

선박화재의 인명안전평가 해석

A Study on Evacuee's Risk Assessment under Ship's Fire

양 영 순* 정 정 호** 이 재 옥*** 공 수 철*** 여 인 철****
Yang, Young-Soon Jung, Jung-Ho Lee, Jae-Ohk Kong, Soo-Chul Yeo, In-Cheol

ABSTRACT

A Fire Safety Evaluation Module(FSEM), which quantitatively evaluates the risk of evacuees when fire occurs in buildings or ships, is presented in this paper. The developed FSEM can be applied to multi-room structure. Basic input data for the FSEM are prepared by fire model and evacuation model. CFAST which is one of the existing fire models is used as fire model and MonteDEM evacuation model was developed for evacuation model, respectively. MonteDEM evacuation model makes use of distinct element method and Monte-Carlo simulation, and it can also take into consideration ground inclination by ship motions in order to simulate the real situation of evacuation. Some typical situations are modelled for illustrative examples and quantitative assessment of evacuee's risk under fire accident is carried out.

1. 서론

선박에서의 화재사고는 선중에 무관하게 발생비율이 비슷하지만 사망자의 발생률이 매우 높은 특징을 가지고 있으며, 특히 거주공간과 기계장치로 구성된 공간이 공존하는 선박의 특성상 화재의 성장이 빠를 경우 대피할 수 있는 시간이 부족하기 쉽고 대피에 성공하더라도 사고발생 선체의 다른 장소나 해상으로의 대피로 국한되어 또 다른 위험상황에 노출되는 문제가 발생한다.⁽¹⁾ 또한 건물에서의 화재사건에서도 최근 건물의 대형화 추세와 함께 화재의 발생을 억제하는 만큼이나 대피경로의 확보 및 계획의 수립을 설계단계에서부터 고려하는 것이 중요한 문제로 인식되고 있다. 특히 기술의 발달에 따라 종래의 경제적 효율성을 강조하는 설계에서 화재사건에 대해서도 성능에 기초한 안전성 관점에서의 설계가 점차 부각되고 있다.^{(2),(3)}

국내외의 화재에 대한 연구는 주로 건축분야를 중심으로 진행되어왔다.^{(4) (7)} 화재에 대한 인명안전성 평가를 위해서는 우선 이들 화재안전공학분야에서의 연구성과를 검토하여 화재안전도를 정의하기 위한 정식화가 수행되어야 하며, 무엇보다도 대피에 소요되는 시간을 정량적으로 해석하기 위한 방법론의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 화재에 대한 인명안전성의 정량적인 평가를 위해 화재모델과 대피모델로 구성된 FSEM(Fire Safety Evaluation Model)을 개발하고 최종 대피자의 사망확률을 산정하는 방법론을 제시하였다. 화재 모델로는 CFAST가 이용되며⁽⁸⁾ 대피모델로는 Monte-Carlo 추출법과 개별요소법이 결합된 MonteDEM이 개발되었다.^{(1),(9)} MonteDEM은 좀더 현실적인 모사를 위해 multi-room 에도 적용할 수 있으며 선박의 횡동요 등에 의한 바닥의 경사도 고려된다.

개발된 MonteDEM을 이용하여 간단한 예제를 통해 병목현상과 대피시 통로의 폭이 대피완료시간에 미치는 영향을 분석할 수 있음을 보이고, 본 논문에서 제시한 FSEM을 이용하여 multi-room에서 바닥의 경사도 고려한 사망확률해석을 수행하였다.

* 정회원 · 서울대학교 조선해양공학과 교수
*** 서울대학교 조선해양공학과 대학원

** 현대중공업 조선사업본부 구조설계부
**** 한국선급 기술연구소 책임연구원

2. Fire Safety Evaluation Model (FSEM)

2.1. FSEM의 개요

FSEM에서 계산하는 사망확률은 구조신뢰성공학 분야에서 다루는 파괴확률과 같은 개념으로, 주어진 한계상태식에 대해 신뢰성해석기법을 적용하여 계산한다. FSEM에서의 한계상태식은 "대피가 허용되는 시간 T_{avail} 이 대피에 소요되는 시간 T_{req} 보다 클 때 안전하다"라는 개념에 기초하여 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$g \equiv T_{avail} - T_{req} \leq 0 \quad (1)$$

T_{avail} 은 화재의 성장 및 전파에 의해 "대피가 불가능해지는 임계조건까지 화재가 성장하는데 걸리는 시간"을 의미하며 화재임계조건 도달시간 S 로 나타낸다. 일반적으로 화재로 인한 인명손실의 최대 원인은 유독가스이므로 본 연구에서는 화재임계조건을 화재로 인한 연기층이 대피자의 호흡기 높이에 도달하는 것으로 설정하였다. 한편 T_{req} 는 대피가 완료되기까지의 시간으로 화재감지시간 D , 대피준비시간 R , 대피완료시간 E 로 구분할 수 있으므로, FSEM에서 사용되는 식 (1)의 한계상태식은 최종적으로 다음과 같다.⁽¹⁾

$$g \equiv S - D - R - E \leq 0 \quad (2)$$

2.2. FSEM의 수행

화재임계조건 도달시간 S 와 화재감지시간 D 는 화재모델에서 얻을 수 있으며 본 연구에서는 미국 상무성 산하 NIST에서 개발된 CFAST를 이용하였다.⁽⁸⁾ 대피준비시간 R 은 기존의 연구 또는 실험자료를 이용하여 산출하며, 대피완료시간 E 는 MonteDEM 대피모델을 개발하여 대피과정을 모사하고 최종 대피자가 안전한 구역에 도달하는 시간으로 설정하였는데 MonteDEM은 다음 장에 상세히 기술하였다.

Reliability Solver는 이렇게 준비된 자료를 이용하여 식 (2)의 한계상태식에 대한 사망확률을 계산하는데, 이를 위해서는 구조신뢰성 해석기법인 Monte-Carlo 추출법이나 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM)이 이용된다.⁽¹⁰⁾ Figure 1은 이러한 FSEM의 전체적인 수행과정을 정리한 그림이다.

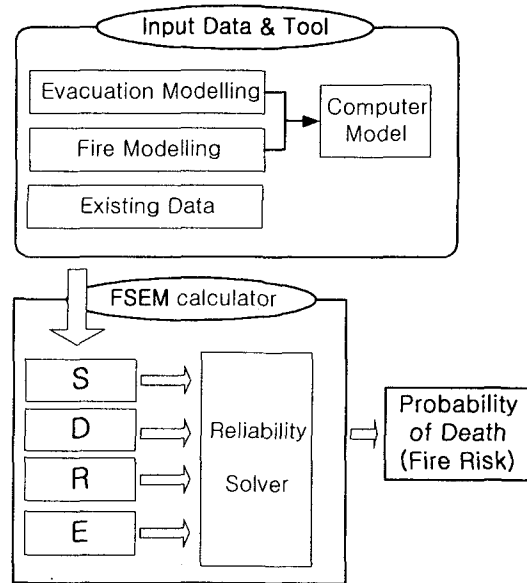


Figure 1. Procedures of FSEM

3. MonteDEM 대피모델

3.1. MonteDEM 대피모델의 구성

건물이나 선박에서 화재가 발생한 경우 대피자들은 주위의 다른 대피자나 벽, 장애물 등과의 접촉에 의해 저항이나 반력을 받게 되며, 특히 선박의 경우 침수에 의한 경사나 동요에 의한 힘을 받을 수도 있다. 이러한 대피과정은 대피자와 벽, 경사나 동요 등 모든 객체와 상황의 역학적 특성을 고려한 개별요소법을 이용하여 모델링할 수 있다.^{(11),(9)}

구조물 모델링

대피모델을 구성하기 위해서는 대피가 이루어지는 구조물에 대한 정의가 필요하다. MonteDEM 대피모델은 계산시간 및 비용의 고려와 함께 출입구와 같이 복잡한 거동이 예측되는 곳에서의 개연성 있는 거동예측을 위해 Figure 2에서와 같이 coarse network를 개선한 extended coarse network를 적용하였다. 그리고, 대피자와 공간내의 구획을 결정하는 벽 사이의 역학적 상호작용에는 Table 2의 속성값이 이용되었다.

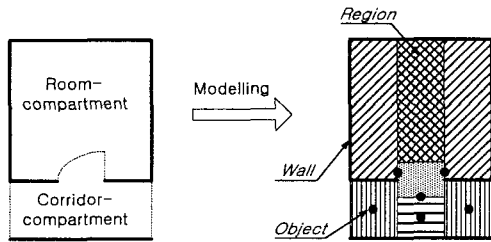


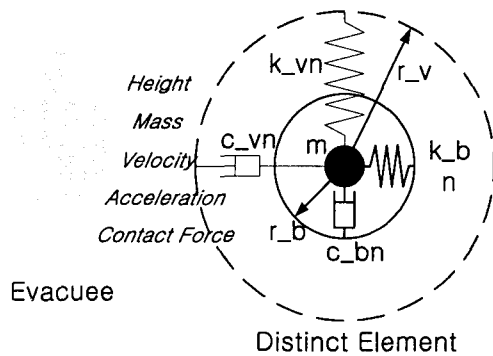
Figure 2. Structure Modelling for MonteDEM

Table 1. Wall Attributes

normal spring constant	6.86E+4 [N/m]
normal damping coeff.	4.58E+3 [N · sec/m]
friction coeff.	0.2

대피자 모델링

대피자는 Figure 3에서와 같이 중심에 집중질량이 위치하고 물리적 신체반경 및 가상적 신체반경으로 정의되는 원형 요소로 모델링하였다. 역학적 속성치는 Table 2에서와 같이 법선방향의 물리적(physical) 스프링 상수와 감쇠계수 외에 근접한 다른 대피자나 벽에 대한 심리적 거부감을 고려하기 위한 가상(virtual) 스프링 상수 및 감쇠계수 등이 고려된다.



Evacuee

Distinct Element

Figure 3. Evacuee Modelling for MonteDEM

Table 2. Evacuee Attributes

walking speed	1.30 [m/sec]
mass / height	37.3 [Kg/m]
self-propulsive force	32.1 [N]
physical radius	0.167 [m]
virtual radius	0.808 [m]
physical spring const.	50.0 [N/m]
virtual spring const.	8.18E+3 [N/m]
physical damping coeff.	1.10E+3 [N · sec/m]
virtual damping coeff.	86.4 [N · sec/m]
physical friction coeff.	0.2
virtual friction coeff.	0.2

대피모델에서 특히 대피자 모델은 고려되는 개개인의 역학적 속성에 분명한 변동성을 예상할 수 있으며 이러한 불확실성은 대피모델의 출력인 대피완료시간 E 에 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 대피자의 속성치 및 초기 위치를 Monte-Carlo 추출법에서의 난수 발생기법을 이용하여 임의로 결정되도록 하여 입력자료의 불확실성이 고려될 수 있도록 하였다. 따라서 대피완료시간 E 는 충분한 횟수의 모사를 반복하여 얻은 자료를 probability paper로 분석하여 확률변수로 고려할 수 있다.^{(1),(10)}

경사 모델링

선박의 경우는 손상에 의한 침수나 황천에서의 동요에 의해 바닥의 경사가 발생할 수 있고 건물은 지진 등의 상황에서 중력에 의한 영향이 특별히 고려될 필요가 있다. 이러한 바닥의 경사에 의한 영향은 Figure 4에서와 같이 시간에 따라 변화하는 경사각으로부터 결정된 외력으로 고려된다.

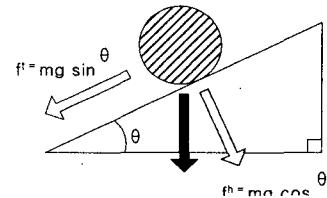


Figure 4. Force by Inclination

3.2. MonteDEM 대피모델의 적용 예

병목현상의 영향

많은 인원이 좁은 출입구를 갖는 공간에서 대피하는 경우 출입구 근처에서의 병목현상으로 인해 대피자의 위험이 증가하게 되므로 효과적인 대피계획의 수립과 대피시설의 설계를 위해서는 이러한 병목현상에 대한 정확한 이해와 파악이 필요하다. 이를 위해 Figure 5와 같은 구조물에서 동일한 속성을 갖는 대피자를 왼쪽 벽으로부터 10m까지의 공간에 균일하게 위치한 상황에서 20명 단위로 100명까지 증가시켜가며 MonteDEM 대피모델을 이용한 모사를 수행하였다. Figure 6은 출구에서 가장 먼 위치에 출발하는 대피자 A의 보행속도와 대피완료시간을 보인 그림으로, 대피인원이 증가함에 따라 병목현상으로 인한 보행방해로 보행속도가 감소하고 그 결과 대피완료시간이 크게 증가함을 확인할 수 있다.

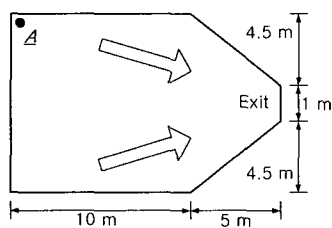


Figure 5. Bottleneck Example

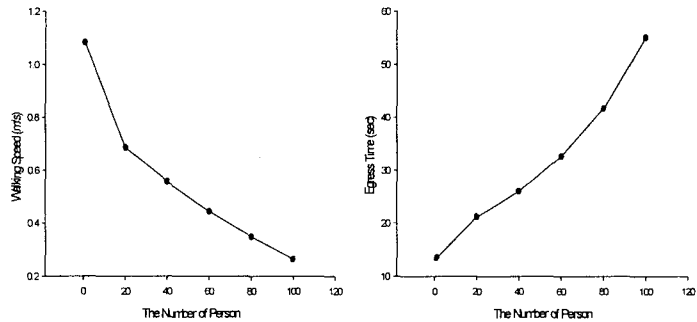


Figure 6. Walking Speed & Egress Time of Evacuee A

복도 폭의 영향

소방관련법규나 선급규정은 과거의 경험과 같은 간접적이고 정성적인 자료를 바탕으로 결정된 적절한 이동통로의 폭을 제시하고 있는데, MonteDEM 등의 대피모델에 의한 모사 결과를 이용하면 좀더 직접적이고 정량적인 자료를 바탕으로 한 통로 폭의 결정에 도움이 될 수 있을 것이다.

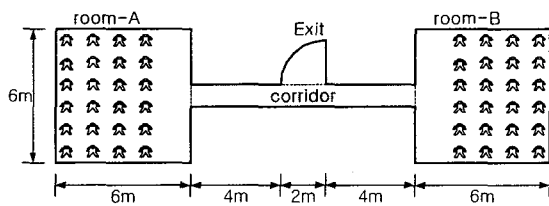


Figure 7. Corridor Breadth Example

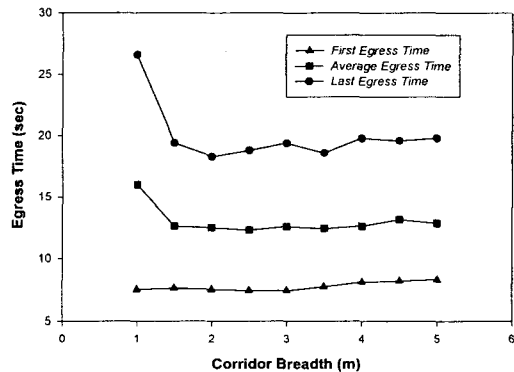


Figure 8. Corridor Breadth & Egress Time

이를 위하여 Figure 7과 같이 폭이 2m인 하나의 출구가 있는 복도로 연결된 양쪽 거실에 각각 24명의 대피자가 나란히 정렬되어 있는 경우에 대해 복도의 폭을 0.5m 단위로 1m부터 5m까지 변화시키며 대피과정 모사를 수행하였다. Figure 8은 복도의 폭이 넓어질수록 최초 대피자를 제외한 대피자의 대피완료시간이 감소하는 경향을 보인 것인데 특히 폭이 1.5m 이상이 될 때 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 현재의 MonteDEM 대피모델이 좀더 현실적인 신뢰성을 보장할 수 있도록 개선될 경우 화재와 관련된 법규나 규정의 객관적인 기준 마련을 위한 효율적인 도구로 이용될 가능성을 보여주는 것으로 판단된다.

4. FSEM의 적용 예

4.1. 문제의 정의

구조물

현재 금강산 관광을 위해 운행중인 "금강호"의 3갑판 Caribbean Deck의 일부분을 단순하게 수정하여 Figure 9와 같이 복도를 사이에 두고 5개의 객실이 서로 마주 보는 구조를 모델링하였다.

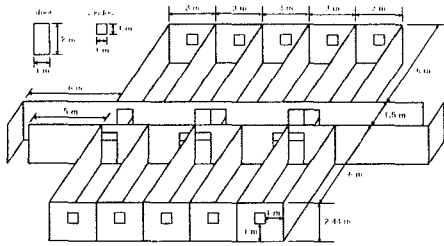


Figure 9. FSEM Example

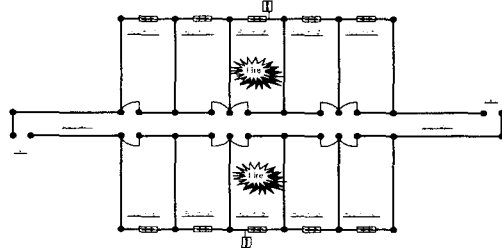


Figure 10. Fire Ignition Points on Plane Map

대피자

2인 1실을 가정하여 대피자는 각 객실마다 2명씩 총 20명이 화재발생시 출입구에서 반대편의 벽쪽에 위치하도록 하였다. 각 대피자의 속성값은 개인차에 의한 변동성을 반영하기 위해 Table 2에 보인 값을 평균으로 하는 변동계수(coefficient of variation) 10%인 대수분포를 가정하고 Monte-Carlo 추출법에서의 난수 발생을 이용하여 모든 대피자가 다른 값을 갖도록 처리하였다.

화재 시나리오

화재는 Figure 10에 보인 바와 같이 room-3와 room-8의 중앙에서 발화하며 두 객실의 천장 중앙에는 화재감지기가 포함된 Residential Sprinkler가 설치되어 있다고 가정하였다. 화재모델로 이용된 CFAST에서는 일반적인 주거지역의 화재 특성을 가정한 medium t^2 화재를 설정하였다.

4.2. FSEM의 수행

화재임계조건 도달시간 S 와 화재감지시간 D

CFAST를 이용하여 복도에서 연기층이 천장에서 쌓여 내려와 바닥으로부터 1.6m 높이에 도달하는 순간까지의 시간인 198sec를 화재임계조건 도달시간 S 의 평균으로 설정하였다. 또한 CFAST에서 화재감지기에 의한 화재감지시간이 room-3과 room-8에서 각각 102.6sec, 98.7sec로 얻어졌으므로, 화재감지시간 D 의 평균은 98.7sec로 설정하였다. S 와 D 모두에 대해 변동계수 10%의 대수분포를 가정하였다.

대피준비시간 R

객실에 구명조끼가 비치되어 있다고 가정하고 객실내의 최대 직선거리인 대각선을 보행속도로 나누어 얻은 5sec를 대피준비시간 R 의 평균으로 설정하였으며, 변동계수 10%의 대수분포를 가정하였다.

대피완료시간 E

대피모델로 개발된 MonteDEM에 의한 모사를 100회 실시하여 얻은 대피완료시간 E 의 자료를 확률지(probability paper)로 분석하여 평균이 24.32sec이고 표준편차가 2.22sec인 대수분포 확률변수로 모델링할 수 있음을 파악하였다. 각 모사마다 대피자의 속성은 4.1절의 설명대로 개인차에 의한 변동성을 반영하여 설정되며 초기위치는 동일하게 유지된다. Figure 11은 대피시작 5sec, 10sec 이후와 대피가 완료된 21sec 이후의 각 대피자 이동궤적을 보인 그림이다.

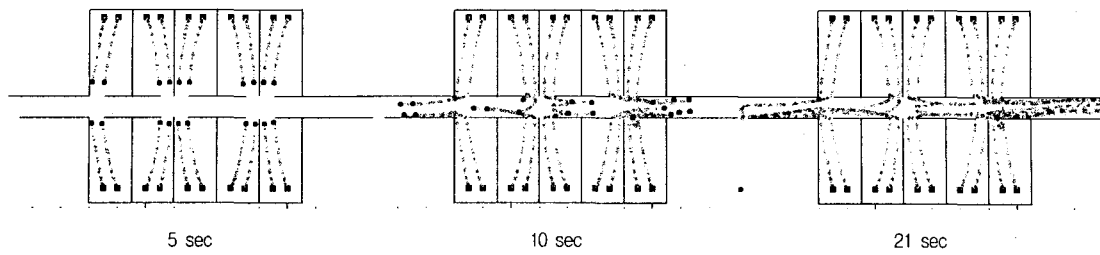


Figure 11. Trajectories of Evacuees

4.3. 사망확률 P_d

4.2절에서 준비된 S , D , R , E 의 분포특성과 식 (2)의 한계상태식을 이용하여 AFOSM이나 추출횟수 500,000번의 Monte-Carlo 추출법으로 최종 대피자의 사망확률을 계산하면 다음의 Table 4와 같다.

Table 3. Probability of Death (without ground inclination)

	AFOSM	MC Simulation
Reliability Index	3.40684	3.36407
Probability of Death	3.286×10^{-4}	3.84×10^{-4}

4.4. 바닥의 경사에 의한 영향

바닥의 경사가 발생하는 대표적인 경우로 선박의 횡동요를 모델링하여 대피거동에 미치는 영향을 살펴본다. 최대 횡동요각을 2° 간격으로 16° 까지 변화시키고 횡동요주기는 최대횡동요각의 sine 값의 제곱근에 비례하도록 설정하였으며 시간에 따른 횡동요각의 변화는 선형적이라고 가정하였다.

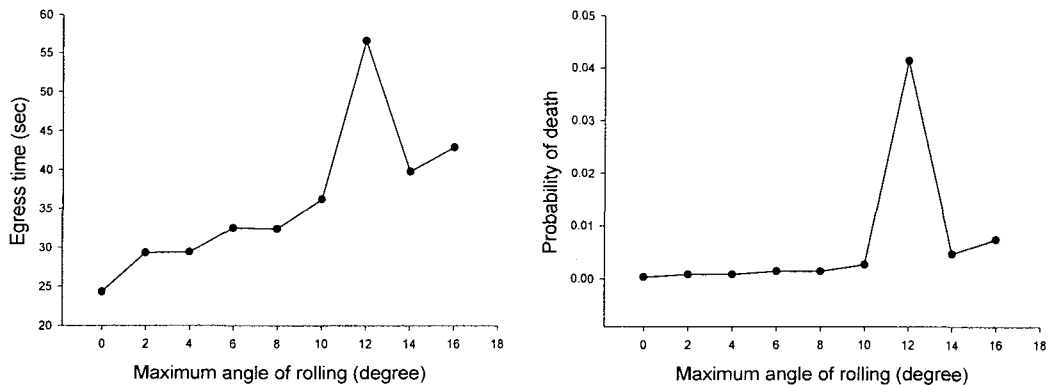


Figure 12. Egress Time and Probability of Death for Various Maximum Rolling Angles

Figure 12는 최대 횡동요각에 따른 대피완료시간과 사망확률의 변화를 보인 것인데, 횡동요가 심할수록 대피에 소요되는 시간이 증가할 것이라는 일반적인 예상과 일치하는 결과를 확인할 수 있다. 그러나, 최대 횡동요각이 12° 인 경우에는 오히려 더욱 심한 횡동요의 경우보다 대피완료시간과 사망확률을 보인다. 이는 Figure 13에 보인 최초 대피자와 최종 대피자의 이동궤적을 확인하면 쉽게 이해할 수 있는데, 12° 의 경우 최대 횡동요각의 크기와 주기와 대피자의 이동 사이의 우연한 조합에 의해 최종 대피자가 이동 중 다른 객실로 흘러 들어가기 때문으로 설명된다.

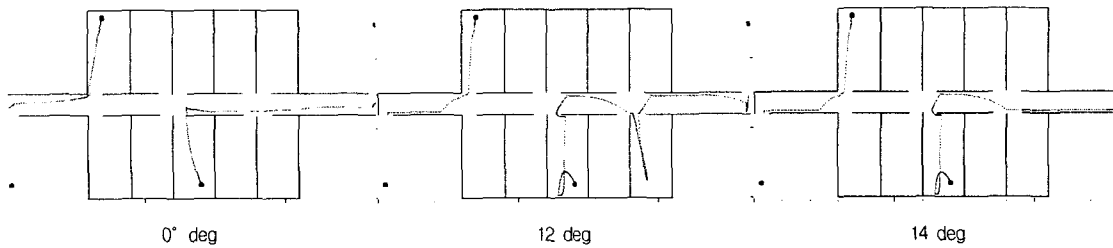


Figure 13. Trajectories of the First and the Last Evacuee

5. 결 론

본 논문에서는 화재시 인명의 위험도를 정량적으로 평가할 수 있는 모델과 방법론을 개발하는 데 일차적인 목표를 두었다. FSEM은 화재모델로 CFAST를 이용하여 화재임계조건 도달시간 S 와 화재감지시간 D 를, 기존 연구나 실험자료에서 대피준비시간 R 을, 그리고 대피모델로 개발된 MonteDEM을 이용하여 대피완료시간 E 를 산정하며, 최종적으로 사망확률을 계산하여 화재안전도를 평가한다. 특히 MonteDEM은 선박이나 건물에서 발생한 화재나 지진 등의 위급한 대피상황에서 대피과정을 모사하고 대피소요시간을 정량적으로 산정할 수 있으며, multi-room 구조에의 적용과 바닥의 경사 효과의 고려도 가능하다.

몇 가지 예제에서 확인한 바와 같이 MonteDEM과 FSEM은 대피경로의 폭이나 위치 등 화재와 관련된 법규나 규정을 위한 객관적이고 정량적인 자료의 준비와 함께 시공이나 건조 이전에 유효한 대피계획을 수립하여 설계에 반영할 수 있는 가능성을 제공한다. 그러나, 아직은 대피자의 속성치나 대피거동의 심리적 측면, 화재임계조건 정의 등과 관련하여 화재공학 및 인간공학 분야의 연구와 좀더 긴밀히 연결되어 지속적인 추후 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다.

참고 문헌

1. 이정훈, 이재욱, 양영순, "선박의 화재안전도에 관한 연구", 대한조선학회논문집 38권 1호, 2001, pp.116-122
2. 青木義次, 富松太基, 森山修治, やさしい火災安全計劃, 學藝出版社, 1999
3. 이수경, "성능기준 소방 안전설계의 세계적 추세와 국내 도입에 관한 고찰", 소방기술 1999년 가을호, pp.22-32
4. Stollard, P. and Johnston, L., Design Against Fire, E&FN Spon, 1994
5. Frantzych, H., "Risk Analysis and Fire Safety Engineering", Fire Safety Journal, vol.31, 1998, pp.313-329
6. Gwynne, S., Galea, E.R., Owen, M., Lawrence, P.J. and Filippidis, L., "A Review of the Methodologies Used in the Computer Simulation of Evacuation from the Built Environment", Building and Environment, vol.34, 1999, pp.741-749
7. 이동근, "안전설계 기술 현황 및 전망", 선박해양기술 30호, 2000
8. Peacock, R.D., Reneke, P.A., Jones, W.W., Bukowski, R.W. and Forney, G.P., A User's Guide for FAST: Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport, National Institute of Standards and Technology, 2000
9. 清野純史, 浦房紀, "被災時の群集避難行動シミュレーションの個別要素法の適用について", 日本土木學會論文集, No.537/I-35, 1996, pp.233-244
10. 양영순, 서용석, 이재욱, 구조신뢰성공학, 서울대학교 출판부, 1999