

Ro/Ro 여객선 차량갑판의 화재 특성에 관한 수치해석 연구

김성찬*, 유홍선†**

중앙대학교 미래신기술연구소*
중앙대학교 기계공학부**

A Numerical Study of Fire Development Characteristics on a Ro/Ro Ferry Vehicle Deck.

Sung Chan Kim* and Hong Sun Ryou†**

Frontier Technology Innovation Centre, Chung Ang University*
School of Mechanical Engineering, Chung Ang University**

Abstract

The present study investigates the fire development characteristics on a Ro-Ro ferry vehicle using the modified FDS code considering droplet break-up. Numerical simulations are compared with model-scale tests for validation of field model. The predicted results such as smoke layer temperature and oxygen concentration are in good agreement with model-scale tests. Also, it is shown that water spray systems are very effective to control the fire development on a vehicle deck. These numerical simulations using a field model may be helpful in accomplishing the fire safety for marine vehicle.

※Keywords: Fire development (화재성장), Numerical simulation(수치해석), Ship fire (선박화재), Model scale test (모형실험)

1. 서론

최근 5년간의 통계청 자료에 의하면 해양사고 중 약 8.2%정도가 화재 및 폭발에 기인한 것으로 이는 가장 빈번한 해양사고 사례인 기관고장의 약 1/3수준이며 좌초 발생건수와 유사한 수준을 보이

고 있다. 특히 선박화재 사고의 경우 다른 해양 사고에 비해 인명 피해의 발생 확률이 매우 높을 뿐만 아니라 육상으로부터 화재 진압을 위한 지원을 받는데 어려움이 있기 때문에 엄청난 인명과 재산 손실을 초래하게 된다. 일반적으로 선박의 화재사고의 절반 정도가 기관실에서 발생된 것으로 보고 되고 있으나 화물구역과 거주구역에서도 상대적으로 빈번한 화재 발생 건수를 보이고 있다. 이와 함께 차량을 운반하는 선박의 경우 개방된 단일 갑판 상에 다수의 차량이 밀집되어 있으

접수일: 2004년 5월 31일, 승인일: 2004년 7월 3일

+ 주저자, E-mail: cfdmec@cau.ac.kr

Tel: +82-2-820-5280

며 차량 자체가 다량의 가연물을 포함하고 있기 때문에 화재 발생의 위험도가 매우 높다. 이러한 이유로 IMO의 SOLAS(2001) 규약과 HSC 코드에서는 여객선의 차량 갑판에 대한 화재감지, 소화, 배연 시스템에 대한 화재안전의 기준을 요구하고 있다. 그러나 아직 국내외적으로 선박화재에 대한 이해가 부족한 실정이며 선박마다 공간적인 특성이 다르기 때문에 선박 화재 안전도를 향상시키기 위해서는 체계적인 연구를 통한 화재 안전 기준 설정과 설비구축에 많은 노력이 이루어져야 한다.

화재 발생으로 인한 공간내부의 열 및 물질전달 특성을 파악하기 위해서는 실제 규모의 실험을 하는 것이 가장 좋은 방법이지만 경제적 비용과 공간상의 제약, 화재발생의 위험성을 감수해야 한다. 이러한 이유로 화재 거동 해석에 수치 해석적 방법이 널리 이용되고 있는데 대표적으로 Zone 모델과 Field 모델이 있다. Zone 모델은 화재부를 상부 뜨거운 연층부와 하부 차가운 공기층으로 나누어 각층내의 온도나 농도 등의 기계적 성질이 균일하다고 가정하여 해석함으로써 각층에 대한 평균적인 자료를 제공한다 (Peacock et al. 1993, Reneke et al. 2001, Cooper 1995). 한편 Field 모델은 화재 공간을 미소격자들로 형성하여 유동장을 지배하고 있는 보존방정식들을 경계조건을 통하여 직접 해석함으로써 화재공간에 대한 보다 상세한 자료를 제공한다 (McGrattan et al. 1998, Galea et al. 2001). 그러나 화재현상은 연소, 열 및 물질전달, 유체유동 등 복잡한 물리적 현상을 해석해야 하기 때문에 수치해석의 결과와 실험결과의 상호비교 분석을 통하여 수치해석의 타당성을 검증하는 것이 무엇보다 중요하다. 그러나 아직도 선박화재에 대한 실험결과가 부족한 현실이고 수치해석을 통한 화재 거동 해석의 정확성을 평가하는 데에 어려움이 있다. 선박의 경우 실제 규모의 화재 실험이 매우 힘들기 때문에 모형실험에 의한 접근이 이루어지고 있지만 모형 화재 실험의 경우도 축소과정에서 발생하는 물리적 특성의 차이로 인하여 수치해석과의 상호비교 분석을 통하여 타당성을 확보하고 있다.

따라서 본 연구에서는 스웨덴의 SP 연구소에서 실행된 Ro-Ro 여객선의 차량갑판 화재에 대한 축

소모형 실험의 결과를 바탕으로 공간내 화재성장과 물분무 시스템 작동시 화재 성장에 미치는 영향을 널리 이용되고 있는 화재 해석 프로그램인 FDS 코드를 이용하여 해석하고자 한다. 그러나 기존의 FDS코드의 경우 분무거동에 대한 액적의 분열현상을 포함하고 있지 않기 때문에 모형실험과 같이 소규모의 실험에서는 이러한 액적분열이 중요한 물리적 변수가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 액적 분열 모델을 추가한 수정된 FDS코드를 이용하여 수치해석 결과와 실험결과를 상호 비교 분석하고자 한다 (Larsson et al. 2002). 또한 수치해석을 통해 얻은 국부적인 자료를 분석하여 차량 갑판내의 화재 거동특성을 이해하고 실험결과와 수치결과를 비교 분석하여 선박화재에 대한 모형실험과 수치해석의 타당성을 확보하고 이를 바탕으로 선박의 화재 안전 기준 및 화재 방지 시스템 설계에 대한 기본적인 자료를 제공한다.

2. 수치해석 모델

수치해석의 대상영역은 실제규모의 화재공간을 1/8수준으로 축소된 크기로서 SP에서 수행된 축소 실험과 동일한 기하학적 형상을 가진 가로 11.425m, 세로 2.786m, 높이 0.625m 로서 화재공간의 개략적인 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. 모형실험에 대한 상세한 내용은 SP Report(Larsson et al. 2002)에 상세히 보고 되고 있다. 화재 발생으로 인한 열 및 연기거동을 해석하기 위하여 이용된 수치해석 프로그램은 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발된 Field 모델인 FDS(Fire Dynamics Simulator) 3.10을 이용하였다. FDS 3.10은 LES(Large Eddy Simulation)/DNS(Direct Numerical Simulation)에 의해 난류유동의 해석이 가능하지만 DNS의 경우 지나치게 많은 격자수를 요구하고 연소모델이 제한적이기 때문에 본 연구에서는 실제 공학적인 문제에 적용 범위가 상대적으로 폭 넓은 LES난류 모델을 적용하였다. 연소모델은 혼합분율모델(mixture fraction combustion model)을 적용하였으며 복사열전달 방정식은 FVM법(Finite Volume Method)에 의해 해석하였다. 화재를 억제하기 위

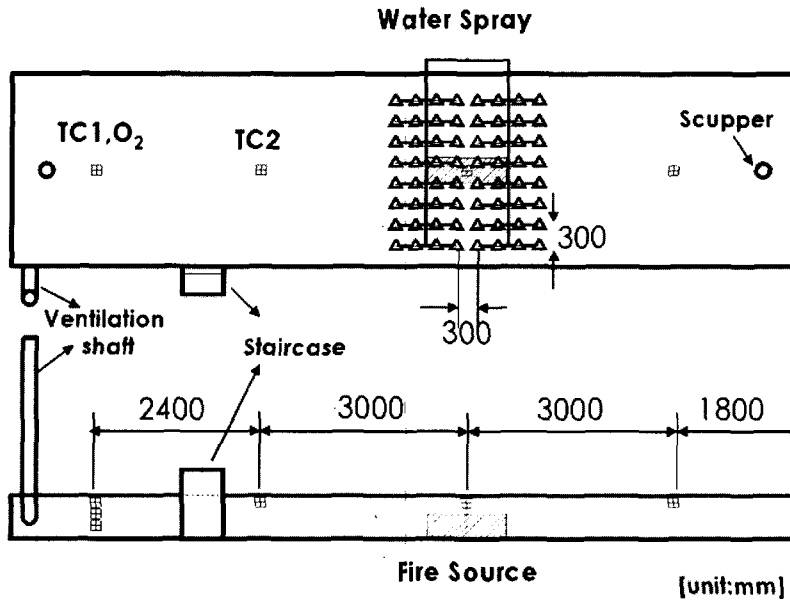


Fig. 1 A Schematic view of the scaled fire compartment

해 적용된 물분무의 거동을 해석하기 위하여 Eulerian - Lagrangian법에 의해 기상과 분무 액적(물 입자)과의 유동을 해석하였으며 분무액적의 거동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}(m_d \mathbf{u}_d) = m_d g - \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}) |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| \quad (1)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 1 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & 1 < Re < 1000 \\ 0.44 & 1000 < Re \end{cases} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| D_d}{\mu_g} \quad (3)$$

여기서, m_d 는 액적(Droplet)의 질량, \mathbf{u}_d 는 액적의 속도, \mathbf{u} 는 기상(Gas phase)의 속도, g 는 중력가 속도, r_d 액적의 반경, Re 는 레이놀즈수를 각각 나타낸다.

일반적으로 물분무 시스템의 경우 액적이 분사된 후 기상의 저항으로 인하여 2차적인 액적 분열 현상 (droplet break up)이 발생하게 된다. 그러나 기존의 FDS코드에서는 이러한 현상을 고려하지 못하고 증발에 의한 액적크기의 변화만을 고려하고 있다. 특히 모형실험과 같이 미소규모의 화재-분무 유동장에 대해서는 이러한 액적 거동의 물리적인 현상이 상대적으로 중요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Reitz 와 Diwakar 등이 제시한 모델에 의해 분무액적의 2차 분열(secondary break-up)을 기존의 FDS코드에 적용하여 FDS코드를 수정하였다. Reitz and Diwakar 모델에서는 두 가지 액적 분열 영역에 대하여 다음과 같이 고려하고 있다.

$$We = \frac{\rho_d \mathbf{u}_d (D_d/2)}{2\sigma} > 6.0, \text{ bag break-up}$$

$$\frac{We}{\sqrt{Re}} > 0.5, \text{ stripping break-up} \quad (4)$$

여기서 We 는 웨버수(Weber No.), σ 는 표면장력, ρ_d 는 액적의 밀도, D_d 는 액적의 직경을 나타낸다.

액적의 상태가 위의 조건을 만족할 때 액적은 불안정한 상태가 되고 액적의 수명($t_{b(s)}$)은 각각 다음과 같다.

$$t_b = C_b \left(\frac{\rho_d D_d^3}{\sigma} \right)^{1/2}, \text{ bag break-up}$$

$$t_s = C_b \frac{D_d}{u_r} \left(\frac{\rho_d}{\rho_g} \right)^{1/2}, \text{ stripping break-up} \quad (5)$$

여기서 u_r 은 기상과 액상의 상대속도차, C_b 는 경험상수로써 10을 적용하였다. 따라서 불안정한 액적의 크기는 다음과 같은 식에 의해 결정된다.

$$\frac{dD_d}{dt} = - \frac{D_d - D_{stable}}{t_{b(s)}} \quad (6)$$

모형실험에 이용된 분무 노즐은 Lechler 212노즐로써 노즐의 주요 특성은 Table 1과 같다.

수치해석은 환기구(Ventilation shaft)와 배수구가 개방된 상태에서 화재의 성장만을 고려한 단독화재의 경우(Case 1)와 물분무 시스템이 작동된 경우(Case 2)에 대하여 각각 수행되었다. 수치해석에 이용된 격자는 약 640,000여개이며 계산시간은 화재 성장만을 고려한 경우에 대하여 화재 발생 후 360초까지 계산하는데 Pentium-IV 2.4GHz를 이용하여 약 40시간이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 시간에 따라 모형실험을 통해 측정된 발열량 과 이 값을 수치해석에 적용하여 공간 및 배기조건을 고려하여 계산된 발열량을 나타내고 있다. 최대 발열은 화재 발생 후 약 3분 이후 180 kW 정도를 나타냈으며 이후 연소물질의 감소 및

Table 1 Specifications of tested nozzle

Orifice Diameter	700 μm
SMD	360 μm
Operating Pressure	2~20 bar
K-factor	0.12
Spray angle	80°
Spray pattern	Hollow cone

공간내부의 산소농도 감소 등으로 인하여 발열량은 지속적인 감소 추세를 보이고 있다.

Fig. 3은 단독화재에 대하여 화원에서 3 m 떨어진 위치에서의 시간에 따른 연층부의 온도변화를 나타내고 있다. 연층부의 온도는 화재 발생이후 최대발열량을 나타내는 180초까지 꾸준한 증가 추세를 보이다가 발열량 감소로 인하여 연층부의 온도 또한 지속적으로 감소하게 된다. 수치해석의 결과는 실험 결과를 잘 예측하고 있으나 최대 발열이 발생하는 시간대에는 약 30°C 정도 상향예측하고 있다. 이는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 상대적으로 큰 발열구간에서 연소모델의 불확실성으로 인하여 수치해석에서 계산된 발열량이 약 20 kW

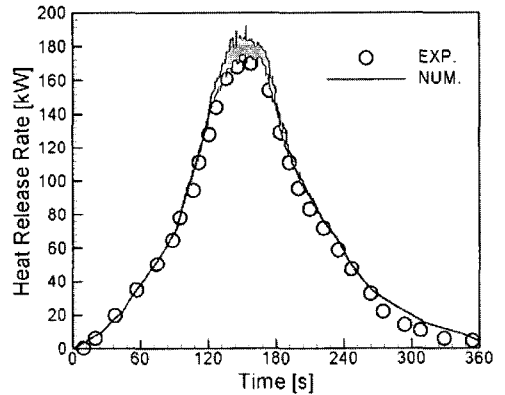


Fig. 2 Comparison between measured heat release rate and numerical simulation.

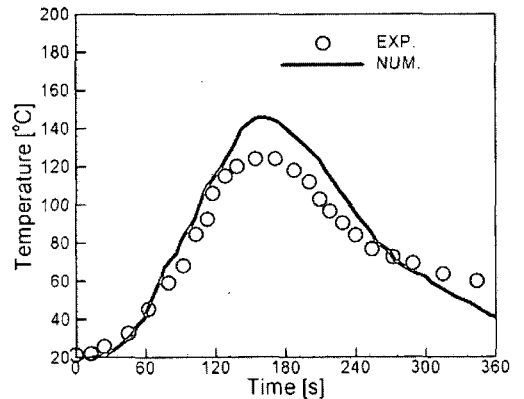


Fig. 3 The smoke temperature at TC2 position for the case 1.

영향이 온도장을 해석하는데 적용되어 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 전체적으로 수치해석결과는 실험의 경향을 잘 따르고 있다. Fig 4는 화원에서 5.4m, 천정하 15cm 위치에서의 시간에 따른 산소농도 변화를 나타내고 있다. 화재 발생이후 화원의 발열량이 증가함에 따라 소모되는 산소량의 증가로 인하여 공간내부의 산소농도는 감소하게 되고 이후 최대발열량을 나타낸 180 s 에서 산소농도는 최소값을 나타내게 된다. 이후 발열량 감소로 인하여 소모되는 산소의 양은 감소하게 되고 환기구와 배수구 등으로 지속적인 공기 유입으로 인하여 공간내부의 산소량은 다시 증가하게 된다. 360 s 이후의 실험결과는 수치결과와 마찬가지로

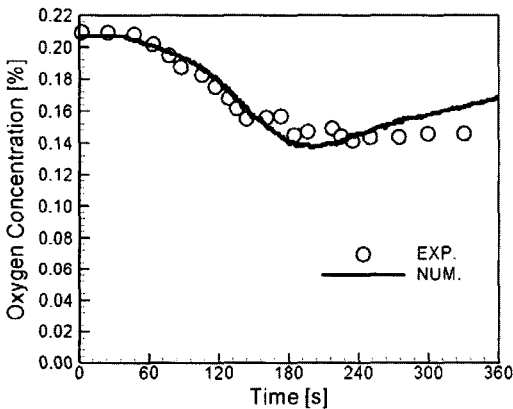


Fig. 4 The oxygen concentration at O2 position for the case 1.

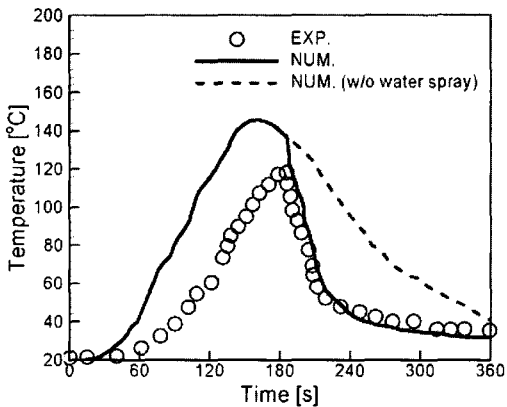


Fig. 5 The smoke temperature at TC2 position for the case 2.

지속적인 산소농도의 증가를 보여준다. 결과적으로 FDS 코드는 화재 성장구간에 대하여 산소농도를 잘 예측하고 있으며 특히 공간내부의 화재발생으로 인한 산소농도 감소와 외부공기 유입으로 인한 산소농도 증가를 잘 예측하고 있음을 보여준다.

Fig. 5는 TC2위치에서의 물분무 시스템 작동시 시간에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 초기 화재 발생과 함께 물분무 시스템이 작동되는 180 s 까지는 지속적으로 연층의 온도가 상승하게 되지만 물분무 시스템이 작동하는 180 s 이후의 온도분포는 급격한 감소를 나타내고 있다. 물분무 작동으로 인한 연층의 냉각은 물분무 시스템 작동 직후의 급속 냉각 구간과 이후 점진 냉각구간으로 구분되고 있다. 이를 물분무 시스템이 작동되지 않은 경우와 비교해보면 연층의 온도감소에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. FDS 코드의 결과는 초기 화원의 성장에 대하여 실험의 결과를 다소 상향 예측하고 있으나 물분무가 작동된 이후의 온도분포는 상대적으로 잘 예측하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6은 case 2에 대하여 천정부 단면에서의 시간에 따른 온도분포의 변화를 나타내고 있다. Fig. 6 (a)는 화재 발생 후 60 s 경과후의 온도분포로써 화원에서 상승한 부력 플럼이 천정과 충돌하여 천정제트를 형성하고 있음을 보여준다. Fig. 6 (b)는 물분무 시스템이 작동하기 직전인 180 s 의 온도분포를 보여주고 있다. 그림과 같이 화원에서 발생된 부력 플럼이 충돌하는 위치에서는 500°C 이상의 고온을 보여주고 있다. 이러한 상태가 지속되고 가연성 물질이 천정부에 존재할 경우 초기 화재가 전파되어 전실화재(Flash over)로의 전이가 이루어진다. Fig. 6 (c) 는 물분무 시스템 작동 후 60 s 경과한 후의 온도장을 보여주는 것으로 천정부의 대부분 영역에서 100°C 이하의 온도분포를 나타내고 있으며 화원의 상부에서도 200 °C를 넘지 않고 있다. Fig. 6 (d)는 물분무 시스템 작동 120 s 경과후의 온도분포로써 전체 천정부에 걸쳐서 100 °C이하로 화재가 제어되었음을 보여주고 있다.

Fig. 7은 화재 발생이후 180 s 의 화재공간 단면에서의 속도분포를 나타내고 있다. 화재 공간의 아래쪽에서는 상대적으로 차가운 주위 공기가 화원으로 유입되어 하층부(Lower layer)를 형성하고

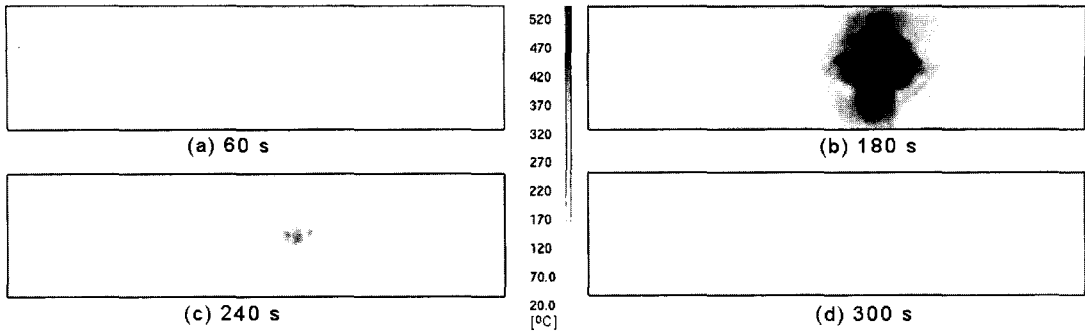


Fig. 6 Temperature field for case 2.

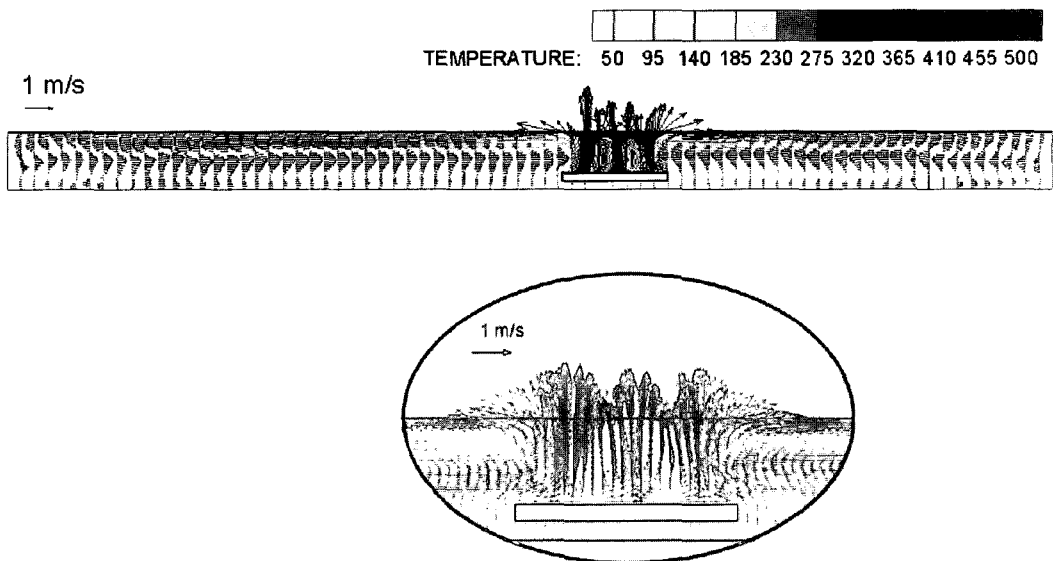


Fig. 7 Velocity field at 180s after fire ignition.

있으며 유입된 공기는 화원에서 발생한 부력 플럼과 함께 상승한다. 상승한 부력 플럼은 천정과 충돌하여 천정제트(Ceiling jet)를 형성하고 이러한 천정제트는 수직 벽에 도달할 때까지 천정을 따라 수평적인 연기 전파가 이루어지며 상부 연층부(Upper layer)를 형성하고 있다. 따라서 FDS 코드는 모형 규모에 대해서도 전체적인 화재 유동장을 잘 모사하고 있는 것으로 파악된다.

4. 결론

본 연구에서는 선박의 차량갑판에서의 화재 특

성과 물분무 시스템에 의한 화재 제어특성을 수치 해석을 통하여 파악하였으며 이를 기존의 모형실험결과와 비교하여 FDS 코드의 타당성을 검증하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. FDS 코드는 연층부 온도 및 산소농도등 공간내 화재특성에 대하여 모형실험의 결과를 잘 예측하였다.
2. 물분무 시스템이 작동하는 경우 연층부의 급격한 냉각효과를 통하여 화재를 적절히 제어하는 것

으로 나타났으며 이는 선박내부에 화재 발생의 위험이 있는 공간에 대하여 물분무 시스템이 적용될 경우 초기 화재를 진압하고 전실화재로의 전파를 막는데 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

3. 모형실험과 수치해석 결과의 상호 비교 분석함으로써 화재 유동장에 대한 두 가지 방법이 타당성을 가지는 것으로 나타났으며 향후에도 이러한 화재 현상의 비교 분석을 통하여 수치해석과 모형실험의 상호 신뢰성을 확보하여야 할 것으로 생각된다.

4. FDS코드는 기존의 육상 건축물 내부의 화재 전파를 예측하는데 주로 이용되어 왔으나 해상 구조물에 대해서도 적용이 가능하고 특히 모형실험의 열 및 분무유동장을 비교적 잘 예측하였다. 그러나 FDS코드를 이용하여 정확한 화재 특성을 예측하기 위해서는 화재 및 분무거동에 대한 다양한 물리적 모델에 대한 지속적인 보완 및 실험결과와의 상호 비교 분석을 통하여 신뢰도를 향상시켜야 하며 이러한 과정에 의해 선박내부의 화재 거동을 보다 정확하게 해석하고 선박의 화재 안전성을 확보하는데 기여할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 인위재해방재기술개발사업(M10113000012-01A2-90000600)지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Cooper, L.Y., 1995, "Interaction of an Isolated Sprinkler Spray and a Two-Layer Compartment Fire Environment," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No. 4, pp.679-690.

- Galea, E.R., Wang, Z., Jia, F., Patel, M.K. and Ewer, J., 2001, "Simulating one of the CIB W14 round robin rest rases Using the SMARTFIRE fire field model," Fire Safety Journal, Vol. 36, No. 7, pp. 661-677.
- Larsson, I., Ingason, H. and Arvidson, M., 2002, "Model Scale Fire Tests on a Vehicle Deck on Board a Ship," Swedish National Testing and Research Institute, SP Fire Technology, SP Report 2002:05.
- MacGrattan, K.B., Baum, H.R. and Rehm, R.G., 1998, "Large Eddy Simulation of Smoke Movement," Fire Safety Journal, Vol. 30, No. 2, pp.161-178.
- Peacock, R.D., Jones, W.W. and Bukowski, R.D., 1993, "Verification of a Model of Fire and Smoke Transport," Fire Safety Journal, Vol. 21, No. 2, pp. 89-129.
- Reneke, P.A., Peatross, M.J., Jones, W.W., Beyler, C.L. and Richards, R., 2001, "Comparison of CFAST Predictions to USCG Real-Scale Fire Tests," Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 43-689.
- SOLAS, 2001, The International Convention for Safety of Life at Sea, International Maritime Organization, London, England, Third Edition, 2001.



< 김 성 찬 >



< 유 홍 선 >