

축소 모형 실험을 통한 정거장내 적정 배연방식에 관한 연구

Experimental Investigation about Optimum Smoke Extraction System for Underground Station

이호근* · 김명우** · 이필영*** · 김남석****

Lee, Ho Keun · Kim, Myoung Woo · Lee, Phill Young · Kim, Nam Suk

Abstract

If fire is occurred in the subway, the train must be moved to the closest station and make passengers get off the train. As a matter of fact, the Fire of Dae-gu Subway was coped with this way. But, the fire smoke extraction system of real subway stations have not designed to deal with fire of trains yet. Therefore, we have to establish a plan of station railroad for preventing from unexpected damage when the fired train comes to the station. The purpose of this study is to establish the effective smoke extraction measure that is to prevent stations from damage by the scale-down experiment.

Key words: Train fire, Fire safety, Platform Screen door, Smoke Extraction

요 지

지하철터널에서 화재가 발생하면, 열차는 가장 가까운 정거장으로 대피하여 승객들을 하차시켜야 한다. 실제로 대구지하철 화재사고가 이러한 방식으로 대응 하였으나 큰 인명 피해를 초래하였다. 지하철 정거장의 화재배연시스템은 열차화재에 대응할 수 있도록 설계되어 있지 않기 때문에 화재열차의 정거장 진입시 예상치 못한 피해를 유발할 수 있으며 피해방지를 위한 정거장 선로부의 배연계획 수립이 필요하다. 본 연구의 목적은 정거장 선로부의 열차화재시 효율적인 배연방식을 연구하고 승객의 피난 동선 확보를 위해 상층부로의 역류 방지대책을 축소모형실험에 의하여 수립하는 것이다.

핵심용어 : 지하철 화재, 정거장 배연시스템, 배연덕트, 축소모형실험, Froude 상사, 연기발생기

1. 서 론

지하철 본선터널에서 열차화재가 발생하는 경우, 부득이 하게 차량운행이 불가능한 경우를 제외하면 운전자는 차량을 인접한 정거장으로 운전하여 진입하고, 승객을 승강장을 통하여 역사의부로 안전하게 피난시키는 것이 원칙이다. 이러한 경우, 승객의 안전한 대피를 위하여 화재의 신속한 진압과 연기의 원활한 배연은 필수적인 요소이다. 2003년의 대구지하철 화재사고는 이러한 처리과정으로 사고대응이 이루어졌으나, 화재의 급격한 확대와 정거장 배연시스템의 대응성 부족으로 대형참사로 발전하였다.

현재 승강장내의 배연시스템은 승강장에서 발생하는 소규모의 화재를 처리하는 정도의 용량에 그치고 있어, 열차화재와 같은 대규모 화재발생시에는 인접한 환기구를 이용하여 연기를 배출하는 방안과 승객의 원활한 대피를 위해 상층부

로의 연기 역류를 방지할 수 있는 대책이 필요하다.

본 연구에서는 화재열차의 정거장진입시에 화재연기를 원활히 배연하기 위해 정거장 양단 환기구를 활용하는 방안과 선로부 상부 별도의 배연덕트를 설치하여 정거장 양단 환기구를 혼용 하는 방안에 대해 축소모형실험을 수행하여 적합한 배연시스템 도출을 위한 기초 데이터로 활용하였다.

2. 축소모형실험

2.1 실험대상의 선정

본 축소모형실험의 대상은 지하 4층 규모의 상대식 정거장으로 지하 4층(승강장)에서 지하 1층(대합실층)으로 통하는 연결통로 1개소만 설치되어 있다. 따라서 화재시 피난인원의 집중현상이 발생할 경우 원활한 피난시간을 만족하기 어려울 가능성이 있으므로 화재시 배연계획이 중요한 정거장이다. 따

*정회원 · ㈜비엔텍아이앤씨 기술 1팀 팀장(E-mail : hokuni@bnttek.co.kr)

**현대건설 기술개발원 차장

***현대건설 기술개발원 과장

****㈜건화 철도부 부장

라서 정거장을 양단의 환기구와 정거장 선로부 상단의 배연덕트를 갖춘 정거장 축소모형으로 제작하여 화재시 화재연기의 원활한 배출이 가능하도록 적정 배연방식을 연구한다.

2.2 상사 법칙의 적용

2.2.1 상사 모델의 선정

본 축소모형실험의 상사는 일반적으로 화재모형실험(Dusseldorf, 1995; Haukur Ingason, 2001)에서 적용되고 있는 Froude 상사(M.White, 2000)를 적용하였다. Froude 상사는 점성이 큰 조건에 있어서는 한계를 보이는 단점이 있으나, 지하철 화재실험의 경우에는 기류의 난류조건이 지배적인 요소이므로 본 축소모형실험에서는 Froude수에 의한 상사법칙을 적용하여 운동학적 상사(열, 압력)를 만족시키는 것으로 축소모형 실험을 계획하였다.

Froude 상사의 기본은 모든 축소변수에 동일한 Froude수를 유지하는 것으로 화재실험에 있어서의 Froude 모델링은 기하학적 형태를 보존하여야 하는 것이 필수적이며, 동일한 Froude 수(열, 압력)를 유지하기 위해서 모형이 선형적으로 축소 제작(Linear Scaling)된 경우에 열량과 풍속 모두 변화시켜야한다. 이에 본 연구에서는 1/35 모형축척에 열에너지와 압력에너지에 중점을 둔 Frude 상사를 적용하였다.

$$\frac{Q_m}{Q_r} = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{5/2} \quad (1), \quad \frac{V_m}{V_r} = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{1/2} \quad (2), \quad \frac{T_m}{T_r} = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{1/2} \quad (3)$$

Q_m, Q_r : 모형, 실제 풍량 L_m, L_r : 모형, 실제 연장
 V_m, V_r : 모형, 실제 유속 T_m, T_r : 모형, 실제 시간

위의 식 (1), (2), (3)과 같은 상사법칙을 적용하여 축소모형

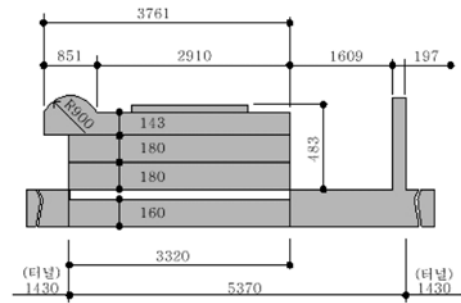


그림 1. 축소모형 제작 개요

을 제작하고 실험에 반영하였다.

2.3 축소모형 제작 및 설치

2.3.1 축소모형 제작

축소모형실험은 그림 1과 같이 1/35 축척으로 제작하며 화재지점은 중앙열차 1량으로 설정한다.

축소모형은 정거장부와 본선선로의 일부구간을 모델링(Dusseldorf, 1995)하였으며 링블로우를 통해 환기소와 정거장 상부의 공조덕트(M.White, 2000)를 모사하였다. 유속감지센서와 차압감지센서, 열감지센서를 설치하여 정거장 내부와 선로부의 데이터를 취득하였다.

2.3.2 축소모형 설치

화재열차는 표 1(a)와 같이 1/35 축척으로 제작하여 8량 열차중 중앙의 열차 1량에서 화재가 발생하는 상황을 모사하기 위해 표 1.(c)열, 연기발생기를 사용하여 화원을 모사(Egger, 2001)하였으며 화원모사가 가능한 투명 아크릴을 사용하여 연기의 유동을 알아보기 쉽도록 제작하였다.

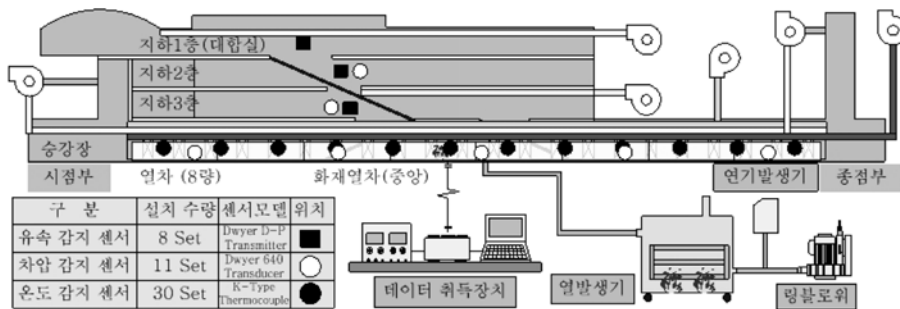


그림 2. 모형 설치 개요

표 1. 축소 모형 실험 장비

(a) 화재열차	(b) 정거장 모형	(c) 열, 연기발생기	(d) 제연경계벽
<ul style="list-style-type: none"> 열차화재 20 MW 화원 1/35 열차 축소 모델 	<ul style="list-style-type: none"> 배연덕트, 대합실 제작 승강장 PSD 제작 	<ul style="list-style-type: none"> 토출온도 최대 470°C 열&연기 화원모사 	<ul style="list-style-type: none"> 계단부 제연경계벽 설치 연기역류 억제 효과 검증

2.4 축소모형실험 CASE 선정

2.4.1 정거장내 화재열차 정차시 배연성능 평가

그림 3(a)의 CASE 1은 정거장 시·종점부에 위치한 환기구를 통해 급기와 배기를 통해 정거장의 선로부를 통해 종방향으로 기류를 형성하여 배연하는 방식이며 그림 3(b)의 CASE 2는 기존의 일반적인 정거장에서 적용하고 있는 배연 방식으로 정거장 시·종점의 환기구를 통해 배연하는 양단 배연방식이다. 그림 3(c)의 CASE 3은 기존의 양단배연 방식에 추가적으로 선로부 상부에 화재연기 및 열기류를 직접 배출할 수 있는 가능한 배연덕트를 설치하는 방식이다.

화재열차가 정거장내부로 진입한 경우 그림 3. 과 같은 배연방식에 대해 축소모형실험을 통해 배연성능을 평가하고 정거장에 적합한 효율적인 배연성능의 적정 배연방식을 도출한다.

2.4.2 정거장 내부 연기 침입 방지를 위한 상부층 운전모드 도출

화재열차가 정거장내부에 정차하게 될 경우 열차내 승객이나 화재열기류로 인해 PSD가 개방될 수 있다. 이때 열차화재에 의한 화재연기가 승강장 내부로 침투하여 정거장 전체에 확산될 경우 대규모 인명피해의 원인이 되므로 정거장내로 화재연기가 확산되는 것을 사전에 방지 할 수 있도록 대책의 마련이 필요하다.

본 축소모형실험에서는 CASE 2(양단배연방식), CASE 3(양단배연 + 상부배연덕트방식)에 화재열차가 정거장 내부에 정차한 경우 정거장 스크린 도어(PSD: Platform Screen Door)

가 개방된 상태에서 화재연기가 정거장내부로 침입하는 것을 방지하기 위한 배연방식 및 정거장 내부 공조 시스템의 운영 방안을 표 2와 같은 실험 CASE를 통해 축소모형실험을 통해 연구하고자 한다.

3. 축소모형을 통한 배연성능 실험 결과

3.1 정거장내 화재열차 정차시 배연성능 평가를 위한 축소모형 실험

3.1.1 CASE 1 (종방향 배연)

종방향 배연은 정거장 시·종점에 위치한 환기구의 운전만으로는 원활한 제연기류가 형성되기 어려우므로 본선구간에 위치한 인접 환기구의 동시가동에 의한 배연계획이 수립되어야 한다.

그림 4(a)는 화재연기가 좌측 시점방향으로 형성되는 제연기류를 따라 배연되고 있는 사진이며 그림 4(b)는 선로내외부의 압력차이를 나타낸 그래프이다. 종방향 배연시에는 선로부의 압력 불균형 현상이 발생하여 난류가 형성되므로 원활한 배연이 어려우며 인접 환기구와의 풍량밸런싱을 유지하기가 어려운 것으로 나타났다. 또한 난류가 형성되어 화재연기의 성층화가 깨지므로 화재연기의 하강으로 인해 피난자의 안전에 영향을 미칠것으로 판단된다.

3.1.2 CASE 2 (양단 배연)

양단 배연은 시·종점부에 위치한 환기구를 통해 동시에

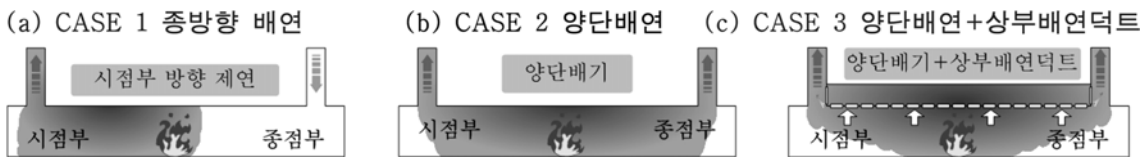


그림 3. 축소 모형 실험 장비

표 2. 정거장 내부 연기침입 방지를 위한 축소모형 실험 CASE

배연방식별 축소모형 실험				정거장내 연기침입 방지를 위한 실험			
구분	배연방식	승강장	PSD	구분	배연방식	승강장	상부층
CASE 1	종방향 배연	가압○	Close	CASE 4	양단배연	가압○	가압×
CASE 2	양단 배연	가압○	Close	CASE 5	양단배연	가압○	가압○
CASE 3	양단배연 + 상부배연덕트	가압○	Close	CASE 6	양단배연 + 상부배연덕트	가압○	가압×
				CASE 7	양단배연 + 상부배연덕트	가압○	가압○

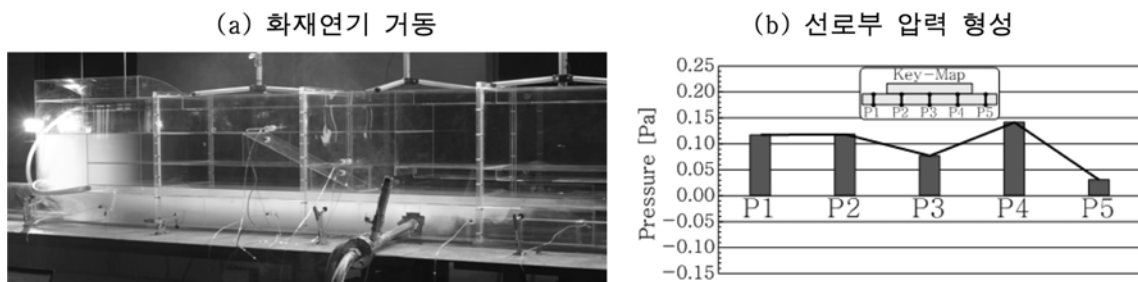


그림 4. CASE 1 (종방향 배연)

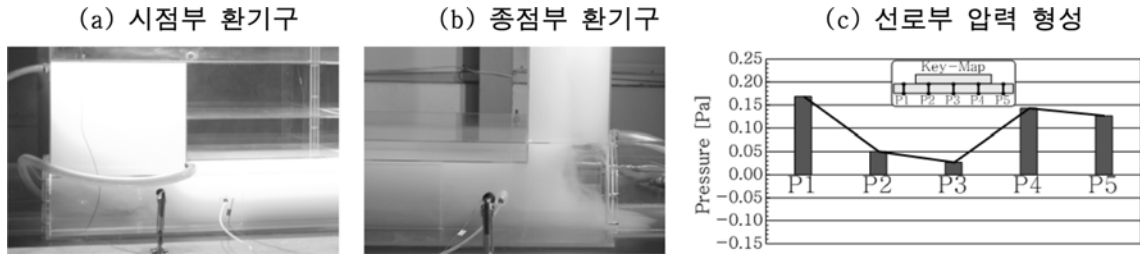


그림 5. CASE 2 (양단 배연)

화재연기 및 열기류를 배연하는 방식으로 실험결과 그림 5(a), (b)와 같이 종방향 배연에 비해 원활한 배연이 가능한 것으로 나타났다.

그림 5(c)와 같이 압력 패턴이 편차가 작고 안정화 되어있어 종방향 배연방식에 비해 양호한 배연성능을 보이지만 환기구에서 본선구간의 신선공기 또한 배기하게 되므로 실질적인 화재연기의 배연량이 비교적 작은 것으로 나타나는 문제점이 있다. 또한 선로부에서 화재연기의 침강이 나타나 피난자의 피난에 취약할 수 있을 것으로 예상된다.

3.1.3 CASE 3 (양단배연 + 상부배연 덕트)

일반적인 양단 배연방식에 추가적으로 상부에 배연덕트를 설치하여 화재열차의 상부에서 직접 화재연기 및 열기류를 배연하는 방식에 대해 실험한 결과 그림 6(a)와 같은 원활한 배연 효과를 확인할 수 있었다. 상부배연덕트를 적용한 결과 화재연기의 성층화가 유지되어 연기 침강이 지연됨으로 선로부를 통한 피난자의 안전성 또한 확보가 가능할 것으로 예상할 수 있다. 이러한 결과는 그림 6의 실험결과에서 확인 할수 있다.

그림 6(b)의 선로부 압력패턴에서도 CASE 1, 2보다 안정적인 압력패턴을 유지하는 것으로 나타나 원활한 배연이 이뤄지는 것으로 나타났으며 가장 안정적인 유동을 만들 수 있는 실험 결과를 보인다.

3.1.4 적정 배연방식에 대한 축소모형 실험 결과 화재열차가 정거장내에 정차할 경우 화재연기의 배연방식에 대한 축소모형 실험결과는 그림 7과 같은 압력 및 유속 데이터를 취득할 수 있었다.

CASE 3의 경우 전체적으로 고른 압력을 선로부의 압력이 (-)압으로 낮게 형성되어 화재연기의 배연성능이 우수한 것으로 나타났으며 환기구를 통한 유속이 최대값으로 나타나 화재연기의 배연량 또한 CASE 1, 2보다 많은 것으로 나타났다.

화재연기의 배연방식에 대한 축소모형 실험결과는 표 3과 같이 정리 할 수 있다.

선로부의 압력배턴싱이 고르며 화재연기의 배연량 또한 가장 많아 상대적으로 배연성능이 우수하면서 연기의 성층화를 유지하여 피난자의 안전성을 확보할 수 있는 CASE 3(양단 배연 + 상부배연덕트)의 배연방식이 정거장의 적정 배연방식으로 적합할 것으로 판단된다.

3.2 정거장 내부 연기 침입 방지를 위한 축소모형 실험

3.2.1 CASE 4 (양단배연, 상부추가압b)

선로부 배연방식은 양단 배연 방식을 적용하고 승강장층은 급기 가압을 유지한 상태에서 상부층(지하 1, 2, 3층)은 가압을 하지 않아 전체적인 압력분포는 그림 8(a)와 같이 (+)압으로 선로부가 높게 형성되어 먼저 화재연기가 승강장 층으

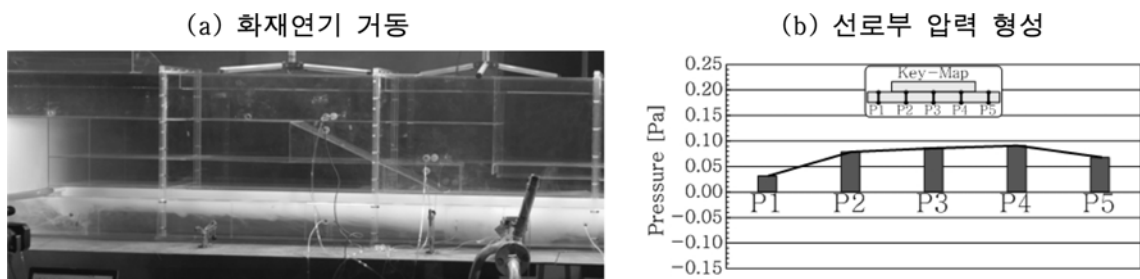


그림 6. CASE 3 (양단 배연 + 상부 배연덕트)

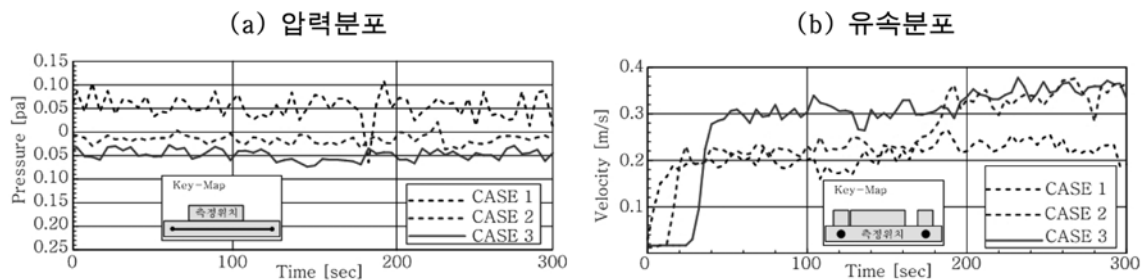


그림 7. 배연방식별 축소모형 실험결과

표 3. 배연방식별 축소모형 실험결과

구분	CASE 1 (중방향 배연)	CASE 2 (양단 배연)	CASE 3 (양단배연 + 상부배연 덕트)
개요도	· 그림 3.(a) 참조	· 그림 3.(b) 참조	· 그림 3.(c) 참조
특징	· 본선구간으로 연기 전파 가능	· 정거장 전체로 연기 확산	· 화재연기의 성층화 유지
배연량	· 1개 환기소 배연으로 작음	· 본선기류 유입으로 배연량 작음	· 배기구를 통한 배연량 최대
침강속도	· 화재연기 일방향으로 전단면에 걸쳐 확산	· 배연량이 작아 연기 침강 발생 기기도 저하	· 상부 배연으로 연기 성층화 유지 기기도 확보
압력배턴성	· 선로부 전체에 불균형 압력 형성	· 양단으로 압력 편차 발생	· 선로부 전체에 고른 압력 형성

로 유입된다. 승강장을 통해 유입된 화재연기는 계단부를 통해 상부층으로 전파되어 그림 8(b)와 같이 정거장 전체에 화재연기가 전파된다.

3.2.2 CASE 5 (양단배연, 상부층기압○)

선로부 배연방식은 양단 배연 방식을 적용하고 승강장층과 상부층은 급기 기압을 유지한다.

시간에 대한 압력 분포도를 분석하면 화재발생 지점 근처를 제외하곤 거의 모든 지역에서 (-)차압을 형성하고 있어 배연이 진행되고 있지만 그림 9(a)와 같이 압력의 분포가 일정치 않으므로 배연성능이 원활히 유지된다고 보기는 어렵다. 압력분포는 그림 9(a)와 같이 CASE 4보다 낮은 압을 형성

하지만 중앙부 부근에서 (+)압으로 선로부가 높게 형성되어 화재연기가 승강장 층으로 유입된후 계단부를 통해 상부층으로 전파되어 CASE 4보다는 양이 작지만 그림 9(b)와 같이 정거장 상부층으로 확산되어 시간이 경과된 후 정거장 전체로 화재연기가 전파된다.

3.2.3 CASE 6 (양단 배연 + 상부배연덕트, 상부층기압×)

선로부 배연방식은 양단 배연 + 상부배연덕트 방식을 적용하고 승강장층은 급기 기압을 유지한 상태에서 상부층(지하 1, 2, 3층)은 기압을 하지 않는 경우에 대한 축소모형실험을 수행한 결과 전체적인 압력분포는 그림 10(a)와 같이 (+)압으로 선로부가 높게 형성되어 화재연기가 유입된다.

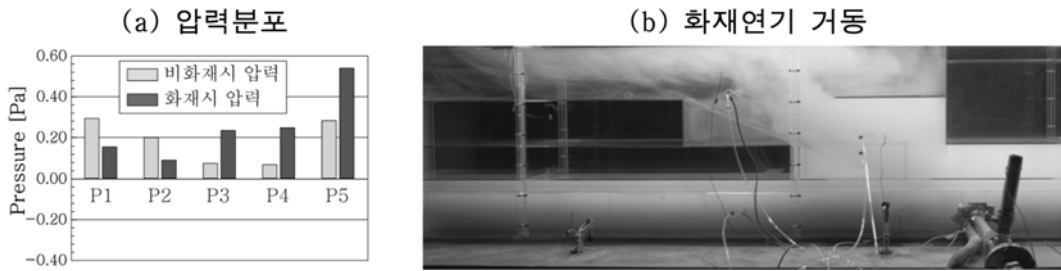


그림 8. CASE 4 축소모형실험 결과

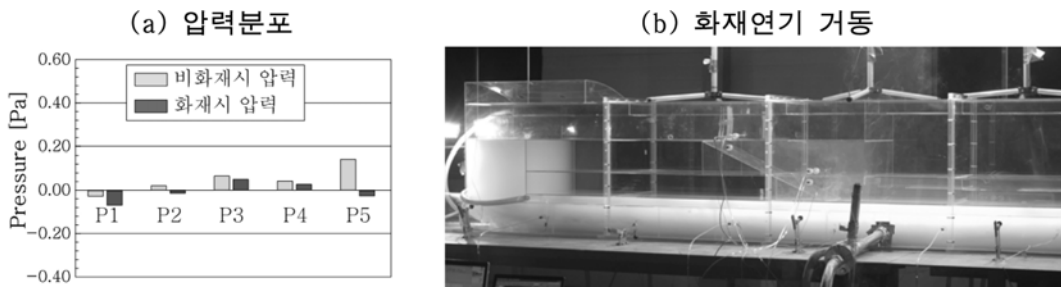


그림 9. CASE 5 축소모형실험 결과

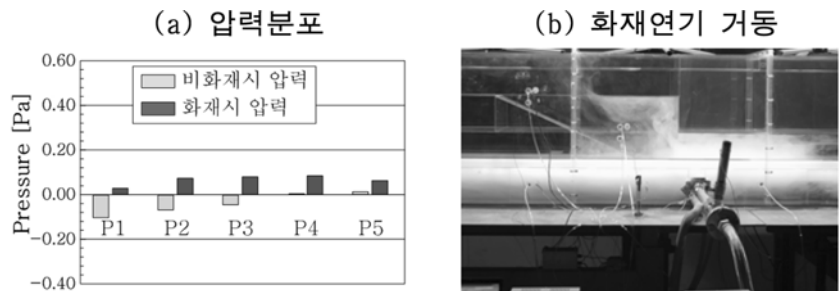


그림 10. CASE 6 축소모형실험 결과

승강장을 통해 유입된 화재연기는 계단부를 통해 상부층으로 전파되어 그림 10(b)와 같이 정거장 전체에 화재연기가 전파된다.

3.2.4 CASE 7 (상부배연덕트 + 양단배연, 상부층가압)

선로부 배연방식은 양단 배연 + 상부배연덕트 방식을 적용하고 승강장과 상부층(지하 1, 2, 3층)은 급기 가압을 유지한다.

그림 11(a)와 같이 (-)압력 분포를 나타내며 그림 11(b)와 같이 정거장 상부층으로의 연기확산은 발생하지 않는다. 상부층의 가압으로 화재연기는 계단부를 통해 전파되지 않으며 또한 제연경계벽을 통해 화재연기의 전파를 방지한다.

3.2.5 정거장 내부 연기 침입 방지를 위한 축소모형 실험결과 화재연기는 승강장과 선로부의 압력차이로 인해서 화재연기가 선로부로 침투하게 되고 승강장으로 침투된 화재연기는 계단부를 통해 상부층으로 전파되어 정거장 전체로 확산된다. CASE 4~7은 배연방식과 정거장 상부층의 배연방식에 따라 화재연기의 전파 방지 방안에 대해 실험하였다.

모든 실험 CASE에는 PSD가 개방되어 있고 제연경계벽이 설치되는 조건하에서 축소모형실험을 수행하였으며 CASE 7의 경우 표 4 및 표 5와 같이 정거장내 화재연기의 확산을 방지할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 축소모형실험을 통해 화재열차의 승강장 진입에 따른 정거장 연기배연시스템을 검토 분석하였다. 승강장 선로부의 화재에 대한 기존의 연구가 부족하여 기존 시스템을 활용하는 방안과 상부배연덕트를 설치하는 새로운 방안을 제시하였다. 축소모형실험을 이용한 연구결과 상부배연덕트를 설치함으로써 배연량이 증가 하였으며 화재연기의 성층화를 유지하면서 배연이 가능하였다. 따라서 대피승객의 안전성을 확보할 수 있게 되어 지하정거장에 적합한 새로운 배연방식임을 확인할 수 있었다.

또한 정거장내 화재연기의 확산을 방지하기 위해 선로부의 원활한 배연이 가능한 양단배연+상부배연덕트 방식과 더불어 정거장내 공조시스템의 급기압운전을 시행하는 경우 연기가 정거장으로 일부 침입하더라도 정거장내 상층부로 화재연기의 전파를 방지할 수 있을 것으로 예상되었다.

향후, 본 시스템을 최적화시키기 위한 추가적인 연구를 통하여 경제성을 강화할 수 있는 최적화시스템의 설계가 필요할 것으로 예상되며, 화재규모의 확대에 따른 심층적인 연구가 이루어진다면, 지하정거장의 배연시스템 구축에 보다 큰 진전이 있을 것으로 예상된다.

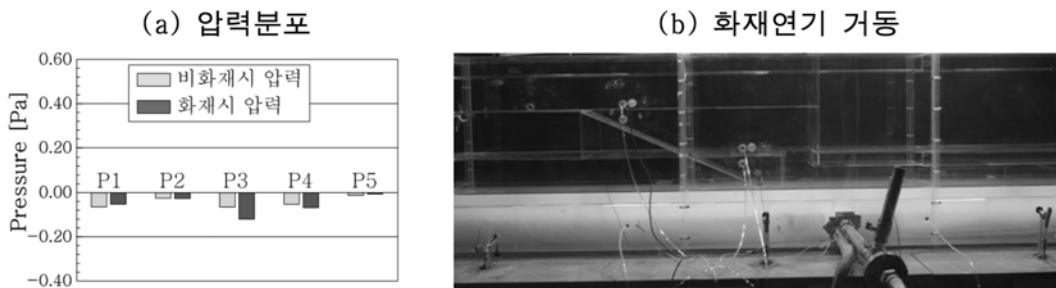


그림 11. CASE 7 축소모형실험 결과

표 4. 정거장내 연기침입 방지 축소모형실험 결과 - 1

구분	CASE 5 양단배연 + 정거장 가압	CASE 7 양단배연 + 상부배연덕트 + 정거장 가압
실험 결과		

표 5. 정거장내 연기침입 방지 축소모형실험 결과 - 2

구분	CASE 5 양단배연+정거장 가압	CASE 7 양단배연+상부배연덕트+정거장 가압
입력 분포		
분석 결과	- 양단배연 / 정거장내 가압 운전 → 상부층 연기 침입	- 상부배연덕트+양단배연/정거장 가압 운전 → 상부층 연기 침입 방지

참고문헌

- Dusseldorf (1995) *Fire in Transport Tunnels: Report on full-scale tests*, EUREKA-Project EU499; Firetun, Studiengesellschaft Stahlanwendung eV.D-40213.
- Frank M.White (2000) *Fluid Mechanics*, 4th Edition. McGraw-Hill, Korea.
- Haukur Ingason (2001) *An Overview of Vehicle Fires in Tunnels*, Fourth International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels. Madrid, pp. 425-434.
- Ingason, H. Gustavsson, S. Dahlberg, M. (1994) *Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires*. SP Report 1994:08, Swedish National Testing and Research Institute.
- Massachusetts Highway Department and Federal Administration (1995) *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program Test Report*. Massachusetts Highway Department and Federal Administration, Massachusetts.
- Michel Egger (2001) *Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels*. UN Economic and Social Council.

- ◎ 논문접수일 : 2008년 07월 23일
- ◎ 심사의뢰일 : 2008년 07월 28일
- ◎ 심사완료일 : 2008년 08월 05일