

# 도로터널의 환기시스템

■ 조형제 / (주)범창종합기술 기계설계팀, hjo@bumchang.co.kr

■ 백중훈 / (주)범창종합기술 기계설계팀, hjbaek@bumchang.co.kr

적정한 환기용량의 산정과 최적의 환기방식 선정으로 공사비를 절감하고, 운영 중의 안전성도 확보하는 방안을 소개하고자 한다.

도로터널의 환기시스템은 적정한 환기용량 산정을 통해 환기시설 규모를 최적화하고, 최적의 환기방식 선정으로 공사비를 절감할 수 있도록 계획해야 한다. 특히 환기방식에 따라 터널 단면계획이 달라지므로 공사비에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 적정한 환기용량 산정과 최적의 환기방식 선정이 필요하다.

<표 1> 정체시 교통량

구분	국도/고속도로 터널	도심지 터널
이전	150 pcu/km/lane	
변경	150 pcu/km/lane	165 pcu/km/lane

<표 2> 승용차 환산계수

구분	대형버스	트럭		
		중형	대형	특수
고속도로	이전	평지 1.3, 구릉지 3.0, 산지 5.0		
	변경	1.5	1.5	2.0
다차선	이전	평지 1.3, 구릉지 3.0, 산지 5.0		
	변경	1.5	1.5	2.0
2차선	이전	평지 1.6, 구릉지 3.5, 산지 5.5		
	변경	1.5	1.5	1.9

## 환기용량 산정

최근 도로설계편람의 환기설계기준이 개정되었다. 지금까지는 1996년의 환경기준에 의한 기준배출량으로 환기용량을 산정하였으나, 앞으로는 2009년 1월 1일 이후 제작차 배출허용기준을 적용함으로써 환기용량을 최적화할 수 있게 되었다. 도로설계편람의 환기설계기준 주요 개정 내용은 다음과 같다.

- 설계교통량 계산방법
- 차량배출량 기준
- 차량배출량 보정방법
- 설계농도
- 소요환기량 계산방법
- TAB(시험·조정·평가) 포함

## 설계교통량 계산방법 개정 내용

교통밀도 산정식은 변경이 없으나, 정체시 교통량 조건과 승용차 환산계수가 변경되었으며, 변경

내용은 표 1 및 표 2와 같다. 정체시 교통량은 도심지 터널에 대해 10% 커진 값을 적용하며, 승용차 환산계수는 종단경사에 상관없이 차종별로 일정한 값을 적용하도록 변경되었다.

**차량배출량 개정 내용**

차량배출량은 환경법의 차량배출량 기준이 강화됨에 따라 차량별 오염물질 기준배출량이 변경되었다. 변경내용은 표 3과 같으며, 차종별로 차이는 있으나 평균적으로 매연은 9.6%, 일산화탄소는 60.6%, 질소산화물은 20.6%로 감소되었다.

**차량배출량 보정방법 개정 내용**

차량배출량에 대한 보정은 다음의 4가지 보정계수를 사용하였다.

- 경사속도 보정계수(매연)
- 속도 보정계수(CO, NOx)

- 경사 보정계수(CO, NOx)
- 표고 보정계수(매연, CO, NOx)

그런데 개정기준에서는 CO 및 NOx에 대해 차량 보정계수를 추가적으로 고려하였으며, 속도 및 경사 보정계수는 30 km/h, 경사 0%를 기준으로 보정계수를 다시 한번 변경 보정하게 하였다. 또한 매연의 경우 최종 보정된 차량배출량에 비차량 배출분진량을 더하도록 개정되었다.

**설계농도 개정 내용**

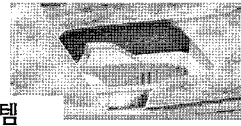
오염물질에 대한 터널 내 설계농도는 차량속도별로 적용한다. 개정기준에서는 운전자 및 유지관리 작업의 안전성 확보를 위하여 표 4와 같이 강화된 기준을 제시하고 있으며, 특히 도심지 터널에 대해서는 5 km/h 속도에 대해서도 환기용량을 검토하도록 규정하고 있다.

<표 3> 오염물질별 기준배출량

구분	승용차		버스		트럭				
	휘발유	경유	소형	대형	소형	중형	대형	특수	
매연 [m <sup>3</sup> /h]	이전	-	-	29.664	172.225	31.536	83.088	208.75	265.84
	변경	0.000	0.787	0.787	23.375	0.787	11.481	25.857	33.460
CO [m <sup>3</sup> /h]	이전	0.101	-	0.061	0.652	0.073	0.320	0.721	0.933
	변경	0.030	0.014	0.018	0.554	0.018	0.272	0.613	0.793
NOx [m <sup>3</sup> /h]	이전	0.010	-	0.025	0.642	0.027	0.315	0.710	0.919
	변경	0.001	0.003	0.004	0.166	0.004	0.082	0.184	0.238

<표 4> 설계농도

구분	차속[km/h]	차속									
		5	10	20	30	40	50	60	70	80	
매연 [m <sup>-1</sup> ]	이전	-	0.008 ~ 0.009	0.007 ~ 0.008			0.005 ~ 0.006				
	변경	0.009	0.009	0.007			0.005				
CO [ppm]	이전	-	150	100							
	변경	100 (2010년 이후 70 ppm)									
NOx [ppm]	이전	-	25								
	변경	25 (2010년 이후 20 ppm)									



**소요환기량 계산방법 개정 내용**

개정기준에서는 표 5와 같이 유효승용차 환산대수비율(EPP)을 고려한 환산승용차 대당 평균배출량(Q<sub>aver</sub>)으로 소요환기량을 산정한다.

$$Q_{aver} = \sum Q_i \times EPP_i \times 5$$

$$Q_i = q_o \times f_{v,i} \times f_h \times f_a + nemp(v)$$

- Q<sub>i</sub> : 차종별배출량 [m<sup>2</sup>/(h·대), m<sup>3</sup>/(h·대)]
- q<sub>o</sub> : 기준배출량 [m<sup>2</sup>/(h·대), m<sup>3</sup>/(h·대)]
- f<sub>v,i</sub> : 속도 및 경사 보정계수
- f<sub>h</sub> : 표고 보정계수
- f<sub>a</sub> : 차령 보정계수
- nemp(v) : 속도별 비차량 배출분진 [m<sup>2</sup>/(h·대)]

**TAB(시험 조정 평가) 포함**

개정기준에서는 TAB를 수행하여 각 설비가 설계 단계에서 요구하는 능력을 만족하는지 여부를 확인하고, 필요한 경우에는 재조정하도록 요구하고 있다.

**환기용량 비교·검토**

환기설계기준 개정 전·후에 대한 환기용량의 차이는 터널제원 및 교통량 조건에 따라 다르겠지만, 터널연장과 종단경사의 변화에 따라 환기용량이 어떻게 변하는 지를 검토하였다.

터널 연장은 1~3 km 3가지 조건, 종단경사는 -2.5%에서 2.5%까지 0.5% 간격으로 10가지 조건으로 구분하였으며, 터널단면적, 평균표고, 교통량은 일정한 조건으로 검토하였다.

환기용량 비교를 위한 터널제원 및 교통량조건은 표 6과 같다.

환기용량 검토결과 연장 증가에 따라 환기용량은 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다.

종단경사 변화에 대해서는 이전기준에서는 1.5%까지는 종단경사 증가에 따라 환기용량도 비례적으로 증가하나, 2%에서 오히려 감소하였다가 다시 증가하는 것으로 나타났다.

이것은 이전기준에서 종단경사에 따라 승용차 환산계수를 다르게 적용함으로 종단경사가 2%에 이르면 오히려 터널 내 차량대수가 감소하면서 환기용량이 줄어드는 것으로 분석되었다.

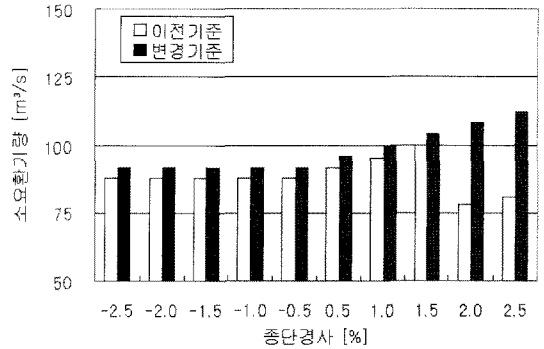
반면에 개정기준에서는 종단경사 증가에 따라 환기용량도 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다 (그림 1~3 참조).

<표 5> 소요환기량 계산방법

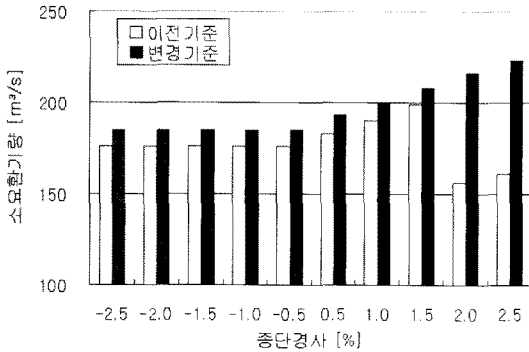
구 분		소요환기량 계산식
매 연	이 전	$Q_T = \sum_{k=차종} (q_k^T \cdot f_{iv} \cdot f_h \cdot n) \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{K_{lim}}$
	변 경	$Q_T = Q_{aver} \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{K_{lim} - K_{amb}} \times n$
CO	이 전	$Q_{CO} = \sum_{k=차종} (q_k^{CO} \cdot f_i \cdot f_v \cdot f_h \cdot n) \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{10^6}{CO_{lim}}$
	변 경	$Q_{CO} = Q_{aver} \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{CO_{lim} - CO_{amb}} \times n$
NOx	이 전	$Q_{NOx} = \sum_{k=차종} (q_k^{NOx} \cdot f_i \cdot f_v \cdot f_h \cdot n) \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{10^6}{NOx_{lim}}$
	변 경	$Q_{NOx} = Q_{aver} \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{NOx_{lim} - NOx_{amb}} \times n$

<표 6> 터널제원 및 교통량 조건

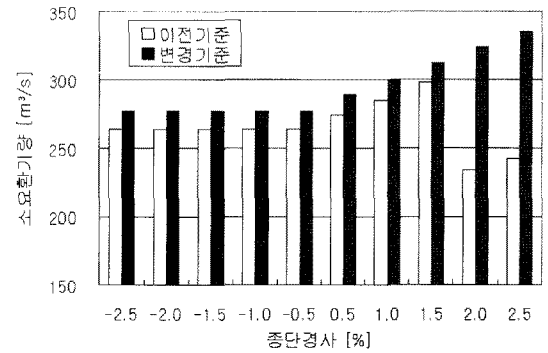
구분	설계조건	구분	설계조건
터널 연장	1 ~ 3 km	차로수	2
종단 경사	-2.5 ~ 2.5%	일교통량	35,366 대/일
터널 단면적	75.29 m <sup>2</sup>	대형차 혼입율	22.47%



[그림 1] 연장 1,000 m의 소요환기량



[그림 2] 연장 2,000 m의 소요환기량



[그림 3] 연장 3,000 m의 소요환기량

전체적으로 모든 조건에서 이전기준보다 변경기준 적용시에 환기용량이 커진 것으로 나타났으며, 차량배출량 감소에 따른 환기용량 감소효과보다는 설계농도 강화에 따른 환기용량 증가효과가 더 크게 작용한 것으로 분석되었다.

종단경사 증가에 따라 차량의 오염물질 배출량이 증가하는 점을 고려할 때, 변경기준에서는 종단경사 증가에 따라 환기용량이 증가하는 것으로 나타나, 변경기준이 환기용량을 보다 적절히 산정하는 것으로 분석되었다.

### 환기방식 검토

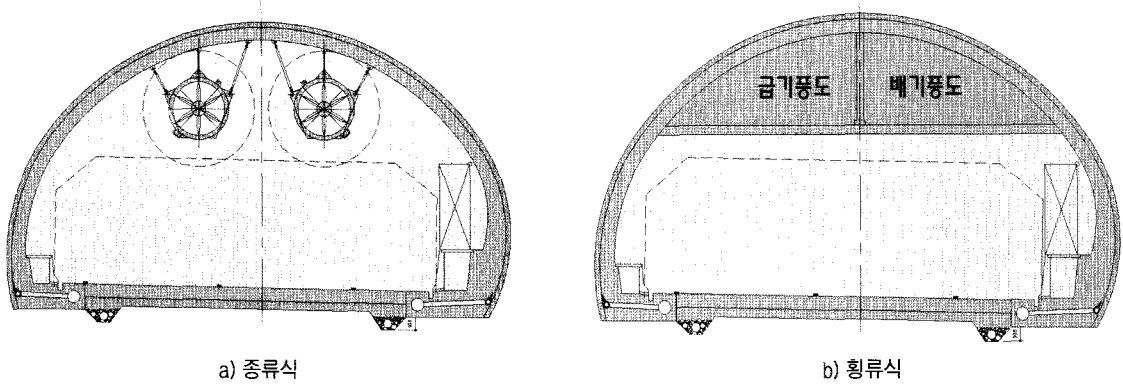
환기방식은 터널의 위치, 연장, 교통량 등 설계조건을 종합적으로 분석하여 결정해야 한다.

일반적으로 지방지역의 산악터널은 종류식을 적

용하며, 도심지 터널은 횡류식(또는 반횡류식)을 주로 적용하고 있다(그림 4 참조).

산악터널은 차량의 정체가능성이 낮아 화재위치 전방의 차량은 터널 밖으로 탈출이 가능하므로, 화재연기를 터널 출구방향으로 배출하는 운전계획이 가능하다. 따라서 경제성이 우수한 종류식을 주로 적용하고 있다.

그러나 도심지 터널은 차량의 정체가능성이 높아 화재위치 전방에도 차량이 존재하므로 화재연기를 터널 출구방향으로 배출하는 것이 곤란하다. 따라서 차량이 정체된 상황에서도 화재연기를 화재위치에서 바로 배출하여 화재차량 전·후방의 터널 이용자 모두에게 안전한 대피환경을 확보할 수 있는 횡류식을 주로 적용하고 있다. 그러나 환기소 및 덕트 설치가 필요하므로 공사비와 운전비용이 비싼 단점이 있다.



[그림 4] 환기방식별 터널 횡단면 개요도

최근 대도시를 중심으로 교통난 해소를 위해 도심지 터널 건설이 증가하고 있으며, 서울시에서도 도심지 지하도로인 U-Smartway를 계획 중에 있다.

이러한 도심지 터널은 많은 공사비가 투입되는 시설로써 국민의 세금을 아낄 수 있도록 경제성과 안전성을 모두 확보할 수 있는 새로운 환기방식의 적용이 요구된다.

부산-거제간 연결도로의 침매터널은 국내에는 처음으로 도입된 건설공법이다. 침매터널은 터널 모양의 콘크리트 구조물인 함체를 지상에서 미리 제작하여 해상으로 설치위치까지 운송한 후 해저로 침수시켜 터널을 연결하는 최첨단 공법이다.

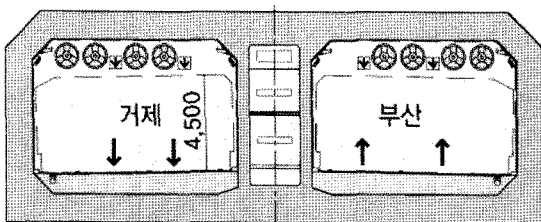
그림 5와 같이 침매터널은 양방향 터널이 하나의 박스 구조물로 되어 있으며, 터널 중앙에 설치된 갤러리로 각 방향의 터널이 분리되어 있는 형태이다. 갤러리는 각종 유틸리티 설비 및 유지관리 공간으로 사용하며, 상부에 배연덕트를 설치하여 터널에 설치된 제트팬과 함께 종류식 환기 및 화재시 반횡류식 부분배연을 동시에 수행할 수 있도록

계획함으로써 평상시의 경제성과 화재시의 안전성을 확보하고 있다. 다만, 구조적인 특성상 배연덕트 면적을 충분히 확보하기 어려워, 화재 초기 터널 이용자가 대피하는 시간동안 연기확산을 지연시켜 안전을 확보할 수 있는 정도로만 배연풍량을 선정하였다.

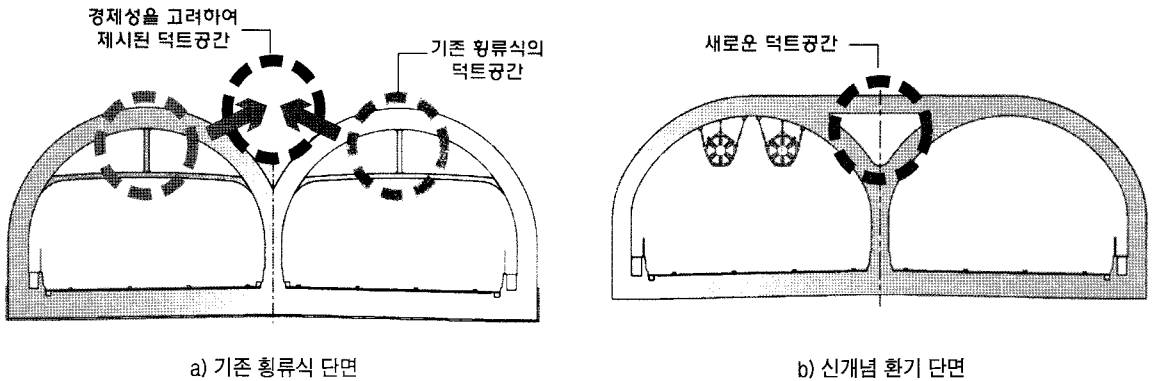
행정중심복합도시내 국도1호선 우회도로 건설공사(2공구)의 세종지하차도는 도시지역을 통과하는 터널에서 새로운 개념의 환기방식으로 터널단면을 계획함으로써 경제성과 안전성을 모두 확보한 대표적인 사례이다.

도심지 터널에서 차량 정체시의 안전성을 확보하기 위해서 그림 6 a)와 같이 차도 상부에 덕트를 설치하여 배연계획을 수립하였다. 그러나 차도 상부에 덕트를 설치하는 횡류식 환기방식은 많은 공사비와 운전비용 상승을 초래하는 문제점이 있으므로, 그림 6 b)와 같이 양방향 차도 중간의 상부를 덕트공간으로 활용함으로써 평상시에는 제트팬 종류식 환기운전으로 경제성을 확보하고, 화재시에는 횡류식 배연운전으로 안전성을 확보하는 복합환기방식을 적용하였다. 덕트 설치가 용이하게 터널 단면을 변경하여 공사비를 절감하였고, 평상시 제트팬 운전으로 유지관리비용도 절감하였으며, “종류식+집중배연덕트 단면”으로 국내 특허까지 획득하였다.

서울시에서 계획 중인 U-Smartway는 서울도심에 동서연결로 3개소, 남북연결로 3개소의 지하도로가 격자형으로 구성되어 있다.



[그림 5] 부산-거제간 침매터널 횡단면도



[그림 6] 새로운 덕트 공간 확보 개념

그림 7과 같이 소형차 전용의 상하 복층터널로 계획 중에 있으며, 지하에 교차로가 형성되는 구조는 환기적으로 매우 특이한 조건이므로 이에 대한 심도 깊은 분석이 필요하다.

외국의 경우 프랑스 파리의 A86W East Tunnel, 말레이시아 칼라룸푸르의 SMART Tunnel, 러시아 모스크바의 Serebryany Bor Tunnel 등도 터널 단면의 이용효율을 높인 경우이다.

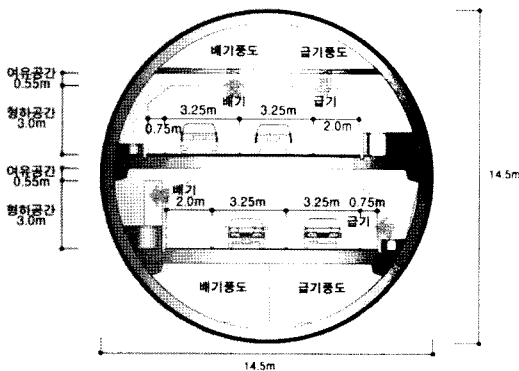
A86W East Tunnel은 파리 도심 외곽을 순환하는 A86 도로의 서쪽구간을 연결하는 터널이며, 그림 8과 같이 승용차 전용의 복층터널로써, TBM (Tunnel Boring Machine) 단면의 특성을 활용하여 차도 상부 및 하부에 급배기 덕트를 설치함으로써 안전성이 우수한 횡류식 환기방식을 적용하였다.

SMART Tunnel은 평상시 도로터널로 사용하다가 홍수시 터널에 홍수를 저장, 배출하는 저류조 용도로 사용하는 다목적 터널로 계획되었으며, Saccardo Nozzle을 사용한 수직갱 급배기의 종류식 환기방식을 적용하였다(그림 9 참조).

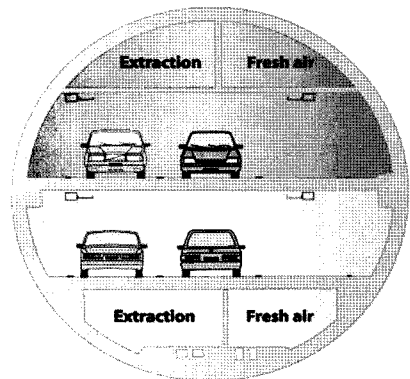
Serebryany Bor Tunnel은 복층구조의 터널에 도로와 철도가 동시에 운행하도록 계획하여 터널 단면의 이용효율을 높였다(그림 10 참조).

결론

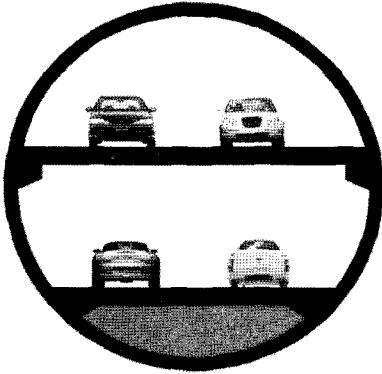
이전의 환기설계기준은 종단경사 1.5%보다 2% 이상에서 환기용량이 오히려 줄어드는 문제점이 있었으나, 변경기준에서는 종단경사 증가에 따라



[그림 7] U-Smartway Tunnel 횡단면도(설계안)

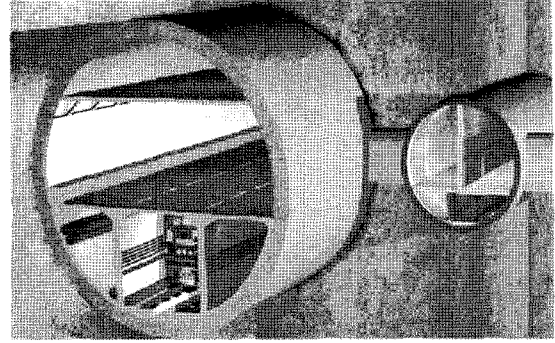


[그림 8] A86W East Tunnel 횡단면도



[그림 9] SMART Tunnel 횡단면도

환기용량도 비례적으로 증가하는 것으로 나타나 적정한 환기용량이 산정되는 것으로 분석되었다. 환기방식은 터널의 위치, 연장, 교통량 등 설계조건에 따라 경제성과 안전성을 고려하여 선정해야 하며, 터널 단면계획과 연계하여 적절한 환기방식을 선정함으로써 공사비도 절감하고 동시에 안전성도 확보할 수 있는 것으로 나타났다.



[그림 10] Serebryany Bor Tunnel 횡단면도

지속적으로 증가하는 장대 도로터널에 대해 적절한 환기용량 산정과 최적의 환기방식 선정으로 공사비를 낮춤으로써 국민의 세금을 절약함과 동시에 국민의 안전까지 보호 할 수 있도록 터널의 제반 여건을 고려한 최적의 환기시스템 계획이 이루어져야 할 것이다. (C)