

# 장대 철도터널의 환기



제갈 광수  
Consulting Engineer

## 1. 서언

최근 연장이 긴 철도터널 건설계획이 추진되고 있으며 이에 따라 환기/방재 시설에 많은 관심을 가지게 되었다. 산지가 많은 우리나라의 국토에는 많은 철도터널이 있으나, 대부분 짧은(주행시간이 5분 미만인)터널로서 오염도나 터널 내 환경에 대해 크게 관심을 갖지 않았다. 그러나 고속철도의 등장과 신설 터널의 길이가 길어지고, 승객 등의 건강, 쾌적감, 유사시의 안전성, 터널주변 자연/생활 환경에의 영향이 관심의 대상이 되고있는 것이다. 일찍부터 전철화 계획을 추진한 외국은 온습도, 터널 누출가스를 제어 대상으로 한 연구가 활발하나, 우리나라는 향후에도 수 십년간 디젤열차의 운행이 불가피한 것이 현실이라 장대 터널을 대상으로 한 환기계획이 필요하다. 더욱이 터널내 주행시간이 긴 장대 터널 내에서 불의의 사고(화재, 탈선, 추돌 등)가 발생하는 경우를 대비하여 승객과 터널구조물의 안전을 확보할 수 있는 방재, 소화, 대피 시설 등도 마련해야 할 것이다. 본고에서는 환기시설 중심의 내용을 다루기로 한다.

## 2. 환기 설비 계획

### 2.1 철도터널 환기의 특징

일정한 궤도 위를 운행 시각표에 따라 주행하며 배기가스도 집중적, 다량으로 발생하는 등, 도로터널과는 여러 가지 다른 특징이 있다. 특히 철도터널의 경우에는 터널 내 기류의 풍속과 풍향에 의한 오염농도 변화가 심하다. (표 1. 참조)

### 2.2 환경 제어 대상 및 기준

국내에는 철도터널을 대상으로 한 환기/방재 계획을 위한 기준이 없어 향후 여러 전문가의 의견을 종합하여 제시되어야 할 것이며 이를 위해 다음사항 등이 고려하여야 할 것이다.

#### (1) 환경 기준 설정 대상

승객, 기관사 등 인명을 대상으로 한 열차내 환경과 터널 내에서 점검, 보수를 수행하는 근무자를 위한 환경, 터널 갱구 및 인근 생활/자연환경을 대상으로 구분하고 각 대상 지역에 체류하는 시간이나 허용농도, 상호 관련인자, 지역별 환경 관리 수준의 검토가 필요하다.

#### (2) 터널환경 오염요소 및 허용치

##### 1) 엔진 배출가스

주행중인 디젤기관차의 배기가스는 주된 오염인자이다. 우리나라에서는 자동차와는 달리 배출허용치(농도, 배출량)가 지정되지 않고 있다. 특히 수령이 긴 기관차가 지역에 따라 운행되고 있어 각 유해물질별 농도나 발생량을 조사, 적용하기는 쉽지 않다. 설계자 마다 서로 다른

표 1. 터널의 환기특성

구분	철도터널	도로터널
차량주행	일정한 궤도 상부	도로상부, 자유이동
차량엔진	디젤, 전기	휘발유, 가스, 디젤
운행	일정한 시간	불특정 시간
운행간격	최소 5분이상 김	매우 짧음
교통형태	양방향/일방향	주로 일방향
터널내공 차폐율	상대적으로 작음/도로보다 현저히 큼	철도보다 현저히 큼/철도보다 작음
터널구배	매우 낮음	상대적으로 높음
기류형태	열차교행, 비정형	일방향, 정형적
디젤차 혼입율	노선에 따라 40%이상(높음)	지역에 따라 20~30%(낮음)
환기목적	오염도/온도제어 (주로 질소산화물)	오염도제어 (주로 매연/CO)
환기개념	다음열차진입전 치환	터널 전체 농도 희석
환기형태	치환(Purging)	희석(Dilution)
환기방식	شات카르트식 Air Exchange Portal Door	Jet Fan 등 종류식 Transverse(횡류식) Simi Transverse
열차풍	현저히 강함	상대적으로 약함
터널온도	점진적 상승/도로보다 높음	계절적 변화에 따름/내외온도차 적음
터널습도	도로보다 높음	대기와 유사
오염배출	국부적, 집중적. 대량 일정시차로 발생	전체적, 선형적, 중소량시차가 없음
매연/시계	영향적용, 궤도상 운전	안전에 직접적 영향
CO	영향적용	터널공기 침입, 영향
NO <sub>x</sub>	주 제어 대상	무시하는 경향임
가스	발생빈도 있음	발생빈도 거의 없음
규제기준	없음(국내)/엔진의 고품화	기간적 기준있음/(제작차 배출기준)
배출량	Notch에 의함	구배의 영향이 큼
열부력	도로보다 큼	현저히 작음
외기침입	창 밀봉, 적음	상시 침입, 많음
침입형태	차량상부, 공조기/간접침입/여과있음	창문, 환기그릴/직접침입/여과없음
터널오염도	상대속도(열차/터널)/진행방향이 가장낮음	주행속도에 관계함/진행방향이 높음
오염농도 영향인자	터널내기류속도, 열차속도, 열부력, 운행간격, 냉방기 환기량	자연풍, 구배, 고도, 주행속도, 디젤차혼입율, 교통밀도, 가시거리
유동특성	터널내 전후이동	직진성
오염제어	객차내, 터널내	터널내를 대상으로함
사고시주행	전방 가속 주행, 탈출/일반적으로 15분주행	정차, 연기 터널 확산/사고차 탈출 곤란
구난역/갱	장대터널에는 설치	없음

자료를 제시하는 이유도 여기에 있다. 표 2는 휘발유(점화식 발화)와 디젤(압축식 발화)엔진의 물질별 발생량을 보인다.

그러나 설계 적용치(발생량)는 허용규제치(향후 제정될 경우)를 적용하거나 주행중인 기관차의 실측평균치(철

도대학 등의 연구자료)를 활용해야 할 것이다. 열차의 주행속도는 Notch에 의해 제어(Idle ~#8)되고 이 Notchs 선택은 결국 배기가스 발생량을 결정하게 된다. 엔진에서 배출된 배기가스는 창문의 밀봉상태가 양호한 객차/기관실로 직접 침입하지 않고 터널내 공기와 혼합, 농도가 다

소 희석된 후에 주로 열차의 냉난방, 환기기기를 통해 간접적으로 침입한다. 즉, 실내로의 침투량은 냉난방/환기 기기의 가동여부나 용량에 크게 영향을 받으며 역시 차내 농도도 같이 영향을 받는다. 또한 터널 내 오염물 농도는 열차 밖의 기류저동(맞바람, 순바람, 열부력, 열차주행속도에 의한 열차풍)과 속도에 따라 변하므로 이의 해석이 매우 중요하며, 도로터널의 경우와 크게 다른 점이다.

표 2. 엔진별 발생량(\*1)

구분	대질(%/ppm평균)	휘발유(%/ppm)
CO	0.02~0.1 / 1,000	3 / 30,000
CO <sub>2</sub>	9 / 90,000	13.2 / 132,000
NO <sub>x</sub>	0.04 / 400	0.06 / 600
SO <sub>2</sub>	0.02 / 200	0.006 / 60
Aldehyde	0.002 / 20	0.004 / 40
Formaldehyde	0.001 / 11	0.0007 / 7

\* 질소산화물(\*2)

내연기관에서 발생하는 질소산화물(NO<sub>x</sub>)중 NO와 NO<sub>2</sub>가 주된 제어 대상이다. 배출되는 NO는 무색, 무취의 기체로서 엔진의 불꽃온도에 따라 발생량이 상승하고, 혈액속의 헤모글로빈과 친화력이 강하여 혈액내의 산소농도를 감소시켜 인체에 유해하다. 또한 대기 중에서 신속하게 독성이 5배가 강한 NO<sub>2</sub>(적갈색의 자극성기체로서 독성이 강하고, 불안, 초조하게 함, 호흡시 95%가 체내에 잔존하며, 폐속에서 물과 화합하여 아질산 또는 질산으로 변하여 산소 이송능력을 저하시킴)로 산화되고 스모그를 발생하게도 하며 가시도를 저하시키는 역할을 한다. NO<sub>2</sub>로의 산화율은 터널길이가 길수록 높아(수 km의 터널에서는 체적기준 20%까지 산화됨) 장대터널일수록 더욱 심각하게 인식하여야 하며, 특히 터널 출구 쪽에서는 햇빛의 산화촉진 작용으로 30~50%까지 적용하라는 자료(PIARC\*2)도 있다. 이에 따라, 미국 및 일부 유럽 국가에서는 도로터널에서도 이의 위해를 우려, 강력히 규제하고 있으며, 저농도 질소화합물 제거기기를 개발, 실험용으로 설치하여 운전 및 효과 분석을 하고있다.(그림 1 참조. 노르웨이 Oslo, Laedal터널. 10,000CMH, Pilot

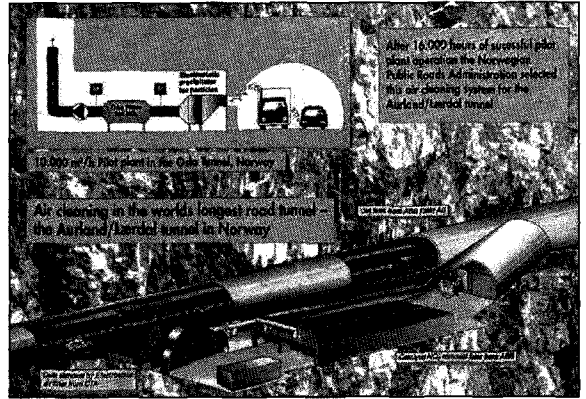


그림 1. 노르웨이 Oslo Laedal 터널 환기

Plant시험 운행 중)

2) 열 발생

주행기관차로 부터의 발생열은 터널 내로 전파되며, 속도별 열차의 기동 에너지로 산출할 수 있다.

한편, 발생열은 폐쇄율(열차단면적/터널단면적, %)이 크고, 긴 터널의 경우에는 고심도의 지중열과 함께 터널 주변에 축열 효과를 가속화 시키다. 특히 여름철에는 대기중의 온도보다 현저히 높아 냉방시 부하를 높이는 역할을 하므로 장대터널을 주행하는 기관차의 냉방기 용량은 터널길이와 터널내 온도에 따라 재검토 되어야 할 것이다. 또한 우리나라에서는 크게 문제가 되지 않겠지만 내연기관 엔진의 냉각을 위해 주위공기의 온도가 48°C이하 이어야 하는 것도 상기할 필요가 있다.

터널 벽체 및 지중으로의 축열은 터널 벽체 주위의 토질, 마감 방법, 지하수위 및 수량, 열차 운행빈도 등 여러 가지 인자에 영향을 받으나 토질 등은 설계 시 정확한 자료를 입수하기 어렵다. 외국에서는 장대터널의 경우에는 상시 온도 측정을 하여 자료로 활용하고 있다. 터널내 온도와 대기온도와의 차이와 입·출구(또는 수직갱)간의 고도차는 열부력을 발생하게 하고 이는 터널 내에 다양한 기류를 형성하게 하며 이는 주행중인 열차와 함께 터널내를 유동하는 배기가스 농도에 영향을 준다.

3) 가스

장대 터널 내에서의 가스(특히 탄광 인근지역) 발생은

매우 중요한 인자이다. 자연풍의 방향과 풍속이 수시로 변하므로 운행간격이 긴 철도터널의 경우, 발생/누설된 가스는 터널 내에서 유동, 체류하여 국부적으로 높은 농도를 보이기도 하고 때로는 주행중인 열차의 배기가스 또는 불꽃에 점화, 폭발하기도 한다. 따라서 설계 시 신뢰도 높은 지질조사 자료를 활용하여 발화점 농도이하로 유지시키는 환기시설이 필요하며, 준공 후에도 지속적인 자료 수집 및 관리가 요망된다.

4) 습도

준공후의 터널 내에는 지하수에 의한 침투, 용출, 우수, 등으로 습도가 높아지며, 이는 기관차의 배기가스(NOx 등)와의 화학작용으로 독성이나 부식성이 강한 화합물을 생성하여 승객이나 터널내 시설물의 수명/기능에 영향을 주게 되므로 적정수준의 습도로 제어하여 이의 대비가 필요하다.

2.3 제어 수준

흔히 설계기준이라고 하지만 이 것은 그 나라의 기술 수준일 수도 있고, 문화 또는 소득수준에 따른다고 할 수 있다. 투자비와 효율을 중시하여야 하고 최소한의 환경/건강수준을 유지하기도 하여야 한다. 또한 교통정책, 승객의 Needs, 사회환경 의 변화 등을 고려하여 각 분야의 전문가가 미래지향적인 수준을 제시하여야 하고, 여건 변화에 대응하여 그 수준도 신속하게 변경되어야 한다. 한편, 제어수준은 터널을 통과하는 시간(노출시간)에 따라 각 오염물질의 농도나, 온도, 습도 등을 정해야 하므로 터널 길이나 평균 주행속도, 지형조건(풍향, 풍속, 지속시간, 선형, 구배, 고도 등) 및 목표 안전수준(방재에서 다름)에 따라 합리적인 값을 제시하여야 한다. 지나치게 여유 있는(안전율이 높은)설계는 경제성(초기공사비, 운전, 유지 관리비)을 악화시키며, 획일적인 기준은 환경변화에 대응하는 유연성이 부족하여 역시 경제성을 악화시킨다. 특히 터널내의 시설은 열차 운영 중에 개조/증설/보수하기가 매우 어려우므로(보통 신설공사비의 10배 이상이 소

요됨) 신중히 제시되어야 한다. 이런 이유로 외국에서는 시간-가중농도를 적용하고 있다.

(1) 오염물 농도

아래 표 3 및 4는 일산화탄소 및 질소산화물에 대한 현재 미국에서 적용하고있는 기준이다(\*1).

표 3. 미국EPA의 노출시간 vs 허용농도 CO

노출시간	고도별 허용농도(ppm)	
	고도1500m까지	고도3000m까지
15분	125	140
30분	65	70
45분	45	50
60분	35	35

표 4. 미국 ACGIH노출시간 vs 허용농도 NOx

구분 \ 노출시간	8시간/일 호흡, 근무기준	1시간/회 단기노출기준
NO	25ppm	37.5ppm
NO <sub>2</sub>	3ppm	5ppm

질소산화물의 대표치인 NOx의 허용농도는 NO와 NO<sub>2</sub>의 혼합량으로 산출하며 앞서 논한 바와 같이 터널길이 등에 영향을 받는 NO:NO<sub>2</sub>의 발생량 비율을 고려하여 허용농도를 제시하여야 한다.

(2) 온도

작은 경사(상향 구배)라도 긴 거리를 주행하는 경우, 열차주위의 온도는 상향 이동하는 고온기류와 축열 등의 영향으로 점진적으로 상승한다. 이는 구배, 터널길이, 열차속도(주행에너지) 등, 가열/감열 부하를 산출하여 해석하여야 하며, 도로터널보다 현저히 높은 폐쇄율 때문에 열차주변 온도는 매우 높게 나타난다. 특히 전기기관차와 달리 내연기관은 기관효율이 낮고, 엔진 냉각수는 공기로 냉각시키므로 일반적으로 터널내 온도가 45°C 이상이 되지 않도록 주의하여야 하며, 역시 터널 주행시간이 길어지면 여름철 열차 냉방기기의 용량도 현저히 감소됨을 감안하여 터널 내 온도제어가 필요하다. 온도 해석은 설계시에 정확한 산출을 하기는 매우 어려우므로 Modelling

을 통한 전산해석을 하여야 하고 시공 후 운전 중에 터널 내에 설치된 계측기 등으로 측정된 자료를 활용하여 대응 방안을 강구 할 수도 있다.(스위스의 장대터널의 경우). 이런 장대터널의 실측 자료는 경과 년수에 따른 계절별 온도변화 및 향후의 변화 추세를 예측할 수 있고, 전산해석 결과의 신뢰성 검증은 물론 보다 실제 상황과 근접한 예측 및 설계를 하여 경제적인 시설계획을 수립하는 데 기여할 수 있다. 한편, 터널 내에 습도, 각종 오염물 농도, 발생가스 농도, 풍향, 풍속 등을 계측하여 경향 분석과 추이를 알 수 있다면 더욱 효과적인 설계/운영이 가능할 것이다. 여기서 중요한 것은 오염물 농도의 허용치는 도로터널과는 달리 열차내의 농도가 주된 제어대상이므로 보다 정확한 자료는 터널내의 환경과 함께 열차내의 환경도 측정하여 활용하여야 한다.

가시도는 도로터널의 경우 주행안전성을 고려하여 PIARC에 주행속도 별로 제시되어 있으나, 철도터널의 경우, 레일 위를 주행하는 기관사의 시야를 위한 기준은 아직 정해진 것은 없고(크게 문제시 하지 않고 있고), 열차내의 승객은 창문 밀폐, 필터를 부착한 공조기의 사용 등으로 큰 문제는 없을 것으로 예상되나, 다만 터널 내에서 점검, 보수, 검사 등을 수행하는 근무자를 위한 환경은 확보되어야 할 것이다. 즉, 터널내의 오염물 농도, 온도, 시계 등의 기준과 함께 터널을 통과하는 열차내의 오염물 농도 등이 제시되어야 하고 이는 근무시간, 조건, 주행시간(인체의 노출시간)을 고려하여 결정해야 한다.

### (3) 소음 및 차내 압력 변화

소음 및 차내 압력 변화는 열차의 주행속도 및 차량의 밀봉 수준(Sealing Level), 폐쇄율, 터널 갱구의 형상, 압력 완화갱(Pressure relief shaft)이 주된 영향 인자이며, 이의 연구는 고속 전철인 경우 매우 중요하다. 일반 중·저속 열차의 경우에는 그간의 설계/분석 결과로는 심각한 문제가 없다고 판단되나, 다른 교통수단과의 경쟁적 상황이 발생한다면 보다 쾌적한 기준을 제시하여야 할 것이다.

참고로 표 5에 UIC에서 제시하는 차내 압력 변화 허용

치를 소개한다.

표 5. 차내압력변화허용치-UIC

압력변화허용치	비고(조건)
±3kPa/4sec	단선, 일반적인 밀봉 수준

### (4) 기타

터널 내 근무자의 안전 작업을 위한 기준으로 터널 내 최대 풍속치를 지정할 수 있으나 폐쇄율이 높은 철도터널에서 도로터널과 같이 약 10m/s를 적용하는 것은 비경제적으로 생각된다. 즉, 단선에서의 터널 단면적을 크게 해야한다는 부담이 있다. 이는 외국의 경우 보행로 등을 확보하는 도로터널에도 최대허용풍속을 11~12m/s로 완화하는 경향이 있으므로 철도 터널 내 근무상황, 빈도 등을 고려하여 발주처와 협의, 적정치를 제시하여야 할 것이다.

터널 내에서 때때로 발생하는 가스(폭발성, 가연성)의 허용치는 우리나라에서는 지정된 것이 없지만 스위스의 사고방지기구(Accident Prevention Institute,1994)의 추천치는 각 가스의 폭발농도이하를 유지하도록 하며, 가연성가스의 경우 1%(체적기준)이하를 제시하고 있다.

갱구 주위의 환경에의 영향은 매우 다양하다. 주행열차와 터널의 구조적 형상 등으로 발생하는 소음, 진동, 음압, 열, 먼지, 디젤기관차 운행으로 발생하는 연소가스, 또한 배출가스와 태양, 공기중의 수분과의 산화 등 화학작용으로 발생하는 2차적 대기오염, 수질오염, 등이다. 자연보호의 차원에서 서구에서는 일찍부터 전기기관차 운영을 높여 왔으나 우리나라는 당분간 디젤기관차 운행이 불가피 한 듯하므로 갱구 인근 지역의 용도(주거, 교육, 문화재, 경관, 삼림, 경작, 축산, 생산, 등)를 고려하여 적절한 수준의 환경을 유지할 수 있는 기준을 마련하여야 한다. 우리나라에서 환기는 단지 오염공기와 신선공기를 혼합하여 농도를 낮게하는 "희석(Dilution)"방식을 주로 적용하고 있으나, 외국(유럽, 일본 등)의 연구 추진 방향과 같이 발생 오염물을 일부 또는 상당부분을 제거하는 "처리(Treatment)"방식에 보다 깊은 관심을 가져야 장기적

쾌적한 환경 확보, 자연보호가 가능할 것이다.

### 3. 환기 개념 및 환기 방식

#### 3.1 환기 개념

디젤기관차가 주행하는 터널을 대상으로 한 환기방식은 도로터널과는 앞서 설명한 바와 같이 다른 점이 많다. 특히 고려해야 할 사항은

- ① 궤도(Rail)위를 달리며
- ② 일정한 시간 계획에 의해 주행하며
- ③ 엔진의 출력이 매우 커서(3000~4000마력) 발생오염물량이 대량, 집중적으로 발생하고
- ④ 폐쇄율이 높은 터널에서 배기가스는 상대속도(열차속도-터널내 기류속도)와 반비례로 확산되며
- ⑤ 훌륭한 밀봉효과를 갖춘 열차라도 터널 내에서의 객차 내 오염은 환풍기/냉난방기 등 기계 환기에 의해 영향을 받으며
- ⑥ 터널 구배, 연장, 주행속도, 등을 고려해야한다.이 중에서 엔진의 대출력 →오염물 다량발생 →국부적 오염물 고농도(폐쇄율이 높은 이유)인 점과 터널내 농도는 상대속도에 반비례한다는 점이 철도 터널에서의 환기계획에 가장 핵심적 부분이라고 본다..

영국철도연구소(BR Research Ltd.)의 연구(\*3)에 따르면(J. Temple발표, Aerodynamics Team)농도는 다음 식으로 산출한다.

$$C = \frac{q \cdot C_o}{Atu \cdot (V-u)} \quad (\text{식 1})$$

C : 터널내 오염물 농도(ppm)

q : 오염물 발생량, C<sub>o</sub> : 배출오염물 농도(ppm)

Atu : 터널 단면적(m<sup>2</sup>), V : 열차주행속도(m/s)

u : 터널기류속도(열차주행방향과 동일 경우+, m/s)

즉, 열차주위의 오염물 농도(객차 내로 침투되는 농도)

는 터널내의 기류방향, 풍속에 큰 영향을 받으며, 터널내 기류방향이 열차 진행방향과 동일한 경우에는 기류방향이 열차 진행방향과 반대인 경우보다 현저히 터널 내 오염물 농도(보다 정확히 하자면 열차주위의 오염물 농도)가 높다.

이 터널내의 기류(u)에 영향을 주는 인자는

- ① 터널 갱구에서의 자연풍향 및 풍속
- ② 열차 주행에 의해 발생하는 열차풍
- ③ 양갱구간의 고도차 또는 터널내 환기탑이 있는 경우 환기탑과 터널과의 고도차
- ④ 위의 경우에서 각각의 온도차
- ⑤ 기계 환기시에는 그의 풍속 및 풍향 등이다.

이 중에서 온도차를 산출하기 위해서는 터널 내 대표적 지점에서의 온도(갱구로부터 이격된 거리 및 계절에 따라 다름.)와 외기 온도를 해석하여야 하며, 이의 해석은 상당한 자료와 장시간의 해석프로그램의 운영이 필요하다. 앞서 언급한 바와 같이 스위스의 경우, 해석프로그램의 수행결과를 검증하고 보다 근접된 결과를 유추할 수 있는 해석 모델을 개발하기 위해 장기간(수년)에 걸친 장대터널의 실측치를 활용하고 있다. 또한 터널 주변 토양, 지하수위 및 수량, 마감재에 따라 흡열 계수값이 현저히 변하므로(계절 및 내외 온도차에 의한 영향) 기초 자료의 조사 및 분석 결과의 신뢰성이 설계결과에 크게 영향을 준다. 또한 터널 내외의 온도차, 고도차 등으로 발생하는 열 부력(Thermal Buoyancy Effect)은 온도차가 큰 겨울철에 보다 크게 발생하므로(여름보다 온도차가 커짐) 계절별 터널 내 위치별 온도 해석이 매우 중요하다. 터널내 각 지점에서의 온도, 열 부력 및 굴뚝효과에 의한 터널내의 기

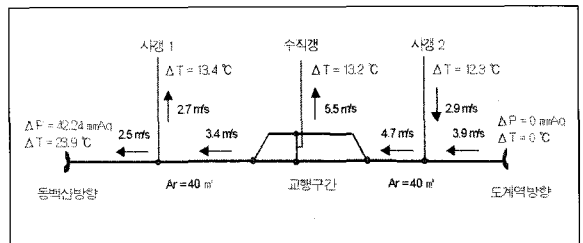


그림 2. 자연환기시 기류/Purging time해석

류 평형을 해석하기 위해서 역시 전산해석 방식이 적용되어야 하고, 이의 해석용 프로그램으로 영국의 A. B. Vardy교수가 개발한 것이 기류 해석용으로(고속철도 포함) 널리 쓰이고 있다.(아래 그림 2. 해석 예 참조, \*4)

### 3.2 환기 방식

터널 내를 주행하는 열차는 배기가스를 터널 내로 배출하지만 주행력에 의해 열차풍을 발생시켜 이에 의한 환기 효과도 있다.(터널이 길면 그 환기효과가 감소 될 수도 있음.) 따라서 해석된 열차풍 효과, 자연풍(열부력에 의한 풍량 포함) 및 주행 열차의 오염물 배출량에 의해 다음 열차(디젤 또는 전기차)가 터널에 진입할 때의 터널내 잔존 오염농도를 해석하여야 한다. 즉 다음 열차의 진입 이전에 터널내의 오염물이 전량 배출되었는지 오염농도가 존재하는지를 확인하여(열차 운행 시간표에 의해 해석되어야 함.) 진입 열차에의 영향을 해석한다. 가장 바람직하기는 터널길이가 짧고, 열차간 시격 등이 충분하여 다음 열

차 진입 전에 터널내 공기가 치환(Purging)될 수 있다면, 또는 디젤차 사이에 전기차가 주행하여 치환작용을 하여 준다면 기계 환기가 필요하지 않을 수도 있다.

즉, 장대터널이라도 디젤차 운행간격, 중간에 전기차의 편성 등 운행 계획이 중요하고, 이 운행 계획이 변경되면(우리나라의 경우에는 매 6개월 마다 변경된다고 함.) 이에 대응한 환기 계획이 검토되어야 한다. 일반적으로 터널 내에는 열차(또는 화차) 1편성 정도가 주행하나, 터널이 길고 시격이 짧은 경우에는 다수의 열차가 주행한다. 일방향 통행이지만 단계 개통으로 한 터널을 양방향 교통으로 영업할 계획인 영동선(동백산-도계간 16.24km, \*5)의 경우에는 시간당 4개 편성이 주행하기도 하며 3대 이상이 동시에 터널 내에서 주행 또는 교행역에서 대기하고 있다. 이 경우 각 열차는 전기기관차, 디젤기관차가 혼재되어 있고, 주행 속도도 상이하다. 이런 환경에서 터널 내 오염도를 해석하려면 용이하지도 않고 터널내 각 위치마다, 각 열차의 내부 오염도도 상이하다.(그림 3. 및 4. 해석 예 참조, 영동선)

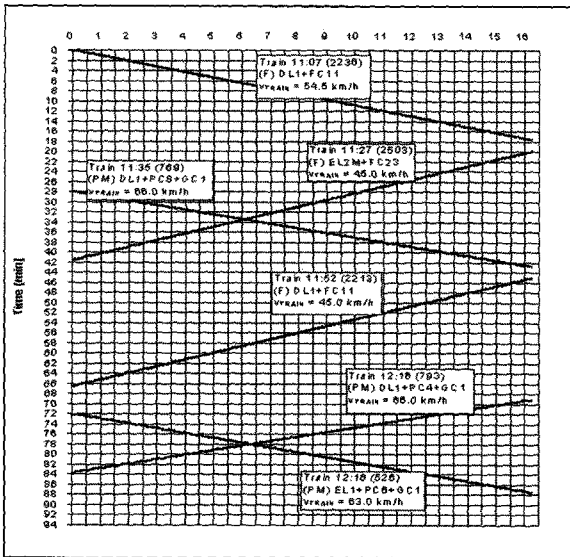


그림 3. 열차 운행 (오전 11시~12시) 계획도

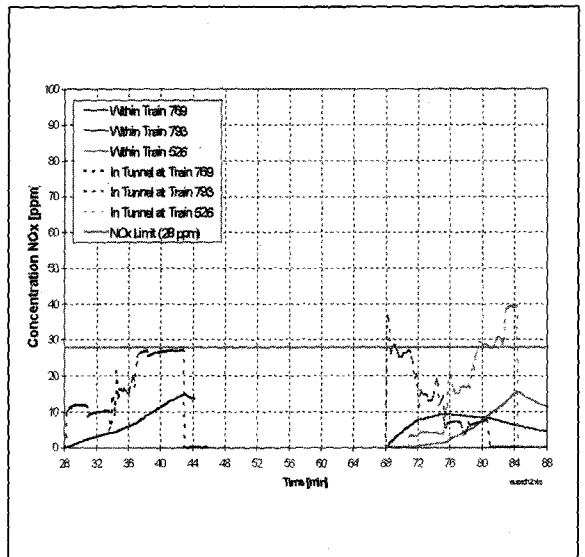


그림 4. 동계, 열부력고려, NOx 오염도 해석결과

주) 상기 그래프에서 허용치를 초과하는 농도가 일부 시간동안 나타나는데 이는 터널내의 농도이며 이 경우 터널내 근무자에게 영향을 주며, 노출 시간과 농도와의 관계를 분석, 해당 초과 농도가 허용 노출시간 내에 나타날 수 있도록 환기 시설을 계획하여야 함

터널내 및 열차내의 오염농도는 전산S/W를 이용하여 해석하지만 역시 검증 방법과 Modelling의 한계가 있어, 모의/모델실험과 함께 개통 후의 실측 자료분석과 그에 대응하는 계획이 필요하다.

치환(Purging)환기는 역시 영국의 BR Research Ltd에서 연구 보고한 환기방식으로 터널내의 잔존

오염물을 터널 밖으로 배출하여 다음 열차가 터널로 진입하기 전에 터널 내를 신선한 외기로 교체하는 방식이다. 열차 시격이 치환시간(Purging Time)보다 긴 경우에는 열차가 터널을 이탈한 후, 다음 디젤 기관차가 터널에 진입하기 전에 열차풍, 기계환기를 이용하여 터널 내를 신선외기로 교체하고(전기기관차의 운행은 오염물 배출이 없으므로 치환시간 속에 포함되어 해석함), 디젤 기관차간의 시격이 치환 시간보다 짧은 경우에는 상대속도값(식 1의 u)이 다음 열차의 터널내 주행시간 중의 차내 농도가 허용농도 이하가 되도록 하는 기계환기 계획을 수립한다.(필요한 터널내 기류속도 산출). 물론 자연환기력(자연풍, 열부력, 굴뚝효과 등)과 열차주행에 의한 열차풍 효과를 해석한 후에 필요한 경우, 기계환기시설을 계획한다.

환기시설은 터널내 교행역의 유무, 방재 계획 중의 제연환기 등의 요구조건에 따라 대응력있는 용량계획과 운전계획을 수립하여야 하나 여기서는 차내 및 터널내의 오염물 농도제어를 위한 계획만 언급하였다.

### 3.3 환경 계측

시설계획의 검증은 계획보다 중요하다고 생각된다. 예측과 다른 결과는 늘 존재하고 움직이는 기류와 관련된 예측은 상이한 것이 당연하다고 주장할 수 있다. 그러나 검증과 사후 관리를 통해 보다 사실(Fact)에 근접한 예측 모델을 연구, 개발할 수 있으므로 소홀히 해서는 안된다. 또한 승객 등 인명과 자연보호를 위한 시설이므로 신중해야 하고 크게 지나치거나 부족하지 않은 계획이 되어야 한다. 짧은 터널의 경우에는 일반적으로 환기시설도, 측

표 6. 터널 계측설비, \*5참조

계측설비	설치위치	용도
풍향풍속계	갱구 근처	자연풍의 풍향, 풍속
풍향풍속계	터널내	터널내의 풍향, 풍속
NO/NOx계	터널내	질소산화물의 농도
CO측정계	터널내	일산화 탄소 농도
온도/습도계	터널내	온도 및 습도 측정
가스측정계	터널내	폭발, 인화성 가스 측정
매연측정계	터널내	매연 농도 측정
NO/NOx계	열차내	배기관 인근 객차내
CO측정계	열차내	배기관 인근 객차내

정시설도 없는 매우 간단한 터널설비(조명, 통신 등)로 부족함이 없으나 터널 길이가 길어지면 터널내 시설도 복잡하고, 대규모시설이 된다.

적절한 시설규모, 운전모드, 유지관리계획을 위해서는 터널 내에 여러 가지 계측설비가 필요하다. 여러 계측설비로부터 얻어진 자료는 계획한 시설의 검증은 물론, 향후의 터널내 환경변화를 예측하거나 그에 따른 운전계획 수립 및 유사 터널의 설계에 활용할 수 있는 귀중한 자료가 된다. 따라서 과거의 짧은 터널과는 달리 추가비용이 필요하더라도 긴터널에는 계획할 가치가 있다. 표 6에 장대 철도 터널에 설치해야 할 계측설비를 소개한다.

## 4. 향후의 연구과제

이상과 같이 철도터널과 도로터널의 환기 특성상의 차이와 철도터널의 환기대상, 환경제어수준, 환기설계시의 착안점 및 환기방식에 대한 개요를 설명하였으나, 터널내의 기류해석이나 오염농도 해석 등은 아직까지 많은 부분이 연구과제로 남아 있다. 또한 축소모형 실험과 모의실험(Full Scale)을 통해 얻은 경향이나 Data를 분석하여 보다 개선된 전산 해석용 모델을 개발하여야 한다. 다음은 이 분야에서 연구, 설계하고 있는 기술인들의 공통된 연구/기술개발 과제라고 생각되는 내용이다.



### 4.1 오염 발생인자 및 환경기준

국내 운행되는 디젤기관차의 배기가스 배출량 → 철도 기지장에서 정비전/후(무부하/부하 운전시)의 자료를 조사, 분석, 이용 ● 기초자료의 확립

### 4.2 환경 설계기준 제시

노출 시간을 고려한 터널내(터널근무자 환경) 및 열차 내의 유해물질 허용농도 ● 환경기준 확립

### 4.3 해석 프로그램의 개발

- 1) 터널 내 온도, 습도, 벽체 전열 및 열 해석프로그램의 개발 ● 계절, 경과 년수에 의한 변화 해석
- 2) 고도차, 열부력, 굴뚝 효과, 자연풍, 열차풍 및 터널의 기하학적 형상에 따른 기류 평형(풍향, 풍속, 압력)의 해석 프로그램의 개발 ● 기류거동해석
- 3) 차내/외 압력 변화치 해석 프로그램의 개발
- 4) 환기설비, 운전모드에 따른 터널 및 열차내의 온도, 농도해석 프로그램의 개발
- 5) 질소산화물(NOx) 제거 기술

## 5. 결론

이 분야는 수식만으로 해결되지 않는 숙제들이 많은 것을 모두들 동감하고 있다. 매년 수회씩 장소를 바꾸어가며 열리는 ITC나 매 4년마다 열리는 BHRA (Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnel) Conference에 참석해 보면, 각 국의 수많은 학계/산업계/발주처 기술자들이 연구, 수행한 Project를 소개하고 토

의를 하고 의견을 경청한다. 그들은 지금까지 해온대로 답습한 결과를 발표하지 않는다. 그렇게 해왔다면 누구도 두 번 참석하지 않을 것이다. 또한 그들은 주장하는 것으로 만족하지 않는다. 자신의 연구, 고민의 결과를 심판(?) 받으려고 하고, 판에는 기술자의 자부심을 보이려고 노력한다. 함께 풀지 못한 문제를 토의하며 해결방향을 찾으려고 노력한다. 늘 하는 말이지만 우리는 환경때문에 그들만큼 성과를 올리지 못한다고 자위한다. 그러나 한번 다시 생각하고 변화려는 노력을 해야 한다. 훌륭한 학계/연구계/산업계의 기술력과 인력을 확보하고 있음에도 불구하고 과거를 답습하거나 남의 것을 내것인양 손쉽게 결론을 내려고 하지 않는지, 문제를 인식하면서도 남들도 그리하니 괜찮을 것이라고 생각을 하지는 않는지, 스스로 이 분야의 전문가라는 자부심을 가지려 하는지, 또 그 자부심에 부족하지 않는 집중력을 발휘하는지(개선의지와 함께), 새롭게 입문하는 후배 기술자들에게 어떻게 기여하고 있는지 등 등. 본인이 실천하지 못한 것을 자책하여 보았다. 이 기회에 이 분야의 발전에 작으나마 뜻을 같이 하여 활동하고 있는 연구회를 소개한다.

“터널환기연구회”(www.tvt.or.kr), 1999년12월 창립

### 참고문헌

1. Tunnel Engineering H/B—2nd Edition John O. Bickel
2. PIARC—1995, 1991, 1987
3. Ventilation Requirement for diesel-hauled train operation through tunnel—J. Temple
4. Ventilation and risk control of the Young Dong rail tunnel in Korea—F. Trada, K.S, Jegal 등(ITC, May 2000, Taiwan)
5. 영동선 동백산-도계간 철도시설공사 실시설계보고서(환기설비)-대우건설