

# 경인고속도로 하부에 설치되는 도시철도 일부 구간의 방재시물레이션 설계사례



유 지 오  
신흥대학 건축설비과교수  
jolew@shc.ac.kr



김 중 원  
㈜범창종합기술  
batmankjw@harmail.net



박 인 기  
두산건설(주) 토목사업본부 소장  
parking@doosan.com



강 문 구  
두산건설(주) 토목사업본부 차장  
moongu@doosan.com

## 1. 서론

대도시의 교통체계는 심각한 교통난의 해소를 위하여 수송효율이 높은 지하철을 중심으로 정착되고 있으며, 지하철의 총연장은 서울, 인천, 부산, 대구, 대전, 광주 등 7개 도시의 16개 노선에 약 500km 이상 달하고 있다. 지하철은 정시성, 쾌적성, 안정성 측면에서 지상 교통수단 보다 우수하고 대량수송이 가능하며 대기오염문제의 해결책으로 그 역할이 더욱 증대되고 있다.

이에 따라 지하철이 일상생활의 중요한 운송수단으로서 역할을 분담하게 되면서 공기질에 대한 관심이나 쾌적성, 안전성에 대한 요구가 증대하고 있으며, 지하철의 경우, 공기오염 및 열환경 문제는 지하철 환기분야에서 시급히 해결해야 할 문제로 대두되고 있을 뿐만 아니라, 사망자 192명, 부상 147명이 발생한 2002년 11월의 대구지하철과 1995년 아제르바이젠(사망 289명)의 지하철 화재사고 등 국내외 지하철에서의 화재사고에서 알 수 있는 바와 같이 지하철에서의 화재는 대형인명피해를 유발할 개연

성이 아주 높은 것으로 평가된다.

그러나 지하공간에서의 화재에 대비한 환기기의 용량이나 운전방안 등이 명확하게 정립되지 못하고 있는 실정이며, 환기기의 용량 및 설계의 적정성을 평가하기 위한 평가 기준, 화재시 열기류의 온도 기준 및 화재로 인해 발생하는 독성물질의 허용농도 기준 등은 아직까지 정립되지 못한 실정이다.

이에 각국에서는 도시철도의 화재안전에 노력하고 있으며, 국내의 경우도 도시철도법 하에 도시철도법 시행령, 동법 시행규칙, 도시철도건설규칙을 제정하여 안전을 도모하고 있으나 대피거리(시간) 및 제연설비용량 산정 등 기술적으로 미흡점이 지적되고 있는 실정이다. 특히, 국내의 경우 본선터널에서의 방재시설로 대피통로, 제연설비, 연결송수관설비를 갖추도록 하고 있으나, 제연설비의 경우, 일방향 제연개념을 도입하여 임계풍속을 만족할 수 있도록 제연설비를 시설하도록 하고 있어 열차중앙부에서 화재가 발생하는 경우에 자칫 연기를 대피방향으로 제어할 우려가 있으며, 대피통로의 적정 설치간격에 대해서는 언급조차하지 않고 있는 실정으로 지하공간에서 화재시 인명안전에 가장 크게 영향을 미치는 초기 대피환경 확보 방안이 미흡한 실정이다.

현재 국내에서는 지하철에 대한 제연설비를 설계하는 경우, 지하철에서의 화재시 안전성을 평가 및 검증, 운전 계획수립에 수치해석을 적극 활용하고 있다. 경인고속도로 하부에 설치되는 지하철의 환기 및 제연설비 설계시 수치해석을 통해서 다음과 같은 기술적 검토를 수행하였으며, 본 원고에서는 본선부의 대피안전성 평가를 중심으로 기술하고자 한다.

첫째, 본선 터널구간의 임계풍속 검토

둘째, 본선 터널구간의 제연풍속 만족 여부평가 및 제연운전모드 도출

- 본선 터널구간의 환기소 운전모드에 따른 제연풍속에 대한 시뮬레이션을 수행하여 제연풍속을 만족하기 위한 운전모드 도출

- 매트릭스(Matrix) 운전기법의 도입 타당성 검토 셋째, 본선 터널구간의 대피안전성 분석
- 화재 시 본선부 대피안전성을 정량적으로 평가하는 기법제시
- 본선부 화재시 안전한 대피를 확보하기 위한 제연팬 운전방안 도출
- 넷째, 정거장 화재시 배연모드 검토
- 정거장 화재시 배연운전모드에 따른 화재해석을 수행하여 최적의 배연모드제시

## 2. 본선 터널구간의 터널 화재 안전성 검토

### 2.1 본선 터널구간의 터널 구간 임계풍속 산

#### 2.1.1 화재강도에 관한 문헌조사 및 평가

지하철 차량에 대한 화재강도에 대한 문헌조사 결과를 정리하면 <표 1>에 나타난 바와 같다. 실험적 연구로는 EUREKA 499 프로젝트가 있으며, 이는 지하철 차량의 최대 화재강도로 35MW(평균 11.5MW)를 제시하고 있으나 연구자의 분석방법에 따라서 차이가 있으며, 24MW로 분석한 연구결과도 제시되고 있다. 또한 설계검토에 적용한 화재강도는 최소 5~24MW 까지 분포하고 있으나 적용빈도는 13.5~16.3MW가 가장 많으며, 평균값은 약

[표-1] 설계적용 화재강도에 대한 분석결과

구분	차종	화재강도 (MW)	비고
실험적 방법	지하철 객차	최대 35 MW (평균 11.5 MW)	EUREKA 499
		10~24	싱가폴
설계 적용	지하철차량	5~10	홍콩(CCL)
		7~17.6	영국
	도시철도	10.8, 12.3, 13.2, 16.1, 18, 23.1, 31.1	미국
연구 논문	일반객차	6~25/14적용	Munro
		15	Ingason
		10	Mrtiinelli(이탈리아)
		15	Li(중국)
	지하철차량	5	Pagan, LUL적용



〈그림 1〉 화재해석을 구간개요도 및 화재지점

14.5 MW 로 평가된다. 그러나 본 문헌조사에 제시된 화재강도는 중량전철을 대상으로 한 것이므로 경량전철로 계획하고 있는 인천도시철도의 경우에는 보다 완화된 화재강도를 적용할 필요가 있는 것으로 평가된다. 따라서 설계화재강도로 10MW 를 적용하였다.

### 2.1.2 임계풍속 해석

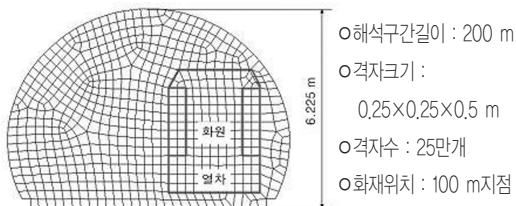
#### 가. 해석조건

임계풍속은 〈그림 1〉에 나타난 본 공구구간의 CASE-1 지점과 CASE-3 지점에 대해서 해석하였으며, 각 지점의 단면적 및 경사도 등 해석을 위한 제원은 〈표 2〉에 나타난 바와 같다.

〈표-2〉 임계풍속 해석지점에 대한 제원

구분	단면적(㎡)	높이(m)	경사도
CASE-1지점	43.1	6.225	-1.7%
CASE-3지점	50.8	6.715	+0.3%

임계풍속 해석은 Fluent를 사용하였으며, 해석모델은 〈그림 2〉에 나타난 바와 같다.



〈그림 2〉 임계풍속 해석모델

#### 나. 해석결과

해석결과는 〈표 3〉에 나타난 바와 같다.

CASE-1 지점에서 화재가 발생하는 경우, 풍속이 1.75 m/s 일때 backlayer의 길이가 61.6 m 로 분석되었으나 풍속을 1.80 m/s 로 증가하면 Backlayer가 없어지는 것

으로 나타나고 있다. 본 해석의 경우, backlayer의 길이가 아주 작은 풍속변화에서 급격하게 변하는 것으로 나타나고 있는데 이는 터널에 대한 열차의 폐색율이 크고 화원을 바닥에서 이격된 천정부에 두고 있기 때문에 화원의 높이가 낮은 경우보다 부력이 감소하기 때문으로 판단된다.

CASE-3 지점에서 화재가 발생하는 경우에 대해서 임계풍속을 검토한 것으로 이 구간에서의 임계풍속도는 1.80 m/s 로 해석되었다. 이 구간의 경우 CASE-1 구간보다 천정높이가 높기 때문에 임계풍속이 증가하여야 하나 경사도가 CASE-1 보다 상대적으로 작기 때문에 두 구간의 값이 동일하게 해석되었다.

위와 같은 해석결과는 일반적으로 적용하는 “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침”에 제시된 터널내 임계풍속 계산식을 적용하는 경우  $\beta$  값을 1.0 을 적용하는 하는 경우와 동일한 결과를 보이고 있다. 이 경우 CASE-1 및 CASE-3 의 임계풍속은 각각 1.805와 1.803 m/s 로 계산된다. 이것은 화원의 폭이 증가하면 임계풍속이 감소하는 경향을 보이며 이에 따라  $\beta$  값이 증가하는 것으로 분석된다.

〈표-3〉 임계풍속 해석결과

구분	해석결과
CASE-1,2	
CASE-3	

## 2.2 본선 터널구간 화재시 제연운전계획

지하철 본선구간에서는 일반적으로 환기풍량보다 제연

풍량이 크기 때문에 터널구간에서 화재가 발생하는 경우, 화재구간의 환기팬 가동만으로 본선 터널구간에서 제연 풍속을 만족하는 것은 곤란하다. 즉, <표 4>의 공구개요도에서 CASE-3 지점에서 화재가 발생하는 경우, 216 정거장으로 연기를 제어하고자 하는 경우, 본선터널의 단면적이 50.8 m<sup>2</sup> 이므로 제연풍속 2.5 m/s 를 만족하기 위해서는 7,620 (50.8×2.5×60 m<sup>3</sup>/min)의 풍량이 필요하게 된다. 이 풍량을 얻기 위해서 215-S1 환기소에서 최대풍량이 7,500 m<sup>3</sup>/min 으로 급기하고 215-E2 환기소에서 최대풍량이 3,000 m<sup>3</sup>/min 으로 배기한다고 하여도 구간의 풍량은 3,000 m<sup>3</sup>/min 밖에는 얻을 수 없으며, 따라서 최대 풍속은 0.98 m/s 가 된다.

이와 같이 지하철 본선 터널구간에서는 화재구간의 환기팬운전만으로 제연풍속을 만족하는 것은 불가능하다. 따라서 급기 및 배기풍량을 화재시 제연풍속을 만족하도록 증대하여야 하나 이는 팬풍량을 과다 산정하는 것으로 이와 같은 불합리한 문제점을 개선하기 위해서 영국의 Jubilee Line 등에서는 인접한 공구의 환기소 팬을 연동하는 matrix 운전기법으로 도입하고 있다.

이에 본 연구에서는 제연풍속을 만족하도록 하는 환기소 운전모드를 SES 프로그램을 이용한 화재해석을 수행하여 검토하였다.

<표 4>는 운전모드에 따른 터널구간의 풍속검토결과를 나타낸 것이다. CASE-1 지점에서 화재가 발생하는 경우, 제연방향을 215 정거장으로 하고 대피방향을 214 정거장으로 하는 경우에 인접한 환기소의 환기팬을 평상시와 같이 정상운전을 수행한다면 본선구간의 풍속은 1.72 m/s 로 제연풍속을 만족하지 못하게 된다. 따라서 화재지점의 우측 환기소(213E2, 214E1, 214S1)는 모두 급기하고, 화재지점의 좌측 환기소(214E2, 215E1, 215S1)는 배기모드로 운전하면 본선구간의 풍속은 2.92 m/s 로 제연풍속을 만족하게 된다.

<표 4>에 CASE-2, CASE-3 지점에서 화재가 발생하는 경우, 제연방향에 따른 환기팬 운전모드(급기 또는 배

기)와 해석에 의한 풍속을 제시하였다.

이상의 검토와 같이 본선구간의 화재시 해당구간의 환기소 환기팬 운전만으로는 제연풍속을 확보하는 것이 곤란한 경우가 많다. 그러나 제연풍속을 만족하기 위해서 환기소 환기팬 증설은 과다투자의 우려가 있는 것으로 판단되며, 이를 해결하기 위해서 matrix 운전기법의 도입이 필요한 것으로 판단된다. 그러나 본 검토결과는 214 정거장과 216 정거장을 대기에 개방된 portal 로 한 해석결과이기 때문에 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 지하철노선 전체에 대한 풍량 밸런스를 고려한 해석이 반드시 필요한 것으로 평가된다. 따라서 본 원고에서는 인천지하철 전체 노선에 대한 SES 해석을 통해서 화재위치별로 인접한 환기소의 환기팬에 대한 Matrix 운전모드를 수립하는 것을 제안하는 바이다.

## 2.3 대피안전성 평가

### 2.2.1 평가조건

대피 안전성은 제연방향과 대피방향에 따라서 큰 차이가 발생하기 때문에 화재발생위치, 대피방향, 제연방향을 고려한 시나리오를 작성하여 화재가 인체에 미치는 영향을 유효복용분량(FED ; Fractional Effective Dose)으로 정량화하여 사상자수를 분석하고 이를 통해서 대피안전성을 평가하였다.

화재지점은 <그림 1>에 표시한 바와 같이 CASE-1, CASE-2, CASE-3 으로 하였으며, 각각에 대해서 제연을 수행하지 않는 경우(터널풍속 0 m/s로 유지)와 상행방향(CASE-1,2 는 214 정거장, CASE-3 의 경우는 215 정거장), 하행방향(CASE-1,2 의 경우는 215 정거장, CASE-3 은 216 정거장)으로 제연하는 것으로 하였으며, 각각에 대해서 제연방향의 반대방향과 제연방향으로 대피하는 경우 및 양방향으로 대피하는 경우에 대해서 대피 해석 및 안전성평가를 수행하였다.

해석시 터널내 초기풍속은 고려하지 않았으며, 화재 후

(표-4) 본선부 제연팬 운전모드(Matrix 운전기법)에 따른 제연풍속검토

환기소풍량(m³/min)				3000	3000	7500	3000	3000	7500	3000	3000	-	-	-
화재 위치	구배 (%)	제연 방향	대피 방향	213 E2	214 E1	214 S1	214 E2	215 E1	215 S1	215 E2	216 E1	풍속 (m/s)	선정	비고
CASE-1	1.7	215	214	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	1.72		정상운전
				↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	2.92	○	214E1E2, 215S1역전운전
		214	215	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	-1.95		214S1,215E1E2역전운전
				↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	-2.33	○	214S1,215E, 216E2역전운전
CASE-2	-1.7	215	214	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	1.57		정상운전
				↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	2.75	○	214E1E2, 215S1역전운전
		214	215	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	-2.18		214S1,215E1E2역전운전
				↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	-2.60	○	214S1,215E, 216E2역전운전
CASE-3	0.3	216	215	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	2.32		215E1E2, 215S1역전운전
				↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	2.45	○	214E1E2,215E1E2, 215S1역전
		215	216	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	-0.88		정상운전
				↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-2.71	○	214S1역전운전

↑: 배기, ↓: 급기

동시에 정해진 배연모드로 배연하는 것으로 하였다.

### 2.2.2 평가결과(CASE-1지점 화재시)

각 시나리오에 대한 화재해석은 FDS(Fire Dynamics Simulator V5.4, by NIST)프로그램을 이용하여 수행하였으며, 해석결과로부터 호흡선 높이를 기준으로 하는 유해가스농도 및 열환경(온도, 복사강도), 산소저감율에 대한 데이터베이스를 작성하였다. 대피해석 프로그램은 대피자의 위치에 따라 화재해석에 의해서 구해진 데이터베이스를 동기화하여 유해가스 농도 및 열환경에 대한 값을 추출하며, 대피자가 노출되는 유해가스와 열환경의 영향 및 대피속도의 감소 등을 계산하여 FED 값을 해석하였다.

〈그림 3〉는 화재지점은 CASE-1이고 제연풍속을 2.92 m/s 로 하여 215 정거장 방향으로 제연하는 경우의 화재 해석 및 대피해석 결과를 나타낸 것이다.

이 경우, 연기류는 화재가 프레스쉬오버에 도달하는 600 초 이후에 아주 빠른 속도로 215정거장 방향으로 이동하며 약 130초 만에 화재하류의 전구간(419 m)을 완전히 포위하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 대피속도를 최저로 하는 연기농도의 이동속도는 3.14m/s 정도로 나타나고 있다.

그림 ③과 ④에 의하면 화재지점을 제외한 터널구간에서 호흡선 높이의 평균온도는 최대 40℃ 이하로 나타나고 있으며, 이에 따라 온도가 인체에 미치는 영향은 화재지점으로 부터 약 100 m 정도로 제한되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 공기의 풍량이 증가하여 이로 인한 냉각 효과가 증가하기 때문이다. 따라서 온도가 대피환경에 미치는 영향은 아주 작은 것으로 평가된다.

그림 ①과 ②에 의하면 터널내 CO농도는 화재지점에 근접한 지점보다 하류로 갈수록 호흡선 높이에서 CO 농도가 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 연기가 화재 하류측으로 이동할수록 냉각에 의해 연기가 호흡선 높이로 하강하기 때문이다. CO의 최대농도는 약 400 ppm 정도로 나타나고 있으며 FED<sub>CO</sub>의 최대값은 약 0.15 정도로 나타나고 있다. 따라서 CASE-1 지점에서 화재가 발생하는 경우, 연기이동속도를 증가시킬지라도 제연을 수행하는 것이 대피안전에 보다 효과적인 것으로 평가된다.

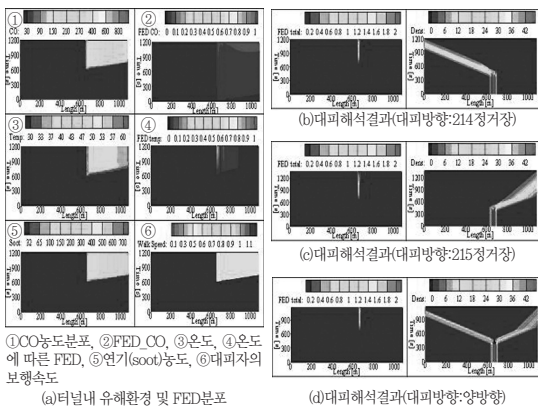
〈그림 3(b)〉는 제연반대방향으로 대피를 하는 경우로 이 경우, 사상자는 발생하지 않으며, 대피속도의 저하현상도 발생하지 않는 것으로 평가된다.

〈그림 3(c)〉는 제연방향과 대피방향이 모두 215 정거장

방향인 경우에 FED 분포와 대피자의 이동방향을 알수 있는 대피자 밀도를 나타낸 것이다. 지역별 FED 값은 화재 지점에서부터 약 20m 정도만 FED 값이 상승하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 이 경우에도 대피환경은 아주 좋은 것으로 평가된다. 이 경우 예상되는 사망자수는 1.1명으로 나타나고 있다.

<그림 3(d)>는 양방향으로 대피하는 경우로 연기와 동일한 방향으로 대피하는 대피자의 일부가 연기에 노출되어 대피속도가 감소하는 현상을 보이고 있으나 FED 값에 의한 추정사망자는 발생하지 않는 것으로 평가된다.

<그림 4>는 CASE-1 지점에서 발생한 화재를 제연하지 않는 경우(0m/s)의 화재해석과 대피해석 결과를 나타낸 것이다. 그림(a)는 유해가스농도 및 지역별 FED 분포를 나타낸 것이며, 따른 지역별 FED분포와 대피자 밀도를 나타낸 것이다.



<그림 3> CASE-1지점 화재시 화재해석 및 대피해석결과 (215정거장방향으로 제연하는 경우)

이 경우 연기류의 방향은 화재지점의 경사도가 +1.7%이기 때문에 부력에 의해서 상향경사 방향인 우측(215 정거장 방향)으로 형성되고 있으며, 화재가 플래쉬오버(flashover)에 도달하는 600초 이후에 터널내 연기농도가 급격하게 상승하는 것을 알 수 있으며, 그림 ⑥에서 연기농도의 영향을 받는 보행속도 또한 급격하게 감소하는 것으로 알 수 있다. 또한 하류방향으로 이동하는 연기는 플래쉬오버 이후에 약 300초 만에 하류방향의 터널 전구간

(419 m)를 완전히 덮는 것으로 나타나고 있다. 따라서 대피속도를 최저로 하는 연기농도의 이동속도는 1.3 m/s 정도임을 알 수 있다. 그림 ③과 ④에 의하면 화재시 터널 전구간에 걸쳐 호흡선 높이에서의 온도는 최대 60℃ 이하로 나타나고 있으며, 이에 따른 온도가 인체 미치는 영향의 정도를 나타내는 FED<sub>T</sub>는 최대 0.3 정도로 비교적 낮게 나타나고 있다. 또한 그림 ① 및 ②에서 CO농도분포는 호흡선에서 약 800 ppm 까지 증가하는 것으로 나타나고 있으나, FED<sub>CO</sub>는 대피시간 동안에 지역별로 최대 약 0.3 이하로 나타나고 있다.

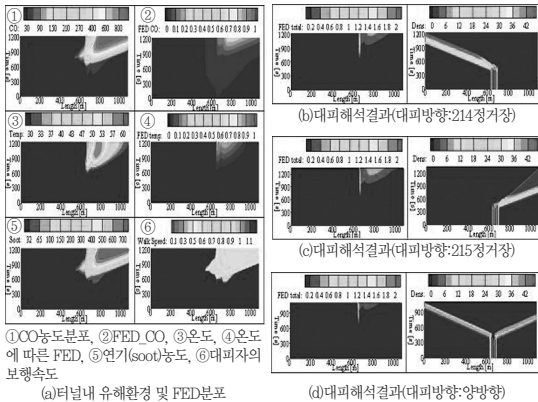
제연 반대방향으로 대피하는 이 경우, 사상자는 발생하지 않는 것으로 예상되며, 대피속도의 저하현상도 발생하지 않는 것으로 평가된다. 그림 ②에 의하면 약 500 초 정도에 거의 모든 대피자가 대피를 시작하는 것으로 나타나고 있으며, 따라서 평균 대피속도는 약 1.0 m/s 정도로 평가된다.

<그림 4(b)>는 FED분포와 대피자의 이동방향을 알 수 있는 대피자 밀도를 나타낸 것이다. 지역별 FED값은 화재점에서 하류방향으로 약 150~200m 구간에서 최대 0.8 정도로 나타나고 있으며, 대피자는 화재의 반대방향으로 이동하는 것으로 알 수 있다. 따라서 이 경우 예상되는 사망자는 0명으로 추정되며, 대피거리는 658m이며 대피가 완료되는데 소요되는 시간은 약 1205초 정도로 평가된다.

<그림 4(c)>는 연기의 이동방향과 대피방향이 동일한 경우로 약 600초 정도에 연기가 일부 대피자를 덮치며, 연기에 노출된 대피자의 대피속도는 0.45m/s 로 급격하게 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이 경우 대피거리는 419m 이고 예상되는 등가사망자는 약 18.4명이며, 대피 완료에 소요되는 시간은 약 1391초 평가된다.

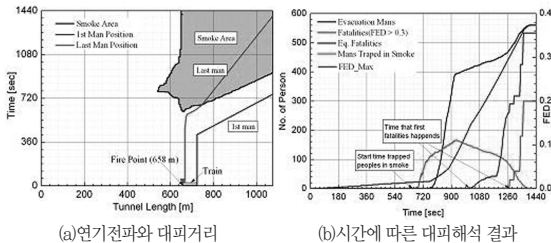
<그림 4(d)>는 양방향으로 대피하는 경우이며 대피에 소요되는 시간은 1105.3초로 가장 짧으며, 사상자는 발생하지 않는 것으로 예측된다.

<그림 5>~<그림 7>은 연기의 전파거리와 대피자의 대피거리등 대피상태를 나타낸 것이다.



(그림 4) CASE-1지점 화재시 화재해석 및 대피해석결과 (제연을 수행하지 않는 경우)

(그림 5)는 CASE-1 지점의 화재시 제연풍속을 0 m/s로 하고 215 정거장 방향으로 대피하는 경우이다. 이 경우 선두부 대피자는 연기에 영향을 받지 않은 상태로 대피를 완료할 수 있으나, 가장 늦게 대피하는 대피자는 670초 정도에 연기에 휩싸이게 되는 것으로 나타나고 있다. 또한 최초로 등가사망자수가 발생하는 시간은 1,100초, 일반적으로 사망여부를 판단하는 기준인 FEDmax 값이 0.3을 초과하기 시작하는 시간은 1,272초 정도이다. 전술한 시간은 모두 유효안전피난시간(ASET)의 개념을 갖는 것으로 볼 수 있다. 또 그림(b)에 의해서 연기에 포획되는 대피자 전원이 사망상태에 도달하는 것으로 가정한다면 사망자는 167명(mans trapped in smoke)이 되며, 등가사망자수(Eq. Fatalities)를 기준으로 하는 경우에는 18명, FED값이 0.3이상(Fatalities, FED>0.3)이면 사망에 도달하는 기준으로 하는 경우에는 10명의 사망자가 발생하는



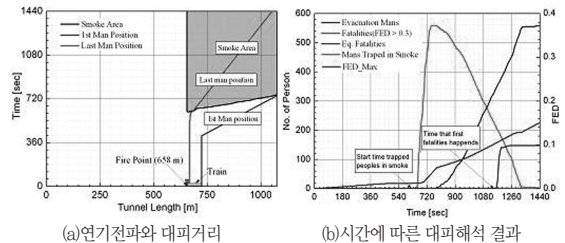
(a) 연기전파와 대피거리 (b) 시간에 따른 대피해석 결과

(그림 5) 연기의 전파거리와 대피해석 결과 (CASE-1지점 화재시 제연풍속을 0m/s로 하는 경우)

것으로 예측할 수 있다. 이와 같은 결과는 대피자가 연기에 노출된다고 해도 그 즉시 사망상태에 도달하는 것이 아니며, 인간에 미치는 영향은 유해가스의 복용총량에 의존하기 때문이다. 따라서 설계시 대피한계를 어떻게 정하는냐에 따라서 유효안전피난시간(ASET)이 달라질 수 있으며, 이를 근거로 피난대피통로의 간격을 설정하고 있기 때문에 대피통로의 간격 또한 달라질 수 있다. 따라서 연기가 대피자를 덮치기 시작하는 시간을 ASET으로 판단하고 있는 현재의 설계기법은 피난연결통로 및 피난대피환 정확보를 위한 시설의 설계에 있어서 과다설계를 유도할 수 밖에 없는 것으로 판단된다. 본 원고에서는 ASET을 판단하기 위한 기준으로 등가사망자가 발생하는 시간을 기준으로 할 것으로 제안하는 바이다.

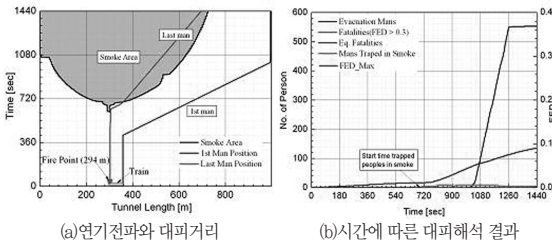
(그림 6)은 화재시 환기설비를 가동하여 연기를 일방향으로 제연하는 경우에 제연방향으로 대피하는 경우이다. 이 경우 연기가 대피자를 덮치는 시간은 658초이며, 대피자 전원이 연기에 포위되는 것으로 나타나고 있다. 따라서 제연을 수행하는 경우가 안전대피 환경확보에 보다 열악한 조건을 제공하게 되는 것으로 평가할 수 있으나 FED 해석에 의한 사망자평가에 의하면 등가사망자를 기준으로 하는 경우 1명의 사망자가 발생할 것으로 예측되고 있으며, FED > 0.3을 사망판단의 기준으로 하는 경우에는 사망자가 발생하지 않는 것으로 평가할 수 있다.

(그림 7)은 CASE-3 지점의 화재시 연기의 전파거리와 대피자의 대피거리 등 대피상태를 나타낸 것으로 이 경우 연기의 이동은 화재지점을 중심으로 양방향으로 이동하



(a) 연기전파와 대피거리 (b) 시간에 따른 대피해석 결과

(그림 6) 연기의 전파거리와 대피해석 결과 (CASE-2지점 화재시 215정거장으로 제연하는 경우)



〈그림 7〉 연기의 전파거리와 대피해석 결과  
(CASE-3지점 화재시 제연풍속을 0m/s로 하는 경우)

는 것을 알 수 있다. 이와 같이 연기가 CASE-1 지점에서의 화재와 달리 양방향으로 이동하는 이유는 CASE-3 지점의 경사도가 0.3%로 부력에 의한 영향이 아주 미미하기 때문이다. 이 경우에도 마지막 대피자는 연기에 포획되는 것으로 나타나고 있으며, 대피자수는 8명으로 해석되며, FED 값을 기준으로 하는 경우, 사망자는 발생하지 않

는 것으로 나타나고 있다.

이상의 검토에서 CASE-1의 화재시에는 대피방향과 무관하게 제연을 수행하는 경우가 사망자수가 적게 발생하고 있으며, CASE-3의 경우에는 제연을 수행하지 않는 경우가 보다 안전한 대피환경을 제공할 수 있는 것으로 판단된다.

### 2.2.3 대피해석 결과정리

이상의 검토에서 대피안전성은 제연방향과 대피방향의 상관관계에 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타났기 때문에 본 절에서는 대피방향과 제연방향의 상관관계에 따라서 대피해석결과를 정리하여 〈표 5〉에 나타냈다.

표에서 알 수 있는 바와 같이 대피방향과 제연방향이 반대인 경우에는 제연연부에 관계없이 대피자가 화재지

〈표-5〉 시나리오에 따른 대피해석결과 정리

제연방향 관계	화재지점	제연방향	연기의 이동거리	대피방향	대피거리	대피시간	예상되는 사상자수
1/2일치	F1	터널풍속 0	419	양방향	658/419	1105.3	0
		214정거장	126(환기소)		658/419	112.7	0
		215정거장	419		658/419	116.2	0
	F2	터널풍속 0	942		942/135	1685.3	4
		214정거장	403(환기소)		942/135	1702.7	0.3
		215정거장	135		942/135	1388	0
	F3	215정거장	294		294/698	1153.3	0
		216정거장	245(환기소)		294/698	1174	0
반대	F1	터널풍속 0	419	214정거장	658	1205.3	0
		214정거장	126(환기소)	215정거장	419	996.7	0
		215정거장	419	214정거장	658	1202.7	0
	F2	터널풍속 0	942	216정거장	135	700	0
		214정거장	403(환기소)	216정거장	135	712	0
		215정거장	135	214정거장	942	1478.7	0
	F3	215정거장	294	216정거장	698	1254	0
		216정거장	245(환기소)	215정거장	294	856	0
일치	F1	터널풍속 0	419	215정거장	419	1391.3	18.4
		214정거장	126(환기소)	214정거장	658	1244	0
		215정거장	419	215정거장	419	1388	1.1
	F2	터널풍속 0	942	214정거장	942	2497.3	59.3
		214정거장	403(환기소)	214정거장	942	1913.3	8.9
		215정거장	135	216정거장	135	743.3	0
	F3	215정거장	294	215정거장	294	1086.7	0
		216정거장	245(환기소)	216정거장	698	1456	0
-	F3	터널풍속 0	-	215정거장	294	864	0
		터널풍속 0	-	216정거장	698	1242.7	0
		터널풍속 0	-	양방향	294/698	1153.3	0



점을 지나 대피하는 경우에도 사상자가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 대피방향과 제연방향이 일치하는 경우에는 연기에 노출되는 거리가 400m 를 초과하는 경우에 사상자가 발생하는 것으로 나타나고 있다. 또한 제연방향과 대피방향이 일치할 때 경사도가 1.7% 인 구간에서는 제연을 수행하는 경우보다 제연을 수행하지 않는 경우가 사상자가 보다 많이 발생하는 것으로 나타났다.

이는 제연을 수행하여 연기가 대피자를 덮치는 시간을 단축하여 오히려 제연을 수행할 때 보다 많은 사상자가 발생할 것이라는 예측과 반대의 결과로 이는 본 연구에서 대피지연시간이 상당히 길기 때문에 대피초기에서부터 연기에 노출되며, 제연을 하지 않는 경우에는 풍량에 의한 희석효과가 상대적으로 작기때문에 대피시간은 비슷한 반면, 고농도의 유해가스에 노출되기 때문으로 판단된다. 그러나 CASE-3 지점에서 화재가 발생하는 경우, 경사도 0.3%로 낮아 연기의 이동속도가 대피속도보다 작기 때문에 제연을 수행하지 않는 경우에 보다 안전한 대피환경을 확보할 수 있는 것으로 나타나고 있다.

따라서 본선구간에서 화재가 발생하는 경우, 열차의 화재지점이 정확하게 파악이 되지 않은 상태에서 제연을 수행할 것인가 아닌가는 화재지점의 경사도에 따른 부력에 의한 풍속에 영향을 크게 받을 것으로 평가된다.

### 3. 맺음말

본 원고에서는 경인고속도로 하부에 설치되는 일부 도시철도 구간의 환기 및 제연설비 설계시 본선터널구간의 화재안전성 평가를 위한 수치해석 결과를 중심으로 지하철 설계시 수치해석의 적용예를 기술하였으며 해석결과로부터 다음과 같은 내용을 제안하는 바이다.

본선터널구간의 제연풍속을 만족하기 위해서 화재지점에 최근접한 환기소의 운영만으로 제연풍속을 얻는 것은 일반적으로 환기풍량보다 제연풍량이 크기 때문에 곤란하므로, 인접구간의 환기소를 포함하는 환기소의 운전모드를 수립할 필요가 있는 것으로 판단된다.

피난연결통로의 간격 선정이나 대피안전성 평가시 일반적으로 연기의 이동거리와 대피거리의 상관관계 분석으로 통해서 연기가 대피자를 추월하는 시간을 ASET 으로 하는 것은 대피환경확보를 위한 시설의 과대설계를 초래할 우려가 있는 것으로 평가되며, 대피자별 유해가스에 대한 유효복용분량(FED)검토를 통해서 등가사망자가 발생하는 시간을 한계시간, 즉, ASET 으로 정하는 것을 제안하는 바이다.