실규모의 실험용 대공간에서 연기제어에 대한 수치해석적 분석

Numerical Analysis on Smoke Control System in Real-scale Experimental Large Space

김정엽* · 김지석**

Kim, Jung Yup* and Kim, Ji Seok**

Abstract

Because of higher floor height in a large space where a large volume of smoke reaching to hundreds of thousands CMH(m^3/h) is generated in the event of fire, coupled with difficulties with compartmentation which is important concept in smoke control design, damage to the people by smoke is inevitably increased and thus, the countermeasure to deal with it is a must. This study is intended to evaluate Murcia Atrium Fire Tests performed in Spain and numerical analysis of smoke flow in a real-scale large space was carried out with same object. As a result of comparing the test and numerical analysis, the numerical analysis approach adopted in this study demonstrated effective application to smoke flow analysis in a large space. Moreover, numerical analysis was further carried out while changing the location of smoke vents and the exhaust flow rate, and consequently smoke concentration appeared to be more dependent on exhaust flow rate than smoke vent location and smoke layer height was determined according to N% rule.

Key words : Large space, Fire, Smoke control, Numerical analysis, Smoke layer height, N% rule

요 지

대공간은 화재발생시 높은 층고로 인하여 수십만 CMH(m^3/h) 규모의 연기가 발생하고 연기제어 설계의 중요한 개념인 국한화가 곤란하기 때문에 연기로 인한 인명피해의 위험도가 증가하므로 이에 대한 대응책의 제시가 필요하다. 본 논문에서는 스페인에서 수행된 Murcia Atrium Fire Tests의 실험내용을 분석하였으며, 동일한 해석대상에 대하여 실규모 대공간의 연기유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 실험과 수치해석 결과에 대한 비교를 통해서 본 연구에서 채택한 수치해석 방안이 대공간의 연기유동 해석에 효과적으로 적용될 수 있다고 판단하였다. 그리고 동일한 해석대상에 대하여 연기제어의 인자 중 일부인 배연구 위치와 배연량을 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 분석결과 해석대상에서는 배연량이 배연구 위치보다 대공간의 연기농도 형성에 더 큰 영향을 미치고 있으며, N% 규칙에 의해서 연기높이를 정량적으로 산출하였다.

핵심용어 : 대공간, 화재, 연기제어, 수치해석, 연기층 높이, N% 규칙

1. 서 론

대공간은 화재발생시 전체 건축물로의 연기확산 경로가 될 가능성이 크고, 연기제어 설계의 중요한 개념인 국한화(Compartmentation)가 곤란하다. 또한 온도차 · 외부풍압 · 실내 건축구조 등 연기확산에 미치는 다양한 조건들로 인해 연기확산에 대한 제어가 어려워지고 이로 인해 연기로 인한 인명피해의 위험도가 증가하므로 이에 대한 대응책의 제시가 필요하다.

대공간에서 화재가 발생할 경우 연료지배형 연소의 급격한 화재성장 가능성과 함께 천장까지의 수직상승 높이가 높기 때문에 일반 건축물의 거실형 공간에 비해 연기가 다량으로 발생하고, 이러한 연기제어를 위해서 수십만 CMH 규모의 배기량 및 급기량이 요구되므로 배연 성능이 뛰어난 연기제어 시스템의 개발이 필요하다. 또한 대공간의 상층부에서는 인접 공간으로의 연기확산력이 크게 작용하여 건물 전체가 연기에 오염될 수 있고, 높은 천장으로 인해 화재감시설비나 소화설비가 충분히 기능을 발휘하기 힘들기 때문에 재실자의 안전

*교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구위원(Tel: +82-31-369-0506, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: jykim1@kict.re.kr)

Corresponding Author: Member, Research Fellow, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구원

Researcher, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

한 피난을 담보할 수 있는 연기제어 시스템의 적용이 필요하다.

국내에서는 1990년대 후반에 대공간에서의 연기유동에 대한 연구가 학계를 중심으로 진행되었으나(No 등 1997; Jeong 등 1999), 실제적인 설계기준의 제시나 신개념의 설비 개발로 연결되지는 못한 실정이다. 현재 국내에서 시공되는 일부 대공간 건축물에 대한 연기제어 분야의 기본설계는 선진외국의 방재 엔지니어링 업계에서 수행하며, 국내 업체는 세부단계 설계 수행에 머물러 있는 실정이다. 따라서 국내의 엔지니어링 경쟁력 향상이 요구되고 있다.

선진외국에서는 1980년대에 대공간에서의 연기제어 설계기준을 제시하였으며, 2000년대에는 실규모 실험의 실험결과를 이용하여 수치해석의 정확성과 신뢰성을 검토하려는 연구가 진행되었다(Harrison 등 2007; Qin 등 2009). 한편 2010년대 들어서면서 대공간 연기제어 분야에서 배연효과, 급기조건, 환기구조 등 다양한 조건에 따른 영향을 분석하고 대공간의 연기제어 시스템 설계방안에 대한 개선 연구가 시작되었다(Jie 등 2010; Gutierrez-Montes 등 2010; Gau 등 2012).

본 연구에서는 대공간의 대용량 연기제어 시스템에 대한 최적설계 기술을 개발하는 과정에서 수치해석적 방법을 통하여 실규모 대공간 실험 건축물에 대한 연기확산 현상을 분석하고 실험결과와 비교하였으며, 연기제어 조건에 따른 결과를 검토하였다.

2. 실규모 대공간 화재 실험

2.1 실험 대상

본 연구에서는 스페인의 Murcia에서 수행된 Murcia Atrium Fire Tests(Gutierrez-Montes 등 2010)의 해석대상을 대공간 연기유동의 해석모델로 선정하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 해석대상의 전경과 전체적인 개요도를 각각 보여주고 있다. 그림에서와 같이 해석모델은 19.5 m×

Fig. 1. Whole view of experimental large space (Gutierrez-Montes et al., 2010).

19.5 m×20.0 m의 크기를 가지며, 벽과 천장은 6 mm 두께의 철판으로 이루어져 있고 바닥은 콘크리트로 구성되었다. 천장에는 4개(E1, E2, E3, E4)의 배연용 송풍기가 중앙 꼭지점에서 1.75 m의 거리를 두고 설치되어 있으며, 송풍기의 직경은 0.56 m이고 배연풍량은 3.8 m³/s이다. 벽의 하단부에 8개의

Fig. 2. Schematic diagram of experimental large space.

Table 1. Installation position of air inlet

Wall	Air inlet	Area of wall and inlet
Wall A	A1, A2, A3	Wall : 19.5 m×17.5 m Inlet : 4.875 m×2.5 m
Wall B	B1	
Wall C	C1, C2	
Wall D	D1, D2

Fig. 3. Sensor position near Wall A.

그릴형 흡입구가 설치되어 있으며, Table 1은 흡입구의 배치에 대한 상세내용을 보여주고 있다.

한편 해석대상에는 Wall A, Wall C, 중앙단면 및 천장에 모두 61개의 센서가 설치되어 있으며, 온도와 풍속 및 압력을 측정하고 있다. Fig. 3은 Wall A 주위에 설치된 센서의 위치를 보여주고 있다.

2.2 실험 조건

앞 절에서 제시한 Murcia Atrium을 대상으로 해서 실험규모 화재 실험이 수행되었다. 실험에서 사용된 연료는 직경 0.92 m, 길이 0.25 m의 Pan에 담긴 헵탄이며, 대공간의 중앙에 위치한다. 완전 연소의 조건에서 헵탄의 반응열 44.6 MJ/kg와 연소효율 0.85을 적용하여 화재시 열방출율은 1.35 MW로 산출된다. 화재실험시 8개의 흡입구가 모두 완전히 열린 상태가 되며 4대의 배연용 송풍기도 모두 가동 되었다. 화재 실험의 주요 조건과 외부 상태를 Table 2에 제시하였다.

3. 실험조건에 따른 수치해석

3.1 수치해석 조건 및 방법

근래들어 3차원 유동의 해석방정식이 고도화되고 컴퓨터 서버의 눈부신 발전이 이루어지면서 유체역학과 응용수학 그리고 컴퓨터를 결합한 전산유체역학이 유동해석의 중요한 방법으로 활용되고 있다. 본 연구에서는 대공간에서의 연기유동을 해석하기 위한 방안으로 전산유체역학을 바탕으로 하는 수치해석 기법을 적용하였으며, 구체적으로는 정확성과 타당성이 검증되어 열 · 유동 해석문제에 널리 적용되고 있는 3차원 범용프로그램인 CFX14(ANSYS Inc. 2013)를 사용하였다.

수치해석 대상과 조건은 앞절에서 분석한 Murcia Atrium Fire Tests의 대공간을 선정하였다. Fig. 4는 해석대상 대공간의 수치해석 모델을 보여주고 있다. 천장에는 4개의 배연용 송풍기가 설치되어 있고, 벽의 하단부에 8개의 그릴형 흡입구가 설치되어 있다. Fig. 5는 해석대상 대공간의 수치해석 모델에 대하여 수치해석을 수행하기 위해 작성한 격자구조를 보여주고 있다.

수치해석 조건은 Table 2와 같이 실험규모 화재 실험과 동일하게 적용하였다. 즉 화재의 열방출율을 1.35 MW, 외부온도를 16.7°C로 하였고, 흡입구와 배연용 송풍기는 모두 가동하는 조건이 적용되었다. 표에서 HRR은 열방출율을 의미한다.

화재 중 연기의 생성은 화재에 의한 발열량과 연소물질의 특성에 크게 영향을 받는다. 화재에 의한 연료의 소모량은 다

Fig. 4. Analysis domain of large space.

Fig. 5. Grids of analysis domain.

음과 같다.

$$M_f/t = \frac{\dot{Q}}{\Delta H_{ch}} \quad (1)$$

여기서 M_f/t 는 연료의 소모량(g/s)이고, ΔH_{ch} 은 연료의 화학연소열(chemical heat of combustion, kJ/g)이며, $\dot{Q}$ 은 화재의 발열량(kW)이다.

연료가 화재로 소모되었을 때 연기의 생성량은 연료의 소모량과 생성율(yield)에 의해 결정되며 다음식과 같다.

$$M_p/t = y_p M_f/t \quad (2)$$

여기서 M_p/t 는 연기의 생성량(g/s)이며 y_p 는 연료의 연기 생성율(yield)를 나타낸다.

Table 2. Experimental conditions

Item	Volume of heptan (l)	Burning time (s)	Open inlets	Exhaust fans on	Ambient temp (°C)	Pressure (mbar)	HRR (MW)
Content	44	837	All	All	16.7	1018	1.35

실규모 화재 실험에 사용된 연료는 헵탄으로서 본 연구에서는 관련된 참고문헌의 내용을 바탕으로 해서 헵탄의 화학연소열과 연기생성율을 각각 41.2 kJ/g과 0.037로 산정하였다(SFPE 2008). 상기의 이론식과 물성치로부터 화재실험에서 생성되는 연기의 발생량을 0.001212379 kg/s로 추정하였으며, 이 값을 수치해석에 적용하였다. 그리고 벽면과 천장은 철제 재료로서 총열전달계수로 5 W/m²K를 적용하였다(Lienhard 2000).

3.2 수치해석 결과

Fig. 6에서 Fig. 8은 수치해석의 수행결과를 보여주고 있다. Fig. 6은 수치해석 대상 대공간의 중앙 단면에서의 시간별 온

(a) At 100 second

(b) At 500 second

(c) At 900 second

Fig. 6. Temperature contours on center plane for time.

도분포를 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 화재가 발생한 후 100초가 경과할 때의 온도분포로서, 그림에서와 같이 중앙 화염원에서 고온의 연기가 생성되어 천장까지 상승해서 천장의 배연구로 배출되며 일부는 천장을 타고 측면으로 퍼져서 벽면을 따라 아래로 하강하는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)는 화재발생 후 500초와 900초에서의 온도분포를 나타낸 것으로서, 차차 연기가 공간의 상층부에 축적되고 일부는 하층부로 하강하면서 전체적인 공간내 온도가 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 실규모 실험과 수치해석의 결과를 비교한 것으로서, Wall A의 벽면의 중앙 상층, 중층, 하층 지점인 1,4,7 지점에서의 시간에 따른 온도변화 결과를 나타낸 것이다. 실규모 실험과 수치해석의 결과에 대한 오차율을 분석해 보면 1 지점

(a) At sensor 1

(b) At sensor 4

(c) At sensor 7

Fig. 7. Temperature variations of experiment and numerical analysis for time.

Fig. 8. Variations of smoke concentration near wall A for time.

에서는 약 6.3%의 평균 오차율을 보이고 있고, 2와 3 지점에서는 각각 약 11.6%와 16.7%의 평균 오차율을 보이고 있다. 이러한 분석결과로부터 본 연구에서 설정한 수치해석 방안이 대공간 건축물의 연기유동 해석과 효과적인 연기제어 시스템 개발에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 수치해석에 의해 분석되어진 연기농도 변화를 보여주고 있으며, Wall A의 벽면의 중앙 상층, 중층, 하층 지점인 1,4,7 지점에서의 시간에 따른 연기농도 변화를 나타내었다. 그림에서와 같이 시간이 경과하면서 각 지점의 연기농도가 서서히 증가하고 있으며 아래지점의 연기농도가 상부지점보다 더 낮게 형성되는 것을 알 수 있다. 대공간의 상부지역인 1 지점에서 연기가 감지되는 시간은 화재발생 후 약 30초 정도가 지난 후이고 연기가 서서히 하강하면서 대공간의 벽 근처 하부지역인 7 지점에서는 화재발생 후 약 140초가 경과한 이후에 연기가 도달하는 것을 알 수 있다.

4. 배연구 위치 및 배연량에 따른 해석

4.1 해석 조건

이번에는 앞절에서 수행한 수치해석 대상과 조건에 대해서 대공간의 연기제어에 영향을 미치는 인자 중 일부인 배연구 위치와 배연량을 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

배연용 송풍기가 설치된 배연구의 위치는 Fig. 9와 같이 상층, 중층, 하층의 3가지 경우를 적용하였으며, 이때 각각의 배연구 위치는 중앙지점에서 수평방향으로 1.75 m(상층), 9.75 m(중층), 17.75 m(하층) 떨어진 지점으로 설정하였다. 한편 배연용 송풍기의 가동 대수를 변화하여 배연량을 조절하였으며, 구체적으로는 송풍기를 4대 모두 가동한 경우와 2대만 가동하여 배연량을 절반으로 줄인 경우를 적용하였다. 이와 같이 배연구 위치에 따른 3가지 조건과 배연량에 따른 2가지 조건을 결합하여 Table 3과 같이 총 6번의 수치해석을 수행하였다.

Fig. 9. Location change of smoke vents.

Table 3. Numerical analysis conditions

Test	Vent location	Exhaust fans on
Test 1-1	Upper	4 EA
Test 1-2	Upper	2 EA
Test 2-1	Middle	4 EA
Test 2-2	Middle	2 EA
Test 3-1	Lower	4 EA
Test 3-2	Lower	2 EA

4.2 해석 결과

Fig. 10은 각 경우에 대해서 Wall A 벽면의 중앙 상층, 중층, 하층 지점인 1,4,7 지점에서의 시간에 따른 연기농도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 배연량이 100%이고 점선은 배연량이 50 %인 경우로서 각 지점에서 동일하게 배연량이 50 %인 경우가 100%인 경우에 비해서 연기농도가 크게 높은 것을 알 수 있다. 한편 배연량이 같은 조건에 대해서 배연구가 상부에 있는 경우가 하부에 있는 경우에 비해 연기농도가 약간 적게 형성되고 있으나 배연구 위치는 배연량 조건에 비해서 연기농도 차이에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 보인다. 이는 수치해석 대상의 기하학적 형상이 중앙부가 솟은 사각뿔 형태로서, 연기의 축연이 효과적으로 이루어지는 형태이기 때문에 배연구의 위치가 연기제어에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)는 각각 Test 1-1과 Test 1-2의 조건에 대한 해석결과로서 각각 100초 간격으로 수치해석 대상 대공간의 높이에 따른 온도분포를 보여주고 있다. 여기서 도시하고 있는 온도의 분포 위치는 센서 1, 센서 4, 센서 7을 통

(a) At sensor 1

(b) At sensor 4

(c) At sensor 7

Fig. 10. Variations of smoke concentration for time.

과하는 수직 직선상으로 하였다. 그림에서와 같이 연기가 축연되고 있는 대공간의 상부지역에서 온도가 높게 형성되며, 연기층의 경계지역을 통과하면서 온도가 차차 떨어져서 외부 온도까지 하강한다. 즉, 대공간의 높이에 따른 온도분포로부터 화재로 인해 발생한 열기류가 천장까지 상승한 후 시간이 경과함에 따라 점차 하부지역으로 하강하고 있음을 정량적으로 파악할 수 있다.

Fig. 11(a)에서와 같이 Test 1-1의 조건에서는 화재가 발생한 후 100초가 경과하면 바닥에서 약 6.5 m 높이부터 온도 상승이 시작되고 약 7.5 m에서 10.5 m 까지의 연기층 경계지역을 지나면서 온도가 급격히 상승한 후 상부 연기층에서는 약 29~30°C의 온도분포를 보여주고 있다. 그리고 화재발생 200 초 경과 시점에서는 온도 상승 시작 지점이 약 3.5 m 정도로 낮아지고, 연기층을 포함하여 전체적인 온도분포가 100초 경과 시점보다 올라간다. 한편 100초 간격으로 전체적인 온도의

(a) For test 1-1

(b) For test 1-2

Fig. 11. Temperature variations with height.

Fig. 12. Smoke layer height of N% rule.

상승폭을 검토해 보면 상승폭이 점차 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 11(a)의 Test 1-1 조건과 Fig. 11(b)의 Test 1-2 조건에 대한 해석결과를 비교하면, 배연량이 Test 1-1에 비해 절반인 Test 1-2의 경우에서 전체적인 온도상승이 크게 이루어짐을 알 수 있다.

건축물에서 화재로 인해 발생한 연기층의 높이를 정량적으로 산출하는 방법으로 N% 규칙(Cooper 등 1982)이 적용될 수 있다. N% 규칙은 외부온도와 상승부의 최고온도 간의 온도차를 구하고, 외부온도에서 온도차의 10~30%가 상승된 온도가 형성되는 지점의 높이를 연기층 경계지역으로 산정하는 방법이다.

Fig. 12는 Test 1-1과 Test 1-2에 대해서 10%, 20%, 30%의

N% 규칙을 이용해서 연기층의 높이를 구한 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 약 300초 정도까지 연기층 높이가 급격히 떨어지다가 약 400초에서 500초 사이에 일정한 값으로 수렴하고 있다. Test 1-1에서 30% 규칙이 적용되면 연기층 높이가 약 3.5 m 정도까지 하강하는 것으로 분석되고 Test 1-2의 경우 30% 규칙에서 연기층 높이가 약 2.4 m 정도까지 하강한다.

5. 결 론

본 연구에서는 스페인에서 수행된 Murcia Atrium Fire Tests의 실험내용을 분석하였으며, 동일한 해석대상에 대하여 실규모 대공간의 연기유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한 연기제어의 인자 중 일부인 배연구 위치와 배연량을 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 대공간의 연기제어 시스템 설계방안에 대한 개선 연구의 과정으로 실규모 화재실험이 수행되고 있으며, 스페인의 Murcia Atrium Fire Tests가 그 일환으로 진행되었다.
- 2) Murcia Atrium Fire Tests에서는 19.5 m×19.5 m×20.0 m의 실규모 대공간이 실험에 사용되었으며, 배연량과 공기 흡입구 및 화재의 열방출 등 연기제어의 주요인자에 대한 영향을 고려하였다.
- 3) 실규모의 실험용 대공간에 대해서 실험과 동일한 조건을 적용하여 연기제어에 대한 수치해석적 분석을 수행하였으며, 이 때 화재에 의해 발생하는 연기량은 대상 연료의 소모량과 연기 생성율을 바탕으로 결정하였다.
- 4) 실규모 실험과 수치해석 결과를 비교해 보면, 벽면의 상층, 중층, 하층 지점에서 각각 약 6.3%, 11.6% 및 16.7%의 평균 오차율을 보이고 있으며, 이로부터 본 연구에서 설정한 수치해석 방안이 대공간 건축물의 연기유동 해석과 효과적인 연기제어 시스템 개발에 적용될 수 있다.
- 5) 기하학적 형상이 중앙부가 솟은 사각뿔 형태의 대공간에서는 연기의 축연이 효과적으로 이루어지기 때문에 배연구의 위치가 연기제어에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 6) 대공간의 높이에 따른 온도분포와 N% 규칙을 이용해서 화재로 인해 발생한 연기층의 높이를 정량적으로 산출하였다. 즉, Test 1-1과 Test 1-2에서 30% 규칙으로 각각 약 3.5 m와 약 2.4 m의 연기층 높이를 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “(14주요)대공간 건축물 화재시 3시간 이상 견딜 수 있는 구조부재 및 연기, 피난 기술 개발”과제의 지원으로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

References

- No, J.S., Ryou, H.S., Jeong, Y.T., Kim, C.I., Yun, M.O., Kim, J.G., and Kim, M.B. (1997) A Numerical study of smoke movement in atrium space, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineerings*, Vol. 11, No. 4, pp. 3-13.
- Jeong, J.Y., Ryou, H.S., and Kim, S.C. (1999) A Numerical study of smoke movement for the three types of atrium fires using PISO algorithm, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineerings*, Vol. 13, No. 1, pp. 21-30.
- ANSYS Inc. (2013) ANSYS CFX-Solver Theory Guide.
- Cooper, L.Y., Harkleroad, M., Quintiere, J., and Reinkinen, W. (1982) An experimental study of upper hot layer stratification in full-scale multi-room fire scenarios, *Journal of Heat and Mass transfer*, 104, pp. 741-749.
- Gao, R., Li, A., Hao, X., Lei, W., Zhao, Y. and Deng, B. (2012) Fire-induced smoke control via hybrid ventilation in a huge transit terminal subway station, *Energy and Buildings*, 45, pp. 280-289.
- Gutierrez-Montes, C., Sanmiguel-Rojas, E., and Viedma, A. (2010) Influence of different make-up air configurations on the fire-induced conditions in an atrium, *Building and Environment*, 45, pp. 2458-2472.
- Harrison, R. and Spearpoint, M. (2007) The Balcony Spill Plume: Entrainment of Air into a Flow from a Compartment Opening to a Higher Projecting Balcony, *Fire Technology*, 43, pp. 301-317.
- Jie, J., Kaiyuan, L., Wei, Z. and Ran, H. (2010) Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency, *Journal of Hazardous Materials*, 177, pp. 209-215.
- Lienhard, J.H. (2000) A Heat Transfer Textbook.
- SFPE (2008) Handbook of Fire Protection Engineering.
- Qin, T.X., Gue, Y.C., Chan, C.K., and Lin, W.Y. (2009) Numerical simulation of the spread of smoke in an atrium under fire scenario, *Building and Environment*, 44, pp. 56-65.

Received	September 16, 2014
Revised	September 17, 2014
Accepted	September 23, 2014