

도시생태계 수목의 대기정화 역할*

-용인시를 사례로-

조현길* · 안태원**

*강원대학교 건축·조경학부 · **강원대학교 대학원

Role of Atmospheric Purification by Trees in Urban Ecosystem - In the Case of Yongin -

Jo, Hyun-Kil* · Ahn, Tae-Won**

*Division of Architecture and Landscape Architecture, Kangwon National University

**Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Kangwon National University

ABSTRACT

This study quantified annual CO₂, SO₂ and NO₂ uptake and annual O₂ production by trees in Yongin's urban ecosystem, and explored values of urban tree plantings in atmospheric purification. Woody plant cover was only 7.7% with planting density of 1.3 trees/100m², and the tree-age structure was largely characterized by a young, growing tree population. Annual per capita pollutant emissions from fossil fuel consumption were 7.3t/yr for CO₂, 7.6kg/yr for SO₂, and 26.6kg/yr for NO_x.

Carbon dioxide storage per unit urban area by trees was 13.1t/ha and the economic value for CO₂ storage was ₩6.6millions/ha. Annual atmospheric purification was 2.0t/ha/yr for CO₂ uptake, 2.0kg/ha/yr for SO₂ uptake, 4.0kg/ha/yr for NO₂ uptake and 1.5t/ha/yr for O₂ production, and the annual economic value for the atmospheric purification was ₩1.5millions/ha/yr.

Urban trees stored an amount of CO₂ equivalent to about 3.1% of the total annual CO₂ emissions, and annually offset total CO₂ emissions by 0.5%. Annual SO₂ and NO₂ uptake by trees equaled 0.5% of total SO₂ emissions and 0.3% of total NO_x emissions, respectively. Urban trees also played an important role through producing annually 9.2% of the O₂ requirement for Yongin's total population, despite relatively poor tree plantings.

Future active plantings and greenspace enlargement in the study city could enhance the role of atmospheric purification by urban trees. The results from this study are expected to be useful in emphasizing environmental benefits of urban trees, and in urging the continuous necessity for tree planting and management budget.

Key Words : Emissions, Gaseous pollutants, Oxygen, Urban trees, Economic value

*: 이 논문은 1999년도 환경부의 환경기술개발사업 연구비에 의한 연구의 일부임.

I. 서론

수목은 광합성 과정에서 엽 기공을 통해, 온실가스인 CO₂를 비롯한 SO₂, NO₂ 등 가스상 물질을 흡수하여 그들의 대기농도를 낮추고, 인간의 호흡에 필요한 O₂를 방출하면서 신선한 공기를 제공한다. 도시수목의 이러한 대기정화 역할은 과거 실험적, 생리적 등 다양한 각도에서 연구된 바 있다(이경재, 1993). 그러나, 기존 연구는 특정 시기에 국한하여 엽내의 오염물질 함량을 분석하거나, 인공환경 조건하에서 주로 유목을 대상으로 단기간에 걸친 오염물질 흡수량을 비교하여, 단목(單木) 수준에서 수종의 내공해성 강약 여부를 파악하는데 초점을 두었다.

자연환경 조건하에서 성목의 연간 생장기간에 걸친 CO₂ 흡수 및 대기정화량이나 도시 전체 식재수목의 그 역할을 구명한 국내 연구는 흔치 않다. 수목의 큰 수관 체적과 긴 생장수명은 장기간에 걸친 자연상태하의 대기정화능 측정을 제한하였다고 볼 수 있다. 다만, 기후변화의 심각성을 인식하고 대기 CO₂의 연간 농도저감에 영향을 미치는 도시수목의 효과를 계량화한 소수의 연구가 존재할 뿐이다(조현길과 조동하, 1998; 조현길, 1999; 조현길과 이기의, 2000). 국외의 경우, 슈카고 및 새크라멘토시 전체 면적을 대상으로 생체량방정식에 기초하여 수목의 CO₂ 흡수률(Nowak, 1994a; McPherson, 1998), 그리고 침착속도모델(deposition velocity model)을 적용하여 수목에 의한 SO₂, NO₂ 등 대기오염물질의 흡수률(Nowak, 1994b; Scott et al., 1998) 계량화한 바 있다.

도시수목의 CO₂ 흡수 및 대기정화 역할을 파악하는 것은 국내의 미흡한 관련 정보를 확충하고 도시내 수목 식재의 환경적 중요성을 홍보하는데 일조할 수 있다. 용인시는 개발도상의 중소도시로서 인구증가로 대기환경의 악화가 예상되는 지역이다. 본 연구의 목적은 용인시를 대상으로 도시생태계 수목의 연간 CO₂, SO₂, NO₂ 흡수 및 O₂ 생산을 계량화하여, 도시내 수목식재가 대기정화에 기여하는 가치를 구명하는 것이다. 본 연구에서, 도시생태계 수목이란 산림지 및 농경지를 제외한 타 도시토지이용내 식재된 수목을 지칭한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 도시수목 조사

용인시 읍, 면, 동별 토지이용 구성을 대표하는(용인시, 1998) 기흥읍, 양지면, 중앙동, 역삼동, 유림동 및 동부동을 식생조사 행정구역으로 선정하였다. 축척 1/5,000의 지형도상에서 각 행정구역의 중심점을 결정한 후, 중심점에서 8개 등방향으로 각 방향의 행정구역 경계선까지 직선을 연장하고 3cm 등간격의 표본추출지점을 설정하였다. 현지답사를 통해, 표본추출지점 가장 가까이에 위치하는 건물 또는 공원의 부지경계내에 식재된 모든 수목의 수종, 직경, 수고, 수관체적, 피도 등을 조사하고 토지이용 유형을 기록하였다. 산림지, 농경지 및 수면을 제외한 전체 표본추출수는 90개이었다.

2. 대기 물질배출량 산출

용인 시민이 최근 3년간 소비한 전기, 석유, 가스, 석탄 등의 용도별 화석에너지 총량을 통계자료의 수집(용인시 법무통계과와의 사신, 2001)을 통하여 파악하였다. 에너지소비 종류별 탄소배출계수(에너지경제연구원, 1999)를 이용하여 연간 CO₂ 배출총량을, 그리고 대기오염물질 배출계수(국립환경연구원, 2000)를 이용하여 연간 SO₂ 및 NO_x 배출총량을 산출하였다. 전기의 경우 공급된 총전력 중 수력, 원자력 및 화력의 전력원별 구성비를 파악한 후, 화력발전은 석탄, 석유 및 가스로부터의 발전량비(<http://www.kepco.co.kr/kepctotal>)에 근거하여 단위소비전력당 대기배출량을 산정하였다. 원자력 및 수력발전에 의한 대기배출은 극히 저량이므로 그 산정에서 제외하였다.

3. 수목의 대기정화량 산정

수목의 CO₂ 저장은 기존 연구에서 발췌한 수종별 생체량방정식들(조현길, 1999)을 이용하여 생체량을 구하고, 이를 광합성 수식에 따라 CO₂량으로 전환하여 계량화되었다(1g 생체량=1.63g CO₂). 여기에서, CO₂ 저장량이란 수목이 생장하면서 여러 해에 걸쳐 축적한 양을 의미하는 것으로서, 한 해 동안 흡수한 연간 CO₂

흡수량과는 구별된다. 수목의 생체량은 동일 수종이라도 생장을 좌우하는 지역별 각종 환경조건에 따라 상이할 수 있다. 따라서, 생체량방정식의 이용은 그 방정식이 유도된 수목직경급 범위내의 개체에 한정하였고, 개체별로 단 하나의 생체량방정식만을 적용하기 보다는 가급적 다수(최대 5개)의 방정식을 이용한 평균 생체량을 구하여, 가능한 한 산정치의 신뢰성을 증진하는데 주력하였다. 생체량방정식을 구할 수 없는 특정 수종의 경우는 동일 속(genus) 또는 그룹(활엽수 또는 침엽수)의 방정식들을 대응하였다.

수목의 연간 대기정화는 운반형 적외선가스분석기에 의한 가스 교환율의 연중 측정과 직경크기에 따른 엽면적 측정을 통해 유도한 수종별 산정식을 활용하여 계량화되었다. 즉, 상록수의 연간 CO₂, SO₂ 및 NO₂ 흡수량은 소나무(*Pinus densiflora*) 및 잣나무(*Pinus koraiensis*)의 각 흡수량 방정식(조현길과 안태원, 2001)을 적용하여 산정하였다. 낙엽수의 연간 CO₂ 흡수량은 은행나무(*Ginkgo biloba*), 플라타너스(*Platanus occidentalis*), 느티나무(*Zelkova serrata*) 및 단풍나무(*Acer palmatum*)의 방정식들(조현길과 조동하, 1998)을 이용하여 산출하였다. 낙엽수의 연간 SO₂ 및 NO₂ 흡수는 아래의 수리와 같이, CO₂와 SO₂ 또는 NO₂간 흡수속도비(Hill, 1971)를 적용하여 상기한 수종별 생장에 따른 단목의 연간 SO₂ 및 NO₂ 흡수량을 산정하는 방정식을 유도하여 계량화되었다. 수목에 의한 가스상 오염물질의 흡수는 엽 기공을 통해 이루어지므로 CO₂ 흡수속도와 밀접한 관계가 있다. 방정식의 변수인 총엽면적과 단위엽면적당 연간 CO₂ 총흡수량은 조현길과 조동하(1998)의 연구자료를 활용하였다.

수목의 연간 SO₂ 또는 NO₂ 흡수량 = (가을 총엽면적 회귀식 × 단위엽면적당 연간 CO₂ 총흡수량 × 월별 엽면적 변화를 반영한 보정계수) × CO₂와 SO₂ 또는 NO₂간 단위체적 및 농도당 증량의 흡수속도비 × (SO₂ 또는 NO₂의 대기농도/CO₂의 대기농도)

수목의 SO₂ 및 NO₂ 흡수량 산정시 대기 CO₂, SO₂ 및 NO₂ 농도는 용인시에 관련 자료가 부재하여, CO₂ 농도의 경우 적외선가스분석기로 1999년부터 2000년까지 2년간 실측한 춘천시의 계절별 평균치를(조현길과 안태원, 2001), 그리고 SO₂ 및 NO₂ 농도의 경우 경기

도내 수원, 부천, 평택 등 14개시 25개 지점에서 측정된 계절별 평균치를(경기도 보건환경연구원과의 사신, 1999) 대응하였다. 수목의 연간 O₂ 생산량은 6mole의 CO₂를 흡수하고 6mole의 O₂를 방출하는 광합성 수식(Lieth, 1963)에 입각하여, 연간 흡수한 CO₂량에 0.7273을 곱하여 산정하였다.

4. 대기정화 경제가치 산출

수목의 대기정화량은 CO₂ 약 50만원/t, SO₂ 200만원/t, NO₂ 500만원/t 등의 처리 또는 저감비용(California Energy Commission, 1992; 임업연구원, 1997; 에너지경제연구원, 1999)을 가정하여 경제가치로 전환되었다. 연간 O₂ 생산의 경제가치는 O₂ 제조원가인 약 30만원/t(임업연구원, 1997)에 근거하여 산출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 도시 수목식재 현황

용인시의 행정구역상 총면적은 1999년 기준 592km²이며 인구밀도는 607인/km²이었다(용인시 법무통계과와의 사신, 2001). 산림지, 농경지 및 하천을 제외한 도시생태계의 토지이용은 총면적의 약 10%를 차지하였다. 그 중, 교통용지를 포함한 상공업지의 점유비가 가장 높아 약 50%를, 주거지가 40%를 구성하는 것으로 나타났다. 공공용지, 일상권 공원 등의 점유율은 각각 1% 미만이었다.

토지이용 유형별 수목피도(Table 1 참조)는 공원에

Table 1. Density, basal area and cover of woody plants by land use type in Yongin's urban ecosystem (mean ± SE)

Land use	n	Density (tree/100m ²)	Basal area (cm ² /100m ²)	Cover (%)	
Residential	Detached	28	1.6 ± 0.3	212 ± 52	11.3 ± 2.4
	Multifamily	14	2.8 ± 0.9	123 ± 33	8.6 ± 2.6
Commercial and industrial	24	0.9 ± 0.3	76 ± 23	5.0 ± 1.7	
Institutional	13	1.2 ± 0.3	175 ± 55	8.6 ± 1.9	
Park	6	1.8 ± 0.3	276 ± 84	14.7 ± 4.2	
Vacant	5	0	0	0	

서 약 15%로서 평균적으로 가장 높았고, 이어서 단독 주거지 11%, 다세대주거지 및 공공용지 9%의 순으로 나타났다. 상공업지의 수목피도는 5%로서 토지이용 유형 중 가장 낮았다. 흉고직경 2cm 이상의 교목밀도는 다세대주거지에서 약 3주/100m²로서 평균적으로 타 토지이용에 비해 가장 높았으나, 기저면적이 상대적으로 적은 이유는 유목의 분포가 많았기 때문이다. 도시생태계 전체의 교목밀도와 기저면적은 각각 1.3주/100m², 133cm²/100m²이고 수목피도는 7.7%이었다. 서울시 일부 행정구에서, 교목밀도가 3주/100m², 수목피도가 13%이었는데(조현길 등, 1998), 이에 비하면 용인시에서의 수목식재는 더 빈약한 것으로 나타났다.

교목의 흉고직경급 분포는 토지이용 유형에 따라 다소 차이가 있었으나, 표본추출된 전체 교목 중 10cm 미만이 약 65%, 20cm 미만이 91%, 30cm 미만이 97%를 점유하였다(Figure 1 참조). 결국, 용인시 도시생태계는 유목내지는 성장과정의 수목들이 우점하는 것으로 분석된다. 다세대주거지에서는 성목의 분포비가 토지이용 중 가장 낮아 직경 10cm 미만이 약 85%를, 20cm 미만이 98%를 차지하였다. 이는 다세대주택 건설 및 수목식재의 경과연수가 비교적 짧음에 기인하는 것으로 사료된다.

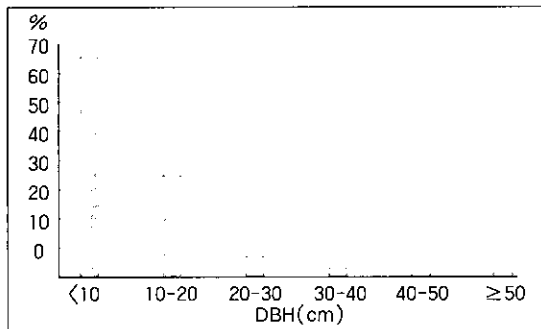


Figure 1. Percentages of DBH distribution of trees sampled in Yongin's urban ecosystem

도시생태계에 식재된 수종 중, 평균 상대우점치가 가장 높은 상위 5개 교목종은 향나무(*Juniperus chinensis*), 은행나무, 단풍나무, 잣나무 및 느티나무 이었다(Table 2 참조). 관목종의 경우는 무궁화(*Hibiscus syriacus*), 회양목(*Buxus microphylla* var. *koreana*), 쥐똥나무(*Ligustrum obtusifolium*), 철쭉(*Rhododendron schlippenbachii*), 개나리(*Forsythia koreana*) 등의 순이었다. 이들은 대개 춘천 및 강릉시와 서울 강남 및 중랑구에서도 상대적으로 높은 상대우점치를 보였던(조현길 등, 1998) 도시의 주요 식재수종들이다.

2. 대기 물질배출량

용인 시민이 1997년부터 1999년까지 3년 동안 소비한 연간 평균 화석에너지의 총량은 전기 2,975,490MWh/yr, 석유 325,030kL/yr, 가스

Table 2. Mean importance values of woody plant species in Yongin's urban ecosystem

Species	MIV (%)
<i>Juniperus chinensis</i>	11.33
<i>Ginkgo biloba</i>	9.02
<i>Acer palmatum</i>	6.08
<i>Hibiscus syriacus</i>	5.58
<i>Pinus koraiensis</i>	5.35
<i>Zelkova serrata</i>	5.05
<i>Buxus microphylla</i> var. <i>koreana</i>	4.04
<i>Pinus densiflora</i>	3.79
<i>Ligustrum obtusifolium</i>	2.85
<i>Magnolia kobus</i>	2.71
<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	2.15
<i>Forsythia koreana</i>	2.08
<i>Taxus cuspidata</i>	2.06
<i>Platanus occidentalis</i>	2.04
<i>Abies holophylla</i>	1.97
Other 84 species	33.90

Table 3. Emission coefficients of CO₂, SO₂, and NO_x per unit consumption for fossil fuels of each type

	Electricity (kWh)	Oil (L)*			Gas		Coal (kg)		
		Gasoline	Kerosene	Diesel	B-C	LNG(m ³)	LPG(kg)	Stone	Soft
CO ₂ (kg)	0.44	2.35	2.57	2.79	3.15	2.46	3.04	1.80	2.49
SO ₂ (g)	0.77	-	1.70	0.85	7.60	0.01	0.02	8.19	4.56
NO _x (g)	0.50	-	5.46	42.30	5.87	2.31	4.41	2.40	2.69

*: Sulfur content-Diesel: 0.05%; B-C: 0.3-0.5%

Source-CO₂: Korea Energy Economics Institute(1999); SO₂ and NO_x: National Institute of Environmental Research(2000)

80,750t/yr이었다. 에너지소비 종류별 배출계수(Table 3 참조)를 이용하여 연간 총 대기배출량을 산출한 결과, CO₂ 배출량은 약 2,400kt/yr이었고 SO₂ 및 NO_x 배출량은 각각 2,500t/yr, 8,750t/yr이었다. 총 CO₂ 배출량의 약 55%가 전기, 35%가 석유, 그리고 나머지 10%가 가스소비에 기인하는 것으로 분석되었다. SO₂ 및 NO_x 배출의 경우, 전기소비가 SO₂ 배출총량의 92%를, 석유소비가 NO_x 배출총량의 80%를 각각 차지하였다(Table 4 참조).

Table 4. Total annual emissions of CO₂, SO₂, and NO_x from fossil fuel use in Yongin averaged for 3 years from 1997-1999

	Emission (t/yr)	Electricity (%)	Oil (%)	Gas (%)
CO ₂	2,398,400	54.6	35.2	10.2
SO ₂	2,499	91.7	8.3	0.0
NO _x	8,754	17.0	80.0	3.0

전기소비량의 용도별 구성비는 제조업으로 대표되는 산업용이 73%로서 가장 높아, SO₂ 및 CO₂ 배출은 공장가동의 영향이 컸음을 시사한다. 공급된 총 전기에너지의 약 57%는 화력, 40%는 원자력, 그리고 나머지 3%는 수력에 의한 것이었고, 화력발전량의 구성비는 석탄 57%, 가스 23% 및 석유 20%이었다. 인구 1인당 연간 대기배출량은 CO₂ 7.3t/yr, SO₂ 7.6kg/yr, NO_x 26.6kg/yr인 것으로 나타났다. 용인시의 1인당 연간 CO₂ 배출량은 산업용 에너지 비중이 적은 춘천 및 강릉시의 5.7t/yr(조현길, 1999)보다 많았다.

3. 수목의 대기정화량

도시 상록수와 낙엽수 단목의 생장에 따른 연간 CO₂, SO₂, NO₂ 흡수 및 O₂ 생산량을 분석하면(Table 5 참조), 낙엽수의 대기정화 효과는 동일 흉고직경의 상

Table 5. Annual CO₂, SO₂ and NO₂ uptake and annual O₂ production per tree by DBH growth for tree species groups

Species	Gas*	DBH (cm)			
		10	20	30	40
Evergreen	CO ₂	11.9	33.1	57.0	80.0
	SO ₂	5.8	18.8	37.4	61.1
	NO ₂	11.7	38.0	75.9	123.9
	O ₂	8.7	24.1	41.5	58.2
Deciduous	CO ₂	12.2	57.5	140.5	263.5
	SO ₂	11.1	48.1	113.8	210.2
	NO ₂	22.6	97.6	230.9	426.4
	O ₂	8.9	41.8	102.2	191.6

*: CO₂ and O₂: kg; SO₂ and NO₂: g

록수보다 더 컸고 그 차이는 직경이 클수록 증가하는 경향을 보였다. 흉고직경 20cm인 도시 낙엽수는 상록수보다 1.7배 많은 약 58kg/yr의 CO₂를 흡수하고 42kg/yr의 O₂를 생산하였다. 그리고 상록수보다 2.6배 많은 48g/yr의 SO₂와 98g/yr의 NO₂를 흡수하였다. 여기에서, 낙엽수의 대기정화량은 은행나무, 느티나무 및 단풍나무 평균치를, 상록수의 경우는 소나무 및 잣나무 평균치를 의미한다. 이러한 차이는 낙엽수의 단위 엽면적당 광합성능과 엽면적이 상록수보다 크기 때문인 것으로 판단된다(조현길과 조동하, 1998; 조현길과 안태원, 2001). 시민 1인당 연간 호흡에 필요한 O₂량은 약 270kg이다(김기원, 1984). 흉고직경 20cm인 낙엽수 단목은 시민 1인이 해마다 필요로 하는 O₂량의 약 16%를 생산하고, 또한 28L의 난방등유 소비로부터 배출되는 SO₂량을 해마다 흡수하는 셈이다.

도시생태계 수목의 토지이용별 단위면적당 대기정화량은 평균적으로 공원에서 가장 많았으며, 이어서 단독주거지, 공공용지, 다세대주거지의 순이었고 상공업지에서 가장 적었다(Table 6 참조). 즉, 수목의 CO₂, SO₂, NO₂ 흡수 및 O₂ 생산량은 단위면적당 기저면적이 크고 피도가 높을수록 많은 경향이였다. 도시생태계

Table 6. Atmospheric purification by woody plants per ha for each land use type in Yongin's urban ecosystem (mean±SE)

Land Use	CO ₂ storage (t)	Annual uptake			Annual O ₂ production(t/yr)	
		CO ₂ (t/yr)	SO ₂ (kg/yr)	NO ₂ (kg/yr)		
Residential	Detached	22.4±6.2	3.1±0.8	3.1±0.7	6.3±1.3	2.3±0.6
	Multifamily	10.5±2.9	1.4±0.4	2.0±0.5	4.0±1.1	1.0±0.3
Commercial and industrial	6.9±2.2	1.1±0.4	1.0±0.4	2.0±0.7	0.8±0.3	
Institutional	18.7±6.2	2.4±0.8	2.1±0.7	4.2±1.3	1.7±0.6	
Park	25.5±7.5	4.6±1.4	5.2±2.2	10.5±4.5	3.3±1.0	

전체의 경우, 수목의 단위면적당 CO₂ 저장량과 연간 CO₂ 흡수량은 각각 13.1t/ha, 2.0t/ha/yr이었고, 연간 SO₂ 및 NO₂ 흡수량은 각각 2.0kg/ha/yr, 4.0kg/ha/yr, 그리고 연간 O₂ 생산량은 1.5t/ha/yr이었다. SO₂ 및 NO₂ 흡수량은 용인시 인근 경기도내 도시들의 계절별 평균 SO₂ 및 NO₂ 대기농도를 적용하여 산출된 것으로서, 도시별 SO₂ 및 NO₂ 농도의 고저에 따라 그 흡수량엔 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 수원, 부천, 평택 등 14개 도시의 평균 SO₂ 및 NO₂ 농도는 중부지방 상륙수의 실질적 생장기간인 3-11월에 각각 7.6 및 31.6ppb이었고, 낙엽수의 생장기간인 5-10월엔 각각 6.9 및 28.7ppb이었다.

4. 도시수목의 대기정화 역할 및 경제가치

용인 도시생태계 총면적을 대상으로 한 식재수목의 CO₂ 총저장량과 연간 CO₂ 총흡수량은 각각 약 75,170t, 11,260t/yr이었다(Table 7 참조).

Table 7. Total atmospheric purification by woody plants and economic value for entire area in Yongin's urban ecosystem

	CO ₂ storage	Annual uptake			Annual O ₂ production
		CO ₂	SO ₂	NO ₂	
t	75,170	11,260	11	23	8,190
₩(million)	37,600	5,600	22	100	2,500
% offset*	3.1	0.5	0.5	0.3	9.2

*: Percentage of storage or uptake against total annual emissions for CO₂, SO₂ and NO₂, and percentage of O₂ production against an amount necessary for total population

연간 SO₂ 및 NO₂ 총흡수량은 각각 11,200kg/yr, 22,670kg/yr, 그리고 연간 O₂ 총생산량은 8,190t/yr이었다. 도시수목의 CO₂ 총저장 경제가치는 약 376억원에 상당하였다. 식재수목의 연간 대기정화 경제가치는 CO₂ 총흡수 56억원/yr, SO₂ 총흡수 22백만원/yr, NO₂ 총흡수 1억원/yr, O₂ 총생산 25억원/yr 등으로서, 이들 연간 가치를 합하면 약 82억원/yr에 달하였다.

연구대상지에는 흉고직경 2cm 이상의 수목이 총 745천주가 식재되어 있는 것으로 산출되었다. 수목 1주당 연간 대기정화 경제가치는 직경크기에 따라 상이하겠지만 평균적으로 약 11,000원/yr이었다. 또한, 수목

1주는 평균 50,000원에 상당하는 CO₂를 저장하고 있다. 도시수목의 단위면적당 연간 대기정화 경제가치는 147만원/ha/yr이었고, CO₂ 저장 경제가치는 655만원/ha인 것으로 나타났다.

도시수목은 화석연료 소비에 기인한 용인시 연간 CO₂ 배출총량의 약 3.1%에 해당하는 CO₂를 저장하고 있었고, 연간 CO₂ 흡수를 통해 그 배출량의 0.5%를 상쇄시키는 역할을 담당하였다(Table 7 참조). 수목의 연간 SO₂ 흡수량은 SO₂ 배출총량의 약 0.5%, 연간 NO₂ 흡수량은 NO_x 배출총량의 0.3%에 각각 상당하였다. 또한, 도시수목은 춘천, 강릉 및 서울시에서보다 그 식재피도가 낮다 하더라도(조현길 등, 1998; 조현길, 1999), 1997-1999년 연평균 총인구(328,600인)의 호흡에 필요한 O₂량의 약 9.2%를 해마다 생산하는 중요한 역할을 제공하였다. 인구 1인당 연간 대기배출량에 근거하면, 식재수목은 최소한 1,540인의 CO₂ 배출량을, 1,470인의 SO₂ 배출량을, 그리고 850인의 NO_x 배출량을 해마다 흡수하는 셈이었다. 아울러, 연간 약 30,330인이 호흡할 수 있는 O₂량을 생산하였다.

춘천과 강릉시의 도시 및 삼림수목은 연간 CO₂ 흡수를 통해 CO₂ 배출총량의 2.2-2.3%를 상쇄시키는 것으로 보고되었다(조현길, 1999). 용인시 수목의 연간 CO₂ 흡수 효과는 이들 도시의 경우보다 적으나 산림지 수목의 흡수 역할을 배제한 것이다. 향후, 용인시 행정구역내에 분포하는 산림을 포함한 연구를 수반하여 대기오염물질 배출 대비 도시식재 수목과 산림지 수목의 통합적인 대기정화 효과를 구명하고, 도시 난개발을 사전에 방지할 녹지공급 총량지표를 마련할 필요가 있다.

선진국들의 1997년 기후변화협약은 1990년 온실가스 배출 대비 평균 5%를 2010년까지 삭감하기로 타결한 바 있다(에너지경제연구원, 1999). 산림지 수목의 효과를 제외한 도시식재 현황만을 고려하면, 용인시에서 2010년까지 현 연간 CO₂ 배출량의 5%를 저감하기 위해서는 흉고직경 20cm의 도시낙엽수를 인구 1인당 약 6주 추가 식재해야 가능한 셈이다. 최근의 연평균 총인구 기준, 1인당 연간 호흡에 필요한 산소량을 제공하기 위해서도 역시 동일 직경크기의 낙엽수 6주가 더 식재되어야 한다. 대기정화능 측면만을 고려한다면 추천 가능한 식재수종의 예는 은행나무, 느티나무 등이다(조현길과 조동하, 1998).

CO₂를 비롯한 대기오염농도의 증가는 계속되는 화석 연료의 사용과 수목벌채에 기인한다. 기후변화 지연 및 대기오염 저감은 화석연료 절약과 대체에너지 개발, 그리고 삼림훼손 제어와 수목식재만을 통해 가능하다. 도시 수목식재와 녹지확충은 대체에너지의 개발보다 대기를 정화하는데 있어 시간과 비용의 절약면에서 효율적일 뿐만 아니라, 삼림훼손의 영향을 상쇄시키기 위한 대체적 역할의 일부를 담당할 수 있다. 본 연구에서 제시한 경제가치는 도시수목의 환경적 혜택을 홍보하고 식재 및 관리를 위한 예산확보의 필요성을 설득할 객관적인 기반자료가 될 것으로 기대한다.

IV. 결론

본 연구는 용인시를 대상으로 도시생태계 수목의 연간 CO₂, SO₂, NO_x 흡수 및 O₂ 생산을 계량화하고, 도시내 수목식재가 대기정화에 기여하는 가치를 구명하였다. 도시생태계 전체의 교목밀도는 1.3주/100m²이고 수목피도는 7.7%로서, 수목식재가 비교적 빈약한 것으로 나타났다. 흉고직경 20cm 이하인 교목이 전체의 91%를 점유하여 유목내지는 성장과정의 수목들이 우점하였다. 최근 인구 1인당 연간 대기배출량은 CO₂ 7.3t/yr, SO₂ 7.6kg/yr, NO_x 26.6kg/yr이었으며, 산업용으로 대표되는 전기소비자가 SO₂ 배출총량의 92%를, 석유소비가 NO_x 배출총량의 80%를 각각 차지하였다.

도시 낙엽수 단목의 대기정화 효과는 단위엽면적당 광합성능과 엽면적의 차이로 동일 흉고직경의 상록수보다 더 컸고, 그 효과의 차이는 직경이 클수록 증가하는 경향을 보였다. 도시생태계 단위면적당 수목의 CO₂ 저장량과 연간 CO₂ 흡수량은 각각 13.1t/ha, 2.0t/ha/yr, 연간 SO₂ 및 NO₂ 흡수량은 각각 2.0kg/ha/yr, 4.0kg/ha/yr, 그리고 연간 O₂ 생산량은 1.5t/ha/yr이었다. 도시수목의 CO₂, SO₂ 및 NO₂ 흡수와 O₂ 생산을 포함한 연간 대기정화 경제가치는 약 1.5백만원/ha/yr이었고, CO₂ 저장 경제가치는 6.6백만원/ha인 것으로 나타났다.

도시수목은 화석연료 소비에 기인한 연간 CO₂ 배출총량의 약 3.1%에 해당하는 CO₂를 저장하였고, 연간 CO₂ 흡수를 통해 그 배출량의 0.5%를 상쇄시키는 역

할을 담당하였다. 연간 SO₂ 흡수량은 SO₂ 배출총량의 약 0.5%, 연간 NO₂ 흡수량은 NO_x 배출총량의 0.3%에 각각 상당하였다. 또한, 도시수목은 빈약한 식재에도 불구하고 총인구의 호흡에 필요한 O₂량의 약 9.2%를 해마다 생산하는 중요한 역할을 제공하였다.

기후변화 지연 및 대기오염 저감은 화석연료 절약과 대체에너지 개발, 그리고 삼림훼손 제어와 수목식재를 통해 가능하다. 대기정화능을 고려한 적정수종 선정, 유목의 성장관리 등을 비롯한 도심지 유휴공간 및 인공지반의 적극적 수목식재와 녹지확충은 상기한 대기정화 효과를 더욱 증진할 수 있을 것이다. 본 연구의 결과는 도시수목의 환경적 혜택을 강조하고 식재 및 관리를 위한 예산확보의 필요성을 설득할 객관적 기반정보가 될 것으로 기대한다. 본 연구는 용인시 행정구역내에 분포하는 산림지 수목의 역할을 고려하지 않았다. 향후, 삼림수목을 포함한 통합적인 대기정화 효과를 구명하고, 도시 난개발을 사전에 방지할 대기오염물질 배출 대비 녹지공급 총량지표를 마련할 필요가 있다.

인용문헌

1. 국립환경연구원(2000) 대기오염물질배출량 1999.
2. 김기원(1984) 삼림육장 설계를 위한 기초연구. 한국임학회지 65: 31-42.
3. 에너지경제연구원(1999) 한국의 지구온실가스 배출과 저감 정책 도입방안 연구. 연구보고서 99-01.
4. 용인시(1998) 용인통계연보.
5. 이경재(1993) 대기오염과 산성비가 생태계에 미치는 영향. 한국대기보전학회지 9(1): 11-18.
6. 임업연구원(1997) 산림의 공익기능 계량화. 임업연구보고서.
7. 조현길(1999) 강원도 일부도시의 경관내 탄소흡수 및 배출과 도시녹지의 역할. 한국조경학회지 27(1): 39-53.
8. 조현길, 안태원(2001) 도시 침엽수에 의한 연간 CO₂ 흡수 및 대기정화. 한국환경생태학회지(인쇄 중).
9. 조현길, 이경재, 권전오(1998) 서울시의 토지이용 및 녹지구조. 환경생태학회지 12(1): 30-41.
10. 조현길, 이기희(2000) 도시녹지의 에너지절약 및 대기 CO₂ 농도저감과 계획지침. 한국조경학회지 27(5): 38-47.
11. 조현길, 조동하(1998) 도시 주요조경수종의 연간 CO₂ 흡수. 한국조경학회지 26(2): 38-53.
12. California Energy Commission(1992) Electricity Report: Air Quality. Sacramento, CA.
13. Hill, A. C.(1971) Vegetation: a sink for atmospheric pollutants. Journal of the Air Pollution Control

- Association 21(6): 341-346.
14. Lieth(1963) The role of vegetation in the carbon dioxide content of the atmosphere. *Journal of Geophysical Research* 68(13): 3887-3898.
 15. McPherson, E. G.(1998) Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24(4): 215-223.
 16. Nowak, D. J.(1994a) Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In E. G. McPherson, D. J. Nowak, and R. A. Rowntree, eds., *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. General Technical Report NE-186. Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, pp. 63-81.
 17. Nowak, D. J.(1994b) Air pollution removal by Chicago's urban forest. In E. G. McPherson, D. J. Nowak, and R. A. Rowntree, eds., *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. General Technical Report NE-186. Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, pp. 63-81.
 18. Scott, K. I., E. G. McPherson, and J. R. Simpson(1998) Air pollutant uptake by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24(4): 224-234.

원고접수: 2001년 6월 12일
최종원고 접수: 2001년 7월 20일
2인 익명 심사필