

# 화재 시뮬레이션 소프트웨어를 이용한 여객선의 화재 안전성 평가 방안

박범진, 최진, 이동근(한국해양연구원 해양시스템안전연구소), 오종환(주)씨플러스)

최근 5년간(1998~2002)의 해양안전심판원 통계 자료에 의하면 해양사고 중 약 8.2% 정도가 화재 및 폭발에 기인한 것으로 이는 가장 빈번한 해양사고 사례인 기관고장의 약 1/3 수준이며, 좌초 발생 건수와 유사한 수준을 보이고 있다. 그러나 화재 사고 발생 시 육상으로부터 화재 진압을 위한 지원을 받는데 어려움이 있기 때문에 엄청난 인명과 재산 손실을 초래하게 된다.

해양 분야의 선진국들은 화재 안전에 관한 각종 의장품과 기자재들을 개발하고 있으며, 개발된 제품의 강제 탑재를 위한 노력을 기울이고 있다. 또한 화재 안전에 관한 연구 개발도 활발하게 수행하고 있다. 유럽공동체(EU)에서는 최근에 종료된 SaferEURORO 프로젝트에서 4년 동안 화재 안전에 관한 연구를 수행하였고, 연구 결과의 활용을 위한 2단계 프로젝트인 SafeDOR에서 화재 성능 해석분야를 중점적으로 연구할 계획을 수립하였다. 일본에서는 화재에 대한 확률론적 안전성 평가(PSA) 기술과 화재 시뮬레이션 기술을 연구하였다.

화재사고에 대한 안전대책은 대부분 국제규약이나 선급규정에 의해 명시되어 있는데, 이러한 규칙들은 사고경험을 토대로 하여 규칙의 적용범위가 확대되고 기술기준의 개정이 이루어져 왔다. 이러한 대책들은 실행 가능한 최대의 방화, 탐지, 소화가 이루어지도록 하기 위한 것으로 구획의 종류와 특성, 각종 소화설비, 관련 시험방법 등으로 구성되어 있다. 선박의 화재 안전성을 한 단계 높이기 위해서는 실질적인 선박의 방화설계를 위한 체계적인 설계지침과 그에 대한 정량적인 평가방법이 요구된다.

선박의 화재안전성능에 대한 정량적 평가를 위해서는 실제 규모의 실험을 하는 것이 가장 좋은 방

법이지만 경제적 비용과 공간상의 제약, 화재 발생의 위험성을 감수해야만 한다. 이런 이유로 화재 해석에 수치 해석 방법이 널리 이용되고 있는데 대표적으로 존 모델과 필드 모델이 있다.

여기서는 선박의 화재 안전성 평가 프로세스 중에서 화재 시뮬레이션의 사용 가능성에 대해 논의하고 화재 시뮬레이션을 선박에 적용한 예를 통해서 그 가능성을 보여주고자 한다. 여기서 사용된 소프트웨어는 미국 NIST (National Institute of Standards and Technology)의 CFAST (Consolidated model of Fire growth And Smoke Transport)와 FDS (Fire Dynamics Simulator), 노르웨이 ComputIT사의 KFX 2005 (Kameleon FireEx) 그리고 일본 교토대학 DPRI (Disaster Prevention Research Institute)에서 개발한 BRI2002이다.

## 여객선 화재 안전성 평가

### 화재 안전성 평가 프로세스

그림 1은 일반적인 선박의 화재 안전성 프로세스를 보여주고 있다. 선박의 화재 안전성을 분석할 때에는 우선 선박의 설계 자료를 이용하여 발생 가능한 fire scenario를 정의한 다음 각 fire scenario 별로 발생 가능 확률을 평가하는 frequency analysis 와 발생했을 때 그 피해를 예측하는 consequence analysis를 수행한다. 마지막으로 각 분석 결과를 이용하여 시스템의 리스크 레벨(risk level)을 예측하게 되는데 이때 리스크 레벨이 원하는 값보다 높으면 추가로 리스크를 저감할 수 있는 방법을 적용하여 다시 분석하게 된다.

화재 발생 가능성을 분석하는 frequency analysis

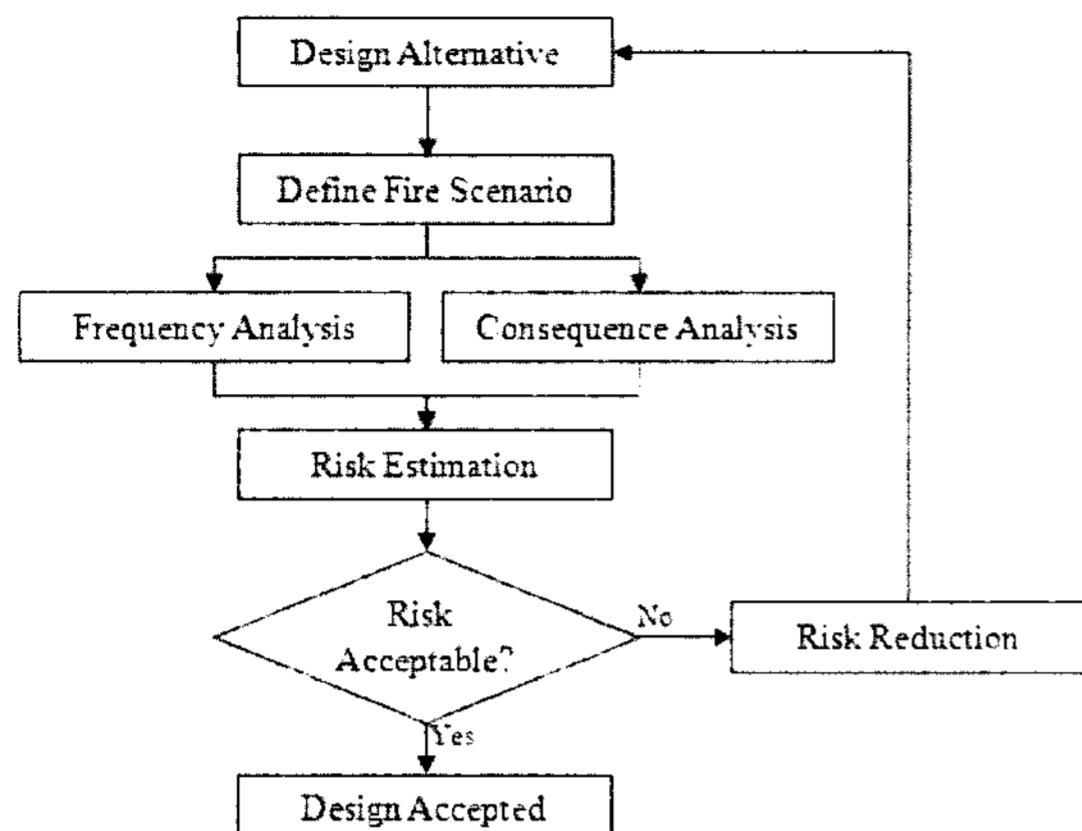


그림 1 Fire safety analysis process

단계에서는 다양한 도구 및 분석방법이 사용되는데 발생 원인을 분석하는 fault tree analysis, failure mode and effect analysis 등의 고전적인 방법 외에도 최근에는 Bayesian network, influence diagram 등의 방법도 사용된다.

Consequence analysis는 화재 사고가 발생했을 때

그 결과를 예측하는 것으로 인명 피해, 재산상의 손실, 환경 오염 및 선박 손상으로 인한 2차 사고 유발 등의 다양한 결과를 예측할 필요가 있다. 이 중에서 여객선의 안전성 평가에 특히 중요한 것은 인명 피해이며 특히 거주구나 많은 사람이 모여 있는 강당, 식당 등의 공간에서 화재 사고가 일어나거나 화재가 전파된 경우 특히 심각한 인명 피해를 초래할 수 있다.

여기서 설명하고 있는 화재 안전성 평가는 다양한 분야에 적용 가능한데, 설계 단계에서의 화재 안전성 평가뿐만 아니라 IMO Msc/Circ. 1002에서 제안하고 있는 alternative design arrangement의 안전성을 검증하는 용도로도 사용될 수 있으며 또한 화재 탐지 및 소화 시스템의 설계 단계에서 설치 위치 또는 성능을 검증하는 용도로도 사용 가능하다.

### 화재 시뮬레이션의 사용

화재가 발생했을 때 그 피해를 예측하는 방법의 대표적인 예가 화재 시뮬레이션이다. 화재 시뮬레

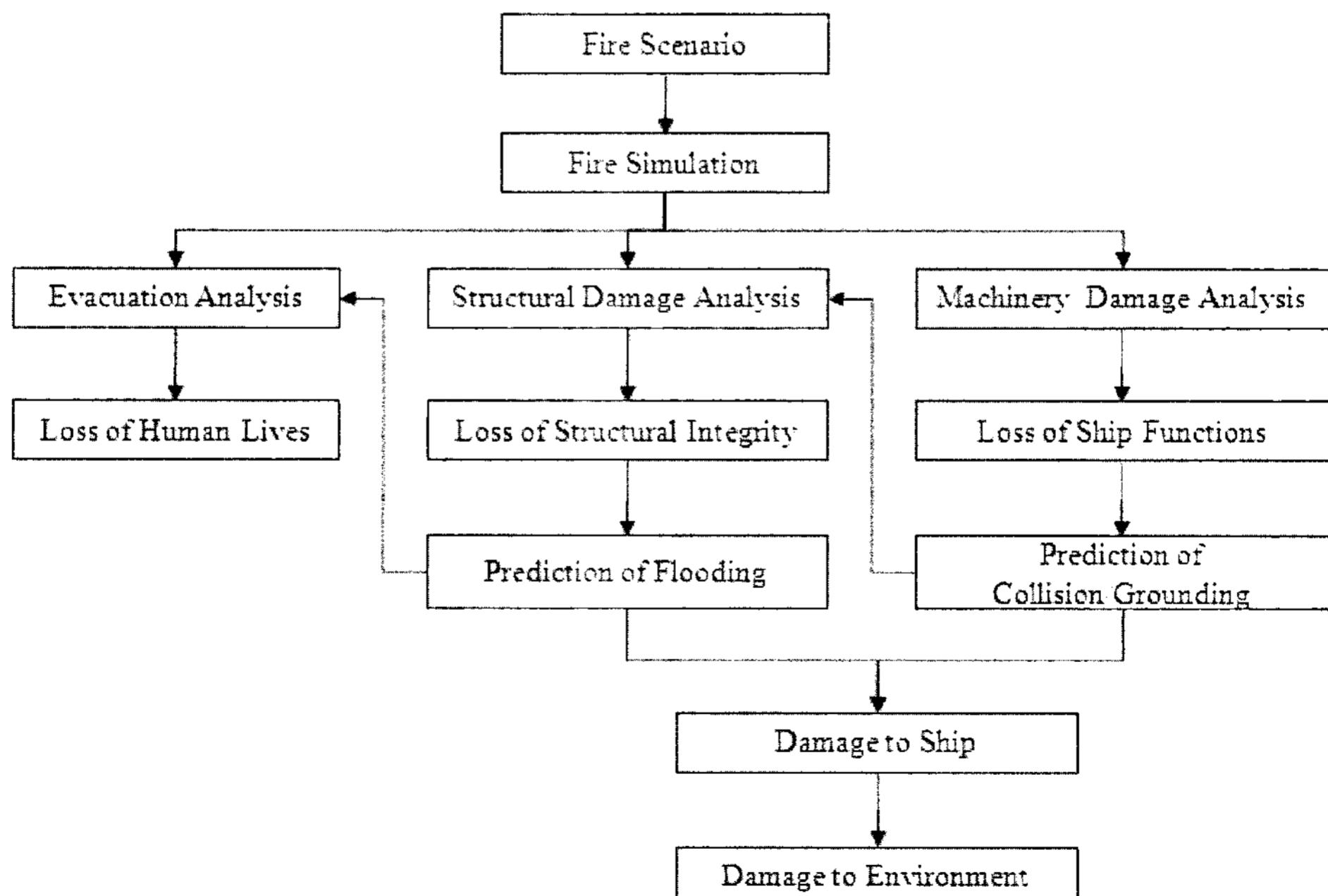


그림 2 Consequence analysis using fire simulation

이션을 통해서 얻을 수 있는 화재 전개 양상, 구획별 온도, 연기 및 유독가스의 분포 등의 데이터를 이용하면 인명 및 재산의 피해 예측이 가능하다. 그러나 화재 시뮬레이션이 직접적으로 인명 및 재산의 피해 정도를 알려 줄 수는 없기 때문에 추가적인 분석이 필요하게 된다. 예를 들어 인명 피해를 분석하기 위해서는 화재 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 하여 탈출 분석 등의 추가적인 분석이 필요하여 화재로 인한 침수 등의 피해를 분석하기 위해서는 화재 시뮬레이션 결과와 구조 해석을 같이 수행하여야 한다. 그림 2는 이러한 화재 시뮬레이션을 이용한 화재 피해 예측 프로세스를 보여주고 있다.

그럼에서 알 수 있듯이 화재 시나리오에 따른 화재 시뮬레이션의 결과는 이후 인명, 선박 및 환경의 피해를 예측하기 위한 기본 데이터로 활용될 수 있다. 화재 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있는 시간별 화재의 전개 양상, 각 구획별 온도 및 유독 가스 분포 데이터를 이용하면 각 구획별로 안전하게 머무를 수 있는 시간을 얻을 수 있는데 이를 탈출 분석에 사용하면 인명 피해를 예측할 수 있다. 또한 화재 시뮬레이션을 통해 선체의 각 부분에 전달되는 열의 양을 이용하면 구조 손상의 정도를 분석할 수 있고 이를 통하여 침수 등의 이차 사고 발생 가능성 및 피해 정도를 예측할 수 있으며 선박 내의

중요한 기능을 담당하는 시스템에 미치는 영향을 분석하면 선박의 기본 기능(추진, 조종 등) 상실로 인한 충돌, 좌초 등의 추가적인 이차 사고 가능성도 분석 가능하다.

## 화재 시뮬레이션 소프트웨어

### 시뮬레이션 모델

화재 시뮬레이션 소프트웨어는 크게 존(Zone) 모델을 이용하는 소프트웨어와 필드(field) 모델을 이용하는 소프트웨어의 두 가지로 구분할 수 있다.

대표적인 존 모델의 해석 방법 중 하나인 2층 존 모델(Two layer zone model)은 그림 3과 같이 화재 공간을 상층부(Upper layer)와 하층부(Lower layer) 그리고 외부와 연결된 개구부로 구분하여 질량과 에너지 유동(Flux)을 계산하여 화재를 해석하는 방법이다. 하층부에서 발생한 화재는 smoke plume을 통해 열(Q)과 질량( $\dot{m}$ )을 상층부로 이동시키며, 시간이 경과할수록 상층부의 깊이가 증가한다.

필드 모델은 CFD 모델이라고도 하며 화재 공간을 미소격자로 나누어 화재 난류 유동에 대해 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석하는 방법이다. 3 차원 미소격자 공간에 대해 질량, 모멘텀, 에너지 보존방정식에 대한 편도 함수(Partial derivative)를 유한 차분법(Finite difference)으로 근사화하고, 열복사(Thermal radiation)는 유한 체적법(Finite volume technique)을 이용하여 계산한다.

## 화재 시뮬레이션 소프트웨어

여기서는 화재 시뮬레이션 소프트웨어 중 존 모델을 기반으로 하는 두 개의 소프트웨어와 필드 모델을 기반으로 하는 두 개의 소프트웨어, 총 네 개의 소프트웨어를 선박 기관실에 적용한 결과를 바탕으로 하여 화재 안전성 분석에의 적용 가능성을 분석해 보았다.

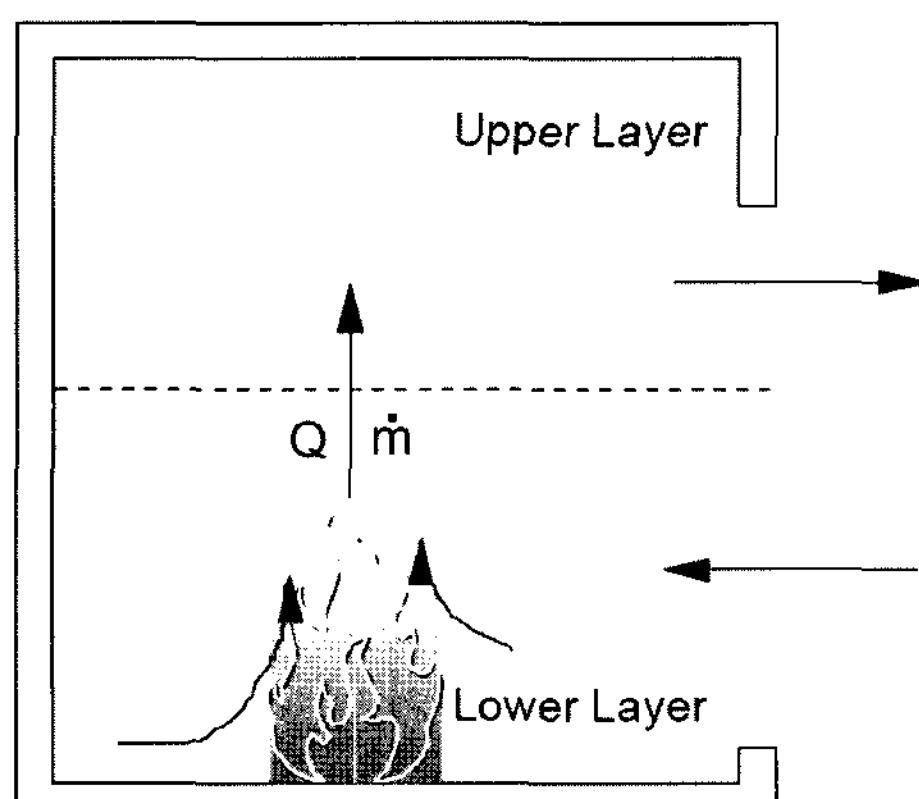
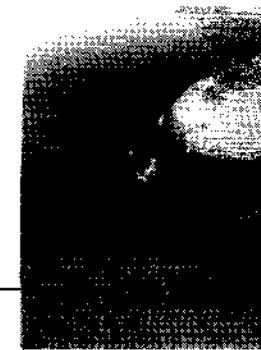


그림 3 Zone model overview



## 시뮬레이션 대상 및 조건

여기서 시뮬레이션 적용 대상은 그림 4와 같이 선박 화재가 가장 빈번하게 발생하는 기관실 및 인근 구획이다. 기관실 화재 시뮬레이션에 대한 Pool fire 시나리오는 IMO MSC/Circ. 1165의 화재 소화 실험 기준(Thermal management test scenario No.7)을 적용하였으며, 실제 선박에 사용되는 연료에 대한 데이터 확보가 어려워 화재 실험 시 많이 사용되는 Heptane을 연료로 사용하였다. 시뮬레이션 수행 조건은 Table 3에서 요약해서 보여주고 있다. 시뮬레이션 전체 체적은 2013.168m<sup>3</sup>으로 IMO MSC/Circ. 1165에 따라 4MW의 화재 크기를 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다.

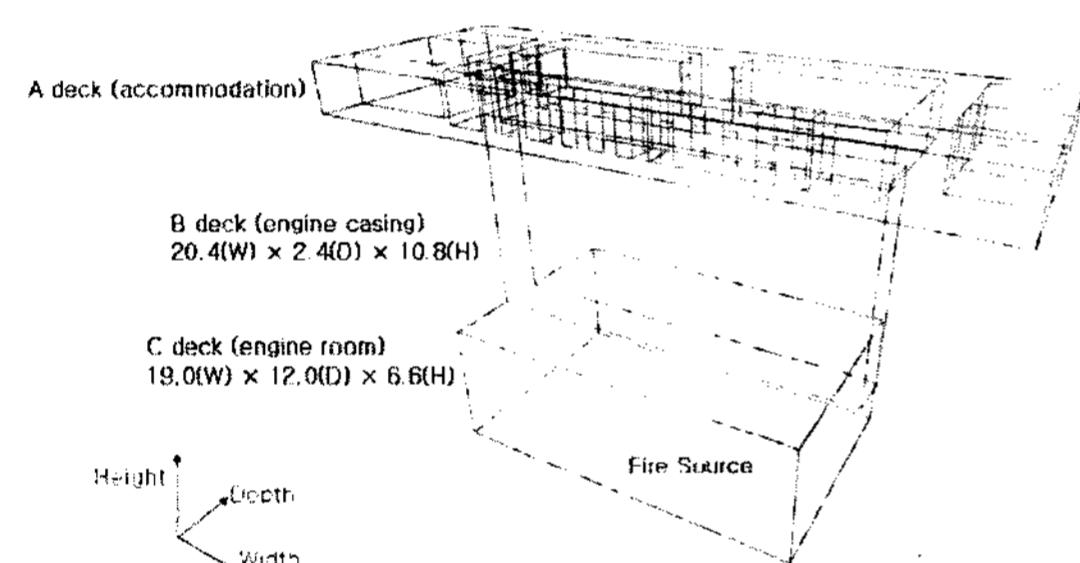


그림 4 3D view of the fire compartments

## 화재 시뮬레이션 결과

존 모델을 이용한 화재 해석은 상층부와 하층부에 대한 평균 결과값을 제공하며, 필드 모델은 특정 지점에 대한 해석 결과값을 제공하기 때문에 존 모델과 필드 모델을 따로 비교하여야 한다. 각 모델의 시뮬레이션 결과 비교는 다음과 같다.

### 1) 존 모델 해석 결과

존 모델의 시뮬레이션 결과 중 가장 중요한 요소는 열과 연기의 양을 나타내는 상층부 온도와 연기 층 높이이다. 그림 5와 6은 engine room의 상층부 온도와 높이를 보여주고 있다. 온도의 경우 CFAST 와 BRI2002의 결과가 매우 흡사하지만 높이의 경우 전혀 다른 양상을 보여주고 있다. 그 이유는

BRI2002의 경우 건물을 대상으로 개발되었기 때문에 건물에 항상 존재하는 문틈, 창문 틈 및 계단 등

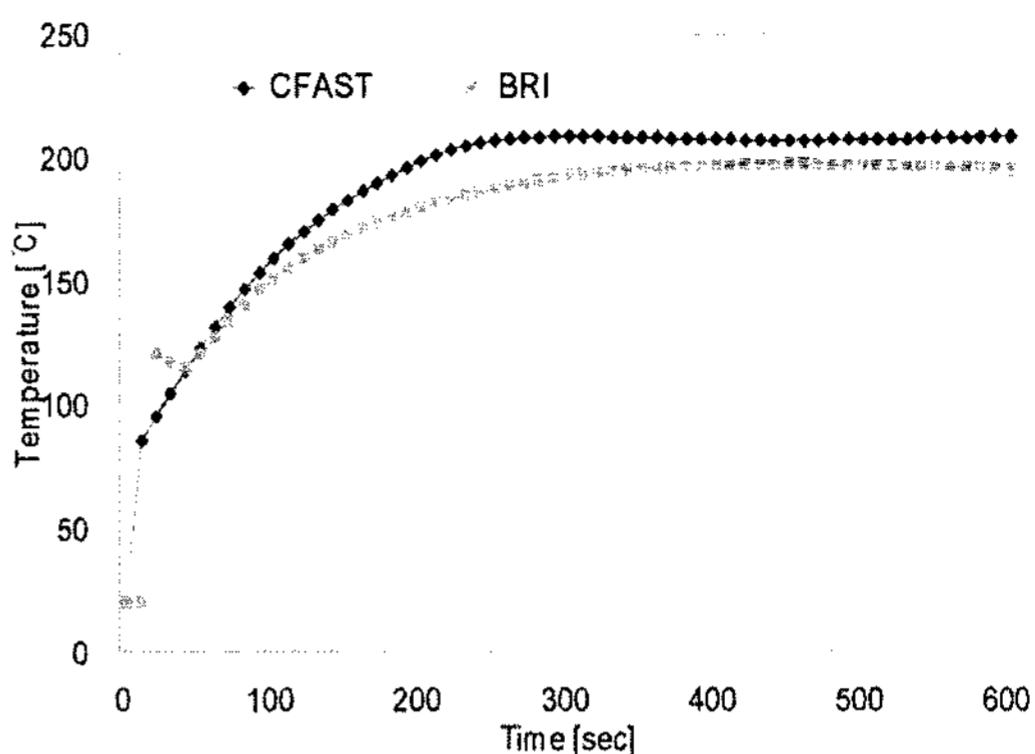


그림 5 Simulation results of upper layer temperature in engine room

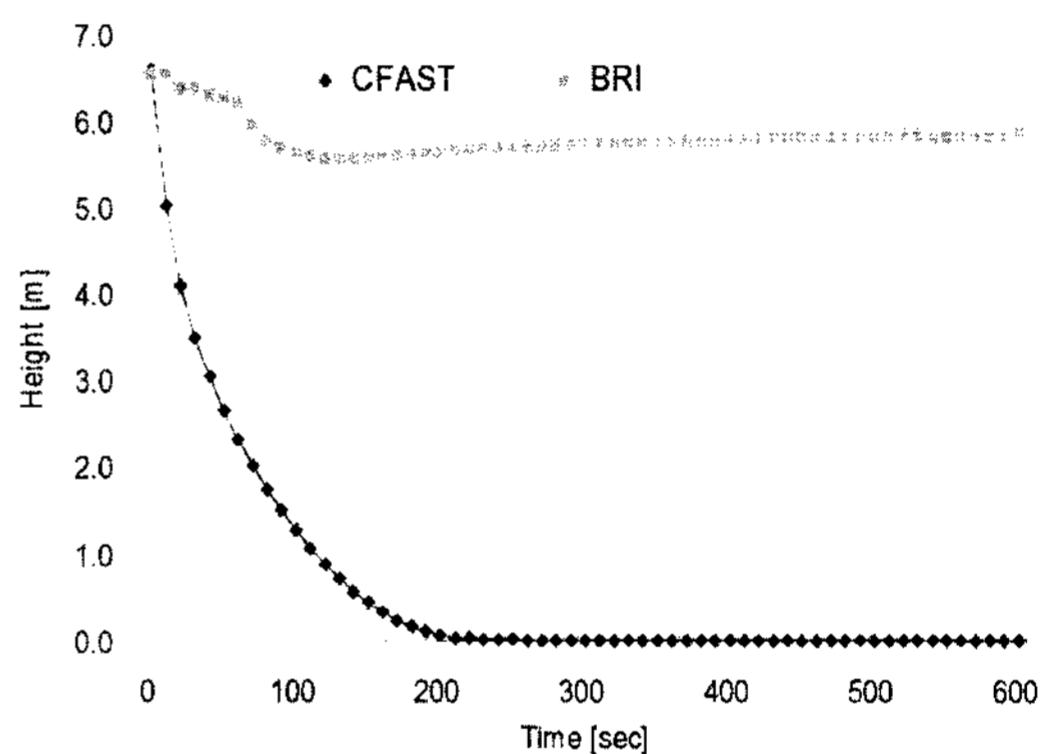


그림 6 Simulation results of layer interface height in engine room

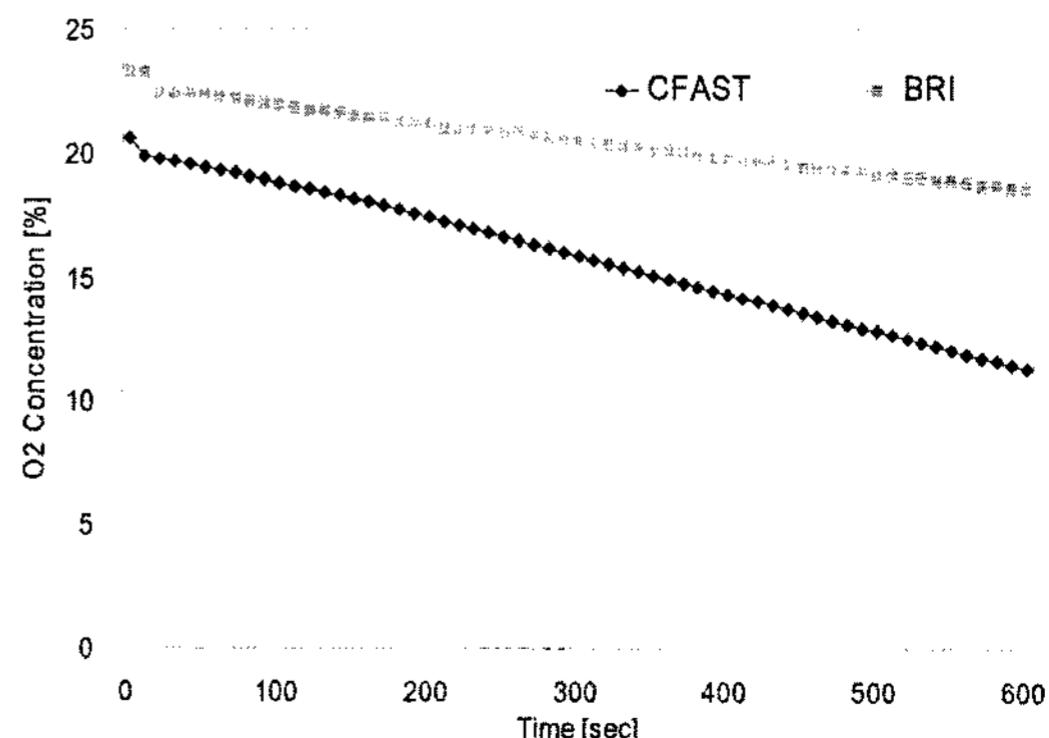


그림 7 Simulation results of O<sub>2</sub> concentration in engine room

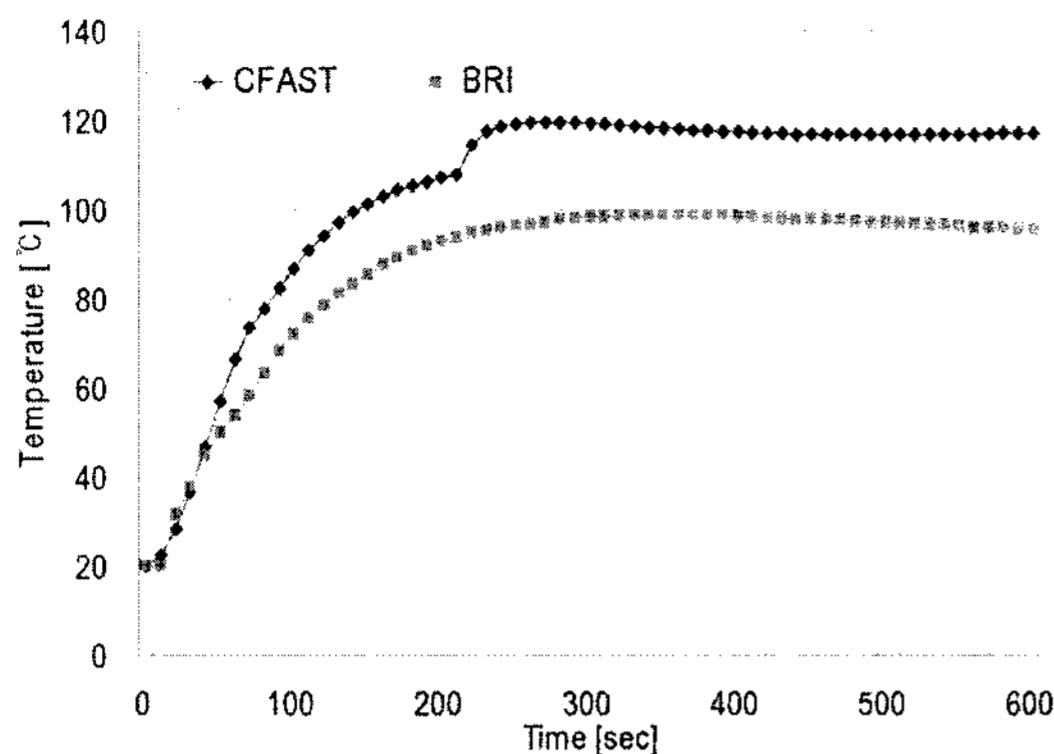


그림 8 Simulation results of upper layer temperature in engine opening

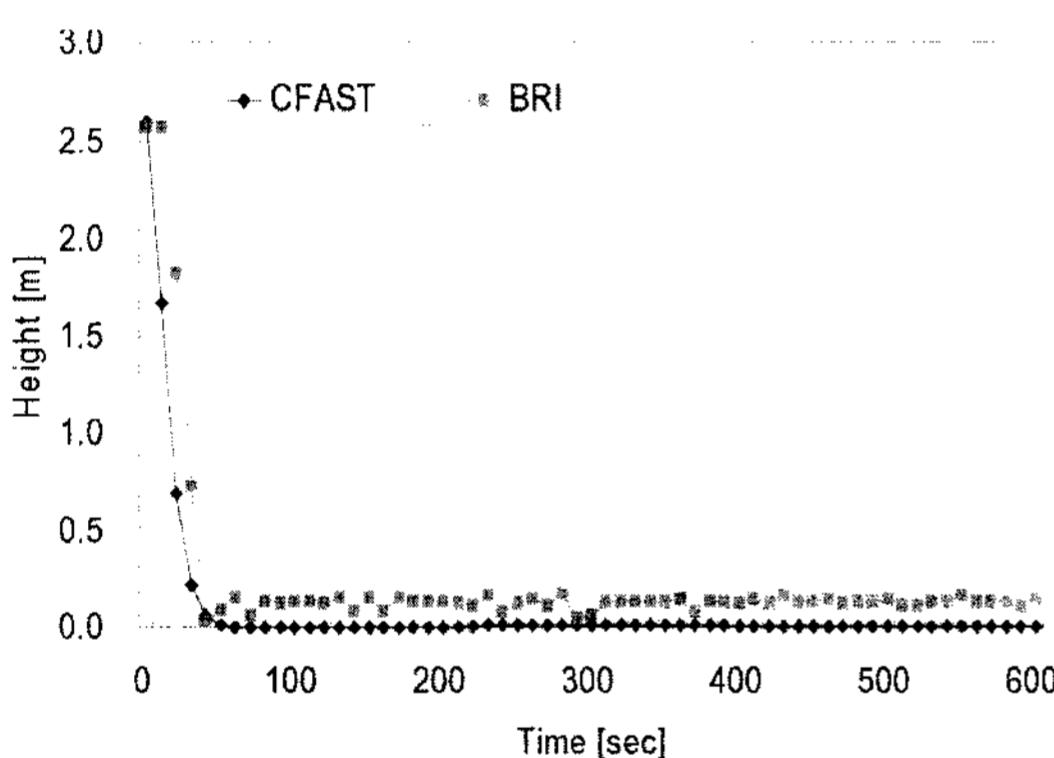


그림 9 Simulation results of layer interface height in engine opening

으로 인한 자연 환기조건을 반드시 입력하도록 되어 있기 때문이다. 본 시뮬레이션에서는 선박의 특징을 감안하여 최소의 값으로 입력하였지만 그럼에도 불구하고 결과가 매우 다르게 나타난다. 이 영향은 그림 7에서와 같이 산소 농도에도 미치며 그림 8과 9의 경우처럼 다른 구획에도 미친다. 따라서 선박의 밀폐된 조건을 고려하기 위해서는 BRI2002 보다는 CFAST가 더 적합함을 알 수 있다.

## 2) 필드 모델 해석 결과

필드 모델에서 화재로 인한 열과 연기를 대표하는 지표는 구획의 온도와 Soot의 농도 값이다. FDS

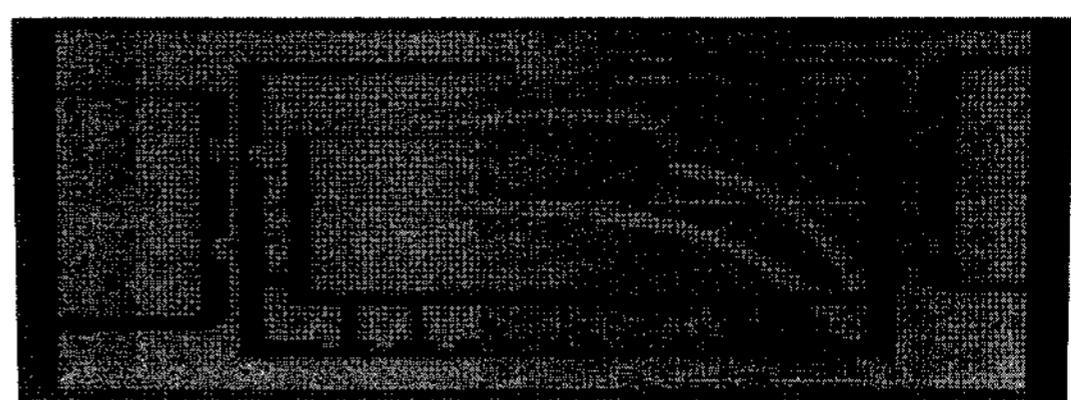


그림 10 Measurement points of A deck

에서 Soot은 구획 체적과 질량의 비(Soot density,  $\text{g}/\text{m}^3$ )로, KFX에서는 연소 시 발생하는 Soot의 발생량의 비(Soot yield fraction, %)로 표현하고 있어 해석 결과를 통한 연기에 대한 단순비교가 어렵기 때문에 그 경향만을 살펴보았다.

필드 모델을 이용한 화재 시뮬레이션은 CFD 해석 특성상 존 모델과 달리 해석 결과의 평균값이 아닌 격자 상의 특정 지점에서의 결과값을 나타낸다. 그림 10은 A deck의 측정점 위치를 나타내고 있으며, deck 바닥으로부터 1.8m의 높이에 대한 각 구획의 중심점을 측정점으로 하였다. B, C deck의 경우 deck의 중간 높이에 대한 구획 중심점을 측정점으로 하였다.

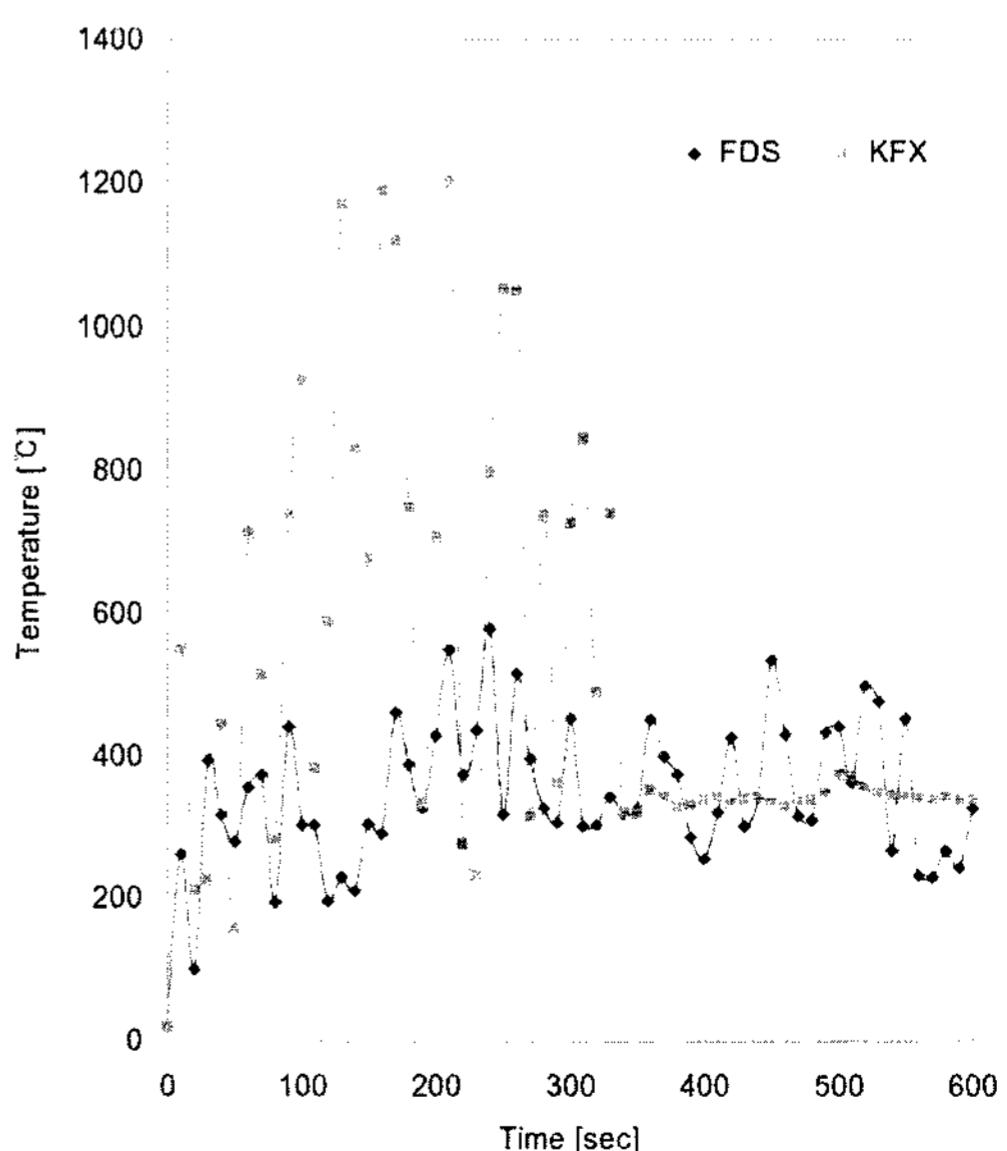


그림 11 Simulation results of temperature in engine room

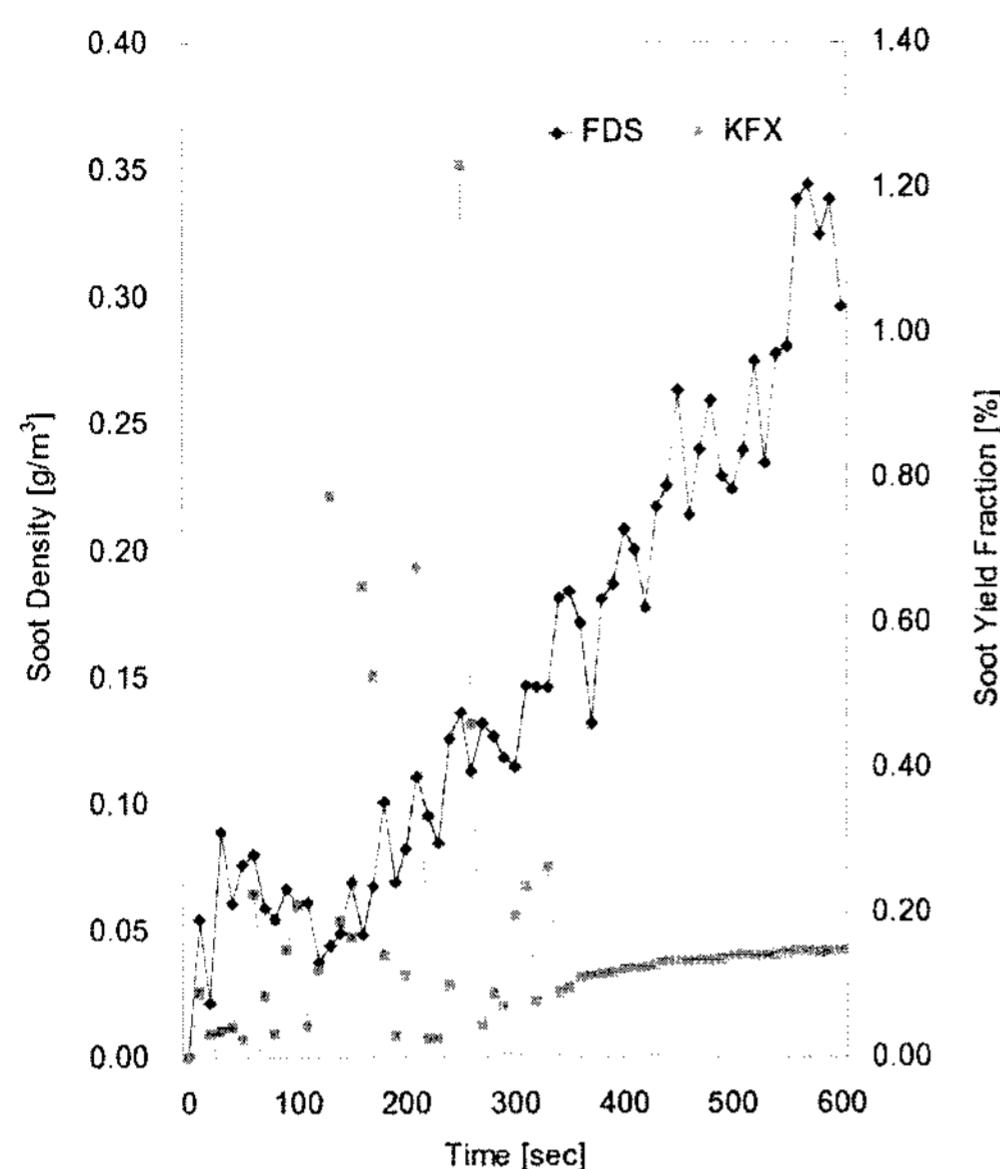


그림 12 Simulation results of soot concentration in engine room

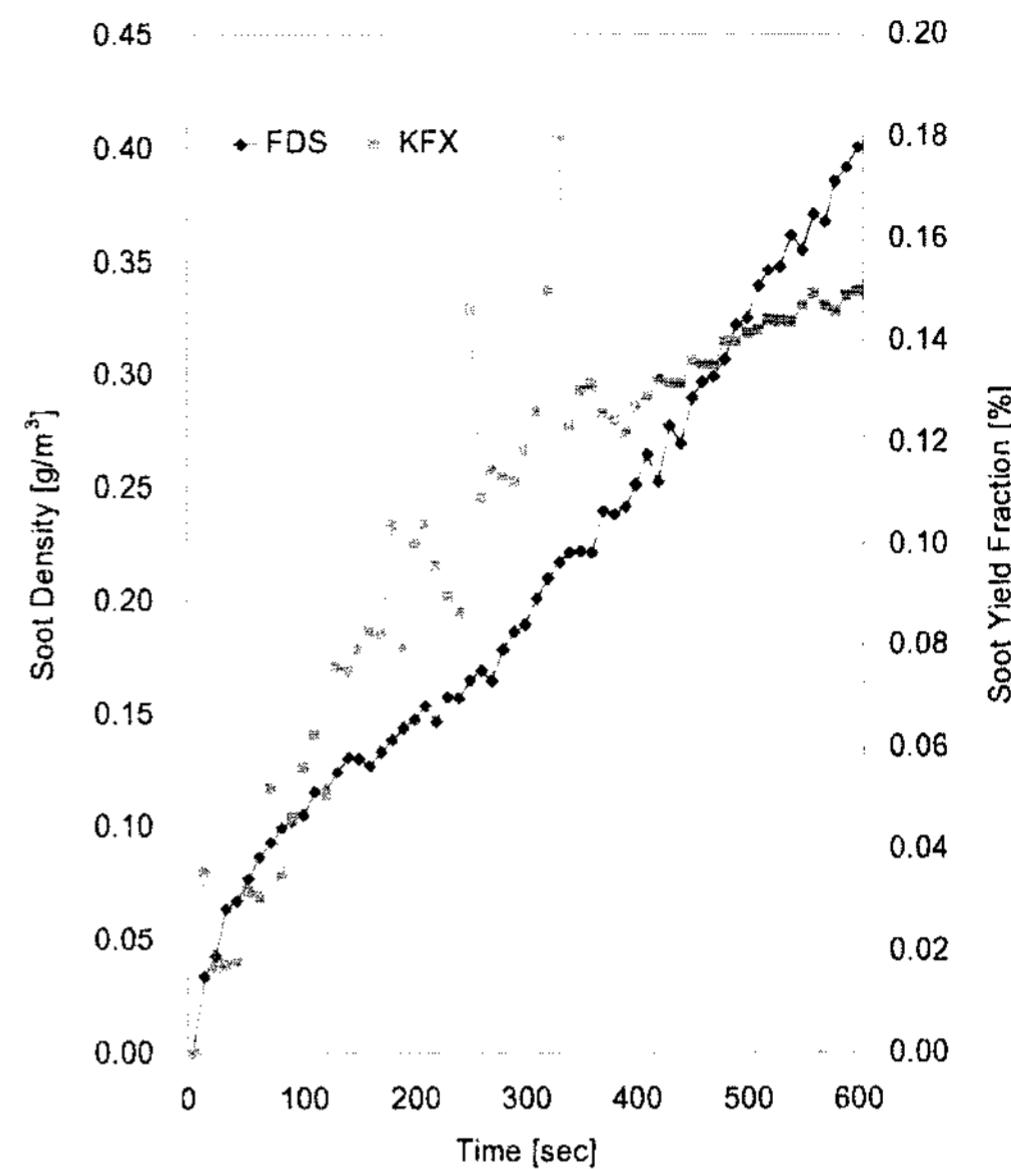


그림 14 Simulation results of soot concentration in engine opening

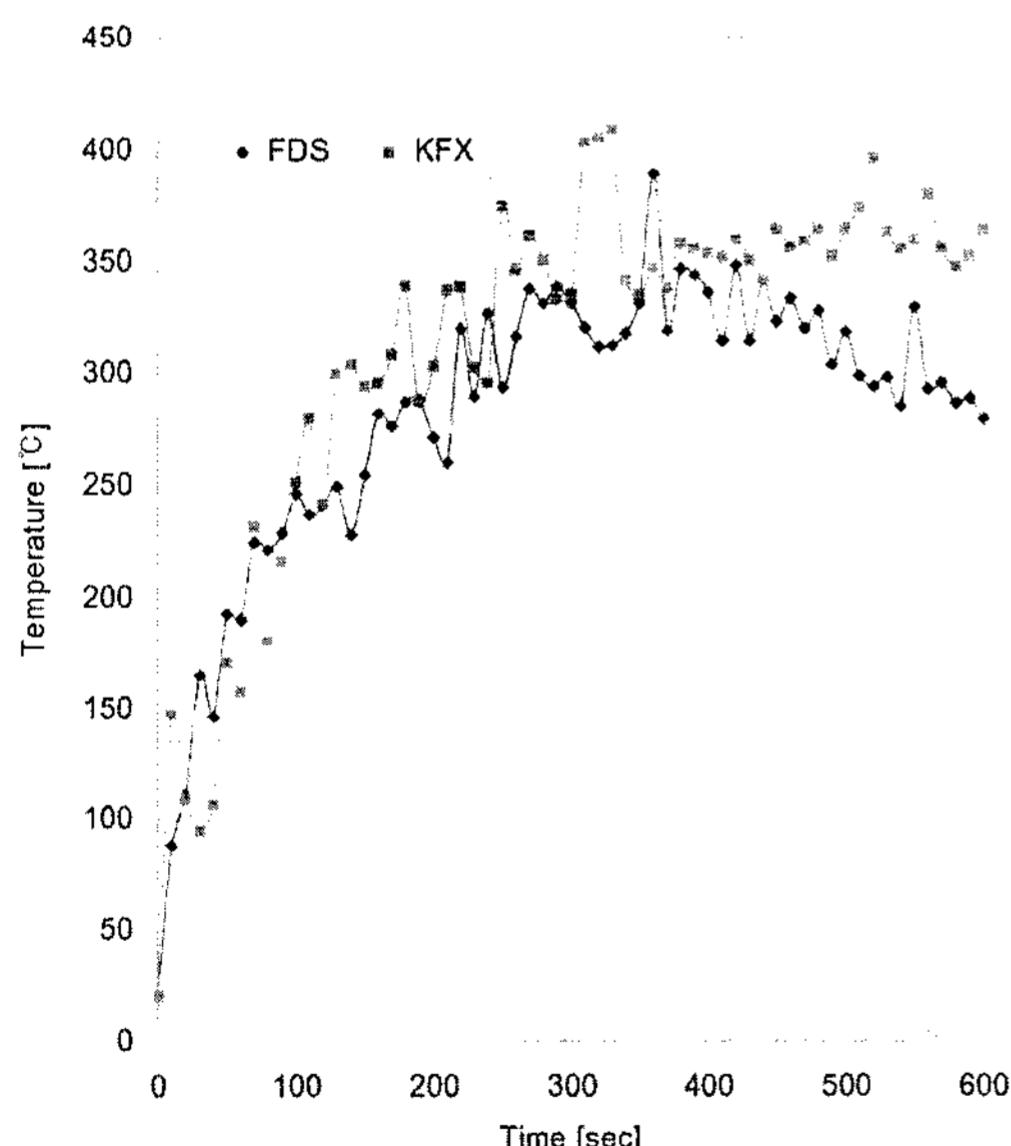


그림 13 Simulation results of temperature in engine opening

그림 11과 12는 Engine room 측정점에서의 온도와 Soot 농도에 대한 해석 결과를, 그림 13과 14는 Engine opening에서의 해석 결과를 나타내고 있다.

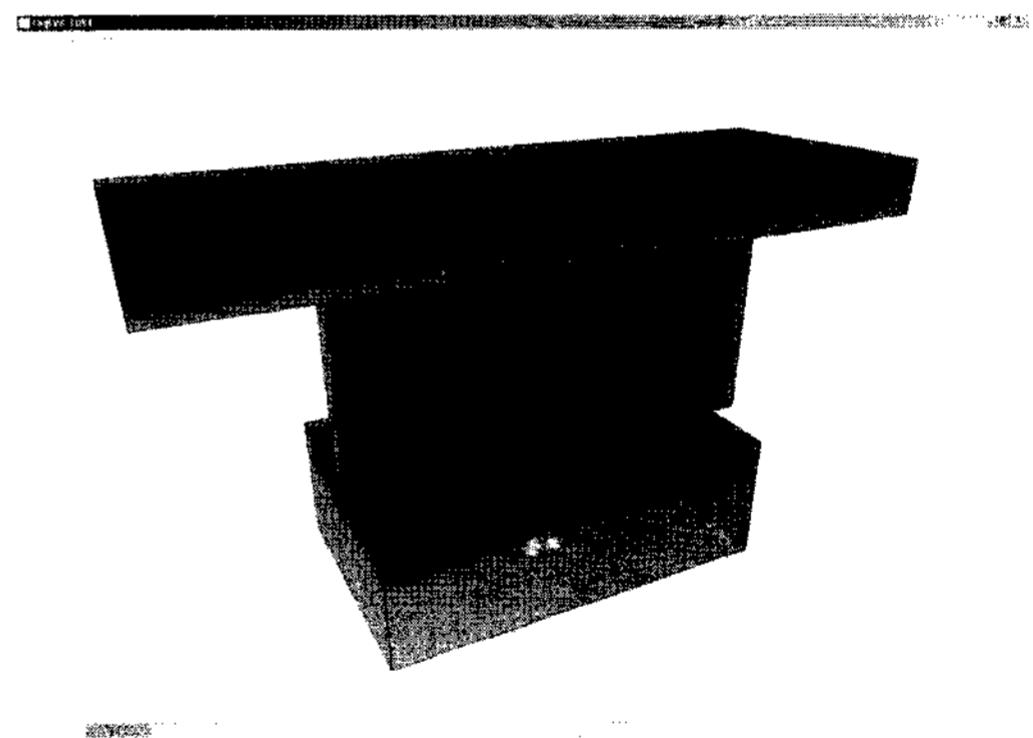


그림 15 3D view of fire plume and soot by smokeview

그림 11과 12를 살펴보면, FDS와 KFX 해석 결과가 매우 상이한 것을 알 수 있는데 이는 FDS가 Mixture fraction 연소 모델을 사용하는 것과 달리 KFX는 EDC(Eddy Dissipation Concept) 연소 모델과 FDS에서는 고려하지 않는 지면 열전달 효과, 연료의 비등점(Boiling temperature), 인화점(Flash temperater) 등을 고려하기 때문으로 판단되며 어느 쪽이 더 정확한지에 대한 것은 시뮬레이션 결과만으로는 판단이 어렵고 추가로 실험을 통해서 검증

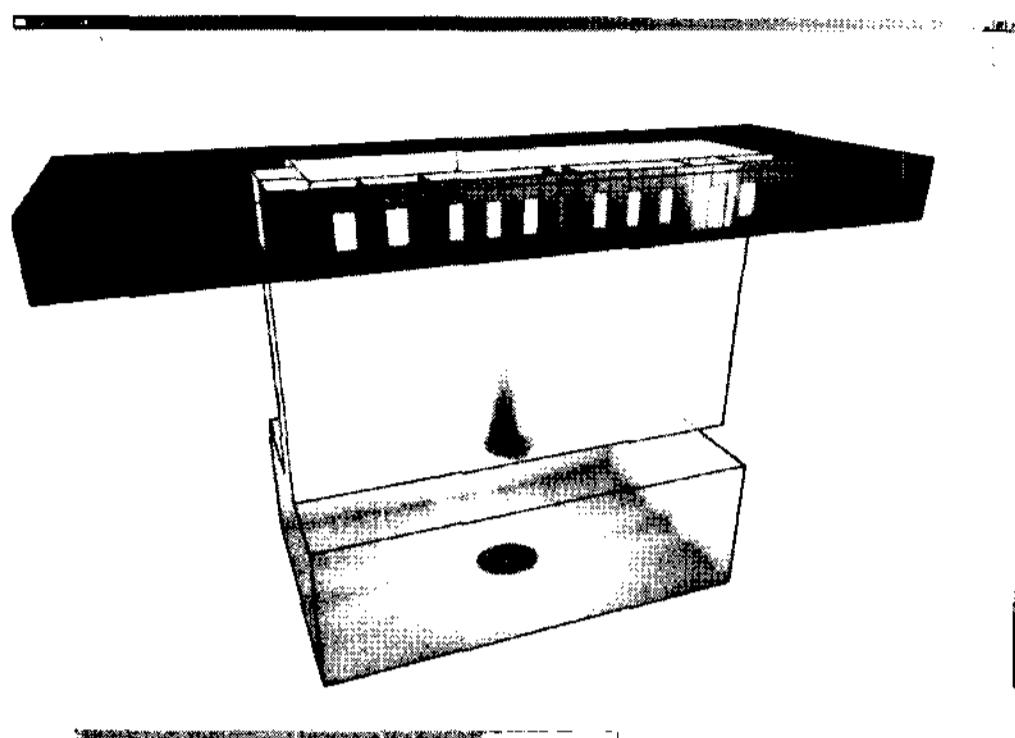


그림 16 3D contour view of wall surface temperature by smokeview

하여야 한다. 그러나 Engine room 내부에서의 상이 한 결과에도 불구하고 Engine opening 에서의 결과는 약간의 차이는 있지만 비슷한 결과를 보여주고 있다.

FDS의 Smokeview는 Iso/contour surface, contour/vector slice 등의 형태로 해석 결과를 3D 동영상으로 보여주는 기능을 제공하며, KFX도 XV라는 S/W를 통해 jpg, mpeg 파일 형식으로 해석 결과를 가시화할 수 있는데 그림 15와 16은 그 중 Smokeview를 통한 Soot의 농도 변화와 화염, 구획 표면의 온도 분포를 가시화한 그림이다.

## 결 론

여기서는 화재 시뮬레이션 소프트웨어를 이용한 선박 화재 안전성 평가의 가능성을 검토해 보았다. 화재 시뮬레이션 소프트웨어는 비록 실험 결과를 대체할 수 있을 정도의 정확한 값을 주지 못하더라도 화재 안전성 평가를 위한 유용한 결과를 제공할

수 있으며, 특히 실험이 불가능하거나 비효율적인 경우에 일반적인 경향을 확인하기 위해 유용하게 사용될 수 있다.

기관실 화재 시뮬레이션의 예를 통하여 아래와 같은 화재 시뮬레이션 소프트웨어에 대한 결론을 얻을 수 있다.

- 존 모델은 짧은 계산시간으로 화재의 특성을 보여주기 때문에 필드 모델에 비해 여객선 거주 구역 같은 많은 구획을 대상으로 한 화재 시뮬레이션에 유용함.
- BRI2002의 경우 외부 환기에 대한 정의가 반드시 필요하기 때문에 선박의 밀폐 구획을 대상으로 한 시뮬레이션에는 부적합하며 open deck와 같은 부분에서는 사용 가능함.
- 필드 모델은 비교적 많은 계산시간이 요구되지만 상대적으로 세밀한 결과를 얻을 수 있으며, 결과 가시화가 가능해 정량적 평가 뿐만 아니라 정성적 평가도 가능함.

그러나 화재 시뮬레이션을 여객선 화재 안전성 평가에 이용하기에는 아직 해결해야 할 문제들이 남아 있다. 이 중 대표적인 문제점들은 다음과 같다.

- 화재 시뮬레이션을 사용하기 위해서는 연료 및 연소물에 대한 열역학적인 특성값들이 필요한데, 특히 여객선처럼 내장재가 많고 다양한 경우 이들에 대한 열역학적 특성치를 얻기가 어려움.
- 여기서 사용된 시뮬레이션 도구들은 육상용으로 개발되었기 때문에 선박의 hull과 같은 굴곡 부를 정의하려면 등가체적이나 근사화 방법을 적용해야 하기 때문에 정확도가 떨어짐. ⚓