

도로터널 화재시 반횡류식 균일배기 환기방식에서의 최적배연 연구

전 용 한*, 유 지 오**, 김 남 진***, 서 태 범****, 김 중 윤*****
*인하대학교 기계기술공동연구소, **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*, Oh-Ji Yoo**, Nam-Jin Kim***, Tae-Boem Seo****, Jong-Yoon Kim*****†

*Mechanical Engineering Research Institute In-ha University, Incheon 402-751, Korea

**Department of Building Mechanical Engineering, Shinheung College

***Department of Nuclear and 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

(Received January 14, 2009; revision received February 19, 2009)

ABSTRACT: In this study it is intended to review the moving characteristics of smoke by performing visualization for 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 design of the smoke exhaust systems by deriving optimal smoke exhaust operational conditions under various conditions. As a result of this study, if it was assumed 0 critical velocity in the tunnel, the smoke exhaust air volume was limited within 250 meter in the road-tunnel disaster prevention indicator and the exhaust efficiency was from 55.1% to 95.8% in the result of this study. In case of oversized exhaust ports, the generated smoke is more than the case of uniform exhaust. 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 moving smoke which can limit the distance to 250 m.

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]

F_r : 프라우드 수

Q_F : 실제화재 강도 [kW]

Q_m : 축소모형 화재 강도 [kW]

V_f : 실제터널 풍속 [m/s]

V_m : 축소모형터널 풍속 [m/s]

L_f : 실제터널 길이 [m]

L_m : 축소모형터널 길이 [m]

† Corresponding author

Tel.: +82-32-862-7327; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: sweat100@hanmail.net

1. 서 론

터널은 반 밀폐구조로 배연이 제한적일 수밖에 없기 때문에 화재발생시 온도상승과 함께 유독성 연기에 의해 대피환경을 열악하게 하여 호흡과 시야장애 및 심리적인 공포감이 초래할 수 있고 외부와 연락이 곤란하여 피난 및 소화·구급활동이 제약을 받게 된다.

따라서 안전확보를 위한 터널의 방재시설 설계 기준의 정비 및 설계자료의 확보를 위한 연구의 필요성이 대두되고 있는 실정이며, 방재시설의 설계를 위한 기초자료, 방재시설의 설계를 위한 설계 툴의 개발 및 평가기술의 확보가 시급한 실정으로 국가적으로 많은 연구와 관심이 요구되고 있으며 국내 외 연구 동향은 다음과 같다.

Lina, and Chuah⁽¹⁾ 등은 횡류식 배기 방식 터널에서 배기구를 한 개만 개방하는 단일배기구와 두 개 이상의 배기구를 개방하는 다중배기구를 비교 분석하였다. 배기구 크기가 24 m²일 때 CO 농도와 온도를 비교하였는데 단일 개방 배기구인 경우가 배기구를 2개 이상을 개방한 다중 개방 배기구보다 배연 효율이 높게 나타나 피난자가 효율적으로 대피 할 수 있다고 발표 하였다.

Brinckerhoff⁽²⁾는 메모리얼터널에서 횡류 환기 방식의 연기 배연효율을 평가하기 위해 여러 조건에 대한 실물화재 실험을 수행하여 실제 화재에 대한 정보를 제공하고 있다. 하지만 규모가 큰 실물화재실험이기 때문에 다양한 조건들에 따른 연기전파거동을 실험하여 보여주기에는 한계가 있었다. 국내 연구에서는 이성룡⁽³⁾ 등은 2002년 폭 0.4 m, 높이 0.4 m, 길이 9 m인 모형터널을 제작 자연환기에 의한 연기거동에 대해 실험적으로 연구하였다. 그 결과 환기구의 높이가 터널의 높이의 1.5배 이상인 경우 온도감소 효과에는 크게 영향이 없고 화재발생 약 1분 후부터 유입되는 차가운 공기와 함께 하강하는 연기가 재유입되어 터널 내부가 연기로 가득차게됨을 발표하였다.

그러나 기존의 연구의 대부분은 수치해석 결과에 의해 수행되었으며 실험의 경우를 수행한 경우에도 터널 내부의 온도분포의 경향을 분석하여 터널 상류측의 온도가 증가하지 않는다는 가정하에 배연량을 결정하거나 실제 연기가 아닌 헬륨을 이용해 실험하는 경우가 많았다. 하지만 실제 연기거동과 차이가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 반횡류방식에서 균일방식의 경우를 도입한 도로터널내 화재발생시 최적 배연량산정을 위해 터널내 풍속, 배연풍량을 변수로 하여 이동특성에 미치는 영향을 연기의 이동거리 측면에서 축소모형을 통한 가시화실험을 통해 알아보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

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

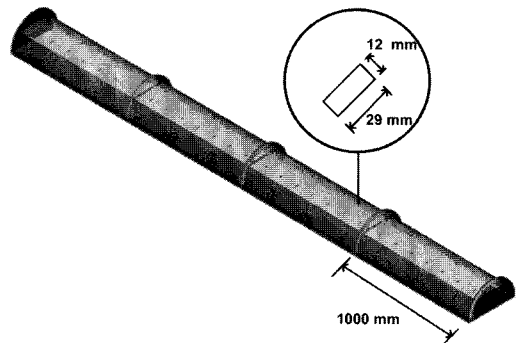
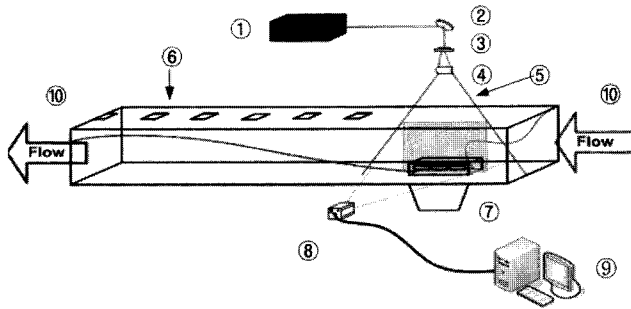


Fig. 1 Balanced exhaust.

Table 1 Specification of experiment

	Scale model (mm)	Prototype (m)
	41.2 : 1	
Tunnel Length	16m	659
Tunnel Hight	122.5	5.04
Tunnel Width	306.2	12.6
Duct Hight	61.7	2.54
Port Size	12×29	0.5×1.2



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.

모형터널의 본체는 강화 아크릴로 제작하였으며, 1 m 길이의 섹션을 연결하여 터널을 구성하였다. 터널 천정덕트는 균일배기 방식으로 제작하였다. 배기구의 크기는 12×29 mm이며, 120 mm의 간격으로 천정에 설치하였다. 화점주변의 터널의 천정부는 강판재질로 제작하였으며 천정의 중심부는 레이저 조명이 투과할 수 있도록 슬릿을 만들고 투명 아크릴로 제작하였다.

터널내 풍속이 존재하는 조건에 대한 실험을 수행하기 위해서 터널입구측에 풍량을 공급할 수 있도록 소형팬에 의한 유량공급장치를 설치하였다. 공급유량은 인버터를 이용하여 주파수 제어에 의해 팬의 회전수의 조절하여 조정하였으며 유량 공급 관로에 피토투브(Φ2 mm)를 설치하여 피토투브의 압력을 측정하여 공급유량 조절하였다. 공급유량을 피토투브를 이용하여 환상등면적분할법에 의해서 유속을 측정하여 유량을 보정하였다.

화재시 발생하는 연기의 모사를 위해 연기발생장치를 사용하였으며 이 장치는 열풍기 및 파이프히터에 의해서 연기를 약 400 °C 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 의

해서 연기를 공급할 수 있도록 하였으며, 공급되는 유량은 인버터에 의해서 링블로워의 회전수를 제어하여 조절하였으며 유량계 및 유량조절밸브에 의해서 조절할 수 있도록 하였다.

화원의 모형은 터널본체와 같이 실제버스를 1/41로 축소하여 6.25 × 300 mm 크기로 제작하였으며 모형을 통하여 연기가 공급될 수 있도록 하였다. 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 60프레임의 화상을 획득하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 실험조건

실험에서는 터널내 화재시 횡류환기 방식의 최적 배연량 산정을 위해 균일배기방식의 배연특성을

Table. 2 Condition of experimental

	Prototype	Scale model
Fire intensity	20 MW	160 KW
Smoke generation rate	80 m ³ /s	440 lpm
Tunnel inner velocity	0, 1.0, 1.75, 2.5 m/s	0, 0.16, 0.2, 0.25 m/s

연기의 이동거리를 측면에서 실험·분석하였다. 모형실험장치의 개략도는 Fig. 3에 실험조건은 Table 2에 나타냈다.

실험방법은 터널 입구측의 유량 공급장치에 의해서 터널내 풍속을 소정의 풍속이 되도록 유량을 공급한 상태(터널내 풍속이 0인 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. 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 검토하였다.

터널내 풍속은 0, 1, 1.25, 2.5 m/s로 하였으며, 배연풍량은 Table 3에 나타내었으며 V_c 를 0.0~3.25 m/s로 변화시켜 실험하였다.

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

2.2.2 Scaling Law

터널 화재 시 연기유동의 측정을 위한 축소모형 실험에서는 일반적으로 프라우드 모델에 의한 상사법칙을 사용한다.

프라우드 모델은 기하학적 상사법칙에 대한 역

학적 상사법칙이 성립해야 하며 이를 위하여 축척과 관계없이 Fr가 일정해야 한다.

따라서 모형터널과 실제터널의 Fr가 같아야 하므로 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\frac{Q_m}{Q_f} = \left(\frac{L_m}{L_f} \right)^{5/2} \quad (2)$$

$$\frac{V_m}{V_f} = \left(\frac{L_m}{L_f} \right)^{5/2} \quad (3)$$

$$\frac{t_m}{t_f} = \left(\frac{L_m}{L_f} \right)^{5/2} \quad (4)$$

본 실험에 사용된 터널 및 화원에 대한 축소법칙은 위 식을 이용하여 결정하였다.

3. 실험결과

Fig. 5~Fig. 7은 균일배기방식을 적용하는 경우에 배연풍량에 따라 연기이동을 가시화한 것으로 각각 터널내 풍속은 0, 1, 1.75, 2.5 m/s인 경우이다. 사진에서 우측은 연기발생장치, 좌측은 터널출구로 기류의 방향은 우측에서 좌측이며, 터널내 풍속은 화원 부근에서 풍속을 기준으로 나타낸 것이다.

3.2 터널 내 풍속이 존재 하지 않는 경우

Fig. 5는 터널내 풍속이 존재하지 않는 경우에 배연풍량에 따른 연기의 이동을 가시화한 결과이다.

사진은 화점을 기준을 하류방향만 나타낸 것으로 실제 연기의 이동은 화원을 기준으로 양방향

Table 3 Smoke spreading distance by V_c

V_c (m/s)	Smoke spreading distance(m)	Exhaust rate per length($m^3/s \cdot m$)	Real exhaust rate (m^3/s)	Exhaust efficiency (%)
0.0	250	0.167	83.50	95.8
0.5	230	0.232	106.72	75.0
1.0	200	0.297	118.80	67.3
1.5	180	0.362	130.32	61.4
2.0	170	0.427	145.18	55.1
2.5	135	0.492	132.84	60.2

으로 이동하게 되며, 이동거리는 거의 동일하게 나타났다. 이때 연기의 이동특성은 예측할 수 있는 바와 같이 천정부를 통해서 터널하류로 이동하며, 터널의 바닥 부근으로는 신선공기가 유입하는 형상으로 보이고 있어 터널의 하부가 검게 나타나고 있다. 이 경우, 연기의 이동거리는 배연풍량이 80 m³/s(모형에서 배연풍량 440 lpm)로 할 때 도로터널 방재시설 설치지침에 규정된 피난연락갱의 간격인 250 m 이내로 제한할 수 있었다.

또한 추가적인 배연풍량 기준인 V_c 가 증가하면 연기의 이동거리가 감소하는 경향을 보이고 있다. 추가적인 배연풍량에 따른 연기의 이동거리는 Fig. 8에 보는바와 같이 배연풍량이 증가하면 연기의 이동거리가 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

Table 3과 Fig. 4는 터널내 풍속이 0인 경우에 부가풍량기준인 V_c 에 따른 단위길이당 풍량과 연기의 이동거리로 부터 구한 실제배연량(연기의 이동거리 × 단위길이당 배연량) 및 배연효율(연기발생량/실제 배연풍량 × 100%)을 계산한 결과이다. Table 3에서 보는바와 같이 V_c 가 증가할수록 실제 배연량도 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 V_c 가 증가하면 동일한 연기발생량을 배연하기 위해서 보다 많은 풍량이 필요해지는 것으로 의미하며, 이에 따른 배연효율이 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이와같이 배연량이 증가하면 배연효율이 감소하는 것은 배기

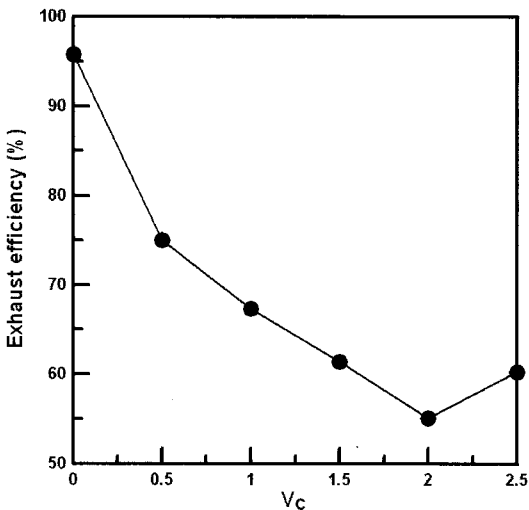


Fig. 3 Exhaust efficiency by V_c .

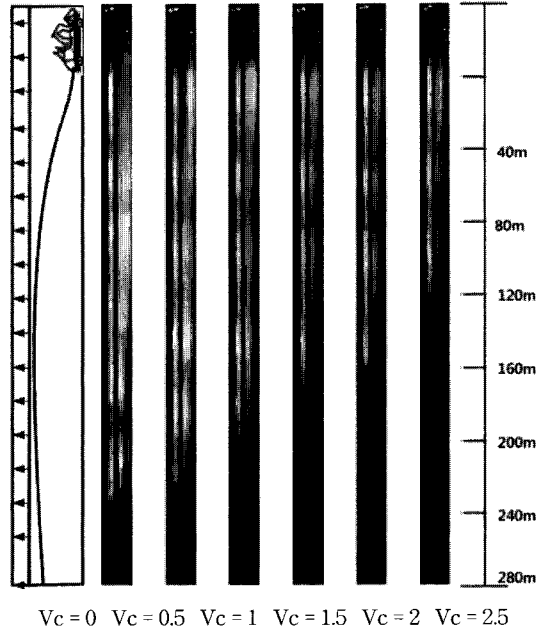


Fig. 4 Experiment of smoke flow(tunnel inner airflow velocity = 0 m/s).

구의 흡입풍속이 증가하여 배기구의 배기효율이 감소하기 때문으로 판단된다. 따라서 균일배기방식으로 배기하는 경우에 배기구간격을 축소하여 배기구의 흡입풍속을 감소하는 것이 보다 효과적인 것으로 예측된다.

또한 현재 건교부의 도로터널 방재시설설치 지침에 의하면 피난연락갱간의 간격이 250m로 되어 있으며, 화재 시 피난자의 대피소요시간을 약 5분 정도로 기준하고 있음을 고려할 때 연기의 이동거리를 화재지점으로부터 250m구간으로 제한하도록 하기 위해서는 500m구간에서 배연풍량이 84 m³/s정도가 되어야 하며, 단위길이당 배연풍량은 0.167 m³/s·m정도가 요구되는 것으로 평가된다.

3.2 터널 내 풍속이 존재 하는 경우

Fig. 6~Fig. 7은 터널내 풍속이 존재하는 경우에 배연풍량($V_c = 0\sim 5$ m/s)에 따른 연기의 이동거리를 나타낸 것이다.

Fig. 6은 터널내 풍속(화점기준)이 1m/s인 경우에 연기의 이동현상을 나타낸 것으로 이 경우, 부가풍량기준인 V_c 가 2m/s로 배연풍량이 205 m³/s

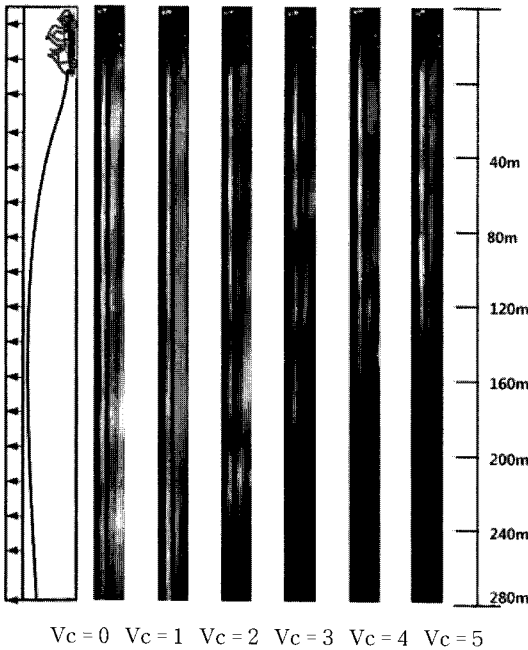


Fig. 5 Experiment of smoke flow(tunnel inner airflow velocity = 1 m/s).

($Q_c = 80 + 2A_r$) 이상인 상태에서 연기의 이동거리를 250 m 이내로 제한할 수 있는 것으로 나타났으며, V_c 에 따른 연기의 이동거리는 250($V_c = 2$ m/s), 200($V_c = 3$ m/s), 170($V_c = 4$ m/s), 150($V_c = 5$ m/s)로 나타났으며, 화재하류에서만 배연이 이루어지는 것으로 고려하여 배연효율을 검토하면 배기구의 배연효율은 78.0($V_c = 2$ m/s), 71.8($V_c = 3$ m/s), 68.5($V_c = 4$ m/s), 65.3%($V_c = 5$ m/s)로 나타났다. 이 경우 화재지점에서 일방향 풍속이 존재하는 경우에는 화재상류측에서 배연효과는 전혀 기대할 수 없는 상황으로 배연풍량이 급격하게 증대하는 것으로 알 수 있다. Fig. 7은 터널내 풍속이 1.75 m/s인 경우로 배연풍량 기준 V_c 가 5 m/s인 경우에 연기의 이동이 실험장치의 한계범위(280 m)에 있으며, 이때 연기의 이동거리는 200 m 정도로 나타났다.

따라서 터널내 풍속이 증가하면 연기의 이동거리는 급격하게 증가하는 것으로 알 수 있으며, 풍속이 존재하지 않는 경우에 $V_c = 1$ m/s($Q_E = 142.2$ m³/s) 일 때 연기의 이동거리가 200 m이므로 동일한 연기 이동거리로 제한하기 위해서는 배연풍량이 약 2.75배 정도로 증가하는 것으로 알 수 있다.

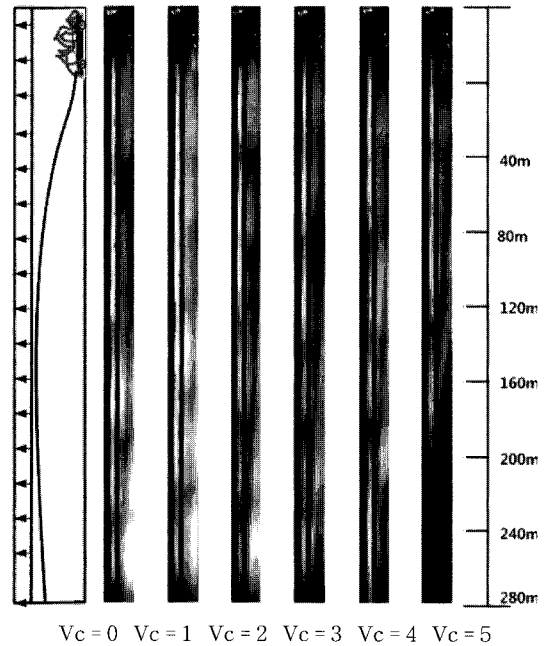


Fig. 6 Experiment of smoke flow(tunnel inner airflow velocity = 1.75m/s).

Fig. 8에서 나타낸 바와같이 터널내 풍속이 존재하면 배연풍량이 급격하게 증가하는 경향을 보이며, 배기구의 풍속이 증가하면 배연효율이 감소하는 경향을 보이며, 풍속이 존재하지 않는 경우에 배연효율은 본 실험범위에서 최소 55.1%에서 95.8%로 나타났다.

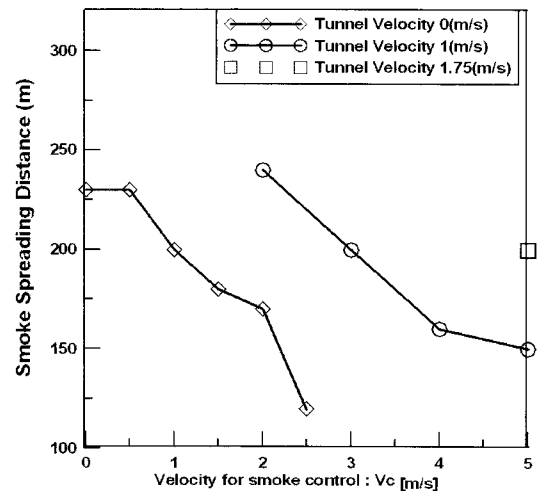


Fig. 7 Smoke spreading characteristic by balanced exhaust.

연기의 이동거리를 목표로 하는 거리로 제한하기 위해서 배연풍량은 연기발생량 보다 최대 1.8배에서 1.04배까지 증대하는 것으로 나타나고 있다. 250 m 이내로 연기의 이동거리를 제한하기 위한 배연풍량은 터널내 풍속이 존재하지 않는 경우에는 배연풍량은 최소 $83 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 250 \text{ m}$, 터널내 풍속을 1 m/s 로 가정하는 경우에 배연풍량은 최소 $205 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 250 \text{ m}$, 터널내 풍속이 1.75 m/s 인 경우에 배연풍량은 최소 $393 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 250 \text{ m}$ 로 나타났다.

4. 결 론

(1) 터널 내 풍속이 존재 하지 않는 경우 연기 발생량과 배연풍량이 동일하면 완전히 배연이 되었다. 또한 부가적인 배연풍량 V_c 를 증가시킬수록 연기 이동거리는 짧아지며 V_c 가 2.5 m/s , 즉 배연풍량이 $236 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_e = 80 + 2.5 A_r$)인 경우에는 $V_c = 0$ 인 정도로 경우보다 약 52% 연기 이동거리가 짧게 나타났다. 또한 V_c 가 증가할수록 배연효율이 감소하는 경향이 나타나므로 균일배기방식으로 배기하는 경우에 배기구간격을 축소하여 배기구의 흡입풍속을 감소하는 것이 보다 효과적인 것으로 예측된다. 연기의 이동거리를 화재지점으로부터 250 m구간으로 제한하도록 하기 위해서 500 m구간에서 배연풍량이 $84 \text{ m}^3/\text{s}$ 정도가 되어야 하며, 단위길이당 배연풍량은 $0.167 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 정도가 요구되는 것으로 평가된다.

(2) 터널 내 풍속이 1 m/s 인 경우는 최적 배연풍량이 $205 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_e = 80 + 2 A_r$), 터널 내 풍속이 1.75 m/s 인 경우 V_c 가 5 즉 $393 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_e = 80 + 5 A_r$)으로 나타났으며 배기구의 배연효율은 78.0 ($V_c = 2 \text{ m/s}$)~65.3% ($V_c = 5 \text{ m/s}$)로 나타났다.

(3) 균일배기 방식을 적용한 반횡류 환기방식의 터널에서는 터널 유입 풍속을 0으로 가정하는 경우에 $V_c = 0$ 이상이면 대피에 문제가 없을 것

으로 판단되나, 일반적으로 환기력등 자연화기력에 종방향 기류가 존재 하므로 균일배기 방식은 터널 내 터널에서는 차량에 의한 교통 화재 시 효과적인 배연이 이루어 지지 않고 있다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2008년도 인하대학교 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Chi-Ji Lina, b. and Yew Khoy Chuah., 2007, A study on long tunnel smoke extraction strategies by numerical simulation, Tunnelling and Underground Space Technology, In Press, Corrected Proof, Available online 26 November.
2. Bechtel/Parsons Brinckerhoff, 1999, Memorial tunnel fire ventilation test program, Phase IV Report, prepared for Massachusetts Highway Department.
3. Lee, S. Y., 1995, An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Natural Ventilation, SAREK, Vol. 14, No. 3, pp. 247-253.
4. H. Kurioka, Y. Oka, H. Satoh and O. Sugama, 2003, Fire Properties in Near Field of Square Fire Source with Longitudinal Ventilation in Tunnels, Fire Safety Journal, Vol. 38, pp. 319-340.
5. A. J. M. Helelden, 1976, studies oh fire and smoke behaviour relevant to tunnel, 2nd international symposium on aerodynamics and ventilation of vehicle tunnel, Paper J1, Cambridge, UK.