

초고층 건축물의 화재 시 피난로 연기거동에 관한 실험 및 해석적 연구

An Experimental and Analytical Studies on the Smoke Movement by Fire in High Rise Building

신 이 철* 김 수 영** 이 주 희*** 권 영 진****
Shin Yi-Chul Kim, Soo-Young Lee, Ju-Hee Kwon, Young-Jin

Abstract

A study on the fire and smoke behavior on experiments and analysis through STAR-CD in using about behavior analysis of the smoke. Kerosene of 3L in using on the experimental garden of 30cm in diameter same applies to heat release rate(HRR), buoyant force by Plume can be calculated at a rate of 1m/s. The result of experiment in average of velocity were 0.29m/s, and interpreted result were 0.28m/s. Besides, it is proved by interpreted that behavior of smoke movement can be not observed in the experiment. After smoke is Plume increased, ceiling-jet in formation being descend in smoke layer will be more thick smoke layer, and then vertical wall is collapsed in formation of wall-jet being descend. It is defined that smoke layer is more thick through descending course in wall-jet and ceiling-jet.

키 워 드 : 연기거동, STAR-CD, Pool Fire, 플룸
Keywords : Smoke Movement, STAR-CD, Pool Fire, Plume

1. 서 론

최근 도시의 산업화로 인하여 다수의 인원을 수용하는 대형 건축물들이 축조되어지고 있는 추세이다. 이에 따라 건축물의 구조는 초고층화 되어가면서 복잡하고 긴 이동경로로 피난시간이 증가하는 문제점이 발생하여 재난시 대형 피해를 입을 수 있는 가능성도 증가하는 실정이다. 더불어 사무 공간의 경우 경제성장과 디지털화에 따라서 차츰 고분자를 사용한 제품들이 늘고 있으며, 이러한 고분자 물질은 화재시 더 큰 열량을 방출하며, 여러 종류의 인체에 치명적인 유독가스를 배출하게 된다. 또한 화재가 발생할 경우 부적절한 방화구획과 연기제어시스템으로 연기가 건물 전체로 확산 될 우려가 있으며 이로 인하여 재실자의 안전 확보가 어려워지게 된다.

이러한 화재를 모델링을 통하여 화재현상을 예측, 분석하기 위한 관심이 방화공학적인 측면에서 지속적으로 증가하고 있

다. 화재모델링은 상미분방정식을 이용하는 zone 모델과 편미분방정식을 이용하는 field 모델로 구분 할 수 있다. zone 모델은 화재발생 공간을 상부고온층과 하부저온층으로 나누어 2영역 모델로 구분되어진 반면, field 모델은 공간 내외의 화재영역을 수많은 Cell로 나누어 각 Cell에서의 열역학적인 성질을 조사하는 모델이다. 이는 공간의 난류, 복사열 전달, 연소를 포함한 연기거동과 온도분포 계산 등을 할 수 있다

따라서 본 연구에서는 초고층 건축물 통로에서의 화재시 연기거동에 관해 실험화재 실험을 실시한 후CFD 프로그램 중 STAR-CD를 이용하여 Pool Fire 화재의 부력 Plume 모델에 적용하여 해석하였다. 이 결과를 비교·분석하여 일반적인 연기의 거동특성을 분석하고자 하였다. 또한 이를 통해 초고층 건축물의 건축 설계 및 시공시 제연대책과 방화계획의 규정 정립에 있어 참고자료가 되고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 해석모델

본 연구에서 연기거동에 대한 해석을 위하여 실험공간은 최근 초고층 건축물로 다수 지어지는 오피스텔과 사무 공간의

* 정희원, 호서대학교 소방학과 초고층·장대터널 방재연구실 석사과정
** 비희원, 소방방재청 중앙소방학교 소방과학연구실 공업연구관·공학박사
*** 비희원, 호서대학교 혁신기술·경영융합대학원 메카트로닉스공학과 교수·공학박사
**** 정희원, 호서대학교 소방방재학과 교수·공학박사

일부를 ISO Room-Test(9705)기준인 길이 3.6m, 폭 2.4m, 높이 2.4m의 치수로 만들어진 화재실로 제작하고 이 화재실과 직각으로 총 길이 20m이며 내부 공간 높이 2.3m인 복도를 만들어 화재실과 복도사이의 연기거동과 복도에서의 연기 평균속도를 구하고자 하였다. 가연물로는 직경 30cm인 등유의 Pool Fire로 연소시켰으며, 이를 통하여 발생되어지는 연소생성물인 연기 및 연소가스들에 대한 복도에서의 유동현상을 관찰하였다. 실물화재 실험시 열전대의 측정위치는 그림 1과 같이 연기 선단의 이동현상을 복도내에서 온도의 변화특성으로 분석하기 위하여 천장을 따라서 수평으로 2.5m마다 설치하였으며, 해석을 수행한 공간의 개략도는 그림 2에 나타내었다.

시뮬레이션에서도 실물화재 실험시 열전대 측정위치와 동일한 위치에 연기평균속도 측정을 위해 설치하였으며, 난류의 공기흐름 모델링으로 범위를 제한하고 연소모델은 포함하지 않는 것으로 하였다. 또한 연기는 이상기체로 가정하였다. 반면에 열원은 특정한 속도, 온도를 가진 등유 Pool Fire와 같은 것으로 후미 흐름처럼 가정하였다. 공기의 흐름은 압축을 유발하며, 부력을 가지고 일시적인 것으로 정의 하였으며, 난류 유동장을 풀기 위하여 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

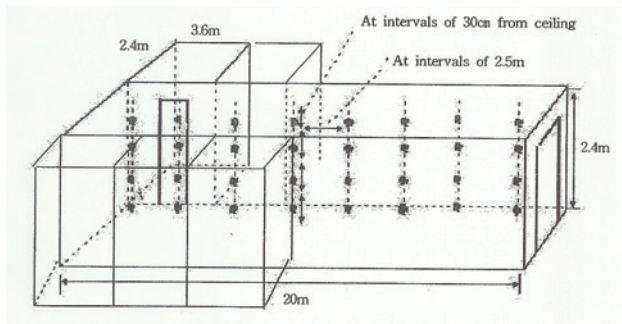


그림 1. 실물화재 실험의 온도센서 위치

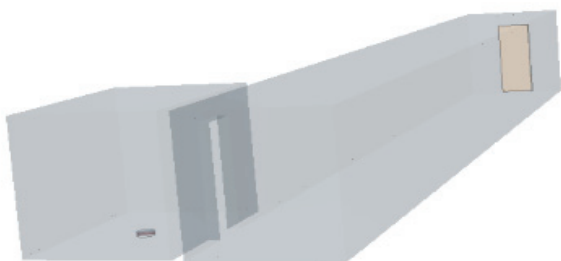


그림 2. 해석 Modeling

2.2 입구 경계조건

입구 경계조건은 실험에서의 30cm직경에 등유(3L) 화원과 동일한 발열량을 파악하여 입구의 경계값으로 주었다. 또

한 상기에서 계산된 발열량을 입구 조건에 적용하기 위하여 화재에 의해 발생하는 부력 Plume을 적용할 필요가 있다. 화재에 의해 발생하는 높은 발열량은 밀도의 변화로 인한 부력을 야기시키고 그로 인하여 주위 공기를 유입하면서 상승하게 된다. 따라서 발열량에 해당하는 온도와 속도를 이용하여 Plume의 상승을 묘사하였다.

그림 3은 모델의 Volumes Mesh를 형성한 것으로 실험에서 설치한 온도 센서 중 연기의 속도를 측정할 센서 2개(9, 12번)를 15m 간격으로 실험과 동일한 위치인 복도 중앙의 천장으로부터 30cm 거리에 설치하여 모델링에 적용하였으며, 화원을 표시하였다. 화원은 Pool Fire 실험과 동일하게 직경 30cm 원통에 3L 등유의 발열량을 기존 연구를 참고로^[1] 온도로 변환하여 입력조건을 1200K로 적용하였으며, 부력은 속도로 치환하여 1m/s로 하였다. 주위에 벽은 완벽한 단열재로 가정하며, 주위의 초기온도는 10℃(283K)로 세팅하였다. 또한 주위의 모든 속도 성분, 압력 그리고 스칼라는 0으로 세팅하였다.

표 1은 모델의 Mesh 개수와 Time Step에 관하여 나타낸 것으로 Volume Mesh는 134,961개가 생성 되었으며, Plume의 수직인 천장부분과 온도센서가 들어간 복도의 중앙은 Mesh size를 작게하여 세분화 된 유동을 관찰 할 수 있도록 제작하였다.

표 1. Mesh 및 Time 조건

구분	수 / 시간
Surface Mesh	22,174개
Volume Mesh	134,961개
Time Step	2s
Running Time	240s

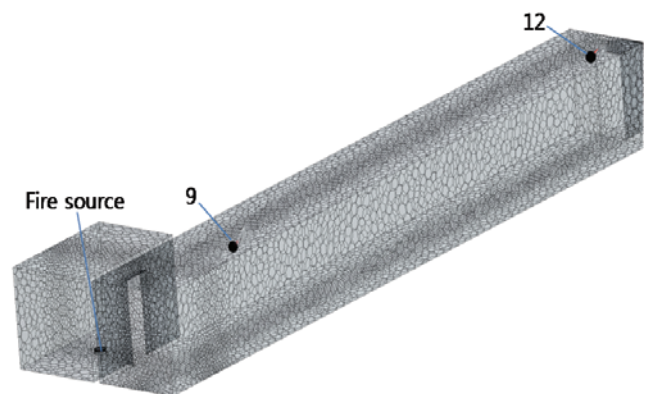


그림 3. Volume Mesh & Thermocouple

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 및 해석 결과 비교

등유 Pool Fire를 화원으로 한 경우 천장에서 30cm구간에 설치한 온도센서의 그래프를 보면 급격한 온도상승부분이 나타났다. 이 지점의 온도상승은 연기의 흐름에 인한 것으로 볼 수 있다.

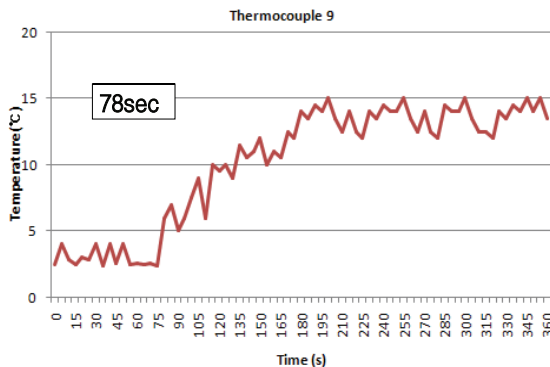
그림 4와 5는 실험 결과와 해석결과의 비교를 나타낸 것이다. 실험에서 화재실 출입구 바로 앞에 설치한 온도센서는 복사열의 영향 등으로 수치가 부정확하여, 2번째 설치된 NO.9 센서와 마지막에 설치된 NO.12센서를 이용하여 평균속도를 계산하였다. 피난로 내부의 온도분포는 실험결과에 비하여 수치해석 결과가 다소 높게 나타났으나 온도센서의 급격한 온도상승은 표 2와 같이 유사하다는 알 수 있었다. 이것은 실물 실험은 벽으로의 열전달로 인한 열손실이 발생하지만 해석조건에서는 단열조건을 적용하였기 때문인 것으로 판단된다. 연기의 평균속도는 실험이 0.29m/s, 해석결과가 0.28m/s로 실험결과가 좀 더 빠르게 나타났다.

표 2. 온도센서 반응시간

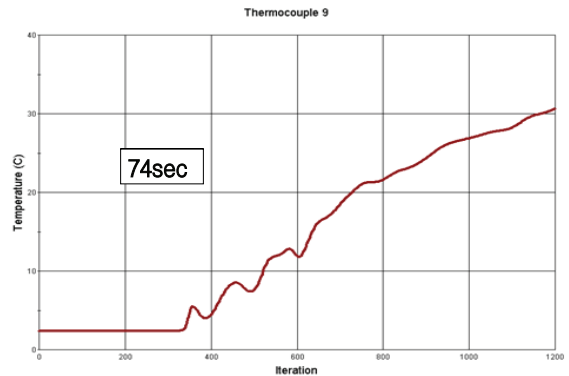
구분		반응시간	연기속도
실험	NO.9	78s	15m/(130-78) ≈0.29m/s
	NO.12	130s	
CFD	NO.9	74s	15m/(128-74) ≈0.28m/s
	NO.12	128s	

3.2 연기거동 해석결과

그림 6은 240초 후 온도결과를 나타낸 것으로 화재실이 복도보다 높게 나타났으며, 하층에서 상층으로 올라갈수록 온도가 높아지는 경향이 나타났다. 또한 그림 7은 시간에 따른 연기의 이동을 속도벡터에 따라 나타낸 것으로 실험을 통하여 화재초기 화재실로 들어가는 공기의 유입을 볼 수 없었으나 CFD를 통하여 눈으로 확인 할 수 없었던 화재초기 화재실로 공기의 유입이 관찰되었고 공기의 유입을 통한 화염의 요동이 관찰되었다. 연기의 전파과정은 Plume이 형성되어 상승한 후 천장과 상호작용을 하며 천장제트를 형성해 천장을 따라 전파되면서 연층이 하강을 하여 연층이 두꺼워지게 되며, 이후 수직벽과 충돌 후 벽제트를 형성하며 하강하게 된다. 하강하는

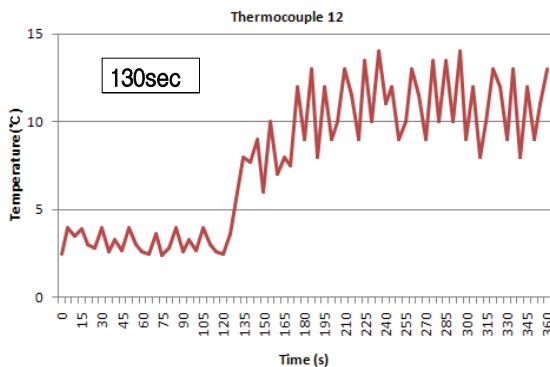


(a) 실험에 의한 온도센서(NO.9)

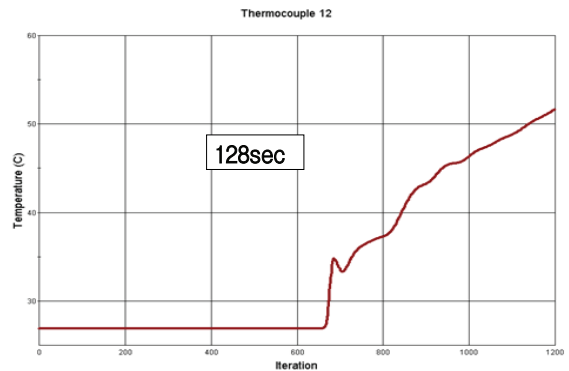


(b) 해석에 의한 온도센서(NO.9)

그림 4. 실험 및 해석의 온도센서 반응시간 (NO.9)



(a) 실험에 의한 온도센서(NO.12)



(b) 해석에 의한 온도센서(NO.12)

그림 5. 실험 및 해석의 온도센서 반응시간 (NO.12)

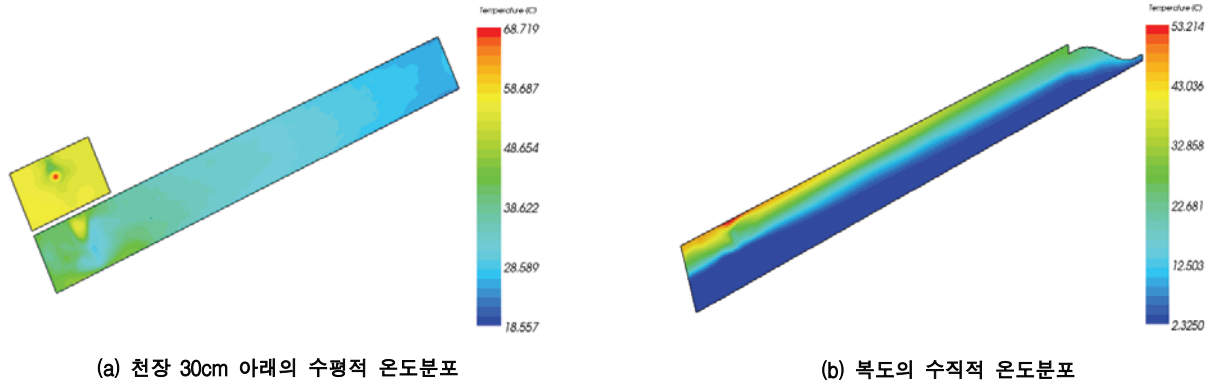


그림 6. Temperature (°C)

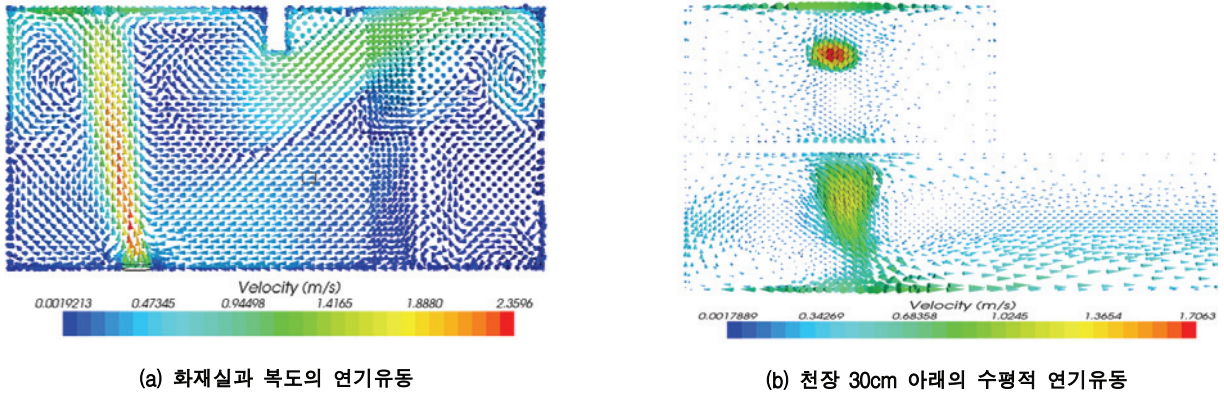


그림 7. Velocity (m/s)

벽제트는 주위공기보다 높은 온도와 낮은 밀도를 가지고 있기 때문에 부력과 벽표면과의 마찰력으로 인해 하강이 멈추고 상대적으로 농도가 적은 안쪽으로 이동하게 된다. 이러한 천장제트와 벽제트의 하강과정을 통해 연층이 두꺼워지게 되는 것을 해석결과 확인되었다.^[2] 또한 화재실에서 나온 연기가 복도벽과 부딪쳐 유선형으로 출구까지 도달되어지는 것을 확인함으로써 연기 선단의 영향을 많이 받는 화재감지기 및 스프링클러의 일률적인 설치위치의 문제점들이 발견되었다.

4. 결 론

Pool Fire를 적절히 묘사하여 CFD 모델에 적용한 해석 결과가 실제 실험에 의한 값과 비교적 잘 일치하였다. 연기유동에 관한 실험과 해석 결과를 비교한 결과 유사한 시간에 온도 센서가 작동되었으며, 연기의 평균 이동속도 또한 실험 0.29m/s, 해석 0.28m/s로 비슷하게 측정되었다. 온도센서 반응시간은 해석결과가 실험보다 조금 앞서는 것으로 나타났는데 이는 해석 가정에 단열조건으로 인한 것으로 판단되었다.

연기의 온도 분포를 살펴보면 화재실에서 가장 높게 나타났으며, 통로의 높이별로 살펴보면 상층부에서 하층부로 내려올

수록 온도가 낮아지는 것으로 확인되었다. 또한 연기의 전파 과정은 Plume이 상승한 후 천장에서 천장제트를 형성해 연층이 하강하여 연층이 두꺼워지며, 수직벽과 충돌 후 벽제트를 형성하여 하강하게 된다. 이러한 천장제트와 벽제트의 하강과정을 통하여 연층이 두꺼워지는 것으로 확인되었다. 또한 화재실에서 배출된 연기가 복도벽과 부딪쳐 출구까지 도달되는 것을 확인하여 연기 선단에 영향을 받는 화재감지기 및 스프링클러 설비의 일률적인 설치위치의 문제점들을 발견되었다. 따라서 이후 화재예측을 통한 연기거동에 관한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

연기의 거동과 연층의 온도분포 등을 파악하여 일반적인 연기의 거동특성을 분석함으로써 건축물의 설계 및 시공시 효과적인 제연대책과 방화계획을 수립하기 위한 정성적 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 이성룡 외 2(2000). "아트리움 및 복도 공간의 화재 발생시 연기 거동에 관한 수치해석적 연구" 한국화재소방학회 추계 학술대회 논문집, pp.49~57
2. James G. Quintiere. "Principle of fire behavior". Delmar Publishers