

횡류식 대배기구 방식을 적용한 도로터널에서 화재시 최적배연풍량 선정에 관한 연구

유지오 · 윤성옥* · 이동호†**

신흥대학 건축설비과 · *GS건설 · **인천대학교 안전공학과
(2005. 8. 31. 접수 / 2006. 8. 14. 채택)

A Study of Smoke Exhaust Rate for the Transverse Ventilation with Oversized Exhaust Ports in Road Tunnel

Yoo jioh · Sungwook Yoon* · Dong Ho Rie†**

Department of Building Mechanical Engineering, Shinheung college

*GS Engineering & Construction

**Department of Safety Engineering, University of Incheon

(Received August 31, 2005 / Accepted August 14, 2006)

Abstract : Recently, the application of transverse ventilation system with oversized exhaust ports has been increased in bidirectional road tunnel in order to improve smoke exhaust ability. Therefore, in this study, for decision of the optimal smoke exhaust rates in the transverse ventilation system, several standards of nations are compared and numerical simulations with variations of exhaust flow rates are carried out in terms of smoke spread distance by FDS ver. 3.1. As results, in the case of no internal longitudinal air velocity in tunnel, the smoke exhaust rate of $80\text{m}^3/\text{s}$ (the smoke generation rate at HRR of 20MW) is sufficient enough to limit the smoke spread within 250m in 6 minutes after the fire. However, in the case of the internal longitudinal air velocity at 2.5m/s, the smoke exhaust rate should be increased $130\text{m}^3/\text{s}$.

Key Words : tunnel fire, transverse smoke exhaust system, single point exhaust, oversized exhaust ports

기호설명

A_r : Tunnel cross sectional area [m^2]

Q_E : Exhaust rate [m^3/s]

V_r : Tunnel air velocity [m/s]

Q_S : Generation rate of smoke [m^3/s]

1. 서 론

도로터널이나 지하공간은 반밀폐공간이라는 특수성으로 인해서 화재가 발생하는 경우, 화재발생 유해가스의 배연이 자연적으로 이루어 질수가 없다.

따라서 지하공간에서의 화재는 유해가스의 확산

및 가시거리저하로 인한 대피로 확보가 곤란한 상황에 처할 우려가 크기 때문에 많은 인명피해가 발생할 개연성이 높다.

국내의 홍지문터널 및 대구지하철 화재사고와 국외의 몽브랑 터널과 고타드, Channel터널 화재사고의 교훈에서 잘 알려진 바와 같이 터널화재시 초기에 대피로 확보에 가장 유효한 수단으로 제연설비가 중요하게 대두되고 있으며, 특히 연기의 방향에 대한 제어가 강조되고 있는 실정이다¹⁻³⁾.

따라서, 일반적으로 연장이 1000m 이상인 도로터널에서는 화재시에 대비하여 제연시설을 설치하도록 정하고 있다⁴⁾. 도로터널 제연방식은 크게 종류환기 방식과 횡류환기 방식으로 구분되며, 일반적으로 종류환기 방식은 일방향 터널에 채택되고 있으며, 양방향 터널이나 교통정체가 심할 것으로 예측되는 터널에서는 횡류환기 방식을 적용하고 있다.

† To whom correspondence should be addressed.
riedh@incheon.ac.kr

횡류 또는 반횡류 환기방식에 최적배연량 산정을 위한 연구로 이 등⁵⁾의 연구에서 균일배기포트를 갖는 횡류환기방식의 최적배연량에 대한 연구를 수행한바 있으며, 본 연구는 배기포트로 대배기구를 채택하는 경우에, 최적 배연풍량의 산정을 위한 연구이다. 이를 위해서 각국의 배연풍량에 대한 기준을 조사·비교하며, 이를 근거로 하여 배연풍량을 변화시켜 연기의 이동특성을 고찰한다.

또한 대피거리를 현재의 도로터널 방재시설 설치 지침에 규정된 바와 같이 250m로 하는 경우, 연기의 전파를 250m로 제한하기 위한 배연풍량 도출을 위한 연구를 FDS이용한 수치시뮬레이션을 통해서 수행한다.

2. 연구동향

2.1. 대배기구 적용 횡류환기방식

횡류환기방식은 터널에 덕트를 설치하여 신선공기를 급기하고 터널내 오염된 공기를 배기하도록 하는 시스템이다. 따라서 횡류식 환기방식은 급기와 배기가 동시에 수행되며, 배기 또는 급기만 수행하는 경우를 반횡류식이라 하며 전자를 배기 반횡류식, 후자를 급기 반횡류식이라 한다.

그러나 화재시에는 횡류환기방식에서는 급기를 중단하고 배기만을 수행하여 배연하며, 반횡류 환기방식의 경우에는 환기운전에 관계없이 배기운전을 수행하여 배연을 하도록 하고 있다. 따라서 환기운전은 횡류환기 방식이나 반횡류환기방식에 관계없이 배기운전을 수행하기 때문에 동일한 특성을 보이게 된다.

최근까지 횡류환기방식은 터널 천정에 덕트를 설치하고 터널에 5~20m정도의 간격으로 개구부를 설치하여 터널전체에서 균일하게 배기되거나 급기되는 균일 급배기 방식이 주류를 이루었다.

그러나 메모리얼 터널의 실험결과⁶⁾에서는 균일 배기방식은 화재크기가 증가하면 제연에 한계가 있다고 보고하고 있으며, 몽브랑 터널에서는 지류제어의 실패로 인해서 사고가 확대되었다는 결론이 제시되고 있다. 따라서 최근 들어 횡류환기방식에서 화재시 중방향 기류의 제어의 중요성이 대두되고 있으며, 몽브랑 터널 및 고타드 터널은 화재이후 대배기구 방식으로 전환하였으며, 국내에서도 이와 같은 추세를 반영하여 도심터널의 설계가 이루어지고 있다.

전술한 바와 같이 이 등이 균일배기방식에서의

최적풍량 산정을 위한 연구를 수행한 바 있으며, 본 연구에서는 횡류환기의 대배기구방식에 국한하여 화재시 안전하게 대피 가능한 최적 배연풍량을 산정함을 목적으로 한다.

2.2. 각국기준 및 연구결과 비교

횡류 환기방식에 대한 적정 배연풍량에 대한 연구는 메모리얼 터널의 실험결과를 기초로 하여 작성된 NFPA 502⁷⁾, 독일의 RABT 02⁸⁾, 프랑스의 CETU 02⁹⁾에 제시된 기준이 있으며, Vauquelin연구¹⁰⁾와 김명배의 실험적인 연구결과¹¹⁾가 보고되고 있으나, 횡류환기방식에서 배연풍량은 터널의 연장 및 배연구간의 계획, 터널내 풍속에 의해서 변하기 때문에 현재까지 적정 배연풍량 산출을 위한 설계자료가 미흡한 실정이다.

각국의 터널설계 기준에 제시된 배연풍량은 Table 1과 같다.

표에 의하면 대부분으로 국가에서 20~30MW정도의 화재강도에서 발생하는 연기발생량(80m³/s)을 기준으로 배연풍량으로 산정하고 있으며, 20~30MW 규모의 화재강도에서 일반적으로 알려진 연기발생량보다 상당히 증대한 배연풍량을 적정풍량으로 제시하고 있다.

이와 같이 배연풍량을 연기발생량보다 크게 하는 것은 균일배기 방식에서는 화재지점을 기준으로 하여 집중배기가 이루어지지 않기 때문에 주위의 공기유입을 고려하는 것이며, 대배기구방식을 적용하는 경우에 화재지점 부근에 집중해서 배연포트를 개방하는 경우, 중방향 기류의 제어를 위한 것이다.

Table 1. Comparison of standards about the smoke exhaust rate for the transverse ventilation system in road tunnel

Country	Extraction rate	Comment
USA	0.132m ³ /s · lane · m	600m Extraction rate : 158.4m ³ /s
Germany (RABT 02)	Q _E = A _r · V _r + Q _s	V _r = 3.0m/s 600m Extraction rate : 215.6m ³ /s
France (CETU 02)	Q _E = A _r · V _r + Q _s	V _r = 1.5m/s Montblanc tunnel : 150m ³ /s · 600 m = 80 + 45.2 × 1.5 = 147.8m ³ /s
Austria	≥ 80m ³ /s · fire zone	80m ³ /s
Swiss	≥ 80m ³ /s · km	80m ³ /s
Kim et al	0.17m ³ /s (Uniform extraction)	6MW, 100m Smoke dispersed 600m Extraction rate : 102m ³ /s

600m 기준 배연풍량은 독일이 가장 크며, 오스트리아와 스위스는 80m³/s로 일반적으로 제시되고 있는 20~30MW의 화재시 연기발생량과 동일한 결과로 신선공기의 유입에 대한 고려를 하지 않고 있다.

독일 및 프랑스의 경우에는 부가적인 배연풍량을 $A_r \cdot V_r$ 로 정의하고 있는데, 이는 화재지점에 연기의 확산을 억제하기 위해서 집중적으로 개방된 배기포트로 흐르는 기류의 풍속을 어떻게 정할 것이냐 하는 개념에서 도입된 것이다.

독일의 경우 V_r 을 3.0m/s, 프랑스의 경우 1.5m/s를 고려하고 있다.

이상의 검토에서 알아본 바와 같이 배연풍량에 대한 각국의 기준이 상당한 차이를 보이고 있으며, 독일 및 프랑스 기준이 최근의 종방향 풍속제어의 필요성을 강조하고 있는 최근의 경향을 반영하고 있는 것으로 평가된다.

종방향 풍속 제어에 대한 개념은 현재 유럽에서 널리 적용되고 있으며, 몽브랑 터널 및 고타드 터널의 경우는 화재이후 종방향 기류를 제어하기 위해서 제트팬을 시설하고 있다.

대배기구를 적용하는 경우에 대한 연구결과로 O. Vauquelin과 F. Demouge의 연구결과가 있으며, O. Vauquelin은 대배기구 시스템에 대한 모델실험을 수행하였으며, 배연효율의 개념을 도입하여 배기구의 형상 및 배연풍량에 따른 배연효율을 비교 검토하였으며, 검토 결과 배기구의 aspect ratio가 동일하면 천장부의 배기구 설치위치에 따른 배연효율은 큰 차이는 없는 것으로 보고하고 있으며, 배기구 형상은 터널 종방향으로 장변을 취하는 것보다는 횡방향으로 장변을 취하는 것이 배연효율을 높일 수 있는 것으로 보고하고 있다.

또한 배연풍량에 대해서는 기류가 없는 경우에 30 MW(연기 발생량: 80m³/s)를 기준으로 하는 경우, 약 1.4(118m³/s)배 정도에서 배연효율이 100%에 도달하며, 화재강도가 작을수록 부가적인 풍량이 증가하는 것으로 보고하고 있다.

F. Demouge는 수치시뮬레이션 및 모형실험을 통한 대배기구 시스템의 배연풍량을 결정하기 위한 연구를 수행하였으며, 연구결과에 의하면 종방향 기류의 풍속이 2.55m/s 정도인 경우에는 배연풍량을 연기 발생량의 2배로 할 때 배연효율은 약 80%정도이며, 종방향 기류가 존재하지 않는 경우에는 배연풍량이 연기발생량에 2배 일때 100 %가 된다고 보고하고 있다.

3. 수치시뮬레이션 검토

3.1. 수치시뮬레이션 조건

횡류환기방식의 연기거동에 대한 검토 및 적정 배연풍량 산정을 위해서 본 연구에서는 Table 2에 제시한 터널모델에 대해서 FDS(Fire Dynamics Simulation)수치시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구에서는 배연풍량을 식 (1)과 같이 정의하였으며 연기 발생량(Q_s)은 80m³/s로 가정하였다. 또한, 부가적인 풍량을 고려하기 위한 V_r 은 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5m/s의 6조건으로 설정하였다. 배기구에서 V_r 에 따른 배연풍량 및 배기구 면풍속은 Table 3에 나타냈다. 배기구의 단면적은 12m²(3×4m)이며, 화재지점을 기준으로 하여 상류 및 하류에 각각 2개소(50, 100m지점, 총 4개소)의 배기구를 개방하였으며, 배기구에 대한 경계조건은 일정풍속조건으로 하였으며, 터널입출구부는 압력경계조건으로 하였다. 화재강도는 20MW로 설정하였으며, 화재가 Flash over에 도달하는 시간은 4분으로 가정하였다.

$$Q_E = A_r \cdot V_r + Q_s \quad (1)$$

3.2. 시뮬레이션 결과

Fig. 1 및 Fig. 2는 배연을 수행하지 않는 경우에 시간에 따른 터널중심에서 연기농도를 나타낸 것이다.

Fig. 1은 터널내 풍속이 0m/s인 경우로 이 경우, 연기는 터널의 양방향으로 대칭현상을 이루며 확산하게 되며, 이동거리는 시간이 증가함에 따라서 거의 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 화재발생 6분후의 연기의 이동거리는 266.7m정도로 나타났다.

Table 2. Dimension of model tunnel

Length	Free area	Height	Duct & vent
1000m	내공 단면적: 60.8 차도 단면적: 50.2	5.0m	덕트 단면적: 10.63m ² 배기구 크기: 3L × 4W (100m 간격, 10개소)

Table 3. Simulation smoke exhaust rate and air velocity

V_r (m/s)	Q_E (m ³ /s)	Face velocity at vent(m/s) (단면적: 12.2m ²)
0.0	80.0	1.639
0.5	105.1	2.154
1.0	130.2	2.669
1.5	155.3	3.183
2.0	180.5	3.698
2.5	205.6	4.213

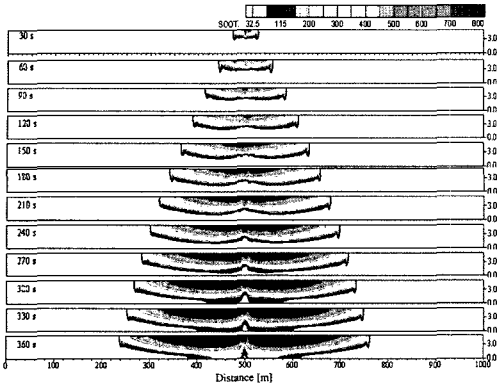


Fig. 1. Smoke density distribution(no ventilation, tunnel air velocity 0m/s).

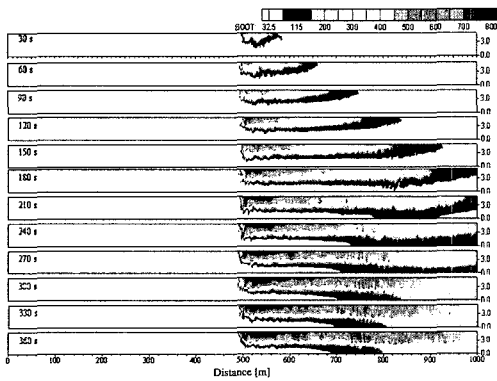


Fig. 2. Smoke density distribution(no ventilation, tunnel air velocity 2.5m/s).

대피시뮬레이션(Simulex)에 의한 계산 결과로부터 피난연락갱의 간격을 250m로 설정할 경우 터널 내 대피가 완료되는 4분 52초 까지 연기의 이동거리는 233m로 나타났다.

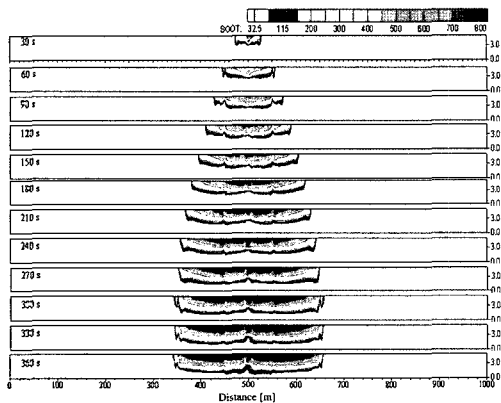


Fig. 3(a). Smoke density distribution(tunnel air velocity 0m/s, exhaust rate $Q_E = 80 + 0.0A_i$).

따라서 횡류환기방식을 적용하는 경우, FED값의 산출을 통해서 보다 정확한 검토가 요구되나 터널 내 풍속을 0m/s로 유지된다면 대피시간을 6분으로 하는 경우, 안전한 대피를 확보하는데 문제는 없을 것으로 판단된다.

그러나 일반적으로 횡류환기방식을 적용하는 경우에도 상하행 교통량이 균형을 이루지 못하는 경우 자동차 진행에 따른 피스톤효과의 불균형 및 자연 풍에 의한 터널내 풍속이 존재하게 된다.

따라서 터널내 풍속이 존재하는 경우에 대한 해석을 수행하여 안전성을 충분히 검토할 필요가 있다.

Fig. 2는 2.5m/s의 터널내 풍속이 존재하는 경우에 대한 해석결과를 나타낸다. 계산결과로부터 비교적 작은 풍속이지만 터널내 풍속이 존재하게 되면 연기가 기류방향으로 확산되어 약 90초 정도가 경과하면 연기는 250m까지 확산되어 이 시점부터 터널 내 대피자는 연기에 영향을 받게 될 것으로 판단된다. 따라서 초기 대피확보를 위해서는 반드시 배연이 필요하게 된다.

본 연구에서는 가시도에 영향을 미치는 연기농도의 한계값을 반사체의 경우에는 65mg/m^3 , 비반사체의 경우에는 115mg/m^3 로 설정하였으며, 그림의 검은색 등농도선은 이 한계 값의 영역을 나타낸 것이다.

대배기구를 적용하는 경우에는 배기구 간격은 전술한 바와 같이 100m 간격으로 하였으며, 화재지점으로부터 양방향으로 50, 150m에 위치한 배기구 총 4개소를 개방하는 것으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 3은 터널내 기류가 존재하지 않는 조건에서 대배기구 방식을 적용하는 경우에 시간에 따른 터널 중심에서 연기농도분포를 것이다.

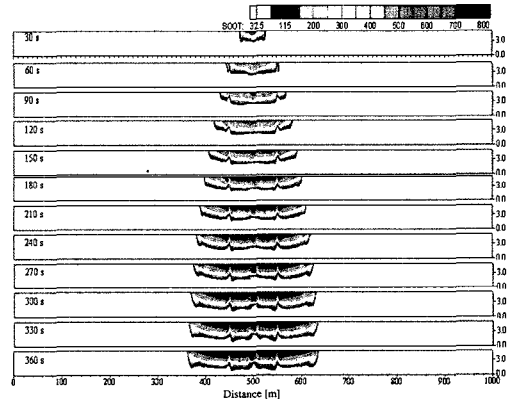


Fig. 3(b). Smoke density distribution(tunnel air velocity 0 m/s, exhaust rate $Q_E = 80 + 1.0A_i$).

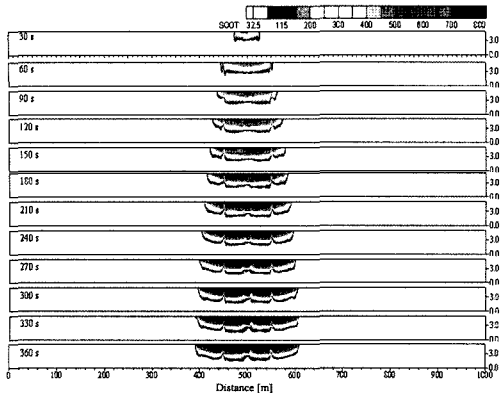


Fig. 3(c). Smoke density distribution(tunnel air velocity 0m/s, exhaust rate $Q_E = 80 + 2.0A_r$).

Fig. 3(a)는 추가적인 풍량을 고려하기 위한 V_r 이 0.0m/s인 경우이다. 즉, 배연풍량을 연기의 발생량에 해당하는 $80\text{m}^3/\text{s}$ 를 적용한 경우이며, (b), (c)는 각각 $V_r = 1.0\text{m/s}(130\text{m}^3/\text{s})$, $V_r = 2.0\text{m/s}(180\text{m}^3/\text{s})$ 를 적용한

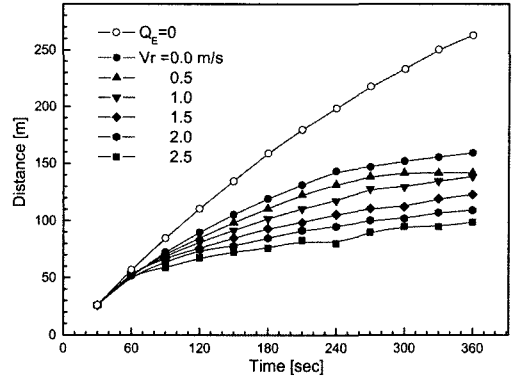


Fig. 3(d). Smoke spread distances at tunnel air velocity 0.0m/s.

경우이다.

배연풍량이 $80\text{m}^3/\text{s}(Q_E = 80 + 0.0 A_r)$ 로 작은 경우에도 연기의 이동거리는 2번째 배기구의 위치를 초과하지는 않는 것으로 나타났다.

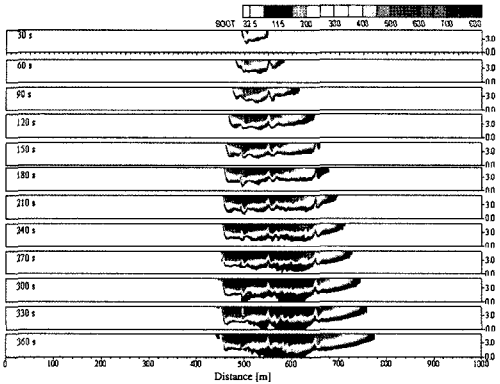


Fig. 4(a). Smoke density distribution(tunnel air velocity 2.5m/s, exhaust rate $Q_E = 80 + 1.0A_r$).

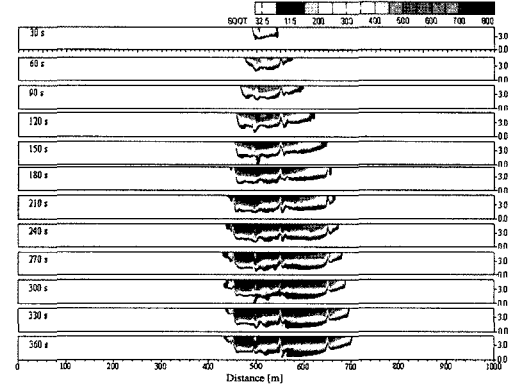


Fig. 4(b). Smoke density distribution(tunnel air velocity 2.5m/s, exhaust rate $Q_E = 80 + 1.5A_r$).

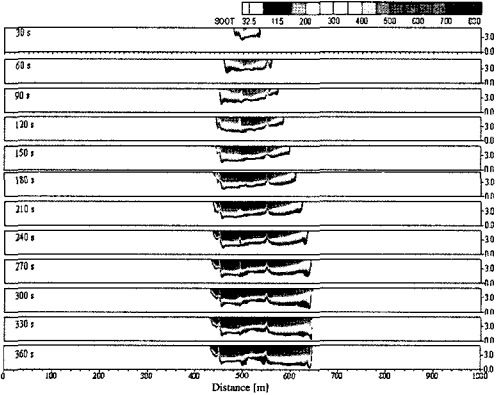


Fig. 4(c). Smoke density distribution(tunnel air velocity 2.5m/s, exhaust rate $Q_E = 80 + 2.5A_r$).

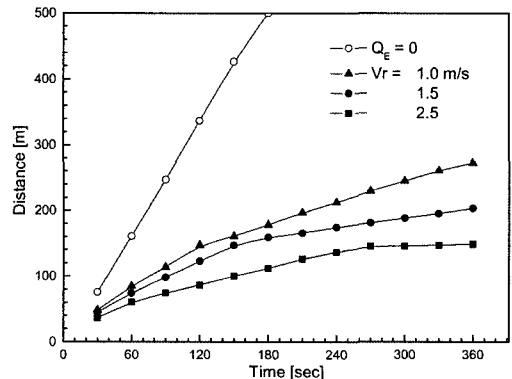


Fig. 4(d). Smoke spread distances at tunnel air velocity 2.5m/s.

Fig. 3(d)는 배연풍량에 따른 연기의 이동거리를 나타낸 것으로 배연풍량이 증가할수록 연기의 이동거리는 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 배연풍량이 $80\text{m}^3/\text{s}(Q_E = 80 + 0.0A_r)$ 인 경우, 360초에서 연기의 이동거리는 160m, $206\text{m}^3/\text{s}(Q_E = 80 + 2.5A_r)$ 조건에서는 100m로 나타났다.

따라서, 대배기구방식을 적용하는 경우, 터널내 풍속을 $0\text{m}/\text{s}$ 로 가정하는 경우에는 연기발생량과 동일한 정도의 배연풍량을 적용하면 연기의 확산거리는 160m 정도로 제한할 수 있는 것으로 예측된다.

Fig. 4는 터널내 풍속이 $2.5\text{m}/\text{s}$ 로 존재하는 경우, 터널중심에서 연기의 농도분포를 나타낸 것으로 (a), (b), (c)는 각각 배연풍량이 $130(Q_E = 80 + 1.0A_r)$, $155(Q_E = 80 + 1.5A_r)$, $206\text{m}^3/\text{s}(Q_E = 80 + 2.5A_r)$ 의 조건에 대한 결과이다.

Fig. 4(d)는 배연풍량에 따른 연기이동거리를 나타낸 것으로 연기이동거리는 화재 발생 후 6분을 기준으로 배연풍량 $206\text{m}^3/\text{s}(Q_E = 80 + 2.5A_r)$ 조건에서 145m, $155(Q_E = 80 + 1.5A_r)$ 조건에서 188m, $130(Q_E = 80 + 1.0A_r)$ 조건에서 245m로 나타났다.

따라서, 피난연락통 간격을 250m 간격으로 선정하는 경우 배연풍량 $130\text{m}^3/\text{s}$ 이상에서 안전한 대피 조건을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다.

이상의 고찰에서 대배기구 방식을 적용하는 경우 터널내 풍속을 $2.5\text{m}/\text{s}$ 이하로 유지하는 경우에는 배연풍량을 $Q_E = Q_S + V_r \cdot A_r$ 로 정의할 때 $V_r = 1.0\text{m}/\text{s}$ 정도로 설정하는 것이 적절한 배연풍량으로 평가된다.

4. 결론

본 연구에서는 대배기구방식을 적용한 횡류환기 방식에서 적정 배연풍량 산정을 위해 배연풍량을 변화시켜 수치시뮬레이션을 수행하여 연기이동특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 터널내 풍속을 $0\text{m}/\text{s}$ 로 가정하는 경우, 성층화에 유리하며 이로 인해서 배연풍량이 연기발생량 이상에서는 터널내 전구간에서 안전한 대피가 이루어질 수 있음을 밝혔다.
- 2) 터널내 풍속을 $2.5\text{m}/\text{s}$ 로 하는 경우에는 배연풍량이 $130\text{m}^3/\text{s}(Q_E = 80 + 1.0A_r)$ 이상의 조건에서 연기 이동거리는 250m 이내로 제한될 수 있음을 밝혔다.
- 3) 횡류환기방식을 적용하는 경우, 대배기구방식을 적용하는 것이 배연에 효과적이며, 배연풍량 또한

감소하며, 배연풍량은 $80 + 1.0A_r\text{m}^3/\text{s}$ 이상으로 하는 것이 적절한 것으로 나타났다.

감사의 글 : 본 연구는 2005년 건설교통부 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업(C03-01)의 “도로터널방재시스템 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구단, 2.18 대구지하철 화재 조사연구 백서, 경북대학교 도시환경설비 연구실.
- 2) Sergiu, F., “Task force for technical investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc vehicular tunnel - Status Report of April 13, 1999”, 2-8-2000.
- 3) 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.
- 4) 건설교통부, 도로터널 방재시설 설치지침, 2004.
- 5) 이동호등, “반횡류식 환기설비를 활용한 화재시 터널 방재연구”, 2005년 한국화재소방학회 춘계 학술논문발표 논문집, pp. 131~137, 2005.
- 6) FHA, Memorial Tunnel : Fire Ventilation Test Program, CD-ROM and Comprehensive Test Report, Massachusetts Highway Dept. 1996.
- 7) NFPA, NFPA 502 standard for road tunnel, Bridges and other limited access highways, Quincy, Massachusetts, 1998 Edition, 1998.
- 8) RABT, “Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)”, Germany, 2002.
- 9) CETU, “Circulaire Int. N° 2000-82 DU relative à la réglementation de la circulation des véhicules transportant des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers du réseau national”, 30 NOV. 2000, France.
- 10) 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 Aero. & Vent. of Veh. Tunnels, pp. 97~103, 2000.
- 11) 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, “도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구”, 한국터널공학회 논문집, 제6권, 제2호, pp. 129~140.