

❖ 터널 환기 및 방재 기술위원회

Annual Technical Report

~ 도로터널 환기설계 최신화를 위한

개선방안 제시 ~

2020

■ 목 차 ■

제 1 장 터널내 오염물질 농도의 현장측정을 통한 실태 조사	1
1.1 국내 주요터널에 대한 환경 실태 조사	1
1.1.1 도심지 주요터널에 대한 환경 실태 사례조사	1
1.1.2 고속도로 주요터널에 대한 환경 실태 사례조사	7
1.1.3 기타 문헌조사를 통한 사례조사	9
1.2 터널내 오염물질 농도 현장측정 조사	11
1.2.1 측정대상 터널	11
1.2.2 터널내 오염물질 농도 현장측정 조사결과	12
제 2 장 터널내 공기질 개선방안 도출	16
2.1 터널내 환경실태 조사를 통한 문제점 도출	13
2.1.1 오염물질 허용기준과 측정값 비교	13
2.1.2 환기설비의 가동현황 분석	15
2.2 터널내 환경실태 시뮬레이션 분석을 통한 문제점 도출	16
2.2.1 환경실태 시뮬레이션 분석	16
제 3 장 현행 설계기준의 개선방안 도출	25
3.1 관계 설계기준 검토 및 상이내용 도출	22
3.1.1 기준배출량 상이에 따른 검토	22
3.2 현행 설계기준상 개정사항 도출	56
3.2.1 오염물질별 기준배출량 상이에 따른 개정사항 도출	56
3.2.2 소요환기량 산정을 위한 보정계수 개정사항 도출	57
3.2.3 오염물질 허용기준 개정사항 도출	65
제 4 장 국내 도로터널 환기설계기준 개선방안	32
4.1 소요환기량 산정을 위한 차량의 기준배출량 제시	66
4.2 터널내 오염물질(PM, CO, NO _x 등)의 허용기준 제시	67
4.3 발생오염물질에 대한 터널외부배출량 산정기법 제시	68
4.4 환기시설(오염물질 저감장치 포함)에 대한 설계기준 제시	70

4.4.1	국내 주요 터널의 공기질관리 사례조사	70
4.4.2	오염물질 배출량 저감대책에 대한 검토	73
4.4.3	종류식 환기시스템의 설계	81
4.4.4	(반)횡류식 환기시스템의 설계	82
4.5	기타 환기방식, 환기소(탑)에 필요한 세부 설계기준 제시	84
4.5.1	대면통행 터널의 환기시스템 설계	84
4.5.2	환기방식별 소요동력 및 경제성 검토	85
4.5.3	환기기설의 운영평가 수행	85
4.5.4	터널내 오염물질 측정센서 설치위치	86

■ 표 목 차 ■

<표 1.1.1> 부산시 주요터널의 입자상물질의 측정결과.....	2
<표 1.1.2> 서울시의 1km이상 연장의 터널현황.....	3
<표 1.1.3> 부산시의 1km이상 연장의 터널현황.....	3
<표 1.1.4> 부산시 가스상물질의 측정결과(최근 7년간).....	4
<표 1.1.5> 부산시 가스상물질의 측정결과(최근 7년간).....	5
<표 1.1.6> 터널별 측정결과(1차측정 - 2016년도).....	8
<표 1.1.7> 터널별 측정결과(2차측정 - 2017년도).....	8
<표 1.1.8> 도로터널 오염물질 농도 분석결과(1999).....	9
<표 1.2.1> 터널내 오염물질 농도 현장측정 요약.....	12
<표 2.1.1> 터널내 오염물질 농도 현황.....	14
<표 2.1.2> E 터널의 터널내 측정농도의 변화량 추이.....	14
<표 2.2.1> 터널내 환경실태 시뮬레이션 결과.....	21
<표 3.1.1(a)> 유럽의 승용차 오염물질 배출량(g/km) 허용기준.....	22
<표 3.1.1(b)> 소형차종에 대한 CO 기준 배출량(m ³ /s) - 차종 : PC-가솔린.....	23
<표 3.1.1(c)> 소형차종에 대한 NOx기준 배출량(m ³ /s) - 차종 : PC-가솔린.....	23
<표 3.1.1(d)> 소형차종에 대한 CO 기준 배출량(m ³ /s) - 차종 : PC-디젤.....	24
<표 3.1.1(e)> 소형차종에 대한 NOx 기준 배출량(m ³ /s) - 차종 : PC-디젤.....	24
<표 3.1.1(f)> 소형차종에 대한 입자상물질 기준 배출량(m ³ /s) - 차종 : PC-디젤.....	25
<표 3.1.2> 독일의 기준배출량 변화추세(단위 : CO ; m ³ /h, 입자상물질 ; m ² /h).....	25
<표 3.1.3> 경사별 한계속도(독일).....	26
<표 3.1.4> 화물차 중량보정계수(독일).....	26
<표 3.1.5(a)> CO에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : PC-가솔린.....	26
<표 3.1.5(b)> CO에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : PC-디젤.....	27
<표 3.1.5(c)> CO에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : 화물차-디젤.....	27
<표 3.1.6> CO에 대한 표고 보정계수(독일).....	28
<표 3.1.7(a)> 매연에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : PC-디젤.....	28
<표 3.1.7(b)> 매연에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : 화물차-디젤.....	28
<표 3.1.8> 매연에 대한 표고 보정계수(독일).....	29
<표 3.1.9> 주행속도별 비엔진 배출 부유분진(독일).....	29
<표 3.1.10> 환기량계산에 사용하는 유해성분의 배출량.....	30
<표 3.1.11> 국가별 표고 보정계수 요약.....	32
<표 3.1.12> 국내 제작차 오염물질 배출량 규제치 변화.....	34
<표 3.1.13> 현행기준 대비 2016년 제작차 허용배출량 감소율(%).....	34
<표 3.1.14> 소요환기량 검토를 위한 모델터널의 제원.....	35
<표 3.1.15> 모델터널의 교통량.....	35
<표 3.1.16> 차량 오염물질 배출량 변경 및 경사·속도보정계수 변경에 따른 환기량 비교.....	36
<표 3.1.17> 제작차 기준(30km/h 보정, Fiv K11, NEPM PN04) - 편람11 배출량.....	37

<표 3.1.18> 제작차 기준(30km/h 보정, Fiv P04, NEPM PN04) - 편람11 배출량.....	39
<표 3.1.19> 제작차 기준(60km/h 보정, Fiv P12, NEPM PN12) - 편람11 배출량.....	41
<표 3.1.20> 제작차 기준(30km/h 보정, Fiv K11, NEPM PN04) - 환경부16 배출량.....	43
<표 3.1.21> 제작차 기준(30km/h 보정, Fiv P04, NEPM PN04) - 환경부16 배출량.....	45
<표 3.1.22> 제작차 기준(60km/h 보정, Fiv P12, NEPM PN12) - 환경부16 배출량.....	47
<표 3.1.23> 제작차 기준(40km/h 보정, Fiv P19, NEPM PN04) - 환경부 2016.....	49
<표 3.1.24> 제작차 기준(40km/h 보정, Fiv P19, NEPM PN12) - 환경부 2016.....	51
<표 3.1.25> 제작차 기준(40km/h 보정, Fiv P19, NEPM PN19) - 환경부 2016.....	53
<표 3.2.1> (기준)도로터널 소요환기량 산정을 위한 기준배출량(m ³ /h 또는 m ³ /h).....	56
<표 3.2.2> (제정(안))도로터널 소요환기량 산정을 위한 기준배출량(m ³ /h 또는 m ³ /h).....	56
<표 3.2.3> 입자상물질에 대한 속도·경사보정계수.....	58
<표 3.2.4> 입자상물질에 대한 속도·경사보정계수.....	59
<표 3.2.5> 입자상물질에 대한 속도·경사보정계수.....	59
<표 3.2.6> 입자상물질에 대한 속도·경사보정계수.....	60
<표 3.2.7> CO 속도·경사보정계수.....	60
<표 3.2.8> CO 속도·경사보정계수.....	61
<표 3.2.9> CO 속도·경사보정계수.....	61
<표 3.2.10> CO 속도·경사보정계수.....	62
<표 3.2.11> NO _x 속도·경사보정계수.....	62
<표 3.2.12> NO _x 속도·경사보정계수.....	63
<표 3.2.13> NO _x 속도·경사보정계수.....	63
<표 3.2.14> NO _x 속도·경사보정계수.....	64
<표 3.2.15> 표고보정계수(2,000m 기준).....	64
<표 3.2.16> 국내 도로터널 환기설계관련 기준 내 오염물질 대상 및 허용기준.....	65
<표 4.1.1> 차속별 비엔진 입자상물질 발생량.....	66
<표 4.1.2> 차령에 따른 상대주행거리비 및 CO, NO _x 의 보정계수.....	67
<표 4.2.1> 오염물질 규제 대상 및 허용 기준.....	67
<표 4.3.1> 이상적인 조건에서의 도로용량.....	68
<표 4.3.2> 대기오염물질배출계수(국립환경과학원, 2015).....	69
<표 4.4.1> 국내외 전기집진기 특성.....	70
<표 4.4.2> 국내 전기집진기 설치사례조사(계속).....	71
<표 4.4.2> 국내 전기집진기 설치사례조사.....	72
<표 4.4.3> A고속도로터널 제원.....	73
<표 4.4.4> A터널 교통량.....	73
<표 4.4.5> A고속도로터널 오염물질 배출량(g/s).....	74
<표 4.4.6> 터널의 입자상물질 주행속도별 배출량.....	76
<표 4.4.7> 터널의 입자상물질 배출량 및 공기정화시설에 의한 개선효과 분석(1).....	77
<표 4.4.8> 터널의 입자상물질 배출량 및 공기정화시설에 의한 개선효과 분석(2).....	77
<표 4.4.9> 국내 대기오염물질 배출량 분포.....	78

■ 그림 목 차 ■

<그림 1.1.1> 가스상 물질(CO)의 측정결과(최근 7년간)	6
<그림 1.1.2> 가스상 물질(NO _x)의 측정결과(최근 7년간)	6
<그림 1.1.3> 고속도로 터널의 PM10 농도분포(6개소)	7
<그림 1.2.1> 현장 측정 터널 위치	11
<그림 2.1.1> 수도권 도로터널의 환기설비 가동현황(2013년)	15
<그림 2.2.1> A터널 농도 분석 결과	16
<그림 2.2.2> B터널 농도 분석 결과	17
<그림 2.2.3> C터널 농도 분석 결과	18
<그림 2.2.4> D터널 농도 분석 결과	19
<그림 2.2.5> E터널 농도 분석 결과	20
<그림 3.1.1> 오염물질별 속도-경사 보정계수 요약	31
<그림 3.1.2> 기준배출량에 따른 소오환기량 변화	36
<그림 3.1.3> 제작차 기준(30km/h 보정, Fiv K11, NEPM PN04) - 편람11 배출량	38
<그림 3.1.4> 제작차 기준(30km/h 보정, Fiv P04, NEPM PN04) - 편람11 배출량	40
<그림 3.1.5> 제작차 기준(60km/h 보정, Fiv P12, NEPM PN12) - 편람11 배출량	42
<그림 3.1.6> 제작차 기준(30km/h 보정, Fiv K11, NEPM PN04) - 환경부16 배출량	44
<그림 3.1.7> 제작차 기준(30km/h 보정, Fiv P04, NEPM PN04) - 환경부16 배출량	46
<그림 3.1.8> 제작차 기준(60km/h 보정, Fiv P12, NEPM PN12) - 환경부16 배출량	48
<그림 3.1.9> 제작차 기준(40km/h 보정, Fiv P19, NEPM PN04) - 환경부 2016	50
<그림 3.1.10> 제작차 기준(40km/h 보정, Fiv P19, NEPM PN12) - 환경부 2016	52
<그림 3.1.11> 제작차 기준(40km/h 보정, Fiv P19, NEPM PN19) - 환경부 2016	54
<그림 3.2.1> 기존 매연에 대한 경사속도 보정계수	57
<그림 3.2.2> 기존 속도 보정계수	57
<그림 3.2.3> 기존 표고보정계수	58
<그림 3.2.4> 기존 경사 보정계수	58
<그림 4.4.1> 환기시스템 개요도	75
<그림 4.5.1> 터널내 오염물질 센서 위치별 풍속 측정 결과	86

제 1 장 터널내 오염물질 농도의 현장측정을 통한 실태 조사

1.1 국내 주요터널에 대한 환경 실태 조사

1.1.1 도심지 주요터널에 대한 환경 실태 사례조사

서울시 및 부산시의 주요 도심지 터널은 <표 1.1.1>과 <표 1.1.2>에 나타내었다. 국토부, 도로교량 및 터널 현황정보시스템(<http://bti.kict.re.kr/bti/>)에서 2016년 기준 터널현황을 조사하였으며, 2017년도 도로 교량 및 터널 현황조사서(2016.12.31. 기준)에서 조사된 터널 34개소(튜브수 기준 59개)와 서울시 강남순환도로(관악, 봉천, 서초터널 3개 터널), 민자도로(용마터널 1개소), 지하차도(위례터널 1개소)를 합하여 총 39개소 터널이 있는 것으로 조사되었다. 서울시 터널의 경우, 조사대상 39개 터널중 기계환기 방식을 채택하고 있는 터널은 총 12개소로 분석되며, 12개소 터널의 환기방식은 종류식 6개소, (반)횡류식 6개소로 조사되었다. 현재 서울시에서는 도로터널 미세먼지 측정기를 설치하여 터널내 미세먼지 및 외부 배출되는 미세먼지를 제어하고 있는데, 설치개소는 총 9개소(500m 이상 터널)이며, 측정기는 E-BAM(미국 Met One Instruments사)로 터널당 2개소 설치(내부 및 외부)하여 운영중인 것으로 파악된다. 그러나 세부 측정값은 공개되어 있지 않아 정확한 값을 파악할 수는 없으나, 남산1, 남산2, 남산3, 홍지문, 구룡, 북악, 구기, 상도, 금화 터널에 설치된 것으로 알려져 있다.

반면, 부산시 터널의 경우, 2016년 기준(국토교통부 터널현황) 부산시 관할 터널 수는 일방향 터널 28개소(56튜브)+1개소(상행), 대면통행 터널 4개소로 파악되었다. 전체 터널 중 기계환기 시설이 설치된 터널은 10개소이며, 제트팬 방식 4개소, 급기 반횡류식 4개소, 전기집진기 방식 1개소(수정산 터널)로 분석되었다.

- 서울시 자료는 공개되지 않아서 현황값을 분석할 수 없었으나, 부산시 자료는 부산광역시보건환경연구원에서 “대기질 평가보고서”를 매년 발간하고 있으며, 25개 터널내부의 CO, NO_x, NO, SO₂ 농도를 측정하여 제시하고 있어, 부산시 터널 현황자료로부터 다음과 같은 현황농도값을 분석할 수 있었다.
- 최근 3년간 부산시에서 관리하고 있는 터널에 대한 농도분포는 <표 1.1.4>~<표 1.1.5> 및 <그림 1.1.1>~<그림 1.1.2>와 같다.
- <표 1.1.4>~<표 1.1.5>에서 음영처리 되지 않은 가덕해저터널 ~ 부산터널은 현재 기계식 환기방식을 적용하고 있으며, 음영 처리된 장산2(구 장지터널)~연산터널은 자연환

기방식을 적용하고 있다.

- CO 농도의 경우에는 황령터널이 비교적 높게 나타나고 있으며, 가덕, 두명, 수영터널이 비교적 낮게 나타나고 있으며, CO농도의 최대치는 황령터널의 16년도 측정결과로 3.0ppm이며 최소치는 장산1, 장산2, 오륜1, 오륜2, 송정터널의 13년, 14년도 측정결과로 0.4ppm이며, 모두 자연환기터널에서 기록되고 있다. 또한 전체 평균치는 1.2ppm으로 실내공기질 기준인 10ppm 보다도 낮은 것으로 나타나고 있다.
- NO_x 농도는 터널별로는 백양터널이 가장 높게 나타나고 있으며, 방곡, 오륜2터널이 상대적으로 낮은 값을 보이는 것을 나타나고 있다. 측정기간 동안에 최대농도는 백양터널의 11년도 측정결과로 2.383ppm을 나타나고 있으며, 전체평균농도는 0.659ppm으로 나타나고 있어, 터널의 설계기준인 20ppm보다 상당히 낮은 값을 보이고 있다.
- 기간에 따른 터널별 CO 농도와 NO_x 농도의 분포에서 볼 수 있듯이 상대적으로 자연환기를 적용하는 터널이 기계환기를 적용하는 터널보다 가스상물질의 농도가 낮은 것으로 나타난다.
- 이러한 문제는 기계환기의 용량 부족 또는 기계환기시설의 가동률에 의해 발생하는 것으로 예상된다.
- 입자상 물질의 경우, 2000~2002년도의 TSP 측정결과는 467 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (부산터널), 486 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (대치터널), 2003~2005년 측정은 PM10과 PM2.5에 대해서 수행되었으며, PM10의 경우 353 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2004, 수정)~163 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2005, 수정)의 범위에 있으며, PM2.5는 312 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2004, 수정)~107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2005 백양)으로 나타났다.

<표 1.1.1> 부산시 주요터널의 입자상물질의 측정결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

터널명	2000	2001	2002	2003		2004		2005	
	TSP	TSP	TSP	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
백양	-	-	-	425	-	285	118	261	137
수정	-	-	-	328	-	319	141	312	122
부산	355	467	366	-	-	-	-	-	-
대치	431	486	428	-	-	-	-	-	-

<표 1.1.2> 서울시의 1km이상 연장의 터널현황

터널명	연장(m)	환기방식	정화장치	준공일	관리기관
관악	4,990	종류식	제진필터장치	16.5.19	강남순환도로(주)
봉천	3,230	종류식	전기집진기	16.5.19	강남순환도로(주)
서초	2,620	종류식	전기집진기	16.5.19	강남순환도로(주)
용마	2,567	종류식	전기집진기	14.11.30	(주)용마터널
우면산	1,967	종류식	전기집진기	03.12.31	우면산인프라웨이(주)
홍지문	1,890	반회류식	-	99.6.30	시설관리공단
위례	1,814	종류식	-	14.11.30	동부도로사업소
정릉	1,650	반회류식	-	99.1.31	시설관리공단
남산2호	1,620	반회류식	-	70.12.24	서부도로사업소
남산1호	1,530	반회류식(상행) /회류식(하행)	-	70.8.15 /94.2.26	서부도로사업소
남산3호	1,280	반회류식	-	78.3.31	서부도로사업소
구룡	1,180	종류식(상행) /반회류식(하행)	-	98.4.30	시설관리공단

<표 1.1.3> 부산시의 1km이상 연장의 터널현황

시설명	통행방식	총길이 (m)	교통량 (대/day)	준공년도	환기시설
두명	대면	1,375		2012	제트팬 : 16대 (30kW)
가덕	대면	1,410	20,000	2010	제트팬 : 28대 (30kW)
개좌	일방향	1,684		2009	제트팬 : 28대 (30kW)
만덕제2	일방향	1,740	100,302	1988	급기반회류 : 8대 (320kW)
곰내	일방향	1,835		2009	제트팬 ; 36대 (kW)
황령	일방향	1,860	0	1995	급기반회류 4대 (320kW), 4대 (120kW)
구덕	일방향	1,870	0	1984	급기반회류 8대 (200kW)
백양	일방향	2,340	67,000	1997	급기반회류(대배기구방식) 90m ³ /s×3EA(공항),139m ³ /s×3EA
수정	일방향	2,356	40,000	2001	전기집진기 (150m ³ /s)+제트팬 (백양 : 8대, 부산역 : 14대)
가덕해저	일방향	3,700		2010	제트팬 90+92대 켈러리:60m ³ /s(SA)+132m ³ /s(EA)

<표 1.1.4> 부산시 가스상물질의 측정결과(최근 7년간)

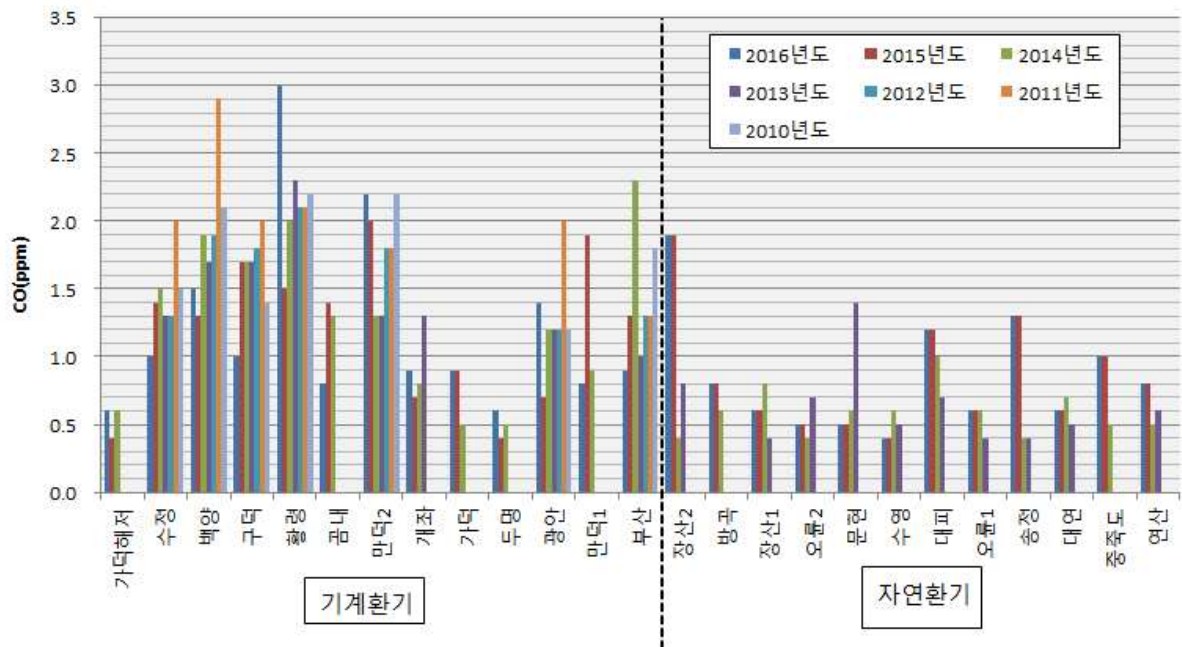
(단위: ppm)

오염물질	터널명	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
CO	가덕해저	0.6	0.4	0.6	—	—	—	—
	수정	1.0	1.4	1.5	1.3	1.3	2.0	1.5
	백양	1.5	1.3	1.9	1.7	1.9	2.9	2.1
	구덕	1.0	1.7	1.7	1.7	1.8	2.0	1.4
	황령	3.0	1.5	2.0	2.3	2.1	2.1	2.2
	곰내	0.8	1.4	1.3	—	—	—	—
	만덕2	2.2	2.0	1.3	1.3	1.8	1.8	2.2
	개좌	0.9	0.7	0.8	1.3	—	—	—
	가덕	0.9	0.9	0.5	—	—	—	—
	두명	0.6	0.4	0.5	—	—	—	—
	광안	1.4	0.7	1.2	1.2	1.2	2.0	1.2
	만덕1	0.8	1.9	0.9	—	—	—	—
	부산	0.9	1.3	2.3	1.0	1.3	1.3	1.8
	장산2	1.9	1.9	0.4	0.8	—	—	—
	방곡	0.8	0.8	0.6	—	—	—	—
	장산1	0.6	0.6	0.8	0.4	—	—	—
	오륜2	0.5	0.5	0.4	0.7	—	—	—
	문현	0.5	0.5	0.6	1.4	—	—	—
	수영	0.4	0.4	0.6	0.5	—	—	—
	대피	1.2	1.2	1.0	0.7	—	—	—
	오륜1	0.6	0.6	0.6	0.4	—	—	—
	송정	1.3	1.3	0.4	0.4	—	—	—
	대연	0.6	0.6	0.7	0.5	—	—	—
중죽도	1.0	1.0	0.5	—	—	—	—	
연산	0.8	0.8	0.5	0.6	—	—	—	

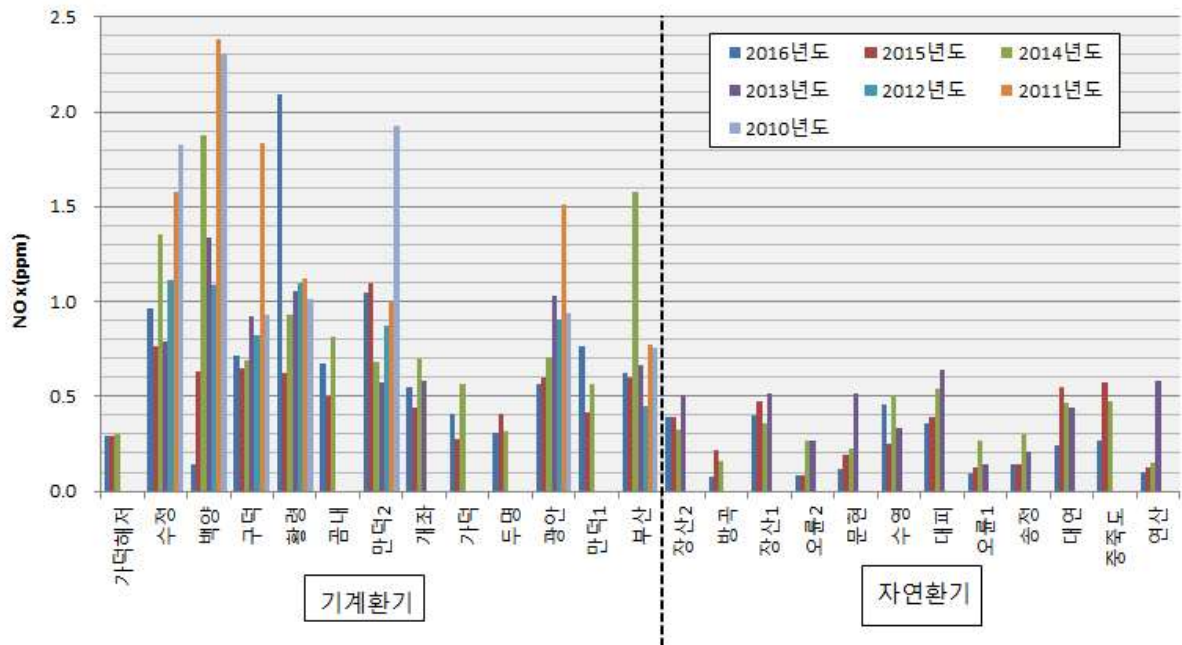
〈표 1.1.5〉 부산시 가스상물질의 측정결과(최근 7년간)

(단위: ppm)

오염물질	터널명	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
NOx	가덕해저	0.295	0.291	0.302	—	—	—	—
	수정	0.965	0.765	1.356	0.786	1.114	1.575	1.825
	백양	0.144	0.633	1.872	1.338	1.085	2.383	2.311
	구덕	0.713	0.646	0.688	0.925	0.823	1.832	0.926
	황령	2.091	0.624	0.929	1.054	1.094	1.122	1.017
	곰내	0.676	0.498	0.810	—	—	—	—
	만덕2	1.048	1.095	0.685	0.570	0.871	1.007	1.924
	개좌	0.547	0.443	0.698	0.582	—	—	—
	가덕	0.406	0.277	0.566	—	—	—	—
	두명	0.309	0.408	0.317	—	—	—	—
	광안	0.564	0.601	0.709	1.027	0.906	1.507	0.941
	만덕1	0.760	0.416	0.566	—	—	—	—
	부산	0.624	0.597	1.578	0.666	0.446	0.776	0.755
	장산2	0.389	0.388	0.321	0.504	—	—	—
	방곡	0.078	0.216	0.158	—	—	—	—
	장산1	0.397	0.470	0.359	0.519	—	—	—
	오륜2	0.080	0.086	0.265	0.265	—	—	—
	문현	0.116	0.190	0.226	0.516	—	—	—
	수영	0.459	0.246	0.509	0.336	—	—	—
	대피	0.358	0.394	0.536	0.640	—	—	—
오륜1	0.089	0.123	0.269	0.143	—	—	—	
송정	0.145	0.145	0.300	0.212	—	—	—	
대연	0.244	0.547	0.465	0.441	—	—	—	
중죽도	0.264	0.570	0.477	—	—	—	—	
연산	0.099	0.121	0.148	0.578	—	—	—	



<그림 1.1.1> 가스상 물질(CO)의 측정결과(최근 7년간)

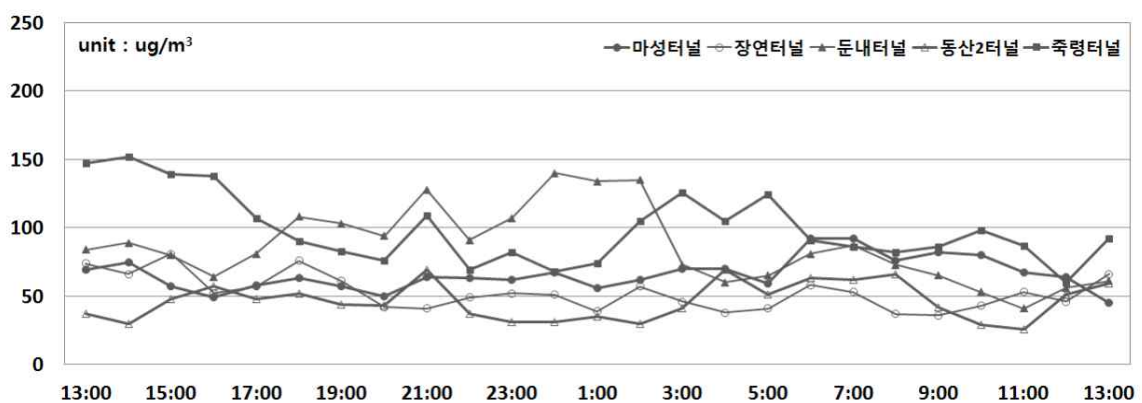


<그림 1.1.2> 가스상 물질(NOx)의 측정결과(최근 7년간)

1.1.2 고속도로 주요터널에 대한 환경 실태 사례조사

고속도로 터널의 경우는 한국도로공사의 연구보고서(고속도로 터널 대기환경 분석 및 환기시설 운영 효율화 연구, 2017년)에서 제시된 현황자료를 조사하였다. 연구보고서에 따른 환경실태 조사 대상터널은 영동선, 마성터널, 둔내터널, 중부내륙선 창연터널, 서울양양선 동산2터널, 중앙선 죽령터널이며, 측정기간은 1차 측정(2016년도), 2차 측정(2017년도)으로 구분하여 진행하였고, 주요내용을 정리하면 다음과 같다.

- <표 1.1.6>과 <표 1.1.7>에 측정된 농도현황을 나타내고 있으며, 터널 내 오염물질(NO_x, CO)의 농도수준은 한국도로공사에서 제시한 환기 운전기준보다 낮은 수준을 나타내고 있다.
- 그러나 미세먼지(PM10, PM2.5)의 경우, 교통량에 따른 일정 비율의 오염도 수준은 영향이 크게 없지만 터널 연장이 길수록 오염물질 농도가 증가하는 경향을 나타내는 것으로 보아 터널 연장과 상관성이 높은 것으로 나타났다. 이는 재 비산먼지 등과 같은 터널 내 환경적 요소에 의해 추가적인 배출이 발생의 영향으로 예상된다.
- CO나 SO₂의 경우, 온도변화에 민감한 측정 장비의 오류로 인해 측정값의 편차가 상당히 크게 나타나 정확한 분석이 어려운 것으로 판단되며, 측정결과 단순히 교통량과 비례적인 관계를 갖지 않는 것으로 분석된다.



<그림 1.1.3> 고속도로 터널의 PM10 농도분포(6개소)

<표 1.1.6> 터널별 측정결과(1차측정 - 2016년도)

구분	기준 (환기운전기준)	측정항목	마성터널	장연터널	둔내터널	동산2 터널	죽령터널
법정 항목	70ppm	CO(ppm) (평균값)	1.1~2.3 (1.7)	1.0~3.3 (1.7)	0~0.7 (0.1)	1.1~2.3 (1.3)	0~4.4 (1.9)
	20,000ppb	NOx(ppb) (평균값)	411~155 3 (883)	365~1561 (939)	131~786 (402)	11.3~28 3 (101)	222~2756 (1198)
참고 항목	—	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (평균값)	N.D	31~153 (68)	42~164 (85)	41~106 (71)	16~169 (88)
	—	PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (평균값)	12~60 (34)	29~96 (50)	21~55 (32)	14~64 (32)	17~114 (64)
	—	SO ₂ (ppb) (평균값)	2.1~8.5 (4.8)	0.1~247 (40.7)	5~16.2 (7.7)	1.2~10.3 (3.7)	0~40.1 (13.8)
연장 (km)			1,500	3,300	3,300	1,100	4,600
교통량 (대/24hr)			74,015	18,886	13,645	5,524	8,967

<표 1.1.7> 터널별 측정결과(2차측정 - 2017년도)

구분	기준 (환기운전기준)	측정항목	마성터널	장연터널	둔내터널	동산2 터널	죽령터널
법정 항목	70ppm	CO(ppm) (평균값)	0.3~1.5 (0.6)	0.4~2.0 (0.8)	0.5~2.3 (0.9)	0.3~2.4 (0.7)	0~3.6 (1.3)
	20,000ppb	NOx(ppb) (평균값)	381~149 7 (884)	374~1547 (1016)	53~1155 (318)	16~635 (113)	384~3274 (1235)
참고 항목	—	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (평균값)	45~92 (66)	36~81 (52)	41~140 (87)	26~69 (47)	60~152 (99)
	—	PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (평균값)	38~90 (60)	14~67 (36)	52~150 (91)	22~55 (32)	38~112 (65)
	—	SO ₂ (ppb) (평균값)	11~26 (17.7)	8~33 (21.9)	0.6~39 (14.2)	3~13 (6.2)	14~54 (25.5)
연장 (km)			1,500	3,300	3,300	1,100	4,600
교통량 (대/24hr)			76,395	19,580	13,497	7,677	8,682

1.1.3 기타 문헌조사를 통한 사례조사

<표 1.1.8>은 국내 도로터널에 대한 오염농도 현황 측정자료로 논문에 발표한 자료를 재정리한 내용이다. 연장 917~3,330m 인 터널을 대상으로 하였으며, 도심지 터널 및 고속도로 터널을 대상으로 2000년 이전에 측정한 사례이다.

<표 1.1.8> 도로터널 오염물질 농도 분석결과(1999)

터널명	위치	길이 (m)	구배 (%)	차선수	단면(m^2)	환기 방식	측정기간
마성터널(상행)	영동 고속도로	1,450	0.62	2	60.4	제트팬	1998/8/17 14:00 ~ 8/24 11:30
마성터널(하행)	영동 고속도로	1,460	-0.62	2	60.4	제트팬	1998/8/27 14:00 ~ 8/31 12:00
달성1터널(상행)	구마 고속도로	1,380	-1.8	2	60	제트팬	1998/9/3 12:00 ~ 9/7 11:00
달성1터널(하행)	구마 고속도로	1,360	-1.8	2	60	제트팬	1998/9/10 13:20 ~ 9/14 9:50
둔내터널(하행)	영동 고속도로	3,300	-1.50 7	2	65.51	수직갱	1999/10/22 06:00 ~10/23 23:30
봉평터널(상행)	영동 고속도로	1,445	0.813	2	59.2	제트팬	1999/10/24 06:00 ~ 10/25 23:00
광명터널(상행)	제2경인 고속도로	917	.	3		자연 환기	1999/10/26 18:00 ~ 10/27 19:00
광암터널(상행)	서울 외곽순환	1,050	2.07	2	65.23	자연 환기	1999/10/28 18:00 ~ 10/29 09:00
구룡터널(하행)	서울도심	1,180	3.0	2	93	반 횡류식	1999/10/29 13:00 ~ 10/30 16:00
정릉터널(상행)	서울 내부순환	1,650	0.303	3	73	반 횡류식	1999/10/30 18:00 ~ 10/31 22:00

구분 터널	가시도(m^{-1})	CO (ppm)	SO ₂ (ppb)	NOx(ppb)	NO ₂	
					농도(ppb)	NOx내 점유율(%)
둔내터널(하행)	0.0012~0.0043	0.5~43.0	5~26	69~215	9~46	6.0~24.0
봉평터널(상행)	0.0003~0.0008	2.5~16.2	3~11	69~184	9~31	7.0~25.2
광명터널(상행)	0.0016~0.0030	8.9~21.8	3~15	78~224	9~38	5.3~30.8
광암터널(상행)	0.0009~0.0017	0.9~3.8	3~7	72~223	8~27	5.3~22.2
구룡터널(하행)	0.0006~0.0031	0.1~18.8	2~31	95~208	10~35	6.7~27.1
정릉터널(상행)	0.0006~0.0011	4.8~11.0	3~11	91~207	8~46	5.8~27.1
마성터널(상행)	0.0009~0.0026	5.9~54.0				
마성터널(하행)	0.0005~0.0021	0.1~27.5				
달성1터널(하행)	0.0009~0.0028	5.1~34.8				
달성1터널(상행)	0.0006~0.0028	6.3~16.1				
마성터널(상행)	0.0009~0.0062	0.1~14.2	6.9~73.8	1.1~621.0	3.1~367.8	

1.2 터널내 오염물질 농도 현장측정 조사

다음은 문헌조사 외 국도터널, 고속도로터널, 도심지터널에 대한 오염물질 농도에 대한 현장측정 조사를 수행하였다. 총 5개 터널에 대한 6회 조사를 수행하였으며, 측정대상 터널의 위치는 <그림 1.2.1>에 나타내었다.

1.2.1 측정대상 터널



<그림 1.2.1> 현장 측정 터널 위치

터널명	위치	측정시간	비고
A터널	경기도 00시	(01.13~01.14) (03.15~03.16)	국도터널 (2회 측정)
B터널	경상남도 00군	(03.22~03.23)	고속도로터널
C터널	경상북도 00시	(03.26.~03.27)	고속도로터널
D터널	경기도 00시	(03.29.~03.30)	도심지터널 (외곽)
E터널	서울시 00구	(04.04~04.05)	도심지터널(지·자체)

1.2.2 터널내 오염물질 농도 현장측정 조사결과

현장측정 조사기간 동안에 CO 농도는 A 터널(국도터널)이 최대 1.9ppm, NOx 농도는 C 터널(고속도로터널)이 최대 89ppb, TSP 농도는 B 터널(고속도로터널)이 최대 906.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 분포를 나타내었으며, 연장이 긴 터널(최대 B터널) 일수록 TSP에 의한 농도가 높게 나타난 것으로 분석된다.

<표 1.2.1> 터널내 오염물질 농도 현장측정 요약

구분	기준 (환기운전기준)	측정항목	A터널	B터널	C터널	D터널	E터널
			국도	고속도로	고속도로	도심지	도심지
법정 항목	70ppm	CO(ppm) (평균값)	0.3~1.9 (0.64)	0.5~0.9 (0.64)	0.3~1.4 (0.39)	0.1~0.9 (0.35)	0.4~1.4 (0.70)
	20ppm	NOx(ppm) (평균값)	0.015 ~0.074 (0.047)	0.000 ~0.025 (0.010)	0.000 ~0.089 (0.052)	0.000 ~0.056 (0.023)	0.021 ~0.043 (0.041)
참고 항목	-	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (평균값)	12.1 ~135.3 (29.5)	3.8~92.4 (10.7)	5.8~43.8 (14.4)	4.1~68.0 (18.4)	4.4~49.6 (18.21)
	-	PM10.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (평균값)	14.0 ~207.7 (48.5)	3.9 ~712.5 (13.6)	6.3~58.5 (17.0)	5.9~99.5 (23.4)	4.8 ~204.3 (22.4)
	-	TSP($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (평균값)	14.0 ~824.4 (78.0)	3.9 ~906.2 (22.3)	6.3 ~185.4 (21.79)	5.9 ~568.8 (51.3)	4.8 ~289.7 (25.5)
연장 (m)			2,405	2,551	1,690	2,197	1,180

제 2 장 터널내 공기질 개선방안 도출

2.1 터널내 환경실태 조사를 통한 문제점 도출

2.1.1 오염물질 허용기준과 측정값 비교

현행 도로터널의 관리대상 오염물질은 매연, CO, NO_x 로 규제하고 있으며, 오염물질에 대한 허용기준은 매연은 0.005~0.009m⁻¹(차량의 주행속도별 차등적용), CO는 70ppm, NO_x는 20ppm 이다. 터널내 오염물질 농도 현장측정을 분석한 결과[<표 1.2.1>참조], CO농도는 현 과제의 측정대상 터널에서 최대값은 1.9ppm 정도이며, 기존의 측정결과에 대한 재분석에서 서울시의 경우는 다소 높은 17.1ppm을 보이고 있으나 부산시 및 한국도로공사의 측정결과는 5ppm 미만으로 나타나고 있다.

NO_x의 경우에는 현 과제에서는 최대 89ppb(0.089ppm)으로 1ppm을 초과하지 않았으나, 서울시 및 부산시는 측정결과에 대한 재분석결과, 3ppm 미만이고 화물차 혼입을 높여 NO_x 발생량이 많은 고속도로의 경우에는 3.3ppm으로 나타나고 있다.

이와 같은 분석결과는 현행 CO 및 NO_x에 대한 한계기준보다 현저하게 낮은 값으로 CO는 약 한계기준의 1/10 수준, NO_x는 1/10 수준으로 터널내 가스상물질에 대한 공기질은 양호한 것으로 판단된다.

입자상물질의 최대농도는 237~906 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나고 있으며, 이는 설계허용기준 0.005m⁻¹(1066.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 비교하여 본 과제의 측정한 입자상물질에 대한 순간최대 농도는 기준에 거의 근접하는 값으로 판단된다. 그러나 1시간 평균농도는 44~222 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 서울시의 측정결과와 유사한 값을 보이고 있다.

또한 입자상물질(PM_{2.5}, PM_{10.0}, TSP)에 대한 측정결과에 따르면 전체 부유분진(TSP)중 입경이 2.5이하인 PM 2.5는 평균 64.3%, PM 2.5~PM₁₀ 사이의 분포는 평균 15.3%, PM₁₀ 이상의 입자는 D 터널(도심지터널)이 최대 36.1%로 나타났으며, 6회 전체에 대한 평균분포는 20.4%로 나타났다.

터널에서 입자상물질의 발생원은 디젤차량의 엔진에서 배출되는 배기와 타이어 마모 및 브레이크 마모와 도로의 마모에 의해서 발생하는 비엔진 발생분진으로 구분된다. 일반적으로 디젤차량의 엔진의 배기가스에서 배출되는 입자상물질(매연)은 1 μm 이하로 알려져 있다. 타이어의 마모분진은 3 μm 이하로 TNO의 연구결과에 의하면, PM₁₀중 PM_{2.5}는 70%, PM₁은 10, PM_{0.1}은 8%로 보고하고 있으며, Fauser에 의한면 중량의 90%사 1 μm 이하로 보고하고 있다. 따라서 타이어 마모분진은 연구결과에 따라 다소 차이는 있으나, 대부분이 PM_{2.5} 이하인 것으로 알 수 있다. 또한 브레이크 마모 분진은 미국 환경 보호국 (USEPA,

1995)과 Berdowski et al. (1997)은 공기중 브레이크 마모입자의 98%(질량 기준)가 PM10으로 분류될 수 있으며, PM10의 약 40%는 PM2.5이고, 10%는 PM1이며, 8%는 PM0.1이라고 분류되고 있다. 따라서 터널에서 발생할 수 있는 입자상물질의 크기는 PM10 이하이며, 이 입자가 침강·응집·재비산 등의 이유로 크기가 큰 입자가 형성되는 것으로 판단된다.

따라서 본 과제의 입경별 측정에서 PM10 이상의 입자의 구성비가 평균 20.4%로 나타난 것은 터널에 침적·응집된 입자상물질에 재비산한 입자에 의한 것으로 판단된다.

<표2.1.2>는 E 터널을 대상으로 1999년 기 측정자료와 2019년 측정자료를 비교·분석한 자료이다. 최대값을 기준으로 CO는 18.4ppm에서 1.4ppm(7.4%), NOx는 208ppb에서 43ppb(20.7%), TSP는 661.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 289.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (43.8%)로 크게 감소한 것으로 나타났다. 이는 터널내 공기질 개선노력과 함께 차량의 성능개선으로 차량으로 배출되는 입자상물질(매연)의 량이 크게 감소한 것에 기인하는 것으로 추정된다. 참고로 표안의 (*)값은 가시도를 중량농도로 환산한 추정값이다.

<표 2.1.1> 터널내 오염물질 농도 현황

시도	TSP($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			NOx(ppm)			CO(ppm)		
	최소	최대	평균	최소	최대	평균	최소	최대	평균
서울시1)	48	237	87	0.015	1.980	0.463	0.3	17.1	7.0
부산시2)	355	486	422	0.078	2.383	0.659	0.4	3.0	1.2
한국도로공사3)	-	-	-	0.011	3.274	0.709	0.0	4.4	1.1
현 과제4)	4	906	40	0.000	0.089	0.035	0.1	1.9	0.5

- 1) 서울시의 2013년 ~ 2016년, 12개 터널에 대한 측정자료 분석
- 2) 부산시의 2010년 ~ 2016년 부산광역시보건환경연구원보 인용 및 재분석
- 3) 한국도로공사의 “고속도로 터널 대기환경 분석 및 환기시설 운영 효율화 연구(2017)” 보고서 인용 및 재분석

<표 2.1.2> E 터널의 터널내 측정농도의 변화량 추이

항목	CO (ppm)	NOx (ppm)	TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
허용기준 변화	100→70	25→20	-
1999년	0.1~18.8	0.095~0.208	128~661.3(*)
2019년	0.4~1.4	0.021~0.043	4.8~289.7
최대값 기준 현황수준 (감소비율)	7.4% (92.6% ↓)	20.7% (79.3% ↓)	43.8% (56.2% ↓)

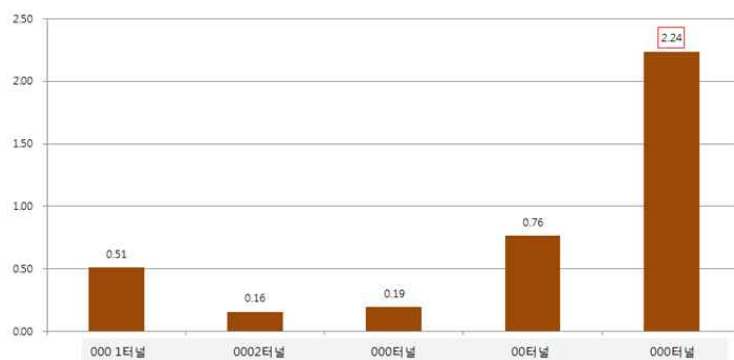
2.1.2 환기설비의 가동현황 분석

<그림 2.1.1>은 2013년도에 수도권 5개 도로터널에 대한 제트팬 가동율을 분석한 자료이다. 연평균 가동율이 최대가 2.24%이며, 터널에 따라서 가동시간이 일일 10분 이하인 경우가 거의 대부분으로 나타나고 있다. 이와 같이 환기기 가동률이 거의 0에 가까우며, 일부에서는 현행 환기설계 방법에 대한 과다설계의 문제가 제기되고 있는 실정이다.

환기량 및 환기기 용량의 과다산정원인은 소요환기량 및 환기기 용량에 가장 크게 영향을 미치는 환기설계를 위한 오염물질 기준배출량 및 교통량 산정방법에 기인하는 것으로 판단된다. 터널내 차량수를 과다하게 산정하는 것이 원인으로 판단되며, 환기기준 정립 과정에서 최신의 제작차 오염물질 배출량 및 경사·속도 보정계수의 적용이 필요하다.

환기량 및 환기기 용량의 과다산정원인은 소요환기량 및 환기기 용량에 가장 크게 영향을 미치는 환기설계를 위한 오염물질 기준배출량 및 교통량 산정방법에 기인하는 것으로 판단된다. 현행 환기설계를 위해 차량종별 오염물질별 기준배출량은 2012년 제작차 허용배출량을 기준으로 오산정하고 있기에 최근의 자동차의 오염물질 배출량 규제강화 및 자동차 제작기술의 발전을 반영하지 못하고 있기 때문으로 판단된다. 또한 터널내 차량수 산정시 도로용량에 근거한 설계시간 교통량을 적용하여 터널내 차량수를 과다 산정하는 것이 원인으로 판단된다.

따라서, 환기기준 정립 과정에서 최신의 제작차 오염물질 배출량 및 경사속도 보정계수의 적용이 필요한 것으로 분석되며, 도로터널과 같이 정속 주행시 자동차 오염물질 배출량 분석 자료의 분석을 통한 오염물질 배출량 재산정이 필요한 것으로 분석된다. 또한 터널내 차량수 산정을 도로용량에 근거하는 것을 지양하고 추정설계시간 교통량을 적용하는 것에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.



<그림 2.1.1> 수도권 도로터널의 환기설비 가동현황(2013년)

2.2 터널내 환경실태 시뮬레이션 분석을 통한 문제점 도출

2.2.1 환경실태 시뮬레이션 분석

실측결과와 설계농도와의 차이를 분석하기 위해서 실측조건외 교통량 및 주행속도를 반영하여 터널내 CO 농도를 시뮬레이션하고 이를 실측결과와 비교하였다.

가. A 터널 사례

(1) 시뮬레이션 대상터널

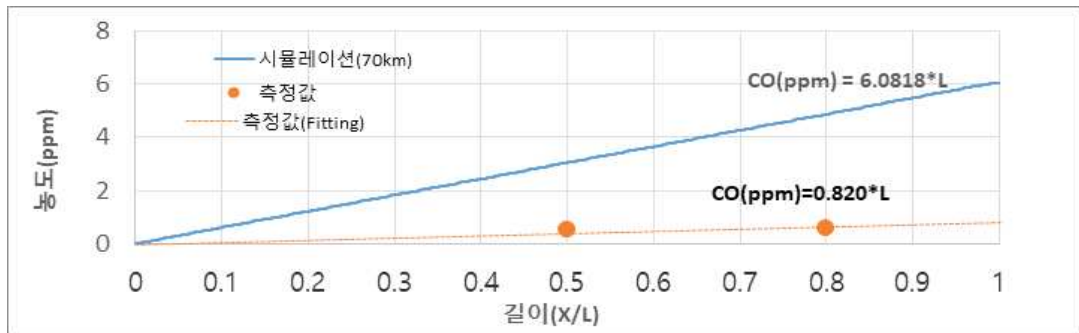
구 분	상행 방향 터널	하행 방향 터널
통행 방식	일방향 3차선	
터널 연장	2,340 m	2,340 m
터널 경사	-1.06 %	+1.06 %
평균 표고	83 m	83 m
차도내공 단면적	95.193 m ²	95.193 m ²
차도 둘레 길이	39.764 m	39.764 m

(2) 적용교통량 및 평균속도

AADT	소형차	소형트럭	중형트럭	대형트럭	특수트럭	소형버스	대형버스
대수(대/day)	24,672	1,632	768	192	0	0	192
평균속도(km/h) ⁽¹⁾	72	70	77	56	0	0	42

(1) 실측결과임

(3) 시뮬레이션 결과



<그림 2.2.1> A터널 농도 분석 결과

측정시간 동안의 평균 주행속도를 70km/h로 하여 CO농도에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션결과 CO농도의 기울기는 6.08 ppm/2.34km로 나타난 반면, 측정값에 대한 추세선은 2.49 ppm/2.34km로 나타났다. 또한, 측정위치가 동일한 지점에서 CO농도는 상대길이 0.5인 지점의 경우, 시뮬레이션은 3.1ppm, 측정값은 0.5ppm으로 약 6배의 차이를 보였으며, 상대길이 0.8지점에서는 시뮬레이션은 4.9ppm, 측정값은 0.6ppm으로 약 8배의 차이를 나타내었다.

나. B 터널 사례

(1) 시뮬레이션 대상터널

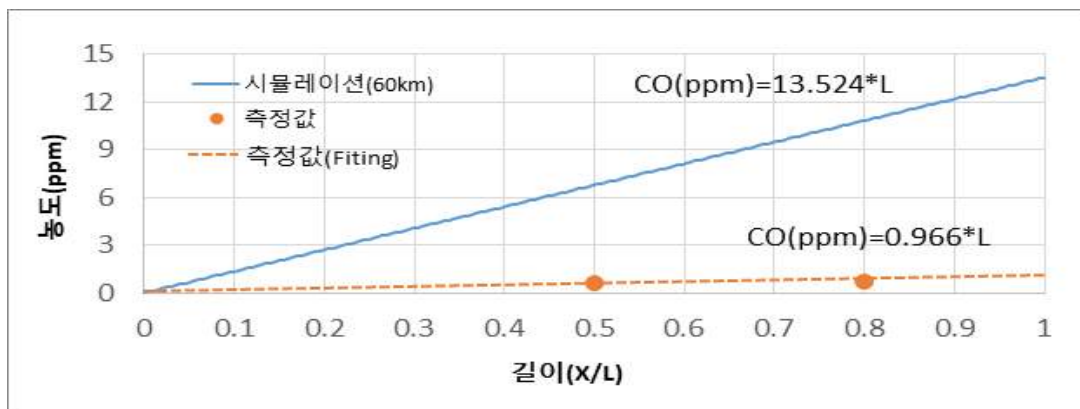
구 분	상행 방향 터널	하행 방향 터널
통행 방식	일방향 2차선	
터널 연장	2,551m	2,551m
터널 경사	-0.3 %	+0.3 %
평균 표고	115 m	115 m
차도내공 단면적	75.67 m ²	75.67 m ²
차도 둘레 길이	35.142 m	35.142 m

(2) 적용교통량 및 평균속도

AADT	소형차	소형트럭	중형트럭	대형트럭	특수트럭	소형버스	대형버스
대수(대/day)	47,424	96	1,632	5,184	672	1,920	2,304
평균속도(km/h) ⁽¹⁾	60	60	60	60	60	60	60

(1) 실측결과임

(3) 시뮬레이션 결과



<그림 2.2.2> B터널 농도 분석 결과

측정시간 동안의 평균 주행속도(60km)에 대한 CO농도의 시뮬레이션(주행속도 : 60km)을 수행하였다. 시뮬레이션결과 CO농도의 기울기는 13.52ppm/2.551km로 나타난 반면, 측정값에 대한 추세선의 기울기는 0.97ppm/2.551km로 나타났다. 또한 측정위치와 동일한 지점에서 CO농도는 상대길이 0.5에서 시뮬레이션 값은 6.8ppm, 측정값은 0.6ppm으로 약 11배의 차이를 보였으며, 상대길이 0.8에서 시뮬레이션 값은 10.8ppm, 측정값은 0.7ppm으로 약 15배의 차이를 나타내었다.

다. C 터널 사례

(1) 시뮬레이션 대상터널

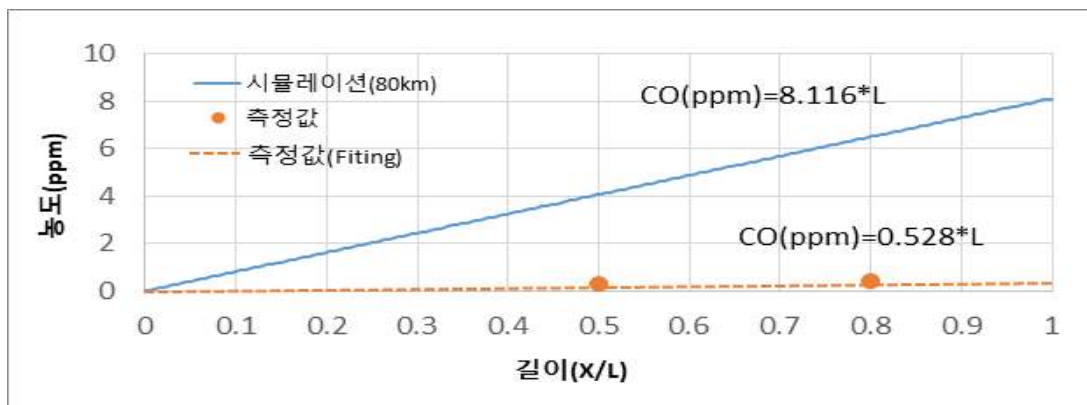
구 분	상행 방향 터널	하행 방향 터널
통행 방식	일방향 3차선	
터널 연장	1,690m	1,690m
터널 경사	-2.00%	+2.00%
평균 표고	218m	218m
차도내공 단면적	101,118m ²	101,118m ²
차도 둘레 길이	40.003m	40.003m

(2) 적용교통량 및 평균속도

AADT	소형차	소형트럭	중형트럭	대형트럭	특수트럭	소형버스	대형버스
대수(대/day)	9,024	-	192	1,056	192	384	480
평균속도(km/h) ⁽¹⁾	111	-	108	104	108	108	106

(1) 실적결과임

(3) 시뮬레이션 결과



<그림 2.2.3> C터널 농도 분석 결과

측정시간동안에 평균 주행속도(107km)에 대한 CO농도 시뮬레이션(주행속도 : 80km-시뮬레이션시 최대 주행속도)을 수행하였다. 시뮬레이션에 의한 CO농도의 기울기는 8.12ppm/1.69km로 나타난 반면, 측정값에 의한 추세선의 기울기는 0.53ppm/1.69km로 나타났다. 또한 측정위치와 동일한 위치에서의 CO농도는 상대길이 0.5에서 시뮬레이션에 의한 CO농도는 4.1ppm, 측정값은 0.3ppm으로 약 14배의 차이를 보였으며, 상대길이 0.8에서 시뮬레이션 결과는 6.5ppm, 측정값은 0.4ppm으로 약 16배의 차이를 나타내었다.

라. D 터널 사례

(1) 시뮬레이션 대상터널

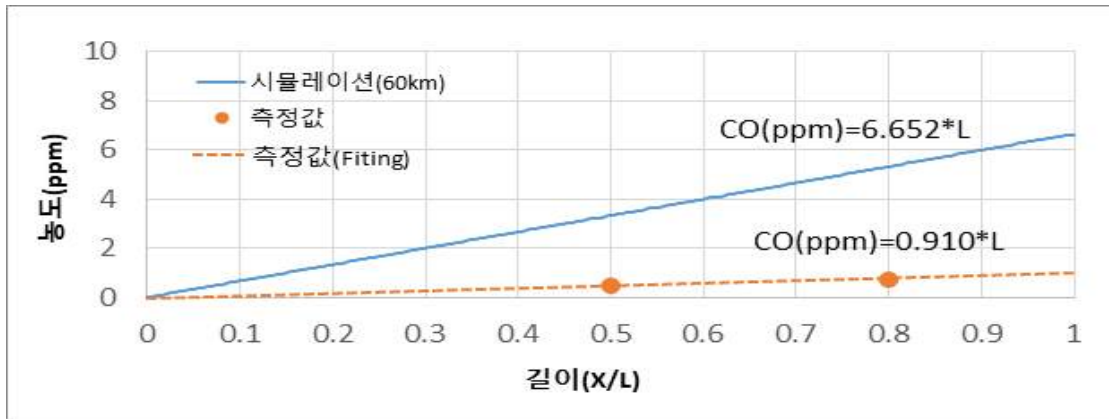
구 분	상행 방향 터널	하행 방향 터널
통 행 방 식	일방향 4차선	
터 널 연 장	2,197m	2,197m
터 널 경 사	+0.50%	-0.50%
평 균 표 고	115m	115m
차도내공 단면적	134.910m ²	134.910m ²
차도 둘레 길이	47.275m	47.275m

(2) 적용교통량 및 평균속도

AADT	소형차	소형트럭	중형트럭	대형트럭	특수트럭	소형버스	대형버스
대수(대/day)	123,936	-	576	6,528	2,592	288	864
평균속도(km/h) ⁽¹⁾	60	-	58	58	59	56	59

(1) 실측결과임

(3) 시뮬레이션 결과



<그림 2.2.4> D터널 농도 분석 결과

측정시간 동안에 평균 주행속도(58km)에 대한 CO농도의 시뮬레이션(주행속도 : 60km)을 수행하였다. 시뮬레이션에 의한 CO농도의 기울기는 6.65ppm/2.197km로 나타난 반면에 측정값에 의한 추세선의 기울기는 0.91ppm/2.197km로 나타났다. 또한 상대길이가 0.5인 지점에서 시뮬레이션에 의한 CO농도는 3.3ppm, 측정값은 0.5ppm으로 약 7배의 차이를 보였으며, 상대길이가 0.8인 지점에서 시뮬레이션 결과는 5.3ppm, 측정값은 0.7ppm으로 약 8배의 차이를 나타내고 있다.

마. E 터널 사례

(1) 시뮬레이션 대상터널

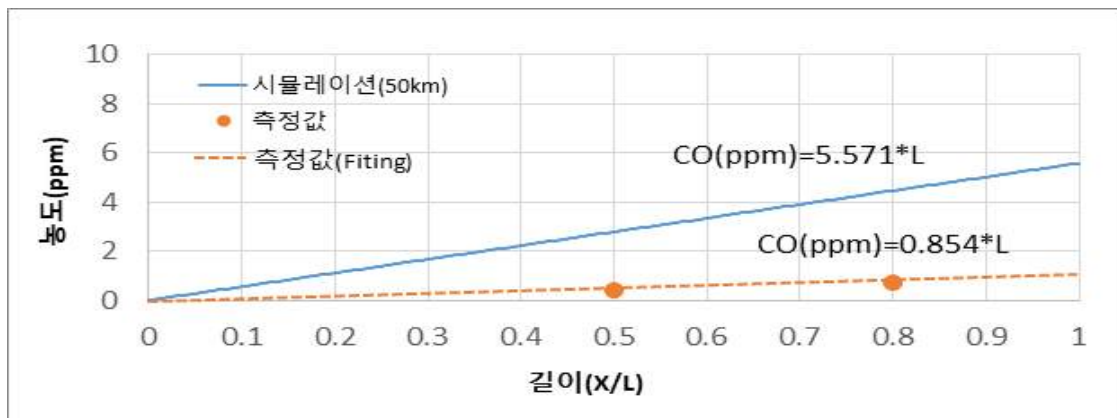
구 분	상행 방향 터널	하행 방향 터널
통 행 방 식	일방향 2차선	
터 널 연 장	1,180m	1,180m
터 널 경 사	-3.0%	+3.0%
평 균 표 고	72 m	72 m
차도내공 단면적	93.000m ²	93.000m ²
차도 둘레 길이	54.700m	54.700m

(2) 적용교통량 및 평균속도

AADT	소형차	소형트럭	중형트럭	대형트럭	특수트럭	소형버스	대형버스
대수(대/day)	54,144	-	96	3,552	480	288	768
평균속도(km/h) ⁽¹⁾	49	-	45	51	59	51	52

(1) 실측결과임

(3) 시뮬레이션 결과



<그림 2.2.5> E터널 농도 분석 결과

측정시간동안에 평균주행속도(50km)에 대한 CO농도의 시뮬레이션(주행속도 : 50km)을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, CO농도의 기울기는 5.71ppm/1.18km로 나타난 반면에 측정값에 의한 추세선의 기울기는 0.85ppm/1.18km로 나타났다. 한편 측정위치와 동일한 위치에서의 값을 보면 상대길이 0.5에서 시뮬레이션은 2.8ppm, 측정값은 0.4ppm으로 약 7배의 차이를 보였으며, 상대길이 0.8에서 시뮬레이션은 4.5ppm, 측정값은 0.7ppm으로 약 8배의 차이를 나타내었다.

바. 터널내 환경실태 시뮬레이션 분석 결과

실제 현장측정을 수행한 터널에서 CO농도를 시뮬레이션을 수행하여 실측CO농도와 비교·분석한 결과를 <표 4.2.1>에 나타내었다. 모든 경우에 시뮬레이션 결과가 측정값보다 최소 6배에서 최대 16배까지 높게 나타나고 있다. 이와 같이 측정값과 시뮬레이션 결과가 차이가 큰 것은 설계에 적용하고 있는 차종별 오염물질 기준 배출량이 과대산정되어 있음을 의미하며, 이러한 결과는 2.1.1절에 분석된 바와 같이 현재 발생하는 오염물질의 농도보다 오염물질의 허용기준이 과도한 것으로 분석되어짐에 따라 현실과 설계의 괴리를 축소하기 위한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

<표 2.2.1> 터널내 환경실태 시뮬레이션 결과

구분			CO 농도		비고
			시뮬레이션	측정값	
A터널	상대길이	0.5	3.1ppm	0.5ppm	약 6배 차이
		0.8	4.9ppm	0.6ppm	약 8배 차이
	기울기		6.08	2.49	
B터널	상대길이	0.5	6.8ppm	0.6ppm	약 11배 차이
		0.8	10.8ppm	0.7ppm	약 15배 차이
	기울기		13.52	0.97	
C터널	상대길이	0.5	4.1ppm	0.3ppm	약 14배 차이
		0.8	6.5ppm	0.4ppm	약 16배 차이
	기울기		8.12	0.53	
D터널	상대길이	0.5	3.3ppm	0.5ppm	약 7배 차이
		0.8	5.3ppm	0.7ppm	약 8배 차이
	기울기		6.65	0.91	
E터널	상대길이	0.5	2.8ppm	0.4ppm	약 7배 차이
		0.8	4.5ppm	0.7ppm	약 6배 차이
	기울기		5.57	0.85	

제 3 장 현행 설계기준의 개선방안 도출

3.1 관계 설계기준 검토 및 상이내용 도출

3.1.1 기준배출량 상이에 따른 검토

가. 국외 기준배출량 조사

(1) PIARC

국제상설도로협회(WRA 또는 PIARC)는 주기적으로 차량의 배출량 규제변화를 고려하여 기준배출량 및 경사 속도보정계수를 제시하고 있다. 본 보고서에서는 2019년에 발간된 Road tunnels : Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation에 내용을 요약하였다.

- 오염물질의 대상은 CO, NO_x, 매연, 부유분진(비배출 오염물질)로 구분하고 있으며, 차종을 승용차(가솔린, 디젤), 소형화물차(가솔린, 디젤), 화물차(23 ton)로 구분하고 있다.
- 유럽국가의 차량별 배출량 규제치는 감소하는 추세에 있으며, 기준배출량은 차령을 고려하여 차종별 배출량 규제치의 구성비를 고려하여 제시하고 있으며, 소형차(PC)에 대한 오염물질별 기준 배출량을 <표 3.1.1>에 제시하였다.
- 화물차에 대한 기준배출량은 23 ton차량에 대한 값을 제시하고 이를 차량의 중량에 따라서 보정하여 적용하고 있다.
- NO_x에 대한 기준 배출량 산정을 위해 필요한 NO_x의 밀도는 NO₂의 구성비를 5~10%로 고려하였으나 최근에는 20~30%로 고려하는 것으로 하고 있다.
- 또한 매연배출량에 대한 원단위(g/km)를 m³/km로 환산하기 위한 감소계수는 0.0047m³/g으로 고려하고 있다.

<표 3.1.1(a)> 유럽의 승용차 오염물질 배출량(g/km) 허용기준

Standards	년도	CO	HC	NO _x	HC+NO _x	Particles
ECE R 1503	1979	21.5	1.8	2.5		
ECE R 1504	1982	16.5			5.1	
US 83	1987	2.1	0.25	0.62	0.373	
PC Euro 1	1992	2.72			0.97	0.14
PC gasoline Euro 2	1997	2.2			0.5	
PC gasoline Euro 3	2000	2.3	0.2	0.15		
PC gasoline Euro 4	2005	1.0	0.1	0.08		
PC gasoline Euro 5	2008	1.0	0.1	0.06	0.068	0.005
PC gasoline Euro 6	2014	1.0	0.1	0.06	0.068	0.005

<표 3.1.1(b)> 소형차종에 대한 CO 기준 배출량(m³/s) - 차종 : PC-가솔린

주행속도 [km/h]	경사도별 배출량 - CO (PC - 가솔린)						
	- 6%	- 4%	- 2%	0%	2%	4%	6%
0	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
10	24.4	25.9	27.8	29.5	32	35.5	42.9
20	28.3	31.4	35.2	38.6	43.6	50.5	65.4
30	28.2	32.9	38.9	46	54.6	64.6	87.4
40	28	34.5	43.5	56.2	71.7	93.2	120.4
50	27.4	35.5	46.9	63	85.4	118	163.2
60	27.1	36	49.4	68.2	97.5	140.2	221.6
70	26.9	36.3	51.7	75	113.2	169.4	290.2
80	26.7	37.1	54.9	85.5	136.6	217.7	369.1
90	27.8	39.4	60.1	99.6	170.3	297.4	483.3
100	32.5	45.2	69.2	117.2	218.1	422.2	643.6
110	44.2	58	86.2	143	291.6	612.1	1,007.4
120	67.2	83.8	119.4	192.7	419.4	889.8	1,615.2
130	106.4	132	183.5	303.1	660.7	1,333.0	2,462.1

<표 3.1.1(c)> 소형차종에 대한 NO_x기준 배출량(m³/s) - 차종 : PC-가솔린

주행속도 [km/h]	경사도별 배출량 - NO _x (PC - 가솔린)						
	- 6%	- 4%	- 2%	0%	2%	4%	6%
0	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
10	3.3	3.3	3.3	4.4	5.1	5.7	6.3
20	3.3	3.3	3.4	5.3	6.2	8.9	12.4
30	3.3	3.3	4	6	9.1	13.2	15.3
40	3.3	3.3	4.3	6.7	12.1	15.3	17.6
50	3.3	3.3	4.4	8.1	13.9	17	19.5
60	3.3	3.3	4.9	10.3	15.7	18.8	23.8
70	3.3	3.3	5.6	13.3	17.5	21.7	29.7
80	3.3	3.3	6.7	15.1	19.3	27	36.4
90	3.3	3.3	9.9	17	22.7	32.9	43.8
100	3.3	4.3	13.7	19	28.4	40.1	52.4
110	3.3	6.2	16.1	22.8	35.1	48.3	62.2
120	3.3	10.9	18.5	29.1	43	57.8	73.3
130	3.7	15	22.4	36.8	52.2	68.6	85.7

<표 3.1.1(d)> 소형차종에 대한 CO 기준 배출량(m³/s) - 차종 : PC-디젤

주행속도 [km/h]	경사도별 배출량 - CO (PC - 디젤)						
	- 6%	- 4%	- 2%	0%	2%	4%	6%
0	1	1	1	1	1	1	1
10	2.2	2.2	2.2	3.6	5.1	6.7	8.4
20	2.2	2.2	2.4	5.4	8.2	4.1	3.2
30	2.2	2.2	3	7.2	4	3.3	3.2
40	2.2	2.2	3.2	8.6	3.1	3.3	2.8
50	2.2	2.2	2.9	6.3	3.3	2.9	2.6
60	2.2	2.2	3.4	4	3.3	2.7	2.6
70	2.2	2.2	4.6	3.2	2.9	2.4	3.1
80	2.2	2.2	6.6	3.4	2.7	2.8	3.6
90	2.2	2.2	7.8	3.2	2.5	3.2	4.2
100	2.2	2.2	3.2	2.8	2.8	3.8	4.8
110	2.2	2.6	3.4	2.5	3.3	4.4	5.5
120	2.2	6.9	3.1	2.7	3.8	5	6.2
130	2.2	3.5	2.7	3.2	4.5	5.7	7

<표 3.1.1(e)> 소형차종에 대한 NO_x 기준 배출량(m³/s) - 차종 : PC-디젤

주행속도 [km/h]	경사도별 배출량 - NO _x (PC - 디젤)						
	- 6%	- 4%	- 2%	0%	2%	4%	6%
0	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
10	6.3	6.3	6.3	11.5	15.8	19.6	23.6
20	6.3	6.3	7.2	16.5	23	28.3	36.6
30	6.3	6.3	9.3	20.9	28.6	38.7	51.7
40	6.3	6.3	10	24	34.6	49.9	68.2
50	6.3	6.3	9	25.7	40.7	61.6	83.7
60	6.3	6.3	10.7	28.6	50.3	76.3	103.9
70	6.3	6.3	14.2	34.7	62.5	92.9	127.9
80	6.3	6.3	19.4	43.1	76.4	113.1	154.1
90	6.3	6.3	24.7	54	91.9	135.9	182.6
100	6.3	6.3	31.3	68.4	112.5	162.7	215.2
110	6.3	7.9	41.7	85.6	137.2	193.1	251.6
120	6.3	20	56.8	107.2	165.8	227.7	292.2
130	6.3	30.1	76.3	134.4	199	266.9	337.6

<표 3.1.1(f)> 소형차종에 대한 입자상물질 기준 배출량(m³/s) - 차종 : PC-디젤

주행속도 [km/h]	경사도별 배출량 - 입자상물질 (PC - 디젤)						
	- 6%	- 4%	- 2%	0%	2%	4%	6%
0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
10	1.4	1.4	1.4	2.9	4.1	5.3	6.6
20	1.4	1.4	1.7	4.4	6.4	8.4	10.7
30	1.4	1.4	2.2	5.7	8.5	11.3	14.7
40	1.4	1.4	2.4	6.7	10.2	14.3	19
50	1.4	1.4	2.2	7.4	11.8	17.3	22.9
60	1.4	1.4	2.6	8.5	14.4	21.1	27.3
70	1.4	1.4	3.7	10.2	17.5	25.2	31.4
80	1.4	1.4	5.3	12.4	21.1	29	35.7
90	1.4	1.4	7.0	15.3	24.9	32.8	40
100	1.4	1.4	9.3	19.1	28.9	37	44.7
110	1.4	1.8	12.1	23.4	33	41.5	49.7
120	1.4	5.5	16.1	27.9	37.5	46.4	54.9
130	1.4	8.9	21.1	32.5	42.4	51.7	60.6

(2) 독일의 기준배출량 산정(RABT - 2006기준)

- 기준배출량은 다음과 같은 조건에서 제시하고 있으며, 이를 정리하면 <표 5.1.2>와 같다.
 - PC(승용차) : 가솔린+디젤(20%)
 - 화물차 : 10ton을 기준으로 하며 차량중량에 따라서 보정함.

<표 3.1.2> 독일의 기준배출량 변화추세(단위 : CO ; m³/h, 입자상물질 ; m²/h)

연도	2000		2005		2010		2015		2020	
	CO	매연	CO	매연	CO	매연	CO	매연	CO	매연
승용차(가솔린)	0.075	0	0.043	0	0.033	0	0.029	0	0.028	0
승용차(디젤)	0.014	20.6	0.010	13.9	0.009	9.53	0.009	7.30	0.008	6.49
화물차(10t)	0.063	71.1	0.037	36.3	0.024	16.9	0.019	8.88	0.018	6.91

○ 화물차량에 대한 한계속도 및 중량에 따른 배출량 보정

<표 3.1.3> 경사별 한계속도(독일)

기울기 i [%]	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
V한계 [km/h]	49	63	74	83	87	86	85	78	72	63	53	46	39

<표 3.1.4> 화물차 중량보정계수(독일)

화물차 평균무게	V _F (주행속도) [km/h]					
	0	40	60	70	80	90
10t	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
20t	1.8	1.8	1.6	1.6	1.6	1.5
30t	2.5	2.5	2.3	2.1	2.0	1.9

○ CO에 대한 속도경사 보정계수 f_{iv}

<표 3.1.5(a)> CO에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : PC-가솔린

V _{iv} [km/h]	기울기 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
5	0.36	0.44	0.52	0.55	0.58	0.61	0.65
10	0.46	0.59	0.72	0.79	0.83	0.91	0.99
15	0.45	0.56	0.69	0.81	0.88	1.06	1.34
20	0.44	0.69	0.76	0.83	0.92	1.21	1.70
25	0.43	0.74	0.81	0.85	0.97	1.41	2.06
30	0.42	0.79	0.91	0.87	1.01	1.61	2.42
40	0.42	0.85	1.00	0.94	1.15	1.87	2.91
50	0.38	0.80	1.01	0.98	1.36	2.03	3.18
60	0.33	0.71	1.00	1.00	1.78	2.88	4.28
70	0.64	1.03	1.03	0.93	2.58	4.40	6.22
80	0.86	1.26	1.06	0.86	3.39	5.92	8.16
90	1.01	0.97	1.13	1.29	5.02	8.76	14.2
100	1.09	0.83	1.35	1.88	7.66	12.2	20.4
110	1.11	0.84	1.74	2.64	11.3	19.8	34.2
120	1.19	1.05	2.69	4.33	18.1	27.3	48.1

<표 3.1.5(b)> CO에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : PC-디젤

V _{iv} [km/h]	기울기 [%]						
	- 6	- 4	- 2	0	2	4	6
0	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
5	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.48	0.62
10	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.50	0.64
15	0.58	0.60	0.62	0.58	0.58	0.66	0.85
20	0.69	0.74	0.77	0.75	0.75	0.83	1.07
25	0.80	0.88	0.93	0.88	0.88	0.99	1.28
30	0.92	1.02	1.08	1.00	1.00	1.15	1.49
40	0.95	1.18	1.21	1.05	1.06	1.40	1.64
50	0.94	1.16	1.23	1.05	1.13	1.46	1.69
60	0.95	1.12	1.18	1.00	1.19	1.44	1.75
70	0.90	1.14	1.10	0.92	1.18	1.47	1.86
80	0.87	1.16	1.01	0.85	1.18	1.50	1.97
90	0.95	1.20	1.10	1.00	1.26	1.55	1.80
100	1.08	1.24	1.21	1.17	1.36	1.65	1.55
110	1.25	1.29	1.34	1.38	1.47	1.54	1.54
120	1.49	1.40	1.53	1.68	1.48	1.47	1.53

<표 3.1.5(c)> CO에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : 화물차-디젤

V _{iv} [km/h]	기울기 [%]						
	- 6	- 4	- 2	0	2	4	6
0	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
5	0.26	0.26	0.26	0.53	0.55	0.57	0.59
10	0.36	0.36	0.36	0.57	0.64	0.70	0.73
15	0.45	0.46	0.46	0.60	0.72	0.84	0.87
20	0.55	0.56	0.56	0.64	0.81	0.97	1.02
25	0.65	0.65	0.67	0.68	0.90	1.11	1.16
30	0.68	0.68	0.70	0.73	0.99	1.23	1.44
40	0.66	0.70	0.75	0.83	1.15	1.44	1.64
50	0.55	0.67	0.76	0.90	1.29	1.80	1.82
60	0.55	0.63	0.77	1.00	1.54	1.90	
70	0.55	0.62	0.78	1.11	1.72	2.01	
80		0.74	0.83	1.23	1.84		
90		0.86	0.92	1.30	1.98		

○ CO배출량에 대한 표고보정계수 f_h

<표 3.1.6> CO에 대한 표고 보정계수(독일)

해수면 높이[m]	0	700	1,000	2,000
f_h (승용차, 가솔린)	1.00	1.00	2.60	11.40
f_h (승용차, 디젤)	1.00	1.14	1.20	1.50
f_h (화물차)	1.00	1.25	1.35	2.75

○ 매연에 대한 속도경사 보정계수 f_{iv}

<표 3.1.7(a)> 매연에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : PC-디젤

V_{iv} [km/h]	기울기 [%]						
	- 6	- 4	- 2	0	2	4	6
0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
5	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.27	0.41
10	0.21	0.21	0.21	0.21	0.23	0.26	0.55
15	0.24	0.25	0.24	0.26	0.30	0.36	0.65
20	0.26	0.28	0.27	0.30	0.36	0.46	0.75
25	0.29	0.32	0.30	0.34	0.43	0.56	0.85
30	0.31	0.35	0.32	0.38	0.49	0.66	0.95
40	0.39	0.45	0.42	0.51	0.67	0.92	1.36
50	0.56	0.66	0.59	0.74	0.99	1.39	2.08
60	0.66	0.78	0.76	1.00	1.31	1.53	2.31
70	0.48	0.57	0.57	0.73	1.00	1.27	1.94
80	0.35	0.42	0.38	0.50	0.69	1.01	1.56
90	0.61	0.74	0.67	0.88	1.24	1.83	2.85
100	0.90	1.10	1.00	1.31	1.86	2.73	4.25
110	1.22	1.51	1.36	1.80	2.56	3.83	5.97
120	1.59	1.98	1.78	2.37	3.39	4.93	7.68

<표 3.1.7(b)> 매연에 대한 속도경사 보정계수(독일) - 차종 : 화물차-디젤

V_{iv} [km/h]	기울기 [%]						
	- 6	- 4	- 2	0	2	4	6
0	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
5	0.28	0.28	0.28	0.56	0.58	0.60	0.63
10	0.38	0.38	0.38	0.60	0.67	0.74	0.77
15	0.49	0.49	0.49	0.64	0.76	0.87	0.92
20	0.59	0.59	0.59	0.68	0.84	1.01	1.06
25	0.69	0.69	0.70	0.72	0.93	1.14	1.21
30	0.73	0.72	0.74	0.77	1.02	1.27	1.48
40	0.73	0.76	0.79	0.84	1.17	1.45	1.65
50	0.76	0.74	0.80	0.90	1.30	1.81	1.80
60	0.85	0.78	0.84	1.00	1.55	1.97	
70	0.94	0.83	0.90	1.12	1.72	2.12	
80		0.91	0.95	1.22	1.85		
90		0.99	1.01	1.29	1.98		

- 매연배출량에 대한 표고보정계수 f_h

<표 3.1.8> 매연에 대한 표고 보정계수(독일)

해수면 [m]	0	1000	2000
f_h (승용차, 디젤)	1.00	1.00	1.25
f_h (화물차)	1.00	1.12	1.69

- 부유분진(비엔진 배출 부유분진)

<표 3.1.9> 주행속도별 비엔진 배출 부유분진(독일)

주행속도 [km/h]	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
승용차 [m ² /h]	0.5	0.51	0.53	0.56	0.61	0.75	0.95	1.2	1.5	1.9	2.3	2.8	3.3	3.9	4.5
화물차 [m ² /h]	4.0	4.0	4.1	4.3	4.5	5.1	6.0	7.1	8.5	10	12	14			

(3) 스위스의 기준배출량 산정방법

- 스위스의 경우도 다른 유럽국가와 마찬가지로 승용차(가솔린차량과 디젤차량으로 구분)와 화물차로 구분하고 있다.
- CO, NO_x, 매연(비엔진 배출 부유분진 고려)를 환기대상물질로 고려하고 있다.
- 보정계수는 차량, 속도, 경사도, 표고보정계수를 고려하고 있다.
- 화물차량에 대해서 경사도별 한계속도를 제시하고 있으며, 10ton 화물차량의 기준배출량을 제시하고 이를 차량과 중량에 따라서 보정하고 있다.
- NO₂의 구성비를 10%로 보고 있으나, NO_x의 밀도는 2,000g/m³으로 하고 있다.

(4) 노르웨이의 기준배출량 산정방법

- 차량의 통행방식에 따라서 최대경사도를 제시하고 있다.
- 대상오염물질은 CO, NO_x, Soot이다.
- 기준배출량은 차종에 구분 없이 제시하고 있으며, 이를 차종별로 촉매사용차량(주로 가솔린기관)과 촉매미사용 차량으로 구분하여 정하여 적용하도록 하고 있다.
 - CO의 기준배출량 : 0.013 m³/km·Veh(주행상태) 0.5 m³/km·Veh(idling 상태, 한시간에 1리터를 소비하고 이중 6%가 CO가스로 발생하다는 가정에 의해서 산출된 값)

- 매연에 대한 기준배출량 : 750mg/km·veh, 디젤승용차는 0.08를 감소계수로 적용함
- NO_x 기준배출량 : 1.3×10⁻³m³/km·veh
- 촉매효과는 승용차에 대해서 0.3을 반영하고 있다.
- 소요환기량 계산후 압력과 온도에 대해서 보정하고 있다,

(5) 일본의 기준배출량 산정

- 환기 대상물질
 - 인간의 생리적 현상에 영향을 주는 CO와 가시거리에 영향을 주는 매연을 대상으로 한다.
 - NO_x의 경우, CO농도에 1/10에 불과하여 CO를 만족하면 NO_x도 만족하는 것으로 하여 환기대상에 제외하고 있다.
- 기준배출량 : 종단경사 0%, 주행속도 40~60km/h를 기준으로 다음과 같이 주어지고 있다.

<표 3.1.10> 환기량계산에 사용하는 유해성분의 배출량

유 해 성분	차 종	배출량 또는 매연농도		비 고
		평균 값 [ℓ/km·대]	표 준 편 차	
일산화 탄소	가솔린차	7	고려하지 않음	지체시의 배출량은 15 ℓ/km·대 정도
	디젤차			
매 연	가솔린차	0.05	0	매연농도 1m당의 빛의 투과율(α)로 다음식으로 구한다. $\alpha = \frac{-1}{1(m)} \log \frac{\tau}{100}$
	디젤차	0.6	0.5	

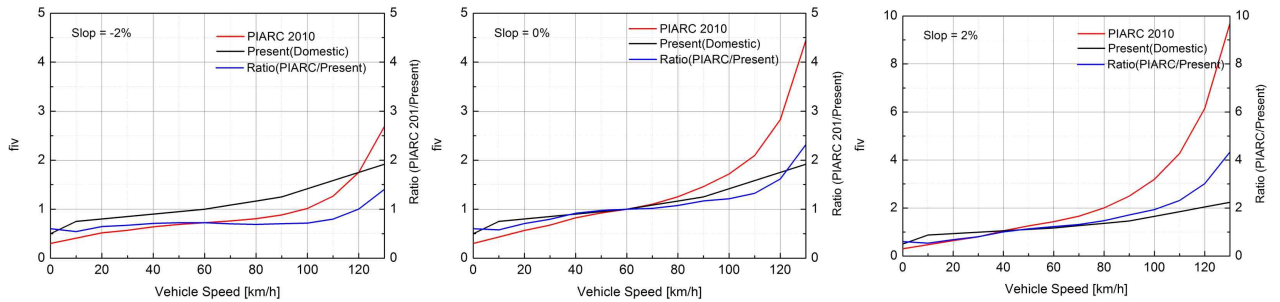
단) 여기서, τ는 매연투과율이다.

(6) 분석결과 요약

① 보정계수에 대한 분석

○ 속도경사 보정계수

- 다음 그림<5.1.1>은 속도보정계수를 경사도별로 분석한 결과이다.
- 속도보정계수는 현행 환기량 산정기준과 비교할 때 상당한 차이가 발생하고 있으며, 오염물질별로 경향이 일치하지 않은 것을 확인 할 수 있다.

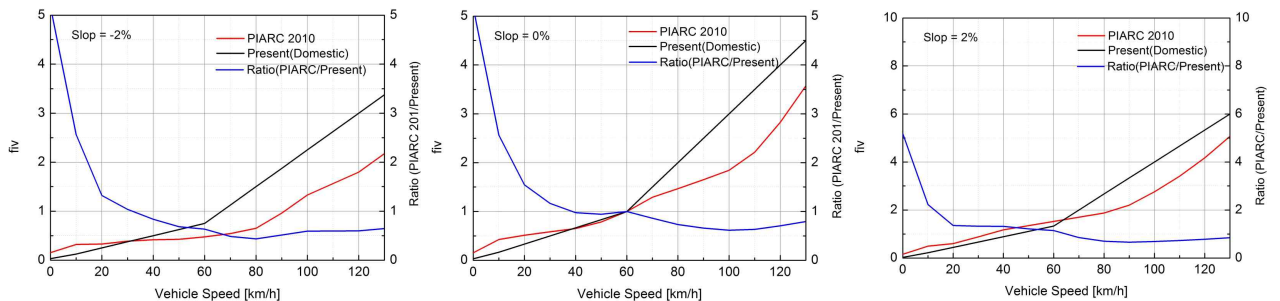


<경사도 : -2%>

<경사도 : 0%>

<경사도 : +2%>

(a)CO에 대한 속도보정계수(PC-가솔린 차량)

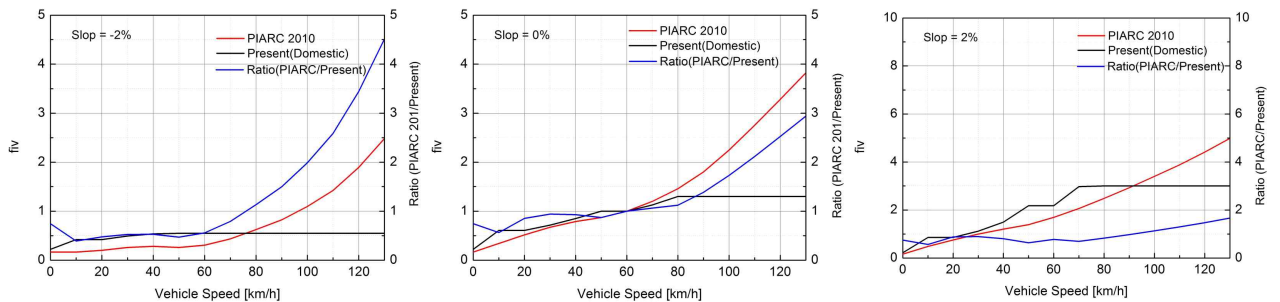


<경사도 : -2%>

<경사도 : 0%>

<경사도 : +2%>

(b) NOx에 대한 속도보정계수(PC-가솔린 차량)



<경사도 : -2%>

<경사도 : 0%>

<경사도 : +2%>

(c)매연에 대한 속도보정계수(PC-가솔린 차량)

<그림 3.1.1> 오염물질별 속도-경사 보정계수 요약

○ 표고 보정계수에 대한 분석

- 차종별 표고보정계수는 다음과 같으며, 표에서 알 수 있는 바와 같이 국내기준이 상당히 높은 값을 보이고 있다. 이는 국내의 경우, 1996년에 PIARC에서 제시하는 보정계수를 도입하여 현재까지 사용하여 왔기 때문으로 분석된다.

<표 3.1.11> 국가별 표고 보정계수 요약

구분		표고(m)	0	700	1000	2000	3000
소형차 (휘발유, 축매장치)	CO	PIARC	1	1	1.8	2.5	3.2
		독일	1	1	2.6	11.4	
		스위스	1	1	2.6	11.4	13
	NOx	PIARC	1	1	0.7	0.5	0.5
		독일	1.0	0.7	2.0	3.0	
소형차 (경유)	매연	PIARC	1	1	1	1.25	1.5
		독일	1.0		1.0	1.25	-
	CO	PIARC	1	1	1.2	1.5	1.8
		독일	1	1.14	1.2	1.5	
		오스트리아	1	1	1.21	1.50	1.81
	NOx	PIARC	1	1	1	1	1
	대형차 (경유)	매연	PIARC	1	1	1.1	1.7
독일			1.0		1.12	1.69	
CO		PIARC	1	1	1.4	2.8	4.0
		독일	1.0	1.25	1.35	2.75	
NOx		PIARC	1	1	1	1	1
모든 차종	도로설계편람		1.0	1.7	2.0	3.0	

② 환기량 산정방법에 대한 분석결과

- 환기대상물질 : CO, NO_x, 매연(Soot), 비엔진 배출 부유분진로 구분하여 규제하고 있다.
 - 일본의 경우 CO와 NO_x만 고려하고 있다.
- 기준배출량 : 구배 0%, 차속 60km/h를 기준으로 오염물질 배출량을 제시하고 있다.
 - 정속주행상태를 기준으로 주행속도·경사도별로 오염물질 발생량을 제시하고 있다.
- 보정계수 : 속도, 경사, 표고 보정계수를 적용하여 기준배출량을 보정한 후에 해당터널에 대한 소요환기량을 산정하고 있다.
- 오염물질 대해 원단위(g/km 또는 g/kW) 발생량을 (m³/hr)로 변화하기 위해서 밀도값이

필요하며, CO에 대한 밀도값은 논란이 없으나 NO_x에 대한 밀도값은 국가마다 측정결과를 반영하여 산정하고 있다.

- PIARC 및 스위스는 터널내 최소 환기량을 1.5m/s로 제시하고 있다.

나. 국내 기준배출량 조사

도로터널의 환기시스템 결정에 있어 가장 기본이 되는 것은 소요환기량의 산정을 위한 기준배출량에 대한 검토가 선행되어야 한다는 것이다. 도로터널의 소요환기량은 터널을 운행하는 차량에서 배출되는 오염물질을 허용농도 이하로 희석하거나 제거하기 위한 풍량이다. 따라서 소요환기량은 터널의 연장, 경사도, 차종별 구성비, 승용차환산계수, 차종별 오염물질 배출량, 경사·속도 보정계수에 영향을 받게 된다.

차종별 오염물질 기준배출량에 차량에서 배출되는 오염물질량을 환기량 계산을 위한 단위로 환산한 값으로 환경부의 “대기환경보전법 시행규칙 별표 17. 제작차 배출허용기준”에 근거하여 원단위(g/km 또는 g/kWh) 오염물질 배출량을 차종 및 오염물질별로 다음의 식과 같이 환산할 수 있다.

- 소형차량의 입자상 물질에 대한 기준배출량 계산방법

$$q_{0Particle} = 6.25 \times E_s (\text{g/km}) \times 0.75 \times Vt \quad [\text{m}^3/\text{hr}] \quad (5.1.1)$$

- 대형차량의 입자상 물질에 대한 기준배출량 계산방법

$$q_{0Particle} = 6.25 \times E_s (\text{g/kWh}) \times 0.75 \times Ps (\text{kW}) \quad [\text{m}^3/\text{hr}] \quad (5.1.2)$$

- 소형차량의 가스상 물질에 대한 기준배출량 계산방법

$$q_{0Gas} = \frac{E_s (\text{g/km})}{\rho_{Gas}} \times Vt \quad [\text{m}^3/\text{hr}] \quad (5.1.3)$$

- 대형차량의 가스상 물질에 대한 기준배출량 계산방법

$$q_{0Gas} = \frac{E_s (\text{g/kWh})}{\rho_{Gas}} \times Ps (\text{kW}) \quad [\text{m}^3/\text{hr}] \quad (5.1.4)$$

따라서, 오염물질 기준배출량은 차량제작기술 및 배기가스 처리기술에 영향을 받으며, 이와 관련한 기술은 발전을 거듭하고 있으며, 대기환경보전에 대한 요구가 증대하면서 차량에서 배출되는 오염물질의 량(“제작차 배출허용기준”) <표 3.1.12>~<표 3.1.13>에서 알 수 있는 바와 같이 급격하게 감소하는 추세에 있다. 그러나 현재 터널의

소요 환기량 산정시 적용하는 기준배출량은 2011년에 제시된 “제작차 배출허용기준”을 적용하고 있기 때문에 이에 대한 기준의 갱신 및 적용이 필요한 실정이다.

또한 속도 및 경사보정계수는 차속과 도로의 경사에 따라 연료소비가 증가하며 이에 따라 오염물질 배출량이 증가하는 차량의 배기가스 배출특성을 반영하기 위한 것이다. 그러나 현재 적용되고 있는 계수는 1996년 “고속도로터널 환기설계기준” 제정시 적용한 1991년에 발표된 PIARC의 보고서에 근거한 것이다. 따라서 현재 속도 및 경사보정계수는 차량의 제작기술의 발전에 따른 오염물질 저감을 적절히 반영하고 있다고 볼 수 없다. 따라서 이에 대한 검토가 필요하다.

<표 3.1.12> 국내 제작차 오염물질 배출량 규제치 변화

년도	차종구분	승용차 (g/km)		소형 버스 (g/km)	대형 버스 (g/kW·h)	소형 트럭 (g/kW·h)	중형 트럭 (g/kW·h)	대형 트럭 (g/kW·h)	특수 트럭 (g/kW·h)
		휘발유	경유	경유	경유	경유	경유	경유	경유
2004	Smoke	-	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	Smoke	-	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*
2011 (현기준)	Smoke	-	0.0045	0.0045	0.030	0.0045	0.030	0.030	0.030
	CO	1.06	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 2016/17	Smoke	0.002(*)	0.0045	0.0045	0.0100	0.0045	0.0100	0.0100	0.0100
	CO	0.625	0.500	0.630	4.000	0.630	4.000	4.000	4.000
	NOx	0.000	0.080	0.105	0.460	0.105	0.460	0.460	0.460

(주) 2011(현기준)은 도로설계편람(617. 환기시설) (국토교통부, 2011)

(*) 환경부 2016년 이후 제작차 허용배출 기준에서는 휘발유 승용차의 입자물질상 배출량값은 제시되지 않았지만, 각주의 “CVS-75 모드의 입자상물질 배출허용기준은 0.002g/km 이하로 한다”라는 규정에 따라 0.002 g/km를 적용

<표 3.1.13> 현행기준 대비 2016년 제작차 허용배출량 감소율(%)

구분	승용차		버스		트럭			
			소형	대형	소형	중형	대형	특수
	휘발유	경유	경유	경유	경유	경유	경유	경유
매연	-	0.0	0.0	66.7	0.0	66.7	66.7	66.7
CO	41.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NOx	0	55.6	55.3	77.0	55.3	77.0	77.0	77.0

(1) 기준배출량에 따른 소요환기량의 변화

본 절에서는 향후, 소요환기량 산정을 위한 국내 기준배출량을 제시하기 위해서 모델터널에 대해서 환경부에서 제시하는 최신 “제작차 배출허용기준”의 변화에 따른 소요환기량의 변화와 속도·경사보정계수의 변경에 따른 소요환기량 변화를 검토하였다.

연장 3 km, 2차선 일방향 터널을 모델터널로 하여 경사도별(-2~2%)로 소요환기량을 검토하여 비교하였다. 검토조건은 다음과 같다.

① 검토조건

터널 소요환기량 산정을 위한 기준배출량을 제시하기 위해서 모델터널에 대해서 소요환기량을 검토하였으며, 검토대상 모델터널의 제원 및 교통량은 <표 5.1.14>과 <표 5.1.15>와 같다. 소요환기량 산정시 속도경사 보정계수는 PIARC에서 1991(K11, 편람11), 2004(P04), 2012(P12), 2019(P19)년에 제시하는 경사·속도보정계수를 적용하여 검토하였다. 참고적으로 비차량 배출분진(NEPM)은 PIARC에서 2004(PN04), 2012(PN12), 2019(PN19)년 보고서에 제시하는 값을 적용하였다.

<표 3.1.14> 소요환기량 검토를 위한 모델터널의 제원

구분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
	- 2%	- 1%	- 0.5%	0%	0.5%	1%	2%
연장 (m)	2,500						
단면적 (m ²)	75						
대표직경(m)	8.8						
중단경사(%)	- 2	- 1	- 0.5	0	0.5	1	2
표고 (m)	0						
차선수(Lane)	2						

<표 3.1.15> 모델터널의 교통량

구분	승용차 (가솔린)	승용차 (디젤)	버스		트럭				AADT (대/일)
			소형	대형	소형	중형	대형	특수	
교통량	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866	44,574
구성비 (%)	40.47	26.98	6.89	6.95	0.47	12.28	4.01	1.94	100
PCE	1	1	1	1.5	1	1.5	1.5	2	1.14
기타	HGV = 25.19%, DO = 150 pc/km · lane, Mmax = 2,200 pc/h · lane								

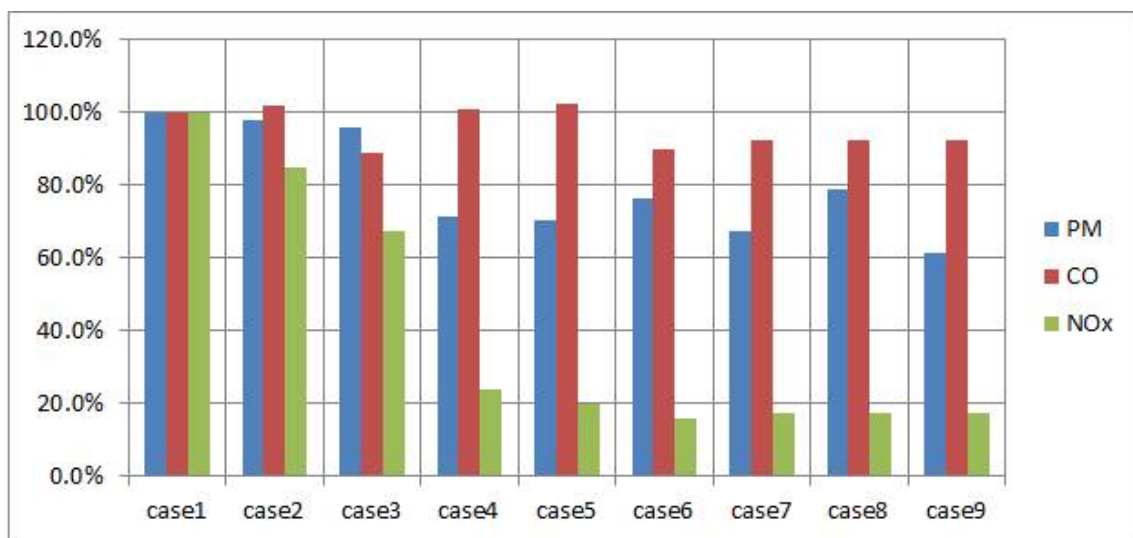
② 검토결과 요약

<표 3.1.16>는 중단경사 변화에 따른 소요환기량 계산결과로 부터 계산범위에서 전체평균 소요환기량과 현행기준 대비 감소율을 나타낸 것이다. 상세계산결과는 <표 3.1.17> ~ <표 3.1.25>와 <그림 3.1.2> ~ <그림 3.1.10>에 제시하였다. 소요환기량 계산결과를 요약하면 다음과 같다.

<표 3.1.16> 차량 오염물질 배출량 변경 및 경사·속도보정계수 변경에 따른 환기량 비교

기준배출량	제작차 허용배출량 기준						연구(안)			
	대기환경보전법 2009년			대기환경보전법 2016년			대기환경보전법 2016년			
Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
경사·속도 보정계수	K11	P04	P12	K11	P04	P12	P19	P19	P19	
비엔진 발생분진	PN04	PN04	PN12	PN04	PN04	PN12	PN04	PN12	PN19	
기준배출량(속도기준)	30	30	60	30	30	60	40	40	40	
소요환기량 산정결과	매연 m³/s	143.8	140.7	138.0	102.6	101.4	109.8	97.0	113.6	88.4
	(비율 %)	100.0%	97.9%	96.0%	71.4%	70.6%	76.4%	67.5%	79.0%	61.5%
	CO m³/s	140.9	143.5	125.4	142.1	144.4	126.7	130.4	130.4	130.4
	(비율 %)	100.0%	101.8%	89.0%	100.8%	102.5%	89.9%	92.6%	92.6%	92.6%
	NOx m³/s	159.7	135.9	107.2	38.1	32.1	25.5	27.9	27.9	27.9
	(비율 %)	100.0%	85.1%	67.1%	23.8%	20.1%	16.0%	17.5%	17.5%	17.5%

(주) 전체 차속별(10~80km/h) 경사별(-2%~+2%) 소요환기량의 평균값임.

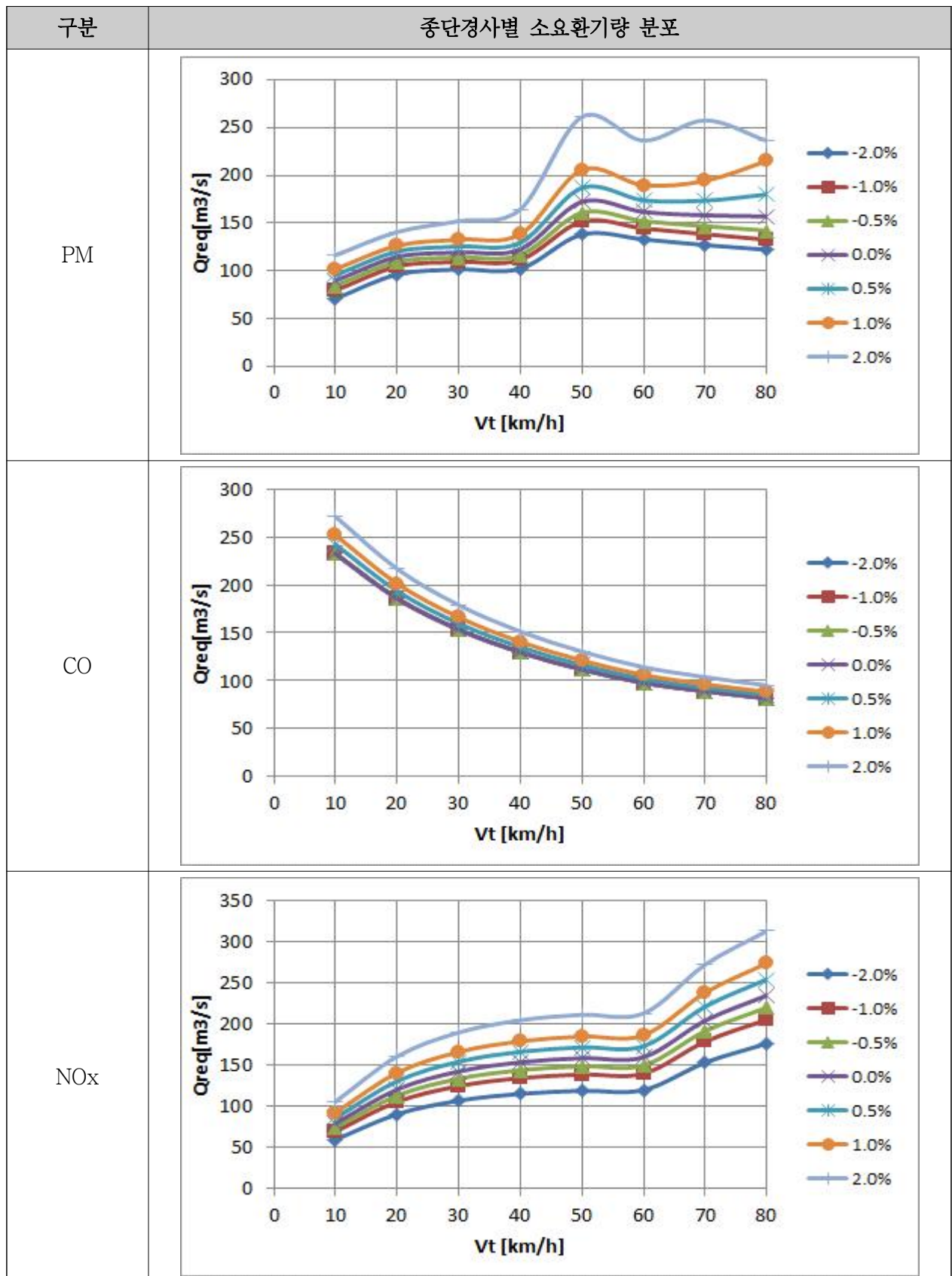


<그림 3.1.2> 기준배출량에 따른 소요환기량 변화

(2) 기준배출량에 따른 소요환기량 산정결과

<표 3.1.17> 제작차 기준(30km/h 보정, F_{iv} K11, NEPM PN04) - 편람11 배출량

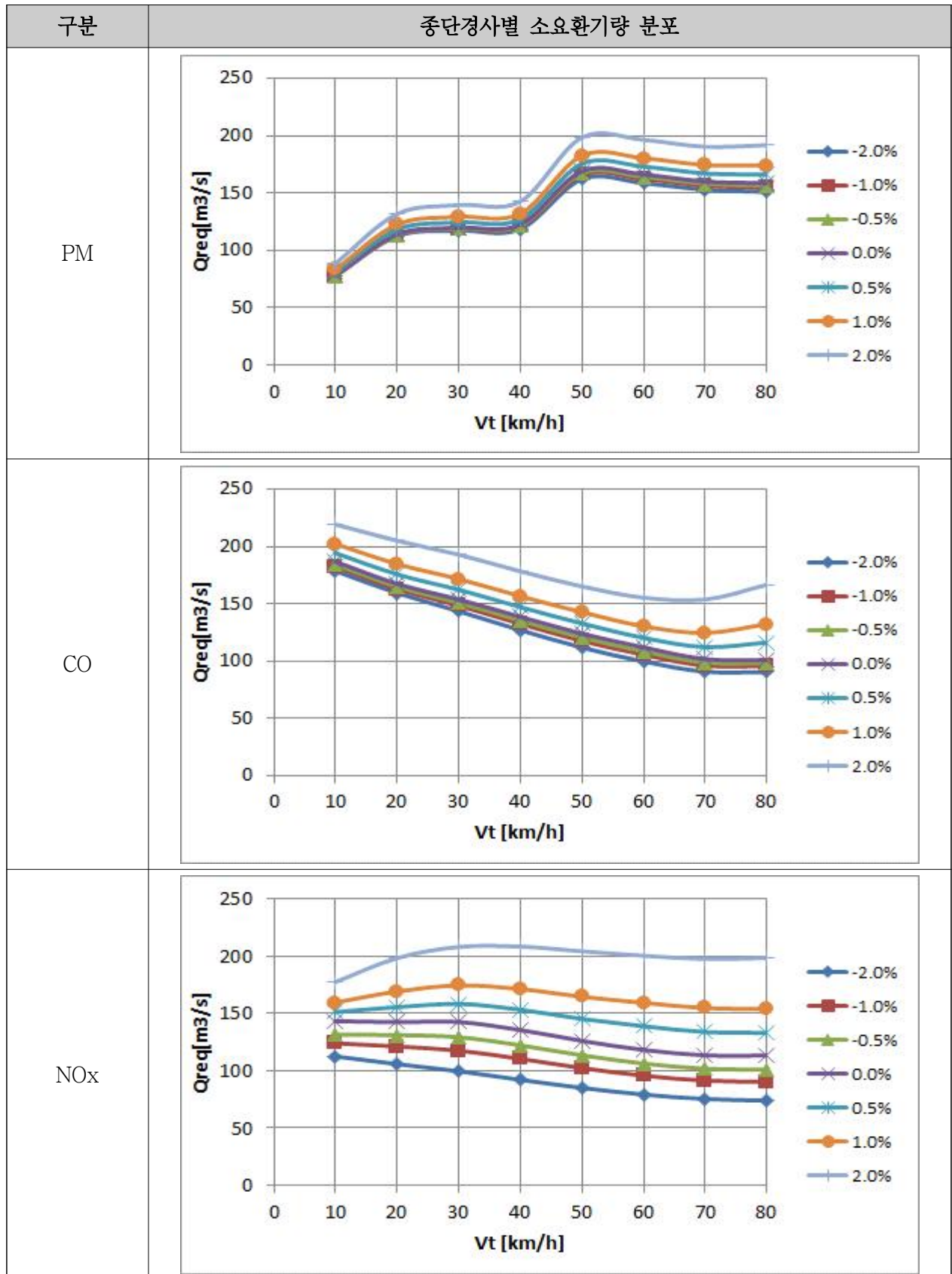
매연	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	71.2	79.8	84.7	90.0	95.7	102.0	116.6
20 km/h	96.4	104.9	109.6	114.8	120.5	126.6	140.9
30 km/h	101.7	109.7	114.3	119.5	125.7	133.0	152.3
40 km/h	102.6	111.7	116.9	122.8	129.9	138.6	164.7
50 km/h	138.3	151.9	161.0	172.4	187.0	205.7	261.2
60 km/h	133.2	144.6	152.3	161.9	174.1	189.8	236.5
70 km/h	127.3	138.6	147.0	158.3	173.7	194.4	257.6
80 km/h	122.4	132.8	142.3	157.2	180.2	215.1	236.3
CO	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	232.7	232.7	232.7	232.7	242.4	252.1	271.5
20 km/h	186.0	186.0	186.0	186.0	193.7	201.5	217.0
30 km/h	153.5	153.5	153.5	153.5	159.9	166.3	179.0
40 km/h	129.8	129.8	129.8	129.8	135.2	140.6	151.4
50 km/h	111.8	111.8	111.8	111.8	116.5	121.1	130.5
60 km/h	97.9	97.9	97.9	97.9	101.9	106.0	114.2
70 km/h	88.9	88.9	88.9	88.9	92.7	96.4	103.8
80 km/h	81.5	81.5	81.5	81.5	84.9	88.3	95.1
NOx	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	59.3	69.2	74.1	79.1	85.7	92.3	105.4
20 km/h	90.3	105.3	112.9	120.4	130.4	140.4	160.5
30 km/h	106.7	124.4	133.3	142.2	154.1	165.9	189.6
40 km/h	115.0	134.2	143.8	153.4	166.1	178.9	204.5
50 km/h	118.7	138.5	148.4	158.3	171.5	184.7	211.1
60 km/h	119.7	139.7	149.6	159.6	172.9	186.2	212.8
70 km/h	153.0	178.5	191.3	204.0	221.0	238.0	272.0
80 km/h	176.0	205.3	220.0	234.6	254.2	273.7	312.8



<그림 3.1.3> 제작차 기준(30km/h 보정, F_{iv} K11, NEPM PN04) - 편람11 배출량

<표 3.1.18> 제작차 기준(30km/h 보정, F_{iv} P04, NEPM PN04) - 편람11 배출량

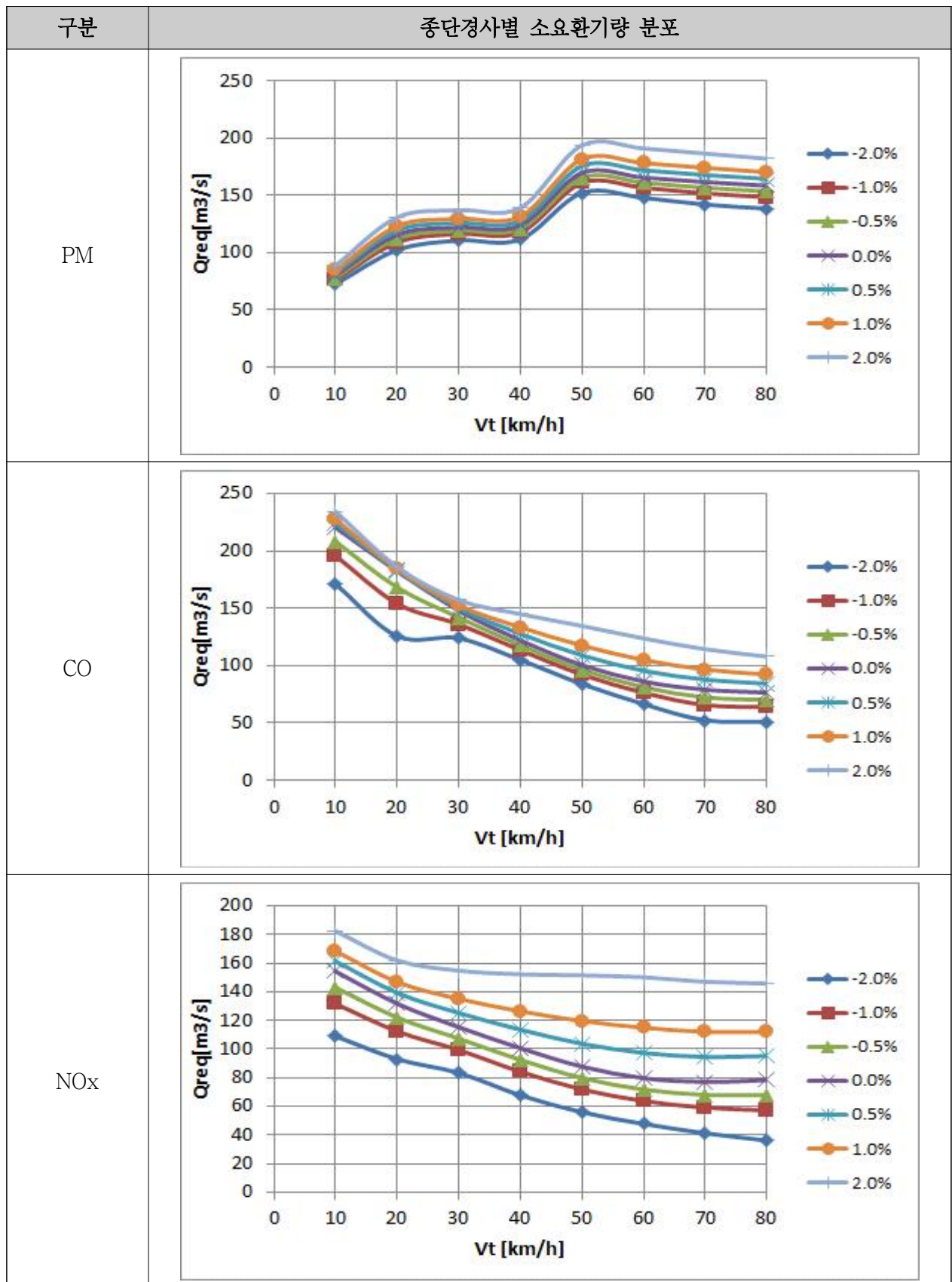
매연	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	78.0	78.0	78.0	78.3	81.0	83.6	88.7
20 km/h	112.5	113.2	113.6	114.0	118.2	122.6	131.7
30 km/h	117.1	118.5	119.1	119.7	124.3	129.2	139.5
40 km/h	118.6	120.6	121.6	122.6	127.2	132.0	142.7
50 km/h	162.2	165.7	167.3	169.1	175.5	182.6	198.4
60 km/h	158.6	162.3	164.1	166.1	173.0	180.3	196.3
70 km/h	152.9	156.4	158.2	160.0	167.1	174.5	190.3
80 km/h	150.9	154.7	156.5	158.5	166.1	174.2	191.7
CO	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	178.6	182.4	184.4	186.8	194.3	202.2	219.2
20 km/h	159.4	163.1	165.1	167.5	175.7	184.7	205.0
30 km/h	143.6	148.5	151.0	153.8	162.3	171.7	192.9
40 km/h	127.0	132.6	135.5	138.7	147.2	156.6	178.4
50 km/h	111.9	117.7	120.7	124.0	132.9	142.8	165.2
60 km/h	99.8	105.7	108.6	112.1	120.4	130.5	155.4
70 km/h	90.9	96.1	98.8	101.9	112.3	124.6	153.8
80 km/h	90.6	95.6	98.2	100.9	116.3	132.4	166.6
NOx	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	112.4	123.9	131.4	143.2	151.1	159.4	177.3
20 km/h	105.7	121.1	131.0	142.3	155.4	169.0	198.1
30 km/h	99.5	117.5	129.2	142.4	158.2	174.3	207.9
40 km/h	92.1	110.3	122.1	135.4	153.2	171.2	208.2
50 km/h	85.0	102.3	113.4	126.0	145.1	164.4	204.0
60 km/h	79.2	95.6	106.2	118.1	138.7	159.1	200.2
70 km/h	75.3	91.3	101.7	113.3	133.8	154.6	197.3
80 km/h	73.9	90.4	101.0	113.1	132.9	153.7	198.2



<그림 3.1.4> 제작차 기준(30km/h 보정, F_{iv} P04, NEPM PN04) - 편람11 배출량

<표 3.1.19> 제작차 기준(60km/h 보정, F_{iv} P12, NEPM PN12) - 편람11 배출량

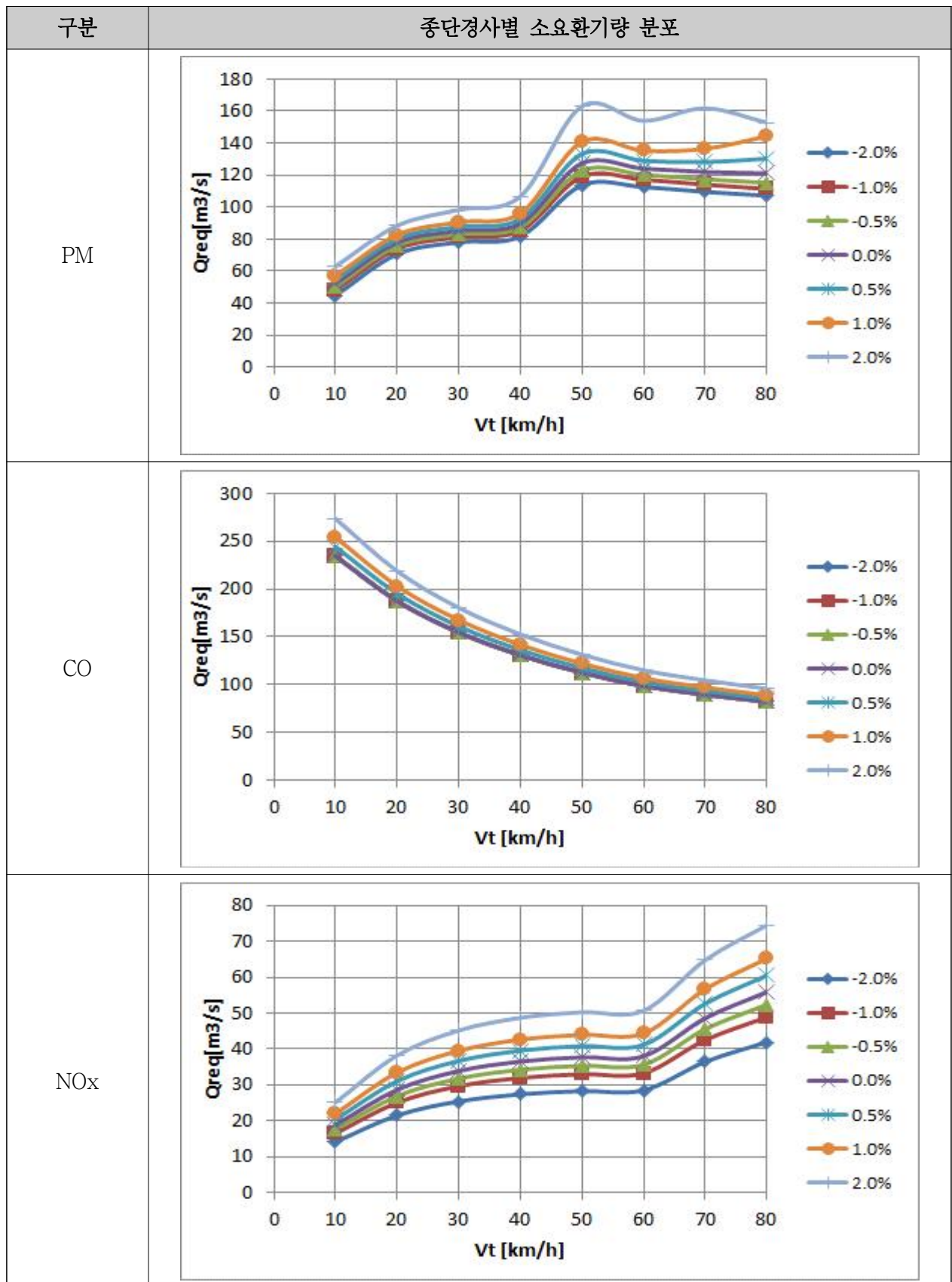
매연	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	72.6	76.4	78.2	80.1	82.3	84.4	88.7
20 km/h	102.2	108.9	112.2	115.5	119.3	123.1	130.7
30 km/h	110.6	116.3	119.1	121.9	125.6	129.4	136.9
40 km/h	111.5	117.7	120.8	123.9	127.7	131.5	139.0
50 km/h	152.0	160.8	165.2	169.5	175.5	181.5	193.5
60 km/h	147.7	156.5	160.9	165.3	171.7	178.0	190.8
70 km/h	141.8	151.7	156.6	161.5	167.7	173.9	186.3
80 km/h	138.4	148.4	153.4	158.4	164.2	170.1	181.8
CO	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	171.1	195.8	208.1	220.5	224.0	227.5	234.4
20 km/h	125.7	154.0	168.2	182.4	183.3	184.2	186.0
30 km/h	123.8	135.9	142.0	148.0	150.3	152.6	157.2
40 km/h	104.9	113.4	117.7	121.9	127.7	133.4	144.9
50 km/h	84.0	92.2	96.3	100.4	109.0	117.5	134.6
60 km/h	66.4	76.3	81.2	86.1	95.5	104.9	123.7
70 km/h	52.4	65.7	72.3	79.0	87.8	96.6	114.2
80 km/h	51.0	63.7	70.1	76.4	84.3	92.2	107.9
NOx	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	109.1	131.7	143.0	154.3	161.3	168.3	182.4
20 km/h	93.1	112.4	122.1	131.8	139.3	146.8	161.9
30 km/h	83.4	99.4	107.4	115.4	125.2	135.1	154.8
40 km/h	67.8	84.3	92.5	100.8	113.6	126.5	152.2
50 km/h	56.0	71.9	79.9	87.8	103.8	119.7	151.5
60 km/h	47.9	63.8	71.8	79.8	97.4	115.0	150.2
70 km/h	41.4	59.2	68.2	77.1	94.6	112.1	147.0
80 km/h	36.3	57.3	67.9	78.4	95.2	112.1	145.8



<그림 3.1.5> 제작차 기준(60km/h 보정, F_{iv} P12, NEPM PN12) - 편람11 배출량

<표 3.1.20> 제작차 기준(30km/h 보정, F_{iv} K11, NEPM PN04) - 환경부16 배출량

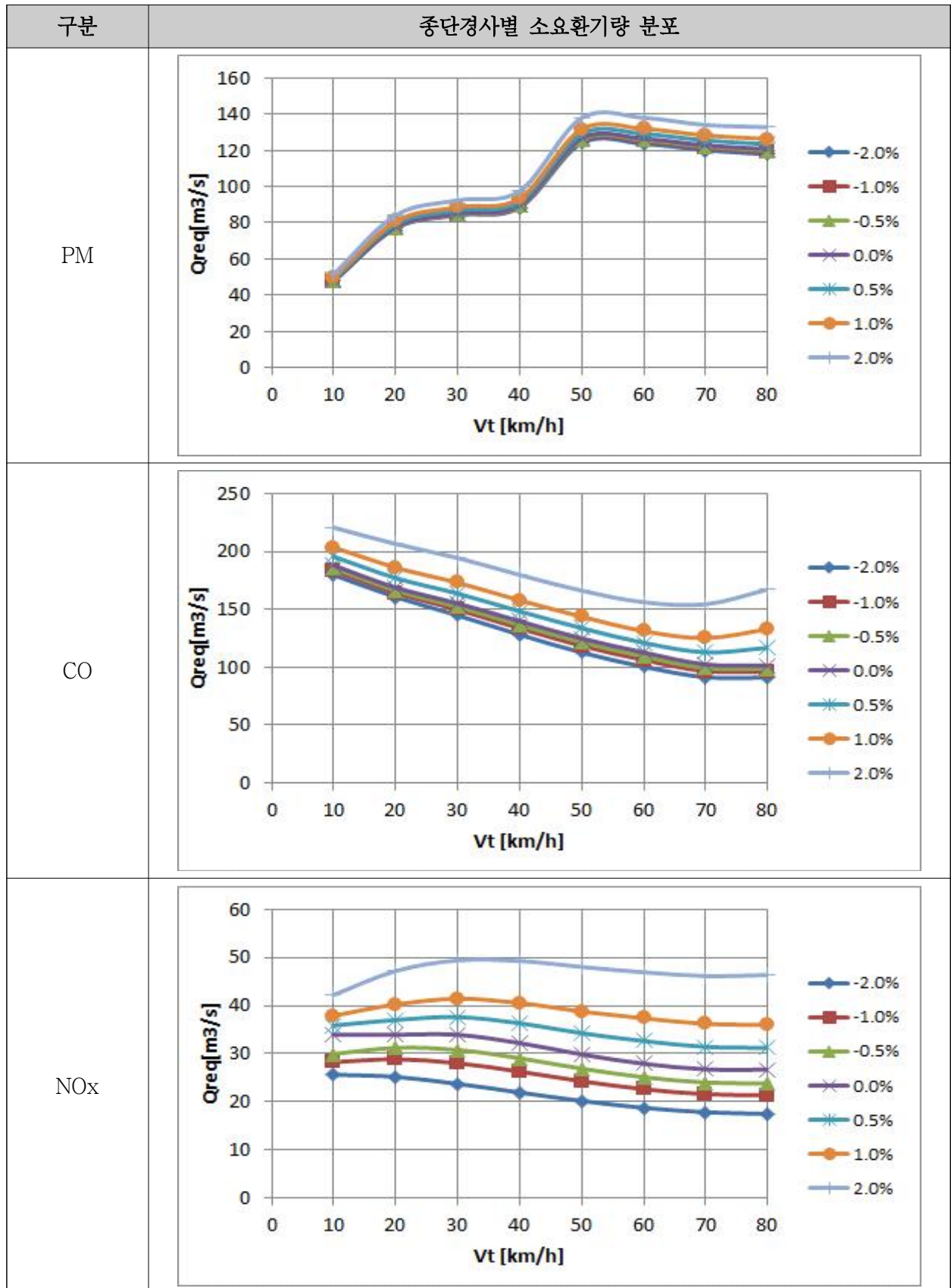
매연	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	44.7	48.2	50.1	52.3	54.6	57.1	63.0
20 km/h	70.5	73.9	75.8	77.9	80.2	82.6	88.4
30 km/h	78.0	81.2	83.0	85.1	87.6	90.6	98.3
40 km/h	81.7	85.4	87.5	89.8	92.7	96.2	106.7
50 km/h	113.7	119.2	122.8	127.4	133.2	140.8	163.0
60 km/h	112.6	117.1	120.2	124.0	129.0	135.3	154.0
70 km/h	109.5	114.1	117.5	122.0	128.2	136.5	161.9
80 km/h	107.1	111.3	115.1	121.1	130.3	144.3	152.8
CO	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	234.6	234.6	234.6	234.6	244.4	254.2	273.7
20 km/h	187.5	187.5	187.5	187.5	195.3	203.1	218.8
30 km/h	154.7	154.7	154.7	154.7	161.2	167.6	180.5
40 km/h	130.8	130.8	130.8	130.8	136.3	141.7	152.6
50 km/h	112.7	112.7	112.7	112.7	117.4	122.1	131.5
60 km/h	98.7	98.7	98.7	98.7	102.8	106.9	115.1
70 km/h	89.7	89.7	89.7	89.7	93.4	97.2	104.6
80 km/h	82.2	82.2	82.2	82.2	85.6	89.0	95.9
NOx	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	14.1	16.5	17.7	18.8	20.4	22.0	25.1
20 km/h	21.5	25.1	26.9	28.7	31.1	33.5	38.3
30 km/h	25.4	29.7	31.8	33.9	36.7	39.6	45.2
40 km/h	27.4	32.0	34.3	36.6	39.6	42.7	48.7
50 km/h	28.3	33.0	35.4	37.7	40.9	44.0	50.3
60 km/h	28.5	33.3	35.7	38.0	41.2	44.4	50.7
70 km/h	36.5	42.6	45.6	48.6	52.7	56.7	64.8
80 km/h	41.9	48.9	52.4	55.9	60.6	65.3	74.6



<그림 3.1.6> 제작차 기준(30km/h 보정, F_{iv} K11, NEPM PN04) - 환경부16 배출량

<표 3.1.21> 제작차 기준(30km/h 보정, F_{iv} P04, NEPM PN04) - 환경부16 배출량

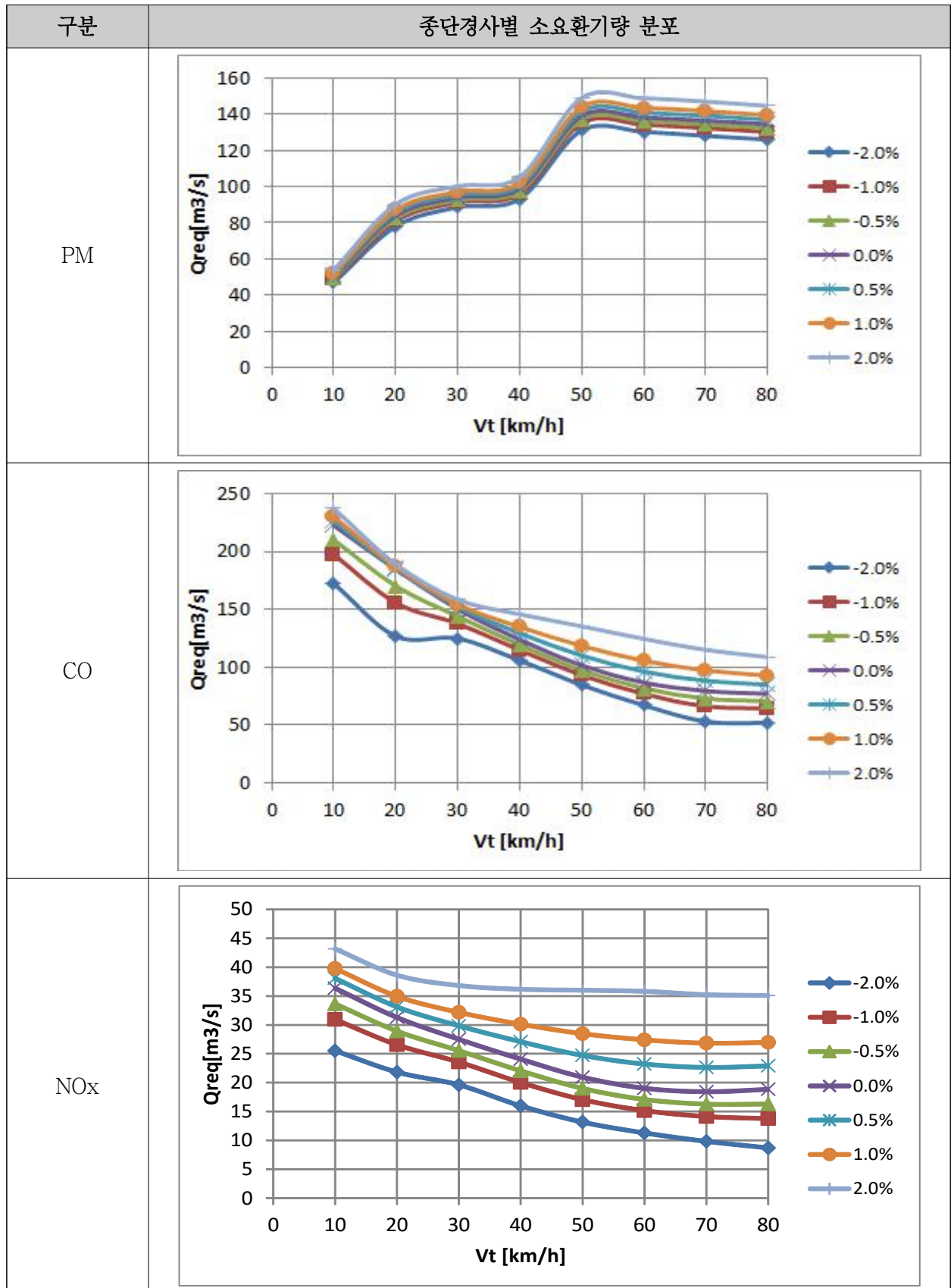
매연	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	47.8	47.8	47.8	47.9	48.9	49.8	51.7
20 km/h	77.1	77.4	77.6	77.7	79.2	80.8	84.2
30 km/h	84.2	84.7	85.0	85.2	86.9	88.7	92.5
40 km/h	88.5	89.3	89.6	90.0	91.7	93.5	97.6
50 km/h	124.1	125.4	126.0	126.7	129.1	131.7	138.0
60 km/h	123.7	125.1	125.8	126.5	129.2	132.0	138.1
70 km/h	120.1	121.5	122.1	122.8	125.5	128.3	134.1
80 km/h	117.9	119.3	120.0	120.8	123.5	126.4	132.8
CO	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	179.7	183.5	185.6	188.0	195.6	203.5	220.6
20 km/h	160.6	164.3	166.3	168.8	177.0	186.1	206.5
30 km/h	144.8	149.7	152.2	155.1	163.6	173.0	194.4
40 km/h	128.1	133.6	136.5	139.8	148.3	157.8	179.7
50 km/h	112.8	118.6	121.5	124.8	133.8	143.7	166.2
60 km/h	100.4	106.4	109.3	112.8	121.1	131.2	156.2
70 km/h	91.4	96.7	99.3	102.4	112.9	125.2	154.4
80 km/h	91.0	96.1	98.7	101.4	116.8	132.9	167.2
NOx	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	25.7	28.3	30.0	34.0	35.9	37.9	42.2
20 km/h	25.2	28.9	31.3	34.0	37.0	40.3	47.2
30 km/h	23.8	28.0	30.8	34.0	37.6	41.4	49.4
40 km/h	22.0	26.3	29.1	32.2	36.4	40.6	49.3
50 km/h	20.2	24.3	26.9	29.9	34.3	38.8	48.1
60 km/h	18.8	22.6	25.1	27.9	32.7	37.4	47.0
70 km/h	17.8	21.6	24.0	26.8	31.4	36.2	46.2
80 km/h	17.5	21.4	23.9	26.7	31.2	36.0	46.4



<그림 3.1.7> 제작차 기준(30km/h 보정, F_{iv} P04, NEPM PN04) - 환경부16 배출량

<표 3.1.22> 제작차 기준(60km/h 보정, F_{iv} P12, NEPM PN12) - 환경부16 배출량

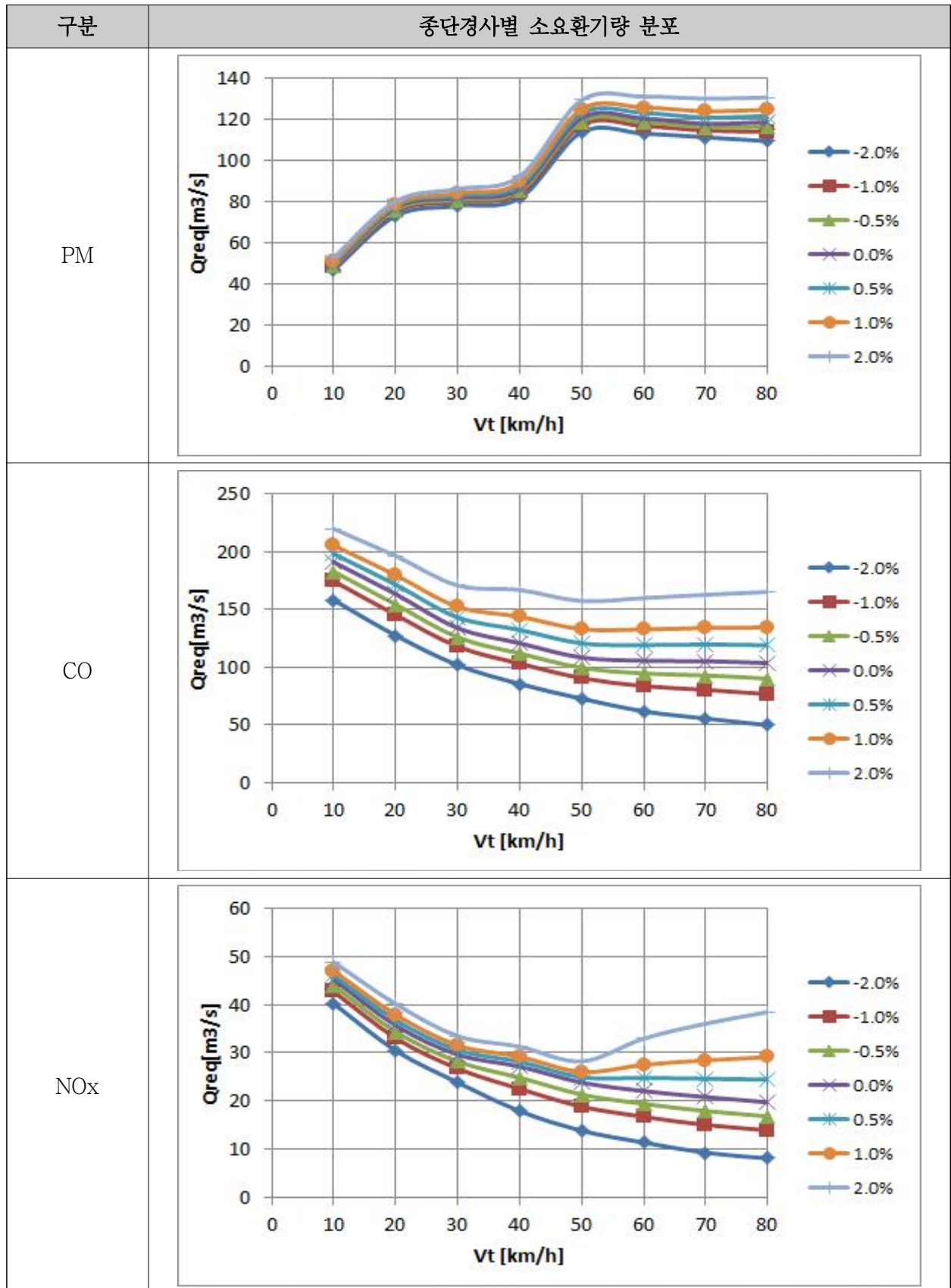
매연	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	47.0	48.7	49.5	50.3	51.2	52.1	53.9
20 km/h	78.1	81.0	82.5	84.0	85.6	87.1	90.2
30 km/h	88.7	91.3	92.7	94.0	95.6	97.1	100.3
40 km/h	93.3	96.2	97.6	99.0	100.6	102.2	105.3
50 km/h	131.2	135.2	137.2	139.2	141.7	144.1	149.1
60 km/h	130.3	134.3	136.3	138.3	140.9	143.6	148.9
70 km/h	128.1	132.3	134.5	136.6	139.2	141.8	147.1
80 km/h	126.0	130.3	132.4	134.6	137.1	139.6	144.6
CO	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	172.4	197.5	210.1	222.6	226.3	229.9	237.3
20 km/h	126.8	155.7	170.2	184.7	185.8	186.9	189.1
30 km/h	124.9	137.6	144.0	150.3	152.3	154.4	158.5
40 km/h	105.9	114.9	119.4	123.9	129.4	134.9	145.8
50 km/h	84.7	93.2	97.4	101.7	110.1	118.5	135.4
60 km/h	67.2	77.0	81.9	86.8	96.3	105.7	124.5
70 km/h	53.1	66.3	72.9	79.5	88.4	97.3	115.1
80 km/h	51.8	64.4	70.7	77.1	85.0	92.9	108.8
NOx	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	25.5	30.9	33.6	36.4	38.1	39.8	43.2
20 km/h	21.8	26.6	28.9	31.3	33.1	34.9	38.6
30 km/h	19.6	23.6	25.5	27.5	29.8	32.2	36.8
40 km/h	16.0	20.0	22.0	24.1	27.1	30.1	36.2
50 km/h	13.2	17.1	19.0	21.0	24.7	28.5	36.0
60 km/h	11.3	15.2	17.1	19.0	23.2	27.4	35.8
70 km/h	9.8	14.1	16.3	18.4	22.6	26.8	35.2
80 km/h	8.7	13.8	16.3	18.8	22.9	27.0	35.1



<그림 3.1.8> 제작차 기준(60km/h 보정, F_{iv} P12, NEPM PN12) - 환경부16 배출량

〈표 3.1.23〉 제작차 기준(40km/h 보정, F_{iv} P19, NEPM PN04) - 환경부 2016

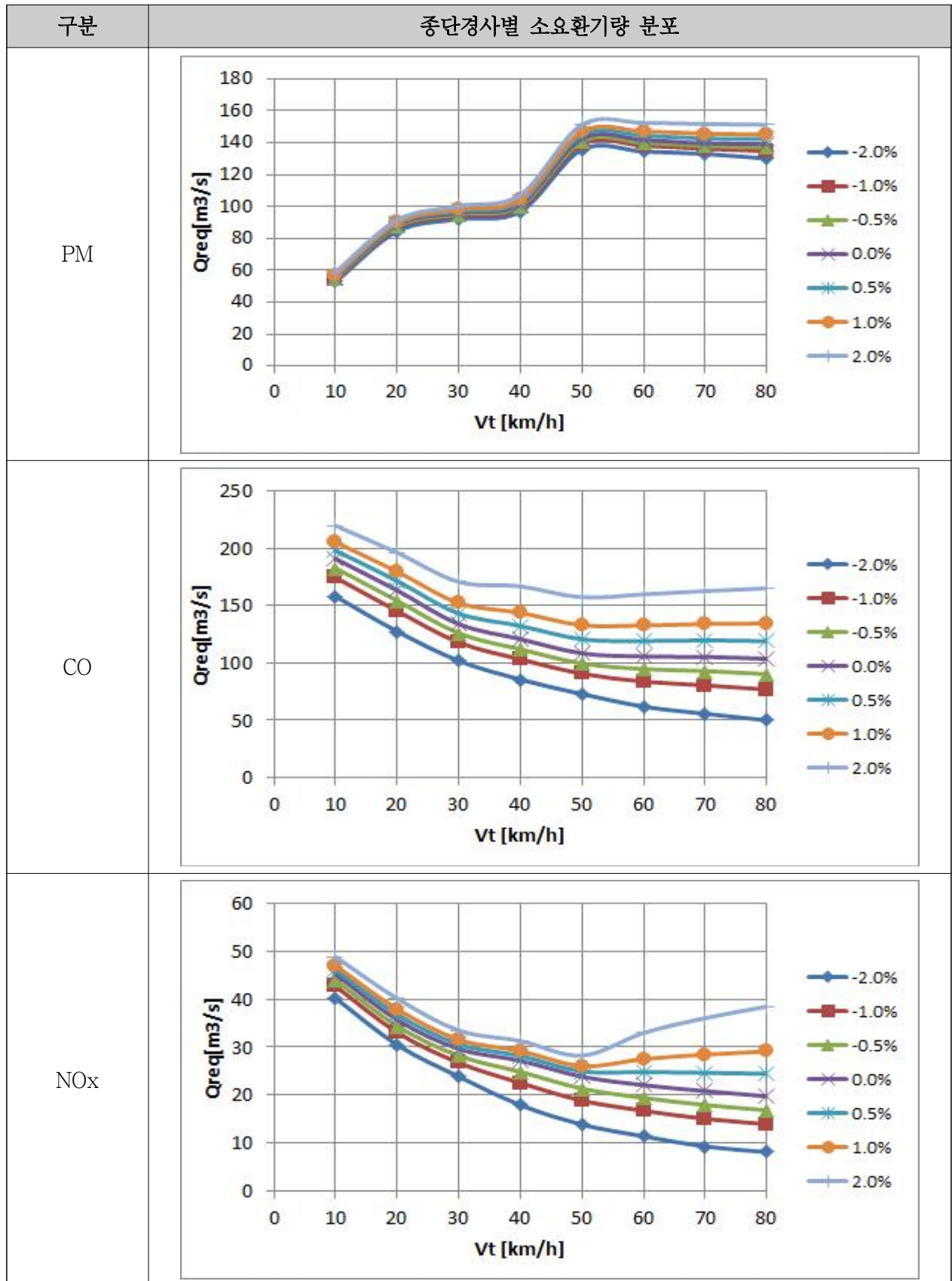
매연	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	46.9	48.1	48.7	49.3	50.2	51.1	52.9
20 km/h	73.1	75.1	76.2	77.2	77.9	78.7	80.2
30 km/h	77.9	80.0	81.0	82.0	83.0	84.1	86.2
40 km/h	81.8	84.1	85.2	86.4	87.8	89.3	92.2
50 km/h	113.7	117.2	118.9	120.6	122.8	124.9	129.3
60 km/h	113.1	116.7	118.6	120.4	123.1	125.7	131.0
70 km/h	111.2	114.5	116.2	117.8	120.9	123.9	130.0
80 km/h	109.4	114.0	116.3	118.6	121.6	124.6	130.6
CO	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	158.1	174.4	182.6	190.8	198.0	205.1	219.5
20 km/h	127.4	145.3	154.2	163.2	171.4	179.7	196.1
30 km/h	101.9	117.9	125.9	133.9	143.1	152.3	170.7
40 km/h	85.6	103.2	112.0	120.8	132.3	143.7	166.7
50 km/h	72.9	90.7	99.5	108.4	120.6	132.9	157.3
60 km/h	62.0	83.8	94.7	105.6	119.1	132.7	159.8
70 km/h	55.8	80.5	92.9	105.3	119.6	134.0	162.7
80 km/h	50.0	76.8	90.2	103.6	118.9	134.3	165.1
NOx	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	40.2	42.7	44.0	45.2	46.1	47.0	48.8
20 km/h	30.5	33.1	34.4	35.7	36.8	37.9	40.2
30 km/h	23.9	26.8	28.2	29.7	30.6	31.6	33.5
40 km/h	18.0	22.6	24.9	27.2	28.2	29.3	31.3
50 km/h	13.9	18.9	21.4	23.9	25.0	26.1	28.3
60 km/h	11.4	16.8	19.4	22.1	24.8	27.5	33.0
70 km/h	9.3	15.1	18.0	20.9	24.7	28.5	36.1
80 km/h	8.2	14.0	16.9	19.8	24.5	29.1	38.5



<그림 3.1.9> 제작차 기준(40km/h 보정, F_{iv} P19, NEPM PN04) - 환경부 2016

〈표 3.1.24〉 제작차 기준(40km/h 보정, F_{iv} P19, NEPM PN12) - 환경부 2016

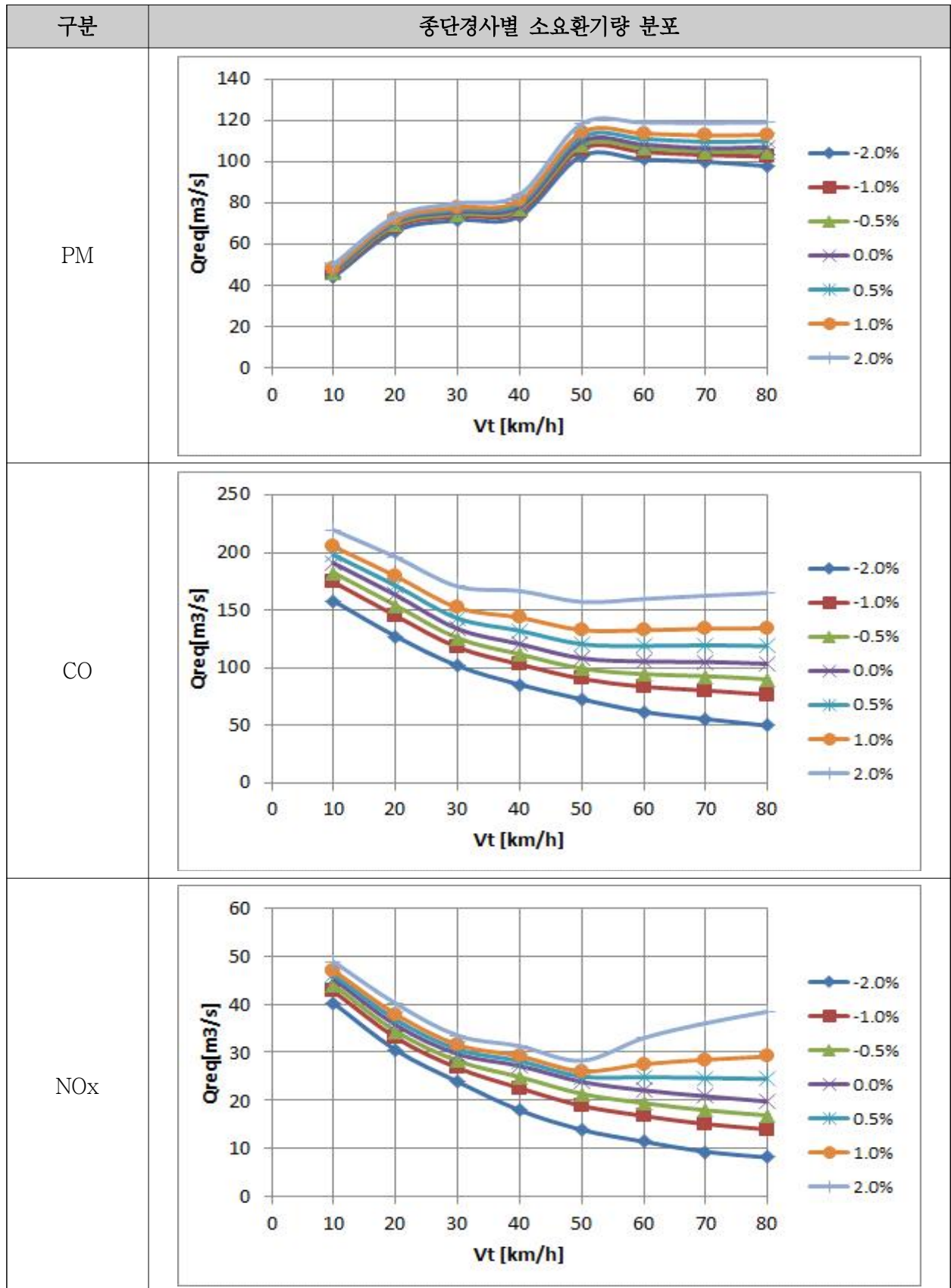
매연	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	52.9	54.1	54.7	55.3	56.2	57.1	58.9
20 km/h	84.4	86.5	87.5	88.5	89.3	90.0	91.5
30 km/h	92.0	94.0	95.1	96.1	97.1	98.2	100.3
40 km/h	96.9	99.2	100.4	101.5	103.0	104.4	107.3
50 km/h	135.8	139.2	140.9	142.7	144.8	147.0	151.3
60 km/h	134.5	138.2	140.0	141.9	144.5	147.2	152.5
70 km/h	133.0	136.3	137.9	139.6	142.6	145.7	151.8
80 km/h	130.1	134.8	137.1	139.4	142.4	145.4	151.3
CO	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	158.1	174.4	182.6	190.8	198.0	205.1	219.5
20 km/h	127.4	145.3	154.2	163.2	171.4	179.7	196.1
30 km/h	101.9	117.9	125.9	133.9	143.1	152.3	170.7
40 km/h	85.6	103.2	112.0	120.8	132.3	143.7	166.7
50 km/h	72.9	90.7	99.5	108.4	120.6	132.9	157.3
60 km/h	62.0	83.8	94.7	105.6	119.1	132.7	159.8
70 km/h	55.8	80.5	92.9	105.3	119.6	134.0	162.7
80 km/h	50.0	76.8	90.2	103.6	118.9	134.3	165.1
NOx	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	40.2	42.7	44.0	45.2	46.1	47.0	48.8
20 km/h	30.5	33.1	34.4	35.7	36.8	37.9	40.2
30 km/h	23.9	26.8	28.2	29.7	30.6	31.6	33.5
40 km/h	18.0	22.6	24.9	27.2	28.2	29.3	31.3
50 km/h	13.9	18.9	21.4	23.9	25.0	26.1	28.3
60 km/h	11.4	16.8	19.4	22.1	24.8	27.5	33.0
70 km/h	9.3	15.1	18.0	20.9	24.7	28.5	36.1
80 km/h	8.2	14.0	16.9	19.8	24.5	29.1	38.5



<그림 3.1.10> 제작차 기준(40km/h 보정, F_{iv} P19, NEPM PN12) - 환경부 2016

<표 3.1.25> 제작차 기준(40km/h 보정, F_{iv} P19, NEPM PN19) - 환경부 2016

매연	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	44.3	45.5	46.1	46.7	47.6	48.5	50.3
20 km/h	66.5	68.6	69.6	70.6	71.4	72.1	73.6
30 km/h	71.6	73.6	74.6	75.6	76.7	77.7	79.8
40 km/h	73.6	75.9	77.1	78.3	79.7	81.2	84.1
50 km/h	103.0	106.4	108.1	109.9	112.0	114.2	118.5
60 km/h	101.1	104.8	106.6	108.4	111.1	113.7	119.0
70 km/h	100.1	103.3	105.0	106.6	109.7	112.7	118.8
80 km/h	97.9	102.6	104.9	107.2	110.2	113.2	119.1
CO	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	158.1	174.4	182.6	190.8	198.0	205.1	219.5
20 km/h	127.4	145.3	154.2	163.2	171.4	179.7	196.1
30 km/h	101.9	117.9	125.9	133.9	143.1	152.3	170.7
40 km/h	85.6	103.2	112.0	120.8	132.3	143.7	166.7
50 km/h	72.9	90.7	99.5	108.4	120.6	132.9	157.3
60 km/h	62.0	83.8	94.7	105.6	119.1	132.7	159.8
70 km/h	55.8	80.5	92.9	105.3	119.6	134.0	162.7
80 km/h	50.0	76.8	90.2	103.6	118.9	134.3	165.1
NOx	-2 %	-1 %	-0.5 %	0 %	0.5 %	1 %	2 %
10 km/h	40.2	42.7	44.0	45.2	46.1	47.0	48.8
20 km/h	30.5	33.1	34.4	35.7	36.8	37.9	40.2
30 km/h	23.9	26.8	28.2	29.7	30.6	31.6	33.5
40 km/h	18.0	22.6	24.9	27.2	28.2	29.3	31.3
50 km/h	13.9	18.9	21.4	23.9	25.0	26.1	28.3
60 km/h	11.4	16.8	19.4	22.1	24.8	27.5	33.0
70 km/h	9.3	15.1	18.0	20.9	24.7	28.5	36.1
80 km/h	8.2	14.0	16.9	19.8	24.5	29.1	38.5



<그림 3.1.11> 제작차 기준(40km/h 보정, F_{iv} P19, NEPM PN19) - 환경부 2016

(3) 소요환기량 분석결과

일반적인 2차로 터널(단면, 75m²)을 대상으로 종단경사별 소요환기량의 변화를 분석한 결과는 다음과 같다. 해석조건은 크게 기준배출량을 환경부에서 제시하는 제작차 기준(현행 편람기준(환경부 2009년) 및 환경부 2016년)을 적용하였으며, 속도·경사보정계수(Fiv), 비차량배출계수(NEPM) 등은 WRA(구, PIARC)에서 제시하는 연차별 보정계수를 사용하여 분석하였다. 단, PIARC에서 제시하는 기준배출량값을 국내 제작차 기준으로 환산하기 위한 차량의 속도보정(Vt)은 30km/h, 60km/h 및 40km/h를 기준하였다.

- 현행 기준배출량 기준인 국토부의 도로설계편람(제작차 기준으로 환경부 2009년, PIARC 1991)의 소요환기량 100%로 하였을 경우, PIARC(2012)의 보정계수를 적용하면 매연은 평균 96.0%, CO는 평균 89.0%, NO_x 는 평균 67.10%의 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.
- 기준배출량으로 환경부의 2016년 이후 적용하게 되어 있는 제작차 기준을 적용하고, PIARC(2012)의 보정계수를 적용하면 매연은 평균 76.4%, CO는 평균 89.9%, NO_x 는 평균 16.0%의 수준으로 나타났다. 반면, 동일한 제작차 기준에 최신 PIARC(2019)의 보정계수를 적용하면 매연은 평균 61.5%, CO는 평균 92.6%, NO_x 는 평균 17.5%의 수준으로 나타났다.
- 종합적으로 NO_x > PM(매연) > CO 순으로 소요환기량의 감소율이 크게 나타났으며, 현행 편람기준(Case1) 대비 본 연구안(Case9)의 소요환기량은 오염물질별로 7.4%에서 72.1% 수준의 감소가 발생하는 것으로 나타났다.
- 터널연장 2.5km(Gr 1%)를 기준으로 현행 기준인 도로설계편람(2011)(case1)와 본 연구 기준(case 9)을 적용할 경우, PM(매연)은 215.1m³/s 에서 114.2m³/s 로 약 46.9%, CO는 252.1m³/s에서 205.2m³/s로 약 18.6%, NO_x는 273.7m³/s에서 47.0m³/s 로 약 82.8% 가 감소하는 것으로 분석된다.

3.2 현행 설계기준상 개정사항 도출

3.2.1 오염물질별 기준배출량 상이에 따른 개정사항 도출

현재 도로터널 설계를 위한 관련 기준 중 현실적으로 적용되고 있는 기준인 ‘도로설계편람 617. 환기편’에 제시된 오염물질별 배출기준은 환경부에서 제시된 대기환경보전법 상 내용을 적용하고 있다. 이는 2011년 고시된 내용을 편람상에 적시함으로써 최근 고시된 내용 받지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 해당 표를 최신화 하여 제시하였으며, 해당 표는 2019년을 기준으로 산정된 내용으로 관련 내용은 최신의 기준을 적용하도록 적시함으로써 최근 고시된 내용을 적용할 수 있도록 하였다. 이에 대한 내용을 <표 3.2.1> ~ <표 3.2.2>에 나타내었다.

<표 3.2.1> (기존)도로터널 소요환기량 산정을 위한 기준배출량(m²/h 또는 m³/h)

차 종	승용차		버 스		트 렉			
			소형	대형	소형	중형	대형	특수
연 료	휘발유	경유	경유	경유	경유	경유	경유	경유
입자상물질 (m ² /h)	0.000	0.787	0.787	23.375	0.787	11.481	25.857	33.460
CO (m ³ /h)	0.030	0.014	0.018	0.554	0.018	0.272	0.613	0.793
NOx (m ³ /h)	0.001	0.003	0.004	0.166	0.004	0.082	0.184	0.238

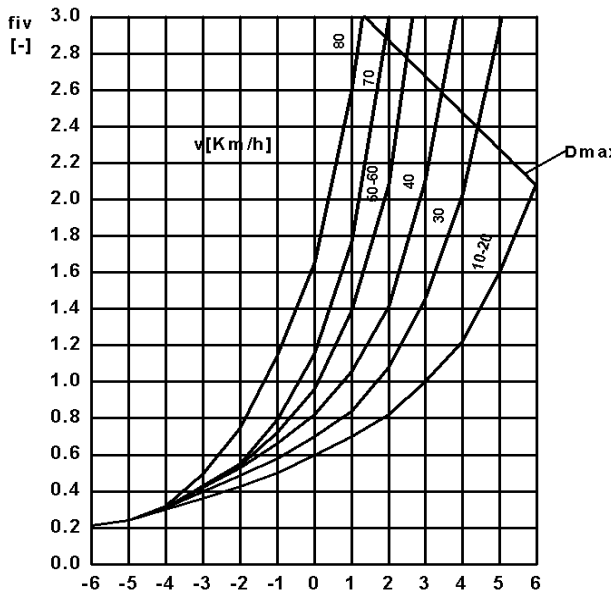
<표 3.2.2> (제정(안))도로터널 소요환기량 산정을 위한 기준배출량(m²/h 또는 m³/h)

차 종	승용차		버 스		트 렉			
			소형	대형	소형	중형	대형	특수
연 료	휘발유	경유	경유	경유	경유	경유	경유	경유
입자상물질 (m ² /h)	0.3206	0.8712	0.8712	7.7917	0.8712	3.8269	8.6191	11.1532
CO (m ³ /h)	0.0178	0.0172	0.0217	0.5541	0.0217	0.2721	0.6129	0.7931
NOx (m ³ /h)	0.0000	0.0017	0.0022	0.0382	0.0022	0.0188	0.0423	0.0547

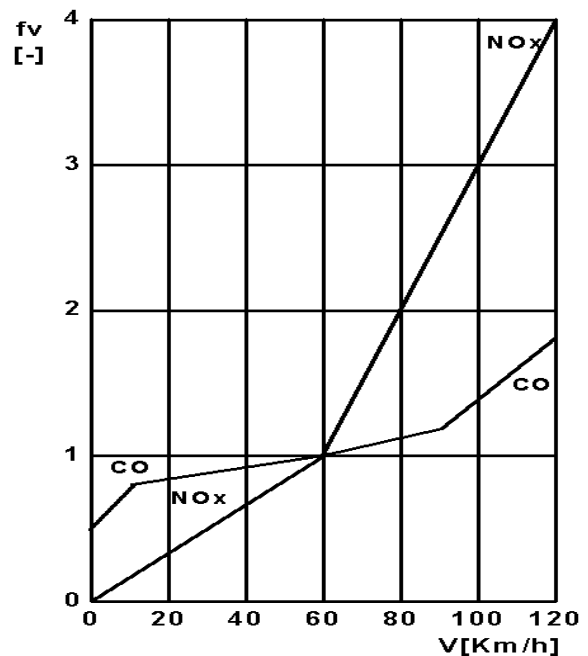
(주) 향후 기준배출량

3.2.2 소요환기량 산정을 위한 보정계수 개정사항 도출

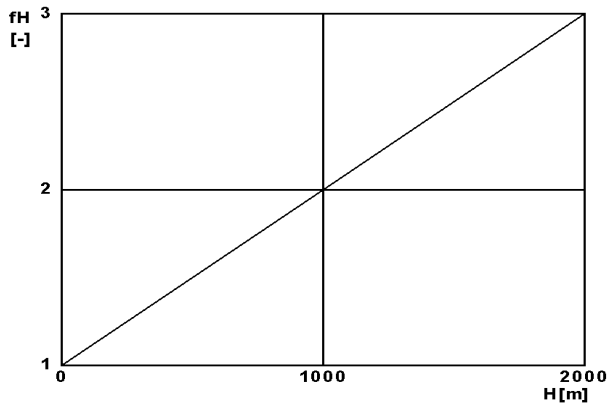
현재 도로터널 환기시설 설계를 위한 관련 설계기준 중 최상위 법률이라 할 수 있는 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙’에는 소요환기량 산정을 위한 보정계수에 관한 내용이 수록되어 있지 않고, 법적 효력이 없는 ‘도로설계편람 617. 환기편’에 관련 보정계수를 그래프화 하여 제시하고 있는 실정이다. 또한 이 역시 과거의 연구자료(PIARC(WRA) 1991)을 준용하고 있어 관련 보정계수의 현실적인 반영이 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 ‘도로설계편람 617. 환기편’에 제시된 PIARC(WRA) 1991의 연구내용을 최신화 하여 WRA(2019)의 보정계수를 갱신하는 것을 제시하였다. 해당 연구내용에 의하면 기존 차종과 사용연료의 구분이 없이 일괄 그래프 제시된 사항을 차종별(승용차, 소형버스, 대형버스, 소형트럭, 중형트럭, 대형트럭, 특수트럭)으로 구분하고 있으며, 사용연료 역시 휘발유 및 경유로 구분하고 있다. 또한 차량의 주행성능 향상으로 인하여 동일 기준상 제시된 설계주행속도가 80km/hr을 100km/hr로 확대 제시하여 최근 도로터널의 설계주행속도 상향 경향에 맞도록 현실화 하였다. 이에 대한 내용을 <그림 3.2.1> ~ <그림 3.2.4> 및 <표 3.2.3> ~ <표 3.2.15>에 나타내었다.



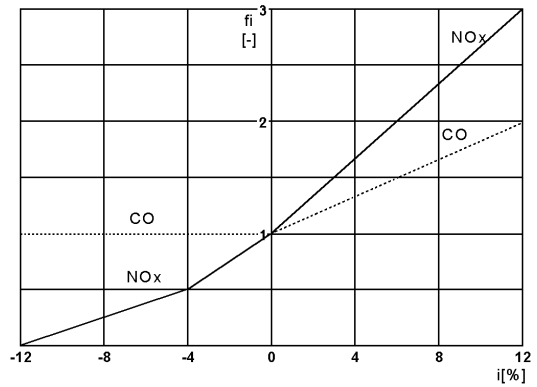
<그림 3.2.1> 기존 매연에 대한 경사속도 보정계수



<그림 3.2.2> 기존 속도 보정계수



<그림 3.2.3> 기존 표고보정계수



<그림 3.2.4> 기존 경사 보정계수

<표 3.2.3> 입자상물질에 대한 속도·경사보정계수

(차종 : 승용차, 사용연료 : 휘발유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.500	0.500	0.500	0.500	1.000	1.000	1.000
20	0.500	0.500	0.500	1.000	1.000	1.000	1.500
30	0.500	0.500	0.500	1.000	1.000	1.500	2.000
40	1.000	1.000	1.000	1.000	1.500	2.000	2.500
50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.500	2.000	3.000
60	1.000	1.000	1.000	1.500	2.000	3.000	4.500
70	1.000	1.000	1.500	1.500	2.500	4.500	7.500
80	1.000	1.500	1.500	2.500	4.000	6.500	12.000
90	1.500	1.500	1.500	3.000	6.000	10.500	19.000
100	2.500	1.500	2.000	3.500	7.500	14.500	24.500
110	3.500	3.000	3.500	5.500	10.000	18.500	31.000
120	5.000	4.500	6.500	10.000	16.500	25.000	40.000
130	6.500	8.000	11.500	18.500	29.000	39.500	52.000

〈표 3.2.4〉 입자상물질에 대한 속도·경사보정계수

(차종 : 승용차, 사용연료 : 경유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174
10	0.478	0.522	0.565	0.652	0.696	0.783	0.870
20	0.478	0.565	0.652	0.783	0.870	1.000	1.174
30	0.478	0.609	0.696	0.870	1.000	1.174	1.348
40	0.522	0.609	0.783	1.000	1.217	1.478	1.739
50	0.522	0.652	0.870	1.174	1.478	1.826	2.087
60	0.565	0.696	0.913	1.217	1.652	2.130	2.609
70	0.565	0.783	1.087	1.391	1.870	2.304	3.043
80	0.565	0.826	1.217	1.652	2.304	2.870	3.739
90	0.652	0.957	1.391	2.000	2.826	3.565	4.217
100	0.870	1.130	1.652	2.435	3.304	4.087	4.609
110	1.174	1.522	2.043	2.870	3.870	4.565	5.087
120	1.478	2.000	2.739	3.435	4.174	4.870	5.435
130	1.870	2.696	3.522	4.304	4.826	5.478	6.130

〈표 3.2.5〉 입자상물질에 대한 속도·경사보정계수

(차종 : 소형버스/소형트럭, 사용연료 : 경유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
10	0.429	0.476	0.524	0.619	0.690	0.786	0.857
20	0.476	0.548	0.667	0.786	0.905	1.095	1.310
30	0.476	0.548	0.690	0.833	1.119	1.405	1.667
40	0.500	0.667	0.786	1.000	1.286	1.714	2.024
50	0.476	0.643	0.881	1.143	1.452	2.095	2.238
60	0.548	0.714	1.000	1.405	1.714	2.500	2.833
70	0.595	0.786	1.095	1.643	2.333	2.905	3.405
80	0.929	1.095	1.524	2.167	2.929	3.524	4.119
90	1.357	1.595	1.976	2.690	3.476	4.143	4.857
100	1.833	2.167	2.619	3.167	3.929	4.714	5.405
110	2.190	2.643	3.143	3.810	4.524	5.310	5.976
120	2.571	3.143	3.690	4.286	5.119	5.905	6.405
130	2.857	3.500	4.095	4.881	5.762	6.357	6.571

<표 3.2.6> 입자상물질에 대한 속도·경사보정계수

(차종:대형버스/중형트럭/대형트럭/특수트럭, 사용연료:경유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225
10	0.538	0.613	0.700	0.788	0.888	0.988	1.075
20	0.463	0.538	0.700	0.813	0.925	1.063	1.200
30	0.438	0.513	0.700	0.850	1.050	1.238	1.413
40	0.413	0.488	0.725	1.000	1.313	1.613	1.875
50	0.388	0.463	0.725	1.075	1.488	1.863	2.188
60	0.388	0.463	0.750	1.163	1.788	2.413	2.825
70	0.388	0.475	0.788	1.263	2.088	2.950	3.463
80	0.413	0.463	0.825	1.538	2.425	3.500	4.100
90	0.438	0.488	0.825	1.800	2.713	3.563	4.138
100	0.438	0.488	0.850	1.875	2.875	3.675	4.163

<표 3.2.7> CO 속도·경사보정계수

(차종 : 승용차, 사용연료 : 휘발유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.394	0.394	0.394	0.394	0.394	0.394	0.394
10	0.562	0.642	0.708	0.803	0.876	1.029	1.212
20	0.613	0.745	0.920	1.131	1.657	2.584	3.664
30	0.562	0.679	0.810	1.000	1.263	1.664	2.270
40	0.606	0.752	0.942	1.197	1.628	2.423	3.569
50	0.650	0.861	1.022	1.328	1.737	2.416	3.409
60	0.620	0.832	0.971	1.328	1.847	2.759	4.321
70	0.723	0.971	1.307	1.869	2.657	4.409	7.956
80	0.912	1.182	1.540	2.263	3.635	6.504	12.131
90	0.854	1.146	1.657	2.599	4.927	10.664	19.292
100	1.131	1.526	2.307	3.679	6.270	15.285	30.343
110	1.949	2.423	3.460	5.701	10.847	23.810	57.752
120	3.445	4.007	5.409	9.540	18.964	44.117	109.942
130	6.226	7.752	10.380	17.270	36.810	96.255	187.496

<표 3.2.8> CO 속도·경사보정계수

(차종 : 승용차, 사용연료 : 경유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
10	0.400	0.450	0.550	0.650	0.750	0.900	1.000
20	0.450	0.500	0.650	1.400	1.650	1.800	2.050
30	0.450	0.600	0.700	1.200	1.500	1.750	1.950
40	0.450	0.600	0.700	1.000	1.350	1.600	1.850
50	0.500	0.550	0.700	0.900	1.300	1.550	1.800
60	0.500	0.550	0.600	0.800	1.200	1.500	1.800
70	0.500	0.550	0.600	0.800	1.050	1.400	1.700
80	0.450	0.550	0.600	0.800	1.050	1.200	1.600
90	0.450	0.500	0.600	0.750	0.950	1.050	1.450
100	0.500	0.550	0.600	0.650	0.800	0.950	1.350
110	0.600	0.600	0.600	0.700	0.750	0.850	1.250
120	0.650	0.650	0.600	0.700	0.900	1.000	1.400
130	0.700	0.700	0.600	0.700	1.000	1.200	1.450

<표 3.2.9> CO 속도·경사보정계수

(차종 : 소형버스/소형트럭, 사용연료 : 경유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
10	0.450	0.500	0.600	0.750	0.800	0.900	1.050
20	0.500	0.600	0.750	0.900	0.950	1.050	1.150
30	0.500	0.650	0.800	1.000	1.100	1.200	1.300
40	0.550	0.650	0.850	1.000	1.150	1.250	1.450
50	0.550	0.700	0.850	1.050	1.250	1.400	1.500
60	0.500	0.700	0.850	1.050	1.350	1.500	1.700
70	0.550	0.800	0.900	1.150	1.500	1.650	1.900
80	0.700	0.850	0.950	1.250	1.650	1.800	2.100
90	0.850	1.000	1.050	1.300	1.750	1.950	2.550
100	1.000	1.150	1.100	1.400	1.950	2.300	2.850
110	1.200	1.300	1.250	1.500	2.200	2.700	3.100
120	1.400	1.500	1.700	2.100	2.700	3.000	3.300
130	1.450	1.800	2.100	2.550	3.000	3.200	3.400

<표 3.2.10> CO 속도 · 경사보정계수

(차종:대형버스/중형트럭/대형트럭/특수트럭, 사용연료:경유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141
10	0.435	0.524	0.643	0.781	0.903	1.041	1.164
20	0.372	0.424	0.662	0.829	0.974	1.138	1.309
30	0.323	0.375	0.680	0.888	1.138	1.405	1.572
40	0.216	0.323	0.699	1.000	1.387	1.788	2.048
50	0.152	0.230	0.717	1.093	1.606	2.112	2.409
60	0.130	0.227	0.736	1.297	1.981	2.316	2.517
70	0.134	0.227	0.755	1.498	2.346	2.520	2.625
80	0.134	0.227	0.770	1.703	2.725	2.870	2.848
90	0.134	0.227	0.825	1.747	2.814	3.089	3.063
100	0.134	0.227	0.829	1.844	2.903	3.294	3.271

<표 3.2.11> NOx 속도 · 경사보정계수

(차종 : 승용차, 사용연료 : 휘발유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074
10	0.444	0.481	0.593	0.667	0.778	0.852	0.963
20	0.481	0.593	0.741	0.889	1.074	1.259	1.556
30	0.481	0.593	0.778	1.000	1.259	1.593	2.000
40	0.519	0.667	0.889	1.148	1.519	1.889	2.296
50	0.481	0.630	0.852	1.185	1.593	2.037	2.630
60	0.481	0.667	0.926	1.333	1.889	2.556	3.185
70	0.481	0.704	1.000	1.481	2.185	3.074	3.741
80	0.519	0.778	1.185	1.926	2.741	3.630	4.556
90	0.593	0.889	1.370	2.370	3.667	4.370	5.407
100	0.704	1.111	1.630	2.852	4.481	5.667	6.593
110	0.963	1.407	2.222	3.407	5.148	6.778	8.333
120	1.259	1.852	3.037	4.519	6.037	8.037	9.778
130	1.630	2.667	4.815	6.630	7.333	9.148	11.000

<표 3.2.12> NO_x 속도 · 경사보정계수

(차종 : 승용차, 사용연료 : 경유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237
10	0.405	0.474	0.542	0.642	0.763	0.889	1.047
20	0.416	0.500	0.611	0.774	0.968	1.216	1.495
30	0.421	0.532	0.674	0.911	1.179	1.542	1.942
40	0.421	0.537	0.711	1.000	1.358	1.832	2.411
50	0.421	0.547	0.747	1.084	1.537	2.116	2.879
60	0.442	0.595	0.853	1.258	1.853	2.684	3.768
70	0.458	0.653	0.984	1.521	2.295	3.316	4.621
80	0.400	0.626	1.053	1.789	2.984	4.674	6.663
90	0.437	0.700	1.289	2.311	3.684	5.716	9.032
100	0.505	0.747	1.421	2.679	4.563	6.900	10.747
110	0.700	1.153	1.995	3.605	6.016	9.411	13.021
120	1.016	1.705	2.800	4.537	7.511	12.589	16.637
130	1.337	2.521	4.058	6.363	10.084	15.342	19.653

<표 3.2.13> NO_x 속도 · 경사보정계수

(차종 : 소형버스/소형트럭, 사용연료 : 경유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242
10	0.331	0.382	0.465	0.573	0.720	0.873	1.019
20	0.338	0.420	0.554	0.745	1.013	1.764	2.223
30	0.344	0.459	0.643	0.917	1.299	2.166	2.841
40	0.312	0.439	0.650	1.000	1.516	2.561	3.459
50	0.287	0.414	0.662	1.089	1.732	2.637	3.732
60	0.255	0.490	0.682	1.178	2.414	3.662	5.191
70	0.287	0.573	1.057	1.885	3.096	4.688	6.650
80	0.312	0.599	1.274	2.752	4.815	6.917	9.312
90	0.541	1.006	1.936	3.694	6.522	9.229	11.580
100	0.777	1.516	2.745	4.860	7.783	10.803	13.408
110	1.280	2.561	4.389	7.038	9.949	12.713	14.975
120	2.089	3.968	6.439	9.369	12.236	14.503	16.108
130	3.484	5.892	8.720	11.675	14.280	15.624	16.478

<표 3.2.14> NOx 속도·경사보정계수

(차종:대형버스/중형트럭/대형트럭/특수트럭, 사용연료:경유)

차속 (km/hr)	경사도(%)						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137
10	0.515	0.624	0.733	0.821	0.880	0.934	0.986
20	0.389	0.525	0.724	0.842	0.938	0.989	1.061
30	0.308	0.461	0.714	0.880	0.979	1.054	1.212
40	0.227	0.395	0.658	1.000	1.132	1.341	1.661
50	0.190	0.314	0.610	1.062	1.233	1.587	2.010
60	0.154	0.233	0.591	1.167	1.728	2.350	2.867
70	0.117	0.155	0.546	1.273	2.224	3.115	3.724
80	0.117	0.155	0.546	1.378	2.721	3.878	4.580
90	0.117	0.155	0.546	1.392	2.798	3.984	4.610
100	0.117	0.155	0.546	1.441	2.893	4.070	4.639

<표 3.2.15> 표고보정계수(2,000m 기준)

fh	CO		NOx		가시도
	가솔린	디젤	가솔린	디젤	디젤
2018년 이전	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2020년 이전	1.6	1.0	1.0	1.0	1.0
2025 이후	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

3.2.3 오염물질 허용기준 개정사항 도출

현재 도로터널 환기 설계와 관련된 기준 중 오염물질의 규제대상 및 허용기준은 <표 3.2.16>과 같다. 표에서 보는 바와 같이 도로터널 환기 설계와 관련된 기준이 모두 상이한 허용기준을 제시하고 있으며, 관련 최상위 법률인 ‘도로의 구조·시설에 관한 규칙’에는 입자상물질에 대한 규제치는 제시되고 있지 않다. 따라서 현재 환기설계는 비교적 자세하게 제시하고 있는 ‘도로설계편람(617. 환기시설)’을 적용하고 있는 것이 대부분이며, 최신의 연구결과를 준용하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 최신의 연구내용과 함께 보다 오염물질 허용기준을 현실화하여 제시하였다.

<표 3.2.16> 국내 도로터널 환기설계관련 기준 내 오염물질 대상 및 허용기준

구분	오염물질 대상 항목		
	CO(ppm)	NOx(ppm)	매연(1/m)
도로의 구조시설기준에 관한 규칙(국토교통부)	100	25	—
도로설계편람(국토교통부)	70	20	0.005~0.009
터널설계기준	관리주체에 따르며, 없을 경우 WRA 권고치를 적용할 수 있음		
고속도로 터널 환기시설 설계기준(도로공사)	70	20	0.005~0.009

(제정(안)) 도로터널 내 오염물질 규제 대상 및 허용농도 기준

구분	차속							
	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
매연(m ⁻¹)	0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
CO(ppm)	70							
NOx(ppm)	20							

제 4 장 국내 도로터널 환기설계기준 개선방안

본 절에서는 앞서 서술된 내용을 바탕으로 “도로터널 환기시설 설계지침 제정(안)”에 주요 수록 내용을 서술하였다. (1) 소요환기량 산정을 위한 차량의 기준배출량 제시, (2) 터널내 오염물질(PM, CO, NO_x 등)의 허용기준 제시, (3) 발생오염물질에 대한 터널 외부 배출량 산정기법 제시, (4) 환기시설(오염물질 저감장치 포함)에 대한 설계기준 제시, (5) 기타 환기방식, 환기소(탑)에 필요한 세부 설계기준 제시로 구분되어지며, 각각에 대한 상세한 내용은 다음과 같다.

4.1 소요환기량 산정을 위한 차량의 기준배출량 제시

소요환기량 산정을 위한 차량의 기준배출량 제시는 앞서 5.2.1절과 5.2.2절에 서술한 오염물질별 기준배출량과 소요환기량 산정을 위한 보정계수의 갱신이 주된 내용이며, 추가적으로 차속별 비엔진 입자상물질의 발생량과 차령보정계수를 갱신하였다. 이에 대한 수록 내용은 <표 4.1.1> 및 <표 4.1.2>와 같다.

<표 4.1.1> 차속별 비엔진 입자상물질 발생량

차속[km/h]	승용차 [m ³ /h]		대형차 [m ³ /h]	
	양방향	일방향	양방향	일방향
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.1	0.7	5.1	4.4
20	2.2	1.3	10.1	8.8
30	3.4	2.0	15.2	13.3
40	4.5	2.6	20.2	17.7
50	5.6	3.3	25.3	22.1
60	6.7	3.9	30.3	26.5
70	7.8	4.6	35.4	30.9
80	9.0	5.3	40.4	35.3
90	10.1	5.9	45.5	39.8
100	11.2	6.6	50.6	44.2
110	12.3	7.2	-	-
120	13.4	7.9	-	-
130	14.6	8.6	-	-

<표 4.1.2> 차령에 따른 상대주행거리비 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				

4.2 터널내 오염물질(PM, CO, NOx 등)의 허용기준 제시

터널내 오염물질의 허용기준과 관련하여서 대상물질은 현행 ‘도로의 구조·시설에 관한 규칙’, ‘도로설계편람(617. 환기시설)’, ‘환기설계기준(KDS 27 60 00)’ 과 동일하게 입자상 물질(PM)과 가스상물질(CO, NOx)로 구분하여 관리하며, 허용기준은 관련 기준 및 최신 연구 결과를 반영하여 <표 4.2.1>과 같이 제시한다.

<표 4.2.1> 오염물질 규제 대상 및 허용 기준

구분 \ 차속	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
매연(m ⁻¹)	0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
CO(ppm)	70							
NOx(ppm)	20							

4.3 발생오염물질에 대한 터널외부배출량 산정기법 제시

도로터널에서 배출되는 오염물질의 양은 터널을 통과하는 교통량과 매우 밀접한 관계가 있다. 도로설계편람(국토교통부, 2011)에서는 터널내 환기용량 산정시 설계속도별 도로용량을 적용하도록 제시하고 있다.

도로용량은 주어진 도로조건에서 15분 동안 원활하게 최대한 통과할 수 있는 승용차 교통량을 1시간 단위로 환산한 값으로, 표 6.3.1에 나타난 것과 같이 국내에서는 설계속도별로 120km/h에서 2,300pcu/h·lane, 100km/h에서 2,200pcu/h·lane, 80km/h에서는 2,000pcu/h·lane을 적용하도록 제시하고 있다.

<표 4.3.1> 이상적인 조건에서의 도로용량

(일방향 터널 기준)

구 분	도로용량(최대교통량) pcu/h·lane		
PIARC 보고서	도시터널 : 1,800 ~ 2,200 (평균 2,000) 안정된 상태의 터널 : 2,200 ~ 2,400		
일본(도로구조령)	1,800		
영국(Webster)	1,900		
미국(HCM)	1,800		
독일	시외터널 : 1,800 시내터널 : 1,900		
한국(고속도로)	설계속도 : 80km/h	설계속도 : 100km/h	설계속도 : 120km/h
	2,000	2,200	2,300

※ 2011 도로설계편람(국토교통부)

그러나 도로용량은 실제 예상되는 교통량과는 차이가 있으며, 터널 외부로 배출되는 오염물질의 양을 산정하기 위해서는 목표연도에 예상되는 교통량으로 산정하는 것이 타당할 것이다. 따라서 본 지침에서는 연평균 일교통량을 기준으로 환기용량을 산정하여 터널외부로 배출되는 오염물질의 양을 선정하도록 제시한다.

또한, 외부로 배출되는 오염물질은 가스상 물질(CO, NOx)과 입자상물질(PM10)에 대해 산정한다.

이때, 오염물질의 양은 다음과 같이 계산한다.

- 가스상 물질 : 소요환기량(m³/sec) × 농도(ppm) × 밀도(g/m³) × 10⁻⁶
- 입자상 물질 : 소요환기량(m³/sec) × 배출농도(m⁻¹) ÷ 환산계수(m²/g)

이때, 터널에서 외부로 배출되는 오염물질의 양은 터널주변의 대기환경기준을 초과하지 않도록 조절할 필요가 있다. 따라서 터널외부 오염물질 확산 시뮬레이션을 수행하여 터널주변의 주요지점에서 대기환경기준을 만족하는지 여부를 검토하여 필요시 오염물질 배출량을 저감하기 위한 공기정화시설의 설치여부를 결정해야한다.

참고로 환경분야에서는 터널 출구부 오염물질 배출량 산정시 “대기오염배출계수(국립환경과학원, 2015)” 에서 제시된 “도로이동오염원의 대기오염물질 배출계수 산정식” 을 적용하여 오염물질 배출계수를 도출 및 적용하고 있다.

<표 4.3.2> 대기오염물질배출계수(국립환경과학원, 2015)

구 분		오염물질	배출계수	비 고
승 용 차	휘발유	NOx	$(-3.5 \times 10^{-6}) \times V^2 + (0.00033 \times V^{-0.00112})$	
		CO	$(2.29 \times 10^{-5}) V^2 - (0.00163 \times V^{+0.0583})$	
	경유	PM-10	$0.0396 \times V^{-0.3420}$	
		PM-2.5	$0.92 \times 0.0396 \times V^{-0.3420}$	
		NOx	$-0.0002V^2 + 0.020V^{-0.0105}$	
		CO	$0.5414 \times V^{-0.7524}$	
	LPG	NOx	$2.0280 \times V^{-0.7978}$	
		CO	$73.022 \times V^{-1.2078}$	
버 스	PM-10	$0.0001 \times V^{1.2263}$		
	PM-2.5	$0.92 \times 0.001 \times V^{1.2263}$		
	NOx	$40.9398 \times V^{-0.5611}$		
	CO	$8.3966 \times V^{-0.8759}$		
트 럭	소형	PM-10	$0.1759 \times V^{-0.5357}$	
		PM-2.5	$0.92 \times 0.1759 \times V^{-0.5357}$	
		NOx	$-0.00003V^2 + 0.0060V^{-0.1339}$	
		CO	$1.2211 \times V^{-0.6083}$	
	중형	PM-10	$0.000168 \times V^{-0.00516}$	
		PM-2.5	$0.92 \times 0.000168 \times V^{-0.00516}$	
		NOx	$1.1797 \times V^{0.2308}$	
		CO	$4.5201 \times V^{-0.7279}$	
	대형	PM-10	$2.6847 \times V^{-0.6112}$	
		PM-2.5	$0.92 \times 2.6847 \times V^{-0.6112}$	
		NOx	$107.5 \times V^{-0.5679}$	
		CO	$52.136 \times V^{-0.8618}$	

4.4 환기시설(오염물질 저감장치 포함)에 대한 설계기준 제시

4.4.1 국내 주요 터널의 공기질관리 사례조사

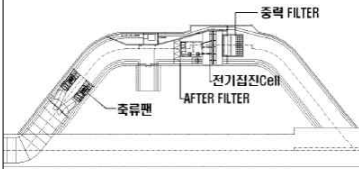
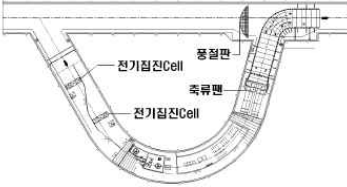
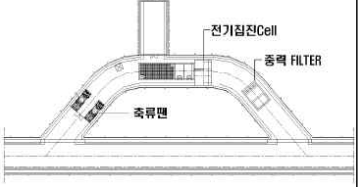
국내의 도로터널은 1970년 이후 교통량 및 터널연장의 증가로 기계적인 환기설비의 설치가 요구되는 터널이 건설되기 시작하였다. 국내의 장대터널에 대한 환기설비의 적용 동향은 서울의 남산 1~3호 터널과 같이 도심지에 건설되는 터널은 주로 횡류 또는 반횡류식 환기방식이 적용되고 있으며, 도시 외곽이나 대부분 산악터널은 경제성이 우수한 종류식으로 건설되고 있다. 터널연장이 3km 이내의 터널에는 제트팬 방식이 적용되고 연장이 3~4km 이상의 장대터널에서는 수직갱 급·배기 방식이나 전기집진기 방식의 환기설비를 적용하는 것이 일반적이 추세였다. 수직갱 급·배기 방식은 터널내 오염물질인 매연, 일산화탄소 및 질소산화물에 대하여 배출하거나 신선외기 공급해 농도를 희석함으로써 터널 내 환경기준을 만족시킬 수 있는 환기방식으로 모든 터널에 적용이 가능하나, 대심도 산악터널에서 수직갱의 높이가 과도하게 높아지는 경우에는 설치가 제한되는 단점이 있다.

전기집진기 방식은 터널 상부 또는 측면의 바이패스 터널을 굴착하여 집진시설을 설치하기 때문에 터널 단면구조상 집진시설의 설치공간 확보가 곤란한 경우를 제외하면 모든 터널에 적용이 가능하나, 일산화탄소 및 질소산화물에 대한 처리능력이 없으므로 이에 대한 정화가 곤란한 단점은 있지만, 수직갱을 설치할 수 없는 경우에는 효용성이 높다고 할 수 있다. 이에 따라 국내의 도로터널에서는 진부터널에 최초로 전기집진기 방식이 도입되었으며 향후 수정산터널, 경주터널 등 다수의 터널에 전기집진기 방식이 설치되어 운영되고 있다. 국내 도로터널에 적용되어 운영 중인 전기집진기는 일본제품과 유럽제품 2종류가 있으며, 최근 국내에서 개발된 전기집진기가 강남순환 7-1, 2공구에 설치되고 있다. 각각의 특징을 알아보면 <표 4.4.1>에 나타낸 바와 같으며, 국내터널의 전기집진기 설치사례는 <표 6.4.2>와 같다.

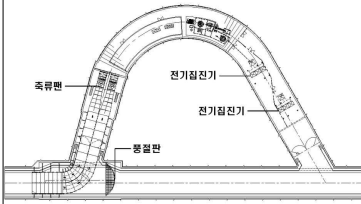
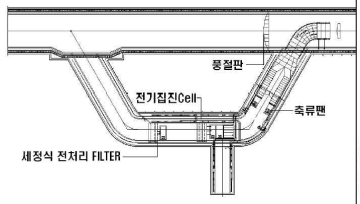
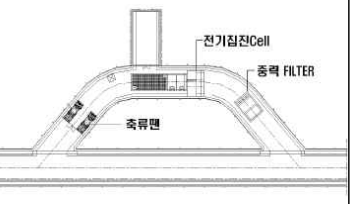
<표 4.4.1> 국내외 전기집진기 특성

구분		일본제품(후지/파나소닉)		유럽제품(CTA/KGD)		국내제품(KC코트렐)	
집진효율		중량법 80%이상		중량법 80%이상		중량법 80%이상	
처리풍속		7 ~ 13 m/s		7.8m/s		7 ~ 13m/s	
집진Cell 또는 조합형	구성	대전부(스파이크)+집진부		대전부(스파이크)+집진부		대전부(스파이크)	
	재질	대전부	Stainless Steel	대전부	Stainless Steel	대전부	Stainless Steel
		집진부	Stainless Steel	집진부	Aluminium Alloy	집진부	-
		프레임	SS400	프레임	Stainless Steel	프레임	Stainless Steel
규격	909.5W*77.6H*972D		854W*610H*580D		914W*819H*1,120D		
비고		1블록 8Cell		개별 Cell		1블록 2Cell	

<표 4.4.2> 국내 전기집진기 설치사례조사(계속)

구분		진부터널	수정산터널	우면산터널
터널연장		2,095m	(상행) 2,341m (하행) 2,356m	2,070m
준공년도		1999년	2002년	2003년
제조업체		유럽제품 (CTA사)	일본제품 (FUJI사)	일본제품 (FUJI사)
집진용량		285 m ³ /s * 1개소	300 m ³ /s * 2개소	100 m ³ /s * 2개소
집진효율		중량법 85% 이상	중량법 80% 이상	중량법 80% 이상
전기 집진기	전처리필터	형식 : 중력필터 재질 : 코르텐강 Cell 수량 : 105개	해당사항 없음	형식 : 중력필터 재질 : 코르텐강 Cell 수량 : 105개
	집진 Cell	풍속 : 7.8m/s 재질 : STS(대전부) / 알루미늄(집진부) 수량 : 126개	풍속 : 7m/s 이상 재질 : STS(대전부) / STS(집진부) 수량 : 유닛 조합에 따름	풍속 : 7m/s 이상 재질 : STS(대전부) / STS(집진부) 수량 : 유닛 조합에 따름
	후처리필터	형식 : 세정식 필터	해당사항 없음	해당사항 없음
	수처리설비	처리방식 : 세정수 재생	처리방식 : 세정수 방류	처리방식 : 세정수 재생
배치도				
현황 검토		<ul style="list-style-type: none"> ○ 집진셀 통과풍속이 기준치 7.8m/s를 초과하여 처리효율 부족(감시결과) → 기류 유도용 반사판을 설치하고, 집진기 이후 후처리필터를 추가로 설치함 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수처리설비의 가압여과장치를 국내에서 제작, 설치하였으나 하자 발생 → 일본 제조업체 기술을 습득하여 문제 해결 후 정상운전 중 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 오수, 세정수탱크에서 콘크리트 재질이 물에 녹아 수처리설비 배관에 이물질이 발생함 → 배관 보수후 정상운전 중

<표 4.4.2> 국내 전기집진기 설치사례조사

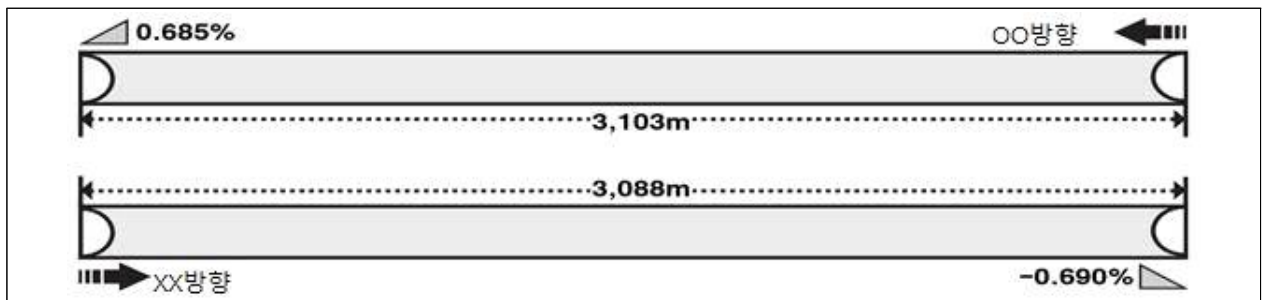
구분		싸리재2터널	수락산터널	사패산터널
터널연장		2,330 m	2,950 m	3,993m
준공년도		2004 년	2006 년	2003년
제조업체	설계사양	일본식	유럽식 (CTA, 노르웨이) / 일본식 (MATSUSHITA사)	유럽제품
	설치사양	일본식 (FUJI사)	유럽식 (KGD, 노르웨이)	일본제품 (FUJI사)
집진 용량		285 m3/s	203 m3/s	100 m3/s * 2개소
집진 효율		중량법 80 % 이상	중량법 85%	중량법 80% 이상
전기 집진기	전처리필터	해당사항 없음	형식 : 세정식 필터 재질 : 알루미늄 Cell : 216개	형식 : 중력필터 재질 : 코르텐강 Cell 수량 : 105개
	집진 Cell	<ul style="list-style-type: none"> • 풍속 : 7 m/s 이상 • 재질 : STS(대전부) STS(집진부) • 수량 : 유닛 조합에 따름 • Cell당 처리풍량 : 유닛 조합 	풍속 : 6.92 m/s 재질 : STS(대전부 / 알루미늄(집진부) 수량 : 90개(설계) -> 100개(시공)	풍속 : 7m/s 이상 재질 : STS(대전부) / STS(집진부) 수량 : 유닛 조합에 따름
	후처리필터	해당사항 없음	해당사항 없음	해당사항 없음
	수처리설비	<ul style="list-style-type: none"> • 처리방식 : 세정수 방류 	세정수 재생	처리방식 : 세정수 재생
배치도				
현황 검토		○ 전기집진기 바이패스 터널 토목구조물 내 결로 발생함.	○ 가동시간 미미하여 집진기 파워팩에서 다운형상발생이 문제점임.	○ 오수, 세정수탱크에서 콘크리트 재질이 물에 녹아 수처리설비 배관에 이물질이 발생함 → 배관 보수후 정상운전중

4.4.2 오염물질 배출량 저감대책에 대한 검토

본 절은 오염물질의 저감대책으로 일부 터널에 설계 적용된 공기정화시설의 효과를 분석하기 위해서 고속도로 터널에서 오염물질(입자상 물질)발생량을 분석하고 오염물질 저감시설을 계획하고 있는 B터널에서의 오염물질 배출량 저감효과를 검토하였다.

가. A 고속도로 터널

(1) 개요



<표 4.4.3> A고속도로터널 제원

구분	OO방향	XX방향
연장	3,103m	3,088m
단면적	75.44 m ²	
도로용량	2,200 pc/h.lane	
구배	0.685%	-0.69%
대형차 혼입율	30.1%	30.1%

<표 4.4.4> A터널 교통량

구분	승용차		버스		트럭				계	
	휘발유	경유	소형	대형	소형	보통	대형	특수		
OO방향	대수	6,614	4,409	1,397	597	2,078	2,046	2,405	1,199	20,745
	구성비	31.88	21.25	6.73	2.88	10.02	9.86	11.59	5.78	100
XX방향	대수	6,614	4,409	1,397	597	2,078	2,046	2,405	1,199	20,745
	구성비	31.88	21.25	6.73	2.88	10.02	9.86	11.59	5.78	100

(2) 오염물질 배출량

CO 배출량은 주행속도가 감소할수록 증가하는 경향을 보이고 있으며, NOx 배출량은 주행속도가 증가할수록 증가하며, 입자상물질의 배출량은 주행속도가 50km/h일 때 최대값을 보이는 것으로 나타나고 있다.

<표 4.4.5> A고속도로터널 오염물질 배출량(g/s)

오염물질	주행속도	OO방향	XX방향	합계	
				g/s	톤/년
CO	10	37.778	35.502	73.280	1,733.2
	20	30.193	28.374	58.567	1,385.2
	30	24.915	23.414	48.329	1,143.1
	40	21.065	19.796	40.861	966.4
	50	18.153	17.060	35.213	832.9
	60	15.886	14.929	30.815	728.8
	70	14.441	13.571	28.012	662.5
	80	13.234	12.437	25.671	607.2
NOx	10	5.944	4.943	10.887	257.5
	20	9.048	7.524	16.572	392.0
	30	10.691	8.890	19.581	463.1
	40	11.528	9.586	21.114	499.4
	50	11.901	9.896	21.797	515.5
	60	11.998	9.977	21.975	519.8
	70	15.336	12.753	28.089	664.4
	80	17.637	14.666	32.303	764.0
입자상 물질	10	0.330	0.273	0.603	14.3
	20	0.304	0.260	0.564	13.3
	30	0.312	0.266	0.578	13.7
	40	0.321	0.268	0.588	13.9
	50	0.335	0.259	0.594	14.0
	60	0.305	0.241	0.546	12.9
	70	0.308	0.231	0.539	12.7
	80	0.314	0.202	0.516	12.2

나. B 도시터널

(1) 해석제원

구분	상행방향	하행방향
연장	9,083.5m	8,712m
단면적	35.736 m ²	
도로용량	2,000 pc/h · lane	
구배	-5.9 ~ 5.9%	-5.9 ~ 5.9%
대형차 혼입율	0%	0%

(2) 교통량제원

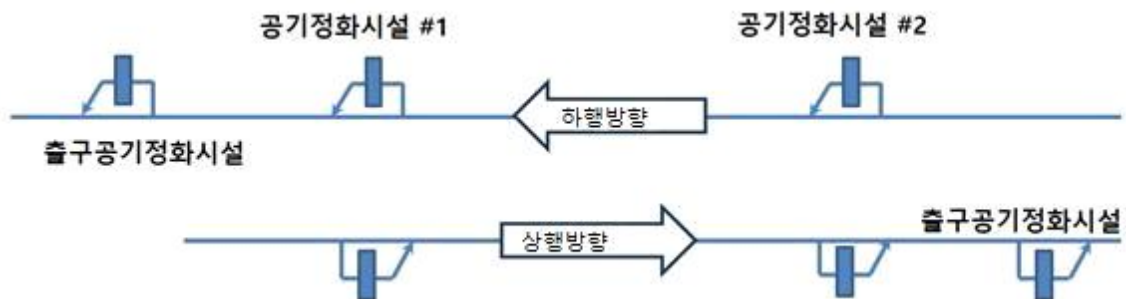
구분		승용차		소형버스	트럭	계
		휘발유	경유	소형	소형	
상행 방향	대수	31,962	21,308	921	7,180	61,371
	구성비(%)	52.1	34.7	1.5	11.7	100.0
하행 방향	대수	31,962	21,308	921	7,180	61,371
	구성비(%)	52.1	34.7	1.5	11.7	100.0

(3) 환기 시스템 개요

환기시스템은 그림에 나타난 바와 같이 방향별로 바이패스방식에 의한 공기정화시설 #1, #2와 출구 오염물질 배출량 저감을 위한 출구공기정화시설을 설치하고 있다.

방향별 환기설비 용량은 다음과 같다.

- 공기정화시설 #1 : 80m³/s(상행), 100m³/s(하행)
- 공기정화시설 #2 : 80m³/s(상행), 100m³/s(하행)
- 출구공기정화시설 : 280m³/s(상하행)



<그림 4.4.1> 환기시스템 개요도

(4) 오염물질 배출량(g/s) 분석

공기정화시설을 설치하지 않는 경우에 오염물질별 주행속도별 오염물질 배출량은 다음표와 같다.

표에 나타낸 바와 같이 CO배출량은 주행속도가 저속일수록 증가하며 최대 배출량은 43.602g/s(10km/h), NOx배출량은 주행속도가 고속일수록 증가하는 경향을 보이고 있으며, 최대값은 5.084g/s(80km/h), 입자상물질은 주행속도가 50km/h일 때 0.432g/s로 최대배출량을 보이고 있다.

<표 4.4.6> 터널의 입자상물질 주행속도별 배출량

주행속도 (km/h)	오염물질별 주행속도별 배출량								
	CO (g/s)			NOx (g/s)			입자상물질 (g/s)		
	상행	하행	합계	상행	하행	합계	상행	하행	합계
10	23.643	19.958	43.602	1.160	0.944	2.103	0.184	0.152	0.336
20	15.002	14.465	29.467	1.369	1.309	2.677	0.185	0.180	0.365
30	12.125	11.693	23.818	1.581	1.519	3.100	0.201	0.194	0.395
40	9.972	9.620	19.592	1.658	1.592	3.250	0.216	0.205	0.421
50	8.668	8.366	17.034	1.725	1.657	3.382	0.223	0.209	0.432
60	7.450	7.188	14.638	1.712	1.640	3.352	0.216	0.205	0.421
70	6.741	6.505	13.246	2.176	2.086	4.262	0.209	0.199	0.408
80	6.398	6.172	12.570	2.615	2.470	5.084	0.188	0.179	0.368

본 과업에서는 설계를 인용하여 입자상 물질에 대한 저감효과를 비교하였으며 다음 표와 같다.

오염물질(입자상물질)저감효과는 주행속도에 따라서 다르며, 배출량이 공기정화시설을 18시간/day운전하는 것을 기준으로 하는 경우, 7.2~9.2톤/년으로 분석되었다.

<표 4.4.7> 터널의 입자상물질 배출량 및 공기정화시설에 의한 개선효과 분석(1)

구분		오염물질(입자상물질) 배출량 (mg/s)							
주행속도(km/h)		10	20	30	40	50	60	70	80
공기정화 시설 미적용	상행	184	185	201	216	223	216	209	188
	하행	152	180	194	205	209	205	199	179
	합계	336	365	395	421	432	421	408	368
공기정화 시설 적용	상행	17.5	18.3	20.5	22.9	23.8	24	23.6	27.8
	하행	13.5	16	17.9	19.9	20.9	21	20.9	26.1
	합계	31.0	34.3	38.3	42.7	44.7	45.0	44.5	53.9
저감량	상행	166.5	166.7	180.5	193.1	199.2	192.0	185.4	160.2
		3.9(*)	3.9	4.3	4.6	4.7	4.5	4.4	3.8
	하행	138.5	164.0	176.1	185.1	188.1	184.0	178.1	152.9
		3.3(*)	3.9	4.2	4.4	4.4	4.4	4.2	3.6
	합계	305.0	330.7	356.7	378.3	387.3	376.0	363.5	314.1
		7.2(*)	7.8	8.4	8.9	9.2	8.9	8.6	7.4

(*) 단위는 톤/년

<표 4.4.8> 터널의 입자상물질 배출량 및 공기정화시설에 의한 개선효과 분석(2)

구분	방향	연장	대형차 혼입율	도로용량	입자상물질		
		(m)	(%)	pc/h.lane	주행속도	배출량(g/s)	년간배출량 (톤/년)
(가)터널(고속도로)	OO방향	3,103	30.1	2,200×2차선	50	0.335	7.924
	XX방향	3,088			40	0.268	6.339
(나) 터널	공기정화시설 미설치	하행방향	0	2,000×2차선	50	0.2231	5.277
		상행방향			50	0.2086	4.934
	공기정화시설 설치	하행방향	0	2,000×2차선	60	0.0278	0.658
		상행방향			80	0.0261	0.617

다. 오염물질 배출량 분석결과

입자상물질의 연간배출량은 최대 발생량기준으로 일일 환기기 운전시간이 18시간으로 가정하여 (나)터널에 대해서 입자상물질의 최대배출량을 분석하였다.

분석결과, 일반적인 고속도로 터널((가) 터널)의 경우, 연장이 3km인 경우에 약 15톤/년 정도가 배출되는 것으로 분석되었다. 자동차 전용도로인 (나) 터널의 경우, 공기정화시설을 설치하지 않는 경우에 입자상 물질 배출량은 약 10톤/년 정도이며, 공기정화시설을 설치하는 경우, 오염물질(입자상물질)에 대한 배출 저감량은 약 7.2~9.2톤/년으로 대략 8톤/년 이상으로 분석된다. 참고로 일본의 동경환상고속도로 노선의 야마테 터널(총연장 18.2km, 신주쿠라인 : 6.7km, 신주쿠-오하시 : 2.7km, 시나가와라인 : 8.8km)은 전 노선에 공기정화시설을 설치하고 있으며, 이를 통한 부유분진 제거효과를 30톤/년으로 분석하고 있다. 또한, 2018년 발간된 “국가 오염물질 배출량” 보고서에 의하면 2015년 도로이동오염원(차량)에서 배출되는 오염물질은 <표 6.4.9>와 같다.

배출원별 대기오염 배출량중 차량에 의해서 배출되는 양은 TSP는 9,580톤/년(1.6%), PM10은 9,583톤/년(4.1%), PM2.5는 8,817톤/년 (8.9%)으로 제시되어 있다. 따라서, 차량에서 의해서 배출되는 분진은 TSP는 거의 없으며, 모두 PM10 이하임을 알 수 있다. 또한 전체 입자상 물질 배출량 중 도로이동오염원(차량)의 배출량은 4.1%를 차지하는 것으로 나타나고 있다. 또한 본 보고서에 의하면 전체 입자상 물질 배출량중 도로이동오염원(차량)의 배출량이 차지하는 비중은 차량이 많은 대도시가 높게 나타나고 있으며, 서울시의 경우에는 약 40%정도로 나타나고 있다. 이상의 검토에서 터널용 공기정화시설의 설치는 터널내 공기질 개선효과 뿐만 아니라 사회적으로 문제가 되고 있는 대기질 개선에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

<표 4.4.9> 국내 대기오염물질 배출량 분포

(톤/년)

배출원	CO	NOx	TSP	PM10	PM2.5
전체배출량	792,776	1,157,728	604,243	233,177	98,806
도로이동오염원	245,516	369,585	9,583	9,583	8,817
	31.0%	31.9%	1.6%	4.1%	8.9%

※ 2015 국가 대기오염물질 배출량, 국립환경원

라. 터널내 공기질 개선을 위한 환기시설 운영기준 강화

국내·외적으로 터널내 공기질 관리기준은 입자상물질(PM10 또는 PM2.5)에 대한 중량농도로 규정하지 않고 차량의 주행속도에 따른 운전자의 시거에 영향을 주는 가시도로 관리하고 있다. 이는 국내 터널현장 조사에서 나타난 바와 같이 터널내 입자상물질의 분포 중 PM10($10\mu\text{m}$ 이하 입자의 농도) 이상의 분포가 20%이상임을 고려하여 현행 대기환경관리 기준처럼 PM10으로 규제하기 보다는 총부유분진(TSP) 개념으로 터널내 농도기준을 규제하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 이와 같은 이유는 터널내 발생 입자상물질중 비엔진 입자상 물질(차량의 엔진에서 배출되지 않는 입자상 물질) 터널내 비산먼지, 재부유 분진, 타이어 마모 등에 의한 영향을 무시할 수 없는 것으로 판단되기 때문이다. 또한, 운영중인 터널에서 CO 및 NO_x농도는 일반적으로 설계허용농도에 미치지 못하므로 환기시설 용량에 여유가 많은 것으로 평가된다. 따라서, 한국도로공사와 서울시의 경우 운영중인 터널에 대한 오염물질의 제어목표 농도를 환기설계 허용농도보다 강화하는 운영방안을 모색하고 있다.

[터널 환기시설 운영기준(예)]

오염물질	CO	가시도
운영중 목표농도	20ppm 이하	2.0×10^{-3} 1/m 이하

마. 외부배출농도 제어기준

도심지 터널내 공기질 개선에 대한 요구는 터널내 공기질 개선보다는 오염물질의 외부배출량을 저감하기 위한 대책의 측면으로 요구되고 있는 실정이다. 이에 외부 배출이 문제시 되는 터널의 경우에는 터널내 공기가 배출되는 출구 및 환기탑에 공기정화시설을 설치하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 이에 터널내 환기시설의 운영기준의 정립 외에 추가적인 외부배출농도 제어기준을 고려할 필요가 있다.

터널내 공기정화시설을 통해서 정화된 오염물질을 배출하는 경우에 오염물질별 배출농도는 경제성을 고려하여 대기환경 영향평가를 통해 주변에 미치는 영향을 최소화 할 수 있도록 정하는 것이 타당하다. 즉, 외부로 배출되는 오염물질의 배출농도는 개통 직후 최근접 민감시설(거주역)을 대상으로 대기환경영향 평가를 실시하여 대기환경기준을 만족할 수 있도록 정하고 있다. 다만, 외부 오염물질 배출량 제어는 입자상물질을 대상으로

하며, 배출량을 실시간 제어할 필요가 있으며, 입자상물질의 농도를 유지할 수 있도록 실시간 감시·제어가 필요하다. 또한 외부 배출농도를 제어하기 위한 배출농도 및 풍량을 측정하기 위해서 터널 출구부 및 환기탑 배기구에 실시간으로 오염농도 및 풍량을 측정하기 위한 계측기를 설치하여야 한다. 외부배출농도 제어기준은 터널의 연장, 교통량 특성 및 터널 출구부 최근접 민간시설과의 거리 등을 상호 복합적으로 검토하여야 하기 때문에 정량적인 수치로 그 규제값을 제어하기는 곤란하지만, 대기확산예측(수치해석 등)을 통해 허용농도가 초과하지 않도록 환기설비의 운영관리를 통해 외부배출농도를 제어할 필요가 있다. 또한 도심지 터널의 경우, 터널에서 발생하는 오염물질의 배출량의 제어를 요구하고 있는 실정인데, 이는 출구 및 오염물질이 배출되는 배기구에 공기정화시설을 설치하여 해결할 수 있다. 국내의 경우, 터널에서 발생하는 오염물질의 배출량을 제어하기 위한 공기정화시설이 설치된 터널은 강남순환고속도로의 관악터널 뿐이며, 서부간선 지하도로 및 제물포로 지하도로에 출구공기정화시설을 민원의 요구에 의한 설치하는 것으로 계획하고 있다. 서부간선 및 제물포로 지하도로의 경우에는 민원인의 요구에 의해서 터널에서 발생하는 최대풍량을 처리하는 것으로 하고 있어 환기설비의 설치비용에 많은 공사비 증가요인이 되고 있다. 현재 외부로 배출되는 오염물질의 배출량을 제어하기 위한 공기정화시설의 용량산정 등 설계를 위한 설계기준이 없는 실정으로 이에 대한 기준의 정립이 필요한 실정이다.

4.4.3 종류식 환기시스템의 설계

본 절에서는 종류식 환기시스템의 설계를 수록하였으며, 종류식 환기방식 중 지침 제정(안)에 수록된 주요 내용을 서술하였다. 기본적으로 종류식 환기방식에서 차도내 풍속은 유지관리자 및 차량고장 등으로 하차한 운전자가 위험에 노출될 경우를 고려하여 10m/s이하를 표준으로 하며, 국부적으로 최대 12m/s를 초과 하지 않도록 제정(안)에 수록하였다.

가. 제트팬 방식

- (1) 제트팬에서 토출되는 분류의 평균속도는 30 m/s 이상으로 한다.
- (2) 제트팬의 설치는 승압효율을 최대로 할 수 있도록 천장과의 이격거리를 0.5D(D는 제트팬 내경) 이상을 유지하는 것을 표준으로 한다.
- (3) 터널 종방향으로 제트팬 간의 설치간격은 터널직경의 10배 또는 100m 이상을 이격하는 것을 표준으로 한다.
- (4) 제트팬 필요대수는 터널내 소요환기량을 만족할 수 있도록 차도내 유동저항, 자연풍에 의한 환기저항, 교통환기력 및 제트팬 승압력이 압력평형을 이루는 상태에서 결정한다.
- (5) 경제성 검토를 통해서 이격거리 및 간격을 조정할 수 있으며, 이 경우 시뮬레이션 등을 통해 승압효율을 검토하고 효율 감소 시 설치 대수를 증가한다.

나. 삭칼드 방식

- (1) 삭칼드 방식의 급기노즐은 터널에 중간지점에 설치하는 것도 가능하다. 그러나, 이 경우에는 노즐 상류측의 풍량이 감소하여 오염농도가 증가할 수 있으므로 유의하여야 한다.
- (2) 급기노즐의 승압력(ΔP_b)은 식(2.4.5)로 계산하며, 일반적인 말발굽형 터널의 급기노즐에서 토출풍속은 30~35m/s, 분사각은 5~15°, 승압계수 K_b 는 0.90~0.95 정도를 적용할 것을 권장한다. 다만, 단면형상 및 노즐형상에 따른 승압효율은 시물레이션이나 모형실험을 통해 신뢰성을 확보한 후에 적용한다.
- (3) 환기(축류)팬에 대한 소요정압(ΔP_{total})은 유로에서 유동손실, 유로형상 변화에 따른 부차적 손실, 노즐의 정압손실의 합으로 계산하며, 팬정압 선정시 10%의 여유율을 고려한다.

다. 수직갱(연직갱) 급·배기 방식

- (1) 일반적으로 수직갱(연직갱) 방식에서 급·배기 풍량은 동일하게 선정하는 것을 원칙으로 하며, 풍량은 수직갱(연직갱)의 설치위치에 영향을 받기 때문에 이를 고려하여 최적화될 수 있도록 검토한다. 다만, 수직갱(연직갱) 배기구와 터널 출구부에서 처리대상물질의 농도가 허용농도가 되도록 설치하는 것이 가장 효율적이다.
- (2) 수직갱(연직갱) 방식에서는 승압력은 급기노즐에 의한 승압력과 배기구에 의한 승압력이 있으나, 배기구에 의한 승압력은 작기 때문에 무시할 수 있다.
- (3) 급기노즐의 토출풍속은 승압력을 고려할 경우 30m/s 이상을 표준으로 한다.
- (4) 연직갱(수직갱)의 풍량이 터널입구에서 유입하는 풍량보다 작은 경우에는 수직갱 구간에서 단락류(short circuit)가 발생할 우려가 있으므로 풍량산정 및 풍량제어시 이를 고려하여야 한다.
- (5) 기류유입 및 급기를 위한 풍도와 수직갱의 풍속은 25m/s 이하로 계획한다.
- (6) 풍도 및 수직갱은 화재시 배연을 위해 사용할 수 있다.
- (7) 제연팬 용량 산정 시에 화재시나리오에 따라 수직갱의 승압력을 고려하여 결정할 수 있다.
- (8) 연직갱(수직갱)의 배기탑에서는 터널 내 오염공기가 집중적으로 배출되므로 주변환경에 미치는 영향을 검토하고, 필요시 오염물질 저감시설을 설치하여 오염공기를 정화한 후에 배출할 수 있다.

4.4.4 (반)횡류식 환기시스템의 설계

본 절에서는 종류식 환기시스템의 설계를 수록하였으며, (반)횡류식식 환기방식 중 지침 제정(안)에 수록된 주요 내용을 서술하였다.

가. 균일 급·배기 방식

- (1) 급기 또는 배기 반횡류식의 경우에는 터널 내 풍속이 0m/s가 되는 중성점이 존재할 가능성이 있으며 특히, 배기 반횡류식의 경우에는 중성점에서는 오염물질의 농도가 과도하게 높아지게 되므로 이에 대한 검토가 필요하다.
- (2) 덕트내 풍속은 25m/s 이하로 한다. 단, 배연겸용인 경우에는 배연풍속은 본 지침 1편(방재설비) 내 ‘6.1.3 제연용 환기기 용량 설계’ 를 따른다.
- (3) 급기방식의 경우, 급기구간의 간격은 5m를 표준으로 하며, 배기구의 간격은 급기구의 간격의 2배를 표준으로 한다.
- (4) 급·배기팬의 소요전압은 덕트 시작부의 풍속 및 동압, 급기 덕트의 정압차, 연결유로의 압력손실 (ΔP_{cn}), 소음장치나 집진설비 등의 압력손실을 고려해야 한다.
- (5) 급배기구에서 균일풍량이 급기 또는 배기될 수 있도록 시뮬레이션을 통해 배기구 또는 급기구의 개도율을 검토하여야 한다.

나. 대배기구 방식

- (1) 대배기구 방식의 대배기구 간격은 50~100m로 하며, 화재시 배연을 목적으로 하는 배기구는 개폐가 원격으로 제어될 수 있도록 한다.

4.5 기타 환기방식, 환기소(탑)에 필요한 세부 설계기준 제시

4.5.1 대면통행 터널의 환기시스템 설계

대면통행에 관한 환기시스템은 환기시설에 따른 환기설계가 아닌 환기방식에 따른 환기설계내용으로써 현재 ‘도로설계편람 617. 환기편’에 일부 수록이 되어 있으나, 도로터널 환기방식 중 대면통행의 정량적인 환기설계를 ‘터널내 차량대수에 따른 차등차속 단계 선정’을 추가하여 보다 상세히 지침 제정(안)에 수록하였다.

[터널내 차량 대수에 따른 차등차속 단계 산정]

- (1) 대면통행 터널에서는 방향별 주행속도가 다를 수 있으므로, 방향별 차등차속을 적용한다.
- (2) 설계교통량은 양방향 최대 교통용량(도로용량)을 기준으로 하며, 교통밀도(식(2.3.1) 참조)에 따른 방향별 교통용량(Mmax)은 동일비율 적용을 표준으로 한다.
- (3) 차등차속 적용에 의한 방향별 터널 내 차량대수비는 중방향계수(D)값을 넘지 않도록 차등차속 단계를 설정한다. 예를 들어 1단계의 차등차속의 범위가 설정되면, 기준방향의 차속이 60km/h 일 경우, 반대방향의 차속은 50km/h, 70km/h에 대한 환기검토(차등차속) 범위가 결정될 수 있다.

[환기시설 용량산정 방법]

- (1) 차등차속의 범위(단계)가 설정되면, 자연풍은 저항력 또는 환기력으로 작용할 수 있으므로 해당 차등차속별로 자연풍의 풍속을 -2.5m/s에서 부터 +2.5m/s 까지 0.1m/s 단위로 자연풍의 영향을 검토한다.
- (2) 소요환기량에 따른 처리풍속($V_{req} = Q_{req}/A_r$)과 터널내 실제 풍속(V_{r*})을 비교하여 자연환기 또는 기계환기 여부를 결정한다. 이때 환기방식을 구별하는 임계점에서의 자연풍 크기를 임계자연풍(V_{n*})이라 한다.
- (3) 임계자연풍값을 기준으로 자연환기가 불가능한 경우는 기계환기방식을 계획하며, 교통력의 방향, 자연풍의 크기, 팬 환기력의 상대적인 크기에 따라 터널내 기류방향이 결정되므로, 이를 고려하여 환기시설의 용량을 산정한다.
- (4) 특정 갱구부 방향으로 배출되는 오염물질의 확산을 제어할 필요가 있는 도시지역 터널의 경우에는 최대 환기시설 용량으로 환기계획을 수립할 필요가 있으나, 갱구부의 오염물질을 제어할 필요가 없는 산악지역 터널의 경우에는 환기시설 용량이 최소로 요구되는 방향으로 환기시설 용량을 계획할 수 있다.

4.5.2 환기방식별 소요동력 및 경제성 검토

환기검토에 따른 환기방식의 최종 선정에 앞서 소요동력 등에 대한 경제성 검토가 필요하다. 소비동력이 동일한 경우 연직갱(수직갱)방식의 환기효과가 제트팬 방식보다 우수하므로 제트팬의 설치대수가 과도하게 증가되는 경우에는 운영비 측면에서 연직갱(수직갱)방식의 적용 필요성을 검토하여야 한다. 또한 연직갱(수직갱) 방식과 제트팬 방식이 조합되는 환기방식에서는 일반적으로 동일한 동력에서 연직갱(수직갱)의 환기효과가 우수하므로 환기기 운영시 이에 대한 충분한 검토를 통해 운전단계를 결정하는 것이 바람직하다.

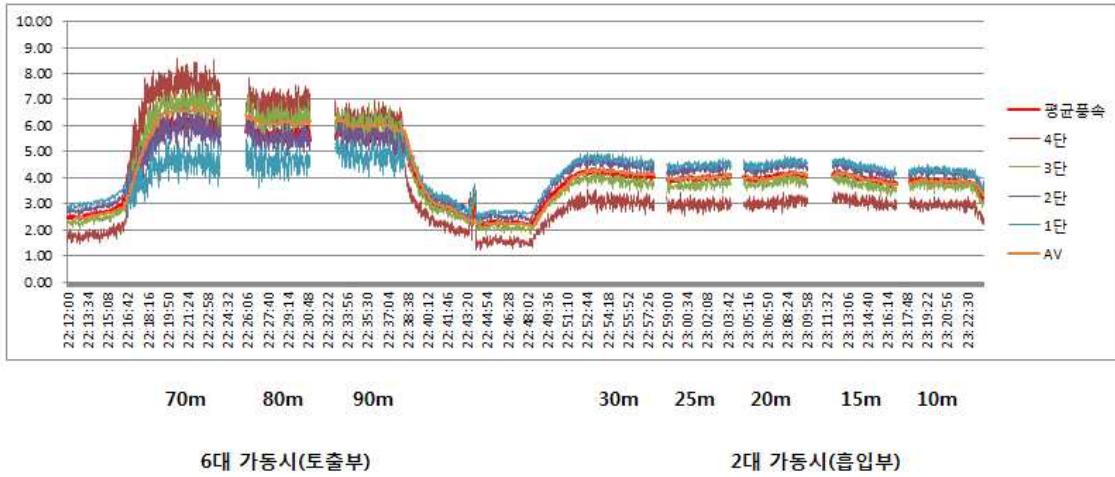
최근 자동제어 로직의 자동화 및 동적환기해석 모델의 개발 등으로 하루 중 혹은 연중 목표연도까지의 교통량 변동에 따른 환기시설의 가동시간 및 이에 따른 소요동력의 예측이 가능하므로 예측결과로부터 환기방식별 경제성 검토가 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 이에 대한 부분을 지침 제정(안)에 수록하여 보다 효율적인 환기설계방안을 제시하였다.

- (1) 환기검토에 따른 환기방식의 최종 선정에 앞서 소요동력 등에 대한 경제성 분석을 수행해야 한다.
- (2) 터널연장이 길고 터널 내 풍속이 고속인 경우에는 제트팬 증가에 따른 풍량 증가가 미미할 수 있으므로, 환기의 경제성을 실현하기 위해서 바이패스방식이나 수직갱 방식을 검토한다.
- (3) 조합 환기 방식(제트팬과 오염물질 저감방식 또는 제트팬과 수직갱 방식)에서는 환기기 운전 조합에 따라서 발생 풍량이 동일할지라도 소비동력의 차이가 발생할 수 있으므로 반드시 소비동력을 최소로 할 수 있는 운전단계를 검토하고 이에 따른 환기기 제어 계획을 수립한다.

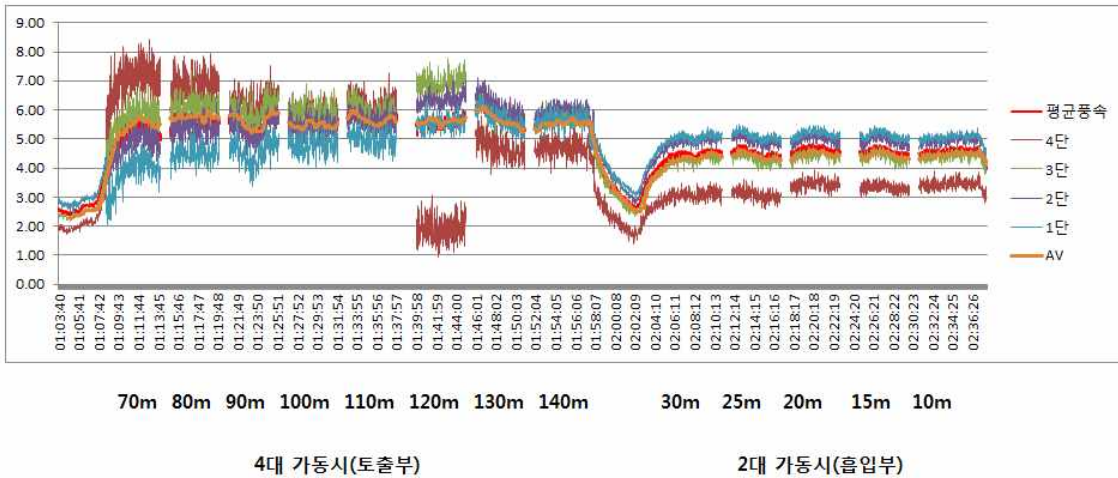
4.5.3 환기기설의 운영평가 수행

도로터널내 환기시설은 터널 준공 전 설계에서 요구하는 능력을 만족하는지 여부에 대한 종합적인 운영평가를 수행하여야 하며, 운영 중 도로터널의 경우는 목표연도의 설계교통량 대비 운영 중 실제교통량을 비교하여 일정 주기별로 환기시설 운영평가를 실시하고 필요한 경우 환기시설의 용량의 증대 또는 감소수준을 검토할 수 있도록 지침 제정(안)에 수록하였다.

4.5.4 터널내 오염물질 측정센서 설치위치



(a)고속도로 ㉠터널 풍속측정결과



(b)고속도로 ㉢터널 풍속측정결과

<그림 4.5.1> 터널내 오염물질 센서 위치별 풍속 측정 결과

터널내 오염물질(입자상, 가스상 물질)은 터널의 기류를 통해 이동하게 되며, 종류식 환기방식을 채택하고 있는 터널의 경우 제트팬의 설치위치에 따라 터널내 풍속은 변화하기 때문에 제트팬 설치 위치로부터 일정 간격이 이격되어야만 기류가 안정될 수 있다. 따라서 터널내 기류가 일정해지는 부분에 오염물질의 센서를 측정하는 것이 가장 유효한 오염물질의 농도값을 획득 할 수 있는 위치라 할 수 있다. 하지만, 국내 도로터널 관련 기준에 이 오염물질의 측정센서의 위치에 관한 기준은 제시되지 않고 있다.

이에 따라 고속도로 터널 중 2개소 터널(부산 외곽순환 고속도로에 위치)을 대상으로 제트팬의 설치지점 중 흡입부와 토출부의 이격거리에 따른 풍속측정 결과를 나타내었다. 각 그림에서의 범례는 크게 T.A.B 측정결과와 터널에 자체 설치된 풍속계로 구분되어진다.

우선 T.A.B 측정 센서는 1단(바닥으로부터 1.0m), 2단(바닥으로부터 2.5m), 3단(바닥으로부터 4.0m), 4단(바닥으로부터 5.5m)로 구성되어 있으며 이에 대한 평균 풍속을 각 그림에 나타내었다. 한편, 터널에 자체 설치된 풍속계는 AV로 표시하여 각 그림에 나타내었다.

각 그림에서 보는 것과 같이 제트팬 설치지점에 따른 흡입부와 토출부의 풍속측정 결과는 우선 토출부의 경우 약 90m 까지는 높이별 풍속변화가 크게 나타났으며, 흡입부의 경우는 10m 이내에서 비교적 균일한 풍속을 나타내고 있다. 이러한 부분들을 고려하여 오염물질 센서의 위치를 결정하는 것이 적합할 것으로 판단된다.