도로터널 횡류환기방식의 환기특성 및 시스템 설계 관한 연구

유지오[1*] · 김효규[2]

[1]정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수
[2]정회원, (주)주성지앤비 대표

A study on the ventilation characteristics and design of transverse ventilation system for road tunnel

Ji-Oh Ryu[1*] · Hyo-Gyu Kim[2]

[1]Professor, Dept. of Automotive Engineering, Shin-Han University
[2]CEO, Jusung G&B Inc.

***Corresponding Author :** Ji-Oh Ryu, geotunnel@hanmail.net

Abstract

In this study, the ventilation characteristics and the relationships between the required ventilation flow rate and the ventilation system flow rate was investigated by numerical method for the optimum design of the transverse ventilation and semi-transverse ventilation system in road tunnels. The following results were obtained. In supply · exhaust transverse ventilation system, the system supply-exhaust air flow rate is theoretically equal to the difference between the required ventilation flow rate and natural ventilation flow rate. However, it is shown that it increases by about 10% in the analysis results. And, in the case of the longitudinal air flow rate is increased by installed jet fans, ventilation system air flow rate is reduced. However, as the longitudinal air flow rate increases, the concentration of pollutants in the tunnel decreases, so the exhaust effect of pollutants decreases, and the effect of reducing the system air flow rate is decreased. In case of semi-transverse with only air supply, ventilation system air flow rate is equal to required ventilation air flow rate when tunnel inlet velocity is negative, but results is shown it is increased within about 13.3%. Also, it was found that ventilation effect can not be expected even if the jet fans are increased when the tunnel inlet velocity is negative.

Keywords: Transverse ventilation system, Semi-transverse ventilation system, Ventilation system air flow rate, Required ventilation air flow rate

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(2)305-315(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.2.305

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received January 11, 2018
Revised February 21, 2018
Accepted February 27, 2018

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

본 연구에서는 도로터널의 횡류환기 및 반횡류환기 방식의 설계 방안을 도출할 목적으로 수치해석적인 방법에 의해서 환기특성을 고찰하고 소요환기량과 환기 시스템 용량의 관계를 검토하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다. 급·배기 횡류환기방식에서 환기시스템의 급·배기풍량은 이론적으로 소요환기량과 자연환기량의 차가 되나, 해석결과에 의하면 환기시스템 용량은 소요환기량과 자연환기량의 차보다 약 10%정도 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 제트팬을 설치하여 종방향 풍속을 증가시키는 경우, 환기시스템의 급배기 풍량은 감소하나, 터널풍속이 증가할 수록 터널 내 농도가 감소하기 때문에 오염물질에 대한 배기효과가 감소하여, 횡류 환기시스템의 용량 감소효과는 감소하는 것으로 나타나고 있다. 급기만 하는 반횡류식에서는 터널입구 풍향이 차량진행방향과 반대인 경우에는 환기시스템의 급기풍량은 소요환기량과 동일하나, 해석결과에서는 약 13.3% 이내의 범위에서 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 터널입구 풍속이 음수인 상태에서는 제트팬 댓수를 증가하여 도 환기효과는 기대할 수 없는 것으로 나타났다.

주요어: 횡류환기시스템, 반횡류환기시스템, 환기시스템풍량, 소요환기량

1. 서 론

도로터널은 통과하는 차량에서 배출되는 오염물질로 인하여 공기의 질이 악화되므로 안전운행환경 및 공기의 질 확보를 위해서 오염물질을 배기하거나 신선공기를 급기하여 희석함으로서 오염물질의 농도를 허용농도 이하로 유지하기 위한 환기가 필요하다.

터널에 대한 환기는 1920년대에 자동차가 본격적으로 보급되기 시작하면서 필요성을 인식하게 되었으며, 1924년 피츠버그의 Liberty 터널에서 일산화탄소(CO) 중독현상이 발생하면서 뉴욕의 Holland 터널 설계 시 환기의 중요성이 대두되고 연구를 촉진하게 되었다(Bickel et al., 1996).

터널의 환기방식은 종류환기(Longitudinal ventilation)방식과 횡류환기(Transverse ventilation)방식으로 대별되며, 종류환기방식은 환기기의 환기력에 의해서 터널을 흐르는 풍량을 증가시켜 오염물질의 농도를 희석하는 방식이며, 횡류환기방식은 터널의 천정부에 덕트를 설치하여 신선공기를 급기하거나 오염된 공기를 배기하는 방식이다. 1970년대 이전에는 횡류환기방식이 주로 적용되었으며, 1970년대 이후에 건설비와 유지관리비가 상대적으로 낮은 제트팬과 고성능 축류팬의 개발로 종류환기방식이 활성화되게 되었다.

횡류환기방식은 1930년에서 40년대까지 미국의 Lincon 터널(2,355 m, 1937년), Posey 튜브(1,080 m, 1928년), 미국과 캐나다를 연결하는 Windsor 터널(1,565 m, 1930년), 네덜란드의 Maas 터널(1,070 m, 1941년), 벨기에의 Anverse Scheld 터널(1,768 m, 1933년)등 많은 주요 터널에 채택하게 되었으며, 그 후에도 1960년대 까지 일본의 간몽(關門) 터널(3,461 m, 1958년), 네덜란드의 Velsen 터널(824 m, 1957년), I·J 터널(1,125 m, 1967년), 독일의 Wagenburg 터널(824 m, 1957년), 일본의 지요다(千代田) 터널(2,110 m, 1964년) 등에서 그 예를 찾아볼 수 있다.

종류환기방식은 전술한 바와 같이 1970년대에 본격적으로 적용되기 시작하였으며, 1980년대에 들어서 일본

에서는 가네쯔 터널을 중심으로 종류환기방식에 대한 조사 연구가 실시되어 종류환기방식 설계에 대한 기본계수를 정립하게 되었다. 특히, 교통환기력에 대한 계수가 정립되어 현재까지 보완되어 사용하고 있다. 당시 준공된 일본 주요 터널은 쓰르가 터널(2,925 m), 다니이나바 터널(1,355 m), 우도산 터널(3,573 m), 가게이히가시 터널(3,277 m), 가게이니시 터널(2,691 m), 간상 터널(2,198 m), 요네야마 터널(3,277 m) 등이 종류환기방식이며, 1985년 이후에는 게이나상 터널(8,625 m), 가네즈 터널(10,926 m) 등이 준공되면서 종류환기방식이 자리 잡게 되었다(Bumchang Engineering Inc., 2000; Japan Road Association, 2007).

국내의 경우에는 2000년 이전에 준공된 터널 중 연장이 1 km 이상인 터널은 총 48개소이며 이 중 횡류환기방식은 20개소로 약 42%를 차지하였으나, 1999년 영동고속도로의 개통과 함께 진부, 둔내 터널이 준공되면서 고속도로 및 국도의 일방향 터널은 거의 대부분이 종류환기방식으로 건설되어 현재는 1 km 이상의 터널 440개소 중 횡류환기방식은 23개소로 5.2%수준이다. 그러나 최근들어 도심터널이 증가하면서 횡류환기방식을 적용한 터널이 늘고 있는 실정이다(MOLIT Statistics System, 2017).

종류환기방식의 설계는 오염물질의 농도를 허용농도 이하로 유지하기 위한 소요환기량을 주행속도별로 산정하고 비교적 간단한 수 계산에 의해서 주행속도별로 환기기 용량을 계산하고 이에 따른 오염물질별 농도를 산정하여 환기기 용량 등 환기시스템을 설계하게 된다. 그러나 횡류환기방식의 환기기 용량은 간단한 수 계산에 의해서 계산하는 것은 불가능하며, 소요환기량이 결정되면 이를 근거로 환기기 용량을 결정하고 수치해석적인 방법에 의해서 허용농도의 만족여부를 검토하여 설계 적정성을 검증하고 있다. 따라서 횡류환기방식의 터널에 대한 환기기 용량산정 방법은 최적화되었다고 보기에는 곤란한 실정이다(Almbauer et al., 2003; Dobashi et al., 2000).

이에 본 연구에서는 급·배기횡류환기시스템과 급기 반횡류 환기시스템에 대한 소요환기량과 환기기 용량의 관계를 수치시뮬레이션을 통해 분석하여 횡류환기시스템의 환기특성을 고찰하고 이를 통해 횡류환기방식의 최적설계방안을 검토하였다.

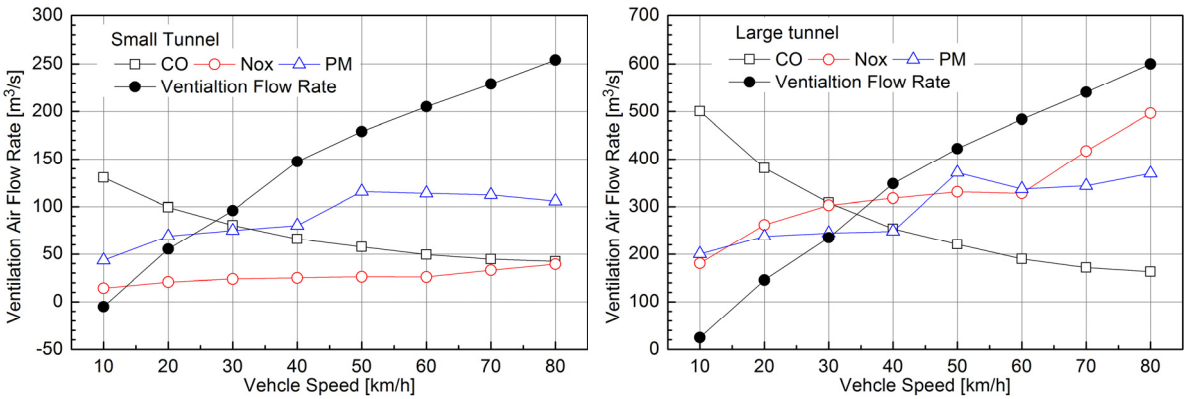
2. 횡류환기방식의 환기특성

횡류환기방식을 적용하기 위해서 모델터널에 대한 소요환기량 및 교통환기력에 의한 자연환기량(이하 자연환기량이라 함.)을 검토하였다. 모델터널의 제원은 Table 1에 나타냈다. 모델 1은 소형차 전용의 터널(이하 소단면 터널)이고, 모델 2는 대형차량이 통행하는 일반터널(이하 대단면 터널)이다.

모델터널에 대한 소요환기량과 자연환기량을 Fig. 1에 나타냈다. 그림에서 소요환기량 보다 자연환기량이 작은 경우가 환기가 필요한 속도(환기설계속도라 함)이다. 그림에서 환기설계속도는 소단면 터널이나 대단면 터널 모두 교통환기력에 의한 자연환기량이 최소가 되고 CO에 대한 소요환기량이 가장 많은 저속에서 결정되게 된다. 또한 기계환기를 통해 확보하여야 하는 환기량은 소요환기량과 자연환기량과의 차이며, 모델터널의 경우에 기계환기에 의해서 확보하여야 하는 환기량은 주행속도가 10 km/h일 때, 소형차 전용 터널은 135.7 m^3/s, 전차종이 통행하는 터널은 476.2 m^3/s이 된다.

Table 1. Characteristics of tunnel and traffic volume

Model 1	Tunnel	Length (m)		Grade (%)		Area (m^2)		H. Diameter (m)	
		5000		1		36.2		5.25	
	Traffic volume	Passenger car		Bus		Truck			
		Gasoline	Diesel	Small	Large	Small	Midium	Large	Special
		15981	10654	461	0	3590	0	0	0
Model 2	Tunnel	Length (m)		Grade (%)		Area (m^2)		H. Diameter (m)	
		5000		1		75		7.75	
	Traffic volume	Passenger Car		Bus		Truck			
		Gasoline	Diesel	Small	Large	Small	Midium	Large	Special
		18040	12026	3069	3098	211	5475	1489	866



(a) Small tunnel (b) Large tunnel

Fig. 1. Comparison of required ventilation flow rate and natural ventilation flow rate

종류환기방식의 터널에서는 환기기 환기력 및 교통 환기력과 환기 저항력에 의한 압력평형방정식이 비교적 간단한 2차 함수로 표현되고, 터널 내 농도분포가 터널입구에서 부터 선형적으로 증가하여 터널출구에서 최대가 되기 때문에 소요환기량을 발생하기 위한 환기력 및 그에 따른 환기기 용량은 계산하는 것이 가능하다. 그러나 횡류식의 경우에는 터널 내 압력분포 및 농도분포가 선형적이지 않기 때문에 수 계산으로 장비용량을 산정하는 것은 불가능하다(Japan Road Association, 2007; Schlaug and Carlin, 1979). 따라서 횡류환기방식에서는 시뮬레이션 프로그램에 의해서 시행착오(Trial - error) 방식에 의해서 급·배기 풍량을 산정하게 된다.

이에 본 연구에서도 횡류환기방식을 해석하기 위한 프로그램을 사용하여 환기기 용량을 검토하였다. 또한 횡류환기방식은 일반적으로 대면교통터널에 적용되는 사례가 많았으나, 최근에는 도시터널에 배연목적으로 횡류환기방식의 적용이 늘어나고 있는 추세이며, 배연을 목적으로 횡류환기방식을 적용하는 경우에는 기류제어를 위해서 제트팬의 설치를 권장하고 있다. 이에 본 연구에서는 제트팬을 설치하는 경우에 횡류환기방식에서 제트팬

이 환기에 미치는 영향을 검토하였다.

제트팬 설치대수는 모델터널대해 임계풍속을 계산하여 이를 만족하기 위한 제트팬 대수로 하였으며, 터널별 방재용 제트팬 대수는 다음과 같다.

○ 소형차전용 터널(소단면 터널)에 대한 방재용 제트팬 산정
- 조건: 화재강도 20 MW, 터널높이 3.5 m, 화점의 높이 1.0 m, 유입공기온도 20°C
- 임계풍속: 1.93 m/s
- 방재용 제트팬 대수: 6대(10~60 km/h)

○ 대단면 터널에 대한 방재용 제트팬 대수
- 조건: 화재강도 20 MW, 터널높이 6.0 m. 화점높이 1.0 m, 유입공기온도 20°C
- 임계풍속: 2.2 m/s
- 방재용 제트팬 대수: 11대(10 km/h)~9대(80 km/h)

2.1 급·배기 횡류환기방식

급·배기 횡류환기방식은 덕트를 통해서 급기와 배기를 하며, 급기풍량과 배기풍량을 동일하게 설정하기 때문에 급·배기 풍량이 터널 내 풍속에 미치는 영향은 없는 것으로 가정한다. 따라서 급·배기 횡류환기방식의 터널에서 풍속은 급기 및 배기에 의한 승압력이 '0'이므로 교통환기력과 종류환기력(제트팬이나 수직갱 급기노즐의 환기력)에 의해서 결정되게 되며, 터널 내 풍속분포는 종류환기방식과 마찬가지로 전 터널이 동일한 값이 된다.

모델터널의 경우, 전술한 바와 같이 소요환기량과 자연환기량의 차는 주행속도가 10 km/h일 때 최대가 되므로 이 속도에서 제트팬 대수에 따른 횡류환기의 급·배기 풍량을 검토하였다.

Fig. 2는 모델 1 (소단면)터널에 급·배기 횡류환기방식을 적용하는 경우에 제트팬 대수 및 급·배기 풍량에 따른 터널 내 농도를 비교하여 나타낸 것이며, Table 2와 Fig. 3은 제트팬 및 교통환기력에 의한 종류환기량(Q_n), 이론적으로 필요한 급·배기 풍량($Q_{req} - Q_n$) 및 실제 요구되는 급·배기 풍량(Q_{Eq})를 나타낸 것이다.

Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 제트팬 대수가 증가하면 CO의 허용농도를 만족하는 횡류환기의 급·배기 풍량은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 제트팬 대수가 증가하여 종류환기량이 증가하기 때문이다.

소단면 터널의 경우, 제트팬을 설치하지 않는 경우에는 주행속도가 10 km/h에서는 터널 내 기류가 차량의 진행방향과 반대방향으로 형성되며, 풍속 Vr = -0.14 m/s (Qn = 5.1 m^3/s)이다. 덕트를 통해 급·배기하는 경우에도 풍속 및 기류의 방향은 변하지 않으며, 따라서 환기시스템에 의해서 요구되는 풍량(Q_{Eq})은 이론적으로는 '소요환기량 - 자연환기량'($Q_{req} - Q_n$ = 130.7 - 5.1 = 125.6 m^3/s)이 된다. 그러나 환기해석결과에 의하면 실제 요구되는 환기기 용량은 138 m^3/s로 $Q_{req} - Q_n$ 보다 10%가 증대된 풍량이 요구됨을 알 수 있다.

Table 2 및 Fig. 3은 소단면 터널에 대해서 제트팬 대수에 따른 이론적으로 요구되는 급배기 풍량과 환기해석에 의해서 CO의 허용농도를 만족하기 위한 급·배기 풍량($Q_{SA\cdot EA}$)을 비교한 것이다.

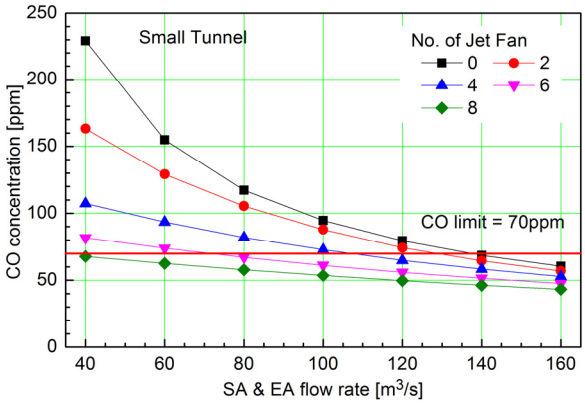


Fig. 2. CO concentration by $Q_{SA\&EA}$ (small tunnel)

Table 2. Ventilation flow rate and equipment capacity according to the number of jet fans (small tunnel)

No. of jet fan N_j	Ventilation flow rate by piston effect Q_n (m^3/s)	$Q_{req}-Q_n$ (m^3/s)	Equipment capacities by simulation Q_{Eq} (m^3/s)	$\frac{Q_{Eq}}{Q_{req}-Q_n}$	CO exhaust mass flow rate (g/s)
0	-5.1	125.6	138	1.10	10.56
2	31.9	98.8	130	1.32	8.35
4	63.0	67.7	108	1.60	5.74
6	90.1	40.5	72	1.78	3.42
8	113.3	17.4	34	1.96	1.50

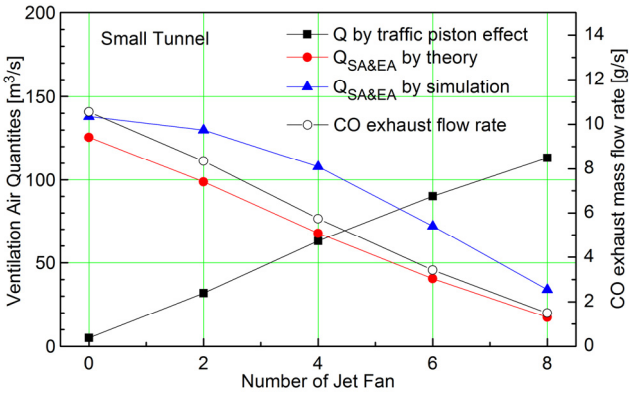


Fig. 3. Comparison of ventilation flow rate and mass flow rate for exhausting CO (small tunnel)

제트팬 대수가 증가하면 교통환기력 및 제트팬에 의한 풍량(Q_n)이 증가하며, 이론적으로 부족한 환기량 즉, 횡류환기방식의 덕트를 통해서 공급해야 하는 급·배기 풍량($Q_{req} - Q_n$)과 시뮬레이션에 의해서 구해지는 급·배기 풍량도 감소한다. 그러나 시뮬레이션에 의해서 구해지는 급·배기 풍량이 $Q_{req} - Q_n$ 보다 상당히 큰 값을 보이고 있으며, 제트팬 대수가 증가하여 종류환기량이 증가할수록 $Q_{req} - Q_n$ 에 대한 급·배기 풍량의 증가율(Q_{Eq}/($Q_{req} - Q_n$))은 증가하며, 풍량의 증가율은 모델 1터널에서는 1.10 (제트팬 0대)~1.96 (제트팬 9대)의 범위에 있는 것으로 나타나고 있다. 이와 같이 이론적으로 요구되는 풍량보다 실제 횡류환기의 급·배기 풍량이 증가하는 것은 제트팬 대수가 증가하여 종류환기풍량이 증가하면 터널 내 CO의 평균농도가 감소하게 되고, 횡류환기의 배기에 의해서 제거되는 오염물질 배출량이 그림 및 표에 나타낸 바와 같이 10.56 g/s (Jet fan 0대)에서 1.5 g/s (Jet fan 8대)로 큰 폭으로 감소하기 때문이다(Fig. 3). 즉, CO의 총 배출량은 10.98 g/s로 종류환기량에 의해서 희석되고 배기풍량에 의해서 제거되게 되나, 종류환기풍량이 증가하면 평균농도가 낮아지게 되어 배기에 의한 오염물질 제거효과가 감소되기 때문이다. 따라서 급·배기를 수행하는 횡류환기방식의 환기기 용량 산정 시에는 터널 내 농도가 낮아지면 오염물질에 대한 배기효율이 감소하고 이로 인해서 급·배기 풍량의 증가가 요구됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 대단면 터널에 대해서 급·배기 횡류환기방식을 적용하는 경우에 제트팬 대수 및 급·배기 풍량에 따른 터널 내 농도를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 제트팬 대수가 증가할수록, 그리고 급·배기 풍량이 증가할수록 터널 내 최대농도가 감소하며, 제트팬 대수가 증가하여 종류환기풍량이 증가하면 횡류환기시스템에서 요구되는 급배기 풍량이 감소한다.

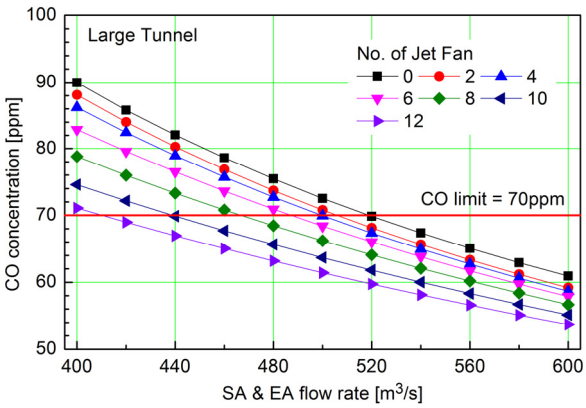


Fig. 4. CO concentration by no. of jet fan & $Q_{SA\&EA}$ (large tunnel)

주행속도가 10 km/h인 경우에 CO 허용농도를 기준으로 제트팬 대수에 따른 급·배기 풍량을 산정한 결과는 Table 3과 Fig. 5에 나타냈다. 이 경우에도 소단면 터널과 마찬가지로 터널 내 CO한계농도를 만족하기 위해서는 부족분의 환기량보다 많은 급·배기풍량이 요구되고 있으며, 종류환기에 의한 터널 내 풍량이 증가할수록 증가율이 증가하는 것으로 나타나고 있다.

Table 3. Ventilation flow rate and equipment capacity according to the number of jet fans (large tunnel)

No. of jet fan N_j	Ventilation flow rate by piston effect Q_n (m^3/s)	$Q_{req}-Q_n$ (m^3/s)	Equipment capacities by simulation Q_{Eq} (m^3/s)	$\frac{Q_{Eq}}{Q_{req}-Q_n}$	CO exhaust mass flow rate (g/s)
0	24.8	476.1	520	1.09	39.86
2	63.8	437.1	506	1.16	36.35
4	102.0	398.9	500	1.25	33.16
6	139.5	361.4	488	1.35	30.06
8	175.5	325.4	468	1.44	27.04
10	210.8	290.1	440	1.52	24.09
12	240.8	260.1	412	1.58	21.64

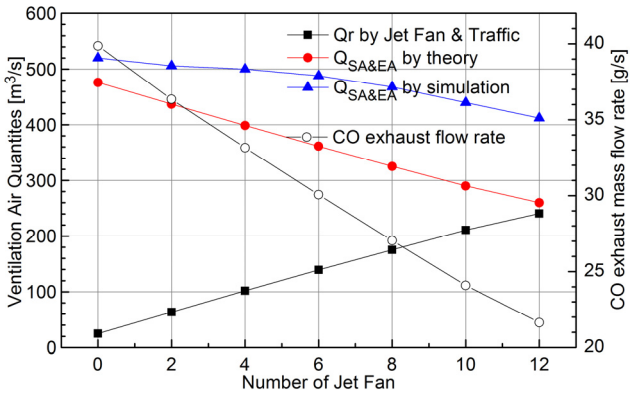


Fig. 5. Compare ventilation flow rate & CO exhaust mass flow rate (large tunnel)

2.2 급기 반횡류 환기방식

일 방향 터널에 급기 반횡류식을 적용하는 경우, 주행속도가 고속인 경우에는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 터널

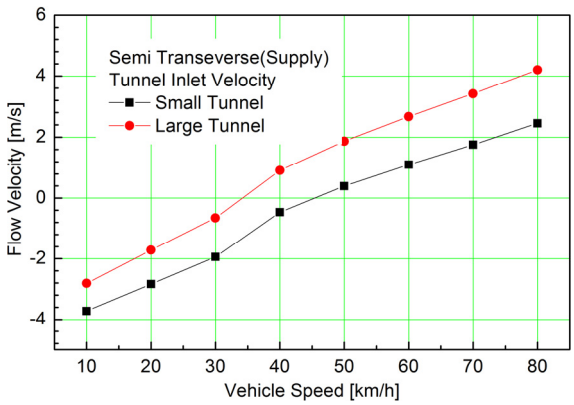


Fig. 6. Tunnel inlet air velocity (semi-transverse system)

입구의 풍속이 양수(+)로 일 방향으로 형성되나, 주행속도가 저속인 경우에는 교통환기력이 감소하여 터널 입구측의 풍속이 음수(-), 즉, 차량진행의 반대방향으로 형성되게 된다. 따라서 주행속도가 저속에서는 교통환기력에 의한 환기효과를 기대할 수 없다.

Fig. 7, 8은 각각 모델 1 (소단면), 모델 2 (대단면)터널에 대해서 환기기 용량이 가장 크게 요구되는 주행속도 10 km/h에서 제트팬 대수에 따른 허용농도를 만족하는 급기풍량(Q_{SA})과 터널 입구풍속(V_{inlet})을 나타낸 것이며, 주행속도가 10 km/h인 경우에 소요환기량은 130.7 m^3/s이다.

Fig. 7에서 제트팬 대수가 4대 이하인 경우에는 터널입구풍속이 음수(-, 차량의 진행방향과 반대방향)로 허용농도를 만족하기 위한 급기풍량은 소요환기량 보다 약 1.0~13.3% 높게 요구된다. 즉, 이 경우에는 제트팬 대수를 증가시켜도 터널 내 최대농도는 허용농도에 도달하며, 최대농도의 감소효과는 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서 급기반횡류식에서는 터널 내 제트팬 대수가 증가하여도 터널입구풍속이 음수(-)인 경우에는 풍량 증가로 인한 환기효과는 기대할 수 없음을 의미한다. 제트팬 대수를 증가하여 5대 이상으로 하는 경우에 급기풍량은 이론적으로 요구되는 풍량($Q_{req} - Q_n$)보다 감소하게 된다. 모델 1터널(소단면터널)에 8대의 제트팬을 설치하는 경우에는 급기풍량이 약 71% 까지 감소하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 터널 내 입구풍속이 음수(-)인 경우에 횡류환기의 급기풍량은 소요환기량 보다 10%정도 증대하여 선정하여야 함을 알 수 있다.

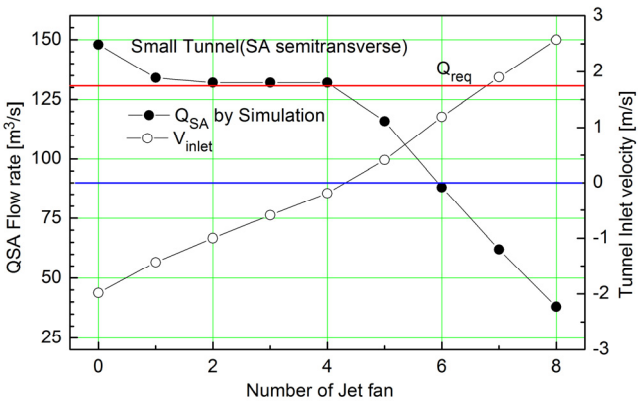


Fig. 7. Supply Semi-Transverse (small tunnel)

Fig. 8은 모델 2 (대단면)터널에서 주행속도가 10 km/h인 경우에 제트팬 대수에 따른 터널입구 풍속과 허용농도를 만족하기 위한 급기풍량을 나타낸 것이다. 제트팬 대수가 증가하면 터널입구 풍속이 증가하나, 17대까지는 터널입구 풍속이 음수(-)로 교통환기력에 의한 환기효과를 기대할 수 없는 상태가 되며, 횡류환기에서 요구되는 급기풍량은 소요환기량보다 약 2% 정도 증가하는 것으로 나타나고 있다. 그러나, 제트팬 대수가 18대 이상인 경우에는 급기풍량이 감소하는 현상이 발생하며, 제트팬이 24대인 경우에는 급기풍량이 소요환기량보다 22.5%정도 감소하고 있다.

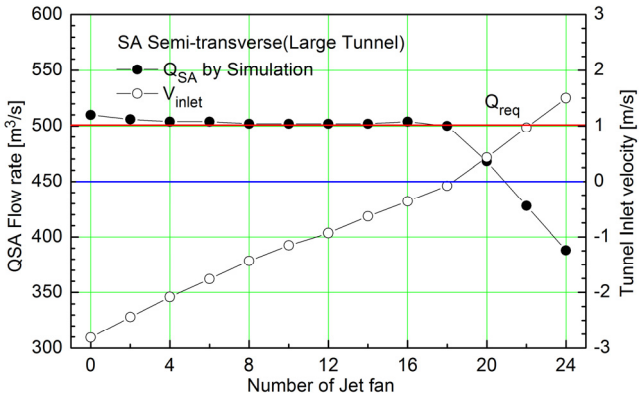


Fig. 8. Supply Semi-Transverse (large tunnel)

따라서 급기반횡류식을 적용하는 경우, 터널의 입구풍속이 음수(-)인 조건에서는 제트팬 대수를 증가하여 종류환기 풍량을 증가시켜도 터널 내 농도를 감소시키는 환기효과는 기대할 수 없는 것으로 나타나고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 소형차 전용 소단면 터널과 전차종이 통행하는 일반터널(대단면 터널)에 대해서 급·배기 횡류환기방식과 급기 반횡류환기방식을 적용하는 경우, 환기시스템의 최적설계를 목적으로 수치해석적인 방법에 의해서 환기특성을 고찰하고, 소요환기량과 환기기용량의 관계를 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 급·배기 횡류환기방식의 경우에 급·배기풍량은 이론적으로 소요환기량과 자연환기량의 차($Q_{req} - Q_n$)로 결정되나, 해석결과에 의하면 약 10%정도 증가하는 것으로 나타나고 있다.
2. 급·배기 횡류환기방식에 제트팬을 설치하여 터널 내 풍속을 증가시키는 경우, 급·배기 풍량은 종류환기량의 증가로 인하여 감소한다.
3. 제트팬에 의해서 터널 내 풍속이 증가하면 풍속이 증가할수록 횡류환기 급·배기풍량의 감소효과는 감소하여 이론적인 급배기 풍량($Q_{req} - Q_n$)대비 급배기 풍량(Q_{Eq})의 비($Q_{Eq}/Q_{req} - Q_n$)는 증가하며, 모델 1터널의 경우, 1.10 (제트팬: 0대)~1.96 (제트팬: 8대), 모델2 터널의 경우, 1.09 (제트팬: 0대)~1.58 (제트팬: 12대)로 나타나고 있다.
4. 급기 반횡류식의 터널에서 기류가 양방향으로 형성되어 입구의 풍속이 음수(-)인 경우에는 횡류환기에 서 요구되는 급기풍량은 이론적으로 소요환기량이 되나, 해석결과에서는 약 10% 이내의 범위에서 증가하는 것으로 나타나고 있다.
5. 급기 반횡류식의 터널에서 기류가 양방향으로 형성되어 입구의 풍속이 음수(-)인 경우에는 제트팬 대수를 증

가시켜도 농도를 저하시키는 환기효과는 기대할 수 없으며, 입구의 풍속이 양수(+)인 경우에는 제트팬 대수가 증가하면 환기효과를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 '대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)' 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Almbauer, R.A., Sturm, P.J., Oettl, D., Bacher, M. (2003), "A new method to influence the air flow in transversely ventilated road tunnels in case of fire", Proceedings of the 11th International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels BHR Group, Boston, USA, pp. 947-956.
2. Bickel, J.O., Kuesel, T.R., King, E.H. (1996), Tunnel Engineering Handbook, 2nd, Chapman & Hall, New York, pp. 384-438.
3. Bumchang Engineering Inc. (2000), Technology of tunnel ventilation, pp. 1-14.
4. Dobashi, M., Imai, T., Yanagi, H., Mizuno, A. (2000), "Numerical simulation of the emergency tunnel ventilation for a tunnel with longitudinal and transverse systems combined", Proceedings of the 10th International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels BHR Group, Luzern, Switzerland, pp. 581-596.
5. Japan Road Association (2007), Road tunnel technical standards (ventilation) and description, Japan Road Association, Tokyo, pp. 112-119.
6. MOLIT Statistics System (2017), http://stat.molit.go.kr/portal/search/searchList.do.
7. Schlaug, R.N., Carlin, T.J. (1979), Aerodynamics and air quality management of highway tunnels, Federal Highway Administration, Washington, D.C., pp. 5-24 - 5-47.