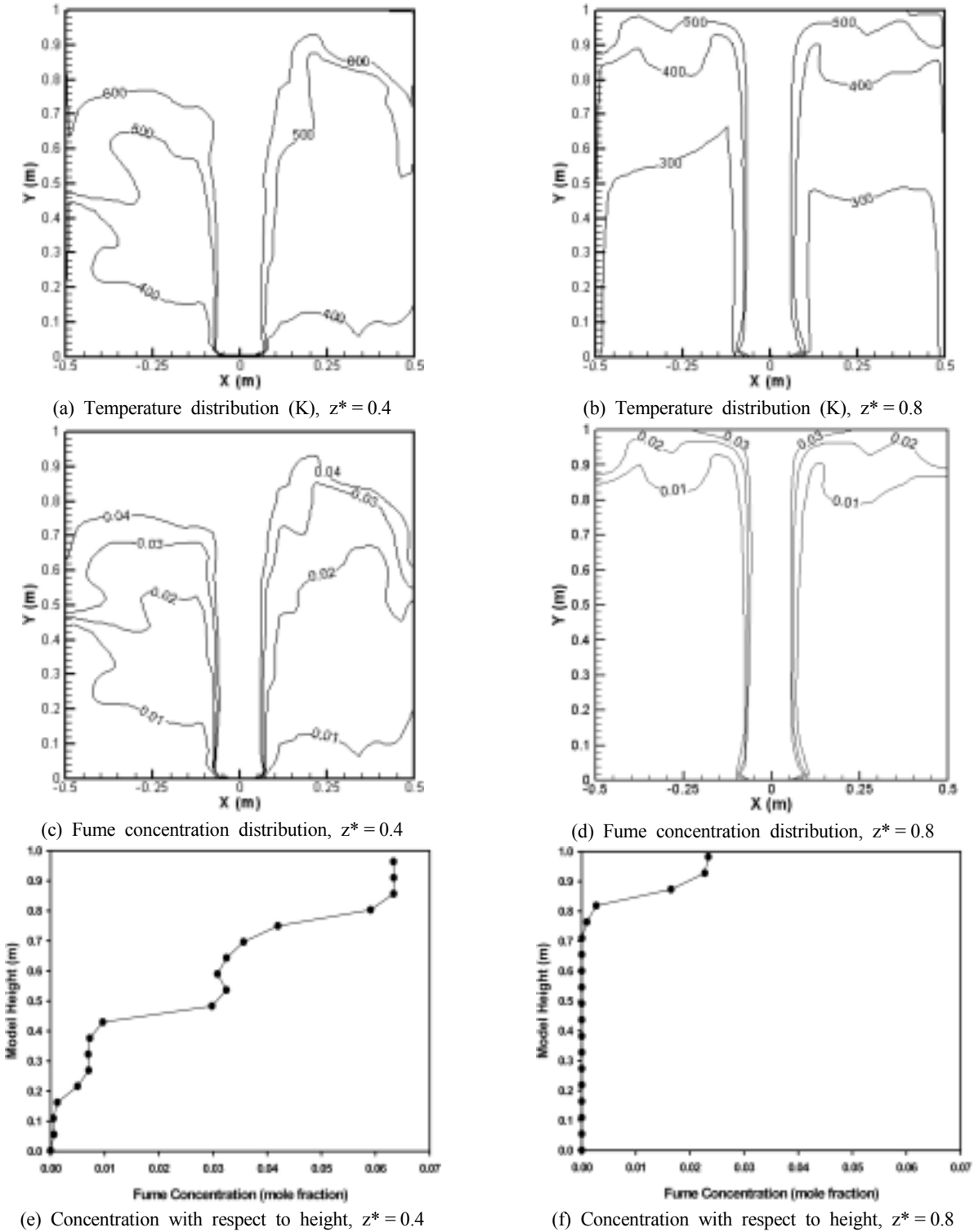


Fig. 4. Result of the numerical study, model A.

정식에 의해 유도된 이론치와 개연성을 가질 것으로 예상된다. Fig. 6, 7은 벽면열손실 및 복사효과를 고려하지 않고 수치해석된 연무의 온도 및 농도 분포를 나타낸다. 벽면열손실 및 복사효과를 고려하지 않은 경우는 열손실 및 복사효과를 고려한 경우 보다 연층이 생성되는 높이가 비교적 상승되었고 전체적인 온도도 높게 예측되었다.

4. 3. 수치해석 결과 비교

Fig. 8, 9와 Fig. 10, 11은 각각 모델 A, 모델 B를 이용한 수치해석결과를 무차원수로 나타낸 그림이다. 그림에서 Zukoski plume 방정식으로부터 예측된 연무발생량(\bar{m}^*)과 연무의 온도를 열적부하(\bar{Q})에 대해 연속적으로 나타

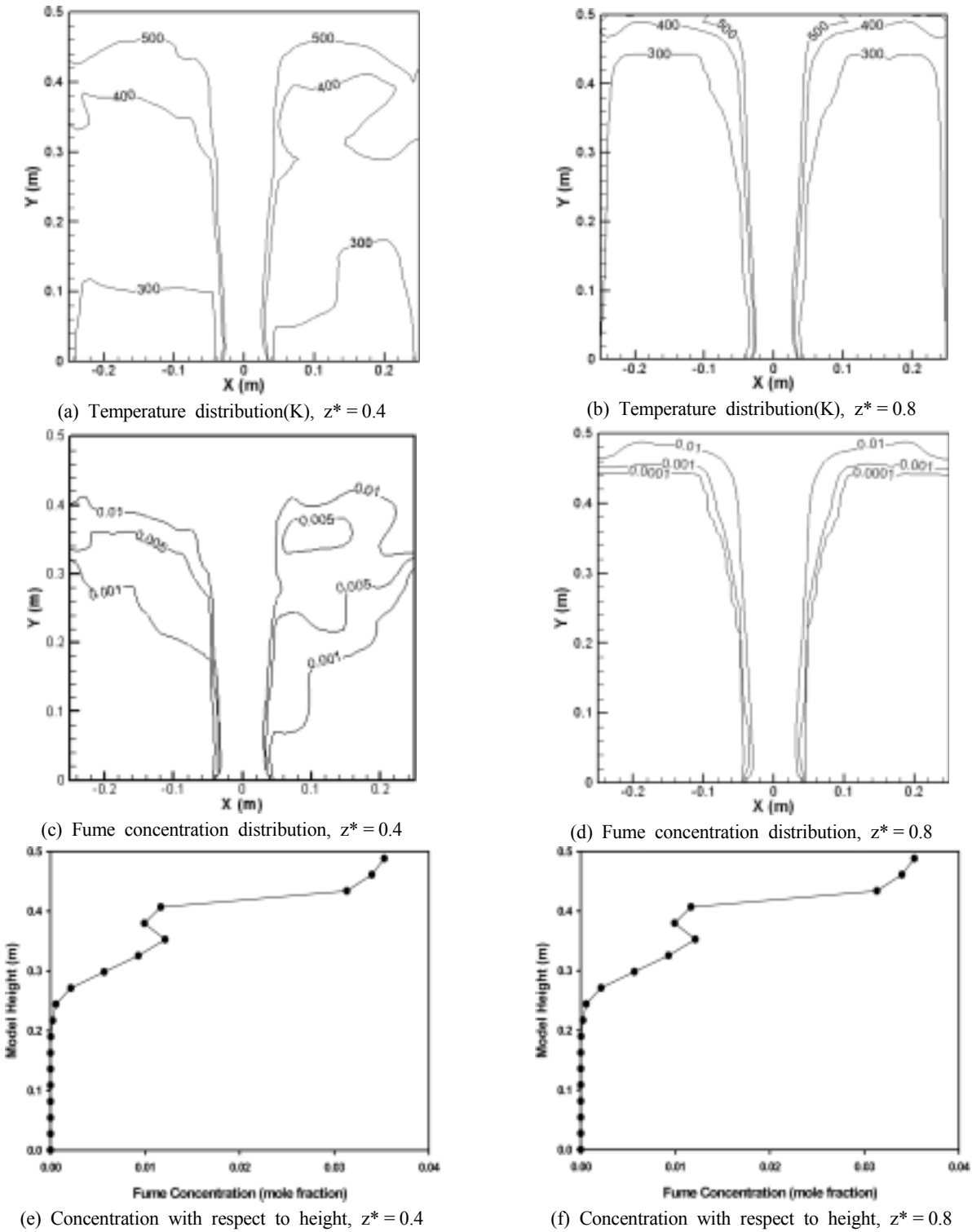
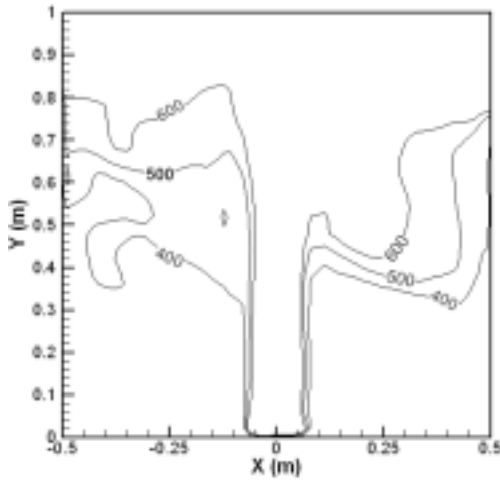


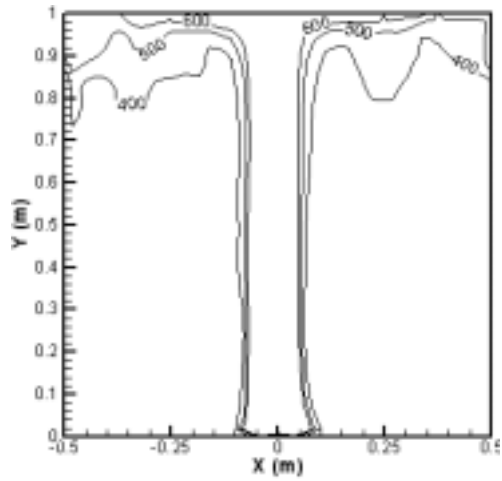
Fig. 5. Result of the numerical study, model B.

내었고 축소모델 실험에 의한 결과를 편차범위와 함께 표시하였다. 수치해석으로 예측된 연무의 거동이 실험에 적용되기 위해서는 벽면을 통한 열손실 및 복사효과를 고려해 예측된 수치해석 결과가 실험결과의 표준편차범위에 포함되어야 한다. 예측된 연무발생량은 모델 A, B에서 모두 축소모델 실험결과의 편차범위 내에 포함되었다. 하지만 모

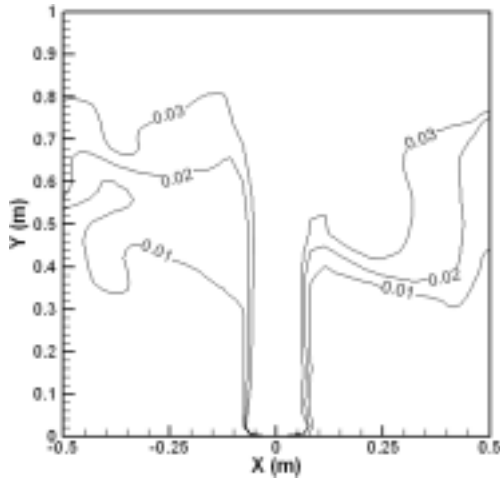
델 A의 경우 연무의 온도가 실험결과보다 비교적 높게 예측되었고 모델 B에서는 $z^* = 0.4$ 에서는 높게, $z^* = 0.8$ 에서는 낮게 예측되었다. 이렇게 예측된 온도가 실험결과와 일치하지 않는 이유는 앞서도 언급했듯이 축소모델에서 발생할 수 있는 모든 열손실이 고려되지 않았고 단지 축소모델의 벽면을 통한 열손실만 고려되었기 때문이다.



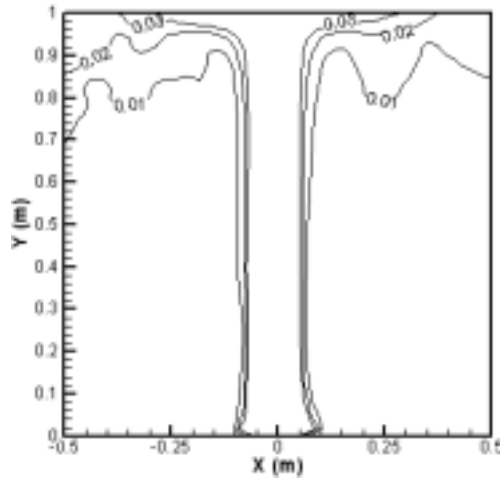
(a) Temperature distribution(K), $z^* = 0.4$



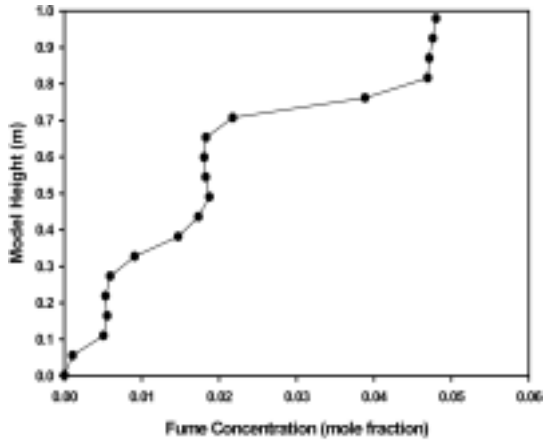
(b) Temperature distribution(K), $z^* = 0.8$



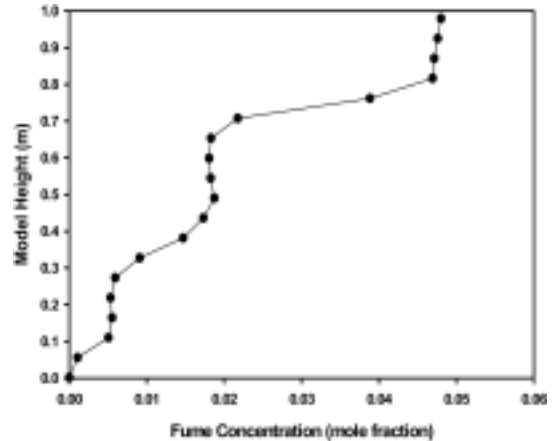
(c) Fume concentration distribution, $z^* = 0.4$



(d) Fume concentration distribution, $z^* = 0.8$



(e) Concentration with respect to height, $z^* = 0.4$



(f) Concentration with respect to height, $z^* = 0.8$

Fig. 6. Result of the numerical study, model A.

수치해석적으로 예측된 연무의 거동은 벽면을 통한 열 손실 및 복사효과를 고려하지 않으면 Zukoski plume 방정식으로 유도된 이론값과 비슷할 것이고 열손실 및 복사효과를 고려한 경우에는 축소모델 실험 결과와 유사하게 나타날 것이라 예상했다. 하지만 예측된 연무의 온도가 실험 결과 및 이론값과 많은 차이를 보였고 Zukoski plume

방정식이 본 연구에서 사용된 field model 보다는 zone model의 알고리즘과 유사하기 때문에 위에서 언급된 상관관계를 파악하는 데는 어려움이 있었다.

수치해석 결과를 모든 에너지방출량에 대해 적용하기 위해서는 실험 결과와 마찬가지로 각 에너지 방출량에 대해 예측된 배기량 및 온도분포가 서로 간에 개연성을 가져야

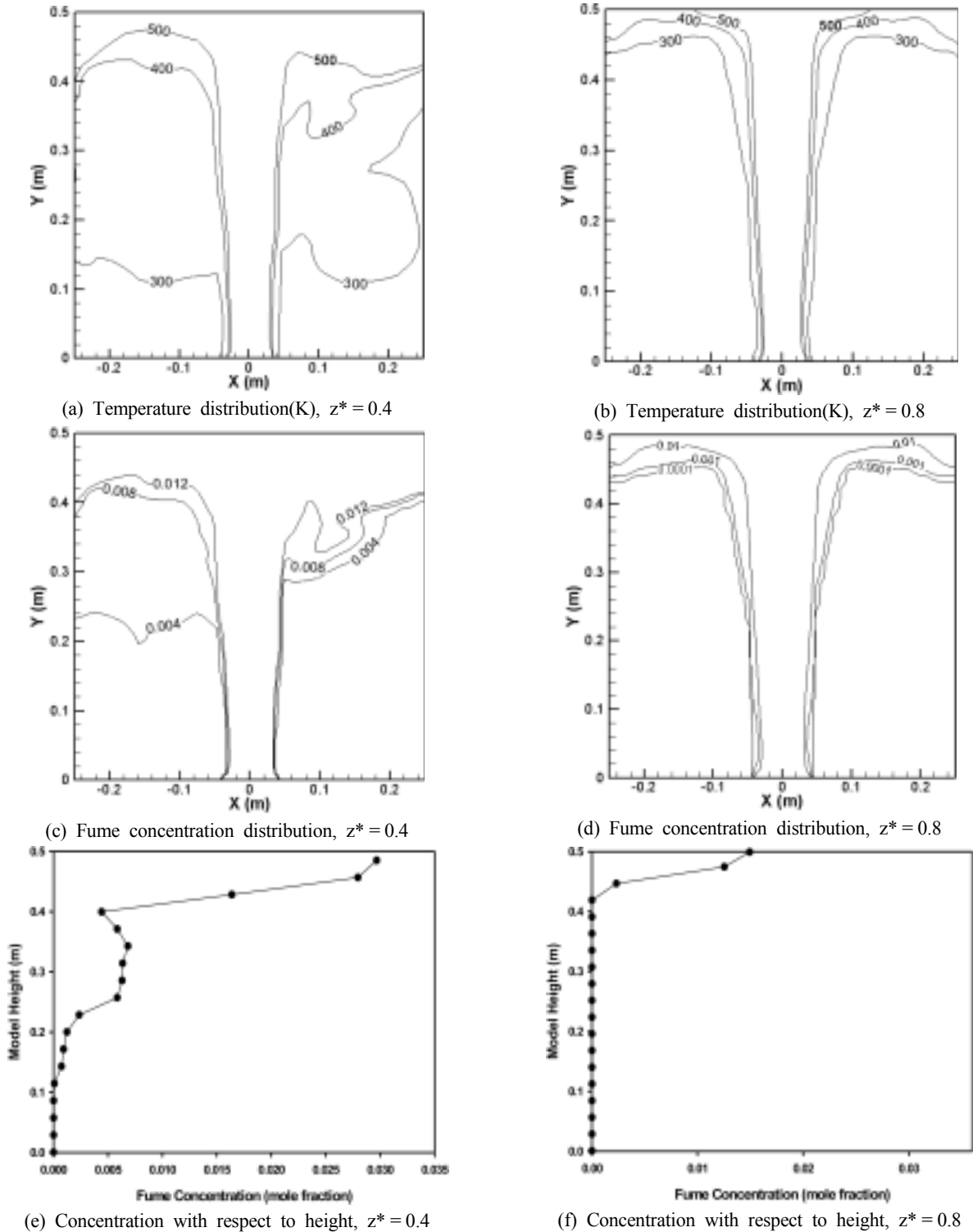


Fig. 7. Result of the numerical study, model B.

한다. 본 연구에서는 이런 개연성을 판단하기 위해 비교적 열손실에 의한 영향이 적은 모델 B를 이용해 $\dot{Q}^* = 0.0052$, $\dot{Q}^* = 0.0186$ 인 경우에 대한 추가실험을 수행하였고 실험 결과를 경계조건으로 $z^* = 0.8$ 인 경우에 대해 수치해석 하였다. 수치해석결과는 Zukoski plume 방정식으로부터 유도된 이론값과 비교하여 Fig. 12, 13에 나타내었다. 질량기

준 무차원 배기량은 에너지 방출량이 증가함에 따라 실험 결과와 유사한 패턴을 가짐을 알 수 있었다.

국소배기시스템에서 실제 배기량을 결정하기 위해서는, 질량기준의 배기량이 아니라 온도변화에 대한 부피팽창 까지 고려된 부피기준 배기량이 사용되어야 한다. Fig. 14는 실험 결과와 수치해석 결과로부터 배기온도를 고려하

여 산정된 배기량과 Zukoski plume 방정식으로 부터 유도된 이론 배기량을 비교해서 나타낸 그림이다. Zukoski plume 방정식으로 부터 유도된 이론값에서 점선으로 표시된 것은 상온(normal temperature)을 기준으로 예측된 결과이고 실선은 열원에 의한 온도변화까지 고려된 결과이다. 축소 모델 실험 결과로 산정된 배기량은 단열조건이 아니기 때문에 이론값보다 비교적 적은 것으로 나타났다.

Table 5. Result of the numerical study

Model	z*	Non-adiabatic condition		Adiabatic condition	
		T _f (°C)	\dot{m}^*	T _f (°C)	\dot{m}^*
A (1 m × 1 m × 1 m)	0.4	380	7.6 × 10 ⁻³	593	7.8 × 10 ⁻³
	0.8	215	2.2 × 10 ⁻²	306	2.0 × 10 ⁻²
B (0.5 m × 0.5 m × 0.5 m)	0.4	174	1.3 × 10 ⁻²	128	1.5 × 10 ⁻²
	0.8	72	2.4 × 10 ⁻²	90	1.8 × 10 ⁻²

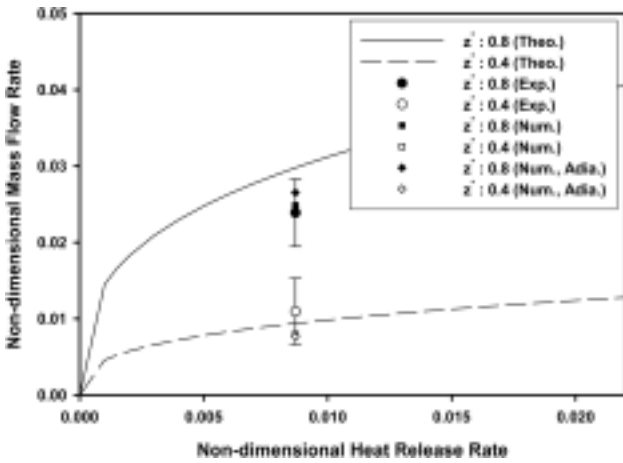


Fig. 8. Non-dimensional mass flow rate (\dot{m}) with respect to non-dimensional heat release rate (\dot{Q}), model A.

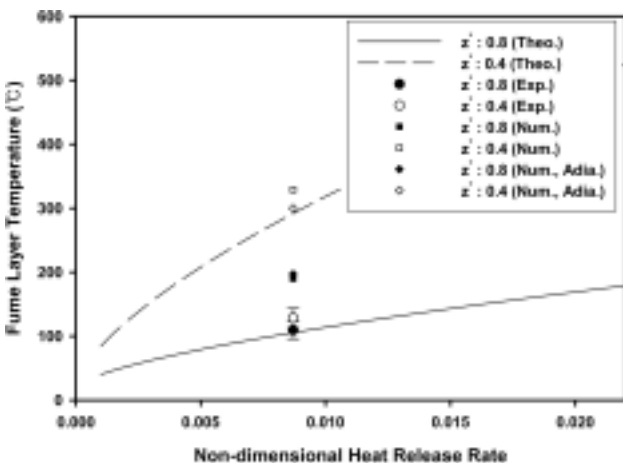


Fig. 9. Fume layer temperature with respect to non-dimensional heat release rate (\dot{Q}), model A.

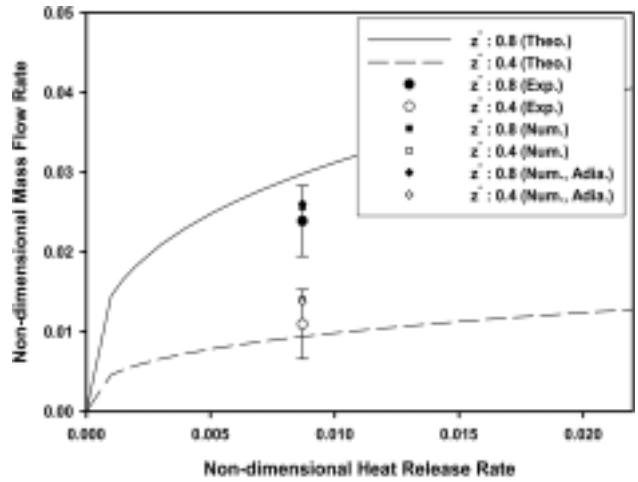


Fig. 10. Non-dimensional mass flow rate (\dot{m}) with respect to non-dimensional heat release rate (\dot{Q}), model B.

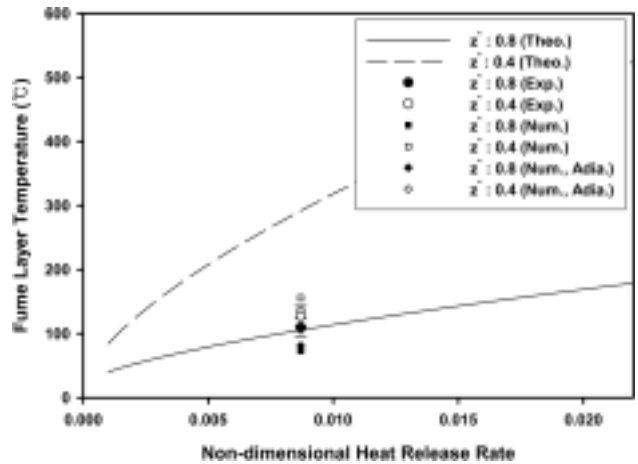


Fig. 11. Fume layer temperature with respect to non-dimensional heat release rate (\dot{Q}), model B.

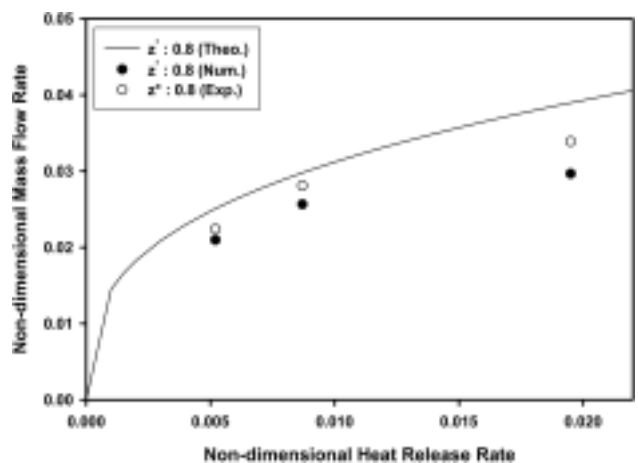


Fig. 12. Comparison of Non-dimensional mass flow rates (\dot{m}) with respect to non-dimensional heat release rate (\dot{Q}), model B.

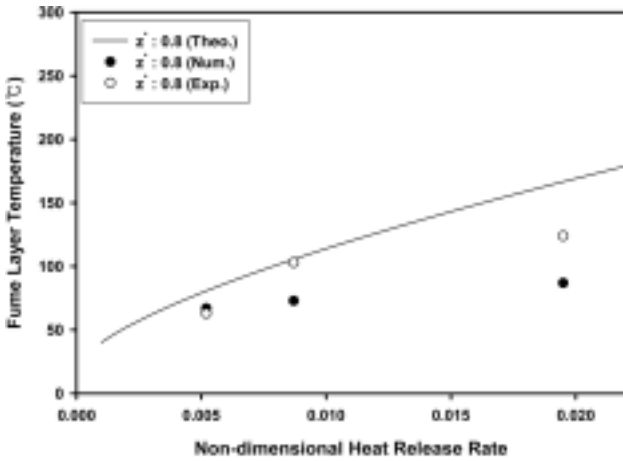


Fig. 13. Comparison of Fume layer temperature with respect to non-dimensional heat release rate(\dot{Q}), model B.

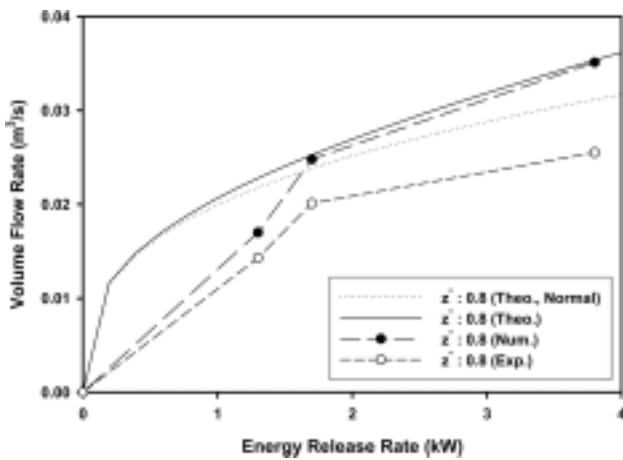


Fig. 14. Volume flow rate with respect to energy release rate ($z^* = 0.8$).

5. 결론

지하철 역사나 작업장과 같은 반밀폐형 공간에서 발생하는 비등은 고농도 연무의 배기량 산정을 위한 수치해석적 연구가 수행되었다. 수치해석적으로 예측된 연무의 거동은 벽면을 통한 열손실 및 복사효과를 고려하지 않으면 Zukoski plume 방정식으로 유도된 이론값과 비슷할 것이고 열손실 및 복사효과를 고려한 경우에는 축소모델 실험 결과와 유사하게 나타날 것이라 예상했었다. 하지만 예측된 연무의 온도가 실험 결과 및 이론값과 많은 차이를 보여 상관관계를 파악하는 데는 어려움이 있었다.

벽면을 통한 열손실 및 복사효과를 고려하여 예측된 배기량이 축소모델 실험 결과의 표준편차 범위 내에 존재하였지만 에너지 방출량이 증가할수록 예측된 연무의 온도가 축소모델 실험 결과와 많은 차이를 보였다. 그리고 비교적 열손실에 의한 영향이 적은 모델 B를 이용해 $\dot{Q} = 0.0052$, $\dot{Q} = 0.0186$ 인 경우에 대한 수치해석을 추가로 수행하였는데, 에너지 방출량이 증가함에 따라 예측된 배기량이 실험 결과와 유사한 패턴을 가지는 것으로 나타났다. 하지만 연무의 온도가 에너지방출량이 증가함에 따라 측정값과 많은 차이를 보였다.

이상의 결과로 미루어 볼 때, 에너지 방출량 및 모델의 크기에 따른 열손실을 보정할 적절한 보정계수를 구할 수 있다면 수치해석으로 예측된 연무의 거동을 실험에 적용하는데 무리가 없고 다양한 실험조건에 대한 후속연구를 수치해석을 이용해 진행할 수 있을 것이라 사료된다.

사사

이 논문은 2006학년도 영남대학교 학술연구조성지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Karlsson, B. and Quintiere, J. G., "Enclosure Fire Dynamics," CRC Press(2000).
2. Merriam-Webster, Inc., "Merriam-Webster's Collegiate Dictionary," Merriam-Webster, Inc(2003).
3. Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," John Benjamins Publishing Co(1980).
4. SFPE, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering," 3rd ed., National Fire Protection Association, Inc (2002).
5. 장혁상, 최병일, 박재철, 김명배, "반밀폐형 공간에서 비등은 고농도 연무의 배연산출량 산정을 위한 Froude 상사 연구," 대한환경공학회지, 27(8), 887~885(2005).
6. 환경부, "다중이용시설 등의 실내공기질관리법,"제5조 1항 (2005).