터널 환기 및 방재 기술위원회

Annual Technical Report

(국외 기술 기준 조사/분석을 통한 국내 도로터널 환기설계 최신화*)

2019

* 본 기술보고서는 “도로터널 환기설계 기준 제정 연구(국토교통부)”의 일부를 발췌한 내용임

목 차

제 1 장 국내·외 제작차 허용배출량 조사 및 분석 ····· 1

1.1 차종구분 ····· 1

1.1.1 국토부 차종구분 ····· 1

1.1.2 환경부 차종구분 ····· 2

1.1.3 환기설계를 위한 차종구분 비교 ····· 3

1.2 제작차 허용배출량 기준조사 ····· 4

1.2.1 제작차 허용배출량기준(2002년 이후) ····· 4

1.2.2 제작차 허용배출량기준(2006년 이후) ····· 5

1.2.3 제작차 허용배출량기준(2009년 이후) ····· 5

1.2.4 제작차 허용배출량기준(2013/2014년 이후) ····· 6

1.2.5 국외 제작차 배출기준 ····· 7

1.2.6 기타 비차량 배출분진 배출량 분포 ····· 8

1.3 기준 배출량 산정 ····· 9

1.3.1 국내외 제작차 허용배출량 및 기준배출량 비교 ····· 9

1.3.2 기준배출량 산정결과 ····· 12

1.3.3 현 설계기준과 최신 환기부 기준배출량 비교 ····· 13

1.4 기준배출량 변화에 따른 소요환기량 비교 ····· 14

1.4.1 터널 및 교통량 제원 ····· 14

1.4.2 현 기준(도로설계편람 2011)에 의한 소요환기량 산정 결과 ····· 14

1.4.3 환경부 기준(2013/2014 이후 제작차 기준)에 의한 소요환기량 산정 결과 ····· 14

1.4.4 검토 결과 ····· 15

제 2 장 국내·외 제작차 허용배출량 조사 및 분석 ····· 16

2.1 현 설계기준의 보정계수 분석 ····· 16

2.1.1 매연, CO, NOx 의 기본 보정계수 ····· 16

2.1.2 비차량 배출분진의 속도 보정 ····· 18

2.1.3 차령보정계수 ····· 18

2.1.4 속도보정계수 기준값의 변경 ····· 18

2.2 검토결과 ····· 19

2.3 환기량 산정을 위한 각종 보정계수 ····· 20

2.3.1 속도 · 경사보정계수 ····· 20

2.3.2 표고보정계수 ····· 24

2.3.3 차령보정계수 ····· 24

제 3 장 제작차 허용배출량 및 보정계수 최신화에 따른 설계소요환기량 분석 ····· 25
3.1 대상터널 선정 ····· 25
3.2 소요환기량 검토 ····· 27
3.3 소요환기량 변화에 대한 고찰 ····· 30

제 4 장 국내 도로터널 환기설계기준 최신화를 위한 제언 ····· 32
4.1 교통특성에 따른 환기검토 제외 속도 ····· 32
4.1.1 고속도로의 지정체 현황 분석 ····· 32
4.1.2 지정체 교통량 분석 ····· 32
4.1.3 환기검토 제외속도식 ····· 35
4.1.4 검토결과 ····· 36
4.2 벽면 마찰계수 재산정 ····· 37
4.2.1 환기저항계수 산정방법 ····· 37
4.2.2 속도감쇄법에 의한 환기저항계수의 측정 ····· 42
4.2.3 유도풍속에 의한 환기저항계수의 추정 ····· 44

▌표 목 차▐

<표 1.1.1> 차종구분(국토부 기준) ····· 1
<표 1.1.2> 기준배출량 산정에 적용한 차종별 소요 마력 ····· 1
<표 1.1.3> 차종별 차량 제원 ····· 1
<표 1.1.4> 자동차 등의 종류(대기환경보전법) ····· 2
<표 1.1.5> 대기환경보전법 제작차 배출허용기준상의 차종 재분류 ····· 3
<표 1.2.1> 1996.9.14 환경부령 제24호 ····· 4
<표 1.2.2> EU 자동차 배출기준 ····· 7
<표 1.2.3> 비차량 배출분진 배출량 분포 (mg/km) – PIARC 2004 ····· 8
<표 1.2.4> 비차량 배출분진 배출량 분포 (mg/km) – PIARC 2012 ····· 8
<표 1.3.1> 유럽의 제작차 허용배출량 및 기준배출량 ····· 9
<표 1.3.2> 국내의 제작차 허용배출량 및 기준배출량 ····· 11
<표 1.3.3> 기준배출량 산정식 ····· 12
<표 1.3.4> 기준배출량 산정결과 ····· 12
<표 1.3.5> 오염물질별 기준배출량 비교 ····· 13
<표 1.4.1> 오염물질별 소요환기량 비교 ····· 15
<표 2.1.1> 차령보정계수 ····· 18
<표 2.2.1> WRA(PIARC) 2012 내용 ····· 19
<표 2.3.1> 입자상물질에 대한 속도 · 경사보정계수 ····· 20
<표 2.3.2> 입자상물질에 대한 속도 · 경사보정계수 ····· 20
<표 2.3.3> CO 속도 · 경사보정계수 ····· 21
<표 2.3.4> CO 속도 · 경사보정계수 ····· 21
<표 2.3.5> CO 속도 · 경사보정계수 ····· 22
<표 2.3.6> NOx 속도 · 경사보정계수 ····· 22
<표 2.3.7> CO 속도 · 경사보정계수 ····· 23
<표 2.3.8> NOx 속도 · 경사보정계수 ····· 23
<표 2.3.9> 표고보정계수 WRA(2004) ····· 24
<표 2.3.10> 차령에 따른 상대 주행거리비 및 CO, NOx의 보정계수 ····· 24
<표 3.1.1> Input values for tunnel & traffic data ····· 26
<표 3.1.2> Permissible concentration limits ····· 26
<표 3.1.3> Case study ····· 26
<표 3.2.1> PM, CO, NOx Qreq ratio for Case 5 over Case 2 ····· 29
<표 3.3.1> Qreq contour map’s table(at 750㎥/s) ····· 31
<표 3.3.2> traffic data for small vehicle tunnel(example) ····· 31
<표 3.3.3> Permissible concentration limits for small vehicle tunnel ····· 31
<표 3.3.4> Qreq contour map’s table(at 400㎥/s) ····· 31
<표 4.1.1> 2차로 환산 AADT 분포 ····· 33
<표 4.1.2> 지체구간의 AADT(대/일) 값을 승용차대수(pc)로 환산 결과 ····· 34

<표 4.1.3> 설계속도 100km/h시 V/C 값에 따른 환기검토 제외속도 분포····· 36
<표 4.2.1> 벽면마찰계수(λ) 측정결과····· 42
<표 4.2.2> 기후 자료····· 44
<표 4.2.3> 교통량 자료····· 44
<표 4.2.4> 자연환기력과 교통환기력의 측정 및 추정····· 44
<표 4.2.5> 속도감쇄법에 의한 벽면마찰 계수 추정 결과····· 49

▮그 림 목 차▮

<그림 1.2.1> 비차량 배출분진량 계산을 위한 속도별 기준배출량(2004 vs 2012) ····· 8
<그림 1.3.1> Euro 기준에 따른 기준배출량 변화 ····· 10
<그림 1.3.2> 국내 기준에 따른 기준배출량 변화 ····· 10
<그림 2.1.1> 매연에 대한 경사속도 보정계수 ····· 16
<그림 2.1.2> 표고 보정계수(매연, CO, NOx) ····· 17
<그림 2.1.3> 경사 보정계수 (CO, NOx) ····· 17
<그림 2.1.4> 속도 보정계수(CO, NOx) ····· 17
<그림 3.2.1> Smoke(PM) Qreq profiles ····· 28
<그림 3.2.2> CO Qreq profiles ····· 28
<그림 3.2.3> NOx Qreq profiles ····· 28
<그림 4.1.1> 고속도로 지정체 원인 ····· 32
<그림 4.1.2> HGV와 AADT 관계 ····· 32
<그림 4.1.3> (왕복)차로수별 AADT 분포(계급구간: 25,000대/일) ····· 33
<그림 4.1.4> 3차로 환산 AADT 분포 ····· 34
<그림 4.1.5> 4차로 환산 AADT 분포 ····· 34
<그림 4.1.6> 고속도로 터널의 지정체 모델의 개념도 ····· 35
<그림 4.2.1> Measured and calculated air velocity after the fans are stopped ····· 39
<그림 4.2.2> Velocity decay characteristic plotted in terms of 1/Vref and ⊿t ····· 40
<그림 4.2.3> 백양터널의 마찰계수 측정결과 ····· 43
<그림 4.2.4> 개통후 백양터널의 환기저항력 측정자료 ····· 45
<그림 4.2.5> 측정풍속과 예상풍속 (기울기 = 1.0) ····· 46
<그림 4.2.6> 풍속조건에 따른 벽면마찰계수의 영향범위 ····· 46
<그림 4.2.7>. 속도감쇄법에 풍속변화 추정결과 ····· 48

제 1 장 국내·외 제작차 허용배출량 조사 및 분석

1.1 차종구분

차종구분 오염물질 기준배출량의 적용을 위한 기초자료이다. 국내 차종구분은 크게 국토부 기준과 환경부 기준으로 대별된다.

1.1.1 국토부 차종구분

환기설계에 적용하는 차종구분(국토부, 도로설계편람(617 환기시설), 2011 기준)은 8종으로 구분하고 있으며, 소요마력 및 제원은 다음 표와 같다.

<표 1.1.1> 차종구분(국토부 기준)

구 분	승용차		버 스		트 럭			
	휘발유	경유	소형	대형	소형	중형	대형	특수

<표 1.1.2> 기준배출량 산정에 적용한 차종별 소요 마력

구 분	승용차		버 스		트 럭			
	휘발유	경유	소형	대형	소형	중형	대형	특수
마력 (PS)	94	94	74	226	80	111	250	323.5
• 승용차 경유는 승용차 휘발유와 동일값으로 적용 • 특수트럭는 세미와 풀트레일러의 평균값으로 적용								

<표 1.1.3> 차종별 차량 제원

구 분		승용차	버 스		트 럭				
			소형	보통	소형	보통	대형	세미 트레일러	풀 트레일러
단위중량당 마력 (PS/톤)		68.6	33.6	18.6	33.5	17.8	13.5	7.4	8.6
무게 [톤]	차중량	1.08	1.48	9.49	1.41	3.25	8.30	13.83	14.45
	총중량	1.37	2.20	12.16	2.39	6.22	18.55	45.02	36.45
차체 규격 [㎝]	길이	434	450	1.077	452	610	874	1831	1872
	너비	168	165	245	168	202	248	261	260
	높이	144	197	312	168	227	321	286	307
마력[PS]		94	74	226	80	111	250	332	315

1.1.2 환경부 차종구분

환경부에서 제작차 배출허용기준상의 차종 분류는 다음의 표와 같으며, 2002년 7월 1일 이후부터 경자동차, 승용자동차, 화물자동차로 구분으로 분류하고 있으며, 2009년을 전후로 소형, 중형 차량의 엔진배기량 800cc에서 1,000cc 로 상향조정된 특징을 보이고 있다.

<표 1.1.4> 자동차 등의 종류(대기환경보전법)

구분	종 류	정 의	규 모	
2000년 12월 31일까지	경자동차	적은 수의 사람이나 적은 양의 화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 800cc 미만	
	승용자동차	사람을 운송하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 800cc 이상이고 차량 총중량이 2.5톤 미만	
	소형화물자동차	사람이나 화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 800cc 이상이고 차량 총중량이 3.5톤 미만	
	중량자동차	많은 사람이나 많은 화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	차량 총중량이 3.5톤 이상	
2001년 1월 1일부터 2002년 6월 30일까지	경자동차	적은 수의 사람이나 적은 양의 화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 800cc 미만	
	승용자동차	사람을 운송하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 800cc 이상이고 차량 총중량이 2.5톤 미만	
	다목적자동차	주로 사람을 운송하는 자동차로서 다양한 용도로 사용하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 800cc 이상이고 차량 총중량이 2.5톤 미만	
	중형자동차	사람이나 화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 800cc 이상이고 차량 총중량이 3.5톤 미만	
	대형자동차	많은 사람이나 많은 화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	차량 총중량이 3.5톤 이상	
2002년 7월 1일 이후	경자동차	사람이나 화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 800cc 미만	
	승용자동차	사람을 운송하기 적합하게 제작된 것	승용1	엔진배기량이 800cc 이상이고, 차량 총중량이 2.5톤 미만이며 승차인원이 8명 이하
			승용2	엔진배기량이 800cc 이상이고, 차량 총중량이 2.5톤 미만인 다목적형 승용자동차
			승용3	엔진배기량이 800cc 이상이고, 차량 총중량이 3.5톤 미만이며 승차인원이 15명 이하(승용1에 해당하지 아니하는 자동차만 해당한다)
			승용4	차량 총중량이 3.5톤 이상
	화물자동차	화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	화물1	엔진배기량이 800cc 이상이고, 차량 총중량이 2톤 미만
			화물2	엔진배기량이 800cc 이상이고, 차량 총중량이 2톤 이상 3.5톤 미만
			화물3	차량 총중량이 3.5톤 이상
2006년 1월 1일 이후	경자동차	사람이나 화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 800cc 미만	
	승용자동차	사람을 운송하기 적합하게 제작된 것	소 형	엔진배기량이 800cc 이상이고, 차량 총중량이 3.5톤 미만이며, 승차인원이 8명 이하
			중 형	엔진배기량이 800cc 이상이고, 차량 총중량이 3.5톤 미만이며, 승차인원이 9명인 이상 15명 이하
			대 형	차량 총중량이 3.5톤 이상 12톤 미만
			초대형	차량 총중량이 12톤 이상
	화물자동차	화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	소형	엔진배기량이 800cc 이상이고, 차량 총중량이 2톤 미만
			중형	엔진배기량이 800cc 이상이고, 차량 총중량이 2톤 이상 3.5톤 미만
			대형	차량 총중량이 3.5톤 이상 12톤 미만
			초대형	차량 총중량이 12톤 이상
2009년 1월 1일 이후	경자동차	사람이나 화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	엔진배기량이 1,000cc 미만	
	승용자동차	사람을 운송하기 적합하게 제작된 것	소 형	엔진배기량이 1,000cc 이상이고, 차량 총중량이 3.5톤 미만이며 승차인원이 8명 이하
			중 형	엔진배기량이 1,000cc 이상이고, 차량 총중량이 3.5톤 미만이며 승차인원이 9명 이상
			대 형	차량 총중량이 3.5톤 이상 15톤 미만
			초대형	차량 총중량이 15톤 이상
	화물자동차	화물을 운송하기 적합하게 제작된 것	소 형	엔진배기량이 1,000cc 이상이고, 차량 총중량이 2톤 미만
			중 형	엔진배기량이 1,000cc 이상이고, 차량 총중량이 2톤 이상 3.5톤 미만
			대 형	차량 총중량이 3.5톤 이상 15톤 미만
			초대형	차량 총중량이 15톤 이상

1.1.3 환기설계를 위한 차종구분 비교

WRA(구, PIARC) 2004에서는 차종분류를 승용차(3.5ton 이하 소형차의 총칭)와 대형차(HGV, 중형, 대형차의 총칭)으로 구분하나 도로설계편람에서는 <표 1.1.1>에서와 같이 환기설계시 적용하는 7개 차종에 경유 승용차 1종을 추가하여 총 8개 차종으로 구분한다. 환경부 대기환경보전법 시행령의 제작차 배출허용기준상의 차종구분이 도로설계편람의 차종구분 방법과 상이하여 기준배출량 산정에 혼선을 빚을 가능성이 있다. <표 1.1.5>는 대기환경보전법 시행규칙 <별표 17>상의 차종을 환기설계를 위한 8개 차종으로 재분류한 결과이다. 표 안의 내용은 대기환경보전법상의 차종 분류항목이다.

<표 1.1.5> 대기환경보전법 제작차 배출허용기준상의 차종 재분류

적용시기	승용차		소형버스	소형트럭
	경유	휘발유	경유	경유
99년이전	승용 자동차	승용 자동차	소형화물 자동차(가)	소형화물 자동차(나)
2000이후	승용 자동차	승용(가)	소형화물 자동차(가)	소형화물 자동차(나)
2001이후	승용 자동차	승용 자동차(가)	중형 자동차(가)	중형 자동차(나)
2002.7이후	승용1	승용1(가)	승용2(나)	화물2
2006이후	소형 승용	소형 승용(가)	중형 승용(2)	중형 화물(2)
2009이후	소형 승용	소형승용 기준2(가)	중형승용 1,305<RW≤1,760	중형화물 1,305<RW≤1,760
2014이후 (휘발유: 2013이후)	소형 승용	소형승용 기준2(가)	중형승용 (ECE-15/EUDC)	중형화물 (ECE-15/EUDC)

적용시기	대형버스	중형트럭	대형트럭	특수트럭
	경유	경유	경유	경유
99년이전	중량 자동차	중량 자동차	중량 자동차	중량 자동차
2000이후	중량 자동차	중량 자동차	중량 자동차	중량 자동차
2001이후	대형자동차(가)	대형자동차(가)	대형자동차(가)	대형자동차(가)
2002이후	대형자동차(나)	대형자동차(나)	대형자동차(나)	대형자동차(나)
2002.7이후	승용4/화물3	화물3	화물3	화물3
2006이후	대형승용	대형화물	대형화물	대형화물
2009이후	대형화물 (ETC)	대형화물 (ETC)	대형화물 (ETC)	대형화물 (ETC)
2014이후	초대형승용 (WHTC)	대형화물 (WHTC)	대형화물 (WHTC)	초대형화물 (WHTC)

1.2 제작차 허용배출량 기준조사

다음은 국내 환경법(대기환경보전법 시행규칙)에서 규제하고 있는 제작차 허용배출량 기준(g/km or g/kw·h)을 정리하였다. 이는 오염물질별 기준배출량(m2/h or m3/h)을 산정하기 위한 기초자료가 된다. 국내 도로터널 환기시설 설계기준 정립을 위해 97년 한국도로공사에서 기준배출량 선정시 제시한 환경부/국토부 차종구분 비교이다. 97년 한국도로공사의 환기설계기준상의 소형트럭은 96년 환경부의 소형화물(나)의 배출량을 적용하고 있는데, 차량총중량이 3.5톤 미만인 차량중 시험중량(공차중량 + 136 kg)이 1.7톤 이하를 제외한 차량을 의미하고 있다. 따라서 도로용량편람(국토부, 1992)을 기준하면, 보통트럭은 적재중량으로 1~8톤 차량이며, 이때의 총중량은 6.22톤이므로 소형트럭은 2001년 도로용량편람에서 규정한 것처럼 적재중량 2.5톤 미만의 차량을 의미한다고 볼 수 있다.

<표 1.2.1> 1996.9.14 환경부령 제24호

1. 휘발유, 가스 자동차							
적용기간	차종구분	단위	매연	CO	NOx	측정방법	비고(건교부 기준)
2000.1.1 이후	승용차	g/km	0	2.11	0.25	CVS-75	-> 승용차
				2.75	0.44		-> Jeep, 8인승 이하
2. 경유 자동차							
적용기간	차종구분	단위	매연	CO	NOx	측정방법	비고
2000.1.1 이후	승용차	g/km	0.05	1	0.62	CVS-75	-> 승용차
			0.11		1.02		-> Jeep, 8인승 이하
2004.1.1 이후	소형화물(가)	g/km	0.06	1.27	0.64	CVS-75	-> 소형버스(시험중량 1.7톤 이하)
	소형화물(나)	g/km	0.08	1.52	0.71		-> 소형트럭(보통트럭 1~8톤중 (가)이외)
2000.1.1 이후	중량화물	g/kW·h	0.25	4.9	6	D-13	-> 대형버스, 중형/대형/특수트럭
			0.1				-> 시내버스

1.2.1 제작차 허용배출량기준(2002년 이후)

2000.10.30 환경부령 제101호
2002년 1월 1일 이후 차종구분

차종구분		규모			차종구분		1) 휘발유				2) 가스				3) 경유			
		엔진	총중량	인승			매연	CO	Nox	측정법	매연	CO	Nox	측정법	매연	CO	Nox	측정법
경자동차		800cc 미만			경자동차			2.11	0.25	CVS-75		2.11	0.25	CVS-75	0.01	0.5	0.02	CVS-75
승용차	승용1	800cc 이상	2.5톤 미만	8인승 이하	승용1	가		2.11	0.12	CVS-75		2.11	0.25	CVS-75	0.01	0.5	0.02	CVS-75
						나		2.61	0.19	CVS-75		2.61	0.37	CVS-75				CVS-75
	승용2	800cc 이상	2.5톤 미만	다목적 승합차	승용2	가		2.11	0.19	CVS-75		2.34	0.37	CVS-75	0.07	0.95	0.65	CVS-75
						나						2.61	0.43	CVS-75	0.09	0.95	0.75	CVS-75
	승용3	800cc 이상	3.5톤 미만	15인 이하	승용3			2.73	0.25	CVS-75		2.73	0.43	CVS-75	0.1	0.95	0.78	ND-13
	승용4		3.5톤 이상		승용4			4	3.5	D-13		4.0 (0.4)	3.5	D-13	0.1	2.1	5	ND-13
화물차	화물1	800cc 이상	2.0톤 미만		화물1			2.11	0.12	CVS-75		2.11	0.25	CVS-75	0.07	0.8	0.65	CVS-75
	화물2	800cc 이상	2.0-3.5톤		화물2			2.73	0.25	CVS-75		2.73	0.43	CVS-75	0.1	0.95	0.78	ND-13
	화물3		3.5톤 이상		화물3			4	3.5	D-13		4.0 (0.4)	3.5	D-13	0.1	2.1	5	ND-13
이륜차		공차중량 0.5톤 미만																
건설기계		19-560kW																

1.2.2 제작차 허용배출량기준(2006년 이후)

2003.12.10 환경부령 제148호																
2006년 1월 1일 이후 차종구분																
차종구분		규모			차종구분		1) 휘발유/가스				2) 경유					
		엔진	총중량	인승			매연	CO	Nox	측정법	매연	CO	Nox	측정법	
경자동차		800cc 미만			경자동차			1.03	0.031	CVS-75	0.025	0.5	0.25	ECE-15/EUDC	
승용차	소형	800cc 이상	3.5톤 미만	8인승	소형승용	가		1.06	0.031	CVS-75	0.025	0.5	0.25	ECE-15/EUDC	
						나		1.31	0.044	CVS-75					
	중형	800cc 이상	3.5톤 미만	9-15인승	중형승용	가		1.03	0.031	CVS-75	0.025	0.5	0.25	ECE-15/EUDC	RW<=1305
						나		1.31	0.044	CVS-75	0.04	0.63	0.33	ECE-15/EUDC	1305<RW<=1760
											0.06	0.74	0.39	ECE-15/EUDC	RW>1760
	대형		3.5-12.0 톤		대형승용			1.5(0.4)	3.5	ND-13	0.02	1.5	3.5	ND-13	
								4	3.5	ETC	0.03	4	3.5	ETC	
	초대형		12.0톤 이상		초대형승용			1.5(0.4)	3.5	ND-13	0.02	1.5	3.5	ND-13	
								4	3.5	ETC	0.03	4	3.5	ETC	
화물차	소형	800cc 이상	2.0톤 미만		소형화물	가		1.06	0.031	CVS-75	0.025	0.5	0.25	ECE-15/EUDC	RW<=1305
						나		1.31	0.044	CVS-75	0.04	0.63	0.33	ECE-15/EUDC	1305<RW<=1760
											0.06	0.74	0.39	ECE-15/EUDC	RW>1760
	중형	800cc 이상	2.0-3.5톤		중형화물	가		1.06	0.031	CVS-75	0.025	0.5	0.25	ECE-15/EUDC	RW<=1305
						나		1.31	0.044	CVS-75	0.04	0.63	0.33	ECE-15/EUDC	1305<RW<=1760
											0.06	0.74	0.39	ECE-15/EUDC	RW>1760
	대형		3.5-12.0톤		대형화물			1.5(0.4)	3.5	ND-13	0.02	1.5	3.5	ND-13	
								4	3.5	ETC	0.03	4	3.5	ETC	
	초대형		12.0톤 이상		초대형화물			1.5(0.4)	3.5	ND-13	0.02	1.5	3.5	ND-13	
								4	3.5	ETC	0.03	4	3.5	ETC	
이륜차		공차중량 0.5톤 미만														
건설기계		19-560kW														

1.2.3 제작차 허용배출량기준(2009년 이후)

2014.6.5. 환경부령 제560호															
2009년 1월 1일 이후 차종구분															
차종구분		규모			차종구분		1)휘발유/가스				2)경유				
		엔진	총중량	인승			매연	CO	Nox	측정법	매연	CO	Nox	측정법	
경자동차		1000cc 미만			경자동차	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.005	0.5	0.18	ECE-15/EUDC	
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75					
승용차	소형	1000cc 이상	3.5톤미만	8인승	소형승용	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.005	0.5	0.18	ECE-15/EUDC	
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75					
	중형	1000cc 이상	3.5톤미만	9인승 이상	중형승용	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.005	0.5	0.18	ECE-15/EUDC	RW<=1305
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75	0.005	0.63	0.235	ECE-15/EUDC	1305<RW<=1760
											0.005	0.74	0.28	ECE-15/EUDC	RW>1760
	대형		3.5-15.0톤		대형승용			4	2	ETC	0.02	1.5	2	ND-13	K=0.5m-1
								4	2	ETC	0.03	4	2	ETC	
	초대형		15톤이상		초대형승용			4	2	ETC	0.02	1.5	2	ND-13	K=0.5m-1
								4	2	ETC	0.03	4	2	ETC	
화물차	소형	1000cc 이상	2.0톤미만		소형화물	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.005	0.5	0.18	ECE-15/EUDC	RW<=1305
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75	0.005	0.63	0.235	ECE-15/EUDC	1305<RW<=1760
											0.005	0.74	0.28	ECE-15/EUDC	RW>1760
	중형	1000cc 이상	2.0-3.5톤		중형화물	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.005	0.5	0.18	ECE-15/EUDC	RW<=1305
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75	0.005	0.63	0.235	ECE-15/EUDC	1305<RW<=1760
											0.005	0.74	0.28	ECE-15/EUDC	RW>1760
	대형		3.5-15.0톤		대형화물			4	2	ETC	0.02	1.5	2	ND-13	K=0.5m-1
								4	2	ETC	0.03	4	2	ETC	
	초대형		15톤이상		초대형화물			4	2	ETC	0.02	1.5	2	ND-13	K=0.5m-1
								4	2	ETC	0.03	4	2	ETC	

1.2.4 제작차 허용배출량기준(2013/2014년 이후)

2014.6.5. 환경부령 제560호,																
휘발유/가스는 2013년 1월 1일 이후, 경유는 2014년 1월1일 이후 차종구분																
차종구분		규모			차종구분		1)휘발유/가스(2013.1.1. 이후)				2)경유(2014.1.1. 이후)				
		엔진	총중량	인승			매연	CO	Nox	측정법	매연	CO	Nox	측정법	
경자동차		1000cc 미만			경자동차	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.0045	0.5	0.08	ECE-15/EUDC	
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75					
승용차	소형	1000cc 이상	3.5톤미만	8인승	소형승용	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.0045	0.5	0.08	ECE-15/EUDC	
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75					
	중형	1000cc 이상	3.5톤미만	9인승 이상	중형승용	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.0045	0.5	0.08	ECE-15/EUDC	
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75					
	대형		3.5-15.0톤		대형승용			4	0.4	WHTC	0.01	1.5	0.4	WHSC	
											0.01	4	0.46	WHTC	
	초대형		15톤이상		초대형승용			4	0.4	WHTC	0.01	1.5	0.4	WHSC	
											0.01	4	0.46	WHTC	
화물차	소형	1000cc 이상	2.0톤미만		소형화물	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.0045	0.5	0.08	ECE-15/EUDC	RW<=1305
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75	0.0045	0.63	0.105	ECE-15/EUDC	1305<RW<=1760
											0.0045	0.74	0.125	ECE-15/EUDC	RW>1760
	중형	1000cc 이상	2.0-3.5톤		중형화물	기준2-가		1.06	0.031	CVS-75	0.0045	0.5	0.08	ECE-15/EUDC	RW<=1305
						기준2-나		1.31	0.044	CVS-75	0.0045	0.63	0.105	ECE-15/EUDC	1305<RW<=1760
											0.0045	0.74	0.125	ECE-15/EUDC	RW>1760
	대형		3.5-15.0톤		대형화물			4	0.4	WHTC	0.01	1.5	0.4	WHSC	
											0.01	4	0.46	WHTC	
	초대형		15톤이상		초대형화물			4	0.4	WHTC	0.01	1.5	0.4	WHSC	
											0.01	4	0.46	WHTC	

현재 도로설계편람의 환기기준이 되는 제작차 허용배출량기준은 환경부의 2006년 이후 제작차 허용배출량 기준을 적용하여 차량의 오염물질 기준배출량으로 산정되었으나, 현시점에서는 2009년 이후 및 2013/2014 이후 적용기준이 단계별로 강화되어온 상태로 조사되었다. 대체로 매연 및 CO 보다는 NOx 관련 허용규정이 강화된 것으로 분석되며, 대형 및 초대형 차량의 측정법이 ND-13/ETC 모드에서 WHSC/WHTC 모드로 변경되었다. 환경부의 2006년 이후 제작차 허용배출량 기준에서 중형승용차(경유)의 허용기준이 중량(RW)에 따라 3단계로 규제되었으나, 2014년 이후 부터는 소형승용차(경유)와 동일하게 ECE-15/EUDC 모드로 단일한 허용기준을 적용하도록 변경되었다.

1.2.5 국외 제작차 배출기준

EU의 배출기준을 살펴보면, 승용차(Euro 4)를 기준할 경우 현재 CO의 배출기준 보다는 NOx의 기준이 2배 이상 강화된 것으로 나타나고 있다. 매연의 경우는 2000년(Euro 3)을 전후로 대폭 감소하여 유지되고 있다.

<표 1.2.2> EU 자동차 배출기준

EU 배출기준(승용차 : M1)							
상태	년도	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
		g/km					#/km
디젤연료							
Euro 1	1992.07	2.72(3.16)	-	0.97(1.13)	-	0.14(0.18)	-
Euro 2, IDI	1996.01	1	-	0.7	-	0.08	-
Euro 2, DI	1996.01a	1	-	0.9	-	0.1	-
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.5	0.05	-
Euro 4	2005.01	0.5	-	0.3	0.25	0.025	-
Euro 5a	2009.09b	0.5	-	0.23	0.18	0.005f	-
Euro 5b	2011.09c	0.5	-	0.23	0.18	0.005f	6.0×1011
Euro 6	2014.09	0.5	-	0.17	0.08	0.005f	6.0×1011
가솔린연료							
Euro 1	1992.07	2.72(3.16)	-	0.97(1.13)	-	-	-
Euro 2	1996.01	2.2	-	0.5	-	-	-
Euro 3	2000.01	2.3	0.2	-	0.15	-	-
Euro 4	2005.01	1	0.1	-	0.08	-	-
Euro 5	2009.09b	1	0.10d	-	0.06	0.005e,f	-
Euro 6	2014.09	1	0.10d	-	0.06	0.005e,f	6.0×1011e,g

EU 배출기준(디젤중차량: SST)								
상태	년도	모드	CO	HC	NOx	PM	PN	Smoke
			g/kWh				1/kWh	1/m
Euro I	1992, ≤ 85kW	ECE R-49	4.5	1.1	8	0.612		
	1992, > 85kW		4.5	1.1	8	0.36		
Euro II	1996.1		4	1.1	7	0.25		
	1998.1		4	1.1	7	0.15		
Euro III	99.10 EEV only	ESC & ELR	1.5	0.25	2	0.02		0.15
	2000.1		2.1	0.66	5	0.10a		0.8
Euro IV	2005.1		1.5	0.46	3.5	0.02		0.5
Euro V	2008.1		1.5	0.46	2	0.02		0.5
Euro VI	2013.01	WHSC	1.5	0.13	0.4	0.01	8.0×1011	

1.2.6 기타 비차량 배출분진 배출량 분포

2000년 이후 매연 배출량의 대폭적인 감소에 따라 차량이외의 요인에 의하여 발생하는 부유분진의 상대적인 중요성이 증가하고 있음에 따라 비차량(엔진) 배출분진(non exhaust emission)에 대한 검토의 필요성을 WRA(PIARC)(2004)에서 제기하고 있다. 타이어 및 브레이크 마모분진, 도로표면 마모분진, 재부유분진이 비차량 배출분진에 속하며 대부분의 입자는 >10㎛ (>PM10)이며 가시거리 파장범위에 큰 간섭을 일으켜 투과율에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이상의 비차량 배출분진을 입도에 따라 PM2.5과 PM10으로 구분하여 발생원인별로 정리하면 <표 1.2.3>과 같으며, WRA(PIARC)(2012)년 보고서에서는 <표 1.2.4>과 같이 제시하고 있다. 그리고 <그림 1.2.1>은 비차량 배출분진의 배출량을 계산하기 위한 속도별 기준배출량을 WRA(PIARC)(2004와 2012)을 기준으로 함께 비교하여 나타내었다.

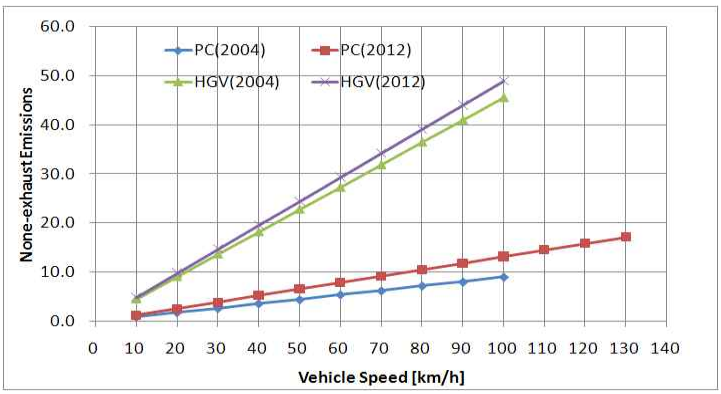
<표 1.2.3> 비차량 배출분진 배출량 분포 (mg/km) - PIARC 2004

구 분	승용차(<3.5ton)		대형차(HGV)	
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
타이어 마모분진	6*	6	31*	31
브레이크 마모분진	1±0.3	11±3.6	3±0.8	160±52
도로마모분진	12±1.9	220±17	63±12	1400±120
총배출량	19±2.4	237±21	97±12	1591±172

주: * 는 PM2.5 자료가 없는 관계로 PM10 값을 의미함.

<표 1.2.4> 비차량 배출분진 배출량 분포 (mg/km) - PIARC 2012

구 분	승용차/경차		대형차(HGV)	
	mg/km	㎡/km	mg/km	㎡/km
비차량 배출분진 (PM2.5)	28	0.1316	104	0.4888



<그림 1.2.1> 비차량 배출분진량 계산을 위한 속도별 기준배출량(2004 vs 2012)

1.3 기준 배출량 산정

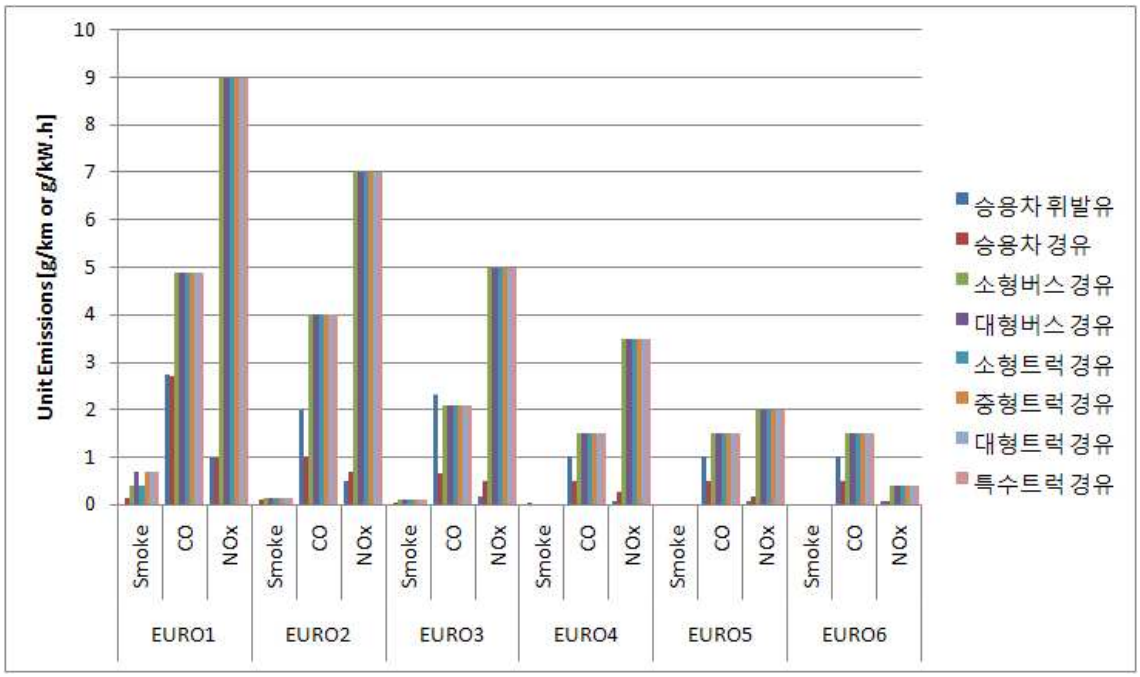
현재 환기설계시 적용되고 있는 기준배출량은 1996년 환경부의 대기환경보전법 시행령에 기초하고 있으나 2년마다 강화되어 가장 최근의 국내 제작차에 대한 배출량 기준은 2009년 1월 1일 이후부터 휘발유자동차 및 경유자동차는 각각 미국 ULEV 및 EURO 5 수준, 2013/2014년 1월 1일 이후부터는 EURO 6 수준으로 강화되고 있는 추세이다. 따라서 향후 환기설계시에는 설계 목표 연도를 고려할 때, 소요환기량을 산정하기 위한 기준배출량은 2013/2014년 1월 1일 이후 적용되는 제작차 배출허용기준을 적용하는 것이 바람직하다.

1.3.1 국내외 제작차 허용배출량 및 기준배출량 비교

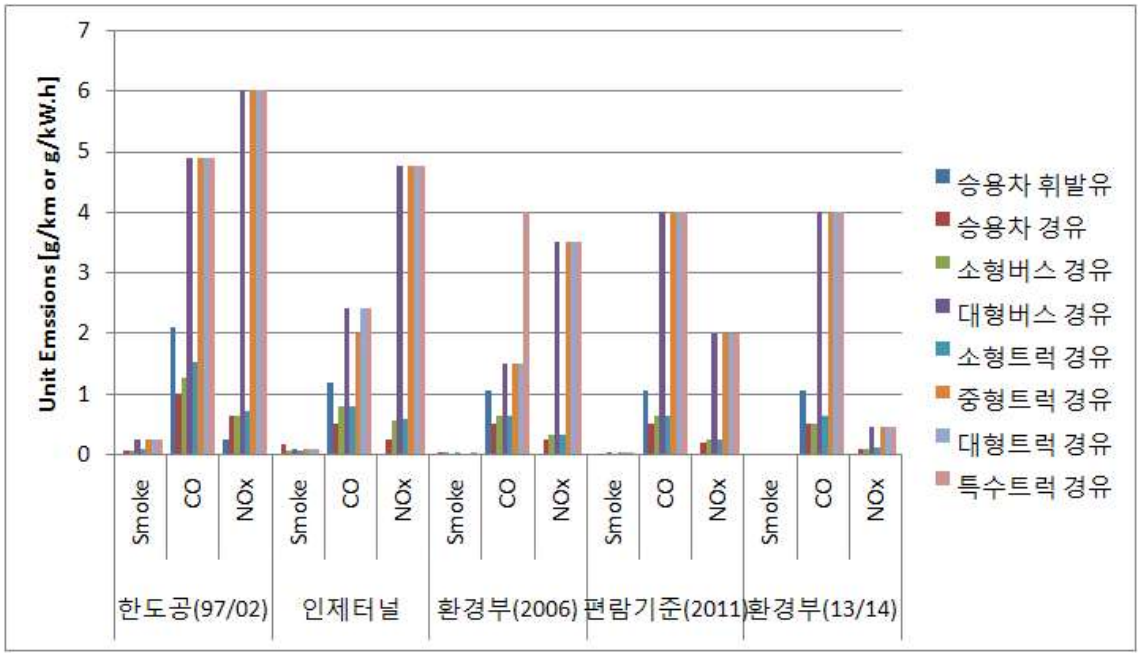
다음으로 현 환기설계기준과의 비교연구를 위해 국내외 주요 기준배출량 계산의 기초가 되는 제작차 허용배출량 기준을 정리하였다. <표 1.3.1>의 * 표시는 매연 이외의 소형버스 및 소형트럭에 대한 배출량 단위가 [g/km]가 아닌 [g/kW.h] 이다.

<표 1.3.1> 유럽의 제작차 허용배출량 및 기준배출량

구분	차종	승용차		소형버스	대형버스	소형트럭	중형트럭	대형트럭	특수트럭
	연료	휘발유	경유	경유	경유	경유	경유	경유	경유
	단위	g/km		g/km*	g/kW.h	g/km*	g/kW.h		
EURO1	매연	-	0.14	0.4	0.68	0.4	0.68	0.68	0.68
	CO	2.72	2.72	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
	NOx	0.97	0.97	9	9	9	9	9	9
EURO2	매연	-	0.09	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	CO	2	1	4	4	4	4	4	4
	NOx	0.5	0.7	7	7	7	7	7	7
EURO3	매연	-	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	CO	2.3	0.64	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
	NOx	0.15	0.5	5	5	5	5	5	5
EURO4	매연	-	0.025	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	CO	1	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	NOx	0.08	0.25	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
EURO5	매연	-	0.005	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
	CO	1.000	0.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
	NOx	0.060	0.180	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
EURO6	매연	-	0.005	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
	CO	1.000	0.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
	NOx	0.060	0.080	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400



<그림 1.3.1> Euro 기준에 따른 기준배출량 변화



<그림 1.3.2> 국내 기준에 따른 기준배출량 변화

<표 1.3.2> 국내의 제작차 허용배출량 및 기준배출량

구분	차종	승용차		소형버스	대형버스	소형트럭	중형트럭	대형트럭	특수트럭
	연료	휘발유	경유	경유	경유	경유	경유	경유	경유
	단위	g/km		g/km	g/kW.h	g/km	g/kW.h		
한도공 97/02	매연	-	0.05	0.06	0.25	0.08	0.25	0.25	0.25
	CO	2.11	1	1.27	4.9	1.52	4.9	4.9	4.9
	NOx	0.25	0.62	0.64	6	0.71	6	6	6
인제터널 기준	매연	0.000	0.169	0.07	0.09	0.07	0.09	0.09	0.09
	CO	1.196	0.500	0.80	2.41	0.80	2.00	2.41	2.41
	NOx	0.038	0.250	0.56	4.76	0.57	4.76	4.76	4.76
환경부 2006	매연	-	0.025	0.04	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03*
	CO	1.06	0.5	0.63	1.5	0.63	1.5	1.5	4*
	NOx	0.031	0.25	0.33	3.5	0.33	3.5	3.5	3.5*
편람기준 (2011) (현기준)	매연	0.000	0.005	0.005	0.030	0.005	0.030	0.030	0.030
	CO	1.060	0.500	0.630	4.000	0.630	4.000	4.000	4.000
	NOx	0.031	0.180	0.235	2.000	0.235	2.000	2.000	2.000
환경부 2013/14	매연	0.000	0.005	0.005	0.010	0.005	0.010	0.010	0.010
	CO	1.060	0.500	0.500	4.000	0.630	4.000	4.000	4.000
	NOx	0.031	0.080	0.080	0.460	0.105	0.460	0.460	0.460

1.3.2 기준배출량 산정결과

제작차량의 허용배출기준으로부터 오염물질별 기준배출량 산정식은 다음과 같다.

<표 1.3.3> 기준배출량 산정식

구분	단위변환 방법
매연	•승용차(휘발유, 경유), 버스(소형), 트럭(소형)의 기준배출량 (m^2/h) = 6.25 × 허용배출기준(g/km) × 감소계수(75%) × 속도(km/h) •버스(대형), 트럭(중형, 대형, 특수)의 기준배출량 (m^2/h) = 6.25 × 허용배출기준(g/kWh) × 감소계수(75%) × 마력(PS) × 0.7355 kW •경유차량 주행속도 33.6km/h 적용 (참고: ECE15+EUDC 모드)
CO	•승용차(휘발유, 경유), 버스(소형), 트럭(소형)의 기준배출량 (m^3/h) = 허용배출기준(g/km) ÷ 1,200g/m3 × 속도(km/h) •버스(대형), 트럭(중형, 대형, 특수)의 기준배출량 (m^3/h) = 허용배출기준(g/kWh) × 마력(PS) × 0.7355 kW ÷ 1,200 g/m^3 •휘발유 및 경유차량 주행속도 각각 34.2 및 33.6km/h 적용 (CVS-75 및 ECE15+EUDC 모드) • CO 밀도 1,200 g/m^3 적용 (WRA(PIARC) 2004)
NOx	•승용차(휘발유, 경유), 버스(소형), 트럭(소형)의 기준배출량 (m^3/h) = 허용배출기준(g/km) ÷ 2,000g/m^3 × 속도(km/h) •버스(대형), 트럭(중형, 대형, 특수)의 기준배출량 (m^3/h) = 허용배출기준(g/kWh) × 마력(PS) × 0.7355kW ÷ 2,000 g/m^3 •휘발유 및 경유차량 주행속도 각각 34.2 및 33.6km/h 적용 (CVS-75 및 ECE15+EUDC 모드) • NOx 밀도 2,000 g/m^3 적용 (WRA(PIARC) 2004)

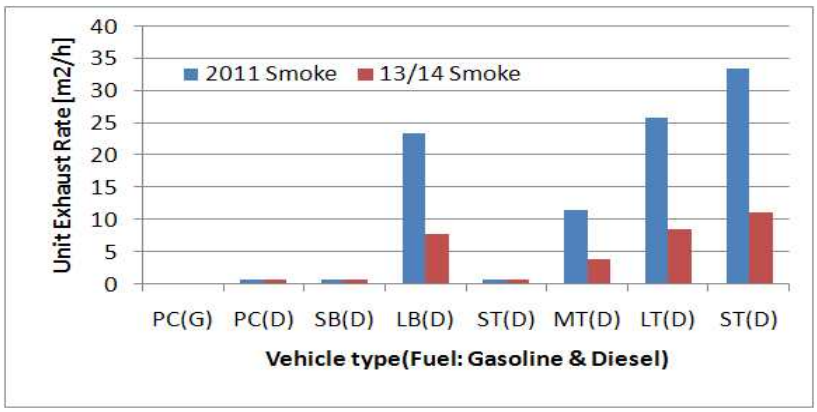
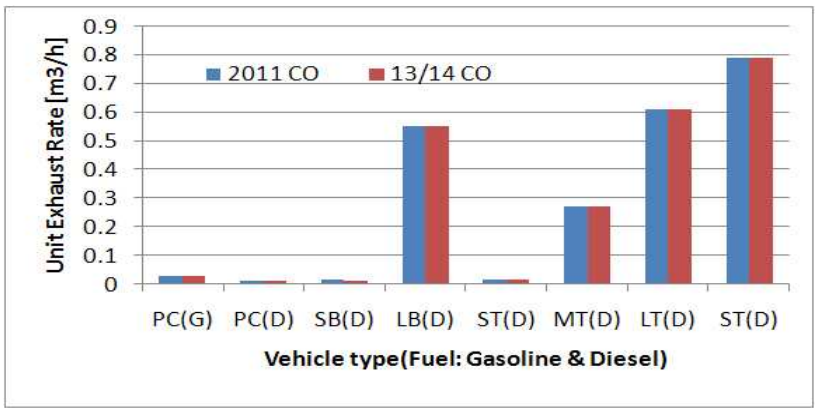
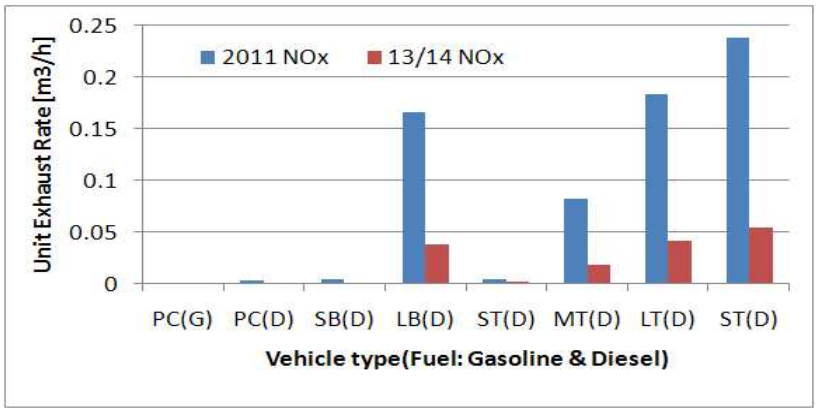
<표 1.3.4> 기준배출량 산정결과

구분		승용차		소형	대형	소형	중형	대형	특수
		휘발유	경유	버스	버스	트럭	트럭	트럭	트럭
도로공사 2002	매연	-	18.893	29.606	172.195	31.594	83.018	208.750	265.832
	CO	0.101	0.080	0.055	0.652	0.072	0.320	0.721	0.933
	NOx	0.010	0.015	0.022	0.642	0.027	0.315	0.710	0.919
인제터널	매연	-	0.000	18.900	69.120	20.420	33.330	76.450	98.930
	CO	0.057	0.057	0.039	0.320	0.039	0.131	0.354	0.458
	NOx	0.001	0.001	0.022	0.509	0.022	0.250	0.563	0.729
편람기준 (2011;현 기준)	매연	-	0.787	0.787	23.375	0.787	11.481	25.857	33.460
	CO	0.030	0.014	0.018	0.554	0.018	0.272	0.613	0.793
	NOx	0.001	0.003	0.004	0.166	0.004	0.082	0.184	0.238
환경부 2013/14	매연	-	0.708	0.708	7.792	0.708	3.827	8.619	11.153
	CO	0.030	0.014	0.014	0.554	0.018	0.272	0.613	0.793
	NOx	0.001	0.001	0.001	0.038	0.002	0.019	0.042	0.055

1.3.3 현 설계기준과 최신 환기부 기준배출량 비교

다음은 현 설계기준(도로설계편람 2011)과 환경부의 '제작차 13/14 이후' 기준에 대한 기준배출량의 비교결과이다. CO의 기준배출량은 디젤승용차량를 제외하면 감소가 없는 반면, 매연과 NOx의 감소폭은 중차량의 경우 각각 67%~77% 수준으로 분석된다.

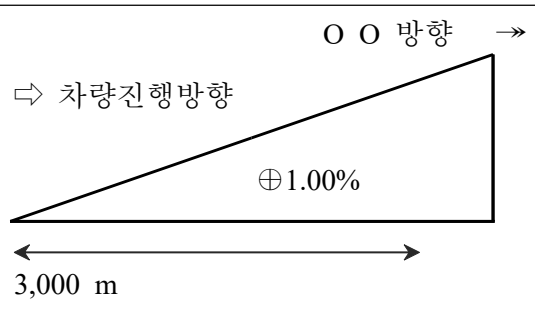
<표 1.3.5> 오염물질별 기준배출량 비교

구분	현 설계기준과 환경부 기준에 따른 기준배출량 변화
매연	
CO	
NOx	

1.4 기준배출량 변화에 따른 소요환기량 비교

본 절에서는 일반적인 고속도로 단면적(75㎡)을 갖는 2차로 일방향 터널(Lr=3km, Gr=1%)을 대상으로 소요환기량 변화 및 환기용량의 변화를 검토하였다.

1.4.1 터널 및 교통량 제원

구분	적용값	개요도
터널연장 (km)	3	
내공단면적 (m2)	75	
대표직경 (m)	8.8	
종단경사 (%)	1	
차선수 (lane)	2	
평균표고 (m)	400	

차종	승용차		버스		트럭				AADT	HGV
구분	휘발유	경유*	소형	대형	소형	중형	대형	특수	(대/일)	(%)
교통량	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866	44,574	25.2
구성비(%)	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9	100.0	

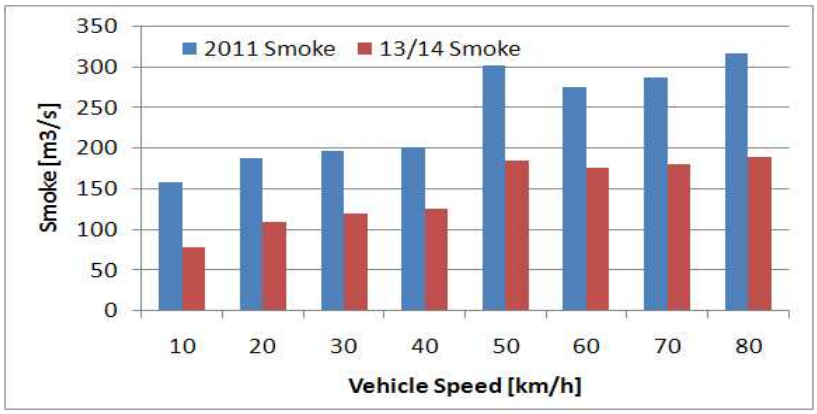
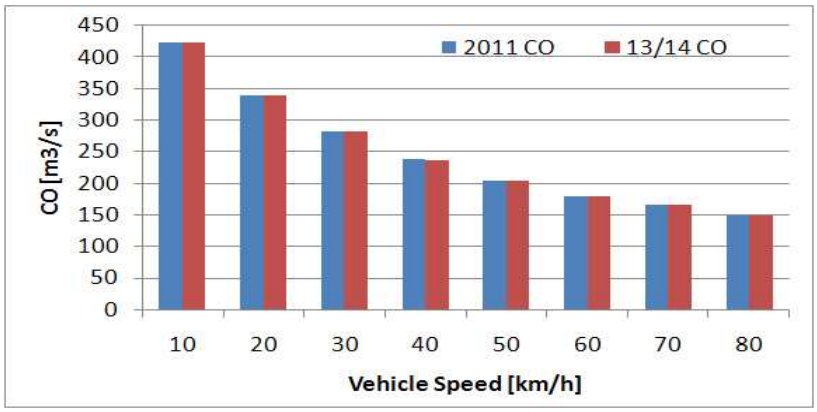
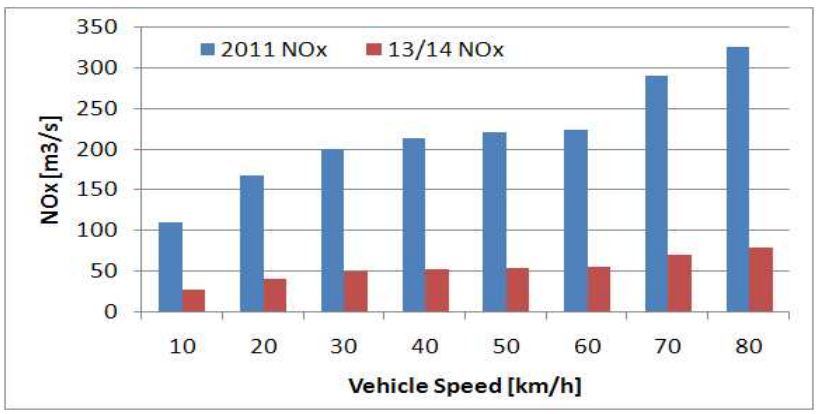
1.4.2 현 기준(도로설계편람 2011)에 의한 소요환기량 산정 결과

구분	10km/h	20km/h	30km/h	40km/h	50km/h	60km/h	70km/h	80km/h
매연(㎥/s)	158.5	187.3	195.8	201.2	301.6	274.2	286.4	315.6
CO(㎥/s)	424.2	339.4	282.9	237.7	204.8	179.5	166.1	148.5
NOx(㎥/s)	110.1	167.6	199.9	214.1	221.0	223.2	290.0	326.5
Type	CO	CO	CO	CO	Smoke	Smoke	NOx	NOx
Qreq(㎥/s)	424.2	339.4	282.9	237.7	301.6	274.2	290.0	326.5
J/F(EA)	23	12	2	-10	-13	-23	-30	-36

1.4.3 환경부 기준(2013/2014 이후 제작차 기준)에 의한 소요환기량 산정 결과

구분	10km/h	20km/h	30km/h	40km/h	50km/h	60km/h	70km/h	80km/h
매연(㎥/s)	78.3	108.8	119.1	125.1	184.6	175.8	180.6	189.0
CO(㎥/s)	423.4	338.8	282.4	237.2	204.4	179.2	165.8	148.2
NOx(㎥/s)	26.7	40.7	48.5	52.0	53.7	54.2	70.4	79.3
Type	CO	CO	CO	CO	Smoke	Smoke	NOx	NOx
Qreq(㎥/s)	423.4	338.8	282.4	237.2	204.4	179.2	180.6	189.0
J/F(EA)	23	12	2	-10	-21	-31	-39	-45

<표 1.4.1> 오염물질별 소요환기량 비교

구분	현 설계기준과 환경부 기준에 따른 기준배출량 변화
매연	
CO	
NOx	

1.4.4 검토 결과

검토결과 환경부 기준을 적용할 경우, 매연의 소요환기량은 주행속도별로 40~51% 수준, NOx 는 76% 수준이 감소하는 것으로 하는 것으로 나타났으며, CO의 소요환기량은 변화가 없는 것으로 분석되었다. 환기설비의 용량(제트팬 대수)은 CO에서 최대 소요환기량이 산출되기 때문에 환기설비 대수에는 변화가 없는 것으로 분석되었다.

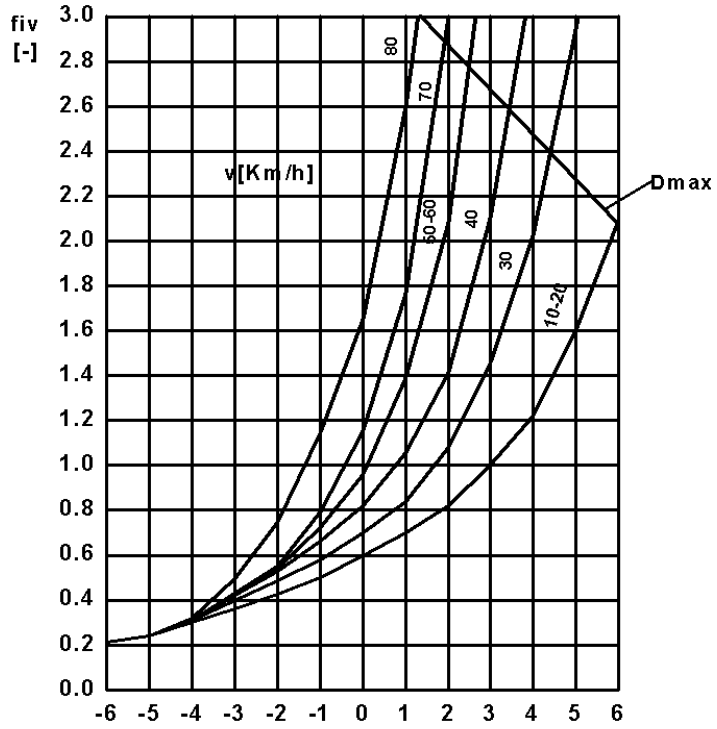
제 2 장 국내·외 제작차 허용배출량 조사 및 분석

2.1 현 설계기준의 보정계수 분석

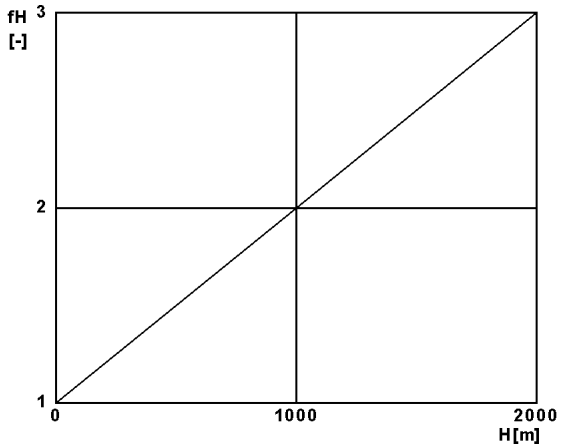
실제 조건의 도로터널에서의 차량 배출량을 산정하기 위해서는 차량의 주행조건의 변화로 인한 배출량 변화를 보정하여야 하는데 현재까지 국내에서 운행중인 차량을 대상으로 제시된 값이 없으므로 WRA(PIARC)에서 제시하고 있는 방법을 적용하고 있다. 2011년도 도로설계편람에서는 WRA(PIARC) 2004에서 EURO-4 차량을 대상으로 한 보정계수가 제시되어 있으나 이의 국내 적용은 추후 면밀한 검토가 요구되기 때문에 기존 국내설계시에 적용하고 있는 WRA(PIARC) 1991 보고서에 권고 제시된 보정계수를 국내자료가 제시되기까지 잠정적으로 적용하고 있다. 즉, 매연에 대하여는 속도·경사 및 표고의 함수로, 일산화탄소와 질소산화물의 경우에는 속도, 경사, 및 표고의 함수로 다음과 같이 보정하고 있다. 제시된 속도보정계수는 속도 30km/h, 경사 0%, 표고 0m를 기준 1로 한다.(<그림 2.1.1~4> 참조).

2.1.1 매연, CO, NOx 의 기본 보정계수

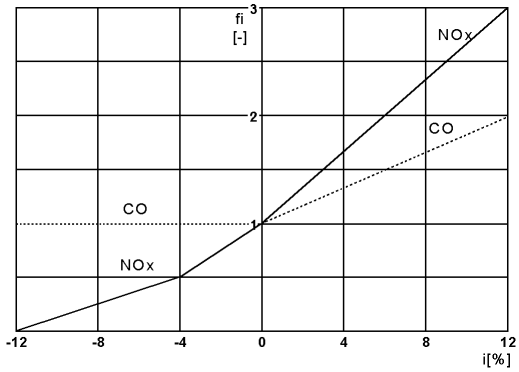
매연에 대한 경사.속도보정계수는 <그림 2.1.1>, 표고보정계수는 <그림 2.1.2>, CO 및 NOx에 대한 경사보정계수와 속도보정계수는 <그림 2.1.3>, <그림 2.1.4>와 같다.



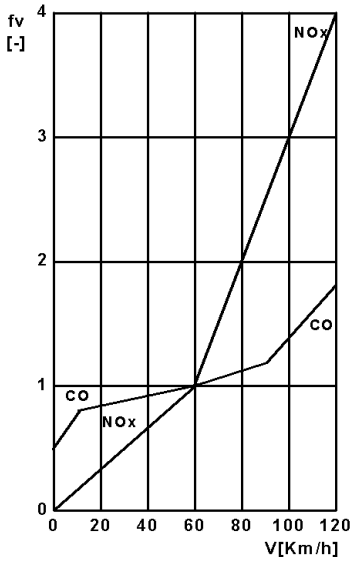
<그림 2.1.1> 매연에 대한 경사속도 보정계수



<그림 2.1.2> 표고 보정계수(매연, CO, NOx)



<그림 2.1.3> 경사 보정계수 (CO, NOx)



<그림 2.1.4> 속도 보정계수(CO, NOx)

2.1.2 비차량 배출분진의 속도 보정

비차량 배출분진의 배출량을 계산하기 위한 속도별 기준배출량은 대형차의 경우에 10ton 차량을 기준으로 하여 중량보정을 수행하나, 현 기준에서는 대형차를 세분화하여 정의하므로 각 차종별 기준배출량을 달리 제시하고 있다. 따라서 중량 보정계수의 적용이 필요하지 않다. 한편, WRA(PIARC)(2004)에서는 기준 배출량 보정계수의 적용 대상 차종을 승용차(passenger car) 및 대형차(HGV, 10ton 기준)로 구분하고 있으며 승용차는 휘발유 및 경유엔진 모두를 포함하며 3.5ton 이하의 경상용차 까지도 포함하며, 대형차는 버스 및 트럭을 지칭하며 승용차 범위에 포함되지 않는 트럭 및 버스로 정의하고 있다.

2.1.3 차령보정계수

촉매장치(catalytic converter)가 장착된 휘발유 차량의 경우, 시간경과에 따라 촉매의 열 노화 (thermal ageing)로 인하여 오염물질 배출량에 직접적인 영향을 미치므로 이에 대한 검토가 필요하다. <표 2.1.1>의 차령보정계수에는 EURO 3 기준 적용 차량의 노화특성이 고려되어 있는 WRA(PIARC) 2004의 차령보정계수이다. 한편 경유차량의 디젤산화촉매(oxidation catalyst)의 노화 영향은 거의 없으며 EURO4 및 5 기준에 관련된 매연 포집필터(particulate matter trap)의 경우에는 노화영향에 대한 충분한 기술적 자료가 없는 실정이다. 따라서 현 설계기준에서는 국내 차량을 대상으로 한 충분한 자료가 확보될 때까지는 WRA(PIARC) 2004의 권고값을 적용하고 있다.

<표 2.1.1> 차령보정계수

구분		차령보정계수					
CO	차령	1	2	4	6	8	10
	계수	1.00	1.10	1.21	1.42	1.62	1.83
NOx	차령	1	2	4	6	8	10
	계수	1.00	1.11	1.33	1.56	1.78	2.00

2.1.4 속도보정계수 기준값의 변경

현 기준에 따르면, 국내의 제작차 배출량 측정을 위한 주행모드는 휘발유, 가스차는 CVS-75(미국의 시가지 주행모드인 FTP-75와 동일)를 1987년부터, 경유를 사용하는 경차 및 소형·중형차량은 유럽에서 사용중인 ECE15+EUDC 모드를 2004년부터 단계적으로 적용하고 있다. 따라서 2009년 1월 1일 이후 제작되는 차량에 적용되는 배출량허용기준은 차종별로 이들 운전모드를 적용하고 있다. CVS-75운전모드는 평균차속

34.2km/h로, ECE15+EUDC 모드는 평균차속 33.6km/h로 주행하며 배출량을 측정하고 있으므로 따라서 편람에서 제시된 속도 및 경사 보정계수는 속도 30km/h, 경사 0%, 표고 0m를 1.0 로 기준하고 있다. 따라서 보정계수의 계산방법은 다음과 같이 제시되어 있다.

<보정계수 계산 예>

· CO 속도보정계수 (차속 80 km/h)

$$\text{변경보정계수} = \frac{\text{보정계수}(60km/h)}{\text{보정계수}(30km/h)} \times \text{보정계수}(80km/h)$$
$$= \frac{1.00}{0.88} \times 1.13 = 1.284$$

현 설계기준은 급격한 환기량 축소와 일선 환기설계기법의 혼선을 최소화하기 위해 상기와 같은 보정계수를 유지하고 있으나 향후 WRA(PIARC) 2004~2012 기준 등을 참고할 경우 매연, CO, NOx 의 기본 보정계수(2.1.1 절)에서 제시한 내용들에 대한 국내 실측자료에 입각한 보정계수의 정립이 필요하다.

2.2 검토결과

WRA(PIARC) 2012에 새롭게 제시된 변경 사항들을 정리하면 다음과 같다.

<표 2.2.1> WRA(PIARC) 2012 내용

항목	비고
NO2 밀도	2.0 -> 1.9kg/㎥
터널내 희석 배기가스	4.64 -> 4.7 (중량농도(g/㎥)와 소광계수(m-1)의 변환계수)
공기치환율	최소 3 -> 4 회/hr
최소풍속	1.5 -> 1.0~1.5 m/s
고도보정계수(fh)	0~1,000m 까지는 1이고, 2000m를 기준으로 보간하여 적용 (2,000m 기준으로 데이터 제시함)
시간보정계수(ft)	2010년을 기준으로 제시된 기준배출량 제시되어 있으므로 새로운 차량, 노후화 등을 고려할 필요가 있음
중차량의 중량보정계수(fm)	중차량(HGV, 평균 23톤 기준)에 대한 총중량에 대한 보정이 필요함
기술기준에 대한 영향보정계수(fe)	기술기준(technology standard) A 에 대하여 다른 배출량 기준을 적용할 때 고려되어야 함.
비차량 배출분진	2004년 제시값 보다 다소 상향됨

2.3 환기량 산정을 위한 각종 보정계수

2.3.1 속도 · 경사보정계수

(1) 속도경사 보정계수는 WRA(2012)에서 제시하는 사용연료 및 차종에 따라서 <표 2.3.1>~<표 2.3.8>을 적용한다. 단, 차속 60km/h를 기준으로 한다.

<표 2.3.1> 입자상물질에 대한 속도 · 경사보정계수

(차종 : 승용차/소형버스/소형트럭, 사용연료 : 경유)

차속	경사도(%)						
(km/h)	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165
10	0.165	0.165	0.165	0.341	0.482	0.624	0.776
20	0.165	0.165	0.200	0.518	0.753	0.988	1.259
30	0.165	0.165	0.259	0.671	1.000	1.329	1.729
40	0.165	0.165	0.282	0.788	1.200	1.682	2.235
50	0.165	0.165	0.259	0.871	1.388	2.035	2.694
60	0.165	0.165	0.306	1.000	1.694	2.482	3.212
70	0.165	0.165	0.435	1.200	2.059	2.965	3.694
80	0.165	0.165	0.624	1.459	2.482	3.412	4.200
90	0.165	0.165	0.824	1.800	2.929	3.859	4.706
100	0.165	0.165	1.094	2.247	3.400	4.353	5.259
110	0.165	0.212	1.424	2.753	3.882	4.882	5.847
120	0.165	0.647	1.894	3.282	4.412	5.459	6.459
130	0.165	1.047	2.482	3.824	4.988	6.082	7.129

<표 2.3.2> 입자상물질에 대한 속도 · 경사보정계수

(차종 : 대형버스/중형트럭/대형트럭/특수트럭, 사용연료 : 경유)

차속	경사도(%)						
(km/h)	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.393	0.393	0.393	0.393	0.393	0.393	0.393
10	0.486	0.479	0.554	0.650	0.764	0.896	1.007
20	0.425	0.493	0.536	0.711	0.918	1.125	1.304
30	0.407	0.493	0.618	0.804	1.061	1.357	1.618
40	0.386	0.475	0.636	0.889	1.211	1.593	1.914
50	0.386	0.464	0.629	0.939	1.382	1.807	2.232
60	0.386	0.443	0.625	1.000	1.557	2.039	2.568
70	0.339	0.400	0.589	1.086	1.721	2.286	2.918
80	0.386	0.407	0.621	1.211	1.904	2.564	3.304
90	0.386	0.425	0.700	1.375	2.104	2.850	3.689
100	0.386	0.461	0.782	1.561	2.307	3.136	4.079
110	0.386	0.471	0.911	1.750	2.504	3.421	4.461
120	0.389	0.539	1.057	1.896	2.696	3.704	4.839
130	0.407	0.643	1.236	2.011	2.889	3.982	5.225

<표 2.3.3> CO 속도·경사보정계수

(차종 : 승용차/소형버스/소형트럭, 사용연료 : 휘발유)

차속 (km/h)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301
10	0.358	0.380	0.408	0.433	0.469	0.521	0.629
20	0.415	0.460	0.516	0.566	0.639	0.740	0.959
30	0.413	0.482	0.570	0.674	0.801	0.947	1.282
40	0.411	0.506	0.638	0.824	1.051	1.367	1.765
50	0.402	0.521	0.688	0.924	1.252	1.730	2.393
60	0.397	0.528	0.724	1.000	1.430	2.056	3.249
70	0.394	0.532	0.758	1.100	1.660	2.484	4.255
80	0.391	0.544	0.805	1.254	2.003	3.192	5.412
90	0.408	0.578	0.881	1.460	2.497	4.361	7.087
100	0.477	0.663	1.015	1.718	3.198	6.191	9.437
110	0.648	0.850	1.264	2.097	4.276	8.975	14.771
120	0.985	1.229	1.751	2.826	6.150	13.047	23.683
130	1.560	1.935	2.691	4.444	9.688	19.545	36.101

<표 2.3.4> CO 속도·경사보정계수

(차종 : 승용차/소형버스/소형트럭, 사용연료 : 경유)

차속 (km/h)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
10	0.550	0.550	0.550	0.900	1.275	1.675	2.100
20	0.550	0.550	0.600	1.350	2.050	1.025	0.800
30	0.550	0.550	0.750	1.800	1.000	0.825	0.800
40	0.550	0.550	0.800	2.150	0.775	0.825	0.700
50	0.550	0.550	0.725	1.575	0.825	0.725	0.650
60	0.550	0.550	0.850	1.000	0.825	0.675	0.650
70	0.550	0.550	1.150	0.800	0.725	0.600	0.775
80	0.550	0.550	1.650	0.850	0.675	0.700	0.900
90	0.550	0.550	1.950	0.800	0.625	0.800	1.050
100	0.550	0.550	0.800	0.700	0.700	0.950	1.200
110	0.550	0.650	0.850	0.625	0.825	1.100	1.375
120	0.550	1.725	0.775	0.675	0.950	1.250	1.550
130	0.550	0.875	0.675	0.800	1.125	1.425	1.750

<표 2.3.5> CO 속도 · 경사보정계수

(차종: 대형버스/중형트럭/대형트럭/특수트럭,사용연료:경유)

차속	경사도(%)						
(km/h)	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270
10	0.378	0.438	0.708	0.918	0.961	0.957	1.011
20	0.292	0.387	0.661	0.968	0.957	1.119	1.274
30	0.268	0.391	0.838	0.970	1.058	1.315	1.488
40	0.242	0.361	0.870	0.963	1.199	1.471	1.678
50	0.242	0.337	0.834	0.968	1.337	1.607	1.892
60	0.242	0.300	0.765	1.000	1.451	1.756	2.130
70	0.212	0.255	0.683	1.078	1.553	1.920	2.382
80	0.242	0.263	0.775	1.203	1.665	2.123	2.687
90	0.242	0.281	0.823	1.333	1.795	2.339	2.994
100	0.242	0.317	0.931	1.456	1.940	2.566	3.300
110	0.242	0.376	0.998	1.572	2.089	2.793	3.605
120	0.242	0.512	1.097	1.663	2.240	3.015	3.907
130	0.266	0.609	1.246	1.739	2.391	3.235	4.214

<표 2.3.6> NOx 속도 · 경사보정계수

(차종 : 승용차/소형버스/소형트럭, 사용연료:휘발유)

차속	경사도(%)						
(km/h)	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155
10	0.320	0.320	0.320	0.427	0.495	0.553	0.612
20	0.320	0.320	0.330	0.515	0.602	0.864	1.204
30	0.320	0.320	0.388	0.583	0.883	1.282	1.485
40	0.320	0.320	0.417	0.650	1.175	1.485	1.709
50	0.320	0.320	0.427	0.786	1.350	1.650	1.893
60	0.320	0.320	0.476	1.000	1.524	1.825	2.311
70	0.320	0.320	0.544	1.291	1.699	2.107	2.883
80	0.320	0.320	0.650	1.466	1.874	2.621	3.534
90	0.320	0.320	0.961	1.650	2.204	3.194	4.252
100	0.320	0.417	1.330	1.845	2.757	3.893	5.087
110	0.320	0.602	1.563	2.214	3.408	4.689	6.039
120	0.320	1.058	1.796	2.825	4.175	5.612	7.117
130	0.359	1.456	2.175	3.573	5.068	6.660	8.320

<표 2.3.7> CO 속도 · 경사보정계수

(차종 : 승용차/소형버스/소형트럭, 사용연료:경유)

차속	경사도(%)						
(km/h)	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220	0.220
10	0.220	0.220	0.220	0.402	0.552	0.685	0.825
20	0.220	0.220	0.252	0.577	0.804	0.990	1.280
30	0.220	0.220	0.325	0.731	1.000	1.353	1.808
40	0.220	0.220	0.350	0.839	1.210	1.745	2.385
50	0.220	0.220	0.315	0.899	1.423	2.154	2.927
60	0.220	0.220	0.374	1.000	1.759	2.668	3.633
70	0.220	0.220	0.497	1.213	2.185	3.248	4.472
80	0.220	0.220	0.678	1.507	2.671	3.955	5.388
90	0.220	0.220	0.864	1.888	3.213	4.752	6.385
100	0.220	0.220	1.094	2.392	3.934	5.689	7.524
110	0.220	0.276	1.458	2.993	4.797	6.752	8.797
120	0.220	0.699	1.986	3.748	5.797	7.962	10.217
130	0.220	1.052	2.668	4.699	6.958	9.332	11.804

<표 2.3.8> NOx 속도 · 경사보정계수

(차종:대형버스/중형트럭/대형트럭/특수트럭, 사용연료:경유)

차속	경사도(%)						
(km/h)	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051
10	0.154	0.224	0.468	0.661	0.779	0.887	1.015
20	0.101	0.162	0.525	0.737	0.905	1.192	1.483
30	0.091	0.167	0.597	0.817	1.096	1.566	1.999
40	0.078	0.149	0.598	0.881	1.331	1.952	2.498
50	0.078	0.130	0.599	0.928	1.605	2.323	3.021
60	0.078	0.104	0.606	1.000	1.891	2.709	3.562
70	0.068	0.083	0.610	1.127	2.166	3.128	4.114
80	0.078	0.086	0.614	1.325	2.485	3.569	4.685
90	0.078	0.096	0.622	1.577	2.820	4.002	5.250
100	0.078	0.118	0.772	1.883	3.151	4.423	5.811
110	0.078	0.177	0.936	2.215	3.463	4.839	6.368
120	0.078	0.302	1.134	2.481	3.745	5.251	6.922
130	0.095	0.425	1.408	2.669	4.030	5.660	7.477

2.3.2 표고보정계수

(1) 차량에서 발생하는 오염물질의 량은 표고에 따른 산소농도 및 압력에 영향을 받기 때문에 터널의 표고에 따른 보정이 필요하다. 이에 본 기준에서 표고보정계수는 WRA(2004)에서 제시하는 <표 2.3.9>의 표고보정계수를 적용한다.

<표 2.3.9> 표고보정계수 WRA(2004)

구분 \ 표고(m)		0	700	1000	2000	3000
소형차 (휘발유, 촉매장치)	CO	1	1	1.8	2.5	3.2
	NOx	1	1	0.7	0.5	0.5
소형차 (경유)	입자상물질	1	1	1	1.25	1.5
	CO	1	1	1.2	1.5	1.8
	NOx	1	1	1	1	1
대형차 (경유)	입자상물질	1	1	1.1	1.7	2.3
	CO	1	1	1.4	2.8	4.0
	NOx	1	1	1	1	1

2.3.3 차령보정계수

(1) 차령보정계수는 촉매장치(catalytic converter)의 열노화(thermal ageing)로 인해, 오염물질 배출량이 증가하는 영향을 고려하기 위한 것으로 국내의 경우에는 이에 대한 연구가 부족한 실정으로 WRA방식에서 제시하는 <표 2.3.10>을 적용한다.

(2) 차령보정은 CO, NOx에 대하여 수행하며, 5년 단위로 차령보정계수 및 상대주행거리비(REM)를 평균하여 적용한다.

<표 2.3.10> 차령에 따른 상대 주행거리비 및 CO, NOx의 보정계수

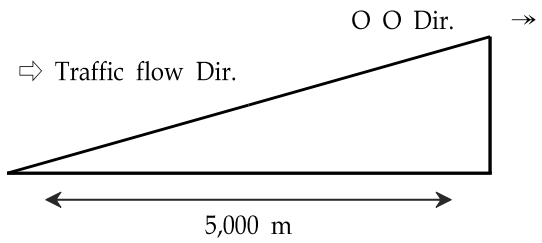
차령(년)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	5년					5년					5년				
구성비 %	10	10	10	10	10	9.5	8.5	7.5	6.5	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
	10.0%					7.5%					2.5%				
상대주행거리비 (REM)%	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	99.7	98.6	97.4	96.3	95.2
	101.3					101.3					97.44				
차령보정계수 (CO)	1	1	1.1	1.155	1.21	1.315	1.42	1.52	1.62	1.725	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
	1.093					1.520					1.830				
차령보정계수 (NOx)	1	1	1.11	1.22	1.33	1.445	1.56	1.67	1.78	1.89	2	2	2	2	2
	1.132					1.669					2.000				

제 3 장 제작차 허용배출량 및 보정계수 최신화에 따른 설계소요환기량 분석

3.1 대상터널 선정

Case 1은 한국도로공사의 고속도로 터널 환기시설 설계기준(1997)으로, 기준배출량(q0_T)은 환경부의 1991년 이후 제작차 배출허용기준(Emission standards)과 비엔진배출량(NEPM)은 고려하지 않은 경우이며, 속도구배보정계수(Fiv)는 WRA(PIARC)의 1991년 보고서를 기준한 것이다. Case 2는 국토교통부의 도로설계편람(2011)에 제시된 현행 환기설계기준이며, 기준배출량(q0_T)은 환경부의 2006년 이후 제작차 배출허용기준과 비엔진배출량은 WRA(PIARC)의 2004년 보고서를 기준한 경우이며, 속도구배보정계수(Fiv)는 WRA(PIARC)의 1991년 보고서를 기준으로 주행모드 30km/h에 대하여 보정한 경우이다. Case 3는 가상의 환기기준으로, 기준배출량(q0_T)은 환경부의 2013/14년 이후 제작차 배출허용기준과 비엔진배출량은 WRA(PIARC)의 2004년 보고서를 기준한 경우이며, 속도구배보정계수(Fiv)는 WRA(PIARC)의 1991년 보고서를 기준으로 주행모드 30km/h에 대하여 보정한 경우이다. Case 4는 Case3과 같이 가상의 환기기준으로, 기준배출량(q0_T)은 환경부의 2016/17년 이후 제작차 배출허용기준(최신의 환경부 기준)과 비엔진배출량은 WRA(PIARC)의 2012년 보고서를 기준한 경우이며, 속도구배보정계수(Fiv)는 WRA(PIARC)의 2012년 보고서를 기준으로 주행모드 30km/h에 대하여 보정한 경우이다. Case 5는 가상의 환기기준으로, 기준배출량(q0_T)은 환경부의 2016/17년 이후 제작차 배출허용기준(최신의 환경부 기준)과 비엔진배출량은 WRA(PIARC)의 2019년 보고서(최신 WRA(PIARC) 보고서)를 기준한 경우이며, 속도구배보정계수(Fiv)는 WRA(PIARC)의 2019년 보고서를 기준으로 주행모드 40km/h에 대하여 보정한 경우이다. 즉, Case 1은 과거 기준, Case 2는 현 기준, Case 3, 4는 가상의 기준으로 과도단계로 볼 수 있으며, Case 5는 최신의 국내 환경부 기준(제작차 허용배출기준)과 최신 WRA(PIARC)의 보정계수(비엔진 배출량, 속도구배 보정계수 등)를 반영한 가상의 (향후 변경이 예상되는) 환기기준으로 볼 수 있다.

<표 3.1.1> Input values for tunnel & traffic data

Type	Value	Layout
Length [km]	5	
Cross Area [m2]	75	
Diameter [m]	8.8	
Grade [%]	-6 ~ +6	
Lane [lane(s)]	2	
Elevation [m]	400	

Type	Passenger car		Bus		Truck				AADT (Veh/day)	HGV (%)
	G	D	Small	Large	Small	Medium	Large	Special		
Traffic	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866	44,574	25.2
Comp. [%]	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9	100.0	

<표 3.1.2> Permissible concentration limits

Vehicle Speed	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
PM [1/m]	0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
CO [ppm]	70							
NOx [ppm]	20							

<표 3.1.3> Case study

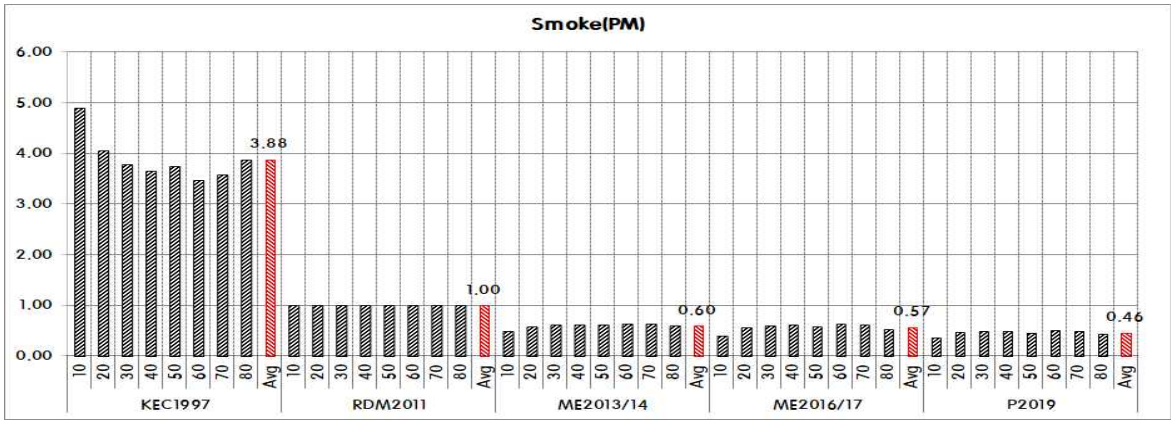
Case	1	2	3	4	5
Std.Vt [km/h]	60	30	30	30	40
Std.Gr [%]	0	0	0	0	0
q0_T (Emission standards)	KEC1997 (ME1991~)	RDM2011 (ME2006~)	ME2013/14~	ME2016/17~	ME2016/17~
NEPM [PIARC year]	N/A	P2004	P2004	P2012	P2019
Correction factor(Fiv) [PIARC year]	K1997 (P1991)	K2011 (Modify P1991)	K2011 (Modify P1991)	P2012	P2019

3.2 소요환기량 검토

<표 3.1.3>과 같이 5가지 Case에 대하여 경사도를 1%씩 증가하면서 총 13개의 경사도(-6% ~ +6%)에 대한 오염물질별 소요환기량을 분석하였다. <그림 3.2.1>~<그림 3.2.3> (a)는 오염물질별로 Case 2 에 대한 경사도별 소요환기량을 나타내고 있으며, (b)는 오염물질별로 Case 5 에 대한 경사도별 소요환기량을 나타내고 있으며, (c)는 경사도 +1% 일 경우, Case 2를 기준으로 Case별 소요환기량에 대한 상대비율을 나타내고 있다. (c)의 붉은색 막대와 레이블값은 전속도에 대한 평균값을 의미한다.

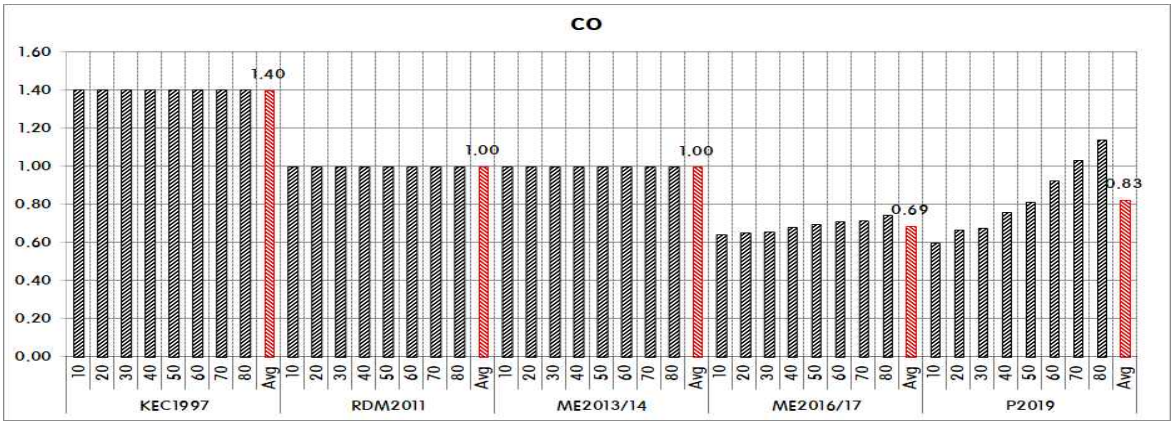
매연(PM)의 경우, Case2(현행 기준)에 대하여 Case 1(도로공사 97)은 3.88배 높고, Case 3(환경부 2013/14)은 0.6배 낮고, Case 4(환경부 2016/17)는 0.57배 낮고, Case 5(PIARC 2019)는 0.46배 낮은 분포를 보이고 있다. 일산화탄소(CO)의 경우, Case2(현행 기준)에 대하여 Case 1(도로공사 97)은 1.4배 높고, Case 3(환경부 2013/14)은 약 1.0배의 미소한 차이로 낮게 나타나고, Case 4(환경부 2016/17)는 0.69배 낮고, Case 5(PIARC 2019)는 0.83배 낮은 분포를 보이고 있다. 질소산화물(NOx)의 경우, Case2(현행 기준)에 대하여 Case 1(도로공사 97)은 2.0배 높고, Case 3(환경부 2013/14)은 0.24배 낮고, Case 4(환경부 2016/17)는 0.19배 낮고, Case 5(PIARC 2019)는 0.21배 낮은 분포를 보이고 있다.

경사도 +1%를 기준으로 향후 환기설계기준이 환경부의 최신 제작차 허용배출기준과 WRA(PIARC)의 최신 보정계수를 적용할 경우, 현행 설계기준 대비 매연(PM)은 약 46% 수준, CO는 약 83% 수준, NOx는 약 21% 수준으로 나타날 것으로 예상된다. 기타 경사도-6%에서 +6%에 대한 소요환기량 변화비율은 <표 3.2.1>에 나타내었다.



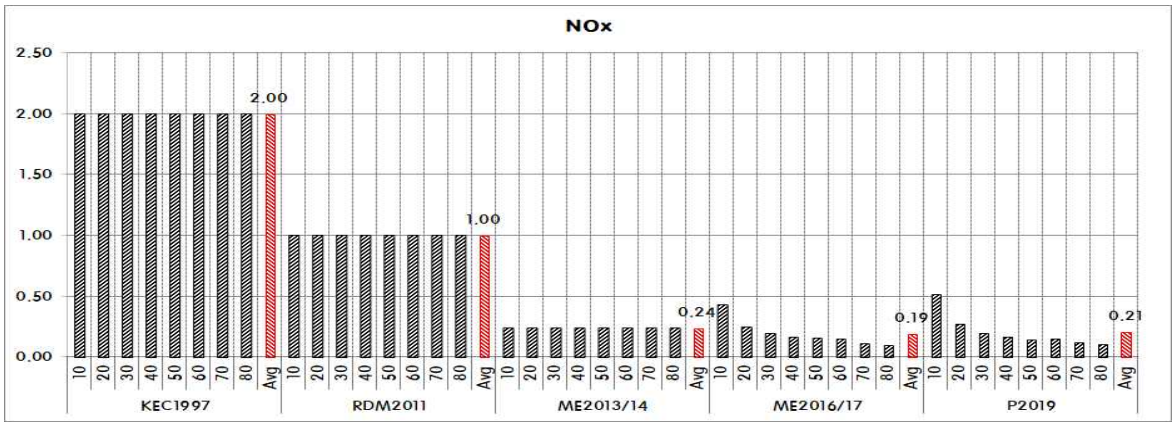
PM Qreq ratio for all cases over case2 (Gr=+1%)

<그림 3.2.1> Smoke(PM) Qreq profiles



CO Qreq ratio for all cases over case2 (Gr=+1%)

<그림 3.2.2> CO Qreq profiles



NOx Qreq ratio for all cases over case2 (Gr=+1%)

<그림 3.2.3> NOx Qreq profiles

<표 3.2.1> PM, CO, NOx Qreq ratio for Case 5 over Case 2

Type	Grade	-6%	-5%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%
Smoke (PM)	10 km/h	0.68	0.63	0.59	0.55	0.50	0.45	0.41	0.37	0.33	0.29	0.25	0.21	0.17
	20 km/h	0.71	0.68	0.65	0.62	0.58	0.55	0.51	0.46	0.42	0.37	0.33	0.28	0.24
	30 km/h	0.76	0.74	0.69	0.65	0.61	0.57	0.53	0.48	0.42	0.36	0.30	0.26	0.27
	40 km/h	0.78	0.75	0.72	0.68	0.63	0.59	0.54	0.49	0.41	0.32	0.29	0.30	0.31
	50 km/h	0.80	0.78	0.74	0.71	0.67	0.61	0.54	0.46	0.36	0.31	0.32	0.33	0.34
	60 km/h	0.80	0.79	0.76	0.73	0.69	0.64	0.58	0.50	0.41	0.36	0.37	0.39	0.40
	70 km/h	0.82	0.80	0.78	0.76	0.72	0.67	0.58	0.48	0.37	0.39	0.41	0.43	0.45
	80 km/h	0.83	0.81	0.79	0.77	0.74	0.70	0.59	0.43	0.41	0.43	0.46	0.48	0.50
	Avg	0.77	0.75	0.71	0.68	0.64	0.60	0.54	0.46	0.39	0.36	0.34	0.34	0.33
CO	10 km/h	0.35	0.38	0.41	0.46	0.50	0.55	0.60	0.60	0.59	0.60	0.60	0.60	0.60
	20 km/h	0.30	0.32	0.34	0.42	0.51	0.58	0.65	0.66	0.68	0.70	0.73	0.75	0.78
	30 km/h	0.25	0.27	0.29	0.39	0.49	0.57	0.64	0.68	0.70	0.74	0.76	0.77	0.78
	40 km/h	0.18	0.22	0.26	0.37	0.49	0.59	0.69	0.76	0.82	0.88	0.93	0.96	0.99
	50 km/h	0.14	0.17	0.20	0.34	0.49	0.60	0.72	0.81	0.89	0.97	1.03	1.05	1.07
	60 km/h	0.12	0.16	0.19	0.33	0.47	0.63	0.80	0.92	1.03	1.06	1.09	1.10	1.11
	70 km/h	0.12	0.16	0.19	0.33	0.47	0.68	0.88	1.03	1.16	1.17	1.17	1.20	1.22
	80 km/h	0.13	0.16	0.19	0.33	0.47	0.71	0.95	1.14	1.30	1.31	1.31	1.35	1.38
	Avg	0.20	0.23	0.26	0.37	0.49	0.61	0.74	0.83	0.90	0.93	0.95	0.97	0.99
NOx	10 km/h	0.83	0.85	0.87	0.76	0.68	0.62	0.58	0.51	0.47	0.43	0.40	0.37	0.35
	20 km/h	0.32	0.35	0.37	0.35	0.34	0.32	0.30	0.27	0.25	0.23	0.22	0.21	0.20
	30 km/h	0.17	0.20	0.22	0.22	0.23	0.22	0.21	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15
	40 km/h	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16
	50 km/h	0.07	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15
	60 km/h	0.05	0.06	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18
	70 km/h	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.15
	80 km/h	0.02	0.02	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14
	Avg	0.20	0.21	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19

3.3 소요환기량 변화에 대한 고찰

최대 소요환기량 측면에서 현행 터널 내공단면적(75㎡) × 터널내 최대풍속(10m/s)인 Qreq_max = 750 ㎥/s 라인이 최대 가능한 종류식(제트팬) 환기방식의 영역이 될 것이다. 따라서 터널연장과 종단경사에 대한 관계로 최대 소요환기량(Qreq_max) 선도를 표시한다면, 기능적인 환기특성도(Qreq contour map)를 나타낼 수 있다.

<표 3.3.1>은 Case 2(현행 기준)와 Case 5(향후 예상기준)에 대한 환기특성도 테이블 값을 나타내고 있다. 현행기준(Case 2)에 따라면 종단경사가 1% 이내일 경우는 최대 5km 까지, 종단경사가 2% 가 되면 4km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석되는데, 최신 WRA(PIARC) 보고서에 따라 향후 예상되는 가상 환기기준(Case 5)을 적용하면, 종단경사 0.5% 이내에서 최대 9km 까지, 종단경사 1~2% 에서는 최대 8km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석된다. 따라서 일반적인 2차선 도로터널을 기준으로 현행 기준(Case 2)에 따른 최대 소요환기량은 약 150㎥/s 정도로 분석되며, 향후기준(Case 5)에는 약 90㎥/s 정도 낮아질 것으로 예상된다.

<표 3.3.2>는 최근 도심지 소형차 전용터널에 계획되고 있는 OOO 터널에 대한 입력제원 자료를 나타내고 있다. 검토를 위해 도심지 터널에 대한 정체시 교통밀도(D_0)는 165 pc/km.lane를 적용하고, 터널 내 허용농도 기준은 <표 3.3.3>과 같이 적용하였다. 다만 현재 국토교통부에서 도시지역 지하도로 설계지침(2016)에서 터널 연장이 15km를 초과하는 구간은 FED 값(0.1)을 고려하여 CO와 NOx 의 허용농도 기준을 변경할 것을 권고하고 있지만 본 검토에서는 제외하였다. 소형차 전용터널의 내공단면적은 약 40㎡ 정도이므로 최대 소요환기량(Qreq_max)은 400 ㎥/s 라인을 기준으로 검토하였다.

현행기준(Case 2)에 따라면 종단경사가 0.3% 일 경우는 최대 16km 까지, 종단경사가 0.5~1.0% 가 되면 15km 까지, 종단경사가 2% 일 경우는 최대 14km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석되는데, 가상 환기기준(Case 5)을 적용하면, 종단경사 0.3% 일 경우는 최대 20km 까지, 종단경사 0.5% 일 경우는 최대 19km 까지, 종단경사 1.0% 일 경우는 최대 18km 까지, 종단경사 2% 일 경우는 최대 16km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석된다. 따라서 일반적인 2차선 소형차 전용터널을 기준으로 현행 기준(Case 2)에 따른 최대 소요환기량은 약 30㎥/s 정도로 분석되며, 향후기준(Case 5)에는 약 25㎥/s 정도 낮아질 것으로 예상된다.

<표 3.3.1> Qreq contour map' s table(at 750㎥/s)

	Lr [m]	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Case 2	0.30%	133.6	267.1	400.7	534.3	667.8	801.4	935	1068.5	1202.1	1335.7
	0.50%	135.7	271.5	407.2	543	678.7	814.4	950.2	1085.9	1221.6	1357.4
	1.00%	141.2	282.3	423.5	564.7	705.8	847	988.2	1129.3	1270.5	1411.7
	2.00%	152	304.1	456.1	608.1	760.1	912.2	1064.2	1216.2	1368.2	1520.3
Case 5	Lr [m]	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
	0.30%	80.3	160.6	240.9	321.3	401.6	481.9	562.2	642.5	722.8	803.2
	0.50%	81.5	163	244.5	326	407.4	488.9	570.4	651.9	733.4	814.9
	1.00%	84.4	168.9	253.3	337.7	422.1	506.6	591	675.4	759.8	844.3
	2.00%	90.3	180.6	270.9	361.2	451.5	541.8	632.1	722.4	812.7	903

<표 3.3.2> traffic data for small vehicle tunnel(example)

Type	Passenger car		Bus		Truck				AADT (Veh/day)	HGV (%)
	G	D	Small	Large	Small	Medium	Large	Special		
Traffic	1,453	968	2,059	0	2,942	0	0	0	29,422	0.0
Comp.[%]	49.8	33.2	7	0	10	0	0	0	100	

<표 3.3.3> Permissible concentration limits for small vehicle tunnel

Vehicle Speed	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
PM [1/m]	0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
CO [ppm]	50							
NOx [ppm]	15							

<표 3.3.4> Qreq contour map' s table(at 400㎥/s)

	Lr [m]	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000
Case 2	0.30%	239.6	263.5	287.5	311.5	335.4	359.4	383.3	407.3	431.3	455.2	479.2
	0.50%	251.6	276.8	301.9	327.1	352.2	377.4	402.6	427.7	452.9	478	503.2
	1.00%	261.7	287.8	314	340.2	366.3	392.5	418.7	444.8	471	497.2	523.3
	2.00%	281.8	310	338.2	366.3	394.5	422.7	450.9	479.1	507.2	535.4	563.6
Case 5	Lr [m]	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000
	0.30%	193.1	212.4	231.7	251	270.3	289.6	308.9	328.2	347.5	366.8	386.2
	0.50%	208.7	229.6	250.5	271.3	292.2	313.1	333.9	354.8	375.7	396.6	417.4
	1.00%	221.5	243.6	265.8	287.9	310.1	332.2	354.4	376.5	398.7	420.8	442.9
	2.00%	247	271.7	296.4	321.1	345.8	370.5	395.2	419.9	444.6	469.3	494

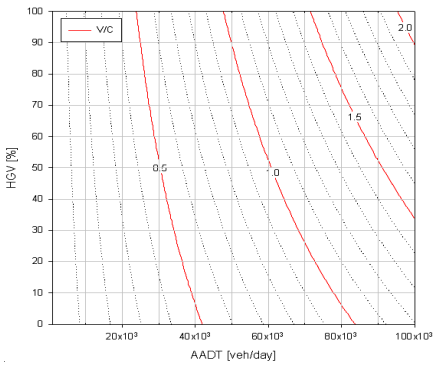
제 4 장 국내 도로터널 환기설계기준 최신화를 위한 제언

4.1 교통특성에 따른 환기검토 제외 속도

4.1.1 고속도로의 지정체 현황 분석

현재 한국도로공사에서는 VDS 망을 통해 고속도로의 지정체 구간을 관리하고 있으며, 관리구간 83개 자료군을 획득하여 분석하였다. VDS 를 통해 획득한 자료를 지정체 발생원인을 누적 집계하여 <그림 4.1.1>에 나타내었다. 고속도로의 지정체 발생 주요원인은 합류차량 과다, 주말/평일 출퇴근 교통량 증가, 차로수 감소에 따른 원인이 가장 많은 것으로 분석되었다. 또한 설계단계에서 실제 교통량의 증가를 예측하기가 곤란하기 때문에 교통량의 예측부분을 제외하면 노선상의 합분류 여부, 차로수 감소 등과 같은 물리적 조건이 있는 경우에 지정체 발생 가능성이 높은 것으로 분석된다. 또한 화물차량이 많은 경우에도 지정체 발생 가능성이 있는데, <그림 4.1.2>에서처럼 대형차혼입률(HGV)과 AADT 값은 반비례 관계에 있으며, 동일한 AADT 값이라도 대형차혼입률이 높을수록 도로용량을 초과하는 경향이 있다. 따라서 대형차혼입률이 증가할수록 지정체의 발생 빈도가 높아질 가능성이 있는 것으로 분석된다.

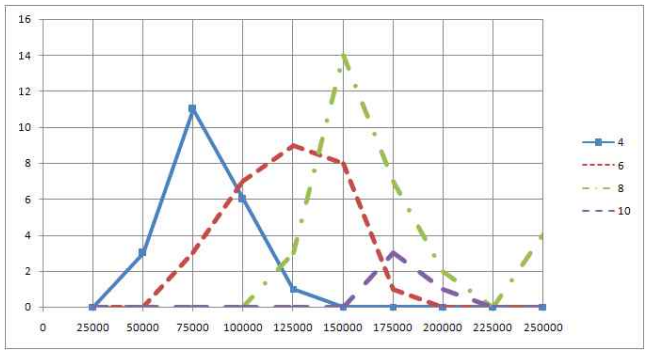
<그림 4.1.1> 고속도로 지정체 원인



<그림 4.1.2> HGV와 AADT 관계

4.1.2 지정체 교통량 분석

다음은 실제 노선의 교통량을 이용하여, 지정체 발생구간의 교통량의 범위를 차로수별로 분석해 보았다. 즉, 지점번호에 대한 교통량은 고속도로 통계연보의 AADT 값 자료를 이용하였으며, 2010년 자료가 없는 노선은 2009년 AADT 값을 이용하였다.(한국도로공사, 2011)

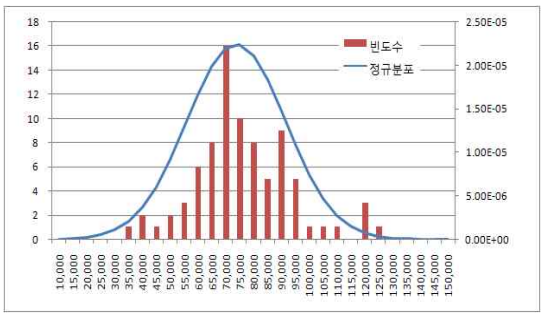


<그림 4.1.3> (왕복)차로수별 AADT 분포(계급구간: 25,000대/일)

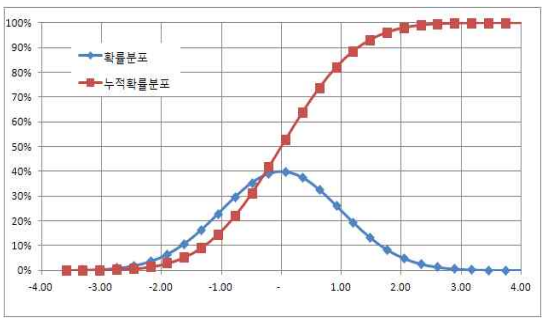
다음은 차로수별 자료수의 부족으로 전체자료에 대하여 차로수를 편도 2차로 환산한 AADT 값을 가지고 이에 따른 지정체 발생 분석을 수행하였다.

<표 4.1.1> 2차로 환산 AADT 분포

<정규분포(계급구간: 5,000대/일)>



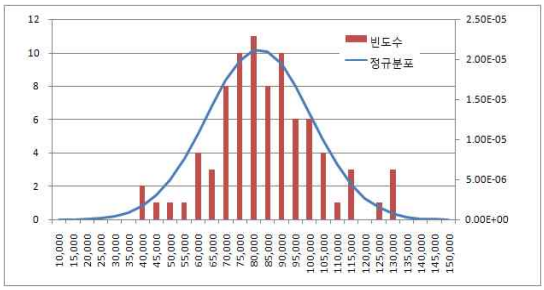
<표준정규분포>



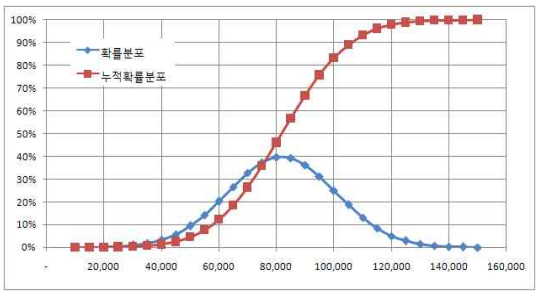
구간	도수	정규분포	누적분포	$Z = \frac{X-\mu}{\sigma}$	비고
~ 16,665	0	1.27E-07	0.1%	- 3.22	누적확률분포값이 2.5%가 되는 계급값은 대략 39,000대/일로 분석됨.
~ 32,689	0	1.54E-06	1.0%	- 2.31	
~ 38,910	3	3.27E-06	2.5%	- 1.96	
~ 44,422	4	5.74E-06	4.9%	- 1.65	
~ 51,010	7	9.91E-06	10.0%	- 1.28	
~ 73,716	46	2.25E-05	50.0%	- 0.00	

<표 4.1.2> 지체구간의 AADT(대/일) 값을 승용차대수(pc)로 환산 결과

<정규분포(계급구간: 5,000pcu/일)>

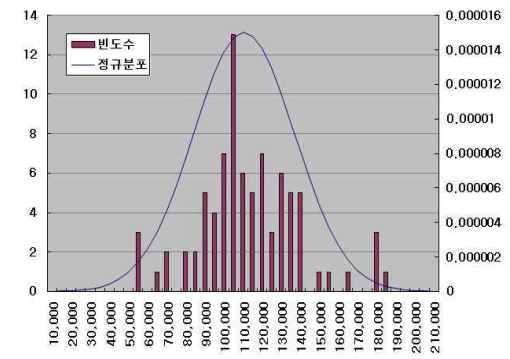


<표준정규분포>

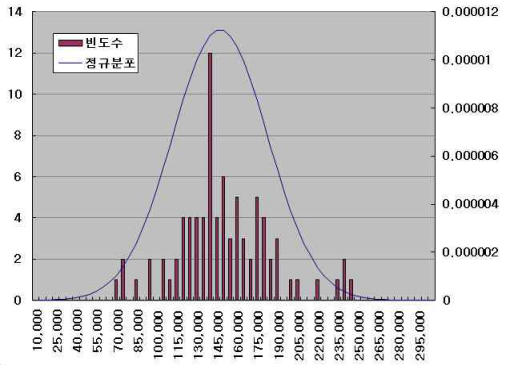


구간	도수	정규분포	누적분포	비고
~40,000	2	1.76E-06	1.3%	누적확률분포값이 2.5%가 되는 계급값은 대략 45,000(pc/일)로 분석됨
~42,500	3	2.35E-06	1.8%	
~45,000	3	3.08E-06	2.5%	
~47,500	3	3.97E-06	3.3%	
~50,000	4	5.02E-06	4.5%	

다음은 3차로 및 4차로 환산 교통량(AADT)에 대한 표준정규분포를 정리하였다.



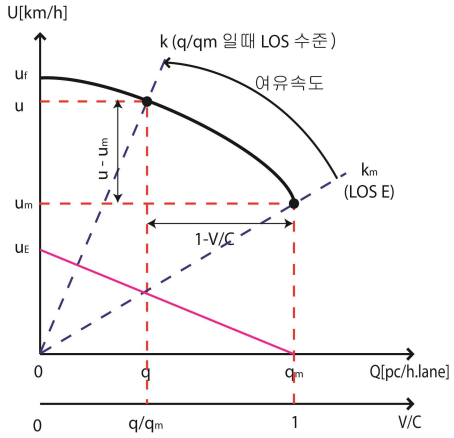
<그림 4.1.4> 3차로 환산 AADT 분포



<그림 4.1.5> 4차로 환산 AADT 분포

이상의 지정체 자료로부터 차로수별 지정체가 발생한 최소 교통량(TAC 2.5% 혹은 누적확률분포의 2.5% 값을 최소 예상 지정체 교통량으로 고려할 고려)을 정리해 보면, (1) 왕복 4차로(편도 2차로) 환산 교통량(AADT)의 경우, 약 39,000 대/일 이상에서는 지정체 발생, (2) 왕복 6차로(편도 3차로) 환산 교통량(AADT)의 경우, 약 58,000 대/일 이상에서는 지정체 발생, (3) 왕복 8차로(편도 4차로) 환산 교통량(AADT)의 경우, 약 78,000 대/일 이상에서는 지정체 발생한 것으로 분석된다.

4.1.3 환기검토 제외속도식



<그림 4.1.6> 고속도로 터널의 지정체 모델의 개념도

일반적으로 환기설계에 적용하는 교통량의 차속범위는 10~80km/h에 대한 전속도를 검토하고 있다. 그러나 지방부 고속도로 터널의 경우 주행속도가 높고, 지정체 발생확률이 낮기 때문에 이러한 특성을 고려하여 환기검토 제외속도를 결정할 필요가 있다. 현재까지 지정체를 정확히 판별할 수 있는 이론적 모델은 없으나, 다음에 제시하는 식을 사용하여 환기검토 제외속도를 결정한다.

$$U_{EV} = u_E \times (1 - V/C)$$

여기서, UEV : 환기검토 (최대)제외속도, V/C : 교통량과 용량과의 비율, uE : (지체환기설비용량 결정 제외를 위한) 원활시 환기검토 제외속도로 설계속도 120km/h시 uE=42.5km/h, 설계속도 100km/h시 uE=40km/h, 설계속도 80km/h시 uE=35km/h를 적용한다.

윗 식은 고속도로(지방부) 교통량에 대한 환기검토 제외속도식으로 원칙적으로 왕복 4차로(편도 2차로) 환산교통량이 39,000대/일 (및 45,000pcu/일) 이하일 경우에 적용한다. 다만, 터널출구 전방 2km 이내에 합분류부(진출입로, 톨게이트, 휴게소 등)가 있을 경우에는 적용하지 아니한다.

<표 4.1.3> 설계속도 100km/h시 V/C 값에 따른 환기검토 제외속도 분포

V/C -	U (km/h)	LOS -	UEV (km/h)	제외속도 (km/h)	환기시설검토속도 (km/h)
0.00	100.0	A	40	40	50~80
0.10	99.6	A	36	40	50~80
0.15	99.4	A	34	30	40~80
0.20	99.3	A	32	30	40~80
0.25	99.1	A	30	30	40~80
0.30	98.8	B	28	30	40~80
0.35	98.6	B	26	30	40~80
0.40	98.3	B	24	20	30~80
0.45	98.0	B	22	20	30~80
0.50	97.4	C	20	20	30~80
0.55	96.7	C	18	20	30~80
0.60	96.1	C	16	20	30~80
0.65	95.1	D	14	10	20~80
0.70	94.1	D	12	10	20~80
0.75	93.0	D	10	10	20~80
0.80	92.0	D	8	0	10~80
0.85	89.0	E	6	0	10~80
0.90	86.0	E	4	0	10~80
0.95	83.0	E	2	0	10~80
1.00	80.0	E	0	0	10~80

(주) 제외속도는 UEV 값을 일의 자리에서 반올림처리(round)하되, 10km/h 미만에서는 버림처리(rounddown)한다

4.1.4 검토결과

도로용량에 비해 교통량 적어 첨두교통량을 적용할 경우, 주행속도는 고속도로 터널의 경우는 60km/h 이상, 도심 및 일반국도 터널의 경유는 40km/h 이상을 적용할 수 있으며, 기타 도로용량으로 환기검토할 경우는 '환기검토 제외속도식'(4.1.3절)을 참고하여 터널의 특성을 반영할 필요가 있다.

4.2 벽면 마찰계수 재산정

4.2.1 환기저항계수 산정방법

(1) 속도감쇄법에 의한 환기저항계수 측정방법

환기설비의 작동을 중지한 후의 환기속도 감쇄는 터널의 총 환기저항에 기인하게 된다. 이와 같은 경우의 터널에서의 공기유동은 unsteady motion에 따라 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$\pm\Delta P_w - \zeta\frac{1}{2}\rho u^2 = \Delta P - \lambda\frac{L_p}{D_h}\frac{1}{2}\rho u^2 = \rho L\frac{du}{dt}$$

ΔP_w : 터널 입·출구 사이의 자연환기압(압력차)
ΔP : 터널 전압(=ΔP_t)
L_p : 터널의 입·출구 사이의 거리(m)
D_h : 대표직경(m)
u : 터널내 평균 순간 환기속도(m/s)

환기저항계수는 $\zeta = \zeta_{in} + \zeta_{out} + \lambda\frac{L_p}{D_h}$ 으로 입·출구 충격계수와 터널 내부 마찰계수 등에 의한 총 환기저항 계수를 나타낸다. (환기설비 가동 후 약 5분간 공기를 가속하기 위하여 소모되는 에너지 $\frac{1}{2}\rho u^2$를 고려할 경우, $\zeta = \zeta_{in} + \zeta_{out} + \lambda\frac{L_p}{D_h}$ 가 된다.) 따라서 총 환기저항계수 ζ는 ΔPw를 측정할 경우 그리고 벽면마찰계수 λ는 ΔP의 시간변화를 측정할 경우 계산 가능하다.

ΔPw를 $\Delta P_w = [C_1(\frac{V_{10}}{u}) + C_2(\frac{V_{10}}{u})^2] \cdot \frac{1}{2}\rho V_{10}^2$ 과 같이 표현할 경우 위식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$[C_1(\frac{V_{10}}{u}) + C_2(\frac{V_{10}}{u})^2 - \zeta] \cdot \frac{1}{2}\rho u^2 = \rho L\frac{du}{dt}$$
$$[C_2^*(\frac{V_{10}}{u})^2 - \zeta] \cdot \frac{1}{2}\rho u^2 = \rho L\frac{du}{dt}$$

C1, C2 : 풍향의 2차 다항식으로 표시되는 계수이다.

환기속도 감쇄가 끝나는 시점에서는 좌변은 "0"이 된다. 결국 환기속도는 자연환기속도이며 지상 10m 지점에서의 풍속인 V10 에 비례하며 비례상수는 풍향에 비례하게 된다. 위 식 중 두 번째 식의 환기속도가 비교적 클 경우 du/dt 에 대한 V10의 영향이 비교적 작으나 첫 번째 식의 경우에는 이와 같은 관계가 성립되지 않는다. 환기속도 감쇄과정 동안의 외부풍속 및 풍향이 일정하다고 가정할 경우 ⊿Pa는 일정하며 $\Delta P_w = \zeta \cdot \frac{1}{2}\rho u_e^2$ 가 된다. 따라서 감쇄도중의 환기속도 u(t)는 다음과 같이 계산 가능하다.

$$u(t) = u_e \frac{e^{a+bt}+1}{e^{a+bt}-1} \qquad (4-2-1.a)$$

또는

$$\ln \frac{u(t)+u_e}{u(t)-u_e} = a+bt, \quad a = \ln \frac{u_o+u_e}{u_o-u_e}, \quad b = \zeta \frac{u_e}{L} \qquad (4-2-1.b)$$

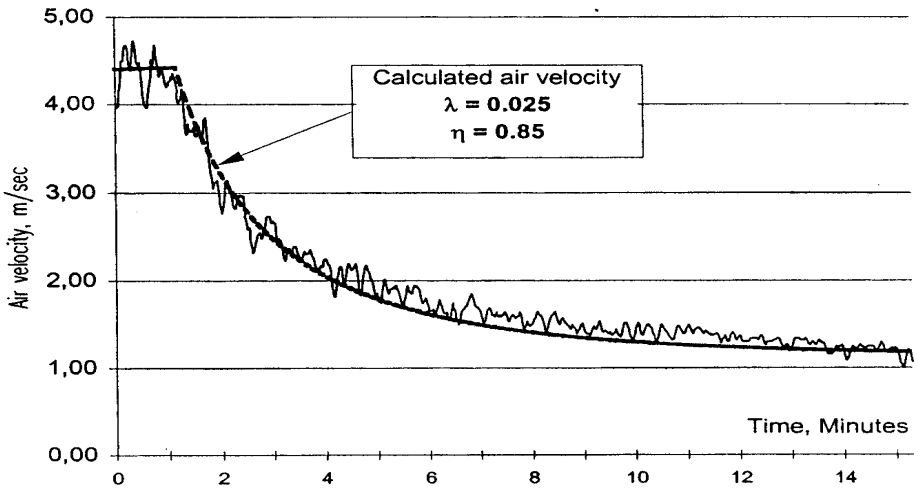
u_e : 환기설비 작동 중지 후 수렴하는 환기속도(자연환기속도)
u_o : 환기설비 작동 중지 직전의 환기속도(초기 환기속도)

따라서 상수 a는 ue와 uo의 측정으로 계산 가능하며, b 및 ζ는 식(4-2-1)의 선형회귀분석(절편=0)을 통하여 계산이 가능하다. 일반적으로 선형회귀식을 통하여 계산된 ζ의 값이 du/dt 관계식을 적용하여 계산한 경우 보다 안정적이다. 스무스(smooth)한 관류와 같은 네덜란드 Wijker tunnel의 경우 Reynolds 수 1~5*106, 환기속도 2~10㎧에서 0.0090 < λ < 0.0116, 0.78 < λLout/Dh (Lout = L-Lin, Lin=75m) 정도이다.

또는 환기설비 작동은 중단한 직후의 속도 감쇄율, du/dt을 그래프상에서 계산하여 식(4-2-1)에 적용함으로써 ζ를 추정할 수 있다. 가동중인 팬을 중단시키면, 공기의 속도변화율(a)은 다음 식에서 구할 수 있다.

$$\rho L a = \Delta P_{nat} - (1 + \zeta_{in} + \lambda \frac{L}{D} + \zeta_{out}) \frac{1}{2} \rho v^2$$

또한 시간과 속도에 대한 그래프를 그려보면, <그림 4.2.1>과 같이 될 것이다.



<그림 4.2.1> Measured and calculated air velocity after the fans are stopped

이 방법은 팬 가동을 중단한 후 측정된 공기의 속도 그래프에 적합한 λ 값을 추정하기가 용이하다. 이 방법의 정확도는 팬 가동을 중단할 때의 초기 속도에 달려있다.

A. West and C. Pope의 보고에 의하면, 오스트리아 Penmaenbach road tunnel 인접 철도터널의 경우 외부바람만에 의한 자연환기압을 ΔP라 하면, 계산식 다음과 같다.

$$\Delta P = (\zeta_{in} + \zeta_{out} + \lambda \frac{L}{D_h}) \frac{1}{2} \rho V_t^2 = C \frac{1}{2} \rho V_t^2 = \rho L \frac{dV_t}{dt}$$

C: overall pressure loss coefficient

그리고 차량이 t = ti 시점에 터널을 빠져나간다면 그 이후 자연환기력 만에 의한 상태로 다다르기까지 unsteady state 상태에서의 관계식은 다음과 같다.

$$- C \frac{1}{2} \rho V_t^2 = \rho L \frac{dV_t}{dt}$$

자연환기속도 Vt와 ti 시점에서의 환기속도 Vti 관계는 위식을 적분하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

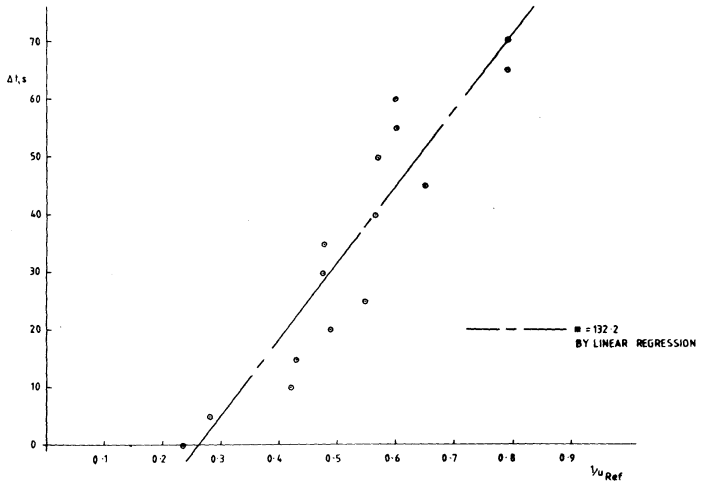
$$\Delta t = 2\frac{L}{C}\left(\frac{1}{V_t} - \frac{1}{V_{ti}}\right)$$

따라서 Vti를 측정한 수 Vt에 도달하게되는 시간 ⊿t를 반복 측정하여 다음과 같은 자료를 얻을 수 있으며, 회귀분석을 통하여 overall pressure loss coefficient인 C 값을 추정할 수 있게 된다.

가령, 측정점에서의 평균풍속이 Vm(=0.93Vref, Vref는 비교지점의 풍속, m/s)이고, 이때의 단면적을 Am(=35.71㎡)하고, 그리고 평균단면적 At(=40.4㎡)에 대한 평균풍속 Vt(=0.822Vref)라 하면, 이산점에서의 Vti = 0.822 Viref의 관계가 있고 위식에 대입하면 아래식과 같다.

$$\Delta t = \frac{2L}{0.822C}\left(\frac{1}{V_{ref}} - \frac{1}{V_{iref}}\right)$$

선형회귀분석을 통해 y=mx+c라 두면, y=⊿t, x=1/Vref, m=2L/0.822C 이다.



<그림 4.2.2> Velocity decay characteristic plotted in terms of 1/Vref and ⊿t

따라서 C=2L/0.822m에서 m=132.2 임으로 overall pressure loss coefficient인 C의 값은 11.9가 된다. 그리고 입·출구 손실계수는 ζ = 0.5 (At / Aen)^2 = 0.75, ξ =

1.0 (At / Aex)^2 = 1.57 이고, 이 터널의 f = 0.024로 주어져 있다.

따라서 터널내 공기에 작용하는 힘 = $F_t = 11.9\frac{1}{2}\rho V_t^2 A_t$ 이고, 터널 양쪽 입/출구에서 작용하는 풍압(력) = $F_w = K\frac{1}{2}\rho V_w^2 A_{en}$ 이다.

그러므로

$$K = 11.9\left(\frac{V_t}{V_w}\right)^2\left(\frac{A_t}{A_{en}}\right) = 0.93^2\left(\frac{V_{ref}}{V_w}\right)^2\left(\frac{A_m}{A_t}\right)11.9\left(\frac{A_t}{A_m}\right) = 9.869\left(\frac{V_{ref}}{V_w}\right)$$

(2) 두지점 정압차 측정에 의한 환기저항계수 계산 방법

직접적 방법(gauge and tube method)으로 터널내 두 지점사이의 정압차, P12를 측정한 경우 이는 벽면마찰 및 터널내 설치물의 저항만에 의한 압력손실이다. 따라서 다음과 같이 마찰계수 λ의 계산이 가능하다.

$$P_{12} = \rho F_{12} = \lambda\frac{L}{D_h}\frac{1}{2}\rho u^2$$

그러나 이 방법은 1~2km이상 되는 장대화 터널에서의 정확한 정압차이를 측정한다는 것은 실험상의 상당히 어려운 문제로 남아있다.

4.2.2 속도감쇄법에 의한 환기저항계수의 측정

터널내 환기저항계수값의 측정에는 어려운 점이 많다. 특히 마찰계수(λ)는 개통전이 아니고서는 측정에 상당한 어려움이 많으며 현재 한국도로공사에서 기준으로 제시하고 있는 도로터널내 설계기준상의 터널내 마찰계수값은 λ=0.025으로만 가정하고 있는 실정이다. 이는 콘크리트(plain concrete)상의 마찰계수값을 기준한 수치이다.

따라서 터널내 환기정항계수인 마찰계수의 추정방법은 환기설비의 작동을 중지한 후의 환기속도 감쇄는 터널의 총 환기저항에 기인함으로 아래의 식을 이용하여 환기저항계수값을 추정할 수 있다.

$$u(t) = u_e \frac{e^{a+bt}+1}{e^{a+bt}-1}$$

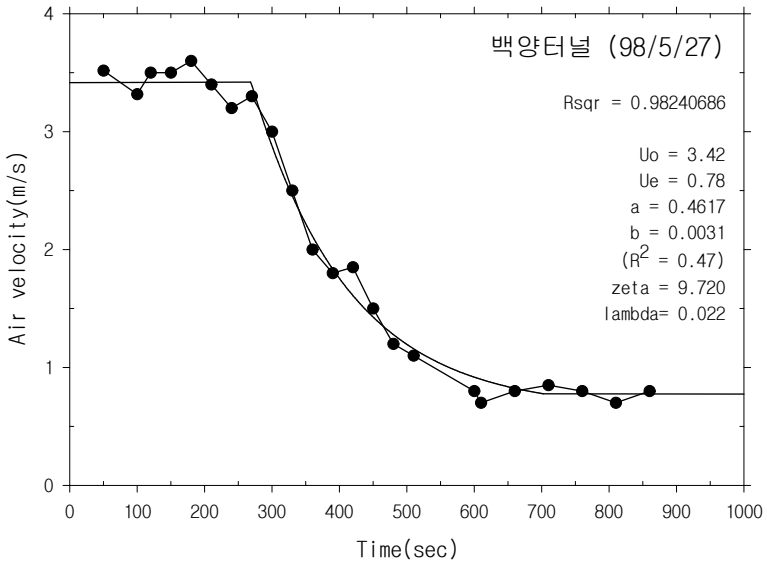
$$\ln \frac{u(t)+u_e}{u(t)-u_e} = a+bt, \quad a = \ln \frac{u_o+u_e}{u_o-u_e}, \quad b = \zeta \frac{u_e}{L}$$

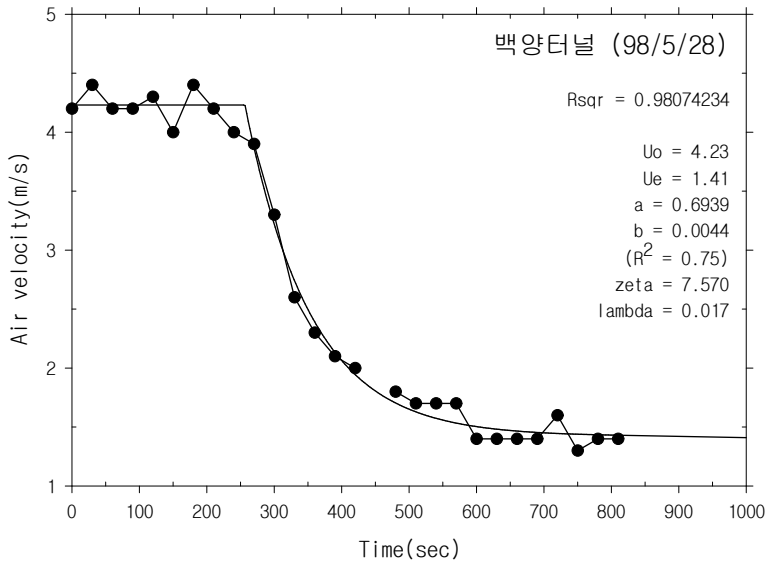
u_e : 환기설비 작동 중지 후 수렴하는 환기속도(자연환기속도)
u_o : 환기설비 작동 중지 직전의 환기속도(초기 환기속도)

다음의 결과는 개통전 백양(하행)터널을 대상으로 하여 Fan on/off를 통해 측정하였으며 결과는 <표 4.2.1>과 같다. 백양터널의 벽면마찰계수(λ)는 0.017-0.022의 범위로 나타났으며, 이는 일반적으로 도로터널내 벽면마찰계수보다 낮은 범위로 설계상의 환기력보다 실재 환기력이 더욱 크게 작용할 수 있음을 나타내고 있다.

<표 4.2.1> 벽면마찰계수(λ) 측정결과

구분	case1	case2
Fan-off time	98/5/27 13:10:00	98/5/28 11:50:00
Uo(m/s)	3.42	4.23
Ue(m/s)	0.78	1.41
a	0.4617	0.6939
b(R2)	0.0031(0.47)	0.0044(0.75)
환기저항계수, ζ	9.72	7.57
마찰계수, λ	0.022	0.017





<그림 4.2.3> 백양터널의 마찰계수 측정결과

4.2.3 유도풍속에 의한 환기저항계수의 추정

다음은 개통터널로서 차량통행이 이루어지는 상황에서 터널내 자연환기력과 교통환기력에 의해 유도된 풍속으로부터 환기저항계수를 결정하는 방법이다. 이 방법은 터널내외부의 기상변수 및 교통량변수들을 정확히 측정하여야 하며 특히 교통량 자료에 관련된 차량의 전면투영면적(Aveh), 터널내 차량대수(N) 그리고 차속(Uveh)과 터널내 풍속이 주요한 변수로 작용한다.

백양(하행)터널(1999/5/7)을 대상으로 자료를 분석해보면 다음과 같다. 먼저 교통량자료의 분석에 앞서 분석시간대의 선택은 터널내 작용풍속이 3.2m/s일 경우 터널내에 영향을 주는 시간은 약 760sec(=12min) 정도가 된다. 따라서 교통량분석은 최소 15min을 정도를 해야하며 본 실험에서는 20min을 기준하여 교통량 자료를 분석하였다. 참고로 터널내 차량대수(N)는 교통량(대/h) * 터널길이(km) * 차량속도(km/h)으로 계산한다. 그리고 대형차혼입율에서 대형차는 승용차, 소형버스, 소형트럭을 제외한 차종의 혼입율을 의미한다.

<표 4.2.2> 기후 자료

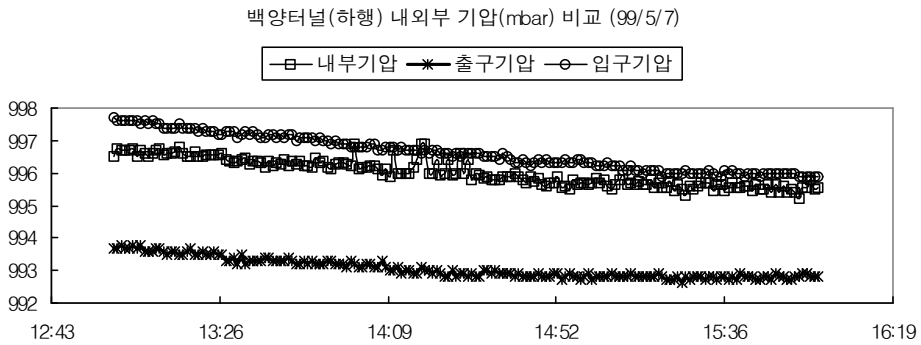
구분	입구(모라)					출구(당감)					터널내부					작용 풍속
	기압 mbar	풍속 m/s	건구 ℃	습구 ℃	밀도 kg/㎥	기압 mbar	풍속 m/s	건구 ℃	습구 ℃	밀도 kg/㎥	기압 mbar	풍속 m/s	건구 ℃	습구 ℃	밀도 kg/㎥	m/s
1	997.2	0.12	28.0	21.2	1.145	993.4	0.03	27.1	21.1	1.143	996.4	3.26	24.1	18.5	1.160	0.09
2	996.4	0.00	29.3	21.8	1.139	992.8	0.36	27.3	21.3	1.142	995.8	3.22	24.8	18.8	1.157	-0.36
3	996.1	0.00	29.2	21.8	1.139	992.8	0.31	27.4	21.4	1.141	995.7	3.18	24.8	18.8	1.156	-0.31

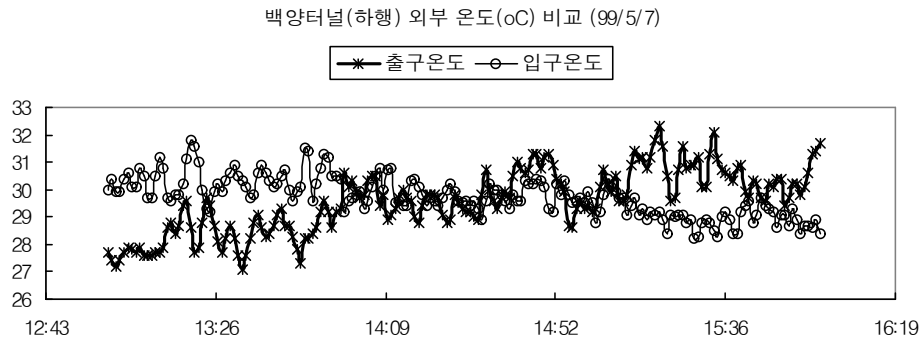
<표 4.2.3> 교통량 자료

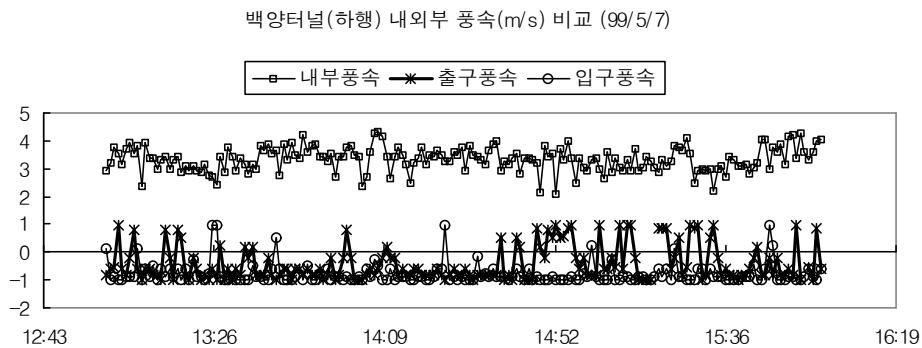
구분	교통량 (대/time)							총계	차속 km/h	대형차 혼입율 %/100	측정 시간 min	차량 대수 N	교통량 대/h
	승용차	소버	대버	소트	중트	대트	특트						
1	119	11	0	33	4	7	0	174	66.2	0.06	20	19	522
2	101	20	0	45	1	7	0	174	67.2	0.05	20	19	522
3	100	22	0	35	2	4	2	165	60.8	0.05	20	20	495

<표 4.2.4> 자연환기력과 교통환기력의 측정 및 추정

구분	자연환기력(Pa)				교통환기력(Pa)		측정 풍속 m/s	예상 풍속 m/s	상대 오차 %
	고도온도 Pa	외부바람 Pa	ΔPMT Pa	유도풍속 m/s	ΔPv Pa	유도풍속 m/s			
1	-3.945	0.002	-3.942	0.79	101.28	4.03	3.26	3.23	1
2	-4.057	-0.035	-4.092	0.81	96.59	3.94	3.22	3.13	3
3	-4.002	-0.026	-4.028	0.80	80.64	3.60	3.18	2.80	12

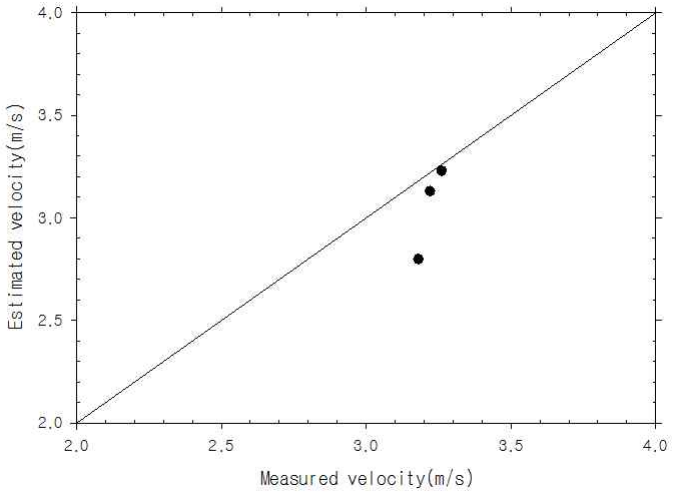




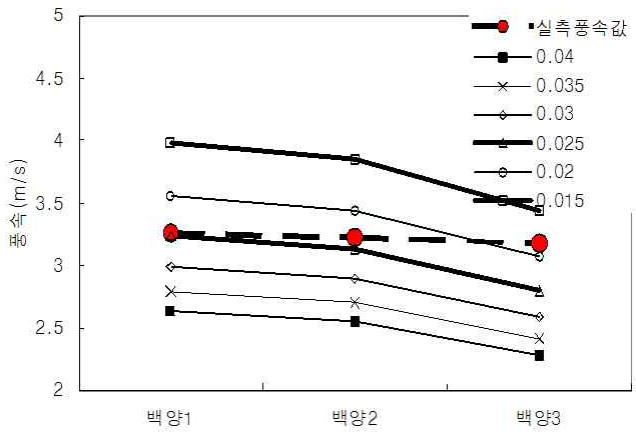


<그림 4.2.4> 개통후 백양터널의 환기저항력 측정자료

구분1은 13:25-13:45, 구분2는 14:39-15:00 그리고 구분3은 15:03-15:23 사이의 분석시간이다. 자연환기력식 및 교통환기력식으로부터 각각의 환기력을 계산할 수 있다. 그리고 각각의 유도풍속은 압력손실식을 기준하여 계산하였다. 계산결과 실측풍속과 예상풍속의 상대오차는 1-12% 정도로 나타났으며 <그림 4.2.4>는 국내 도로공사의 환기설계 기준인 plain con'c상의 마찰계수인 λ를 0.025로 가정하여 자연환기력과 교통환기력에 의해 유도된 풍속과 터널내에서 실재 측정한 풍속을 비교한 그림이며, 직선은 기울기가 1인 직선을 의미한다. 이러한 차이의 원인중 하나인 마찰계수에 따른 예상풍속을 <그림 4.2.5>에서 그려봤다. 또한 마찰계수의 범위를 찾아보기 위해 분석시간대별로 마찰계수에 따른 예상풍속을 <그림 4.2.6>에 그려봤다. 유도풍속에 의한 백양터널의 마찰계수는 0.015-0.025사이의 범위를 보였다.

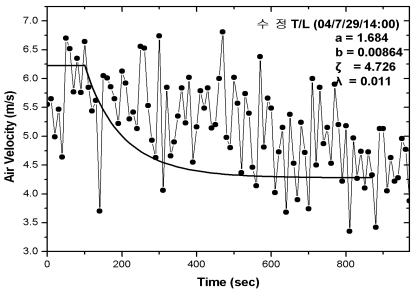


<그림 4.2.5> 측정풍속과 예상풍속 (기울기 = 1.0)

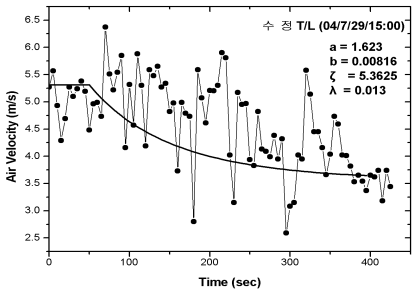


<그림 4.2.6> 풍속조건에 따른 벽면마찰계수의 영향범위

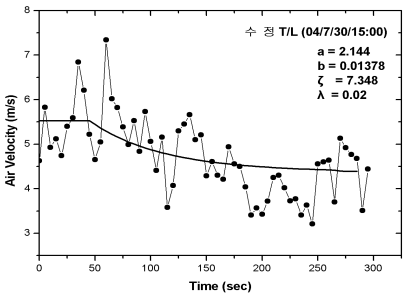
<그림 4.2.7>의 (a)~(m)에는 교통환기력 변화가 비교적 적은 시간대인 오후 2:00 및 3:00부터 터널 전체 기류 치환이 가능한 시간인 약 15분간 팬을 가동한 후 중단시키고 터널 출구 150m 정도지점에서 풍속과 속도감쇄법에 따라 추정한 추정속도와의 관계를 도시하였다.



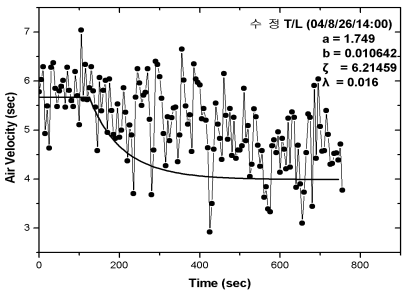
(a) 수정산터널 (04/07/29/14:00)



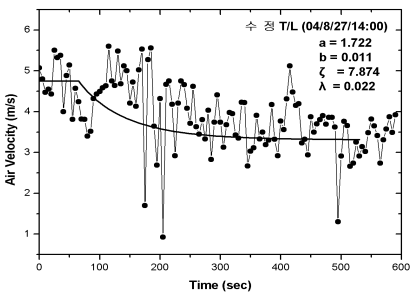
(b) 수정산터널 (04/07/29/15:00)



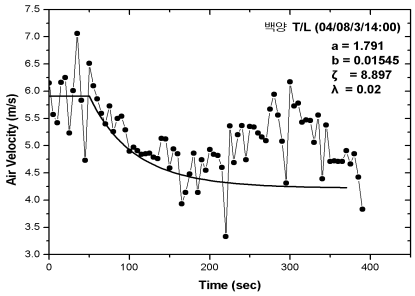
(c) 수정산터널 (04/07/30/15:00)



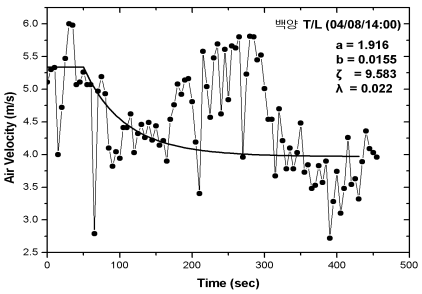
(d) 수정산터널 (04/08/26/14:00)



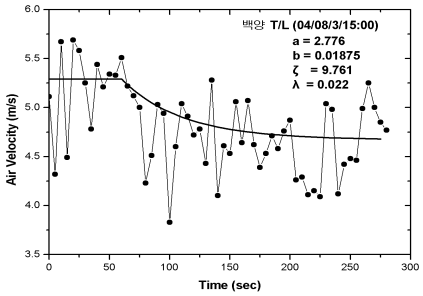
(e) 수정산터널 (04/08/27/14:00)



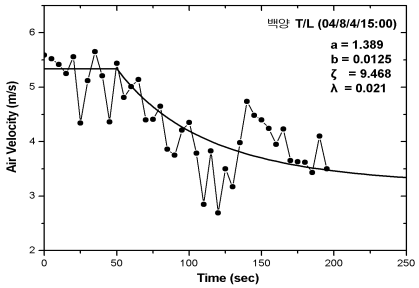
(f) 백양산터널 (04/08/31/14:00)



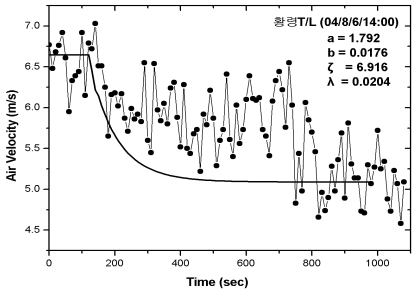
(g) 백양산터널 (04/08/3/14:00)



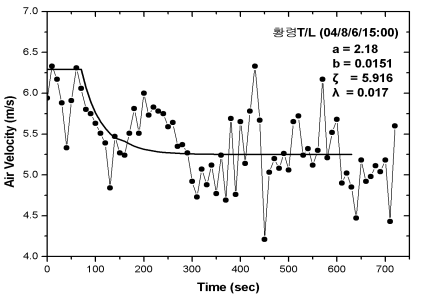
(h) 백양산터널 (04/08/3/15:00)



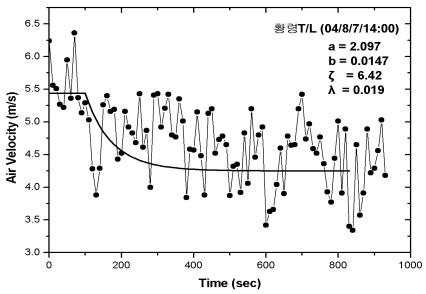
(i) 백양산터널 (04/08/4/15:00)



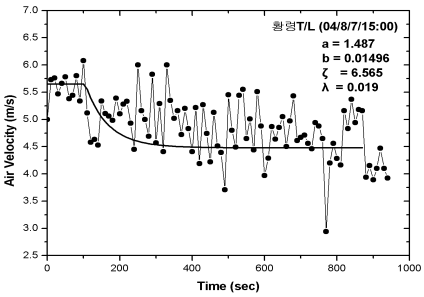
(j) 황령산터널 (04/08/6/14:00)



(k) 황령산터널 (04/08/6/15:00)



(l) 황령산터널 (04/08/7/14:00)



(m) 황령산터널 (04/08/7/15:00)

<그림 4.2.7>. 속도감쇄법에 풍속변화 추정결과

<표 4.2.5> 속도감쇄법에 의한 벽면마찰 계수 추정 결과

터널	날짜	환기방식	u_0(m/s) initial velocity	u_e(m/s) final velocity	λ wall friction coeff	λ 평균
백양산	98/5/27 13:10	반횡류식	3.42	0.78	0.022	0.02
백양산	98/5/28 11:50		4.23	1.41	0.017	
백양산	99/5/7 13:00		N/A	N/A	0.015-0.025	
수정산	04/07/29/14:00	제트팬 종류식	6.23	4.28	0.011	0.017
수정산	04/07/29/15:00		5.31	3.56	0.013	
수정산	04/07/30/15:00		5.53	4.37	0.020	
수정산	04/08/26/14:00		5.67	3.99	0.016	
수정산	04/08/27/14:00		4.75	3.31	0.022	
백양산	04/08/3/14:00	반횡류식	5.91	4.22	0.020	0.021
백양산	04/08/3/15:00		5.29	4.67	0.022	
백양산	04/08/4/14:00		5.34	3.97	0.022	
백양산	04/08/4/15:00		5.34	3.208	0.021	
황령산	04/08/6/14:00	반횡류식	6.65	5.09	0.021	0.019
황령산	04/08/6/15:00		6.29	5.25	0.017	
황령산	04/08/7/14:00		5.44	4.25	0.019	
황령산	04/08/7/15:00		5.65	4.48	0.019	