

A-11

CFD 모델을 이용한 화재용 열량계의 유동해석

김성찬

경일대학교 소방방재 학부

Analysis of Exhaust Flow of a Large Scale Fire Calorimeter using CFD Model

Kim, Sung Chan

School of Fire and Disaster Prevention, Kyungil University

요 약

발열량은 화재현상을 이해하고 화재의 위험도를 평가하는데 있어서 가장 기본이 되는 물리량으로 화재강도를 나타내는 척도로 인식되고 있다. 발열량의 신뢰성은 화재 물성이나 공간화재 특성의 이해뿐만 아니라 화재해석을 통한 위험성 평가에 있어서 중요한 요소이기 때문에 측정의 신뢰성이 매우 중요하다. 본 연구에서는 수치해석 모델을 통하여 화재 발열량계의 배기덕트 구조에 따른 내부 유동특성을 파악하고자 한다. 해석결과를 바탕으로 각 측정점의 위치에 따른 상태오차 정도를 분석하고 산소소모법에 의해 계산된 발열량을 비교한다. 화재 발열량계의 수치해석을 통하여 발열량 산정의 오차특성을 평가함으로써 발열량계 설계 과정을 최적화하고 효과적인 발열량계 운영을 위한 기초자료를 얻는데 기여하고자 한다.

1. 서 론

발열량(heat release rate)은 화재의 크기정도를 나타내는 척도으로써 화재위험의 정도를 평가하고 방화설계를 위한 가장 기본적이고 중요한 화재 요소의 하나로 인식되고 있다. 발열량은 화재로부터 방출되는 열에너지로써 가연물 종류나 양에 따라 다르지만 $1^1 \sim 10^3$ W의 매우 폭 넓은 크기정도를 가지기 때문에 발열량을 정량적으로 측정하는 과정이 간단하지 않다.

화재의 발열량을 측정하는 방법에는 몇 가지 방법이 있으나 연소과정중 화학적 조성변화를 계측하여 화학적 발열량(chemical heat release rate)를 산정하는 방법이 실규모 화재 실험(real scale fire test)에서 널리 이용되고 있다. 연소과정의 물질변화에 기초한 발열량 측정방법은 증발된 연료가 모두 연소한다는 가정하에 연소된 연료의 양을 계측하여 산정할 수도 있고 연소과정중에 연료와 반응한 산소의 양을 계측하여 발열량을 정량화 할 수 있다. 이중 반응한 산소량에 기초한 방법은 대부분의 탄화수소계 연료가 연소과정중에 산

소의 연소열이 매우 일정하다는 사실에 근거하여 소모된 산소량과 산소의 연소열을 고려함으로써 발열량을 평가하게 되는데 이는 Hugget의 산소소모법에 기초하고 있다. [1].

산소소모법에 의한 발열량의 산정은 배기덕트에서의 산소소모계수(oxygen depletion factor)와 배기가스의 질량유량의 측정에 의해 이루어지기 때문에 배기덕트에서의 유동특성을 이해하고 측정을 최적화하는 과정이 매우 중요하다. 발열량계의 설계 및 운용에 관한 일부 연구가 보고된 적이 있으나[2,3] 대부분의 화재용 발열량계는 명확한 현상에 대한 이해와 정량적인 설계인자의 최적화를 통해 이루어지기보다 엔지니어의 직관과 경험에 의존하여 설계되어 왔다.

본 연구에서는 배기덕트의 형태에 따른 유동특성을 파악하고 측정조건과 화재조건 및 배기조건에 따른 발열량 측정의 오차를 수치적으로 해석하고자 한다. 이러한 해석결과를 통하여 화재 발열량계의 설계 및 운용과정에 효율성을 도모하고 불확실성을 최소화하여 신뢰성 높은 발열량 측정을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 수치해석 모델

본 연구의 해상대상은 미국립 표준기술연구원(NIST)의 대규모 화재실험동 내에 설치된 3 m × 3 m 후드를 가진 화재 발열량계로써 주로 가구나 단일 가연물의 발열량을 측정하는데 이용된다(그림 1). 바닥에서 후드의 측면까지의 높이는 2.4 m. 후드의 높이는 약 1.66 m 정도이며 화염으로부터 후드를 보호하기 위하여 후드의 내부는 내화단열재로 도포되어 있다. 화재에서 발생한 연소생성물은 직경 49 cm의 배기덕트에서 측정이 이루어지고 직경 2 m의 주배기관과 후연소버너(after burner) 및 집진설비를 통과한 후 외부로 배출된다. 교정버너(calibration burner)는 한 번의 길이가 31 cm인 경사각형으로 바닥으로부터 70 cm 높이에 설치되고 연료는 천연가스(natural gas)를 이용한다. 일반적으로 후드와 연결된 배기덕트는 직관이 유리하나 화재실험동의 공간상의 제약으로 인해 곡관을 사용하여 덕트의 길이를 연장하게 된다. 본 연구에서는 후드와 연결된 덕트가 직관인 경우와 곡관인 경우에 대해 배기덕트 내부에서의 유동형태를 비교 분석한다.

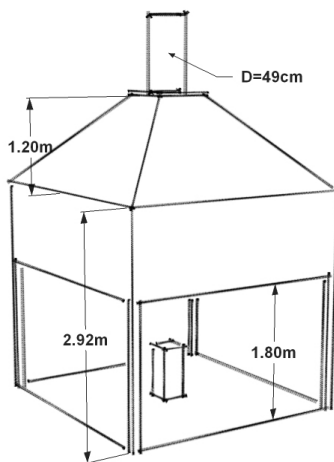
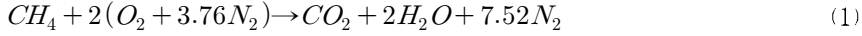


그림 1. 해석 대상 화재발열량계의 개략도와 사진

수치해석에 적용된 연소모델은 반응율이 난류혼합과정에 의존하고 반응과정은 매우 빠르다고 가정하는 에디소산모델(eddy dissipation model)을 적용하였고 반응기구는 메탄(CH₄)의 일단계 연소반응을 가정하여 연소생성물은 CO₂, H₂O의 생성만을 고려한다.



난류유동은 부력에 의한 난류생성 및 소멸을 고려한 수정된 k-ε모델을 적용하였으며 복사열전달은 DTRM 모델에 의해 해석되고 연소가스의 복사물성치는 회색가스중합법(WSGGM)에 의해 계산된다. 후드의 아래쪽과 배기덕트의 출구에는 압력경계조건을 적용하였으며 후드아래쪽의 압력차는 0 pa, 배기덕트 끝단에서는 음의 압력을 적용하여 연소생성물이 후드덕트 및 배기덕트를 통해 출구로 배출되도록 설정하였다. 버너 입구에서 메탄의 질량유량은 발열량과 연소열에 기초하여 산정하였다.

$$\dot{m}_f = \dot{Q} / \Delta H_c \quad (2)$$

산소소모비에 발열량 산정은 배기덕트에서의 질량유량과 산소소모 계수에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = \frac{\dot{m}_{O_2}^o - \dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_{O_2}^o} = \frac{X_{O_2}^o(1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2}(1 - X_{CO_2}^o)}{(1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO})X_{O_2}^o} \quad (3)$$

$$\dot{Q} = (\Delta H_c)_{O_2} \phi \frac{\dot{m}_e}{1 + \phi(\alpha - 1)} (1 - X_{H_2O}^o) X_{O_2}^o \frac{MW_{O_2}}{MW_{air}} \quad (4)$$

3. 해석결과

그림 2는 90° 곡관이 적용된 화재발열량계의 중앙단면에서의 반응율, 온도, 속도, 산소농도 분포를 나타낸다. 화원부근에서 발생한 연소생성물은 후드부로 수집되고 배기덕트내에서 유동을 가속되어 곡관을 지나게 되고 곡관의 바깥쪽에서 유동은 가속되고 안쪽에서는 감속되어 곡관부의 끝단에서 박리현상이 일어난다. 수평관을 통과하는 동안 유동은 발달된 형태를 보이고 덕트의 상부쪽의 유속이 하부쪽에 비해 상대적으로 빠른 속도분포를 나타낸다. 화재로부터 발생한 연소생성물의 일부는 후드 내에 누적되어 연층을 형성하게 되는데 이는 실제화재로부터의 발열량과 측정점에서 계측된 값에 의해 산정된 발열량사이의 시간지연에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 후드의 커튼높이를 결정하는 매우 중요한 인자로 고려되어야 한다. 곡관부를 지나 유동이 점차적으로 발달함에 따라 주변으로의 열전달로 인해 냉각되기 때문에 배기구쪽으로 갈수록 온도는 감소하지만 산소농도는 거의 일정한 분포를 나타낸다.

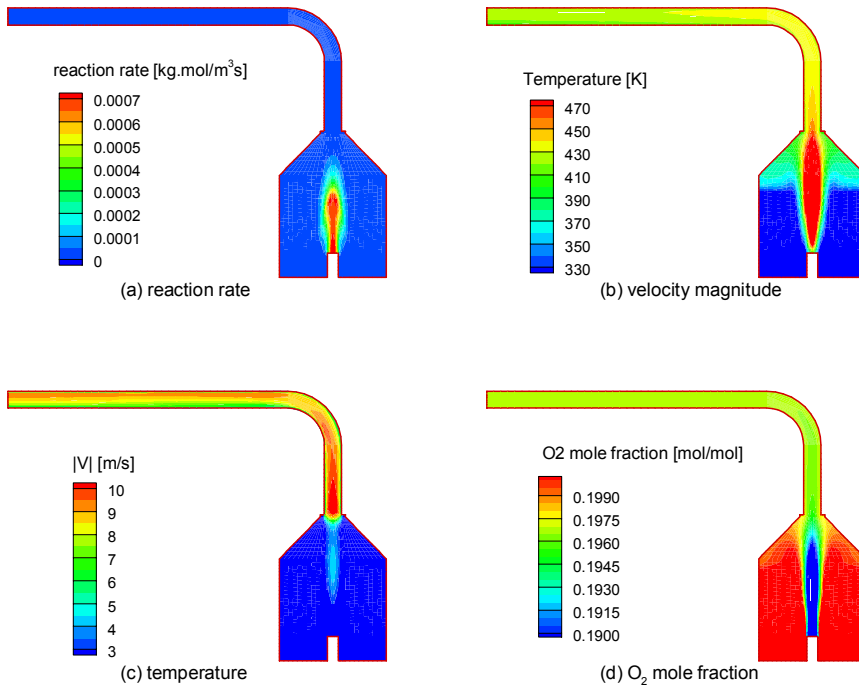


그림 2. 후드와 덕트부에서의 유동특성 분포

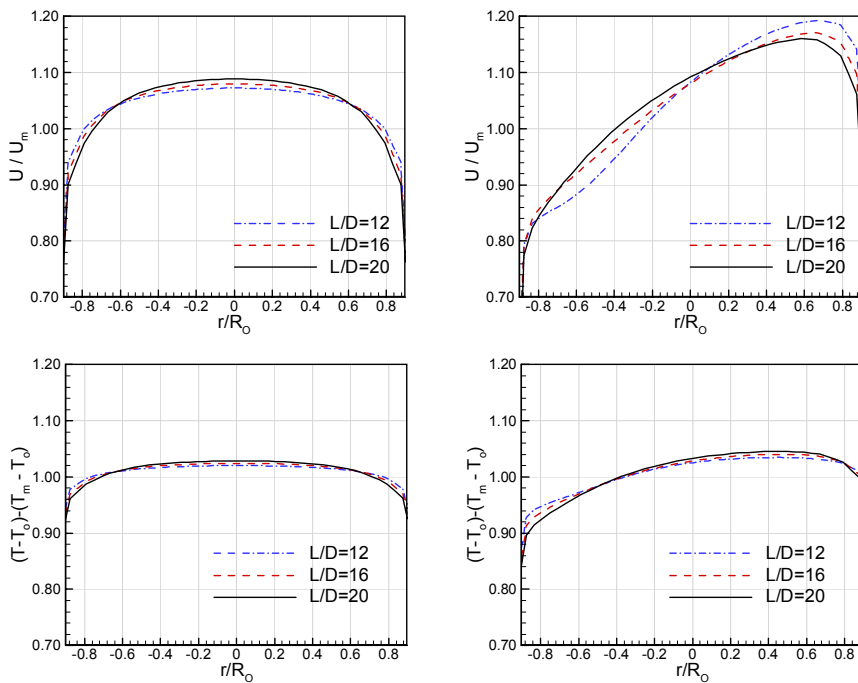


그림 3. 수직배기덕트와 수평배기덕트의 속도 및 온도분포

그림 3은 수직배기덕트와 수평배기덕트에 대하여 후드 입구에서 덕트의 길이방향에 따른 각 위치별 속도와 온도분포를 나타낸다. 수직배기덕트에서는 후드에 모인 연소생성물이 그대로 상방향으로 배출되기 때문에 대칭적인 유동형태를 보이고 있다. 그러나 곡관이 적용된 수평 배기덕트의 경우 90° 곡관을 지나며 유동이 비대칭적인 행태를 띄게 되는데 유동이 발달해감에 따라 비대칭성이 감소하지만 전반적으로 배기덕트의 상부쪽 속도가 빠르고 하부쪽 속도가 상대적으로 느린 경향은 지속된다. 속도와 온도분포에 대하여 평균치에 대한 최대값의 정도를 비교해보면 온도분포의 경우 모두 5% 이하를 나타내고 있으나 속도분포의 경우 수직배기덕트의 경우 약 10% 정도 수평배기 덕트의 경우 최대 20%정도의 차이를 나타내고 있다. 따라서 수평배기덕트가 적용된 경우 유속측정에 불확실성 상대적으로 높기 때문에 속도측정에 세심한 주의를 필요로 함을 알 수 있다.

표 1은 측정점의 수에 따른 배기질량유량과 식 (4)에 적용하여 계산된 발열량을 나타낸다. 여기서 단면평균값에 대한 측정점수에 따른 발열량 산정의 상대오차 ϵ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon = \left(\frac{\dot{Q}_{pt} - \dot{Q}_{av}}{\dot{Q}_{av}} \right) \times 100 \quad (5)$$

여기서 \dot{Q}_{pt} 는 측정점에서 계측된 값에 의해 산정된 발열량이고 \dot{Q}_{av} 는 단면 평균값을 적용하여 산정한 발열량을 의미한다. 앞서 언급한 바와 같이 온도나 농도의 경우 단면에서 비교적 균일한 분포를 가지는데 반해 속도분포는 위치에 따라 큰 차이를 나타낸다. 따라서 측정점의 수가 많을수록 평균속도가 단면평균속도에 근사해지기 때문에 산정된 발열량의 정확도는 증가하는 것으로 나타났다. 후드의 입구로부터 측정점 위치의 영향을 살펴보면 후드입구부에서 측정점이 떨어질수록 유동은 발달된 형태를 띄게 되고 적은 수의 측정점에 대해서도 비교적 단면평균에 근사한 평균속도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 그림 5는 배기조건에 따른 L/D=16인 측정위치에서 속도와 온도의 평균값과 표준편차를 나타낸다.

표 1. 측정위치에 따른 배기질량유량과 계산된 발열량

	L/D = 2			L/D = 20		
	\dot{m}_e [kg/s]	\dot{Q} [kW]	ϵ	\dot{m}_e [kg/s]	\dot{Q} [kW]	ϵ
1 point sampling	1.4957	230.50	20.74	1.3292	203.46	3.03
2 points sampling	1.4680	226.24	18.51	1.3171	201.90	2.24
3 points sampling	1.4492	223.34	16.99	1.3160	201.44	2.00
Area weighted average	1.3512	190.90	-	1.2900	197.48	-

그림에서 보는 것처럼 배기량이 증가함에 따라 배기가스의 온도는 감소하고 측정위치에서의 표준편차는 감소하는 경향을 보이지만 속도분포의 표준편차는 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 배기량이 증가할 경우 속도측정점에 따른 평균유속의 불확실성으로 인해 발열량 산정의 불확실성이 증가할 것으로 예측되기 때문에 화재조건에 따른 적정 배기유량의 선정이 매우 중요한 요소중의 하나임을 보여준다.

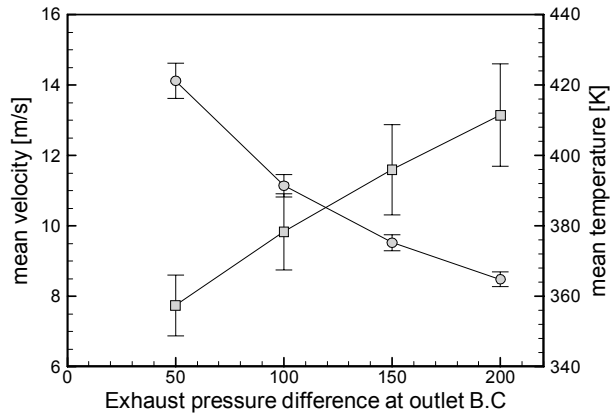


그림 4. 배기조건에 따른 평균속도와 평균온도 변화

3. 결 론

본 연구에서는 화재용 산소소모 발열량계를 수치적으로 모델링 하여 배기덕트의 형태에 따른 유동특성을 파악하고 발열량 측정의 주요 변수인 유속, 온도, 연소가스농도 측정변수들의 분포에 대해 분석하였다. 온도나 연소가스의 경우 여러 위치에서 측정을 통한 평균값을 계측하는 것이 어렵지 않고 측정위치에서 비교적 균일한 분포를 가지기 때문에 발열량 평가시 불확실성에 미치는 영향을 상대적으로 크지 않을것으로 생각된다. 그러나 배기 유속의 경우 덕트의 형상 및 측정위치에 따라 큰 차이를 보이고 있으며 동일 측정면에서도 측정점에 따라 계측속도가 평균유속과 큰 차이를 보이기 때문에 발열량 측정오차의 주요원인이 될 수 있음을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 경일대학교 신입교원정착연구비 지원에 의해 수행된 것임.

참고문헌

- Huggett, C. (1980). "Estimation of rate of heat release by means of oxygen-consumption measurements". *Fire and Materials*, Vol. 4, No. 2, pp.61-65.
- Cooper, L. (1994). "Some Factors Affecting the Design of A calorimeter Hood and Exhaust," *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 99-112.
- Kim, S. C. and Bundy, M. (2008). "Numerical Model of a Large Scale Oxygen Consumption Fire Calorimeter," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 93., No. 3, pp.1013-1019.