

도로터널 화재시 대배기구 환기방식에서의 배연 연구

전 용 한*, 한 상 철*, 유 지 오**, 김 남 진***, 서 태 범****, 김 종 윤*****†

상지영서대학 소방안전과*, 신흥대 건축설비과**, 제주대학교 에너지공학과***, *인하대학교 기계공학과****

한국소방안전협회*****†

A Study on the Effective Fire and Smoke Control in Road-Tunnel with Semi-Transverse Ventilation

Yong-Han Jeon, Sang-Cheol Han, Oh-Ji Yoo* Nam-Jin Kim, Tae-Boem Seo*, Jong-Yoon Kim

*Department of Fire Fighting and Safety, Sangji yongseo college, Wonju 660, Korea

**Department of Building Mechanical Engineering, Shinheung College

**Department of Nuclear & Energy Engineering, Cheju National University, Jeju, 690-756, Korea

****Department of Mechanical Engineering, In-ha University, Incheon 402-751, Korea

*****† Korea Fire Association, Seoul 87-4, Korea

ABSTRACT: In this study it is intended to review the moving characteristics of smoke by performing visualization for the calculation of the optimal smoke exhaust air volume in case a fire occurs in tunnels where transverse ventilation is applied, and to obtain basic data necessary for the design of smoke exhaust systems by deriving optimal smoke exhaust operational conditions under various conditions.

As a result of this study, when the critical velocity in the tunnel is 1.75 m/s and 2.5 m/s, the optimal smoke exhaust air volume has to be more than 173 m³/s, 236 m³/s for the distance of the smoke moving which can limit the distance to 250m. In addition, in case of uniform exhaust the generated smoke is effectively taken away if the two exhaust holes near the fire region are opened at the same time.

Key words: transverse ventilation(횡류 환기), critical velocity(임계속도)

기 호 설 명

Q_E : 배연용량(m³/s)

Q_S : 연기발생량(m³/s)

A_r : 터널단면적(m²)

V_c : 기류의 방향성제어(%)

터널은 일반 도로에 비해 가시화 거리 등에 의해 사고율이 40%이상 높으며, 밀폐구조로서 어둡고 환기가 곤란하여 화재발생시 온도상승과 함께 유독성 연기에 의한 확산이 제한됨으로 인해서 대피환경을 열악하게 하여 호흡과 시야장애 및 심리적인 공포감이 초래할 수 있고 외부와 연락이 곤란하여 피난 및 소화·구급활동이 제약을 받게 되기 때문에 터널에서의 화재는 대형인명피해를 유발 가능성이 아주 높다.

1. 서 론

일례로 알프스 산맥을 관통하는 몽브랑 터널의 경우, 1999년 화재로 인해서 39명의 사망자가 발생하고 경제적인 피해는 총 3억 9천 2백만 유로에 달하는 것으로 보고되고 있다. 또한 고타드(Gotthard), 타우언(Tauern)터널에 발생한 화재참사 역시 많은 인명 피해 및 경제적 손실 발생시켰다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

우리나라 역시 2003년 홍지문 터널 화재 사고 및 2005년 달성 2터널 사고등 2000년 이후 1800여건의 터널 사고가 발생 하였다.

이러한 사고들로 인해 각 나라에서는 터널안전성 향상을 위한 연구와 기준의 정립 및 정비를 위해 많은 노력을 기울이고 있으며, 국내에서도 터널화재사고의 개연성이 크다는 것을 인식하여 터널의 방재시설 설계기준의 정비 및 설계자료의 확보를 위한 연구의 필요성이 대두되고 있는 실정이며, 국내 외 연구 동향은 다음과 같다.

Vauquelin⁽⁴⁾등은 모형 횡류식 터널내의 열방출을 변화 시키며 배기구의 위치와 형상에 따른 배연 효율을 연구하여 배기구가 천정에 설치 한 경우가 벽면에 있을 경우 보다 배연 효율이 높게 나타났다.

Ribot⁽⁵⁾은 1999년 자연 환기터널에 대해 수직갱 부근에서 연기의 농도를 영상 이미지에 의한 실험결과와 비교한 결과가 잘 일치함을 보였다.

또한 국내연구에서는 윤성욱⁽⁶⁾은 장대형 수직 환기구를 통한 매연확산 연구에서, 일정한 기준의 질량분율을 일관되게 적용하여 얻어진 매연의 확산은 실험결과를 기본으로 구한 매연확산의 경험적 상관관계식과 거의 유사한 속도로 환기구내에서 상승함을 보였다.

하지만 횡류환기방식 시스템에서 배연시스템설계를 위한 개념의 설정이 현재까지는 관행적으로 환기용량이 결정되어 왔고 정확한 화재공학적인 분석이 이루어지지 않았다. 특히 우리나라에서는 종류환기방식이 건축비가 적다는 이유로 무분별하게 종류환기방식을 선호하고 있다.

따라서 본 연구에서는 반횡류방식에서 대배기구 환기방식을 도입한 도로터널에서 화재발생시 최적배연량산정을 위해 화재시 터널내 풍속, 배연풍량을 변수로 하여 이들 인자가 연기의 이동 특성에 미치는 영향을 연기의 이동거리 측면에서 축소모형을 통한 가시화실험을 통해 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 대배기 횡류환기방식의 최적배연량 산정을 위해서 모형실험장치를 제작하여 연기의 가시화를 통해서 연기이동거리에 대한 검토를 수행하였다. 모형 터널은 실제터널의 약 1/41의 축소모형으로 총 길이 16 m의 반횡류식 배기방식의 터널이며, Fig. 1에 본 연구에서 사용된 모형터널의 단면도를 Table. 1에 모형실험장치제원을 나타내었다.

모형터널의 본체는 강화 아크릴로 제작 하였으며, 1 m 길이의 섹션을 연결하여 터널을 구성하였다. 터널 천정덕트는 대배기 방식으로 제작하였으며 배기구의 크기는 73×97 mm 크기의 배기구를 각 섹션마다 1개씩 설치하였다. 화점주변의 터널의 천정부부는 열에 의한 변형을 막기 위하여 강판재질로 제작하였으며 천정의 중심부는 레이저 조명이 투과할 수 있도록 슬릿을 만들고 투명 아크릴로 제작하였다. 터널에서 배기되는 배기풍량을 균일하게 유지하기 위해서 터널의 천정상부는 각 섹션별로 인접한 섹션으로 부터 공기의 흐

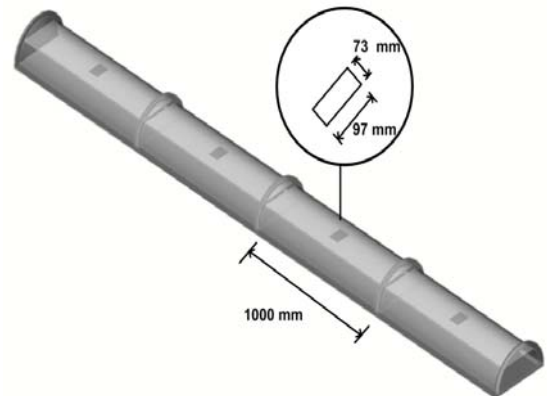


Fig. 1 Oversized exhaust port

Table. 1 Specification of experiment

Elements	Scale model (mm)	Prototype (m)
Length	1600	659
Height	122.5	5.04
Width	306.2	12.6
Duct height	61.7	2.54
Port size	73×97	3×4

름을 차단할 수 있는 차단판을 설치하였으며, 2개의 섹션마다 공기흡입을 위한 링블로워를 설치하고 각각의 유로에 유량계 및 유량조절밸브를 설치하여 배기풍량을 조절할 수 있도록 하였다.

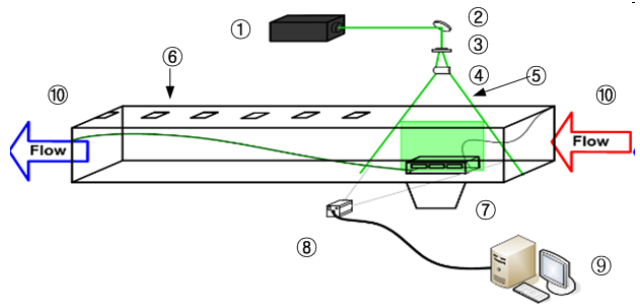
화재시 발생하는 연기의 모사를 위해 연기발생장치를 사용하였으며 이 장치는 열풍기 및 파이프히터에 의해서 연기를 약 400℃정도까지 가열하고 가열된 공기에 파라핀 오일을 분사하여 파라핀오일의 증발에 의해서 연기가 발생할 수 있도록 제작하였다. 열풍기에서 공급되는 연기의 온도는 연기발생기 출구에 RTD타입의 온도센서를 설치하여 자동조절될 수 있도록 하였으며, 공급되는 연기는 버스를 대상으로 제작한 화원 모형을 통해서 터널내부로 공급되며, 링블로워에 의해서 연기를 공급할 수 있도록 하였으며, 공급되는 유량은 인버터에 의해서 링블러워의 회전수를 제어하여 조절하였으며 유량계 및 유량조절밸브에 의해서 조절할 수 있도록 하였다.

화원의 모형은 터널본체와 같이 실제버스를 1/41로 축소하여 6.25×300 mm 크기로 제작하였다. 공급되는 연기량은 80 m³/s(화재강도 20 MW에서 연기발생량)을 기준으로 하였다. 연기 거동의 가시화는 레이저를 광원으로 사용하여 2차원 단면으로 조사 하였으며, 터널 정면에서 CCD 카메라를 이용하여 1초 당 60 프레임의 화상을 획득하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 터널내 화재시 횡류환기 방식의 최적 배연량 산정을 위해 대배기구 방식에 대한 배연특성을 연기의 이동거리를 측면에서 실험·분석하였다. Fig. 2에 모형실험장치의 개략도Table. 2에 나타냈다.

터널 입구측의 유량 공급장치에 의해서 터널내 풍속을 소정의 풍속이 되도록 유량을 공급한 상태(터널내 풍속이 0 인 조건은 유량공급장치를 제거함)에서 각 섹션의 배기풍량을 조절하여 소정의 배기풍량으로 설정하고 유량공급이 안정된 상태에서 연기를 공급하였다. 모형차량을 통해서 연기를 공급하면 초기에는 연기의 이동거리가 변화하여 연기의 도달지점이 점차 증가하며, 시간이 경과하면 연기의 이동거리의 변화가 더 이상 발생하지 않는데, 이때 레이저 조명을 소정의 섹션에 조사하고 가시화를 시작하였다



①	Diode laser	⑤	Laser light sheet	⑨	computer
②	Mirror	⑥	Reduce scale tunnel	⑩	Air flow
③	Spatial filter	⑦	Smoke generator		
④	Cylindrical lens	⑧	CCD camera		

Fig. 2 Schematic of the apparatus

가시화를 위한 레이저는 500 mW의 다이오드 레이저를 사용하였으며 원통형 렌즈를 이용하여 2차원 단면의 빔을 조사하였다. 연기의 유동이 일정한 상태가 되었을 때 CCD 카메라를 이용하여 빔이 조사된 터널섹션 부분의 화상을 초당 60 프레임씩 약 15초간 획득하였다. 촬영된 화상은 컴퓨터의 하드디스크에 저장하고 연기의 이동 특성을 검토 하여 배연풍량 및 터널내 풍속을 변수로 하여 배기구의 개방위치에 따른 가시화를 수행하였으며 배기구의 위치에 따라 case를 구분하여 Table.2에 나타내었다. 또한 터널내 풍속은 0, 1, 1.25, 2.5 m/s로 하였으며, 배연풍량은 식(1)에

나타내었으며 부가풍량 기준인 V_c 를 0.0~3.0 m/s로 변화시켜 실험하였다.

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

3. 실험결과

대배기구방식을 적용하는 경우에는 개방되는 배기구의 위치 및 배기구의 개수가 배연에 영향을 미치므로 본 연구에서는 터널내 풍속이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 배기구의 위치 및 개방되는 배기구의 개수를 달리하여 배연풍량에 따른 연기의 이동거리 특성을 검토하였다.

Table 2 Port distance according to case type

Case	Distance [m]
case 1-1	60
case 1-2	140
case 2-1	60/140
case 2-2	100/180
case 2-3	140/220
case 3	60/140/220

(1) 터널 내 풍속이 존재 하지 않는 경우

Fig. 3은 배기구의 위치 및 개소에 따라 배연풍량에 변화에 따른 연기의 이동현상을 가시화하여 나타낸 것으로 터널 내 풍속이 존재 하지 않는 경우이다. 60 m이격된 지점의 배기구를 각각 1개씩 개방한 경우 화재지점을 기준으로 상류 및 하류 양방향으로 이동하며, 연기는 부력에 의해서 천정부로 상승하며, 연기의 하부를 통해서 신선공기가 유입되게 된다. 연기발생기에서 발생한 연기는 배기구에서 집중적으로 배기되고 있다. 그림에서 보듯이 부가풍속기준인 V_c 가 0 인 경우, 연기는 배기구를 지나 140 m지점까지 확산되고 있으나 거리의 증가는 거의 없는 것으로 나타나고 있으며 배연풍량이 증가하면 연기의 이동거리가 감소하며, 배연풍량기준인 V_c 가 2.5 m/s에 도달하면 연기의 이동이 배기구 지점부근에서 제한되는 것으로 나타나고 있다. 140 m지점의 배기구를 개방하는 경우(case 1-2) 140 m지점에서 배기되기 시작하며, $V_c = 1$ 일 경우에는 배기구를 지나 확산되는 현상으로 보이나 $V_c = 2.5$ m/s에

서는 연기의 이동거리가 배기구 지점에 제한되는 것으로 나타나고 있다. 따라서, 1개의 배기구만을 개방하는 경우에는 화점에서 근접한 지점의 배기구를 개방하는 것이 연기이동을 제한하는데 효과적임을 알 수 있다.

2개의 배기구를 개방하는 경우 개방되는 배기구의 위치는 각각 60과 140 m, 100과 180 m, 140과 220 m이다. 이와 같이 2개의 배기구를 개방하는 경우에는 $V_c=0$, 즉, 배연풍량이 연기발생량과 동일한 경우, 연기의 이동이 연기의 흐름방향으로 최하류의 배기구 위치를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 2개소의 배기구를 개방하는 경우가 1개소의 배기구를 개방하는 경우 보다 배연이 효과적으로 이루어지며, 화점에 근접한 배기구를 개방하는 것이 연기의 이동거리를 제한하는데 효과적인 것으로 평가된다.

60, 140, 220 m지점의 배기구 3개소를 개방하는 경우 2개소의 배기구를 개방하는 경우와 마찬가지로 연기의 이동은 부가풍량이 없는 경우 ($V_c=0$)에도 흐름방향으로 최하류에 있는 배기구를 초과하지 않는 것으로 나타나고 있다. 따라서 대배기구방식을 적용하는 경우에는 터널내 풍속이 존재하지 않는 경우에 배연풍량은 부가풍량 없이 연기발생량을 기준으로 하여도 연기의 이동거리를 충분히 제한 할 수 있는 것으로 평가되며, 2개소이상의 배기구를 개방하면 부가풍량이 없는 경우에도 연기의 이동거리를 최하류의 배기

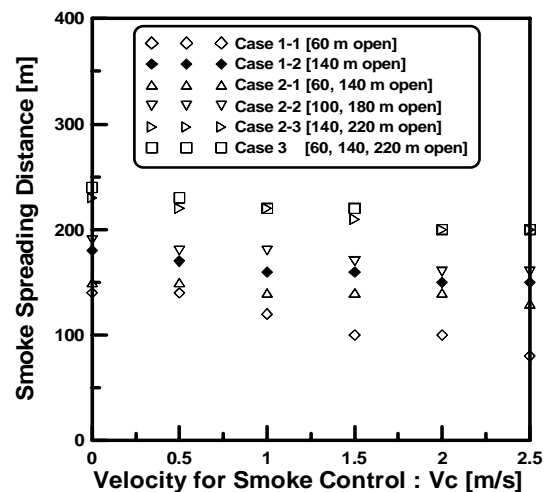


Fig. 3 Smoke spreading characteristic by oversized exhaust (tunnel inner airflow velocity = 0m/s)

구로 제한할 수 있는 것으로 나타났으며, 배기구간의 거리를 고려할 때 화재지점에 근접한 2개소의 배기구를 개방하는 것이 연기의 이동을 제한하는데 가장 효과적인 것으로 평가된다.

(2) 터널 내 풍속이 존재 하는 경우

터널내 풍속이 존재하는 경우에 배연풍량 및 배기구 위치에 따른 연기이동의 가시화한 결과를 Fig. 4.~Fig. 6에 나타냈다. 터널 내 풍속이 존재하는 경우 역류(back layer)는 존재 하지 않기 때문에 화원 하류방향 배기구만 개방하고 상류방향의 배기구는 폐쇄하여 하류방향으로 이동하는 연기를 배연할 수 있도록 하였다.

Fig. 4는 터널 내 풍속(화점에서의 풍속기준)이 1 m/s 일 때 배기구의 위치 및 개방 개소수에 따른 연기이동을 가시화한 결과이다. case 1-1, 즉 화재하류 60 m지점의 배기구를 개방한 경우로 배기구를 통해서 연기가 배연되는 모습이 확실히 나타나고 있으나, 연기의 이동은 배기구를 지나 하류측을 확산되는 것으로 나타나고 있다. 이때 부가풍속기준인 V_c 따른 연기의 최대이동거리는 부가적인 배연풍량이 증가하면 감소하는 경향을 보이며, 부가적인 배연풍량기준인 V_c 가 2 m/s 이상이 되면 감소율이 둔화되는 경향을 보이고 있다. 화재하류 140 m지점의 배기구 1개를 개방하는 case 1-2 경우 배기구에서 연기의 배연현

상은 비슷한 경향을 보이나, 연기의 이동거리 는 60 m지점의 배기구를 개방하는 case 1-1 보다 9% 정도 증가하는 것으로 나타나고 있다.

case 2-1, case 2-2, case 2-3, 2개소의 배기구를 개방한 경우 배기구의 위치는 각각 60과 140 m, 100과 180 m, 140과 220 m이다. 이 경우에도 배연풍량이 증가하면 연기의 이동거리가 감소하며, 부가풍량기준인 V_c 가 2.0 m/s 이상에서는 연기의 이동거리가 최하류의 배기구부근에서 제한되는 것으로 나타나고 있다. 따라서 2개의 배기구를 개방하는 경우 연기의 이동거리는 배기구가 화재지점에 근접할수록 연기의 이동거리를 제한하는데 효과적인 것으로 평가 된다. case 3, 즉 3개소의 배기구를 개방하는 경우 $V_c = 1.0$ m/s 정도에서 최하류에 위치한 배기구 부근에서 연기의 이동을 제한할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 터널내 풍속이 1.75 m/s인 경우에 배기구의 개방에 따른 연기의 이동특성에 대한 결과이다. 60 m지점과 140 m지점의 배기구를 개방하여 배연한 경우 부가적인 풍량이 증가할수록 연기의 이동거리는 감소하며, 부가풍량 기준인 V_c 가 1 m/s이하인 경우에는 연기의 이동거리가 실험장치의 거리를 초과하며, V_c 가 1.5 m/s 이상인 경우에 연기의 이동거리가 300 m이하로 제한되는 것으로 나타나고 있다. 또한 1개의 배기구

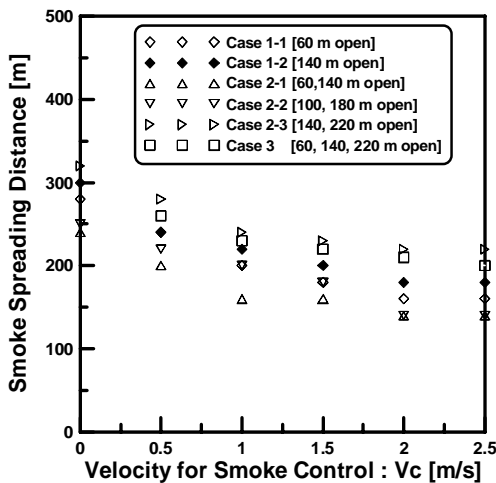


Fig. 4 Smoke spreading characteristic by oversized exhaust (tunnel inner airflow velocity = 1 m/s)

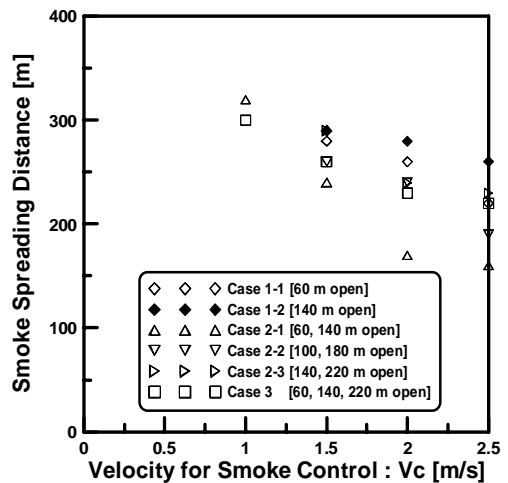


Fig. 5 Smoke spreading characteristic by oversized exhaust (tunnel inner airflow velocity = 1.75 m/s)

만 개방하는 경우에는 부가풍량이 2.5 m/s까지 증가하여도 연기는 배기구를 지나 이동하고 있으며, 연기의 이동거리는 60 m지점의 배기구를 개방하는 경우와 140 m지점의 배기구를 개방하는 경우 거의 비슷한 것으로 나타나고 있다.

2개의 배기구를 개방하여 배기하는 경우 각각 60과 140m와 100과 180 m지점, 140과 220 m지점의 배기구를 개방한 case 2-1, case 2-2, case 2-3이다. 이 경우에도 부가풍량 기준인 V_c 가 증가하면 연기의 이동거리는 감소하며, $V_c=2.0$ m/s 이상이 되면 연기의 이동을 최하류의 배기구로 제한할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 연기의 이동거리는 V_c 가 2.0 m/s 이상에서는 배기구의 위치에 의존하는 것을 알 수 있다. 3개의 배기구를 개방한 case 3은 부가풍량기준인 V_c 가 2 m/s 이상이 되면 연기의 이동을 배기구의 위치까지 제한할 수 있는 것으로 나타났다.

배연풍량 및 배기구 위치에 따른 연기의 이동거리는 연기의 이동거리는 case 2-1의 경우가 가장 짧게 나타나고 있으며, 연기의 이동거리에 대한 평가기준을 도로터널방재시설 설치지침의 피난연락갱 설치간격 이내로 연기의 이동을 제한하는 것으로 하는 경우, 부가풍량기준(V_c)을 1.5 m/s 이상으로 하여야 할 것으로 평가된다.

Fig. 6은 화점기준 터널내 풍속을 2.5 m/s로 하는 경우이다.

60 m지점과 140 m지점의 1개소의 배기구를 개방하는 경우 연기는 배기구를 지나 하류로 이동하는 형상이 발생하며, 배기구 위치에 따른 연기의 이동거리측면에서 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 연기의 이동거리는 부가풍량기준 V_c 가 2.0 m/s 이하인 경우에는 연기의 이동거리가 실험 범위인 320 m를 초과하며, $V_c = 2.5$ m/s 이상에서 240 m 이하로 제한될 수 있는 것으로 나타났다.

각각 60과 140 m, 100과 180 m지점, 140과 220 m지점의 배기구를 개방한 경우 연기의 이동거리는 V_c 가 2.5 m/s에서는 배기구 위치에 관계없이 이동거리가 250 m를 초과하고 있으며, V_c 가 3.0 m/s에서 배기구 주변으로 연기의 이동을 제한할 수 있는 것으로 나타나고 있다.

3개의 배기구를 개방한 경우 배연풍량에 따른 연기의 이동거리는 2개의 배기구를 개방하는 경우와 거의 비슷한 경향을 보이고 있으며, 이 경

우에도 V_c 가 3 m/s일 때 연기의 이동을 배기구 주변으로 제한할 수 있는 것으로 나타났다.

터널내 풍속이 2.5m/s인 경우에 부가풍량 기준 V_c 에 따른 연기의 이동거리는 60과 140 m지점의 2개 배기구를 개방하는 경우가 연기이동을 제한하는데 가장 효과적인 것으로 나타났다. 이를 최적으로 조건으로 하여 배연풍량 평가기준으로 피난 연락갱 설치간격 이내로 연기의 이동을 제한하기 위해서는 부가풍량기준 $V_c=2.5$ m/s 이상이 요구되는 것으로 평가된다.

4. 결론

(1) 터널내 풍속이 존재하지 않는 경우 배연풍량이 증가하면 연기의 이동거리가 감소하며, 화점에서 근접한 지점의 배기구를 개방하는 것이 연기이동을 제한하는데 효과적이며 2개소의 배기구를 개방하는 경우가 1개소의 배기구를 개방하는 경우 보다 배연이 효과적으로 이루어지며, 화점에 근접한 배기구를 개방하는 것이 연기의 이동거리를 제한하는데 효과적인 것으로 평가된다. 배연풍량은 부가풍량 없이 연기발생량을 기준으로 하여도 연기의 이동거리를 충분히 제한할 수 있는 것으로 평가된다.

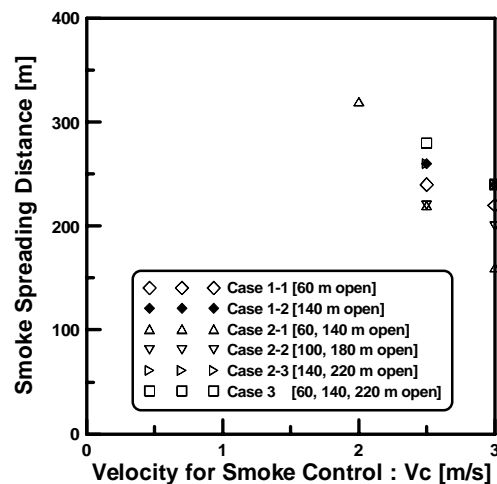


Fig. 6 Smoke spreading characteristic by oversized exhaust
(tunnel inner airflow velocity = 2.5 m/s)

(2) 터널내 풍속이 존재하는 경우 동일 배연풍량에서 연기의 이동거리가 급격하게 증가한다. 부가풍량 기준 $V_c=1.5$ m/s인 경우에 터널내 풍속이 1.75로 증가하면 연기의 이동거리는 약 2배 정도 증가하면, $V_c= 2.0$ m/s인 경우에는 터널풍속이 0 m/s에서 2.5 m/s로 증가하면 연기의 이동거리는 약 1.8배 정도 증가하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 연기의 이동거리에 터널내 풍속이 아주 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

(3) 최적배연량에 대한 평가기준을 연기의 이동거리를 피난연락경 간격인 250 m 이내로 하고 일반적으로 터널설계 시 역풍으로 고려하는 풍속인 2.5 m/s를 터널내 풍속으로 하는 경우, 부가풍량기준 V_c 는 2.0 m/s이상이 되어야 하는 것으로 나타났다.

and One Day Seminar on Escape from Tunnels, Lyon, France, pp. 169-179, 1999

6. Yoon, Sung-Wook., "Modeling of Smoke Dispersion through a Long Vertical Duct", Journal of Korean society for rock mechanics , Vol 13권 No 4, pp 100-107, 2003,

참고문헌

1. 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.
2. Sergiu, F., "Task force for technical investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc vehicle tunnel - Report of 30 June 1999", 2-8-2000.
3. Alan Weatherill, "New Mont Blanc tunnel ventilation systems," 2003, Tunnel Management International, Vol. 6, No. 1
- White, S., and Han, J. C., 1984,
4. O. Vauquelin and O. Megret, "Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel", Fire Safety Journal 37, pp.525-533 2002,
5. B. Ribot and P. Chasse., "Numerical Simulation of Smoke Extraction by Roof Vents in a tunnel", Comparison with Experimental Tests Analysis of Physical Phenomena, Proceedings of the 1st International Conference on Tunnel Fires