



특성길이에 따른 FDS 모델의 격자 의존성

김성찬
경일대학교

Effect of the Characteristic Length Scale on the Grid Dependency of FDS model

Sung Chan Kim
Kyungil University

요 약

Field Model에 의한 화재해석방법은 화재현상을 지배하는 방정식을 직접 해석하기 때문에 Zone model에 비해 공간내의 상세 정보를 제공함과 동시에 다양한 화재형태에 대해 보편적인 적용이 가능하다. Field model은 해석영역을 구성하는 격자점에 대해 이산화된 지배 방정식을 해석하는 과정에서 차분방법이나 격자의 크기에 따라 수치오류가 발생할 수 있다. 특히 격자수는 계산시간에 영향을 미치는 가장 중요한 인자이기 때문에 효율적인 계산을 위해서는 격자크기의 최적화가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 구획공간 화재의 최적 격자크기 선정을 위해 격자해상도(Grid Resolution)에 따른 해석결과의 독립성을 비교분석하고 이를 통해 구획공간화재에 대한 격자 최적화 방법에 대해 논의하고자 한다. 화재크기 및 특성 길이에 따른 격자의존성을 파악하기 위해 ISO-9705 표준화재실에 대해 적용된 격자크기는 최소 3 cm에서 최대 30 cm 까지 총 7 종류의 격자크기에 대해 FDS 해석이 수행되었다. 해석결과, 환기량이 충분한 화재에 대해서도 격자해상도가 16보다 작은 경우 출입구의 유동은 격자에 따른 독립성을 확보하지 못하는 것으로 나타났으며 화재발열량이 증가함에 따라 독립적인 해석해를 얻기 위해서는 더 큰 격자해상도를 요구하는 것으로 나타났다. 따라서 현재 실무에서 격자최적화를 위해 사용되고 있는 격자선정법에 대한 재검토가 필요하며 화재특성 및 구획공간 조건에 따른 최적격자 조건을 도출하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

1. 서 론

화재현상의 물리적 이해 및 공간내 화재특성해석을 위한 전산화재해석분야는 화재현상에 대한 물리적 모델 및 수치해석 기법의 발달에 따라 활발한 연구가 진행중이며 건축물이나 시설물의 화재안전성평가에 직접 적용되어 그 활용성이 증대되고 있다. 전산화석기법 및 컴퓨터성능의 발달과 함께 Field model은 화재공간내의 상세 유동정보를 제공하고

다양한 형태의 화재에 적용이 가능하기 때문에 널리 이용되고 있다. 그러나 Field model 에 의한 화재해석은 복잡한 화재현상을 묘사하는 물리적 모델의 제약 및 적용되는 물성값의 부정확함 뿐만 아니라 수치해석 기법을 적용하는 과정에서 오류가 발생할 수 있다. 특히 지배방정식의 이산화과정과 관련하여 격자크기나 차분기법에 따라 수치적 오류가 발생할 수 있으며 사용자가 차분기법을 수정하기 않을 경우 대부분의 오류는 격자와 관련있다. 현재 화재해석분야에 널리 이용되고 있는 FDS 모델의 경우 RANS 모델을 적용한 다른 CFD 모델에 비해 격자크기에 따라 직접 해석하는 와동의 길이규모가 달라지기 때문에 격자크기는 연소과정의 열유동장의 해석결과에 상대적으로 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 격자독립성시험(grid independence test) 혹은 격자민감도시험(grid sensitivity test)를 통해 해석결과에 대한 격자크기의 영향을 정량화하고 계산의 효율성을 고려한 격자크기의 최적화를 도모하는 과정이 필수적이다. 그러나 격자민감도시험은 주해석 이전단계에 많은 시간을 필요로 하기 때문에 기간이 제한된 실무에 있어서 적용이 쉽지 않다. 그런 이유로 화재의 특성길이(characteristic length scale)에 기초하여 격자해상도(grid resolution)를 산정하고 이를 통해 합리적인 해석해를 제공하는 범위를 산정하는 경험적인 격자선택방법이 자주 활용된다. 일반적으로 무차원 화재직경이 특성길이로 널리 이용되고 있으며 이에 대한 격자해상도는 다음과 같이 계산되며 일부 연구에 따르면 합리적인 결과를 제공하는 격자해상도는 4~16정도로 보고되고 있다.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

$$R = \frac{D^*}{\max(\delta x, \delta y, \delta z)} \quad (2)$$

그러나 화재의 대표특성길이는 화재특성이나 물리적 현상을 구현하는 모델에 따라 다르기 때문에 해석문제에 따라서는 특성길이나 경험적인 격자해상도 범위가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 구획공간 화재에 대한 격자민감도시험을 통해 경험적인 접근방법의 타당성을 분석하여 구획공간화재에 대한 격자 최적화 방법에 대해 논의하고자 한다.

2. 연구내용

해석대상 화재공간은 ISO-9705 표준화재실로 길이 3.6 m, 폭 2.4 m, 높이 2.4 m 이며 출입구의 크기는 폭 0.8 m, 높이 2.0 m 이다. 출입구에서의 경계조건 설정을 배제하고 출입구에서의 유동분석을 위해 확장해석영역을 적용하였으며 해석영역의 크기는 길이 6.0 m, 폭 2.4 m, 높이 3.0 m 로 설정하였다. 본 연구에서는 화재크기에 따른 격자해상도의 영향을 파악하기 위해 환기량이 충분한 511 kW 화재와 환기부족화재인 4.0 MW 화재를 적용하였다. Table 1은 격자민감도 시험에 적용된 격자크기와 격자수, 511 kW와 4.0 MW 화재에 대한 격자해상도와 계산시간을 각각 나타낸다.

Table 1. Summary of grid sensitivity test and computation time for 511 kW fire

	Grid size [m]	Dx	Dy	Dz	Number of cells	Grid resolution		Computation time [hr]	
						511 kW	4000 kW	511 kW	4000 kW
Case 1	0.3	20	8	10	1,600	2.4	5.6	0.0	0.0
Case 2	0.2	30	12	15	5,400	3.7	8.4	0.1	0.2
Case 3	0.15	40	16	20	12,800	4.9	11.1	0.3	0.4
Case 4	0.1	60	24	30	43,200	7.3	16.7	1.3	1.7
Case 5	0.05	120	48	60	345,600	14.7	33.4	26.2	32.0
Case 6	0.04	150	60	75	675,000	18.3	41.8	60.3	81.1
Case 7	0.03	200	80	100	1,600,000	24.4	55.7	167.0	213.5

3. 해석 결과

Figure 1은 격자해상도에 따라 511 kW 화재시 준정상상태에 도달한 이후 60 초동안 시간평균된 온도분포를 나타낸다. 격자해상도가 14 이상의 경우 온도장은 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 화재크기가 4 MW인 경우 격자해상도에 따라 공간내의 온도분포는 큰 차이를 보였으며 경험적으로 제시되고 있는 최적격자범위에 대해 격자의 독립성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. Table 2는 격자해상도에 따른 511 kW와 4 MW 화재의 발열량과 유입질량유량을 비교하여 나타낸다. 여기서 ΦR 은 최대격자수를 적용한 결과에 대한 상대오차를 나타낸다.

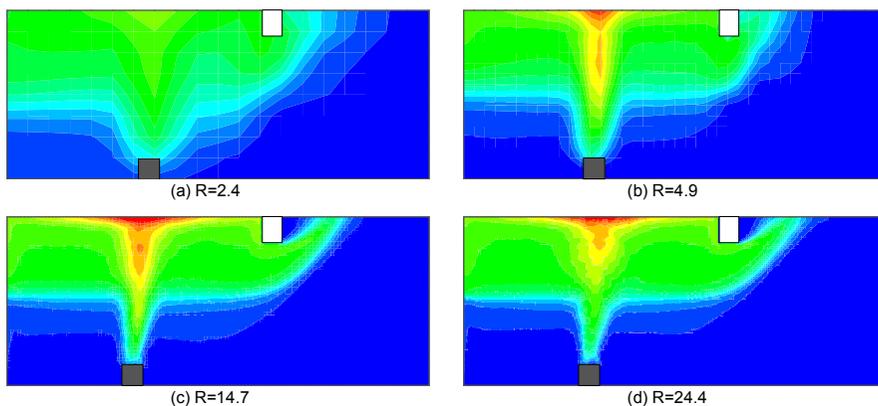


Figure 1. Comparison of time averaged temperature field during the quasi-steady state for 511 kW fire.

Table 2. Comparison of the mass flow rate and HRR with grid resolution

		Case name	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
		Grid size	0.30	0.20	0.15	0.10	0.05	0.04	0.03
Mass flow rate [kg/s]	511 kW	R	2.4	3.7	4.9	7.3	14.7	18.3	24.4
		\bar{m}_a	0.891	0.812	0.751	0.714	0.684	0.685	0.686
		Φ_R	29.83%	18.32%	9.49%	4.03%	0.34%	0.17%	-
	4 MW	R	5.6	8.4	11.1	16.7	33.4	41.8	55.7
		\bar{m}_a	0.995	1.056	1.029	0.946	0.848	0.832	0.818
		Φ_R	21.61%	29.09%	25.79%	15.62%	3.74%	1.77%	-
HRR [kW]	511 kW	R	2.4	3.7	4.9	7.3	14.7	18.3	24.4
		\bar{q}	512.1	511.3	511.4	511.1	510.8	510.8	510.9
		Φ_R	0.23%	0.08%	0.09%	0.04%	0.02%	0.02%	-
	4 MW	R	5.6	8.4	11.1	16.7	33.4	41.8	55.7
		\bar{q}	3165.2	3253.3	3229.8	3004.7	2753.4	2691.3	2666.7
		Φ_R	18.69%	21.99%	21.11%	12.67%	3.25%	0.92%	0.00%

$$\epsilon_R = \frac{(\phi - \phi_{case7})}{\phi_{case7}} \times 100 \quad (3)$$

격자선정에 대한 경험적인 방법을 적용할 경우 511 kW 화재에 대한 상대오차는 발열량의 경우 1 % 이내, 유입공기 질량유량의 경우 10 % 이내이지만 4 MW 화재에 대한 상대오차는 발열량이 최대 22 %, 유입공기 질량유량의 경우 30 %까지 상대오차가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 무차원 화원직경을 이용한 격자선정법은 동일공간에 대해 화재 특성에 따라 큰 차이를 보였으며 최적격자 선정을 위한 대표길이 및 격자선정에 대한 추가적인 연구를 필요로 한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2011-0004171)

참고문헌

1. K. Hill, J. Dreisbach, F. Joglar, B. Najafi, K. McGrattan, R. Peacock, and A. Hamins, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", NUREG-1824, Vol. 7, US-NRC, 2007.
2. A. Bounagui, N. Benichou, C. McCartney, A. Kashef, "Optimizing the grid size used in CFD simulations to evaluate fire safety in houses", 3rd NRC Symposium on CFD, HPC and VR, Ottawa, 2003.