

# 교통정체가 심한 도로터널에 대한 화재시 제연방식에 관한 연구

유 지 오, 신 현 준, 남 창 호

신흥대학 건축설비디자인과, 한국건설기술연구원,(주)범창종합기술

## The study of ventilation system during fire in road tunnel with bi-directional or congested unidirectional traffic

Yoo Jioh, Shin Hyunjun, Nam Changho

Dept. of Building Mech Eng., Shin Heung collage, Euijungbu, Kyunggi, 117  
Korea Institute construction technology, Ilsan, Kyunggi  
Bumchang Engineering Co. Ltd.

**ABSTRACT** : The purpose of this paper is to estimate the fire safety in tunnels with bi-directional and/or congested unidirectional traffic where there may be people on both sides of the fire. Therefore, the spread and movement of smoke are simulated by Fire Dynamic Simulator code under different ventilation systems, longitudinal, semi-transverse, large port exhaust system. And as quantitative risk index, FED (Fractional Effective Dose) for each ventilation system are calculated and compared by existed code developed previous research.

Key Words : Tunnel fire safety, Fractional effective dose, Urban tunnel, Tunnel Ventilation

### 1. 서 론

도로터널은 반밀폐 공간이라는 특성으로 인해서 터널내부에서 차량화재가 발생하면 인명 및 재산상의 피해를 가중할 개연성이 높은 것으로 보고되고 있다. 특히 몽브랑 터널이나 고타드 터널의 화재에서 알 수 있는 바와 같이 화재지점을 기준으로 하여 양방향에 대피자가 존재할 우려가 있는 대면통행터널이나 도심지의 정체빈도가 높은 일방통행터널의 경우에는 인명피해가 확대될 우려가 매우 크다.

국내의 경우, 도심지역의 교통난 해소를 위해서 소형차전용도로의 도입 등 도심지역에서의 터널 건설계획이 증가하고 있는 실정으로 도심터널의 화재시 안전에 대해서 기술적으로나 사회적으로 많은 관심의 대상이 되고 있다.

이에 본 연구에서는 교통정체빈도가 높은 일방

통행 터널 및 대면통행 터널과 같이 화재시 대피자가 화재지점을 기준으로 양방향에 존재할 가능성이 있는 터널에 대해 화재시 초기안전 확보에 효과적인 제연방식에 대해 고찰하고자 한다.

이를 위해서 각국의 도시터널에 대한 제연방식 설계기준을 분석하고, 화재지점 상하류에 대피자가 존재하는 터널에 대해서 종류식, 배기반환류식, 선택대배기구방식을 적용하는 경우, 화재시 안전성 평가를 위해서 터널 화재시 유해가스농도 및 열환경이 대피자에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가기준인 유효복용분량(FED ; Fractional Effective Dose)을 계산하여 위험도를 정량적으로 구하고 이를 상호·비교하여 제연방식에 따른 화재시 안전성에 대한 고찰을 수행하였다.

### 2. 이론적 배경

터널 화재시 대피자가 화재에 노출되는 정도를 정량화하는 지수인 FED값을 계산하기 위해서는 화재시 유해가스농도 해석 및 대피시물레이션이

Corresponding author  
Tel.:+82-31-870-3611; fax:82-31-870-3619  
Email address : jolew@shc.ac.kr

수행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 대상터널을 선정하여 화재시 시간에 따른 터널내 유해물질의 농도 및 온도해석을 수행하고 이를 입력데이터로 하여 기존에 개발된 프로그램<sup>(1)</sup>에 의해서 대피시물레이션 및 대피자별 FED값을 해석하여 제연방식에 따른 예상사상자를 예측하고 이를 비교·분석하였다.

## 2.1 화재해석모델

본 연구에서는 버스 및 위험물을 적재하지 않은 화물차의 화재를 대상으로 하였으며, 이에 대한 화재강도는 EUREKA 터널의 실물실험 결과에서 제시하고 있는 29~34 MW근거로 하여 30MW로 하였으며, 총발생열량은 48GJ로 하였다.<sup>(2)</sup> 화재는 2차함수에 의해 7.5분만에 완전히 성장하고 화재의 감쇄는 지수함수에 의해서 감쇄하는 것으로 하였으며, 최대화재강도의 1%로 감소하는 시간을 1시간정도로 산정한 화재성장곡선을 적용하였다. 이 경우, 화재 성장율은  $0.15 \text{ kW/s}^2$ 이며, 감쇄율은  $0.002 \text{ m}^{-1}$ 이다. 또한 화재해석은 FDS프로그램에 의해서 수행하였으며, FDS는 기본적인 연소물질로 매탄을 적용하고 있다. 따라서 터널내 화재시 유해가스 농도를 해석하기 위해서는 soot발생량 및 CO발생량을 터널화재조건에 적합한 값을 입력데이터로 하여야 하는데, 본 연구에서는 연기생성비율(smoke yields)  $Y_s = 0.133g_{\text{soot}}/g_{\text{fuel}}$ , CO의 생성비율,  $Y_{\text{CO}} = 0.168 \text{ g}_{\text{CO}}/g_{\text{fuel}}$ 로 적용하였다.

Fig. 2는 전술한 입력조건에서 FDS를 수행하는 경우, 화재강도 및 연소생성물 발생량을 나타낸 것이다. 그림에서 화재가 완전히 성장한 상태에서 CO발생량은 평균  $0.1234 \text{ kg/s}$ 로 PIARC보고서에 제시된 버스의 화재시 CO발생량  $0.077 \sim 0.128 \text{ kg/s}$ 의 범위에 있으며, Soot발생량은  $0.11 \text{ kg/s}$ 이며, 이는 Hall (Mott MacDonald)<sup>(3)</sup>가 도로터널 해석에 적용한  $0.12 \text{ kg/s}$ 보다 약 9%정도 작은 값을 적용하였다.

## 2.2 유효복용분량(FED) 계산모델

인간이 유독성 가스에 노출되는 경우, 인체에 미치는 영향은 노출농도 및 노출시간의 곱에 비례하기 때문에 인체에 미치는 영향 정도를 Ct(유해가스의 농도×노출시간)에 의해서 평가하며, 유효복용분량이란 대피자가 일정시간동안(t)에 유해가스

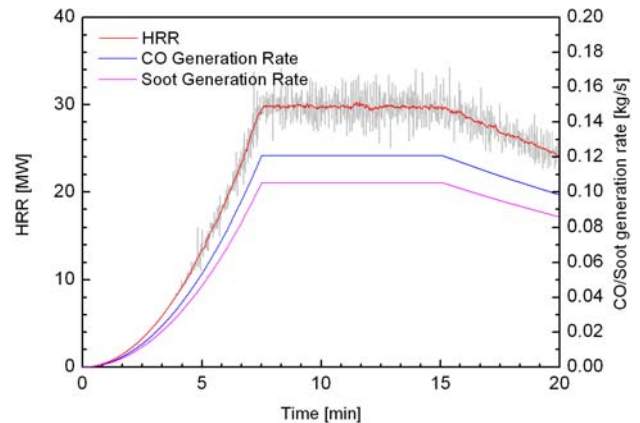


Fig. 1 화재강도 및 연소생성물 발생량

에 노출되어 호흡하게 되는 총복용량( $\sum_{at} Ct$ )에 대한 무기력한 상태에 이르게 하거나 치사상태에 도달하게 하는 복용분량( $Ct_{\text{effect}}$ )의 비를 말하며, 일반적으로 무기력 상태에 도달하게 하는  $Ct_{\text{Effect}}$ 를 기준으로 하여 FED값이 1.0에 도달하면 사망에 이르는 것으로 평가되나 일반적으로 소방대상 시설물의 성능설계에서는 0.3을 한계값으로 적용하고 있다.

$$\text{FED} = \frac{\text{dos recived at time}(t)}{\text{effective Ct dose to cause incapacitation or death}} = \sum_{at} Ct/Ct_{\text{effect}} \quad \text{식(1)}$$

FED 계산모델은 Purser모델, N-GAS모델, 미국 항공우주국(FAA)의 모델 등이 있으며<sup>(4)(5)</sup> 본 연구에서는 Purser모델을 기본으로 열과 복사에 대한 평가항을 추가한 식(1)을 적용하였다.

$$\text{FED}_1 = F_{\text{ICO}} \times V_{\text{CO}_2} + F_{\text{ICO}_2} + F_{\text{IO}} + F_{\text{IHeat}} + F_{\text{IRAD}} \quad (1)$$

여기서,  $F_{\text{ICO}}$ 와  $F_{\text{ICO}_2}$ 는 각각 CO,  $\text{CO}_2$ 에 대한 FED이며,  $F_{\text{IHeat}}$ ,  $F_{\text{IRad}}$ 는 온도 및 복사열에 의한 FED값을 의미한다.

본 연구에서는 대피자에 노출되는 농도의 기준을 FDS에 의해서 버스 화재시 화재해석을 수행하고 호흡선 높이에서 열환경 및 유해가스에 대한 농도분포를 구하고 이를 평균하여 적용하였다.

## 2.3 대피모델

터널 화재시 대피시간은 화재발생 후 대피자가 차량에 대기시간, 대피를 결정하는 시간, 안전지역으로 이동시간(Walking time)의 합이 되며, 차량

Table 1 해석 대상터널 제원

구 분	제 원
터널연장	1,500 m
단면적	794 m <sup>2</sup> 차도단면적 : 61.5m <sup>2</sup> , 덕트단면적 : 17.9m <sup>2</sup>
피난연락갱 간격	250 m
배기구	균일배기방식 : 0.6m×1m×2개점 5m간격 대배기구방식 : 3×4 100m간격

대기시간 및 대피결정시간은 인간적인 특성에 의해서 결정되는 값으로 터널 화재시 대피시간에 큰 영향을 미치게 되며, 이동시간은 보행에 의해서 피난연락갱까지 대피하는데 소요되는 시간으로 연기농도 및 피난연락갱 설치간격에 의해서 결정된다.

본 연구에서는 대기시간 및 대피결정시간은 Anders Noren<sup>(6)</sup>에 의해서 제시된 각 시간에 대한 확률분포를 적용하여 구하였으며, 이동시간에 대한 시뮬레이션은 기존에 유에 의해서 개발된 프로그램을 사용하였다. 대피시간은 산정을 위한 기준은 대피자의 대피시간에 영향을 미치는 화재감지시간은 60초, 경고방송시간은 120초하였으며, 터널내 차량수 계산 및 이로 인해 터널내 대피자수에 영향을 미치는 터널차단시간을 180 초로 하였다.

### 3. 해석조건

#### 3.1 터널모델

본 연구에 적용한 터널연장은 1,500 m이며, 각종 제원은 Table 1에 나타냈다.

환기방식에 따른 안전성 비교대상은 ①종류환기방식, ② 균일배기반회류방식, ③선택 대배구 방식으로 하였다.

종류식은 터널에 젯트팬을 설치하여 화재시 일방향으로 연기를 제연(smoke control)하여 대피공간에서 연기를 제거함으로써 대피안전을 확보하는 방식이며, 배기 반회류식은 터널의 천장에 덕트를 설치하여 배기구를 통해서 화재지역으로부터 연기를 직접 배연(smoke exhaust)하는 방식이다. 또한 선택 대배기구 방식은 터널의 천정부에 덕트를 설치하고 배기구에 개폐가 가능한 댐퍼를 설치하여 화재지역의 배기구만을 개방하여 화재연기를 집중적으로 배연할 수 있는 방식이다.

전술한 바와 같이 3개의 환기방식을 적용하는 경우, 터널내 풍속조건에 따라서 온도 및 유해가스농도를 FDS프로그램에 의해서 해석하였으

며, 해석조건은 Table 2에 정리하였다.

종류환기방식을 적용하는 경우, 터널내 풍속은 화재전 차량 진행방향으로 3.3 m/s일때 화재가 발생하여 화재시 터널내 풍속은 임계풍속인 2.15 m/s로 제어하는 경우와 0 m/s로 제어하는 것으로 가정하였으며, 배기 반회류식은 종류식의 풍속조건으로 하는 경우와 터널 입출구를 Open조건으로 하고 각각에 대해서 배기구에서 균일한 풍량으로 배기가 되는 경우와 배기구 포트사이즈를 평상시 급기를 위해 조정된 상태로 배연하는 경우로 하였다. 대배기구 방식의 경우에는 터널풍속을 종류환기방식에 적용한 풍속을 적용하는 경우와 터널 입출구를 개방상태로 유지하는 경우에 대해서 검토

Table 2 환기방식별 해석조건

환기방식	화재시풍속 (입구경계조건)	배연풍량	
종류방식	3.3m/s->0m/s	임계풍속 2.15 m/s	L1
	3.3->2.15		L2
균일배기 반회류방식	3.3->0	단위 길이당 배연풍량 균일	SU1
	Open	급기방식으로 배기구size조정	SU2
	Open	단위 길이당 배연풍량 균일	SU3
선택 대배기구 방식	5.4->2.15	(화재 상하류 각 2개소 개방)	LP1
	Open		LP2

하였다.

배기 반회류식 및 선택대배기구 방식의 배연풍량은 도로터널설치지침에 제시된 식(2)로 계산하였으며, 종방향 풍속제어를 위한 V<sub>C</sub>를 3으로 하였으며, 이때 배연풍량은 264.5 m<sup>3</sup>/s이다.

$$Q_E = Q_S + V_C A_T \quad \text{식(2)}$$

### 4. 해석결과

Fig. 2는 해석조건별로 화재발생 후 720초 후에 호흡선 높이에서 연기농도를 나타낸 것이다.

종류식의 경우, 터널내 풍속을 0 m/s로 제어하는 경우(L1)와 임계풍속으로 제어하는 경우(L2)로, 터널내 풍속을 임계풍속(2.15 m/s)으로 제어하는 경우에는 연기가 일방향으로 이동하며, 터널내 풍속을 0으로 제어하는 경우에는 연기의 이동이 제한되며, 양방향으로 이동하고 있다. L2의 경우에 터널내 풍속이 존재하므로 연기농도는 풍속이 0인 경우보다 낮게 나타났다. 배기 반회류방식의 경우

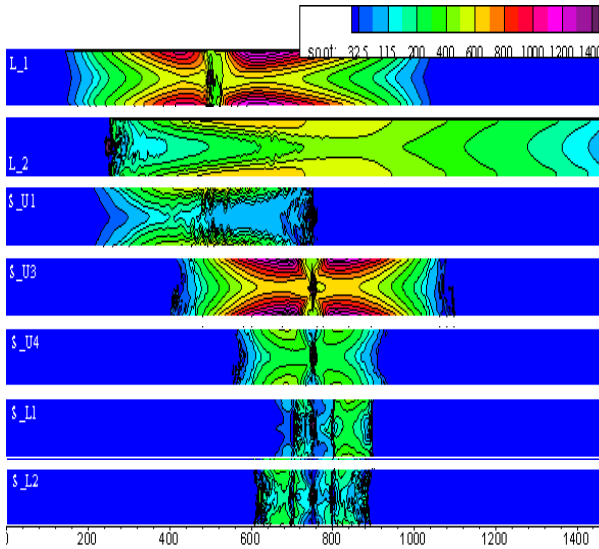


Fig.2 환기방식별 연기농도(t=720 s)

에는 배기풍량이 균일하게 되도록 조절한 경우 (SU3)가 연기의 이동거리가 가장 짧으며, SU2의 경우에는 배연이 터널의 입출구부에 집중되는 현상이 발생하여 화점에서부터 비교적 먼거리까지 연기가 이동하는 것으로 알 수 있다. 또한 선택대 배구 방식을 적용하는 경우에는 집중적으로 배연하는 배기구에서 연기의 이동을 제한할 수 있는 것으로 나타나고 있으며, 연기농도 또한 비교대상 중 가장 낮은 것으로 나타나고 있다.

### 5. FED해석 결과

Fig. 3~5는 FED 및 대피시간 해석결과를 나타낸 것으로 그림에서 각점은 대피전 대피자의 위치에서 초기대피를 시작하는 시간(●)과 대피완료시간(●) 및 대피를 완료한 상태에서 FED값(●)을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 대피 해석프로그램이 대피자를 난수를 발생하여 배치하기 때문에 해석시 약간의 차이가 발생한다. 따라서 5회의 계산을 수행하고 이를 평균한 결과를 정리하였으며, 총 대피인원은 2371명이다.

Fig. 3(a),(b)는 종류환기방식을 적용하는 경우로, Fig. 3(a)는 터널내 풍속을 0 m/s로 제한하는 경우(L1)이다. 최초의 대피를 개시하는 시간은 6초~624초에 분포하며, 대피완료시간은 961초 정도로 나타났다. 대피자의 대피속도는 0.3~1.2 m/s 사이에 분포하며, 본 프로그램에서 대피속도는 전방 대피자간의 간격, 주변의 밀도, 연기농도에 의해서 결정되도록 하였으나 대부분의 경우가 연기농도에 의해서 보행속도가 결정된다. 이 경우 화재

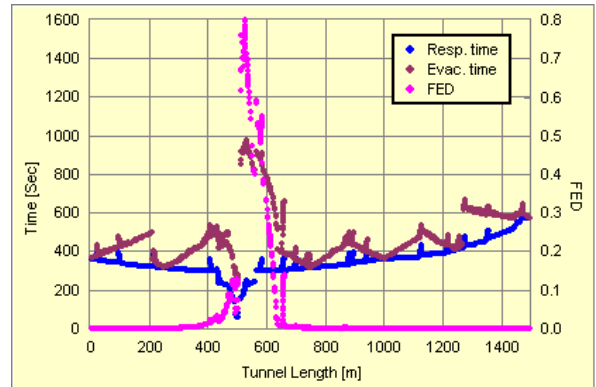


Fig.3(a) 종류환기방식 풍속을 0으로 제한하는 경우(L1)

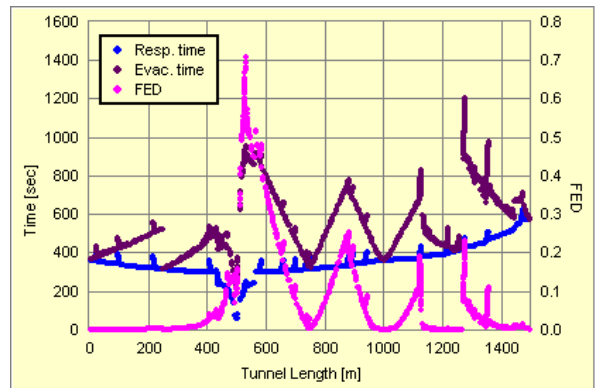


Fig.3(b) 종류환기방식 임계풍속으로 제한하는 경우(L2)

에 영향을 받아 FED값이 상승하는 범위는 화재상하류 약 150 m구간으로 나타났으며, FED의 최대값은 0.781로 나타났으며, FED에 대한 분포는 Table 3에 정리하여 나타냈다.

Table 3에 의하면 이 경우, 예상사상자는 160명으로 전체의 6.7%로 나타났다.

Fig.3(b)는 종류환기방식을 적용하는 경우에 터널내 풍속을 임계풍속으로 제한하는 경우이다.

대피시간지간은 전술한 L1의 경우와 비슷한 경향을 보이고 있으나 연기의 영향으로 최종대피자가 대피를 완료하는 시간은 1093초로 L1의 경우보다 2분이상 지연되는 것으로 나타났다. FED의 최대값은 0.707이며, 대피자에 대한 FED분포는 Table 3에 나타났다. 이 경우 예상 사망자수는 188명으로 전체에 7.9%로 나타났다.

그러나 이 경우 연기를 화재하류로 제한하여 화재하류의 대피자가 광범위한 지역에서 영향을 받는 것으로 나타나고 있으며, FED값이 0.1이상이 대피자의 수는 L1의 경우보다 약 2배에 이르는 것으로 나타나고 있다. 따라서 종류환기방식을 적용하는 터널에서 화재시 차량이 정체되어 있는 상황

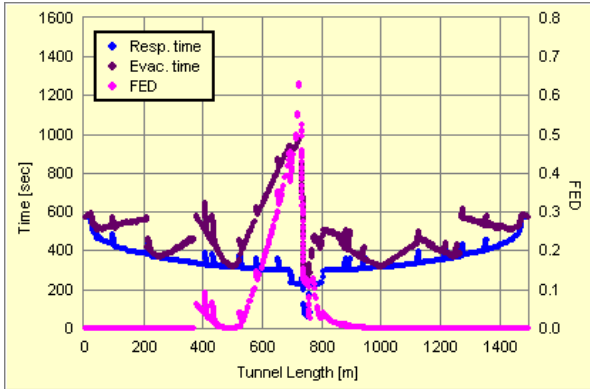


Fig.4(a) 균일배기 횡류환기방식  
(일방향기류가 존재하는 경우;SU1)

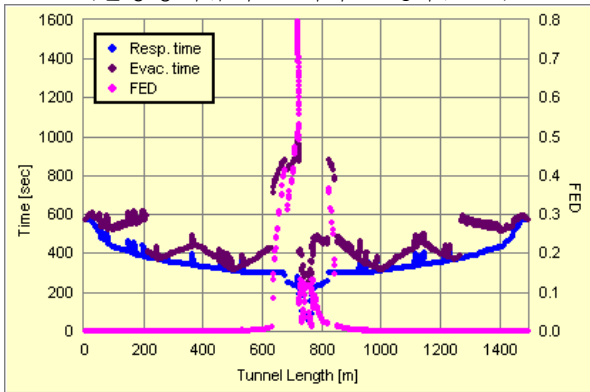


Fig.4(b) 균일배기 횡류환기방식  
(급기방식으로 배기구사이즈가 조정된 경우;SU2)

에서는 제연팬의 가동 시점에 주의하여야 할 것으로 판단된다.

Fig.4는 균일배기반횡류방식을 적용하는 터널에 대한 FED 평가를 나타낸 것으로 (a)는 SU1(화점에서 풍속이 존재하는 경우), (b)는 SU2(급기포트로 조절된 배기구를 통해 배연하는 경우), (c)는 SU3(배연풍량을 균일하게 하여 배연하는 경우)이다.

Fig.4(a)는 균일배기방식을 적용하는 경우, 화원 부근에 풍속이 존재하는 경우로 Fig.2의 SU1에 나타낸 바와 같이 일방향으로 연기가 이동하는 경우이다. 이 경우 최대 FED 값은 0.632로 나타났으며, 대피완료시간은 966초로 화재에 영향을 받는 거리는 300 m 정도로 나타나고 있다.

Fig.4(b)는 배기구 사이즈를 균일한 급기풍량을 얻을 수 있도록 조정된 상태에서 배연하는 경우로 최대 FED 값은 0.836이며, 대피완료시간은 955초로 SU1과 거의 비슷한 결과를 나타나고 있다. 또한 화재에 의해서 영향을 받는 거리는 화재 상하류 100 m 정도로 짧으나 예상되는 사망자수는 126명으로 전체에 5.3%를 차지하고 있다. 이와 같이

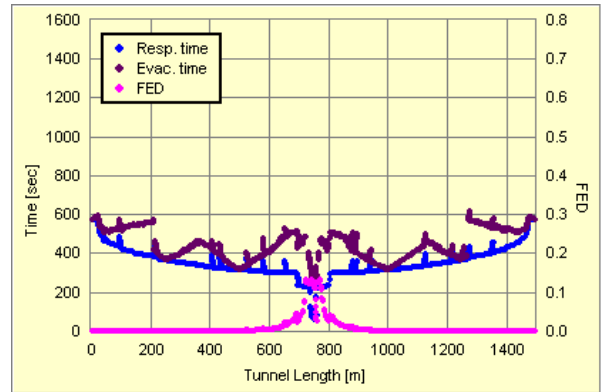


Fig.4(c) 균일배기 횡류환기방식  
(단위길이당 풍량이 균일한 경우;SU3)

Table 3 해석조건별 사상자수 예측

조건	대피 시간	0.1 이상	0.2 이상	0.3 이상	0.4 이상	0.5 이상	0.6 이상	0.7 이상	0.8 이상	사망 비율
L1	961	237	186	160	145	110	56	29	5	6.7%
L2	1093	612	330	188	142	73	16	2	0	7.9
SU1	966	320	204	141	76	29	5	0	0	5.9
SU2	955	218	160	126	61	22	12	6	1	5.3
SU3	616	70	0	0	0	0	0	0	0	0.0
LP1	619	61	0	0	0	0	0	0	0	0.0
LP2	616	71	0	0	0	0	0	0	0	0.0

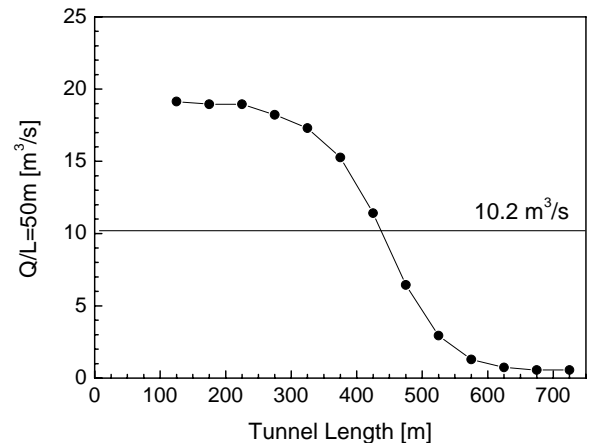


Fig. 5 급기방식으로 조정된 배기구를 통해서 배연하는 경우, 구간별(50m구간) 배연풍량 비교

예상되는 사망자수가 증가하는 것은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 배연풍량이 환기소가 설치되어 있는 터널의 입출구부에 집중되기 때문이다.

참고로 Fig.5는 ●점을 기준으로 50 m구간의 배연풍량을 나타낸 것이다. 그림에서 10.2 m³/s는 균일한 배기가 되는 경우에 50 m구간의 설계 배연풍량이다. 그러나 그림에서 알 수 있는 바와 같이 터널중앙부 750~450 m구간에서 총배연풍량이 10

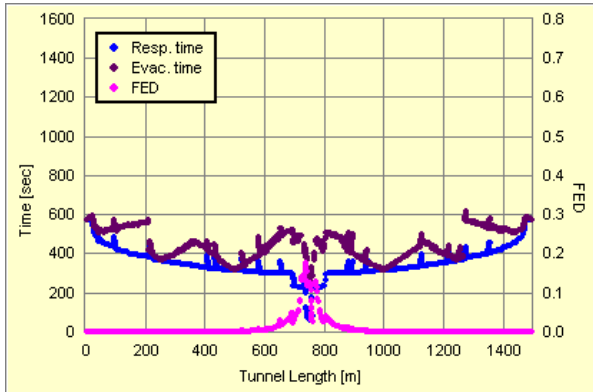


Fig. 6(a) 선택대배기구방식 적용  
(터널내 기류가 존재하는 경우 ; LP1)

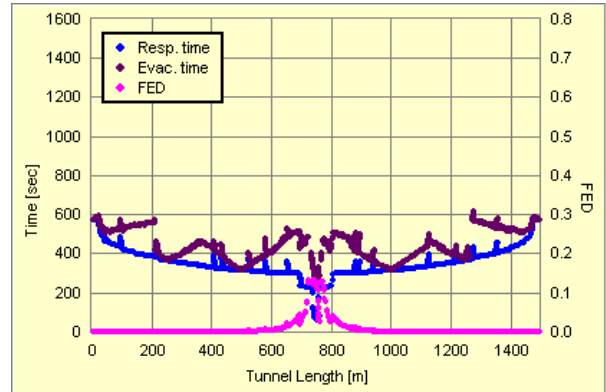


Fig.6(b) 선택대배기구 방식 적용(LP2)  
(터널내 풍속이 0 m/s인 경우)

$m^3/s$ 이하로 터널중앙부에서 배연이 거의 이루어지지 않음을 알 수 있다.

Fig.4(c)는 단위길이당 배연풍량이 균일하게 되도록 배기구사이즈를 조정하여 배연하는 경우로 Table 3에 나타난 바와 같이 FED가 0.3을 초과하는 예상사상자가 0로 나타나고 있다.

Fig. 6은 선택대배기구를 사용하는 경우에 FED 해석결과를 나타낸 것으로 그림에서 LP1, LP2모두 최초로 화점부근에 위치한 대피자의 FED값이 증대하고 있으나 최대값은 0.166정도로 아주 낮게 나타나고 있으며, 대피시간 또한 616초 정도로 가장 짧으며, SU1의 경우보다, 약 36%정도 감소하는 것으로 나타나고 있다. 또한 FED값이 0.3을 초과하는 예상사상자가 0명으로 나타나고 있다.

이상이 결과를 정리하면 정체터널에서 종류환기방식을 적용하는 경우에는 화재지점의 풍속을 0으로 하는 것이 보다 효과적이며, 급기반회류 환기방식으로 적용하는 경우에도 환기목적상 균일한 급기량을 얻을 수 있도록 포트사이즈를 조정하는 경우, 배연시 중앙부에서 배연풍량을 얻을 수 없으며, 따라서 환기효율이 저하할지라도 배연시 균일한 풍량을 얻을 수 있도록 배기구 사이즈를 조정하여 운영하여야 하며, 신설되는 터널의 경우에는 배연방식을 선택대배기구 방식으로 적용하는 것이 안전확보에 가장 효과적임을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구는 화재시 대피자가 화재의 상하류에 존재하는 정체가 심한 터널이나 대면터널에 대해 환기방식의 적용성을 검토하는 것으로 목적으로 한다. 이에 종류환기방식, 배기반회류 방식, 선택대배기구 방식을 적용하는 경우, 환기기 운전조건에

따른 화재시 연소생성물 및 온도에 대한 해석을 수행하고 해석된 결과를 이용하여 유해가스 및 열 환경에 노출되는 정도에 대한 정량적인 지표인 FED값을 해석하여, 환기방식 및 환기기 운전에 따른 안전성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 종류환기방식을 적용하는 경우에는 대피자가 하류에 존재하는 상황에서는 제연팬을 운전하는 경우 보다는 터널풍속을 0으로 하는 것이 보다 안전하다.
2. 회류환기방식을 적용하는 경우, 화재지점에서의 풍속을 0으로 하는 것이 화재안전에 효과적이며, 평상시 급기방식으로 운영하는 터널의 경우, 화재시 안전을 위해서는 급기포트를 배연시 균일한 풍량을 얻을 수 있도록 조정하여 운영하는 것이 필요하다.
3. 환기방식에 따른 사상자수를 추정된 결과, 선택대배기구 방식을 적용하는 것이 화재안전에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 2003년 건설교통부 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업(C03-01)의 “도로터널방재시스템 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 유지오, 2006, 대한설비공학회 하계발표 논문집
2. Haukur Ingason, 2005, Fire safety J., 40, 646-668.
3. R.C. Hall, 2006, Ventilation during road tunnel emergencies, Mott MacDonald project report.
4. SFPE Handbook of Fire Protection Eng. 3rd.
5. DOT/FAA/AR-95/5, Report.
6. Anders Noren, 2003, Lund Univ. Report.