

철도터널 환기설계의 기초

Railway tunnel ventilation system design

신 현 준
H. J. Shin
한국건설기술연구원



- 1953년생
- 공기조화설비(HVAC) 및 기계설비시스템의 최적화와 에너지절약기술개발 분야에 관심이 있으며 특히 터널의 환기시스템 최적화에 깊은 관심을 가지고 있다.

유 지 오
J. O. Yu
신홍대학 건축설비과



- 1961년생
- 유동층 열전달 및 터널, 지하철 환기, 공조설비에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

산업과 생활수준의 향상에 따라서 도로나 철도 등의 기간산업에 대한 고속화 및 대용량화가 요구되고 있다. 특히 철도에 있어서는 선형의 직선화 및 복선화계획이 진행되면서 터널건설이 증가하고 장대터널이 요구되고 있는 실정이다.

이에 따라 철도터널의 환기 및 방재 시스템의 설계기법에 관심이 고조되고 있으나 현재의 국내 철도 터널은 대부분 오래 전에 건설된 것이며 또한 환기설비를 요구할 만큼의 장대터널이 없기 때문에 이를 고려하지 않고 있다. 그래서 국내의 철도터널 환기설계 기술은 미약한 상태로 현재 발주되는 대부분의 공사를 외국의 용역사의 설계에 의존하고 있는 실정이다.

일반적으로 철도터널의 환기는 차량의 발열을 처리하기 위하여 터널내 온도상승을 억제·제어

하는 목적과 차량에서 배출되는 오염물질을 제거하여 쾌적한 환경을 확보하기 위한 환기로 구분되며, 또 장대터널에서는 화재시를 대비한 배연 및 방재시설이 환기시스템과 관련하여 설계되고 있다.

철도 터널에서 환기 시스템은 터널을 운행하는 차량의 구성에 따라서 크게 변할 수 있다. 즉 터널에 전기관차만이 통과하는 외국의 경우에는 평상 운행 시에는 온도제어를 목적으로 하는 환기와 화재시에는 방재나 재연(배연)을 목적으로 하는 환기설비를 고려하고 있으나, 현재 국내에서 계획되는 것과 같이 디젤차가 통과하는 경우에는 차량에서 배출되는 오염물질을 배출하기 위한 환기 및 방재를 고려한 설계가 되어야 한다.

오염물질 제거를 목적으로 하는 환기의 경우에 철도 터널에서는 도로터널과는 달리 차량이 궤도를 일정한 시간 간격을 두고 운행하기 때문에 가

시거리는 크게 문제시되지 않으며, 인간에게 생리적인 영향을 주는 가스상물질(CO, NOx)이 환기의 대상이 되게 된다. 특히 디젤 기관차에서의 오염물질 배출량은 차량에 비해 상당히 크기 때문에 이에 대한 처리가 요구되고 있다.

그러나 이에 대한 국내의 기술축척이 전무하며, 또한 도로터널과는 달리 터널내 기류의 형성이 열차의 운행에 의해서 급격하게 변하기 때문에 비정상류가 되는 특징이 있기 때문에 수 계산을 통한 환기설계에 많은 어려움이 있다.

따라서 본 원고에서는 철도터널의 환기설계 기술개발을 위한 기초자료를 소개하고, 미국의 운수성에서 개발되어 전세계적으로 지하철환기 설계에 사용되고 있는 SES프로그램을 이용하여 철도터널에서 열차의 주행에 따른 터널내 풍속변화 및 오염농도분포에 대한 계산결과를 소개하고자 한다.

2. 철도터널의 환기방식

철도 터널환기방식은 터널의 특성상 열차가 통과한 후에 오염공기를 효율적으로 신선공기로 교체할 수 있는 방식이 적용되고 있으며, 다수의 터널에 채택된 방식은 saccrdo방식, 수직갱 송배기방식, portal door방식 및 서비스(또는 파이롯트) 터널을 이용한 송배기방식이 있다. 사카르트 방식은 터널의 진출입 갱구에 환기소를 설치하여 노즐에 의해서 신선공기를 터널내부로 밀어 넣어 오염공기를 신선공기로 교체하는 방식이며, portal door방식은 일반적으로 터널의 한쪽 갱구에 door를 설치하고 열차가 터널을 통과한 후에 이 door를 닫고 사카르트 방식이나 송기방식에 의해서 터널내 공기를 밀어내어 신선공기로 교체하는 방식이다. 전술한 방식은 일반적으로 짧은 터널에 적용하고 있으며, 장대터널에서는 환기측면에서 터널을 여러 개의 환기구역으로 나눌 수 있는 수직갱 송배기방식이나 파이롯트 tube방식을 채택하고 있으며, 외국의 대표적인 터널로는 Channel 터널, Gotthard-base터널, Seikan터널, Lotschberg터널 등이 있으며, 이 터널들은 전기기관차가 운행되는 연장이 30~50 km에 달하는 장대터

널로 하나 이상의 수직갱과 service터널을 이용해서 신선공기를 유입하며, 온도제어 및 배연과 방재를 목적으로 하는 환기를 주로 수행하고 있다. 또 디젤기관차가 통과하는 철도터널로는 Congo의 터널과 영국의 Volvorine 터널 및 Table터널에 대한 보고자료가 있으며, 이들은 모두 단선대면터널로 대면터널의 특성상 기류의 방향이 열차의 운행에 따라서 급격하게 변하는 관계로 일 방향성을 유지하는 환기방식으로는 환기가 곤란하여 portal door방식의 환기방식을 채택하고 있는 것이 특징이다.

외국의 대표적인 철도터널의 환기방식 및 특징은 표 1에 나타났다.

3. 터널내 풍속 계산

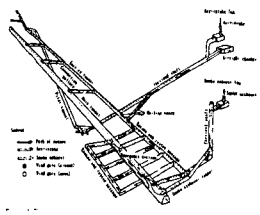
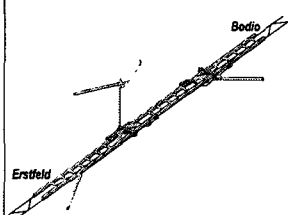
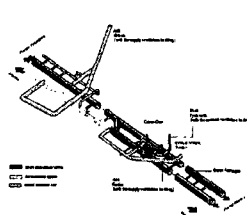
3.1 압력평형식

철도터널에서 터널내 공기흐름을 야기하는 환기력은 차량의 피스톤효과와 부력효과가 있으며, 차량의 피스톤효과는 기관차가 주행하는 동안 열차의 항력에 의해서 발생하는 것이며, 부력효과는 터널의 내외 부의 온도차 및 고도차에 의해서 발생하는 압력차에 의한 것으로 부력효과에 대한 일반식을 적용하여 계산하며, 작용방향에 따라서 환기력으로 작용할 수도 있고 저항력으로도 작용할 수 있다.

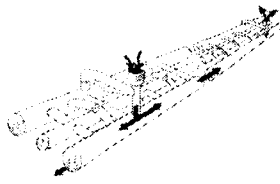
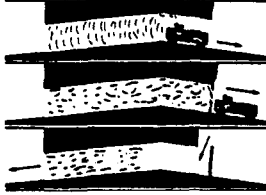
또한 환기저항으로는 터널벽면에서의 마찰저항과 기상조건에 따른 자연풍에 의한 저항이 있으며, 계산방법은 도로터널의 경우와 동일하므로 이에 대한 기술은 생략한다.

터널내 기류의 방향은 도로터널의 경우에는 차량의 수가 급격하게 변하지 않으므로 차량의 운행으로 인한 승압력(피스톤효과)이 급격하게 변하지 않기 때문에 준정적 상태로 가정하여 계산을 수행하고 있으나, 철도터널에서는 피스톤효과를 야기하는 기관차의 주행이 간헐적이기 때문에 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 열차가 진입하여 주행하는 경우에는 터널내 풍속이 급격하게 증가하며 일정시간이 지나면 속도가 특정한 값에 수렴하게 된다. 또 차량이 터널을 통과한 후에는 점차적으로 감소하는 경향을 갖는다. 따라서 철도터널에서

표 1 외국의 철도 터널

구 분	Seikan 터널 (일본)	Gotthard- Base 터널 (스위스)	Lotschberg 터널 (스위스)
터널 연 장	54 km	57 km	35 km
운행열차종류	전기 기관차	전기 기관차	전기 기관차
열차운행횟수	여객 34 회/일 화물 40 회/일	300 회/일	170 회/일
터널 종 류	해저 터널	산악터널	산악터널
터널 구 성	<ul style="list-style-type: none"> 복선터널(대면교통) +Service 터널 Pilot터널(해저구간) 	<ul style="list-style-type: none"> 단선터널(일방향 교통) Service 터널 없음 (비상역으로 대체) 	<ul style="list-style-type: none"> 단선터널(일방향 교통) 부분적으로 단선터널 1개 + Service터널
환 기 방 식	<ul style="list-style-type: none"> 전기기관차의 발열량에 따른 터널내 온도를 제어하는 환기 Pilot 터널을 통해 신선공기를 본선터널 중앙부로 공급하고 입·출구로 배출함 환기 개념도 	<ul style="list-style-type: none"> 비상역에 위치한 2개의 환기소에서 터널 내부로 공기를 공급하거나 배출함 전체터널을 5개의 section으로 나누어 환기를 실시하고 있음 환기 개념도 	<ul style="list-style-type: none"> Service터널 2개의 환기구를 통해 비상역에 공기를 공급하거나 배출함. 환기 개념도 
환 기 설 비	<ul style="list-style-type: none"> 급기용 <ul style="list-style-type: none"> - 65 m³/s × 190 kW × 1대 - 80 m³/s × 370 kW × 1대 배기용 <ul style="list-style-type: none"> - 170 m³/s × 360 kW × 1대 	<ul style="list-style-type: none"> 정상시 35 m³/s를 비상역을 통해 본 터널에 공기를 공급 비상시 비상역에 200 m³/s 공기를 급기, 200 m³/s 배기 	<ul style="list-style-type: none"> 정상시 80 m³/s를 서비스 터널을 통해 본 터널에 공급 비상시 150 m³/s나 200 m³/s 공기를 급기, 250 m³/s 배기
환기설비의 목적	<ul style="list-style-type: none"> 터널내 온도상승방지를 목적으로 필요한 환기량을 공급하고, 화재시 대피자의 안전을 위해 제연설비로 환기방식을 계획 	<ul style="list-style-type: none"> 평상시는 온도상승을 제어하기 위해서 신선공기를 교동환기력이 작용하는 방향으로 급기 또는 배기하고 있음 터널 화재시 비상역에 공기를 공급 및 배출시켜 대피장소의 안전을 위한 제연설비 목적으로 환기방식 계획 	<ul style="list-style-type: none"> 터널 화재시 비상역에 공기를 공급 및 배출시켜 대피장의 안전을 위한 제연설비 목적으로 환기방식 계획 전기기관차가 운행되므로 오염물질의 환기는 고려하지 않고 있음.

(표 1 계속)

구 분	Channel 터널 (프랑스/영국)	Congo 터널 (콩고)	Lebanon 터널 (미국, Pittsburg)
터널 연장	50 km	4.623 km	888 m
운행열차종류	전기 기관차	디젤 기관차	LRV(Light rail vehicle)
열차운행횟수	-	열차운행간격 15분	-
터널 종류	해저터널	산악터널	산악터널
터널 구성	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 단선터널 (일방향 교통) + 중앙 Service 터널 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 단선터널 (대면교통) ◦ Service터널 없음 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 복선터널 ◦ 2개의 cross passage
환기 방식	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 2개의 환기소를 두어 중앙 service 터널과 500m간격으로 설치된 cross passage에 의해서 본선터널에 신선공기를 공급하거나 배출함. ◦ 환기 개념도 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 터널 갱구부 1개소에 환기소를 설치 열차 통과후 portal door로 터널의 한쪽 갱구를 밀폐한 후, 사카르트방식으로 터널내부로 공기를 공급하여 열과 오염물질을 터널 출구로 배출 ◦ 환기 개념도 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 터널의 양갱구부에 환기소를 설치하여 2대의 impulse팬을 설치를 설치하여 신선공기를 공급하며, 댐퍼에 의해서 양 tube에 대한 기류조정 ◦ 터널내 화재시 재연을 위해서 유연한 대처가 가능 ◦ 터널내에 2개의 cross passage를 설치하여 도피로를 확보하고 있음
환기 설비	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 정상시 100 m³/s를 서비스 터널을 통해 본 터널에 공기를 공급 ◦ 비상시 배연을 위해 2개의 환기구를 통해서 260 m³/s 나 300 m³/s를 공급하거나 배기 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 급기용 - 180 m³/s × 370 kw × 2대 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 급기용 - 35 CMS × 2개소 × 2대
환기목표	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 터널화재시 비상역에 공기를 공급 및 배출시켜 대피장의 안전을 위한 제연설비 목적으로 환기방식 계획 ◦ 정상시에는 service터널과 cross passage를 통해서 본선터널에 신선공기를 공급함 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 단선터널이면서 열차의 운행이 대면이기 때문에 기류의 방향이 수시로 변하여 환기류의 방향을 설정하는데 문제점이 있음. ◦ 따라서 portal door를 설치하여 발열량 및 오염물질을 saccardo방식에 의해서 다음 열차가 진입하기 전에 완전 교체하는 것을 목표로 함. 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 터널내 화재시 열차에 위치에 따라서 유연하게 팬을 가동하여 재연을 목적으로 함 ◦ SES에 의한 해석을 통해서 최적을 시스템 고찰 ◦ SES검증 실험을 실시한 바있으며 풍속에 있어서 3.13%정도의 오차를 보이고 있음

풍속은 비정상상태로 계산되어야 한다. 즉 터널내 공기가 갖는 관성력을 고려하여 풍속을 구해야 한다.

터널내 압력평형식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 식 (1)에서 좌변은 기계환기력, 즉 송기노즐이나 송기구에 의한 환기력을 나타내는 것이며, 우변의 첫째 항은 관성력항, 둘째 항은 피스톤효과, 셋째 항은 벽면마찰저항, 넷째 항은 부력효과 및 기상조건에 의한 환기력과 터널 입출구에서의 입출구 저항을 나타내고 있다.

$$\sum F_m = \rho LA \frac{dV}{dt} - \Delta F_{piston} + \lambda \rho \frac{AV^2}{2} + A \Delta P_a \quad (1)$$

3.2 열차에 의한 교통환기력

그림 2는 일반적으로 열차가 터널을 주행할 때 열차 주변에서 발생하는 압력분포를 개략적으로 나타낸 것이다.

열차에 의한 교통 환기력(승압력)은 차량의 전면부의 항력과 측면의 마찰저항력, 후미의 부압에 의한 견인력의 합으로 표시되며, 각각은 식 (2), (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

- 차량의 전면에서 발생하는 압력상승 (형상견인) :

$$P_1 - P_2 = \frac{\sigma(2-\sigma)}{(1-\sigma)^2} \frac{\rho}{2} (V-U)^2 \quad (2)$$

- 차량의 측면 저항에 따른 압력상승(마찰저항)

$$P_2 - P_3 = \frac{\lambda l_v}{\sqrt{A_v}} \frac{\sigma}{(1-\sigma)^3} \frac{\rho}{2} (V-U)^2 \quad (3)$$

- 차량후면의 압력변화 (부압에 의한 견인력)

$$P_3 - P_4 = -\frac{\sigma}{1-\sigma} \frac{\rho}{2} (V-U)^2 \quad (4)$$

여기서, σ : 차폐율, ρ : 공기의 밀도, V : 차량의 속도, U : 터널내 풍속, λv : 차량의 마찰계수, l_v : 길이, A_v : 단면적이다.

전술한 바와 같이 열차에 의한 피스톤효과에서 설명한 차량전면의 형상견인력과 차량측면의 마찰저항, 차량후미의 부압에 의한 견인력의 합이 된다. 즉, 차량 전면과 후면의 전체 압력차(P_1-P_4)를 피스톤효과에 의한 환기력으로 볼 수 있으며, 이를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1 - P_4 = \frac{\sigma}{1-\sigma} \left[\frac{2-\sigma}{1-\sigma} + \frac{\lambda l_v}{\sqrt{A_v}} \frac{1}{(1-\sigma)^2} - 1 \right] \frac{\rho}{2} (V-U)^2 \quad (5)$$

4. 철도터널에서 오염농도 계산

4.1 철도터널에서 오염물질 배출특성

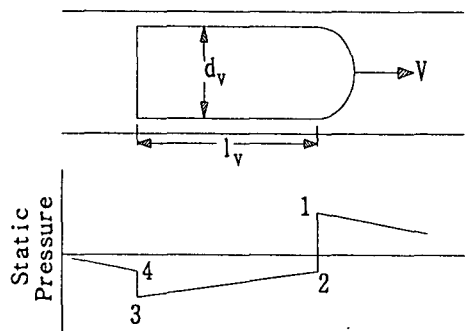


그림 2 교통환기력에 대한 개념도

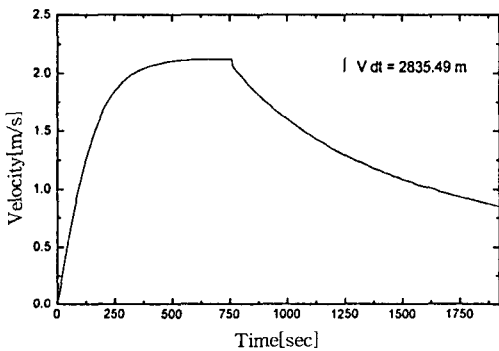


그림 1 터널에 주행속도 60km/h로 열차가 통과하는 경우, 터널내 풍속변화

철도터널에서의 오염물질 배출특성은 터널을 통과하는 차량에 따라서 현저한 차이를 나타낸다. 즉 터널을 전기기관차만이 주행하는 경우에는 오염물질의 배출이 전혀 없다고 볼 수 있으나, 디젤기관차가 통과하는 경우에는 기관의 출력이 자동차에 비해서 대형이기 때문에 오염물질 배출량이 현저하게 증대하며, 주 오염물질은 CO, NOx, 매연 등이 된다.

특히, 기관차에서는 NOx의 발생량이 많기 때문에 단 한대가 통과하더라도 터널내 농도가 허용농도를 초과하는 경우가 발생할 수도 있다.

또한 기관차는 자동차와는 달리 차량의 시간간격이 길고 궤도를 신호에 의존하여 운행하기 때문에 가시거리의 그다지 문제가 되지 않으며, CO와 NOx가 거의 동일한 수준으로 발생하기 때문에 상대적으로 허용농도가 엄격한 NOx가 문제시 되는 경우가 많다.

따라서 연속적으로 디젤기관차가 운행하는 터널에서는 터널내 축적되는 유해물질의 농도에 대한 예측과 세심한 고려가 요구된다.

(1) 유해물질별 배출량

디젤기관차의 유해물질 배출량에 영향을 주는 요인은 다음과 같다.

- 열차의 정격 출력
- 열차의 종류와 내구연수
- 열차의 유지보수 정도
- 열차운행 notch (throttle position)
- 배출 필터 또는 촉매장치의 부착여부

디젤기관차에 대한 배출량 기준은 선진국의 경우에는 EPA규정 등이 제정되어 있으나, 국내의

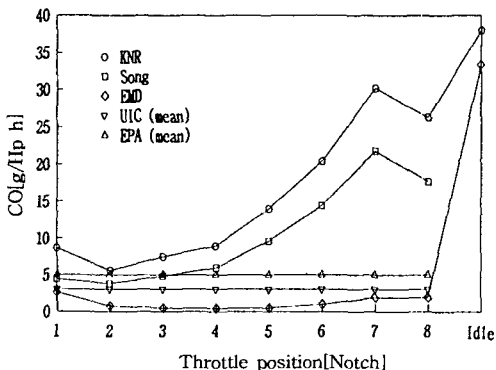


그림 3 디젤기관차의 notch별 출력당 CO배출량

규정은 없으며 배출량에 대한 자료도 정확하게 알려진 것이 없으며, 소수의 연구보고서에 제시된 연구결과만 있는 실정이다.

그림 3과 4는 디젤기관차의 notch별 출력당 CO 및 NOx의 배출량을 나타낸 것으로 국내의 자료로는 철도기술 연구소(KNR)와 송(Song)의 연구결과가 있으나 외국의 자료와는 상당한 차이를 보이고 있으며, 또 UIC나 EPA규정보다 상당히 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

(2) 배출량 계산식

유해물질의 배출량 계산은 다음과 같으며, throttle position(notch)별 유해 배출량은 그림 5, 6과 같다.

- 매연 (\dot{S}_T)

$$\dot{S}_T = q_0^T \cdot \frac{1}{3600} \cdot P \quad [g/s] \quad (6)$$

q_0^T : Notch별 출력당 기준배출량 (g/HP · hr)

P : 운행 Notch 제동마력 (Hp)

- 일산화탄소 및 질소산화물 ($\dot{S}_{CO,NOx}$)

$$\dot{S}_{CO,NOx} = q_0^{CO,NOx} \cdot v \cdot \frac{1}{3600} \cdot P \quad [m^3/s] \quad (7)$$

q_0^{CO} : Notch별 출력당 기준배출량 (g/HP · hr)

v : 가스 비체적(CO : 1/1200 m³/g, NOx : 1/2000 m³/g)

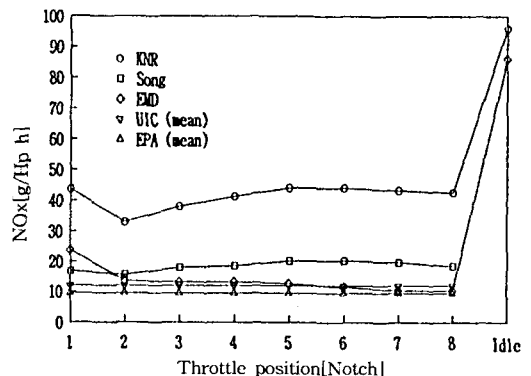


그림 4 디젤기관차의 notch별 출력당 NOx배출량

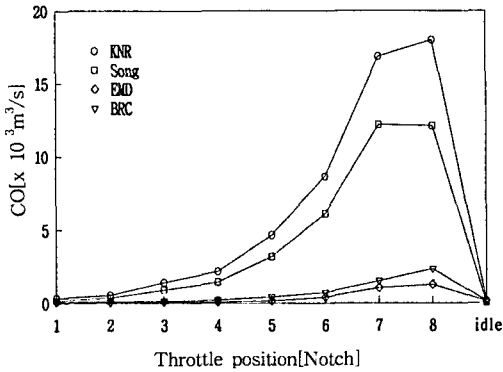


그림 5 Notch별 CO배출량

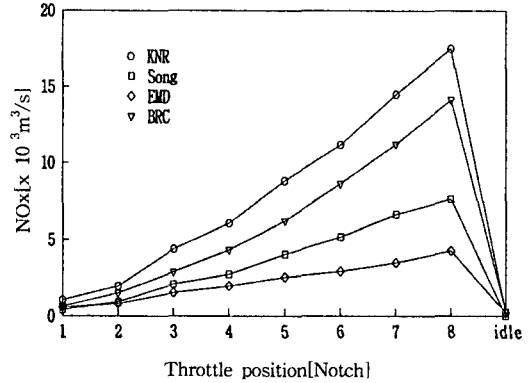


그림 6 Notch별 NOx배출량

그림 5와 6은 식 (7)에 의해서 계산되는 오염물질 배출량을 notch별로 나타낸 것으로 적용례에 따라서 상당히 큰 차이를 보이고 있으며, 주행 notch가 증가할 수록, 즉 열차가 고속으로 운행할 수록 오염물질 배출량이 급격하게 증가하며, 국내의 연구결과는 외국의 연구결과 보다 상당히 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

(3) 터널내 허용농도

터널내 허용농도는 인체에 미치는 영향을 고려해서 정하고 있으며, 철도터널에서의 허용농도에 대한 규정은 없으며 도로터널과 동일하게 적용하고 있다. 참고로 British Columbia Railway의 Volvoline터널과 Table터널의 설계시 Workers' Compensation Board of British Columbia 규정을 기초로 하여 작성한 규정을 나타내면 표 2와 같다.

표 2 터널내 오염물질에 대한 허용기준

오염물질	국내 (ppm)	영 국			
		8 Hour limit		15 minute limit	
		ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
CO	100	50	55	400	440
NOx	25 (28)	-	-	-	-
NO ₂	5	5	9	-	-
NO	25	25	30	35	45
SO ₂	-	5	13	-	-
CO ₂	-	5000	9000	15000	27000

4.2 철도터널에서 오염물질의 농도 계산

(1) 철도 터널 및 도로터널에서 오염물질의 확산
 도로터널에서는 차량에서 배출되는 오염물질은 차간 간격이 짧기 때문에 터널전체에 균일하게 분포하는 것으로 볼 수 있다. 즉 도로 터널에서 오염물질의 발생원을 선 소스(line source)가 된다.

터널내 농도 분포는 터널입구에서부터 터널 출구까지 선형적으로 증가하는 경향을 보이게 된다.

따라서 도로터널의 경우에 환기풍량이 증가(풍속의 증가)하면 최대 농도는 감소하고 종방향의 농도 기울기는 작아지게 된다.

그러나 철도터널에서 오염물질은 열차의 이동에 따라서 이동하는 점 소스(point source)가 되므로 열차의 속도와 터널내 풍속이 일정하면 열차가 지나간 지점의 농도는 일정한 값을 나타내게 된다.

또한 열차가 터널을 주행할 때 열차의 화통(exhaust stack)에서 오염물질이 배출되면 오염물질은 열차주위를 흐르는 공기흐름이 난류이기 때문에 급속하게 터널내 공기와 혼합되며, 터널내 오염물질의 농도는 확산체적에 의존하게 된다.

철도터널에 대한 환기방식은 전술한 바와 같이 교통특성 및 오염물질배출량 특성이 도로터널과는 다르기 때문에 환기특성도 상당히 다른 특성을 나타내게 되며 이를 정리하면 표 3과 같이 나타낼 수 있다.

(2) 철도 터널에서의 오염농도계산

철도 터널에서 오염물질의 농도는 전술한 바와 같이 터널내 풍속과 열차의 상대속도에 의해서 결

표 3 철도터널과 도로터널의 환기특성 비교

구 분	철 도 터 널	도 로 터 널
환기일반 일반	<ul style="list-style-type: none"> 열차에 의한 폐색율이 커서 피스톤효과에 의한 교통 환기력이 크게 작용한다. 터널내공 단면적이 비교적 도로터널보다 크다. 차량의 주행간격이 크며, 정해진 궤도를 운행한다. 대면교통이 비교적 많으며, 터널내 풍속이 비정상 상태이기 때문에 수계산이 불가능하다. 따라서 적절한 설계기법의 확립이 요구된다. 통과하는 열차에 따라 환기목표가 변하며 일반적으로 평상시는 발열 및 오염물질의 배출을 목적으로 하며, 방재설비가 요구된다. 	<ul style="list-style-type: none"> 폐색율은 비교적 작으나 교통류가 연속적으로 작용하여 교통환기력이 연속적으로 작용한다. 교통량이 시간에 따라서 변하며, 일정한 운행 패턴이 없다. 오염물질의 회석이나 배출이 환기의 주목적이 되며, 방재를 위한 환기가 고려된다. 일방향 교통이 많으며, 터널내 기류는 준정상상태로 가정한다.
환기방식	<ul style="list-style-type: none"> 환기력은 열차에 의한 피스톤효과와 송기노즐에 의한 송압력이 주가됨 회석에 의한 환기보다는 치환환기가 우선시 된다. 치환환기(purge)를 위해서 사카르트 방식, 수직갱송 배기 방식(push & pull), portal door 방식, 서비스갱에 의한 송배기 방식 등이 채택되고 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> 환기력은 차량의 주행에 의한 교통환기력과 jet팬, 송기노즐, 집진기등이 주가됨 터널내 오염물질을 회석하거나 제거하기위한 개념으로 접근 터널내 신선공기의 도입량이 증가하면 회석효과가 발생하며, 회석을 목적으로 하는 환기방식(jet팬 방식, 송기반회류식)과 회석과 제거의 효과를 동시에 달성할 수 있는 방식(수직갱방식, 집진기방식, 배기 반회류식)으로 대별된다.
오염물질 배출특성	<ul style="list-style-type: none"> 오염물질의 배출원은 점소스(point source)가 되며, 터널내를 이동하는 특성을 갖는다. 오염물질 배출은 디젤기관에 의한 것이며, 가시도에 영향을 미치는 매연보다는 가스상물질(CO, NOx, SOx)이 환기 대상이 된다. 특히, 철도 터널에서는 허용농도에 대한 규제치가 상대적으로 낮은 NOx가 문제시된다. 오염물질의 배출량 규제기준은 국내의 경우에 제정된 것이 없으며, 외국의 경우에는 EPA규정등 각국의 규정에 준한다. 오염물질 배출량은 기관차의 제동마력 및 throttle position(notch)에 따라 변한다. 	<ul style="list-style-type: none"> 터널내 차량이 연속적이기 때문에 오염물질의 배출도 터널전체에 걸쳐서 일정한 것으로 가정된다. 즉 오염물질 배출원은 선소스(line source)가 된다. 가솔린 기관의 경우에는 CO배출량이 문제시 되며, 디젤기관의 경우에는 가시거리에 영향을 주는 매연이 환기대상이 된다. 저속에서는 CO농도가 환기량을 결정하게 되며, 고속에서는 매연의 농도가 환기량을 결정하게 된다. 오염물질 배출량은 PIARC방식에 의한 국내 보건환경법상의 제작차 배출량 규제를 근거로 한다 오염물질 배출은 터널의 구배, 속도, 고도에 영향을 받기 때문에 이에 대한 보정을 한다.
터널내 오염농도	<ul style="list-style-type: none"> 터널내 오염농도는 배출량과 터널내 풍속과 열차의 상대속도에 의해서 결정된다. 열차가 통과하고 있는 구간의 오염농도는 상대속도가 일정하면 일정한 값을 가지며, 환기량이 증가한다고 해서 농도가 낮아 지는 것은 아니다. 인간에 영향을 주는 객차내 농도는 공기조화장치의 환기횟수에 의존한다. 오염물질의 배출량이 많기 때문에 열차가 한 대 지나가는 것으로도 허용농도에 육박할 수 있으며, 오염물질이 배출되기 전에 열차가 진입하는 경우에는 오염물질이 증집되어 심각한 오염을 초래할 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> 터널내 오염농도는 종류식 환기방식에서는 차량의 진행방향으로 증가하는 경향을 갖는다. 환기량이 증가하면 터널내 최고오염농도는 감소하는 특성을 갖는다. 오염농도는 차량의 주행속도와 교통량에 큰 영향을 받는다.
비상 환기	<ul style="list-style-type: none"> 화재등 사고시에도 일정시간(약15분) 주행가능하므로 터널탈출 운전 우선으로 한다. 터널 탈출이 불가능한 경우(15km이상의 장대터널) 구난역 및 서비스 터널에 대한 지획이 필요 장대터널의 경우 터널 및 구난역구에 제연환기(매연의 승객 탈출방향으로의 역류방지) 시설계획 	<ul style="list-style-type: none"> 화재, 사고시 전후의 운행차량 때문에 터널 탈출 곤란 일반적으로 1km이상의 터널에는 매연 역류방지 환기(제연환기) 계획수립

정되는 확산체적에 의해서 결정되게 되며 다음과 같이 계산된다.

초기오염농도가 C_0 인 터널을 열차가 일정한 속도(V)로 통과하고 터널내 풍속(U)이 일정하다는 가정 하에 그림 7과 같이 한 대의 열차가 진입하여 t 초 동안 주행하는 경우에 터널내 오염농도를 계산하면 다음과 같다.

t 초 동안 열차의 이동거리 :

$$L_t = V \cdot t \quad (8)$$

t 초 동안 터널입구에서 신선공기 유입하는 거리 :

$$L_a = U \cdot t \quad (9)$$

오염공기의 확산 체적 :

$$V_a = |V - U| \cdot A_r \cdot t \quad (10)$$

오염농도의 변화량 :

$$\Delta C = \frac{\dot{S} \cdot t}{V_a} = \frac{\dot{S}}{|V - U| \cdot A_r} \quad (11)$$

오염농도 :

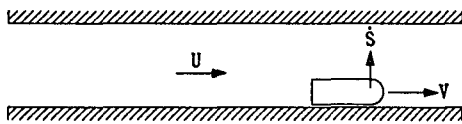
$$C_t = C_0 + \Delta C \quad (12)$$

따라서, 열차가 터널을 주행하고 있는 동안에 터널내 농도는 그림 7의 (a)와 같이 열차가 통과한 구간에서는 거의 일정한 값을 보이게 되며, 이 값은 터널길이와는 무관하며, 상대속도와 오염물질 배출량에 의해서만 결정된다.

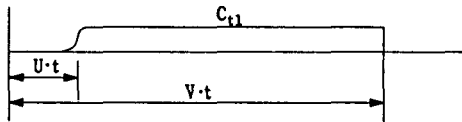
그림 7의 (b)는 열차가 완전히 터널을 통과한 후의 터널의 농도분포를 나타낸 것으로 열차의 진행방향으로 기류가 형성되므로 열차가 진입한 구간을 통해 신선공기가 유입되며, 신선공기가 유입되는 구간은 농도가 0이 된다.

또 이 상태에서 후행열차가 터널을 진입한다면 시간이 경과함에 따라 터널내 농도는 (c)와 (d)로 나타낼 수 있다.

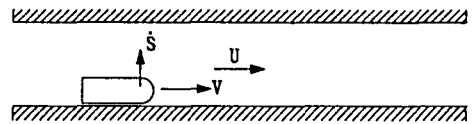
그림에서 신선공기가 유입되어 터널내 농도가 0인 지역을 후행열차가 통과할 때는 선행열차가 통과하는 경우와 동일한 경향을 나타내지만 선행열차에 의해서 오염된 지역을 지나게 되면 오염농도가 증첩하게 되어 상당한 농도에 달하게 된다. 이때 농도는 조건이 동일하다면 2배에 달할 것



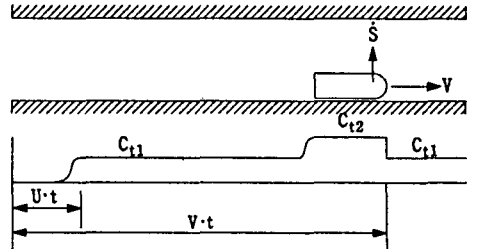
(a) 한대의 열차가 운행중인 경우



(b) 열차가 터널출구를 통과한 시점



(c) 일정시간후에 다음열차가 진입한 경우



(d) 열차가 오염물질이 배출되지 않은 지점을 통과하는 경우

그림 7 철도 터널에 오염농도에 대한 개념도

로 판단된다.

따라서 철도터널의 환기에서는 다음열차가 주행하여 오염물질이 누적되어 허용농도를 초과하기 전에 오염공기를 배기하는 것이 중요하다 할 수 있다. 그러나 빠른 배기를 위해서 열차주행 방향으로 환기풍의 풍속을 증가시키면 상대속도가 감소하여 터널내 농도가 증가하게 되므로 허용농도를 초과하지 않는 범위에서 열차 스케줄을 고려하여 환기량이 결정되어야 할 것으로 판단된다.

특히 일방향 터널의 경우에는 기류의 방향이 한 방향으로만 형성되어 오염물질의 배기가 원활하게 이루어지지만 대면교통의 터널에서는 기류의 방향이 열차주행방향에 따라 급격하게 변하기 때문에 오염물질의 배기가 불리하며, 경우에 따라서는 터널내 기류의 정체현상이 발생하여 터널내 농도가 급격하게 증대할 것을 판단할 수 있다.

그림 8은 연장이 4 km, 단면적이 43 m²인 터널에서 주행속도가 60 km/h로 열차가 주행할 때 터널의 풍속에 따른 터널에서의 NOx의 예상 농도와 퍼지 시간(터널내 오염물질을 완전히 배출하는데 걸리는 시간)을 나타낸 것이다.

그림에서 터널내 풍속이 0 m/s인 경우에 열차가 8 notch상태로 운행한다면 현재의 배출량 기준에 의해서 터널내 NOx의 농도는 13.2 ppm 정도로 예측되며, 터널내 풍속이 증가(상대속도 : 감소)할 수록 오염농도는 증가하고 있다.

터널내 풍속(U)이 8 m/s 이상(상대속도 8.67 m/s 이하)되면 허용농도(25 ppm)를 초과하는 것으로 나타나고 있으며, 이와 같은 경향은 터널 길이에

에 관계 없이 나타난다.

또 그림에서 오염물질을 완전히 배출하기 위한 purging time은 터널의 길이와 터널내 풍속에 영향을 받게 되며, 터널내 풍속이 증가할수록 짧아지게 된다. 그러나 터널내 풍속이 증가하면 상대속도가 감소하므로 이로 인하여 터널내 농도가 증가하게 된다. 따라서 purging time은 허용농도를 넘지 않는 수준에서 다음열차의 진입시간을 고려해서 결정해야 될 것으로 판단된다.

즉, 예를 들어 열차의 운행간격이 16분(960초)이라면 터널길이가 4 km일 때 중첩을 피하기 위해서는 터널내 평균풍속이 6 m/s에 달해야 할 것으로 판단된다.

(3) 객차내의 오염농도

철도차량의 경우에 일반적으로 창문을 밀폐한 채로 운행하기 때문에 터널의 오염물질이 직접 객실에 영향을 미친다고 볼 수는 없다. 즉, 에어컨디션에 의해서 환기가 이루어지기 때문에 외기 도입량에 따라서 그림 10에 나타낸 바와 같이 일정시간 시간지연을 두고 점차적으로 객실내(passenger cabin) 농도가 터널내 농도에 수렴하는 경향을 나타내게 된다.

따라서, 임의 시간 t에서 객차내부의 농도는 환기횟수(λ 회/h)를 고려하여 식 (13)으로 구할 수 있다.

$$C_{inside}^i = C_{inside}^{i-1} + \frac{\lambda \Delta t}{3600} [C_{outside}^{i-1} - C_{inside}^{i-1}] \quad (13)$$

- C_{inside}^i : i 시간에서 객차내 오염농도
- $C_{outside}^{i-1}$: i-1 시간에서 터널내 오염농도
- λ : 시간당 객실의 환기회수(시간당 터널 공기유입량/객실의 체적)

5. 계산예

본 절에서는 연장에 4 km, 단면적이 43 m²인 단선터널을 예로 하여 주행속도 60 km/h로 3대의 열차가 16분 간격으로 주행하는 경우에 SES

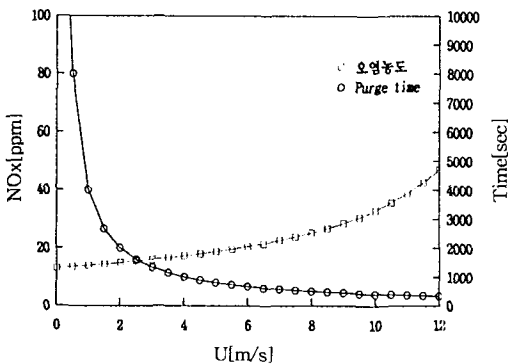


그림 8 상대속도에 따른 터널내 최대농도와 Purge Time

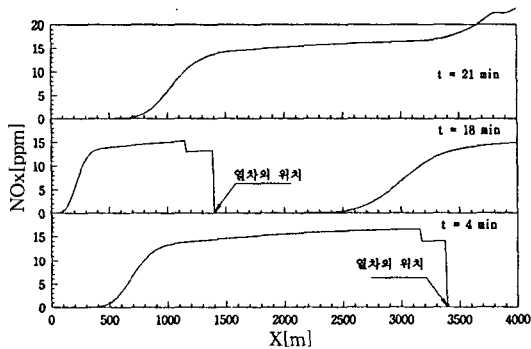
에 의해서 계산되는 결과를 소개한다.

그림 9는 열차의 주행방향이 일방향인 경우에 터널내 농도 분포 및 풍속분포를 나타낸 것이다.

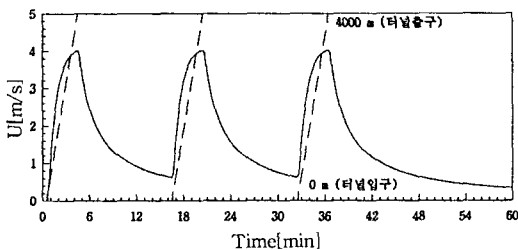
그림 9의 (a)는 열차의 거동에 따른 터널내 풍속분포를 나타낸 것으로 전술한 바와 같이 열차의 터널진입과 동시에 증가하기 시작하여 열차가 통과한 후에 급격하게 풍속이 감소하고 있음을 알 수 있다. 본 계산의 예는 전형적인 단선터널을 예를 들은 것으로 차량의 주행속도가 60 km/h일 때 터널내 최대 풍속은 4 m/s정도에 도달하고 있음을 알 수 있다.

또 그림 9의 (b)는 터널내 종방향의 NOx농도 분포를 나타낸 것으로 열차의 주행으로 인해 터널내 풍속이 점차 증가하여 상대속도가 감소하기 때문에 농도는 점차 증가하고 있으며, 터널 입구에서는 신선공기의 유입으로 인하여 농도가 감소하는 것을 알 수 있다.

열차 한 대가 주행할 때 터널내 농도는 약 16.7



(a) 터널 종방향의 NOx농도 분포



(b) 시간에 따른 터널내 풍속

그림 9 일방향 터널에서의 터널내 풍속 및 농도분포

ppm정도로 나타나고 있다.

이 경우는 전형적인 단선터널을 대상으로 구한 값으로 터널내 농도는 열차의 주행속도가 빨라지면 감소할 것으로 생각된다. 또 그림 (a)에서 $t = 21$ 분일 때 터널내 농도 분포는 터널 출구에서 농도가 상승하는 현상을 보이고 있는데 이것은 전술한 바와 같이 오염물질이 미처 배출되지 못한 구역을 다음 열차가 진입하여 오염물질이 중첩되어 생기는 현상이다.

그림 10은 두 번째 열차가 터널을 주행할 때 열차를 따라가면서 열차의 앞부분(head)과 열차 후미(tail)부근 및 객실내(cabin) 농도를 나타낸 것이다.

오염농도는 열차의 진행으로 인해 터널내 풍속이 증가하면서 상대속도가 감소하므로 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며, 또 20분 이후에 농도가 급격하게 증가하고 있는데, 이것은 선행 열차에서 배출된 오염물질이 잔류하는 구간을 지날 때 농도의 중첩에 의한 것이다.

또 그림에서 열차의 전면부보다 열차의 후미부가 농도가 높게 나타나는데, 이것은 열차 후미에 발전차에서 배출되는 오염물질을 고려하고 있기 때문이다.

또 객차내의 농도는 전술한 바와 같이 터널내 부 농도 보다 상당히 낮은 농도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 본 계산에서는 환기횟수를 5.2회/시로 하여 계산하였다.

그림 11은 동일한 터널에서 열차의 운행이 대면인 경우에 시간에 따른 터널내 농도분포 및 속도분포를 나타낸 것이다. 그림 (a)는 위에서부터 첫 번째 열차가 통과하는 상태에서부터 6번째 열

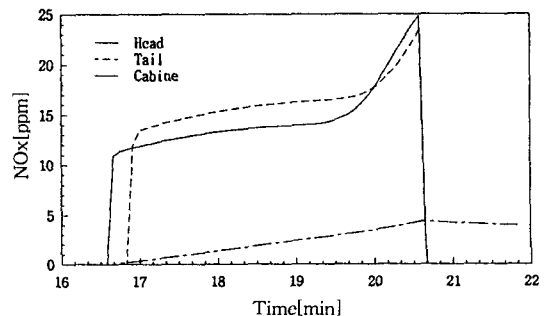
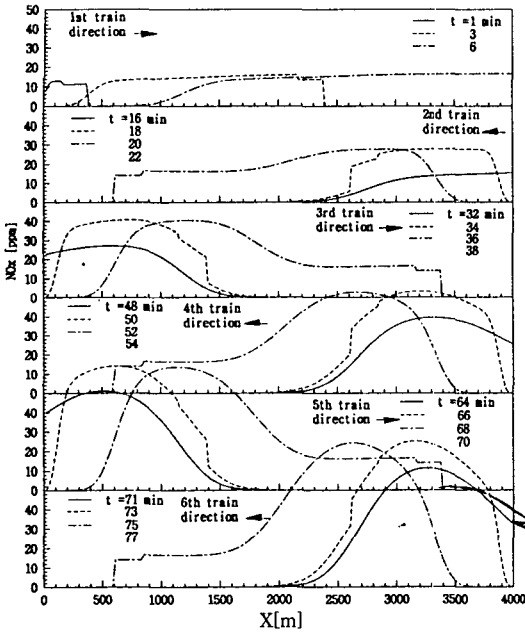
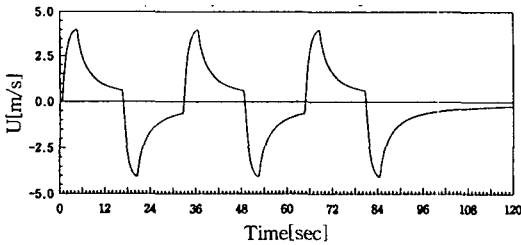


그림 10 열차의 이동에 따른 농도분포



(a) 터널 종방향의 NOx농도 분포



(b) 터널내 풍속 분포

그림 11 양방향 터널에서의 터널내 풍속 및 농도 분포

차가 통과할 때 터널종방향의 농도를 나타낸 것이다. 첫 번째 열차가 통과하는 경우에는 터널내 농도는 일방향의 경우와 동일한 경향을 갖으나, 2번째 열차가 반대방향으로 통과하는 경우에는 기류의 방향이 급격하게 변하여 터널내 풍속이 (-)가 되어 터널내 일부 공기가 배기되지 못하기 때문에 t=18 분대에 터널내 농도는 오염물질이 중첩하여 농도가 2배 정도에 도달하고 있음을 알 수 있다. 또 열차의 운행수가 많아질수록 배기가 되지 않는 일정구간에서의 농도는 1대가 통과할 때의 농도만큼씩 증가하는 것을 알 수 있다.

따라서, 대면 교통의 경우에는 특히 기류의 정

체여부를 판단하여 purging time과 열차운행 스케줄을 고려하여 터널내 환기설비가 설계되어야 할 것으로 판단된다.

6. 맺음말

이상으로 철도터널에서 환기개념을 기술하고 도로터널의 환기특성과 비교 고찰하였다.

철도터널에서 환기는 도로터널과는 달리 희석 개념보다는 치환개념(air purging)에 의해서 접근하고 있으며, 디젤차가 주행하는 경우에는 상대적으로 허용농도가 작은 NOx가 문제시 될 것으로 판단된다.

또 터널내 농도는 상대속도에 의존하며, 치환을 빠르게 하기 위해서 환기량을 증가시키면 상대속도가 감소하므로 터널내 농도는 상당히 큰 값으로 증대할 것으로 생각된다.

또한 열차에 의한 교통 환기력이 크기 때문에 기류의 방향이 주행하는 열차의 방향이나 속도에 따라서 급격하게 변하므로 풍속의 계산은 비정상 상태에서 계산되어야 하므로 수계산은 거의 불가능할 것으로 판단되며, 대면교통의 경우에는 기류의 방향이 수시로 변하게 되므로 이에 대한 충분한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다.

또한 현재 국내의 철도터널의 환기에 대한 연구는 거의 전무한 실정으로 기관차에 오염물질 배출량 및 환기방식에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

참고 문헌

1. A.E. Vardy, 1976, "The use of air shafts for the alleviation of pressure transients in railway tunnel," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 2th International Sym.*, pp. c4-55-69.
2. R.G. Carlwood, J.R. Huggett and P.E. Salt, 1982, "Tunnel Ventilation systems for the British Columbia Railway," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 4th International Sym.*, pp. 15~30.

3. A.E. Vardy and A. Anandara, 1982, "Initial design considerations for rail tunnel Aerodynamics and Thermodynamics," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 4th International Sym.*, pp. 353~366.
4. H. Barrow, C.W. Pope, 1988, "Aspects of flow and heat transfer in railway tunnels," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 6th International Sym.*, pp. 79~90.
5. B. Brousse, 1988, "Heating and pollution measurements in a railway tunnel on the CONGO-OCEAN railway line," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 6th International Sym.*, pp. 91~122.
6. I.J. Cockram, et.al., 1988, "Smoke removal in tunnels and it's effect on the safety environment of rail cars," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 6th International Sym.*, pp. 223~233.
7. W. D. Kennedy and S.J. Patel, 1988, "The mount Lebanon tunnel ventilation system," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 6th International Sym.*, pp. 235~272.
8. B. Bopp, R. Mauron and M. Zwiskyl, 1994, "Ventilation and cooling of the Lotschberg Base Tunnel," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 8th International Sym.*, pp. 489~521.
9. M.A. Berner, J.R. Day and G. Bagnoud, 1994, "Ventilation and cooling studies for the Gotthard Base tunnel," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 8th International Sym.*, pp. 523~576.
10. D.A. Henson, et.al, 1982, "Aerodynamic and ventilation of proposed Channel tunnel," *Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels 4th International Sym.*, pp. 1~14.
11. 송문섭, 1997, "철도차량 Diesel Engine의 배출가스 현황 및 저감방안에 관한 연구," 철도대학 논문집 별책, 제13집.