다중이용시설 구획 공간에서의 화재 및 연기 확산에 대한 수치해석적 연구

A Numerical Analysis For The Fire and Smoke Spread Study in the Small Compartment Space

권오상* · 채승언**

Kweon, Oh Sang* and Chae, Seung Un**

Abstract

In multi purpose use facilities, there are a large number of people occupied in a small compartment space. The fire in the multi purpose use facility can be occurred human loss and property damage due to spread of a fire and a smoke in buildings. It is most critical to control flame spread in the early stage. To make the model work for practical fire protection engineering problems, property of combustible materials were predicted so that it could be help to reduced the risk. Computational analysis result from numerical models were compared with a real scale fire test. For computational analysis, the Fire Dynamics Simulator(FDS) was conducted with a Large Eddy Simulation(LED) model for turbulence. Especially, The computational fire modeling can help to mitigate risk and to prevent a fire.

Key words : Compartment space, Muti purpose use facility, Smoke Spread, Fire Spread, FDS

요 지

노래방과 같은 다중이용시설에서는 좁은 공간에 많은 사람들이 이용을 한다. 다중이용시설에서의 화재는 화염 및 연기의 확산으로 많은 인명과 재산의 피해가 야기되고 있다. 따라서 수치 해석은 다중이용시설의 시설 설계 특성과 다중이용시설에 설치된 가연물간의 연소 특성을 예측하여서 화재 위험에 노출된 요소를 제거하는데 도움을 줄 수 있다. 이러한 예측의 신뢰도를 검증하기 위해서 실제 화재 실험과 동일한 조건으로 수치해석이 필요하며, 본 연구에서는 컴퓨터 화재 시뮬레이션 프로그램인 FDS를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수행된 해석 결과의 검증을 위해서는 실험실실험을 통한 결과와 비교 분석 하였다. 특히, 작은 구획 공간들 사이에서의 연기 유동 해석은 재실자들의 위험을 사전에 점검하고 대처할 수 있게 할 것이다.

핵심용어 : 구획 공간, 다중이용시설, 연기 확산, 화재 확산, FDS

1. 서 론

다중이용시설로 분류되고 있는 노래방은 화재 안전의 사각지대에 놓여있다. 2012년 5월에 부산 부전동에 위치한 6층 건물의 3층의 한 노래방에서 발생한 화재 사건으로 화재의 원인은 천장 위 전선이 손상되면서 누전돼 주변에 있던 석고보드 합판 목재에 불이 붙어 화재가 발생한 것으로 소방합동 조사본부에서 발표하였다. 화재가 발생한 노래방의 경우 건축물의 외벽이 강화유리로 이루어져서 외부와 통하는 창이 없는 무

창층과 같은 구조였다. 이러한 구조는 화재 시 실내가 밀폐상태와 가까우며 고온의 연기와 유독가스가 밀폐된 공간에 급속도로 번져 대형 참사를 일으킨다. 화재 당시 노래방에 있었던 27명의 재실자중 9명이 사망하고 부상자 중 2명의 생명도 위독한 것으로 알려졌다. 부산소방본부에 의하면 노래방 화재 초기에 주인과 종업원이 자체적으로 진압을 시도하였으나 진압에 실패하고 신고가 늦어졌다. 또한, 3개의 비상구 중 2개가 출입구 방향으로 되어져 있었고 나머지 하나도 구석에 있어서 노래방 재실자들이 인지하기에 어려움이 있었던 것으

*정회원. 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구원 (E-mail: oskweon@kict.re.kr)
Member. Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 전임연구원(Tel: +82-31-369-0549, Fax: +82-31-369-0549, E-mail: seungun.chae@kict.re.kr)
Corresponding Author. Member. Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Fig. 1. Multi-use establishment number of fires (2011)(14,15).

로 조사되었다.

노래방과 같은 다중이용시설에서의 화재 사고가 끊임없이 발생하고 있으며 많은 사망자와 부상자가 발생하고 있다. Fig. 1은 다중이용시설에서 발생한 화재 사고로 인한 인명피해 통계이다.

증가하는 화재 사고로부터 인명의 피해를 미연에 방지하기 위하여 실내건축에 대한 정의를 건축법상으로 끌어들이려 하고 있으며 이를 위해 시설기준을 정하고 정기점검의 의무화 등 건축물 안전성 확보를 위한 노력 중에 있다. 다중이용시설과 같이 미로와 같은 좁은 통로에서는 피난이 어렵고, 화재 및 유독가스의 빠른 확산으로 많은 인명 피해가 예상되는 곳에 수치해석을 수행하여 화재의 성장과 연기의 확산 현상을 예측하여 재실자의 안전한 피난을 유도할 수 있게 한다. 또한, 실내 마감 재료의 안전한 선정과 배치에 도움을 줄 수도 있다. 그리고 공간이 넓은 다중이용시설에서의 화재 수치 해석은 화재의 유동 현상을 분석하여 적절한 제연설비 및 방재설비 선정에 유용하게 사용 될 수 있다. 최근에는 컴퓨터 성능은 대형 건축물 또는 독특한 실내 디자인 건축물에서의 화재현상을 수치해석으로 예측 가능 할 정도로 발전하였다. 그러나 아직은 실물 화재실험 대처하기 보다는 실물 화재실험과 수치해석 상호간의 비교 검증을 통한 신뢰성을 높이는데 연구 목적이 있다. 본 연구에서 실물화재 실험 데이터는 유용호 등 (14) “노래방의 화재위험성 분석을 위한 실규모 화재 실험” 논문을 참조하였다.

2. 다중이용 건축물 수치해석 모델링

2.1 다중이용 건축물인 노래방의 화재 수치해석 모델

다중이용 건축물의 수치해석을 위해 사용한 화재시뮬레이션은 Fire Dynamics Simulator(FDS)이다. FDS는 미국국립표준기술연구원 National Institute of Standards and Technology(NIST)에서 개발한 대표적인 3차원 Field Model 프로그램이다. FDS는 수 계산으로 하는 편미분방정식 또는 수계산이 불가능한 수치해석을 컴퓨터를 이용하여 시간을 단축시키고 발생 가능한 오차를 줄여 주고 있다.

Table 1. Multi-use construction

Item	Contents
Address	Incheon-Si Se-Gu Gajung-Dong
Use	Muli Use Purpose Facility
Structure	Steel Concrete 4-story Bldg.
Garaoke	Appx. 27py (90 m ²)
Compartments	Lobby, Corridor, Total 6 Rooms
Height	2.4 m

Fig. 2. Photo of real fire test site.

Fig. 3. Real karaoke-floor plan.

Fig. 4. Karaoke fire modeling-floor plan.

수치해석 및 실물 화재실험은 상업시설물 2층에 위치한 노래방에서 이루어졌으며 Fig. 3은 분석 대상 노래방의 평면도

를 보여 주며 Fig. 4는 각 구역의 정의와 이에 대한 수치해석 모델링의 모습을 보여준다. 노래방 화재의 발화 지점은 노래방 5번 방이며 노래방 기기 옆에 위치한 쓰레기 통에서 발생하여 기기로 확산된 시나리오로 수행 되어졌다. 본 수치 해석에서는 실물 화재실험에서 연기의 전파와 화재 확산을 중점으로 다루었다. 그러므로 화재 시뮬레이션 모델에서는 발화가 되는 5번 노래방을 제외한 노래방들의 가연물과 로비의 가구와 같은 가연물은 모델링에서 제외 시켰다.

2.2 다중이용 건축물인 노래방의 화재 수치해석 모델의 실내 가연물

건축물을 대상으로 하는 수치해석 및 실물 화재실험에서의 중요한 실험조건으로는 가연물의 중량, 재질 및 배치, 화재원의 성상, 개구부의 형상 등이 있다. 이들에 대한 조건을 다음과 같이 설정하였다.

가연물은 고정 가연물과 유동 가연물로 나누어진다. 고정 가연물은 건물에 내부마감을 위하여 부착된 내장재와 같은 가연물을 의미하며, 수납 가연물은 노래방의 사용에 따라 건축물 공간에 가변적으로 적재된 가연물을 의미한다. 국내의 화재하중을 조사분석하여 그 결과를 토대로 Table 2 같은 가연물을 실내에 배치하였다.

2.3 다중이용 건축물인 노래방의 화재 수치해석 모델의 화재 시나리오

본 논문에서는 노래방화재에 대한 모델링의 화재 시나리오는 실제 화재 시나리오와 동일하게 진행하였다.

화재의 위치는 노래방 5번 방이며 화원은 노래방 기기 옆에 위치한 쓰레기통에서 화재가 발생하여 옆에 위치한 노래방 기기로 옮겨 붙는 것으로 설정하였다. 각 노래방 룸에 설치되어져 있는 창문들은 본 모델링에서 제외 하였다.

2.4 다중이용 건축물인 노래방의 화재 수치해석 모델링

노래방 화재에 대한 모델링은 실제의 건축물과 동일한 크기로 노래방 복도의 양 옆으로 6개의 실로 구성되었다(Fig. 5와 Fig. 6 참조). 실물 화재실험과 동일하게 화재 발화가 이루어지는 5번 룸과 발화가 이루어진 방 옆인 4번 룸에 온도를 측정

Garaoke rm5

Garaoke rm5

Lobby

Corridor

Fig. 5. Photo of inside garaoke.

Garaoke rm5 FDS

Garaoke rm5 FDS

Fig. 6. Photo of inside garaoke FDS.

정할 수 있는 point를 설정하였다. 추가로 노래방 5번방과 6번 방 문 앞에 위치한 로비 지역에 온도를 측정 할 수 있는 point를 설정하였다.

격자의 간격은 10 cm로 설정하여 계산영역의 총 격자계는 117×81×25로 구성된 uniform-rectangle 격자계를 사용하였다.

3. 노래방 수치 해석 결과 및 고찰

노래방 화재 수치해석의 결과는 다음 Fig. 7과 같이 나타난다. Fig. 7 평면 그림은 212 초와 380 초에서의 연기 온도 분포를 나타내는 그림으로서 빨간색이 높은 온도를 나타내고 파란색으로 갈 수 록 낮은 온도를 나타내고 있다. 또한, 입체 모델링 그림은 228 초와 380 초 각각에서의 연기 유동과 연기층의 높이를 보여주고 있다.

Table 2. List of combustible materials

Compartment	List	Combustible Weight (kg)
Garaoke	Floor Finish Material	1.2 kg/m ²
	Ceiling Finish Material	3.5 kg/m ²
Garaoke Room 5 (Fire Origin)	TV	25.2 kg/m ²
	Sofa	13.4 kg/m ²
	Mis.	6.3 kg/m ²

Time	Photos			
3 min. Real Fire Test
	Room 5	Room 4	Corridor	Lobby
4~7 min. FDS
	Temp. at 212 s	Smokeview at 228s	Temp. at 380s	Smokeview at 380s

Fig. 7. Real fire test vs. FDS (photos)

Fig. 8. Heat release rate(HRR)(5,6)

3.1 열방출량(HRR)

수치해석에 의한 시뮬레이션에서는 로비에 위치한 외부로 통하는 문이 개방되어져 있어서 화염의 성장 과정에서 충분한 산소를 공급한 것으로 보인다. 따라서 본 모델링에서 화염의 성장은 발화와 동시에 점차적으로 성장하여 292 초에 약 1.6 MW까지 상승하고 줄어 들었다가 421초에서 최고 열방출량 (HRR)인 약 2.5 MW 까지 상승하였다. Fig. 9와 Table 3 에서와 같이 천장에서의 온도 변화는 284 초에 808°C까지 상승하였다가 다시 상승하여 400 초에서 최대치 821°C까지 증가하는 것을 볼 수 있었다. 화염이 감소하다가 다시 한 번 증가하게 되는 것은 실내의 공기에 의한 변화보다는 화염 근처의 가연물인 쇼파로 이전되면서 화염이 다시 한 번 증가한 것을 볼 수 있다.

하지만 4번 룸과 로비에서는 FDS 수치가 높게 측정되었다. 이러한 이유는 실제 실험 모델의 경우 건축물 외벽에 창문이 있으며 로비 반대쪽에 위치한 복도 끝에는 비상문이 있었다.

또한 각 룸 실내 천장에는 환기구가 있어서 틈 사이로 연기

가 외부로 또는 환기구를 통하여 다른 곳으로 전파되면서 자연적으로 감소분이 있었으나 이러한 오차는 본 모델링에서는 감안이 안 되었다. 메인 홀인 로비에서 500초 이후에 온도가 재상승한 것은 발화가 일어나 5번 룸의 복도에 위치한 창문이 파손되면서 뜨거운 연기가 로비로 출하하면서 5 번 방의 고온의 연기가 로비로 빠져나가면서 온도의 변화가 일어난 것으로 판단된다. 실물 실험에서 로비의 연기가 질어서 노래방 실과 복도에 위치한 창문의 파손은 CCTV 화면으로는 확인하기 어려웠다. 따라서 수치해석에서는 실내 창문의 파손은 제외시켰다.

3.2 화재공간 주요지역 온도 분포

노래방 화재 제현의 경우 실내 쓰레기통에서 시작한 불이 노래방 기기와 모니터로 확산되면서 화재가 커지기 시작하였다. Fig. 9에서 보여주는 실물 화재 시험 결과와 시뮬레이션 결과 시작 3~4 분 이내에 가연물에 급격한 화재 확산이 진행됨을 알 수 있었다. 화재가 일어난 5 번 룸 천장 온도 곡선에서 시뮬레이션 결과와 실물 화재 실험 결과에서의 화재성상은 유사하게 진행되었다.

공간 온도가 500°C를 넘으며 전역화재(Flash-Over Fire)에 도달하는 시기가 수치 해석 결과와 실물 화재 실험 결과 모두는 약 220 초를 경과하는 시점에서 나타났다. 본 모델링에서는 전역화재의 발생 시간이 실물 화재에서와 비슷하게 측정되었음을 알 수 있다.

SPFE hadbook of Fire Protection Engineering에서는 개스의 온도가 350°C~650°C 사이에 있을 때 시작한다고 보고 있다(18). 본 FDS 결과 분석에서는 실내 온도가 500°C를 넘는 시기를 전역화재 (Flash-Over Fire) 발생 시점으로 판단하였다.

(a) Real Scale Fire Test⁽¹⁴⁾ vs. FDS - Room 5

(b) Real Scale Fire Test⁽¹⁴⁾ vs. FDS - Room 4

(c) Real Scale Fire Test⁽¹⁴⁾ vs. FDS - Lobby

Fig. 9. Real scale fire test temperature vs. FDS temperature.

Table 3. Time and peak temperature. (real test vs. FDS)

	Real Scale Fire Test(14)		Fire Modeling	
	Max. Temperature	Fire retardant	Max. Temperature	Fire retardant
Rm 5	827.5°C	254 sec	821°C	400 sec
Rm 4	97.7°C	524 sec	153°C	383 sec
Lobby	505.6°C	272 sec	404°C	727 sec

3.2 연기 확산 및 피난

노래방 실물 실험의 경우 화재가 5 번 방에서 시작하여 빠르게 확산되는 것을 볼 수 있었다. 그러나 화염과 짙은 연기

Fig. 10. Smoke layer heights.

Fig. 11. Visibility at around 100 seconds(1.5m height).

로 인하여 자세한 연기의 이동 경로를 확인하기는 불가능하였다. 따라서 컴퓨터 모델링을 통하여 6 개의 방에 연기가 순차적으로 확산되는 모습과 시간을 알 수 있게 한다. 본 연구에서 수행한 모델링에서는 화재가 시작한 5번방에 연기가 차기 시작하여 열린 문을 통해 로비와 복도로 전파되었다. 복도에 차기 시작한 연기는 순차적으로 1번 방을 시작으로 6 번 방, 2 번 방, 3 번 방, 그리고 마지막으로 5 번 방에 연기가 차기 시작하는 것을 확인할 수 있었다. 4 분 이내에 대부분의 방, 복도, 그리고 로비에 연기가 전파되어 가시도가 낮아진 것을 확인할 수 있었다.

3.3 연기층 높이 변화 및 가시도

화재 모델링에서 화재 및 연기의 전파로 인한 연기층의 시간에 따른 연기층의 높이 변화는 다음 Fig. 10과 같다. 화재실인 5 번 방에서는 약 200 초부터 급격히 낮아져서 1.5 m 이하로 낮아지기 시작하였다. 로비의 경우 화재실로부터 연기가 확산되어 106초 이후부터 연기층의 높이가 1.7 m 이하로 낮아지기 시작하였으며 약 200 초에서는 1.5 m를 이하로 낮아졌다. 이후 10 분 경에는 약 0.7 m를 유지하였다.

Fig. 11는 Smoke View에서 높이 1.5 m 단면에서의 가시도를 보여주는 Slice file을 캡처한 것으로 빨간색이 최대 30 m 가시도를 보여주며 하늘색에서 파란색이 10 m이하의 가시도를 보여주고 있다. 그림에서 검은색 선은 가시도 10 m를 나타내고 있다.

4. 결 론

노래방과 같은 다중이용시설들은 좁은 공간에서 많은 재실자들이 시설을 사용하고 있는 공간으로 화재 사고 시에는 화염 및 연기의 급속한 확산이 이루어지며 이로 인하여 인명의 피해가 큰 화재 사고가 발생할 수 있다.

노래방과 같이 좁은 공간에서의 실내 마감재료 및 인테리어의 경우, 복합재료와 플라스틱품의 사용이 많으며 가연성 가구들이 비치되어져 있다. 실물 화재 실험과 수치 해석의 결과에서 볼 수 있듯이 전반적으로 설치되는 인테리어 소품과 가구들은 방의 벽을 따라 위치해 있으며 방의 출구 문 근처까지 설치되어 있는 경우가 많아서 실에서 일어난 화재가 전역화재(Flash-Over Fire) 시작이 급속하게 이루어지고 실외까지 확산이 용이한 구조로 되어있다. 현재 국내에서의 노래방 실내 마감재료에 대한 특별한 규제가 없어서 화재에 취약한 것으로 보인다.

다중이용 시설인 노래방의 화염 전파 및 연기의 이동을 예측하기 위하여 수치해석모델을 이용한 FDS 시뮬레이션을 수행하였다. 모델링은 실물화재실험과 유사한 화염 및 연기 전파를 확인 하였다.

연구 결과 화재 모델이 실물 화재 실험에서의 화재 확산과 연기의 확산 경향이 정성적으로 잘 예측되어지고 있음을 확인하였다. 그러나 정량적 온도 및 시간 예측에서는 정확한 신뢰도를 얻지 못하였다. 이는 실내의 인테리어 및 가연성 창문 등과 같이 화염 및 연기 유동에 영향을 미치는 조건들을 만족하게 구현하기가 어렵기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 노래방과 같이 밀폐된 작은 공간들이 여러개가 붙어 있는 구조가 화재에 얼마나 취약하고 연기로 인한 인명의 피해가 큰지를 알아보며 연기 이동 및 피난의 기초 자료로 사용하고자 하였다. 본 연구에서와 같이 화재 가연물이 실물에서 보다 FDS 모델에서 빠르게 성장한 부분은 물리적, 화학적 특성에 의해 발생된 오차인 것으로 추정되며 화재실에서의 화재 확산 경향과 전역화재(Flash-Over Fire) 현상은 FDS에서 정성적으로 잘 예측되어지고 있는 것으로 확인되었다. 향후 좁은 노래방 구조에서 급속한 화재, 연기의 확산은 재실자의 피난에 큰 영향을 줄 수 있다. 화재 경보 시설이 미약하거나 잘 관리되어지지 않은 시설에서의 화재 시 전역화재(Flash-Over Fire) 현상과 인명의 피난 상황에서 미치는 현상에 대한 보완연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업으로 수행하는 “(14주요)개방형 적외선분석 Passive Method 개발” 과제의 일환으로 연구수행 되었고, 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, C.-S., Kim, H.-Y., You, Y.-H., Kim, H.-J. (2012) “A Numerical Analysis for Fire Spread Mechanism of Residential Building Fire”, *Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 26. NO. 1, pp. 31-37.
- Bystrom, A., Cheng, X., Wickstrom, U., and Veljkovic, M. (2011) “Full-scale Experimental and Numerical Studies on Compartment Fire Under Low Ambient Temperature”, *Building and Environment*.
- Kerber, S. and Milke, J.A. (2007) “Using FDS to Simulate Smoke Layer Interface Height in a Simple Atrium”, *Fire Technology*, Vol. 43, pp. 47-75.
- Kim, M.B., Han, Y.S., Choi, B.I., Do, K.Y., and Lee, Y.W. (2009) “A Full-scale Fire Test of an Apartment House”, *Proceedings of 2009 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering*, pp. 415-422.
- McGrattan, K.B., Floyd, J., Forney, G., and Baum, H. (2003) “Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model”, *International Association for Fire Safety Science Symposium* pp. 827-838.
- McGrattan, K.B. (2010) “FDS Ver.5.5 Technical Guide”, NIST Special Publication.
- McGrattan, K.B. (2010) “FDS Ver.5.5 User Guide”, NIST Special Publication.
- National Emergency Management Agency (2011) “Fire Statistical Yearbook” National Emergency Management Agency (NEMA), statistics on fire in the Korea.
- NFPA 285 (2006) “Standard Fire Test Method for Evaluation of Fire Propagation Characteristics of Exterior Non-Load-Bearing Wall Assemblies Containing Combustible Components 2006 Edition”, pp. 5-8.
- Olenick, S.M. and Carpenter, D.J. (2003) “An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 13, pp. 87-110.
- Proulx, G. (2002) “Movement of People: The Evacuation Timing”, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition*, pp. 3342-3366.
- Quintiere, J.G. (1997) “Principles of Fire Behavior”, *Delmar Publishers*, pp. 101-127.
- The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition, William D Walton, Philip H. Thomas, “Estimating Temperatures in Compartment Fires”, pp. 3171-3188.
- Wang, J.H. Kim, Y.S., and Lim, C.H. (2006) “Fire & Egress Simulation”, *Donghwapub*, Korea.
- Yoo, Y.H., Choi, Y.H., and Kwon, O.S. (2012) “Real Scale Fire Test for the Karaoke Fire Risk Analysis”, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 6, pp. 1-6.
- Yoo, Y.H., Kwon, O.S., and Kim, H.Y. (2009) “The Real Scale Fire Test for Fire Safety in Apartment House”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 57-65.

Received	September 5, 2014
Revised	September 11, 2014
Accepted	September 18, 2014