

전과정평가를 통한 자연기반해법 조성 탄소환불기간 분석 연구

천예준^{1*}, 김익²

¹한국환경보전원, ²스마트에코

Analysis of Carbon Payback Period for the Development of Natural-Based Solutions through Life Cycle Assessment

Yeajun Chun^{1*}, Ian Kim²

¹Korea Environmental Conservation Institute, Korea, ²SMaRT ECO, Korea

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effectiveness of nature-based solutions (NBS) as carbon sinks by estimating greenhouse gas (GHG) emissions and absorption through Life Cycle Assessment (LCA). The study focused on a designated area within the Han Gang River water source management region, calculating GHG emissions and absorption during the implementation of NBS, and deriving the carbon payback period. The results indicate that a total of 5.71 tCO₂ of GHGs were emitted during the NBS implementation process, and 150.58 tCO₂ were absorbed by 2050. The carbon payback period was estimated to be approximately three years. This research highlights the importance of considering GHG emissions during the NBS implementation process to enhance its effectiveness and suggests the need for further studies for more accurate carbon balance assessments.

Key words: nature-based solution, LCA, carbon budget, carbon payback period, ecological restoration project

요약

본 연구는 자연기반해법 조성과정 등을 분석하여 온실가스 흡수원으로서의 효율성을 평가하기 위해 수행되었다. 연구대상지는 한강수계 상수원 관리지역을 대상으로 하여 전과정평가(LCA)를 통해 자연기반해법 조성과정에서 발생하는 온실가스와 흡수량을 산정하여 탄소환불기간을 도출하였다. 연구 결과 자연기반해법 조성 과정에서 총 5.71 tCO₂의 온실가스가 발생하였으며, 조성 후 2050년까지 150.58 tCO₂의 온실가스를 흡수할 수 있는 것으로 나타났다. 탄소환불기간은 약 3년으로 산정되었다. 본 연구는 자연기반해법의 실효성을 높이기 위해 조성과정에서 발생하는 온실가스를 고려하는 것이 중요함을 강조하며, 향후 더욱 정교한 탄소수지 산정을 위한 연구의 필요성을 제기한다.

주제어: 자연기반해법, 전과정평가, 탄소수지, 탄소환불기간, 생태복원사업

1. 서론

자연기반해법(nature-based solutions)은 수변녹지대 등 온실가스 저감 등 다양한 생태계 서비스를 강화·회복시키기 위

한 지속가능한 방안으로 탄소중립 달성을 위한 중요한 정책 중 하나이다. 생태계를 보전하고, 숲과 습지 등의 파괴를 방지하며 기후변화 완화(mitigation)에도 효과적이기 때문에 국내·외에서 자연기반해법은 많은 주목을 받고 있다[1,2]. IPCC

Date Received: Jul. 16, 2024, Date Revised: Aug. 28, 2024, Date Accepted: Aug. 29, 2024

* Corresponding author: Yeajun Chun, Tel: +82-2-3406-3144, E-mail: absolution1@naver.com

© Copyright 2024 The Korean Society for Life Cycle Assessment. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

제6차 평가보고서에서는 자연기반해법이 심도 있게 다뤄졌으며, 다양한 평가와 모니터링 등이 이어질 필요성이 강조되기도 하였다[3].

우리나라에서는 도시숲 등 녹지대 조성을 통해 온실가스 흡수원 확충을 계획, 실행하고 있는 등 자연기반해법을 통한 온실가스 흡수원 확충이 기후변화 대응에 중요한 방안으로 인식되고 있다[4]. 국내에서는 수목에 의한 온실가스 흡수량을 정량화 하기 위해 주요 산림 수종의 탄소흡수량을 제시하거나, 조경수 중 느티나무, 소나무 등에 대한 수령별 온실가스 흡수량 연구가 수행되기도 하였다[5,6]. 한국환경공단(2017)[7]에서는 IPCC에서 제시한 인벤토리를 국내실정에 적합하게 적용하여 온실가스 배출 및 흡수량을 제시하였으며, AFOLU 분야에서는 임지, 습지 등으로 구분하여 세부적인 연구를 수행하였다. 해외의 경우 수목의 성장에 따른 온실가스 흡수량 증가를 측정하거나 종합적인 관점에서 숲 관리가 기후변화 완화에 미치는 영향을 연구하기도 하였다[8,9].

자연기반해법 중 하나로 중요한 역할을 하는 숲의 종합적인 탄소수지를 연구한 사례로는 숲의 관리를 위해 발생하는 온실가스를 탄소부채(carbon debt)로 설정하고 숲의 탄소고정능력을 통해 부채를 상환하는 탄소환불기간(carbon payback) 산정 연구 등이 진행된 바 있다[10]. Mitchell et al.[11]은 효율적인 숲의 관리를 통한 탄소저감효과의 중요성을 강조하기 위해 바이오매스를 생산하여 얻는 온실가스 저감효과와 숲을 보전하여 얻는 효과를 탄소수지로 산정하여 비교하는 방법을 사용하였다.

우리나라의 경우, 자연기반해법 조성을 통해 온실가스 저감효과를 산정하고 있지만, 탄소환불기간 산정 등을 통한 온실가스 흡수원으로서의 효율성을 분석한 연구는 상대적으로 드물다. 이에, 본 연구는 전과정평가를 통해 자연기반해법 조성 중 발생하는 온실가스 발생량을 산정하고 온실가스 흡수량을 산정하여 탄소환불기간을 도출, 종합적인 온실가스 흡수원으로서의 효율성을 평가하고자 한다.

2. 연구범위 및 방법

2.1. 연구범위

시간적 범위는 자연기반해법 조성에 따른 온실가스 발생량과 조성 후 식재된 수목 등에 의한 온실가스 흡수 기간으로 나누어 산정하였다. 온실가스 발생량 산정은 토지이용 변화부터 조성공사, 유지관리 공사를 각 단계별로 연구범위에 포함하였다. 온실가스 흡수는 조성공사가 완료된 시점부터 우리나라가 탄소중립을 목표로 하고 있는 2050년까지를 기준으로 하였다.

공간적 범위로, 연구대상지는 AFOLU 부문의 변화를 예측하는 데 용이한 한강수계 상수원 관리지역 내 수변녹지 조성 지역을 선정하였다[12]. 선정된 연구대상지는 가평군 청평면 삼회리 일원에 위치하고 있으며, 기존 토지이용 형태였던 나대지에서 자연기반해법 조성을 통해 교목식재 및 건습지가 조성된 상태이다(Table 1). 토지이용변화로 인한 고사유기물 탄소축적 변화량은 <지자체 온실가스 배출량 산정지침>을 준용하여 Tier 1 방법론으로 산정하였다[7](Table 2).

온실가스 배출량 산정범위는 Scope 1(조직경계 내 직접배출)과 Scope 3(조직경계 외 간접배출)으로 설정하였다. Scope 1은 조성공사 시 중장비 사용 등에 따른 온실가스 발생 등을 주로 산정하였다. Scope 3은 수목 등을 운송하는데 배출되는 온실가스 발생량을 산정하였다(Table 3).

Table 1. Study area [12]

Study area size (m ²)	8,486
Number of trees planted	676
Area for maintenance (m ²)	7,149
Major construction process	Tree plants, detention pond

Table 2. Greenhouse gas emission assessment methods [13,14]

Tier	Description
Tier 1	Most basic level, relying on generalized default emission factors
Tier 2	Country-specific or region-specific data
Tier 3	Direct measurements and highly detailed models or data.

Table 3. Scope of greenhouse gas estimation [15]

Range	Description
Scope 1 (direct emissions)	Construction equipments, lawnmowers
Scope 2 (indirect emissions)	-
Scope 3 (indirect emissions outside of the organisation's direct control)	Operation of irrigation vehicles, transportation of plants

2.2. 연구방법

2.2.1. 온실가스 배출 및 흡수량 산정방법

자연기반해법 조성과정의 탄소수지 분석을 위해 전과정평가(LCA, life cycle analysis)를 활용하여 정량 산정하였다. 전과정평가는 농업생산이나 바이오매스, 에너지 사용에 따른 온실가스 발생량 산정 등에도 활발히 활용되고 있다[16-18]. 분석 프로그램은 기 작성된 데이터베이스 선택 등의 장점이 있는 SimaPro를 사용하였다[19].

조성 과정에서 발생하는 온실가스는 투입되는 물량을 기초로 정량자료를 구축한 후 온실가스 발생을 분석하였다[20]. 온실가스 발생은 자연기반해법 조성을 위해 토지를 매수한 시점부터 ① 토지이용 변화, ② 조성공사, ③ 유지관리 단계로 구분하여 산정하였다[21]. 흡수량은 식재된 수목에 의한 온실가스 흡수량과 고사유기물 증가량을 산정하였다[5-7].

2.2.2. 연구자료

토지이용 변화 단계의 탄소축적량 변화량은 건습지로 조성된 지역과 교목식재가 진행된 지역으로 구분하여 산정하였다. 건습지가 조성된 지역은 교목식재가 이루어지지 않았으므로 탄소축적량 변화량 산정에서 제외하였다. 교목을 식재한 지역은 ‘임지로 전환된 토지(3B1b)’의 경우를 적용하였다[7]. 고사유기물 탄소 축적 증가량($\Delta CDOM$)을 식 (1)과 같이 산정하였으며, 단위는 tCO_2/yr 이다[7]. 가용한 산정 기초자료를 고려하여 Tier 1 방법론으로 산정하였다. 산정된 탄소(C)량은 환산계수(44/12)를 곱하여 CO_2 로 전환하였다.

$$\Delta CDOM = (C_n - C_0) \times A_{om} / T_{om} \quad (1)$$

여기서, $\Delta CDOM$: 바이오매스 탄소 축적 변화량(tC/yr)

C_n : 전환 이후 토지의 고사유기물 탄소 축적량(tC/ha)

C_0 : 전환 이전 토지의 고사유기물 탄소 축적량(tC/ha)

A_{om} : 전환된 면적(ha)

T_{om} : 토지 이용 전환을 위해 소요되는 기간(기본 값은 ‘20’)(yr)

조성공사와 유지관리공사로 인해 발생하는 온실가스는 중장비 등의 사용으로 인한 화석연료 사용량을 중심으로 산정하였다[20,22](Table 4). 조성공사 과정 중에서 발생 되는 온실가스는 경운, 수로조성 등에서 사용된 화석연료 사용량을 주로 산정하였으며, 식재공사에는 비료사용과 수목운송이 산정되었다. 수목운송은 본 설계에 적용된 식물종의 수급이 원활한 전 북 익산을 기준으로 연구대상지 까지 거리를 적용하였으며, 운

Table 4. Greenhouse gas emission factors by material [7,24,25]

Material		Diesel (L)	Gasoline (L)	Fertilizer (kg)
Net calorific value (kcal)		8,420	7,230	-
Emission factor by green house gas (tGHG/hr)	CO_2	2.59E-03	2.08E-03	5.45E-02
	CH_4	2.62E-06	2.25E-06	5.80E-01
	N_2O	6.24E-06	5.36E-06	9.16E-04
	Total	2.59E-03	2.08E-03	6.36E-02
Emission factor ($kgCO_2$)		2.59	2.09	5.76E-01

송량 계산 시 수목중량은 조경설계기준을 준용하였다[23]. 유지관리공사 단계에서는 예초 시 사용되는 예초기와 관수를 위한 살수차 운용에 사용되는 화석연료량을 산정하였다.

교목에 의한 온실가스 흡수는 식재된 수목 대부분이 조경수이므로 Jo and Park이 제시한 조경수의 수목별 흡수 변화량 및 흡수량 평균치를 준용하였다[6]. 수령의 증가에 따라 온실가스 흡수 변화량도 점증하는 연구결과를 적용하였다. 관목과 초본 및 자연천이 지역은 온실가스 흡수량을 산정할 수 있는 자료가 상대적으로 부족하여 본 연구에서는 제외하였다(Table 5).

2.2.3. 분석방법

매년 발생된 온실가스가 자연기반해법 조성 후 산정된 흡수량에 의해 모두 환불된 기간을 탄소환불기간으로 정하였으며,

Table 5. Annual changes in greenhouse gas absorption [6] ($kgCO_2/yr$)

Species	Tree age				
	5	10	15	20	25
<i>Zelkova serrata</i>	0.5	2.6	7.2	14.8	25.9
<i>Prunus yedoensis</i>	0.4	1.9	4.7	9.0	14.8
<i>Pinus koraiensis</i>	0.2	1.2	3.8	8.9	17.0
<i>Pinus densiflora</i>	0.5	1.7	3.3	5.4	8.0
<i>Ginkgo biloba</i>	0.1	0.8	2.2	4.5	7.9
<i>Prunus armeniaca</i>	0.3	1.1	2.5	4.4	6.9
<i>Abies holophylla</i>	0.2	1.0	2.2	3.9	6.1
<i>Chionanthus retusus</i>	0.2	0.8	1.9	3.5	5.5
<i>Acer palmatum</i>	1.2	1.7	2.4	3.1	5.1
<i>Cornus officinalis</i>	0.1	0.6	1.6	2.9	4.7
<i>Taxus cuspidata</i>	0.0	0.1	0.2	0.5	1.0

산식은 식 (2)와 같다[10,11].

$$C_{balance} = \sum_{t=2022}^n (C_{storage(t)} - C_{emission(t)}) \quad (2)$$

여기서, $C_{balance}$: 탄소수지(tCO₂)

$C_{storage(t)}$: 온실가스 흡수량(tCO₂)

$C_{emission(t)}$: 온실가스 발생량(tCO₂)

3. 결과 및 고찰

3.1. 활동량 데이터 산정

3.1.1. 토지이용 변화

연구대상지의 일부분이 건습지로 조성되었으며 나머지는 교목 식재를 주로 한 숲으로 조성되었다. 토지이용 변화 전은 나대지 상태로 인위적 활동에 의한 온실가스 발생량은 산정하지 않았다. 산림식생이 발달된 지역은 공사를 통해 자연기반해법으로 조성된 곳이 아니므로 해당 면적은 연구대상에서 제외하였다.

3.1.2. 조성단계

연구대상지 내 일부 면적을 건습지로 조성하기 위해 식생저류지 공사가 포함되었다. 건습지 주변은 교목이 식재되었으며 각 수목에 마운딩이 적용되었다. 경운/잡풀 제거 공정에는 7,000 m²가 설계되어 전체 공사량의 대부분을 차지하였다. 표토 이식공정에는 550 m²가, 식생유도수로 공정에는 524 m가 설계되었다. 식생저류지 조성 공정과 마운딩에는 각각 141 m³가, 식재객토 공정에는 23.15 m³가 설계되었다.

조성단계 입력데이터에는 공사에 사용된 장비에 따라 사용된 연료가 다르므로, 경유와 휘발유를 구분하여 투입된 연료량을 산정하였다. 조성공사 단계에서는 경운/잡풀 제거에서 가장 많은 667 L의 경유가 투입되었으며, 표토 이식에는 126 L의 경유가 투입되었다. 식생저류지 조성에 84 L의 경유가 투입되었고, 식생유도수로와 마운딩에는 40 L와 26 L가 각각 투입되었다. 휘발유의 경우 식생유도수로 조성에 83 L가 투입되었고, 식재공사 시 교목수송은 1,697 tkm으로 산정되었다. 식재 후 사용될 비료는 679 kg가 산정되었다(Table 6).

3.1.3. 유지관리 단계

유지관리단계에서는 예초기 사용으로 인한 휘발유 연소와 관수공사에 사용될 살수차 운용 시 발생하는 수송량이 산정되

Table 6. Input data for construction work

Work type	Material	Quantity
Tillage/weed control	Diesel (L)	667.8
Mounding	Diesel (L)	26.01
Detention pond	Diesel (L)	84.88
Topsoil transfer	Diesel (L)	126.59
Channels	Diesel (L)	40.82
	Gasoline (L)	83.84
Planting	Transportation (tkm)	1,697.43
	Fertilizer (kg)	679

었다. 예초는 조성공사 후 2년 동안 6회를 실시하는 것으로 산정하였고, 관수는 조성공사 기간을 포함하여 3년간 연 3회씩 실시하는 것으로 산정하였다. 예초기에는 휘발유 263.54 L가 사용된 것으로 나타났으며, 관수공사에는 2,014.92 tkm이 산정되었다(Table 7).

3.2. 온실가스 발생량 산정

3.2.1. 조성공사 단계(토공사)

연구대상지는 조성단계 중 토공사 단계에서 3,103.79 kgCO₂의 온실가스가 발생되는 것으로 산정되었다. 경운/잡풀제거 공정에서 2,039.56 kgCO₂의 온실가스가 발생되어 가장 큰 부분을 차지하였으며, 그 다음으로 표토이식 공정에서 386.64 kgCO₂이 산정되었다. 식생 유도수로 공정에서는 338.91 kgCO₂가 발생된 것으로 나타났고, 식생저류지 조성과 마운딩 공정에서는 각각 259.23 kgCO₂과 79.45 kgCO₂의 온실가스 발생이 산정되었다(Table 8).

3.2.2. 조성공사 단계(식재공사)

조성단계 중 식재공정에서는 1,119 kgCO₂의 온실가스발생이 산정되었다. 가장 큰 비중을 차지하는 수목운송은 Scope 3에서 1,018.96 kgCO₂의 온실가스가 발생되는 것으로 산정하였고, 비료사용은 100.06 kgCO₂의 온실가스가 Scope 1에서 발생하는 것으로 산정되었다(Table 9).

Table 7. Input data for maintenance work

Type	Material	Quantity
Mowing	Gasoline (L)	263.54
Irrigation	Transportation (tkm)	2,014.92

Table 8. Greenhouse gas emissions during earthworks (kgCO₂)

Type	Diesel		Gasoline		GHG emission
	Scope 1	Scope 3	Scope 1	Scope 3	
Tillage/weed control	1,730.27	309.29	-	-	2,039.56
Mounding	67.40	12.05	-	-	79.45
Detention pond	219.92	39.31	-	-	259.23
Topsoil transfer	328.01	58.63	-	-	386.64
Channels	105.76	18.90	175.38	38.87	338.91
Sum	2,451.36	438.18	175.38	38.87	3,103.79

Table 9. Greenhouse gas emissions during planting work (kgCO₂)

Type	Scope 1	Scope 3	GHG emission
Transportation		1,018.96	1,018.96
Fertilizer	100.06		100.06
Sum	100.06	1,018.96	1,119.02

3.2.3. 유지관리공사 단계

예초기 사용으로 인해 발생하는 온실가스는 Scope 1의 경우 258.52 kgCO₂, Scope 3은 57.1 kgCO₂가 각각 산정되었다. 관수용 살수차 운송에는 Scope 3에서 1,174.63 kgCO₂가 발생하는 것으로 나타났다. 유지관리 단계 총 온실가스 발생량은 1,489.25 kgCO₂로 산정되었다(Table 10).

3.3. 온실가스 흡수량과 탄소환불기간

3.3.1. 온실가스 흡수량 산정

식재된 교목을 기준으로 탄소중립 목표시점인 2050년까지

Table 10. Greenhouse gas emissions during maintenance work (kgCO₂)

Mowing		Irrigation		Sum	
Scope 1	Scope 3	Scope 3	Scope 1	Scope 3	Total sum
258.52	57.10	1,173.63	258.52	1,230.73	1,489.25

산정하였다. 식재된 교목은 성목과 묘목으로 구분되어 있으며, 본 연구에서는 수목이 성장함에 따라 온실가스 흡수량이 증가 되는 것으로 설정하였다[6]. 일부 대상지 내 존치된 수목은 규격이 불분명하여 온실가스 흡수량 산정에 포함시키지 않았다.

연구대상지의 온실가스 흡수량 산정결과 2050년까지 150.58 tCO₂를 흡수하는 것으로 나타났다. 수목에 의해 108.76 tCO₂의 온실가스를 흡수하며, 고사유기물 증가에 의해서는 41.82 tCO₂ 정도 축적량이 증가되는 것으로 산정되었다(Table 11).

3.3.2. 탄소환불기간 산정

자연기반해법 조성과정 중 발생한 온실가스를 모두 환불 (payback)하는 탄소환불기간을 산정한 결과 누적 온실가스 흡수량이 약 6 tCO₂에 이를 때 달성되고, 기간은 3년으로 나타났다(Table 12). 연구대상지는 조성 후 1년 차에는 약 2 tCO₂의 온실가스를 흡수하는데 그치나 수목이 성장함에 따라 10년 차까지 27 tCO₂을 누적 흡수하는 것으로 산정되었다(Fig. 1).

Table 11. Estimation of greenhouse gas absorption (tCO₂)

Greenhouse gas absorption by trees	Decomposed organic matter	Sum
108.76	41.82	150.58

Table 12. Carbon payback period

Greenhouse gas emissions	Greenhouse gas absorption	Carbon payback period
5.71 tCO ₂	150.58 tCO ₂	3 yr

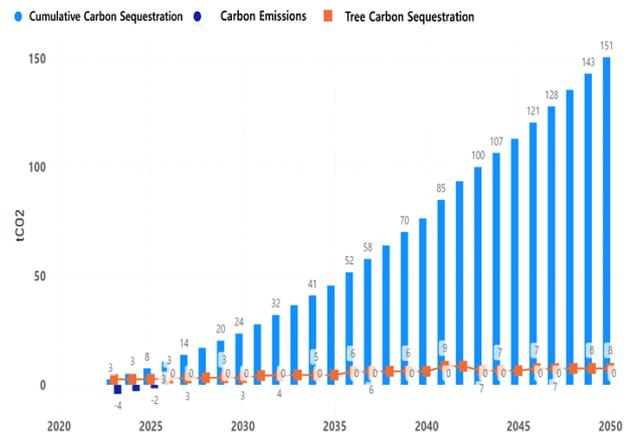


Fig. 1. Carbon balance and carbon sink analysis.

4. 결론

자연기반해법은 탄소중립 달성을 위한 중요한 정책 중 하나로 대두되었으며, 우리나라 역시 자연기반해법의 적용을 위해 다방면으로 노력하고 있다. 실효성 있는 자연기반해법 적용을 위해서는 온실가스 흡수량 산정뿐만 아니라, 조성과정 중 발생하는 온실가스량을 고려해야 하지만, 이와 관련한 연구는 드물다고 할 수 있다. 이에 본 연구는 자연기반해법 실시설계 도면을 활용하여 전과정평가를 통해 탄소환불기간을 산정, 효율적 조성방안을 제시하고자 수행되었다.

선정된 연구대상지의 온실가스 발생량을 모두 환불하는 기간은 약 3년으로 산정되었다. 조성공사 단계에서는 토공사에서 약 3.1 tCO₂가 발생되고 식재공사에서는 약 1.12 tCO₂이, 유지관리공사 단계에서는 약 1.49 tCO₂가 발생되어 총 5.71 tCO₂가 발생된 것으로 나타났다. 공종별로 살펴보면 토공사에서의 온실가스 발생 비중이 가장 큰 것으로 분석되었으며, 경운/잡풀제거 공정이 2.04 tCO₂의 온실가스를 발생시켜 모든 공종 중 가장 큰 부분을 차지하는 것으로 나타났다. 온실가스 흡수량은 2050년까지 점증하여 총 150.58 tCO₂의 온실가스를 흡수할 수 있는 것으로 나타났다. 온실가스 흡수량은 식재된 교목이 성장함에 따라 점증하는 것으로 분석되었다.

자연기반해법은 온실가스 흡수원 조성 등 탄소중립을 위한 다양한 효과를 발생시킬 수 있는 정책이나 조성과정과 유지관리과정에서 발생하는 온실가스량을 설계 단계에서 고려하지 않아 온실가스 흡수원으로써 자연기반해법 조성효과 대한 실효성에 의문이 제기될 수 있다. 전과정평가는 자연기반해법 조성 과정을 평가하여 온실가스 발생량을 산정할 수 있으므로 향후 자연기반해법의 탄소환불기간 등 종합적인 탄소수지 산정에 대한 연구에 활용할 필요가 있다.

본 연구에서는 자연기반해법의 온실가스 발생 및 흡수량 산정 시 각 식물종별, 영급별 온실가스 흡수량 등 기초자료 부재로 심도 있게 적용되지 못하였다. 향후 무기토양의 유기탄소 축적 변화량 등 기초자료 확보에 따른 다양한 자연기반해법의 탄소수지 산정 방안에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

References

1. Shiao, T., Kammeyer, C., Brill, G., Feinstein, L., Matosich, M., Vigerstol, K., Muller, Z., C. Benefits accounting of nature-based solutions for watersheds: guide, United nations global compact CEO water mandate and pacific institute, Oakland, California (2020).
2. UNEP, IUCN. Nature-based solutions for climate change

- mitigation (2021).
3. IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change. IPCC sixth assessment report working group III: Mitigation of climate change (2022).
4. The Government of the Republic of Korea. 2050 Carbon neutral scenario (2021).
5. Lee, S.J., Lim, J.S., Kang, J.T. Standard carbon absorption amount of major forest species (National Institute of Forest Science) (2019).
6. Jo, H.K., Park, H.M. Changes in growth rate and carbon sequestration by age of landscape trees. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 45(3), pp. 97-104 (2017).
7. Korea Environment Corporation. Guidelines for local government greenhouse gas inventories (Ver 4.1) (2017).
8. Stephenson, N.L., Das, A.J., Condit, R., Russo, S.E., Baker, P.J., Beckman, N.G., Coomes, D.A., Lines, E.R., Morris, W.K., Ruger, N., Alvarez, E., Blundo, C., Bunyavejchewin, S., Chuyong, G., Davies, S.J., Duque, A., Ewango, C.N., Flores, O., Franklin, J.F., Grau, H.R., Hao, Z., Harmon, M.E., Hubbell, S.P., Kenfack, D., Lin, Y., Makana, J.R., Malizia, A., Malizia, L.R., Pabst, R.J., Pongpattananurak, N., Su, S.H., Sun, I.F., Tan, S., Thomas, D., van Mantgem, P.J., Wang, X., Wiser, S.K., Zavala, M.A. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. Nature 507, pp. 90-93 (2014).
9. Kim, N., Chen, Y.I., Mcgrath, M.J., Ryder, J., Valade, A., Otto, J., Luyssaert, S. Europe's forest management did not mitigate climate warming. Science 351(6273), pp. 597-600 (2016).
10. Jonker, J.G.G., Junginger, M., Faaij, A. Carbon payback period and carbon offset parity point of wood pellet production in the South-eastern United States. GCB Bioenergy 6, pp. 371-389 (2014).
11. Mitchell, S.R., Harmon, M.E., O'Connell KEB. Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. Global Change Biology Bioenergy 4, pp. 818-827 (2012).
12. Donghae Engineering & Consultants Co., Ltd. Smart design for enhancing ecosystem service functions (2021).
13. IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (2019).

14. GHG Statistics. Manual on the basic set of environment statistics of the FDES (2020).
15. IPCC, Climate Change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (2014).
16. Kim, S.H., Han, S.H., Kang, S.S., Suh, K. Evaluation methods of carbon reduction contribution for green budget of national R&D projects in agricultural sector. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 64(5), pp. 41-51 (2022).
17. Nam, J.J., Ok, Y.S., Choi, B.S., Lim, S.T., Jung, Y.S., Jang, Y.S., Yang, J.E. Methodology of life cycle assessment (LCA) for environmental impact assessment of winter rapeseed in double-cropping system with rice. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 27(2), pp. 205-210 (2008).
18. Liu, W., Zhang, Z., Xie, X., Yu, Z., Von Gadow, K., Xu, J., Zhao, S., Yang, Y. Analysis of the global warming potential of biogenic CO₂ emission in Life Cycle Assessments. *Scientific Reports* 7, p. 39857 (2017).
19. Jang, D. W. Development of GHG emission factor of by-product hydrogen with life cycle assessment: focused on LPG steam reforming process. Master's Thesis, Sejong University, Korea (2022).
20. Seo, J., Park, C. A Study on greenhouse gas issues in landscape construction and estimation of emissions at the children's park construction. *Journal of the Korea Institute of Garden Design* 8(1), pp. 27-34 (2022).
21. Rieger, J., Stanley, J., Traynor, R. *Project Planning and Management for Ecological Restoration*. Nexus (2016).
22. Chun, Y. An LCA study on the carbon balance estimation of ecological restoration projects based on nature-based solutions. Ph.D. Dissertation, Sejong University, Korea (2024).
23. Korean Institute of Landscape Architecture. *Landscape design standards* (2016).
24. Yun, S.J., Kim, K.H., Lee, D.H., Huh, J.H. Choi, E.J., Lee, J.S., Jeong, H.C. Estimation of life-cycle greenhouse gas emissions of decomposed manure fertilizer in Korea. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology* 16(5), pp. 397-402 (2015).
25. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. *Guidelines for estimating carbon emissions by facility* (2011).

