

부산지하철 지하역사에서의 열부력 연기화재 실험

Experiments in the underground station of Busan by using heated smoke

박원희* 김동현** 장용준***

Park, Won-Hee, Kim, Dong-Hyeon, Jang, Yong-Jun

ABSTRACT

In this study, experiments were carried out to investigate smoke behavior in platform of a subway station which currently is in service in Pusan, the second largest city in Korea. The smoke generator and heater are used for simulating the smoke behavior at the fire train break in the platform located in the 2nd basement of the station. Video recordings were used to monitor smoke lowering. The structure of subway stations is almost closed to ambient surroundings so that the smoke and toxic gas by fire are to be generally extracted by mechanical ventilation systems. For comparison of ventilation modes, three tests were conducted according to its operating mode of the ventilation systems in the platform: no operation of any ventilation systems in the platform, smoke extraction mode in occurrence of fire (presently running mode) and full capacity of smoke extraction where all vents are activated. The results can be used for determination of the smoke optimal extraction mode and capacity of underground subway platforms and comparing with the numerical prediction results of fire subway stations.

1. 서론

지하철과 같은 대중교통수단인 지하철에서 화재가 발생할 경우 인적 및 재산 피해는 매우 방대할 수 있으므로 지하역사에서 화재안전 및 승객 피난에 대한 설계는 매우 중요하다. 지하철의 지하역사 내에서 화재가 발생하거나 화재가 발생한 철도 차량이 지하역사에 정차할 경우 불완전한 연소조건으로 인하여 유독가스가 많이 발생될 수 있다. 국내에 운영되는 대부분의 승강장에는 화재를 감지하는 연기감지기가 설치되어 있으며, 감지기가 화재를 감지할 경우 승강장 및 대합실의 제연시스템이 작동하여 화재연기를 배연하여 승객이 연기로부터 보다 안전하게 피난할 수 있도록 설계가 되어 있다. 승강장에서 화재가 발생할 경우 상대적으로 지하에 위치하였기 때문에 대피시간이 더 많이 소요되므로 보다 위험할 수 있다. 지하역사에서 제한된 규모의 발열량의 풀화재를 이용한 실험이 수행된 바 있으며[1], 지하역사의 화재 발생시 공기 및 연기의 거동 현상을 파악하기 위한 실험 및 이론 연구[2,3,4]가 수행된 바 있다. 본 연구에서는 승강장에 화재가 발생한 열차가 정차하였을 경우를 모사하기 위하여 가열된 연기를 이용하였으며, 여러 가지 제연모드에 따른 연기 흐름 현상을 화면 취득하여 이를 분석하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

2. 부산지하철 승강장에서의 연기가시화 실험

2.1 부산지하철 좌천동역

부산지하철 1, 2호선의 경우 73개의 역사가 있으며, 이중 두개의 플랫폼이 선로로 나뉘어져 있는 형태의 승강장인 상대식 승강장이 64개로 대부분의 역사가 상대식 승강장 구조이다. 실험의 대상이 되는 역사는 부산 지하철 1호선 좌천동 역사로, 지하 2층의 역사로 직선 역사이며, 지하 1층에는 대합실 지하 2층에는 승강장이 설치되어 있는 전형적인 상대역사이다. 좌천동 역사 승강장의 길이는 약 195 m이며, 너비 28 m, 선로에서 승강장 천장까지의 높이는 5.6 m 이다(Fig. 1 참조).

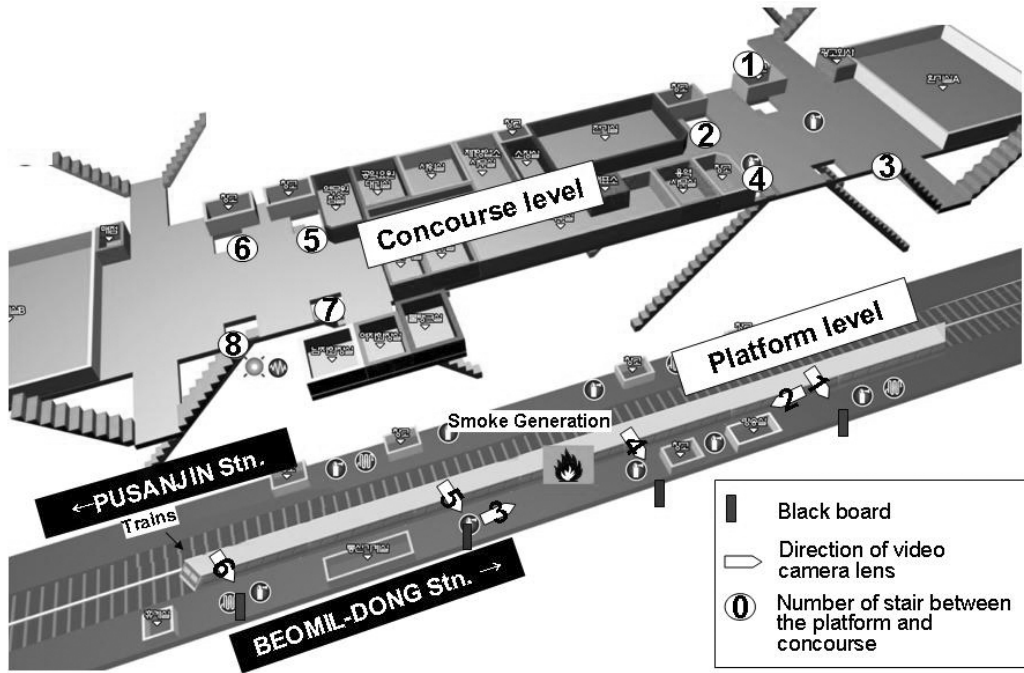


Fig. 1 실험 역사의 개략도

본 실험에서는 범일동역 방면 하행선로에 8량 1편성인 열차가 정차되어 있으며, 3번째 차량 뒷부분에서 화재가 발생하는 것으로 가정하였다. 화재연기를 모사하기 위하여 연기발생장치(Vicount 500, Concept engineering) 및 가열기를 이용하였다.

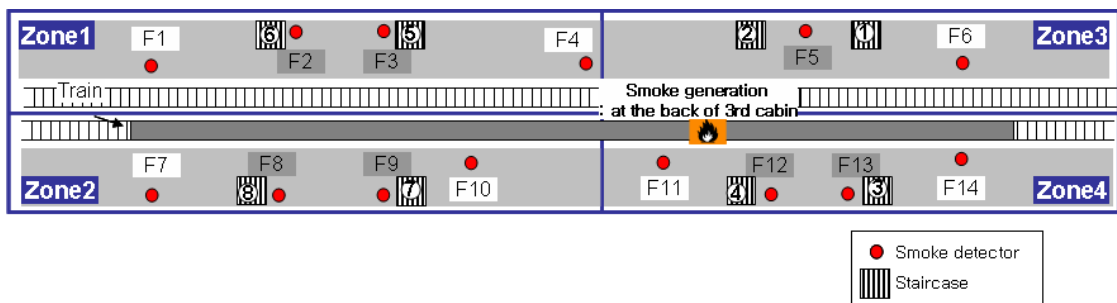


Fig. 2 승강장의 제연구역과 연기감지기 및 연기발생 위치

Fig. 2에서는 해당 승강장의 화재연기를 감지하는 감지기의 설치 위치, 제연구역 및 계단위치 등을 보여주고 있다. 또한 승강장에 정차된 차량과 연기발생위치를 확인할 수 있다. 연기감지기의 번호가 표시되어 있는데, 흐린 바탕의 숫자로 표현된 감지기는 승강장에 위치한 창고와 같이 승강장과 구별된 공간에 설치된 감지기를 나타내며, 흰색 바탕의 숫자로 표현된 감지기는 승강장에 노출된 연기감지기이

다. 승강장에서 화재 발생 및 화재열차가 정차시 연기는 승강장 천장에 설치되어 있는 승강장 환기구 및 승강장 상하부배기를 통하여 배출된다. 이러한 제연(smoke control) 운전의 기준이 되는 구역을 제연구역이라고 하는데, 해당역사의 승강장의 경우 Figure 2와 같이 4개의 제연구역으로 나뉘어져 있다. Figure 3에서는 승강장의 단면에 연기배연되는 구(배기구, 급기구)가 표시되어 있다. 승강장 천장에는 승강장 급기구가 총 78개 설치되어 있으며(단면 610 mm* 457 mm), 선로부에는 승강장 상부에 상부배기가 40개(단면 406 mm * 304 mm)가 평상시에는 브레이크열 배출을 주목적으로 하는 하부배기가 74개(단면 1,000 mm * 500 mm)가 설치되어 있다.

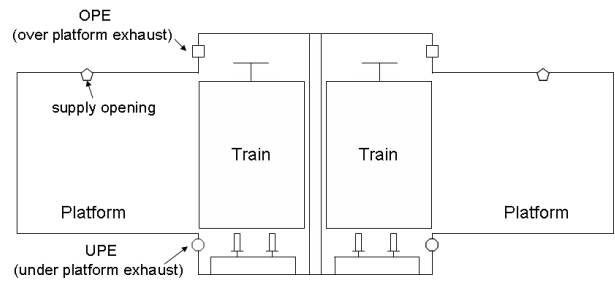


Fig. 3 승강장에 설치되어 있는 환기구(배출구)

2.2 실험조건

해당 역사의 경우 승강장에서 화재가 감지된 경우 감지된 제연 구역의 승강장 급기가 정지되고 배기로 전환되며, 감지된 제연구역의 승강장 상하부배기는 계속 작동한다. 반면 화재가 감지된 제연 구역 이외에 구역에서는 승강장 급기구 및 승강장 상하부배기 전부가 정지된다. 본 실험에서는 승강장에 설치되어 있는 제연시설의 작동 방법 및 가부에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 조건은 아래와 같다.

Case 1. 자연배기(모든 배연팬 정지)

Case 2. 자동배기(실제 제연운전 모드)

Case 3. 전 구역 강제배기

Case 1은 연기감지기가 연기를 감지한 후에도 배연하지 않는 제연 시설이 작동하지 않는 극한 상황을 모사한 경우이다. Case 2는 연기를 감지한 구역에 자동으로 배기가 작동되게 설계가 되어 있으며, Case 3의 경우에는 연기감지기가 연기를 감지한 동시에 승강장 모든 구간에서 배연을 작동하도록 한 경우이다.

3. 실험 결과

모든 Case에 있어 연기 발생후부터 30분 동안 Fig. 1에 설치된 6개의 캠코더를 통하여 연기 거동을 화면 취득하였다. 실험 수행시 승강장과 연결된 본선터널 부분에서 유속을 측정하였으며, 내부계단에서도 유속 및 풍향을 측정하였다. 즉 승강장과 외부로 연결되는 모든 부분의 유속을 측정하는 것이다. 모든 내부계단에서의 유속측정은 동시에 이루어지고 실험 시간동안 계속 측정되어야 하나 센서 및 데이터수집 장치의 부족으로 인해서 내부계단을 돌아다니면서 순차적으로 측정하였다. 반면 본선터널 연결부에서는 계속 유속을 측정하였다.

3.1 연기가시화 결과

3.1.1 Case 1 자연배기(모든 배연팬 정지)

Case 1은 승강장 내에 제연 설비가 작동을 하지 않는 최악의 조건에서의 연기거동을 파악하고 및 배연장치가 작동되는 Case 2, 3과의 결과 비교를 위하여 수행되었다. Fig. 4-9는 화재 발생 후 10분 뒤의 연기 상황을 보여주고 있는데, 1-4번 캠코더의 경우에는 연기로 인하여 시야가 거의 확보되지 않는 것을 볼 수 있다. 터널에서의 기류가 좌측(부산진역에서 범일동역방면)으로 형성되어 있으므로, 5,6번 캠코더에서는 상대적으로 연기농도가 흐린 것을 볼 수 있다. 모든 캠코더 위치에서 시간에 따라 연기가 짙어지는 것을 확인할 수 있었다. 이 때 내부계단을 따라 상승한 연기가 대합실까지 전파되어 대합실에서도 시계를 확보하기 힘들었다.



Fig. 4 After 10 min.(Case 1 and at 1 camcorder)



Fig. 5 After 10 min.(Case 1 and at 2 camcorder)



Fig. 6 After 10 min. (Case 1 and at 3 camcorder)



Fig. 7 After 10 min. (Case 1 and at 4 camcorder)



Fig. 8 After 10 min. (Case 1 and at 5 camcorder)



Fig. 9 After 10 min. (Case 1 and at 6 camcorder)

3.1.2 자동배기(Case 2) 실험결과

연기 발생 후 3분만에 화재 발생 위치와 가장 가까운 F11 연기감지기가 연기를 감지하였다. 이로부터 8초 후에 F21 연기감지기가 속해 있는 존 4에서의 배기가 작동되는 동시에 다른 제연구역의 모든 배기는 멈춘다. 연기는 Zone 4에 속해 있는 F14 감지기보다 1층 위인 대합실의 F15 연기감지기에 먼저 감지되었으며, 이로부터 약 2분 후에 F14 연기감지기가 연기를 감지하였다. 이후에는 반대편 승강장 범일동역 방향의 Zone 1구역에서 연기가 감지되었으며 Zone 1 제연구역의 배기가 작동되었다. Fig. 10은 연기발생 후 1번 위치에서 2분 후의 사진인데 이때부터 전체적으로 약하게 연기가 차가기 시작하지만 시간이 많이 흘러도 연기가 진하게 차오르지 않는 것을 볼 수 있다. 2번 캠코더의 영상의 경우 시간이 흐름에 따라 연기

Table 1 감지기 감지순서 (Case 2)

감지기	감지시각	비고
F1	7분18초	Zone 1 배기시작
F2, F3	감지안됨	방송실 및 창고
F4	14분19초(5)	
F5	감지안됨	통신기계실
F6	감지안됨	
F7	감지안됨	
F8, F9	감지안됨	창고
F10	감지안됨	
F11	3분00초(1)	Zone 4 배기시작
F12, F13	감지안됨	창고
F14	6분10초후(3)	
F15*	4분22초(2)	

* 대합실 내에 설치된 화재발생 위치와 가장 가까운 센서

가 많이 차며 10분 후(Fig. 11)에는 화재 발생 위치까지도 시야가 확보되지 않는다. 이 구역은 화재가 발생한 구역이므로 배연이 작동되어도 많은 연기가 이 영역에 존재하는 것을 확인할 수 있다. 위치 3에서는 화재발생 후 연기가 승강장 천장을 타고 성장하는 것을 볼 수 있다. Fig. 12에서 보면 화재발생 4분 후부터 연기가 내려오는 것을 볼 수 있으며, 배연의 영향으로 8분 이후(Fig. 13)로 연기가 더욱 짙어지지 않았다. 위치 4에서 화재발생 초기에는 위치 1에서 보다 연기가 훨씬 빨리 차는 것을 볼 수 있는데 이는 터널에서 불어오는 기류의 영향으로 파악된다. 화재 발생 3분 후에는 승강장 바닥면에서 1 m까지 하강한다(Fig. 14). 이 영역에서 연기농도가 시간에 따라서 계속 짙어지나 화재가 발생한 영역을 포함하는 Zone 4에서 배연이 작동되는 시점(화재발생 후 3분후)부터 연기가 배출되어 연기가 감소되는 것을 확인할 수 있다. Fig 16을 보면 위치 5에의 연기 발생 6분 후부터 연기 상태를 확인할 수 있는데, 화원으로부터 멀리 떨어져 있고 실제 고온의 화재 연기가 아니므로 연기가 벽을 타고 급하게 진행되는 것이 아니라 열부력을 많이 손실하여 연기두께가 비교적 두껍게 형성되어 진행되는 것을 확인할 수 있다. 배연이 작동하여도 연기가 완전히 제거되지 않는다. Fig. 17, 18을 검토하여 보면 위치 6에서 6분 후에 연기가 도달하며 배연이 작동된 후 8분 뒤인 화재발생 후 11분부터 연기가 점점 사라지는 것을 볼 수 있다. 이후로 배연 작동으로 인하여 연기가 위치 6 영역 까지 거의 전파되지 않는다.



Fig. 10 After 2 min. (Case 2 and at 1 camcorder)



Fig. 11 After 10 min. (Case 2 and at 2 camcorder)



Fig. 12 After 4 min. (Case 2 and at 3 camcorder)



Fig. 13 After 8 min. (Case 2 and at 3 camcorder)

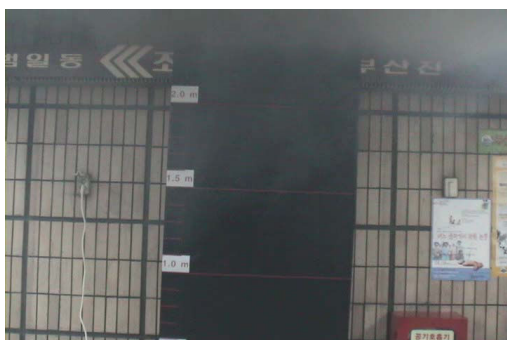


Fig. 14 After 3 min. (Case 2 and at 4 camcorder)

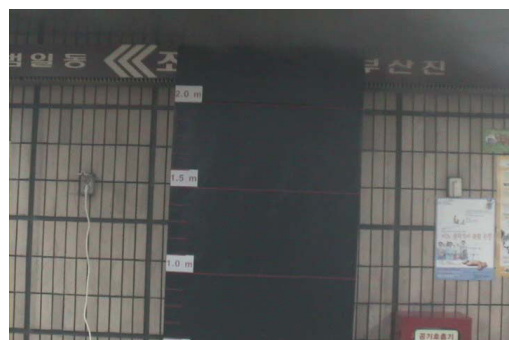


Fig. 15 After 10 min. (Case 2 and at 4 camcorder)



Fig. 16 After 6 min. (Case 2 and at 5 camcorder)



Fig. 17 After 6 min. (Case 2 and at 6 camcorder)



Fig. 18 After 11 min. (Case 2 and at 6 camcorder)

3.1.3 전 구역 강제배기 (Case 3) 실험결과

연기가 발생한지 22초만에 F11에서 감지되었으며, 이후 바로 모든 구역에서 강제 배기가 작동되었다. 전체 구간이 배연 모드로 운전되므로 위치 1의 경우 Case 2의 캠코더 1의 상황보다 더 연기의 영향이 거의 미치지 않는다. Fig. 19에서는 위치 2의 연기 발생 4분이 경과된 상황을 보여주고 있는데, 이후부터는 시간이 경과하여도 연기농도가 거의 비슷하다. 이는 배연이 잘 작동되어 화재로 인한 연기를 잘 배출시키기 때문으로 판단된다. 3번 위치의 연기발생 8분후 인 Fig. 20과 같은 시간/위치의 Case 2의 Fig. 13을 비교하여 보면 Case 3의 경우에 연기가 훨씬 더 잘 배출되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 21과 Fig. 15를 비교하여 보면 위치 4에서는 배연장치의 작동으로 신선공기가 계단으로 유입되어 계단과 인접한 승강장 천장으로 전파되는 연기를 교란시켜 Case 2보다 오히려 연기가 더 짙은 것을 확인할 수 있다. 대합실에서 충분한 신선공기의 유입으로 승강장에서 발생한 연기가 대합실로 전파되지 않는 현상을 볼 수 있었다(Fig. 22). 이러한 현상은 대합실에서의 충분한 피난시간을 확보하여 주나, 승강장에서 화재가 발생하였을 경우에 대피가 시작되는 화재발생 초기에는 대합실에서의 승객은 화재로 인한 위험에 노출되지 않으므로, 대합실에 위치한 승객들의 피난대피에 큰 이점이라고는 할 수 없다. 또한 신선공기의 유입으로 인한 화재 발생 부근의 피난 통로인 내부계단 부근에 연기가 충만하게 되어 승강장의 승객피난에 큰 장애물이 될 수 있음을 확인하였다. 그러나 모든 대합실 모든 영역에서 배연이 작동하므로 승강장의 대부분의 영역에서 연기가 피난 승객의 호흡높이 까지 하강하는 시간을 더 연장하여 승객들이 안전하게 피난할 수 있는 시간을 확보할 수 있다.

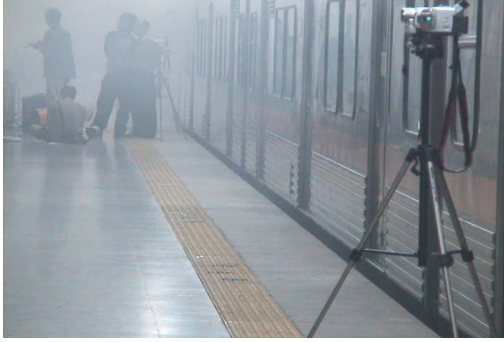


Fig. 19 After 4 min. (Case 3 and at 2 camcorder)



Fig. 20 After 8 min. (Case 3 and at 3 camcorder)



Fig. 21 After 10 min. (Case 3 and at 3 camcorder)



Fig. 22 공기 유입에 따라서 연기가 승강장으로 전파되지 않는 상황 (Case 3)

4. 결론

본 연구에서는 승강장에서 화재가 발생시에 승강장 내부 배연 모드에 따른 연기 전파 상황을 실험적으로 검토해 보았다. 또한 계단 및 터널연결부와 같이 승강장과 연결되는 경계면들에서의 유속을 측정하였다. 승강장의 모든 제연 구역에서 배연이 작동한 경우(Case 3)가 화재가 발생한 구역에서만 배연(Case 2)하는 것보다 더 화재연기하강 시간을 더 확보할 수 있는 것으로 판단되었다. 이는 전구역 배연을 할 경우 배연량이 제연구역별 배기를 할 경우보다 최대 4배(제연구역이 4개이므로)까지 크고 환기실이 연결되어 있는 터널과 외부와 통하는 대합실과 연결된 내부계단에서 충분한 신선공기의 유입이 가능하기 때문이다. 그러나 전구역에서 배연장치를 작동하면 계단을 통한 대합실에서의 신선공기 유입으로 인한 연기층 교란과 계단실 부근의 연기 적체 현상이 생길 수 있는데, 이는 내부계단 연결부의 제연경계벽의 설치와 계단 인접승강장의 배연구를 설치함으로써 어느 정도 해소될 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 지원으로 설립된 지하공간 환경개선 및 방재기술연구단의 과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 실험 수행에 많은 도움을 주신 중앙대학교 기계공학부 김태국 교수님과 대학원들에게 깊은 감사드립니다.

참고문헌

1. Hasemi, Y. et al., (2004), "Research needs on the fire safety of subway station fire disasters, regulations, research efforts and recent smoke movement tests in subway stations in Japan," 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology 17-20, pp. 797-804.
2. 장희철, 김태국, 박원희, 김동현, (2005). "지하역사에서 화재발생시 자연풍 및 강제배연의 유무에

따른 열 및 연기거동 특성 연구,” 한국화재·소방학회 논문지, 제19권, 제1호, pp.80-86.

3. 박원희, 장희철, 김태국, 김동현, (2005). “지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구 (I) -실험적 접근-,” 한국화재·소방학회 논문지 제출.

4. 장희철, 박원희, 김태국, 김동현, (2005). “지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구 (II) -수치적 접근-,” 한국화재·소방학회 논문지 제출.