

인적요소를 고려한 선상 탈출 시뮬레이션 기술

김홍태*·이동곤*·박진형*

A Review of Simulation for Human Escape on Shipboard

Hongtae Kim, Dongkon Lee and Jin-Hyoung Park

Key Words: Evacuation Analysis, Human Behaviour, Ship Motion

Abstract

In the last years there have been some severe accidents with passenger vessels. So, International Maritime Organization(IMO) has recognized that computer simulation of the evacuation may be required for passenger vessels. Human elements is a key issues of escape analysis on shipboard. There are technical requirements to simulate of escape analysis for human elements. Technical requirements include model of ship structure, evacuation algorithm, human behaviour analysis and influence of ship listing/motion. This paper provides the key issues and technologies of simulation for human escape on shipboard.

1. 서 론

해상에서의 인명탈출 분석에 대한 연구는 선박의 안전설계(Design for Safety ; DFS)의 관점에서 매우 중요한 분야이다. 이러한 탈출 분석의 목표는 연안 여객선, Cruiser, Ro-Ro Car Ferry선 및 대형 함정과 같이 많은 인명이 탑승하는 선박을 대상으로, 선박이 손상되거나 화재가 발생했을 때, 승객이나 승무원을 안전하고 효율적으로 탈출시키기 위한 탈출경로의 분석, 탈출시간의 계산, 탈출시나리오의 구현 및 구명장비의 효율적 배치 등을 목표로 한다[10].

이러한 인명탈출 분석에 대한 연구는 육상 건축물(대형 빌딩, 경기장) 및 항공기 분야에서 1970년대 초반부터 화재 사고를 중심으로 시작되었으며, 선박과 관련된 해상사고에 대해서는 1995년 국제해사기구(International Maritime Organization ; IMO)를 중심으로 빈번히 발생하는 선박의 전복

사고로 인해 대량의 인명손실이 발생하자, 탈출 시보다 많은 인명을 구하기 위한 방안으로 설계 초기단계에서 Ro-Ro Passenger 선에 대한 탈출분석을 요구(IMO MSC/Circ. 909)하고 있다.

현재 IMO에서 요구하는 탈출분석은 탈출로의 유효 폭, 인명의 이동시간 등과 같은 주요 요소들의 값을 미리 정하여두고 약간의 제한조건을 가하여 단순계산을 하는 방법이다. 이는 선박이 탈출에 필요한 일정 수준 이상의 설비(폭도의 폭, 계단의 경사 등)를 갖추도록 하는 데는 효과적이거나, 승객의 안전을 만족할 수준으로 향상시키지는 못한다. 따라서 IMO에서는 탈출분석에 필요한 충분한 시뮬레이션 기술이 개발되기까지만 잠정적으로 현재의 규정을 적용하도록 하고 있다.

본 논문에서는 탈출분석에 관한 국제법규와 탈출분석에 관한 알고리즘을 살펴보고, 현재 선박에 적용한 탈출분석 연구의 현황에 대하여 기술하였다. 또한 현재 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 수행하고 있는 인명 탈출분석 연구의 내용을 정리하여 소개하고자 한다.

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

2. 관련 국제 법규

현재 선박에서 인명 탈출분석에 관한 요구로는 IMO의 MSC/Circ. 909인 'Interim Guidelines for a Simplified Evacuation Analysis on Ro-Ro Passenger Ships'이 대표적이며 이를 요약하면 다음과 같다[1].

- 목적
 - 선박의 탈출분석을 통한 탈출경로 평가
 - 탈출로 상의 혼잡지역의 파악 및 제거
 - 탈출설비 배치의 유연성 확보
 - 다양한 탈출 시나리오에 대한 반복적인 설계 변경을 통하여 최적의 탈출경로 설정
- 탈출 허용시간(Fig. 1 참조)
 - 탈출경로 인식시간(A) : 주간 5분, 야간 10분
 - 집합장소(Mustering Station)로의 이동시간(T) : MSC/Circ. 909 부록에 의한 방법으로 계산
 - 구명정의 승선 시간(E) 및 진수 시간(L) : 30분 이내
 - 총 소요시간 : $A + T + \frac{2}{3}(E+L) \leq 60$ 분
- 승인용 문서
 - 탈출분석을 수행했다는 것을 입증하는 자료
 - 탈출 시간을 줄이기 위한 조치가 취해졌음을 나타내는 자료
 - 정해진 기준을 만족함을 보여주는 자료

IMO는 현재의 탈출분석에 관한 정도를 향상시키기 위한 후속 조치로서 Ro-Ro Passenger 선박만 아니라 대형여객선과 고속 여객선에 적용할 수 있는 단일 지침 개발을 계속하고 인적요소들의 세부적인 파악을 지속하며 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 탈출 분석의 지침을 개발하고 있다. 이를 위하여 주요 인자들의 통계자료를 수집 및 분석하고 Full Scale Evacuation Test와 운항 중인 선박에서 본선 탈출 시험을 통하여 얻어진 결과를 탈출분석 결과와 비교하여 개선하는 작업을 수행하고 있다.

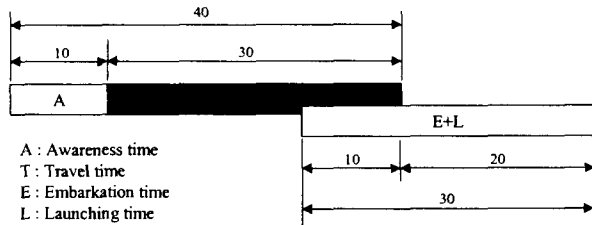


Fig. 1 IMO MSC/Circ. 909에 의한 최대 탈출 허용 시간(단위:분)

3. 인명탈출 분석 시스템의 분류

지금까지 위기 상황에서의 인명탈출 분석을 위한 많은 시스템들이 개발되었다. 이들 시스템은 추구하는 목적과 구현 당시의 컴퓨터의 성능, 분석을 통해서 얻고자하는 정보에 따라 각각 다른 기법들을 사용하였다. 적용 모델, 공간 표현방식, 탈출객체의 모델링 기법, 탈출객체의 의사결정 모델 등 4가지 요소를 기준으로 기존 시스템의 특성과 장단점, 그리고 응용가능 분야에 대한 객관적인 평가와 분류를 하였다[2].

첫 번째로 탈출분석에 적용되는 모델의 특성에 따라 최적화, 시뮬레이션, 위해도 평가 등의 세 가지 형태로 구분할 수 있다. 최적화 기법은 탈출객체들을 동일한 탈출 능력과 행동 양식을 가진 입자로 간주하며, 시뮬레이션 기법은 최적화 기법에서 얻을 수 있는 정량적 결과와 더불어 각 객체들의 의사결정 과정이나 탈출 경로 등의 정보도 같이 얻고자 하는 기법이다. 또, 위해도 평가기법은 탈출 시에 접할 수 있는 위험 요소들에 대한 평가를 통해 탈출분석을 하고자 하는 모델이다.

두 번째는 탈출의 대상이 되는 공간은 탈출분석 시스템에서 반드시 표현되어야 하는 요소이다. 공간의 표현방식은 Fine Network와 Coarse Network 두 가지로 크게 나눌 수 있다. Fine Network는 표현하고자 하는 공간을 일정크기로 나누어진 node의 집합으로 표현하며, Coarse Network는 탈출 대상 구조물을 의미 있는 하위구조물 또는 하위 공간의 연결체로 표현한다.

세 번째는 탈출을 위한 객체의 모델링 방식으로, Individual View와 Global View가 있다. Individual View를 통한 모델링은 객체 하나 하나에 대해 특성 값들을 설정하는 것을 의미하며, Global View를 통한 모델링은 탈출객체를 일괄적으로 모델링 한다.

마지막으로 탈출객체의 의사결정 방식은 여러 가지 모델을 이용해서 표현된다. 즉, 모델링 되는 객체는 각각 나름대로의 논리적이고 독특한 방식의 행동 양식을 가지며, 의사결정 요소를 사용하지 않는(no rules applied) 기법, 기능적 분석(functional analogy based) 기법, 암시적(implicit) 기법, 규칙기반(rule-based)의 의사결정 기법, 인공지능(AI)을 이용한 기법 등으로 분류된다[4].

Table 1은 위와 같은 4가지 기준을 적용하여 현재까지 개발된 인명탈출 분석 시스템을 분류한 것이다.

Table 1 인명탈출 분석 시스템의 분류

적용 모델	공간표현 방식	탈출객체 모델링 기법	탈출객체의 의사결정 모델	시스템	
시물레이션	Fine Network	Individual	AI Based	Egress Vegas	
			Rule Based	Bgraf Exodus	
			Implicit	Simulex	
			Functional Analogy Based	Magnet	
			Global	-	
	Coarse Network	Individual	Rule-based	E-Scape EvacSim Exit	
			Global	Implicit	PaxPort Exit89
				AI-Based	Donegan
		Global	-	-	
			-	-	
최적화	Fine Network	-	-	-	
	Coarse Network	Global	No Rules Applied Functional Analogy Based	Evacnet+ Takahashi's model	
위해도 평가	Fine Network	-	-	-	
	Coarse Network	Individual	Rule-based	Crisp	
Global		Implicit	WavOut		

4. 관련 연구 현황

EU의 BriteEuram Programme으로 “Mustering and Evacuation of Passengers: Scientific Basis for Design-MEPdesign” Project가 네덜란드의 TNO Human Factors Research Institute 주관으로 1998년 1월에 시작되었다[3]. 컨소시엄 형태로 유럽의 7개 조직이 참여하고 있는 MEPdesign 프로젝트는 손상된 Ro-Ro Passenger 선에서 선박의 동적효과를 고려한 인명의 Mustering과 Evacuation 과정을 시물레이션할 수 있는 컴퓨터 시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 탈출장비인 Life boat, Life raft, Davit, Sliding system 등의 성능 향상을 위한 연구도 포함하고 있다[4].

EU의 연구자금으로 수행되고 있는 또 다른 프로젝트인 “Design for safety-Safer EURORO”에서도 탈출분석에 관한 연구를 수행하고 있다[5]. Safer EURORO 프로젝트는 Ro-Ro Passenger 선의 안전성을 향상시키기 위하여 5개 분야의 연구를 집중적으로 수행하고 있으며, 그 중의 하나가 Design for Passenger Survival이다.

MEPdesign 프로젝트와 Safer EURORO 프로젝트는 부분적으로 Subcontract 관계에 있으며 부분적으로 동일한 기관이 참여하고 있다. 따라서 근

본적인 연구 목표는 동일하며, 주요 내용으로는 집합, 탈출, 의사결정지원, 인적 요소, 탈출 장비 등이 있다.

캐나다에서는 상용 탈출분석 도구인 EXODUS를 선박에 적용하기 위한 변환 연구를 수행하고 있으며, 미국에서는 USCG와 SNAME을 중심으로 IMO의 규정에 대한 대응 연구를 수행하고 있다.

또한, 독일의 Gerhard-Mercator 대학에서는 Cellular Automation(CA) Model을 사용하여 고속선의 탈출분석을 시도하였다[6].

일본에서도 탈출 구역을 Node-Path-Space 시스템으로 표현하고 개개인은 가장 짧은 동선으로 움직인다는 가정으로 인명 안전탈출 시물레이션을 수행하였고, 결과의 정확도를 검증할 목적으로 실선에서 실제 사람을 대상으로 한 실험도 수행하였다[11]. 이의 결과를 바탕으로 초기 설계안에 대한 인명 안전성을 평가하고, 시물레이션을 통하여 병목 현상을 파악한 후 수정 보완을 통하여 선박의 탈출 안전성을 향상시킨다고 보고하고 있다.

5. 탈출시 인간거동 관련 영향 요인

탈출분석을 위한 시물레이션에서 인간의 거동(human behavior) 문제는 가장 중요한 요소이다. 이러한 이유로는 탈출분석 시물레이션을 위하여 선박의 경사 및 거동, 정전상태 및 통로의 연기상황, 공황장애 승객, 선실로 돌아오는 승객, 이동통로의 장애요인, 승객들의 특성(나이, 성별, 가족동반 여부) 등과 같은 여러 가지 조건의 고려가 필요하기 때문이다. 시물레이션을 통하여 이러한 많은 조건들의 조합을 통하여 인간의 거동을 예측할 수 있다.

일반적으로 탈출상황에서 인간의 거동은 주변의 여러 가지 요인들과 복잡한 관련성을 가지는데, Figure 2는 유럽에서 진행중인 MEPdesign 프로젝트에서 집합 및 탈출(mustering and evacuation) 과정에서의 영향 요인들을 정의하고 있는 그림이다[3].

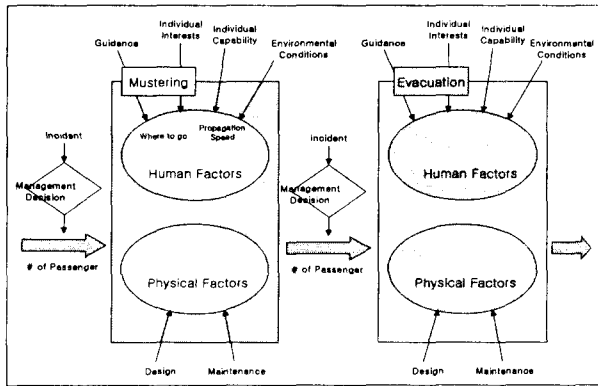


Figure 2 집합 및 탈출 과정에서의 영향 요인

탈출과정에 영향을 미치는 요인들을 탈출 객체(승객)를 중심으로 나타내어 보면, 다음과 같은 4가지 유형으로 정리할 수 있다[12].

첫 번째는 People-Self Interaction으로 탈출 승객의 경험이나 태도에 의한 반응을 나타내는데, 위기상황에서 이러한 유형의 인터랙션은 화염으로부터 물러서거나 소리를 지르는 등의 반응을 동반할 수 있다. 위기상황에서의 공황상태와 같은 것들도 여기에 포함된다.

두 번째는 People-People Interaction으로 다른 탈출 승객들과의 인터랙션을 나타내는데, 위기상황에서 이러한 유형의 인터랙션은 구출을 유도하거나 다른 승객들에게 비상상황을 알리는 행동이 여기에 포함된다.

세 번째는 People-Structure Interaction으로 둘러싸인 구조물과의 인터랙션을 나타내는데, 위기상황에서 이러한 유형의 인터랙션은 선내 배치설계, 안전장비 및 정보시스템에 관련된 내용으로 탈출 시스템의 전반적 효율에 영향을 미친다.

마지막으로는 People-Environment Interaction으로 주변의 환경적인 요인에 의한 생리적 반응으로서, 화재상황에서 이러한 유형의 인터랙션은 마취성의 화재 가스로 흥분상태와 자극성 가스로 인한 감각기와 호흡기에 자극한다.

이러한 인터랙션들은 각 탈출 승객들의 움직임에 영향을 미치고, 그 결과를 통해 탈출을 위한 의사결정이 이루어진다.

6. 인적요인을 고려한 탈출객체의 거동

탈출과정의 시뮬레이션에서 가장 복잡하고 어려운 부분이 인간의 거동 부분이며, 아직까지 어떠한 모델도 탈출에서의 인간거동 부분을 완전하게 처리하지 못했다. 더욱이 이러한 인간의 거동 부분

에 대한 이해와 정량화가 충분하게 이루어지지 않고 있다. 이러한 이유로는 사고의 유형 및 환경에 따라 가변적인 요소가 많은 부분을 차지하기 때문에 모델링 및 정량화에 많은 어려움이 따르기 때문이다.

예를 들어 1999년의 Lloyd's Cruise International에 의하면, 몇몇의 실제 사고상황에서 60%의 승객이 승무원의 지시에 따르지 않았으며, 15%의 승객은 아무런 행동도 취하지 못한 예가 보고되고 있다. 또, 1995년 프랑스의 41m급 고속 쌍동 여객선인 St. Malo호 사고의 경우에는 308명이 탈출하는데, 사전에 실시된 훈련시의 8분에 비해 9배 이상인 1시간 17분이 소요되었다고 한다. 즉, 사고상황에서의 선박의 경사 및 동요문제와 긴급상황에서 승객들의 심리적 요인이 전체 탈출시간에 가장 중요한 요인으로 작용하는 것으로 나타났다.

이러한 내용을 바탕으로 본 연구팀에서는 2001년부터 “인적요인을 고려한 탈출분석 기술 개발”과제를 수행하고 있으며, 최종 목표는 인적요인을 반영한 선상 탈출 시뮬레이션 시스템의 개발이다. 주요 내용으로는 인간거동의 해석을 위해 선박의 경사 및 동요에 따른 보행속도를 중심으로 한 육체적(physiological) 분석과 위기사 심리적 요인의 반영과 같은 심리적(psychological) 분석이다.

6.1 선박의 경사 및 동요

탈출상황에서의 인간 거동 중에 보행의 흐름을 수학적으로 모델링하는 방법에는 거시적(macroscopic) 모델과 미시적(microscopic) 모델의 두 가지 접근 방법이 있다. 거시적 모델은 인간의 이동만을 고려한 모델로서, 인간보행의 흐름을 유체나 가스와 유사하게 모델화한 것이다. 미시적 모델은 인간의 이동과 거동을 연결시키는 모델로서, 각 탈출 객체는 연령, 성별, 보행속도 등의 파라미터를 가진 셋으로 표현되며, 이러한 파라미터들은 현실적인 시뮬레이션을 위하여 통계적 분포로부터 값을 얻는다.

선상 탈출 시뮬레이션 시스템의 개발에 미시적 모델을 이용하기 위해서는 선박의 경사 및 동요에 따른 보행속도의 고려가 필요하다.

선박의 경사 및 동요 효과에 따른 보행속도의 측정을 위해서는 다음과 같은 실험설계가 이루어져야 한다.

- 실험 대상
 - 연령 (10대~70대)
 - 성별 (남자, 여자)
- 실험 종류
 - 복도

- 계단
- 출입구 및 출입문
- 실험 조건
 - 종경사 ($-20^{\circ} \sim +20^{\circ}$)
 - 횡경사 ($0^{\circ} \sim 20^{\circ}$)
 - 종동요 (pitch)
 - 횡동요 (roll)

현재까지의 연구에 의하면, 평지에서의 보행속도는 연령에 따라 0.9m/s~1.4m/s 사이를 유지하는 것으로 보고되고 있다[11]. 한편, 일반적으로 긴급상황에서의 보행속도는 평상시 보다 빨라지는 것으로 보고되고 있다 또, 선박의 경사에 대한 실험에 대해서는 종경사 오르막의 경우에 경사각도에 따라 보행속도가 차이가 심하며, 종경사 내리막과 횡경사의 경우에는 보행속도의 차이가 미미한 것으로 보고되고 있다[7][8]. 또, 선박의 동요에 대해서는 종동요 및 횡동요 모두에서 10%~15%의 속도가 감소하는 것으로 보고되고 있다.

6.2 긴급상황에서의 심리적 요인

선박의 사고상황에서 인간의 행동양식을 나타내는데, 가장 큰 문제는 탈출경로의 선택을 어떻게 할 것인가 하는 것이다. 동일한 구조의 선박이더라도 승객들의 심리 상태에 따라 탈출 경로가 달라질 수 있기 때문이다[9]. 이러한 심리적 요인에는 선박 내의 승객들간의 인지도, 동반 가족의 유형, 선내의 채광여건 등이 해당된다.

기존의 탈출 시뮬레이션에서는 대부분 동일한 구조의 시설물이면, 동일한 탈출 결과를 보여주고 있는데, 이러한 결과는 탈출 객체의 심리적 요인을 반영하지 않고, 단순히 대기 시간의 최소화 및 최단 경로의 선택만을 고려했기 때문이다.

결국 이러한 심리적 요인의 반영을 위해서는 탈출객체 각각이 환경을 인식하고 판단해서 행동할 수 있는 에이전트(agent) 기반의 시뮬레이션 시스템의 개발이 요구된다.

7. 맺음말

IMO는 Ro-Ro Passenger 선과 여객선에 대하여 탈출분석을 요구하고 있고, 이들 선종은 국내 산업계에서 향후 주력하여야 할 대상 품목이므로 산업적인 측면에서도 중요하며, 또한 상선에 비하여 승선 인원이 많은 함정이나 최근 인천 앞 바다에서 화재로 전소한 고속 여객선 등의 선박에도 탈출분석 기술의 적용이 요구된다.

인명의 안전은 그 무엇보다도 중요하며 해상에서의 인명 안전은 육상의 건축물과 달리 제한된

공간과 주변 환경의 상대적 열악함으로 인하여 육상에서의 탈출분석 기술을 그대로 적용하는 것이 무의미하다. 따라서 선박에 탈출분석 기술을 적용하기 위해서는 선박의 경사 및 동요효과가 인간의 거동에 미치는 영향을 체계적으로 파악하고 분석하는 것이 필요하며, 또한 심리적 요인을 고려한 행동 양식의 분석과 화재에 의한 유해 물질의 영향을 파악하는 것도 필요하다.

현재 유럽을 중심으로 한 대학과 연구 기관에서는 탈출분석에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 그 결과는 국제법규의 형태로 국내 조선산업에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

본 연구팀에서도 탈출 시뮬레이션 시스템의 개발을 위한 시스템의 설계와 탈출 알고리즘의 개발을 진행하고 있으며, 향후 부분적인 실험을 계획하고 있다.

후 기

본 글은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(KRISO)에서 기본연구사업으로 수행중인 "인적요소를 고려한 탈출분석 기술 개발" 과제의 연구결과 일부분임을 밝힌다.

참고문헌

- [1] Interim Guidelines for a Simplified Evacuation Analysis on Ro-Ro Passenger Ships, MSC/Circ. 909, IMO, 1999
- [2] S. Gwynne, E.R. Galea, et al. "A review of the methodologies used in the computer Simulation of evacuation from the built environment", Vol. 34, Building and Environment, 1999.
- [3] L. C. Boer, W. Bles, "Evacuation from ships : Account for ship motion", Safety of transportation : Imbalance between growth and safety, Delft, Netherlands, Feb. 1998.
- [4] O. Rutgersson, E. Tsyckova, "Safety management of the mustering and evacuation of damaged passenger ships-MEPdeign on the development of a tool box", Learning from marine incidents (RINA conference), London, UK, Sep. 1999.
- [5] "Design for Safety : An integrated approach to safe European Ro-Ro ferry design", 1998. 11, Ist Annual Report, EU.
- [6] H. Klupfel, "Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships", Proceedings of Int. Conference on Escape, Evacuation & Rescue,

1996

- [7] V. Bles, "Influence of ship listing and ship motion on walking speed", Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Duisberg, 2001.
- [8] M. Murayama, "Study on evaluation of escape route by evacuation simulation", 일본조선학회 논문집 188호, 2000.
- [9] M. Katuhara, et al, "Simulation of human escape on board -I,II,III", 일본항해학회 강연회, 1998.
- [10] 이동곤, 안전설계 기술현황 및 전망, 선박해양기술, 30호, 2000.
- [11] 황규성, 한국인의 보행특성에 관한 연구, 대한인공학회지, 10권 2호, 1991.
- [12] 김홍태, 탈출분석을 위한 Human Factors 기술의 현황 및 전망, 선박설계연구회 연구발표회, 2001.