

## 화재시뮬레이션 S/W를 이용한 연소예측모델링기법에 의한 국내 사우나 시설의 화재원인규명을 위한 사례연구

박형주\*, 신동철\*\*

\*안실련 화재조사연구센터장 \*\*화재조사위원

### A Case Study on Determination of Fire Causes for SAUNA FACILITY Fires Validated by CFD Fire & Smoke Simulation Modeling Method

#### 요약

최근 빈번하게 발생하고 있는 사우나 등의 열을 방사하는 도크내에서 발생하는 화재사고는 다중이용업소를 이용하는 불특정한 사람들의 생명을 위협하고 있는 수준에 도달하고 있다. 특히 이런 시설의 화재는 화재발생 후에 소방대에 의한 진압에만 치중하고 있어 향후 계속하여 화재가 발생할 우려가 큼에도 불구하고 착화원인을 규명하는데 소홀히 하고 있다. 특히 현장감식에 의한 육안조사만을 실시하여 화재원인을 추정하거나 설정하는 경우가 대부분이라 근본적인 대책을 세우지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 육안조사 등에 의하여 설정한 착화원인을 과학적인 분석법 즉, EU국가에서 널리 사용하는 CFD(컴퓨터수치해석)시뮬레이션 S/W를 사용하여 연소모델링에 의한 검증조사기법을 적용하여 원인을 검증하는데 사용하여 국내화재조사기술의 과학화를 시도하였다.

#### I. 사우나 화재개요(Introduction)

##### 1. 화재발생장소 및 구조

- 화재일시 : 2002년 7월 29일(월) 19시 20분
- 화재장소 : ○○호텔 스포츠센터 남자 건식사우나 도크 (서울 소재)
- 화재발생피해 : 2층 남자 건식사우나 전소 및 사우나 훌천정파손
- 화재발생장소의 구조
  - 용도 : 사우나 도크
  - 구조 : 벽돌구조
  - 내장마감(바닥 : 마루판, 벽체 : 황토마감, 천정 : 목재루버반자, 단열 : 반자위 스티로폼 단열)
  - 기타개구부(강화유리문 1개소: 12mm, 투명유리창 1개소: 10mm)

## 2. 화재발생 및 진압스케줄

### ○ 적외선 스토브 가동 및 내부작업

- 13:00 ~ 14:00 1차가동
- 14:00 ~ 16:30 중단
- 14:00 ~ 16:00 건식사우나실내부 벽면 마감후 철수
- 16:30 ~ 2차가동(화재시까지 계속)

### ○ 화재상황요약

- 19:23 ~ 건물 외부배풍구에서 유독성 연기발생 (화재신고)
- 19:46 ~ 소방대 도착 및 현장진입

### ▶ 현장상황

- 소방대 현장진화 작업중 2층 남자사우나실로 추정
- 2층 EPS 분전반 확인(전기누전 아닌것으로 판단)
- 남자 사우나실 화재발견

- 20:00 경 화재진압완료

### ▶ 현장상황

- 사우나 도크앞 적치 숲에서 발화된 것으로 추정 (진압 소방대 진술종합)
- 지하실 사우나설비 전기분전반 확인(현장직원)

## II. 조사현황(Investigation)

### 1. 화재발생 현장도

1) 남자사우나 화재소손부 현황도(평면도) : 그림 1 참조

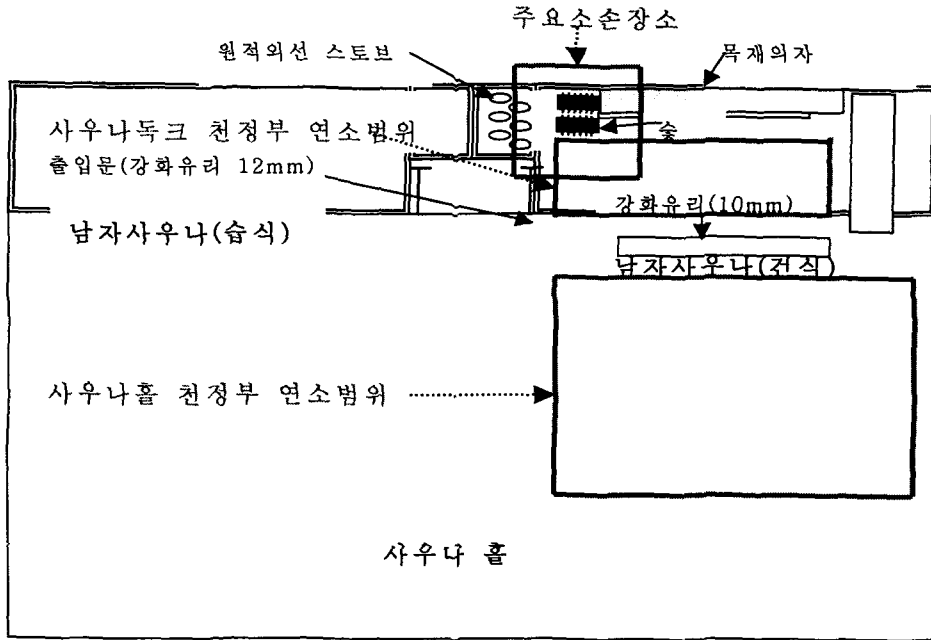


그림 1. 남자사우나 화재소손 범위 Layout

2) 남자사우나 도크제원 및 스토브설치위치 : 그림 2 참조

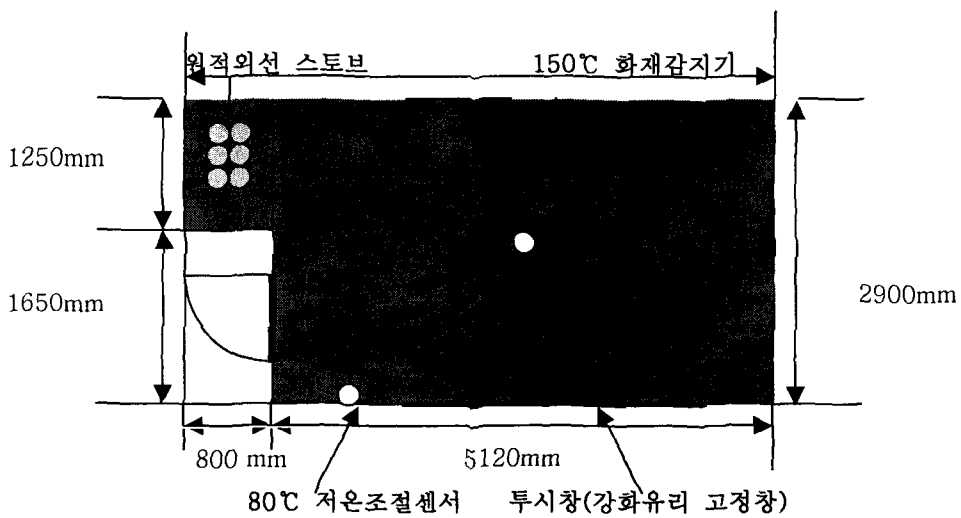


그림 2. 남자사우나 도크 평면도

3) 사우나 도크 단면현황 : 그림 3 및 그림 4 참조

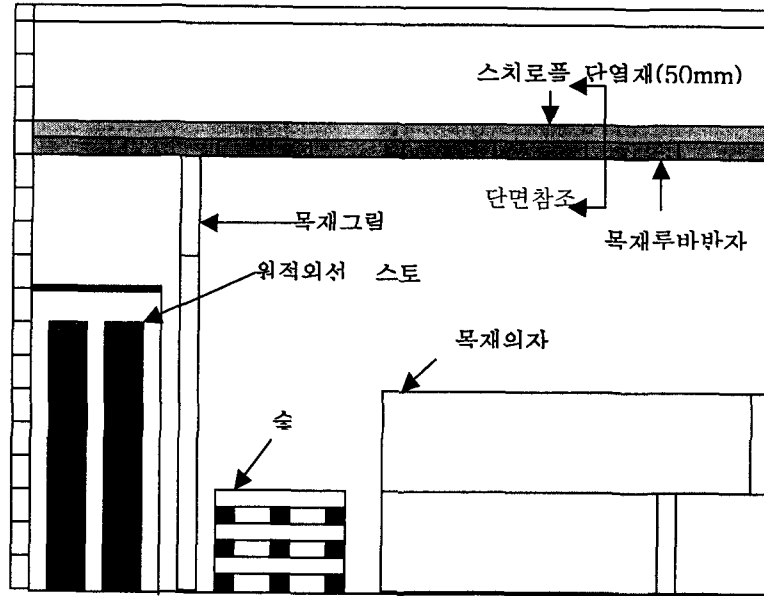


그림 3. 남자사우나 도크 단면도

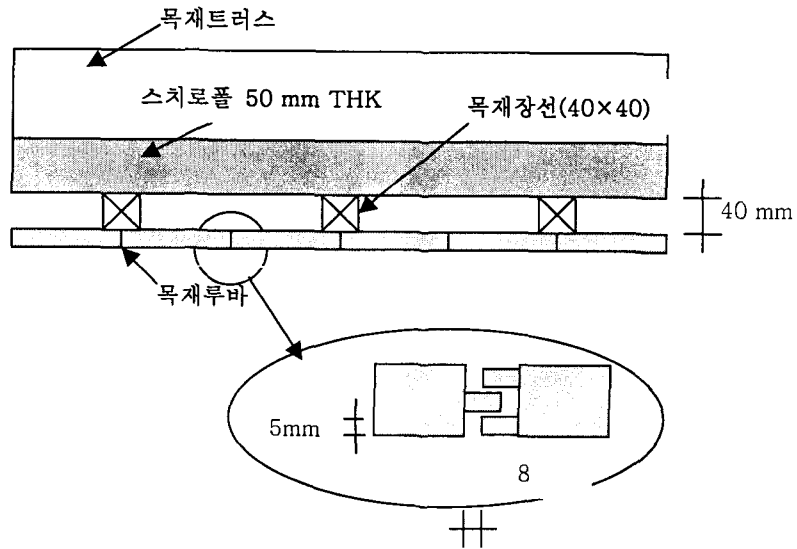


그림 4. 남자사우나 도크 천정반자 상세도

## 2. 현장 육안조사 현황(사진자료)

### (1) 일반화재상황 사진(진압직후)

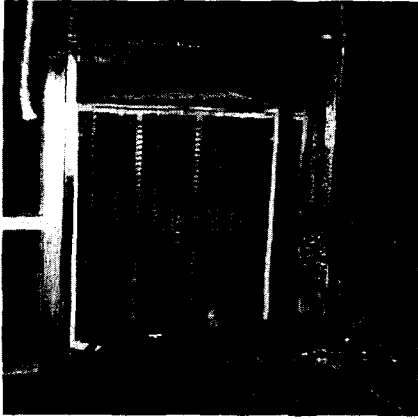


그림 5. 건식사우나실 적외선 스토브 전면 소손부 현황

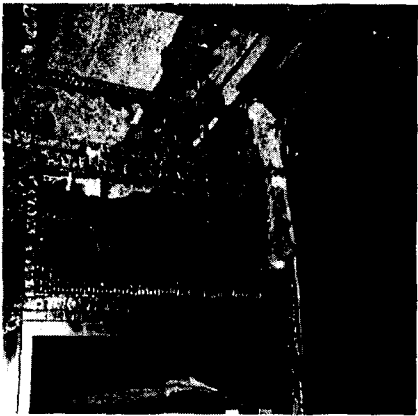


그림 6. 적외선 스토브 상단부 목재그릴 및 천정소손부 확대사진



그림 7. 사우나 도크내부 천정부 파손 현황

그림 7. 사우나 도크내부 천정부 파손 현황

3. 추정 연소부 확대사진



그림 8. 스토브 전면에 적치된 숯의 연소 후 현황



그림 9. 스토브 인접 우각부에 설치된 코너기둥의 하단부 연소흔적 현황



그림 10. 스토브 인접 우각부에 설치된 코너기둥의 연소현황 확대사진



그림 11. 사우나 도크내부 목재루바의 응착된 스티로폴 잔재 확대사진



그림 12. 사우나 도크내부 목재루바틈새로 새어나온 액상스티로폴 잔재 확대사진(반자 하단부)

4. 화재발생전 천장반자구조의 기밀성조사(동일구조사우나를 기준)

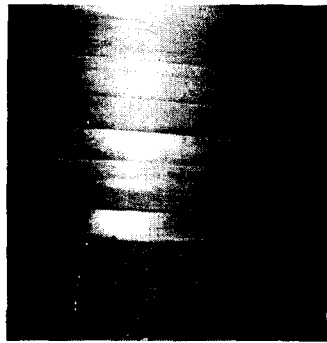


그림 13. 사우나 천정부 목재루버의 누수 시험결과 1(벽체와의 접합부 누수장면)

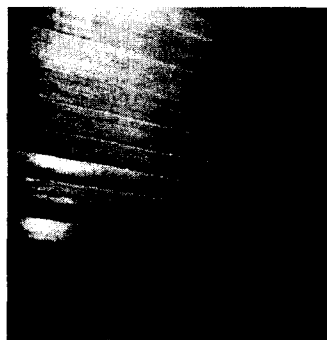


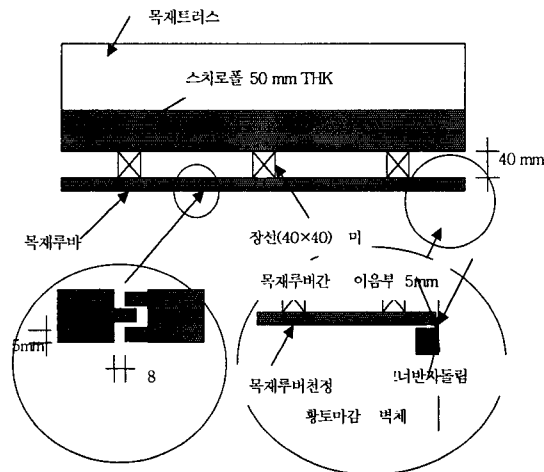
그림 14. 사우나 천정부 목재루버의 누수 시험결과 3(루버와 루버 이음틈새를 통한 누수장면)

### III. 화재원인 분석(Determination of Origin)

#### 1. 최초 발화지점 추정

- 화재발화장소: 남자사우나 도크내에서 원적외선 스토브를 시험가동중에 도크내부에서 가연물이 착화되어 화재가 발생한 사건
- 사우나도크 내부구조 분석
  - 바닥마감 : 목재플로링마감
  - 벽체구조 : 시멘트벽돌 구체에 황토치장마감(5 mm내외)
  - 천정구조
    - 40×40 장선 + 목재루버반자
    - 40 mm 장선위 50 mm 스티로폴 단열재 깔기
    - 목재루버와 벽체면과의 사이에 관통공간 형성(코너반자돌림상부 목재루버간 이음부 공간: 5mm×5mm)
  - 천정챔버 : 상부지붕 데크플레이트(Deck Plate) 노출공간으로 데크플레이트 하부에는 횡방향으로 H형강이 받치고 있는 구조임
- 사우나도크내 내장재의 발화온도 조사결과(출처 : Fire Dynamics)

구분	발화온도범위	비고
Polystyrene(스티로폴)	366℃ ~ 375℃	용융점(240℃)
목재(미송)	230℃ ~ 260℃	170℃ ~ 180℃에서도 착화된 경우에 발생함



(a) 목재루버간 이음부 관통부 상세도 (b) 목재루버와 벽체면의 연결관통부 상세도  
 그림 15. 사우나 천정부 관통부 현황

→ 1차 추정발화원 : 목재루버판 상부에 설치된 스티로폴이 천정관통부 사이를 통하여 스면든 열기에 의해 용융되어 도크하부로 흘러떨어진 후 슯표면에 닿아 슯에 축적된 열기와 합해져서 발화된 것으로 추정됨.



2. 시간별 예측가능 발화원 설정(시뮬레이션 시행전 예측)

시 간	진행상황 및 추정시나리오	입증추정근거
16:30	(건식사우나내 적외선스토브 시험가동)  상황① : 적외선스토브의 자동온도조절 장치에 의해 천정하부의 내부평균온도는 80℃~150℃의 온도분포대를 유지하며 계속가동	
	상황② : 목재루버반자의 루버이음새로 고온의 열기가 새어나가 반자상부에 설치된 스티로폼(용해점 240℃)을 일부 용해시키기 시작됨	→ Smoke 시뮬레이션 결과에 의해 스티로폼 용해 가능한 외주온도 도달 검증 시도예정
	상황③ : 용해된 액상 스티로폼이 목재루버 틈새와 우각부의 벽체와의 이음부 틈새로 흘러 적외선 스토브 정면에 적치된 숯에 떨어지기 시작하여 숯표면에 확산된 것으로 추정	→ 현장사진으로 입증(그림 13, 14)
	상황④ : 숯표면에 확산된 액상스티로폼이 숯전면의 스토브에서 방출되는 복사열과 숯 내부기공에 저장된 열기와 합하여 액상스티로폼이 최초로 점화한 것으로 추정	→ 숯의 열기함유능력 특성에 따라 예측
	상황⑤ : 한번 점화된 스티로폼액이 계속적으로 떨어지거나 떨어지면서 우각부 코너목재기둥 표면에 남은 잔존 스티로폼액으로 확산되어 스토브상부의 목재그릴등에서 본격적으로 확산된 것으로 추정	→ 스티로폼의 인화온도 특성으로 입증가능
	상황⑥ : 천정반자상부에 기용해된 스티로폼로 화염이 확산되어 스티로폼 단열재로 확산되면서 하부의 목재루버까지 연소확대시킨 것으로 추정	→ 현장사진으로 입증(그림 15, 16)
	상황⑦ : 천정반자상부의 챔버를 통하여 화염과 연기가 확산되어 사우나 욕조상부까지 확산되어 외부로 누출되었을 것으로 최종추정됨	→ 현장사진과 진압소방대의 진술로 입증
19:23	사우나실 외부 배풍구로 검은연기 분출(최초발견시점)	

3. 컴퓨터 시뮬레이션 모델 결과에 따른 온도분포예측

○ 화재발생장소의 구조모델 투명도 및 분석범위

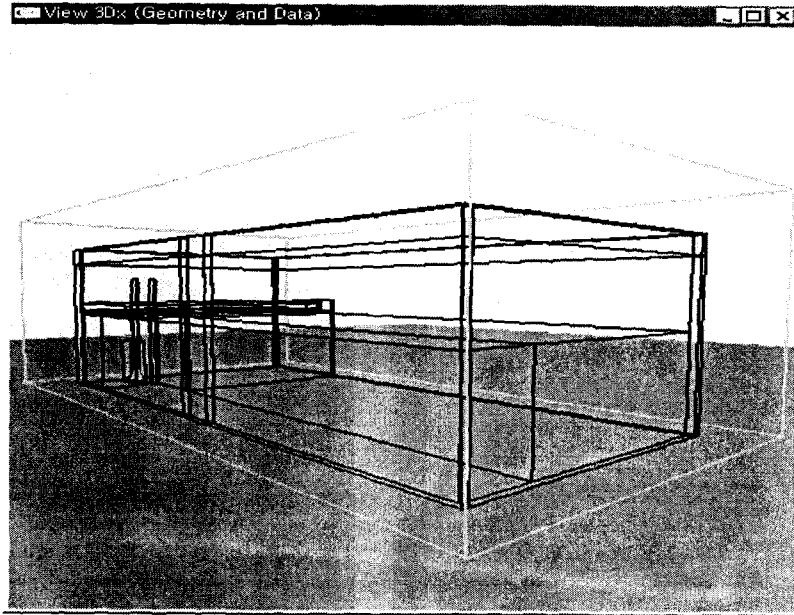


그림 16. 화재발생장소의 구조모델 투명도 및 분석범위

○ 남자 건식사우나 도크의 스토브 연소모델

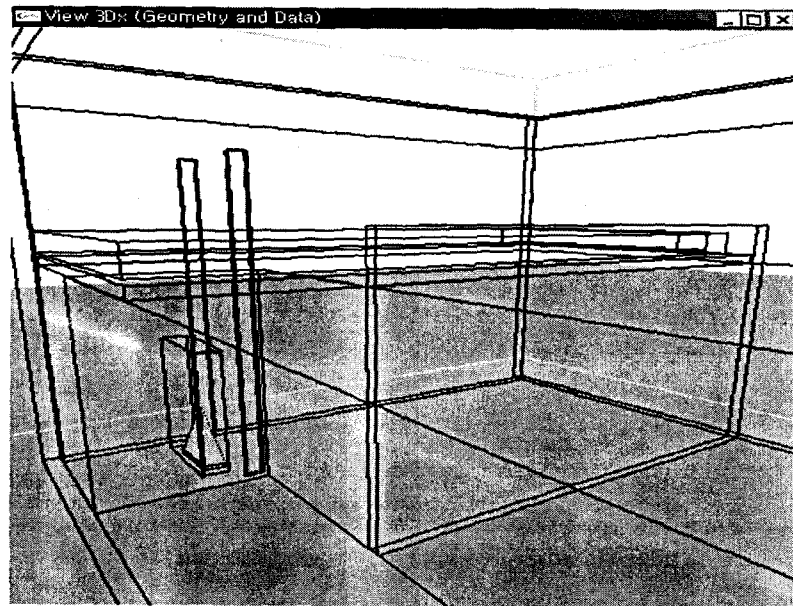


그림 17. 남자 건식사우나 도크의 스토브 연소모델

- 1) 모델(1): 스토브열량 100% 60분가동, 50% 30분가동  
 ○ 스토브 열량을 근거로한 화재하중 및 화재성장곡선(1)

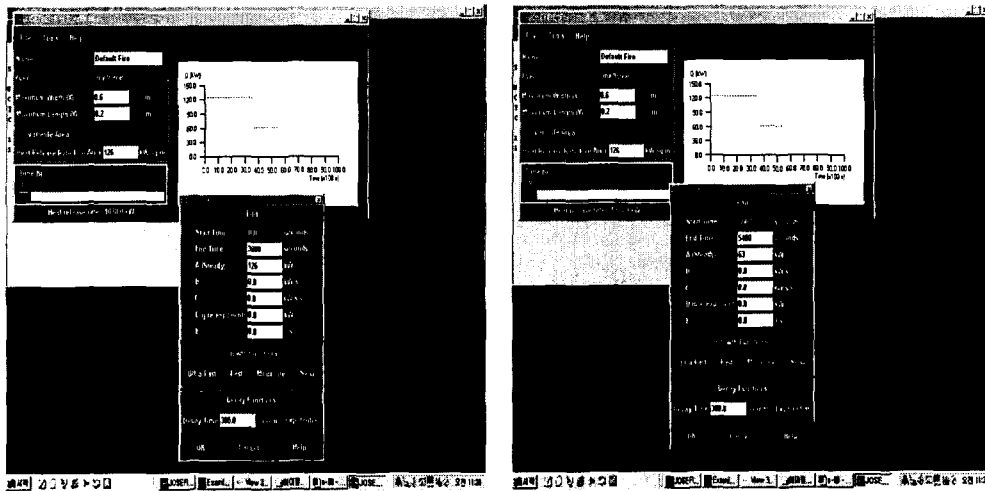


그림18. 화재하중 및 화재성장곡선 1시간 a) 화재하중 및 화재성장곡선 1시간 30분)

- 연기성상분포도(90분후 정상속도)

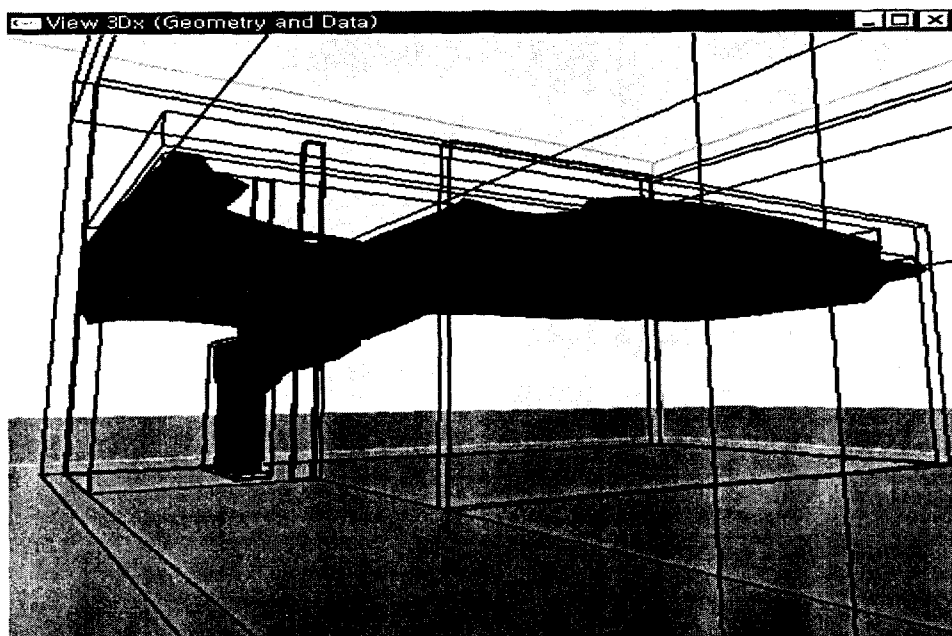


그림 19. 90분후 정상속도의 연기성상분포도

○ 남자사우나 도크 스토브 가동 60분후 온도분포현황

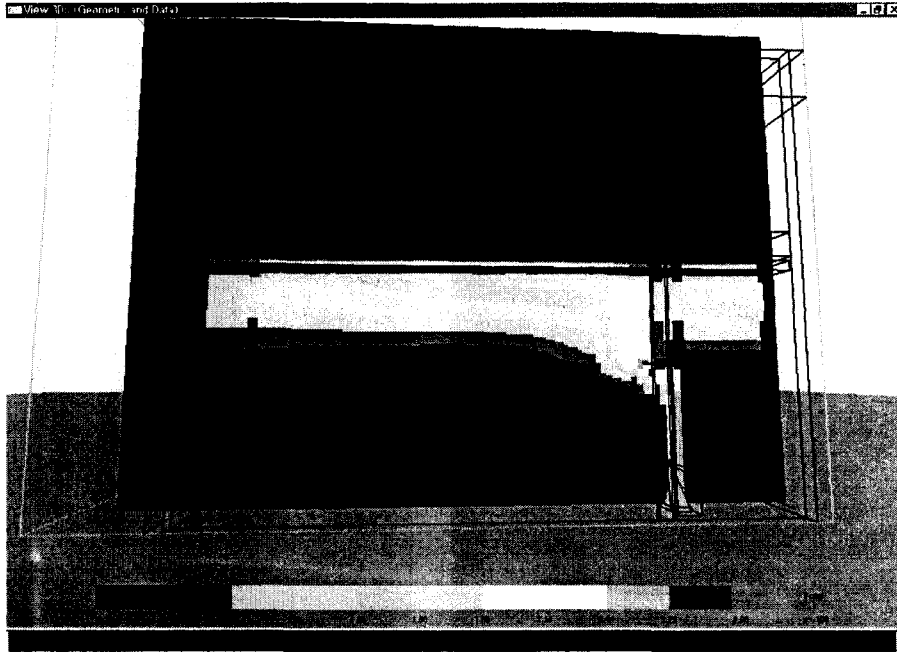


그림 20. 남자사우나 도크 스토브 가동 60분후 온도분포현황

○ 남자사우나 도크 스토브 가동 60분후 온도분포확대

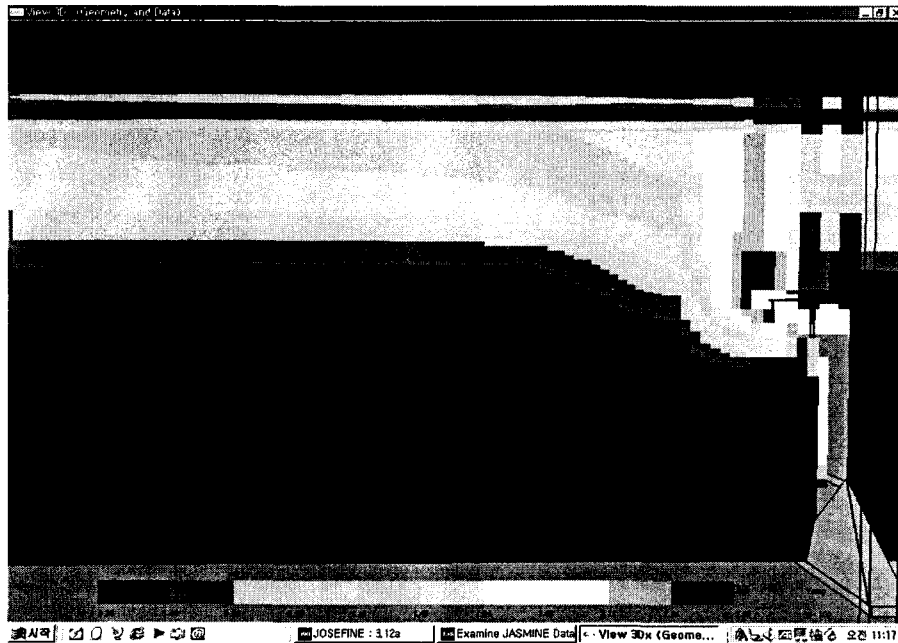


그림 21. 남자사우나 도크 스토브 가동 60분후 온도분포확대

○ 남자사우나 독크 스토브 가동 90분후 온도분포현황(1)

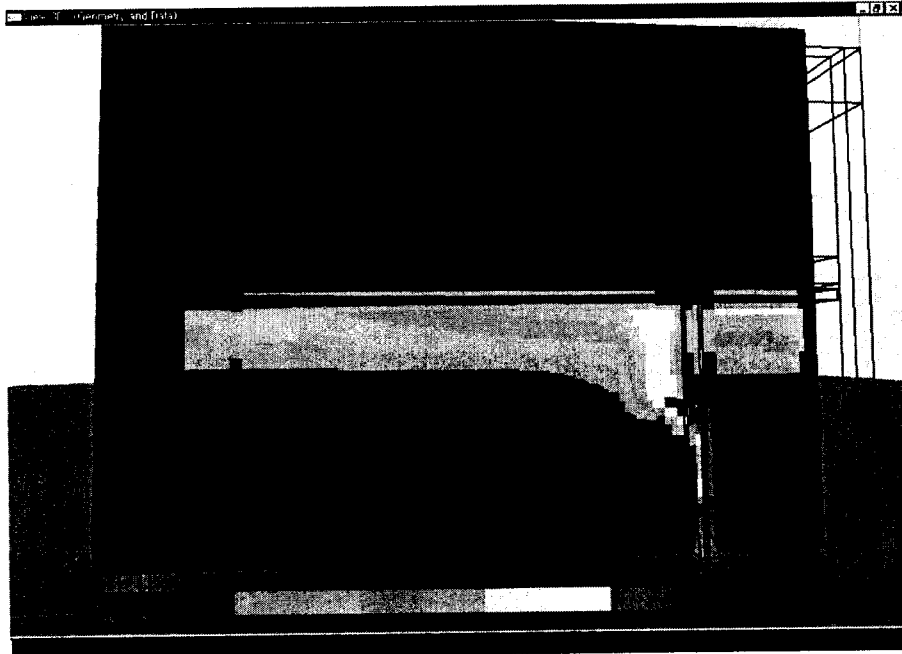


그림 22. 남자사우나 독크 스토브 가동 90분후 온도분포현황(1)

2) 모델(2) : 스토브열량 100% 를 90분간 가동

○ 스토브 열량을 근거로한 화재하중 및 화재성장곡선(2)

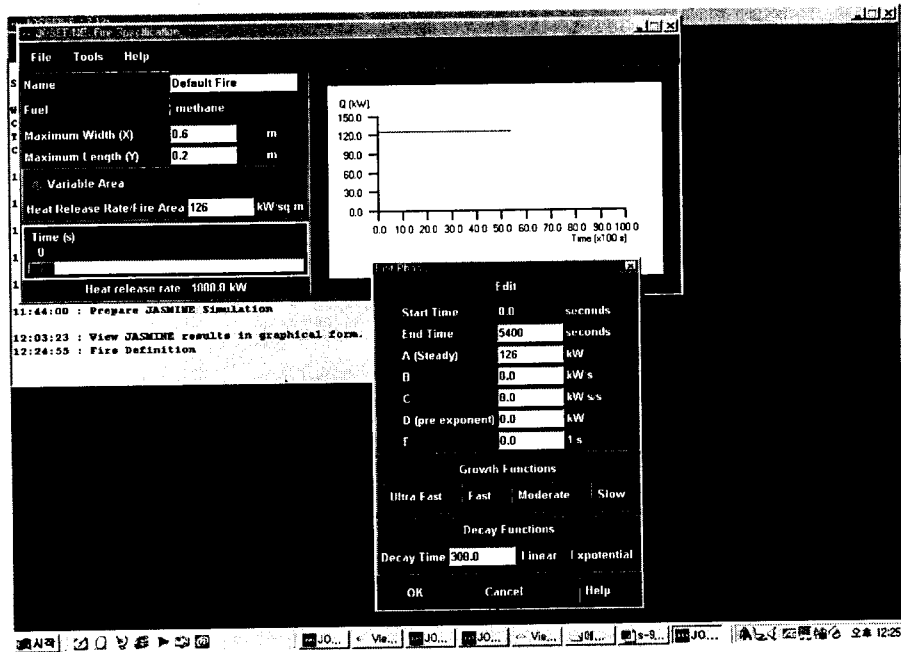


그림 23. 스토브 열량을 근거로한 화재하중 및 화재성장곡선(2)

○ 남자사우나 도크 스토브 가동 90분후 온도분포현황(2)



그림 24. 남자사우나 도크 스토브 가동 90분후 온도분포현황(2)

#### IV. 분석 및 결론

1. 시뮬레이션 모델결과에 따른 발화원 추정

- 본 시뮬레이션 작업은 영국의 화재시험 연구원(Building Research Establishment/Fire Risk Station)의 화재유동학 연구팀의 Dr. Shresh Kumar의 지원을 받아 KWC화재유동연구센터가 모델링함.
- 사용 화재시뮬레이션 소프트웨어 소개  
화재전용시뮬레이션 Jasmine V3.12a (원 개발자:영국 BRE, 한국내 판매자 : (주)파이어테크)를 사용하여 화재가 발생한 남자사우나를 대상으로 CFD(Computational Fluid Dynamics) Field Model에 의한 연기유동시뮬레이션을 실시하였음.
- ▶ 화재시뮬레이션에 의한 사우나 도크내 화재온도분포 현황
  - 화재시뮬레이션에 의한 실험결과 그림 28에 나타난 것처럼 원적외선 스토브 상부 온도는 216℃ ~ 244℃, 스토브 전면 목재갤러리 주위온도는 230℃ ~ 270℃ 까지 상승하며 특히 갤러리 하부면의 온도가 제일 높은 것(약 270℃)으로 나타남
  - 천정부에 설치된 목재루바와 스킨로폴 사이의 공간(40 mm)은 벽면이음틈새로 누기된 열기류에 의해 80℃ ~ 160℃ 의 온도분포를 나타남
- ▶ 시뮬레이션 온도분포에 의한 착화부 수정
  - 당초추정 착화부 : 천정반자 상부에 설치된 스킨로폴 단열재가 용해되어 스토브

상단 철판위 또는 전면 슛적치부로 떨어져 착화된 것으로 사진조사와 현장수거한 목재루바잔재에 남아있는 용착스치로폴을 근거로 설정함.

(시뮬레이션 결과 판정사항)

시뮬레이션 온도분포 검증결과 결과 천정부의 마감재인 목재루바와 단열 스킨로 폴 사이의 40mm 공간의 온도가 화재발생 추정시간대에 80℃ ~ 160℃를 보임에 따라 고체 스킨로폴(폴리스틸렌)의 용융점이 240℃정도(근거자료 Fire Dynamics)임을 감안할 때 천정반자위의 스킨로폴은 녹아내리지 않았을 것으로 판단됨.

→ 당초 착화부로 지목된 천정반자에서 녹아 떨어지는 액상스치로폴의 최초 착화 가능성은 매우 희박한 것으로 판명됨

재설정 착화부 : 원적외선 스토프 전면상단에 매달려 있는 목재갤러리 하단면의 최초착화

(시뮬레이션 결과 판정사항)

원적외선 스토프 전면상단부분의 온도분포가 최대 270℃를 보임에 따라 이 온도 범위에서 발화위험성이 큰 목재가 상존할 경우 착화위험성 큰것으로 판명됨.

→ 갤러리는 폭이 짧고 긴 목재의 창살구조형태로 연소하기에 좋은 형상으로 설치되어 있고 높은 온도대가 형성된 상태에서 끈임없이 유입되는 열기에 의해 목재갤러리에서 직접 연소가 시작되어 천정부에 설치된 스킨로폴로 급격히 확산되었을 것으로 추정됨.

▶ 시뮬레이션 시행결과에 따른 수정예측 시나리오

시 간	진행상황 및 추정시나리오	입증데이터
16:30	(건식사우나내 적외선스토브 시험가동)	
	<p>상황① : 적외선스토브의 가동후 80℃온도조절 센서에 의하여 50%로 가동이 저하될 때 까지 약 60~90분 정도 스토브가 100% 가동됨.</p> <p>상황② : 최종예측 적외선스토브의 상부 폐쇄공간대로 열기가 상승함에 따라 목재갤러리로 스토브의 배면공간에 고온의 열기가 축적</p>	→ 시뮬레이션 결과에 의해 스티로폼 용해 가능한 외주온도가 되지 않은 것으로 판명
	<p>상황③ : 최종예측 스토브 전면 상부의(약 50cm 돌출된 지점) 온도대는 시간이 축적됨에 따라 최고 260℃ 까지 상승됨에 따라 스토브 전면 상부에 설치된 목재 갤러리가 착화되기 시작함</p>	→ 시뮬레이션 결과 목재갤러리에 직접 착화가능한 온도형성 (260℃ )
	<p>상황④ : 목재갤러리에서 착화되어 스토브 상부의 목재루버를 연소시키면서 천정챔버내에 설치된 스티로폼을 용융시켜 천정챔버사이로 연소가 급격히 확대된 것으로 추정됨. 목재루버와 벽면의 이음부 틈새를 통하여 스토브 용융액이 스토브 좌측면에 설치된 기둥으로 흘러내리면서 스토브 전면에 적치된 숯과 기둥부의 표면으로 화염이 확대된 것으로 추정됨</p> <p>상황⑤ : 한번 점화된 스티로폼액이 계속적으로 떨어지거나 떨어지면서 우각부 코너목재기둥 표면에 남은 잔존스티로폼액으로 확산되어 스토브상부의 목재루버천정상부로 본격적으로 확산된 것으로 추정</p> <p>상황⑥ : 천정반자상부의 챔버를 통하여 화염과 연기가 확산되어 사우나 욕조상부까지 확산되어 외부로 누출되었을 것으로 최종추정됨</p>	→ 목재갤러리 연소시 발영량이 충분하여 스티로폼을 용융시키면서 연소가 확대된 것으로 판단 가능
19:23	사우나실 외부 배풍구로 검은연기 분출)	최초발견시점
19:46	소방대도착 및 진압시작	

V. 건의

화재조사수행에 있어서 착화원 설정시 CFD 시뮬레이션 모델링을 이용한 과학적검증방법의 제도화가 시급하며 소방국 소속 화재조사팀의 조사역량을 강화하여야만 화재조사권



의 완전한 소방국 이양을 추진할 수 있으며 조속히 과학적 선진조사기법의 기술습득에 정진하여야만 향후 예상되는 21세기 소방과학선진화를 기대할 수 있다.

## VI. 참고자료

1. Dougal Drysdale, "FIRE DYNAMICS", John Wiley & Sons Ltd.
2. H.K. Versteeg & W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method", Prentice Hall.
3. "Fire Safety Approved Document B", Manual to the Building Regulations.
4. "International Fire Code 2000", International Code Council.
5. 박형주, 지남용, "건축방화", 지인당
6. 이창욱, "신방화공학", 의제
7. 박형주외 5인, "건축화재안전설계", 지인당
8. 박형주, "방화재료·시험", 지인당