

선박화재시 피난 안전성 연구

A Study on the Safety Evacuation of Onboard Fire

김원욱*, 김창제*, 채양범*

Won-Wook Kim^{*}, Chang-Je Kim^{*}, Yang-Beom Chae

요 약 문

선박화재는 육상과 달리 숙련된 인원과 다양한 장비에 의한 소화활동이 곤란하며 거의 자체적인 진화작업을 수행해야하므로 소화가 쉽지 않다. 화재는 일반적으로 화염에 의한 인명사고보다 매연에 의한 질식사의 확률이 높으므로 인명사고를 방지하기 위해서는 신속한 초기 진화가 가장 중요하다. 하지만 여러 가지 이유로 부득이 소화가 지연되거나 불가능할 경우에는 화재 구역으로부터 신속한 탈출만이 인명사고를 방지할 수 있다. 이 연구에서는 CFD기법을 이용한 시뮬레이션을 통하여 선박화재시 탈출에 지장이 되는 매연농도를 측정하고 피난시간과 비교하여 적절한 피난이 가능한지에 대한 안전성을 검토하고자 한다.

※ **핵심용어** : 선박화재, 피난시간, 피난로

1. 서 론

1.1 개 요

선박에 의한 해양사고에는 충돌, 접촉, 좌초, 화재·폭발 등이 있다. 이 연구에서는 다양한 해양사고 중 선박화재에 대해 고찰하고자 한다. 선박은 대부분의 경우 육상의 화재와 달리 외부로부터 소방활동을 기대할 수 없고 자력으로 화재

사고를 처리해야 하므로 소화에 한계가 있으며 이로 인해 화재가 대규모로 확산되어 인명과 선박의 손실을 가져오는 경우가 많다. 특히, 선박의 특성상 화재의 성장이 빠르고 대피시간이 부족하며 대피를 완료한다 하더라도 화재가 확산되지 않은 장소가 협소하고 대부분 해상으로 도피할 수밖에 없어 2차적 위험에 봉착하는 경우가 많다.

그러므로 선박에서는 강제화된 규정에 의하여 매월 소화 훈련과 소화실패시를 대비하여 신속한

* 한국해양대학교

† 논문주저자

탈출을 위한 퇴선훈련을 실시하고 있다. 이 연구에서는 화재의 성장에 따른 가시거리 예측과 연구자들에 의해 발표된 피난시간 예측식을 이용하여 피난안전성에 대해 소개하고자 한다.

1.2 연구방법

이 연구는 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 사용중인 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 사용하였으며 시뮬레이션을 위해 화재구역 도면을 DXF 파일로 제작하고 이 파일을 DXF2FDS를 이용하여 FDS에서 요구하는 데이터 포맷으로 변환하였다. 그 후 FDS를 이용하여 연구를 수행하였으며 적용 방법은 Fig. 1, 2와 같다(NIST, 2004).

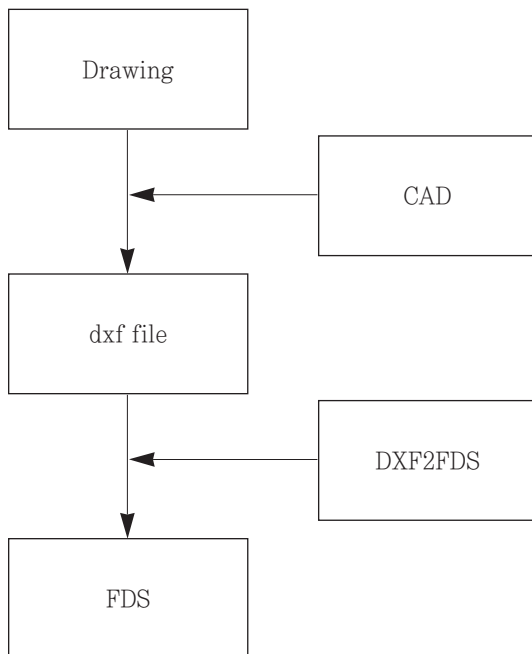


Fig. 1 Diagram of flow

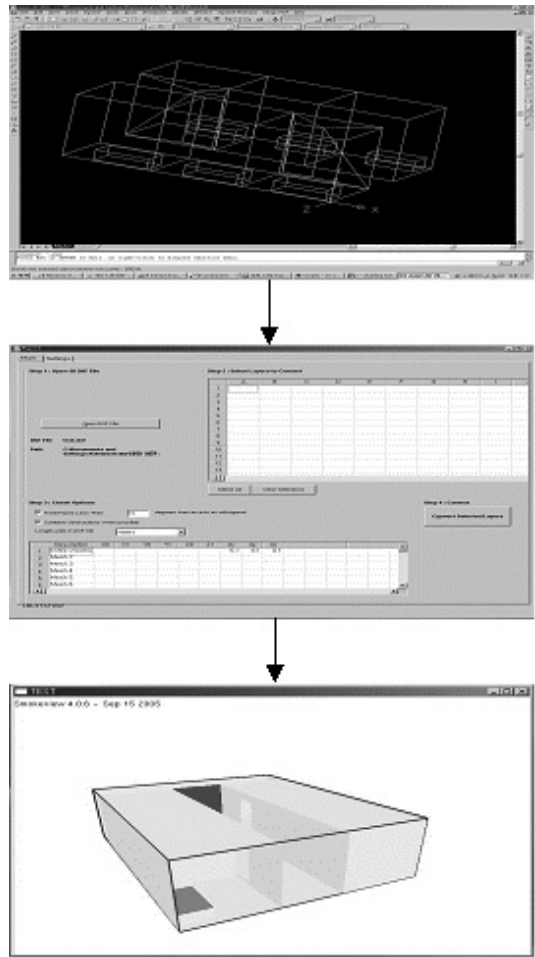


Fig. 2 Example of FDS format

2. 피난 관련규정

2.1 육상의 규정 검토

우리나라의 경우 건축법 시행령에 의하면 제34조의 “직통계단의 설치”, 제35조의 “피난계단의 설치”, 제36조의 “옥외피난 계단 설치” 등에서 피난에 관한 설비를 규정하고 있다. 외국의 경우 미국은 NFPA 101 Life Safety Code에서는 피난에 대해

“피난로, 피난로의 분리, 피난로의 구성요소, 피난로의 수용능력” 등을 규정하고 있다(국가법령정보센터, 2010). 일본은 2000년 건설성 고시의 피난 계산방법과 1985년에 발간된 신 건설방화설계지침에 피난에 관련하여 “피난 허용시간, 피난시간, 유동계수” 등을 규정하고 있다.

2.2 선박의 규정 검토

우리나라는 “선박방화구조기준”에 탈출통로 확보를 위한 내용을 규정하고 있다. 그리고 선박의 경우는 그 특성상 국제항해에 종사하기 때문에 국제규정을 따르게 된다. 그 규정은 SOLAS FSS Code 제13장의 “탈출수단 배치”에 여객선과 화물선을 구분하여 규정하고 있다. 이 중 화물선에 대해서는 계단과 복도에 대하여 “실제 통과 폭이 70cm 이상이어야 하며 그 한 쪽에 핸드레일이 부착되어야 한다”라고 규정되어 있다. 이러한 규정들은 승무원의 안전한 탈출에 필요한 시간을 충족시키기 위하여 설비기준을 정한 것이다.

3. CFD¹⁾를 이용한 화재분석

3.1 FDS 개요 및 특징

화재연구는 상·하층부의 온도 및 연기 하강 시간을 고려한 간단하고 쉽게 적용이 가능한 Zone Model 방식과 3차원 공간에서의 복잡하고 세분화된 해석이 가능한 Field Model 방식을 사용하고 있다. 이 연구에서는 정확한 화재연구를 위하여 Field Model인 NIST(National Institute

of Standards and Technology)에서 개발하여 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하였다.

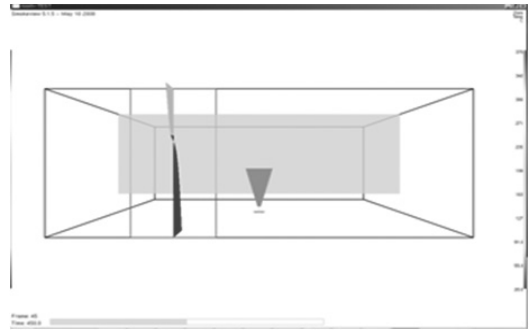


Fig. 3 Example of Zone Model

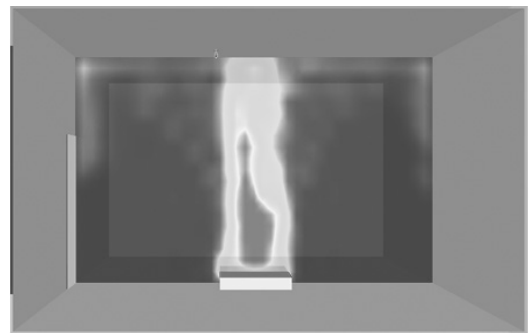


Fig. 4 Example of Field Model

FDS는 화재로 발생하는 유체의 흐름을 계산하는 CFD모델로서 저속도의, 열적으로 발생하는 유동에 적정한 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석하여 화재로부터의 열과 연기의 유동에 대해 중점적으로 검토하는데 사용하는 프로그램이다. 이 프로그램은 미국의 NIST에서 다양한 형태로 약 25년동안 개발되어 2000년 이후 일반에 알려지게 되었다. Fig 5는 FDS를 이용하여 화재시물레이션을 실시하는 흐름도를 도식한 것이다(NIST, 2004).

1) CFD(Computational fluid dynamics) : 전산 유체 역학

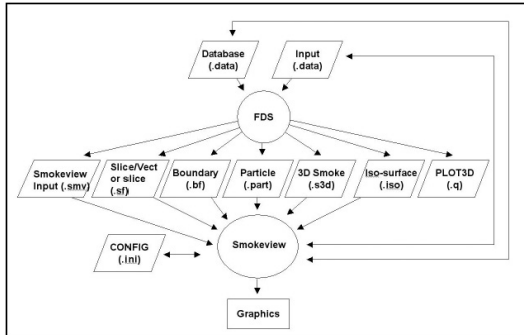


Fig. 5 Diagram illustrating data files and program used in the NIST Fire Dynamics Simulator

FDS는 주로 두 가지에 사용이 되는데 첫째는 연기제어 및 스프링클러 동작에 대한 연구, 둘째는 주거용 및 산업용 화재에 적용된다. 이 연구는



Fig. 6 Comparison of the real fire(WTC; World Trade Center) and FDS

선박화재에 대한 기초적 연구로서 연기의 확산을 예측하고, 향후 이를 더욱 심도있게 검토하여 화재 제어 및 안전 탈출시간을 제시하는데 그 목적을 두고자 한다. Fig 6은 실제 미국의 WTC(World Trade Center)의 항공기 테러로 인한 화재를 FDS로 재현한 것으로 FDS의 신뢰성을 보여준다.

3.2 화재 시뮬레이션

이 연구에서는 많은 인원이 동시에 모여 있는 선박의 세미나실에 대한 화재시뮬레이션을 실시 하였다. 선박의 경우 SOLAS II-2의 FTP Code 에서 화재시험조건을 점화용 불꽃이 있을 경우 50kW/m^2 에서 10분간 실시하도록 되어 있다 (SOLAS 1974). 화재 크기 및 가연성물질에 따라 매연농도가 다르지만 이 연구에서는 50kW/m^2 의 화원에 대하여 분석하기로 한다. 그리고 화재시뮬레이션을 아래 조건에 의해 실시한 후 각 출입문에서 매연농도를 측정하고 이로인한 가시거리를 구하였다. 가시거리의 제한은 피난자의 이동속도를 감소시키는 요인이다.

이 시뮬레이션을 위한 계산조건은 아래와 같다.

- 시뮬레이션 시간 : 120초
- 화 재 규 모 : 50kW
- 화 원 의 크 기 : $1\text{m} \times 1\text{m}$
- 가 연 성 물 질 : PMMA
- 실 내 온 도 : 20°C
- 화 재 구 역 : 세미나실(한국해양대학교 실습선)

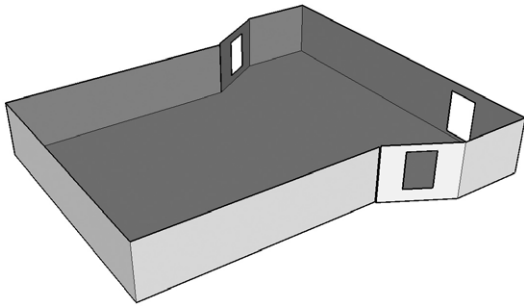


Fig. 7 Seminar room 3D model

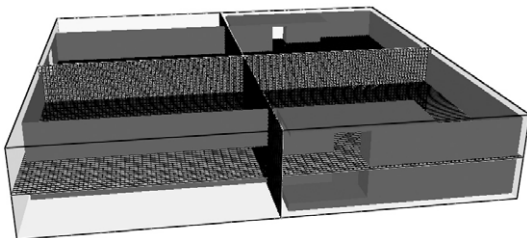


Fig. 8 Seminar room 3D model of FDS

1) 시뮬레이션 결과

FDS를 이용한 시뮬레이션 결과에 의하면 좌우현 출입구에서는 약 20초 후부터 대피한계온도인 60℃를 초과하는 것으로 나타났다 그 결과는 Fig 9와 같다. 그리고 Fig. 10 & 11은 4장 피난시간

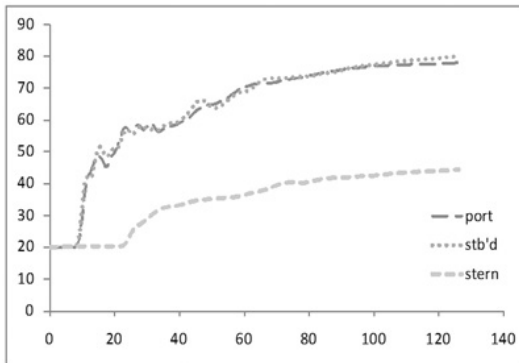


Fig. 9 Temperature per second

예측에 따른 65초 및 78초후에 온도 분포를 3차원 그래픽으로 나타낸 것이다.

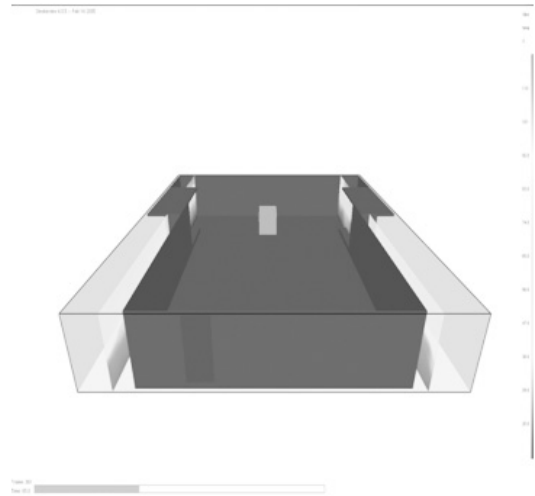


Fig. 10 After 65 sec

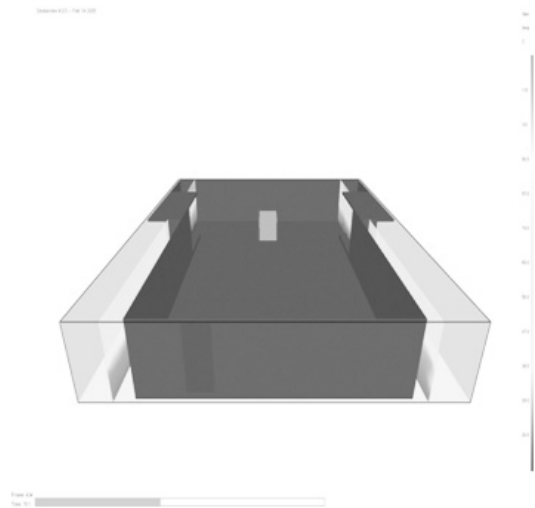


Fig. 11 After 78 sec

또한, 보행속도를 감소시키는 요소인 소멸계수는 Fig. 12와 같다. 보행속도 감소 정도는 Fig. 20에서 알 수 있다.

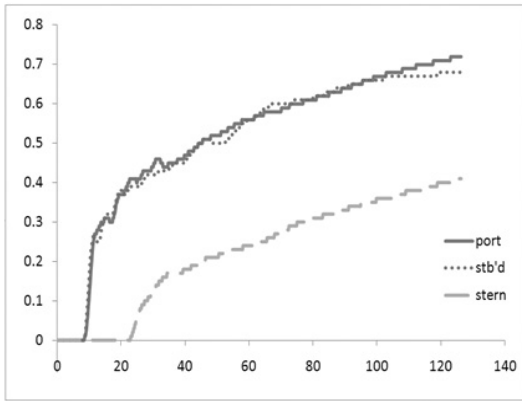


Fig. 12 Extinction coefficient per second

Fig. 13에 나타난 바와 같이 약 20초 후 좌우현 피난구에 가시거리가 10m로 감소되나 피난에 지장을 받을 수 있는 6m는 약 40초 후에 감소되었으며 뒤쪽 출입구는 시뮬레이션 시간 중 계속해서 10m이상을 유지함을 알 수 있었다.

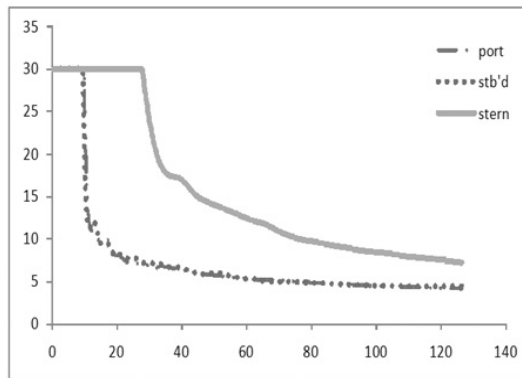


Fig. 13 Visibility per second using FDS

4. 피난시간 예측

4.1 계산식에 의한 피난시간 예측

이 연구에서는 한국해양대학교 실습선인 한나

라호의 다중 이용시설인 세미나실(100인실)에서 화재시를 가정하여 학생들이 탈출하는데 소요되는 시간을 예측하였다. 예측방법은 Harold E. “Bud” Nelson의 비상시 이동 연구의 피난계산방법에 의하여 예측하였다(SFPE, 2005).

1) Harold E. “Bud” Nelson의 연구

피난시간이란 거주자가 거주구역을 빠져나간 시간을 나타내는데 그 식은 식(1)과 같이 정리된다.

$$T_{ae} = T_{me}e + T_d \quad (1)$$

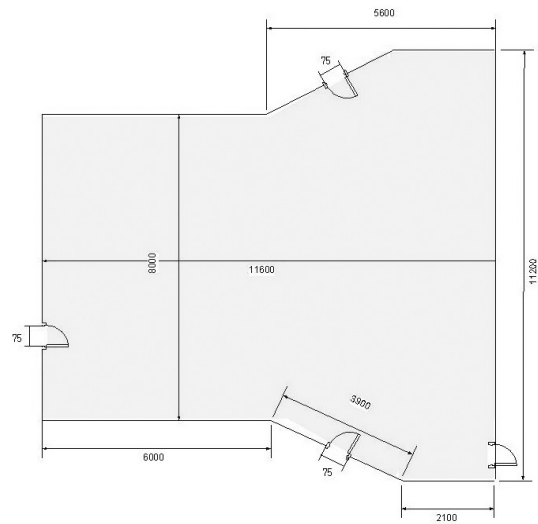


Fig. 14 seminar room(cm)

여기서

T_{ae} = 실제 피난 시간

T_{me} = 계산에 의한 피난시간

e = 피난효율

T_d = 피난 초기 지연

$$T_d = \frac{\sqrt{\sum A_{area}}}{30}$$

[일본 건설성 고시 1441호(2000년)] (2)

- ① 밀도(D) : 피난경로내에 형성되는 균중의 정도로 단위면적당 사람수

$$D = \frac{\text{인원수(명)}}{\text{유효면적(m}^2\text{)}} \quad (3)$$

- ② 피난속도(S) : 거주밀도와 피난속도 상수와 관련있는 사람의 피난 속도

$$S = k - 0.266kD \quad (4)$$

k = 피난속도 상수 (복도, 비상구는 1.4를 적용함)

- ③ 비유동계수(F_s) : 비상구 통로상에서 단위 시간 및 단위유효폭에 대해 특정지점을 통과하는 사람

$$F_s = S \times D \quad (5)$$

- ④ 유동계수(F_c) : 비상구의 특정지점을 통과하는 사람들의 예상유동속도

$$F_c = F_s \times W_e(\text{유효폭, m}) \quad (6)$$

- ⑤ 통과시간(tp) : 한 균중의 사람들이 비상구 통로상의 특정지점을 통과하는데 걸리는 시간

$$tp = \frac{P(\text{통과인원})}{F_c} \quad (7)$$

세미나실의 전체면적은 $105m^2$ 이며 총 사용가능 인원은 100명이다. 비상시 피난구로 사용되는 출입문은 총 3개로 그 넓이는 75cm이다. 식에 의해 피난시간을 구하면 피난시간은 132초로 예측되었다. 세미나실에는 총 3개의 비상구가 있으므로 약 44초의 피난시간이 소요될 것으로 예측되었다. 이는 최소한의 결과이며 이 계산에서는 모든 피난자가 피난준비가 된 상태에서 실시한 것으로 식

(2)에 의한 피난초기 지연시간 21초가 추가되면 약 65초의 피난소요시간이 걸릴 것으로 예상된다.

2) 시뮬레이션에 의한 피난시간 예측

시뮬레이션에 의한 예측방법으로는 인간의 피난 특성을 고려하여 개발된 Pathfinder를 이용하였으며 피난조건은 총 100명의 인원이 세미나실에 있는 것으로 하였다. Fig 19에서 보는 바와 같이 100명의 인원이 3개의 출입구에 모이는 현상은 Fig. 15에서 보는 바와 같이 약 5초 후에서 50초 까지 나타났다. 그리고 전체 피난에 대한 결과는 Fig. 16에서 보는 바와 같이 약 56초 후 100명 전원이 탈출 완료하는 것으로 나타났다.

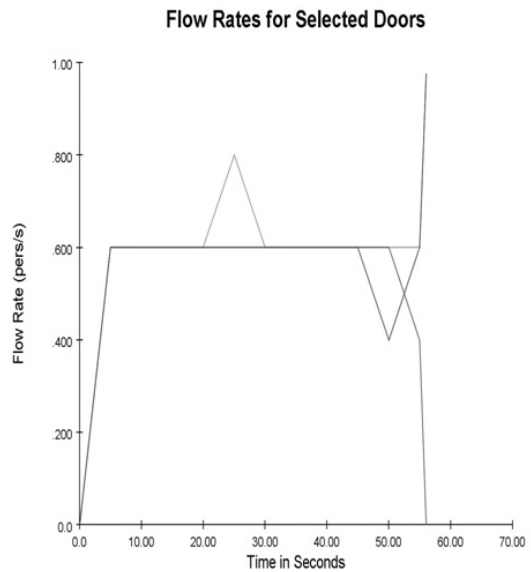


Fig. 15 Flow Rates for Selected Doors

약 56초후 전원이 탈출하는 것으로 나타났다. 피난을 개시하기전까지의 소요시간 21초를 추가하면 총 77초의 피난시간이 소요될 것으로 예상된다.

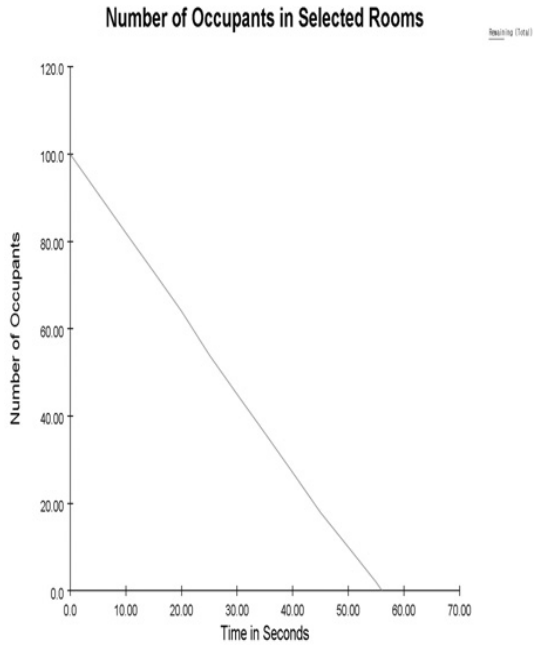


Fig. 16 Number of Occupants in Selected Rooms

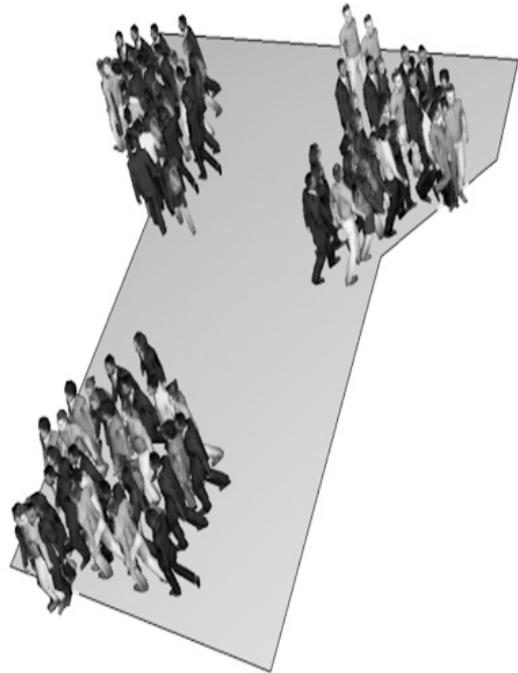


Fig. 18 Evacuation Simulation

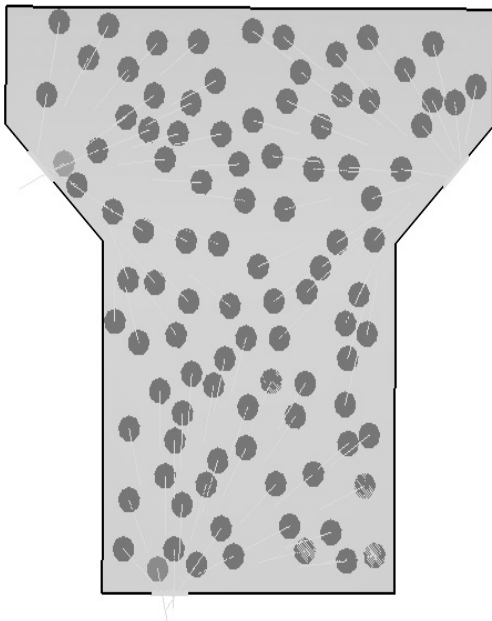


Fig. 17 Simulation condition

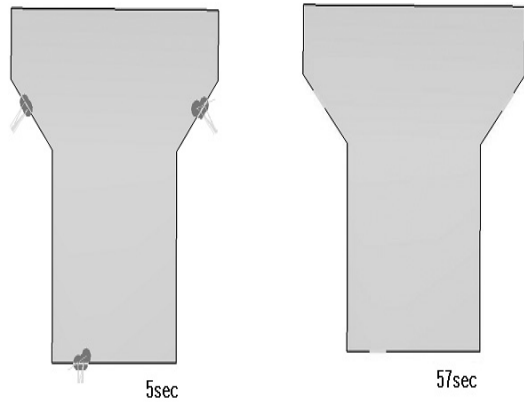


Fig. 19 5초후, 피난종료

여기서 피난효율은 피난유도 담당자의 활동지연, 합류지점에서의 지연, 피난자 개개인의 자체적인 지연 사유 및 복수의 피난구에 유난히 집중되는 피난구에 의한 영향 등에 따라 달라진다. 그리고

선행 연구에 의하면 Fig 20에서 보는 바와 같이 자극성 연기의 소멸계수가 0.4에 도달할 때 급격하게 보행속도가 감소함을 알 수 있다. 그러나 단 시간에 출입구로 피난인원이 집중적으로 모이는 구조를 가진 세미나실에서는 보행감소가 적용되지 않을 것으로 판단된다. 그러나 일반적인 구조인 긴 통로 혹은 층간 이동 등에는 반드시 이러한 내용의 검토가 이루어져야 한다. Table 1은 화재 연구학자들이 제안하는 안전 탈출에 필요한 가시거리이다.

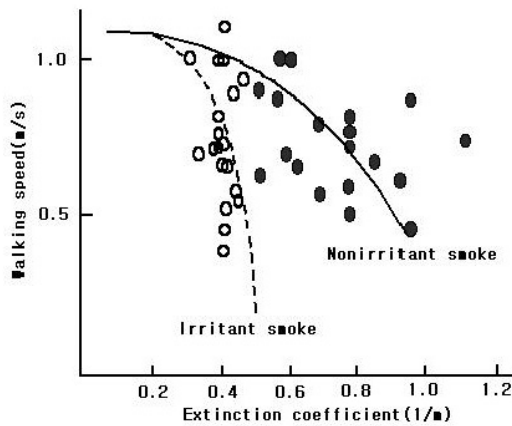


Fig. 20 Walking speed during fire

Table 1 Escape necessary safe visibility

Proposer	Visibility
Kawagoe	20m
Rasbash	4.5m
Fire department	13.5m
Rasbash	10m

5. 결 론

여러 가지 조사 및 통계에 의하면 화재발생시 온도상승에 의한 인명손실보다는 연소시 발생하는 각종 독성물질에 의해 질식사하는 경우가 많은 것으로 나타나는데 이는 주로 가시거리 미확보로 신속한 탈출을 하지 못함으로써 발생한다. 일반적으로 매연에 의해 가시거리가 제한되면 사람들은 패닉현상에 빠져 당황하게 되어 탈출이 쉽지 않게 된다. 그러므로 안전 탈출이 가능한 가시거리가 확보된 상태에서 탈출을 시도하여야 인명안전을 확보할 수 있다. 이 연구에서는 계산식에 의한 피난 시간은 65초, 시뮬레이션에 의한 결과는 77초로 나타났다. 또한, 이 연구에서 실시한 화재시뮬레이션에 의하면 약 40초 이전까지만 가시거리를 확보하는 것으로 나타났다. 피난시뮬레이션 결과 100명의 인원 중 40초까지 피난에 성공한 사람은 73명으로 27명이 세미나실에 남아 있는 것으로 예상된다. 즉 가시거리가 제한되는 약 25초~38초에 27명의 인원이 유독가스에 질식할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

그리고 이 결과는 피난자의 지연행동이 적용되어 있지 않은 상태에서 피난구 주변에 피난자가 넘어져 생기는 정체현상, 가시거리 미확보로 인하여 피난구를 찾지 못하는 경우 등을 감안하면 실제 화재시에는 상당한 시간이 증가할 것으로 판단된다. 이를 미연에 방지하여 승무원의 생존율을 높이기 위해서 다음과 같은 선박구조를 제안할 수 있다.

1. 선박의 모든 구역을 일정한 천장 높이로 하기 보다는 많은 인원이 동시에 사용하는 다중

이용시설은 천장의 높이를 다른 구역보다 높게하여 연기충만시간을 증가시켜 안전피난 시간을 증가하도록 한다.

2. 출입구 폭을 넓혀 유동계수를 높여 원활한 피난을 돕는다.

3. 긴 가지거리 확보에 용이한 LED 비상탈출 유도 등의 설치도 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 김미경, 김운형, Ichiro Hagiwara(2001), “일본의 피난설계 규정”, 한국화재·소방학회 추계학술논문발표회
- (2) 국가법령정보센터(2010), 건축법시행령, www.law.go.kr

- (3) 김운형, S.E Dillon, J. G. Quintiere(1999), “ISO 9705 Room-Corner Test와 모델 평가”, 한국화재·소방학회, 제13권 제2호, pp. 3-11.
- (4) 이동호, 유지오(2003), “지하철 화재시 본선 터널 환기 시스템에 따른 열 및 연기배출특성”, 한국화재·소방학회, 제17권 제2호, pp. 62-69.
- (5) 한국화재보험협회(2005), SFPE 방화공학 핸드북
- (6) 1974年 海上人命安全協約-1998 統合本 (2001), 해인출판사
- (7) NIST(2004), Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's.
- (8) NIST(2004), User's Guide for Smokeview Version 4-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data.

이 논문은 한국해양대학교 마린시뮬레이션센터 자체연구개발 사업으로 이루어진 것임을 밝힙니다.