

철도차량에 대한 피난모델 적용

An Application of Evacuation Model for Rail Passenger Car

김종훈*

김운형**

이덕희***

정우성***

Kim, Jong-Hoon

Kim, Woon-Hyung

Lee, Duck-Hee

Jung, Woo-Sung

ABSTRACT

To predict the fire and smoke hazards of rail car with a evacuation model is essential for achieving life safety of all passengers in the event of fire. Currently, more than 30 different evacuation models are available and expected increasing demand in high population density areas as a metro train station. This paper includes brief history of evacuation models and review some key factors of design egress scenario, these are pre-movement time, egress route, location of fire, overturned carriage, and configuration of rail car. Applying the egress model for rail passenger car, users need to confirm the model's ability of physiological, psychological responses effecting to pre-movement time of individual or crowd unit, representation of complexity of carriage layout, and evaluation of effects of smoke.

1. 서 론

일반적으로 화재안전에서 가장 우선시되는 도달목표는 인명의 안전이며, 이러한 사항은 철도차량에도 동일하다고 할 수 있다. 철도차량에 대한 화재안전성능평가를 수행함에 있어 분석해야할 중요한 현상 중 하나는 승객의 피난이다. 철도차량 내부에서 발생된 화재에 대해 그 차량의 구조와 재질, 그리고 차량을 구성하는 부품들이 충분한 안전성을 가졌는지 여부를 판단하기 위한 중요한 기준 중 하나가 바로 승객의 안전이기 때문이다. 철도차량의 화재위험성평가에 대한 표준 가이드인 ASTM E 2061을 보면 화재안전의 목표에 대한 부분에서 ‘화재안전의 가장 중요한 목표는 화재의 발생 시 철도운송차량의 모든 탑승자들의 안전한 피난을 확보하는 것이다.’라고 서술하고 있다.¹ 그러므로 철도차량의 피난안전 성능을 평가하는 일은 매우 중요하다.

본 논문에서는 철도차량에 대한 피난안전의 개념을 정립해보고, 차량에 대한 시나리오의 설정과 이를 분석하기 위한 피난모델들의 적용성을 분석해 보았다.

* 경민대학 소방행정과, 비회원

E-mail : aina47@hanmail.net

TEL : (031)828-7312 FAX : (031)828-7949

** 경민대학 소방행정과

*** 한국철도기술연구원

2. 피난모델의 정의

피난모델은 대상공간에서 거주자가 피난을 수행할 경우 소요되는 시간과 정체구간을 예측하기 위한 것이다. 대상공간에서의 피난 소요시간은 피난인이 위험에 처하게 되는 시간과 비교하여 주로 안전성을 평가하게 된다. 대상 공간의 각 지역과에서 피난인이 위험에 처하게 되는 시간은 위험현상이 피난인의 생명에 대해 시각적, 생물학적 영향을 주기 시작하는 시간을 의미하며, 이는 여러 가지 기준으로 정해진다. 피난시간의 단축을 위해서는 정체 구간의 파악이 필수적이다. 정체구간은 문의 폭, 복도의 폭, 계단의 폭과 용량 등과 같이 피난경로를 구성하는 요소 중 하나이며, 이를 조정하여 정체구간에서의 피난시간 자체를 해소, 전체적인 피난시간을 단축시킬 수 있다. 현재까지는 주로 건축물의 화재안전 분야에 사용되었으며, 현재는 선박, 비행기, 철도차량 등과 같은 대규모 인원이 탑승하는 운송수단에도 사용되고 있다.

3. 피난모델의 발전과 종류

2003년도에 발표된 Olenick의 연구결과를 보면 24개의 피난모델이 있는 것으로 조사되었으며, 2005년 발표된 Kuligowski 등의 연구에서는 30개의 모델에 대한 분석을 수행하였다.³

피난모델은 초기 단순 수식 계산모델에서부터 꾸준한 발전을 이뤄 현재는 4세대 모델까지 발전되었다.

현재 개발되고 있는 모델들은 4세대 모델들로서 3세대모델들에서 고려되지 못하였던 물리적, 사회적, 심리적 조건에 의한 영향을 포함하고 있다. 즉 각 개인단위별로 정해진 주위 상황에 대하여 판단을 통해 의사결정을 수행하고 이에 의해 행동하는 모델들이 개발되고 있는 것이다.⁴

구분	모델명	특성	장단점
1세대	Manual Calculation	단순수식계산	<ul style="list-style-type: none">· 이동거리의부적합· 동시반응· 동일한 개인조건· 방해조건에 노출되지 않음
2세대	Flow/hydraulic Model	컴퓨터기반 수력학적 모델	<ul style="list-style-type: none">· 조금 복잡한 상황에 대한 고려 가능· 정확한 공간조건 고려 불가능· 개인에 대한 고려 불가능
3세대	Ball-bearing Model	개인에 대한 고려 시작	<ul style="list-style-type: none">· 인구의 유동을 액체나 불을 사용하여 모사· 물리적 환경에 의해 가정된 행동이 영향을 받음· 모델은 의사결정에 관여되는 풍부한 변수가 결여되어있음.
4세대	Rule-based Model	정교한행동이 적용 가능한 규칙기반모델	<ul style="list-style-type: none">· 다양한 행동변수 고려 가능· 개인변수와 중요조건에 의한 규칙이 행동에 영향을 미침· 행동은 물리적, 심리적, 사회적 조건에 영향을 받음

3.2. 피난모델의 종류

현재 30개가 있는 것으로 조사된 피난모델의 종류는 세대적으로 구분하는 등 연구자들마다 조금씩

구분이 다르며, 대상공간에 대한 이동영역을 모사하는 방식에 따라 구분을 하자면 다음의 3가지 범주로 나누어 볼 수 있다.

(1) 연속공간모델 (continuous space models)

연속공간모델에서 피난자의 시간과 장소를 연속적인 흐름으로 계산하는 모델을 의미한다. 피난자의 이동방향과 흐름이 비교적 자연스러운 특징이 있다. 이러한 모델에 대표적인 것은 Simulex, Gridflow 등이 있으며, 최근 개발되고 있는 FDS+EVAC 도 있다.

(2) 셀 자동화모델(cellular automata models)

대상 공간의 격자의 셀로 구분하고, 시간에 따라 각 셀 단위로 보행자의 이동과 환경에 대한 정보가 계산결과에 따라 변화 되는 방식이다. 보행자가 하나의 셀에서 다음 셀로 이동하는 데에 여러 가지 정해진 규칙에 따라 이동하게 된다. 이는 연속공간모델에 비해 계산결과가 빠른 장점이 있다. 대표적인 모델로는 building-EXODUS와 STEPS가 있다.

(3) 비정밀 네트워크 모델(coarse network models)

비정밀 네트워크모델은 방, 복도, 에스컬레이터 등의 노드로 건물을 나누고, 각 부분의 피난을 모사한다. 노드는 각 구조부의 실제적인 연결을 의미하는 아크에 의해 연결된다. 이는 각 피난인 상호간의 물리적, 심리적 영향은 고려가 불가능하다. 대표적인 모델로는 EVACNET4과 EXITT가 있다.

4. 철도차량에 대한 피난모델의 적용

4.1. 철도차량의 피난안전성능 평가의 기준

철도차량은 이동한다는 점을 제외한다면, 바닥과 벽, 그리고 벽으로 타 공간과 구획되어있다는 점에서 건축공간과 동일하다고 할 수 있다. 이러한 철도차량의 피난안전이 확보되어있는지 여부를 판단하는 기준은 건축화재분야에서 이전부터 사용되어오던 ASET(Available Safety Egress Time)과 RSET(Required Safety Egress Time)의 비교를 사용할 수 있다.² 여기서 ASET은 피난인이 위험에 도달하게 되는 시간을 의미하며, 시간의 결정은 일정높이에 대한 연기층, 또는 가시거리, 특정가스들의 농도 등의 변화를 예측하게 된다. 화재로 인해 인명이 위험하게 되는 시간의 측정은 주로 화재현상에 대한 예측 수식, 화재모델링, 화재실험 등에 의해 이뤄지게 된다. 또한 RSET은 대상공간의 피난인이 피난을 완료하는 시간으로 이 또한 예측수식, 피난모델링에 의해 예측되게 된다. 평가의 결과는 화재가 인명에 위험하게 되는 시간이전 피난이 완료되면 안전한 것이므로 ASET보다 RSET이 작으면 안전이 확보된 것으로 평가하게 된다. 철도차량이 가지는 피난안전성능은 이러한 기준을 사용하여 평가할 수 있으며, 평가를 위한 피난현상의 분석은 피난모델을 사용하여 수행하게 된다.

4.2. 철도 차량의 피난시나리오 구성

철도차량의 피난안전성능을 분석하기 위한 피난시나리오는 위험 지역으로부터 안전지역으로의 피난이라는 면에 있어서는 일반적인 건축화재의 시나리오와 같지만, 차량이라는 특성과 운행 시 주변 환경적 요소에 의한 영향 등 특징적으로 고려해야할 부분들이 몇 가지 있다.

이전에 수행되었던 철도차량의 화재위험성평가들과 ASTM E 2061 등을 참고하여 분석하여 철도차량에 대한 피난시나리오 수립의 고려요소를 선정해보면 다음과 같다.^{1,5,6}

(1) 피난개시 시간

일반적인 건축물에서는 피난 개시시간을 화재실에서는 화재발생과 거의 동시에 그 외 공간에서는 화재경보시스템의 작동 등으로 규정하는 경우가 일반적이다. 이에 비하여 철도차량은 각 공간이 일렬로 연속되어있으며, 특별히 감지기나 기타 자동화된 화재경보 수단이 없다면, 전 차량에서 동시에 피난을 수행할 가능성은 지극히 적다고 할 수 있다. 특히 침대차의 경우는 승객들은 취침을 하고 있으며, 공간 구조상 화재발생을 알기가 매우 어려운 면이 있다. 또한 충돌 및 탈선으로 인한 전복 등의 사고 등과 화재를 복합적으로 고려한다면, 사고로 인한 충격에서 회복하여 피난을 수행하는 상황에 대한 고려도 필요하다.

그러므로 이러한 피난개시시간 설정에 대한 타당성 있는 데이터의 확보는 매우 중요한 사항이다.

(2) 피난경로

철도차량에서의 화재발생 시 피난은 운행 상황에 따라 그 이동경로가 달라진다. 운행상황은 화재 발생 후 평가 수행 시간동안 운행 중, 운행 후 정차, 정차 중으로 나누어 생각해볼 수 있다.

먼저 운행 중인 경우 승객들은 차량과 차량 사이의 연결통로를 통해 화재발생 칸으로부터 먼 쪽으로 이동을 수행할 것이다. 그리고, 운행을 수행하던 중 정차를 하게 되는 경우 사람들은 화재가 발생한 칸으로부터 먼 쪽으로 이동을 수행하다가, 정차가 되면 비상문을 열고 외부로 탈출하게 될 것이다. 마지막으로, 정차 중 화재가 발생하게 되면, 문을 통해 차량의 외부로 피난을 수행할 것이다.

이 세 가지 경우 중 철도차량 피난에 대한 최악의 시나리오(Worst Case)는 운행 중이며, 이 경우 피난인들은 모두 화재와 먼 쪽 객차방향으로 이동을 수행하게 될 것이다. 그러므로 각 차량을 연결하는 통로에서 정체가 발생하게 될 것이며, 이러한 피난시간의 지연이 화재로 인한 피해를 가져올 가능성을 증가시키게 된다. 물론 이동 중이 아니라 시스템적 문제로 인하여 외부로의 문이 원활하게 열리지 않는 경우에도 유사한 상황을 보일 수 있다.

(3) 화원의 위치

철도차량이 정차를 하고 있는 상황이라 문을 열고, 또는 열려진 문을 통해 즉시 외부로 피난할 수 있는 상황이라면, 화재 발생 차량 외에는 화원의 위치에 따른 영향이 적을 것이다. 단, 발생 객차의 경우 화원과 인접한 하나이상의 문을 사용 불능으로 가정할 필요가 있다.

하지만 차량이 운행 중이거나 기타 이유로 화재발생차량 객차에서 타 객차로 이동을 해야 하는 경우에는 화재발생 객차의 위치가 중요한 사항이 된다. 만약 6개의 객차가 연결된 경우라면, 5번 객차에서 화재가 발생할 경우 1번 객차 방향으로 피난하는 승객과 6번 객차 방향으로 피난하는 승객의 안전성을 검토해보아야 할 것이며, 이와 더불어 1번에서 화재발생시 6번 방향으로 피난하는 경우도 분석을 수행해보아야 할 것이다.

(4) 차량의 상태

일반적으로 철도 차량의 상태는 운행, 또는 정차 중이지만, 사고로 인해 객차가 옆으로 쓰러져 누운 경우도 생각해볼 수 있다. 차량이 정상상태거나 전복되었을 경우에 비해 쓰러져 누운 경우에는 천장부분까지 올라가거나, 객차와 객차사이에 바닥으로부터 약 1m 정도가 되는 벽 위에 있는 문을 통해 다른 구역으로 이동해야 하는 상황이 된다. 이러한 경우 혼자서 피난이 어려운 경우 타인의 도움을 받게 영국 열차의 실험결과에 따르면 연기속에서 전복된차량에서의 평균 유동율은 분당 5명이며 연기로 인하여 유동율은 1/2, 피난시간은 거의 2배에 이르는 것으로 나타났다. (Ed Galea)

(5) 외부환경

외부의 환경이란 플랫폼과 같이 차량으로부터 외부로의 피난이 용이한 경우와, 그 외의 장소로 차량으로부터 외부 바닥까지 높이가 있는 경우를 산정해 볼 수 있다. 외부적 환경은 차량 자체의 피난안전 성능과 관계없는 것으로 생각될 수 있으나, 외부로의 피난을 용이하게 할 수 있는 장비의 효용성 등을

평가하게 된다면, 이러한 상황도 시나리오에 고려해야 할 요소가 될 것이다.

(6) 피난 중 행태반영

1) 연기 중의 피난특성

대피자가 연기에 노출되거나 연기 층에 대면하게 되는 경우, 연기농도 및 시간에 따른 물리적인 위험 수준을 규명하고 이와 함께 심리적인 반응과 피난출구 선택에 대한 영향이 고려되어야 한다. 즉 연소생 성물중의 Soot, 유독성 가스 그리고 열에 대한 정량적 분석을 통하여 실제적인 피난이 불가능하게 되고 심각한 부상이나 의식불명에 도달하는 상황과 수준을 예측하여야 한다. 연기 속을 통과하여 피난하는 대피자는 완전히 어두운 공간에서 벽을 따라 이동하는 상황을 보여주며 이동속도는 optical density에 따라 저하된다. (Jin 1976)

한편, 연기에 직면한 대피자의 약 30% 는 그 장소를 통과하기보다는 원래 장소로 되돌아 온다는 사실이 밝혀졌다. (Wood 1972, Bryan 1977) 이 때의 평균 가시거리는 3미터이며 여성의 비율이 남성보다 더 많았다.

2) 패닉현상

화재 시 이성을 상실하고 본능적이고 자기 파괴적인 상황에 이르는 소위 공항(panic)현상은 실제로 드문 현상이며 오히려 주어진 환경과 조건에서 가능한 한 이성적이고 종종 이타적인 반응 (Non adaptive behavior)을 보인다. (Wood 1972, Sime 1980, Keating 1982, Ramachandran 1990) 패닉 현상에 대한 부 적절한 이해와 해석은 종종 피난 모델링의 적용자체를 제한할 수도 있다. 피난모델에서는 대피자에게 예상되는 모든 피난관련 요소들을 포함하고 행동과정의 가능성을 정확하게 예측할 필요가 있다. 그러나 현재 사용 중인 어떤 피난 모델도 모든 요소를 구체적이고 상세하게 반영 할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 사용자는 모델마다의 특성과 한계를 이해하고 모델링 결과에 대한 적합한 해석능력이 필요하다.

4.3. 철도차량 피난분석에 대한 피난모델의 적용

어떤 모델이 한 분석에 적합한지 여부를 판단할 수 있는 1차적인 기준은 시나리오의 고려가능범위일 것이다. 즉 분석을 하기위해 선정된 시나리오의 요소들을 얼마나 모델이 반영해줄 수 있는 가라는 점이다. 하지만 피난모델들이 현실의 피난현상을 완전히 모사해줄 수 없는 이상, 피난시나리오를 설정할 때 모델의 반영가능 요소들을 미리 검토하는 것도 가능하다.

철도차량 피난성능분석에 적합한 모델은 위에서 제시된 피난 시나리오에 대해 얼마나 수용할 수 있는지 여부에 따라 판단하게 될 것이다. 가장 먼저 개별적 피난개시시간의 적용가능성이 있다. 즉 개인별, 지역 단위별 피난개시시간을 별도로 적용 가능한지 여부를 점검해봐야 한다.

두 번째로 모델에서 피난공간을 반영할 때, 복잡한 공간을 얼마나 반영할 수 있는지 여부이다. 즉, 의자와 의자사이, 의자사이의 복도, 문, 계단 등으로 구성된 차량내부에서의 피난경로 요소들의 구조적 치수를 얼마나 반영해줄 수 있는지도, 중요한 문제이다.

세 번째로 화재위험요소의 반영부분이다. 철도차량은 협소한 공간에 많은 인원이 밀집되어있고 피난 경로와 화염확대 및 연기의 유동경로가 동일하다. 그러므로 승객들이 피난을 수행하는 도중 연기에 노출될 가능성이 많다. 이러한 상황을 평가하기 위해서는 화재모델링을 통해 얻은 연기의 이동과 유독성

가스의 농도변화, 가시거리 등의 정보들을 반영할 수 있는지 여부도 모델의 중요한 능력이 될 것이다.

철도차량에 대한 피난모델의 적용 가능성을 판단하기 위해서는 모델의 특성을 조사하여, 위에서 제시된 요소들을 적용시켜 분석할 수 있는지 여부를 알아보아야 할 것이다. 그 후 이러한 특성들의 반영이 결과의 신뢰도에 영향을 주는지 여부에 대한 연구도 추가적으로 수행해보아야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ASTM E 2061 Standard Guide for Fire Hazard Assessment of Rail Transportation Vehicles
2. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd Edition, 2002.
3. E.D.Kuligowski et al, "A Review of Building Evacuation Models", NIST Technical Note 1471, 2005.
4. E. R. Galea, S.Gwynne, P.J.Lawrence, L.Filippidis & D Blackshields, building EXODUS V4.0 User Guide and Technical Manual, Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, UK, 2004
5. P. Kangedal, D. Nilsson, "Fire Safety on Intercity and Interregional Multiple Unit Trains", Lund University, 2002
6. R.D. Peacock et al, et al, "Fire Safety of Passenger Trains; Phase II, NIST, 2002.
7. Olenick, et al, "An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke," SFPE Journal of Fire Protection Engineering, 2003
8. 김운형, David Purser, “건물의 피난시간 설계요소의 분석”, 한국화재소방학회 춘계학술논문발표회, 2003
9. 김운형, 윤명오, E.R.Galea, "EXODUS 피난모델의 검토", 한국화재소방학회 춘계학술발표회, 2000
10. 김운형, 김종훈, 김병찬, “Exodus 모델을 적용한 Day care 시설의 피난안전성능 검토”, 한국화재 소방학회 춘계학술발표회, 2007