지하철 차량 선로 정차 시 피난 행동에 관한 실험

김종훈[†] · 김운형 · 이덕희* · 정우성*

경민대학교 소방행정과, *한국철도기술연구원

Experiments of Egress Behavior When Subway Car Stops on Railroad

Jong-Hoon Kim[†] · Woon-Hyung Kim* · Duck-Hee Lee* · Woo-Sung Jung*

Dept. of Fire Safety Administration, Kyungmin Univ.,

*Korea Railroad Research Institute

(Received June 15, 2011; Revised June 8, 2012; Accepted June 8, 2012)

요 약

지하철 차량이 선로에 정차하는 경우 승객들은 지하철 바닥과 선로 바닥의 1.2 m 높이를 내려가야 하는 상황에 처하게 된다. 이러한 상황에 대한 데이터의 확보는 선로와 터널에 정차된 지하철 차량의 피난해석을 수행하는 데 필요한 자료가 된다. 실험결과 20대 및 그 이하 연령층은 매우 신속히 이 높이를 내려가 하차할 것으로 나타났다. 그러나 고령자들에게는 보조자의 도움 없이는 쉽게 내려갈 수 없는 높이로 실제 실험에서도 넘어짐과 부상이 발생하였다. 또한 차량 문앞에 선로 벽이 있고, 타 피난인들이 지나가고 있어 합류를 해야하는 경우에는 20대 그룹도 낮은 유동율을 보여주었으며, 실제 화재 시 벽이 있는 선로나 터널의 경우 차량에서 외부로의 피난시간을 증가 시킬 것으로 나타났다.

ABSTRACT

When the subway car stop on track, passengers have to overcome a height of 1.2 m from floor level of the subway car to the level of track for evacuation. In this experiments, participates in the group of twenties or under ages were rapidly jumping down from the subway car. However, Most elderly group were not easy to overcome the height without help of others and some of them were fell and injured. In case of merging flows, the flow rate of the group of twenties was lower than the other cases. If fire occurred in the train and train stopped in the tunnel, it will be needed a lot of total evacuation time because of the heigh difference and wall effect from subway car to outside.

Keywords : Egress, Subway car, Experiment, Tunnel, Fire

1. 서 론

대구 지하철 화재 발생 이후 국내에서는 철도 화재안전에 대한 대규모 연구가 진행되었다. 특히 철도차량 및 시설에 대한 화재위험도 평가의 도입은 국내 철도의 화재안전수준의 향상을 가져올 것으로 기대된다. 기본적으로 화재위험도 평가는 화재와 피난에 대한 예측을 기반으로 수행하는 것이 일반적이다. 이러한 위험도평가에서는 인명피해 예측결과를 기준으로 손실을 판단하게 되므로, 피난현상의 예측은 매우 중요하다. 피난 현상에 대한 예측은 현재의 수계산 방식(Hand calculation)과 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 사용하는 방법이 있다⁽¹⁾. 이러한 방법들은 건축물의 피난안전성능평가를 위해 연구개발이 진행되어 왔으며, 현재도 새로운 연구와 개발이 꾸준히 이루어지고 있는 상황이다.

지금까지 차량 및 역사와 터널을 포함한 시설에서의 피난에 대해 건축물에서 사용되는 피난분석기법을 적용하여온 것이 사실이다. 하지만 차량과 터널 또는 선로에서의 피난은 일반 건축물에서의 피난과는 특별히 다른 부분이 있다. 먼저 차량바닥과 선로바닥사이의 높이 차이가 존재한다. 국내 지하철의 경우 대부분 1.0~1.2 m의 높이를 가지게 된다⁽²⁾. 이러한 높이 차이는 승강장에 정차하였을 경우에는 문제가 되지 않지만, 선로에 정차하였을 경우에는 승객들이 피난 시 뛰어내려야할 장애로 존재하게 된다.

둘째로 일부 선로와 터널에서의 정차 시 기존의 1.0~1.2 m의 바닥높이에 더하여, 차량과 선로 구조물 또는 터널에 의해 형성되는 벽 사이의 거리가 약 0.6 m 정도 형성되게 된다. 즉 차량이 화재 시 터널에 정차하게 되면, 승객들은 1.2 m의 높이를 뛰어내리는 것뿐만 아니라

[†]Corresponding Author, E-Mail: aina47@hanmail.net
TEL: +82-10-9972-3752, FAX: +82-31-462-2119

0.6 m의 좁은 공간에서의 이동, 그리고 이를 통과하는 다른 승객들이 동시에 피난의 장애 요소로 만나게 되는 것이다. 이러한 문제점은 화재와 같이 신속히 공간으로부터 외부로 나가야 되는 상황에서는 치명적인 결과를 낼 수도 있다.

이러한 상황에 대한 연구 데이터는 세계적으로도 드물며, 특히 피난예측에서 사용할 수 있는 데이터는 거의 없다고 할 수 있는 상황이다. 예를 들면 단위 넓이 및 시간당 통과하는 사람을 나타내는 유동율(Flow rate)은 피난계산에 많이 쓰이지만, 이러한 데이터는 없는 상황이다.

본 연구는 먼저 이러한 상황에 대한 연령별 소요시간 측정 및 현상 관찰을 수행 분석하였으며, 이 후 시나리오를 수립하고 군집 이동에 대한 실험을 수행하여 현상의 관찰 연구, 관련 데이터 분석 등을 수행해보았다.

2. 선행 연구 분석

스웨덴 Lund University의 Hkan Frantzich는 1999년 터널에서 정차된 차량으로 부터의 탈출에 관한 실험을 수행하였다⁽³⁾. 이 연구는 차량 바닥과 선로바닥이 1.2 m 높이를 가진 상황이었으며, 지원자 150명의 참여를 통해 실험을 수행하게 되었다. 아무런 보조기구 없이 차량외부로 탈출하는 경우에 대한 실험을 수행한 결과 평균적으로 1인당 약 5초의 지연시간이 기록되었다. 또한 사다리를 사용하는 방법도 실험해보았는데, 이 경우에는 평균적으로 1인당 10초의 지연시간이 나타나는 것으로 측정되었다. 사다리의 사용이 더 많은 소요시간을 기록하나, 실험참여자의 일부는 사다리 없이는 피난이 불가능한 경우도 있었던 것으로 나타났다.

오스트리아 Institute for Building Construction and Technology의 Monika Oswald 등은 2006년 지하철 차량 바닥과 선로바닥의 1.0~1.2 m의 높이와 지하철(Metro)차량과 터널 벽 사이에 형성된 공간의 통행에 초점을 맞추어진 실험연구를 수행하였다⁽⁴⁾. 이 실험에는 440명의 다른 연령대와 신체적 조건을 가진 사람들이 참여하였다. 이 실험에서 벽면과 차량사이의 0.75 m이나 핸드레일이 0.1 m 공간 쪽으로 돌출되어, 유효한 공간폭은 0.65 m가 되는 상황이었다. 이 실험에서는 차량외부로 나가는 사람을 뛰어 내려가는 사람(Jumper), 차량 또는 외부 벽의 핸드레일을 잡는 사람(Sider), 그리고 앉아서 내려가는 사람(Sitter)으로 구분하였다. 이 실험의 결과 터널에서 문을 통한 흐름은 0.25 persons/min · m인 것으로 제시하고 있다.

이들 연구는 유럽에서 수행되었으며, 아시아권의 실험결과는 찾을 수 없었다. 실험의 결과로는 현상에 대한 관찰결과와 지연시간 혹은 문에서의 흐름을 제시하였다. 하지만 실제 피난시물레이션에 데이터로 참고하기에는 매우 제한적인 데이터만 공개되었다.

3. 지하철 차량 개인 선로 유출 소요 시간 측정 실험

3.1 성인(20대) 개인선로 유출 소요시간 실험

2008년 5월 28일 서울 메트로 수서차량기지에서 실시된

Figure 1. Experimental set up.

Figure 2. Exiting in the train.

Table 1. The Age of 20~25 Years Group

	Male	Female
Average	1.73	2.75
Maximum	2.4	5.21
Minimum	1.12	1.34
ST DEV.	0.33	0.84

*29.63 s record is not included

Figure 3. Analysis of time data from the age of 20~25 years group (29.63 s record is not included).

피난실험에서 개인의 선로 하차 실험이 수행되었다. 이 실험에서는 차량 바닥과 선로 바닥 사이의 높이가 1.27~1.30 m로 현장에서 측정되었다. 산로 바닥의 높이는 하부 자갈의 높낮이가 고르지 못하여 차이가 발생하였다. 이러한 차량에서 바닥으로 하차하는 실험을 수행하였다. 수행 대상은 남녀 각각 20명씩으로 20~25세의 성인 남녀 평균 적 시간을 구하기 위해 수행하였다. 실험수행의 결과 남자는 평균 1.73초, 여자는 평균 2.75초의 시간이 소요되었다. 참가자는 1인을 제외하고 쉽게 하차했지만, 최대 29.63초 동안 뛰어내리지 못한 1인의 참여자가 있었다.

3.2 저 연령층(15세)과 고 연령층(66세 이상)의 개인 선로 유출 소요시간 실험

저 연령층과 고 연령층에 대한 실험은 2009년 6월 12일 경민대학에서 수행되었다. 이 실험은 차량과 유사한 세트를 제작하고 뛰어내리도록 하였다. 실제 지하철 차량과 유사하도록 설정하였으며, 바닥에서 세트 바닥까지의 높이는 1.2 m로 제작하였다. 안전을 위해 하부에는 매트리스를 설치하였다.

3.2.1 저연령층 대상 실험

저연령층으로 중학교 1학년에 재학 중인 15세 남학생 29명과 여학생 32명이 참가하였다. 수행결과 15세 남녀는 각각 최고속도 0.78초, 최저속도 1.56초의 기록을 나타내

Figure 4. Design of experimental setup.

Figure 5. Experimental set up.

Figure 6. Exiting of elderly persons.

Table 2. Comparison of Test Results

	Persons aged 15 years	Elderly persons
Average	1.215	8.43
Maximum	1.56	19.53
Minimum	0.78	2.06
ST DEV.	0.24	4.39

Figure 7. Analysis of time data from the ages 15 years and elderly persons.

었으며, 평균은 1.215초로 평면에서의 이동과 큰 차이를 보이지 않았다.

3.2.2 고연령층 대상 실험

고령층으로는 남녀 66~89세의 연령층의 28명이 참가하였으며, 평균 77.97세를 기록하였다. 고령층의 경우는 단독 이동을 전제로 하였지만, 요청을 할 경우 2인의 남자 성인이 내려오는 것을 보조하였다. 측정시간은 문에 서부터 바닥에 설 때까지의 시간을 측정해보았다. 그 결과 최대 속도는 2.06초로 거의 성인 및 저연령층과 유사한 결과를 보여주었지만, 최대 시간은 19.53초로 측정되었으며, 평균 8.43초의 시간소요를 보여주었다. 이 실험의 결과에서 정규분포를 보면 고령자의 실험결과가 더 넓은 분포를 나타내었다.

4. 지하철 선로 군집 유출 실험

본 실험은 지하철 차량의 선로 및 터널 정차 시 군집이

동에 관한 현상의 관찰과 유출 시간을 구하기 위해 수행되었다. 지하철 차량에서 개인에 관한 연령대별 선로 유출 시간은 앞장의 실험들에서 데이터를 확보할 수 있었다. 군집이동은 이러한 개인이 모여 선로로 유출될 때의 현상이다. 이 실험에서 확보된 군집이동 시의 유동율(Flow rate)을 구하여 실제 평가에 사용할 수 있으며, 피난시뮬레이션의 비교데이터로도 활용될 수 있다.

4.1 실험 개요

본 실험은 2011년 5월 27일에 한국건설기술연구원 건축물안전성능 실험센터에서 수행되었다. 실험을 위해 특별한 실험세트가 제작되었다. 이 세트는 지하철 차량을 모델로 제작되었으며, 실제와 유사하게 양쪽으로 열리는 폭 1.3m의 문을 설치하였다. 이 문은 실험개시 신호와 함께 실험진행요원에 의해 수동으로 열리도록 제작되었다.

세트의 높이는 바닥에서 1.2m이며 많은 인원이 올라가는 관계로 사고방지를 위한 난간도 제작되었다. 또한 터널 벽을 대신하기 위해 가동식 벽을 제작하였으며, 이 벽은

Figure 8. Experimental setup.

Figure 9. Experimental setup.

Table 3. Composition of Group

Group	Ages	Number of participants
A	20's	48
B	20's	2
	30's	3
	40's	5
	50's	10
	60's	19
	70's	1

차량세트와 0.6 m 간격으로 설치되어 통로 공간을 형성할 목적을 가지고 있다.

4.2 인원특성

총 89명이 실험 참여자로 참가하였다. 실험대상자는 두 개의 그룹으로 구분하였다.

Group A는 20~26세 사이의 남녀로 구성되었으며, 총 48명이었다. Group B는 20대에서부터 73세까지의 다양한 연령층을 포함하였으며, 총 40명으로 구성하였다. Group B에 20~30대가 추가된 것은 현장에서 고연령자의 수가 부족하였기 때문이다. Table 3은 연령층 분포를 나타내었다.

4.3 시나리오 작성

실험의 시나리오는 지하철 차량이 선로에서 정차하는 상황에 대한 총 3가지 경우를 가정하고 있다.

① Case 1: 외부 장애물 없음. 이 경우는 차량의 옆 선로 방향으로 문이 열리거나, 또는 정차 선로 환경이 하차하는데 아무런 장애물이 없는 경우를 가정한 것이다.

② Case 2: 외부 벽 설치(간격 0.6 m). 이 경우는 터널 또는 벽이 있는 선로에 정차하는 경우를 가정한 것으로 이동할 수 있는 통로가 차량과 벽 사이에 0.6 m 간격으로 형성된 경우이다.

③ Case 3: 외부 벽 설치(간격 0.6 m). 이 경우는 Case 2와 동일하나 하차하는 그룹과 통과하는 그룹 사이에 합류되는 현상을 만들기 위한 경우이다.

4.4 Case 1 수행

외부 장애물이 없는 상황에서의 군집유출실험은 각 그룹이 총 2회 실시하였다. 실험참가자들은 신호와 함께 문이 열리면 1.2 m 아래로 내려간 뒤 원하는 방향으로 이동하도록 하였다.

이 실험의 결과를 보면, 20대로 구성된 Group A는 최대 23.50초의 소요시간을 기록한 반면에, 20~70대로 구성된 Group B는 최대 78.83초를 기록하여 많은 차이를 보여주고 있다.

실험 시 매트리스를 바닥에 설치하는 등의 안전 조치를 수행하였다. 하지만 Group B의 실험 중 1차 실험에서 정

Figure 10. Outflow of group A and B.

Figure 12. Outflow of group A.

Figure 11. Fall down.

Table 4. Results of Case 1 (Free Space)

Group	Round	Time (s)	Flow rate (N/m · s)
A	1	23.50	1.571
	2	21.84	1.691
B	1	52.45	0.601
	2	78.83	0.399

상적인 착지가 되지 않은 경우가 5명이나 있었으며, 2차 실험에서는 73세의 여성 참여자가 부상을 당하는 사고가 발생하였다. Table 4에서 시간과 유동율을 나타내었다.

4.5 Case 2 수행

외부 벽이 설치된 상황에서의 군집유출에 대한 실험을 그룹별로 2회씩 실시하였다. 차량문이 열리면 앞에 벽이 나타나는 데, 이는 터널 등에서의 정차시 문이 열렸을 경

Table 5. Results of Case 2 (Wall Installed)

Group	Round	Time (s)	Flow rate (N/m · s)
A	1	32.50	1.136
	2	29.66	1.245
B	1	95.33	0.331
	2	86.01	0.367

우를 가정한 것이다.

Group A의 경우는 많은 실험 참가자들이 벽을 잡고 수월하게 내려왔다. Group B의 경우 자력으로 내려오는 참여자도 있었으나, 일부 참여자는 타 참여자의 하차를 도와주는 모습이 관찰되었다. 모두 하차하는데 소요된 가장 긴 시간은 A는 32.5초, B는 95.33초를 보여주었다.

4.6 Case 3 수행

외부 벽이 설치된 상황에서 한 그룹은 통로를 통과하고 다른 그룹은 하차를 하는 상황을 실험해 보았다. 통로를 통한 보행자는 연령대에 대한 변수가 없으므로 해당 실험에 대해 상대그룹을 통로 통과 인원으로 배치했다.

합류상황에서 Group A는 지나가는 Group B로 공격적으로 내려오며 신속한 하차를 수행하였다. 하지만 Group B의 하차에서는 하차하는 인원의 동작이 느려, 외부로 나가는 동작을 하는 동안 Group A의 실험자들은 통과하지 못하는 상황이 발생하였다.

Figure 13. Joint flow of groups.

Table 6. Results of Case 3 (Joint Flow)

Group	Round	Time (s)	Flow rate (N/m · s)
A	1	93.94	0.393
	2	97.21	0.379
B	1	132.18	0.239
	2	138.84	0.227

Group A가 외부로 나가고 다른 그룹이 통로실험에서 최대 97.21초의 시간이 소요되었으며, Group B의 경우는 최대 138.84초의 시간이 소요되었다.

4.7 실험 결과 분석

실험의 수행 결과 Case 1의 장애물이 없는 환경에서 20대로 구성된 Group A의 유출은 매우 신속한 편이지만, 20~70대의 다양한 인원이 분포되어있는 Group B는 거의 절반 수준으로 급감하는 것으로 나타났다. 평균으로 볼 때 Group B의 소요시간은 Group A의 기록에 비해 2.89배 길게 나타나는 것으로 분석되었다.

터널 또는 선로에 설치된 벽으로 인해 0.6 m의 통로가 형성되는 Case 2에서도 Group A는 Case 1보다는 낮지만 원활한 유출을 보여주는 반면 Group B는 여전히 낮은 유출을 보여주고 있다. Group B의 소요시간은 Group A의 기록에 비해 2.92배 길게 나타나는 것으로 분석되었다.

합류가 진행되는 Case 3의 경우에는 Group A의 유출이

Figure 14. Comparison of time.

Figure 15. Comparison of flow rates.

이전 보다 급감하는 것을 볼 수 있으며, Group B는 매우 낮은 수준의 유동율을 보여주고 있다. 또한 이 경우 Group B의 실험참여자수가 내려오는 동안 Group A의 참여자들이 통과하지 못하는 현상을 보여주고 있다. Group B의 소요시간은 Group A의 기록에 비해 1.42배 길게 나타나는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

화재 등 비상상황에서 지하철 차량이 선로에 정차한 경우, 승객하차에 대한 현상과 이와 관련된 데이터의 측정을 수행하였다. 먼저 개인의 유출 소요시간 측정에서 성인그룹(20대)의 경우 평균 남자는 1.73초, 여자는 2.75초의 시간이 소요되는 것으로 나타났으며, 저연령층 그룹(15세)도 평균은 1.17초로 매우 신속한 것으로 기록되었다. 그러나 2인의 보조자가 있는 상황에서 고연령층 그룹은 평균 8.43초의 시간소요를 보여주었다. 하지만 고연령층은 최대 19.53초를 기록하여 상황에 따라 평균 이상의 시간이 소요될 것으로 나타났다.

군집유출에 대한 실험에서는 지하철 차량 문 앞에 아무런 장애물이 없는 경우나 벽이 있는 경우 20대 그룹은 신속하게 유출될 것으로 판단되지만, 이러한 상황에서도 20~70대가 혼합된 그룹은 매우 느린 유출이 진행될 것으

로 나타났다. 또한 합류가 진행되는 경우 20대 그룹도 급격히 유동율이 저하되는 현상을 보여 실제 지하철 차량이 터널이나 벽이 있는 선로에 정차하여 벽 방향으로 문이 열리고 타 차량에서 내린 피난인들과 합류가 되는 현상까지 발생한다면 차량에서 외부로 나가는 피난시간이 매우 길어질 것으로 예상된다.

후 기

“이 논문은 국토해양부 미래철도기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임”.

참고문헌

1. Erica D. Kuligowski, Richard D. Peacock and Bryan L. Hoskins, “A Review of Building Evacuation Modes”, NIST Technical Note1471 (2005).
2. J. H. Kim, W. H. Kim, S. K. Roh, D. H. Lee and W. S. Jung, “Experiments on Egress of Persons with Mobile Disability in Train Car”, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 2, No. 6, pp. 865-867 (2009).
3. Håkan Frantzich, “Utrymning av tunnelbanetåg-Experimentell utvärdering av möjligheterna att utrymma i spår-tunnlar”, Lunds Tekniska Hgskola (2000).
4. M. Oswald, H. Kirchberger and C. Lebeda, “Evacuation of a High Floor Metro Train in a Tunnel Situation: Experimental Findings”, The fourth International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Wuppertal, Germany (2008).
1. Erica D. Kuligowski, Richard D. Peacock and Bryan L.