

**B-06**

## **반횡류식 환기설비를 활용한 화재시 터널방재연구**

이동호, 김치경, 유지오\*, 신현준\*\*

인천대학교 안전공학과, 신홍대학 건축설비과\*, 건설기술연구원\*\*

### **A study for disaster prevention of tunnel fire by using semi-transverse ventilation utility**

#### **1. 서론**

도로터널의 증가와 함께 환기 뿐만 아니라 화재시 안전성 확보를 위한 각종 방재시설에 대한 우려와 관심이 증가하고 있는 실정이다. 지하공간이나 터널에서 화재시 인명의 초기대피환경을 확보하기 위한 가장 효과적인 수단으로 제연설비를 들 수 있다.

본 연구는 현재 도로터널의 대표적인 환기방식인 균일 배기 반횡류 환기방식에 대한 최적배연량 산정을 위한 기초 연구로서 각국의 기준상에 제시되어 있는 반횡류 방식에서의 배연풍량에 대한 조사연구를 수행하고 수치시뮬레이션을 통해서 적정배연풍량에 대한 기초자료를 도출함을 목표로 한다.

#### **2. 도로터널의 배연방식**

도로터널의 제연방식은 연기를 화재공간에서 완전히 제거하는 배연(smoke exhaust)과 대피로 반대방향으로 기류를 형성하여 대피공간을 확보할 수 있도록 제어하는 제연(smoke control)개념으로 구분하며 전자를 횡류식(반횡류식), 후자는 종류식 환기시스템이라 한다.

일반적으로 횡류환기방식은 화재지점의 연기를 직접 배연함으로서 화재지점으로부터 연기를 제거하는 적극적인 수단이나 연기류의 방향성에 대한 제어가 곤란한 단점이 있다. 종류환기방식의 경우는 화재지역으로부터 직접적인 배연은 불가능하나 승객의 원활한 대피환경을 구축하기 위해 승객의 대피방향과 반대방향으로 연기류 방향 유도함으로서 연기를 효과적으로 제어할 수 있는 시스템이다.

따라서 종류환기방식은 대피자가 화재지점을 기준으로 한쪽방향(화재상류지점)에만 존재할 가능성이 높은 정체가 발생하지 않는 일방통행 터널에서 효과적으로 제연을 수행할 수 있는 경제적인 시스템이나, 대면통행 터널이나 차량정체가 빈번하여 화재지점의 상하류에 대피자가 존재할 가능성이 많은 터널에서는 제연방향의 선정이 불가능하여 이와 같은 터널의 적용은 부적절하다.

반횡류 환기방식의 경우, 터널내에 신선공기를 급기하거나 배기를 수행하기 위한 급배

기구의 개폐가 불가능한 경우와 급·배기구에 개폐를 위한 댐퍼를 설치하여 선택적으로 배기할수 있도록 하는 방식으로 구분된다.

본 연구에서는 전자를 균일배기 방식, 후자를 선택 대배기구 방식으로 구분한다. Fig.1은 균일배기 방식의 반횡류 방식을 Fig.2는 대배기구 적용 반횡류방식의 개념도를 나타낸다. 본 연구에서는 전술한 두가지 방식의 반횡류방식의 배연풍량에 대한 조사연구를 수행하고 이를 기초로 하여 적정배연량 산정을 위한 수치해석을 수행하였다.

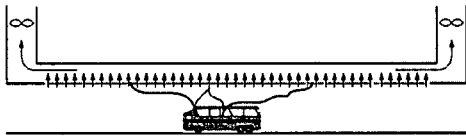


Fig.1 횡류식 환기의 균일배기 방식

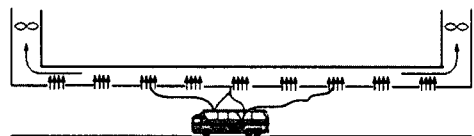


Fig.2 횡류식 환기의 대배기구 방식

### 3. 수치시물레이션 검토

#### 3.1 수치시물레이션 조건

횡류환기방식의 연기거동에 대한 검토 및 적정 배연풍량 산정을 위해서 본 보고서에서는 Table2에 제시한 터널모델을 대상으로 FDS11(Fire Dynamics Simulation)수치시물레이션을 수행하였다.

Table1. 터널모델 제원

터널길이	단면적	터널높이	배기구간격
1000 m	내공 단면적 : 60.8 차도 단면적 : 50.2 덕트 단면적 : 10.63	5.0 m	10 m간격 단면적: 1m <sup>2</sup> ( 90개소)

Table2. Vr에 따른 배연풍량 및 배기구 면풍속

V <sub>r</sub> (m/s)	Q <sub>E</sub> (m <sup>3</sup> /s)	배기구 면풍속(m/s)
		균일배기방식적용 (단면적 : 1.0 m <sup>2</sup> )
0	80.000	0.889
0.5	105.113	1.168
1	130.226	1.447
1.5	155.339	1.726
2	180.452	2.005
2.5	205.565	2.284
3	230.678	2.563
3.5	255.791	2.842

본 연구에서는 연기 발생량 ( $Q_s$ )은 80 m<sup>3</sup>/s로 하여 식(1)로 배연풍량 정의하였으며, 부가적인 풍량을 고려하기 위한  $V_r$ 은 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m/s의 6조건으로 고려하였다.

$$Q_E = A_r \cdot V_r + Q_s \quad \text{식(1)}$$

배기구에서  $V_r$ 에 따른 배연풍량 및 배기구 면풍속은 Table3에 나타냈으며 배기구 단면적은 1.0 m<sup>2</sup>로 설정하였다. 배기구의 경계조건은 터널연장 전체의 배기구를 개방된 상태로 설정하였다. 화재강도는 20 MW로 하였으며, 이 경우 화재가 Flash over에 도달하는 시간은 4분으로 하였다.

### 3.2 시뮬레이션 결과

Fig.3 및 Fig.4는 배연을 수행하지 않는 경우, 시간에 따른 연기의 확산특성을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 가시도에 영향을 미치는 연기농도의 한계값을 반사체의 경우에는 65 mg/m<sup>3</sup>, 비반사체의 경우에는 115 mg/m<sup>3</sup>로 하여 검토하였다.

Fig.3은 터널내 풍속이 0 m/s인 경우로 연기는 화재지점을 기준으로 하여 양방향으로 대칭현상을 이루며 확산하게 되며, 확산속도는 시간이 증가하면 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 화재발생 6분후 연기의 확산거리는 266.7 m로 연기의 평균확산속도는 1.1 m/s정도에 이르는 것으로 나타나고 있다.

일반적인 대피시뮬레이션(Simulex) 결과에 의하면 피난연락경의 간격이 250 m인 경우에도 도로터널에서 대피가 완료되는 시간은 약 5분 정도로 보고되고 있으며, 본 연구의 시뮬레이션 결과에 의하면 5분 이때 연기의 확산거리는 233 m로 나타났다.

따라서 배기반회류식 환기방식을 적용하는 경우, 터널내 풍속을 0 m/s로 유지된다면 배연을 하지 않아도 안전한 대피환경을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig.4는 터널내 풍속이 2.5 m/s인 경우에 시간에 따른 연기의 전파특성을 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 비교적 작은 풍속이지만 터널내 풍속이 존재하게 되면 연기가 기류방향으로 확산되어 약 90초 정도가 경과하면 연기는 250 m까지 확산되는 것을 알 수 있다. 또한, 연기층의 높이도 빠른 속도로 강하하기 때문에 이 시점부터 터널내 대피자는 연기에 영향을 받게 된다.

도로터널에서는 대면통행 방식의 터널일지라도 상하행 교통량의 불균형으로 인한 교통에 의한 피스톤효과 및 자연풍의 영향으로 인해서 터널내 풍속이 상시 존재하게 되므로 터널내 풍속이 존재하는 경우에 안전성을 검토할 필요가 있으며, 초기대피의 환경확보를 위해서는 반드시 배연이 필요함을 알 수 있다.

Fig.5는 균일배기방식을 적용하는 경우에 배기풍량에 따른 연기의 확산특성을 나타낸 것으로 Fig.5(a)는  $V_r=0.0$  m/s인 경우이다. 즉, 배연풍량을 연기의 발생량에 해당하는 80 m<sup>3</sup>/s를 적용한 경우이며, (b)와 (c)는 각각 130 m<sup>3</sup>/s, 180 m<sup>3</sup>/s를 적용한 경우이다. 그림에서 배연풍량이 증가할 수록 연기의 확산거리는 감소하고 있으며, 배연풍량을 연기발생량 이상으로 하면 연기의 확산거리를 200 m 이내로 제한할 수 있는 것으로 예측된다. 또한

Fig.5(d)는 배연풍량에 따른 연기의 확산거리를 정리하여 나타낸 것으로 배연풍량을 205 m<sup>3</sup>/s( $V_r=2.5$  m/s 적용)로 하면 연기의 확산거리는 배연을 수행하지 않는 경우보다 1/2로 감소하는 것으로 나타나고 있다. 배연풍량이 80 m<sup>3</sup>/s인 경우, 5분후의 연기 확산거리는 183 m정도로 배연을 하지 않는 경우보다 72%수준으로 감소한다. 따라서, 균일배기방식을 적용하는 경우, 터널내 풍속을 0 m/s로 유지하는 경우에는 배연풍량이 연기발생량과 동일한 조건하에서는 충분한 대피시간이 확보할수 있을 것으로 예측된다.

Fig.6(a),(b),(c)는 터널내 풍속을 2.5 m/s로 가정하여 배연풍량에 따른 연기의 확산특성을 나타낸 것으로 각각 206(  $Q_E=80 + 2.5 Ar$ ), 230(  $Q_E=80 + 3.0 Ar$ ), 256  $Q_E=80 + 3.5 Ar$ ) m<sup>3</sup>/s를 적용한 경우이다. 이상의 결과로부터 균일배기 방식을 적용하는 경우, 터널내 풍속을 0 m/s으로 가정하는 경우에 배연풍량이 연기발생량 이상이면 대피에 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 터널내 풍속을 2.5 m/s정도로 가정하는 경우에 배연풍량은 연기발생량보다 상당한 증대가 요구된다.

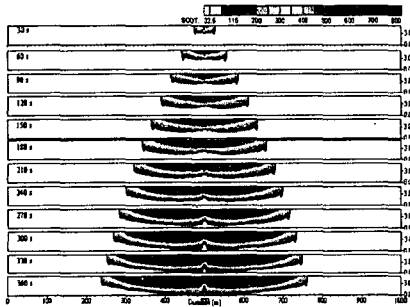


Fig. 3. 연기의 확산특성  
(배연하지 않는 경우, 터널내 풍속 0 m/s)

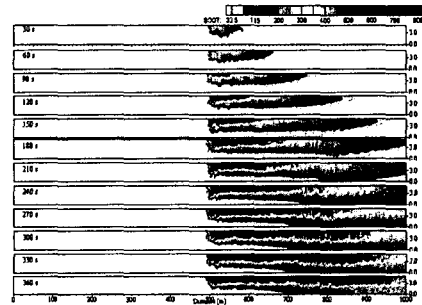


Fig. 4. 연기의 확산 특성  
(배연하지 않는 경우, 터널내 풍속 2.5 m/s)

터널내 풍속이 2.5 m/s인 경우, 배연풍량을 206(  $Q_E=80 + 2.5 Ar$ )을 적용하면 약 180초가 경과되면 연기 확산거리는 250 m에 도달하는 것으로 예측되어 현재 방재시설 설계지침을 기준(대피시간 6분, 250 m간격)으로 하여 피난연락갱을 설치한다면 안전한 대피환경을 확보하는 것은 불가능한 것으로 판단된다. 이 경우, 화재가 완전히 성장한 240 초 이후 연기의 확산거리는 거의 변하지 않는 경향을 나타내고 있는데 이는 240 초 이후에 정상상태(steady state condition)에 도달하고 있음을 의미하는 결과이다.

Fig.6 (b)는 배연풍량이 231(  $Q_E=80 + 3.0 Ar$ )인 경우로 배연풍량을 연기발생량보다 2.9 배 정도로 증가시킨 경우이다. 이 경우, 240초(4분)이후에 연기의 확산거리는 227 m정도로 나타났다. 따라서 이 경우 피난연락갱 간격을 250 m로 설정시 대피시간이 5분 정도라는 점을 감안하면 대피에 충분한 시간확보가 불가능하게 된다.[Fig.4(d)참조]

Fig.6(c)는 배연풍량이 256(  $Q_E=80 + 3.5 Ar$ )인 경우로 연기의 확산이 160 m정도에서 제한되고 있음을 알 수 있다. 이 경우에도 240 초 이후에 연기의 확산거리가 거의 증가하지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 터널내 풍속을 2.5 m/s로 가정하는 경우, 배연풍량을

$Q_E=80 + 3.5 \text{ Ar}$ 로 설정하면 연기의 확산거리는 250 m이내로 제한할 수 있을 것으로 예측된다. [Fig.6(d)참조] 이상의 결과로부터 균일배기 방식을 적용하는 경우, 터널내 풍속을 0 m/s으로 가정하는 경우에 배연풍량이 연기발생량 이상이면 대피에 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 터널내 풍속을 2.5 m/s정도로 가정하는 경우에 배연풍량은 연기발생량보다 상당한 증대가 요구된다. 본 연구 결과에서는 배연풍량을 추가적인 풍량을 고려하여  $Q_E= Q_s + V_r \cdot A_r$ 로 계산하는 경우,  $V_r=3.0 \text{ m/s}$ 이상으로 설정되어야 연기의 확산거리를 250 m이하로 제한할 수 있다.

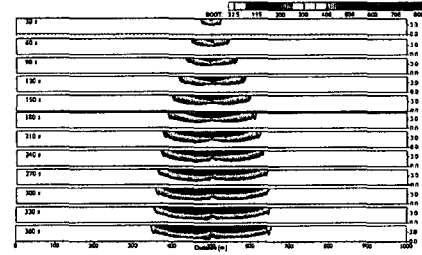
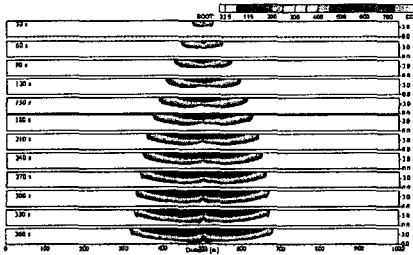


Fig.5(a) 터널내 풍속이 0인 경우 시간에 따른 연기의 확산특성 (균일배기방식  $Q_E=80+0.0 \text{ Ar}$ )  
 Fig.5(b) 터널내 풍속이 0인 경우 시간에 따른 연기의 확산특성 (균일배기방식  $Q_E=80+1.0 \text{ Ar}$ )

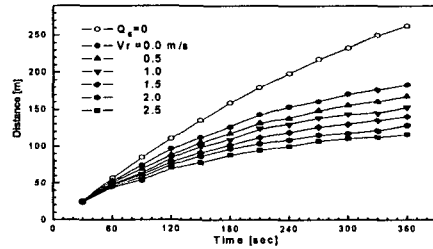
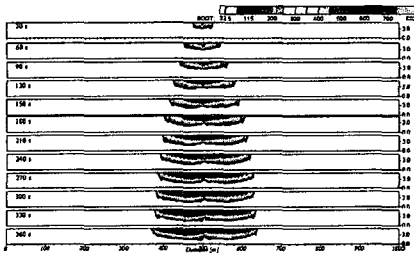


Fig.5(c) 터널내 풍속이 0인 경우 시간에 따른 연기의 확산특성 (균일배기방식  $Q_E=80+2.0 \text{ Ar}$ )  
 Fig.5(d) 배연풍량에 따른 연기의 확산거리

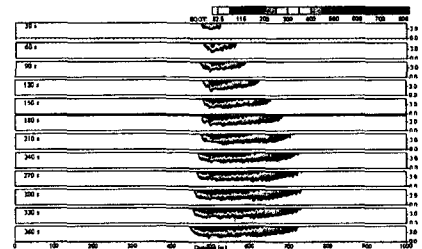
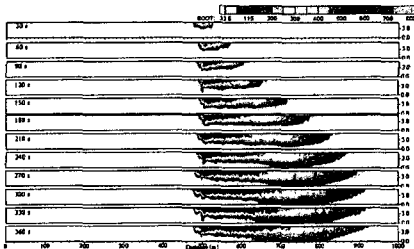


Fig.6(a) 터널내 풍속을 2.5 m/s인 경우 연기의 확산특성 ( $Q_E=80+2.5\text{Ar}$ , 터널내 풍속 2.5 m/s)  
 Fig.6(b) 터널내 풍속이 2.5 m/s인 경우 연기의 확산특성 ( $Q_E=80+3.0\text{Ar}$ , 터널내 풍속 : 2.5 m/s)

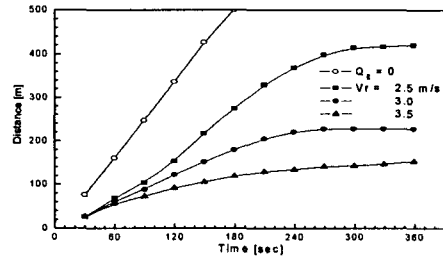
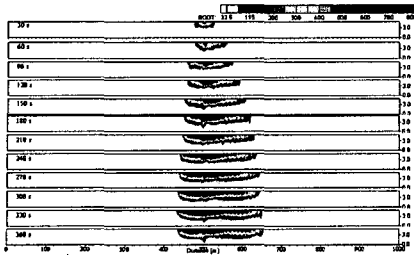


Fig.6.(c) 터널내 풍속이 2.5 m/s인 경우 Fig.6.(d) 터널내 풍속이 2.5 m/s일때 배연풍 양에 따른 연기의 확산거리  
 연기의 확산특성  
 ( $Q_E=80+3.5Ar$ , 터널내 풍속 : 2.5 m/s)

#### 4. 결론

본 연구에서는 반환류 방식의 도로터널에서 수치시뮬레이션을 통해 최적배연량 산정을 위한 연구를 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 터널내 풍속을 0 m/s로 가정할 때 배연풍량을 연기발생량으로 하는 경우, 6분간의 연기의 확산거리는 250 m 정도로 나타났다.
2. 터널내 풍속을 2.5 m/s로 가정하는 경우에는 배연풍량을  $231 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_E=80+3.0Ar$ )로 할때 연기의 확산거리를 250 m 이내로 제한할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. National Fire Protection Association, "NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways", 2001 Ed, NFPA, USA, 2000.
2. Forschungsgesellschaft für Strassenund Verkehrswesen, "Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von strabenTunneln (RABT)", Germany, 2002.
3. Ministere de L'Interieur, "Circulaire Interministerielle No 2000-82 du 30 Novembre 2000, Relative à la Réglementation de la Circulation des Véhicules Transportant des Marchandises Dangereuses dans les Tunnels Routiers du Réseau National", France, 2000.
4. 9. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, "RVS 9.286 Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Funkeinrichtungen, Bauliche Anlagen", Austria, 2002.
5. 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.
6. O. Vauquelin, et.al., "Smoke extration experiments in case of fire in a tunnel.", Fire

- Safety Journal, 37, pp. 525-533, 2003.
7. 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, “도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 129-140, 2004.
  8. Alan Weatherill, "New Mont Blanc tunnel ventilation systems,", Tunnel Management International, Vol. 6, No. 1, 2003.
  9. B. Bettelini, A. Henke, "Upgrading the Ventilation of the Gotthard road tunnel", 11th Int. Sym. on the Aero. and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.29-45, BHRGroup, 2003.