

## 지하철 역사 화재 시 하향식 수직 피난동선에 관한 연구

노삼규, 함은구, 김종훈, 김병수  
 광운대학교 건축공학과

### A study for downward vertical evacuation route at subway station fire

Sam-Kew Roh, Eun-Gu Ham, Jong-Hoon Kim, Byung-Soo Kim  
 Department of Architectural Engineering Kwangwoon University

#### 1. 서론

화재로 인한 사망자의 대부분은 초기에 유독가스를 포함한 연기의 질식에 기인한다. 따라서 유독성가스와 연기를 신속하게 제거하거나 불연재와 난연재의 사용으로 화재의 급격한 성장을 지연시키는 것이 인명손실을 줄이는 보편적인 접근방식이다. 그러나 난연성 재료는 대체로 석유화학제품군으로 화재 시 높은 독성가스를 배출하는 단점을 갖고 있으며, 제연설비를 포함한 지하구조의 자동제어시스템의 복잡성과 그에 따른 높은 오작동율로 인해 어려움이 따른다. 따라서 화재 시 열과 연기가 상부로 거동하는 지하공간의 화재 특성을 고려하여 피난동선과 연기를 포함한 독성물질을 구조적으로 분리시키는 방안이 가장 효과적인 대안이라고 판단된다.

제연설비는 연기의 발생량과 그 독성지수를 고려해서 설치해야 하는데, 지하 공간 시설물인 경우에 급배기방식과 가압급기방식이 사용되고 있다. 급배기방식은 실내에 외부의 공기를 공급하여 공기 농도를 희석하고, 외부보다 높은 압력을 유지하여 연기의 유입을 방지하면서 실내의 연기를 배출하는 방식이다. 가압급기방식은 실내 압력이 주위 압력보다 높게 유지되도록 급기 함으로써 연기의 유입을 방지하는데 사용되지만, 화재참사가 발생한 대구 중앙로역에는 가압급기방식의 제연설비가 설치되어 있다. 배기방식(흡인방식)은 실내의 연기의 제거하는데 효과적이거나 새로운 공기가 유입될 수 있는 개구부가 작으면 충분한 제연효과를 기대할 수 없다. 한편, 급기 또는 배기풍량도 연기를 배출하는데 중요하며, 연기를 신속하게 배출하기 위해서는 충분한 풍량이 필요하다. 그러나 실제로 이러한 제연설비가 모든 부분을 커버할 수 없으며, 이를 보완하기 위한 구조적인 설계가 요구되어지며 그 대안으로 하향식 수직 피난동선구조 Proto Type을 제안하고 이를 기존 역사와 비교 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 제시하고 자 한다.

## 2. 기존 역사와 하향식 피난구조의 연기거동 및 피난시간 분석

관련연구에 의하면 서울 지하철 ○○역의 경우 평균혼잡도 180%를 적용하여 출퇴근 시간 때(peak time)에 승객 이용수와 수직·수평 통로의 길이를 고려할 때 평균보행속도는 수평통로에서 0.93m/s, 계단에서는 0.26m/s로 조사되었으며, 이때 승객 밀집도는 수평통로에서 3.1人/m<sup>2</sup> 계단에서는 3.9人/m<sup>2</sup>로 조사된 바 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 조건을 이용한 피난 simulation의 결과 상대식 승강장의 경우 피난인원 3000명(열차정차 측-2500, 반대 측 승차 대기인원-500人)을 기준으로 했을 때 열차가 정차의 직후의 피난 완료시간은 495초 승차 대기 인원만 있는 반대 측은 120초에 피난 소요시간이 묘사되었다.

또한, 대구 지하철을 모델로 호리우치 계산방법과 Simulex 피난 시뮬레이션을 비교한 관련 연구에 따르면 보행속도를 1.2m/sec로 가정하면 190초이며, 화재 시 보행속도를 0.4-0.5m/sec(A.W. Heskestad 연기증에서 피난자가 유도등에 의한 피난 시 이동속도)로 가정하여 계산하여 300~400초가량으로 추정되고 Simulex 피난 시뮬레이션의 경우 화재영향을 고려하지 않은 호리우치 계산 결과와 비교하면 각각 280초와 311초의 계산 결과를 보여줌으로서 유사한 피난 시간 결과를 보여주는 것으로 나타내고 있다.[2]

그러나 후자의 결과치는 혼잡도를 고려한 최대인원을 대상으로 하지 않았으며, 두 경우 모두 Simulex 피난 시뮬레이션 최단거리 알고리즘을 선택하였기 때문에 피난 인원 효율적인 분배가 이루어지지 않아 실제상황과 달리 과도한 한쪽방향 쏠림현상이 유발되어 총 피난시간을 더욱 지연시키는 결과를 초래할 수 있다.

### 2.1.1 승강장 연기 거동 분석

대구 지하철 사고 이후 새로이 구성된 표준 지하철 역사시설 및 객차 내장재로부터의 화재시 최대방출열의 범위는 15~20MW로 설정된 바 있다(참고1)

이때 지하3층(platform)에 설치된 8개의 출구를 고려한 화재영향 분석은 피난자의 호흡 장애에 이르는 연층부 노출 높이를 1.8m로 가정한다. 각 계단 입구별로 연층 하강 시각은 각각 137~304초로 나타났다(T1)

또한, 연층부가 바닥면까지 확대되는 시간은 계단부 입구별 각각 295~362초로 분포되었다.(T2)

본 연구에서 연기의 유동을 분석하기 위하여 사용된 CFD 모델은 미국 NIST에서 개발된 FDS 4.0이다. 화원은 Ultra-fast로 상승하여 324초에 최대 20MW에 도달하는 것으로 설정되었다. 324초 이후에는 20MW Steady로 모델링 종료까지 지속시켰다. 20MW 화재를 사용한 이유는 표준지하철 역사시설 및 장비 안전성향상 방안에서 제안된 A급 내장재로 구성된 지하철 전동차의 최대 열방출율의 범위가 15~20MW로 설정되었기 때문이다. 지하철 역사는 총 8개의 상향식 출구가 존재하며, 기타 입력값은 다음과 같다.

Gird : 489,600 computational cells  
 Volume dimension : 170m (W) × 18m (D) × 5m (H)  
 Ambient temperature : 20℃  
 Car size : 19m (W) × 3m (D) × 2.25m(H)  
 Materials : Structure - Concrete, Subway Car - Steel

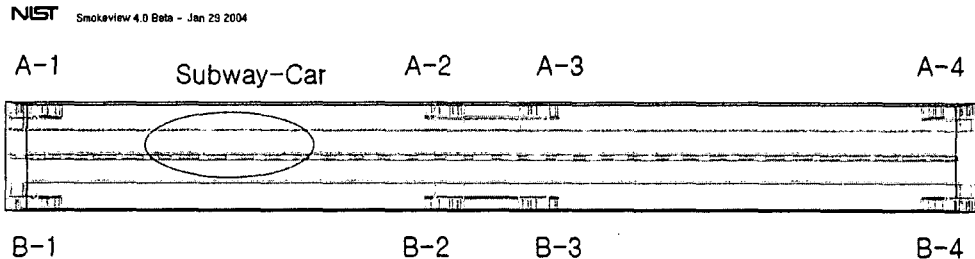


그림 1. Location of each exit on the platform

Modeling and result

화재모델링의 분석은 2개의 케이스에 대하여 수행되었다. 1번 케이스는 플랫폼 바닥에서 1.8m 높이까지 연기층이 하강하는 경우와 2번 케이스는 플랫폼 바닥까지 연기층이 도달하는 경우이다.

연기층 표면은 Mixture Fraction = 0.001로 가시화 시켰다. Field Model의 특성상 연기층의 유동이 나타나기 때문에 정확한 시간적 판단은 약간의 오차가 있을 수 있으며, 플랫폼 바닥의 도달시간은 가운데 두개의 출구가 공통이므로 동일하게 표시하였다. 각 출구별 시간은 다음과 같다.

표 1. 각 출구별 연기층 하강시간 (Case 1)

| Exit | Time | Exit | Time |
|------|------|------|------|
| A-1  | 137  | B-1  | 152  |
| A-2  | 143  | B-2  | 146  |
| A-3  | 200  | B-3  | 205  |
| A-4  | 304  | B-4  | 301  |

표 2. 각 출구별 연기층 하강시간 (Case 2)

| Exit    | Time | Exit    | Time |
|---------|------|---------|------|
| A-1     | 295  | B-1     | 311  |
| A-2/A-3 | 340  | B-2/B-3 | 348  |
| A-4     | 361  | B-4     | 362  |

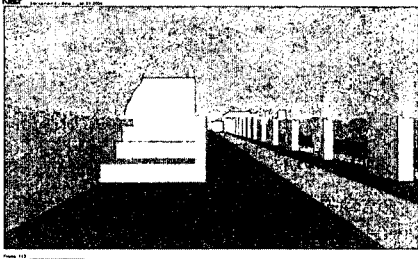


그림 2. Exit A-2 at 143s (Case 1)

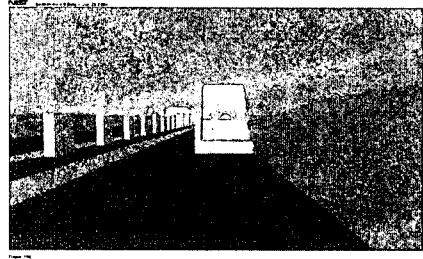


그림 3. Exit B-2 at 146s (Case 1)



그림 2-2. Exit A-2 at 143s (Case 2)

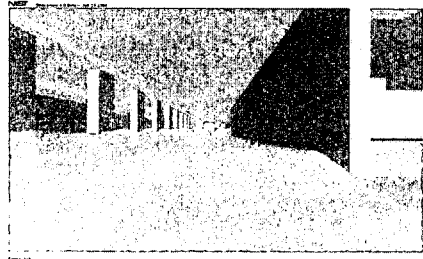


그림 3-2. Exit B-2 at 146s (Case2)

### 2.1.2 기존 상대식 승강장 피난 시물레이션

피난 시물레이션은 Simulex model을 이용하였으며, 피난은 모든 인원이 사고와 동시에 일제히 개시하는 것으로 설정하였다. 인원 산정은 지하철 1량 정원 160명에 Peak time 혼잡도 180%를 적용 시켜 객차6량 내 총인원 1176명, 승강장 대기 인원을 상 하행 각각 240명으로 산정하여 플랫폼의(지하3층) 총 피난 인원 1656으로 산출했다.

표 3. 기존 승강장 피난개시 140초 상황

| 층수                  | 시물레이션 |
|---------------------|-------|
| 지하2층<br>(concourse) |       |
| 지하3층<br>(platform)  |       |

표 3은 열차 화재 개시 후 연층이 천장으로부터 1.8m까지 하강하는, 피난시작 140초대의 상황으로 지하3층 플랫폼의 경우 열차가 정차하고 있는 승강장에서 지하2층으로 올라가는 계단 진입구에서 체류가 발생되고 있는 모습을 보여주고 있다. 반대편 승강장의 경

우 승강장 대기 인원 240명은 동일시간대에 체류 없이 피난이 이루어지는 것으로 나타났다. 이때, 피난 완료지점은 지하2층 개찰구로 가정, 피난완료 시간은 6분 6초로 나타났고 연층이 바닥까지 하강하는 140초를 기준시점으로 가정할 때 지하3층 플랫폼에 남아 있는 피난 대기 인원은 480명으로 총 피난 인원 28.9%에 이른다. 이는 화재 시 발생하는 연기고려하지 않은 결과이다.

### 2.2.1 하향식 계단 피난 시뮬레이션

분석도구 및 분석 방법은 대구 지하철 기존 역사를 이용하였다. 기존 승강장에 하향식 피난 계단을 두어 화재 시 연기층에 노출을 피하도록 구상하였다. 그림3은 변경 전 기존 지하철역사 공간구조이고 그림4는 하향식 계단이 추가된 공간구조를 나타내고 있다.

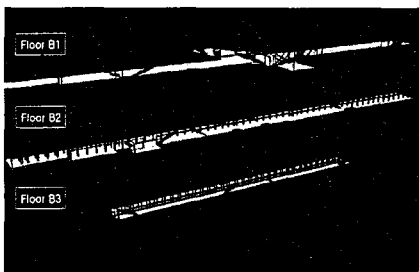


그림 4. 기존구조

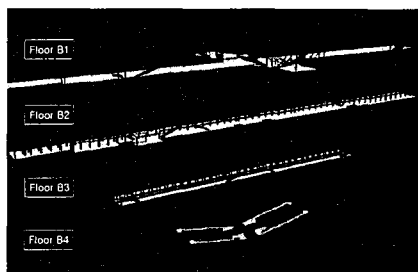


그림 5. 변경구조

하향식 수직 피난동선이 추가된 공간구조의 경우 그림5에서 나타나듯이 지하3층의 승강장에서 지하 4층 하부로 피난할 수 있는 하향식 계단을 두었고 이를 곧바로 지하2층 까지 연결되는 직통계단을 두었다.

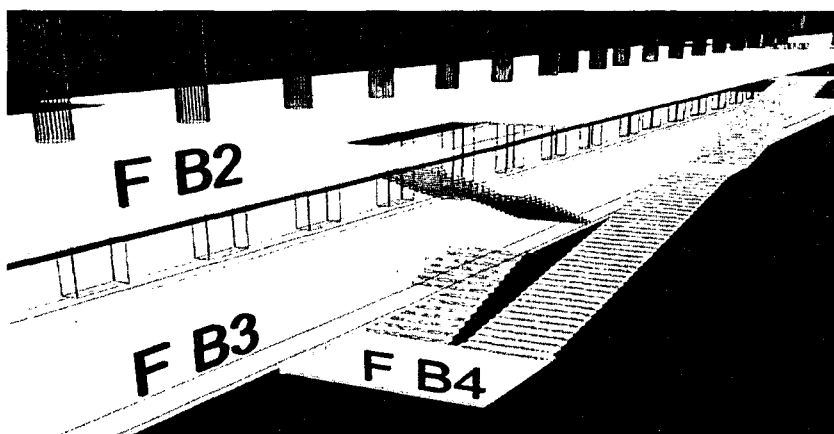


그림 6. 하향식 피난로 상세도

그림6은 140초 이후에 지하2층과 3층, 4층의 상황으로 지하3층의 경우 화재 발생열차

승강장에서 지하2층으로 올라가는 계단과 하향식계단 진압부에서 체류가 발생되고 있는 모습을 보여주고 있다. 특히, 지하4층의 경우 하향식 계단을 통해 이동한 인원이 별다른 체류 없이 피난이 이루어지고 있는 것으로 보여 진다. 반대편 승강장의 경우 기존의 경우보다 별다른 체류 없이 피난이 이루어지는 것으로 나타났다.

| 층수   | 시뮬레이션 |
|------|-------|
| 지하2층 |       |
| 지하3층 |       |
| 지하4층 |       |

표 4 하향식 계단을 이용한 피난 개시 140초 이후에 상황

피난 완료시점은 지하2층 개찰구로 가정할 때, 시뮬레이션 결과 피난완료 시간은 4분 27초로 나타났다. 이는 앞서 기존 역사 시뮬레이션 피난완료 시간 6분 6초보다 1분 39초 빨라진 것으로 나타났다. 그 이유는 피난 탈출구가 추가된 데 기인한다. 그러나 이는 실제 화재 시 연기로 인해 피난자가 피난불능에 이르는 시간을 고려하지 않은 결과로서, 연기거동 시뮬레이션에서 연층 하강시간 140초를 고려하여 피난 실패한 인원을 산정하면 전체인원 1656명중 126명으로 이는 총 피난인원에 7.6%가 피난을 하지 못하는 것으로 나타났다. 이에 연층 하강시간 140초 이후에 피난이 가능한 하향식계단 만으로 시뮬레이션 한 결과 126명의 피난 완료시간은 2분 12초로 나타났으며, 126명이 하향식 계단에 진입한 시간은 1분 25초로 나타났다.

### 3. 결론

기존 역사 시뮬레이션 결과 플랫폼 바닥까지 연층 하강시간 140초를 고려하면 전체인원 1656명중 480명(총 피난인원에 28.9%)은 피난에 지장을 받는 것으로 나타났다.

하향식 피난 구조의 경우 피난완료 시간은 4분 27초로 나타났다. 이는 앞서 기존 역사 시뮬레이션 피난완료 시간 6분 6초보다 1분 39초 빨라진 것으로 나타났다. 그 이유는 피난 탈출구가 추가된 데 기인하는 것으로 판단되며, 140초 이후에 피난하지 못하고 체류되어 있던 126명(7.6%)도 하향식 계단만을 이용, 1분 25초 만에 하향식 계단에 진입이 가능

하며, 2분 12초에 피난이 완료되어 지는 것으로 나타났다.

한편, 연기로 인한 탈출불능 시점인 140초를 기준으로 살펴보면 기존역사가 480명 (28.9%), 하향식 역사 126명(7.6%)로 하향식 역사가 21.3% 더 탈출에 성공할 수 있는 것으로 나타났다.

일본과 국내에서는 비상직통 대피로의 확보를 위한 방안이 고려되어 별도의 직통계단, 기존의 계단 폭 확대 등이 대안으로 거론되고 있다. 그러나 피난시간 확보를 위한 피난계단 폭의 확대 효과보다 피난자의 계단 진입부 적체 인구를 하향식 계단을 이용하여 대피를 시도함으로써 연층으로부터 격리될 수 있는 장점과 동시에 출구의 확장으로 인한 피난시간의 단축효과를 가져올 수 있다.

## **References**

1. Park, Jae-Song, Yoon, Myong-O, Lee, Yong-Jae, "A Study on the Design Standards for Egress Safety Performance of an Underground Subway Station", Architectural Institute of Korea. Vol. 19, No. 8, 2003
2. Eung-Sik Kim., Soo-Young Kim., Hee-Kwon You., "A Study on the Simulation of evacuation time in Daegu Subway Stations", Korean Institute of Fire Science. & Engineering, 2003
3. Yuji Hasemi., S.MORIYAMA., D.NAM., S.TANAKA., N.OKAZAWA., M.YONEZAWA., W.DING., "Research Needs on the Fire Safety of Subway Station-Fire distance, regulation, research efforts and recent smoke movement tests in subway stations in Japan", KIFA, 2003, 3
4. Public hearing committee for "Urban Railway Safety Improvement Plan" Korean Railroad Research Institute, 2003. 6
5. Dea-gu Subway Facility Technique seminar, Korea Building Facility Engineering Institute, 2003, 4
6. Subway Fire Safety Performance Professional Forum, Korea Fire Technique Institute, 2003, 4
7. S. K Roh., J. H Hur., W. H Kim., J. H Kim., "Analysis for Dau-gu subway disaster Emergence Response", KIFA, 2003, 5
8. LegCo Panel on Transport Subcommittee matters relating to railway "Preventive and Prsponse Measures for Emergence Incidents" LC paper No. CB(1)1168/03-04(02), 2004, 3
9. Woe-Chul Park, "A Numerical Simulation of Smoke Control in Daegu Subway Stations", KoreanInstitute of Fire Science. & Engineering. Vol. 17, No. 4, 2003