

선박의 경사 및 동요효과가 탈출승객의 이동성에 미치는 영향

김홍태^{1*} · 이동곤¹ · 박진형¹ · 홍승권²

¹한국해양연구원 해양시스템안전연구소 / ²한국소프트웨어진흥원

The Effect on the Mobility of Evacuating Passengers in Ship with Regard to List and Motion

Hongtae Kim¹ · Dongkon Lee¹ · Jin H. Park¹ · Seung-Kweon Hong²

¹Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering/KORDI, Daejeon, 305-600

²Korea IT Industry Promotion Agency, Seoul, 138-711

The most complicated and difficult area in the simulation of evacuation process is the area of human behavior. However, it is generally very difficult to understand and quantify human behaviors since the factors involved vary significantly according to the types of accidents and the environment. The walking speed of passenger is especially affected by dynamic effect and list due to damage and ship motion in wave. There are various methods to get the useful data for evacuation simulation. The onboard experimental approach is one of the strongest method. This paper discusses the onboard experimental results of human mobility of passengers in evacuation from ship. To realize ship trim and heel due to maritime casualty, the passage model for experiment is made. The experiment was carried out at dynamic and static condition respectively using the ship with passage model. The result was evaluated and it will be reflected in evacuation simulation tool.

Keywords: human behavior, escape simulation, human mobility

1. 서론

선박의 사고로부터 인명을 안전하게 보호하기 위한 노력의 일환으로 국제해사기구(International Maritime Organization; IMO)에서는 Ro-Ro Passenger 선을 대상으로 탈출분석 결과를 요구하고 있다. 또한 현재의 규정으로는 여러 가지 제약으로 인하여 탈출상황을 정확하게 묘사하는 것이 어렵다는 인식하에 시뮬레이션에 기반한 탈출분석 기술의 개발을 동시에 추진하고 있다. 탈출 시뮬레이션에서는 선박의 경사와 동적 효과를 반영

하는 것이 매우 중요하며, 이러한 상황을 고려한 인명의 보행 속도에 관한 실험적 연구가 수행되어 왔다.

위기 시, 인명의 행동양식은 사람을 대상으로 하고 있기 때문에 실험이나 분석을 필요로 하는 분야로서, 집단이 속해 있는 문화적인 차이, 성별과 나이에 따른 거동의 제한, 심리적인 공황상태 등을 고려해야 한다. 선박의 경사와 동요효과와 고려는 육상 건축물에서는 크게 영향을 주지 않으나 선박의 경우에는 이동속도에 큰 영향을 주는 인자로서, 인명의 거동에 직접적인 제한을 주는 요인이다(Kim *et al.*, 2001; 김홍태 외,

이 논문은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 기본연구사업(해양위해도 통합시스템 기반기술개발)의 연구비 지원에 의한 것임.

*연락처 : 김홍태 선임연구원, 305-600 대전시 유성구 장동 171 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, Fax : 042-868-7236,

E-mail : kht@kriso.re.kr

2003년 4월 접수, 1회 수정 후 2004년 1월 게재 확정.

2001).

본 논문에서는 세계 각국에서 수행되고 있는 선박의 경사 및 동요와 승객의 이동성에 관한 실험결과를 분석하였다. 또한, 해양사고에서 가장 특징적으로 나타나는 선박의 경사 및 동요효과가 승객의 탈출과정에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하기 위한 해상 피난실험을 수행하였고, 그 결과를 정리하였다. 동요가 없는 상태와 동요가 있는 상태 각각에 대하여 종경사(trim)와 횡경사(heel), 그리고 종경사와 횡경사를 조합한 조건에서 실험결과를 분석하였다.

2. 탈출상황에서의 인간행동

탈출분석을 위한 시뮬레이션을 수행하는 데 있어서 가장 복잡하고 어려운 부분이 인간의 행동양식(behavior)에 대한 부분이며, 아직까지 어떠한 모델도 탈출상황에서의 인간행동을 완전하게 반영하고 있지 못하다. 이는 사고의 유형 및 환경에 따라 가변적인 요소가 많은 부분을 차지하기 때문에 인간행동의 모델링 및 정량화에 많은 어려움이 따르기 때문이다.

일반적으로 사고상황에서 대피를 위한 인간의 본능적 행동은 다음과 같은 형태로 나타난다고 보고되고 있다(이상준 외, 1999).

- 되돌아오는 길
- 일상 동선 지향성
- 향광성
- 향개방성
- 일시경로 선택성
- 지근거리 선택성
- 직진 지속성
- 본능적 위험 회피성
- 이성적 안전 지향성
- 부화뇌동성

대부분의 탈출상황에서 일어날 수 있는 인간의 행동을 기본적인 3가지 단계로 정리하면 다음과 같다. 첫 번째는 이해단계로서 사람들이 사고의 본질을 이해하고, 어떻게 행동해야 하는지를 결정하려고 하는 단계이다. 두 번째는 준비단계로서 사람들에게 위협이 인식되면, 지시를 따를 준비를 하는 단계이다. 마지막으로 세 번째는 행동단계로서 사람들이 비상사태의 원인을 극복하고 위험지역으로부터 탈출하는 데 적극적으로 참여하기 시작하는 단계이다.

이러한 단계는 계층적 행동분석(hierarchical behavior analysis) 기법과 같은 분석을 통하여, 좀더 세분화된 행동으로 나누어 정리할 수 있다. <그림 1>은 탈출 시뮬레이션 프로그램인 E-escape에서 탈출 시의 거동에 대한 행동을 계층적으로 분석한 예이다(Reisser-Weston, 1996).

탈출객체(evacuee)의 거동에 영향을 미치는 요인을 구조적(configurational) 요소, 절차적(procedural) 요소, 환경적(enviromental) 요소 및 탈출집단(occupants)의 거동(behavioral) 요소로 구분할 수 있으며(Gwynne *et al.*, 1997), 이 가운데 탈출집단의

거동요소는 다른 세 가지 요소들로부터 영향을 받는 것으로 되어 있다. 구조적 요소로부터의 영향은 배치의 잘못으로 인한 밀집현상(high density population), 탈출방해(blockage), 비상구 오용(exit misuse) 등을 초래한다. 절차적 요소는 경보(alarm) 체계, 신호표시(signage) 체계, 승무원/관리자, 구조에 대한 친밀도(familiarity) 등이 탈출에 미치는 영향에 대한 부분이다. 환경적 요소는 화재로 인한 연기, 열, 가스 등의 영향을 나타내며, 탈출객체에게 육체적으로나 심리적으로 영향을 주게 된다. 마지막으로 거동요소로서 탈출집단의 이동, 반응 및 인지, 상호작용, 성별, 연령 등에 따른 영향을 나타낸다.

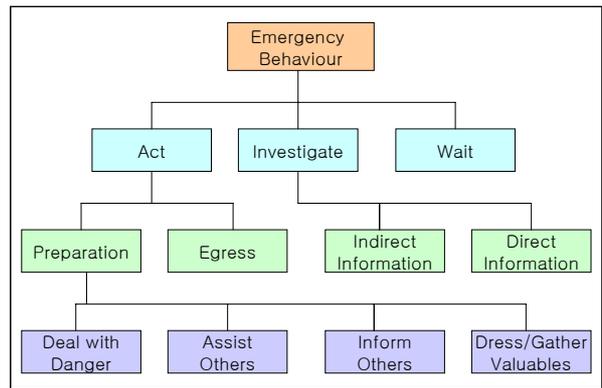


그림 1. 탈출상황에서 인간행동의 계층적 분류.

해상에서의 선박사고와 육상에서의 건축화재와 같은 긴급상황에서의 인간 행동특성은 상황과 사람에 따라 다양하게 나타나므로 그 양상을 일관되게 설명하기가 어렵다. 이러한 특징은 긴급상황 시 사람의 행동을 시뮬레이션하기가 어려운 가장 큰 이유가 된다.

즉, 탈출분석을 위한 시뮬레이션에서 인간의 행동양식이 중요한 이유는 탈출분석 시뮬레이션을 위하여 선박의 경사 및 거동, 정전상태 및 통로의 연기상황, 공항장에 승객, 선실로 돌아오는 승객, 이동통로의 장애요인, 승객들의 특성(나이, 성별, 가족동반 여부) 등과 같은 여러 가지 조건의 고려가 필요하기 때문이다.

해상에서 발생하는 선박사고의 경우에 1999년의 Lloyd's Cruise International의 보고에 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 탈출하는 데, 통상적인 훈련 시의 8분에 비해 9배 이상인 1시간 17분이 소요되었다고 한다(Lockey *et al.*, 1997).

위와 같이 탈출객체의 거동에 영향을 미치는 요인들 중에서 선박의 경우에는 경사 및 동요와 같은 환경적 요소와 심리적 요인과 같은 탈출집단의 거동요소가 중요한 요인으로 작용한다. 즉, 전체 탈출시간에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 탈출객체의 이동성이 가장 중요함을 알 수 있다.

탈출객체의 이동성을 보행속도(walking speed)를 통하여 정량적으로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 선박의 경사 및 동요에 따른 보행속도의 변화와 사고상황에서 집단이동으로 인한 보행속도의 변화 등을 실제 실험을 통하여 파악하고, 이를 탈출분석을 위한 시뮬레이션 시스템에 반영하고자 한다.

3. 관련 연구현황

현재까지의 연구에 의하면, 평지에서의 보행속도는 동양인의 경우에는 연령에 따라 0.98 m/s~1.39 m/s 사이를 유지하는 것으로 보고되고 있다(Fukuchi *et al.*, 1998; Hwang *et al.*, 1991). 한편 Ando *et al.*(1988)의 연구에 의하면 혼잡한 철도역에서 승객들의 이동을 분석하여 성별과 연령에 따른 이동속도의 변화를 확인하였는데, 20세를 전후한 연령에서 가장 빠른 보행속도를 보이는 것으로 나타났다. 한편, 유럽 및 호주의 연구사례에서는 성인 남성의 평지 보행속도를 1.4m/s~1.6m/s으로 보고하고 있다. <그림 2>는 기존의 연구들을 바탕으로 연령에 따른 남성의 보행속도를 나타내고 있다.

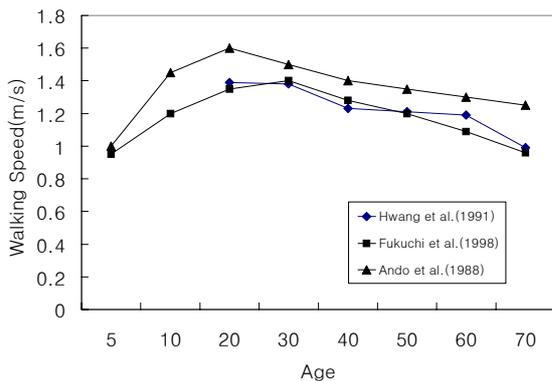


그림 2. 나이에 따른 일반 보행속도의 비교.

탈출상황에서의 인간거동 중에 보행의 흐름을 정확하게 모델링하기 위해서는 각 탈출객체를 연령, 성별, 보행속도 등의 파라미터를 가진 셋으로 표현하는 것이 필요하며, 이러한 파라미터들은 현실적인 시뮬레이션을 위하여 실험을 통해 얻어야 한다. 선박사고 시의 인간보행에 대한 정확한 분석을 위해서는 <그림 2>와 같은 정상상태에서의 보행 실험결과를 그대로 사용할 수 없으므로, 선박의 경사 및 동요를 반영한 실험결과가 필요하다. 본 논문에서는 선박과 관련하여 인간의 보행에 관련된 대표적인 연구사례들의 특징과 실험결과를 정리하였다.

일본의 해상기술안전연구소(National Maritime Research Institute)에서는 1994년부터 3년에 걸쳐 70명에서 120명의 20세 학생들을 대상으로 부두에 정박된 실선에서 실험을 행하였다(Katuhara *et al.*, 1997). 여기서의 실험은 정해진 피난경로를 따

라 이동하는 시간을 비디오 카메라로 촬영하여 결과를 분석하였다. 실선실험에 대한 분석으로 통로의 보행속도는 1.4 m/s, 계단의 보행속도는 0.7 m/s, 최대밀도는 3.0 persons/m²의 결과가 나왔다.

일본의 선박의장품연구소(Research Institute of Marine Engineering)에서는 20명의 성인 남녀 피실험자를 대상으로 통로에서의 경사에 실험을 행하였다(Murayama *et al.*, 2000). 통로의 폭(1.2 m, 0.9 m, 0.6 m)과 경사각(-20° ~ +20°)의 조건에 따른 보행속도의 변화를 분석하였다. 또한, 동요에 대해서는 6명을 대상으로 동요각 10°, 동요주기 5초와 10초의 조건으로 실험이 행해졌다. 통로폭에 대한 실험에서는 1.23 m/s~1.25 m/s의 결과가 나왔는데, 통로폭에 따른 보행속도의 차이는 미미한 것으로 보고되고 있다. 종경사 실험에서는 0.82 m/s~1.38 m/s의 결과가 나왔는데, 오르막 경사일수록 보행속도가 늦어짐으로 알 수 있다. 횡경사 실험에서는 0°에서 20°의 경사에 따른 보행속도의 차이는 미미한 것으로 보고되고 있다. 동요실험에서는 수평정지 시의 0.90 m/s보다 20% 정도 늦은 0.71 m/s~0.77 m/s의 결과가 나왔다.

호주의 AME-CRC(Australian Maritime Engineering-Cooperative Research Center)에서는 Australian Maritime Safety Authority Program의 일환으로 통로 및 사다리의 경사에 따른 인간의 보행속도를 실험하였다. 실험은 18세에서 25세의 성인 남녀 67명을 대상으로 행해졌다(Koss *et al.*, 1997). 통로의 경사에 대한 실험에 대해서는 종경사 내리막의 경우에 경사가 없을 때의 1.65 m/s에 비해 경사각도의 커짐에 따라 보행속도가 증가하는 경향이 있고, 종경사 오르막과 횡경사의 경우에는 보행속도의 차이가 미미한 것으로 보고되고 있다. 횡경사의 경우 1.2m 폭의 통로를 두 사람이 나란히 보행할 경우에는 속도가 감소하는 것으로 나타났다.

네덜란드의 TNO Human Factors는 BriteEuram 프로젝트인 MEPdesign(Mustering and Evacuation : Scientific Basis for Design) 프로그램의 일환으로, 18세에서 83세의 성인 150명을 대상으로 통로 및 계단의 경사와 동요에 따른 인간의 보행속도를 실험하였다(Bles *et al.*, 2001). TNO Human Factors의 실험에서는 유압 시스템 위에 4m×2.4m×2.3m의 캐빈을 장착한 모의 동요장치가 이용되었다. 통로의 경사에 대한 실험에 대해서는 경사가 없을 때의 1.32 m/s에 비해 종경사 오르막의 경우에 경사각도에 따라 보행속도가 차이가 심하며, 종경사 내리막과 횡경사의 경우에는 보행속도의 차이가 미미한 것으로 나타났다. 또, 선박의 동요에 대해서는 종동요 및 횡동요 모두에서 동요주기와 각도가 증가됨에 따라 15%의 속도가 감소하는 것으로 나타났고, 60세 이상의 피실험자의 경우에는 타 그룹에 비해 10% ~ 15% 정도 늦은 속도를 나타내었다.

또 한 가지 탈출상황에서 중요하게 고려해야 할 점은 탈출 집단의 이동성으로서, 복도에서의 집단이동의 속도와 집단과의 마주치는 상대자가 있을 경우의 이동속도를 고려하는 것이 중요하다. 여기서 기준이 되는 것은 보행밀도로서, m²당 탈출

개체의 수를 나타낸다. 일반적으로 한 사람이 차지하는 공간이 0.135 m^2 이고, 최대 밀집할 경우 7.4 persons/m^2 가 되는 것으로 알려져 있으며, 균중의 보행속도를 밀도와 관련지어 연구한 몇 가지 사례를 정리하면 다음과 같다.

일본의 Railway Research Review에 발표된 Ando *et al.*(1988)의 연구에 의하면 집단의 이동과 관련하여 극한 상황(extreme condition)에서는 15 persons/m^2 의 밀도도 가능하며, 밀도가 2 persons/m^2 이상인 경우에 보행에 어려움을 겪게 되고, 보행밀도가 4 persons/m^2 가 되면 정체현상을 일으키나 약간의 전진은 가능하다는 것을 보여주었다. 이 연구는 철도역 내에서 움직이는 승객들을 비디오 기록(video recording)한 것으로서, 일반적인 실험에서 보다 승객들이 카메라를 의식하지 않고 자연스럽게 행동하는 것으로 나타났다.

영국 셰필드대학의 Smith(1995)는 밀집된 균중의 보행밀도와 속도에 대한 연구에서 보행밀도가 0.1 persons/m^2 인 경우에는 1.3 m/s 의 속도를 유지하고, 2.2 persons/m^2 인 경우에는 0.7 m/s , 4.0 persons/m^2 인 경우에는 0.3 m/s 로 속도가 감소한다는 보고에 대해 언급한 바 있다.

한편 1996년의 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering에서는 보행속도가 밀도와 직접적인 관련성을 가진다는 가정하에 0.54 persons/m^2 에서 3.8 persons/m^2 사이의 밀도에 대한 보행속도를 계산하였다(Nelson and MacLennan, 1996). 계산 결과 0.54 persons/m^2 이하의 밀도에서는 원하는 방향으로 자유로운 보행이 가능하고, 3.8 persons/m^2 이상의 밀도에서는 거의 움직임이 불가능한 것으로 나타났다.

일본 선박의장품연구소의 Murayama *et al.*(2000)의 실험에 의하면, 탈출집단의 보행 시 마주오는 단독 보행자가 있는 경우 전체적인 이동속도가 20% ~ 55% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 통로폭이 60 cm일 때는 0.78 m/s , 90 cm일 때는 0.60 m/s , 120 cm일 때는 0.93 m/s 의 결과가 나왔다. 또, 집단보행 시 마주오는 단독 보행자의 이동속도는 통로폭이 1.2m와 90cm일 때는 큰 차이가 없으나, 60cm일 때는 20% 정도 늦어지는 것으로 나타났다.

또, AME-CRC의 실험(Koss *et al.*, 1997)에 의하면 집단의 이동속도는 다음과 같이 측정되었다. 집단의 선두에서는 1.32 m/s , 집단의 중간에서는 1.10 m/s , 집단의 후미에서는 0.80 m/s 의 결과가 나타났다. 이러한 결과는 집단의 선두에 있는 경우가 후미에 있는 경우보다 이동속도가 상당히 빠름을 알 수 있고, 이와 같은 결과로 인해 집단은 흩어지게 된다. 마주 오는 균중들과 마주치는 경우는 50% 정도의 속도감소가 일어나며, 나란히 이동하면서 주위와의 충돌에 의한 이동속도의 감소는 20%로 측정되었다.

한편, IMO의 MSC/Circ. 909인 'Interim Guidelines for a Simplified Evacuation Analysis on Ro-Ro Passenger Ships'(IMO, 1999)에서는 탈출계산식에 필요한 계단 및 통로에서의 보행속도를 제시하였다. 여기에 제시된 자료는 National Fire Protection Association의 'SFPE of Fire Protection Engineering Handbook'을 기초로 하여 작

성되었으며, 보행밀도에 따른 보행속도를 4단계(low, optimum, moderate, crush)로 나누어 제시하고 있다.

이러한 보행밀도는 한정된 폭을 가진 도어를 1초당 통과할 수 있는 사람의 수를 나타내는 유출계수(specific flow of persons)와 관련이 깊다. 일반적인 피난 시물레이션에서 복도 등 수평부분의 통로에서의 유출계수는 $1.5 \text{ persons/m} \cdot \text{sec}$, 계단 등 수직부분의 통로는 $1.3 \text{ persons/m} \cdot \text{sec}$ 의 값을 사용한다. 한편 IMO의 Circ. 909에서는 유출계수로서 내리막 계단에서는 $1.1 \text{ persons/m} \cdot \text{sec}$, 오르막 계단에서는 $0.88 \text{ persons/m} \cdot \text{sec}$, 복도와 도어에서는 $1.3 \text{ persons/m} \cdot \text{sec}$ 의 값을 사용하여 탈출분석에 활용하고 있다.

4. 탈출승객의 거동자료 확보를 위한 실선실험

탈출분석 시물레이션 시스템의 개발과정에서 가장 중요한 부분은, 실제 선박사고 시의 비상상황에서 일어날 수 있는 여러 가지 문제점들을 사전에 예측할 수 있는 시물레이션 시스템의 개발에 있다.

선박사고 시의 상황에 대한 정확한 예측을 위해서는 탈출상황에서 승객들의 거동에 대한 다양한 기초자료가 필요하며, 이러한 자료의 획득을 위해서는 여러 가지 실험이 필요하지만, 모두 실제 실험을 통하여 얻는다는 것은 비용과 안전 측면에서 매우 힘들다.

본 연구에서는 해상에서의 사고상황에서 가장 특징적으로 나타나는 선박의 경사 및 동요효과가 승객의 탈출과정에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하기 위해 해상 피난실험을 수행하였다.

4.1 실험내용

본 연구에서 수행된 실험은 선박의 경사 및 동요효과를 재현하기 위해 선박의 복도와 유사하게 제작된 복도모형($10\text{m} \times 1.2\text{m} \times 1.9\text{m}$)을 제작하여 활용하였다. 본 연구에서 제작된 복도 모형은 시물레이션 시스템 내의 탈출객체의 이동자료를 확보하기 위한 것으로서, 종경사($-20^\circ \sim 20^\circ$)와 횡경사($0^\circ \sim 20^\circ$)조절이 가능하고 복도 양측에 핸드레일이 설치되어 있으며, 종경사의 경우 복도 끝에 계단이 설치되어 있다.

본 실험에서는 선박의 사고상황에서 승무원의 지시에 따라 승객이 정상적으로 이동하는 상황을 전제로 하였으며, <그림 3>에 나타난 것과 같은 조건과 종류에 대한 실험을 수행하였다. 본 실험에서 수행된 내용을 크게 다음과 같이 세 가지로 구분할 수 있다.

- 선박의 경사효과를 따른 개인이동 실험
- 선박의 경사효과에 따른 집단이동 실험
- 선박의 동요효과에 대한 실험

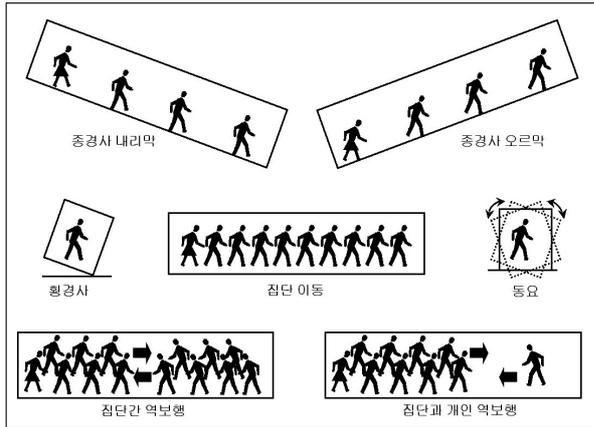


그림 3. 실험의 조건 및 종류.

모든 실험은 각 피실험자가 동일 조건에 5회 실시하였으며, 다시 선박이 계류된 상태(동요가 없는 경우)와 선박이 운항중 정지상태(동요가 있는 경우)에 대하여 2회 실시되었다. 이와 같은 이유는 선박의 동요효과가 탈출승객의 이동에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보고자 함이다. <표 1>은 본 실험에서 수행된 실험의 종류 및 조건을 나타내고 있다.

선박의 동요효과를 반영하기 위하여 복도모형을 한국해양대학교에서 실습선으로 사용중인 한나라호의 선미 갑판에 설치하였다. 선박이 부산항에서 대마도 앞바다를 경유하여 여수항까지 운항하는 도중에 해상에서 동요효과를 고려한 실험이 수행되었다. 선박의 동요(roll, pitch)는 선박동요 측정기를 사용하여 계측되었다. 본 실험에서는 한국해양대학교에서 실습선으로 사용중인 한나라호를 대상선박으로 사용하였으며, 한나라호는 1993년에 건조되었고, 총 톤수 3,640톤이며, 202명의 승선하고 있다. 피실험자들은 한국해양대학교 해사대학 실습생 21명으로, 20세에서 22세 사이의 남학생 18명과 여학생 3명으로 이루어져 있다.

표 1. 실험의 종류 및 조건

선박의 경사	복도사양	10M × 1.2M × 1.9M
	종경사	-20, -10, 0, 10, 20 degree
	횡경사	20, 10, 0 degree
	조합경사	종경사와 횡경사의 조합경사 (10/10, -10/10, 10/20, -10/20)
선박의 동요	복도사양	10M × 1.2M × 1.9M
	종경사	-10, 0, 10 degree
	횡경사	20, 10, 0 degree
	횡동요각	3 - 4 degree
	주기	5 - 12 seconds

<그림 4>와 같이 피실험자들은 안전모와 구명조끼를 착용

용하고 실험에 임하였고, 안전모 양쪽에는 2개의 고유번호를 부착하였다. 고유번호와 이동모습은 <그림 5>와 같이 복도모형에 설치된 8개의 카메라를 통하여 보행장면과 이동속도가 8-channel image grabber board 장착 측정기에 전달되어 컴퓨터에 저장된다.



그림 4. 선박의 경사에 따른 승객의 개인이동 실험.



그림 5. CCD High resolution camera를 이용한 승객이동 측정.

4.2 실험결과 분석

4.2.1 선박의 경사효과에 따른 개인이동 실험

본 연구에서 선박의 경사가 개인의 이동속도에 영향을 미치는지를 평가하기 위하여 세 가지 실험이 실시되었다. 첫 번째 실험은 선박의 종경사를 -20°, -10°, 0°, 10°, 20°로 변화시키면서 승객의 이동속도를 측정하는 것이고, 두 번째 실험은 선박의 횡경사를 0°, 10°, 20°로 변화시키면서 승객의 이동속도를 측정하는 것이다.

그리고 세 번째 실험은 선박의 종경사와 횡경사가 조합된 상황(종경사/횡경사 : 10°/10°, -10°/10°, 10°/20°, -10°/20°)에서 승객의 이동속도를 측정하는 것이다.

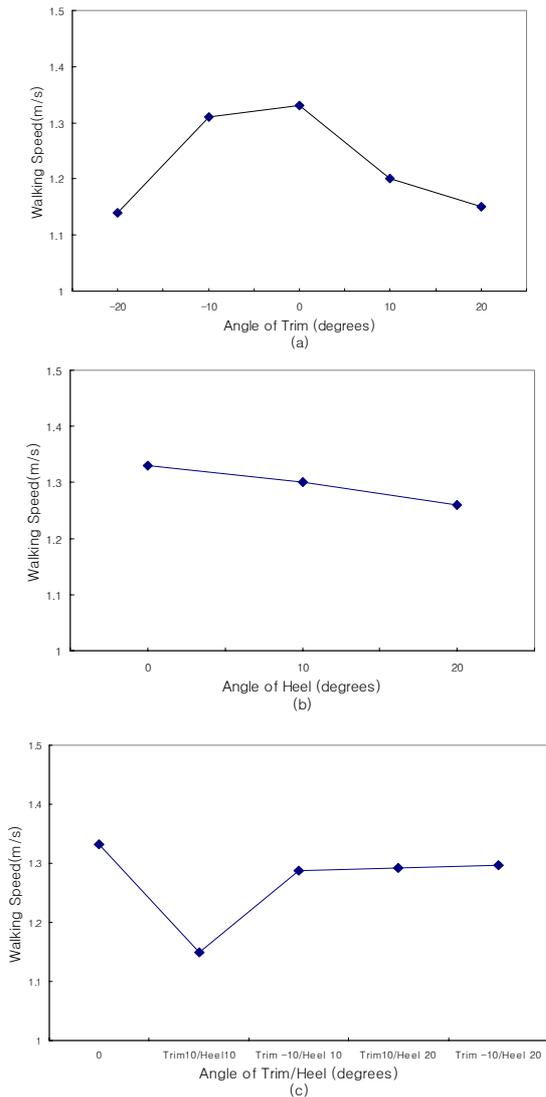


그림 6. 선박의 경사에 따른 평균 보행속도의 변화.

세 가지 실험에서 나타난 경사효과에 따른 개인이동 속도의 결과는 <그림 6>과 같다. 선박의 경사효과에 따른 개인이동 실험의 결과는 <그림 6>과 같다. <그림 6>의 경사각들에 의한 평균 보행속도의 변화를 알아보기 위해 경사각과 피실험자를 요인으로 한 이원배치 분산분석(two-way ANOVA)을 수행하였다. 분산분석은 종경사(오르막), 종경사(내리막), 횡경사, 조합경사(종경사 10° 고정), 조합경사(종경사 -10° 고정) 등 다섯 개의 데이터 집단에 대해 각각 실시하였다. <표 2>에서 <표 5>는 분산분석 결과를 나타내고 있다.

<표 2>와 <표 3>에서 보는 바와 같이, 종경사 실험에서 오르막 경사가 높아지면서 보행속도는 현저히 떨어졌다($F(2, 62)=8.65$ $P=0.001$). 또한 내리막 경사가 높아지면서도 보행속도는 떨어졌다($F(2, 62)=28.92$ $p<0.001$). 내리막 경사와 오르막 경사의 효과를 비교한다면 내리막 경사의 효과가 더 큰 것으로 평가된다.

표 2. 분산분석표(종경사 오르막)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Subjects	20	0.6481	0.0324	2.45	0.008
Degree	2	0.2284	0.1142	8.65	0.001
Error	40	0.5282	0.0132		
Total	62	1.4047			

표 3. 분산분석표(종경사 내리막)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Subjects	20	0.3791	0.0190	2.12	0.021
Degree	2	0.5169	0.2585	28.92	0.000
Error	40	0.3575	0.0089		
Total	62	1.2535			

횡경사가 주어진 경우에는 <표 4>의 분산분석에서 보는 바와 같이, 각도의 차이에 따라 유의한 보행속도의 차이가 있는 것으로 나타났다($F(2, 62)=17.09$, $P<0.001$).

표 4. 분산분석표(횡경사)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Degree	2	0.0576	0.0288	17.09	0.000
Subjects	20	0.7502	0.0375	22.25	0.000
Error	40	0.0674	0.0017		
Total	62	0.8753			

조합경사의 효과를 분석하기 위하여, 종경사를 10°로 고정하고 횡경사를 0°, 10°, 20°로 높여가는 경우와 종경사를 -10°로 각각 고정하고 횡경사를 0°, 10°, 20°로 높여가는 경우에 대하여 별도로 분산분석을 하였다. <표 5>와 같이 10°인 종경사를 부여하고 추가적으로 횡경사를 부여할 때, 보행자의 속도는 유의한 차이를 보였다($F(2, 62)=25.81$, $P<0.001$). 그러나 <표 6>에서 보는 바와 같이 -10°인 종경사를 부여하고 추가적으로 횡경사를 부여하는 경우는 보행자의 속도가 유의하게 차이가 나지 않았다($F(2, 62)=0.50$, $P=0.613$). 이는 내리막 경사의 보행속도에 대한 영향력이 너무 커서, 추가적인 횡경사의 부여는 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

표 5. 분산분석표(조합경사 : 종경사 10° 고정)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Subjects	20	0.6935	0.0347	8.05	0.000
Degree	2	0.2223	0.1111	25.81	0.000
Error	40	0.1722	0.0043		
Total	62	1.0880			

표 6. 분산분석표(조합경사: 종경사 -10°고정)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Subjects	20	0.7065	0.0353	6.61	0.000
Degree	2	0.0053	0.0027	0.50	0.613
Error	40	0.2139	0.0054		
Total	62	0.9257			

본 연구에서 수행한 선박의 경사효과에 대한 개인이동 실험은 국외 연구에서의 실험들과 피실험자의 특성(연령, 성별), 실험의 종류(복도, 계단, 출입구), 실험의 조건(경사 및 동요) 등이 일부 상이하므로, 동일한 기준으로 비교하기는 힘들다.

본 연구에서 수행된 실험에서의 결과와 국외의 연구 중 예 실험조건이 비교적 비슷한 Bles *et al.*(2001)과 Kathhara *et al.*(1998)의 실험결과를 종경사와 횡경사로 나누어 비교한 결과가 <그림 7>과 <그림 8>이다.

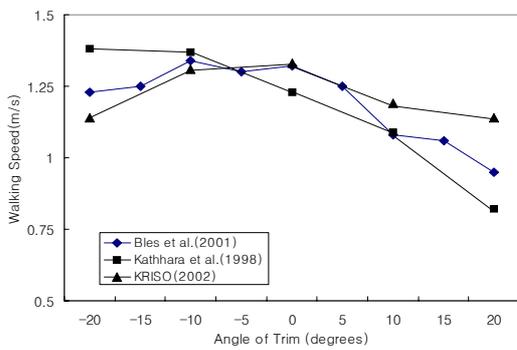


그림 7. 통로의 경사에 따른 평균 보행속도(종경사).

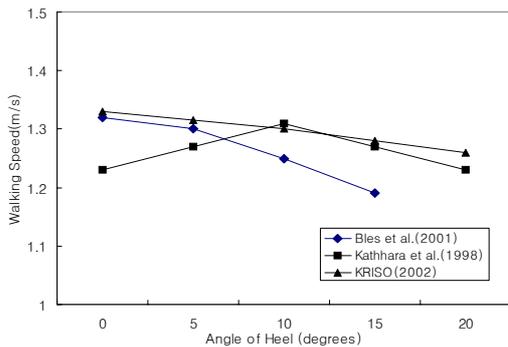


그림 8. 통로의 경사에 따른 평균 보행속도(횡경사).

<그림 7>과 <그림 8>의 경사에 따른 평균 보행속도에 대한 비교분석을 위해서, 5% 유의수준의 paired-wised t-test를 실시하였다. 본 연구(KRISO(2002))와 Bles *et al.*(2001)의 실험결과에 대한 비교에서는 모든 경사도에서 평균 보행속도에 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다(종경사 : $p=0.4899$, 횡경사 : $p=0.1124$). 또한, Kathhara *et al.*(1998)의 실험결과와의 비교에서

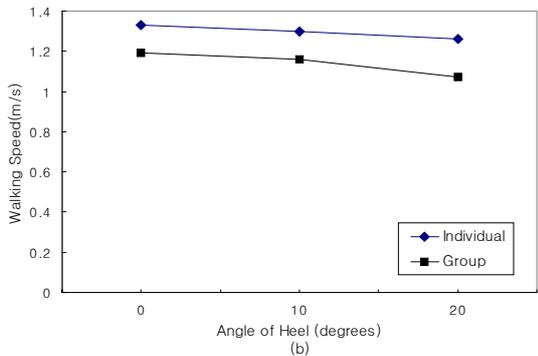
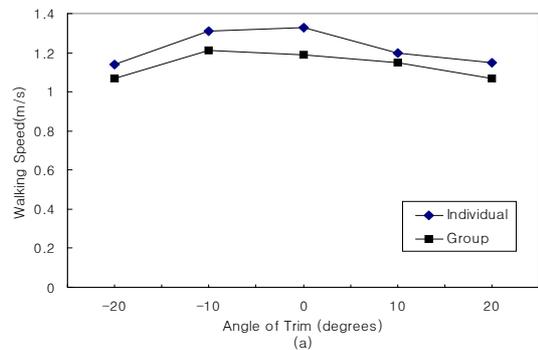
도 모든 경사도에서 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다(종경사 : $p=0.6616$, 횡경사 : $p=0.2296$). 위와 같이 본 연구에서 수행한 실험결과는 기존의 실험과 크게 차이를 보이지는 않았지만, 종경사 실험에서 다음과 같은 차이점을 나타내고 있다.

종경사 내리막의 경우에는 상식적으로 속도가 빨라질 것으로 예상되었으나, 경사도가 급해질수록 오히려 속도의 감소현상이 나타나고 있다. 이는 안전을 고려하려는 심리적인 현상을 반영한 것으로 사료된다. 또한 종경사 오르막의 경우에는 기존의 실험에 비하여, 경사도가 급해질수록 속도의 감소현상이 크게 나타나지 않는 것으로 나타났는데, 이는 본 실험에서 사용한 복도모형의 바닥면이 카펫으로 제작되어 있어, 철판이나 합판에 비해 상대적으로 미끄럼이 덜하기 때문인 것으로 파악되었다.

4.2.2 선박의 경사효과에 따른 집단이동 실험

본 연구에서 수행한 선박의 경사효과에 대한 집단이동 실험은 세 가지로 구분하여 행해졌다. 첫 번째는 피실험자 21명이 전후 간격 없이 연속적으로 이동해 나가는 실험으로, 실제의 사고상황과 유사한 조건이라고 할 수 있다. 이 실험의 분석결과와 앞서 언급한 개인이동(피실험자 간 3m 이상의 간격 유지)의 분석결과를 비교한 것이 <그림 9>이다.

<그림 9>의 경사에 따른 개인이동과 집단이동 시 평균 보행속도에 대한 비교분석을 위해서, 5% 유의수준의 t-test를 실시하였으며, 모든 경사상황에서 평균 보행속도는 개인이동이 집단이동보다 유의하게 빠른 것으로 나타났다(종경사: $p=0.0045$, 횡경사: $p=0.0111$, 조합경사: $p=0.0116$)



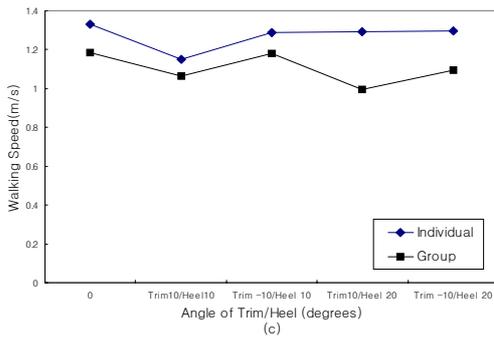


그림 9. 개인과 집단이동에 따른 보행속도의 변화.

종경사 및 횡경사의 모든 경우에 집단이동에 따른 속도가 개인이동의 경우보다 20% 정도 낮은 것으로 나타났다. 또한 국외의 연구에서 수행하지 않았던 종경사와 횡경사가 함께 있는 조합경사에 대해 실험을 수행하였으며, 이 경우에는 종경사나 횡경사 가운데 한쪽 경사만 있을 때보다 이동속도의 감소가 큰 것으로 나타났다.

집단이동에 대한 두 번째 실험은 선내 복도에서 각각 10명의 탈출집단이 마주치는 조건에서의 실험이며, 이와 같은 경우는 실제 사고에서 흔히 일어날 수 있는 상황이다. <그림 10>의 (a)는 종경사에 대한 실험결과를 나타내고 있으며, 모든 경사상황에서 평균 보행속도는 집단의 앞쪽에 위치하는 승객들이 뒤쪽에 위치하는 승객들보다 유의하게 빠른 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 (b)의 횡경사에 대한 결과에서도 동일하게 나타남을 알 수 있었다(종경사: $p=0.0053$, 횡경사: $p=0.0326$).

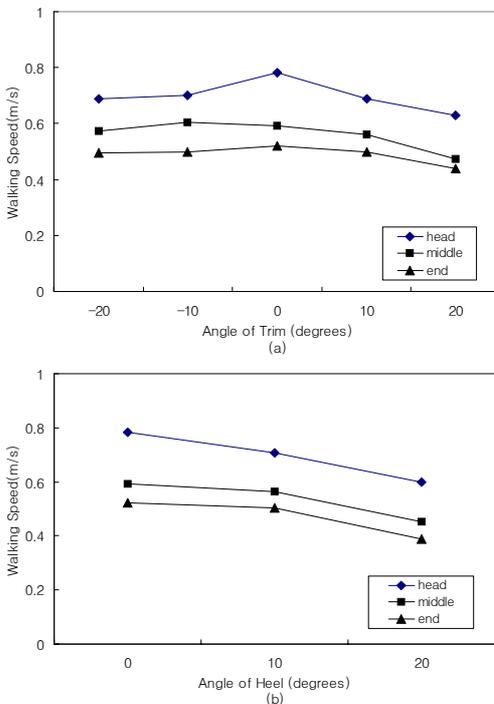


그림 10. 집단 간 마주치는 경우의 평균 보행속도.

집단이동에 대한 세 번째 실험은 선내 복도에서 10명의 탈출 집단과 개인이 마주치는 조건에서의 실험이다. <그림 11>의 (a)는 종경사에 대한 실험결과를 나타내고 있으며, 대부분의 경사상황에서 집단의 이동속도가 마주치는 개인의 이동속도보다 유의하게 빠른 것으로 나타났다.

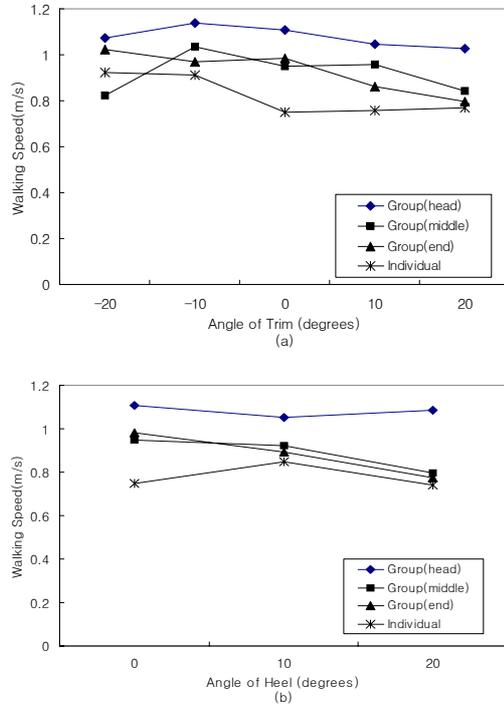


그림 11. 집단과 개인이 마주칠 때의 평균 보행속도.

(b)의 횡경사의 경우에도 집단의 이동속도가 마주치는 개인의 이동속도보다 유의하게 빠른 것으로 나타났다(종경사: $p=0.0013$, 횡경사: $p=0.0089$).

4.2.3 선박의 동요효과에 따른 개인이동 실험

본 연구에서 수행한 선박의 동요효과에 대한 개인이동 실험은 선박을 외해에서 정지시킨 후, 자연적인 동요를 받는 조건에서 수행되었다. 선박 동요효과를 정확하게 분석하기 위해서는 앞서 언급되었던 선체운동 모의동요장치(ship motion simulator)를 사용한 실험이 이루어져야 하나, 아직까지 국내에서는 이와 같이 실험시설이 없으므로, 차선택으로 경사시험이 가능한 복도모형을 선박에 탑재하여 파도에 의한 자연적인 동요를 이용하여 실험을 수행하였다. 따라서 강제동요장치를 사용할 경우에 비하여 제한적인 실험만이 가능하였다. 향후 선박의 동요효과에 의한 승객의 거동을 본격적으로 실험할 수 있는 선체운동 모의동요장치가 제작되면, 보다 정확하고 다양한 변수를 반영한 실험이 가능하리라 생각된다.

본 실험에서는 선박의 동요를 측정하기 위해 Seatex Motion Reference Unit (MRU-5)을 사용했다. 본 실험을 실시하는 동안에

선박의 횡동요주기와 횡동요의 크기(최소치, 최대치)를 나타낸 것이 <표 7>이다. 종경사 20°에 대한 동요실험은 피실험자의 안전문제 때문에 실시하지 못했다.

표 7. 동요실험에서의 주기와 횡동요

동요 \ 경사	0°	종경사 ±10°
Cycle Time(sec)	13	14
Max. Rolling(degrees)	-2.355	4.36001
Min. Rolling(degrees)	2.95881	-4.11534

<그림 12>는 종경사, 횡경사 및 조합경사 상황에서 선박의 동요가 없는 경우와 있는 경우에 대하여 탈출승객의 이동속도를 비교한 것이다.

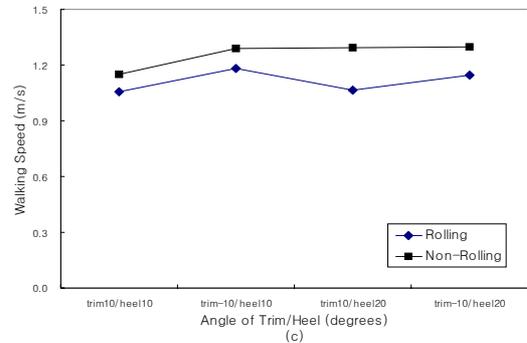
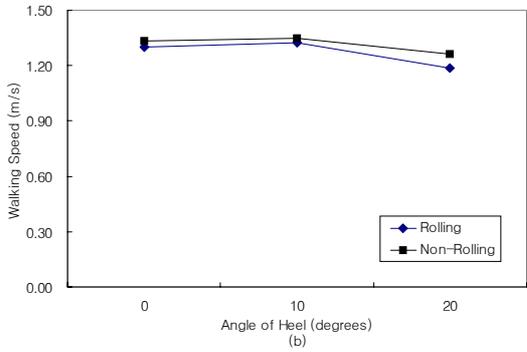
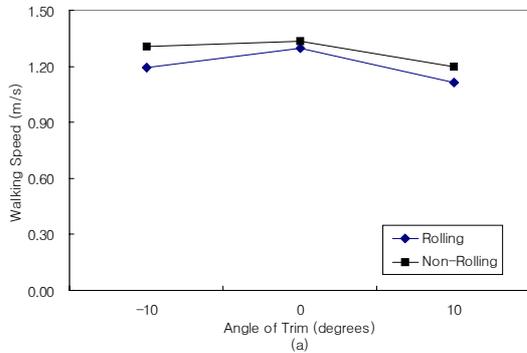


그림 12. 선박의 동요 유무에 따른 평균 보행속도.

선박동요의 유무에 따라 보행속도가 달라지는지를 알아보기 위하여, 동요의 유무를 요인으로 하여 이원분산분석을 수행하였다. 여기서 이루어진 분산분석은 경사의 종류를 구분하지 않고 합하여 이루어졌다.

표 8. 분산분석표(동요효과)

Factor	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
Motion	1	0.77542	0.77542	54.03	0.000
Subjects	20	2.73160	0.13588	9.47	0.000
Error	378	5.18491	0.01372		
Total	419	8.97894			

<표 8>의 분산분석표에서 보는 바와 같이 모든 경사상황에서 평균 보행속도는 동요가 없을 경우가 있을 경우보다 유의하게 빠른 것으로 나타났다($F(1, 419) = 54.03, p < 0.001$). 또한 이 실험의 경우에는 피실험자에 따라 유의한 보행속도의 차이가 있는 것으로 나타났다($F(20, 419) = 9.47, p < 0.001$).

<그림 12>에서 보는 바와 같이 선박동요 시에 전반적으로 10%~20% 정도의 보행속도 감소효과가 나타났으며, 특히 <그림 12(c)>와 같이 조합경사 조건에서 선박의 동요에 따른 이동속도의 감소가 큰 것으로 나타났다.

5. 결론 및 토의

본 논문에서는 선박의 해상사고 시 인명탈출과 같은 위급상황에서 피난을 위한 인간의 거동을 분석하기 위해 일반적인 상황에서의 인간 보행특성과 탈출상황에서의 인간 행동특성에 대한 국내·외 연구현황을 정리하였다. 또한 선박에서 탈출과 관련된 국외의 연구에서 수행된 실험결과를 참고로 하여 선박의 경사 및 동요를 고려한 탈출승객의 이동성을 파악하기 위한 피난실험을 실시하였으며, 그 결과를 비교 및 분석하였다.

본 실험은 선박의 경사 및 동요효과가 탈출승객의 피난 이동성에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위한 국내 최초의 실험이었다. 본 실험의 분석결과는 국외 연구기관의 실험결과와 별다른 차이를 보이지 않았으며, 본 실험에서 처음 수행한 조합경사에 대한 결과는 실제 사고조건을 보다 정확하게 반영하는 데 도움이 될 것이다.

또한 집단이동에 따른 속도감소 효과와 탈출승객 간에 마주치는 역주행(counterflow)에 따른 이동속도 감소효과가 현저히 나타났으며, 제한된 조건에서 이루어진 선박 동요효과에 대한 실험에서도 동요효과로 인해 이동속도 감소효과를 확인할 수 있었다.

본 실험을 통하여 얻어진 결과는 현재 개발중인 탈출분석 시뮬레이션 시스템(Kim et al., 2001; Park et al., 2001)에 반영되어

시스템의 정확도를 높이는 데 기여하였다.

탈출승객의 이동성과 관련하여, 탈출 시뮬레이션의 정확도를 좀더 향상시키기 위해서는 다음과 같은 종류의 실험이 추가적으로 필요하다.

- 선박의 경사효과에 대한 추가 실험 (여성, 노약자, 장애인 등)
- 선박의 동요효과에 대한 추가 실험 (선체운동 모의실험장치 이용)
- 선내 도어(door) 및 계단에 대한 실험 (도어의 폭, 계단의 폭 및 높이 등)
- 화재 시 연기효과에 의한 승객거동 실험

위와 같이 선박의 경사, 동요 및 연기 등에 의한 탈출승객의 이동 장애요인은 실험을 통하여 많은 부분을 정량화할 수 있다. 그러나 탈출상황에서 집단의 보행문제와 심리적 요인의 반영은 실험이나 시뮬레이션을 통하여 타당성 있는 자료를 얻기가 곤란하다.

먼저, 탈출집단의 보행 시 혼잡에 의한 속도감소 문제는 앞서 본 연구에서 수행한 실험에서와 같이 부분적인 실험을 통하여 분석할 수 있으나, 극한 위기상황에서의 혼잡은 실험으로 재현할 수 없으므로, 보행밀도에 따른 보행속도의 감소 효과 등을 추가로 반영할 필요가 있다.

또한 심리적 요인의 반영을 위해서는 일부 보고되고 있는 사고 경험자에 대한 인터뷰 및 설문조사 결과들을 바탕으로 사고의 초기인지, 심각성의 지각, 사고신고 및 전파, 안전지역 탐색, 탈출 개시, 탈출 시간 등을 분석하여 탈출 시뮬레이션에 반영할 수 있다. 또한 경보시스템, 사전훈련, 사고에 대한 지식 등의 분석결과도 반영할 수 있다. 그러나 이와 같은 심리적 요인의 반영은 현재로서는 자료수집의 어려움과 계량화에 대한 타당성을 객관적으로 검증하기 매우 어렵다는 문제점을 내포하고 있다.

위기 시 탈출상황에서의 인간의 거동문제에 대한 모델링 및 정량화에 관한 연구는 전 세계적으로도 초기단계에 있으며, 앞으로 여객선, 신형 함정, 잠수함 등과 같은 고부가가치 선의 개발에 대한 요구가 증대되고 있는 우리나라의 입장에서, 기초연구를 위한 실험시설의 지원은 물론, 조속히 관련된 다양한 학문 분야에 대한 검토 및 핵심기술의 확보를 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 김홍태, 이동곤, 박진형 (2001), 탈출분석을 위한 Human Factors 기술의 현황 및 전망, *선박설계연구회 동계연구발표회 논문집*, 362-371.
- 이상준, 이수경, 김운형, 이재성 (1999), *대형할인매장의 화재시 피난에 관한 연구*, 서울산업대학교 안전공학과.
- Ando, K., Ota, H. and Oki, T. (1988), Forecasting the Flow of People, *Railway Research Review*, 45(8), 8-14.
- Bles, W., Nooy, S. and Boer, L.C. (2001), Influence of Ship Listing and Ship Motion on Walking Speed, *Proceedings of Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*.
- Fukuchi, N., Shinoda, T. and Imamura T. (1998), Establishing the Methodology for Safe Evacuation in the Event of a Marine Fire, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 184, 579-590.
- Hwang, K., Chung, M., Lee, D. (1991), An Analysis of Gait Characteristic Parameters for the Koran Normal Adults, *Journal of the Human Engineering Society of Korea*, 10(2), 15-22.
- IMO (1999), Interim Guidelines for a Simplified Evacuation Analysis on Ro-Ro Passenger Ships, IMO Msc/Circ. 909.
- Gwynne, S., Galea, E.R., Owen, M. and Lawrence, P.J. (1997), *Escape as a Social Response*, CMS Press, 51-67.
- Katuhara, M., Kameyama, M., Miyata, O., Takasugi, Y. and Sakane, Y. (1997), Simulation of Human Escape On Board-I, *Journal of Japan Institute of Navigation*, 96, 283-293.
- Kim, H., Lee, J.K., Lee, D., Park, J.H. (2001), State of the Art of Human Factors Technologies for Ships and Ocean Engineering, *Journal of the Human Engineering Society of Korea*, 20(2), 99-111.
- Kim, H., Lee, D. and Park, J.H. (2001), Establishing the Methodologies for Human Evacuation Simulation in Marine Accidents, *Proceedings of the 29th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, 332-338.
- Koss, L.L., Moore, A. and Porteous, B. (1997), Human Mobility Data for Movement on Ships, *Proceedings of Int. Conference on Fire at Sea*, pp. 1-11.
- KRISO (2002), *An Experimental Analysis on the Mobility of Evacuating Passengers in Ship with regard to Listing and Motion*, Technical Report, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering.
- Lockey, D., Purcell-Jones, G., Davies, C.T. and Clifford, R.P. (1997), Injuries Sustained During Major Evacuation of the High-speed Catamaran St Malo off Jersey, *Injury*, 28(3), 187-190.
- Murayama, M., Itagaki T. and Yoshida, K. (2000), Study on Evaluation of Escape Route by Evacuation Simulation, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 441-448.
- Nelson, H.E. and Maclennan, H.A. (1996), Emergency Movement. In Dilenno, P.J. et al.,(Eds.), *The SFPE handbook for fire protection engineering*, National Fire Protection Association, (3-286)-(3-295).
- Park, J.H., Kim, H. and Lee, D. (2001), Simulation-based Evacuation Analysis on Korean Coastal Passenger Ships, *Proceedings of the Seoul International Simulation Conference*, 444-449.
- Reisser-Weston, E.(1996), Simulation Human Behaviour in Emergency Evacuations, *Proceedings of Int. Conference on Escape, Evacuation & Rescue*, 1996.
- Smith, R.A.(1995), Density, Velocity and Flow Relationships for Closely Packed Crowds, *Safety Science*, 18, 321-327.

**김홍태**

고려대학교 산업공학과 학사
 고려대학교 산업공학과 석사
 고려대학교 산업공학과 박사
 한국기계연구원 조선시스템연구부 선임연구원
 현재: 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
 선임연구원
 관심분야: Simulation Based Manufacturing,
 Marine Ergonomics, Marine Safety Engineering

**박진형**

경북대학교 컴퓨터공학과 학사
 경북대학교 컴퓨터 공학과 석사
 한국과학기술원 전자전산학과 박사 과정
 현재: 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
 선임연구원
 관심분야: Human Agent Modeling, Intelligent
 System

**이동곤**

부산대학교 조선공학과 학사
 부산대학교 조선공학과 석사
 부산대학교 조선공학과 박사
 한국기계연구원 조선시스템연구부 선임연구원
 현재: 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
 책임연구원
 관심분야: Simulation Based Design, Design for
 Safety

**홍승권**

성균관대학교 산업공학과 학사
 고려대학교 산업공학과 석사
 뉴욕주립대 산업공학과 박사
 한국국방연구원 선임연구원
 현재: 한국소프트웨어진흥원
 관심분야: Human-integrated Information Systems
 Cognitive Engineering