

인접 터널로부터의 재유입을 고려한 터널 내 소요환기량 산정 연구

이동호[†] · 최백열^{*} · 윤성욱^{**}

인천대학교 안전공학과 · ^{*}인천대학교 대학원 · ^{**}GS건설
(2009. 5. 4. 접수 / 2010. 5. 24. 채택)

A Study of Ventilation Requirements for Tunnel Considering Recirculation near Tunnel Portals

Dong-ho Rie[†] · Baek-yeol Choi^{*} · Sung-wook Yoon^{**}

Department of Safety Engineering, University of Incheon

^{*}University of Incheon Graduate School

^{**}GS Engineering & Construction

(Received May 4, 2009 / Accepted May 24, 2010)

Abstract : This paper analyzes difference between current tunnel ventilation calculation method and advanced one which considers effects of polluted air recirculation near tunnel portals. For the calculation, CFD(Computational fluid dynamics) technique was utilized. From the result, it was found that 4.38% more fresh air is required when there is polluted air recirculation near tunnel portal areas. Hence, it is recommended that the consideration of polluted air recirculation should be made when deciding the ventilation requirements for tunnel.

Key Words : recirculation, CFD, ventilation, requirements

1. 서론

현재 도로의 직선화 사업과 차량의 증가 등으로 인하여 터널 건설이 급격히 증가하고 있다.

이와 같은 터널의 증가는 산악지형이 많은 국내의 특성상 터널 계획 시 장대 터널로의 설계의 증가를 가져왔다. 이에 따라 터널 내부의 오염물질의 농도를 허용농도 이하로 유지하기 위한 환기설계의 중요성이 대두되고 있다.

이러한 환기설계 중 터널 내 합리적인 환기량 운용을 위하여 차량의 유동량에 따른 적정 환기량을 계산한 환기 시스템이 설계되고 있다. 그러나 적정 환기량 계산시 터널 내부차량에서 발생하는 오염물질만을 고려하고 주변 환경에 의한 재유입의 고려없이 소요환기량을 계산할 경우 운영상 소요환기량 산정의 오차가 발생할 수 있다. 특히 짧은 거리로 연결된 갱구부가 근접한 연속 터널의 경우 재유입의 고려가 없는 소요환기량 산정은 각각의 출구 터널에서 배출되는 오염물질이 터널의 입구

로 유입됨에 따라 실제 유입량과의 차이가 크게 발생할 우려가 있다¹⁻⁴⁾.

터널부로의 오염물질 재유입은 소요환기량 산정시 실제와 계산상의 오차가 발생하여 터널 내부의 환기량 부족으로 오염물질을 효과적으로 제어하지 못할 가능성이 매우 높다.

본 연구는 연속 터널간에 오염물질의 재유입 여부를 CFD2000 프로그램을 사용하여 분석하며 근접터널로 재유입되는 오염물질의 영향을 고려한 환기량 산정방식과 기존의 산정 방식간의 차이를 분석하였다.

2. 환기량 산정 및 기준

2.1. 환기량 산정

소요환기량 산정은 크게 세계도로협회(PIARC : Permanent International Association of Road Congresses) 기준에 의한 환기산정 방식과 일본방식이 있으며 본 연구에서는 국내에서 보편적으로 적용되는 PIARC 방식을 사용하였다. PIARC 방식은 대상 물질의 배출량과 차량 대수 및 계획한 허용 농도 기

[†] To whom correspondence should be addressed.
riedh@incheon.ac.kr

준의 관계에 의해 산출되며, 여기에 차량속도, 계획 터널의 구배, 터널이 위치한 곳의 표고에 따른 보정을 통해서 최종적으로 산정된다. 오염농도 제어대상 물질에 대한 소요환기량은 매연은 Q_T , 일산화탄소(CO)는 Q_{CO} , 질소산화물(NOx) Q_{NOx} 으로 나타내며 관계식은 다음과 같다.

$$Q_T = \sum_{i=차종} (q_0^T \cdot n)_i \cdot \frac{f_{iv} \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{1}{K_{lim}} \quad (1)$$

$$Q_{CO} = \sum_{i=차종} (q_0^{CO} \cdot n)_i \cdot \frac{f_v \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{10^6}{CO_{lim}} \quad (2)$$

$$Q_{NOx} = \sum_{i=차종} (q_0^{NOx} \cdot n)_i \cdot \frac{f_v \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{10^6}{NOx_{lim}} \quad (3)$$

- Q_T : 매연에 대한 소요환기량[m³/(s · km · lane)]
- Q_{NOx} : NOx에 대한 소요환기량[m³/(s · km · lane)]
- Q_{CO} : CO에 대한 소요환기량[m³/(s · km · lane)]
- q_0^T : 매연에 대한 기준배출량[m²/(h · 대)]
- q_0^{CO} : CO에 대한 기준배출량[m³/(h · 대)]
- q_0^{NOx} : NOx 대한 기준배출량[m³/(h · 대)]
- CO_{lim} : 허용CO 오염물질 농도[ppm]
- NOx_{lim} : 허용 NOx 농도[ppm]
- K_{lim} : 허용소광계수[m⁻¹]
- f_{iv} : 경사속도보정계수[-]
- f_h : 표고보정계수[-]
- f_i : 경사보정계수[-]
- f_v : 속도보정계수[-]
- n : 차량별 교통량[대/(h · km · lane)]

2.2. 국내 터널 내 오염 기준

터널 내 차량 주행은 다수의 오염물질을 발생시키며 건설교통부 ‘도로설계편람’⁵⁾에서는 이러한 다

Table 1. Standard project concentration

Pollutants	Travel speed	Standard project concentration
Smoke decay factor Klim (or smoke transmissibility, %)	10km/h	0.008 ~ 0.009m ⁻¹ (45 ~ 40%)
	20 ~ 40km/h	0.007 ~ 0.008m ⁻¹ (50 ~ 45%)
	50 ~ 80km/h	0.005 ~ 0.006m ⁻¹ (60 ~ 55%)
CO	10km/h 20 ~ 80km/h	150ppm 100ppm
NOx	all-speed	25ppm

수의 오염물질 인 매연, 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)에 대한 설계 농도치를 PIARC보고서와 국내에서 적용되는 기준을 바탕으로 차량의 주행속도에 따라 분류한다.

Table 1은 이러한 건설교통부의 표준설계농도를 나타낸다.

3. 수치해석 설정 조건 및 방법

3.1. 재유입을 고려한 소요환기량 산정 방법

본 연구에서는 터널 갱구부 재유입을 고려한 터널 내 소요환기량 산정을 위해서 실제 재유입이 발생될 것으로 예상되는 출구부가 근접된 연속 터널을 대상으로 재유입을 분석하였다. 또한 도출된 재유입량을 고려하기 위해 다음의 수정식을 통하여 소요환기량을 재산정하였다.

$$Q_{T1} = \left\{ \sum_{i=차종} (q_0^T \cdot n)_i + K \right\} \cdot \frac{f_{iv} \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{1}{K_{lim}} \quad (4)$$

$$Q_{CO1} = \left\{ \sum_{i=차종} (q_0^{CO} \cdot n)_i + C \right\} \cdot \frac{f_v \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{10^6}{CO_{lim}} \quad (5)$$

$$Q_{NOx1} = \left\{ \sum_{i=차종} (q_0^{NOx} \cdot n)_i + N \right\} \cdot \frac{f_v \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{10^6}{NOx_{lim}} \quad (6)$$

- Q_{T1} : 매연에 대한 소요환기량[m³/(s · km · lane)]
- Q_{NOx1} : NOx에 대한 소요환기량[m³/(s · km · lane)]
- Q_{CO1} : CO에 대한 소요환기량[m³/(s · km · lane)]
- K : 대상터널로 재유입되는 매연 유입량
- C : 대상터널로 재유입되는 CO 유입량
- N : 대상 터널로 재유입되는 NOx 유입량

식 (4)~(6)은 수치해석을 통하여 분석된 대상터널 내부로 재유입 되는 오염물질량을 각 오염물질의 차종별 기준 배출량에 합산하여 재유입 발생시 터널 내부에 존재하는 오염물질의 양을 얻을 수 있다. 이때 얻어진 오염물질의 양을 기준으로 하여 소요 환기량을 산정한다.

3.2. 해석 대상 및 설정 조건

터널 갱구부 재유입을 고려한 터널 내 소요환기량을 산정하기 위한 대상 터널의 제원은 다음 Table 2와 같다.

Table 2. Simulation Dimension

Compartment	A Tunnel		B Tunnel	
	northbound lane	southbound lane	northbound lane	southbound lane
Direction				
Travel system	One-way traffic tunnel			
tunnel length	2,663m	2,663m	10,945m	10,959m
Corross section	75.44m ²	75.44m ²	79.887m ²	79.887m ²
Grade	-0.4183%	+0.35%	+1.95%	-1.95%
Position	A _{IN}	A _{OUT}	B _{OUT}	B _{IN}

본 연구에서는 Adaptive-Research사의 CFD2000을 이용하여 컴퓨터 수치해석을 수행하였다. 해석 모델은 LES(Large Eddy Simulation)모델⁶⁾을 사용하였고 해석 대상 영역은 터널 연결부를 중심으로한 400×300×50[m]로 총 격자수는 1.03×10⁵개로 설정하였다. Table 3은 수치해석 경계조건을 나타내며 Fig. 1은 모델링 형상을 나타낸다. 오염물질의 발생량은 최악 조건을 고려하기 위해서 국내 터널 내

Table 3. Boundary Conditions

Compartment	Contents	
Simulation Program	CFD2000	
Turbulent Model	LES Model	
Condition	Steady -State Condition	
Grid	103,000	
Output wind direction	northeaster	
Output wind velocity	4.0m/s	
Discharge wind velocities in tunnels	9.48m/s	
wind velocities in tunnels	9.64m/s	
Pollutants	Smoke	0.006m ⁻¹
	CO	100ppm
	NOx	25ppm

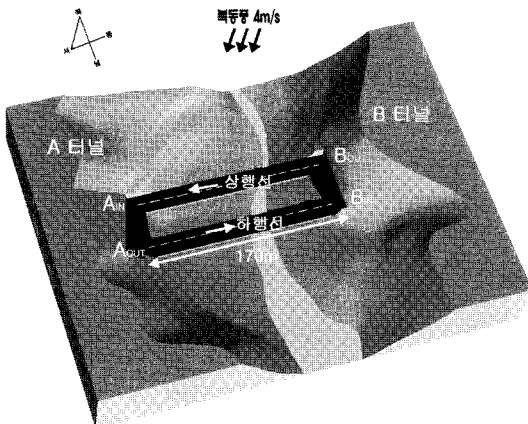


Fig. 1. Simulation Modelling.

오염 물질 한계값이 A_{OUT}와 B_{OUT}에서 배출하는 것으로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 재유입 분석

오염물질에 따른 터널 주변의 수치해석 분석 결과 기류흐름은 큰 차이가 없는 특성을 보이며 Fig. 2~4는 수립된 수치해석결과를 나타내었다.

본 연구에서는 터널 갱구부 재유입을 고려한 터널 내 소요환기량 산정에 대해 알아보기 위해 B_{IN}의 재유입 오염물질의 농도를 분석하였다.

Fig. 2는 근접 터널의 재유입에 따른 매연 농도 분포를 나타낸다. B_{IN}터널의 하행선 입구 지점의 매연농도는 최대 1.175×10⁻³[m⁻¹], 평균 6.744×10⁻⁴[m⁻¹]으로 나타났다.

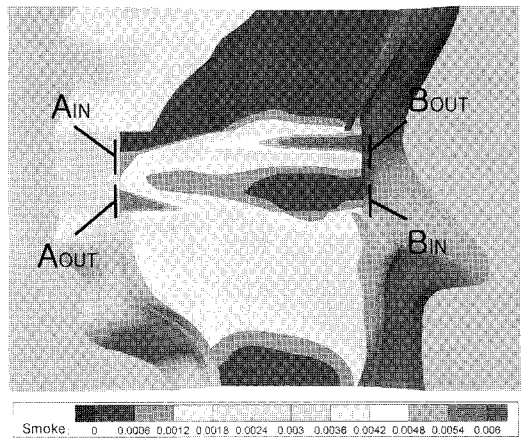


Fig. 2. Smoke concentration distribution.

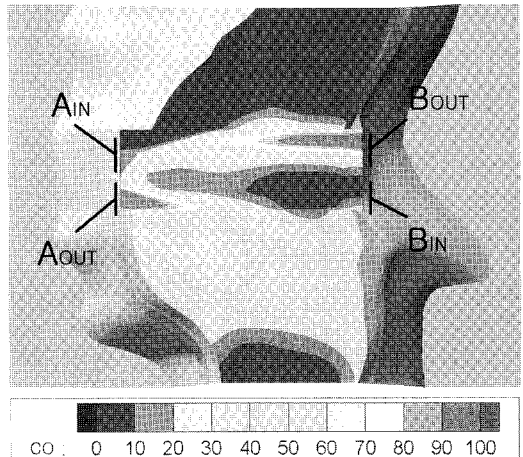


Fig. 3. CO concentration distribution.

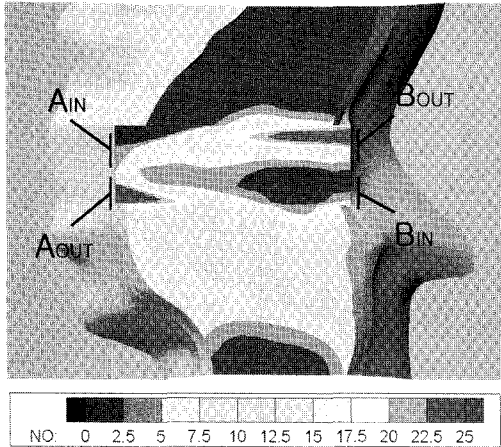


Fig. 4. NO concentration distribution,

Table 4. Average concentration distribution

Classification	Smoke	CO	NOx
Average Concentration	$6.744 \times 10^{-4} [m^{-1}]$	13.24ppm	3.07ppm

Fig. 3은 근접 터널의 재유입에 따른 CO농도 분포를 나타낸다. B_{IN}터널의 하행선 입구 지점의 매연농도는 최대 23.52ppm, 평균 13.24ppm으로 나타났다.

Fig. 4는 근접 터널의 재유입에 따른 NO농도 분포를 나타낸다. B_{IN}터널의 하행선 입구 지점의 매연농도는 최대 5.44ppm, 평균 3.07ppm으로 나타났다.

B_{IN}부분의 오염물질의 농도는 평균물질로 결정하였으며 다음과 같이 적용하였다.

Table 4는 입구에서 터널 안쪽으로 1[m] 들어간 곳의 단면적에서의 오염물질 별 평균 재유입량을 나타낸다.

4.2. 재유입량을 고려한 소요 환기량 비교

Table 4에서 분석된 오염물질 재유입량을 위 식 (4)~(6)에 대입하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

4.2.1. 매연 소요환기량

해석된 수치해석 데이터에서 B_{IN}으로 유입되는 매연의 오염물질분석 결과를 사용하여 식 (4)에 대입하여 소요환기량을 구한 후 그 결과를 재유입여부의 적용시와 미적용시로 나타내면 그 결과는 Table 5와 같다. 적용시가 미적용시보다 평균 6.17% 높은 소요환기량값으로 나타났다.

4.2.2. CO 소요환기량

해석된 수치해석 데이터에서 B_{IN}으로 유입되는

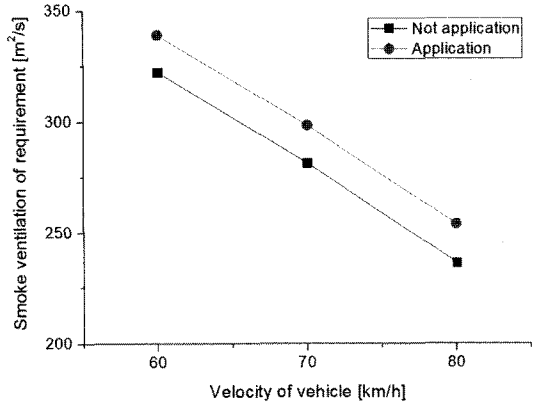


Fig. 5. Smoke ventilation of requirements,

Table 5. Smoke concentration

Classification	Not application	Application	Percentag(%)
10km/h	-	-	-
20km/h	-	-	-
30km/h	-	-	-
40km/h	-	-	-
50km/h	-	-	-
60km/h	322.31	338.89	5.15
70km/h	281.42	298.31	6.00
80km/h	236.38	253.80	7.37

CO의 오염물질분석 결과를 사용하여 식 (6)에 대입하여 소요환기량을 구한 후 그 결과를 재유입여부의 적용시와 미적용시로 나타내면 그 결과는 Table 6과 같다. 적용시가 미적용시보다 평균 4.22% 높은 소요환기량값으로 나타났다.

4.2.3. NOx 소요환기량

해석된 수치해석 데이터에서 B_{IN}으로 유입되는

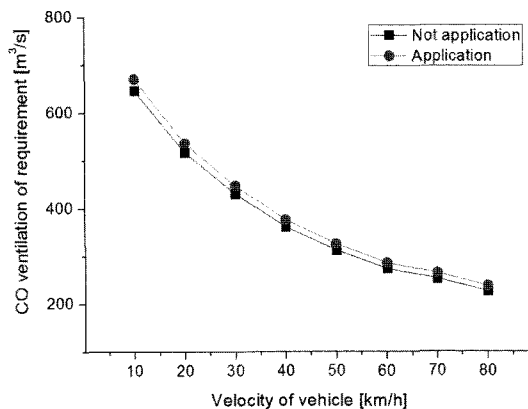


Fig. 6. CO ventilation of requirements,

Table 6. CO concentration

Classification	Not application	Application	Percentage(%)
10km/h	646.07	670.53	3.79
20km/h	516.85	535.96	3.70
30km/h	430.50	447.23	3.89
40km/h	361.23	375.87	4.06
50km/h	312.93	326.19	4.24
60km/h	274.00	286.02	4.39
70km/h	253.10	265.06	4.73
80km/h	226.55	237.78	4.50

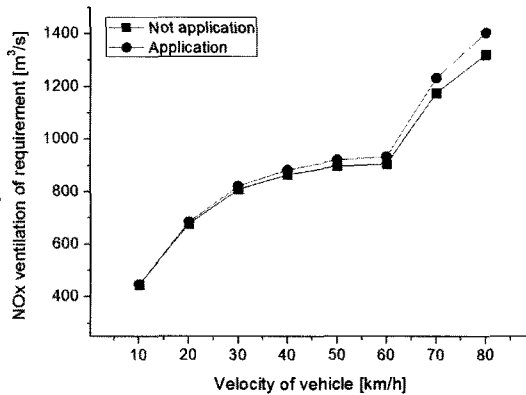


Fig. 7. NOx ventilation of requirements.

Table 7. NOx concentration

Classification	Not application	Application	Percentage(%)
10km/h	444.89	447.29	0.54
20km/h	677.97	685.03	1.04
30km/h	808.52	821.27	1.58
40km/h	865.38	883.69	2.12
50km/h	897.50	921.04	2.62
60km/h	905.37	934.01	3.16
70km/h	1176.80	1232.51	4.74
80km/h	1321.08	1404.53	6.32

NOx의 오염물질분석 결과를 사용하여 식 (5)에 대입하여 소요환기량을 구한 후 그 결과를 재유입여부의 적용시와 미적용시로 나타내면 그 결과는 Table 7과 같다. 적용시가 미적용시보다 평균 2.77% 높은 소요환기량값으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서 도로 터널설계시 소요환기량 계산에서 오염물질의 재유입정도를 분석하여 터널 내 소요환기량을 재검토하였다. 이를 통하여 얻어진 결

론은 다음과 같다.

- 1) 재유입 검토결과 CO에서 가장 높은 평균 농도치인 13.24ppm을 나타내었다.
- 2) 소요환기량 계산시 재유입량을 적용했을 때 미적용시 보다 평균 4.38%의 환기량 차가 발생하는 것으로 나타났다.
- 3) 근접 터널로부터 재유입 발생 여부를 확인하여 터널 소요환기량 설계에 반영할 필요가 있음을 밝혔다.

감사의 글 : 이 논문은 인천대학교 2009년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) 김영섭, 김정욱, 이창우, “인접 Tunnel 간 Canopy 설치에 따른 오염물질 재유입 연구”, 2002 한국암반공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 335~342, 2002.
- 2) “동해고속도로(주문진-속초간)건설공사 실시 설계 현납1터널/현납2터널 환기영향 검토 보고서”, (주)삼보기술단/비엔텍, 2003.
- 3) “2008년 도로교량 및 터널 현황 조서”, 국토해양부, 2008.
- 4) A. Mizuno, T. Satoh, Y. Hattori, K. Yamamoto and T. Kanoh, “Interference of contaminated air in successive tunnels linked by a snow shed”, 10th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 335~342, 2000
- 5) “도로설계편람”, 건설교통부, pp. 618-1~618-50, 1999.
- 6) 이동호, 유지오, 신현준, “도로터널 반횡류식 환기방식의 최적 배연 풍량 산정에 관한 연구- 균일 배기의 경우”, 한국안전학회지, 제21권, 제2호, pp. 46~51, 2006.
- 7) Bruno Brousse and Ghislaine Goupil, “Pollution dispersion at an urban motorway tunnel portal”, Atmospheric Environment 39, 2005.
- 8) Diermar Oerri and Peter Sturm, “Evaluation of GRAL for the pollutant dispersion form a city street tunnel potal at depressed level”, Environmental Modelling & Software 20. 2004.
- 9) Adaptive-research, “CFD2000 User Guide”, 2008.