





| SRI-기본-2018-01 |

# 수원시 대로변 가로수의 광화학대기오염물질 배출특성 기초 연구

Preliminary Study on the Emission of Photochemical Air Pollutants from the Street Trees  
in Suwon City

강은하

연구진

연구책임자 강은하 (수원시정연구원 연구위원)  
참여연구원 김은영 (수원시정연구원 연구위원)  
오미현 (수원시정연구원 연구위원)

© 2018 수원시정연구원

**발행인** 이재은  
**발행처** 수원시정연구원  
경기도 수원시 권선구 수인로 126  
(우편번호) 16429  
전화 031-220-8001 팩스 031-220-8000  
<http://www.suwon.re.kr>  
**인쇄** 2018년 10월 31일  
**발행** 2018년 10월 31일  
**ISBN** 979-11-89160-26-5 (93530)

---

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처 표시해 주십시오.  
강은하. 2018. 「수원시 대로변 가로수의 광화학대기오염물질 배출특성 기초 연구」. 수원시정연구원.

---

비매품

## 국문요약

가로수는 대기오염물질을 흡수하기도 하지만 배출하기도 한다. 가로수에서 배출되는 자연적 휘발성유기화합물(BVOCs: Biogenic Volatile Organic Compounds)은 대표적으로 이소프렌류(isoprene)와 테르펜류(terpene)가 있는데, 이소프렌은  $\text{NO}_2$ 와 반응하여 오존을 생성하기도 하고, 2차 유기입자 생성에 기여하기도 한다. 테르펜류는  $\text{NO}_2$ 가 낮은 지역에서는 오존을 저감시키나  $\text{NO}_2$ 가 높은 도로변에서는 2차 유기입자를 생성하는 등 대기오염도에의 영향이 다각적이다. 따라서 본 연구는 도심 가로수 식재로 인한 대기환경에의 영향을 파악하기 위한 기초연구로서, 수원시 대로변에 식재되어 있는 가로수를 조사하고 수종에 따른 대기오염물질 흡수 및 BVOCs를 중심으로 한 배출 특성, 가로수 식재 형태로 인한 물리적인 대기오염도에의 영향을 파악하고자 하였다. 이를 위해 국내외 문헌에 대한 조사 및 고찰과 주요 도로의 가로수 식재 현황 현장조사를 실시하였다.

문헌조사 결과 대기오염에 대한 수목의 저항성은 상록활엽수가 비교적 강하고 낙엽활엽수는 다소 약하며, 침엽수는 대체로 약한 것으로 나타났다. 미세먼지 저감효과는 침엽수가 활엽수보다 미세먼지 흡수에 효과적이고 관목보다는 교목이 우세하였다. 수종에 따른 VOCs 배출특성을 살펴보면 BVOCs중 이소프렌은 주로 활엽수에서, 모노테르펜은 주로 침엽수에서 배출되며, 온도와 빛의 영향에 따라 배출량이 달라짐을 알 수 있었다. 따라서 일반적으로는, 저항성과 대기오염 저감성 모두를 고려할 때 수목을 골고루 조성하는 것이 대기오염 저감에 더 효과적임을 시사 하였다.

도심 내 수목의 물리적인 대기오염도 영향에 대한 문헌 고찰 결과, 가로수가 없는 도로보다 있는 도로에서 확산, 흡수 등으로 역할로 대기오염농도 감소 속도가 빨랐다. 그러나 가로수 사이가 촘촘하게 식재될 경우 오히려 오염된 공기가 갇히게 되어 오염농도가 낮아지는 영향도 고찰되었다. 또한 가로수가 주변 건물보다 높을 때, 가로수 잎의 밀집도가 높을 때 대기오염농도 감소가 빠르게 진행된다는 연구결과를 고찰할 수 있었다. 따라서 대기오염물질의 흡수속도가 높은 수목을 식재하는 것도 좋으나 도시협곡내의 대기질 개선을 위해서는 가로수 수관부의 높이, 형상 등을 적정하게 관리하여 협곡 내외부의 기류교환을 촉진시키는 것도 중요하다는 시사점을 얻을 수 있었다.

수원시에 식재된 69종 중 느티나무, 은행나무, 왕벚나무, 메타세콰이아가 59.6%를 차지하고 있으며, 차량 통행이 많은 대로(현장조사 지점인 중부대로, 경수대로, 창룡대로 등 8개 구간)에는 은행나무(48%), 느티나무(15%), 칠엽수(11%), 중국단풍(7%), 그 외 버즘나무, 벚나무, 소나무, 회화나무, 메타세콰이아, 대왕참나무 등이 식재되어 있었다. 수원시 가로수 중에 가장 많은 이소프렌을 배출하는 나무는 대왕참나무와 버즘나무이며, 모노테르펜은 소나무에서 배출량이 가장 높았다. 이산화탄소 흡수량은 메타세콰이아가 가장 높았으며, 이산화질소와 이산화황은 단풍나무가 가장 높은 흡수율을 보였다. 또한 미세먼지 흡착율은 메타세콰이아와 소나무가 높았다. 그러나 수원시 가로수만을 대상으로 한 직접 측정이 아니고 국내·외 문헌으로부터 고찰한 것이기에, 모든 나무의 동일 조건상의 측정값이 존재하지 않아, 가로수간 정량적인 배출량 비교나 절대적 수치화는 어려웠다.

도로와 식재된 가로수의 형태에 따른 물리적 영향 고찰 결과, 가로수가 건물보다 높이 식재된 도심협곡(예: 정조로, 매산로)의 경우 물리적 기류확산이 활발할 것으로 판단되었으며, 다양한 수종이 식재되어 있는 경수대로와 수인로의 경우 수목으로 인한 종합적 대기오염도 저감 효과를 기대할 수 있을 것이다. 중부대로와 창룡대로의 경우 보행자도로 폭이 좁아 가로수의 적절한 식재를 통해 공기 확산유도가 필요할 것으로 판단되었다. 차량정체가 심한 곳의 경우(예: 경수대로, 정조로) 특히 BVOCs의 배출이 적은 나무로의 적절한 식재를 통해 광화학반응으로 인한 2차 유기입자 생성 억제 및 대기 확산을 유도하는 것이 중요할 것으로 고찰되었다.

위의 결과를 종합하여 볼 때, 수원시의 가로수 선정 시 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

첫째, 대기오염물질 제거율 높은 가로수 선정; 수원시 도로변의 대기질은 도시대기측정소보다 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도가 높았으므로 느티나무, 단풍나무류(중국단풍, 청단풍, 홍단풍 등) 같이 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 흡수율이 높은 나무, 미세먼지 흡착능이 높은 메타세콰이아를 식재하여 직접 제거 효과를 기대할 수 있다.

둘째, 차량 많은 도로에 VOCs 배출이 적은 수종 선정; 도로변 대기질은 VOCs를 줄임으로 광화학적 2차 대기오염물질 생성을 줄일 수 있는 조건이므로 이소프렌 배출이 많은 대왕참나무나 버즘나무, 모노테르펜 배출이 많은 소나무류의 식재를 지양하여 BVOCs의 배출을 줄이는 것이 필요할 것이다.

셋째, 혼합 식재 및 특정 지역 맞춤형 식재; 느티나무나 메타세콰이아처럼 미세먼지 흡착능이 좋은 수종과 VOCs 배출량이 낮은 단풍나무류를 혼합하여 식재하여 종합적인 대기오염도를 낮추는 것도 바람직할 것이다.

넷째, 소·중로 가로수 선정 시 물리적인 조건 고려; 좁은 도로인 도심협곡에서는 주변 건물높이보다 높은 나무 식재 및 도로변 인근 집단 주거지역이 위치하는 경우, 가로수 인접 도시숲(완

충녹지)을 조성하여 도로변 대기오염물질이 도시숲을 통해 제거되도록 하는 것이 바람직할 것이다.

다섯째, 기후변화 대응을 위한 가로수 식재; 가로수 식재를 통해 증산작용으로 인한 도심 내 온도 저하, 미기상학적 난류 발생을 통한 희석과 열섬 완화효과를 기대할 수 있다.

주제어: 가로수, 도로변 대기오염, 자연적휘발성유기화합물질, 도심협곡, 광화학대기오염물질



---

## 차 례

---

<b>제1장 서론</b> .....	<b>3</b>
제1절 연구의 배경 및 목적 .....	3
제2절 연구방법 및 추진체계 .....	6
 <b>제2장 수목의 대기오염물질 정화 능력과 배출 특성</b> .....	 <b>9</b>
제1절 수목의 대기오염물질 정화능력 .....	9
1. 이산화탄소 흡수 .....	9
2. 미세먼지 저감 .....	10
제2절 수목의 대기오염물질 내성도 .....	20
1. 식물에 해를 끼치는 오염물질 .....	20
2. 대기오염에 대한 식물의 저항성 .....	20
제3절 수목의 대기오염물질 배출특성 .....	28
1. 휘발성유기화합물 배출 특성 .....	28
2. 이소프렌(Isoprene)과 테르펜류(Terpenes)의 배출특성 .....	33
3. 수종별 BVOCs의 배출특성 .....	37
제4절 시사점 .....	50
 <b>제3장 도시 수목의 대기오염도 영향과 적합성 평가</b> .....	 <b>53</b>
제1절 도심 내 식재된 수목의 대기오염도 영향 .....	53
1. 가로수의 물리적인 대기환경영향 .....	53
2. 도시숲(산림)이 대기오염에 미치는 영향 .....	58
제2절 도시 수목의 적합성 평가 사례 .....	59
1. 미세먼지 저감을 위한 도시 수목의 적합성 평가 .....	59
2. 도시수목의 적합성: I-Tree Species Selector .....	62
3. 도시수목의 적합성 평가(I-Tree Species Selector 활용) 사례 .....	66
제3절 시사점 .....	68

<b>제4장 수원시 가로수가 대기오염에 끼치는 영향</b> .....	<b>71</b>
제1절 수원시 주요 도로변 가로수 식재현황 .....	71
1. 수원시 가로수 현황 .....	71
2. 수원시 주요 도로변 가로수 조사 .....	71
제2절 식재된 가로수의 대기오염물질 배출 및 정화 특성 .....	78
1. 수원시 주요 가로수 수종의 대기오염 배출 및 흡수 특성 .....	78
2. 도로변 대기오염도와 가로수 배출 VOCs와의 상호 작용 고찰 .....	80
3. 수원시 주요 가로수의 물리적인 대기오염 저감 효과 .....	83
제3절 수원시 주요 도로별 가로수의 대기오염 영향 .....	89
1. 매산로 .....	89
2. 정조로 .....	89
3. 수인로 .....	91
4. 경수대로 .....	92
5. 중부대로, 창룡대로, 덕영대로 .....	93
제4절 시사점 .....	95
<b>제5장 결론</b> .....	<b>99</b>
제1절 연구의 의의 및 한계점 보완 .....	99
1. 연구의 의의 및 주요 결과 .....	99
2. 연구의 한계점 및 보완 .....	101
제2절 정책적 제안 .....	102
<b>참고문헌</b> .....	<b>105</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>109</b>

## 표 차례

〈표 2-1〉 수종별 이산화탄소 흡수량과 산소생산량 .....	10
〈표 2-2〉 산림의 대기 중 미세먼지 조절 방식 .....	11
〈표 2-3〉 도시 산림 유형에 따른 미세먼지 침강농도 .....	12
〈표 2-4〉 수종에 따른 PM2.5 조절량 .....	12
〈표 2-5〉 측정현황 및 개요 .....	14
〈표 2-6〉 조경 수목의 대기오염물질에 대한 저항성 .....	21
〈표 2-7〉 아황산가스에 의한 수목별 최종피해점수 .....	22
〈표 2-8〉 수종별 정화능 비교 .....	24
〈표 2-9〉 수종별 오염물질 흡수 추정치 .....	25
〈표 2-10〉 수목과 숲의 대기오염 저감 기능 .....	26
〈표 2-11〉 수종별 이소프렌 발생량(미국환경청 발표) .....	37
〈표 2-12〉 수종별 잎의 바이오매스 밀도 값과 표준 배출율 .....	38
〈표 2-13〉 활엽수의 이소프렌 배출율 비교 .....	46
〈표 2-14〉 침엽수의 성분별 배출계수 .....	47
〈표 2-15〉 활엽수의 성분별 배출계수 .....	47
〈표 3-1〉 수종의 PM2.5 제거 효율의 순위 결정 방법 .....	60
〈표 3-2〉 도시 환경의 나무 종류별 적합성 평가 방법 .....	60
〈표 3-3〉 대기질에 부정적인 영향 순위 결정 방법 .....	61
〈표 3-4〉 도시나무 9종의 모노테르펜 배출율 .....	66
〈표 4-1〉 수원시 가로수 현황 .....	71
〈표 4-2〉 수원시 주요 도로 지점별 가로수 .....	72
〈표 4-3〉 가로수종 특성표① .....	73
〈표 4-4〉 가로수종 특성표② .....	74
〈표 4-5〉 가로수종 특성표③ .....	75
〈표 4-6〉 가로수종 특성표④ .....	76
〈표 4-7〉 가로수종 특성표⑤ .....	77
〈표 4-8〉 수원시 주요 도로 가로수종의 대기오염물질 흡수량 및 배출량 .....	79
〈표 4-9〉 수원시 가로수종의 대기오염물질 배출 및 흡수 순위 .....	83

## 그림 차례

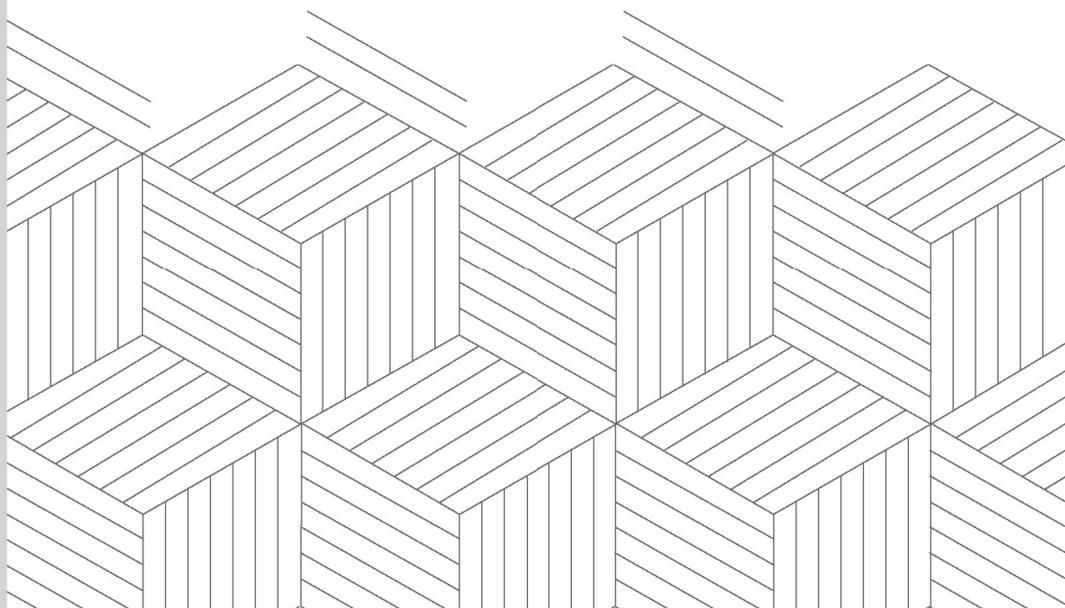
<그림 1-1> 2차 유기에어로졸(SOA)를 생성하는 BVOCs .....	4
<그림 1-2> 2차 유기에어로졸(SOA) 생성과 변환 과정에 대한 모식도(BVOCs 중요성) · 4	
<그림 1-3> 자연적 배출원(지시종: 이소프렌과 그 중간 산화물)과 인위적 배출원(지시종: CO)이 섞일 경우 유기에어로졸(OA) 생성에 미치는 영향 비교 .....	5
<그림 1-4> 연구의 추진체계 .....	6
<그림 2-1> 가로수의 대기정화 및 소음저감 기능 .....	9
<그림 2-2> 수종별 이산화탄소 흡수율 .....	10
<그림 2-3> 산림의 미세먼지 축적 효과 .....	11
<그림 2-4> 도로변 그린벨트 조성 예 .....	13
<그림 2-5> 공원 수목 조성 예 .....	13
<그림 2-6> 도시숲에서의 공기 확산 .....	15
<그림 2-7> 시간대별 풍속변화 .....	15
<그림 2-8> 시간대별 도시숲과 도심의 미세먼지 농도 비교 .....	16
<그림 2-9> 가로수 사이의 간격 .....	16
<그림 2-10> 풍상 .....	17
<그림 2-11> 풍하 .....	17
<그림 2-12> 침엽수와 활엽수의 PM2.5 흡착 .....	17
<그림 2-13> 퇴적속도의 비교 .....	18
<그림 2-14> 나뭇잎의 PM2.5 집적량 .....	19
<그림 2-15> 광화학 오존 및 2차 유기에어로졸의 생성 과정을 보여주는 모식도 .....	28
<그림 2-16> 식물기원 VOCs의 환경과 상호작용 .....	31
<그림 2-17> 기후변화에 따른 BVOCs의 증가 .....	32
<그림 2-18> 조사 위치 .....	33
<그림 2-19> 이소프렌(위)과 모노테르펜(아래)의 측정기간별 농도변화 .....	34
<그림 2-20> 고농도가 관측된 2013년 6월의 오존과 이소프렌의 상관관계 .....	35
<그림 2-21> 2013년 관측기간 동안 오존과 모노테르펜의 관계 .....	35
<그림 2-22> 서울 도심과 도심 주변에서의 NO <sub>x</sub> 광화학 모식도 .....	35

〈그림 2-23〉 초여름의 POC, SOC, 이소프렌, 모노테르펜 일변화 .....	36
〈그림 2-24〉 봄철 금성산 소나무(3령)의 온도변화에 따른 테르펜 배출량 추이 .....	42
〈그림 2-25〉 여름철 금성산 소나무(3령)의 온도변화에 따른 테르펜 배출량 추이 .....	42
〈그림 2-26〉 가을철 금성산 소나무(3령)의 온도변화에 따른 테르펜 배출량 추이 .....	42
〈그림 2-27〉 계절에 따른 금성산 소나무의 배출량 추이 .....	42
〈그림 2-28〉 관악 수목원 잣나무 숲의 월별 VOC 농도 변화(좌)와 잣나무 앞에서 방산 되는 월별 NVOC 농도 변화(우) .....	43
〈그림 2-29〉 침엽수(a)와 활엽수(b)의 모노테르펜 배출율 .....	44
〈그림 2-30〉 동일기간동안 침엽수(a)와 활엽수(b)의 모노테르펜 배출비교 .....	45
〈그림 2-31〉 침엽수(a)와 활엽수(b)의 이소프렌 배출율 .....	46
〈그림 3-1〉 가로수가 식재된 도시협곡 모델 .....	54
〈그림 3-2〉 도시 협곡 내의 순간 농도 분포 .....	54
〈그림 3-3〉 평균 오염농도 변화 .....	55
〈그림 3-4〉 건물보다 가로수가 높을 때 .....	55
〈그림 3-5〉 건물보다 가로수가 낮을 때 .....	56
〈그림 3-6〉 가로수 개구율 10%(밀집도 높음)일때 농도변화 .....	56
〈그림 3-7〉 가로수 개구율 90%(밀집도 낮음)일때 농도변화 .....	57
〈그림 3-8〉 도심의 가로수와 오염물질 확산 .....	57
〈그림 3-9〉 미세먼지 측정결과 분산분포도 .....	58
〈그림 3-10〉 이산화질소 측정결과 분산분포도 .....	58
〈그림 3-11〉 오존 측정결과 분산분포도 .....	58
〈그림 3-12〉 도시 수목의 적합성 평가 예 .....	62
〈그림 3-13〉 I-Tree Tools .....	63
〈그림 3-14〉 I-Tree Species Selector .....	63
〈그림 3-15〉 I-Tree 추천 수종 .....	64
〈그림 3-16〉 I-Tree에서 추천된 수종 .....	65
〈그림 3-17〉 9종의 낮은 나무의 BVOCs 배출 .....	67
〈그림 3-18〉 케르메스 오크의 BVOCs 배출 .....	67
〈그림 3-19〉 잉글리쉬 오크 BVOCs 배출 .....	67
〈그림 4-1〉 수원시 대로변 가로수 조사 지점 .....	72
〈그림 4-2〉 2017년 도로변 대기질과 도시대기(수원시 도시대기측정소 6개소 평균) 대기	

질의 박스 플랏 .....	80
〈그림 4-3〉 수원시 인계동 측정소의 오존과 질소산화물과의 월평균농도 및 상관관계 · 81	
〈그림 4-4〉 전형적인 EKMA 다이어그램 .....	82
〈그림 4-5〉 건물보다 가로수가 높은 경우 .....	84
〈그림 4-6〉 건물보다 가로수가 낮은 경우 .....	85
〈그림 4-7〉 가로수 식재간격 .....	87
〈그림 4-8〉 아파트 단지 옆의 가로수 .....	87
〈그림 4-9〉 가로수 앞의 밀집도 .....	88
〈그림 4-10〉 수원시 매산로 조사현황 .....	89
〈그림 4-11〉 수원시 정조로 조사현황 .....	90
〈그림 4-12〉 수원시 수인로 조사현황 .....	91
〈그림 4-13〉 수원시 경수대로 조사 현황 .....	92
〈그림 4-14〉 수원시 중부대로 조사 현황 .....	93
〈그림 4-15〉 수원시 창룡대로 조사 현황 .....	94
〈그림 4-16〉 수원시 덕영대로 조사 현황 .....	94

# 제1장 서론

제1절 연구의 배경 및 목적  
제2절 연구방법 및 추진체계





# 제1장      서론

## 제1절 연구의 배경 및 목적

도로변 가로수는 자동차로부터의 대기오염물질을 흡수하고 광합성을 통해서도 이산화탄소를 흡수하고 산소를 방출하는 등 도로변 환경에 긍정적인 영향을 준다. 이에 따라 수목의 대기오염물질 내성도에 관한 연구, 수목의 대기오염 정화능력(흡수, 흡착, 상쇄 등)에 관한 연구는 많이 진행되었고, 수목 식재 시 고려사항으로 제안하고 있다.

그러나 수종에 따라 pinene류나 limonene<sup>1)</sup> 같은 고분자 유기화합물을 배출하는 나무의 경우 자동차로부터의 질소산화물의 반응에 의해 오히려 오존이나 에어로졸을 생성하기도 하나 도심 내 식재되어 있는 수종에 대한 대기오염물질 배출현황 연구는 잘 이루어지지 않은 실정이다.

대기 중의 휘발성유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs)은 질소산화물과 광화학 반응에 의해 광화학 옥시던트<sup>2)</sup> 생성과 성층권 오존층 파괴, 지구온난화 등 다양한 환경 문제에 관련되어 있다.

VOCs의 발생 근원은 자동차 주행, 페인트칠, 용제 및 스프레이 사용 등 다양하다. 인간 활동뿐만 아니라 숲, 바다, 토양 등에서도 발생한다.

자연계로부터 방출되는 VOC(Biogenic volatile organic compounds, BVOCs)<sup>3)</sup>는 지구환경 문제가 대두될 때까지는 그다지 주목하지 않았지만, 사실 기후를 좌우하는 에어로졸의 원인 물질로 매우 중요하다(그림 1-1, 1-2).

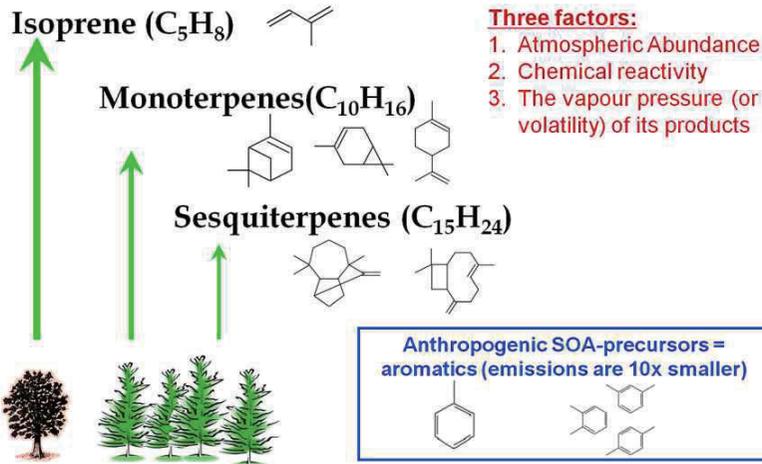
최근 연구결과(e.g., Shilling et al., ACP 2013) BVOCs의 대표 종인 이소프렌(isoprene)이 도시에서 배출되는 질소산화물의 영향으로 에어로졸 생성량 증가에 기여하는 것을 밝혔다(그림 1-3).

1) pinene, limonene: 모노테르펜류에 속하는 탄화수소

2) 대기 중의 광화학 반응에 의해 생성되는 2차적 오염물질인 오존, PAN(퍼옥시아세틸나이트레이트) 등 기타 광화학 반응에 따라 생성되는 산화물질.

3) 자연적 휘발성 유기화합물(BVOC)은 BVOCs는 이소프렌(isoprene, 2-methyl 1,3-butadiene: C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>), terpene, ORVOCs(other reactive VOCs, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub>), OVOCs(other VOCs) 네 개의 그룹으로 나뉜다.

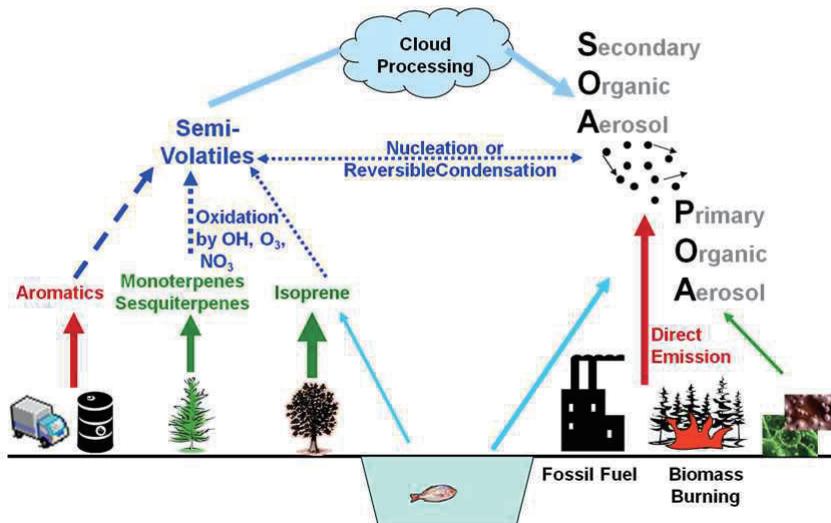
〈그림 1-1〉 2차 유기에어로졸(SOA)을 생성하는 BVOCs



자료: www.colostate.edu

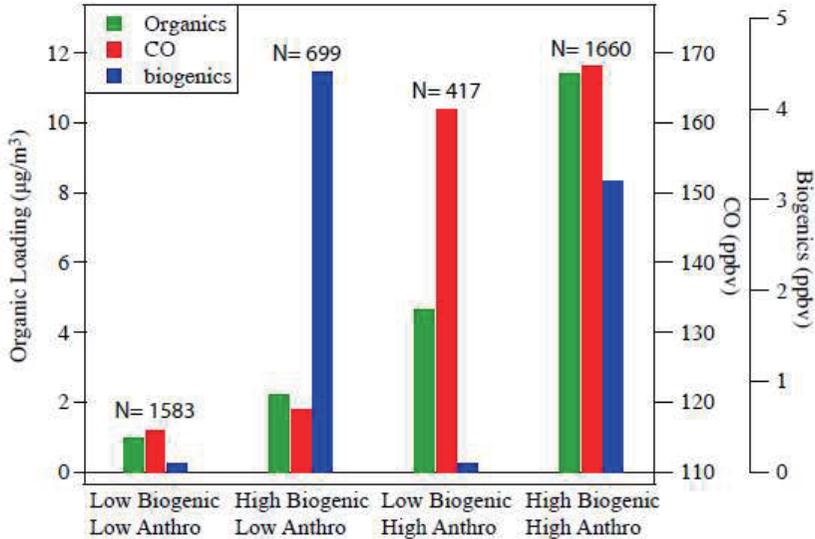
〈그림 1-2〉 2차 유기에어로졸(SOA) 생성과 변환 과정에 대한 모식도(BVOCs 중요성)

**ORGANIC CARBON AEROSOL**



자료: www.colostate.edu

〈그림 1-3〉 자연적 배출원(지시종: 이소프렌과 그 중간 산화물)과 인위적 배출원(지시종: CO)이 섞일 경우 유기에어로졸(OA) 생성에 미치는 영향 비교



자료:Shilling et al., Atmospheric Chemistry & Physics 2013

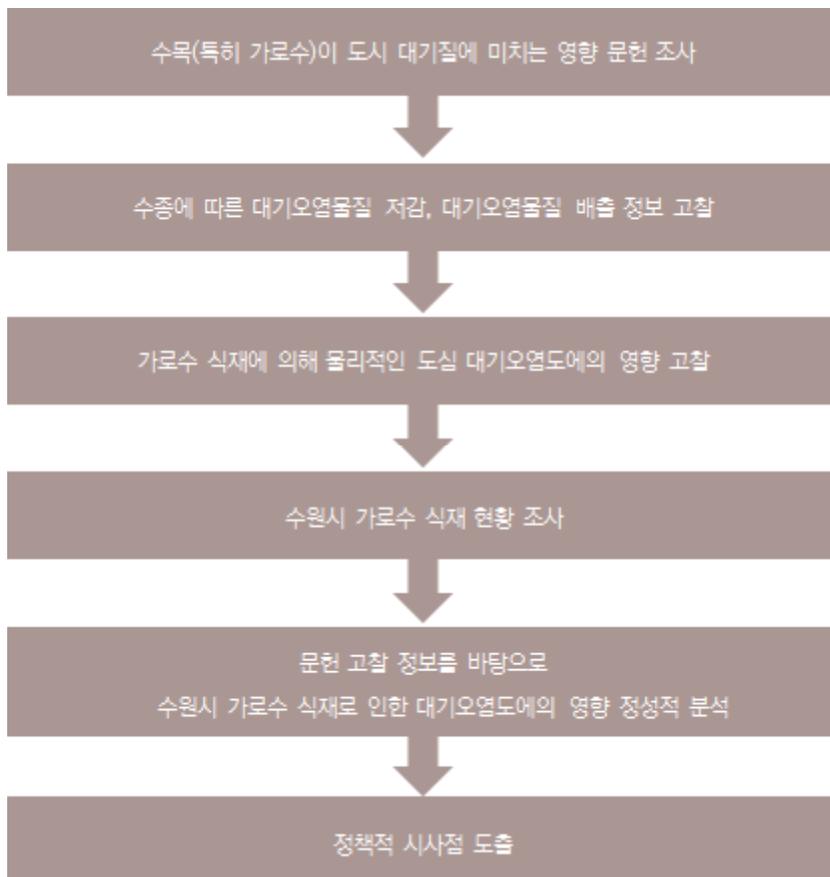
자연적으로 배출되는 VOCs는 오존 뿐 아니라 에어로졸 생성에까지 큰 영향을 미치기에 우리나라의 경우 대기환경 개선을 위한 정책 수립 시 나무에서 배출되는 BVOCs를 고려하지 않을 경우 정책의 실효성이 떨어질 수밖에 없다.

따라서 수원시 대로변에 식재되어 있는 가로수를 조사하고 수종에 따른 대기오염물질(특히 자연적 휘발성유기화합물을 중심으로) 배출현황을 조사하여 향후 수원시 가로수 식재계획을 수립할 때 고려사항으로 제안하고자 한다.

## 제2절 연구방법 및 추진체계

- 수원시 가로수 식재 현황
  - 문헌 및 현장 조사
- 식재된 가로수 수종의 대기오염배출특성
  - 문헌 및 사례 분석
- 도로변 대기오염도
  - 2017년 도로변 대기질과 도시대기 대기질 비교

〈그림 1-4〉 연구의 추진체계



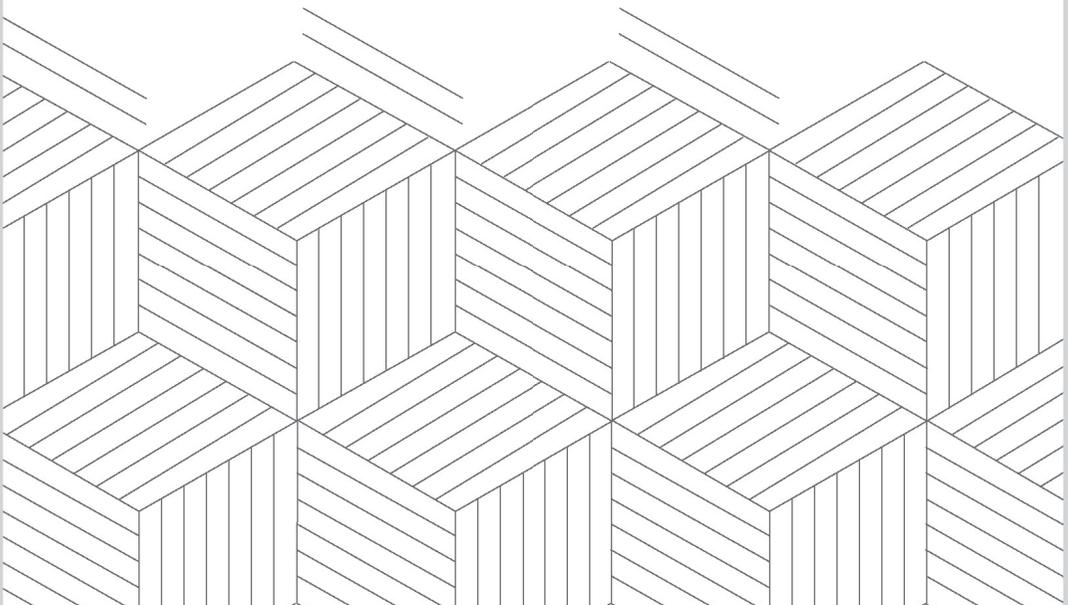
## 제2장 수목의 대기오염물질 정화능력과 배출특성

제1절 수목의 대기오염물질 정화능력

제2절 수목의 대기오염물질 내성도

제3절 수목의 대기오염물질 배출특성

제4절 시사점



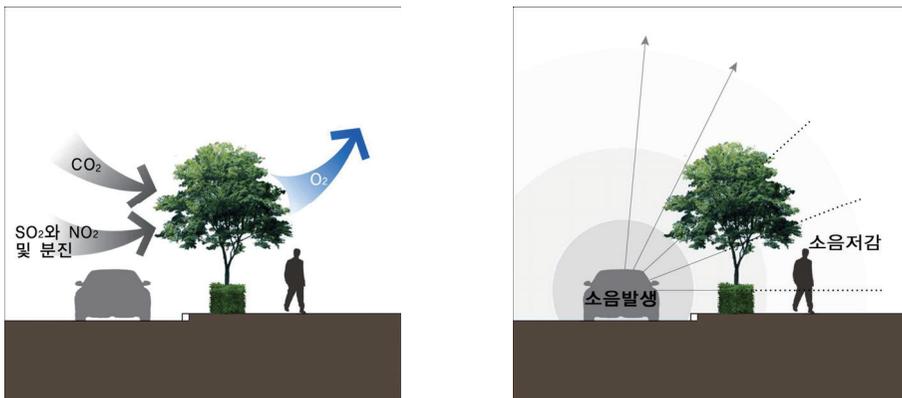


## 제2장 수목의 대기오염물질 정화능력과 배출특성

### 제1절 수목의 대기오염물질 정화능력

나무는 미세먼지를 차단하고 광합성 등 대사과정에서 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 아황산가스(SO<sub>2</sub>), 오존(O<sub>3</sub>) 등을 흡수하는 대기정화기능, 산소를 생산하여 맑은 공기 제공을 통한 환경개선기능, 수분방출 및 녹음 등으로 기후를 조절하는 기능, 삭막한 도시경관을 개선하는 경관기능, 소음저감 등 다양한 기능으로 시민의 쾌적한 생활환경 제공에 기여하고 있다.

〈그림 2-1〉 가로수의 대기정화 및 소음저감 기능



자료: 대전발전연구원(2015), 가로수의 효율적 조성 및 관리방안 연구

#### 1. 이산화탄소 흡수

국립산림과학원(2005)에서는 주요 가로수종인 버즘나무, 느티나무, 은행나무(수고  $8\pm 1\text{m}$ , 흉고 직경  $20\pm 3\text{cm}$ )를 대상으로 2005년 5월부터 10월까지 매월 광합성, 증산, 수분이용효율 등 생리특성 일변화를 측정·비교하고, 이산화탄소 흡수능과 산소 생산능, 온도 등을 산출하였다. 그 결과, 월평균 이산화탄소 일일흡수량과 산소생산량은 버즘나무가 가장 높게 나타났다.

〈표 2-1〉 수종별 이산화탄소 흡수량과 산소생산량

구분	수종	5월	6월	7월	8월	9월	10월	평균
이산화탄소 흡수량 (g/m <sup>2</sup> /d)	버즘나무	11.5	16.1	15.7	15.1	15.3	4.6	13.0
	느티나무	8.8	11.5	11.5	10.4	8.7	3.3	9.0
	은행나무	7.6	8.1	9.2	8.2	5.7	0.7	6.6
산소 생산량 (g/m <sup>2</sup> /d)	버즘나무	8.4	11.7	11.4	11.0	11.1	3.4	9.5
	느티나무	6.4	8.4	8.4	7.5	6.3	2.4	6.6
	은행나무	5.5	5.9	6.7	6.0	4.1	0.5	4.8

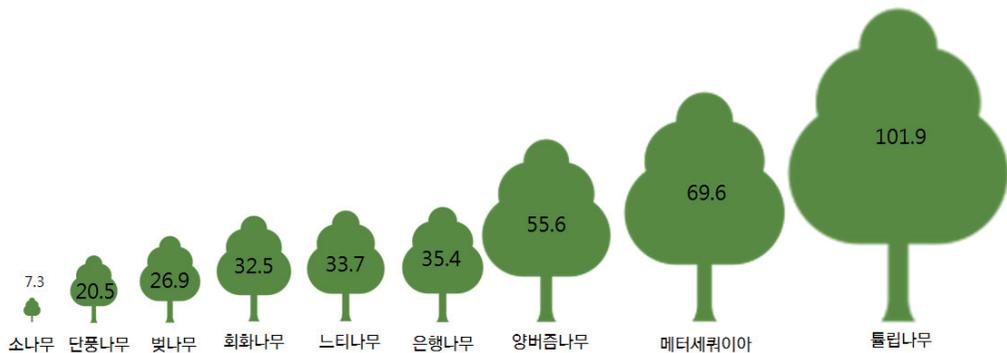
측정장소: 대구시청 주변 가로수

자료: 국립산림과학원(2005), 도시숲의 생태적 기능

박은진(2009) ‘도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안’ 연구에서 벚나무, 은행나무, 느티나무 등 9개의 대표적인 가로수 수종을 대상으로 수목이 선형의 성장속도를 가지고 매년 같은 비율로 성장한다고 가정하고, 조사 수목들의 수령 조사결과와 탄소량의 이산화탄소량 환산계수를 적용하여 CO<sub>2</sub> 흡수율을 산정하였다.

튤립나무의 이산화탄소 흡수율이 101.9kg CO<sub>2</sub>/tree/y로 가장 높게 평가되었으며, 은행나무, 회화나무, 느티나무 등은 이산화탄소 흡수율에 있어 표준오차를 고려할 때 비슷한 범주에 있다고 할 수 있고, 소나무가 가장 낮아 튤립나무의 7%, 메타세쿼이아의 10% 정도 수준인 것으로 나타났다(박은진 외, 2009).

〈그림 2-2〉 수종별 이산화탄소 흡수율(kg CO<sub>2</sub>/tree/y)



자료: 박은진 외(2009), 도시 수목의 이산화탄소흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안, 경기연구원

## 2. 미세먼지 저감

최근 문제가 되고 있는 미세먼지를 줄이는 도시숲, 가로수의 역할 및 가능 강화방안에 대한 연구들이 진행되고 있다.

## 1) 도시숲의 PM2.5 저감

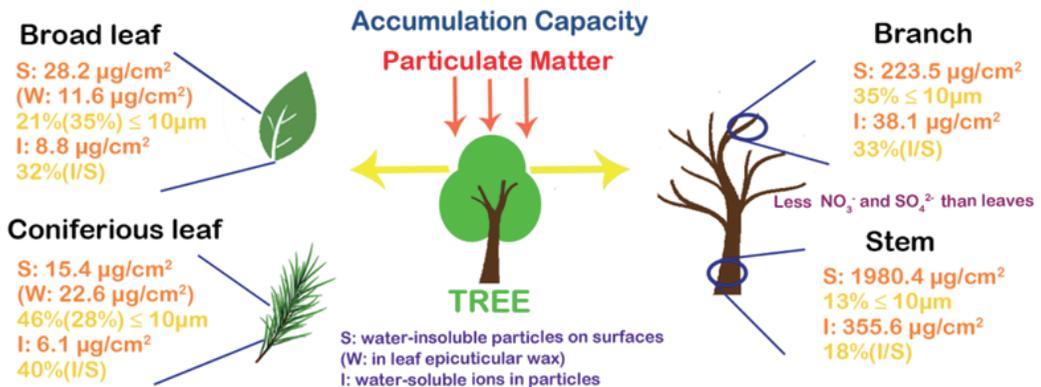
Xinxiao Yu(2018)의 중국의 방풍림 비교 연구결과 최소 폭 15~18m 정도의 방풍림을 만들면, 초미세먼지 제거에 효과적이라고 하였다(Xinxiao Yu, 2018). 산림에 의한 대기 중 미세먼지의 조절 방식은 침강(Deposition), 차단(Blocking), 흡착(Accumulation), 흡수(Intake)로 나뉘며 자세한 내용은 다음 표와 같다.

〈표 2-2〉 산림의 대기 중 미세먼지 조절 방식

방식	측정방식	메커니즘
Deposition(침강)	기상관측법 공기역학구배법	미세먼지는 중력 침강 및 난류 확산과 같은 공기 역학적 힘을 통한 퇴적된다.
Blocking(차단)	기존 농도 모니터링	산림은 복잡한 나뭇잎과 가지 구조를 통해 미세먼지의 운동 에너지와 운동 패턴을 변화시킨다.
Accumulation(흡착)	세탁 및 계량 방법	표면 구조와 분비물은 상호 작용에 의해 미세먼지를 가둔다.
Intake(흡수)	동위원소표시 방법	대기 입자는 식물 기공을 통해 식물에 유입되어 식물의 대사 반응에 참여할 수 있다.

나무줄기는 큰 크기의 미세먼지를, 가지 표면과 잎의 왁스층은 작은 크기의 미세먼지를 흡수하는데 효과적이며 관목보다는 교목이 우세하고 침엽수가 미세먼지 흡수에 더 효과적이라고 하였다.

〈그림 2-3〉 산림의 미세먼지 축적 효과



자료: Xinxiao Yu(2018), Regulation on PM2.5 and Other Atmospheric Particulate Matter by Forests, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집

〈표 2-3〉 도시 산림 유형에 따른 미세먼지 침강농도

	초원	관목림	침엽수림	활엽수림	혼합림
PM2.5( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	147.58	168.03	184.01	165.40	166.65

관목: 높이가 2m 이하의 수목

침엽수: 바늘이나 비늘같이 생긴 잎을 지니고 있는 나무. 원뿔형 열매가 열려 구과식물이라고 불림

활엽수: 평평하고 넓은 잎이 달리는 나무

산림구조, 농도, 화학조성 등을 분석하여 PM2.5의 산림 생태계 조절 영향을 평가한 결과, 혼합된 산림은 PM2.5를 조절할 수 있는 가장 강력한 능력을 가지고 있으며, 다음으로 활엽수, 침엽수, 관목 및 초원 순으로 나타났다.

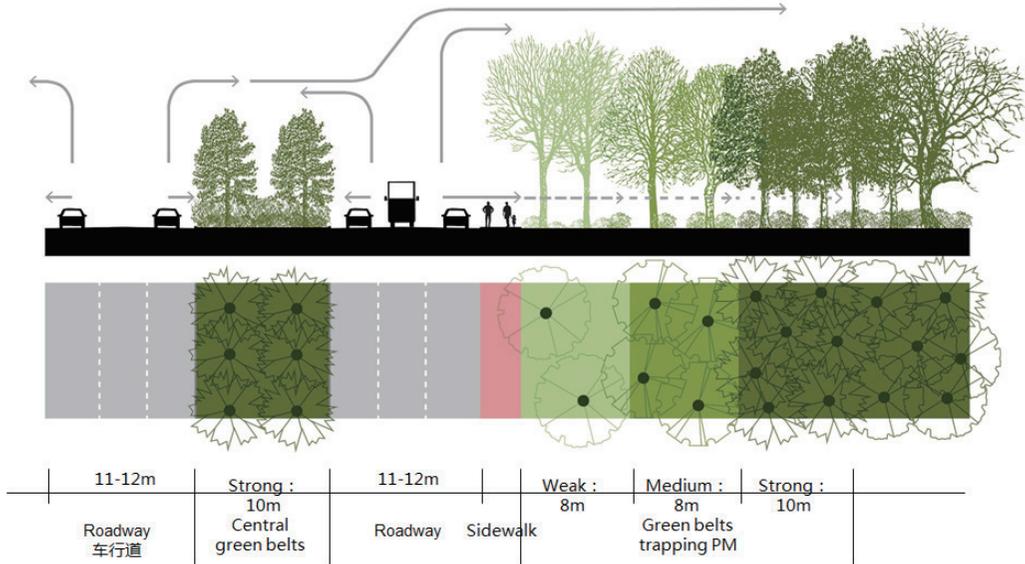
〈표 2-4〉 수종에 따른 PM2.5 조절량

Vegetation type	Accumulation	Deposition	Blocking	Intake	합계
	Mass(kg/a·km <sup>2</sup> )				
Conifer	68.01	149.23	132.66	0.04	349.94
	19%	43%	38%	0.01%	100%
Broadleaf	90.23	171.48	146.37	0.52	408.6
	22%	42%	36%	0.13%	100%
Mix	120.33	254.12	201.12	0.67	576.24
	21%	44%	35%	0.12%	100%
Shrub	30.54	59.75	44.75	0.33	135.37
	23%	44%	33%	0.24%	100%
Grass	16.91	33.74	24.23	0.12	75
	23%	45%	32%	0.16%	100%
Average	65.20	133.66	109.83	0.34	309.03
	21.50%	43.57%	34.80%	0.13%	100%

자료: Xinxiao Yu(2018), Regulation on PM2.5 and Other Atmospheric Particulate Matter by Forests, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집

도로변 그린벨트 조성 시 중앙분리대에 백백한 식생대를, 좌우식생대에는 가장자리부터 중심으로 약, 중, 강 형태로 숲을 백백하게 두어서, 미세먼지를 잡는 식생대를 조성하는 것이 좋다고 제안하였다.

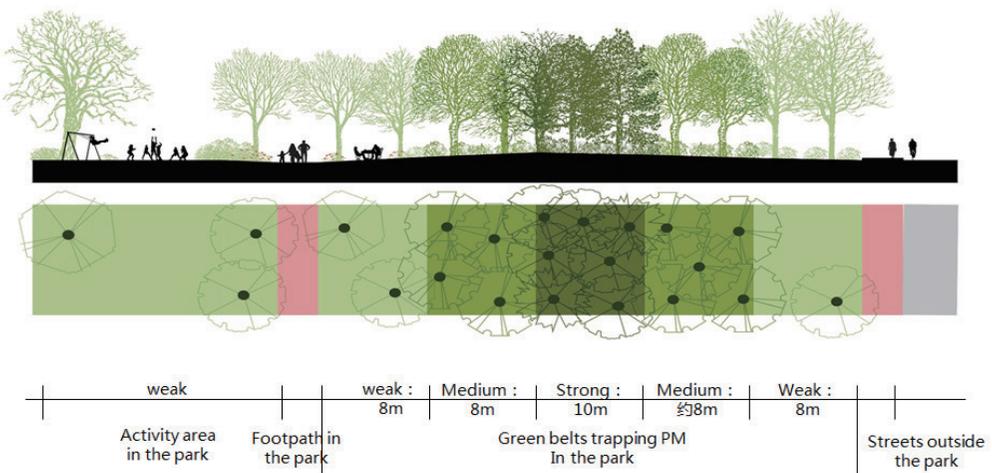
〈그림 2-4〉 도로변 그린벨트 조성 예



자료: Xinxiao Yu(2018), Regulation on PM2.5 and Other Atmospheric Particulate Matter by Forests, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집

공원의 경우 미세먼지 체류형 식생대를 중심에 두고, 가장자리는 밀도를 약하게 하는 것이 좋다고 제안하였다.

〈그림 2-5〉 공원 수목 조성 예



자료: Xinxiao Yu(2018), Regulation on PM2.5 and Other Atmospheric Particulate Matter by Forests, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집

산림청 국립산림과학원은 2017년 6월부터 11월까지 서울시 동대문구에 있는 국립산림과학원 내 홍릉수목원과 청량리역 주변 도심을 대상으로 측정된 미세먼지와 기상자료를 분석하였다.

〈표 2-5〉 측정현황 및 개요

	측정지점	도시숲 : 홍릉수목원 내 도시 : 직선거리 2km
	측정장비	OSIRIS(영국 Turnkey Instrument 社)
	측정항목	미세먼지, 초미세먼지, 풍향, 풍속, 기온 등
자료생산	24시간 연속측정 매 5분 자료(원자료) → 1시간 자료 생산(활용)	

자료: 국립산림과학원(2018), '점심 산책은 미세먼지 없는 도시숲에서' 보도자료

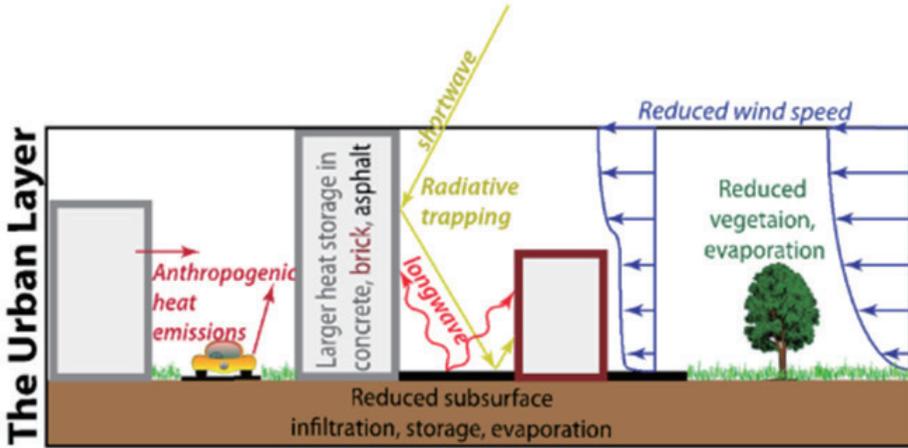
도시의 초미세먼지 농도는 오전 11시에 가장 낮게 나타났으며, 도시숲에서 오후 시간대에 미세먼지 농도가 낮아지는 것은 도시숲 안의 풍속이 높아져 나뭇잎의 오염물질 흡착(흡수)이 쉬워지기 때문으로 분석되었다.

조사기간 중 도시숲의 평균 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5) 농도는 도심과 비교해 15%와 8% 낮게 나타났다. 특히, 오전 9시부터 오후 4시까지 도시숲의 초미세먼지와 미세먼지 농도는  $17.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $29.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 도심보다 15%와 24% 각각 낮았다. 또한, 오후 9시의 초미세먼지 농도( $15.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 하루 중 가장 낮게 나타났다.

오전 시간대에는 도시 미세먼지의 주요 배출원으로 알려진 도로에서 바람의 유입이 이뤄지고, 도시숲 내부의 풍속이 약하지만, 오후 시간대에는 풍속이 높아지면서 나뭇잎들이 미세먼지와 같은 입자상의 오염물질을 흡착(흡수)하여 제거하는데 유리하게 작용하기 때문이라는 분석이다. 시간대별로 기온 및 바람의 영향으로 도시숲의 미세먼지 농도 변화가 큰 것으로 보인다.

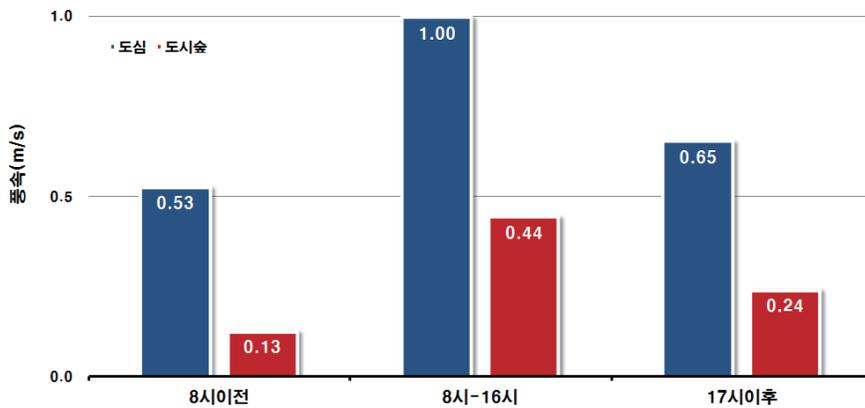
다음 그림은 도심에서 건물만 있을 때보다 나무가 있을 때 공기확산이 더 활발하다는 것을 보여주고 있다.

〈그림 2-6〉 도시숲에서의 공기 확산



자료: Elie Bou-Zeid, Land-Atmosphere-Hydrosphere Interactions in Urban Terrain, <https://erams.com/UWIN/a2-a/>

〈그림 2-7〉 시간대별 풍속변화

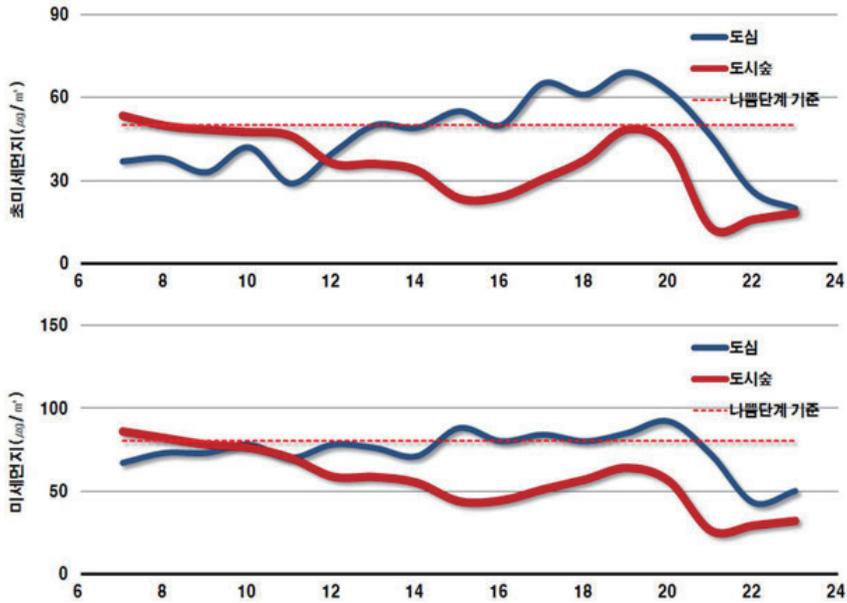


자료: 국립산림과학원(2018), '점심 산책은 미세먼지 없는 도시숲에서' 보도자료

특히, 초미세먼지가 '나쁨' 단계일 때, 오전 시간대에는 도시숲의 초미세먼지 농도가 도심보다 높았지만 오후 시간대에는 도시숲이 '보통' 수준으로 감소한 반면 도심은 '나쁨' 단계를 유지했다.

9월 중 오전 6시부터 9시까지의 초미세먼지 농도는 도시숲이 도심보다 오히려 37% 높게 조사되었다. 하지만, 오후 시간(12시~16시)에는 도시숲의 초미세먼지 농도가 낮아져 도심보다 낮게 나타났으며, 이런 경향은 늦은 저녁시간(18시 이후)까지 지속되었다.

〈그림 2-8〉 시간대별 도시숲과 도심의 미세먼지 농도 비교



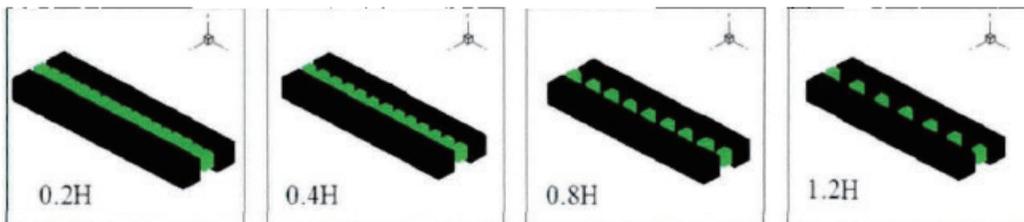
자료: 국립산림과학원(2018), '점심 산책은 미세먼지 없는 도시숲에서' 보도자료

도시 숲이 미세먼지를 저감하는 차단, 침강, 흡착, 흡수의 4가지 기능을 토대로 화력발전소 주변 미세먼지 차단 숲, 주거지 주변 미세먼지 저감 숲, 도로변 띠녹지대, 산줄기와 연결한 바림길 숲 등 미세먼지 대응 숲을 맞춤형으로 조성할 필요가 있다(국립산림과학원, 2018).

## 2) 가로수의 PM2.5 저감 효과

Lixin Chen(2018)의 최근 연구에서 도로에서 가로수 사이의 간격이 대기오염에 미치는 영향을 보기위해 가로수 사이 공간을 다르게 하여 각각의 시나리오 하에서 풍상·풍하 측에서 오염 농도의 분포를 조사하였다. 가로수 사이가 촘촘할수록 오염농도가 높은 것을 알 수 있다.

〈그림 2-9〉 가로수 사이의 간격



〈그림 2-10〉 풍상

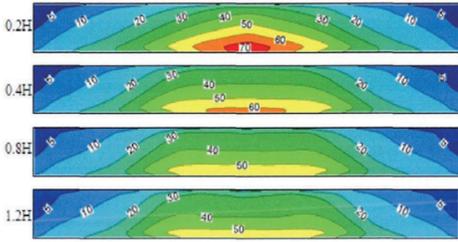


图 3-7 四种树间距下街道峡谷背风面的无量纲浓度分布云图

〈그림 2-11〉 풍하

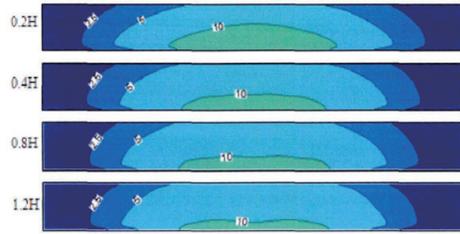
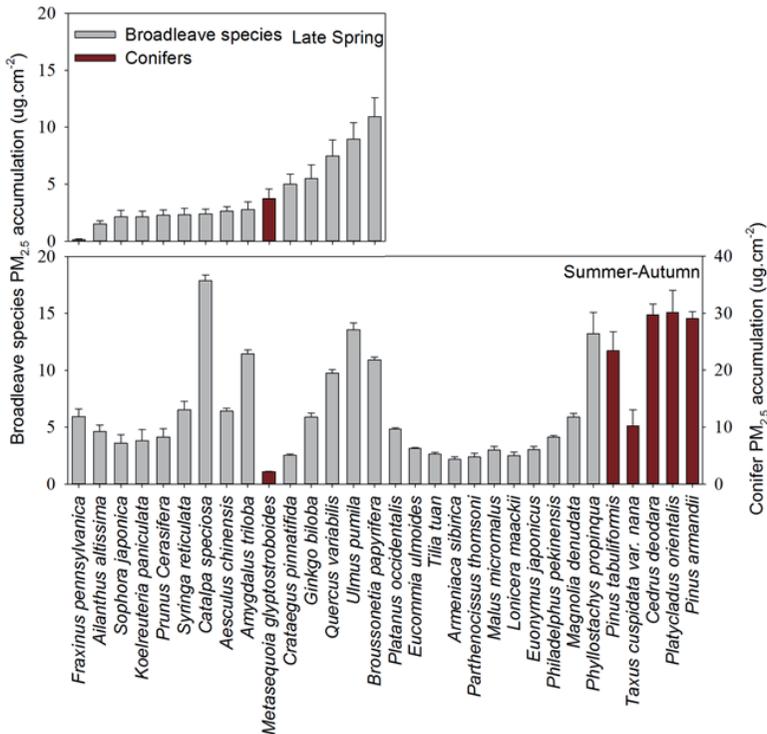


图 3-8 四种树间距下街道峡谷迎风面的无量纲浓度分布云图

자료: Lixin Chen(2018), Effect of Street Trees on PM<sub>2.5</sub> Abatement in Street Canyon, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집

가로수 종류에 따른 영향을 조사하였으며 그 결과 침엽수가 활엽수보다 미세먼지 흡착량이 높았다, 대부분 20 $\mu\text{g}/\text{m}^2$  이상의 흡착량을 보였다. 하지만 개화패턴이 다양하도록 수목을 골고루 조성한다면 초미세먼지를 붙잡는 데 더 효과적이어서, 수목의 다양성 유지가 중요하다고 하였다.

〈그림 2-12〉 침엽수와 활엽수의 PM<sub>2.5</sub> 흡착

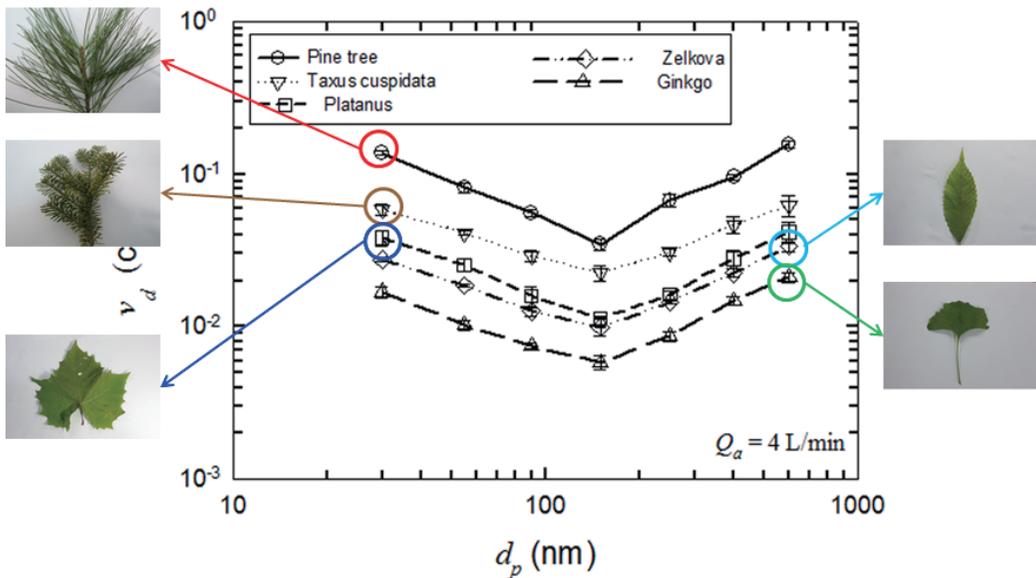


자료: Lixin Chen(2018), Effect of Street Trees on PM<sub>2.5</sub> Abatement in Street Canyon, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집

### 3) 나뭇잎에 의한 초미세먼지 제거

육세진(2018)의 연구에 따르면 모의 공간에서 미세먼지를 인위적으로 공급했을 때 수목의 미세먼지 제거율을 조사한 결과, 소나무, 주목나무, 양버즘나무, 느티나무, 은행나무 순이었으며, 침엽수가 활엽수보다 미세먼지 제거에 효과적이었다. 또한 수목의 모양뿐만 아니라 나뭇잎의 표면 굴곡도를 고려하여 수종을 선정하여 미세먼지에 대응하는 나무심기가 필요하다고 하였다.

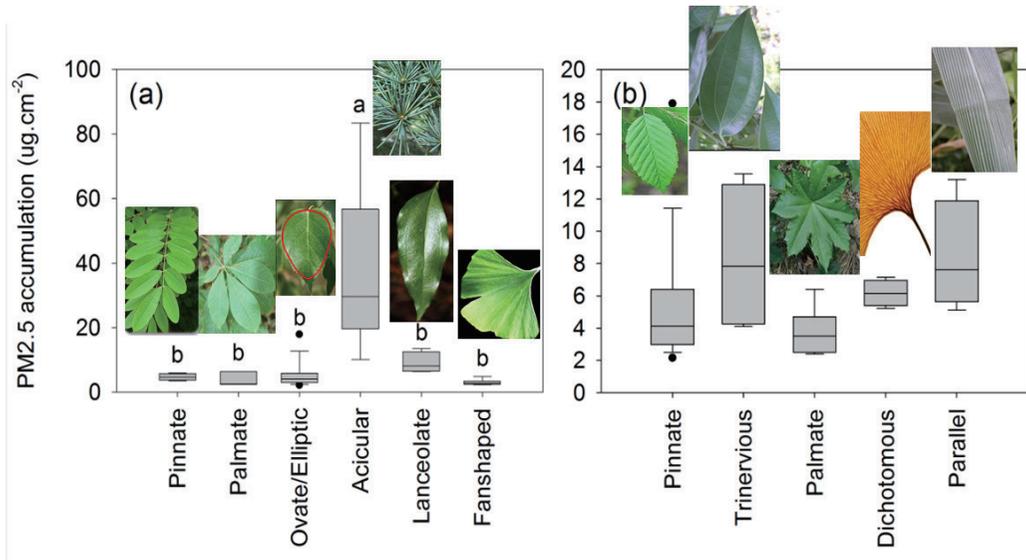
〈그림 2-13〉 퇴적속도의 비교



자료: 육세진(2018), Characteristics of Submicron and Ultrafine Soot Particle Removal by Tree Leaves, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집

Lixin Chen(2018)의 연구에서는 바늘잎은 미세먼지 저감률이 높지만, 넓은 잎이어도 잎에 흠이나 털이 많을수록 초미세먼지를 잘 흡착시킨다고 하였다.

〈그림 2-14〉 나뭇잎의 PM2.5 집적량



Pinnate : 공통의 중축에 대해 작은 잎이 좌우로 배열한 겹잎의 전체적인 모양(깃모양)

Palmate: 손바닥 모양의 잎

Ovate: 달걀모양 잎

Acicular: 바늘모양의 잎

Lanceolate: 창모양의 잎

Fanshaped: 부채꼴 모양

Dichotomous: 잎맥이 두갈래로 갈라진 모양

Parallel: 병렬형

자료: Lixin Chen(2018), Effect of Street Trees on PM2.5 Abatement in Street Canyon, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집

## 제2절 수목의 대기오염물질 내성도

### 1. 식물에 해를 끼치는 오염물질

식물은 탄산가스를 제외한 모든 가스에 피해를 입으며 식물생육에 해를 주는 가스로는 아황산가스, 일산화탄소, 질소산화물, 탄화수소, 황화수소, 염소 등이 있다. 이 중에서 가장 많은 피해를 주는 것은 아황산가스이며, 분진(매연, 미세먼지)과 옥시던트<sup>4)</sup> 및 산성비도 큰 피해를 준다.

아황산가스는 엽록소를 파괴시키며, 분진은 잎 표면에 심하게 부착되면 동화작용, 호흡작용, 증산작용을 방해하여 식물의 생육이 나빠진다. 오존은 식물체에 흡수되면 기공 폐쇄와 엽육세포 파괴 등을 유발하여 광합성 능력 및 생리·생화학적인 과정의 저해를 통하여 수목의 성장을 감소시킨다(Pye, 1988). 오존이 식물 체내로 유입되었을 때 나타나는 반응을 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 체내로의 오존 유입을 차단하기 위하여 기공을 닫는 기피성 반응이고, 다른 하나는 세포 내에 유입된 오존에 의해 발생된 독성물질인 활성산소들을 항산화 효소나 항산화물질을 이용하여 직접 해독하는 내성 반응이다(Heath, 1980).

### 2. 대기오염에 대한 식물의 저항성

수목에 영향을 미치는 가스의 유해농도는 가스의 종류, 접촉시간, 접촉 시 자외선의 강도, 온도, 습도, 수종, 생육기간 등에 따라 다르나 대개 가스농도와 접촉 시간에 비례한다(국립산림과학원, 2012).

수목의 스트레스에 대한 생리적 반응은 수종뿐만 아니라, 스트레스의 종류, 노출 강도 및 노출 기간에 따라 매우 다르게 나타난다(Coleman et al., 1995; Oksanen et al., 2001). 이러한 생리적 반응 차이는 스트레스에 대한 내성능력이 수종 간 다르기 때문이다. 이제까지 많은 연구를 통해서, 아황산가스, 질소산화물, 오존 등에 대한 장기 만성 반응으로부터 단기 급성 반응에 이르기까지 다양한 수종들을 대상으로 생리적 결과들이 보고되었으나, 수종 간 생리적 반응 차이에 대한 명확한 답은 얻지 못하고 있다.

한심희 외(2009)의 연구에 의하면, 수목의 오존 내성은 단기 노출 후 나타난 생리적 피해와 생화학적 반응들의 표준화 지수로 결정된다고 하였다. 모감주나무, 벽오동, 때죽나무, 물푸레나무, 백당나무를 150ppb의 오존에 노출 시킨 실험을 기초로 한 5개 수목의 오존 내성은 두 내성 수종(물푸레나무>모감주나무)과 세 민감성 수종(때죽나무>벽오동>백당나무)으

4) 질소산화물과 탄화수소가 빛에너지에 의해 반응하여 생기는 강산성 물질이다. 대기 속의 아황산가스와 습기가 반응하여 생기는 아황산을 산화시켜 황산을 만들기 때문에 광화학스모그·황산미스트의 원인이 된다.

로 구분되었다.

대기오염에 따른 식물성장 관련 보고들을 종합해 보면, 장기적으로 스트레스인 대기오염에 대한 수목의 저항성은 상록활엽수가 비교적 강하고, 낙엽활엽수는 다소 약하다. 그러나 낙엽 활엽수 중에서도 강한 수종이 있으며, 침엽수는 대체로 약한 것이 많다.

국립산림과학원(2012)과 정환도(2012)의 연구에서 수목의 대기오염물에 대한 저항성을 다음표와 같이 정리하였다.

〈표 2-6〉 조경 수목의 대기오염물질에 대한 저항성

구분	주요수종	
	침엽수	활엽수
이황산 가스 (SO <sub>2</sub> )	강한 수종	화백 · 향나무 · 편백 · 측백 · 섬잣나무 · 노간주나무 · 해송 · 은행나무 · 낙우송 · 메타세쿼이아
	약한 수종	독일 가문비나무, 삼나무, 소나무, 전나무, 낙엽송, 히말라야시다, 느티나무, 감나무, 빛나무류, 단풍나무, 매화나무, 고로쇠나무 등
불화 수소	강한 수종	소나무 · 향나무 · 전나무 · 일본전나무
질소 산화물 (NO <sub>x</sub> )	강	오이 · 수박 · 벼 · 옥수수 · 감나무 · 포도 · 소나무 · 해송 · 편백 · 삼나무
	중	피망 · 완두콩 · 부추 · 토란 · 메밀 · 글라디올러스 · 나팔꽃 · 배나무 · 밤나무
	약	대두 · 깨 · 토마토 · 가지 · 시금치 · 장미 · 국화 · 썩 · 딸기 · 빛나무 · 단풍나무
오존 (O <sub>3</sub> )	강한 수종	삼나무 · 해송 · 편백 · 화백 · 서양측백 · 은행나무
복합 대기 오염	강한 수종	향나무 · 가이즈까향나무 · 히말라야시다 · 개비자나무 · 노간주나무 · 은행나무
	흡착력 높은 수종	향나무 · 히말라야시다 · 은행나무
분진	흡착력 높은 수종	향나무 · 히말라야시다 · 은행나무
대기오염 정화 수종	가죽나무, 거제수나무, 양버즘나무, 이태리포플러, 두충나무, 느티나무, 박태기나무, 광나무 등	

자료: 국립산림과학원(2012), 대기오염과 수목피해 / 정환도(2012), 대기오염과 식물생태에 관한 기초연구, 대전발전연구원

국립환경과학원(1990)에서는 우리나라에서 대표적으로 이용된 활용되는 활엽수와 침엽수 91종을 대상으로 내연성과 감수성, 생산량 등을 비교해 가로수 정화능력을 평가하였다. 조사 대상수목의 내연성을 비교하기 위해 각 나무의 단위 잎 면적 중 아황산가스로 인한 피해면적의 비율을 5점 만점으로 계산해 피해점수를 산출했다.

조사결과 라일락, 광나무, 박태기나무 등은 아황산가스농도 3.0ppm에서도 피해 면적이 전체 면적의 20%수준인 1점대의 낮은 가지 피해를 보여 내연성이 강한 수종으로 나타났다. 반면 무궁화나 모과나무 대추나무 등은 잎 전체가 갈색 황갈색 등으로 변하고 바싹 마르는 전형적인 아황산가스 피해를 보여 내연성이 약한 수종임이 드러났다. 특히 플라타너스란 이름으로 일반에 알려진 양버즘나무 역시 4.5점 이상의 피해점수가 측정돼 내연성이 약한 것으로 나타났다.

〈표 2-7〉 아황산가스에 의한 수목별 최종피해점수

수목명	아황산가스 농도(ppm)			
	0.4	0.7	1.5	3.0
라일락	-	-	-	1.0
광나무	-	-	-	1.7
팽나무	-	-	1.0	2.0
박태기나무	-	-	0.7	3.0
은행나무	-	-	2.0	3.0
흰작살나무	-	-	2.3	3.0
단풍나무	-	-	1.3	3.2
신나무	-	-	1.3	3.2
낙상홍	-	0.3	1.8	3.2
자귀나무	-	0.7	3.3	3.3
회잎나무	-	-	0.7	3.7
가죽나무	-	-	2.0	3.7
백당나무	-	0.7	2.2	3.8
갈매나무	-	0.3	1.3	4.0
사철나무	-	-	0.7	4.3
개나리	-	-	3.0	4.3
층층나무	-	-	3.8	4.3
들메나무	1.3	0.3	4.0	4.3
느티나무	-	0.7	4.0	4.3
이팝나무	-	0.7	4.0	4.3
자작나무	-	-	3.7	4.5
산철쭉	-	-	3.8	4.5
꽃말발도리	0.1	0.2	3.3	4.6

수목명	아황산가스 농도(ppm)			
	0.4	0.7	1.5	3.0
주엽나무	-	-	2.7	4.7
양버즘나무	-	-	3.3	4.7
물푸레나무	-	0.4	3.7	4.7
배롱나무	-	0.4	3.7	4.7
마가목	0.2	1.3	4.3	4.8
목련	-	-	2.0	4.9
벽오동나무	-	-	2.3	5.0
무궁화	-	-	4.3	5.0
조팝나무	0.8	0.8	4.5	5.0
중국굴피나무	2.7	3.8	4.6	5.0
병꽃나무	0.7	0.9	4.7	5.0
대추나무	-	1.0	5.0	5.0
산사나무	1.3	2.0	5.0	5.0
모과나무	1.3	2.0	5.0	5.0
미선나무	2.2	3.0	5.0	5.0

자료: 배정오(1990), 과학동아 1990년 09호

앞서의 측정기준을 통해 우수한 정화기능을 가진 것으로 평가된 나무라 하더라도 생산량이 적으면 대기오염 정화에 크게 효과를 나타낼 수 없다. 따라서 각 나무의 잎의 총량으로 생산량을 측정해 본 결과, 활엽수의 경우 잎의 총생산량은 양버즘이 가장 많아 4,198g/주(株)였고 가장 적은 것은 은행나무로 1,430g/주로서 양버즘나무가 은행나무보다 약 3배의 높은 생산량을 보였다. 수종별 생산량의 순서는 양버즘나무, 은단풍나무, 능수버들, 가죽나무, 은행나무의 차례로 나타났다.

침엽수에서 잎 생산량은 테다소나무가 가장 많아 9,445g/주였고 소나무가 2,917g/주로 가장 적었다. 잎 생산량은 테다소나무, 일본잣나무, 리기테다 소나무, 잣나무, 곰솔, 소나무의 차례로 나타났다.

이상의 자료를 기초로 대기오염정화능력이 뛰어난 수목을 선별해 보면 다음 표와 같다. 여러 가지 측정기준을 종합적으로 검토해 보면 활엽교목류에서는 자작나무, 가죽나무, 수원포플러, 두충나무, 느티나무, 양버즘나무 등 6종과 관목류에서 박태기나무, 광나무 등 6종이며 침엽수에서는 일본잣나무와 테다소나무가 우수한 정화수로 꼽혔다.

〈표 2-8〉 수종별 정화능 비교

구분	정화능										
	강			↔				약			
활엽수	교목	자작나무	수원포플러	뽕나무	향나무		물푸레나무	배롱나무			이팝나무
		가죽나무	두충나무	흑호도	목동백	아몬드나무		팽나무		살구나무	모과나무
		양버즘나무	느티나무	두릅나무			백목련	산수유나무			목련
				목백합	뽕나무	아까시	신갈나무	가시나무	은행나무	당단풍나무	산사나무
				덕나무	은단풍나무	백오동나무			신나무	칠엽수	중국굴피나무
										아가목	
	관목			황금포도		참		대추나무		박달나무	
				박태기나무		노박덩굴	무궁화나무		흰작살나무		
				괭나무					수수꽃다리		조팝나무
								개암나무	개나리		매화나무
									층층나무	꽃말발도리	
침엽수	교목	일본젓나무	테다소나무		곰솔	젓나무		소나무	리기테소나무	병꽃나무	

자료: 배정오(1990), 과학동아 1990년 09호

국립환경과학원(1994)의 환경개선을 위한 정화식물 개발에 관한 연구에서는 광합성 흡수 속도에 의한 방법으로 수종별 가스 흡수량을 추정하였다.

〈표 2-9〉 수종별 오염물질 흡수 추정치

수종	흡수량(g/d)			수령
	이산화탄소	이산화황	이산화질소	
은행나무	49.43	0.05	0.04	6~10
	92.25	0.10	0.08	
양버즘나무	2032.92	2.22	1.79	16~20
	703.60	0.77	0.62	
백목련	328.58	0.36	0.29	6~10
	461.56	0.50	0.41	21<
낙산홍	25.06	0.03	0.02	6~10
느티나무	908.47	0.99	0.80	21<
목백합	368.14	0.40	0.32	16~20
광나무	17.77	0.02	0.02	6~10
가시나무	200.63	0.22	0.18	11~15
아왜나무	197.87	0.22	0.17	16~20
배롱나무	386.93	0.42	0.34	21<
태산목	215.23	0.23	0.19	21<
계수나무	564.68	0.62	0.50	21<
동백나무	15.43	0.02	0.01	<5

\* 흡수량은 식재지역과 수종의 상태에 따라 상이할 수 있음

자료: 국립환경과학원(1994), 환경개선을 위한 정화식물 개발에 관한 연구

미국 EPA는 1976년 나무 수종의 정화능력을 실험하였으며 특정식물을 환경정화수로 추천하고 있지는 않다. 수목의 대기오염물질 정화능력은 수종, 잎의 종류, 잎의 나이, 지역 등에 따라 다르기 때문에 일률적으로 어느 수종이 얼마나 많은 오염물질을 흡수하는가를 쉽게 말하기 어렵다.

국외 연구사례의 수종별 수령별 대기오염물질 정화량은 다음표와 같다.

〈표 2-10〉 수목과 숲의 대기오염 저감 기능

구분	수종	조건	흡수량	자료
SO <sub>2</sub>	소나무	26년생	30.3kg/ha/년, 20.2g/주/yr	국립환경연구원 (1988)
	곰솔	26년생	42.5kg/ha/년, 28.3g/주/yr	
	잣나무	24년생	34.3kg/ha/년, 31.7g/주/yr	
	리기테다	30년생	32.6kg/ha/년, 26.0g/주/yr	
	테다소나무	30년생	21.3kg/ha/년, 29.3g/주/yr	
	일본잣나무	60년생	88.8kg/ha/년, 136.5g/주/yr	
	능수버들	10~15년생	12.4g/주/yr	
	양버즘나무		6.2g/주/yr	
	은단풍나무		14.0g/주/yr	
	가중나무		50.3g/주/yr	
	은행나무		21.0g/주/yr	
	알팔파	높이 16±2 인치	21.38×10 <sup>5</sup> μg/m <sup>2</sup> /hr	Hill(1971)
	단풍나무류	묘목, 실험실조건	8.8×10 <sup>-4</sup> kg/ha/hr	Murphy et al.(1975)
	자작나무류		8.6×10 <sup>-4</sup> kg/ha/hr	
	물푸레나무류		4.6×10 <sup>-4</sup> kg/ha/hr	
	테다소나무		7.0×10 <sup>-4</sup> kg/ha/hr	
	산사나무류	야외나무(4m높이, 3m높이)	157.2μg/hr	Martin et al(1971)
	철쭉류	묘목, 실험실조건	0.081mg/dm <sup>2</sup> /hr	Roberts et al.(1976)
		묘목, 엽건중량으로 추정	0.127mg/g/hr	
	피라칸다	묘목, 실험실조건	0.128mg/dm <sup>2</sup> /hr	
		묘목, 엽건중량으로 추정	0.272mg/g/hr	
	자작나무류	Open-top 시스템에서 잎의 흡수량	0.268mg/g/hr	Roberts(1974)
	물푸레나무류		0.115mg/g/hr	
	피라칸다		0.222mg/g/hr	
	진달래류		0.071mg/g/hr	
	활엽수림	1ha면적	360kg/yr	Smith(1991)
	침엽수림	1ha면적	120kg/yr	
	목초지	야외측정	36~50mg/m <sup>2</sup> /14h	Owers san Powell(1974)
	초원	야외측정	58~216mg/m <sup>2</sup> /14h	
	생울타리	야외측정	245~353mg/m <sup>2</sup> /14h	
	초원	야외측정	19~109mg/m <sup>2</sup> /14h	Shepherd(1974)
	초원	키작은 풀, 야외측정	7~148mg/m <sup>2</sup> /14h	Garland et al.(1974)
구주적송림	야외측정	14mg/m <sup>2</sup> /14h	Galbally et al(1979)	
농장	완두콩, 독보리, 야외측정	43mg/m <sup>2</sup> /14h		
해바라기집단	생장상 실험	100mg/m <sup>2</sup> /14h	清水 et al.(1979)	
단풍나무류	수고6m	흡수량 실험결과와 엽량으로 산정	0.01tons/yr	US EPA(1976)
참나무류	수고6m		0.01tons/yr	
포플러류	수고6m		0.02tons/yr	
피나무류	수고5m		0.009tons/yr	
자작나무류	수고5m		0.01tons/yr	
소나무류	수고3m		0.002tons/yr	

구분	수종	조건	흡수량	자료	
NO <sub>2</sub>	소나무	26년생	7.0kg/ha/년, 4.7g/주/yr	국립환경연구원 (1988)	
	곰솔	26년생	12.3kg/ha/년, 8.2g/주/yr		
	잣나무	24년생	7.1kg/ha/년, 6.6g/주/yr		
	리기테다	30년생	9.4kg/ha/년, 7.5g/주/yr		
	테다소나무	30년생	7.6kg/ha/년, 10.5g/주/yr		
	일본잣나무	60년생	21.1kg/ha/년, 32.4g/주/yr		
	능수버들	10~15년생	2.6g/주/yr		
	양버즘나무		2.2g/주/yr		
	은단풍나무		8.4g/주/yr		
	가중나무		13.2g/주/yr		
	은행나무		4.1g/주/yr		
	알팔파	높이 16±2 인치	4.63×10 <sup>4</sup> μg/m <sup>2</sup> /hr	Hill(1971)	
	활엽수림	1ha면적	690kg/yr	Smith(1990)	
	침엽수림	1ha면적	240kg/yr		
NO <sub>2</sub>	단풍나무류	수고6m	흡수량 실험결과와 엽량으로 산정	0.0008tons/yr	US EPA(1976)
	참나무류	수고6m		0.0008tons/yr	
	포플러류	수고6m		0.001tons/yr	
	피나무류	수고5m		0.0005tons/yr	
	자작나무류	수고5m		0.0006tons/yr	
	소나무류	수고3m		0.00009tons/yr	
O <sub>3</sub>	참나무류	묘목, 0.20ppm	1.318mg/g/hr	Smith(1990)	
	자작나무류		2.347mg/g/hr		
	설탕단풍		0.863mg/g/hr		
	물푸레나무류		0.562mg/g/hr		
	단풍나무류	수고6m	흡수량 실험결과와 엽량으로 산정	0.02tons/yr	US EPA(1976)
	참나무류	수고6m		0.02tons/yr	
	포플러류	수고6m		0.03tons/yr	
	피나무류	수고5m		0.01tons/yr	
	자작나무류	수고5m		0.02tons/yr	
	소나무류	수고3m		0.003tons/yr	
	알팔파	-	2.80mg/hr/m <sup>2</sup> /ppm	Townsend(1974)	
	Coliseum maple	-	0.502mg/dm <sup>2</sup> /hr		
	Ohio buckeye	-	0.362mg/dm <sup>2</sup> /hr		
	Redvein maple	-	0.285mg/dm <sup>2</sup> /hr		
Sweetgum	-	0.278mg/dm <sup>2</sup> /hr			
Red maple	-	0.272mg/dm <sup>2</sup> /hr			
해바라기	키 20cm, 1~1.2vol ppm. 30분	0.25~0.39×10 <sup>-5</sup> g/cm <sup>3</sup>	Omasa et al(1984)		

자료: 국립환경과학원(1997), 도시유형별 녹지의 환경개선 기능 평가

### 제3절 수목의 대기오염물질 배출특성

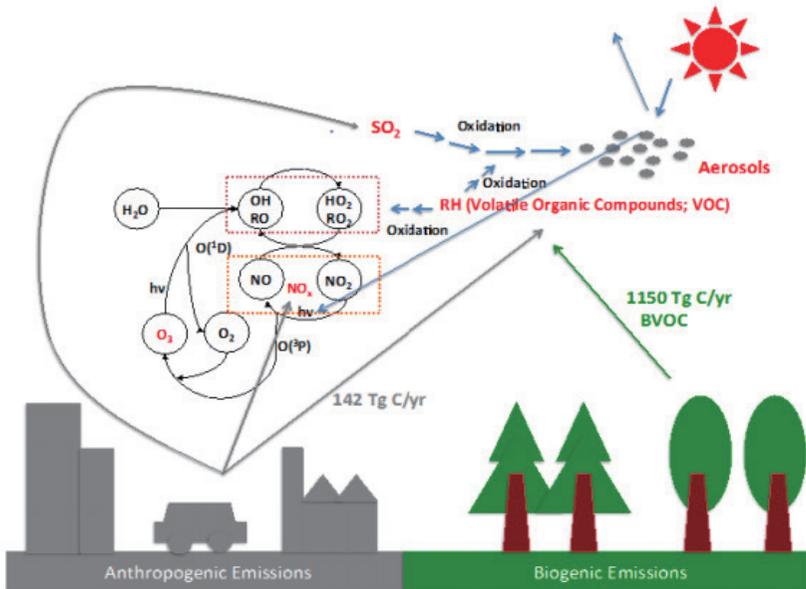
#### 1. 휘발성유기화합물 배출 특성

지구상의 모든 VOCs(휘발성유기화합물질)는 자연적으로 발생하는 것과 인위적으로 발생하는 것으로 구분된다. 자연적으로 발생하는 VOCs는 식물이나 해양을 기원으로 하는 것이 대부분이다. 그 중에서 식물에서 발생하는 VOCs는 대류권에서 오존을 생성하거나 에어로졸을 생성하여 지구 기후에 영향을 미치는 매우 중요한 물질이다.

공장이나 자동차에서 배출되는 인위적 VOCs가 주로 동물이나 인체의 건강에 위해성을 끼치는 것에 비해 식물기원 VOCs는 인위적 기원 VOCs보다 발생량도 훨씬 많으며 환경에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다.

자연기원의 휘발성 유기물질은 배출량이 인위적 기원의 휘발성 유기물질 배출량의 10배 이상에 달하며 반응성 지표로 비교할 때 BVOCs의 광화학 반응성이 일반적으로 높기 때문에 중요하다(국립환경과학원, 2012).

〈그림 2-15〉 광화학 오존 및 2차 유기에어로졸의 생성 과정을 보여주는 모식도



자료: 국립환경과학원(2012), 자연적 휘발성 유기화합물이 오존 및 유기에어로졸에 미치는 영향연구(II)

## 1) BVOCs(자연적 휘발성유기화합물) 종류

일반적으로 식물은 이소프렌(isoprene), 테르펜(terpene), 알콜, 에스테르 등 다양한 VOCs를 잎, 줄기, 뿌리 등 여러 기관에 함유하고 있으며 수종에 따라 함유량도 다르고 배출되는 물질들도 다르다.

## 2) BVOCs의 배출 영향 인자

BVOCs의 대기 중으로 배출은 식생과 주변 환경의 복잡한 상호작용에 의해서 영향을 받을 뿐 아니라 생리적 및 생리화학적 관점으로도 영향을 받는다. 생리적인 관점에서 볼 때 기상 인자인 광합성 유효광(Photosynthetically Active Radiation; PAR)과 온도 등에 의해 BVOCs가 배출하는 것으로 밝혀졌고, 생리화학적인 관점에서는 잎의 구조와 기공의 개폐에 따른 식물체 자체의 동화작용의 영향에 의해서 BVOCs가 배출되는 것으로 알려져 있다. 침엽수에서 테르펜 등을 잎과 줄기의 저장소에 축적하고 주변 환경, 즉 온도, 광합성 유효광 등과 같은 기상인자와 CO<sub>2</sub>, 곤충, 새, 초식동물의 공격, 상처치유, 식물간의 교신, 열적 내성 등 식물 생리나 생태학적 차원에서 BVOCs물질이 대기 중으로 배출된다(Peñuelas, J., 2003, Nunes, T.V, 2001., Owen, S. M., 2001.).

또한 BVOCs 배출에는 기상요소, 식물들의 교신에 의한 영향 또한 받는다. 기상요소 변화가 BVOCs의 배출속도, 증기압, 대기로의 확산 정도에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 즉 BVOCs 배출은 식물의 생리현상 및 기상요소, 교신 등 복합적인 영향으로 이루어진다(김형철, 2013).

### (1) 온도

잎 온도는 식물의 잎 안쪽 기공 등 저장소로부터 BVOCs가 휘발되는 정도를 조절하는데 온도가 높고 빛이 강하면 휘발되는 양이 많아지고 온도가 낮으면 휘발되는 양이 감소한다. 모노테르펜(monoterpene)은 잎 표면에서 만들어져 기공을 통해 저장되었다가 배출되므로 배출량이 빛의 영향을 적게 받는다(Harley, P.C. 외, 1999., Cooke, K. M. 외, 2001., Riba, M. L 외, 1987.). 반면에 이소프렌은 광합성을 하는 과정에 생성되는 부산물로서 잎 안에 저장되지 않고 잎의 표면을 통해 바로 배출되어진다.

하루 중에서 BVOCs 배출량의 변동은 온도와 광합성 유효광이 최대 시점인 12시에서 13시에서 BVOCs 배출량의 최대를 보이는 알려져 있다(Kesselmeier, J.외, 1998., Alex, B., 1993., Tarvainen, V, 2005.).

## (2) 광합성 유효광(PAR; PhotosyntheticallyActiveRadiation)

광합성 유효광은 모노테르펜의 배출과는 크게 상관이 없다고 알려져 있으나 이소프렌은 광합성 정도에 따라 배출량이 달라지므로 광합성유효광의 유입량이 절대적인 영향을 미친다. 이소프렌은 햇빛이 존재하는 낮에 광합성 후에 생성되어 곧바로 대기 중으로 배출되는 특징을 갖고 있으며 햇빛이 제공되지 못하면 생성하지 않는다(Guenther, A.외, 1994). 식물에 빛을 쏘이면 빛의 세기에 비례하여 이소프렌 배출속도가 증가하지만 빛의 세기가 어느 점에 이르면 더 이상 이소프렌 배출속도가 증가하지 않는 경향을 보인다.

## (3) 습도

일반적으로 상대습도는 이소프렌이나 테르펜의 배출에 대한 영향이 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있다(Nunes, T. V.,2001). 그렇지만 상대습도가 높아지면 BVOCs의 농도가 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 식물들이 자기 자신을 지키려는 방어능력과 관련이 있다. 만약 수분이 충분하여 상대습도가 높으면 식물은 자기 스스로 높은 온도와 열을 내릴 수 있을 것이다. 다시 말해 BVOCs가 많이 배출되는 조건인 높은 온도와 강한 빛을 충분한 수분으로 인해서 해소시킬 수 있을 것이고, 식물들은 높은 온도를 견디기 위해서 BVOCs를 배출할 필요가 없게 되어 배출량이 줄어든다. 반대로 수분이 부족하면 식물은 잎 안에서 광합성과 호흡이 천천히 감소하고 엽록소가 감소하게 될 것이다(Hsieh, C. C.,1999). 따라서 높은 온도와 강한 빛 등의 기상상태를 쉽게 해소시키지 못하여 BVOCs의 배출량은 많아질 것이다(Hsieh, C. C.,1999).

## (4) 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)

식물의 광합성 시에만 생성되는 이소프렌의 제한 요소로는 CO<sub>2</sub>와 햇빛 모두 해당된다. 대부분의 녹색식물은 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하면 광합성량이 증가한다. 햇빛의 양과 온도가 적합할 때는 CO<sub>2</sub>가 광합성 제한 요소가 된다. 이소프렌 배출속도는 CO<sub>2</sub> 농도가 50~600ppm까지는 일정한 반면 50ppm 이하와 750ppm 이상에서는 감소하는 경향을 보인다(Alex,B. 외, 1993).

### 3) BVOCs가 환경에 미치는 영향

자연에서 배출되는 모노테르펜 중  $\alpha$ -pinene으로 대표되는 피톤치드는 인간에게 면역력을 높여주고 스트레스를 낮춰주는 이로운 물질이기도 하지만 대기 중에서  $O_3$ (오존), OH 라디칼, nitrate 라디칼 등과 반응하여 에어로졸을 생성하고 태양 빛을 반사하여 지구 냉각에 영향을 주는 오염 물질이다.

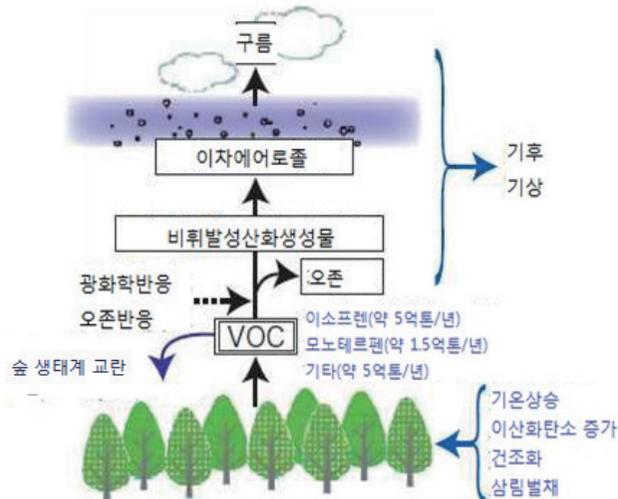
지구상의 식물이 내뿜는 VOCs 발생량은 연간 약10억 톤에 달한다. 식물 기원 VOCs는 인위적 VOCs와는 다른 성분이지만 역시 대기 반응에 관여하거나 생성권  $O_3$ 을 파괴하고 있으며, 해양에서 방출되는 유황을 함유한 VOCs는 구름의 근원이 되는 에어로졸을 만든다.

이용기(2012) 보고서에 의하면 일본 국립 환경 연구소는 이러한 지구환경과 깊게 관련되어 있는 자연계 VOCs에 대해서 발생과정과 환경에 끼치는 영향을 해명하기 위한 연구를 진행하였으며 내용은 다음과 같다.

식물에서 방출되는 VOCs는 대기의 반응에 따라 비휘발성 산화 생성물로 바뀐다. 일부는 미세한 이차 에어로졸이 되고 태양 방사선을 반사하여 지구 대기를 냉각한다. 또한 구름 응결 핵으로 작용하여 흐린 날씨의 증가 등 간접 효과에 의해 기상 및 기후에 영향을 준다. 또한 이소프렌은 대기 중의  $NO_x$  농도가 높은 경우, 광화학 반응에 의해  $O_3$ 을 생성한다.

따라서 기후 변화 및 삼림 벌채에 의한 식물 기원 VOCs 발생량의 변화는 환경에 큰 피드백을 가져올 우려가 있다. 또한 식물 기원 VOCs의 양적 · 질적 변화는 식물과 곤충 또는 식물 간의 상호작용에 영향을 미치고 숲 생태계를 교란시킬 가능성도 있다.

〈그림 2-16〉 식물기원 VOCs의 환경과 상호작용

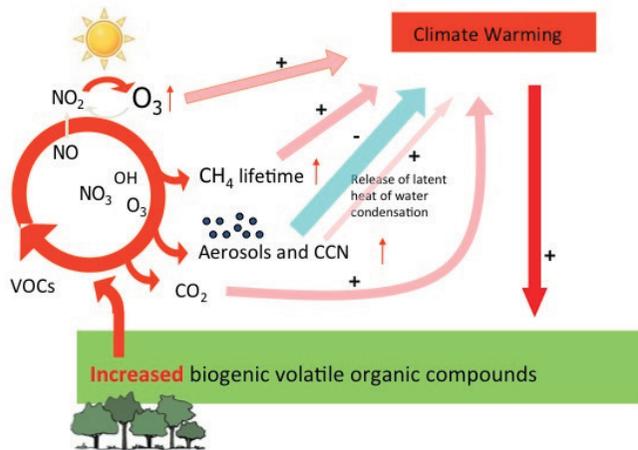


자료: 이용기(2012), 자연발생 VOC(Volatile Organic Compound)의 실태와 지구환경에 미치는 영향, 코네티카포스트

대기 중 에어로졸은 기후에 중요하다. VOCs 등의 반응에 의해 만들어지는 미세한 이차 에어로졸은 태양광을 반사하기 때문에 지구를 냉각하는 방향으로 거동한다. 또한 일부는 구름을 생성하기 때문에 강수량과 그 분포도 좌우하게 된다. 또 이소프렌의 광화학 반응으로 O<sub>3</sub>의 생성이 많아지는 동시에 메탄 반응의 상대인 OH 라디칼이 소비되기 때문에 CH<sub>4</sub>(메탄)이 증가하게 된다. O<sub>3</sub>이나 CH<sub>4</sub>은 모두 온실가스이므로 향후 지구온난화를 통해 식물 기원 VOCs가 증가 하느냐 감소하느냐는 기후에 중대한 영향을 미칠 수 있다(이용기, 2012).

〈그림 2-17〉 기후변화에 따른 BVOCs의 증가

Effects of increased BVOCs on atmospheric chemistry and climate



자료: <http://www.newsletter.fondationairliquide.com>

이러한 식물기원 VOCs의 증감이 지구 기후변화에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 파악은 환경변화의 예측 측면에서도 중요하지만 국가 또는 세계 경제에 미치는 효과 또한 매우 크다고 할 수 있다.

하지만 아직 체계적인 연구는 물론이며 기본적인 측정조차 이루어지지 않고 있다.

## 2. 이소프렌(Isoprene)과 테르펜류(Terpenes)의 배출특성

모든 나무는 자라는 기간 동안 VOCs를 배출하는데 대표적인 물질로 침엽수는 테르펜류, 활엽수는 이소프렌으로 알려져 있다.

국립환경과학원의 자연적 휘발성 유기화합물이 오존 및 유기에어로졸에 미치는 영향연구(2014)에 따르면 경기도 광주에 위치한 태화산에서 BVOCs의 농도는 초여름(5~6월) > 여름(8월) > 가을(8월)순으로 높게 나타났다.

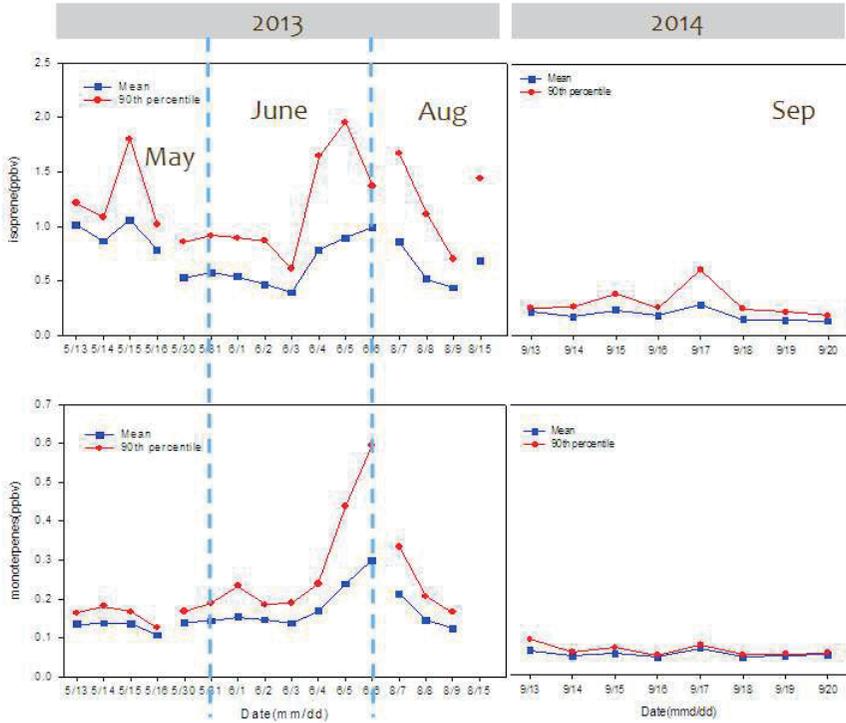
〈그림 2-18〉 조사 위치



BVOCs 중 이소프렌은 전체 측정 기간 동안 늦은 오후에 최고 농도를 보였다. 이소프렌은 주로 활엽수에서 배출되는 것으로 알려져 있는데, 활엽수는 햇빛이 생기면서 바로 광합성 작용을 통해 BVOCs를 배출하는 특성이 있다.

모노테르펜은 침엽수에서 주로 배출되는데, 침엽수는 활엽수와는 달리 광합성을 하면 바로 배출되지 않고 잎에 머금고 있다가 늦은 오후부터 배출되어 밤 동안에도 배출되는 특성이 있다(Laffineur et al., 2011).

〈그림 2-19〉 이소프렌(위)과 모노테르펜(아래)의 측정기간별 농도변화



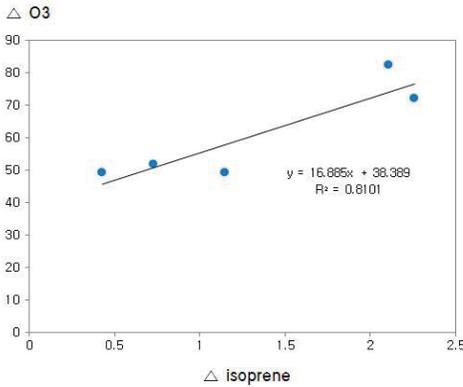
자료: 국립환경과학원(2014), 자연적 휘발성 유기화합물이 오존 및 유기에어로졸에 미치는 영향연구(IV)

고농도가 나타난 6월에 오존과 이소프렌의 상관관계를 살펴본 결과(그림2-18)  $R^2$ 는 0.81로 이소프렌의 증가와  $O_3$ 증가 사이에 강한 양의 상관성이 나타났다.

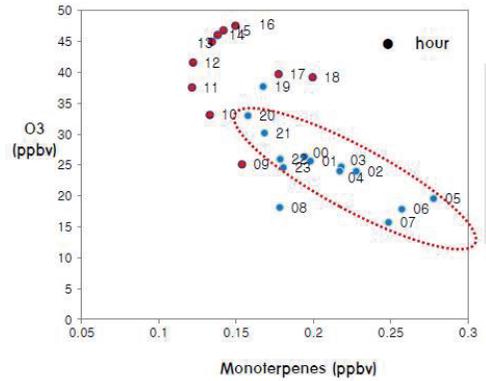
테르펜은 낮에는 OH와 밤에는  $NO_3$ 와 반응할 뿐 아니라  $O_3$ 과도 반응하여  $O_3$ 농도를 감소시키게 된다.

태화산에서 이소프렌은  $O_3$ 을 생성하는데, 모노테르펜은  $O_3$ 을 소멸하는 데 영향을 미치는 것을 알 수 있다(국립환경연구원, 2014). 이는 인위적으로 배출되는 질소산화물( $NO_x$ )의 영향이 산림배출과 혼재되어 나타나는 현상이다. 즉, 산림이  $O_3$ 을 생성하기도 하지만 소멸하기도 하므로 시 정책 수립 시 다각도로 고려해봐야 할 것이다.

〈그림 2-20〉 고농도가 관측된 2013년 6월의 오존과 이소프렌의 상관관계



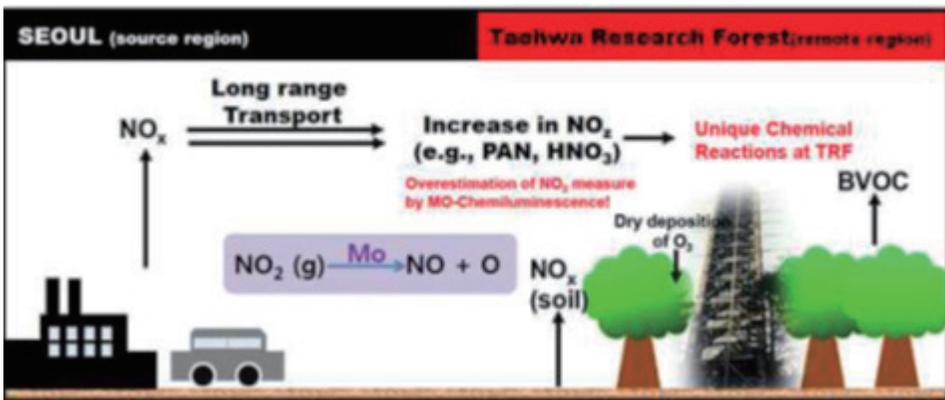
〈그림 2-21〉 2013년 관측기간 동안 오존과 모노테르펜의 관계



자료: 국립환경과학원(2014), 자연적 휘발성 유기화합물이 오존 및 유기에어로졸에 미치는 영향연구(Ⅳ)

서울 시내 등 통행량이 많은 지역에서는 많은 양의 NO<sub>x</sub>가 배출될 것으로 예상되고 이중 화학적 변환이 일어나지 않은 NO<sub>x</sub>가 도심의 주변지역에 영향을 미칠 것으로 유추할 수 있다. NO<sub>x</sub> 반응 부산물 등은 도심지역보다는 태화산 관측소와 같이 도심주변 지역에 더 높게 분포할 것이며 이에 대한 개념도는 다음 그림과 같다.

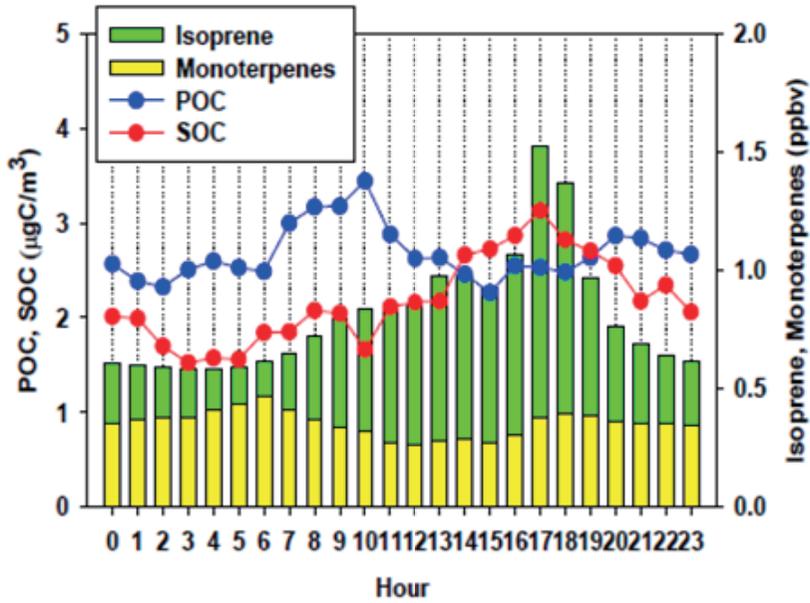
〈그림 2-22〉 서울 도심과 도심 주변에서의 NO<sub>x</sub>광화학 모식도



자료: 국립환경과학원(2014), 자연적 휘발성 유기화합물이 오존 및 유기에어로졸에 미치는 영향연구(Ⅳ)

이소프렌과 테르펜류의 이차에어로졸 생성 특성을 살펴보면 이소프렌 농도가 높아지는 오 후에 SOC(이차유기에어로졸: 초미세먼지 주요 성분)의 생성이 증가한다.

〈그림 2-23〉 초여름의 POC, SOC, 이소프렌, 모노테르펜 일변화



자료: 국립환경과학원(2014), 자연적 휘발성 유기화합물이 오존 및 유기에어로졸에 미치는 영향연구(Ⅳ)

\*POC: Primary Organic Carbon

### 3. 수종별 BVOCs의 배출특성

미국 환경청발표자료에 의하면 이소프렌 배출량은 참나무류, 이태리포플러, 가문비나무 등이 많고 소나무, 낙엽송, 백합나무 등은 적은 것으로 나타났다.

미국 남부 캘리포니아에서는 루브라참나무, 미국풍나무, 런던버즘나무가 VOC배출량이 높은 것으로 보고 있다(Nowak과 Crane, 1998).

〈표 2-11〉 수종별 이소프렌 발생량(미국환경청 발표)

수 종	Isoprene Flux ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{hr}$ )	수 종	Isoprene Flux ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{hr}$ )
가문비나무	23,800	이태리포플러	29,750
편백나무	170	사시나무	29,750
일본전나무	170	참나무류	29,750
측백나무	170	유칼립투스	29,750
솔송	79	버드나무류	14,875
히말라야시다	79	플라타너스	14,875
소나무	79	야자나무	14,875
아카시아	78	호도나무	43
낙엽송	43	백합나무	43
자작나무	43	목련	43
낙우송	43	사과나무	43
단풍나무	43	멀구슬나무	43
칠엽수	43	산뽕나무	43
가중나무	43	새우나무	43
유동	43	오동나무	43
오렌지	43	너도밤나무	43
오리나무	43	물푸레나무	43
채진목	43	호랑가시나무	43
서어나무	43	사람주나무	43
젓밤나무	43	마가목	43
밤나무	43	미국느릅나무	43
개오동	43	정금나무	43
팽나무	43	층층나무	43
박태기	43	산사나무	43
알파파	19	감나무	43

M. Karl(2009)<sup>5)</sup>의 대기모델 구현을 위한 유럽의 수종별 VOC배출량 목록을 제시한 연구에서 수종별 VOC배출량은 다음 표에 나타내었다.

5) M. Karl 외(2009), A new European plant-specific emission inventory of biogenic volatile organic compounds for use in atmospheric transport models, Biogeosciences, 6, 1059-1087

〈표 2-12〉 수종별 잎의 바이오매스 밀도 값과 표준 배출율

수종	d (gm <sup>-2</sup> )	Stand. emission potential ( $\mu\text{g g}^{-1}\text{DW hr}^{-1}$ )					계절	A.F. (%)	참고
		ISOP	MT <sub>synt</sub>	MT <sub>pool</sub>	OVOC	SQT			
가문비나무	1260	1	0.5	1	2	0.1	eve	1.505	AAK95
불가리아 전나무	1260	18.4	2.5	0.2	2	0.1	eve	0.149	Abies alba
세팔로니아 전나무	1260	0	0.3	0.6	2	0.1	eve	0.223	Abies alba
그랜드 전나무	1260	0	0.3	0.6	2	0.1	eve	0.003	Abies alba
캄페스트레 단풍	320	0	1.5	0	2	0.1	dec	0.046	CO99,1
몽펠리에 단풍	320	0	1.5	0	2	0.1	dec	0.02	CO99,1
이태리 단풍	320	0.1	1.5	0	2	0.1	dec	0.044	CO99,1
노르웨이 단풍	320	0.1	1.5	0	2	0.1	dec	0.337	CO99,1
Acer sp.	320	0.1	1.5	0	2	0.1	dec	0.122	CO99,1
이탈리아 오리나무	320	0	1.5	0	2	0.1	dec	0.072	CO99,2
앨더(오리나무)	320	0	1.5	0	2	0.1	dec	0.346	CO99,2
grey alder	320	0	1.5	0	2	0.1	dec	0.188	CO99,2
덤불 오리나무	320	0	1.5	0	2	0.1	dec	0.004	CO99,2
Greek strawberry tree	300	0	0	0	2	0.1	dec	0.009	VE89,1
딸기나무	300	0.1	0	0.1	2	0.1	dec	0.042	VE89,1
Betula pendula	240	0	0	3	2	2	dec	2.321	M. Karl 외(2009)
Betula pubescens	240	0	0	3	2	2	dec	4.661	M. Karl 외(2009)
회양목	980	10	0	0.2	2	0.1	eve	0.025	OW01
유럽 서어나무	320	0	0	0.1	2	0.1	dec	0.97	CO99,3
동양 서어나무	320	0	0	0	2	0.1	dec	0.012	CO99,3
유럽 밤나무	380	0	10	0	2	0.1	dec	1.077	VE89
아틀라스 시더우드	700	0	0	1	2	0.1	eve	0.024	CO99,4
개잎갈나무	700	0	0	1	2	0.1	eve	0.003	CO99,4
유럽 박태기	300	0	0	0	2	0.1	dec	0.011	VE89,1
캐럽나무	300	0	0	0	2	0.1	eve	0.003	VE89,1
개암나무	300	0	0	0	2	0.1	dec	0.01	VE89,1
사이프러스	700	0	0	0.7	2	0.1	eve	0.03	CO99
Erica arborea	96	13	0	0	2	0.1	eve	0.011	OW01
Erica multiflora	150	0	0	0	2	0.1	eve	<0.001	OW01
Erica scoparia	150	0	0	0	2	0.1	eve	<0.001	OW01
Eucalyptus sp.	400	50	0	5.4	2	0.1	eve	0.847	CO99
Fagus moesiaca (너도밤나무)	320	0	0	0	2	0.1	dec	0.148	CO99
동양 너도밤나무	320	0	0	0	2	0.1	dec	0.015	CO99,5
유럽 너도밤나무	350	0	21.1	0	2	0.1	dec	7.107	M. Karl 외(2009)

수종	d (gm <sup>-2</sup> )	Stand. emission potential ( $\mu\text{g g}^{-1}\text{DW hr}^{-1}$ )					계절	A.F. (%)	참고
		ISOP	MT <sub>synt</sub>	MT <sub>pool</sub>	OVOC	SQT			
양구스티폴리아 물푸레	320	0	0	0	2	0.1	dec	0.049	CO99,6
구주물푸레	320	0	0	0	2	0.1	dec	0.596	CO99,6
서양물푸레	320	0	0	0	2	0.1	dec	0.091	CO99,6
서양 호랑가시나무	375	0	0	0	2	0.1	eve	0.006	GE94
블랙 월넛	320	0	0	1	2	0.1	dec	0.001	CO99
페르시아 호두	300	0	0	1	2	0.1	dec	0.003	VE89
Juniperus communis(향나무)	700	0	0.3	0.6	2	0.1	eve	0.025	CO99,7
Juniperus oxycedrus	700	0	0	1.5	2	0.1	eve	0.038	CO99,7
Juniperus phoenicea(페니 키아 노간주)	700	0	0	1.5	2	0.1	eve	0.015	CO99,7
Juniperus thurifera	700	0	0	0	2	0.1	eve	0.147	CO99,7
유럽 앞갈나무	300	0	0	5	2	0.1	dec	0.808	VE89,2
일본 앞갈나무	300	0	0	5	2	0.1	dec	0.065	VE89,2
월계수	500	0	0	0	2	0.1	eve	<0.001	VE89,3
사과나무	375	0	0	0	2	0.1	dec	0.002	GE94
올리브나무	200	0	0	0.1	2	0.1	eve	0.041	CO99
서어잎 새우나무	320	0	0	0	2	0.1	dec	0.288	CO99,3
그린 올리브 나무	300	0	0	0.5	2	0.1	eve	0.028	VE89,1
독일 가문비 나무	1340	1	2.1	0.4	2	0.1	eve	21.36	M. Karl 외(2009)
시트가 가문비	1400	4.8	0	6.5	2	0.1	eve	0.776	VE89
브루티아 소나무	700	0	0	2	2	0.1	eve	0.04	VE89,4
카나리섬 소나무	700	0	0	6	2	0.1	eve	0.062	VE89,4
스위스 잣나무	700	0	0	2.5	2	0.1	eve	0.02	VE89,4
로지폴 소나무	700	0	0	6	2	0.1	eve	0.198	VE89,4
알레포 소나무	700	0	0	2.7	2	0.1	eve	1.296	VE89,4
보스니아 소나무	700	0	0	6	2	0.1	eve	0.008	VE89,4
무고 소나무	700	0	0	6	2	0.1	eve	0.002	VE89,4
유럽 곰솔	700	0	3	3	2	0.1	eve	1.735	VE89,4
해변 소나무	700	0	0	2	2	0.1	eve	2.532	VE89,4
파니아 소나무	700	0	3	3	1.8	0.1	eve	0.233	VE89,4
라디에터 소나무	700	0	3	3	2	0.1	eve	0.136	VE89,4
스트로브 잣나무	700	0	2.5	2.5	2	0.1	eve	0.031	VE89,4
구주 소나무	690	0.1	2.5	2.5	2	0.1	eve	31.15	M. Karl 외(2009)
웅시나타 소나무	700	0.1	2.5	2.5	2	0.1	eve	0.056	VE89,4
유향나무	1014	0	0	0.6	2	0.1	eve	0.001	OW01
테레빈 나무	230	0	0	0.1	2	0.1	eve	0.014	OW01

수종	d (gm <sup>-2</sup> )	Stand. emission potential ( $\mu\text{g g}^{-1}\text{DW hr}^{-1}$ )					계절	A.F. (%)	참고
		ISOP	MT <sub>synt</sub>	MT <sub>pool</sub>	OVOC	SQT			
버즘나무	320	18.5	0	0.1	2	0.1	dec	0.068	CO99
은사시나무	320	60	0	0	2	0.1	dec	0.031	CO99,8
은회양 (회색 포플러)	320	70	0	0	3.5	0.1	dec	0.06	CO99,8
Populus hybrides	320	70	0	0	2	0.1	dec	0.179	CO99,8
서양 사시나무	320	70	0	0	2	0.1	dec	0.044	CO99,8
Populus tremula	320	60	0	0	2	0.1	dec	0.598	CO99,8
양벚나무	300	0	0	0.1	2	0.1	dec	0.151	CO99,9
귀룽나무	300	0	0	0.1	2	0.1	dec	0.001	CO99,9
세로티나 벚나무	300	0	0	0.1	2	0.1	dec	0.005	CO99,9
더글러스 소나무	1000	1	0	2	2	0.1	eve	0.42	CO99
서양배	300	0	0	0	2	0.1	dec	0.005	VE89,1
체리 참나무	320	0.1	0	0.6	2	0.1	dec	1.037	VE89,5
켈메스 참나무	520	0.1	25	0	2	0.1	eve	0.225	This work
발렌시아 참나무	320	111	0	0	2	0.1	dec	0.228	VE89,5
헝가리 참나무	320	85	0	0	2	0.1	dec	0.517	VE89,5
Quercus fructosa	320	0.1	20	0	2	0.1	eve	0.048	VE89,5
사철 가시나무	510	0.1	43	0	2	0.1	eve	2.177	M. Karl 외(2009)
Quercus macrolepis	320	0.2	0	0.7	2	0.1	dec	0.019	VE89,5
페트라 참나무	290	45	0	0.3	2	0.1	dec	2.309	M. Karl 외(2009)
Quercus pubescens	320	70	0	0.3	2	0.1	dec	1.488	VE89,5
Quercus pyrenaica	320	59	0	0.3	2	0.1	dec	0.618	VE89,5
유럽갈참나무	290	70	0	1	2	0.1	dec	2.93	M. Karl 외(2009)
Quercus rotundifolia	500	0.2	14.6	0	2	0.1	eve	0.201	VE89,3
루브라 참나무	320	35	0	0.1	2	0.1	dec	0.132	VE89,5
코르크 참나무	500	0.2	20	0	2	0.1	eve	0.835	VE89,3
Quercus trojana	320	0.2	0	0.2	2	0.1	eve	0.041	VE89,5
아까시나무	320	12	0	0.1	2	0.1	dec	0.464	CO99
백버들	150	37.2	0	1.1	2	0.1	dec	0.003	CO99,10
호랑버들	150	18.9	0	0.1	2	0.1	dec	0.037	CO99,10
Salix cinerea	150	28	0	0.8	2	0.1	dec	0.001	CO99,10
Salix eleagnos	150	28	0	0.8	2	0.1	dec	0.001	CO99,10
Salix sp.	150	28	0	0.8	2	0.1	dec	0.024	CO99,10

수종	d ( $\text{gm}^{-2}$ )	Stand. emission potential ( $\mu\text{g g}^{-1}\text{DW hr}^{-1}$ )					계절	A.F. (%)	참고
		ISOP	MT <sub>synt</sub>	MT <sub>pool</sub>	OVOC	SQT			
마가목류	300	0	0	0	2	0.1	dec	0.036	VE89,1
마가목	300	0	0	0	2	0.1	dec	0.046	VE89,1
Sorbus domestica	300	0	0	0	2	0.1	dec	0.01	VE89,1
Sorbus torminalis	300	0	0	0	2	0.1	dec	0.016	VE89,1
Thuya sp.	1500	0	0	0.6	2	0.1	eve	0.003	GE94
Tilia cordata	320	0	0	0	2	0.1	dec	0.211	CO99,11
Tilia platyphyllos	320	0	0	0	2	0.1	dec	0.044	CO99,11
Tsuga sp.	700	0.1	0	0.2	2	0.1	eve	0.02	GE94
Ulmus glabra 느릅나무과	320	0.1	0	0.1	2	0.1	dec	0.03	CO99,12
Ulmus laevis 느릅나무과	320	0.1	0	0.1	2	0.1	dec	0.006	CO99,12
Ulmus minor 느릅나무과	320	0.1	0	0.1	2	0.1	dec	0.012	CO99,12

d: 나뭇잎 바이오매스 밀도값

MT<sub>synt</sub>: 온도와 빛에 의해 방출되는 모노테르펜

MT<sub>pool</sub>: 온도에 의해 방출되는 모노테르펜

SQT: sesquiterpene 세스퀴테르펜

OVOC: oxygenated VOC

A.f.: 총 산림면적에 대한 각 수종의 비율

참고: AAK95 Andreani-Aksoyoglu and Keller (1995); VE89 Veldt (1989), value for: 1 default deciduous broadleaved, 2 Larix default, 3 default evergreen broadleaved, 4 other Pinus spp., 5 deciduous oaks; CO99 EMEP/CORINAIR (1999), value for 1 Acer sp., 2 Alnus sp., 3 Carpinus, 4 Cedrus, 5 Fagus sp., 6 Fraxinus, 7 Juniperus, 8 Populus, 9 Prunus, 10 Salix, 11 Tilia, 12 Ulmus; OW01 Owen et al. (2001); GE94 Geron et al. (1994).

자료: M. Karl 외(2009), A new European plant-specific emission inventory of biogenic volatile organic compounds for use in atmospheric transport models, Biogeosciences, 6, 1059-1087

## 1) 소나무

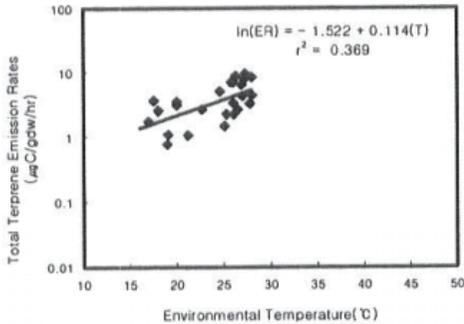
계절별 소나무로부터 배출되는 자연 VOC 배출특성 연구(김조천 외, 2003)에 따르면 봄철이 다른 계절에 비해 VOC 배출량이 높은 것으로 나타났다.

이는 봄철이 다른 계절에 비해 소나무의 성장속도가 상대적으로 매우 빠르기 때문인 것으로 사료된다고 판단하였으며 각 계절의 배출량은 봄>여름>가을 순서로 배출량이 줄어드는 것으로 확인하였다.

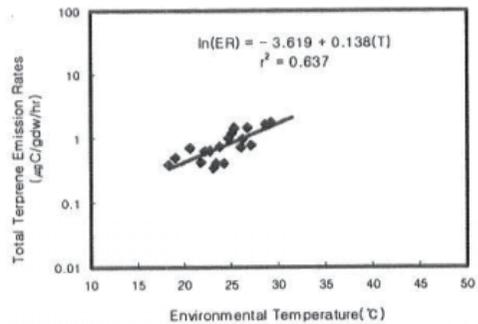
국내의 두 지역(금성산 그리고 월악산) 지역에서 세가지 식물수종(소나무, 리기다 그리고 낙엽송)의 테르펜의 배출속도를 측정한 결과 수종별로는 소나무의 테르펜 배출속도가 리기다보다 약 2배정도 높게 나타났으며, 낙엽송에 비해서는 약 2~3배 배출속도가 높게 나타났다고(임준호, 2004).

소나무에서는  $\alpha$ -pinene, myrcene,  $\beta$ -phellandrene, 리기다는 myrcene,  $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -phellandrene의 순서로 테르펜이 배출되었으며, 이 세 가지 성분이 전체 테르펜의 약 80% 정도를 차지하였다. 한편, 낙엽송은  $\alpha$ -pinene,  $\alpha$ -terpinene, myrcene이 주요한 배출물질이었다. 계절에 따른 배출특성은 소나무의 경우 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철 순으로 배출속도의 차이를 보였다. 또한 리기다의 경우도 소나무와 비슷하였으나, 가을철이 봄철보다는 약간 높게 나타났으며, 낙엽송의 경우 다른 두 수종에 비해서 계절에 따른 변화가 명확히 나타나지 않았다. 소나무의 경우 수령별 배출특성은 수령이 높은 4령(30년~41년)이 3령(20년~30년)에 비해서 배출속도가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.

〈그림 2-24〉 봄철 금성산 소나무(3령)의 온도변화에 따른 테르펜 배출량 추이

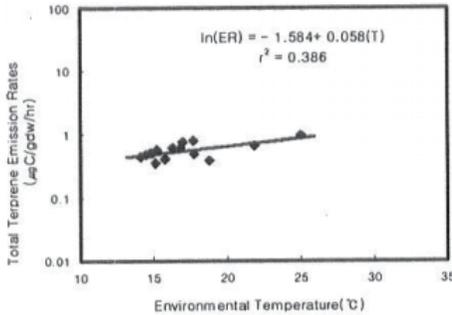


〈그림 2-25〉 여름철 금성산 소나무(3령)의 온도변화에 따른 테르펜 배출량 추이

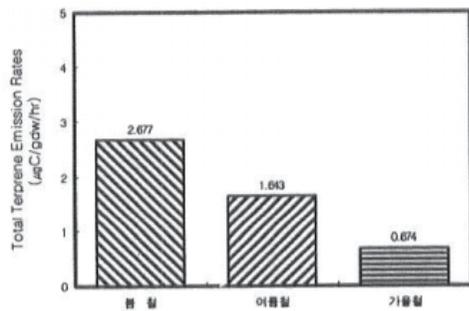


자료: 김조천 외(2003). 침엽수로부터 발생하는 방향성 테르펜의 배출속도 비교

〈그림 2-26〉 가을철 금성산 소나무(3령)의 온도변화에 따른 테르펜 배출량 추이



〈그림 2-27〉 계절에 따른 금성산 소나무의 배출량 추이



자료: 김조천 외(2003). 침엽수로부터 발생하는 방향성 테르펜의 배출속도 비교

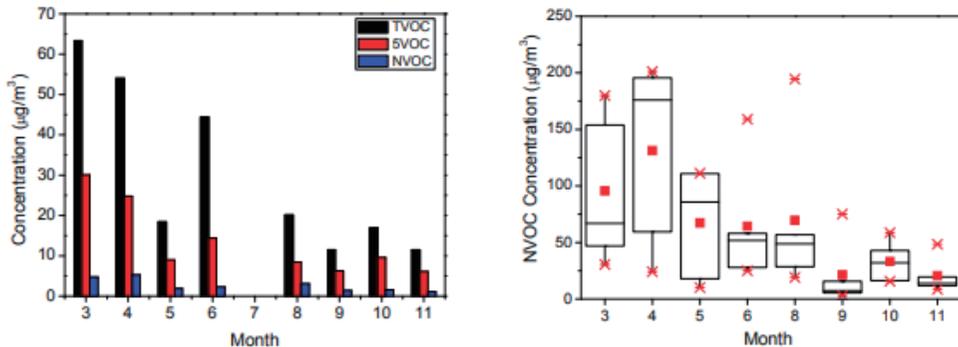
## 2) 잣나무

잣나무 앞에서 방사되는 자연적휘발성유기화합물(NVOC; Natural Volatile Organic Carbon)의 월별 농도변화는 상대적으로 3월과 4월에 각각  $95.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $131.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 값을 나타냈다. 5월, 6월, 8월에는  $67.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $64.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $69.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 비슷한 값을 나타냈으며 9월, 10월, 11월 에는  $21.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $33.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $20.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도는 나타내어 상대적으로 낮은 값을 나타냈다.

이와 같은 결과는 NVOC의 농도 변화는 잣나무가 고정성장형 수종과 관련이 깊다. 잣나무는 당년에 자랄 모든 줄기의 원기(primordia)<sup>6)</sup>가 전년도에 형성된 겨울눈(winter bud)<sup>7)</sup> 속에 미리 형성되어 있다가 봄에 겨울눈이 개엽(잎이 퍼지는 것)하는 고정성장 수종이다. 따라서 고정생장을 하는 수종은 전년도에 미리 형성된 기 형성줄기를 당년 봄에 신장시키기만 하기 때문에 일찍 줄기 성장을 끝마치게 되고 성장량이 적다. 또한 이러한 수종은 봄에 빠른 속도로 줄기가 자라 엽면적이 최대치에 달하기 때문에 광합성량도 초여름에 최대치에 도달하게 된다. 따라서 봄철에 상대적으로 높은 NVOC 방산량을 나타냈다. 또한 관악수목원의 잣나무는 수고가 약 8~10m 정도 되는 어린 수종이어서 봄철 성장 속도가 더 빠르게 진행되는 것으로 판단된다.

앞에서 방사되는 NVOC 농도 변화를 측정하면서 챔버 내에 온도, 습도, 조도, 산소,  $\text{CO}_2$  농도 변화를 함께 측정하여 그 상관관계를 분석한 결과 조도와 NVOC의 상관관계가 다른 인자들과 비교하여 상대적으로 높은 상관성을 나타냈다.

〈그림 2-28〉 관악 수목원 잣나무 숲의 월별 VOC 농도 변화(좌)와 잣나무 앞에서 방사되는 월별 NVOC 농도 변화(우)



자료: 이영규 외(2014). 잣나무 앞의 천연VOC 방산 특성

6) 생물의 각 기관을 형성하게 될 최초단계의 세포조직

7) 수목이나 다년생 초본이 여름부터 가을에 걸쳐 겨울을 지내기 위해 만드는 눈으로, 봄에 새싹이 나올 수 있도록 겨울내 내 보호된다.

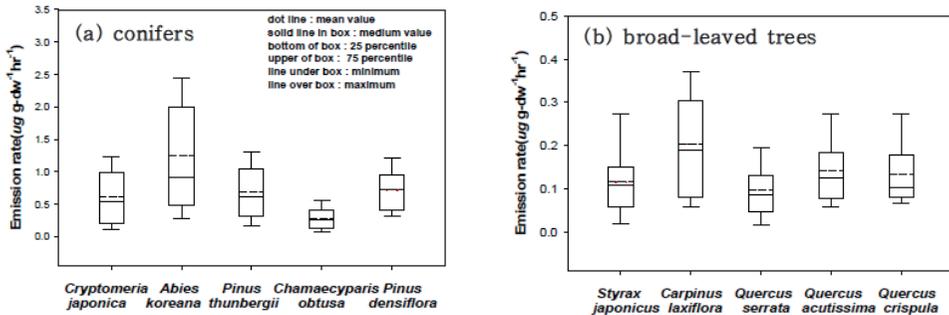
### 3) 제주도 수종별 BVOC배출 특성

김형철(2013) 연구에서는 CMAQ 광화학모델을 이용하여 제주도의 수종별 BVOCs 배출 속도와 배출계수를 산정하였다.

모노테르펜과 이소프렌배출속도는 여름철이 가장 높으며, 다음으로 봄, 가을, 겨울 순이었다. 그리고 이들의 일중 변동을 보면 잎 온도가 높고 광합성이 활발한 시간대인 13시~14시에 가장 높은 배출속도를 나타냈고, 특히 이소프렌은 빛이 없는 야간에는 배출되지 않았다.

침엽수(삼나무, 구상나무, 곰솔, 편백나무, 소나무) 및 활엽수(때죽나무, 서어나무, 졸참나무, 상수리나무, 물참나무) 수종별로 측정된 모노테르펜 배출속도는 다음 그림과 같다. 전체 수종 중에서 평균배출속도를 보면 구상나무가 1.24 $\mu\text{g g/dw/hr}$ 로서 가장 높게 나타났고, 다음으로 소나무(0.72 $\mu\text{g g/dw/hr}$ ), 곰솔(0.69 $\mu\text{g g/dw/hr}$ ), 삼나무(0.61 $\mu\text{g g/dw/hr}$ ), 편백나무(0.29 $\mu\text{g g/dw/hr}$ )순으로 높게 나타났다. 활엽수는 0.1~0.2 $\mu\text{g g/dw/hr}$ 로서 침엽수에 비해 1/3~1/10수준의 낮은 배출속도를 보였으며 침엽수에 비해 수종별 변동폭도 적게 나타났다. 구상나무가 타 수종에 비해 모노테르펜 배출속도가 크게 높은 것은 구상나무가 타 침엽수나 활엽수들보다 풍부한 정유 성분을 함유하고 있기 때문으로 판단되며, 침엽수에 비해 활엽수의 모노테르펜 배출속도가 크게 낮은 것은 활엽수 잎 내부에 함유된 BVOCs의 양이 침엽수의 잎에 비해 상대적으로 아주 적기 때문으로 생각된다(김조천 외, 2004).

〈그림 2-29〉 침엽수(a)와 활엽수(b)의 모노테르펜 배출율

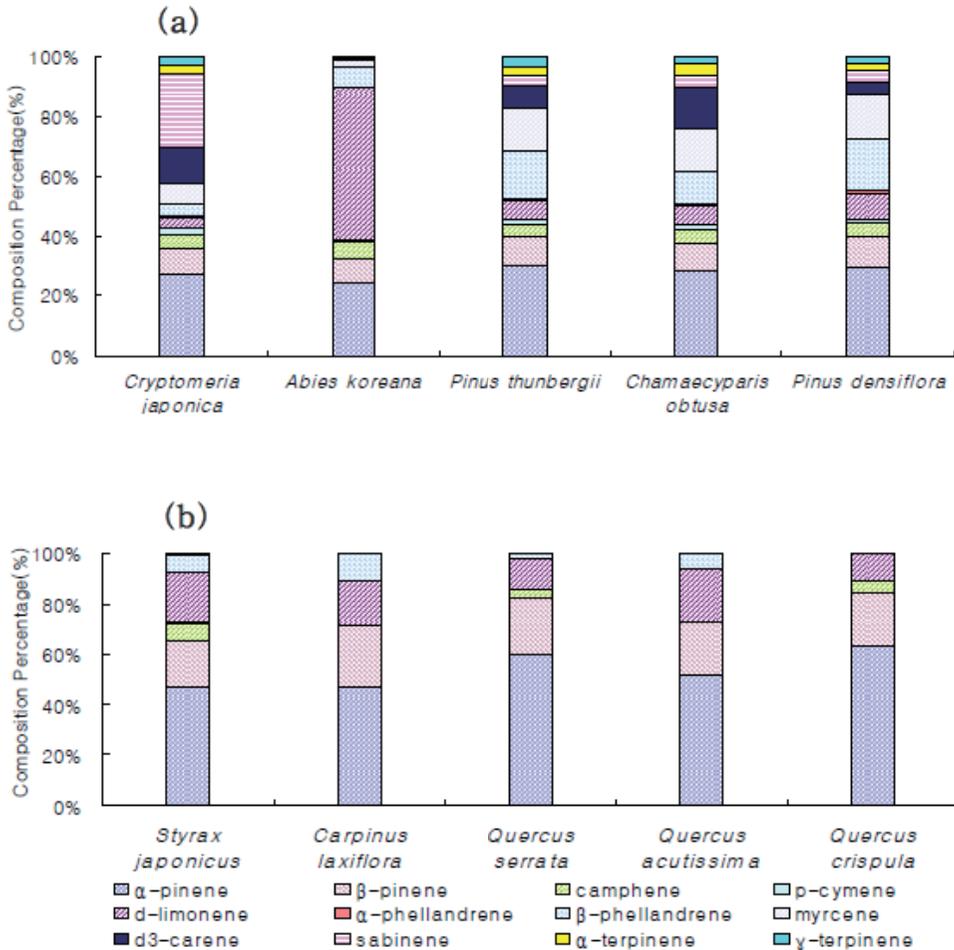


자료: 김형철. 2013, 제주지역의 식물기원 VOCs배출 특성과 오존 생성에 미치는 영향 연구

다음 그림에는 침엽수와 활엽수에 있어서 모노테르펜 배출속도에 있어서 성분별 점유율을 수종별로 나타냈다. 전체적으로 보면 침엽수와 활엽수에 있어서  $\alpha$ -pinene성분은 모든 수종에서 중요한 성분인 것을 확인할 수 있었다. 삼나무에서는  $\alpha$ -pinene과 sabinene성분이 중요한 것으로 나타났으며, 동일 속에 속하는 곰솔과 소나무는  $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene,

myrcene,  $\beta$ -phellandrene들이 중요하면서도 서로 비슷한 점유율을 나타냈다. 편백나무는 d3-carene의 중요도가 다른 수종보다 높았으며, 구상나무에서는 limonene 성분이 50%의 점유비율을 보여 특히 중요한 성분인 것으로 나타났다.

〈그림 2-30〉 동일기간동안 침엽수(a)와 활엽수(b)의 모노테르펜 배출비교

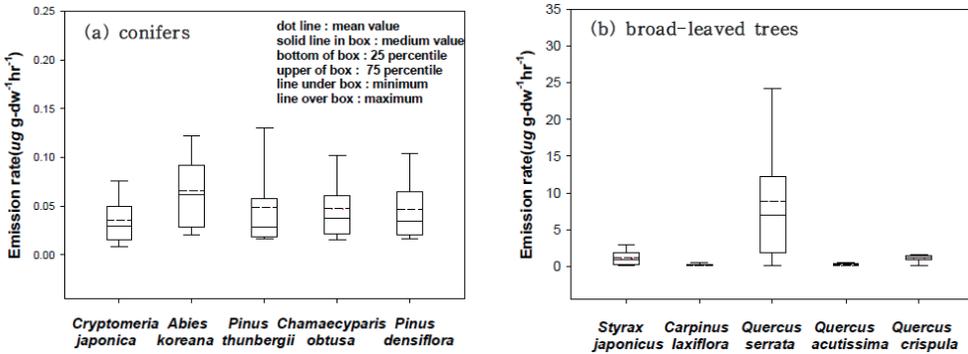


자료: 김형철. 2013, 제주지역의 식물기원 VOCs배출 특성과 오존 생성에 미치는 영향 연구

침엽수(삼나무, 구상나무, 곰솔, 편백나무, 소나무)와 활엽수(때죽나무, 서어나무, 졸참나무, 상수리나무, 물참나무)에서의 이소프렌 배출속도는 다음그림과 같다. 조사된 5종의 활엽수 중에서 졸참나무에서의 이소프렌 배출속도가 타 수종들보다 월등히 높을 뿐 아니라 그 변동 범위도 큰 것을 볼 수 있었다. 그리고 동일 속인 물참나무와 상수리나무와도 배출속도에서 큰 차이를 보였다. 반면에 침엽수의 이소프렌 배출속도는 수종별로 대부분  $0.1\mu\text{g} \cdot$

g/dw/hr 이하로서 활엽수에 비해 1/10~1/100수준으로 아주 적은 것을 알 수 있었다. 이와 같이 활엽수와 침엽수의 이소프렌 배출속도가 큰 차이를 보이는 것은 활엽수와 침엽수의 광합성 능력의 차이로 볼 수 있는데, 광합성이 활발한 활엽수에서 침엽수보다 이소프렌 배출속도가 큰 것으로 추정된다.

〈그림 2-31〉 침엽수(a)와 활엽수(b)의 이소프렌 배출율



자료: 김형철, 2013, 제주지역의 식물기원 VOCs배출 특성과 오존 생성에 미치는 영향 연구

다음 표를 보면 국내외에서 보고된 활엽수 수종에 대한 이소프렌 배출속도를 탄소(C)기준으로 표준온도로 환산하여 제시하였다. 결국, 동일한 속 및 동일한 종이라고 해도 토양이나 기후 등 수목의 서식환경에 따라 이소프렌 배출속도가 달라질 수 있음을 말해주고 있다(임용재, 2005).

〈표 2-13〉 활엽수의 이소프렌 배출율 비교

Scientific name	Isoprene emission rate (ERs, $\mu\text{gC gdw}^{-1}/\text{hr}$ )	Reference
Carpinus laxiflora(서어나무)	0.81	김형철(2013)
Styrax japonicus(때죽나무)	4.68	
Quercus serrata(참나무)	54.57	
Quercus acutissima(상수리 나무)	1.16	
Quercus crispula(물참나무)	12.00	
Carpinus hornbeam(소사나무)	< 0.1	Guenther,A외(1994)
Quercus serrata(참나무)	91.4~101.4	지동영 외(2002)
Quercus acutissima(상수리나무)	0.059~0.062	
Quercus agrifolio	24.0~38.7	최병훈(2004)
Quercus pubescen	37.0~51.5	

김형철(2013) 연구에서 제주도의 침엽수의 BVOCs배출량을 산정하기 위해 사용된 침엽수의 성분별 배출계수는 다음 표와 같다. 보면 모노테르펜 성분이 이소프렌 성분보다 월등히 높은 배출계수를 보였으며, 이는 선행연구 결과와도 비슷한 경향을 나타내었다. 침엽수의 주요성분인 모노테르펜에서는 구상나무가 단위면적·단위시간당 가장 큰 2.9888kg/km<sup>2</sup>/hr를 보였으며 다음으로 리기다소나무, 잣나무, 삼나무, 비자나무, 소나무, 곰솔, 편백 순으로 나타났다.

이소프렌은 비자나무, 구상나무, 삼나무, 편백나무, 소나무, 곰솔, 리기다, 잣나무 순으로 나타나 모노테르펜과는 수종별 배출계수 패턴이 다르게 나타났다.

〈표 2-14〉 침엽수의 성분별 배출계수

종	Emission factor(kg/km <sup>2</sup> /hr)		
	Isoprene	Monoterpene	OVOCs
곰솔 <sup>1)</sup>	0.1820	1.1340	1.2950
삼나무 <sup>1)</sup>	0.3863	2.0775	1.2950
소나무 <sup>1)</sup>	0.1890	1.2425	1.2950
구상나무 <sup>1)</sup>	0.5100	2.9888	2.7750
리기다 소나무 <sup>2)</sup>	0.0793	2.3800	1.2950
편백 <sup>1)</sup>	0.2065	0.3623	2.7750
비자나무 <sup>2)</sup>	0.7454	1.3666	0.9939
잣나무 <sup>2)</sup>	0.0793	2.3800	1.2950
Other conifer trees <sup>2)</sup>	0.7454	1.3666	0.9939

1)김형철(2013) 연구에서 계산된 factor

2)Emission factors in CAPSS

활엽수의 수종별 배출계수를 비교해 보면, 가시나무속인 가시나무(29.75 kg/km<sup>2</sup>/hr)와 붉가시나무(29.75kg/km<sup>2</sup>/hr)가 높고, 참나무속에서도 신갈나무(29.75kg/km<sup>2</sup>/hr)와 굴참나무(29.75kg/km<sup>2</sup>/hr), 졸참나무(24.0437kg/km<sup>2</sup>/hr)가 다른 활엽수들에 비해 월등히 높은 배출계수를 보였으며 이들 수종의 영향이 큰 것으로 나타났다.

〈표 2-15〉 활엽수의 성분별 배출계수

종	Emission factor(kg/km <sup>2</sup> /hr)		
	Isoprene	Monoterpene	OVOCs
서어나무 <sup>1)</sup>	0.3133	0.1211	0.6937
졸참나무 <sup>1)</sup>	24.0437	0.071	0.6937
물참나무 <sup>1)</sup>	5.1558	0.1053	0.6937
때죽나무 <sup>1)</sup>	2.0695	0.0737	0.8718
상수리나무 <sup>1)</sup>	0.5463	0.0859	0.6937
가시나무 <sup>2)</sup>	29.75	0.085	0.6937
구실잣밤나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
산벚나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
단풍나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.68	0.6937
팽나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.085	0.6937
말채나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.68	0.6937
자귀나무 <sup>2)</sup>	5.4594	0.2783	0.7425
고로쇠나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.68	0.6937
느릅나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
비목나무 <sup>2)</sup>	5.4594	0.2783	0.7425
굴거리나무 <sup>2)</sup>	2.1124	0.3688	0.8718
합다리나무 <sup>2)</sup>	5.4594	0.2783	0.7425
까치박달나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.085	0.6937
솔비나무 <sup>2)</sup>	5.4594	0.2783	0.7425
굴피나무 <sup>2)</sup>	0.0793	0.476	1.295
동백나무 <sup>2)</sup>	9.999	1.3666	0.9939
박달나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.085	0.6937
예덕나무 <sup>2)</sup>	2.1124	0.3688	0.8718
총총나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.68	0.6937
꾸지나무 <sup>2)</sup>	5.4594	0.2783	0.7425
산딸나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.68	0.6937
담팔수 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
감탕나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.085	0.6937
생달나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
쪽동백나무 <sup>2)</sup>	2.1124	0.3688	0.8718
밤나무 <sup>2)</sup>	2.1124	0.3688	0.8718
새덕이나무 <sup>2)</sup>	5.4594	0.2783	0.7425
들메나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
개서어나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.68	0.6937
아왜나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
이나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
붉가시나무 <sup>2)</sup>	29.75	0.085	0.6937

종	Emission factor(kg/km <sup>2</sup> /hr)		
	Isoprene	Monoterpene	OVOCs
참식나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
다릅나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
느티나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
사람주나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
팔배나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
황벽나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
피나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
목련 <sup>2)</sup>	0.0425	1.275	0.6937
나도밤나무 <sup>2)</sup>	2.1124	0.3688	0.8718
주엽나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
머귀나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
산뽕나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.085	0.6937
물푸레나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
센달나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
붓순나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
음나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
후박나무 <sup>2)</sup>	2.1124	0.3688	0.8718
황칠나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
마가목 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
녹나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
까마귀베개 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
푸조나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
복자기나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
대뺨집나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.085	0.6937
육박나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
신갈나무 <sup>2)</sup>	29.75	0.085	0.6937
오리나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
풍계나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.085	0.6937
노각나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
굴참나무 <sup>2)</sup>	29.75	0.085	0.6937
말구슬나무 <sup>2)</sup>	0.0425	0.0425	0.6937
아까시나무 <sup>2)</sup>	5.95	0.085	0.6937

1)김형철(2013) 연구에서 계산된 factor

2)Emission factors in CAPSS

## 제4절 시사점

수종에 따른 대기오염물질 저항성과 저감 연구 사례 조사결과 대기오염에 대한 수목의 저항성은 상록활엽수가 비교적 강하고 낙엽활엽수는 다소 약하며, 침엽수는 대체로 약한 것으로 나타났다.

미세먼지 저감효과는 침엽수가 활엽수보다 미세먼지 흡수에 효과적이고 관목보다는 교목이 우세하였다. 바늘모양의 잎이 미세먼지를 흡착할 수 있는 표면적이 넓기 때문에 미세먼지 저감을 높이나 넓은 잎이어도 잎에 흠이 많거나 털이 많을수록 미세먼지 흡착에 효과적이므로 개화패턴이 다양하도록 수목을 골고루 조성하는 것이 미세먼지 제거에 더 효과적(다양성 유지 중요)임을 알 수 있었다.

수종에 따른 휘발성유기화합물 배출특성을 살펴보면 BVOC 중 이소프렌은 주로 활엽수에서 배출되고 온도가 높고 빛이 강하면 배출속도가 빨라진다. 모노테르펜은 주로 침엽수에서 배출되고 늦은 오후부터 배출된다.

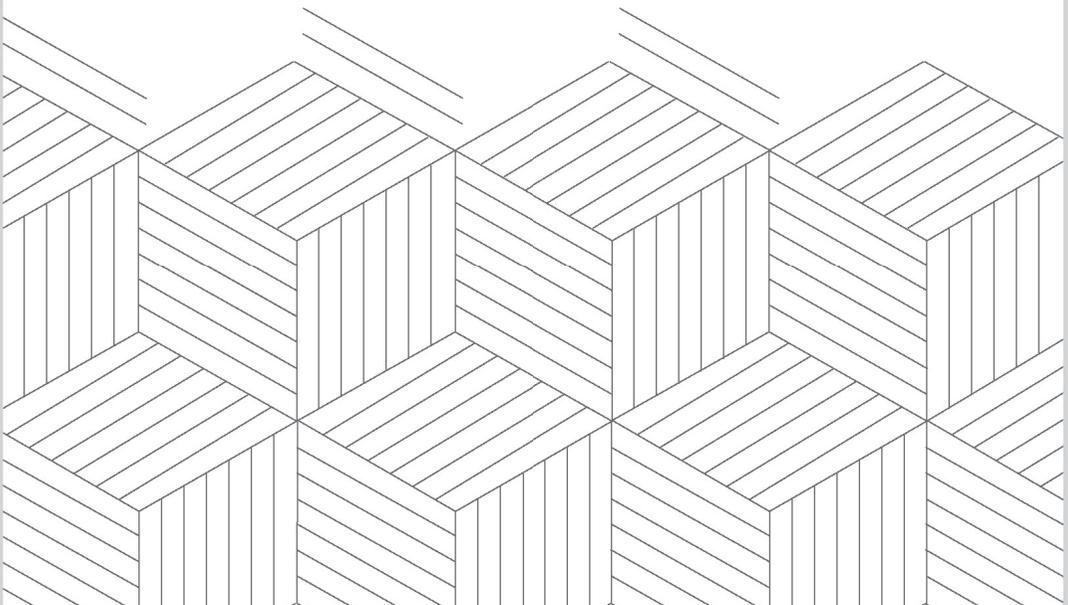
이소프렌은 오존 증가와 양의 상관성을 보이며, 테르펜은 오존과 반응하여 오존농도를 감소하는 결과를 보였다. 따라서 수목은 오존을 생성하기도 하고 소멸하기도 하므로 정책 수립 시 다각도로 고려해야할 것이다.

# 제3장 도시 수목의 대기오염도 영향과 적합성 평가

제1절 도심 내 식재된 수목의 대기오염도 영향

제2절 도시 수목의 적합성 평가 사례

제3절 시사점





## 제3장 도시 수목의 대기오염도 영향과 적합성 평가

### 제1절 도심 내 식재된 수목의 대기오염도 영향

#### 1. 가로수의 물리적인 대기환경영향

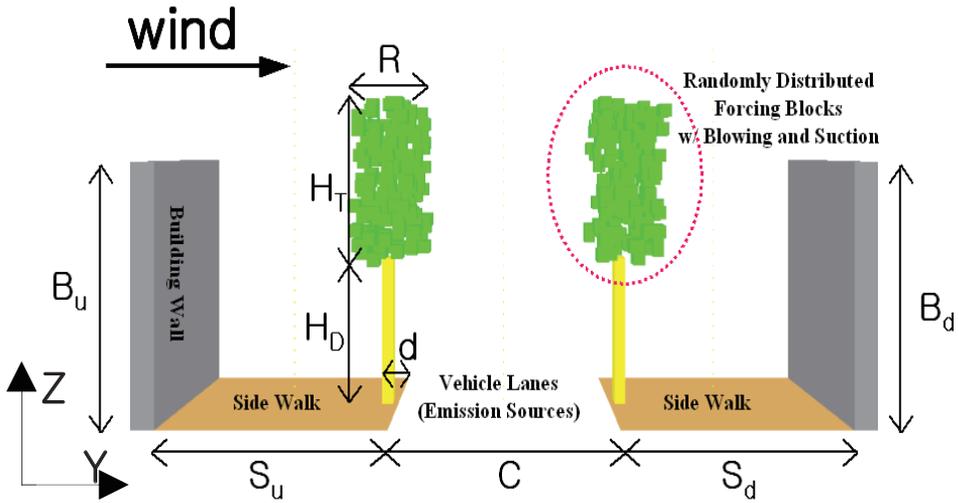
대기오염이 심화된 도심지역에서의 수목은 특히 대기질 개선 측면에서 최근 주목을 받고 있으나, 수목이 실제로 대기질에 얼마만큼의 영향을 미치는지에 대한 연구는 아직 명확하게 정립되지 않은 상황이라 할 수 있다.

주현수 외(2005)의 연구에서는 수목 자체의 기공을 통한 오염물질 흡수 능력과 더불어 바람과 같은 미기상 현상과 오염 확산 과정이 종합적으로 고려된 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모델링 방법을 통하여 도시 협곡에서 가로수가 대기질에 미치는 영향을 분석하였다.

도시 협곡이란 차도를 따라 빌딩이 줄지어 배치된 지역으로, 통행차량에서 배출된 각종 오염물질이 협곡 내부에 축적되어 국지적 대기환경이 심각하게 악화될 수 있는 지형조건이며, 이러한 고농도의 대기오염물질은 협곡내의 보도나 인접 사무실에서 활동하는 사람들의 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있으므로 도시 협곡 내의 대기질 환경문제는 매우 중요하다(주현수 외, 2005).

모델링 조건은 대기오염물질은 차도에서만 발생되며 일정한 속도 0.2m/s로 연속적으로 배출되며 풍향은 도로에 직각으로 1m/s의 풍속으로 분다고 가정하였다. 가로수 높이는 2가지(건물보다 높을 때와 낮을 때)로 제한하였고 건물높이는 저층에서 고층까지 고려하였다.

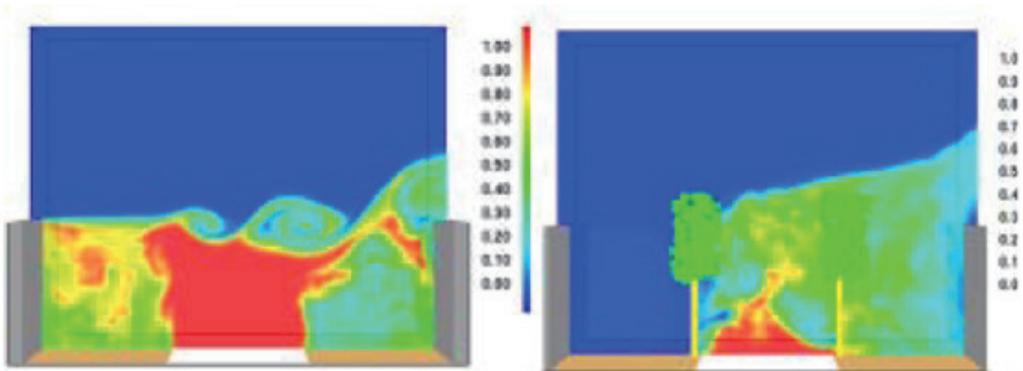
〈그림 3-1〉 가로수가 식재된 도시협곡 모델



자료: 주현수 외(2005), 녹지의 대기환경영향에 관한 연구(도심녹지의 국지적 대기영향을 중심으로), 한국환경정책평가연구원

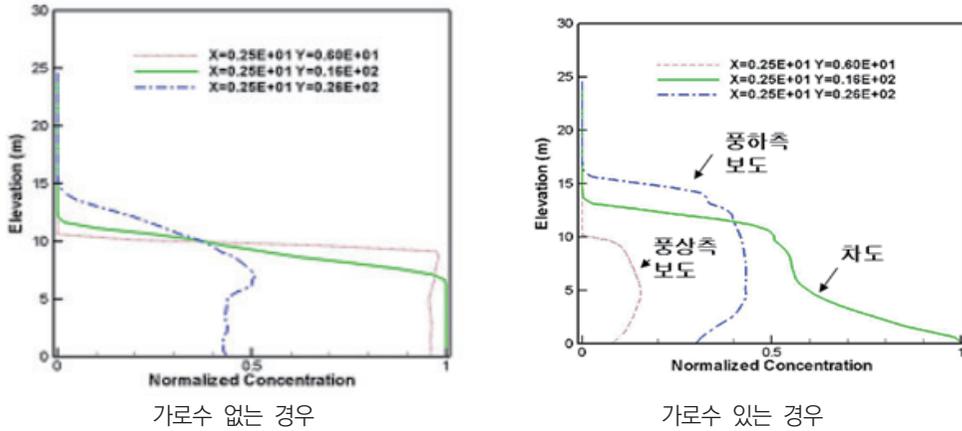
가로수가 없는 경우와 있는 경우를 비교하였으며, 가로수로 인해 순간 오염농도가 현저히 낮아지는 것을 확인하였다. 풍상 측 가로수는 도로 협곡 상부를 통과하는 기류를 협곡 내부로 끌어들이는 작용을 하며 협곡내로 유입되는 외부공기량이 많을수록 협곡내의 오염농도는 낮아지게 된다. 따라서 가로수가 있는 경우 협곡 내 오염농도 감소 속도가 현저히 빠르다. 어떤 초기조건에서 모델링을 시작하든지 협곡의 깊이를 약간 초과하는 가로수(예: 건물높이 10m, 가로수 12m)가 식재된 경우(또는 양쪽 건물 높이 비대칭) 도시 협곡 내 대기오염도를 낮추는 결과가 도출되었다.

〈그림 3-2〉 도시 협곡 내의 순간 농도 분포



자료: 주현수 외(2005), 녹지의 대기환경영향에 관한 연구(도심녹지의 국지적 대기영향을 중심으로), 한국환경정책평가연구원

〈그림 3-3〉 평균 오염농도 변화

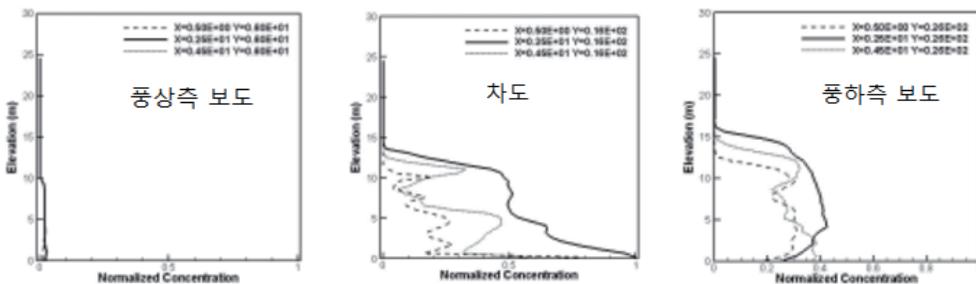


자료: 주현수 외(2005), 녹지의 대기환경영향에 관한 연구(도심녹지의 국지적 대기영향을 중심으로), 한국환경정책평가연구원

모델링 결과에 의하면 가로수 수관부의 높이, 형상 및 개구율<sup>8)</sup>(porosity)이 도시 협곡 내의 대기오염저감을 위한 중요한 인자로 파악되었으며, 반면에 일반적으로 대기질 개선 측면에서 매우 중요한 인자로 알려져 있는 수목의 오염물질 흡수속도는 실제 도심 환경의 조건하에서 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(주현수 외, 2005).

도시 협곡의 대기질에 가장 많은 영향을 미치는 가로수 인자는 수관부의 높이로써, 초기에 자동차 배가스로 가득 찬 높이 10m의 도시협곡에 건물보다 가로수가 높은 경우와 낮은 경우를 비교한 모델링 결과에 따르면 건물고도를 초과하는 가로수가 식재된 경우 협곡 내 오염농도가 현저히 낮아지는 효과를 보였다.

〈그림 3-4〉 건물보다 가로수가 높을 때

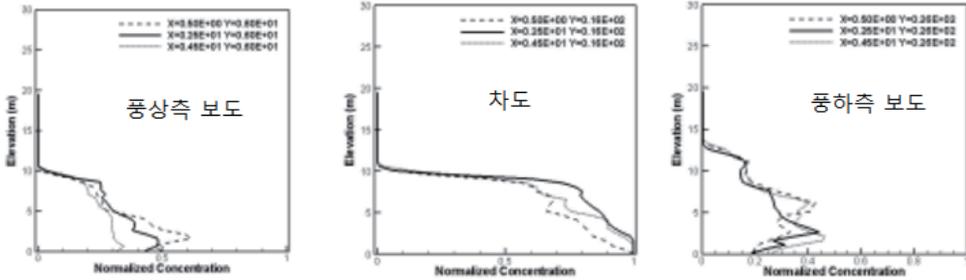


X축: 높이 / Y축: 농도

자료: 주현수 외(2005), 녹지의 대기환경영향에 관한 연구(도심녹지의 국지적 대기영향을 중심으로), 한국환경정책평가연구원

8) 잎이 어느 정도로 밀집하게 구성되어있는가를 나타내는 지표, 개구율이 낮을수록 밀집도가 높음. 일반적으로 여름철의 수목이 겨울철보다, 활엽수가 침엽수보다 개구율이 낮다.

〈그림 3-5〉 건물보다 가로수가 낮을 때

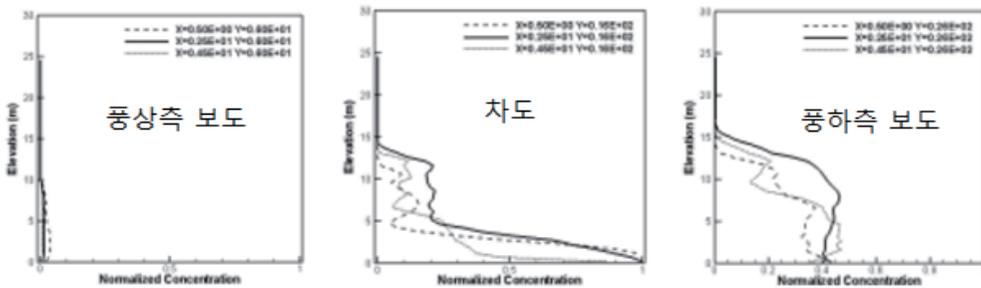


자료: 주현수 외(2005), 녹지의 대기환경영향에 관한 연구(도심녹지의 국지적 대기영향을 중심으로), 한국환경정책평가연구원

가로수가 없는 상황에서도 협곡의 양쪽 건물 높이가 비대칭이면 기류흐름의 변화로 인한 대기개선효과가 나타나며, 이 때 풍상측 건물보다 키가 큰 가로수를 식재하면 그 효과는 증대된다(주현수 외, 2005).

도시협곡 대기질에 영향을 미치는 인자로 수관부의 개구율이 있다. 개구율이란 잎이 어느 정도로 밀집하게 구성되어있는가를 나타내는 지표이다. 개구율이 낮을수록 밀집도가 높다. 일반적으로 여름철의 수목이 겨울철보다 활엽수가 침엽수보다 개구율이 낮다. 가로수의 개구율이 높고 낮음에 따라 비교한 결과 가로수 앞의 밀집도가 높을수록 대기오염 저감 효과가 높은 것으로 나타났다.

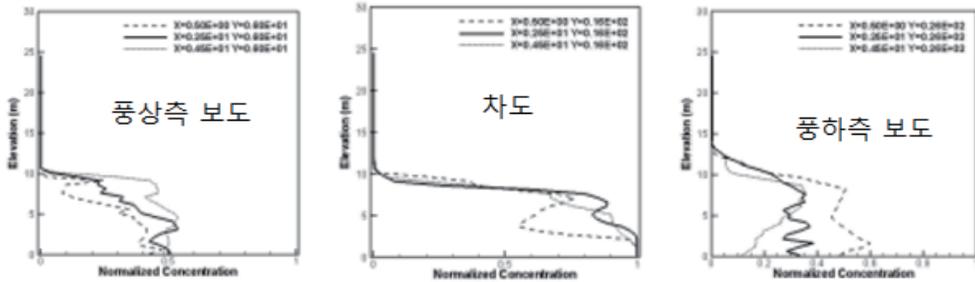
〈그림 3-6〉 가로수 개구율 10%(밀집도 높음)일때 농도변화



X축: 높이 / Y축: 농도

자료: 주현수 외(2005), 녹지의 대기환경영향에 관한 연구(도심녹지의 국지적 대기영향을 중심으로), 한국환경정책평가연구원

〈그림 3-7〉 가로수 개구율 90%(밀집도 낮음)일때 농도변화

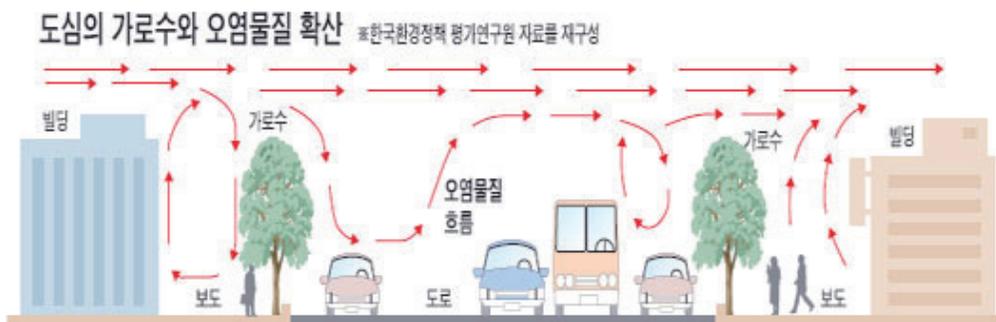


자료: 주현수 외(2005), 녹지의 대기환경영향에 관한 연구(도심녹지의 국지적 대기영향을 중심으로), 한국환경정책평가연구원

이러한 가로수의 도시협곡 내 대기오염저감 메커니즘은 나뭇잎 등에 의한 직접적인 오염물질 흡수작용이 주가 아니라 가로수 수관부에 의한 기류흐름 변화로 인해 협곡 내·외부간의 공기교환이 촉진되는 작용에 기인한다.

국내·외의 많은 가로수 관리지침 등에서는 도심의 대기질 개선과 관련하여 대기오염물질의 흡수속도가 높은 가로수를 식재할 것을 권유하고 있다. 그러나 주현수 외(2005)의 연구결과에 따르면 오염이 심화된 도시협곡내의 대기질 개선을 위해서는 오염물질 흡수 능력이 큰 가로수를 식재하기 보다는 가로수 수관부의 높이, 형상 등을 적정하게 관리하여 협곡 내외부의 기류교환을 촉진시키는 것이 더욱 효율적인 것으로 나타났다.

〈그림 3-8〉 도시의 가로수와 오염물질 확산



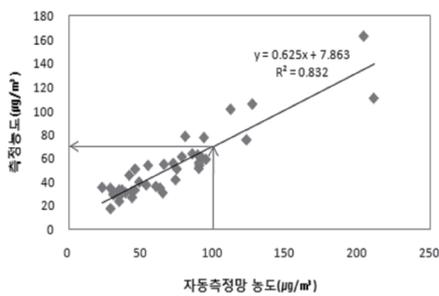
자료: <http://news.join.com/article/2163533>

## 2. 도시숲(산림)이 대기오염에 미치는 영향<sup>9)</sup>

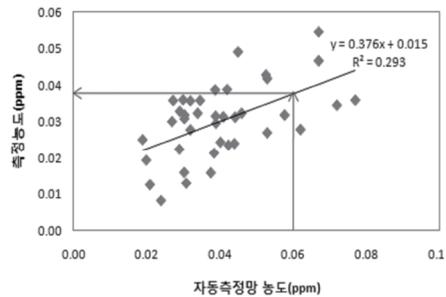
서울시 도시숲(관악산, 수락산, 천왕산, 인왕산, 초안산)에서 가을, 겨울, 봄, 여름에 측정된 결과를 대기오염자동측정망의 농도와비교하여 산림이 대기오염물질 저감에 미치는 영향을 분석하였다.

미세먼지 측정당시 기후에 상관없이 황사가 발생한 날, 강우가 있었던 날도 자동측정망에 비하여 산림에서의 측정값이 낮게 나타나 약 35% 저감 효과를 나타냈다. 이산화질소 측정결과 자동측정망의 농도보다 산림에서 농도가 약 62.4% 낮게 나타났다. 오존 측정결과 산림에 의한 저감 효과는 없는 것으로 나타났으며, 오히려 오존농도가 증가하는 경우가 많았다. 오존의 생성과 소멸은 주변 여건에 따라 수시로 변화하기 때문으로 판단되었다. 또한 수목에서 발생하는 유기화학물질들이 오존생성 전구물질로 사용되었기 때문으로 추정된다.

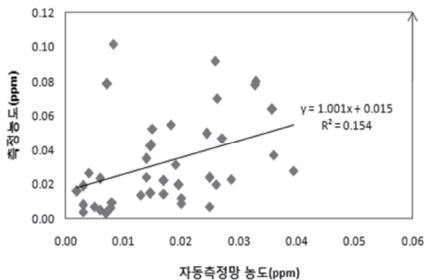
〈그림 3-9〉 미세먼지 측정결과 분산분포도



〈그림 3-10〉 이산화질소 측정결과 분산분포도



〈그림 3-11〉 오존 측정결과 분산분포도



자료: 김신도 외(2008), 서울시내 도시숲(산림)이 대기오염에 미치는 영향, 한국대기환경학회2008 추계학술대회 논문집

9) 김신도 외(2008), 서울시내 도시숲(산림)이 대기오염에 미치는 영향, 한국대기환경학회2008 추계학술대회 논문집

## 제2절 도시 수목의 적합성 평가 사례

### 1. 미세먼지 저감을 위한 도시 수목의 적합성 평가

PM2.5저감을 위해 더 많은 나무를 심는 것이 문제를 완화시키는 방법으로 제안됨에 따라 Jun Yang(2014)의 연구에서는 PM2.5 제거 효율, 대기 오염에 대한 부정적인 영향 및 일반적으로 발생하는 도시 수목의 도시 환경에 대한 적합성을 평가하기 위한 순위 접근법을 개발했다.

도시 나무는 PM 2.5 오염을 직·간접적으로 줄인다. 직접적인 감소에서 나무의 가지와 잎으로 PM 2.5를 차단한다. 간접적으로 나무는 음영 및 증발산을 통해 기온을 낮춘다. 냉각 효과는 에너지 사용 팬과 에어컨의 필요성을 줄여 발전소의 배출 가스를 더욱 낮춘다. 또한 도시 대기의 광화학 반응 속도는 대기 온도가 낮아짐에 따라 느려져 2차 대기오염물질의 생성을 감소시킨다.

나무에 의한 PM2.5의 직접적인 제거는 나무의 생물·물리학적 특성뿐만 아니라 환경 요인에 의해 영향을 받는다. 기후 조건, 도시 형태, PM2.5의 농도와 같은 환경 요인은 나무가 가로 채는 PM2.5의 양에 상당한 영향을 미친다. 식생 밀도, 공간적 배열, 총 잎 표면적, 그리고 생물학적 현상과 같은 집단 수준에서의 생물·물리적 특성이 주요 영향 인자이다. 나무 치수, 캐노피 질감, 잎 특성 및 성장 습관 등에 따라 종의 PM2.5 제거 효율이 달라진다. 상록 침엽수는 일년 내내 높은 잎 표면적을 유지하기 때문에 효율성이 더 높다. 조밀한 캐노피와 미세한 질감을 가진 나무는 PM2.5의 차단을 촉진할 수 있는 표면 조도가 더 높다. 잎의 복잡한 구조와 거칠거나 끈적거리는 또는 왁스 같은 표면을 가진 잎은 PM2.5를 더 효율적으로 포획할 수 있다.

PM2.5 제거 효율은 나무 종마다 다르므로 도시 수목 식재 시 PM2.5 제거 효율이 높은 종을 사용하는 것이 좋다. 그러나 높은 PM2.5 제거 효율만이 종 선택을 위한 유일한 기준은 아니다. 중요한 고려 사항은 종의 도시 환경에 적응하는 능력이다. 도시 환경에서 자라는 나무는 토양, 물, 가뭄, 해충 및 질병, 대기 오염 등으로 인해 스트레스를 받는다. 나무가 이러한 조건을 견딜 수 없다면 성장이 저해되고 수명이 단축될 수 있다.

또한 대기질을 저해하는 수종은 피해야하며 덜 심어야 한다. 나무에 의해 방출되는 BVOCs은 질소산화물 및 기타 화학물질과 반응하여 오존 및 2차 유기 에어로솔(SOA)을 형성할 수 있다. 따라서 낮은 BVOC 배출율의 수종은 도심에 식재 시 선호된다(Nowak et al., 2000).

이러한 나무들의 특성들을 고려하여 PM2.5제거효율성을 보기위한 생물·물리학적 변수,

도시환경 적합성, 대기질의 부정적인 영향 등 변수를 사용하여 전 세계 주요 도시에 주로 식재된 100종의 나무들의 순위를 매겼다. 수종의 생물·물리학적 변수는 북미 Silvics(1990), Gilman and Watson(1993), Horticipia(2013)에서 수집되었다. 변수의 등급은 간단한 가산 법을 사용하여 집계되었다.

〈표 3-1〉 수종의 PM2.5 제거 효율의 순위 결정 방법

변수	등급 및 기준		
	3	2	1
타입	상록 침엽	상록 활엽	낙엽
크기	20m 이상	10~20m	5~10m
성장률	빠름	보통	느림
캐노피 구조	조밀한 밀도, 정밀한 질감	중간 밀도, 중간 질감	열린 캐노피, 거친 질감
잎 복잡성	2중 또는 3중의 복엽 또는 침엽수 모양의 잎	우상복엽 <sup>10)</sup> 또는 장상복엽 <sup>11)</sup>	단일구조
잎 크기	5cm 이하	5cm~20cm	20cm이상
잎 표면특징	거칠고, 털이 많은, 분비물(송진), 끈적끈적하고, 비늘로 뒤덮인, 비늘 모양, 끈기가 많은, 다발성	섬모, 부드러운, 솜털, 왁스, 흰 가루로 덮인, 보송보송한, 약간의 털이 있는	부드러운 표면

자료: Jun Yang 외(2014), Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution, Atmospheric Pollution Research 6

〈표 3-2〉 도시 환경의 나무 종류별 적합성 평가 방법

변수	등급 및 기준		
	3	2	1
척박한 토양에 대한 저항성	Strong	Medium	Low tolerance, need good soil
가뭄에 대한 저항성	Strong	Medium	Low tolerance, need watering
해충과 질병에 대한 저항력	Strong	Medium	Susceptible to multiple pests and diseases
이산화황의 저항성	Strong	Medium	Low to sensitive
오존의 저항성	Strong	Medium	Low to sensitive
이산화질소의 저항성	Strong	Medium	Low to sensitive

자료: Jun Yang 외(2014), Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution, Atmospheric Pollution Research 6

대기질에 대한 부정적인 영향은 다음 표에 열거된 기준을 사용하여 평가되었다.

10) 잎자루의 양쪽에 작은잎이 새의 깃 모양을 이룬 복엽

11) 끝에 여러 개의 작은 잎이 손바닥 모양으로 평면배열한 겹잎

〈표 3-3〉 대기질에 부정적인 영향 순위 결정 방법

구분	등급 및 기준		
	3	2	1
꽃가루 알레르기 유발 수준	Highly	Medium	Low
BVOC 배출율	이소프렌 및 모노 테르펜의 방출 속도 10g/day/tree 이상	1~10g/day/tree	1g/day/tree 이하

자료: Jun Yang 외(2014), Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution, Atmospheric Pollution Research 6

전 세계 도시에 많이 심어진 나무 100종을 대상으로 평가한 결과 일부 널리 분포 된 도시 나무 종(단풍 버즘나무 *Platanus acerifolia*, 은단풍 *Acer saccharinum* L., 주엽나무 *Gleditsia triacanthos* L. 아까시나무 *Robinia pseudoacacia* L. 등)은 PM2.5를 제거하는데 있어 최고의 성과를 거두지 못했다. 침엽수 종은 PM2.5 제거 효율이 높았다. 침엽수의 높은 제거효과는 다음 요소들로 인한 것이다. 일년 내내 단풍, 조밀하고 미세한 질감의 캐노피, 잎 복잡성 및 특징에서 높은 점수를 받았다.

그러나 침엽수 중에서 연필향나무(측백나무과)는 PM2.5 제거효율에서 상위종으로 선정되었지만, 그 꽃가루는 또한 매우 알레르기성이 있다. 따라서 도시에 식재 시 피해야한다. 스트로부스 소나무는 PM2.5 제거 효율은 높지만 대기 오염에 대한 내성은 낮았다. 대기 오염 수준이 높은 장소에서의 사용을 피해야 한다.

PM2.5 제거 효율이 높고 대기질에 미치는 부정적 영향이 적으며 도시 환경에 대한 적합성이 우수한 활엽수 종류로는 아메리카 꽃단풍(*A. rubrum*), 실버 린든(*T.tomentosa*), 아메리칸 느릅나무(*U. americana*)로 나타났다.

이러한 간단한 순위결정법으로 도심 나무 식재 시 PM2.5 제거 효율이 높고 도시 환경에 잘 적응할 수 있으며 공기의 질에 미치는 부정적인 영향이 적은 침엽수와 활엽수를 사용함으로써 PM2.5의 감소를 향상시킬 수 있을 것이다.

〈그림 3-12〉 도시 수목의 적합성 평가 예

Occurrence	Scientific Name	PM <sub>2.5</sub> Removal Efficiency							Negative Impact			Suitability for Urban Environment					
		Type	Growth Rate	Height	Crown Density and Texture	Leaf Complexity	Leaf Length	Leaf Characteristic	Sum	BVOC Emissions	Pollen Allergy	Soil Tolerance	Drought Tolerance	Pest. and Disease Resistance	SO <sub>2</sub> Tolerance	O <sub>3</sub> Tolerance	NO <sub>x</sub> Tolerance
35	<i>Juniperus virginiana</i> L.	3	3	2	2	3	3	3	19	1	3	3	3	2	3	3	3
33	<i>Cupressus sempervirens</i> L.	3	2	2	3	3	3	3	19	1	1	3	3	1	3	3	2
45	<i>Juniperus chinensis</i> L.	3	2	2	2	3	3	3	18	1	3	3	3	2	3	3	3
69	<i>Thuja occidentalis</i> L.	3	1	2	3	3	1	3	16	2	3	3	2	1	3	3	2
43	<i>Pinus strobus</i> L.	3	3	3	2	1	2	2	16	2	1	2	2	1	1	2	1
38	<i>Toxodum distichum</i> (L.) Rich.	1	3	3	3	1	3	2	16	2	1	2	3	2	2	3	
31	<i>Tsuga canadensis</i> (L.) Carr.	3	1	3	2	1	3	3	16	1	1	2	2	1	2	3	
29	<i>Grevillea robusta</i> A.Cunn. ex R.Br.	3	3	3	2	2	1	2	16	1	2	2	3	2	2	2	
79	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	1	3	3	2	2	2	2	15	1	3	3	3	1	2	3	
66	<i>Acer rubrum</i> L.	1	3	3	2	2	2	2	15	1	1	2	2	2	2	3	
66	<i>Populus alba</i> L.	1	3	3	1	2	2	3	15	2	2	3	3	1	3	1	3
53	<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.	3	1	3	2	1	3	2	15	2	1	2	2	1	2	3	2
51	<i>Ulmus pumila</i> L.	1	3	3	2	1	3	2	15	1	2	3	3	1	2	3	
50	<i>Picea pungens</i> Engelm.	3	1	2	3	1	3	2	15	2	1	3	2	1	3	3	2
45	<i>Tilia tomentosa</i> Moench.	1	3	3	2	1	2	3	15	1		3	2	2	2	3	1
43	<i>Ulmus americana</i> L.	1	3	3	2	1	2	3	15		2	2	3	1	2	3	2
38	<i>Salix alba</i> L.	1	3	3	3	1	2	2	15	2	3	3	3	2	1	2	
35	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	1	3	2	2	3	3	1	15	1	2	2	3	2	1	3	
33	<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu and W.C.Cheng	1	3	3	2	1	3	2	15	1	2	2	2	2	2	3	1
32	<i>Tilia neopaeae</i> L.	1	2	3	3	1	2	3	15		2	3	2	2	3		1
31	<i>Ulmus glabra</i> Huds.	1	3	3	2	1	2	3	15		2	3	2	2	2	2	3
96	<i>Platanus acerifolia</i> (Ait.) Willd.	1	3	3	2	2	1	2	14	2		3	3	1	3	2	2
95	<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	1	3	3	2	3	1	1	14	1	1	3	3	1	2	1	

자료: Jun Yang 외(2014), Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM<sub>2.5</sub> pollution, Atmospheric Pollution Research 6

## 2. 도시수목의 적합성: I-Tree Species Selector

I-Tree는 미 농무부 산림청의 전문가 검토 소프트웨어이다. 도시 및 지역 사회 산림 분석과 편익 평가 도구를 제공하는 I-Tree Tools는 나무가 제공하는 환경 서비스를 수량화하고 도시 숲의 구조를 평가함으로써 모든 규모의 지역 사회가 도시 숲 관리를 강화할 수 있도록 지원한다. USDA Forest Service와 수많은 협력자가 개발한 I-Tree는 공개 도메인이며 I-Tree 웹 사이트([www.itreetools.org](http://www.itreetools.org))를 통해 요청할 수 있다. I-Tree 도구 중 I-Tree Species Selector는 도시의 산림 보호자들이 환경 기능과 지리적인 지역에 근거하여 가장 적합한 나무 종을 선택할 수 있도록 설계된 프로그램이다(<https://www.itreetools.org>).

〈그림 3-13〉 I-Tree Tools



출처: (<https://www.itreetools.org/species/index.php>)

〈그림 3-14〉 I-Tree Species Selector

출처: (<https://species.itreetools.org/selector>)

지역, 생육 조건(나무 높이, 최저평균기온, 대기오염물질 제거 및 다른 기능 중요도)을 설정하면 수종을 추천한다. 한국으로 설정한 후 미세먼지, 질소산화물 제거 등 대기오염물질 제거, UV 방사 감소, VOCs 저배출 등의 조건으로 검색한 결과 세쿼이아(구과목 낙우송과), 툴립나무(목련목 목련과), 미국 느릅나무(썩기फल목 느릅나무과), 미국 피나무(이욱목 피나무과), 개잎갈나무(구과목 소나무과) 등의 68개가 추천 수종으로 검색되었다.

〈그림 3-15〉 I-Tree 추천 수종



세쿼이아



튤립나무



느릅나무

I-Tree에서 추천된 나무 리스트 중에 수원시에 식재된 가로수와 겹치는 것은 버즘나무, 소나무, 참나무, 세쿼이아, 단풍나무이다. 완전히 같은 학명을 가진 종류는 아니고 같은 분류에 속하는 나무들이다.

## 〈그림 3-16〉 I-Tree에서 추천된 수종

## Trees Recommended by i-Tree Species

This is a list of the top 10% of tree species based on the following functions.

Generated: 9/19/2018

Location: Korea, Republic of

Hardiness: 9

Constraints:

- Minimum Height: 2 feet
- Maximum Height: None

Air Pollutant Removal (0-10 Importance)

- Carbon Monoxide: 8
- Nitrogen Dioxide: 9
- Sulfur Dioxide: 8
- Ozone: 10
- Particulate Matter: 10

Other Functions (0-10 Importance)

- Low VOC: 10
- Carbon Storage: 6
- Wind Reduction: 0
- Air Temperature Reduction: 6
- UV Radiation Reduction: 7
- Building Energy Reduction: 5
- Streamflow Reduction: 5
- Low Allergenicity: 6

S = Sensitive I = Intermediate S/I = Indeterminate



Species				Sensitivity			Pest Risk
Scientific Name	Common Name	Hardiness Zone	Invasive	Ozone (O3)	Nitrogen Dioxide (NO2)	Sulfur Dioxide (SO2)	Possible Pests
SEQUOIA SEMPERVIRENS	COAST REDWOOD	7 ~ 10					
LIRODENDRON TULIPIFERA	TULIP TREE	5 ~ 9		S			
ULMUS AMERICANA	AMERICAN ELM	3 ~ 9			I/S		
TILIA AMERICANA	AMERICAN BASSWOOD	4 ~ 9		I	I		
LIRODENDRON CHINENSE	CHINESE TULIP TREE	5 ~ 9**					
CEDRUS DEODARA	DEODAR CEDAR	7 ~ 9					
MAGNOLIA GRANDIFLORA	SOUTHERN MAGNOLIA	7 ~ 10					
PLATANUS RACEMOSA	CALIFORNIA SYCAMORE	7 ~ 9					
CUNNINGHAMIA LANCEOLATA	BLUE CHINESE FIR	7 ~ 9					
PINUS ELLIOTTII	SLASH PINE	8 ~ 11					
PERSEA PALUSTRIS	SWAMP BAY	8 ~ 11					
FRAXINUS UHDEI	EVERGREEN ASH	7 ~ 10					
PERSEA HUMILIS	SILK BAY	8 ~ 11**					
PERSEA KRUGII	CANELA	8 ~ 11**					
PERSEA LINGUE	LINGUE	8 ~ 11**					
PERSEA URBANIANA	AQUACATILLO	8 ~ 11**					
PLATANUS WRIGHTII	ARIZONA SYCAMORE	7 ~ 9					
ACER RUBRUM	RED MAPLE	4 ~ 10		I	I		
PERSEA BORBONIA	REDBAY	8 ~ 11					
PLATANUS ORIENTALIS	ORIENTAL PLANETREE	7 ~ 9					
UMBELLULARIA CALIFORNICA	CALIFORNIA LAUREL	9 ~ 11					
FRAXINUS AMERICANA	WHITE ASH	4 ~ 9		S			
QUERCUS SUBER	CORK OAK	7 ~ 11					
EUCALYPTUS VIMINALIS	RIBBON GUM EUCALYPTUS	9 ~ 11					
PINUS PALUSTRIS	LONGLEAF PINE	7 ~ 10					
PLATANUS OCCIDENTALIS	AMERICAN SYCAMORE	5 ~ 9		S			

### 3. 도시수목의 적합성 평가(I-Tree Species Selector 활용) 사례

A.J. Curtis(2014)의 연구에서는 9종의 나무를 콜로라도 주 덴버 카운티에 대량으로 심음으로써 발생하는 BVOC 배출량 변화를 조사하였다.

나무선택은 I-tree Species Selector를 이용하여 9종을 선택하였다. 중요도 척도에서 10의 값(0은 가장 덜 중요하고 10은 가장 중요함을 나타냄)은 일산화탄소, 오존, 이산화질소, 아황산가스 및 미세먼지의 공기 오염 제거 범주에 입력하였다. 또한 낮은 VOC배출 및 건물 에너지 감소 범주에 10의 값을 입력하였다. 연구 대상 수종은 Sugar Maple(*Acer saccharum* Marshall), Ohio Buckeye(*Aesculus glabra* Willd), Northern Hackberry(*Celtis occidentalis* L.), Turkish Hazelnut(*Corylus colurna* L.), London Plane Tree(*Platanus acerifolia* Aiton Willd.), American Basswood(*Tilia americana* L.), Littleleaf Linden(*Tilia cordata* Mill.), Valley Forge elm(*Ulmus americana* L. 'ValleyForge'), 그리고 Japanese Zelkova(*Zelkova serrata* Thunb. Makino)이다.

선정된 수종의 BVOC 배출량(실험실에서 각각의 나무 VOC측정)<sup>12)</sup>을 조사하여 모델링(자연으로부터의 기체 및 에어로졸 배출 모델, MEGAN)을 사용하여 콜로라도 덴버의 BVOC배출량을 추정하였다. 또한 콜로라도 기후 및 환경적 성장 조건 하에서 I-tree Species Selector 자료를 평가하였다. 비교를 위해 높은 BVOC를 배출하는 것으로 알려진 Kermes Oak와 English Oak 대상으로 모델링을 실시하였다. Kermes Oak는 다른 오크 종에 비해 이소프렌을 낮게 배출하지만, 높은 모노테르펜 및 SQT(세스퀴테르펜)를 배출한다.

〈표 3-4〉 도시나무 9종의 모노테르펜 배출율

구분	설탕 단풍	칠엽수	팽나무	개암 나무	단풍 버즘나무	미국 피나무	유럽 피나무	미국 느릅나무	느티 나무
총 모노테르펜 배출율 (mg/g/h)	0.07 (0.02, 0.11)	6.61 (1.76, 11.47)	0.33 (0.09, 0.57)	1.30 (0.32, 2.23)	0.15 (0.02, 0.27)	1.50 (0.40, 2.70)	0.71 (0.33, 1.09)	0.96 (0.01, 1.92)	0.42 (0.26, 0.58)

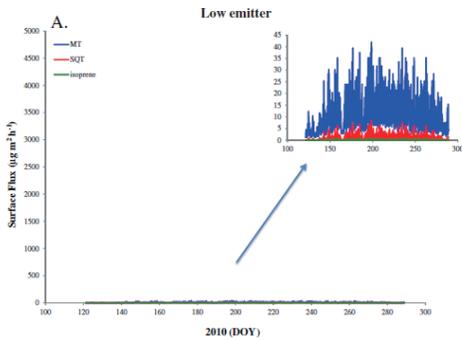
자료: A.J. Curtis(2014), Biogenic volatile organic compound emissions from nine tree species used in an urban tree-planting program, Atmospheric Environment 95 (2014) 634-643

모델링 연구에 따르면, BVOC을 낮게 배출하는 나무를 100 만 개 심을 때 발생하는 대기 배출량은 연간 총 19,000 kg의 VOC 배출량을 발생시킬 것으로 나타났다. 이는 높은 BVOC

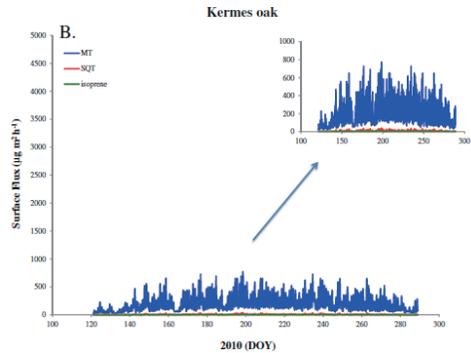
12) BVOC 배출량 실험은 2010 년 6월 2일부터 10월 8일까지 미국 Colorado 주 Boulder에 있는 Creekside Tree Nursery에서 실시되었다. 나무 종묘장에 트레일러는 이동 현장 실험실로 활용되었다.

배출나무인 Kermes Oak와 English Oak 종을 심는 것보다 각각 300,000 kg과 1,100,000 kg을 낮게 배출하는 것이다. 또한 시 도로에서 약 49 만 대의 자동차를 제거하는 것과 같다. 이 연구의 결과에 따르면 i-Tree 데이터베이스를 사용하면 덴버시의 대기 오염을 개선하기 위한 저 배출 나무 종의 선택 및 목표를 성공적으로 촉진 할 수 있다고 제시하였다.

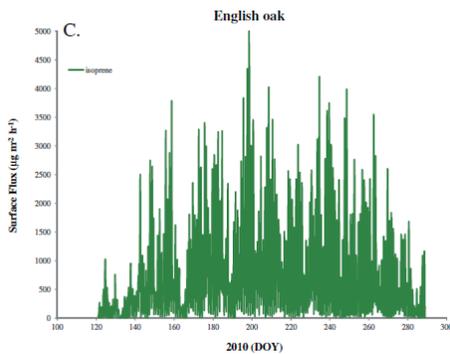
〈그림 3-17〉 9종의 낮은 나무의 BVOCs 배출



〈그림 3-18〉 케르메스 오크의 BVOCs 배출



〈그림 3-19〉 잉글리쉬 오크 BVOCs 배출



자료: A.J. Curtis(2014), Biogenic volatile organic compound emissions from nine tree species used in an urban tree-planting program

### 제3절 시사점

도심 내 수목의 대기오염도 영향과 적합성 평가사례를 살펴보았다.

주현수 외(2005)의 연구결과를 보면 가로수가 대기오염에 미치는 영향을 보기 위한 모델링 연구 결과 가로수 사이가 촘촘하게 식재될 경우 오염농도가 높게 나타났다. 그리고 가로수가 없는 도로보다 있는 도로에서 오염농도 감소속도가 현저히 빠른 것으로 나타났으며, 가로수가 건물보다 높을 때, 가로수 앞의 밀집도가 높을 때 대기오염농도 감소가 빠르게 진행되었다.

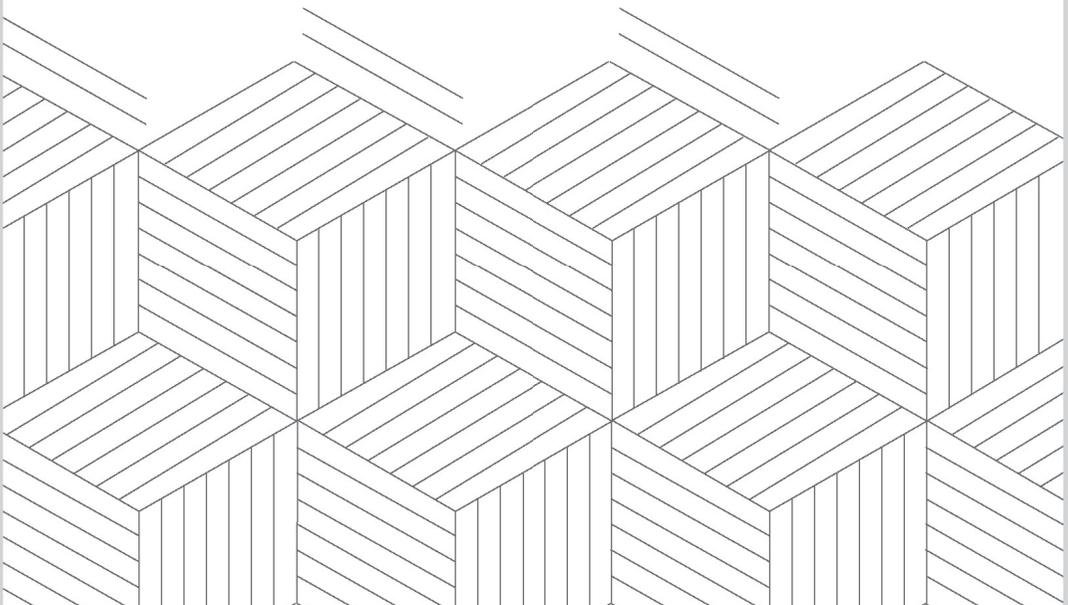
국내·외의 많은 가로수 관리지침 등에서는 도심의 대기질 개선과 관련하여 대기오염물질의 흡수속도가 높은 수목을 식재할 것을 권유하고 있다. 그러나 연구결과에 따르면 수목의 오염물질 흡수속도는 실제 도심환경의 조건하에서 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 오염이 심화된 도시협곡내의 대기질 개선을 위해서는 오염물질 흡수 능력이 큰 가로수를 식재하기 보다는 가로수 수관부의 높이, 형상 등을 적정하게 관리하여 협곡 내·외부의 기류교환을 촉진시키는 것이 더욱 효율적인 것으로 나타났다.

Jun Yang(2014)의 연구에서는 PM2.5 제거 효율, 대기 오염에 대한 부정적인 영향 및 일반적으로 발생하는 도시 수목의 도시 환경에 대한 적합성을 평가하기 위한 순위 접근법을 개발하였다. PM2.5 제거 효율, 수종이 도시 환경에 적응하는 능력(토양, 물, 가뭄, 해충 및 질병, 대기 오염 등의 영향), 나무의 PM2.5의 상대적 효율성은 7가지 생물·물리학적 변수를 사용하여 순위를 매겼다. 이러한 기준에 따라 전 세계 주요 도시에 주로 식재된 수종들을 평가한 변수의 등급은 간단한 가산법을 사용하여 집계하였다. 평가한 결과 일부 널리 분포된 도시 나무 중(단풍 버즘나무 *Platanus acerifolia*, 은단풍 *Acer saccharinum* L., 주엽나무 *Gleditsia triacanthos* L. 아까시나무 *Robinia pseudoacacia* L.)은 PM2.5를 제거하는 데 있어 최고의 성과를 거두지 못하였다. 침엽수종은 PM2.5 제거 효율이 높았으나 일부 대기오염에 대한 내성이 낮았다.

이러한 간단한 순위결정법으로 도심 나무 식재 시 PM2.5 제거 효율이 높고 도시 환경에 잘 적응할 수 있으며 공기의 질에 미치는 부정적인 영향이 적은 침엽수와 활엽수를 식재함으로써 PM2.5의 감소를 향상시킬 수 있을 것이다.

# 제4장 수원시 가로수가 대기오염에 끼치는 영향

- 제1절 수원시 주요 대로변 가로수 식재현황
- 제2절 식재된 가로수의 대기오염물질 배출 및 정화 특성
- 제3절 수원시 주요 도로별 가로수의 대기오염 영향
- 제4절 시사점





## 제4장 수원시 가로수가 대기오염에 끼치는 영향

### 제1절 수원시 주요 대로변 가로수 식재현황

#### 1. 수원시 가로수 현황

수원시에는 69종 70,562주가 식재되어 있으며, 식재된 가로수 수종 중 느티나무, 은행나무, 왕벚나무, 메타세콰이아가 전체 가로수의 59.6%로 절반이상을 차지하고 있다.

〈표 4-1〉 수원시 가로수 현황

구분	계	느티 나무	은행 나무	왕벚 나무	메타세 콰이아	소나무	버즘 나무	회화 나무	기타
계 (비율)	70,562 (100%)	17,571 (25%)	12,480 (18%)	8,809 (13%)	3,203 (5%)	2,398 (3%)	2,211 (3%)	1,973 (2%)	21,917 (31%)
장안구	14,267	4,393	3,348	1,220	980	1,271	179	304	2,572
권선구	28,551	5,802	3,888	5,230	709	592	741	252	11,337
팔달구	8,813	1,367	2,978	738	326	281	655	603	1,865
영통구	18,931	6,009	2,266	1,621	1,188	254	636	814	6,143

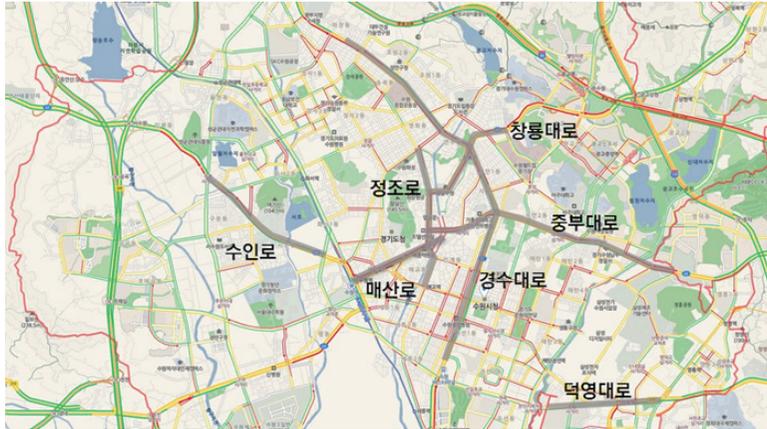
출처: 수원시청 홈페이지

#### 2. 수원시 주요 대로변 가로수 조사

수원시에서 차량 통행이 많은 대로를 중심으로 가로수 조사를 진행하였다. 중부대로, 경수대로, 창룡대로 등 8지점을 조사하였으며 조사지점은 다음 〈그림 4-1〉에 회색으로 표시된 지점이다.

수원시 전체 가로수 중 가장 많이 식재된 가로수는 느티나무(25%), 은행나무(18%), 왕벚나무(13%) 순이다. 본 연구에서 조사한 도로 중 식재된 가로수는 관목을 제외하고 은행나무(48%)가 가장 많았으며, 그 다음으로 느타나무(15%), 칠엽수(11%), 중국단풍(7%) 순으로 나타났다. 자세한 사항은 다음 표에 나타내었다.

〈그림 4-1〉 수원시 대로변 가로수 조사 지점



〈표 4-2〉 수원시 주요 도로 지점별 가로수

		수인로 (2.7km)	매산로 (1.7km)	정조로 (2.7km)	중부대로 (4.9km)	경수대로 (7.8km)	덕영대로 (2.2km)	창룡대로 (2.4km)	
핵심지	교목	느티나무	187			11	6	367	54
		대왕참나무					15		
		버즘나무			124				
		산벚나무	51						
		왕벚나무						70	
		이팝나무	9					99	5
		중국단풍	10				272		
		청단풍					58	5	
		칠엽수	72				358	2	1
	홍단풍							12	
	회화나무						18		
	관목	명자나무					400		
		무궁화	390						334
		사철나무					288		1,680
산수국						500			
쥐똥나무					56,300	102,300			
철쭉						2,000	1,080	2,600	
홍매자						800			
회양목				1,200	89				
침엽	교목	메타세쿼이아	70						
		선주목				5			
		소나무				12	224		
		은행나무	144	234	162	678	561		161

1. 수인로: 구운사거리~서둔교차로 지점(2.7km)
2. 매산로: 수원역광장 교차로~수원천로 교차지점 직전(1.7km)
3. 정조로: 매교역사거리~장안문로터리(2.7km)
4. 중부대로: 중동사거리~삼성삼거리(4.9km)
5. 경수대로: 한전KDN~시청앞사거리(6.4km)
7. 덕영대로: 래미안영동1단지~덕영대로와 봉영로 교차 지점(2.2km)
9. 창룡대로: 정조로 교차지점~팔달구 경계지점(2.4km)

본 보고서에서 조사한 지점의 식재된 가로수 특성을 표로 정리하였다. 철쭉이나 무궁화 등은 제외하고 교목 위주로 정리하였다. 수원시에 식재된 가로수는 대부분 내한성과 내공해성에 강한 수종들이다.

〈표 4-3〉 가로수종 특성표①

구분	느티나무	은행나무	왕벚나무	메타세쿼이아	
사진					
					
형태	낙엽 활엽 교목	낙엽 침엽 교목	낙엽 활엽 교목	낙엽 침엽 교목	
분류	느릅나무과	은행나무과	장미과	낙우송과	
학명	<i>Zelkova serrata</i>	<i>Ginkgo biloba</i>	<i>Prunus yedoensis</i> Matsum.	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	
원산지	한국, 일본, 중국	중국동부	한국(제주도)	중국	
생태적 특성	수형	평정형	원추형	원정형	원추형
	음양성	중용수	양수	양수	양수
	내한성*	강	강	강	강
	내공해성*	중	강	중	중
	내염성*	강	약	중	-
	내건성*	적윤	내건	적윤	습윤
	이식	보통	용이	보통	곤란
	생장속도	빠름	느림	빠름	빠름
가로수 특성	· 바람에 대한 저항력이 강하고 이황산화물과 대기오염에 약하다.	· 조경수, 내공해수종으로 가로수, 녹음수, 독립수로 식재	· 환경정화 수종 · 봄의 담홍색 꽃 기을 단풍이 아름다움	· 수형이 아름다워 공원, 관광지, 가로수 등에 적합	

\*내한성: 생물이 추위(저온)에 견디며 생존할 수 있는 성질

\*내공해성: 오염된 환경에서 생존할 수 있는 성질

\*내염성: 식물이 높은 염분환경에 견디어 생육할 수 있는 성질

\*내건성: 식물이 건조에 견디어 생명을 유지하려는 성질

〈표 4-4〉 가로수종 특성표②

구분		소나무	버즘나무	회화나무	대왕참나무
사진					
					
형태		상록 침엽 교목	낙엽 활엽 교목	낙엽 활엽 교목	낙엽 활엽 교목
분류		소나무과	버즘나무과	콩과	참나무과
학명		<i>Pinus densiflora</i>	<i>Platanus orientalis</i> L.	<i>Sophora japonica</i> L.	<i>Quercus palustris</i>
원산지		한국, 일본, 중국	미국	중국	미국
생태적 특성	수형	원추형	원추형	타원형	원추형
	음양성	양수	중용	양수	-
	내한성	중	강	강	강
	내공해성	중	강	강	강
	내염성	약	중	강	-
	내건성	적윤	-	적윤	-
	이식	어려움	용이	용이	용이
	생장속도	-	매우 빠름	느림	보통
가로수 특성		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 도시공간의 정원수로는 공해와 음지에 약하여 적합하지 않다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 환경정화 수종</li> <li>· 대기오염 정화 능력 탁월</li> <li>· 가로수로 전 세계적으로 가장 많이 사용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 내한성과 내공해성이 강하여 공원이나 가로수로 적당하고 병충해가 적은 편</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 단풍이 아름다워 정원수, 가로수로도 활용</li> </ul>

〈표 4-5〉 가로수종 특성표③

구분		중국단풍	청단풍(단풍나무)	칠엽수	홍단풍
사진					
					
형태		낙엽 활엽 교목	낙엽 활엽 교목	낙엽 활엽 교목	낙엽 활엽 교목
분류		단풍나무과	단풍나무과	칠엽수과	단풍나무과
학명		<i>Acer buergerianum</i> Miq.	<i>Acer palmatum</i> Thunb.	<i>Aesculus turbinata</i>	<i>Acer palmatum</i> var. <i>sanguineum</i>
원산지		중국	한국, 중국, 일본	일본	일본
생태적 특성	수형	원정형	원정형	선형	원형
	음양성	중용	중용	음수	양수
	내한성	강	중	강	중
	내공해성	강	강	중	강
	내염성	강	강	중	강
	내건성	적습	적윤	-	적습
	이식	용이	용이	곤란	용이
	생장속도	보통	느림	보통	-
가로수 특성		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 단풍이 아름다우며 수형이 단생하여 정원수, 가로수 등으로 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 공해 및 병충해에 강하며 공원수, 정원수, 경관수 등으로 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 어려서 음수이지만 자라면서 햇빛을 좋아하며 도시 공해에 약하다</li> <li>· 수형이 웅대하고 수려해서 가로수, 녹음수로 좋음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 잎의 질감이 곱고 관상수, 경관수, 녹음수로 이용</li> </ul>

〈표 4-6〉 가로수종 특성표④

구분	이팝나무	선주목	산벚나무	쥐똥나무	
사진					
					
형태	낙엽 활엽 교목	상록 침엽 교목	낙엽 활엽 교목	낙엽 활엽 관목	
분류	물푸레나무과	주목과	장미과	물푸레나무과	
학명	<i>Chionanthus retusus</i> Lindl. & Paxton	<i>Taxus cuspidata</i>	<i>Prunus sargentii</i> Rehder	<i>Ligustrum obtusifolium</i> Siebold & Zucc.	
원산지	한국, 중국, 일본	한국, 일본, 만주	한국	한국, 중국	
생태적 특성	수형	원정형	원추형	원정형	부정형
	음양성	양수	음수	양수	중용
	내한성	강	강	강	강
	내공해성	강	중	중	강
	내염성	강	강	중	강
	내건성	적윤	적윤	적윤	적윤
	이식	용이	용이	-	용이
	생장속도	느림	느림	보통	-
가로수 특성	· 여름의 흰꽃과 수형이 아름다우며 가로수, 정원수로 적당	· 생장이 느리고 음지에서 잘 견디기 때문에 기초식재 또는 도로변의 경사지 식재용으로 이용	· 양수로서 평탄하면서 습기가 많은 비옥지에서 잘 자라며 대기오염에 대한 저항성도 강하다	· 적응성이 높아 어느 곳이나 식재가 가능하며 생물타리 조성에 최적	

〈표 4-7〉 가로수종 특성표⑤

구분	명자나무	사철나무	회양목	홍매자	
사진					
					
형태	낙엽 활엽 관목	상록 활엽 관목	상록 활엽 관목	낙엽 활엽 관목	
분류	장미과	노박덩굴과	회양목과	매자나무과	
학명	<i>Chaenomeles lagenaria</i>	<i>Euonymus japonicus</i>	<i>Buxus microphylla</i>	<i>Berberis thunbergii</i>	
원산지	중국	한국, 일본, 중국	한국	일본	
생태적 특성	수형	피복형	원형	원형	타원형
	음양성	중용	양수	중용	중용
	내한성	강	강	강	강
	내공해성	강	강	강	중
	내염성	중	강	중	약
	내건성	적윤	적윤	적윤	-
	이식	용이	용이	용이	-
	생장속도	-	-	-	-
가로수 특성	· 대기 오염에 대한 저항성도 강하고 특별히 건조한 곳을 제외하고는 어디서나 잘 자람(공원수, 생울타리용)	· 토질을 가리지 않고 공해, 조해에도 강하여 식재범위가 넓다.(공원수, 생울타리용)	· 수형조절이 자유로워 정원, 공원 구역의 경계지, 생울타리 등으로 쓰임	· 내염성, 내공해성이 강하지 못하므로 식재지 선정에 주의를 기울인다	

## 제2절 식재된 가로수의 대기오염물질 배출 및 정화 특성

### 1. 수원시 주요 가로수 수종의 대기오염 배출 및 흡수 특성

가로수가 도시환경에 미치는 영향은 대기정화, 경관형성, 기온조절 등 여러 가지 기능을 지니고 있으므로 이소프렌(VOCs) 방출량만으로는 판단할 수 없다(이소프렌은 온도가 높고 빛이 강할수록 배출되기 때문에 도심온도의 영향이 크다고 할 수 있다). 또한, 수목은 대기 중 오존 흡수 및 VOCs가 오존으로 전환되는 전단계 물질인 질소산화물 흡수 등 오존 발생을 저감시키는 기능이 있으므로 가로수 수종 선정은 종합적인 대기오염방지능력과 환경개선기능 등을 고려해서 결정하여야 할 것이다.

수원시에 주로 식재된 가로수 수종은 느티나무, 은행나무, 왕벚나무, 메타세쿼이아, 소나무, 버즘나무, 회화나무 등 이다. 앞에서 조사한 대기오염물질 정화능력 사례조사를 검토하여 조사를 수행한 수원시 도로의 가로수와 주요 가로수 종의 대기오염물질 흡수량과 배출량을 다음 표와 같이 정리하였다.

수목의 대기오염물질 정화능력은 수종, 잎의 종류, 잎의 나이, 지역 등에 따라 다르기 때문에 일률적으로 어느 수종이 얼마나 많은 오염물질을 흡수하는가를 쉽게 말하기 어렵지만 수목 선택 시 여러 실험값들을 참고하면 좋을 것으로 판단된다.

국내·외 연구 자료에 따라 수원시 가로수 중에 이소프렌을 배출하는 나무는 느티나무, 대왕참나무, 버즘나무, 산벚나무, 단풍나무, 칠엽수, 소나무 등이다(데이터가 없는 나무는 배출량이 없는 것이 아니라 연구자료가 없는 것이다).

모노테르펜을 배출하는 나무는 느티나무, 산벚나무, 단풍나무, 소나무가 있으며 소나무가 배출량이 가장 높다. 이산화탄소 흡수량을 보면 메타세쿼이아가 이산화탄소 흡수율이 가장 높으며 그 다음으로 버즘나무, 은행나무, 느티나무, 회화나무, 벚나무 순이다. 이산화질소의 경우 단풍나무가 가장 높은 흡수율을 보이며 그 다음으로 느티나무로 나타났다. 이산화황도 단풍나무가 높은 흡수율을 보였다.

미세먼지는 Jun Yang 외(2014)의 연구의 미세먼지 제거 효율의 등급 및 기준에 따른 순위결정방법을 점수화 한 결과를 바탕으로 보면 메타세쿼이아의 점수가 15점으로 가장 높았으며, 느티나무, 대왕참나무, 버즘나무가 14점으로 그 다음으로 높았다. 육세진(2018)의 연구에서는 5종류의 나무만 실험하였으나 그 순위를 보면 소나무가 미세먼지를 가장 잘 흡착하고 그 다음으로 선주목, 버즘나무 순으로 나타났다. 그러나 모든 나무의 흡수율과 배출량 데이터가 없기 때문에 절대적으로 판단할 수는 없다.

〈표 4-8〉 수원시 주요 도로 가로수종의 대기오염물질 흡수량 및 배출량

구분	비율	대기오염물질 흡수율(kg/y)					미세먼지 흡착		VOC배출량 (kg/km <sup>2</sup> /hr)				
		CO <sub>2</sub>		NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	⑥	⑦	이소프렌		모노테르펜		
		③	①	②	②	②	점수	순위	④	⑤	⑤		
활엽수	교목	느티나무	25%	33.7	331.6	0.29	0.4	-	14	4	-	0.0425	0.0425
		대왕참나무		-	-	-	-	-	14	-	30	25~29 (졸참나무, 굴참나무)	-
		버즘나무	3%	55.6	499.4	0.002	0.006	-	14	3	15		-
		산벚나무		26.9	-	-	-	-	-	-	-	0.0425	0.0425
		왕벚나무	13%	26.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		이팝나무		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		중국단풍		20.9	-	0.80	10.0	20	-	-	0.043	0.0425	0.68
		청단풍		20.9	-	0.80	10.0	20	11	-	0.043	0.0425	0.68
		칠엽수		-	-	-	-	-	-	-	0.043	-	-
		홍단풍		20.9	-	0.80	10.0	20	-	-	0.043	0.0425	0.68
침엽수	교목	회화나무	2%	32.5	-	-	-	-	12	-	-	-	-
		메타세쿼이아	5%	69.6	-	-	-	-	15	-	-	-	-
		선주목		-	-	-	-	-	-	2	-	-	-
		소나무	3%	7.3	-	0.005	0.02	3	-	1	0.079	0.189	1.2425
		은행나무	18%	35.4	25.8	0.004	0.02	-	13	5	-	-	-

\*어두운 색칠 부분이 수원시 전체 주요 가로수 종이며 비율은 수원시 전체 가로수 중 차지하는 비율임.

자료: ①국립환경과학원(1994), 환경개선을 위한 정화식물 개발에 관한 연구

②국립환경과학원(1997), 도시유형별 녹지의 환경개선 기능평가

③박은진 외(2009), 도시 수목의 이산화탄소흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안, 경기연구원

④국립산림과학원(2004)보도자료(EPA발표자료 재인용)

⑤김형철(2013), 제주지역의 식물기원 VOCs배출 특성과 오존 생성에 미치는 영향 연구, 제주대학교

⑥Jun Yang 외(2014), Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution, Atmospheric Pollution Research 6

⑦육세진(2018), Characteristics of Submicron and Ultrafine Soot Particle Removal by Tree Leaves, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집

## 2. 도로변 대기오염도와 가로수 배출 VOCs와의 상호 작용 고찰

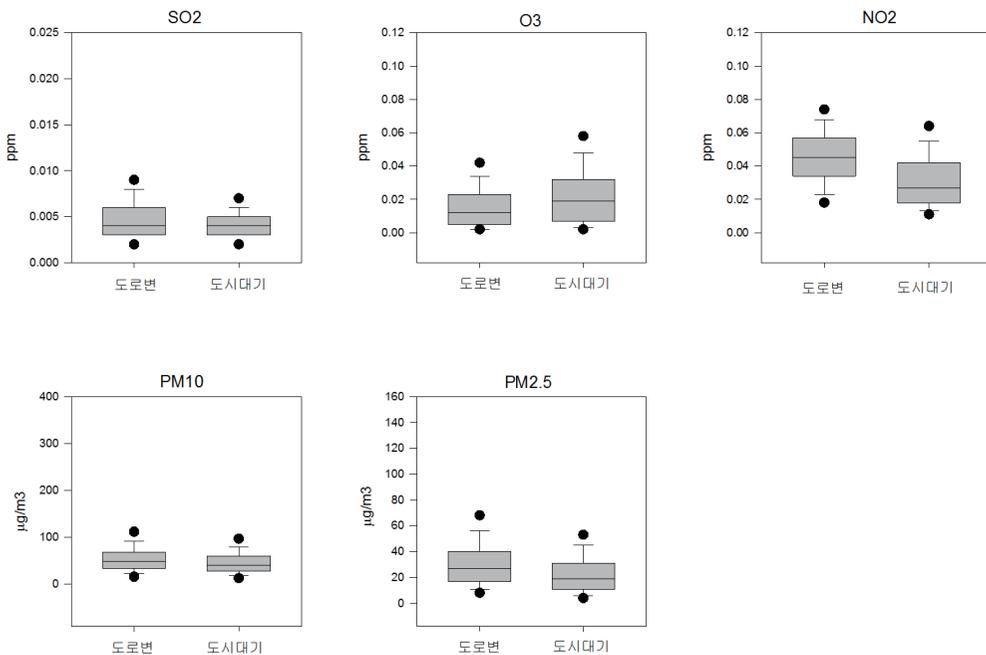
### 1) 수원시 도로변 대기오염도

수원시 도로변 대기오염도는 다음과 같이 O<sub>3</sub>과 CO를 제외한 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도가 도시대기측정소보다 각각 25%, 45%, 14%, 25% 더 높다.

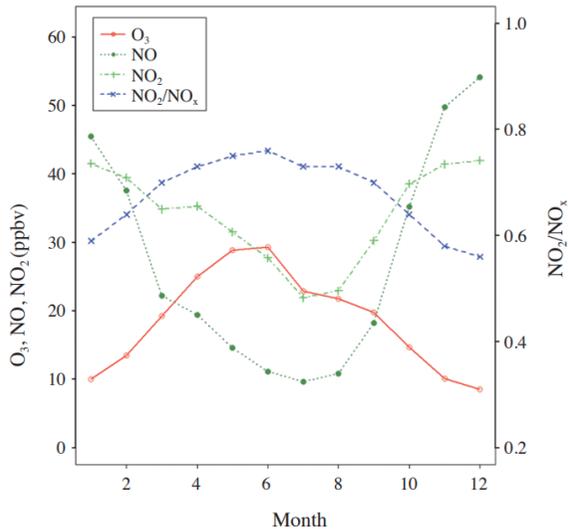
도로변의 NO<sub>2</sub>는 도시대기측정소보다 항상 높은 농도로 측정되었으며, 그 이유는 자동차로부터의 배출이 많기 때문이다. PM<sub>10</sub> 고농도는 도로변 비산먼지의 영향 때문일 수도 있으나 SO<sub>2</sub> 고농도 시기와 유사한 것으로 보아 그 시기의 도로변 공기가 원활히 확산되지 않고 축적되었던 것이 원인이 될 수도 있을 것이다.

도로변의 NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>의 평균농도가 도시대기 측정소보다 높았으며 95 퍼센타일과 평균값 모두 도드라지는 차이를 보였다. O<sub>3</sub>은 NO<sub>2</sub>와의 광화학 연쇄반응에 의해 역의 상관성을 갖기 때문에 NO<sub>2</sub>가 높은 곳에서 O<sub>3</sub> 농도는 그와 비례하여 낮게 된다(안현진 외, 2015). 따라서 가로수 식재시 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 흡수를 잘 하는 수종, PM<sub>2.5</sub> 흡착을 잘하는 수종, 그리고 VOCs 배출이 낮은 수종을 선택하면 도로변 대기오염도를 낮추는 데 효과적일 수 있다.

〈그림 4-2〉 2017년 도로변 대기질과 도시대기(수원시 도시대기측정소 6개소 평균) 대기질의 박스 플랏



〈그림 4-3〉 수원시 인계동 측정소의 오존과 질소산화물과의 월평균농도 및 상관관계



자료: 안현진 외(2015), 수원시 대기 중 오존과 질소산화물의 장기변동 특성(1991~2012)

## 2) NO<sub>2</sub>와 가로수 주요 배출 VOCs와의 관계

가로수에서 배출되는 VOCs는 크게 테르펜류와 이소프렌으로 나뉘질 수 있다. 이소프렌은 NO<sub>2</sub>와 반응하여 오존을 생성하기도 하며 최근에는 2차 유기입자 생성에도 기여한다고 밝혀졌다(국립환경과학원, 2014). 테르펜류는 NO<sub>2</sub>, 오존의 광화학반응에 의해 오존을 생성하기도 하며 2차유기입자(Secondary Organic Aerosol)을 생성하기도 한다. 특히 모노테르펜 중 a-pinene과 b-pinene은 이차유기입자를 생성하는 대표적인 자연적 휘발성유기화합물이다(Kang et al., 2007). 테르펜류는 오히려 오존을 분해하여 오존 농도를 낮추는 데 기여하기도 하지만 이는 교외지역처럼 NO<sub>2</sub> 농도가 낮을 때에 해당되기 때문에 도로변처럼 NO<sub>2</sub> 농도가 높은 곳에서는 오히려 2차유기입자를 생성하는 효과가 더 클 것으로 판단된다(Crutzen et al., 1985; Jacob and Wofsy, 1988).

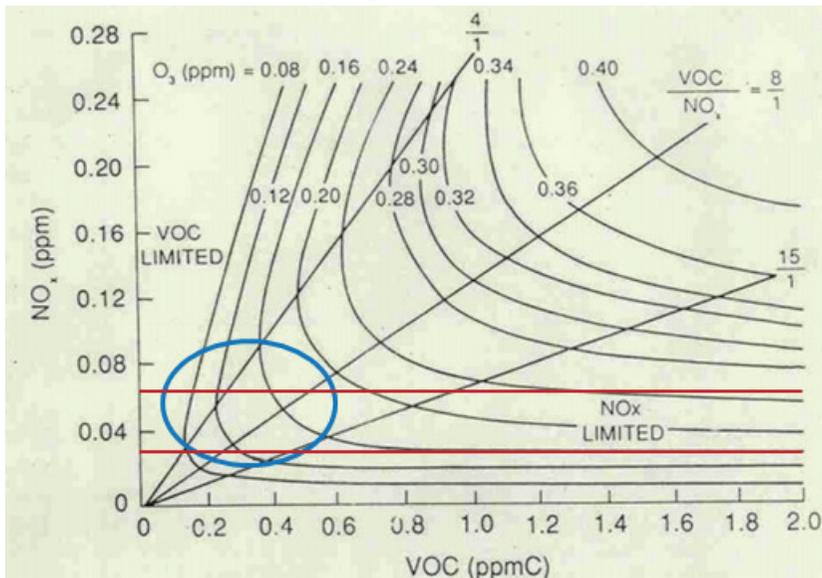
하지만 자동차에서 배출되는 VOCs는 가로수에서 배출되는 테르펜류보다 훨씬 다양하며 배출량이 더 많다. 또한 아래 그림과 같은 오존 생성 메카니즘에서도 NO<sub>x</sub> 농도가 50~100 ppb 범위에서는 VOCs 농도가 낮을 때는 VOCs 농도를 줄이는 것이 오존 농도를 낮추는데 효과적이며(VOCs-limited regime), VOCs 농도가 높을 때는 NO<sub>x</sub> 농도를 줄이는 것이 오존 농도를 낮추는 데 효과적(NO<sub>x</sub>-limited regime)이다.

홍콩 도로변의 VOCs 측정결과를 참고한다면(총 VOCs로 최고 농도 240ppb, Ho et al., 2013) 홍콩 도로변은 VOCs limited regime에 해당되며, 국내 도시대기 중 도로변과 인접

한 지역(종로지역, 유승성 외, 2007)에서는 VOCs/NO<sub>x</sub> 비가 4 이하 43%, 4~15 사이가 57%로 VOCs limited regime과 transit regime에 위치(아래 그림에서 원으로 표시한 부분)하여 있었다. 따라서 VOCs를 줄이는 것이 해당 지역 오존 생성을 낮추는 데 기여한다는 해석을 할 수 있다.

수원시 도로변의 VOCs는 측정자료가 없어 VOCs 측정값을 알 수는 없지만, 서울시 종로 지역과 유사하다고 가정하면 수원시의 경우에도 VOCs-limited regime에 해당한다고 유추할 수 있다. 이는 VOCs 농도를 줄임으로써 도심 생성 오존 농도를 줄일 수 있기 때문에 테르펜류(특히 오존 생성에 기여하는 VOCs 중심)와 같은 VOCs 배출이 적은 수종을 선택하여 식재하는 것이 필요하다. 테르펜류 저감을 통해 자연적 휘발성유기화합물로부터 생성되는 2차유기입자의 생성도 낮출 수 있을 것이다.

〈그림 4-4〉 전형적인 EKMA 다이어그램



출처: Models in Environmental Regulatory Decision Making, p22, 2007)

### 3) 가로수 수종의 대기오염도 영향 고찰

수원시에 식재된 주요 가로수인 느티나무, 은행나무, 왕벚나무는 이산화탄소 흡수율이 비교적 높은 수종이다. 그 중 느티나무는 은행나무나 왕벚나무에 비해 NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>의 흡수율이 높은 편이어서 도로 자동차에서 배출되는 대기오염물질을 흡수하는 데 좋은 수종이라 할 수 있다. VOCs 배출량은 수원시 가로수 중 느티나무, 대왕참나무, 버즘나무, 산벚나무, 단풍나무, 칠엽수, 소나무의 자료만을 구할 수 있어서 주요 가로수의 상대적 배출량 정도를 판단할

수는 없었다. 다만 이소프렌의 경우 활엽수의 배출량이 침엽수 배출량보다 380배 가량 많았으며(예: 침엽수인 소나무의 배출량이 0.079kg/km<sup>2</sup>/hr, 활엽수인 대왕참나무의 배출량이 30kg/km<sup>2</sup>/hr, 버즘나무 15kg/km<sup>2</sup>/hr, 표 4-8 참조), 모노테르펜의 경우 침엽수의 배출량이 활엽수보다 29배 가량 많았다(예: 침엽수인 소나무의 배출량이 1.2425 kg/km<sup>2</sup>/hr, 활엽수인 느티나무의 배출량이 0.0425 kg/km<sup>2</sup>/hr, 표 4-8 참조). 따라서 대왕참나무와 버즘나무, 소나무는 차가 많은 도로변 가로수로 적당하지 않을 수 있다. 다만 경수대로와 중부대로에 일부 식재되어 있는 소나무는 침엽수로 미세먼지 흡착력이 다른 나무들보다 높아(본 보고서 제2장 제1절(p.10~20) 참조) 발생한 미세먼지를 제거하는 데에는 긍정적인 효과가 있다. 따라서 광화학반응이 활발하고 가스상 오염물질의 농도가 높은 곳에는 참나무와 버즘나무 식재를 지양하여 2차 입자 및 오존을 저감하고, 비산먼지의 발생이 많은 곳에서는 소나무와 같은 침엽수를 식재하여 부유된 미세먼지를 저감할 수 있을 것이다. 하지만 다음 장에서 살펴보는 바와 같은 물리적인 대기오염저감 효과와 함께 도로변 좁은 공간에서의 수목의 안정적인 생장도 중요한 요소로 복합적으로 고려하여 식재하여야 할 것이다.

〈표 4-9〉 수원시 가로수종의 대기오염물질 배출 및 흡수 순위

번호	많이 식재된 순서		CO <sub>2</sub> 흡수량		NO <sub>2</sub> 흡수량		SO <sub>2</sub> 흡수량		미세먼지 제거 점수		이소프렌 배출량		모노테르펜 배출량	
	종류	비율	종류	값	종류	값	종류	값	종류	값	종류	값	종류	값
1	느티나무	25%	메타세쿼이아	69.6	단풍나무	0.8	단풍나무	10	메타세쿼이아	15	대왕참나무	30	소나무	1.243
2	은행나무	18%	버즘나무	55.6	느티나무	0.29	느티나무	0.4	느티나무, 대왕참나무, 버즘나무	14	버즘나무	15	단풍나무	0.68
3	왕벚나무	13%	은행나무	35.4	소나무	0.005	소나무	0.02	은행나무	13	소나무	0.079	느티나무	0.043
4	메타세쿼이아	5%	느티나무	33.7	은행나무	0.004	은행나무	0.02	회화나무	12	단풍나무	0.043	산벚나무	0.043
5	소나무, 버즘나무	3%	회화나무	32.5	버즘나무	0.002	버즘나무	0.006	단풍나무	11	침엽수	0.043		

### 3. 수원시 주요 가로수의 물리적인 대기오염 저감 효과

국내·외의 많은 가로수 관리지침 등에서는 도심의 대기질 개선과 관련하여 대기오염물질의 흡수속도가 높은 수목을 식재할 것을 권유하고 있다. 그러나 국내·외 연구결과에 따르면 오염이 심화된 도시협곡내의 대기질 개선을 위해서는 오염물질 흡수 능력이 큰 가로수를 식재하기 보다는 가로수 수관부의 높이, 형상 등을 적절하게 관리하여 협곡 내외부의 기류교환을 촉진시키는 것이 더욱 효율적인 것으로 나타났다. 따라서 여기에서는 가로수 식재로 인한 물리적인 대기오염 저감 효과를 종합하여 판단해 보았다.

도시협곡이란 차도를 따라 빌딩이 줄지어 배치된 지역으로, 통행차량에서 배출된 각종 오염물질이 협곡 내부에 축적되어 국지적 대기환경이 심각하게 악화될 수 있는 지형조건이며, 이러한 고농도의 대기오염물질은 협곡내의 보도나 인접 사무실에서 활동하는 사람들의 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있으므로 도시협곡(대로보다는 소·중로) 내의 대기질 환경문제는 매우 중요하다(주현수 외, 2005).

따라서 수원시의 주요 도로에서 가로수와 건물의 높이 차이, 식재 간격 등 물리적인 현황을 살펴보았다.

### 1) 건물보다 가로수가 높은 경우

대로보다는 도시협곡(소·중로)에서 가로수의 높이는 중요하다. 주현수 외(2005)의 연구 결과에 따르면 건물보다 가로수가 높아야 바람이 불 경우 공기확산이 잘되어 대기오염농도가 낮아진다고 한다.

수원시 정조로, 매산로 등의 소·중로에서는 대부분 건물들이 낮아 가로수의 높이가 높았다. 정조로와 매산로에서는 공기 기류 확산이 잘 될 것으로 판단하였다.

〈그림 4-5〉 건물보다 가로수가 높은 경우



수원시 매산로



수원시 정조로



## 2) 건물보다 가로수가 낮은 경우

수원시의 소·중로에서는 대부분 건물높이가 낮아 건물보다 가로수가 작은 경우는 드물었다. 대로에서는 건물의 높이가 대부분 높기 때문에 가로수가 건물보다 작았으나 대로에서는 공기확산이 가로수 높이와 상관없이 확산이 잘 되기 때문에 가로수 높이가 소·중로보다는 크게 상관이 없다.

정조로 한 구간이 건물보다 가로수가 낮았으나 맞은편의 건물이 낮아 공기확산에는 문제가 없을 것으로 판단하였다.

〈그림 4-6〉 건물보다 가로수가 낮은 경우



정조로



덕영대로



경수대로



중부대로

### 3) 식재간격

가로수 조성 및 관리규정 고시에 따르면 식재 간격을 8m를 기준으로 하고 있으나 도로의 위치와 주위 여건, 식재수종의 수관폭과 성장속도, 가로수로 인한 피해 등을 고려하여 식재간격을 조정할 수 있다.

가로수 조성 및 관리규정 고시 [산림청고시 제2013-87호, 2013.12.31., 일부개정]  
제5조(식재 기준) 가로수는 다음과 같은 기준에 따라 식재한다. ① 교목(키큰나무)  
1. 식재간격은 8미터를 기준으로 한다. 다만, 도로의 위치와 주위 여건, 식재수종의 수관폭과 성장속도, 가로수로 인한 피해 등을 고려하여 식재간격을 조정할 수 있다.  
2. 식재유형은 도로선형과 평행한 열식을 원칙으로 하되 도로의 여건, 방음·녹음제공·경관개선 등 특정목적에 따라 군식·혼식할 수 있다.  
3. 보도의 한쪽을 기준으로 1열심기를 하고 보도의 폭이 넓은 경우 2열 이상 식재할 수 있다.  
4. 도로의 동일 노선과 도로 양측에는 동일한 수종으로 식재한다. 다만, 도로의 방향이 바뀌거나 도로가 신설·확장되는 경우에는 동일 노선일지라도 다른 수종으로 식재할 수 있다.

Lixin Chen(2018)은 도로에서 가로수 사이의 간격이 대기오염에 미치는 영향을 보기 위해 가로수 사이 공간을 다르게 하여 각각의 시나리오 하에서 풍상·풍하 측에서 오염 농도의 분포를 시뮬레이션하였다. 가로수 사이가 촘촘할수록 오염농도가 높아 가로수가 도로의 오염 물질을 갇히게 하는 벽의 역할을 하는 것으로 평가되었다.

수원시의 가로수 식재간격을 조사해본 결과, 도로 가로수의 식재간격은 대부분 일정했고 오염된 공기가 순환되지 않게 촘촘히 식재된 구역은 거의 없었다. 수인로에서 다음 사진과 같이 촘촘히 식재되어있는 구간이 있었으나 그 주변은 대부분 눈밭으로 오히려 오염된 공기가 눈밭으로 들어오지 못하게 차단효과를 위해 심었을 것으로 판단된다. 만약 도시협곡에서 수인로의 아래사진처럼 심었다면 오염된 공기가 순환되지 못하고 오염농도가 높았을 것이다. 그러나 덕영대로의 도로변 아파트 단지 옆에는 아래 사진과 같이 가로수가 촘촘하고 두껍게 식재(완충녹지)되어 있었는데 이는 공기순환의 악영향보다는 도로의 대기오염물질과 소음을 막아주는 역할을 하기 때문에 장점으로 볼 수 있다. 이는 Yu et al (2018)에서 제시한 도시 숲을 이용한 미세먼지 저감 방안과 유사한 방식이었다.

〈그림 4-7〉 가로수 식재간격



매산로



정조로

적당한 식재간격



덕영대로



수인로

촘촘한 식재간격

대부분 도로변의 아파트 단지 옆에는 차폐역할을 위해 완충녹지로 나무가 울창하고 촘촘하게 식재되어 있었으나 신도시의 경우 나무가 1~2줄 정도로 심어져 있어 차폐역할이 약한 곳도 있어 향후 나무 식재 공간이 넓게 계획되어야 할 것이다.

〈그림 4-8〉 아파트 단지 옆의 가로수



#### 4) 가로수 앞의 밀집도

도시협곡 대기질에 영향을 미치는 인자로 앞의 밀집도가 있다. 일반적으로 여름철의 수목이 겨울철보다 활엽수가 침엽수보다 앞의 밀집도가 높다. 가로수의 앞의 밀집도가 높고 낮음에 따라 비교한 결과 가로수 앞의 밀집도가 높을수록 대기오염 저감 효과가 높은 것으로 나타났다. 적당한 식재간격과 앞의 밀집도가 높은 나무를 심는 것이 좋다고 할 수 있다.

수원시의 경우 다음 사진과 같이 앞의 밀집도가 높은 구역도 있고 낮은 구역도 있었다. 앞의 밀집도의 높고 낮음은 수종의 차이보다는 어린 나무와 성숙한 나무의 차이로, 수년 후 나무가 성숙하면 앞의 밀집도가 높아질 것으로 보인다.

〈그림 4-9〉 가로수 앞의 밀집도



중부대로



정소로

앞의 밀집도 높음



덕영대로



경수대로

앞의 밀집도 낮음

## 제3절 수원시 주요 도로별 가로수의 대기오염 영향

### 1. 매산로

수원시 주요 도로에 식재된 가로수의 대기오염물질 배출 특성과 식재된 물리적인 조건에 따른 기류확산에 의한 대기오염저감 등을 살펴보았다.

매산로는 도로가 좁고 양옆에 건물들이 있어 도시협곡이라 할 수 있으며 가로수는 은행나무이었다. 은행나무는 이산화탄소를 1년에 25.8~35.4kg을 흡수하며, 이산화질소는 0.004kg, 이산화황은 0.02kg을 흡수한다. 또한 내공해성과 내한성이 강하여 가로수로 적당하다. 매산로의 가로수는 잎이 풍성하고 대부분 건물보다 높고 적당한 식재간격을 유지하고 있어 물리적으로 기류 확산이 잘 될 것으로 보였다. 은행나무는 Yang et al. (2015)에 의한 미세먼지 제거 효율 점수에서는 14점(최고 19점, 최저 11점으로 중간 값에 해당)으로 중간 정도에 해당되었다.

〈그림 4-10〉 수원시 매산로 조사현황



### 2. 정조로

조사를 수행한 정조로 구간도 매산로와 마찬가지로 적당한 식재간격과 잎이 풍성한 버즘나무와 은행나무가 식재되어 있었다. 버즘나무는 내한성과 내공해성이 강하여 전 세계적으로 가로수로 가장 많이 이용된다. 또한 조사된 수종 중에 가장 많은 이산화탄소를 흡수(1년에

이산화탄소를 55.6kg 흡수) 하고, 이산화질소는 0.002kg/yr, 이산화황 0.006kg/yr를 흡수 하는 등의 환경정화 수준으로 알려져 있다. 그러나 오존과 미세먼지 생성에 영향을 끼치는 이소프렌을 15kg/km<sup>2</sup>/hr을 배출하기 때문에 광화학반응에 의한 2차 생성 대기오염이 유발될 수도 있다. 특히 정조로는 차량 정체가 많이 되고 주변에 높은 건물이 없어 늦여름 공기가 정체될 때 오존이나 2차유기입자 생성이 높아질 수 있다. 따라서 공기 확산을 높여 공기가 정체되는 것을 막는 것이 중요할 것으로 사료된다.

물리적 요인에 있어서는 건물보다 가로수가 높아 오염된 공기가 확산되는 데 가로수가 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 다음 사진과 같이 한 부분에 건물이 높아 가로수가 건물보다 낮은 구간이 있었으나 맞은편에 건물이 낮아 기류 확산이 잘 될 것으로 보인다. 양쪽 건물 높이가 비대칭이면 도시 협곡 내 대기오염도를 낮추는 연구 결과도 있다(주현수 외, 2006).

정조로 가로수는 아래 사진과 보듯이 일정하게 사각형으로 다듬어 놓은 구간이 있었는데 물리적인 측면에서 보면 나무는 건물보다 높아야 기류확산에 좋기 때문에 높이(나무 윗부분)까지 다듬지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다.

〈그림 4-11〉 수원시 정조로 조사현황



### 3. 수인로

수인로 부근에는 높은 건물보다는 주로 눈·밭으로 전형적인 도시지역의 특성은 없어서 가로수의 식재간격이나 잎의 밀집도, 가로수 높이가 크게 영향을 끼치는 구역은 아니다.

또한 매산로와 정조로보다는 다양한 가로수종이 식재되어 있으며, 주로 느티나무, 은행나무, 메타세쿼이아, 칠엽수, 벚나무 등이다. 느티나무는 내한성과 바람에 대한 저항력이 강하지만 내공해성이 약한편이다. 일년에 이산화탄소를 33.7kg, 이산화질소 0.29kg, 이산화황 0.4kg을 흡수하지만 이소프렌과 모노테르펜을 0.0425kg/km<sup>2</sup>/hr을 배출한다. 메타세쿼이아는 내한성이 강하고 내공해성은 중간정도이고 이산화탄소를 일년에 69.6kg 흡수한다. 또한 미세먼지를 잘 흡착하는 침엽수이다. 칠엽수는 내한성이 강하고 내공해성은 약한편이나 수향이 웅대하고 수려하여 녹음수로 좋으나 이소프렌을 0.043kg/km<sup>2</sup>/hr 배출한다.

수인로는 다양한 수종의 식재로 인해 대기오염물질 흡착, 휘발성유기화합물 배출이 서로 상쇄될 수 있으며, 도로 주변 넓은 평지로 인한 공기 확산효과가 커서 가로수의 수종이나 가로수 유무가 대기오염도에 큰 영향을 주지는 않을 것으로 판단된다. 오히려 도로 주변 눈·밭에서 배출되는 암모니아 가스와 자동차에서 배출되는 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>의 결합으로 인한 질산염, 황산염의 생성으로 인한 2차 미세먼지 생성 기여가 높을 것으로 추정된다. 따라서 가스상 대기오염물질의 흡수 능력이 큰 수종(예: 느티나무, 단풍나무류 등)을 선택하여 식재함으로써 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>를 제거하여 대기오염 개선을 기대하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 그런 면에서 느티나무의 식재는 적절하였으며, 향후 추가 식재 계획 시에는 대기오염물질 흡수율이 높은 단풍나무류를 식재하는 것을 제안할 수 있다.

〈그림 4-12〉 수원시 수인로 조사현황



#### 4. 경수대로

경수대로는 은행나무, 칠엽수, 중국단풍, 소나무 등 다양한 수종이 식재되어 있다. 소나무는 이산화탄소를 일년에 7.3kg, 이산화질소 0.005kg, 이산화황 0.02kg, 오존 3kg 흡수하고, 이소프렌을 0.079~0.189kg/km<sup>2</sup>/hr, 모노테르펜을 1.2425kg/km<sup>2</sup>/hr배출한다. 소나무는 내한성, 내공해성이 약한편이라 가로수로는 적합하지 않지만 미세먼지를 가장 많이 흡착하는 장점이 있다.

그리고 경수대로에는 소량이지만 15그루 정도 대왕참나무가 식재되어 있는데 대왕참나무는 이소프렌을 30kg/km<sup>2</sup>/hr을 배출하여 다른 나무종에 비해 많은 이소프렌을 배출하기 때문에 향후 가로수 식재 계획 시 고려해야 할 것이다.

경수대로는 주변 건물의 높이가 높고 차로의 폭이 넓어서 가로수의 물리적인 영향이 적은 곳이지만 동수원고가차도 다리 밑을 공원처럼(다음 그림 참고) 나무를 식재하였는데 도로의 온도도 낮춰주고 대기오염물질도 흡수함에 따라 좋을 것으로 보이나 봄·여름 나무가 울창해지면 그 구간은 오히려 오염된 공기가 순환되지 못하고 정체될 가능성도 있을 것이다. 중간에 식재된 쥐똥나무는 대기오염물질 흡수량 조사에는 포함되지 않았지만 키가 작은 관목으로 도로 자동차 배기관에서 나오는 대기오염물질이 보행자도로로 바로 확산되지 못하도록 하는 차폐역할을 하여 긍정적인 영향을 줄 수 있다.

〈그림 4-13〉 수원시 경수대로 조사 현황





〈그림 4-15〉 수원시 창릉대로 조사 현황



〈그림 4-16〉 수원시 덕영대로 조사 현황



## 제4절 시사점

수원시의 주요 도로변에 식재된 가로수 수종의 대기오염도에의 영향을 조사하고, 도로변에 식재된 가로수의 물리적 특성을 문헌조사 결과를 바탕으로 살펴보았다.

수원시의 주요 가로수는 느티나무, 은행나무, 왕벚나무, 메타세콰이아로 대부분 내한성, 내공해성에 강한 수종들이었다. 느티나무, 버즘나무, 단풍나무류, 소나무, 은행나무 등의 수종의 대기오염물질 흡수율, 자연적 휘발성유기화합물(VOCs) 배출량을 문헌조사를 통해 얻을 수 있었다. 그러나 VOCs 배출의 경우, 아직 가로수의 대기오염도 영향에 대한 연구가 많이 이루어져 있지 않으며 국외 자료의 경우 우리나라와 가로수 수종이 달라서 수원시의 모든 가로수에 대한 자료를 얻을 수 없었다. 하지만, 가로수 식재로 인한 물리적인 공기확산 영향 등에 대한 연구는 비교적 많이 이루어져 있었다. 따라서 주어진 자료를 중심으로 수원시 도로변 가로수의 대기오염도 영향을 분석해 본 주요 시사점은 다음과 같다.

첫째, 수원시 도로변의 대기질은 도시대기측정소보다 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도가 높았다. 따라서 이들 오염물질을 제거할 수 있도록 가로수를 식재하는 것이 바람직하다. 수원시에 식재된 가로수 중 느티나무, 단풍나무류(중국단풍, 청단풍, 홍단풍 등)의 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 흡수율이 높았으며, 미세먼지 흡착능이 높은 메타세콰이아도 식재되어 있어 대기오염도를 낮추는 데 기여할 것으로 판단되었다.

둘째, 수원시 측정자료는 없으나 관련 연구결과에 의하면 우리나라 도로변 대기질은 VOCs limited regime과 transit regime에 위치하였다. 따라서 VOCs를 줄임으로 광화학적 2차 대기오염물질 생성을 줄일 수 있는 조건이라 할 수 있다. 수원시 가로수 중 VOCs(이소프렌) 배출이 많은 가로수는 대왕참나무와 버즘나무가 있으며, 모노테르펜은 소나무에서 많이 배출된다. 연구결과에 따르면 이소프렌은 활엽수가 침엽수보다 많이 배출하고, 모노테르펜은 활엽수보다 침엽수에서 많이 배출된다고 한다. 또한 수원시 식재된 전체 가로수 중 활엽수가 44%, 침엽수가 26%로 활엽수가 더 많이 식재되어 있었다. 다만, 조사된 수원시 도로변의 가로수는 도시숲과 연결된 부분을 제외하고는 그루수가 많지 않았다. 따라서 자동차에서 배출되는 VOCs에 비해서 상대적 배출량 적을 것으로 유추되므로 가로수를 줄이거나 늘임으로 인해 VOCs 배출량 자체를 줄이기는 어려울 것으로 생각된다. 하지만 보다 정확한 판단은 도로변 VOCs 측정을 통해 할 수 있을 것이다. 향후 도시숲 조성 시는 면적당 수목 밀도가 높아지므로, VOCs 배출이 적은 수종을 주의깊게 선택하여 식재하는 것이 더 중요한 것으로 시사한다. 또한 느티나무나 메타세콰이아처럼 미세먼지 흡착능이 좋은 수종과 VOCs 배출량이 낮은 단풍나무류를 혼합하여 식재하는 것도 종합적인 대기오염도를 낮추는 데 적절

한 방법이 될 것이다.

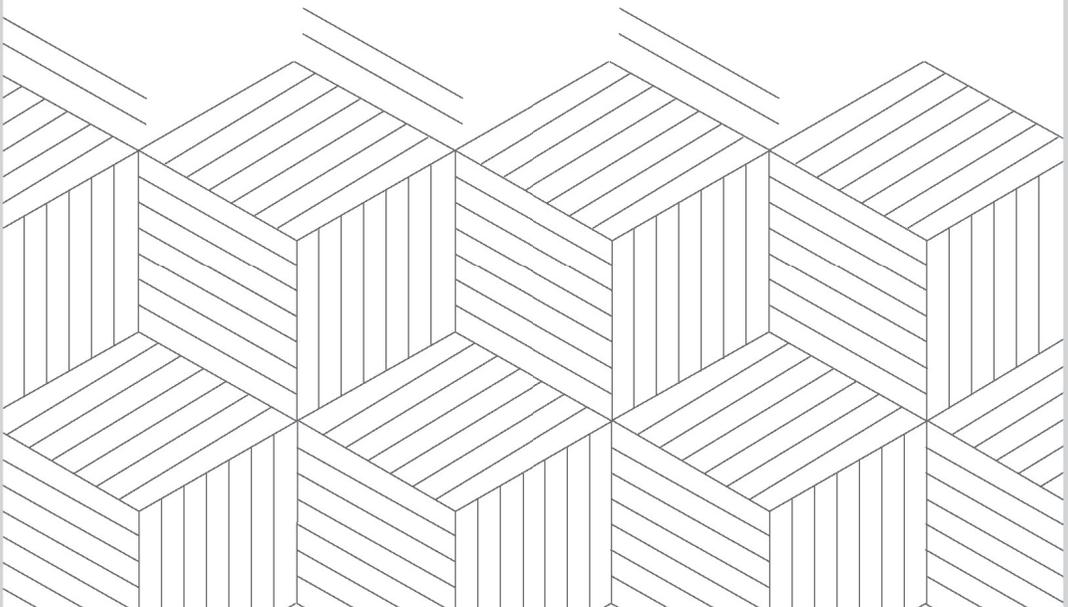
셋째, 좁은 도로인 도심협곡에서는 주변 건물높이보다 높은 나무를 식재하거나, 경관을 위해 나무줄기를 가지치기 하는 것 보다는 높은 나무가 그대로 자랄 수 있도록 관리하는 것이 도로변 대기오염도를 낮추는 데 도움이 될 것이다. 또한 도로변 인근 집단 주거지역이 위치하는 경우, 3~4줄 정도의 두께가 있는 완충녹지대를 조성하여 도로변 대기오염물질이 도심숲을 통해 제거되도록 하는 것이 바람직할 것이다. 영덕대로 일부 지역 아파트단지 인접지역을 좋은 사례로 들 수 있었다.

넷째, 본 연구에서 조사한 주요 도로 중 중부대로, 경수대로에는 키가 작은 관목(취퐁나무 등)이 식재되어 있었는데, 이들은 물리적으로 자동차 배기가스가 보행자도로로 유입되지 못하게 하는 차폐역할을 할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 잎의 증산작용으로 인한 도심 내 온도 저하, 미기상학적 난류 발생을 통해 대기오염물질의 희석을 통한 오염 저감 효과도 매우 큰 것을 알 수 있었다.

결론적으로 수원시에 식재된 가로수는 수종에 따라 가스상 및 입자상 대기오염물질을 제거하는 데 효과적이기도 하고, 휘발성유기화합물을 배출하기도 하는 등 다양한 역할을 하였다. 또한 가로수를 통한 도심 내 공기 순환도 도시 대기오염도를 낮추는 중요한 역할임을 알 수 있었다. 다만, 국내외 연구 자료의 부족으로 인해 수원시 가로수의 휘발성유기화합물 배출 현황 자료를 모두 구할 수 없어서 가로수 별 상대적 중요도를 평가할 수는 없었다.

# 제5장 결론

제1절 연구의 의의 및 한계점 보완  
제2절 정책적 제안





## 제5장 결론

### 제1절 연구의 의의 및 한계점 보완

#### 1. 연구의 의의 및 주요 결과

가로수는 대기오염물질을 흡수하기도 하지만 배출하기도 한다. 특히 가로수에서 배출되는 BVOCs 중 이소프렌은 NO<sub>2</sub>와 반응하여 오존을 생성하기도 하며, 2차 유기입자 생성에도 기여한다. 테르펜류는 NO<sub>2</sub>가 낮은 지역에서는 오존을 저감시키나 NO<sub>2</sub> 높은 도로변은 2차 유기입자를 생성한다.

따라서 수원시 도로변에 식재되어 있는 가로수를 조사하고 수종에 따른 대기오염물질, 특히 자연적 휘발성유기화합물(BVOCs)을 중심으로 배출현황을 파악하여 향후 수원시 가로수 식재 계획을 수립할 때 고려사항으로 활용하고자 하는데 연구의 의의가 있다.

수종에 따른 대기오염물질 흡수 연구 사례 조사결과 대기오염에 대한 수목의 저항성은 상록활엽수가 비교적 강하고 낙엽활엽수는 다소 약하며, 침엽수는 대체로 약한 것으로 나타났다. 미세먼지 저감효과는 침엽수가 활엽수보다 미세먼지 흡수에 효과적이고 관목보다는 교목이 우세하였다. 바늘모양의 잎이 미세먼지를 흡착할 수 있는 표면적이 넓기 때문에 미세먼지 저감율은 높으나 넓은 잎이어도 잎에 흠이 많거나 털이 많을수록 미세먼지 흡착에 효과적이므로 수목을 골고루 조성하는 것이 미세먼지 제거에 더 효과적(다양성 유지 중요)이라고 할 수 있다.

국내·외 연구 자료에 따라 수종에 따른 VOC 배출특성을 살펴보면 BVOC중 이소프렌은 주로 활엽수에서 배출되고 온도가 높고 빛이 강하면 배출속도가 빨라진다. 모노테르펜은 주로 침엽수에서 배출되고 늦은 오후부터 배출된다. 수원시 가로수 중에 가장 많은 이소프렌을 배출하는 나무는 대왕참나무와 버즘나무이며, 모노테르펜은 소나무에서 배출량이 가장 높다. 이산화탄소 흡수량은 메타세쿼이아가 이산화탄소 흡수율이 가장 높으며 이산화질소와 이산화황의 경우 단풍나무가 가장 높은 흡수율을 보이며 그 다음으로 느티나무로 나타났다. 미세먼지 흡착률은 메타세쿼이아와 소나무가 높았다. 그러나 모든 나무의 흡수율과 배출량 데이터가 없기 때문에 절대적으로 판단할 수는 없는 한계점이 있었다.

도심 내 수목의 물리적인 대기오염도 영향 조사 결과 가로수 사이가 촘촘하게 식재될 경우 오염농도가 높게 나타났다. 그리고 가로수가 없는 도로보다 있는 도로에서 오염농도 감소속도가 현저히 빠른 것으로 나타났으며, 가로수가 건물보다 높을 때, 가로수 앞의 밀집도가 높을 때 대기오염농도 감소가 빠르게 진행되었다. 도심의 대기질 개선과 관련하여 대기오염물질의 흡수속도가 높은 수목을 식재하는 것도 좋으나 도시협곡내의 대기질 개선을 위해서는 가로수 수관부의 높이, 형상 등을 적정하게 관리하여 협곡 내외부의 기류교환을 촉진시키는 것도 중요하다.

수원시 주요 도로에 식재된 가로수의 대기오염물질 배출 특성과 식재된 물리적인 조건에 따른 기류확산에 의한 대기오염저감 등을 살펴보았다.

매산로와 정조로와 같은 도시 협곡에서는 대부분이 건물보다 가로수가 높고 적당한 식재간격을 유지하고 있어 물리적으로 기류 확산이 잘 될 것으로 보인다.

정조로와 경수대로에는 이소프렌을 높게 배출하는 버즘나무와 대왕참나무가 식재되어있어 광화학반응에 의한 2차 생성 대기오염이 유발될 수도 있다. 특히 정조로는 차량 정체가 많이 되고 주변에 높은 건물이 없어 늦여름 공기가 정체될 때 오존이나 2차 유기입자 생성이 높아질 수 있다. 따라서 공기 확산을 높여 공기가 정체되는 것을 막는 것이 중요하며, 광화학반응이 활발하고 가스상 오염물질의 농도가 높은 곳에는 참나무와 버즘나무 식재를 지양하여 2차 입자 및 오존을 저감하고, 비산먼지의 발생이 많은 곳에서는 메타세쿼이아, 소나무와 같은 침엽수를 식재하여 부유된 미세먼지를 저감할 수 있을 것이다.

수인로는 다양한 수종의 식재로 인해 대기오염물질 흡착, 휘발성유기화합물 배출이 서로 상쇄될 수 있으며, 도로 주변 넓은 평지로 인한 공기 확산효과가 커서 가로수의 수종이나 가로수 유무가 대기오염도에 큰 영향을 주지는 않을 것으로 판단된다. 오히려 도로 주변 눈밭에서 배출되는 암모니아 가스와 자동차에서 배출되는 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>의 결합으로 인한 질산염, 황산염의 생성으로 인한 2차 미세먼지 생성 기여가 높을 것으로 추정된다. 따라서 가스상 대기오염물질의 흡수 능력이 큰 수종(예: 느티나무, 단풍나무류 등)을 선택하여 식재함으로써 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>를 제거하여 대기오염 개선을 기대하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 그런 면에서 느티나무의 식재는 적절하였으며, 향후 추가 식재 계획 시에는 대기오염물질 흡수율이 높은 단풍나무류를 식재하는 것을 제안할 수 있다.

도로에 식재된 쥐똥나무 등의 관목은 자동차 배기관에서 나오는 대기오염물질이 보행자도로로 바로 확산되지 못하도록 하는 차폐역할을 할 수 있기 때문에 긍정적인 영향을 줄 수 있다.

경부·중부·창릉·덕영대로는 도로가 넓고 대부분 건물들이 높아 가로수가 건물보다 아

도 공기확산이 잘 되나 증부대로와 창용대로의 경우 차로폭은 넓지만 보행자도로 폭이 좁은 곳이 곳곳에 있어 가로수로 인한 대기오염물질의 흡수 및 흡착, 공기 확산 유도가 중요할 것으로 보인다. 따라서 향후 추가 식재계획 수립 시 미세먼지 흡착능이 좋으며 키가 큰 메타세쿼이아를 고려하는 것도 제안할 수 있다.

## 2. 연구의 한계점 및 보완

대기오염물질 흡수율과 자연적 휘발성유기화합물(VOCs) 배출량은 문헌조사를 통해 얻을 수 있었다. 그러나 VOCs 배출의 경우, 가로수의 대기오염도 영향에 대한 연구가 많이 이루어져 있지 않으며 국외 자료의 경우 우리나라와 가로수 수종이 달라서 수원시의 모든 가로수에 대한 자료를 얻을 수 없었다.

따라서 모든 나무의 흡수율과 배출량 데이터가 없기 때문에 절대적으로 판단할 수는 없어도심 내 가로수 식재의 물리적 특성이 대기오염도에 기여하는 바가 상대적으로 커서 물리적 특성 조사 및 분석을 통해 연구내용을 보완하였다.

## 제2절 정책적 제안

수원시의 주요 도로변에 식재된 가로수 수종의 대기오염도에의 영향을 조사하고, 도로변에 식재된 가로수의 물리적 특성을 문헌조사 결과를 바탕으로 수원시 가로수의 대기오염도 영향을 분석하여 향후 가로수 식재 시 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

첫째, 대기오염물질 제거율 높은 가로수 선정

수원시 도로변의 대기질은 도시대기측정소보다 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도가 높았다. 따라서 이들 오염물질을 제거할 수 있도록 가로수를 식재하는 것이 바람직하다. 수원시에 식재된 가로수 중 느티나무, 단풍나무류(중국단풍, 청단풍, 홍단풍 등)의 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 흡수율이 높았으며, 미세먼지 흡착능이 높은 메타세쿼이아도 식재되어 있어 대기오염도를 낮추는 데 기여할 것으로 판단되었다.

둘째, 차량 많은 도로에 VOCs 배출이 적은 수종 선정

수원시 측정 자료는 없으나 관련 연구결과에 의하면 우리나라 도로변 대기질은 VOCs limited regime과 transit regime에 위치하였다. 따라서 VOCs를 줄임으로 광화학적 2차 대기오염물질 생성을 줄일 수 있는 조건이라 할 수 있다. 수원시 가로수 중 VOCs(이소프렌) 배출이 많은 가로수는 대왕참나무와 버즘나무가 있으며, 모노테르펜은 소나무에서 많이 배출된다. 다만, 조사된 수원시 도로변의 가로수는 도시숲과 연결된 부분을 제외하고는 그루수가 그다지 많지 않았다. 따라서 자동차에서 배출되는 VOCs에 비해서 상대적인 배출량 이적은 것으로 유추되므로 가로수를 줄이거나 늘임으로 인해 VOCs 배출량 자체를 줄이기는 어려울 것으로 생각할 수 있다. 하지만 보다 정확한 판단은 도로변 VOCs 측정을 통해 할 수 있을 것이다.

셋째, 혼합 식재 및 특정 지역 맞춤형 식재

향후 도시숲 조성 시 면적당 수목 밀도가 높아지므로, VOCs 배출이 적은 수종을 주의 깊게 선택하여 식재하는 것이 더 중요할 것이다. 또한 느티나무나 메타세쿼이아처럼 미세먼지 흡착능이 좋은 수종은 비산먼지 발생지역 (예: 운동장 주변, 트럭 진출입로 주변 등)에 식재하면 효과가 있을 것이라 판단된다. 또한 VOCs 배출량이 낮거나 가스상 오염물질 흡수능이 좋은 느티나무, 단풍나무류는 차량 정체구간에 식재하는 것도 제안한다. 그러나 일반적인 가로수로의 선정이거나, 또는 특정 오염원에 대응하는 수종 선정이 어려울 경우, 종합적으로는 느티나무나 메타세쿼이아처럼 미세먼지 흡착능이 좋은 수종과 VOCs 배출량이 낮은 단풍나무류를 혼합하여 식재하는 것도 대기오염도를 낮추는 데 적절한 방법이 될 것이다.

넷째, 소·중로 가로수 선정 시 물리적인 조건 고려

좁은 도로인 도심협곡에서는 주변 건물높이보다 높은 나무를 식재하거나, 높은 나무가 그대로 자랄 수 있도록 관리(수직방향 가지치기 지양)하는 것이 필요하다. 또한 도로변 인근 집단 주거지역이 위치하는 경우, 가로수인접 도시숲(완충녹지)을 조성하여 도로변 대기오염 물질이 도시숲을 통해 제거되도록 하는 것이 바람직할 것이다. 또한 키가 작은 관목(예: 쥐똥나무)을 식재하여 물리적으로 자동차 배기가스가 보행자 도로로 유입되지 못하게 하는 차폐 역할을 하도록 하는 것도 바람직하다.

다섯째, 기후변화 대응을 위한 가로수 식재

가로수 식재가 많으면 많을수록 증산작용으로 인한 도심 내 온도 저하, 미기상학적 난류 발생을 통한 희석과 열섬 완화효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서 분석한 수목의 대기오염물질 흡수 및 배출 특성과 물리적인 영향을 참고하면, 산업단지 주변과 주거지역, 차량이 많은 도로변 등의 목적에 맞는 가로수 수종 선정에 활용할 수 있을 것이다.



## | 참고문헌 |

## 〈국문 자료〉

- 김신도, 이경빈, 이민주, 이경재, 김태식. 2008. 서울시내 도시숲(산림)이 대기오염에 미치는 영향, 한국대기환경학회 2008 추계학술대회 논문집 p. 281-283
- 김조천, 홍지형, 강창희, 선우영, 김기준, 임준호. 2003. 침엽수로부터 발생하는 방향성 테르펜의 배출속도 비교, 한국대기환경학회지, 20(2), 175~183
- 김형철. 2013. 제주지역의 식물기원 VOCs배출 특성과 오존 생성에 미치는 영향 연구, 제주대학교 국립환경과학원. 2014. 자연적 휘발성 유기화합물이 오존 및 유기에어로졸에 미치는 영향연구(IV)
- 박은진, 좌승희. 2009. 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안, 경기연구원 산림청. 2018, 한·중 도시숲과 미세먼지 대응 심포지엄 자료집
- 안현진, 한지현, 이미혜, 강은하. 2015. 수원시 대기 중 오존과 질소산화물의 장기변동 특성 (1991~2012), 한국대기환경학회 Volume 31, Issue 4, pp.378-384
- 이영규, 최원실, 조민석, 김주완, 김재현, 박미진. 2014. 잣나무 잎의 천연VOC 방산 특성, 한국목재 공학 학술발표논문집, 제2014권 p. 192~193
- 이용기. 2012. 자연발생 VOC(Volatile Organic Compound)의 실태와 지구환경에 미치는 영향, 코네티컬리포트
- 임용재, 2005. 국내 주요 낙엽수에서 발생하는 이소프렌 배출속도 비교에 관한 연구, 건국대학교 임준호. 2004. 국내 주요 침엽수의 자연 VOC 배출속도 비교에 관한 연구, 건국대학교
- 지동영, 김소영, 한진석. (2002). 소나무와 잣나무에서 배출되는 주요 테르펜의 배출특성에 관한 비교 연구," 한국대기환경학회지, 18(6), 515~525
- 주현수, 김석철, 최순심, 배수영. 2005. 녹지의 대기환경영향에 관한 연구-도심지역에서의 녹지와 국지적 대기환경영향과의 상관관계를 중심으로, 한국환경정책평가연구원
- 최명훈. 2004. 자연에서 배출되는 VOC가 오존 생성에 미치는 영향에 관한 연구," 강원대학교 함심희, 김두현. 2009, 표준화 지수를 이용한 환경수목의 오존 내성 결정, 한국농림기상학회지, 제11권 제1호. pp. 3~12

## 〈영문 자료〉

- Peñuelas, J., and Llusà, J.,(2003). "BVOCs: plant defense against climate warming?,"Trends in plant science,8(3), 105~109
- Nunes, T. V., and Pio, C. A.,(2001). "Emission of volatile organic compounds from Portuguese eucalyptus forests,"Chemosphere-Global Change Science,3, 239~248

- Owen, S. M., Boissard, C., and Hewitt, C. N.,(2001). "Volatile organic compounds(VOCs) emitted from 40 Mediterranean plant species: VOC speciation and extrapolation to habitate scale," *Atmos. Environ.*, 35, 5393~5409
- Cooke, K. M., Hassoun, S., Saunders, S. M. and Pilling, M.J., "Identification and quantification of volatile organic compounds found in a eucalyptus forest during FIELDVOC'94 in portugal," *Chemosphere-Global change science*, 3, 249~257(2001).
- Riba, M. L., Tathy, J. P., Tsiropoulos, N., Monsarrat, B., and Torres L., "Diurnal variation in the concentration  $\alpha$ -pinene, $\beta$ -pinenein the Landes forest(france)," *Atmos. Environ.*, 21(1), 191~193(1987).
- Harley, P. C., and Monson, R. K., "Ecological and evolutionary aspects of isoprene emission from plants," *Oecologia*, 118, 109~123(1999).
- Alex, B., Guenther, A., Patric, R., Zimmerman, P.,and Peter, C., "Isoprene and monoterpene emission rate variability : model evaluations and sensitivity analysis," *J. Geophys. Res.*, 98(D7), 12,609~12,617(1993).
- Tarvainen, V., Hakola, H., Hellén, H., Bäck, J., Hari ,P.,and Kulmala, M., "Temperature and light dependence of the VOC emissions of scotspine," *Atmos. chem. physics*, 5, 989~998(2005).
- Kesselmeier, J., Bode, K., Schafer, L., Schemeske, G., Wolf, A., Brancaleoni, E., ecinato, A, Ciccioli, P., Fratton, M., Dutaur, L., Fit, L., Simon, V., and Torres, L., "Simultaneous field measurements of terpene and isoprene emissions from two dominant mediterranean oak species in relation to a north americal species," *Atmos. Environ.* 32(11),1947~1953(1998).
- Guenther, A., Zimmerman, P., and Wildermuth, M., "Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S woodland landscapes," *Atmos. Environ.*, 28, 1197~1210(1994).
- Hsieh, C. C., Chang, K. H., and Wang, L. T., "Ambient concentrations of biogenic volatile organic compounds in southern taiwan," *Chemosphere*, 39(5), 731~744(1999).
- Jun Yang, Yamin Chang, Pengbo Yan.(2014), Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution, *Atmospheric Pollution Research* 6(2015) 267~277.
- Crutzen, P.J., Delany, A.C., Greenberg, J. Haagenson, P., Heidt, L. Lueb, R., Pollock, W., Seiler, W., Wartburg, A., and Zimmerman, P. 1985. Tropospheric chemical

- composition measurements in Brazil during the dry season. *J. Atmos. Chem.* 2: 233-256
- Jacob, D.J. and Wofsy, S.C. 1988. Photochemistry of biogenic emissions over the Amazon forest. *J. Geophys. Res.* 93(D2): 1477-1486.
- E. Kang<sup>1</sup>, M. J. Root<sup>1</sup>, D. W. Toohey<sup>2</sup>, and W. H. Brune<sup>1</sup>, Introducing the concept of Potential Aerosol Mass (PAM) *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5727-5744, 2007
- Models in Environmental Regulatory Decision Making, p 22, The National Academies Press, 2007



# Abstract



## Preliminary Study on the Emission of Photochemical Air Pollutants from the Street Trees in Suwon City

This is a preliminary study to understand the effect of street trees on the roadside air pollution in Suwon City. We examined the species of trees along the street in major roads and physical planting condition and reviewed the characteristics of air pollutants adsorption and the emission of photochemical air pollutants such as Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) from street trees. Especially 8 sections of the roads were selected for case studies and qualitatively analyzed the effect of street trees on the roadside local air pollution.

In Suwon city, Sawleaf Zelkova (*Zelkova serrata* Makino), Ginkgo Tree (*Ginkgo biloba* L.), Yoshino Cherry (*Prunus yedoensis* Matsum.), and Dawn Redwood (*Metasequoia glyptostroboides*) were dominantly planted along the streets (up to 59.6% of total street trees). The examined 8 sections had ginkgo Ginkgo Tree (*Ginkgo biloba* L.)(48%), Sawleaf Zelkova (*Zelkova serrata* Makino)(15%), Japanese Horse Chestnut (*Aesculus turbinata* Blume)(11%), Trident Maple (*Acer buergerianum* Miq.)(7%), and minorly American Plane Tree (*Platanus occidentalis* L.), Yoshino Cherry (*Prunus yedoensis* Matsum.), Japanese Red Pine (*Pinus densiflora*), Chinese Scholar Tree (*Sophora japonica*), Dawn Redwood (*Metasequoia glyptostroboides*), and pin oak (*Quercus palustris*). Among the street trees in Suwon city, Pin Oak (*Quercus palustris*) and American Plane Tree (*Platanus occidentalis* L.) emits isoprene the most and Japanese Red Pine emits monoterpenes the most. Dawn Redwood absorbs CO<sub>2</sub> the most, but Japanese Maple (*Acer palmatum* Thunb.) absorbs NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> the most. In addition, Dawn Redwood and Japanese Red Pine adsorbs PM<sub>2.5</sub> the most. But, note that the quantitative comparison of the air pollutants emission and removal among the

trees were inappropriate due to the limitation of that the reviewed data were collected from dispersed references, not from the direct measurements or from a single reference with the same measurement technique. Review about the physical condition of the street trees on the examined sections informed that the air circulation would be more efficient when trees were taller than the nearby buildings (e.g. Jeongjo-ro Road, Maesan-ro Road). For removal of both gaseous and particulate air pollutants, various species of trees would be recommended (e.g. Kyeongsu-daero Road, Suin-ro Road). When the sidewalks were narrow, the physical air circulation from street trees were beneficial to reduce the air pollution exposure for pedestrians (Jungbu-daero Road, Changyong-daero Road). In addition, on the street canyons with vehicular congestions, the trees less emitting BVOCs were recommended to inhibit photochemical reaction to form secondary organic aerosols and ozone (e.g. Kyeongsu-daero Road, Jeongjo-ro Road).

Conclusively, we suggest the following suggestions should be considered to plant and grow street trees. First, the trees with high removal rate of air pollutants such as Trident Maple, Japanese Maple, Dawn Redwood are recommended as street trees. Second, the trees with less emitting BVOCs are recommended especially in highly congested roads. Third, multiple planting of various species of trees are recommended to reduce overall air pollution if specific species were not able to be chosen for specific condition. Fourth, physical planting condition should be seriously considered especially for street canyons and narrow sidewalks. Fifth, quantitatively more street trees were strongly recommended in the urban areas to reduce the heat and air pollution island effect by decreasing the urban atmospheric temperature and inducing the microphysical turbulence for the air pollution dilution.

Keyword : BVOCs(Biogenic Volatile Organic Compounds), Street trees, Roadside air pollution, Street canyons, Photochemical Air Pollutants



| 저자 약력 |

강은하

이학박사

수원시정연구원 안전환경연구실 연구위원(현)

E-mail : ehkang09@suwon.re.kr

주요 논문 및 보고서

「수원시 스마트 환경센서 적용 방안」 (2017, 수원시정연구원)

「ANN을 사용한 수원시 미세먼지 농도 예측」 (2017, 수원시정연구원)

「수원시 대기오염물질 배출현황 분석」 (2017, 수원시정연구원)



