

네트워크형 지하도로 입체교차로 내의 교통환기력에 의한 환기 특성

Ventilation Characteristics by Traffic Piston Effect in Underground Network-type Road Junction

김남영(Nam-Young Kim)¹, 조중복(Jong-Bok Jo)¹, 한화택(Hwataik Han)^{2*}

¹삼보기술단 기전부, ²국민대학교 기계공학과

¹Mechanical and Electrical Division, Sambo Engineering, Seoul, 183-834, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea

(Received April 14, 2015; revision received May 28, 2015; Accepted: June 1, 2015)

Abstract This paper investigates the ventilation characteristics in a two-dimensional underground network junction composed of four main lines interconnected by eight ramps. Simple one-dimensional models cannot be applied to network junctions since there are interferences of traffic piston effects in the main lines and at the ramps. A numerical algorithm was developed to analyze the pressure and airflow distributions iteratively. The Darcy-Weisbach equation was used to calculate the piston effects by traffic flows, and a Hardy Cross iteration was conducted for network analysis at the interconnected junction. The results show interesting ventilation characteristics and CO concentration distributions depending on system parameters such as vehicle speed, tunnel diameter, and other junction configurations.

Key words Tunnel ventilation(터널환기), Underground road(지하도로), Piston effect(교통환기력), Junction(입체교차로), Ventilation characteristics(환기특성)

* Corresponding author, E-mail: hhan@kookmin.ac.kr

기호설명

A	: 지하도로 본선 단면적 [m^2]
A_t	: 차량 등가저항면적 [m^2]
D	: 지하도로 대표직경 [m]
ΔP	: 통기력 [Pa]
ΔP_t	: 교통환기력 [Pa]
ΔP_w	: 외부 저항풍력 [Pa]
L	: 지하도로 연장 [m]
n	: 터널내 차량 대수 [대]
V	: 지하도로내 풍속 [m/s]
V_t	: 차량 주행속도 [m/s]
V_w	: 외부 자연풍속 [m/s]

그리스 문자

λ	: 터널벽면 마찰계수
ξ	: 터널입구 손실계수
ρ	: 공기 밀도 [kg/m^3]

1. 서론

서울시에서는 Fig. 1과 같은 입체교차로를 포함하는 U-Smart way 지하도로를 구상하고 있다.⁽¹⁾ 이러한 대규모 네트워크형 지하도로에서 안전하고 무해한 주행 환경을 유지하기 위해서 적절한 환기설계가 매우 중요하다. 도심지 지하도로의 환기방식은 교통량의 지체와 정체가 우려되므로 운영 중 환기와 함께 화재시 제연을⁽²⁾ 고려하여 일반적으로 횡류식 환기방식을 적용한다.⁽³⁾ 그러나 횡류식은 급기덕트와 배기덕트가 설치되므로 네트워크형 지하도로의 입체교차로에 적용하기에 구조가 복잡해져 시공이 어렵고 유지관리도 곤란하다. 반면 입체교차로 연결로의 환기방식을 반횡류식이나 종류식으로 적용하면 입체교차로에 설치되는 덕트의 구조를 간단하게 구성할 수 있다. 하지만 반횡류식이나 종류식을 적용하기 위해서는 본선과 연결로에서 교통환기력에 의해 발생하는 환기량이나 풍향 풍속 등 터

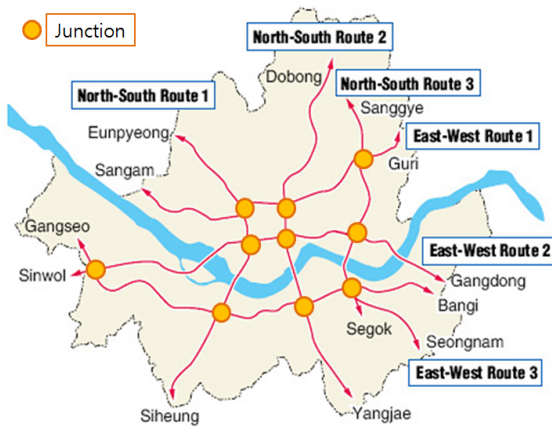


Fig. 1 U-Smartway plan in Seoul.⁽¹⁾

널내 환기 특성이 명확히 파악되어야 설계가 가능하다. 그러나 차량이 주행하는 4개 방향으로 본선과 그 본선들을 연결하는 8개의 연결로들은 단면적과 기울기, 교통량 등이 제각기 다를 뿐만 아니라 본선이 서로 연결되어 상호작용을 일으키므로 교통환기력의 차이에 의한 환기량이나 차량배기 가스에 의한 오염농도를 예측하는 것이 어렵다.

기존의 일자형 지하도로내 교통환기력이나 오염분석에 관한 연구는 단순 1차원 모델을 이용하여 오래전부터 진행되어 왔고, 환기계통 설계를 위한 방법론 역시 잘 정립되어 있다.⁽³⁾ 하지만 네트워크형 지하도로에 대해서는 아직 국내외적으로 설치된 사례가 없고, 환기 특성에 관한 정량적 분석이나 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있다. 두 개의 본선이 교차하는 입체교차로에 대하여 상호작용을 고려하지 않고 기존의 방식을 이용할 경우 정확한 환기량 산정이 어렵기 때문에 환기부족으로 인한 심각한 오염이나 과도한 환기설비로 인한 에너지 낭비가 초래될 수 있다.

따라서 본 연구는 네트워크 지하도로의 환기해석 프로그램으로 개발된 기존 n.TAQS 프로그램⁽⁴⁾ 반복적으로 활용하여 아직까지 시도된 바 없는 네트워크형 지하도로 입체교차로 내에서 다양한 입력변수에 따른 환기특성과 오염농도를 정량적으로 분석하고자 한다.

2. 해석 방법

지하도로 내 오염농도를 허용치 이내로 유지하기 위한 환기설비는 터널내 차량오염 배출량과 터널의 형상, 그리고 교통환기력과 외기 조건 등을 고려하여 계획한다.⁽⁵⁾

2.1 소요환기량 산정

차량의 유해성분 배출량은 차종, 차령, 주행상태, 지하도로의 특성(종단 기울기 및 표고) 등에 따라 다르다.

Table 1 Exhaust rates from vehicles

Classification	Passenger Car		Bus	Truck
	Gasoline	Diesel	Small	Small
Soot[m ² /h]	0.000	0.787	0.787	0.787
CO[m ³ /h]	0.030	0.014	0.018	0.018
NOx[m ³ /h]	0.001	0.003	0.004	0.004

국내 지하도로 환기설계 시, WRA(PIARC)의 권고에 따른 유해성분별 기준배출량을 기준으로 하고 있다.⁽⁶⁾ 본 연구에서 사용한 국내 차종별 기준배출량은 Table 1과 같다.

2.2 자연환기력 해석

자연환기력은 기계환기를 활용하지 않을 때 지하도로 내에 발생하는 환기력으로 교통환기력과 자연 저항풍력의 차이이다.⁽⁷⁾

$$\Delta P = \Delta P_t - \Delta P_w \quad (1)$$

여기서 교통환기력은 지하도로 내공 단면적, 차량 등가 저항면적, 지하도로 내의 차량 대수, 차량 속도 등의 영향을 받으며, 식(2)으로 구한다.

$$\Delta P_t = \frac{A_t}{A} \cdot n_t \cdot \frac{\rho}{2} (V_t - V)^2 \quad (2)$$

또 자연 저항풍력은 지하도로를 주행하는 차량과 반대 방향으로 풍압에 의해 발생하는 외부 저항력으로 식(3)으로 구한다.

$$\Delta P_w = (1 + \xi + \lambda \frac{L}{D}) \cdot \frac{\rho}{2} V_w^2 \quad (3)$$

교통환기력과 저항풍력에 의한 자연환기력에 상응하는 지하도로내 통기력은 일반적으로 풍속의 제곱에 비례하며, 입구 손실계수와 벽면의 마찰 계수, 연장 길이 등에 따라 식(4)에 의해 결정된다.

$$\Delta P = (1 + \xi + \lambda \frac{L}{D}) \cdot \frac{\rho}{2} V^2 \quad (4)$$

2.3 관로망 유동해석

Hardy-Cross 계산방법에 따라 관로망에서 병렬인 관로의 분기점에서 합류점까지 경로의 마찰손실이 같고,

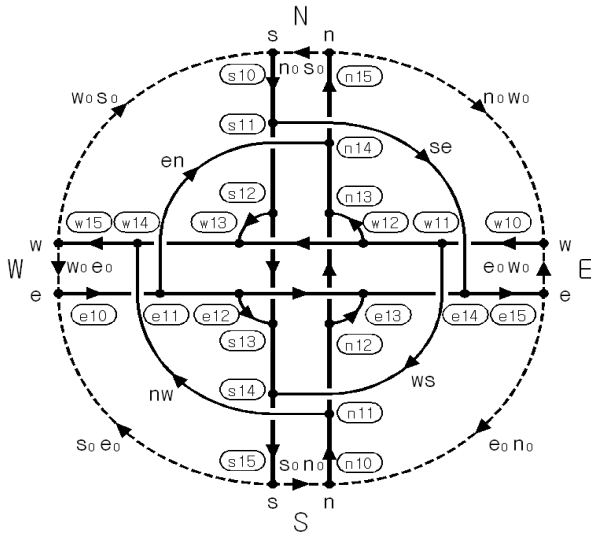


Fig. 2 Schematic of the sections and nodes in a network-type junction.

합류점에서 두 유체의 힘이 같을 경우 병렬인 관로를 흐르는 유체의 속도와 양을 산정할 수 있다.⁽⁸⁾

두 개의 1-D 지하도로가 서로 교차할 때의 연결 형상을 일반화하면 Fig. 2와 같이 세그먼트와 노드로 이루어진 기하학적 구조로 구성된다.⁽⁷⁾ 계산은 모든 분기점을 비록하여 직경, 압력, 유량 등이 변하는 곳을 기준으로 관로를 세그먼트(segment)로 나누고, 변화점을 노드(node)로 구성하여 각 노드에서 압력과 유량 등을 시행착오법에 의해 구한다.

대문자 N, S, W, E는 본선의 차량 진행방향을 나타내며, 소문자 n, s, w, e는 연결로의 차량 진행방향을 나타낸다. 연결로(ramp)는 se, en, nw 등과 같이 표시하고 o는 외부와 접속되었음을 의미한다. 지하도로의 입출구를 포함하는 구간과 수직갱 구간들은 다른 구간들과 폐회로로 구성되어야 하므로, 대기 중의 경로를 의미하는 가상의 구간으로 연결되어 있고 그림에는 점선으로 표시되어 있다.

2.4 입체교차로 형상

본선의 연장은 3,000 m이며, 연결로가 접속되는 부분을 기준으로 구역(zone)을 구분한다. Fig. 3은 입체교차로의 형상과 각 구역별 길이를 나타낸다. 본선의 단면적은 Table 2와 같이 상부층은 45 m², 하부층은 35 m², 경사도는 서쪽과 북쪽으로 상향 1% 나머지는 -1%이다.

연결로 중에서 교차로의 바깥쪽에 설치되는 외곽연결로(Ramp 1~4)의 경우는 연장이 1,000 m이고, 안쪽에 설치되는 내곽연결로(Ramp 5~8)는 600 m이다. 각

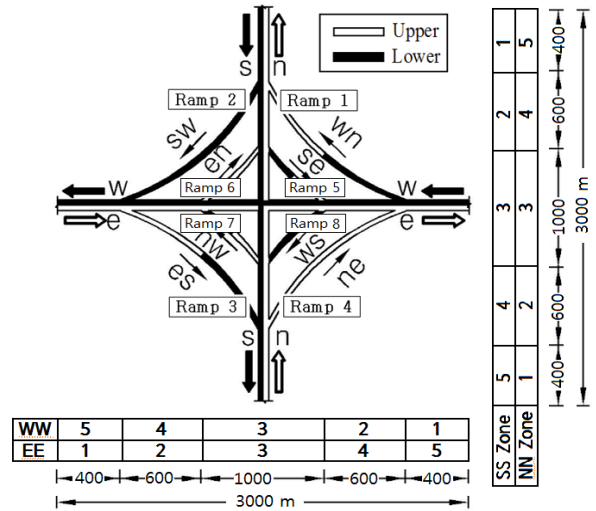


Fig. 3 Configuration of the present junction model.

Table 2 Cross sections of main lines and ramps

	Main lines				Ramps	
SS Zone	5	4	3	2	1	
NN Zone	1	2	3	4	5	
AREA	45 m ²	35 m ²			29 m ²	

Table 3 Slopes of ramps

Ramp	1	2	3	4	5	6	7	8
	(wn)	(sw)	(es)	(ne)	(se)	(en)	(nw)	(ws)
Gradient[%]	+4.2	-1.5	-1.2	-1.5	-1.5	1.0	-1.0	+1.5

경사도는 Table 3과 같다.

2.5 교통량 설정

교통량 설정을 위해서 소형차 전용도로를 가정하며, Table 4의 연평균 일교통량(AADT : Average Annual Daily Traffic)을 적용한다. 본선의 교통량은 2,000 pcu/lane.h로 설정하고, 외곽연결로의 교통량은 600 pcu/lane.h, 내곽연결로의 교통량은 510 pcu/lane.h을 적용한다.

2.6 수치해석 알고리즘

본 연구에서 사용한 프로그램은 n.TAQS로,⁽⁸⁾ 해석은 Fig. 4와 같이 자료 입력, 계산 수행, 결과 출력의 3단계로

Table 4 Traffic in main lines and ramps

Classification	Passenger Car	Bus	Truck	AADT [veh/day]	
	Gasoline	Diesel	Small		
EE(W → E)(Upper)	22,270	14,840	3,390	45,640	
WW(E → W)(Lower)			5,140		
NN(S → N)(Upper)	17,411	11,607	2,652	35,688	
SS(N → S)(Lower)			4,018		
Ramp	2,608	1,739	397	602	5,346

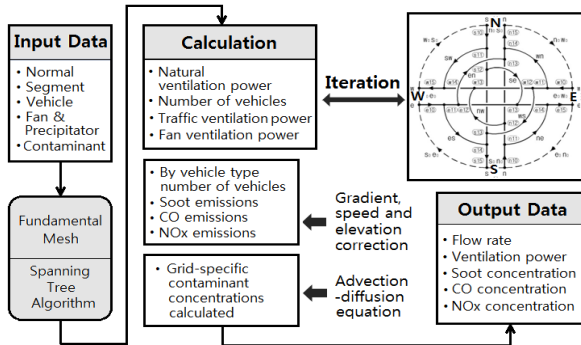


Fig. 4 Calculation procedure using n.TAQS program.

이루어진다. 자료입력은 각 세그먼트 별로 차량속도 및 교통제원, 기상 관련 자료와 지하도로 제원을 입력한다.

계산 수행을 위해 우선 유량보전법칙에 입각하여 초기 구조를 구성한다. 터널 단면적, 경사도, 연결로 분기 등에 따라 네트워크 구성을 위한 세그먼트를 배열하고, 모든 노드 번호를 부여하여 메시 다이어그램을 완성한다.

첫째, 지하도로 입출구 세그먼트에 작용하는 풍압에 의한 저항풍력과 차량 통행에 의한 교통환기력을 계산한다.

둘째, 세그먼트가 조합되어 폐회로로 구성된 메시 다이어그램에서 계산을 진행하기 위한 세그먼트의 환기의 방향을 정해준다.

셋째, 폐회로에서 Kirchhoff 법칙에 따라 병렬인 세그먼트의 분기점 노드에서 합류점 노드까지 경로의 통기 저항력이 같게 될 때 까지 시행착오법에 의해 환기량을 변화시키며 계산을 반복한다. 수렴된 환기량 결과로부터 세그먼트별 오염배출량을 대입하여 오염농도를 계산한다. 수렴조건으로 결과 변동값 10^{-6} 이하로 하였으며 계산회수가 15,000회에 이르면 계산을 종료하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 본선의 풍량과 CO 농도

외부 저항풍이 없는 상태에서 차량 주행속도를 변화시키며 본선내 환기량을 해석하였다. 차량 속도는 4개

의 본선과 8개의 연결로에서 모두 동일하다. 차량속도 증가에 따라 본선의 풍량은 Fig. 5에 보이는 바와 같이 증가하지만, 그 증가율은 점차 둔화된다.

단면적이 넓은 본선 EE와 NN에서 단면적이 좁은 WW와 SS보다 풍량이 크게 나타나고 있다. 교통환기력은 차량속도와 지하도로내 풍속 차이의 제곱에 비례하며 면적에 반비례하고, 통기저항력은 지하도로 내 풍속의 제곱에 비례하며 대표직경에 반비례하므로 단면적이 넓을 때 풍속은 감소되지만 풍속 감속에 따른 통기저항력의 감소폭이 더 크므로 환기량이 증가하게 된다.

본선내 CO 농도는 Fig. 6과 같이 길이방향으로 선형적으로 증가한다. 이것은 주행속도가 10 km/h로 교통환기력이 가장 약할 때의 결과로서 본선 입출구의 농도차가 상당히 크게 나타난다. 단면적이 넓은 본선 EE와 NN의 농도는 단면적이 좁은 WW와 SS의 농도보다 다소 낮게 나타나고 있다. 그리고 본선 WW와 NN은 도로의 경사도가 +1%이므로 경사도가 -1%인 본선 EE

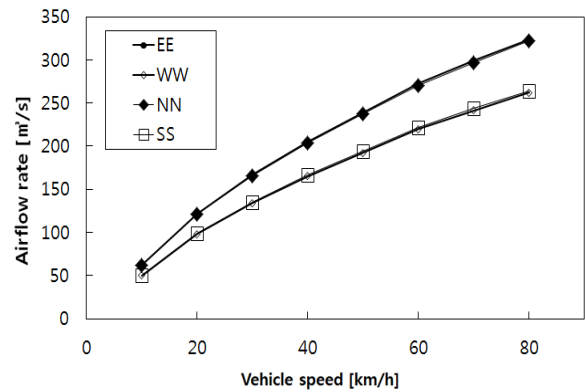


Fig. 5 Airflow rates induced by traffic in main lines as a function of vehicle speed.

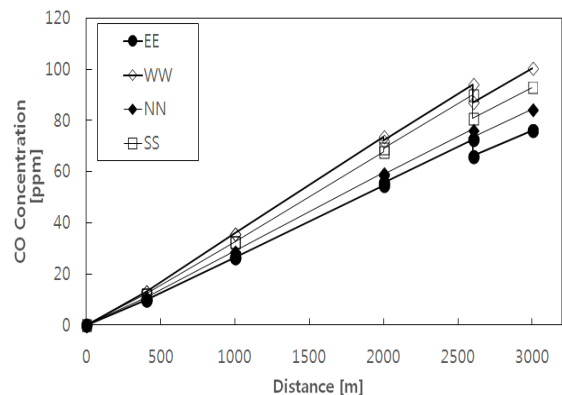


Fig. 6 Distributions of CO concentration along main lines($V_t = 10$ km/h).

와 SS보다 낮음을 알 수 있다. 아울러 2,600 m 지점의 CO 농도가 불연속적으로 나타나는 것은 접속된 외곽 연결로로부터 상대적으로 농도가 낮은 공기가 인입되기 때문이다.

3.2 연결로의 풍량과 CO 농도

차량 주행속도에 따른 8개 연결로내 환기량의 변화가 Fig. 7에 보인다. 연결로내의 환기량은 본선과 마찬가지로 차량속도의 증가에 따라 증가한다. 외곽연결로의 풍량은 실선으로 표시되어 있고 내곽연결로의 풍량은 점선으로 표시되어 있다. 대체적으로 외곽연결로의 풍량이 내곽연결로에 비하여 크게 나타나고 있다. 외곽연결로의 길이가 길기 때문에 체류 차량 대수가 많고, 연결로가 접속된 본선의 위치가 중심에서 멀리 떨어져 있기 때문에 본선의 영향을 더 많이 받기 때문이다. 일부 곡선에서 굴곡을 보이는 것은 연결로의 길이가 짧아 소수의 차량 대수가 체류하기 때문에 정수로 반올림되는 과정에서 나타난 것으로 보인다.

또한 연결로의 입구(inlet)와 출구(outlet)에 접속되는 본선의 단면적에 따라 영향을 받는다. 외곽연결로 중에서는 단면적이 큰 본선 NN에서 분기되어 본선 EE로 진입하는 연결로 ne의 풍량이 제일 크고, 단면적이 작은 본선 SS에서 분기하여 WW로 진입하는 연결로 sw의 풍량이 제일 적다. 내곽연결로 중에서는 입출구 단면적이 모두 넓은 연결로 en에서 풍량이 가장 많고, 입출구 단면적이 모두 작은 연결로 ws 풍량이 가장 적다.

전체 입체교차로내 각 구간별 환기량이 Fig. 8에 보인다. 환기가 원활이 이루어지는 80 km/h일 때의 결과로서 각 노드에서 풍량 밸런스를 확인할 수 있다. 입체교차로가 기하학적으로 대칭이기 때문에 환기량 분포도 전반적으로 대칭 구조를 보이나 단면적 차이로 인해 다소의 비대칭성을 갖는다. 연결로 풍량은 앞서

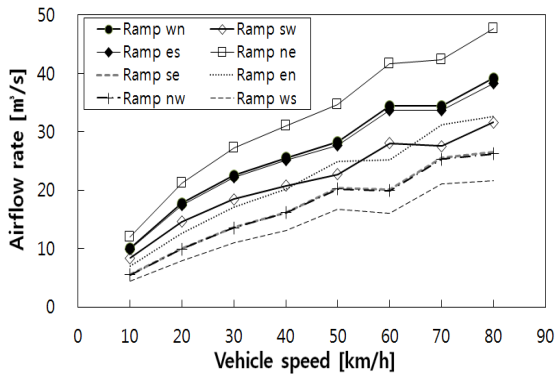


Fig. 7 Airflow rates induced by traffic in ramps as a function of vehicle speed.

설명한 바와 같이 외곽연결로 ne에서 환기량이 50 m³/s로 가장 크고, 내곽연결로 ws에서 33.8 m³/s로 가장 적다.

각 연결로의 입출구 CO 농도는 Fig. 9에 보인다. 연결로는 밀폐되어 있기 때문에 입구에서 시작하여 출구까지 이르는 동안 선형적인 증가를 보인다. 외곽연결로는 본선의 시작부분에서 분기되므로 본선 중간부분에서 분기되는 내곽연결로에 비해 유입 농도가 낮다. 연결로를 통과하는 동안의 CO 농도 증가는 연결로의 길이가 긴 외곽연결로의 값이 내곽연결로보다 크다.

3.3 외부 저항풍의 영향

국내에서는 터널 설계시 일반적으로 외부 저항자연풍이 2.5 m/s인 상태에서 충분한 소요환기량이 공급되도록 하는 극히 보수적인 환기 설계를 하고 있다. 외부 저항풍이 주어질 때 차량 주행속도에 따른 본선의 환

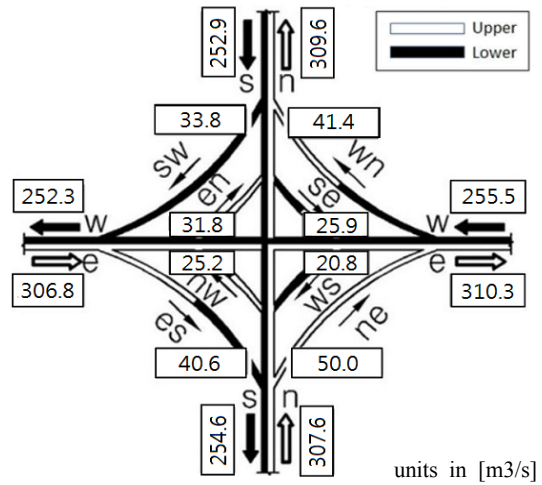


Fig. 8 Airflow rates at internal sections with no wind ($V_t = 80$ km/h).

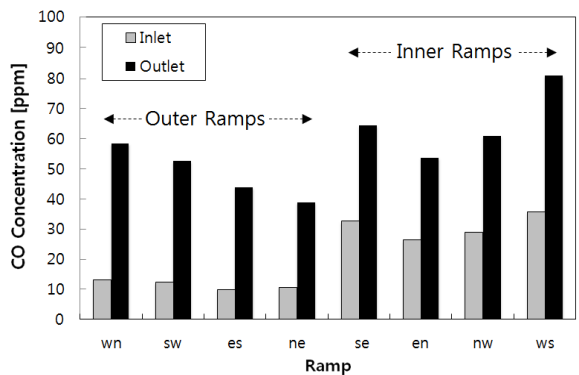


Fig. 9 CO concentrations at ramp inlets and outlets ($V_t = 10$ km/h).

기량은 Fig. 10과 같다. 저항풍이 없을 때에 비하여 전반적으로 30~50 m³/s 정도의 풍량 감소가 일어나고 있으며, 차량의 속도가 저속일수록 풍량 감소분이 크다. 차량 주행속도가 10 km/h일 때 본선 출구 환기량은 양(+)의 값을 갖는다. Fig. 11에 교차로내 구간별 환기량을 보인다. 연결로와 대부분의 본선 구간에서 환기량이 양의 값을 갖지만, 교차로 내부 구간에서 부분적으로 음의 값을 갖는다. 음의 환기량은 이탤릭체로 표시되어 있으며 주행방향과 반대방향의 공기흐름을 의미한다. 내곽연결로와 외곽연결로 사이 8군데 도로구간에서 역류가 발생하는 것을 알 수 있다.

단면적이 적은 하층부 구간에서는 역류가 발생하지 않으나, 단면적이 넓은 4개의 상층부 구간에서 역류가 발생하고 있다. 역류가 발생하면 차량의 배기가스가 외부로 배출되지 못하고 계속 구간을 순환하며 축적되어 CO 농도가 상당한 레벨까지 올라간다. 기류가 역류하

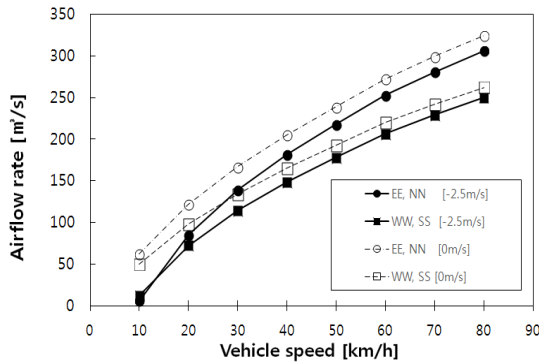


Fig. 10 Airflow rates in main line exits as a function of vehicle speed.

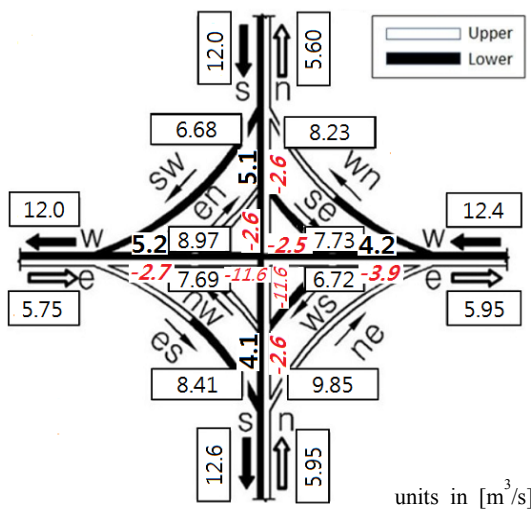


Fig. 11 Airflow rates at internal sections with opposing wind($V_t = 10$ km/h).

며 오염물질이 축적되지 않도록 강제 환기설비가 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 네트워크형 지하교차로에서 교통환기력에 따른 환기 특성과 오염농도에 관한 수치해석 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 지하도로 본선에서 교통환기력에 의한 자연환기량은 1차원 터널과 마찬가지로 차량 주행속도의 증가에 따라 증가하며, 동일한 조건에서 단면적이 넓은 본선에서 큰 환기량을 보인다.
- (2) 지하도로 본선의 CO 농도는 중간에 연결로가 연결되어 있지 않은 경우, 길이 방향을 따라 선형적으로 증가하며, 연결로가 접속되는 곳에서 유입되는 CO 농도에 따라서 급격히 증가 또는 감소한다.
- (3) 연결로에서의 환기량은 차량 대수와 주행속도의 증가에 따라 증가하며, 연결로 길이가 긴 외곽연결로에서 내곽 연결로에 비하여 큰 것으로 나타난다. 연결로의 입출구 양단에 접속되는 본선의 단면적이 넓은 경우에 환기량이 가장 크고, 양단에 좁은 본선이 접속되는 경우에 환기량이 가장 적게 나타난다.
- (4) 외부 저항풍이 주어지면 터널 및 연결로내의 환기량이 전반적으로 감소한다. 특히 10 km/h 이하의 저속인 경우, 일부 본선 구간에서 역방향의 기류가 형성된다. 이 경우 배기가스가 부분적으로 정체되어 CO 농도가 급격히 상승하기 때문에 적절한 기계환기 대책이 요구된다.

본 연구에서는 네트워크형 지하교차로내의 환기특성을 수치해석하기 위한 방법을 제시하였으며, 장대화된 네트워크형 지하도로 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 향후 다양한 형상변수 및 운전 변수에 따른 환기특성에 관한 연구와 함께, 여러 개의 교차로를 포함하는 전체 지하 교통망에 대한 종합적인 해석 및 해석 방법에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받고(2013401020 0580), 교육부와 한국연구재단의 BK21플러스사업의 일환으로 수행된 연구(31Z20130012959)입니다.

References

1. Korea Times, 2009, Seoul plans underground road network, Aug. 5, 2009.

2. Li, J. S. M. and Chow, W. K., 2003, Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 18, pp. 435-452.
3. PIARC-World Road Association, 2004, PIARC technical committee on road tunnels operation (C5), *Road Tunnels : Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation*, pp. 9-41.
4. BNTTEK Inc, 2004, Numerical analysis report on ventilation and disaster prevention in underground road of Olympic Expressway, BNTTEK Report, Korea.
5. Kim, N. Y., 2014, Ventilation characteristics by piston effect in underground network road junctions, Ph.D. Thesis, Kookmin University, Seoul, Korea.
6. Kwon, O. Y. and An, Y. S., 2006, Temporal and spatial distributions of PM10, NO_x and O₃ around the road, *J. KOSAE*, Vol. 22, No. 4, pp. 440-450.
7. Lee, S. C., 2013, Experiment of scale model, three-dimensional numerical simulation, resistance of ventilation, natural wind, tunnel condition, *Journal of Korean Institute of Plant Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 41-49.
8. Byun, S. H., Jeong, J. H. Jun, D. C., Shin, I. J., and Sim, D. H., 2011, A case study on M&E design for double-deck tunnel in urban area, *Tunnel and Underground Space*, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 21, No. 4, pp. 281-286.