

국내 생태계 유형별 탄소 저장 및 거동 산정 연구 현황 분석

장인영 · 정현모 · 한상학 · 안나현 · 김덕엽 · 강성룡**

국립생태원

Estimation of Carbon Storages and Fluxes by Ecosystem Type in Korea

Inyoung Jang · Heon Mo Jeong · Sang-Hak Han · Na-Hyun Ahn · Dukyeop Kim · Sung-Ryong Kang*

National Institute of Ecology, Seoecheon, Korea

(Received : 10 November 2023, Revised : 18 November 2023, Accepted : 22 November 2023)

요약

생태계는 탄소순환에 있어 매우 중요한 탄소 저장고이다. 기후변화가 점점 심화됨에 따라, 생태계의 이러한 기능을 활용하여 기후변화를 완화하려는 노력들이 진행되고 있다. 본 연구에서는 국내 생태계를 대상으로 생태계 유형(산림, 농경지, 습지, 초지, 정주지) 및 탄소저장고별(지상부·지하부 생체량, 고사목, 낙엽, 토양유기탄소 및 생태계 전체) 탄소 저장 및 거동과 관련된 연구를 목록화 하고 분석하였다. 또한, 선행연구 결과를 모아 각 생태계 유형과 탄소저장고를 대상으로 탄소 저장 및 거동량의 평균값을 산정하였다. 그 결과, 대부분의(66%) 국내 탄소 저장·거동 관련 연구가 산림에서 수행된 것을 확인할 수 있었다. 산림에서 수행된 연구 결과를 토대로 탄소저장고별 저장량을 분석한 결과, 식생의 지상부($4,166.66 \text{ gC m}^{-2}$)와 지하부($3,880.95 \text{ gC m}^{-2}$)와 토양($4,203.16 \text{ gC m}^{-2}$)에 많은 양의 탄소가 저장되어 있는 것을 확인하였다. 특히 산림 지하부에 많은 탄소가 저장되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 다른 생태계 유형의 경우, 데이터의 제한으로 탄소저장고별 저장·거동량은 확인이 불가능하였다. 다만, 토양유기탄소 저장의 경우 산림과 초지의 데이터가 비교 가능하였는데, 두 생태계가 상대적으로 비슷한 탄소의 양을 저장하고 있는 것으로 나타났다(각각 $4,203.16 \text{ gC m}^{-2}$, $4,023.23 \text{ gC m}^{-2}$). 본 연구를 통하여, 상대적으로 다양한 생태계 유형에서의 탄소 연구가 필요함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 비교 연구, 탄소저장고, 생태계 유형

Abstract

As climate change gets severe, the ecosystem acts as an important carbon sink, therefore efforts are being made to utilize these functions to mitigate climate change. In this study, we inventoried and analyzed the previous studies related to carbon storage and flux by ecosystem type (forest, cropland, wetland, grassland, and settlement) and carbon pool (aboveground and belowground biomass, dead wood, Litter, soil organic carbon, and ecosystem) in Korean ecosystems. We also collected the results of previous studies and calculated the average value of carbon storage and flux for each ecosystem type and carbon pool. As a result, we found that most (66%) of Korea's carbon storage and fluxes studies were conducted in forests. Based on the results of forest studies, we estimated the storage by carbon stock. We found that much carbon is stored in vegetation (aboveground: $4,018.32 \text{ gC m}^{-2}$ and belowground biomass: $4,095.63 \text{ gC m}^{-2}$) and soil ($4,159.43 \text{ gC m}^{-2}$). In particular, a large amount of carbon is stored in the forest understory. For other ecosystem types, it was impossible to determine each carbon pool's storage and flux due to data limitations. However, in the case of soil organic carbon storage, the data for forests and grasslands were comparable, showing that both ecosystems store relatively similar amounts of carbon ($4,159.43 \text{ gC m}^{-2}$, $4,023.23 \text{ gC m}^{-2}$, respectively). This study confirms the need to study carbon in rather diverse ecosystem types.

Key words : comparable study, carbon pool, ecosystem type

*To whom correspondence should be addressed.
National Institute of Ecology, Seoecheon, Korea
E-mail : srkang@nie.re.kr

• Inyoung Jang National Institute of Ecology / Senior Researcher (ijjang@nie.re.kr)
• Heon Mo Jeong National Institute of Ecology / Researcher (eimple01@nie.re.kr)
• Sang-Hak Han National Institute of Ecology / Researcher (hsh2334@nie.re.kr)
• Na-Hyun Ahn National Institute of Ecology / Researcher (multi017@nie.re.kr)
• Dukyeop Kim National Institute of Ecology / Researcher (leaf2022@nie.re.kr)
• Sung-Ryong Kang National Institute of Ecology / Team Leader (srkang@nie.re.kr)

1. 서 론

최근 전세계적으로 기온상승, 강수량 변화 등의 급격한 기후변화가 관찰되고 있으며, 기후변화에 의한 인명·재산의 피해가 보고 되고 있어 ‘기후위기’라는 단어까지 대두되고 있다. 이에 전세계적으로 대기 중 온실가스의 농도를 낮추고자 하는 노력을 기울이고 있다. UNFCCC(유엔기후변화협약)의 1997년 교토협약(Kyoto protocol)에서는 온실가스 감축 목표를 설정하고, 이를 실현하기 위한 구체적인 이행 방안에 대해 논의하였으며, 2015년에는 지구온도 상승을 산업화 이전 대비 2°C 보다 상당히 아래로 억제하고, 나아가 1.5°C를 달성토록 각국의 참여를 촉구하는 파리협정이 채택되었다. 이에 따라 많은 국가들이 탄소중립을 선언하고, 온실가스의 대기로의 방출을 줄이기 위한 노력을 기울이고 있다. 우리나라도 2019년 2050 장기저탄소발전전략을 수립·공표하였는데, 이 전략에서 탄소중립 5대 기본 방향을 ① 깨끗하게 생산된 전기·수소의 활용 확대, ② 디지털 기술과 연계한 혁신적인 에너지 효율 향상, ③ 탈탄소 미래기술 개발 및 상용화 촉진, ④ 순환경제로 지속가능한 산업혁신 촉진, ⑤ 산림, 갯벌, 습지 등 자연·생태의 탄소 흡수 기능 강화로 설정하였다. 이 중 생태계에 대한 관리를 주요 기본방향 중 하나로 설정한 것이 눈에 띈다. 실제로 2021년 UNFCCC 제26차 당사국총회에서 채택된 글래스고 기후합의에서도 파리협정의 기후 목표 달성을 위한 자연과 생태계의 보호, 보전 및 복원의 중요성을 확인하여, 탄소중립 달성을 위한 생태계의 역할을 강조하였다.

대기 중 온실가스의 농도를 결정하는 탄소의 방출과 흡수에서, 생태계는 흡수원의 역할을 수행하게 된다. 매년 전 지구적 탄소수지를 계산하여 발표하는 Global Carbon Project의 2022년 보고에 의하면, 화석연료와 토지이용변화로 인해 발생하는 이산화 탄소의 양($40\text{Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$)의 약 41%의 양이 생물권(biosphere, $11\text{Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$)과 해양(ocean, $10\text{Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$)에 흡수된다(Global Carbon Project, 2022). 또한, 육상생태계와 해양에는 많은 양의 탄소가 저장되어 있으며, 이러한 저장된 탄소 양의 변화에 따라 대기 중으로 유출되는 탄소의 양에도 변화가 생기기 때문에 생태계에서의 탄소 순환에 대한 이해가 매우 중요하다. 실제로 많은 연구자들이 탄소중립의 달성을 위해서는 대기 중으로 방출되는 탄소의 양을 줄이는 전통적인 탄소 조절 방법뿐만 아니라, 생태계로 흡수되는 탄소의 양에 대한 관리도 필요하다고 주장하고 있다.

탄소 순환에 있어서 생태계의 역할이 강조되고 생태계에서의 탄소 저장 및 흡수가 중요한 기능이라는 것을 인지함에 따라, 전통적으로 다양한 생태계를 대상으로 탄소 수지를 산정하려는 연구들이 꾸준히 진행되었다. 특히, 식물체에서의 탄소 흡수 및 방출의 경우 식물체의 성장에 주요 원인이 되는 광합성과 연계하여 많은 연구들이 수행되었다. 국내의 경우에도 다양한 생태계를 대상으로 탄소의 저

장 및 거동을 산정하고자 하는 연구들이 진행되었다. 특히, 국내의 경우 산림생태계가 많은 면적을 차지하는 만큼, 산림생태계를 대상으로 탄소의 저장과 거동을 산정하는 연구들이 진행되었으며, 최근 습지와 해양 등 다양한 생태계에서의 탄소 순환이 강조됨에 따라 관련 연구들과 과제들도 활발히 진행되고 있다. 하지만, 이러한 연구들은 개별적이고 산발적으로 진행되고 있어, 이를 종합한 결과 도출이나 격차 분석들이 필요한 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 이전에 국내 생태계를 대상으로 탄소 저장이나 거동을 산정한 연구를 목록화하고, 관련 연구 결과를 정리하여 국내 생태계에서의 탄소 저장 및 거동 현황을 파악하고자 한다. 또한, 관련 격차 분석을 통해 국내 생태계 탄소 저장 및 거동의 정확한 산정을 위해 필요한 연구를 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 선행연구 수집

국내 생태계의 탄소 저장·거동 능력을 평가하기 위해, 우선적으로 국내 생태계를 대상으로 한 관련 연구들을 수집하여 목록화 하였다. 선행연구 검색은 학술연구정보 서비스(www.riss.kr) 및 구글 스칼라(scholar.google.com) 검색엔진을 통해 수행하였으며, 검색어는 산림, 습지, 농경지 등의 생태계 유형 + 탄소 등을 활용하였다. 본 연구에서의 생태계 유형 구분은, IPCC 국가 온실가스 인벤토리 보고서 가이드라인 중 토지이용, 토지이용변화 및 임업(LULUCF, Land Use, Land Use Change and Forestry)에서 제시한 생태계 유형(산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지 및 기타토지) 중 우리나라에서 없는 토지로 가정하고 있는 기타토지를 제외한 5가지 카테고리를 사용하였다. 검색된 결과 중 신뢰성 있는 결과의 획득을 위해 동료 평가가 완료된 발간된 논문과 국가 연구소에서 발간된 보고서를 분석에 활용하였다.

2.2 선행연구 분석

수집된 선행연구는 크게 저장량(Storage) 산정 연구와 시간당 온실가스의 이동을 의미하는 거동량(flux) 산정 연구로 구분하여 결과를 분석하였다. 생태계 유형별로 탄소 저장 및 거동 산정을 위하여 수집 연구를 분석하여 탄소 저장 및 거동에 영향을 미치는 환경적 요인(생태계 구분, 지형·지질 특성, 토양 특성, 기후 특성, 위치), 측정 방법 및 주요 결과(탄소 저장량 또는 거동량)를 정리하였다(Table 1). 주요 결과의 경우, 논문 및 보고서에서 제시하고 있는 저장 및 거동량을 정리하되, 크게 6가지 카테고리로 나누어 정리하였다. 이 카테고리는 IPCC 가이드라인 LULUCF 분야에서 제시하고 있는 생태계 내 주요 탄소 저장고(Pool) 5개(지상부 생체량(aboveground biomass)/ 지하부 생체량(belowground biomass)/ 토양유기탄소(soil

Table 1. Categories of carbon storage and flux results from previous studies

Category		Carbon Storage		Carbon Flux	
Environmental factor	Ecosystem type	Ecosystem type			
		Dominant plant species			
	Topography and geography	Elevation			
		Slope			
		Topography			
		Geography			
	Soil characteristics	Soil average water content	Soil organic matter		
		Soil average temperature	Soil average water content	Soil average temperature	
	Climatic characteristics	Climatic zone			
		Annual average temperature			
		Annual precipitation			
	Location	Latitude			
		Longitude			
		Administrative district			
Methodology					
Result	Biomass	Aboveground Belowground		Productivity	Aboveground Belowground
	Soil	Soil organic carbon		Soil respiration	
	Dead organic carbon	Dead wood		Litter production	
		Litter			
	Ecosystem				

organic carbon)/ 고사목(dead wood)/ 낙엽(litter)와 생태계 전체를 대상으로 실험을 진행하였기 때문에 탄소저장고 분류 내로 포함시킬 수 없는 연구인 '생태계'로 나누어 결과를 정리하였다. 또한, 저장량으로 포함되는 탄소와 거동에서 표현되는 탄소가 다르기 때문에, 이에 대해 다른 항목으로 제시하였다. 생체량의 경우, 저장량은 저장되어 있는 양을 의미하지만, 거동량의 경우에는 해당 년도에 새로 생산되는 양으로 정의하여 분류하였다. 또한, 토양유기탄소의 경우, 저장은 토양유기탄소 저장량으로 나타나고 거동의 경우 토양탄소와 관계되는 항목은 토양 호흡으로 나타내었다.

2.3 종합결과 도출

본 연구에서는 생태계 유형별 탄소 관련 연구 현황뿐만 아니라, 각 유형별 탄소 저장·거동의 대푯값을 산정하여 연구결과의 활용성을 높이고자 하였다. 따라서, 선행연구에서 취합·정리된 결과를 활용하여 생태계 유형별·매체별 탄소 저장 및 거동량의 평균값(대푯값) 및 범위를 도출하였다. 수집된 연구들을 대상으로 일정한 결과값들을 산출하기 위해서는 통일된 단위가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 저장량 산정에는 gC m^{-2} 의 단위로 통일하였으며, 거동량을 대상으로 한 연구의 경우에는 시간을 고려하여 $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 의 단위값을 사용하였다. 위의 단위값 통일을 위해서 선행연구 중 탄소의 저장 및 거동의 결과값이 면적 단위로 제시된 연구들만 활용하여 대푯값 및 범위 산정에 활용하였다. 예를 들어 토양 탄소 저장량의 경우 토양 g 당 탄소 저장량을 산정한 연구들이 있었으나, 이를 면적으로 환산하기 위해서는 토양 가밀도(bulk density)나 토양 채취 깊

이 등 추가 데이터들이 필요하므로 이와 같은 연구는 대푯값 산정에서 제외하고 진행하였다.

3. 결과

3.1 선행연구 수집

검색엔진을 통해 수집된 생태계 유형별 탄소 관련 연구(보고서 및 논문)은 전체 124 건이었다. 이 중, 85 건은 논문이고 나머지 39 건은 국가 기관에서 발간한 보고서였다. 생태계 유형별로 분류해 보면, 산림이 82 건으로 제일 많은 보고들이 있었으며, 농경지에서 행해진 연구는 20 건, 습지는 10 건, 초지에서의 연구는 6 건, 정주지는 6 건으로 확인되었다. 국내 생태계를 대상으로 한 탄소 저장 및 거동의 연구는 대부분(66%)이 산림에서 행해진 연구이며, 특히, 산림에서의 결과는 논문을 통해 많이 보고되었다(Fig. 1).

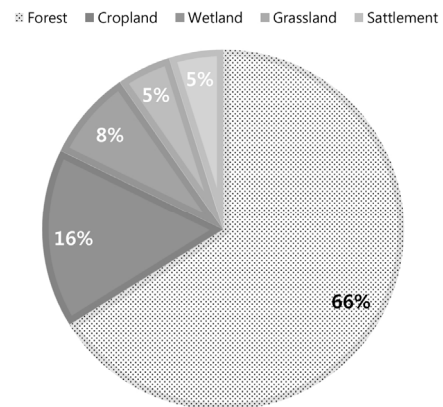


Fig. 1. Proportion of previous studies by ecosystem type

3.2 종합결과 도출

취합된 선행연구 중에서 생태계 유형별 탄소 저장 및 거동량 대푯값 산정이 가능한 연구는 산림 35 건, 농경지 7 건, 초지 2 건, 정주지 2 건이었다(Table 2). 아래의 선행연구의 결과값들을 바탕으로 각 생태계 유형별 탄소 저장 매체별 탄소 저장 및 거동값의 평균값을 산정하여 보았다.

그 결과, 생태계 유형별 저장값의 경우 산림은 모든 탄소저장고별(지상부·지하부 생체량, 토양, 유기물, 생태계)로 결과를 도출할 수 있었으나, 초지와 정주지는 각각 토양·유기탄소와 지상부 바이오매스 값만 도출이 가능하였다. 습지와 농경지는 모든 매체에서 결과값 도출이 불가능하였다. 탄소 거동의 경우 지하부 바이오매스와 낙엽생산량, 임상낙엽량에 대한 결과값은 모든 생태계 유형에서 결과값 도출이 불가능하였다(Table 3). 산림지의 경우, 지상부 바이오매스와 생태계의 평균값 산정이 가능하였으며 토양호

흡의 경우 결과값이 1 개라 평균값 도출이 불가능하였다. 농경지의 경우, 저장량의 데이터 도출이 어려웠던 반면 지상부와 토양호흡, 생태계 전체에 대한 결과값 도출이 가능하였다. 습지와 초지, 정주지의 경우 관련 데이터들의 부족으로 결과값 도출이 불가능하였다(Table 3).

3.3 산림생태계에서의 탄소 저장 및 거동

본 연구에서는 관련 연구 결과를 생태계 유형별로 산림지, 습지, 농경지, 초지, 정주지로 나누어 정리하고자 하였지만, 산림을 제외한 나머지 생태계 유형(습지, 농경지, 초지, 정주지)의 경우에는 데이터의 한계로 탄소 매체별로 분류하는 것이 불가능하였다. 따라서, 본 연구에서는 산림생태계만을 대상으로 탄소 저장 매체별 탄소 저장량 및 거동량의 대푯값을 산정하고 비교하는 연구를 진행하였다. 탄소 저장의 경우 5 가지 탄소 저장 매체(지상부·지하부 생체

Table 2. List of previous studies used in analysis

Ecosystem Type	Carbon storage	Carbon flux
Forest	NiFoS, 2018; NiFoS, 2019; NiFoS, 2020a; NiFoS, 2020b; NiFoS, 2021; Lee et al., 2017; GRI, 2009; Seo et al., 2005; Choi et al., 2014; Jang et al., 2014; Wie et al., 2011; Kwon and Lee, 2006; Mon and Yim, 2021; Seo et al., 2017; Kwon et al., 2012; Yang and Kim, 2020; Kwon et al., 2005; Kang and Kwak, 1998; Park et al., 2005.; Kim et al., 1985; Lim and Lee, 2018; Son et al., 2007; Jung et al., 2014; Yim et al., 2009; Seo et al., 2010; Lee et al., 2019; Lee and Kwon, 2006; Kwon and Lee, 2006	Kim et al., 2014; Son et al., 2017; Jo et al., 2019; Seo et al., 2005; Song et al., 2014; Lee et al., 2021; Lee et al., 2019
Cropland	Hong et al., 2013	Hur et al., 2020; Lim et al., 2012; Jo et al., 2014; Lee et al., 2017; Seo et al., 2015; Shim et al., 2016
Grassland	Kim et al., 2016	Chung and Lee, 1993
Sattlement	Choi et al., 2020; Hong et al., 2021	Choi et al., 2020; Hong et al., 2021

Table 3. Amount of carbon storage and flux in different ecosystem type and carbon pool

	Carbon Storage (gC m ⁻²)						Carbon Flux (gC m ⁻² yr ⁻¹)				
	Biomass		Soil	Dead Organic Matter		Ecosystem	Production		Soil	Dead Organic Matter	Ecosystem
	Aboveground	Belowground	Soil Organic Carbon	Dead Wood	Litter		Aboveground	Belowground	Soil respiration	Litter Production	
Forest	4166.66 ±4436.01 (n=30)	3880.95 ±2666.67 (n=38)	4203.16 ±2272.43 (n=24)	80.58 ±78.81 (n=26)	592.28 ±236.47 (n=37)	7753.80 ±12044.6 (n=4)	907.44 ±468.06 (n=24)	-	321.3 ±367.50 (n=5)	-	418.38 ±505.14 (n=5)
Wetland	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cropland	-	-	-	-	-	-	621.2 ±554.77 (n=5)	-	638.96 ±489.62 (n=15)	-	401.58 ±225.40 (n=11)
Grassland	-	-	4023.23 ±2855.31 (n=13)	-	-	-	-	-	-	-	-
Sattlement	27.32 ±31.53 (n=7)	-	-	-	-	-	95.12 (n=1)	-	-	-	-

량, 토양유기탄소, 고사목, 낙엽)와 산림생태계 전체를 대상(생태계)으로 한 저장량을 모두 산정·비교할 수 있었다. 5 가지 탄소저장 매체와 생태계별 탄소저장량 산정 결과는 아래 Table 3과 같다. 분석을 위해 사용된 선행연구 개수는 5~38 개였다. 이 중 생태계 전체를 살펴본 연구가 4 개로 가장 적었으며, 낙엽의 저장량을 산정한 연구가 37 개로 가장 많았다. 나머지 탄소 저장 매체는 25~35 개로 비슷한 경향을 보였다. 탄소 저장량의 결과를 살펴보면, 탄소 저장 매체 중 토양에 $4,203.16 \text{ gC m}^{-2}$ 의 가장 많은 탄소가 저장되어 있는 것으로 나타났다. 지상부·지하부 생태량은 이와 비슷한 양인 $4,166.66 \text{ gC m}^{-2}$ 와 $3,880.95 \text{ gC m}^{-2}$ 의 탄소가 저장되어 있는 결과를 나타냈다. 반면 고사유기물로 분류되는 고사목과 낙엽은 상대적으로 적은 양인 단위면적 당 80.57g 과 592.28g 의 탄소를 저장하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 2(a)).

산림 생태계에서는 탄소 저장량뿐만 아니라, 탄소 저장 매체별 탄소 거동량도 산정 가능하였다. 다만, 모든 매체별로 가능한 것은 아니었고, 지상부 바이오매스와 생태계 전체의 거동을 살펴볼 수 있었다. 생태계의 저장량 산정에는 시간의 흐름이나 변화를 살펴볼 필요가 없고 한 지점의 한 시점에서만의 측정값으로도 저장량을 산정할 수 있는 반면, 거동량의 경우 시간에 따른 변화량이기 때문에 일정기간의 측정이 필요하여, 저장량에 비해 상대적으로 적은 양

의 연구가 진행된 것으로 보인다. 이 중 지상부 바이오매스의 탄소 거동을 산정하여 대포깁 계산에 활용된 개수는 20 개였으며, 생태계의 경우에는 5 개였다(Table 2). 지상부의 경우 평균적으로 단위면적당 연간 975.78g 의 탄소를 흡수하는 결과를 나타냈으며, 전체 산림 생태계의 경우 이의 절반 정도에 해당하는 418.38g 의 탄소를 흡수하는 것으로 나타났다(Fig. 2(b)).

3.4 생태계 유형별 탄소 저장 및 거동 산정

산림생태계의 경우 많은 선행 연구들이 진행되어 산림 생태계 내에서의 탄소 저장 매체별 저장량 및 거동량 산정이 가능하였으나, 타 생태계의 경우 탄소 저장 매체별 비교를 할 수 있을 정도의 데이터가 확보되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 한 생태계 유형 내 탄소 저장 매체별 비교뿐만 아니라, 다른 생태계의 같은 탄소 저장 매체별로 탄소 저장 및 거동의 차이가 얼마나 나타나는지 알아보고자 하였다. 서로 다른 생태계의 동일 탄소 저장 매체의 탄소 저장과 거동을 살펴볼 수 있는 생태계 및 저장 매체는 많지 않았다. 탄소 저장량에 있어서는 산림 및 초지 생태계 중 토양유기물함량이 비교 가능했다. 초지 및 산림의 토양유기물함량을 산정에 활용한 데이터의 개수는 초지 13개, 산림 24개였다. 이 데이터들을 활용하여 산정한 값은

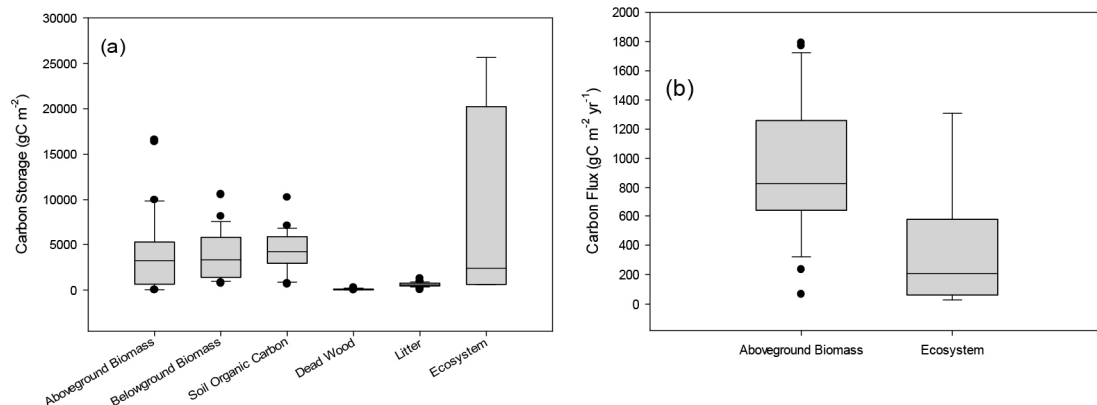


Fig. 2. (a) Carbon storage and (b) flux of different carbon pool in forest ecosystem

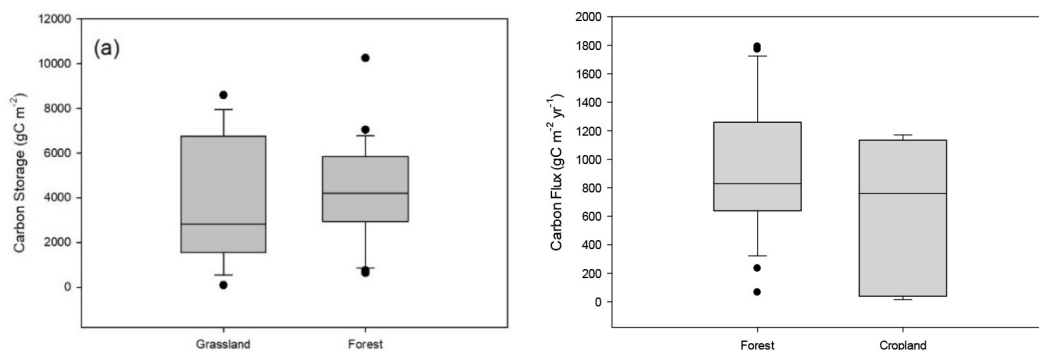


Fig. 3. (a) Carbon storage in soils at forest and grassland, (b) carbon flux of aboveground biomass at forest and cropland

초지는 토양에 단위 면적당 $4,023.23 \text{ gC}$ 을 저장하고 있었으며, 산림은 $4,159.43 \text{ gC m}^{-2}$ 을 저장하고 있었다(Fig. 3 (a)). 농경지와 산림에서는 탄소 저장량뿐만 아니라, 지상부 생체량을 대상으로 탄소 거동량 역시 비교 분석이 가능하였다. 분석 가능 개수는 산림 20개, 농경지 5개였으며, 이를 통해 도출된 결과는 산림은 지상부 바이오매스를 통해 매년 단위면적당 $975.78 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 을 흡수하는 것으로 나타났으며, 농경지의 경우 $621.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 의 탄소를 흡수하는 것으로 나타났다(Fig. 3 (b)).

4. 고찰 및 제언

4.1 생태계 유형별 탄소 저장 및 거동 산정 연구 현황

본 연구에서 국내 생태계를 대상으로 수행된 탄소 저장 및 거동 관련 연구의 현황을 분석해 본 결과, 대부분의 연구가 산림에서 수행되었다는 것을 알 수 있었다. 국내 산림의 경우, 산림 경영 등을 이유로 산림 탄소 수지에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 산림에서는 산림자체의 탄소 저장량과 거동량을 분석하는 연구 뿐만 아니라, 산림 탄소 산정 방법 제시 등과 관련한 연구들도 진행되었다(Jeong *et al.* 2022). 산림 탄소 저장 및 거동과 관련하여 생태계 서비스 측면에서의 정책적 활용도 활발히 이뤄지고 있다. 산림청은 매년 산림의 공익적 가치를 평가하여 발표하고 직불제 등에 활용하고 있는데, 가장 최근에 발표된 산림의 공익적 가치는 259 조원으로 평가하고 있으며, 이 중 온실가스 저장 및 흡수 기능이 전체의 37.8%로 가장 큰 가치를 나타내고 있다. 이처럼, 산림에서의 탄소 저장·흡수 기능이 강조되고 활용되어 온 것과 달리, 타 생태계에서의 탄소 저장·흡수에 관한 연구는 극히 제한적으로 진행되었다. 농경지의 경우, 이산화탄소의 흡수와 함께 메탄가스의 발생에 주요한 원인이라 여겨져서 온실가스의 거동에 관한 연구가 상당부분 진행되었다. 또한 대기 중 이산화탄소 농도가 높은 미래 환경에서의 작물의 성장 등과 같이 기후변화와 관련한 연구들이 상당부분 진행되었다(Kim *et al.* 2022). 하지만, 일년생을 주요 작물로 하는 우리나라 농경 특성상 저장에 관한 연구는 거의 진행되지 않았다. 실제로 UNFCCC 에 보고되고 있는 우리나라 온실가스 인벤토리 보고서에서도 농경지와 초지에 대해서는 토양탄소만을 산정하고 있다(GIR 2022). 반면, 습지의 경우, 관련연구가 다른 생태계에 비해 매우 제한적임을 알 수 있었다. 습지의 경우, 토양의 특성상 식물에 의해 생태계 내로 유입된 탄소가 분해되지 않아 생태계 내로 저장되고 대기 중으로 방출되지 않는다는 특징이 있다. 최근 전세계적으로 습지의 탄소 저장 및 흡수 기능이 강조되고 습지에 저장된 탄소의 양이 전체 토양 탄소의 15~20%에 이른다는 보고가 있어 습지에서의 탄소 저장·흡수 기능을 증대하기 위한 연구들이 진행되고 있다(Lal 2008). 우리나라의 경우, 다른 생태계에 비해 상대적으로 적은 면적을 차지하고 있어 지

금까지 탄소흡수원으로서의 역할에 대해 상대적으로 적은 연구가 수행되었다. 하지만, 우리나라 2050 장기저탄소발전전략에서 강조하였듯이, 이전에 고려되지 않던 신규 흡수원의 발굴이 매우 중요한 과제로 제시되고 있는 것과 같이 습지와 같이 기존에 상대적으로 적은 연구가 진행된 생태계에 대한 연구가 필요하다.

4.2 생태계 유형별 탄소 저장고별 탄소 저장 및 거동 대푯값 산정

본 연구에서는 이전에 국내 생태계를 대상으로 수행된 연구를 모아 생태계 유형별(산림, 농경지, 습지, 초지, 정주지)·탄소 저장고별(지상부·지하부 생체량, 토양유기탄소, 고사목, 낙엽, 생태계)에 대한 결과값들을 모아 대푯값을 산정하는 연구를 진행하였다. 데이터의 한계로 모든 생태계 유형과 탄소 저장고에 대한 값을 도출하지는 못하였으나, 도출된 결과값들을 살펴보면, 우선 산림의 경우 5 가지 주요 탄소저장고에 대한 결과값 도출이 가능하였다. 산림에서의 주요탄소저장고 중 가장 높은 저장량을 기록한 것은 토양탄소였다. 생체량이 이와 비슷한 정도로 토양의 탄소를 저장하고 있는 것으로 나타났다. 생체량 중에서도 지상부와 지하부 탄소 저장량이 비슷한 것으로 나타나 실제 표면적으로 드러나는 탄소저장량뿐만 아니라, 지하부의 탄소 저장이 매우 중요한 것으로 나타났다. 실제로 이러한 경향은 국외 다른 연구에서도 비슷하게 나타나고 있다(Cruickshank *et al.* 1998; Ni 2001; Wang *et al.* 2021). 현재 산림에서의 탄소저장 및 거동과 관련한 연구는 많은 부분 지상부에 초점이 맞추어 진행되고 있다. 실제 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서도 생체량만 산정하고 토양에 대한 산정은 진행하지 않고 있는 것을 확인할 수 있었다(GIR, 2022). 본 연구에서 산림 식생에서의 탄소저장만 큼이나 토양에 많은 양의 탄소가 저장되어 있다는 것이 확인되었으므로, 이에 대한 연구 및 토양탄소의 관리를 위한 제도의 마련이 필요하다.

또한, 다양한 생태계 유형을 대상으로 같은 탄소저장고를 대상으로 저장 및 거동량을 살펴본 결과, 산림뿐만 아니라 타생태계에서도 산림과 비슷한 양의 탄소를 저장하고 있는 것으로 나타났고, 토양호흡도 비슷한 값을 나타내, 산림에서의 연구뿐만 아니라 다른 생태계에서의 연구가 매우 중요하다는 결과를 다시 한번 확인할 수 있었다.

4.3 결론

본 연구에서는 국내 생태계의 기후변화에 대한 기여를 판단하기 위하여 5 가지 생태계 유형과 6 가지 주요 탄소저장고별 관련 연구 현황을 분석하였다. 그 결과 국내에서 수행된 탄소 저장·거동 관련 연구의 절반 이상(66%)이 산림생태계에서 진행되었으며, 그 다음이 농경지(16%), 습지(8%), 초지(5%), 정주지(5%) 순이었다. 또한, 생태계 유형별로 탄소 저장 및 거동 측정값을 정리한 결과, 초지나 농

경지에서도 상대적으로 많은 양의 탄소를 저장하고 있으며, 거동에 있어서도 많은 양의 탄소가 흡수·배출되는 것으로 나타났다. 이는 산림이 아닌 다른 생태계에 대한 탄소 연구의 수행이 필요하다는 것을 의미하고 있다. 특히, 이전 연구들에서 탄소 저장에 대한 기능으로 강조되고 있는 습지 생태계의 탄소 관련 연구가 매우 제한적인 것으로 나타나 이에 대한 고려가 필요한 것으로 보인다. 본 연구에서 산림생태계를 대상으로 탄소저장고별 저장 및 거동값을 분석해 본 결과, 식생(지상부·지하부 생체량)에 가장 많은 양의 탄소가 저장되어 있는 것으로 나타났다. 하지만, 상대적으로 토양도 식생과 비슷한 정도의 탄소를 저장하고 있는 것으로 나타나, 토양 탄소의 측정 및 관리가 중요하다는 결론을 내릴 수 있었다.

사사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2023-16).

References

- Choi, H. A., Lee, W. K., Jeon, S. W., Kim, J. S., Kwak, H., Kim, M., Kim, J. and Kim, J.T. (2014) Quantifying Climate Change Regulating Service of Forest Ecosystem - Focus on Quantifying Carbon Storage and Sequestration. *J. Climate Change Res.*, Vol. 5(1), pp. 21-36, DOI : <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2014.5.1.21>
- Choi, S. E., Ham, B., Song, C., Park, E., Kim, J., and Lee, W. K. (2020). Pilot Study and Development of Activity Data for Greenhouse Gas Inventory of Settlement Categories in Korea: A Case of Incheon Seo-gu. *J. Climate Change Res.*, Vol. 11(3), pp. 187-196, DOI : <https://doi.org/10.15531/kscrcr.2020.11.3.187>
- Chung, Y.S. and Lee, H.S. (1993) On the environmental Impact Assessment of Traditional Tombs: The Source and Sink of O₂ and CO₂. *JESI*, Vol. 2(2), pp. 115-121.
- Cruickshank, M. M., Tomlinson, R.W. Devine, P.M. and Milne, R. (1998) Carbon in the vegetation and soils of Northern Ireland. *Biol. Environ.*, Vol. 98B(1), pp. 9-21.
- Global Carbon Project. (2022) Carbon budget and trends 2022. <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>
- GRI (2009) Quantification of CO₂ uptake by urban trees and greenspace management for C sequestration. Gyounggi Research Institute.
- Hong, S., Ham, B. Y., Choi, S. E., Kim, W. J., Ha, R., Park, S. Y. and Lee, W. K. (2021) Comparative Analysis on the Sequestration of CO₂ Depending on Spatial Ranges for Estimating Greenhouse Gas Inventory in Settlement - In Case of Seoul -. *J. Climate Change Res.*, Vol. 12(6), pp. 767-776, DOI : <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2021.12.6.767>
- Hur, J., Shim, K., Lee, B. T., Kim, Y. S. and Cho, S. R. (2020) Estimation and Comparison of Carbon Uptake in Rice Paddy, Dry Cropland and Grove in South Korea using Eddy Covariance Flux Data. *Korean J Environ Agric.*, Vol. 39(4), pp. 334-342.
- Jang, R. H., Cho, K. T. and You, Y. H. (2014) Annual biomass production and amount of organic carbon in *Abies koreana* forest of subalpine zone at Mt. Halla. *Korean J. Environ. Ecol.*, Vol. 28(6), pp. 627-633.
- Jeong, H. M., Kim, H. R., Kim, D., Jang, I. and Kang S. R. (2022) A Study of Improvement on Estimation Methodology of Carbon Storage amount by Damaged Trees for Environmental Impact Assessment. *Korean J. Ecol. Environ.* 55(4), pp.330-340. DOI : <https://doi.org/10.11614/KSL.2022.55.4.330>
- Jeong, H. M., You, Y. H., and Hong, S. (2022) Carbon balance and net ecosystem production in *Quercus glauca* forest, Jeju Island in South Korea. *Journal of ecology and environment* 46: 24
- Jo, H.J., Park, S. M., Kim, J.Y. and Park, H. M. (2014) Carbon Uptake and Emissions of Apple Orchards as a Production-type Greenspace. *J KILA*, Vol. 42(5), pp. 64-72.
- Jo, H.K., Park, S.H., Park, H.M. and Kim, J.Y. (2019) Carbon Reduction by and Quantitative Models for Landscape Tree Species in Southern Region - For *Camellia japonica*, *Lagerstroemia indica*, and *Quercus myrsinaefolia* -. *J KILA*, Vol. 47(3), pp. 31-38.
- Jung, J., Nguyen, H., Heo, J., Kim K. M. and Im J. H. (2014) Estimation of Aboveground Forest Biomass Carbon Stock by Satellite Remote Sensing - A Comparison between k-Nearest Neighbor and Regression Tree Analysis - *Korean J. Remote Sens.*, Vol. 30(5), pp. 651-664, DOI : <https://doi.org/10.7780/kjrs.2014.30.5.10>
- Kang, S. J. and Kwak, A. K. (1998) Comparisons of Phytomass and Productivity of Watershed Forest by Allometry in South Han River. *J. Kor. For. En.*, Vol. 17(1), pp. 8-22.
- Kim, H.R., You, Y.H. and Jeong, H. M. (2022) Effect of Elevated CO₂ and Temperature on Growth, Yield and Physiological Responses of Major Rice Cultivars by Region in South Korea. *Korean J. Ecol. Environ.* 55(4), pp.341-351 DOI: DOI : <https://doi.org/10.11614/KSL.2022.55.4.341>
- Kim, J. S., Han, S. H., Jang, H. N., Kim, T. Y., Jang, I. Y., Oh, W. S., Seo, C. W., Lee, W.K. and Son, Y. W. (2016) Quantitative Assessment of Climate Regulating Ecosystem Services Using Carbon Storage in Major Korean Ecosystems. *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 34(1), pp. 8-17. DOI : <https://doi.org/10.11626/KJEB.2016.34.1.008>
- Kim, K. D., Kim, T. W., Lee, K. J. and Kim, J. S. (1985) Distribution of Biomass and Production of *Robinia pseudoacacia* Plantation

- in Korea. *J. Korean Soc. For. Sci.*, Vol. 68(1), pp. 60–68.
- Kim, K. M., Roh, Y. H. and Kim, E. S. (2014) Comparison of Three Kinds of Methods on Estimation of Forest Carbon Stocks Distribution Using National Forest Inventory DB and Forest Type Map. *J. KAGIS*, Vol. 17(4), pp. 69–85, DOI : <https://doi.org/10.11108/kagis.2014.17.4.069>
- Kwon, K. C. and Lee, D. K. (2006) Biomass and Annual Net Production of *Quercus mongolica* Stands in Mt. Joongwang with Respect to Altitude and Aspect. *J. Korean Soc. For. Sci.*, Vol. 95(4), pp. 398–404.
- Kwon, S.D., Seo, J.H., Son, Y.M. and Park, Y.K. (2005) Biomass Carbon Emissions according to Conversion of Forest Land in Korea. *J. Kor. For. En.*, Vol. 24(2), pp. 10–15.
- Kwon, S. S., Choi, S. H. and Lee, S. D. (2012) Estimation of Spatial–Temporal Net Primary Productivity and Soil Carbon Storage Change in the Capital area of South Korea under Climate Change. *J. EIA*, Vol. 21(5), pp. 757–765.
- Lal, R. (2008) Carbon sequestration. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B*, Vol. 363, pp. 815–830
- Lee, D. K. and Kwon K. C. (2006) Biomass and Annual Net Production of *Quercus Mongolica* Stands in Pyungchang and Jecheon Areas. *J. Korean Soc. For. Sci.*, Vol. 95(3), pp. 309–315.
- Lee, H., Ju, H., Jeon, J. H., Lee, M. S., Suh, S. U. and Kim, H. S. (2021) Evaluation of Carbon Sequestration Capacity of a 57-year-old Korean Pine Plantation in Mt. Taehwa based on Carbon Flux Measurement Using Eddy-covariance and Automated Soil Chamber System. *J. Korean Soc. For. Sci.*, Vol. 110(4), pp. 554–568.
- Lee, S. J., Kim, R. H., Son, Y. M., and Yim, J. S. (2017). Estimating Litter Carbon Stock and Change on Forest in Gangwon Province from the National Forestry Inventory Data. *J. Climate Change Res.*, Vol. 8(4), pp. 385–391. DOI : <https://doi.org/10.15531/kscsr.2017.8.4.385>
- Lee, T., Kim, S., Shin, Y., Jung, Y., Lim, K. J., Yang, J. E. and Jang, W. (2019) Development of Soil Organic Carbon Storage Estimation Model Using Soil Characteristics. *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, Vol. 61(6), pp. 1–8.
- Lim, H. W. and Lee, K. H. (2018) Estimates of annual biomass production in the *Pinus densiflora* and the *Styrax japonica* stands in Yeochon Coastal Area. *TJOKI*, Vol. 30(2), pp. 165–175
- Lim, S. S, Choi, W. J., Kim, H. Y., Jung, J. W. and Yoon K. S. (2012) Fly Ash Application Effects on CH₄ and CO₂ Emission in an Incubation Experiment with a Paddy Soil Korean. *KJSSF*, Vol. 45(5), pp. 853–860.
- Namgung, J, Choi, H. J., Han, A. R. and Mun, H. T. (2008) Organic carbon distribution and budget in the *Quercus variabilis* forest in the Youngha valley of Worak National Park. *Korean Journal of environmental biology* 26: 170–176
- NASS. 2013. Estimation of carbon storage in cropland using remote sensing. Wanju. National Institute of Agricultural Sciences.
- Ni, J., Zhang, X. S. and Scurlock, J. M. (2001) Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests. *Ann. For. Sci.*, Vol. 58(4), pp. 351–384.
- NiFoS. (2018) Carbon storage dynamics in the belowground according to the thinning of pine tree plantation. Seoul. National Institute of Forest Science
- NiFoS. (2019) Dynamic Analysis of Carbon Storage in belowground according to thinning of Japanese larch and Black pine. Seoul. National Institute of Forest Science
- NiFoS. (2020a) Dynamic Analysis of Carbon Storage in belowground according to thinning of Oak tree. Seoul. National Institute of Forest Science
- NiFoS. (2020b) Estimation of carbon change in forest soil using a carbon model. Seoul. National Institute of Forest Science
- NiFoS. (2021) Dynamic Analysis of belowground carbon storage according to the thinning intensity of Pine Tree Plantation. Seoul. National Institute of Forest Science.
- Park, I. H., Kim, D. Y., Son, Y.W., Yi, M.J., Jin, H. O. and Choi, Y. H. (2005) Biomass and Net Production of a Natural *Quercus mongolica* Forest in Namsan, Seoul. *Korean J. Environ. Ecol.*, Vol. 19(3), pp. 299–304.
- Seo, J. H., Son, Y. M., Lee, K. H., Lee, W. K. and Son, Y. W. (2005) The Estimation of Stand Biomass and Net Carbon Removals Using Dynamic Stand Growth Model. *J. Kor. For. En.*, Vol. 24(2), pp. 37–45.
- Seo, J. H., Son, Y. M., Lee, K. H., Lee, W. K. and Son, Y. W. (2005) The Estimation of Stand Biomass and Net Carbon Removals Using Dynamic Stand Growth Model. *J. Kor. For. En.*, Vol. 24(2), pp. 37–45.
- Seo, Y., Jung, S. C. and Lee, Y. J. (2017) Mapping of Spatial Distribution for Carbon Storage in *Pinus rigida* Stands Using the National Forest Inventory and Forest Type Map: Case Study for Muju Gun. *J. Korean Soc. For. Sci.*, Vol. 106(2), pp. 258–266. DOI : <https://doi.org/10.14578/jkfs.2017.106.2.258>
- Seo, Y. O., Lee, Y. J., Pyo, J. K., Kim, R. H., Son, Y. M. and Lee, K. H. (2010) Above- and Belowground Biomass and Net Primary Production for *Pinus densiflora* Stands of Cheongyang and Boryeong Regions in Chungnam. *J. Korean Soc. For. Sci.*, Vol. 99(6), pp. 914–921.
- Shim, K. M., Min, S. H., Kim, Y. S., Jung, M. P., Choi, I. T. and Kang, K. K. (2016) Estimation of Annual Net Ecosystem Exchange of CO₂ in an Apple Orchard Ecosystem of South Korea. *KJAFM*, Vol. 18(4), pp. 348–356
- Son, Y. M, Lee, K. H. and Kim, R. H. (2007) Estimation of Forest Biomass in Korea. *J. Korean Soc. For. Sci.*, Vol. 96(4), pp. 477–482.
- Song, M., Bae J. S. and Seol, M.H. (2014) Development of the Forest Carbon Sink Index on Afforestation and Reforestation Activities. *J. Korean Soc. For. Sci.*, Vol. 103(1), pp. 137–146.

- Suh, S. U, Choi, E. J., Jeong, H. C., Lee, J. S., Kim, G. Y., Lee, J. S. and Sho, K. H. (2015) The Study on Carbon Budget Assessment in Pear Orchard. *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 33(3), pp. 345-351.
- Wang, Y. T., Zhang, X. L. and Guo, Z. Q. (2021) Estimation of tree height and aboveground biomass of coniferous forests in North China using stereo ZY-3, multispectral Sentinel-2, and DEM data. *Ecol. Ind.*, Vol. 12, pp. 107645, DOI : <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107645>
- Won, H. Y, Shin, C. H. and Mun, H. T. (2014). Valuation of ecosystem services through organic carbon distribution and cycling in the *Quercus mongolica* forest at Mt. Worak National Park. *Journal of wetlands research* 16: 315-325
- Won, H. Y, Lee, Y. S. and Mun, H. T. (2015). Valuation of ecosystem services through organic carbon distribution and cycling in the *Pinus densiflora* forest in Mt. Worak National Park. *Journal of wetlands research* 17: 332-338
- Wie, G.J., Lee, H., Lee, D. H., Cho, J. M. and Suh, Y. C. (2011) Estimation of the carbon absorption of a forest using Lidar Data. *J. Korean Soc. Surv. Geod. Photogramm. Cartogr.* Vol. 29(1), pp. 55-62.
- Yang, K. C. and Kim, J. S. (2020) Carbon Storage and Absorption of Trees in the Ecological Restoration Area and Vegetation Conservation Area of Bulamsan Urban Nature Park. *Ecol. Resil. Infrastruct.*, Vol. 7(4), pp. 284-293.
- Yim, J. S., Han, W. S., Hwang, J. H., Chung, S. Y., Cho, H. K. and Shin, M. Y. (2009) Estimation of Forest Biomass based upon Satellite Data and National Forest Inventory Data. *Korean J. Remote Sens.*, Vol. 25(4), pp. 311-320.