

도로터널 제연설비 설계기준 동향

도로터널 제연설비 설계기법 및 각국의 기준에 제시되어 있는 시설기준과 운전방안에 대해서 소개한다.

유 지 오

신흥대학 건축설비과(jolew@shc.ac.kr)

도로터널 제연설비

도로터널은 반밀폐구조라는 특수성으로 인해서 터널내에서 화재가 발생하는 경우, 기류의 확산이 제한되어 화재연기로 인한 가시거리의 감소, 유독성가스의 확산 및 공기온도의 급격한 상승, 산소농도의 감소를 초래하여 통행자의 생명을 위협할 뿐만 아니라 구조물이나 각종설비 및 차량의 손상을 유발할 수 있다.

따라서, 도로터널은 평상시나 화재 등의 비상상황에서 안전을 확보하기 위해서 우선적으로 사고를 예방하기 위한 대책 및 시설을 설치하며, 사고의 충격을 최소화할 수 있도록 환기설비를 비롯하여 각종 방재설비가 설치된다. 도로터널의 화재시 안전을 위해서는 다양한 방재설비의 유기적인 체계구축이 중요하며, 특히 많은 연구보고서에 의하면 인명의 대피환경을 확보하기 위한 수단으로 제연설비가 가장 효과적인 것으로 보고되고 있다.

터널이나 지하철에서 화재가 발생하는 경우, 화재에 직면한 대피자들은 초기에 정확한 상황판단을 수행하기가 어려우며, 몽브랑 터널화재시 사망자의 대부분이 차량에 근접한 지역에서 발생했다는 사실에서 알 수 있는 바와 같이 대피자의 대부분은 차량이 외부보다 안전하다는 의식이 지배적이기 때문에 초기에 차량을 버리고 대피하는데 많은 시간이 소요되며, 차량안에서 대기하다 화재가 확산되어 급박한 상황에 직면한 후 대피하려는 성향을 보이는 것이

일반적이다. 이와 같은 이유로 해서 도로터널에서의 차량화재시 초기에 신속한 대피명령의 전파 및 대피환경의 확보가 가장 중요한 요소이며, 대피환경의 확보에 가장 중요한 역할을 하는 것은 제연설비이다.

이에 본 원고에서는 도로터널의 제연설비 설계를 위한 화재강도 및 연기발생량, 임계풍속등 설계기준과 터널의 특성별 제연설비의 적용연장 및 제연팬의 운전계획 등에 관련된 각국의 기준상의 규정을 소개하고자 한다.

도로터널 제연방식

도로터널에서 화재가 발생하는 경우, 연기의 제어 및 배연은 평상시 환기시스템에 의해서 수행되며, 터널의 천정이나 측벽에 덕트를 설치하여 화재연기를 흡입·배출하여 화재공간에서 연기를 완전히 제거하는 배연(smoke exhaust)방식과 대피로 반대방향으로 기류를 형성하여 대피공간을 확보할 수 있도록 연기류를 제어하는 제연(smoke control)개념의 환기시스템으로 구분할 수 있다. 전자는 횡류 또는 반횡류 환기시스템이며, 후자는 종류 환기시스템이라 한다. 각각의 화재시 특성은 표 1과 같이 정리할 수 있다.

일반적으로 횡류환기방식은 화재지점의 연기를 배출하여 연기를 제거하는 적극적인 수단으로 연기를 대피공간으로부터 완전히 제거한다는 장점이 있으나 연기발생이 많은 경우에 연기류의 배연이나 제어

가 곤란한 단점이 있으며, 종류환기방식의 경우에는 연기를 배연하지는 못하나 대피자의 반대방향으로 연기류를 제어함으로써 연기가 대피자를 덮치는 것을 방지할 수 있는 시스템이다.

따라서 횡류환기방식은 도로터널에서 대피자가 화재의 상류와 하류 전지역에 존재할 가능성이 높은 대면통행터널에서 효과적이며, 종류환기방식은 정체가 발생하지 않는 일방통행 터널에서 효과적으로 제연을 수행할 수 있는 경제적인 시스템이나, 차량정체로 인해서 터널내 화재지점의 상·하류에 대피자가 존재하는 경우에는 어떤 방향으로 제연을 하더라도 대피자를 위협에 처하게 할 우려가 있다.

각국의 제연설비 관련기준

도로터널 제연설비설계시 주요 인자는 설계화재강

도 및 이에 따른 임계풍속과 연기발생량으로 임계풍속은 종류환기방식의 젯트팬용량에 영향을 미치며, 연기발생량은 횡류환기방식의 배연량에 산정을 위한 기초자료이다. 또한 제연설비와 관련하여 젯트팬의 설치위치 및 화재시 운영방안과 횡류환기방식의 경우에는 배출구의 간격 및 형상이 설계시 중요한 인자로 고려되어야 한다. 본 절에서 각국의 기준상에서 정하고 있는 관련 규정을 소개한다.

화재강도 및 연기발생량

터널에서 차량화재가 발생하는 경우, 차종별 화재강도 및 연소생성물의 양은 연소상태에 따라서 차이가 많으나, 차종별 화재강도 및 연기발생량과 일산화탄소(CO)발생량은 현재 국내에서는 "Fire and Safety in Road Tunnel, PIARC"에 제시되어 있는 값

<표 1> 횡류환기방식 및 종류환기방식의 비교

구분	횡류식(또는 반횡류식)	종류식
연기의 제어	배연(Exhaust Smoke) : 터널공간으로부터 연기를 배기할, 열기류의 방향성 제어 곤란 메모리얼 터널의 화재실험결과에 의하면 화재규모가 20 MW 이하에서는 연기의 제어가 가능하나 20 MW를 초과하는 경우에 제어가 곤란하여 적용성이 떨어짐	제연(Smoke Control) : 열기류의 흐름을 대피반대방향으로 제어함. 화재지역으로부터 대피 반대방향으로 연기류를 제어 열기류의 방향성 제어용이
환기팬의 운전제어	송기 반횡류식의 경우, 화재시 배연모드로 전환하기 위한 대기시간과 역전운전후에 정상가동에 필요한 시간지연이 길다.	30초에서 1분 이내에 젯트팬 정상운전속도에 도달
통행방식에 따른 적용	일방통행 터널의 경우에는 차량의 피스톤효과에 의한 풍속이 상시 존재하므로 열기류의 방향성 제어가 곤란하여 일방통행 터널보다는 대면통행 터널에 대한 적용성 우수함	대면통행 터널보다는 일방통행 터널에 대한 적용성 우수함 교통정체시에는 연기가 화재하류 지역의 차량이나 대피자를 덮칠 수 있다. 이와 같은 이유에서 독일 및 프랑스에서는 단순히 젯트팬에 의한 종류환기방식은 대면통행터널에 적용을 금지하는 경우도 있음.
배연을 위한 환기 용량 산정	화재강도에 따른 연기발생량 및 연기의 확산을 억제하기 위한 최소풍속을 얻기 위한 풍량으로 추가하여 배연풍량 결정	연기의 역류를 억제하기 위한 임계풍속을 유지할 수 있도록 젯트팬 설치 댓수를 결정한다.
배연 또는 제연능력 향상을 위한 방안	선택 배기구 방식에 의해서 화재지점에서 집중적으로 연기를 배기할 수 있는 시스템 구축이 필요 제어가 복잡해지고 각 배기구에 전동팬퍼의 설치로 인해서 설치비용 및 유지관리 비용 증대	일정 간격으로 수직갱 또는 배연용 덕트를 설치하여 연기의 배기능력을 증대할 필요가 있음.
비상전원	현 기준에 의하면 배기 또는 급기목적의 대형 축류팬은 비상전원시설 용량이 대용량이 되며, 소요비용이 증대됨.	종류식 환기의 주 제연설비인 젯트팬은 비상발전기에 의해서 가동되도록 시설하고 있어, 정전 등의 비상시 제연이 가능하다.



을 기준으로 적용하고 있다. 전술한 문헌의 화재강도와 CO 및 연기발생량은 차종별로 제시되어 있어 어떤 차종을 설계차종으로 할 것이냐에 따라서 제연설비용량이 달라지기 때문에 설계시 혼란의 여지가 있는 실정이며, 각국의 설계기준에 제시되어 있는 기준치를 알아보면 표 2에 나타낸 바와 같다.

미국의 경우 차종별 화재강도와 연기발생량을 제시하고 있으며, 설계화재강도에 대한 언급은 없으나 NFPA 502의 부록 G에 횡류환기방식의 설계를 위한 연기배출풍량 기준은 20 MW로 제시하고 있다. 독일의 경우에는 대형차의 통과 댓수에 따라서 구분하고 있으며, 30~100 MW를 설계화재강도로 하고 있다. 영국의 경우에는 터널연장과 도로구분에 따라서 20, 50 MW를 차등적용하고 있는 특징을 보이고 있다. 일본의 경우, 방재시설설계기준에 설계화재강도는 명시하고 있지는 않으나 20MW를 일반적으로 적용하고 있다.

임계풍속

일반적으로 터널에서는 화재가 발생하면 열기류가 급격히 천정으로 상승하여 종방향 기류가 작은 경우에는 기류의 방향과 반대방향으로 이동하게 되면 +경사방향으로 열기류가 이동하게 되는데, 이를 백레이어링(backlayering)이라 한다. 또한 종방향 풍속이 증가하여 관성이 부력보다 소정의 값 이상으로 증대하는 경우에는 부력에 의한 연기의 성층화가 교란되게 된다.

따라서 터널이나 덕트 구조물에서 화재시 성층화를 유지하면서 열기류의 역류현상은 억제하기 위한 최소풍속을 임계풍속(critical velocity)이라 한다.

임계풍속은 프라우드(Fr)수를 변수로 하는 관계식에 의해서 계산하고 있으며, 다음과 같은 과정을 통해서 유도된다.

터널방재 이론에서 사용하는 Fr는 수정된 Fr(이하

<표 2> 화재강도 및 연기발생량

구분	화재강도 (MW) 및 연기발생량(m ³ /s)				
도로터널방재시설설치지침	화재강도 : 20, 연기발생량 : 80				
미국 (NFPA502)	구분	승용차	버스/트럭	탱크롤리	
	화재강도	약 5	약 20	약 100	
	연기발생량	20	60	100-200	
독일 (RABT 2002)	대형차 차량대수에 따라서 정의함				
	대형차대수 (대 · km/day · tube)	4000 이하	4000 ~6000	6000 이상	
	화재강도(MW)	30	50	100	
	연기발생량m ³ /s	80	120	200	
프랑스 (CETU 2002)	화재강도는 30 MW로 하며, 이중 1/3은 열복사에 의해서 손실되는 것으로 한다. 연기발생량 : 80				
영국 (BD7899C)	터널연장 (m)	화재강도			
		Motorway	Urban Major Route	Rural Major Route	Urban Major Route
		> 2000	50	50	20
	< 2000	50	20	20	20
- 연기발생량에 대한 기준없음					
일본	- 기준상에 제시되지 않음				
	- 일반적으로 화재강도를 20 MW 정도로 하고 있음				

Fr로 함)로 식(1)과 같이 표현된다.

$$Fr = \frac{gH(\rho_o - \rho_i)}{\rho V_r^2} = \frac{\text{부력}}{\text{관성력}} \quad (1)$$

$$= \frac{gH}{V_r^2} \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right)$$

또한, 화재지점의 상류 및 하류의 열평형식은 식(2), 연속방정식은 식(3)으로 표현된다.

$$mC_p T_o + Q = mC_p T_i \quad (2)$$

$$\frac{T_o}{T_i} = 1 - \frac{Q}{mC_p T_i}$$

$$m = \rho A_r V_r \quad (3)$$

여기서, T_o : 화재지점 상류로부터 유입되는 공기 온도, m : 유입되는 공기의 질량, C_p : 공기의 비열, T_i : 화재에 의해서 가열된 화재지점하류의 공기의 온도이다.

따라서, 식(2)와 식(3)을 식(1)에 대입하면 Fr는 식(4)로 표시될 수 있다.

$$Fr = \frac{gHQ}{\rho_o C_p A_r T_i V_r^3} \quad (4)$$

식(4)에서 V_r 은 식(5)로 표현된다.

$$V_r = Fr^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{gHQ}{\rho_o C_p A_r T_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

따라서, 임계풍속은 백레이어를 방지하는 Fr를 어떻게 정의하느냐에 따라서 달라지게 되며, 이를 임계

Fr(Fr_c)라 한다. Thomas(1968)는 $Fr_c=1$ 로 하고 있으며, Leel(1979)는 $Fr_c=4.5 \sim 6.7$ 의 범위에서 백레이어링이 발생하지 않고 있다고 밝히고 있으며, Kennedy는 $Fr_c=4.5$ 로 정하고 구배보정계수를 도입하여 구배에 따른 영향을 검토하고 있다.

또한 Tetzner는 터널의 바닥면적과 화원의 면적이 임계풍속에 큰 영향을 미치게 된다고 밝히고 식(5)를 식(6)과 같이 수정하여 값을 적용해야 한다고 보고하고 있다.

$$V_r = K_g Fr_c^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{gHQ}{\beta \rho_o C_p A_r T_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

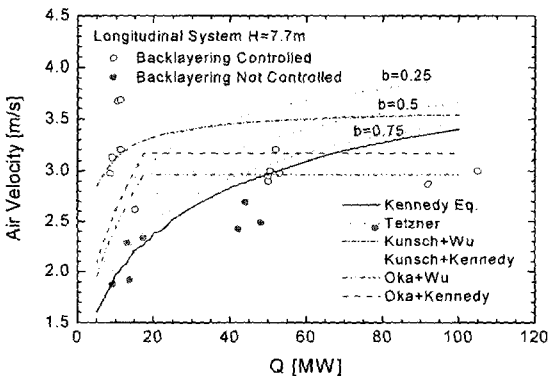
$$T_i = \frac{Q}{\beta \rho_o C_p A_r V_r} + T_o$$

$$K_g = 1 + 0.020 \text{grade}^{0.8}$$

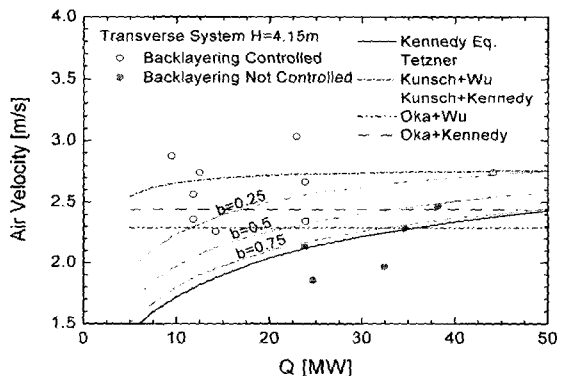
Wu(1996)는 화재강도가 증가하면 $V_{rc} \propto Q^{1/3}$ 의 관계가 유지되지 않는다는 개념에서 상임계풍속(Super critical velocity)를 고려할 것을 제안하고 있다.

메모리얼 터널(연장: 853 m, 종단경사: 3.2%)의 실험결과와 연구결과를 비교하면 그림 1과 그림 2와 같다. 그림에서 ○은 백레이어링이 제어되는 경우이고, ●은 백레이어링이 발생하는 경우이다. 또한 임계풍속에 대한 실험식에 의한 계산 결과를 나타냈다.

그림 1에 의하면 Kennedy식에 의해서 구한 임계풍속은 실험범위의 화재강도에 대해서 20 MW 범위에서는 과소평가되고 있으며, 50~100 MW 범위에서는 5~15%범위에서 과대평가하고 있음을 알 수 있다.



[그림 1] 임계풍속 비교
(종류식: 단면적 60.4 m², 높이 7.7 m)



[그림 2] 임계풍속 비교
(횡류식: 단면적 36.2 m², 높이 4.15 m)



또한 그림에서 화재강도가 50 MW 이상의 범위에서는 화재강도가 증가해도 임계풍속에 변화가 생기지 않는 것으로 나타나고 있는데, 이는 상임계풍속(Supercritical velocity)이 존재함을 보이는 결과이다.

Tetzner가 제시한 보정계수($\beta=0.25, 0.5, 0.75$) 적용한 경우, 정확한 비교는 곤란하나 20 MW의 화재에 대해서 $\beta=0.75$ 를 적용하는 경우에는 약간 작게 평가되는 것으로 나타나고 있으며, $\beta=0.25$ 를 적용하는 경우에는 상당히 크게 평가되는 것으로 나타나고 있다. 또한 $\beta=0.5$ 를 적용하는 경우에는 비교적 실험결과와 잘 일치하는 것으로 판단할 수 있다.

그러나 화재강도가 증가하여 40~50 MW 범위에서는 Kennedy 및 Tetzner식은 임계풍속을 과대평가하는 것으로 나타나고 있다.

Kunsch, Oka에 의해서 제시된 식은 실험결과와 비교할 때 20 MW 범위에서는 과대평가하고 있는 것으로 나타나고 있으며, Oka의 식에 Wu가 제시한 보정

계수를 적용하는 경우 40~50 MW 범위의 상임계풍속(Supercritical Velocity)영역에서는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.

그림 2는 횡류환기방식에 대한 실험결과와 비교한 것으로 Kennedy식은 전반적으로 임계풍속을 과소평가하고 있는 것으로 나타나고 있으며, Oka의 연구결과를 적용한 결과, 실험범위의 임계풍속은 상임계풍속(Supercritical Velocity)영역에 있는 것으로 나타나고 있다. 이 경우에는 Oka와 Tetzner가 발표한 계산식이 비교적 근사한 결과를 보이는 것으로 나타나고 있으나, Tetzner의 식의 경우 보정계수를 0.25를 적용할 때 20 MW범위에서는 약 10%정도로 과대평가하고 있으며, $\beta=0.75$ 인 경우에는 약간 과소평가하는 결과를 보이고 있다. 이 경우에도 $\beta=0.5$ 인 경우가 가장 근접하는 것으로 나타나고 있다.

표 3은 각국의 기준에 제시된 임계풍속 관련 규정을 정리하여 나타낸 것으로 미국과 국내의 경우에는

<표 3> 방재설비 기준상의 임계풍속

국 가	임계풍속 적용기준				
도로터널방재 시설설치지침	Kennedy가 제시한 경험식과 Wu에 의해서 제시된 구배보정계수의 적용을 원칙으로 하여, Tetzner가 제시한 β 을 고려하여 CFD 시뮬레이션을 통해서 결정한다.				
미국 (NFPA502)	Kennedy가 제시한 경험식을 적용한다.				
영국 (BD7899C)	임계풍속에 대한 정의 없음				
독일 (RABT)	종단경사	임계풍속(m/s)			
		30 MW	50 MW	100 MW	
		0~2%	2.5	2.8	3.1
		2~3%	2.6	2.9	3.3
	3~6%	2.8	3.1	3.6	
프랑스 (CETU)	화재강도에 따른 임계풍속에 대한 언급이 없으며, 환기방식에 따라서 다음과 같이 제연설비를 운영하도록 규정하고 있다. <ul style="list-style-type: none"> • 도시터널이외 일방향 터널 : <ul style="list-style-type: none"> - 3 m/s 이상으로 제연설비를 운전한다. • 도시의 일방향 터널 및 양방향 터널 <ul style="list-style-type: none"> - 화재초기단계 1~2 m/s 이하를 유지하며, 인명의 대피가 완료됐다고 판단되는 시점에서 3 m/s 이상으로 운전한다. • 횡류환기방식의 터널 <ul style="list-style-type: none"> - 1.5 m/s를 초과하지 않도록 한다. 				
일본	임계풍속에 대한 정의는 없으며, 일반적으로 제연설비는 2 m/s 이상을 확보할 수 있도록 하고 있다. (참고) 동경만 터널 2 m/s 이상				
오스트리아	임계풍속에 대한 정의는 없으며, 종류식에서 1.5 m/s 이상의 풍속을 유지하도록 함.				
네덜란드	화재강도 100 MW 이하 : 3 m/s, 화재강도 100 MW 이상 : 5 m/s 이상으로 할 것으로 추천하고 있다.				
PIARC	Kennedy식에 의한 임계풍속 산정을 추천하고 있다.				

Kennedy에가 제시한 경험식을 적용하고 있으며, 독일의 경우에는 이를 근거로 하여 터널현상, 경사도, 화재강도에 따라서 표로 제시하고 있다. 그러나 그 외의 국가에서는 경험에 의한 수치를 개략적으로 제시하고 있음을 알 수 있다. 임계풍속은 화재강도, 터널의 형상 및 화원의 크기 등 다양한 인자에 영향을 받기 때문에 정확하게 예측하는 것은 불가능할 뿐만 아니라 일반적으로 터널에서 화재가 발생하는 경우, 임계풍속을 정밀제어하는 것은 현재의 제어수준에서 불가능하다. 따라서 임계풍속의 결정은 CFD 시뮬레이션등을 수행하여 신뢰성을 확보하고 안전을

을 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

제연시설의 터널적용

도로터널에서 제연시설은 터널연장 및 지리적인 위치나 교통류의 특성을 반영하여 결정하며, 이에 대해서 각국 기준상에 제시된 규정을 알아본다.

표 4의 각국의 제연설비적용기준을 나타낸 것으로 제연시설의 최소 적용연장은 일본을 제외하고 200~600 m정도로 하고 있으며, 터널의 통행방식과 지역적인 특성을 고려하여 적용제연방식을 결정하기도

<표 4> 각국의 제연설비 적용기준

국가 또는 기준	적 용
도로터널방재 시설설치지침	<ul style="list-style-type: none"> • 지방의 일방통행터널 <ul style="list-style-type: none"> - 연장 1000 m 이상, 위험도평가에 의해서 500 m부터 검토함. • 대면통행 터널과 교통정체가 심한 일방통행 터널 <ul style="list-style-type: none"> - 연장 500 m 이상 터널부터 검토
일본 (도로공단)	1000 m 이상 터널, AA 등급 터널은 배연시설이나 피난갱을 검토함.
독 일 (RABT 2000)	<ul style="list-style-type: none"> • 대면통행 터널과 교통정체가 심한 일방통행 터널 <ul style="list-style-type: none"> - 400 m 이상은 제연설비를 설치한다. - 400~600 m의 범위는 종류환기방식을 적용할 수 있다. - 600~1200 m의 범위는 위험도 분석에 의해서 종류환기방식이나 또는 대배기구 방식의 환기방식을 적용함. - 1200 m 이상의 터널은 매퍼의 개폐가 가능한 제연시스템을 설치. • 정채 빈도가 낮은 일방통행 터널 <ul style="list-style-type: none"> - 600 m 이상의 터널에 대해서 재연설비를 설치한다. - 600~3000 m 종류식 환기방식 적용가능 - 3000 m 이상은 점 흡입(수직갱등)에 의해 배연능력을 향상한 종류환기방식의 적용 또는 대배기구 방식의 환기방식 적용
프랑스 (GETU 2002)	<ul style="list-style-type: none"> • 제연시설적용 연장 <ul style="list-style-type: none"> - 도시터널의 경우, 300 m 이상 - 통행량이 상당한 지방터널은 500 m 이상(대피시설등 보호시설을 강화하는 경우에는 800 m까지 확장될 수 있음) - 통행량이 적은 터널의 경우 1000 m 이상 • 종류환기방식의 적용 <ul style="list-style-type: none"> - 지방의 일방통행 터널 5000 m까지 적용, 수직갱등 배연시스템을 추가하여 적용 연장을 늘릴 수 있음. - 도시의 일방통행 500 m 이상의 터널은 종류환기방식은 적용하지 않는 것이 바람직함. 종방향 기류를 제어할 수 있는 시스템을 추가하는 경우 800 m까지 확대할 수 있음. - 도시외의 대면통행 터널 1,000 m까지 보호시설을 강화하여 적용 가능 - 도시의 대면통행 터널은 종류식 금지함. • 횡류환기방식의 적용(대배기구 방식) <ul style="list-style-type: none"> - 400~600 m 이상의 터널에 적용하며, 종방향 기류를 제어할 수 있는 시설을 추가한다.
영 국	<ul style="list-style-type: none"> - 교통량이 상당히 작고 경사도가 작은 터널의 경우는 400 m부터 검토. - 경사도가 크고 빈번한 정체가 예상되는 터널은 200 m부터 검토. - 경제성이 우수한 종류환기 방식을 우선적으로 고려하며, 팬의 역전운전이 가능해야한다.
미 국	<ul style="list-style-type: none"> - 최소 적용연장을 800 ft(240 m)로 하며, 대면통행터널은 터널내 풍속을 최소화하도록하며 연기 배출시스템을 권장, 일방통행터널은 임계풍속을 유지할 수 있도록 설계하며, 제연방식에는 제한이 없음.
노르웨이	<ul style="list-style-type: none"> - 제연설비의 적용 길이에 대한 규정 없음. - 종류식 환기방식은 터널연장이 길고 교통량이 많은 경우에는 부분적으로 제한함.



록 한다. 즉 대면통행터널의 경우에는 종류환기방식을 지향하고 횡류환기방식의 적용을 권장하고 있으며, 횡류환기방식의 경우, 기류의 제어를 위해서 균일배기방식 보다는 대배기구방식을 권장하고 있다. 또한 일방통행터널에 종류환기방식을 적용하는 경우에도 일정간격으로 대배기구(OEP : oversized exhaust ports)나 수직갱(SPE : single point extract system)을 적용하여 연기의 배출을 규정하고 있음을 알 수 있다.

횡류 환기방식(반횡류식)의 배연풍량

횡류환기방식은 터널에 덕트를 시설하여 신선공기를 급기하고 터널내 오염된 공기나 연기를 배기하도록 하는 시스템으로 일반적으로 급기와 배기가 동시에 수행될 수 있도록 하는 시스템을 횡류식이라 한다. 횡류환기방식은 배기 또는 급기만 수행하는 경우를 반횡류식이라 하고 전자를 배기 반횡류식, 후자를 급기 반횡류식이라 한다. 반횡류식의 경우, 배기 반횡류식은 터널내부에 풍속이 0이 되는 중성점이 발생할 수 있고 일반적으로 환기효율이 저하하는 단점이 있어 환기측면에서 급기 반횡류식의 채택이 많다. 그러나 급기 반횡류식의 경우, 화재시 연기를 배출하기 위해서 송풍기를 역회전하여야 하며, 역회전을 위해서 상당한 시간지연이 요구되기 때문에 화재시 초기대응에 문제점을 내포하고 있는 것으로 보고되고 있다.

또한, 횡류환기방식의 경우, 터널에 신선공기를 급

기하거나 배기를 위한 포트의 개폐가 불가능한 경우와 포트에 댐퍼를 설치하여 선택적으로 운영할 수 있도록 하는 방식이 있으며, 전자를 균일배기 방식, 후자를 선택 대배기 방식이라 한다.

횡류 환기방식에 대한 적정 배연풍량에 대한 연구는 메모리얼 터널의 실험결과를 기초로하여 작성된 NFPA 502, 독일의 RABT 02, 프랑스의 CETU 02에 제시된 기준이 있으며, Vauquelin 연구와 김명배의 실험적인 연구결과가 보고되고 있으나, 횡류 환기방식에서 배연풍량은 터널의 연장 및 배연구간의 선정, 터널내 풍속에 의해서 변하기 때문에 현재까지 적정 배연풍량 산출을 위한 설계자료가 미흡한 실정이다.

각국의 터널설계 기준에 제시된 배연풍량을 나타내면 표 5와 같으며, 일반적으로 600 m를 배연구역으로 하고 있으며, 이를 기준으로 할 때 배연풍량은 독일의 경우가 가장 크며, 오스트리아나 스위스는 80 m³/s로 일반적으로 제시되고 있는 화재강도가 20~30 MW의 화재시 연기발생량과 동일한 것을 알 수 있다.

독일이나 프랑스 기준상의 부가적인 배연풍량 ($A_r \cdot V_r$)은 종방향 기류를 제어하고 신선공기의 유입을 고려한 것으로 독일의 경우는 V_r 을 3.0 m/s, 프랑스의 경우는 1.5 m/s를 고려하고 있다.

전술한 바와 같이 횡류환기방식의 배연풍량은 각국의 기준이 상당한 차이를 보이고 있으며, 최근의 경향은 독일 및 프랑스 기준에서 제시하는 바와 같이 배연풍량으로 연기발생량 뿐만 아니라 주위의 신선공기의 유입이나 종방향 기류의 제어를 위해서 부

<표 5> 배연풍량 기준 비교

국가	배연풍량	비고
미국	균일배기방식 0.155 m ³ /s · lane · m	600 m기준 배연풍량 : 186 m ³ /s
	선택 대배기구방식 0.132m ³ /s · lane · m	600 m기준 배연풍량 : 158.4 m ³ /s
독일(RABT 02)	$Q_E = A_r \cdot V_r + Q_S$	$V_r = 3.0 \text{ m/s}$ 600 m 기준 배연풍량 : 215.6 m ³ /s
프랑스(CETU 02)	$Q_E = A_r \cdot V_r + Q_S$	$V_r = 1.5 \text{ m/s}$ 몽브랑 터널 : 150 m ³ /s · 600 m = 80 + 45.2 1.5 = 147.8 m ³ /s
오스트리아	$\geq 80 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{fire zone}$	80 m ³ /s
스위스	$\geq 80 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$	80 m ³ /s
김등	0.17 m ³ /s	6 MW, 100 m연기확산 600 기준 배연풍량 : 102 m ³ /s

가적으로 풍량을 고려하는 추세이다.

종방향 풍속제어에 대한 개념은 최근에 유럽에서 적용되고 있으며, 몽브랑 터널의 경우, 화재이후 종방향 기류를 제어하기 위해서 젯트팬을 시설하고 있으며, 니혼자키 터널의 경우에는 사칼트 방식을 적용하여 풍속을 제어할 수 있도록 고려하고 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 검토하여, 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 20 MW(연기 발생량 : 80 m³/s)를 기준으로 할 때 약 1.4 (118 m³/s)배 정도에서 배연효율이 100%에 도달하며, 화재강도가 작을수록 부가적인 풍량이 증가하는 것으로 보고하고 있다.

F. Demouge는 수치시뮬레이션 및 모형실험을 통한 대배구 시스템의 배연풍량을 결정하기 위한 연구를 수행하였으며, 연구결과에 의하면 종방향 기류의 풍속이 2.5 m/s정도인 경우에는 배연풍량을 연기발생량의 2배로 할때 배연효율이 약 80%정도이며, 종방향 기류가 존재하지 않는 경우에는 배연풍량이 연기발생량의 2배일 때 100%가 된다고 보고하고 있다.

화재시 제연팬 운전계획

본 절에서는 각국의 기준상에서 규정하고 있는 제연팬 운전계획 및 현재설계에 반영하고 있는 제연팬 운영계획에 대해서 정리하여 소개한다.

터널화재시 제연팬은 터널내 연기의 유동방향을 제어하고 배출하는 것을 목적으로 하고 있으며, 기본적으로 다음과 같은 기능을 수행한다.

- 백래이어링을 방지하기 위하여 종방향 기류를 형성하여 화재초기 대피 환경의 확보
- 신선공기를 공급하여 화재로부터 탈출로를 격리

하여 안전을 확보

종류환기방식을 채택하고 있는 일방통행터널은 화재 발생단계 및 이에 따른 제연팬 운전모드의 작성시 다음과 같은 사항을 고려하여 작성함을 기본으로 한다.

- 제 1 단계 (Ignition Phase) : 화재발생 및 감지, 이에 따른 제연팬 화재모드 가동
- 제 2 단계 (Evacuation Phase 1) : 화재 발생시 구조대가 도착하기 전, 자기구조단계(Self rescue)로 대피자 스스로가 판단하여 안전을 확보하여야 하는 단계로 대피 활동을 원활하게 하기 위해서 연기의 성층화를 유지하여 횡단면내에서 연기의 교란을 방지하며 종방향의 흐름을 유지하기 위한 단계
- 제 3 단계 (Evacuation Phase 2) : 구조대 및 소방관계자에 의한 대피와 구조가 이루어지는 단계로 소화활동과 구조활동을 위해 임계풍속을 유지하도록 계획
- 제 4 단계 (Fire Fighting) : 대피가 완료된 단계로 소화·구급활동을 위한 배연을 목적으로 하는 연기제어, 제연팬은 소화와 구급활동을 위해서 최대용량 또는 임계풍속으로 하여 가동한다.

위에 설명한 화재단계는 일반적인 화재 발생 단계를 나타낸 것이며, 환기기운영은 화재 감지에 의한 환기기 운전 개시, 임계풍속을 유지하기 위한 환기기 운전 단계, 대피가 완료된 후 소화활동을 원활하기 위한 최대 환기기 용량에 의한 환기기 운전단계로 구분될 수 있다.

화재시 제연팬 운전계획 수립을 위한 고려사항

화재시 연기확산의 최소화, 백래이어링의 방지, 성층화 유지, 가압운전을 통한 상대터널로의 연기유입 방지 등을 목적 다음과 같은 사항을 고려한 운전계획의 수립이 필요한 것으로 정리된다.

- ① 화재지점에서 가능한 먼 지점에 있는 팬의 운전한다.

일본 가구등 터널의 경우 화점에서 400~500 m 범위의 제트팬은 운전을 하지 않는 것으로 계획하고 있다.

- ② 압입운전 및 흡입운전 모드

터널내 화재시 화재와 제트팬의 상대적인 위치에 따라서 압입운전과 흡입운전으로 구분할 수 있으며, 압입운전은 화재 상류지역에 위치한 제트팬을 가동



하는 경우로 화재에 의한 열기류에 제트팬이 노출되지 않으므로 열에 의해 손상될 확률이 적으나 화점의 위치는 양압이 될 가능성이 많으며, 이 결과로 피난연락갱을 통해 연기가 유출될 가능성이 많기 때문에 대피터널에서의 가압운전이 요구된다.

또한 흡입운전은 화재하류지점의 제트팬을 가동하는 경우로 화재부근 기류의 성층화를 교란할 우려가 없으며, 터널내 압력을 부압으로 유지할 수 있는 가능성이 높으나 제트팬이 열기류에 노출되므로 제트팬의 내열성이 문제시 될 수 있다. 이와 같은 점을 고려하여 국가마다 약간의 차이는 있으나 외국의 경우에도 제트팬의 내열한도를 250℃, 1시간으로 정하고 있는 것이 일반적이다.

③ 가압운전모드

가압운전의 목적은 2 튜브터널에서 화재 발생지점 하류의 압력을 대피터널의 압력보다 낮게 유지하여 화재터널의 연기가 피난연락갱을 통해서 대피터널로 유입하는 것을 방지하기 위한 운전으로 다음과 같이 제연팬 운전을 계획한다.

- 대피터널의 제트팬이 입출구에 분산배치된 경우에는 입출구 제트팬을 대향으로 운전하여 터널 전체를 가압한다.
- 대피터널의 제연팬 입구 또는 출구에 편중되어 설치된 경우에는 압입운전이 될 수 있도록 팬을 운전한다. 즉, 입구에 팬이 편중되어 설치되어 있는 경우에는 정방향으로 운전하고, 출구에 편중되어 배치되어 있는 경우에는 역방향운전을 수행하여 터널내부가 가압될 수 있도록 운전한다.

상기에 기술된 내용은 일반적인 제트팬위치 및 운전관계에 따른 터널내 가압운전 수행방법을 기술한 것이며, 가압운전을 수행하는 경우라도 국부적으로 부압이 형성될 수 있음에 주의하고 또한 대피터널의 화재연기가 재유입할 수 있으므로 이를 고려하여야 한다.

④ 주행속도에 따른 환기팬 운전

풍속제어는 터널내 교통상황에 의해서 크게 달라질 수 있으므로 이를 고려한 환기팬 운전이 요구된다. 따라서 정상주행시와 지체시를 구분하여 운전계획을 수립하고 있다.

- 정상 주행시

터널화재시 화재하류에 위치한 대피자는 차량의

주행속도가 터널내 기류의 속도보다 빠르므로 차량을 운행하여 터널을 탈출하는 것이 가능하며, 화재상류에 정체된 차량의 탑승자는 차량에서 하차하여 가까운 피난연락갱이나 터널 입구로 탈출하는 것을 원칙으로 한다.

따라서, 화재 하류의 차량은 화염의 전파속도보다 빠르게 차량을 이용하여 터널을 탈출할 수 있으므로 화재 상류에 위치한 대피자의 대피를 위해서 임계풍속을 유지함을 원칙으로 하며, 화재 발생시 터널내 풍속이 한국도로공사 기준에 제시되어 있는 화재강도 20 MW에 요구되는 풍속보다 작은 경우에는 20 MW에 해당하는 임계풍속을 유지하기 위한 제연팬 운전제어 로직을 계획한다.

- 차량이 극심한 정체를 보이는 경우

주행속도가 터널내 임계풍속보다 작은 경우에는 임계풍속에 의한 운전은 화재 하류지역의 차량을 연기가 덮칠 수 있으므로 이를 고려하여 연기의 확산을 최소화하기 위하여 터널내 풍속을 0 m/s가 되도록 제어한다.

이를 위해 환기기의 역가동이 필요한 경우에는 연기의 성층화를 유지하기 위하여 화재지점에서 가장 멀리 떨어진 지점의 환기팬을 가동하는 것을 원칙으로 한다. 또한 터널내 인명이 대피를 완료하면 환기기를 가동하여 소화활동을 위한 접근로를 확보할 수 있도록 환기기 운전을 계획한다.

맺음말

본 원고에서는 도로터널의 화재시 초기대피환경 확보에 효과적인 것으로 알려진 제연설비에 대한 각국의 설계기준과 설계시 필요한 사항을 정리하여 소개하였다.

도로터널에서의 화재안전을 위해서는 방재시설의 설치뿐만 아니라 이들의 적절한 운영계획 및 운영자에 대한 훈련이 가장 중요한 것으로 여겨지고 있으며, 국내의 경우, 아직까지도 각종 설계자료의 부족 및 구체적인 제연팬 운전계획이 미흡한 실정으로 방재시설 설계를 위한 기초자료의 정립과 방재시설의 신뢰성 확보를 위한 연구 및 노력이 경주되어야 보다 안전한 터널환경이 구축될 수 있을 것으로 판단하는 바이다. *