

지하역사에서의 화재연기거동 실험

Experiments of Smoke Behavior in an Underground Subway Station

박원희[†] · 김동현^{*} · 장용준^{**}

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

Abstract

Experiments were carried out to investigate smoke movement in platform of a subway station which currently is in service in Pusan, the second largest city in Korea. The recently constructed underground station of the "bank type" (two platforms on both sides of track) which is the popular layout of platforms in Korea, is chosen in Pusan. The smoke generator and heater are used for simulating the smoke movement at the fire break in the platform located in the 2nd basement of the station. Video recordings were used to monitor smoke lowering. In this study, the movements of smoke in the underground station are investigated under various smoke-control operating modes. Three tests were conducted according to its operating mode of the ventilation systems in the platform: no operation of any ventilation systems, smoke extraction mode in occurrence of fire (presently running mode) and full capacity of smoke extraction where all vents are activated in the platform. The results can be used for comparing with the numerical prediction results of fire subway stations.

Keywords : Underground Subway Fire, Platform, Smoke

지하역사 화재, 승강장, 연기

1. 서론

대구지하철 화재참사에서 볼 수 있듯이 지하역사에서 발생한 화재로 인하여 방대한 재산손실 및 심각한 인명 피해로 이어질 수 있으므로 지하역사의 화재안전과 승객 피난에 관련된 설계는 매우 중요하다. 대표적인 대중교통인 지하철의 지하역사 내에서 화재가 발생할 경우 불완전한 연소조건으로 인하여 유독가스가 많이 발생될 수 있다. 화재발생으로 인한 피해는 화재 조기 탐지, 억제 및 소화 등을 통하여 최소화 될 수 있다. 국내 대부분의 지하역사는 대합실층과 승강장층으로 구분되어 설계되어 있으며[1], 대부분 승강장이 대

합실보다 지하에 설치되어 있다. 대합실에는 화재초기진압을 위하여 스프링클러가 설치되어있는 반면 승강장에는 스프링클러가 설치되어 있지 않는 등 승강장에서 화재가 발생할 경우 더욱 위험한 상황에 처할 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. 일본에서는 지하역사 승강장에서 제한된 규모의 발열량의 풀화재를 이용하여 화재실험이 수행된 바 있으며[2], 국내에서는 지하역사의 화재 발생시 공기 및 연기의 거동 현상을 파악하기 위한 실험 및 이론 연구[4-6]가 수행된 바 있다.

본 연구에서는 승강장에 화재열차가 정착하였을 경우 여러 제연모드에 따른 연기하강 현상을 화면취득하였으며, 계단 및 터널부에서 유속을 측정하여 이를 분석하였다.

† 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 레도토목연구본부 선임연구원
E-mail : whpark@krti.re.kr

TEL : (031)460-5358 / FAX : (031)460-5319

* 회원, 한국철도기술연구원, 레도토목연구본부 책임연구원

** 회원, 한국철도기술연구원, 레도토목연구본부 선임연구원

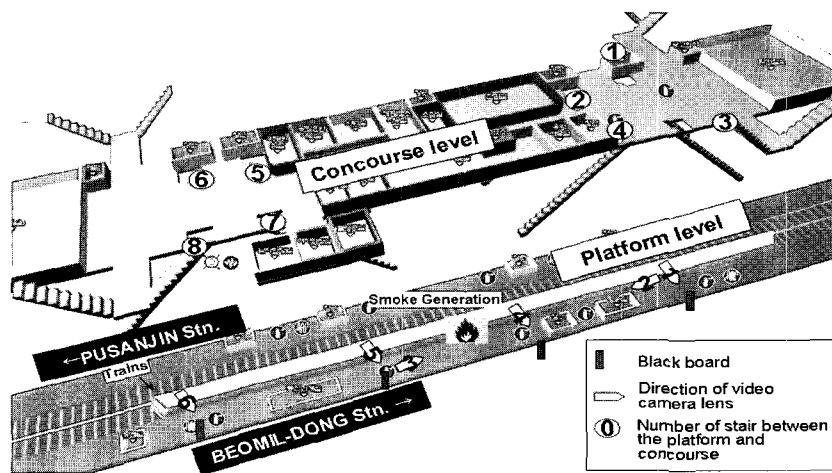


Fig. 1. Schematic diagram of the subway station for the experiment

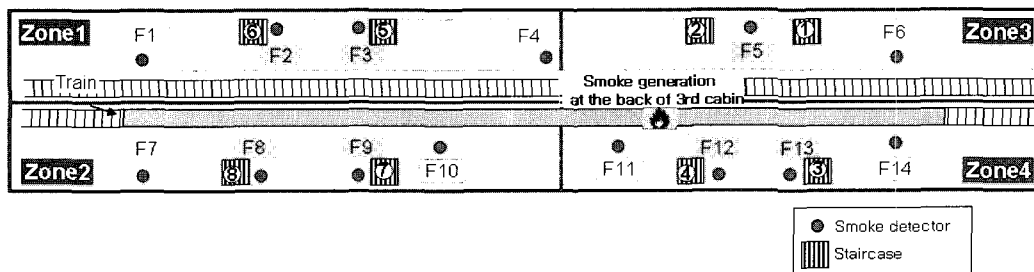


Fig. 2. Locations of smoke control zones and smoke detectors and smoke generation in the platform

2. 실험 역사 소개 및 실험조건

2.1 연구 대상 지하철 승강장의 개요

부산지하철 1, 2호선은 73개의 역사가 있으며, 이중 두개의 플랫폼이 중앙에 위치한 선로로 나뉘어져 있는 형태의 승강장인 상대식 승강장이 64개로 대부분의 역사가 상대식 승강장 구조이다. 실험대상 역사는 부산지하철 1호선 좌천동역사로, 지하 2층의 역사로 직선 역사이며, 지하 1층에는 대합실, 지하 2층에는 승강장이 설치되어 있는 전형적인 상대식역사이다. 좌천동역사 승강장의 길이는 약 195m이며, 너비 28m, 선로에서 승강장 천장까지의 높이는 5.6m 이다 (Fig. 1 참조).

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

Fig. 2에서는 연기발생 위치, 화재연기를 감지하는 연기 감지기의 설치위치, 제연구역 및 계단 등의 구조를 보여주고

있다. 연기감지기의 번호가 표시되어 있는데, 회색 바탕위의 숫자로 표현된 감지기는 승강장에 위치한 창고와 같이 승강장과 구별된 공간에 설치된 감지기를 나타내며, 흰색 바탕위의 숫자로 표현된 감지기는 승강장에 노출된 연기감지기이다. 승강장에서 화재 발생 및 화재열차가 정차시 연기는 승강장 천장에 설치되어 있는 승강장 환기구 및 승강장 상하부배기를 통하여 연기가 배출된다.

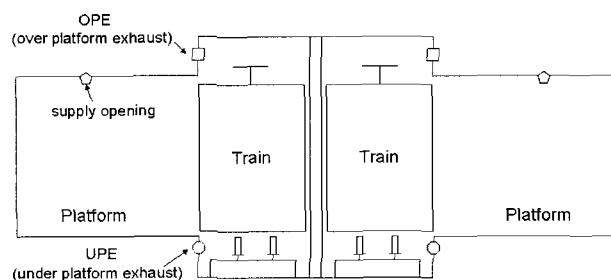


Fig. 3. Vents in the platform

제연(smoke control)운전의 기준이 되는 구역을 제연구역이라고 하는데, 해당역사의 승강장의 경우 Fig. 2와 같이 4개의 제연구역으로 나뉘어져 있다. 연기가 배연될 수 있는

구(배기구, 급기구)에 위치는 Fig. 3과 같이 승강장 단면도에 나타내었다. 승강장 천장에는 승강장 급기구가 총 78개소 설치되어 있으며 (단면 610 mm* 457mm), 선로부에는 승강장 상부에 상부배기가 40개소(단면 406mm* 300mm)가 설치되어 있고, 평상시에는 브레이크열 배출을 주목적으로 하는 하부배기가 74개소(단면 1,000 mm* 500 mm)가 설치되어 있다.

화재 발생시에는 승강장 상부배기(상부배기 1개소당 배기량 2395CMH)는 계속 배기운전을 하고, 승강장 하부배기(하부배기 1개소당 배기량 1180CMH)에 연결된 배기팬이 승강장 급기구에도 같이 연결되어 배연을 하게 된다.

2.2 환기조건

해당 역사의 제연운전모드는 승강장에서 화재가 감지된 경우 감지된 연기구역(smoke zone)의 승강장 급기가 정지되고 배기로 전환되며, 감지된 제연구역의 승강장 상하부배기는 계속 작동한다.

반면 화재가 감지된 제연구역 이외에 구역에서는 승강장 급기구 및 승강장 상하부배기 전부가 정지된다.

본 실험에서는 승강장에 설치되어 있는 제연시설의 작동방법 및 여부에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 조건은 아래와 같다.

- Case 1. 자연배기(모든 배연팬 정지)
- Case 2. 현 운전중인 제연모드
- Case 3. 전 구역 강제배기

Case 1은 연기감지기가 연기를 감지한 후에도 배연하지 않는 제연 시설이 작동하지 않는 극한 상황을 모사한 경우이다. Case 2는 현재 운전되는 제연모드이며, Case 3의 경우에는 연기감지기가 연기를 감지한 동시에 승강장 모든 구간에서 배연을 작동하도록 한 경우이다.

3. 연기가시화 실험 결과

모든 Case에 있어 연기 발생후부터 30분 동안 Fig. 1에 표시된 위치에 설치된 6개의 캠코더를 통하여 연기 거동을 화면 취득하였다.

실험 수행시 승강장과 연결된 본선터널 부분에서 유속을 측정하였으며, 내부계단을 통해서도 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 데이터수집장치의 부족으로 인해서 내부계단을 돌아다니면서 순차적으로 측정하였다. 반면 본선터널 연결부에서는 실험수행 줄곧 유속을 계속하였다.

3.1 연기가시화 결과

3.1.1 Case 1 (자연배기, 모든 배연팬 정지)

Case 1은 승강장 내에 제연 시설이 작동을 하지 않는 최악의 조건에서의 연기거동을 파악하고 배연장치가 작동되는 Case 2, 3과의 결과 비교를 위하여 수행되었다.

Fig. 4-8는 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 우측(부산진역에서 범일동역방면)으로 형성되어 있으므로 5, 6번 캠코더에서는 연기농도가 다른 캠코더에서 보다 상대적으로 낮다.

모든 캠코더 위치에서 시간에 따라 연기가 짙어지는 것을 확인할 수 있었다. 이 때 내부계단을 따라 상승한 연기가 대합실까지 전파되어 대합실에서도 시계를 확보하기 힘들었다.(Fig. 9)

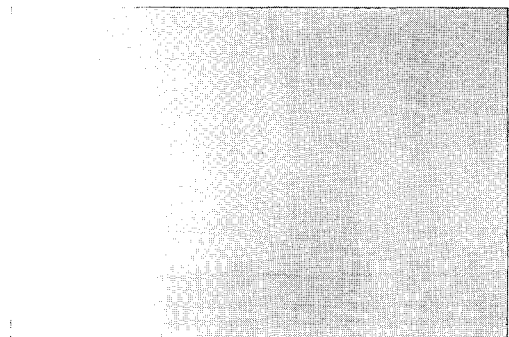


Fig. 4. After 10 min. (Case 1, at #1 camcorder)



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

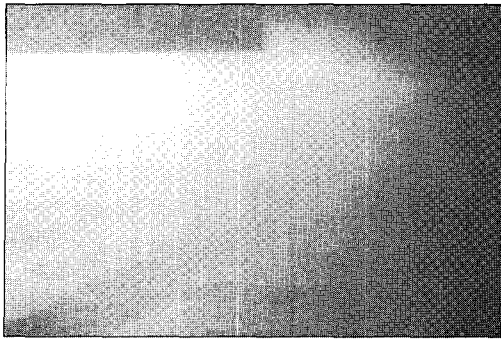


Fig. 6. After 10 min. (Case 1, at #3 camcorder)

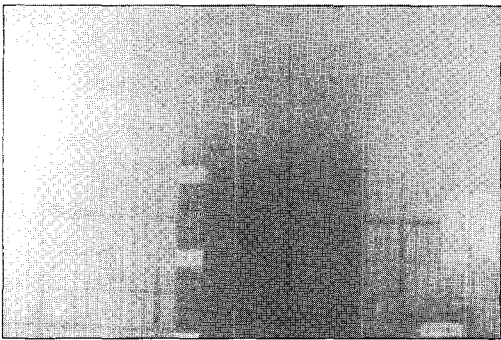


Fig. 7. After 10 min. (Case 1, at #4 camcorder)

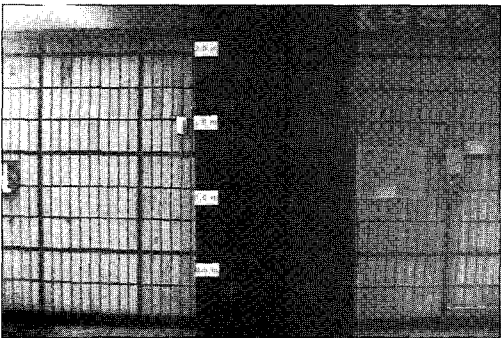


Fig. 8. After 10 min. (Case 1, at #5 camcorder)

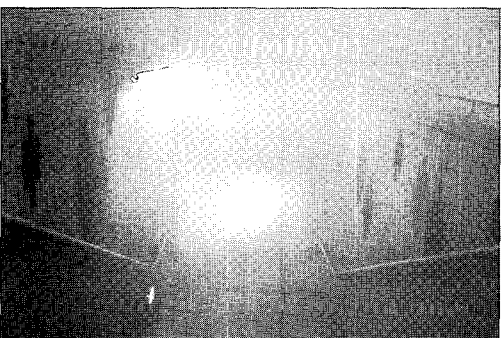


Fig. 9. Filled smoke in the concourse(Case 1)

3.1.2 Case 2 (현 운전중인 제연모드) 실험결과

Case 2의 제연모드는 현 운전중인 제연모드로 연기가 감

지된 Zone에서만 배연이 작동되는 경우이다. 연기 발생 후 3분만에 화재 발생 위치와 가장 가까운 F11연기감지기가 연기를 감지하였다. 이로부터 8초 후에 F11연기감지기가 속해 있는 Zone 4에서의 배기가 자동으로 작동되었고 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.

Table 1. Detected sequence of sensors (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	6분10초(3)	
F15*	4분22초(2)	

* 대합실 내에 설치된 화재발생 위치와 가장 가까운 센서

Fig. 10은 연기발생 후 1번 위치에서 2분 후의 사진인데 이때부터 전체적으로 약하게 연기가 차가기 시작하지만 시간이 많이 흘러도 연기가 진하게 차오르지 않았다. 2번 캠코더의 영상의 경우 시간이 흐름에 따라 연기가 많이 차며 10분 후(Fig. 11)에는 화재 발생 위치까지도 시야가 확보되지 않는다.

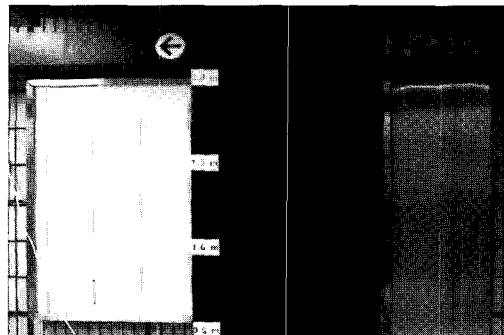


Fig. 10. After 2 min. (Case 2, at #1 camcorder)

이 구역은 화재가 발생한 구역이므로 배연이 작동되어도 많은 연기가 이 영역에 존재하는 것을 확인할 수 있다. 위치 3에서는 화재발생 후 연기가 승강장 천장을 타고 성장한다.

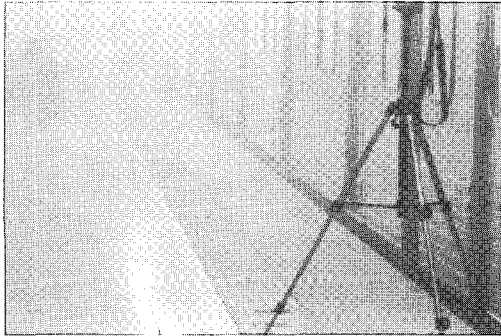


Fig. 11. After 10 min. (Case 2, at #2 camcorder)

Fig. 12에서 보면 화재발생 4분 후부터 연기가 내려오는 것을 볼 수 있으며, 배연의 영향으로 8분 이후(Fig. 13)로 연기가 더욱 줄어들지 않았다.

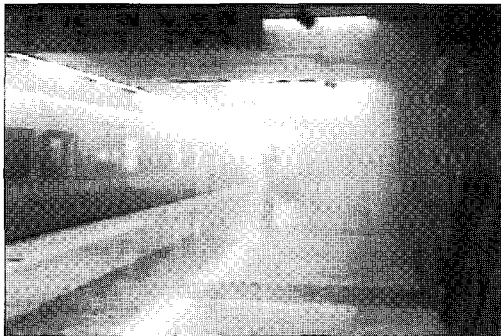


Fig. 12. After 4 min. (Case 2, at #3 camcorder)

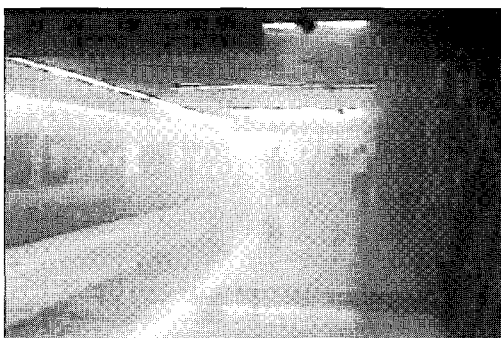


Fig. 13. After 8 min. (Case 2, at #3 camcorder)

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).

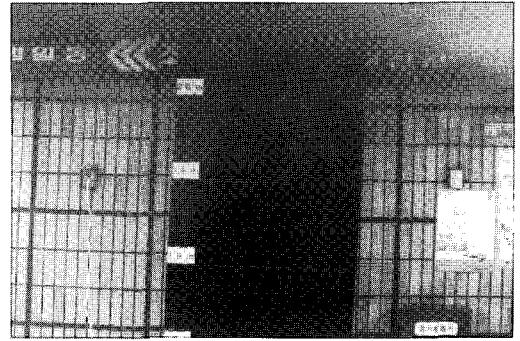


Fig. 14. After 3 min. (Case 2, at #4 camcorder)

이 영역에서 연기가 시간에 따라서 계속 짙어지거나 화재가 발생한 영역을 포함하는 Zone 4에서 배연이 작동되는 시점(화재발생 후 3분후)부터 연기가 배출되어 연기가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 위치 4에의 연기 발생 6분 후부터 연기 상태를 확인할 수 있는데(Fig. 15), 이 위치는 화원으로 부터 멀리 떨어져 있고 실제 고온의 화재 연기가 아니므로 연기가 벽을 타고 급하게 진행하는 것이 아니라 열부력(국뚝효과)을 많이 손실하여 연기두께가 비교적 두껍게 형성되어 진행되기 때문이다. 배연이 작동하여도 연기가 완전히 제거되지는 않는다.

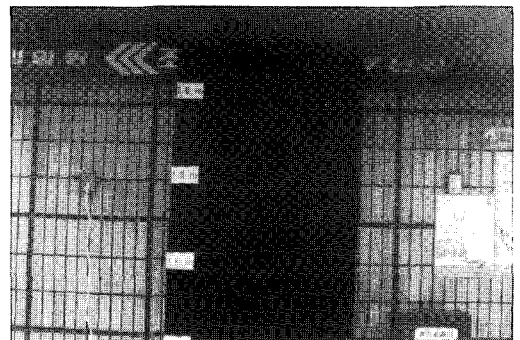


Fig. 15. After 10 min. (Case 2, at #4 camcorder)

3.1.3 Case 3(전 구역 강제배기) 실험결과

화재발생 후 22초만에 F11에서 연기가 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. 16에서는 위치 2의 연기 발생 4분이 경과된 상황을 보여주고 있는데, 이후부터는 시간이 경과하여도 연기농도가 거의 비슷하다.

이는 배연이 잘 작동되어 화재로 인한 연기를 잘 배출시키기 때문이다. 3번 위치의 연기발생 8분후 인 Fig. 17과 같은

시간/위치의 Case 2의 Fig. 13를 비교하여 보면 Case 3의 경우에 연기가 훨씬 더 잘 배출되는 것을 확인할 수 있다.

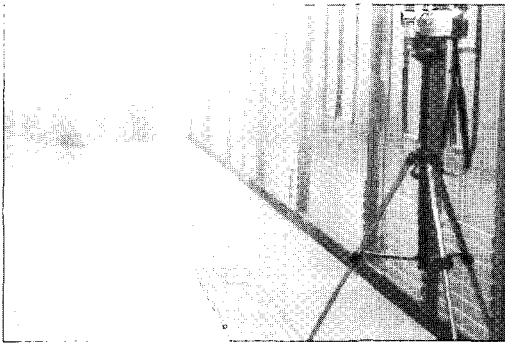


Fig. 16. After 4 min. (Case 3, at #2 camcorder)



Fig. 17. After 8 min. (Case 3, at #3 camcorder)

Fig. 18의 위치 4에서는 배연장치의 작동으로 신선공기가 계단으로 유입되어 계단과 인접한 승강장 천장으로 전파되는 연기를 교란시켜 Case 2보다 오히려 연기가 더 짙었다. 또한 대합실에서 충분한 신선공기의 유입으로 승강장에서 발생한 연기가 대합실로 전파되지 않는 현상을 볼 수 있었다(Fig. 19).

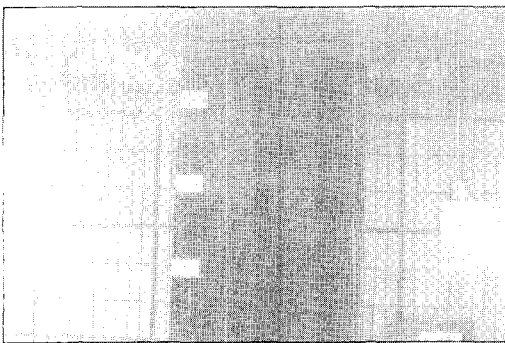


Fig. 18. After 10 min. (Case 3, at #4 camcorder)

이러한 현상은 대합실에서의 충분한 피난시간을 확보해주고, 승강장에서 화재가 발생하였을 경우에 대피가 시작되

는 화재발생 초기에는 대합실에서의 승객은 화재로 인한 위험에 노출되지 않으므로, 대합실에 위치한 승객들의 피난대피에 큰 이점이라고는 할 수 없다.

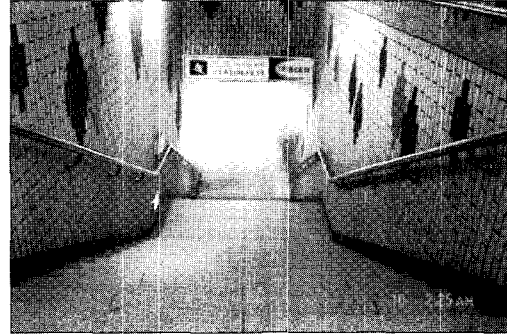


Fig. 19. Confined smoke in the platform due to intake from the platform(Case 3)

또한 신선공기의 유입으로 인한 화재 발생 부근의 피난 통로인 내부계단 부근에 연기가 충만하게 되어 승강장의 승객피난에 큰 장애물이 될 수 있음을 확인하였다. 그러나 승강장 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.

3.2. 유속 계측 결과

승강장 내부계단 및 터널 연결부에서의 열선유속계를 설치하여 실험 수행시간동안 유속 및 방향을 측정하였다. Fig. 20에서는 터널부에 설치된 열선유속계를 보여주고 있으며, 내부계단 및 터널연결부에서 측정된 흐름의 방향 및 유속은 Table 2와 같다. 내부계단의 경우 승강장으로 유입되는 방향을 양으로 설정하였으며, 터널과 승강장 연결부의 경우에는 범일동역 방향을 양으로 설정하였다. Case 1의 경우 대부분의 계단에서 승강장에서 대합실로 유동이 흐르는 것을 볼 수 있다. 이는 승강장에서 열부력 연기가 대합실로 상승되어 전파됨으로 이러한 현상이 나타나는 것으로 판단된다. Case 2는 계단별로 승강장으로 유입되거나 대합실로 유출된다. 배연이 작동된 부근에 위치한 내부계단 3, 4에서는 유동 방향이 대합실에서 승강장으로 향한다.

Case 3의 경우에는 승강장에 위치한 모든 배연기가 작동하므로 모든 계단에서 공기가 대합실에서 승강장으로 유입된다. 승강장과 연결된 터널에서는 범일동 방향으로 기류가 형성되다가, 배연이 작동하면 터널 양단에서 승강장 내부 방향으로 기류가 형성된다.

Table 2. Time averaged velocities and directions of the airflow at various positions

	Case 1	Case 2	Case 3
계단 1*	-0.09	-0.27	0.34
계단 2*	-0.50	0.11	0.65
계단 3*	0.06	0.23	0.67
계단 4*	-0.56	0.23	0.83
계단 5*	0.01	-0.31	0.42
계단 6*	0.06	0.11	0.65
계단 7*	0.40	-0.32	1.01
계단 8*	0.08	0.20	0.58
범일동역방향터널**	0.60	-0.67	-1.17
부산진역방향터널**	0.20	0.69	1.01

* 승강장으로 유입방향을 양으로 설정
 ** 범일동역 방향을 양으로 설정

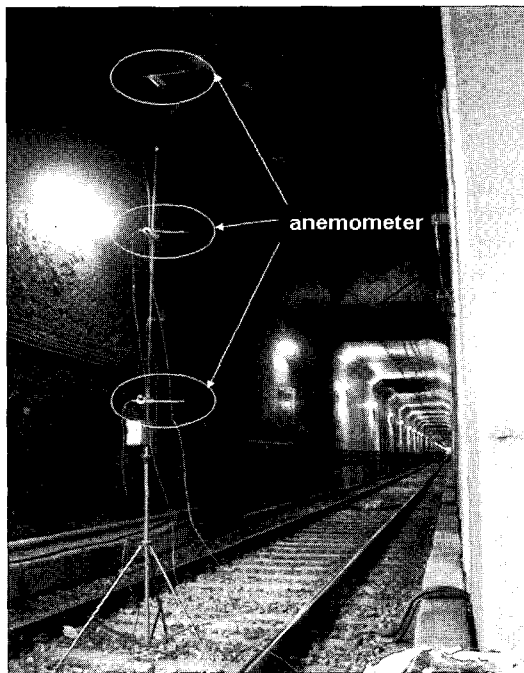


Fig. 20. Anemometers in the tunnel

4. 결론

본 연구에서는 승강장에서 화재가 발생시에 승강장 내부 제연모드에 따른 연기 전파 상황을 실험적으로 검토하였으며, 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 2배(환기실이 양단에 동일하게 2개가 있으므로)까지 크고 환기실이 연결

되어 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 연기적체 현상이 생길 수 있는데, 이는 내부계단 연결부의 제연 경계벽의 설치와 계단 인접승강장의 배연구를 설치함으로써 어느 정도 해소될 수 있다고 사료된다. 제연장치가 작동하여 화재가 성장하여 많은 연기가 생성되어 연기가 연기구역에 국한되지 않고 비연기구역까지 확산되는 경우, 화재 연기가 감지된 연기구역뿐만 아니라 새로운 연기구역까지도 배연운전을 할 수 있도록 제연운전이 작동되도록 하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업인 「지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업」(03산학연C03-01)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 실험 수행에 많은 도움을 주신 중앙대학교 기계공학부 김태국 교수님과 대학원들에게 깊은 감사드립니다.

* 본 논문은 한국철도학회 2006년 춘계학술대회에서 발표되었으며, 수정되어 게재되었습니다.

참고문헌

1. 김동현 (2004), “기존운행 도시철도의 환기 및 화재안전 개량대책 기술개발 1차년도 보고서,” 건설교통부, pp. 103-113,2004.
2. 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.
3. 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.
4. W. H. Park, D. H. Kim, H. C. Chang (2006), “Numerical Predictions of Smoke Movement in a Subway Station under Ventilation”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, No. 3-4, pp. 304.
5. 박원희, 김동현, 장희철, 김태국 (2006), “지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구 (I) -실험적 접근-,” 한국화재·소방학회 논문지, 제20권, 제3호, pp.9-14.
6. 장희철, 김태국, 박원희, 김동현, (2006), “지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구 (II) -수치적 접근-,” 한국화재·소방학회 논문지, 제20권, 제3호, pp.15-20.