

네트워크형 지하 도로터널 분기부에서의 환기효율 향상방안에 대한 실험적 연구

이호석¹, 홍기혁^{2*}, 최창림³, 강명구⁴, 임재범⁵, 문흥표⁶

Experimental study of improvement of ventilation efficiency at intersection in network-form underground road tunnel

Ho-Seok Lee, Ki-Hyuk Hong, Chang-Rim Choi, Myung-Koo Kang, Jae-Bom Lim, Hong-Pyo Mun

ABSTRACT The experiment was performed to analyze the intersectional ventilation efficiency by intersection structure and Jet Fan in network-form road tunnel. For this, the size of real road tunnel was reduced by 1/45. To apply traffic inertia force when driving, blower fan was used to form an airflow in model tunnel and the intersectional efficiency was also investigated by measuring the speed at local point of the tunnel. To improve the reduction of ventilation caused by the structure character, Jet Fan was installed to optimize ventilation efficiency in tunnel.

Keywords: Underground road tunnel, partition wall, Jet Fan. ventilation performance

요약 네트워크형 도로터널 내 분기부 구조물과 제트팬에 의한 분기 환기효율 분석하고자 실제 도로터널을 1/45로 축소하여 실험을 수행하였다. 차량이 주행할 때 발생하는 교통관성력을 적용하기 위해 블로워 팬을 사용하여 축소모형 터널내 기류를 형성하였고, 터널의 국부적인 위치에서 속도를 측정하여 분기 효율을 연구하였다. 구조물의 특징으로 발생하는 환기 저감을 개선하기 위해 제트팬을 설치하여 터널 내 환기 효율을 최적화하였다.

주요어: 지하 도로터널, 격벽, 제트팬, 환기 성능

접수일(2011.12.26), 수정일(2012.1.5), 게재확정일(2012.2.24)

¹정회원, (주)비엔텍아이엔씨 대표이사

²비회원, (주)비엔텍아이엔씨 팀장

³정회원, (주)삼보기술단 이사

⁴정회원, 대림산업 상무

⁵비회원, 대림산업 부장

⁶비회원, 대림산업 대리

*교신저자: 홍기혁 (E-mail: pvs430@bnttek.co.kr)

1. 서론

최근 우리나라의 눈부신 경제성장으로 광역도시간 이동이 자유롭고 수송능력이 향상됨에 따라 도로 및 도로교통 기반시설들도 상당히 발전해왔다. 이에 따른 교통수요도 점점 증가하는 추세이나, 도심지의 경우 출퇴근 등의 특정 시간 때에서 도로정체가 발생하여 경제, 시간 등의 사회적 비용 문제로 제시되고 있다.

2010년 통계청의 자료에 의한 서울의 도로혼잡율(1 km당 자동차 수)을 분석해보면 367.2%로 상당히 높다. 또한 서울시 도시교통본부 교통지표에 따르면 통행속도 24.0 km/h이고 도심지의 경우 16.6 km/h으로 교통정체가 심각한 수준임을 알 수가 있다.

이를 해결하는 대안으로 자동차 전용도로가 많이 주목받고 있지만, 대도시 시가지 도로망 건설시 이미 기존에 있는 기반시설과의 연계 문제와 특히 용지 취득시 발생하는 경제적 비용을 무시할 수 없다. 이러한 단점을 극복하고자 최근에는 도로시스템 구축 시 발생하는 사회·경제적 비용이 상대적으로 저렴하고 다른 기반 시설과 중복되지 않는 범위에서 건설 가능한 네트워크형 지하 도로 터널이 새로운 대안으로 떠오르고 있는 추세이다. 네트워크형 지하 도로터널이란, 지상의 극심한 차량정체의 해결책으로 주요도심지역을 지하공간으로 만들어 서로 네트워크 방식으로 연결하는



그림 1. Södra Länken 터널 분기 현황



그림 2. 서울제물포터널 현황도

지하터널을 말한다. 국외의 네트워크형 도로터널 사례는 스웨덴 Södra Länken 터널과 호주 Clem Jones 터널이 대표적인 경우이다. 그림 1의 Södra Länken은 연장 6 km 터널로 8개의 IC(분기부)를 설치하였으며, Clem Jones 터널은 연장 6.8 km로 노선 중앙부에 1개의 분기부를 설치하였다(김세환, 2011). 국내의 경우 최근 서울 시내를 격자형으로 연결하는 네트워크형 지하 전용 도로터널을 구상 중에 있다.

본 논문의 연구대상인 서울제물포터널은 그림 2와 같이 서울시 신월동~여의도동을 연결하는 연장 7.53 km의 소형차 전용도로로 진·출입부 일부를 제외한 전구간이 터널구간으로 본선 2차로 터널과 Ramp 1차로 터널로 계획하였고 올림픽대로 진·출입로 연결을 위해 분기부 1개소를 계획하였다. 분기구간 단면 설계 시 변이구간, 가·감속차로, 분기시점의 최소 터널이격거리 등의 기하구조를 고려하여 3차로 단면과 3차로 확폭단면을 적용하였다. 또한, 서울제물포터널과 같이 상습 도로정체 개선을 목적으로 건설되는 네트워크형 도로터널의 경우, 터널의 자체적인 공간적 폐쇄성 때문에 보다 높은 안전설계 및 선진 기술이 요구된다.

그 중에 자동차에서 발생하는 오염물질이 분기부 공간 급확대로 인하여 터널내부에 퇴적될수 있는데 이러한 오염물질 퇴적은 운전자의 시야 및 건강상의 문제점을 야기시킬 수 있기 때문에 터널 환기가 중요하다. 그러므로 본 연구는 설계된 네트워크형 도로터널의 분기부 구조물에 대한 환기 분기비를 분석하고 능동적 제어 가능한 제트팬을 사용하여 환기 효율을 최적화하고자 한다(신현준, 1996; 이창우, 2002; 권오상, 2006).

2. 실험

2.1 축소모형

본 실험은 차량의 교통관성력에 의해 발생하는 기류가 분기터널 구조물에 따라 램프터널과 본선 램프 터널로 환기되는 효율을 분석하고, 제트팬을 작동하여 최적의 환기 효율을 제시하는 것으로 그림 3과 같이 실제 터널을 1/45로 축소하여 모형터널을 제작하였다. 모형의 재질은 아크릴이고 본선터널, 분기터널, 램프터널, 본선램프 터널로 구성되어 있다. 터널의 총 길이는 16.8 m이고, 3개의 단면을 가지는 터널이 그림 4와 같이 서로 연결되어 있다. 분기터널에는 환기효율을 증대시키기 위한 제트팬이 설치되어 있으며(강기훈, 2002), 또한 기류의 흐름을 원활히 유도하여 분기효율을 증가시키는 구조적 장치인 격벽을 설치할 수 있다. 또한 분기터널 끝단에 연결된 램프터널의 경우 6.99°의 경사도를 가지고 있으나 본선램프 터널은 경사도가 없고 터널 연장을 고려하여 자바라를 설치하여 연장에 따른 터널벽면 마찰 효과를 모사하였다.

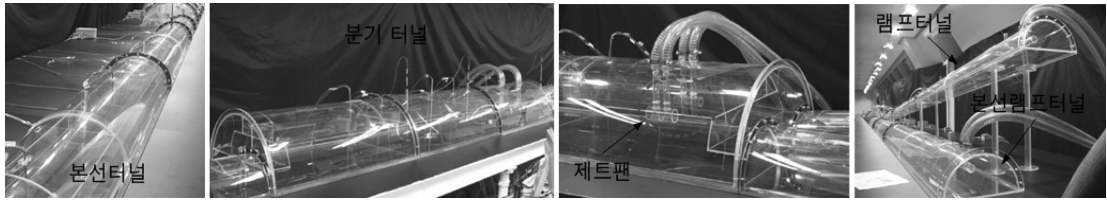


그림 3. 모형실험 모델

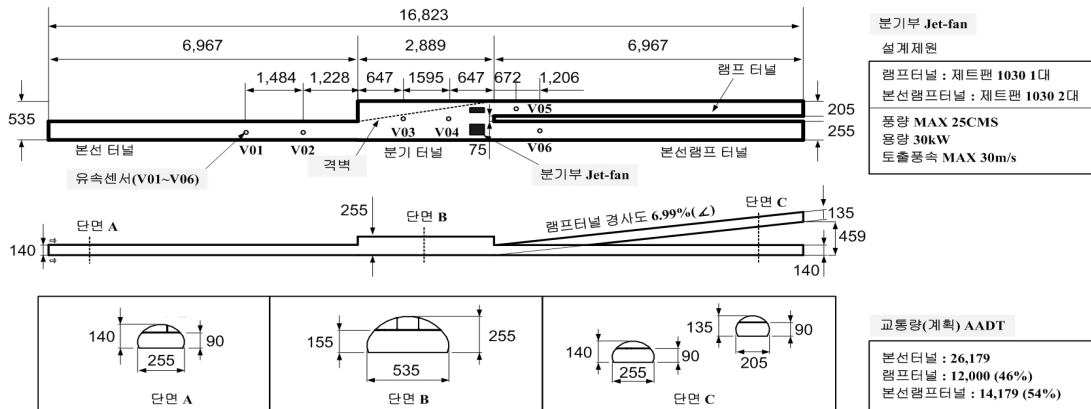


그림 4. 모형실험 장치구성

2.2 실험장치

터널 내부 교통관성력에 의한 기류를 파악하여 분기효율을 분석하고자 정확도 $\pm 5\%$ 의 dwyer사의 열선유속계 7개를 사용하여 그림4와 같이 국부적인 위치에서 유속을 측정하였다. 본 실험 모형은 터널의 단면적이 비교적 작으므로 터널 평균유속을 측정하기에 제약이 따르므로 불가피하게 터널 단면 중앙부분의 유속을 평균유속으로 가정하였다. 또한 차량에서 발생하는 교통관성력에 의한 기류는 축소모형의 경우 차량 이동 모사가 어렵기 때문에 본선터널 끝단에 연결된 블로워 팬을 이용하였고 램프터널과 본선램프터널의 분기 환기효율 개선을 위해 분기터널에 설치되어 있는 제트팬 2개를 이용하여 최적의 분기 환기효율을 제시하였다(안중환, 2001). 설계된 실물 스케일의 본선터널에서 속도 5~70 km/h 차량 이동시 발생하는 기류는 3.53~7.09 m/s의 속도범위를 가진다(김정엽, 2009). 이 기류 속도를 축소실험에 적용하고자 레이놀즈 무차원 상사법칙에 적용하면 비실용적인 높은 공기속도가 요구되기 때문에 본선부 유속을 0.3 m/s, 0.4 m/s, 0.5 m/s, 0.6 m/s, 0.7 m/s를 적용하였다. 본 실험은 구조물 형상과 제트팬의 작동유무에 따른 환기 효율을 분석하고 제트팬의 최적화된 운영을 제시하고 있기 때문에 분기 효율을 분석하고자 하는 점에서는 무리가 없다고 판단된다(류재홍, 2003; 윤순현, 2010; 박시형, 2004).

2.3 실험 시나리오

본 실험에서는 표 1과 같이 총 6가지 Case를 선정하였다. 분기터널 구조물 특성에 따른 환기 효율을 분석하고자 격벽의 유무에 따른 Case를 설정하였고, 분기효율 악화 시 제트팬을 가동하여 최적의 운전조건을 찾는 Case를 설정하였다. 또한 차량 운행 조건 또는 임의로 특정 터널의 환기 효율을 변경하는 경우를 고려하여 임의의 분기효율을 설정하는 Case 등의 총 6개의 Case에 대해 실험을 수행하였다. 환기 효율 분석은 터널 중앙 단면에서 측정된 유속을 평균유속으로 가정하여 유량을 계산하였고, 이를 결과를 토대로 유량비 분석을 수행하였다.

2.4 설계 구조물에 대한 오염도 분석

네트워크형 도로터널 내 오염도 분석을 분석하기 위해 N. TAQS V3.0 프로그램을 이용하였다. N. TAQS V3.0은 1-D 운동량 방정식과 이류 확산식을 유한차분법으로 해석하여 준정상상태(Quasi-Steady State)에서의 유속, 일산화탄소(CO)의 소요환기량을 예측한다. 네트워크형 도로터널의 특성을 입력하면 소요환기량이 구해지고 일산화탄소(CO)는 다음의 식에서 구해진다(조형제, 2011; 남상진, 2008; 조형제, 2010; 김남영, 2001).

$$Q_T = \sum_t Q_{t,aver} \times n \times \frac{1}{3,600} \times \frac{10^6}{CO_{lim} - CO_{amb}} \quad (1)$$

Q_{CO} 은 소요환기량(m^3/s)나타내고 $Q_{t,aver}$ 는 차종별 환산승용차 대당 평균배출량(m^3/h)이다. n 은 차종별 터널내 환산승용차 대수(PCU대)이고 lim 은 설계농도(ppm)이며 amb 는 외부농도(ppm)이다.

표 1. 실험조건

구분	격벽적용	제트팬	제트팬에 의한 분기비 유도	비고
Case 1	격벽 무	off	-	각 Case 마다 본선터널 기류속도를 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7m/s로 설정하여 실험함
Case 2		on	5 : 5	
Case 3	격벽 유	off	-	
Case 4		on	5 : 5	
Case 5	격벽 유	on	3 : 7	
Case 6		on	7 : 3	

표 2. 차량속도 5 km/h 주행시 터널내부 CO농도 해석결과

	분기부 직전	본선램프 터널	램프터널
CO	20.52 ppm	6.65E-03 ppm/m	4.90E-03 ppm/m

N. TAQS 프로그램 의해 실제 스케일의 본선터널 내부 차량 이동속도가 5 km/h이면, 기류의 속도는 3.53 m/s로 계산된다. 이때의 유량은 140.50 m³/s이며 본선램프 터널과 램프터널의 거리당 CO농도는 표 2와 같다.

3. 실험 결과

표 3의 실험결과를 보면 분기터널 내부 격벽이 없고 제트팬 작동이 없는 Case 1의 경우, 교통 관성력에 의해 유속이 0.3~0.7 m/s로 증가할수록 램프터널과 본선램프 터널의 속도가 선형으로 증가하는 것으로 나타났다. 램프터널과 본선램프 터널의 유량 분기비는 24.5 : 75.5로 차량 이동으로 발생된 유량의 대부분은 본선램프 터널로 이동하여 램프터널 내부의 오염물질 발생이 증대되는 경우 오염물질 농도상승에 따른 환기효과가 저하될수 있다. 이와 같이 도심지 네트워크형 도로터널과 같이 교통량의 변화가 시간 또는 기간별로 크게 상이한 분포를 나타내는 특성을 가진 경우 이러한 분기부에서의 환기유량비 제어를 통한 각 지점별(램프, 본선램프) 오염물질 농도를 능동적으로 제어하여 환기효율을 증대할 필요가 있다. 본 실험에서는 격벽 및 제트팬에 의한 분기부에서의 유량 분기비 제어를 통한 각 지점의 오염물질 농도를 예측하여 격벽 및 제트팬에 의한 효과를 분석하였다.

표 3. 유량 분기비 결과

구분	0.3 m/s		0.4 m/s		0.5 m/s		0.6 m/s		0.7 m/s	
	램프	본선 램프	램프	본선 램프	램프	본선 램프	램프	본선 램프	램프	본선 램프
Case 1	24.5	75.5	28.2	71.8	30.3	69.7	32.3	67.7	32.9	67.1
Case 2	51.1	48.9	48.9	51.1	49.0	51.0	50.8	49.2	51.2	48.8
Case 3	50.4	49.6	52.2	47.8	52.3	47.7	53.9	46.1	54.6	45.4
Case 4	51.1	48.9	49.4	50.6	50.3	49.6	49.8	50.2	49.4	50.6
Case 5	30.6	69.4	29.7	70.3	30.0	70.0	30.2	69.8	31.5	68.5
Case 6	68.3	31.7	73.2	26.8	67.9	32.1	68.8	31.2	69.6	30.4

표 4. 터널 지점별 CO농도 분석결과

구분	Case	1	2	3	4	5	6	비고
램프터널	CO(ppm)	39.79	29.5	29.6	29.5	35.8	27.1	0.3 m/s적용 500 m지점 농도분석값
본선램프터널	CO(ppm)	28.71	33.5	33.3	33.5	29.5	40.8	
램프/본선램프 분기비		표 3의 분기비 참조						

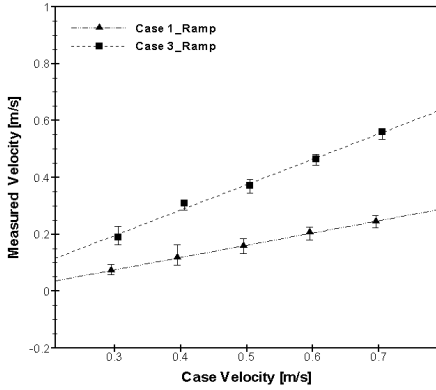


그림 5. Case 1과 Case 3과의 램프터널에서의 평균속도 비교값

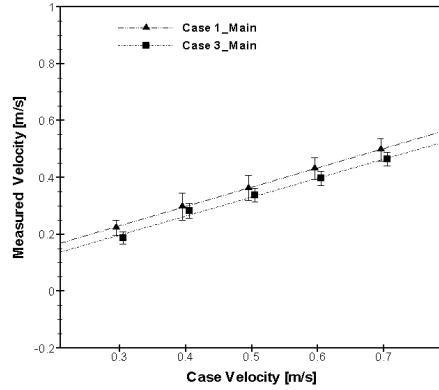


그림 6. Case 1과 Case 3과의 본선램프 터널에서의 평균속도 비교값

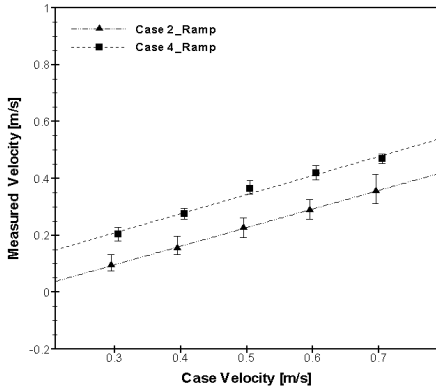


그림 7. Case 2과 Case 4과의 램프터널에서의 평균속도 비교값

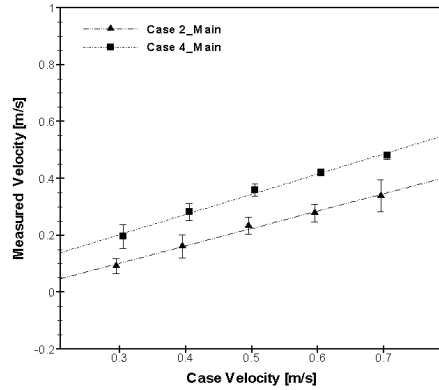


그림 8. Case 2과 Case 4과의 본선램프 터널에서의 평균속도 비교값

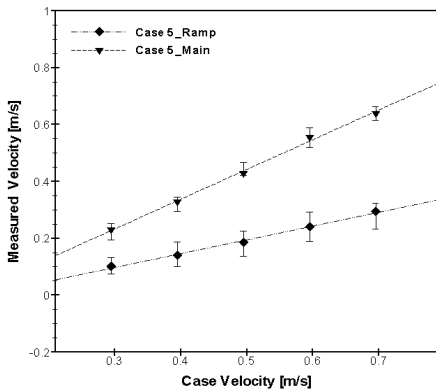


그림 9. Case 5, 램프터널과 본선램프 터널에서의 평균속도 결과값

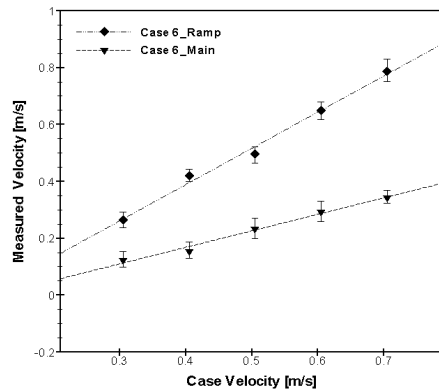


그림 10. Case 6, 램프터널과 본선램프 터널에서의 평균속도 결과값

Case별 분기비 적용에 따른 N. TAQS 분석에 의한 오염농도를 적용하였을 경우, 지점에 따른 본선램프 터널과 램프터널에서의 오염농도는 표 4와 같다. 분기부의 격벽이나 제트팬에 의한 기류 분기비를 조절하지 않은 경우 Case 1 결과와 같이 램프터널에서의 오염농도는 39.79 ppm으로 본선램프보다 높게 나타났으나 램프터널과 본선램프 터널로 유입되는 기류의 분기비를 조절가능한 구조물 또는 능동적으로 제어되는 fan을 적용하는 경우 능동적인 분기비 제어를 통한 오염물질 농도를 조절이 가능하여 상황에 따라 환기효율을 증가시킬수 있을 것으로 판단된다

Case 2의 경우, 분기터널 구조물에 의한 환기 분기효율 저하를 개선하기 위해 분기터널 내 램프 터널 방향 제트팬을 가동한 경우이다. 제트팬 가동 시 램프터널과 본선램프 터널의 분기비가 거의 5:5로 조정된 것을 알 수 있고 이때의 각 기류속도 0.3~0.7 m/s에 대한 제트팬의 유량은 2.15, 5.75, 5.96, 7.48, 10.08 CMH이다. 제트팬의 경우 차량의 교통상황에 대한 능동적 대처가 가능하다는 장점을 가진다.

Case 3의 경우는 분기터널에 격벽이 설치되는 조건으로 기류의 속도에 상관없이 램프터널과 본선램프 터널의 분기비는 대략 5:5의 결과를 나타내었다. 격벽 설치 시 분기 효율이 증가하는 이유로는 격벽의 벽면 마찰에 의한 점성 효과 때문에 분기터널내 기류는 격벽을 따라 이동하여 기류의 방향을 유도하게 되어 격벽이 없는 구조물에서 발생하는 회전유동에 의한 정체현상을 감소시켜 환기의 분기효율이 증가된 것으로 사료된다. 따라서 그림 5의 램프터널 유속 결과에서 격벽이 없는 구조물보다 격벽이 있는 구조물에서 기류의 속도가 증가하여 분기 환기효율을 증가시키는 결과를 가져온 것으로 판단된다. 하지만 램프터널에서는 격벽의 유무가 중요한 변수인 반면에 그림 6와 같이 본선램프 터널에서의 기류 속도는 큰 변화가 없는 것으로 나타났는데 이는 본선램프 터널의 경우 교통환기력에 의해 생성되는 기류의 영향이 직접적으로 미치는 것을 알 수 있다. 또한 격벽 구조물의 경우 0.3~0.7 m/s의 속도범위에서 5:5 분기비의 결과를 가져왔으나 제트팬처럼 능동적 제어가 불가능하여 분기비의 다양성이 제한되는 한계가 있다

Case 4는 제트팬을 작동하여 분기비를 5:5로 최적한 결과이고 각 기류속도에 따른 제트팬의 유량은 2.19, 2.73, 3.26, 3.94, 4.03 CMH이다. 그림 7과 8의 결과처럼 능동적으로 제트팬을 작동하여 분기 효율을 증가시킬 수 있으며, 격벽 구조물과 제트팬의 터널 시스템 구성이 분기비를 향상으로 환기성능이 증가할 것으로 판단된다.

터널의 보수작업 또는 교통량에 따른 터널 내부의 구역적 환기 운전을 위해 Case 5, 6의 경우 램프터널과 본선램프 터널의 환기량을 임의로 설정하여 제트팬을 작동시켰다. 그림 9는 분기비 3:7을 적용한 결과로 본선램프 터널에서 기류의 속도가 높고, 그림 10은 반대로 7:3을 적용한 결과로 램프터널에서 기류의 속도가 높아 제트팬을 이용하면 터널내 기류의 분기비를 능동적으로 제어하여 환기를 조절할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

지하 도로터널에서 분기부의 기하구조 특성에 따른 각 분기지점(램프터널, 본선램프터널)의 유량 분기비에 따른 오염물질 농도를 예측하였으며 분기부에 격벽과 제트팬을 적용하여 분기부에서의 유량 분기비와 그에 따른 각 지점의 오염물질 농도를 예측하여 환기효율을 파악하고자 축소모형 실험을 수행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 네트워크형 도로터널 분기부의 경우 기하구조 특성에 따라 본선터널부에서 유입된 기류의 분기비가 램프터널과 본선램프터널부에서 약 3 : 7로 형성되는 것으로 나타났으며 분기비 불균형에 따른 두 지점에서의 오염물질농도의 차이가 발생하였다. 이와 같이 기하구조적 특성 및 분기부 교통상황과 같은 여러 가지 요인에 의하여 각 지점의 오염물질농도 차이가 크게 나타나는 경우 능동적인 유량의 분기비 제어를 통한 환기효율 증대가 필요한 것으로 나타났다.
2. 분기부에 격벽과 같은 구조물을 적용하는 경우 분기부의 단면 급확대에 의한 회전기류발생에 따른 기류정체를 방지하여 본선램프 터널의 분기비는 대략 5 : 5로 개선되는 것으로 나타났으나 구조적인 영향에 의한 분기비로 분기부에서의 기류 분기비에 대한 다양성이 제한되는 특성을 갖게 된다.
3. 제트팬 가동 시 램프터널과 본선램프 터널의 분기비는 상황에 따라 5 : 5, 7 : 3, 3 : 7과 같이 조정할 수 있으며 이는 터널내부 차량의 교통상황등과 같은 요인들에 의해 각 지점의 오염물질 농도 저감을 위한 능동적 대처가 가능하다는 장점이 있다.
4. 터널 내 분기터널부가 계획되는 경우 본선램프터널, 램프터널부의 특수적인 상황으로 터널 내 임의의 환기량 조정이 필요시 상황에 따른 각 지점의 유량 분기비를 통한 능동적인 대처가 가능하도록 분기터널부에 제트팬을 계획함으로써 본선램프터널, 램프터널부의 환기효율을 최적화 할수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 강기훈, 한화택 (2002), “도로터널 내 환기경 주위의 단락 및 우회유동 특성”, 대한설비공학회 2002 하계 학술발표대회 논문집, pp. 706-711.
2. 권오상, 윤찬훈, 윤성욱, 김진 (2006), “제트팬 설치간격과 재유입 현상 분석을 위한 모형실험”, 한국터널 지하공간학회 논문집, 제8권 제4호(2006. 12), pp. 335-344.

-
3. 김남영, 김효규 (2001), “장대터널 환기 설계 기준에 관한 기초 연구”, 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집, pp. 774-778.
 4. 김세환, 최창립, 한석희, 이계화, 최연식, 석재덕 (2011), “도심지 분기터널의 안정성 평가에 관한 설계 사례”, 한국암반공학회, 추계 총회 및 창립 30주년 기념 심포지엄, pp. 275-279.
 5. 김정엽, 신현준 (2009), “터널에서 차량의 운행에 의해 생성되는 비정상 유동에 대한 실험적 연구”, 한국터널지하공간학회 논문집, 제11권 제4호(2009. 12), pp. 411-417.
 6. 남상진, 조창영 (2008), “국내 도로터널 환기설비 설계의 문제점 및 개선방향”, 설비/공조·냉동·위생 10월호
 7. 류재홍, 유용호, 김진 (2003), “도로터널 제트팬 모형 실험”, 설비공학논문집, 제15권, 제8호, pp. 630-640.
 8. 박시형, 이석원 (2004), “터널 모형실험에 대한 상사성 이론정립에 대한 연구”, 한국터널지하공간학회 논문집 제6권 제2호(2004. 6), pp. 161-169.
 9. 신현준, 김정엽 (1996), “중류식 터널환기방식에 관한 수치해석적 연구”, 공기조화 냉동공학회, 창립 25주년 기념 하계학술발표 논문집, pp. 381-386.
 10. 안종환, 김종식, 강신형, 이진호 (2001), “장대터널 내 제트팬 위치에 따른 환기해석”, 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 논문집, pp. 1180-1185.
 11. 윤순현, 외 5명 공역 (2010), 유체역학, 제6판, 교보문고.
 12. 이창우 (2002), “도로터널 환기관련 연구동향”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 12, No. 3, pp. 152-157.
 13. 조형제, 백종훈 (2011), “도로터널의 환기시스템”, 설비저널, 제40권 제4호, 4월호
 14. 조형제, 이원기, 여인철, 민대기 (2010), “장대 도로터널의 환기시스템”, 대한설비공학회, 동계학술발표회 논문집, pp. 491-497.