

도심지와 자연지간 토양 특성 및 탄소저장량 비교

- 춘천시를 대상으로 -

조현길¹⁾ · 한갑수²⁾

Comparison of Soil Characteristics and Carbon Storage between Urban and Natural Lands

- Case of Chuncheon -

Jo, Hyun-Kil¹⁾ and Han, Gab-Soo²⁾

요 약

본 연구는 춘천시의 도심지와 자연지 토양을 표본추출하여 그것의 물리화학적 특성과 탄소저장량을 비교 분석하였다. 토양산도는 도심지에서 평균 6.6, 자연지에서는 그보다 낮은 5.0이었고, 따라서 치환성양이온도 자연지에서 약간 더 낮았다. 유기물함량과 양이온치환능은 자연지에서 도심지보다 각각 1.4배, 1.7배 높은 반면, 유효태인산은 도심지에서 약 3.2배 높았다. 유기탄소저장량은 도심지 평균 24.8 ± 1.6 (표준오차) t/ha, 자연지 31.6 ± 1.6 t/ha로서, 자연지가 도심지보다 약 1.3배 더 많았다. 수목의 낙엽, 낙지 및 낙근에 의한 연간 탄소유입량에서 분해에 의한 연간 탄소유출량을 제감한 자연지 토양내 단위면적당 연간 탄소축적량은 1.3 t/ha/yr이었다. 춘천시 토양에 저장된 총탄소량은 연간탄소배출량(245,590 t/yr)의 약 31%에 해당하였다.

ABSTRACT

This study compared soil characteristics and carbon storage between urban and natural lands in Chuncheon. Soil pH was lower in natural lands (5.0) than in urban lands (6.6), and therefore exchangeable cation was a little lower in natural lands. Organic matter and cation exchange capacity were respectively, 1.4 and 1.7 times higher in natural lands than in urban lands, while available P_2O_5 was about 3.2 times higher in urban lands. Organic carbon storage in soils averaged 24.8 ± 1.6 (standard error) t/ha in urban lands and 31.6 ± 1.6 t/ha in natural lands, 1.3 times greater than in urban lands. Annual carbon accumulation in soils of natural lands was 1.3 t/ha/yr (litterfall minus decomposition). The carbon storage in Chuncheon's soils equaled about 31% of annual carbon emission (245,590 t/yr).

Key words : *Climate change, CO₂, Urban and forest soils, Storage and accumulation*

1) 강원대학교 녹지조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Kangwon National University

2) 강원대학교 대학원 Graduate School, Kangwon National University

I. 서론

기후변화를 야기시키는 주요 가스는 CO₂, CH₄, N₂O, CFCs 등이며, 이들 가스 중 CO₂는 온실효과를 야기시키는데 있어, 단독으로 약 50%의 영향력을 발휘하는 가스이다(IPCC, 1994). 대기 CO₂의 현 농도는 산업혁명 이전 농도의 27%나 증가된 360ppm으로서, 이러한 추세가 지속된다면 21세기 중에는 600ppm에 이를 것으로 추정된다(IPCC, 1994; Boden et al., 1990). 1980년대 자연지에서 산림파괴 및 토지이용변화는 지구전체 탄소배출량의 약 23%인 1.6 Gt/yr의 탄소를 방출하여 대기 CO₂ 농도를 증가시키는 역할을 하였다(임업연구원, 1998).

1990년, 국내 산림의 CO₂ 순흡수량은 7,155 kt으로 국내 총탄소배출량의 약 10.3%를 차지하였다(임업연구원, 1998). 이는 산림지가 대기 탄소저감을 위한 국가적 환경정책에 중요한 역할을 할 수 있음을 시사하는 것이다. 특히 토양은 녹지를 구성하는 근간으로서 지구 총탄소량의 50% 이상을 차지하고 있어(Vitousek, 1991) 그 비중은 더욱 크다.

토양은 식물의 성장 및 사멸의 과정에서 탄소를 저장한다. 즉, 식물의 광합성으로부터 축적된 생체량의 일부는 낙엽, 낙지 및 낙근의 형태로 해마다 토양에 이입되며, 토양미생물에 의한 분해량을 제외한 유기탄소는 토양에 축적된다. Birdsey(1990)는 미국의 토양내 저장된 탄소량은 삼림생태계 전체의 약 60%라고 보고하였고, Jo and McPherson(1995)는 미국 Chicago시의 주거녹지에 저장된 총탄소량 중 토양이 79-89%를 점유함을 구명한 바 있다. 토양의 탄소저장량에 대한 연구는 주로 산림지 토양을 대상으로 수행되어 왔고, 도심지 토양에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 본 연구의 목적은 춘천시를 대상으로 도심지 및 자연지 토양의 물리화학적 특성과 탄소저장량을 비교 분석하는 것이었다.

II. 연구내용 및 방법

1. 토양표본추출

춘천시 지형도상에서 도심지와 자연지를 대상

으로 계층적 체계표본추출(stratified systematic sampling)에 의해 표본추출지점을 선정하고, 도심지 및 자연지 각각 30개씩, 총 60개의 표본추출지점을 임의로 선정하였다. 여기에서, 도심지는 단독 및 다세대주거지, 시설우점의 공공용지 및 공원, 가로식재지 등을 포함하였다. 각 지점에서 직경 5.1cm의 다층토양표본추출기(AMS의 multi-stage core soil sampler)를 이용하여, 깊이 60cm까지의 토양표본을 채취하였다.

2. 토양표본분석

채취된 토양표본들을 1주일 동안 음건시켜 직경 2mm의 체(sieve)로 정선하고 그 무게를 0.1g까지 측정 후, 각 표본별로 Walkley-Black 방법(Jackson, 1958)에 의해 토양에 저장된 유기탄소함량을 분석하였다. 또한, 농촌진흥청(1988)의 표준방법에 따라 수분, 산도, 전질소, 유효태인산, 치환성양이온, 양이온치환능 등의 물리화학적 특성을 분석하였다.

3. 연간 탄소축적량

수목의 낙엽, 낙지 및 낙근에 의한 자연지 토양에의 탄소유입과 그들의 분해를 통한 대기예의 탄소유출을 기존의 국내외 연구결과들에 근거하여 계량화하였다. 즉, 단위면적당 연간 낙엽 및 낙지량은 한국 중부지방의 침엽수림 및 활엽수림을 대상으로 연구된 결과치들(이경재와 박인협, 1987; 허성두, 1987; 김종성 등, 1996)을 평균하고 탄소량으로 전환되었다. 낙근에 기인된 토양내 탄소유입량의 산출은 국외 여러지역 온대림에서의 연구결과를 종합하여 유도된 수목의 지상부대 지하부의 탄소유입량비(Reiners, 1973)를 적용하였다. 분해에 의한 토양으로부터의 단위면적당 연간 탄소유출량은 온대지역내 낙엽, 낙지 및 낙근의 연간 분해율(Reichle et al., 1973; Ajtay et al., 1979; Edwards et al., 1989; Vogt et al., 1991)을 바탕으로 산정되었다. 토양에의 연간 탄소유입량에서 분해에 의한 연간 유출량을 제감하여 자연지 토양내 연간 탄소축적량을 파악하였다. 본 연구에서, 낙엽 및

낙지랑의 대부분이 수거되고 탄소유동이 인위적으로 교란되는 도심지 토양내 연간 탄소축적량의 산정은 배제되었다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 연구대상지 현황

춘천시의 총면적은 약 52km²으로서 자연지는 약 54%를 차지하였다. 그 다음의 순으로는 농경지가 약 23%를 차지하였고, 주거지, 상공업지 등 도심지는 17%를 구성하였다. 1992년에서 1996년까지 5개년간 연평균기온과 평균연강수량은 각각 10.9℃, 1,194mm이었다(춘천시, 1997). 1994년에서 1996년까지 3개년간 춘천시의 화석연료 소비를 통한 평균 연간 탄소배출량은 약 245,590 t/yr이었으며, 인구 1인당 연간 탄소배출량은 약 1.3t이었다(조현길 등, 1995).

2. 물리화학적 특성

Table 1은 춘천시 도심지 및 자연지 토양의 물리화학적 특성을 나타낸 것이다. 춘천시의 토성은 대체로 자갈이 있는 양토 내지는 사양토인

것으로 분류된다(농촌진흥청, 1986). 도심지에서 토양산도는 중성에 가까운 6.6이었고, 자연지의 경우는 평균 5.0으로서, 한국 자연지의 평균치인 5.5보다 낮았다(Table 2 참조, 이수옥, 1981). 유기물함량은 도심지가 0.5-0.7%, 자연지는 이보다 높은 1.0%였다. 이는 도심지가 자연지에 비해 척박한 토양임을 나타낸다. 도심지 및 자연지 모두 한국 산림토양의 평균치인 3.2%에 비해 훨씬 적었다. 양이온치환능은 도심지가 약 5.0 cmol(+)/kg, 그리고 자연지는 이보다 1.7배 높은 8.6 cmol(+)/kg이었으며, 국내 산림토양의 평균치인 11.3 cmol(+)/kg보다 모두 낮았다. 일반적으로, 양이온치환능의 증가는 유기물함량의 증가와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고된다(조인상 등, 1985).

유효태인산은 도심지에서 자연지보다 훨씬 많았으며, 자연지에서도 51.6 mg/kg으로서 국내 산림토양의 평균치인 26.7 mg/kg보다 약 2배 많았다. 치환성양이온 역시, 도심지에서 자연지에 비해 높았다. 이것은 토양산도가 낮아질수록 Ca, Mg, K, Na 등 염기이온이 수소이온과 치환, 용탈되는 경향을 반영한 것이다.

Table 1. Physical and chemical characteristics of urban and natural soils in Chuncheon*

Land use	Depth (cm)	Moisture (%)	pH	OM (%)	Total N (%)	Available P ₂ O ₅ (mg/kg)	EC** (cmol(+)/kg)				CEC ^
							K ⁺	Ca ⁺⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	
Urban	0-30	9.0	6.6	0.7	0.2	224.9	0.02	0.56	0.15	0.03	5.0
		(0.4)	(0.1)	(0.1)	(0)	(42.0)	(0)	(0.05)	(0)	(0)	(0.3)
	30-60	7.7	6.6	0.5	0.1	166.7	0.02	0.57	0.14	0.03	5.1
		(0.4)	(0.2)	(0)	(0)	(31.0)	(0)	(0.06)	(0)	(0)	(0.3)
Natural	0-60	8.3	5.0	1.0	0.2	51.6	0.02	0.11	0.14	0.02	8.6
		(0.5)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)	(0.1)

* Figure in parenthesis: Standard error

** Exchangeable cation

^ Cation exchange capacity (cmol(+)/kg)

Table 2. Physical and chemical characteristics of forest soils in Korea*

Moisture (%)	pH	OM (%)	Available P ₂ O ₅ (mg/kg)	EC** (cmol(+)/kg)				CEC [^]
				K ⁺	Ca ⁺⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	
15.6	5.5	3.2	26.7	0.21	3.51	0.23	1.56	11.3

* Source: Lee, 1981

** Exchangeable cation

^ Cation exchange capacity (cmol(+)/kg)

3. 탄소저장량

Table 3은 춘천시 도심지 및 자연지 토양의 유기탄소저장량 차이를 분석한 결과이다. 단위면적당 평균 유기탄소저장량은 도심지에서 24.8±1.6(표준오차) t/ha, 자연지에서 31.6±1.6 t/ha로서, 자연지가 도심지보다 약 1.3배 더 많았다. 국내 산림토양내 유기탄소저장량은 57-67 t/ha 이었고(정진현 등, 1998; 임업연구원, 1998), 미국 중북부 및 동북부지역 자연지의 경우는 130-160 t/ha이었다(Birdsey, 1992). 한편, 미국 Chicago시 주거지에서의 유기탄소저장량은 162.7 t/ha인 것으로 보고되었다(Jo and McPherson, 1995). 춘천시 자연지의 단위면적당 탄소저장량은 국내 산림토양의 약 47-55%, 그리고, 미국 경우의 약 21.8%에 불과하였다. 도심지 토양의 경우, 춘천시는 Chicago시의 15.2%에 불과한 것으로 분석되었다.

도심지에 저장된 유기탄소량은 토심 30cm까지는 16.2±1.2 t/ha, 30-60cm까지는 8.6±0.9 t/ha로서, 표토의 탄소량이 심토의 경우보다 약 2배 더 많았다. 이는 낙엽, 낙지 등의 분해잔재와

식생의 뿌리가 주로 이 깊이에 분포하기 때문인 것으로 사료된다. 조진현 등(1998) 역시 토양탄소저장량이 0-10cm의 표토층에서 가장 많고, 토양의 깊이가 증가할수록 완만하게 감소하는 경향을 보고한 바 있다. 단위면적당 탄소저장량을 전체 행정면적으로 환산하면, 춘천시 토양의 총탄소저장량은 약 76,070t이었다. 이는 연간 탄소배출량의 약 31%에 해당되는 양이었다.

4. 연간 탄소축적량

국내 중부지방의 자연지에서, 침엽수 및 활엽수림의 낙엽과 낙지에 의한 토양에의 연간 탄소유입량은 평균 약 2.5 t/ha/yr(건중량은 5 t/ha/yr)인 것으로 나타났다(이경재와 박인협, 1987; 허성두, 1987; 김종성 등, 1996). 국외 여러지역 온대림에서의 연간 낙엽 및 낙지의 건중량도 평균 5 t/ha/yr인 것으로 분석되었다(Edwards et al., 1989). 온대림에서의 낙근에 의한 토양내 탄소유입량은 지상부 유입량의 약 25%이었다(Reiners, 1973). 수목의 지상부와 지하부를 합한 단위면적당 연간 탄소유입량은 3.2

Table 3. Mean organic carbon storage per unit weight and area of soils in Chunchon*

Urban					Natural (0-60cm depth)		
0-30cm depth		30-60cm depth		Total (t/ha)			
g/kg	t/ha	g/kg	t/ha		g/kg	t/ha	
5.2	16.2	3.2	8.6	24.8	7.2	31.6	
(0.4)	(1.2)	(0.3)	(0.9)	(1.6)	(0.6)	(1.6)	

* Figure in parenthesis: Standard error

t/ha/yr이었다. 지상부로부터의 유입량 중, 낙지는 10%, 그리고 낙엽 및 기타 부위가 90%를 차지하였다(허성두, 1987; Edwards et al., 1989; 김종성 등, 1996). 토양에 유입된 부위별 연간 분해율은 엽 0.8(체재기간 1.25년), 세균 0.2(체재기간 5년), 기타 목질부 0.05(체재기간 20년) 등인 것으로 보고되었다(Reichle et al., 1973; Ajtay et al., 1979; Edwards et al., 1989; Vogt et al., 1991). 부위별 구성비와 분해율에 근거하여 산정된 토양으로부터의 단위면적당 연간 탄소유출량은 1.9 t/ha/yr이었다. 연간유입량에서 분해에 의한 연간 유출량을 제감한 토양내 단위면적당 연간 탄소축적량은 1.3 t/ha/yr이었다. 춘천시 도심지를 제외한 자연지 토양의 연간탄소축적량은 약 2,810 t/yr으로서, 춘천시 연간 탄소배출량의 1.2%를 상쇄시키는 것으로 나타났다.

면적당 연간 탄소축적량은 1.3 t/ha/yr이었다.

춘천시 토양의 단위면적당 탄소저장량을 전체 행정면적으로 환산하면, 토양의 총탄소저장량은 약 76,070t이었으며, 연간 탄소축적량은 2,810 t/yr이었다. 토양에 저장된 총탄소량은 연간 탄소배출량의 약 31%에 해당하였고, 도심지를 제외한 자연지 토양은 해마다 축적을 통해 연간 탄소배출량을 약 1.2% 상쇄시키는 역할을 담당하였다. 토양에 축적 저장된 탄소방출을 최소화하기 위해서는 무분별한 산림훼손과 토양침식을 방지할 필요가 있다. 본 연구에서 자연지 토양의 연간 탄소축적량 산정은 기존의 문헌에 의존하였다. 향후, 도심지를 포함한 자연지 토양의 탄소유입 및 유출량에 관한 실측연구를 통해, 도시경관에서의 탄소순환에 대한 이해를 증진해야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구의 목적은 춘천시를 대상으로 도심 및 자연지 토양을 표본추출하여 토양의 물리화학적 특성과 탄소저장량을 비교 분석하는 것이었다. 대상지의 토성은 대체로 양토내지 사양토였다. 토양산도는 도심지에서 평균 6.6, 자연지에서는 이보다 낮은 5.0을 나타내었다. 유기물함량은 도심지가 0.5-0.7%, 자연지가 1.0%로서 도심지가 자연지에 비해 적박하였다. 양이온치환능은 도심지가 약 5.0 cmol(+)/kg, 그리고 자연지는 이보다 1.7배가 높은 8.6 cmol(+)/kg이었다. 유효태인산은 도심지 토양이 자연지의 경우보다 훨씬 많았고, 치환성양이온의 경우도 도심지에서 자연지에 비해 적었다.

춘천시 토양의 단위면적당 유기탄소저장량은 도심지 24.8±1.6 t/ha, 자연지 31.6±1.6 t/ha로서, 자연지가 도심지보다 약 1.3배 더 많았다. 도심지에 저장된 유기탄소량은 토심 30cm까지는 16.2±1.2 t/ha, 30-60cm까지는 8.6±0.9 t/ha로서, 표토의 탄소량이 심토의 경우보다 약 2배 더 많았다. 수목에 의한 연간 유입량에서 분해에 의한 연간 유출량을 제감한 자연지 토양내 단위

인 용 문 헌

1. 임업연구원, 1998. 산림의 온실가스 저감방안. 임업연구원 연구자료 제143호.
2. 김종성, 손요환, 임주훈, 김진수. 1996. 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지의 지상부 생체량, 질소와 인의 분포 및 낙엽에 관한 연구. 한국임학회지 85(3): 416-425.
3. 농촌진흥청. 1986. 토양해설도.
4. 농촌진흥청. 1988. 토양화학분석법.
5. 이경재, 박인협. 1987. 경기도지방 22년생 잣나무 및 신갈나무림의 물질생산량과 무기영양물분포. 임산에너지 7(1): 11-21.
6. 이수옥. 1981. 한국의 삼림토양에 관한 연구(II). 한국임학회지 54: 25-35.
7. 정진현, 김춘식, 이원규. 1998. 지역별, 임분별 산림토양내 탄소량 추정. 산림과학논문집 57: 178-183.
8. 조인상, 허태구, 김이열, 조성진. 1985. 우리나라 토양의 물리화학적 특성 상호관계에 관한 연구. 한국토양비료학회지 18(2): 134-139.
9. 조현길, 윤영환, 이기의. 1995. 도시녹지에

- 의한 대기 CO₂의 흡수. 한국조경학회지 23(3): 80-93.
10. 춘천시. 1997. 통계연보.
 11. 허성두. 1987. 잣나무림과 물참나무림의 Litterfall 과 그 분해에 따른 양분 동태에 관한 연구. 강원대학교 대학원 석사학위논문.
 12. Aitay, L. L., P. Ketner, and P. Duvigneaud. 1979. Terrestrial production and phytomass. In Bolin, B., E. T. Degens, S. Kempe, and P. Ketner, eds., The Global Carbon Cycle. SCOPE Report No. 13. New York: John Wiley & Sons. pp. 129-181.
 13. Birdsey, R. A. 1992. Methods to estimate forest carbon storage. In Sampson, R. N. and D. Hair, eds., Forests and Global Change (Volume 1). Washington, D.C.: An American Forests Publication. pp. 255-261.
 14. Boden, T. A., P. Kanciruk, and M. P. Farrel. 1990. Trends '90-A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S.A.
 15. Edwards, N. T., D. W. Johnson, S. B. McLaughlin, and W. F. Harris. 1989. Carbon dynamics and productivity. In Johnson, D. W. and R. I. van Hook, eds., Analysis of Biogeochemical Cycling Processes in Walker Branch Watershed. New York: Springer-Verlag. pp. 197-232.
 16. IPCC. 1994. Draft Summary for Policymakers of the 1994 WG I Report on Radiative Forcing of Climate Change.
 17. Jackson, M. L. 1958. Soil Chemical Analysis. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
 18. Jo, H. K. and E. G. McPherson. 1995. Carbon storage and flux in urban residential greenspace. Journal of Environmental Management 45: 109-133.
 19. Reichle, D. E., B. E. Dinger, N. T. Edwards, W. F. Harris, and P. Sollins. 1973. Carbon flow and storage in a forest ecosystem. In Woodwell, G. M. and E. V. Pecan, eds., Carbon and Biosphere, Proceedings of the 24th Brookhaven Symposium in Biology. Upton, NY: US Atomic Energy Commission, Office of Information Services, pp. 345-365.
 20. Reiners. 1973. Terrestrial detritus and the carbon cycle. In Woodwell, G. M. and E. V. Pecan, eds., Carbon and Biosphere, Proceedings of the 24th Brookhaven Symposium in Biology. Upton, NY: US Atomic Energy Commission, Office of Information Services. pp. 307-327.
 21. Vitousek, P. M. 1991. Can planted forests counteract increasing atmospheric carbon dioxide? Journal of Environmental Quality 20: 348-354.
 22. Vogt, K. A., D. J. Vogt, and J. Bloomfield. 1991. Input of organic matter to the soil by tree roots. In McMichael, B. L. and H. Persson, eds., Plant Roots and Their Environment. Amsterdam: Elsevier Science Publishers. pp. 171-190.