

대나무 숲에서의 연간 탄소흡수량 및 배출량 추정

정재엽¹ · 주정운¹ · 배은지¹ · 노혜정² · 신윤희² · 박천희² · 김우용³ · 김정수³ · 손영모^{ID}^{3*}

¹국립산림과학원 산림바이오소재연구소, ²한국산지보전협회, ³(주)씨엔 산림경영연구소

Estimation of the Annual Absorption and Emission of Carbon in Bamboo Forests of Korea

Jaeyeop Jeong¹, Jeongwoon Joo¹, Eunji Bae¹, Hyejung Roh², Yunhee Shin²,
Chunhee Park², Wooyong Kim³, Jungsoo Kim³, Yeongmo Son^{ID}^{3*}

¹Forest Biomaterial Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Korea

²Korea Forest Conservation Association, Daejeon 35262, Korea

³Forest Management Research Center, CN Corporation, Anyang 14059, Korea

요약: 본 연구는 우리나라 대나무 숲에서의 연간 탄소흡수량을 추정하기 위하여 수행되었다. 조사된 국내 대나무 숲은 솜대, 왕대 및 맹종죽 등 3가지 숲이었다. 대나무 숲에서의 탄소흡수량 산정을 위해서는 먼저 대나무 숲 내부에서 발생하는 신죽(죽순)량, 숲 밖으로 확장되는 신죽의 양, 고사목 량의 측정과 이를 추정하기 위한 식을 도출하였다. 이들 추정식은 역다항식, 회귀식, Schumacher 식 등이 최적의 식으로 도출되었다. 그리고 추정식의 검정은 적합도 지수, 결정계수 및 F 검정통계량 등을 적용시켰으며, 모두 5% 수준에서 유의한 값을 갖는 것으로 나타났다. 탄소흡수량은 신죽 발생량, 외연부로의 확장 신죽발생량, 숲 내부의 고사목 량의 재적을 산정하고, 여기에 탄소배출계수를 곱하여 산출하였다. 우리나라 대나무 숲 내부에서의 신죽 발생에 따른 연간 이산화탄소흡수량은 213,041 tCO₂/yr, 숲 외부로의 신죽 확장에 따른 흡수량은 43,354 tCO₂/yr, 고사목 발생에 따른 배출량은 44,171 tCO₂/yr 으로 나타났으며, 이를 탄소계정법인 획득손실법으로 계산한 결과 212,224 tCO₂/yr 이었다. 이 수치가 우리나라 대나무 숲의 순 이산화탄소흡수량이다. 대나무 숲의 정확한 탄소흡수량을 계산하기 위해서는 국가산림조사와 같은 정밀 산림조사와 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 보인다.

Abstract: This study was conducted to estimate the annual carbon absorption in bamboo forests in Korea. There were three domestic bamboo forests surveyed: *Phyllostachys nigra*, *Phyllostachys bambusoides*, *Phyllostachys pubescens*. To calculate the amount of carbon absorption in the bamboo forests, the amount of new bamboo trees generated inside the bamboo forests, the amount of bamboo shoots extending out of the forest, and the amount of dead bamboo trees were measured, and an equation was derived to estimate this. In these estimation equations, inverse polynomial, regression equation, and Schumacher equation were derived as optimal equations. In addition, the test of the estimation equation applied the fitness index(FI), coefficient of determination(R²), and F test statistic, and all were found to have significant values at the 5% level. Carbon absorption was derived by calculating the volume of new bamboo trees generated in forest, new bamboo trees generated to the outer edge, and dead bamboo trees inside the forest, and multiplying it by the carbon emission coefficient. The annual carbon dioxide absorption due to the generation of new bamboo trees inside bamboo forests in Korea was 213,041 tCO₂/yr, the absorption due to the expansion of new bamboo trees outside the forest was 43,354 tCO₂/yr, and the emission due to the generation of dead bamboo trees was 44,171 tCO₂/yr. And as a result of calculating this by the gain loss method known as the carbon accounting method, it was 212,224 tCO₂/yr. This value is the net carbon dioxide absorption mass of bamboo forests in Korea. In order to calculate the accurate carbon absorption of bamboo forests, precise forest surveys such as the national forest inventory and continuous monitoring are expected to be necessary.

Key words: carbon absorption and emission, bamboo forests, dead bamboo trees, new bamboo trees, carbon accounting method, gain loss method

* Corresponding author
E-mail: ymson@cn-corp.com

ORCID
Yeongmo Son ^{ID} https://orcid.org/0000-0002-9346-4351

서론

FAO (Food and Agriculture Organization)는 FRA 2020 (Global Forest Resources Assessment 2020)에서 전세계 대나무의 분포면적은 약 35,040천ha이고, 이중 대부분이 아시아 권역인 중국과 인도에 분포하고 있으며, 대나무의 종류는 약 1,600여종이라고 보고하였다(Ohrnberger, 1999; Scurlock et al., 2000; FAO, 2020). 우리나라 대나무 숲의 면적은 국립산림과학원 산림바이오소재연구소에서 2022년 기준으로 20,262 ha라고 밝혔으며, 입목축적량은 513,452 m³라는 연구결과를 제시하였다(Forest Biomaterial Research Center, 2023).

대나무는 나무라고 칭하고 있으나, 분류학적으로 보면 벼목 벼과 대나무아과에 속하는 다년생 상록초본으로, 나무라고 불리기 어렵다. 즉, 식물학적으로 나무로 분류하려면 단단한 부분(목질부, xylem)이 있어야 하고, 형성층이 있어 부피 성장(volume growth)을 해야 하는데, 첫 번째 조건은 만족을 하나, 대나무는 나이가 들면서도 부피생장을 하지 못하기 때문에 나무로서의 요건을 갖추지 못하기 때문이다. 이렇게 나무인 듯 하나 나무가 아닌 식물을 예를 들면, 바나나, 야자수 등을 들 수 있다(Kim, 2013).

국내에서 대나무는 최근까지만 하여도 매각거래를 할 때는 속(束)이라는 묶음 단위로 하던지 중량단위인 무게(kg, ton)로 이루어져 왔다. 그러나 국립산림과학원에서는 국내 처음으로 대나무에 대한 재적표(volume table)를 만들게 되면서 부피단위로 거래가 가능하게 되었고, 여기에 탄소배출계수를 연계시켜 탄소저장량도 계산할 수 있게 되었다(Bae et al., 2022, 2023; Jeong et al., 2023). 그러나 이들 연구에서는 연간 순탄소흡수량 통계산정이 불가능하였다. 즉, 대나무 숲에서 연간 발생하는 죽순(bamboo sprout, new bamboo trees)량을 파악할 수 없었고, 또한 대나무 숲 외부로 확산되는 죽순발생 면적을 알 수 없었기 때문에 연간 증가하는 탄소흡수량을 계산할 수 없었다. 또한 매년 발생하는 대나무의 고사량을 알 수 있는 정보가 없었기 때문에 연간 탄소배출량도 계산할 수가 없었다.

대나무에 대한 바이오매스 및 탄소저장량 등에 대한 연구는 중국에서 활발한데, Chen et al.(2009)은 중국 대나무 숲에서 탄소저장 변화를 국가산림조사(NFI) 자료로서 추정하였는데, 1950~1962년 318.55 TgC, 1977~1981년 463.80 TgC, 1999~2003년 631.58 TgC 등으로 점차 증가하고 있다고 보고하였다. Wang et al.(2013)은 1977~2008년간 모니터링에 의하면 중국 moso 대나무림 중 북부/중앙 아열대림에서는 70~85MgC/ha의 저장량을 가진다고 하였으며, Nath et al.(2009)는 인도 북동지역 대나무 숲에

서의 지상부 바이오매스는 121.51 ton/ha, 탄소저장량은 61.05 ton/ha이라 하였다.

국내의 연구는 Kim et al.(1984)이 백운산 지역 조릿대를 대상으로 해발고별 현존량을 구명한 것이 대나무 바이오매스 연구의 처음으로 알려지고 있으며, 그 이후 Park et al.(1996)이 왕대속 대나무의 물질생산 및 무기영양물 분배에 관한 연구를 통해 현존량을 구할 수 있는 대수회귀식을 개발하였다. Hwang et al.(2005)은 맹종죽의 바이오매스 추정 연구에서 지상부는 69.7 ton/ha, 지하경은 13.7 ton/ha, 뿌리는 7.5 ton/ha이라 밝혔으며, Lee et al.(2012) 역시 맹종죽 바이오매스 연구에서 지상부 57.8 ton/ha, 지하부 53.4 ton/ha라고 하여 앞선 연구와는 약간 다른 결과를 보여주었다. 최근 Bae et al.(2023)은 대나무 탄소계정을 위해 탄소배출계수 중 하나인 목재기본밀도를 새롭게 도출하여 0.79 g/cm³임을 밝혔다. Jeong et al.(2023)은 경남지역의 대나무 숲의 탄소저장량은 287,277 tCO₂이었으며, ha당 저장량은 47.6 tCO₂/ha에 달한다고 보고하였다.

본 연구에서는 대나무 숲에서 죽순발생량과 숲 외연부의 죽순 확장 면적을 조사 분석하여 탄소흡수량을 도출하고, 연간 고사목량을 측정하여 탄소배출량을 계산하였으며, 결론적으로 탄소흡수량에서 탄소배출량을 감하여, 국내 대나무 숲의 연간 이산화탄소흡수량을 도출하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 공시 재료

대나무 숲에서의 연간 탄소흡수량을 추정하기 위하여 조사 분석한 지역은 남부권역인 부산, 울산, 경남, 경북, 전남, 전북 등지가 대부분을 차지하였으나, 일부 강원 및 충청권도 대나무 숲으로 군락 형성되어 있는 곳은 소수지만 표준지 조사를 실시하였다(Figure 1). 조사 대상 수종은 솜대(*Phyllostachys nigra*), 왕대(*Phyllostachys bambusoides*), 맹종죽(*Phyllostachys pubescens*) 등이었으나, 맹종죽의 경우는 극소수 지역에 국한되어 있고, 솜대와 왕대는 일부 순림이 존재하지만 대부분 혼생하고 있어, 3개 수종을 통합하여 조사/분석하였다. 또한 현재 대나무의 재적을 산출할 수 있는 재적표도 일반용재 수종 대비 국내 대나무 분포가 극소수이므로 하나로 통합하여 이용함도 3개 수종의 통합 분석 이유이다. 조사된 표준지 중 살아있는 나무(living trees, 입목죽)와 죽은 나무(dead trees, 고사목)의 개황은 Table 1과 같다. 그리고 현존 대나무 외연부로의 신죽 확장에 따른 성장량 조사는 약 697개 표준지 중 이런 현상이 일어나는 79개 표준지에서 정보를 획득하였다.

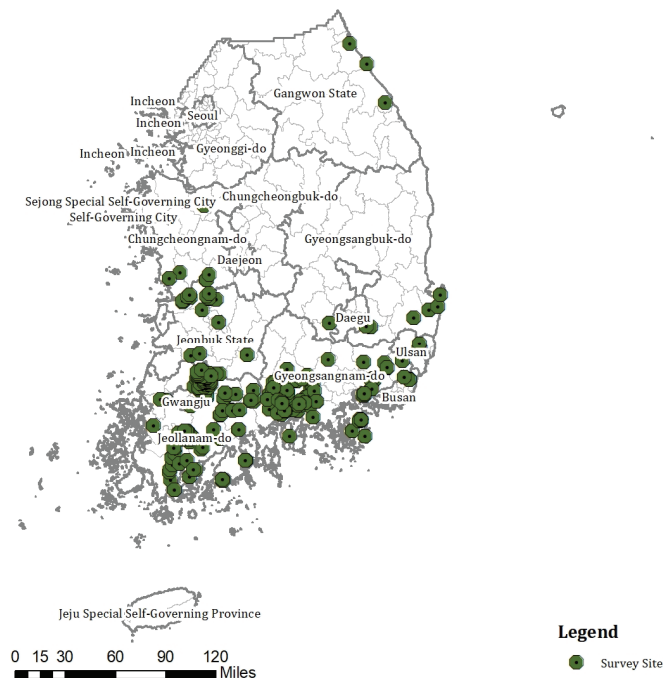


Figure 1. Distribution map for survey site.

Table 1. The general characteristic of bamboo forest survey sites in Korea.

Species	Current state	No. of plots	DBH (cm)	Height (m)	Trees number/ha (No.)
<i>Phyllostachys nigra</i>	Living bamboo trees	697	4.3	8.7	13,048
<i>Phyllostachys bambusoides</i>			0.9 – 12.4	1.6 – 14.2	100 – 82,222
<i>Phyllostachys pubescens</i>	Annual dead bamboo trees	697 (517)*	3.5	-	1,307
"			0.5 – 8.9	-	33 – 21,109

Note. * : This was a survey site where annual dead bamboo trees occurred, and this site was used in the analysis.

Table 1은 분석에 사용한 대나무숲에 대한 생장정보를 나타낸 것인데, 대나무 숲 내와 숲 바깥에서 발생하는 신죽은 죽순형태로 조사되었기 때문에 생장량을 표기하지 않았으나, 탄소량 계산 등에는 죽순의 직경을 이용하여 수고를 추정하였으며, 이들 2가지를 재적표에 적용시켜 재적을 산출하였다. Table 1을 보면, 우리나라 대나무 숲의 입목죽에 대한 입분단위 평균직경은 4.3 cm, 수고는 8.7 m, ha당 입목본수는 13,048본이었으며, ha당 입목본수는 최고 82,222본까지 분포하는 것으로 나타났다. 연간 대나무 숲의 고사량 조사는 입목죽 조사 표준지 개소수가 다른데, 실제로는 동일한 표준지이나 일부 표준지에서 고사목이 발생하지 않았기 때문에 개소수가 차이가 나는 것이다. ha당 고사목은 평균적으로 1,307본인 것으로 나타났으며, 고사목은 초두부가 없어졌거나, 구부러진 경우가 흔하게 발

생하여 수고를 측정하지 않았다. 숲 외연부로의 확장되는 신죽은 숲의 가장자리에서 부터 최대 11 m까지 발생하였으나 대부분 5 m 내에서 발생하는 것으로 조사되었다.

2. 분석 방법

1) 대나무 숲의 재적생장량 계산

대나무 숲의 표준지 조사자료 중 신죽의 평균직경과 수고 자료를 이용하여 아래 식 1로 평균목에 대한 재적을 산정하였으며, 여기에 ha당 본수를 적용시켜 입분단위의 ha당 재적을 계산하였다.

Tree volume (m^3)

$$= 0.0000243761 \cdot DBH^{1.654873} \cdot Height^{1.031993} \quad (1)$$

2) 대나무 숲의 연간 탄소흡수량 추정

(1) 숲 내 신죽 발생량 추정 및 탄소흡수량 산정

본 분석에서 탄소흡수량은 연간 이산화탄소흡수량(annual CO₂ absorption)을 의미하며, 이하에서도 간략히 탄소흡수량이라는 용어로 사용토록 하겠다.

대나무 숲에서는 신죽(new bamboo trees, 죽순발생에 의해 새롭게 숲을 구성하는 대나무)이 발생하여 당해연도에 성숙목으로 자라면, 대나무는 더 이상 직경생장이나 수고생장을 하지 않으므로, 해당연도 이전에 형성된 대나무 숲은 더 이상 탄소흡수를 하지 않는다고 보아야 한다. 다만 숲 내부에서 발생하는 신죽은 매년 새롭게 발생되므로 이는 연간 탄소흡수량에 기여를 하게 된다. 따라서 신죽발생량에 탄소배출계수를 적용하여 아래와 같이 탄소흡수량을 산정하였다.

Carbon absorption

$$= V \text{ or } G \times WD \times BEF \times (1+R) \times CF \times 44/12 \quad (2)$$

(Where, *V*: Volume, *G*: Growth (total or annual growth), *WD*: Basic wood density (0.76), *BEF*: Biomass expansion factor (1.26), *R*: Root-shoot ratio (0.06), *CF*: Carbon conversion factor (0.5), 44/12: carbon dioxide conversion factor)

대나무 숲 내부에서의 ha당 신죽발생량은 아래와 같은 1차 역다항식(1st degree inverse polynomial)을 이용하여 추정하였다. 이 식은 Jeong et al.(2024)이 경남지역에서 신죽발생량을 추정할 때 사용했던 식으로, 본 분석에서는 동일한 식의 형태를 가져오되 전국 자료에 적용시켜 파라미터를 재 도출하였다.

$$No_n = \frac{No_s}{a + b No_s} \quad (3)$$

(where is, *No_n*: number of new bamboo trees, *No_s*: number of standing bamboo trees, *a, b*: parameters)

(2) 숲 외부로의 신죽 확산량 및 탄소흡수량 추정

대나무 숲에서의 연간 탄소흡수량에 영향을 끼치는 또 다른 요인은 대나무 숲 바깥으로 확산되는 신죽의 발생이다. 연간 대나무 숲 바깥으로 확장되는 죽순발생량은 다양한 요인에 의해서 발생하나, 본 분석에서는 입목죽의 직경, 본수, 숲 가장자리에서부터의 죽순발생 외연부 확장거리 등을 설명변수로 하는 회귀분석을 실시하여 유의수준 내에 포함되는 최적의 인자를 찾고자 하였다(Huh et al., 1993; Kim, 2000).

$$E = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 \dots \quad (4)$$

(where is, *E*: Expanding bamboo trees number per ha, *a, b, c, d* = Parameters, *x_i* = Independent variables)

3) 대나무 숲의 연간 탄소배출량 추정

대나무 숲에서의 탄소배출은 고사목이 발생하면서 일어난다. 일반 산림에서의 수목은 간벌 등에 따른 발생하는 용재를 수확된 목재제품(harvested wood products, HWP)으로 활용할 수 있으나, 현재 국내의 대나무 숲에서는 간벌에 따른 활용은 극소수이다. 따라서 대나무 숲에서의 입목은 상호간 경쟁, 밀도 및 기타 환경적 인자들로 인하여 고사목이 발생하는데, 이런 고사목은 전부 탄소배출량으로 계산하였다.

고사목량은 역 J형태를 갖는 즉, 초기 입목죽의 본수가 많을 때 고사목량이 많이 발생하고, 점차 고사목량이 줄어드는 형태를 갖는 Schumacher식인 식 5를 이용하였으며, 숲 내부의 입목죽에 대한 입목밀도와 고사목 간은 밀접한 관계가 있으므로, 이를 변수로 하여 아래 식에 대한 파라미터를 도출하였다(Kim et al., 2014).

$$M = e^{a + b/No_s} \quad (5)$$

(where is, *M*: Dead bamboo trees number per ha, *No_s*: number of standing bamboo trees, *a, b*: parameters)

4) 우리나라 대나무 숲의 탄소계정

IPCC 가이드라인(GL, 2007) 및 우수실행지침(GPG, 2003)에서는 산림에서 탄소계정방법으로는 축적차이법(difference stocks method)과 획득손실법(gain-loss method)을 제시하고 있다. 축적차이법은 전년도에 저장·흡수한 탄소량에서 당해년도의 탄소량을 감하는 방법으로, 현재 우리나라는 대나무 숲에 대한 연차별 정밀 산림조사 및 모니터링이 되지 않으므로 적용할 수 없다. 따라서 본 분석에서는 획득손실법을 적용시켰는데(식 6), 획득손실법은 당해연도에 흡수하는 탄소량에서 배출하는 양을 감하는 방법을 말한다. 우리나라 대나무 숲 면적은 2022년말을 기준으로 임상도에서 나타난 값을 이용하였다(Korea Forest Service, 2023).

$$\Delta C = \Delta CG - \Delta CL \quad (6)$$

(Where: ΔC : Annual carbon stock change in the pool, tonnes C yr⁻¹, ΔCG : Annual gain of carbon, tonnes C yr⁻¹, ΔCL : Annual loss of carbon, tonnes C yr⁻¹)

Table 2. The number of new bamboo trees by standing bamboo trees.

Standing bamboo trees/ha	100,000	80,000	60,000	40,000	20,000	10,000	5,000	1,000
New bamboo trees/ha (%)	8,117 (8.1)	7,555 (9.4)	6,774 (11.3)	5,614 (14.0)	3,708 (18.5)	2,208 (22.1)	1,221 (24.4)	267 (26.7)

Table 3. Annual carbon absorption due to bamboo shoots inside forests.

District	Bamboo area (ha)	CO ₂ absorption per ha (tCO ₂ /ha/yr)	Annul CO ₂ absorption (tCO ₂ /yr)
Gyeongsangnam-do	6,474.2	1.28 ~ 10.74	57,007.48
Gyeongsangbuk-do	1,803.5	8.22 ~ 37.62	31,570.03
Jeollanam-do	8,181.3	0.39 ~ 11.67	78,062.36
Jeollabuk-do	1,742.8	1.60 ~ 16.93	15,701.74
Mean	-	12.71	45,585.40

결과 및 고찰

1. 대나무 숲의 탄소흡수량 추정

1) 숲 내부의 신죽 발생량에 따른 탄소흡수량

대나무 숲에서의 신죽 발생량은 기존 입목죽의 발생량을 변수로 하는 1차 역다항식을 적용시켜 파라미터를 도출하였으며, 식의 형태는 아래와 같고 비선형식인 관계로 식의 설명력은 적합도 지수(FI)로 표현하였다.

$$No_n = \frac{No_s}{3.662031 + 0.00008658 No_s} \quad (FI = 0.5514) \quad (7)$$

신죽 발생 추정식으로 입목죽 밀도 대비 신죽의 발생량을 계산한 결과 Table 2와 같다.

Table 2에서 입목죽의 입목밀도가 높은 곳에서는 신죽의 발생도 많으나, 발생률을 보면 입목죽의밀도가 적은 곳이 더 높음을 알 수 있었다. 결국 이것은 한정된 생육공간 내에 들어 설 수 있는 입목의 한계가 분명 존재함을 알 수 있게 하는 것이었다.

대나무 숲의 신죽 직경으로 수고를 추정하고, 이를 대나무 재적을 산출할 수 있는 식 1을 적용하여 평균목에 대한 재적으로 산정하였으며, 여기에 단위면적당 본수를 곱하여 ha당 임분재적을 산출하였다. 또한 재적량을 식 2에 적용시켜 탄소량을 산정하였다.

Table 3은 우리나라에서 대나무 숲이 가장 많은 분포를 보이는 전북, 전남, 경북, 경남지역에서의 숲내 신죽 발생에 따른 연간탄소흡수량을 산정하였는데, 전국 시도 단위로 확장하지 않은 것은 4개 지역 외 다른 지역은 대나무 숲의 분포범위가 적고, 따라서 연간탄소흡수량도 적었기

때문이며 여기에서는 경향치만을 살펴보고, 마지막 총괄 표(Table 6)에서 전국단위의 탄소흡수량을 제시하였다.

Table 3을 보면, 4개 지역의 신죽 발생에 따른 ha당 평균 이산화탄소흡수량은 약 12.7 tCO₂/ha/yr 인 것으로 나타났다. 그리고 대나무 면적분포가 가장 많은 전라남도 지역이 78,062 tCO₂/yr 으로 가장 높은 흡수량을 보임을 알 수 있었다.

Janssen(1996)은 코스타리카 guadua 대나무림에서 연간 17 tCO₂/ha/yr 의 이산화탄소를 흡수한다고 보고한다고 하였는데, 이는 우리나라 4개 지역 대나무림보다 더 많은 흡수량임을 알 수 있었다. Yen et al.(2011)은 중국 moso 대나무림의 연간 탄소흡수량이 중국 전나무림 보다 2.39 배 높다고 하였으며, 흡수량은 29.81±7.88 tCO₂/ha/yr에 달한다고 하였고, Li et al.(2015) 또한 중국 moso 대나무림 연구에서 37.36±9.31 tCO₂/ha/yr를 연간 흡수한다고 하여, 우리나라 대나무림과 비교하면 약 3배나 높은 흡수량을 보여 주었다. 우리와 이웃해 있는 일본 교토의 맹종죽림에서도 약 31 tCO₂/ha/yr의 이산화탄소를 흡수한다고 보고한 바 있다(Isagi et al., 1997).

2) 숲 외부로의 신죽 발생에 따른 탄소흡수량

대나무 숲에서의 연간 탄소흡수량에 영향을 끼치는 또 다른 요인은 대나무 숲 외연부로 확산되는 신죽의 발생이다. 연간 대나무 숲 바깥으로의 신죽(죽순)발생량은, 숲 외연부 죽순발생량을 반응변수로 두고 현존 대나무 숲 입목죽의 입목본수와 숲 외연부로의 확장거리를 설명변수로 하는 회귀식을 도출시켜 활용하였다. 회귀식은 선형식이므로 식의 설명력은 R²로 표현하였다.

아래 식에서 회귀식의 설명력은 아주 낮으나, 회귀계수의 유의성 검정 결과 모두 5% 이내에서 유의성이 인정되

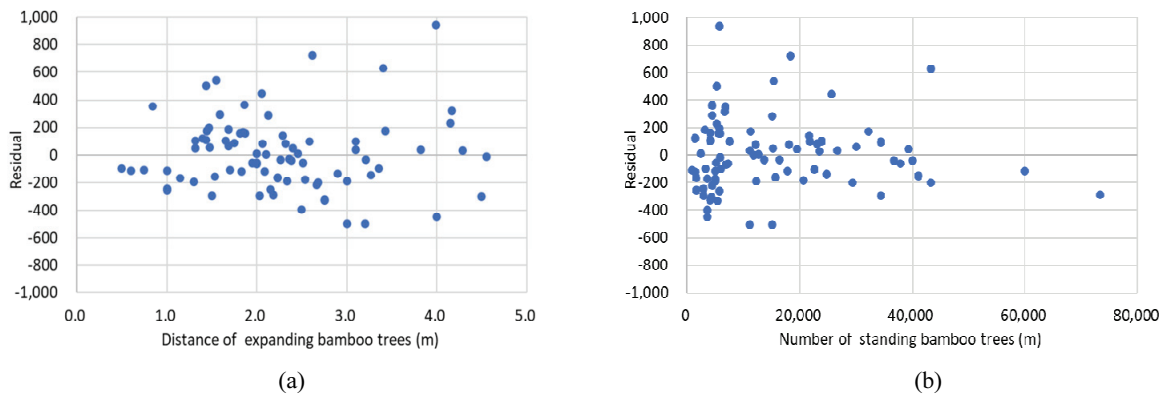


Figure 2. Residual diagram of new bamboo trees generated to the outer forest.

Table 4. Annual carbon absorption due to new bamboo trees generated to the outer forest.

District	Bamboo area (ha)	CO ₂ absorption per ha (tCO ₂ /ha/yr)	Annul CO ₂ absorption (tCO ₂ /yr)
Gyeongsangnam-do	6,474.2	2.29	13,827.03
Gyeongsangbuk-do	1,803.5	2.86	4,989.03
Jeollanam-do	8,181.3	2.03	16,279.20
Jeollabuk-do	1,742.8	1.83	3,189.30
Mean	-	2.25	9,571.14

었고, 또한 식의 잔차도를 도식화한 결과(Figure 2), 숲 바깥으로 확장되는 거리(a)와 입목죽의 입목밀도(b)를 X축으로 하는 잔차가 구간별로 변이의 차이는 있으나 모두 “0”를 중심으로 고르게 분포하고 있어, 추정식의 추세선이 실측치의 중심을 통과하고 있는 식임을 알 수 있었다. 따라서 이 식을 대나무 숲 외부로 확장되는 신죽 발생을 추정하는데 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단하였다.

$$E = 230.28 + 0.0046x_1 + 100.15x_2 \quad (R^2 = 0.1732) \quad (8)$$

(0.0054)* (0.0292)* (0.0028)*

(Where, x_1 : Number of standing bamboo trees, x_2 : Outside distance of expanding bamboo trees, *: Significant test of variables by F-value)

그리고 외연부로의 확장되는 신죽의 직경, 수고를 식 1에 적용시켜 재적을 계산하고, 이를 식 8에서 나온 외연부 신죽발생량을 적용시켜 ha당 입목재적량(m³)을 계산하였다. 이어서 숲 내부 신죽발생량에 따른 이산화탄소흡수량 산정은 식 2를 적용하여 산출하였다.

Table 4에서 대나무 숲 외연부로 확장되는 신죽의 발생은 숲 내부에서 발생하는 신죽보다 현저히 적기 때문에, ha당 연간 탄소흡수량도 1/5 수준인 약 2 tCO₂/ha/yr에 불과하였다. 이를 지역별 면적에 적용시키면, 전남, 경남지

역 순으로 숲 외연부로의 신죽발생에 따라 탄소가 흡수되고 있음을 알 수 있었다.

2. 대나무 숲의 탄소배출량 추정

1) 고사목 발생량에 따른 탄소배출량

대나무 숲 지상부 바이오매스 중 유일한 탄소배출은 고사목에서 일어나므로 먼저 ha당 고사목량을 추정할 수 있는 식 5를 적용시켜 파라미터를 구한 결과 식 9와 같은 형태의 식이 도출되었다. 이 식에 따르면 현존 숲의 입목밀도가 2~3,000본 이하로 떨어지면 고사목이 거의 발생하지 않는 정보를 제공하는 식임을 알 수 있었다. 그리고 현지 조사한 고사목 생장 자료와 이 식으로서 고사목에 대한 재적, 연간탄소배출량 등을 계산하였다.

표준지 자료에 식 9를 적용시켜 고사량을 추정한 후, 이의 평균값을 구하여 입목죽, 신죽 및 연간 고사목 등의 대나무 숲을 구성하는 전체 숲 본수로 나눈 결과, 우리나라 대나무 숲은 약 5%의 고사율이 나타나는 것으로 추정되었다. 이것을 Son et al.(2017)이 우리나라 침엽수의 연간 고사율 4.7%, 활엽수 4.4%이라 한 것과 비교하면, 거의 유사한 고사율을 갖는 것임을 알 수 있었다. Castro et al. (2013)은 남서부 아마존 대나무 숲 내부에서는 연간 3.6%, 숲 가장자리는 3.8%의 고사율을 갖는다고 보고하였는데,

Table 5. Annual carbon emission due to dead bamboo trees.

District	Bamboo area (ha)	CO ₂ emission per ha (tCO ₂ /ha/yr)	Annul CO ₂ emission (tCO ₂ /yr)
Gyeongsangnam-do	6,474.2	0.27 ~ 3.91	11,068.35
Gyeongsangbuk-do	1,803.5	1.71 ~ 5.99	5,377.77
Jeollanam-do	8,181.3	0.86 ~ 4.33	15,695.16
Jeollabuk-do	1,742.8	2.01 ~ 4.59	6,523.48
Mean	-	2.67	9,666.19

Table 6. Annual carbon account of bamboo forests in Korea.

District	Total annul CO ₂ absorption (tCO ₂ /yr)	CO ₂ absorption by new bamboo trees inside forest (tCO ₂ /yr) (+)	CO ₂ absorption by new bamboo trees outside forest (tCO ₂ /yr) (+)	CO ₂ emission by dead bamboo trees (tCO ₂ /yr) (-)
Total	212,224.29	213,041.59	43,354.05	44,171.35
Seoul	-	-	-	-
Busan	977.17	963.41	196.81	183.06
Daegu	146.03	1,181.37	169.11	190.98
Incheon	146.03	145.38	27.49	26.85
Gwangju	1,923.10	1,890.70	328.89	296.48
Daejeon	134.68	139.93	20.60	25.84
Ulsan	3,793.12	3,569.70	802.22	578.80
Sejong	146.78	152.49	22.45	28.16
Gyeonggi-do	115.29	114.78	21.71	21.20
Gangwon-do	3,059.32	2,831.96	535.57	308.21
Chungcheongbuk-do	1,274.59	1,539.67	226.62	491.71
Chungcheongnam-do	16,491.09	17,133.01	2,521.81	3,163.72
Jeollabuk-do	12,367.56	15,701.74	3,189.30	6,523.48
Jeollanam-do	78,646.40	78,062.36	16,279.20	15,695.16
Gyeongsangbuk-do	31,181.29	31,570.03	4,989.03	5,377.77
Gyeongsangnam-do	59,766.17	57,007.48	13,827.03	11,068.35
Jeju	1,042.20	1,037.57	196.22	191.59

본 연구는 이보다 약간 높은 고사율이었다.

$$M = e^{9.01342 - 27.888.32816/N_0} \quad (FI = 0.6065). \quad (9)$$

Table 5에 따르면, 대나무 숲 내 고사량에 따른 ha당 탄소배출량은 동일지역 뿐만 아니라 지역 간에도 다양한 변이폭이 있음을 알 수 있었으며, 4개 지역을 기준으로 볼 때는 ha당 평균 2.7 tCO₂/ha/yr의 탄소를 배출하는 것으로 나타났다.

3. 전국 대나무 숲의 연간 탄소흡수량 추정

IPCC 가이드라인(2007)에서 탄소계정방법으로 제시한 획득손실법에 의해 산정된 우리나라 대나무 숲의 탄소흡수

및 배출량은 Table 6과 같다. Table 6에서는 지역을 특별시, 광역시 및 도 단위의 기본계획구별로 세분하여 제시하였다.

Table 6에서 2022년말 기준 대나무 숲 내부에서의 신죽 발생에 의한 연간 이산화탄소흡수량은 213,041.59 tCO₂/yr로 나타났고, 숲 외부로의 신죽발생 면적 확장에 따른 이산화탄소흡수량은 43,354.05 tCO₂/yr, 숲 내부에서의 고사목 발생에 따른 탄소배출량은 44,171.35 tCO₂/yr으로 나타났다. 이를 IPCC(2007)가 탄소계정방법으로 제시한 획득손실법으로 계산하면, 212,224.29 tCO₂/yr이었는데, 이것이 우리나라 대나무 숲에서 연간 흡수하는 이산화탄소량이다. 온실가스종합정보센터의 국가온실가스 인벤토리 보고서에 의하면(GIR, 2023), 2021년 기준 산림부문에서는 총 40,389천 tCO₂/yr을 흡수한다고 하였는데, 우리가 추정한

대나무 숲에서의 연간 이산화탄소흡수량이 추가된다면, 지금의 통계량보다 0.5%가 증가될 수 있을 것이다.

결론

본 연구는 우리나라 대나무 숲에서의 탄소흡수량이라 볼 수 있는 숲 내부의 신죽 발생과 숲 바깥으로의 신죽 확산량, 그리고 탄소배출량인 고사목량을 산정하여, 전국적 단위로 계산하였다. 이러한 연구는 국내 처음이며, 탄소중립정책을 추구하고 있는 우리 현실로서는 충분히 시도할 만한 일이라고 본다.

본 연구의 결과를 간단히 요약해 보면, 대나무 숲 내부의 신죽 발생량은 기존 입목죽이 많은 곳에서 많은 발생량을 보이니, 입목죽 대비 신죽 발생량 비율은 오히려 기존 입목죽이 적은 곳에서의 신죽 발생률이 더 높음을 알 수 있었다. 그리고 신죽의 발생은 기존 입목죽의 입목밀도를 변수로 하는 1차 역다항식 형태의 추정식으로 도출되었고, 이를 재적의 계산 및 탄소흡수량 추정에 활용하였다. 대나무 숲 외부로의 신죽 발생 면적확장은 기존 입목죽의 입목밀도와 확장거리가 영향을 끼치는 것으로 나타나 이를 회귀식 형태로 도출하고, 이를 숲 외연부로의 확장되는 신죽발생량 및 탄소흡수량 추정에 활용하게 되었다. 대나무 숲에서의 연간 고사목 발생률은 약 5% 대로 나타나 우리나라 일반 수목들과 비슷한 고사율이었으며, 고사목 발생량은 Schumacher 식의 형태로 도출하고, 이 역시 전자의 탄소흡수량 도출과 같은 절차로 배출량을 추정하였다.

약 2만 ha에 달하는 우리나라 대나무 숲의 2022년말 기준 연간 이산화탄소흡수량은 212,224.29 tCO₂/yr 인 것으로 나타나, 대나무 숲에서도 분명히 탄소의 흡수작용이 일어나고 있음을 알 수 있었다. 그러나 국내 대나무 숲의 분포면적이 너무 적은 관계로 연간 탄소흡수량이 그다지 높지 않으나, 신규 온실가스 흡수원을 찾는 우리로서는 결코 대나무 숲을 배제시켜서는 안 될 것이다.

Bae et al.(2023)과 Jeong et al.(2023)의 대나무 관련 논문에서도 계속 언급하고 있다시피, 국가차원에서는 현재의 대나무 숲이 산업화에서 소외 시 되고, 생육분포 상으로는 묘지, 주택 등에 침입하여 부정적 인식과 생태적 교란을 발생시킨다고 해서 지금과 같이 계속 방치해서는 안 될 것이다.

공익적, 환경적, 정서적 차원에서 대나무 숲의 존재는 지자체 및 교육공간 등에서 서서히 국민들에게 인정을 받고 있고, 앞으로도 충분히 가치가 있을 것이 예상되므로, 관계 당국에서는 지속적인 확대정책 수립과 경영 관리방안을 제시해야 할 것이며, 정밀한 산림조사와 모니터링 또한 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

This research was funded by the Forest Biomaterial Research Center, National Institute of Forest Science (Project No.FE0100-2020-01-2024).

References

- Bae, E.J., Jeong, J.Y., Lee, S.J., Roh, H.J. and Son, Y.M. 2023. A study on the development of basic wood density for carbon account in bamboo forests. *Journal of Korean Society of Forest Science* 112(2): 188-194.
- Bae, E.J., Son, Y.M. and Kang, J.T. 2022. Estimation of stem taper equations and a stem volume table for *Phyllostachys pubescens* Mazel in South Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 111(4): 622-629.
- Castro, W., Salimon, C.I., Medeiros, H., Silva, I.B. and Silveira, M. 2013. Bamboo abundance, edge effects, and tree mortality in a forest fragment in Southwestern Amazonia. *Scientia Forestalis*. 41(98): 159-164.
- Chen, X., Zhang, X., Zhang, Y., Booth, T. and He, X. 2009. Changes of carbon stocks in bamboo stands in China during 100 years. *Forest Ecology and Management* 258(7): 1489-1496.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. pp. 164.
- Forest Biomaterial Research Center. 2023. Analysis of spacial distribution and estimation of volume statistic for bamboo forests in Korea. Inner information (Results of external research). pp. 36.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR). 2023. 2023 National greenhouse gas inventory report of Korea.
- Huh, M.H. and Seo, H.S. 1993. SAS, Regression analysis . Freedom Academy. Seoul. pp. 126.
- Hwang, J.H., Chung, Y.G., Lee, S.T., Kim, B.B., Shin, H.C., Lee, K.J. and Park, K.J. 2005. Estimation of aboveground biomass and belowground nutrient contents for a *Phyllostachys pubescens* stand. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 94(3): 161-167.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2003. Good practice guidance(GPG) for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan. pp. 3-24.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007.

- 2006 IPCC guidelines(GL) for national greenhouse gas inventories, volume4. Agriculture, forestry and other land use. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan. pp. 4-73.
- Isagi, Y., Kawahara, T., Kamo, K. and Ito, H. 1997. Net production and carbon cycling in a bamboo *Phyllostachys pubescens* stand. *Plant Ecology* 130: 41-52.
- Janssen, J.A. 1996. Building codes for bamboo housing -Bamboo, people and the environment. Engineering and Utilization. Proceedings of the 5th International Bamboo Workshop. pp. 3.
- Jeong, J.Y., Bae, E.J., Roh, H.J., Park, C.H., Kim, W.Y. and Son, Y.M. 2024. Estimation of standing tree density and mortality for bamboo forests in Gyeongnam district. (The manuscript is being submitted).
- Jeong, J.Y., Ryu, J.C., Roh, H.J., Shin, Y.H., Lee, S.J. and Son, Y.M. 2023. Estimation of carbon storage and calculation of standing tree volume of bamboo forests in Gyeongnam province. *Journal of Agriculture & Life Science* 57(4): 53-62.
- Kim, C.R. 2000. SAS, a statistic box. *Data Plus*. pp. 592.
- Kim, K.D., Kim, J.S. and Park, L.H. 1984. Studies on some characters of culms and biomass of *Sasamorpha purpurascens* var. *borealis* in Mt. Baekun area. *Forest Bioenergy* 49(1): 19-25.
- Kim, S.W., Son, Y.M., Kang, J.T., Lee, K.H. and Park, H. 2014. Linear and nonlinear models for the fitness of experimental analysis in forest Science. *Research Information* No. 542. pp. 109.
- Kim, W.J. 2013. Bamboo forests - Is bamboo a tree or a herb?, *Landscaping Tree* 135: 53-56.
- Korea Forest Service (KFS). 2023. Forest type map (1/5,000, shp file).
- Lee, K.S., Jung, S.Y., Son, Y.M., Lee, K.H., Bae, E.J. and Yun, S.L. 2012. Biomass estimation of *Phyllostachys pubescens* stands in KFRI, Southern Forest Research Center. *Journal of Korean Society of Forest Science* 101(1): 138-147.
- Li, P., Zhou, G., Du, H., Lu, D., Mo, L., Xu, X., Shi, Y. and Zhou, Y. 2015. Current and potential carbon stocks in Moso bamboo forests in China. *Forest Ecology and Management*. 156(1): 89-96.
- Nath, A.J., Das, G. and Das, A.K. 2009. Above ground standing biomass and carbon storage in village bamboos in North East India. *Biomass and Bioenergy* 33(9): 1188-1196.
- Ohrnberger D. 1999. The bamboos of the world: Annotated nomenclature and literature of the species and the higher and lower taxa. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. pp. 585.
- Park, I.H. and Ryu, S.B. 1996. Biomass, net production and nutrient distribution of bamboo *Phyllostachys* stands in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 85(3): 453-461.
- Scurlock J, Dayton D and Hames B. 2000. Bamboo: An overlooked biomass resource? *Biomass Bioenergy* 19: 229-244.
- Son, Y.M., Jeon, J.H., Lee, S.J., Yim, J.S. and Kang, J.T. 2017. Development of estimated equation for mortality rates by forest type in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 106(4): 450-456.
- Wang, B., Wei, W.J., Liu, C.J., You, W.Z., Niu, X. and Man, R.Z. 2013. Biomass and carbon stock in Moso bamboo forests in subtropical China: Characteristics and implications. *Journal of Tropical Forest Science* 25(1): 137-148.
- Yen, T.M. and Lee, J.S. 2011. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. *Forest Ecology and Management*. 261(6): 995-1002.
- Yuen, J.Q., Fung, T. and Ziegler, A.D. 2017. Carbon stocks in bamboo ecosystems worldwide: Estimates and uncertainties. *Forest Ecology and Management* 393(1): 113-138.

Manuscript Received : August 2, 2024

First Revision : October 31, 2024

Second Revision : November 20, 2024

Accepted : November 27, 2024