

## CFD 화재 시뮬레이션을 이용한 여객선 제연설비의 성능기반 설계 사례

이정무<sup>†\*</sup>, 김성훈\*, 이성근\*

대우조선해양(주), 미래연구소\*

### A Performance-based Design Example of Smoke Extraction System Using CFD Fire Simulation

Jung Moo Lee<sup>†\*</sup>, Sung Hoon Kim\* and Sung Geun Lee\*

Future Product & Business Development Institute, DSME CO., LTD.\*

#### Abstract

The new SOLAS regulation permits the alternative design approach for the approval of designs which deviate from those where prescriptive rules apply. The new approach is being promoted by recent advances of noble designs such as those employing large public spaces in passenger ships. From the respect of fire safety, it is needed to show that the level of safety of new design is equivalent to what can be achieved from the prescriptive rules where the fire simulation is regarded to be the essential tool. This paper provides an overview of the process of performance-based design of the smoke extraction system in a cafeteria of a ROPAX. FDS, a CFD fire simulation software is used to show that the field-model software can improve the fire safety over what are expected from prescriptive rule sets or zone-model application.

※Keywords: Performance-based design(성능기반설계), Fire simulation(화재 시뮬레이션), Smoke extraction system(제연설비), Field model(필드 모델), Zone model(존 모델)

#### 1. 서론

여객선이 대형화 되면서 공실의 규모도 점차 커지고 있으며, 현행 SOLAS 규정에서 길이를 40m로 제한하고 있는 주수직구역들을 관통하는 대형

공실들이 등장하였다. 이와 같이 현행 규정에서 벗어 나는 대형 공실을 채용한 설계의 적정성은 SOLAS Ch. II-2/17 에 명시된 대체설계 방식으로 승인을 받을 수 있다. 대체설계란, SOLAS 에서 요구하는 기술적(prescriptive) 규정에서는 벗어나지만 화재안전목표와 기능적 요구사항을 만족시키는 설계를 의미한다. 따라서 화재 안전성의 정량적 평가를 통해 대체설계가 규정요구사항만큼의 화재

접수일: 2009년 10월 8일, 승인일: 2010년 3월 9일

†교신저자: jmlee39@dsme.co.kr, 02-2129-0886

안전성을 지니고 있음을 증명할 수 있어야 한다 (MSC/Circ. 1002, 2001).

선박의 화재 안전성능에 대한 정량적 평가에서는 수치 해석 방법이 널리 이용되고 있다(Kim and Ryou 2004). 화재 시뮬레이션 모델은 존 모델과 필드 모델로 나눌 수 있다. 존 모델(zone model)은 화재 구획을 균일한 두 개의 층, 즉 상부의 뜨거운 연층부(upper layer)와 저온의 하층부(lower layer)로 나누고 각 층 사이의 질량 및 에너지 유동을 계산하는 방법이다. 반면 필드 모델(field model)은 화재 공간을 미소격자로 나누어 화재 난류 유동에 대해 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석하는 방법이다(Choi et al. 2007).

Andersson and Saterborn(2002)은 ROPAX 거주구의 제연설비에 대한 화재 안전성 평가를 수행하였다. 먼저 정성적인 분석으로부터 주수직구역별로 화재 시나리오를 결정하고, 정량적인 분석에서는 화재 발생 시에 탈출 경로 상에서 사람들이 안전하게 대피할 수 있는 환경을 유지하는데 필요한 제연설비(smoke extraction system)의 용량을 판단하기 위해 존 모델 프로그램인 CFAST 로 해석을 수행하였다. 하지만 존 모델의 특성상 연기의 유동을 모사할 수 없기 때문에 환기구의 위치에 따른 영향이 반영되지 않고, 각 층의 평균적인 물리량만을 알 수 있기 때문에 면적이 넓은 장소에서의 화재 현상을 해석하기에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 Andersson and Saterborn (2002)이 다룬 바 있는 ROPAX 카페테리아의 제연설비를 사례로 대체설계 기법에 대해 검토하는 과정에서 제연설비의 용량뿐만 아니라 환기구의 위치까지 고려하기 위해 NIST 에서 개발한 필드 모델 프로그램 FDS version 5 를 활용하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다.

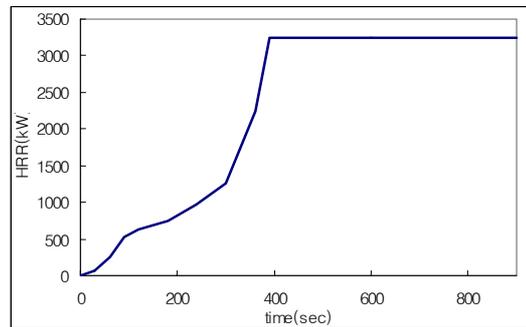
## 2. 화재 시나리오

정량적인 해석에 들어가기 앞서 화재 시나리오를 결정해야 한다. 화재 위험요소(hazard)들을 모두 찾아낸 후 각 위험요소에 대하여 화재가 발생할 확률과 화재로 유발되는 결과를 정성적으로 평

가하고, 위험도가 높은 항목들을 선별하는 과정을 거쳐 최종적으로 정량적 해석을 수행할 시나리오들을 선정한다. Table 1은 Andersson and Saterborn(2002)이 파악한 대상 선박 거주구의 화재 위험요소들 중에서 가장 위험도가 높은 요소들을 정리한 것이다. 본 논문에서는 이 중 면적이 가장 넓은 카페테리아에 대해서만 정량적 해석을 수행하였다.

**Table 1** Identified fire hazards on the accommodation area of a ROPAX (Andersson and Saterborn 2002)

| Fire Scenario       | Possible origin and cause              |
|---------------------|--|
| Cabin               | Smoking in bed                         |
| Children's playroom | Playing with fire in plastic ball pool |
| Cafeteria           | TV-set, Smoking                        |
| Cinema              | Electrical equipment, Smoking          |



**Fig. 1** Heat release rate of design fire

카페테리아에서의 화재 시나리오는 Andersson and Saterborn(2002)을 참조로 하여 TV-set 에서 시작된 화재가 90 초 후 파티클보드에 옮겨 붙는 상황을 가정하였다. 별도의 실험으로부터 TV 와 파티클보드의 열방출속도(Heat Release Rate) 곡선을 각각 구한 다음 파티클보드의 열방출속도 곡선은 90 초 지연시켜 두 곡선을 합하였다. 이렇게 구한 설계 화재의 열방출속도 곡선은 Fig. 1과 같다.

### 3. 성능 기준

성능 기준이란 대체설계에서 요구되는 기능, 즉 SOLAS 규정의 기능적 요구사항과 화재 안전목표를 정량적으로 표현한 것이다. 여객선과 같이 인명안전이 최우선 목표인 경우에는 열, 연기, 독성물질, 가시거리, 탈출 소요 시간 등과 같이 승객과 승무원의 생존 가능성과 관련된 사항들이 성능기준안에 포함된다(MSC/Circ. 1002). 설계 화재의 연기 및 독성 가스의 생성량에 대한 정보가 없어서 독성물질의 농도나 시야는 정확한 추정이 불가능하므로 본 논문에서는 연층 경계면의 높이와 상층부 및 하층부의 평균 온도만을 고려한 Tonelli and Guassardo (1997)의 성능기준안을 참조하였다.

$$\text{if } h > 1.6\text{m} \quad T_u \leq 65^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\text{if } h \leq 1.6\text{m} \quad T_u \leq 65^\circ\text{C} \quad (2)$$

여기서  $h$ ,  $T_u$ ,  $T_l$  은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 각각 연층 경계면 높이, 상층부의 평균 온도, 하층부의 평균 온도를 의미한다. 이 성능기준안은 사람이 호흡하는 선의 높이를 1.6m 로 볼 때 호흡선이 위치하는 층의 평균 온도가  $65^\circ\text{C}$ 를 넘지 않아야 한다는 의미이다.

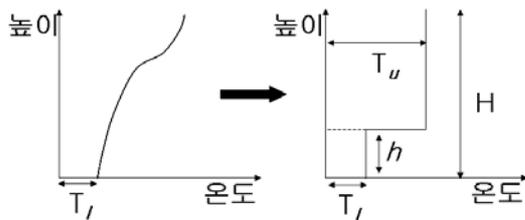


Fig. 2 Overview of layer interface height

존 모델은 상층부와 하층부의 경계에 해당하는 연층 경계면 높이와 상층부 및 하층부의 평균 온도가 바로 계산되지만, 필드 모델에서 연층 경계면 높이를 구하려면 별도의 후처리 과정이 필요하다. FDS에서는 Janssens and Tran(1992)이 제시한 방법대로 (3)식과 (4)식을 이용하여 Fig. 2와 같이 온도의 연직 분포로부터 연층 경계면의 높이를 결정한다.

$$\int_0^H T(z) dz = T_u(H - h) + T_l h \quad (3)$$

$$\int_0^H \frac{1}{T(z)} dz = \frac{H - h}{T_u} + \frac{h}{T_l} \quad (4)$$

여기서  $H$  는 천장의 높이를 의미하며, 하층부의 평균 온도는 바닥( $z=0$ )에서의 온도로 두고 위의 두 식으로부터 상층부의 평균 온도와 연층 경계면 높이를 계산한다.

### 4. 화재 시뮬레이션

#### 4.1 대상 구역

본 논문에서 시뮬레이션을 수행한 카페테리아는 선수 부분에 위치하고 있으며, 길이가 38m, 폭이 15.5m, 높이가 2.2m이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 선미 방향 끝 양쪽으로 계단이 있어서 화재 발생 시 이 계단들을 통해 한 층 위에 있는 갑판으로 대피할 수 있도록 하였다.

화원은 박스 형상(2m x 2m)으로 단순하게 모델링하였고, Fig. 4와 같이 선수로부터 전체 길이의 1/4 이 되는 지점의 중앙에 화원의 중심이 놓이도록 하였다. 아래 층과 연결된 계단들은 개구부(opening)로 두고, 카페테리아의 우현 선수부에 연결된 식당과 선미 양 옆 계단으로 통하는 문들을 제외한 나머지 문은 모두 닫혀 있는 것으로 가정하였다.

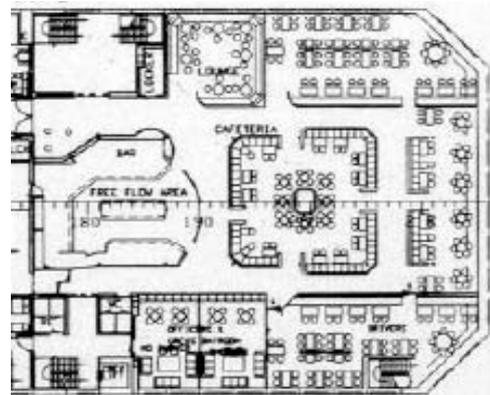


Fig. 3 Plan of cafeteria in a ROPAX

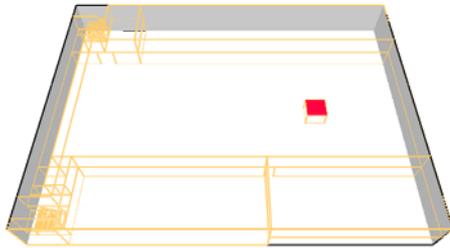


Fig. 4 Fire source in cafeteria

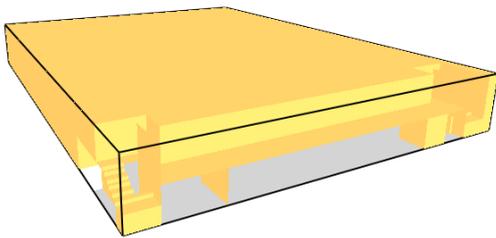


Fig. 5 Stairs leading to hallway on upper deck

4.2 해석 조건 및 가정

약 40 만개의 격자를 사용하였으며, 길이 및 폭 방향 모두 1m 간격마다 연층 경계면 높이, 상층부 및 하층부의 평균 온도를 계산하도록 하였다.

Andersson and Saterborn(2002)과 동일한 몇 가지 가정들이 본 해석에서도 포함되었다. 직접적으로 스프링클러(sprinkler)의 영향을 고려하지 않는 대신 화원 이외의 다른 가연 물질로 화재가 확산되지는 않는다고 가정하였으며, 발화 직후 제연 설비가 가동되는 것으로 가정하였기 때문에 화재가 감지되는데 걸리는 시간의 영향이 포함되지 않았다. 또한 별도의 탈출 시뮬레이션을 수행하지는 않았지만, 900 초 만에 카페테리아에 있는 모든 사람들이 계단을 통해 갑판으로 빠져나갈 수 있는 것으로 보고 이 시간 동안 (1)식과 (2)식으로 표현되는 성능 기준안을 만족시킬 수 있는지를 검토하였다.

4.3 제연 설비 용량의 추정

생성되는 연기의 유량과 동일한 양을 배출시키면 연층 경계면의 높이가 그대로 유지될 수 있다고 보는 방식이 제연 설비의 용량을 산정하는 가

장 단순한 방법이다. Stephen(2004)은 이러한 방식으로 요구되는 연기 배출 용량을 추정하기 위해서 1999 BOCA National Building Code 에 제시된 연기 생성 속도 추정식을 이용하였다.

$$V = 17.6Q_c^{1/3}Z^{5/3} + 3.36Q_c \tag{6}$$

V: smoke production rate (ft<sup>3</sup>/min)

Q<sub>c</sub>: convective heat release rate (= 0.7Q, kW)

Z: layer interface height (ft)

열방출속도가 최대인 3.2MW 로 유지되는 상황을 가정하여 (6)식으로부터 연기 생성 속도를 추정하면 약 6 m<sup>3</sup>/s 가 나온다.

한편 Andersson and Saterborn(2002)이 카페테리아를 길이 방향으로 두 구획으로 나누어 존 모델로 해석한 결과 각 구획에 2.5 m<sup>3</sup>/s(총 5 m<sup>3</sup>/s)의 제연 설비가 있으면 충분하다는 결론을 얻었다. 즉, 환기구의 위치를 고려하지 않은 두 가지 방법은 서로 유사한 결과를 주고 있다.

4.4 결과

4.4.1 제연설비가 없을 경우의 화재 시뮬레이션

먼저 제연 설비가 없는 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

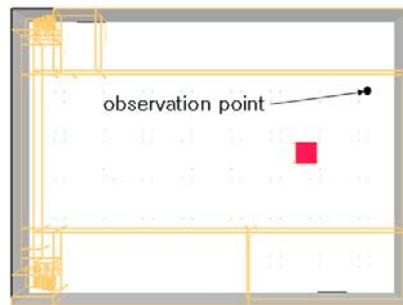


Fig. 6 Observation point, no smoke extraction

Fig. 7~9 는 Fig. 6에 표시되어 있는 한 점에서의 연층 경계면 높이, 하층부 및 상층부의 평균

온도이다. 화원에서 뜨거워진 공기가 상승하여 천장을 타고 확산되어 1 분 후에는 관측 점의 위치에 도달하면서 연층 경계면의 위치가 1.6m 아래로 내려온다. 상층부의 평균 온도도 약 4 분 만에

65°C를 넘어가므로 성능 기준안이 만족되는 시간은 4 분에 불과하다. 즉, 제연 설비가 없는 경우에 이 지점에서 안전하게 대피할 수 있는 환경이 유지되는 시간은 4 분이다.

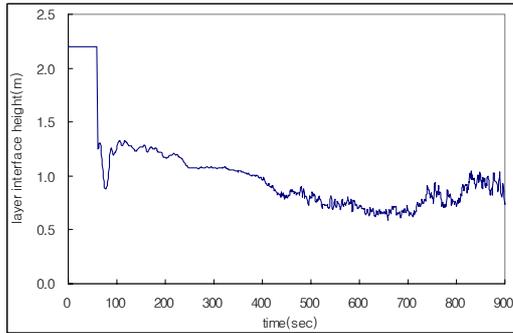


Fig. 7 Layer interface height at an observation point, no smoke extraction

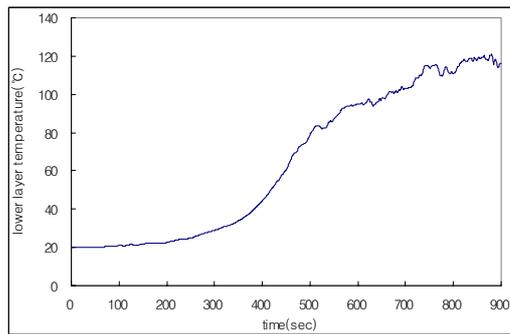


Fig. 8 Mean temperature of lower layer at an observation point, no smoke extraction

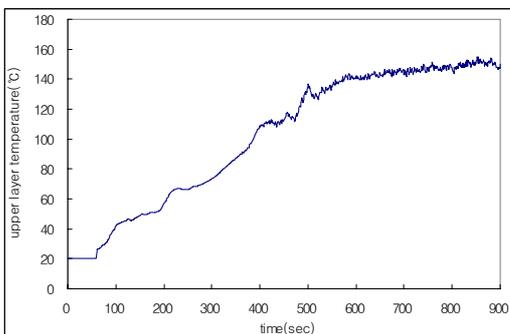


Fig. 9 Mean temperature of upper layer at an observation point, no smoke extraction

4.4.2 필드 모델을 이용한 설계의 성능 검증

이어서 (6)식으로부터 추정된 배출 유량으로도 충분하다는 결론이 나온 존 모델 결과와 비교하기 위해 Fig. 10과 같이 두 지점에 각각 3 m<sup>3</sup>/s 의 배기구를 두었으며, 하단의 급기구를 통해 배출된 유량만큼 공기를 보충해 주었다.

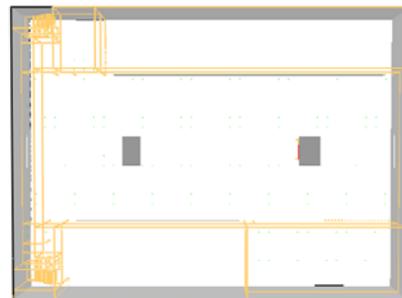


Fig. 10 Two smoke exhaust vents, 2 x 3 m<sup>3</sup>/s

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 발화 후 약 9분 경과했을 때 연층 경계면 높이 및 상층부 평균온도의 분포를 나타낸 것이고, Fig. 13은 성능기준안을 만족시키지 못하는 영역을 표시한 것이다. 연층 경계면 높이는 선수부의 환기구 주변을 제외하면

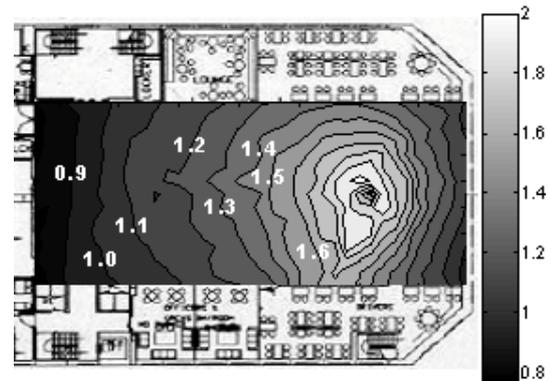


Fig. 11 Layer interface height(m) in cafeteria, t=539sec, 2 x 3 m<sup>3</sup>/s

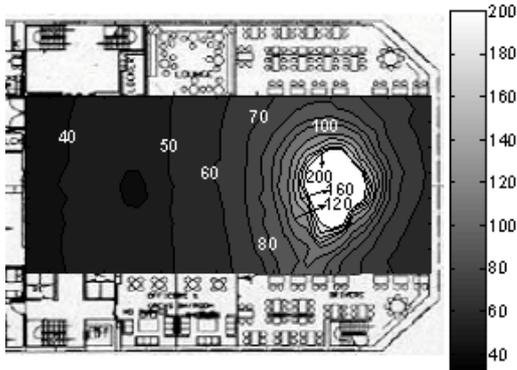


Fig. 12 Mean temperature(°C) of upper layer in cafeteria, t=539sec, 2 x 3 m<sup>2</sup>/s

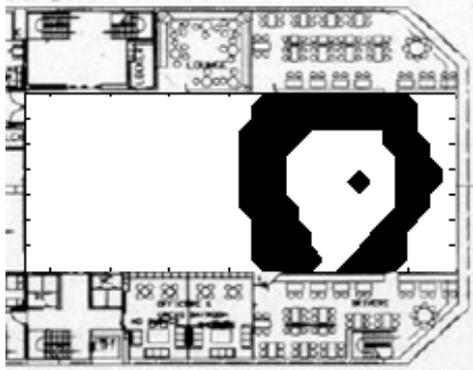


Fig. 13 Overview of area not satisfying the performance criteria, t=539sec, 2 x 3 m<sup>2</sup>/s

모두 1.6m 보다 낮지만, 선미 부분은 상층부 평균 온도가 낮으므로 성능 기준이 만족된다.

하지만 상층부 평균 온도가 65°C를 넘는 고온부가 화원 주위에 형성되어 성능 기준을 만족시키지 못하는 영역이 9 분 이내에 선수부분을 선미부 위 계단과 격리시키기 때문에 대피를 불가능하게 만들 수 있음이 확인되었다.

그러나 Fig. 14와 같이 연기 생성속도(6 m<sup>2</sup>/s)와 동일한 유량의 배기구가 화원 바로 위에 위치하는 경우에는 필드 모델로 해석한 결과에서도 존 모델과 마찬가지로 충분히 성능 기준이 만족된다. Fig. 15는 발화 후 900 초가 지났을 때 카페테리아 중앙 단면에서의 온도 분포를 보여준다. 65°C를 넘는 구역이 거의 나타나지 않는데, 이는 화재로부

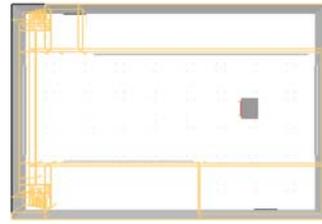


Fig. 14 One smoke exhaust vent, 1 x 6 m<sup>2</sup>/s

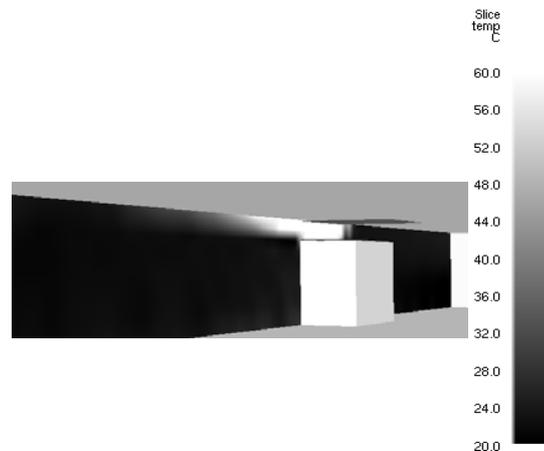


Fig. 15 Contour of gas temperature, t=900sec, 1 x 6 m<sup>2</sup>/s

터 생성된 고온의 연기가 상승하자마자 천장을 타고 확산되기도 전에 대부분 화원 바로 위에 위치하는 배기구를 통해 빠져나가기 때문이다. 이처럼 연기 생성 속도 이상의 용량을 갖는 배기구가 화원에 충분히 근접해 있어서 상승한 연기를 바로 배출시킬 수 있는 경우를 제외하면 전체적으로 연기 생성 속도보다 더 많은 용량의 배출 유량이 요구된다. 이처럼 존 모델과 달리 필드 모델에서는 실제 화원의 위치나 배기구의 배치에 따른 영향을 고려함으로써 보다 합리적으로 제연 설비의 효과를 판단할 수 있게 해준다.

성능기준의 만족여부만 생각한다면 Fig. 14의 경우 문제가 없다고 볼수 있지만, 다른 위치에서도 화재가 발생할 가능성이 있다는 점과 화원에서 너무 가까우면 제연 설비가 화재로 인해 손상될 수 있다는 점을 염두에 둔다면 적절하지 않다. 따라서 보다 일반적인 배치를 생각해볼 필요가 있다.

4.4.3 임의의 화원 위치를 고려한 제연 시스템 설계

Fig. 10의 경우 화원으로부터 상승한 고온의 연기 중 배기구로 배출되지 않은 일부가 천장을 타고 확산되다가 벽에 가로막히면 하강하여 연층을 형성한다. 이렇게 코너로 이동한 연기를 중앙에 있는 배기구로는 배출시킬 수 없으므로 코너로 유입되는 고온의 연기가 계속 축적되면서 성능 기준을 만족시키지 못하는 영역의 면적을 점차 증가시킨다. Fig. 16과 같이 배기구를 배치함으로써 코너로 유입되는 연기를 배출시켜 연기가 축적되는 영역을 줄이고자 하였다.



Fig. 16 Six smoke exhaust vents, 6 x 4 m<sup>2</sup>/s

Fig. 16에 대한 계산 결과를 Fig. 17~Fig. 19에 나타내었다. 중앙에 배기구가 없으므로 생성된 고온의 연기가 그대로 천장을 타고 확산되어 상층부 온도가 65℃보다 높은 영역은 Fig. 10에 비해 증가했지만, 코너에 축적되는 연기가 많이 줄어들어 연층 경계면 높이가 1.6m 이상으로 유지되는

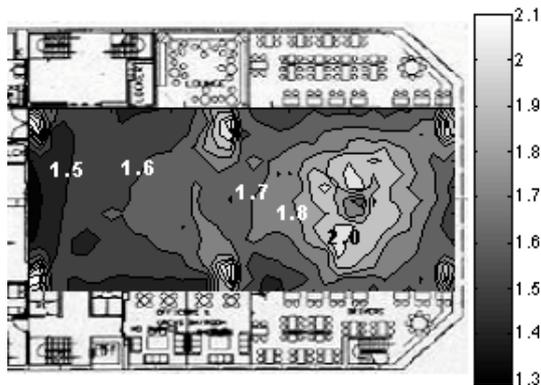


Fig. 17 Layer interface height(m) in cafeteria, t=899sec, 6 x 4 m<sup>2</sup>/s

영역의 면적이 상당히 증가하는 효과를 보였다. 따라서 Fig. 19에서 볼 수 있듯이 900 초 동안 성능 기준안을 만족시키지 못하는 지점이 거의 생기지 않아 선수부에서 계단으로 가는 경로가 차단되지 않는다.

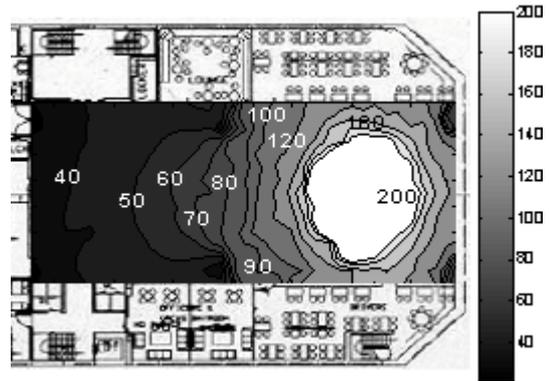


Fig. 18 Mean temperature(°C) of upper layer in cafeteria, t=899sec, 6 x 4 m<sup>2</sup>/s

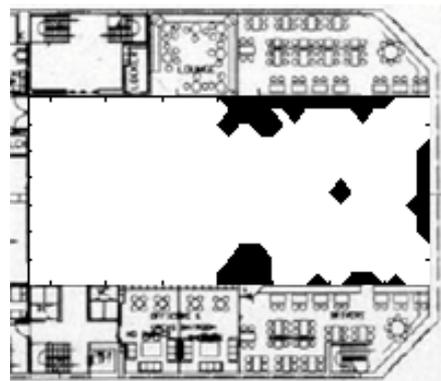


Fig. 19 Overview of area not satisfying the performance criteria, t=899sec, 6 x 4 m<sup>2</sup>/s

5. 결론

ROPAX 선박의 카페테리아 제연설비를 사례로 성능기반설계의 절차에 대해 살펴보았으며, 이 과정에서 필드 모델 프로그램인 FDS 로 화재 시뮬레이션을 수행하였다.

기존의 존 모델 해석 결과에 의하면 연기 생성

속도와 동일한 용량의 제연 설비로 연층 경계면 높이를 유지할 수 있다. 그러나 필드 모델 해석 결과 제연 설비의 용량이 같더라도 배기구의 위치에 따라 성능 기준안 만족 여부가 달라지며, 이러한 효과가 반영되지 않는 존 모델은 요구되는 제연 설비의 용량을 과소 추정할 가능성이 있다. 실제로 배기구가 화원 바로 위에 위치하는 경우에는 존 모델 결과와 마찬가지로 연기 생성 속도에 해당하는 용량(6 m<sup>3</sup>/s) 만으로도 충분하지만, 그렇지 않은 경우에는 훨씬 큰 용량(24 m<sup>3</sup>/s)의 제연 설비가 필요하다는 사실을 알 수 있었다. 따라서, 여객선 대형 공실의 제연 설비 평가에 있어서 필드 모델의 활용은 필수적이라 생각된다.

비록 성능 위주 해석 결과(Andersson & Saterborn 2002)를 근거로 스웨덴에서 제안한 거주구 제연설비 설치 의무화 방안은 소화 설비 등이 미치는 영향이 고려되지 않는 등 해석 결과에 불확실성이 많다는 점과 본 장치의 추가 구비가 미치는 영향에 대한 선주 협회의 우려를 이유로 IMO에서 받아들여지지 않았으나(FP 46/4/3 2001), 방법론의 문제점이라기 보다 타당한 설계방법론으로서 자격을 갖추기 위해서는 매우 엄밀한 접근이 필요함을 의미한다고 할 수 있다. 따라서 이를 반면교사로 삼아 현재 다양하게 적용되고 있는 사례를 참고하면서 성능 해석 기술을 개발하고 현실적으로 받아들일 수 있는 설계 대안을 제공할 수 있는 기술 개발을 지속적으로 추진해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- Andersson, C. and Saterborn, D., 2002, " Smoke Control Systems Aboard - A risk analysis of smoke control systems in accommodation spaces on passenger ships," Department of Fire Safety Engineering,

Lund University, Sweden, Report 5093, Lund 2002.

- IMO, 2001, Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety, MSC/Circ. 1002.
- Choi, J., Lee, D. and Park, B.J., 2007, " A Study on the Analysis and Application of the Fire Simulation Tools for Ships," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 44, No. 2, pp. 83-92.
- Janssens, M.L. and Tran, H.C., 1992, " Data Reduction of Room Tests for Zone Model Validation," Journal of Fire Sciences, Vol. 10, No. 6, pp. 528-555.
- Kim, S.C., Ryou, H.S., 2004, " A Numerical Study of Fire Development Characteristics on a Ro/Ro Ferry Vehicle Deck," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 5, pp. 48-54.
- Stephen, W., 2004, " Atria Smoke Exhaust - 3 Approaches to Replacement Air Delivery," ASHRAE Journal, June 2004, pp. 20-26
- Tonelli, A. and Guassardo, G. 1997, " Fire Risk Analysis on Cruise Ships Application to an Accommodation Zone," Research and Development Department, Registro Italiano Navale.



< 이 정 무 > < 김 성 훈 > < 이 성 근 >