

Original article

## 환경영향평가 온실가스 항목 내 훼손수목의 탄소저장량 평가 개선을 위한 제언

정현모\* · 김해란<sup>1</sup> · 김덕엽 · 장인영 · 강성룡

국립생태원 기후탄소연구팀, <sup>1</sup>국립생태원 환경영향평가팀

**A Study of Improvement on Estimation Methodology of Carbon Storage amount by Damaged Trees for Environmental Impact Assessment.** Heon Mo Jeong\* (0000-0003-4151-0659), Hae Ran Kim<sup>1</sup> (0000-0002-3443-9842), Dukyeop Kim (0000-0002-0445-0186), Inyoung Jang (0000-0002-1779-6928) and Sung-Ryong Kang (0000-0002-8728-0732) (Carbon and Climate Change Research Team, National Institute of Ecology, SeoCheon 33567, Republic of Korea; <sup>1</sup>Environmental Impact Assessment Team, National Institute of Ecology, SeoCheon 33567, Republic of Korea)

**Abstract** We deduced the proper estimation methodology for the amount of carbon sequestration by damaged trees for Environmental Impact Assessment (EIA). The nine development projects related to renewable energy, damaged trees occur, assessment status and used method of evaluating the carbon storage of damaged trees were summarized. And after re-calculating the carbon storage of damaged trees through allometric equations, the difference between the two groups, re-calculated the damaged trees carbon storage and the damaged trees carbon storage in the report, was validated. As a result, damaged trees carbon storage in words was more than the re-calculated damaged trees carbon storage, and it was statistically significant ( $p < 0.005$ ). This result means that the existing method for calculating damaged tree carbon storage is over-calculated. It was judged that it was necessary to improve the calculation method. Therefore, allometric equations suitable for each dominated-tree species should be used when calculating the damaged tree carbon storage. Furthermore, we propose to establish a carbon storage calculation system based on actual data from the ecosystem so that researchers can efficiently and accurately the damaged trees carbon storage.

**Key words:** damaged vegetation, carbon sequestration, allometric equation, environmental impact assessment, climate change impact assessment

### 서 론

환경영향평가제도에서 훼손수목량이란 개발사업 시행에 따라 생태계 파괴로 인해 교란되는 수목의 양으로, 생태복원의 이식 수목량 결정, 온실가스 흡수원 평가, 임목폐기물 산정 등 다양한 부분에 연계된 항목이다(Park, 2021).

특히 훼손수목의 이식 또는 생태복원에 따른 활용이나 재 활용 되지 못하는 수목의 폐기는 그 자체가 탄소를 흡수하거나 방출하는 흡수원 또는 방출원으로서 작용할 수 있으므로 환경영향평가의 온실가스 산정부분에서 중요한 평가 항목이라 할 수 있다. 현재 훼손수목은 동·식물상 및 온실가스 항목에서 발생량을 예측하고 이에 따른 훼손수목의 CO<sub>2</sub> 흡수·저장량을 지침을 통해 산정하도록 하고 있다(환경영향평가서등의 작성 등에 관한 안내서, www.eiass.go.kr).

Manuscript received 29 November 2022, revised 21 December 2022, revision accepted 21 December 2022

\* Corresponding author: Tel: +82-41-950-5496, Fax: +82-41-950-6119  
E-mail: eimple01@nie.re.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

현재 전 세계는 온실가스 저감을 위해 수목의 탄소흡수원 확충 및 평가를 위한 노력을 기울이고 있는데, IPCC (2006)는 국가 온실가스 인벤토리 지침서를 발간하여 온실가스 저장 및 흡수량 산정 방법론을 구체적으로 제시하고 있으며, 수준별로 Tier 1 (기본 배출계수), Tier 2 (국가 고유 통계), Tier 3 (지역별 모델 또는 공간 정보 활용, 직접 측정)으로 구분하여 가능하면 높은 수준의 온실가스 저장 및 배출량 산정 방법을 적용하도록 요구하고 있다. 우리나라의 생태계 (산림, 농경지, 초지 등) 유형별 온실가스 산정 방법은 Tier 1 또는 Tier 1과 Tier 2의 중간 정도로 평가되고 있으며 (Rural Development Administration, 2013; Park *et al.*, 2018; Bigeum Solar Power Corporation, 2021) 신뢰도 높은 탄소 저장 및 거동량 산정은 지구온난화에 대한 현 실태 이해와 완화 정책 실행을 위한 가장 기초적인 작업이라 할 수 있을 것이다. 환경영향평가 제도의 식생 현존량 및 훼손수목의 탄소저장량 산정은 개발사업에 따른 유일한 온실가스 흡수원 평가 항목이다. 그러나 환경영향평가 보고서상 온실가스 항목의 작성이 부실하거나 형식적으로 작성되어 제도적인 한계점이 지적되고 있다 (Green Technology Center, 2021).

현재까지 환경영향평가의 훼손수목과 관련한 연구로는 훼손수목 활용을 위한 수목 선정 및 이식에 관한 연구 (Lee and Choi, 2009), 방형구 크기에 따른 수목량 산정의 불확실성에 대한 연구 (Comas *et al.*, 2011; McRoberts *et al.*, 2015), 드론영상을 통한 수목량 산정 연구 (Park, 2021), 훼손수목 이식에 대한 인식 연구 (Moon *et al.*, 2021) 등으로 훼손수목의 발생 예측 및 이식·활용에 대한 연구는 일부 수행되어졌으나, 훼손수목 탄소저장 및 흡수량 평가 개선을 위한 연구는 매우 부족한 실정이다 (Hwang and Park, 2011).

전 세계적으로 지구온도 상승 억제를 위하여 탄소중립 관련 노력을 가속화하고 있고, 우리나라는 “기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법” 시행에 따른 기후변화영향평가를 통하여 정책적으로 온실가스 관리를 위한 노력을 이어가고 있다. 따라서 탄소중립 사회 실현의 정책적, 과학적 근거 마련을 위해 생태계의 탄소 저장 및 흡수량 산정에 대한 다양한 연구가 필요하며, 연구 데이터에 대한 편차와 불확실성을 최소화하고 정확도를 높일 수 있는 방안을 적극적으로 강구하여야 한다. 본 연구는 기 협의된 환경영향평가 개발사업 중, 재생에너지 사업을 대상으로 훼손수목 탄소저장량 산정 현황 및 방법을 파악하고 세밀하고 정확한 탄소저장량 산정을 위한 방법론을 제시하고자 수행하였다.

## 수목의 탄소저장량 산정 방법

산림생태계는 대기 중 이산화탄소를 흡수하고 광합성 작용을 통해 생산된 유기물을 저장하는 한편, 토양호흡을 통해 이산화탄소를 대기 중으로 방출하는 기능을 수행하고 있다. 광합성 작용으로 생산된 유기물은 수목 체내에 축적되며 이 때 축적된 수목의 바이오매스가 탄소저장량을 의미한다. 그리고 수목이 여러 해에 걸쳐 축적한 연간 성장량을 순생산량 (Net Primary Production) 또는 탄소흡수량으로 표현할 수 있다.

일반적으로 수목의 탄소저장량은 수목의 바이오매스를 산정하고 이를 기초로 탄소저장량을 추정하는데, Hwang and Park (2011)은 수목의 바이오매스 산정 방법을 ① 임업통계자료 (산림청, 2022산림임업통계연보)에서 제공하는 임목재적을 활용하여 탄소저장량을 산정하는 방법, ② 우리나라 환경영향평가 보고서 작성 지침의 임목폐기물 수종별 수간의 체적당 중량 (환경영향평가서등의 작성 등에 관한 안내서 (제정 2022.03.21)), ③ 상대성장식을 활용하는 방법, ④ 흉고직경이나 근원직경 관련 회귀식을 활용하여 탄소저장량을 산정하는 방법을 소개한 바 있다. 임업통계자료의 임목축적량을 통한 탄소저장량을 산정하는 경우 지자체별로 자료가 정리되어 있어 다양한 상황에 따른 적용이 어렵다. 환경영향평가 보고서 작성 지침의 임목폐기물량은 수종별 단위 체적당 중량값을 활용하여 대상 수종에 대한 바이오매스를 산정하도록 하고 있다 (Table 1). 이 방법은 흉고직경 (Diameter at Breast Height, 이하 DBH) 과 수고를 활용하여 수목의 체적을 산출하고 여기에 정해진 목본 그룹에 따른 단위 체적당 중량 값을 곱하여 수목의 바이오매스를 측정한다. 이 경우 수종별 그룹에 해당되는 단위체적당 중량이 특정값이 아닌 범위로 설정되어 있어 바이오매스 산정이 일률적으로 이뤄지게 되는 단점이 존재한다. 상대성장식을 이용하는 방법은 수목의 DBH 또는  $D^2H$  (DBH와 수고)와 같이 생체값을 변수로 활용하여 수목에 해당하는 상대성장식에 대입하고 수목의 전체 또는 부분별 (줄기, 가지, 잎, 뿌리 등) 바이오매스를 산정하는 방법이다. 이 방법은 대상 수종에 대응하는 상대성장식을 활용하여 정확도는 높지만 반드시 상대성장식이 개발되어야 적용할 수 있는 한계점이 존재한다. 전술한 바이오매스 산정방법은 크게 수목의 체적을 구한 후 목재밀도, 바이오매스 확장계수, 탄소함량비 등의 계수를 곱하여 구하는 방법과 수목의 DBH, 수고 값을 상대성장식 또는 회귀식 등에 대입하여 구하는 방법으로 구분해 볼 수 있었다. 한편, 원격위성영상 (Remote-Sensing methods)을 활용한 식생지

**Table 1.** Weight per unit volume each tree species.

Tree species	Weight per unit volume (kg m <sup>-3</sup> )
Evergreen oaks, <i>Ilex integra</i> , <i>Quercus accutissima</i> , <i>Ilex cornuta</i> , <i>Quercus serrata</i> , <i>Buxus microphylla</i>	Above 1,340
<i>Zelkova serrata</i> , <i>Magnolia kobus</i> , <i>Ulmus parvifolia</i> , <i>Eurya japonica</i> , <i>Styrax obassia</i> , <i>Cleyera japonica</i> , <i>Deutzia parviflora</i>	1,300~1,340
<i>Acer palmatum</i> , <i>Ginkgo biloba</i> , <i>Prunus sargentii</i> , <i>Daphniphyllum macropodum</i> , <i>Larix kaempferi</i> , <i>Juniperus chinensis</i> , <i>Pinus thunbergii</i>	1,250~1,300
<i>Pinus densiflora</i> , <i>Chamaecyparis obtusa</i> , <i>Platanus occidentalis</i> , <i>Aesculus turbinata</i>	1,210~1,250
<i>Larix kaempferi</i> , <i>Cinnamomum camphora</i> , <i>Cryptomeria japonica</i> , <i>Sciadopitys verticillata</i> , <i>Magnolia obovata</i>	1,170~1,210
<i>Platycarya strobilacea</i> , <i>Chamaecyparis pisifera</i>	1,170 below

수(NDVI) 또는 다변량회귀분석 등을 통해 산림의 바이오매스를 산정하는 방법(Liang, 2012)은 환경영향평가와 같이 국지적인 규모에서 활용하기에 부적절하여 본 연구에서 제외하였다.

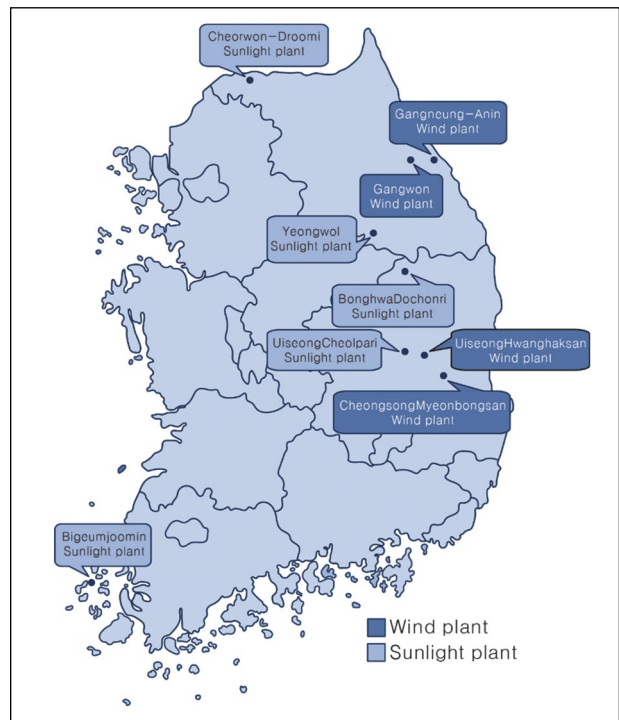
전술한 방법으로 산정된 수목의 바이오매스는 탄소전환계수를 적용하여 탄소저장량으로 변환할 수 있다. 수목에 따라 바이오매스에 함유되어 있는 탄소함량은 서로 차이가 있으나, IPCC (2006) 온실가스 인벤토리 산정 지침에서는 수목에 저장된 기본 탄소량을 수목 바이오매스의 50%로 산정할 것을 권고하고 있다. 이에 본 연구에서는 연구 대상 사업의 탄소저장량 산정을 위하여 탄소전환비율을 0.5로 적용하였다. 또한 환경영향평가서에서 훼손수목에 대한 탄소저장량 단위를 Mg CO<sub>2</sub>로 표시하고 있으므로 본 연구 결과 역시 동일한 단위로 환산하여 분석에 활용하였다.

## 연구 대상사업 지역 현황

훼손수목 바이오매스의 산정 사례를 분석하기 위하여, 최근 산림훼손이 빈번하게 일어나고있는 재생에너지 개발(풍력발전, 태양광발전) 관련 환경영향평가 대상 사업을 검색하였다(환경영향평가정보지원시스템, www.eiass.go.kr). 검색결과 총 18개의 풍력 및 태양광 발전 사업이 검색되었으며, 이 중 훼손수목의 바이오매스를 산정하는 환경영향평가 대상 사업 9개(풍력발전 4개, 태양광발전 5개)를 선정하여 분석하였다.

### 1. 연구 대상사업의 현황

본 연구에서 선정된 9개 재생에너지 개발 사업은 “청송 면봉산 풍력발전단지 조성사업”, “강릉 안인풍력발전사업

**Fig. 1.** A map showing locations of development project.

조성사업”, “의성 황학산 풍력발전단지 조성사업” 그리고 “강원풍력 발전단지 건설사업” 등 4개 풍력발전 관련 사업과 “봉화 도촌리 태양광발전단지 조성사업”, “비금주민태양광 발전사업”, “철원두루미 태양광발전소 사업”, “의성 철파리 태양광발전소 조성사업” 그리고 “영월 태양광발전소 건설사업” 등 5개 태양광발전 관련 사업 총 9개 사업이다(Table 2). 9개 재생에너지 사업의 위치를 지도에 표시해보면 대부분의 사업이 강원도, 경상북도 지역에 편중되어 있는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 1).

**Table 2.** Status of development projects in this study.

No.	Type	Project name	Location	Area	Generation scale
1		Cheongsong Myeonbongsa Wind plant	Gyeongsangbuk-do Cheongsong-gun Hyundong-myeon	196,590 m <sup>2</sup>	27.0 MW
2	Wind plant	Gangneung Anin Wind plant	Gangwon-do Gangneung-si Gangdong-myeon Eonbyeol-ri	340,900 m <sup>2</sup>	60.0 MW
3		Uiseong hwanghaksan Wind plant	Gyeongsangbuk-do Uiseong-gun Oksan-myeon Olyu-ri	231,418 m <sup>2</sup>	72.0 MW
4		Gangwon Wind plant	Gangwon-do Pyeongchang-gun Deagwallyeong-myeon Hoenggye-ri	119,854.0 m <sup>2</sup>	160.4 MW
5		Bonghwa Dochonri Sunlight plant	Gyeongsangbuk-do Bonghwa-gun Bonghwa-eup Dochon-ri	1,399,857.0 m <sup>2</sup>	35 MW
6		Biguemjoomin Sunlight plant	Jeollanam-do Shinan-gun Bigeum-myeon Gasan-ri	2,354,363 m <sup>2</sup>	200 MW
7	Sunlight plant	Cheorwon Sunlight plant	Gangwon-do Cheorwon-gun Galmal-eup Munhye-ri	406,445.0 m <sup>2</sup>	28 MW
8		Uiseong Cheolpari Sunlight plant	Gyeongsangbuk-do Uiseong-gun Uiseong-eup Cheolpa-ri	726,715.0 m <sup>2</sup>	27.5 MW
9		Yeongwol Sunlight plant	Gangwon-do Yeongwol-gun Nam-myeon	974,232 m <sup>2</sup>	50 MW

**2. 식생현황**

**1) 청송 면봉산 풍력발전단지 조성사업**

본 조사지역은 소나무군락, 굴참나무-소나무군락, 신갈나무-소나무군락, 잣나무식재림, 신갈나무-굴참나무군락, 신갈나무군락, 리기다소나무식재림, 신갈나무-물푸레나무군락이 분포하고 있어 2차 천이가 진행되고 있는 지역으로 판단되었다. 분포 식생을 식생보전등급으로 분류하면 식생보전등급 III 등급 158,484 m<sup>2</sup> (80.62%), 식생보전등급 IV 등급 19,547 m<sup>2</sup> (9.94%), 식생보전등급 V 등급 18,559 m<sup>2</sup> (9.44%)으로 구성되어 있었다.

**2) 강릉 안인풍력발전 사업 조성사업**

본 조사지역은 소나무군락, 신갈나무군락, 소나무-신갈나무군락, 굴참나무군락, 굴참나무-신갈나무군락, 신갈나무-굴참나무군락, 소나무-굴참나무군락이 분포하고 있으며, 교란 후 2차 천이에 의해 군락의 계층구조가 안정되고, 신갈나무림 및 굴참나무림 등이 분포하여 종조성의 대부분이 해당지역의 잠재자연식생을 반영하고 있는 것으로 분석되고 있다. 조사지역의 식생보전등급은 식생보전등급 II 등

급 23,363 m<sup>2</sup> (6.85%), 식생보전등급 III 등급 221,144 m<sup>2</sup> (64.87%), 식생보전등급 IV 등급 11,079 m<sup>2</sup> (3.25%), 식생보전등급 V 등급 85,314 m<sup>2</sup> (25.03%)으로 구성되어 있었다.

**3) 의성 황학산 풍력발전단지 사업 조성사업**

본 조사지역은 소나무군락, 굴참나무-신갈나무군락, 신갈나무-굴참나무군락, 신갈나무군락, 굴참나무군락, 소나무-신갈나무군락, 신갈나무-상수리나무군락, 소나무-굴참나무군락, 물박달나무-굴참나무군락이 분포하고 있으며 교란 후 4층구조가 안정되고 있는 2차림인 것으로 판단된다. 조사지역의 식생보전등급은 식생보전등급 III 등급 225,499 m<sup>2</sup> (97.44%), 식생보전등급 V 등급 5,919 m<sup>2</sup> (2.56%)으로 구성되어 있었다.

**4) 강원풍력 발전단지 건설사업**

본 조사지역은 신갈나무군락, 물푸레나무군락, 일본잎갈나무식재림, 관목림 등이 분포하고 있으며 인근지역으로 신갈나무군락이 넓은 범위로 분포하는 것으로 조사되었다. 조사지역의 식생보전등급은 식생보전등급 III 등급 2,891.4 m<sup>2</sup> (2.4%), 식생보전등급 IV 등급 772.9 m<sup>2</sup> (0.6%),

**Table 3.** Vegetation status and methodology for estimation of damaged tree carbon storage for each development projects.

Projects	Dominated vegetation	Estimation equations of damaged tree carbon storage
Cheongsong Myeonbongsa Wind plant	<i>Pinus densiflora</i> community, <i>P. densiflora-Quercus mongolica</i> community, <i>P. densiflora-Q. variabilis</i> community, <i>Q. mongolica</i> community	
Gangneung Anin Wind plant	<i>Q. mongolica</i> community, <i>Q. mongolica-Q. variabilis</i> community, <i>P. densiflora</i> community, <i>P. densiflora-Q. mongolica</i> community	
Uiseong hwanghaksan Wind plant	<i>Q. variabilis-Q. mongolica</i> community, <i>P. densiflora</i> community, <i>Q. mongolica-Q. variabilis</i> community, <i>Q. mongolica-Q. acutissima</i> community	CO <sub>2</sub> storage equation A = Individuals of broad-leaved tree × A <sub>T1</sub> + Individuals of needle-leaved tree × A <sub>T2</sub> A <sub>T1</sub> : storage of broad-leaved tree, Y = 0.2572 DBH <sub>aver.</sub> <sup>2.4595</sup> A <sub>T2</sub> : storage of needle-leaved tree, Y = 0.3501 DBH <sub>aver.</sub> <sup>2.1435</sup>
Gangwon Wind plant	<i>Q. aliena</i> community, <i>P. densiflora</i> community, <i>P. densiflora-Q. mongolica</i> community, <i>Q. mongolica</i> community, <i>Q. mongolica-P. densiflora</i> community	※ Assessment guideline of greenhouse gas inventory in Environmental Impact Assessment (Ministry of Environment, 2015)
Bonghwa Dochonri Sunlight plant	<i>P. densiflora</i> community, <i>Q. mongolica</i> community, <i>Q. serrata</i> community, <i>P. densiflora-Q. serrata</i> community	
Biguemjoomin Sunlight plant	<i>P. thunbergii</i> community	
Cheorwon Sunlight plant	<i>P. densiflora</i> community, <i>Q. mongolica</i> community, <i>Q. mongolica-P. densiflora</i> community, <i>P. densiflora-Q. mongolica</i> community	
Uiseong Cheolpari Sunlight plant	<i>Q. acutissima</i> community, <i>P. densiflora</i> community, <i>Q. acutissima-Q. variabilis</i> community, <i>P. rigida</i> plantation	
Yeongwol Sunlight plant	<i>P. densiflora</i> community, <i>Q. variabilis</i> community, <i>P. densiflora-Q. variabilis</i> community, <i>P. densiflora-Robinia pseudoacacia</i> community	W (kg) = k × 3.14 × (B/2) <sup>2</sup> × h × W <sub>1</sub> × (1 + p) ※ k: Stem formation coefficient (0.5), B: Diameter of Breast Height (m) (Diameter × 0.8), h: Height (m), p: the ratio of branches and leaves on tree (forest tree: 0.3, Isolated tree: 1.0) W <sub>1</sub> : Biomass per volume each individual (kg m <sup>-3</sup> ) ※ Landscape design brochure 1998 (Landscaping Press)

식생보전등급 V 등급 116,189.7 m<sup>2</sup> (97.0%)으로 구성되어 있었다.

##### 5) 봉화 도촌리 태양광발전단 조성사업

본 조사지역은 소나무군락, 굴참나무군락, 졸참나무군락, 갈참나무-졸참나무군락, 소나무-졸참나무군락, 갈참나무-졸참나무군락, 소나무-졸참나무군락, 갈참나무군락, 상수리나무-아까시나무군락, 신갈나무군락, 졸참나무-갈참나무군락, 소나무-밤나무군락, 졸참나무-상수리나무군락이 분포하는 것으로 조사되었으며, 본 이차림은 종조성과 수령, 아까시나무 및 텅굴성 복본 등이 혼생하는 지역으로 보전가

치는 다소 낮은 것으로 조사되었다. 조사지역의 식생보전등급은 식생보전등급 III 등급 1,118,908 m<sup>2</sup> (79.8%), 식생보전등급 IV 등급 134,849 m<sup>2</sup> (9.7%), 식생보전등급 V 등급 146,100 m<sup>2</sup> (10.5%)으로 구성되어 있었다.

##### 6) 비금주민태양광 발전사업

본 조사지역은 목본 식생은 곰솔군락이 분포하고 있고 주변에 곰솔군락, 졸참나무군락, 후박나무군락 등이 분포하고 있었다. 조사지역의 식생보전등급은 식생보전등급 III 등급 34,128 m<sup>2</sup> (0.98%), 식생보전등급 V 등급 3,431,498 m<sup>2</sup> (99.02%)으로 구성되어 있었다.

7) 철원두루미 태양광발전소 사업

본 조사지역은 소나무군락, 소나무-신갈나무군락, 신갈나무군락, 신갈나무-소나무군락, 신갈나무-굴참나무군락, 굴참나무-신갈나무군락, 이차관목림, 이차초지 등이 분포하고 있으며, 조사지역의 식생보전등급은 식생보전등급 III 등급 365,248 m<sup>2</sup> (89.87%), 식생보전등급 V 등급 41,197 m<sup>2</sup> (10.13%)으로 구성되어 있었다.

8) 의성 철파리 태양광발전소 조성사업

본 조사지역은 소나무군락, 상수리나무군락, 상수리나무-굴참나무군락, 소나무-리기다소나무군락, 리기다소나무식재림, 리기다소나무-소나무식재림 등이 분포하고 있었다. 조사지역의 식생보전등급은 식생보전등급 III 등급 576,597 m<sup>2</sup> (79.35%), 식생보전등급 IV 등급 118,446 m<sup>2</sup> (16.29%), 식생보전등급 V 등급 31,672 m<sup>2</sup> (4.36%)으로 구성되어 있었다.

9) 영월 태양광발전소 건설사업

본 조사지역은 소나무군락, 굴참나무군락, 소나무-굴참나무군락, 소나무-아까시나무군락, 갈참나무-떡갈나무군락, 일본잎갈나무식재림, 일본잎갈나무-소나무식재림, 일본잎갈나무-떡갈나무식재림 등이 분포하고 있었다. 영월 태양광발전소 건설사업 환경영향평가 보고서는 식생보전등급이 적용되는 2014년 이전인 2008년도에 작성되어 식생보전등급 관련 내용은 확인되지 않았다.

**연구 대상사업의 훼손수목 탄소저장량 산정 사례**

1. 훼손수목 탄소저장량 산정 방법

대상 연구사업에서 적용된 훼손수목의 바이오매스 산정 방법은 크게 “온실가스 항목 환경영향평가등 평가지침”의 “생체량 방정식에 의한 식생·토양의 CO<sub>2</sub> 저장 및 흡수량 산정식”을 적용한 사례와 “조경설계요람”(조경출판사 1998)에서 제시된 식(equation)을 적용한 사례로 구분되었다(Table 3). “생체량 방정식에 의한 식생·토양의 CO<sub>2</sub> 저장 및 흡수량 산정식”은 2012년 “온실가스 항목 환경영향평가등 평가지침”이 제정되어 환경영향평가 온실가스 항목 작성을 위한 지침이며, “조경설계요람”은 “온실가스 항목 환경영향평가등 평가지침” 제정 이전 개발사업의 훼손수목량 산정을 위한 방법이다. “영월 태양광발전소 건설사업”의 경우 2008년에 보고서가 작성되어 “조경설계요람”

에서 제시하는 방법에 따라 훼손수목량을 산정한 것으로 판단된다.

“온실가스 항목 환경영향평가등 평가지침”의 “생체량 방정식에 의한 식생·토양의 CO<sub>2</sub> 저장 및 흡수량 산정식”은 아래와 같다.

$$A = \text{교목활엽수 개체수} \times A_{T1} + \text{교목침엽수 개체수} \times A_{T2} \quad (1)$$

$$\ast A_{T1}: \text{교목활엽수 저장량}, Y = 0.2572 \text{DBH}_{\text{aver.}}^{2.4595}$$

$$A_{T2}: \text{교목침엽수 저장량}, Y = 0.3501 \text{DBH}_{\text{aver.}}^{2.1435}$$

식(1)은 훼손수목의 교목활엽수와 교목침엽수의 평균 DBH를 해당 산정식에 각각 대입하여 CO<sub>2</sub> 값으로 환산된 바이오매스를 산출하고 개체수를 곱하여 전체 훼손수목의 바이오매스를 구하도록 하고 있다. 이 방법은 수종에 관계없이 활엽수 또는 침엽수인지에 따라 산정되고 수목의 생체량은 DBH만을 필요로 하기 때문에 적용하기에 매우 간편하다는 장점이 있다. 반면 이 방법은 대상 수종에 따라 상대적으로 과소 또는 과다하게 산정될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 한편, 환경영향평가 보고서 작성 지침에서 온실가스 저장·흡수량 산정은 산림청 산림공간정보서비스의 임상별 조사자료의 CO<sub>2</sub> 저장 계수를 활용하도록 하고 있어 임목폐기물량과 수목의 온실가스 저장·흡수량 산정 방법은 상이한 것으로 분석되었다. 조경설계요람에 따른 훼손수목 바이오매스는 측정된 DBH로 수목 체적을 구한 뒤 수종별 체적당 중량을 적용하고 가지와 잎(지엽울)량을 적용하여 산정한다. 이 방법 역시 DBH와 수고 값을 활용하기 때문에 적용하기 간편하나 수종별이 아닌 그룹별로 단위체적 당 중량이 적용된 바이오매스 산정이 일률적으로 이뤄지게 된다.

2. 대상사업의 훼손수목 탄소저장량

본 연구의 대상사업별 훼손수목의 수종과 수목량, 탄소저장량을 정리하면 Table 4와 같다. 사업 특성상 우리나라의 산림생태계에서 시행됨에 따라 대부분의 사업에서 참나무류와 소나무류가 훼손수목으로 발생하였다. 특히, 우리나라 산림의 주요 우점종이라 할 수 있는 신갈나무와 소나무는 대부분이 사업에 모두 포함되어 있고, 사업에 따라 상수리나무, 굴참나무, 갈참나무, 곰솔 등이 훼손수목으로 발생하였다. 또한 흉고직경은 최소 9cm에서 최대 44cm까지 다양하며, 훼손수목량 또한 9개 대상사업 평균 22,000여 주로 추정되어 적지 않은 식생이 파괴 되는 것으로 판단된다. 훼손수목의 탄소저장량은 흉고직경과 훼손수목량에 비례하여 194.4~23,400.5 Mg CO<sub>2</sub>의 범위를 나타냈다.

**Table 4.** Species, DBH, the number of tree and carbon storage of damaged trees.

Project name	Damaged tree species	DBH (cm)	Damaged tree (ea)	Carbon storage (Mg CO <sub>2</sub> )
Cheongsong Myeonbongsa Wind plant	<i>Q. mongolica</i> , <i>Q. variabilis</i> , <i>Q. acutissima</i> , <i>P. densiflora</i>	9~28	27,105	11,658.9
Gangneung Anin Wind plant	<i>Q. mongolica</i> , <i>Q. variabilis</i> , <i>P. densiflora</i> , <i>P. koraiensis</i>	10~44	20,456	13,410.6
Uiseong hwanghaksan Wind plant	<i>Q. mongolica</i> , <i>Q. acutissima</i> , <i>Q. variabilis</i> , <i>P. densiflora</i>	14~38	35,767	17,400.0
Gangwon Wind plant	<i>Q. mongolica</i> , <i>Q. aliena</i> , <i>P. densiflora</i> , <i>P. koraiensis</i>	20.5~34	249	194.4
Bonghwa Dochonri Sunlight plant	<i>P. densiflora</i> , <i>Q. serrata</i> <i>Q. mongolica</i> , <i>Q. aliena</i> , <i>Q. variabilis</i>	15.1	48,504	6,930.0
Biguemjoomin Sunlight plant	<i>P. thunbergii</i>	10.4	4,778	23,400.5
Cheorwon Sunlight plant	<i>Q. mongolica</i> , <i>Q. variabilis</i> , <i>P. densiflora</i>	12~25	22,709	5,294.7
Uiseong Cheolpari Sunlight plant	<i>P. densiflora</i> , <i>Q. acutissima</i> , <i>Q. variabilis</i>	10~17.5	92,941	16,064.9
Yeongwol Sunlight plant	<i>P. densiflora</i> , <i>Q. dentata</i> , <i>Q. variabilis</i>	4~20	48,503	9,409.4

## 연구 결과 및 고찰

### 1. 훼손수목 탄소저장량 재산정 및 환경영향평과의 격차 분석

9개 대상사업에서 발생하는 훼손수목 중 우리나라 천연림에 널리 분포하는 우점식물인 신갈나무, 굴참나무, 상수리나무, 소나무, 곰솔 등은 각 수종에 적합한 상대생장식에 적용하고, 산벚나무, 물박달나무, 팔배나무, 물푸레나무, 일본잎갈나무 등과 같이 개체 수가 적은 수목은 연구 대상사업에서 사용하는 방법에 따라 훼손수목의 탄소저장량을 추정하였다. 이때, 상대생장식을 적용한 산정값을 CO<sub>2</sub> 저장량으로 변환하기 위하여 탄소전환 계수 0.5 (IPCC 2006)를 곱하고, 결과 값에 다시 44/12 (CO<sub>2</sub> 분자량/C원자량)를 곱하였다. Table 5는 연구 대상사업의 보고서상 훼손수목 탄소저장량과 재산정한 탄소저장량을 비교한 것이다. 보고서의 탄소저장량과 재산정한 탄소저장량 간의 차이를 분석하기 위하여 paired t-test를 실시하였다. paired t-test는 서로 대응이 되는 집단 간 차이를 확인하는 통계분석 방법이다 (Ross and Willson, 2017).

훼손수목 탄소저장량을 재산정한 결과 연구 대상사업에 따라 106.5~13,709.4 Mg CO<sub>2</sub>의 범위를 나타냈고, 보고서 탄소저장량보다 작은 값을 나타냈다 (Table 5). 특히 보고서 탄소저장량은 재산정 탄소저장량보다 적게는 1.1배에서 크게는 약 3배까지 차이가 나 환경영향평가의 훼손수목 탄소저장량은 상대생장식을 사용할 때보다 과발현 되는 것으로 나타났다. paired t-test 분석 결과 보고서 탄소저장량과 재산정 탄소저장량 두 집단 간에는 통계적으로 유의한 것으로 나타났고 보고서 탄소저장량이 재산정 탄소저장량보다 더 많았다 ( $p < 0.005$ ). 한편, 비금주민 태양광 발전사업의 경우 219.7배 과발현 되는 것으로 나타났다. 이는 평균 10.4 cm의 DBH 및 적은 훼손수목량을 고려하여 볼 때, 탄소저장량 23,400.5 Mg CO<sub>2</sub>는 잘못 산정된 것으로 판단되며, 이에 대한 검토 및 수정 없이 환경영향평가 보고서에 표시된 것으로 사료된다.

### 2. 환경영향평가 훼손수목 탄소저장량 산정을 위한 상대생장식 적용

산림에서 수목의 바이오매스를 측정하기 위한 방법은

**Table 5.** Comparison of carbon storage in report and re-calculation carbon storage.

Project name	Carbon storage in report ( $W_1$ ) (Mg CO <sub>2</sub> )	re-calculation carbon storage ( $W_2$ ) (Mg CO <sub>2</sub> )	$\Delta W = W_1 - W_2$	$W_1/W_2$
Cheongsong Myeonbongsa Wind plant	11,658.9	7,939.5	3,719.4	1.5
Gangneung Anin Wind plant	13,410.6	8,085.3	5,325.3	1.7
Uiseong hwanghaksan Wind plant	17,400.0	13,709.4	3,690.6	1.3
Gangwon Wind plant	194.4	170.8	23.6	1.1
Bonghwa Dochonri Sunlight plant	6,930.0	4,509.7	2,420.3	1.5
Biguemjoomin Sunlight plant	23,400.5	106.5	23,294.0	219.7
Cheorwon Sunlight plant	5,294.7	4,464.7	830.0	1.2
Uiseong Cheolpari Sunlight plant	16,064.9	11,205.0	4,859.9	1.4
Yeongwol Sunlight plant	9,409.4	3,251.0	6,158.4	2.9

크게 파괴적 채집법 (destructive sampling methods)과 비 파괴적 상대성장법 (nondestructive allometric equations)으로 나눌 수 있다 (Liang, 2012). 상대성장법은 방형구 내 수확이 어려울 때 광범위한 손상 없이 식생조사를 통해 얻어지는 수목의 DBH에 근거하여 수목의 바이오매스를 추정할 수 있는 방법이다 (Wittaker and Woodwell, 1968; Madgwick and Satoo, 1975). 개발사업에 따른 훼손수목의 탄소저장량은 대상 수종에 따라 상대성장식 적용을 통해 얻어지는 바이오매스를 통해 산정될 수 있으며, 9개 대상 사업의 환경영향평가 보고서에는 교목활엽수 및 교목침엽수의 산정식을 활용하여 훼손수목 탄소저장량을 산정하였다. 그러나 상대성장식을 적용하여 탄소저장량을 재산정하여 비교해본 결과 적게는 1.1배에서 2.9배까지 탄소저장량이 차이가 나서 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다.

최근 기후변화 완화를 위한 수목의 탄소저장 및 흡수에 대한 관심이 높다. 특히 수목은 탄소를 흡수하는 동시에 체내에 탄소를 저장하는 저장고로서 어느때 보다 수목의 정확한 탄소저장량 산정이 요구되고 있다. IPCC (2006)는 더 높은 수준 (Tier 2, 3)의 탄소 흡수 및 저장량을 산정해

NIR (National Inventory Report)를 제출할 것을 요구하고 있고, Kwon *et al.* (2012)은 산림생태계의 탄소흡수량을 보다 정확히 예측하여 사업에 따른 토지이용계획 수립시 참고할 수 있는 자료를 제공하고자 하였다. 또한 Hwang and Park (2011)은 식생의 탄소저장 및 흡수량 산정을 위한 방법을 소개하고 정확한 산정값을 위해 상대성장식을 활용하는 것이 바람직하다는 결과를 발표한 바 있다. 현재 “온실가스 항목 환경영향평가등 평가지침”이 마련되기 전보다 수목의 탄소저장량 산정 방법이 향상된 것은 확실하나 최근 기후변화 완화 대응 위한 정책에 부합하기 위하여 수목의 탄소저장량의 정확도를 고도화 할 필요가 있는 것으로 판단된다. 따라서 개발사업에 의해 발생하는 훼손수목의 정확한 탄소저장량 산정을 위해서는 주요 수종에 대한 상대성장식을 사용하는 것이 합리적이다. 정확한 훼손수목 현존량 산정을 위한 우리나라 산림의 주요 우점수목인 신갈나무, 굴참나무, 상수리나무, 소나무, 잣나무 등의 적용 가능한 상대성장식 사용을 제안하며, 관련 상대성장식을 Table 6과 같이 소개한다.



**Table 6.** The allometric equations of tree species in forest each the region.

Species	Allometric equations					Region	Reference
	Components	Equations	a	b	c		
<i>Pinus densiflora</i>	Stem	$W = aD^b$	0.07	2.379		Central temperate	Son <i>et al.</i> , 2011
	Branch	$W = aD^b$	0.001	3.341			
	Leaf	$W = a + bD + cD^2$	1.564	-0.095	0.014		
<i>Quercus variabilis</i>	Stem	$W = a + bD + cD^2$	-51.453	4.913	0.227	Northern temperate	Son <i>et al.</i> , 2007
	Branch	$W = a + bD + cD^2$	-8.684	0.121	0.089		
	Leaf	$W = a + bD + cD^2$	-1.598	0.215	0.005		
<i>Q. mongolica</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	2.076	2.579		Northern temperate	Son <i>et al.</i> , 2007
<i>P. koraiensis</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	-0.5432	2.0553		Central temperate	Ryu <i>et al.</i> , 2014
<i>Q. mongolica</i>	AGB	$W = aD^b$	1.632	2.505		Central temperate	Park, 1999
<i>Q. serrata</i>	AGB	$W = aD^b$	1.443	2.645			
<i>Prigida</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	-2.822	2.579		Southern temperate	Seo and Lee, 2011
<i>Q. acutissima</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	2.094	2.417		Southern temperate	Park and Moon, 1994
<i>Q. variabilis</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	2.063	2.445			
<i>Q. mongolica</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	1.982	2.546			
<i>Q. variabilis</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	2.116	2.446			
Broad-leaved tree	AGB	$\ln W = a + b \ln DBH$	-1.4134	2.4581		-	Lee, 2003
needle-leaved tree	AGB	$\ln W = a + b \ln DBH$	-1.047	2.1436			

### 3. 환경영향평가의 훼손수목 탄소저장량 산정 제언

재생에너지 사업 중, 산림 생태계의 훼손수목이 발생하는 개발사업의 보고서상 훼손수목의 탄소저장량과 재산정된 탄소저장량을 비교해본 결과 다음과 같은 제언을 도출하였다.

- (1) 환경영향평가 온실가스 항목의 훼손수목 탄소저장량 산정값의 정확성을 높이기 위해, 개체수가 많은 우점수종은 기 개발된 상대성장식을 활용한다. 그 밖에 나머지 수종에 대해서는 기존의 방법대로 훼손수목 바이오매스를 산정한다.
- (2) 발생하는 훼손수종의 탄소저장량은 이론적으로 각각의 상대성장식을 개발하여 사용하는 것이 가장 이상적이거나 현실적으로 모든 수종에 적용하기 어렵다. 그러므로 국내에 알려진 식생 또는 수종별 탄소저장량 연구 데이터를 수집·분석하여 수종별 DBH를 활용한 탄소저장량을 산정할 수 있는 체계(system)를 구축·활용한다. 이때, 같은 수종이라 하더라도 수목의 바이오매스는 기후환경에 따라 차이가 있으므로 한반도 산림 식생대

(아한대, 온대 북부, 온대 중부, 온대 남부, 난대)에 따라 고도화 할 수 있도록 한다. 이 방법을 활용하게 되면 수목의 탄소저장량을 산정하는 모든 이용자가 동일한 방법을 사용하게 되어 다른 지역과 비교 가능한 탄소저장량을 산정·추적하게 되고, 데이터 누적을 통해 전국 단위 식생의 탄소저장량을 기대할 수 있다. 추가로 본 연구의 대상사업인 “비금주민 태양광 발전사업”과 같이 타 지역과의 비교 및 산정 과정 확인 등을 통해 오류 발생을 예방할 수 있을 것이다.

## 적 요

이 연구는 환경영향평가 개발사업 시 발생하는 훼손수목 탄소저장량의 적합한 산정방법에 대해 논의하고자 수행되었다. 이를 위해, 훼손수목이 발생하는 재생에너지 관련 개발사업 9개를 선정하여 훼손수목 탄소저장량의 평가 현황 및 방법을 정리하였다. 그리고 상대성장식을 활용하여 훼손수목 탄소저장량을 재산정 한 후 보고서의 훼손수목 탄소저장량과 비교하여 두 집단 간 차이를 검증하였다. 그 결과 개발사업의 보고서의 훼손수목 탄소저장량은 재

산정 탄소저장량 보다 큰 것으로 나타났고 통계적으로 유의성이 있었다( $p < 0.005$ ). 이는 기존의 훼손수목 탄소저장량 산정이 과다 산정되고 있음을 나타내며 산정 방법의 개선이 필요한 것으로 판단된다. 따라서 훼손수목의 탄소저장량 산정 시 우리나라 산림의 우점 수종에 적합한 상대생장식을 사용해야 한다. 더 나아가, 사용자들이 효율적이고 정확하게 훼손수목 탄소저장량을 산정할 수 있도록 생태계의 실측 데이터에 기반한 탄소저장량 산정 시스템을 구축하여 사용할 것을 제안한다.

**저자정보** 정현모(국립생태원 기후탄소연구팀 연구원), 김해란(국립생태원 환경영향평가팀 전임연구원), 김덕엽(국립생태원 기후탄소연구팀 연구원), 장인영(국립생태원 기후탄소연구팀 전임연구원), 강성룡(국립생태원 기후탄소연구팀 책임연구원)

**저자기여도** 개념설정: 정현모 & 김해란 & 강성룡, 방법론: 정현모 & 김해란, 분석: 정현모 & 김덕엽, 자료관리: 정현모 & 김덕엽, 원고 초안작성: 정현모, 원고 교정: 정현모 & 장인영 & 강성룡, 원고 편집 및 검토: 장인영 & 강성룡

**이해관계** 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

**연구비** 본 논문은 국립생태원의 “생태계 부분 탄소저장량 및 거동산정 현황 분석 연구(NIE-고유연구-2022-16)”에 의해 지원되었습니다.

## REFERENCES

- Bigeum Solar Power Corporation. 2021. Environmental impact assessment for solar power generation project in Bigeum-myeon.
- Cheongam Energy Corporation. 2019. Environmental impact assessment for solar power plant construction project in Cheolpa-ri, Uiseon.
- Cheongsong Myeonbongsan Wind Power Corporation. 2016. Environmental impact assessment for wind power plant development project in Myeonbongsan, Cheongsong.
- Comas, C., J. Mateu and P. Delicado. 2011. On tree intensity estimation for forest inventories: Some statistical issues. *Biometrical Journal* **53**: 994-1010.
- Gangwon Wind Power Corporation. 2022. Environmental impact assessment for Gangwon wind power complex construction project.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center. 2021. 2021 National greenhouse gas inventory report of Korea.
- Green Technology Center. 2021. Discussion on the introduction of Climate Change Impact Assessment and its impact on the carbon-emission industry.
- Hwang, S.I. and S.H. Park. 2011. A comparative study on estimation methodologies of carbon sequestration amount by vegetation for environmental impact assessment on development projects. *Journal of Environmental Impact Assessment* **20**: 477-487.
- IPCC 2006. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme (Eggleston H.S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe, eds.). Published: IGES, Japan.
- Korea Southern Power Corporation. 2019. Environmental impact assessment for wind power project in An-in, Gangneung.
- Kwon, S.S., S.H. Choi and S.D. Lee. 2012. Estimation of spatial-temporal net primary productivity and soil carbon storage change in the capital area of South Korea under climate change. *Journal of Environmental Impact Assessment* **21**: 757-765.
- Lee, K.K. 2003. Sustainability indicators of greenspace in apartment sites. Seoul national University. Ph. D. thesis.
- Lee, S.D. and S.H. Choi. 2009. Study on the selection criteria for transplanting trees in the forest reserve areas designated for future development. *Korean Journal of Environmental Ecology* **23**: 535-544.
- Liang, S., X. Li and J. Wang. 2012. Advanced remote sensing: Terrestrial information extraction and applications, Academic Press: Cambridge, MA, USA.
- Madgwick, H.A.I. and T. Satoo. 1975. On estimating the aboveground weights of tree stands. *Ecological Society of America* **56**: 1446-1450.
- McRoberts, R.E., E.O. Tomppo and R.L. Czaplewski. 2015. Sampling designs for national forest assessments. Knowledge Reference for National Forest Assessments; FAO: Rome, Italy, 23-40.
- Moon, Y., H. Park, J. Cha, J. Na and S. Lee. 2021. Stakeholder perception on the transplanting damaged trees. *Journal of Environmental Impact Assessment* **30**: 361-379.
- Park, G.S. 1999. Aboveground and soil carbon storage in *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis* natural forest ecosystems in Chungju. *Journal of Korean Forest Society* **88**: 93-100.
- Park, I.H. and G.S. Moon. 1994. Biomass, net production and biomass estimation equations in some natural Quercus forests. *Journal of Korean Forest Society* **83**: 246-253.
- Park, M. 2021. Comparison of accuracy between analysis tree detection in UAV aerial image analysis and quadrat method for estimating the number of trees to be removed in the environment impact assessment. *Journal of Environmental Impact Assessment* **30**: 155-163.
- Park, S.J., C.H. Lee and M.S. Kim. 2018. The analysis of greenhouse gases emission of cropland sector applying the 2006 IPCC guideline. *Journal of Climate Change Research* **9**: 445-452.

- Ross, A. and V.L. Willson. 2017. Paired t-test. In Basic and advanced statistical tests. p. 17-19. Rotterdam: Sence Publishers.
- Rural Development Administration. 2013. Development of absorbance factor and inventory of GHG to adopt 2006 IPCC guideline.
- Ryu, D., M. Moon, J. Park, S. Cho, T. Kim and H.S. Kim. 2014. Development of allometric equations for V age-class *Pinus koraiensis* in Mt. Taehwa plantation, Gyeonggi-do. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**: 29-38.
- Seo, Y.O. and Y.J. Lee. 2011. Aboveground biomass estimation of *Pinus rigida* stands in Muju region. *Journal of Agriculture & Life Science* **45**: 15-20.
- SK D&D. 2020. Environmental impact assessment for wind power development project in Hwanghak-san, Uiseong.
- Son, Y., D.Y. Kim, I.H. Park, M.J. Yi and H.O. Jin. 2007. Production and nutrient cycling of oak forests in Korea: A case study of *Quercus mongoilca* and *Q. variabilis* stands. Kangwon National University press, 57p.
- Son, Y.M., K.H. Lee and J.K. Pyo. 2011. Development of biomass allometric equations for *Pinus densiflora* in central region and *Quercus variabilis*. *Journal of Agricultural & Life Science* **45**: 65-72.
- Sunwoo Solar Power Plant and 13 other Companies. 2019. Environmental impact assessment for Cheorwonduroomi solar power plant project.
- Toptec. 2012. Environmental impact assessment for solar power complex in Dochon-ri, Bonghwa.
- Wittaker, R.H. and G.M. Woodwell. 1968. Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest, New York. *Journal of Ecology* **56**: 1-25.
- Yeongwol Solartech Corporation. 2008. Solar power plant construction project in Yeongwol.