

선박 거주구역의 높이가 피난안전에 미치는 영향에 대한 연구

김원옥* · 김종수**†

* 부경대학교 대학원, ** 한국해양대학교 선박전자기계공학부

A Study on the Effects of an Increase in the Height of Ship's Accommodation Area on Safe Evacuation in Emergency Situation

Won-Ouk Kim* · Jong-Su Kim**†

* Graduate School of Pukyong National University, 608-737, Korean

** Devison of Mechatronics Engineering, Korea Maritime University, 606-791, Korean

요 약 : 선박화재는 육상화재와 달리 숙련된 인원과 다양한 장비에 의한 소화활동이 곤란하므로 거의 자체적으로 소화되어야 하므로 소화가 쉽지 않다. 화재발생시 온도 상승에 의한 사망보다 연기에 의해 질식사의 경우가 더 많다. 그 이유는 화재현장에서 충분한 가시거리를 확보하지 못하여 신속하게 피난하지 못하기 때문이다. 이 연구에서는 피난에 필요한 시간을 좀 더 확보하기 위해 선박 거주구역의 높이를 기존의 2.0m에서 공동주택(아파트)의 높이에 해당하는 2.3m로 상향하여 연기거동을 상호 비교하였다. 비교 방법은 기존의 실습선 한바다호의 도면을 바탕으로 30cm 상향조정된 도면을 추가 제작하여 미국의 NIST에서 제작·운용중인 FDS를 이용하여 시뮬레이션을 실시하고 결과를 예측하였다. 온도에 의한 피난 안전시간을 예측한 시뮬레이션 결과, 화재구역에서 10m 떨어진 지점에서 피난 안전시간은 55.8초 증가하였다. 가시거리에 의한 피난 안전시간을 예측한 시뮬레이션 결과, (1) 화재구역에서 10m 떨어진 지점에서 피난 안전시간은 27.1초 증가하였고, (2) 화재구역에서 20m 지점에서는 피난 안전시간이 109.2초 증가하였으며, (3) 화재구역에서 30m지점에서는 피난 안전시간이 73.3초 증가하였다. 즉, 선박의 거주구역 높이를 육상건축물과 동일하게 할 경우 승무원의 피난안전성이 증가하는 것으로 예측되었다.

핵심용어 : 선박화재, 연기, 가시거리, 거주구역 높이, FDS

Abstract : Unlike land fires, Fires on board a ship are not likely to be extinguished by skilled human resources using a variety of fire fighting equipments, but have to be brought under control on board a ship itself despite of difficult task. There are more cases of deaths from suffocation by smoke than from an increased temperature by heat in fires on board ships, because crew fail to secure a sufficient visibility range enough to escape from the scene of a fire or to leave the ship as early as possible. On the assumption that the height of ship's accommodation area increases from 2.0m to 2.3m comparable to the height of apartments on the ground in Korea, behaviors of fire smokes between the cases of 2.0m and 2.3m heights were compared and analyzed. Based on the blue print of the existing Training Ship "Hanbada", a new blueprint with the 30cm height adjustment was additionally created. FDS (Fire Dynamic Simulator), which was created by the NIST in the United States and is the most widely distributed simulator for fires, was used to conduct a simulation and predict results. The results of simulation on the basis of temperature of 60°C showed a safe evacuation period of time at the position 10m apart from the scene of a fire to increase by 55.8 seconds, when the height of ship's accommodation area increased from 2.0m to 2.3m. The results of simulation on the basis of visibility range of 6m showed the safe evacuation periods of time at the positions 10m, 20m and 30m apart from the scene of a fire to increase by 27.1 seconds, 109.2 seconds and 73.3 seconds, respectively, as the height of ship's accommodation area increased from 2.0m to 2.3m. This means that crew can escape more safely from a scene of fires on board when the height of ship's accommodation area is increased and equal to the height of living room in a building on land.

Key Words : Ship fire, Smoke, Visibility, Accommodation height, FDS

1. 서 론

우리나라는 수출입 물동량의 대부분을 해상교통 즉, 선박에 의해 운송하고 있다. 이런 양적인 증가는 국가경제에 이바지

하는 긍정적인 측면도 있지만 해양사고 증가와 같은 부정적인 측면이 증가하고 있다는 사실을 간과할 수 없다. 이런 선박에 의한 해양사고에는 충돌, 접촉, 좌초, 화재·폭발 등이 있다.

선박은 육상의 화재와 달리 외부로부터의 소방지원을 기대할 수 없어 선박자체의 소방자원으로 소화활동을 해야 하므로 소화에 한계가 있다. 특히, 선박화재의 특성상 성장이 빨라 대

* 대표저자 : 종신회원, kw072@hhu.ac.kr, 051-410-4762

† 교신저자 : 종신회원, jongskim@hhu.ac.kr, 051-410-4831

피시간이 부족하다. 그리고 대피를 완료한다하더라도 해상이라는 2차적 위험요소에 봉착하게 된다. 또한, 초대형 유조선이나 LNG선이 화재로 인해 폭발한다면 수치적으로 계산하기 힘든 국가에 큰 피해를 줄 수도 있어 선박화재의 진압은 아주 중요하다. 화재는 화염 자체에 의한 인명사고보다는 화재시 발생하는 독성가스에 의해 인명이 치명적인 손상을 입는데 이는 신속한 피난으로 줄일 수 있다.

이 연구에서는 다양한 해양사고 중 선박화재에 대해 고찰하기 위하여, 2005년 12월에 건조된 한국해양대학교 실습선 한바다호의 실습생 거주구역에 대한 화재를 가상하여 CFD(Computational Fluid Dynamics)기법을 이용함으로써 동일한 화재 발생 시 기존 선박 천정의 높이에 대한 연기거동과 변경된 천정 높이(공동주택의 일반적인 높이 2.3m)에 대한 연기거동의 비교 검토를 통하여 실습생 피난시간의 증가에 대해 분석하였다.

2. 연구 방법

이 연구에서는 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발하여 화재관련 분석에 전 세계에서 가장 많이 사용하는 프로그램 중에 하나인 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 사용하였다. 한바다호의 거주구역은 조선소에서 만들어진 도면을 이용하여 DXF 파일로 제작하고 FDS에서 요구하는 데이터 포맷으로 변환 후 FDS를 이용하여 실행시켰다. 적용 방법은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다(NIST, 2004).

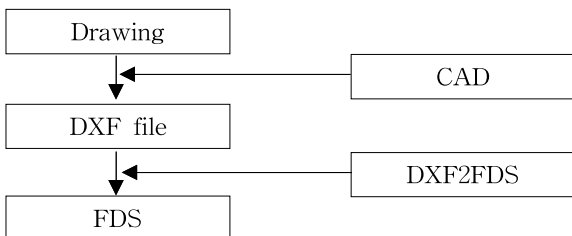


Fig. 1. Method of format conversion.

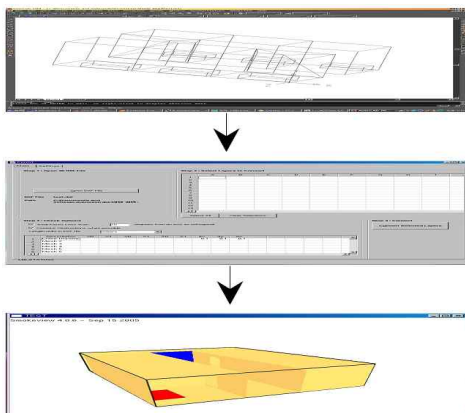


Fig. 2. Example of FDS format.

3. 선박화재 관련 규정

3.1 화재에 대한 규정 검토

화재에 관련된 규정은 우리나라의 경우 행정자치부고시 제 2004-6호 국가화재안전기준(NFSC : National Fire Safety Codes)에서 자세히 다루고 있으며 외국의 경우 미국의 방화협회(NFPA : National Fire Protection Association)가 화재예방과 안전을 목적으로 역할을 담당하고 있다.

3.2 선박화재에 대한 규정 검토

국내 소형어선 및 연안선을 제외하고는 선박은 그 특성상 국제항해에 종사한다. 그러므로 거의 모든 규정이 국제법을 따른다. IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)는 선박의 안전항해, 화물의 안전운송 및 해양오염방지 등 해사문제 전반에 대하여 다루는 조직이다.

이 중 해사안전위원회(MSC)의 방화 소위원회(FP)에서 선박의 화재제어에 대한 전반적인 내용을 다룬다. SOLAS 74 (International Convention for the Safety of Life At Sea) Chapter II-2 "Construction - fire Protection, fire detection and fire extinction"에서 선박의 방화, 화염탐지 및 소화에 대해 자세히 기술하고 있으며 전 세계의 거의 모든 선박화재에 관련한 법령들은 이 내용을 근간으로 하고 있다(한국선급과 해양수산부, 2006).

우리나라도 SOLAS규정을 근간으로 해양수산부고시 제2004년 61호, "선박소방설비기준", 한국선급의 선급 및 강선규칙 제8편 "방화구조 및 소방설비"를 적용하고 있다.

3.3 선박 거주구역 높이에 대한 규정 검토

선박에서 갖추어야 하는 각종 설비를 규정하여 정리한 해양수산부고시 "선박설비기준 제7조"에 의하면 2004년 10월 19일 이전은 거주공간의 높이는 1.8m 이상(원양항해 2.0m 이상)으로 규정하고 있으며 이후 인간의 신체변화를 고려하여 거주환경을 개선하기 위해 2.0m 이상으로 동일하게 적용하도록 개정 고시하였다. 외국의 경우 영국(Statutory Instrument 1508)은 1.98m 이상, 일본의 선박설비기준 및 선박설비규정은 우리나라와 동일하며 ILO협약에서는 1.9m 이상을 규정하고 있다. 이에 반해 공동주택(아파트)은 "주택건설기준등에 관한 규정" 제4조에 의하면 침실과 거실의 높이는 2.2m 이상으로 규정하고 있으며 최근 아파트는 높이가 상향조정되는 추세이며 일반적으로 2.3m 이상을 유지하고 있다.

4. 화재 시뮬레이션

4.1 FDS의 개요

FDS는 화재로 발생하는 유체의 흐름을 계산하는 CFD모델로서 지속도, 열적으로 발생하는 유동에 적절한 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석하여 화재로부터의 열과 연기의 유동

에 대해 중점적으로 검토하는 데 사용하는 프로그램이며 Navier-Stokes 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

여기서, u : 속도, f : 단위체적당 걸리는 외력, ρ : 밀도, p : 압력, ν : 압력

이 프로그램은 미국의 NIST에서 다양한 형태로 약 25년 동안 개발되어 2000년 이후 일반에 알려지게 되었다. Fig. 3은 FDS를 이용하여 화재 시뮬레이션을 실시하는 흐름도를 도식한 것이다(NIST, 2004).

FDS는 주로 두 가지에 사용이 되는데 첫째는 연기제어 및 스프링클러 동작에 대한 연구, 둘째는 주거용 및 산업용 화재에 적용된다. 이 연구에서는 선박화재에 대한 기초적 연구로 연기의 확산을 예측하고, 향후 이를 더욱 심도 있게 검토하여 화재제어 및 안전 피난 시간을 제시하고자 하였다.

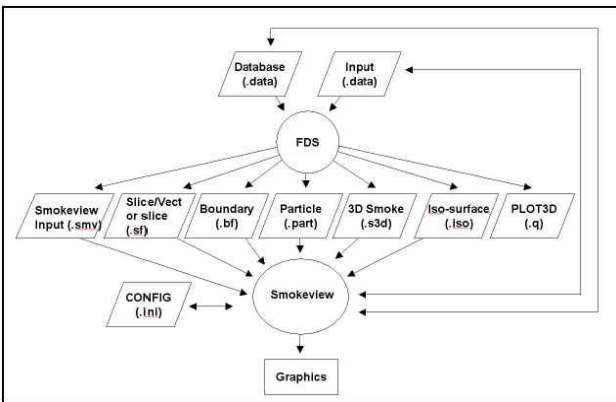


Fig. 3. Diagram illustrating data files and program used in the NIST Fire Dynamics Simulator.

4.2 모델 제작 및 시뮬레이션 조건

한바다호의 도면을 AutoCAD를 이용하여 제작한다. FDS를 사용하여 시뮬레이션을 하기 위해서는 DXF 파일로 화재구역을 제작해야 하므로 AutoCAD를 이용하여 DXF 파일로 변환한 후 3차원 파일로 제작한다. 변환된 파일을 DXF2FDS 프로그램을 이용하여 FDS에서 원하는 파일로 변환한다.

FDS를 이용하여 시뮬레이션을 실시하기 위해서는 화재공간의 재질, 화재의 크기, 유입공기의 속도 및 화재장소 등과 같은 다양한 조건과 변수가 필요하다.

4.3 시뮬레이션 수행

1) 데이터베이스 제작

이 연구에서는 한바다호의 설계도면을 DXF파일로 변환한 후 DXF2FDS를 이용하여 FDS에 필요한 프로그래밍을 실시

하였다. Fig. 4는 한바다호의 설계도면(위)뿐만 아니라 이 도면을 이용하여 제작한 3차원 형상(아래)을 나타낸 것이다.

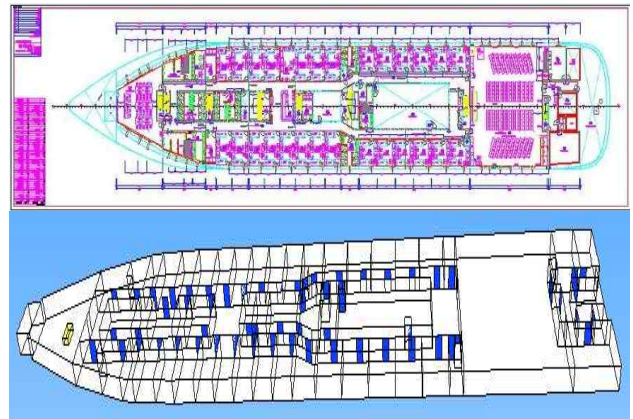


Fig. 4. 3-D shapes of T/S "Hanbada" by Drawing.

2) 시뮬레이션 개요

이 시뮬레이션에서는 실습생 구역의 컴퓨터실을 대상으로 하였다. 화재 시 온도 및 연기농도를 이용한 가시거리 측정은 피난통로로 이용하게 될 좌·우현 통로의 중심에 화재로부터 약 10m, 20m, 30m 후방으로 하였다. 그리고 측정 높이는 학생들의 호흡 위치를 가정하여 바닥에서 1.5m로 하였다(Fig. 5).

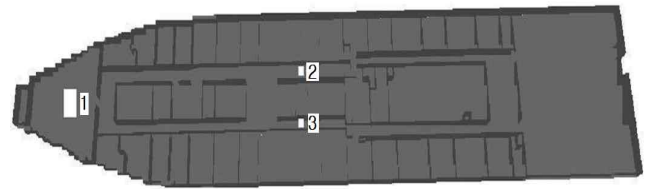


Fig. 5. Fire position(1) & check points (2 & 3) on board T/S "Hanbada".

3) 화재 시뮬레이션

선박의 경우 SOLAS II-2의 FTP Code에서 화재시험조건을 점화용 불꽃이 있을 경우 50 kW/m²에서 10분간 실시하도록 되어있는 조항을 감안하여 이 시뮬레이션에서는 약 10분간, 목재에 50 kW/m²의 화원에 대하여 분석하였다(한국선급과 해양수산부, 2006).

이 시뮬레이션을 위한 계산 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Calculation conditions for simulation

Simulation time	600 sec
Scale of a fire	50 kW
Size of a fire	1m × 1m
Flammable material	Wood
Temperature indoors	20 °C

그리고 이 시뮬레이션에서는 연기의 흐름 및 확산을 3차원 그래픽으로 확인함과 동시에 온도의 변화와 연기농도를 검토한다. 이를 이용하여 대피한계 온도 및 가시거리를 파악한다. 대피공간의 온도는 60°C를 초과하지 않아야 하며 가시거리는 출입문, 벽, 계단 등 스스로 발광하지 않는 반사체는 약 6m에서 식별 가능한 조건을 만족하도록 규정하고 있다(이와 유, 2003). 온도 측정방법은 FPA방법을 사용하며 식(2)와 같다(한국원자력기술원, 2008).

$$\frac{\Delta T_g}{T_a} = 0.63 \left(\frac{\dot{Q}}{m \cdot C_p T_a} \right)^{0.72} \left(\frac{h_k A_T}{m \cdot C_p} \right)^{-0.36} \quad (2)$$

ΔT_g : 고온 기체층 온도상승 (Tg-Ta) [K]

T_a : 주위온도 [K]

\dot{Q} : 화재의 열방출율 [kW]

m : 강제환기 유량 [kg/s]

C_p : 비열 [kJ/kg K]

h_k : 열전달 계수 [kW/m²]

A_T : 공간내의 총 면적 [m²]

온도는 Table 2에서와 같이 화원에서 10m 떨어진 지점에서 60°C에 도달하는 시간은 천정의 높이를 30cm 증가하였을 때 55.8초가 더 소요되는 것으로 분석되어 온도에 의한 실습생 피난 안전시간은 증가하는 것으로 판단된다(Fig. 6).

Table 2. Time(sec) to reach a temperature of 60°C

Check point \ Height	Existing rule	30 cm height adjustment
10 m from fire place	40.8 sec	96.6 sec
20 m from fire place	More than 600 sec	More than 600 sec
30 m from fire place	More than 600 sec	More than 600 sec

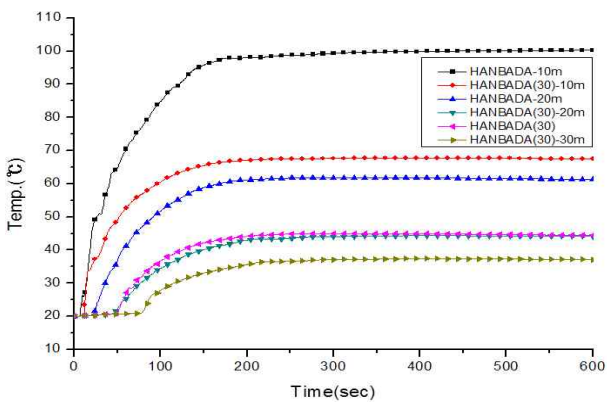


Fig. 6. Relation between temperature and time(sec) depending on the distance from a fire and the height of accommodation area.

가시거리의 경우 가시도를 평가하기에 가장 유용한 특성 값은 소광계수(Light Extinction Coefficient), K이다.

소광계수, K는 연기입자의 밀도(ρY_s)와 연료와 관련된 비흡광계수(K_m)로부터 식(3)을 통해 구할 수 있다.

$$K = K_m \rho Y_s \quad (3)$$

연기를 투과하는 가시도는 식(4)를 이용하여 추정할 수 있다.

$$S = C / K \quad (4)$$

여기서 K_m 은 비흡광계수(7.6 m²/kg)이며, C는 상수로서 연기의 종류 및 상황에 따라 달리 적용된다. 선박의 경우 형광성분의 스티커용 비상표지판을 사용하기 때문에 반사체에 대한 상수 3을 적용하였다.

화재 발생 시 인명사고는 온도상승에 의한 것보다 질식으로 인해 발생하는 경우가 높게 나타난다. 이는 연소 시 발생하는 연기로 인해 가시거리를 확보하지 못하여 신속한 피난이 불가능하기 때문에 발생한다. 이 연구에서는 기존의 거주구역 높이와 30cm 상향 조정된 높이를 상호 비교하여 연기농도를 측정하고 안전 피난 가능 가시거리까지 소요시간을 예측하였다. 측정 위치는 화재 발생구역에서 10m, 20m 및 30m 떨어진 지점의 바닥에서 1.5m 높이를 기준으로 하였으며 선박의 우현과 좌현은 그 값이 거의 비슷하므로 좌현만을 기준으로 하였다. 기존과 상향조정된 거주구역 높이에 대한 피난 가능 가시거리 6m까지 걸리는 시간은 Table 3과 같이 분석되었다.

Table 3. Time(sec) to reach the visibility range of 6m

Check point \ Height	Existing Rule	30 cm height adjustment
10 m from fire place	58.2 sec	85.3 sec
20 m from fire place	92.4 sec	201.6 sec
30 m from fire place	160.8 sec	234.1 sec

화재구역에서 10m 떨어진 지점은 27.1초 밖에 차이가 나지 않았지만 화재가 성장하는 시기인 20m 지점에서는 109.2초나 차이가 남을 알 수 있었다. 30m지점에서는 체적의 증가로 매연농도가 낮아져 초과시간이 길어짐을 알 수 있었으며 이 경우도 상향조정 시 73.3초가 증가하였다. 이 결과로 거주구역의 높이를 육상건축물과 동일하게 30cm 상향조정 시 상대적으로 안전 피난시간이 증가한다는 사실을 알 수 있었다. Fig. 7은 화재지점에서 기존의 상태에서 10m, 20m 및 30m 떨어졌을 경우와 높이를 30cm 상향 조정했을 경우의 가시거리 비교를 그래프로 표현한 것이다. 그리고 화재 시 가시거리는 급속하게 낮아짐을 알 수 있는데 이는 화재 시 신속한 소화 그리고 소화 불가 시에는 빠른 피난이 필요하다는 것을 나타낸다.

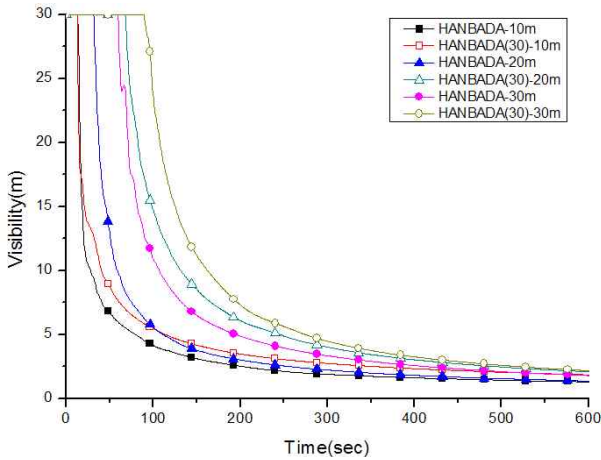


Fig. 7. Relation between visibility and time(sec) depending on the distance from a fire and the height of accommodation area.

5. 결론

여러 가지 조사에 의하면 화재발생시 연소 시 발생하는 각종 독성물질에 의해 질식사하는 경우가 많은 것으로 나타난다. 이는 가시거리 미확보로 신속한 피난을 하지 못해 발생한다. 일반적으로 매연으로 인해 가시거리가 제한되면 사람들은 패닉현상에 빠져 당황하게 되어 피난이 쉽지 않다. 그러므로 가시거리 즉, 6m이상의 시야가 확보된 상태에서 피난을 시도하여야 인명 안전을 가지고 올 수 있다. 이 연구에서는 동일한 화재 시 온도상승 감소와 매연농도를 감소시키기 위하여 공동주택(아파트)의 일반적인 높이인 2.3m를 선박에 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 기존의 선박 거주구역 높이와 상호 비교하여 피난시간이 정량적으로 얼마나 증가 되는지를 예측하였다. 그 결과 공동주택과 동일하게 30cm 상향 조정할 경우 안전한 피난을 위해 필요한 온도 60℃ 및 가시거리 6m 도달시간 추가 확보에 도움이 되는 것으로 나타났다.

1. 온도에 의한 피난 안전시간을 분석한 결과, 화재구역에서 10m 떨어진 지점에서 피난 안전시간은 55.8초 증가하였다.
2. 가시거리에 의한 피난 안전시간을 분석한 결과, (1) 화재구역에서 10m 떨어진 지점에서 피난 안전시간은 27.1초 증가하였고, (2) 화재구역에서 20m 지점에서는 피난 안전시간이 109.2초 증가하였으며, (3) 화재구역에서 30m지점에서는 피난 안전시간이 73.3초 증가하였다.

참 고 문 헌

- [1] 이동호, 유지오(2003), 지하철 화재시 본선터널 환기시스템에 따른 열 및 연기배출특성, 한국화재·소방학회, 제17

권, 제2호, pp. 62-69.

- [2] 한국원자력기술원(2008), 성능기반 화재위험도분석 방법론 및 평가체계 개발 - 화재모델링 평가 -, pp 19-20.
 [3] 한국선급, 해양수산부(2006), SOLAS -CONSOLIDATED EDITION 2006-, 해인출판사, pp. 359-661.
 [4] NFPA(2009), NFPA 101 Life Safety Code, <http://www.nfpa.org/>
 [5] NIST(2004), Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's, <http://fire.nist.gov/fds/>

원고접수일 : 2011년 01월 11일

원고수정일 : 2011년 02월 10일 (1차)

: 2011년 03월 17일 (2차)

게재확정일 : 2011년 03월 24일