대 한 조 선 학 회 논 문 집
제44권 제2호 2007년 4월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 44, No. 2, pp. 83-92, April 2007

선박화재 시뮬레이션을 위한 도구 분석과 적용에 관한 연구

최 진†*, 이동곤*, 박범진*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

A Study on the Analysis and Application of the Fire Simulation Tools for Ships

Jin Choi†*, Dongkon Lee* and Beom-Jin Park*

Maritime and Ocean Engineering Research Institute(MOERI)/KORDI*

Abstract

To improve the fire safety of ships, it is required to prepare the systematic design guideline for fire protection and the way of assessing fire characteristics quantitatively. The introduction of simulation technique based on fire engineering is useful to assess fire safety performance quantitatively. Fire simulation tools are currently developing with U.S.A., Europe and Japan as a leader. Most of current fire simulation tools were developed for building or inland structure. Therefore it is required validation process and development of data base to apply maritime environments. In this paper, I/O parameters of simulation tools such as CFAST and BRI2002 of zone model and FDS and KFX of field model analysed, and designed data base considering maritime environment. The fire simulation for the pool fire model of engine room and its adjacent compartments is performed and evaluated the results.

※Keywords: Fire safety of ships(선박화재안전), Fire simulation(화재 시뮬레이션), Pool fire(풀 화재), Fire engineering(화재 공학), Zone model(존 모델), Field model(필드 모델)

1. 서론

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 발생건수와 유사한 수준을 보이고 있다. 일반적으로 선박의 화재사고는 절반 정도가 기관실에서 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 사고 발생 시 육상으로부터 화재 진압을 위한 지원을 받는데 어려움이 있기 때문에 엄청난 인명과 재산 손실을 초래하게 된다(김성찬과 유홍선 2004).

해양 분야의 선진국들은 화재 안전에 관한 각종 의장품과 기자재들을 개발하고 있으며, 개발된 제

접수일: 2006년 11월 14일, 승인일: 2007년 1월 25일
†교신저자: jinnycc@moeri.re.kr, 042-868-7221

풍의 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(이동곤 등 2004).

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(이정훈 등 2001).

선박의 화재안전성능에 대한 정량적 평가를 위해서는 실제 규모의 실험을 하는 것이 가장 좋은 방법이지만 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(김성찬과 유홍선 2004).

본 논문에서는 두 모델을 기반으로 개발된 화재 시뮬레이션 도구들 중에서 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 CFAST(Consolidated model of Fire growth And Smoke Transport) Version 5와 FDS(Fire Dynamics Simulator) Version 4, 노르웨이 ComputIT사의 KFX 2005(Kameleon FireEx), 일본 교토대학 DPRI(Disaster Prevention Research Institute) 등에서 개발한 BRI2002에 대한 도구별 특성과 각 도구들을 이용한 화재 시뮬레이션에 필요한 데이터베이스에 대해 분석하고, 선박의 기관실 주변 구획을 대상으로 Pool fire 시뮬레이션을 수행해 그 해석 결과를 비교 분석하였다.

2. 화재 시뮬레이션 모델

2.1 존 모델

대표적인 존 모델의 해석 방법 중 하나인 2층 존 모델(Two layer zone model)은 Fig. 1과 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 상층부는 아래로 발전하게 된다(Jason 2002).

2.2 필드 모델

필드 모델은 CFD 모델이라고도 하며 화재 공간을 미소격자로 나누어 화재 난류 유동에 대해 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석하는 방법이다. 3차원 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(Kelvin 2005).

2.3 화재 시뮬레이션 도구

본 논문에서는 화재 시뮬레이션 도구 중 국내에 가장 많이 소개되고, 입수가 비교적 용이한 네 가

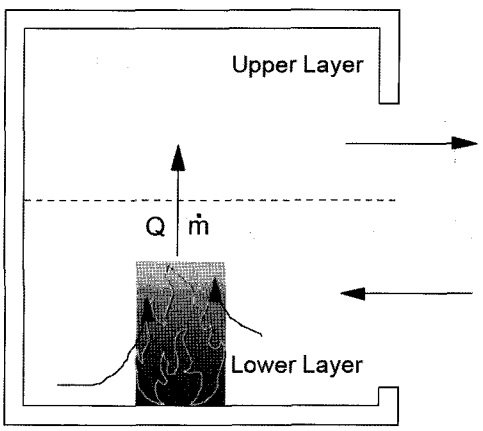

Fig. 1 Zone model overview

Table 1 Characteristics of zone model fire simulation tools(Richard 2005 and Tanaka 2004)

Model Type	Tool Name	Output Data	Development
Two Layer Zone Model	CFAST	- Upper Layer Temperature - Lower Layer Temperature - Layer Interface Height - Pyrolysis Rate - Fire Size - Flame Height - Room Pressure - Combustion Species etc.	Building and Fire Research Laboratory, NIST, U.S. Department of Commerce
	BRI2002	- Upper Layer Temperature - Lower Layer Temperature - Layer Discontinuity Height (Lower Layer Thickness) - Room Pressure - Mass Flow Rate - Wall Temperature etc.	Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University Building Research Institute, Japan etc.

Table 2 Characteristics of field model fire simulation tools(Vembe 2001 and Kelvin 2005)

Model Type	Tool Name	Output Data	Development
Field Model	FDS	- Temperature - Thermocouple Temperature - Pressure - Heat Release Rate - Species Concentration - Flow Speed etc.	Building and Fire Research Laboratory, NIST, U.S. Department of Commerce
	KFX	- Temperature - Pressure - Flow Speed - Heat Release Rate - Species Concentration - Radiation etc.	ComputIT, Norway

지 도구를 선정하였다. Table 1에는 존 모델 도구 중 CFAST와 BRI2002에 대한 특징을, Table 2에는 필드 모델 도구인 KFX와 FDS의 특징을 각각 나타내고 있다. KFX와 FDS의 경우 XV, Smokeview라는 S/W를 통해 시뮬레이션 결과를 3D로 가시화 해주는 기능을 제공한다.

2.4 화재 시뮬레이션 절차(Process)

화재 시뮬레이션은 화재 모델, 시뮬레이션 도구에 따라 입력 방식, 입·출력 데이터, 운영환경 등이 상이하지만, 기본적으로 동일한 시뮬레이션 절차를 따른다. Fig. 2는 화재 시뮬레이션의 절차를 나타내고 있다. 첫 번째 단계로 구획들의 위치, 크기 및 구획연결 상태, 외부 개구부(Door, window,

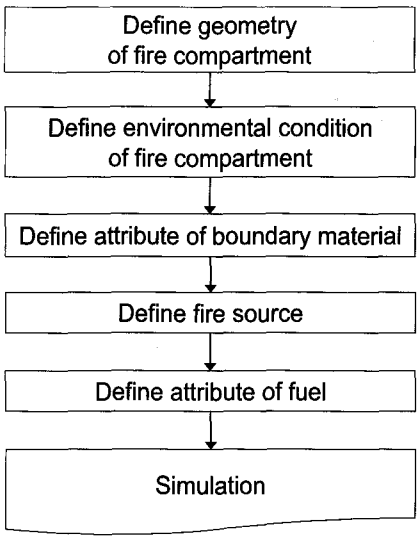

Fig. 2 Process of fire simulation

vent etc.)와 같은 화재 모델에 대한 기하학적 정보를 정의한다. 다음 단계에서는 정의된 구획들의 주변 온도, 바람 등의 대기 환경 정보와 구획의 벽, 바닥, 천장재에 대한 열적 특성값을 정의하게 된다. 마지막으로 화원의 위치와 화재 유형, 화재 크기 및 연료의 특성을 정의한 후 시뮬레이션을 수행한다.

3. 화재 시뮬레이션 입력 데이터 분석

화재 시뮬레이션에 사용되는 입력 데이터들은 이용 목적, 환경, 도구 등에 따라 적절히 결정되어야 한다. 본 장에서는 화재 시뮬레이션 입력 데이터 중 Fig. 2의 시뮬레이션 절차에서 요구되는 주요 공통 파라미터를 중심으로 요구 데이터를 분석하였다. 화재 시뮬레이션 입력 데이터는 기본적으로 화재 구획의 기하학적 정보, 내장재 및 경계의 열적 속성, 대기 조건, 화원 및 연료의 속성을 포함한다. 현재 화재 관련 연구는 주로 육상 건축물을 위주로 이루어지고 있기 때문에 선박용 화재 시뮬레이션에 사용하기 위한 화재 속성 관련 입력 데이터의 확보가 힘든 실정이다. 선박화재 시뮬레이션에 적용할 수 있는 보다 정확한 데이터의 구축을 위해서는 실제 사용 재료에 대한 연소 실험이 필요하지만(최진 등 2006), 본 논문에서는 화재 시뮬레이션 도구의 특성에 대한 비교, 분석과 선박 적용에 초점을 두고 있는 기초 연구이기 때문에 기존에 구축되어 있는 화재 데이터들을 활용하여 선박의 화재 시뮬레이션에 적용하였다.

4. 화재 시뮬레이션의 선박 적용

4.1 시뮬레이션 대상

본 연구에서는 선박 화재 중 가장 빈번하게 발생하는 기관실 화재에 대해 Pool fire 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3, 4와 같이 Engine room과 Engine casing, Engine opening을 포함한 거주구역의 3개 Deck를 화재 발생 구역으로 가정하여 Engine room 중앙에서의 Pool fire형 화재 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

4.2 시뮬레이션 조건

기관실 화재 시뮬레이션에 대한 Pool fire 시나리오는 Table 3, 4에서 나타내고 있는 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 결정하였다. Table 3은 화재 구역의 체적과 열방출율(Heat Release Rates)로 표현되는 화재 크기와의 관계를 나타내고 있으며, Table 4는 해당 화재 크기에 대한 Pool 크기를 나타내고 있다. 시뮬레이션 대상 구역의 전체 체적은 2013.168m^3으로 4MW의 화재 크기를 기준으로 Table 5와 같은 시뮬레이션 조건을 적용하였다.

5. 화재 시뮬레이션 결과

존 모델을 이용한 화재 해석은 상층부와 하층부에 대한 평균 결과값을 제공하며, 필드 모델은 특정 지점에 대한 해석 결과값을 제공하기 때문에 시뮬레이션 결과에 대해 화재 모델별 비교, 분석을 수행하였다.

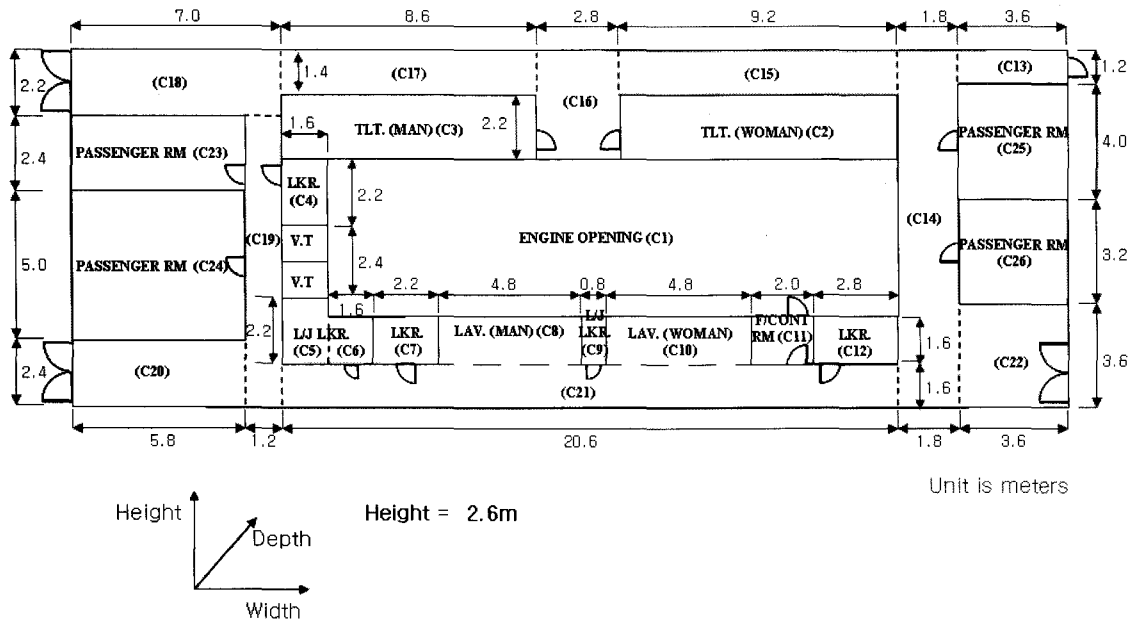

Fig. 3 Sectional view of the fire compartments(A deck)

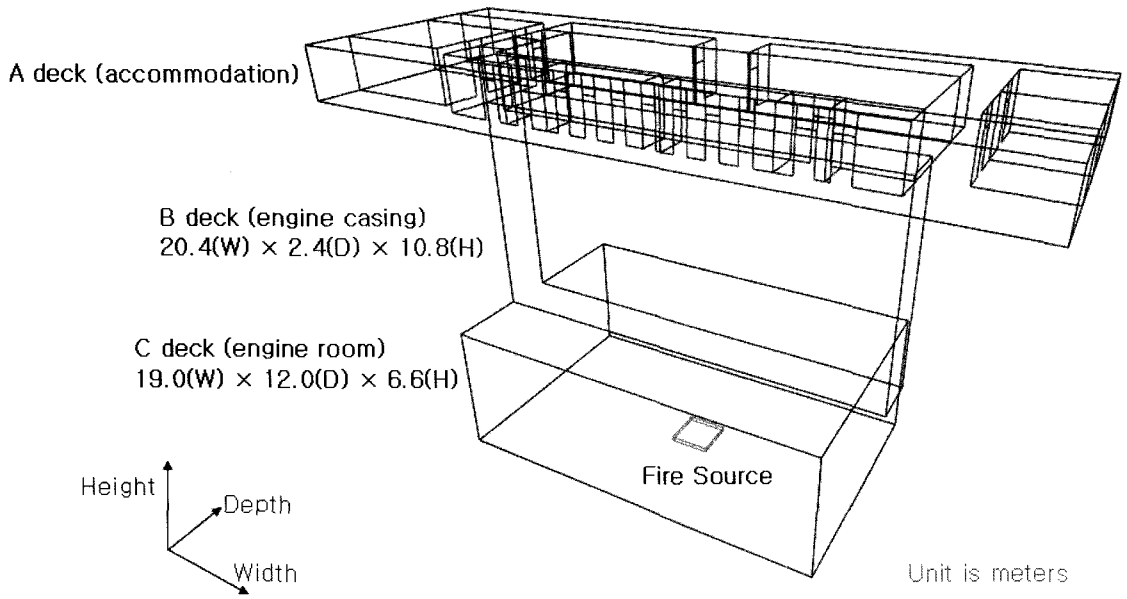

Fig. 4 3D view of the fire compartments

5.1 존 모델 해석 결과

화재로 인한 피해는 여러 가지 요소들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 하지만 이런 요소들 중 가장 쉽게 표현될 수 있고, 피해 영향이 큰 요소는 열과 연기라고 할 수 있다. 때문에 CFAST와 BRI2002의 해석 결과 중 열과 연기의 양을 나타내는 상층부 온도(Upper layer temperature)와 연기층 높이(Layer interface height)에 대해 비교 분석하였다. Fig. 5는 화재 발생 구획인 Engine room의 상층부 온도를 나타내고 있다. 두 시뮬레이션 도구의 온도 변화 경향이 전체적으로 비슷한 것을 알 수 있으며, 최고 온도도 약 200℃로 유사한 해석 결과를 나타내었다. Fig. 6은 Engine room의 상층부와 하층부의 경계, 즉, 상층부를 메우고 있는 연기층의 바닥으로부터 높이를 나타내고 있으며, Fig. 7은 Engine room의 산소 농도 변화를 나타내고 있다. Fig. 8과 9는 각각 A deck engine opening의 상층부 온도와 연기층 높이를 나타내고 있다. Fig. 6과 7에서 두 도구의 해석 결과가 상이한 것을 알 수 있는데 이는 BRI2002의 경우 창문틀, 계단, 승강기 등과 같이 실제 건물에서 존재하는 환기 특성을 고려한 외부와의 개구부를 반드시 정의해야 해석이 가능하기 때문에 나타난 결과로 해석된다. 다시 말해 선박에서 존재할 수 있는 완전 밀폐 구획에 대한 시뮬레이션의 경우 가상으로 외부와의 개구부를 정의해야 한다는 것이다. 이는 같은 화재 모델을 사용하는 두 도구라도 임의 개구부로 인해 특정 구획에서 서로 상이한 해석 결과를 나타낼 수 있으며, 시뮬레이션 대상 구획의 환기 특성을 고려하여 해석 도구를 선정해야 한다는 것을 의미한다. Fig. 8의 해석 결과에서도 온도 변화의 경향은 두 도구가 유사한 결과를 보여주고 있지만, 최고 도달 온도에서 약 20℃의 차이를 보이고 있는데, 이는 BRI2002에 시뮬레이션을 위해 가정한 B deck engine casing의 외부 개구부 영향인 것으로 판단된다.

5.2 필드 모델 해석 결과

필드 모델에서 화재로 인한 열과 연기를 대표하는 지표는 구획의 온도와 Soot의 농도 값이다. FDS에서 Soot은 구획 체적과 질량의 비(Soot density, g/m^3)로, KFX에서는 연소 시 발생하는 Soot의 발생량의 비(Soot yield fraction, %)로 표현하고 있어 해석 결과를 통한 연기에 대한 단순 비교가 어렵기 때문에 그 경향만을 살펴보았다.

필드 모델을 이용한 화재 시뮬레이션은 CFD

Table 3 Correlation between nominal pool fire sizes and test compartment volume

Test Compartment volume	Pool Fire Scenario
500 m^3	1.0 MW
1000 m^3	2.0 MW
1500 m^3	3.0 MW
2000 m^3	4.0 MW
2500 m^3	5.0 MW
3000 m^3	6.0 MW

Note: Interpolation of the data in the table is allowed.

Table 4 Pool tray diameters and the corresponding area, for a selection of nominal heat release rates

Nominal HRR	Diameter	Area
1.0 MW	83 cm	0.54 m^2
2.0 MW	112 cm	0.99 m^2
3.0 MW	136 cm	1.45 m^2
4.0 MW	156 cm	1.90 m^2
5.0 MW	173 cm	2.36 m^2
6.0 MW	189 cm	2.81 m^2

Note: Interpolation of the data in the table is allowed.

Table 5 Specification of engine room pool fire simulation

Description	Value
Compartment Volume	2013.168 m^3
Nominal HRR	4 MW
Pool Tray Area	1.9 m^2
Fire Source(fuel)	Heptane
Heat of Combustion	44600 J/g
Burning Rate	48 g/m^2/s
Simulation Time	600 s
Ambient Temperature	293.15 K(20℃)

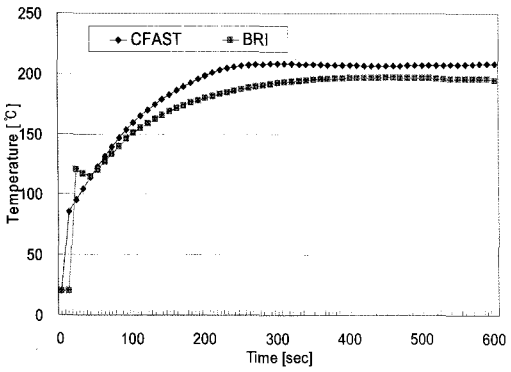

Fig. 5 Simulation results of upper layer temperature in engine room

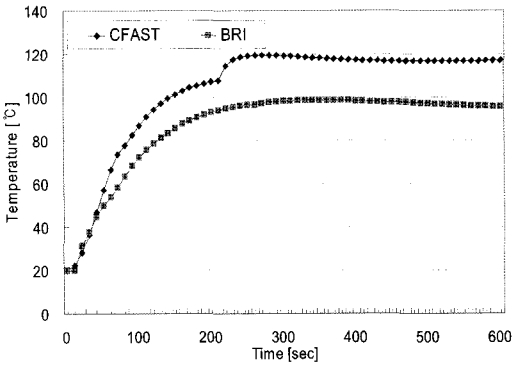

Fig. 8 Simulation results of upper laye temperature in engine opening

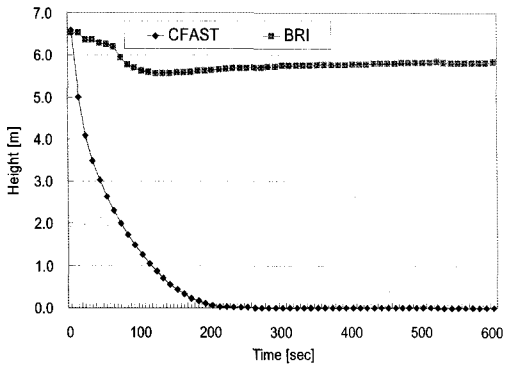

Fig. 6 Simulation results of layer interface height in engine room

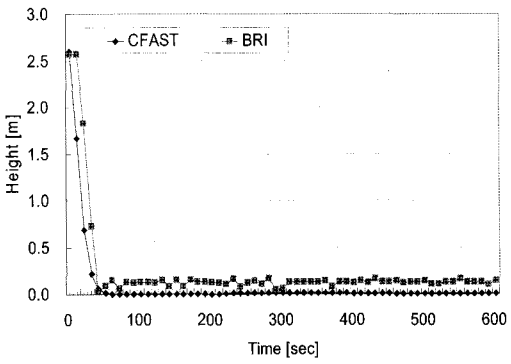

Fig. 9 Simulation results of layer interface height in engine opening

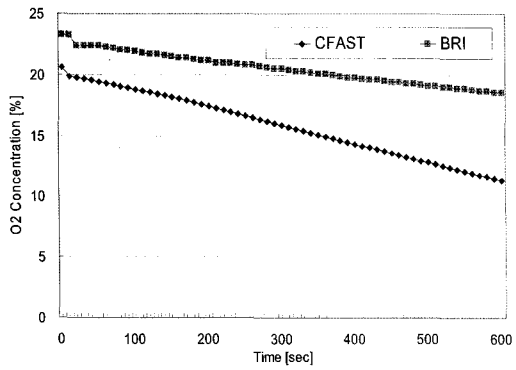

Fig. 7 Simulation results of O_2 concentration in engine room

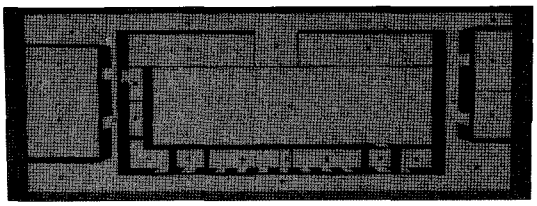

Fig. 10 Measurement points of A deck

해석 특성상 존 모델과 달리 해석 결과의 평균값이 아닌 격자 상의 특정 지점에서의 결과값을 나타낸다.

Fig. 10은 A deck의 측정점 위치를 나타내고

있으며, deck 바닥으로부터 1.8m의 높이에 대한 각 구획의 중심점들을 측정점으로 하였다. B, C deck의 경우 deck의 중간 높이에 대한 구획 중심점들을 측정점으로 하였다.

Fig. 11, 12는 Engine room 측정점에서의 온도와 Soot 농도에 대한 해석 결과를, Fig. 13, 14는 Engine opening에서의 해석 결과를 나타내고 있다. 화재 시 화염은 일정한 주기로 생성되며 열을 방출하는데 필드 모델은 격자 상에서의 값을 시간에 대해 계산하기 때문에 Fig. 11~14와 같이 온도 변화폭을 가지는 주기 함수 형태의 결과 그래프를 나타낸다. Fig. 11~14를 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 고려하는 해석 방법의 차이로 인한 영향이 작용한 것으로 판단된다.

특히 해석 결과 중 Engine room에서의 온도 해석 결과 차이가 매우 큰 것을 알 수 있는데 이와 같은 결과가 시뮬레이션 해석의 정확성 문제인지 실제 화재 현상이 해석 결과와 같은 경향을 보이는지 대해서는 실험을 통한 검증이 이루어지지 않았지 때문에 결과 분석에서 제외하였다.

Fig. 12에서 나타내고 있는 Engine room의 soot 관련 값을 보면, 약 350초부터는 soot의 발생량이 일정한 수준을 유지하게 되지만, 외부로의 개구부가 없기 때문에 FDS의 soot 농도 값은 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 화재로 인한 soot이 외부로 배출되지 못하고 구획 내부에 계속 체류하고 있다는 것을 의미한다.

필드 모델 화재 시뮬레이션 도구들은 해석 결과를 3D Post Processor를 통해 정성적으로 관찰하는 것이 가능하다.

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 Fig. 15와 16은 그 중 Smokeview를 통한 Soot의 농도 변화와 화염, 구획 표면의 온도 분포를 가시화한 그림이다.

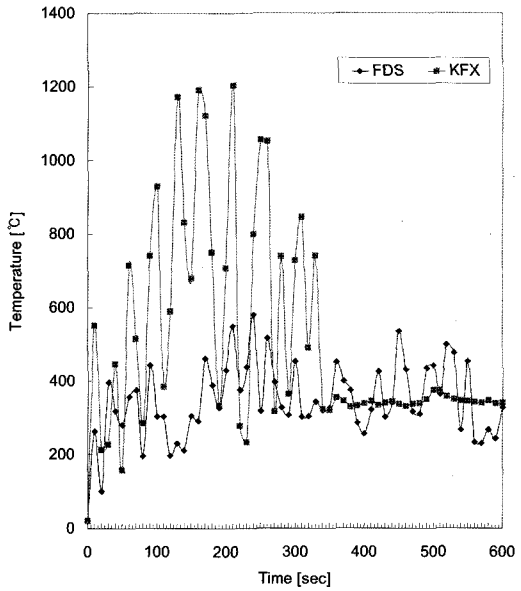

Fig. 11 Simulation results of temperature in engine room

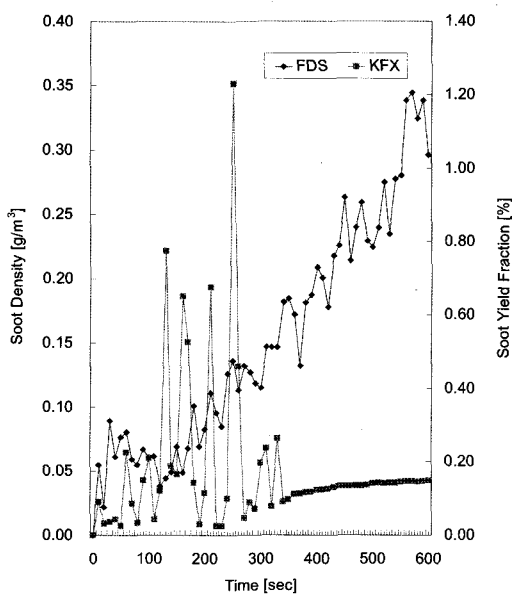

Fig. 12 Simulation results of soot concentration in engine room

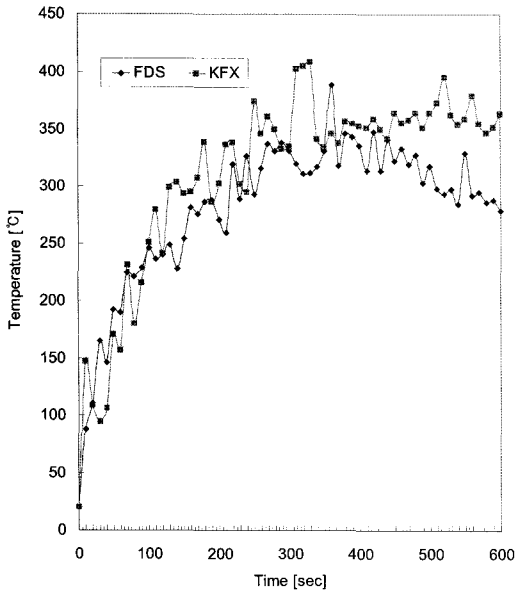

Fig. 13 Simulation results of temperature in engine opening

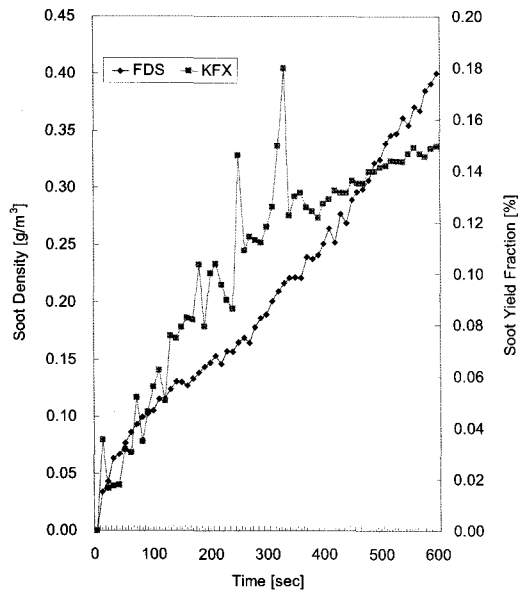

Fig. 14 Simulation results of soot concentration in engine opening

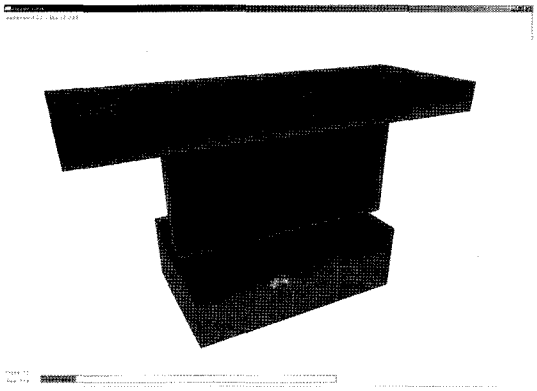

Fig. 15 3D view of fire plume and soot by smokeview

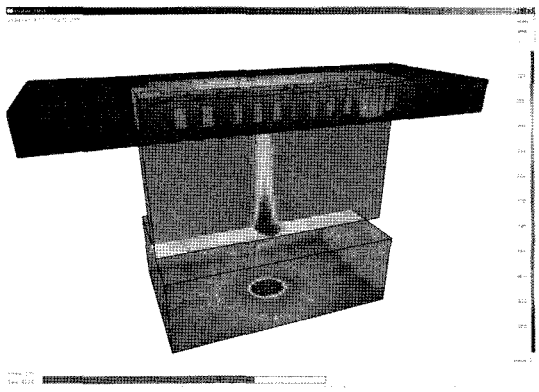

Fig. 16 3D contour view of wall surface temperature by smokeview

6. 결론

본 연구는 존 모델과 필드 모델을 이용한 화재 시뮬레이션 도구의 선박 적용 가능성을 검토해 보기 위한 것으로 선박의 기관실 화재에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 현재 개발된 화재 시뮬레이션 도구들은 육상용으로 개발되었기 때문에 실제 선박 화재에 적용하기 위해서는 선박에 사용되는 재료와 연료에 대한 화재 특성 데이터베이스의 구축이 필요하다.

2) 존 모델은 짧은 계산 시간으로 화재의 특성을 보여주기 때문에 필드 모델에 비해 정확도는 상대적으로 낮으나 초기 설계 단계에서의 설계 검증 등에 활용 가능하다.

3) 필드 모델의 경우 비교적 많은 계산 시간이 요구되지만 상대적으로 정확하고 세밀한 결과를 얻을 수 있으며, 결과 가시화가 가능해 정량적 평가뿐 아니라 정성적 평가도 가능하다.

4) 본 논문에서 사용한 시뮬레이션 도구들은 직육면체의 구획만을 정의할 수 있기 때문에 선박의 Hull부와 같은 굴곡부를 정의하기 위해서는 등가체적법이나 계단형으로 근사화하는 방법을 적절히 활용해야 한다.

5) BRI의 경우 외부 환기에 대한 정의가 반드시 필요하기 때문에 선박의 밀폐 구획을 정의하기에 부적합하며, 거주구 등의 육상과 환경이 유사한 일부 구획에 적용 가능할 것으로 본다.

6) 화재 시뮬레이션은 화재 안전성을 정량적으로 평가할 수 있는 도구로 활용될 수 있으며, 화재로 인해 발생하는 온도 상승, 연기 및 유독 가스 발생량 등을 분석하여, 화재 안전 대책 수립에 필요한 지침을 제시할 수 있다.

후 기

본 논문은 한국해양연구원의 기본연구 사업인 "선박 화재 시뮬레이션 기술 기초 연구" 연구 결과의 일부분임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 김성찬, 유홍선, 2004, "Ro/Ro 여객선 차량갑판의 화재 특성에 관한 수치해석 연구," 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 5호, pp. 48-54.
- 이동곤 등, 2004, "선박 화재안전을 위한 방화 설비 등 기초기술 조사연구를 위한 기획 연구," 해양수산연구개발사업 연구보고서, 한국해양연구원.
- 이정훈, 이재옥, 양영순, 2001, "선박의 화재안전도에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제1호, pp. 116-122.
- 최진, 이종갑, 이동곤, 이순섭, 2006, "화재 시뮬레이션 기술의 선박 적용에 관한 연구," 제25회 선박설계연구발표회, pp. 493-507.
- Jason E.F., 2002, "Comparison of CFAST and FDS for Fire Simulation with the HDR T51 and T52 Tests," Fire Research Division of Building and Fire Research Laboratory.
- Kelvin McGrattan, 2005, "Fire Dynamics Simulator(Version 4) Technical Reference Guide," Fire Research Division of Building and Fire Research Laboratory, VTT Building and Transport.
- Richard, D.P,, Walter, W.J. and Glenn, P.F., 2005, "CFAST-Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport(Version 5) User's Guide," Fire Research Division of Building and Fire Research Laboratory.
- Tanaka, T. and Yamada, S., 2004, "BRI2002: Two Layer Zone Smoke Transport Model," International Journal for Fire Science and Technology, Vol. 23, No. 1(Special Issue).
- Vembe, B.E., Rian, K.E., Holen, J.K., Lilleheie, N.I., Grimsmo, B. and Myhrvold, T., 2001, "Kameleon FireEx 2000 Theory Manual," Computational Industry Technologies AS.

<최 진>

<이 동 곤>

<박 범 진>