

## 터널 화재 시 환기 방식에 따른 배연 특성의 수치해석 연구 A Numerical Study on Characteristics of Smoke Exhaust in Road Tunnel Fires for Different Ventilation System

김종윤<sup>†</sup> · 유지오\*

Jong-Yoon Kim<sup>†</sup> · Ji-Oh Yoo\*

<sup>†</sup>한국소방안전협회, \*신홍대학 건축설비디자인과  
(2008. 6. 18. 접수/2008. 9. 11. 채택)

### 요 약

본 연구에서는 양방향 도로 터널 내에서 화재 발생 시, 3차원 수치해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 효과적인 배연방식시스템을 도출하였다. 수치해석은 횡류방식과 반횡류방식의 환기방식에서 균일배기와 대배기의 배연방식을 각각 적용하는 경우에 대한 해석을 실시하였으며, 종류환기 방식을 적용한 경우에 대하여 연기의 이동특성의 해석을 실시하였다. 연기의 확산은 CO농도를 이용하였으며 터널 내의 풍속 및 배기구의 크기, 배기방식의 변화에 따른 배연 특성 해석을 실시하였다. 연구결과로서 양방향 도로터널에서는 횡류환기방식의 배연이 적절하며, 대배기구의 경우가 균일배기의 경우보다 효과적으로 연기의 이동을 억제하였다.

### ABSTRACT

In this study, three Dimensional CFD simulations were carried out to investigate the effective smoke extraction system in bi-directional road tunnel fires using FLUENT. Characteristics of smoke extraction system with big size extraction port or with uniform extraction port, semi-transverse system and longitudinal system for smoke extraction system were analyzed. Air velocity, port size, and operating method were used with variable. Distributions of smoke spread, CO was analyzed. As a result, the transverse ventilation system with big size port was found to be more effective than the uniform ports for bi-directional road tunnel.

**Keywords :** Bi-directional Road tunnel, Smoke extraction, Transverse, Semi-transverse, Longitudinal, CFD

## 1. 서 론

도로터널은 일반도로와는 달리 많은 위험성이 내재되어 있어 비상상황 발생 시 이용자들의 안전을 확보하기 위하여 여러 대책 및 시설을 설치하고 있다. 이중 터널 내에서 화재가 발생하는 경우 환기시스템은 방재시스템으로 전환되어 터널 내부의 제연 및 배연의 역할을 수행하게 된다.

도로터널에서의 환기 시스템은 주로 통행방식에 따라 결정되며 크게 종류환기방식과 횡류환기 방식의 두 가지로 구분할 수 있다.

종류 환기 방식은 제트팬을 이용하여 임계풍속을 공급함으로써 연기가 대피자의 반대방향으로 이동하도록

하는 방법으로 연기를 한 방향으로 제어할 수 있는 장점이 있는 반면 연기를 대피자와 분리 할 수 없는 단점을 가지고 있다. 횡류 환기 방식은 배기 덕트를 이용하여 화재 지점의 연기를 터널 바깥으로 배출하는 적극적인 방법으로 연기가 대피공간으로부터 완전히 제거된다는 장점이 있으나 연기 발생이 많은 경우 연기류의 배연이나 제어가 곤란한 단점이 있다. 따라서 일반적으로 일방통행 터널에서는 교통환기력을 유효하게 이용할 수 있는 종류 환기방식이 효과적인 것으로 알려져 있으며, 양방향 통행 터널이나 교통정체가 예상되는 도시터널의 경우에는 횡류방식이 효과적인 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 수치해석을 이용하여 양방향 통행터널 내 화재 발생 시 횡류방식과 반횡류방식의 환기방식에서 균일배기와 대배기의 배연방식을 적용하는 경

<sup>†</sup>E-mail: sweat100@hanmail.net

우에 대한 해석을 실시하고, 종류환기 방식을 적용한 경우에 대하여 연기의 이동특성의 해석을 실시함으로써 최적의 배연방식을 도출하여 실제 터널 설계에 필요한 기초 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식

터널의 연장은 일반적으로 수백 m에서 수 km에 달하므로, 터널 전체를 CFD 3-D 모델링 하는 것은 중형비 등 비현실적인 격자에 대한 요구로 인해 시스템의 한계 및 해석 시간상의 문제 등 어려움을 가지고 있기 때문에 일반적으로 국부적인 구간만을 모델링하고 있으나, CFD 해석은 터널 설계의 신뢰성 향상을 위한 검증 도구로써 중요한 역할을 담당하고 있다. 본 연구에서는 상용 코드인 FLUENT를 이용하여 화재 발생에 따른 열 및 물질 이동현상을 해석하였으며 이 때 고려된 지배방정식<sup>1)</sup>은 다음과 같다.

· 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (1)$$

· 운동량 방정식

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

· 에너지 방정식

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} (\rho E + p)) = -\nabla \cdot (\sum_j h_j J_j) + S_h \quad (3)$$

· 화학종 방정식

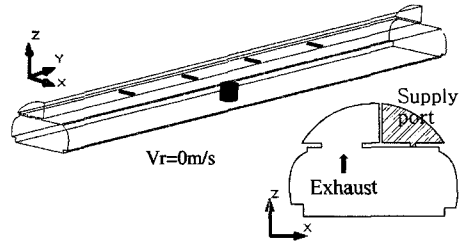
$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

· 난류 운동 에너지 방정식

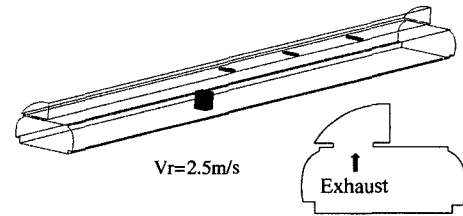
$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

· 난류 운동량 소멸 방정식

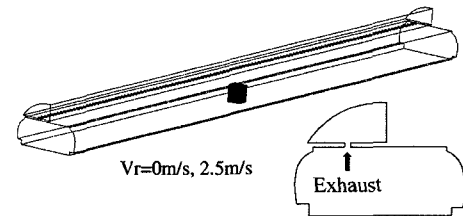
$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\rho} + S_\epsilon \quad (6)$$



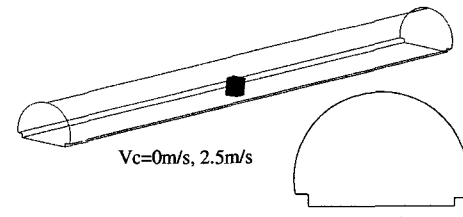
(a) Transverse ventilation system with oversized exhaust ports (Case 1 : Case1.1 and Case 1.2)



(b) Transverse ventilation system with balanced exhaust ports (Case2)



(c) Semi-Transverse ventilation system with balanced exhaust ports (Case3)



(d) Longitudinal ventilation system (Case4)

**Figure 1.** The Schematic of tunnel model for different ventilation system.

### 2.2 해석모델 및 조건

본 연구에서는 양방향통행 터널에서 배연방식의 적용성을 검토하기 위해서 황류식과 반황류식, 종류환기

방식에 대해 수치해석을 실시하였다. Figure 1에 해석 모델의 개요도를 나타내었다. 그림에 나타나는 바와 같이 횡류환기방식은 대배기구방식(Case 1)과 균일배기방식(Case 2)을 적용하는 경우로 구분하였으며, 반횡류환기방식(Case 3)은 균일 배기 방식의 경우에 대해서만 해석을 하였다. 또 종류식 환기방식(Case 4)은 배기구가 존재하지 않으며 터널을 배연통로로 풍속을 공급하는 경우에 대하여 해석을 실시하였다.

터널내 풍속은 Case 1~Case 3에서 터널 내 풍속이 존재하지 않는 경우(0 m/s)와 자연풍(2.5 m/s)이 존재하는 경우에 대하여 해석 하였으며, 이 때 배연 풍량은 188 m<sup>3</sup>/s로 설정하였다. Case 1.1의 횡류환기 대배기구 방식에서 자연풍이 존재하는 경우는 화재 하류 방향의 배기구에서만 배연되는 것으로 가정 하였다. Case 4의 종류식 환기방식의 경우에서는 터널 내 풍속이 존재하지 않는 경우(0 m/s)와 연기의 제연 풍속인 임계풍속을 공급하였을 경우(2.6 m/s)에 대하여 해석을 실시하였다.

해석방식은 비정상상태, Standard k-ε 모델, Species transport 모델을 사용하였으며, 화재강도는 PIARC에서 제시한 화재시나리오 중 트럭 1대의 화재에 해당하는

30MW로 가정하였다. 또한 NFPA92b<sup>3)</sup>의 t-square 화재 성장곡선을 이용하여 화재 발생 6분후 최대가 되도록 설정 하였으며 이때 CO농도(100 ppm 기준)의 확산과 연기의 확산이 동일하다고 가정하여 연기의 확산을 판단하였다. Table 1 및 Table 2에 본 연구에 대한 해석 모델의 제원과 실험 조건에 대하여 나타내었다.

### 3. 수치해석 결과

#### 3.1 배연방식별 연기이동 거리

##### 3.1.1 풍속이 존재하지 않는 경우 (0 m/s)

Figure 2와 Figure 3에 각 배연 방식별 화재상류와 화재하류방향으로의 시간에 따른 연기이동거리를 나타내었다. 그림에 나타나는 바와 같이 터널의 종단구배가 화재상류방향으로 1.27%이기 때문에 부력에 의해서 연기가 화재상류방향으로 이동이 증대하고 있음을 알 수 있다. Figure 2에서 화재상류방향으로 연기의 이

Table 1. Specification of simulation model

터널 단면적(m <sup>2</sup> )		71.96 m <sup>2</sup>
대표직경		8.58 m
터널 해석 구간 거리		600 m
배연 풍량		188 m <sup>3</sup> /s
터널 구배		1.27%
배기구 크기 및 간격	균일배기구 (Case 2,3)	0.12 m <sup>2</sup> (0.3 × 0.4 m, 5 m 간격)
	대배기구 (Case 1)	12 m <sup>2</sup> (3 × 4 m, 100 m 간격)

Table 2. Case of simulation

Case	풍속	배기구 크기	비고
Case 1.1	0 m/s	12 m <sup>2</sup> (3 × 4 m)	대배기
	2.5 m/s		
Case 1.2	0 m/s	9 m <sup>2</sup> (3 × 3 m)	대배기
	2.5 m/s		
Case 2	0 m/s	0.12 m <sup>2</sup> (0.3 × 0.4 m)	균일배기
	2.5 m/s		
Case 3	0 m/s	0.12 m <sup>2</sup> (0.3 × 0.4 m)	반횡류식
	2.5 m/s		
Case 4	0 m/s	-	종류식
	2.6 m/s		

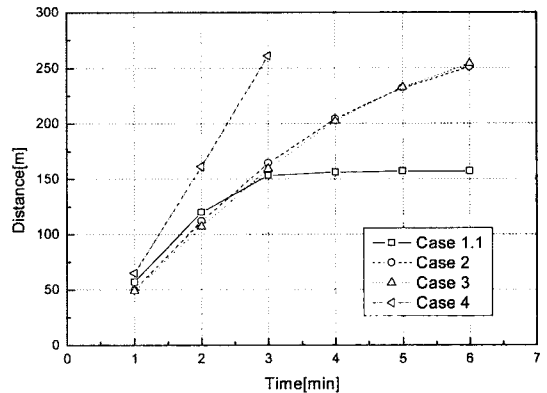


Figure 2. Fire upstream diffused distance according to elapsed time.

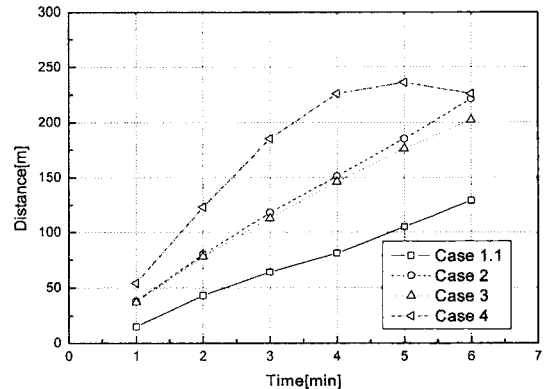


Figure 3. Fire downstream diffused distance according to elapsed time.

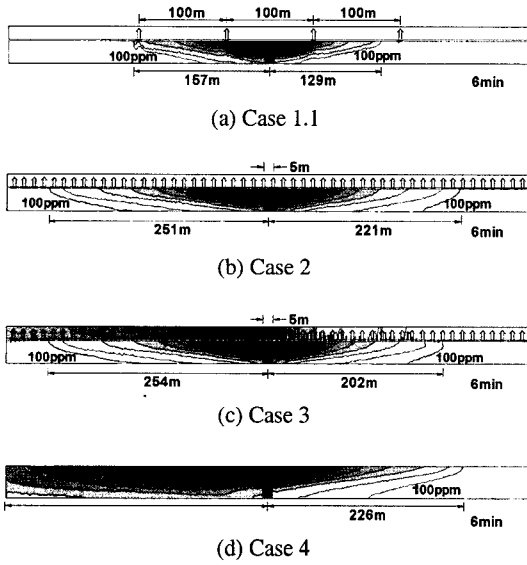


Figure 4. CO distribution of different ventilation system tunnel ( $v=0$  m/s, 6 min).

동거리는 종류환기방식의 경우에는 화재 발생 후 3분 이내에 250 m이상, 반횡류식의 경우에는 화재발생 6분 후 254 m정도 이동하며, 횡류식 균일배기구를 설치한 경우에는 반횡류식과 유사한 특성을 보이며, 대배기구를 적용하는 경우에는 화재발생 6분후 확산거리가 157 m로 나타나고 있다. 따라서 대배기구를 적용하는 경우가 연기의 이동을 가장 효과적으로 제한할 수 있는 것으로 나타났다.

3.1.2 풍속이 존재하는 경우(2.5 m/s)

다음은 터널 내에 자연풍이 존재하는 경우에 연기의 이동 특성을 검토하였다. 환기방식에 따른 터널내 적용풍속은 종류환기방식의 경우 Kennedy식으로 계산한 임계풍속<sup>2)</sup>(2.6 m/s)을 터널내 풍속으로 하였으며, 횡류환기방식의 경우에는 실제 자연풍 풍속(2.5 m/s)을 적용하였다.

Figure 5와 Figure 6은 환기방식에 따른 화재하류로의 연기이동거리를 나타낸 것이다. 종류환기방식, 반횡류 환기방식, 횡류환기 균일배기방식을 적용하는 경우 화재 발생 후 3분 이내에 화재연기가 250 m이상 이동하며, 횡류환기 대배기구를 설치한 경우에는 화재발생 6분후 확산거리가 145 m로 가장 짧게 나타났으며, 대배기구 이후로 연기확산이 제한되는 것으로 나타났다. 따라서 터널내 자연풍이 존재하는 조건에서도 횡류환기 대배기구 방식이 배연에 가장 효과적임을 알 수 있다.

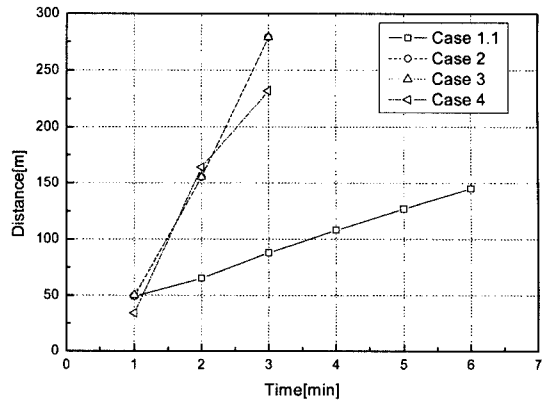


Figure 5. Fire downstream diffused distance according to elapsed time.

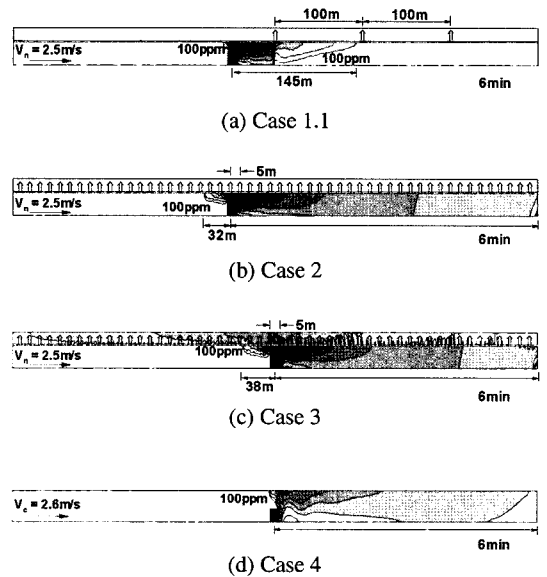


Figure 6. CO distribution of different ventilation system tunnel ( $v \neq 0$  m/s, 6 min).

3.2 배기구 크기별 연기이동거리

양방향 통행터널의 횡류환기 방식에서 배기구의 크기와 설치간격에 대한 영향을 알아보기 위하여 배기구 크기의 변화에 따른 배연특성에 관한 수치해석을 실시하였다.

해석모델은 대배기구방식을 적용하는 경우에는 배기구 간격을 100m로 하여 배기구의 크기를  $3 \times 4$  m (Case 1.1)와  $3 \times 3$  m (Case 1.2)로 하였으며, 화재지점 부근 상·하류 방향으로 각각 2개씩 개방하는 것으로 하였으며, 균일배기 방식의 경우에는  $0.3 \times 0.4$  m 크기 (Case 2)의 배기구를 5 m 간격으로 설치하는 3가지 조건에

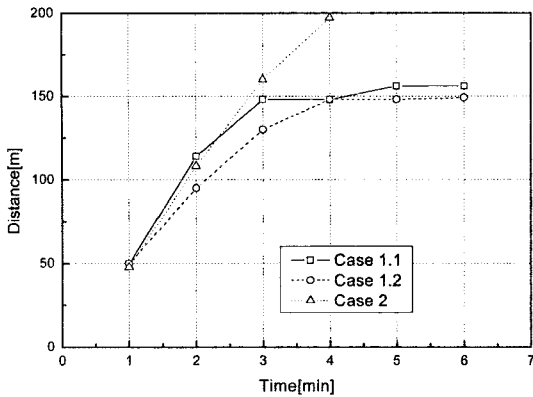


Figure 7. Fire upstream diffused distance according to elapsed time.

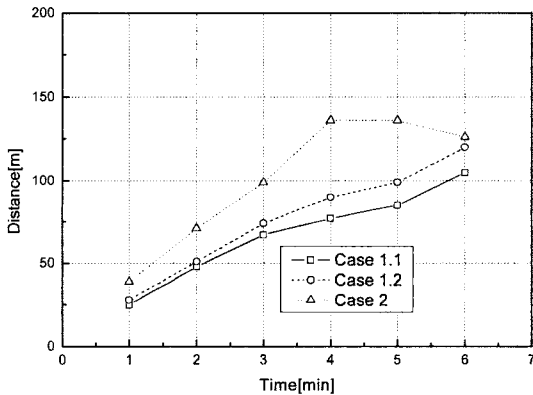


Figure 8. Fire downstream diffused distance according to elapsed time.

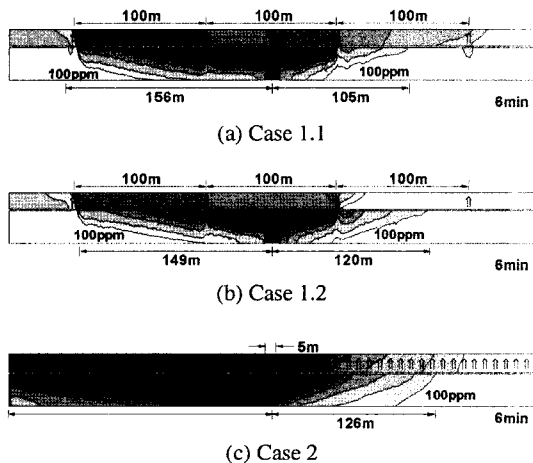


Figure 9. CO distribution of transverse ventilation system tunnel at 6 minutes.

대하여 해석을 실시하였다.

해석 결과로서 Figure 7~Figure 9에 화재 상류와 하류방향으로의 연기이동거리를 나타내었다. 그림에 나타나는 바와 같이 균일배기방식을 적용하는 경우(Case 2), 연기는 화재발생 4분 후 상류방향으로는 200m 이상, 하류방향으로는 화재 발생 6분 후 126m 정도 이동한다. 대배기구 방식을 적용하는 경우의 연기이동은 Case 1.1의 경우에는 화재 발생 6분 후 148m, Case 1.2의 경우에는 130m까지 이동하며, 확산특성은 유사하게 나타났다.

3.3 횡류환기 대배기구 운영방법에 대한 영향

횡류 대배기구 환기방식을 적용하는 경우, 배기구의 개방조건이 배연특성에 미치는 영향에 대하여 수치해석을 실시하였다. 터널내 풍속이 0 m/s인 경우와 자연풍의 영향이 있는 경우(2.5 m/s)에 대해서 고려하였으며 이 때, 대배기구의 개방 포트수를 변화 시키며 해석을 실시하였다.

3.3.1 풍속이 존재하지 않는 경우(0 m/s)

터널에 자연환기력이 없는 환경에서 화재가 발생하

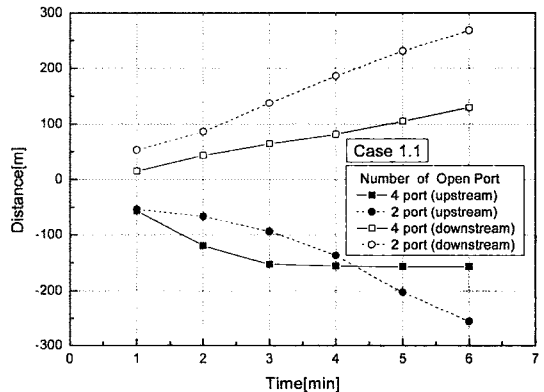


Figure 10. Diffused distance according to elapsed time.

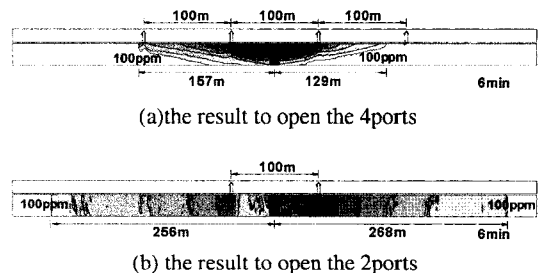


Figure 11. CO distribution of oversized exhaust ports tunnel ( $v=0$  m/s, 6 min).

는 경우, Case 1.1에 대하여 화재지점에서 상·하류 방향으로 각각 2개 배기구를 개방하여 배연 운전하는 경우(a)와 각각 1개의 배기구를 개방하는 경우(b)에 대해서 검토하였다.

Figure 10과 Figure 11은 각각의 연기의 이동거리와 연기의 이동특성을 나타낸 것으로 상하류 1개만 개방하는 경우(b), 연기가 배기구를 지나 상하류 방향으로 이동하게 되며, 각각 2개소를 개방하는 경우(a)에는 6분이 경과하여도 연기확산 거리가 157 m로 개방된 배기구 이후로 연기의 확산이 이루어지지 않음을 알 수 있다.

3.3.2 풍속이 존재하는 경우 (2.5 m/s)

터널에 자연환기력에 의해서 기류가 존재하는 경우 배기구의 개방조건이 배연특성에 미치는 영향을 검토하기 위해서 Case 1.1에 대하여 화재지점에서 기류의 하류방향으로 3개의 배기구를 개방하는 경우(a)와 2개의 배기구를 개방하는 경우(b)에 대해서 해석하였다.

Figure 12와 Figure 13에서 나타나는 바와 같이 배기

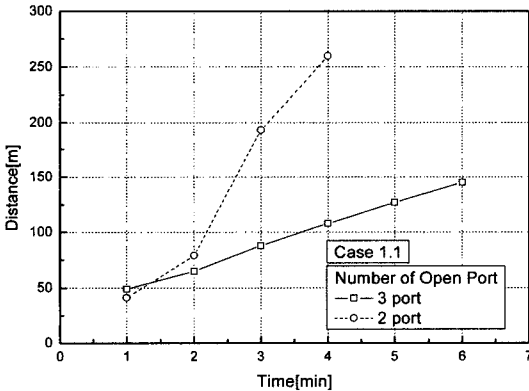


Figure 12. Fire downstream diffused distance according to elapsed time.

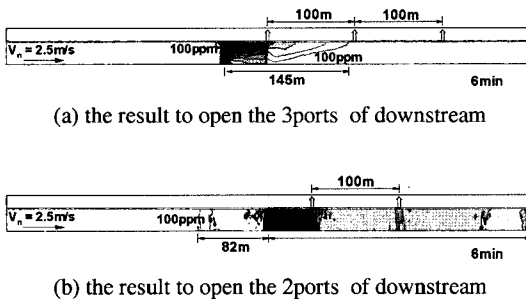


Figure 13. CO distribution of oversized exhaust ports tunnel (v=2.5 m/s, 6 min).

구를 2개만 개방하는 경우(b), 배기구를 통한 연기의 배연이 충분하지 못하여 연기의 확산이 하류방향으로 지속되며, 배기구를 3개 개방(a)하는 경우, 6분이 경과하여도 연기이동거리가 145 m로 나타났다. 따라서 일 방향 기류가 존재하는 경우에는 연기의 확산을 억제하기 위해서 기류방향으로 최소 3개소 이상의 배기구의 개방이 필요한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 양방향통행 터널에서 가장 효과적인 배연방식을 검토하기 위해서 다양한 환기 방식에 대하여 수치해석을 실시하였다. 특히 횡류환기 방식 중 배기방식(균일배기방식과 대배기구방식), 배기구의 크기, 배기구의 개방조건이 연기의 이동거리에 미치는 영향을 3차원 CFD를 이용하여 검토하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 횡류식 균일배기 방식과 반횡류식은 유사한 배연 특성을 보이며, 횡류환기 대배기구방식을 적용하는 경우 가장 효과적으로 연기의 이동을 억제하였다.
2. 3×3 m 크기와 3×4 m 크기의 대배기구를 사용한 경우, 연기의 확산을 효과적으로 억제하였으며, 0.3×0.4 m 크기의 균일배기구를 사용한 경우는 연기확산의 억제가 곤란하였다.
3. 배연시 배기구의 운영방법에 대해 검토한 결과, 터널내 자연풍이 존재하지 않을 경우, 화재 전·후방으로 각각 2개소의 배기구를 개방하고 자연풍이 존재할 때 화재 후방으로 3개의 배기구를 개방하여야 연기 확산을 효과적으로 제어할 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Fluent 6.1 User's Guide, Volume 2, (2003).
2. O. Vauquelin and D. Telle, “Smoke control in tunnel fires - should we talk about critical velocity or critical mass flow rate”, 10th Int. Sym. on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.97-pp.103, BHRGroup 2000 Vehicle tunnel(2000).
3. James A. Milke, “NFPA 92B, Guide For Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large

- Areas, 2000 Edition”, NFPA, pp.47-48(2000).
4. O. Vauquelin, O. Mégret, “Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel”, Fire Safety Journal, 37, pp.525-533(2003).
  5. 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, “도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 6, No.2, pp.129-140(2004).