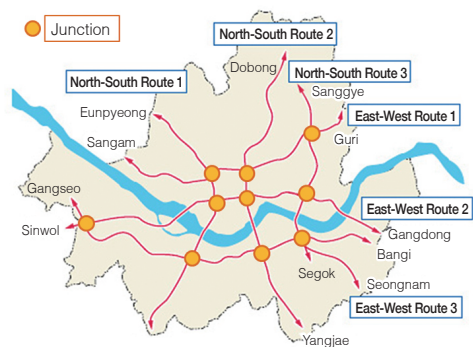


지하도로 입체교차로 내의 교통환기력에 의한 환기 특성

지하입체교차로에서 차량 이동에 의해 발생하는 자연환기량과 배기가스 오염농도 분포의 수치해석 결과를 소개하고자 한다.

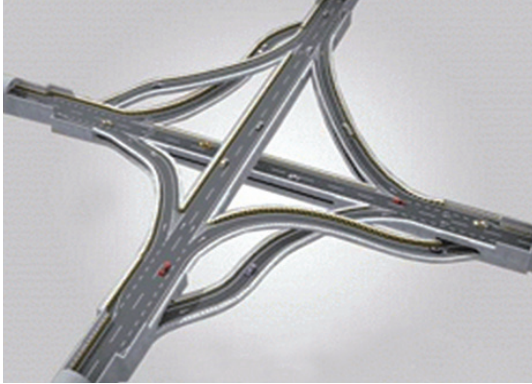
배경

대도시는 인구 집중과 자가용의 대중화로 인하여 교통난이 심화되고 있다. 차량의 증가에 따른 물류비용 부담을 경감하기 위한 지상도로 확충은 토지보상비의 급등, 환경 공해에 대한 민원 등으로 인해 곤란을 겪고 있다. 따라서 그에 대한 대책으로 지하에 도로를 건설하는 계획이 많아지고 있다. 이러한 상황에 발맞추어 서울시에서는 지하 40~60 m 깊이에 6개 노선, 149 km의 전용도로망을 건설하고 지상공간에는 녹지공간을 확보하기 위해 그림 1과 같은 U-Smartway 계획을 발표하였다. U-Smartway는 3개의 남북축과 3개의 동서축의 노선으로 구성되며, 각 노선이 만나



[그림 1] U-Smartway와 입체교차로

김남영
(주) 비엔텍아이엔씨
부사장
n220911@naver.com
조종복
(주)삼보기술단 부장
channel71@naver.com
한화택
국민대학교 교수
hhan@kookmin.ac.kr



[그림 2] 입체교차로 개념도

는 곳에 입체교차로(Junction)가 설치된다.

그러나 네트워크형 지하도로의 입체교차로는 **그림 2**와 같이 지하에서 본선과 연결로(Ramp)가 상호 연결되므로 교통량과 차량속도의 변화에 따라 상호 구역간에 공기흐름의 간섭이 심하여 자연환기 특성을 예측하기 어렵다.

자연환기 특성 파악

도시 지하도로의 환기방식은 지정체가 우려되므로 운영 중 환기뿐 아니라, 화재 시 제연에 대해서도 고려해야 한다.

그러나 4개 방향으로 차량이 주행하는 본선과 그 본선들을 연결하는 8개의 연결로는 단면적과 기울기, 교통량 등이 제각기 다르므로 교통환기력의 차이에 의한 기류의 예측이 곤란하다.

따라서 본고는 네트워크 지하도로의 환기해석 프로그램으로 네트워크형 지하도로의 입체교차로 내의 자연환기 특성을 파악하였다.

자연환기 특성을 본선과 연결로의 자연환기량 및 본선과 연결로의 오염농도를 분석한다. 또한, 연결로도 본선의 중심으로부터 외부에 있는 외곽연결로(Ramp)와 중심에 가까운 내곽연결로(Ramp)의 토목제원의 특성도 상이하므로 그에 대한 자연환

기의 차별성도 파악한다.

본고에서 분석된 자연환기특성은 네트워크형 지하도로 계획 시 운영 중 환기팬 운전 모드 설정과 화재 시 제연 운전계획에도 유용할 것이다.

이론적 배경

지하도로의 운전자와 승객, 유지관리요원에게 필요한 적절한 공기환경을 제공하기 위하여 자동차가 배출하는 오염물질을 환기에 의해 허용치 이내로 유지하여야 한다.

적정한 환기시설을 계획하기 위해서는 오염물질의 기준농도와 오염농도에 영향을 미치는 교통량, 차종별 배출량, 차량속도, 지하도로의 경사도, 차종별 차령 등에 의한 차량 배기물질량과 환기력 관련 변수인 자연환기력, 교통환기력과 제트팬 등의 기계환기력을 고려한 환기력을 계산하여 최종 터널 내 공기환경의 농도를 계산한다.

소요환기량

차량 배기가스에 의해 오염된 공기환경 개선을 위해 필요한 환기량을 소요환기량이라 하고, 소요환기량은 지하도로 내에 사람이 체류하는 시간에 따른 허용 농도 기준을 만족하는 양이 되어야 하며, 현재 국내도로터널의 오염물질별 허용 농도 기준은 **표 1**과 같다. 차종별 실주행 차종구성비를 구하고, 유효승용차 환산대당 점유비율을 구하여 주행속도별 교통량을 산정하며 그에 따라 차종별 매년, CO, NOx 기준배출량을 결정하여 속도별 차종을 반영한 총 배출량을 산정한다.

환기력 해석

환기력에 관련된 주요 변수들은 지하도로의 단면적, 길이, 교통환기력에 관련된 차량의 구성비, 차량의 단면적, 지하도로 벽면의 마찰계수, 지하도로 설치 표고, 터널의 경사도 등이며, 자연환기력

〈표 1〉 차량 속도별 허용 농도

Speed [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80
Soot [m^{-1}]	0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
CO [ppm]	70							
NOx [ppm]	20							

은 통기저항력, 교통환기력, 저항자연풍력의 영향을 받는다.

관로망 유동해석

하디크로스 계산방법은 Illinois 대학의 구조 교수였던 Hardy Cross가 1936년에 개발한 방법이다. 구조물 전체가 평형상태에 다다를 때까지 구조물을 이루고 있는 부재의 고정단 모멘트들을 이웃하는 부재들에 점차 분배하는 식으로 구조물을 해석하거나, 배관망에서 유체흐름에 따른 유량을 계산하기 위해 고안해낸 수학적 해석법으로 관망에서의 유량이나 수두손실을 가정하여 시행착오법에 의해 계산한다.

관로망에서 병렬인 관로의 분기점에서 합류점까지 경로의 마찰손실이 같고, 합류점에서 두 유체의 힘이 같을 경우 병렬인 관로를 흐르는 유체의 속도와 양을 산정할 수 있다.

네트워크 모델링

네트워크형 지하도로의 환기특성을 해석하기 위해서는 기존의 1차원적인 지하도로 환기 모델을 확장하여 두 개의 1차원 지하도로가 상호 교차하고 양방향 진입 진출 연결로가 존재하는 지하도로 입체교차로에 적용 가능하도록 네트워크 모델을 설정하고 이를 해석하기 위한 알고리즘(Algorithm)을 작성하였다. 프로그램은 1-D 운동방정식과 이류(Advection) 확산식을 반복 적용하고 Hardy Cross Iteration으로 해석하여 준 정상상태(Quasi-steady state)에서 환기속도, 매연, 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)의 오염농도 예측을 한다.

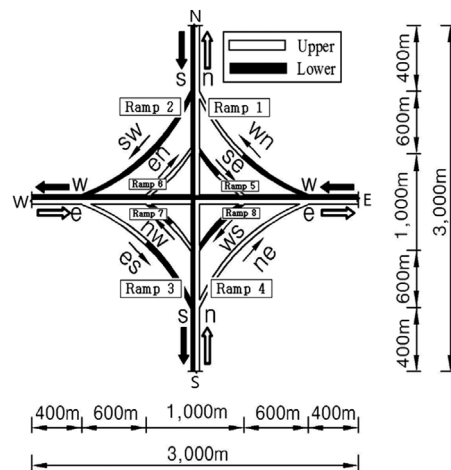
수치해석 대상

입체교차로의 선정

도심에 적용 가능한 네트워크형 지하도로의 입체교차로는 소형차 전용이며 복층구조에 적합하고 구조가 간단하여 가장 경제적으로 건설할 수 있는 직결형 입체교차로가 채택될 가능성이 가장 높다. 아울러, 도심 지하도로의 환기소와 환기소 사이의 적정 간격은 풍도의 넓이와 환기팬의 정압 한계 등에 의해 3,000 m 이내이므로 본고에 적용할 입체교차로는 본선의 길이가 3,000 m인 직결형의 입체교차로를 선정한다.

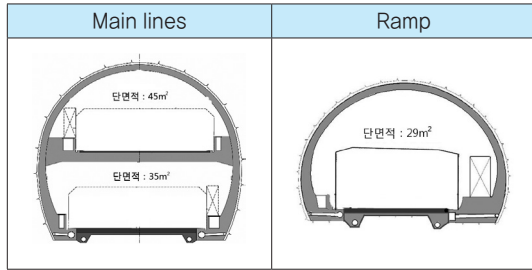
지하입체교차로 모델

자연환기 분석을 위한 입체교차로는 그림 3과 같은 형상이며, 8개의 연결로가 있고 자연저항력이 없는 경우를 선정하였다.



[그림 3] Direct Connection Type Junction

〈표 2〉 Cross Section of main lines and Ramp



단면적은 표 2와 같이 상부층은 45 m²이며, 하부층은 35 m²를 선정하였다. 본선의 길이는 3,000 m로 설정하였고, 연결로의 길이는 외곽과 내곽의 연결로를 각각 1,000 m와 600 m로 설정하였다.

대문자 N, S, W, E는 본선의 차량 진행방향을 나타내며, 소문자 n, s, w, e는 연결로의 차량 진행 방향을 뜻하고, 그 예로 NN은 북쪽을 향해 차량이 진행하는 본선을 표시한다. 또한, 본선과 본선을 연결하는 연결로(Ramp)의 명칭은 se, en, nw 등 소문자로 나타내며, se는 남쪽에서 동쪽을 향해 차량이 진행하는 본선을 연결하는 연결로를 나타낸다.

교통량 설정

교통량은 일반적으로 설계교통량을 기준으로 하며 WRA(PIARC)에서 추천하는 교통밀도를 적용하여 구한다. 교통량은 해당 지하도로의 계획 목표 연도 설계교통량을 적용하게 되며, 이때 단순한 차량대수뿐만 아니라 교통류의 차종구성에 대해서도 알아야 한다. 환기량을 산정하는 경우에 최대교

통량의 적용방법이 환기량을 결정하는 주요 인자가 된다. 본고의 지하도로 입체교차로 기류분석을 위한 교통량은 소형차 전용도로를 가정하며, 각 연결로의 교통량은 유사시설의 교통량을 평균값이 본선의 15% 정도이므로 그에 따라 본선교통량의 15%로 설정하며, 본선의 초기 진입교통량은 2,000 pcu/lane.h로 설정한다.

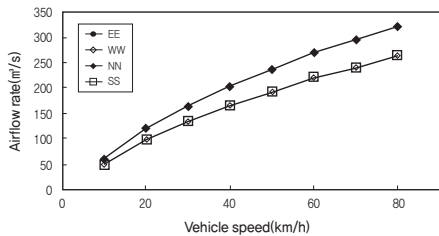
해석결과 및 분석

네트워크 지하도로에 설치되는 입체교차로에 차량 주행 시 발생하는 자연환기량과 CO 농도는 차량 주행속도별로 해석한다. 알고리즘은 도로설계 편람의 도로터널 환기량 산정방법에 따라 하디크로스 알고리즘에 의한 반복계산을 15,000회까지 반복하거나 앞선 결과값과의 차이가 10⁻⁶ 이내이면 계산을 끝내도록 작성되었다.

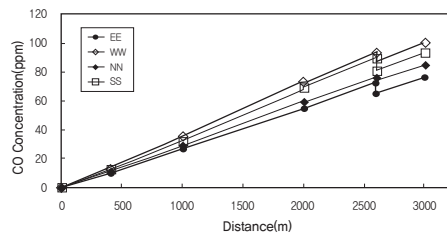
본선의 분석 결과

자연저항풍이 없는 환경에서 연결로가 8개 모두 있는 경우에 대한 기류 분석결과는 다음과 같다. 차량 주행속도 10 km/h부터 80 km/h까지 본선의 풍속을 분석한 결과 그림 4와 같이 차량속도 증가에 따라 자연환기량은 증가하며, 자연환기량 증가 비율은 차량속도가 높아짐에 따라 점차 둔화된다.

본선의 자연환기량과 단면적의 관계는 단면적이 넓은 본선 EE와 본선 NN은 단면적이 좁은 본선 WW와 본선 SS의 자연환기량보다 많다. 차량 주행



〈그림 4〉 Airflow rate in main lines exits as a function of vehicle speed



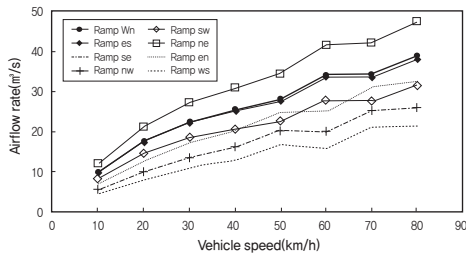
〈그림 5〉 CO concentration distributions in main lines exits as a function of vehicle speed (V = 10 km/h)

속도별 지하도로 본선의 CO 농도는 **그림 5**와 같이 길이 방향으로 선형적으로 증가하며, 단면적이 넓은 본선 EE와 본선 NN의 농도는 단면적이 좁은 본선 WW와 본선 SS의 농도보다 낮다. 그리고 본선 WW와 본선 NN은 도로의 경사도가 +1%이므로 경사도가 -1%인 본선 EE와 본선 SS보다 낮음을 알 수 있다. 아울러 2,600 m 지점의 CO 농도가 수직적으로 낮아지는 이유는 접속된 외곽연결로로부터 상대적으로 농도가 낮은 공기가 인입되기 때문이다. 또한, 외곽연결로의 CO 농도가 낮은 이유는 연결로의 입구가 본선의 입구부와 가까워 신선공기 인입 비율이 높고, 연결로의 연장이 본선보다 상대적으로 짧아 차량으로부터 배출되는 오염물질량이 적기 때문이다.

연결로의 분석 결과

차량 주행속도별 연결로의 자연환기량은 **그림 6**과 같이 차량속도에 따라 증가하며, 그 증가 비율은 차량속도가 높아짐에 따라 점차 둔화된다. 자연환기량 증가 추세는 본선과 유사하나 속도별로 매끄러운 곡선이 이루어지지 않은 이유는 연결로의 길이가 짧으며, 교통량이 적으므로 주행로에 주행하고 있는 차량의 대수가 적기 때문에 차량대수가 소수점에서 정수로 변화되는 과정에서 사사오입되어 계단적으로 변화하기 때문이다.

그리고 연결로별로 자연환기량이 다른 이유는 세 가지가 있다. 첫째 외곽연결로와 내곽연결로의

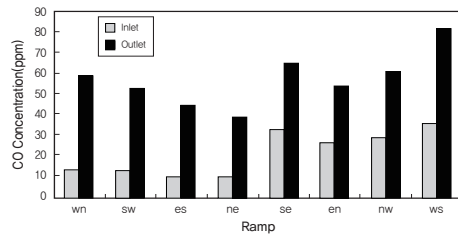


[그림 6] Airflow rate in ramps as function of vehicle speed

길이가 다르므로 길이에 따라 발생하는 교통환기력이 차이가 있으며, 둘째는 본선의 저항은 본선 길이에 비례하는데, 내곽연결로 입출구부에 접속된 본선의 길이가 외곽연결로에 접속된 본선의 연장보다 길어서 본선의 영향을 더 많이 받는다. 이 두 가지 이유로 자연환기량은 외곽연결로가 내곽연결로에 비해 많다. **그림 6**에서 실선은 외곽연결로의 자연환기량이며 점선은 내곽연결로의 자연환기량을 표현하고 있다. 또한, 셋째 요인은 램프의 입구와 출구부에 연결되는 본선 단면적에 따라 영향을 받는다. 따라서 외곽연결로 중에서는 단면적이 넓은 본선 NN에서 분기되어 본선 EE로 진입하는 연결로 ne의 자연환기량이 제일 많고, 단면적이 좁은 본선 SS에서 분기하여 본선 WW로 진입하는 연결로 sw의 자연환기량이 제일 적다. 내곽연결로 중에서는 단면적이 넓은 본선 EE에서 분기되어 본선 NN으로 진입하는 연결로 en의 자연환기량이 제일 많고, 단면적이 좁은 본선 WW에서 분기하여 본선 SS로 진입하는 연결로 ws의 자연환기량이 제일 적다. 또한, 내곽연결로는 접속되는 본선의 길이가 길기 때문에 본선의 단면적에 대한 영향성이 확연히 나타난다.

연결로의 CO 농도는 **그림 7**과 같으며, 외곽연결로 CO 농도는 외기와 가까운 본선의 입구부에 연결되므로 본선 중간부에 연결되는 내곽연결로의 농도보다 낮다.

연결로의 CO 농도는 연결로 자연환기량 증가



[그림 7] Inlet and outlet CO concentration in ramp (V=10 km/h)

에 따라 감소하며, CO 농도가 가장 낮은 연결로는 본선의 입구부에 연결되면서 단면적이 넓은 본선 NN에서 분기되어 본선 EE로 진입하는 외곽연결로 ne이다. CO 농도가 가장 높은 연결로는 본선의 중간부에 연결되면서 단면적이 좁은 본선 WW에서 분기하여 본선 SS로 진입하는 내곽연결로 ws이다. 그러나 외곽연결로 중 wn과 es는 연결되는 본선의 단면적이 넓은 곳과 좁은 곳, 연결하는 형태가 동일하므로 유사한 농도를 보여야 되나, wn의 경사도는 +4.2%, es의 경사도는 -1.2%이므로 연결로 wn이 경사도가 높아 자동차의 오염물질 배출량이 많으므로 CO 농도가 더 높게 나타난다.

전체 입체교차로의 자연환기량은 입체교차로가 기하학적으로 대칭을 이루고 있으므로 그림 8과 같이 단면적이 넓은 상층(upper)과 상층, 단면적이 좁은 하층(lower)과 하층의 경우 각각 거의 동일하며, 연결로의 자연환기량은 입구와 출구에 연결된 본선의 단면적이 넓은 외곽연결로 ne에서 50 m³/s로 가장 크고, 입구와 출구에 연결된 본선의 단면적이 좁은 내곽연결로 ws에서 33.8 m³/s로 가장 작으며, 연결로의 양단에 접속된 본선의 단면

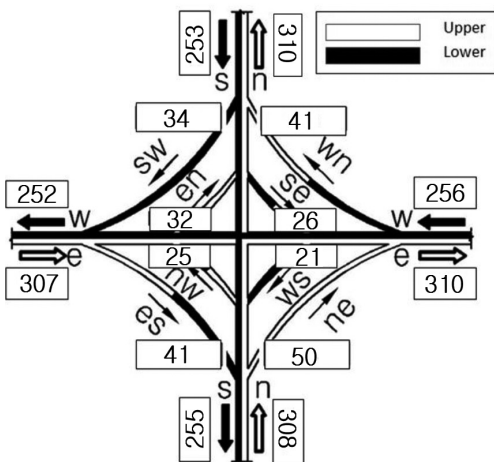
적이 좁은 것과 넓은 것에 각각 접속된 외곽연결로 wn, es에서 40.6 m³/s, 41.4 m³/s, 내곽연결로 se, nw에서 25.9 m³/s, 25.2 m³/s로 거의 유사하다.

결론

본선의 자연환기량은 1차원 터널에서 얻을 수 있는 결과와 동일하게 차량 주행속도가 빨라질수록 증가하며, 단면적이 넓은 본선이 좁은 본선 보다 많다.

지하도로 본선의 CO 농도는 중간에 연결로가 연결되어 있지 않는 한 길이 방향으로 선형적으로 증가하며, 차량이 유출되는 접속부 하류의 CO 농도 기울기는 차량 주행속도가 저속 시에는 증가하고 고속 시에는 감소하였다. 또한, 차량이 유입되는 연결로가 접속된 본선의 CO 농도는 연결로에서 유입되는 CO 농도에 의해서 수직적으로 증가 또는 감소한다. 외곽연결로에서 차량이 유입되는 본선 접속부의 CO 농도는 수직적으로 낮아지는데, 그 이유는 접속된 외곽연결로부터 상대적으로 CO 농도가 낮은 공기가 유입되기 때문이다. 외곽연결로의 CO 농도가 낮은 이유는 연결로의 입구가 본선의 입구부와 가까워 신선공기 인입 비율이 높고, 연결로의 연장이 본선보다 상대적으로 짧아 차량으로부터 배출되는 오염물질량이 적기 때문이다.

연결로의 자연환기량은 연결로의 길이, 지하도로 내의 차량 대수, 차량의 주행속도 상승에 따라 증가하며, 연결로의 입출구 양단에 접속되는 본선의 단면적 넓이는 양쪽이 넓은 경우와 한쪽만 넓은 경우, 양쪽이 좁은 경우 3가지 형태인데, 양단이 넓은 단면적의 본선과 연결되면 자연환기량이 가장 많고 양단이 좁은 단면적의 본선과 연결되면 자연환기량이 가장 적었다. 연결로의 CO 오염농도는 본선과 마찬가지로 자연환기량이 많은 연결로가 낮게 나타났다.



[그림 8] Airflow rate [m³/s] in junction(Vehicle speed = 80 km/h, Natural Wind velocity = 0 m/s)

참고문헌

1. 한도영, 윤진원, 2004, 신경망을 이용한 도로터널 오염물질 동적 모델, 설비공학논문집, 제16권 제9호, pp. 838-845.
2. Kim, N.Y., Cho, J.B., and Kim, J.W., 2010, The ventilation and disaster prevention measure of long tunnel at great depth in urban, 2010 Proceedings of the SAREK Winter Conference, pp. 460-465.
3. Seoul, 2010, Second public hearing of the seoul's underground passage build plans, Second Pubic Hearing of the Seoul.
4. Korea Times, 2009, Seoul Plans Underground Road Network.
5. 도로설계편람, 2011, 소형차 전용 지하도로, 623-2. 국토교통부.
6. Hardy Cross, 1936, Analysis of flow in networks of conduits or conductors, University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin No. 286.
7. 홍석우, 2012, 네트워크형 도심지 지하차도의 환기 시뮬레이션 모델, 대한설비공학회설비, 제41권, 제1호, pp. 12-21.
8. Han, H.T., Han, C.H., 2011, Effect of flow inertia on turbulent ventilation due to pressure fluctuations, Proceedings of SAREK Summer Conference, pp. 850-853.
9. 이호석, 홍기혁, 최창립, 강명구, 임재범, 문홍표, 2012, 네트워크형 지하 도로터널 분기부에서의 환기효율 향상방안에 대한 실험적 연구, 한국터널지하공간학회논문집 제14권 제2호, pp. 107-116.
10. Federal Highway Administration, 1995, The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, US DOT. 