

녹지계획지표 수립을 위한 도시녹지의 CO₂ 저감효과 분석

- 춘천시를 대상으로 -

안태원 · 조현길
강원대학교 조경학과

I. 서론

과거 성장 위주의 개발논리와 화석연료에 의존한 에너지소비 및 산업구조로 인해 현 세대는 기후변화와 에너지 위기에 당면해 있다. 지구의 평균 기온은 지난 100년간 0.74°C 증가하였고, 최근 25년간 그 증가 추세가 100년간 추세보다 2배 이상 급속히 진행되었다(권원태, 2008). 국제사회는 금세기말 지구 온도 상승을 2°C 이내로 억제하는 글로벌 장기목표(shared vision)를 실현하기 위하여 2020년 중기 온실가스 감축목표를 국가별로 설정하여 발표하고 있다(녹색성장위원회, 2009). 우리나라는 2008년 저탄소 녹색성장을 국가비전으로 제시하였고, 국토해양부는 2009년 8월 저탄소 녹색도시 조성을 위한 제도적 기반을 확충하고 도시공간적 적응역량을 강화하기 위하여 저탄소 녹색도시 조성을 위한 도시계획수립지침(국토해양부 훈령 제422호)을 제정하였다.

기후변화를 야기하는 주요 온실가스인 CO₂의 대기 농도 증가는 계속되는 화석연료의 소비와 무분별한 산림훼손에 기인한다(Schneider, 1990). 기후변화의 지연은 CO₂의 대기 배출원을 줄이고 흡수원을 확충하는 저탄소 도시의 구현을 필요로 한다. 즉, 석탄, 석유 등 화석연료의 효율적 이용 및 절약, 저탄소 연료나 대체에너지 개발 등 기술적 대책과 더불어, 개발에 따른 산림훼손의 제어 및 녹지 확충이 요구된다. 후자는 대체에너지의 개발보다 CO₂ 농도를 감소시키는데 있어 시간과 비용의 절약면에서 더욱 효과적일 것이다.

현재의 녹지계획지표는 공원녹지율, 1인당 공원면적 등이 제시되고 있는데, 도시관리계획상의 공원녹지에 한정되고 도시 전체에서 총량적인 기준이나 흡수원으로서의 녹지기능에 대한 고려가 부재한 실정이다. 본 연구의 목적은 춘천시를 대상으로 에너지소비에 따른 CO₂ 배출과 녹지의 CO₂ 흡수를 계량화하여, 그들의 양적관계를 구명하고 저탄소 도시 구현을 위한 녹지계획지표 수립의 기반정보를 구축하는 것이다. 본 연구에서 녹지의 CO₂ 흡수는 수목이 광합성을 통한 성장과정에서 대기 CO₂를 흡수 저장하는 직접적 흡수를 지칭한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 토지이용 및 녹지구조 분석

축척 1/25,000의 지형도상에서 4cm의 격자를 그린 후, 항공정사사진(<http://aerophoto.kfri.go.kr>)과 중첩시켜 해당 지점의 토지이용을 판독하고 유형별 면적비를 산출하였다. 개발밀도가 높은 동지역의 경우는 2cm의 격자를 적용하였다. 표본수는 읍·면지역 1,065지점, 동지역 210지점으로 총 1,275지점이었다. 토지이용 유형은 CO₂ 흡수능을 고려하여 산림지, 농경지, 하천·호수, 교통용지, 주거지, 상업지, 공업지, 공공용지, 공원·유원지 등으로 구분하였으며, 산림지의 경우 제4차 수치임상도로부터 식생유형 및 영급을 함께 파악하였다.

토지이용 분석 결과를 토대로 산림지와 개발지로 구분한 후, 산림지는 식생유형 및 영급별 구성비를 고려한 계층적 임의표본추출에 의해 105개의 표본지점을, 개발지는 116개의 전체 표본지점을 대상으로 현장답사를 통해 식생조사를 실시하였다. 산림지 식생조사는 방형구법을 적용하고 수종, 직경, 수관폭, 수고 등을 조사하였다. 개발지의 경우는 해당 부지의 경계를 조사 구역으로 설정하여 그 면적을 측정하고 구역 내 수목을 전수 조사하였다. 식생조사 자료를 바탕으로 수목의 밀도 및 피도, 직경구조, 수종의 상대우점치 등을 포함하는 녹지구조를 분석하였다.

2. 에너지소비 및 CO₂ 배출량 산출

에너지 소비에 의한 CO₂ 배출량은 연간 에너지소비 총량을 파악하고 에너지 종류별 CO₂ 배출계수를 적용하여 산정하였다. 춘천 시민이 1998년부터 2007년까지 최근 10년간 소비한 전기, 석유, 가스, 석탄 등의 에너지 종류별 총량은 통계자료(춘천시, 2003; 2008)의 수집을 통해 파악하였다. 배출계수의 경우, IPCC 탄소배출계수(에너지경제연구원, 2007), 에너지열량환산 기준(에너지기본법시행규칙 제5조1항), 에너지관리공단 탄소시장실 홈페이지(<http://co2.kemco.or.kr>) 등을 참고하여 에너지 종류별 CO₂ 배출계수를 도출하여 적용하였다. 전기의 배출계수는 한국전력통계(한국전력공사, 2008)의 연간 총발전량과 발전연료사용량을 토대로, 1998년부터 2007년까지 10년간 연도별 단위소비전량당 CO₂ 배출을 계량화하여 적용하였다.

3. 녹지의 CO₂ 흡수능 계량화

식생조사 결과에 수종별 단목(單木)차원의 산정식들(조현길과 조동하, 1998; 조현길, 1999; 2001, 조현길과 안태원, 2000; 2001; Jo and Ahn, 2003)을 적용하여 각 수목 개체의 CO₂ 저장 및 흡수량을 산정하고, 토지이용 유형별 단위면적당 CO₂ 저장 및 흡수를 계량화하였다. 그리고 토지이용 유형별 면적비에 준거하여 춘천시 전체 녹지의 CO₂ 저장 및 연간 흡수량을 산출하였다. 여기에서, CO₂ 저장량이란 수목이 성장하면서 여러 해에 걸쳐 축적한 총량을, 연간 CO₂ 흡수량은 수목이 한 해 동안 흡수한 양을 각각 의미한다.

III. 연구결과

1. 토지이용 및 녹지구조

춘천시의 행정구역 면적은 2007년 기준 1,116.8km²이고, 총 인구는 260,439명이었다(춘천시, 2008). 춘천분지 중심부에 위치하는 동지역은 시 면적의 4.8%를 점유하는데, 인구의 84%가 거주하고 상대적으로 개발밀도가 높았다. 시 전체의 토지이용은 산림지 78%, 농경지 11%, 하천·호수 6%, 주거지 2% 등의 순으로서 자연지가 84%를, 여기에 농경지를 포함하면 대부분인 95%를 점유하는 것으로 분석되었다. 한편, 동지역만의 경우는 집중된 개발에 의해 시설임지의 개발지가 40%로서 상대적으로 높은 점유비를 나타냈다.

산림지의 식생유형 구성은 40%가 활엽수림, 37%가 침엽수림, 그리고 23%가 혼효림이었다. 영급별로는 III영급이 41%로서 가장 많고, II영급과 IV영급이 각각 27% 및 25%를 점유하였다. 교목밀도는 식생유형 및 영급에 따라 11.0~16.5주/100m² 이었고, 기저면적은 직경생장의 결과로 영급이 높을수록 증가하였다. 수목피도는 최소 70%에서 최대 184%의 울폐도를 나타냈다. 직경구조는 흉고직경 20cm 미만인 전체 교목의 73%, 30cm 미만이 대부분인 96%로서 성장과정의 수목이 우점하였다. 상대우점치가 가장 높은 상위 3개 수종은 신갈나무(*Quercus mongolica*), 소나무(*Pinus densiflora*) 및 잣나무(*P. koraiensis*)이었다.

산림지를 제외한 개발지 전체의 평균 교목밀도, 기저면적 및 수목피도는 각각 1.6주/100m², 145cm²/100m² 및 8.4%이었다. 수목식재량이 상위인 토지이용 유형은 공원·유원지와 공동주거지였고, 최하위인 유형은 상업지였다. 교목의 직경구조는 흉고직경 10cm 미만 53%, 20cm 미만 93%, 그리고 30cm 미만이 98%로서 유목 내지 성장과정의 수목이 우점하였다. 상대우점치가 상위인 3개 교목종은 잣나무, 느티나무(*Zelkova serrata*) 및 소나무이었다.

2. 에너지소비 및 CO₂ 배출량

춘천 시민이 최근 10년 동안 소비한 화석에너지량은 연평균 석유 191,381kl/년, LNG 53,864천m³/년, LPG 10,588t/년, 부탄 18,776t/년, 석탄 24,856t/년, 전기 919,559MWh/년이었다(춘천시, 2003; 2008). 에너지소비에 따른 CO₂ 배출량은 연평균 1,100kt/년이었으며, 그 배출량 중 약 42%가 석유, 35%가 전기, 19%가 가스, 그리고 4%가 석탄 소비에 기인한 것이었다(그림 1 참조). 2007년 CO₂ 배출량은 1,269kt/년으로서 1998년 대비 1.6배 증가하였다. 인구 1인당 CO₂ 배출량은 최근 3년 평균 4.9t/년/인으로서 2006년 전국 평균치 11.0t/년(지식경제부, 2009)의 1/2 수준이었다.

3. 단위면적차원 CO₂ 흡수능

산림지 전체의 단위면적당 평균 CO₂ 흡수능은 각각 저장량 275.6t/ha, 연간 흡수량 26.6t/ha/년이었다. 식생유형 및 영급별로는 영급이 높을수록 그 흡수능이 증가하였고, 동일영급 내에서는 활엽수림이나 혼효림이 침엽수림보다 더욱 컸다. 통계적 유의차 분석을 통해 그 흡수능을 5개 등급으로 구분하면, 1등급에는 활엽수림 IV, V영급과 혼효림 V영급이, 2등급에는 침엽수림 V영급과 혼효림 IV영급이, 3등급에는 III영급의 모든 식생유형과 침엽수림 IV영급이, 그리고 4등급에는 II영급의 식생유형이 각각 해당하였다. I영급은 5등급으로 분류되었는데, 개발지의 모든 토지이용 유형보다는 흡수능이 상대적으로 높았다.

개발지의 토지이용 유형별 단위면적당 CO₂ 흡수능은 대체로 기저면적 및 수목피도의 고저와 유관하여, 공원·유원지, 교외 단독주거지, 공동주거지 등에서 높았고, 상업지에서 가장 낮았다. 개발지 전체의 평균 CO₂ 저장량과 연간 흡수량은 각각 13.5t/ha 및 1.5t/ha/년이었다. 국내 중부지방 일부 도시에서 도심지 식재수목의 CO₂ 흡수능은 연구도시에 따라 각각 저장량 13.1~26.4t/ha, 연간 흡수량 1.9~2.9t/ha/년이었다(조현길과 안태원, 2001; Jo, 2002; 조현길 등, 2003). 춘천시 개발지의 경

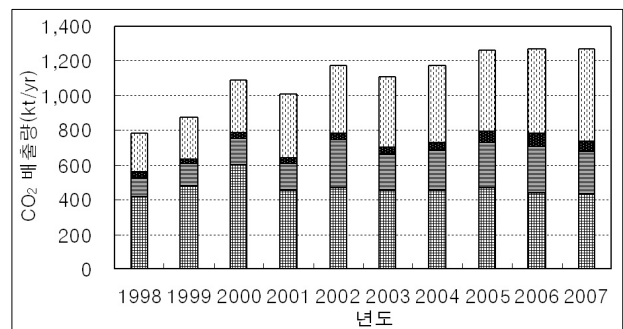


그림 1. 에너지소비에 기인한 연도별 CO₂ 배출량 변화
 범례: ■ 석유, ▨ 가스, ■ 석탄, ▨ 전기

우는 이들 도시 중 상대적으로 수목식재량이 적은 용인시와 CO₂ 저장량이 유사하였고, 타 도시에 비해 그 흡수능이 51~77% 수준이었다. 개발지의 CO₂ 흡수능은 인위적 식재량에 따라 도시별로 차이가 있으며, 춘천시는 CO₂ 흡수능 증진을 위한 수목식재량 확충이 필요한 것으로 분석되었다.

4. 녹지의 CO₂ 저감역할

춘천시의 토지이용과 단위면적당 CO₂ 흡수능에 준거하여 산출한 시 전체 수목의 CO₂ 총저장량과 연간 총흡수량은 각각 24,196kt 및 2,340kt/년이었다(표 1 참조). 그 양의 대부분은 산림지 수목에 의한 것이며, 개발지 수목의 기여비는 0.4%에 불과하였다. 에너지 소비에 기인한 연간 CO₂ 배출량은 상기와 같이 2007년 기준 1,269kt/년이었다. 시 전체 수목은 해마다 그 배출량의 184%에 해당하는 CO₂를 상쇄하는 중요한 흡수원 역할을 담당하였다. 그리고 연 배출량의 19배에 상당하는 CO₂량을 저장하고 있는 셈이었다. 한편, 동지역의 경우는 총인구의 84%가 거주하고 면적상으로 약 5%를 차지하는데 반해, CO₂ 흡수능은 시 전체의 1%로서 상대적으로 낮은 점유비를 나타냈다. 이는 집중된 개발에 의한 산림지 감소와 개발지 내 빈약한 수목식재 및 성목분포 미흡에 기인하는 것으로 사료된다.

이와 같이 CO₂ 배출과 흡수의 양적관계를 분석한 결과, 춘천시는 인구 1인당 CO₂ 배출량이 전국 평균치의 약 1/2 수준으로 배출원이 적으면서, 배출량 이상의 양호한 산림지 흡수원을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 반면, 개발지에서는 녹지 확보의 소홀로 CO₂ 배출을 상쇄하는 흡수원 역할이 미미하였다. 저탄소 도시 구현을 위한 춘천시의 녹지계획은 각종 개발사업에 따른 산림지의 CO₂ 흡수능 손실을 제어하고 개발지의 녹지 확충을 통해 CO₂ 흡수능을 증진하는 전략을 필요로 한다. 즉, 식생유형 및 영급별 단위면적차원의 CO₂ 흡수능을 개발가능지 분석, 토지적성평가, 개발행위 허가, 대체 흡수원 확보 등의 평가기준으로 반영하여 CO₂ 흡수능 저하를 제어할 토지이용계획 및 관리 전략을 수립하는데 적용해야 하겠다. 개발지에서는 CO₂ 배출량 대비 일정 수준을 상쇄할 녹지계획지표를 설정하고 현재의 빈약한 녹지를 확충하여 저탄소 도시 구현에 기여함이 바람직

하다. 그리고 녹지 확충을 통한 CO₂ 흡수능의 효과적인 증진을 위해 다층구조의 녹지조성, 생장률이 양호한 수종 선정, 인공지반 녹화, 에너지절약적 식재, 저탄소 관리 등을 포함하는 식재 및 관리 전략이 추진되어야 할 것이다.

IV. 결론

본 연구는 춘천시를 대상으로 에너지 소비에 따른 CO₂ 배출과 녹지의 CO₂ 흡수를 계량화하여 양적관계를 구명하고 저탄소 도시 구현을 위한 녹지계획지표 수립의 기반정보를 구축하였다. 춘천 시민이 최근 10년 동안 소비한 화석에너지량은 연평균 329,463TOE/년이었으며, 에너지소비에 따른 CO₂ 배출량은 2007년 1,269kt/년으로서 1998년 대비 1.6배 증가하였다. 인구 1인당 CO₂ 배출량은 최근 3년 평균 4.9t/년/인으로서 2006년 전국 평균치의 1/2 수준이었다. 산림지의 단위면적당 CO₂ 흡수능은 식생유형별로 영급이 높을수록 증가하였고, 동일영급 내에선 활엽수림이나 혼효림이 침엽수림보다 더욱 컸다. 개발지의 경우는 토지이용 유형별 기저면적 및 수목피도의 고저와 유관하였다.

시 전체 수목의 CO₂ 총저장량과 연간 총흡수량은 각각 24,196kt 및 2,340kt/년이었으며, 해마다 에너지소비에 따른 배출량의 184%에 해당하는 CO₂를 흡수하는 중요한 역할을 담당하였다. 춘천시는 CO₂ 배출량 이상의 양호한 산림지 흡수원을 보유하고 있는 한편, 개발지에선 녹지 확보의 소홀로 CO₂ 배출을 상쇄하는 흡수원 역할이 미미하였다. 따라서, 저탄소 도시 구현을 위한 녹지계획은 산림지의 CO₂ 흡수능 손실 제어와 개발지의 녹지 확충을 통한 CO₂ 흡수능 증진이 필요한 것으로 분석되었다. 본 연구는 도시 차원에서 연간 CO₂ 배출과 녹지의 CO₂ 흡수를 정량 분석하여 녹지기능에 근거한 계획지표를 수립할 기반 자료를 마련한 점에 그 의의가 있다. 녹지 유형별 단위면적 차원의 CO₂ 흡수능과 등급화 결과는 개발에 의한 CO₂ 흡수능 감소의 상대적 고저를 평가하고 그 악영향을 최소화하는 정책 수립과 의사결정의 기준으로 적용할 수 있다.

인용문헌

1. 권원태(2008) 국제적 기후변화 현황. 국제평화 5(1): 37-65.
2. 녹색성장위원회(2009) 국가온실가스 중기(2020년) 감축목표의 설정방안.
3. 에너지경제연구원(2007) 지역에너지 통계연보.
4. 조현길(1999) 강원도 일부도시의 경관내 탄소흡수 및 배출과 도시녹지의 역할. 한국조경학회지 27(4): 23-28.
5. 조현길(2001) 식생의 CO₂ 흡수 및 대기정화능 지표개발. 지속가능한 개발을 위한 생태계지표 개발 전문가 초청 세미나 III. 서울대학교 환경계획연구소, pp. 39-73.
6. 조현길, 안태원(2000) 자연생태계 수목의 생장에 따른 탄소저장 및 흡수량 지표. 한국환경생태학회지 14(3): 175-182.
7. 조현길, 안태원(2001) 도시 침엽수에 의한 연간 CO₂ 흡수 및 대기정화-소나무와 잣나무를 대상으로. 한국환경생태학회지 15(2): 118-124.

표 1. 춘천시 녹지의 총 CO₂ 저감효과

구분	CO ₂ 총저장		연간 CO ₂ 총흡수	
	동지역	시 전체	동지역	시 전체
산림지(kt)	215.3	24,102.7	23.8	2,330.0
개발지(kt)	42.1	93.6	5.3	10.1
계(kt)	257.4	24,196.3	29.1	2,340.1
저감효과(%)*	20.3	1,906.6	2.3	184.4

*: 2007년 기준 연간 CO₂ 배출량 1,269kt/년 대비 저감효과

8. 조현길, 조동하(1998) 도시 주요조경수종의 연간 CO₂ 흡수. 한국조경학회지 26(2): 38-53.
9. 조현길, 조용현, 안태원(2003) 도시녹지의 대기환경개선 효과-서울시 중구를 중심으로. 한국조경학회지 31(3): 83-90.
10. 지식경제부(2009) 국가 온실가스 배출량 증가율 소폭 증가세로 반전. 지식경제부 보도자료 2009. 2. 3.
11. 춘천시(2003) 춘천통계연보.
12. 춘천시(2008) 춘천통계연보.
13. 한국전력공사(2008) 한국전력통계.
14. Jo, H. K. and T. W. Ahn(2003) Atmospheric CO₂ uptake by *Pinus densiflora* and *Quercus mongolica*. Journal of the Environmental Sciences 12(8): 853-860.
15. Jo, H. K.(2002) Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. Journal of Environmental Management 64: 115-126.
16. Schneider, S. H.(1990) The changing climate. In Managing Planet Earth. New York: W. H. Freeman and Company. pp. 25-36.
17. <http://aerophoto.kfri.go.kr>
18. <http://co2.kemco.or.kr>