

도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구

A Study on Fire ventilation design of road tunnel

김명배*¹, 최병일², 최준석², 한용식²

Kim, Myung-Bae · Choi, Byung-Il · Choi, Jun-Seok · Han, Yong-Shik

Abstract

The several assumptions and design parameters to determine the ventilation rate in tunnel ventilation system were examined. In longitudinal ventilating tunnel, the ventilation rate has been determined by the critical velocity above which the smoke propagation to the upstream of ventilating air is prevented. Based upon the examination of assumptions and experimental results, we suggested the improved method to determine the critical velocity. In transverse ventilating tunnel, we found that the ventilation rate has been determined in accordance with the custom rather than fire-smoke dynamics such as the critical velocity in the longitudinal ventilating tunnel. It is because the ventilation rate in the transverse ventilation system has been determined by considering only the ventilation of contaminant by vehicle. To improve the ventilation design parameters based upon the fire-smoke dynamics, we conducted model tunnel fire experiments. From the experimental results, smoke propagating distance and smoke filling were suggested as the design parameter to determine the ventilation rate in transverse ventilating tunnel. And tunnels in Europe designed by the custom is found to have the dangerous nature in view of fire safety.

Keywords: Tunnel fire, longitudinal ventilation, critical velocity, transverse ventilation, smoke propagating distance

요 지

터널의 환기설계에 관련하여 종류식과 횡류식의 환기용량의 산정을 위해서 필요한 제반 가정들을 검토하였고, 종류식 설계에서의 최종 값인 임계유속 산정을 위한 몇 가지의 공식을 분석하였다. 이를 토대로 특정 공식을 개선하기 위한 방안을 실험결과를 토대로 제시하였다. 횡류식 설계에서 국제적으로 사용되고 있는 용량산정에 관한 지침은 화재공학적인 의미가 전혀 없으며 관행적으로 적용되어 온 것임을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 기존의 횡류식 환기설계에는 설계개념조차 명확하지 않음을 입증하였다. 즉 횡류식 시스템에서는 종류식에서의 “연기의 역류 방지를 위한 최소 유속의 유지” 라는 개념조차 없이 환기용량이 결정되어 왔으며, 이것은 터널의 화재환기가 오염물질의 환기로부터 시작되어 정확한 화재공학적인 분석이 결여되었기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 시도로 횡류식 환기의 설계개념으로서 연기전파거리와 연기축적을 제안하였다. 축소모델 터널을 이용하여 연기전파거리에 관한 실험결과를 제시하였고, 이를 이용하여 기존의 관행대로 설계된 유럽의 터널들에 적용하였을 때 안전성에 문제가 있음을 보였다.

주요어: 터널화재, 종류식, 임계유속, 횡류식, 연기전파거리

*1 정회원, 한국기계연구원 화재안전연구팀 부장 (mbkim@kimm.re.kr)

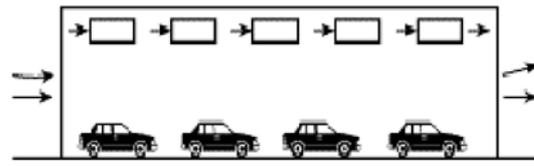
2 비회원, 한국기계연구원 화재안전연구팀

1. 서론

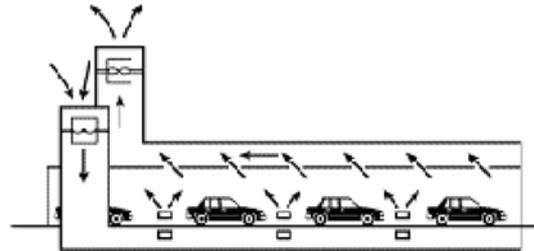
최근 유럽에서의 도로터널 화재사고는 터널화재 시 배연(smoke extraction) 또는 보다 광범위한 의미로 화재환기(fire ventilation)의 중요성을 역설해 주고 있다. Mont Blanc 터널의 경우 사고후에 환기용량을 2배 이상 증강시켰을 뿐만 아니라 화재 시 연기를 효율적으로 제거할 수 있도록 터널내의 배기구 간격을 축소하였다. 이와 더불어 유럽 각국은 도로터널에 대한 화재안전 성능을 확보하기 위하여 관련된 규정의 제정 및 개정을 수행하여 오고 있다. 본 연구에서는 이상과 같은 흐름 속에서 형성된 기술적 방향을 검토하고 그 시사점 또는 개선점을 소개하고자 한다. 이를 위하여 환기설계 방식에 대한 문제와 이에 따른 환기용량 설계방법의 두 가지로 나누어 검토한다.

환기설계 방식에 대하여는 종류식(longitudinal ventilation)과 횡류식(transverse ventilation)을 비교하여 그 적용 범위를 분석하였고 각 국의 규정을 검토한 결과(PIARC, 1999), 위험등급이 높은 터널에 대해서는 횡류식 시스템의 설치가 의무화되어 있었으며, 특히 도심지 근처의 교통혼잡이 예상되는 터널에는 종류식 시스템의 적용이 매우 제한되어야 하는 타당성이 입증되었다.

환기용량의 산정을 위해서 필요한 제반 가정들을 검토하였고, 종류식 설계에서의 최종 값인 임계유속(critical speed) 산정을 위한 몇 가지의 공식을 분석하였다. 이를 토대로 특정 공식을 개선하기 위한 방안을 실험결과를 토대로 제시하였다. 횡류식 설계에서 국제적으로 사용되고 있는 용량산정에 관한 지침은 화재공학적 의미가 전혀 없으며 관행적으로 적용되어 온 것임을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 기존의 횡류식 환기설계에는 설계개념(design philosophy)조차 명확하지 않음을 입증하였다. 즉 횡류식 시스템에서는 종류식에서의 “연기의 역류(back layering) 방지를 위한 최소 유속의 유지”라는 개념조차 없이 환기용량이 결정되어 왔으며, 이것은 터널의 화재환기가 오염물질의 환기로부터 시작되어 정확한 화재공학적 분석이 결여되었기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 시도로 횡류식 환기의 설계개념으로서 연기전파거리(smoke propagating distance)와



(a) 종류식 환기 방식



(b) 횡류식 환기 방식

그림 1. 터널의 환기 시스템

연기축적(smoke filling)을 제안하였다. 축소모델 터널을 이용하여 연기전파거리에 관한 실험결과를 제시하였고, 이를 이용하여 기존의 관행대로 설계된 유럽의 터널들에 적용하였을 때 안전성에 문제가 있음을 보였다.

터널의 환기설비는 크게 자연통풍형, 종류식, 횡류식으로 나뉘는데, 종류식과 횡류식을 나누는 기준은 그림 1과 같이 공급 또는 배출되는 공기가 터널 내에서 터널 길이방향으로 진행되는가(종류식), 또는 터널 단면방향으로 진행되는가(횡류식)에 따라 결정된다. 횡류식 환기는 터널 천장부와 바닥부에 환기용 덕트를 마련하여 공기를 공급, 배출하는 시스템으로 주 유동방향이 터널 단면 방향이다. 이러한 터널 환기시스템은 일반적으로 터널내의 오염물질 농도를 일정 수준 이하로 제어하기 위해 설치된다.

2. 종류식 환기시스템

종류식 환기방식의 설계에서는 화재시 피난자의 안전을 확보하기 위해 화원 상류로 전파되는 연기의 역류 현상을 방지하기 위한 일정유속 이상의 공기 흐름을 터널내에 유지하여야 하는데, 이때 역류가 방지되는 최소 유

속을 임계유속이라 한다. 현재 세계적으로 종류식 터널에서의 임계유속 결정을 위하여 몇가지의 식이 이용되고 있는데, 다음은 Kennedy (1996)의 식에 대한 설명이다. 이 식은 다음 그림 2처럼 화원 하류 전체가 연기로 충전한다는 가정 아래 유도된다.

$$V_c = K_g \left(\frac{g H Q}{\rho c_p A T_f} \right)^{1/3} F \gamma_c^{-1/3} \quad (1)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho c_p A V_c} + T \quad K_g = 1 + 0.0374 \gamma^{0.8} \quad (2)$$

Tetzner (1999)는 기존의 Kennedy 식에 보정계수 (β)를 곱하여 사용할 것을 제안하였다. 화재의 규모가 상대적으로 작을 때, 화원주위에서는 터널 단면의 일부분에만 연기가 존재한다는 사실로부터 유도되었다. 분석결과 β 의 의미는 화원에서의 “연층단면적/터널단면적”이라는 물리적 의미를 가진다.

보정된 Kennedy 식은 다음과 같다.

$$V_c = K_g \left(\frac{g H Q}{\beta \rho c_p A T_f} \right)^{1/3} F \gamma_c^{-1/3} \quad (3)$$

$$T_f = \frac{Q}{\beta \rho c_p A V_c} + T \quad K_g = 1 + 0.0374 \gamma^{0.8} \quad (4)$$

Tetzner (1999)는 보정계수는 0과 1 사이의 값이며 (이 값이 1인 경우 Kennedy 식에 해당된다) 화재하중, 터널형상 등 여러 조건에 따라 달라지게 되는데, 20MW 급 화재에서는 0.25~0.3 정도의 값을 제안하고 있다. 본 연구에서는 모델실험을 통한 보정계수 관련 연구 결과 화재 크기가 터널 단면적에 비해 상대적으로 작은 경우 (~20MW), 보정계수 (β)는 0.1~0.2 근처의 값을 제안하고 있다.

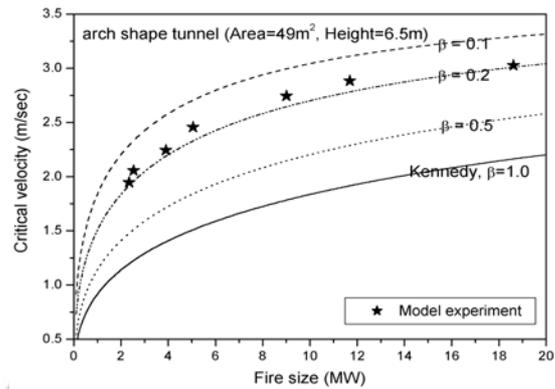


그림 4. 보정된 임계유속

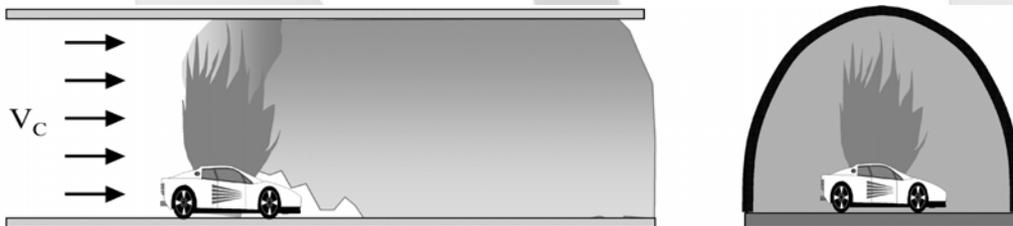


그림 2. 임계유속 결정을 위한 가정

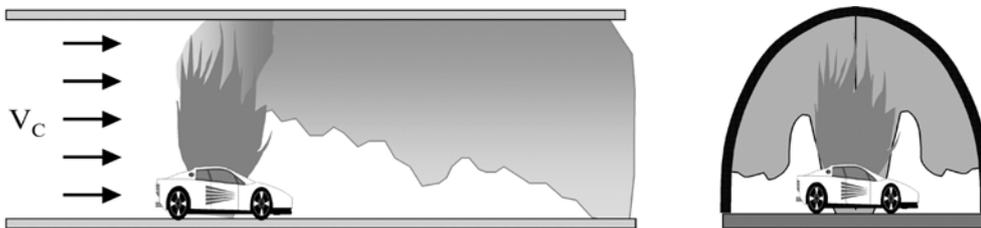


그림 3. 임계유속의 보정

보정계수를 고려한 임계유속의 실제 예는 다음 표 1과 같다.

Wu(2000)는 Kennedy 식과 전혀 다른 형태의 임계유속 결정식을 제안하였다. 그들의 제안식은 Froude similiary 기반의 차원해석 (dimensional analysis) 를 통하여 얻어진 식을 이용하여 실험식을 fitting한 결과이다.

$$V^* = 0.04(0.2)^{-1/3} [Q^*]^{1/3} \text{ for } Q^* \leq 0.20 \quad (5)$$

$$V^* = 0.40 \text{ for } Q^* \geq 0.20$$

여기에서

$$V^* = \frac{V_c}{\sqrt{gH}}, \quad Q^* = \frac{Q}{\rho_o C_p T_o \sqrt{g(H)^5}}$$

화재크기 20MW의 경우 이 새로운 제안식에 의하면

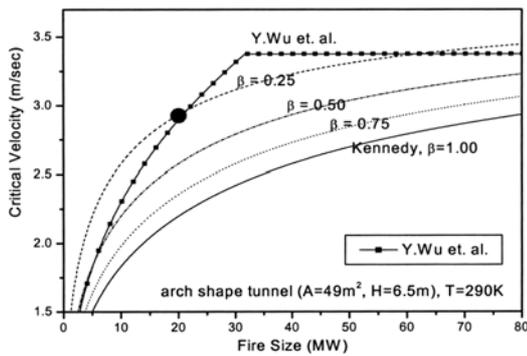


그림 5. 각종 임계유속의 비교

표 1. 임계유속의 비교 (터널높이 H=6.5m, 터널단면적 A=49m²)

Fire Size (MW)	Critical Velocity Vc 현 설계치 대비 증가율					
	β = 1 (현 설계치)		β = 0.4		β = 0.2	
1	0.93 m/sec	100%	1.24 m/sec	133%	1.54 m/sec	166%
5	1.54 m/sec	100%	2.00 m/sec	130%	2.38 m/sec	155%
10	1.88 m/sec	100%	2.38 m/sec	127%	2.77 m/sec	147%
20	2.25 m/sec	100%	2.77 m/sec	123%	3.13 m/sec	139%
50	2.77 m/sec	100%	3.23 m/sec	117%	3.49 m/sec	126%
100	3.13 m/sec	100%	3.49 m/sec	112%	3.66 m/sec	117%

임계유속 값은 Kennedy 식 보다 약 32% 증가되어야 하며, 이는 Kennedy 식에 보정계수 β를 도입한다면 보정계수의 값이 0.25인 경우에 해당한다.

3. 횡류식 환기시스템

종류식 환기시스템에서는 화재연기가 환기풍의 상류로 흘러가는 것을 방지하기 위한 임계유속의 산정에 주로 관심을 두고 있다. 그러나 횡류식 환기시스템은 급기와 배기의 양에 따른 연기의 거동이 주 관심사항이다. 특히 횡류식 환기시스템은 그 특성상 연기를 한 방향으로 제어할 수 없기 때문에 종류식 시스템의 환기설계에 사용된 역류방지를 위한 임계유속같은 개념을 사용할 수 없다. 따라서 횡류식 시스템의 화재환기 설계를 위한 개념의 설정이 필요하게 된다. 우선 고려되어야 하는 사실은 되도록이면 환기에 의해 터널내에 연기가 존재하지 않도록 또는 그 양을 최소화하도록 해야 한다. 이를 위하여 우선 그림 6과 같이 연기전파거리 (smoke propagating distance)를 화원으로부터 연기의 선단이 멈추어 있는 위치까지의 거리로 정의한다.

횡류식 환기시스템에서의 제연 성능을 조사하기 위해서 메모리얼 터널에서 다양한 조건에서의 실험이 진행되었다. 그러나 실물화재 실험의 특성상 다양한 조건(화재크기 및 위치, 급배기량)의 변화에 따른 연기의 전파거동을 실험하는데 한계가 있다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하고자 모델터널 실험을 통하여 화재크기 및 위치의 변화, 급배기 유량의 변화에 따른 연기의 전파거동을 살펴보았다.

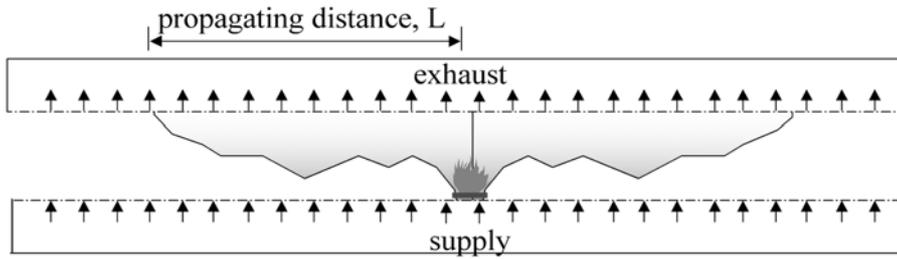
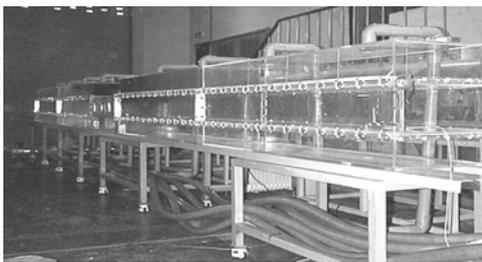
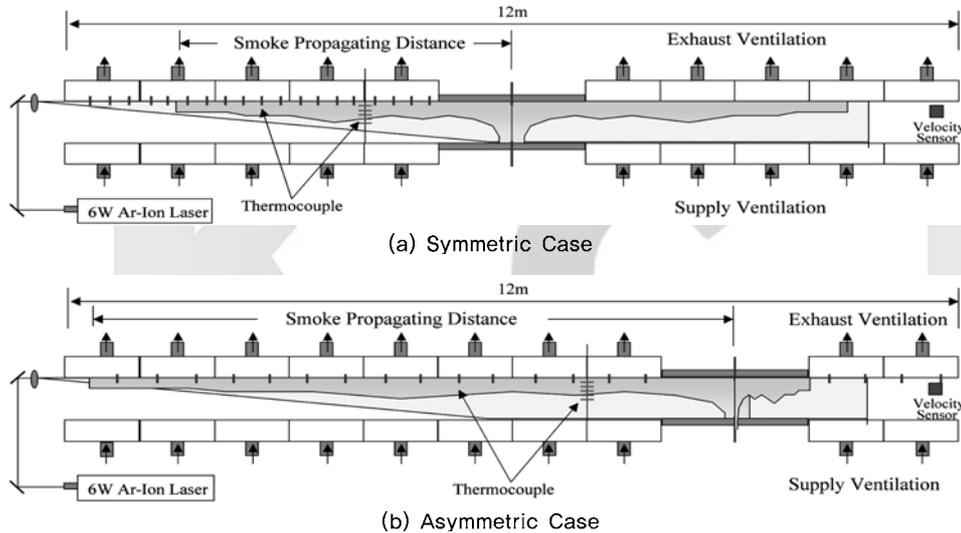


그림 6. 연기전파거리 개념도

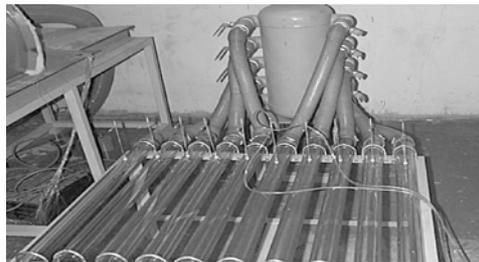
3.1 실험장치

본 실험에서는 메모리얼 터널 (Brinckerhoff, 1996)의 축소 모델이 사용되었다. 메모리얼 터널은 환기를 위한 천장부의 덕트부를 제외하면 폭 8.8m, 높이 4.4m이

며 총 길이는 810m이다. 천장에 4.6m 간격으로 설치된 폭 15.2cm slit을 통하여 배기가 되며 바닥 양 측면을 통하여 급기가 된다. 본 축소모형 터널은 이 터널의 단면 및 급배기부를 1/20로 축소하여 제작되었으며, 총 길이는 12m이다. 화원부위는 단열재와 화원 관측창이 부착



(c) 모델터널



(d) Flow Control

그림 7. 실험장치

된 철판으로 기타 연기전파 부위는 가시화를 위하여 아크릴로 제작되었다. 그림 7은 제작된 축소모형터널의 개략도이다. 화원 위치에 따른 영향을 살펴보기 위하여 화원이 터널의 중앙에 위치한 대칭형태의 경우와 한쪽 측면에 위치한 비대칭 형태의 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 급기와 배기는 바닥과 천장을 통하여 터널 전체에 걸쳐 균일하게 이루어졌으며, 온도측정을 위하여 천장을 따라 총 27개의 열전대가 설치되었다. 연기 전파 거리와 연층 하강을 가시화하기 위하여 레이저 단면 가시화를 수행하였다. 화원으로는 헵탄 폴화재를 사용하였으며, 실험시 연소량을 실시간 계측하여 화재의 크기를 결정하였다. 팬으로의 열전달에 의한 연소량의 급격한 확대를 방지하기 위하여 연료팬 하단에 냉각팬을 설치하였다.

3.2 실험결과

사진 1은 횡류식 화재실험에서 연기 전파, 화원, 그리고 연기선단의 모습을 보여준다. 터널 바닥면으로부터의 급기량과 터널 천장으로의 배기량, 그리고 화재의 크기를 변수로 하여 앞에서 정의한 연기전파거리를 측정하였다.

대칭의 경우

여기서는 화원의 위치가 터널의 중앙에 위치하여 연기 전파를 비롯한 물리적 현상이 대칭인 경우의 실험결과를 설명한다. 대칭형상의 경우 터널내 공기의 유동은 다음과 같이 결정된다. 배기량이 급기량보다 많은 경우 터널 외부의 공기가 터널 내부로 유입되어 종방향 유속이 터

널 외부에서 화원을 향하게 된다. 이때 화원에서 발생한 연기는 종방향 유속을 이기며 터널 출구를 향해 전파되면서 천장을 따라 배기된다. 급기량이 배기량보다 많은 경우 터널 내부의 공기가 터널 외부로 유출되어 종방향 유속이 화원으로부터 터널 외부로 향하게 된다. 이때 화원에서 발생한 연기는 종방향 유속을 따라 터널 출구를 향해 전파되면서 천장을 따라 배기된다. 따라서 급기량이 배기량보다 많은 시스템은 환기가 연기를 터널출입구로 실어 나르는 역할을 하게 된다. 그러므로 화재환기 설계 시 배기량이 급기량보다 많아야 함을 알 수 있다. 배기량이 급기량보다 많은 경우 연기가 환기에 의해 터널의 일정한 구역으로 제한되는 긍정적인 효과를 얻게 된다. 모든 유동은 화원부를 중심으로 대칭이며 화원부에서의 종방향 유속은 사라지게 된다.

그림 8은 화재규모, 배기량의 변화에 따른 연기전파거리를 보여주고 있다. 가로축은 터널의 단위 길이당 환기

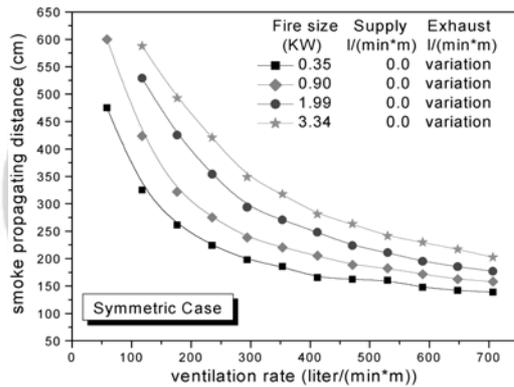
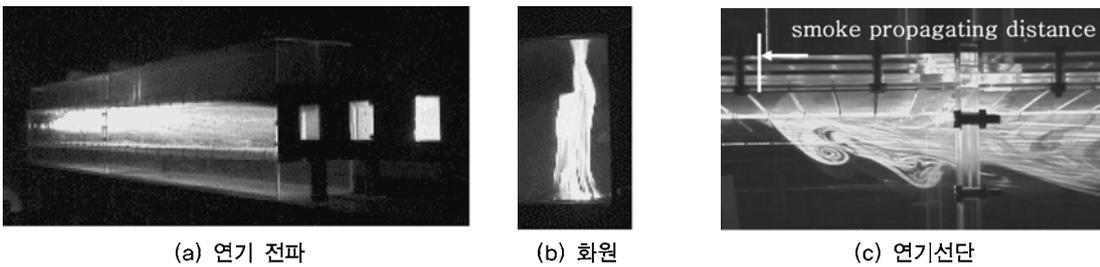


그림 8. 연기전파거리와 배기 (대칭의 경우)



(a) 연기 전파

(b) 화원

(c) 연기선단

사진 1. 모델 터널 실험 사진

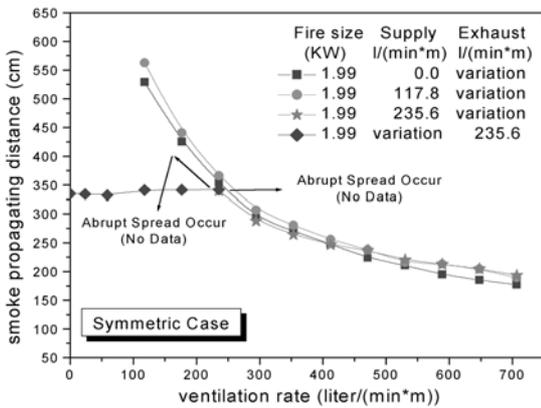


그림 9. 급기가 연기전파거리에 미치는 영향 (대칭의 경우)

량을 나타낸다. 터널내로 급기가 주어지지 않는 경우 (Supply=0), 배기량 (Exhaust)이 증가하면서 연기전파거리가 감소하고, 화원의 크기가 증가하는 경우 연기전파거리는 증가함을 알 수 있는데 물리적으로 매우 자명한 사실이다.

그림 9는 급기량의 변화가 연기전파거리에 미치는 영향을 보여주고 있다. 급기유량 117.8 l/min·m의 경우와 급기가 없는 경우를 비교하면 연기전파거리가 아주 조금 변화하기는 하나 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 급기량이 증가하면서 연층이 조금씩 하강하는 것을 실험중에 관찰할 수 있었다. 이러한 급기 실험의 경우 급기량이 배기량보다 많아지면 (배기량 235 liter/min·m), 연기가 터널 전체로 퍼져 연기전파거리

를 측정할 수 없었다. 이러한 경향은 배기량을 고정 (Exhaust=235.6 l/min·m)하고 급기량을 변화시킨 실험결과 사진 2에도 잘 나타나고 있다. 급기량이 증가해도 연기전파거리는 거의 변화하지 않다가, 급기량이 배기량보다 많아지는 경우에 연기가 급기된 공기와 급격히 섞여 터널 전체로 확산되어 터널 전체에 충만하게 된다. 사진 2의 (b)와 (a)를 비교하여 보면 급기량의 증가가 터널내의 연기확산에 미치는 영향을 알 수 있다. 연층이 상당부분 하강하고 급기에 의한 난류가 형성되고 있다. 급기와 배기가 동시에 이루어지는 전횡류식 (full transverse) 환기시스템의 경우 급기는 화재연기 전파의 관점에서는 긍정적인 요소가 전혀 없으며, 급기량이 배기량을 넘어서면 오히려 부정적인 영향이 미치게 됨을 알 수 있다.

비대칭의 경우

여기에서는 화원의 위치가 터널의 한쪽 측면에 위치하여 연기전파를 비롯한 물리적 현상이 비대칭인 경우의 실험결과를 설명한다. 비대칭 형상의 경우 터널내 공기의 유동은 대칭 형태의 경우와 다르게 그림 10과 같이 결정된다. 배기량이 급기량보다 많은 경우 터널 외부의 공기가 터널 내부로 유입되어 종방향 유속이 터널 외부에서 터널 중심부를 향하게 된다. 이 경우 종방향 유속이 없어지는 정체면은 정체면 좌우 부분의 압력손실과 직접적인 관계가 있다. 만일 화원과 연기가 압력손실에 미치는 영향을 무시할 수 있다면 정체면은 터널의 중앙부근



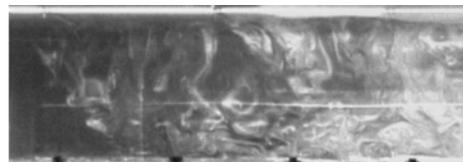
(a) Supply ventilation rate = 0 liter/min·m



(b) Supply ventilation rate = 58.9 liter/min·m



(c) Supply ventilation rate = 117.8 liter/min·m



(d) Supply ventilation rate = 235.6 liter/min·m

사진 2. 급기에 의한 터널내의 연기확산 (대칭, 배기량 = 235.6 liter/minm)

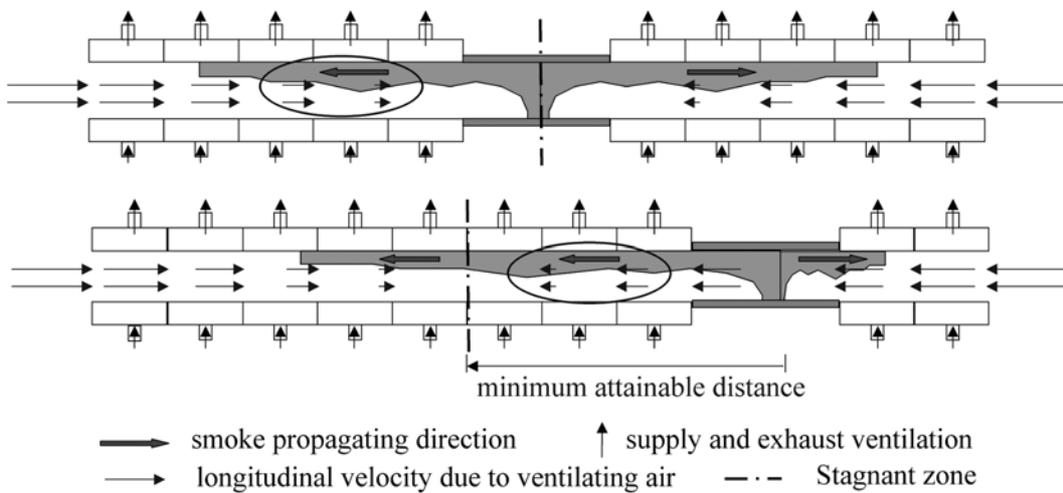


그림 10. 연기전파와 종방향 환기풍속의 방향

에 위치할 것이다. 실제로는 터널 좌측으로부터 5m 주변에 정체면이 형성되었다. 지금 정체면은 오직 환기용 공기에만 국한해서 논의되고 있다. 화원에서 발생한 연기는 우측으로는 종방향 유속을 이기며 터널 출구를 향해 전파되면서 천장면으로 배기된다. 좌측으로는 터널 중심부까지는 종방향 유속을 따라, 그 후로는 종방향 유속을 이기며 전파되면서 천장면으로 배기된다. 급기량이 배기량보다 많은 경우 터널 내부의 공기가 터널 외부로 유출되어 종방향 유속이 배기량이 급기량보다 많은 경우의 반대방향으로 형성된다. 따라서 화재연기 거동도 배기량이 급기량보다 많은 경우와 반대의 경로를 겪는다.

그림 11은 화재규모, 배기량의 변화에 따른 화재연기 전파 결과를 보여주고 있다. 세로축은 화원으로부터의 연기전파거리를 나타내며, 가로축은 단위 길이당 환기량을 나타낸다. 터널내로 급기가 주어지지 않는 경우 (Supply=0), 배기량이 증가하면서 연기전파거리가 감소하고, 화원의 크기가 증가하는 경우 연기전파거리는 증가함을 알 수 있다. 그러나 배기량이 증가하더라도 연기전파거리가 계속 짧아지지 않고 일정한 값으로 접근되는 거리 (4m 부근)가 존재한다. 이는 배기량이 증가하면 터널 천장면을 통하여 연기가 급속히 배출되지만 기본 유동의 특성상 화원으로부터 터널 중심부로의 강한 종방향 유속이 발생하여 이를 따라 연기가 전파되기 때문이

다. 즉 환기에 의한 종방향의 공기유동이 터널의 일정 구역에서 연기전파를 보조하기 때문이다. 대칭적 구조에서는 터널의 전 구간에 걸쳐 환기유동과 연기유동의 방향은 반대이다. 이러한 원인에 의하여 비대칭 형태에서의 연기전파거리가 대칭 형태의 거리에 비하여 일반적으로 크게 된다. 화재가 터널 중앙부에서 일어나지 않는다면, 터널 길이방향으로 균일하게 배기하는 횡류식 환기 시스템의 경우, 배기량이 충분히 많더라도, 연기가 터널 중앙까지는 항상 전파되는 부정적인 결과를 얻는다. 그

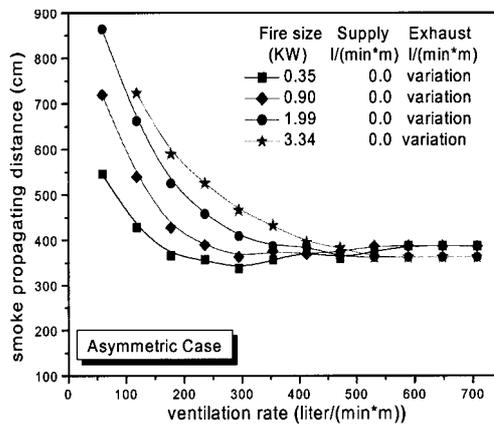


그림 11. 연기전파거리와 배기 (비대칭의 경우)

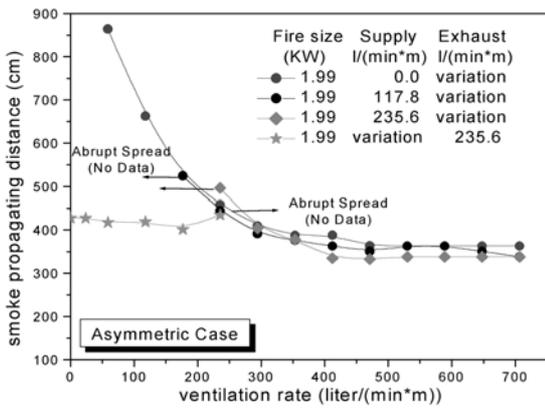


그림 12. 급기가 연기전파거리에 미치는 영향 (비대칭의 경우)

러므로 횡류식 시스템을 설계할 때 이러한 상황을 고려하여 종방향 유속의 크기를 제한할 수 있는 고려가 있어야 할 것이다.

그림 12는 급기량의 변화가 연기전파거리에 미치는 영향을 보여주고 있다. 급기량을 변화시켰을 때는 대칭형상의 경우와 마찬가지로 연기전파거리에 큰 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있으며, 비대칭 형상에서도 대칭형상과 마찬가지로 급기량이 배기량보다 많아지는 경우 연기가 급기된 공기와 급격히 섞여 터널 전체로 확산되어 연기 전파거리에 대한 실험 결과가 없다. 즉 급기와 배기가 동시에 이루어지는 전횡류식 (full transverse) 환기 시스템의 경우 급기는 터널 내 오염 공기의 환기에는 유

용한 영향을 미칠 수 있으나, 대칭과 비대칭에 관계없이 화재연기 전파의 관점에서는 긍정적인 요소가 전혀 없으며, 급기량이 배기량을 넘어서면 오히려 부정적인 영향을 미치게 됨을 알 수 있다(Federal Highway Administration, 2000).

실제 터널에서의 연기전파거리 추정

모델터널 실험에서 측정된 발열량과 환기량은 Froude 상사에 의해 실물터널에서의 발열량과 환기량으로 예측될 수 있다. Froude 상사에서 축소터널과 실물터널사이의 발열량과 유속의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{Q_M}{Q_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{\frac{5}{2}} \frac{V_M}{V_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{\frac{1}{2}}$$

위의 관계식으로부터 실물터널 화재에서의 화재크기 및 환기유량, 연기전파거리를 도시하면 그림 13, 14와 같다. 화재 규모 5.97MW, 급기 0, 배기 0.351m²/sec에서 연기전파 거리는, 대칭형상에서는 60m, 비대칭 형상에서는 85m임을 예측 할 수 있다.

표 2에 외국 주요 터널의 횡류식 환기 용량과 본 연구에서 수행한 환기유량을 비교하였다. 비록 실험상의 한계 때문에 화재 규모의 범위가 6MW정도까지 만을 예측하였지만 본 연구의 연기전파거리 예측은 기존의 횡류식 터널 설계자료나 기존 연구에서 찾아볼 수 없는 본 연구만의 독창적인 것이다. 이는 화재시 환기용량 및 피난시

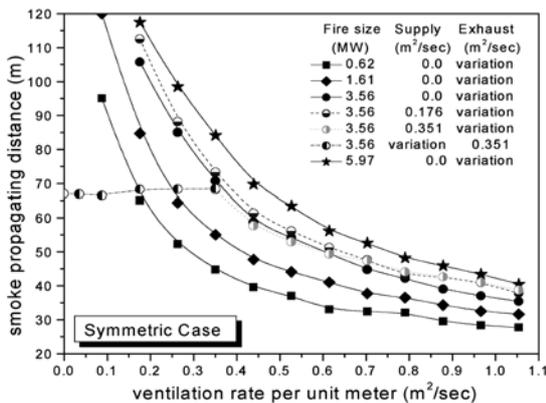


그림 13. 실제 터널에서의 연기전파거리 (대칭의 경우)

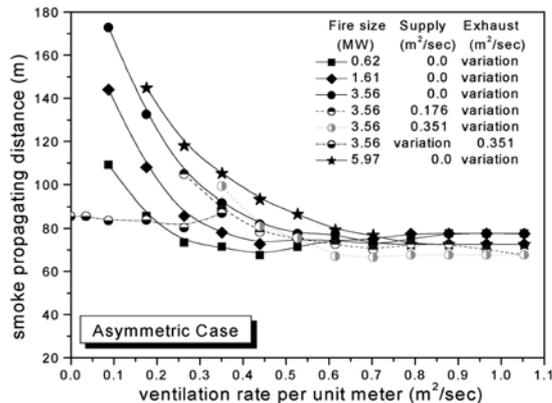


그림 14. 실제 터널에서의 연기전파거리 (비대칭의 경우)

표 2. 유럽 주요 도로터널의 환기용량

터널	길이/환기방식	총환기량	단위길이당 환기유량
Memorial Tunnel Experiment	0.81km/Supply and Exhaust		0.078~0.31m ² /s
Monte Blanc Tunnel, France, (Before Accident)	11.6km/Supply and Exhaust	900m ³ /s	0.078m ² /s
Monte Blanc Tunnel, France (After Accident)	11.6km/Supply and Exhaust	2000m ³ /s	0.172m ² /s
Gotthard tunnel, Swiss	16.3km/Supply and Exhaust	2150m ³ /s	0.132m ² /s
Seelisberg Tunnel, Swiss	9.25km/Supply and Exhaust	3540m ³ /s	0.382m ² /s
Frejus Tunnel, France	13.5km/Supply and Exhaust	2880m ³ /s	0.213m ² /s
Model Tunnel, KIMM	Supply and Exhaust		100m Propagation with 6MW Fire at 0.17m ² /sec Exhaust

간 결정 등의 화재 안전설계에 중요한 자료가 될 것이다.

여기에서 급기와 배기를 동시에 수행하는 횡류식 터널의 경우 실제 배기만을 위한 환기량은 위에 도시한 값의 대략 50~60% 정도이다. 이들을 본 연구에서 수행한 모델터널 실험과 비교해 보면 장대터널들의 횡류식 환기 설비용량은 6MW정도의 작은 화재에서도 연기전파거리를 약 100m 이상 정도까지만 제한할 수 있는 설비를 가지고 있음을 알 수 있다. 실제로 터널 환기설비의 설계 화재 규모는 일반적으로 20~100MW까지 이므로 이들 터널들에서 실제 화재시 연기전파거리는 수백m에 도달할 것으로 예상된다.

4. 결론

종류식 화재환기설계 방법에 대한 분석결과는 다음과 같다.

1. 도심지 근처의 교통혼잡이 예상되는 터널에는 종류식 시스템의 적용이 매우 제한되어야 한다.
2. 임계유속 결정을 위한 식들을 검토한 결과 Kennedy의 식이 가장 작은 임계유속 값을 준다. 따라서 환기설계를 적정하게 하기 위하여는 수정된 식이나 다른

식을 사용함이 효과적이다.

횡류환기식 모델터널에서 화재크기, 위치, 급배기량의 변화에 따른 연기전파 거동을 관찰한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

3. 화재가 터널의 중앙이 아닌 곳에서 일어날 경우 배기유량이 증가하여도 연기는 터널 중앙부까지 전파된다. 즉 배기량과 관계없이 최소 연기전파거리가 존재한다.
4. 급기의 양은 그 양이 배기의 양보다 작은 경우 연기전파거리에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 급기량이 배기량을 넘어서면 터널 바닥에서 공급되는 급기에 의해 연층이 급격히 섞여 터널 단면을 가득 채우면서 터널 길이 전체로 퍼져나가게 된다. 이는 분명히 화재 안전에 강한 부정적인 영향을 끼친다.
5. Froude 상사법칙에 의해 실험결과를 실험터널 결과로 환산 할 경우, 주요 횡류환기식 터널들에서 6MW 정도의 작은 화재라도 연기가 100m 이상 전파된다.
6. 횡류식 터널의 화재환기 설계시 지금까지 관행적으로 설계하였던 방법은 물리적 근거가 희박하기 때문에 본 연구에서 논의한 연기전파거리, 급기와 배기량의 비율 등에 의한 환기용량 결정을 제안한다.

기호

- β : 보정계수
- γ : 터널의 경사도 (%)
- A : 터널 단면적
- Fr_c : 임계 Froude 수
- H : 터널높이
- \overline{H} : 터널의 수력직경
- L_F : 실물터널의 길이
- L_M : 모델터널의 길이
- K_g : 경사도 계수
- Q : 화재규모
- Q_F : 실물터널의 화재규모
- Q_M : 모델터널의 화재규모
- T_f : 화재의 가스온도
- V_c : 임계유속
- V_F : 실물터널의 종방향 유속
- V_M : 모델터널의 종방향 유속

참고문헌

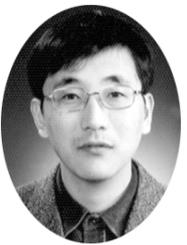
1. Y. Wu and M. Z. A. Bakar (2000), "Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems a study of the critical velocity", Fire Safety Journal, Vol. 35, pp. 363-390.
2. PIARC Committee on Road Tunnels (C5) (1999), Fire and smoke control, 05.05.B.
3. Bechte/Parsons Brinckerhoff (1996), "Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Phase IV Report", prepared for Massachusetts Highway Department, January.
4. Prevention and Control of Highway Tunnel Fires (2000), FHWARD-83-032, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
5. W. D. Kennedy (1996), "Critical Velocity: Past, Present and Future", Paper presented in the One Day Seminar on Smoke and Critical Velocity in Tunnels, London, 2 April.
6. D. Tetzner (1999), "Critical Velocity - Comparative Assessment of Test Results and CFD Simulation", Proceedings of the First International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Escape from Tunnels, 5-7 May, Lyon, France.



김명배
한국기계연구원 화재안전연구팀 부장
mbkim@kimm.re.kr



최병일
한국기계연구원 화재안전연구팀
cbisey@kimm.re.kr



최준석
한국기계연구원 화재안전연구팀
jschoi@kimm.re.kr



한용식
한국기계연구원 화재안전연구팀
yshan@kimm.re.kr