
수도권 비산먼지 관리대책 평가
기준 개선

한국에너지기후환경협의회

시흥녹색환경지원센터

[별지 제26호 서식]

연구결과보고서

2017년도 연구개발사업에 따라 연구 중인 수도권 비산먼지
관리대책 평가 기준개선에 관한 연구의 최종보고서를 제출
합니다.

2017.12

연구기관 : 한국에너지기후환경협의회

연구책임자 : 동 종 인 (인)

연구기관장 : 동 종 인 직인

시흥녹색환경지원센터장 귀하

제 출 문

시흥녹색환경지원센터장 귀하

본 보고서를 “수도권 비산먼지 관리대책 정량적
평가 기준 개선”에 관한 최종보고서로 제출합니다.

2017.12

연구기관명 : 한국에너지기후환경협의회

연구책임자 : 동 종 인 교수 (서울시립대 환경공학부)

연 구 원 : 여 상 구 (서울시립대 환경공학부)

박 풍 모 (서울시립대 환경공학부)

윤 재 량 (서울시립대 환경공학부)

수도권 비산먼지 관리대책 평가
기준 개선

(사)한국에너지기후환경협의회

시흥녹색환경지원센터

요 약 문

I. 연구개요

- 수도권 대기오염현상은 인구의 도시 집중으로 인해 악화되고 있으며, '13년 미세먼지(PM10) 및 초미세먼지(PM2.5) 배출량 중 비산먼지 기여율은 각각 70%, 30%로 가장 높음.
- 수도권지역에서는 미세먼지에 대한 포장도로 비산먼지 배출량의 비중이 가장 높은 것으로 추정되고 있으며, 어떠한 배출계수 값을 적용하느냐에 따라 비산먼지량이 크게 차이를 보일 수 있고, 비산먼지 배출량 자료의 불확도로 인해 공식 통계배출량에서 제외하고 있음.
- 본 연구에서는 수도권 비산먼지 관리대책별 정량적 평가 개선 방안 연구를 수행하여 비산먼지 관련 산정방법의 신뢰도를 향상시키고자 함.

II. 연구의 필요성 및 목적

- 제2차 수도권 대기환경관리 기본 계획에서 오염물질 배출량 감축 목표 설정
 - 국내 특성에 맞는 비산먼지 삭감식 및 평가 분석 등의 기초연구 부족
 - 비산먼지 기초삭감자료 보완 및 효율적인 산정방법 기반 필요
- 수도권 비산먼지 관리대책 정량적 평가 기준 개선 필요
 - 국내 특성에 맞는 삭감식에 대한 검토 필요
 - 국내 비산먼지 자료의 불확도로 인해 공식통계에서 제외
- 수도권 비산먼지 관리대책 평가에 있어서 중요한 비산먼지 발생량 및 대책 적용시 삭감량과 관련된 합리적인 추정식 및 개선방안을 분석·제시하고자 함.

III. 연구의 내용 및 범위

- 수도권 미세먼지 및 비산먼지 발생 현황조사
 - 수도권 미세먼지 오염도 현황
 - 수도권 비산먼지 배출현황 조사

- 국외 비산먼지 배출량 산정식 및 인벤토리 조사
 - 미세먼지 배출자료 현황
 - 초미세먼지 배출자료 현황

- 수도권 관리대책별 비산먼지 삭감량 산정방법 조사·분석
 - 1차 수도권 기본계획
 - 2차 수도권 기본계획
 - 수도권 대기환경관리 비산먼지 삭감식 현황 조사

- 국내·외 비산먼지 배출량 산정식 조사
 - 미국의 비산먼지 관련 배출량 산정식 조사
 - 유럽의 비산먼지 관련 배출량 산정식 조사
 - 한국의 비산먼지 관련 배출량/삭감량 산정식 조사

- 수도권 관리대책별 비산먼지 삭감량 산정방법 개선안 마련
 - 먼지 제거장비 보급 활성화 관련 비산먼지 삭감량 개선안
 - 저마모 타이어 보급 활성화 관련 비산먼지 삭감량 개선안
 - 나대지 녹색화 사업 관련 비산먼지 삭감량 개선안
 - 비산먼지 발생사업장 관리 강화 관련 비산먼지 삭감량 개선안

IV. 연구결과

- 본 연구에서는 수도권 비산먼지 관리대책별 삭감식 개선을 위해 기존의 비산먼지 배출량 산정방법과 국외에서 사용하는 비산먼지 배출량 자료 및 배출량 산정식 등을 파악함.

- 수도권 비산먼지 배출량 및 배출원에 대한 기존 현황 등의 자료 조사를 수행하여 비교 검토함.
- 먼지제거 장비 보급 활성화 관련 비산먼지 배출계수 및 배출량 개선을 위해 수도권 지역 연구사례와 국내 현황을 조사하였으며, 분진흡입식 먼지제거 장비의 주행거리당 삭감식을 제안하였으며, 이에 대한 비교 분석을 수행함.
- 나대지 비산먼지 배출량 개선을 위해 국내외 연구를 조사하고, 서울시의 도로정보 지도서비스를 활용하여 나대지 면적을 산정하여 기존 현황과 비교 검토하여 기초자료를 마련함.
- 건설 활동별 비산먼지 배출량 개선을 위해 국내·외 산정방법을 조사하였으며, 건설 활동기간별 연구별 사례를 활용하여 기초자료를 마련함.
- 저마모 타이어 보급 활성화 관련한 비산먼지 산정방법과 삭감량 개선을 위해 국내·외 산정방법을 조사하였으며, 타이어 마모량 및 PM2.5/PM10 분율을 활용한 배출량 및 삭감식 활용에 기초자료를 마련함
- 2016 수도권 대기환경 시행계획 보고서(2016)를 활용하여 추가적으로 조사분석하여 비산먼지 대책별 산정방법의 개선방안을 제시함.

V. 연구결과의 활용계획

- 수도권 관리대책별 비산먼지 삭감량 자료의 신뢰도 향상을 통한 정책의 기초자료로 활용함.
- 본 연구의 개선안 등을 통한 관리대책별 삭감량 산정에 있어서 과학적이고 합리적인 방안을 확보함.

목 차

요약문	i
제 1 장 서 론	1
1. 연구의 배경 및 필요성	3
2. 연구개발 목표 및 주요내용	10
2.1 연구개발의 최종 목표	10
2.2 연구개발의 주요내용	10
제 2 장 수도권 미세먼지 및 비산먼지 발생현황 조사	11
1. 수도권 미세먼지 오염도 현황	13
2. 수도권 비산먼지 배출현황 조사	14
제 3 장 국내·외 미세먼지 배출자료 조사	17
1. 미국	19
1.1 EPA 미세먼지 배출자료 현황	19
1.2 미국 캘리포니아 주(CARB) 미세먼지 배출자료 현황	23
1.3 미국의 미세먼지 인벤토리 현황	25
1.4 미국 캘리포니아 주 미세먼지 인벤토리 현황	27
2. 유럽	29
2.1 유럽 미세먼지 배출자료 현황	29
2.2 유럽 미세먼지 인벤토리 현황	31
3. 중국	33
3.2 중국 미세먼지 배출자료 현황	33
3.2 중국 미세먼지 인벤토리 현황	34
4. 한국	35
제 4 장 국내·외 비산먼지 배출량/삭감식	39
1. 미국	41
1.1 EPA AP-42 : Paved road EF equation	41

1.2 CARB : Paved road dust	42
1.3 EPA AP-42 : Heavy construction operations	44
1.4 CARB : Building construction dust	45
1.5 WRAP : Construction and demolition	47
1.6 EPA AP-42 : Industrial wind erosion	48
1.7 WRAP : Open area wind erosion	50
1.8 CARB : Tilled fields wind erosion	51
2. 유럽	52
2.1 EEA : Road transport : automobile tyre and brake wear	52
2.2 EEA : Construction and demolition	54
3. 중국	56
3.1 건설활동에 의한 비산먼지 배출량 산정방법	59
3.2 중국의 야적장에서 발생하는 비산먼지 배출량 산정방법	62
3.3 중국의 도로에서 발생하는 비산먼지 배출량 산정방법	64
3.4 중국의 토양에서 발생하는 비산먼지 배출량 산정방법	66
4. 한국	68
4.1 포장도로 재비산먼지	68
4.2 건설공사	71
4.3 나대지	74
5. 비산먼지 배출량 산정방법 연구동향	77
5.1 포장도로 재비산먼지 관련연구	77
5.2 타이어마모 관련연구	82
5.3 나대지 관련연구	86
5.4 건설 사업장 재비산먼지 관련연구	89
5.5 그 외 중복되는 관련 연구	91
5.6 비산먼지 배출량 산정방법 선행연구 자료 정리	92
제 5 장 수도권 대기환경관리 기본계획 비산먼지 산정방법 조사	93
1. 2차 수도권 대기질 개선 종합대책 기본계획 개요	95
1.1 1차 기본계획	95
1.2 2차 기본계획	95
2. 비산먼지 배출량/삭감식 산정방법 현황	97
2.1 도로 비산먼지 제거장비 보급 개선 활성화 사업 비산먼지	98

2.2 저마모 타이어 보급 활성화 사업 비산먼지 산정방법	99
2.3 비산먼지 발생사업장 관리강화 사업 비산먼지 산정방법	100
2.4 나대지녹색화사업 비산먼지 산정방법	101

제 6 장 비산먼지 관리대책별 삭감식 개선방안 103

1 비산먼지 삭감식 관련 전문가 설문조사 및 자문회의 결과	105
2. 먼지 제거장비 보급 활성화 삭감식 개선(안)	122
2.1 현황 및 문제점 분석	122
2.2 개선방안 수립을 위한 분석	125
3. 저마모 타이어 보급 활성화 삭감식 개선(안)	141
3.1 현황 및 문제점 분석	141
3.2 개선방안 수립을 위한 분석	143
4. 나대지 삭감식 개선(안)	152
4.1 현황 및 문제점 분석	152
4.2 개선방안 수립을 위한 분석	159
5. 비산먼지 발생 건설사업장 관리 강화 사업 삭감식 개선	170
5.1 현황 및 문제점 분석	170
5.2 개선방안 수립을 위한 분석	174
6. 비산먼지 관리대책별 개선방안 요약 정리 및 활용방안	182
7. 요약	186
7.1 주요 연구결과	186
7.2 개선방안 요약	187

참 고 문 헌 188

표 목 차

<표 1> 미세먼지/초미세먼지 중 비산먼지 배출량 (2007년)	3
<표 2> 서울시 비산먼지 관리대책	5
<표 3> 먼지흡입 청소차량 보급 계획 및 삭감량(서울시)	6
<표 4> 타이어마모 전망배출량 및 삭감량(서울시)	6
<표 5> 비산먼지 발생 전망 및 배출량 및 관리강화에 의한 보급에 의한 삭감량(서울시)	7
<표 6> 나대지 전망 배출량 및 잔디 설치에 의한 삭감량(서울시)	8
<표 7> 수도권 미세먼지 배출량 (2013년)	14
<표 8> 서울시 비산먼지 배출량 (2013년)	15
<표 9> 연도별 미국지역(US EPA) 미세먼지 배출량	20
<표 10> 배출원별 미국지역 (US EPA) 미세먼지 배출량	21
<표 11> 미국 캘리포니아주(CARB) 미세먼지 연도별 배출현황	23
<표 12 > 배출원별 미세먼지 배출량 현황(2016)	24
<표 13> 미국 NEI 대기오염물질 인벤토리 (Tier 1) 분류 (2014)	25
<표 14> 미국 NEI 대기오염물질 인벤토리 Sector 분류 (2014)	26
<표 15> 미국 캘리포니아주 대기오염물질 인벤토리 Sector 분류 (2016)	27
<표 16> 배출원별 EU 미세먼지 배출량	30
<표 17> 유럽 대기오염물질 인벤토리 Sector 분류 (2016)	31
<표 18> 중국 배출원별 PM10 배출량	33
<표 19> 중국 대기오염물질 인벤토리 분류	34
<표 20> 비산먼지 발생원 분류체계	35
<표 21> 비산먼지 부문 유관기관 입수자료	37
<표 22> 국가별 비산먼지 배출목록 비교	37
<표 23> 미국 EPA AP-42 포장도로 입경보정계수	42
<표 24> 미국의 건설 활동에 의한 비산먼지 배출계수	44
<표 25> 캘리포니아 주의 건설 활동에 의한 비산먼지 배출계수	46
<표 26> 건설 활동에 의한 비산먼지 배출계수(미국 WRAP)	47
<표 27> 입경별 크기에 따른 보정계수 값	48
<표 28> EU의 타이어마모에 의한 미세먼지 배출계수	52

<표 29> EU의 타이어 마모에 의한 미세먼지 입경별 질량분율	53
<표 30> EU의 브레이크마모에 의한 미세먼지 배출계수	53
<표 31> EU의 타이어 마모에 의한 미세먼지 입경별 질량분율	53
<표 32> EU의 건설 활동에 의한 비산먼지 배출계수	54
<표 33> EU의 건설기간에 따른 배출계수 (d)	55
<표 34> 중국의 먼지 발생원 분류 시스템	57
<표 35> 먼지배출원으로부터 미세먼지 배출산정 기술적 과정	58
<표 36> 중국의 건설 활동 분야 조치별 비산먼지 배출 제어 효율	60
<표 37> 중국의 바람 풍화 중에 발생하는 입자 크기 계수	62
<표 38> 중국의 야적장에 대한 풍화 관리 대책의 효율	63
<표 39> 임계 값 마찰 풍속 기준값	63
<표 40> 중국의 포장도로에 의해 생성된 입자크기별 비산먼지 계수	65
<표 41> 중국의 포장도로에 의해 생성된 입자크기별 비산먼지 계수	65
<표 42> 중국의 농지 바람 침식에 대한 비산먼지 방지 대책별 효율	67
<표 43> 중국의 토양 풍식 지수 참고치	67
<표 44> 도로별 silt 부하량	68
<표 45> 차종별 평균 차중	69
<표 46> 수도권 0.254mm 이상 강우 일수 (예, 2010)	69
<표 47> 수도권지역 용도별 건축착공면적 (예,2010)	71
<표 48> 건설공사 부문 비산먼지 배출계수	72
<표 49> 건설 활동의 종류별 배출계수	73
<표 50> 나대지의 입자 크기에 따른 마찰속도 역치	76
<표 51> 일평균 주행거리 (2014)	77
<표 52> 미국 기관별 교통량에 따른 silt 부하량	79
<표 53> PM2.5/PM10 비산먼지 배출원별 분율 비교	80
<표 54> PM2.5/PM10 비산먼지 배출원별 분율 비교	80
<표 55> 도로별 보정계수(SF)	81
<표 56> 기존타이어와 저마모 타이어의 마모량 비교	82
<표 57> 차량속도에 따른 기존타이어 마모입자의 PM10 농도	83
<표 58> 차량속도에 따른 저마모 타이어 마모입자의 PM10, PM2.5 분율	83
<표 59> 비산먼지 발생원별 연구 자료 정리표	92
<표 60> 비산먼지 배출량/삭감식 산정식 비교	97
<표 61> 먼지흡입식제거장비에 의한 오염물질 삭감량 산정식	98

<표 62> 진공청소차 및 진공살수차 운행에 의한 오염물질 삭감량 산정식	98
<표 63> 저마모 타이어 보급 활성화에 의한 삭감식	99
<표 64> 비산먼지 발생사업장 관리강화에 의한 삭감식	100
<표 65> 나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량	101
<표 66> 서울시 비산먼지 배출량 (2013년)	122
<표 67> WRAP에서 제시한 포장도로에서의 제어방법과 제어효율	128
<표 68> 청소차량에 의한 도로먼지 입경 및 청소방법에 따른 저감효율[Amato et al. 2010]	129
<표 69> 국내·외 도로청소 미세먼지 저감효과	130
<표 70> 먼지청소차량 필터별 미세먼지 저감효율	130
<표 71> 주행거리당 청소차량 단위 삭감량	131
<표 72> 서울시 청소차량 보유 현황(2017)	131
<표 73> 도로별 평균 교통량	132
<표 74> 수도권 도로길이	133
<표 75> 도로별 보정계수 비교	133
<표 76> 도로별 평균 차속을 적용한 비산먼지 배출량 비교	133
<표 77> 교통량에 따른 겨울철 비산먼지 배출계수	134
<표 78> 2016 서울시 먼지 제거장비 보급확대로 인한 삭감량	136
<표 79> 분진흡입식 제거 청소차의 작업거리당 먼지수거량	138
<표 80> 서울시 비산먼지 배출량 및 삭감식에 의한 삭감량 비교 (2013년)	140
<표 81> 서울시 타이어 마모 PM10, PM2.5 배출량 (2013년)	141
<표 82> 차량속도에 따른 기준타이어 마모입자의 PM10 농도	144
<표 83> 차량속도에 따른 기준타이어 마모입자의 PM10 농도	144
<표 84> 차량속도에 따른 저마모 타이어 마모입자의 PM10, PM2.5 분율	144
<표 85> Version별 타이어 미세먼지 배출량	146
<표 86> 타이어 마모 전망 배출량 및 저마모 타이어 보급에 의한 삭감량 (기존 삭감식 적용)	147
<표 87> 타이어 마모 전망 배출량 및 저마모 타이어 보급에 의한 삭감량 (기존 삭감식 적용)	147
<표 88> 타이어 마모의 입경별 질량 분율	148
<표 89> 저마모 타이어 보급에 의한 삭감량 (금호타이어 2007년 연구 적용)	148
<표 90> 저마모 타이어 보급에 의한 삭감량 (금호타이어 2016년 연구 적용 - Energy saver)	149

<표 91> 저마모 타이어 보급에 의한 삭감량 (Ecowing)	149
<표 92> 저마모 타이어 보급에 의한 삭감량 비교	149
<표 93> 저마모 타이어 보급 활성화에 의한 배출 삭감량 삭감식 비교	150
<표 94> 저마모 타이어 보급 활성화에 의한 배출량 비교	150
<표 95> 서울시 비산먼지 배출량 (2013년)	152
<표 96> 각 분류에 해당하는 입자 크기의 범위	154
<표 97> 중국의 토양 바람 침식 지수 참고치	155
<표 98> 나대지 비산먼지 배출량 및 배출계수 산정식	155
<표 99> 서울시 나대지(운동장) 현황	156
<표 100> 나대지 배출계수에 따른 변화량	156
<표 101> 국가별 나대지 비산먼지 분율표	157
<표 102> 서울시 나대지(운동장) 현황	158
<표 103> 서울시 나대지 현황	165
<표 104> 나대지별 거칠기 높이	166
<표 105> 나대지별 거칠기 높이에 따른 배출계수 및 삭감량	166
<표 106> 먼지억제제 및 살수에 의한 먼지제거량	167
<표 107> 먼지억제제 및 살수 적용시 삭감량	168
<표 108> 먼지억제제 및 살수 적용시 배출량	168
<표 109> 건축물 축조공사 공정도	170
<표 110> 건축물 축조공사 비산먼지 발생요인	171
<표 111> 토목공사 공정도	171
<표 112> 토목공사 비산먼지 발생요인	171
<표 113> 조경공사 공정도	172
<표 114> 조경공사 비산먼지 발생요인	172
<표 115> 지반조성공사 공정도	172
<표 116> 지반조성공사 비산먼지 발생요인	173
<표 117> 인천시 비산먼지 발생사업장 지도점검 실적(2016)	174
<표 118> 2016 경기도 비산먼지 점검 결과	175
<표 119> 먼지억제제 및 살수에 의한 먼지제거량	176
<표 120> 주택분야 공사기간	177
<표 121> 건설형태별 토공기간	177
<표 122> 서울시 사업장 비산먼지 배출량	179
<표 123> 비산먼지 제거 방법에 따른 서울시 사업장 비산먼지 삭감량	180

<표 124> 비산먼지 삭감량 개선 전·후 비교	181
<표 125> 비산먼지 대책별 삭감식 및 개선식 비교	182
<표 126> 비산먼지 대책별 삭감식 요약정리	183
<표 127> 비산먼지 삭감식 개선에 필요한 기간별 대책	184
<표 128> 비산먼지 대책별 활용계획	185

그림 목 차

<그림 1> 먼지청소차 및 노면청소차(서울시)	5
<그림 2> 나대지 비산먼지 억제 사업(서울시)	8
<그림 3> 비산먼지 배출량/삭감식 개선을 위한 연구 절차	9
<그림 4> 연도별 수도권 지역 미세먼지 농도변화	13
<그림 5> 미국 섹터별 미세먼지 배출량	22
<그림 6> 연도별 EU 미세먼지 배출량 (단위 : 톤/년)	29
<그림 7> 나대지 풍식 비산먼지 관련한 입자크기 (Shao, 2008)	86
<그림 8> 북경식 비산먼지 측정장치	87
<그림 9> DRI의 PI-SWERL	88
<그림 10> 강동구 미세먼지 분포곡선(실측자료)	132
<그림 11> 미국 CARB의 2016년 Miscellaneous source 중 PM10 배출량	135
<그림 12> 미국 CARB의 2016년 Miscellaneous source 중 PM2.5 배출량	135
<그림 13> 토양 내 수분과 TFV의 관계	153
<그림 14> PI-SWRL 측정기	154
<그림 15> 서울시 바이오톱 토지이용현황도	162
<그림 16> a. 서울시 토지용도별 지도(예시) b. daum 면적 계산 방법(예>시) ·	162
<그림 17> a. 서울시 Daum 로드뷰(예시) b. 서울시 토지용도별 지도(예시) ····	163
<그림 18> a. 서울시 Daum 로드뷰(예시) b. 서울시 토지용도별 지도(예시) ····	163
<그림 19> 행정구역별 지목별, 국토이용현황(시군구)	164

제 1 장 서 론

1. 연구의 배경 및 필요성	3
2. 연구개발의 목적 및 주요내용	10

제 1 장 서 론

1. 연구의 배경 및 필요성

- 수도권 대기오염현상은 인구의 도시 집중으로 인해 악화되고 있으며, '13년 미세먼지(PM10) 및 초미세먼지(PM2.5) 배출량 중 비산먼지 기여율은 각각 70%, 30%로 가장 높음.
- 수도권지역에서는 미세먼지에 대한 포장도로 비산먼지 배출량의 비중이 가장 높은 것으로 추정되고, PM2.5/PM10 비로 어떤 값을 적용하느냐에 따라 비산먼지 배출계수가 크게 차이를 보일 수 있고, 비산먼지 배출량 자료의 불확도로 인해 공식 통계배출량에서 제외하고 있기 때문에 PM2.5/PM10 비에 대한 검토가 필요함.

<표 1> 미세먼지/초미세먼지 중 비산먼지 배출량 (2007년)

	PM10 배출량(톤/년)	PM2.5 배출량(톤/년)
도로재비산	35,314	8,075
건설공사	5,755	576
나대지	5,151	773
하역 및 야적	2	0.3
타이어 마모	1,399	979
브레이크 패드 마모	2,191	872
도로표면 마모	1,333	720

출처 : 국립환경과학원(2010), 도시지역 PM2.5 생성과정에 관한 연구

- 비산먼지 배출목록 및 배출계수는 미국을 중심으로 잘 구축되어 있으며, 유럽의 경우 도로교통과 관련한 마모 배출 등에 대한 비산먼지 배출계수가 제시되어 있으며, 중국의 경우에도 황사 등의 자연적 비산먼지 외에 도시지역에서 도로재비산먼지의 미세먼지에 대한 영향이 큰 것으로 파악.
- 비산먼지에 대한 배출계수는 주로 미국에서 개발되어 왔으며, 이러한 자료를 많은 나라에서 배출량 산정에 적용하고 있으며, 대표적인 미국의 배출계수 정

의서인 AP-42에서는 다음과 같은 배출원에 대한 배출계수를 제시하고 있음.

Paved Roads
Unpaved Roads
Heavy Construction Operations
Industrial Wind Erosion

- 2005년 미국 배출량 자료에 따르면 각 배출원에서 직접 배출되는 1차 PM10 배출량 중 주요 비산먼지 배출량은 76%를 차지하고 있고, 1차 PM2.5의 배출량의 경우 주요 비산먼지가 약 31% 비중을 차지하고 있음.
- 비산먼지 저감을 위해서 2012년부터 공사장 비산먼지 자발적 협약을 체결 운영하고 있으며, 비산먼지 발생사업장 중 주변이 주거지역이면서 지역실정에 맞는 사업장을 선정하여 사업자는 비산먼지 저감계획을 수립 이행하고 정부는 이를 기술적 행정적으로 지원하여 사업장 스스로 비산먼지 저감을 위해 자발적으로 노력할 수 있도록 행정적 지원을 강화함.
- 현재 비산먼지 배출량/삭감량 사용되는 배출계수는 해외사례를 통하여 산정하고 있고, 특히 CAPSS 배출계수 중 85%가 미국 등 해외 자료를 활용하고 있으며, 서울시의 경우 보정식을 이용하여 비산먼지 배출량을 산정하고 있음.
- 비산먼지 배출계수가 부정확한 부분에 근거에 대하여 분석하고, 배출계수 개선에 따른 개선수준의 정량화에 대한 국내 전문가들의 자문의견을 수렴한 평가가 필요함
- 비산먼지 저감을 위해서는 관련 기관들이 협력하여 비산먼지 발생원에 대한 근본적인 저감대책을 추진해야 하며, 비산먼지 관리의 첨단화와 선진화가 필요함.
- 현재 수도권 대기환경관리 기본계획 및 지자체 시행계획에 따라 비산먼지 관리대책을 추진하고 있으며, 그 중 비산먼지 제거효율이 높은 먼지 제거장비 보급확대, 비산먼지 발생사업장 관리강화, 나대지 녹색화 사업, 저마모 타이어 보급 등의 활성화가 필요함.
- 서울시의 경우 서울의 지역 맞춤형 대기환경 관리를 위해 생활오염원 관리 가운데 미세먼지 배출에서 가장 큰 배출 비중을 차지하고 있는 비산먼지의 특화관리를 별도로 구분하여 관리하고 있으나 이에 대한 평가가 필요함.

<표 2> 서울시 비산먼지 관리대책

구분		배출량 삭감식 여부
도로먼지 제거 장비 확대	먼지흡입차 보급확대	○
	이동측정시스템 구축	X
	저마모 타이어 보급	○
비산먼지 발생사업장 관리 강화	사업장 업종 추가 및 관리기준 강화	○
	발생예방 및 관리 강화	○
나대지 관리	나대지 녹색화	○
	주차장 바닥 친환경 포장	X

○ 먼지흡입식 제거장비 보급에 의한 오염물질 삭감량식은

$$\text{삭감량} : \text{보급대수(대)} \times \text{단위삭감량(톤/년·대)}$$

으로 계산하고 있고, 토사 및 먼지 중 10 μm 이하의 PM10 분율을 약 15%라고 가정하였으며, 도로재비산먼지의 PM2.5/PM10 분율은 0.14로 적용하여 계산하고 있음.



<그림 1> 먼지청소차 및 노면청소차(서울시)

<표 3> 먼지흡입 청소차량 보급 계획 및 삭감량(서울시)

(단위:톤)

구분		2015	2016	2017	2018	2019
보급계획		10대	10대	10대	10대	10대
당해연도 삭감량	PM10	8	8	8	8	8
	PM2.5	1	1	1	1	1
누적삭감량	PM10	33	41	50	58	66
	PM2.5	5	6	7	8	9

○ 저마모 타이어 보급 활성화에 의한 오염물질 삭감량식은

삭감량 : 해당연도 전망배출량(BAU(톤/년)) X 저마모 타이어 보급률 X 삭감률(%)

으로 계산하고 있으며, 아래 표에 마모타이어 전망 배출량 및 저마모 타이어 보급에 대한 삭감량을 나타내었음.

<표 4> 타이어마모 전망배출량 및 삭감량(서울시)

(단위:톤)

구분		2015	2016	2017	2018	2019
타이어 마모 전망배출량 (BAU)	PM10	530	539	547	556	565
	PM2.5	371	377	383	389	395
삭감량	PM10	32	49	66	83	102
	PM2.5	22	34	46	58	71

○ 비산먼지 발생사업장 관리 강화에 의한 오염물질 발생량은

삭감량 : 해당연도 전망배출량(BAU)(톤/년) X PM10 저감효율(10%) X
이행률(20%)

으로 계산하고 있으며, 아래 표에 비산먼지 발생 전망 및 배출량 및 관리강화에 의한 보급에 의한 삭감량을 나타내었음.

<표 5> 비산먼지 발생 전망 및 배출량 및 관리강화에 의한 보급에 의한 삭감량
(서울시) (단위:톤)

구분		2015	2016	2017	2018	2019
비산먼지 발생사업 장 전망 배출량 (BAU)	PM10	2,408	2,443	2,478	2,516	2,551
	PM2.5	241	244	248	252	255
삭감량	PM10	48	49	50	50	51
	PM2.5	5	5	5	5	5

○ 나대지 관리에 의한 오염물질 발생량은

$$\text{해당연도 전망배출량(BAU)(톤/년)} \times \text{인조/천연 잔디 운동장 설치율(\%)} \times \text{삭감률(80\%)}$$

으로 계산하고 있으며 아래표에 나대지 전망 배출량 및 잔디 설치에 의한 삭감량을 나타내었음.

<표 6> 나대지 전망 배출량 및 잔디 설치에 의한 삭감량(서울시) (단위:톤)

구분		2015	2016	2017	2018	2019
비산먼지 발생사업장 전망 배출량 (BAU)	PM10	2,408	2,443	2,478	2,516	2,551
	PM2.5	241	244	248	252	255
삭감량	PM10	48	49	50	50	51
	PM2.5	5	5	5	5	5



<그림 2> 나대지 비산먼지 억제 사업(서울시)



<그림 3> 비산먼지 배출량/삭감량 개선을 위한 연구 절차

- 따라서 본 연구에서는 수도권 및 국외 비산먼지 배출현황 조사 및 분석을 통하여 기초자료를 확보하고, 비산먼지 배출량·삭감량 산정방법 조사 및 삭감량 산정 개선 방안을 도출하고, 수도권 비산먼지 관리대책 효과분석 및 개선방안을 마련하고자함.

2. 연구개발 목표 및 주요내용

2.1 연구개발의 최종 목표

- 국내외 비산먼지 배출량 및 삭감식 산정방법 조사를 통한 제2차 수도권 기본 계획에 반영된 1) 먼지 제거장비 보급확대 2) 저마모 타이어 보급 활성화 3) 비산먼지 발생사업장 관리강화 4) 나대지 녹색화 사업 등을 중심으로 비산먼지 배출량 및 삭감량 산정방법 개선방안 제시
- 수도권지역 미세먼지, 초미세먼지, 비산먼지의 합리적인 발생량 조사를 위한 개선된 산정방법 확립
- 지자체(광역, 기초)별 비산먼지 관리대책 현황조사를 통하여 수도권 비산먼지 저감 대책 효과분석 및 개선방안 분석에 있어서 합리적인 대안을 제시함

2.2 연구개발의 주요내용

- 미세먼지, 초미세먼지, 비산먼지 발생량 조사
- 비산먼지 산정방법별 한계점 및 개선방안 검토
- 국외 비산먼지 배출현황 및 인벤토리 분석
- 국내·외 비산먼지 배출량 산정방법 조사
- 관련 연구기관 전문가, 지자체 담당자들과 정보 교류/자문
- 국내 비산먼지 배출계수/삭감률 근거, 타당성 분석

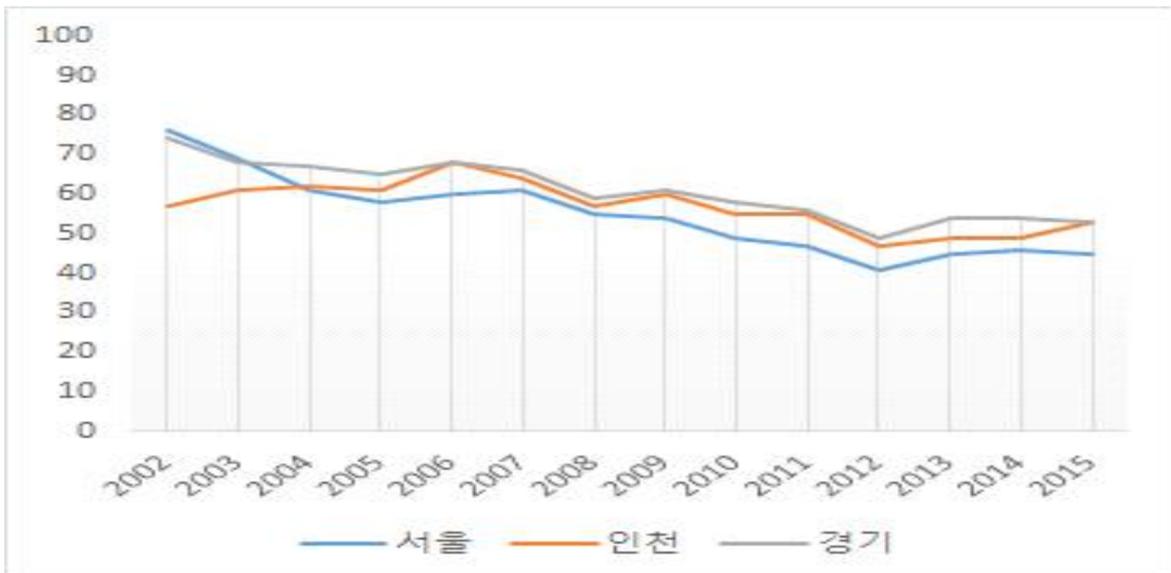
제 2 장 수도권 미세먼지 및 비산먼지 발생현황 조사

1. 수도권 미세먼지 오염도 현황 13
 2. 수도권 비산먼지 배출량 조사 14
-

제 2 장 수도권 미세먼지 및 비산먼지 발생현황 조사

1. 수도권 미세먼지 오염도 현황

- <표 7>의 연도별 수도권 PM10 평균 농도변화 살펴보면, 서울은 2002년 당시 연평균 환경기준치 70을 초과하였으나, 이후 감소추세를 보이고 있으며, 2007년부터 강화된 연평균 환경기준치 50을 초과함.
- PM10의 253개 유효측정소 중 연평균기준을 초과한 측정소는 87개소(미달성률 34.4%), 24시간 기준을 초과한 측정소는 226개소(미달성률 89.3%)로 나타남.
- PM2.5의 100개 유효측정소 중 연평균기준을 초과한 측정소는 35개소(미달성률 35.0%), 24시간 기준을 초과한 측정소는 96개소(미달성률 96.0%)로, 연평균기준 미달성률은 PM10과 유사하였으나 24시간 기준은 6.7% 높게 나타남.
- 농도 기여도는 추정기법과 어느 지점을 기준으로 하였는지에 따라 달라지기 때문에 특성을 파악하기에 어려움이 있음.



<그림 4> 연도별 수도권 지역 미세먼지 농도변화
(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

출처 : 대기환경연보(2016년)

2. 수도권 비산먼지 배출현황 조사

- 현재 국내 대기오염물질 통계자료에는 비산먼지의 높은 불확도로 인해 공식자료에서는 제외되어 연구자료인 서울시의 미세먼지 관련 보고서를 참고하여 작성하였음.
- <표 7>의 수도권 미세먼지 배출량을 살펴보면 미세먼지 중 비산먼지는 PM10은 29,282 톤/년(69.7%), PM2.5는 4,775 톤/년(30.4%)으로 가장 높은 배출비중을 나타냄.

<표 7> 수도권 미세먼지 배출량 (2013년)

(단위 : 톤/년)

구 분		CAPSS	
		PM10	PM2.5
에너지산업 연소		749	697
비산업 연소		546	383
제조업 연소		740	300
생산공정		281	206
에너지수송 및 저장		0	0
유기용제 사용		0	0
도로이동오염원	경유	4,096	3,769
	경유 외	-	-
	계	4,096	3,769
비도로이동오염원		3,618	3,328
폐기물 처리		75	63
농업		0	0
기타 먼 오염원		100	90
비산먼지		29,282(69.7%)	4,775(30.4%)
생물성 연소		2,551	2,122
합계		42,039	15,732

출처 : 서울시(2016), 초미세먼지(PM2.5)배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구

- 서울시 비산먼지 배출량의 대부분은 포장도로에서 자동차가 주행하면서 발생하는 재비산먼지로 추정되며, 포장도로 비산먼지는 주로 타이어마모, 브레이크마모, 도로표면 마모에 의하여 생성되는 미세먼지들이 주행에 따라 재비산되어 발생하는 것으로 알려져 있으나 현재 국내에서는 타이어마모 및 브레이크 마모에 대한 산정을 하지 않음.
- 포장도로를 제외한 건설공사, 나대지, 농축산활동에서도 비산먼지가 발생되며, 건설공사는 주로 토목공사 과정에서, 나대지에서는 강한바람이 불어 나대지 표면의 흙먼지를 날릴 때, 비산먼지를 추정함.
- <표 8>을 살펴보면 서울시 비산먼지 발생량 대부분 도로 재비산먼지, 건설공사, 나대지에서 발생하는 것으로 나타남.

<표 8> 서울시 비산먼지 배출량 (2013년)

(단위 : kg/년)

구 분	CAPSS	
	PM10	PM2.5
도로재비산먼지	2,403,949	581,601
타이어마모	-	-
브레이크마모	-	-
건설공사	2,160,917	216,092
나대지	1,486,846	223,027
하역 및 야적	0.21	0.02
농업활동	3,951	790
축산활동	136	82
폐기물처리	37,508	3,751
비포장 도로 비산먼지	-	-
합 계	6,093,307	1,025,342

출처 : 서울시(2016), 초미세먼지(PM2.5)배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구

- 제철 및 제강산업에서 폐기물로서 배출되는 제철 및 제강분진을 아스팔트의 배합원료로 재활용되고 있음.

- 제강분진이 사용된 아스팔트 콘크리트에 대한 유해성분의 용출시험은 국내에서도 수차례 검토되어 왔는데 일반 석회성분과 별 차이가 없는 것으로 보고되고 있음.

- 그러나 제강분진속에 포함된 유해중금속이 자동차 통행에 의해 포장된 도로에서 비산분진으로 발생이 우려되며, 아스팔트 포장재가 기이용된 도로를 대상으로 환경영향 관리가 필요함.

제 3 장 국내·외 미세먼지 배출자료 조사

1. 미국	19
2. 유럽	29
3. 중국	33
4. 한국	35

제 3 장 국내·외 미세먼지 배출자료 조사

1. 미국

- 미국은 비산먼지에 대한 배출자료는 비산먼지 중요도가 높은 서부지역에서 주로 구축해놓은 실정이며, 비산먼지 배출원을 인위적 배출원과 자연적 배출원으로 분류하고 있음.
- 미국의 서부지역은 건조한 기후조건으로 인한 비산먼지 기여도가 높기 때문에, 서부지역 중심으로 비산먼지 배출계수 및 배출량 등의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 서부지역대기협의회(Western Regional Air Partnership)에서 비산먼지 배출원에 대한 배출계수 및 배출량 산정방법을 기술한 “WRAP Fugitive Dust Handbook”을 발간함.
- 미국의 EPA에서는 배출계수와 배출량 산출 모델에 의하여 고정 및 이동오염원에서 배출되는 대기오염물질 배출자료체계를 구축하고 있으며, 이러한 자료는 3년마다 50개 주에서 작성되고, county별 연간 배출자료는 경제활동자료에 의해서 산출되고 있음.

1.1 EPA 미세먼지 배출자료 현황

- 미국 EPA의 대기오염물질 중 미세먼지 배출량을 살펴보면 PM10의 경우 2000년부터 2012년까지 감소하는 추세를 보이다가 2013년부터 증가하는 추세를 보이며, PM2.5의 경우 2000년 7,288,000톤/년으로 가장 많이 배출되었으며, 이후 낮아지는 추세를 보이다가 2011년부터 소폭 변동하는 추세를 보임.

<표 9> 연도별 미국지역(US EPA) 미세먼지 배출량

(단위 : Gg/yr)

Year	PM10	PM2.5
2000	23,747	7,288
2001	23,708	6,996
2002	21,576	5,806
2003	21,664	5,888
2004	21,749	5,970
2005	21,302	5,592
2006	21,401	5,736
2007	21,501	5,881
2008	21,580	6,014
2009	21,199	5,988
2010	20,823	5,988
2011	20,723	6,100
2012	22,074	6,222
2013	23,425	6,345
2014	24,502	6,220
2015	24,472	6,191
2016	24,442	6,163

출처 : National Emission Inventory(2014)

- 미세먼지 배출원 중 MISCELLANEOUS Source 에서 PM10 21,803,000 톤/년 (88.98%), PM2.5 4,425,000톤/년(71.14%) 으로 가장 많은 미세먼지가 배출되는 것으로 나타남.

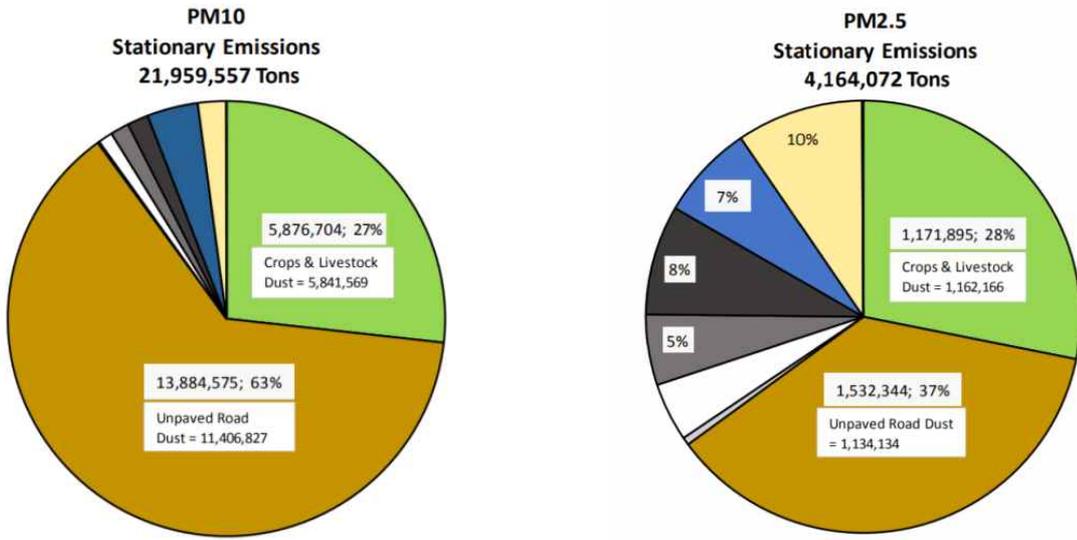
<표 10> 배출원별 미국지역 (US EPA) 미세먼지 배출량

(단위 : Gg/yr)

Source Category	2016	
	PM10	PM2.5
FUEL COMB. ELEC. UTIL.	229	177
FUEL COMB. INDUSTRIAL	325	240
FUEL COMB. OTHER	368	363
CHEMICAL & ALLIED PRODUCT MFG	20	14
METALS PROCESSING	58	45
PETROLEUM & RELATED INDUSTRIES	36	32
OTHER INDUSTRIAL PROCESSES	777	307
SOLVENT UTILIZATION	4	4
STORAGE & TRANSPORT	67	18
WASTE DISPOSAL & RECYCLING	305	253
HIGHWAY VEHICLES	287	133
OFF-HIGHWAY	163	151
MISCELLANEOUS	21,803	4,425
Total	24,472	6,163

출처 : National Emission Inventory(2014)

- 미세먼지 SECTOR 중에서 Unpaved Road Dust에서 PM10은 13,884,575 톤/년(63%), PM2.5는 1,532,344톤/년(37%)으로 가장 많은 미세먼지가 배출되는 것으로 나타났으며, 그 다음으로 Agriculture - Crops & Livestock Dust에서 PM10은 5,876,704톤/년(27%), PM2.5 1,171,895톤/년(28%)으로 나타났음.



<그림 5> 미국 섹터별 미세먼지 배출량

출처 : National Emission Inventory(2014)

1.2 미국 캘리포니아주(CARB) 미세먼지 배출자료 현황

- 미국 CARB의 대기오염물질 중 미세먼지 배출량을 살펴보면 PM10의 경우 2000년부터 2015년까지 감소하는 추세를 보이다가 2015년부터 소폭 증가하는 추세를 보이며, PM2.5의 경우 2004년 497.519톤/일로 가장 많이 배출되었으며, 이후 낮아지는 추세를 보임.

<표 11> 미국 캘리포니아주(CARB) 미세먼지 연도별 배출현황

(단위 : ton/day)

Year	PM10	PM2.5
2000	1,597.458	486.736
2001	1,604.479	486.464
2002	1,582.513	466.94
2003	1,636.174	497.519
2004	1,653.095	492.635
2005	1,571.383	459.396
2006	1,549.532	459.178
2007	1,521.157	444.068
2008	1,460.784	415.043
2009	1,435.860	404.179
2010	1,429.825	401.066
2011	1,393.132	387.004
2012	1,394.299	381.274
2013	1,396.232	377.552
2014	1,395.666	371.006
2015	1,402.742	369.616
2016	1,413.501	371.211

출처 : CARB (2016), <http://www.arb.ca.gov>

○ 미세먼지 배출원 중 MISCELLANEOUS PROCESSES에서 PM10 1159.359, 톤/일(82.02%), PM2.5 238.859톤/일(64.34%)로 가장 많은 미세먼지가 배출되는 것으로 나타남.

<표 12 > 배출원별 미세먼지 배출량 현황(2016)

(단위 : ton/day)

Source Category		2016	
		PM10	PM2.5
STATIONARY SOURCES	FUEL COMBUSTION	28.702	25.282
	WASTE DISPOSAL	22.361	3.072
	CLEANING AND SURFACE COATINGS	2.703	2.604
	PETROLEUM PRODUCTION AND MARKETING	2.303	2.050
	INDUSTRIAL PROCESSES	102.529	40.858
	TOTAL STATIONARY SOURCES	158.597	73.866
AREAWIDE SOURCES	SOLVENT EVAPORATION	0.040	0.039
	MISCELLANEOUS PROCESSES	1159.359	238.859
	TOTAL AREAWIDE SOURCES	1159.399	238.898
MOBILE SOURCES	ON-ROAD MOTOR VEHICLES	63.684	30.176
	OTHER MOBILE SOURCES	31.821	28.270
	TOTAL MOBILE SOURCES	95.504	58.446
GRAND TOTAL		1413.501	371.211

출처 : CARB (2016)

1.3 미국의 미세먼지 인벤토리 현황

- 미국의 대기오염물질 인벤토리 분류는 크게 Tier1 기준과 Sector별 기준으로 분류하고 있으며, Tier1 분류에서 국내 비산먼지 분야에 해당하는 부문은 MISCELLANEOUS 이며, Sector별 분류기준에서 Dust - Construction Dust, Dust - Paved Road Dust, Dust - Unpaved Road Dust 등의 부문에 해당하는 것으로 나타남.

<표 13> 미국 NEI 대기오염물질 인벤토리 (Tier 1) 분류 (2014)

Source Category
FUEL COMB. ELEC. UTIL.
FUEL COMB. INDUSTRIAL
FUEL COMB. OTHER
CHEMICAL & ALLIED PRODUCT MFG
METALS PROCESSING
PETROLEUM & RELATED INDUSTRIES
OTHER INDUSTRIAL PROCESSES
SOLVENT UTILIZATION
STORAGE & TRANSPORT
WASTE DISPOSAL & RECYCLING
HIGHWAY VEHICLES
OFF-HIGHWAY
MISCELLANEOUS

출처 : National Emission Inventory(2014)

<표 14> 미국 NEI 대기오염물질 인벤토리 Sector 분류 (2014)

Sector	PM 산정
Agriculture - Crops & Livestock Dust	0
Agriculture - Fertilizer Application	-
Agriculture - Livestock Waste	0
Bulk Gasoline Terminals	-
Commercial Cooking	0
Dust - Construction Dust	0
Dust - Paved Road Dust	0
Dust - Unpaved Road Dust	0
Fires - Agricultural Field Burning	0
Fuel Comb - Comm/Institutional - Biomass	0
Fuel Comb - Comm/Institutional - Coal	0
Fuel Comb - Comm/Institutional - Natural Gas	0
Fuel Comb - Comm/Institutional - Oil	0
Fuel Comb - Comm/Institutional - Other	0
Fuel Comb - Electric Generation - Coal	-
Fuel Comb - Electric Generation - Natural Gas	-
Fuel Comb - Electric Generation - Oil	-
Fuel Comb - Electric Generation - Other	-
Fuel Comb - Industrial Boilers, ICEs - Biomass	0
Fuel Comb - Industrial Boilers, ICEs - Coal	0
Fuel Comb - Industrial Boilers, ICEs - Natural Gas	0
Fuel Comb - Industrial Boilers, ICEs - Oil	0
Fuel Comb - Industrial Boilers, ICEs - Other	0
Fuel Comb - Residential - Natural Gas	0
Fuel Comb - Residential - Oil	0
Fuel Comb - Residential - Other	0
Fuel Comb - Residential - Wood	0
Gas Stations	-
Industrial Processes - Chemical Manuf	0
Industrial Processes - Mining	0
Industrial Processes - NEC	0
Industrial Processes - Non-ferrous Metals	0
Industrial Processes - Oil & Gas Production	0
Industrial Processes - Petroleum Refineries	0
Industrial Processes - Pulp & Paper	-
Industrial Processes - Storage and Transfer	-
Miscellaneous Non-Industrial NEC	0
Mobile - Aircraft	-
Mobile - Locomotives	0
Mobile - Non-Road EquipMent - Diesel	-
Mobile - Non-Road EquipMent - Gasoline	-
Mobile - Non-Road EquipMent - Other	-

출처 : National Emission Inventory(2014)

1.4 미국 캘리포니아주 미세먼지 인벤토리 현황

- CARB에서의 대기오염물질 인벤토리 분류는 크게 STATIONARY SOURCES, AREA WIDE SOURCES, MOBILE SOURCES 등으로 분류하고 있으며, 국내 비산먼지 분야에 해당하는 부문은 MISCELLANEOUS PROCESSES 중 Paved road dust, Fugitive windblown dust, Construction and demolition 등이 해당하는 것으로 나타남.

<표 15> 미국 캘리포니아주 대기오염물질 인벤토리 Sector 분류 (2016)

STATIONARY SOURCES	
Fuel Combustion	ELECTRIC UTILITIES
	COGENERATION
	OIL AND GAS PRODUCTION (COMBUSTION)
	PETROLEUM REFINING (COMBUSTION)
	MANUFACTURING AND INDUSTRIAL
	FOOD AND AGRICULTURAL PROCESSING
	SERVICE AND COMMERCIAL
	OTHER (FUEL COMBUSTION)
WASTE DISPOSAL	SEWAGE TREATMENT
	LANDFILLS
	INCINERATORS
	SOIL REMEDIATION
	OTHER (WASTE DISPOSAL)
CLEANING AND SURFACE COATINGS	LAUNDERING
	DEGREASING
	COATINGS AND RELATED PROCESS SOLVENTS
	PRINTING
	ADHESIVES AND SEALANTS
	OTHER (CLEANING AND SURFACE COATINGS)
PETROLEUM PRODUCTION AND MARKETING	OIL AND GAS PRODUCTION
	PETROLEUM REFINING
	PETROLEUM MARKETING
	OTHER (PETROLEUM PRODUCTION AND MARKETIN
AREAWIDE SOURCES	
SOLVENT EVAPORATION	CONSUMER PRODUCTS
	ARCHITECTURAL COATINGS AND RELATED PROCESS SOLVENTS
	PESTICIDES/FERTILIZERS
	ASPHALT PAVING / ROOFING

(계속)

MISCELLANEOUS PROCESSES	RESIDENTIAL FUEL COMBUSTION
	FARMING OPERATIONS
	CONSTRUCTION AND DEMOLITION
	PAVED ROAD DUST
	UNPAVED ROAD DUST
	FUGITIVE WINDBLOWN DUST
	FIRES
	MANAGED BURNING AND DISPOSAL
	COOKING
	OTHER (MISCELLANEOUS PROCESSES)
MOBILE SOURCES	
ON-ROAD MOTOR VEHICLES	LIGHT DUTY PASSENGER (LDA)
	LIGHT DUTY TRUCKS - 1 (LDT1)
	LIGHTDUTYTRUCKS-2(LDT2)
	MEDIUMDUTYTRUCKS(MDV)
	LIGHTHEAVYDUTYGASTRUCKS-1(LHDV1)
	LIGHTHEAVYDUTYGASTRUCKS-2(LHDV2)
	MEDIUMHEAVYDUTYGASTRUCKS(MHDV)
	HEAVYHEAVYDUTYGASTRUCKS(HHDV)
	LIGHTHEAVYDUTYDIESELTRUCKS-1(LHDV1)
	LIGHTHEAVYDUTYDIESELTRUCKS-2(LHDV2)
	MEDIUMHEAVYDUTYDIESELTRUCKS(MHDV)
	HEAVYHEAVYDUTYDIESELTRUCKS(HHDV)
	MOTORCYCLES(MCY)
	HEAVYDUTYDIESELURBANBUSES(UB)
	HEAVYDUTYGASURBANBUSES(UB)
	SCHOOLBUSES-GAS(SBG)
	SCHOOLBUSES-DIESEL(SBD)
	OTHERBUSES-GAS(OBG)
	OTHERBUSES-MOTORCOACH-DIESEL(OBC)
ALLOTHERBUSES-DIESEL(OBD)	
MOTORHOMES(MH)	
OTHER MOBILE SOURCES	AIRCRAFT
	TRAINS
	SHIPSANDCOMMERCIALBOATS
	OCEANGOINGVESSELS
	COMMERCIALHARBORCRAFT
	RECREATIONALBOATS
	OFF-ROADRECREATIONALVEHICLES
	OFF-ROADEQUIPMENT
	FARMEQUIPMENT
FUELSTORAGEANDHANDLING	

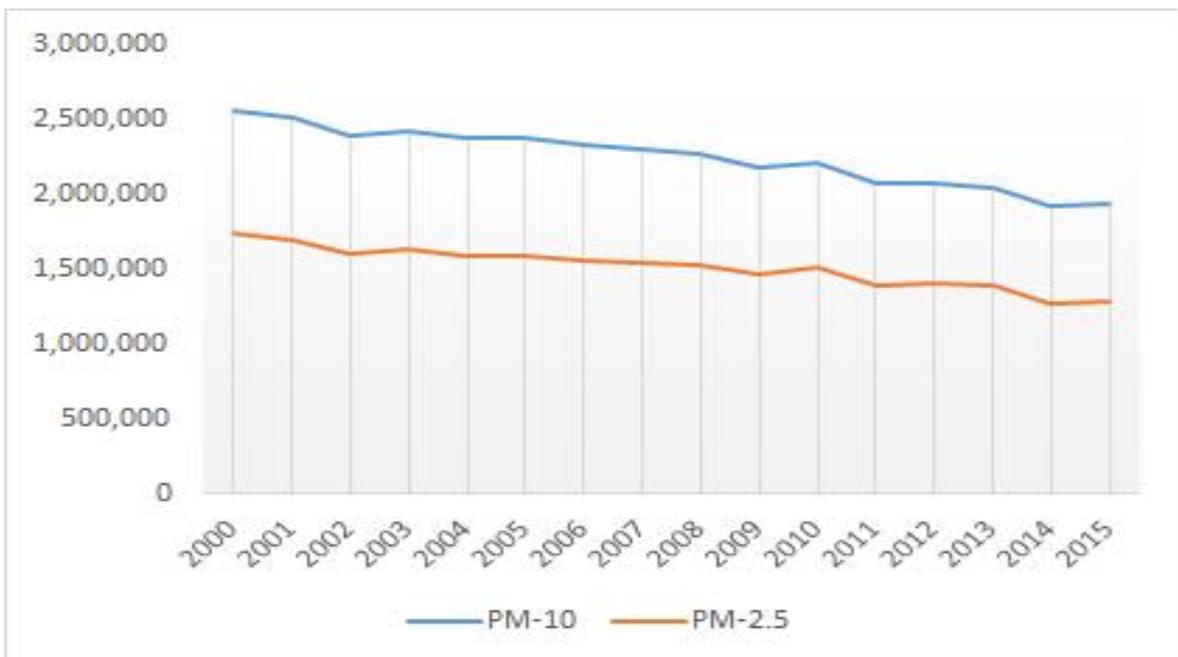
출처 : CARB (2016)

2. 유럽

- EU에서는 대기오염물질 배출량을 수록한 Air Pollutant emission inventory guidebook을 연간 발간하고 있으며, 미국과 달리 일부 비산먼지 배출원만 다루고 있으며, 타이어/브레이크 마모 등에 의해 발생하는 비산먼지를 배출자료를 제시하고 있음,
- EU에서는 도로재비산먼지에 대한 부문은 불확도, 다른 도로배출원과의 중복산정 가능성으로 인해 배출원에서 배제하고 있음.

2.1 유럽 미세먼지 배출자료 현황

- EU의 대기오염물질 중 미세먼지 배출량을 살펴보면 PM10, PM2.5의 경우 2000년부터 2014년까지 감소하는 추세를 보이다가 2015년에 소폭 증가하는 추세를 보임.



<그림 6> 연도별 EU 미세먼지 배출량 (단위 : 톤/년)

출처 : Air pollutant emission inventory guidebook (2016)

- 미세먼지 배출원 중 Commercial, institutional and households에서 PM10 799,584 톤/년(38.04%), PM2.5 736,530톤/년(57.45%)으로 가장 많은 미세먼지가 배출되는 것으로 나타남.

<표 16> 배출원별 EU 미세먼지 배출량

(단위 : 톤/년)

Source Category	2015	
	PM10	PM2.5
Agriculture	289,206	51,920
Commercial, institutional and households	799,584	736,530
Energy production and distribution	101,877	57,478
Energy use in industry	102,974	83,603
Industrial processes	332,576	125,888
Non-road transport	30,796	25,220
Other	4,361	3,722
Road transport	208,545	146,623
Waste	58,161	50,978
Total	1,928,080	1,281,962

출처 : Air pollutant emission inventory guidebook (2016)

2.2 유럽 미세먼지 인벤토리 현황

- EU 대기오염물질 인벤토리 분류는 크게 1) Energy, 2) Industrial processes and product use, 3) Agriculture, 5) Waste, 6) Other sources 11) Natural Sources 로 구분되며, 국내 비산먼지 부문에 해당되는 부문은 1.A.3.b vi Road transport : automobile tyre and brake wear, 2.A.5.b Construction and demolition 등으로 나타남.

<표 17> 유럽 대기오염물질 인벤토리 Sector 분류 (2016)

NFR	Sector
1. Energy	A.Combustion
	B.Fugitive emissions from fuels
2. Industrial processes and product use	A.Mineral products
	B.Chemical industry
	C.Metal production
	D.Other solvent and product use
	H.Other industry production
	I.Wood processing
	J.Production of POPs
	K.Consumption of POPs and heavy metals 2016
	L.Other production, consumption, storage, transportation or handling of bulk products
3. Agriculture	B.Manure management 2016
	D.Crop production and agricultural soils
	D.f,3.I Agriculture other including use of pesticides
	F.Field burning of agricultural residues 2016
5. Waste	A.Biological treatment of waste – Solid waste disposal on land 2016
	B.1 Biological treatment of waste – Composting 2016
	B.2 Biological treatment of waste – anaerobic digestion at biogas facilities
	C.1.a Municipal waste incineration 2016
	C.1.b Industrial waste incineration incl haz waste&sewage sluge 2016
	C.1.b.iii Clinical waste incineration 2016
	C.2.b.v Cremation 2016
	C.2 Open burning of waste 2016
	D. Wastewater handling 2016
	E. Other waste 2016

NFR	Sector
6. Other source	A. Other sources 2016
11. Natural sources	A.Volcanoes 2016
	B.Forest fires 2016
	C.Other natural sources

출처 : Air pollutant emission inventory guidebook (2016)

3. 중국

3.1 중국 미세먼지 배출자료 현황

- 미세먼지 배출원 중 Industry에서 PM10 9451 Gg/년(56.88%), 가장 많은 미세먼지가 배출되는 것으로 나타남.

<표 18> 중국 배출원별 PM10 배출량

Unit: Gg of PM10 Year:2010	Power	Industry	Residential	Transportation	Total
Anhui	46.6	340.5	313.7	23.0	723.7
Beijing	3.7	74.4	45.3	6.5	130.0
Chongqing	15.8	180.4	134.6	8.4	339.2
Fujian	25.1	183.0	61.3	10.2	279.6
Gansu	24.5	133.1	121.1	8.5	287.2
Guangdong	73.8	381.3	154.0	25.4	634.5
Guangxi	15.0	321.9	287.0	11.7	635.7
Guizhou	30.7	194.9	289.4	5.9	520.8
Hainan	2.5	21.3	16.2	2.3	42.3
Hebei	69.0	796.5	316.1	39.5	1221.1
Heilongjiang	68.4	177.1	216.6	14.1	476.3
Henan	90.5	799.7	289.4	41.1	1220.7
Hong Kong	0.0	0.1	0.9	2.0	2.9
Hubei	26.9	436.4	301.2	19.8	784.3
Hunan	21.9	414.3	209.2	15.3	660.7
Inner Mongolia	110.8	263.8	262.2	20.3	657.1
Jiangsu	108.4	526.1	178.9	36.3	849.7
Jiangxi	22.2	270.0	88.2	12.8	393.2
Jilin	44.8	198.2	156.0	11.4	410.4
Liaoning	72.8	417.4	185.6	22.8	698.6
Macao	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3
Ningxia	20.9	69.9	21.4	2.7	114.9
Qinghai	4.8	50.5	25.5	2.1	82.9
Shaanxi	39.1	230.9	183.9	15.8	469.7
Shandong	139.0	982.1	361.3	65.9	1548.3
Shanghai	23.6	113.7	12.3	6.6	156.2
Shanxi	90.6	550.9	216.5	17.1	875.1
Sichuan	29.7	467.2	435.6	15.3	947.8
Taiwan	2.0	48.2	7.7	20.8	78.8
Tianjin	20.9	100.8	45.3	5.1	172.1
Tibet	0.0	2.6	2.9	1.2	6.7
Xinjiang	43.4	160.8	96.0	9.4	309.5
Yunnan	23.7	254.0	162.0	11.5	451.1
Zhejiang	78.0	289.3	48.8	17.4	433.5
China Total	1389.1	9451.0	5246.3	528.6	16615.1

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

3.2 중국 미세먼지 인벤토리 현황

- 중국에서는 대기오염물질 인벤토리 분류는 크게 1) Power 2) Industry 3) Transportation 구분하여 추정하고 있으며, 섹터별 구분은 아래 표에 나타내었음.

<표 19> 중국 대기오염물질 인벤토리 분류

Sector	Subsector
	Power
	Industry
Residential	Urban
	Rural
Transportaion	On-road
	Non-road : agriculture
	Non-road : construction
	Non-road : other source
Agriculture	Fertilizer livestock

1 Agriculture
2 Coal mining and processing
3 Crude petroleum and natural gas products
4 Metal ore mining
5 Non-ferrous mineral mining
6 Manufacture of food products and tobacco processing
7 Textile goods
8 Wearing apparel, leather, furs, down and related products
9 Sawmills and furniture
10 Paper and products, printing and record medium reproduction
11 Petroleum processing and coking
12 Chemicals
13 Nonmetal mineral products
14 Metals smelting and pressing
15 Metal products
16 Machinery and equiPMent
17 Transport equiPMent
18 Electric equiPMent and machinery
19 Electronic and telecommunication equiPMent

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

4. 한국

4.1 비산먼지 인벤토리 현황

- 비산먼지는 도로운행으로 인한 자동차 재 비산먼지와 사업장 또는 공정사에서 일정한 배출구 없이 대기로 배출되는 먼지를 말하며, CAPSS 비산먼지 배출원 분류체계는 다음<표 20>과 같이 구분하며, 타이어마모를 중분류로 정의하고 있으나 도로 재비산먼지 배출량 산정 시 포함하여 산정하고 있음.
- 비산먼지는 하역 및 야적, 농업활동, 축산활동, 폐기물처리, 비포장도로 비산먼지 분야는 산정하고 있으나 본 과업에는 미포함.

<표 20> 비산먼지 발생원 분류체계

대분류	중분류	소분류	세분류
비산먼지	포장도로 재비산먼지	승용차	경형
			소형
			중형
			대형
		택시	소형
			중형
			대형
		승합차	경형
			소형
			중형
			대형
			특수
		버스	시내버스
			시외버스
			전세버스
			고속버스
			기타
		화물차	경형
			소형
			중형
			대형
특수			
덤프트럭			
콘크리트믹서트럭			

대분류	중분류	소분류	세분류	
비산먼지	포장도로 재비산먼지	RV	소형	
			중형	
	타이어마모	승용차	경형	
			소형	
			중형	
			대형	
			택시	소형
				중형
		대형		
		승합차	경형	
			소형	
			중형	
			대형	
		버스	특수	
			시내버스	
			시외버스	
			전세버스	
			고속버스	
		화물차	기타	
			경형	
	소형			
	중형			
	대형			
	특수차	특수		
		구난차		
		견인차		
	RV	기타		
		소형		
건설공사	주거시설	소형		
		중형		
	단독주택			
공동주택				
나대지	비주거시설			
	도로건설			
	학교운동장			

출처 : 국립환경과학원(2013), 국가 대기오염 배출량 산정방법 편람(III)재구성

○ 비산먼지 부문 유관기관 자료를 <표 21>에 나타내었음.

<표 21> 비산먼지 부문 유관기관 입수자료

입수자료		기관
기상자료	지상기상관측소 일반현황 및 지점별 관측자료	기상청
자동차관련	차종별 일일평균 주행거리	교통안전공단
	제작사별 차량별 등록대수	
	행정구역별 차량 등록대수	
	택시 및 CNG 자동차 등록대수	
	도로망도 GIS 자료	
면적관련	용도별 건축착공면적(시군구)	각 지자체 건축 관련과
	주택유형별 건축착공면적	국토교통부
	시군구별 유치원 초·중·고등·대학교 운동장 면적	교육통계센터, 한국교육개발원
도로보급률 현황	시도별 도로유형별 도로 현황	국토교통 통계연보, 국토교통부

출처 : 국립환경과학원(2013), 국가 대기오염 배출량 산정방법 편람(III)재구성

○ 국가별 비산먼지 배출 목록을 <표 22>에 나타내었으며, 이를 기준으로 비산먼지 산정방법을 조사함.

<표 22> 국가별 비산먼지 배출목록 비교

한국	미국 연방정부	CARB	WRAP	유럽	중국
포장도로 재비산먼지	Paved road EF equation	Paved road dust	-	-	도로비산먼지
타이어 마모	-	-	-	auto mobile tyre and brake wear	-
건설공사	Heavy construction operations		Construction and demolition	Construction and demolition	건설공사
나대지	Industrial Wind Erosion	-	Open Area Wind Erosion	-	야적지

제 4 장 국내·외 비산먼지 배출량/삭감식 산정방법 조사

1. 미국	41
2. 유럽	52
3. 중국	56
4. 한국	68
5. 비산먼지 배출량 산정방법 연구동향	77

제 4 장 국내·외 비산먼지 배출량/삭감식 산정방법 조사

1. 미국

1.1 EPA AP-42 : Paved road EF equation

- 미국에서는 포장도로에서 발생하는 비산먼지 배출량을 산정하기 위해 EPA AP-42 배출계수 산정식을 이용하고 있으며, 자동차 주행거리(Vehicle kilometers traveled, VKT)를 적용하여 산정함
- EPA-AP 42는 도로의 풍상과 풍하지역에서 측정한 미세먼지 차이를 이용하여 차량이 측정도로를 통과할 때 발생하는 플러스 차이를 측정한 후 확산모델링을 이용하여 배출계수를 산정하고, 도로의 silt loading 값, 평균 차중과 회기분석을 이용하여 산정함.
- 미국 EPA에서는 차량운행으로 인한 포장도로 재비산먼지 발생량 산정식 아래와 같은 식을 이용함.

$$E = k(sL)^{0.91} \times (W)^{1.02}$$

E : particulate emission factor

K : particle size multiplier for particle size range and units of interest

sL : road surface silt loading (g/m²)

W: average weight(tons) of the vehicles traveling the road

출처 : EPA AP-42(2011)

- 포장도로 비산먼지 배출량은 도로분류 및 교통량에 근거해 산정하고 있으며, 입자 크기별 k 값은 PM10은 0.62g/VKT, PM2.5는 0.15g/VKT, PM16는 0.77g/VKT, PM30은 3.23g/VKT로 적용하고 있음.

<표 23> 미국 EPA AP-42 포장도로 입경보정계수

(단위 : g/VKT)

Size range	Particle size multiplier, k
PM2.5	0.15
PM10	0.62
PM16	0.77
PM30	3.23

환경부(2014), 비산먼지 배출자료 개선기술 개발

- 위의 식은 건조한 날에 적용하는 식으로 강수가 있어 도로가 젖은 경우 일간 자료를 기반으로 다음과 같은 강수일을 고려하여 보정함.

$$E_{\text{ext}} = E \times (1 - P/4N)$$

N : 평균한 기간의 일수

P : 평균한 기간의 강우 일수

- 포장도로에서 발생하는 비산먼지중 PM2.5분율은 PM10의 25%,로 계산하고 있음.

1.2 CARB : Paved road dust

- 미국 CARB에서는 차량운행으로 인한 포장도로 재비산먼지 발생량 산정식을 아래와 같은 식을 이용함.

$$E = k(sL)^{0.91} \times (W)^{1.02} (1 - P/4N)$$

E : particulate emission factor

K : particle size multiplier for particle size range and units of interest

sL : road surface silt loading (g/m²)

W : average weight(tons) of the vehicles traveling the road

P = number of “wet” days, when at least one site per county received at least 0.01 inch of precipitation during the annual averaging period

N = the number of days in the annual averaging period (default = 365)

출처 : CARB(2016)

- 포장도로에서 발생하는 비산먼지의 분율은 PM10은 0.4572, PM2.5는 0.0686, PM 0.5428 로 적용하고 있으며, PM2.5는 PM10의 15%, PM의 6.86%로 계산됨.

1.3 EPA AP-42 : Heavy construction operations

- 미국 EPA에서는 건설 활동에 의한 비산먼지(TSP) 배출계수는 <표 24>와 같음.

<표 24> 미국의 건설 활동에 의한 비산먼지 배출계수

단위	megagrams (Mg)/hectare/month of activity	tons/acre/month of activity
건설 활동에 의한 배출계수	2.69	1.2

출처 : EMEP/EEA(2016), Air pollutant emission inventory guidebook

1.4 CARB : Building construction dust

- The instructions and associated table below provide an example of estimating residential and commercial building construction dust emissions for Alameda county. This example is adapted from the previous methodology, dated March 1990.

Step 1: Construction Basis. Enter the units the estimates of construction activity are based on into Table A. For residential construction, the units are 'units built', for the other construction, the units are 'construction valuation'.

Step 2: Construction Basis Value. Using Table 2 for residential construction, or Table 3 for non-residential construction, locate the appropriate values for each construction type. Enter the residential construction value. Prior to entering the non-residential construction value, it must first be scaled to reflect 1987 dollar valuations. This is required because the acres per dollar valuation values (i.e., 3.7, 4.0, or 4.4 acres per million) are based on 1977 valuations. Using the ratio of the 1977 to 1987 Department of Commerce composite indices, the Table 3 valuations are scaled. The ratio of the 1977 to 1987 values is 63.5/114.3 which equals 0.556. So, multiplying the Table 3 valuations by 0.556 provides the correct value for entry into Step 2 of the emissions estimation table.

Step 3: Acres/Basis Unit. Enter the acres per construction units. For residential construction in Alameda county, this is 1/7 acres per home, and 1/20 acres per multi-unit dwelling (see Table 4 for the acreage assignments). For commercial construction, the acres/unit is 3.7 acres per million dollars of valuation.

Step 4: Project Duration. Residential construction is estimated to take six months, commercial construction 11 months.

Step 5: Compute Acre-Months. Multiply the values from steps 2, 3, and 4 together to get acre-months. Construction Basis Value x Acres/Unit x Months = Acre-Months.

Step 6: Emission Factor. Input the emission factor. ARB's default factor is 0.11 tons PM /acre-month when watering practices are employed. 10

Step 7: Compute Emissions. Multiply the values from step 5 and step 6 to compute the annual PM emissions. Acre-Months x Emission Factor = Emissions

<표 25> 캘리포니아 주의 건설 활동에 의한 비산먼지 배출계수

		Construction Type		
		Residential Single Family	Residential Multiple Unit	Commercial
step 1	Construction Basis	Units Built	Units Built	Valuation
step 2	Construction Basis Value (per year)	4474 units	4900units	\$124.86 million
step 3	Acres/Basis	1/7 acres/unit	1/20 acres/unit	3.7 acres/million
step 4	Project Duration	6 mos	6 mos	11 mos
step 5	Acre-Months/year	3835	1470	5081.8
step 6	Emission Factor (tons PM10/acres-month)	0.11	0.11	0.11
step 7	PM10 Emissions (tons/year)	421.8	161.7	559.0

출처 : CARB(1997), Background Material : Section 7.7 Building Construction Dust

1.5 WRAP : Construction and demolition

- 미국 WRAP에서는 건설 활동에 의한 비산먼지(PM10) 배출계수 산정방법은 아래식과 같음

<표 26> 건설 활동에 의한 비산먼지 배출계수(미국 WRAP)

단위		tons/acre/month of activity
건설 활동에 의한 배출계수	주거시설	0.032
	비주거시설	0.190
	도로	0.420

출처 : WRAP(2006), Fugitive dust handbook

1.6 EPA AP-42 : Industrial wind erosion

- 미국 EPA에서는 풍화에 의한 비산먼지 배출량 산정 방법은 아래식과 같음

$$E = k \sum_{i=1}^N P_i$$

k : 입경보정계수(particle size multiplier)

N : 연간 나대지 토양의 교란횟수(number of disturbances per year)

P : 풍화잠재력(erosion potential corresponding to the observed fastest mile of wind for the i-th period between disturbances, g/m²)

- 입경별 크기에 따른 입경보정계수 값은 <표27>와 같음

<표 27> 입경별 크기에 따른 보정계수 값

Aerodynamic Particle Size Multipliers			
30 μm	<15 μm	<10 μm	<2.5 μm
1.0	0.6	0.5	0.075

출처 : EPA AP-42, Air pollutant emission inventory guidebook

- 건조한 지표면에 대한 풍화잠재력은 아래와 같은 식으로 표현함

$$P = 58 \times (u^* - u_t^*)^2 + 25 \times (u^* - u_t^*)$$

$$P = 0 \text{ for } u^* \leq u_t^*$$

u^* = friction velocity (m/s)

u_t = threshold friction velocity (m/s)

- 나대지의 비산먼지 배출계수를 산정하기 위해 1)마찰속도의 역치와 2)풍화잠재력을 산출하여 비산먼지 배출량을 산정함.

○ 표면마찰 속도에 의한 비산먼지 배출계수는 아래와 같은 식으로 산정하고 있음.

$$u^* = 0.053u_{10}^+$$

u^* = friction velocity, (m/s)

u_{10}^+ = fastest mile of reference anemometer for period between disturbances(m/s)

1.7 WRAP : Open area wind erosion

- WRAP의 풍화에 의한 비산먼지 배출량 산정식은 아래와 같음

$$\text{PM10 Emission Factor} = 0.5 \sum_{i=1}^N P_i$$

N = number of disturbances per year

P_i = erosion potential corresponding to the observed (or probable) fastest mile of wind for the ith period between disturbances (g/m²)

- 건조한 표면에 대한 풍화잠재력은 아래와 같은 식으로 표현하며, PM_{2.5}/PM₁₀ 비율은 0.15로 MRI에서 분석을 기반으로 한 수치를 사용하고 있음.

$$P = 58 \times (u^* - u_t^*)^2 + 25 \times (u^* - u_t^*)$$

$$P = 0 \text{ for } u^* \leq u_t^*$$

u* = friction velocity (m/s)

u_t* = threshold friction velocity (m/s)

1.8 CARB : Tilled fields wind erosion

- 미국 CARB(California Air Resources Board)에서는 토양의 산성과 기상, 식생과 관련된 인자들을 적용하여 농업토지, 목초지, 비포장도로 등의 노출된 토양에서 바람에 의해 발생하는 비산먼지 배출계수 산정방법을 아래와 같이 제시함.

$$E_s = A I K C L' V'$$

E_s = suspended particulate fraction of wind erosion losses of tilled fields, ton TSP/acre/year

A = (entrained soil factor) portion of total wind erosion losses that would be measured as suspended particulate, estimated to be 0.025 (for unpaved roads, 0.038)

I = soil erodibility. ton/acre/year

K = surface roughness factor, dimensionless

C = climatic factor, dimensionless

L' = unsheltered field width factor, dimensionless

V' = vegetative cover factor, dimensionless

2. 유럽

2.1 EEA : Road transport : automobile tyre and brake wear

- 유럽 EEA의 타이어, 브레이크 마모에 의한 비산먼지 배출량 산정식은 아래와 같은 식을 이용함.

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{TSP,s,j} \times F_{s,i} \times S_s(V)$$

TE = total emissions of TSP, PM10 or PM2.5 for the defined time period and spatial boundary [g],

N_j = number of vehicles in category j within the defined spatial boundary,

M_j = average mileage driven per vehicle in category j during the defined time period [km],

$EF_{TSP,i, j}$ = mass emission factor for pollutant i and vehicle category j [g/km].

$F_{s,i}$ = TSP, PM10, PM2.5

$S_s(V)$ = correction factor for a mean vehicle travelling speed V

j = vehicle category (two-wheel vehicle, passenger car, light-duty truck, heavy-duty vehicle).

출처 : EEA

- 차종에 따른 타이어 마모에 의한 미세먼지 배출계수는 <표 28>에 나타내었으며, 급정지시 재비산 되는 큰 입자들은 포함하지 않음.

<표 28> EU의 타이어마모에 의한 미세먼지 배출계수

Vehicle class (j)	TSP emission factor (g/km)	Uncertainty range (g/km)	Quality code
Two-wheel vehicles	0.0046	0.0042-0.0053	B
Passenger cars	0.0107	0.0067-0.0162	B
Light-duty trucks	0.0169	0.0088-0.0217	B
Heavy-duty vehicles	식으로 계산	식으로 계산	B

출처 : EU emissions(2017), LRTAP report

○ 입경별 타이어 마모에 의한 미세먼지 질량분율을 <표 29>에 나타내었음.

<표 29> EU의 타이어 마모에 의한 미세먼지 입경별 질량분율

Particle size class	Mass fraction (r,t,l) of TSP
TSP	1.000
PM10	0.600
PM2.5	0.420
PM1	0.060
PM0.1	0.048

출처 : EU emissions(2017), LRTAP report

○ 차종에 따른 브레이크 마모에 의한 미세먼지 배출계수는 <표 30>에 나타내었음

<표 30> EU의 브레이크마모에 의한 미세먼지 배출계수

Vehicle class (j)	TSP emission factor (g/km)	Uncertainty range (g/km)	Quality code
Two-wheel vehicles	0.0037	0.0022-0.0050	B
Passenger cars	0.0075	0.0044-0.0100	B
Light-duty trucks	0.0117	0.0088-0.0145	B
Heavy-duty vehicles	식으로 계산	0.0235-0.0420	B

출처 : EU emissions(2017), LRTAP report

○ 입경별 브레이크 마모에 의한 미세먼지 질량분율을 <표 31>에 나타내었음

<표 31> EU의 타이어 마모에 의한 미세먼지 입경별 질량분율

Particle size class	Mass fraction (r,t,l) of TSP
TSP	1.000
PM10	0.980
PM2.5	0.390
PM1	0.100
PM0.1	0.080

출처 : EU emissions(2017), LRTAP report

2.2 EEA : Construction and demolition

○ EEA의 건설 활동에 의한 비산먼지 배출량 산정식은 아래와 같음

$$EMPM10 = EFPM10 \times A_{\text{affected}} \times d \times (1-CE) \times (24/PE) \times (s/9\%)$$

EMPM10 = PM10 emission (kg PM10)

EFPM10 = the emission factor for this pollutant emission
(kg PM10/[m² x year])

Aaffected = area affected by construction activity (m²)

d = duration of construction (year)

CE = efficiency of emission control measures (-)

PE = Thornthwaite precipitation-evaporation index (-)

s = soil silt content (%)

※ 9% : The average silt content for California/Las Vegas
(EPA's measurements)

○ 유럽의 건설 활동에 의한 비산먼지(PM10) 배출계수는 아래식과 같음

<표 32> EU의 건설 활동에 의한 비산먼지 배출계수

단위		kg/(m ² ·yr)		
	구분	TSP	PM10	PM2.5
건설 활동에 의한 배출계수	주거시설	0.29	0.086	0.0086
	아파트	1	0.30	0.030
	비주거시설	3.3	1.0	0.1
	도로	7.7	2.3	0.23

출처 : EU emissions(2017), LRTAP report

○ 유럽의 건설유형별 기간을 <표 33>에 나타내었음.

<표 33> EU의 건설기간에 따른 배출계수 (d)

Type of construction	Estimated duration (year)
Construction of houses (detached single family, detached two family and single family terraced)	0.5(6month)
Construction of apartments (all types)	0.75(9month)
Non-residential construction (all construction except residential construction and road construction)	0.83(10month)
Road construction	1(12month)

출처 : EU emissions(2017), LRTAP report

3. 중국

- “중국의 대기 오염 방지 및 제어 작업 프로세스를 촉진하기 위한 환경 보호 우선 순위 강화에 관한 대기 오염 통제 조치 계획”을 국무회의로 이행하여 과학적, 표적 및 효과의 먼지 오염 방지 및 제어 작업을 향상시키기 위해 “중국 환경 보호법, 중국 대기 오염 통제법, 환경 대기 질 기준 및 관련 법률 및 표준규정, 및 먼지 배출원 배출 평가 지침을 발간함.

- 먼지배출원(먼지배출원, 도로먼지배출원, 건설시먼지배출원 및 야적지먼지배출원)에서 발생하는 입자 물질 발생 기술적 방법 및 기술적 프로세스 품질 관리를 수행하며, 이 가이드는 먼지 입자(TSP, PM10, PM2.5) 배출 인벤토리 작성을 수행하는 지역 규모의 배출원을 위한 것임.

- 이 지침에서 다루는 먼지에는 토양 먼지, 도로 먼지, 건설 먼지 및 마당 먼지가 있으며, 먼지 발생 메커니즘과 배출 특성의 차이를 고려할 때, 먼지원의 배출리스트를 준비 할 때 다른 먼지 배출원에서 고려해야 할 요소가 달라짐.

- 배출계수와 배출량의 산정방법은 관련 활동도를 결정하기 위해 실제 상황과 결합된 신장방법을 선택하며, 먼지배출원의 4가지 범주를 기반으로 하고 있음.

- 토양 먼지, 도로 먼지, 건설 먼지 및 야적장 먼지의 4가지 범주로 나뉘며, 두 번째 단계는 토양 기본 특성 및 배출 특성에 따라 분류되며, 세 번째 유형은 각 하위 배출원 등급별 배출 특성에 따라 분류되며, <표 34>은 다양한 종류의 먼지배출원 종류를 나타냄.

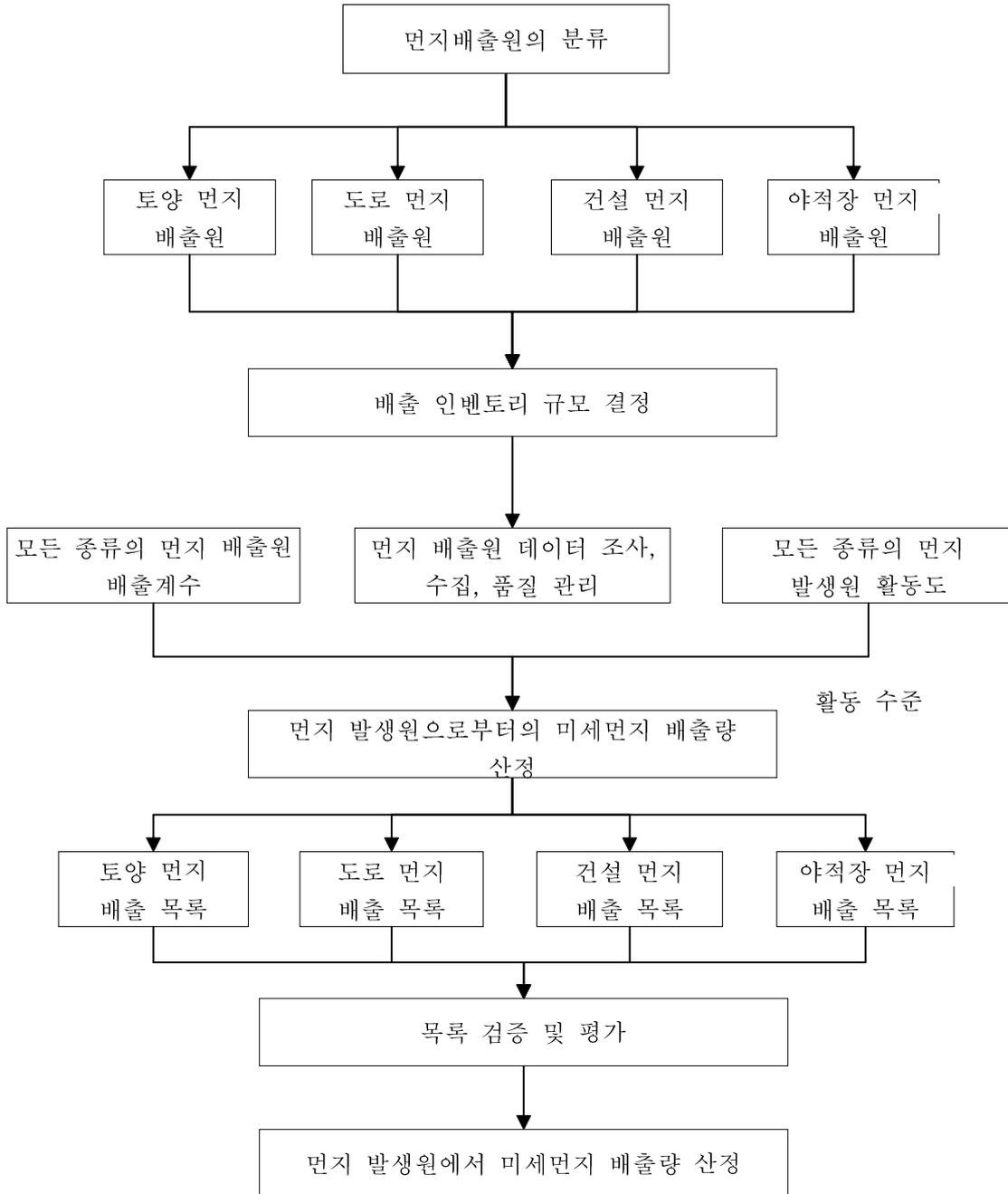
<표 34> 중국의 먼지 발생원 분류 시스템

1단계	2단계	3단계
토양 먼지	농지 황무지 녹화되지 않은 산지 해변 마른 계곡 경화되지 않거나 녹색 공간이 아닌 지역	모래
		흙
		점토
도로 먼지 배출원	포장 도로 비포장 도로	도시 도로
		고속 도로
		산업 지역 도로
		산림 도로
		시골 도로
건설 먼지 배출원	도시 기반 시설 건설 건물 건설 및 철거 장비 설치 작업 장식 수리 작업	지구 발굴
		기초 공사
		어스 백필
		본관
		장식
야적장 먼지 배출원	산업용 원료 건축 자재 산업용 고체 폐기물 건설 폐기물 생활 폐기물	적재 및 하역
		쌓아 올림

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

- 먼지 배출 목록 작성 시 우선 인벤토리 지역의 배출원에 대한 예비 조사를 실시하고, 지역 배출원의 주요 성분을 명확히하고 먼지 및 등급 체계의 분류에 따라 배출원을 분류하고, 준비 과정에서 활동도 데이터를 편집하고 수정하고 있음.
- 먼지 배출원으로부터 미세먼지 배출량 산정의 기술적 과정은 <표 35>에 나타내었음.

<표 35> 먼지배출원으로부터 미세먼지 배출산정 기술적 과정



출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

3.1 건설 활동에 의한 비산먼지 배출량 산정방법

○ 중국 북경시의 건설 활동에 의한 비산먼지 배출량 산정방법은 아래와 같음

$$W_G = E_G \times A_C \times T$$
$$E_G = 2.69 \times 10^{-4} \times (1 - \eta)$$

W_{Gi} : 먼지 배출원 PMi의 총 배출량 (t/a)

E_{Ci} : 전체 건설 현장 PMi의 평균 배출 계수 (t/m²/월)

A_C : 건축 면적 (m²)

T : 건설 개월 수 (일반적으로 건설 일수/30으로 계산)

η : 오염제어 기술을 위한 먼지 제거 효율, %, 모든 종류의 통제 조치

○ 이 공식은 전체 건축면적의 총 배출량에 대한 전반적인 추정치를 이용하며, PM10 및 PM2.5 배출량은 건설 활동에서 발생하는 입자크기에 따라 결정함.

○ <표 36>은 건설 활동에서 비산먼지 제어에 따른 비산먼지 제어효율을 나타냄.

<표 36> 중국의 건설 활동 분야 조치별 비산먼지 배출 제어 효율

건설 활동에서 발생하는 비산먼지 제어 조치		제어 효율(%)		
		TSP	PM10	PM2.5
포장 도로 살수	콘크리트, 스프링쿨러 강도 (W) = 0.6mmH2O/hr	96	80	67
에어 필터	나일론 플라스틱 메쉬 직경 0.5mm, 간격 3mm	24	20	17
	나일론 플라스틱 메쉬 직경 1mm, 간격 5mm	12	10	8
표면 방진포	고강도 섬유 밀폐 덮개	32	27	22
	나일론 플라스틱 메쉬 직경 1mm, 간격 5mm	20	17	14
화학 먼지 억제제		89	84	71
펜스	2.4m 하드펜스	18	15	13
	1.8m 하드펜스	12	10	8

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

○ 건설 활동으로 인한 비산먼지 배출량의 정밀 계산방법은 아래와 같음

$$W_{Ci} = E_{Ci} \times A_c \times t$$

$$E_{Ci} = 0.02534 \times D \times u^{1.983} \times M^{-1.993} \times sL^{0.745} \times N^{0.684} \times (1-\eta) \times 10^{-6}$$

W_{Ci} : 먼지 배출원 PM_i 의 총 배출량 (t)

E_{Ci} : 건설 먼지 공급원의 PM_{10} 배출율 (t/m²/h)

A_c : 건축 면적 (m²)

t : 건설 시간 (h)

D : 건설 현장 샘플링의 면적 비율 (%)

u : 지상 2.5m의 풍속 (m/s)

M : 토지 표면의 수분 함량, %, 실제 결정, 방법 및 도로 먼지 내용 결정
방법.

sL : 도로 먼지 부하 (g/m^2)

N : 건설 현장의 시간당 운행하는 차량 수 (대)

η : 오염 제어 기술을 위한 먼지 제거의 효율 (%)

3.2 중국의 야적장에서 발생하는 비산먼지 배출량 산정방법

○ 야적장에서 발생하는 비산먼지 배출량의 정밀 계산방법은 아래와 같음

$$E_w = k_i \times \sum_{i=1}^n P_i \times (1 - \eta) \times 10^{-3}$$

$$P_i = \begin{cases} 58 \times (u^* - u_t^*)^2 + 25 \times (u^* - u_t^*); & (u^* > u_t^*) \\ 0; & (u^* \leq u_t^*) \end{cases}$$

E_w : 야적장의 바람 침식에 대한 배출계수 (kg/m^2)

k_i : 물질 입자 크기 계수, <표 37>참조

n : 연간 교란 건수

P_i : i 번째 부식에서 관찰된 최대 풍속의 풍력 잠재력, g/m^2

η : 오염제어 기술을 위한 먼지 제거의 효율, %, 다양한 제어 수단의 효율성에 대한 권장 값은 <표 38>에 제시함.

u^* : 마찰풍속, m/s

u_t^* : 한계 마찰 풍속, 임계 마찰 풍속, m/s

$$u^* = 0.4u(z) \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

$u(z)$: 지상풍속, m/s

z : 지상 속도 감지 높이, m

z_0 : 지면의 거칠기, m (도시 0.6, 교외 0.2)

0.4 : 폰 카르멘 상수

<표 37> 중국의 바람 풍화 중에 발생하는 입자 크기 계수

입자크기	TSP	PM10	PM2.5
분류별 계수	1.0	0.5	0.2

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

<표 38> 중국의 야적장에 대한 풍화 관리 대책의 효율

(단위 : %)

재질 특성	제어 조치	TSP 제어효율	PM10 제어효율	PM2.5 제어효율
광산 재료	정기 스프링클러	52	48	40
	화학 억제제	88	86	71
석탄 더미	정기 스프링클러	61	59	49
	화학 억제제	86	85	71
건설 재료	직물 덮개	18	76	64

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

<표 39> 임계 값 마찰 풍속 기준값

정원 재료	임계 마찰 풍속(m/s)
석탄 더미	1.02
철 슬래그, 스래그(퇴적물)a	1.33
석탄으로 덮이지 않은 곳a	1.12
석탄 스크레이퍼 또는 스크레이퍼 트랙a,b	0.62
석탄 먼지 더미c	0.54
철광석	6.3
석탄 맥석	4.8

비고) : a 열린 탄광; b 약간 덮여짐; c 발전소

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

3.3 중국의 도로에서 발생하는 비산먼지 배출량 산정방법

○ 도로에서 발생하는 비산먼지 배출량 산정방법은 아래와 같음

$$W_{Ri} = E_{Ri} \times L_{Ri} \times N_R \times \left(1 - \frac{n_r}{365}\right) \times 10^{-6}$$

W_{Ri} 는 도로 먼지 발생원의 미립자 물질 PMi의 총 배출량, t/a

E_{Ri} 는 도로 먼지 발생원의 PMi 평균 배출 계수, g/(km · 자동차).

L_R 은 도로 길이, km

N_R 은 특정 기간 동안 도로에서 차량의 평균 교통량, (차량/a)

n_r 은 얻을 수 있는 측정된(통계적 강수량은 도로의 습한 날로 인한)을
통해 먼지 배출량 산정 어려움 : 측정 과정에서 0.25mm/d 일 이상
강수량의 일수를 사용

○ 포장도로에서 발생하는 비산먼지 배출량 산정방법은 아래와 같음

$$E_{Pi} = k_i \times (sL)^{0.91} \times (W)^{1.02} \times (1 - \eta)$$

E_{Pi} 는 PMi 배출 계수(1km 도로 먼지를 주행하는 자동차)의 포장 먼지,
(g/km)

k_i 는 생성된 먼지 중 PMi의 입도 비율

sL 는 도로 먼지 부하, (g/m^2)

W 는 평균 중량, (t) 평균 차량 중량은 주어진 도로를 통과하는 모든
차량의 평균 중량을 나타냄.

η 는 먼지 오염 제어 기술의 제거 효율, (%).

<표 40> 중국의 포장도로에 의해 생성된 입자크기별 비산먼지 계수

입자 크기	TSP	PM10	PM2.5
입자 크기별 계수 (g/km)	3.23	0.62	0.15

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

<표 41> 중국의 포장도로에 의해 생성된 입자크기별 비산먼지 계수

제어 조치	컨트롤 개체	TSP	PM10	PM2.5
2회 / 일 살수	모든 포장 도로	66%	55%	46%
스프레이 먼지 억제제	도시 도로	48%	40%	30%
진공 청소 (진공 장치 X)	미끄러지는 도로	8%	7%	6%
	트렁크	13%	11%	9%
진공 청소 (진공 장치 O)	미끄러지는 도로	19%	16%	13%
	트렁크	31%	26%	22%

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

3.4 중국의 토양에서 발생하는 비산먼지 배출량 산정방법

○ 토양 오염원에서 발생하는 비산먼지 배출량 산정방법은 아래와 같음

$$W_{Si} = E_{Si} \times A_S$$

$$E_{Si} = D_i \times C \times (1 - \eta) \times 10^{-4}$$

$$D_i = k_i \times I_{we} \times f \times L \times V$$

$$C = 0.504 \times u^3 / PE^2$$

W_{Si} 는 토양 먼지에서 PM_i (미립자 물질에서 공기 역학적인 입자 크기가 0~1 μ m 사이)의 총 배출량

E_{Si} 는 토양 먼지원의 PM_i 이며, 배출 계수 $t/(m^2 \cdot a)$

A_S 는 토양 먼지원의 면적, (m^2)

D_i 는 PM_i의 먼지 계수, $t/(10^4 m^2 \cdot a)$

C 는 기상 요인이 토양 먼지에 미치는 영향을 특징짓는 기후 요인

η 는 입자상 제거 효율 (%)

k_i 는 토양 먼지 중 PM의 비율이며, TSP의 권장값은 1임. PM₁₀은

0.30, PM_{2.5}는 0.05이며, 측정을 위해 Barker 입자 크기 분석기 또는 동적 입자 크기 분광계, 보정값을 사용할 수 있음.

I_{we} 는 토양 바람 침식 지수이며, 다른 유형의 토양 바람 침식 지수는 토양 유형에 가까운 질감을 선택할 수 있음.

f 는 토지 조도 계수로 0/5의 값을 해외, 섬, 해안, 호수 및 사막 지역 값 1에서 계산

L 은 차폐되지 않은 폭 인자, 즉 장애물(예를 들어, 건물이나 큰 나무)의 큰 범위가 없음 비 차폐 폭이 300 μ m보다 작으면 $L = 0.7$, 비 차폐 폭이 300~600 μ m일 때 $L = 0.85$, 비 차폐 폭이 600 μ m보다 크면 $L = 1.0$.

V 는 식생 커버 계수이며, 총 토지 면적과 계산된 토지 면적의 비율을 나타내며, 다음과 같은 식으로 나타냄.

$$V = \text{노출 토양 면적} / \text{총 산출 면적}$$

u 는 연간 평균 풍속, m/s^2 임.

PE 는 상위 위트 강수량-증발 지수 공식은 다음과 같음.

$$PE = 1.099 \times p / [0.5949 + (0.1189 \times T_a)]$$

p 는 연간 강수량(mm), T_a 는 연간 평균 기온($^{\circ}C$)

<표 42> 중국의 농지 바람 침식에 대한 비산먼지 방지 대책별 효율 (단위 : %)

제어 조치	TSP 제어 효율	PM10 제어 효율	PM2.5 제어 효율
인공 바람 장벽	75%	63%	52%
자르기 범위	90%	90%	75%
지면 커버	36%	30%	25%
방풍 숲 만들기	30%	25%	21%

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

<표 43> 중국의 토양 풍식 지수 참고치 (단위 : $t/10^4m^2 \cdot a$)

토양 종류	토양 종류	TSP	PM10	PM2.5
모래	모래	490	147	24
	토양 모래	331	99	17
흙	흙	911	273	46
	샌디 흙	447	134	22
	모래 양토	911	273	46
	실트흙	476	143	24
	점토 양토	290	87	15
	규조토	385	116	19
	실록	75	23	4
점토	점토	170	51	9
	실크 점토	170	51	9
	샌디 클레이	138	41	7

출처 : 북경시(2014), 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

4. 한국

4.1 포장도로 재비산먼지

- 포장도로를 운행하는 자동차에 의한 비산먼지 배출량을 평가하는 부문으로 포장도로와 비포장도로를 구분해서 비산먼지 배출량을 산정함.
- 관련자료는 지상기상관측소 일반현황 및 지점별 관측자료, 차종별 일일평균 주행거리, 행정구역별 차량 등록대수, 제작사별 차량별 등록대수, 택시 및 CNG 버스 등록대수, 도로망도 GIS 자료, 시도별 도로유형별 도로 현황을 이용함.
- 포장도로 비산먼지를 산정하기 위한 활동도는 주행거리(VKT)이며, 이 자료는 엔진 가열배출에서 이용하는 주행거리 산정방식을 이용하며, 이외에도 silt loading, 차종별 평균 차량무게, 강우일수 등의 자료가 필요함.
- 포장도로의 silt 부하량은 고속국도, 일반국도, 국가지원지방도, 지방도, 특광역시 시도별로 구분하여 제시함.

<표 44> 도로별 silt 부하량

구 분		구 분	
도로	sL(g/m ²)	도로	sL(g/m ²)
고속국도	0.01	지방도	0.12
일반국도	0.06	특광역시도	0.06/0.1a
국지도	0.08	일반시도	0.06

출처 : 국립환경과학원(2008), 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로 재비산먼지 실시간 측정방법 개발(I,II)

a : 인천은 0.1g/m²적용, 그 외 특광역시는 0.06g/m²적용

○ 차종 분류에 맞게 적용되는 평균 차중은 아래에 나타내었음.

<표 45> 차종별 평균 차중

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

출처 : 건설교통부(2010), 도로포장설계지침서 및 자동차 축 하중 조사연구

○ 강우일 중 0.254mm이상인 날에 대해서 강우일수를 적용하고 76개소의 관측 기상자료가 일별로 수집되기 때문에 월별 VKT에 대해 월별 평균 강우일수를 적용함.

<표 46> 수도권 0.254mm 이상 강우 일수 (예, 2010)

시도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
서울	8	7	11	9	11	9	15	22	13	4	7	7
인천	7	7	9	12	8	10	12	19	13	4	7	8
경기	7	8	13	10	7	9	10	21	14	4	5	8

출처 : 국립환경과학원(2013), 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람
○ 포로포장에서 배출량 산정식은 US EPA에서 제시한 아래의 식을 이용함.

$$E = VKT \times EF/1000$$

E : 배출량(kg/yr)

VKT : 주행거리(km/yr)

EF : 먼지배출계수(g/km)

1000: 환산계수

출처 : US EPA(1955) AP-42, Paved Road

- 포장도로의 배출계수는 도로표면 silt 부하량과 평균차중의 함수이며, 아래에 제시된식에 의하여 결정되며, US EPA에서 제시한 식으로 TSP와 PM10에 대하여 별도로 배출계수를 산정하여 적용하고 있음.
- silt 부하량과 평균차중은 앞에서 제시한 값을 적용하며, 해당년도의 시도별 강우일수를 제외하여 배출량을 산정함.

$$E = k(sL)^{0.91} \times (W)^{1.02}$$

E : 먼지배출계수(g/km)

k : 보정계수 (3.23 for TSP, 0.62 for PM10, 0.15 for PM2.5)

sL : 도로표면 silt 부하량 (g/m²)

4.2 건설공사

- 토지정리, 파괴, 굴삭, 건물건설, 도로건설 등 건설공사 다단계 과정에서 발생하는 비산먼지를 산정하는 부문이며, 도로건설은 활동자료가 구축되지 않고 있음.
- 우리나라 특성상 비산먼지 발생신고 대상 면적 및 기간등을 현실적으로 입수에 어려움이 있어 각 지자체에서 입수한 용도별 건축착공면적을 주로 활용하여 산정함.
- 주거시설 중 단독주택의 경우 일반 단독주택과 다가구주택, 다중주택 그리고 공관을 포함하며, 공동주택은 다세대주택과, 연립주택, 아파트와 기수사를 포함함.
- 비주거시설은 상업·공공용, 농수산용, 공업용(광업용 제외), 문교·사회기타용 등을 포함하여 배출량 산정에 적용함.
- 공사기간은 대한주택공사의 표준공사기간인 7개월(일반 건축공사의 6층 이하)인 아파트용 표준공사기간 산정자료를 적용함.

<표 47> 수도권지역 용도별 건축착공면적 (예,2010)

(단위 : 천m²)

구분	주거용	상업용	공공용	공업용	문교사회용	농수산용	기타
서울	99,686	279,035	131	72,478	97,583	0	1,235
인천	64,063	42,278	1,104	28,348	32,105	4,632	25,534
경기	199,630	418,318	9,954	359,656	106,145	72,711	139,188

출처 : 국토통계누리, 국토교통부(2010), 시도별 건축물착공현황

○ 건설공사장 및 도로건설에서 비산먼지 배출량은 아래와 같이 산정함.

$$E = \sum A \times P \times EF$$

E : 건설공사 배출량(kg/yr)

A : 연간 공사면적(m²)

P : 토공기간(7개월/yr)

EF : 배출계수 (kg/m²/월)

<출처 : 국립환경과학원(2008), 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로 재비산먼지 실시간 측정방법 개발(I,II)>

○ 건설공사의 비산먼지 배출계수는 국립환경과학원(2008)의 자료를 활용하였으며, 토공기간과 공사면적을 기초로 하여 배출량을 산정함.

<표 48> 건설공사 부문 비산먼지 배출계수 (단위 : kg/m²/월)

	구 분		TSP	PM10	PM2.5
건설 활동에 의한 배출계수	주거 시설	단독 주택	0.0105	0.0072	0.00072
		공동 주택	0.036	0.0247	0.00247
	비주거시설		0.0621	0.0426	0.00426
	도로		0.1372	0.0941	0.00941

출처 : 국립환경과학원(2008), 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로 재비산먼지 실시간 측정방법 개발

○ 국가별 건설사업장 배출계수를 비교하면 다음과 같음.

<표 49> 건설 활동의 종류별 배출계수

PM	건설 활동		한국 (kg/m ² / month)	미국 연방정부 (ton/acre/ month)	CARB (tpn/acre· month)	유럽 (kg/m ² ·yr)	중국
TSP	주거 시설	단독 주택	0.0072	1.2	-	0.29	-
		공동 주택	0.0247	1.2	-	1	-
	비주거시설		0.426	1.2	-	3.3	-
	도로		0.1372	1.2	-	7.7	-
PM10	주거 시설	단독 주택	0.0072	-	0.11	0.086	-
		공동 주택	0.0247	-	0.11	0.30	-
	비주거시설		0.0426	-	-	1.0	-
	도로		0.0941	-	-	2.3	-
PM2.5	주거 시설	단독 주택	0.00072	-	-	0.0086	-
		공동 주택	0.00247	-	-	0.030	-
	비주거시설		0.00426	-	-	0.1	-
	도로		0.00941	-	-	0.23	-

4.3 나대지

- 흙이 노출된 나대지와 흙, 모래, 곡물 등의 작은 알갱이가 노출된 야적더미가 풍화되면 비산먼지가 발생하며, 나대지에서 발생하는 비산먼지 배출량은 나대지의 활용빈도, 풍속과 토양의 특성 등에 의하여 결정됨.
- 학교운동장에서 발생하는 비산먼지에 대하여 배출량만을 산정하고 있으며, 그 외의 활동도와 배출계수가 입수되면 보완될 예정임.
- 나대지는 도시지역은 물론이고 농림지역 등에 다양한 형태로 존재하며, 흙 표면이 대기에 노출되고 있고, 1일 1회 이상 지면 교란이 있는 학교 운동장을 대상으로 비산먼지 배출량을 산정하고 있음.
- 한국교육개발원 교육통계센터에서 제공하는 읍면동별 유치원 및 초·중·고등학교 운동장 면적을 활용하였으며, 각 76개의 기상관측소의 순간최대풍속 자료를 활용함.
- 나대지에서 비산먼지 배출량은 아래와 같이 산정함.

$$E = \sum A \times EF/1000$$

E : 나대지 배출량(kg/yr)

A : 나대지 면적(m²)

EF : 배출계수(g/m²/yr)

출처 : 국립환경과학원(2008), 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로 재비산먼지 실시간 측정방법 개발(I,II)

- 나대지에서의 비산먼지 배출계수는 국립환경과학원의 ‘비산먼지 배출량 산정 방법 개선 및 도로 재비산먼지 실시간 측정방법 개발II(2008)’의 자료를 활용함.

$$\text{배출계수(g/m}^2\text{/yr)} = k \times 0.5 \times \text{풍화잠재력(Erosion potential function)}$$

$$\begin{aligned}
&= k \times 0.5 \times [58 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})^2 \\
&\quad + 25 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})] \\
&= k \times 0.5 \times \{58 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58]^2 \\
&\quad + 25 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58] \}
\end{aligned}$$

(k=100/39 for TSP, k=0.15 for PM2.5)

○ 건조한 표면에 대한 풍화잠재력은 다음과 같이 나타냄.

$$\begin{aligned}
P &= 58 \times (u^* - u_t^*)^2 + 25 \times (u^* - u_t^*) \\
P &= 0 \text{ for } u^* \leq u_t^*
\end{aligned}$$

u^* = friction velocity (m/s)

u_t^* = threshold friction velocity (m/s)

○ 표면마찰속도 역치는 입자가 움직이기 시작하는 최소 풍속을 말하며, 마찰속도 역치식은 아래와 같음.

$$u_t^* = A \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g d}$$

A = 실험상수, 보통은 0.1을 사용

ρ_p = 입자밀도(kg/m³)

ρ_a = 공기밀도(kg/m³)

g = 중력가속도(m/sec²)

d = 입자직경(m)

○ 토양입자의 크기는 체를 이용해서 측정하는데, 입자 크기에 따른 마찰 속도역치는 다음과 같음.

<표 50> 나대지의 입자 크기에 따른 마찰속도 역치

	Seive Opening(mm)	Midpoint(mm)	ut* (m/s)
1	4		
2	2	3	1
3	1	1.5	0.76
4	0.5	0.75	0.58
5	0.25	0.375	0.43

출처 : 인하대학교(2015), 국내 나대지의 비산먼지 배출계수 산정을 위한
임계마찰속도 측정 : 휴대용 소형 풍동을 이용하여

- 나대지에서 풍화에 의한 비산먼지 배출계수는 토양 조건과 기상조건에 의하여 결정되며, 국내에서는 fastest miles of wind 관측 자료를 구할 수 없으므로, 대신 기상관측대의 순간최대풍속의 11m/sec이상의 자료를 활용함.
- 기상측정은 지표가 아닌 10m 높이에서 풍속을 측정하므로, 관측된 풍속을 표면 마찰속도로 환산함.

$$u^* = 0.053u_{10}^+$$

u^* = friction velocity, (m/s)

u_{10}^+ = fastest mile of reference anemometer
for period between disturbances(m/s)

5. 비산먼지 배출량 산정방법 연구동향

5.1 포장도로 재비산먼지 관련연구

가. 배출자료 관련 연구

- 연구명 : 도로 재비산먼지 배출량 산정 모델 모의
 - 근거 : 한국기상학회 학술대회 논문집 (2016.4, 339-340)
 - 김성지(2016)등은 도로재비산먼지 배출량 산정 모델링을 이용하여 서울지역의 포장도로 재비산먼지 등을 조사하였음. 여기서 VKT는 “2010년 자동차 주행거리 실태분석 연구“ 자료를 인용하여 배출량을 산출함.

- 포장도로재비산먼지 배출자료 관련하여 일평균 주행거리에 대한 검토가 필요함.

<표 51> 일평균 주행거리 (2014)

년도	km
2008	47.8
2009	47.6
2010	46.2
2011	44.1
2012	43.6
2013	43.8

출처 : 교통안전공단(2013), 자동차 주행거리 실태분석 연구

- 연구명 : 차량 주행시 포장도로에서 발생하는 재비산먼지 측정방법에 관한 연구
 - 홍지혜(2013)등은 포장도로에서 차량이 주행시 발생하는 재비산먼지의 실시간 측정 시 이동식측정차량의 측정조건에 따라 측정한 재비산먼지 PM10농도를 비교 분석함.

○ 연구명 : 새로운 산출식에 의한 포장도로 비산먼지 배출량 추정

- 정소영(2011)등은 2006년 미국 환경청 AP-42에서 제시한 방법론을 2011년 새롭게 제시한 포장도로부문 산출식을 적용하여 PM10, PM2.5의 배출량을 재산정함.

$$2006년 식 : E = k \times (sL/2)^{0.65} \times (W/3)^{+1.5} \times ((1-P/(4 \times 365)))$$

$$2011년 식 : E = k \times (sL/2)^{0.91} \times (W/3)^{1.02} \times ((1-P/(4 \times 365)))$$

나. 입자크기 관련 연구

- 연구명 : Improved Activity Levels for National Emission Inventories of Fugitive Dust from Paved and Unpaved Roads
 - 근거 : 11th International Emission Inventory Conference, Atlanta, Georgia
 - Cowherd(2002) 등은 미국의 여러 기관에서 제시한 silt loading 추천값과 측정값을 교통량에 및 도로 구분에 따라 정리하였음.

<표 52> 미국 기관별 교통량에 따른 silt 부하량

	Local	Collector	<5,000	>5,000	Minor arterial	Major >10,000	Freeway >10,000
NEI	1.0	<-	0.02	0.04	-	->	-
AP-42	0.6	<-	0.02	0.06	-	->	0.03
CARB	0.320 1.6(rural)	0.035	->	->	-	->	0.02
Utah DEQ	3.402	0.906	-	-	-	0.280	0.124
MRI	0.58	0.24	-	-	0.07	0.04	0.04
TRAKER	5.1	1.6	-	-	1.8	0.73	0.34

출처 : EPA AP-42, Air pollutant emission inventory guidebook

- 연구명 : 차량주행속도에 따른 포장도로 재비산먼지의 입경별 배출특성
 - 근거 : 한국대기환경학회지 2012년 춘계학술대회 발표 논문집 89page
 - 한세현(2013)등은 인천지역의 주행속도에 따른 재비산먼지의 입경별 배출특성을 연구하였으며, 차량 속도가 증가할 PM10 및 PM2.5, PM1의 농도가 증가했으며, 평균 PM2.5/PM10 비는 0.21로 추정함 .

- 연구명 : Examination of the Multiplier Used to Estimate PM2.5 Fugitive Dust Emissions from PM10
 - 근거 : US EPA Document (www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei14/session5/pace.pdf).

- Pace(2005)등은 PM2.5 분율이 높게 측정된 자료를 배출량 자료에 적용하게 되면 PM2.5 배출량이 과대평가되는 문제점을 지적하고 당시 적용되고 있는 비산먼지 PM2.5/PM10 비를 비교하였음.

<표 53> PM2.5/PM10 비산먼지 배출원별 분율 비교

Fugitive dust	2005	Range of new data	midpoint of new data
Paved road test	0.2	0.03 ~ 0.10	0.09
Unpaved road tests	0.15	0.10 ~ 0.12	0.11
Other category tests	0.15~ 0.25	0.06 ~ 0.12	0.1
General indications based on ambient measurements and other tests	0.15~ 0.25	0.06 ~ 0.11	0.1

출처 : Toronto(2016), PM10 and PM2.5 Street Sweeper Efficiency Test Protocol

- MRI(2006)에서는 배출량 자료 개선을 위해 PM2.5/PM10 비율에 대한 연구를 수행함.

<표 54> PM2.5/PM10 비산먼지 배출원별 분율 비교

Fugitive dust	2005	2006 ~ 현재
Paved road test	0.25	0.15
Unpaved road tests	0.15	0.1
Construction & demolition	0.208	0.1
Open area wind erosion	-	0.15

출처 : Toronto(2016), PM10 and PM2.5 Street Sweeper Efficiency Test Protocol

다. 배출계수 관련 연구

- 한국환경산업기술원(2014)에서는 배출량 자료 개선을 위해 지역별 평균 차종을 고려하여 포장도로 비산먼지 배출량을 산정함.

<표 55> 도로별 보정계수(SF)

구분	보정계수(SF)
고속국도	1
특광역시도 및 일반시도	$0.27 \times (sL)^{-0.58} \times (V/45)^{1.52}$
일반국도	1
국지도	1
지방도	1

- 연구명 : 수도권지역 포장도로의 silt loading 특성 및 재비산먼지 배출계수 산출 : 이동먼지측정시스템의 측정사례를 중심으로
 - 한세현(2013)등은 수도권 지역 포장도로를 대상으로 수행된 이동먼지측정시스템을 이용한 측정사례를 중심으로 여러 요인에 의한 silt loading의 분포 및 변동 특성 등을 살펴보고 대표적인 silt loading 값을 2011년 1월에 개정된 미국 EPA AP-42의 배출계수 식에 적용하여 국내 도시지역의 도로재비산먼지 배출계수를 산출하였으며, 국내.외 자료와 비교 검토한 바 있음.

5.2 타이어마모 관련연구

가. 배출자료 관련 연구

- 국내의 권진웅(2014)는 타이어마모, 브레이크 마모, 도로 표면 마모 등의 도로 재비산으로 배출원을 세분화하고, 타이어 마모에 의한 미세먼지 배출량 추정은 한국기계연구원(2012)에서 실제 도로 주행거리에 따른 승용차 타이어 마모량을 측정하고, 승용차 등록대수를 고려하여 연간 타이어 마모에 의한 미세먼지 배출량을 추정한 자료를 토대로 대한타이어공업협회(2011)타이어 생산 판매, 내수 판매, 교환용 판매 회수현황자료와 교통안전공단의 자동차 검사자료, 신생타이어와 폐타이어의 트레드 깊이 및 무게 측정을 통하여 단위 주행거리 당 타이어 마모량을 산출하고 이를 이용하여 타이어마모에 의한 미세먼지 배출량을 추정한 바 있음.
- 김정 (2013) 등은 국내 타이어 마모량을 산출하기 위하여 EU의 산정식을 적용한 산정식과 대한타이어공업협회와 교통안전공단의 검사자료를 토대로 PM10 배출량을 산출하였으며, EU 산정식보다 국내자료를 활용하여 약 20% 높게 추정한 바 있음.
- 한세현 (2015)등은 국내 외 연구자료들을 조사 검토하고, 국내 미세먼지 배출량 자료 개선을 위해 배출계수 자료등을 조사한 바있으며, 이석환 (2012)등은 도로 주행 조건에서 도로먼지 및 타이어 마모입자를 측정하여 아스팔트 재질로 건설된 고속도로에서 정속 조건 및 급가속, 급감속 조건에서 발생하는 입자들의 특성을 분석한 바 있음.
- 환경부(2016)에서는 저마모 타이어와 기존 타이어의 마모량 및 차량 속도별 미세먼지 기여율에 관한 연구를 수행한 바 있음.

<표 56> 기존타이어와 저마모 타이어의 마모량 비교

타이어 종류 (km/h)	마모량 (mg/vkm)
기존타이어	51.8
저마모 타이어	43~49.8

<표 57> 차량속도에 따른 기준타이어 마모입자의 PM10 농도

차량속도 (km/h)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	기준	저마모
50	45.7±3.8	30.5±5.6
80	44.3±4.8	26.6±2.8
110	58.3±3.7	35.5±7.0
140	150.5±3.7	50.9±10.5

<표 58> 차량속도에 따른 저마모 타이어 마모입자의 PM10, PM2.5 분율

차량속도 (km/h)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 / PM10
50	13.6	20.6	0.67
80	24.4	31.7	0.77
110	26.3	33.7	0.78
140	28.7	37.2	0.77

- 연구명 : 타이어에서 발생하는 초미세입자의 생성 특성 연구
 - 김온도조건을 변화하면서 발생한 미세입자의 발생량 평가와 입자의 형상 및 성분
- 연구명 : 차량 주행 시 타이어 및 브레이크에서 발생하는 초미세입자(UFP)의 물리적 특성 평가
 - 정속조건에서는 차량 속도의 증가에 따라서 초미세입자들의 배출량은 큰 변화가 없었지만 급제동하는 조건에서 50nm 이하의 크기를 가지는 초미세입자의 배출량은 크게 증가하는 것을 확인한 바 있음.
- 연구명 : 국내 실태조사에 의한 타이어마모 미세먼지 배출량 추정
 - 국내 실태조사에 의한 타이어마모 배출계수 추정을 통한 미세먼지 배출량

산정. 입경별 질량 분율은 Corinair Emission Inventory Guidebook의 것을 적용, 국내 교통안전공단의 검사자료와 대한타이어공업협회의 자료를 적용하였을 경우 EU의 산정식을 적용하였을 때보다 훨씬 큰 배출량 값을 보인 바 있음.

- 연구명 : 자동차 주행 시 타이어와 도로 경계면에서 발생하는 초미세 입자의 특성 평가
 - 정속 주행 시 타이어와 도로 경계면에서 발생하는 입자의 수농도는 배경농도와 동일하여 초미세입자의 발생이 거의 없는 것으로 나타남. 초미세입자의 경우 기계적 마찰에 의해 발생하는 것보다는 타이어 후면에서 마찰열 등에 의하여 준휘발성 물질이 증발, 응축과정을 거치면서 생성되는 것으로 판단된 바 있음.

- 연구명 : 타이어마모 및 브레이크마모에 의한 PM 중 마찰에 의해서 발생하는 미세입자의 특성연구
 - 타이어마모와 브레이크마모에 의한 PM10과 PM2.5 배출량과 유해대기오염물질의 배출량 산출함.

- 연구명 : 타이어 마모지수에 따른 타이어 마모 입자 평가
 - 차량 속도의 증가에 따라서 타이어 마모량이 증가하였으며, 타이어 마모지수가 높을수록 타이어 마모량 및 미세입자들의 발생량이 적게 발생된다고 언급함.

- 연구명 : 실차 주행 조건에서 타이어 마모 미세먼지 평가법에 관한 연구
 - 차량 속도의 증가에 따라서 미세먼지 배출량이 증가하였으며 특히 차량이 감속하는 경우 배출량은 크게 증가. 차량 감속 시 발생하는 미세먼지 분석 결과 중량농도 기준으로는 1~5 μm 의 입경크기에서 입자들이 대부분 존재하였으며 수농도 기준으로는 50nm 이하의 극미세입자들이 다량 검출된다고 언급함.

나. 배출계수 관련 연구

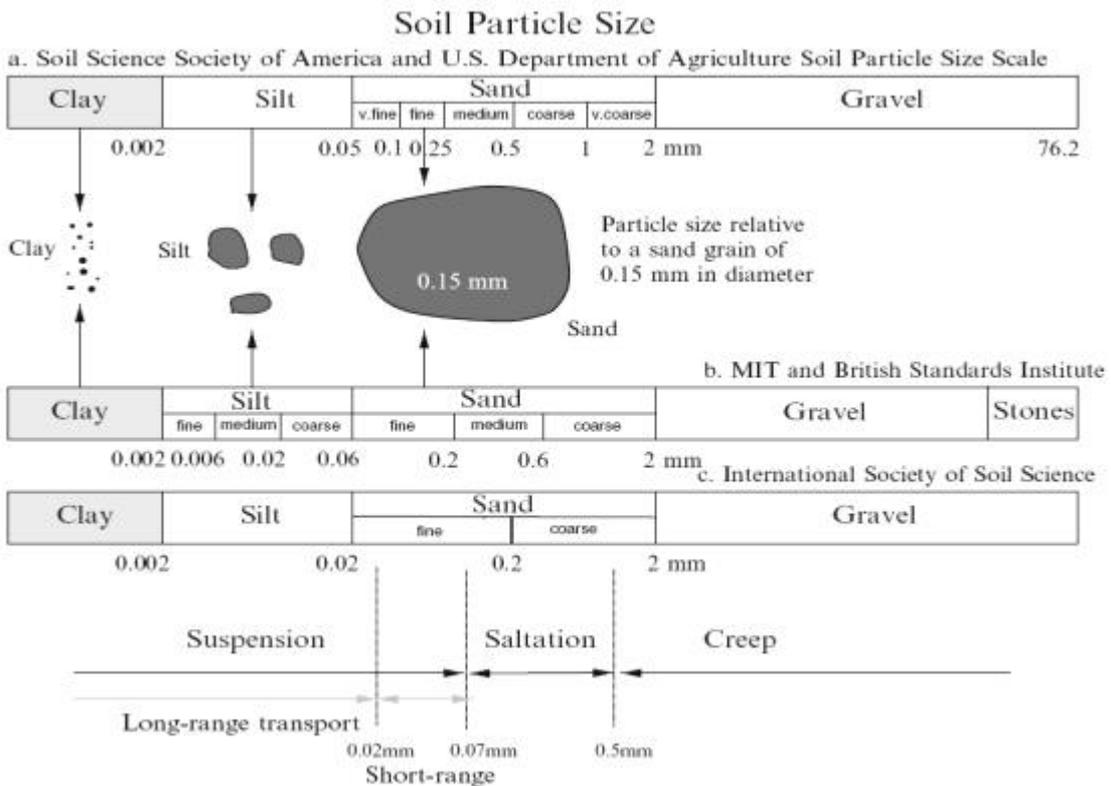
- 연구명 : 차량 타이어 마모 미세먼지 측정방법 및 배출계수 조사 연구
 - 타이어 마모 미세먼지 측정방법 조사 검토 및 국내 미세먼지 배출량 자료 개선을 위한 배출계수 자료 조사한 바 있음.

- 백성현 (2016)은 직진형 레이저 센서를 이용하여 자동차 타이어의 마모도 및 편마모를 판정한 사례가 있으며, 이석환 (2017)은 타이어 마모에 의해 발생되는 미세먼지 연구사례에 의하면 미국, 유럽은 경량차량 타이어 마모로 인한 PM10 미세먼지 배출계수를 6.0~10.0mg/vkm으로 산정하고 있으며, PM2.5/PM10의 비율을 유럽은 0.7, 미국은 0.15로 적용하고 있으며, 국내의 경우 타이어 및 브레이크 마모 미세먼지 배출계수를 따로 관리하고 있지 않으며, CAPSS에서 TSP 기준으로만 118mg/vkm으로 미국 및 유럽 대비 높은 경향을 나타낸다고 언급함.

5.3 나대지 관련연구

가. 배출자료 관련 연구

- 김영진(2014)는 서울시 교육청의 2009년 학교 현황 자료를 참고하여 인터넷 포털 사이트 Daum의 위성자료를 이용하여 나대지를 면적을 산정하였으며, 강우 보정을 위하여 기상청의 기상 월보 자료를 참고하여 비산먼지 배출량을 추정함 바 있음.
- 인하대학교(2014)에서 토양환경정보시스템의 자료를 활용하여 나대지 토양의 토성은 평균적으로 모래(sand)가 91.6%로 측정되었으며, 미사(silt)는 약 7.9%, 점토(clay)는 약 0.5%로 측정함.

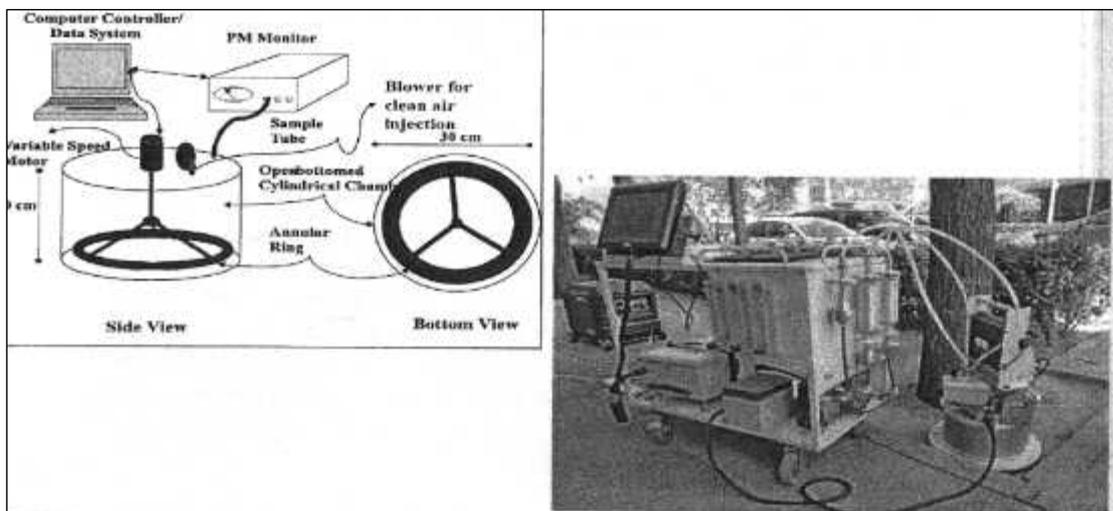


<그림 7> 나대지 풍식 비산먼지 관련한 입자크기 (Shao, 2008)

출처 : 인하대학교(2015) 국내 나대지의 비산먼지 배출계수 산정을 위한
 임계마찰속도 측정 : 휴대용 소형 풍동을 이용하여

나. 배출계수 관련 연구

- Bagnold(1941)는 실험실 풍동을 이용하여 리비아 사막의 모래 움직임 관찰함으로써 도약비산(saltation)하는 모래입자들의 거동 및 입자비산의 메커니즘을 처음으로 연구함.
- Zingg(1951)는 침전입자들의 도약비산거동에 관한 풍동실험을 수행하였으며, Gillette(1978)는 풍속과 관련한 주요 인자인 임계마찰속도 등을 측정하기 위해 휴대용 풍동을 이용하였으며, 그 이후로 휴대용 풍동을 이용한 많은 연구들이 진행되어 왔음.
- 국내의 이재희(2015)는 나대지 중 학교운동장과 공사장, 공터, 주차장 등 다양한 임계마찰속도 실험을 하였으며, 수분함량과 토양 구성에 따라 차이가 있는 것으로 나타났으며, EPA AP-42방법과 비교하였을 때 나대지 장소별로 임계마찰속도 값의 변동이 큰 것을 추정할 바 있음.
- 중국 북경시의 나대지의 비산먼지를 추정하였으며, 토양 성분별 입자등을 고려하여 지표면에서 발생 Flux를 풍속등의 변수에 따른 비산먼지 배출량을 추정할 바 있음.



<그림 8> 북경식 비산먼지 측정장치

출처 : 북경시(2014) 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

- 풍식(wind erosion) 현상에 대한 현재의 많은 지식은 풍동실험을 통해서 연구되었는데, Bagnold(1941) 연구 이래로 오랜 역사를 지님(Shao, 2008). 풍동은 실험실내 풍동(laboratory wind tunnel)과 현장에서 측정할 수 있는 휴대용 풍동(portable wind tunnel)으로 구분할 수 있음.
- 미국 DRI,에서 개발한 PI-SWERL(Portable in situ wind erosion lab)은 원통상에 회전날개를 이용하여 토양표면에서 풍식 잠재력 및 먼지 배출량을 측정하는 소형장치를 개발함.
- 공기유속분포가 실제 자연 상태의 공기유속분포와는 크게 다를 수 있지만, 각 토양별로 상대적인 마찰속도 등의 풍식잠재력 및 이에 따른 발생하는 먼지(PM10) 플럭스를 용이하게 측정함.



<그림 9> DRI의 PI-SWERL

출처 : 인하대학교(2015) 국내 나대지의 비산먼지 배출계수 산정을 위한
임계마찰속도 측정 : 휴대용 소형 풍동을 이용하여

5.4 건설 사업장 재비산먼지 관련연구

가. 배출자료 관련 연구

- 연구명 : 분산모델을 이용한 건설현장에서의 미세먼지 농도 모사 및 분석
 - 노나리(2013)등은 건설현장이 인근 주민에게 미치는 영향을 알아보기 위해 대기 분산모델을 수행하였으며 미세먼지의 특성을 분석하기 위하여 미세먼지가 퍼져 나갈 수 있는 4방위에 대해서 실태조사 및 측정하여 미세먼지의 단위시간당 배출량을 산출하였음.

- 연구명 : 건설현장에서 채취한 미세먼지(PM10)의 분석으로 건설현장 오염원 분류표 작성
 - 서영화(2013)등은 도시 미세먼지의 오염원 추적하는 수용모델을 적용하기 위하여 필수적인 오염원 분류표 중 건설현장 미세먼지의 오염원 분류표를 작성하였음.

- 연구명 : 우리나라 건설현장에서의 비산먼지 저감방안에 관한 연구
 - 이상수(2011)등은 건설현장에서 발생하는 환경문제 중 건설현장 주변 거주민 및 건설현장 근로자에게 폐 관련 질환을 유발하는 PM10이하의 미세먼지를 저감하기 위한 방안인 방진덮개 및 방진망(벽) 설치 시 제거효율과 설치장소에 따른 개선방안을 제시하였음.

- 연구명 : 건설 공사가 주변 지역 대기중의 PM10에 미치는 영향
 - 송희봉(2015)등은 대구광역시에 위치한 도시 대기측정소 총 11곳 중 주변에 건설공사가 완료되었거나 진행중인 4곳의 측정소를 선정하여 건설공사가 진행 중일 때와 그렇지 않을 때를 비교, 하여 건설공사가 주변의 PM10농도를 높이는데 크게 기여하고 있다는 것과 주변의 지형 혹은 바람의 방향등에 의해 PM10농도가 영향을 받는다는 것을 연구함.

나. 배출계수 관련 연구

- 연구명 : 건설현장의 공사장비에 의한 미세먼지 배출계수 평가
 - 이임학(2014)등은 공식적으로 사용되는 배출계수에 의하여 산정된 배출량을 입력하여 수행한 대기분산모델링의 결과와 실제 현장에서 측정한 먼지농도를 비교하고, 부지경계선에서의 허용농도를 만족할 수 있는 공사장 먼지배출계수에 의하여 산출한 배출량을 비교하여 기존의 배출계수와 본 연구에서 산출한 배출계수가 어느정도의 차이가 있는지를 파악하고 어느정도의 배출계수를 적용하는 것이 우리나라 현실에 적절한지를 판단하는 것을 연구하였음.

5.5 그 외 중복되는 관련 연구

- 연구명 : 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산 먼지 실시간 측정방법 개발 종합보고서(Ⅰ,Ⅱ)
 - 건설 공사장, 나대지 및 야적더미, 알갱이 물질 취급시설, 화재등에 의한 비산먼지 배출량 산정법 제안과 이를 근거로 수도권지역에 비산먼지 배출량을 산출하였으며 비산먼지 배출을 억제하는 방지기술을 조사하고 녹지가 비산먼지 배출억제에 기여하는 효과를 평가한 바 있음.

- 연구명 : CAPSS 비산먼지 배출량 신뢰도 향상을 위한 배출계수 보완
 - CAPSS를 통해 산정되는 비산먼지 배출량의 신뢰도 향상을 위해서 도로의 silt loading을 측정하여 포장도로 비산먼지 배출계수를 보완하는 것을 목적으로 하며 포장도로 비산먼지 배출계수의 주요 산정인자는 해당 도로의 silt loading 값이며, 대표적인 대도시인 서울과 산업·항구도시인 인천,경기도 일부 지역을 시범측정 대상지역으로 선정하여 이동먼지측정시스템을 이용한 실시간 silt loading 측정 연구를 수행한 바 있음.

5.6 비산먼지 배출량 산정방법 선행연구 자료 정리

○ 분야별로 비산먼지 관련 연구 자료를 구분하여 간단하게 표로 정리하였음.

<표 59> 비산먼지 발생원별 연구 자료 정리표

세부사항	관련 연구	연구 자료
포장도로	배출자료	4
	입자크기	5
	배출계수	2
저마모 타이어	배출자료	11
	입자크기	-
	배출계수	2
나대지	배출자료	2
	입자크기	-
	배출계수	7
건설현장	배출자료	4
	입자크기	-
	배출계수	1
그 외(중복)		2
총 계	-	40

제 5 장 수도권 대기환경관리 기본계획 비산먼지 산정방법 조사

-
1. 2차 수도권 대기질 개선 종합대책 기본계획
개요 95
 2. 비산먼지 삭감식 산정방법 현황 97
-

제 5 장 수도권 대기환경관리 기본계획 비산먼지 산정방법 조사

1. 2차 수도권 대기질 개선 종합대책 기본계획 개요

1.1 1차 기본계획

- 서울을 포함한 수도권의 대기환경을 개선하기 위하여 정부가 2005년부터 2014년 사이에 3조 819억원을 투입하여 1차 수도권 대기환경관리 기본계획을 수행하였음.
- 1차 기본계획의 목표는 미세먼지와 NO₂ 오염도를 선진국 수준으로 개선하여 맑은 날 남산에서 인천 앞바다를 볼 수 있을 정도의 시정확보를 위해 서울시의 2014년 연평균 미세먼지 40 과 NO₂ 22ppb로 낮추는 것을 목표로 하여 PM₁₀, NO_x, VOC, SO_x 등 대기오염물질 관리대상으로 선정하여 각 물질에 대해 배출량 저감목표를 설정하여 관리함.
- 제작차 배출허용기준 강화, 특정경유차 배출가스 저감, 친환경자동차 보급 및 인프라를 구축하였으며, 대기오염 총량제 및 사업장 최적방지시설 기준 강화, 중소사업장 저녹스 버너 보급등을 추진하였으며, 주유소 유증기 회수설비 설치 의무화, 도로 VOCs 함유 기준 설정, 도로 먼지 제거장비 보급 등을 수행하였음..

1.2 2차 기본계획

- 2차 수도권 기본계획은 1차 수도권 기본계획(05~14)의 성과를 분석·평가하고 미흡한 점을 보완하여 변화된 여건을 반영할 수 있도록 수립하였음.
- 2차 기본계획의 기본방향은 크게 4가지의 방향으로 1)고농도 노출인구의 건강 보호 등 인체위해성관리에 중점 2)생활주변 오염원 관리를 통해 쾌적한 생활환

경 조성 3)사전예방 관리 정책 강화 4)과학적 기반을 강화하여 대책의 신뢰성 제고 등으로 계획함.

- 2차 기본계획의 신규 세부사업 추진에 따른 오염물질 삭감량 산정식을 마련하고, 기존 시행계획의 세부사업 중 삭감량 산정식이 없는 사업의 정량적 산정방법을 마련하고, 기존의 삭감량 산정식 개선·보완을 하였음.
- 친환경자동차 보급 확대, 제작차 배출허용기준 강화, 노후차 저공해화 및 운행제한, 비도로 이동오염원 관리, 교통 수요관리등의 자동차부문 추진대책을 수립함.
- 대기오염 총량관리 강화, 총량 사업장의 배출시설 관리 등의 대책을 수립하였으며, 인쇄업 등 VOCs 배출원 관리 강화, 숲가마 등 미세먼지 배출원 관리강화, 도료 및 생활소비재 VOCs 기준 강화, 도로 재비산먼지 관리 강화 등의 대책을 수립하였고, 대기측정망 확충, 대기환경관리 정책지원, 시스템 구축 및 중장기 정책 R&D 확대 등을 추진하고 있음.

2. 비산먼지 배출량/삭감식 산정방법 현황

- 2차 기본계획의 오염물질 중 비산먼지 저감사업 및 CAPSS 오염물질 배출량 산정방법, 기본계획 삭감식, 시행계획 수립 삭감식으로 비교하여 표에 정리함.

<표 60> 비산먼지 배출량/삭감식 산정식 비교

NO	세부사항	CAPSS 오염물질 배출량 산정방법	기본계획 삭감식	시행계획 수립 삭감식
1	먼지 제거장비 보급 확대	$E = VKT \times EF / 1000$ E : 배출량(kg/yr) VKT : 주행거리(km/yr) EF : 먼지배출계수(g/km) 1000:단위환산계수	<먼지흡입식 제거장비 보급> 보급대수(대) × 단위삭감량(톤/년·대) <진공청소·진공살수차 운행> 운행대수(대) × 단위삭감량(톤/년·대)	좌동
2	저마모 타이어 보급 활성화	상동	해당연도 전망배출량(BAU) (톤/년) × 저마모 타이어 보급률 × 삭감률	좌동
3	비산먼지 발생사업장 관리 강화	연간공사면적(m ²)×토공기간(7개월/yr)×배출계수(kg/m ² /월)	해당연도 전망배출량(BAU) (톤/년) × PM10 저감효율(10%)× 이행율(20%)	좌동
4	나대지 녹색화 사업	$E = \sum A \times EF / 1000$ E : 나대지배출량(kg/yr) A : 나대지 면적(m ²) $EF = k \times \{ [58 \times (0.053 - \text{순간최대풍속}) - 0.058]^2 + 25 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.058] \}$ (g/m ² /yr)	해당연도 전망배출량(BAU) (톤/년) × 인조/천연 잔디 운동장 × 삭감율(80%)	좌동

출처 : 수도권 대기환경관리 시행계획 수립 가이드라인(안) 및 추진실적 평가방법(안) 마련(2014)

2.1 도로 비산먼지 제거장비 보급 개선 활성화 사업 비산먼지 산정방법

- 도로에서 발생하는 미세먼지를 저감하기 위하여 도로재비산 농도를 측정하여 고농도 지역을 집중관리하고 먼지제거장비 보급 확대하는 사업임.
- 도로재비산먼지의 효율적 제거를 위하여 PM2.5 제거가 가능한 먼지흡입식 제거장비를 확대 보급하고자 함.
- 먼지흡입식 제거장비 보급에 의한 오염물질 삭감량 산정식과 진공청소차 및 진공 살수차 운행에 의한 오염물질 삭감량 식은 아래와 같음.

<표 61> 먼지흡입식제거장비에 의한 오염물질 삭감량 산정식

<p>① 먼지흡입식 제거장비 보급에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)</p> <p>= 보급대수(대) x 단위삭감량(톤/년·대)</p> <p>(먼지흡입 제거장비 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.813톤/년·대 PM2.5 0.114톤/년·대</p> <p><small>* 2011년 당시 서울시에서만 운행중인 먼지흡입식 제거장비에 의한 제거량에 근거하여 산정된 것임.</small></p>
--

<표 62> 진공청소차 및 진공살수차 운행에 의한 오염물질 삭감량 산정식

<p>② 진공청소차 및 진공살수차 운행에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)</p> <p>= 운행대수(대) x 단위삭감량(톤/년·대)</p> <p>(진공청소차 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.36톤/년, PM2.5 0.050톤/년·대)</p> <p>(살수청소차 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.25톤/년, PM2.5 0.035톤/년·대)</p>

2.2 저마모 타이어 보급 활성화 사업 비산먼지 산정방법

- 타이어 마모로 인한 도로비산먼지발생을 억제하기 위해 수립된 대책으로, 고무성분을 보강하여 미세먼지 발생률을 기존 타이어 대비 30% 감소하도록 제작된 저마모 타이어의 보급 활성화 하는 사업임.
- 저마모 타이어 보급 활성화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량 식은 아래와 같음.

<표 63> 저마모 타이어 보급 활성화에 의한 삭감식

$\begin{aligned} & \text{저마모 타이어 보급 활성화에 의한 오염물질 삭감량 (톤/년)} \\ & = \text{해당연도 전망배출량(BAU)(톤/년)} \times \\ & \quad \text{저마모 타이어 보급률} \times \text{삭감률} \\ & \quad * \text{PM10 삭감률 : 30\%, PM2.5 삭감률 : 15\%} \\ & \quad (\text{PM2.5 삭감률은 PM10 삭감률의 50\%로 가정}) \end{aligned}$
--

2.3 비산먼지 발생사업장 관리강화 사업 비산먼지 산정방법

- 우리나라의 비산먼지 발생 사업장 중에서 발생량의 80%를 차지하고 있는 건설 사업장의 비산먼지 발생을 억제하고자 함
- 먼지 억제제 살포, 도로먼지 제거차량 운영, 관리 감독 강화 등의 방법을 통하여 비산먼지 발생 억제하고자 함.
- 비산먼지 발생사업장 관리 강화에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량 식은 아래와 같음.

<표 64> 비산먼지 발생사업장 관리강화에 의한 삭감식

$$\begin{aligned} & \text{비산먼지 발생사업장 관리 강화에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)} \\ & = \text{건설현장 비산먼지 발생량(kg/년)} \times \text{저감효율(PM10 10\%)} \times \\ & \quad \text{이행률(20\%)} \times 10^{-3} \end{aligned}$$

10⁻³ = 단위 환산계수, 저감효율 : PM10 10%

2.4 나대지녹색화사업 비산먼지 산정방법

- 녹색성장과 관련된 경제활동(녹색산업설비, 기반시설 설치·공사, 녹색기술·산업의 응용·보급·확산)으로써 나대지에서 발생하는 비산먼지 대기오염 개선을 위한 사업임.
- 나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량 식은 아래와 같음.

<표 65> 나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량

<p>나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량(톤/년) =해당연도 나대지에 의한 배출량(톤/년) x 인조/천연 잔디운동장 설치율 x 삭감율(80%) ※ 설치율은 각 연도마다 다름</p>

제 6 장 수도권 비산먼지 대책별 삭감식 개선방안

1. 1차 비산먼지 삭감식 관련 전문가 설문조사 및 자문회의 결과	105
2. 먼지 제거장비 보급 활성화 비산먼지 삭감식 개선(안)	122
3. 저마모 타이어 보급 활성화 비산먼지 삭감식 개선(안)	141
4. 나대지 녹색화 사업 비산먼지 삭감식 개선 (안)	152
5. 비산먼지 발생사업장 관리 강화 비산먼지 삭 감식 개선(안)	170
6. 기존 삭감식의 개선(안) 및 활용계획	182
7. 요약	186

제 6 장 비산먼지 관리대책별 삭감식 개선방안

1 비산먼지 삭감식 관련 전문가 설문조사 및 자문회의 결과

- 수도권 비산먼지 관리대책별 산정방법에 관한 설문을 통하여 다음과 같이 정리하였음.

비산먼지 삭감량 산정 관련 개선사항 및 자문내용							
1. 먼지 제거장비 보급 확대							
1. 개요							
<ul style="list-style-type: none"> - 도로에서 발생하는 미세먼지를 저감하기 위하여 도로재비산 농도를 측정하여 고농도 지역을 집중관리하고 먼지제거장비 보급 확대 - 도로재비산먼지의 효율적 제거를 위하여 PM2.5 제거가 가능한 먼지흡입식 제거장비를 확대 보급 							
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="2">먼지흡입식 제거장비보급에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>① 먼지흡입식 제거장비 보급에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)</td> <td> $= \text{보급대수(대)} \times \text{단위삭감량(톤/년·대)}$ <p>(먼지흡입 제거장비 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.813톤/년·대 PM2.5 0.114톤/년·대</p> <p>※ 2011년 당시 서울시에서만 운행중인 먼지흡입식 제거장비에 의한 제거량에 근거하여 산정된 것임.</p> </td> </tr> <tr> <td>② 진공청소차 및 진공살수차 운행에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)</td> <td> $= \text{운행대수(대)} \times \text{단위삭감량(톤/년·대)}$ <p>(진공청소차 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.36톤/년, PM2.5 0.050톤/년·대</p> <p>(살수청소차 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.25톤/년, PM2.5 0.035톤/년·대)</p> </td> </tr> </tbody> </table>		먼지흡입식 제거장비보급에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)		① 먼지흡입식 제거장비 보급에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)	$= \text{보급대수(대)} \times \text{단위삭감량(톤/년·대)}$ <p>(먼지흡입 제거장비 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.813톤/년·대 PM2.5 0.114톤/년·대</p> <p>※ 2011년 당시 서울시에서만 운행중인 먼지흡입식 제거장비에 의한 제거량에 근거하여 산정된 것임.</p>	② 진공청소차 및 진공살수차 운행에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)	$= \text{운행대수(대)} \times \text{단위삭감량(톤/년·대)}$ <p>(진공청소차 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.36톤/년, PM2.5 0.050톤/년·대</p> <p>(살수청소차 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.25톤/년, PM2.5 0.035톤/년·대)</p>
먼지흡입식 제거장비보급에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)							
① 먼지흡입식 제거장비 보급에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)	$= \text{보급대수(대)} \times \text{단위삭감량(톤/년·대)}$ <p>(먼지흡입 제거장비 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.813톤/년·대 PM2.5 0.114톤/년·대</p> <p>※ 2011년 당시 서울시에서만 운행중인 먼지흡입식 제거장비에 의한 제거량에 근거하여 산정된 것임.</p>						
② 진공청소차 및 진공살수차 운행에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)	$= \text{운행대수(대)} \times \text{단위삭감량(톤/년·대)}$ <p>(진공청소차 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.36톤/년, PM2.5 0.050톤/년·대</p> <p>(살수청소차 단위삭감량 :</p> <p>PM10 0.25톤/년, PM2.5 0.035톤/년·대)</p>						

자문내용
<ul style="list-style-type: none"> - 먼지흡입식 제거장비 이용에 따른 삭감효율성은 '단위 삭감량' 계수가 매우 중요함. - 2011년 실험치 반영한 계수 적용한 예비적으로 적용 가능하다는 판단함. 다만, 모든 유형의 도로를 대상으로 같은 계수 적용은 바람직하지 못함. 즉 도로별 교통량, 도로 여건 등 다양한 조건을 반영한 '단위 삭감량' 계수 개발이 필요함. - 그 밖에, 도로 먼지제거장비의 연료특성을 감안하여 오염물질 삭감량 수준에 대한 차감(差減)이 필요함. 예를 들어 경유연료 제거장비와 CNG 제거장비 간 삭감량 수준의 차별이 고려될 것이 필요함.

검토대상	개선점										
<p>2. 먼지흡입식 제거장비 보급에 의한 오염물질 삭감량</p> <p>- 먼지흡입식 제거장비 보급에 의한 삭감식은 2011년 이후 사용된 것으로 2차 기본계획에서도 사용됨.</p> <table border="1" data-bbox="268 577 967 689"> <thead> <tr> <th>운행대수(대)</th> <th>운행거리(km)</th> <th>토사 및 먼지 제거량(ton/yr)</th> <th>차량당 제거량(ton/yr·대)</th> <th>차량당 PM₁₀ 제거량(ton/yr·대)¹⁾</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4</td> <td>20,828</td> <td>21.666</td> <td>5.417</td> <td>0.813</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>[자료] 서울시 보도자료(겨울철 서울시내 도로먼지, 먼지흡입 차량이 책임진다) *과거 4대의 먼지 제거량 기준으로 산정한 것임 먼지흡입 제거장비에 의해 제거되는 토사 및 먼지 중 10um 이하의 PM₁₀ 분율을 약 15%라고 가정. 도로 재비산먼지의 PM_{2.5}/PM₁₀ 분율은 0.14</small></p> <p>- 2015년 기준 서울시 도로청소차 보유 현황은 노면청소차량 143대, 고압살수차량 211대, 먼지흡입차량 35대로 조사되고 있음.</p>	운행대수(대)	운행거리(km)	토사 및 먼지 제거량(ton/yr)	차량당 제거량(ton/yr·대)	차량당 PM ₁₀ 제거량(ton/yr·대) ¹⁾	4	20,828	21.666	5.417	0.813	<p>- 최근 관련연구 사례 중 필터 종류에 따른 PM₁₀ 제거효율 {0.931(일반필터), 0.954(특수막필터)}과 PM_{2.5} 제거효율 {0.896(일반필터), 0.943(특수막필터)}을 고려할 필요가 있음.(현재 미적용)</p> <p>- 도로재비산먼지 PM_{2.5} 분율 개선 필요</p> <p>- 현재 보급된 먼지흡입식 차량수가 증가하였으므로 이에 대한 단위삭감량 산정이 필요함.</p>
운행대수(대)	운행거리(km)	토사 및 먼지 제거량(ton/yr)	차량당 제거량(ton/yr·대)	차량당 PM ₁₀ 제거량(ton/yr·대) ¹⁾							
4	20,828	21.666	5.417	0.813							

자문내용

- 초기의 시범적용 차원에서 최근 사례의 적용하되, 삭감방식의 공식화(편람) 위해 '먼지제거장비별 표준적 삭감효율 계수' 제시 필요
- 최근 도로청소 차량의 제거효율에 대한 근거 자료가 있다면 얼마든지 보완 되는 것이 필요하다고 판단됨
- 필터종류에 따른 실험결과를 삭감량에 적용하려면 결과적으로 현재 운영중인 차량에 장착가능하고 유지관리가 되어야 함이 전제가 되어야 하므로 효율 뿐만 아니라 적용이 가능한지 여부에 대한 검토결과가 제시되어야 할 것으로 사료됨
- 우선적으로 현재 자치단체에서 보유·운영 중인 도로청소차 보유 현황과 도로먼지제거장비 종류 간 매칭이 필요함
- 삭감량 산정을 위해 '먼지제거장비별 표준적 삭감효율 계수' 제시 필요
- 단위삭감량은 가동일수 또는 운행거리 형태로 변환하여 적용하는 것이 타당함
- 차량 증가로 단위삭감량 산정을 다시 하는 것은 배출계수 도출 목적에 부합하지 않는 것으로 판단됨.
- 현재의 결과를 활용하여 합리적인 배출계수 추정이 바람직할 것으로 사료됨
- 필터사용시간이나 지역 및 도로여건에 따라 PM2.5 분율은 달라질 것이므로, 이에 대한 기초자료 점검이 필요함
- 청소차량 1대당 운행거리, 좀더 엄밀하게는 청소차량운행거리의 지역적 편차가 적지 않음
- 이에 대해 서울시의 현황자료를 일괄적으로 적용하는 것은 적절하지 않음

검토대상	개선점
<p>3. 진공청소차 제거장비 운행에 의한 오염물질 삭감량</p> <p>- 도로재비산먼지배출량(kg/년) x 진공청소차량 운행도로길이(km) / 해당지자체</p> <p>포장도로길이(km) x 저감효율(PM10 10.5%) (2012년 운행실적을 근거로 산출)</p> <p>- 도로재비산먼지 배출량 산정 개선(배출식변경), 저감효율 재검토</p> <p>10.5~52.7% 중 가장 낮은 값 사용</p> <p>- PM2.5/PM10 분율(도로재비산먼지) : 0.14</p>	<p>- 미세먼지는 계절에 따른 영향이 크기 때문에 이에 대한 검토가 필요함. (국내 관련 연구에 따르면 건기 시 0.866~0.920 효율을 나타낸 사례가 있으며, 우기시 0.222로 낮아짐)</p> <p>-도로재비산먼지 PM2.5 분율 근거 검토 필요</p>

자문내용
<p>-계절별 삭감량 산정의 차별화 위해 우기, 건기 등의 조건을 반영한 삭감공식 제시는 바람직함. 다만, 우기, 건기 구별이 모호해서, '계절별 계수'(가칭)의 평균적용을 통한 삭감량 산정접근을 제안함.</p> <p>-분율 수치는 '정기적 조사를 통해 확인 정보' 공식제시가 필요</p> <p>-건기와 우기 구분은 이에 대한 정의를 명확하게 하고 적용하는 것이 필요</p> <p>- 개선점으로 검토된 결과를 적용하였을때의 삭감량이 타당한지 여부가 검토될 필요</p> <p>- 도로재비산 분율이 삭감후에도 같은 분율로 적용되어 이를 보완할 방안에 대한 조사가 필요할 것으로 보임. 위 결과를 보면 진공살수차와 진공청소차의 PM2.5 제거율이 동일함</p> <p>- 진공청소차량 운행도로길이보다는 실제 진공청소차가 먼지제거장비가 운행된 거리로서, 진공청소차량 청소운행도로길이가 적절한 표현임.</p> <p>- 지역이나 여건별로 silt loading 값이 다를 수 있지만, 이에 대한 고려가 제한적이라는 점도 염두에 두어야 함.</p> <p>- 저감효율의 대표성 검토 필요</p> <p>- 도로의 먼지량, 강수량에 따른 제거량 변동을 고려한 복합계수의 적절성 검토</p>

검토대상	개선점
<p>4. 진공살수청소차 제거장비 운행에 의한 오염물질</p> <p>삭감량</p> <ul style="list-style-type: none"> - 도로재비산먼지배출량(kg/년) x 진공청소차량 운행도로길이(km) / 해당지자체 <li style="padding-left: 20px;">포장도로길이(km) x 저감효율(PM10 38.6%) (2012년 운행실적을 근거로 산출) - 도로재비산먼지 배출량 산정 개선(배출식 변경), 저감효율 재검토 <li style="padding-left: 20px;">38.6~44.7% 중 가장 낮은 값 사용 - PM2.5/PM10 분율(도로재비산먼지) : 0.14 	<ul style="list-style-type: none"> - 미세먼지는 계절에 따른 영향이 크기 때문에 이에 대한 검토가 필요함. (국내 연구에 따르면 건기시 0.430~0.970 효율을 나타낸 사례가 있으며, 우기시 0.611~0.707 효율을 나타냄) - 도로재비산먼지 PM2.5 분율 근거검토 필요

자문내용
<p>- 계절별 삭감량 산정의 차별화 위해 우기, 건기 등의 조건을 반영한 삭감공식 제시는 바람직함. 다만, 우기, 건기 구별이 모호해서, '계절별 계수'(가칭)의 평균적용을 통한 삭감량 산정접근을 제안함.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 분율 수치는 '정기적 조사를 통해 확인 정보' 공식제시가 필요 - 도로재비산먼지 PM2.5 분율은 국내 조사자료를 제시할 수 없으면 국외자료라도 사용할 수 밖에 없다고 생각함 - 진공청소차량 운행도로길이보다는 실제 진공청소차가 먼지제거장비가 운행된 거리로서, 진공청소차량 청소운행도로길이가 적절한 표현임. - 지역이나 여건별로 silt loading 값이 다를 수 있지만, 이에 대한 고려가 제한적이라는 점도 염두에 두어야 함. - 저감효율의 대표성 검토가 필요함. - 도로의 먼지량, 강수량에 따른 제거량 변동을 고려한 복합계수의 적절성 검토

검토대상	개선점
<p>5. CAPSS 포장도로 비산먼지 배출량 산정식</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p align="center">※ 기본계획 수립시 사용한 배출량 포장도로 비산먼지 산정식</p> <p align="center">E= VKT × EF/1000</p> <p>E : 배출량(kg/yr), VKT:주행거리(km/yr), EF:먼지배출계수(g/km), 1000:단위 환산계수</p> <p align="center">EF = k × (sL/2)^{0.65} × (W/3)^{1.5} × (1-P/(4×365))</p> <p>EF* = k(sL)^{0.91} × (W)^{1.02} EF : 먼지배출계수(g/km), EF* : PM2.5 배출계수(g/km) k : 보정계수. TSP :24g/km, PM10 : 4.6g/km, PM2.5 : 0.15g/km sL:도로표면 silt 부하량(g/m²), W : 평균차중(ton), P : 강우일수</p> <p align="center">EPA AP-42 (1995년도 식 사용)</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p align="center">※ US EPA AP-42 2011년 포장도로 비산먼지 배출량 산정식</p> <p>EPA AP-42, CARB 포장도로 비산먼지 산정식(최근 식)</p> <p align="center">E= k(sL)^{0.91} × (W)^{1.02}</p> <p>E : particulate emission factor</p> <p>K : particle size multiplier for particle size range and units of interest</p> <p>sL : road surface silt loading (g/m²)</p> <p>W: average weight(tons) of the vehicles traveling the road</p> <p align="center">입자 크기별 k 값 :</p> <p align="center">PM10 0.62 g/VKT, PM2.5 0.15 g/VKT PM15 0.77 g/VKT, PM30 3.23 g/VKT</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p align="center">※ PM2.5 분율</p> <ul style="list-style-type: none"> - PM10 × 0.14 (기본계획시 PM2.5 분율) - PM10 × 0.15 (CARB(2016), 국내 국립환경과학원(2015) 출처:AP-42 (2006)) - PM10 × 0.25 (EPA AP-42 2011) </div>	<ul style="list-style-type: none"> - 국내 포장도로 재비산먼지 배출량 산정방법은 TSP와 PM10의 경우 EPA AP-42 1995년 식을 이용하여 산정. - EPA에서는 PM10의 경우 기존배출량보다 7배 높은 값을 보여 지수등을 변경하여, silt loading 영향이 증가하고, 평균 차중의 영향이 낮게 배출량 산정식이 변경되었으므로 이에 대한 검토가 필요함. - EPA AP-42에서는 강우에 대한 산출방법도 아래의 식으로 변경되어 이에 대한 검토가 필요함. <p align="center">AP-42 산정식(강우시)</p> <p align="center">$E_{ext} = E \times (1-P/4N)$</p> <p>N : 평균한 기간의 일수 P : 평균한 기간의 강우 일수 - 국내 실정에 맞는 PM2.5 분율에 대한 검토가 필요함. - 국내 실정에 맞는 입자 크기별 k값 적용이 필요함. </p>

자문내용

- 현재 CAPSS의 도로 비산먼지 배출량 산정의 경우 U.S. EPA AP-42, CARB 최근 산정방법을 적용함,
- 한국환경산업기술원(2014)연구에서 '도로별 평균 차속을 적용한 보정계수를 이용한 배출량 산정방법 제시' 산정방법 적용 검토를 제안함.
- 분율 수치는 '정기적 조사를 통해 확인 정보' 공식제시가 필요함.
- CAPSS 배출량의 경우 미국 EPA 2011년 산출식에 대한 지적이 이미 여러 차례 있어서 이를 반영하고 있는 것으로 알고 있음.
- 국내 실정에 맞는 PM2.5 분율의 필요성을 알고 있으나 현재 국내 사례에 대한 조사자료가 부족하므로 EPA 자료를 사용하고 있음.
- 현재 포장도로 비산먼지는 최근 도로 종류별 silt loading 값을 제대로 update 못하여 실제 특성을 반영하지 못하는 것이 문제임.
- 비포장도로에서 발생하는 비산먼지 배출량도 활동도에 비하여 배출량이 작지 않을 것으로 예상됨.
- 인하대 전기준 교수 연구팀이 수행한 silt loading 측정치를 검토하여 수정적용 가능성을 검토하는 것이 필요할 것으로 사료됨.

2. 나대지 녹색화 사업

검토대상	개선점				
<p>1. 개요</p> <p>- 녹색성장과 관련된 경제활동(녹색산업설비, 기반시설 설치·공사, 녹색기술·산업의 응용·보급·확산)으로써 나대지에서 발생하는 비산먼지 대기오염 개선.</p> <table border="1" data-bbox="268 640 962 931"> <thead> <tr> <th>기본계획 삭감식</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <p>나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량(톤/년)</p> <p>= 해당연도 나대지에 의한 배출량(톤/년) x 인조/천연 잔디운동장 설치율 x 삭감율(80%)</p> <p>※ 설치율은 각 연도마다 다름</p> </td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" data-bbox="268 931 962 1357"> <thead> <tr> <th>CAPSS 배출량 선정식</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> $E = \sum A \times EF / 1000$ <p>E : 나대지 배출량(kg/yr)</p> <p>$\sum A$: 나대지 면적(m²)</p> <p>EF : 배출계수(g/m²/yr)</p> <p>1000 : 단위 환산계수</p> <p>※ 나대지에 의한 배출량(kg/yr) = 학교 운동장 나대지 면적(m²) x 배출계수(g/m²/yr) x 풍속 적용일수 x 10⁻⁶</p> </td> </tr> </tbody> </table>	기본계획 삭감식	<p>나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량(톤/년)</p> <p>= 해당연도 나대지에 의한 배출량(톤/년) x 인조/천연 잔디운동장 설치율 x 삭감율(80%)</p> <p>※ 설치율은 각 연도마다 다름</p>	CAPSS 배출량 선정식	$E = \sum A \times EF / 1000$ <p>E : 나대지 배출량(kg/yr)</p> <p>$\sum A$: 나대지 면적(m²)</p> <p>EF : 배출계수(g/m²/yr)</p> <p>1000 : 단위 환산계수</p> <p>※ 나대지에 의한 배출량(kg/yr) = 학교 운동장 나대지 면적(m²) x 배출계수(g/m²/yr) x 풍속 적용일수 x 10⁻⁶</p>	<p>㉠ 국내 나대지 현황 자료 구축</p> <p>- 단일한 임계마찰속도로 적용하고 있어, 항공/위성 사진을 이용한 나대지 검색/추출 기법 등을 이용하여 나대지 현황 자료 구축이 필요함.</p> <p>㉡ 국내 나대지의 분류 및 기상인자</p> <p>- 강우를 고려하지 못한 비산먼지 배출량을 산정하고 있으며, 국내 토질특성 및 여러 인자를 고려하지 못하고 있는 실정이기 때문에, 학교운동장과 그 외의 나대지도 분류하여 토질특성 및 함수율 등의 기상인자를 조사가 필요함.(천연/인조 잔디도 따로 고려필요)</p> <p>㉢ 국내 나대지 풍속 반영</p> <p>배출계수의 불확도 및 측정장비.</p> <p>- 나대지(운동장)의 잔디에 의한 삭감률(80%)라고 가정하고 있으며, 입경보정계수 PM2.5/PM10비 : 0.15 가정. PM10/T S P비 : 0.5 가정하고 있음.</p> <p>- 배출계수의 주요 산정인자인 임계마찰속도와 표면 거칠기 높이를 휴대용 소형 풍속장치를 이용한 실측값과 다양한 조건의 나대지의 실험결과 값 도출 필요.</p>
기본계획 삭감식					
<p>나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량(톤/년)</p> <p>= 해당연도 나대지에 의한 배출량(톤/년) x 인조/천연 잔디운동장 설치율 x 삭감율(80%)</p> <p>※ 설치율은 각 연도마다 다름</p>					
CAPSS 배출량 선정식					
$E = \sum A \times EF / 1000$ <p>E : 나대지 배출량(kg/yr)</p> <p>$\sum A$: 나대지 면적(m²)</p> <p>EF : 배출계수(g/m²/yr)</p> <p>1000 : 단위 환산계수</p> <p>※ 나대지에 의한 배출량(kg/yr) = 학교 운동장 나대지 면적(m²) x 배출계수(g/m²/yr) x 풍속 적용일수 x 10⁻⁶</p>					

자문내용

-나대지 항공/위성사진 등을 이용한 '나대지 현황 파악'은 시간, 비용 대비 배출량 산정 이점(利點)은 다소 불리함.

-현재 서울시, 환경부 등에서 '비오톱' 지도자료와 필지 과세(課稅)를 이용하면, 실제 나대지 현황 파악 가능함.

-나대지 대상 배출량 산정방식에서 '강우일수'을 고려한 방식으로의 전환 검토 필요함, 다만, 기상인자를 구체적으로 적용하기에는 한계가 있으므로, '계절별 계수'(가칭)의 평균적용을 통한 배출량 산정접근을 제안함.

-다양한 조건의 나대지 대상 배출계수 개발은 필요성인 인정하나, 점진적인 접근을 제안함.

-나대지 비산먼지의 경우 불확실성은 기존 산출식의 문제 보다는 이를 적용하기 위한 국내 나대지의 현황, 토질, 임계마찰속도 자료 등을 확보하는데 한계가 있기 때문임.

-국내특성 조사 자료를 제시하면 이를 적용하고 제시할 수 없으면 기존 식을 적용할 수밖에 없는 것이 현실임.

-개선향목에 대한 다양한 인자를 제시하고 있는데 실제 도출 가능한 매개변수를 이용하여 배출량 산정식을 재구성해보는 방안이 고려될 수 있으리라 사료됨. 그리고 제시된 개선점에서 기상자료의 경우 현재 도출 가능한 영역과 향후 도출하여야 하는 항목으로 구분해서 개선(안)의 구현가능성을 검토해보는 것이 적절할 것으로 판단됨.

- 나대지 중 학교운동장 나대지에 한정하여 배출량을 산정하고 있는 한계 외에도, 학교운동장 나대지의 인조/천연 잔디운동장 설치에 따른 삭감율을 일괄적으로 80%를 적용한 점은 적정하지 않음.

- 비산억제제 활용에 따른 비산율 변동이라든가 포장여부 외에도 학교운동장의 활용정도에 따른 풍속에 따른 비산가능성이 상이할 수 있는데 이에 대한 고려가 미흡함.

- 나대지 배출량 대비 녹화시 삭감율 가정은 현장을 반영한 자료라고 보기 어려움 나대지의 배출계수가 유형별로 적절한 지 검토 필요함.

- 녹화사업 시행 후 비산 배출량은 없는 것으로 가정하는 것이 타당할 것으로 판단됨.

- 나대지의 녹화사업 현황을 정확하게 반영하는 방법도 제시함.

검토대상	개선점																								
배출계수 선정식																									
$EF = k \times [58 \times (u^* - ut^*)^2 + 25 \times (u^* - ut^*)]$ $u^* = 0.053 \times u_{10}^+$ $ut^* = A \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g d}$ <p> ρ_p : 입자밀도(kg/m³) d : 입자직경(m) ρ_a : 공기밀도(kg/m³) g : 중력가속도(m/s²) k : 입경보정계수 u* : 표면마찰속도(m/s) ut* : 표면임계마찰속도(m/s) A : 실험상수(0.1) u₁₀⁺ : 높이10m인 기상대에서의 순간최대 풍속(m/s) </p> <p>- 입자 크기에 따른 임계마찰속도</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>체개구(mm)</th> <th>midpoint(mm)</th> <th>ut*(m/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>1.5</td> <td>0.76</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.5</td> <td>0.75</td> <td>0.58</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.25</td> <td>0.375</td> <td>0.43</td> </tr> </tbody> </table>		체개구(mm)	midpoint(mm)	ut*(m/s)	1	4			2	2	3	1	3	1	1.5	0.76	4	0.5	0.75	0.58	5	0.25	0.375	0.43	<p>- 나대지 풍속에 의한 비산먼지 배출량은 현재 CAPSS 배출량보다 낮게 산정되기 때문에 이에 대한 검토가 필요함. (국내 연구에 따르면 학교운동장에 대해서 평균 임계마찰속도는 0.68 m/s로 나타났으며, 현재 CAP SS에서 적용하는 0.58 m/s 보다는 약 0.1 m/s가 높게 나타났음.)</p>
	체개구(mm)	midpoint(mm)	ut*(m/s)																						
1	4																								
2	2	3	1																						
3	1	1.5	0.76																						
4	0.5	0.75	0.58																						
5	0.25	0.375	0.43																						
표면 마찰속도 선정식(인하대)																									
$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (z > z_0)$ <p> u = z 높이에서의 풍속(cm/s) u* = 표면마찰속도(cm/s) z = 지표면 위의 높이(cm) z₀ = 거칠기 높이(cm) k = 카르만 상수 </p>																									

자문내용
<p>- 다양한 조건의 나대지 대상 배출계수 개발은 필요성인 인정하나, 점진적인 접근을 제안함.</p> <p>- 배출계수에 해당하는 나대지 풍속에 의한 배출량보다는, 활동도에 해당하는 나대지의 비포장면적과 변동면적에 대한 현황자료를 현실화하는 방안이 더욱 중요함.</p> <p>- 표면 마찰속도 산정식 변경으로 나대지 배출량 재산정 결과가 어느 정도 변화하는지 검토해보는 것이 필요할 것으로 판단됨.</p>

3. 비산먼지 발생 사업장 관리 강화

1. 개요

- 우리나라의 비산먼지 발생 사업장 중에서 발생량의 80%를 차지하고 있는 건설 사업장의 비산먼지 발생을 억제
- 먼지 억제제 살포, 도로먼지 제거차량 운영, 관리 감독 강화 등의 방법을 통하여 비산먼지 발생 억제

자문내용

-건설 사업장 대상의 비산먼지 발생 억제 필요성에 대한 동의함.

검토대상	개선점
<p>2. 비산먼지 발생 사업장 기본계획 삭감식</p> <ul style="list-style-type: none"> - 비산먼지 발생사업장 관리 강화에 의한 오염물질 삭감량(톤/년) $= \text{건설현장 비산먼지 발생량(kg/년)} \times \text{저감효율(PM10 10\%)} \times \text{이행률(20\%)} \times 10^{-3}$ <p>10^{-3} = 단위 환산계수</p> <p>저감효율 : PM10 10%</p> <p>※참고자료 : MRI(2001), Particulate Emission Measurements from Controlled Construction Activities.</p> <ul style="list-style-type: none"> - PM2.5/PM10 비율 : 0.1 	<ul style="list-style-type: none"> - PM10 저감 효율의 경우 살수 시간 간격에 따라 달라지는데 14시간 간격일 때 10%, 4시간 간격일 때 36%, 2.1시간 간격일 때 74%이므로 이를 고려하여 저감 효율을 적용할 필요가 있음. - 현재 사용중인 저감 효율은 살수에 의한 비산먼지 억제 효율만 적용되고 있으므로 개요에서 설명하고 있는 먼지 억제제 살포, 도로먼지 제거차량 운영, 관리 감독 강화 등 방법을 고려한 저감효율 개선이 필요함. - 정확한 이행율의 산정이 필요함. - PM2.5 분율에 대한 검토가 필요함.

자문내용

- 살수 시간 간격에 따라 PM10 저감효율이 다르게 나타나므로, 시간 간격을 고려한 '비산먼지 배출 억제 지침' 제시, 이에 따른 삭감식 적용이 바람직함.
- 다양한 비산먼지 억제 효율 판단을 위한 충분한 수단별 저감 효율 개선이 필요하다는데 동의함.
- 새로운 근거자료나 국내 실측 자료를 확보할 수 있으면 삭감식은 얼마든지 개선하는 것이 가능하다고 판단됨.
- 저감효율과 이행율을 기준으로 산정하는 건설현장 비산먼지 발생량 추정방식 보다 조금 더 과학적 기반에 근거한 발생량 산정방식을 검토해보는 것이 바람직할 것으로 사료됨.
- 저감효율, 이행율 자료의 근거와 적정성 검토 필요
- 비산먼지 발생사업장에서의 비산먼지 배출량 산정과정의 한계를 극복하는 것이 더 중요함.
- 배출량 산정의 합리성이 전제되어야 개별 저감노력에 의한 저감율을 다각적으로 검토하는 것이 유의미할 것임.

검토대상	개선점
<p>3. 건설공사 비산먼지 배출식</p> <p>- 건설공사 배출량(kg/년) = 연간 공사면적(m²) x 토공기간(7개월/년) x 배출계수 (kg/m²/월) *참고자료 : 토공기간은 LH에서 산정한 표준공사기간(일반 건축 공사의 5층 이하)중 아파트용 표준 공사기간 산정 자료를 이용하여 3층 건물의 공사기간 7개월을 적용</p> <p>- PM10 배출 계수(kg/m²/월) :</p> <p style="padding-left: 40px;">단독주택 = 0.0504 공동주택 = 0.1729 비주거시설 = 0.2982 도로건설 = 0.6587</p> <p>*참고자료 : 국립환경과학원(2008), 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산 먼지 실시간 측정방법 개발.</p> <p style="text-align: center;">*EPA AP-42 (EEA) 배출식</p> <p>-EM_{PM10} = EF_{PM10} x A_{affected} x d x (1-CE) x (24/PE) x (s/9%)</p> <p>Where :</p> <p style="padding-left: 20px;">EM_{PM10} = PM10 emission (kg PM10) EF_{PM10} = the emission factor for this pollutant emission(kg /[m² x year]) A_{affected} = area affected by construction activity (m²) d = duration of construction (year) CE = efficiency of emission control measures (-) PE = Thornthwaite precipitation-evaporation index (-) s = soil silt content (%)</p> <p>* 9% : The average silt content for California/Las Vegas (EPA's measurements)</p> <p>PM2.5/PM10 분율 = 0.1 PM10/TSP 분율 = 0.3</p>	<p>- 현재 배출식에서 배출계수와 달리 토공기간은 모두 7개월로 계산하고 있으나, 정확한 비산먼지 발생량을 알기 위해서 건물의 종류별로 토공기간을 세분화하여 계산할 필요가 있음.</p> <p>- EPA의 경우 배출식에서 강우와 토지별 silt 량에 대한 보정계수를 식에 포함하고 있으나 우리나라의 배출식의 경우 이런 세부적인 조정이 되어 있지 않으므로 배출식의 검토가 필요함.</p> <p>- PM2.5 분율에 대한 검토가 필요함.</p>

자문내용
<p>-건물 종류별 토공기간을 세분화하여 계산할 필요가 있다는 것에 공감함. 다만, 배출량과 예상 배출량 등을 위한 '세분화' 범위 파악이 선행될 필요가 있음.</p> <p>-분율 수치는 '정기적 조사를 통해 확인 정보' 공식제시가 필요</p> <p>-새로운 근거자료나 국내 실측 자료를 확보할 수 있으면 삭감식은 얼마든지 개선하는 것이 가능하다고 판단됨.</p> <p>- 건설현장의 비산먼지 발생량을 주로 주거시설에 한정하여 평가하고 있는데 실제 발전시설이나 대형 토목공사와 같은 부분에서 배출되는 배출량에 대한 검토가 필요할 것으로 사료됨</p> <p>- 실질적인 공사자료의 확보 가능성을 검토하여야 수정안을 적용할 수 있을 것으로 판단됨.</p>

4. 저마모 타이어 보급사업 활성화

1. 개요

- 타이어 마모로 인한 도로비산먼지발생을 억제하기 위해 수립된 대책
- 고무성분을 보강하여 미세먼지 발생률을 기존 타이어 대비 30% 감소하도록 제작된 저마모 타이어의 보급 활성화

저마모 타이어 보급 활성화에 의한 배출 삭감량 산정식

$$\begin{aligned} & \circ \text{저마모 타이어 보급 활성화에 의한 오염물질 삭감량 (톤/년)} \\ & = \text{해당연도 전망배출량(BAU)(톤/년)} \times \\ & \quad \text{저마모 타이어 보급률} \times \text{삭감률} \\ & * \text{PM10 삭감률 : 30\%, PM2.5 삭감률 : 15\%} \\ & \quad (\text{PM2.5 삭감률은 PM10 삭감률의 50\%로 가정}) \end{aligned}$$

자문내용

- DPF의 내구년도처럼 저마모 타이어 장착에 따른 배출량 삭감이 가능한 산정방법이 필요
- 새로운 근거자료나 국내 실측 자료를 확보할 수 있으면 삭감식은 얼마든지 개선하는 것이 가능하다고 판단됨.
- 전망배출량을 기반으로 하는 삭감량과 함께 실질적인 배출량 산정방안에 대한 검토도 같이 수행되면 좋을 것이라 사료됨
- 전망배출량 대기 삭감율의 적용은 실측 연구가 없어서 적용한 방법임
- 타이어 마모 실측연구 결과에 근거한 삭감율을 적용할 필요가 있음

검토대상	개선점
<p>2. 저마모 타이어에 의한 삭감률</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기본계획에서는 미세먼지 발생률이 기존 타이어 대비 30% 감소하도록 제작된 저마모 타이어의 보급 활성화를 목표로 함 - 그러나 이 수치에는 명확한 근거가 없으며 시판되고 있는 친환경 타이어 중에도 미세먼지 저감에 대한 언급은 거의 없음 	<ul style="list-style-type: none"> - 저마모 타이어의 미세먼지 발생률에 대한 근거 필요요함 - PM10에 대한 PM2.5 삭감률 분을 검토 필요함,

자문내용
<ul style="list-style-type: none"> -저마모 타이어의 미세먼지 저감 비율에 대한 근거 필요함에 공감하며, 실험치 자료의 누적 필요 -저감효율 30% 수치의 과학적 증빙 필요 - 개선점 제시에 동의하며, 이를 위한 기초연구가 필요하거나 저마모 타이어 제조업체에서 이에 대한 자료제공의무를 갖도록 조치할 필요가 있음. - 인하대 전기준 교수가 수행한 저마모 타이어 발생량 산정연구를 참조하면 도움이 될 것이라 판단됨.

<p>3. 해당연도 전망배출량(BAU)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 현재는 교통안전공단에서 작성한 2006년에서 2010년까지의 자동차 주행거리 실태 분석보고서를 분석하여 2024년까지의 타이어 및 브레이크패드 마모물질 - 전망 배출량을 전망 예측한 자료를 사용 - 배출량 전망 예측 시 배출량 산정은 유럽의 배출계수를 이용하여 산정 <p>※ 연평균 증가율 : $[(\frac{b}{a})^{\frac{1}{n}} - 1] \times 100$</p> <p>(b : 당해연도 값, a : 기준년도 값, n : 당해연도-기준년도)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 타이어 마모 배출량 산정시 2011년 기준으로 차량 등록대수에 연평균 증가율을 적용하여 EU 배출계수식을 이용하여 산정하였기 때문에, 이에 대한 최신화가 필요
---	--

자문내용
<ul style="list-style-type: none"> - 2006년에서 2010년까지의 자료는 다소 오래되었기 때문에 최신 자료로의 갱신 필요함.

검토대상	개선점
<p style="text-align: center;">EEA Emission Factor</p> <p style="text-align: center;">1.A.3.b.vi-vii Road tyre and brake wear</p> $TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{i,j}$ <p style="text-align: center;">TE : 총 배출량 [g]</p> <p style="text-align: center;">N_j : 카테고리 j 내의 차량의 수</p> <p style="text-align: center;">M_j : 카테고리 j 내의 차량 당 평균 주행거리 [km]</p> <p style="text-align: center;">$EF_{i,j}$: 오염물질 i 및 차량 카테고리 j에 대한 배출계수 [g/km]</p>	

자문내용
<ul style="list-style-type: none"> - 이번 연구 과제를 통하여 비산먼지 산정에 대한 개선된 산출식과 활동도 자료 제시를 기대함 - 위의 산정식은 전망배출량을 기준한 삭감량 산정으로 판단됨. 저마모 타이어 장착에 따른 배출량을 산정하는 접근법에 대한 검토가 필요함. - 타이어 및 브레이크 패드 제작사가 각 제품별 마모계수를 제출하여 이를 객관적으로 검증하는 절차를 마련할 필요가 있음. - 이를 통해 타이어와 브레이크 패드 판매 및 교체, 폐기 등의 활동도 자료와 연계하여 먼지 발생 저감효과를 확인할 수 있는 근거를 마련하기 바람.

- 수도권 비산먼지 관리대책별 산정방법 개선에 관한 자문회의를 통하여 아래와 같은 결과를 얻음.

자문회의내용

일시 : 2017.09.26

장소 : 용산역 ITX 특실

참석인원 : 장영기 교수, 김운수 박사, 김동영 연구원 및 연구진

1) 포장도로 재비산먼지

- 현재 CAPSS에서 과대평가 가능
- Silt Loading은 도로종류보다는 지역의 함수일 가능성이 크므로 고려가능한지 검토
- TSP/PM10/PM2.5 분율 검토
- 포장도로 재비산먼지 발생량 보정 관련 강우일수 경우 변수 고려 검토 필요
- Silt Loading(g/m2)의 도로 유형별 차이 재검토
- 배출량 산정편람 대비 저감개선(안) 제시필요
- 도로청소 차종별 단위저감량 자료 구분하여 적용이 필요
- 우기를 별도로 구분할 필요는 없음

2) 나대지

- 학교운동장만 고려하는 방식은 과소 평가 불가피함
- 실질적 나대지 면적을 어떻게 반영하는냐가 관건
- 나대지 면적 파악(현황)이 배출량/삭감량 산정 이전 일차적으로 통계자료 구축 필요
- 나대지 면적의 정확도, 계절변동 등 중요할 것

3) 건설 활동

- 제어효율에서 TSP/PM10/PM2.5 분율 검토
- 나대지 상태의 비산먼지 발생 고려방안
- 건설 활동에 따른 비산먼지 발생사업장의 삭감량에서 이행율(20%)제시의 타당성 검토 필요
- 이행률의 근거를 명확하게 하는 것이 필요

4) 타이어마모

- 기본적으로 타이어 마모 비산먼지 배출량 삭감산정식과 연계가 필요
- 차종에 대한 고려가 중요(실제 적용하고 있는 차종은 승용차만 적용)

2. 먼지 제거장비 보급 활성화 삭감식 개선(안)

2.1 현황 및 문제점 분석

가. 현황

- 서울시 비산먼지 배출량(2013년)에 따르면 도로 재비산먼지 중 PM10 2,403,949kg/년으로 39.4%, PM2.5 581,601kg/년으로 56.7%로 배출량을 추정하고 있음.

<표 66> 서울시 비산먼지 배출량 (2013년)◆

(단위 : kg/년)

구 분	CAPSS	
	PM10	PM2.5
도로재비산먼지	2,403,949	581,601
타이어마모	-	-
브레이크마모	-	-
건설공사	2,160,917	216,092
나대지	1,486,846	223,027
하역 및 야적	0.21	0.02
농업활동	3,951	790
축산활동	136	82
폐기물처리	37,508	3,751
비포장 도로 비산먼지	-	-
합 계	6,093,307	1,025,342

출처 : 서울시(2016), 초미세먼지(PM2.5)배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구

- 실제 배출량 측면에서 비산먼지 중 가장 큰 부분을 차지하는 포장도로에서 발생하는 도로 재비산먼지의 발생량 산정방법은 미국 EPA AP-42산정식을 이용하여 산정하는데, 비산먼지 문제가 심각한 미국 서부 건조 지역에서 현장 실험을 통해 개발된 산정식으로 국내적용시 불확실성을 내포하고 있음.

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

나. 문제점 분석

- 실제 배출량 측면에서 비산먼지 중 가장 큰 부분을 차지하는 포장도로에서 발생하는 도로 재비산먼지의 발생량 산정방법은 미국 EPA AP-42산정식을 이용하여 산정하는데, 비산먼지 문제가 심각한 미국 서부 건조 지역에서 현장 실험을 통해 개발된 산정식으로 국내적용시 불확실성을 내포하고 있음.
- CAPSS에서 포장도로 재비산먼지 산정식은 US-EPA의 산정식을 활용하여 산정하고 있기 때문에 국내 실정에 맞는 보정계수가 필요함.
- 특광역시 및 일반시도를 고려한 silt loading 보정계수가 필요함.
- 먼지흡입식 차량의 작업거리 당 저감량을 파악하여, 청소차량에 운행실적에 따른 평가가 필요함.
- 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 수립당시 분진흡입식 제거장비 단위삭감량 산정이 silt loading 기반으로 산정하였기 때문에 살수차량 및 노면청소차량의 먼지제거량이 과대평가 될 소지가 있음.
- 먼지흡입식 제거장비 이용에 따른 삭감효율성은 ‘단위 삭감량’ 계수가 매우 중하기 때문에 2011년 실험치 반영한 계수 적용한 예비적으로 적용 가능하지만, 모든 유형의 도로를 대상으로 같은 계수 적용은 바람직하지 못하기 때문에, 도로별 교통량, 도로 여건 등 다양한 조건을 반영한 ‘단위 삭감량’ 계수 개발이 필요함.
- 최근 관련연구 사례 중 필터종류에 따른 PM10 제거효율 {0.931(일반필터), 0.954(특수막필터)}과 PM2.5 제거효율 {0.896(일반필터), 0.943(특수막필터)}을 고려할 필요가 있음.(현재 미적용)
- 도로 먼지제거장비의 연료특성을 감안하여 오염물질 삭감량 수준에 대한 차감(差減)이 필요함. 예를 들어 경유연료 제거장비와 CNG 제거장비 간 삭감량 수준의 차별에 대한 고려가 필요함.

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

- 초기의 시범적용 차원에서 최근 사례의 적용하되, 삭감방식의 공식화(편람) 위해 ‘먼지제거장비별 표준적 삭감효율 계수’ 제시가 필요함.
- 우선적으로 현재 자치단체에서 보유·운영 중인 도로청소차 보유 현황과 도로먼지제거장비 종류 간 매칭이 필요함.
- 삭감량 산정을 위해 ‘먼지제거장비별 표준적 삭감효율 계수’ 제시 필요함.
- 계절별 삭감량 산정의 차별화 위해 우기, 건기 등의 조건을 반영한 삭감공식 제시는 바람직함. 다만, 우기, 건기 구별이 모호해서, ‘계절별 계수’(가칭)의 평균 적용을 통한 삭감량 산정접근이 필요함.
- 산정되고 있는 포장도로 재비산먼지의 입경별 보정계수가 미국 현황에 맞게 설정되어 있기 때문에 한국환경산업기술원(2014)연구에서 ‘도로별 평균 차속을 적용한 보정계수를 이용한 배출량 산정방법 제시’ 국내실정에 맞게 산정시 개선이 필요함.

2.2 개선방안 수립을 위한 분석

가. 선행연구 결과

- Ellis와 Revitt(1982)은 도로청소(Street Sweeping)는 특히 250 μm 이상의 고형물 입자와 이와 결합된 금속물질을 제거하는 데 효과적이지만, 작은 입자에 좀 더 큰 친화도(Affinity)를 갖는 금속물질 제거에는 큰 효과가 없을 것이라고 함.
- Duncan 등(1985)은 포장도로에서 발생하는 먼지 배출량은 도로청소에 의해 관리될 수 있으며, 전형적인 기계식 블룸 청소차는 도로 고형물의 20 %를 제거하고, 진공청소차는 70 %, ISS(Improved Street Sweeper)는 약 80 %를 제거한다고 함.
- Cowherd(1988)은 강력한(Vigorous) 도로청소 프로그램이 수행되었을 때, 포장도로에서 PM10 배출량은 약 33~37 % 정도 저감될 수 있다고 함.
- Chow 등(1990)은 대기 중 입자상 물질 농도에 미치는 도로청소(Regenerative-air Vacuum Street Sweeping)의 효과에 대한 평가를 목적으로 도로를 청소한 기간과 도로를 청소하지 않은 기간 동안의 PM10 농도에 대한 배출원 기여도의 차이를 조사하였으며, 수용모델과 통계분석을 사용하여 분석함. 연구 결과 도로청소 전후의 PM10에 지각물질의 기여도의 차이는 거의 없는 것으로 조사됨. 따라서 도로청소는 PM10 배출량 저감정책은 전적으로 비효과적이며, 청소효과 평가에 앞서 청소차 자체의 효율에 대한 철저한 검증부터 시작해야 한다고 주장함.
- Fitz(1998)는 PM10 배출량 관리를 위한 도로청소의 효과를 평가함. 평가방법으로는 upwind-downwind PM10 측정방법과 Silt Loading 측정방법을 사용하였는데, 도로청소는 특히 교통량이 많은 도로에서 비용효과적인 먼지 관리 방법이 될 수 있다고 주장함. 또한 도로청소에 의해 포장도로의 입자상 물질 배출량을 관리하기 위해 입자상 물질의 농도 저감에 효과적인 청소프로그램(Good Sweeping Program)을 만드는 것이 필요하다고 주장함.

- Bris 등(1999)은 프랑스 파리 시에서 실시하는 살수도로청소(Water Jet Street Cleaning Procedure) 전과 후의 입자상 물질의 도로 표면부하를 비교한 실험을 수행함. 실험결과 고형물에 대한 살수 청소의 효과는 20~65 %로 경우에 따라 크게 달라지는데, 더 큰 입자에 대해서는 효과가 좀 더 높은 것으로 나타남.
- Fitz and Bumiller(2000)는 도로청소차량에서 발생하는(재비산 또는 배출) PM10 배출량의 측정하기 위해 인공텐트를 적용한 시험방법을 사용하였으며, 이러한 장치로부터 비산먼지 배출량을 측정하는데 유용하다고 주장함. 이러한 실험결과를 토대로 SCAQMD에서는 이를 보완하여 PM10 Efficient Street Sweeper에 대한 성능 시험 프로토콜을 작성함. 실험에서 공기재생식 청소차 4대와 기계식 청소차 1대를 대상으로 청소차의 도로먼지 제거효율과 청소차에서의 PM10 배출량(도로재비산 먼지와 배출가스에 포함된 먼지를 합한 것)을 측정하여 비교·연구한 결과 대부분의 청소차는 한 번 운행에 질량을 기준으로 97 % 이상의 도로먼지 제거효율을 보임.
- Gromaire 등(2000)은 매일 물청소에 의해 도로표면에서 감소되는 오염물 부하량은 한번의 많은 강우에 의해 감소되는 것과 유사하다고 주장함. 강우 시 빗물에 의한 도로청소는 우선적으로(Preferentially) 도로 상의 부유할 수 있는 고형물과 유기물질을 씻어낸다고 함.
- Kuhns 등(2001)은 TRAKER는 도로청소와 같은 도로먼지 배출량 관리정책의 효과를 빠르고 정확하게 측정하는데 적용될 수 있다고 함. 실험을 통해 도로위의 부유할 수 있는 물질들의 분포가 크게 변화하며, 청소과정에 의해 영향을 받는다는 것을 보여줌.
- Vaze and Chiew(2003)는 도로청소 후에 도로먼지는 좀더 작은 입자의 구성비가 높아짐. 도로청소는 미세입자의 일부만을 제거하고 날리기 때문에 오염물질 청소(Pollutant Washoff)는 오히려 반대의 영향을 가질 수 있음. 따라서 처리장비(Treatment Facility)는 10~50 μm 이하의 미세한 입자를 제거할 수 있어야 청소효과가 있다고 함.
- Etymezian 등(2003)은 기계적 또는 진공청소차를 이용한 도로청소에서 PM10 배출포텐셜(Emission Potential, g/km/(m/s))의 감소는 측정을 통해서 확인되지

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

않았다고 보고함. 도로청소가 TSP 또는 PM10이 될 수 있는 입자들을 제거할 수 있다면, 장기적인 대기질 관리 효과에 클 것으로 주장함.

- Sutherland(2003)는 도로청소는 알갱이 크기의 침전물 제거와 관련해 효과가 있다고 함. 도로청소는 이러한 알갱이 크기의 침전물을 제거하는 목적으로 수행 될 수 있음.
- Chang 등(2005)은 타이완에서 풍속, 교통량, 먼지부하량에 따른 진공청소와 살수청소를 병행하였을 경우의 도로청소효율에 관한 연구를 수행함. Upwind-downwind Method로 TSP에 대한 저감효과를 확인하고, 재래식 Silt Loading 측정을 통해서 Silt 저감효과를 평가함. 실험결과 도로청소에 의해 TSP의 경우 약 30 %의 저감효과가 있었으며, 그 효과는 3~4시간 이상 지속되지 않는 것으로 보고됨. 또한 교통량과 Silt Loading과는 높은 상관성을 가지는 것이 타 연구자의 결과와 동일하게 확인됨.
- Chou 등(2007)은 대만의 Taipei의 특정 시험도로에서 도로진공청소와 물청소를 병행할 경우 도로변 PM10 농도를 평균적으로 16.4 % 정도 낮출 수 있다는 결과를 보고함. Chou 등은 청소효율을 평가하기 위한 지표로서 Dust Loading 저감효율(η_d), Silt Loading 저감효율(η_s), PM10 저감효율(η_p)의 세가지 지표를 설정하여 분석함.
- Amato 등(2009)은 스페인 바로셀로라 지역의 도로에서 기계식 청소차 및 물청소를 수행할 경우 풍하지역의 대기 중 PM10 농도의 7~10 % 감소효과가 있었으며, 도로침적먼지를 샘플링 한 경우, 청소를 한 도로과 청소를 수행하지 않은 도로에 비해 10 μm 이하의 먼지부하량에 대해 90 % 이상의 저감효과가 있는 것으로 평가함.
- 미국의 서부지역 대기협력체(WRAP)에서는 배출량 산정 및 비용효과 분석을 위해 포장도로에서의 미세먼지 제거 방법과 제어 효율을 개략적으로 제시함.

<표 67>WRAP에서 제시한 포장도로에서의 제어방법과 제어효율◆

제어 방법	원인 요소	PM10 제어 효율	참고 문헌/ 설명
효과가 없는 진공 장치가 있는 도로 청소 (14일 주기)	지역 도로	7 %	MRI, September 1992. non-PM10의 55 % 효율적인 청소, 5.5일의 주기와 CA-VMT에 근거한 청소 (7~30일)
	간선 도로	11 %	
PM10에 효과적인 진공 장치가 있는 도로 청소 (14일 주기)	지역 도로	16 %	MRI, September 1992. PM10의 86 % 효율적인 청소, 8.6일의 주기와 CA-VMT에 근거한 청소 (7~30일)
	간선 도로	26 %	
효과가 없는 진공 청소 (한 달에 1번)	지역 도로	4 %	MRI, September 1992. non-PM10의 55 % 효율적인 청소, 5.5일의 주기와 CA-VMT에 근거한 청소 (7~30일)
	간선 도로	4 %	
PM10에 효과가 있는 진공 청소 (한 달에 1번)	지역 도로	9 %	MRI, September 1992. PM10의 86 % 효율적인 청소, 8.6일의 주기와 CA-VMT에 근거한 청소 (7~30일)
	간선 도로	9 %	
24시간 안에 진공 청소와 물 청소	모든 도로	100 %	차량이 다니기 전에 도로의 모든 것을 청소했다고 가정.
파이프 격자 제어 장치 설치	쓰레기 있는 도로	80 %	Sierra Research,2003
자갈로 보수 하고 포장된 도로	쓰레기 있는 도로	46 %	MRI, April 2001
100피트 도로 길이와 전체 도로 폭을 포장하거나, 견각 4피트를 더 포장하게 요구	쓰레기 있는 도로	42 %	MRI, April 2001

출처: WRAP Fugitive Dust Handbook(2006)

- Amato 등(2010)은 도로청소 저감효과에 관한 논문 리뷰를 통해 도로먼지 입경 및 청소방법 등에 따라 저감효율을 정리하여 보고한 바 있는데, 도로청소차의 종류, 도로먼지의 입경, 평가방법 등에 따라 도로먼지 저감효과의 차이를 나타냄
- 환경부·수도권대기환경청 연구용역 보고서(2015)에서 정리한 국·내외 도로청소의 미세먼지 저감효과에 대한 문헌자료는 다음과 같음. 도로 청소 효과는 다양한 조건과 방법에 의하여 이루어져 있으며 청소차량의 경우 진공청소차량의 경우 약 20 % 내외, 물청소차량은 45 % 내외, 진공청소와 물청소를 함께 실시하였을 경우에는 55 % 내외의 저감효율을 보인 것으로 언급하고 있음

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 68> 청소차량에 의한 도로먼지 입경 및 청소방법에 따른 저감효율[Amato et al. 2010]◆

	Mechanical broom	Vacuum assisted broom	Regenerative air		Mechanical and vacuum	High frequency broom
Sizes (µm)						
0-10	55 ↔	>90 △				
0-40/63	15 • 57 ↔	10 †	-50 †	10-98 • 32*	16 †	-25 †
40/63-100/125	20 •	18 †	-8 †		24 †	-15 †
100/125-250	50 •	28 †	10 †		29 †	-5 †
250-500/600	60 •	30 †	20 †		32 †	5 †
500/600-850/1000	65 •	38 †	34 †	94*	34 †	10 †
850/1000-2000	65 •	40 †	38 †		34 †	15 †
>2000	80 •	50 †	35 †		43 †	18 †
	19-37 †	14-47 †	25 †	52-100 •	31 †	
	13-53 †	45-60 †	50-75 †			
Total sediments	54 F	30 †				
	5-45 †	31-48 F				
	60 ↔					

† Pitt (1979).

‡ Selbig and Bannerman (2007) (values are extracted from a graph).

• Sartor and Boyd (1972) (efficiencies grew with the number of passes).

-Minton et al. (1998).

F Clark and Cobbins (1963), Sartor and Boyd (1972), Pitt and Amy (1973).

‡ Duncan et al. (1985) (values depends from initial loads).

↔ Ang et al. (2008) (mechanical sweeper with water wash and fine dust filter in the hopper).

△ Amato et al. (2009b) (tandem with water flushing; sampling performed the morning after).

• Chang et al. (2005) (in tandem with washer).

* Depending on road surface type.

출처 : 서울시(2016), (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 69> 국내·외 도로청소 미세먼지 저감효과◆

연구자 및 연구기관	도로여건	청소방법	측정방법	저감효과
국립환경과학원(2008)	도로노면	진공청소	silt loading	15.70 %
국립환경과학원(2008)	도로노면	물청소	silt loading	44 %
국립환경과학원(2008)	도로노면	진공 및 물청소	silt loading	52.80 %
국립환경과학원(2008)	도로측구	진공청소	silt loading	23.70 %
국립환경과학원(2008)	도로측구	물청소	silt loading	47.30 %
국립환경과학원(2008)	도로측구	진공 및 물청소	silt loading	59.80 %
부천시	포장도로	물청소	general	10~18 %
Duncan et al(1985)	포장도로	도로청소(브러쉬)	general	33 %
Duncan et al(1985)	포장도로	진공청소	general	20 %
Duncan et al(1985)	포장도로	진공 및 물청소	general	70 %
Cowherd(1988)	포장도로	도로청소프로그램	general	33~37 %
Bris et al(1999)	포장도로	물청소	general	20~60 %
Fitz and bumiller(2000)	포장도로	도로청소	general	97 % 이상
Chang et al(2005)	포장도로	진공 및 물청소	general	30 %
WRAP	포장도로	진공청소	general	4~26 %

출처: 수도권대기환경청, 수도권지역 도로청소 매뉴얼 제작을 위한 연구(2015)

- 국내 연구를 토대로 먼지 제거장비의 필터에 따른 차량 조사가 필요하며, 이를 활용하여 비산먼지 제거효율을 산정식에 활용하여 삭감식에 적용하되 차량별 구조 분석이 이뤄져야 할 것임.

<표 70> 먼지청소차량 필터별 미세먼지 저감효율◆ (단위 : %)

구분	PM10	PM2.5
먼지흡입청소차(일반필터)	93.1	89.6
복합청소차(특수막필터)	95.4	94.3

출처 : 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구, 2016

* 기존 삭감량 산정식의 PM10, PM2.5 저감효율을 고려하여 산정.

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

- 먼지흡입식 차량의 작업거리 당 저감량을 파악하여, 청소차량에 운행실적에 따른 삭감식 산정한 연구가 있음.

<표 71> 주행거리당 청소차량 단위 삭감량▲

미세먼지	단위삭감량
PM10	0.157 kg/km·대
PM2.5	0.039 kg/km·대

출처 : 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

* 먼지제거량 : 평균 1.16kg/km·대

* PM10 분율 : 13.5% 추정(2mm 이상의 질량분율은 0.3~3%)

- 서울시 청소차량 (2017.8.30 기준) 보유현황은 아래 <표 71>와 같으며, 이를 토대로 삭감식에 필요한 차량대수 최신화가 필요함.

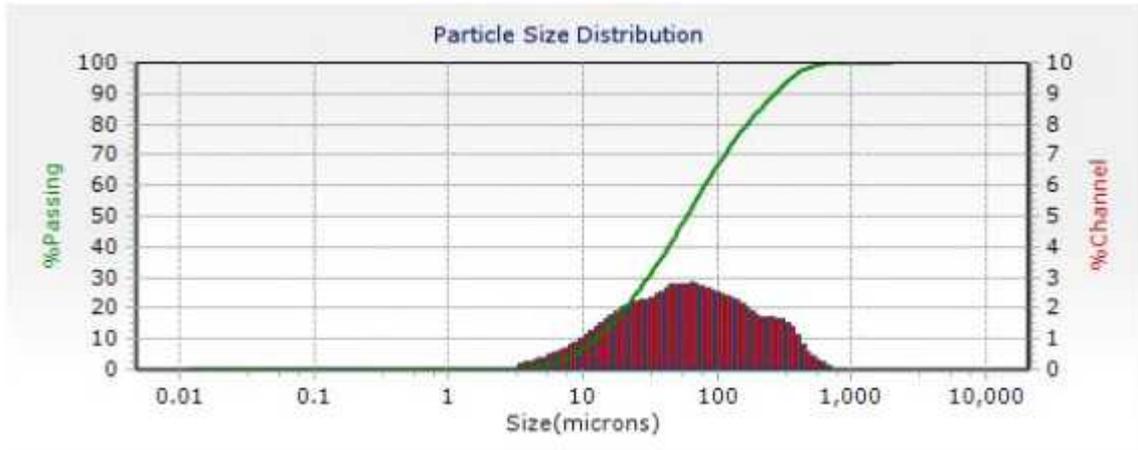
<표 72> 서울시 청소차량 보유 현황(2017)

(단위 : 대)

구분		분진흡입 전용청소	물청소	노면청소
총계		77	191	144
자치구	소계	75	175	132
	직영	73	184	119
	대행	2	11	13
시설공단		2	16	12

- 서울시 강동구 먼지흡입식 제거 차량에서 시료를 분석한 결과 PM10 (5.86%), 으로 나타났으며, PM2.5는 나타나지 않았으며, 추후 차량별 입경분포에 대한 실질적인 측정이 필요함.

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터



<그림 10> 강동구 미세먼지 분포곡선(실측자료)▲

- 2013년 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 수립에서 살수차량과 노면청소차량의 삭감량은 silt loading을 기반으로 산정하였기 때문에 실제로 측정한 미세먼지의 입경분포를 고려하여 산정이 필요하며, 청소거리에 따른 삭감량 산정방법이 고려되어야 함.
- 통계청 도로 평균 교통량(2016)을 이용하여 도로 등급에 대한 연간 비산먼지 배출량 산정시 활용(WRAP 식-활용).

<표 73> 도로별 평균 교통량

(단위 : 대/일)

도로	2015
고속국도	48,505
국가지원지방도	7,828
일반국도	11,991
지방도	5,011

- 도로길이는 현재 구축 중인 도로면지도(2016)를 활용하여 산정이 필요함 (4차선 이상도로).

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 74> 수도권 도로길이

지역	도로(km)
서울	885.7
경기	1,323
인천	422.9

출처 : 환경부(2016), 2016년 도로면지지도 제작결과

- 도로 길이와 평균 교통량을 이용하여 비산먼지 배출량 산정이 필요함.

$$* \text{Annual PM10 emissions} =$$

$$(\text{Emission Factor} \times \text{Vehicles/day} \times \text{Road length} \times 365 / 2,000)$$

- 포장도로 재비산먼지 배출량 산정시 국내 연구를 통하여 추정된 보정계수를 적용하여 산정이 필요함.

<표 74>도로별 보정계수 비교▲

구분	고속 국도	특광역시 및 일반시도	일반국도, 국지도, 지방도
보정계수	1	$0.27 \times (sL)^{-0.56} \times (V/45)^{1.52}$	1

출처 : 한국환경산업기술원

- 국내 연구를 통한 평균차속을 고려한 k값을 0.155g/VKT로 추정한 연구 결과를 토대로 비산먼지 배출량식에 활용한 사례가 있음.

<표 76> 도로별 평균 차속을 적용한 비산먼지 배출량 비교▲ (단위 : 톤/년)

구분	PM10 변경 전	PM10 변경 후	PM2.5 변경 전	PM10 변경 후
서울	2,362	1,832	571	458
경기	1,291	800	312	200
인천	5,908	5,719	1,429	1,430

출처 : 환경산업기술원 2014

- 계절별 삭감량 산정의 차별화를 위해 통행량과 겨울철 특성에 따라 silt loading 값을 적용하여 산정시 활용(WRAP식-활용)

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

<표 77> 교통량에 따른 겨울철 비산먼지 배출계수◆

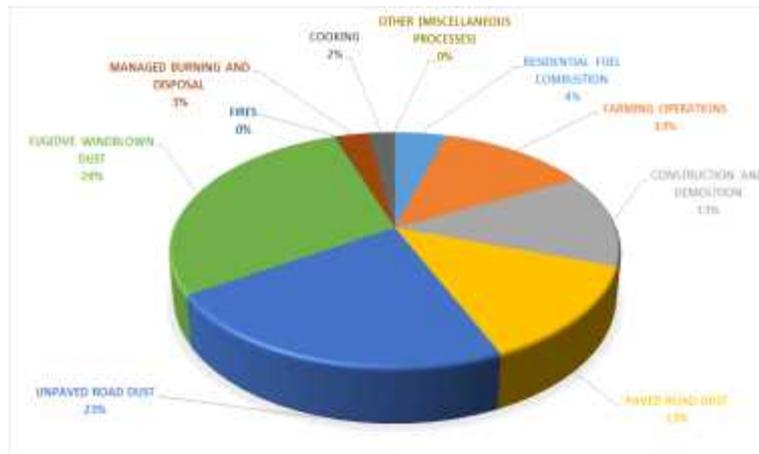
ADT(Average Daily Traffic Category)	<500	500 ~ 5,000	5,000 ~ 10,000	>10,000
Ubiquitous winter baseline multiplier during months with frozen precipitation	X4	X3	X2	X1

출처: WRAP(2006), Fugitive Dust Handbook

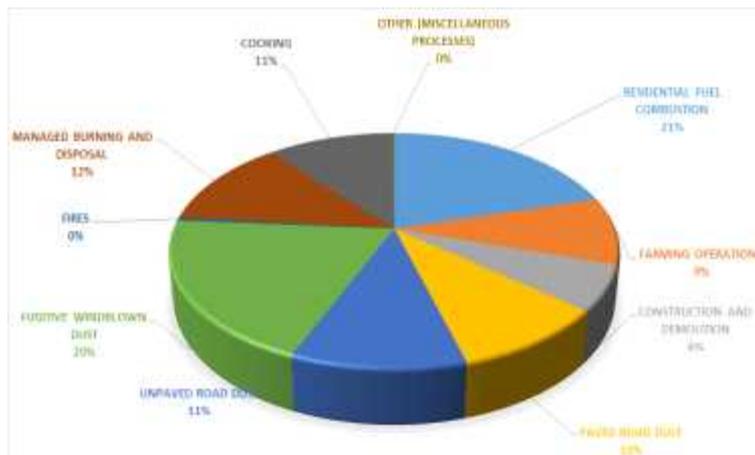
- Watson and Chow(2000)등은 도로먼지의 다양한 배출원에서 유입된 물질들이 모인 복잡한 혼합물이고, 그 조성은 전형적으로 Si, Al, Ca, Fe, K 등과 같은 지각물질과 관련 있는 원소 및 화합물이 큰 비중을 차지하며, 도로먼지는 해당 지역의 지각/토양 성분 및 주변 배출원의 영향을 크게 받아 도로먼지의 성분이 차이를 보이는 연구를 수행함.
- 포장도로 먼지는 다른 비산먼지 배출원과 유사하게 지각원소 성분이 풍부하며, OC/EC, Zn, Pb 등의 원소 성분이 상대적으로 높게 분포함.
- 이학성(2005)등은 포장도로 재비산먼지의 평균 조성은 PM10에는 지각원소들이, PM2.5에는 인위적 기원 원소들이 상대적으로 높은 구성비를 보이고 있으며, 재비산 도로먼지 PM10과 PM2.5에 대해 OC/EC의 질량비는 각각 4.1~11.0, 2.1~11.4의 범위를 보이고 있음.

나. 외국 비산먼지 배출량/저감량 산정사례

- 그림 은 CARB의 2016년도 PM10과 PM2.5 배출량 산정 자료이며, 그림과 그림 은 비산먼지 배출원별 구성비를 나타냄.
- PM10의 경우 비산먼지 배출량 중 포장도로의 배출량은 13%이며 PM2.5의 경우는 10%로 차지하고 있음.



<그림 11> 미국 CARB의 2016년 Miscellaneous source 중 PM10 배출량



<그림 12> 미국 CARB의 2016년 Miscellaneous source 중 PM2.5 배출량

- 포장도로의 배출량은 경우 배출계수 입자크기별 보정계수를 적용하여 산정하는데, PM10은 PM의 45.72%, PM2.5는 PM10의 15%로 적용하고 있음.

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

다. 국내 적용사례

- 먼지제거 장비 제거장비 보급확대로 인한 삭감량은 수도권지역(서울, 경기, 인천)에서 산정하고 있으며, 서울시 2016년도 먼지제거 장비 실적은 PM10 138톤/년, PM2.5 19톤으로 삭감량을 추정하고 있음.

<표 78> 2016 서울시 먼지 제거장비 보급확대로 인한 삭감량◆

구 분		PM10(톤/년)	PM2.5(톤/년)
삭감계획		69	9
삭감실적	분진 흡입 차량	36.45	5.10
	노면청소 차량	51.12	7.16
	고압살수 차량	50.50	7.07
	해당연도 총 삭감량	138	19
달성률(%)		200	215
먼지 제거장비 보급실적	계획 대수 (당해년도/누적)	20/20	
	보급 대수 (당해년도/누적)	15/45	
먼지 제거장비 운영실적	일일평균 청소거리(km) (당해년도/누적)	142/142	
	운영 차량 대수(대) (당해년도/누적)	202/202	

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

라. 전문가 설문조사/자문의견

- CAPSS에서 과대평가 가능성이 높기 때문에 이에 대한 검증이 필요하며, 이를 통한 분진흡입식 차량 운행도 결정되어야 함.
- Silt Loading은 도로종류보다는 지역의 함수일 가능성이 크므로 고려가능한지 검토가 필요하며 추후 연구가 필요함.
- TSP/PM10/PM2.5 분율 검토가 필요하며, 이에 대한 연구가 필요함.
- 포장도로 재비산먼지 발생량 보정 관련 강우일수 경우 변수 고려 검토 필요하나, 현재 적용이 어렵기 때문에 이에 대한 연구가 필요함.
- Silt Loading(g/m²)의 도로 유형별 차이에 따른 검토가 필요하며 추후 연구가 필요함.
- 배출량 산정편람 대비 저감개선(안) 제시 필요하며, 배출량에 대한 지속적인 연구가 필요함.
- 도로청소 차종별 단위저감량 자료 구분하여 적용이 필요함.
- 계절별 특성을 고려시 우기를 별도로 구분할 필요는 없음.
- 먼지흡입식 제거장비 이용에 따른 삭감효율성은 ‘단위 삭감량’ 계수가 매우 중요하기 때문에 이에 대한 검토가 필요함.
- 2011년 실험치 반영한 계수 적용한 예비적으로 적용 가능하다고 판단함. 다만, 모든 유형의 도로를 대상으로 같은 계수 적용은 바람직하지 못함. 즉 도로별 교통량, 도로 여건 등 다양한 조건을 반영한 ‘단위 삭감량’ 계수 개발이 필요함.
- 도로 먼지제거장비의 연료특성을 감안하여 오염물질 삭감량 수준에 대한 차감(差減)이 필요함. 예를 들어 경유연료 제거장비와 CNG 제거장비 간 삭감량 수준의 차별이 고려될 것이 필요함.

마. 결과 분석 및 방안 제시

제안 1) 분진제거장비 단위삭감량을 주행거리당 삭감식 제안 (살수차량, 진공청소 차량 제외)

- 수도권 2차 계획시 분진흡입식 제거장비 청소작업거리 0.26Kg/km·대로 나타났으며, 서울시 연구사례에서는 1.16kg/km·대로 나타남.
- 분진흡입식 제거장비 단위삭감량의 서울, 경기, 인천에 대한 작업거리 당 먼지수거량에 대한 자료가 확보가 필요함.

<표 79> 분진흡입식 제거 청소차의 작업거리당 먼지수거량[●]

구분	작업거리 당 먼지수거량 (kg/km·대)	
	수도권2차 계획	서울시 연구사례 (2016)
TSP	0.26	1.16
PM10	0.039	0.157
PM2.5	0.0055	0.039

출처 : 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구

(단위삭감식 예시)

$$\begin{aligned} & \text{단위삭감량 (톤/년·대)} : \text{먼지제거량(톤/년)} / \text{차량대수(대)} \\ & \quad \downarrow \\ & \text{단위삭감량 (톤/년·대)} : \text{작업거리 당 먼지수거량 (톤/km·대)} \times \\ & \quad \text{주행거리(km/년)} \end{aligned}$$

(단위 : 톤/년)

구분	기존삭감량1) 서울시(2016) 분진흡입식 제거장비	제안삭감량2) 분진흡입식 제거장비	제안삭감량3) 분진흡입식 제거장비
PM10	36.45	36.55	147.14(6.12%)
PM2.5	5.10	5.12	

- 1) 수도권 2차 기본계획 PM10 : TSP의 15%, PM2.5 : PM10의 14%, 작업거리 미적용
- 2) 수도권 2차 기본계획 PM10 : TSP의 15%, PM2.5 : PM10의 14%, 작업거리 적용
- 3) 서울시 연구사례 PM10 : TSP의 13.5%, PM2.5 : PM10의 25%
- 4) 2016년도 시행계획 보급실적 분진흡입식 제거장비 44대, 2011년도 운행거리 20,828km 적용함.

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

- 분진흡입식 제거장비 청소작업거리 적용시 PM10 삭감량이 0.1톤 증가하였으며, PM2.5의 경우 0.2 톤이 증가하였음.

- 분진흡입식 제거장비의 청소작업거리 45대(2016년기준)에 대한 운행거리 및 먼지 수거량을 통한 삭감식 산정이 필요함.

- 분진흡입식 제거장비의 PM2.5/PM10 분율에 관한 사례가 충분하지 못하기 때문에 이에 대한 지속적인 연구가 필요함.

제안 2) 분진제거장비에 의한 삭감된 도로 재비산먼지 발생량 산정

<표 80> 서울시 비산먼지 배출량 및 삭감식에 의한 삭감량 비교 (2013년)●
(단위 : 톤/년)

구 분	2013 도로재비산먼지 발생량(CAPSS)	서울시(2016) 분진흡입식 제거장비 기존삭감량1)	제안삭감량2) 분진흡입식 제거장비	제안삭감량3) 분진흡입식 제거장비
PM10	2,404	36.45(1.50%)	36.55(1.52%)	147.14(6.12%)
PM10 제거 필요운행 대수		65.9대/년	65.7대/년	16대/년
PM2.5	582	5.10(0.87%)	5.12(0.88%)	36.55(6.28%)
PM2.5 제거 필요 연간 운행 대수		114.1대/년	113.6대/년	15.9대/년

- 1) 수도권 2차 기본계획 PM10 : TSP의 15%, PM2.5 : PM10의 14%, 작업거리 미적용
- 2) 수도권 2차 기본계획 PM10 : TSP의 15%, PM2.5 : PM10의 14%, 작업거리 적용
- 3) 서울시 연구사례 PM10 : TSP의 13.5%, PM2.5 : PM10의 25%
- 4) 2016년도 시행계획 보급실적 분진흡입식 제거장비 45대, 2011년도 운행거리 20,828km 적용함.

- 분진흡입식 제거장비의 수도권 2차 기본계획의 삭감식을 사용하였을 때, PM 10 은 36.45 톤/년(1.5%), PM2.5는 5.10 톤/년(0.87%)이 삭감되었으며, 서울시 연구에 의한 삭감식을 사용하였을 때, PM10은 147.14 톤/년(6.12%), PM2.5는 36.55 톤/년(6.28%)로 나타났음.
- 분진흡입식 제거장비의 수도권 2차 기본계획의 삭감식을 사용하였을 때, PM 10 제거 필요 운행 대수는 65.9대/년, PM2.5는 114.1대/년을 운행해야하며, 서울시 연구에 의한 삭감식을 사용하였을 때, PM2.5 제거 필요 운행 대수는 16대/년, PM2.5는 15.9대/년을 운행할 해야 함.
- 분진흡입식 제거장비의 실제주행거리에 대한 먼지제거량 산정을 통한 도로재비산 먼지 발생량 대비 삭감량 산정이 필요하며, 이를 통해 분진흡입식 제거장비 운행일정 조율 가능할 것으로 판단됨.

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

3. 저마모타이어 보급 활성화 식감식 개선(안)

3.1 현황 및 문제점 분석

가. 현황

- 서울시의 2013년 타이어 마모 PM10, PM2.5 배출량을 살펴보면, 1년간 미세먼지 배출량 전체 317,475kg 중 승용차가 약 33%인 106,191kg으로 가장 높은 수치를 보임.

<표 81> 서울시 타이어 마모 PM10, PM2.5 배출량 (2013년)◆

(단위 : kg/년)

구분	PM10	PM2.5
승용차	106,191	74,334
택시	42,751	29,926
승합차	10,436	7,305
버스	17,763	12,434
화물차	94,416	66,091
특수차	507	355
RV	45,411	31,788
합계	317,475	222,232

출처 : 서울시(2016), 초미세먼지(PM2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구

나. 문제점 분석

- 타이어마모에 의한 비산먼지 배출량의 경우 현재 CAPSS에서 제외되어 있어 EU의 식을 그대로 사용하고 있음. 국내는 EU와 도로 조건, 차종과 타이어의 종류 등이 매우 다르기 때문에 이에 대한 고려가 필요함.
- 국내, 국외 모두 타이어마모에 의한 통계자료가 매우 빈약함.

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

- 타이어공업협회에서도 저마모타이어에 대한 통계자료는 제작하지 않기 때문에 저마모타이어 보급률을 산정하는데 어려움이 있음.

- 기본계획에서는 미세먼지 발생률이 기존 타이어 대비 30% 감소하도록 제작된 저마모타이어의 보급 활성화를 목표로 한다고 하였으나 이에 대한 정확한 근거가 없음.

- 기존의 삭감식에서는 PM2.5 삭감률을 PM10 삭감률의 50%로 가정한다고 하였으나 이에 대한 정확한 근거가 없음.

3.2 개선방안 수립을 위한 분석

가. 선행연구 결과

- 국내의 권진웅(2014)는 타이어마모, 브레이크 마모, 도로 표면 마모 등의 도로 재비산으로 배출원을 세분화하고, 타이어 마모에 의한 미세먼지 배출량 추정은 한국기계연구원(2012)에서 실제 도로 주행거리에 따른 승용차 타이어 마모량을 측정하고, 승용차 등록대수를 고려하여 연간 타이어 마모에 의한 미세먼지 배출량을 추정하여 자료를 토대로 대한타이어공업협회(2011)타이어 생산 판매, 내수 판매, 교환용 판매 회수현황자료와 교통안전공단의 자동차 검사자료, 신생타이어와 폐타이어의 트레드 깊이 및 무게 측정을 통하여 단위 주행거리 당 타이어 마모량을 산출하고 이를 이용하여 타이어마모에 의한 미세먼지 배출량을 추정하는 바 있음.
- 김정 (2013) 등은 국내 타이어 마모량을 산출하기 위하여 EU의 산정식을 적용한 산정식과 대한타이어공업협회와 교통안전공단의 검사자료를 토대로 PM10 배출량을 산출하였으며, EU 산정식보다 국내자료를 활용하여 약 20% 높게 추정한 바 있음.
- 한세현 (2015)등은 국내 외 연구 자료들을 조사 검토하고, 국내 미세먼지 배출량자료 개선을 위해 배출계수 자료 등을 조사한 바 있으며, 이석환 (2012)등은 도로 주행 조건에서 도로먼지 및 타이어 마모입자를 측정하여 아스팔트 재질로 건설된 고속도로에서 정속 조건 및 급가속, 급감속 조건에서 발생하는 입자들의 특성을 분석한 바 있음.
- 백성현 (2016)은 직진형 레이저 센서를 이용하여 자동차 타이어의 마모도 및 편마모를 판정한 사례가 있으며, 이석환 (2017)은 타이어 마모에 의해 발생하는 미세먼지 연구사례에 의하면 미국, 유럽은 경량차량 타이어 마모로 인한 PM10 미세먼지 배출계수를 6.0~10.0mg/vkm으로 산정하고 있으며, PM2.5/PM10의 비율을 유럽은 0.7, 미국은 0.15로 적용하고 있으며, 국내의 경우 타이어 및 브레이크 마모 미세먼지 배출계수를 따로 관리하고 있지 않으며, CAPSS에서 TSP 기준으로만 118mg/vkm으로 미국 및 유럽 대비 높은 경향을 나타낸다고 언급함.

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

- 환경부(2016)에서는 저마모타이어와 기존 타이어의 마모량 및 차량 속도별 미세먼지 기여율에 관한 연구를 수행한 바 있는데, 기존 타이어의 마모량은 51.8mg/vkm, 저마모타이어는 43~49.8mg/vkm로 나타났고, 속도에 따라 PM10 농도, PM2.5/PM10분율이 상이하게 나타났음.

<표 82> 차량속도에 따른 기존타이어 마모입자의 PM10 농도◆

타이어 종류	마모량 (mg/vkm)
기존타이어	51.8
저마모타이어	43~49.8

출처 : 환경부(2016), 차세대 저탄소-저마모 친환경 타이어 개발

<표 83> 차량속도에 따른 기존타이어 마모입자의 PM10 농도◆

차량속도 (km/h)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	기준	저마모
50	45.7±3.8	30.5±5.6
80	44.3±4.8	26.6±2.8
110	58.3±3.7	35.5±7.0
140	150.5±3.7	50.9±10.5

출처 : 환경부(2007), 환경친화적 미세먼지 저감 저마모 타이어 개발

<표 84> 차량속도에 따른 저마모타이어 마모입자의 PM10, PM2.5 분율◆

차량속도 (km/h)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5/PM10
50	13.6	20.6	0.67
80	24.4	31.7	0.77
110	26.3	33.7	0.78
140	28.7	37.2	0.77

출처 : 환경부(2007), 환경친화적 미세먼지 저감 저마모 타이어 개발

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

나. 전문가 설문조사/자문의견

- 전망배출량을 기반으로 하는 삭감량과 함께 실질적인 배출량 산정방안에 대한 검토가 필요함.
- 타이어 마모 실측연구 결과에 근거한 삭감률을 적용할 필요가 있으며, 타이어 마모에 대한 배출량을 토대로 삭감식을 개선할 필요가 있음.
- 저마모타이어의 미세먼지 발생률에 대한 연구가 필요함.
- 저마모타이어 보급으로 인한 삭감식 중의 저감효율 30% 수치의 과학적 증빙이 필요함.
- 전망배출량(BAU) 자료는 2006년에서 2010까지의 자료로 다소 오래되었기 때문에 최신 자료로의 갱신이 필요함.

다. 결과분석 및 방안제시

제안 1) 기존의 삭감식 내에서 저마모타이어에 의한 삭감을 보정

- 금호타이어의 ‘환경친화적 미세먼지 저감 저마모타이어 개발’(2007)에서 친환경 타이어를 개발하여 일반 타이어와 함께 미세먼지 배출량 측정 실험을 진행함.

<표 85> Version별 타이어 미세먼지 배출량●

구분	타이어	미세먼지량
1	저마모 타이어	555(83.7%)
2	일반 타이어	663(100%)

출처 : 환경부(2007), 환경친화적 미세먼지 저감 저마모 타이어 개발

- 실험은 주위 온도 및 공기의 유동 등을 최소화할 수 있는 무향실에서 New EF Sonata를 80km/h 주행 조건에서 실시하였으며 실험 결과 저마모타이어는 일반 타이어에 비해 미세먼지가 약 17% 적게 배출되었음.
- 금호타이어의 ‘차세대 저탄소 저마모 친환경타이어 개발’(2016)에서 개발한 타이어인 Energy saver는 10~30%, Ecowing은 8~10% 수준의 마모입자 저감 효과를 보임.
- 아래 <표 86>에는 기존의 삭감식에 적용했을 때 저마모타이어 보급에 의한 삭감량을 나타냄. 저마모타이어 보급에 관한 통계는 따로 산정하고 있지 않기 때문에 ‘2차 수도권 대기환경관리 서울특별시 시행계획 수립 연구’에서와 같이 저마모타이어 보급률은 2015년부터 10%로 시작해 매년 10%씩 증가한다고 가정하여 추정함.

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

<표 86> 타이어 마모 전망 배출량 및 저마모타이어 보급에 의한 삭감량 (기존 삭감식 적용)●

(단위 : 톤/년)

구분		2015	2016	2017	2018	2019
타이어 마모 전망배출량 (BAU) 수도권	PM10	1,585	1,610	1,635	1,661	1,687
	PM2.5	1,110	1,127	1,144	1,163	1,181
삭감량	PM10	48	97	147	199	253
	PM2.5	17	34	51	70	89
타이어 마모 전망배출량 (BAU) 서울	PM10	530	539	547	556	565
	PM2.5	371	377	383	389	395
삭감량	PM10	32	49	66	83	102
	PM2.5	22	34	46	58	71
타이어 마모 전망배출량 (BAU) 경기	PM10	865	878	892	906	920
	PM2.5	606	615	624	635	644
삭감량	PM10	26	53	80	109	138
	PM2.5	9	18	28	38	48
타이어 마모 전망배출량 (BAU) 인천	PM10	190	193	196	199	202
	PM2.5	133	135	137	139	141
삭감량	PM10	6	12	18	24	30
	PM2.5	2	4	6	8	11

<표 87> 타이어 마모 전망 배출량 및 저마모타이어 보급에 의한 삭감량 (기존 삭감식 적용)●

(단위 : 톤/년)

구분		2013	2014	2015	2016	2017
2016년도 서울시 연구 타이어마모 배출량	PM10	317	326	335	344	353
	PM2.5	222	228	234	240	246
타이어 마모 전망배출량 (BAU)서울	PM10			530	539	547
	PM2.5			371	377	383

- 1) 전망배출량 산정은 EU식을 이용하여 추정함. (2006~2010년 차량 증가율을 이용하여 산정, 연평균 증가율 2.1%)
- 2) 2016년도 서울시 연구에서 타이어마모 배출량(2013년) 산정 시 EU식 이용하여 추정함. (BAU 증가율 적용)
- 3) 기존 전망배출량 보다 PM10 약 300톤 PM2.5 약 150톤 차이가 나타나는 것을 확인함.
- 4) 전망배출량에 대한 최신화가 필요함.

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

제안 2) PM2.5/PM10 분율 개선

- 아래의 표 88에 나타난 EU의 Emission Inventory Guidebook에서 제시한 타이어 마모의 입경별 질량 분율에서 전체 TSP 중의 PM10은 60%, PM10 중의 PM2.5는 70%로 나타남.

<표 88> 타이어 마모의 입경별 질량 분율◆

Particle Size Class	Mass fraction of TSP
TSP	1.00
PM10	0.60
PM2.5	0.42

출처 : 환경부(2016)차세대 저탄소-저마모 친환경 타이어 개발

- <표 88>에 환경부(2016)에서 제시한 차량속도에 따른 저마모타이어 마모입자의 PM10, PM2.5 분율이 나타나있음.
- 환경부(2016)이 제시한 바에 따르면, PM2.5/PM10 분율이 차량 속도가 50km/h 일 때는 0.67로 EU에서 제시한 바와 비슷한 값을 보이거나 80km/h가 넘어가면 0.77~0.78로 높아지는 경향이 있음.
- 아래 <표 92~95>은 금호타이어의 2007년 연구와 2016년 연구의 Energy saver, Ecowing의 마모입자 저감 효율을 적용하였을 때의 저마모타이어 보급에 의한 삭감량을 나타내며 마찬가지로, 저마모타이어 보급률은 2015년부터 10%로 시작해 매년 10%씩 증가한다고 가정함.

<표 89>저마모타이어 보급에 의한 삭감량 (2007년 전망배출량 적용)●

(단위 : 톤)

구분		2015	2016	2017	2018	2019
삭감량	PM10	18	28	37	47	58
	PM2.5	12	19	26	33	40

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 90> 저마모타이어 보급에 의한 삭감량 (Energy saver)●

(단위 : 톤/년)

구분		2015	2016	2017	2018	2019
삭감량	PM10	11~32	16~49	22~66	28~83	34~102
	PM2.5	7~22	11~34	15~46	19~58	24~71

<표 91> 저마모타이어 보급에 의한 삭감량 (Ecowing)●

(단위 : 톤/년)

구분		2015	2016	2017	2018	2019
삭감량	PM10	9~11	13~16	18~22	22~28	27~34
	PM2.5	6~7	9~11	12~15	15~19	19~24

- 위의 삭감량은 EU에서 제시한 바와 같이 PM2.5/PM10 비율로 0.7을 적용하여 산정함.
- 2017년 기준, 금호타이어의 2007년도 연구 결과를 적용할 경우 37톤, Energy saver는 22~66톤, Ecowing은 18~22톤의 PM10이 삭감될 수 있음.

<표 92> 저마모타이어 보급에 의한 삭감량 비교●

(단위 : 톤/년)

구분		2015	2016	2017	2018	2019
#1 서울시 삭감량	PM10	11	16	22	28	34
	PM2.5	7	11	15	19	24
#2 서울시 삭감량	PM10	9	13	18	22	27
	PM2.5	6	9	12	15	19
서울시 삭감량	PM10	32	49	66	83	102
	PM2.5	22	34	46	58	71

1) #1은 Energy saver 타이어, #2는 Ecowing 타이어 적용

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

제안 3) 타이어마모 배출량 산정을 통한 삭감식 제안

- 서울시 브레이크 마모에 의한 배출량은 2013년 기준의 차량별 등록대수, 총 주행거리(VKT), 입경별 질량 분율, 평균 차속을 고려하여 산정하였으며, SB(V)는 차속 범위에 따라 차이가 있으며, 도로별 평균 차속을 적용하여, PM10 317,476kg/년, PM2.5는 222,232kg/년으로 추정하여 산정함.
- 기존의 저마모타이어 보급 활성화에 의한 삭감량 식을 타이어 마모에 의한 배출량에서 저마모타이어 보급율과 저감효율을 이용하여 배출량 삭감식을 제안함.

<표 93> 저마모타이어 보급 활성화에 의한 배출 삭감량 삭감식 비교

기존식	제안식
○ 저마모타이어 보급 활성화에 의한 오염물질 삭감량(톤/년) = 해당연도 전망배출량(BAU)(톤/년) × 저마모타이어 보급률 × 삭감률	○ 저마모타이어 마모에 의한 오염물질 삭감량(톤/년) = 해당연도 타이어마모 배출량(톤/년) × 저마모타이어 보급률 × 삭감률

1) PM10 삭감률 : 30%, PM2.5 삭감률 : 15% (PM2.5 삭감률은 PM10 삭감률의 50%로 가정)

- 기존의 BAU는 2007년에 추정된 배출량이기 때문에 서울시에서 수행한 배출량 자료보다 다소 높게 나타났음.

<표 94> 저마모 타이어 배출량 산정에 따른 비교●

(단위 : 톤/년)

구분	오염물질	2013	2014	2015	2016	2017
서울 (BAU)	PM10	512	521	530	539	547
	PM2.5	359	365	371	377	383
서울 (서울시 연구자료)	PM10	317	-	-	-	-
	PM2.5	222	-	-	-	-

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

라. 추후연구 필요성

- 국내 실정에 맞는 타이어 마모 비산먼지 배출량 산정식에 대한 연구가 필요함.
- 실제 주행 조건에서의 타이어 마모 비산먼지 배출량에 관한 연구가 필요함.
- 현재 저마모타이어 보급에 관한 자료는 존재하지 않기 때문에 이에 대한 산정이 필요함.
- 차종별 및 속도별 저마모타이어의 미세먼지 저감 효율에 대한 연구가 필요함.

4. 나대지 녹색화 사업 삭감식 개선(안)

4.1 현황 및 문제점 분석

가. 현황

- 국내의 다양한 나대지의 풍식에 의한 비산먼지 발생원이 있으나, 확인할 수 있는 통계자료의 미비로 학교운동장만 대상으로 배출량을 산정하고 있음.
- 서울시 비산먼지 배출량(2013년)에 따르면 나대지 중 PM10 1,486,846 kg/년으로 22.40%, PM2.5 223,027 kg/년으로 21.75%로 배출량을 추정하고 있음.

<표 95> 서울시 비산먼지 배출량 (2013년)◆

(단위 : kg/년)

구 분	CAPSS	
	PM10	PM2.5
도로재비산먼지	2,403,949	581,601
타이어마모	-	-
브레이크마모	-	-
건설공사	2,160,917	216,092
나대지	1,486,846	223,027
하역 및 야적	0.21	0.02
농업활동	3,951	790
축산활동	136	82
폐기물처리	37,508	3,751
비포장 도로 비산먼지	-	-
합 계	6,093,307	1,025,342

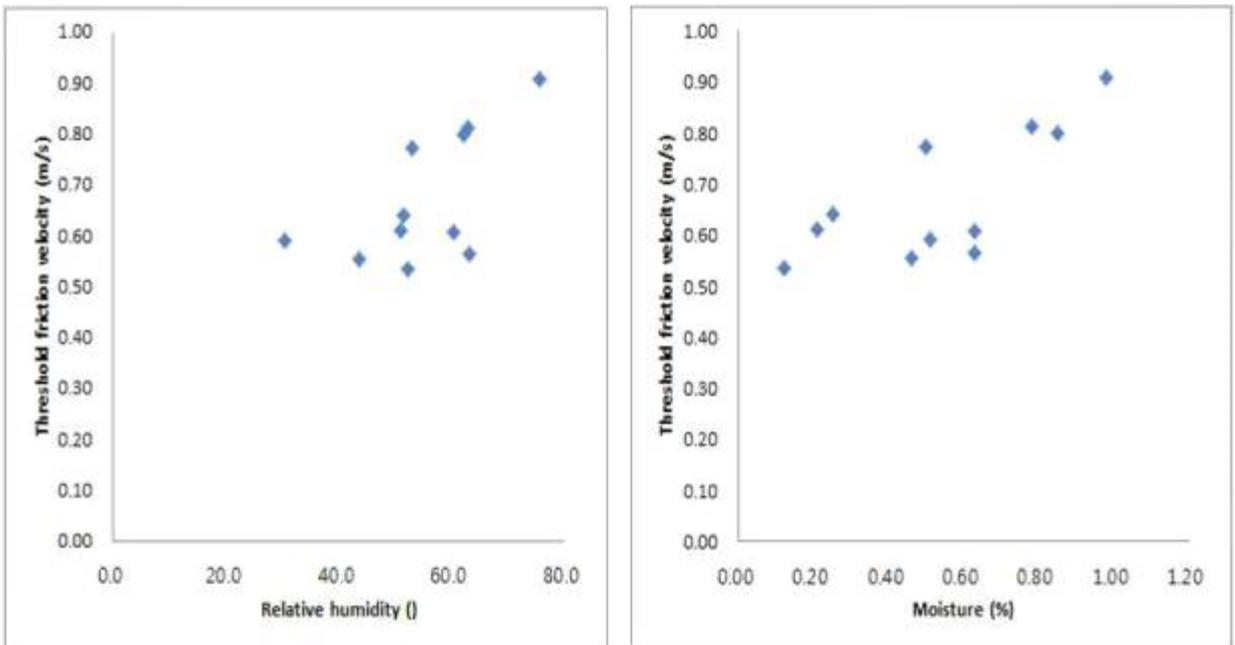
출처 : 초미세먼지(PM2.5)배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구(2016년)

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

나. 문제점 분석

1) 배출량 및 배출계수 산정식

- 강우나 토양 내 함수율 등에 따른 배출량 감소를 고려하지 못함.
- 나대지 비산먼지 배출계수 산정 방법은 국내 토성 및 여러인자(수분)를 고려하지 않은 채, 대표토성으로 양토를 기준함.
- 미국 서부지역이나 사막지역과 달리 국내 학교운동장의 경우에도 그늘진 곳이 많고, 인천 지역 같은 경우 대개 습도가 높기 때문에 토양 내 함수율도 따라 높을 것으로 추정됨.
- 국내 나대지의 비산먼지 배출계수 산정을 위한 임계마찰속도 측정 연구자료에 의하면 현장에서 실측시, 비가 오면 전후로 3일 정도는 표면상태를 확인하고 입자가 비산될 정도인 5m/s 정도의 바람을 인위적으로 불어주며 진행하였음.



<그림 13> 토양 내 수분과 TFV의 관계

출처 : 인하대학교(2015) 국내 나대지의 비산먼지 배출계수 산정을 위한 임계마찰속도 측정 : 휴대용 소형 풍동을 이용하여

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

- 아래식은 토양 수분에 따른 임계마찰속도식을 나타냈으며 이러한 부분을 연구하여 산정식에 반영방안을 모색해야함.

$$u^*_{t,R}(D,w) = f_w(w)u^*_{t,R}(D_s)$$

(u^* : 임계마찰속도 , w : 토양 수분함유량)

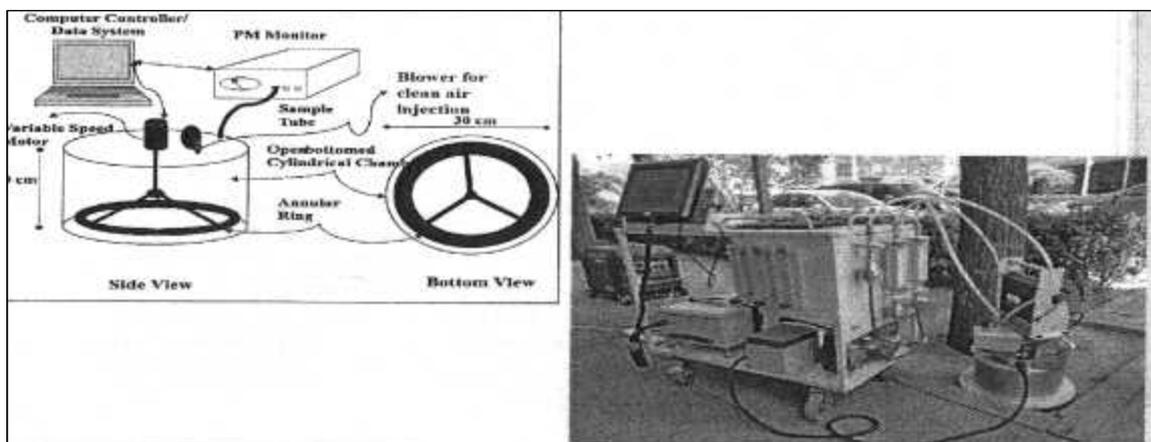
- <표 96>에서는 자갈, 모래, 실트, 점토를 크기별로 구분한 자료를 나타냄.

<표 96> 각 분류에 해당하는 입자 크기의 범위◆

분류법	입자크기			
	자갈	모래	실트	점토
MIT(MIT 공대)	>2	2~0.06	0.06~0.002	<0.002
USDA(미국 농업국)	>2	2~0.05	0.05~0.002	<0.002
AASHTO(미국 도로교통국)	76.2~2	2~0.075	0.075~0.002	<0.002
통일분류법	76.2~4.75	4.75~0.075	세립토(실트,점토)<0.075	

출처 : 인하대학교(2015), 국내 나대지의 비산먼지 배출계수 산정을 위한 임계마찰속도 측정 : 휴대용 소형 풍동을 이용하여

- 중국 북경시 환경국에서는 나대지에서 발생하는 비산먼지를 Portable in-situ wind erosion laboratory(PI-SWIRL)로 측정하여 토양성분에 따라 배출계수를 적용하여 산정하고 있음.



<그림 14> PI-SWIRL 측정기

출처 : 북경시(2014) 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 97> 중국의 토양 바람 침식 지수◆

($t/10^4m^2 \cdot a$)

토양 종류	토양 종류	TSP	PM10	PM2.5
모래	모래	490	147	24
	토양 모래	331	99	17
흙	흙	911	273	46
	샌디 흙	447	134	22
	모래 양토	911	273	46
	실트흙	476	143	24
	점토 양토	290	87	15
	규조토	385	116	19
	실록	75	23	4
점토	점토	170	51	9
	실크 점토	170	51	9
	샌디 클레이	138	41	7

출처 : 북경시(2014) 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침

- 배출량 산정식의 일반적인 거칠기 높이를 0.5cm로 적용하고 있으며, 나대지별로 거칠기 높이에 대한 연구가 필요함.
- <표 100>는 국가별 배출량 및 배출계수 산정식이며 국내 CAPSS자료는 미국 EPA AP-42를 참고하여 만든 자료이므로 국내현황에 적용하기에 부족함.

<표 98> 나대지 비산먼지 배출량 및 배출계수 산정식

구 분	배출량 산정식	배출계수 산정식
CAPSS (국내)	나대지에 의한 배출량(kg/yr) = 학교 운동장 나대지 면적(m^2) x 배출계수($g/m^2/yr$) x 풍속 적용일수 x 10^{-6}	배출계수($g/m^2/yr$) = $k \times 0.5 \times [58 \times$ (표면마찰속도-표면마찰속도 역치) 2 $+25 \times (\text{표면마찰속도}-\text{표면마찰속도 역치})]$
EPA , WRAP (미국)	$E = \sum A \times EF/1000$	Emission Factor = $k \sum_{i=1}^N P_i$
CARB (미국)	-	$E_s = A K C L' V'$
(중국)	-	$E_w = k_i \times \sum_{i=1}^n P_i \times (1-\eta) \times 10^{-3}$

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

- 각 해당연도의 나대지 면적과 풍속 적용일수에 따른 배출계수를 적용하여 산출된 배출량을 나타냄.

<표 99> 서울시 나대지(운동장) 현황◆

구 분	2011(CAPSS)	2015(서울시)	2016(서울시)
나대지 면적(m ²)	10,914,599	4,982,110	5,942,422
배출량(ton/yr)	1,650	715.82	869.50
배출계수(g/m2/yr)	2.36	2.71	2.71
풍속 적용일수(day)	64	54	54

- 1) 2011년은 CAPSS자료에서 산출한 학교운동장의 면적을 적용함.
- 2) 2015, 2016년은 서울시에서 산출한 학교운동장의 면적을 적용함.

- 2015, 2016년 서울시 나대지(운동장) 현황을 기존 배출계수에서 2011년 배출계수로 산출하여 2015, 2016년 배출량 차이를 확인할 수 있도록 나타냄.

<표 100> 나대지 배출계수에 따른 변화량● (단위 : 톤/년)

구 분	2015	2016
1) 서울 나대지(운동장) 배출량	752.50	897.54
2) 배출계수에 따른 배출량 차이	752.50 - 715.82 = 36.68	897.54 - 869.50 = 28.04

- 1) 2011년 배출계수를 적용하여 구한 배출량을 제시함.
- 2) [현재 배출계수를 적용한 배출량 - 2011년 배출계수를 적용한 배출량]을 제시함.

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

- 국가별 나대지 비산먼지 분율 PM2.5/PM10은 미국과 한국이 0.15로 동일하며 중국만 0.25로 차이를 보였으며 PM10/TSP는 모두 0.5로 동일함.

<표 101> 국가별 나대지 미세먼지 분율◆

구 분	PM2.5/PM10	PM10/TSP
국내	0.15	0.5
미국	0.15	0.5
중국	0.25	0.5

- 국내의 다양한 나대지의 풍식에 의한 비산먼지가 발생원이 있으나, 확인할 수 있는 통계자료의 미비로 학교운동장만 대상으로 배출량을 산정하고 있음.
- 나대지별 토성을 조사하고 구분 짓는 것은 매우 어려우며, 우리나라의 대표적인 토성을 적용할 필요가 있음.
- 국토교통통계를 확인해보면 지목별, 시군구로 현황 파악 자료가 있지만 나대지로 따로 분류된 자료가 없음.
- 지금 비오톱 나대지 면적은 2015년도 업그레이드 된 자료이므로 현재 나대지 면적과 차이가 있음.
- 2016 서울시 나대지 현황을 살펴보면 5,942,422m² 으로 나타났지만 토지용도별 지도로 산정한 나대지 현황 14,108,721.45m² 보다 매우 낮게 파악되었음.
- 토지용도별 지도에서는 나대지라고 표시 되어있지만 건축물이 지어져 있어서 나대지가 아닌 경우도 있음.
- 운동장을 제외한 나대지에 포함되는 토지를 적용하지 못함.
- 계절에 따른 잔디 삭감률을 고려하지 못함.

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

2) 삭감식 산정식

- 나대지별 먼지억제제나 살수에 의한 저감량을 고려하여 삭감식 개정이 필요하며, 나대지 비산먼지 산정방법은 아래와 같음.

$$\begin{aligned} & \text{나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량(톤/년)} \\ & = \text{해당연도 나대지에 의한 배출량(톤/년)} \\ & \quad \times \text{인조/천연 잔디운동장 설치율} \times \text{삭감율(80\%)} \end{aligned}$$

- 인조/천연 잔디운동장 설치율에 따라 삭감량도 변함.
- (1) 현재 잔디 설치율(4%) 값을 적용한 값과 (2) 잔디 설치율(14%)을 가정한 값을 비교하여 나타냄.

<표 102> 서울시 나대지(운동장) 현황●

구 분	2016	
	1) 현재	2) 가정
나대지 면적(m ²)	5,942,422	
배출량(ton/yr)	869.50	
잔디 설치율(%)	4	14
PM10 삭감량(ton/yr)	26.49	97.38
PM2.5 삭감량(ton/yr)	3.97	14.61

1) 2016년 인조/천연 잔디운동장 설치율

2) 가정한 인조/천연 잔디운동장 설치율

4.2 개선방안 수립을 위한 분석

가. 선행연구 결과

- 김영진(2014)는 서울시 교육청의 2009년 학교 현황 자료를 참고하여 인터넷 포털 사이트 Daum의 위성자료를 이용하여 나대지를 면적을 산정하였으며, 강우 보정을 위하여 기상청의 기상 월보 자료를 참고하여 비산먼지 배출량을 추정한 바 있음.
- 인하대학교(2014)에서 토양환경정보시스템의 자료를 활용하여 나대지 토양의 토성은 평균적으로 모래(sand)가 91.6%로 측정되었으며, 미사(silt)는 약 7.9%, 점토(clay)는 약 0.5%로 측정함.
- Bagnold(1941)는 실험실 풍동을 이용하여 리비아 사막의 모래 움직임 관찰함으로써 도약비산(saltation)하는 모래입자들의 거동 및 입자비산의 메커니즘을 처음으로 연구함.
- Zingg(1951)는 침전입자들의 도약비산거동에 관한 풍동실험을 수행하였으며, Gillette(1978)는 풍식과 관련한 주요 인자인 임계마찰속도 등을 측정하기 위해 휴대용 풍동을 이용하였으며, 그 이후로 휴대용 풍동을 이용한 많은 연구들이 진행되어 왔음.
- 국내의 이재희(2015)는 나대지 중 학교운동장과 공사장, 공터, 주차장 등 다양한 임계마찰속도 실험을 하였으며, 수분함량과 토양 구성에 따라 차이가 있는 것으로 나타났으며, EPA AP-42방법과 비교하였을 때 나대지 장소별로 임계마찰속도 값의 변동이 큰 것을 추정한 바 있음.
- 중국 북경시의 나대지의 비산먼지를 추정하였으며, 토양 성분별 입자등을 고려하여 지표면에서 발생 Flux를 풍속등의 변수에 따른 비산먼지 배출량을 추정한 바 있음.

- 풍식(wind erosion) 현상에 대한 현재의 많은 지식은 풍동실험을 통해서 연구되었는데, Bagnold(1941) 연구이래로 오랜 역사를 지님(Shao, 2008). 풍동은 실험실내 풍동(laboratory wind tunnel)과 현장에서 측정할 수 있는 휴대용 풍동(portable wind tunnel)으로 구분할 수 있음.
- 미국 DRI,에서 개발한 PI-SWERL(Portable in situ wind erosion lab)은 원통상에 회전날개를 이용하여 토양표면에서 풍식 잠재력 및 먼지 배출량을 측정하는 소형장치를 개발함.
- 공기유속분포가 실제 자연 상태의 공기유속분포와는 크게 다를 수 있지만, 각 토양별로 상대적인 마찰속도 등의 풍식잠재력 및 이에 따른 발생하는 먼지(PM10) 플럭스를 용이하게 측정함.

나. 전문가 설문조사/자문의견

- CAPSS에서는 현재 활동도인 나대지 면적에 대한 통계자료가 확보 가능한 학교 운동장을 대상으로 나대지 풍식에 의한 비산먼지를 산출하고 있어 상대적으로 비산먼지 배출량이 과소평가되기 때문에 이에 대한 개선이 필요함.
- 나대지 항공/위성사진 등을 이용한 ‘나대지 현황 파악’은 시간, 비용 대비 배출량 산정 이점(利點)은 다소 불리함.
- 현재 서울시, 환경부 등에서 ‘비오톱’ 지도자료와 필지 과세(課稅)를 이용하면, 실제 나대지 현황 파악 가능함.
- 나대지 대상 배출량 산정방식에서 ‘강우일수’을 고려한 방식으로의 전환 검토 필요하나 기상인자를 구체적으로 적용하기에는 한계가 있으므로, ‘계절별 계수’(가칭)의 평균적용을 통한 배출량 산정접근방법이 필요함.
- 다양한 조건의 나대지 대상 배출계수 개발은 필요성이 있으나, 점진적인 접근이 필요함.
- 먼지역제제 살포로 인한 삭감량 산정방안 마련 필요함.

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

- 본 용역에서는 나대지 배출량 산정방법 검토는 참고로 이뤄지고, 삭감량 산정시 활용할 나대지 배출량과 삭감대책에 대한 삭감효과에 국한하여 검토 필요함.
- 먼지저감량이 먼지억제제 살포량 대비인지 단위가 필요함.
- 기초자료 취합없이 단순 삭감량이 산정되는 식이므로 문제가 있음. 즉 먼지억제제 살포 대상 학교의 운동장면적에 따른 전체 배출량 중 비중을 고려해야하며 먼지억제제 표준사용량 대비 면적을 추산하여 조정해야함.
- 교육부 잔디설치 지원 제도 추진 현황 파악이 필요함(유해물질 발생문제로 인조잔디 설치지양)
- 학교운동장만 고려하는 방식은 과소평가 불가피함.
- 실질적 나대지 면적을 어떻게 반영하느냐가 관건임.
- 나대지 면적의 정확도, 계절변동 등 중요함.
- 나대지 면적 파악(현황)이 배출량/삭감량 산정 이전에 일차적으로 통계자료의 구축이 필요함.

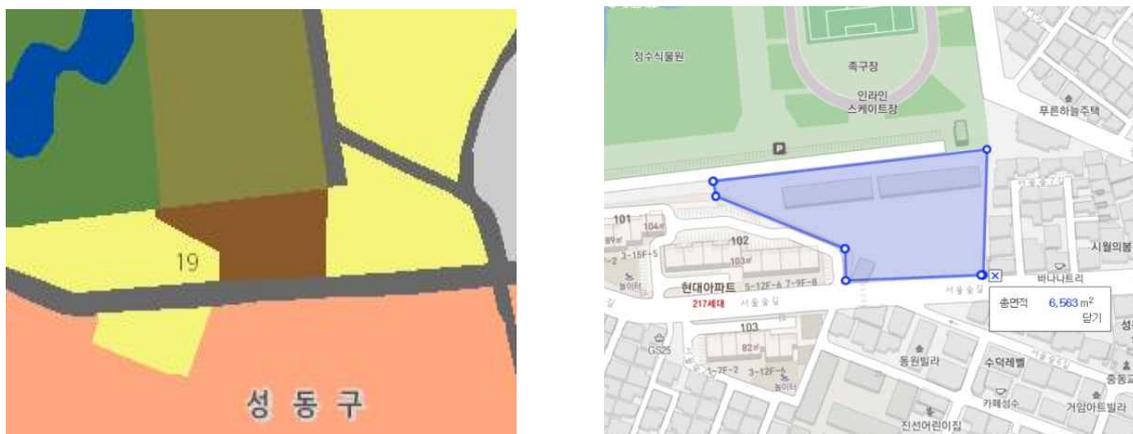
다. 결과분석 및 방안제시

제안 1) 면적에 의한 배출량 산정식 보정

- 나대지 항공/위성사진 등을 이용한 ‘나대지 현황 파악’은 시간, 비용 대비 배출량 산정 이점(利點)은 다소 불리하기 때문에, 현재 서울시, 환경부 등에서 ‘비오톱’ 지도자료를 이용하여 나대지 현황 파악 제시함.



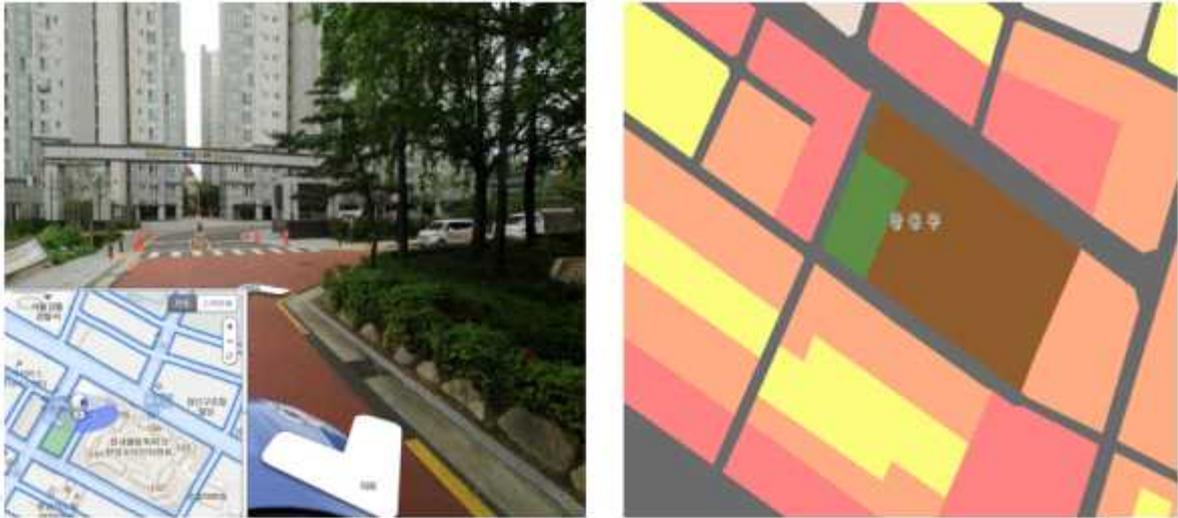
<그림 15> 서울시 비오톱 토지이용현황도



<그림 16> a. 서울시 토지이용도별 지도(예시) b. daum 면적 계산 방법(예시)

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

- 추가적으로 Daum로드뷰 서비스로 나대지 지역이 맞는지 확인하여 나대지 지역이 아닌 지역은 제외하고 나대지 지역인 곳을 따로 자료로 산출함. (Daum 로드뷰 서비스 주기 - 인기지역 : 1년, 비인기지역 : 2~3년 / 비오톱 주기 : 10년)



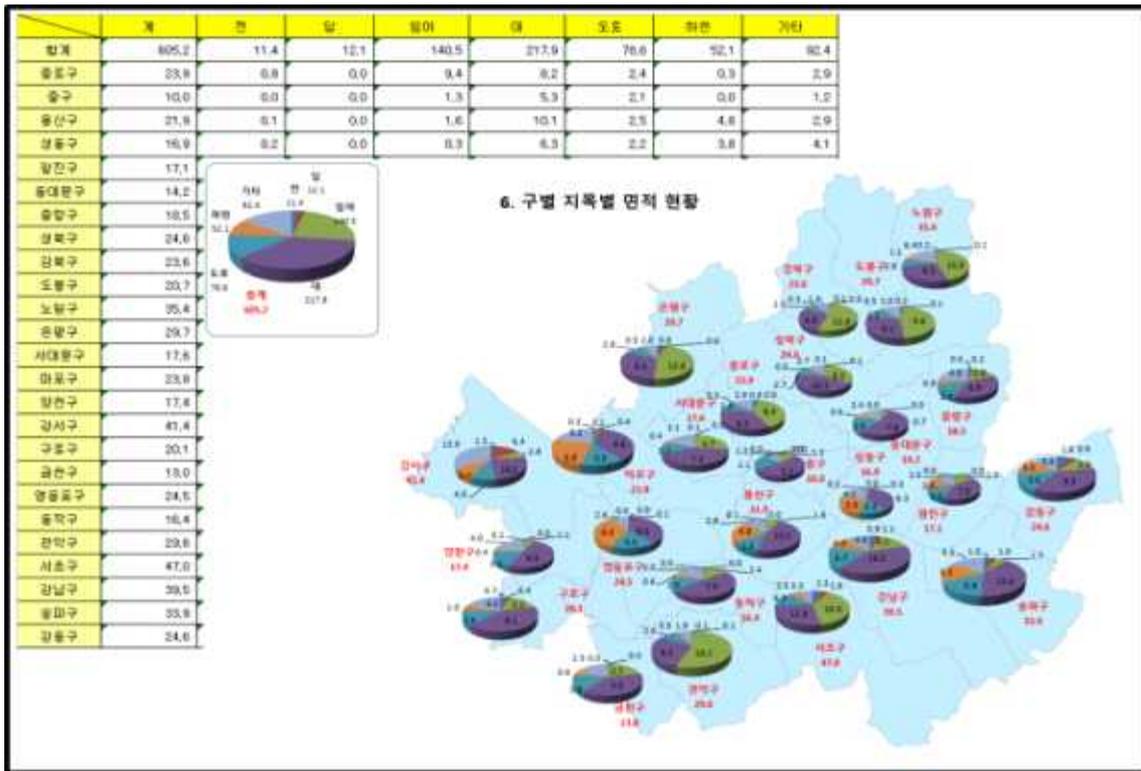
<그림 17> a. 서울시 Daum 로드뷰(예시) b. 서울시 토지용도별 지도(예시)



<그림 18> a. 서울시 Daum 로드뷰(예시) b. 서울시 토지용도별 지도(예시)

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

- 지목별(28개)로 나누어진 국토교통통계자료 중 나대지에 포함될만한 땅을 분류하여 적용함.



<그림 19> 행정구역별 지목별, 국토이용현황(시군구)

출처 : 국토교통통계누리(2016) 행정구역별·지목별 국토이용현황_시군구

나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량(톤/년)
 = 해당연도 나대지에 의한 배출량(톤/년) x 잔디 설치율 x 삭감율

나대지 배출량(kg/yr) = 나대지 면적(m²) x 배출계수(g/m²/yr) x 풍속 적용일수 x 10⁻⁶

*나대지 대상 : 학교운동장, 창고용지, 잡종지, 주택용지, 향만용지

- <표 103>은 2015년 기준으로 나대지 면적을 운동장만 하였을 때와 운동장 이외 추가 가능한 지목을 산출하여 나타냄.

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 103> 서울시 나대지 현황●

구 분	2015년	
	전	후
나대지 대상	학교운동장	학교운동장 주택용지(서울시)
나대지 면적(m ²)	4,892,110	4,905,142
배출량(ton/yr)	715.82	717.72

- 1) 나대지 면적 (학교운동장 : 3,280㎡ 이상 지역)
- 2) 주택용지(서울시 공유재산 나대지 현황) : 13,031.6㎡
- 3) 추후지목을 고려하여 학교운동장 외 대형나대지에 대한 현황파악 후 추가 고려대상 적용 여부를 결정하여야 할 것임.

제안 2) 거칠기 높이에 의한 배출계수 산정식 보정

- 나대지별 거칠기 높이에 대한 국내 연구결과 기반으로 거칠기 높이 적용 고려.
(기존 0.5cm)

$$\begin{aligned} \text{배출계수}(g/m^2/yr) &= k \times 0.5 \times \text{풍화잠재력(Erosion potential function)} \\ &= k \times 0.5 \times [58 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})^2 \\ &\quad + 25 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})] \\ &= k \times 0.5 \times \{58 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58]^2 \\ &\quad + 25 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58] \} \end{aligned}$$

<표 104> 나대지별 거칠기 높이◆

Site type	거칠기 높이(cm)
학교운동장	0.22
공사장 및 공터	0.47
자갈피복 나대지	1.28

출처 : 인하대학교(2014), 비산먼지 배출자료 개선기술 개발

$$\begin{aligned} \text{배출계수}(g/m^2/yr) &= k \times R \times \text{풍화잠재력(Erosion potential function)} \\ &= k \times R \times [58 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})^2 \\ &\quad + 25 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})] \\ &= k \times R \times \{58 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58]^2 \\ &\quad + 25 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58] \} \end{aligned}$$

R = 학교 운동장 : 0.22, 공사장 및 공터 : 0.47, 자갈피복 나대지 : 1.28

- 대지의 유형에 따라 거칠기 높이를 적용하여 나타냄.(서울시 2016년을 기준하였으며 표면마찰속도는 높이 상관없이 동일하다고 가정)

<표 105> 나대지별 거칠기 높이에 따른 배출계수 및 삭감량●

거칠기 높이	배출계수	2016 삭감량(ton/yr)	
		PM10	PM2.5
기존(0.5cm)	2.71	26.49	3.97
학교운동장(0.22cm)	1.19	11.63	1.74
공사장 및 공터(0.47cm)	2.55	24.93	3.74
자갈피복 나대지(1.28cm)	6.94	67.84	10.18

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

제안 3) 삭감효율에 의한 삭감식 보정

○ 먼지억제제 및 살수에 의한 나대지 비산먼지 저감 삭감량을 제시함.

<표 106> 먼지억제제 및 살수에 의한 먼지제거량◆

연구	제어 조치	TSP 제어효율(%)
EPA	Watering	20~50%
국내 연구	살수	45%
	CaCl ₂	45.8~50.7
	Cellulose	72.9~87.4%
	Polymer	89.8~95.2%
해외 연구	CaCl ₂	33.8%
	Polymer	93.2%

출처 : 인하대학교(2011), 비산먼지 저감을 위한 화학적 먼지억제제의 단기간 효율에 관한 연구

$$\begin{aligned} & \text{나대지 녹색화 사업에 의한 비산먼지 오염물질 삭감량(톤/년)} \\ & = \text{해당연도 나대지에 의한 배출량(톤/년)} \times \\ & \quad * \text{먼지억제제 및 살수에 의한 먼지저감량 (\%)} \end{aligned}$$

(CaCl₂ : 33.8~50.7%, Cellulose : 72.9~87.4%, Polymer : 89.8%, 살수 20~50%)

○ 각 해당연도 먼지억제제 및 살수에 의한 먼지 삭감량을 표로 비교하여 나타냄.

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

<표 107> 먼지억제제 및 살수 적용시 삭감량●

(단위: 톤/년)

구 분		2011	2015	2016
CaCl ₂	大	836.55	362.92	440.83
	小	557.70	141.95	293.89
Cellulose	大	1,442.10	625.63	759.94
	小	1,202.85	521.83	633.86
Polymer	大	1,570.80	681.46	827.76
	小	1,481.70	642.81	780.81
살수	大	825	357.91	434.75
	小	330	143.16	173.90

○ 각 해당연도 먼지억제제 및 살수에 의해 삭감된 배출량을 평균으로 나타냄.

<표 108> 먼지억제제 및 살수 적용시 배출량●

(단위 : 톤/년)

구 분	2011	2015	2016
기존 배출량	1,650	715.82	869.50
CaCl ₂	952.88	463.39	502.14
Cellulose	327.53	142.09	172.6
Polymer	123.75	53.69	65.22
살수	1072.50	465.29	565.18

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

다. 추후연구 필요성

- 잔디뿐만 아니라 다른 방식의 비산먼지 방지기능이 있는 방법에 대한 삭감률 연구 실시.
- 다른 방식의 비산먼지 방지기능 설치율에 대한 자료조사 필요함.
- 계절에 따른 배출계수 값을 선정하여 배출량 및 삭감식 적용이 필요함.
- 거칠기 높이와 토양 성상에 따른 배출계수 연구가 필요함.
- 인조잔디와 천연잔디의 삭감률을 따로 분류하여 선정함. (유해물질 발생문제로 인조잔디 설치를 지양하며 물질이 달라 삭감률에 차이가 있을듯함)
- 지목별 나대지 구분 할 수 있는 방법이 추가적으로 필요함.
- 운동장을 제외한 토지의 계절/조건에 따른 배출량 및 삭감률 연구 자료조사가 필요함.
- 나대지의 토양 수분함량에 따른 나대지 배출량 산정식을 반영 위해 추가적인 연구가 필요함.
- 2015 서울시 나대지 현황을 살펴보면 4,892,100m² 으로 토지용도별 지도로 산정한 나대지 현황 (14,108,721.45m²) 보다 매우 낮게 파악되었으며, 용도별 나대지 현황에 대한 추가적인 연구가 필요함.

5. 비산먼지 발생 건설사업장 관리 강화 사업 삭감식 개선 (안)

5.1 현황 및 문제점 분석

가. 현황

- CAPSS 건설사업장에서 발생하는 비산먼지 발생량 산정식 중 사업장에서 토공 기간 7개월/yr에 대한 보다 정확한 검토가 필요함.
- 건물 종류별 토공기간을 세분화하여 계산할 필요가 있으나 배출량과 예상 배출량 등을 위한 '세분화' 범위 파악이 우선적으로 필요함.

나. 문제점 분석

1) 건설사업장별 건설 공정

- 건설사업장의 공사종류에 따라 건설 공정이 다르므로 공사종류를 구분하여 배출계수와 공사기간을 산출하여 계산할 필요가 있음.
- 건설사업장의 건설 공정별 비산먼지 배출량이 다르므로 건설공정별 비산먼지 발생량 및 배출계수의 조사가 필요함.
- 공정에서 비산먼지가 많이 발생하는 공정과 적게 발생하는 공정을 구분하여 토공기간 및 배출계수를 산출함.
- 건설공정의 분류에 따른 토공기간의 재검토가 필요함.

<표 109> 건축물 축조공사 공정도

공정도
굴착공사 → 철골공사 → 기초공사 → 구조물 공사 → 마감공사 → 조경공사 → 도로포장 공사

출처 : 환경부(2014), 사업별, 공정별 비산먼지 관리 매뉴얼

- 건축물 축조 공사란 종합적인 계획, 관리 및 조정에 따라 토지에 정착하는 공작물 중 지분과 기둥을 의미함.
- 비산먼지 배출공정은 싯기 및 내리기, 야적, 뽐칠 및 그 외, 수송이며 배출공정별 비산먼지 발생 요인은 <표 110>과 같음.

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 110> 건축물 축조공사 비산먼지 발생요인

공정명	비산먼지 배출 세부공정 및 요인
싣기 및 내리기	-토사/골재의 운반차량 싣기 및 내리기 시 비산먼지 발생
야적	-토사/골재 등 바람의 영향으로 비산먼지 발생
뽕칠 및 그 외	-골조공사 시 뽕칠작업으로 주변 비산먼지 발생 -바닥청소, 벽체연마, 분사방식에 의한 도장공사 시 비산먼지 발생 -건축구조물 해체 작업 시 비산먼지 발생
수송	-운반차량 이동에 따른 비포장 도로 비산먼지 발생 미 외부도로 차량 타이어에 묻은 토사 유출 -수송 : 터파기 → 싣기 → 현장 내 소운반 → 세륜시설 → 외부운반

출처 : 환경부(2014), 사업별, 공정별 비산먼지 관리 매뉴얼

<표 111> 토목공사 공정도

공정도
가설공사 → 흙막이(굴착공사) → 기초공사 → 구조물 공사 → 포장공사 및 기타공사

출처 : 환경부(2014), 사업별, 공정별 비산먼지 관리 매뉴얼

- 토목공사란 토사와 목석으로써 하는 공사를 뜻함. 목재, 철재, 토석 등을 사용하여 도로, 제방, 항만, 철도, 상하수도 등을 건설/유지하는 공사를 총칭함.
- 비산먼지 배출공정은 토사 야적, 싣기 및 내리기, 수송이며 배출 공정별 비산먼지 발생요인은 <표 112>와 같음.

<표 112> 토목공사 비산먼지 발생요인

공정명	비산먼지 배출 세부공정 및 요인
싣기 및 내리기	토사/골재의 운반차량 싣기 및 내리기 시 비산먼지 발생
야적	토사/골재 등 바람의 영향으로 비산먼지 발생
채광채취	절토부 및 구조물 하부 암반제거를 위한 발파 작업시 발생하는 비산먼지
수송	운반차량 이동에 따른 비포장 도로 비산먼지 발생 미 외부도로 차량 타이어에 묻은 토사 유출 수송 : 터파기 → 싣기 → 현장 내 소운반 → 세륜시설 → 외부운반
그밖의 공정	구조물 마감공사 시 분사방식에 의한 도장 및 표면 연마 작업시 발생하는 비산먼지

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

출처 : 환경부(2014), 사업별, 공정별 비산먼지 관리 매뉴얼

<표 113> 조경공사 공정도

공정도
1. 터파기 → 절토 → 다짐 → 골재 및 모래 포설 → 포장(포장) 2. 수목반입 → 식재 → 지주목 결속 및 관수(식재) 3. 철근가공 및 조립 → 거푸집 조립 → 레미콘 타설(시설물)

출처 : 환경부(2014), 사업별, 공정별 비산먼지 관리 매뉴얼

- 조경공사란 종합적인 계획, 관리, 조정에 따라 수목원, 공원, 녹지, 숲의 조성 등 경관 및 환경을 조성, 개량하는 공사를 의미함.

-비산먼지 배출공정은 톳 야적, 싣기 및 내리기, 수송이며 배출 공정별 비산먼지 발생요인은 <표 114>와 같음.

<표 114> 조경공사 비산먼지 발생요인

공정명	비산먼지 배출 세부공정 및 요인
싣기 및 내리기	-토사/골재의 운반차량 싣기 및 내리기 시 비산먼지 발생
야적	-토사/골재 등 바람의 영향으로 비산먼지 발생
수송	-운반차량 이동에 따른 비포장 도로 비산먼지 발생 미 외부도로 차량 타이어에 묻은 토사 유출 -수송 : 터파기 → 싣기 → 현장 내 소운반 → 세륜시설 → 외부운반

출처 : 환경부(2014), 사업별, 공정별 비산먼지 관리 매뉴얼

<표 115> 지반조성공사 공정도

공정도
철거 → 터파기 → 절토 → 성토 → 다짐 → 관로부설 → 포장

출처 : 환경부(2014), 사업별, 공정별 비산먼지 관리 매뉴얼

-지반조성공사란 계약 또는 자기 계정에 의하여 지반조성을 위한 발파, 시굴, 굴착, 정지 등을 수행하는 공사를 의미함.

-비산먼지 배출공정은 토사야적, 싣기 및 내리기, 수송, 건축물 해체이며 배출 공정별 비산먼지 발생요인은 <표 116>와 같음.

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 116> 지반조성공사 비산먼지 발생요인

공정명	비산먼지 배출 세부공정 및 요인
실기 및 내리기	-토사/골재의 운반차량 실기 및 내리기 시 비산먼지 발생
야적	-토사/골재 등 바람의 영향으로 비산먼지 발생
수송	-운반차량 이동에 따른 비포장 도로 비산먼지 발생 미 외부도로 차량 타이어에 묻은 토사 유출 -수송 : 터파기 → 실기 → 현장 내 소운반 → 세륜시설 → 외부운반
건축물 해체	-기존 건축물 및 도로의 깨기 작업 시 비산먼지 발생

출처 : 환경부(2014), 사업별, 공정별 비산먼지 관리 매뉴얼

2) 산정대상

- 현재 비산먼지 배출량 산정대상이 주거시설을 위주로 산정되고 있으며, 주거시설보다 발생량이 많은 비주거시설의 배출량 산정에 힘쓸 필요가 있음.

3) 이행률

- 현재 삭감식에서의 이행률은 매우 낮은 상태이며, 비산먼지 발생 기준에 따라 각 시, 도에서 관리, 점검하고 있는 사업장에서의 위반율을 바탕으로 이행률을 다시 산정할 필요가 있음.
- 사업장에서 시행중인 저감방법을 구분하여 이행률 산정이 필요함.

4) 저감효율

- 비산먼지 저감효율에 관련하여 보다 체계적이고 과학적인 접근이 필요함.
- 살수시간 간격에 따라 PM10 저감효율이 다르게 나타나므로, 시간 간격을 고려한 ‘비산먼지 배출 억제 지침’ 제시, 이에 따른 삭감식 적용이 필요함.
- 다양한 비산먼지 억제효율 판단을 위한 충분한 수단별 저감효율 개선이 필요함.

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

5.2 개선방안 수립을 위한 분석

가. 선행연구 결과

- 2016년 인천시와 경기도에서 실시한 비산먼지 발생사업장의 비산먼지 지도/점검을 통해 사업장의 시행기준 위반율을 산정한 바 있으며, 위반율을 통해 이행율을 알 수 있음.

<표 117> 인천시 비산먼지 발생사업장 지도점검 실적(2016)

업종별	점검업소수	위반업소수	위반내역					조치내역					과태료(금액)	고발
			계	개선명령 이행 불응	개선명령 등 분행	시설기준 부적정	허용기준 초과	(변경) 신고 미이행	계	사용지	조치명령 이행	개선명령		
소계[A+B]	1,930	144	168	1	117	3	47	168	4	20	93	51	45 (5,772)	17
건설업 (일반공사장) [A]	1,328	75	87	1	58	3	25	83	0	10	48	28	25 (2,928)	8
특별관리공사장 [B]	602	69	81	0	59	0	22	85	4	10	45	23	20 (2,844)	12

- ◆ : 문헌조사 데이터
- : 계산에 의한 데이터
- ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 118> 2016 경기도 비산먼지 점검 결과

시군	대상 업소 수	점검 업소 수	위반 업소 수	위 반 내 역(건수)						조 치 내 용(건수)									
				계	비산먼지 방지시설 (연결 신호 미이행)	비산먼지 지역제 설 · 조치 미이행	비산먼지 지역제 시설 · 조치 미흡	조치 이행 · 개선 명 · 불이행	기 타	계	사 용 중 지	조 이 명	개 명	선 명	경 고	기 타	과태료		고 발
																	건수	금 액 (만원)	
계	6,318	2,269	184	189	79	41	64	3	2	189	3	53	72	57	0	64 (60)	3614	56 (56)	
수원시	302	237	14	14	4	1	9	0	0	14	0	1	9	4	0	3 (3)	1020		
성남시	128	128	5	5	2	-	3	-	-	5	-	1	2	-	-	2	120	-	
용인시	121	121	5	5	2	-	3	-	-	5	-	1	2	2	-	2 (2)	120	1 (1)	
부천시	160	151	12	12	11	-	1	-	-	12	-	1	-	11	-	9 (9)	432	3 (3)	
안산시	230	182	10	10	6	2	2			10		2	2	6		3 (3)	288	2 (2)	
안양시	64	59	2	2	-	-	-	-	2	2	-	-	-	-	-	2	96		
화성시	54	54	22	23	3	12	7	1	-	23	2	12	7	2	-	1 (1)	80	13 (13)	
평택시	769	78	7	7	3	1	3	-	-	7	-	1	3	3	-	2 (2)	120	1 (1)	
시흥시	190	52	5	5	1	1	3	0	0	5	0	1	3	1	0	(0)		2 (2)	
광명시	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
김포시	436	35	2	2	2	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	2 (2)	120	(0)	
군포시	43	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
광주시	21	21	1	2	1	1	-	-	-	2	-	1	-	1	-	1 (1)	60	1 (1)	
오산시	93	45	6	6	3	3	-	-	-	6	-	3	-	3	-	3 (3)	180	3 (3)	
이천시	26	20	2	2	2	-	-	-	-	2	-	-	-	2	-	2 (2)	120	- ()	
안성시	383	36	1	1	1	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1 (1)	60	-	
의왕시	73	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
하남시	96	53	3	3	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0 ()	0	0 ()	
여주시	522	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
양평군	1,124	5	1	1	-	1	-	-	-	1	-	-	-	1	-	- ()	-	1 (1)	
과천시	16	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
고양시	236	133	15	15	6	2	6	1		15	0	2	6	7		5 (5)	252	4 (4)	
남양주	293	173	10	10	2	6	2	-	-	10	-	5	2	3	-	3 (3)	144	5 (5)	
의정부	117	117	3	3	1	-	2	-	-	3	-	-	2	1		1 (1)	60	(-)	
파주시	127	127	29	29	22	7	-	-	-	29	-	7	22	-	-	19 (19)	114	3 (3)	
양주시	57	17	9	11	2	3	6	0	0	11	0	3	6	2	0	0	0	4 (4)	
구리시	46	46	3	3	1	-	2	-	-	3	-	-	2	1	-	()	60	()	
포천시	136	44	14	15	3	0	11	1	0	15	1	11	0	3	0	2 (2)	120	12 (12)	
동두천	36	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
가평군	290	30	2	2	-	1	1	-	-	2	-	1	1	-	-	()	-	1 (1)	
연천군	109	86	1	1	1	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1 (1)	48	()	

◆ : 문헌조사 데이터
● : 계산에 의한 데이터
▲ : 측정에 의한 데이터

- 국내에서는 인하대학교(2011)에서 먼지억제제와 살수를 하였을 때 비산먼지 억제 효율에 대하여 연구하였으며, 해외에는 EPA와 다른 연구 자료들에서 살수와 먼지억제제의 효율을 연구한 결과가 있음.

<표 119> 먼지억제제 및 살수에 의한 먼지제거량◆

연구	제어 조치	TSP 제어효율(%)
EPA	Watering	20~50%
국내 연구	살수	45%
	CaCl ₂	45.8~50.7%
	Cellulose	72.9~87.4%
	Polymer	89.8~95.2%
해외 연구	CaCl ₂	33.8%
	Polymer	93.2%

출처 : 인하대학교(2011), 비산먼지 저감을 위한 화학적 먼지억제제의 단기간 효율에 관한 연구

- 해외 연구 사례는 EEA Air pollutant emission inventory guidebook(2016)에서 건물 종류별 토공기간의 연구 결과가 있으며, 우리나라에서는 N의 주택분야 건축설계지침(2010)에서 건축물의 건설기간을 지침하고 있음.

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

<표 120> 주택분야 공사기간

구분		공사기간	비고(유로폼 적용시)
일반건축 공사	6층 이하 건축물	185일+26일+20일×2층 이상 층수 (단, 2층 이하 건 축물 전체기간은 230일)	185일+30일+20일×2층 이 상층수 (단, 2층 이하 건축 물 전체기간은 230일)
	7층 이상 건축물	185일+26일+12일×2층 이상 층수	185일+26일+12일×2층 이 상층수
P.C조건 축공사	6층 이하 건축물	162일+30일+19일×2층 이상 층수 (단, 2층 이하 건 축물 전체기간은 220일)	-
	7층 이상 건축물	162일+30일+15일×2층 이상층수+16층 이상 층수×2	-
설계, 시공 일괄입찰 방식		일반 건축 공사기간 + 55일	-

<표 121> 건설형태별 토공기간◆

Type of construction	Estimated duration (year)
Construction of houses (detached single family, detached two family and single family terraced)	0.5(6month)
Construction of apartments (all types)	0.75(9month)
Non-residential construction (all construction except residential construction and road construction)	0.83(10month)
Road construction	1(12month)

* 출처 : EEA(2016), Air pollutant emission inventory guidebook

나. 전문가 설문조사/자문의견

- 살수 시간 간격에 따라 PM10 저감효율이 다르게 나타나므로, 시간 간격을 고려한 ‘비산먼지 배출 억제 지침’ 제시, 이에 따른 삭감식 적용이 필요함.
- 저감효율 이행율을 기준으로 산정하는 건설현장 비산먼지 발생량 추정방식 보다 조금 더 과학적인 기반에 근거한 발생량 산정식에 대한 검토가 필요함.
- 다양한 비산먼지 억제 효율 판단을 위한 충분한 수단별 저감효율 개선이 필요함.
- 건물 종류별 토공기간을 세분화하여 계산할 필요가 있으나 배출량과 예상 배출량 등을 위한 ‘세분화’ 범위 파악이 우선적으로 필요함.
- 건물 종류별 토공기간을 세분화하여 계산할 필요가 있다는 것에 공감함. 다만, 배출량과 예상 배출량 등을 위한 ‘세분화’ 범위 파악이 선행될 필요가 있음.
- 분율 수치는 ‘정기적 조사를 통해 확인 정보’ 공식제시가 필요함.
- 건설현장의 비산먼지 발생량을 주로 주거시설에 한정하여 평가하고 있는데 실제 발전시설이나 대형 토목공사와 같은 부분에서 배출되는 배출량에 대한 검토가 필요할 것으로 사료됨.

다. 결과분석 및 방안제시

제안 1) 배출량 산정식 개선(안)

- 건물 종류별 토공기간을 세분화하여 계산할 필요가 있으나 배출량과 예상 배출량 등을 위한 ‘세분화’ 범위를 적용하여 산정하는 것을 제안함.
- 건설 과정에서의 공정을 세분화하여 주요 발생공정을 찾고 이에 따라 배출식에서 공정별로 나누어 계산, 혹은 주요 발생공정을 중심으로 토공기간 및 배출계수를 다시 산정하는 것을 제안함.
- 공사장 비산먼지 억제제 및 살수에 의한 비산먼지 저감효율을 고려하여 산정하는 것을 제시함.

$$\text{사업장 비산먼지 배출량} = \sum\{\text{공정별 배출계수(kg/m}^2\text{/month)} \times \text{공정별 토공기간(month/yr)} \times \text{공사면적(m}^2\text{)}\}$$

- 토공기간의 세분화를 통한 PM10 배출량은 다음과 같음.
- 현재 비산먼지 배출식의 토공기간의 7개월을 건물의 종류별로 유럽의 기준을 따라 적용하였을 때 단독주택의 배출량은 감소, 공동주택과 비주거시설의 배출량은 증가하였음.

<표 122> 서울시 사업장 비산먼지 배출량[●]

	2016 서울시 사업장 비산먼지 배출량(ton)	개선 후(ton)
단독주택	37.69	32.31
공동주택	514.54	661.55
비주거시설	1,699.74	2,185.38

※ 건설기간 : 단독주택(6개월), 공동주택(9개월), 비주거시설(10개월)

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

제안 2) 삭감식 개선(안)

- 먼지역제제 및 살수에 의한 미세먼지 저감효율 제시함.

(삭감식 예시)

$$\begin{aligned} & \text{비산먼지 발생사업장 관리 강화에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)} \\ & = \text{건설현장 비산먼지 발생량(톤/년)} \times \text{저감효율} \times \text{이행률(90\%)} \\ & (\text{이행률} = \text{인천시, 경기도에서의 점검현황, 저감효율 : CaCl}_2 \text{ : 33.8\sim50.7\%,} \\ & \text{Cellulose : 72.9\sim87.4\%, Polymer : 89.8\%~95.2, 살수 20\sim50\%}) \end{aligned}$$

- 이행률은 인천시와 경기도의 비산먼지 발생 사업장의 감독, 점검을 통한 사업장의 위반율을 통해 이행률을 산정함.
- 먼지 제거 방법별 삭감량을 계산 하였을 때 삭감량이 현재보다 상당히 증가하였으며, 여러 방법을 같이 사용하였을 때의 효율은 차후 연구가 필요함.
- 먼지역제제 및 살수를 통한 PM10 삭감량은 다음과 같음.

<표 123> 비산먼지 제거 방법에 따른 서울시 사업장 비산먼지 삭감량[●]

		2016 서울시 사업장 비산먼지 삭감량(ton)	개선 후(ton)
CaCl ₂	최저	-	190.29
	최고		
Cellulose	최저	-	360.99
	최고		
Polymer	최저	-	416.62
	최고		
살수	최저	45.04	157.64
	최고		

* 저감효율의 평균값으로 적용하여 삭감량을 산정함.

◆ : 문헌조사 데이터
 ● : 계산에 의한 데이터
 ▲ : 측정에 의한 데이터

○ 점검 결과를 통해 이행률 90%로 설정한 후 삭감량을 계산하였을 때 202.68ton으로 삭감량이 증가하였음.

○ 이행률 변화에 따른 PM10 삭감량의 변화는 다음과 같음.

<표 124> 비산먼지 삭감량 개선 전·후 비교●

2016 서울시 사업장 비산먼지 삭감량(ton)	개선 후(ton)
45.04	202.68

다. 추후연구 필요성

- 주기적인 현장측정을 통해 많은 실측자료들이 필요함.
- 삭감량을 알기위해서 여러가지 방법으로 비산먼지를 억제하였을 때 비산먼지 저감효율에 대한 연구가 필요함.
- 정확한 발생량을 산정하기 위해 건설공정별 토공기간이 필요함.
- 건설 형태에 따른 공사기간을 적용하여 비산먼지 배출량을 산정해야 하고, 먼지 억제제 및 살수에 의한 미세먼지 저감효율 제시함.

6. 기존 삭감식의 개선(안) 및 활용계획

○ 비산먼지 관리대책별 삭감식 개선(안)을 요약 정리함.

<표 125> 비산먼지 대책별 삭감식 및 개선식 비교

세부 사항	기본계획 삭감식	개선(안) 삭감식
포장 도로	<p><먼지흡입식 제거장비 보급> 보급대수(대) × 단위삭감량(톤/년·대)</p> <p><진공청소·진공살수차 운행> 운행대수(대) × 단위삭감량(톤/년·대)</p>	<p>(단위삭감식)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px;"> $\text{단위삭감량 (톤/년·대)} : \text{먼지제거량(톤/년)} / \text{차량대수(대)}$ <p style="text-align: center;">↓</p> $\text{단위삭감량 (톤/년·대)} : \text{작업거리 당 먼지수거량 (톤/km·대)} \times \text{주행거리(km/년)}$ </div> <p>*기존단위삭감량은 거리를 고려하지 않았으나 개선(안) 삭감량은 거리를 고려하여 제안함.</p>
저마모 타이어	<p>해당연도 전망배출량(BAU)(톤/년) × 저마모 타이어 보급률 × 삭감률</p>	<p>(배출량)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px;"> $\text{저마모 타이어 마모에 의한 오염물질 삭감량(톤/년)} = \text{해당연도 타이어마모 배출량(톤/년)} \times \text{저마모 타이어 보급률} \times \text{삭감률}$ </div> <p>*BAU배출량을 과거 배출량산정기간을 향후 실제 배출량으로 조정하여 산정함.</p>
나대지	<p>해당연도 전망배출량(BAU)(톤/년) × 인조/천연 잔디 운동장 × 삭감율(80%)</p>	<p>(나대지 면적)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px;"> $\text{배출량(kg/yr)} = \text{나대지 면적(m}^2\text{)} \times \text{배출계수(g/m}^2\text{/yr)} \times \text{풍속 적용일수} \times 10^{-6}$ <p style="text-align: center;">*나대지 대상 : 학교운동장 ↓ *나대지 대상 : 학교운동장, 주택용지(서울시 공유재산 나대지)</p> </div> <p>*나대지 대상지역을 기존 운동장에서 추가적으로 주택용지 등을 제안함.</p> <p>(거칠기 높이)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px;"> $\text{배출계수(g/m}^2\text{/yr)} = k \times 0.5 \times \text{풍화잠재력}$ <p style="text-align: center;">↓</p> $\text{배출계수(g/m}^2\text{/yr)} = k \times R \times \text{풍화잠재력}$ <p style="text-align: center;">(거칠기 높이(cm): R = 0.22, 0.47, 1.28)</p> </div> <p>*기존0.5cm로 사용하던 거칠기 높이를 각 지형에 따라 제시하였음.</p>

건설 현장	해당연도 전망배출량(BAU)(톤/년) × PM10 저감효율(10%) × 이행률(20%)	(공정별 토공기간 및 배출계수)
		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> $\begin{aligned} \text{배출량(kg/년)} &= \text{연간 공사면적(m}^2\text{)} \\ &\times \text{토공기간(7개월/년)} \times \text{배출계수(kg/m}^2\text{/월)} \\ &\downarrow \\ \text{배출량} &= \sum\{\text{공정별배출계수(kg/m}^2\text{/month)} \\ &\times \text{공정별 토공기간(month/yr)} \times \text{공사면적(m}^2\text{)}\} \\ &\text{(단독주택:6개월, 공동주택:9개월, 비주거시설:10개월)} \end{aligned}$ </div> <p>*기존 단일 토공기간을 건설공사 종류별로 구분하고 공정별 배출계수로 구분하여 제시함.</p> <td>(저감효율과 이행률)</td>
		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> $\begin{aligned} \text{삭감량(톤/년)} &= \text{건설현장 비산먼지 발생량(톤/년)} \\ &\times \text{저감효율(PM10 : 10\%)} \times \text{이행률(20\%)} \\ &\downarrow \\ \text{삭감량(톤/년)} &= \text{건설현장 비산먼지 발생량(톤/년)} \\ &\times \text{저감효율} \times \text{이행률(90\%)} \end{aligned}$ </div> <p>※저감효율 : CaCl₂(33.8~50.7%), Cellulose(72.9~87.4%), Polymer(89.8%), 살수 (20~50%) 이행률 : 인천, 경기도의 점검 위반율 10%를 통해 산정</p> <p>*비산먼지 저감수단별(먼지억제제, 살수등) 저감효율을 구분하고 건설현장 미세먼지 저감이행률을 실제 점검 결과를 반영하여 조정함.</p>

<표 126> 비산먼지 대책별 삭감식 요약정리

세부 사항	요약정리	
	제시방안	추후연구
포장 도로	-분진제거장비에 의한 미세먼지 발생량에 따른 운행대수 산정. -분진제거장비 단위 삭감량을 주행거리당 삭감식 제시. (살수차량, 진공청소차량 제외)	<분진흡입식 제거장비> -단위삭감량 작업거리당 먼지수거량 자료 -청소작업거리에 대한 운행거리 및 먼지 수거량을 통한 삭감식 -PM10/PM2.5 분율에 관한 사례가 부족 -실제주행거리에 대한 먼지제거량 산정을 통해 재비산먼지 발생량 대비삭감량 산정
저마모 타이어	-금호타이어와 환경부의 보고서를 토대로 삭감을 보정. (삭감률 : 10~30%, 8~10% 선택적 적용) -PM2.5/PM10 분율에 한 보정 (차량 속도에 따라 0.67~0.78 분율 적용)	-실정에 맞는 타이어마모 배출량 산정식 -실제 주행 조건에서의 타이어마모 배출량 -저마모 타이어 삭감량 (저마모 타이어 보급률을 대입한 값 적용)
나대지	-운동장 이외의 지목들을추가 -거칠기 높이에 의한 배출계수 제시 -먼지억제제 및 살수에 의한 먼지제거량 제시	-토양 성상과 수분 -면적산출(운동장 이외의 토지). -계절에 따른 배출계수 -거칠기 높이와 이에 따른 표면마찰속도 -삭감율에 대한 정확도

건설 현장	-건설중인 건물의 종류별로 토공기간을 다르게 적용 -건설 공정별 배출계수 산출 및 적용 -이행률은 인천시와 경기도의 사업장 점검 현황에 따라 산정	-배출계수 -토공기간 -저감효율별 이행률 -여러가지 저감법
------------------	---	---

○ 비산먼지 관리대책에 따른 삭감식 개선에 필요한 기간별 대책에 대한 내용을 <표 127>에 나타내었음.

<표 127> 비산먼지 삭감식 개선에 필요한 기간별 대책

비산먼지 대책	단기	중기	장기
도로 재비산먼지 체계적 관리 강화	서울시의 먼지제거장비에 대한 주행거리당 먼지제거량 모니터링 및 삭감량 산정.	서울, 경기 인천시의 먼지제거장비에 대한 주행거리당 먼지제거량 모니터링. 수도권 먼지제거장비에 의한 먼지입경분포 모니터링	수도권의 먼지제거장비 주행거리당 먼지제거량으로 삭감식 산정. 수도권 먼지제거장비에 의한 먼지입경분포를 적용한 삭감식 산정
	서울시의 저마모 타이어 보급 실적에 대한 통계조사	서울, 경기, 인천시의 저마모 타이어 보급 실적에 대한 통계조사에 의한 삭감식 산정	-
	저마모 타이어에 의한 삭감률을 적용한 삭감량 산정		
나대지	서울시 운동장외 나대지 적용한 삭감량 산정	수도권 나대지(운동장제외) 적용가능한 면적 모니터링	수도권 나대지 관리에 대한 삭감식 산정
	먼지역제제를 이용한 나대지 삭감량 산정		
비산먼지 발생사업장 관리강화	인천시 건설활동에 의한 비산먼지 관리 대책 이행률을 통한 삭감량 산정	수도권 건설활동에 의한 비산먼지 관리 대책 이행률을 통한 삭감량 산정	-
	건설활동별 기간을 적용한 삭감량 산정		
	먼지역제제를 이용한 삭감량 산정		

○ 비산먼지 관리대책별 활용계획에 대한 내용을 <표 128>에 나타내었음.

<표 128> 비산먼지 대책별 활용계획

비산먼지 대책	활용계획	근거
도로 재비산먼지 체계적 관리 강화	- 지자체 도로먼지 제거장비의 효과적 운용 평가를 위해 삭감량 개선식 지자체 활용	- 도로 먼지제거 장비 삭감식 개선(안)
	- 저마모 타이어 보급시 효과적 평가를 위해 삭감식 개선량 지자체 활용	- 저마모 타이어 삭감식 개선(안)
나대지	- 나대지 관리에 의해 삭감되는 비산먼지 평가를 위해 삭감량 개선식 지자체 활용	- 나대지 삭감식 개선(안)
비산먼지 발생사업장 관리강화	- 지자체 비산먼지 발생사업장 관리강화에 의한 효과적 평가를 위해 삭감량 개선식 지자체 활용	- 건설활동 삭감식 개선(안)

7. 요약

7.1 주요 연구결과

가. 수도권 미세먼지 및 비산먼지 발생 현황 조사

- 수도권 배출량을 각 종류에 따라 백분율로 구분하였음.
- 2002년부터 2015년 까지 수도권 PM10, PM2.5의 연평균치를 그래프로 제시함.

나. 국외 비산먼지 배출량 산정식 및 인벤토리 조사

- 국가별 비산먼지 배출목록을 나타내어 이를 기준으로 비산먼지 산정방법을 조사함.

다. 수도권 관리대책별 비산먼지 삭감량 산정방법 조사·분석

- 수도권 관리대책별 비산먼지 삭감량에 대한 개선안을 작성하고 전문 자문위원들에게 설문조사를 하여 추가적인 개선안을 검토하였음.

라. 국내·외 비산먼지 배출량 산정식 조사

- 배출량 산정식에 관련된 국내·외 연구자료와 논문자료에 사례들을 제시.

마. 수도권 관리대책별 비산먼지 삭감량 개선안 마련

- 국내·외 자료를 수집하여 기존 삭감식과 개선 삭감식을 예시를 통해 비교하여 개선방안을 제시함.

7.2 개선방안 요약

가. 도로 비산먼지 제거장비 보급 개선 활성화 삭감식 개선(안) 마련

- 분진제거장비에 의한 미세먼지 운행대수를 감안하여 단위 발생량을 산정함.
- 분진제거장비 단위 삭감량을 주행거리당 삭감식으로 산정함.

※수도권(서울,경기,인천)지역에 대한 분진흡입식 제거장비 주행거리당 먼지제거량 수집통계자료에 관한 지속적 연구가 필요함.

나. 저마모 타이어 보급 활성화 삭감식 개선(안) 마련

- PM2.5/PM10 분율을 보정함.(EU 산정식 0.7 적용)
- 참고문헌을 토대로 미세먼지 삭감률을 적용하여 삭감식으로 산정함.

※수도권(서울,경기,인천)지역에 대한 저마모 타이어 보급에 관한 자료 마련이 필요함.

다. 나대지녹색화사업 삭감식 개선(안) 마련

- 기존의 운동장 이외의 지목들을 추가함.
- 거칠기 높이에 의한 배출계수를 산정함.
- 먼지역제제 및 살수에 의한 삭감량을 산정함.

※수도권(서울, 경기, 인천)지역에 대한 지목별 나대지 구분 자료와 조건(계절, 토양 수분함량, 거칠기 높이)에 따른 연구조사가 필요함.

라. 비산먼지 발생사업장 관리강화 사업 삭감식 개선(안) 마련

- 건설 중인 건물의 종류별 토공기간을 적용하여 산정함.
- 건설 공정별 배출계수를 산정 및 적용함.
- 이행율과 먼지역제제 및 살수에 따른 삭감식을 적용함.

※수도권(서울,경기,인천)지역에 대한 주기적인 현장측정을 통한 실측자료 조사가 필요함.

참 고 문 헌

1. 대기오염 배출 인벤토리 개선 및 신뢰도 향상기술 개발, 환경부, 2014
2. 수도권 대기환경관리 기본계획에 따른 '15년 서울특별시 시행계획 추진실적 보고서, 서울시, 2016
3. 2013년도 자동차 주행거리 실태분석 연구, 교통안전공단, 2014
4. 2016년 도로먼지지도 제작결과, 환경부, 2016
5. Fugitive dust handbook, WRAP, 2006
6. 비산먼지 배출자료 개선기술 개발, 환경부, 2014
7. Air pollutant emission inventory guidebook, EMEP/EEA,2016
8. National Emission Inventory(2014)
9. 북경시 비산먼지 발생원별 산정방법 지침, 북경시, 2014
10. 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로재비산 먼지 실시간 측정방법 개발, 국립환경과학원, 2008
11. 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람, 국립환경과학원, 2013
12. 국내 나대지의 비산먼지 배출계수 산정을 위한 임계마찰속도 측정:휴대용 소형 풍동을 이용하여, 인하대학교, 2015
13. 초미세먼지(PM2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구, 서울특별시, 2016

14. 차세대 저탄소-저마모 친환경 타이어 개발, 환경부, 2016
15. 타이어 및 브레이크 패드마모에 의한 비산먼지 배출량 및 위해성 조사, 환경부, 2012
16. 환경친화적 미세먼지 저감 저마모 타이어 개발, 환경부, 2007
17. 사업별, 공정별 비산먼지 관리 매뉴얼, 환경부, 2014
18. Background Material : Section 7.7 Building Construction Dust, CARB, 1997
19. 대기환경연보, 국립환경과학원, 2015
20. LRTAP report – EU emissions, 2017
21. PM10 and PM2.5 Street Sweeper Efficiency Test Protocol, Toronto, 2016
22. 서울시 (초)미세먼지 저감기술 및 대기질 개선방안 연구, 서울시, 2016
23. 수도권 대기환경관리 시행계획 수립가이드라인(안) 및 추진실적 평가방법(안) 마련, 대기환경학회, 2014

주 의 문

최종연구보고서 (17-10-04-01-18)

수도권 비산먼지 관리대책 평가 기준 개선

발행인 : 센터장 김덕현

발행일 : 2018년 1월 25일

발행처 : 시흥녹색환경지원센터

주 소 : 경기도 시흥시 정왕동 2121번지

전 화 : 031-8041-0936

팩 스 : 031-8041-0939

e-mail : yichoi@kpu.ac.kr

※ 주 의

1. 이 보고서는 시흥녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 시흥녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.