

# 도로터널 환기시스템 개발연구

이창우

동아대학교 에너지·자원공학과

## Development of Vehicle Tunnel Ventilation System

Changwoo Lee

*Underground space environmental engineering, Dong-A University*

**ABSTRACT:** This paper aims at studying the key design elements for the optimal ventilation system design, developing the design models and suggesting the design guidelines. The key elements include the basic exhaust emission rate, wall friction coefficient, vehicle drag coefficient and slip streaming effect, jet fan operating efficiency, natural ventilation force and installation scheme for jet fans and ventilation monitors in tunnel. The design models developed in this study are one-dimensional ventilation simulator to analyze the air flow, pressure profile and pollutant dispersion inside and outside tunnel, expert model to choose the optimal ventilation method, and the ventilation characteristic chart to evaluate the preliminary ventilation system. The study results are reflected in the design guideline for road tunnel ventilation system.

**Keywords:** Road tunnel ventilation, Natural ventilation, Ventilation design guideline, Ventilation simulator, Wall friction, Vehicle drag, Basic exhaust emission rate

### 1. 서론

도로터널 환기시스템은 도로터널 이용자에게 쾌적하고 안전한 환경을 제공할 수 있도록 최적화 되어야한다. 환경적 인식의 제고, 차량 오염물질 배출량을 포함한 특성의 변화, 관련 법규의 변화 등은 터널 환기시스템 설계인자에 대한 재검토 필요성을 제기하고 있다. 본 연구는 도로터널 환기시스템의 최적 설계를 위하여 주요 설계요소 인자에 관한 연구, 설계틀 연구, 설계 기준의 제안을 목표로 한다.

기준배출량은 소요환기량의 결정에 가장 큰 영향을 미친다. Fig 1.은 (1) 현재의 환기설계 기준에 경유승용차의 구성비를 고려한 경우, (2) 차령계수를 고려하기 위해 2006년 이후 제작차와 운행차를 구분하고 차종별 구성비에 대한 가중평균값을 고려한 경우, (3)2006년 이후 환경부기준을 반영한 경우, (4)EURO기준, (5)국내의 기존 배출계수(2010년)를 적용한 경우를 비교한 매년 기준 배출량이다. 2안의 기준배출량 혹은 EURO-3 수준의 기준배출량을 적용하는 것이 현 단계에서는 적절한 것으로 보이며, 향후에는 이보다 강화된 EURO-4 수준이나 환경부(2006년 이후) 기준으로 적용하는 것이 합리적인 것으로 분석된다.

### 2. 설계인자

#### 2.1 오염물질 기준배출량

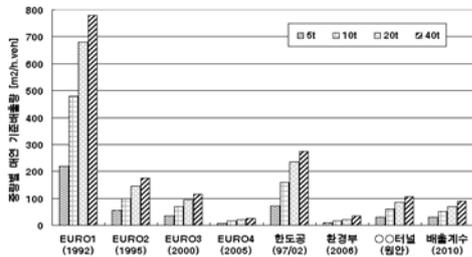


Figure 1. 기준배출량 비교

## 2.2 벽면마찰계수

제트팬의 가동을 통한 속도감쇄법에 의하여 현장실험 결과를 Figure 2에 도시하였으며 연구결과, 현재의 국내기준 0.025보다 낮은 벽면마찰계수의 제시가 시급히 요구된다. 고속도로의 경우, 0.015, 도심터널의 경우 0.018의 벽면마찰계수가 바람직하다.

Fig 2. 벽면마찰계수 실험시간동안의 속도분포

## 2.3 차량항력계수

최근 차량의 특성변화 및 운행차량의 차중별 구성비의 변화 추세로 항력계수의 변화가 예상된다. 2006년도 일본기준에 이와 같은 변화가 반영되었다. PIARC는 교통밀도에 의한 슬립스트리밍 효과의 고려를 권고하고 있으며, 본 연구결과 항력계수는 차간거리 및 폐색율과 뚜렷한 관계가 나타났다. 기존의 차량등가면적의 개념을 적용한 교통환기력 계산을 위하여 일본기준(2006)의 개정된 등가면적 계산식의 적용이 바람직하며 인증된 국내 연구결과가 도출될 때까지 슬립스트리밍에 의한 교통환기력의 감소는 차속 10km/h이하 속도에서 30%를 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## 2.4 자연환기력

터널내 작용 환기력 중 가장 정량화가 어려운 자연환기력은 국내 장대터널의 경우 현재 기준보다 훨씬 큰 경우가 빈번하게 관측되고 있다. 본 연구에서는 기압장벽고(barometric barrier)의 개

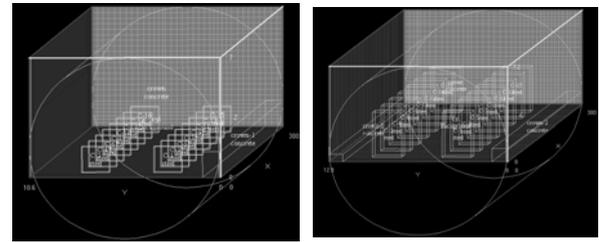


Fig 3. 슬립스트리밍 효과 분석을 위한 모델

념을 적용한 자연환기력의 최대 가능값을 추정하는 방법을 제시하였다. 자연환기력의 최대값을 다음 식과 같이 기압장벽고의 크기에 비례한다고 가정한다. Fig 4.에서 검은 부분은 갱구로부터 기준지점까지 단면상의 모든 지형을 중합 투영한 투영면이며 기압장벽고는 투영면적과 같은 크기를 가지는 가상의 직사각형(가로, 터널길이의 두 배)의 면적이다. 국내 터널에서의 기압장벽고와 자연환기력의 상관관계는 다음 식으로 정량화가 가능하다.

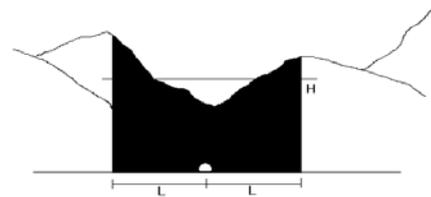


Fig 4. 기압장벽고개념

$$P_{Nmax} = 0.45 \cdot H$$

$P_{Nmax}$ : 자연환기력의 최대값 (Pa)  
 $H$ : 기압장벽고 (m)  
 $L$ : 터널길이 (m)

## 2.5 제트팬 환기효율 및 설치기준

차량 운행중인 터널내 제트팬의 환기효율을 제트팬 가동실험을 통하여 분석한 결과가 Fig 5.과 Fig 6.와 같다.

제트팬 운전효율을  $\eta = \frac{\Delta P_{JF, measured}}{\Delta P_{JF, CFD}} \times 100(\%)$ 로 정의할 경우 효율은 83%이하로 이론효율과는 큰 차이를 보인다. Fig 6.에서와 같이 자연환기력 또한 제트팬 효율에 큰 영향을 미친다. 한편 Fig 7.와 Fig 8.는 제트팬 가동시 풍속분포를 보여준다. 약 140m이상 떨어진 범위에서 제트류의 영향이 소멸되어 3차원 풍속분포가 균일하여진다. 제트팬 승압계수는 일본 기준(90~99%)의 적용이 현실적이라고 판단된다. 제트팬의 설치간격은 제트류의 환

기효과를 극대화하기 위하여 “일정 거리 이상”으로 정의함이 바람직하다.

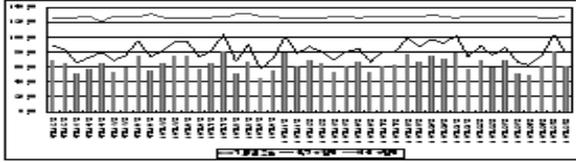


Fig 5. 제트팬 승압력 및 운전효율 분포

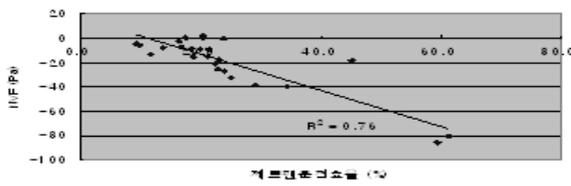


Fig 6. 자연환기력과 제트팬운전효율

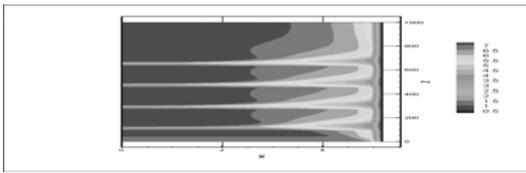


Fig 7. 제트팬 가동에 따른 풍속분포 (높이 3.4m 단면)

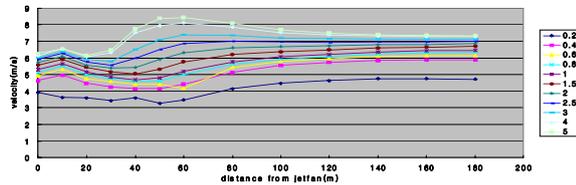


Fig 8. 제트팬 가동에 따른 풍속분포 (제트팬 및 벽면으로 부터의 거리별 분포)

## 2.6 계측기 설치기준

터널 입구 및 출구 부근에서의 풍속과 횡단면에서의 측벽으로부터 이격 거리(20cm, 50cm, 전 단면)에 따른 풍속 측정값의 차이를 Fig 9.과 Fig 10.에 도시하였다. 측방향으로의 풍속차이 및 횡단면상의 비교지점사이의 차이의 통계적 유의성이 없다. 따라서 풍속의 대표성 있는 값의 측정을 위하여 2개의 설치지점이 요구되며 측방향 설치지점은 환기설비로부터는 환기설비 설치 시에 요구되는 이격만큼 떨어진 위치에 설치하여야 한다. 한편, 단면상의 계측기 설치지점은 벽면으로부터 약 20cm이상 떨어진 지점이어야 한다.

## 3. 설계틀

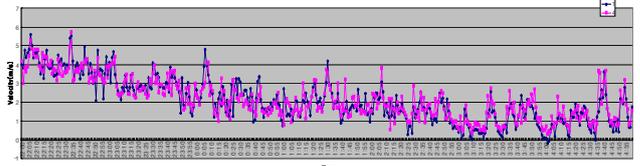


Fig 9. 입구 및 출구 부근 풍속 측정값

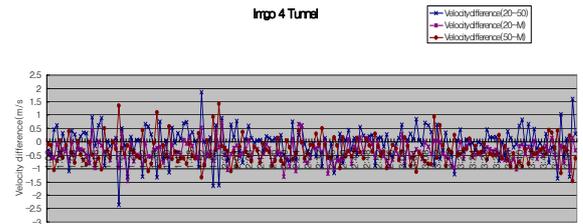


Fig 10. 벽면과의 이격거리에 따른 풍속측정값 비교 (이격거리 20cm, 50cm지점 및 전단면 측정값)

### 3.1 1-D 시뮬레이터

터널내 풍속, 압력 등 기류유동 특성과 이류 확산에 따른 오염물질 확산 분석이 가능한 환기시뮬레이터는 네트워크 이론을 적용하여 본 터널 및 덕트내 유동분석이 가능하므로 모든 환기방식의 분석이 가능하다. 자연환기력 분석 및 점오염원으로부터 분류확산 모델을 적용한 갱구 확산 모듈도 포함하고 있다. 시뮬레이터의 흐름도는 Fig 11.과 같다.

### 3.2 최적환기방식 결정 전문가시스템 모델

CLIPS 틀을 기반으로 한 전문가시스템 모델은 기존 환기시스템의 최적화 근접도를 정량적으로 평가하기 위한 모델로 환기시스템 최적화에 관련된 변수를 지수화하여 종합 근접도지수(overall index for optimization)를 계산하게 된다. 최적화 기준은 (1)공학적 신뢰성, (2)외부환경성, (3)시공성, (4)유지관리성, (5)경제성, (6)위험관리성을 포함하였다.

### 3.3 소요환기량 특성도

소요환기량 특성도는 토목제원에 대한 피드백 평가수행이 가능하여 설계초기 단계에서 능동적인 평가가 가능한 틀로 제시되었다. 사업성 분석을 위한 초기계획단계시 교통량, 예상계획만으로도 토목제원에 대한 능동적 환기평가가 가능하므로, 손쉽게 환기특성을 파악할 수 있어 설계시간의 단축이 기대된다.

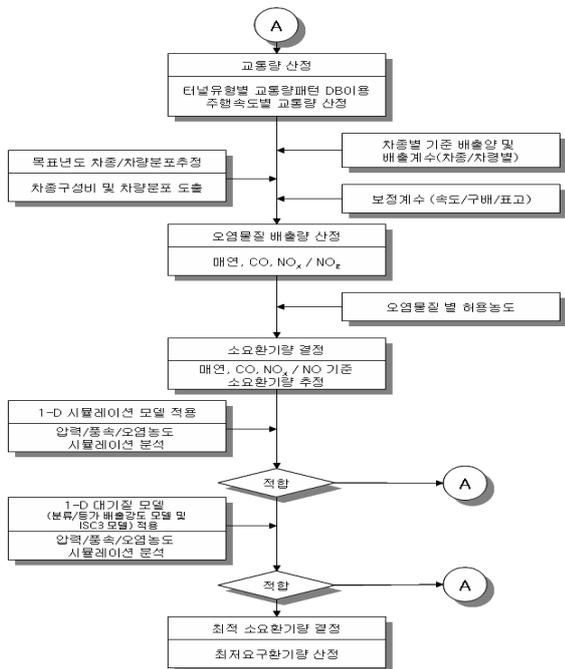


Fig 11. 시뮬레이터에 의한 소요환기량 결정

## 5. 결론

도로터널의 환기시스템의 환경성, 경제성, 안정성을 최적화하기 위하여 본 연구의 주용 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 주요 설계자 중 오염물질 기준 배출량, 벽면마찰계수, 차량항력계수, 자연환기력, 제트팬 환기효율 제트팬 및 계측기 설치기준 등에 관한 연구를 수행하여 국내 터널에 적합한 기준을 제안하였다.

(2) 설계툴로서는 최적 환기방식의 결정을 위한 전문가 모델, 환기시스템의 기류 및 터널내외 오염물질 확산분석이 가능한 모델을 개발하였다. 시뮬레이터의 경우, 터널의 형태 및 환기방식에 관계없이 적용 가능하므로 활용성을 극대화하였다.

(3) 제안된 소요환기량 특성도는 기존의 외국 교통환기도에 비하여 상대적으로 제작 및 활용이 용이하여 설계 초기단계에 토목제원에 대한 능동적 환기평가가 가능하므로, 손쉽게 환기특성을 파악이 가능한 틀이다.

(4) 연구결과를 바탕으로 국내 도로터널내의 소요환기량을 최적화할 수 있는 기준 및 주요 설비의 설치기준에 관한 제안을 하였다.

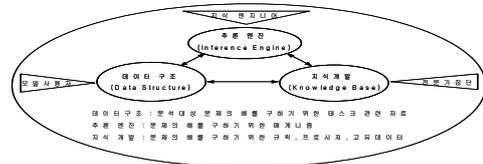


Fig 12. 전문가모델 개요

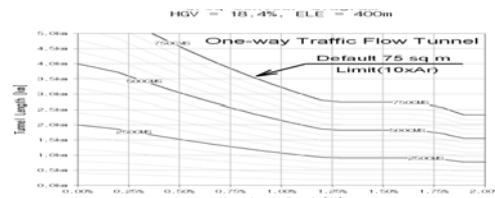


Fig 13. 소요환기량 특성도

## 후 기

본 연구는 국토해양부의 2003 건설핵심기술연구개발사업인 “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구개발-지하생활공간방재기술개발(과제번호: C03-02)” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Lee, C.W., 2005, A fundamental study on the road tunnel ventilation system - focused on the wall friction coefficient and the vehicle drag coefficient, J. of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, vol.34, no.3, pp.21-26
2. Sturn, P.J., 2005, "Safety features in the 10km long Plabutsch Tunnel", Int Symp on Design, Construction and Operation of Long Tunnels, Taipei, Taiwan, pp.635-642
3. Casale, E., et al., 2006, "Influence of the natural ventilation on the transverse ventilation," 12th AVVT, pp. 479-494
4. 환경부, 2003, 경유차 대기오염 저감대책(경유승용차 배출허용기준 포함)
5. 이창우, 이경복, 2005, “국내 도로터널내 차량항력계수 관련 연구”, 터널기술, 한국터널공학회, vol.7, no.4, pp.313~321