J. of Korean Tunnelling A. 14(6)607-616(2012)
http://dx.doi.org/10.9711/KTAJ.2012.14.6.607
eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

터널 내 대기오염물질의 공간분포 예측

박일건[1*], 홍민선[2], 김범석[3], 강호근[4]

Prediction of spatial distribution of air pollutants within tunnel

Il-Gun Park, Min-Sun Hong, Beom-Seok Kim, Ho-Geun Kang

ABSTRACT The need for management of tunnel air quality is imminent considering the rapid increase of number and span of tunnels in Korea. To investigate spatial distribution of CO_2 within tunnels, CO_2 were measured and model simulations were performed in Namsan 1 tunnel. Results show that CO_2 concentrations were 250 ppm to 400 ppm higher in the exit than tunnel entrance. Also, CO_2 concentrations were 200 ppm to 300 ppm lower inside no ventilating vehicle than in the tunnel. Both experimental and model simulation results show that spatial distribution and concentration gradient of air pollutant inside tunnel are highly dependent on traffic density.

Keywords: Multi box model, Road tunnel, CO_2 concentration, Fluxes of air pollutants, Steady state

요 약 지속적인 터널 건설의 증가는 터널 내 대기질 관리에 대한 필요성을 점증시키고 있어 측정 및 모델 모사를 통한 터널 내 대기질 거동에 대한 연구를 수행하였다. 남산1호 터널 입구와 출구의 CO_2 농도차는 250 ppm~400 ppm으로 출구쪽이 높았으며 환기를 안 하는 차량 내부의 농도는 외부에 비해 200 ppm~300 ppm 낮게 측정되었다. 교통량이 적을 시 터널 내 유속은 빨라지며 일정한 농도 구배를 나타내고, 교통량이 증가하면 일정치 않은 농도 구배를 나타내는 것으로 나타났다.

주요어: 다중box 모델, 도로터널, 이산화탄소 농도, 대기질 거동, 정상상태

Received on October 26, 2012. Revised on November 6, 2012. Accepted on November 27, 2012.

[1]정회원, 아주대학교 환경공학과 박사과정
[2]비회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수
[3]비회원, 아주대학교 환경공학과 석박통합과정
[4]비회원, 평화엔지니어링 기술연구원 책임연구원

***Corresponding author: Il-Gun Park, park1302@ajou.ac.kr**

Copyright ⓒ2012, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativescommons.org/license/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

터널은 반 밀폐형으로 운전자의 건강을 위협할 수 있는 공간으로 인식되고 있다. 국내의 경우 2011년 기준 1,465개소의 터널이 건설되었고, 연장 길이는 1,053 km로 2001년 528개소에 비해 약 2.8배 이상 증가하였고, 그 중 1 km 이상의 장대터널은 17%인 254개소에 이르고 있다. 이처럼 터널 건설의 증가와 더불어 터널 내 오염물질 관리가 중요하게 대두되고 있다. 현재 "도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙"(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011) 에서 터널 내부의 오염물질 기준을 일산화탄소(CO) 100 ppm 이하, 질소산화물(NOx) 25 ppm 이하로 설계 기준을 권고하고 있고, 이에 따라 터널 건설 시 환기설비 및 오염물질에 대한 관리가 강화되어야 할 것으로 판단된다. 특히, 자동차 배출가스 규제 강화에 따라 삼원촉매 등의 저감 기술 및 환기시설의 기능 향상으로 터널 내 CO 및 NOx의 농도는 대부분 기준치 이하로 배출되고 있다. 이에 반해 지구온난화의 주요 물질인 동시에 자동차 배출가스 중 하나인 이산화탄소(CO_2)는 밀폐된 공간에서 대부분 1,000 ppm을 상회하는 것으로 나타나고, 이는 호흡곤란 및 두통, 졸음의 원인 되고 있다(Kwon et al, 2006). 전 세계적으로 장대터널 건설이 지속적으로 증가하고 있고, 교통량 증가에 따른 터널 내 운전자의 체재시간이 늘어남에 따라 오염물질에 의한 인체 건강에 미치는 영향이 클 것으로 보여 지속적인 대책 마련이 요구되고 있다. 현재 터널 내 오염물질 관리에 대한 연구는 국내·외에서 활발히 진행되고 있으나(Lee et al, 2012; Lonneman et al, 1986; Pierson et al, 1996; Raf et al, 1994) 대부분이 미세먼지(PM-10), CO, NOx에 대한 연구만 수행되고 있고, CO_2 관리에 대한 연구는 진행된 바가 없다.

이에 본 연구에서는 측정실험을 통해 터널 내 차량에 의해 배출되는 CO_2 농도의 분포 특성을 제시하였으며, 모델 모사를 통해 이러한 현상을 평가 하였다.

2. 측정실험

2.1 현장측정

현장측정 대상인 남산1호 터널은 Fig. 1과 같이 서울시 중구 예장동~용산구 한남동을 연결하는 연장 1,530 m로 강남지역과 강북 도심을 연결하는 주요 통로에 위치하고 있어 도심의 교통뿐 아니라 경부고속도로로부터 시내로 유·출입하는 교통량을 처리하고 있다.

본 연구에서는 터널 내 차량 정체 전·후의 CO_2 농도를 측정하여 터널 진·출입로의 CO_2 농도 변화와 차량 내·외부의 CO_2 농도차를 도출하였다. CO_2 농도 측정은 차량의 창문을 개방한

상태(차량외부)와 창문을 닫고 환기시설을 가동하지 않은 상태(차량내부)로 구분하여 출근시간 전·후 시간대에 상행선(한남1고가~명동, 도심방향) 방향에서 차량 2대를 이용하여 5회 왕복하며 측정하였다. CO_2 농도는 측정범위 0~5,000 ppm, 온도 -20℃~80℃, air pressure 800~1,100 hpa의 측정 조건을 가진 KIMO사의 AQ-200 장비를 사용하여 5초 간격으로 실시간 측정하였다. Table 1은 현장측정 시간과 평균 CO_2 농도를 나타낸다.

Fig. 1. Map of Nam-san No.1 tunnel.

Table 1. Measuring time and average CO_2 concentrations.

No. of measurements	Measuring time	Average CO_2 concentration
1st	06:14 ~ 06:15	592 ppm
2nd	06:44 ~ 06:45	647 ppm
3rd	07:08 ~ 07:10	618 ppm
4th	07:35 ~ 07:37	669 ppm
5th	08:06 ~ 08:10	826 ppm

note) up-line(downtown direction) direction, window open

2.2 측정결과

Fig. 2는 남산1호 터널 내 상행선에서 측정한 CO_2 농도 분포를 나타낸 것으로 창문개방 시 CO_2 농도가 400 ppm에서 최고 900 ppm까지 측정되었고, 특히 교통량이 집중되는 7시 30분에서 8시 사이에 터널 내 CO_2 농도가 가장 높게 나타났다. 터널 입구와 출구에서의 CO_2 농도는 250 ppm에서 400 ppm 정도의 농도 차이를 보이는데, 이는 반 밀폐된 터널 내의 피스톤 효과에 의해 오염물질이 출구쪽으로 이동하는 전형적인 현상으로 Raf et al, (1994), Chih et al, (2011)에 유사한 경향이 나타나 있다. 반면, 창문을 닫고 환기를 하지 않은 차량내부의 CO_2 농도는 380 ppm에서 510 ppm으로 외부 농도에 비해 200 ppm에서 300 ppm 정도 낮게 유지되고 있으며 터널 입구와 출구에서의 농도 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 측정결과에서 보여지는 바와 같이 차량내부는 차량외부에 비해

외부 공기의 영향을 덜 받는 것을 알 수 있다. 이는 터널을 통과하는 차량의 운전조건에 따라 운전자가 오염물질에 노출되는 정도를 판단 할 수 있는 자료이다.

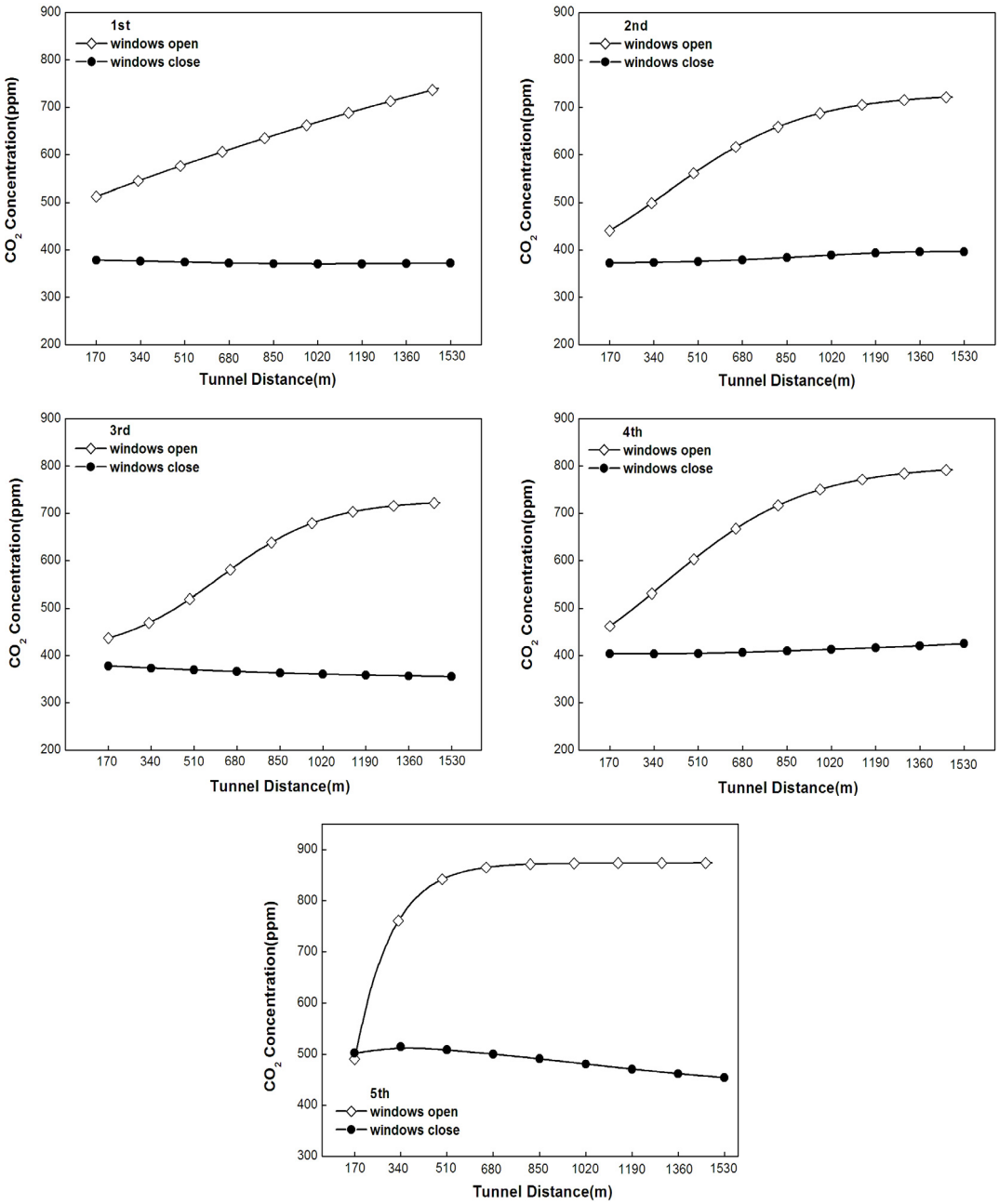

Fig. 2. Observed CO_2 concentrations in the tunnel.

3. 모델모사

3.1 입력자료 및 모델계산

터널 내 대기질 거동은 차량에 의한 대기오염물질의 발생량, 풍속, 터널 내 환기시설 등에 영향을 받는다. 터널 내 차량이동 및 환기시설 등에 의해 나타나는 현상인 피스톤 효과에 의해 대기오염물질 농도는 터널 출구쪽으로 갈수록 높아질 것으로 예측된다. 또한, 터널 내 오염물질은 이류확산에 의해서 이동·확산하게 되는데 오염물질의 농도분포는 터널 내 공기 유동이 극히 발달된 난류유동이기 때문에 터널 단면상에서 공기의 유동속도와 마찬가지로 균일한 것으로 가정할 수 있다(Lew et al, 1999).

본 논문에서는 터널 내 대기질 거동 예측을 위해 multi-box 모델을 적용하였으며, 풍향과 풍속이 일정하고, 일방향 기류유입 및 유출만을 고려할 시 오염물질의 질량보전식은 식 (1)과 같다(Seinfeld et al, 1998).

$$\frac{d}{dt}(C_i \triangle X \triangle Y H) = Q_i + R_i \triangle X \triangle Y H - S_i + uH \triangle Y (C_i^0 - C_i) \tag{1}$$

식 (1)에서, u는 풍속, C_i는 box 내 농도, Q_i는 배출량, R_i는 화학 반응량, S_i는 침전 등으로 제거되는 양을 나타낸다.

또한, 식 (1)에서 CO_2는 비활성 가스로 대기 중 화학반응이 무시되고, 침전은 차량 운행으로 인한 심한 난류에 의해 무시할 수 있으며, $\triangle X \triangle Y H$는 V_i(부피)로 나타낼 수 있어 식 (1)은 식 (2)로 변형할 수 있다.

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = q(C_{i-1} - C_i) + Q_i \tag{2}$$

식 (2)에서, V_i, C_i는 i번째 box의 부피, 오염물질 농도이며, q는 유량, Q_i는 오염물질 배출량을 나타낸다.

Table 2는 모델 모사 시 입력된 초기조건을 나타낸 것으로 본 연구에서는 남산1호 터널을 기준으로 현장측정에서 조사된 기초자료를 초기조건으로 설정하였다. 현장측정 시 시간대 별 터널 내 유속은 평균 0.5 m/s~5 m/s로 조사되어 차량 정체에 따른 터널 내 유속의 변화를 통행이 원활한 경우 5 m/s, 교통량 증가로 인한 교통정체가 시작되는 단계를 2 m/s 그리고 교통정체가 심한 단계를

0.5 m/s로 가정하여 계산하였다. CO_2 배출량은 승용차 평균 배출량 195 g/km(에너지관리공단 수송에너지)를 기준으로 터널 내 대형차량의 통행을 고려하여 차량 1대당 230 g/km로 가정하였고, 1개의 box 모델에 해당하는 부피 1,500 m^3/box으로 환산하여 1.33 ppm/sec (3.6 g/sec)를 배출량 자료로 이용하였다. 또한, Seinfeld et al (1998)에서 제시한 multi-box 모델의 100개 box를 1/10로 축소하여 터널 입구에서 출구까지의 전체 길이를 9개 구간으로 적용하였고, 모든 풍속 조건에서 모델 모사 시간을 360초로 가정하였다. Fig. 3에 구간 세부모식도를 나타내었다. 모델 계산은 fortran 프로그램을 이용하였고, 적분시간은 1초로 하였다.

Table 2. Initial conditions for model simulation.

Input data	box volume	CO_2 concentration	CO_2 emission	Wind speed
Initial condition	1,500 m^3/box	500 ppm	3.6 g/sec	0.5 m/s, 2 m/s, 5 m/s

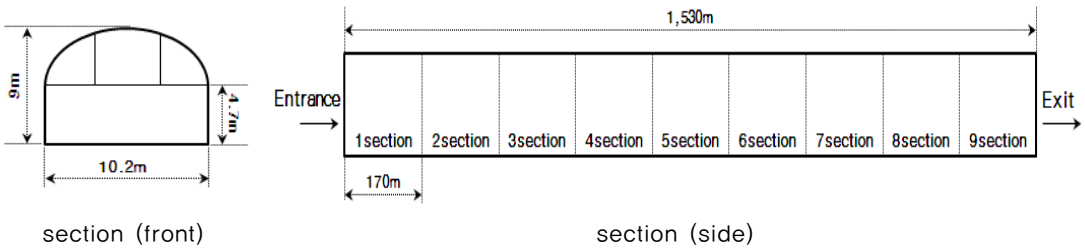

Fig. 3. Schematic diagram of tunnel sections.

3.2 모사결과

Fig. 4는 유속에 따른 터널 구간에서의 CO_2 농도 분포를 모사한 결과이다. 터널 내 오염물질의 분포는 차량이동 속도와 높은 상관성을 가지고 있기 때문에 0.5 m/s, 2 m/s, 5 m/s의 유속변화를 통해 터널 내 CO_2 농도 분포 특성을 도출하였다. 5 m/s의 조건에서는 터널 내 차량의 흐름이 원활하여 일정 속도가 유지되면서 공기흐름이 빠르게 일어나는 경우로 출구쪽으로 갈수록 일정한 기울기로 CO_2 농도가 증가하는 것으로 나타났고, 2 m/s의 조건에서는 교통량의 증가로 인하여 가·감속을 반복하게 되므로 터널 중간부까지 급격하게 농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 0.5 m/s 에서는 터널 내 정차 구간이 많아짐으로 인하여 초기 입구에서 CO_2 농도가 급격히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 모사결과는 앞에서 설명한 바와 같이 반 밀폐된 터널 내 피스톤 효과에 의해 CO_2 농도가 터널 입구에서 출구쪽으로 갈수록 증가하는 것을 보여주고 있다.

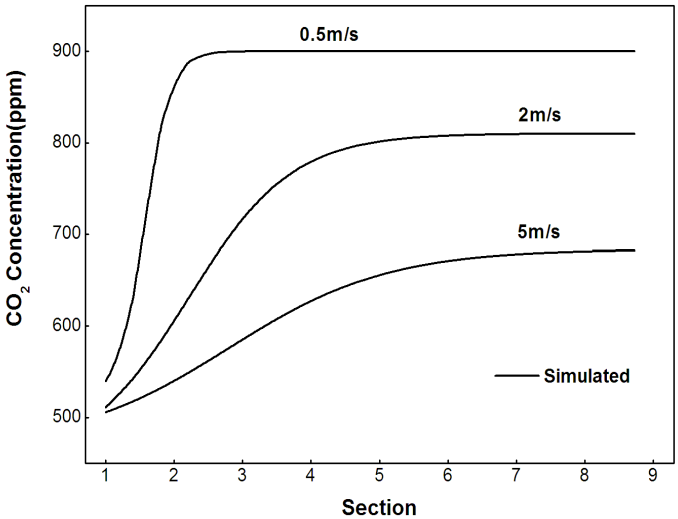

Fig. 4. Simulated CO_2 concentrations at different wind speeds in tunnel sections.

Fig. 5의 (a)~(e)는 현장측정에서 실측된 CO_2 농도와 풍속에 따른 모델 모사결과를 비교한 것으로 터널 입구에서 출구쪽으로 갈수록 농도가 증가하는 유사한 경향을 보이고 있다. (a)의 경우 출근 전 시간대인 오전 06시 경으로 터널 내 차량 흐름이 원활한 단계인 5 m/s의 풍속을 가정한 모사결과와 비교한 것으로 입구에서 출구쪽으로 갈수록 일정하게 농도가 증가하는 선형 형태를 나타내고 있다. (b)~(d)는 차량 증가로 인한 교통체증이 시작되는 단계로 2 m/s의 풍속을 가정한 모사결과와 비교한 결과 입구에서 출구쪽으로 갈수록 지속적으로 농도가 증가하는 곡선 형태를 나타내고 있다. 특히, (e)는 교통량의 증가로 인하여 차량 정체가 심한 경우로 0.5 m/s의 풍속을 가정한 모사결과와 비교하였다. 그 결과 터널 입구쪽에서 CO_2농도가 급격히 증가하다 출구쪽에서 flat한 형태를 보이는데 이는 터널 입구쪽에서 교통량의 급격한 증가로 차량 정체가 심했기 때문인 것으로 판단된다.

이러한 결과는 터널 내 대기질 거동 특성이 터널 내 풍속 및 차량이동 속도에 따른 공기유속과 밀접한 상관관계가 있는 것을 알 수 있으며 향후 터널을 비롯한 지하공간에 대한 대기질 거동 특성을 파악하는데 응용이 가능할 것으로 기대된다.

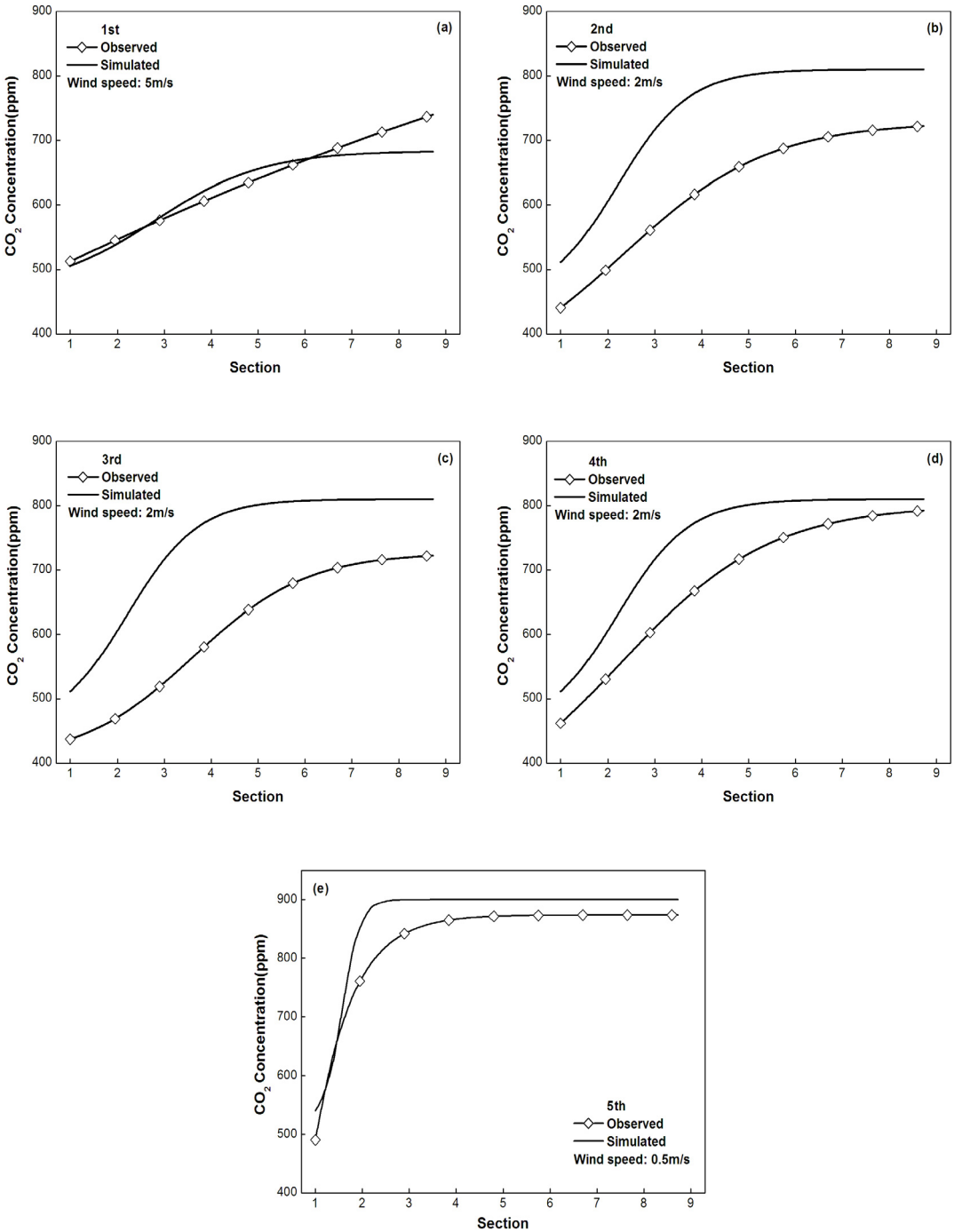

Fig. 5. Comparison of observed and simulated CO_2 concentrations at different sections.

4. 결 론

본 연구에서는 남산1호 터널을 대상으로 측정실험을 통해 터널 통과 구간 내 CO_2 농도 변화의 특성을 도출하고, 모델 모사를 통해 터널 내 대기질 거동에 대한 현상을 고찰하였으며, 다음 결론을 얻었다.

1. 남산1호 터널 내 상행선의 CO_2 농도 분포를 조사한 결과 창문개방 시 CO_2 농도가 400 ppm에서 최고 900 ppm까지 측정되었고, 교통량이 집중되는 7시 30분에서 8시 사이에 터널 내 CO_2 농도가 가장 높게 나타났다. 또한, 터널 입구와 출구에서의 CO_2 농도 차이는 250 ppm에서 400 ppm로 반 밀폐된 터널 내의 피스톤 효과에 의해 대기오염물질이 출구쪽으로 이동하는 전형적인 경향이 나타나 있다. 환기를 하지 않는 차량 내부의 CO_2 농도는 380 ppm에서 510 ppm으로 외부 농도에 비해 200 ppm에서 300 ppm 정도 낮게 유지되고 있으며 터널 입구와 출구에서의 농도 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.
2. 모델 모사결과 5 m/s의 조건에서는 CO_2 농도가 출구쪽으로 갈수록 일정한 기울기로 증가하고, 2 m/s의 경우 중간부까지 급격하게 농도가 증가하는 경향을 볼 수 있으며, 0.5 m/s 에서는 초기 입구에서 CO_2 농도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 모사결과는 터널 내 피스톤 효과에 의해 CO_2 농도가 터널 입구에서 출구쪽으로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다.
3. 터널 구간 내 측정된 CO_2 농도를 비교한 결과 터널 입구에서 출구쪽으로 갈수록 농도가 높아지는 유사한 경향을 보인다. 특히, 1차 측정 결과는 차량의 원활한 소통으로 인하여 일정하게 농도가 증가하고, 5차 측정 결과는 터널 내 차량 정체로 인하여 출구쪽에서 flat한 형태를 나타내고 있다. 이러한 결과는 터널 내 대기질 거동 특성이 차량이동 속도에 따른 공기유속과 밀접한 상관관계가 있다는 것을 알 수 있다.

향후 본 연구를 통해 도출된 결과는 터널 및 지하공간에 대한 여러종류의 대기질 거동 특성을 파악하는데 응용이 가능할 것으로 판단되며, 도로 상황별 오염물질 농도 변화를 예측할 수 있어 터널 내 대기질 개선효과를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 11-기술혁신A03)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Chih, M.M., Gui, B.H., Chang, T.C. (2011), “Influence of traffic flow patterns on air quality inside the longest tunnel in asia”, Aerosol and Air Quality Research, Vol. 11, pp. 44-50.
2. Kwon, S.B., Cho, Y.M., Park, D.S., Park, E.Y. (2006), “Correlation of CO_2 concentration with number of passengers and tunnel regions in the KTX cabin”, The Korean Society for Railway (proceedings), Korea Maritime University, pp. 41-44.
3. Lee, H.S., Hong, K.H., Choi, C.R., Kang, M.K., Lim, J.B., Mun, H.P. (2012), “Experimental study of improvement of ventilation efficiency at intersection in network-form underground road tunnel”, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 2, pp. 107-116.
4. Lew, J.O., Rie, D.H., Shin, H.J. (1999), “Study on optimization technique for design of the road tunnel ventilation system”, Journal of KIIS, Vol. 14, No. 4, pp. 60-70.
5. Lonneman, W.A., Selia, R.L., Meek, S.A. (1986), “Non-methane organic composition in the lincoln tunnel”, Environmental Science & Technology, Vol. 20, No. 8, pp. 790-796.
6. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), “Rules on the basis of the road structure and facilities”, Article 42.
7. Pierson, W.R., Gertler, A.W., Robinson, N.F. (1996), “Real-world automotive emissions: Summary of studies in the Fort Mchenry and Tuscarora Mountain tunnels”, Atmospheric Environment, Vol. 30, No. 12, pp. 2233-2256.
8. Raf, D.F., Patrick, B., Jan, G.K. (1994), “Air pollution measurements in traffic tunnels”, Environmental Health Perspectives, Vol. 102, suppl. 4, pp. 31-37.
9. Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (1998), “*Atmospheric chemistry and physics*”, Wiley-interscience publication, Ch. 23, pp. 1193-1200.