

둔내터널 환기방식 및 환경측정결과

서 중 원 | 신광대학 환경과학계열 교수

E-Mail : sjw8304@shc.ac.kr

유 지 오 | 신광대학 건축설비과 교수

E-Mail : lollew@shc.ac.kr

1. 서론

도로터널에서는 운행하는 차량에서 발생하는 오염물질을 희석·배기 하거나 희석·제거하여 터널내 환경허용기준을 만족하기 위한 환기시설이 설치된다. 환기시설의 용량계산에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 차종별 주행속도별 오염물질 배출량이며, 현재는 대기환경보전법의 제작차배출허용기준에 제시된 오염물질별 배출량을 근거로 하여 환기설계에 필요한 기준배출량을 산정하여 이를 적용하고 있다.

그러나 현재 도로터널의 운영 경험에 의하면 제작차배출허용기준을 적용하여 예상되는 오염농도와 실제 터널에 설치된 계측기에 의해서 측정되는 오염농도가 상당한 차이가 발생하는 것으로 나타나고 있으며, 이에 따라 환기기 운영실적 또한 예상치와 상당한 차이를 보이고 있다.

따라서 현재 터널 환기시스템 설계에 적용하는 기준배출량의 적정성을 판단하기 위한 실측 및 측정 데이터의 분석이 요구되고 있으나, 도로터널에서의 실측 및 분석결과에 대한 연구는 극히 미약한 실정이며, 소수의 논문은 터널에 설치된 환경측정장비(VICO)에 의한 CO농도 및 가시거리의 척도인 소광계수를 측정하는 VI계의 계측값을 활용하는 연구와 터널 주변의 환경오염 실태 파악을 위한 연

구에 국한되어 있어 도로터널의 환기설계를 위한 기준 배출량에 대한 평가나 설계를 위한 기초 데이터로 활용가치가 부족한 실정이다. 그리고 터널내 오염물질의 농도는 단위 시간동안에 통과하는 터널내 차량수에 의존하기 때문에 터널을 통과하는 차량에 의해 배출되는 오염물질을 평가하고 기준배출량의 적정성 여부를 평가하는데 많은 어려움이 있다.

따라서 터널현장의 환경측정을 실시하여 터널별 환기량 산정 및 환기기 운영평가를 위한 실제 측정 자료를 통한 기초자료의 구축이 필요하며 이를 활용하여 현재의 기준배출량과 실제 배출량과의 편차를 파악함으로써 환기기 운전을 위한 데이터의 표준화가 절실히 필요한 실정이다.

본 고에서는 둔내 터널에서의 공기오염농도 현황을 파악하기 위해 2002년 8월에 측정된 환경측정자료를 소개하고 이를 통해서 도출된 설계인자를 제시하며 도로터널환기설계를 위한 기초자료의 확보의 중요성을 강조하고자 한다.

2. 둔내 터널제원

둔내 터널은 영동고속도로상에 연장이 3300 m에 달하는 장대터널로 하향구배인 하행선은 젯트팬 방식, 상향구배인 상행선은 젯트팬+수직갱방식을 적용하고 있다. 터널제원 및 교통량은 표 1~3과 같다.

표 1. 둔내터널제원

구 분	터널연장 (m)	구배 (%)	단면적 (m ²)	접수길이 (m)	대표직경 (m)	표고 (m)	차선수
상 행	3300 m	1.507	65.51	31.79	8.24	682.18	2
하 행	-	-1.507	-	-	-	-	-

표 2. 둔내터널의 차종별 일교통량(AADT)

차 종		승용차	버 스		트 렉			
			소 형	대 형	소 형	중 형	대 형	특 수
덧 수		30935	2381	3283	2593	8374	3190	1720
환산덧수	도로공사기준	1.0	1.3	1.3	1.5	1.5	1.5	1.5
	실제적용	1.0	1.0	2.5	1.0	1.5	2.5	2.5

표 3. 둔내터널 환기용량

방 향	젯트팬	수 직 갱	
		송 기 팬	배 기 팬
상 행	덧수 : 32대 ϕ 1030mm 동력 : 30 kW/대 설치간격 : 206 m	풍량 : 330×2 CMS 동력 : 880×2 kW 송기구 위치 : 1650 m(입구기준)	풍량 : 330×2 CMS 동력 : 720×2 kW 배기구 위치 : 1970 m(입구기준)
하 행	덧수 : 26대 ϕ 1030mm 동력 : 30 kW/대, 설치간격 : 254 m		

3. 둔내터널의 환경측정

둔내 터널에는 현재 환기기의 자동제어 및 환경 감시를 목적으로 가시거리와 CO농도를 측정하기 위한 VICO계(SICK co, VI : 0~16×10⁻³ 1/m, C

O : 0~300 ppm)가 그림 1에 나타난 바와 같이 상하행 각 약 450m 간격으로 8개 지점에 설치되어 있다. 본 고에 소개하고자 하는 터널현장의 공기질 측정 및 분석을 위한 현장측정에서는 TSP, PM₁₀, NO_x(NO₂ + NO), CO농도에 대한 측정을 수행하

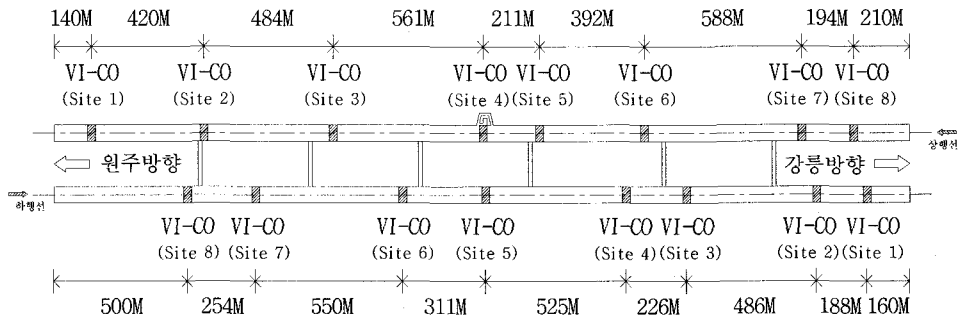


그림 1. 둔내터널 VI-CO 계측기와 측정 Site별 위치

였으며, 이 측정자료를 분석하여 자동제어 목적으로 설치되어 있는 계측기(VI)의 K값 및 CO농도를 비교하였으며, 모니터링한 자료를 통해 교통량모델의 작성을 위한 차종구성비 및 차량속도에 따른 교통량을 분석하였다.

현장측정 방법은 하행선 터널 출구로부터 VI 및 CO계측기가 첫 번째 설치되어있는 450m 지점을 Site 1으로 하고 두 번째 설치지점을 Site 2, 입구쪽 최종 설치지점을 Site 8로 구분하였으며 상행선의 경우도 동일한 방법으로 Site를 결정하였다.

표 4. 측정항목별 측정원리

측정항목	측정원리
NO _x	화학발광법(Chemiluminescent method)
CO	정전위전해법(Constantic potential electrolysis method)
TSP	β선 흡수법(β-ray absorption method)
PM10	광산란법(Light scattering method)
교통량 및 차량속도	터널내 계측기 데이터

각 Site에서는 VI 및 CO계측기의 LCP 모니터 값을 1분 단위로 30분간 기록하였고 같은 방법으로 휴대용 간이 측정장비를 사용하여 CO 및 분진농도를 측정하였다. 또한 Site 1위치에 대기환경 측정장비를 설치하여 NO_x, CO, TSP, PM₁₀을 24시간 연속으로 측정하였다. 둔내터널 현장조사 및 측정항목, 측정기기, Site별 위치는 그림 1과 같다. 표 4에 현장 측정에 사용한 각종 계측기의 제원을 나타냈다.

4. 환경측정 결과

영동고속도로 둔내터널의 오염물질의 농도를 분석하기 위하여 2002년 8월 23일(금요일)부터 8월 25일(일요일)까지 터널내 농도가 가장 높을 것으로 예상되는 Site 1에서 NO_x(NO, NO₂), PM₁₀, CO농도를 24시간동안 오염물질별로 1분에서 5분 단위로 연속측정하였으며, 각 Site의 CO농도(1분 간격)와 PM10농도(5분 간격)를 간이측정장비를 사용하여 30분간 측정하였다.

4.1 CO의 농도변화

그림 2는 둔내터널 상행선의 Site 1에서 연속측정된 CO농도분포로 24일 오전 6시부터 저녁 10시까지 IAQ측정기로 연속 측정된 CO의 측정값과 동

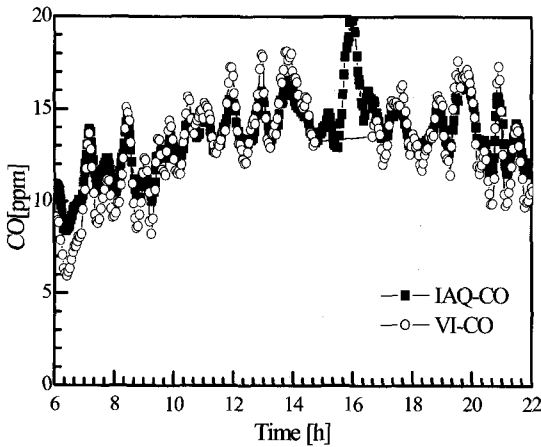


그림 2. VI-CO와 IAQ-CO의 농도비교

일지점에 설치된 VICO 계측기의 측정값을 비교하여 나타낸 것이다.

측정시간동안 IAQ 계측기에 의해서 측정된 농도와 터널에 설치된 VICO 계측기에 의해서 측정된 농도가 거의 비슷한 농도변화를 나타내고 있음을 알 수 있다.

본 측정은 차량이 비교적 많은 토요일에 측정된 결과로 오후 4시 정도에 최대값을 나타내고 있으며, 최대 농도는 20 ppm을 초과하지 않는 것으로 나타나고 있다. 또한 차량이 적어 공기의 상태가 아주 좋을 것으로 판단되는 새벽시간대의 농도는 5 ppm에서 8 ppm 정도로 나타나고 있어 터널내 CO농도는 허용농도인 100 ppm보다는 상당히 낮은 것을 알 수 있다.

그림 3은 Site별 IAQ계측기에 의해서 측정된 CO농도와 터널에 설치된 VICO계측기에서 측정된 CO농도를 site구분 없이 나타낸 것으로 23일 오후 3시부터 4시간동안 측정된 결과이다. 출구 쪽 Site 1에서 입구 쪽 Site 8까지의 CO농도 측정값은 전체 평균농도가 8.1ppm으로 실내공기질 허용농도 10ppm보다 작은 값으로 양호한편이나 출구방향

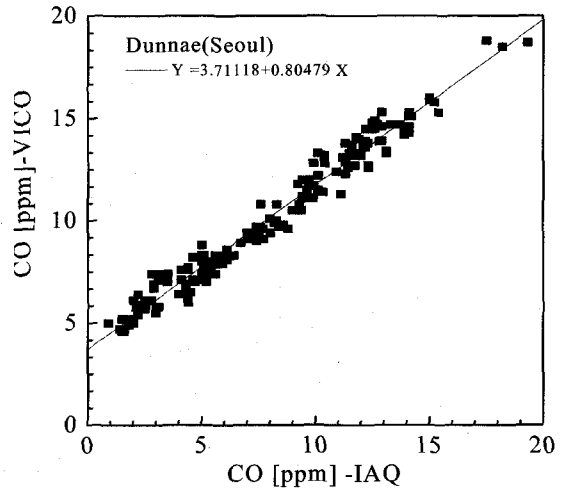


그림 3. 계측기와 IAQ에 의한 CO 농도비교 (상행선)

Site 1~Site 3은 13.0~11.7ppm으로 실내공기질 기준값 보다 조금 높게 나타났다. 또한 터널에 설치된 VI-CO 계측기의 평균농도는 10.7ppm으로 나타나 IAQ계측기로 측정된 값보다 전반적으로 30% 정도 높은 값을 나타내고 있다.

IAQ에 의한 측정 값과 터널내 설치된 VICO의 측정값은 농도가 낮은 5 ppm범위에서는 터널내 계측기가 IAQ계측기의 측정값보다 높게 나타나고 있으나 10 ppm이상에서는 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4.2 NOx(NO₂+NO)의 농도변화

그림 4는 둔내터널 상행선에서 측정된 NOx(NO₂+NO)의 농도변화를 나타낸 것으로 상행선 터널내 NOx의 측정은 출구 쪽으로부터 200 m지점인 Site 1에서 23일 오후 3시부터 25일 오후 5시까지 3일간 연속측정 하였다.

24시간 평균 NOx농도는 1617ppb로 나타났으며 오전 10시부터 오후 4시까지는 일중 최고농도인

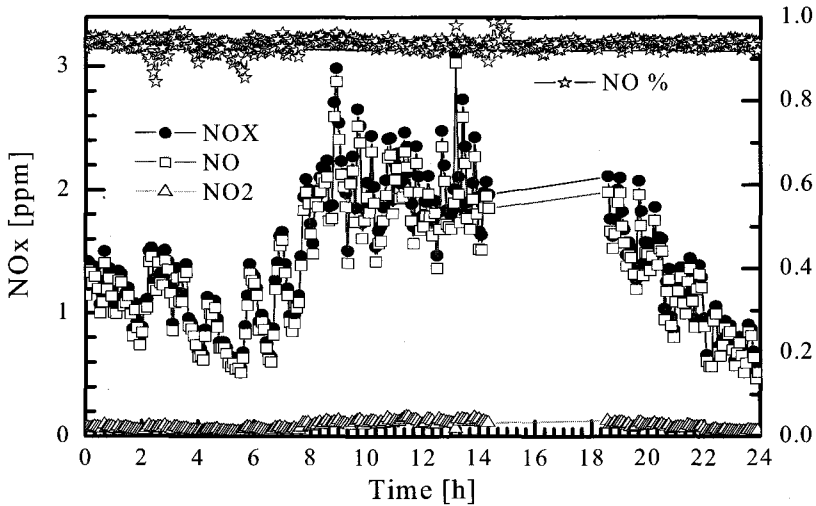


그림 4. 둔내터널(상행선)의 NOx 농도변화

2000~2700ppb로 측정되었고 새벽과 밤사이에는 600~1400ppb로 나타나고 있다. 이러한 측정값은 현재 도로터널의 환기설계기준인 25 ppm보다는 상당히 작은 농도이며, 우리나라 환경부의 실내공기질 권장기준 150ppb보다 매우 높은 수치이나 미국의 산업안전 허용기준값 3000 ppb를 초과하지는 않는 농도이다.

표 5는 특성이 서로 다른 여러지점에서 NO₂와 NO의 분율을 나타낸 것으로 표에서 알 수 있는 바와 같이 신선공기에 의한 산화 반응이 비교적 쉬울

것으로 판단되는 도로상에서의 NO₂분율이 터널이나 지하주차장에서의 분율보다 높은 것으로 나타나고 있다. 도로터널인 둔내 터널의 경우 NO₂분율은 94%로 매우 높게 분석되었다. 이와 같은 결과는 대기중에서는 자동차 배기가스에서 배출되는 NO는 공기 중에서는 O₂와 직접 반응하여 대부분 NO₂로 변환되어 NO₂의 분율이 높아지게 되나, 터널을 포함한 지하공간에서는 NO가 차지하는 분율이 상대적으로 높아지는 역전 현상이 발생하는 것으로 분석되었다.

이상의 결과에서 현재 도로터널의 환기설계를 위

표 5. 유형별 NO 및 NO₂의 분포비율

구 분	고속도로터널	전라선기차터널	지하버스터미널	일반도로주변
	둔내터널	슬치터널	경기분당터미널	서울 도봉동
NO _x 평균농도	1617 ppb	2194 ppb	1079 ppb	71 ppb
NO분율	94.1 %	95.7 %	73.1 %	23.2 %
NO ₂ 분율	5.9 %	4.3 %	26.9 %	76.8 %

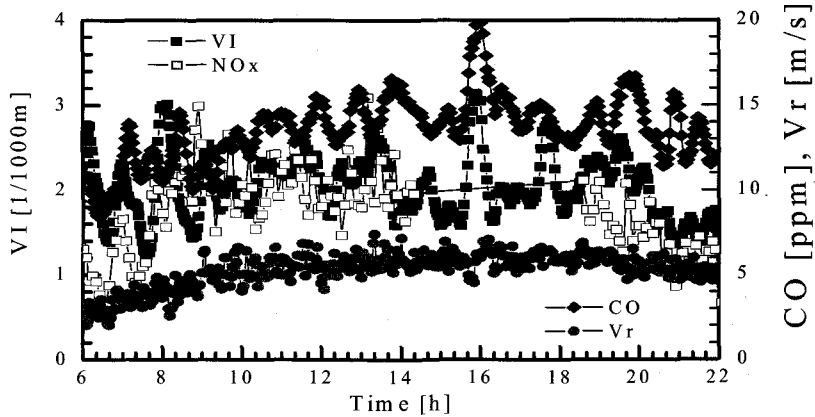


그림 5. 둔내터널 오염물질의 농도변화

한 기준배출량 산정시 NO₂ : NO의 비는 75%를 적용하고 있으나 이 값은 실측결과와는 상당한 차이를 보이는 것으로 보다 신뢰성있는 환기설비 설계를 위해서 이에 대한 보다 광범위한 측정 및 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4.3 분진의 농도와 소광계수

그림 5는 둔내 터널 상행선에서 터널내 설치된 계측기의 오염물질별 농도변화 및 터널 풍속을 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있는 바와 같이 CO,

NO_x, 소광계수(K)가 거의 동일한 경향을 가지고 변함을 알 수 있다.

이중에 분진농도에 영향을 받는 소광계수는 최소 1.4에서 최대 3.2×10^{-3} 1/m의 범위의 값을 보이고 있는 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 값은 현재 도로터널의 소광계수에 대한 설계기준인 0.006보다 작은 값으로 소광계수 또한 현재 설계기준보다 상당히 낮은 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 Site별 분진농도를 입경별로 나타낸 것으로 23일 오후 3시부터 VICO 계측기가 설치되어

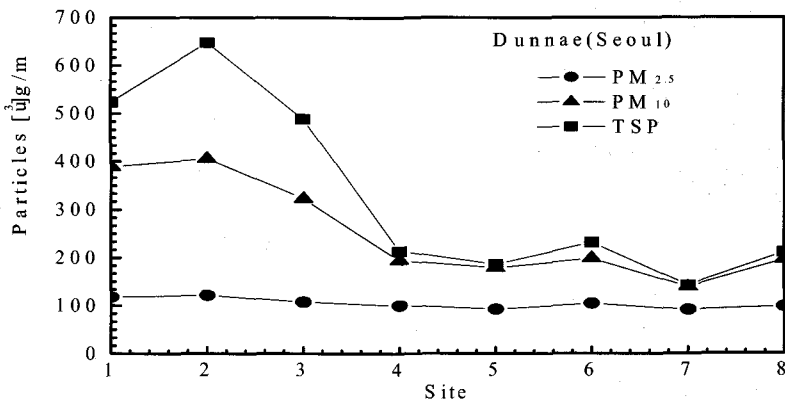


그림 6. 둔내터널의 분진크기별 농도변화 비교

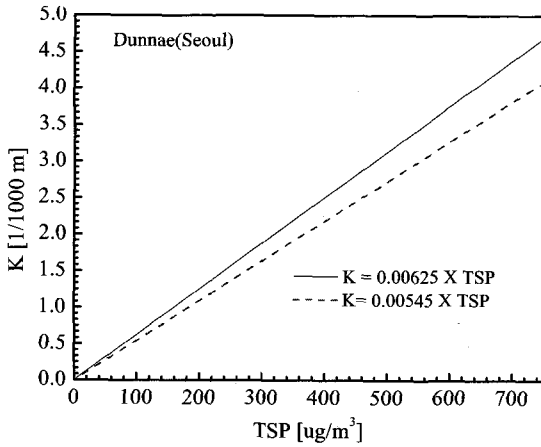


그림 7. 분진농도와 소광계수(K) 비교(상행선)

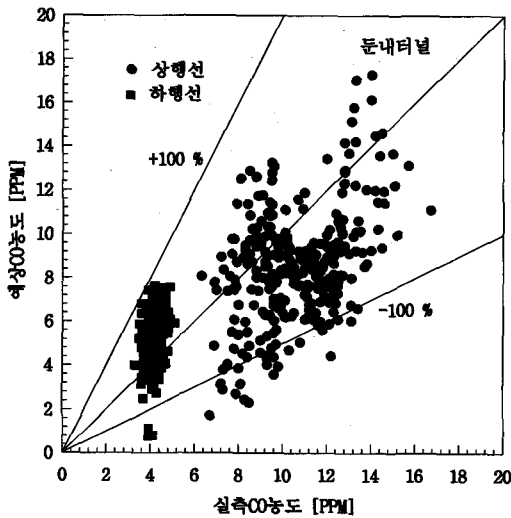
있는 위치에서 측정하였다. 측정기간동안 TSP의 평균농도는 $200 \sim 650 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었으며 전체 분진(TSP)에 대하여 초미세분진인 $\text{PM}_{2.5}$ 의 분포도는 22.5%를 차지하는 것으로 나타났고 자동차

연료 연소시 발생되는 분진크기인 $\text{PM}_{2.5} \sim \text{PM}_{10}$ 의 분포는 전체의 51.8%, 도로의 마모 및 차량 적재물에서 발생하는 분진의 크기인 $\text{PM}_{10} \sim \text{TSP}$ 의 분포는 25.7%로 분석되었다.

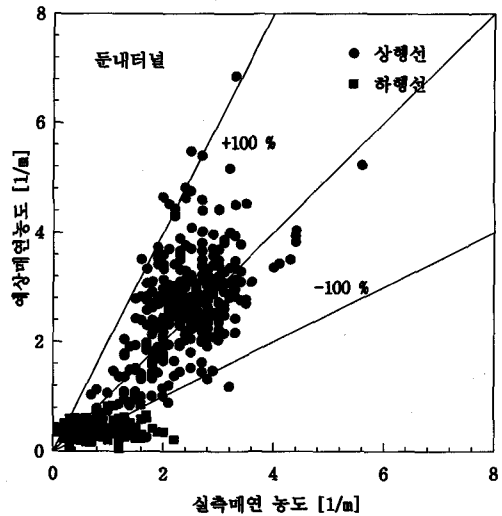
또한 그림 7은 둔내터널 상행선에서 24시간 연속으로 측정된 분진농도와 소광계수 K를 비교 분석한 것으로 K값과 분진농도(TSP)의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 관계식은 $K=0.00545 \times \text{TSP}$ 로 변환계수가 $0.00545 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 로 분석되었다, 이는 MIRA에 의해서 제안된 $0.00625 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 에 근접한 것으로 나타났다.

4.4 둔내터널의 예상농도와 실측농도비교

그림 8은 둔내터널에서 2000년 6월 5일부터 6월 30까지의 터널계측기에 의한 계측된 계측데이터를 분석하여 예상되는 농도와 실제 측정된 농도를 비교하여 나타낸 것으로 그림에 나타낸 것은 2000년



(a) CO농도비교



(b) 매연농도비교

그림 8. 실측농도와 예상농도의 비교(둔내터널)

6월 5일부터 일주간의 데이터를 분석한 결과이다. 터널내 교통량은 평일에는 최대 1000대/h정도이며 토요일(6월 9일)과 일요일(6월10일)에는 최대 1500대/h수준까지 도달하나 도로용량보다는 현저하게 작은 것으로 나타나고 있다.

또한, 주행속도는 100 km/h를 넘는 아주 원활한 상태가 대부분인 상태이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 터널내 오염농도는 CO의 경우 최대 15ppm을 초과하지 않고 있으며, 매연농도 또한 0.002 m^{-1} 를 초과하지 않는 것으로 나타나 터널환경은 아주 양호한 것으로 나타나고 있다.

이와 같이 오염농도가 작게 나타나는 것은 터널내 차량수가 최대 상태에서도 도로용량의 1/2 정도로 현저하게 작기 때문으로 판단할 수 있다.

또한 예상농도와 실측농도를 비교하면 CO의 경우에는 예상농도가 실측농도보다 낮게 나타나고 있으며, 교통량이 많은 경우 보다 교통량이 작은 경우에 예상농도와 실측농도의 차이가 크게 발생하는 것으로 나타나고 있다.

그림에 나타난 것은 차량의 통행량이 비교적 많은 06시에서 20시까지의 실측농도(X축)와 예상농도(Y축)를 나타낸 것으로 실측치와 예상치의 분산의 정도가 아주 크게($\pm 100\%$ 범위) 나타나고 있으며, CO의 경우에는 예상농도와 실측농도의 비는 평균 75%정도로 실측농도가 높게 나타나고 있으며, 매연의 오염농도 분포는 CO의 경우보다 양호한 것으로 나타나고 있으며 평균적으로 불매 기준선을 중심으로 분포하고는 있으나 편차가 100%정도로 아주 큰 것으로 나타나고 있다.

이상의 결과로부터 현재 측정된 연구결과로는 현재 적용하고 있는 오염물질 기준배출량의 적정성여부를 판단하는 것은 곤란한 실정으로 생각된다.

따라서 도로터널의 환기설계의 발전을 위해서 이

분야에 대한 보다 많은 연구와 결과의 공유가 필요한 것으로 사료된다.

5. 맺음말

본고에서는 현재의 환기설계기준의 오염물질 기준배출량의 적정성 여부를 판단하기 위해서 둔내 터널을 대상으로 실측한 결과를 분석하여 소개하였다.

둔내 터널 상행선의 경우, 24시간 동일지점에서의 연속측정 결과 및 사이트별 측정결과 저농도(5ppm이하)에서 환경계측기와 터널내 계측기 사이에 비교적 큰 편차가 발생하고 있으나 고농도에서는 편차가 감소하여 거의 일치하는 경향을 가지고 있다.

현재 분진 농도에 대한 측정은 환경계측기에서 측정되는 단위와 터널내 계측기의 단위가 서로 상이하여 절대치의 비교는 불가능하나 변환계수를 비교한 결과 $0.00545 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나고 있어 기존의 측정결과들과 비교할 때 비교적 근접한 값을 얻을 수 있었으나 일본의 경우에는 $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 적용하며, PIARC권고치는 $0.0469 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 차이를 보이고 있다.

이와 같은 차이는 환기량을 차이를 유발하고 결국에는 환기기 용량에 영향을 미치므로 이에 대한 심도있는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

또한 질소산화물에 있어서 NO_2 의 분율은 도로터널에서 90%이상인 것으로 나타나고 있어 PIARC에서 제시하는 값과는 상당한 차이를 보이고 있으며, 이 값 또한 NO_x 환기량 및 환기용량에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

이상의 소개에서 도로터널의 환기설계의 신뢰성 확보를 위해서 우선적으로 차종별 주행속도별 오염물질 기준배출량에 대한 정립이 시급하고 환기량 산정시 적용되는 각종 계수에 대한 수정·보완을 위한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

- 참고문헌 -

- [1] PIARC Committee on Road Tunnels, "Fire and smoke control in road tunnels", 1999
- [2] Erwin Sick GmbH, Product catalogues, 1999
- [3] PIARC Committee on Road Tunnels, "Classification of tunnels, existing guidelines and experiences, recommendations", 1995
- [4] Fuji Electric Co., 터널 계측기의 설치장소에 관한 내부자료, 1992
- [5] 동화기술, "대기오염, 소음, 진동 공정시험방법", 1996
- [6] 한국건설기술연구원, "터널환기시설에 대한 연구", 한국도로공사 연구보고서, 1996
- [7] 동아대학교 생산기술연구소, 선진엔지니어링 종합건축사 사무소, "터널 환기시설 현장 조사 및 분석", 한국도로공사 연구보고서, 1998
- [8] 자동차오염물질 배출량 산정, 엄명도 등, 국립환경연구원 자동차공해연구소, 1999
- [9] 동아대학교, 산화촉매에 의한 대형디젤엔진의 배출가스 정화특성에 관한 연구, 조강래, 박사 학위논문, 1997