

## 선박의 화재안전도에 관한 연구

이정훈\*, 이재옥\*\*, 양영순\*\*\*

### A Study on the Fire Safety Assessment of a Ship

Jung-Hoon Lee\*, Jae-Ohk Lee\*\* and Young-Soon Yang\*\*\*

#### 요 약

본 논문에서는 화재안전공학에서 사용되는 모델링 기법과 통계자료들을 검토하고 구조 신뢰성 분야의 확률론적 안전도 평가방법을 도입하여 선박에 대한 방화설계나 선급 규정을 정량적으로 평가하는 방법을 마련하였다. 본 논문에서 개발된 FSEM(Fire Safety Evaluation Module)은 화재안전도의 척도로서 마지막으로 대피하는 사람의 사망확률을 산정하는 프로그램이며, 이를 이용해서 규정에 의한 방화설비를 갖춘 소규모의 화재실에서 대피자에 대한 사망확률을 추정해 보았고, 민감도 해석을 통해 선박에 대한 정량적인 화재안전 평가에의 적용가능성을 검토해 보았다. 계산결과와 검토로부터 선박화재에 대한 새로운 설계지표와 대피상황에서의 인간행동에 대한 폭넓은 연구의 필요성 및 선박의 특수 상황을 고려할 수 있는 새로운 화재진척 모델에 대한 개발이 수행되어야 함을 제시하였다.

#### Abstract

In this paper, to make a base of the fire safety assessment about ship's fire protection design and Classification Society rule, statistical informations and modeling techniques for the fire safety engineering are investigated and probabilistic safety assessment methods in the structural reliability engineering are introduced. FSEM(Fire Safety Evaluation Module) developed in this paper calculates the probability of fatality, which can be used as an index of fire safety. FSEM is used to calculate the probability of fatality of the evacuees in a small room installed according to the rules for fire-proof. Sensitivity analysis is executed to investigate FSEM's applicability to ship. From results, the necessity of new criterion for ship's fire safety design, the need to study the human behavior in the evacuation from fire, and the development of new fire progress model considering special situations in ships are acknowledged.

---

접수일자: 2000년 7월 15일, 승인일자: 2000년 9월 20일

\*현대중공업 선박해양연구소 해양산업연구실 연구원 (E-mail:ljh0920@hhi.co.kr)

\*\*학생회원, 서울대학교 조선해양공학과 박사과정 (E-mail:ohk@insdel.snu.ac.kr)

\*\*\*정회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수 (E-mail:ysyang@gong.snu.ac.kr)

1. 서론

선박사고는 많은 인명피해와 환경오염을 초래한다는 점에서 국제사회에서 심각한 문제로 대두되어 왔으나, 선급 규정의 개정이나 새로운 국제 규약의 제정에도 불구하고 발생률이 감소하지 않고 있는 실정이다. 특히 선박의 화재사고는 침수나 전복 등에 비해 빈도는 크지 않으나 선박의 총톤수나 종류에 무관하게 발생률이 비슷하며, 다른 사고들에 비해서 사망자의 발생비율이 매우 높아 많은 희생자를 내어왔다. 본 연구는 이러한 선박의 화재사고에 집착하려는 노력의 일환으로 선박의 화재사고에 대한 안전도를 정량적으로 산정하고 규정들에 대한 평가방법을 개발하는데 그 목적이 있다.

화재사고에 대한 안전대책은 대부분 국제 규약이나 선급 규정에 의해 명시되어 있는데, 이러한 규칙들은 사고경험을 토대로 하여 규칙의 적용범위가 확대되고 기술기준의 개정이 이루어져 왔다. 그 중 대표적인 것으로 「해상에서의 인명안전을 위한 협약(SOLAS)」의 II-2 부분은 현행 선급 규정에서 다루고 있는 화재안전 부분에 대한 근간을 이루고 있다. SOLAS에 명시된 선박의 화재안전 대책들은 실행가능한 최대의 방화, 탐지, 소화가 이루어지도록 하기 위한 것으로 상식적으로 쉽게 유추할 수 있는 원칙들을 기본으로 하여 구획의 종류와 특성, 각종 소화설비, 관련 시험방법 등으로 구성되어 있으나 대부분이 원론적이고 정성적인 언급이 대부분이다. 따라서 화재안전을 위한 최소 요구사항으로 보다 실질적인 선박의 방화설계를 위한 체계적인 설계지침과 그에 대한 정량적인 평가방법이 요구되며, 특히 후자는 현행 규정에 없는 유지·보수의 기준을 마련하기 위해서 더욱 중요하다고 생각된다.

화재에 대한 선박의 안전도를 정량적으로 평가하기 위해서는 Fig.1과 같이 화재안전공학 분야의 기본적인 내용을 검토하여 이를 토대로 화재안전도 평가에 필요한 정식화의 과정을 수행하는 것이 선행되어야 하고, 설계를 통해 제시된 각종 설비들을 고려해서 선박의 화재안전도에 대한 정량

적인 수치를 산정하는 방법론에 대한 개발이 필요하다.

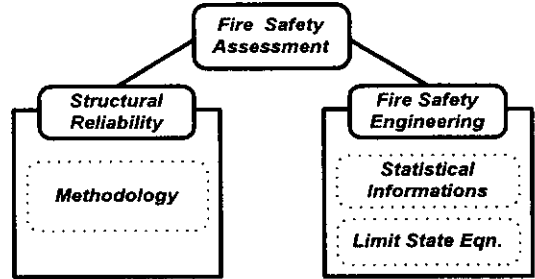


Fig.1 Fire safety assessment of a ship

2. 화재안전도 평가의 개요

2.1 화재안전 한계상태식

본 연구에서는 화재안전공학 분야에서의 대피자 사망확률 산정을 위한 한계상태식을 다음과 같은 형태로 정식화하였다(Magnusson 1996).

$$G = S - D - R - E \leq 0 \quad (1)$$

여기서,  $S$ 는 연기충만시간으로 화재발생에서부터 대피의 임계조건에 이르는 데 걸리는 시간이며,  $D$ 는 화재를 감지하는데 걸리는 시간,  $R$ 은 화재감지부터 대피개시까지 대피를 준비하는데 걸리는 시간,  $E$ 는 대피자들이 화재를 피해 안전한 장소로 이동하는데 걸리는 시간이다.

2.2 선박의 화재안전평가를 위한 고려

화재안전공학 분야에서 행해진 화재안전평가(Magnusson 1996)를 선박에 적용하기 위해서는 선박에서의 화재사건의 특성에 대한 고려가 필요하다.

우선 대피상황에서의 인간행동에 대한 시뮬레이션 기법이 마련되어야 한다. 건축분야의 자료를 살펴보면 대피시간을 공식을 이용해서 계산하고 있는데, 선박처럼 선실의 크기가 작고 복도의 영향을 고려하여야 하는 경우에는 부적합할 수 있다. 따라서 출입구로의 쇄도 과정이나 복도에서의 대피과정 등을 고려하기 위해 개별요소법(Cundall 1979)을 이용하여 직접 대피 시뮬레이

션을 수행하였다.

그리고, 작은 방에서의 연기충만시간 및 화재감지시간의 계산을 위한 프로그램의 개발이 필요한데, 이를 위해서는 화재안전 공학 분야에서 사용되는 ASET(Cooper 1981)과 DETACT-T2(Evans 1985)를 이용하였다.

### 3. 선박 화재안전평가 프로그램

#### 3.1 FSEM의 개요

선박의 화재안전평가를 위해 개발된 FSEM은 식 (1)의 각 항에 해당하는 시간을 산출하고 사망 확률을 산정하는 프로그램이다.

Fig.2에 정리된 바와 같이 불과 선실, 사람에 대한 특성치를 입력자료로 이용하며, ASET와 DETACT-T2로부터  $S$ 와  $D$ 를, 개별요소법과 Monte-Carlo 추출법, Probability Paper를 결합한 MonteDEM으로부터  $E$ 를 계산하고, 통계자료에서  $R$ 을 추정한 후 Monte-Carlo 추출법이나 개선된 일계이차모멘트법을 이용하여 최종적으로 화재안전도의 지표인 사망확률을 산정한다.

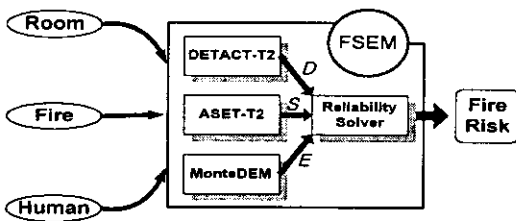


Fig.2 Outline of FSEM

#### 3.2 DETACT-T2와 ASET-T2 모듈

화재감지시간  $D$ 를 추정하기 위한 DETACT-T2(Evans 1985)는 막힘이 없는 천장면에 설치된 열 감지형 화재경보기의 작동시간을 계산하는 모듈로서 열방출률이 시간의 2차 포물선 형태로 증가하는  $t^2$  화재에 대해서 정해진 온도나 온도 상승률에 대한 작동시간을 산출하는데 사용된다.

그리고, 연기충만시간  $S$ 를 계산하는 ASET은

화재가 발생했을 때 안전한 대피가 가능한 시간을 추정하기 위한 시뮬레이션 모듈로, 밀폐된 공간 내에서 발생한 화재가 진척되는 과정에서 생기는 여러 상황들을 추정하여 화재가 발생한 후에 대피에 대한 임계조건까지 이르는 시간을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 기존의 ASET(Cooper 1981)을 변형하여  $t^2$  화재에 대한 고려를 할 수 있도록 화재성장률을 입력인자로 받게 함으로써 DETACT-T2와의 일관성을 유지하도록 하였다.

#### 3.3 MonteDEM 모듈

MonteDEM은 각 대피자마다의 고유한 물리적 특성치를 고려하여 화재시 대피과정을 모사하고 대피시간에 대한 확률분포를 계산하기 위한 모듈이다.

본 연구에서는 각 개인의 물리적 특성을 고려하기 위해서 Fig.3과 같이 사람들의 신장, 체중, 가속도, 최대속도, 충돌력의 다섯 가지를 고려하여 개인마다 다른 값을 가지도록 모델링하고, 이들 물리적 특성들을 개별요소의 반경, 단위높이당 질량, 순간가속도, 최대속도, 스프링 상수들로 표현하였다.

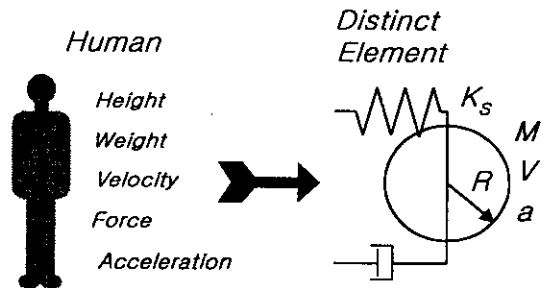


Fig.3 Human and distinct element

개별요소들의 물리적인 특성치는 일본에서 행해진 연구(清野純史/三浦房紀 1996)의 값을 평균으로 하고 변동계수를 부여하여 확률변수로 간주하였으며 감쇠특성은 임계감쇠를 가정하였다.

#### 3.4 Reliability Solver 모듈

전 단계의 모듈에서 식 (1)의 한계상태식에서

의 각 항의 통계적 특성이 구해지면 구조신뢰성 분야에서 파괴확률의 계산을 위한 Monte-Carlo 추출법이나 개선된 일계이차모멘트법을 이용하여 사망확률을 산정할 수 있다. 이들 방법은 양영순 등(1999)에 자세히 설명되어 있으므로 여기에서는 상세한 기술을 생략한다.

4. 적용 예

4.1 계산모델

Fig.4는 화재가 발생할 선실을 보인 그림인데, 방화설비는 규정에 기초하였다. 즉 고려된 방화설비는 열감지형 화재경보기로써 설치와 작동온도 및 작동온도상승률은 규정(한국선급 1997)을 따라 선실내에 2개를 설치하고, 66°C와 1°C/min를 각각 작동온도 및 작동온도상승률로 설정하였다.

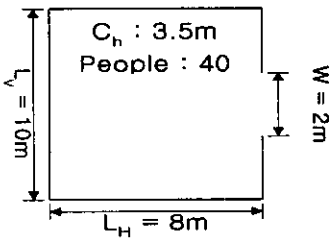


Fig.4 Room

그리고, Fig.5는 계산에 이용된 개별요소의 확률변수 정보를 나타낸 것으로, 평균값은 清野純史/三浦房紀(1996)에서 인용하였으며 변동계수는 일정하게 0.1로 가정하였다.

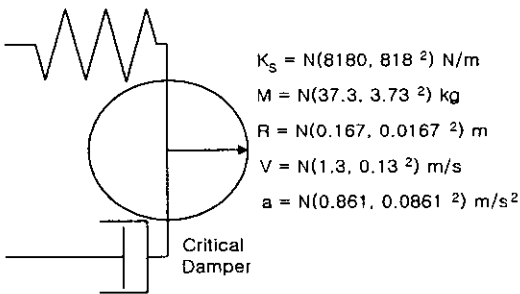


Fig.5 Human

불은  $t^2$  화재의 특성을 결정짓는 화재성장률 (fire growth rate)을 화재안전공학 분야에서 주로 이용되는 범위인 0.01 ~ 0.1 [ $kW/sec^2$ ] 사이의 값을 갖는 확률변수로 가정하였다.

계산에 이용된 확률변수들의 자세한 정보는 이정훈(1999)에 기술되어 있다.

4.2 대피시간의 확률분포

대피자의 초기위치와 물리적인 특성치를 Monte-Carlo 추출법으로 결정하여 시뮬레이션을 위한 100개의 set을 구성한 후, 각각에 대해 개별요소법을 이용하여 대피 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 각 개인의 대피시간 중 최후 대피자의 대피시간을 찾았다. 100회의 대피 시뮬레이션을 통해 구해진 대피시간으로부터 얻은 최후 대피자의 대피시간의 누적확률분포는 Fig. 6과 같다.

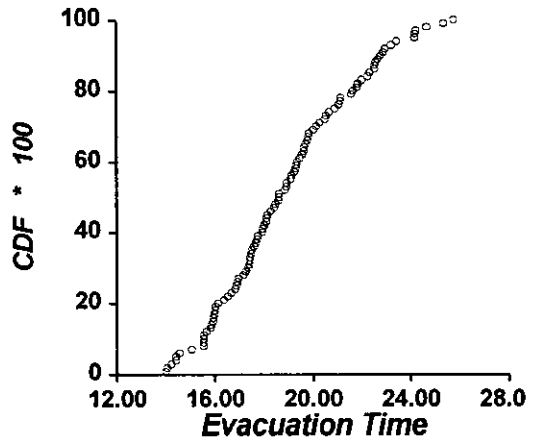


Fig.6 CDF of E

최후 대피자의 대피시간에 맞는 가장 적합한 확률분포는 Fig.6의 결과를 정규분포, 대수분포, Weibull분포, Gumbel분포의 Probability Paper에 도시하여 가장 오차가 작은 분포로 결정하였다. 검토한 네 분포 중 Weibull 분포는 평균, 표준편차, 하한값의 세 가지 특성치를 갖는데, 대피시간은 하한값을 반드시 가지므로 Weibull 분포가 가장 오차가 작았으며 그 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Statistical Information of  $E$

Distribution	$\mu$	$\sigma$	$l$
Weibull	18.99	2.91	13.00

4.3 사망확률의 계산

계산모델에 대해 개선된 일제이차모멘트법과 추출횟수 500,000번의 Monte-Carlo 추출법을 이용하여 구한 사망확률을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 Probability of fatality

		Detector		
		Activated	Non-Activated	
Monte-Carlo		0.0591	0.3869	
AFOSM		0.0428	0.3866	
	sensitivity			
	$\alpha$	0.16	0.16	
	$R$	0.98	0.99	
	$E$	0.07	0.06	

만일 선박의 사고에 대한 조사를 토대로 구축된 화재사고에 대한 데이터베이스에서 화재발생물이 얻어진다면, 앞에서 구한 사망확률에 화재발생물을 곱한 값이 진정한 선박의 화재안전도에 대한 지표가 될 것이고 그 값은 사망확률보다 매우 작아질 것이다.

4.4 민감도 해석

사망확률에 미치는 각 특성치의 영향을 고려하기 위해 여러 가지 경우에 대해서 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석의 내용은 계산모델에서 선실의 특성을 나타내는 인자들의 값에 따른 차이 및 출입구의 위치나 개수, 그리고 선박의 동요에 의한 영향을 조사하였다.

선실의 특성을 나타내는 인자인 가로 및 세로, 천장 높이, 문의 폭과 인구밀도는 선박의 설계에 있어서 결정해야 할 설계변수로 생각할 수 있다. 이 변수들의 값을 변화시켰을 때 사망확률의 변화

은 Fig.7과 같은데, 선실의 크기가 커질수록 사망확률이 작아진다.

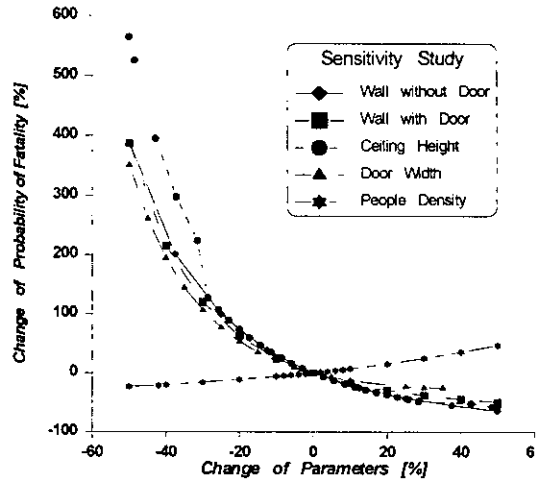


Fig.7  $P_f$  w.r.t. design parameters

각 변수가 사망확률에 미치는 영향은 기울기로부터 파악할 수 있는데, 선실의 모양을 결정하는 변수들의 영향은 거의 동일하고 인구밀도는 다른 변수들에 비해 영향이 매우 적다. 또한 설계변수들의 변화시 사망확률의 증가경향은 뚜렷한데 비해 감소경향은 매우 작은데, 이는 설계변수들을 최적화 하더라도 사망확률의 급격한 감소를 기대하기는 어렵다고 해석할 수 있다.

한편 실제 설계문제에서 발생할 수 있는 상황으로 정해진 규격의 선실에서 출입구의 위치나 개수를 결정하는 문제가 있을 수 있다.

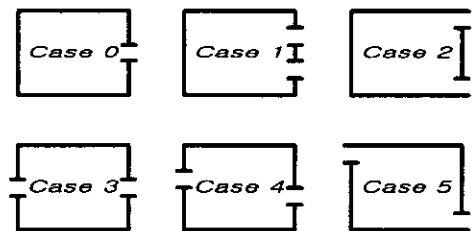


Fig.8 Exit door configuration

일반적으로 생각하면 Fig.8에서 출입문이 양쪽으로 위치하고 대피자의 출입문 접근시간이 짧을 것으로 추정되는 Case 3일 때 사망확률이 가장

작을 것으로 예상되나, Fig.9에 의하면 출입문이 한쪽으로 위치할 때가 양쪽에 위치하는 경우보다 작고 한쪽으로 가운데에 몰려서 위치하거나 양쪽으로 충분히 멀리 떨어져 있을수록 작은 것을 확인할 수 있다.

육상건물과는 달리 해상에서 이동중인 선박은 선체운동이 대피과정에 미치는 영향을 고려할 필요가 있으며, 이를 위해 Fig. 10과 같은 기본적인 상황을 설정하였다.

Fig.11을 보면 횡동요 현상의 유무에 따라서 대피시간의 확률분포에 큰 변화가 발생함을 볼 수 있는데, 횡동요가 고려될 때 선실이 좌우로 기울어졌다가 원래의 수평상태로 복원되는 동안에 대피시간이 풀리게 된다.

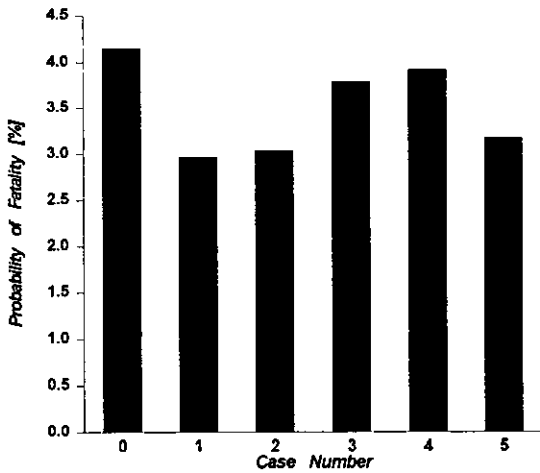


Fig.9  $P_f$  w.r.t. door configuration

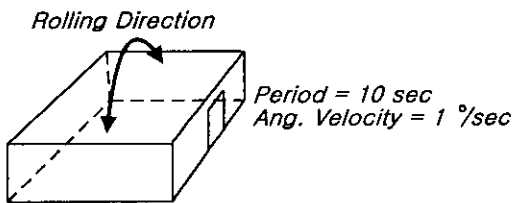


Fig.10 Rolling effect

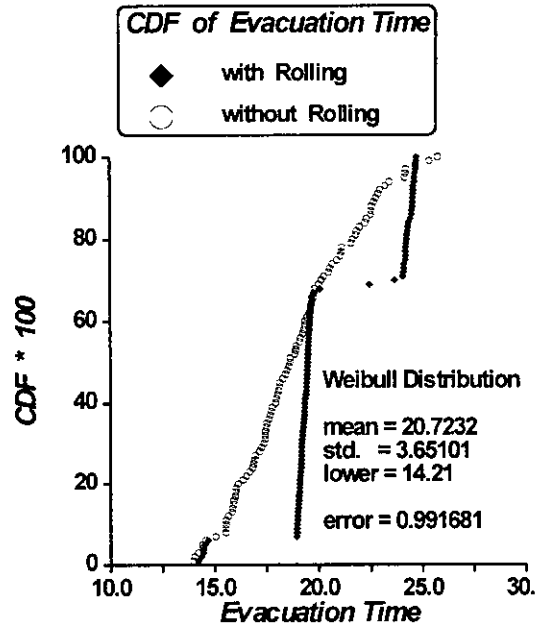


Fig.11 CDF of  $E$  considering rolling

5. 결 론

본 논문은 선박의 화재사고에 대한 안전도를 정량적으로 평가하기 위한 프로그램을 개발하고 적용 예를 보였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 한계상태식의 정식화와 사망확률의 계산과정을 통해 화재안전도 산출의 기본적인 방법론을 제시하였다.
2. 화재발생시 인간의 대피활동을 개별요소법을 이용하여 모사하고 대피자들의 대피시간에 대한 이론적 접근이 가능하였다.
3. 계산모델에 대한 적용 결과 FSEM을 이용하여 정량적인 화재안전도 평가가 가능함을 제시하였다.
4. 사망확률을 지표로 하여 현재의 규정 및 방화설계방안에 대한 정량적인 검토와 평가가 가능하다.

한편 본 연구에서 보인 계산모델은 천장의 높이나 출구의 넓이를 비롯한 방의 규격 및 승객의 밀도, 횡동요 특성 등에 있어서 실제 선박에서 발생

한 화재시 대피사건을 정확하게 반영한다고 하기에는 부족하다.

또한 화재의 성장과 사람의 대피과정이 독립적으로 고려되는 점을 보완하기 위해서는 선실 배치의 특수성을 고려할 수 있는 다중구획 연기모델링 기법과 인간의 대피행위를 좀더 정확히 모사하기 위한 연구가 요구된다.

따라서 추후의 연구에서는 정량적인 화재안전도 평가를 선박의 화재관련 규정 및 방화설계방안에 실제적으로 이용하기 위해 앞에서 언급한 바와 같이 다중구획 환경에서 설정된 현실적인 계산모델을 이용한 해석이 수행될 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- 양영순, 서용석, 이재욱 1999 구조 신뢰성 공학, 서울대학교 출판부
- 이정훈 1999 선박의 화재안전도 평가에 관한 연구, 서울대학교 공학석사 학위논문
- 한국선급 1997 선급 및 강선규칙, 제8편 방화구조 및 소방설비
- Cooper, L.Y. 1981 "Estimating Safe Available Egress Time from Fires." NBSIR 80-2172
- Cundall, P.A. 1979 "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies," Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65
- Evans, D.D. 1985 "Methods to Calculate the Response Time of Heat and Smoke Detectors Installed Below Large Unobstructed Ceilings," Fire Technology, Vol.22, No.1, pp.54
- Magnusson, S.E. 1996 "Fire Safety Design Based on Calculations," Fire Safety Journal, Vol.27
- 清野純史, 三浦房紀 1996 "被災時の群集避難行動シミュレーションへ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, pp.233-244