오염농도의 공간적 분포를 고려한 도시림의 대기정화기능 계량화*

최철현¹ · 이우성² · 정성관¹※

A Quantitative Analysis of Air Purification Effectiveness on Urban Forest Considering the Spatial Distribution of Pollutant Concentration*

Chul-Hyun CHOI¹ · Woo-Sung LEE² · Sung-Gwan JUNG¹※

1:2

요 약

본 연구는 도시의 대기환경과 관련하여 도시림의 정화 기능을 평가해보고 개선방안에 대해 고찰해 보는 것이 목적이다. 대기오염은 도시화가 특히 심화되어 있는 지역일수록 심각하기 때문에 우리나라의 대도시 중 하나인 대구광역시를 대상으로 도시림의 대기정화기능을 추정하였다. 오염물질의 흡수량을 산정함에 있어 기존에는 고려되지 못했던 오염농도의 공간적 차이를 적용하였으며, 크리깅을 통해 대기확산모델링 자료의 해상도를 향상시켰다. 도시림의 유형 및 분포를 파악해 본 결과, 대상지역 도시림 내의 식생군락은 총 26개 유형이었으며, 소나무군락, 소나무-신갈군락, 소나무-상수리군락 등 다양한 수종이 분포하고 있었다. 도시림의 대기정화기능을 알아보고자 CO₂의 흡수량을 파악해 본 결과, 연간 흡수량은 총 108,155t/yr인 것으로 분석되었다. 도시림의 대기오염물질 흡수량의 경우 SO₂ 흡수량은 총 183.5t/yr이었으며, NO₂ 흡수량은 총 410.2t/yr인 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 오염농도에 대한 공간적 분포를 고려하지 않아 확인이 불가능했던 농도에 따른 흡수량의 차이를 확인해 볼 수 있었다.

주요어 : 도시림, 대기정화기능, 크리깅, 공간적 이질성

ABSTRACT

The purpose of this study is to estimate air purification effectiveness considering the improvement of its methods related atmospheric environment. The air purification

2012년 3월 27일 접수 Received on March 27, 2012 / 2012년 5월 21일 수정 Revised on May 21, 2012 / 2012년 6월 4일 심사완료 Accepted on June 4, 2012

* 본 연구는 주저자의 석사학위논문과 2011 한국지리정보학회 추계학술대회 발표논문을 수정·보완한 것임.

1 경북대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

2 텍사스 A&M 대학교 조경·도시계획학과 Dept. of Landscape Architecture and Urban Planning, Texas A&M University

※ Corresponding Author E-mail : sgjung@knu.ac.kr

effectiveness is estimated in Daegu, one out of Korean Metropolitan cities because air pollution is getting serious in a heavily urbanized area. The absorption of pollutants is calculated by considering spatial heterogeneity that was not considered previous studies and the spatial resolution of air dispersion modeling is also improved by kriging method. According to the type and distribution of urban forest, total 26 kinds of plant communities were distributed with *Pinus densiflora* community, *Pinus densiflora-Quercus mongolica* community, *Pinus densiflora-Quercus acutissima* community and other kinds of communities in the study area. In the results of estimating the CO₂ absorption amount for identification of the air purification effectiveness on urban forest, the annual absorption amount was total 108,155t/yr. Also, the annual absorption amounts of NO₂ and SO₂ were total 183.5 ton and 410.2 ton respectively. The findings from this study can confirm the differences of pollutant absorption by concentration that could not identify if spatial distribution of pollutant concentration had not been considered.

KEYWORDS : Urban Forest, Air Purification Effectiveness, Kriging, Spatial Heterogeneity

서론

도시림은 인공적인 도시경관을 개선시키고 긍정적인 환경기능을 수행할 뿐 아니라 사회적 통합을 위한 기회를 제공한다(Kweon *et al.*, 1998; Sullivan *et al.*, 2002). 과거에는 단순히 도시림의 경관적·미적 측면만을 강조하였으나 현재에는 다양한 기능을 제공하는 녹지기반(green infrastructure)의 개념으로서 인식되고 있다. 이 중에서도 특히 도시화로 인한 각종 환경문제 증가 및 도시기후의 특징으로 인해 발생하는 대기질의 악화현상에 대한 개선 및 완화를 위해 도시림의 효과를 입증하는 연구가 주목받고 있다. 연구결과, 도시림 내의 수목은 광합성과 같은 대사과정을 통해서 대기오염물질을 흡수하거나 정화하여 대기질을 개선시키는 효과가 있는 것으로 밝혀졌다(McPherson and Haip, 1989; Smith, 1990; Jo and McPherson, 1995). 따라서 도시의 불량한 대기질을 자연적인 정화기능으로 개선시킬 수 있다는 측면에서 이러한 도시림의 기능 및 중요성이 부각되고 있다.

도시림의 대기정화기능을 정량화 하는 것은 효과를 입증하는 것과 동시에 녹지의 필요성

을 적극적으로 제시할 수 있는 기초자료가 된다. 또한 환경에 대한 가치를 높이고 가치에 상응하는 만큼 보존의 필요성을 인식시켜 줄 수 있다. 이에 최근에는 GIS를 이용하여 정량적인 산림녹지의 기능평가에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(박경훈과 정성관, 1999; 김정태 등, 2005; 오정학 등, 2005; 김형호 등, 2006; 이우성 등, 2010; 이우성과 정성관, 2011).

도시림의 대기정화기능 계량화에 관한 연구는 정화효과를 사회적 한계비용으로 환산하여 그 가치를 파악해 볼 수 있다는 점에서 중요한 의의를 지닌다(Chow and Rolfe, 1989; 조현길과 안태원, 2001; 조용현과 조현길, 2002; 조현길 등, 2002; 국립산림과학원, 2010b). 그러나 대기정화 기능에 대해서 도시림의 양적·질적 다양성 및 대기오염 농도의 공간적 분포를 고려하지 않을 경우 실질적 가치가 제대로 반영되지 못할 수 있다. 현재 국립산림과학원에서 시행되는 산림의 공익적 가치 계량화에 대한 연구는 환경부담금의 한 종류인 대체산림자원조성비의 산정에 이용되고 있으나 지역별 대기오염도의 차이가 고려되지 않고 있다(국립산림과학원, 2010b). 이는 대기오염 심화지역에 속하는 산림의 중요

도가 상대적으로 저평가될 우려가 있기 때문에 반드시 보완되어야 할 사항이다. 또한 대기정화기능이 크게 요구되는 도심지 주변 산림의 훼손이나 전용이 발생할 경우 해당 지역의 대기질에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 이를 방지할 수 있는 산림의 보존방안 및 대책이 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 대기오염물질의 광역적인 공간적 분포를 예측해보고 이를 고려하여 도시림의 대기정화기능을 정량적으로 산정해 보았다.

이론적 고찰

도시림의 대기질 개선효과는 산림을 구성하고 있는 모든 요소가 복합적인 상호관계를 통해서 환경적 기능을 수행하는 것이기 때문에 그 효과를 정확하게 계량화하기란 어려운 일이다. 최근 수목의 대기정화기능에 대한 연구역시 많이 이루어지긴 했으나 복잡한 유기체로 구성되어 있는 생물을 대상으로 하기 때문에 어려운 점이 많다. 대기정화 메커니즘 역시 한 가지로 설명될 수 없으며, 여러 가지 방식이 복합적으로 이루어져 정화기능을 수행하게 된다.

도시림의 대기정화효과 규명과 관련된 연구를 살펴본 결과, 국내의 경우 대부분 국외의 연구를 인용하고 있는 실정이었으며, 수목의 대기오염물질 흡수량의 추정은 광합성능으로부터 환산하여 산정하는 방법을 주로 사용하고 있었다(Hill, 1971; Townsend, 1974; Roberts and Krause, 1976; US EPA, 1976; Smith, 1990). 광합성능은 대기오염물질의 정화능력이 얼마나 우수한지를 나타내는 척도로서 사용되어 왔으며, 식물의 광합성능 계산은 CO_2 흡수속도에 의해 계량화 될 수 있다(국립환경연구원, 1993). 직접적으로 CO_2 흡수량을 측정하는 방법은 비효율적이기 때문에 간접적으로 추정하는 방식이 주로 사용되며, 수종별 다수의 CO_2 교환율 실측을 통해 유도된 회귀식을 적용하여 산출하게 된다(조용현과 조현길, 2002; 조현길 등, 2002). 다른 방식으로는 연간생장량에 의한 탄소축적

변화를 바이오매스 상대생장식으로 추정하는 방법이 있다(국립산림과학원, 2010b).

대기정화기능을 계량화하기 위해서는 대기오염농도에 대한 정보가 반드시 필요하다. 대기 중의 오염물질 농도를 정확히 파악하기 위해서는 실시간으로 계측하는 것이 가장 바람직하지만 대상지가 광범위할 경우 실효성이 떨어지게 된다. 따라서 대기확산모델링과 같은 대기질 모사방법을 통해 대기질을 예측해야 할 필요성이 있다. 대기확산모델링 기술은 지속적으로 발전해 왔으며, 다양한 방법들이 있으나 현재 기술적으로 가장 앞서 있고 최근 들어 활발하게 활용되고 있는 모형은 CMAQ 대기질 모델링 체계이다(김동영, 2009). CMAQ 모델링 체계는 3차원 기상장 모델인 MM5(Mesoscale Model 5)와 배출모델인 SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions system), 화학수송모델인 CMAQ로 구성되어 있으며, 국내의 경우 대기질예보시스템(Korea Air Quality Forecasting System: KQFS)에서 이 모델링 체계를 구축하여 사용 중에 있다. 이를 통해 수도권 및 한반도 전체 각 지역을 대상으로 대기확산 모델링을 실시하며, 예측결과를 실시간으로 제공한다. 그러나 모델링 범위가 광범위할 경우 공간해상도가 낮다는 단점이 있다. 따라서 해당 자료를 국지적 분석에 사용할 경우에는 적합한 공간보간법(spatial interpolation)을 통해 농도분포도를 작성해야 할 필요성이 있다.

연구방법

1. 연구의 과정

본 연구의 목적은 대상지 내 도시림의 대기정화기능을 추정하는 것이며, 기존에 고려되지 못했던 대기오염 농도의 공간적 분포에 대해 분석한 뒤, 이를 적용하여 기존의 평가방법과 비교해 보는 것을 목표로 한다. 도시림의 대기정화기능 추정을 위해 사용된 기초자료로는 수치임상도와 생태자연도 그리고 위성영상 등을 이용해 구축된 현존식생도가 사용되었다. CO_2 의 흡수량 추정은 IPCC

(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 작성된 주제보고서인 IPCC (2003)와 IPCC(2006)에 의거한 방법론에 기초하여 산정하였으며, 바이오매스전환식에 사용된 계수는 국립산림과학원(2010a)에서 산림탄소계정 기반 구축을 위해 수행된 연구에서 도출된 전환계수를 사용하였다. 대기정화기능은 규제대상이 되는 오염물질 중에서 자료가 충실하고 다른 물질에 의한 반응이 비교적 적은 SO_2 와 NO_2 의 흡수량을 오염물질별 침적속도가 적용된 산정식을 통해 분석하였다. 흡수량 산정을 위해 필요한 대상지의 오염물질별 대기 중 농도를 파악하기 위하여 대기확산 모델링 자료를 획득한 뒤, 공간통계기법인 크리깅(kriging)기법을 적용한 내삽을 시행하여 농도분포도를 작성하였다. 이러한 과정을 통해 도시림의 대기오염물질 흡수량을 산정한 뒤, 기존의 방법과 비교해 보았으며, 공간적 차이를 규명하였다. 본 연구의 전체적인 진행 과정은 그림 1과 같다.

FIGURE 1. 연구의 수행과정

2. 연구대상지

대기오염은 도시화가 특히 심화되어 있는

지역일수록 심각하기 때문에 우리나라의 대도시 중 하나인 대구광역시를 대상으로 도시림의 대기정화기능을 추정하였다. 대구광역시는 분지형 도시라는 지형특성상 공기의 순환성이 불량하여 대기질의 악화가 심각하고 주변부에 도시림이 둘러싸고 있으나 도심부에는 공단이 산재해 있어 대기질의 공간적 차이가 뚜렷하다고 판단되기 때문에 대상지로 선정하였다. 그러나 달성군의 경우 도시화율이 비교적 낮기 때문에 대기오염에 대한 민감도가 적다고 판단되어 제외하였으며, 중구는 실제적으로 도시림이 분포하고 있지 않기 때문에 분석결과에서 제외되었다.

3. 식생현황 분석 및 현존식생도 작성

도시림의 자원조사를 위하여 식생군락의 공간적 분포를 우선적으로 파악하였다. 우리나라의 경우 산림자원 기본통계자료 구축을 위해 국가산림자원조사가 정기적으로 이루어지고 있으나 매년 유동적으로 변하는 도시림의 구조를 파악하기는 어렵다. 따라서 이를 보완하기 위해 식생학적 공간분석, 토지개발, 산림관리 등과 같이 다양한 분야에서 활용되고 있는 현존식생도를 활용하였다.

현존식생도를 작성하기 위하여 먼저 2008년 2월에 촬영된 고해상도 KOMPSAT-2 위성영상을 사용하여 상관식생을 폴리곤으로 구분한 후 현장조사를 실시하여 식생경계 및 식생유형을 확인하였다. 현지조사는 381개의 표본점이 조사되었으며, 이 중에서 129개 지점은 각 군락을 대표하는 수목의 흉고직경, 수고 등의 자료조사를 위해 사용되었다¹⁾. 최종적으로 시간 및 경제적 여건으로 인해 미조사된 지점에 대해서는 수치임상도, 생태자연도 내 식생군락, 환경부의 현존식생도 자료 등을 이용하여 세부 식생군락유형을 설정하였다.

4. 대기오염 농도분포도 구축 및 분석

본 연구에서는 한반도 전 지역을 대상으로 CMAQ 모델링을 통해 예측된 2008년도 오염물질별 농도자료를 사용하였으며, 자료의 공

간해상도는 9km×9km이다. 이 중 공간보간에 사용된 자료는 대구광역시를 포함하는 가로 45km, 세로 55km의 범위로 총 42개의 격자 좌표이다(그림 2). 공간해상도 향상을 위하여 사용한 기법은 통상적으로 널리 사용되고 있는 정규크리깅(ordinary kriging)을 사용하였으며, 자료의 사전검증을 위하여 히스토그램분석을 실시하였다. 이를 통해 자료의 정규성을 확인할 수 있었으며, 유사정규분포를 나타내도록 대수변환을 실시하였다. 또한 격자점의 평균거리와 최대거리를 고려하여 분리거리(lag size)와 분리개수(lag number)를 설정하였다(Johnston *et al.*, 2001). 크리깅을 실시하기 위해서는 공간적 상호관계와 연속성에 대해 이를 이상적으로 표현할 수 있는 이론적 베리오그램(theoretical variogram)을 결정해야 하는데 본 연구에서는 자료의 실험적 베리오그램(experimental variogram)과 유사한 형태인 가우스 모형(gaussian model)을 적용하였다. 또한 대기 오염 농도자료의 경우 기상학적 영향에 의한 방향성을 고려해야 할 필요성이 있기 때문에 계절별 주풍향을 적용한 이방성 베리오그램을 적합시킨 모형을 사용하였다.

최종적으로 도시림의 CO₂ 흡수량과 대기오염 농도자료를 종합하여 흡수량 현황도를 작성하는 작업은 각각의 자료를 그리드 형태로 전환하여 ArcGIS 9.3의 공간질의처리(spatial query processing)를 통해 이루어졌다(최철현 등, 2011).

FIGURE 2. 농도분포도 구축 범위 및 격자망

5. 대기정화능 추정

1) CO₂ 흡수량 산정

현재 산림의 CO₂ 저장량에 대한 연구는 기후변화협약과 관련하여 탄소배출권 잠재력의 추정을 위해 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우 국립산림과학원의 산림탄소계정 연구를 기반으로 주요 수종별 탄소배출계수를 개발하여 사용하고 있으며, CO₂ 저장량을 산정하는 방법은 식 (1)과 같다. 줄기체적(SV)을 구하기 위해 현존식생도에서 파악된 정보를 바탕으로 단목차원에서 입목간체적을 산출하여 단위면적당 체적을 파악하였다. 그 후, 식생군락별 면적비 및 수종별 계수를 적용하여 축적된 탄소의 양을 계산하고 이에 CO₂ 흡수량 전환비를 적용하여 총 CO₂ 저장량을 계산하였다(국립산림과학원, 2010a).

$$CO_2 \text{ 저장량} = SV \times WD \times BEF \times (1 + R) \times CF \times 44/12 \quad (1)$$

여기서, SV : Stem Volume, 줄기체적

WD : Wood Density, 목재기본밀도

BEF : Biomass Expansion Factor, 바이오매스 확장계수

R : Root-to-shoot ratio, 뿌리-지상부 비율

CF : Carbon Fraction, 탄소전환계수

도시림에 축적된 CO₂ 저장량의 총량을 계산하는 것과는 달리 흡수량은 한 해 동안 흡수한 CO₂의 양을 의미하며, 이를 계산하기 위해서는 수령의 파악이 중요하다. 수령은 생장추에 의한 목편의 연륜수를 측정하여 추정될 수 있지만 본 연구에서 사용된 도시림 실태조사자료의 경우 생장추에 의한 측정항목이 누락되어 수령을 파악할 수 없었다. 따라서 이를 해결하기 위해 제4차 수치임상도 상의 영급자료를 활용하였으며, 대구광역시의 조사연도가 1998년도인 것을 감안하여 영급을 조정하였다. 이를 통해 각 식생군락의 영급을 파악한 뒤, 한 해 동안 흡수한 평균적인 CO₂ 흡수량을 계산하였다.

2) 대기오염물질 흡수량 산정

일반적으로 도시림에 의한 가스 상 오염물질의 연간 정화효과는 CO₂ 흡수속도와 밀접한 관계가 있다. 100ppb 이하의 저농도 수준에서는 CO₂ 흡수속도와 비례하여 대기오염물질 흡수속도가 증가하기 때문에 연간생장량에 의한 CO₂ 흡수량을 계량화 한 뒤, 흡수속도비를 적용하여 흡수량을 계량화 할 수 있다(Hill, 1971). 흡수속도는 침적속도에 의해 결정되며, 수종에 따른 대기오염 물질별 침적속도를 분석에 적용해야 할 필요성이 있다. 국내외의 경우 수종별 침적속도에 대한 연구가 많이 진행되어 이를 종합한 침적속도모델 등을 사용하는 추세이지만 해당 모델에 대한 국내의 적용성 여부는 아직 검토되지 못했다. 따라서 본 연구에서는 선행연구에서 사용된 대기오염물질별 침적속도를 사용하여 분석에 적용하였다(표 1). 또한 대기오염물질별 흡수량을 추정하기 위한 산정식은 국립환경연구원(1993)의 연구를 참고하였다(식 2).

TABLE 1. 대기오염물질별 침적속도

오염물질	침적속도(cm/S)
CO ₂	0.33
SO ₂	2.80
NO ₂	1.90

자료 : Hill, 1971; 戸塚 績, 1987;
大氣環境に關する綠地機能檢討會, 1989

$$W_X = [XO_2/CO_2] \times P_G \quad (2)$$

$$= (G_X \times D_X) / (G_{CO_2} \times D_{CO_2}) \times P_G$$

여기서, WX : 개체수목의 가스(X) 흡수량
(gXO₂/h)

[XO₂] : 가스(X)의 흡수속도(mgX)

G_X : 가스(X)의 침적속도(cm/S)

D_X : 대기중 가스(X) 농도(ppm)

[CO₂] : CO₂ 흡수속도(gCO₂)

GCO₂ : CO₂의 침적속도(cm/S)

DCO₂ : CO₂의 대기중 농도(ppm)

P_G : 개체수목의 총 CO₂ 흡수량
(gCO₂/h)

결과 및 고찰

1. 도시림의 분포 및 비율

대상지 내의 현존식생도를 분석해 본 결과 경작지, 암석, 시설지 및 나지, 초지 등을 제외한 식생군락의 유형은 총 26종류로 나타났다. 이 중에서 소나무군락의 분포면적은 약 8,450.6ha로 전체 면적의 39.5%를 차지하고 있었으며, 소나무-신갈군락이 그 다음으로 약 20.3%를 차지하고 있었다.

각 구별 주요 식생군락의 면적 및 비율을 분석해 본 결과, 표 2와 같이 나타났다. 대상지에서 산림의 면적이 가장 넓은 동구의 경우 총 18개 유형의 식생군락이 분포하고 있었으며, 그 중 소나무군락이 약 40%를 차지하고 있었다. 동구를 비롯한 북구, 달서구 역시 소나무군락의 분포비율이 가장 높았으며, 산림의 면적이 가장 적은 서구의 경우 아까시-상수리군락의 비율이 46%로 가장 높았다. 수성구의 경우 북구보다 산림의 면적은 적었지만 동구와 같은 18개 유형의 식생군락이 분포하고 있었으며, 북구와 달서구의 경우 14개 유형의 식생군락이 분포하였다. 남구와 서구는 각각 9개, 5개 유형의 식생군락을 나타내고 있었다.

2. 대기오염 농도분포도의 구축

모델링 자료에 대해 공간통계기법을 사용하여 대상지의 연평균 오염농도에 대한 공간적 분포도를 작성하였다(그림 3). 그 결과, SO₂ 오염물질의 농도가 가장 높은 지역은 달서구로 나타났으며, NO₂ 농도는 남구와 수성구가 가장 높은 것으로 나타났다. 동구의 경우 SO₂와 NO₂의 농도가 가장 낮은 것으로 나타났는데, 이는 동구지역 대부분이 산지로 둘러싸여 있으며, 대기오염물질이 주로 배출되는 도시화지역의 면적이 적은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

대상지 내에서 SO₂ 농도분포도를 살펴보면 북서쪽으로부터 고농도의 등가분포가 서구와

TABLE 2. 각 구별 주요 식생군락의 면적 및 현존식생도

행정구	식생군락	면적 (ha)	비율 (%)	행정구	식생군락	면적 (ha)	비율 (%)	현존식생도
동구	소나무	4,357.9	40.1	서구	소나무	735.7	41.0	
	소나무-신갈	2,868.2	26.4		소나무-신갈	609.8	34.0	
	소나무-상수리	1,540.9	14.2		소나무-상수리	160.7	9.0	
	신갈	728.2	6.7		아까시-소나무	56.6	3.2	
	소나무-굴참	357.3	3.3		상수리	55.3	3.0	
	기타(13군락)	1,005.1	9.3		기타(9군락)	176.0	9.8	
북구	계	10,857.6	100.0	남구	계	1,794.2	100.0	
	소나무	2,383.4	54.4		소나무-신갈	179.0	24.3	
	소나무-상수리	963.0	21.9		소나무	130.2	17.7	
	소나무-신갈	247.8	5.6		신갈-소나무	130.1	17.7	
	소나무-굴참	170.9	3.9		신갈	108.8	14.8	
	소나무-졸참	120.6	2.7		일본잎갈나무	66.7	9.1	
수성구	기타(9군락)	504.4	11.5	서구	기타(4군락)	120.4	16.4	
	계	4,390.3	100.0		계	735.2	100.0	
	소나무-상수리	957.2	27.7		아까시-상수리	71.1	46.0	
	소나무	825.5	23.8		상수리	39.0	25.2	
	소나무-신갈	438.0	12.6		소나무	17.8	11.5	
	소나무-졸참	294.8	8.5		리기다소나무	15.5	10.0	
수성구	상수리-밤나무	188.9	5.4	서구	소나무-상수리	11.3	7.3	
	기타(13군락)	762.5	22.0		기타(0군락)	0.0	0.0	
	계	3,466.8	100.0		계	154.6	100.0	

자료 : 대구광역시, 2008

달서구를 거쳐 점차 면적이 넓어지는 것을 확인해 볼 수가 있었다. 이는 서구와 달서구의 경우 SO₂의 주 오염원인 SO_x 배출량이 높기

때문인 것으로 판단된다. 이를 확인해 보기 위하여 서구의 2008년 SO_x 오염원 총 배출량을 확인해 본 결과, 약 2,023톤으로 대상지

FIGURE 3. 오염물질별 농도분포도

내에서 SO_x 배출량이 가장 높았으며, 달서구는 730톤으로 두 번째로 배출량이 높았다 (<http://airemiss.nier.go.kr>).

NO₂의 오염농도 분포도를 살펴본 결과, 도심지역 뿐만 아니라 남동측 부근의 농도가 높게 분석된 것으로 나타났다. 이는 NO₂의 주요 오염원인 NO_x의 주요 배출원이 자동차와 같은 이동오염원임을 감안할 때, 도심지 내부에서 오염원이 대량으로 발생되었으나 바람이나 지형 등의 영향으로 인해 남동방향으로 확산되어 도심지 외부지역의 농도가 더 높게 나타난 것으로 판단된다. 대상지 남동측에 NO₂의 원인물질 배출량이 높다고 해석해 볼 수도 있지만 해당 지역의 경우 달성군과 경산시가 위

치하고 있으며, 이 지역이 대도시인 대구광역시에 비해 NO₂ 주요 배출원인 도로이동오염원이 많다고는 볼 수 없다. 따라서 NO₂ 오염물질은 도심지 내부에서 발생하여 외부로 확산되었다는 해석이 더 옳을 것으로 판단된다.

3. 대기정화능 산정

1) CO₂ 흡수량

식생군락별 CO₂ 흡수량을 산정한 결과는 표 3과 같다. 달성군을 제외한 대구광역시 도시림의 연간 CO₂ 흡수량을 종합해 본 결과, 총 108,155t/yr으로 분석되었다. 대상지 내의 도시림에서 양적으로 가장 많은 양의 CO₂를 흡수하는 식생군락은 소나무군락으로 나타났

TABLE 3. 식생군락별 면적 및 CO₂ 흡수량

식생군락	영급	면적		CO ₂ 흡수량	
		ha	%	t/yr	%
소나무	IV	8,450.6	39.49	41,929.8	38.77
소나무-신갈	V	4,342.8	20.29	14,083.6	13.02
소나무-상수리	IV	3,684.8	17.22	19,073.7	17.64
신갈	V	1,005.6	4.70	2,910.1	2.69
소나무-굴참	IV	648.8	3.03	2,989.3	2.76
소나무-줄참	IV	415.4	1.94	2,726.8	2.52
잣나무	II	389.9	1.82	8,252.1	7.63
신갈-상수리	IV	283.2	1.32	1,992.1	1.84
상수리-아까시	III	267.5	1.25	3,035.5	2.81
소나무-아까시	IV	267.0	1.25	980.0	0.91
상수리	III	263.3	1.23	3,528.4	3.26
상수리-밤나무	IV	188.9	0.88	328.2	0.30
리기다소나무	II	176.8	0.83	801.7	0.74
일본잎갈나무	IV	174.1	0.81	1,468.9	1.36
신갈-소나무	IV	160.1	0.75	885.1	0.82
아까시	III	115.8	0.54	708.1	0.65
아까시-소나무	IV	114.6	0.54	296.2	0.27
상수리-굴참	IV	111.6	0.52	466.0	0.43
아까시-상수리	IV	104.5	0.49	480.0	0.44
신갈-굴참	V	67.0	0.31	330.4	0.31
소나무-밤나무	IV	57.3	0.27	281.3	0.26
소나무-갈참	IV	43.0	0.20	183.1	0.17
아까시-굴참	V	21.7	0.10	153.0	0.14
은사시나무	IV	19.5	0.09	33.7	0.03
굴참	III	18.4	0.09	152.3	0.14
아까시-줄참	III	6.5	0.03	85.7	0.08
합계		21,398.7	100.00	108,155.0	100.00

으며, 연간 CO_2 흡수량은 전체 흡수량의 38.8%에 해당하는 41,929.8t/yr인 것으로 분석되었다. 한편, 잣나무군락의 경우 도시림 전체 면적에서 차지하는 비율은 1.8%였으나 CO_2 흡수량의 비율은 전체에서 약 7% 이상을 차지하고 있었다.

연간 단위면적당 CO_2 흡수량은 그림 4에서 나타난 바와 같이 식생군락별로 차이가 났으며, 도시림 전체의 평균값은 6.4t/ha/yr인 것으로 분석되었다. 산림의 단위면적당 CO_2 흡수량에 대해 조사한 다른 선행연구와 비교해보면, 조현길(1999)이 춘천과 강릉의 산림에 대해 조사한 결과 각각 6.3t/ha/yr, 5.9t/ha/yr이었다. 또한 국립산림과학원(2010b)에서 2008년도에 실시한 우리나라의 전체 산림에 대한 조사결과에 따르면 7.5t/ha/yr으로 산정되었으며, 경기도의 산림에 대해 조사한 박은진과 좌승희(2009)의 연구에서는 6.4t/ha/yr의 CO_2 가 산림에 의해 흡수된다는 결과를 도출하였다. 식생군락별로 비교해 보면 잣나무군락의 CO_2 흡수량이 21.2t/ha/yr로 가장 높

게 분석되었으며, 다음으로 상수리나무 군락이 13.4t/ha/yr로 높게 분석되었다. 활엽수종의 흡수량이 가장 높을 것으로 예상되었으나 이는 영급에 따른 성장량 및 임상별 생육특성의 차이에 의해 다른 결과가 나타난 것으로 판단된다. 대상지 내 잣나무군락의 평균임령은 II영급이었으며, 상수리군락은 III영급으로 나타났는데, 선행연구에 의하면 우리나라 산림수종의 대부분은 II영급일 때 재적생장률이 가장 양호하며, 영급이 높아짐에 따라 성장률이 점차 감소한다고 하였다(전어진, 2008). 또한 활엽수종의 경우 대부분 낙엽기가 있어 겨울철 광합성량의 감소로 인한 성장률이 감소하기 때문에 연평균 CO_2 흡수량은 상록수종인 잣나무가 더 높게 분석된 것으로 판단된다. 다음으로 CO_2 흡수량이 높게 나온 아까시-졸참군락, 상수리-아까시군락의 경우도 III영급으로 평균임령이 IV~V영급인 타 군락에 비해 성장률이 높아 흡수량이 높게 분석된 것으로 보인다.

FIGURE 4. 식생군락별 단위면적당 평균 CO_2 흡수량

2) 대기오염물질 흡수량

수종에 따른 대기오염물질 흡수량의 차이를 분석해 본 결과, 식생군락 중에서 침엽수종인 잣나무군락의 대기오염물질 흡수량이 가장 높게 분석되었으며, 활엽수종인 상수리군락, 아까시-졸참군락, 상수리-아까시군락이 다음으로 높게 분석되었다(그림 5). 일반적으로 활엽수의 대기오염물질 흡수량이 높다고 알려져 있으나 잣나무군락의 CO_2 흡수량이 상대적으로 높아 오염물질 흡수량 역시 높게 분석된 것으로 판단된다.

영급에 따른 대기오염물질의 흡수량 차이를 분석해 보기 위하여 식생군락을 임상으로 재분류한 뒤, 그 차이를 비교하였다(표 4). 그 결과, 영급이 증가함에 따라 오염물질의 흡수량은 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 일정 수령 이상인 성목의 경우 동화기관의 흡수량에 비해 비동화기관의 호흡량이 증가하게 되면서 연간 생장률이 점차 느려지기 때문인 것

으로 판단된다. 생장률의 감소는 곧 CO_2 흡수량 역시 감소한다는 것을 의미한다고 볼 수 있으며, 수목의 가스상 오염물질의 흡수속도는 CO_2 흡수속도에 비례하기 때문에 대기오염물질 흡수량 역시 감소하는 결과를 나타냈다고 볼 수 있다.

대상지 내 도시림 전체의 평균 오염물질 흡수량을 분석해 본 결과, SO_2 가 11.4kg/ha/yr, NO_2 가 26.0kg/ha/yr으로 나타났다. 이를 국립산림과학원(2010b)의 공익기능 계량화 연구에서 우리나라 전체 산림을 대상으로 조사한 결과와 비교해 보면 본 연구에서 산정한 흡수량이 더 높게 분석되었다는 것을 알 수 있다(표 5). 이는 공익기능 계량화 연구의 경우 SO_2 와 NO_2 의 농도에 대해 각각 전국 평균치인 0.0059ppm, 0.0225ppm을 적용하였기 때문인 것으로 판단되며, 대상지의 경우 SO_2 와 NO_2 의 평균 농도는 각각 0.0064ppm, 0.0291ppm으로 전국 평균치보다 높았다. 따

FIGURE 5. 식생군락별 단위면적당 평균 SO_2 , NO_2 흡수량

TABLE 4. 임상·영급별 대기오염물질 흡수량

임상	SO ₂ 흡수량(kg/ha/yr)					임상	NO ₂ 흡수량(kg/ha/yr)				
	영급						영급				
	II	III	IV	V	VI		II	III	IV	V	VI
침엽수	30.5	10.3	7.4	4.8	3.4	침엽수	70.0	22.1	16.8	10.0	6.9
활엽수	26.5	17.5	9.5	7.8	3.1	활엽수	54.3	37.9	21.1	19.6	6.7
혼효림	13.6	10.9	8.1	5.3	3.1	혼효림	29.5	23.8	18.1	12.9	6.6
평균	23.5	12.9	8.3	6.0	3.2	평균	51.3	27.9	18.7	14.2	6.7

TABLE 5. 우리나라 산림의 단위면적당 대기오염물질 흡수량

임상	SO ₂ 흡수량(kg/ha/yr)	NO ₂ 흡수량(kg/ha/yr)
침엽수림	5.79	10.72
활엽수림	11.48	21.24
혼효림	9.32	17.25
전체 산림	8.37	15.49

자료 : 국립산림과학원, 2010b. 필자재작성

라서 대상지가 대도시인 점을 감안할 때, 대기오염농도가 전국 평균치에 비해 높기 때문에 도시림의 대기오염물질 흡수량이 더 높게 분석된 것으로 판단된다.

3) 오염농도분포에 따른 흡수량의 차이

대기오염물질 흡수량에 대한 공간적 차이를 비교해 보기 위하여 SO₂, NO₂ 흡수량 현황도를 작성하였다(그림 6). 대상지 도시림 내에서 SO₂ 흡수량이 연간 30kg/ha/yr 이상인 지역의 면적은 약 484ha인 것으로 나타났으며, 해당 지역은 잣나무군락, 소나무-상수리군락, 상수리-아까시군락의 빈도가 높은 것으로 나타났다. 20~30kg/ha/yr인 군락은 총 면적이 227ha였으며, 상수리군락, 상수리-아까시군락, 일본잎갈나무군락의 빈도가 높았다. 반면, 5kg/ha/yr 미만으로 분석된 군락의 면적은 4,878ha로 전체 면적의 약 23%에 달했으며, 소나무-신갈군락, 소나무군락, 신갈군락의 빈도가 높았다. SO₂의 경우 흡수량이 적은 지역의 비율이 높았으며, 이는 대상지 전체적으로 SO₂ 농도가 비교적 낮은 편이기 때문에 도시림이 정화하게 되는 오염물질의 양이 상대적으로 적게 분석된 것으로 판단된다.

NO₂ 흡수량의 경우 50kg/ha/yr 이상인 군

락의 면적은 약 690ha였으며, 잣나무군락, 상수리군락, 소나무-상수리군락의 빈도가 높았다. 흡수량이 40~50kg/ha/yr인 군락은 면적이 169ha였으며, 상수리-아까시군락, 상수리군락 등의 빈도가 높았다. 반면, 5kg/ha/yr 미만으로 나타난 군락의 면적은 145ha였으며, 신갈군락, 소나무-신갈군락, 소나무군락 등의 빈도가 높았다. NO₂ 흡수량 현황도를 살펴보면, 동구나 북구보다는 남구나 수성구, 달서구 주변 지역의 흡수량이 많은 것으로 나타났으며, 이는 해당 지역의 NO₂ 오염농도가 높아 침적되는 양이 많기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 따라서 이 지역의 산림은 NO₂에 대한 오염 부하가 높은 편이며, 대기오염 정화기능의 요구도가 다른 곳이 비해 높은 지역이라 볼 수 있다.

4) 구별 대기오염농도와 영급구조에 따른 흡수량의 차이

대기오염농도의 차이에 따른 흡수량의 차이를 비교해 보기 위하여 대상지 전 지역에 걸쳐 넓게 분포하고 있는 주요 군락의 단위면적당 대기정화 기능을 구별로 비교하여 보았다(표 6). 소나무군락의 경우 대상지 전역에서 CO₂의 단위면적당 흡수량의 범위는

FIGURE 6. 대기오염물질 흡수량 현황도

4.10~5.55t/ha/yr로 큰 차이가 없었다. 이는 소나무군락의 영급분포가 III영급에서 IV영급 사이로 비교적 비슷하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 소나무군락의 구별 SO₂와 NO₂의 흡수량은 오염농도에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. SO₂의 농도가 가장 높고 NO₂ 농도가 두 번째로 높은 달서구의 경우 SO₂와 NO₂ 흡수량이 가장 높은 것으로 나타났다. 소나무-상수리군락 역시 달서구의 대기오염물질 흡수량이 가장 높게 나타났다. 이는 대기오염이 심화된 지역일수록 상대적으로 오염물질의 침적량이 높아지기 때문에 나타난 결과로 보이며, 영급 역시 다른 지역에 비해 낮기 때문에 연간생장률의 증가폭이 커 CO₂ 흡수량이 많기 때문인 것으로 판단된다.

상수리군락의 경우 달서구와 동구의 흡수량을 비교해 보면 CO₂ 흡수량은 동구가 1.6배 가량 높지만 SO₂ 흡수량은 달서구가 더 높은 것으로 나타났다. CO₂ 흡수량이 가스상 오염물질의 흡수량과 상관성이 크지만 대기 중 SO₂ 농도에 의한 침적량의 차이에 의해 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 리기다소나무군락의 경우 수성구와 동구의 흡수량 차이를 비교해 보면 평균 영급이 비슷하여 CO₂ 흡수량 역시 비슷하게 나타났으나, NO₂ 흡수량은 약 1.7배 가량 차이가 나는 것으로 나타났다. 이 역시 수성구의 NO₂ 농도가 동구에 비해 더 높기 때문인 것으로 판단되며, 대기오염농도가 흡수량에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

TABLE 6. 구별 대기오염 농도 및 주요 식생군락의 단위면적당 흡수량

행정구	농도(ppb)			소나무군락			소나무-상수리군락			상수리군락			리기다소나무군락					
	SO ₂	NO ₂	평균 영급	흡수량			평균 영급	흡수량			평균 영급	흡수량			평균 영급	흡수량		
				CO ₂	SO ₂	NO ₂		CO ₂	SO ₂	NO ₂		CO ₂	SO ₂	NO ₂		CO ₂	SO ₂	NO ₂
북구	5.9	23.3	III	5.55	9.84	18.77	IV	5.06	9.84	18.01	II	24.06	41.37	78.06	III	3.89	7.28	13.53
달서구	7.4	33.3	III	5.10	11.95	27.81	III	6.18	14.61	30.58	IV	9.32	22.05	48.48	III	2.60	6.17	11.32
서구	7.1	28.1	IV	4.73	10.98	19.89	IV	4.74	11.15	20.74	IV	7.98	18.73	34.47	II	5.88	13.70	24.22
동구	4.6	20.9	IV	4.70	6.54	13.89	IV	4.90	7.16	15.66	II	15.25	20.39	41.68	II	4.67	6.79	15.28
수성구	6.0	34.2	IV	4.69	9.18	26.61	IV	5.59	10.23	27.99	III	8.72	16.08	48.33	II	5.10	9.34	26.00
남구	7.0	34.2	IV	4.10	9.37	22.45	IV	4.89	10.66	26.41	V	6.21	13.72	32.75	II	5.88	13.29	32.06

CO₂ 흡수량: t/ha/yr, SO₂ 흡수량: kg/ha/yr, NO₂ 흡수량: kg/ha/yr

결론 및 제언

도시림은 대기오염물질들을 정화하고 피해를 저감시킬 수 있는 완충지역으로서 산림의 건전성 및 구조, 지역별 대기오염농도 등에 따라 정화기능의 차이가 있다. 따라서 산림 및 대기질의 지역적 차이를 파악하여 대기오염 저감방안 및 도시림 관리방안을 세우는 것은 도시환경구조에 따른 산림자원의 효율적 확보를 위해 중요한 과제라 할 수 있다. 이에 본 연구는 오염물질별 농도분포를 적용하여 정화기능의 공간적 차이를 규명하였다는 데 의의가 있다.

본 연구의 결과를 간단히 요약하면 대상지의 대기오염 농도분포도를 구축해 본 결과, 달서구의 SO₂ 농도가 가장 높게 나타났으며, NO₂의 경우 남구와 수성구가 가장 높게 나타났다. 또한 도심지뿐만 아니라 대상지 남동측 지역의 NO₂ 농도가 높은 것으로 나타났다. 대상지 내 도시림의 CO₂ 흡수량을 분석해 본 결과, 단위면적당 평균 6.4t/ha/yr인 것으로 나타났으며, 대기오염물질 흡수량은 SO₂가 11.4kg/ha/yr, NO₂가 26.0kg/ha/yr인 것으로 나타났다. 또한 공간적인 흡수량의 차이를 분석해 본 결과, SO₂의 경우 흡수량이 낮은 지역의 면적이 대부분을 차지하고 있었으며, NO₂의 경우 동구나 북구보다는 남구나 수성구, 달서구 주변 지역의 흡수량이 많은 것으로 나타났다.

도시림의 영급구조와 대기오염농도에 의한

흡수량의 차이에 대해 분석해 본 결과, 영급이 높아짐에 따라 대기오염물질의 흡수량은 감소한다는 사실을 알 수 있었다. 같은 영급일 경우에는 그 지역의 오염농도에 따라 흡수량이 크게 차이가 나는 것으로 확인되었으며, 오염농도가 높은 지역의 경우 흡수량이 높게 분석되었다.

대기오염농도의 공간분포를 고려하여 도시림의 대기정화기능을 평가해 본 결과, 오염이 심화된 지역에 대한 도시림의 정화기능이 상대적으로 저평가될 수 있었던 기존 연구의 한계를 보완할 수 있었다. 이는 도시림 중에서 대기정화기능이 특히 요구되는 지역에 대한 훼손의 방지 및 보전 필요성을 제시할 수 있는 정량적 자료로서 활용될 수 있을 것이다. 연구의 한계로는 수목의 오염물질 정화효과에 대해 수종별·계절별 차이를 고려한 침적속도를 적용하지 못했다는 점을 들 수 있으나 이는 추후 계량적 실험에 의해 개선되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 대기오염 문제라는 도시민의 건강과 직결되는 환경적 측면에서 중요한 의의를 가지고 있으며, 오염이 심화된 지역의 도시림이 훼손될 경우 그에 상응하는 정화기능의 상실효과에 대해서 정량적으로 탐구해 볼 수 있는 실험적 연구라 할 수 있다. 따라서 이를 바탕으로 대기질의 개선효과가 높은 도시림 지역을 탐색해보고 그에 대한 중요도를 평가하여 추후 환경자원의 가치와 도시림의 중요성에 대한 평가척도로서 활용될 수 있을 것이다.

주

- 1) 이 작업은 대구광역시 도시림 실태 조사를 목적으로 2007년에서 2008년까지 시행된 것으로 본 연구에서는 이 중 대상지에 해당되는 자료 일부를 사용하였다(대구광역시, 2008).

참고문헌

- 국립산림과학원. 2010a. 산림 온실가스 인벤토리를 위한 주요 수종별 탄소배출계수. 33쪽.
- 국립산림과학원. 2010b. 산림의 공익기능 계량화 연구. 87쪽.
- 국립환경연구원. 1993. 환경개선을 위한 정화생물 개발에 관한 연구(II)-대기질 개선을 위한 정화수 개발-. 32쪽.
- 김경태, 정성관, 박경훈, 오정학. 2005. GIS 및 RS기법을 활용한 산사태 취약성 평가. 한국지리정보학회지 8(1):75-87.
- 김동영. 2009. 대기질 모형 CMAQ을 이용한 수도권 미세먼지 특성 연구. 경기개발연구원. 9쪽.
- 김형호, 정세경, 정주상. 2006. 산림기능평가를 위한 GIS 응용모델의 개발. 한국지리정보학회지 9(4):1-11.
- 대구광역시. 2008. 대구광역시 도시림 실태 조사. 37쪽.
- 박경훈, 정성관. 1999. 광역적 녹지계획 수립을 위한 도시열섬효과 분석. 한국지리정보학회지 2(3):35-45.
- 박은진, 좌승희. 2009. 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안. 경기개발연구원. 145쪽.
- 오정학, 박경훈, 정성관, 이종원. 2005. 경관메트릭스를 이용한 금호강 유역 산림경관의 시,공간적 변화탐지. 한국지리정보학회지 8(2):81-94.
- 이우성, 정성관. 2011. GIS를 활용한 산림녹지의 환경조절적 기능 평가. 한국지리정보학회지 14(4):102-115.
- 이우성, 정성관, 박경훈, 김정태. 2010. 친환경적 공간계획을 위한 도시의 열환경 분석. 한국지리정보학회지 13(1):142-154.
- 전어진. 2008. 우리나라 산림의 임상별·수종별 재적생장량 및 재적생장률 추정에 관한 연구. 국민대학교 대학원 석사학위논문. 47쪽.
- 조용현, 조현길. 2002. 서울시 도시녹지의 대기정화효과. 한국환경복원녹화기술학회지 5(4):51-60.
- 조현길. 1999. 강원도 일부도시의 경관 내 탄소흡수 및 배출과 도시녹지의 역할. 한국조경학회지 27(1):39-53.
- 조현길, 안태원. 2001. 도시 침엽수에 의한 연간 CO₂ 흡수 속도 및 대기정화-소나무와 잣나무를 대상으로-. 한국환경생태학회지 15(2):118-124.
- 조현길, 조용현, 안태원. 2002. 서울 남산공원의 대기정화능과 가치. 환경생태학회지 16(2):172-178.
- 최철현, 정성관, 이우성. 2011. 공간구문론과 GIS를 이용한 조망점 위치결정. 한국지리정보학회지 14(2):53-68.
- 大氣環境に關する綠地機能檢討會. 1989. 大氣淨化 植樹指針: 綠のインビテーション. 第一法規.
- 戸塚 績. 1987. 植物の生産力に基づく各種植物群落のガス吸収量の評価. 国立公害研究所研究報告 108:19-24.
- Chow, P. and G.L. Rolfe. 1989. Carbon and hydrogen contents of short-rotation biomass of five hardwood species. Wood and Fiber Science 21(1):30-36.

- Hill, A.C. 1971. Vegetation: a sink for atmospheric pollutants. *Journal of the Air Pollution Control Association* 21(6):341-346.
 - IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IGES, Kanagawa, Japan. 24pp.
 - IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. IGES, Kanagawa, Japan. 11pp.
 - Jo, H.K., and E.G. McPherson. 1995. Carbon storage and flux in urban residential greenspace. *Journal of Environmental Management* 45:109-133.
 - Johnston, K., Ver Hoef., J.M. Krivoruch and N. Lucas. 2001. Using ArcGIS Spatial Analyst. ESRI Press. 141pp.
 - Kweon, B.S., W.C. Sullivan and A. Wiley. 1998. Green common spaces and the social integration of inner-city older adults. *Environment and Behavior* 30:832-858.
 - McPherson, E.G., and R.A. Haip. 1989. Emerging desert landscape in Tucson. *American Geograph Society* 79:435-449.
 - Roberts, B.R. and C.R. Krause. 1976. Changes in ambient SO₂ by Rhododendron and Pyracantha. *Hortscience* 11(2):111-112.
 - Smith, W.H. 1990. Air Pollution and Forests (2nd). Springer-Verlag, New York. 618pp.
 - Sullivan, W.C., F.E. Kuo and S.F. Depooter, 2002. The fruit of urban nature: vital neighbourhood spaces. *Environment and Behavior* 36:678-700.
 - Townsend, A.M. 1974. Sorption of ozone by nine shade tree species. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 99(3):206-208.
 - U.S. EPA. 1976. Open Space as an Air Resource Management Measure, Vol. I Sink Factor. EPA-450/3-76-028a.
- <http://airemiss.nier.go.kr>.
- <http://www.kaq.or.kr>. **KAGIS**