

도로터널 환기시뮬레이션 모델 현장적용 연구

이창우¹⁾ · 김효규²⁾

On-site Application of a Vehicle Tunnel Ventilation Simulator

Chang-Woo Lee and Hyo-Gyu Kim

Abstract. Introduction of new design tools has been required to optimally design and operate the ventilation system of long vehicle tunnels. The demand has led to wide spread use of the simulation technique throughout the world to analyze the dynamic relationship among the variables associated with vehicle tunnel ventilation. This paper aims at performing on-site study at local tunnels to test the applicability of NETVEN, a simulation model of vehicle tunnel ventilation. The study was carried out at four urban as well as highway tunnels employing different ventilation systems as well as traffic methods. There were some discrepancies found between the simulation output and measurements and the following four factors are considered to mainly cause those disagreement. (1) The real situation shows distinctive transient and retarding characteristics with respect to air flow and contaminant dispersion, while the steady-flow assumption is made in the simulation model. (2) Contrary to the steady-state simulation logics, the measured data are instantaneous and their variation is relatively high. Most of the variables associated with ventilation forces are not steady-state and in particular those traffic and climatic variables show significant instantaneous variation. (3) Near the exit portal, the CO levels show bigger differences. The general trend is that data with higher CO concentrations carry bigger discrepancies. Turbulent diffusion is thought to be the main reason for it and also contribute to the fact that the highest CO concentrations are found at the locations somewhat inward, not at the exit portals. (4) Higher traffic rate results in higher discrepancies of ventilation velocity. Along with the exhaust characteristics, the vehicle aerodynamic characteristics need to be studied continuously in order to reduce the velocity disagreement.

Keywords: tunnel ventilation, simulation, turbulent diffusion, ventilation force, exhaust characteristics, aerodynamic characteristics

초 록. 장대도로터널 환기시스템의 최적 설계 및 운영은 새로운 설계도구의 개발을 요구하며 최근 환기 관련 변수들의 동적인 관계를 정량적으로 분석할 수 있는 도구로써 널리 이용되고 있다. 본 연구는 도로터널 환기시뮬레이션 모델인 NETVEN의 현장 검증연구를 국내 도로터널을 대상으로 수행함을 목적으로 하였다. 환기방식 및 차량통행방식이 다른 4개 터널을 대상으로 시뮬레이션 및 현장 측정연구를 수행하였으며 시뮬레이션 모델의 적용 결과와 측정 결과의 차이는 다음 4가지 요인에 기인한 것으로 분석된다. (1) 실제 터널내 기류는 정상류 유동을 가정하는 시뮬레이션 모델과는 달리 천이-지연계의 특성을 가지고 있다. (2) 시뮬레이션 모델은 정상상태를 가정하나 측정값은 순간값을 대상으로 하므로 분산이 상대적으로 크게 나타난다. 환기력 관련변수들은 거의 정상상태가 아니며 교통 및 기상관련 변수들은 특히 순간적인 변화가 심한 편이다. (3) CO 농도의 경우에 출구부근에서의 차이가 상대적으로 크게 나타나는 현상이 뚜렷하며 특히 농도가 상대적으로 클수록 차이가 크다. 이는 난류확산에 의한 농도 저하가 원인으로 보인다. 난류확산 가능성은 최대 농도지점이 출구점이 아닌 약간 안쪽 지점에서 나타나는 현상에서도 나타나고 있다. (4) 교통량이 많을 경우 환기속도 오차가 크게 나타나므로 차량의 배기특성뿐만 아니라 공기역학적 특성에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

핵심어: 터널환기, 시뮬레이션, 난류확산, 환기력, 배기특성, 공기역학적특성

1. 서 론

국내 도로터널 환기시스템 설계는 최근까지 주로 국

제 상설 도로협회(PIARC)와 일본의 설계기준 및 지침 등에 전적으로 의존하여 왔다. 그러나 이들 설계방법의 무조건적인 적용은 현재 적지 않은 문제점을 낳고 있다. 국내의 기상, 차량, 교통특성 등을 고려하지 않음으로써 특히 반횡류식 시스템의 경우 과다용량의 환기설비가 설치·운영됨으로써 비용이 과다 지출되는 문제가 발생하고 있으며 시스템의 운영면에서도 자동제어시스템의

¹⁾정회원, 동아대학교 지구환경공학부 교수

²⁾정회원, (주)삼보기술단 주임

접수일 : 2001년 9월 26일

심사 완료일 : 2001년 11월 15일

운영효율이 극히 낮은 문제가 제기되고 있다. 최근에 각국에서는 터널에서 배출되는 배기물질에 의한 주변 환경오염을 심각한 문제로 다루고 있으며 중량화된 오염물질 규제도 터널 환기에 적용되기 시작하였다. 따라서 최근 터널 환기시스템의 설계 및 운영은 더욱 효율적인 설계방법을 요구하고 있으며 궁극적으로는 최적의 환기시스템을 설계하기 위한 설계도구의 개발 필요성이 대두되고 있다.

도로터널 환기시스템의 최적화란 환경적, 기술적, 경제적 그리고 안전성 측면에서의 최적운영이 가능한 시스템을 의미하고 있으나 기존의 소요 환기량에 기초하는 최적 환기시스템 설계방식은 적용가능 환기방식이 다양할 경우, 개별 환기방식의 검토에 많은 시간과 비용이 요구될 뿐만 아니라 터널환기에 관련된 외부기상 변수, 차량 및 교통관련변수, 터널의 물리적 특성변수들 간의 동적인 연관분석이 불가능한 결정적인 문제를 안고 있다. 따라서 최적 터널환기시스템의 선택 및 운영을 위한 의사결정 방법 또한 다양하게 제시되고 있으며, 최근 환기 시뮬레이션이 관련 변수들의 동적인 관계를 정량적으로 분석할 수 있는 도구로써 많이 이용되어 세계 주요 도로터널의 설계 및 운영방안의 마련시 적극 활용되고 있다. 국내의 경우 환기시스템 설계시 기본적인 분석 단계로서 시뮬레이션을 적용하고 있는 추세이며 시뮬레이션 모델 자체에 대한 연구도 소수이지만 진행 중에 있다. 국내에서 개발된 모델의 경우 주로 터널 내부 환기속도, 매연, CO, NOx 등과 같은 오염물질의 농도 분포를 예측할 수 있는 기능을 가지고 있으나 차량의 공기역학적 특성이나 오염물질 배출특성에 관한 기초 연구결과가 부족한 관계로 시뮬레이션 분석 결과에 대한 적극적인 검증작업이 이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구는 도로터널 환기시설의 최적화를 위하여 범용화된 설계도구로써 개발된 환기시뮬레이션 모델인 NETVEN²⁾의 현장 검증연구를 국내 주요 도로터널을 대상으로 수행함을 목적으로 하였다.

2. 시뮬레이션 모델 현장적용

2.1 모델 개요

모델은 터널의 형태 및 적용 환기 방식에 관계없이 공기유동 경로를 네트워크로 해석하여 터널내의 환기량, 압력, 농도 분포를 시뮬레이션 할 수 있는 기능을 가지고 있다. 종류식, 반횡류식, 횡류식 등과 같은 환기방식은 물론 2개 이상의 환기방식이 결합된 조합형 환기방식 및 진입/진출 터널이 접속된 형태의 터널도 시뮬레이션 가능하다. Visual Basic 6.0으로 작성된 모델은 단 굴 또는 쌍굴형태의 본 터널, 환기덕트 및 비상 연락갱을 네트워크 형태로 해석하여 minimum spanning tree 선택 알고리즘과 Hardy Cross 해석 알고리즘을 적용하여 환기량을 계산하고 일차원 이류확산식에 기초하여 오염물질 농도를 계산한다. 터널환기 시뮬레이션은 비압축성 이상 기체, 일차원 유동, 준정상류 유동을 기본 가정으로 하고 있다. 농도계산을 위한 배출량 기준은 사용자가 임의로 각종 국내의 배출기준을 선택할 수 있으며 default 값은 한국도로공사의 1997년도 설계기준이다.

2.2 조사대상 터널

모델의 현장 검증을 위하여 부산시내 도심터널인 황령터널 및 백양터널, 진해-창원사이의 안민터널, 구마고속도로의 달성터널 등 4개 터널을 대상으로 현장 측정을 수행하였다.

Table 1. Specifications of the tunnels studied.

Tunnel	Dal-sung 1 (downline)	Whang-ryong (Jingu → Namgu)	Baek-yang (Mora → Danggam)	An-min
Study period	1998/6/17~18	1998/6/15~6/16	2000/9/7~9/15 2000/10/10~10/14	2000/9/27~30 2000/10/4~10/8
Location	Kuma Highway	Busan	Busan	Jinhae-Changwon
Length (m)	1,360	1,860	2,340	1,818
Grade (%)	1.8	2.2	1.02	1.8335
Cross-sectional area (m ²)	60	52	53.315	51
No. of lanes (lane)	2	2	2	2
Traffic direction	uni	uni	uni	bi
Ventilation method	Longitudinal with jet fans	semi-transversal	semi-transversal	semi-transversal
Ventilation equipment	22 jet fans, Ψ 1030	2 axial-flow fans, Ψ 3000 (320 kW)	6 axial-flow fans, Ψ 3000 (4,160 kW fans, 2,370 kW fans)	3 axial-flow fans, Ψ 2400 (160 kW)

Table 1에 정리한 바와 같이 달성터널의 환기방식은 제트팬을 이용한 종류식이며 나머지 터널들은 반횡류식이다. 안민터널의 경우 측정당시 계획된 쌍굴중 1개의 터널만 완공된 상태로 대면식 차량통행이 이루어지고 있었다.

2.3 현장 측정방법

터널내에 작용하는 환기력 관련변수들을 측정하기 위하여 터널 양 갱구 직상부에서 외부기상조건, 교통량, 차종 구성 및 차속을 측정하고 양 갱구로부터 100~200 m 지점 2개소에서 풍속, 오염물질 농도분포, 기압 및 온·습도를 측정하였다. 한편 터널 전구간에서의 풍속 및 오염물질 농도분포 측정을 위하여 교통량 및 차속 분포의 변화가 적은 시간대를 선택하여 측정계기를 이동하면서 측정하였다.

갱구면의 외부 풍향, 풍속, 기압, 온·습도는 Davis Instruments의 Weather Monitor Product no. 7440, 터널 내부 풍향, 풍속, 기압, 온·습도는 TSI의 열식풍속계인 VELOCICALC 8388-M-GB, SICK의 압전세라믹 초음파방식을 채택한 FLOWSIC 200을 이용하여 측정하였으며, CO 농도의 경우는 Kanomax의 정전위 전해 방식의 Indoor Gas Monitor Model 2323과 Sick의 비분산적외선 분석방식인 VICOTEC을 이용하여 측정하

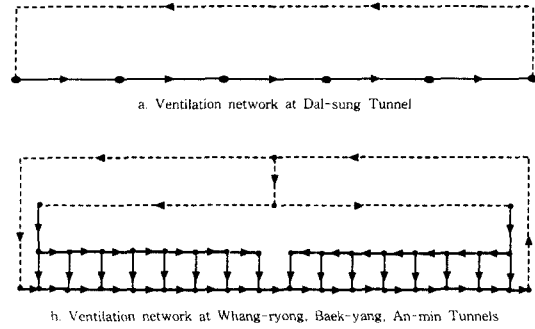


Fig. 1. Ventilation Networks Constructed for Simulation.

였다.^{1,3,5)}

3. 시뮬레이션 분석

Fig. 1은 시뮬레이션의 적용을 위하여 작성한 각 터널 환기경로의 네트워크 형태를 보여주고 있다. 네트워크의 실선은 실제의 환기경로 즉 본터널 및 덕트구간을 표시하며 점선구간은 가상의 환기경로로 네트워크의 closed cycle을 구성하기 위한 목적으로 작성되었다. 종류식 환기방식을 적용하는 달성터널, 반횡류식 환기방식을 적용하나 측정시간 동안 환기팬의 가동이 없었던

Table 2. Input variables for simulation.

Data Groups	Associated Variables		
Tunnel branch data (input by branch)	Network data	<ul style="list-style-type: none"> • branch no. • end node • length • hydraulic diameter • elevation at end node • no. of lanes (basic direction) • Darcy coeff. of friction • shock loss factor at end node 	<ul style="list-style-type: none"> • start node • branch type (tunnel, duct) • cross-sectional area • elevation at start node • portal directions • no. of lane (opposite direction) • shock loss factor at start node • shock loss factor at junction
	Data for ventilation equipment	<ul style="list-style-type: none"> jet fan <ul style="list-style-type: none"> • installation no. • discharge rate axial flow fan <ul style="list-style-type: none"> • fan name 	<ul style="list-style-type: none"> • efficiency • discharge velocity • characteristic curve equation
	Data for traffic characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • vehicle speed (basic direction) • traffic rate(basic direction) 	<ul style="list-style-type: none"> • vehicle speed (opposite direction) • traffic rate(opposite direction)
	portal pollution	<ul style="list-style-type: none"> • smoke level at portals • NOx level at portals 	<ul style="list-style-type: none"> • CO level at portals
	Traffic data	<ul style="list-style-type: none"> • vehicle composition (car, small bus, large bus, small truck, medium truck, heavy goods truck, tanker) • percentage of empty vehicles 	
	Weather outside portals	<ul style="list-style-type: none"> • atmospheric pressure • dry/wet temperature 	

Table 3. Main input data for simulation at Dal-sung Tunnel.

Traffic-related variable							
Vehicle speed (km/h)	80						
Traffic rate (veh/h)	821						
Vehicle composition (%)	car	small bus	Large bus	Small truck	Medium truck	Heavy goods truck	Tanker
	38.8	13.2	11.8	12.5	13.8	9.9	0
Ventilation Equipment							
Ventilation rate (m ³ /s)	10 jet fans (jet flow 25.25 m ³ /s, jet velocity 27.79 m/s)						
Wind velocity at portals							
Inlet (m/s)				Outlet (m/s)			
1.8				1.8			

안민터널의 환기네트워크는 Fig. 1(a), 반횡류식 환기방식을 채택하고 축류팬을 가동하였던 황령터널 및 백양터널 경우는 Fig. 1(b)와 같은 네트워크 형태로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션시에 필요한 주요 입력 자료는 Table 2와 같이 본 터널 구간, 교통, 기상 관련 자료군으로 구분된다.

차량의 공기역학적 특성 중 교통환기력 계산시 가장 중요한 변수인 전면 투영면적은 한국도로공사 고속도로 터널환기설비 설계기준에 제시된 소형차 2.31 m², 대형차 7.11 m²를 적용하였다.

4. 시뮬레이션 결과와의 비교

4.1 달성터널

트럭혼입율이 36.2%로 비교적 높은 편인 달성터널에서는 교통 및 기상변수의 변화가 없는 1998년 6월 18일 15:15~15:30 15분 동안 터널 전 구간에 걸친 환기 속도 및 오염물질 농도 측정결과를 시뮬레이션 분석하였다.

교통 및 외부 기상변수 값은 Table 3에 정리하였으며 터널 전구간에 걸친 환기속도 및 CO 농도 분포 측정값과 시뮬레이션 결과는 Fig. 2와 3에 비교하였다. 모든 터널에서의 갱구 외부풍속은 갱구면에 수직으로 작용하는 풍속이며 외부에서 내부로 작용하는 방향을 "+"로 가정하였다.

4.2 황령터널

도심터널인 황령터널의 개통 직후에 진행된 현장측정 결과중 터널 전체 길이에 대한 측정이 이루어진 1998년 6월 15일 16:00~18:00 시간대의 자료를 대상으로 시뮬레이션하였다. 교통량이 적은 편이며 터널내 차량속도 단속으로 차속이 평균 65 km/h에 불과한 상

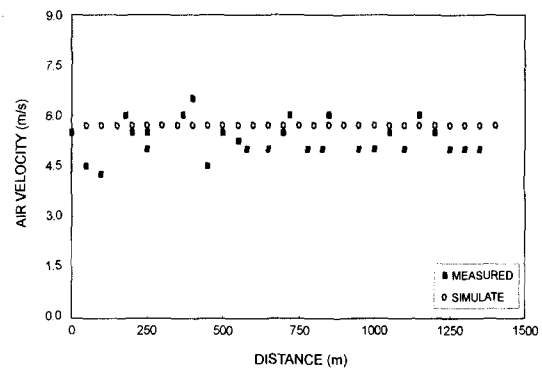


Fig. 2. Measurements vs simulation results of air velocity along Dal-sung Tunnel (1998/6/18 15:15~15:30).

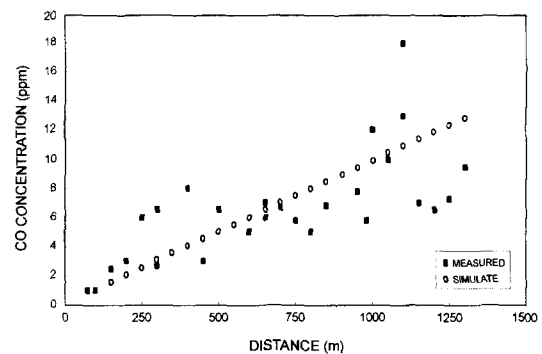


Fig. 3. Measurements vs simulation results of CO level along Dal-sung Tunnel (1998/6/18 15:15~15:30).

황이었으며 CO 농도 및 가시도(K)도 허용수준 이하였으나 주로 유지관리를 목적으로 한 환기설비의 시간제어 방침에 따라 터널양편의 축류팬 1대씩이 가동되었다. 시뮬레이션 주요 입력자료는 Table 4에, 결과는 Fig. 4와 5에 정리하였다.

Table 4. Main input data for simulation at Whang-ryong Tunnel (1998/6/15 16:00~18:00).

Traffic-related variable							
Vehicle speed (km/h)	61						
Traffic rate (veh/h)	1,272						
Vehicle composition(%)	car	small bus	Large bus	Small truck	Medium truck	Heavy goods truck	Tanker
	73.7	8.1	2.3	6.8	4.0	5.1	0
Ventilation Equipment							
Ventilation rate (m ³ /s)	Flow rate of 2 axial-flow fans: 160						
Wind velocity at portals							
Inlet (m/s)				Outlet (m/s)			
-0.19				-0.19			

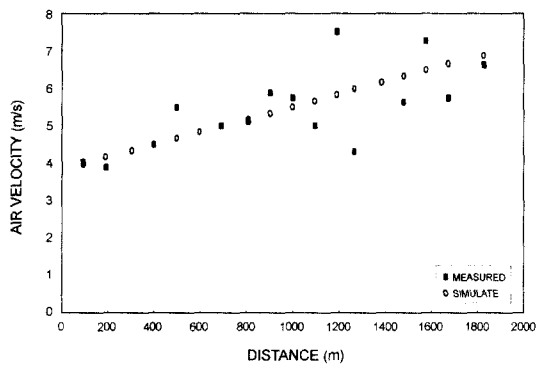


Fig. 4. Measurements vs simulation results of air velocity along Whang-ryong Tunnel (1998/6/15 16:00~18:00).

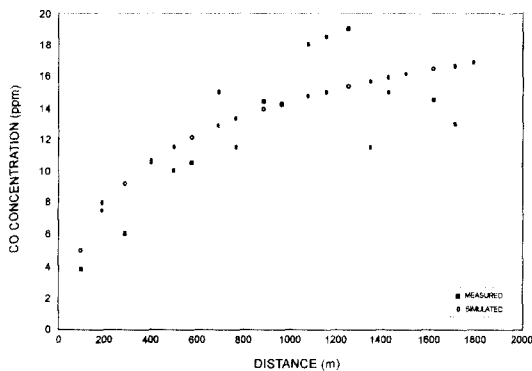


Fig. 5. Measurements vs simulation results of CO level along Whang-ryong Tunnel (1998/6/15 16:00~18:00).

4.3 백양터널

백양터널은 부산도심과 고속도로와 연결되는 구간의 터널로 시간대별 교통량 차이가 심한 편이다. 현장측정 결과 중 비교적 교통 및 기상관련 변수값들의 분산이 크지 않은 2000년 9월 7일~10월 12일 사이의 시간대

중 15분 평균값을 대상으로 시뮬레이션하였다. 달성 및 황령터널의 경우와는 달리 터널내에 고정 설치한 2개의 측정스테이션 중 출구편(갱구로부터 100 m 지점)의 측정점으로부터 기록된 고정점 자료를 시뮬레이션 대상으로 하였다. Table 5에는 시뮬레이션 주요 입력자료를 정리하였으며 환기속도 및 CO 농도의 시뮬레이션 결과 비교자료는 Fig. 6과 7에 나타내었다.

4.4 안민터널

조사대상 터널 중 유일하게 대면식 차량통행을 한 현장으로 양방향 교통환기력 차이에 따라 터널내 기류방향 변화가 심한 편이었다. 양방향 교통환기력이 유사할 경우에는 터널 중앙에서 양 갱구방향으로 배출되는 형태였으며 한쪽 방향으로의 교통환기력이 우세할 경우에는 우세한 방향으로 환기가 형성되었다. 본 분석에서는 일방향 환기가 관측된 자료들을 대상으로 2000년 9월 27일~10월 7일 사이의 환기팬이 가동되지 않은 시간대 중 15분 평균값을 대상으로 시뮬레이션 분석하였다. Table 6에 진해 및 창원방향으로의 교통량, 차속, 차중 구성비와 양 갱구에서의 외부풍속을 정리하였으며 시뮬레이션 결과와 출구에서 300 m 지점에서 측정된 값은 Fig. 8~9에 정리하였다.

4.5 결과 분석 및 고찰

유일한 제트팬 종류식 환기방식을 채택한 달성터널의 경우 터널 전구간에 걸친 환기속도의 경우 정상류 유동을 가정한 시뮬레이션 결과는 5.7 m/s이며 측정값은 4.25~6.5 m/s (평균 5.4 m/s) 범위를 보이고 있다. 환기속도 차이의 분포는 터널 전구간에 걸쳐 특별한 형태를 보이지 않는다. CO 농도의 경우 출구편으로 점진적으로 증가하는 형태를 보이며 측정값과의 차이도 출구 부근에서 상대적으로 큼을 알 수 있다.

반회류식 황령터널의 경우 출구편 측류팬 1대를 가

Table 5. Main input data for simulation at Baek-yang Tunnel.

Observation time	Traffic rate (veh/h)	Vehicle speed (km/h)	Vehicle composition (%)							Wind velocity at portal (m/s)	
			car	small bus	large bus	small truck	medium truck	heavy goods truck	tanker	inlet	outlet
2000-09-07 13:15	720	83	67.78	10.56	0.56	16.11	2.78	1.67	0.56	-0.43	0.62
2000-09-07 15:15	880	90	66.82	11.82	0.91	17.27	1.36	1.36	0.45	0.03	0.47
2000-09-07 16:15	912	79	69.30	12.28	1.32	13.16	2.63	0.44	0.88	0.33	0.28
2000-09-07 18:45	2008	93	68.13	15.14	1.39	14.14	1.20	0.00	0.00	0.55	0.15
2000-09-15 11:15	748	93	66.31	11.23	0.53	16.58	1.07	1.07	3.21	-0.39	-0.18
2000-09-15 14:15	792	90	66.16	12.12	1.52	16.16	2.02	1.52	0.51	-0.37	-0.13
2000-09-15 18:15	1324	81	75.83	7.55	0.30	14.20	2.11	0.00	0.00	-0.71	-0.05
2000-09-23 11:45	760	100	66.32	10.53	1.58	15.26	2.11	2.63	1.58	-0.04	0.09
2000-09-23 13:15	1016	94	73.23	8.27	0.39	12.20	3.15	2.36	0.39	0.25	-0.09
2000-09-23 15:15	1112	84	74.82	5.04	0.36	15.83	2.52	0.72	0.72	-0.16	-0.01
2000-09-23 19:15	1880	82	69.15	11.70	0.64	14.68	2.55	1.06	0.21	-0.17	0.00
2000-10-11 13:15	576	96.3	52.08	20.14	1.39	18.06	5.56	2.78	0.00	0.25	-0.23
2000-10-11 19:15	1876	81.6	64.18	20.90	0.85	11.30	2.56	0.21	0.00	0.73	0.10
2000-10-12 09:45	864	91.6	60.65	12.96	1.39	15.28	1.85	7.41	0.46	1.35	0.78
2000-10-12 11:45	648	94.2	48.15	24.07	0.62	17.28	4.94	4.94	0.00	0.14	-0.94
2000-10-12 17:45	1320	89.1	60.00	20.91	1.21	11.21	5.45	1.21	0.00	1.39	0.32
2000-10-13 13:15	792	89.9	46.46	20.20	1.52	20.20	5.05	6.57	0.00	-0.88	-0.24
2000-10-13 17:15	1220	90.5	56.72	21.64	0.66	18.03	2.30	0.33	0.33	0.07	1.36
2000-10-13 19:15	1776	78.6	61.26	22.97	0.45	13.51	1.35	0.45	0.00	0.50	0.53

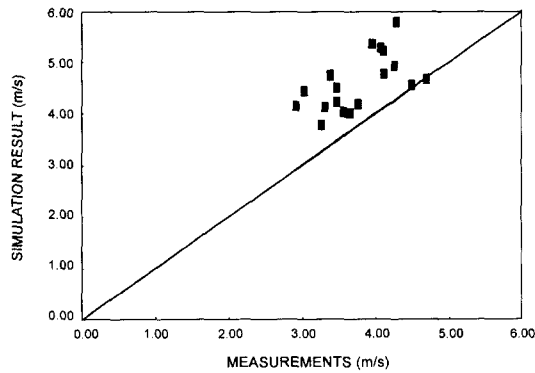


Fig. 6. Measurements vs simulation results of air velocity at Baek-yang Tunnel (2000/9/7 ~ 10/12).

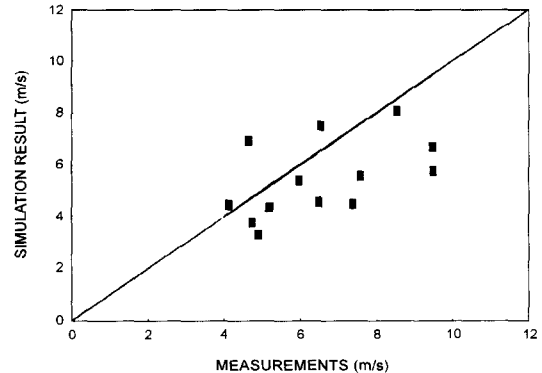


Fig. 7. Measurements vs simulation results of CO level at Baek-yang Tunnel (2000/9/7 ~ 10/12).

동하여 총 160 m³/s를 송기하였으며 환기속도는 입구에서 출구쪽으로 점진적으로 증가하였다. 시뮬레이션 환기속도는 4.00~6.88 m/s (터널 중간 5.30 m/s), 측정값 3.90~7.50 m/s (터널 중간 5.20 m/s)의 범위를 보이며 시뮬레이션 오차는 터널 출구편에서 상대적으로 커지고 있다. CO 농도는 터널상부 환기구를 통한 송기로 인하여 농도 증가율이 점진적으로 감소하는 형태를 보이고

있다. 시뮬레이션값은 5.00~16.89 ppm (터널 중간 13.91 ppm), 측정값은 3.80~19.00 ppm(터널 중간 14.40 ppm)의 범위를 보이며 시뮬레이션 오차는 터널 출구방향으로 점차 커지는 경향을 보이고 있다.

측정대상 터널 중 교통량이 가장 많았던 백양터널의 경우 분석대상 시간대 중 일부를 제외하고는 차종구성비가 거의 일정하며 환기속도의 경우 출구편 650 m 지

Table 6. Main input data for simulation at An-min Tunnel.

Observation time	Direction	Traffic rate (veh/h)	Vehicle speed (km/h)	Vehicle composition (%)							Wind velocity at portal (m/s)	
				car	small bus	large bus	small truck	medium truck	heavy goods truck	tanker	Changwon	Jinhae
2000-09-27 16:15	To Jinhae	408	67	72.55	10.78	0.98	6.86	3.92	3.92	0.98	0.63	1.93
	To Changwon	448	48	63.39	15.18	0.89	13.39	3.57	2.68	0.89		
2000-09-28 12:45	To Jinhae	172	65	39.53	18.60	2.33	23.26	11.63	2.33	2.33	-0.47	0.56
	To Changwon	368	59	61.96	11.96	3.26	11.96	4.35	4.35	2.17		
2000-09-29 13:45	To Jinhae	404	66	59.41	12.87	0.99	11.88	6.93	6.93	0.99	1.90	3.29
	To Changwon	360	50	70.00	6.67	1.11	13.33	5.56	3.33	0.00		
2000-09-29 19:15	To Jinhae	672	63	79.17	13.69	0.60	5.95	0.00	0.60	0.00	2.87	2.11
	To Changwon	412	49	79.61	7.77	1.94	6.80	0.97	1.94	0.97		
2000-09-30 14:45	To Jinhae	552	65	73.91	8.70	0.00	6.52	4.35	3.62	2.90	-1.95	2.06
	To Changwon	564	55	72.34	7.80	0.00	10.64	2.84	4.26	2.13		
2000-10-06 14:45	To Jinhae	476	65	65.55	8.40	0.84	15.13	3.36	5.04	1.68	2.12	-0.25
	To Changwon	424	55	69.81	8.49	0.94	11.32	4.72	4.72	0.00		
2000-10-07 11:45	To Jinhae	476	69	60.50	12.61	0.84	15.97	1.68	7.56	0.84	-2.60	2.42
	To Changwon	456	50	58.77	9.65	2.63	16.67	0.88	9.65	1.75		

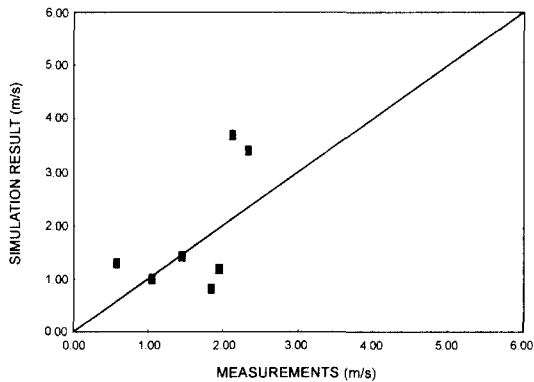


Fig. 8. Measurements vs simulation results of air velocity at An-min Tunnel (2000/9/27~10/7).

점의 시뮬레이션 결과 속도(3.8~5.8 m/s, 평균 4.62 m/s)가 측정속도(2.90~4.69, 평균 3.73 m/s)에 비하여 전반적으로 높게 나타나고 있다. 특히 교통량이 많을수록 오차의 크기가 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보여주고 있으며 Fig. 6의 기울기 1인 직선상의 2점은 교통량이 각각 792, 864대/h로 비교적 작게 나타난 경우이다. 시뮬레이션 환기속도가 크게 나타난 관계로 CO 농도의

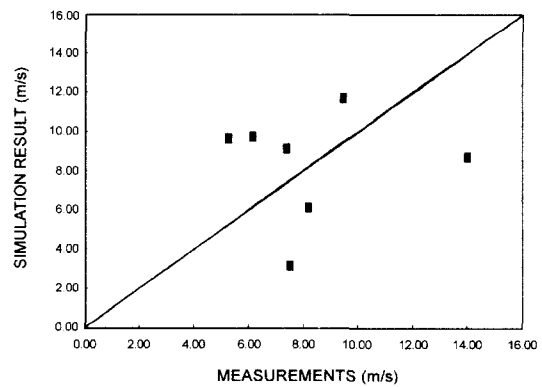


Fig. 9. Measurements vs simulation results of CO level at An-min Tunnel (2000/9/27~10/7).

경우 측정값에 비하여 일반적으로 작은 값을 보여 준다. 시뮬레이션 결과 농도는 3.34~8.10 ppm(평균 5.49 ppm), 측정농도의 경우 4.10~9.45 ppm(평균 6.52 ppm)의 범위를 보이고 있다.

안민 터널은 유일하게 대면식 통행을 하고 있었으며 일방향으로 기류가 형성된 경우만 분석대상으로 하였다. 다른 터널에 비하여 환기속도는 비교적 낮게 나타나

시뮬레이션 결과속도는 0.83~3.71 m/s(평균 1.85 m/s), 측정속도는 0.56~3.41 m/s(평균 1.60 m/s) 범위이며 기류방향의 변화가 심한 편이어서 실제 터널에서의 천이 단계(transient stage) 및 확산 지체시간의 빈번한 발생으로 측정속도의 분산이 크게 나타남을 알 수 있다.^{3,8)} CO 농도의 시뮬레이션 결과는 3.21~11.74 ppm(평균 8.36 ppm), 측정값은 5.22~13.96 ppm(평균 8.24 ppm)으로 분산은 비교적 크나 평균값은 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과와 측정값의 차이는 다음과 같은 요인에 의한 것으로 추정된다.

- 실제 터널 내 기류는 정상류 유동을 가정하는 시뮬레이션 모델과는 달리 차량의 단속적인 통행에 따른 천이단계의 생성 그리고 확산에 소요되는 시간만큼의 지연 등의 특성을 가지고 있다.

- 환기속도 및 CO 농도 측정은 순간값을 대상으로하므로 자료 자체의 분산이 크나 시뮬레이션 결과는 정상상태를 고려하고 있다.

- 교통 및 기상관련 변수들 또한 순간적인 변화가 지속되므로 일정한 값을 가정하는 시뮬레이션 입력값과는 차이가 있다.

- 대부분의 경우 출구 부근에서의 차이가 상대적으로 크게 나타나고 있으며 환기속도의 경우보다 CO 농도의 경우가 뚜렷하다. 특히 CO 농도가 상대적으로 큰 달성, 황령터널에서 현저하게 나타나고 있으며 측정값이 농도가 높은 출구 부근에서 시뮬레이션값에 비하여 상대적으로 작아지는 것은 난류확산에 의한 농도 저하가 원인으로 보인다.

- 난류확산 현상은 최대 농도는 출구가 아니라 약간 안쪽 지점에서 나타나는 현상에서도 추정이 가능하다.

- 교통량이 많을수록 환기속도 오차가 큰 경향을 보이므로 차량의 공기역학적 특성에 대한 연구의 필요성이 제기된다.

5. 결 론

본 연구에서는 환기방식 및 차량통행방식이 다른 4개 터널을 대상으로 시뮬레이션 모델, NETVEN의 현장 적용 실험을 수행하였다. 정상류 유동을 가정하고 있는 시뮬레이션 모델의 적용 결과와 측정 결과의 차이를 비교 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 실제 터널 내 기류는 정상류 유동을 가정하는 시뮬레이션 모델과는 달리 천이-지연계의 특성을 가지고

있다.

(2) 시뮬레이션 모델은 정상상태를 가정하나 측정값은 순간값을 대상으로 하므로 분산이 상대적으로 크게 나타난다. 환기력 관련변수들은 거의 정상상태가 아니며 교통 및 기상관련 변수들은 특히 순간적인 변화가 심한 편이다.

(3) CO 농도의 경우에 출구 부근에서의 차이가 상대적으로 크게 나타나는 현상이 뚜렷하며 특히 농도가 상대적으로 클수록 차이가 크다. 이는 난류확산에 의한 농도 저하가 원인으로 보인다. 난류확산 가능성은 최대 농도지점이 출구점이 아닌 약간 안쪽 지점에서 나타나는 현상에서도 나타나고 있다.

(4) 교통량이 많은 경우 환기속도 오차가 크게 나타나므로 차량의 배기특성 뿐만 아니라 공기역학적 특성에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

시뮬레이션이 터널환기시스템의 설계도구로서 정확성 및 활용성을 갖추기 위해서는 국내 차량의 공기역학적 특성 및 배출특성에 관한 연구가 필요하며 아울러 천이-지연계의 특성을 보이는 터널내 기류 유동을 해석하기 위해서는 3차원 비정상류 유동에 기초한 시뮬레이션 모델의 개발이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1998학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)와 한국도로공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 1996, 터널환기시설에 대한 연구, 한국도로공사 연구보고서
2. 이창우 등, 1997, Network이론을 이용한 차량터널 환기시스템 시뮬레이션 모델 개발연구, 한국자원공학회지, 34.6, 617-629.
3. Brun, A.C.de and R.A. Maarsingh, 1997, New attempts to solve an old problem: aerodynamic measurements in new vehicle tunnels, Proc. of the 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, 3-23.
4. 이창우 등, 1998, 터널 환기시설 현장 조사 및 분석, 한국도로공사 연구보고서.
5. 이창우 등, 1999, 도로터널의 환경실태 조사 및 계측기 설치기준 연구, 한국건설기술연구원 연구 보고서.
6. Riess, I., M. Wehner and R. Brandt, 1999, Time scales in road-tunnel ventilation, Proc. of int. conference on

tunnel control and instrumentation and communications systems for tunnels, Hong Kong, 59-65.
 7. PIARC Committee on Road Tunnels, 1999, Reduction

of operational cost of road tunnels.
 8. 김태형, 2001, 터널환기시설의 운전방안, 설비저널, 30.7, 14-18.

이창우



1978년 서울대학교 자원공학과 공학사
 1983년 미국 Pennsylvania State University 대학원 자원시스템공학 공학석사
 1986년 미국 Pennsylvania State University 대학원 자원환경공학 공학박사
 Tel : 051-200-7769
 E-mail : cwlee@mail.donga.ac.kr
 현재 동아대학교 지구환경공학부 교수

김효규



1997년 동아대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1999년 동아대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
 Tel : 02-3433-3127
 E-mail : xram77@netian.com
 현재 동아대학교 공과대학 자원공학과 박사과정
 (주)삼보기술단 기전부 주임