

저탄소 녹색도시 구축 (기후변화예측과 대응체계 구축)

성지홍, 전용성, 이명진, 오영진, 최종규, 정일진, 전미희, 방준상, 오영태, 방기인, 심재덕, 김용희

인천보건환경연구원 환경조사과

Constructing Low-Carbon Green City (Prediction of Climate Change and response System)

Ji-Hong Seong, Yong-Seong Jun, Myung-Jin Lee, Young-Jin Oh, Jong-Kyu Choi, Il-Jin Jung,
Mi-Hee Jeon, Joon-Sang Bang, Young-Tae Oh, Ki-In Bang, Jae-Duck Shim, Yong-Hee Kim

Division of Environment Research, Incheon Institute of Public Health and Environment

ABSTRACT

Based on the data obtained from Ambient air quality monitoring stations in incheon area, We monitored the pattern of green house gases such as carbon dioxide(CO₂) and methane(CH₄) in 2010~2012. In order to find out the long range transport source of green hose gases, HYSPLIT-4(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) back trajectory model provided by US NOAA/ARL was used. This study was carried out to evaluate reduction capability of Green house Gas such as carbon dioxide(CO₂) by plants and trees in incheon area.

The average concentration of carbon dioxide(CO₂) at Songhae air quality monitoring station in 2012 was 400.8 ± 12.7 ppm, which was sightly higher than that of korea global atmosphere watch center(400.2 ppm) located in anmyeon-do. Seasonal variation of carbon dioxide showed the highest winter(401.8 ± 12.6 ppm) and the lowest in summer(389.2 ± 17.0 ppm). Hourly pattern showed peak at 7:00 AM(402.4 ± 15.3 ppm), showed the lowest at 5:00 PM(389.7 ± 13.6 ppm) in Songhae station. The average concentration of methane(CH₄) in Songhae station was 1.941 ± 0.12 ppm, which was slightly higher than that of korea global atmosphere watch center(1.938 ppm) in anmyeon-do. Through analyzing HYSPLIT-4 model for the period of 72 hours at the height of 500m, we could find out that the air currents from south-west, west, north-west direction had most frequent and serious effect on the level of Green House Gases in incheon area.

The total absorption volume of carbon dioxide(CO₂) by plants and trees in incheon area in 2013 was estimated as 9,090.6ton CO₂/year. There were various absorption results of carbon dioxide(CO₂) depending on the types of green area and plants&trees. The neighborhood park showed the highest absorption volume(5,288ton CO₂/year). Roadside trees were estimated to have absorption volume of 6,982.2ton CO₂/year, and tulip trees showed highest absorption volume(66.3kg CO₂/tree-year) among trees. The total volume of carbon storage by plants and trees in green area of incheon($24,281,000\text{m}^2$) was estimated as 30,231ton C, and roadside trees showed the carbon storage of 46,671ton C. The total absorption volume of air pollutants such as carbon dioxide, sulfur dioxide, nitrogen dioxide by plants and trees in green area of incheon, roadside trees, and forest trees were estimated as 269,781ton, 116 ton, and 113 ton respectively, which can be converted into the economic value of about 21.4 million dollars.

Key Words : Green house Gas, Carbon dioxide, methane, HYSPLIT, Plants, Tree, Carbon storage

1. 서론

산업화로 인해 20세기 이후 화석연료 사용 증가로 대기 중 온실가스 농도가 증가하고 전 세계 평균기온과 해수면의 상승 등이 관측되고 있다. IPCC 제4차 평가보고서에 따르면 인위적 온실가스 배출량은 1970년 대비 2004년 약 70% 증가하였으며, 전 세계 평균기온이 지난 100년간 0.74℃ 상승하고 해수면은 1961~ 2003년간 매년 평균 1.8mm 씩 상승하였다.

지자체별로 기후변화대응을 위한 중요한 정책 중 하나로 녹지 확충 및 수목 식재 등의 사업을 전개하고 있으나 그 효과에 대한 평가나 기후변화 대응을 위한 효과적인 도시녹지의 계획과 관리에 대한 논의와 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 다음과 같은 내용을 포함하여 수행하고자 하였다. 첫째, 인천지역 온실가스 농도와 대기오염물질, 기상조건간의 상관

성을 분석하여 향후 인천지역의 기후변화 적응 정책 및 온실가스 관리 정책 수립에 있어 기초자료를 제공하는데 있다. 둘째, 도시녹지에 의한 이산화탄소를 흡수하는 효과를 산정하여 대기정화 효과를 분석하며, 기후변화 대응전략으로서 도시녹지의 기능적 중요성을 파악하고 이산화탄소 흡수를 포함한 탄소저장량의 지속적인 증진방안을 제시하고자 한다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 기후변화물질 모니터링

2.1.1. 연구대상

관측지점은 이산화탄소 측정소 7개소(송해, 고잔, 계산, 동춘, 연희, 구월, 부평역측정소)와 메탄 측정소 3개소(송해, 연희, 고잔측정소)로 구성되어 있으며, 2013년에 신규 설치된 측정소는 본 연구에서 제외하였다(CO₂ : 계산, 구월, CH₄ : 고잔).

| 측정소 | 설치년도 | | 용도구분 | 측정항목 | |
|-----|-----------------|-----------------|------|-----------------------------------|--|
| | CO ₂ | CH ₄ | | | |
| 계산 | 2013 | - | 주거 | CO ₂ | |
| 고잔 | 2009 | 2013 | 공업 | CO ₂ , CH ₄ | |
| 송해 | 2009 | 2010 | 농업 | CO ₂ , CH ₄ | |
| 동춘 | 2008 | - | 주거 | CO ₂ | |
| 연희 | 2011 | 2011 | 상업 | CO ₂ , CH ₄ | |
| 구월 | 2013 | - | 주거 | CO ₂ | |
| 부평역 | 2010 | - | 도로 | CO ₂ | |

<그림 1> 기후변화물질 상시측정망 현황

2.1.2. 연구방법

본 연구는 상기 측정소에서 2010년부터 2012년까지 측정된 온실가스 시간평균농도를 이용하여 연도별, 계절별, 요일별, 시간대별 추이자료를 대상으로 하였으며, 측정소에 설치된 대기오염 측정장비(SO₂, NO₂, CO, O₃, PM10, PM2.5) 및 기상장비(풍향, 풍속, 온도, 습도 등) 측정 자료와 비교분석하였다.

또한 인천기상대에서 기록된 기상 현상별로 온실가스 농도를 구하여 기상여건에 따른 변화를 살펴보았으며, 송해 측정소의 경우에는 고농도 이산화탄소 농도가 측정된 날짜의 기류를 역으로 추적하여 인천지역에 영향을 미치는 영향인자를 분석하였다.

2.2. 수목을 이용한 기후변화물질 감축방안

2.2.1. 조사대상

1) 도시공원

인천시 도시공원의 종류별 현황을 파악하여 그 중 면적비율로 전체의 93.1%를 차지하는 도시자연공원(59.9%), 근린공원(29.8%), 어린이공원(3.8%)

을 대상으로 종류별로 조사대상 공원을 선정하였다.

〈표 1〉 인천광역시 도시공원 현황

(단위 : 천 m²)

| 구분 | 총계 | 도시자연 공원 | 근린 공원 | 어린이 공원 | 묘지 공원 | 체육 공원 | 소공원 |
|------|--------|------------|----------|-----------|----------|----------|------|
| 면적 | 26,607 | 15,845 | 7,917 | 1,016 | 1,669 | 142 | 18 |
| 개소 | 473 | 1 | 101 | 355 | 1 | 7 | 8 |
| 면적비율 | 100% | 59.6% | 29.8% | 3.8% | 6.3% | 0.5% | 0.1% |

※ 조성 완료된 공원, 2012년 12월 기준(2012년 환경백서)

〈표 2〉 조사대상 도시공원

| 명 칭 | 분 류 | 명 칭 | 분 류 |
|-------|--------|--------|-------|
| 인천대공원 | 도시자연공원 | 소래습지공원 | 습지공원 |
| 해돋이공원 | 근린공원 | 중앙공원 | 근린공원 |
| 부평공원 | 근린공원 | 건지공원 | 어린이공원 |

2) 도로변 가로수

인천시 도로변에 식재되어 있는 가로수의 총 수량은 188,422본(2012.12.31 기준)으로 식재거리는 955.13 km이며 수종은 34종이고, 노선 수는 622개 이다(인천광역시, 2012).

수종별 구성비는 은행나무(24.93%), 느티나무(18.17%), 뽕나무(16.31%), 버즘나무(9.02%), 이팝나무(7.79%), 메타세퀘이아(7.13%), 중국단풍(4.29%), 튜립나무(2.41%), 해송(2.40%), 회화나무(1.19%) 등의 10종이 93.64%로 차지하였다.

전체 수목의 93.64%를 차지하는 10종을 선정하였으며, 각 수종별로 구·군에 고르게 분포하도록 61개 노선을 선정하였다.

3) 산림

인천시 산림에서 탄소저장량과 이산화탄소흡수량은 국립산림과학원(2010년)의 방법에 따라 2006~2010년 임업통계자료의 임목축적량으로부터 산정하였다.

2.2.1. 조사방법

본 연구는 행정구역상 인천광역시 내에 인위적

으로 조성된 다양한 형태의 도시녹지를 대상으로 하며, 이산화탄소의 흡수량을 산정하고 탄소흡수원 확대를 위한 방안을 제시하고자 하는 것으로 다음의 내용을 포함한다.

첫째, 도시녹지의 수목 및 가로수, 산림에 의한 바이오매스와 탄소저장량을 산정하였다. 둘째, 도시녹지와 가로수에 의한 연간 이산화탄소흡수량과 식재된 수목의 생태환경적응도를 평가하였다. 셋째, 도시녹지에 의한 대기정화효과 및 경제적 가치를 계산하였다. 넷째, 기후변화 대응을 위한 도시녹지 관리 방안 및 탄소흡수원 확대를 위한 정책 방향을 제안하였다.

3. 조사 결과

3.1. 기후변화물질 모니터링

3.1.1. 이산화탄소(CO₂)

1) 시계열 분석결과

각 측정소의 연평균 농도는 송해 측정소의 경우 2010년 394.3±16.5(n=8,695)ppm, 2011년 395.3±13.5(n=6,898)ppm, 2012년 400.8±12.7 (n=8,167)ppm으로 3년 동안 6.5 ppm(1.65%) 증가하였고, 국

가배경농도(안면도, 2012년 400.2ppm)보다 0.15% 높게 나타나, 그 차이가 크지 않았다. 연희 측정소는 2012년에 감소하는 경향을 보였으며, 전년도에 비해 2012년 이산화탄소 농도 450.4 ± 25.5 (n=8,692) ppm으로 전년에 비해 3.5% 감소하는 추세를 보였으나, 인천 지역배경농도인 송해 측정소의 2012년 400.8 ± 12.7 (n=8,167)ppm보다 12.38% 높게 조사되었다. 고잔 측정소는 2010년 398.8 ± 25.6 (n=8,616)ppm, 2011년 430.2 ± 25.2 (n=8,459)ppm, 2012년 431.6 ± 27.7 (n=8,634)ppm으로 3년 동안 32.8ppm(8.22%) 증가하는 추세로, 국가

배경농도보다 7.85% 높게 조사되었다. 동춘 측정소는 2010년 430.7 ± 74.5 (n=8,573)ppm, 2011년 427.1 ± 82.4 (n=7,896)ppm, 2012년 418.9 ± 44.5 (n=8,640)ppm으로 감소 추세를 나타냈고, 전년도에 비해 8.2ppm (1.96%) 감소하였으나, 국가배경농도에 비해 4.66% 높게 관측되었다. 부평역 측정소는 2010년 460.2 ± 29.2 (n=4,844)ppm, 2011년 471.0 ± 23.9 (n=8,661)ppm, 2012년 477.0 ± 26.6 (n=8,624)ppm으로 3년 동안 16.8ppm(3.65%) 증가 추세로, 국가배경농도와 비교 시 19.20% 높게 나타났다.

<표 3> 연도별 이산화탄소(CO₂) 측정농도 비교

(단위 : ppm)

| 연도 | Mauna Loa* | Ryori* | 안면도* | 인천 | | | | |
|------|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 송해 | 연희 | 고잔 | 동춘 | 부평역 |
| 2010 | 389.9 | 393.5 | 394.5 | 394.3 | - | 398.8 | 430.7 | 460.2 |
| 2011 | 391.6 | 394.4 | 395.7 | 395.3 | 466.0 | 430.2 | 427.1 | 471.0 |
| 2012 | 393.8 | 397.2 | 400.2 | 400.8 | 450.4 | 431.6 | 418.9 | 477.0 |

주) *는 세계온실가스자료센터(WDCGG : World Data Center for Greenhouse Gases)에서 인용

계절별로는 송해 측정소의 경우 광합성이 활발한 여름철이 389.2 ± 17.0 (n=4,339)ppm으로 가장 낮았고, 일조량이 적고 화석연료의 사용이 많은 겨울철에 401.8 ± 12.6 (n=6,403)ppm으로 가장 높았다. 연희 측정소는 여름철에 최저농도(438.0 ± 18.9 ppm), 겨울철에 최고농도(485.2 ± 51.5 ppm)를 나타냈다. 고잔·동춘·부평역 측정소는 여름철에 가장 낮았고, 겨울철에 최고 농도를 나타냈다.

요일별로는 송해·연희·고잔 측정소의 경우 수·목요일에 가장 높은 농도를 보였고, 동춘 측정소는 화요일에, 부평역 측정소는 금요일에 최고농도를 나타냈으며, 측정소들(5개소)은 일요일에 최저농도로 조사되었다. 시간대별로는 송해 측정소의 경우 최고농도(402.4 ± 15.3 (n=1,025)ppm)는 07시에, 최저농도(389.7 ± 13.6 (n=944) ppm)는 17시로 나타났다. 연희 측정소는 최고농도(478.1 ± 45.7 (n=723)ppm)은 10시, 최저농도(449.2 ± 34.8 (n=717)ppm)는 18시로 나타났다. 송해 측정소의 경우 06시~07시 증가는 아침 취사 및 난방에 의한 영향으로 판단되며, 연희 측정소의 경우 08~10시 증가는 교통량 정체에 의한 영향을 주로 받는 것으로 추정되고, 모두

17~18시에 최저농도를 보였다. 고잔 측정소, 동춘 측정소, 부평역 측정소는 가정 및 도로 교통 활동도가 높은 08시~09시에 높은 농도를 보였고, 오후 17시~18시에 최저농도를 보이다가 다시 상승하는 경향을 나타내고 있다.

2) 기상인자별 이산화탄소의 특성 평가

기상인자와의 관계를 살펴보면, 상대습도는 송해 측정소의 경우 60%(394.3 ± 12.0 ppm)이상부터 증가, 고잔 측정소는 60%(422.0 ± 32.5 ppm)까지 증가하다가 구간별 농도 변화 없이 관측되는 데, 이는 상대습도 40~60%의 일반적인 기상에서 광합성이 가장 활발하고, 60% 이상의 습도에서는 박무·연무·흐림과 같은 광합성에 불리한 일기가 형성됨에 따라 이산화탄소 농도가 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다. 연희 측정소의 경우 상대습도 50%까지 증가하다가 60% 이상부터 다소 감소 추세, 동춘 측정소는 구간별로 농도 차이를 보이지 않았다.

송해·연희 측정소는 0℃ 이후, 고잔·동춘 측정소는 5℃ 이후부터 기온이 증가할수록 이산화탄소의 농도는 낮아졌는데, 이는 기온이 높은 하절기

에 식물의 활발한 식물의 광합성작용이 나타난 결과이다. 기온이 0℃ 이하 일 때는 감소하는 경향을 나타냈는데, 이는 저온이 낙엽이나 목재와 같은 유기물의 분해속도를 감소시켜 이산화탄소 발생이 감소되어 나타나는 특성으로 추정할 수 있다.

풍향에 의한 이산화탄소 농도는 송해 측정소의 경우 측정소 북서방향에 위치한 주택의 난방 및 취사의 영향으로 북, 북서방향 및 무풍 시에 농도가 증가한 것으로 판단된다. 연희 측정소의 경우 주로 북풍 및 무풍 구간에서, 고잔 측정소는 북, 북북서, 무풍에서, 동춘 측정소는 북풍, 무풍에서 고농도로 관측되었다. 측정소 모두 풍속의 증가에 따른 이산화탄소 농도는 전체적으로 감소하는 경향을 보였으며, 무풍 및 풍속 1 m/s에서 고농도를 보였다. 측정소 모두 일사량이 증가함에 따라 CO₂ 농도가 감소하는 경향을 나타냈는데, 이는 일사량이 식물의 광합성에 영향을 주기 때문에 반비례하는 것으로 판단된다. 측정소 4개소는 일기현상별 이산화탄소 농도는 박무, 연무, 안개 등 대기 정체일 때 고농도를 나타내었으며, 시정거리가 증

가할수록 이산화탄소의 농도는 지속적으로 감소하는 것으로 조사되었다.

3.1.2. 메탄(CH₄)

1) 시계열 분석결과

연도별 각 측정소의 연평균 메탄 농도는 송해 측정소의 경우 2010년 $2.032 \pm 0.254(n=4,838)$ ppm, 2011년 $1.933 \pm 0.163(n=8,090)$ ppm, 2012년 $1.941 \pm 0.117(n=8,442)$ ppm으로, 2년(2011~2012) 동안 8ppb (0.4%) 증가하였고, 국가배경농도(안면도, 2012년 1.938ppm)와 비교 시 0.3% 높게 나타났다. 연희 측정소는 이산화탄소와 마찬가지로 2012년에 다소 감소하는 경향을 나타냈으며, 2011년 $1.940 \pm 0.436(n=8,526)$ ppm에 비해 2012년 메탄 농도 $1.930 \pm 0.196(n=8,557)$ ppm으로 전년도에 비해 0.5% 감소하는 것으로 조사되었다. 인천 지역배경농도인 송해 측정소의 2012년 $1.941 \pm 0.117(n=8,442)$ ppm에 비해 연희 측정소는 0.6% 낮게 나타났으며, 국가배경농도보다 0.4% 낮게 기록되었다.

<표 4> 연도별 메탄(CH₄) 측정농도 비교

(단위 : ppm)

| 연도 | Mauna Loa* | Ryori* | 안면도* | 인천 | |
|------|------------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | 송해 | 연희 |
| 2010 | 1.817 | 1.882 | 1.914 | 2.032 | - |
| 2011 | 1.818 | 1.885 | 1.929 | 1.933 | 1.940 |
| 2012 | 1.826 | 1.886 | 1.938 | 1.941 | 1.930 |

주) 2010년 송해측정소 통계는 2010년 6월부터 12월까지의 측정결과임

주) *는 세계온실가스자료센터(WDCGG : World Data Center for Greenhouse Gases)에서 인용

계절별 평균 메탄 농도는 송해 측정소의 경우 겨울철에 $1.986 \pm 0.100(n=4,964)$ ppm으로 가장 높았고, 다음으로 여름철이 $1.983 \pm 0.253(n=5,932)$ ppm으로 높았다. 계절별 농도는 겨울>여름>가을>봄 순으로 높게 나타났다. 메탄은 일반적으로 HO 라디칼이 활발히 생성되는 여름철에 농도가 낮아지는데, 강화 송해의 경우 쌀농사 등의 농업이 활발하게 작용하며 이들 작물은 온도에 비례하여 메탄을 배출한다(Ed Dlugokenky., 1993; Yang et al., 1999). 따라서 강화 송해의 지역 특성상 여름철에

고농도를 나타내어 명확한 계절 변동은 보이지 않고 있다. 연희 측정소는 겨울철에 $2.102 \pm 0.378(n=4,225)$ ppm으로 최고농도를 나타냈으며, 계절별로는 겨울>가을>봄>여름 순으로 조사되었다.

월평균 메탄농도는 송해 측정소의 경우 최고농도는 1월에 $2.016 \pm 0.084(n=1,465)$ ppm으로, 최저농도는 4월 $1.896 \pm 0.086(n=1,348)$ ppm으로 나타났다. 연희 측정소의 경우 1월에 $2.159 \pm 0.4092(n=1,396)$ ppm으로 가장 높았고, 최저농도는 8월에 $1.757 \pm 0.255(n=1,474)$ ppm으로 관측되기 때문에, 메탄의

특성상 HO 라디칼이 활발히 생성되는 여름철에 농도가 낮아지고, 겨울철에 메탄의 농도가 높아지는 월별 변동을 뚜렷하게 나타내고 있다.

요일별로는 송해 측정소의 경우 최고농도는 목요일 $1.972 \pm 0.182(n=2,963)$ ppm으로 평균대비 0.7% point 높았으며, 최저농도는 일요일 $1.946 \pm 0.210(n=3,096)$ ppm으로 평균대비 -0.6% point 낮은 수치로 나타났다. 연희 측정소의 최고농도는 목요일 $1.953 \pm 0.364(n=2,411)$ ppm으로 평균대비 0.9% point 높았고, 최저농도는 일요일에 $1.913 \pm 0.307(n=2,469)$ ppm으로 평균대비 -1.2% point 낮게 관측되었다. 요일별 농도순위를 보면, 주중(목요일)이 높은 농도를 보였고 교통량이 적은 주말이 낮게 나타났다.

시간대별 메탄농도 분포는 대체로 가정 및 도로교통 활동도가 높은 08~09시에 높은 농도를 보였고, 17~18시에 최저농도를 보이다가 다시 상승하는 경향을 나타내고 있다. 송해 측정소의 경우 08시에 $2.026 \pm 0.227(n=9026)$ ppm으로 최고농도를 보였고, 최저농도는 오후 17시에 $1.888 \pm 0.1168(n=893)$ ppm으로 관측되었다. 연희 측정소는 09시 $1.998 \pm 0.284(n=717)$ ppm으로 가장 높았고, 최저농도는 18시에 $1.843 \pm 0.212(n=709)$ ppm으로 조사되었다.

2) 기상인자별 메탄 농도의 특성조사

기상인자와의 관계를 보면, 상대습도는 송해 측정소의 경우 상대습도가 증가할수록 메탄 농도도 지속적으로 증가하는 경향을 보였고, 100% 이상일 때 최고농도($2.109 \pm 0.301(n=628)$ ppm)를 나타내었다. 연희 측정소는 60% 상대습도 구간까지 $1.972 \pm 0.307(n=3,243)$ ppm으로 증가하다가 70% 이상부터 점차적으로 감소하는 경향을 나타냈다

데, 이는 다른 측정소와 달리 일기현상 중 비중이 가장 많은 호림·연무와 같은 대기 역전 등 정체현상이 상대습도 50~80%에 주로 형성됨에 따라 나타난 경향이라 판단된다. 기온 구간별 메탄농도는 송해 측정소의 경우 10℃까지 감소하다가 20℃에서 최고농도를 나타냈으며, 연희 측정소는 0℃에서 최고농도였고, 기온이 상승할수록 메탄 농도는 낮아지는 경향을 보였다. 풍향과 풍속의 영향은 송해 측정소의 경우 북풍, 북북서풍, 무풍에서 높은 농도를 나타냈고, 연희 측정소는 북서풍, 북북서 및 무풍에서 높은 농도를 보였다. 풍속이 증가함에 따라 측정소 모두 전체적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 일사량에 따른 메탄농도는 송해 측정소의 경우 $100 \text{ w/m}^2/\text{hr}$ 이후로, 연희 측정소는 일사량 구간별로 메탄농도 변화폭이 크지 않았고, $600 \text{ w/m}^2/\text{hr}$ 이후부터 낮아지는 것으로 조사되었다.

일기현상에 따른 메탄 농도는 송해 측정소와 연희 측정소 모두 연무·박무 등 대기정체가 발생했을 때 메탄 농도가 가장 높았으며, 시정거리가 증가할수록 메탄 농도는 낮아지는 경향을 나타내었다.

3.2. 수목을 이용한 기후변화물질 감축방안

3.2.1. 도시공원 및 가로수, 산림의 이산화탄소흡수량

1) 도시공원 수목의 이산화탄소흡수량

인천시 도시공원 수목에 의한 총 연간 이산화탄소흡수량은 $9,090.6 \text{ ton CO}_2/\text{year}$ 로 평가되었으며, 유형별로는 근린공원이 $5,287.8 \text{ ton CO}_2/\text{year}$ 로 가장 높았으며, 소공원에 의해서도 약 $6.4 \text{ ton CO}_2/\text{year}$ 흡수효과가 있는 것으로 추정되었다.

<표 5> 도시공원 수목에 의한 총 연간 이산화탄소흡수량

| 공원 유형 | 전체면적 (㎡) | 시설면적 (㎡) | 식재면적 (㎡) | 단위면적당 CO ₂ 흡수량(kg/㎡) | 도시녹지별 CO ₂ 흡수량(kg) |
|--------|-------------|-------------|-------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 도시자연공원 | 15,663,000 | 6,265,200 | 9,397,800 | 0.31 | 2,925,788 |
| 근린공원 | 7,660,000 | 3,064,000 | 4,596,000 | 1.14 | 5,287,818 |
| 어린이공원 | 954,000 | 572,400 | 381,600 | 2.36 | 900,678 |
| 소공원 | 4,000 | 800 | 3,200 | 2.00 | 6,400 |
| 합계 | | | | | 9,090,684 |

2) 가로수의 이산화탄소흡수량

가로수에 의한 이산화탄소흡수량은 약 6,982.2

ton CO₂로 평가되었으며, 수종별 연간 이산화탄소 흡수량은 톨립나무가 $66.3 \text{ kg CO}_2/\text{tree}/\text{year}$ 로 가장

높았고, 은행나무 51.0kg CO₂/tree-year 순으로 생 장률이 빠른 나무들이 높게 나타났다.

〈표 6〉 가로수 수종별 연간 이산화탄소 흡수량

| 수종 | 단목별 연간 CO ₂ 흡수량 (kg CO ₂ /tree-year) | 연간 총 CO ₂ 흡수량 (kg CO ₂ /year) |
|----------|---|--|
| 은행나무 | 51.0 | 2,343,481.9 |
| 느티나무 | 38.1 | 1,278,101.8 |
| 벚나무 | 33.1 | 1,018,502.1 |
| 버즘나무 | 47.6 | 779,807.7 |
| 이팝나무 | 17.1 | 230,707.3 |
| 메타세쿼이아 | 44.4 | 591,808.7 |
| 중국단풍 | 38.3 | 300,561.6 |
| tulip 나무 | 66.3 | 311,932.5 |
| 해송 | 6.3 | 26,386.9 |
| 회화나무 | 43.1 | 100,926.3 |

3) 산림 수목의 이산화탄소흡수량

국립산림과학원에서 제시된 통계자료를 이용하여 인천시 산림에 의한 연간 흡수량을 산정한 결과, 2009년도 산림의 연간 이산화탄소흡수량은 253,708ton CO₂/year로 평가되었다. 연도별로 산림

면적이 조금씩 감소하고 있으나, 수목 생장 및 꾸준한 수목식재에 의해 임목축적량이 증가하여 바이오매스량 및 탄소저장량, 연간 이산화탄소흡수량이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

〈표 7〉 연도별 CO₂ 저장량 및 연간 CO₂ 흡수량(산림청 통계자료 이용)

| 연도 | 산림면적(ha) | CO ₂ 저장량(ton) | 연간 CO ₂ 흡수량(ton CO ₂ /year) |
|-------|----------|--------------------------|---|
| 2006년 | 40,627 | 4,753,232 | - |
| 2007년 | 40,612 | 4,978,039 | 224,807 |
| 2008년 | 40,607 | 5,214,671 | 236,632 |
| 2009년 | 40,583 | 5,468,379 | 253,708 |

3.2.2. 도시공원 및 가로수, 산림의 탄소저장량

1) 도시공원 수목의 탄소저장량

도시공원 유형별 단위면적당 탄소저장량을 이용하여 산정한 인천시 도시녹지(면적 : 24,281,000

m²)수목에 의한 전체 탄소저장량은 30,231ton C로 산정되었다. 참고로 경기도 도시공원(학교생태숲, 옥상녹화 미포함) 면적(44,743,031m²) 수목의 탄소저장량은 67,637ton C로 산출되었다.

〈표 8〉 인천시 도시녹지 수목에 의한 총 탄소저장량

| 공원 유형 | 전체면적 (m ²) | 시설면적 (m ²) | 식재면적 (m ²) | 단위면적당 탄소 저장량(kg C/m ²) | 도시녹지별 탄소저장량(kg C) |
|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 도지자연공원 | 15,663,000 | 6,265,200 | 9,397,800 | 1.53 | 14,418,251 |
| 근린공원 | 7,660,000 | 3,064,000 | 4,596,000 | 2.23 | 10,244,345 |
| 어린이공원 | 954,000 | 572,400 | 381,600 | 14.56 | 5,557,663 |
| 소공원 | 4,000 | 800 | 3,200 | 3.42 | 10,944 |
| 합 계 | | | | | 30,231,203 |

(2) 가로수의 탄소저장량

인천시 전체 가로수 중 93.64%를 차지하는 상위 10종에 의한 탄소저장량은 43,627,240kg C이었으며, 나머지 포함하면, 전체 탄소저장량은 약 46,671,067 kg C(46,671 ton C)로 추정되었다. 식재 수량과 수목별 평균 탄소저장량을 이용한 수종별

탄소저장량은 은행나무 18,560 ton C로 가장 많았고, 해송 100 ton C로 가장 낮게 나타났다.

단위수목별 평균 탄소저장량은 툼리나무 782.5 kg C, 은행나무 419.4 kg C, 버즘나무 337.7 kg C 등 순이었으며, 생장율이 가장 크다고 알려진 툼리나무의 탄소저장량이 가장 높게 조사되었다.

〈표 9〉 가로수 수종별 단목의 평균 탄소저장량

(단위 : kg C/tree)

| 수종 | 툼리 나무 | 은행 나무 | 버즘 나무 | 메타세 퀘이어 | 회화 나무 | 느티 나무 | 중국 단풍 | 벚나무 | 이팝 나무 | 해송 |
|-----------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|-------|----------|------|
| 탄소 저장량 | 782.5 | 419.4 | 337.7 | 297.4 | 275.2 | 218.3 | 188.8 | 147.7 | 36.5 | 31.8 |

(3) 산림 수목의 탄소저장량

인천시 전체 산림 수목에 의한 탄소저장량은 2,213,527 ton C(2010년 임목축적량자료 이용 기준)로 산정되었으며, 구·군별 비교 시, 산림면적과

임목축적량이 많은 강화군>옹진군>중구>서구>남동구>계양구>부평구>연수구>남구>동구 순으로 나타났다.

〈표 10〉 인천광역시 연도별 바이오매스와 탄소저장량

(단위 : ton)

| 연도 | 바이오매스 | | | 바이오매스 합계 | 탄소저장량 (ton) |
|-------|---------|-----------|-----------|-------------|----------------|
| | 침엽수 | 활엽수 | 혼효림 | | |
| 2006년 | 487,296 | 1,073,328 | 1,032,049 | 2,592,673 | 1,296,336 |
| 2007년 | 51,6317 | 1,125,143 | 1,073,834 | 2,715,293 | 1,357,647 |
| 2008년 | 547,290 | 1,177,726 | 1,119,350 | 2,844,366 | 1,422,183 |
| 2009년 | 582,044 | 1,234,525 | 1,166,183 | 2,982,752 | 1,491,376 |
| 2010년 | 691,384 | 2,079,229 | 1,656,440 | 4,427,053 | 2,213,527 |

4. 고찰

4.1. 대기오염물질 및 기후변화물질과의 상관성 평가

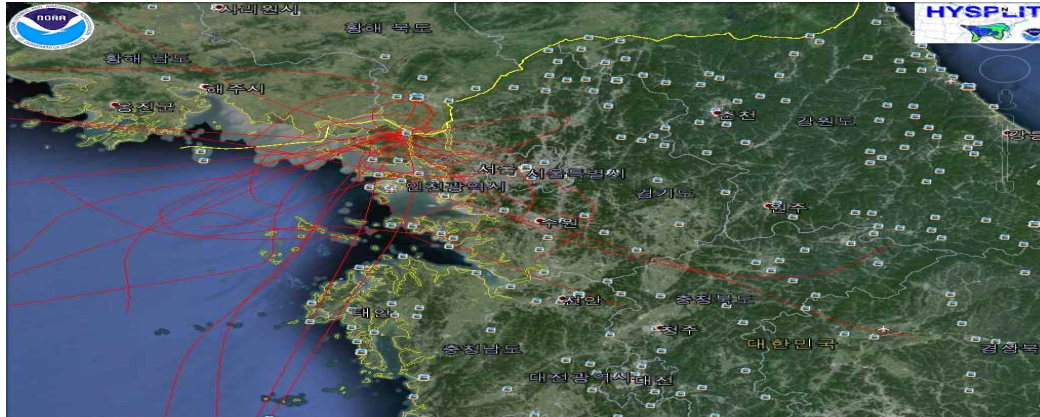
기준성 대기오염물질 6 항목과 이산화탄소, 메탄 농도의 상관성 분석결과, 모든 측정소에서 CO, NO₂, SO₂, PM10, PM2.5와는 비교적 높은 양의 상관성을 보였고, O₃은 높은 음의 상관성을 나타내 모두 유의한 결과를 얻었다(p<0.01).

4.2. 역계적 모델을 이용한 기후변화물질 장거리 이동경로 추적

송해 측정소에서 측정된 이산화탄소 시간평균

농도를 이용하여 고농도 이산화탄소 측정 시 측정소 주변 기류를 역계적 분석을 실시하였는데, 인천시에 유입되는 기류의 중·장거리 이동 경로와 송해 측정소의 이산화탄소 농도에 미치는 간접 영향원을 추정하기 위해서 적용하였다.

50m 상공 24시간 분석결과, 송해 측정소를 기준으로 수도권인 남서, 남, 남동 방향의 기여도가 62.5%로 가장 높게 나타났다. 남서쪽의 경우 주로 상하이, 항저우, 난징, 옌청, 쑤저우 등 중국지역 기류의 영향을 크게 받고 있었으며, 일부 수도권 남부지역의 기류가 유입되는 것으로 조사되었다.

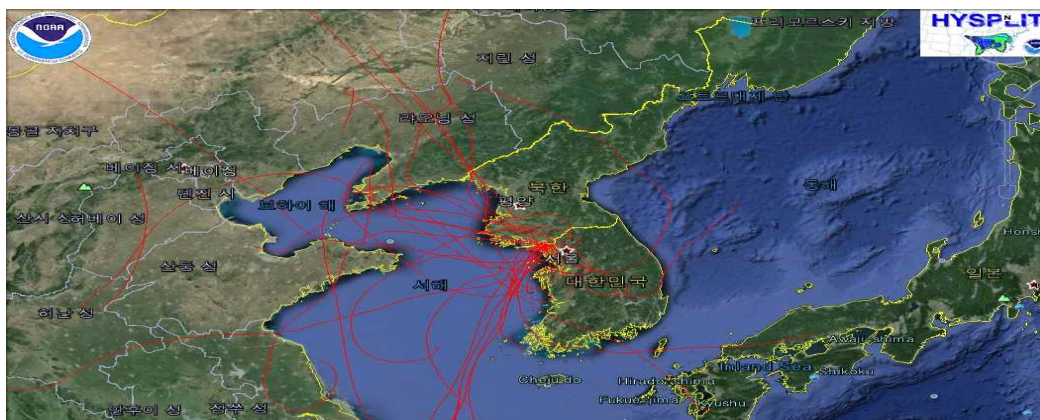


〈그림 2〉 송해 측정소 50m 상공, 24시간 역궤적 분석결과, 2012.9~2013.8

500m 상공 72시간 역궤적 분석결과, 인천시의 장거리 이동 기류는 남서 및 서, 북서 등 주로 중국이 위치한 서쪽(53.9%)의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타났다.

지역별 현황을 살펴보면, 남서방향은 상하이,

장쑤, 후난, 난징, 쑤저우 등이 위치하고 있으며, 서쪽으로는 산둥, 산시, 허베이, 북서방향으로는 베이징, 톈진, 다롄, 북쪽으로는 북한 평안도 지역과 중국 선양, 지린 등이 있다.



〈그림 3〉 송해측정소 500m 상공, 72시간 역궤적 분석결과, 2012.9~2013.8

4.3. 수목의 생태환경 적응도 평가

4.3.1. 도시공원 수목의 생태환경적응도

도시공원별로는 인천대공원 수목의 생태환경적응도가 가장 양호하며, 다음으로 중앙공원 등 순이었고, 수목의 스트레스가 가장 높은 도시 녹지는 소매습지공원으로 나타났는데, 이는 해안 염습지라는 지역적, 토양 특성에 의한 것으로 판단된다.

4.3.2. 가로수의 생태환경적응도

가로수의 수종별로는 메타세콰이어와 은행나무, 느티나무가 스트레스를 많이 받는 것으로 나타났

으며, 노선별로는 연수구(비류대로)의 느티나무와 부평구(부흥북로)의 메타세콰이어가 가장 스트레스 정도가 높았는데, 이는 교통량, 대기오염, 토양 영양성분, 수분함량 등 복합적인 영향으로 이에 대한 추가 조사가 필요하다고 판단된다.

4.4. 수목의 대기정화효과 및 경제적 가치 평가

인천시 도시공원 수목에 의한 연간 대기오염물질(CO_2 , SO_2 , NO_2)의 흡수량 비율은 도시공원 수목 3.4%, 가로수 2.6%, 산림 수목 94.0%로 산림 수목의 흡수량이 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다.

〈표 11〉 도시공원 수목 및 가로수, 산림에 의한 연간 흡수량

| 연간흡수량(kg/year) | CO ₂ | SO ₂ | NO ₂ |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 도시녹지 수목 | 9,090,684 | 3,904 | 3,808 |
| 가로수 | 6,982,217 | 2,999 | 2,925 |
| 산림 | 253,708,000 | 108,961 | 106,272 |
| 합계 | 269,780,901 | 115,864 | 113,004 |

도시공원 수목과 가로수, 산림에 의한 CO₂, SO₂, NO₂의 연간 흡수량을 경제적 가치로 환산한 결과, 약 214억 원의 가치가 있는 것으로 평가되었다.

〈표 12〉 도시공원 수목 및 가로수, 산림의 대기정화의 경제적 가치

| 경제적 가치(원/year) | CO ₂ 흡수 | SO ₂ 흡수 | NO ₂ 흡수 |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 도시공원 수목 | 281,811,204 | 406,193,829 | 34,899,006 |
| 가로수 | 216,448,727 | 311,982,405 | 26,804,631 |
| 산림 수목 | 7,864,948,000 | 11,336,289,319 | 973,981,386 |
| 합계 | 8,363,207,931 | 12,054,465,553 | 1,035,685,023 |
| 총금액 | 21,453,358,507 | | |

4.5. 지역별 환경특성을 고려한 수목 식재 및 관리

이산화탄소 흡수·저장을 극대화하기 위한 수목 선정 및 식재기준은 아래와 같다.

- 잘 적응하지 못한 수목은 느리게 성장하며, 스트레스의 증상을 보이거나 초기에 고사할 것이므로 식재할 입지에 적합한 수종을 선정하는 것이 가장 중요하다.
- 수목생장률이 큰 낙엽교목이 상록교목보다 대기 중의 CO₂, SO₂ 및 NO₂ 흡수량이 월등히 크고, 도시 내 미기후 조절을 위해서도 낙엽교목을 주로 식재하도록 한다.
- 다층식재구조(초본, 관목, 교목 혼합)를 도입해야 하며, 탄소흡수량이 큰 톨립나무, 버즘나무, 은행나무, 느티나무 등을 주요 수종으로 선정한다.

따라서 도시 탄소흡수원의 지속적인 효과 모니터링과 관리를 위하여 가로수와 도시공원 수목 등의 도시수목 인벤토리를 작성하여 GIS데이터베이스를 구축하여야 할 것이다.

5. 정책 제언

도시 탄소흡수원 확대방안으로는 도시의 탄소흡수원을 확대하고 이산화탄소 흡수효과를 증진시키기 위한 정책은 다음과 같다.

- 이미 조성되어 있는 공원에 대해서는 수목식재 밀도를 높이고, 새로이 “탄소흡수공원”을 전략적으로 조성할 필요가 있으며,
- 도심지 내 공원에 생태면적율을 일정비율 이상 확보하여 공원 내 탄소순환 및 주변 유출수 저감 등을 극대화할 수 있다.
- 옥상녹화와 벽면녹화 등의 건물녹화는 열악한 환경에서도 잘 자랄 수 있는 자생종을 식재하는 저관리형 녹화가 바람직하며,
- 가로수를 포함한 도로변 녹지대는 녹지공간과 보행공간을 더 확보하여 수관을 크게 형성하고 그늘을 많이 만들 수 있는 수종을 식재하는 것이 필요하고,
- 탄소저장량이 많은 수종을 주로 식재하여야 하며, 관목과 교목의 다층구조로 식재하여 탄

소흡수원을 증가시킬 수 있다.

- 도시 수목의 전정으로 발생하는 폐목재와 낙엽을 이용하여 퇴비 활용 및 우드칩 등으로 토양 표면의 피복이나 유기물 공급 등에 재 활용하여 녹지의 생태적 건강성을 증진시킬 수 있다.
- 도시수목의 탄소흡수원을 산정하기 위한 기초자료인 수령과 흉고직경을 매년 조사하여 데이터화하고 연간 탄소흡수율을 산정할 수 있도록 도시수목 인벤토리를 작성하고 GIS 데이터베이스를 구축해야 한다.

또한, 탄소배출 감소시킬 수 있는 방안은 다음과 같다.

- 용수공급, 홍수방지, 수자원 보전 등 다양하게 적용되고 있는 빗물이용시설을 적극 도입하기 위해 빗물관리 교육 및 홍보, 빗물관리 연구 및 기술개발 지원, 수도요금 감면, 빗물관리시설 설치대상 확대 등 관련 있는 세부 정책을 추진하여야 한다.
- 에코리빙, 에코드라이빙 등 시민 탄소줄이기 홍보활동 및 캠페인 확대 등으로 유치원, 초·중·고등학교 및 일반시민들을 상대로 기후감사를 활용한 현장교육 등을 실시하여야 한다.
- 기후변화대응을 위한 승용차 요일제 참여 활성화를 통해 온실가스 감축과 에너지 절약에 기여하도록 해야 한다.

참고문헌

1. 기상청 (2010) 2009 지구대기감시보고서
2. 기상청 (2013) 2012 지구대기감시보고서
3. 기상청-기후변화정보센터, <http://www.climate.go.kr/>
4. 에너지관리공단-기후변화협약대책, <http://co2.kemco.or.kr/>
5. 인천광역시 보건환경연구원(2012), 대기질 평가 보고서
6. 전민선, 류정호, 유영숙, 김종춘, 임철수, 김대옥, 정성운, 조석연 (2005) 휘발유자동차의 메탄(CH₄) 배출특성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 21(6), 649-655.
7. 인천광역시, 2012 환경백서
8. Angelos Anastassopoulos, Son Nguyen, Xiaohong Xu (2004) On the Use of the HYSPLIT Model to Study Air Quality in Windsor, Ontario, Canada, Environmental Information Archives, 2, 517-525.
9. EPA, <http://www.epa.gov>
10. 손영모, 김정남, 이경학, 김래현. 2009, 미국 캘리포니아주 도시녹지 탄소계정, 국립산림과학원.
11. Irene Ridge, 조성호(역). 2006. 식물의 이해, 월드사이언스.
12. 인천광역시. 2012. 생명의 숲 푸른도시 만들기 2012년 주요업무추진지침(조경·공원·산림분야), 인천광역시.
13. 최태섭. 2007. Chlorophyll Fluorescence : Emotions & Reason, 14회 한국조류학회 Workshop, 국립수산과학원 해조류연구센터, 네오엔비즈
14. 인천광역시. 2011 도시공원 및 녹지현황, 인천광역시 공원녹지과
15. 조현길, 조용현, 안태원. 2002. 서울 남산 도시자연공원의 대기정화능과 가치, 한국환경생태학회지 16(2) : 172 ~ 178.
16. 박은진. 2009. 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안, 경기개발연구원.
17. 광영세, 허용균, 송재활, 황보준권. 2004. 광양제철소 녹화영향도 분석을 통한 대기 정화능력 산정, RIST 연구논문 제 18권 제4호.
18. 이정주, 이경용 등, 2007. 수도권 대기특별법 시행에 따른 안산시 대응 방안 도출, 안산환경기술개발센터.
19. 정환도. 2009. 나무심기와 저탄소도시 실현방안, 대전발전연구원.
20. A. Clyde Hill, 1971, Vegetation : “A Sink for Atmospheric Pollutants”, JAPCA, 21(6) : 341-346.
21. Robert, B.R and C.R.Krause, 1976, “Changes in ambient SO₂ by rhododendron and pyracantha”, Hort. Sci. 7:133-140 in William H. Smith, 1990, Interaction between Air Contaminants and Forest Ecosystems, Air Pollution and Forests, Springer-Verlag, New York.
22. 고재경, 박년배, 황원실(2007). “경기도 시·군 지자체의 온실가스 배출 특성 연구”, 경기개발연구원.