

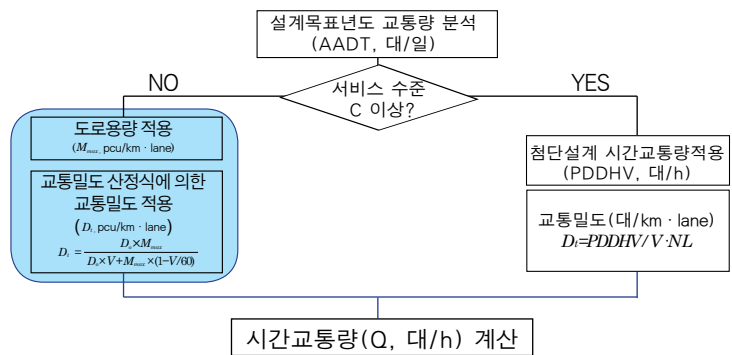
네트워크형 도심지 지하차도의 환기 시뮬레이션 모델

서울시에서 계획 중인 네트워크형 도심지 장대 지하차도의 환기시스템 설계를 위한 시뮬레이션 모델을 소개하고자 한다.

네트워크형 지하차도 환기 시뮬레이션 모델의 요구사항

도심지 도로의 정체가 심화되어 사회비용 증가가 문제되고 있으며, 서울시는 이를 해결하기 위한 방안으로 네트워크형 장대 지하차도 건설을 계획하고 있다. 이른바 U-Smartway 사업은 지하차도를 심도 40 m 이상 위치에 건설하고 지상도로로부터의 진입, 진출을 위하여 램프터널과 지하에 위치한 JCT(Junction, 접속부)를 경유하여 본선터널과 연결하도록 계획 중이다. 이는 단일튜브 방식인 기존 도로터널과 다른 점으로 여러 개의 터널이 네트워크를 구성하게 되므로 기존의 환기설계 조건 및 시뮬레이션 모델에 추가적으로 고려해야 할 여러 요소 중 시뮬레이션 모델과 관련된 몇 가지 이슈에 대해서 논의하고자 한다.

환기시설 계획 시 고려해야 할 가장 기본적인 설계조건은 교통량이며 이는 시뮬레이션 모델의 가장 중요한 요소이기도 하다. 그림 1에서 보는 바와 같이 현행 도로설계편람(2010)에서는 터널의 환기시설 계획



[그림 1] 교통량 적용안

홍석우

(주)에프엔에스이엔지

대표이사

fnseng@naver.com

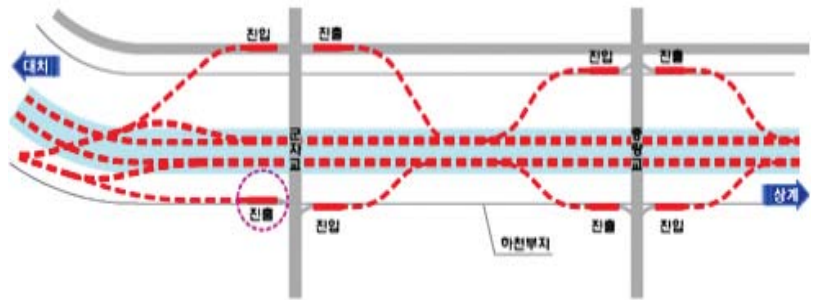
시 도로용량(최대교통량) 기준의 교통량 산정을 권고하고 있으며 서비스수준에 따라서 설계 목표년도의 추정교통량(실제교통량)이 도로용량보다 현저히 적은 경우에 고속도로 터널 60 km/h 이상, 도심지, 일

반국도 터널 40 km/h 이상에 추정교통량을 적용할 수 있도록 제안하고 있다.

특히 도심지 지하차도에서는 지체와 정체가 빈번할 수 있으므로 도로용량 기준의 교통량 산정이 요구되고 있으나 JCT를 경유하여 유입되는 교통량이 분선터널부로 합류하게 되면 도로용량을 초과하는 문제가 발생하여 네트워크형 터널에 기존 교통량 산정법을 그대로 적용하기에 무리가 있다. 따라서 교통량 산정에 관한 수정된 모델을 도입하는 것이 필요하다.

또한, 터널 내 자연풍은 외기와 터널 내 공기의 온도차로 인한 연돌효과(Stack Effect)와 외풍에 의한 풍압으로 인하여 형성된다. 이는 교통관성력과 함께 자연환기력을 결정하는 중요한 인자이며 현행 도로설계편람에서는 이 두 가지 효과를 모두 고려하여 터널구간 내 2.5 m/s의 자연풍이 환기방향의 역으로 작용하는 것을 반영하여 시설계획을 하도록 지침하고 있다. 그러나, 자연풍의 조건이 구간에 따라 변화가 심한 네트워크형 지하차도에 균일한 자연풍 조건을 적용하기에는 무리가 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 그밖에 교통관성력 및 오염물질 발생량 계산에 관한 모델은 현행 설계지침을 그대로 따르는 것이 바람직하다.

그림 2는 서울시가 계획 중인 동부간선도로 지하화 구간 중 일부구간을 나타낸 것으로 대심도에 위치한 분선터널 구간과 지상도로 구간이 다수의 진입, 진출 램프터널로 지하 JCT에서 연결되는 네



[그림 2] 대심도 분선지하차도와 지상도로의 진입, 진출 연결

트위크형 구조를 보이고 있다. 현행 도로설계편람에서 제시한 환기설계 기준 및 해석모델로는 운영 중 실제상황에 대한 모사가 어려우므로 이에 적합한 수정된 해석모델과 시뮬레이션 분석 결과를 예제로 소개한다.

시뮬레이션 수행절차 및 해석모델

환기 시뮬레이션을 진행하기 위해 먼저 과업구간의 설계목표년도 교통량을 조사하여 구간별 교통량 분석을 선행한다. 다음으로 구간별 교통량에 근거하여 차량배출 오염물질과 타이어마모 등 비차량 배출분진을 포함한 오염물질 총 발생량 및 소요환기량을 산정한다. 설계조건에 대한 선행분석으로 시뮬레이션을 위한 입력제원이 준비되면 교통관성력과 자연풍 등 자연환기력에 대한 해석모델을 반영하고 자연환기 및 기계환기에 대한 시뮬레이션을 진행한다. **표 1**은 네트워크형 지하차도의 환기 시뮬레이션 수행절차를 요약한 것이고 앞서 언급한 것처럼 구간별 교통량의 분배가 중요하며 자연풍은 계절에 따른 연돌효과를 시뮬레이션에 의해 모사하도록 일반 도로터널 자연풍 모델과는 다른 방식으로 제안하였다. **표 2**는 도로설계편람의 터널 내 공기 질 기준을 정리한 것이고 오염물질 발생량에 대한 분석과정은 편람에 자세히 수록되어 있으므로 생략하였다. 지하차도의 공기 질 기준에 대해서는 정체 시 터널 구간 내 체류시간 증가

등의 이유로 보다 엄격한 기준이 적용되어야 할 필요가 있음이 제기되고 있으나, 현재 설계기준이 마련되어 있지 않은 관계로 기존 터널 기준을 그대로 적용하였다.

구간별 교통량 산정 모델

네트워크형 지하차도의 구간별 교통량 조사 자료를 활용하여 환기설계에 적용할 교통량을 도로용량 기준으로 반영하되 다음의 세 가지 구속조건을 만족하도록 구간별로 분배한다.

① 구간별 차종구성비율은 설계목표년도의 구간별 년평균일교통량(AADT, 대/일)의 차종별 구성비율을 따른다.

② 모든 구간에서 시간교통량(Q, 대/h) 보존을 만족해야 한다.

③ 모든 구간에서 도로용량(최대교통량) 기준을 초과하지 아니한다.

구속조건 ②를 만족하도록 과업 구간 중 최대

교통밀도 구간을 기준구간으로 선정 후 도로용량을 적용하여 시간교통량(대/h)으로 환산한다. 나머지 구간의 교통량을 년평균일교통량(AADT) 비율로 분배하면 모든 구간에서 시간교통량 보존을 만족한다. 도로용량에 의한 최대교통밀도를 초과하는 구간이 존재하는 경우 기준 구간을 변경하여 구속조건 ③을 만족하도록 한다. 표 3은 JCT에서 시간교통량 보존을 만족해야 함을 표현한 것으로 마치 비압축성 유체의 유량이 보존되어야 함과 흡사하며 시간교통량 Q[대/h]는 다음의 수식으로 산출된다.

$$Q = \frac{\text{교통밀도}(\text{pcu/km lane})}{\text{승용차환산계수}} \times \text{차선수}(\text{lane}) \times \text{주행속도}(\text{km/h}) \quad (1)$$

표 4와 표 5는 도로용량과 교통밀도 산정식을 나타낸 것이고 서울시 동부간선 지하화구간 상세 기본계획에서는 도로용량 2,000[pcu/h lane]와 정체 시 교통밀도 165[pcu/km lane]을 적용하였다.

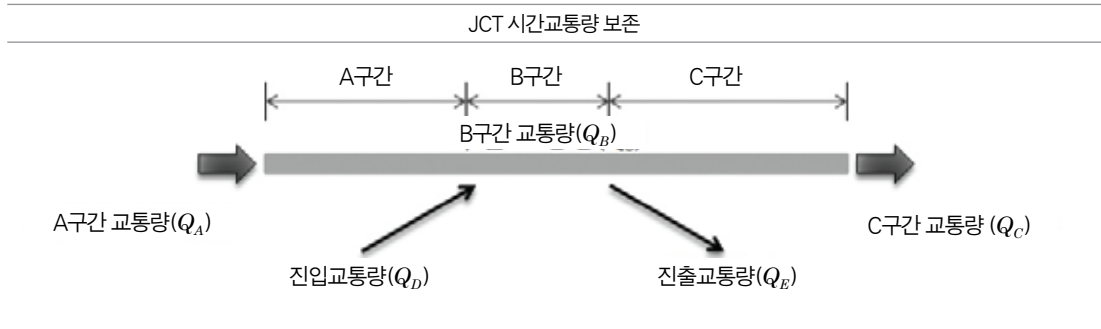
<표 1> 환기시뮬레이션 수행절차

교통량 분석	<ul style="list-style-type: none"> ●설계목표년도 교통량 분석을 통해 구간별 교통량, 차종별 구성비, 승용차 환산계수, 차종별 혼입률 분석 ●도로용량을 초과하지 않도록 구간별 교통량 분배
오염물질 발생량분석	<ul style="list-style-type: none"> ●차종별 매연, CO, NOx 배출량 및 차속별 총배출량 산정 ●환기소관할영역당 총 오염물질 발생량 분석
소요환기량 분석	<ul style="list-style-type: none"> ●오염물질별 소요환기량, 시간당 처리환기 횟수에 의한 소요환기량 산출 ●소요 환기량 중 큰 값을 적용하여 총 소요환기량 결정
시뮬레이션	<ul style="list-style-type: none"> ●본선 및 진출·입 연결로 구간별 교통량을 고려한 시간교통량 보존법칙 적용 ●계절별 Stack effect를 고려한 차속별 자연환기 및 기계환기 가능여부 분석

<표 2> 도로설계편람의 터널 내 공기 질 기준

차속[km/h]	5	10	20	30	40	50	60	70	80
매연[m ⁻¹]	0.009	0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
CO[ppm]	70								
NOx[ppm]	20								

〈표 3〉 JCT 시간교통량 보존



● 구간별 교통량 구속조건 : $Q_A + Q_D = Q_B$ $Q_B - Q_E = Q_C$, [대/h]

〈표 4〉 도로용량(최대교통량, $pcu/h \cdot lane$)

구분	도로용량(최대교통량)		
한국 (고속도로)	설계속도 120 km/h	설계속도 100 km/h	설계속도 80 km/h
	2300	2200	2000
적용			◎

자연풍 모델

자연환기력은 외풍으로 인한 갱구에 작용하는 풍압효과와 터널 내·외부 공기의 밀도 차로 인해 발생하는 연돌효과로 인한 것이며 도로설계편람에서는 이 두가지 효과를 식 (2)와 같이 단순화하여 2.5 m/s의 자연풍속에 상당하는 압력을 터널 내부 주기류 방향의 반대로 작용하도록 양 갱구간 압력차를 계산하여 적용할 것을 권고하고 있다.

$$\Delta P_{MTW} = \left(1 + \zeta_o + f \frac{L}{D}\right) \cdot \frac{1}{2} \rho U_n^2 \quad (2)$$

여기서 ΔP_{MTW} 은 터널 양갱구간 압력차(Pa)로 자연풍에 의한 환기력, ζ_o 는 입구손실계수로 0.06, f 는 터널벽면 마찰손실계수로 0.025, L 은 터널연장(m), D 는 터널내공단면의 대표직경(m), ρ 는 공기 밀도(kg/m^3), 그리고 U_n (m/s)은 터널내부 자연풍속을 나타낸다.

그러나, 네트워크형 지하차도에서는 JCT 주변에서 자연풍의 풍속 및 방향이 급격히 변화하며 대심도에 위치한 본선지하차도와 지상도로 간 고도차가 40~60m에 이르게 되어 연돌효과가 자연풍을 지배하게 된다. 이는 약 15층 정도의 건축물의 높이에 해당하는 고도차로 150m 이상의 고층빌딩보다 작지만 겨울철 연돌효과가 자연풍을 지배하게 될 것으로 예상할 수 있다. 더욱이 터널 내·외부 공기 기동의 무게 차로 발생하는 연돌효과는 계절별 기상조건, 지중온도, 그리고 터널벽면의 열관류율 등을 고려하면 시뮬레이션으로 직접 모사가 가능한 부분이므로 네트워크형 지하차도의 환기계

〈표 5〉 교통밀도 산정식

$D_t = \frac{D_o \times M_{max}}{[D_o \times V + M_{max} \times (1 - V/60)^2]}$	D_t : 교통밀도[$pcu/km \cdot lane$] D_o : 정체시교통량 (속도 $V=0km/h$ 에서 국도/고속도로터널 : 150 $pcu/km \cdot lane$ 도심지터널 : 165 $pcu/km \cdot lane$) M_{max} : 승용차 대수표시 최대가능교통량 또는 도로용량[$pcu/h \cdot lane$] V : 주행속도[km/h]
---	--

● 교통밀도 산정시 정체시교통량은 도심지 터널 165 $pcu/km \cdot lane$ 로 적용

획 시 시뮬레이션의 해석조건으로 연돌효과를 모사하도록 지침하는 것이 바람직하다. 또한, 외풍에 의해 갱구부에 작용하는 풍압효과는 기상자료의 통계치를 활용하면 계절에 따른 평균적인 풍압효과를 가정할 수 있으나 다수의 램프터널로 연결되는 네트워크형 구조에서는 적용이 용이하지 않다. 특히 도심지 장대 지하차도인 경우 횡류식 환기시설 계획이 일반적이므로 외풍의 영향을 비교적 받지 않는다 할 수 있으므로 외풍에 의한 풍압효과는 생략할 수 있을 것이다.

연돌효과의 모사를 위한 모델은 두 가지 방식이 있으며 터널 내·외부의 공기 밀도의 차를 이용하여 부력항을 운동량 방정식에 추가하여 모사하는 방법이 있으나 일반 건축물과 같이 공기의 진·출입 경로가 다수 존재하는 경우에는 이러한 방식으로 연돌효과를 모사하기 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 램프터널이 다수 존재하는 도심지 장대 지하차도에서는 건축물의 연돌효과를 모사하는 모델과 같은 방식을 도입하는 것이 바람직하다. 즉, 외부 공기기둥의 무게와 실내 공기기둥의 무게를 운동량 방정식의 중력항으로 표현하고 고도차에 의한 공기의 압력 변화를 고려하여야 정확한 모사가 가능하다.

갱구부의 고도차와 기상조건에 의한 공기의 밀도, 압력 등 물성치 변화를 계산하는 방법은 물리량 보존법칙을 따라야하므로 주의를 기울여야 한다. 먼저 외부공기를 포함한 해석영역 내 총엔탈피는 유선(Streamline)을 따라 항상 보존 되어야 하므로 갱구부의 고도와 기상조건에 의한 외부자연풍의 풍속을 고려하면 식 (3)의 총엔탈피 정의로부터 엔탈피를 구할 수 있다. 여기서 p, ρ, h 는 압력, 밀도, 엔탈피 이고 p_o, ρ_o, h_o 는 해당 유체가 등엔트로피 조건으로 정체조건에 도달했을 때의 운동에너지와 위치에너지가 물성치에 추가되는 것을 고려한 정체조건 물성치(Stagnation Property)을 나타낸다.

$$h_o = h + \frac{1}{2} v^2 + gH \quad (3)$$

엔탈피와 총엔탈피는 $h = C_p T$ 와 $h_o = C_p T_o$ 을 만족하므로 갱구부의 경계조건인 압력과 온도 (p_o, T_o)로부터 h_o 와 h 를 얻을 수 있다. 또한 식 (4)의 등엔트로피 관계식과 식 (5)의 이상기체 상태방정식을 이용하면 물성치 p, ρ 를 구할 수 있으므로 결과적으로 고도차와 기상조건으로부터 갱구부의 공기 물성치를 물리량 보존법칙과 관계식을 따르도록 계산할 수 있음을 알 수 있다.

$$\frac{p_o}{p} = \left(\frac{h_o}{h} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad \frac{\rho_o}{\rho} = \left(\frac{h_o}{h} \right)^{1/(\gamma-1)} \quad (4)$$

$$p = \frac{(\gamma-1)}{\gamma} \rho h \quad (5)$$

교통관성력 모델

교통관성력 모델은 도로설계편람에 제시된 식 (6)으로 표현되며 시뮬레이션 지배방정식의 모멘텀 소스(Momentum Source) 형태로 구현이 용이하다. 네트워크형 터널에서는 구간 별 교통량의 분배와 차량의 주행경로에 따라 차등 적용될 것이다.

$$\Delta P_t = \frac{A_m}{A_r} \cdot n \cdot \frac{1}{2} \rho (V_t - U_r) |V_t - U_r| \quad (6)$$

$$A_m = 0.64 + \frac{8.84}{A_r} + \left(3.97 + \frac{107}{A_r} \right) \times \gamma_L \quad (7)$$

여기서 A_m 은 차량의 등가저항 면적, A_r 은 터널 내공단면적, n 은 차량수, V_t 는 차량주행속도, U_r 은 터널 내 기류속도, 그리고 γ_L 은 대형차 혼입률을 나타낸다. 차량의 등가저항 면적 계산식은 일본에서 연구된 결과(일본고속도로주식회사, 2006)를 반영

한 것이다.

몇 가지 중요한 시물레이션 해석모델의 이슈를 소개하였고, 마지막으로 동부간선도로 지하화1구간 상세기본계획안에 대한 시물레이션 예제를 소개하고자 한다.

시물레이션 예제

대심도 지하차도 제원 및 교통량 분석

그림 3은 동부간선도로 지하화구간 중 일부구간에 대한 본선과 램프터널의 개요를 표현한 것이고 1구간 본선연장 10 km 이상, 램프터널 연장 총 7 km 이상의 장대터널로 구성되어 있으며 본선연장은 강남으로 연결된 2구간을 포함하면 17 km에 이른다. 구간별 교통량과 소요환기량 분석에는 표 6과 7에 정리하였으며 해당 터널은 소형차전용으로 계획 중이고 대표단면은 표 8에 나타내었다. 소요환기량 분석은 도로설계편람의 설계지침을 따라 계산한 것으로 기계환기 시물레이션의 해석조건으로 반영하였다.

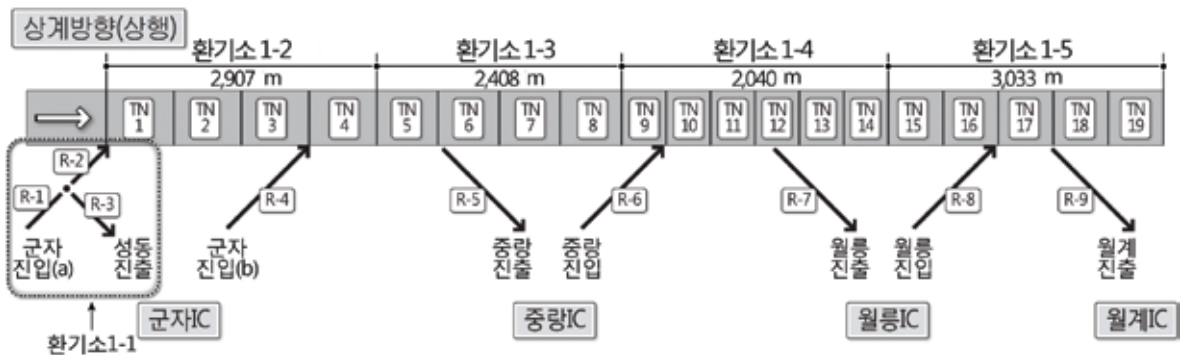
시물레이션 결과

그림 4는 교통관성력을 배제한 상태에서 연돌효과에 의한 자연풍을 예측해 본 것이다. 앞서 예상한 대로 겨울철 연돌효과에 의한 자연풍이 가장 크

며 JCT 전·후로 자연풍의 방향 및 크기가 급격히 변화하는 경향을 나타내고 있다. 반면 여름철은 터널 내·외부 공기의 무게차가 작아져서 연돌효과도 저감되고 있으며 겨울철과 자연풍의 방향이 대체적으로 상반된 경향을 보이게 되지만 구간에 따라서는 같은 방향의 흐름을 보이기도 한다. 램프터널 구간은 계절별 자연풍은 그림 5로 표현하였다.

그림 6, 7은 계절에 따른 연돌효과와 차량운행에 따른 교통관성력, 그리고 오염물질 발생량을 모두 반영하여 자연환기 시물레이션을 실시한 결과를 보여주고 있다. 소형차전용 도로터널에서는 오염물질 중 CO농도가 가장 문제가 되는데 5~10 km/h 주행시 자연환기로는 터널 내 공기 질 기준을 만족할 수 없음을 보여준다. 20 km/h 이상 주행시는 자연환기로 공기 질 기준을 만족하는 것으로 예측하였다.

저속주행시(5~10 km/h) 횡류식 환기시설을 가동한 결과는 그림 8에 표현하였으며 터널 내 공기 질 기준을 여유있게 만족하게 되었다. 시물레이션에 사용한 환기량은 표 7에 언급한 바와 같이 공기치환 3회 기준을 반영하였으므로 예측결과는 공기치환 3회 기준의 환기량으로 소형차전용 도심지 지하차도 내 공기 질 기준을 만족할 수 있음을 보여주는 사례이다.



[그림 3] 지하차도와 램프터널 개요

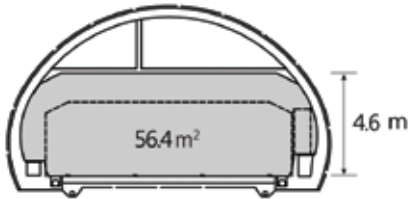
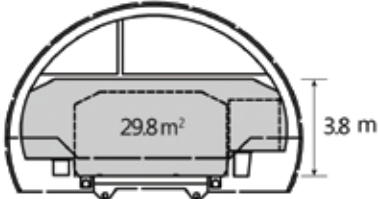
〈표 6〉 구간별 교통량 분석 예

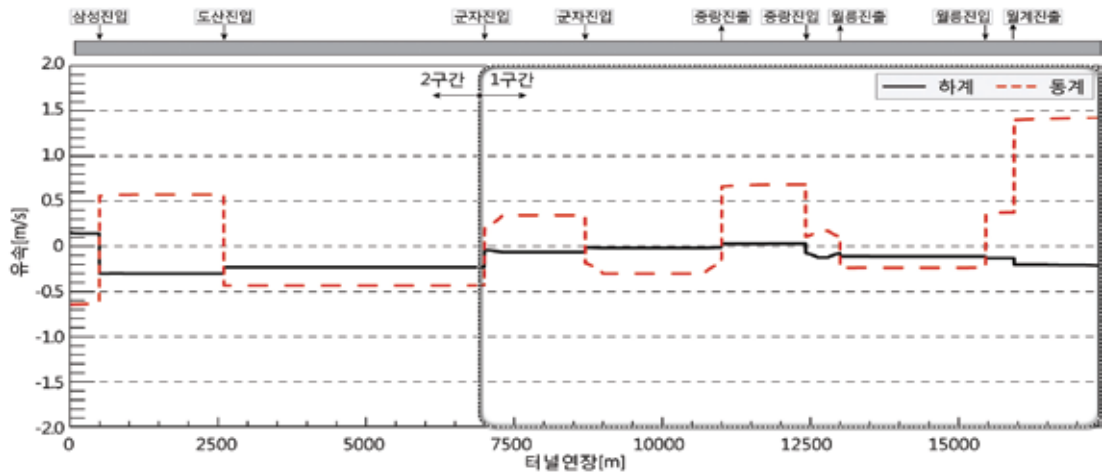
구분			승용차		소형버스	소형트럭	계
			휘발유	경유			
환기소 1-1	군자진입(a)	Ramp-1	16,827	11,217	1,527	4,118	33,689
		Ramp-2	7,880	5,253	715	1,928	15,776
	성동진출	Ramp-3	8,947	5,964	812	2,190	17,913
환기소 1-2	TN-1		31,782	21,187	2,884	7,778	63,631
	TN-2		31,782	21,187	2,884	7,778	63,631
	TN-3		37,165	24,776	3,372	9,095	74,409
	TN-4		37,165	24,776	3,372	9,095	74,409
	군자진입(b)	Ramp-4	5,383	3,589	488	1,317	10,778

〈표 7〉 구간별 소요환기량 산정 예

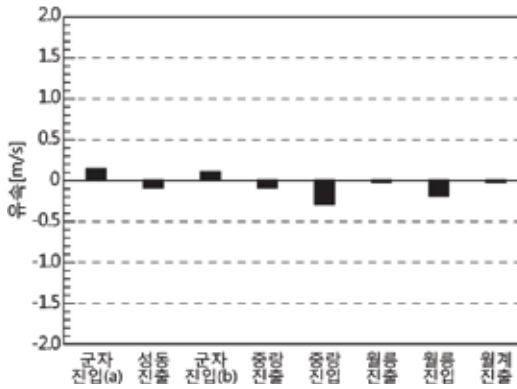
구분			소요환기량				최대 소요 환기량	총 소요 환기량
			오염물질			공기치환 3회		
			매연	CO	NOx			
환기소 1-1	군자진입(a)	Ramp-1	19.6	23.9	2.3	42.5	42.5	77.6
		Ramp-2	1.7	2.0	0.2	7.8	7.8	
	성동진출	Ramp-3	10.6	14.5	4.1	27.3	27.3	
환기소 1-2	TN-1		8.8	10.1	2.3	23.1	23.1	176.4
	TN-2		41.3	47.1	11.0	65.8	65.8	
	TN-3		10.3	11.8	2.7	23.1	23.1	
	TN-4		31.3	35.8	8.3	42.6	42.6	
	군자진입(b)	Ramp-4	4.0	4.9	0.3	21.8	21.8	

〈표 8〉 대표단면 개요

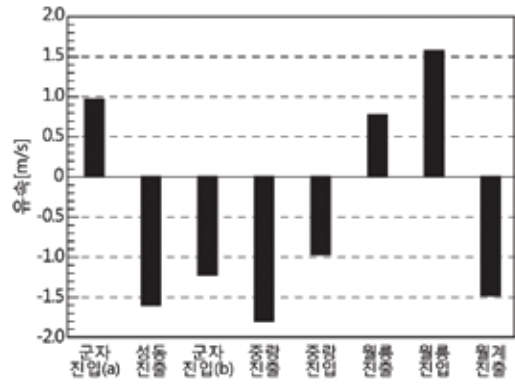
구분	본선	진출 · 입 연결로
대표 단면		
	단면적: 56.4 m ² , 천장고: 4.6 m	단면적: 29.8 m ² , 천장고: 3.8 m



[그림 4] 지하철도 구간의 계절별 자연풍 분석

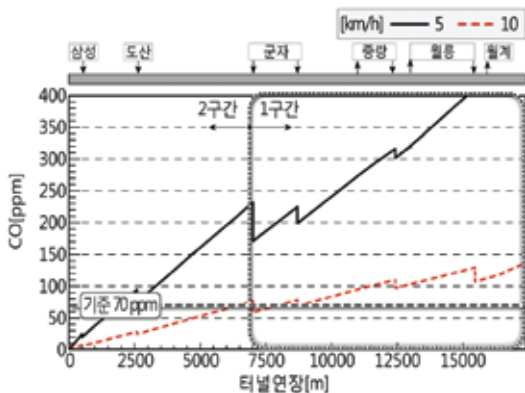


a) 하계 자연풍

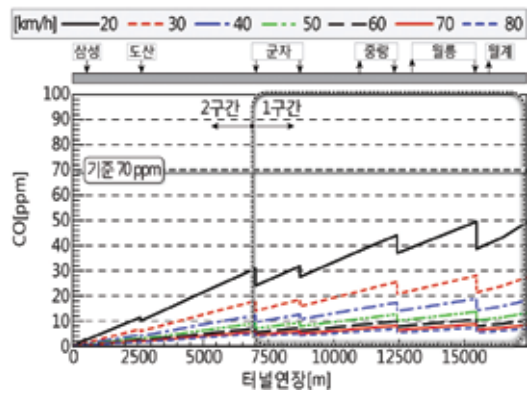


b) 동계 자연풍

[그림 5] 램프터널 구간의 계절별 자연풍 분석

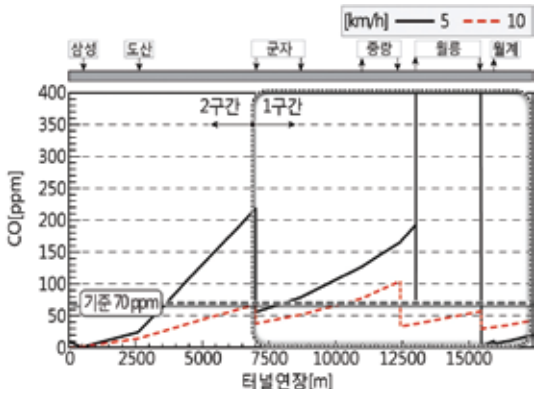


a) 5~10km/h 주행시

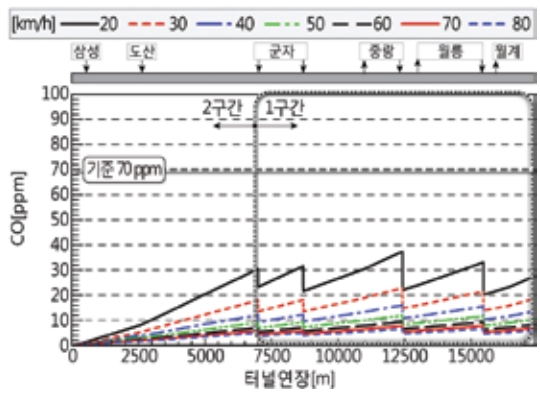


b) 20~80 km/h 주행시

[그림 6] 하계 자연환기 시뮬레이션

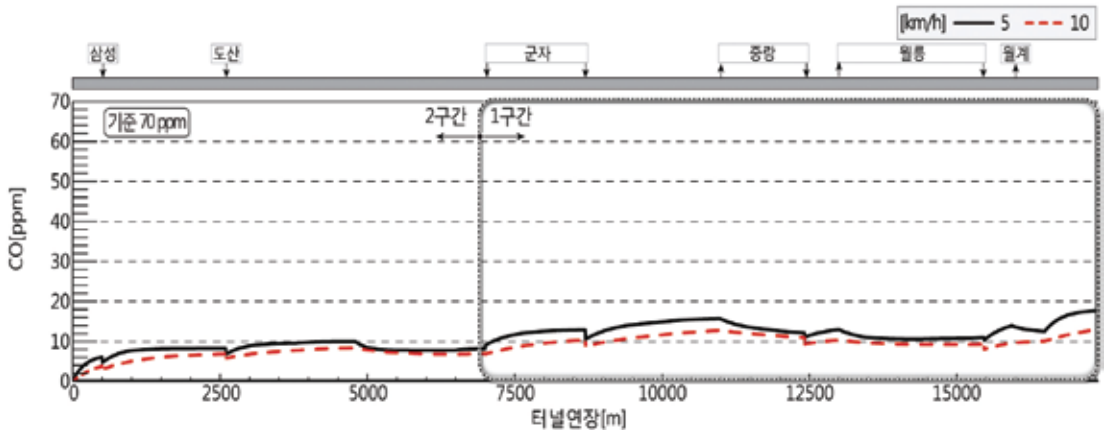


a) 5~10 km/h 주행시

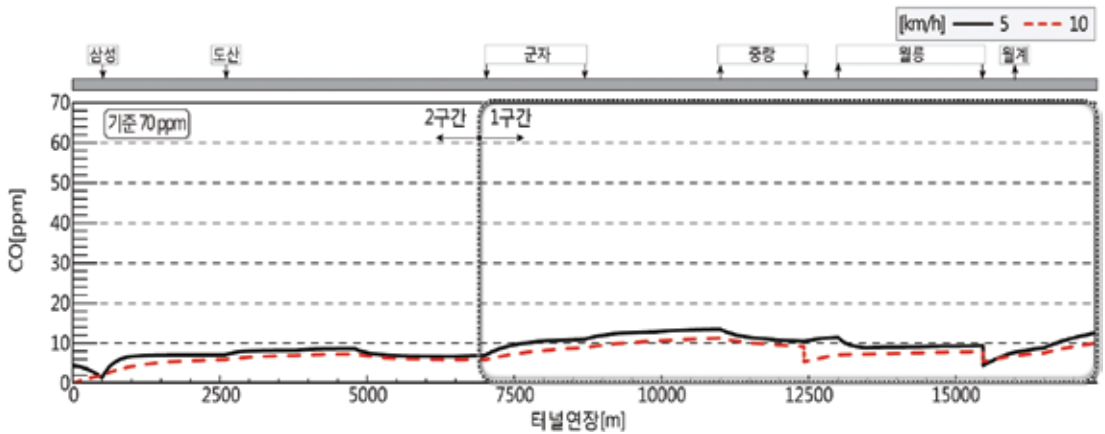


b) 20~80 km/h 주행시

[그림 7] 동계 자연환기 시뮬레이션



a) 하계 기계환기



b) 동계 기계환기

[그림 8] 기계환기 시뮬레이션

결론

다수의 터널이 JCT로 연결되어 상호작용하는 네트워크형 지하차도에서는 공기 질 기준, 환기용량 산정에 사용할 교통량 분배 방식, 자연풍 조건 등 설계지침을 일부 보완하여 적용할 필요가 있으며 수치해석 모델 역시 설계지침의 수정 및 보완에 따라야 할 것이다. 본 글에서는 네트워크형 지하차도의 환기시뮬레이션에 적합한 수정된 해석모델을

제안하였으며 설계지침이 마련되기 전까지 대안이 될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 네트워크형 터널에서는 수계산에 의한 환기용량 산정이 정확성을 기대하기 어려우므로 환기시설 계획에 있어 시뮬레이션을 활용하여야함이 매우 중요하다. 마지막으로 시뮬레이션 예제를 통한 분석 결과는 소형 차전용 도심지 지하차도의 경우 횡류식 환기방식으로 공기치환 3회 기준의 환기량을 계획하면 충분할 수 있음을 보여주었다. 