조합환기 방식 터널의 환기기 운전 단계에 관한 연구

The study of operation mode of ventilation system in the longitudinal ventilation system tunnel

유지오*1, 신현준*2, 이동호*3, 이용화*4
Yoo, Ji-Oh • Shin, Hyun-Jun • Lee, Dong-Ho • Lee, Young-hwa

Abstract

In the past many tunnels have been built to lowest capital investment cost without adequate regard for the cost of operation. But according to increasing the capacity of a ventilation system and to becoming diverse, it is to become more important to come up with the optimal operation stage of ventilation system. In this study, the tunnel ventilation dynamic simulation program had been developed. it is used to calculate the unsteady-state tunnel air velocity and concentration of pollutants according to the assumed average day traffic profile and summarize the energy consumption for the operation of ventilation system. And the operation energy consumption for the electric precipitation system and vertical vent shaft system are evaluated and compared in various operation mode. As the results of this study, the optimal operation stage for these ventilation system are provided.

Keywords: Tunnel ventilation system, dynamic simulation program, jet fan, operation mode

요 지

최근들어 장대터널이 증가하여 환기시스템의 환기기 용량이 증대하게 되면서 환기방식이 다양화 되어 환기기 운전동력등 터널준공 후 유지관리의 중요성이 부각되게 되었다. 따라서 환기기 운전단계나 환기기 운전모드에 대한 연구의 필요성이 증대하여 본 연구에서는 기 개발된 일교통량의 변화 및 환기기 가동상태에 따라 비정상상태로 터널 환기를 해석할 수 있는 동적 시뮬레이션 프로그램에 의해서 집진기 방식과 수직갱방식에 대한 운전동력을 평가하여 최적운전 모드를 제안하였다.

주요어: 터널환기 운전모드, 터널환기 동적해석, 젯트팬 방식, 전기 집진기 방식, 수직갱 방식

1. 서론

사회간접자본의 확충과 함께 고속도로의 직선화 및 신설도로의 증가로 장대터널에 대한 수요가 증가하게 되면서 터널의 환기방식도 다양화 되고 환기기의 용량 또한 증대하게 되었다.

*1 신흥대학 건축설비과 교수
*2 한국 건설기술 연구원 건축연구부 부장
*3 인천대학 안전공학과 교수
*4 유한대학 건축설비과 교수

이로 인해 터널의 환기 시스템은 일반적으로 터널연장이 비교적 짧은 터널에 적용하던 단순 젯트팬 방식에서 집진기를 조합한 방식이나 수직갱을 조합한 환기방식의 터널이 다수 준공되어 현재 운영되고 있으며, 또한 조합환기방식의 설계가 증가하고 있는 실정이다.

도로터널의 환기기 용량이 증대함에 따라서 도로터널의 환기방식의 선정이나 환기 시스템의 설계에 있어서 초기 투자비 뿐만 아니라 운전비용 및 유지관리비용에 대한 검토가 반드시 필요하게 되었다.

그러나 현재까지 도로터널에서 환기기 운전 경험이 부족하여 환기기 운전에 대한 명확한 지침이 없으며, 또한 환기기 운전 동력을 최소화하기 위한 운전방안에 관한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고속도로 터널에 적용되고 있는 전기집진기와 젯트팬을 조합한 환기방식과 수직갱과 젯트팬을 조합한 조합환기방식의 터널에 대한 최적의 운전모드를 산정하기 위한 방안을 제시함을 목적으로 한다.

이를 위해 모델터널을 선정하여 전기집진기 방식과 수직갱방식을 적용하는 경우에 소요되는 환기용량을 산정하고, 각각에 대해서 젯트팬을 우선 운전하는 젯트팬 우선 운전모드와 전기 집진기 또는 수직갱을 우선 운전하는 운전모드를 산출하여 각 운전모드에 대해서 동적 시뮬레이션을 수행하여 경제성을 검토・비교한다.

2. 모델터널

2.1 모델터널의 제원

모델 터널은 전기집진기 또는 수직갱에 의한 환기방식의 적용이 가능하도록 하기 위해서 터널연장을 2500 m로 하였으며, 모델터널에 대한 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of model tunnel

	specification
tunnel length	2500 m
slop	1.0%
area	75.259 ㎡
diameter	8.670 m
elevation	400 m
weight of HV	30%

2.2 모델터널의 환기기 용량

터널의 환기기 용량은 터널내 차량의 주행속도에 따른 소요환기량을 계산하고 이를 만족하기 위한 환기기 용량을 주행속도별로 산정하여 최대용량을 환기기 용량으로 산정한다. 전기집진기 방식이나 수직갱 방식에서는 일반적으로 전기집진기 및 수직갱은 배연을 목적으로 활용하지 않기 때문에 화재시 배연을 위한 최소한의 젯트팬을 결정하고 전기집진기의 급기용팬 또는 수직갱의 급・배풍용팬 용량을 결정하게 된다.

본 연구에서는 모델 터널에 대해서 현행의 고속도로터널 환기 설계기준을 적용해서 환기기 용량을 계산하였으며, 계산과정은 다음과 같다.

2.2.1 배연용 젯트팬수 계산

터널내 화재시 배연을 목적으로 하는 배연용 젯트팬수는 터널제원, 화재의 크기에 영향을 받는 임계풍속을 Kennedy식에 의해서 구하고, 화재직전의 주행속도와 화재 인지 후 터널내 차량 유입의 차단까지 경과시간 등을 고려하여 임계풍속을 만족하기 위한 배연용 젯트팬수를 계산하게 된다. 모델터널에 대해 화재강도를 20 MW로 하여 임계풍속을 계산한 결과, 2.35 m/s 계산되었다.

또한 화재후 차량이 차단될 때 까지 경과시간은 3분으로 하여 터널내 차량수 및 임계풍속을 만족하기 위한 배연용 젯트팬 수를 주행속도별로 구하였으며, 젯트팬수는 Table 2와 같다.

Table 2는 화재직전의 주행속도별로 요구되는 젯트팬수를 나타낸 것으로 저속일수록 젯트팬 수가 증가하는데, 이는 저속일수록 터널내 정체되는 차량수가 증대하여 이로 인해 환기저항이 증대하기 때문이다.

본 연구에서는 10 km/h를 화재직전으로 주행속도로

Table 2. Number of Jet Fan for Extracting Smoke

Traffic speed	10	20	30	40	50	60	70	80
Number of car	551	489	441	401	368	340	316	295
Neumber of jet fan	9	9	8	8	8	7	7	7

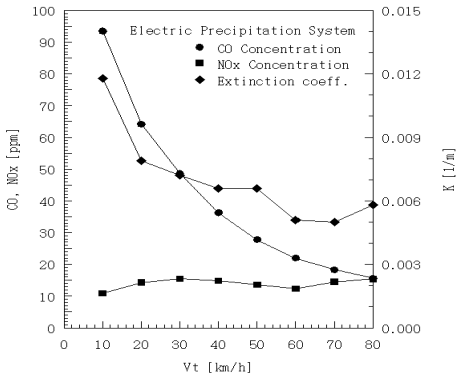


Fig. 6. Emission contamination for electric precipitation system

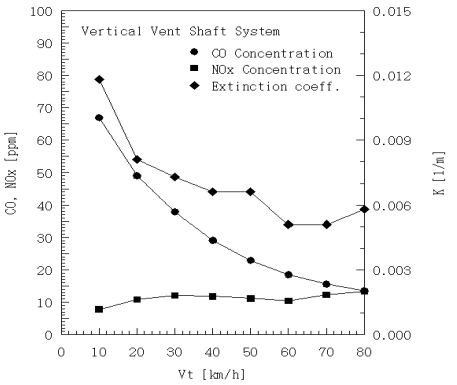


Fig. 2. Emission contamination for vertical vent shaft system

가정하여 요구되는 젯트팬 수를 9대로 산정하였다.

2.2.2 전기집진기 방식의 환기기 용량 산정

모델터널을 전기집진기 방식으로 설계하는 경우, 집진기는 매연만을 처리하기 때문에 저속시 (10 km/h) CO를 처리하기 위한 젯트팬 대수가 최소 팬댓수가 되며, 전기집진기의 급기 노즐의 승압력을 고려하여 젯트팬 댓수를 결정하면 9대가 되며, 집진기 용량은 200 ㎥/s가 된다. 이때 집진기의 효율은 85%로 이다.

Fig. 1은 전기집진기 방식으로 설계하는 경우에 주행속도에 따른 터널내 오염물질의 최대 오염농도를 나타낸 것으로 터널내 허용농도를 최소한으로 만족하고 있음을 알 수 있다.

2.2.3 수직갱 방식의 환기기 용량 산정

수직갱 방식을 적용하는 경우, 전기집진기 방식과는 달리 CO를 처리하지 못하는 문제는 발생하지 않으므로 최소 젯트팬 수에 대한 제약조건은 없다. 그러나 현재 수직갱 방식의 경우에 일반적으로 터널내 화재시 수직갱은 운영하지 않기 때문에 배연용 젯트팬 수가 최소한의 젯트팬 수가 된다. 따라서 배연용 젯트팬 댓수 9대를 기준으로 하여 수직갱 용량을 산정한 결과, 수직갱용급·배풍기의 용량은 170 ㎥/s가 된다.

Fig.2는 수직갱방식으로 설계하는 경우, 환기기가 최대로 가동하는 상태에서 각 주행속도별, 오염물질별 터널내 최대 오염농도를 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있는 바와 같이 설계속도 50 km/h에서 근소하게 매연의 허용농도를 만족하고 있으므로 적정규모로 설계된 것으로 판단된다.

이상의 검토에서 전기집진기의 급기용 팬 및 수직갱의 급·배기용 팬의 사양은 Table 3과 같이 결정하였다.

표에서 팬정압은 일반적인 조건에서 풍도내 압력손실

Table 3. Specification of EP and vertical vent shaft fan

Ventilation System		flow rate (m^3/s)	static pressure (mmAq)	Power (kW)	Q T Y	Total power (kW)	
Electric precipitation		100	140	200	2	400+50.81	
Vertical Vent shaft	supply fan	85	160	195	2	390	690
	exhaust fan	85	130	150	2	300	

Table 4. Power consumption of Electric precipitation

QTY	flow rate	Power (kW)			Power supply
1	200 ㎥/s	Contector	10.8	7.58	3P ×380V ×60Hz
		power pack	9.67	6.79	
		breed fan	51.92	36.44	
		total	72.39	50.81	

을 고려하여 산정한 것으로 자세한 내용은 본 논문에서는 생략한다.

또한 전기집진기는 급기팬 운전을 위한 동력뿐만 아니라 집진기 자체의 브리드 팬이나 파워팩등에서 소비되는 동력이 있으며, 이는 Table 4에 나타낸 바와 같다. Table 4의 집진기 자체소비동력은 현재 진부터널에 설치된 전기집진기를 기준으로 하여 산정한 것이다.

3. 환기 방식별 운전단계의 검토

터널 환기는 경제성을 용량제어가 필수적이며 이를 위해서 전기집진방식이나 수직갱방식에서는 인버터에 의한 회전수 제어나 가변익 방식에 의한 급·배기팬의 용량 제어 수행하고 있다. 따라서 단순 젯트팬 방식의 경우에는 시스템의 특성상 댓수제어에 의한 제어가 불가피하나, 전기 집진기 방식이나 수직갱 방식에서는 운전동력을 최소화하기 위한 운전단계에 대한 검토가 필요하나 현재 이에 대한 연구가 수행되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 운전단계의 검토를 위해서 수직갱이나 전기집진기의 급·배풍용 팬의 부분부하시 운전동력에 대한 검토를 수행하였다.

Fig.3은 육십령 터널에 설치된 가변익 팬과 AXICO사의 가변익의 팬에 대한 부분부하율 (Q/Q_{max})에 따른 최대운전동력에 대한 동력비 (P/P_{max})를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 부분부하율이 50%이상

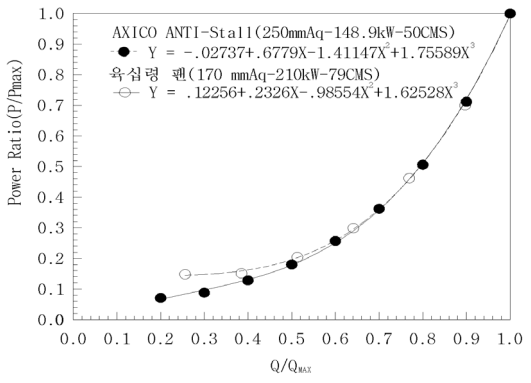


Fig. 8. Power ratio for partial load

에서는 두 경우, 거의 비슷한 경향을 보이고 있으며, 50%이하에서는 약간 차이가 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나 일반적으로 터널에서는 30%이하의 운전을 하지 않기 때문에 30%이상의 부하율에서 최대 운전동력에 대한 운전동력의 비는 거의 차이가 없는 것으로 볼 수 있으며, 본 연구에서는 비교적 정확한 측정이 수행된 AXICO사의 팬에 대한 부분부하 특성을 적용하여 검토하였으며, 이때 풍량비 (Q/Q_{max})에 따른 운전동력의 비 (P/P_{max})는 식 (1)로 표시된다.

$$\frac{P}{P_{max}} = -0.02737 + 0.6779\left(\frac{Q}{Q_{max}}\right) - 1.41147\left(\frac{Q}{Q_{max}}\right)^2 + 1.75589\times\left(\frac{Q}{Q_{max}}\right)^3 \quad (1)$$

3.1 집진기 방식에 대한 검토

3.1.1 운전단계 검토

운전조합에 따른 운전동력을 검토하기 위해 젯트팬은 0대에서 9대까지 1대씩 댓수분활 운전하며, 각각에 대해서 전기집진기의 급기용팬은 0%~100%까지 10%씩 단계운전하는 것으로 하여 총 110개의 운전조합에 대해서 주행속도별로 운전동력을 검토하였다.

Fig.4와 5는 각각 주행속도가 저속인 10, 30 km/h일 때 운전조합에 따른 운전동력 및 확보풍량의 관계를 나타낸 것이다. 확보풍량은 집진기에서 처리되는 풍량을 고려한 터널내로 공급되는 신공기의 양으로 확보풍량이 증대한다는 것은 터널내 오염농도가 감소하는 것을 의미하며, 확보풍량은 식 (2)로 계산한다.

$$Q_r = Q_{ri} + \eta_{EP} \cdot Q_{EP} \quad (2)$$

그림에서 실선은 젯트팬수와 전기집진기 급기팬의 용량이며, 점선은 등풍량곡선이다. 또 ●는 확보 풍량이 동일한 경우에 운전동력이 최소가 되는 운전조합을 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 운전조합에 따라서 확보풍량이 동일할지라도 운전동력은 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 일예로 젯트팬 0대, 급기팬 140 ㎥/s로

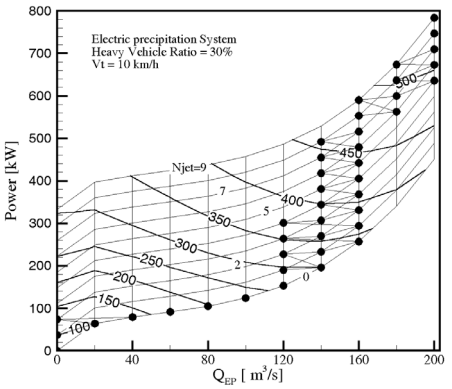


Fig. 4. Comparisons of operation power with Q_{EP} and number of jet fan (Vt=10 km/h)

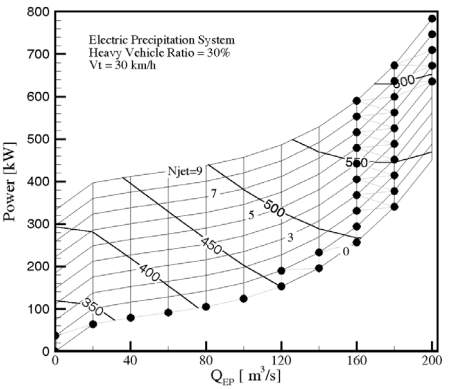


Fig. 5. Comparisons of operation power with Q_{EP} and number of jet fan (Vt=30 km/h)

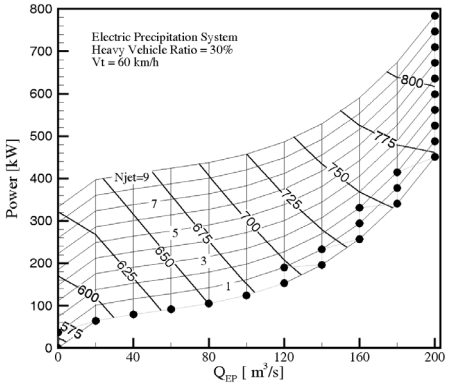


Fig. 6. Comparisons of operation power with Q_{EP} and number of jet fan (Vt=60 km/h)

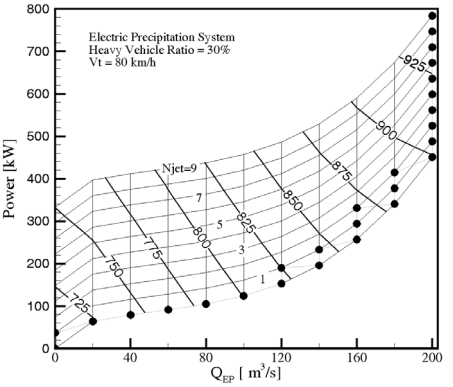


Fig. 7. Comparisons of operation power with Q_{EP} and number of jet fan (Vt=80 km/h)

운전하는 경우와 젯트팬 9대, 급기팬 0 ㎥/s로 조합 운전하는 경우를 비교하면, 두 경우 모두 확보풍량은 300 ㎥/s정도이나 운전동력은 약 330 kW와 200 kW로 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

또한 환기기 운전조합은 젯트팬은 가동하지 않고 집진기의 급기팬만을 운전하는 운전영역과 집진기와 젯트팬이 동시에 운전되는 운전영역, 젯트팬이 최대로 운전되는 상태에서 집진기를 운전하는 운전영역으로 구분될 수 있음을 알 수 있다. 즉, 확보풍량이 250 ㎥/s 정도까지는 집진기 만을 운전하고, 250~500 ㎥/s까지는 집진기와 젯트팬을 조합운전하고, 풍량이 500 ㎥/s이상에서는 젯트팬은 풀로 가동하고 집진기를 가동하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 5는 주행속도가 30 km/h인 경우로 10 km/h인 경우와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

Fig. 6과 7은 주행속도가 60 km/h인 경우와 80 km/h인 경우로, 저속에서와 달리 급기팬 용량이 최대가 될 때까지 젯트팬의 가동댓수는 최대 3대를 초과하지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 주행속도가 40 km/h에서부터 확연히 나타나고 있는데, 이것은 주행속도가 증가하여 교통환기력에 의한 풍속이 증가하는 경우에는 전기집진기가 젯트팬 보다 환기 효과가 우수하다는 것을 의미한다.

또 운전조합에 따른 운전동력은 주행속도가 저속인 경

Table 5. Operation Step for E.P. system

Operation step	Congest traffic		Normal traffic	
	no. of jet fan	Axial Fan	no. of jet fan	Axial Fan
1	2	0	2	0
2	0	30	0	30
3	0	40	0	40
4	0	50	0	50
5	0	60	0	60
6	0	70	0	70
7	0	80	0	80
8	3	80	0	90
9	6	80	0	100
10	9	80	3	100
11	9	90	6	100
12	9	100	9	100

우보다 보다 큰 차이를 보이고 있으며, 일예로 젯트팬 0대+급기팬 80%용량으로 운전하는 경우와 젯트팬 9대+급기팬 50%인 경우는 모두 825 ㎥/s의 풍량이 발생하나 전자의 경우에는 운전동력이 450 kW이고 후자는 230 kW로 약 2배 정도의 동력차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 주행속도가 고속일때가 젯트팬 보다 집진기의 환기 효과가 우수함을 알 수 있다.

따라서 터널내 풍속이 증가할수록 전기 집진기가 젯트팬 보다 환기효과가 우수하다는 것을 알 수 있다.

Table 5는 이상과 같은 검토를 통해서 모델터널에 대해서 정체시와 정상운행시 최적의 환기기 운전단계를 나타낸 것이다. 집진기 방식의 터널은 종래와 같이 운전의 편의성 때문에 젯트팬을 운전하고 이에 환기량 만족하지 못하는 경우에 집진기를 가동하는 것보다는 각 터널의 제원에 따라서 최적의 운전단계를 검토하여 환기기를 운영하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3.1.2 운전동력 비교

본 절에는 단순히 젯트팬을 우선 운전하고 젯트팬에 의해 환기량을 충족하지 못하는 경우에 전기 집진기를 운전하는 경우 (이하 CASE 1이라 함)와 본 연구에서 도출된 운전단계에 의해서 집진기와 젯트팬을 조합하여 운전하는 경우 (CASE 2)에 대한 운전동력을 비교・검토하였다.

본 연구에 사용한 동적 시뮬래이션 프로그램은 환기기의 제어로직 및 운전평가를 목적으로 개발한 것으로 자세한 내용은 이미 발표된 바 있으므로 생략하였다.

Fig. 8은 CASE 1에 대해 6:00～22:00까지 가상교통량하에서 제어주기를 3분으로 하여 시뮬래이션을 수행한 결과이다. 그림 (c)는 본 시뮬래이션에 적용한 시간변화에 따른 교통량 및 주행속도의 변화를 나타낸 것이며, Poole이 환기기의 운전평가를 위해서 적용한 교통량 모델을 기초로 하여, 모델터널의 혼입율을 적용해서 재구성한 것으로 출퇴근시간을 전후해서 정체가 발생하는 비교적 차량수가 많은 상태로, 최대 교통량은 2200 pc/h・lane로 60 km/h에서 발생한다.

동적시뮬레이션 프로그램의 환기기 제어모델은 퍼지알고리즘을 적용하였으며, 제어대상은 터널내 오염물질의 농도로 제어시점의 농도와 제어주기 동안의 농도변화를 제어입력으로 하였다. 제어 설정치 CO의 허용농도는 전속도에서 100 ppm, 매연에 대한 허용소광계수는 저속 (10～30)에서 0.008, 중속 (40～50)에서는 0.007, 고속 (60～80 km/h)에서는 0.006m^{-1}로 적용하였다.

그림 (b)는 터널내 CO와 K에 대한 최대 오염농도의 변화를 나타낸 것으로 환기기가 가동되는 시간동안 허용농도에 대한 터널내 농도의 평균편차는 약 7.6%로 나타났다. 그러나 그림에서 차량의 평균주행속도가 약 8 km/h까지 감소하는 정체시간대 (17:30～19:00)에는 터널내 농도가 제어설정치인 0.008 m^{-1}을 초과하고 있는데, 이것은 설계시 도로터널의 허용 소광계수를 0.012 m^{-1}로 적용하여 환기기 용량을 산정하였으나 운영시에는 매연에 대한 허용농도를 0.008 m^{-1}로 강화하여 적용하였기 때문이다. 그러나 이 시간대외에는 터널내 오염농도는 허용농도를 비교적 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

그림 (a)는 환기기의 운전단계와 터널내 풍속을 나타낸 것으로 터널내 평균 풍속은 약 7.5 m/s이하로 나타나고 있으며, 환기팬이 가동되는 시간은 735분이며, 운전동력은 약 5288.9 kWh/day로 나타났다.

Fig. 9는 CASE 2에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 허용농도에 대한 터널내 농도의 평균 편차는 7.3%로 CASE 1과 거의 비슷하게 나타나고 있으며, 이

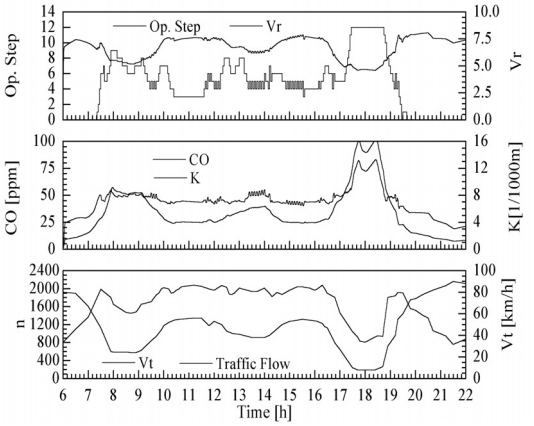


Fig. 8. Ventilation System simulation (Jet Fan prior operation mode)

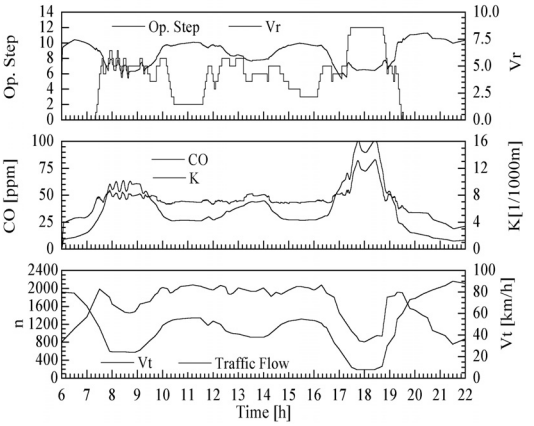


Fig. 9. Ventilation System simulation (combined operation mode)

경우에도 주행속도가 10 km/h이하인 17:30~19:00시간대의 소광계수는 제어 설정농도를 초과하고 있으나 터널내 농도는 비교적 허용농도를 잘 만족하는 것으로 나타났다.

이 경우, 일일 환기기 가동시은 Table 7에 나타낸 바와 같이 729분으로 젯트팬 방식과 거의 비슷한 값을 보이고 있으나 일일소비동력은 3507.8 kWh/day로 CASE 1의 경우 보다 약 34%정도 감소하는 것으로 나타나고 있다.

이상의 검토에서 집진기 방식의 터널에서 단순히 운전의 편의성에 때문에 젯트팬을 우선 운전하고 젯트팬에 의한 환기풍량이 부족하면 집진기를 운전하는 종래의 방식보다는 운전동력을 최소화할 수 있는 운전조합을 산정하여 이에 의해서 운전하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

3.2 수직갱 방식에 대한 검토

수직갱에 의한 환기방식은 수직갱에 의해서 터널내 오염된 공기를 배기하고 신선 외기를 수직갱을 통해서 급기하므로서 터널내 오염된 공기를 제거함과 동시에 오염공기를 희석하여 터널내 오염물질의 농도를 허용농도로 유지하는 방식이다. 배기용 축류팬과 급기용 축류팬이 각각 필요하며, 전기집진기 방식보다는 동일풍량에서 운전동력이 증가하나 가스상 물질도 처리할 수 있는 장점이 있다.

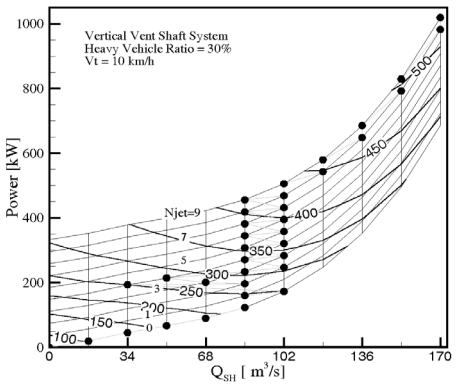
3.2.1 운전단계 검토

이 경우에도 전기집진기 방식과 마찬가지로 젯트팬은 댓수분할 운전을 하며, 수직갱은 10%단계로 운전하는 것으로 하여 주행속도별로 운전동력을 검토하였다. 운전단계에 따른 소비동력이 검토시 배풍용 축류팬과 급기용 축류팬 풍량은 실제와 마찬가지로 동일한 풍량으로 운전되는 것으로 하였다.

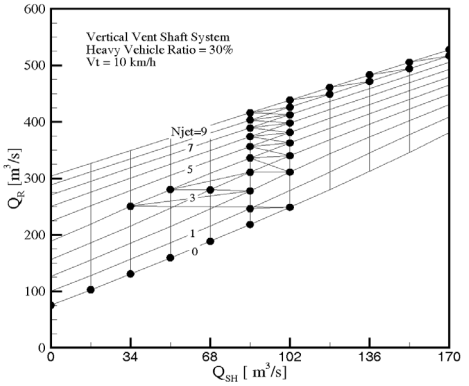
Fig. 10 (a)는 주행속도가 10 km/h인 경우에 운전조합에 따른 급기량 및 운전동력을 나타낸 것으로 전기집진기 방식과 마찬가지로 운전조합의 특성을 3개의 영역으로 구분되고 있음을 알 수 있다. 즉, 수직갱 용량이 50%이하에서는 수지갱만을 운전하고, 50~60% 범위에서는 젯트팬과 부분적으로 조합하여 운전하며, 그 이상에서는 젯트팬을 풀로 가동하고 수직갱을 운전하는 것이 효과적인 것으로 나타나고 있다.

또 Fig.10 (b)는 젯트팬수와 수직갱의 풍량에 따른 터널내 풍량 변화를 나타낸 것으로 수직갱 풍량이 증가하면 터널내 풍량은 선형적으로 증가하며, 젯트팬 수가 증가할수록 풍량 증가 기울기는 감소하고 있다. 즉 수직갱 풍량이 작은 경우가 젯트팬 수의 증가에 따른 풍량 증가가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 주행속도가 80 km/h 인 경우로 조합운전이 요구되는 수직갱의 풍량범위가 집진기 방식과 마찬가지로 고풍량 영역으로 이동하고 있으나 전기 집진기방식에

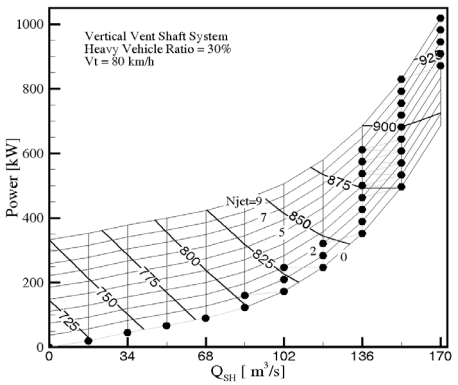


(a) Vent Shaft flow rate and operation power

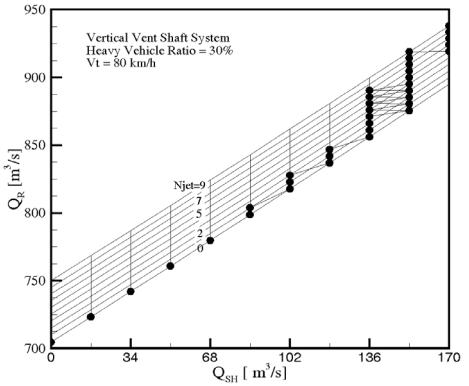


(b) Vent Shaft flow rate and tunnel flow

Fig. 10. Comparisons of operation power consumption with Q_{SH} and number of jet fan



(a) Vent Shaft flow rate and operation power



(b) Vent Shaft flow rate and tunnel flow

Fig. 11. Comparisons of operation power consumption with Q_{SH} and number of jet fan

서는 집진기의 용량이 최대 용량에 도달한 다음에 젯트팬을 운전하는 것이 소비동력면에서 유리하였으나 수직갱방식에서는 수직갱 풍량이 80~90%범위에서 젯트팬 용량이 최대가 될 때 가지 운전하고 다음에 수직갱 풍량을 증가하는 것이 효과적인 것으로 나타나고 있다.

Fig. 11 (b)는 주행속도가 80 km/h일때 수직갱 풍량 및 젯트팬 수에 따른 터널내 풍량을 나타낸 것이다. 이 경우에도 수직갱 풍량이 증가하면 터널내 풍량은 직선적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 젯트팬 댓수증가에 따른 풍량 증가는 주행속도가 10 km/h인 경우보다 작게 나타나고 있는데, 이는 교통환기력에 의한 터널내 풍속 증가로 인해서 터널내 풍속과 분류의 풍속의 제곱에 비례하는 승압력이 감소하기 때문이다.

Table 6은 운전단계별 급·배풍량 과 젯트팬 댓수를 나타낸 것이다.

Table 6에 의하면 저속에서는 축류팬 용량의 60%까지는 수직갱을 단독운전하는 것이 경제적이나 수직갱의 풍량이 60%를 초과하게 되면 젯트팬과 조합하여 운전하고 젯트팬이 최대에 도달하면 수직갱 용량을 증가시키는 것이 바람직한 것으로 나타나고 있다. 또한 정상운전시에는 축류팬 용량의 80%까지는 수직갱 단독운전이 효과적이며, 풍량이 보다 증가 하는 경우에는 젯트팬을 조합

Table 6. The operation step of vent shaft system

Operation step	Congest traffic		Normal traffic	
	no. of jet fan	Axial Fan	no. of jet fan	Axial Fan
1	2	0	2	0
2	0	30	0	30
3	0	40	0	40
4	0	50	0	50
5	0	60	0	60
6	3	60	0	70
7	6	60	0	80
8	9	60	3	80
9	9	70	6	80
10	9	80	6	90
11	9	90	9	90
12	9	100	9	100

하여 운전하는 것이 바람직한 것으로 나타나고 있다.

3.2.2 운전동력 검토

Fig. 12 및 13은 수직갱 방식에 대해서 젯트팬 우선 운전방식 (Fig.12)을 적용하는 경우 (CASE 3)와 본 연구에서 구해진 최적의 운전단계를 적용하는 경우 (Fig. 13, CASE 4)에 운전동력을 비교한 것이다.

Fig. 12는 CASE 3에 대한 시뮬레이션 결과로 환기기

Table 7. Results of simulation

Item		Electric precipitation system		Vertical Shaft system	
		jet fan	combined operation	jet fan	combined operation
Running time of fan (min)		735	729	735	729
Operation power consumption (kWh/day)		5288.9	3507.8	5622.8	4485.6
Average deviation (%)		7.6	7.3	7.5	7.3
Excessive deviation time (min)	over 5%	48.2	43.60	61.03	35.88
	over −5%	149.18	113.17	148.55	118.07
	over 10%	14.47	19.43	13.65	20.17
	over −10%	92.90	83.75	94.03	90.78

가동시간은 735분이며, 제어 평균 오차는 7.5%로 나타났다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 제어 헌팅현상이 발생하는 시간대가 나타나고 있으며, 운전동력은 5622.8 kWh/day로 나타나고 있다.

Fig. 13은 CASE 4에 대한 환기시뮬레이션을 수행한 결과로 이 경우에도 환기기 가동시간은 729분으로 젯트팬 운선 운전하는 경우보다 약간 작게 나타나고 있으나

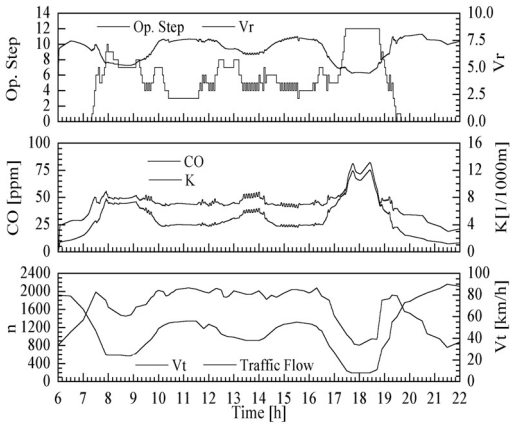


Fig. 12. Ventilation System simulation (Jet Fan prior operation mode)

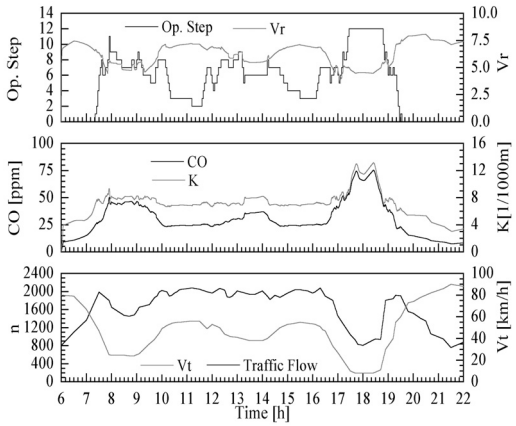


Fig. 13. Ventilation System simulation (combined operation mode)

그 차이는 미미한 것으로 나타났다. 또 허용농도에 대한 제어 평균오차는 7.3%이며, 운전동력은 4485.6 kWh/day로 CASE3에 비해서 약 25%정도의 운전동력이 절감되는 것으로 나타나고 있다.

Table 7은 이상의 검토내용을 비교하여 정리한 것으로 모든 경우에 과도초과시간이 전체 운전시간에 대해서 상당히 크게 나타나고 있는데, 이는 전술한 바와 같이 정체가 심하게 발생하는 17시대에 대한 환기기 용량 산정시 매연에 대한 소광계수를 도로공사의 설계기준인 $0.012m^{-1}$를 적용하였으나 운영시에는 설정치를 $0.008m^{-1}$로 하였기 때문이다.

이상의 검토 결과에서 젯트팬 우선 운전보다는 젯트팬과 급배기용 축류팬을 조합하여 운전하는 것이 환기 효율이 좋은 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 조합환기 방식(젯트팬+집진기, 젯트팬+수직갱)의 터널에서 환기기의 운전 방법에 따른 환기기 운전동력을 비교・검토하였다. 운전동력을 최소로 하기 위한 운전단계를 검토하고 도출된 최적의 운전단계를 적용하여 동적 시뮬레이션을 실시하였으며, 환기 시뮬레이션 결과, 현재 수행되고 있는 바와 같이 단순이 젯트팬을 우선 운전하고 젯트팬에 의해서 환기량을 만족하지 못하는 경우에 집진기 또는 수직갱을 운전하는 것 보다는 최적의 운전단계를 도출하여 운전하므로서 상당한 운전동력을 절감할 수 있음을 알았다.

조합운전 방식의 경우 집진기 방식에서는 최적의 운전단계를 적용하여 운전한 결과, 단순히 젯트팬을 우선 운전하고 풍량이 부족한 경우에 소배풍기를 운전하는 것보다 약 34%의 운전 동력이 절감되는 것으로 나타났으며, 수직갱 방식에서는 약 25%정도의 운전동력이 절감되는 것으로 나타났다.

기호 설명

K : Extinction coefficient [1/m]
Q_r : Flow rate in tunnel [m^3/s]
Q_{ri} : Tunnel inlet flow rate
Q_{EP} : Flow Rate of Electric precipitation
Q_{SH} : Flow rate of Vertical vent shaft
V_r : Velocity of Air flow [m/s]
η_{EP} : Efficiency of electric precipitation

참고문헌

1. 한국도로공사, 1997, 고속도로터널 환기설계 기준, 서울.
2. G.F.Poole, 2000, "Predicting annual consumption for longitudinally ventilated road tunnel", Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 10th International Sym., pp. 411-429.
3. 유지오 등, 2002, "터널환기 동적해석프로그램에 관한 연구", 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 689-694.

유지오
신흥대학 건축설비과 교수
jolew@shc.ac.kr

이동호
인천대학 안전공학과 교수
riedh@incheon.ac.kr

신현준
한국 건설기술 연구원 건축연구부 부장
hjshin@kict.re.kr

이용화
유한대학 건축설비과 교수
lyh@green.yuhan.ac.kr