



연구보고서 2012-03

초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향 평가 및 관리정책 연구 I

A Study on the Health Impact and Management Policy of PM_{2.5} in Korea I

공성용 외



한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

연구진

연구책임자 공성용 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)
참여연구원 배현주 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
 윤대옥 (충북대학교 교수)
 홍석표 (한국환경정책·평가연구원 연구원)
 박해용 (한국환경정책·평가연구원 연구원)

연구자문위원

이우원 (환경부 사무관)
김용표 (이화여자대학교 교수)
박정임 (순천향대학교 교수)
김진영 (한국과학기술연구원 선임연구원)
정 권 (서울시보건환경연구원 팀장)

© 2012 한국환경정책·평가연구원

발행인 이병욱

발행처 한국환경정책·평가연구원
 서울특별시 은평구 진흥로 215 (우편번호) 122-706
 전화 02)380-7777 팩스 02)380-7799
 <http://www.kei.re.kr>

인쇄 2012년 12월 26일

발행 2012년 12월 31일

출판등록 제17-254호

ISBN 978-89-8464-633-9 93530

값 9,000원

서 언

초미세먼지(PM_{2.5})는 머리카락 직경에 비해 20분의 1보다 더 작은 매우 미세한 입자로 호흡을 통해 코나 기관지 등에 걸리지 않고 폐포 깊숙이 도달하여 인체에 호흡기 질환, 기관지염, 암 발병, 어린이들의 폐 성장 악화, 천식 증상 악화, 조기 사망의 요인, 신생아들의 저체중증, 심장질환과 심장마비 등의 가능성을 높이는 것으로 국내·외 연구사례를 통해 밝혀진 바 있습니다.

최근 정부에서는 초미세먼지의 이러한 인체영향을 고려하여 대기환경기준 시 설을 위한 관계 법령을 개정하기 위해 노력하고 수도권에서 추진 중인 각종 미세먼지 대책을 전국으로 확대 관리를 실시하고 있습니다.

하지만 초미세먼지는 자연적·인위적인 배출원으로부터 직접 발생되고 발생한 초미세먼지는 대기 중에서 산소와 오존, 각종 라디칼(Hydroxyl, nitrate 등)과 같은 전구물질의 형태로 대기 중에서 화학반응을 통해 형성되고 또 중국 등으로부터 중·장거리 이동영향 등에 의해 매우 복잡하게 발생하고 있기에 초미세먼지에 대한 물리·화학적 특성, 건강 영향 및 건강 편익, 배출원 및 배출량 등에 대한 연구가 미미한 실정입니다.

이러한 배경과 필요성에 의해 초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향 평가 및 관리정책 연구(Ⅰ)에서는 현재 초미세먼지의 물리·화학적 특성, 건강 영향 및 건강 편익, 배출원 및 배출량을 정량 또는 정성적으로 평가하고 특히 사업장에 배출되는 초미세먼지의 관리를 위한 방안을 모색하였습니다.

본 연구의 결과가 앞으로 국내 초미세먼지 관리에 유용하게 활용되기 바라며, 본 연구를 맡아 수행한 공성용 박사, 배현주 박사, 윤대옥 박사, 홍석표 연구원,

박해용 연구원의 노고에 깊은 감사를 표합니다. 아울러 바쁘신 와중에도 전문성 있는 자문과 조언을 해 주신 환경부 이우원 사무관님, 이화여자대학교 김용표 교수님, 순천향대학교 박정임 교수님, 한국과학기술연구원 김진영 선임연구원님, 서울시보건환경연구원 정권 팀장님, 본 원의 주현수 박사, 심창섭 박사, 이영수 박사, 서양원 박사에게도 깊은 감사를 드립니다.

2012년 12월

한국환경정책·평가연구원

원장 이 병 욱

국문 요약

본 연구는 2015년부터 시행 예정인 PM_{2.5}의 대기환경기준 신설에 따른 건강영향 및 관리정책을 마련하는 데 목적이 있다. 이를 위해 “PM_{2.5}의 농도분포 및 물리·화학적 특성 분석”, “PM_{2.5}의 건강영향 평가 및 건강편익 산정”, “PM_{2.5}의 배출량 추정 및 관리정책 로드맵”의 세 분야로 나누어 분야별 세부주제에 대하여 연구를 진행하였다.

1. PM_{2.5}의 농도분포 및 물리·화학적 특성 분석

PM_{2.5} 구성성분을 보면 황산암모늄과 질산암모늄의 질량이 전체 질량의 37%(겨울) ~ 76%(여름)를 차지하고 있어 2차 입자의 비중이 크며, 이는 SPSS 통계프로그램을 이용한 PM_{2.5}와 다른 오염물질과의 상관관계 분석에서도 확인 되었다. 따라서 PM_{2.5} 관리를 위해서는 1차 입자의 관리뿐만 아니라 2차 입자를 생성하는 SO_x와 NO_x 그리고 암모니아의 관리도 함께 필요하고 지역별로 PM_{2.5}의 구성성분의 차이가 있기에 지역별 분석결과에 근거한 차별화된 정책이 필요하다고 할 수 있다. 시간대별 PM_{2.5} 농도 패턴은 도로 재비산 먼지가 PM_{2.5}보다는 PM₁₀의 농도에 더 큰 영향을 미치기 때문에, 도로 살수와 같은 대책들은 PM_{2.5} 농도 개선에는 제한적인 효과를 가져올 가능성이 높은 것으로 판단된다. 한편 장거리 이동에 의한 황사는 PM_{2.5}와 PM₁₀ 모두의 농도를 증가시키지만 상대적으로 PM₁₀ 농도 증가가 훨씬 큼을 확인할 수 있었다. 마지막으로 인체위해성 측면에서 PM_{2.5}의 구성성분 중 OC와 중금속(특히 전이금속)은 유해성이 크기에 이러한 성분의 삭감 및 관리가 우선되는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

2. PM_{2.5}의 건강영향 평가 및 건강편익 산정

본 연구에서는 2006년부터 2010년까지 서울시를 대상으로 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})가 사망에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 대기질 개선에 따른

건강편익을 추산하였다. 대기오염의 건강영향을 평가하기 위해 일반화 부가모형(GAM)을 적용하였고, 대기질 개선의 건강편익을 추정하기 위해 BenMAP을 사용하였다.

미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})는 사망발생위험을 통계적으로 유의하게 높이고 있었다. 전체연령 집단과 65세 이상 연령집단에서, 미세먼지(PM₁₀) 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 전체원인 사망발생위험은 0.44%(95% CI : 0.25 ~ 0.63%)과 0.64%(95% CI : 0.41 ~ 0.87%) 높였다. 또한 초미세먼지(PM_{2.5}) 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 전체원인 사망위험은 0.95%(95% CI : 0.57 ~ 1.34%)과 1.37%(95% CI : 0.90 ~ 1.84%) 높였다.

서울시의 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 수준이 WHO에서 권고하고 있는 대기질 기준을 달성한다고 가정하였을 때, 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 개선으로 기대되는 조기사망 감소의 건강편익을 산출하였다.

건강영향 평가와 건강편익 분석에서 제한점과 불확실성이 있으나, 우리나라에서 국민의 건강을 보다 체계적으로 보호하기 위해서는 대기질 기준 항목 선정과 대기질 기준 농도 설정에서 건강부문의 비용과 편익 분석이 반드시 필요하다.

3. PM_{2.5}의 배출량 추정 및 관리정책 로드맵

본 절에서는 PM_{2.5} 배출량 산정을 위해 대기정책지원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System) 배출목록에서 누락된 배출원을 추가하였고 배출량 산정 시에도 최신의 활동도 자료 및 방법론을 적용하였기 때문에 기존의 다른 연구결과에 비해 정확도가 높아졌다고 생각된다. 하지만 여전히 불확실성이 큰 배출원이 존재하는데, 특히 제조업의 경우가 그러하였다. 따라서 제조업을 중심으로 다량 배출원에 대해서는 추가적인 검토가 필요하며, 국가 공식적인 배출량 인벤토리의 구축이 요구된다. 배출량 추정결과 특이한 점은 CAPSS에서 누락된 배출원의 배출량이 크다는 점과 이제까지 큰 관심을 가지지 않았던 배출원이 대량 배출원으로 나타난 점이다. 예를 들어 비금속광물 제품 제조업, 숯가마, 노천소각, 1차 금속산업

등이 그것인데, PM₁₀ 다량 배출원 순위와는 차이가 남을 확인하였다.

PM_{2.5} 관리와 관련해서는 기본 데이터 부족과 오염현상에 대한 이해가 아직 부족하다는 현실을 감안하여, 우선은 1차 입자 또는 독성관리 위주의 접근이 바람직하다고 결론지었다. PM_{2.5}의 조성 중 sulfate나 nitrate와 같이 2차 생성물질의 중량비중이 큰 상황을 감안하면, 우선적으로 황산화물과 질소산화물, 암모니아의 삭감이 효과적이지만, 이들 오염물질이 삭감된다 하더라도 얼마만큼이나 PM_{2.5}의 농도 개선에 기여할 수 있을 것인지 정량적인 분석이 이루어지지 않았고 조만간 해결될 것도 아니기 때문에, OC나 중금속과 같은 유해성이 큰 물질을 우선적으로 삭감하고 이후 준비를 통해 SOx, NOx 등 기체 상 오염물질을 삭감하는 전략을 제안하였다.

마지막으로, PM_{2.5}의 농도현황과 조성, 현재의 관리여건과 외국의 사례를 검토하여 인벤토리 구축, 측정 자료의 확보, PM_{2.5}의 오염현상 규명, 그리고 사업장 관리라는 4개의 범주에 대하여 정부가 추진해야할 정책과제를 4단계에 걸쳐 제안하였다.

주제어: 초미세먼지(PM_{2.5}), 부가모형, 대기정책지원시스템, 인벤토리, 로드맵

| 차례 |

제1장 · 서 론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
2. 연구 내용	3
제2장 · PM _{2.5} 의 물리·화학적 특성과 시계열 분석	5
1. PM _{2.5} 의 물리·화학적 특성과 생성기전	5
가. 입경에 따른 먼지의 성분	5
나. PM _{2.5} 의 물리·화학적 특성과 독성	8
다. PM _{2.5} 의 생성기전 및 발생원	10
2. 일반대기오염물질과 기상인자의 시계열 분석 및 상관관계 분석	12
가. 기상현황	13
나. 일반대기오염물질의 시계열 분석	14
다. 대기오염물질 및 기상인자 상호 간의 상관관계분석	28
3. PM _{2.5} 주요성분의 특성	31
가. 탄소성분	31
나. 이온성분 농도	32
다. 금속성분 농도	34
라. 다환방향족탄화수소	36
4. 황사의 영향	38
가. 황사 사례 시 기상상태	39
나. 황사/비황사 사례 시 일반대기오염물질의 농도 변화 및 일변화 특성	40
다. 황사/비황사 사례 시 대기오염물질 및 기상인자 사이의 상관관계	49
5. 황사/비황사 사례 시 미세먼지 중 화학적 조성	52

제3장 · PM_{2.5}의 건강영향 평가 및 건강편익 산정 54

1. 관련 선행 연구	54
가. 미세먼지와 초미세먼지에 의한 건강영향	55
나. 대기오염농도 변화로 인한 건강영향 추정	57
2. 건강영향 분석 자료 및 통계 분석 방법	59
가. 분석 범위 및 분석 자료	59
나. 대기오염의 건강영향 분석 방법	60
다. BenMAP을 이용한 건강영향의 추정	62
3. 연구결과	64
가. 기본 자료에 대한 분석	64
나. 미세먼지 농도 증가로 인한 사망영향	70
다. 초미세먼지 농도 증가로 인한 사망영향	72
라. 대기오염 농도 개선에 따른 건강영향 추정	74

제4장 · PM_{2.5}의 배출량 추정 및 관리정책 로드맵 81

1. PM _{2.5} 배출량 추정	81
가. 배출량 산정방법	81
2. PM _{2.5} 배출량 산정 결과	108
가. 중분류별 배출량 결과	108
나. 소분류별 PM _{2.5} 배출량 결과	111
다. 배출량 산정 결과에 대한 검토	116
3. 기존 배출량 자료와의 비교	119
가. 총 PM _{2.5} 배출량 비교	121
나. 대분류별 PM _{2.5} 배출량 비교	121
다. 중분류별 PM _{2.5} 배출량 비교	128
라. 소분류별 PM _{2.5} 배출량 비교	132

4. PM _{2.5} 관리 정책 미국 사례	137
가. 뉴욕 주(州)	137
나. 남가좌 주(州)	145
5. 국내 관리정책 로드맵(사업장을 중심으로)	157
가. 정책방향 결정을 위한 고려 요소	157
나. PM _{2.5} 관리 전략	161
다. 추진 과제 및 로드맵	164
 제5장 · 결론 및 제언	 173
 참고 문헌	 177
 부록	 183
 Abstract	 189

| 표 차례 |

〈표 1-1〉 선행연구결과를 바탕으로 재가공한 전국의 PM _{2.5} 평균 농도	2
〈표 2-1〉 월평균 자료를 바탕으로 실시한 일반대기오염물질과 기상인자의 상관관계	30
〈표 2-2〉 서울지역의 계절별 이온성분 농도	33
〈표 2-3〉 서울지역의 PM _{2.5} 에 포함된 계절별 PAHs 농도	37
〈표 2-4〉 연도별 서울지역의 황사 발생일	39
〈표 2-5〉 황사 사례 시 잔후 이틀 간격의 대기오염물질 평균농도 및 기상 현황	43
〈표 2-6〉 황사 시 일반대기오염물질 및 기상인자 간의 상관관계	50
〈표 2-7〉 비황사 시 일반대기오염물질 및 기상인자 간의 상관관계	51
〈표 3-1〉 미세먼지의 건강영향 연구	56
〈표 3-2〉 초미세먼지의 건강영향 연구	57
〈표 3-3〉 대기오염농도 변화에 따른 건강영향 추정 연구	58
〈표 3-4〉 서울시의 기상특성	66
〈표 3-5〉 서울시의 미세먼지와 초미세먼지 농도	67
〈표 3-6〉 서울시의 전체원인 일별 사망자수	69
〈표 3-7〉 서울시의 심혈관계 관련질환 일별 사망자 수	70
〈표 3-8〉 사망에 대한 미세먼지의 영향	72
〈표 3-9〉 사망에 대한 초미세먼지의 영향	74
〈표 3-10〉 미세먼지 농도개선에 따른 줄어든 급성 조기사망	79
〈표 3-11〉 초미세먼지 농도개선에 따른 줄어든 급성 및 만성 조기사망	80
〈표 4-1〉 유럽의 휘발유 승용차에 대한 PM emission factor	85
〈표 4-2〉 전국 휘발유 차량 등록대수 및 총 주행거리	86
〈표 4-3〉 이륜차의 배기량별 PM ₁₀ 배출계수	87

〈표 4-4〉 이륜차의 배출계수	88
〈표 4-5〉 전국 배기량별 이륜차 등록대수 및 총 주행거리	89
〈표 4-6〉 입자 크기에 따른 보정계수	90
〈표 4-7〉 전국의 silt loading 값	90
〈표 4-8〉 차량별 평균 차중	91
〈표 4-9〉 전국 차종별 연간주행거리 및 자동차 등록대수	92
〈표 4-10〉 비포장도로의 형태별 PM ₁₀ 배출계수	94
〈표 4-11〉 전국 도로현황 및 도로포장률	96
〈표 4-12〉 건설활동별 적용 배출계수	97
〈표 4-13〉 2010년 전국 용도별 착공 면적	98
〈표 4-14〉 농업활동 경지 정리 시 PM ₁₀ 배출계수	98
〈표 4-15〉 2010년 전국 밭 면적	98
〈표 4-16〉 농업활동 수확 시 적용된 배출계수	98
〈표 4-17〉 지역별 풍화에 의한 비산먼지 배출계수	100
〈표 4-18〉 지역별 체육장의 면적	101
〈표 4-19〉 축종별 PM _{2.5} 배출계수	102
〈표 4-20〉 전국 가축별 사육두수	103
〈표 4-21〉 맥류 소각에 의한 PM _{2.5} 배출계수	106
〈표 4-22〉 본 연구에 적용된 농업 부산물 소각에 의한 PM _{2.5} 배출계수	106
〈표 4-23〉 전국 작물별 농지면적	106
〈표 4-24〉 기타 문헌자료를 참고한 PM _{2.5} 배출목록 및 배출량	107
〈표 4-25〉 PM _{2.5} 의 중분류별 상위 20위 이하 배출목록 및 배출량	110
〈표 4-26〉 PM _{2.5} 의 소분류별 상위 20위 이하 배출목록 및 배출량	113
〈표 4-27〉 연구별 PM 배출량 산정방식 비교	120
〈표 4-28〉 해양 레저용 디젤 연료 배출기준	143
〈표 4-29〉 비도로 디젤 엔진 배출 기준	144

〈표 4-30〉 남가좌 주(州)의 시설관리	149
〈표 4-31〉 남가좌 주(州)의 시장 인센티브/제도운영의 유연성 전략 ·	150
〈표 4-32〉 남가좌 주(州)의 면오염원 프로그램 전략	152
〈표 4-33〉 남가좌 주(州)의 이동오염원 프로그램 전략	153
〈표 4-34〉 SO _x , NO _x , PM _{2.5} , VOC 관리를 위한 관리 대책	156
〈표 4-35〉 현재 시행 중인 주요 관리대책	159
〈표 4-36〉 국내 PM _{2.5} 관리정책 로드맵	172

| 그림 차례 |

〈그림 2-1〉 입자 크기별 분류 및 특성	5
〈그림 2-2〉 먼지의 발생과 구조	11
〈그림 2-3〉 PM _{2.5} 의 생성 기전	12
〈그림 2-4〉 기온, 상대습도, 강수량의 변화	13
〈그림 2-5〉 풍향 및 풍속 변화	14
〈그림 2-6〉 SO ₂ 의 월평균 변화 경향	15
〈그림 2-7〉 SO ₂ 의 일평균 변화 경향	16
〈그림 2-8〉 NO ₂ 의 월평균 변화 경향	17
〈그림 2-9〉 NO ₂ 의 일평균 변화 경향	17
〈그림 2-10〉 CO의 월평균 변화 경향	18
〈그림 2-11〉 CO의 일평균 변화 경향	19
〈그림 2-12〉 O ₃ 의 월평균 변화 경향	20
〈그림 2-13〉 O ₃ 의 일평균 변화 경향	21
〈그림 2-14〉 PM ₁₀ 의 월평균 변화 경향	22
〈그림 2-15〉 PM ₁₀ 의 일평균 변화 경향	23
〈그림 2-16〉 PM _{2.5} 의 월평균 변화 경향	24
〈그림 2-17〉 PM _{2.5} 의 일평균 변화 경향	25
〈그림 2-18〉 PM _{2.5} /PM ₁₀ 의 월평균 변화 경향	26
〈그림 2-19〉 PM _{2.5} /PM ₁₀ 의 일평균 변화 경향	26
〈그림 2-20〉 먼지의 시간대별 농도 변화	27
〈그림 2-21〉 가스상 오염물질의 시간대별 농도 변화 경향	28
〈그림 2-22〉 OC와 EC 농도의 계절별 변화	31
〈그림 2-23〉 서울시와 광양시의 PM _{2.5} 구성 성분 비율 비교	34

〈그림 2-24〉 계절별 금속성분 농도	35
〈그림 2-25〉 황사 발생 시 바람장미도	39
〈그림 2-26〉 황사/비황사 사례 시 입자상 오염물질의 평균농도	40
〈그림 2-27〉 황사 발생 시 일별 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 평균농도 및 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비	41
〈그림 2-28〉 황사 발생일 전·후 이틀 간격의 시간대별 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 평균농도 변화	42
〈그림 2-29〉 황사/비황사 사례 시 가스상 오염물질의 평균농도	48
〈그림 2-30〉 황사 발생일 전·후 이틀의 시간대별 오염물질의 평균농도 변화	49
〈그림 2-31〉 수도권 측정소에서의 시간대별 미세먼지 농도	52
〈그림 2-32〉 황사기간 중 수도권 측정소에서의 이온성분 평균농도	53
〈그림 2-33〉 황사기간 중 수도권 측정소에서의 탄소성분 평균농도	53
〈그림 3-1〉 BenMAP 개념도	62
〈그림 3-2〉 서울시의 기상변수, 미세먼지와 초미세먼지 농도	65
〈그림 3-3〉 서울시의 연령별, 사망원인별 일별 사망자 수	68
〈그림 3-4〉 사망에 대한 미세먼지의 영향	71
〈그림 3-5〉 사망에 대한 초미세먼지의 영향	73
〈그림 3-6〉 서울시 구별 65세 이상 연령집단의 인구분포	75
〈그림 3-7〉 2010년 서울시 구별 미세먼지(PM_{10}) 농도 분포	76
〈그림 3-8〉 2010년 서울시 구별 미세먼지 농도와 WHO 기준 달성 시 농도 차이	76
〈그림 3-9〉 2010년 서울시 구별 초미세먼지 농도 분포	77
〈그림 3-10〉 2010년 서울시 구별 초미세먼지 농도와 WHO 기준 달성 시 농도 차이	78
〈그림 4-1〉 $PM_{2.5}$ 배출량 산정방법 개요	81
〈그림 4-2〉 CAPSS 2009 배출원 분류체계 가공 모습	82
〈그림 4-3〉 $PM_{2.5}$ 배출비율을 바탕으로 한 $PM_{2.5}$ 배출량 산정 방법	83
〈그림 4-4〉 추가된 $PM_{2.5}$ 배출목록 및 배출원 구분체계	84

〈그림 4-5〉 $PM_{2.5}$ 의 중분류별 배출우선순위 및 배출량	109
〈그림 4-6〉 $PM_{2.5}$ 의 중분류별 배출비율	110
〈그림 4-7〉 $PM_{2.5}$ 의 소분류별 배출우선순위 및 배출량	112
〈그림 4-8〉 $PM_{2.5}$ 의 소분류별 배출비율	116
〈그림 4-9〉 미확인 배출시설의 $PM_{2.5}$ 배출량 비교	117
〈그림 4-10〉 미확인 배출목록에 $PM_{2.5}/PM_{10}$ Fraction 0.9 적용 시 $PM_{2.5}$ 배출량 비교	118
〈그림 4-11〉 수정된 총 $PM_{2.5}$ 배출량 비교	121
〈그림 4-12〉 본 연구결과와 수정된 환경부 자료의 대분류별 $PM_{2.5}$ 배출량의 차이	123
〈그림 4-13〉 본 연구결과와 수정된 학계 자료의 대분류별 $PM_{2.5}$ 배출량의 차이	125
〈그림 4-14〉 수정된 연구기관별 대분류별 $PM_{2.5}$ 배출비율	127
〈그림 4-15〉 본 연구결과와 수정된 환경부 자료의 중분류별 $PM_{2.5}$ 배출량의 차이	129
〈그림 4-16〉 수정된 연구기관별 중분류별 $PM_{2.5}$ 배출비율	131
〈그림 4-17〉 본 연구결과와 수정된 환경부 자료의 소분류별 $PM_{2.5}$ 배출량의 차이	134
〈그림 4-18〉 수정된 연구기관별 소분류별 $PM_{2.5}$ 배출비율	136
〈그림 4-19〉 SCAQMD 최적의 제어전략 설정을 위한 절차	146

| 제1장 · 서론 |

1. 연구의 배경 및 목적

PM_{2.5}는¹⁾ 작은 크기 때문에 호흡기를 통해 폐에 침투하는 성향이 강하여 폐에 염증을 일으키거나 폐를 손상하기도 한다. 그리고 염증 반응 시에 만들어진 cytokine이 폐 이외의 다른 신체로 이동하여 문제를 일으키거나(Brook R.D. et al., 2003) 또는 먼지의 응결 성질이 심근경색을 유발하는 원인이 되기도 한다(Peters A et al., 2010). 이외에도 혈관장애, 동맥경화를 유발하는 것으로 보고되고 있다(Brook RD et al., 2002; Kunzli N et al., 2005). 그리고 먼지 중의 특정 성분은 순환기에 문제를 일으킬 수도 있고 혈압, 심장박동 수에 영향을 미칠 수도 있다.

현재 정부의 공식적인 PM_{2.5} 농도 발표가 없어²⁾ 전국적인 오염현황을 살펴보기는 어렵지만 국내 발표된 논문과 기타 자료 등을 보면³⁾ 서울을 포함한 수도권 지역에서 농도가 상대적으로 가장 높고 광양·울산 등 공업단지로 알려진 지역의 PM_{2.5} 농도도 높음을 확인할 수 있는데 전체적으로 보면 연간 대기환경 기준치인 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을⁴⁾ 초과하고 있다(표 1-1 참조).

1) PM_{2.5}는 공기역학적 입경(aerodynamic diameter)이 2.5 μm 이하의 입자를 나타낸다.

2) QA/QC를 거쳐 공개될 예정이다.

3) 문헌조사를 통한 지역별 PM_{2.5} 농도의 경우 각 문헌별 연구방법 및 측정방법 그리고 측정시기 등에 차이가 있어 단순 비교는 어렵다.

4) 2015년도 시행예정인 PM_{2.5} 대기환경기준의 연간평균치는 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균치는 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다.

〈표 1-1〉 선행연구결과를 바탕으로 재가공한 전국의 PM_{2.5} 평균 농도

측정연도	대상지역	PM _{2.5} 연평균 농도 (μg/m ³)	출처
1996	태안	17.8	이종훈 외(1997)
1996	고산	18.3	이종훈 외(1997)
1996	강화	25.6	이종훈 외(1997)
1997	수원	46.3	김병화 외(2000)
2003	춘천	24.93	김희갑 외(2006)
2003	서울	45.28	김희갑 외(2006)
2003	울산	36.58	김희갑 외(2006)
2003	부산	30	부산광역시 보건환경연구원보(2004)
2003	포항(산업지역)	36.6	허윤경(2005)
2004	익산	33.97	강공언 외(2011)
2008	구미	39.8	조영혁 외(2010)
2008	제주도	22.9	조은경(2010)
2008	포천	48.79	최규식(2009)
1999~2001	덕적도	20.8	윤용석(2002)
2003~2004	광양	38.1	허종배(2005)
2005~2006	대전	31.6	임종명 외(2006)
2007~2008	천안	45.74	이현미 외(2008)
2007~2008	용인	49	이형우 외(2009)
2010~2011	충주	40.84	최준락(2012)

먼지가 가지는 환경적 영향 때문에 초기 미국에서는 총부유먼지(total suspended particulate, TSP) 농도를 관리⁵⁾하였고 유럽에서는 흑연(black smoke, BS) 농도를 관리하였다. 그러다가 먼지가 가지는 위해성이 부각되면서 보다 작은 먼지의 관리가 주목을 받게 되어, 미국은 PM₁₀을 1987년부터 그리고 PM_{2.5}는 1997년부터 대기기준을 설정하여 관리하고 있다(U.S. EPA, 2009). 그리고 WHO는 2000년 air quality guidelines를 통해 PM₁₀과 PM_{2.5}의 대기 기준을 제안한 바 있으며, 2006년에는 이보다 강화된 기준을 제시하였다(WHO, 2005).

우리나라도 그동안 대기환경기준으로 PM₁₀을 관리하여 왔으나 PM_{2.5}가 인체에 더 위해하다는 사실에 입각해 2011년 3월 29일 「환경정책기본법」 시행령을 개정하여 PM_{2.5}

5) 미국에서는 1971년도부터 TSP에 대한 관리를 실시하였고, 국내의 경우 1983년도부터 관리를 실시하였다.

의 대기환경기준을 신설하였으며 2015년부터 시행 예정에 있다. $PM_{2.5}$ 대책의 일환으로 그동안 환경부에서는 기존 대기오염측정망에 추가로 $PM_{2.5}$ 측정망을 설치해 왔으며 2012년 현재 4개소의 측정소가 운영 중에 있다. 그리고 2015년까지 전국 36개소로 확충하고, 수도권 중심의 미세먼지 저감대책을 광역시와 인구 50만 이상 도시 등 전국으로 확대 추진할 계획을 발표하였다.⁶⁾ 그러나 측정망 확대 추진 계획 이외에는 아직 이렇다 할 관리수단이 마련되어 있지 않아 준비가 부족한 것으로 보인다. 관리의 기본이 되는 측정망 자료의 확보, 배출량 인벤토리의 구축 등 관리 인프라도 미흡한 상태이고, 관리 대상 및 관리 수단도 모호한 상태이다. 2015년부터 대기환경기준이 시행되는 일정을 감안하면 지금이라도 적극적인 준비가 필요한 상황이다.

$PM_{2.5}$ 의 체계적인 관리를 위해서는 $PM_{2.5}$ 오염현상의 분석을 통해 그 특징을 파악하여야 함과 동시에 주요 배출원도 파악하여야 한다. 또한 관리 필요성의 근거가 되는 $PM_{2.5}$ 로 인한 사회적 피해가 어느 정도인지에 대한 분석도 필요하다.

이러한 배경 하에서 본 연구는 $PM_{2.5}$ 오염 현상의 특징에 대한 분석과 $PM_{2.5}$ 오염으로 인한 사회적 영향, 그리고 관리의 방향과 정책 과제를 도출하는 데 목적을 두고 진행하였다.

2. 연구 내용

본 연구의 목적은 우리나라 $PM_{2.5}$ 오염 현상의 특징에 대한 분석과 $PM_{2.5}$ 오염으로 인한 사회적 영향, 그리고 관리의 방향과 정책 과제를 도출하는 데 있다. 이를 위해 기존의 문헌을 조사하였고, $PM_{2.5}$ 측정 자료는 서울에 설치된 측정소(은평구 불광동, 서울특별시 보건환경연구원)의 데이터를 사용하였는데 이는 통계적으로 유효한 결과를 줄 수 있을 만큼의 데이터가 있기 때문이다.

2장에서는 $PM_{2.5}$ 의 물리화학적 특성과 시계열 분석을 다루었는데, 이는 $PM_{2.5}$ 의 조성과 조성 상호간의 상관관계 분석을 통해 어떤 성분의 관리가 효과적인지를

6) 환경부(2011), 「인체 위해성이 높은 초미세먼지 관리 본격화」.

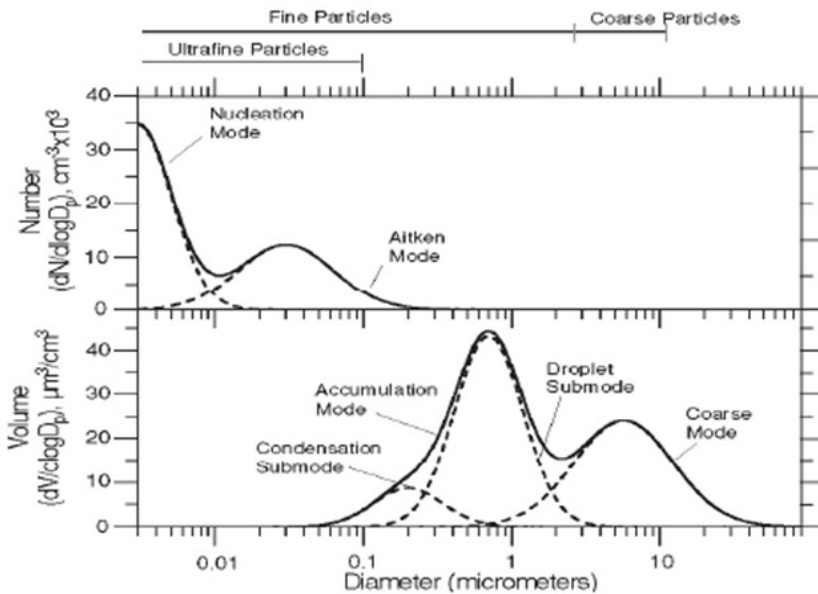
살펴보기 위한 것이다. 3장에서는 PM_{2.5}로 인한 건강영향과 건강편익을 산정하였는데, 공간적인 범위는 서울시이며 대상은 사망자 수이다. 4장에서는 PM_{2.5}의 배출량을 추정하고 외국의 관리정책을 조사하였으며, 사업장 중심의 정책과제를 제시하였다. 주요 배출원의 파악은 관리정책의 방향을 결정하는 데 있어 중요한 요소이지만 우리나라는 아직 배출량 인벤토리가 구축되어 있지 않아 본 연구에서 별도로 진행하였고, 2차 입자 생성에 대한 연구가 매우 부족한 현실을 감안하여 본 연구에서는 구체적인 삭감 수단을 제시하지는 않고 정부가 추진할 필요가 있는 정책과제를 도출하는 데 중점을 두었다. 그리고 5장에서는 연구결과를 요약하여 제시하였다.

제2장 · PM_{2.5}의 물리·화학적 특성과 시계열 분석 I

1. PM_{2.5}의 물리·화학적 특성과 생성기전(mechanism)

가. 입경에 따른 먼지의 성분

일반적으로 먼지는 그 크기(주로 입자의 지름) 즉, 입경 분포에 따라 크게 3가지로 구분한다.



자료: U.S. EPA(2009), Integrated Science Assessment for Particulate Matter

〈그림 2-1〉 입자 크기별 분류 및 특성

먼저, 지름이 2.5 μm 이상인 입자를 조대입자(coarse particles)라고 하는데 주로 고체의 파쇄과정에서 생성되며 더 작은 입자로 변하기 위해서는 에너지 투입이

필요하다. 도로 재비산 먼지나 산업 활동에서 발생하는 먼지, 또는 꽃가루나 박테리아와 같은 생물성 입자가 전형적으로 여기에 해당되며, 농업생산, 비포장 도로, 나대지, 교통수단 등도 조대입자의 생성에 관여한다. 또한 해안가에서는 해염(sea salt)도 구성 입자가 되며, 연료 연소 시 발생하는 비산재(fly ash)도 조대입자를 구성한다.

지름이 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 입자는 미세입자(fine particles)라고 하는데, 기체상(gas phase) 물질로부터 형성되는 비율이 높지만 조대입자와 마찬가지로 연료의 연소 시에도 생성된다. 사실 PM_{2.5}는 화학반응이나 증기압이 낮은 물질의 핵화(nucleation)·응축(condensation)으로 생성되는 미세입자(fine particles)가 응결(coagulation) 또는 기존의 먼지 표면에 기체나 증기분자가 응축·성장하여 만들어지는 비중이 높다. 응결이나 응축은 입자의 수와 입자 표면적과 직접 관련이 있어서 어느 정도 크기가 되면 더 이상 입자가 성장하지는 않는데 최고 크기는 $1\ \mu\text{m}$ 정도로 알려져 있다.

$1\ \mu\text{m}$ 미만의 입자는 고온 연소과정에서 증기화(vaporization)한 금속이나 유기화합물의 응축에 의해서도 생성이 되며, 증기압이 낮은 물질의 대기 중 반응으로 형성된 기체의 응축에 의해서도 생성된다. 대표적인 전구물질로는 SO₂, NO_x, NH₃, VOCs가 있다. 따라서 전구물질의 대기 중 농도 변화는 먼지의 농도에도 영향을 미치게 되며, 이러한 기체 물질의 반응에 의해 형성되는 입자를 2차 입자(secondary particles)라고 한다. $1\ \mu\text{m}$ 미만의 입자는 주로 nitrate, sulfate, ammonium, EC(elemental carbon), 수많은 유기화합물과 약간의 금속성분으로 구성되어 있다. 그리고 생물성 연소 입자의 크기는 대부분 $1\ \mu\text{m}$ 미만이며 대체로 $0.15 \sim 0.41\ \mu\text{m}$ 의 크기를 보인다(Hueglin C et al., 1997).

유럽의 경우 황산염(sulfate)과 유기물(organic matter)이 먼지입자를 구성하는 두 가지 주요 성분이었고 PM₁₀의 농도가 $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 날에는 질산염(nitrate)이 주된 성분이라고 보고되었다(Putaud JP et al., 2003). 미국에서는 PM₁₀의 농도 중 40~90%가 PM_{2.5}인데, 동부지역에서는 황산염(20~50%)이, 서부지역인 캘리포니아는 질산염(25% 이상)이 주요 구성 성분이었다. 반면 미국의 Mexico

city에서는 블랙카본과 황산염이 주성분을 이룬 반면 질산염의 비중은 낮다 (McMurry PH et al., 2004). 이와 같이 PM_{2.5}의 조성은 지역마다 다르기 때문에 우리나라에 적합한 저감 전략 수립을 위해서는 우리나라의 조성 분석이 필요함을 알 수 있다.⁷⁾

입자의 성분과 질량 자료를 분석하면 배출원을 파악할 수 있다. 일반적으로 선진국에서는 PM_{2.5}의 2/3 이상이 인간 활동에 기인하는 것으로 간주하고 있는데, 화석 연료의 연소와 biomass burning(산불, 농산물 잔재 소각, 가정에서의 목재 소각 등), 그리고 농업활동에서 배출되는 암모니아 배출이 주된 배출원으로 여겨진다. 산업보일러, 벽난로, 가솔린 자동차, 경유차, 고기 조리(meat cooking)에서는 주로 1.1 ~ 0.2 μm 의 아주 작은 입자를 배출하며, 경유 차량의 먼지는 거의 순수 탄소이며 0.1 μm 정도의 크기를 갖는다. Chow의 연구에 따르면 미국 캘리포니아 San Joaquin 지역의 6개 도시의 PM_{2.5}는 황산암모늄과 질산암모늄, 자동차 배가스가 50 ~ 70 % 정도 차지한다고 하였고(질량기준), Andrade 등은 브라질 San Paolo의 PM_{2.5} 조성의 41 %와 28 %가 경유와 잔사유(residual oil) 연소, 그리고 재비산하는 토양먼지라고 보고하였다(Andrade F, Orsini C, Maenhaut W, 1993). 한편 유럽을 대상으로 한 Querol의 연구에서는 도시지역은 탄소성분의 에어로졸과 2차 물질이 PM_{2.5}의 주성분이지만 도로변에서는 재비산 먼지가 주된 성분이라고 하였다.

7) 우리나라에서도 지역마다 PM_{2.5} 조성성분이 차이가 남을 보여주는 분석결과가 있다.

나. PM_{2.5}의 물리·화학적 특성과 독성

먼지의 독성은 먼지를 구성하고 있는 화학물질 성분 이외에도 크기, 농도, 입자의 수(number) 등이 독립적으로 또는 복합적으로 연관되어 나타난다.

1) 먼지의 크기

일반적으로 입자의 크기와 화학성분이 완전히 독립된 것이 아니기 때문에 입자의 크기와 독성의 관계를 명확히 하는 것은 어렵지만, PM_{2.5}와 같이 크기가 매우 작은 입자는 크기 자체가 화학조성보다 더 독성의 원인이 되는 것으로 간주된다. 즉 동일한 질량농도와 화학조성의 조건에서 PM_{2.5}는 PM₁₀보다 더 유해한데, 그 이유는 동일한 질량농도라면 PM_{2.5}가 입자의 수가 훨씬 많고 표면적도 넓어서 유해물질을 더 많이 흡착할 수 있기 때문이다. 또한 작은 입자일수록 기관지로부터 다른 기관으로의 이동이 용이한 것도 원인으로 간주된다.

2) 먼지의 조성

먼지의 화학적 성분이 인체에 유해한 영향을 미친다는 사실은 많은 연구에서 밝혀진 바 있다. 주요한 성분에 대하여 이제까지 밝혀진 유해성을 정리하면 다음과 같다.

가) 유기 탄소(OC, organic carbon) 및 원소 탄소(EC, elemental carbon)

연소과정에서 발생하는 먼지는 유기 탄소나 원소 탄소를 포함하고 있으며 독성과 관련이 있다. 동맥혈관 크기의 변화, 심장박동수의 변화, 지질의 산화 등이 탄소 성분에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있는데, 가장 연구가 많이 진행된 부분은 디젤입자(diesel exhaust particles, DEP)에 관한 것이다. WHO는 2012년 디젤입자를 폐 발암 물질로 분류하였는데, 방광암의 위험도 증가시킬 수 있음을 경고하고 있다.

물에 용해되지 않는 성분 등은 생체 내에서 축적되는 가능성이 있고 장기간에

걸쳐 누적이 되면 건강에 큰 영향을 줄 수가 있다. Kreyling WG, Scheuch G(2000)의 실험은 비수용성 입자들의 1/3이 폐에 남아 있음을 보여 주었고, 이는 저 농도 환경에서도 탄소(carbon black)에 장기간 노출되면 폐의 흑화(blacken)를 초래할 수도 있음을 의미한다.

나) 전이금속⁸⁾과 금속 화합물

전이금속이 건강에 부정적인 영향을 미치는 원인은 전이금속이 가지는 산화력에 기인한다. 즉, 용해성 전이금속은 반응과정에서 전자를 전달하거나 산화환원반응을 통해 자유 라디칼(free radical)을 생산하여 세포를 산화시키는 역할을 하게 된다. 하지만 아직 모든 금속이 동일한 독성을 가지는지 또는 상대적 독성이 어떠한지는 불분명하며 전이 금속의 물성 중 하나인 용해도가 중요한 요소인 것으로 간주된다.

다) 황산염과 질산염(2차 생성물질)

PM_{2.5} 중 황산염과 질산염은 인체 내에 흡수되어 강한 산성을 띠기 때문에 건강에 부정적인 영향을 미치는 것으로 간주된다. 그러나 Schlesinger RB, Cassee F(2003)의 연구와 Maciejczyk P, Chen LC(2005), 그리고 Huang SL, Hsu MK, Chan CC(2003)은 황산염이 인체에 유의할 정도의 부정적인 영향을 주지 않는다고 하였다. 이는 황산염과 질산염이 조성의 비중으로는 중요하지만 독성 측면에서는 조성 비율만큼의 역할은 하지 않는 것으로 이해된다. 이러한 결과는 황산염과 질산염이 건강 영향과 강한 관련이 있다는 역학연구와는 대조되는 것이다.

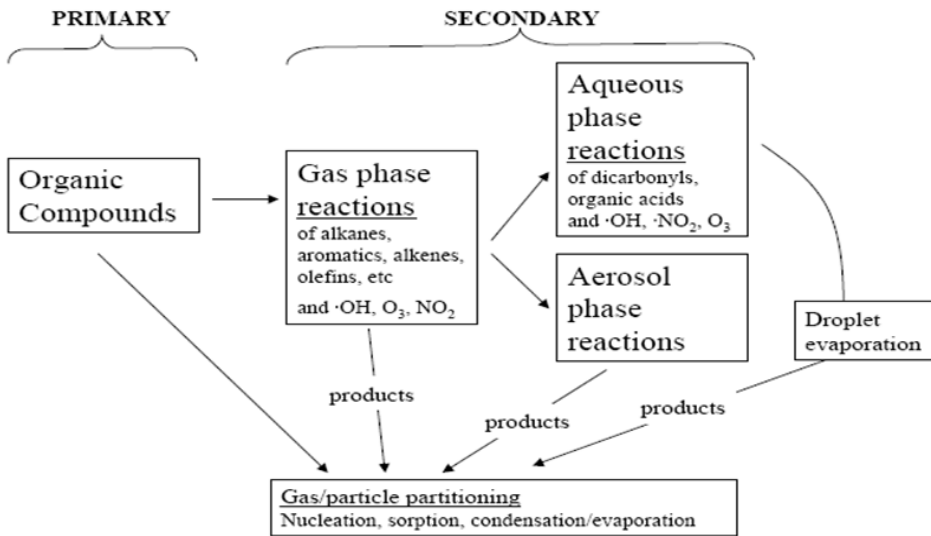
지금까지의 연구결과를 정리하면, PM_{2.5}가 건강에 부정적인 영향을 미치는 것은 분명하지만 건강에 영향을 미치는 기전이 명확하지는 않다는 것이다. 입자의 크기만 하더라도 입자 자체가 영향을 미치는 요인인지 혹은 입자가 작기 때문에 같은

8) 보통 원자번호 21인 스칸듐부터 30인 아연까지, 원자번호 39인 이트륨부터 48인 카드뮴까지, 원자번호 57인 란타넘부터 80인 수은까지의 원소들과 원자번호 89인 악티늄을 포함시킨다.

중량농도에서 입자 수가 많기 때문인지 아니면 표면적이 커서 보다 많은 화학물질을 흡착할 수 있기 때문인지도 불분명하다. 다만 독성의 관점에서 보면 화석연료의 연소(도시의 경우 자동차 배출가스)에서 발생하는 먼지가 중요하다는 사실은 여러 연구에서 밝혀지고 있다. 화석연료 연소 시 발생하는 먼지는 OC와 금속 성분을 많이 포함하고 있고 입자의 수가 많으며(동일한 중량 농도에서) 표면적도 큰 특성이 있기 때문이다.

다. PM_{2.5}의 생성기전 및 발생원

미국 국가 대기질 기준(National Ambient Air Quality Standard, NAAQS)에서는 먼지를 1차 생성 입자와 2차 생성 입자로 구분하고 있다. 먼저 1차 생성 입자는 다시 여과성 먼지와 응축성 입자로 구분한다(그림 2-2 참조). 여과성 입자(PM filterable)는 배출원에서 고체나 액체 형태 배출되는 입자를 의미하고 대부분 PM_{2.5}와 PM₁₀의 입경 범위 내에 존재한다. 반면 응축성 입자(PM condensable)는 대기 중에 기체 상태로 배출되나, 배출 후 즉시 고체 또는 액체성 입자로 변환되는 입자를 의미하고 보통 PM_{2.5} 또는 그보다 크기가 작은 입자의 형태로 배출되는 특성을 보인다. 2차 생성입자는 고체상 먼지 외 공기 중의 산소, 오존, 수증기, 각종 라디칼(hydroxyl, nitrate 등)과 같은 전구물질과 대기 중에서 화학반응을 통해 형성되는 먼지를 의미한다.



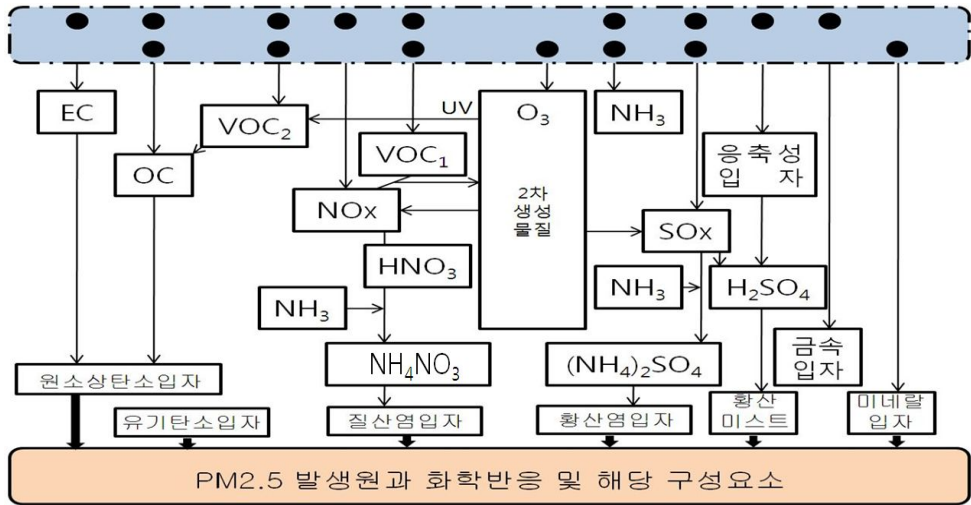
자료: U.S. EPA(2009), Integrated Science Assessment for Particulate Matter

〈그림 2-2〉 먼지의 발생과 구조

PM_{2.5}의 형성과 관련된 대표적인 물질로는 원소 탄소(EC), 유기 탄소(OC), 질소산화물(NO_x), 고비점 휘발성유기화합물(VOC₂), 저비점 휘발성유기화합물(VOC₁), 오존(O₃), 암모니아(NH₃), 황산화물(SO_x), 응축성 입자, 금속입자, 미네랄 입자를 들 수 있다. 각각의 주요발생원은 다음과 같다(Wakamatsu Shinji, 2010).

- EC: 불완전연소과정에서 발생, 자동차 배기가스
- OC: 자동차 배기가스, 바이오매스 연소(삼림화재, 화전)
- NO_x: 연소과정
- VOC₁: 도장용제, 식물
- VOC₂: 공업, 식물
- NH₃: 농업, 축산, 생활관련
- SO_x: 화석연료의 연소

- 금속입자: 산업공정(금속정련, 석유정제, 석유화학, 첨가제 제조 등)
- 미네랄입자: 토양기원(황사 등) 등



자료: Wakamatsu Shinji(2010)에서 재구성

〈그림 2-3〉 PM_{2.5}의 생성 기전

2. 일반대기오염물질과 기상인자의 시계열 분석 및 상관관계 분석

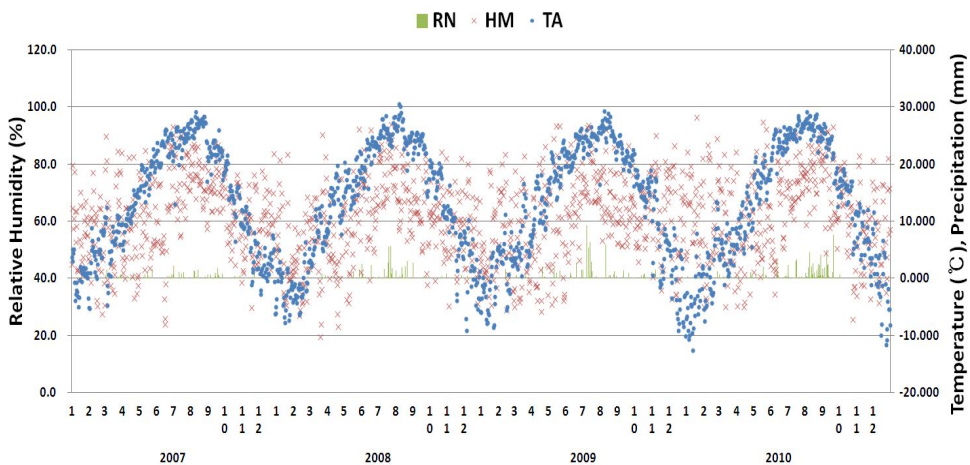
앞서 설명한 바와 같이 PM_{2.5}는 SO_x, NO_x와 같은 특정 화학물질이 아니라 다양한 크기 및 성분, 모양을 가진 입자의 혼합체(mixture)로서 다양한 물리·화학적 특성을 가지고 있다. 또한 PM_{2.5}의 생성기전에서 보았듯이 다양한 입자상·가스상 물질로 구성(원소 탄소(EC), 유기성 탄소(OC), 질소산화물(NO_x), 고비점 휘발성유기화합물(VOC₂), 저비점 휘발성유기화합물(VOC₁), 오존(O₃), 암모니아(NH₃), 황산화물(SO_x), 응축성 입자, 금속입자, 미네랄 입자 등)되어 있기 때문에 대기 중 SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀ 등과 같은 일반대기오염물질의 대기 중 농도 분포 특성을 살펴보는 것 또한 중요하다.

일반대기오염물질의 농도분포를 살펴보기 위해 국립환경과학원 및 서울특별시 보건환경연구원으로부터 제공받은 불광동 측정소 자료⁹⁾를 이용하였으며, 일반대기 오염물질과 기상인자 간의 영향을 살펴보기 위해 불광동 AWS 자료(지점 번호: 416)를 활용하였다. 습도 자료의 경우 불광동 지점에서 이루어지지 않아 근접한 종로구(지점 번호: 108번) 지점의 자료를 활용하였다.

가. 기상현황

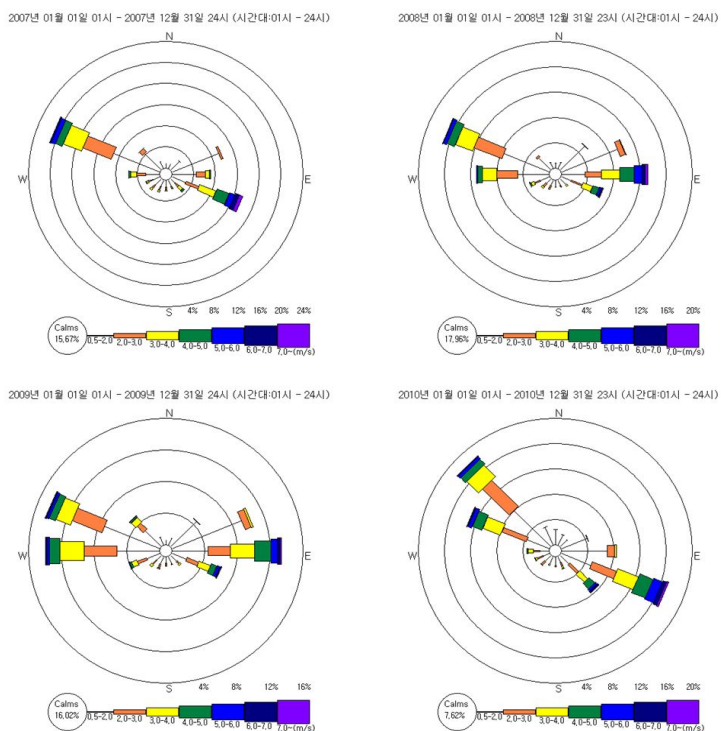
2007년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 서울특별시 은평구 불광동 측정소에서 관측된 기상현황은 <그림 2-4> 및 <그림 2-5>와 같다.

총 4년 동안의 총 강수량은 5,605 mm로 여름철 장마기간에 강우가 집중되었고, 여름철을 기점으로 기온과 습도가 최대 피크를 나타낸 후 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 풍향의 경우 우리나라의 지리적 특성상 서풍의 영향을 받아 주 풍향이 서풍계열임을 확인할 수 있었고 지형의 특성상 동풍계열의 바람이 불광동 지점에 영향을 끼침을 확인할 수 있었다.



<그림 2-4> 기온, 상대습도, 강수량의 변화(서울, 2007.1.1~2010.12.31)

9) PM_{2.5} 데이터는 서울특별시 보건환경연구원으로부터 제공 받았으며, PM_{2.5}를 제외한 일반대기오염물질(NO_x, SO_x, CO, O₃, PM₁₀)은 국립환경과학원으로부터 제공 받아 활용하였다.



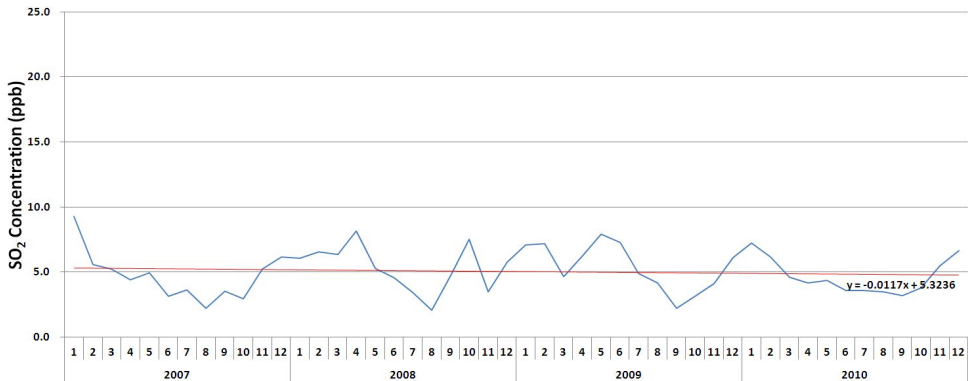
〈그림 2-5〉 풍향 및 풍속 변화(서울, 2007.1.1~2010.12.31)

나. 일반대기오염물질의 시계열 분석

1) 이산화황(SO₂)

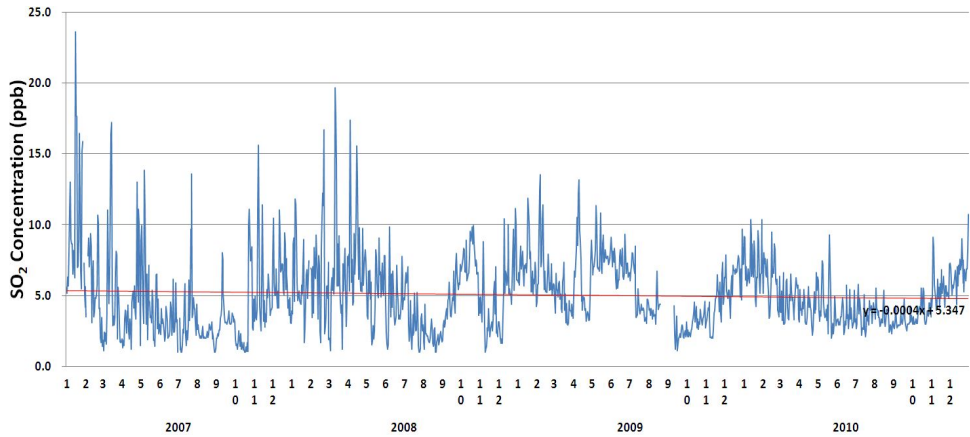
이산화황은 물에 대단히 잘 녹는 무색의 자극성이 있는 불연성 가스로 황산화물(SO_x) 중에서 가장 많은 양을 차지하고 있으며, 대기 중에서 산화된 후에는 수분(H₂O)과 결합하여 쉽게 황산(H₂SO₄)으로 변화하는 특성을 가지고 있다. 주로 황을 함유하고 있는 연료(주로 석탄과 석유)의 연소, 금속 제련공정, 기타 산업공정 등에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 이산화황은 시정장애를 일으키는 미세먼지(PM₁₀) 및 초미세먼지(PM_{2.5})의 주요 원인물질로 알려져 있다(국립환경과학원, 2011).

<그림 2-6>은 2007년부터 2010년까지 SO₂의 월별 시계열 분석 결과로서 여름철과 초가을에는 농도가 낮고, 겨울철에는 상대적으로 농도가 높은 패턴을 보이고 있다. 이는 겨울철이 낮은 기온으로 인해 대기 혼합고가 낮아지고 난방연료 등의 소비 증가로 대기 중 아황산가스 오염도가 상승한 반면 여름철에는 대기혼합고가 높아 대기의 확산이 활발히 진행되고 또 난방 수요 등의 감소, 강수 등의 영향에 의해 아황산가스의 농도가 더욱 감소된 것으로 판단된다. 한편 SO₂의 월별 오염도 수준은 꾸준히 감소하는 경향을 나타내었고, 대기환경기준 연간평균치인 0.02 ppm을 초과하는 월수는 없는 것으로 확인되었다.



<그림 2-6> SO₂의 월평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

<그림 2-7>은 같은 기간 SO₂의 일별 시계열 분석 결과로서 월별결과와 유사한 패턴을 보이고 있으며, 대기환경기준 24시간 평균치인 0.05 ppm을 초과하는 일수는 없는 것으로 나타났다.



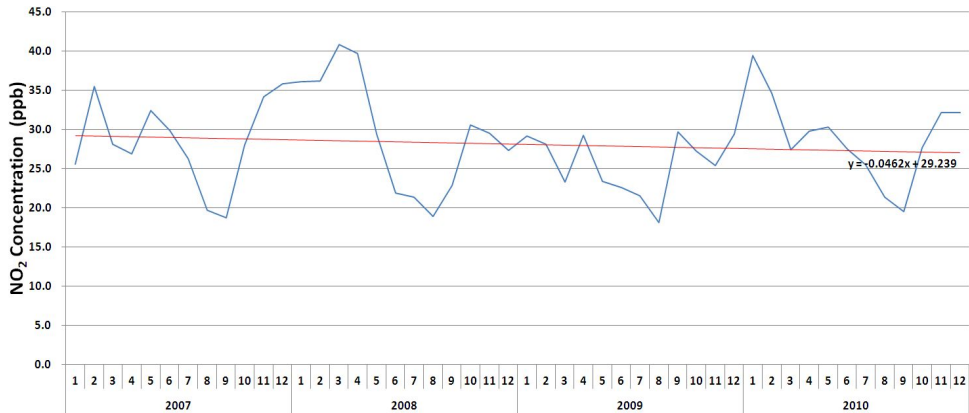
〈그림 2-7〉 SO₂의 일평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

2) 이산화질소(NO₂)

NO₂는 적갈색의 반응성이 큰 기체로서, 대기 중에서 일산화질소(NO)의 산화에 의해서 발생한다. 대기 중 휘발성유기화합물(VOCs)과 반응할 경우에는 오존을 생성하는 전구물질의 역할을 한다. 질소산화물의 발생원은 자연적 발생원으로 토양과 수중 미생물의 작용, 번개 등이 있으며, 인위적 발생원으로 자동차, 발전소, 보일러, 소각 등과 같은 고온 연소공정과 화학물질 제조공정 등이 있다. 이 중 90% 이상이 NO의 형태로 대기 중에 배출되고 이렇게 배출된 NO가 대기 중에서 산화되어 NO₂로 생성된다(국립환경과학원, 2011).

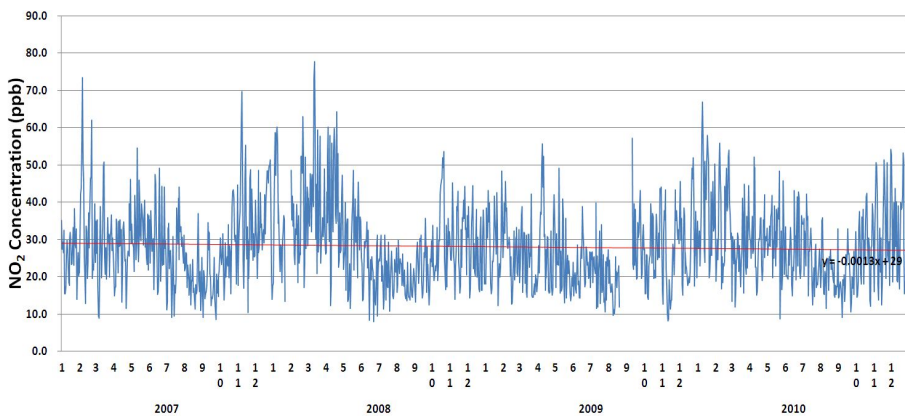
〈그림 2-8〉은 2007년부터 2010년까지 NO₂ 월별 시계열 분석 결과로서 SO₂의 월별 변화경향(동고하저)과 유사한 패턴을 보임을 확인할 수 있다. NO₂의 대부분은 연료의 연소에 의해 배출되는 NO가 공기 중에서 산화되어 생성되는 물질로 여름철의 경우 연료의 사용량이 적고 잦은 강우에 의한 세정으로 대기 중 농도가 낮고 겨울철에는 연료 사용량의 증가 등으로 다시 높아지는 경향을 확인할 수 있다. NO₂의 월별 오염도 수준은 꾸준히 감소하는 경향을 나타내었으나 대기환경기준 연간평

균치인 0.03 ppm을 초과하는 월수는 총 48개월 중 14개월로 확인되었다.



〈그림 2-8〉 NO₂의 월평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

〈그림 2-9〉는 동일한 기간의 일별 시계열 분석 결과로서 SO₂의 일별 시계열 분석결과와 유사한 패턴을 보인다. 또한 NO₂의 대기환경기준 24시간 평균치인 0.06 ppm을 초과하는 일수는 총 1,462일 중 11일이었다.

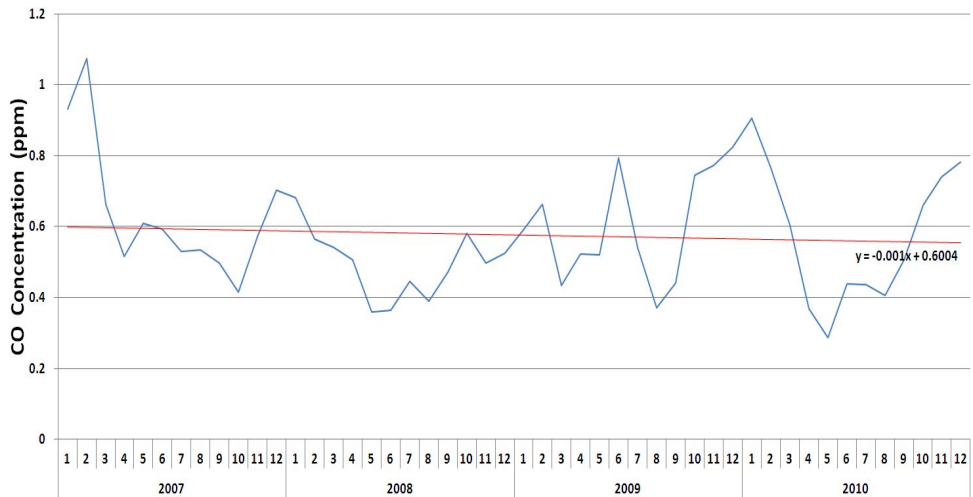


〈그림 2-9〉 NO₂의 일평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

3) 일산화탄소(CO)

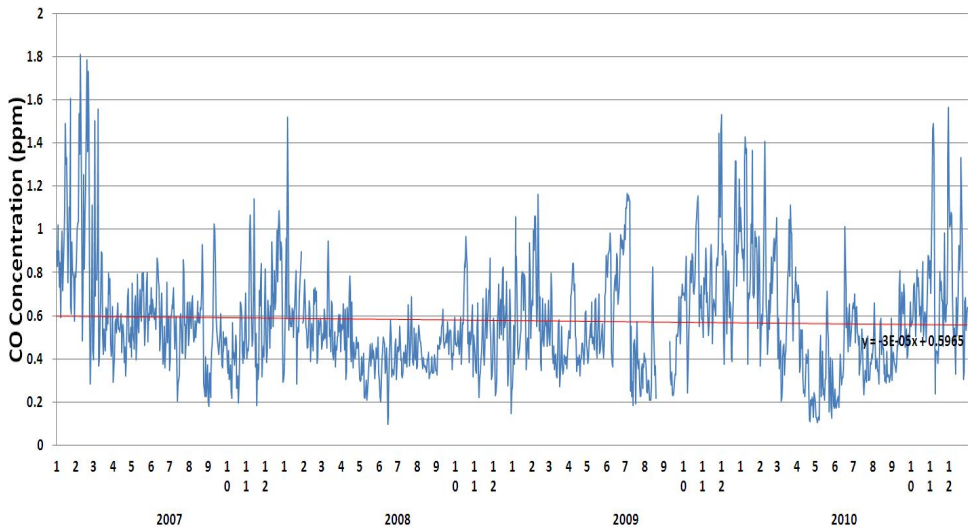
CO는 무색, 무취의 유독성 가스로서 연료 속 탄소성분이 불완전 연소되었을 때 발생한다. 일산화탄소의 자연적 발생원으로는 화산폭발, 테르펜류의 산화, 클로르 필의 분해, 산불 및 해수 중에서 미생물의 작용, 메탄의 광산화, 이산화탄소의 광분해 등을 들 수 있으며, 인위적 발생원으로는 수송부문, 폐기물 소각, 발전 및 산업공정 등이 있고 실내 발생원으로는 주방, 담배연기, 지역난방 등이 있다(국립환경과학원, 2011).

<그림 2-10>은 2007년부터 2010년까지 CO 월별 시계열 분석 결과로서 SO₂와 유사한 변화경향(동고하저)을 보임을 확인할 수 있다. 이는 일산화탄소가 난용성 기체로 하절기 강수에 의한 오염도 감소보다 동절기 연료사용량의 증가에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다. 또한 월별 오염도 수준은 꾸준히 감소하는 경향을 보이며 대기환경기준 8시간 평균치인 9ppm을 초과하는 경우는 없는 것으로 확인되었다.



<그림 2-10> CO의 월평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

<그림 2-11>은 동일기간 일별 시계열 분석결과로서 이 역시 SO₂와 비슷한 패턴임을 알 수 있다. 그리고 대기환경기준 8시간평균치인 9 ppm을 초과하는 일수는 없는 것으로 확인되었다.

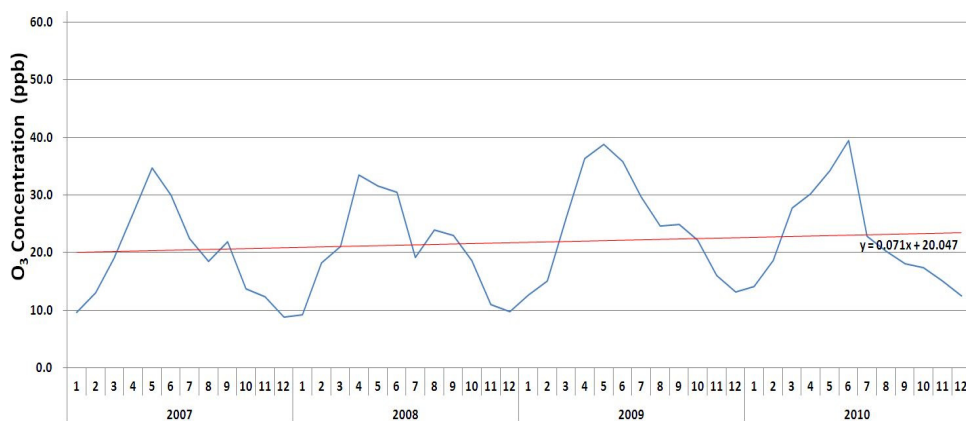


<그림 2-11> CO의 일평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

4) 오존(O₃)

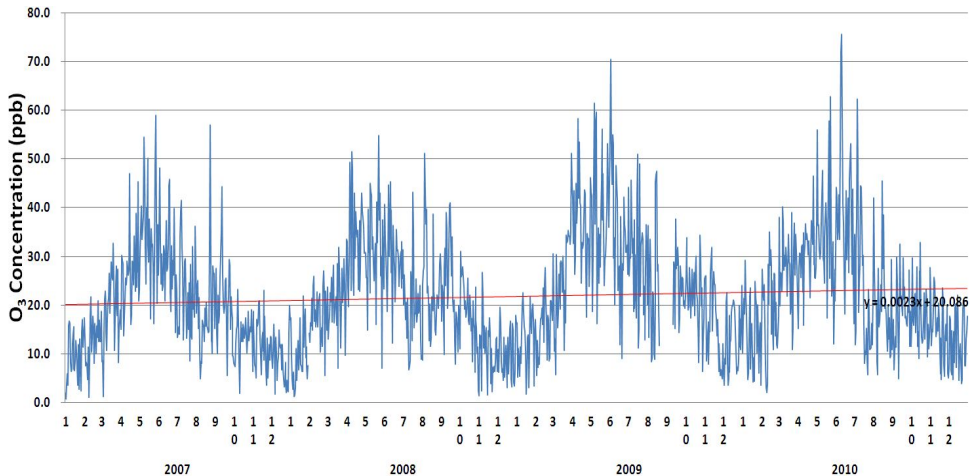
O₃은 대기 중에 배출된 질소산화물(NO_x)과 휘발성유기화합물(VOCs) 등이 자외선과 광화학 반응을 일으켜 생성된 PAN, 알데하이드, Acrolein 등의 광화학 옥시던트(oxidant)의 일종으로 2차 오염물질에 속한다. 전구물질인 휘발성유기화합물은 자동차, 화학공장, 정유공장과 같은 산업시설과 자연적 생성 등 다양한 배출원에서 발생한다. 또한 고농도 오존은 하절기 강한 일사량과 낮은 풍속, 고온 등의 기상조건 하에서 발생하는데 맑은 날보다는 일사량이 크면서 시정거리가 나쁜 날, 온도가 높고 상공으로 역전층이 생겨 수직으로 대기가 확산하기 어려운 날, 바람이 약해 수평적으로 혼합이 적은 날에 발생빈도가 높다(경기도보건환경연구원, 2010).

<그림 2-12>는 2007년부터 2010년까지 O₃의 월별 시계열 분석을 실시한 결과로서 주로 일사량과 기온이 높아지는 봄철부터 점차 증가하다가 5월 ~ 6월 사이에 최고치를 나타낸 후 감소하기 시작하여 11월 ~ 2월 사이에 최소치를 보이고 있다. 이는 오존의 생성이 광화학반응에 의해 이루어지 때문에 추운 겨울철보다는 상대적으로 여름철이 일사량과 기온이 높아 광화학반응이 이루어지기 위한 적절한 조건이 형성되었기 때문이고 7월 ~ 8월이 5월 ~ 6월보다 기온이 높은데도 불구하고 월평균 농도가 더 낮은 이유는 장마, 태풍 등 강수에 의한 영향으로 오존 형성이 감소한 것으로 판단된다. 그리고 대기환경기준 8시간평균치인 0.06 ppm을 초과하는 월수는 없는 것으로 확인되었지만, 월별 오염도 수준은 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있어 향후 보다 자세한 원인 분석 및 대책이 필요하다.



<그림 2-12> O₃의 월평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

<그림 2-13>은 동일기간 일별 시계열 분석을 실시한 결과로서 월별 시계열 분석 결과와 유사한 패턴을 보임을 확인할 수 있었다. 그리고 대기환경기준 8시간평균치인 0.06 ppm을 초과하는 일수는 총 1,462일 중 6일인 것으로 나타났다.



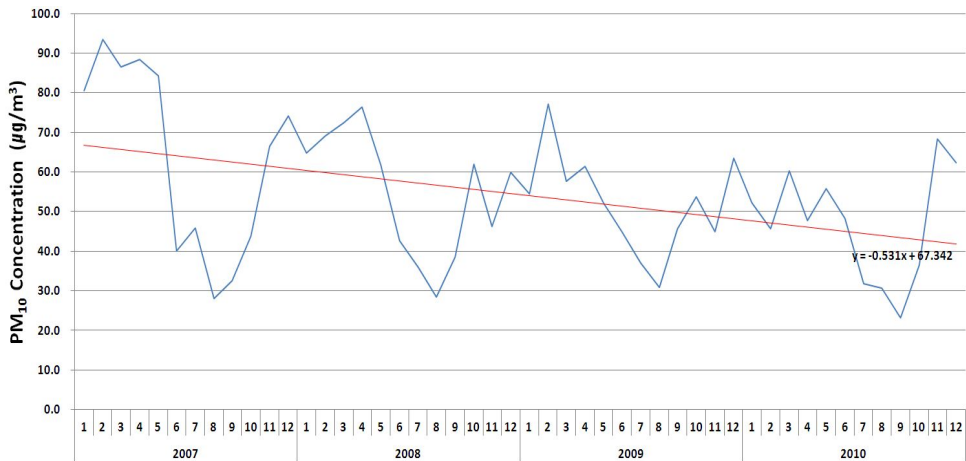
〈그림 2-13〉 O₃의 일평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

5) 미세먼지(PM₁₀)

PM₁₀은 공기역학적경이 10 μm 이하인 고체·액체상태 입자의 혼합물을 말한다. 대기 중 PM₁₀은 황사나 토양의 비산, 해염입자 등과 같은 자연현상과 석유, 석탄 등의 화석연료 연소, 토석이나 광물의 기계적 처리(파쇄, 선별, 가공 등), 자동차 배출가스 및 주행에 따른 먼지 비산 등 다양한 요인에 의해 발생 또는 이산화황이나 질소산화물과 같은 기체 상 물질에 의해 2차적으로 생성되기도 한다(국립환경과학원, 2011).

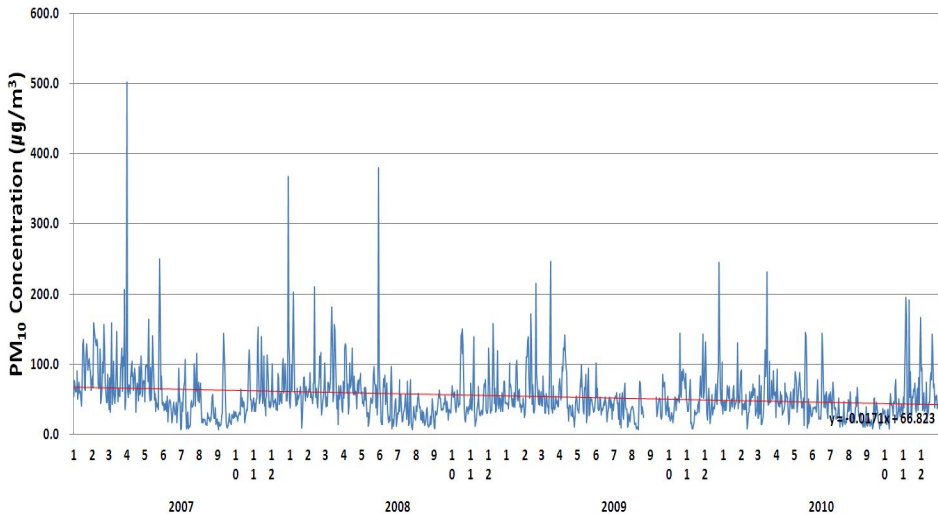
<그림 2-14>는 2007년부터 2010년까지 PM₁₀의 월별 시계열 분석을 실시한 결과로서 SO₂의 월별 변화경향과 거의 유사한 패턴을 보인다. 여름철의 경우 대기 혼합고가 높아 대기확산이 잘 일어나고 강우량과 강우빈도의 집중에 따른 영향으로 대기 중 PM₁₀의 확산 및 세정효과에 의해 다른 계절보다 PM₁₀ 농도가 낮게 나타났고 부분적으로 늦은 봄과 이른 봄, 늦은 가을 또는 이른 겨울 사이에 고농도 PM₁₀ 현상이 발생하였는데, 이는 황사 영향이 크게 기여한 것으로 판단된다. 그리고 겨울

철의 경우 난방 등 수요의 증가로 PM₁₀ 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. PM₁₀의 월별 오염도 수준은 꾸준히 감소하는 경향을 나타내었으나 대기환경기준 연간평균치인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 총 48개월 중 27개월을 초과하는 것으로 확인되었다.



〈그림 2-14〉 PM₁₀의 월평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

〈그림 2-15〉는 동일 기간 동안 일별 시계열 분석 결과로서 SO₂의 월별 시계열 분석결과와 유사한 패턴을 보였으며, 마찬가지로 대기환경기준 24시간 평균치인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 일수는 총 1,462일 중 129일로 확인되었다.



〈그림 2-15〉 PM₁₀의 일평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

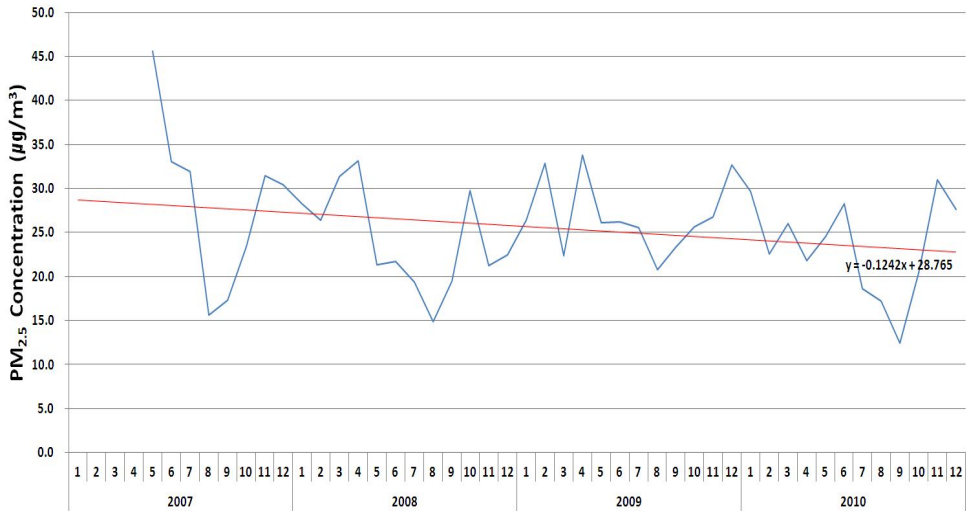
6) 초미세먼지(PM_{2.5})

PM_{2.5}는 공기의 질과 가시거리 등에 직접적인 영향을 미친다. 또한 조대 입자와 비교했을 때 PAHs 등의 독성물질을 상대적으로 많이 포함¹⁰⁾하고 있고 크기가 작아 대기 중 체류시간이 길어 인체에 악 영향을 미친다.

〈그림 2-16〉은 2007년부터 2010년까지 PM_{2.5}의 월별 시계열 분석 결과로서 PM₁₀의 월별 변화경향과 거의 유사한 패턴을 보인다. 여름철에는 대기 혼합고가 높아 확산이 잘 일어나고 강우량과 강우빈도의 집중에 의한 세정효과에 의해 다른 계절보다 PM_{2.5} 농도가 낮게 나타났다. 부분적으로 늦은 봄과 이른 봄, 늦은 가을 또는 이른 겨울 사이에 고농도 PM_{2.5} 현상이 발생하였는데 이는 황사 영향이 크게 기여한 것으로 판단된다. 그리고 겨울철의 경우 난방 등 수요의 증가로 PM_{2.5} 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. PM_{2.5}의 월별 오염도 수준은 꾸준히 감소하는 경향을 보이지만 대기환경기준 연간평균치인 25 µg/m³ 초과 개월 수가 총 44개월 중 24개월로

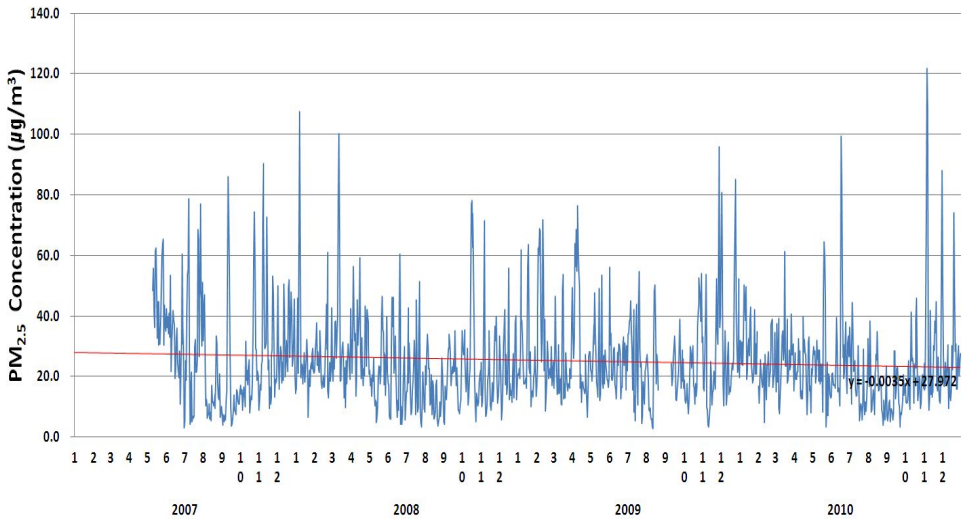
10) PM_{2.5} 중 PAHs는 TSP 대비 80~120 % 포함되어 있다고 보고되고 있다(국립환경과학원, 2005)

심각한 오염 수준을 확인할 수 있었고 주요 현안 문제임을 다시 확인할 수 있었다.



〈그림 2-16〉 PM_{2.5}의 월평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

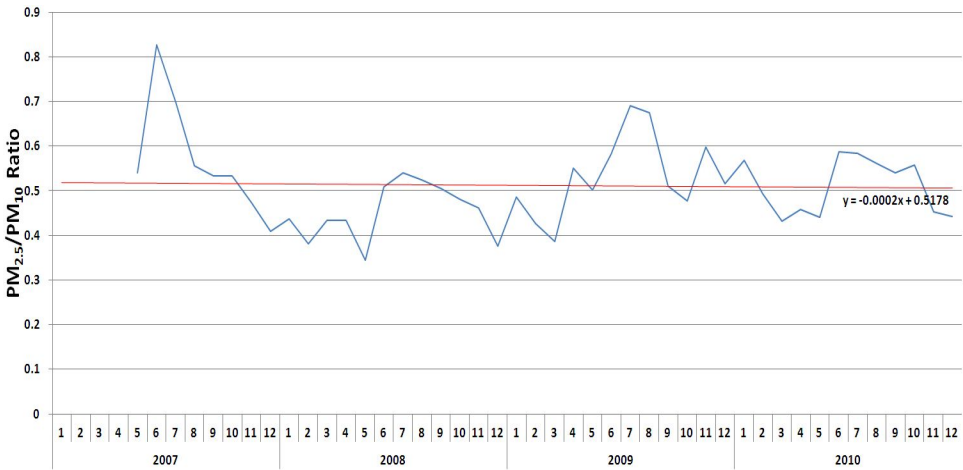
〈그림 2-17〉은 동일기간의 일별 시계열 변화를 나타내는 것으로 PM₁₀의 패턴과 유사함을 보였으며, 마찬가지로 PM_{2.5}의 대기환경기준 24시간 평균치 50 µg/m³을 초과하는 일수는 총 1,462일 중 99일(missing data 제외)인 것으로 나타났다.



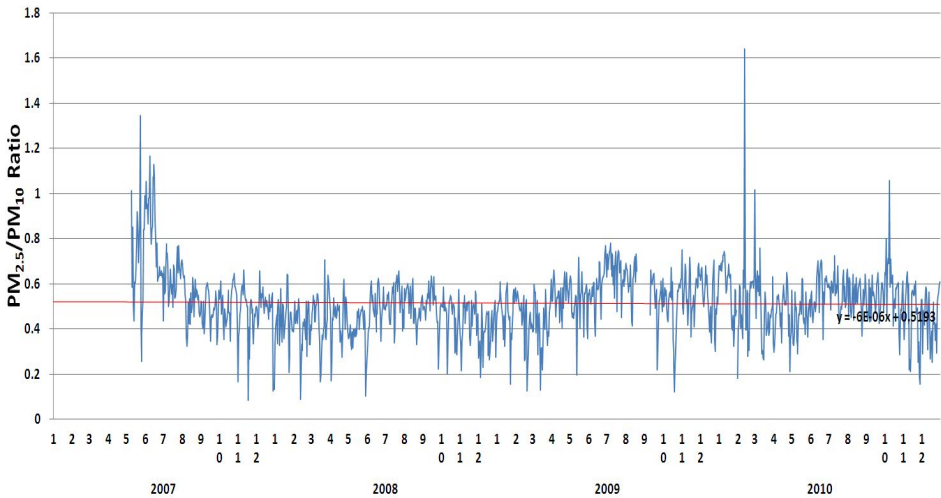
〈그림 2-17〉 PM_{2.5}의 일평균 변화 경향(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

7) PM_{2.5}/PM₁₀ 비율

〈그림 2-18〉은 2007년부터 2010년까지 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율의 월 변화로서 미세하지만 그 비율이 감소하고 있음을 알 수 있고 대체적으로 겨울철에는 비율이 낮고 여름철 특히 6~월에는 비율이 높아짐을 확인할 수 있다. 이는 여름철 장마 또는 태풍 등과 같은 강수의 영향으로 PM₁₀과 같은 큰 입자가 상대적으로 세정 및 침강이 쉬워 제거되었기 때문인 것으로 판단된다. 〈그림 2-19〉의 일별 분석결과도 이와 유사한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다.

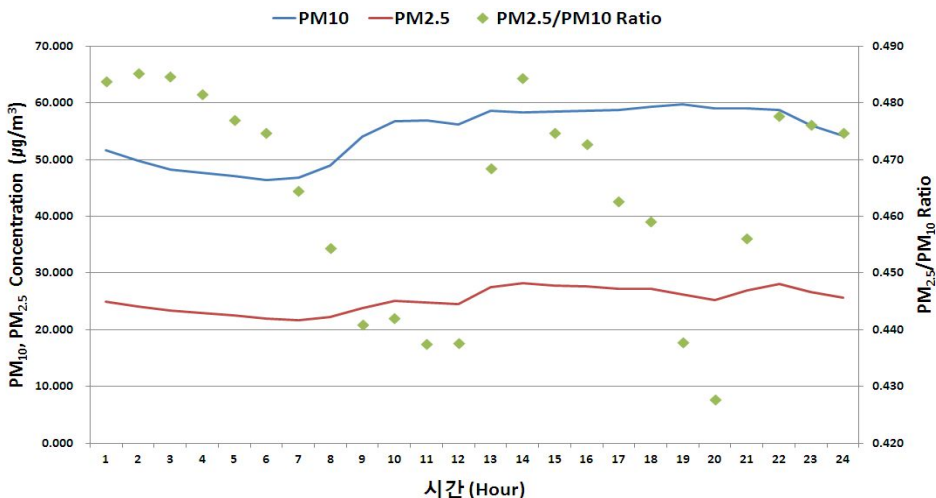


〈그림 2-18〉 PM_{2.5}/PM₁₀의 월평균 변화 경향
(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)



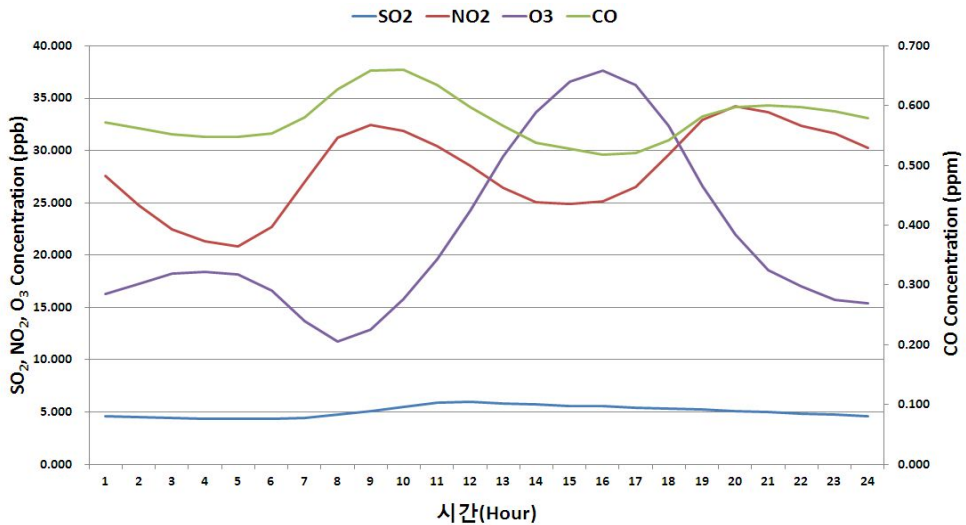
〈그림 2-19〉 PM_{2.5}/PM₁₀의 일평균 변화 경향
(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

<그림 2-20>의 시간대별 분석 결과를 보면 출근시간대부터 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율이 감소하기 시작하여 정오쯤 최소 피크를 나타낸 후 서서히 상승하여 오후 2시쯤 최대 피크를 나타내고 다시 감소하여 퇴근시간대에 다시 최소 피크를 나타낸 후 상승하는 패턴을 확인할 수 있다. 그러나 이 시간대의 PM_{2.5}나 PM₁₀의 농도는 증가 추세에 있음을 감안하면 자동차 운행으로 인한 도로 재비산 먼지로 인하여 PM₁₀의 농도가 크게 증가하였기 때문으로 판단된다. 이는 도로 재비산 먼지의 억제가 PM_{2.5} 보다는 PM₁₀의 농도 개선에는 큰 효과가 있음을 의미한다.



<그림 2-20> 먼지의 시간대별 농도 변화(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

<그림 2-21>은 같은 기간 일반오염물질의 시간대별 시계열 분석 자료이다. 오존과 질소산화물, 황산화물, 일산화탄소의 시간대별 패턴과 <그림 2-20>의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율 패턴을 보면 질소산화물의 패턴이 시간 지연(time lag)을 둔 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율 패턴과 유사하다. 이는 질소산화물이 시간을 두고 대기 중에서 반응하여 PM_{2.5} 생성에 기여한 것으로 해석되는데, 보다 자세한 관계는 다음의 절에서 나타내었다.



〈그림 2-21〉 가스상 오염물질의 시간대별 농도 변화 경향
(서울 불광동, 2007.1.1~2010.12.31)

다. 대기오염물질 및 기상인자 상호 간의 상관관계분석

위에서 PM_{2.5}의 농도는 질소산화물이나 황산화물, 오존 등의 오염물질의 농도와 관련되어 있고 강우량이나 풍속 등 기상조건과도 관련이 있음을 살펴보았다. 이를 확인하기 위하여 통계프로그램인 SPSS Windows version 11.5를 이용하여 Pearson correlation coefficients를 구하였다.

연구대상 기간은 2007년 1월 1일부터 2010년 12월 31일로 설정하였으며 시간별 데이터를 월평균 자료로 가공 후 사용하였다. 또한 일반대기오염물질로는 입자상 물질인 PM₁₀, PM_{2.5} 두 종과 기체 상 물질인 SO₂, NO₂, CO, O₃ 네 종을 선정하였으며. 기상인자로는 평균기온(TA), 상대습도(HM), 풍향(WD), 풍속(WS), 강수량(RN) 등 다섯 인자를 설정하여 상관관계를 살펴보았다.

<표 2-1>은 그 결과로써 PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관계수는 0.798로 가장 강한 양의

상관관계를 보였고, NO₂와의 상관계수는 0.637로 강한 양의 상관관계를 나타내 PM₁₀과 NO₂의 농도 증가가 PM_{2.5}의 농도 증가에 매우 밀접한 관계가 있음을 나타내는 유의미한 결과를 확인할 수 있었다. 그리고 PM_{2.5}와 SO₂, CO, 풍향과의 상관계수도 각각 0.520, 0.443, 0.409로 비교적 강한 양의 상관관계를 나타내 SO₂나 CO 등의 농도 증가가 PM_{2.5}의 농도증가와 관련이 있음을 확인할 수 있었다. 반면 PM_{2.5}의 강수와 습도에 대한 상관계수는 각각 -0.462, -0.456으로 비교적 강한 음의 상관관계를 나타냈으며 기온과는 -0.381로 음의 상관관계를 나타내었다. 이는 현재 우리나라는 PM₁₀과 유사하게 NO₂, SO₂, CO, 풍향 등이 증가할수록 PM_{2.5}의 농도 증가에 상당한 영향을 끼치는 반면 강수, 습도, 기온은 감소할수록 PM_{2.5}의 농도 증가에 상당한 영향을 미치는 것을 통계적 확인할 수 있었다.

〈표 2-1〉 월평균 자료를 바탕으로 실시한 일반대기오염물질과 기상인자의 상관관계

	Pearson Correlation	PM10	PM2.5	SO2	NO2	CO	O3	TA	WD	WS	RN	HM
PM10	Sig. (2-tailed)	1										
	N	48										
PM2.5	Pearson Correlation	0.798**	1									
	Sig. (2-tailed)	0.000	.44									
	N	44	44									
SO2	Pearson Correlation	0.597**	0.520**	1								
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	.48								
	N	48	44	48								
NO2	Pearson Correlation	0.649**	0.637**	0.478**	1							
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.001	.48							
	N	48	44	48	48							
CO	Pearson Correlation	0.461**	0.443**	0.492**	0.395**	1						
	Sig. (2-tailed)	0.001	0.003	0.000	0.005	.48						
	N	48	44	48	48	48						
O3	Pearson Correlation	-0.140	0.117	-0.116	-0.223	-0.475**	1					
	Sig. (2-tailed)	0.343	0.448	0.432	0.127	0.001	.48					
	N	48	44	48	48	48	48					
TA	Pearson Correlation	-0.642**	-0.381*	-0.607	-0.658	-0.591	0.573	1				
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	.48				
	N	48	44	48	48	48	48	48				
WD	Pearson Correlation	0.581**	0.409**	0.472**	0.612**	0.443**	-0.277	-0.801**	1			
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.006	0.001	0.000	0.002	0.057	0.000	.48			
	N	48	44	48	48	48	48	48	48			
WS	Pearson Correlation	0.358*	0.075	0.153	0.188	0.162	-0.129	-0.495**	0.568**	1		
	Sig. (2-tailed)	0.012	0.628	0.300	0.201	0.272	0.383	0.000	0.000	.48		
	N	48	44	48	48	48	48	48	48	48		
RN	Pearson Correlation	-0.576**	-0.462**	-0.383**	-0.613**	-0.366**	0.208	0.632**	-0.499**	-0.265	1	
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.002	0.007	0.000	0.010	0.156	0.000	0.000	0.069	.48	
	N	48	44	48	48	48	48	48	48	48	48	
HM	Pearson Correlation	-0.717**	-0.456**	-0.556**	-0.665**	-0.280	0.127	0.756**	-0.624**	-0.370**	0.755**	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.002	0.000	0.000	0.054	0.390	0.000	0.000	0.010	0.000	.48
	N	48	44	48	48	48	48	48	48	48	48	48

**, Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

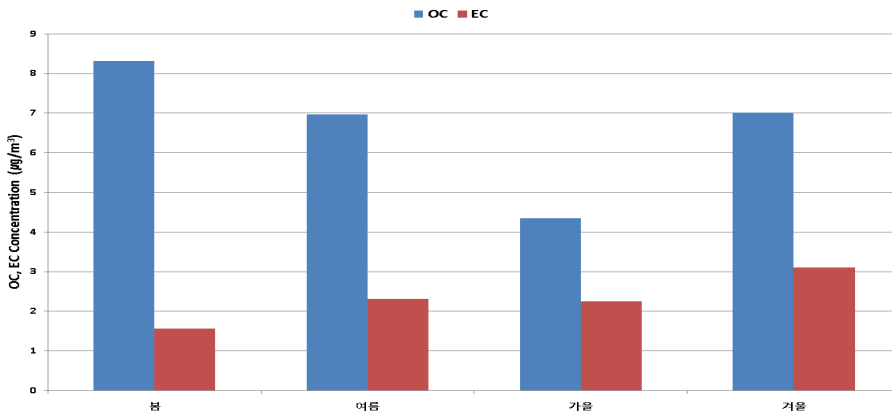
*, Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

3. PM_{2.5} 주요성분의 특성

여기에서는 PM_{2.5} 주요성분의 특성을 살펴보기 위해 2009년 국립환경과학원에서 발간한 자료(국립환경과학원, 2009b)를 참고하여 서울지역의 PM_{2.5} 주요성분 특성을 살펴보았으며 본 자료의 측정기간은 2008년 11월부터 2009년 1월까지이다.

가. 탄소성분

PM_{2.5} 성분 중 탄소성분의 평균농도는 OC 6.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, EC 2.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 총 탄소(Total carbon, TC)는 9.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. OC의 계절별 평균농도는 봄 8.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 6.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 4.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 7.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, EC의 경우 봄 1.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 2.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 2.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 3.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. OC 농도는 EC 농도보다 항상 높으며 계절별 차이가 심하고 OC/EC 비율은 봄에는 5.3배, 여름 3.0배, 가을 1.9배, 그리고 겨울은 2.3배인 것으로 나타났다. 특히 봄철에는 OC 농도가 높으면서도 EC 농도는 가장 낮은 특성을 보였다. OC의 경우 봄의 농도가 가장 높고 가을이 낮은 반면 EC는 봄이 가장 낮고 겨울이 가장 높은 것으로 나타났다.



자료: 국립환경과학원(2009b)에서 재구성

〈그림 2-22〉 OC와 EC 농도의 계절별 변화

OC가 EC보다 항상 높다는 것은 탄소 검댕과 같은 고체 상 물질보다는 자동차 배기가스나 VOCs의 관리가 중요함을 의미한다고 볼 수 있다. 그리고 화학 반응에 염의 형성보다는 응결이나 흡착 등 물리적 변화를 통한 입자의 형성이 중요하다는 사실을 보여준다. 한편 VOCs와 같은 OC 성분은 건강에 영향을 미치는 주요 성분이므로 건강 피해를 저감하기 위해서는 중요 관리 대상물질임을 보여준다.

나. 이온성분 농도

서울지역의 PM_{2.5} 구성 성분 중 이온성분이 가장 큰 조성비를 차지하는 것으로 나타났으며, 전체 평균 35.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 중 음이온성분 16.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (46.4%), 양이온성분 5.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (16.0%)로 나타났다. 또한 계절별로는 봄철 24.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름철 25.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을철 18.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울철 20.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄철과 여름철의 농도가 높고 가을철과 겨울철에는 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. 이는 OC 조성 변화 패턴과 유사하다. 따라서 OC 성분과 이온성분을 동시에 배출할 수 있는 배출원 예를 들면 화석연료 연소 등이 존재할 가능성이 크다.

봄철 음이온성분의 경우 nitrate 농도가 9.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났으며 다음으로 sulfate의 농도가 8.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 chloride 등 다른 성분보다 훨씬 높으며, 양이온성분의 경우에는 ammonium 농도가 4.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 sodium, potassium, calcium, magnesium 등 금속성분에 비하여 크게 높게 나타났다.

여름철 음이온성분의 경우 봄철과 다르게 sulfate의 농도가 12.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났으며 다음으로 nitrate 농도가 6.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 봄철 경우와 순서는 바뀌었지만 sulfate와 nitrate 성분이 주된 조성을 이루고 있다는 사실은 변함이 없음을 확인할 수 있다. 또한 양이온성분의 경우에는 조성이나 순서가 봄철과 거의 유사함을 확인할 수 있었다. 가을철과 겨울철의 이온성분의 구성은 비록 농도에는 차이가 있으나 주된 성분은 봄의 경우와 매우 유사하게 나타났다.

이온성분으로 살펴본 결과 질소산화물과 황산화물, 그리고 암모니아의 비중이

높기 때문에 중량농도 측면에서는 이들의 관리가 효과적임을 알 수 있다. 그러나 앞서 살펴본 바대로 독성 측면에서 보면 금속성분이나 OC의 관리가 우선되어야 할 것으로 판단된다.

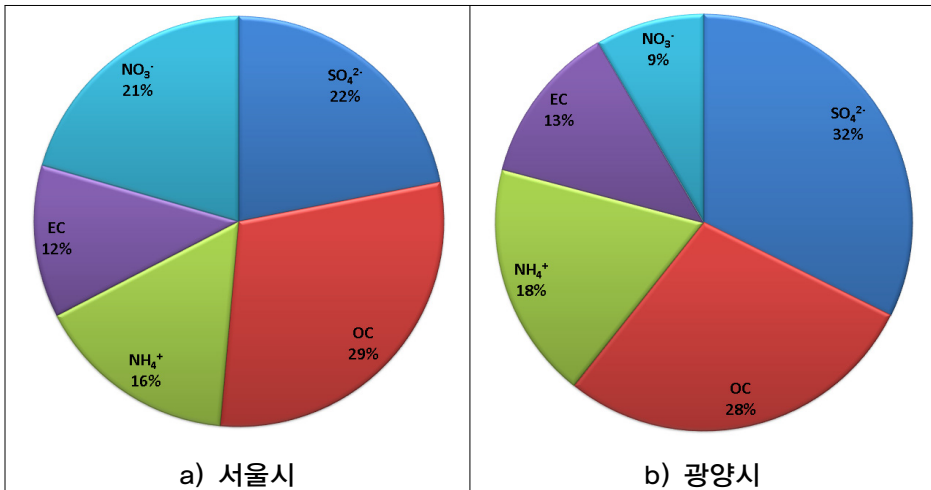
〈표 2-2〉 서울지역의 계절별 이온성분 농도

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Mass	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
봄	34.0	0.29	9.55	8.13	0.53	4.69	0.51	0.03	0.49
여름	31.7	0.25	6.94	12.3	0.57	4.94	0.47	0.06	0.39
가을	29.5	0.29	6.96	6.82	0.26	3.84	0.38	0.02	0.12
겨울	47.6	0.86	8	5.93	0.6	3.94	0.76	0.04	0.21

자료: 국립환경과학원(2009b)에서 재구성

한편 PM_{2.5}의 조성은 지역별로 차이가 있다. <그림 2-23>은 서울시(김현선, 2005)와 광양시(허중배 외, 2004)의 PM_{2.5} 조성을 비교한 것으로 OC와 EC, 암모늄의 비율은 비슷하나 서울시의 경우에는 nitrate의 비율이 높은 반면 광양시는 sulfate의 비율이 높다. 이는 서울시의 경우에는 자동차가 주요 배출원인 반면 광양시는 산업단지로서 산업체의 연료연소가 주 배출원인 것으로 설명된다. 그리고 지역별로 조성의 차이가 있기 때문에 삭감대책 역시 지역별 특성을 반영하는 것이 필요함을 알 수가 있다.



자료: a) 김현선(2005)에서 재구성, b) 허종배(2004)에서 재구성

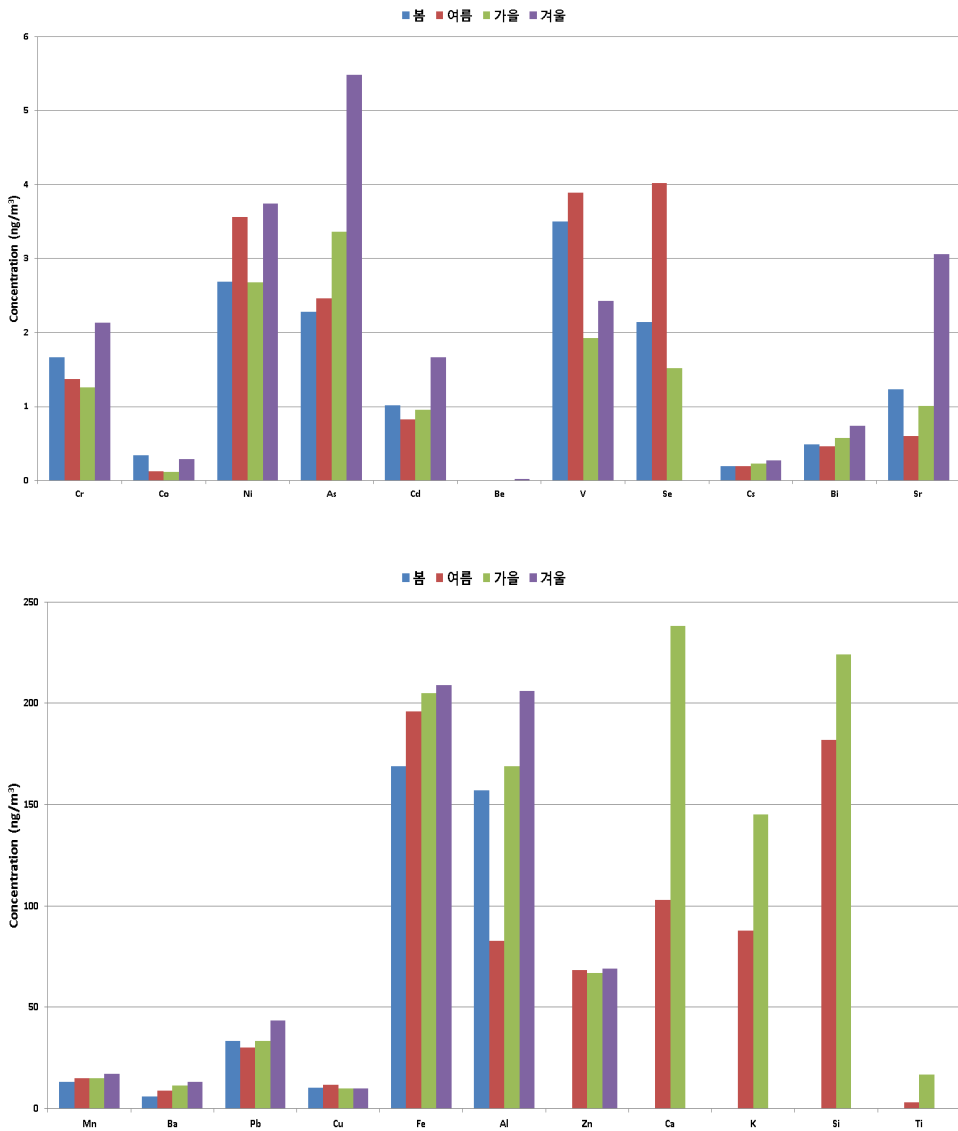
〈그림 2-23〉 서울시와 광양시의 PM_{2.5} 구성 성분 비율 비교

다. 금속성분 농도

금속성분들은 발생원에 따라 차이를 보이기 때문에 배출원을 규명하는 데 중요한 성분이다. 비산먼지 및 자동차로 인한 재비산먼지, 농장이나 건설활동으로 인한 주요성분으로는 Al, Si, K, Ca, Fe과 같은 지각성분들이 주성분이며, 가솔린 및 디젤 자동차의 경우 Fe, Zn 등이 주요 성분이다. 폐기물 및 생활쓰레기 소각에서는 K, As, Pb, Zn 등이 주요성분이며, 산림의 화재나 나무소각에서는 K이 발생원 추적에 사용된다. 제철, 정유 등 산업시설에서는 Se, V, Ni, OC, EC가, 중유를 사용하는 보일러나 난방 등에서는 Zn, Pb, Cu, Mn, As, Hg이, 유리산업이나 전기전자산업에서는 Zn, Pb, Cu, Mn, As, Hg이 배출되며 석탄을 사용하는 발전시설의 경우 As, Se이 중요한 발생원 추적자이다. 자연적으로 해염입자로 Na, Cl이 해당되며, nitrate와 amonium, sulfate 및 OC는 대기 중에서 2차적으로 생성되는 물질이기도 하다(국립환경과학원, 2009b).

PM_{2.5} 구성 성분 중 금속성분의 계절별 농도를 살펴보면 봄철 405 ng/m³, 여름철

807 ng/m³, 가을철 1,149 ng/m³, 겨울철 588 ng/m³로 가을철의 농도가 상당히 높았는데, 인체유해성과 관련한 물질로 알려진 As, Cd, Cr, Pb의 경우에는 겨울철에 농도가 높고 상대적으로 여름철에는 낮음을 확인할 수 있었다.



자료: 국립환경과학원(2009b)에서 재구성

〈그림 2-24〉 계절별 금속성분 농도

하지만 건강에 영향을 미치는 중금속으로 알려진 전이금속 분석결과가 부족하므로 측정 항목의 확대여부에 대한 검토가 필요하다.

라. 다환방향족탄화수소(PAHs)

다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)는 벤젠고리 2개 이상을 가지는 탄화수소류 물질을 총칭한다. 대기 중 PAHs의 자연적 발생원으로는 산불이나 화산폭발과 같은 자연재해가 있으며, 인위적 발생원은 가정 난방, 발전소, 소각 등의 점오염원과 가솔린, 디젤 자동차 등이 있고 대부분 인위적인 발생원에서 배출된다(Smith, I. M., 1984).

대기 중에 존재하는 PAHs는 발암력을 가지고 있는 잔류성 유기 오염물질 중 하나이고 공기역학직경 3 μm 이하인 입자에 주로 포함되기 때문에, 저농도 일지라도 위해성 측면에서는 중요한 물질이라고 할 수 있다(U.S National Research Council, 1983).¹¹⁾ 특히 2006년 IARC 보고에 의하면 PAHs 물질 중 Benzo(a)pyrene에 대해 등급을 인체 발암 추정물질(Category 2A)에서 인체에 발암성이 있음(Category 1)으로 강화하였고 인체에 충분한 발암근거가 있는 물질로 규정하였다.

다음은 서울지역(동대문구 전농동)¹²⁾의 PM_{2.5}에 포함된 PAHs의 농도 수준을 알아보기 위해 국립환경과학원 자료를 사용한 결과이다(국립환경과학원, 2005). PM_{2.5}에 포함된 PAHs의 평균농도는 봄철 7.2 ng/m³, 여름철 0.7 ng/m³, 겨울철 9.3 ng/m³으로 나타나 겨울철의 농도가 가장 높았으며 여름철의 농도가 상대적으로 낮음을 확인할 수 있었다. 또한 기온이 높은 여름철보다 기온이 낮은 겨울철에 벤젠 고리 4개 이상의 고분자 PAHs의 비중이 크고, 봄철의 경우 전체 PAHs 중 고분자 PAHs가 약 93.8%를 차지하였다. 또한 환경 대기 중에서 상대적으로 관심이 높은

11) IARC(International Agency for Research on Cancer)와 IRIS(Integrated Risk Information System) 모두 PAHs에 대해 동물실험결과 발암 잠재성, 돌연변이원성 물질이라고 보고하고 있다.

12) PM_{2.5}에 포함된 PAHs 농도분포 연구의 경우 불광동 지점에 대한 연구결과가 없어 동대문구 전농동 자료를 인용하였다.

Benzo(a)pyrene의 경우 봄철이 0.09 ng/m³, 여름철 0.03 ng/m³, 겨울철이 0.24 ng/m³으로 겨울철의 농도가 높음을 확인할 수 있었다.

〈표 2-3〉 서울지역의 PM_{2.5}에 포함된 계절별 PAHs 농도

(단위: ng/m³)

	봄	여름	겨울
NAP(2)	0.333	0.187	0.425
ACY(2)	0.025	—	0.1
ACE(3)	0.028	—	0.009
FLU(3)	—	—	0.045
PHEN(3)	0.053	0.023	0.721
ANTH(3)	0.009	0.011	0.186
FLT(4)	0.065	0.02	1.426
PYR(4)	0.057	0.032	0.741
BaA(4)	0.109	0.025	0.358
CHR(4)	0.266	0.065	0.672
B(k)F(5)	0.158	0.02	0.189
B(b)F(5)	2.059	0.131	1.764
B(a)P(5)	0.094	0.032	0.238
DBaH(5)	1.368	0.029	0.094
B(ghi)P(5)	2.177	0.113	1.896
IND(5)	0.437	0.046	0.39

자료: 국립환경과학원(2005), 「환경대기 중 유해대기오염물질(HAPs) 모니터링(Ⅱ)」

4. 황사의 영향

중국으로부터의 장거리 이동에 의한 국내 PM_{2.5} 농도가 얼마나 영향을 받는지 살펴보기 위해 황사기간 중 대기오염 특성에 대하여 살펴보았다.

본 장에서 이용된 일반대기오염물질의 자료는 국립환경과학원 및 서울특별시 보건환경연구원으로부터 제공받은 불광동 측정소 자료¹³⁾를 이용하였으며, 일반대기오염물질과 기상인자 간의 영향을 살펴보기 위해 불광동 AWS 자료(지점 번호: 416)를 활용하였다. 습도 자료의 경우 불광동 지점에서 이루어지지 않아 근접한 종로구(지점 번호: 108번) 지점의 자료를 활용하였다. 황사발생일은 에어코리아¹⁴⁾에서 발표한 황사 발생일을 참고하여 황사/비황사 사례 시 일반대기오염물질의 농도 및 기상인자의 변화를 살펴보았다.

황사 사례 시 일반대기오염물질의 농도 변화는 연구기간인 2007년 1월 1일부터 2010년 12월 31까지이며 황사 발생일을 황사 사례 시로 설정하였으며, 황사 발생일 전·후 이틀 간격을 제외한 날을 비황사 사례 시로 설정 후 데이터를 사례별로 가공하였다.

연구기간동안 에어코리아에서 발표된 서울지역의 황사일수는 2007년 12회, 2008년 11회, 2009년 9회, 2010년 15회로 총 47회로 주로 이른 봄 또는 늦은 가을 사이에 발생한 것으로 나타났다.

13) PM_{2.5} 데이터는 서울특별시 보건환경연구원으로부터 제공 받았으며, PM_{2.5}를 제외한 일반대기오염물질(NOx, SOx, CO, O₃, PM₁₀)은 국립환경과학원으로부터 제공 받아 활용하였다.

14) 에어코리아(<http://www.airkorea.or.kr>)

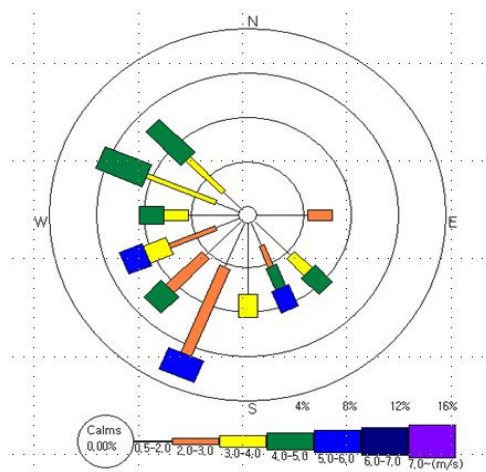
〈표 2-4〉 연도별 서울지역의 황사 발생일

년	월	일	년	월	일
2007	2	14	2009	2	20
	3	6, 27, 28, 31		3	14, 16, 17
	4	1/2		9	22
	5	8, 9, 25, 26		10	20
	12	29		12	25, 26, 30
2008	2	12	2010	1	25
	3	2, 3, 16		3	13, 15, 16, 20
	4	3, 4		4	2
	5	30, 31		5	10, 11
	12	2, 9, 10		11	11, 12, 27
				12	2, 3, 10, 11

자료: 에어코리아(<http://www.airkorea.or.kr>)

가. 황사 사례 시 기상상태

<그림 2-25>는 황사 사례 시 풍향과 풍속 등의 내용을 담은 바람장미도이며 황사기간 중에는 북서풍 및 남서풍 계열의 바람이 주를 이룸을 확인할 수 있다.



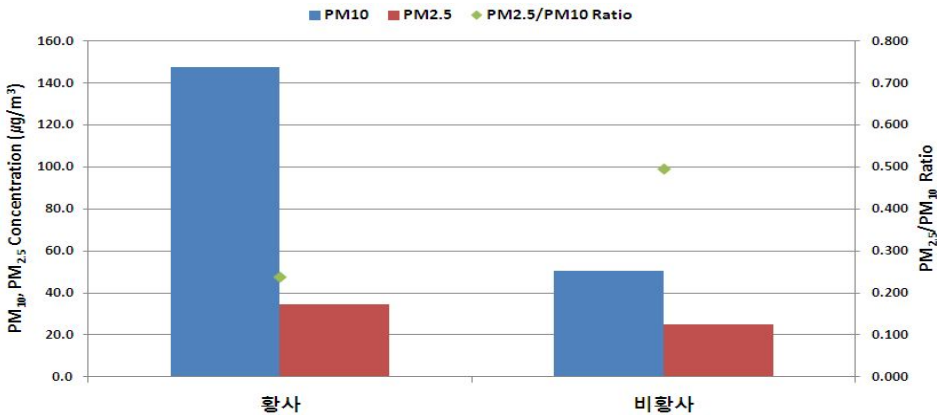
〈그림 2-25〉 황사 발생 시 바람장미도

나. 황사/비황사 사례 시 일반대기오염물질의 농도 변화 및 일변화 특성

황사 사례 시 일반대기오염물질의 농도 변화 및 일변화 특성을 살펴보기 위해 입자상 오염물질(PM₁₀, PM_{2.5})과 가스상 오염물질(SO₂, NO₂, CO, O₃)로 구분하여 살펴보았다.

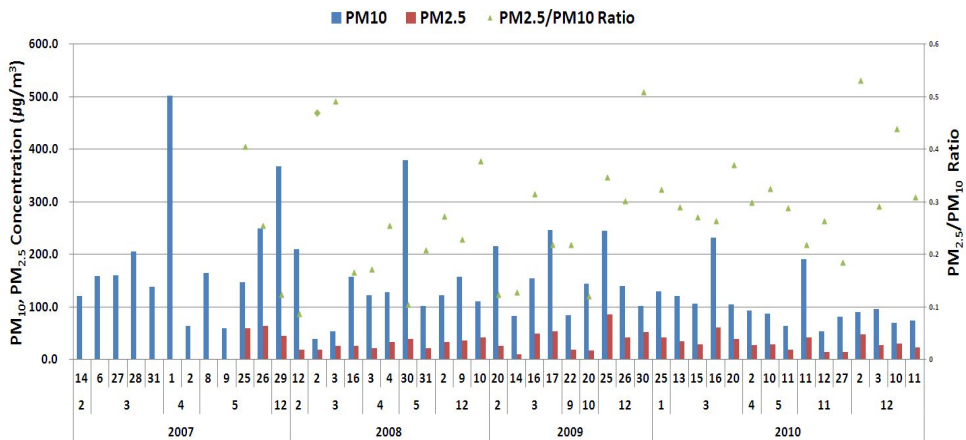
1) 입자상 오염물질의 농도 변화 및 일변화 특성

입자상 오염물질의 황사 사례 시 PM₁₀ 평균농도는 147.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 평균농도는 34.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 비황사 사례 시 PM₁₀ 평균농도는 50.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 평균농도는 25.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 황사 사례 시 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도가 상당히 증가하였다. 하지만 PM_{2.5}/PM₁₀ Ratio는 황사 사례 시 0.239, 비황사 사례 시 0.496으로 나타나, 황사에 의해서 PM_{2.5}보다 PM₁₀이 더 많이 유입되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 황사 사례 시 입자상 오염물질의 대기환경기준 초과 일수를 살펴보면 PM₁₀의 경우 대기환경기준 24시간 평균치인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 총 47일 중 32일이 초과하였으며, PM_{2.5}의 경우 대기환경기준 24시간평균치인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 총 47일 중 6일(PM_{2.5} 데이터 오류 일: 9일)이 초과하는 것으로 나타났다.



〈그림 2-26〉 황사/비황사 사례 시 입자상 오염물질의 평균농도

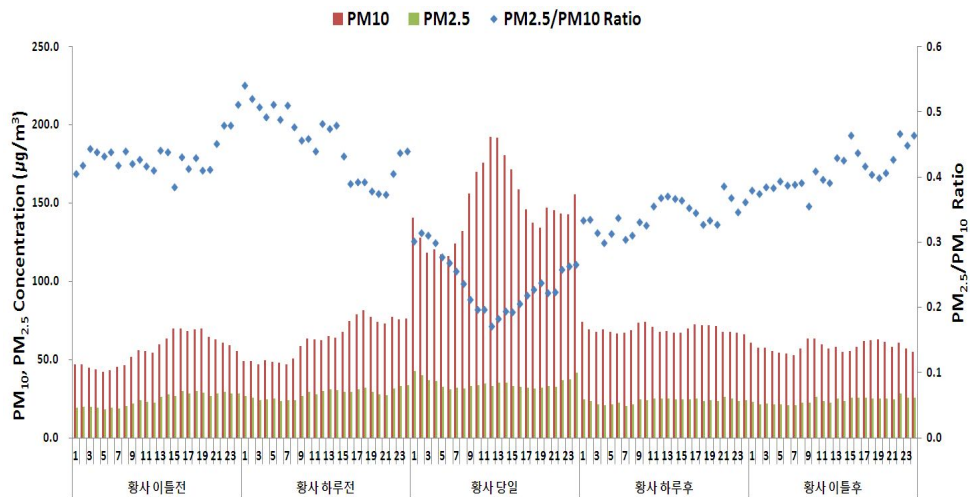
<그림 2-27>은 연구기간 동안 황사 발생일별 PM₁₀과 PM_{2.5}의 일평균 농도 및 일평균 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율을 나타낸 것으로, 황사 사례 시 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.3을 초과하는 경우는 전체 사례일 38일 중 13일에 불과한 것으로 나타나 황사기간 중에는 PM_{2.5}보다는 PM₁₀의 유입이 더 크다는 사실을 다시 한 번 보여준다.



〈그림 2-27〉 황사 발생 시 일별 PM₁₀, PM_{2.5} 평균농도 및 PM_{2.5}/PM₁₀ 비

<그림 2-28>은 연구기간 동안 발생한 황사 전·후 이틀과 황사일의 시간대별 PM₁₀, PM_{2.5} 평균 농도 변화를 나타냈다. 황사당일에는 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 농도 증가를 보이고 특히 PM₁₀의 농도 증가가 두드러짐을 확인할 수 있다. 이는 PM_{2.5}의 경우 PM₁₀에 비하여 황사의 영향이 상대적으로 적다는 것을 의미할 수 있으나 황사 기간과 비황사기간 사이의 PM_{2.5} 농도차이가 약 9.8 µg/m³이기 때문에 무시할 만한 수준은 아님을 확인할 수 있었다.

<표 2-5>는 <그림 2-28>에 대한 각 발생일별 시간대별 일반대기오염물질 및 기상인자 값을 정리하여 나타낸 것이다.



〈그림 2-28〉 황사 발생일 전·후 이틀 간격 시간대별 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 평균농도 변화

〈표 2-5〉 황사 사례 시 전 · 후 이틀 간격의 대기오염물질 평균농도 및 기상 현황

구분	시간	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	TA	WD	WS	RN	HM
황사 이틀 전	1	47.0	19.1	4.2	29.8	0.57	14.9	4.9	150	2.1	0.0	60.5
	2	46.8	19.5	4.2	27.3	0.54	16.5	4.7	149	2.1	0.1	60.9
	3	44.6	19.8	4.2	24.8	0.53	18.5	4.4	157	2.1	0.2	63.1
	4	43.7	19.2	4.1	22.6	0.51	19.4	4.2	152	2.1	0.0	64.8
	5	41.9	18.1	3.6	22.6	0.51	18.0	4.0	142	2.3	0.0	66.6
	6	43.2	19.0	3.7	25.5	0.53	15.5	3.9	130	2.5	0.2	67.7
	7	45.3	18.9	4.0	32.1	0.57	10.6	4.0	143	2.6	0.3	68.2
	8	46.3	20.4	4.3	35.7	0.64	9.7	4.6	179	2.3	0.3	66.4
	9	51.6	21.7	4.9	37.5	0.74	11.3	5.8	178	3.0	0.1	62.1
	10	56.0	23.9	5.5	35.9	0.72	12.9	6.8	196	2.9	0.1	56.6
	11	55.2	23.0	5.6	33.1	0.66	16.6	8.3	177	3.4	0.1	53.2
	12	54.3	22.3	5.6	29.9	0.59	20.3	9.1	190	3.3	0.0	48.5
	13	59.7	26.3	6.0	30.2	0.59	23.4	9.9	200	3.3	0.0	46.7
	14	63.6	27.9	6.1	29.3	0.57	26.2	10.2	202	3.3	0.0	45.7
	15	69.8	26.9	6.1	28.8	0.57	27.8	10.5	223	3.5	0.0	47.4
	16	69.6	30.0	6.3	28.5	0.56	28.7	10.5	223	3.0	0.0	48.5
	17	68.4	28.3	6.0	30.6	0.58	27.1	10.1	214	3.1	0.1	51.9
	18	69.2	29.7	5.9	32.6	0.61	26.3	9.4	210	3.0	0.2	55.3
	19	69.6	28.6	5.5	35.5	0.64	22.2	8.9	181	2.4	0.2	58.5
	20	64.6	26.6	5.4	38.6	0.67	17.4	8.3	199	2.4	0.3	59.8
	21	62.8	28.4	5.1	38.0	0.66	15.1	7.8	176	2.4	0.3	61.0
	22	60.8	29.2	5.0	36.7	0.67	14.3	7.4	156	2.5	0.2	63.2
	23	59.3	28.4	5.0	38.3	0.69	12.6	7.1	173	2.2	0.1	66.1
	24	55.5	28.3	4.6	35.9	0.66	13.1	6.9	153	2.0	0.2	67.0

단위: PM₁₀, PM_{2.5}: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ SO₂, NO₂, O₃: ppb

CO: ppm

TA: °C

WD: °

WS: m/s

RN: mm

HM: %

구분	시간	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	TA	WD	WS	RN	HM
황사 하루 전	1	48.9	26.4	4.4	33.3	0.65	12.6	6.2	156	1.7	0.1	69.0
	2	48.9	25.5	4.4	31.5	0.67	13.9	6.0	157	1.8	0.1	70.0
	3	47.0	23.9	4.2	29.4	0.65	14.8	5.8	135	2.0	0.1	71.3
	4	49.5	24.4	4.2	29.7	0.65	13.8	5.6	162	1.9	0.2	72.4
	5	48.7	24.9	4.3	28.6	0.64	14.2	5.5	165	2.2	0.9	72.9
	6	48.0	23.4	4.1	29.4	0.65	13.7	5.5	138	2.1	0.1	72.9
	7	46.9	23.9	4.3	33.4	0.67	11.0	5.5	136	2.3	0.1	72.4
	8	50.7	24.2	4.6	38.7	0.73	8.6	6.1	176	2.4	0.1	71.3
	9	58.7	26.8	4.6	38.2	0.83	9.2	6.2	184	2.4	0.5	67.0
	10	63.3	29.1	5.4	35.5	0.75	12.1	7.6	192	2.8	0.1	62.3
	11	62.9	27.6	6.2	34.3	0.73	14.3	8.5	214	2.8	0.2	58.0
	12	62.5	30.1	6.2	32.3	0.67	19.9	9.2	202	2.8	0.1	54.9
	13	65.0	30.9	6.7	30.3	0.65	24.5	9.9	195	3.0	0.0	52.8
	14	63.7	30.6	6.8	28.5	0.61	26.0	10.4	225	3.2	0.1	50.9
	15	67.5	29.2	6.4	28.6	0.59	28.0	10.5	236	3.1	0.1	51.3
	16	74.7	29.2	6.6	29.9	0.60	30.6	10.5	237	3.0	0.2	51.1
	17	78.7	30.9	6.6	32.3	0.60	29.1	10.0	229	3.0	0.3	52.4
	18	81.7	32.0	6.3	35.3	0.63	26.8	9.1	205	2.9	0.5	54.3
	19	77.4	29.3	6.0	37.9	0.67	20.8	8.4	197	2.5	0.5	55.9
	20	74.0	27.7	5.8	38.3	0.67	18.5	7.8	198	2.4	0.3	58.9
	21	73.1	27.3	5.2	39.0	0.68	16.4	7.4	183	2.6	0.1	60.7
	22	77.3	31.3	5.3	36.9	0.66	16.9	7.1	189	2.6	0.1	60.6
	23	75.9	33.2	5.2	35.9	0.67	16.5	6.8	195	2.3	0.1	60.9
	24	76.0	33.5	5.5	33.7	0.68	20.3	7.0	195	2.4	0.1	64.2

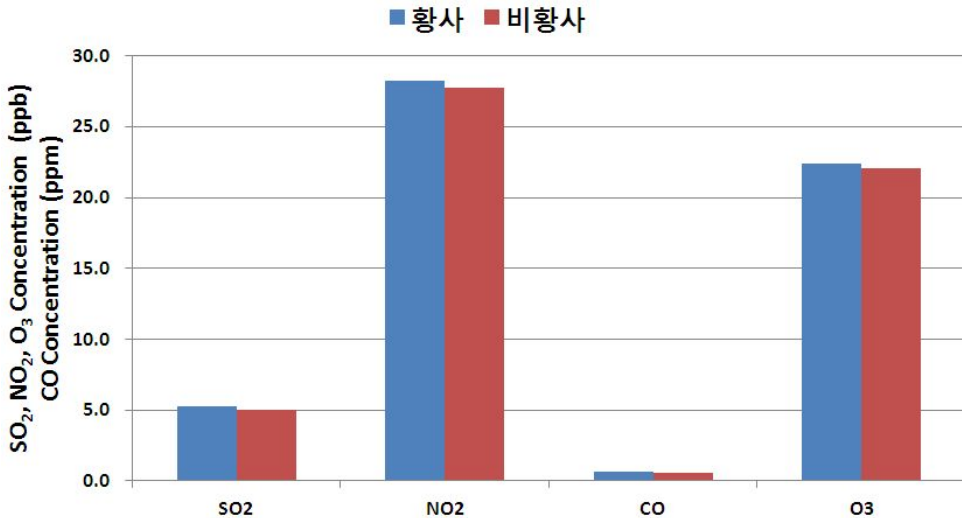
구분	시간	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	TA	WD	WS	RN	HM
황사 당일	1	140.8	42.5	5.5	30.3	0.68	20.0	6.8	192	2.5	0.1	67.0
	2	127.7	40.1	5.2	26.8	0.67	21.0	6.5	202	2.3	0.1	67.9
	3	118.4	36.8	5.0	25.0	0.65	21.0	6.1	183	2.4	0.1	68.2
	4	120.3	36.0	4.7	23.8	0.63	21.3	5.8	190	2.5	0.1	69.8
	5	117.4	32.5	4.5	22.9	0.63	21.0	5.6	200	2.7	0.1	70.3
	6	116.3	31.2	4.6	23.6	0.63	19.1	5.3	181	2.9	0.0	70.8
	7	124.3	31.8	4.8	27.1	0.65	16.1	5.3	176	2.9	0.0	70.7
	8	132.3	31.3	5.1	31.3	0.68	14.7	5.7	200	2.9	0.1	66.8
	9	156.2	33.1	5.4	32.6	0.69	15.0	6.4	205	3.2	0.1	62.3
	10	169.7	33.4	5.5	31.0	0.66	17.7	7.2	215	3.2	0.1	56.4
	11	175.8	34.5	5.7	29.3	0.64	20.4	8.0	238	3.2	0.0	51.6
	12	192.3	33.0	5.7	28.6	0.62	23.0	8.6	236	3.6	0.1	48.4
	13	191.8	35.1	5.7	26.6	0.59	26.9	9.2	237	3.6	0.0	45.0
	14	180.8	35.0	5.9	24.5	0.57	30.3	9.6	253	3.9	0.0	44.0
	15	171.4	33.1	6.2	24.0	0.57	32.7	9.7	267	4.0	0.1	43.4
	16	158.6	32.7	5.8	23.9	0.54	33.6	9.8	261	3.8	0.1	42.0
	17	145.8	31.9	5.0	24.9	0.54	32.4	9.2	254	3.5	0.0	44.7
	18	137.3	31.3	4.9	27.3	0.57	29.5	8.3	260	3.1	0.1	48.7
	19	134.5	32.0	5.0	30.3	0.58	26.1	7.6	246	2.8	0.0	51.4
	20	147.3	32.8	4.9	32.2	0.60	22.9	6.9	238	2.5	0.0	53.4
	21	145.3	32.5	5.1	33.5	0.61	20.0	6.2	235	2.3	0.0	55.6
	22	143.2	37.0	5.1	32.4	0.61	18.7	5.6	219	2.1	0.0	56.5
	23	142.6	37.5	5.3	33.1	0.63	17.6	5.1	216	2.1	0.0	58.4
	24	155.3	41.4	5.0	32.3	0.65	16.9	4.6	195	2.2	0.0	59.4

구분	시간	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	TA	WD	WS	RN	HM
황사 하루 후	1	74.1	24.8	4.5	25.2	0.57	20.3	2.5	210	2.3	0.0	58.6
	2	69.4	23.3	4.3	22.4	0.56	21.3	2.4	209	2.0	0.1	59.4
	3	67.4	21.2	4.1	19.9	0.55	21.4	2.1	200	1.8	0.1	59.9
	4	69.4	20.8	4.3	18.9	0.54	21.9	1.9	193	2.0	0.0	60.1
	5	67.6	21.1	4.1	19.8	0.53	20.3	1.6	167	1.7	0.0	60.5
	6	66.4	22.4	3.9	22.7	0.56	17.3	1.5	176	2.1	0.0	61.3
	7	67.3	20.5	4.3	27.8	0.60	13.2	1.6	156	2.1	0.0	61.1
	8	68.5	21.3	4.6	30.9	0.61	12.9	2.4	176	2.2	0.0	58.0
	9	73.8	24.5	5.1	30.6	0.65	16.2	3.7	219	2.4	0.0	51.9
	10	74.0	24.1	5.6	29.9	0.63	19.4	4.9	210	2.8	0.0	45.4
	11	70.8	25.2	6.0	28.3	0.62	22.1	6.3	230	3.1	0.0	40.8
	12	67.8	24.9	5.8	26.0	0.60	24.6	7.2	216	2.7	0.0	37.4
	13	68.2	25.3	5.6	23.3	0.57	30.1	7.8	223	3.2	0.0	35.4
	14	67.1	24.7	5.4	23.9	0.54	33.2	8.6	234	3.2	0.0	36.7
	15	67.2	24.5	5.4	25.0	0.55	36.5	9.0	251	2.9	0.0	37.0
	16	70.0	24.7	5.6	23.9	0.53	37.0	9.1	235	3.1	0.0	38.2
	17	72.3	25.0	5.4	24.4	0.55	34.8	8.7	249	3.0	0.0	42.2
	18	72.0	23.6	5.2	27.7	0.56	32.2	8.0	234	2.8	0.2	47.5
	19	71.8	24.0	4.7	33.6	0.61	26.2	7.3	212	2.2	0.2	51.9
	20	71.5	23.4	4.6	36.5	0.63	20.4	6.6	211	2.2	0.1	54.8
	21	67.9	26.2	4.6	36.3	0.64	16.3	6.2	194	2.0	0.0	56.1
	22	67.5	24.8	4.6	36.9	0.64	14.5	5.6	158	2.1	0.1	58.4
	23	67.1	23.3	4.3	35.8	0.64	12.8	5.2	148	1.8	0.1	58.8
	24	66.0	23.9	4.2	36.7	0.64	11.9	5.0	145	2.2	0.1	57.7

구분	시간	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	TA	WD	WS	RN	HM
황사 이틀 후	1	60.9	23.1	4.1	31.2	0.62	14.1	4.8	165	2.1	0.0	59.4
	2	57.3	21.5	4.0	29.9	0.63	14.6	4.7	145	2.0	0.0	59.9
	3	57.6	22.1	4.1	26.5	0.62	17.0	4.4	157	1.8	0.0	61.4
	4	55.4	21.2	4.3	26.8	0.63	17.0	4.0	142	1.9	0.0	62.0
	5	54.1	21.3	4.1	25.4	0.61	15.8	3.8	165	2.0	0.0	63.1
	6	53.7	20.8	4.0	28.1	0.63	14.4	3.6	128	2.0	0.0	64.5
	7	52.9	20.6	4.2	34.3	0.68	11.0	3.7	140	2.2	0.0	65.0
	8	57.0	22.3	4.7	36.8	0.73	9.0	4.5	130	2.4	0.0	62.6
	9	63.3	22.5	5.2	38.9	0.78	9.9	5.7	171	2.4	0.0	56.4
	10	63.5	26.0	5.7	37.3	0.78	13.2	7.1	169	2.6	0.0	50.3
	11	59.6	23.6	6.3	37.1	0.76	15.5	8.0	201	2.4	0.2	45.8
	12	56.8	22.3	6.5	34.4	0.70	18.4	8.9	201	2.4	0.1	44.1
	13	58.0	24.9	6.1	32.4	0.68	22.8	9.5	219	2.5	0.0	42.8
	14	55.1	23.5	6.0	29.2	0.61	25.7	10.1	231	2.6	0.0	41.2
	15	55.2	25.6	5.7	30.6	0.62	27.3	10.3	213	2.5	0.0	41.5
	16	58.3	25.5	5.9	31.1	0.63	28.2	10.3	234	2.6	0.1	41.7
	17	61.8	25.8	5.6	33.6	0.64	28.5	9.8	238	2.5	0.1	45.2
	18	62.1	25.1	5.5	36.3	0.70	26.8	8.9	189	2.5	0.1	49.1
	19	62.8	25.0	5.2	37.6	0.72	22.8	8.0	179	2.2	0.7	53.0
	20	61.3	24.9	5.0	38.8	0.73	18.1	7.4	205	2.2	0.8	55.5
	21	58.0	24.7	5.2	38.0	0.73	15.5	7.0	194	2.1	0.0	57.7
	22	60.6	28.2	5.0	37.0	0.73	15.5	6.5	163	1.7	0.2	59.3
	23	57.1	25.6	5.3	37.2	0.73	15.7	6.3	172	1.8	0.0	62.4
	24	54.8	25.4	5.4	36.5	0.74	16.5	6.0	193	2.0	0.3	63.0

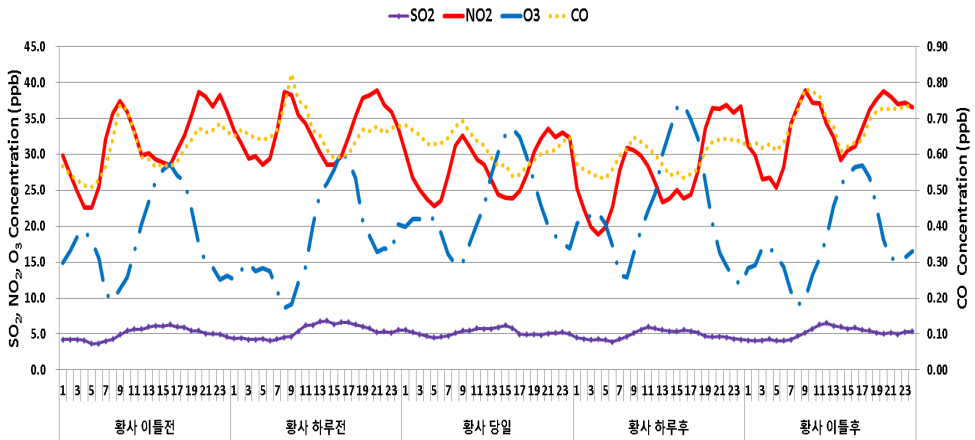
2) 가스상 오염물질의 농도 변화 및 일변화 특성

가스상 오염물질의 황사 사례 시 SO₂ 평균농도는 5.2 ppb, NO₂ 평균농도는 28.2 ppb, CO 평균농도는 0.62 ppm, O₃ 평균농도는 22.4 ppb으로 나타났으며, 비황사 사례 시 SO₂ 평균농도는 5.0 ppb, NO₂ 평균농도는 27.8 ppb, CO 평균농도는 0.57 ppm, O₃ 평균농도는 22.1 ppb로 황사 사례 시 가스상 오염물질의 농도가 약간씩 더 높음을 확인할 수 있었지만 그 증가폭은 크지 않았으며, 이는 입자상 물질과는 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 확인되었다.



〈그림 2-29〉 황사/비황사 사례 시 가스상 오염물질의 평균농도

〈그림 2-30〉은 연구기간 동안 발생한 황사 전·후 이틀 동안의 시간대별 오염물질의 평균농도 변화를 나타낸 것인데, 그림에서 보는 바와 같이 황사 당일에는 그 전·후일에 비하여 NO₂와 CO의 농도가 다소 감소하는 추이를 보이지만 전반적인 특성 변화는 크지 않은 것으로 보인다.



〈그림 2-30〉 황사 발생일 전 · 후 이틀의 시간대별 오염물질의 평균농도 변화

다. 황사/비황사 사례 시 대기오염물질 및 기상인자 사이의 상관관계

황사/비황사 사례 시 일반대기오염물질과 기상인자 간의 상관관계를 살펴보기 위해 통계프로그램인 SPSS Windows version 11.5를 이용하여 Pearson correlation coefficients를 실시하였다. 황사 사례는 2007년 1월 1일~2010년 12월 31일 동안 발생한 황사일로 하고, 비황사 사례는 황사발생일과 황사발생일 전·후 이틀을 제외한 날로 설정하였는데, 이때의 각 데이터를 월평균 자료로 가공 후 사용하였다. 분석 항목은 PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO, O₃ 등 6개이며 기상인자는 평균기온(TA), 상대습도(HM), 풍향(WD), 풍속(WS), 강수량(RN) 등 5개 항목이다.

<표 2-6>과 <표 2-7>은 황사 당일과 비황사기간의 대기오염물질과 기상인자 상호 간의 상관관계 분석결과를 나타낸 것이다. 황사일의 경우 PM_{2.5}의 PM₁₀ 상관계수는 0.635로 강한 양의 상관관계를 나타내었고 SO₂는 0.385, CO는 0.527, NO₂는 0.137의 상관관계를 보였다. 반면 비황사기간에는 PM₁₀이 0.903으로 아주 강한 상관관계를 보였고 SO₂는 0.539, NO₂는 0.496, CO는 0.572의 상관관계를 나타냄을 확인할 수 있었다. 전반적으로 비황사기간의 PM_{2.5}와 PM₁₀, SO₂, NO₂의 상관관계는 황사기간보다 더 큰 것으로 나타났다.

〈표 2-6〉 황사 시 일반대기오염물질 및 기상인자 간의 상관관계

	PM10	PM2.5	SO2	NO2	CO	O3	TA	WD	WS	RN	HM	
PM10	Pearson Correlation	1										
	Sig. (2-tailed)	.1122										
PM2.5	Pearson Correlation	0.635**	1									
	Sig. (2-tailed)	0.000	.904									
SO2	Pearson Correlation	0.076*	0.385**	1								
	Sig. (2-tailed)	0.011	0.000	.1123								
NO2	Pearson Correlation	0.117	0.900	1								
	Sig. (2-tailed)	0.060	0.000	0.000	.1110							
CO	Pearson Correlation	0.105**	0.527**	0.357**	0.396**	1						
	Sig. (2-tailed)	0.001	0.000	0.000	0.000	.1095						
O3	Pearson Correlation	-0.003	0.034	0.128**	-0.463**	0.355**	1					
	Sig. (2-tailed)	0.919	0.311	0.000	0.000	0.000	.1122					
TA	Pearson Correlation	0.051	0.070*	0.206**	0.264**	-0.113**	0.379**	1				
	Sig. (2-tailed)	0.090	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	.1128				
WD	Pearson Correlation	0.117**	0.089**	0.015	-0.489**	-0.023	0.306**	-0.250**	1			
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.008	0.625	0.000	0.455	0.000	0.000	.1115			
WS	Pearson Correlation	0.109	0.891	1.110	1.097	1.082	1.109	1.115	1.115	1		
	Sig. (2-tailed)	0.450	0.191	0.079	0.000	0.838	0.000	0.000	0.000	.1115		
RN	Pearson Correlation	-0.067*	-0.068*	-0.114**	0.037	-0.029	-0.061*	0.042	-0.032	-0.016	1	
	Sig. (2-tailed)	0.025	0.042	0.000	0.218	0.335	0.041	0.157	0.283	0.589	.1128	
HM	Pearson Correlation	-0.057	0.236**	-0.031	0.256**	0.365**	-0.387**	0.096**	-0.283**	0.227**	0.222**	1
	Sig. (2-tailed)	0.058	0.000	0.294	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	.1128

**, Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*, Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

〈표 2-7〉 비화사 시 일반대기오염물질 및 기상인자 간의 상관관계

	PM10	PM2.5	SO2	NO2	CO	O3	TA	WD	WS	RN	HM
PM10	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	1 30131									
PM2.5	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.903** 0.000 26931	1 .								
SO2	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.609** 0.000 29546	0.539** 0.000 26849	1 .							
NO2	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.512** 0.000 29707	0.496** 0.000 26849	0.387** 0.000 29596	1 .						
CO	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.554** 0.000 29923	0.572** 0.000 27039	0.430** 0.000 29790	0.549** 0.000 29945	1 .					
O3	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.038** 0.000 29940	0.109** 0.000 26992	0.038** 0.000 29781	-0.341** 0.000 29953	-0.274** 0.000 30163	1 .				
TA	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	-0.183** 0.000 30122	-0.025** 0.000 27190	-0.236** 0.000 29829	-0.167** 0.000 29995	-0.246** 0.000 30216	0.344** 0.000 30235	1 .			
WD	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	0.111** 0.000 30072	0.046** 0.000 27147	0.194** 0.000 29829	-0.059** 0.000 29995	-0.004 0.000 30216	0.217** 0.000 30235	-0.145** 0.000 31140	1 .		
WS	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	-0.102** 0.000 30097	-0.155** 0.000 27172	-0.010 0.092 29854	-0.212** 0.000 30020	-0.185** 0.000 30241	0.164** 0.000 30260	-0.056** 0.000 31165	0.144** 0.000 31140	1 .	
RN	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	-0.107** 0.000 30100	-0.088** 0.000 27168	-0.075** 0.000 29857	-0.069** 0.000 30023	-0.065** 0.000 30244	-0.017** 0.003 30263	0.077** 0.000 31168	-0.027** 0.000 31120	0.113** 0.000 31145	1 .
HM	Pearson Correlation Sig. (2-tailed) N	-0.125** 0.000 30131	-0.009 0.142 27199	-0.214** 0.000 29888	-0.053** 0.000 30054	0.082** 0.000 30275	-0.328** 0.000 30294	0.203** 0.000 31190	-0.240** 0.000 31140	-0.100** 0.000 31165	0.186** 0.000 31168

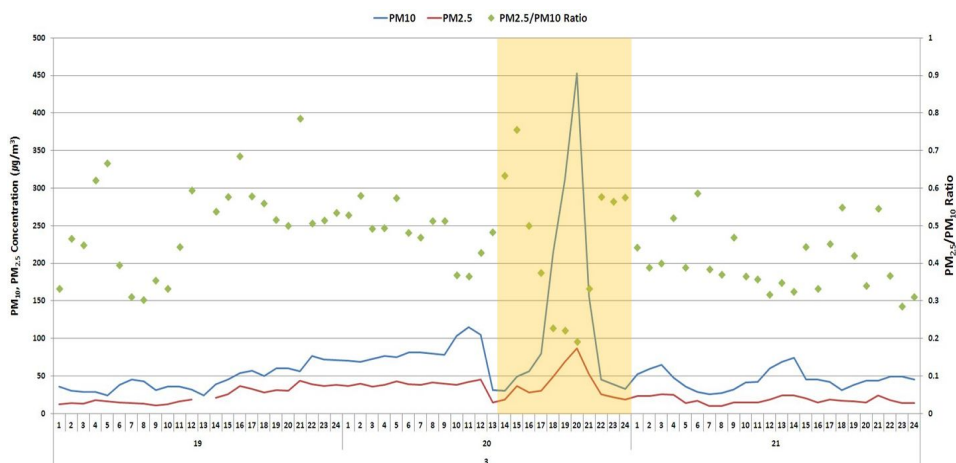
**, Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*, Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

5. 황사/비황사 사례 시 미세먼지 중 화학적 조성

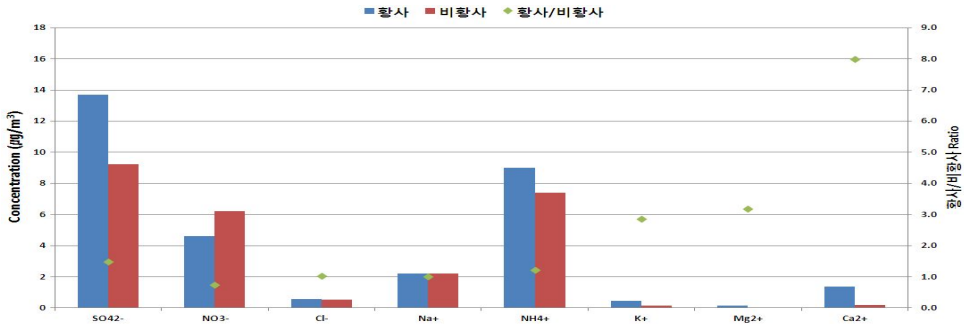
황사 및 비황사 사례 시 미세먼지 중 화학적 조성을 살펴보기 위해 국립환경과학원의 황사 발생 특성 분석결과자료(국립환경과학원, 2010)를 인용하였다. 본 연구에서 인용한 황사 사례는 2010년 3월 19일 몽골(고비사막) 및 중국 북부지방에서 발생하여 중국 동해안을 거쳐 남동진하였고 2010년 3월 20일 오후 서해안을 시작으로 전국에 강하게 영향을 준 후 동월 21일에 소멸된 경우이다.

<그림 2-31>은 이 기간(3월 19 ~ 21일)의 서울특별시 은평구 불광동의 시간대별 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 변화를 나타낸 것인데 이때 PM₁₀ 평균농도는 298.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 평균농도는 89.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 황사 당일 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 모두가 증가하고 있음과 특히 PM₁₀의 농도 증가가 두드러짐을 다시 보여준다.



〈그림 2-31〉 수도권 측정소에서의 시간대별 미세먼지 농도

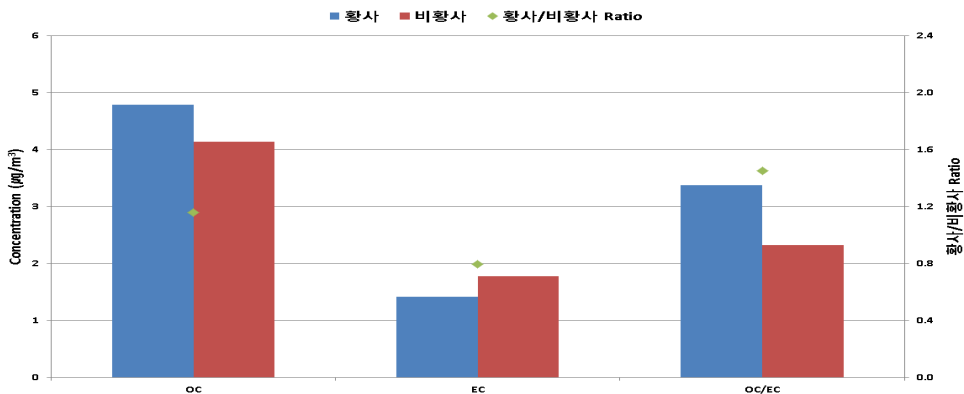
<그림 2-32>는 황사기간 중 수도권 측정소에서의 이온성분의 평균농도인데, 토양성분인 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} 의 농도가 비황사기간 대비 약 3 ~ 8배 증가하였고, 황사발생 전과 황사기간 동안 SO_4^{2-} , NO_3^{-} , NH_4^{+} 의 농도도 비교적 높게 나타났다.



주: 비황사기간의 평균농도는 황사발생일 1일전(3/19)의 평균농도를 의미
 자료: 국립환경과학원(2010)에서 인용

〈그림 2-32〉 황사기간 중 수도권 측정소에서의 이온성분 평균농도

〈그림 2-33〉은 황사기간 중 수도권 측정소에서의 탄소성분의 평균농도를 나타낸 것으로, 황사기간 중 OC/EC의 비는 3.4, 비황사기간 중 OC/EC의 비는 2.3으로 황사기간 중 OC/EC의 비가 높았다. 또한 OC의 황사/비황사 비는 1.2로 황사기간 중 OC의 농도가 비교적 높음을 확인한 반면 EC의 황사/비황사 비는 0.8로 나타나 황사 영향에 따른 EC의 기여율은 낮은 것으로 나타났다. 즉, 황사기간 중에는 OC의 유입이 EC보다 더 많아 위해도 측면에서는 황사시의 사례가 중요하다고 할 수 있다.



주: 비황사기간의 평균농도는 황사발생일 1일전(3/19)의 평균농도를 의미
 자료: 국립환경과학원(2010)에서 인용

〈그림 2-33〉 황사기간 중 수도권 측정소에서의 탄소성분 평균농도

| 제3장 · PM_{2.5}의 건강영향 평가 및 건강편익 산정 |

세계 여러 도시를 대상으로 한 대기오염으로 인한 건강위해 가능성에 대한 연구 결과들이 일관되게 보고되고 있다. 지금까지의 연구결과들을 종합해 보면, 대기오염물질은 사망의 증가, 심혈관계 관련질환 및 호흡기계 관련질환의 증가, 폐기능 저하, 폐암발생 및 저체중아 출산 등에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

대기질 관리정책의 패러다임은 다양한 오염원(source) 중심으로부터 인체 건강과 생태계 피해를 반영하는 수용체(receptor) 중심의 관리로 전환되고 있다. 이에 따라 선진국들은 대기오염으로 인한 건강영향을 정량적으로 평가하고, 이 결과를 토대로 대기오염 농도 변화에 따른 건강피해 또는 건강편익의 규모를 산출하고 있다. 대기오염농도 변화에 따른 건강피해 또는 건강편익은 정책관련 의사결정자 또는 이해관계자들에게 대기오염물질 기준 선정뿐만 아니라 대기오염관리 정책에 관하여 중요한 과학적 근거자료를 제공할 수 있다(배현주, 2011; EPA, 1999). 우리나라에서는 대기환경기준 오염물질의 건강영향을 평가한 연구는 많이 진행된 바 있으나, 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 건강영향에 대한 분석이 미흡하며, 대기오염농도 수준에 따른 건강피해 또는 건강편익 산출에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 장에서는 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 건강영향을 정량적으로 평가하고, 이를 토대로 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 변화에 따른 건강편익을 산정하여, 국민의 건강을 보호하기 위한 수용체 중심의 과학적 대기 정책수립의 근거로 활용하고자 한다.

1. 관련 선행 연구

본 장에서는 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})가 건강에 미치는 영향에 관한

선행연구들을 문헌 고찰하고, 대기오염 농도 변화에 따른 건강영향 추정에 관한 선행연구들을 살펴보았다.

가. 미세먼지와 초미세먼지에 의한 건강영향

미세먼지에 의한 건강영향에 대한 연구는 대표적인 건강지표인 사망에서부터 시작하여 전체원인 사망, 호흡기계 관련질환 사망, 심혈관계 관련질환 사망으로 세분화되고, 호흡기계와 심혈관계 관련질환 병원입원 및 응급실 방문 등에 대한 영향으로 확장되고 있다.

대기오염물질 중 입자상 물질은 기도 자극, 호흡곤란, 폐기능의 감소, 천식 악화, 만성 기관지염 발생, 만성폐쇄성폐질환 등과 같은 호흡기계 질환 증상이 증가하고, 혈관 기능 장애, 혈전증, 부정맥, 불규칙한 심장박동 등과 같은 심혈관계 관련 증상이 증가하고 다양한 생리학적 변화들과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다(Brook, 2008; Baccarelli et al., 2008). 특히 초미세먼지(PM_{2.5})는 입자의 크기가 매우 작기 때문에 폐포까지 침투하여 심각한 건강영향을 줄 수 있다. 초미세먼지(PM_{2.5})에 노출되면 호흡기계 관련질환과 심혈관계 관련질환으로 인한 입원 증가뿐만 아니라 사망발생위험이 유의하게 증가한다는 결과들이 보고되고 있다(Jerrett et al., 2009; Pope III et al., 2006).

미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 건강영향을 살펴본 연구는 다음 <표 3-1> 및 <표 3-2>와 같다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 건강영향은 시계열 연구(time-series study)와 환자교차 연구(case-cross over study)를 이용하여 대기오염이 건강영향 발생에 얼마나 위험을 미치는지를 분석하였다. Schwartz and Neas(2000)는 미국 6개 도시를 대상으로 한 하버드 연구에서 입자상 물질의 크기에 따른 건강영향을 분석한 결과, PM₁₀ 8 μ g/m³ 증가 시 하기도 호흡기계 증상의 상대위험비는 1.05%(95% Confidence interval[CI] : 0.9-1.23%)인데 비해 PM_{2.5} 15 μ g/m³ 증가 시 상대위험비는 1.29%(95% CI : 1.06-1.57%)로 입자상

물질의 크기가 작을수록 건강에 더 큰 영향을 주는 것으로 보고한 바 있다.

〈표 3-1〉 미세먼지(PM₁₀)의 건강영향 연구

저자 및 연도	연구 대상 지역 및 기간	주요 연구 결과
Ostro et al. (2011)	스페인, 바르셀로나, 2003-2007	- PM₁₀ 농도 증가로 인한 건강영향을 환자교차(case-crossover) 방법을 적용하여 분석함 - 전체원인 사망발생위험은 PM₁₀농도 20.6$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 2.4%, PM₁₀농도 10$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 1.2%(95% CI : 0.6~1.7%) 증가함 - 심혈관계 관련질환 사망발생위험은 PM₁₀농도 20.6$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 5.7%, PM₁₀농도 10$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 2.8%(95% CI : 1.7~3.8%) 증가함
Mallone et al. (2011)	이탈리아, 로마, 2001-2004	- 유럽지역의 황사현상 때문에 미세먼지로 인한 심혈관계 관련질환 사망발생위험이 증가하는 것으로 나타남 - PM₁₀ 농도 10$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 심혈관계 관련질환 사망발생위험은 9.55%(95% CI : 3.81~15.61%) 증가하는 것으로 나타남
Kan et al. (2010)	중국, 상하이, 2001-2004	- PM₁₀의 이동평균 농도가 전체원인 사망과 심혈관계 관련질환 사망에 미치는 영향을 시계열 분석함 - PM₁₀의 이동평균 농도가 10$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하면 전체원인 사망발생위험은 0.26%(95% CI : 0.14~0.37%) 증가하는 것으로 나타남
Zeka et al. (2005)	미국 20개 도시, 1989-2000	- 미국 20개 도시를 대상으로 PM₁₀ 농도 증가에 따른 건강영향을 지연효과와 도시 특성에 따라 분석함 - PM₁₀ 농도 증가로 인하여 전체원인 사망발생위험은 0.35%(95% CI : 0.21~0.49%), 호흡기계 관련질환 발생위험은 0.52%(95% CI : 0.15~0.89%), 심혈관계 관련질환 발생위험은 0.30%(95% CI : 0.12~0.48%) 증가함

〈표 3-2〉 초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향 연구

저자 및 연도	연구 대상 지역 및 기간	주요 연구 결과
Zeger et al. (2008)	2000~2005, 미국	- PM_{2.5}의 장기노출로 인한 건강영향을 미국 노인의료 보험 가입자를 대상으로 코호트연구를 실시함 - PM_{2.5} 10$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 65세 이상 고령자에서 사망발생위험은 동부지역은 6.8% (95 % CI : 4.9~8.7%) 이었으며, 중부지역은 13.2% (95 % CI : 9.5~16.9%) 임
Peng et al. (2008)	1999~2005, 미국 108개주	- PM_{10-2.5} 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 심혈관계 입원위험을 0.36 % (95 % CI : 0.05~0.68 %) 높임 - PM_{2.5} 를 보정한 후 PM_{10-2.5} 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 심혈관계 입원위험을 0.25 % (95 % CI : -0.11~0.60 %) 높임
Franklin et al. (2007)	1997~2002, 미국 27개 도시	- PM_{2.5} 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 전체원인 사망위험을 1.21 % (95 % CI : 0.29~2.14 %) 높임 - PM_{2.5} 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 호흡기계 사망위험을 1.78 % (95 % CI : 0.20~3.36 %) 높임 - PM_{2.5} 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 뇌졸중 사망위험을 1.03 % (95 % CI : 0.02~2.04 %) 높임
Ostro et al. (2006)	1999~2002, 미국 캘리포니아 9개 지역	- Poisson multiple regression 모델을 이용하여 PM_{2.5} 가 사망에 미치는 영향을 분석함 - PM_{2.5} 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 전체원인 사망발생위험은 0.6% (95 % CI : 0.2~1.0%) 증가하는 것으로 나타남

나. 대기오염농도 변화로 인한 건강영향 추정

환경오염으로부터 건강한 삶을 지키고 영위하도록 하는 것은 사회경제적으로 가장 중요한 편익이다. 최근 들어 선진국들은 대기오염으로 인한 건강영향 평가 결과에서 도출된 대기오염과 건강영향의 농도-반응(CR) 함수를 적용하여 대기오염농도 변화에 따른 건강피해 또는 건강편익을 정량적으로 추산하고 있다. 이러한 건강피해 또는 건강편익의 규모를 파악하는 것은 관련 정책의 효과를 파악할 수 있으므로 정책관련 의사결정자들 혹은 이해관계자들에게 과학적인 판단근거자료를 제공할 수 있다(EPA, 1999; 배현주, 2011).

대기질 농도 변화에 따른 건강영향을 추정한 주요 연구는 〈표 3-3〉과 같다. 4개의 선행연구 모두 미국 환경보호청에서 개발한 BenMAP 모형을 적용하여 대기

질 변화에 따른 건강피해 또는 건강편익을 산출하였다. Boldo et al.(2011)과 Wong et al.(2004)은 과거에 비해 현재 대기질 개선으로 인한 건강편익을 산출하여 대기 정책의 효과를 분석하였다. 또한 Davidson et al.(2006)은 초미세먼지(PM_{2.5})에 대한 미국 국가 대기환경기준과 캘리포니아 대기환경기준 달성으로 기대되는 건강 편익을 산출하여 대기환경기준 값에 대하여 검토하였다. Chang et al.(2010)은 미래 오존 농도를 예측하고 이로 인한 건강피해 규모를 추정하여 대기질 관리정책 추진의 당위성을 제시하였다.

〈표 3-3〉 대기오염농도 변화에 따른 건강영향 추정 연구

저자 및 연도	연구 대상 지역	주요 연구 결과
Boldo et al. (2011)	스페인	- 2004년 대비 2011년 스페인의 PM_{2.5} 농도는 0.7$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 개선되고, 이에 따른 건강피해 감소를 추정함 - PM_{2.5} 농도 개선으로 30세 이상 연령집단에서 PM_{2.5} 장기노출로 인한 만성 조기사망 감소는 매년 1,720명(95% CI : 673~2,760건) 감소하여, 만성 조기사망자가 인구 10만 명당 6명 감소한 것으로 나타남
Chang et al. (2010)	미국	- 미국 남동부지역에서 2000년대 대비 2040년대 오존 농도는 기후변화로 인하여 0.43 ppb (95% CI: 0.14~0.75) 증가할 것으로 추정됨 - 오존 농도 증가로 인하여 사망률은 0.01% 증가하고, 조기사망자수는 45.2 (95% CI: 3.26~87.1) 증가할 것으로 추정함
Davidson et al. (2006)	미국	- 2001년 미국의 PM_{2.5}의 농도 수준이 캘리포니아 대기질 기준인 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$을 달성한다고 가정하였을 때, 이로 인한 조기사망자수는 14,000명(95% CI : 8,100~20,000명), 호흡기계 입원은 7,200건(95% CI : 1,400~13,000건), 심혈관계 입원은 5,500건(95% CI : -1,800~15,000건) 감소할 것으로 추정함
Wong et al. (2004)	미국	- 1990년부터 2010년까지의 기간 동안 대기오염물질의 농도 개선으로 인하여 저감되는 건강피해를 추정함 - PM₁₀의 농도 개선으로 1세 미만의 신생아 조기사망이 160명(95% CI : 45~270명) 감소하고, 1~16세의 천식입원이 430건(95% CI : 150~700건), 응급실 방문이 1,300건(95% CI : 480~6,600건) 감소할 것으로 추산함

2. 건강영향 분석 자료 및 통계 분석 방법

가. 분석 범위 및 분석 자료

본 연구의 분석기간은 2006년부터 2010년까지이며 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도의 자료 확보가 가능한 기간으로 선정하였고, 연구대상지역은 서울 특별시를 중심으로 하였다.

본 연구에서의 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 증가로 인한 건강영향은 사망자료를 중심으로 평가하였다. 사망자료는 국가 차원에서 장기간 동안 구축되고 관리되어 인구학적 특성과 사망원인 등에 대한 정보의 정확도와 신뢰도가 높다.

연구대상 인구집단은 연령과 사망원인에 따라 구분하였다. 인구집단의 연령에 따라서는 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단으로 구분하였고, 사망원인에 따라서는 사고사를 제외한 전체 사망원인과 심혈관계 관련질환 사망원인으로 구분하여 대기오염의 건강영향을 분석하였다.

대기오염으로 의한 건강영향을 평가하기 위해 사망 자료, 기상 자료, 그리고 대기오염농도 자료가 필요하며, 시계열 분석을 하기 위해 각각의 자료들을 일별 대표치로 가공하였다.

첫째, 사망 자료는 통계청의 통계원시자료제공시스템(MDSS)에서 사망원인 마스타 자료를 입수하였다. 사망 자료는 사망 시점을 기준으로 하여 분석대상 지역에 거주하지 않거나 사망원인이 사고사(ICD-10 code, V00-Y99)와 같은 사망외인(external cause of death)인 경우는 분석대상에서 제외하였다. 본 연구에서는 사고사를 제외한 전체원인(ICD-10 code, A00-U99)과 심혈관계 관련질환(ICD-10 code, I00-I99)을 대상으로 분석하였다.

둘째, 기상 자료는 기상청의 기상 자동측정망자료를 이용하였으며, 기상대에서는 기온과 상대습도를 한 시간 간격으로 측정한다. 일별 대푯값으로 기온은 당일(lag=0)과 하루 전날(lag=1) 일별 평균 기온의 이동평균값(moving average)을 사용하였고, 상대습도는 일별 평균값을 사용하였다.

마지막으로 대기오염자료 중 미세먼지(PM₁₀)자료는 국립환경과학원의 대기측정망 자료를 이용하였고, 초미세먼지(PM_{2.5})자료는 서울시 보건환경연구원의 대기측정망 자료를 이용하였다. 분석대상지역인 서울시에는 27개의 대기오염 측정망이 설치되어 있으며, 시간대별 대기오염농도 자료를 제공하고 있다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도자료는 시간대별 27개의 측정망 값을 평균하여 분석대상지역의 일 24회 시간별 대푯값을 계산하고, 일 24회 시간별 대푯값의 평균값을 산출하여 일별 대푯값으로 사용하였다.

나. 대기오염의 건강영향 분석 방법

본 연구에서는 대기오염으로 인한 건강영향을 평가하기 위해 시계열 연구(time-series study)를 이용하여 일별 대기오염이 일별 사망발생위험에 얼마나 영향을 미치는지를 분석하였다. 시계열 연구는 대기오염의 급성 건강영향을 평가하는데 매우 유용한 방법으로, 인구집단에 영향을 미치는 대기오염의 효과를 분석하기 때문에 성별 또는 연령 등과 같은 개인적인 차이는 고려하지 않아도 되는 장점이 있다.(Schwartz, 1994; 김선영, 2004).

분석 대상의 건강영향은 일별 사망자료이므로 포아송분포를 가정하여 포아송 회귀모형(Poisson Regression Model)을 적용하였다. 본 연구에서는 장기적인 추세변동과 계절변동, 기상요인, 요일 등 본 연구에 영향을 미칠 수 있는 혼란변수들을 반모수적 평활함수로 통제하면서, 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})가 건강에 미치는 영향을 분석하기 위해 일반화 부가모형(Generalized additive model, GAM)을 적용하였다. 일반화 부가 포아송 모델은 다음 식과 같다.

$$\text{Ln}E(Y) = S_1(X_1) + S_2(X) + \dots + S_i(\Xi)$$

여기서, S_i = i 번째 변수에 대한 평활함수

본 연구에서는 사망의 일별 변동과 밀접한 관계가 있다고 보고된 기상변수, 장기

추세 및 계절 변동 등을 통제하기 위해 비모수적 평활방법인 locally weighted regression smoothing(LOESS) 함수를 사용하였다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})가 사망에 미치는 영향에 대한 최종 분석 모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Ln}E(\text{Daily death count}) = & B_0 + B_1(\text{Pollutnat}) + D(\text{Day of week}) \\ & + S_1(\text{Temperature}) + S_2(\text{a humidity}) \\ & + S_3(\text{Pressure at sealevel}) + S_4(\text{Date}) \end{aligned}$$

여기서, S = 각 변수에 대한 Loess 평활함수

D = 요일에 대한 가변수(Dummy variable)

통계모형의 선정은 모형적합도(goodness of fit)의 기준이 되는 통계량인 Akaike's information criterion (AIC)가 가장 작은 값을 가지는 모형으로 선정하였고(Akaike, 1973), 강화된 수렴기준(default convergence criterion)을 적용하였다.

또한 대기오염으로 인한 건강영향은 대기오염이 발생한 당일에 즉시 영향을 줄 수도 있지만, 지연효과(lag effect)를 나타낼 수도 있으므로 대기오염이 일별 사망에 미치는 지연효과를 고려하였다. 현재까지 대기오염물질로 인한 건강영향에 관한 지연효과 기간에 대해 규명된 바가 없기 때문에 사망 발생 당일과 1일에서부터 최고 6일 이전까지의 대기오염이 사망에 미치는 지연효과를 분석하였다. 적절한 지연효과 일을 결정하기 위해 사망과 관련성이 가장 높게 나타난 날을 지연효과일로 선정하였다. 자료의 정리는 SAS 9.2 version을 이용하였고, 자료를 GAM에 적합시키는 것은 S-Plus 6.1 version을 사용하였다.

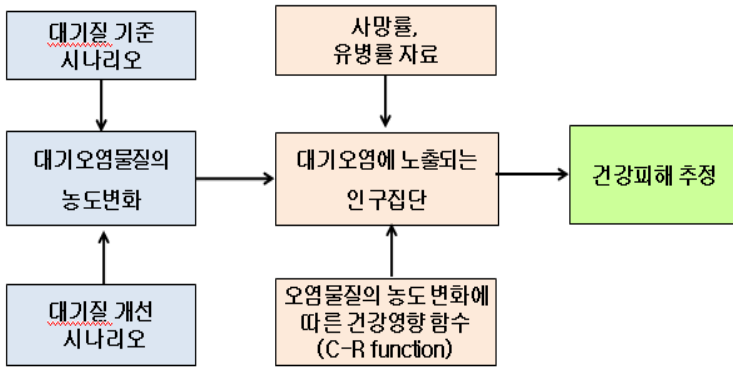
포아송 회귀분석의 회귀계수(β)는 대기오염물질의 단위 농도 증가가 사망자수 발생에 미치는 정도를 의미하므로, 대기오염 농도 증가로 인한 건강영향 발생위험인 상대위험비(Relative Risk, RR)는 $RR = \exp(\beta)$ 로 계산한다. 또한 상대위험비를 이용하여 건강영향의 백분율 변화(percentage change)는 다음과 같이 계산한다.

$$\% change = (RR - 1) \times 100$$

다. BenMAP을 이용한 건강영향의 추정

미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발한 Environmental Benefits Mapping and Analysis Program(BenMAP)을 이용하여 대기오염농도 변화에 따른 건강편익을 분석하였다. 초기 BenMAP은 미국에서 국가 차원의 대기관련 환경기준 또는 규제를 만들 때 정책수립의 근거자료를 제시하기 위하여 사용하였으며, 최근에는 이동 및 고정 오염원을 관리하기 위한 정책개발에 적용하고 있다(배현주, 2011).

대기오염농도 변화에 따른 건강영향을 추정하는 BenMAP의 개념도는 <그림 3-1>과 같다. 즉, 대기오염농도의 기준 시나리오와 달성하고자 하는 대기오염농도의 목표 시나리오의 차이인 대기오염물질의 농도 변화를 계산한다. 여기에 연구대상 인구집단에 대한 인구자료와 지리정보자료를 입력하여 대기오염물질의 농도 변화에 노출되는 인구집단을 추정한다. 또한 연구대상 인구집단의 기본 건강상태를 반영하는 사망률 자료와 대기오염농도(concentration) 변화에 따른 건강영향(response)의 평가 결과인 농도-반응(CR)함수를 적용하여 대기질 개선에 따른 건강편익을 산출하게 된다.



〈그림 3-1〉 BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program) 개념도

대기오염 농도 변화에 따른 건강편익을 추산하기 위해서는 대기오염 농도 변화에 노출되는 연구대상 집단의 인구수, 연구대상 인구집단의 건강상태를 반영하는 사망률, 대기정책을 시행함으로써 기대되는 대기오염물질의 농도 변화, 그리고 대기오염물질의 농도 변화에 따른 건강위해영향 정도의 변화를 정량적으로 평가한 농도-반응(CR)함수를 적용하여 다음 식과 같이 계산한다(Davidson et al., 2007; Hubbell et al., 2005).

Health Impact Function

$$= (\exp(\text{Beta} \times (\text{Delta Q}) - 1)) \times \text{Incidence} \times \text{Pop}$$

여기서, Beta: 대기오염물질 농도 변화에 따른 건강위해 영향의 농도-반응(CR)함수

Delta Q: 대기오염물질 농도값의 변화

Incidence: 사망률

Pop: 대기오염물질에 노출되는 인구수

3. 연구결과

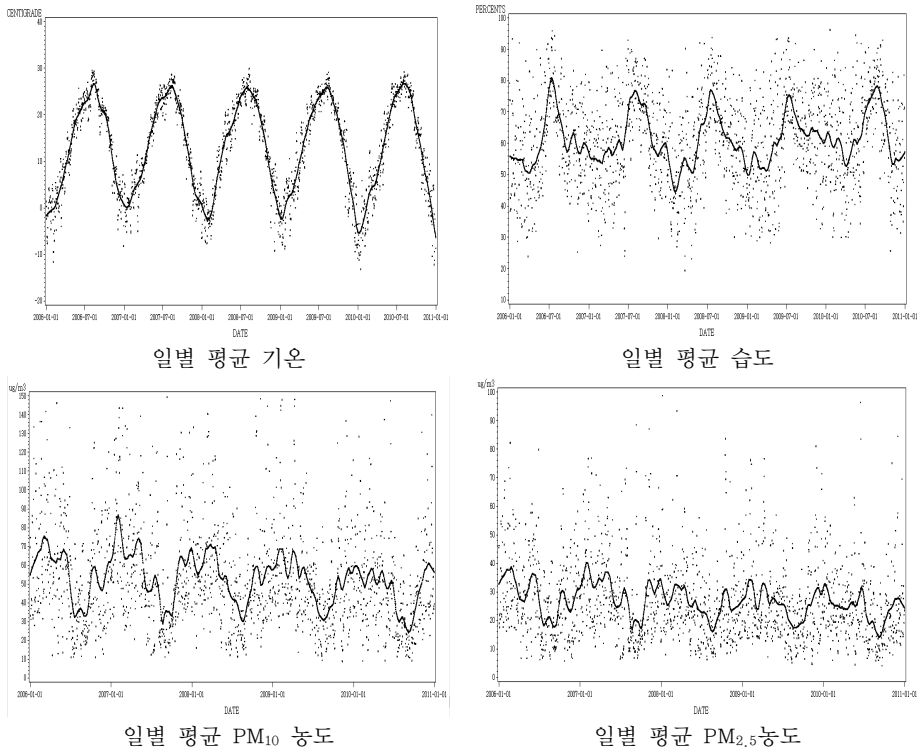
가. 기본 자료에 대한 분석

본 연구에서는 2006년부터 2010년까지 서울특별시를 중심으로 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단을 대상으로 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가가 사망에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

1) 기상요소, 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5})의 시계열 경향

2006년부터 2010년까지 전체 연구기간 동안 서울특별시의 일별 기온, 일별 습도, 일별 미세먼지(PM₁₀) 농도와 일별 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도에 대한 시계열적 경향은 <그림 3-2>와 같다.

전체 연구기간 동안 서울시의 일별 평균 기온과 일별 평균 습도의 시계열 경향은 여름에 높고 겨울에 낮은 계절성을 강하게 나타내고 있다. 일별 미세먼지(PM₁₀) 농도와 일별 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 여름철에 비교적 낮으며, 겨울과 봄에 비교적 높은 경향을 나타내고 있다.



〈그림 3-2〉 서울시의 기상변수, 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도

연구기간 동안의 기온, 습도와 해수면기압의 일별 기상변수 및 일별 미세먼지(PM₁₀) 농도의 평균값과 분포는 〈표 3-4〉 및 〈표 3-5〉와 같다.

2006년부터 2010년까지 일별 평균 기온은 평균적으로 12.88 °C으로, 2007년은 다른 연도에 비해 높은 13.28 °C이었고, 2010년은 상대적으로 낮은 12.14 °C이었다. 일별 평균 습도는 평균적으로 61.26 %로, 2010년에 다른 해에 비해 다소 높은 62.90 %이었고, 2008년은 다소 낮은 59.45 %이었다. 일별 평균 해수면기압은 평균적으로 1,015 hPa이었으며, 5년 기간 동안 1,015~1,016 hPa의 일정한 수준을 유지하고 있었다.

〈표 3-4〉 서울시의 기상특성

연도	기온(℃) 평균		습도(%) 평균		해수면기압(hPa)	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
2006	13.06	9.87	60.62	14.96	1016.05	8.41
2007	13.28	9.47	62.25	13.99	1015.74	8.24
2008	12.95	10.16	59.45	14.73	1016.34	7.81
2009	12.95	10.27	61.10	14.97	1015.59	8.31
2010	12.14	11.10	62.90	15.26	1016.02	7.45
전체	12.88	10.18	61.26	14.82	1015.95	8.05

연구기간 동안의 일별 평균 미세먼지(PM₁₀) 농도는 55.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 2007년부터 지속적으로 감소하는 경향을 보이며 2010년에는 가장 낮은 49.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 특히 2006년의 일별 평균 미세먼지(PM₁₀)의 최대 농도는 782.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2010년 최대 농도는 216.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 현저하게 감소하고 있다.

또한 연구기간 동안의 일별 평균 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 27.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 2007년부터 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 일별 평균 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 2007년에 가장 높은 29.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 2010년에는 가장 낮은 24.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

연구기간 동안의 미세먼지(PM₁₀)의 최대값은 782.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 최소값은 8.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 초미세먼지(PM_{2.5})의 최대값은 219.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 최소값은 4.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일별 변동성이 상당히 크게 나타났다. 따라서 일별 평균 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도의 변동이 심한 상위 1%에 대한 것은 이상치(outlier)로 간주하여 결측(missing) 처리하였다.

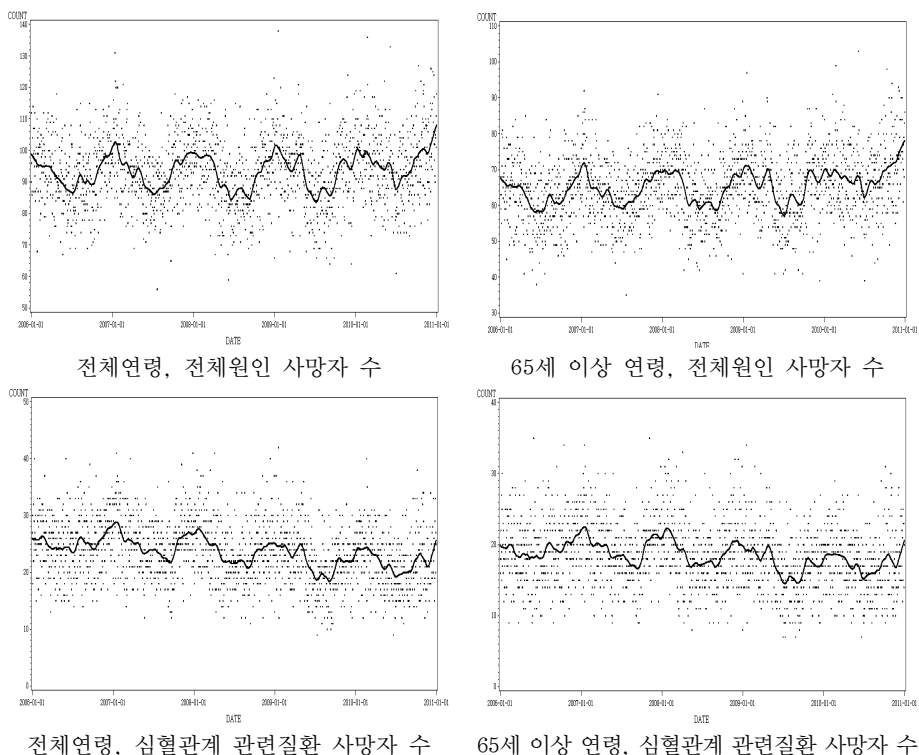
〈표 3-5〉 서울시의 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

연도	일별 평균 미세먼지(PM ₁₀)				일별 평균 초미세먼지(PM _{2.5})			
	평균	표준편차	최소	최대	평균	표준편차	최소	최대
2006	59.28	52.56	11.09	782.55	29.43	18.35	5.78	219.03
2007	61.13	41.65	11.31	464.91	29.76	16.46	6.61	88.67
2008	55.03	31.85	11.42	304.28	25.81	14.04	6.38	98.83
2009	54.04	33.23	8.97	298.02	26.13	14.51	4.61	81.11
2010	49.03	29.58	9.03	216.03	24.79	14.69	4.22	121.59
전체	55.70	38.89	8.97	782.55	27.18	15.8	4.22	219.03

2) 사망자 수의 시계열 경향

2006년부터 2010년까지 전체 연구기간 동안의 서울특별시의 연령별 전체원인 사망자 수와 심혈관계 관련질환 일별 사망자 수에 대한 시계열적 경향은 〈그림 3-3〉과 같다.

전체 연구기간 동안 서울시의 일별 전체원인 사망자 수와 심혈관계 관련질환 일별 사망자 수의 시계열 경향은 여름철에 낮고 겨울철에 높은 계절성을 나타내고 있다.



〈그림 3-3〉 서울시의 연령별, 사망원인별 일별 사망자 수

2006년부터 2010년까지 서울특별시 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단의 전체원인 일별사망자 수는 <표 3-6>과 같다. 연구기간 동안 전체원인 일별 사망자 수는 전체 연령집단에서 93.56명이었고, 65세 이상 연령집단에서 65.18명이었다. 전체원인 사망의 경우, 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단에서 2010년 일별 사망자 수가 96.59명과 68.72명으로 다른 연도에 비해 급증하였다. 전체원인 사망에서 65세 이상 연령집단이 차지하는 비중은 68~71%이었다.

〈표 3-6〉 서울시의 전체원인 일별 사망자 수

(단위 : 명)

연도	전체연령				65세 이상 연령			
	평균	표준편차	최소	최대	평균	표준편차	최소	최대
2006	92.63	10.29	67	118	63.10	8.86	38	85
2007	93.61	10.72	56	131	64.48	8.90	35	92
2008	92.24	11.43	59	123	64.40	9.29	41	89
2009	92.75	11.59	64	138	65.19	9.52	39	97
2010	96.59	11.43	61	136	68.72	9.72	39	103
전체	93.56	11.20	56	138	65.18	9.45	35	103

2006년부터 2010년까지 서울특별시 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단의 심혈관계 관련질환 일별사망자 수는 〈표 3-7〉과 같다. 연구기간 동안 전체 연령집단에서 일별 사망자 수는 23.58명이었고, 65세 이상 연령집단에서 일별사망자 수는 18.50명이었다. 심혈관계 관련질환 사망의 경우, 전체원인 사망자 수와는 달리 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단에서 2006년부터 일별 사망자 수가 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 심혈관계 관련질환에 대한 사망자에서 65세 이상 연령집단이 차지하는 비중은 76~79%이었다. 또한 전체원인 사망 중에서 심혈관계 관련질환 사망자수는 전체연령에서 23~27%를, 65세 이상 연령집단에서는 25~31%를 각각 차지하는 것으로 나타났다.

〈표 3-7〉 서울시의 심혈관계 관련질환 일별 사망자 수

(단위 : 명)

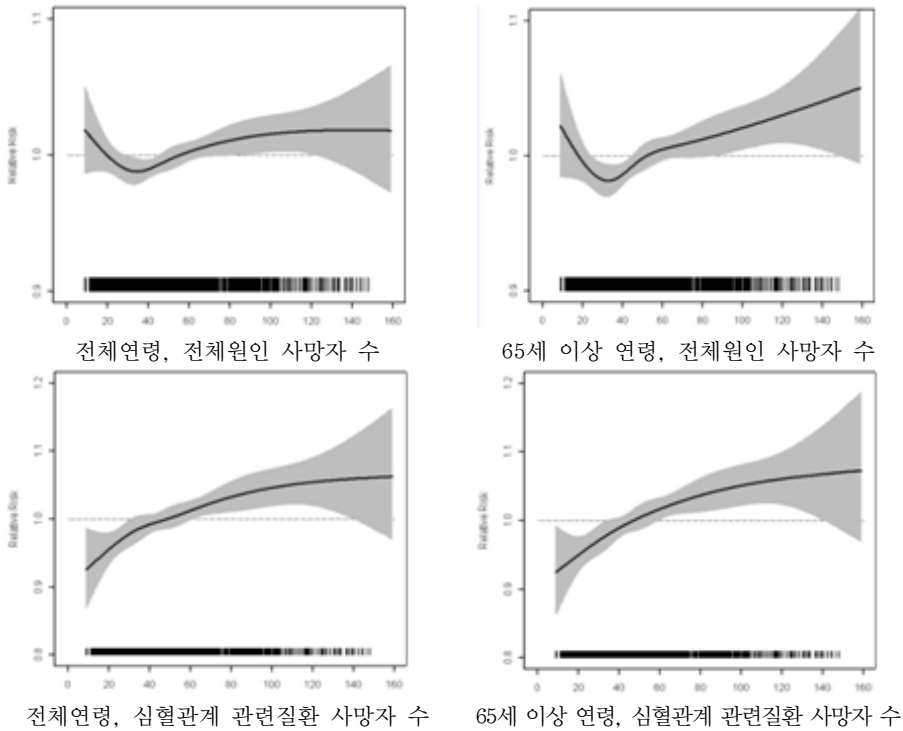
연도	전체연령				65세 이상 연령			
	평균	표준편차	최소	최대	평균	표준편차	최소	최대
2006	25.27	5.10	13	40	19.38	4.57	9	35
2007	24.95	5.18	12	41	19.48	4.45	9	35
2008	23.77	5.50	11	41	18.96	4.80	8	33
2009	21.96	5.21	9	42	17.23	4.42	7	34
2010	21.97	5.18	9	40	17.45	4.42	7	31
전체	23.58	5.42	9	42	18.50	4.63	7	35

나. 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가로 인한 사망영향

일별 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가가 일별 사망자 수에 대한 영향을 평가하였으며, 연구 대상 인구집단은 연령과 사망원인에 따라 구분하였다. 연령별로는 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단으로 나누어 분석하였고, 사망원인별로는 전체원인으로 인한 사망과 심혈관계 관련질환으로 인한 사망으로 구분하여 분석하였다.

서울특별시의 일별 평균 미세먼지(PM₁₀) 농도가 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가함에 따른 일별 사망자 수에 대한 Log(상대위험비) 함수를 도식화한 것은 〈그림 3-4〉와 같다. 그림에서와 같이 일별 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가로 인하여 전체원인과 심혈관계 질환 사망자 수는 증가하는 경향을 나타내었다.

일별 평균 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가로 인한 일별 사망의 Log(상대위험비) 함수는 당일(lag=0)부터 5일(lag=5) 전까지 중에서 관련성이 가장 큰 것으로 선정하였다. 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단에서 모두 당일(lag=0)에서 가장 강한 관련성을 보였다.



〈그림 3-4〉 사망에 대한 미세먼지(PM₁₀)의 영향

전체 연령집단에서는 미세먼지(PM₁₀) 농도가 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 사망발생위험은 0.44 % (95 % CI : 0.25 ~ 0.63 %) 증가하였고, 특히 65세 이상 연령집단의 심혈관계 관련 질환 사망발생위험은 0.80 % (95 % CI : 0.39 ~ 1.21 %) 증가하였다. 전체 연령집단에 비하여 민감집단으로 알려진 65세 이상 연령집단과 전체 연령집단의 심혈관계 관련질환 사망 발생에서는 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가로 인한 사망발생위험이 더 높은 것으로 나타났다.

〈표 3-8〉 사망에 대한 미세먼지(PM₁₀)의 영향

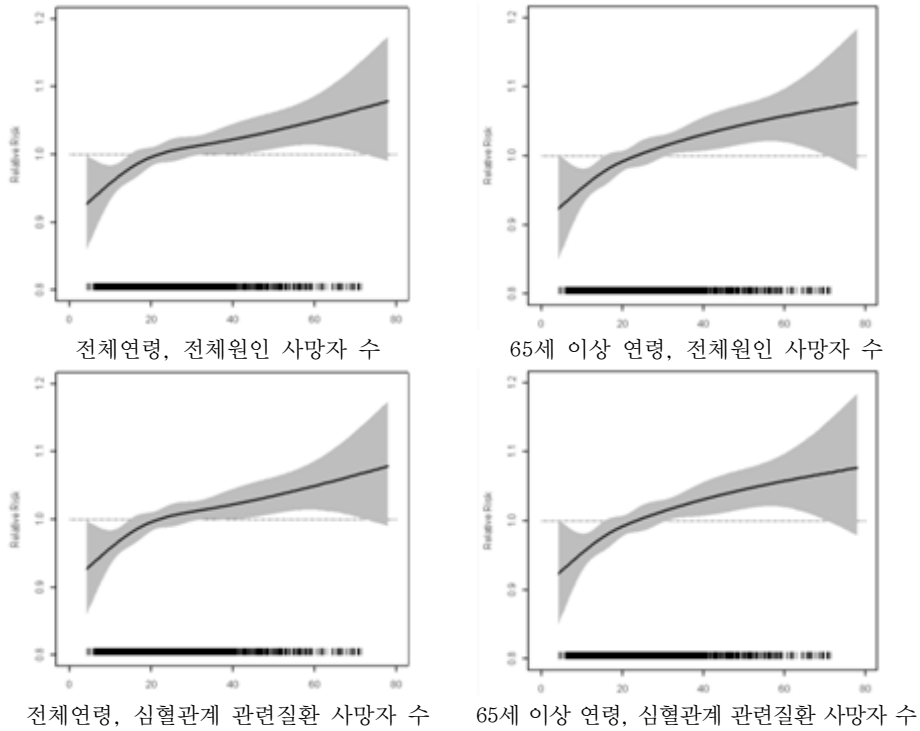
사망원인	연령구분	지연효과	PM ₁₀ 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 백분율 변화	95 % 신뢰구간
전체원인 사망영향	전체연령	Lag 0	0.44	0.25 ~ 0.63
	65세 이상 연령	Lag 0	0.64	0.41 ~ 0.87
심혈관계 관련질환 사망영향	전체연령	Lag 0	0.76	0.40 ~ 1.12
	65세 이상 연령	Lag 0	0.80	0.39 ~ 1.21

다. 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가로 인한 사망영향

일별 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가가 일별 사망자수에 대한 영향을 평가하였으며, 미세먼지(PM₁₀)의 건강영향 평가에서와 마찬가지로 연구 대상 인구집단은 연령과 사망원인에 따라 구분하여 분석하였다.

서울특별시의 일별 평균 미세먼지(PM₁₀) 농도가 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가함에 따른 일별 사망자수에 대한 Log(상대위험비) 함수를 도식화한 것은 〈그림 3-5〉와 같다. 그림에서와 같이 일별 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가로 인한 전체원인과 심혈관계 질환 사망자수 증가는 선형 관련성을 나타내었다.

일별 평균 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가로 인한 일별 사망의 Log(상대위험비) 함수는 당일(lag=0)부터 5일(lag=5) 전까지 중에서 관련성이 가장 큰 것으로 선정하였다. 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단에서 모두 당일(lag=0)에서 가장 강한 관련성을 보였다.



〈그림 3-5〉 사망에 대한 초미세먼지(PM_{2.5})의 영향

전체 연령집단에서는 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 사망위험은 0.95 % (95 % CI : 0.57 ~ 1.34 %) 증가하며, 특히 65세 이상 연령집단의 심혈관계 관련질환 사망위험은 1.75 % (95 % CI : 0.91 ~ 2.59 %) 증가하였다. 전체 연령집단에 비하여 민감집단으로 알려진 65세 이상 연령집단과 전체 연령집단의 심혈관계 관련질환 사망 발생에서는 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가로 인한 사망위험이 더 높은 것으로 나타났다.

〈표 3-9〉 사망에 대한 초미세먼지(PM_{2.5})의 영향

사망원인	연령구분	지연효과	PM _{2.5} 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 백분을 변화	95 % 신뢰구간
전체원인 사망영향	전체연령	Lag 0	0.95	0.57 ~ 1.34
	65세 이상 연령	Lag 0	1.37	0.90 ~ 1.84
심혈관계 관련질환 사망영향	전체연령	Lag 0	1.63	0.89 ~ 2.37
	65세 이상 연령	Lag 0	1.75	0.91 ~ 2.59

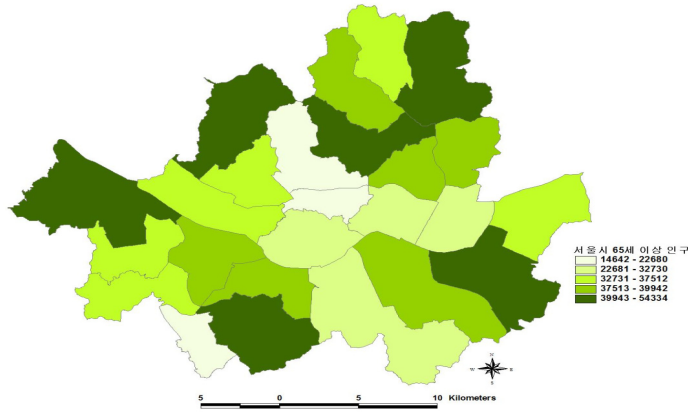
라. 대기오염 농도 개선에 따른 건강영향 추정

서울시의 2010년 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 수준이 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서 권고하고 있는 대기질 기준을 달성한다고 가정하였을 때, 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 개선으로 기대되는 급성 및 만성 조기사망 감소의 건강편익을 산출하였다. 본 연구에서 도출한 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 증가에 따른 초과사망자의 농도-반응(concentration-response)함수를 적용하여, 서울시 대기질 개선에 따른 건강영향을 추정하였다.

1) 분석 시나리오

본 연구에서는 서울시 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 개선으로 기대되는 건강영향은 다음과 같은 시나리오를 분석하였다.

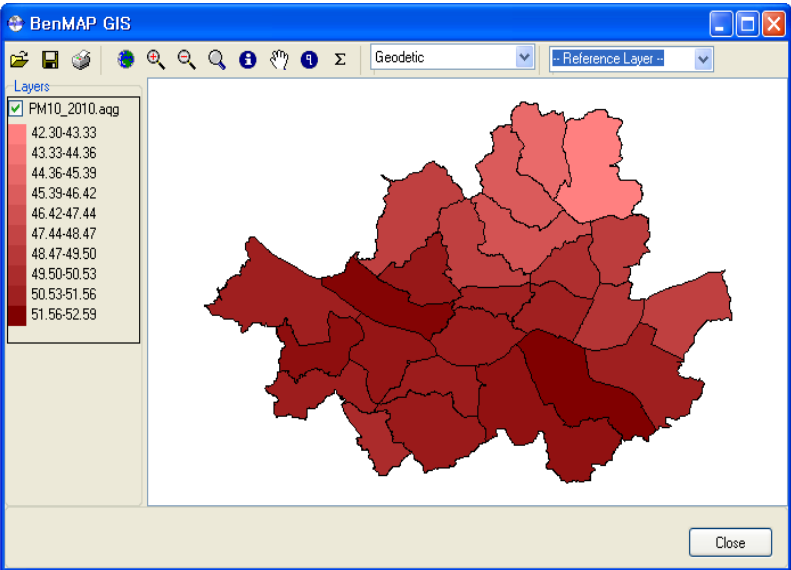
첫째, 분석 대상지역은 서울특별시이며, 연구대상 인구집단은 65세 이상 연령집단을 대상으로 하였다. 인구자료는 통계청의 2010년 주민등록 인구자료를 사용하였으며, 서울시의 65세 이상 연령집단의 총 인구수는 1,002,770명이고, 서울시 구별 인구분포는 〈그림 3-6〉과 같다.



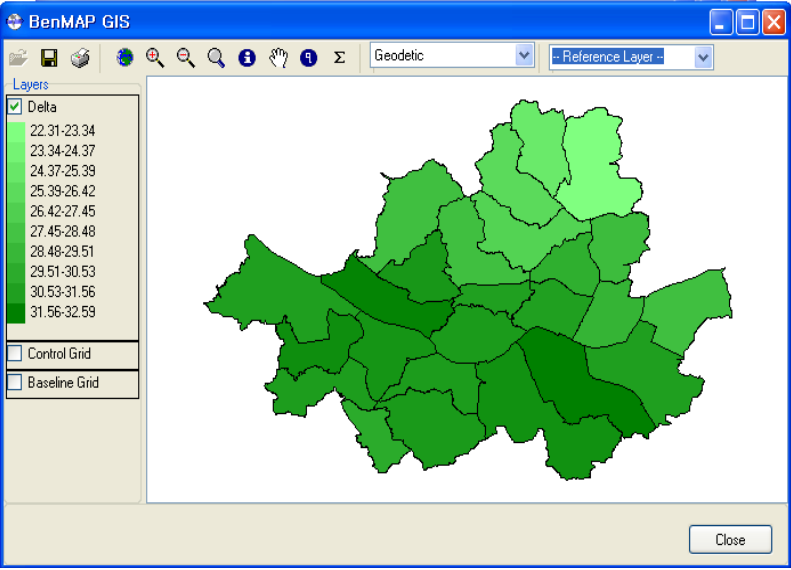
〈그림 3-6〉 서울시 구별 65세 이상 연령집단의 인구분포

둘째, 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 개선으로 인한 건강편익을 산출하기 위해 2010년 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도가 WHO에서 권고하고 있는 대기질 기준을 달성하고 가정하였다. WHO에서는 대기오염으로 인한 건강영향에 관한 방대한 자료를 검토한 과학적 근거에 기초하여 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 대기질 권고기준을 발표하였다(WHO, 2006). WHO에서는 미세먼지(PM₁₀)의 연평균 농도를 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 초미세먼지(PM_{2.5}) 연평균 농도를 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 권고하고 있다(WHO, 2006).

미세먼지(PM₁₀) 농도의 기준 시나리오인 2010년 농도는 국립환경과학원의 대기오염 측정망 자료를 사용하였다. 2010년 대기오염자동측정망에서 측정한 서울지역의 미세먼지(PM₁₀) 농도 분포는 〈그림 3-7〉과 같으며, 서울시 구별 연평균 농도값은 42~53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 미세먼지(PM₁₀) 농도의 목표 시나리오인 WHO 권고 기준 연평균 농도 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성하도록 'rolling back to standard' 방법으로 미세먼지(PM₁₀) 농도를 시뮬레이션하였다. 기준 시나리오인 2010년 미세먼지(PM₁₀) 농도와 목표 시나리오인 WHO 권고 기준 달성 시 미세먼지(PM₁₀) 농도값의 차이는 〈그림 3-8〉과 같으며, 서울시 구별 연평균 농도는 최저 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최고 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에 분포하였다.

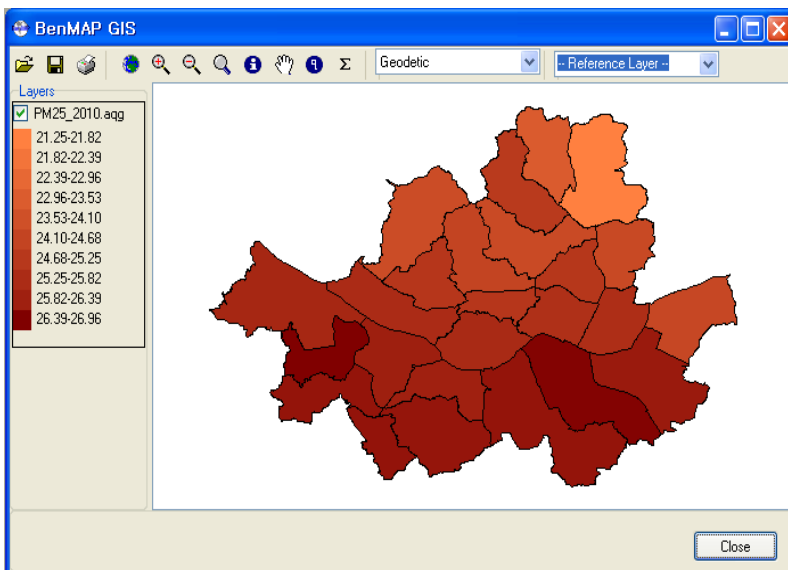


〈그림 3-7〉 2010년 서울시 구별 미세먼지(PM₁₀) 농도 분포

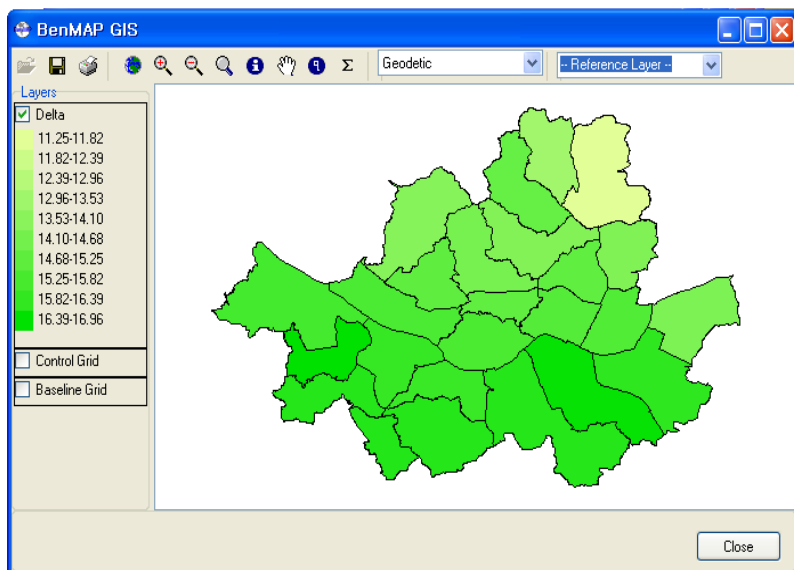


〈그림 3-8〉 2010년 서울시 구별 미세먼지(PM₁₀) 농도와 WHO
기준 달성시 농도 차이

초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 개선으로 인한 초과사망자 감소의 건강편익을 산정하기 위해, 기준 시나리오인 2010년 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 서울시보건환경연구원의 대기오염 측정망 자료를 사용하였다. 2010년 대기오염자동측정망에서 측정한 서울지역의 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 분포는 <그림 3-9>와 같으며, 서울시 구별로 연평균 농도값은 21~27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 초미세먼지(PM_{2.5})의 목표 시나리오인 WHO 권고 기준인 연평균 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성하도록 'rolling back to standard' 방법으로 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도를 시뮬레이션하였다. 기준 시나리오인 2010년 미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 목표 시나리오인 WHO 권고 기준 달성 시 미세먼지(PM_{2.5}) 농도값의 차이는 <그림 3-10>과 같으며, 서울시 구별 연평균 농도는 최저 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최고 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에 분포하였다.



<그림 3-9> 2010년 서울시 구별 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 분포



〈그림 3-10〉 2010년 서울시 구별 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 WHO
기준 달성시 농도 차이

2) 미세먼지(PM₁₀)과 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 개선으로 인한 조기사망 감소의 건강편익 산정

65세 이상 연령집단을 대상으로 2010년 미세먼지(PM₁₀) 농도가 WHO의 대기질 권고기준 달성으로 인하여 발생할 것으로 추정되는 조기사망자수 감소는 〈표 3-10〉과 같다. 미세먼지(PM₁₀) 농도는 24시간 일평균 농도를 사용하였고, 건강영향 추정에서 65세 이상 인구 1,002,770명을 대상으로 하였다. 기준 사망률은 2010년 65세 이상인구를 대상으로 산출하였으며, 전체 원인 평균 사망률은 인구 10만 명당 2,501명과 심혈관계 관련질환 사망률은 인구 10만 명당 635명이었다.

2010년 서울시 미세먼지(PM₁₀) 농도가 WHO 권고기준인 연평균 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성하는 경우, 일별 미세먼지(PM₁₀) 농도와 일별 사망간의 농도-반응함수를 적용한 결과, 미세먼지(PM₁₀) 농도 개선으로 인하여 전체원인 급성 조기사망은 1.28명 (95% CI: 0.82 ~ 1.74명) 감소하고, 심혈관계 관련질환 급성 조기사망은 0.41명

(95% CI: 0.20 ~ 0.62명) 감소하는 것으로 추산되었다.

〈표 3-10〉 미세먼지(PM₁₀) 농도개선에 따른 줄어드는 급성 조기사망(65세 이상)

항목	전체원인 사망	심혈관계 관련질환 사망
인구 수	1,002,770	1,002,770
인구 10만명당 사망률	2,501	635
농도-반응함수	0.000639	0.000799
초과사망자 수	1.28 (0.82~1.74)	0.41 (0.20~0.62)

2010년 서울시 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 WHO 권고기준인 연평균 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성하는 경우, 일별 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 개선으로 인한 급성 및 만성 조기사망자수 감소를 산출하였다. 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 사망은 단기노출로 인한 급성 사망과 장기노출로 인한 만성사망이 있으며, 만성사망의 농도-반응함수는 연구대상자를 장기 추적조사한 코호트 연구결과에서 도출된다. 우리나라에서는 대기오염과 건강영향에 대한 코호트 연구결과가 없기 때문에 미국을 대상으로 한 Krewski(2000)의 농도-반응함수를 적용하여 만성 조기 사망자 수를 산출하였다.

초미세먼지(PM_{2.5})의 단기 노출로 인한 급성 조기사망은 일별 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 일별 사망간의 농도-반응함수를 적용한 결과, 65세 이상 인구집단에서 전체원인 급성 조기사망은 1.34명(95 % CI: 0.92 ~ 1.88명) 감소하고, 심혈관계 관련질환 급성 조기사망은 0.45명(95 % CI: 0.24 ~ 0.67명) 감소하는 것으로 추산되었다.

초미세먼지(PM_{2.5})의 장기 노출로 인한 만성 조기사망은 Krewski et al.(2000)의 농도-반응함수를 적용한 결과, 65세 이상 인구집단에서 전체원인 만성 조기사망은 2,067명(95 % CI: 1,419 ~ 2,702명) 감소하는 것으로 추산되었다.

〈표 3-11〉 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도개선에 따른 줄어든 급성 및 만성
조기사망(65세 이상)

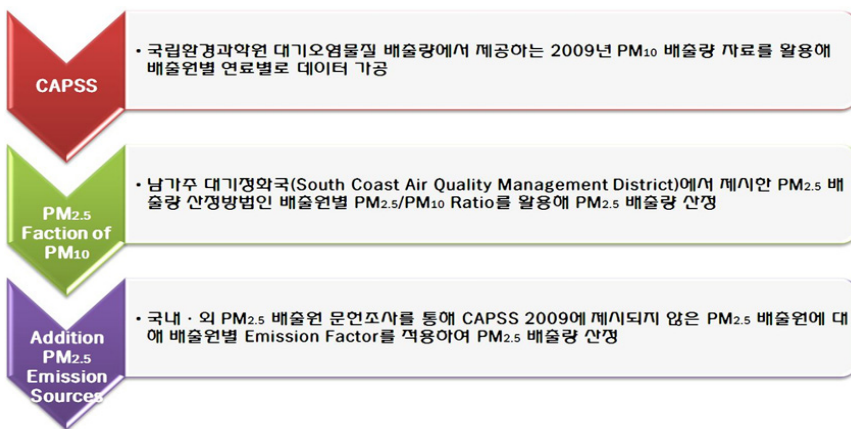
항목	급성		만성
	전체원인 조기사망	심혈관계 관련질환 조기사망	전체원인 조기사망
인구수	1,002,770	1,002,770	1,002,770
인구 10만 명당 사망률	2,501	635	2,501
농도-반응함수	0.001362	0.001734	0.005827
초과사망자수	1,34 (0.92~1.88)	0.45 (0.24~0.67)	2,067 (1,419~2,702)

| 제4장 · PM_{2.5}의 배출량 추정 및 관리정책 로드맵 |

1. PM_{2.5} 배출량 추정¹⁵⁾

가. 배출량 산정방법

본 연구에서는 아래와 같은 배출량 산정원칙을 정하여 PM_{2.5} 배출량을 추정하였다.



〈그림 4-1〉 PM_{2.5} 배출량 산정방법 개요

- 참고: 1) SCAQMD상 미확인된 배출시설에 대해서는 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 0.9 적용
 - 2010 환경부 보도자료 방법론 인용
 2) Emission Factor 적용 및 산정 방법론 적용 원칙
 - U.S. EPA, EMEP/EEA 또는 기타 문헌을 참고하여 최근에 제시된 방법론 적용

15) PM_{2.5}는 대기 중에서 생성되는 2차 입자의 비중이 크다. 그러나 오존의 배출량을 추정할 수 없듯이 2차 입자의 배출량도 추정할 수는 없다. 따라서 여기서의 배출량은 1차 입자의 배출량만을 의미한다.

1) CAPSS 2009 데이터 가공

PM_{2.5} 배출량을 산정하기 위해 먼저 국립환경과학원에서 제공¹⁶⁾하는 2009년도 대기 오염물질 배출량(Clean Air Policy Support Program, CAPSS)에서 PM₁₀ 배출량 자료를 배출원 대분류, 중분류, 소분류, 연료 대분류별로 구분하여 각 배출원별로 배출량을 재가공하였다.

CAPSS 2009 배출원 분류체계 가공	
행 레이블	합계 : PM10
기타 면오염원	342555.56
산불 및 화재	342555.56
산불	53915.76
일반화재	288639.8
도로이동오염원	16540652.76
버스	569891.9888
고속버스	4677.24497
시내버스	147278.2331
시외버스	303745.4573
전세버스	114191.0534
승용차	17938.84636
승합차	792775.7454
특수차	147892.3738
화물차	11041342.11
RV	3970811.692
비도로이동오염원	12572561.82
건설장비	4526377.975
공기압축기	99089.12851
굴삭기	2627507.283
기중기	61527.61939
로우더	181445.2706
로울러	29985.36705
불도저	37071.77978
지게차	1315189.199
천공기	42464.05183
콘크리트펌프	132098.2763
농업기계	766862.0742
선박	6475503.272
철도	719161.7188
항공	84656.7752
비산업 연소	2108540.603
농업.축산.수산업시설	479330.2186
1,2,3층(보일러)	283.80132
기타	479046.4173
상업 및 공공기관시설	244803.5096

〈그림 4-2〉 CAPSS 2009 배출원 분류체계 가공 모습

16) <http://airemiss.nier.go.kr/>

2) 남가좌 주(州) 대기정화국 PM_{2.5}/PM₁₀ 배출비율 적용

2006년 남가좌 주(州) 대기정화국에서 발표한 Final-Methodology to Calculate PM_{2.5} and PM_{2.5} Significance Thresholds 보고서를 참고하여 국내 CAPSS 2009 PM₁₀ 배출량 자료에 배출원별, 연료별로 PM_{2.5}/PM₁₀ 배출비율을 적용하여 국내 PM_{2.5} 배출량을 산정하였다. 하지만 CAPSS 2009 자료와 비교해 SCAQMD에서 제시되지 않은 일부 배출시설에 대해서는 PM_{2.5}/PM₁₀ 배출비율을 0.9¹⁷⁾를 적용하여 배출량을 산정하였으며, 본 연구에 적용한 PM_{2.5}/PM₁₀ 배출비율은 부록에 나타내었다.



〈그림 4-3〉 PM_{2.5} 배출비율을 바탕으로 한 PM_{2.5} 배출량 산정 방법

17) 환경부(2010), 「인체 위해성이 높은 초미세먼지 관리 본격화」.

3) CAPSS 2009 자료상 제시되지 않은 PM 배출목록 추가 및 PM_{2.5} 배출량 산정

본 연구에서는 국내·외 선행연구결과를 바탕으로 CAPSS에 포함되지 않은 PM 배출목록을 추가하여 국내 PM_{2.5} 배출목록 개선 및 PM_{2.5} 배출원에 대한 불확실성을 줄이고자 하였다. 추가된 배출목록으로는 휘발유 승용차, 이륜오토바이, 고기구이, 폐기물 노천소각, 농업 잔재물 노천소각, 숯가마, 아궁이, 화목난로, 포장도로 및 비포장도로의 도로비산, 주거시설 및 비주거시설의 건설활동에 의한 비산먼지, 경작 및 수확과 관련된 농업활동에 의한 비산먼지, 나대지, 축산활동 등이다.

추가된 PM 배출목록의 경우 U.S. EPA, EMEP/EEA 또는 기타 문헌을 참고하여 최근에 제시된 방법론을 적용하여 PM₁₀ 배출량 및 PM_{2.5} 배출량을 산정하였다.



〈그림 4-4〉 추가된 PM_{2.5} 배출목록 및 배출원 구분체계

가) 휘발유 승용차

국내·외 연구결과에 의하면 휘발유를 연료로 사용하는 승용차의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 배출량이 상당히 크다고 보고되고 있고, 이에 따른 관리 대책을 수립 및 마련을 준비하고 있는 실정이다. 하지만 국내 CAPSS 2009 자료에 의하면 경유를 사용하는 승용차에 대하여 PM 배출량을 산정하고 있으나 휘발유를 사용하는 승용차에서 배출되는 PM 배출량을 산정하고 있지 않고 있다. 이와 같은 연유로 본 연구에서는 휘발유를 연료로 사용하는 승용차에서 대하여 PM 배출목록으로 선정하였으며 EMEP/EEA의 Emission Inventory Guidebook에서 제시한 방법과 U.S. EPA AP-42에서 제시한 방법론을 검토하였다.

먼저 EMEP/EEA의 Emission Inventory Guidebook에서 제시된 방법론을 살펴보면 엔진의 연소 상태 또는 교통 상태에 따라 배출계수를 구분 및 제시하고 있다.

〈표 4-1〉 유럽의 휘발유 승용차에 대한 PM emission factor

Emission Standard	Urban [g/km]	Rural [g/km]	Highway [g/km]
Euro 1 & Euro 2	3.22E-03	1.84E-03	1.90E-03
Euro 3 & Euro 4	1.28E-03	8.36E-04	1.19E-03
Euro 1 &	6.60E-03	2.96E-03	6.95E-03

자료: EEA(2007), Emission Inventory Guidebook

반면 U.S. EPA의 Mobile 6.1에서는 Light Duty Gasoline Vehicle의 PM₁₀ 배출계수를 6mg/km를 제시하고 있다. 본 연구에서는 유럽에서 제시한 PM 배출계수를 적용하려 하였으나 국내 통계자료, 국내 휘발유 자동차의 엔진의 연소상태 그리고 교통 상태에 대한 자료의 불충분으로 U.S. EPA에서 제시한 배출계수를 적용하였다.

배출량 산출은 주행거리(VKT)와 배출계수의 곱으로 산출되고, PM_{2.5}/PM₁₀ 배출비율은 EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook 2007에서 제시한 1을

적용하였으며, 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$Q = VKT \times EF/1000000$$

Q : 배출량(ton/yr)
VKT : 주행거리(km/yr)
EF : 배출계수(g/km)
1000000 : 단위환산계수(g → ton)

자료: U.S. EPA(1995), AP-42

주행거리 등의 활동도자료는 교통안전공단에서 제공한 자료를 이용하였으며 전국 차량 등록대수 및 주행거리는 다음과 같다.

〈표 4-2〉 전국 휘발유 차량 등록대수 및 총 주행거리

구분	연료	등록대수	연간 주행거리(km/yr)
승용차	휘발유	8,712,276	91,456,246,082
승합차	휘발유	7,694	63,692,471
화물차	휘발유	11,455	79,816,722
특수차	휘발유	26	115,588

자료: 교통안전공단(2010), 「2010년도 자동차 주행거리 실태분석 연구」

나) 이륜차

국내·외 연구결과에 의하면 이륜차의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 배출량이 상당히 크다고 보고되고 있고, 캘리포니아의 경우 이에 따른 관리 대책 마련 및 수립하고 있는 실정이다. 하지만 국내 CAPSS 2009 자료에 의하면 이륜차에서 배출되는 PM 배출량을 산정하고 있지 않으며, 현황파악이 부족하여 관리 대책도 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 이륜차에서 대하여 PM 배출목록으로 선정하였으며 EMEP/EEA의 Emission Inventory Guidebook에서 제시한 방법론과 2010년 국내

한국대기환경학회지에서 발표된 방법론¹⁸⁾을 검토하였다. 먼저 EMEP/EEA의 Emission Inventory Guidebook에서 제시된 방법론을 살펴보면 PM₁₀ 배출계수를 이륜차의 배기량과 2행정기관, 4행정기관으로 구분하여 제시하고 있다.

〈표 4-3〉 이륜차의 배기량별 PM₁₀ 배출계수

배기량	배출기준	속도범위 (km/hr)	배출계수 (g/km)
Mopeds 〈 50 cm ³	Conventional	10~110	0.1880
	Euro 1	10~110	0.0755
	Euro 2	10~110	0.0376
	Euro 3	10~110	0.0114
2-stroke	Conventional	10~110	0.2000
	Euro 1	10~110	0.0800
	Euro 2	10~110	0.0400
	Euro 3	10~110	0.0120
〈 250 cm ³	Conventional	10~110	0.0200
	Euro 1	10~110	0.0200
	Euro 2	10~110	0.0050
	Euro 3	10~110	0.0050
〈 750 cm ³	Conventional	10~110	0.0200
	Euro 1	10~110	0.0200
	Euro 2	10~110	0.0050
	Euro 3	10~110	0.0050
〉 750 cm ³	Conventional	10~110	0.0200
	Euro 1	10~110	0.0200
	Euro 2	10~110	0.0050
	Euro 3	10~110	0.0050

자료: EEA(2007), Emission Inventory Guidebook

국내 한국대기환경학회지에서 발표된 방법론의 경우 연식 분포를 고려한 이륜차의 가중 평균 배출계수(유럽의 PM₁₀ 배출계수는 국내 배출허용기준이 2005년도는 Euro 1, 2006~2007년도는 Euro 2, 2008년도는 Euro 3을 기준으로 하고 있어 각 해당되는 연도의 가중 평균 배출계수를 적용)를 제시하고 있다(표 4-4 참조).

18) 장영기 외(2010), 「이륜차의 일 주행거리조사와 대기오염 배출량 추정」.

〈표 4-4〉 이륜차의 배출계수

구분	배출계수(g/km)
50cc 이하	0.058
50cc 이상	0.062
100cc 이상	0.014
260cc 이상	0.014

자료: 장영기 외(2010), 「이륜차의 일 주행거리조사와 대기오염 배출량 추정」.

본 연구에서는 유럽의 배출계수보다 국내 실정에 맞게 적용된 배출계수라고 판단되는 한국대기환경학회지에서 발표된 배출계수를 적용하여 배출량을 계산하였다. 배출량의 계산은 이륜차 등록대수와 배출계수 그리고 일 주행거리의 곱으로 산출되고, PM_{2.5}/PM₁₀ 배출비율은 EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook 2007에서 제시한 1을 적용하였으며, 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$Q = \text{Motorcycle} \times EF \times VKT \times 365 \times 1000000$$

Q : 배출량(ton/yr)
 VKT : 일 주행거리(km/대·일)
 EF : 배출계수(g/km)
 Motorcycle : 이륜차 등록대수
 1000000 : 단위환산계수(g →ton)

자료: EEA(2007), Emission Inventory Guidebook

일 주행거리 및 이륜차 등록대수 등의 활동도자료는 e-나라지표에서 제공한 자료를 이용하였으며 전국 배기량별 이륜차 등록대수 및 총 주행거리는 다음과 같다.

〈표 4-5〉 전국 배기량별 이륜차 등록대수 및 총 주행거리

구분	소계	50 cc 이하	50 cc 이상	100 cc 초과	260 cc 초과
이륜차 등록대수	1,828,786	40,000	909,825	873,099	45,862
일 주행거리 (km/대·day)	—	19.1	36.4	38.4	53.3

자료: e-나라지표(2011. 8), 이륜차 사용신고 현황

다) 포장도로

국내·외 연구결과에 의하면 포장도로 부문의 도로비산에 의한 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 배출량이 상당히 크다고 보고되고 있고, 이에 따른 관리 대책을 마련하고 있지만 우리나라는 아직 이에 대한 PM 배출량을 산정하고 있지 않다. 본 연구에서는 포장도로 부문의 도로비산에서 대하여 PM 배출목록으로 선정하고 U.S. EPA AP-42에서 제시한 방법론을 검토하였다. 2011년 U.S. EPA AP-42에서 제시된 포장도로 부문의 도로비산먼지 배출계수 산정식의 경우 입자크기에 따른 보정계수와 표면 silt 함량(표면 silt 함량 산출 실험시 타이어 마모와 브레이크 마모에 의한 영향이 포함되었으며 본 연구의 포장도로의 경우 포장도로와 브레이크 마모 및 타이어 마모에 의한 영향이 모두 포함되었다 볼 수 있음), 도로를 달리는 차량의 평균 무게(총 차량의 무게에 총 차량 등록대수를 나누어 평균 차중을 산정) 그리고 강우일수 보정(0.254mm 이상의 강우일수의 경우 123일을 적용하였음¹⁹⁾)의 곱으로 산출되어지며 식은 다음과 같다.

19) 서울시정개발연구원(2011), 「서울시 고농도 미세먼지 오염현상의 원인분석 및 지역별 맞춤형 관리대책」.

$$EF = K \times sL^{0.91} \times W^{1.02} \times [1-(P/(4 \times 365))]$$

- K

:

입자크기에 따른 보정계수
- sL

:

포면 silt 함량(%)
- EF

:

배출계수(g/km)
- W

:

평균차중
- P

:

0.254mm 이상의 강우일수

자료: U.S. EPA(2011), AP-42

〈표 4-6〉 입자 크기에 따른 보정계수(k)

Size range	Particle Size Multiplier k		
	g/VKT	g/VMT	lb/VMT
PM _{2.5}	0.15	0.25	0.00054

자료: U.S. EPA(2011), AP-42

〈표 4-7〉 전국의 silt loading 값

지역	값
서울	0.061
경기	0.077
인천	0.103
수도권 외 지역	0.077
평균	0.0795

자료: 국립환경과학원(2007b), 「비산먼지 배출량 산정 방법 개선 및 도로 재비산 먼지 실시간 측정방법 개발(Ⅱ)」.

〈표 4-8〉 차량별 평균 차중

차종	크기	차중(톤)	차종	크기	차중(톤)
승용차	경형	0.58	버스	전세버스	5.58
승용차	소형	1.6	버스	고속버스	5.58
승용차	중형	1.6	버스	기타	5.58
승용차	대형	1.6	화물차	경형	0.58
택시	소형	1.6	화물차	소형	1.6
택시	중형	1.6	화물차	중형	4.02
택시	대형	1.6	화물차	대형	8.11
승합차	경형	0.58	화물차	특수	9.36
승합차	소형	1.6	특수차	구난차	8.42
승합차	중형	5.58	특수차	견인차	2.46
승합차	대형	5.58	특수차	기타	2.46
승합차	특수	2.6	RV	소형	1.6
버스	시내버스	5.58	RV	중형	1.6
버스	시외버스	5.58			

자료: 건설교통부(1998), 「도로포장설계지침서 작성 및 자동차 축하중 조사연구」.

배출량 산정식의 경우 주행거리(VKT)와 배출계수의 곱으로 산출되며, 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$Q = VKT \times EF/1000000$$

Q : 배출량(ton/yr)
VKT : 주행거리(km/yr)
EF : 배출계수(g/km)
1000000 : 단위환산계수(g → ton)

자료: U.S. EPA(1995), AP-42

주행거리의 경우 2011년 교통안전공단에서 보고한 자료를 바탕으로 가공한 자료는 다음과 같다.

〈표 4-9〉 전국 차종별 연간주행거리 및 자동차 등록대수

연간 주행거리(km/yr)					자동차 등록대수	
구분	관용	자기용	사업용	합계		
승용						
일반형						
1,000cc 미만	경형	21,988,943	9,716,146,619	-	9,738,135,562	1,057,386
1,500cc 미만	소형	47,055,563	22,478,482,426	-	22,525,537,989	2,433,891
2,000cc 미만	중형	100,643,363	54,662,088,962	23,859,918,425	78,622,650,750	5,112,685
2,000cc 이상	대형	18,739,684	23,313,482,524	-	23,332,222,208	1,642,706
다목적형						
2,000cc 미만	중형	13,753,718	16,235,167,917	-	16,248,921,635	1,074,204
2,000cc 이상	대형	39,016,044	17,492,132,746	-	17,531,148,790	1,074,149
기타형						
2,000cc 미만	중형	1,522,999	8,003,136,343	-	8,004,659,342	532,706
2,000cc 이상	대형	18,352,948	6,719,457,112	-	6,737,810,060	412,339
1500cc 미만	소형		3,208,963	-	3,208,963	228
승합						
15인	소형	39,404,028	10,035,155,893	-	10,074,559,921	905,674
35인	중형	36,732,914	406,425,587	6,298,822,739	6,741,981,240	115,227
36인	대형	23,962,221	291,129,110	-	315,091,331	15,924
구급, 장의등	특수	84,171,281	115,105,509	-	199,276,790	13,492
화물						
일반형						
1톤 이하	소형	101,331,300	25,482,854,870	2,195,600,925	27,779,787,095	1,736,418
5톤 미만	중형	19,371,893	3,447,918,458	3,840,919,236	7,308,209,587	288,562

연간 주행거리(km/yr)						자동차 등록대수
구분		관용	자가용	사업용	합계	
5톤 이상	대형	3,296,892	1,196,455,517	4,514,784,798	5,714,537,207	136,794
덤프형						
1톤 이하	소형	1,200,295	148,625,664	9,349,241	159,175,200	21,776
5톤 미만	중형	1,712,638	143,334,055	62,547,188	207,593,881	17,143
5톤 이상	대형	3,439,855	69,882,269	36,868,168	110,190,292	6,880
벤형						
1톤 이하	소형	53,395,967	9,050,504,475	571,839,587	9,675,740,029	655,401
5톤 미만	중형	874,160	126,897,652	12,953,456	140,725,268	7,372
5톤 이상	대형		903,798	9,696,867	10,600,665	315
	특수용도형	10,930	210,815	43,700	265,445	43,700
특수						
견인형		934,210	104,840,089	-	105,774,299	32,380
구난형		1,004,947	61,223,990	-	62,228,937	10,722
특수 작업형		9,386,245	47,869,279	-	57,255,524	11,748

자료: 교통안전공단(2011), 2010년도 자동차 주행거리 실태분석 연구

라) 비포장도로

비포장도로의 경우 포장도로와 달리 도로 노면의 구성, 노면의 수분 함량, 자동차의 속도 및 중량 등의 영향으로 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 배출량이 상당히 크다고 보고되고 있으나, 현재 국내 CAPSS 2009 자료에 의하면 비포장도로에 대하여 PM 배출량을 산정하고 있지 않다. 본 연구에서는 비포장도로 부문의 비산먼지 배출량 산정을 위해 참고한 CARB(2007)의 방법론을 따랐다.²⁰⁾ CARB(2007)에서 제시된 비포장도로의 PM₁₀ 배출계수는 2 lbs/mile로 도로의 형태별로 제시하고 있다. 배출량의 경우 비포장도로의 길이와 배출계수 그리고 강우일수 보정(0.254mm 이상의 강우일수의 경우 123일을 적용)의 곱으로 계산되어지며 계산식은 다음과 같다.

$$Q = VMT \times EF \times [1 - (P/365)]$$

Q : 배출량(ton/yr)
EF : 배출계수(lbs/mile)
VMT : 비포장도로의 길이(km)
P : 0.254mm 이상의 강우일수

자료: CARB(2007), Unpaved Road Dust

〈표 4-10〉 비포장도로의 형태별 PM₁₀ 배출계수

(단위: lbs/mile)

Cite &Country	U.S. Forest &Parks	BLM &BIA
2,0	2,0	2,0

비포장도로 길이 산정방법은 국립환경과학원²¹⁾에서 제시된 방법을 이용하였으며 다음과 같다.

$$\text{시도별 도로현황} \times [1 - (\text{시도별 도로포장율}/100)]$$

20) AP-42와 CARB(2001, 2006)의 방법론을 종합하여 배출계수 및 배출량 산정식 등을 제시하였다.

21) 국립환경과학원(2009a), 「PM_{2.5} 대기환경기준 설정을 위한 연구」.

또한, CARB(2007)에서는 비포장도로에 대하여 1일 비포장도로를 통과하는 차량을 10대로 가정하여 배출량을 산출하는 방법론을 제시하고 있는데, 국내에서는 이에 관련된 활동도를 추정하기 어려워 1일 통과 차량을 20대로 가정²²⁾하여 배출량을 계산하였으며, PM_{2.5}/PM₁₀ 배출비율은 0.1²³⁾을 적용하여 PM_{2.5} 배출량을 계산하였다.

〈표 4-11〉 전국 도로현황 및 도로포장률

시도별	도로현황(km)	도로포장률(%)	비포장도로길이(km)
서울	8144,505	100.0	0
부산	3020,244	96.9	93,628
대구	2435.71	98.9	26,793
인천	2476,151	91.1	220,377
광주	1620,933	99.0	16,209
대전	1899,132	99.7	5,697
울산	1719,501	96.8	55,024
경기	13389,684	84.8	2035,232
강원	9742,271	72.0	2727,836
충북	6699,223	73.3	1788,693
충남	7844,373	74.9	1968,938
전북	7970,116	72.7	2175,842
전남	10267,034	72.5	2823,434
경북	12404,139	73.2	3324,309
경남	12725,883	68.7	3983,201
제주	3206,179	83.9	516,195
합계	105565,078		21761,408

자료: KOSIS(2010)

22) 국립환경과학원(2009a), 「PM_{2.5} 대기환경기준 설정을 위한 연구」

23) MRI, Background Document for Revisions to Fine Fraction Ratios Used for AP-42 Fugitive Emission Factors, Final Report prepared for the WRAP by Midwest Research Institute, Project No. 110397, February 1.

마) 건설활동

건설활동을 통해 배출되는 PM의 경우 국내 CAPSS 2009에서는 PM 배출량을 산정하고 있지 않고 있어 이의 배출량을 추정하였다. 배출량 산정을 위해 국립환경과학원(2007) 자료를 이용하였으며, 배출계수는 MIR(1997) 자료를 이용하여 본 연구에 적용하였다.

$$Q = R \times A \times (1 - P) \times S$$

- Q : 배출량(ton/yr)
R : 단위면적 및 단위활동도 기반으로 하는 배출계수
A : 활동도
P : 방지시설의 방지효율
S : 배출원이 차지하는 면적

자료: 국립환경과학원(2007a), 「비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산먼지 실시간 측정방법 개발(Ⅰ)」.

〈표 4-12〉 건설활동별 적용 배출계수

시설명		PM ₁₀ 배출계수 (kg/m ² /month)
주거시설	단독주택	0.0072
	공동주택	0.0247
	평균	0.01595
비주거시설		0.0426
도로건설		0.0941

자료: MRI(1997), MRI BACM Project(Midwest Research Institute, Best Available Control Method Project)

또한 본 연구에서는 건설공사 기간 3.5개월²⁴⁾을 적용하였고, 방지효율에 대한 고려는 이루어지지 않았으며, PM_{2.5}/PM₁₀ 배출비율은 0.1²⁵⁾을 적용하여 PM_{2.5} 배

24) 국립환경과학원(2009a), PM_{2.5} 대기환경기준 설정을 위한 연구

25) MRI, Background Document for Revisions to Fine Fraction Ratios Used for AP-42 Fugitive Emission Factors, Final Report prepared for the WRAP by Midwest Research Institute, Project No. 110397, February 1.

출량을 계산하였다.

MIR(1997)의 건설활동에 의한 PM₁₀ 배출계수는 건설공사별(단독주택, 공동주택, 비주거시설, 도로건설)로 제시하고 있으며, 국내 전국 용도별 착공 면적은 크게 주거시설과 비주거시설로 나누어 구별하고 있다.

〈표 4-13〉 2010년 전국 용도별 착공 면적

(단위: 1000 m²)

용도별	주거시설	비주거시설			
		상업용	공업용	교육 및 사회	기타
총 합계	24,416	20,434	14,922	8,336	14,374

자료: 국토해양부(2011), 「건축통계연보」.

바) 농업활동

농업활동 부문의 비산먼지에서 대해 PM 배출량 산정을 위해 CARB(2007)와 WRAP(Western Regional Air Partnership) 자료를 이용하였다. CARB(2007)에 의하면 농업활동으로 발생하는 비산먼지는 크게 경지정리와 수확시로 구분하고 있으며, 본 연구에서는 경지 정리 시 발생하는 비산먼지의 경우 전국 밭 면적만 고려하여 CARB(2007)에 제시된 배출계수 Wheat all(밀 농사)를 적용해 PM₁₀ 배출량을 계산하였으며, 수확시에 발생하는 비산먼지의 경우 미국, 맥류, 잡곡, 두류, 서류, 채소, 특용작물, 과수, 기타수원지, 시설작물, 기타작물별 재배 면적에 CARB(2007)와 WRAP(Western Regional Air Partnership)에서 제시된 배출수를 적용하여 PM₁₀ 배출량을 계산하였다. PM_{2.5}/PM₁₀ 배출비율은 0.15²⁶⁾를 적용하였다.

$$Q = EF \times \text{Acres}$$

26) MRI, Background Document for Revisions to Fine Fraction Ratios Used for AP-42 Fugitive Emission Factors, Final Report prepared for the WRAP by Midwest Research Institute, Project No. 110397, February 1.

Q : 배출량(ton/yr)
EF : 배출계수(kg/m²)
Acres : 경작지 면적(m²)

자료: CARB(2007), Agricultural Harvest Operation

〈표 4-14〉 농업활동 경지 정리 시 PM₁₀ 배출계수

배출계수	lbs/acre	g/m ²
wheat all	3.7	0.41

자료: CARB(2007), Agricultural Land Preparation

〈표 4-15〉 2010년 전국 밭 면적

(단위: ha)

구분	전국
밭 면적	731,161

자료: 농림수산식품부(2011), 「농림수산식품통계연보」.

〈표 4-16〉 농업활동 수확 시 적용된 배출계수

구분	배출계수 적용 작물	배출계수 (lbs/acre)	재배면적 ³⁾ 단위(ha)
미 곡	Rice	1.68 ¹⁾	892074
맥 류	Barley &Wheat	5.8 ¹⁾	51081
잡 곡	Miscellaneous Grains	2.8 ²⁾	24644
두 류	Pulses	2.8 ²⁾	83129
서 류	Potatoes	1.7 ¹⁾	41915
채 소	Vegetables	0.08 ¹⁾	206148
특용작물	Specialty Crops	2.8 ²⁾	85891
과 수	Orchards	0.085 ¹⁾	156247
기타수원지	Other Tree Crops	2.8 ²⁾	51994
시설작물	Greenhouse Crops	0 ¹⁾	91487
기타작물	Other	2.8 ²⁾	135208

자료: 1) Western Regional Air Partnership, Fugitive Dust handbook

2) CARB(2007), Agricultural land Preparation

3) 농림수산식품부(2011), 농림수산식품통계연보

사) 나대지

나대지란 지상에 건축물 등이 없는 대지를 의미하며, 나대지의 경우 일반적으로 계획 또는 관리되어지지 않아 바람 등의 영향에 의해 표면의 토양 성분 혹은 작은 알갱이가 대기 중으로 방출되어 대기 중 PM 농도를 높이는데 기여하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 나대지의 비산먼지 배출량을 산정하기 위해 풍속에 근거한 AP-42 방법과 MM5 모형을 이용한 WRAP RMC 방법을 검토하고 수도권에 적합한 방법을 제안한 국립환경과학원(2007) 자료에 강우일수를 보정한 식을 사용하였으며, PM_{2.5} 배출량 추정을 위해 PM_{2.5}/PM₁₀ 성분비 0.15를 제시한 MIR(2006) 자료를 이용하였다.

$$Q = R \times A \times (1 - P_1) \times S \times [1 - (P_2 / 365)]$$

Q : 배출량(ton/yr)

R : 단위면적 및 단위활동도 기반으로 하는 배출계수

A : 활동도

P₁ : 방지시설의 방지효율

S : 배출원이 차지하는 면적

P₂ : 0.254mm 이상 강우일수

자료: 국립환경과학원(2007a), 「비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산먼지 실시간 측정방법 개발(I)」.

활동도 자료의 경우 전국 나대지는 지목분류상의 나대지, 청라 및 송도 매립지, 한강 둔치 지구와 학교 운동장 등이 있으며, 이 중에서 흙 표면이 대기에 노출되어 있고, 1일 1회 이상 지면 교란이 있는 학교 운동장만을 선정하여 산출하였다(국립환경과학원, 2009).

〈표 4-17〉 지역별 풍화에 의한 비산먼지 배출계수

(단위 : kg/m²/yr)

지역	배출계수	고려된 측정소	강우일수를 보정한 PM ₁₀ 배출계수
수도권지역	0.183	서울, 인천, 수원	0.121
부산경남지역	0.31	부산, 마산, 진주	0.206
대구경북지역	0.201	대구, 울산, 포항, 구미	0.133
광주지역	0.117	광주	0.078
전남지역	0.292	목포, 순천, 장흥	0.194
대전지역	0.066	대전	0.044
충남지역	0.182	서산, 천안	0.121
충북지역	0.082	충주, 청주	0.054
강원도지역	0.19	춘천, 강릉	0.126
전북지역	0.281	군산, 전주	0.186
제주지역	0.577	제주	0.383

주: 강우일수 보정 배출계수 = 배출계수 × (1 - (강우일수/365)) ; 강우일수 123일 적용

자료: 국립환경과학원(2007b), 「비산먼지 배출량 산정 방법 개선 및 도로 재비산 먼지 실시간 측정방법 개발(Ⅱ)」

〈표 4-18〉 지역별 체육장의 면적

(단위: m²)

구분	유치원	초등학교	중학교	일반계 고등학교	실업계 고등학교	특수학교	기타 중고등학교	대학교	합계
서울특별시	163,907	4,054,582	2,423,195	2,541,350	644,564	71,093	54,991	873,627	10,827,309
부산광역시	101,513	1,791,412	1,076,472	893,969	283,669	31,665	3,462	351,491	4,533,653
대구광역시	64,891	1,681,472	859,596	937,702	240,388	37,207	422	232,312	4,053,990
인천광역시	50,739	1,405,510	810,582	629,284	250,988	10,430	5,268	249,031	3,411,832
광주광역시	38,471	856,965	487,716	616,436	149,244	37,884	750	340,503	2,527,969
대전광역시	56,524	1,059,605	648,478	534,510	140,420	16,248	1,125	299,907	2,756,817
울산광역시	50,471	775,696	384,857	332,318	111,966	10,255	0	97,381	1,762,944
경기도	263,905	7,913,997	3,675,636	2,032,708	1,284,633	76,427	5,939	1,218,193	16,471,438
강원도	48,139	3,945,566	1,140,594	842,700	547,282	30,348	0	439,419	6,994,048
충청북도	31,363	2,693,003	1,514,106	678,378	358,237	30,941	0	296,324	5,602,352
충청남도	71,293	3,691,616	1,758,139	958,054	507,279	22,822	8,218	587,499	7,604,920
전라북도	85,338	3,960,002	1,912,220	902,907	675,326	18,046	0	351,971	7,905,810
전라남도	49,629	5,041,104	2,893,193	919,695	724,160	28,194	0	318,214	9,974,139
경상북도	286,553	6,028,183	2,492,395	1,863,413	1,099,075	34,619	4,910	763,360	12,572,508
경상남도	145,027	3,731,269	2,117,500	1,238,331	605,609	30,040	2,610	298,226	8,168,612
제주도	18,812	754,498	384,328	237,093	186,815	5,027	0	96,404	1,682,977

자료: 한국교육개발원(2007), 「교육통계연보」.

아) 축산활동

축산활동의 경우 일반 비산먼지와 달리 바이러스, 세균, 곰팡이 등의 미생물과 유해가스, 중금속 등 구성 성분이 높고, 인체 흡입시 생물반응을 유도하게 되므로 건강상 위해성이 크다고 보고되고 있다. 실제로 미국산업안전보건연구원(The National Institute for Occupational Safety and Health)의 경우 미국 축산농업인들의 호흡기 관련 질환에 대한 연구를 실시하고 있으며, 관련된 연구를 바탕으로 작업장 내·외적인 저감 대책 수립 및 제안을 하고 있고 미국을 비롯한 유럽에서도 축산활동에 의한 PM 배출량을 배출목록으로 설정해 관리를 실시하고 있다.

본 연구에서는 축산활동 부문의 비산먼지 배출량 산정을 위해 EMEP/EEA의 Emission Inventory Guidebook 2009 자료를 이용하였다. EMEP/EEA의 Emission Inventory Guidebook 2009에서 제시된 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 배출계수는 축종별, 축사형태별로 구분하여 각각의 배출계수를 제공하고 있으며, 가축 두당 1년에 배출되는 PM_{2.5}의 배출계수는 다음과 같다.

〈표 4-19〉 축종별 PM_{2.5} 배출계수

(단위: kg/yr-마리)

구분	한우	젖소	육우	산란계	육계	비육돈	모돈	자돈
배출계수	0.23	0.23	0.16	0.002	0.007	0.07	0.07	0.029

주²⁷⁾ : 한우와 육우: 육우의 solid 형태 축사의 배출계수 적용
 산란계: cage 형태 축사의 배출계수 적용
 자돈: 돼지-월령 2개월 미만
 비육돈: 자돈과 모돈을 제외한 나머지 사육두수
 자돈과 비육돈의 경우 slurry 적용

자료: EMEP/EEA(2009), Emission Inventory Guidebook

배출량 산출식의 경우 축종별 사육두수와 배출계수의 곱으로 산출되어지며 산출식은 아래와 같다

27) 서울시정개발연구원(2011), 「서울시 고농도 미세먼지 오염현상의 원인분석 및 지역별 맞춤형 관리대책」.

$$Q = EF \times NB$$

Q : 배출량(ton/yr)
 EF : 배출계수(kg/yr-마리)
 NB : 가축별 사육두수(마리)

자료: EMEP/EEA(2009), Emission Inventory Guidebook

〈표 4-20〉 전국 가축별 사육두수

(단위: 마리)

구분	한우	젖소	육우	산란계
전국 사육두수	2,818,000	404,000	123,000	63,199,000
구분	육계	비육돈	모돈	자돈
전국 사육두수	69,387,000	5,129,000	950,000	2,772,000

자료: 통계청(2012), 「2012년 4분기(3월 1일 기준) 가축동향조사 결과」.

자) 노천소각_폐기물

노천소각이란 인위적으로 폐기물 또는 산업잔재물을 개방된 공간에서 소각 처리하는 행위로 정의할 수 있으며, 생활쓰레기 노천소각은 인체에 치명적인 해를 주는 환경호르몬을 다량으로 발생 시키며, 쓰레기를 태웠을 때 발생하는 바닥재와 비산재는 인체유해물질인 납과 수은, 카드뮴, 다이옥신 등이 다량 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 또한 노천소각으로 인해 발생하는 대기오염물질은 처리시설을 거치지 않고 직접 대기 중으로 확산되기 때문에 대기오염물질에 대한 피해는 심각한 상황이 되고 있지만 이를 규제하는 제도적 방법의 준비도 미흡한 상황이다(한국대기환경학회, 2008). 미국 캘리포니아 주의 PM_{2.5} 배출량을 살펴보면 폐기물 노천소각 및 처리에 의한 영향이 상당히 큰 것으로 보고되고 있으며, 이에 따른 관리 대책을 수립하여 주정부차원 또는 연방정부차원에서 PM_{2.5} 발생량을 저감하려고 노력하고

있다.²⁸⁾

본 연구에서는 폐기물 노천소각 배출량 산정을 위해 미국 EPA식을 참조하여 국내에 적용할 수 있도록 수정한 노천소각에 의한 배출량 산정식 및 기본 가정을 제시한 서울시정개발연구원²⁹⁾ 자료를 이용하여 배출량을 계산하였으며, 배출량 계산시 필요한 배출계수는 U.S. EPA EIIP, Volum III, 2001을 참고하여 배출량을 산정하였다.

$$Q = \text{농업인구} \times \text{1인당 폐기물 발생량} \times \text{배출계수} \times 0.5$$

Q	: 배출량(ton/yr)
1인당 폐기물 발생량 ^{a)}	: 1.02(kg/day-명)
배출계수 ^{b)}	: 34.8(lbs/ton)
농업인구 ^{c)}	: 3,117,322(명)

자료: a) 환경부(2009), 전국폐기물 발생 및 처리현황

b) U.S. EPA(2001), EIIP, Volum III

c) 환경부(2009), 전국폐기물 발생 및 처리현황

배출량 산정을 위한 연구 가정은 다음과 같다.

- 노천소각은 농가에서 한다.
- 농가에서 전구 평균 1인당 폐기물 발생량이 배출된다.
- 농가의 폐기물 중 노천 소각하는 비율은 50 %로 가정한다.

28) SCAQMD(2007), 2007 Air Quality Management Plan

29) 서울시정개발연구원(2011), 「서울시 고농도 미세먼지 오염현상의 원인분석 및 지역별 맞춤형 관리대책」.

차) 노천소각_농업잔재물

농업잔재물 노천소각의 PM_{2.5} 배출량 산정을 위해 California Air Resources Board의 배출량 산출방법 및 배출계수 그리고 일부 국내에서 제시된 배출계수를 사용하였으며, 2009 농림통계연보에서 제시된 2008년도 농지면적을 바탕으로 PM_{2.5} 배출량을 산정하였다. PM_{2.5} 배출량은 배출계수와 경작지 면적 그리고 작물단위당 소각량의 곱으로 산정되며, 산정식은 다음과 같다.

$$Q = EF \times Acres \times Fule \text{ Loading}$$

Q	: 배출량(ton/yr)
Acres	: 경작지 면적
Fule Loading	: 작물단위당 소각량

자료: CARB(2006), Areawide Emissions Inventory
Methodology Agricultural Burning

본 연구에서는 농업잔재물 노천소각에 의한 PM_{2.5} 배출량을 추정하기 위해 기존 선행 연구사례³⁰⁾에서 제시한 가정을 적용하였으며, 제시된 가정은 다음과 같다.

- 잡초 제거의 경우 국내 활동도 추정이 어려워 가지치기와 밭 작물에 대해 배출량 추정
- 벼의 경우 현장에서 소각되는 경우 거의 없기에(가축사료 등에 이용) 제외
- 채소의 잔재물의 경우 소각처리보다 퇴비로 활용하기에 제외
- 뽕밭 및 기타 수원지, 기타 작물 재배 면적 그리고 시설작물의 경우 소각되는 경우가 거의 없기에 제외

30) 국립환경과학원(2009a), 「PM_{2.5} 대기환경기준 설정을 위한 연구」

〈표 4-21〉 맥류 소각에 의한 PM_{2.5} 배출계수

(단위: g/m²)

구분	배출계수
맥류	9.5

자료: 고지연 외(2004), 「보릿짚의 수분함량 및 수확시기가 소각 시 대기오염물질 발생에 미치는 영향」.

〈표 4-22〉 본 연구에 적용된 농업 부산물 소각에 의한 PM_{2.5} 배출계수

구분		배출계수 (lbs/ton)	Fuel Loading (ton/acre)
PM _{2.5}	과수	1.01	2.3
	잡곡	10.9	4.2
	두류	13	2.5
	기타	15.18	2.175

자료: SJVUAPCD(2005), Emission Inventory Methodology – agricultural Burning

또한 활동도 데이터는 2009년 농림통계연보에 제시된 전국 작물별 농지면적을 이용하여 PM_{2.5} 배출량을 산정하였다.

〈표 4-23〉 전국 작물별 농지면적

(단위: ha)

구분	맥류	서류	잡곡	두류	과수	특용작물
농지면적	56,320	39,991	26,375	86,763	155,470	75,723

자료: 농림수산식품부(2009), 「농림통계연보」

카) 기타 문헌자료를 참고한 PM_{2.5} 배출량

2010년 환경부에서 발표한 선행연구³¹⁾에 의하면 생물성 연소의 고기구이, 숯가마, 화목난로, 아궁이 등 위 네 가지 배출목록에 대하여 PM_{2.5} 배출량 산정 및 방법론을 제시하였다.

본 연구에서는 위 네 가지 배출목록에 대해 최근에 제시된 PM_{2.5} 배출량 산정방법 및 활동도 데이터를 이용하여 PM_{2.5} 배출량을 산정하려 하였으나, 통계 데이터의 부족 및 설문 조사 등의 방법으로 활동도를 산정하기에는 상당한 어려움이 따르기에 2010년 환경부에서 제시한 PM_{2.5} 배출량을 인용하였으며, 제시된 PM_{2.5} 배출목록 및 배출량은 다음과 같다.

〈표 4-24〉 기타 문헌자료를 참고한 PM_{2.5} 배출목록 및 배출량

배출목록	PM _{2.5} 배출량
고기구이	3,975ton/yr
숯가마	11,938ton/yr
화목난로	4,406ton/yr
아궁이	1,545ton/yr

자료: 환경부(2010), 「인체 위해성이 높은 초미세먼지 관리 본격화」

31) 환경부(2010), 인체 위해성이 높은 초미세먼지 관리 본격화

2. PM_{2.5} 배출량 산정 결과

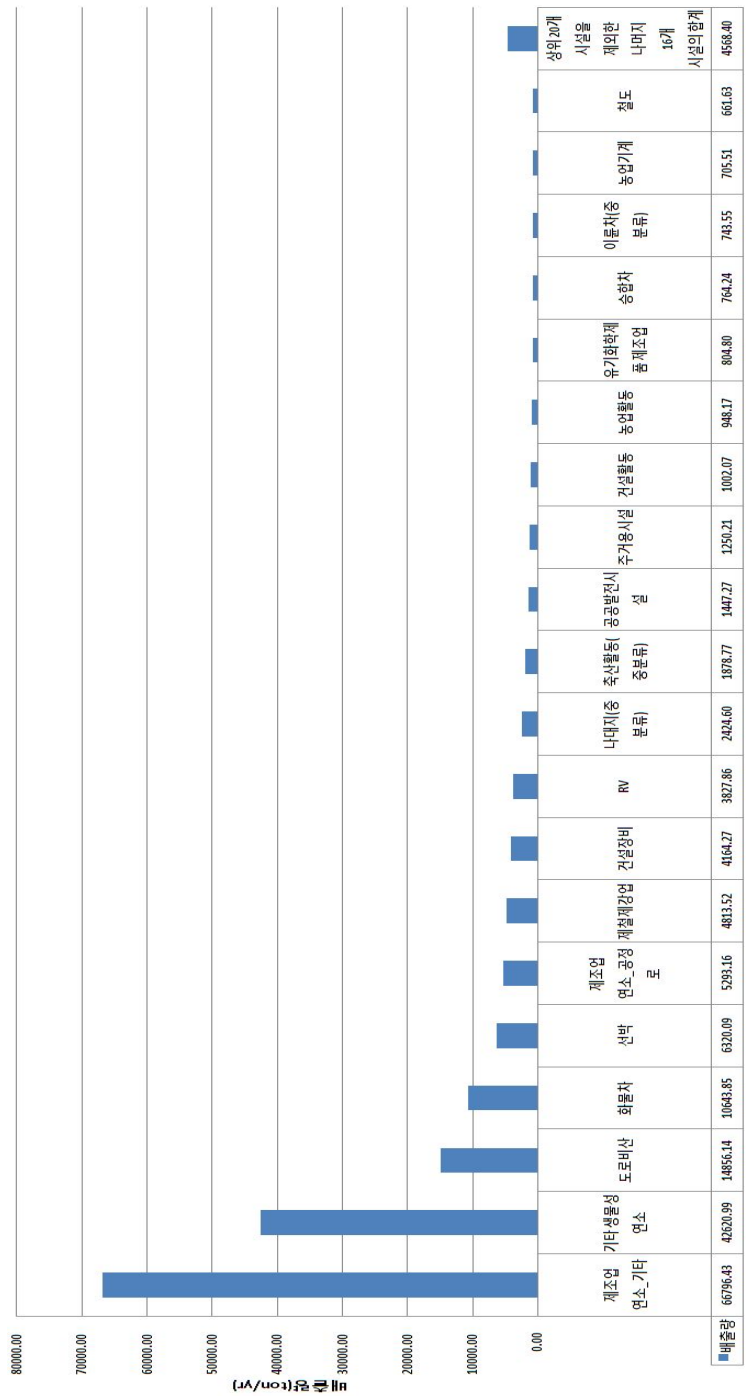
가. 중분류별 배출량 결과

현재 CAPSS 2009 자료는 PM_{2.5} 배출량을 산정하고 있지 않고 기존의 일부 연구진들을 통해 산출된 배출량 또한 중분류, 소분류별로 배출량을 산정하고 있지 않았기에 본 장에서는 중분류별 PM_{2.5}의 연간 배출특성을 살펴보았다.

제조업연소 중 기타 배출목록이 연간 약 66,796 ton으로 전체 배출량 중 약 38%로 가장 높은 비율을 나타내었으며, 기타 생물성 연소가 42,621 ton으로 전체 배출량 중 약 24%, 도로비산이 약 14,856 ton으로 전체 배출량 중 약 8%를 차지하는 순으로 높게 나타났으며, 상위 3개 배출목록 총합은 약 124,273ton으로 전체 배출량의 약 70%를 차지하는 것으로 나타나 이들 배출원의 관리가 중요함을 알 수 있었다.

PM₁₀의 경우 도로비산, 제조업연소 중 기타, 기타 생물성 연소의 배출 순위를 보였지만, PM_{2.5}의 경우 제조업연소 중 기타, 기타 생물성 연소, 도로비산 순으로 많이 배출하여 PM₁₀의 순서와는 다름을 확인하였다.³²⁾ 중분류별 PM_{2.5}의 배출 우선 순위 및 배출량은 <그림 4-5>와 같고 상위 20개 시설을 제외한 나머지 16개 시설 목록은 <표 4-25>에 나타내었다. <그림 4-6>은 중분류별 배출비율을 나타낸 것이다.

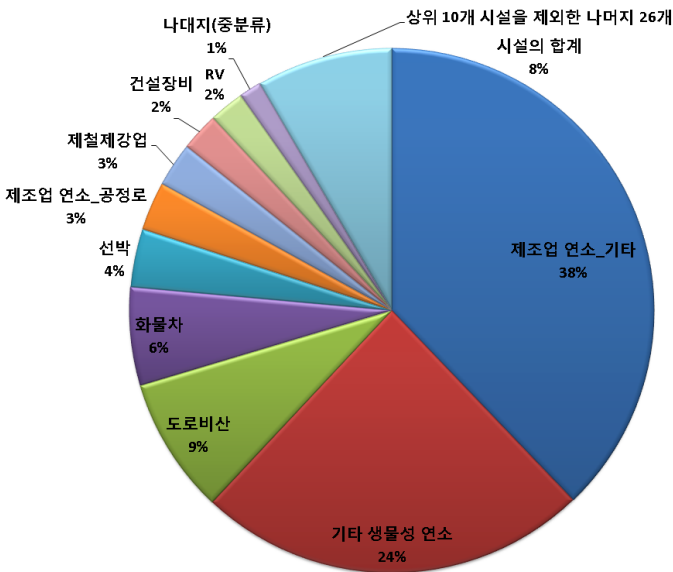
32) PM₁₀ 배출원과 PM_{2.5}의 주요 배출원을 비교해볼 때 도로비산이 35%에서 8%로, 제조업 연소 중 기타가 23%에서 38%로, 기타 생물성 연소가 12%에서 24%로 각각의 배출비율이 크게 달라짐을 확인할 수 있었다.



〈그림 4-5〉 PM_{2.5}의 종단류별 배출원순위 및 배출량 : KEI 연구결과

〈표 4-25〉 PM_{2.5}의 중분류별 상위 20위 이하 배출목록 및 배출량

배출목록	배출량(ton/yr)
민간발전시설	635.06
승용차	566.25
버스	549.38
제조업 연소_연소 시설	493.80
농업, 축산, 수산업시설	418.97
무기화학제품 제조업	365.47
산불 및 화재	317.23
폐기물소각	221.66
상업 및 공공기관시설	216.85
기타 제조업	203.98
석유정제시설	201.74
특수차	142.57
석유제품산업	82.06
항공	76.19
지역난방시설	49.75
목재, 펄프 제조업	27.44



〈그림 4-6〉 PM_{2.5}의 중분류별 배출비율

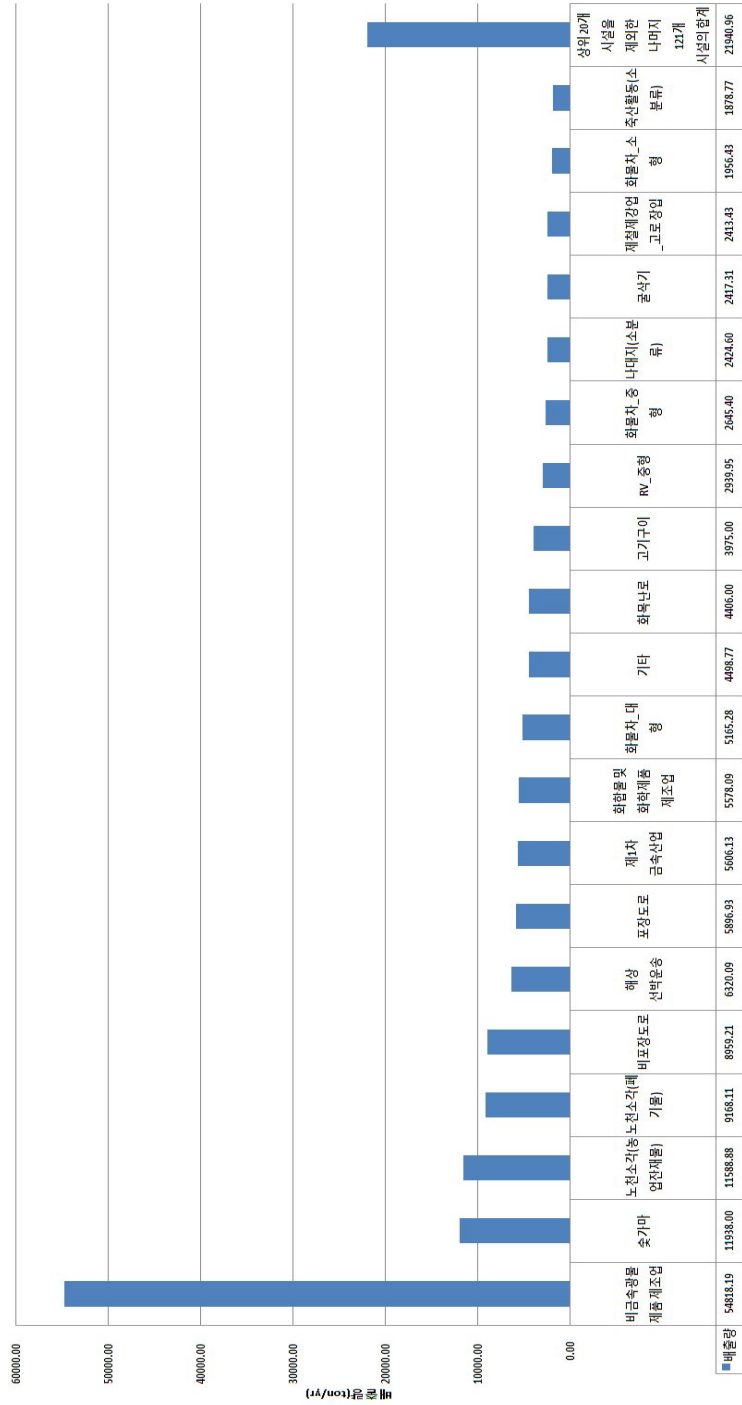
나. 소분류별 PM_{2.5} 배출량 결과

비금속광물제품 제조업이 연간 약 54,818ton으로 전체 배출량 중 약 31%로 가장 높은 비율을 나타내었으며, 다음으로 숯가마에서 약 11,938ton으로 전체 배출량 중 약 7%, 농업잔재물이 약 11,589ton으로 전체 배출량 중 약 7%를 차지하는 순서로 나타났으며, 이 들 상위 3개의 배출목록 총합은 약 124,273ton으로 전체 배출량 의 약 44%를 차지하였다. 이러한 결과는 비포장도로(도로비산), 비금속광물제품 제조업(제조업연소_기타), 포장도로(도로비산)의 배출 우선순위를 나타낸 PM₁₀의 경우와는 차이가 있는 것이다. 이러한 결과는 PM_{2.5} 관리대상 배출원이 PM₁₀과는 다를 수 있으며, 따라서 PM_{2.5} 배출량 인벤토리가 별도로 필요함을 의미하는 것이다.³³⁾ 비금속광물제품 제조업의 경우 SCAQMD 상 제시된 배출원 목록과 CAPSS 배출목록이 불일치하는 항목에 대해 일률적으로 PM_{2.5}/PM₁₀ 분율 0.9³⁴⁾를 적용하였기 때문에 어느 정도 불확실성이 존재할 것으로 판단되지만, 공통적으로 비금속광물제품 제조업 부문에서 상당량의 PM_{2.5}가 발생한다는 사실은 변함이 없다.

소분류별 PM_{2.5} 배출 우선순위 및 배출량에 대해 <그림 4-7>에 나타내었고, 상위 20개 시설을 제외한 나머지 121개 배출원 목록의 배출량은 <표 4-26>과 같다. 그리고 <그림 4-8>은 중분류별 배출비율을 나타낸 것이다.

33) 예를 들어, PM₁₀과 PM_{2.5}의 배출량 비중을 살펴보면 비포장도로가 27%에서 5%로, 비금속광물제품 제조업이 19%에서 31%로, 포장도로가 7%에서 3%로, 숯가마와 농업잔재물의 경우 각각 4%에서 7%로 각각의 배출비율이 크게 달라짐을 확인할 수 있었고, 이는 PM₁₀ 배출원 관리계획과는 차별된 계획이 수립되어야 된다는 점을 확인할 수 있다.

34) 환경부(2010)에서는 일률적으로 0.9를 적용하였다.



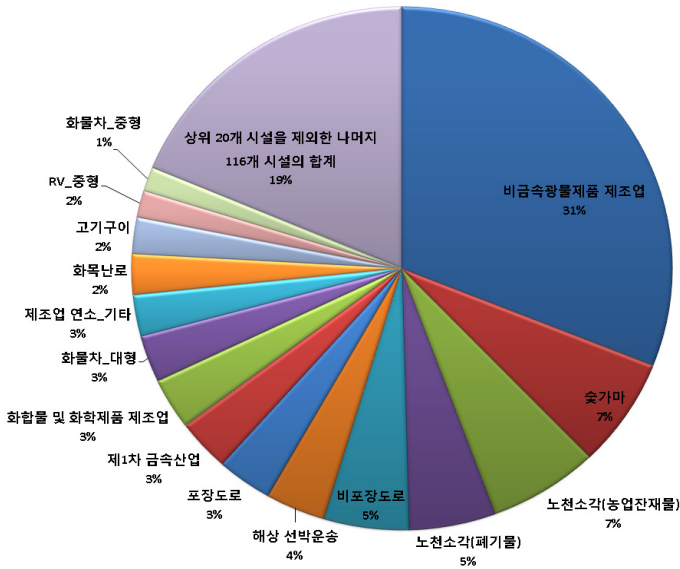
〈그림 4-7〉 PM_{2.5}의 소분류별 배출우선순위 및 배출량

〈표 4-26〉 PM_{2.5}의 소분류별 상위 20위 이하 배출목록 및 배출량

배출원 대분류	배출원 소분류	배출량(ton/yr)
기타 먼오염원	아궁이	1545.00
비산업 연소	주거용시설_기타	1217.19
비도로이동오염원	지게차	1209.97
에너지산업 연소	공공발전시설_1,2,3종(보일러)	1188.25
생산공정	제철제강업_소결로(연소공정 제외)	895.73
도로이동오염원	RV_소형	887.91
비산먼지	비주거시설	865.76
생산공정	유기화학제품 제조업_무수프탈산	804.80
생산공정	제철제강업_출선공정	752.42
도로이동오염원	이륜차(소분류)	743.55
에너지산업 연소	민간발전시설_1,2,3종(보일러)	619.97
제조업 연소	석회 생산	618.64
비도로이동오염원	기관차	570.34
도로이동오염원	승용차_휘발유	549.60
비산먼지	수확	498.51
제조업 연소	연소 시설_1,2,3종(보일러)	493.25
도로이동오염원	승합차_소형	478.31
비산먼지	경작	449.66
비산업 연소	농업, 축산, 수산업시설_기타	418.70
생산공정	제철제강업_전기로	388.58
도로이동오염원	덤프트럭	383.09
비도로이동오염원	경운기	365.15
생산공정	제철제강업_코우크스 오븐(누출 및 소화)	340.32
도로이동오염원	화물차_특수	327.87
도로이동오염원	시외버스	292.81
기타 먼오염원	일반화재	269.30
생산공정	무기화학제품 제조업_Carbon black 생산	264.72
비도로이동오염원	트랙터	260.99
에너지산업 연소	공공발전시설_가스터빈	248.27
도로이동오염원	승합차_중형	223.88
비산업 연소	상업 및 공공기관시설_기타	209.02
비도로이동오염원	로우더	166.93
도로이동오염원	콘크리트믹서트럭	165.79
제조업 연소	조립금속제품 제조업(기계 및 가구 제외)	161.84
도로이동오염원	시내버스	141.98
비산먼지	주거시설	136.30
생산공정	기타 제조업_유리(탄소제거공정)	123.35
비도로이동오염원	콘크리트펌프	121.53
에너지산업 연소	석유정제시설_공정로	115.94
폐기물처리	사업장폐기물(플래어링 제외)	111.73
도로이동오염원	전세버스	110.08
폐기물처리	생활폐기물	109.93

배출원 대분류	배출원 소분류	배출량(ton/yr)
제조업 연소	음, 식료품 제조업	99.88
비도로이동오염원	동차	91.29
비도로이동오염원	공기압축기	91.16
에너지산업 연소	석유정제시설_1,2,3종(보일러)	85.80
생산공정	석유제품산업_석유제품가공	82.06
생산공정	기타 제조업_석회(탄소제거공정)	80.63
도로이동오염원	특수차 기타	74.51
제조업 연소	전자부품, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	64.57
제조업 연소	기타 기계 및 장비 제조업	64.14
도로이동오염원	견인차	57.88
제조업 연소	섬유제품제조업(봉제, 의복 제외)	56.92
비도로이동오염원	기중기	56.61
제조업 연소	자동차 및 트레일러 제조업	56.20
생산공정	무기화학제품 제조업_인산비료 생산	53.95
제조업 연소	고무 및 플라스틱 제품 제조업	50.28
제조업 연소	가구 및 기타제품 제조업	50.00
에너지산업 연소	지역난방시설_1,2,3종(보일러)	49.06
기타 면오염원	산불	47.93
제조업 연소	기타 전기기계 및 전기변환장치 제조업	47.56
비도로이동오염원	콤바인	46.36
제조업 연소	강철 재가열로	45.37
제조업 연소	시멘트 생산	40.63
비도로이동오염원	천공기	39.07
비도로이동오염원	국제항공	38.60
비도로이동오염원	국내항공	37.59
제조업 연소	의료, 정밀, 광학기기 및 시계 제조업	35.51
비도로이동오염원	볼도저	34.11
비도로이동오염원	이앙기	33.01
비산업 연소	주거용시설_1,2,3종(보일러)	32.14
도로이동오염원	승합차_특수	32.06
도로이동오염원	승합차 대형	29.99
비도로이동오염원	로울러	27.59
생산공정	제철제강업 산소전로	23.04
제조업 연소	펄프, 종이 및 종이제품 제조업	22.70
제조업 연소	석고제조로	22.26
생산공정	무기화학제품 제조업_요소 생산	22.04
제조업 연소	기타 운송장비 제조업	20.85
생산공정	목재, 펄프 제조업_합판 생산	20.01
제조업 연소	유리제품 생산	18.97
제조업 연소	아스팔트 콘크리트 생산	15.05
제조업 연소	봉제·의복 및 모피제품 제조업	14.84
생산공정	무기화학제품 제조업_황산암모니움 생산	13.94

배출원 대분류	배출원 소분류	배출량(ton/yr)
에너지산업 연소	민간발전시설_가스터빈	12.75
제조업 연소	회주철 주물로	11.51
제조업 연소	목재 및 나무제품 제조업(가구 제외)	11.25
제조업 연소	출판, 인쇄 및 기록매체 복제업	11.20
생산공정	무기화합제품 제조업_질산암모니움 생산	10.83
에너지산업 연소	공공발전시설_내연기관	10.75
도로이동오염원	구난차	10.18
제조업 연소	광업	8.50
제조업 연소	2차 알루미늄 생산	8.35
비산업 연소	상업 및 공공기관시설_1,2,3종(보일러)	7.82
생산공정	목재, 펄프 제조업_제지, 펄프공정	7.43
도로이동오염원	승용차_중형(경유)	7.19
도로이동오염원	승용차_소형(경유)	6.95
제조업 연소	코크스, 석유정제품 및 핵연료 제조업	6.80
제조업 연소	컴퓨터 및 사무용기기 제조업	4.94
도로이동오염원	고속버스	4.51
제조업 연소	가죽, 가방 및 신발 제조업	4.35
제조업 연소	기타 비철금속 1차 생산	4.28
제조업 연소	벽돌 및 타일 생산	3.41
도로이동오염원	승용차 대형(경유)	2.51
에너지산업 연소	민간발전시설_내연기관	2.34
제조업 연소	제지 산업(건조공정)	2.04
제조업 연소	기타 비금속광물 제품제조업	1.86
제조업 연소	담배제조업	1.68
제조업 연소	1차 구리 생산	1.51
비산업 연소	주거용시설_고정 엔진	0.88
에너지산업 연소	지역난방시설_가스터빈	0.70
제조업 연소	연소 시설_고정 엔진	0.55
제조업 연소	기타 비철금속 2차 생산	0.35
비산업 연소	농업, 축산, 수산업시설_1,2,3종(보일러)	0.28
제조업 연소	2차 구리 생산	0.10
제조업 연소	1차 납 생산	0.05
제조업 연소	소결로(제철산업)	0.01
비산업 연소	상업 및 공공기관시설_고정엔진	0.00
생산공정	무기화합제품 제조업_인산암모니움 생산	0.00
제조업 연소	고로(제철산업)	0.00
생산공정	기타 제조업_시멘트(탄소제거공정)	0.00



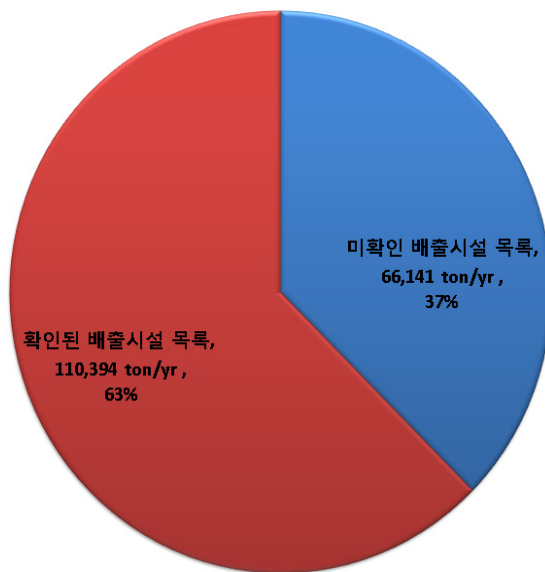
〈그림 4-8〉 PM_{2.5}의 소분류별 배출비율

다. 배출량 산정 결과에 대한 검토

본 연구에서 PM_{2.5} 배출량 산정을 위해 미국 남가 주(州) 대기정화국의 PM_{2.5}/PM₁₀ 분율을 사용하였는데, 남가 주 자료에 명시된 배출원 목록과 CAPSS 2009의 PM₁₀ 배출원 목록이 일치하지 않는 경우가 있다. 불일치된 배출원에 대해서는 환경부 자료에서 제시된 PM_{2.5}/PM₁₀ 분율 0.9를 일괄적으로 적용하여 배출량을 산정하였는데, 이로 인하여 산정치에 오차가 발생할 것으로 생각된다. 배출량의 차이를 확인하기 위해 편의상 “확인된 배출시설”과 “미확인된 배출시설”로 나누어 배출량 비교를 실시하였다. 여기서 “확인된 배출시설”이란 PM_{2.5}/PM₁₀ 분율이 제시된 배출원을 말하고 “미확인된 배출시설”은 분율이 제시되지 않아 일괄적으로 0.9를 적용한 배출원을 말한다.

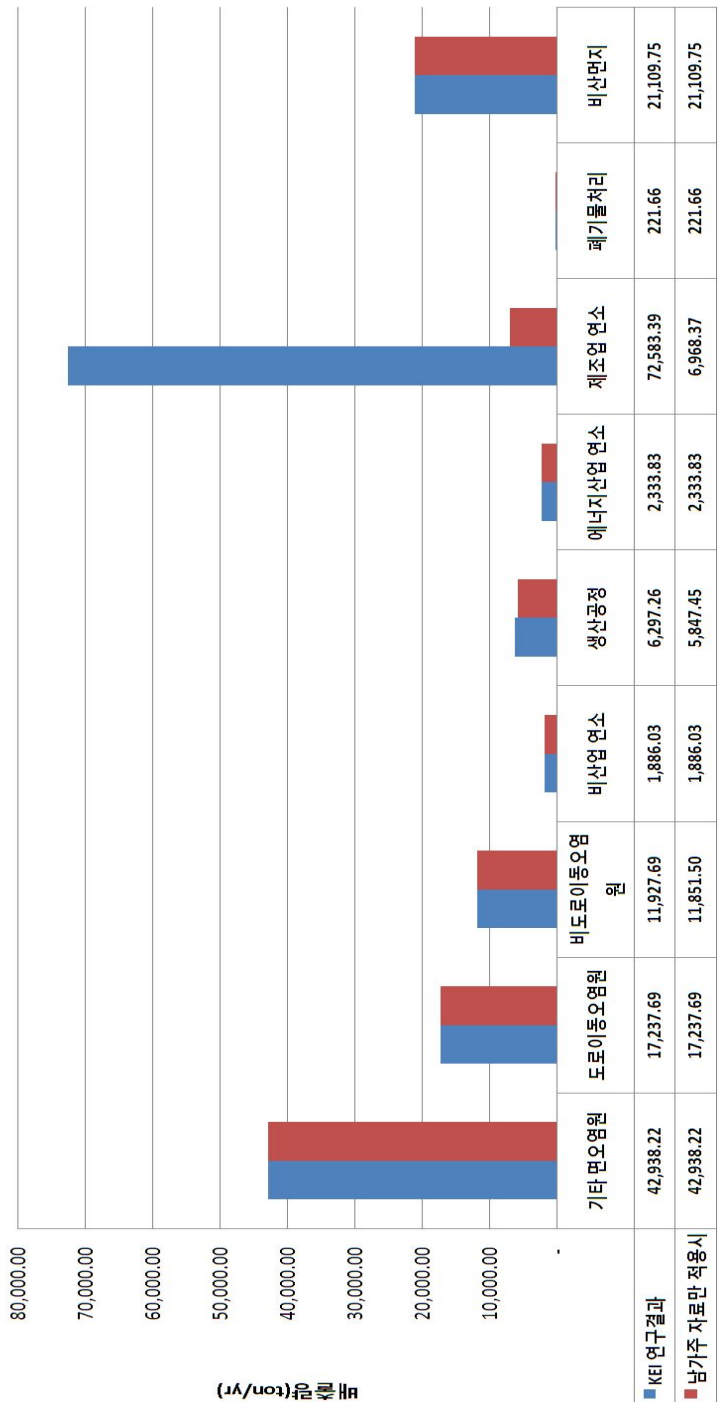
PM_{2.5} 배출량 차이를 살펴보면 비도로 이동오염원에서 약 76ton, 생산 공정에서

약 450ton, 제조업연소에서 약 65,615ton을 나타내, 제조업 연소 부문에서 가장 큰 차이가 나는 것을 확인하였다. 확인/미확인된 배출시설의 PM_{2.5} 배출량 비율을 살펴 보면 확인된 배출시설의 PM_{2.5} 배출량은 약 110,394ton/yr로 약 63%의 비율을 나타내었으며, 미확인된 배출시설의 PM_{2.5} 배출량은 약 66,141ton/yr로 약 37%의 비율을 나타내었다. 미확인된 배출시설의 경우 PM_{2.5} 배출량 산정 및 배출목록 작성 시 상당한 불확실성을 포함한다고 볼 수 있다. 그러나 이러한 불확실성에도 불구하고 선행연구 결과보다는 보다 정확도가 개선된 것이며 국내 PM_{2.5} 배출량 인벤토리로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.³⁵⁾



〈그림 4-9〉 미확인 배출시설의 PM_{2.5} 배출량 비교

35) 하지만 PM_{2.5}의 미확인된 배출 부문에 대해 향후 보다 깊은 연구가 이루어져야 할 것이다.



〈그림 4-10〉 미확인 배출목록에 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 0.9 적용 시 PM_{2.5} 배출량 비교

3. 기존 배출량 자료와의 비교

본 연구를 통해 새롭게 산정된 PM₁₀, PM_{2.5} 배출량과 기존 국내 연구결과는 산정 방식 및 사용된 기본자료(예컨대 CAPSS 버전, 활동도) 등의 차이가 크기 때문에 그 결과를 단순 비교하기에는 무리가 따른다고 판단하였다. 그리하여 본 장에서는 기존 국내 연구결과에 동일한 CAPSS 2009 및 활동도 자료를 사용함으로써 PM_{2.5} 배출량 산정 방식 간의 차이를 검토하였다.

비교 대상 자료는 ① 환경부 자료(환경부, 2010) ② 학계에서 발표된 자료(진형아 외, 2012)이다. 비교 대상 연구결과와 본 연구결과 간의 큰 차이를 나타낸 부분을 간략히 요약하면 환경부 자료의 경우 기본적으로 CAPSS 2005 자료³⁶⁾를 이용하였으며, 학계에서 발표된 자료의 경우 휘발유 승용차, 이륜 오토바이 등등의 기타 배출목록을 고려하지 않았다.

이러한 이유로 환경부 자료는 당시 사용한 방법론에 CAPSS 2009 및 활동도 자료를 사용하였고, 학계 발표 자료는 비산먼지 등 배출목록 추가하여 그 결과를 비교하였다.³⁷⁾ 배출목록의 구분은 CAPSS 2009 자료상 제시되어 분류기준에 기초하였다. 그리고 연구별 PM 배출량 산정방식은 <표 4-27>에 간략히 요약하였으며, 본 장에서 재산정으로 인해 수정된 부분을 별도로 표시하여 나타내었다.

36) CAPSS 자료의 경우 배출목록 추가, 배출계수 수정 등의 작업이 매년 이루어지고 있기 때문에 연도별 배출량의 차이가 크게 나타나고 있다.

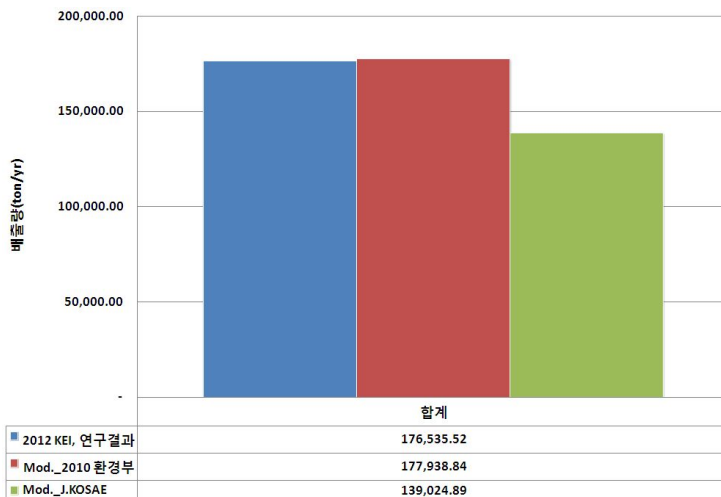
37) 수정된 환경부 자료와 학계에서 발표된 자료는 본문에 표현 시 편의상 “수정된”이란 문구를 넣었다.

〈표 4-27〉 연구별 PM 배출량 산정방식 비교

	2012 KEI, 연구결과	2010 환경부, 보도자료	J.KOSAE (2012, NIER)
기본 배출량 산정 원리	CAPSS 2009년도 자료를 바탕으로 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 적용	(기존) CAPSS 2005년도 자료를 바탕으로 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 적용 (수정) CAPSS 2009년도 자료를 바탕으로 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 적용	(기존) 연료사용량 × 배출계수 × 방지시설의 효율
PM _{2.5} /PM ₁₀ Fraction	남가 주 대기정화국에서 제시한 배출원별 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 적용	(기존) 배출시설에 대해 일률적으로 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 0.9 적용	(기존) U.S EPA Speciate 4.2
배출량 산정식 및 배출계수/ 활동도 자료	2012년도 기준 최신버전의 U.S EPA AP-42, EMEP/EEA CORINAIR 2012년도 기준 최신버전의 활동도 자료 이용	(기존) 2009년도 기준 최신버전의 U.S. EPA AP-42, EMEP/EEA CORINAIR (기존) 2009년도 기준 최신버전의 활동도 자료 이용 (수정) 2012년도 기준 최신버전의 활동도 자료 이용	(기존) Cal. EAP ARB, EMEP/EEA CORINAIR(2006) SODAC, CleanSYS
추가된 배출목록	휘발유 승용차, 이륜 오토바이, 고기구이, 노천소각(폐기물, 농업 잔재물), 숯가마, 아궁이, 화목난로, 포장도로, 비포장도로, 건설활동(주거시설, 비주거시설), 경작, 수확, 나대지, 축산활동	(기존) 좌동	(기존) 해당 없음 (수정) 좌동

가. 총 PM_{2.5} 배출량 비교

KEI 연구결과 PM_{2.5} 배출량은 약 176,536 ton/yr, 수정된 환경부 자료의 PM_{2.5} 배출량은 약 177,939 ton/yr, 수정된 학계 자료의 PM_{2.5} 배출량은 약 139,025 ton/yr으로 나타났다. KEI 연구결과와 수정된 환경부 자료의 경우 배출량 차이는 약 1,403 ton/yr 정도에 불과하며 상당히 비슷한 반면, 수정된 학계 자료의 경우 KEI 연구결과와 약 37,511 ton 이상 적게 배출하는 것으로 나타나 비교적 차이가 크다. 그러나 뒤에서 살펴보겠지만 총배출량이 비슷하다고 해서 소분류별 배출량도 유사하다는 것은 아니다. 즉, 소분류별로는 본 연구결과와 환경부 자료와 상당한 차이를 보이는 배출원이 있음을 확인하였는데 관리대상 배출원을 결정할 때는 소분류별 배출량 정보가 유용하기 때문이다.



〈그림 4-11〉 수정된 총 PM_{2.5} 배출량 비교

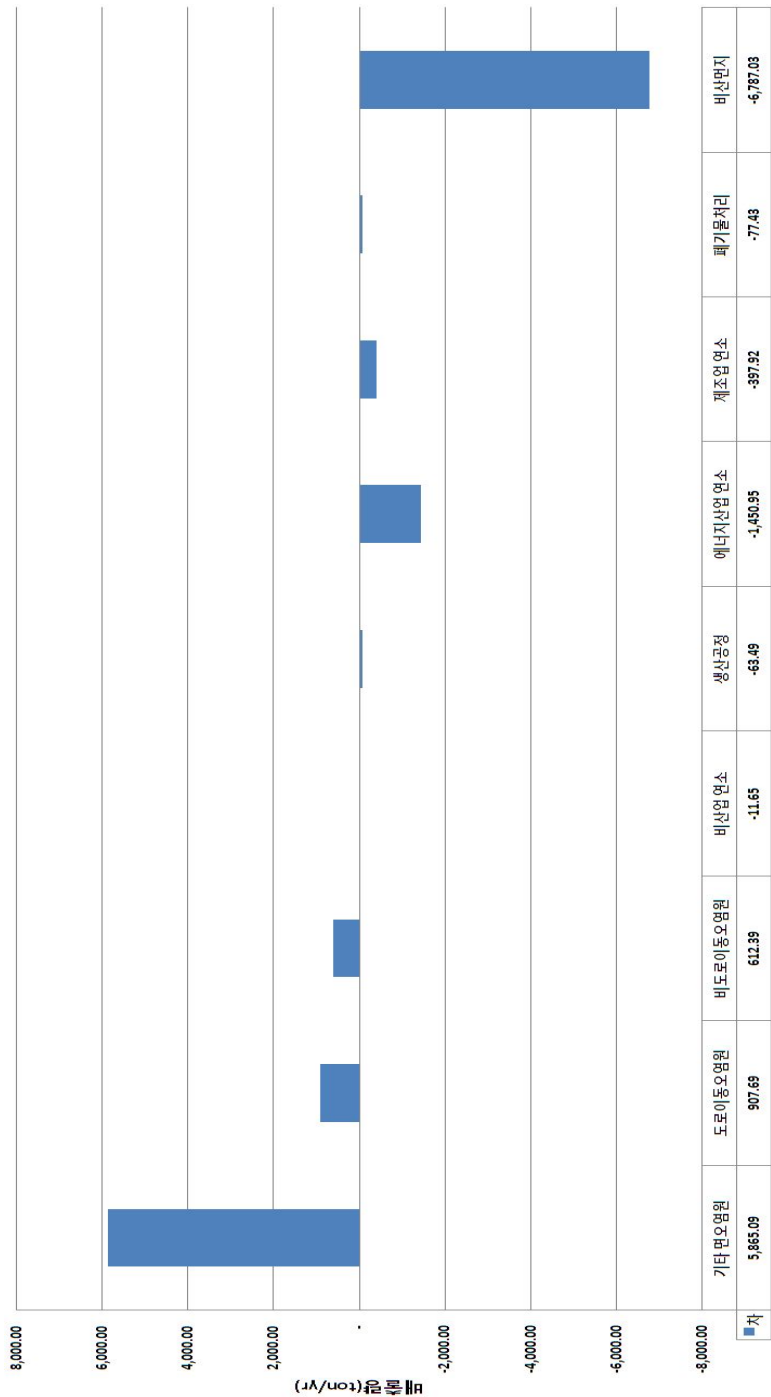
나. 대분류별 PM_{2.5} 배출량 비교

본 연구결과에 의해 산정된 PM_{2.5} 배출량과 환경부 자료에서 제시한 방법론에 본 연구에서 사용한 동일한 데이터(CAPSS 2009, 활동도)를 적용 후 재산정된 PM_{2.5}

배출량을 바탕으로 연구기관별 배출량 차이 및 원인을 살펴보았으며 <그림 4-12>에 나타내었다.

본 연구결과와 수정된 환경부 자료의 경우,

- 비산먼지는 연간 약 -6,787 ton으로 본 연구결과가 더 적은 배출량을 나타내었으며, 이는 대분류별 PM₁₀ 배출량 결과와 동일하게 배출계수와 PM 배출량 산정식의 차이인 것으로 확인되었음
- 예컨대, 비산먼지에 속하는 도로비산(포장)의 경우 PM_{2.5} Emission Factor를 산정하기 위해 2011년에 수정된 U.S. EPA AP-42를 참고하여 PM_{2.5} 배출량 산정하였으며, PM_{2.5} Emission Factor 산정 시 강우 일수에 따른 보정을 하였으므로 PM_{2.5} 배출량 차이를 나타냄
- 기타 먼오염원은 연간 약 5,865 ton으로 본 연구결과가 더 많은 배출량을 나타내었으며, PM_{2.5} 배출계수 및 PM_{2.5} 배출량 산정식 그리고 배출량 산정 시 사용한 가정에 의해 PM_{2.5} 배출량 차이를 나타냄
- 예컨대, 노천소각 중 폐기물의 경우 1인당 1년간 생활폐기물 발생량 및 노천소각비율이 환경부에서 제시한 가정과 다른 것으로 확인되었으며, 소분류에서 보다 자세히 기술하였음
- 에너지산업연소는 연간 약 -1,451 ton으로 본 연구결과가 더 적은 배출량을 나타내었으며, 이는 PM_{2.5} 배출량 산정을 위해 기본적으로 이용한 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction의 차이인 것으로 확인됨
- 예컨대, 본 연구의 경우 SCAQMD에서 제시한 배출원별 각기 다른 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction을 사용하였으며, 환경부 방법론의 경우 에너지산업연소부문에 대하여 일률적으로 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 0.9를 적용해 동일한 데이터를 사용하더라도 PM_{2.5} 배출량의 차이가 나타난 것으로 확인됨

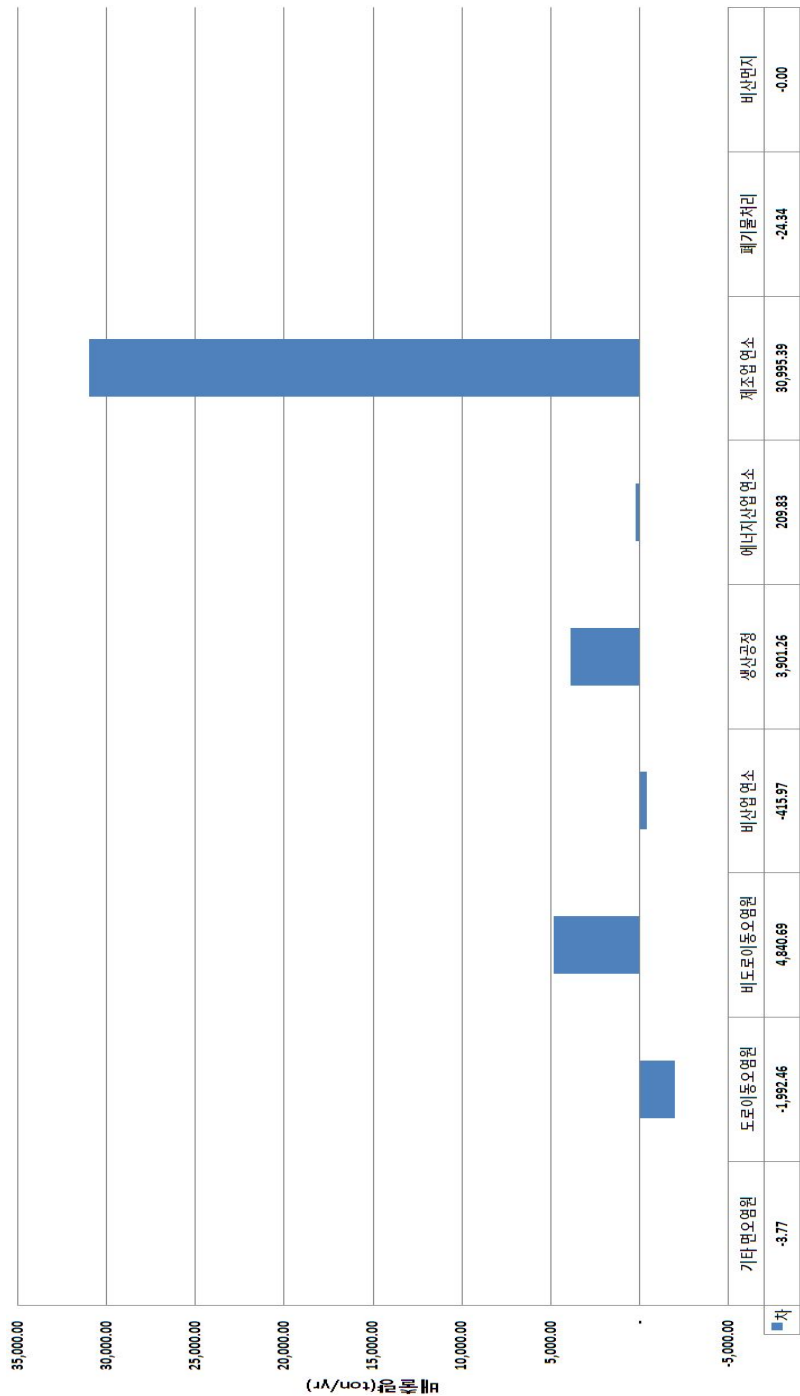


〈그림 4-12〉 본 연구결과와 수정된 환경부 자료의 대분류별 PM_{2.5} 배출량의 차이

학계에서 발표된 PM_{2.5} 배출량의 경우, 배출목록의 차이(예컨대, 비산먼지, 생물성 연소가 포함된 기타 먼오염원)로 본 연구결과와 비교하는데 무리가 따르는 것으로 판단하여, 학계에서 발표된 PM_{2.5} 배출목록에 본 연구결과인 PM_{2.5} 배출목록 및 배출량을 추가하여 연구결과별 PM_{2.5} 배출량을 살펴보았으며 <그림 4-13>에 나타내었다.

본 연구결과와 수정된 학계 자료의 경우,

- 수정된 학계 자료의 경우 총 배출량은 약 139,025 ton으로 나타났으며, 상위 3위의 배출목록을 살펴보면 기타 먼오염원에서 약 42,942 ton으로 가장 큰 배출량을 나타내었고, 다음으로 제조업 연소에서 약 41,588 ton, 비산먼지에서 약 21,110 ton으로 배출량이 큰 것으로 나타남
- KEI 연구결과의 경우 총 배출량은 약 176,536 ton으로 수정된 학계 연구결과보다 약 37,511 ton 이상 많이 배출되는 것으로 나타났으며, 상위 3위의 배출목록을 살펴보면 제조업연소에서 약 72,538 ton으로, 기타 먼오염원에서 약 42,938 ton으로, 비산먼지에서 약 21,101 ton으로 나타남
- 본 연구결과와 수정된 학계 자료의 배출량 차이를 나타낸 주요 부분은 제조업 연소(30,995 ton/yr)였으며 이는 배출량 산정 방식에 따른 결과로 확인되었음
 - 예컨대 본 연구의 경우 CAPSS 2009년도 자료를 바탕으로 남가좌 주(州)에서 제시한 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 적용하여 PM_{2.5} 배출량을 산정
 - 학계에서 발표된 자료의 경우 PM_{2.5} 배출량 산정을 위해 연료사용량 × 배출계수 × 방지시설의 효율을 고려하고, U.S EPA Speciate 4.2를 참고하여 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction 사용



〈그림 4-13〉 본 연구결과와 수정된 학계 자료의 대분류별 PM_{2.5} 배출량의 차이

대분류별 PM_{2.5} 배출량 비율을 정리하면 다음과 같다(그림 4-14 참조).

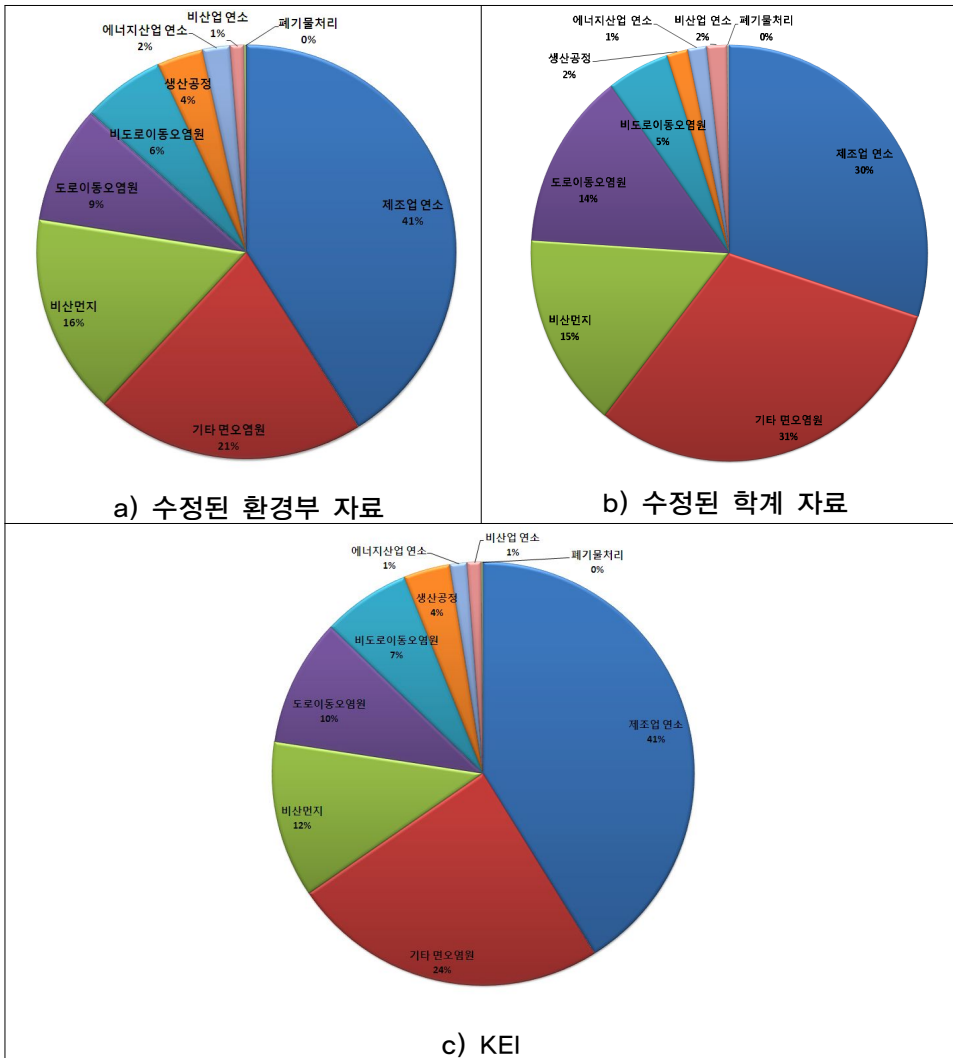
본 연구결과와 수정된 환경부 자료의 경우,

- 본 연구결과는 제조업연소가 41 %로 가장 높은 비율을 나타내었으며, 다음으로 기타 먼오염원 24 %, 비산먼지 12 % 순으로 나타남
- 수정된 환경부 자료는 제조업연소가 41 %로 가장 높은 비율을 나타냈으며, 다음으로 기타 먼오염원 21 %, 비산먼지 16 % 순으로 나타나 KEI 연구결과와 동일한 배출순위를 나타내는 것으로 확인됨
- 하지만 본 연구결과와 수정된 환경부 자료에 의한 PM_{2.5} 배출 특성을 서로 비교해보면 기타 먼오염원의 경우 24 %에서 21 %로, 비산먼지의 경우 12 %에서 16 %로, 도로이동오염원의 경우 10 %에서 9 %로 미묘한 차이를 나타냈으며, 동일한 기본자료(CAPSS 2009, 활동도)를 가지고 계산을 하더라도 배출량 계산시 사용되는 배출계수 및 산정식에 의해 배출특성이 다를 수 있음을 확인할 수 있었음

본 연구결과와 수정된 학계 자료의 경우,

- 기타 먼오염원 부문이 약 31 %로 가장 큰 것으로 확인되었으며, 제조업 연소가 약 30 %, 비산먼지가 약 15 % 순으로 나타나 본 연구결과와는 다른 배출 우선순위 및 배출비율을 나타내었음

연구결과별 배출 우선순위 특성을 종합해볼 때 제조업 연소와 비산먼지의 배출 우선순위 특성이 조금 다르지만 전반적으로 연구결과별 배출 우선순위 특징이 비슷하고 제조업연소, 기타먼오염원, 비산먼지, 도로이동오염원 등과 같은 배출원에서 발생되는 PM_{2.5}의 양이 지배적임을 확인할 수 있었다.

〈그림 4-14〉 수정된 연구기관별 대분류별 PM_{2.5} 배출비율

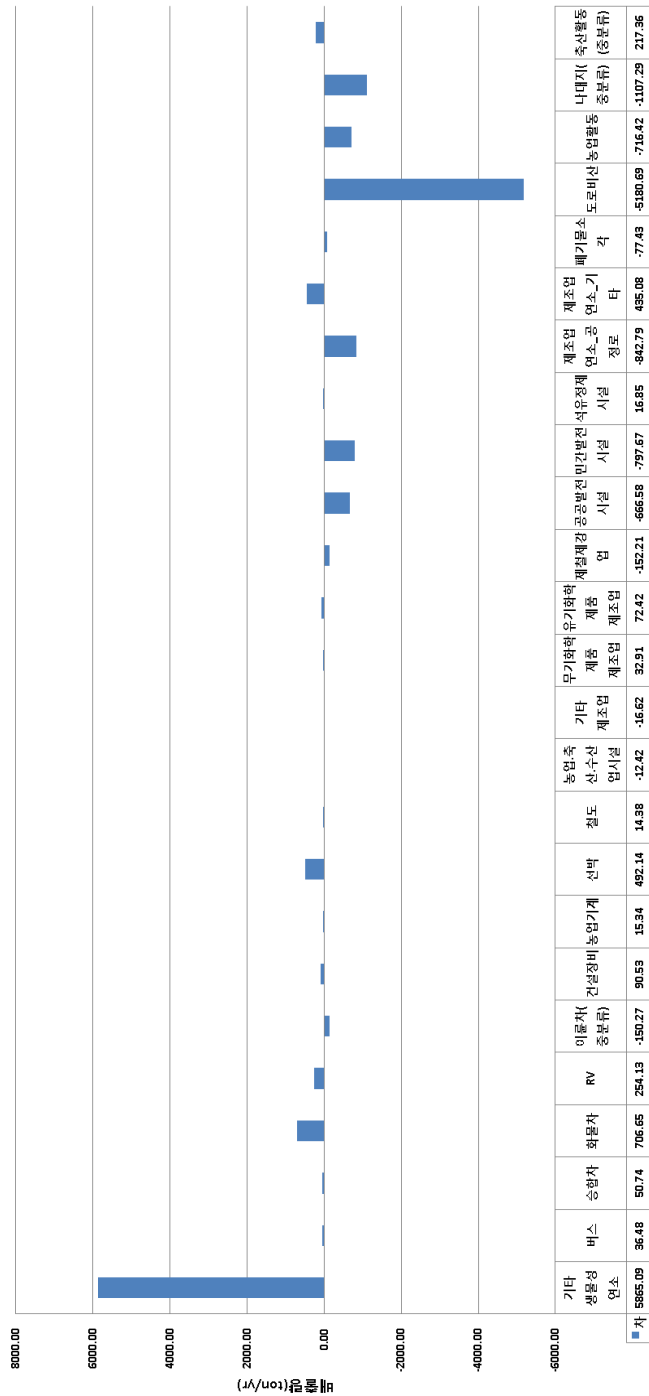
다. 중분류별 PM_{2.5} 배출량 비교

<그림 4-15>는 본 연구결과와 수정된 환경부 자료의 중분류별 PM_{2.5} 배출량의 차이를 나타내었는데, 배출량의 차이가 10 ton 미만인 배출원은 제외한 것이다.

기타 생물성연소의 경우 연간 약 5,865 ton으로 본 연구결과가 더 많은 배출량을 나타내었는데, 이는 기타 생물성연소 항목 중 노천소각(폐기물)의 배출량 산정 시 1인당 1년간 생활폐기물 발생량 및 노천소각비율이 환경부에서 제시한 가정과 다른 것으로 확인되었으며, 소분류에서 보다 자세히 기술하였다.

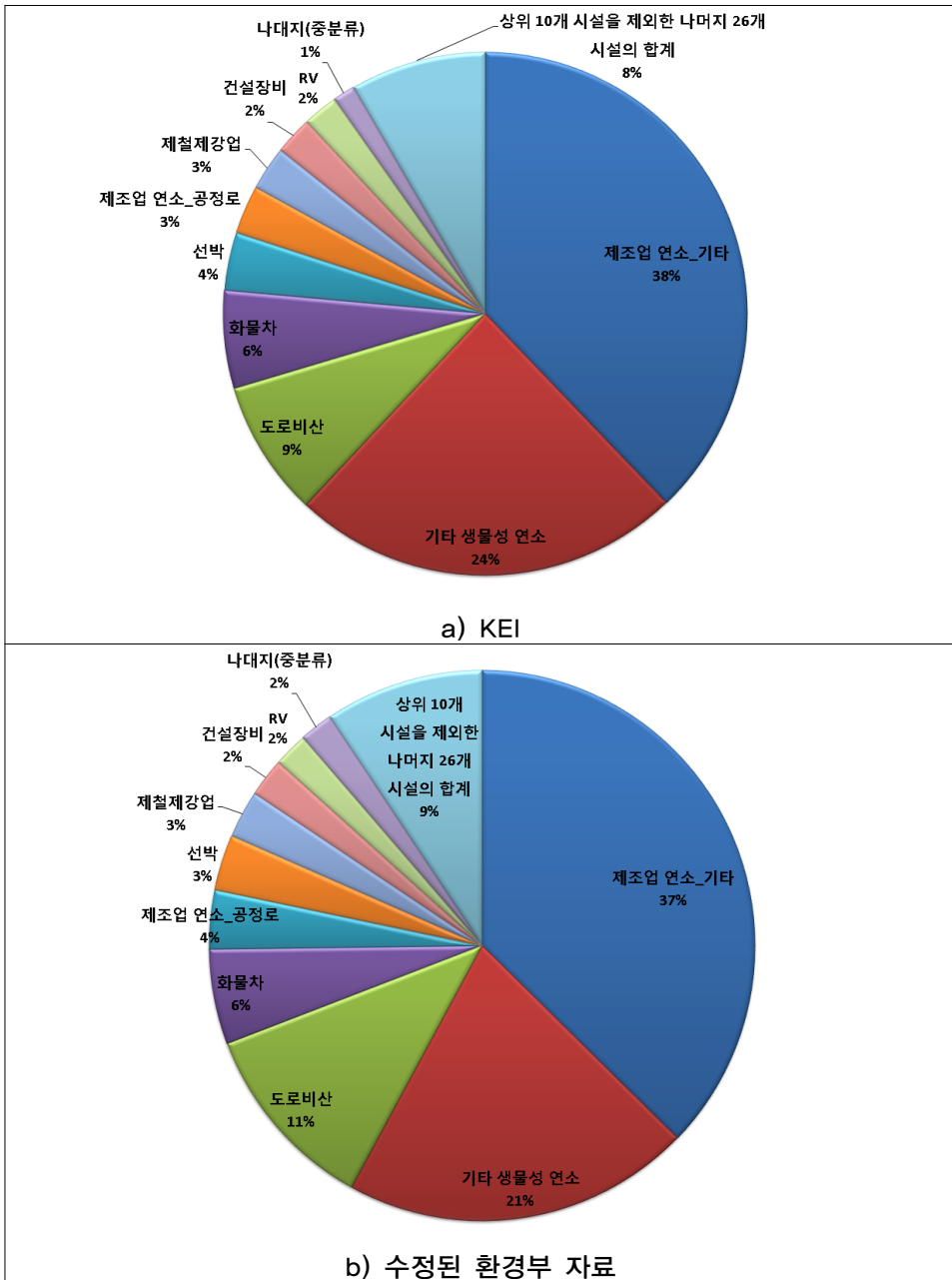
도로비산의 경우 연간 약 -5,181 ton으로 본 연구결과가 더 적은 배출량을 나타내었으며, 비산먼지에 속하는 도로비산(포장)의 경우 본 연구에서는 PM_{2.5} Emission Factor를 산정하기 위해 2011년에 수정된 U.S. EPA AP-42를 참고하여 PM_{2.5} 배출량 산정하였고, PM_{2.5} Emission Factor 산정 시 강우 일수에 따른 보정식을 사용한 반면 환경부 방법론의 경우 2006년에 제시된 U.S. EPA AP-42 방법론을 적용 및 강우일수에 따른 보정을 고려하지 않은 PM_{2.5} 배출량을 산정해 각기 다른 방법론에 의해 PM_{2.5} 배출량 차이를 나타내는 것으로 확인되었다.

그리고 나대지의 경우 연간 약 -1,107 ton으로 본 연구결과가 더 적은 배출량을 나타내었고, 이는 본 연구의 경우 강우 일수에 따른 보정을 실시한 반면 환경부 방법론의 경우 강우 일수에 따른 보정을 고려하지 않아 연구결과별 PM_{2.5} 배출량의 차이가 생기는 것으로 확인되었으며, 소분류에 보다 자세히 기술하였다.



또한 배출원별 PM_{2.5} 배출량 우선순위를 살펴보았는데 다음과 같다(그림 4-16 참조).

먼저 본 연구결과의 경우 제조업연소 중 기타가 38%로 가장 높은 비율을 나타냈으며, 다음으로 기타 생물성연소 24%, 도로비산 8% 순으로 나타났다. 수정된 환경부 자료의 경우 제조업연소 중 기타가 37%로 가장 높은 비율을 나타냈으며, 다음으로 기타 생물성연소 21%, 도로비산 11% 순으로 본 연구결과와 매우 유사한 배출순위를 나타내는 것으로 확인되었다. 하지만 본 연구결과와 환경부 방법론에 의한 PM_{2.5} 배출 특성을 서로 비교해보면 기타 생물성연소의 경우 24%에서 21%로, 도로비산의 경우 8%에서 11%로, 선박의 경우 4%에서 3%로 미묘한 차이를 나타내었고, 동일한 기본자료(CAPSS 2009, 활동도)를 가지고 계산을 하더라도 배출량 계산시 사용되는 배출계수 및 산정식에 의해 배출특성이 다를 수 있었다. 그리고 연구 방법론별 차이는 있지만 제조업 연소 중 기타, 기타 생물성연소, 도로비산 등에서 상당량의 PM_{2.5} 배출이 이루어지고 있다는 결과를 확인할 수 있었다.

〈그림 4-16〉 수정된 연구기관별 중분류별 PM_{2.5} 배출비율

라. 소분류별 PM_{2.5} 배출량 비교

<그림 4-17>은 본 연구결과와 수정된 환경부 자료의 소분류별 PM_{2.5} 배출량의 차이를 나타내었으며, 연간 배출량의 차이가 10 ton 미만인 배출원은 제외한 것이다. 포장도로의 경우 연간 약 -51,801 ton으로 본 연구결과가 더 적은 배출량을 나타내었고, 이는 배출계수와 PM 배출량 산정식의 차이인 것으로 확인되었으며, 그 주요원인은 다음과 같다.

- PM₁₀ Emission Factor 산정식(2011, 2006)의 차이
 - 본 연구 Emission Factor 산정식 ; (U.S. EPA, AP-42, 2011)

$$0.15 \times sL^{0.91} \times W^{1.02} \times [1 - (P/(4 \times 365))]$$
 - 환경부 방법론 Emission Factor 산정식 ; (U.S. EPA, AP-42, 2006)

$$0.66 \times (sL/2)^{0.65} \times (W/3)^{1.5} \times [1 - (P / (4 \times 365))]$$
- 본 연구 강우 일수(123일)에 따른 보정, 선행 연구의 경우 강우 일수에 따른 보정을 고려하지 않음

노천소각 폐기물의 경우 연간 약 4,913 ton으로 본 연구결과가 더 많은 배출량을 나타내었다. 예컨대 기타 생물성 연소에 포함되는 노천소각 중 폐기물의 경우 1인당 1년간 생활폐기물 발생량 및 노천소각비율이 환경부에서 제시한 가정과 다른 것으로 확인되었으며, 요약하면 다음과 같다.

- 본 연구
 - 1인당 폐기물 발생량 : 0.3723t on/yr ·인
 - 노천소각 비율³⁸⁾ : 50 %
- 환경부 방법론
 - 1인당 폐기물 발생량 : 0.36 ton/yr ·인
 - 노천소각 비율 : 24 %

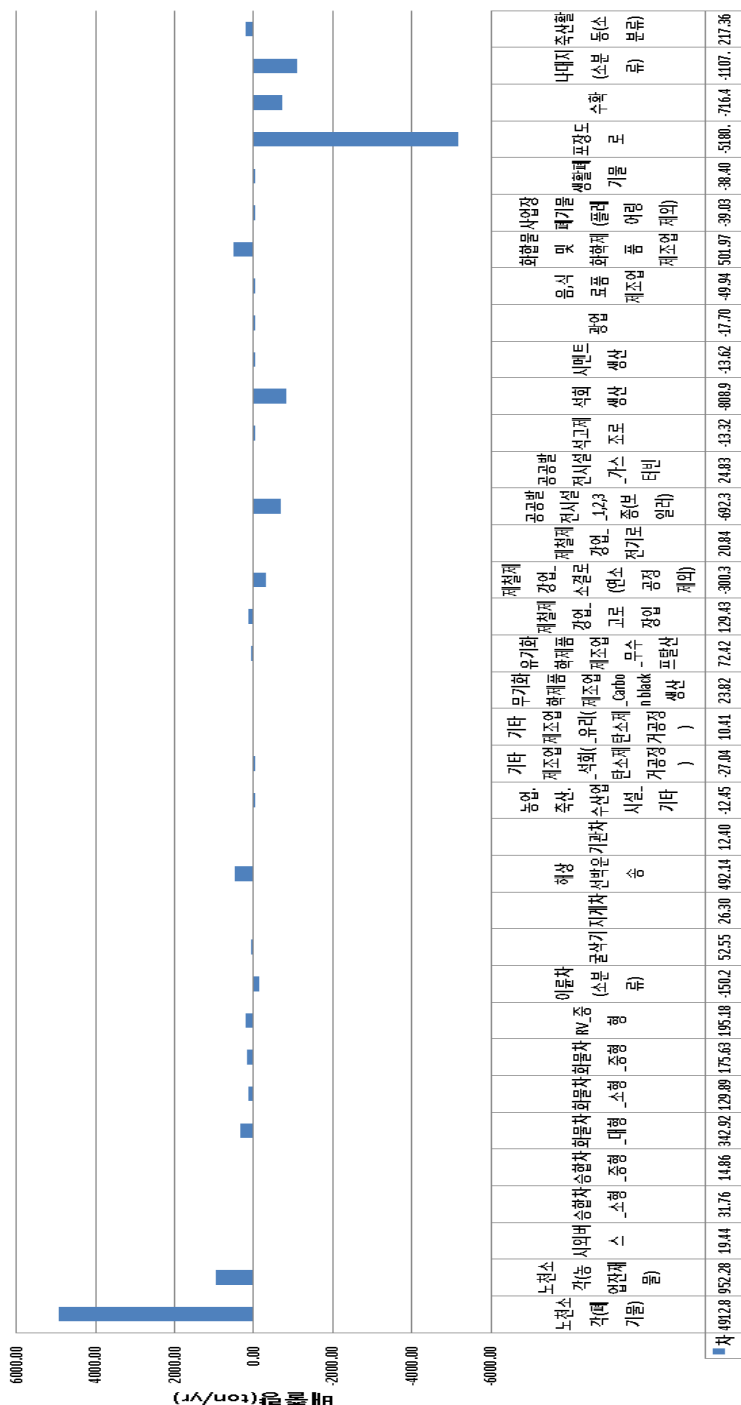
38) 서울시정개발연구원(2011), 서울시 고농도 미세먼지 오염현상의 원인분석 및 지역별 맞춤형 관리대책

도로비산의 경우 연간 약 -5,181 ton으로 본 연구결과가 더 적은 배출량을 나타내었으며, 비산먼지에 속하는 도로비산(포장)의 경우 본 연구에서는 PM_{2.5} Emission Factor를 산정하기 위해 2011년에 수정된 U.S. EPA AP-42를 참고하여 PM_{2.5} 배출량 산정하였고, PM_{2.5} Emission Factor 산정 시 강우 일수에 따른 보정식을 사용하였다. 반면 환경부 방법론의 경우 2006년에 제시된 U.S. EPA AP-42 방법론을 적용 및 강우일수에 따른 보정이 고려되지 않았으며 이에 따라 PM_{2.5} 배출량 차이를 나타내는 것으로 확인되었다.

나대지의 경우 연간 약 -1,107 ton으로 본 연구결과가 더 적은 배출량을 나타내었으며, 이는 본 연구의 경우 강우 일수에 따른 보정을 실시한 반면 환경부 방법론의 경우 강우 일수에 따른 보정을 고려되지 않아 연구결과별 PM_{2.5} 배출량의 차이가 생기는 것으로 확인되었으며, 간략히 요약하면 다음과 같다.

- 본 연구 Emission Factor 산정식
 - 선행연구³⁹⁾에서 제시된 비산먼지 배출계수(2007)×[1-(P/4×365)] 이용
- 환경부 방법론 Emission Factor 산정식
 - 선행연구에서 제시된 비산먼지 배출계수(2005)만 이용
- 선행연구에서 제시된 비산먼지 배출계수의 경우 지역별 풍화에 의해 산정된 배출계수이므로 연도별 배출계수가 다름
예컨대, 2005년 수도권의 경우 0.197 kg/m²/yr이며, 2007년 0.183kg/m²/yr으로 연도별 배출계수가 다름을 확인할 수 있음

39) 국립환경과학원(2007b), 비산먼지 배출량 산정 방법 개선 및 도로 재비산 먼지 실시간 측정방법 개발(Ⅱ)

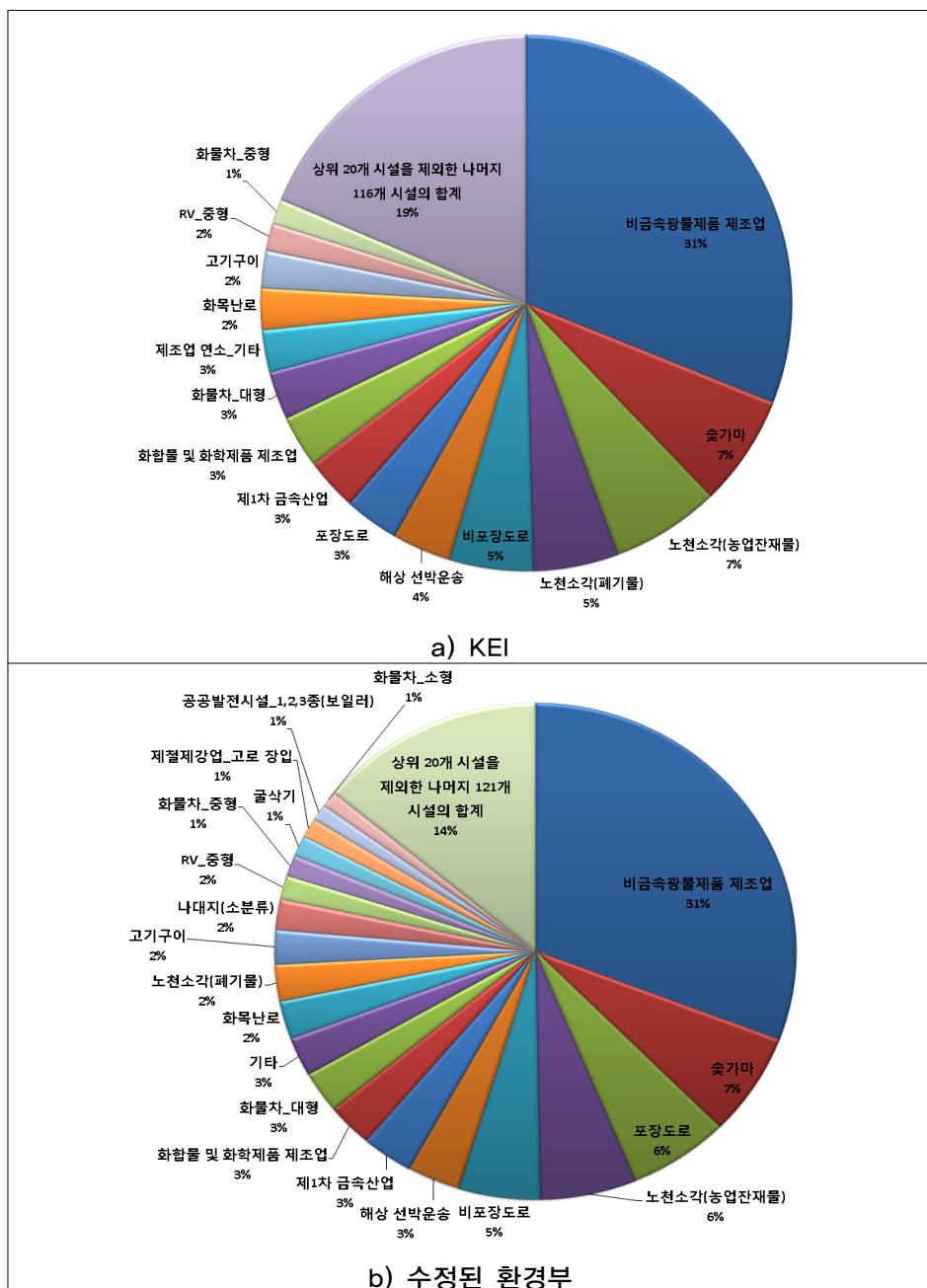


〈그림 4-17〉 폐수정수장 및 하수처리장 주변 대기 중 PM_{2.5} 배출량 차이

<그림 4-18>은 배출원별 PM_{2.5} 배출량 우선순위를 나타낸 것으로 정리하면 다음과 같다.

먼저 본 연구결과의 경우 비금속광물제품 제조업이 31 %로 가장 높은 비율을 나타냈으며, 다음으로 숯가마 7 %, 농업잔재물(노천소각) 7 % 순으로 나타났다. 수정된 환경부 자료의 경우 비금속광물제품 제조업이 31 %로 가장 높은 비율을 나타냈으며, 다음으로 숯가마 7 %, 포장도로 6 % 순으로 본 연구결과와 매우 유사한 배출순위를 나타내는 것으로 확인되었다.

또한 본 연구결과와 수정된 환경부 자료에 의한 PM_{2.5} 배출 특성을 서로 비교해보면 비금속광물제품 제조업의 경우 31 %에서 31 %로, 숯가마의 경우 7 %에서 7 %로, 농업잔재물(노천소각)의 경우 7 %에서 5 %로 비교적 유사한 경향을 나타냈다. 그리고 연구 방법론별 차이는 있지만 비금속광물제품 제조업, 숯가마, 노천소각, 비포장도로 등에서 상당량의 PM_{2.5} 배출이 이루어지고 있다는 결과를 확인할 수 있었다.



〈그림 4-18〉 수정된 연구기관별 소분류별 PM_{2.5} 배출비율

4. PM_{2.5} 관리 정책 미국 사례

가. 뉴욕 주(州)

뉴욕 주(州)는 미국 북동부에 위치하고 있으며, 대서양 해안에서 내륙의 오대호 지방까지 이르고 있는 주(州)로서 중부 대서양 해안에 있는 여러 주(州)의 하나이다. 특히 인구는 미국 내에서 세 번째로 많으며 산업화, 도시화 영향에 따른 대기오염문제가 사회적인 이슈로 대두되는 지역으로 알려져 있다.

뉴욕 주(州)에서는 대기오염문제를 해결하기 위해 연방정부의 Clean Air Act 준수와 주(州) 정부 차원의 대기오염물질 잠재적 배출 제어 전략을 통해 대기질 개선을 위한 노력을 기하고 있으며, 대기오염물질 관리를 위한 대기질 관리계획은 기본적으로 서부지역의 대기질 관리계획인 고정·이동 오염원 등과 같은 배출원에 대한 제어전략을 수립하고 있다. 다만 뉴욕 주(州)의 경우 지리·지형적 특성 상, 미 남부 대서양 연안 또는 미 중서부지역에서 중부지역으로 생성된 고기압 발달에 의한 기류의 이동, 하층 제트기류의 발달, 육풍, 해풍, 산·곡풍 등과 같은 기상학적인 현상으로부터 초래된 오염물질의 중·장거리 이동에 의한 대기오염문제 해결을 위해 해당 오염물질의 영향권 안에 있는 주(州)들을 공동 관리구역으로 지정하고 주(州)간의 대기오염물질 이동을 고려하여 오염물질 배출량 관리를 실시하고 있다.

뉴욕 주(州)의 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 관리를 위한 대기질 관리계획을 살펴보면 배출원으로부터 직접 배출되는 입자상 물질, 황산화물, 질소산화물 등 PM_{2.5}의 구성 성분을 중심으로 관리 대책을 제시하고 있다.

1) PM 관리

PM_{2.5} 및 PM₁₀ 제어를 위해 기존시설(6NYCRR Part 215)과 신규시설(6NYCRR Part 227)로 구분하여 관리하며 기존 시설 관리에 대한 세부 내용은 다음과 같다.

- 노천소각(open burning)
 - 인구가 20,000명 이하인 소도시에서 5월 15일과 그 다음해 3월 15일 사이에 가로 6인치, 세로 8피트 이하인 나뭇가지(downed limes and branches)의 소각을 허용
 - 단, 기타 가정에서 발생하는 쓰레기의 소각은 금지이며, 캠프파이어, 농업 관련 소각, 허가된 소각 및 기념행사 등에서 사용되는 소각은 제외됨
- 연방정부 소유의 증기기관(locomotive Engines)과 선박의 압축 점화 엔진(marine compression-ignition engines)
 - 이러한 엔진의 배출량을 줄이기 위해 EPA는 이에 관련된 규칙들을 제정하고 있으며 이를 위해서 “실린더 당 30리터 이상의 기관차 엔진 및 선박용 압축점화 엔진에 관한 새로운 배출 기준”을 발표함
 - 이 프로그램은 새로운 엔진에 대한 배출규제를 포함하며 향후 PM과 NO_x의 배출을 각각 90%, 80% 줄일 것으로 기대하고 있음

2) 황산화물 관리

뉴욕 주(州)에서는 연료 연소 관리(6NYCRR Part 225)를 하고 있고, 연방정부차원에서 산성비 프로그램, 저황유 보급, CAIR 프로그램 등의 제어 대책을 실시하고 있다. 대책별 세부적인 내용은 다음과 같다.

- 연료 연소
 - 각기 다른 종류의 연료 사용으로 배출되는 황 성분에 의한 대기오염을 줄이기 위해 채택됨
 - 황 성분을 함유한 기름(Oil) 또는 석탄(Coal)의 양적 규제를 실시하고, 총 열량이 시간당 250 mmBtu 이상인 고정연소 시설(Stationary combustion

installation)에서 연소를 목적으로 한 연료의 구입 또는 판매 금지 등의 내용을 다루고 있음. 이 규제는 특정 지역 및 장비에 대한 규제이며, 현재 적용되는 규제는 1986년 1월부터 시행되었음

- 뉴욕 주(州)에서 자동차 디젤 연료 또는 연료첨가제의 판매 또는 공급하는 경우 반드시 40 CFR Part 80, Subpart I에 의거하여야 함. 2006년 6월 1일에 발표되었으며 이는 모든 연료첨가제 및 디젤 연료를 뉴욕 주(州)에 제공하는 공급자에게 적용되는데, 2006년 7월 15일에는 소매점을 제외한 모든 지역의 모든 디젤 공급 업자가 그리고 2006년 9월 1일부터는 소매점도 적용됨

- 산성비 프로그램

- 주로 화석연료의 연소로 인해 발생하는 산성침적(acid deposition, 또는 산성비) 문제를 해결하기 위해 CAA IV에서는 SO₂와 NO₂의 배출량에 대하여 1980년 배출수준으로부터 연간 각 1,000만 톤, 200만 톤 삭감목표를 설정하였음
- 또한 허용 배출량의 수준에 따라 각 오염원에 대하여 아황산가스의 배출 허용량(allowances)을 부여하고, 각 오염원으로부터 이를 자유롭게 거래할 수 있는 배출권 거래 제도를 도입. 배출허용량 이하로 배출하는 시설은 감소에 따른 잉여분을 다른 배출시설에게 매도할 수 있고, 이와 반대로 배출허용량 이상을 배출하는 시설에게는 매수할 수 있게 하도록 설계됨
- 1단계는 1995년 1월 1일에 시행되었으며, 화석연료를 사용하는 110개 시설에 대하여 배출허용량을 부여하여 이들 시설에 대해 허용량 이상의 배출을 금지함
- 2단계는 2000년 1월 1일부터 시행되었으며, 1단계보다 적용 대상 시설이 확대되어 소규모 시설을 포함하였고, 할당된 배출허용량의 경우 대폭 감소되었음

- 또한 아황산가스거래제도의 적용대상시설은 그 운영을 위하여 허가를 받아야 하며, 이행 여부의 계속적인 감시 및 보고의무를 가지게 됨
 - 할당된 배출허용량을 초과하여 배출하는 시설의 소유자 또는 운영자에게는 초과 톤당 2,000달러 상당의 초과배출벌금(excess emissions penalty)이 부과되며, 다음 해에 초과 배출량을 상쇄해야 하는 등의 제한이 가해짐
- 저황유 보급
- 가솔린의 황 함량을 강화하여 이동오염원에서의 배출량을 저감하기 위한 것임
 - 예컨대, 연료 공급자(Refiners)들은 2004년에는 평균 가솔린 황 함량을 120 ppm으로 낮추어야 하고, 2006년부터는 80 ppm으로 낮추어야 함

3) 질소산화물 관리

질소산화물 제어를 위해 뉴욕 주(州)에서는 기존시설의 경우 개인선박(6NYCRR Part 210), 자동차(6NYCRR Part 217, 6NYCRR Part 218) 등의 제어 대책을 제시하고 있고, 연방정부 차원에서 19 kW 이상의 산업용 대형 점화엔진(Large Industrial Spark-Ignition Engines)과 레저용 자동차, 디젤연료, 비도로 디젤엔진, NOx MACT, CAIR 프로그램 등을 실행하고 있다. 또한 신규시설에 대해서도 별도의 관리를 하고 있는데, 일반적인 조항 이외에도 시멘트 공장과 유리 생산 시설에 대한 관리기준을 제시하고 있다(6NYCRR Part 212, 6NYCRR Subpart 220-1, 6NYCRR Subpart 220-2, 6NYCRR Part 227, 6NYCRR Part 231). 제어 대책별 세부적인 내용은 다음과 같다.

- 개인용 선박에 대한 배출관리 및 평가 실시
- 개인이 소유한 선박 엔진(제트스키, 수상 모터바이크 포함)에 대한 배출

및 표시 요구사항을 제정했고, 2003년에 개인 선박용 엔진에 대한 배출 감소 프로그램을 제정하였으며, 이 규제는 PM, NOx 그리고 탄화수류의 배출을 감소시킬 것으로 기대하고 있음

- 이 규제는 낮은 배출 수준을 포함하고 점차적으로 강화되고 있으며, 새로운 엔진에 대해서는 본 규제에 부합하는 검사 및 환경 표시 프로그램을 실시하여야 함
- 자동차 배출 규제
- 2002년 10월 20일부로 시행되었는데, 자동차의 NOx, PM, 탄화수소 및 일산화탄소의 배출을 제한하고 검사 및 유지를 명시함
 - 주(州)에 속하는 자동차는 특정 가스 배출기준을 만족하여야 하고 1996년 모델 및 새로운 자동차들의 경우 이에 맞는 진단을 받아야함
 - 평균 8,500 lbs 이상의 대형 자동차에 대한 공회전 금지에 대한 내용을 담고 있으며, 이 규제는 사람 및 물건 등을 운송하지 않는 자동차에 해당되며 자동차가 5분 이상 움직이지 않을 때 정지해 있는 것을 허용하지 않음
 - 또한 뉴욕 주(州)에 필요한 모든 대형 디젤 차량(HDDVs; heavy duty diesel vehicles)은 배출량 검사를 하도록 규정(단 버스, 관용차 및 규제에 해당되지 않는 기타 차량은 제외)
- 자동차 배출허용기준
- CAA의 Section 177에서는 캘리포니아 주(州)와 동일한 신규 자동차 배출 허용기준을 채택하여 승인하였으며, 소형 자동차(light-duty vehicle)에 대한 배출허용기준도 포함하였음
 - 저공해자동차 규제는 각기 다른 배출허용기준(Low-Emission Vehicle, Ultra-Low-Emission vehicle, Super-Ultra-Low-Emission Vehicle, Zero-Emission Vehicle 등) 중 하나를 적용하도록 하여 자동차 제조업자에

계 유연성을 제공함

- 하지만 제조업자들은 반드시 각 모델들이 해당 년도에 명시된 비메탄계 유기가스 기준에 부합함을 입증하여야 함
- 산업용 대형 점화엔진 및 레저용 엔진
- 2002년 EPA는 NO_x, direct PM, 탄화수소, 일산화탄소 등의 오염물질을 규제할 목적으로 산업용 대형 점화엔진 및 레저용 엔진을 규제함(67 FR 68242)
 - 이 규정은 지게차와 공항의 지원장비(Airport Ground Service Equipment), 비도로 자동차, ATV(All Terrain Vehicle), 스노우 모빌뿐만 아니라 레저용으로 즐기는 선박용 엔진 등을 포함. 해당 규정에 포함된 엔진 또는 자동차를 제작할 경우 새로운 기준에 맞는 엔진을 만들도록 요구됨
- 디젤 연료
- EPA의 자동차 디젤 연료(motor vehicle diesel fuel)에 관한 규제들은 디젤 엔진 시스템 및 연료를 하나의 시스템으로 치부함
 - 규제에 포함되는 자동차 디젤 연료는 2007년도 이후 생산된 모델 및 8,500 파운드 GVWR 보다 큰 차량과 고속도로 통행 대형엔진(Heavy-duty highway engines)들에 대해 새로운 배출허용기준을 적용
 - PM 배출규제를 위해 추가적으로 NO_x 및 비메탄계 탄화수소에 대해 각각 0.2 g/bhp-hr, 0.14 g/bhp-hr을 제시하고 있으며, 2007년 및 2010년 사이에 디젤 엔진에 대하여 시행됨
 - 또한 많은 저감 장치가 황 성분에 의해 손상되기 때문에 자동차 디젤 연료의 황 함량 수준을 2006년 6월 1일부로 500 ppm에서 15 ppm으로 강화함

〈표 4-28〉 해양 레저용 디젤 연료 배출기준

하위 구분	HC+NO _x (g/kW-hr)	PM (g/kW-hr)	시행일
disp* < 0.9	7.5	0.40	2007
0.9 ≤ disp < 1.2	7.2	0.30	2006
1.2 ≤ disp < 2.5	7.2	0.20	2006
disp ≥ 2.5	7.2	0.20	2009

주: * engine displacement

자료: <http://www.dec.ny.gov/>

- 소형 점화 엔진

- 19kW(25마력) 이하의 또는 새로운 비도로 점화 엔진의 배출가스 규제를 위해 1995년 7월부터 적용되었으며, 1997년 이후에 사용되었거나 제조된 다양한 새로운 엔진들 예컨대 정원용 장비(lawn equipment and garden equipment)나 소형 건설기계 등도 포함됨
- 1999년 3월부터는 19kW(25마력) 미만의 잔디깎기 및 정원 트랙터와 같은 소형엔진의 배출가스를 중점적으로 줄이기 위해 관리를 시행

- 비도로 디젤 엔진

- 1994년 6월 EPA(59 FR 31306)에서는 비도로 엔진에 의해 주로 PM이 발생하고 오존 전구물질 및 일산화탄소 등의 대기오염물질을 대기로 방출하여 건강상 유해한 영향을 미친다고 발표하였고 이에 따른 37kW 및 그 이상의 비도로 디젤 엔진의 배출허용기준을 제정함
- 이후 2006년 10월에는 37kW 미만의 비도로 디젤 엔진을 포함하였으며, 이 규정은 37kW 또는 그 이상의 기관차, 관산 시추 장치 및 선박용 엔진을 제외한 모든 비도로 디젤 엔진 배출에 대하여 새로운 규정을 제시하였음

〈표 4-29〉 비도로 디젤 엔진 배출 기준

엔진 파워	단계(Tier)	모델 연도	NMHC+NO _x *	PM*
kW < 8 (hp<11)	Tier 1	2000	10.5 (7.8)	1.0 (0.75)
	Tier 2	2005	7.5 (5.6)	0.80 (0.60)
8 ≤ kW < 19 (11≤hp<25)	Tier 1	2000	9.5 (7.1)	0.80 (0.60)
	Tier 2	2005	7.5 (5.6)	0.80 (0.60)
19 ≤ kW < 37 (25≤hp<50)	Tier 1	1999	9.5 (7.1)	0.80 (0.60)
	Tier 2	2004	7.5 (5.6)	0.60 (0.45)
37 ≤ kW < 75 (50≤hp<100)	Tier 2	2004	7.5 (5.6)	0.40 (0.30)
	Tier 3	2008	4.7 (3.5)	—
75 ≤ kW < 130 (100≤hp<175)	Tier 2	2003	6.6 (4.9)	0.30 (0.22)
	Tier 3	2007	4.0 (3.0)	—
130 ≤ kW < 225 (175≤hp<300)	Tier 2	2003	6.6 (4.9)	0.20 (0.15)
	Tier 3	2006	4.0 (3.0)	—
225 ≤ kW < 450 (300≤hp<600)	Tier 2	2001	6.4 (4.8)	0.20 (0.15)
	Tier 3	2006	4.0 (3.0)	—
450 ≤ kW ≤ 560 (600≤hp≤750)	Tier 2	2002	6.4 (4.8)	0.20 (0.15)
	Tier 3	2006	4.0 (3.0)	—
kW > 560 (hp > 750)	Tier 2	2006	6.4 (4.8)	0.20 (0.15)

주: * g/kW-hr (g/hp-hr)

자료: <http://www.dec.ny.gov/>

– NO_x MACT

- MACT와 관련된 NO_x 배출에 대한 주요 규제 대상은 고정연소 터빈, 제지공장의 연소시설 등임

– NO_x 배출시설의 공통요구 사항

- 물리적·화학적·생물학적 처리에 의해 산업, 공업, 농업 또는 기타 시설 등에서 배출되는 NO_x 및 VOC 배출시설은 RACT(Reasonably Available Control Technology)를 적용
- 오렌지 카운티 또는 뉴욕시에 위치한 질소산화물 배출시설 중 연간 잠재적 배출량이 25톤 이상, 시 외각의 경우 100톤인 경우 해당됨
- 오렌지 카운티 또는 뉴욕시에 위치해 있는 휘발성 유기화합물 배출시설 중 연간 잠재적 배출량이 25톤 이상, 시 외각의 경우 50톤인 경우 해당됨

- 아스팔트 생산 시설은 NO_x의 주요 배출원 중 하나이며, 건조시설에 대해서는 저 NO_x 버너 및 배가스 재순환 기술을 적용
- 유리 제조시설
 - 고온이 요구되는 유리 용해로(Glass melting furnaces)의 특성상 많은 양의 NO_x가 발생
 - 뉴욕 주(州)에서는 현재 유리 제조업에 대한 특정한 배출기준을 가지고 있지는 않지만 오존위원회(Ozone Transport Commission)가 제시한 기준을 검토함. 오존위원회가 제안한 NO_x 배출기준을 적용하면 뉴욕 주(州)의 유리 공장에서 약 85% 정도의 NO_x 감소가 예상됨
- 고정연소시설
 - 천연가스 또는 중유 연소 보일러 등 주요 고정 오염원에 대해 더욱 엄격한 관리를 검토하고 있음. 단, 배출허용 기준은 보일러의 크기 및 연료의 종류에 따라 차별적으로 적용
 - 질소산화물 배출 프로그램(Nitrogen Oxides Emissions Budget and Allowance Program)의 폐지에 따라 소형의 천연가스 또는 중유 보일러도 대상에 포함할 예정으로 있음

나. 남가좌 주(州)

남가좌 주(州) 대기정화국은 오렌지 카운티와 로스앤젤레스 카운티 도심지역, 리버사이드 카운티 및 샌버너디노 카운티의 일부를 포함하는 4개의 대기오염 규제 구역을 하나의 지역 관리국으로 통합하는 1977년 Lewis-Presley 대기질 관리법에 의해 창설되었다. 이 지역은 지리적으로 분지형태이고 저풍속 및 잦은 침강성 역전 현상으로 오염물질이 축적되는 특징 때문에 미국 내에서도 대기오염이 가장 심각한 지역들 중의 하나로 알려져 있다.

1) 남가좌 주(州) 대기정화국의 대기질 관리전략

남가좌 주(州) 대기정화국의 2007 대기질 관리계획(South Coast Air Quality Management Plan)에서는 관할 구역 내 대기환경기준 달성률이 미미한 오염물질인 PM_{2.5}와 오존의 대기환경기준 달성을 위한 저감 계획 및 대책을 수립하였으며, PM_{2.5}의 경우 2015년, 오존(8시간 기준)의 경우 2024년 대기환경기준 달성을 위한 목표를 설정하여 시행 중에 있다.



〈그림 4-19〉 SCAQMD 최적의 제어전략 설정을 위한 절차

최적의 제어전략 개발의 목적은 장기적으로 축적된 자료(예컨대, 대기질 모델링 및 배출량)를 바탕으로 지역의 대기오염 특성을 보다 상세히 파악하고 이에 따른 대기질 관리방향을 설정하는 데 있다. 실제로 남가좌 주(州) 대기정화국에서는 지역의 대표적인 오염물질인 오존과 PM_{2.5}에 대해 PM_{2.5}의 전구물질로 알려진 구성 성분(예컨대, 질산염, 황산염, PM_{2.5}의 직접 배출원)에 대해 배출 제어 전략을 수립하였으며, VOCs의 경우 PM_{2.5}에 대한 기여도는 낮으나 오존생성의 전구물질임을 감안해 이에 대한 배출 제어 프로그램을 시행중에 있다.

2007 남가좌 주(州) 대기질 관리계획을 살펴보면 크게 이동·고정오염원 제어 대책, 지역 전체에 대한 교통전략 및 제어대책, 캘리포니아 주(州)에서 연방정부에 제안하는 오염원 제어정책, 장기 제어전략으로 나누어진다.

가) 이동·고정오염원에 대한 중·단기 제어 전략

이동·고정오염원에 대한 중·단기 제어 전략의 경우 배출시설 설비의 현대화, 에너지 효율 관리, 시설관리, 시장 인센티브/제도운영의 유연성, 먼오염원 프로그램, 배출량 관리, 이동 오염원 프로그램 등 총 7가지의 기본 접근 방법을 채택하고 있다. PM_{2.5}, SO_x, NO_x, VOCs 등의 오염물질에 대한 각각의 관리 대책을 살펴보면 다음과 같다.

- 배출시설 설비의 현대화
 - NO_x RECLAIM 프로그램에 참여하고 있지 않는 기존 시설에 대해 BACT 수준의 개량 또는 교체
 - NO_x RECLAIM 프로그램에 참여하고 있는 기존 시설은 BACT 평가를 통해 추가적으로 NO_x 저감
 - RECLAIM 시설뿐만 아니라 Non-RECLAIM 시설에 대해 BACT와 같은 실현 가능한 포괄적인 제어 방법 적용
- 에너지 효율 관리
 - 도시 열섬현상을 줄이기 위한 밝은 색 지붕 재료 및 도로 자재와 나무 심기 장려 프로그램을 실시
 - 에너지 효율 및 보존을 위해 금전적인 보상 실시. 예컨대, 지역 주민의 경우 기존의 장치(보일러, 온수기)를 높은 연료 효율 장치로 교체 시, 사업장의 경우 높은 연료 효율 및 장치 구입 시 추가적인 인센티브 제공 등

- 시설 관리

- 개선된 비산누출관리프로그램(Leak Detection and Repair Program)을 통한 VOC 저감
- 비산누출관리프로그램이란 오일 또는 가스 생산시설, 석유 또는 화학제품 생산과정, 저장 또는 이동시설을 포함한 기타 VOC를 발생 시키는 배출원의 Valve, Pump, Compressor 및 각 배관의 연결부 등의 공정 시설 중에서 VOC가 누출될 수 있는 모든 지점에 대해 시설의 위치, 장치의 종류, 흐르는 물질 등을 정리한 후, 일정한 주기(1회/3개월)를 정해 VOC 측정기로 VOC 누출 농도를 측정하여 일정농도 이상 누출되면 신속하게 수리함으로써 VOC 누출을 최소화하는 프로그램을 의미함
- 유증기 회수 규정을 강화하여 주유소로부터 VOC 배출 저감
- 주유 시 대기로 방출되는 VOC를 줄이기 위해 주유기의 친환경 펌프 교체 시행
- 자가진단 시스템(ISD, In-Station Diagnostics)을 도입하여 설치된 유증기 회수 설비의 효율을 자동으로 측정 및 기록하여 일정 수준 이상의 효율을 유지 및 관리
- 파이프라인과 저장 탱크로부터 추가적인 VOC 배출 저감
- 진보된 제어 기술 활용, 배출시설의 범위 확대(파이프라인, 작은 규모의 저장 탱크 등), 배출 농도 제한 설정
- 여과 집진기, 습식 스크러버, 전기집진기, 기타 장치 등의 저감장치를 이용한 PM 제어 전략
- PM 방지시설에 대해 배출기준을 명시(기존 방지시설 : 0.01 gr/dscf, 신규 방지시설 : 0.005 gr/dscf)
- 공정 설비와 컨베이어 등에 펜스 설치
- EPA에서 입증된 고효율 여과포 사용
- 벤틸레이션과 후드설비의 효능 기준 명시

- 위의 배출시설에 대하여 자동 누출 감지 시스템(Automatic leak Detection System) 도입
- 엄격한 배출허용 기준, 모니터링 시스템, 유지 보지보수 등 기존 규제 사항 강화
- 최신 기술을 활용한 폐기물 퇴비화로부터 PM_{2.5}, VOC 배출 저감
- BMPs(Biochemical Methane Potential) inventory 개선 및 저감 잠재성 평가

〈표 4-30〉 남가좌 주(州)의 시설 관리

제목	대상오염물질
개선된 비산누출관리	VOC
주유소에 강화된 유증기 회수(EVR : Enhanced Vapor Recovery) 규제	VOC
파이프 라인과 저장 탱크로부터의 배출량 저감	VOC
먼지 저감 장치 개선 (백하우스, 습식 스크러버, 전기집진기 및 기타 장치 등)	PM _{2.5}
최신 기술을 이용한 폐기물 퇴비화	VOC, PM _{2.5}
설비의 가동과 중단, 전환 절차 개선	모든 오염물질

- 시장 인센티브/제도 운영의 유연성
 - 클린 코팅 인증 프로그램을 통한 VOC 배출저감 유도
 - Low-VOC, Ultra Low-VOC, Zero-VOC와 같은 등급 인증 설정
 - 인증과정은 “Clean Air Coating” 기준에 부합하는 해당 제품에 대해 정해 짐
 - RECLAIM에 대한 추가적인 SO_x 삭감
 - Best Available Retrofit Control Technology(BARCT)의 재평가를 통해 RECLAIM 시설에 대해 최신의 이용 가능한 제어기술 적용을 적용함
 - 경제적인 인센티브 프로그램을 실시

· 배출권 거래제도

: Emission Reduction Credits(ERCs), Mobile Source Emission Reduction Credits(MSERCs)을 이용해 해당 배출시설에서 오염물질의 배출저감에 따른 Credit을 제공. 제공된 Credit은 해당 지역 내 다른 배출시설(예컨대 오염물질이 많이 발생한 시설)에 사용이 가능하게끔 적용하여 추가적으로 오염물질 배출저감에 기여

· 배출부과금 프로그램

: 배출규제를 준수하지 못하는 경우 배출부과금 부과

〈표 4-31〉 남가좌 주(州)의 시장 인센티브/제도운영의 유연성 전략

제목	대상오염물질
클린 코팅 증명서 교부(인증) 프로그램	VOC
RECLAIM에 대한 추가적인 SO _x 감소	SO _x
경제적 인센티브 프로그램	모든 오염물질
석유정제시설 파일럿 프로그램	VOC, PM _{2.5}

- 면오염원 프로그램

- 공업유회환유로부터 VOC 배출 저감
 - 산업시설에서 사용되는 VOC 배출이 높은 유회환유를 VOC 배출이 적은 대체물질로 교체하도록 유도
 - VOC를 함유한 배출원 또는 사용하거나 판매하는 경우에 대한 규제 개발을 통해 추가적으로 VOC 배출 저감을 기대할 수 있음
- 공업·상업시설의 소비재 사용으로부터 소비재 기준설정 및 VOC 배출 저감 달성
 - 예컨대, Low-VOC, Ultra Low-VOC, Zero-VOC를 함유한 제품이라는 등급 설정 또는 "Green" 제품 등과 같은 인증프로그램 시행

- 공업·상업시설에서 사용되는 High-VOC 소비재 사용제한(또는 사용금지) 또는 Ultra Low-VOC, Zero-VOC를 함유한 소비재 사용을 촉진 추진
- 주정부에서 허가되지 않은 VOC를 함유한 소비재로부터 VOC 배출 저감
 - ARB에 따르면 래커 희석액(Lacquer Thinners)과 도료 희석제(Paint Thinner)의 사용으로 인한 VOC 배출량이 상당히 크기 때문에, 기관, 산업시설 그리고 소비자에게 VOC를 함유한 소비재의 판매제한과 같은 특별한 규칙 개발을 통해 VOC 배출 저감
- 컷백 아스팔트로부터 추가적인 VOC 배출 저감
 - 도로포장 시 이용되는 컷백 아스팔트 공법으로부터 발생하는 VOC를 저감하기 위해 에멀전 아스팔트(Emulsified asphalt)로 대체
 - High-VOC를 함유한 아스팔트의 사용금지
- 기존의 Non-RECLAIM시설로 분류된 오븐, 건조기, 히터 등으로부터 NOx 저감
 - low-NOx 버너 등 2007 AQMP 제어 대책에 제시된 BACT/LAER 수준의 이용 가능한 모든 기술을 적용하여 NOx 저감
- PM Hot Spot들에 대한 국지적 제어 프로그램
 - 비산먼지 발생시설에 대해 방풍막 설치
 - 거리 청소, 주민들에게 되도록 포장도로를 이용하도록 권함
 - 잡초 및 초지를 제거하거나 또는 그 범위를 축소시켜 화재위험을 감소
- 목재 연소시설로부터 배출량 저감
 - 공기질이 나쁠 때 자발적 혹은 강제적 관리, 관리되지 않는 실내·외 벽난로 설치 금지, 주민 의식 개선을 위한 교육활동 시행, 가스난로 교체 장려 프로그램 시행
- 노천소각 규제를 통한 PM 배출량 저감. 예컨대, No burn day 지정
- 숯을 사용하는 연소시설. 예를 들어 직화구이 음식점에 대해 미세먼지

및 악취제거 장치 설치 의무화

- 연간 10톤 이상 오염물질을 배출하는 고정오염원에 대해 배출허용기준을 충족시키지 못하는 경우 부과금 징수(VOC, NO_x 톤당 5천 달러). 이 요금은 매년 소비자 물가 지수를 반영하여 조정함

〈표 4-32〉 남가좌 주(州)의 면오염원 프로그램 전략

제목	대상오염물질
공업유탄유로부터 배출량 저감	VOC
공업, 상업시설의 소비재 사용으로부터 배출량 저감	VOC
주정부에서 허가하지 않은 VOC를 함유한 소비재로부터 배출량 저감	VOC
아스팔트포장으로부터 배출량 저감	VOC
Non-RECLAIM Oven, Dryers, Furnaces로부터 NO _x 저감	NO _x
실내용 난방기구로부터 추가적인 NO _x 저감	NO _x
천연가스 품질	모든 오염물질
PM Hot Spot들에 대한 국지적 제어 프로그램	PM _{2.5}
목재를 사용하는 벽난로와 스토브로부터 배출량 저감	PM _{2.5}
노천소각 규제를 통한 PM 배출량 저감	PM _{2.5}
숯을 연료로 사용하는 시설의 배출량 저감	PM
축산 폐기물로부터 배출량 저감	VOC
실행 가능한 모든 저감 대책	모든 오염물질
연간 10톤 이상 NO _x , VOC를 배출하는 고정오염원에 대한 배출 부과금	VOC, NO _x

- 이동 오염원 프로그램

- 이동오염원(비행기, 선박, 기차)에 수수료 징수 및 비도로 이동오염원에 대한 배출규제 강화
- 상업적으로 이용 가능한 청정한 엔진으로 교체 강화
- 차량 폐차 확대 및 차량 부품교체 강화
- 항만 및 항만관련 간접배출원에 대한 배출 규제. 예컨대, 청정 선박 엔진과

저황 연료 사용, 항만에서 사용되는 노후 대형 경유 트럭의 교체 또는 수리

- Carl More Program을 적용한 배출량 저감: 오염물질 배출을 줄일 수 있는 이동오염원의 엔진이나 장치의 개조와 관련된 비용 보조. 예컨대, 노후 디젤 차량 엔진교체 시 신규차량 교체 시 10 천 달러~45천 달러, 엔진개조 시 5천 달러 ~ 10천 달러 지원
- Smog Check 프로그램과 연계하여 경량·중량 자동차에 대해 오염물질 배출 저감: 증발시스템 검사 강화, 오래된 자동차 또는 오래 사용한 차량에 대해 매년 검사 실시, 공회전시 배출 검사, 이륜차에 대한 검사 실시를 통해 인증 프로그램 실시
- 지구온난화전략과 연계해 배출량 저감

〈표 4-33〉 남가좌 주(州)의 이동오염원 프로그램 전략

제목	대상오염물질
미 연방 오염원에 대한 완화 요금 프로그램 / 연방 이동오염원(비행기, 선박, 기차)에 수수료 징수 및 비도로 이동오염원에 대한 배출규제 강화	모든 오염물질
청정한 엔진으로 교체 강화	모든 오염물질
항만 및 항만관련 간접배출원에 대한 배출 규제	모든 오염물질
Carl More Program을 적용한 배출량 저감: 오염물질 배출을 줄일 수 있는 이동오염원의 엔진이나 장치의 개조와 관련된 비용 보조	NO _x , PM _{2.5}
경량 자동차 인증 프로그램(smog check 프로그램)	VOC, NO _x
중량 자동차 인증 프로그램(smog check 프로그램)	VOC, NO _x
지구온난화전략과 연계해 배출량 저감	모든 오염물질

나) 지역 전체에 대한 교통전략 및 제어 대책

지역 전체에 대한 주요 교통전략 및 제어 대책을 크게 3가지로 구분하고 있으며, 주요내용은 다음과 같다.

- 다인승 차량(High Occupancy Vehicle) 전략
 - 다인승 차량 우대 전략을 통해 나홀로 차량의 운행을 감소시키고, 교통 혼잡 시간대에 다인승 차량 우선 차선(High Occupancy Vehicle lanes)의 이용을 허락
- 대중교통 이용 촉진
 - 버스, 철도 등 대중교통 인프라 확충 및 자전거 이용이나 보행률을 증진시키기 위한 시설을 확충
- 정보에 바탕을 둔 교통전략
 - 인터넷 등 정보 네트워크를 이용하여 실시간 교통상황 정보를 차량운전자에게 공급하여 교통량을 재분배
 - 카풀 제도를 활성화하기 위한 방안으로 참여자들을 연결하기 위한 정보 제공

다) 캘리포니아 주(州)에서 연방정부에 제안하는 오염원 제어정책

캘리포니아 주(州)에서는 오존과 PM_{2.5}의 대기환경기준 초과라는 문제 해결을 위해 추가적으로 연방정부에 아래와 같이 오염원 제어정책을 제시하였다.

- Smog Check 프로그램 강화를 통한 자동차의 오염물질 배출 저감
 - 증발시스템 검사 강화
 - 오래된 자동차 또는 오래 사용한 차량에 대해 매년 검사 실시

- 공회전시 배출 검사
- 경·중량 자동차의 디젤 차량 점검 강화 및 개조 또는 저감장치 부착
- 이륜차에 대한 검사 실시
- 노후차량의 폐차 확대 및 차량 부품교체 강화
- 개질가솔린의 개량
- Zero-emission 차량의 보급을 확장
- 소비재의 VOC 배출규제 강화

라) 오염물질 저감을 위한 장기 전략

PM_{2.5} 제어전략은 오존 농도 개선에 기여하겠지만 8시간 오존 기준을 달성하기 위해서는 VOC, NO_x 등의 오염물질을 추가적으로 삭감하여야 한다. 장기대책은 중·단기 대책을 보다 강화하고 첨단기술을 정책에 적극적으로 반영하는 것으로 수립되어 있는데, 주로 이동오염원에 초점을 두고 있다.

- 전기자동차 보급
 - 예컨대, 전기차 구입 시 최고 7,500달러 세금 감면
- 노후 차량의 폐차 유도
- 기존의 대형 트럭과 버스의 개조 및 교체 또는 하이브리드 차량 구매 지원
- zero emission 차량 보급 확대 및 CNG 수소연료전지 등과 같은 대체 연료 사용 차량에 대하여 클린자동차 표시를 실시하며, 인증된 차량의 경우 다인승 차량 우선 차선(High Occupancy Vehicle lanes ; HOVs) 이용 허용
- 경유와 휘발유의 강화된 연료 기준 및 대체연료 사용
- 농기구 등 zero-emission 지원
- 연료전지 기술을 고정·이동오염원에 확대해 적용
- 진보된 엔진기술 활용 정책
- 교통 인프라 개선 정책
- 신재생에너지 의무할당제를 도입하여 에너지사업자에게 공급량의 일정비

을을 신재생에너지를 사용하도록 의무할당

- 비도로오염원(항만, 항공)에 대해 엔진 기준, 청정연료, 개조 등의 배출 기준 강화
- 진보된 Low-VOC 대체기술(Waterborne, Radiation-Curing, High Solids, Powder Coating, Exempt Solvent 등) 개발

〈표 4-34〉 SOx, NOx, PM_{2.5}, VOC 관리를 위한 관리 대책

구분		내용	대상 물질
중단기 전략	이동·고정오염원 제어 대책	배출시설 설비의 현대화	NOx, VOCs, PM _{2.5}
		PM 제어시설의 적용 강화	NOx, VOCs, PM _{2.5}
		청정기술 사업장 인센티브 제공	All Pollutants
		PM hot spot에 대한 국지적 제어대책	PM _{2.5}
		항만관리	NOx, SOx, PM _{2.5}
		청정연료사용 장려	All Pollutants
	지역 전체에 대한 교통전략 및 제어 대책	다인승차량 우대전략	All Pollutants
		교통 인프라 확충	All Pollutants
		교통정보 제공	All Pollutants
	캘리포니아주에서 연방정부에 제안하는 오염원 제어 정책	청정엔진 교체	All Pollutants
		Smog check 프로그램 강화	NOx, VOCs, PM _{2.5}
		오토바이 배출기준 강화	NOx
		차량 폐차 확대 및 부품교체 강화 프로그램	NOx
		Zero-emission 차량 보급 확장	NOx
		소비재의 VOC 배출규제 강화	VOCs
장기 전략	중장기대책 강화 및 진보기술 적용	연료전지기술을 고정, 이동오염원에 확대 적용	NOx
		하이브리드-전기 자동차와 고급전지	NOx
		향상된 엔진기술 활용 및 교통인프라 개선	NOx
		신재생에너지 기술 및 사용 촉진을 위한 인센티브 프로그램	NOx, VOCs, PM _{2.5}
		진보된 저 VOC 기술(산업, 소비재) 적용	VOCs

5. 국내 관리정책 로드맵(사업장을 중심으로)

가. 정책방향 결정을 위한 고려 요소

PM_{2.5}는 여러 가지 성분으로 구성되어 있고 생성 과정이 매우 복잡하여 관리가 쉽지 않은 오염물질이다. 그러나 PM_{2.5}의 농도를 효과적으로 개선하기 위해서는 오염현상의 이해와 구성성분, 주요 배출원을 파악하고 이에 적합한 대책을 마련하는 것이 중요하다. 앞선 연구결과로부터 정책 방향을 결정하는 데 고려해야 하는 중요한 요소를 정리하면 다음과 같다.

- ① PM_{2.5} 구성성분을 보면 황산암모늄과 질산암모늄의 질량이 전체 질량의 37%(겨울) ~ 76%(여름)(표 2-2 참조)를 차지하고 있어 2차 입자의 비중이 큼을 알 수 있는데 이는 <표 2-1>의 PM_{2.5}와 다른 오염물질과의 상관관계에서도 확인된다. 따라서 PM_{2.5} 관리는 1차 입자의 관리뿐만 아니라 2차 입자의 관리 즉, 2차 입자를 생성하는 SO_x와 NO_x, 그리고 암모니아의 관리도 함께 필요함을 의미한다. 그리고 지역별로 조성의 차이가 있어 지역별 분석결과에 근거한 차별화된 정책이 필요하기도 하다. 예를 들어 <그림 2-23>에서 보듯이 서울지역은 SO_x보다는 NO_x의 관리가 중요한 반면 산업시설이 밀집된 광양지역은 SO_x의 관리가 상대적으로 중요하다. 질량 비중을 볼 때 2차 입자를 생성하는 기체 상 오염물질의 삭감이 효과적인 것으로 생각되지만, 그러나 이들 물질의 농도와 PM_{2.5} 농도와의 정량적 상관관계가 불분명하여 SO_x와 NO_x 등의 삭감 목표량을 세우는 데 한계가 있다.
- ② PM₁₀의 농도 감소추이는 PM_{2.5}의 그것보다 크다(그림 2-14, 그림 2-16 참조). 이는 그동안 이루어진 많은 대책들이 PM₁₀의 삭감에 기여하여 왔지만 상대적으로 PM_{2.5} 삭감에는 덜 효과적이었음을 의미하며, 추가적인 노력이 필요하다는 사실을 보여주는 것이다. <그림 2-18>의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율 변화도 이러한 사실을 보여준

다.

- ③ 시간대별 PM_{2.5} 농도 패턴은 도로 재비산 먼지가 PM_{2.5}보다는 PM₁₀의 농도에 더 큰 영향을 미치기 때문에, 도로 살수와 같은 대책들은 PM_{2.5} 농도 개선에는 제한적인 효과를 가져올 가능성이 높다(그림 2-20 참조).
- ④ 황사는 PM_{2.5}과 PM₁₀ 모두의 농도를 증가시키지만 상대적으로 PM₁₀ 농도 증가가 훨씬 크다(그림 2-27, 그림 2-28 참조). 이는 PM_{2.5}과 개선을 위해서는 국내 배출원 관리가 더욱 중요함을 의미한다.
- ⑤ PM_{2.5}가 건강에 부정적인 영향을 미치는 것은 분명하지만(표 3-6 참조), 구체적으로 PM_{2.5}의 어떤 성분 또는 성질 때문인지는 아직 불분명하다. 그러나 WHO에 따르면 PM_{2.5} 성분 중 OC와 중금속(특히 전이금속)의 유해성이 크며, 2차 입자를 이루는 무기염의 유해성은 상대적으로 적다고 보고하고 있다. 따라서 시민의 건강 보호 측면에서는 OC와 중금속(특히 전이금속)의 삭감이 우선되는 것이 바람직하다.⁴⁰⁾
- ⑥ PM_{2.5} 국가 공식 인벤토리가 구축되어 있지 않아 대책 수립에 어려움이 있다. 본 연구의 결과가 기존의 다른 연구자들의 결과에 비해 조금 더 개선되었다고는 하지만, 여전히 불확실성이 큰 배출원이 존재하는 것도 사실이다. 특히 제조업의 경우에는 불확실성이 가장 높게 나타났으며 우선적으로 확인이 필요하다(그림 4-9 참조). 한편 연구자와의 배출량 차이가 큰 배출원(노천소각, 포장도로 등)도 발견되었는데 이에 대한 설명은 가능하지만 확인도 필요하다(그림 4-17 참조).
- ⑦ CAPSS에서 분류하고 있는 배출원에 해당되지 않는 배출원(그림 4-4 참조)의 배출량이 큰 비중을 차지한다. 이 역시 검증을 거쳐 국가 공식 통계에 포함시킬 것인지를 검토할 필요가 있다.
- ⑧ 배출량 산정결과 배출량이 큰 배출원(비금속광물 제품 제조업, 숯가마, 노천소

40) 전이금속 39종 중 특정대기유해물질로 지정된 물질은 5종, 배출허용기준이 설정된 물질은 7종에 불과하다. 건강위해성 관리측면에서 PM_{2.5} 문제를 접근한다면 이들 전이금속에 대한 규제여부에 대한 검토가 필요하다.

각, 1차 금속산업 등)에 대해서는 관리 우선 대상이 될 수 있으나 실태조사가 선행되어야 한다.

- ⑨ PM_{2.5}를 배출량이 크지만 소형사업장으로 이루어진 배출원(숯가마, 노천소각, 고기구이 등)이 존재하여 관리 수단의 선택에 한계가 있다.
- ⑩ 이미 우리나라는 다양한 수단을 사용하여 먼지와 SO_x, NO_x, VOCs 등을 관리하고 있어 추가적인 수단을 채택하는데 어려움이 있다. <표 4-35>는 우리나라의 오염물질별 관리수단을 정리한 것으로 미국의 사례에 포함된 대책이 거의 포함되어 있다. 이와 함께 먼지나 질소산화물, 황산화물은 2020년 이후에나 규제 강화가 가능한 상태이다.⁴¹⁾

〈표 4-35〉 현재 시행 중인 주요 관리대책

항목	내용	대상오염물질	출처
비산 먼지	특별관리공사장 , 특별관리지역, 특별사업장	PM	환경부훈령 제929호
	도로굴착공사	PM	환경부훈령 제929호
	배출사업장, 나대지 등 잔디, 수목식재 등 녹화사업 추진	PM	환경부 보도자료, 2005
	분체상물질 저장시설	PM	환경부훈령 제929호
	비산먼지 발생 저감공법	PM	환경부훈령 제929호
	비포장도로 개선	PM	서울특별시 홈페이지
	항만관리-석탄 부두 야적장 먼지 축소 및 곡물 부원료 밀폐식 하역기 도입	PM	인천광역시, 대기질 개선 종합 계획, 2009
사업장	대기배출시설의 배출허용기준 강화	All Pollutant	대기환경보존법
	총량규제 및 배출권거래제 실시	PM, NO _x , SO _x	환경부 보도자료, 2005
	사업장 미세먼지 방지시설 투자 촉진	PM	수도권대기환경개선예관 한특별법
	도장시설 및 저장시설의 VOC 배출허용기준 강화	VOCs	대기환경보존법
	세정, 도장시설의 비산배출관리	PM, VOCs	대기환경보존법

41) 2015년부터 적용될 배출허용기준이 최근 입법예고 되어 2020년 이전에 다시 기준을 강화하기에는 현실적으로 무리가 따른다.

항목	내용	대상오염물질	출처
사업장	발전시설을 포함한 대기배출시설에 탈질시설 설치 및 가동	NO _x ,	대기환경보존법
	발전시설을 포함한 대기배출시설에 탈황시설 설치 및 가동	SO _x	대기환경보존법
	소형소각시설의 폐쇄 및 이전	NO _x , SO _x	수도권대기환경청 보도자료, 2007
	Low-Nox 버너 설치지원	NO _x ,	서울시, 보도자료, 2011
	신재생에너지 사용확대	NO _x , SO _x	신에너지 및 재생에너지 개발이용보급 촉진법
	지역난방 실시	NO _x , SO _x	서울시홈페이지
	일반주택의 도시가스(LNG) 보급 확대	SO _x	환경백서, 2006
	저황유 공급확대	SO _x	환경백서, 2006
기타	청정연료사용 의무화	PM, NO _x , SO _x	환경백서, 2006
	자전거 이용 활성화 및 자전거 전용도로 설치	PM, NO _x , VOCs	환경백서, 2006
	환경친화형 도로 보급(유기용제 함량 기준 강화)	VOCs	수도권대기환경청 보도자료, 2010
	교통량 감축(승용차 요일제, 차없는 날 운영)	PM, NO _x , SO _x	환경백서, 2006

측정 자료의 부족이나 배출량 인벤토리의 부족으로 당장 체계적인 관리수단을 제안하기는 현실적으로 어려움이 있으므로, 전략적인 접근이 필요하다고 생각된다. 위에서 언급한 사실과 문제의식을 가지고 사업장을 중심으로 하는 PM_{2.5}의 관리정책을 살펴본다.

나. PM_{2.5} 관리 전략

1) 1차 입자 우선 관리

PM_{2.5}에 대한 기본적인 데이터가 부족한 상황에서 현실적인 한계를 인정하고 접근하여야 한다. PM_{2.5}의 조성분석에서 보았지만 sulfate나 nitrate와 같이 2차 생성물질의 중량비중이 큰 상황(EC와 OC를 제외한 성분은 59% 정도를 차지한다)을 감안하면, 우선적으로 황산화물과 질소산화물, 암모니아의 삭감이 효과적인 대책이 될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 질소산화물과 황산화물은 상대적으로 배출량 인벤토리가 잘 구축되어 있고 관리대책도 이미 정립되어 있으므로 관리대책을 수립하기가 상대적으로 용이하다. 하지만 이들 오염물질이 삭감된다 하더라도 얼마만큼이나 PM_{2.5}의 농도 개선에 기여할 수 있을 것인지에 대해서는 아직 과학적으로 규명되지 않았고, 단기간 내에 해결될 성질의 것도 아니다. 한편 PM_{2.5}의 독성이 주로 OC나 중금속과 같은 물질에 주로 기인하는 사실을 감안하면, 대기기준의 달성을 우선할 것인지 또는 독성 위주로 대책을 수립할 것인지 정해야 한다. 따라서 대기환경기준의 달성이 국가정책목표의 최우선이기는 하지만 다음과 같은 이유로 먼저 독성 위주의 관리를 우선하는 것이 합리적이라고 생각된다.

- ① 2차 생성 입자의 주성분인 암모니아의 배출량 인벤토리 구축이 미흡하다. 따라서 배출원 파악이 부족한 상태이기 때문에 어떤 대상을 상대로 어떤 수단이 효과적인지 불분명하다
- ② 질소산화물과 황산화물, 암모니아의 배출을 삭감하더라도 실제 PM_{2.5} 농도 개선에 어느 정도 효과가 있을지 확신하지 못한다. 오존의 사례에서 이미 많은 경험을 하여 알고 있지만, 대기 중에서의 반응은 기후의 영향과 직접관련이 있고 반응자체가 복잡하여 배출량과 대기농도와의 인과관계를 단기간에 입증하기가 어렵다.

- ③ 실제로 PM_{2.5}의 관리 이유는 PM_{2.5}로 인한 건강위해 때문이다. 그런데 독성은 주로 OC나 중금속 성분에 기인하며, EC의 경우에도 독성 자체는 작아도 탄소의 물리적 성격상 VOCs 등 많은 유해 화학물질을 흡착할 가능성이 높아 결과적으로 독성을 유발하게 된다.
- ④ 1차 입자는 배출량 인벤토리도 비교적 잘 구축되어 있고 배출량과 대기농도와 인과관계도 분명하다. 그리고 독성관리를 위해서는 1차 입자의 주성분인 EC와 OC(VOCs) 관리, 중금속을 관리하는 것이 효과적이다.

2) 위해도 우선 관리

전술한 바와 같이 PM_{2.5}의 건강 위해 원인은 많은 연구에도 불구하고 아직 그 원인이 분명한 것은 아니다. 하지만 OC나 중금속, VOCs가 주원인이라는 사실은 과학적으로 입증된 상태이므로 의심의 여지가 없다. EC는 탄소의 성격상 화학물질의 흡착능력이 좋으므로 EC의 삭감은 위해도의 삭감에도 도움이 된다. 다행히도 이러한 물질들은 1차 입자와 유사하므로 1차 입자 관리 우선과 동일한 방향성을 가진다.

3) 인벤토리 및 측정망의 구축

인벤토리 및 대기농도 변화 패턴, 기상 요소와의 상관관계 파악 등은 PM_{2.5}의 과학적 관리를 위해 필수적인 요소이지만 아직 우리나라는 이에 대한 준비가 부족하다. 특히 누락된 배출원을 파악하여 이를 국가 배출량 인벤토리에 포함하여 지속적인 관리를 기울이는 것이 필요하다. 또한 국가 측정 자료의 축적이 부족한 상태이므로 여기에 대해서도 지속적인 투자가 필요하다. 지역마다 PM_{2.5}의 조성 성분이 다른 것도 확인된 바 있으므로 효과적인 관리를 위해서는 지역별 접근 방식이 필요하며 이를 위해서는 측정망 자료의 축적이 필요하다.

4) 기체 상 물질과 PM_{2.5}의 상관관계 규명

PM_{2.5}의 중량농도 기준을 달성하기 위해서는 sulfate나 nitrate 염을 삭감하는 것이 효과적이고 필수적이기는 하지만 아직 배출량과 대기농도와의 인과관계 또는 상관성이 정량적으로 입증된 바가 없다. 여기서 정량적이라는 것은 원인물질을 얼마만큼 저감하면 대기질이 얼마만큼 개선될 것인가를 계량화하는 것으로, 이것이 중요한 이유는 구체적인 삭감대책을 수립할 수 있기 때문이다.

5) 다량 배출 배출원 우선 관리

1차 입자의 경우나 중금속, VOCs 경우에는 배출량 인벤토리가 이미 구축된 상태이거나 또는 구축과정에 있다. 이를 활용하여 우선 배출량이 큰 배출원을 선정하여 관리하는 것이 효과적일 것이다. 본 연구에서는 산정된 결과를 활용하면 PM_{2.5} 다량 배출원을 확인할 수 있다.

6) 지역별 특성에 맞는 관리

전술한 바와 같이 PM_{2.5}의 조성이 지역에 따라 다르다는 사실을 확인하였다. 즉 자동차가 주 배출원인 서울과 산업단지가 형성되어 있는 광양의 PM_{2.5} 조성은 차이가 있기 때문에 효과적이면서 효율적인 삭감을 위해서는 조성을 참조하여 관리하는 것이 필요하다.

다. 추진 과제 및 로드맵

PM_{2.5} 관리를 위해서는 우선 현황에 대한 정확한 분석이 필요하다. 대기오염도의 수준과 구성물질의 종류와 조성비, 황사 등 장거리 이동오염에 의한 영향, 그리고 대기 중에서의 2차 생성 메커니즘 등에 대한 자세한 이해가 선행되어야만 한다. 이와 더불어 배출량 인벤토리를 구축하여 주 배출원이 무엇인지에 대한 파악도 완료되어야만 체계적인 관리가 가능하다. 그러나 우리는 아직 준비가 부족하기 때문에 향후의 추진과제는 이러한 기초적인 준비부터 시작되는 것이 타당하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 사업장을 중심으로 PM_{2.5} 관리를 위해 어떤 정책이 필요한지를 도출하고 이를 시급성과 중요성, 가능성을 토대로 준비단계(~'14)를 포함한 전체 4단계로 구분하여 제시한다.

1) 배출량 인벤토리의 구축

우리나라의 공식적인 대기오염물질 인벤토리는 CAPSS이나 여기에는 PM_{2.5}가 포함되어 있지 않아 배출량이 어느 정도인지 또는 주요 배출원이 무엇인지 파악할 수가 없다. 물론 몇몇 연구자를 통해 배출량이 제시되어 있고 본 연구에서도 CAPSS 소분류별로 배출량을 추정하였지만 이는 국가 공식통계 자료가 아니다. 본 연구에서 제시된 배출량이 가장 최신의 것으로 지난 통계에 비하여 개선된 것이라고 생각되지만 여기서도 배출량 추정과정에서 많은 가정이 포함되어 있다. 예를 들어 PM_{2.5}는 PM₁₀의 분율로 추정하는 경우가 많았는데 외국 자료를 포함 이용 가능한 자료가 없는 경우에는 일괄적으로 $0.9(\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10})$ 를 사용하여 추정한 것이 그것이다. 그 결과 비금속광물제품제조업의 PM_{2.5} 배출량이 전체의 31%를 차지하는 등 두드러지게 높은 값을 보이는 경우가 발생하였다. 또한 배출량 추정에 있어 외국의 공식을 그대로 사용하면서 적절한 활동도 자료가 부족한 경우도 많이 발생하였는데, 방법론의 확정과 활동도 자료의 생산, 현장 실태조사 등을 통해서 국가 공인 인벤토리를 구축하여야 한다. 한편 암모니아가 대기 중에서

반응하여 황산암모늄이나 질산암모늄을 생성하므로 암모니아의 배출원을 확인하는 것도 매우 중요하다. 하지만 암모니아는 CAPSS에서 공식통계로 잡히지 않고 있다. 더불어 VOCs 배출통계도 역시 중요한데, 그 이유는 PM_{2.5} 조성 중 OC의 비중이 매우 높기 때문이다. 인벤토리 구축에 있어서 특히 관심을 두어야 할 부분은 다음과 같다.

- ① 연구결과 간 배출량 차이가 큰 배출원: 노천소각, 포장도로, 나대지, 석회생산, 공공발전시설(보일러), 해상운송선박, 농작물 수확, 화물차 등
- ② 배출량이 많은 배출시설: 비금속광물제조업, 숲가마, 노천소각, 비포장도로, 해상운송선박, 포장도로, 제1차 금속산업, 고기구이, 나대지 등
- ③ PM_{2.5}/PM₁₀ 비율이 확인되지 않은 배출원: 제조업연소, 생산공정
- ④ 암모니아 배출량 인벤토리: 배출원 및 배출량
- ⑤ VOCs: 자연 배출원 배출량 중심

배출량 인벤토리의 구축이 중요하고 시급하기는 하지만 단기간 내에 완료하는 것은 현실적으로 어려운 것이다. 따라서 위에서 언급한 내용을 중심으로 배출량 산정방법(사용 활동도 자료 포함)을 정하고 이에 근거하여 배출량을 추정하되 지속적인 보완작업이 있어야 할 것이다.

2) 측정망의 구축

대기질 측정 자료는 현황을 파악하고 이로 인한 건강영향 등 사회적 피해를 가늠하는 데 필수적인 자료이다. 그러나 아직 우리나라는 일부 지역을 제외하고는 측정 자료가 부족하고 측정방법(중량법 vs. 베타 레이법)도 운영 주체에 따라 달라서 서로 보완적이지 못하다. 측정방법의 통일은 환경부에서 추진 중이며 측정망 확충 계획도 가지고 있으므로 측정 자료의 축적은 상당히 개선될 것으로 보지

만, PM_{2.5}의 생성 기작이 오존만큼이나 복잡하므로 보다 많은 데이터가 필요할 것으로 생각된다. 다만 여기서 언급하고 싶은 것은 중금속 농도 특히, 건강에 위대한 주요 성분으로 언급된 전이금속의 농도 측정이 필요하다고 생각된다. 대기환경 기준이 중량기준이기는 하지만 위해도 측면에서는 VOCs나 전이금속, 중금속 등이 중요하므로 기존의 중금속 측정망과 더불어 전이금속도 측정항목으로 추가하는 것을 검토할 필요가 있다.

3) PM_{2.5}의 오염현황 파악

오존에 대해서는 수많은 모델이 구축되었고 모델링을 통한 대기오염도 예측도 이루어졌다. 그러나 PM_{2.5}는 아직 이에 대한 연구가 진행되지 않고 있는데, 효과적인 저감대책의 수립이나 대책의 효과 등을 평가하기 위해서는 적정 모델링 구축을 통한 현황파악이 매우 중요하다. 여기서 중요한 것은 2차 입자에 관한 것으로 암모니아와 질소산화물, 황산화물이 PM_{2.5} 농도에 어느 정도 기여하는 것인지를 규명하는 것이다, 한편, PM_{2.5}의 조성 자료의 확보가 중요한데 이 자료는 지역별(산업지역과 도시지역 등)로 구분하여 작성되어야 한다. 이는 지역별로 조성이 다르다는 기존의 결과를 반영한 것인데, 조성이 다르면 삭감대책도 차별화되기 때문이다.

대기오염과 관련하여 또 하나의 중요한 요소는 황사로 대별되는 장거리이동오염원의 영향이 어느 정도인가를 파악하는 것이다. 황사발생 시 PM₁₀뿐만 아니라 PM_{2.5}의 농도도 증가하는 사실을 현황분석을 통해 확인하였는 바 국내 배출원 관리를 통해 실제로 개선 가능한 농도를 파악하는 데 도움이 된다. 하지만 장거리 이동의 영향은 PM_{2.5}가 상대적으로 낮기 때문에 국내 배출원 관리를 통해서 PM_{2.5}의 농도 개선은 PM₁₀보다 효과적일 것으로 판단된다.

4) 배출원 관리(사업장을 중심으로)

전술한 바와 같이 PM_{2.5} 관리를 위한 기본 자료가 부족하고 경험도 없기 때문에

구체적인 삭감대책을 제안하기는 무리가 있어 여기서는 정부가 추진해야 할 정책과제를 제안하는 데 목적을 둔다. 오염물질별로 향후 검토가 필요한 정책과제는 다음과 같다.

가) PM_{2.5}

PM_{2.5} 다량 배출사업장을 우선 대상으로 실태조사와 대책을 마련하여야 한다. 연구결과 배출량이 큰 배출원, 즉, 비금속광물제조업, 숯가마, 노천소각, 비포장도로, 해상운송선박, 포장도로, 제1차 금속산업, 고기구이, 나대지에 대하여 실태조사를 하고 현실적인 삭감수단이 무엇인지 고민해야 한다. 대형 사업장이나 굴뚝을 통해 배출되는 사업장의 경우에는 배출허용기준 강화 등이 선택 가능한 수단이 될 수 있으나, 일부 시설의 경우에는 이미 방지기술 수준이 BAT 수준에 도달한 경우도 있으므로 배출허용기준 강화 이외의 수단에 대한 고민도 필요할 것이다. 또한 숯가마나 고기 직화구이 등 소형시설에 대해서는 직접규제 이외에도 방지시설 또는 공정 개선을 유도하고 시설용자나 지원과 같은 경제적 인센티브의 도입도 검토가 가능하다. 신규 시설에 대해서는 BAT 수준의 기술규제를 검토할 필요가 있으며, 대형사업장은 엄격한 허가를 통해 사전에 배출을 최소화 할 수 있다. 그리고 최종적으로는 배출총량제도의 도입을 적극적으로 검토할 필요가 있다.

- 해당 사업장에 대해 배출량 실태조사 및 가능한 대책 마련
 - 비금속광물제조업, 숯가마, 노천소각, 비포장도로, 해상운송선박, 포장도로, 제1차 금속산업, 고기구이, 나대지 등 다량 배출원을 대상으로 함
 - 배출허용기준은 2020년 기준 설정 시 반영하되 추가적인 기준 강화가 어려울 경우 총량제의 도입을 적극 검토
 - 소규모 사업장에 대해서는 설비 개선을 유도할 수 있도록 용자 또는 설비비 일부 지원
- 2020년 이전에는 신규 대형사업장에 대하여 BAT 부착을 의무화

- 위해도 관리 측면에서 중금속과 전이금속의 배출허용기준 신규 설정 및 허용 기준 강화

나) SO_x

SO_x는 2차 입자의 생성 성분이므로 어떤 형태로든 관리가 필요하며, 아직도 배출량을 삭감할 수 있는 여지가 있다고 판단된다. 선택 가능한 정책 수단으로는 배출허용기준 강화, 기본부과금 요율 인상, 신규사업장 BAT 의무화, 사업장 총량제의 도입 등이 있다. 배출허용기준은 이미 2020년까지 적용될 기준이 예고되었으므로 추가적인 강화는 2020년 이후에나 가능한 상태이고, 연료정책을 재검토하지 않는 이상 추가적인 강화도 현실적으로 어렵다. 우리나라는 저황유를 사용하면 별도의 방지시설 없이도 기준을 만족할 수 있는 구조를 가지고 있어, 기술이 있음에도 불구하고 더 이상의 삭감을 할 수 없다는 한계에 직면해 있다. 고효율의 탈황 기술이 보편화되어 있는 상황에서 저황유 사용정책을 계속 고집할 필요는 없다고 생각되며, 사업장에게 연료 선택권을 준다는 장점도 있다. 사업장 총량제는 사업장에게 저감 대책을 채택할 수 있는 자율권이 있다는 점에서 비용효과적인 수단으로 평가되지만 아직 우리나라는 수도권을 제외하면 시행되지 않고 있는 제도이다. 저황유 정책의 재검토를 통해 배출허용기준을 강화하는 방안의 대안으로는 사업장 총량제의 도입의 검토가 필요하다.

- 2020년 이전에는 신규 대형사업장에 대하여 BAT 부착을 의무화
 - 2020년 이후에는 모든 사업장을 대상으로 총량관리로 전환
- 사업장에 대해서는 저황유 공급정책의 재검토
- 기본부과금 요율 인상

다) NO_x

NO_x도 2차 입자의 생성 성분이므로 어떤 형태로든 관리가 필요하며, SO_x와

마찬가지로 일부 사업장 특히 LNG 등 천연가스를 사용하는 사업장에서는 배출량을 삭감할 수 있는 여지가 크다. 관리 수단으로는 배출허용기준의 강화, 기본부과금제도의 도입, 총량제도의 도입이 대표적이다.

NOx는 아직 배출허용기준 강화를 통해 배출량을 삭감할 수 있는 여지가 큰 물질이기 때문에, 배출허용기준 강화를 주된 수단으로 산정할 수 있다. 그러나 직접규제보다는 시장경제를 통한 관리가 비용효과적이기 때문에 시장경제의 도입을 적극적으로 검토할 필요가 크다.

- 배출허용기준은 2020년 기준 설정 시 반영하되 추가적인 기준 강화가 어려울 경우 총량제의 도입을 적극 검토
 - 소규모 사업장에 대해서는 설비 개선을 유도할 수 있도록 용자 또는 설비비 일부 지원
- 2020년 이전에는 신규 대형사업장에 대하여 BAT 부착을 유도
 - 2020년 이후 총량관리로 전환
- 기본부과금 부과 도입
 - 기본 부과금 도입이 어려울 경우, 스웨덴에서 사용하고 있는 NOx budget 프로그램을 검토

라) VOCs

휘발성 유기화합물질은 이미 미국 NESHAPs 수준의 시설관리가 실시되고 있고 최근에는 특정대기유해물질 배출시설에 대한 시설관리 기준도 마련되고 있으므로 사업장에서 특별히 추가할 수 있는 수단은 한계가 있다. 따라서 페인트의 유기용제 함량 제한과 같은 기존의 제도를 확대하여 시행하는 것이 중요하다. 그러나 조선업의 도장시설, 자동차 도장시설과 같은 대형시설은 엄격한 관리를 통해 많은 양의 VOCs 배출은 삭감 가능하다고 보여진다. 미국의 사례를 참조한 총량제도의 도입도 검토해볼만한 가치가 있다.

- 대형 도장시설에 대한 관리대책 마련
 - 조선업과 자동차 도장 시설에 대한 도로 사용제한 또는 배출기준 강화
 - 사업장 총량제 도입 검토
- 카센터 등 소형이지만 다수가 존재하는 사업장에 대한 실태조사 및 대책 마련
 - 전국적으로 산재해 있으나 실태도 파악되고 있지 않은 소형배출시설을 대상으로 유기용제 사용량과 페인트 사용량 등의 실태파악 필요

마) 기타

PM_{2.5} 전구물질은 화석연료의 사용에 기인하는 비율이 높기 때문에 궁극적으로는 화석연료를 대체할 수 있는 에너지원의 개발과 이용이 필요하다. 풍력과 태양력 등 자연력을 이용한 에너지 사용을 유도할 수 있는 방안과 연료전지 사용처 발굴, 사업장에서 운영하고 있는 자동차를 전기자동차 등 친환경자동차로 대체하는 방안 등에 대한 연구가 필요하다.

위에서 언급한 여러 가지 정책과제를 그 시급성에 따라 4단계로 나누고 2024년까지 추진일정을 정리하여 <표 4-36>에 나타내었다.

〈표 4-36〉 국내 PM_{2.5} 관리정책 로드맵

	배출량 인벤토리	측정 자료의 확보	PM _{2.5} 현상규명	사업장 관리	
준비단계 (13~14)	1차 입자	· 배출량 인벤토리 공식통계 작성	· 측정망의 구축계획의 재검토 및 조정 (조정 포함)	· 비금속광물제품제조업, 숯가마, 노천소각 등 배출량 상위 3개 업종의 실태조사 및 대책 마련	관리 준비
	SOx	-	· 황사 영향 파악	-	
	NOx	-	· PM _{2.5} 모델구축		
	VOCs	-	· PM _{2.5} 의 사회적 영향 평가		
	NH ₃	· 배출량 인벤토리 공식통계 작성	-		
중금속	-	전이금속의 측정 항목 추가 검토			
1단계 (15~17)	1차 입자	· 배출량 인벤토리 보완	· 지역별 PM _{2.5} 오염 현상 (local/regional/배경농도 기여도 파악) · PM _{2.5} 의 사회적 영향 평가	· 1차금속산업, 화목난로, 고기구이 등 배출량 차 상위 3개 사업장 실태조사 및 관리	위해도 저감
	SOx	-		· 저황유 보급정책의 재검토	
	NOx	-		· 사업장 총량관리제도 검토	
	VOCs	· 배출량 인벤토리 보완 (자연 배출원 등 누락 배출원 중심으로)		(공통) 풍력, 태양력 등 자연력을 이용한 에너지 사용 촉진 방안 발굴	
	NH ₃	· 배출량 인벤토리 공식통계 작성 (축산, 자연 배출원 등 추가 및 보완)		(공통) 연료전지 사용확대 방안 마련	
	중금속	-		전이금속의 대기농도 측정	

		배출량 인벤토리	측정 자료의 확보	PM _{2.5} 현상규명	사업장 관리	
2단계 (’18~’20)	1차 입자	배출량 인벤토리 보완		· 지역별 PM _{2.5} 오염현상 규명(local/regional/ 배경농도 기여도 파악)	· 신규사업장 BAT 도입	중량농도 저감
	SOx					
	NOx	-				
	VOCs					
	NH ₃	· 배출량 인벤토리 공식통계 작성 (측산 자연 배출원 등 추가 및 보완)		· 주요 배출원 실태조사 및 배출 허용기준 설정		
	중금속	-		전이금속 및 중금속의 배출허용기준 설정		
3단계 (’21~’24)	1차 입자			· PM _{2.5} 삭감대책 평가(사 회적 편익 포함)	· 사업장 총량제도의 도입	
	SOx				· 사업장 총량제도의 도입	
	NOx				· 사업장 총량제도의 도입	
	VOCs				· 기본부과금 도입	
	NH ₃				· 사업장 총량제도의 도입	
	중금속				· 배출허용기준 강화	
						중금속 및 전이금속의 배출허용기준 도입

| 제5장 · 결론 및 제언 |

본 연구는 2015년부터 시행 예정인 PM_{2.5}의 대기환경기준 신설에 따른 건강영향 및 관리정책을 마련하는 데 목적이 있다. 이를 위해 “PM_{2.5}의 물리·화학적 특성과 시계열 분석”, “PM_{2.5}의 건강영향 평가 및 건강편익 산정”, “PM_{2.5}의 배출량 추정 및 관리정책 로드맵”의 세 분야로 나누어 분야별 세부주제에 대하여 연구를 진행하였다.

1. PM_{2.5}의 물리·화학적 특성과 시계열 분석

국립환경과학원의 서울특별시 불광동 지점의 대기오염물질 측정소 자료와 서울시에서 운영중인 측정소 자료, 불광동의 AWS 자료, 그리고 종로구(측정소 번호 108번) 습도 자료를 사용하여 PM_{2.5}의 시계열 분석과 오염물질과의 상관관계 등을 분석하였고, 기타 조성 및 황사관련 자료는 국립환경과학원에서 발간한 자료(국립환경과학원, 2009b)를 이용하였다.

PM_{2.5} 구성성분을 보면 황산암모늄과 질산암모늄의 질량이 전체 질량의 37%(겨울)~76%(여름)를 차지하고 있어 2차 입자의 비중이 크며, 이는 SPSS 통계프로그램을 이용한 PM_{2.5}와 다른 오염물질과의 상관관계 분석에서도 확인 되었다. 따라서 PM_{2.5} 관리를 위해서는 1차 입자의 관리뿐만 아니라 2차 입자를 생성하는 SO_x와 NO_x, 그리고 암모니아의 관리도 함께 필요하다. 지역별로 조성의 차이가 있어 지역별 분석결과에 근거한 차별화된 정책이 필요하기도 하다. 질량 비중을 볼 때 2차 입자를 생성하는 기체 상 오염물질의 삭감이 효과적인 것으로 생각되지만, 그러나 이들 물질의 농도와 PM_{2.5} 농도와의 정량적 상관관계가 불분명하여 SO_x와 NO_x 등의 삭감목표량을 세우는데 한계가 있다. 시간대별 PM_{2.5} 농도 패턴은 도로 재비산 먼지가 PM_{2.5}보다는 PM₁₀의 농도에 더 큰 영향을 미치기 때문에, 도로 살수와 같은 대책들은 PM_{2.5} 농도 개선에는 제한적인 효과를 가져올 가능성이 높다. 한편 황사는 PM_{2.5}과 PM₁₀ 모두의 농도를 증가시키지만

상대적으로 PM₁₀ 농도 증가가 훨씬 큼을 알 수 있었다. PM_{2.5} 성분 중 OC와 중금속(특히 전이금속)의 유해성이 크며, 2차 입자를 이루는 무기염의 유해성은 상대적으로 적다고 보고하고 있다(WHO, 2005). 따라서 시민의 건강 보호 측면에서는 OC와 중금속(특히 전이금속)의 삭감이 우선되는 것이 바람직하다.

2. PM_{2.5}의 건강영향 평가 및 건강편익 산정

본 연구에서는 2006년부터 2010년까지 서울시를 대상으로 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})가 사망에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 연구 대상집단은 연령에 따라 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단으로 구분하였으며, 사망원인에 따라서 전체원인 사망과 심혈관계 관련질환 사망원인으로 구분하여 분석하였다.

건강영향 평가 결과 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 증가는 사망발생위험을 통계적으로 유의하게 높이고 있었다. 연령별로는 민감집단으로 보고된 65세 이상 연령집단이 전체 연령집단보다 대기오염으로 인한 사망발생위험이 높았으며, 사망원인에 따라서는 전체원인보다 심혈관계 관련질환 사망발생위험이 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 또한 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향을 비교하면 미세먼지(PM₁₀)로 인한 사망발생위험보다 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 사망발생위험이 더 높은 것으로 평가되었다.

또한 서울시의 2010년 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 수준이 WHO에서 권고하고 있는 대기질 기준을 달성한다고 가정하였을 때, 본 연구에서 도출한 대기오염 농도 증가에 따른 초과사망자의 농도-반응(concentration-response) 함수를 적용하여 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 개선으로 기대되는 급성 조기사망 감소의 건강편익을 산출하였다.

대기환경기준을 신설 또는 개정하기 위해서는 현재 대기오염의 농도 수준, 목표 대기질을 달성할 수 있는 과학적 저감기술, 사회적·경제적·문화적 요소 등을 종합적으로 고려해야 한다. 선진국들을 중심으로 대기환경기준에서 환경기준항목을 선정하고 대기환경기준의 농도 수준을 설정할 때 건강에 대한 영향을 신중하게 검토하고 있다. 이를 위하여 대기오염농도와 건강영향 간의 농도-반응함수를 활용하여 대기질 변화에 따른 건강영향을 정량적으로 추정한 연구결과들에 근거하여 대기환경기준 항목을 선정하고 대기환경기준의 농도를 설정하고 있다. 따라서 우리나라에서 국민의 건강을 보다 체계적으로 보호하기 위해서는 대기질 기준 항목 선정과 대기질 기준 농도 설정에서 건강부문의 비용과 편익 분석이 반드시 필요하다.

3. PM_{2.5}의 배출량 추정 및 관리정책 로드맵

PM_{2.5} 국가 공식 인벤토리가 구축되어 있지 않아 대책 수립에 어려움이 있어, 본 연구에서는 최신 자료를 이용하여 배출량을 추정하였다. CAPSS 배출목록에서 누락된 배출원을 추가하였고 배출량 산정 시에도 최신의 활동도 자료와 방법론을 사용하였기 때문에 기존의 다른 연구결과에 비해 정확도가 높아졌다고 생각된다. 하지만 여전히 불확실성이 큰 배출원이 존재하는데, 특히 제조업의 경우가 그러하다. 따라서 제조업을 중심으로 다량 배출원에 대해서는 추가적인 검토가 필요하며, 국가 공식적인 배출량 인벤토리의 구축이 요구된다. 배출량 추정결과 특이한 점은 CAPSS에서 누락된 배출원의 배출량이 크다는 점과 이제까지 큰 관심을 가지지 않았던 배출원이 대량 배출원으로 나타난 점이다. 예를 들어 비금속광물 제품 제조업, 숯가마, 노천소각, 1차 금속산업 등이 그것인데, PM₁₀ 다량 배출원 순위와는 차이가 남을 확인하였다.

PM_{2.5} 관리와 관련해서는 기본 데이터 부족과 오염현상에 대한 이해가 아직 부족하다는 현실을 감안하여, 우선은 1차 입자 또는 독성관리 위주의 접근이 바람직하다고 결론지었다. PM_{2.5}의 조성 중 sulfate나 nitrate와 같이 2차 생성물질의 중량비중

이 큰 상황을 감안하면, 우선적으로 황산화물과 질소산화물, 암모니아의 삭감이 효과적이지만, 이들 오염물질이 삭감된다 하더라도 얼마만큼이나 PM_{2.5}의 농도 개선에 기여할 수 있을 것인지 정량적인 분석이 이루어지지 않았고 조만간 해결될 것도 아니기 때문에, OC나 중금속과 같은 유해성이 큰 물질을 우선적으로 삭감하고 이후 준비를 통해 SOX, NOx 등 기체 상 오염물질을 삭감하는 전략을 제안하였다.

마지막으로, PM_{2.5}의 농도현황과 조성, 현재의 관리여건과 외국의 사례를 검토하여 인벤토리 구축, 측정 자료의 확보, PM_{2.5}의 오염현상 규명, 그리고 사업장 관리라는 4개의 범주에 대하여 정부가 추진해야 할 정책과제를 4단계에 걸쳐 제안하였다.

| 참고 문헌 |

<국문 자료>

- 강공언 외. 2011. 「익산지역 대기 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 계절별 특성». 한국환경보건학회.
- 건설교통부. 1998. 「도로포장설계지침서 작성 및 자동차 축하중 조사연구」.
- 경기도보건환경연구원. 2010. 「2009년 경기도 대기오염 평가보고서」.
- 고지연 외. 2004. 「보릿짚의 수분함량 및 수확시기가 소각시 대기오염물질 발생에 미치는 영향」. 한국환경농학회지.
- 교통안전공단. 2010. 「2010년도 자동차 주행거리 실태분석 연구」.
- 국립환경과학원. 2005. 「환경대기 중 유해대기오염물질(HAPs) 모니터링(Ⅱ)」.
- _____. 2007a. 「비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로 재비산 먼지 실시간 측정방법 개발(Ⅰ)」.
- _____. 2007b. 「비산먼지 배출량 산정 방법 개선 및 도로 재비산 먼지 실시간 측정방법 개발(Ⅱ)」.
- _____. 2009a. 「PM_{2.5} 대기환경기준 설정을 위한 연구」.
- _____. 2009b. 「PM_{2.5} 물리·화학적 특성에 관한 연구」.
- _____. 2010. 「황사 발생 특성 분석 결과」.
- _____. 2011. 「대기환경연보」.
- 국토해양부. 2011. 「건축통계연보」.
- 김기홍 외. 2008. 「노천소각으로 인한 대기오염물질 배출계수 산정 연구」.
- 김병화 외. 2000. 「수원지역 대기 중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 환경거동에 관한 연구」. 한국대기환경학회지.
- 김선영. 2004. 「사회경제적 지위에 따른 대기오염이 천식에 미치는 영향」. 서울대학교 대학원.
- 김현선 외. 2005. 「서울시의 PM_{2.5} 및 화학적 구성성분의 특성 파악」. 한국대기환경학회.
- 김희갑 외. 2006. 「중소도시, 대도시 및 산업지역에서 채취한 미세분진 (PM_{2.5})과 입자상 다환방향족탄화수소의 계절적인 분포 특성」. 환경독성보건학회.
- 농림수산식품부. 2009. 「농림통계연보」.
- _____. 2011. 「농림수산식품통계연보」.
- 서울시정개발연구원. 2011. 「서울시 고농도 미세먼지 오염현상의 원인분석 및 지역별 맞춤형 관리 대책」.
- 윤용석. 2002. 「황해도 덕적도 PM_(2.5) 오염원의 기여도 추정」. 경희대학교 석사학위논문.

- 이중훈 외. 1997. 「제주도 고산지역의 1996년 3월 중 PM_{2.5} 입자 특성」. 한국대기환경학회.
- 이현미 외. 2008. 「Dust Monitor를 이용한 천안시 대기 중 PM₁₀, PM_{2.5} 오염특성 조사」. 한국대기환경학회.
- 이형우 외. 2009. 「충주시미세입자(PM_{2.5})의 화학적 특성 및 계절변동 특성」, 충주대학교 석사학위 논문.
- 임종명 외. 2006. 「대전지역 미세먼지의 오염원 분석과 장거리 이동 평가」. 한국대기환경학회 추계학술대회.
- 장영기 외. 2010. 「이륜차의 일 주행거리조사와 대기오염 배출량 추정」. 한국대기환경학회지.
- 조영혁 외. 2010. 「구미시 PM-2.5의 질량농도 및 이온성분의 분석」. 한국대기환경학회 춘계학술대회.
- 조은경. 2010. 「2008년 국내 배경지역 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 미세먼지의 화학 조성 분석」. 제주대학교 석사학위 논문.
- 진형아 외. 2012. 「국내 배출원별 PM_{2.5} 배출량 산정 및 배출 기여도 분석」. 한국대기환경학회지.
- 최규식. 2009. 「포천지역 대기중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 화학적 특성에 관한 연구」. 대전대학교 석사학위 논문.
- 최준락. 2012. 「용인지역 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 질량농도 및 이온성분 특성에 관한 연구」. 한국대기환경학회.
- 통계청. 2012. 「2012년 4분기(3월 1일 기준) 가축동향조사 결과」.
- 한국교육개발원. 2007. 「교육통계연보」.
- 환경부. 2009. 「전국폐기물 발생 및 처리현황」.
- _____. 2011. 「인체 위해성이 높은 초미세먼지 관리 본격화」.
- 허윤경. 2005. 「포항지역 대기 중 미세먼지의 오염특성평가-PM_{2.5}를 대상으로」. 영남대학교 석사학위 논문.
- 허중배 외. 2004. 「광양시 대기 중 미세먼지(PM_{2.5})의 오염원 파악을 위한 PMF모델의 적용」. 한국대기환경학회
- 허중배. 2005. 「광양시 대기 중 미세먼지 (PM_{2.5})의 오염원 파악을 위한 PMF모델의 적용」. 서울대학교 석사학위 논문.

<영문 자료>

- Akaike, H. 1973. "Information theory and an extension of the maximum likelihood principal." *Second International Symposium on Information Theory*. 267-281. In: Petrov BN, Caski F, editors. Budapest, Akademiai Kiado.
- Andrade F, C. Orsini, W. Maenhaut. 1993. "Receptor modeling for inhalable atmospheric particles in Sao Paulo, Brazil". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B. 75:308-311.
- Baccarelli et al. 2008. "Exposure to particulate air pollution and risk of deep vein thrombosis". *Archives of Internal Medicine*. 168(9):920-927.
- Bell, ML. et al. 2006. "The avoidable health effects of air pollution in three Latin American cities: Santiago, São Paulo, and Mexico City". *Environmental Research*, 100(3): 431-40.
- Brook et al. 2004. "Air Pollution and Cardiovascular Disease: A Statement for Healthcare Professionals From the Expert Panel on Population and Prevention Science of the American Heart Association". *Circulation*. 109:2655-2671.
- Brook RD et al. 2002. "Inhalation of fine particulate air pollution and ozone causes acute arterial vasoconstriction in healthy adults". *Circulation*. 105:1534-1536.
- Brook RD, Brook JR, S. Rajagopalan. 2003. "Air pollution: the "heart" of the problem". *Current Hypertension Reports*. 5:32-39.
- CARB. 2006. *Areawide Emissions Inventory Methodology Agricultural Burning*.
 _____. 2007a. *Agricultural Harvest Operation*.
 _____. 2007b. *Agricultural Land Preparation*.
 _____. 2007c. *Unpaved Road Dust*.
- Chow JC et al. 1992. "PM10 source apportionment in California's San Joaquin Valley". *Atmospheric Environment*. 18:3335-3354.
- Davidson K. et al. 2007. "Analysis of PM2.5 using the Environmental Benefits Mapping and Analysis Program (BenMAP)". *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*. 70: 332-346.
- EEA. 2007. *Emission Inventory Guidebook*.

- _____. 2009. *Emission Inventory Guidebook*.
- Huang SL, Hsu MK, Chan CC. 2003. "Effects of submicrometer particle compositions on cytokine production and lipid peroxidation of human bronchial epithelial cells". *Environmental Health Perspectives*. 111:478-482.
- Hubbell BJ. et al. 2005. "Health-related benefits of attaining the 8-hr ozone standard." *Environmental Health Perspectives*. 113(1): 73-82.
- Hueglin C et al. 1997. "Characterization of wood combustion particles:morphology, mobility, and photoelectric activity". *Environmental Science & Technology*. 31:3439-3447.
- Jerrett, m, et al. 2009. "Long-Term Ozone Exposure and Mortality", *The New England Journal of Medicine*. 360(11):1085-1095.
- Kreyling WG, Scheuch G. 2000. *Clearance of particles deposited in the lungs*. In: Gehr P, Heyder J, eds. Particlerung interactions. New York, Marcel Dekker. pp323-376.
- Kreyling, W.G., M. Semmler-Behnke, and W. Moller. 2006. "Ultrafine particle-lung interactions: does size matter?". *Journal of Aerosol Medicine*. 19(1):74-83.
- Kunzli N et al. 2005. "Ambient air pollution and atherosclerosis in Los Angeles". *Environmental Health Perspectives*. 113:201-206.
- Maciejczyk P, Chen LC. 2005. "Effects of subchronic exposures to concentrated ambient particles (CAPs) in mice. VIII. Source-related daily variations in in vitro responses to CAPs". *Inhalation Toxicology*. 17:243-253.
- Mallone S. et al. 2011. "Saharan dust and associations between particulate matter and daily mortality in Rome, Italy". *Environ Health Perspect*. 119(10):1409-1414.
- McMurry PH, M. Shepherd., JS. Vickery. eds. 2004. *Particulate matter science for policy makers: a NARSTO assessment*. Cambridge, Cambridge University Press.
- MRI. *Background Document for Revisions to Fine Fraction Ratios Used for AP-42 Fugitive Emission Factors*. Final Report prepared for the WRAP by Midwest Research Institute. Project No. 110397. February 1.
- MRI. 1997. *MRI BACM Project(Midwest Research Institute. Best Available Control*

Method Project).

- Ostro B. et al. 2011. "The effects of particulate matter sources on daily mortality: a case-crossover study of Barcelona, Spain". *Environ Health Perspect.* 119(12):1781-1787.
- Peters A et al. 2010. "Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction". *Circulation.* 103:2810-2815.
- Pope et al. 2006. "Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that connect". *Journal of Air & Waste Manage. Assoc.* 56:709-742 .
- Putaud JP et al. 2003. "A European aerosol phenomonology: physical and chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe". Ispra, European Communities Joint Research Centre.
- Querol X et al. 2004. "Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in selected European cities". *Atmospheric Environment.* 38:6547-6555.
- SCAQMD. 2007. *2007 Air Quality Management Plan*.
- Schlesinger RB, F. Cassee. 2003. "Atmospheric secondary inorganic particulate matter: the toxicological perspective as a basis for health effects risk assessment". *Inhalation Toxicology.* 15:197-235.
- Schwartz, J. 2005. "How sensitive is the association between ozone and daily deaths to control for temperature?" *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine.* (171): 627-631.
- SJVUAPCD. 2005. *Emission Inventory Methodology - agricultural Burning*.
- U.S. EPA. 1995. *AP-42*.
- _____. 1999. *The Benefits and Costs of the Clean Air Act Amendments of 1990-2010*.
- _____. 2001. *EIIP. Volum III*.
- _____. 2006. *Excessive Heat Events Guidebook*.
- _____. 2009. *Integrated Science Assessment for Particulate Matter*.
- _____. 2011. *AP-42*.
- Venables WN and Ripley BD. 1999. *Modern Applied Statistics with S-plus*. Springer.

New York.

Western Regional Air Partnership. *Fugitive Dust handbook*.

WHO Europe. 2006. *Air Quality Guidelines Global Update 2005*.

World Health Organization. 2006. *WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide*.

Zanobetti A, Schwartz J. 2011. "Ozone and survival in four cohorts with potentially predisposing diseases". *Am J Respir Crit Care Med*. 184(7):836-841.

〈부록〉 PM_{2.5}/PM₁₀ Fraction

SCC MAIN CATEGORY	SCC SUBCATEGORY	PM _{2.5} Fraction of Total PM	PM ₁₀ Fraction of Total PM	PM _{2.5} Fraction of PM ₁₀
ASBESTOS REMOVAL		0.500	0.500	1.000
ASPHALT PAVING / ROOFING	FUGITIVE EMISSIONS	0.925	0.960	0.964
	MANUFACTURING	0.945	0.980	0.964
BURNING	AGRICULTURE/FIELD CROPS, WEED ABATEMENT	0.938	0.984	0.954
	FOREST MANAGEMENT, TIMBER AND BRUSH FIRE	0.854	0.961	0.889
	ORCHARD PRUNINGS	0.925	0.981	0.943
	RANGE MANAGEMENT, WASTE BURNING	0.932	0.983	0.948
	UNPLANNED STRUCTURAL FIRES	0.914	0.980	0.933
CEMENT MANUFACTURING		0.620	0.920	0.674
CHEMICAL MANUFACTURING	FERTILIZER-UREA	0.950	0.960	0.990
	ORGANIC AND INORGANIC CHEMICALS	0.890	0.900	0.989
COATINGS, SOLVENTS, INKS AND DYES	SOLVENT BASED	0.925	0.960	0.964
	WATER-BASED COATING	0.620	0.680	0.912
CONSUMER PRODUCTS		0.925	0.960	0.964
COOKING	BAKING, CHARBROILING, DEEP FAT FRYING	0.420	0.700	0.600
COOLING TOWER		0.420	0.700	0.600

SCC MAIN CATEGORY	SCC SUBCATEGORY	PM _{2.5} Fraction of Total PM	PM ₁₀ Fraction of Total PM	PM _{2.5} Fraction of PM ₁₀
DRY CLEANING		0.925	0.960	0.964
ELECTROPLATING	HEXAVALENT CHROME, CADMIUM	1.000	1.000	1.000
	ZINC AND COPPER	0.925	0.960	0.964
EXTERNAL COMBUSTION	COAL, COKE, LIGNITE	0.150	0.400	0.375
	GASEOUS FUEL-EXCEPT PETROLEUM AND INDUSTRIAL PROCESS HEATERS	1.000	1.000	1.000
	GASEOUS FUEL-PETROLEUM AND INDUSTRIAL PROCESS HEATER ONLY	0.930	0.950	0.979
	LIQUID FUEL-EXCEPT RESIDUAL OIL	0.967	0.976	0.991
	RESIDUAL OIL-EXCEPT UTILITY BOILERS	0.760	0.870	0.874
	RESIDUAL OIL-UTILITY BOILERS ONLY	0.953	0.970	0.982
	STEEL FURNACE	0.930	0.980	0.949
	WOOD/BARK WASTE	0.927	0.997	0.930
	ABRASIVE BLASTING	0.790	0.860	0.919
	ARC WELDING, OXY FUEL, COPPER, ZINC, BATH	0.925	0.960	0.964
FOOD AND AGRICULTURE	COFFEE ROASTING	0.610	0.620	0.984
	FERMENTATION, RENDERING, FISH AND NUT PROCESSING	0.420	0.700	0.600
	GRAIN ELEVATORS	0.010	0.290	0.034
	GRAIN MILLING, DRYING	0.400	0.540	0.741
	LIVESTOCK WASTE	0.420	0.700	0.600

SCC MAIN CATEGORY	SCC SUBCATEGORY	PM _{2.5} Fraction of Total PM	PM ₁₀ Fraction of Total PM	PM _{2.5} Fraction of PM ₁₀
FUGITIVE DUST	AGRICULTURAL TILLING DUST	0.101	0.454	0.222
	CONSTRUCTION AND DEMOLITION	0.102	0.489	0.208
	LANDFILL DUST	0.102	0.489	0.208
	LIVESTOCK DUST	0.055	0.482	0.114
	PAVED ROAD DUST	0.077	0.457	0.169
	UNPAVED ROAD DUST	0.126	0.594	0.212
FUGITIVE EMISSIONS – ORGANIC AND INORGANIC	LIQUID FUEL STORAGE/HANDLING, LOADING, UNLOADING DISPENSING	0.925	0.960	0.964
	NATURAL GAS PRODUCTION, CRUDE OIL PRODUCTION, PETROLEUM REFINING	0.555	0.610	0.910
	ORGANIC AND INORGANIC CHEMCALS	0.925	0.960	0.964
	PROCESSING	0.925	0.960	0.964
	WELL CELLEARS, PUMPS, VALVES, FLAGES, SEALS	0.925	0.960	0.964
HEALTH CARE, LABS	STERILIZATION	0.420	0.700	0.600
INCINERATOR, AFTERBURNER, FLARES	GASEOUS FUEL	1.000	1.000	1.000
	LIQUID FUEL	0.967	0.976	0.991
	SOLID FUEL	0.200	0.300	0.667
INTERNAL COMBUSTION	DISTILLATE AND DIESEL-ELECTRIC GENERATION	0.937	0.960	0.976
	DISTILLATE AND DIESEL-EXCEPT ELECTRIC GENERATION	0.967	0.976	0.991

SCC MAIN CATEGORY	SCC SUBCATEGORY	PM _{2.5} Fraction of Total PM	PM ₁₀ Fraction of Total PM	PM _{2.5} Fraction of PM ₁₀
INTERNAL COMBUSTION	GASEOUS FUEL	0.992	0.994	0.998
	GASOLINE	0.992	0.994	0.998
	JET FUEL	0.967	0.976	0.991
	SOLID PROPELLANT	0.927	0.997	0.930
MINERAL PROCESS LOSS	BRICK, CEMENT, FIBERGLASS, GLASS MFG.	0.146	0.500	0.292
	COAL CLEANING, SURFACE COAL MINE, NONMETALLIC MINERAL	0.146	0.500	0.292
	GRINDING, CRUSHING, SURFACE BLASTING	0.146	0.500	0.292
	LOADING AND UNLOADING BULK MATERIALS	0.146	0.500	0.292
MINERAL PRODUCTS	CLAY AND RELATED PRODUCTS GRINDING OPERATIONS	0.513	0.560	0.916
	CRUSHING, SCREENING, BLASTING, LOADING AND UNLOADING	0.030	0.100	0.300
	FIBERGLASS MANUFACTURING	0.992	0.994	0.998
	GLASS MELTING FURNACE	0.963	0.980	0.983
	GYPSUM MANUFACTURING	0.495	0.880	0.563
	LIME MANUFACTURING	0.117	0.300	0.390
	STONE QUARRYING	0.146	0.500	0.292
OFF-ROAD EQUIPMENT	DIESEL	0.920	1.000	0.920
	GASEOUS FUEL	0.992	0.994	0.998
	GASOLINE	0.680	0.900	0.756

SCC MAIN CATEGORY	SCC SUBCATEGORY	PM _{2.5} Fraction of Total PM	PM ₁₀ Fraction of Total PM	PM _{2.5} Fraction of PM ₁₀
ON-ROAD VEHICLES	BRAKE WEAR	0.420	0.980	0.429
	DIESEL	0.920	1.000	0.920
	GASOLINE-CATALYST	0.900	0.970	0.928
	GASOLINE-NO CATALYST	0.680	0.900	0.756
	HEAVY, MEDIUM, LIGHT DUTY TRUCKS AND VEHICLES, MOTORHOMES, BUSES, MOTORCYCLES	0.925	0.960	0.964
	TIRE WEAR	0.250	1.000	0.250
PETROLEUM INDRY	ASPHALT CONCRETE	0.333	0.400	0.833
PRIMARY AND SECONDARY METALS	ELECTRO REDUCTION, FURNACE, FLUXING, STORAGE, PROCESSING	0.903	0.950	0.951
	IRON & STEEL, FOUNDRY, HEAT TREATING	0.860	0.960	0.896
	STEEL FURNACE	0.600	0.830	0.723
RESIDENTIAL FIREPLACES AND WOOD COMBUSTION		0.900	0.935	0.963
SHIPS	DIESEL	0.920	1.000	0.920
	LIQUID FUEL	0.937	0.960	0.976
TRAINS	HAULING, SWITCHING	0.920	1.000	0.920
WASTEWATER, SEWAGE TREATMENT, DIGESTER		0.925	0.960	0.964
WOOD PRODUCTS	SANDING	0.885	0.920	0.962
	SAWING	0.283	0.400	0.708

Abstract

A Study on the Health Impact and Management Policy of PM_{2.5} in Korea I

This study is to analyze health influence and to propose managing policy of PM_{2.5}. The study had been classified into three sectors - 1) analysis of concentration characteristics and physical/chemical properties of PM_{2.5} 2) influence of PM_{2.5} on health and social cost, 3) estimation of PM_{2.5} emissions and suggestion of management policy.

1) analysis of concentration characteristics and physical/chemical properties of PM_{2.5}

Considering of PM_{2.5} composition(the mass ratio of ammonium sulfate and ammonium nitrate is 37%(winter)~76%(summer)), secondary particles is important to reduce PM_{2.5} concentration. Therefore, there must be some measures to reduce not only primary particles but also SO_x, NO_x, and ammonium emissions. And there is difference in composition in PM_{2.5} depending on regions, it is desirable that control measures also are adjusted by regional peculiarities.

The time concentration pattern of PM_{2.5} shows that road dust affects concentration of PM₁₀ rather than PM_{2.5}, which means that the measures such as spraying water on road will bring about restrictive effect on reducing concentration of PM_{2.5}. Finally, OC and metals in PM_{2.5} are important

compounds in aspect of harmfulness.

2) influence on health and social cost

We investigated the short-term association between air pollution and mortality and assessed the impact of improved air quality on mortality in Seoul during 2005-2010. We used generalized additive model(GAM) to estimate the relative risks(RR) of mortality associated with changes in air pollution. And we used the BenMAP to estimate the health benefits.

PM10 and PM2.5 were significantly associated with an increase of risk of death. For people all age group and elderly people, an increase of $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ in PM10 was associated with increases in daily death counts of 0.44%(95% confidence interval [CI]: 0.25 ~ 0.63%) and 0.64%(95% CI : 0.41 ~ 0.87%), respectively. For people all age group and elderly people, an increase of $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ in PM2.5 was associated with increases in daily death counts of 0.95%(95% CI : 0.57 ~ 1.34%) and 1.37%(95% CI : 0.90 ~ 1.84%) respectively.

We estimated the health benefits of attaining the World Health Organization's(WHO) air quality guidelines for PM10 and PM2.5. Even considering the limitations and uncertainties of the analysis,

Although the limitations and uncertainties of the analysis were considered, it is necessary benefit-cost analysis framework of environmental regulations that examine the impacts of the air pollutants and quantify the health benefits associated with reductions in air pollutants.

3) estimation of PM2.5 emissions and suggestion of management policy.

We had estimated PM2.5 emissions by applying most recent data and methodology, and the results are believed to have been improved. Nevertheless, the emissions of manufacturing sector are still imprecise. And more seriously, emissions of some sources which have been missed in CAPSS are large. Such sources are nonferrous metal manufacturing, charcoal furnace, outdoor combustion, primary metal industry. Therefore, there should be some additional investigation.

Considering lack of basic data and understanding of pollution situation, we had concluded that there should be approach toward primary particle or

management of toxic material. Although the weight of secondarily particles such as sulfate or nitrate is much heavier, it is not clear the reduction of those pollutants can make improve air concentration of PM_{2.5}. Finally, we suggested some tasks which should be carried out by government for 4 themes such as: ① understanding of pollution phenomena of PM_{2.5} ② preparation of inventory ③ acquisition of measuring data ④ measures for industry.

Keywords : PM_{2.5}, model(GAM), CAPSS, inventory, Road-map