

편백과 삼나무에 대한 신규 중량추정식 및 중량표 개발

강진택 · 서연옥^{ID*} · 박정묵 · 고치용 · 권순덕
국립산림과학원 산림경영연구과

Development of Weight Estimation Equation and Weight Table for *Chamaecyparis obtusa* and *Cryptomeria japonica*

Jintaek Kang, Yeonok Seo^{ID*}, Jungmook Park, Chiung Ko and Soonduk Kwon
Forest Management Research Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 본 연구는 우리나라 남부지방에 분포하는 편백과 삼나무의 중량추정식 및 중량표를 개발하기 위해 수행되었다. 중량표 개발을 위해 전국을 대상으로 편백 100본, 삼나무 50본의 표준목을 선정하였다. 선정된 표준목은 현장에서 벌채 후 생중량을 측정하고 각 부위별 채취한 시료는 실험실에서 건중량을 측정하였다. 편백 및 삼나무의 생중량과 건중량을 추정하기 위하여 활용한 추정식은 흉고직경 1변수, 흉고직경과 수고를 이용한 2변수 식으로 구분하여 산출하였다. 생중량 및 건중량 추정식의 적합성 검증을 위해 적합도지수(FI), 평균제곱근오차(RMSE), 추정표준오차(SEE), 잔차도 등 통계량을 분석하였으며, 도출된 최적의 식을 활용하여 무게 단위의 중량을 산출하고 적용 가능성을 검토하였다. 분석 결과, 흉고직경 1변수를 이용하였을 때 $W = a + bD + cD^2$ 그리고 흉고직경과 수고 2변수를 이용하였을 때 $W = aD^bH^c$ 로 선정되었다. 최적의 식으로 선정된 1변수 중량추정식의 적합도지수는 편백 0.89, 삼나무 0.92였으며, 2변수 중량추정식은 편백 0.94, 삼나무 0.96으로 나타났다. 최적의 추정식을 활용하여 편백과 삼나무에 대한 생중량 및 건중량표를 신규로 작성하였으며, 기존에 편백류로 사용되었던 입목수간중량표를 각 수종별로 제공할 수 있어 임업 관련 종사자들에게 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract: We aimed to develop weight estimation equations and weight tables for *Chamaecyparis obtusa* and *Cryptomeria japonica*, species commonly found in the southern region of South Korea. To achieve this, we sampled 100 *C. obtusa* and 50 *C. japonica* trees from various locations and measured their green and dry weights on-site and in the laboratory, respectively. We developed two types of estimation equations: a one-variable equation that uses only the diameter at breast height (DBH) and a two-variable equation using both DBH and height. We tested the equations' fitness by analyzing their fitness index (FI), root mean square error (RMSE), standard error of estimation (SEE), and residuals. The optimal equations were then used to estimate weights and assess their applicability. The optimal one-variable equation has the form $W = a + bD + cD^2$, where; while the optimal two-variable equation is $W = aD^bH^c$. The FI values for the one-variable equation are 0.89 and 0.92 for *C. obtusa* and *C. japonica*, respectively; and 0.94 and 0.96, respectively, for the two-variable equation. We used the optimal equations to generate new green and dry weight tables for the two tree species. These results enhance the applicability of stem weight tables for standing trees. Weight tables provide forestry workers with practical information, as previous tables were solely based on *C. obtusa*.

Key words: green weight, dry weight, *Chamaecyparis obtusa*, *Cryptomeria japonica*, weight estimation equation, weight table

서론

편백(*Chamaecyparis obtusa*)은 한반도 전체 산림면적 6,298,134 ha 중 4,092 ha로 약 2.4%가 한반도 남부 지역과

제주도를 중심으로 조림되어 있다(KFS, 2024). 특히 생장이 빠르고 용재로서 가치가 우수하여 우리나라에 1920년대 도입되어 1960년대부터 대단위 조림이 진행되었다(NIFoS, 2012). 편백은 용재 생산을 위한 경제적 기능과 더불어 독특한 향기를 포함하고 있어 건축재, 가구재 등으로 사용되고 있다. 또한, 산림휴양 등 다양한 용도로 사용되고 있어 지속적인 관심을 받고 있으며 이에 따라 편백을 활용한 산림사업이 증가 될 것으로 예상된다(Kim et al., 2020).

* Corresponding author
E-mail: yoseo85@korea.kr

ORCID

Yeonok Seo ^{ID} https://orcid.org/0000-0003-2444-1807

삼나무(*Cryptomeria japonica*)도 수간이 통직하고 재질이 우수하며 생장이 빠르고 용재로서 가치가 높아 일본 및 대만 등 주요 조림수종으로 알려져 있다. 특히 우리나라에서는 편백과 동일하게 1920년대에 조림되기 시작하였으며 1970년대 이후 제주도에서 주요 조림수종으로 치산녹화 1차, 2차 기간 동안 약 4만ha에 달하는 대면적으로 조림을 실시하였다(NIFoS, 2005; 2006). 현재 두 수종 모두 다양한 기능에 활용되지만 조림 당시에는 목재 생산 기능에 초점이 맞춰져 있었다.

산림에서 생산되는 목재의 거래는 부피(m^3)와 더불어 중량(톤)을 사용하고 있다. 건중량은 임목을 펄프재의 원료로 사용할 때 실제로 활용되는 섬유량을 나타내며, 연료재로 사용할 때 실제 얻을 수 있는 에너지양의 척도이기도 하다(NIFoS, 2018). 또한 온실가스 흡수원으로서 산림자원을 평가하고자 할 때 건중량에 일정한 계수를 곱하면 탄소량으로 전환할 수 있다(NIFoS, 2018).

이에 국립산림과학원은 산림현장에서 직접적으로 거래될 수 있는 임목의 중량에 대한 연구를 진행 중이며, 강원 지방소나무 등 8개 수종에 대한 임목중량표를 개발하여 사용하고 있다(NIFoS, 2001). 생중량은 건중량을 나타내는 바이오매스는 아니지만 현장에서는 펄프용 원자재 등으로 원목을 거래할 때 사용하고 있으므로 임업 현장에서 매우 중요한 정보이다(Son et al., 2007). 개체목의 생중량을 추정하는 추정식은 실무현장에서 자료의 가용성과 요구하는 정도에 따라 다양하게 사용할 수 있다. 일반적으로 원목의 중량 산출은 흉고직경의 1변수식과 흉고직경과 수고 2변수식으로 산출할 수 있다(Kang et al., 2023). 흉고직경의 경우 수고보다 작은 비용으로 쉽게 측정할 수 있다는 장점이 있다고 밝힌 바 있으며(Dorado et al., 2006; Sharma and Parton, 2007), 캐나다의 산림 바이오매스 지침서(Guidelines for forest biomass inventory)에서도 수고를 직접 측정하지 못할 경우, 2변수식 사용보다 측정 가능한 흉고직경 1변수식을 이용하라고 권장하고 있다(Aldred and Alemdag, 1988). 또한 탄소저장 및 흡수량 산정을 위해 흉고직경 1변수와 흉고직경과 수고 2변수식을 이용하여 바이오매스 추정식 즉, 건중량 추정식을 주로 사용하고 있다(Jeong et al., 2023). 바이오매스(biomass)와 관련된 연구는 20세기 중반 이후에 미국, 일본, 벨기에, 캐나다를 중심으로 Biomass의 생산구조 및 측정방법에 관한 연구가 활발히 진행되었다(Kozak, 1970; Lavigne and von Nostrand, 1981; Ouellet, 1985; Marshall and Wang, 1995). 우리나라에서도 바이오매스 연구는 생산력 추정에 관한 연구(Kim and Yoon, 1972) 등 관련된 연구가 활발하게 수행되어 왔다(Lee and Park, 1986; Park and Lee, 1990). 또

한, 본 연구 수종인 삼나무와 편백에 대한 물질 생산량(Kim et al., 1987), 삼나무 영급별 바이오매스 추정(Seo and Lee, 2013), 남부지역 삼나무의 줄기밀도 및 현중량 확장계수(Lim et al., 2013), 삼나무 조림지의 상대생장식(Gwon et al., 2014)에 대한 연구도 진행되었다. 그러나 대부분의 연구가 전라남도 지역에 집중되어 있고 전국을 대상으로 다양한 표준목을 포함하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 전국 분포를 고려 소경급부터 대경급까지 편백 및 삼나무를 대상으로 현장에서 가장 많이 활용되고 있는 흉고직경과 수고 자료를 통해 상대생장식 및 중량표 등을 개발하였다. 또한, 산림자원의 정량적인 가치를 평가할 수 있는 기본적인 자료와 실무자들이 사용할 수 있는 자료를 제공하고자 실시하였다.

재료 및 방법

1. 공시재료

본 연구는 임상도(1:5000)를 활용, 지역별 분포면적을 고려하여 총 150본(편백 100본, 삼나무 50본)을 대상으로 경급별로 구분한 후 표준목을 선정하였다. 편백은 5개 지방청 12개 국유림관리소 권역을 중심으로 25개 표준지, 삼나무는 2개 지방청 8개 국유림관리소 권역을 중심으로 18개 표준지에서 자료를 수집하였다(Table 1, Figure 1).

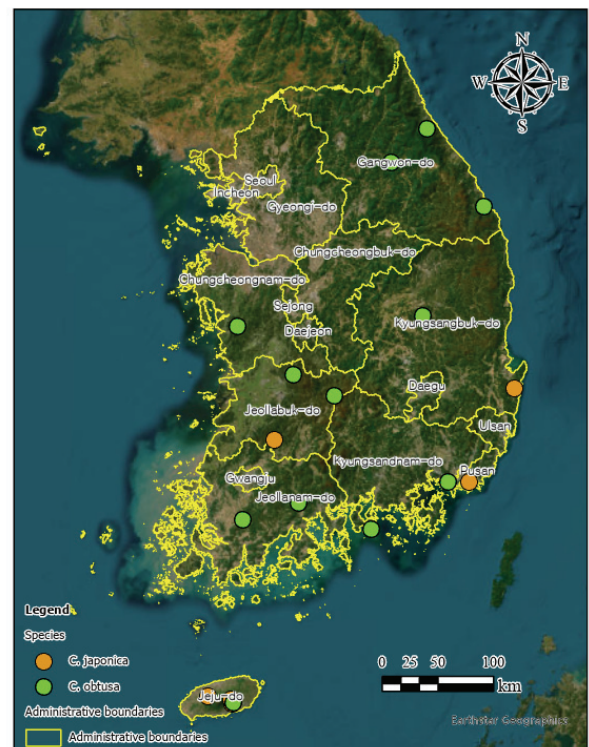
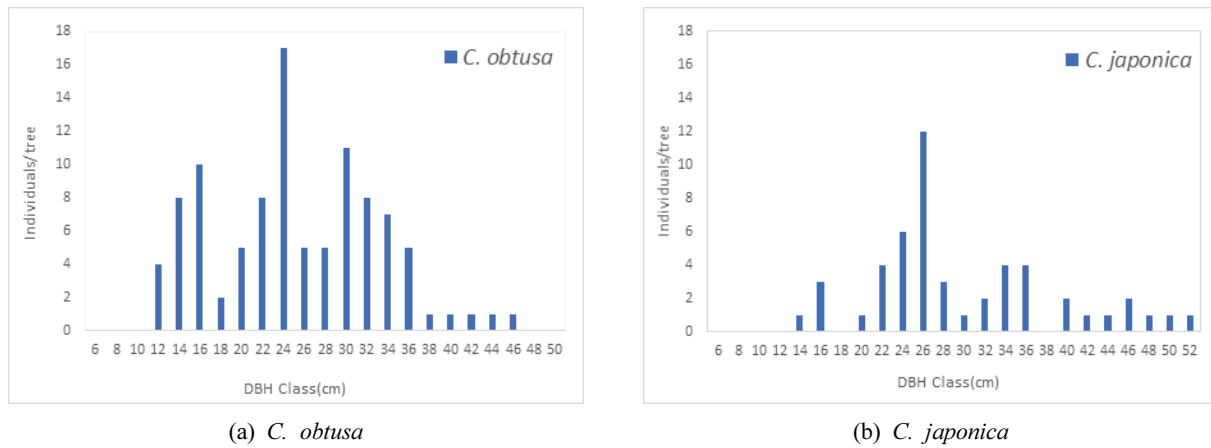


Figure 1. Location of study sites for *C. obtusa* and *C. japonica*.

Table 1. Characteristic of growth factors in *C. obtusa* and *C. japonica*.

Species	No.	Region	Plot size (m ²)	Altitude (m)	Slope (°)	Aspect	Stem density (trees/ha)	Sample tree (trees)	DBH (cm)	Height (m)
<i>C. obtusa</i>	1	Hongcheon1 (HC1)	600	419	5	SE	550	6		
	2	Yangyang1 (YY1)	200	271	17	E	600	3		
	3	Sancheok1 (SC1)	200	272	15	NE	1,500	3		
	4	Uiseong1 (US1)	400	280	5	S	875	3		
	5	Changwon1 (CW1)	400	88	8	NE	700	4		
	6	Changwon2 (CW2)	200	78	17	E	600	3		
	7	Changwon3 (CW3)	400	90	10	N	1,175	6		
	8	Boryeong1 (BR1)	400	218	13	W	1,150	6		
	9	Boryeong2 (BR2)	200	220	10	W	1,350	3		
	10	Wanju1 (WJ1)	200	170	15	W	650	2		
	11	Wanju2 (WJ2)	400	176	23	SW	1,325	6		
	12	Wanju3 (WJ3)	100	185	7	SE	1,500	1		
	13	Wanju4 (WJ4)	100	179	18	SE	1,200	1	25.1 11.1–46.9	17.2 9.3–23.7
	14	Wanju5 (WJ5)	100	177	8	SE	1,300	1		
	15	Wanju6 (WJ6)	100	175	5	SE	1,600	1		
	16	Wanju7 (WJ7)	100	165	8	SW	1,100	1		
	17	Muju1 (MJ1)	400	671	26	N	925	5		
	18	Yeongam1 (YA1)	200	340	24	S	1,100	5		
	19	Yeongam2 (YA2)	200	355	16	NW	900	3		
	20	Yeongam3 (YA3)	200	351	20	N	650	2		
	21	Suncheon1 (SCn1)	400	480	22	NE	600	6		
	22	Suncheon2 (SCn2)	400	491	19	N	1,150	7		
	23	Suncheon3 (SCn3)	400	495	13	S	1,050	7		
	24	Namhae1 (NH1)	400	154	5	W	800	5		
	25	Seoqiposi1 (SQP1)	1200	343	11	NE	1,458	10		
<i>C. japonica</i>	1	Pohang1 (PH1)	200	176	34	NE	2,400	5		
	2	Busan1 (PS1)	200	206	24	NE	1,350	4		
	3	Sunchang1 (SC1)	400	317	5	N	175	2		
	4	Sunchang2 (SC2)	200	307	6	N	600	3		
	5	Yeongam1 (YA1)	100	348	19	NW	400	1		
	6	Yeongam2 (YA2)	200	361	19	N	700	4		
	7	Suncheon1 (SCn1)	400	464	12	NE	550	3		
	8	Suncheon2 (SCn2)	200	465	19	SW	600	2		
	9	Namhae1 (NH1)	200	160	12	NE	850	2	29.8 13.9–51.6	18.8 12.7–27.4
	10	Namhae2 (NH2)	100	167	12	NE	500	2		
	11	Jejusi1 (JJ1)	400	657	4	NW	425	1		
	12	Jejusi2 (JJ2)	400	666	12	NW	1,200	3		
	13	Seoqiposi1 (SQP1)	200	367	9	S	750	2		
	14	Seoqiposi2 (SQP2)	400	364	12	S	725	4		
	15	Seoqiposi3 (SQP3)	200	379	18	S	900	2		
	16	Seoqiposi4 (SQP4)	100	652	4	NW	800	1		
	17	Seoqiposi5 (SQP5)	300	481	4	W	1,400	4		
	18	Seoqiposi6 (SQP6)	1200	343	11	SE	1,392	2		

(a) *C. obtusa*(b) *C. japonica***Figure 2.** Frequency distribution of DBH class in *C. obtusa* and *C. japonica*.

시료 수집은 임목의 생장이 왕성한 시기인 6~10월 사이에 실시하였고 GPS를 활용하여 표준지의 위치 정보를 취득하였으며, 임분밀도, 영급 및 경급을 고려하여 10×10 m~30×40 m 크기로 표준지를 구획하였다. 매목조사는 표준지 내 흉고직경을 전수 조사하였고 수고는 경급별 3분씩 조사하였다. 경급별 시료를 다양하게 수집하기 위하여 제 7차 국가산림자원조사(NIFoS, 2021)의 경급별 비율(소경급 30%, 중경급 50%, 대경급 20%)을 우선적으로 고려하여 소경급, 중경급, 대경급의 수집 비율을 구분한 후, 다시 각 경급별로 본수를 할당하였다. 편백 소경급 22본, 중경급 42본, 대경급 36본으로 총 100본, 삼나무 소경급 4본, 중경급 26본, 대경급 20본으로 표준목 50본을 조사·수집하였다(Figure 2). 표본목 선정 시 편백과 삼나무의 중·대경급별 비율이 소경급 보다 높은 이유는 현재 40년생 이상의 임목이 주로 분포하고 있으며 벌채 시기에 도달했기 때문이다. 편백과 삼나무의 생중량은 현장에서 벌채한 임목의 수간 무게를 측정하였으며, 원판(Disk)은 후버식에 의해 지상으로부터 0.2 m 높이에서 2 m 간격으로 절단하였고 원판의 두께는 건중량 측정을 위하여 5 cm 단위로

통일하였다. 개체목당 평균 원판 개수는 편백 10개, 삼나무 11개로 나타났으며 수집된 원판 시료는 수간석해에 활용, 수피외·내 직경, 재적, 연륜수 등을 측정하였다(NIFoS, 2007). 그리고 대형 건조기에서 105°C로 설정하여 수분이 완전히 제거되는 향량에 도달할 때까지 건조, 건중량을 측정한 후 건중량 대 생중량 비를 산출하였다(NIFoS, 2007). 또한, 표본목별 임목전체 중량, 중량 추정식, 줄기밀도를 산출하였다.

2. 분석방법

1) 임목 생중량과 건중량 추정식 및 통계적 검증

임목의 생중량과 건중량 추정식은 흉고직경을 변수로 하는 $W=f(D)$ 식 4개와 흉고직경과 수고를 이용하는 $W=f(D, H)$ 식 4개, 총 8개식(Table 2) 활용하였다(Lee et al., 2002). 이 모형은 간재적 및 건중량을 추정하는데 주로 사용되고 있으며 다양한 연구에서 정확도를 인정받고 있다(Avery and Burkhart, 2002; Husch et al., 2003, Son et al., 2011). 추정식에 대한 적합성을 검증하기 위해 적합도지수(Fitness

Table 2. The eight stem weight equations in *C. obtusa* and *C. japonica* stand.

Equations(variable D only)		Equations(variables D and H)	
$W = a + bD^2$	(1)	$W = bD^2H$	(5)
$W = aD + bD^2$	(2)	$W = a + bD^2H$	(6)
$W = a + bD + cD^2$	(3)	$W = a(D^2H)^b$	(7)
$W = aD^b$	(4)	$W = aD^bH^c$	(8)

Note) D(DBH)=Diameter outside bark at breast height(1.2 m), H=Tree height, W = Total weight of stem, a, b, c = Model parameters

Index, FI), 오차제곱근(Root mean square error), 표준오차와 잔차도 등을 산출하여 최적의 추정식을 선정하였다(Lee et al., 2002; Parresol, 1999, Schlaegel, 1984). 추정된 값이 모수의 참값에 대하여 평균적인 과소 과대치가 나타나는지 확인하고자 편의(Bias)와 추정치 표준오차(Standard error of estimate, SEE)를 비교하여 적합성을 설명하였다. 통계량은 추정치와 실측치 차이를 나타내는 것으로 “0”에 가까울수록 높은 정확도를 나타낸다. 또한, 관련된 통계분석은 R 프로그램(Version 4.4.2)으로 분석하였다.

$$FI = 1 - \left[\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \right]$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / n}$$

여기서 Y_i , $\hat{Y}_i$, $\bar{Y}_i$ = 관측 임목의 중량 측정치, 추정치, 평균값

2) 임목의 생중량 및 건중량표 작성

임목의 중량표 작성을 위해 흉고직경 1변수식과 흉고직경과 수고 2변수식을 이용하여 중량을 추정하는 최적식을 산출하였으며 편백과 삼나무 생중량과 건중량표를 작성하였다. 임목의 생중량과 건중량 표는 사용자의 편의를 위하여 흉고직경 1변수만 측정하거나 흉고직경과 수고 모두를 측정하였을 때 중량을 산출할 수 있도록 2개 정보 모두를 제공하고 작성하였다. 또한, 제8차 국가산림자원 조사 자료를 활용하여 현실임분에서 확인되고 있는 흉고직경과 수고 범위를 중량표에서 색깔을 다르게 표시하였다.

결과 및 고찰

1. 임목 중량 추정식 도출

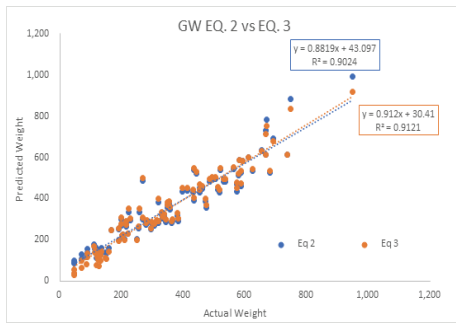
1) 임목 생중량 추정식 및 통계적 검증

(1) 흉고직경 1변수 추정식 및 검증

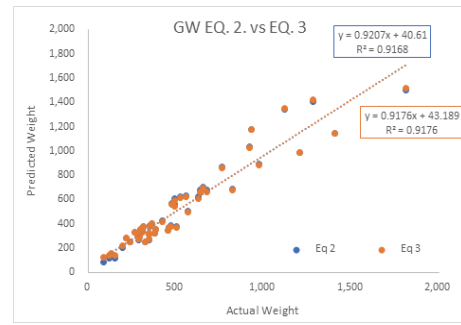
편백과 삼나무의 생중량을 추정하기 위해 흉고직경 1변수만을 이용한 4개 추정식의 계수 및 적합도 검증 결과는 Table 3과 같다. 흉고직경 1변수만을 이용한 4개 생중량 추정식의 적합도지수는 편백 0.89~0.91, 삼나무 0.916~0.918 범위로 나타났으며, RMSE는 각각 58.4~63.3, 101.9~102.7, SEE는 각각 17.2~18.6, 20.1~20.3 범위에 있는 것으로 확인되었다. 편백 추정식의 적합도지수는 4개 식 모두 거의 차이가 없었으나, SEE 등 통계량과 추정식에 의해 추정된 중량표의 이상치 유무를 종합적으로 고려하여 식 (3)을 두 수종의 생중량을 추정하는데 가장 적합한 것으로 판단하였다. 기존 연구 결과, 일본잎갈나무와 리기다소나무는 통계량과 이상치 유무를 종합적으로 판단하였을 때 식 (2)가 가장 적합한 것으로(Kang et al., 2023) 나타났으며 본 연구와는 동일한 패턴을 보이지 않았다. 이는 통계량에는 큰 차이가 없지만 여러 이상치 등을 고려하여 식 (2)와 식 (3)에 대한 적합도 검증 비교를 통해 최적의 식을 산출하였고 그 비교 결과는 Figure 3과 같다. 4개 식에 대한 실측치와 추정치 간 잔차를 도식화하였으며 그 결과는 Figure 4와 같다. 편백 및 삼나무의 실측치와 추정치 간의 잔차도에서 4개의 추정식 모두 “0”을 중심으로 대부분 잔차가 고르게 분포하고 있으나, 경급이 증가할수록 잔차의 폭이 증가하는 경향을 보였다. 특히 삼나무는 흉고직경 30 cm 이상에서 잔차폭이 더 큰 경향을 보였으며 이는 경급을 고르게 분포하도록 표준목을 선정

Table 3. Green weight equation and statistics information using variable DBH.

Equations	Species	Parameters			Statistic		
		a	b	c	FI	RMSE	SEE
$W = a + bD^2$	<i>C. obtusa</i>	34.0036	0.4505		0.8968	63.2761	18.5683
	<i>C. japonica</i>	-26.3529	0.5686		0.9163	102.6871	20.2071
$W = aD + bD^2$	<i>C. obtusa</i>	3.4547	0.3775		0.9024	61.7258	18.1134
	<i>C. japonica</i>	-1.9292	0.5998		0.9168	102.3893	20.1485
$W = a + bD + cD^2$	<i>C. obtusa</i>	-180.1310	17.4197	0.1275	0.9121	58.3844	17.2218
	<i>C. japonica</i>	110.7304	-8.8773	0.7002	0.9176	101.8754	20.2641
$W = aD^b$	<i>C. obtusa</i>	1.2249	1.7344		0.9053	60.5980	17.7824
	<i>C. japonica</i>	0.3563	2.1177		0.9173	102.0773	20.0871

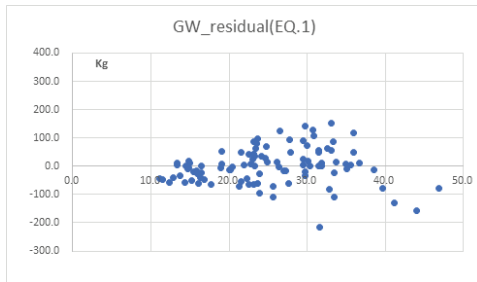


(a) Compare weight in *C. obtusa*

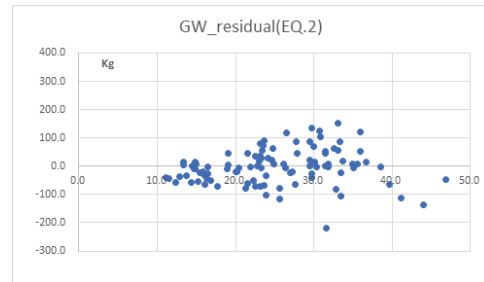


(b) Compare weight in *C. japonica*

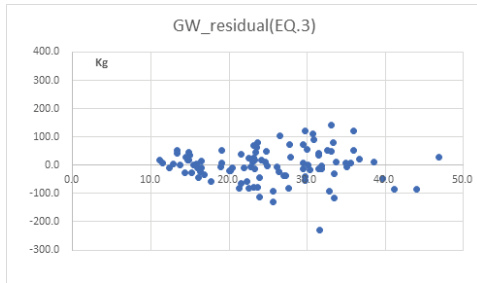
Figure 3. Compare graph for green weight estimation equations using EQ 2 and EQ3 in *C. obtusa* and *C. japonica*.



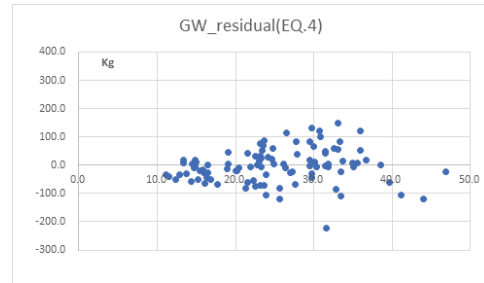
(a) Residual on EQ.1 in *C. obtusa*



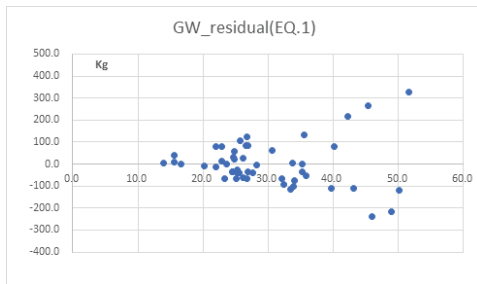
(b) Residual on EQ.2 in *C. obtusa*



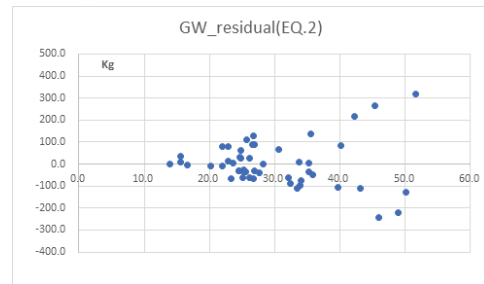
(c) Residual on EQ.3 in *C. obtusa*



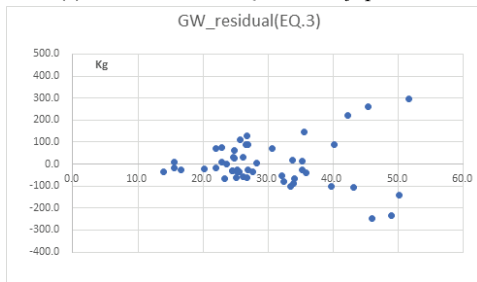
(d) Residual on EQ.4 in *C. obtusa*



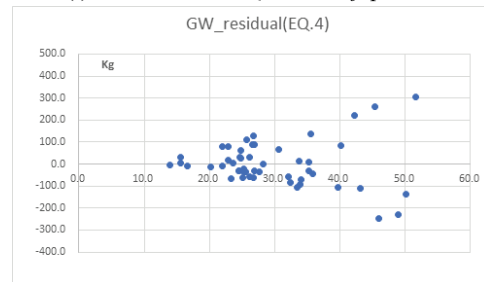
(e) Residual on EQ.1 in *C. japonica*



(f) Residual on EQ.2 in *C. japonica*



(g) Residual on EQ.3 in *C. japonica*



(h) Residual on EQ.4 in *C. japonica*

Figure 4. Residual scatter diagram for green weight estimation equations using DBH in *C. obtusa* and *C. japonica*.

하였음에도 불구하고 편백 직경 분포 36~46 cm 10본, 삼나무 36~52 cm 13본으로 표준목 선정 및 개체수 분포가 많지 않아 잔차 발생 폭이 더 큰 것으로 판단되며 지형적, 환경적인 원인 등도 발생 원인으로 판단된다. 또한, 추정식 (1)~(4)의 잔차가 모두 유사한 패턴을 보이고 있으나 추정식 (3)이 경급이 작을 때 다른 추정식에 비해 “0”을 중심으로 다소 균형있게 분포하고 있는 경향을 보였다. 편백과 삼나무의 경우 대부분 중경목 이상 대경목이 많이 분포하고 있기 때문에 40 cm 이상의 개체 표준목을 확대하여 중량식 및 중량표 개발 시 정확성을 고도화 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

(2) 흉고직경과 수고 2변수 추정식 및 검증

편백 및 삼나무의 생중량 산출을 위해 흉고직경과 수고 2변수를 이용한 4개 추정식에 대한 계수 및 적합도 지수 결과는 Table 4와 같다. 흉고직경과 수고 2변수에 의한 생중량 추정식의 적합도지수는 편백 0.92~0.97, 삼나무 0.958~0.969 범위내로 추정식 (5)~(8) 간에는 큰 차이를 보이지 않았으며, RMSE는 각각 34.5~54.8, 62.1~72.6, SEE는 각각 10.2~16.0, 12.3~14.1 범위에 있는 것으로 나타났다. 흉고직경만을 활용한 1변수 추정식보다는 2변수 추정식의 적합도 지수가 높아짐을 확인할 수 있는데, 이는 수고가 추가됨에 따라 설명력이 높아진 것으로 판단된다. 편백과 삼나무의 생중량 최적 추정식은 적합도 지수와 오차 등의 통계량을 종합적으로 고려하였을 때 식 (8)이 적합한 것으로 나타났다. 이는 소나무, 일본잎갈나무, 리기다소나무에 대한 생중량을 추정, 흉고직경과 수고를 이용한 2변수 추정식이 적합하다고 보고한 결과와 유사한 경향을 보였다(Kang et al., 2022; Kang et al., 2023). 또한 우리나라 주요 7개 수종에 대한 생중량 추정에서도 흉고직경과 수고 2변수 추정식이 가장 적합하다고 보고한 결과와 유사하였다(Lee et al., 2002). 추정식에 대한 실측치와 추정치 간의 잔차를 도식화한 결과는 Figure 5와 같다. 흉고직경과 수고 2변수에 의한 중량 추정식의 잔차도 식 (5)~(8)은 모두 유사한 경향을 보였다. 삼나무는 중경급 이상에서 잔차의 폭이 증가하는 경향을 보였으며 편백은 상대적으로 중경급 이상에서도 안정된 경향을 보였다. 흉고직경 1변수식보다 흉고직경과 수고의 2변수식의 잔차가 “0”을 중심으로 밀집되어 있는 경향을 보였다. 이는 일본잎갈나무와 리기다소나무에서 흉고직경과 수고 2변수식의 잔차가 다소 “0”을 중심으로 균형적으로 분포하는 경향을 보인다는 결과(Kang et al., 2023)와 유사한 것으로 나타났다.

2) 건중량 추정식 도출 및 통계적 검증

(1) 흉고직경 1변수 추정식 및 검증

편백 및 삼나무에 대한 건중량을 산출하기 위해 흉고직경 1변수를 이용한 4개 추정식의 계수 및 적합도 검증 결과는 Table 5와 같다. 특히 건중량 산정 추정식 도출은 온실가스 흡수원으로서 중요한 역할과 산림부문 탄소흡수량 산출을 통해 줄기 바이오매스를 추정하는데 기초 및 기본 자료이다(Kwon and Lee, 2006; Lee and Chung, 2003; Son et al., 2010). 흉고직경을 이용하는 4개 생중량 추정식의 적합도는 편백 0.88~0.89, 삼나무 0.91~0.92 범위내로 추정식 (1)~(4) 간에는 큰 차이를 보이지 않았으며, RMSE는 각각 37.7~39.3, 43.3~44.6, SEE는 각각 20.5~21.3, 20.4~20.8 범위에 있는 것으로 나타났다. 최적 건중량 추정식 도출에 있어서 FI, RMSE, SEE 및 추정된 임목 중량값의 적합성 등을 종합적으로 고려하여 흉고직경 1변수만을 이용하는 경우 식 (3)이 두 수종 모두에서 건중량을 추정하는데 가장 적합한 추정식으로 확인되었다. 이들 식에 대한 실측치와 추정치 간 잔차도는 Figure 6과 같다. 편백의 건중량을 추정할 수 있는 4개 모두 생중량과 마찬가지로 경급이 증가할수록 잔차폭이 다소 증가하는 유사한 경향을 보였으며, (1)~(4)식에서 낮은 경급(10~20 cm)에서 “0”을 중심으로 균일한 잔차 분포 경향을 보였다. 삼나무도 편백과 마찬가지로 경급이 증가할수록 잔차폭이 증가하는 경향을 보였으며, 식 (1)~(4)간에는 큰 차이를 보이지 않았다.

(2) 흉고직경과 수고 2변수 추정식 및 검증

편백과 삼나무에 대한 건중량을 산출하기 위하여 흉고직경과 수고 2변수를 이용한 4개 추정식의 계수 및 적합도 검증 결과는 Table 6과 같다. 건중량을 추정하는 4개 추정식의 적합도는 편백 0.91~0.94, 삼나무 0.95~0.96 범위내로 추정식 (5)~(8) 간에는 큰 차이를 보이지 않았으며, RMSE는 각각 27.6~33.8, 29.8~34.0, SEE는 각각 15.0~18.2, 13.9~15.7 범위에 있는 것으로 나타났다. 편백의 건중량 추정식 (5)~(8)의 FI는 유사하였으나, RMSE, SEE의 적합도는 추정식 (8)이 높은 것으로 나타났다. 삼나무는 FI, RMSE는 유사하였으나, SEE 등 종합적으로 고려하여 추정식 (6)이 적합도가 높은 것으로 나타났으나 식 (6)은 흉고직경 20 cm 이하에서 과대값을 도출하고 있어 건중량 추정식에서 최적식으로 채택하기에는 적절하지 않다고 판단하여 최적식을 추정식 (8)로 선정하였다. 기존 연구 결과, 일본잎갈나무와 리기다소나무에서 추정식 (6)은 흉고직경 20 cm 이하에서 과소값을 도출하고 있어 건중량

Table 4. Green weight equation and statistics information using variable DBH and Height.

Equations	Species	Parameters			Statistic		
		a	b	c	FI	RMSE	SEE
$W = bD^2H$	<i>C. obtusa</i>		0.0261		0.9223	54.8841	16.0233
	<i>C. japonica</i>		0.0262		0.9581	72.6318	14.1430
$W = a + bD^2H$	<i>C. obtusa</i>	59.6222	0.0228		0.9508	43.7004	12.8238
	<i>C. japonica</i>	58.3297	0.0242		0.9678	63.6513	12.5255
$W = a(D^2H)^b$	<i>C. obtusa</i>	0.1952	0.7971		0.9643	37.2088	10.9189
	<i>C. japonica</i>	0.0744	0.9002		0.9689	62.5546	12.3097
$W = aD^bH^c$	<i>C. obtusa</i>	0.1090	1.5081	1.0972	0.9692	34.5350	10.1869
	<i>C. japonica</i>	0.0659	1.7547	0.9951	0.9694	62.0668	12.3457

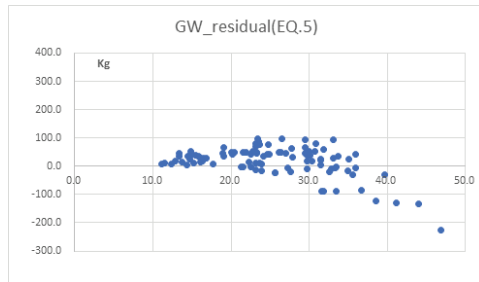
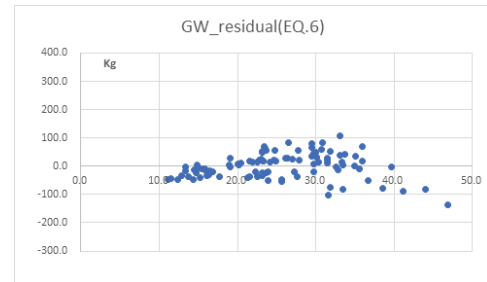
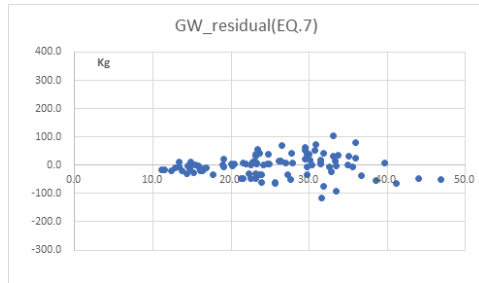
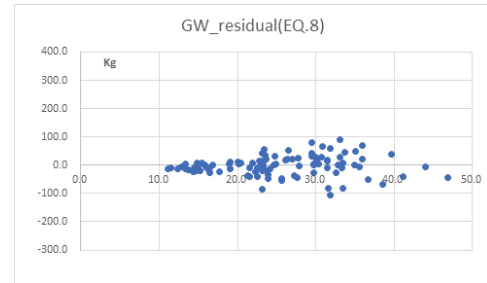
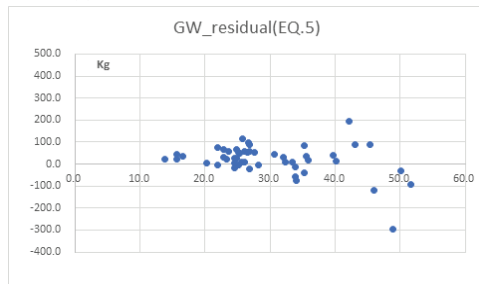
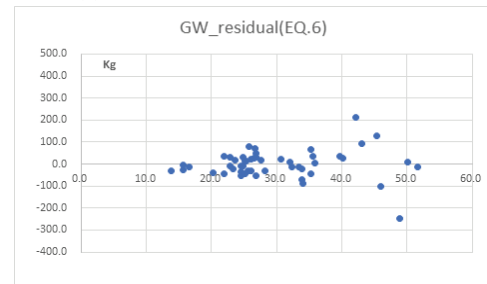
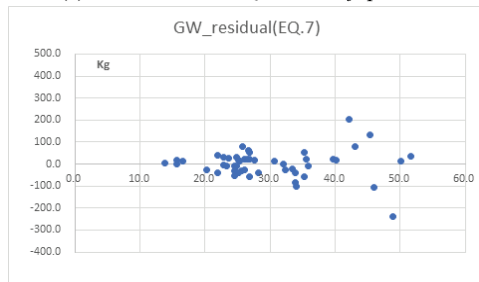
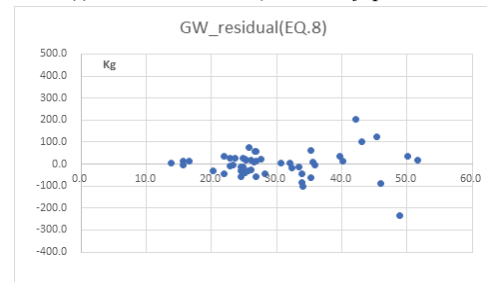

 (a) Residual on EQ.5 in *C. obtusa*

 (b) Residual on EQ.6 in *C. obtusa*

 (c) Residual on EQ.7 in *C. obtusa*

 (d) Residual on EQ.8 in *C. obtusa*

 (e) Residual on EQ.5 in *C. japonica*

 (f) Residual on EQ.6 in *C. japonica*

 (g) Residual on EQ.7 in *C. japonica*

 (h) Residual on EQ.8 in *C. japonica*

 Figure 5. Residual scatter diagram for green weight estimation equations using DBH and height in *C. obtusa* and *C. japonica*.

Table 5. Dry weight equation and statistics information using variable DBH.

Equations	Species	Parameters			Statistic		
		a	b	c	FI	RMSE	SEE
$W = a + bD^2$	<i>C. obtusa</i>	11.8349	0.2535		0.8769	39.3074	21.3006
	<i>C. japonica</i>	-8.2607	0.2374		0.9100	44.5881	20.7596
$W = aD + bD^2$	<i>C. obtusa</i>	1.2882	0.2253		0.8795	38.8932	21.0761
	<i>C. japonica</i>	-0.7467	0.2509		0.9109	44.3742	20.6600
$W = a + bD + cD^2$	<i>C. obtusa</i>	-85.1369	7.8886	0.1072	0.8866	37.7230	20.5482
	<i>C. japonica</i>	105.3408	-7.3567	0.3464	0.9152	43.2904	20.3733
$W = aD^b$	<i>C. obtusa</i>	0.5202	1.8071		0.8819	38.5125	20.8698
	<i>C. japonica</i>	0.1427	2.1314		0.9122	44.0426	20.5056

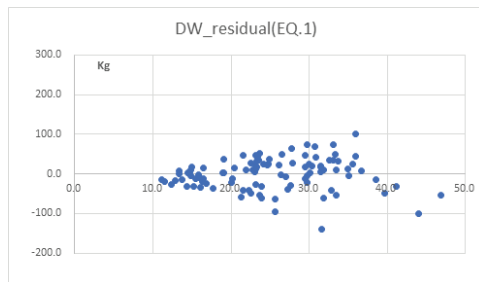
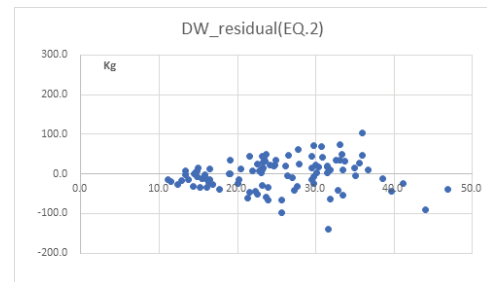
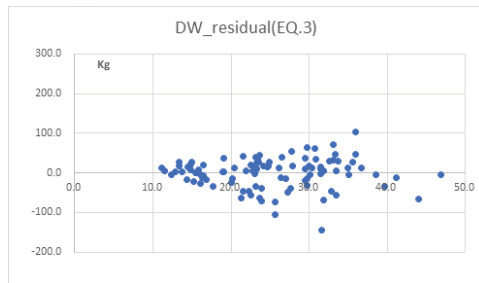
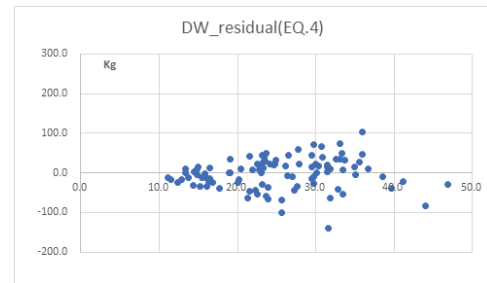
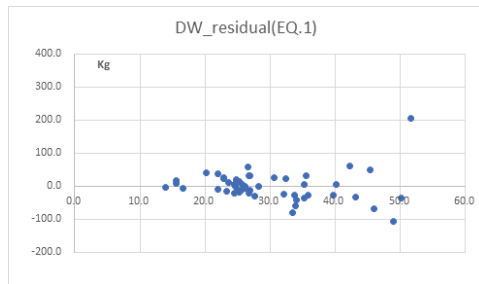
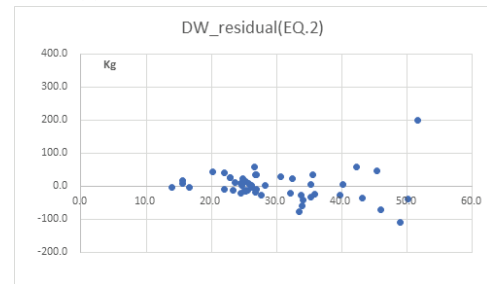
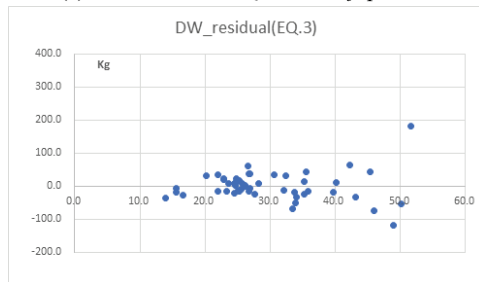
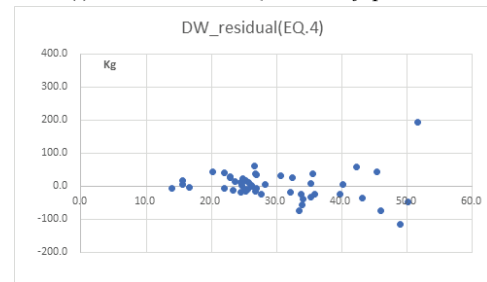
(a) Residual on EQ.1 in *C. obtusa*(b) Residual on EQ.2 in *C. obtusa*(c) Residual on EQ.3 in *C. obtusa*(d) Residual on EQ.4 in *C. obtusa*(e) Residual on EQ.1 in *C. japonica*(f) Residual on EQ.2 in *C. japonica*(g) Residual on EQ.3 in *C. japonica*(h) Residual on EQ.4 in *C. japonica***Figure 6. Residual scatter diagram for dry weight estimation equations using DBH in *C. obtusa* and *C. japonica*.**

Table 6. Dry weight equation and statistics information using variable DBH and Height.

Equations	Species	Parameters			Statistic		
		a	b	c	FI	RMSE	SEE
$W = bD^2H$	<i>C. obtusa</i>		0.0143		0.9088	33.8388	18.2433
	<i>C. japonica</i>		0.0110		0.9477	33.9968	15.6626
$W = a + bD^2H$	<i>C. obtusa</i>	26.5533	0.0128		0.9262	30.4365	16.4935
	<i>C. japonica</i>	27.2360	0.0101		0.9598	29.8151	13.8815
$W = a(D^2H)^b$	<i>C. obtusa</i>	0.0780	0.8288		0.9360	28.3349	15.3546
	<i>C. japonica</i>	0.0297	0.9054		0.9571	30.7968	14.3385
$W = aD^bH^c$	<i>C. obtusa</i>	0.0484	1.5860	1.0760	0.9392	27.6319	15.0514
	<i>C. japonica</i>	0.0288	1.7993	0.9294	0.9571	30.7858	14.4884

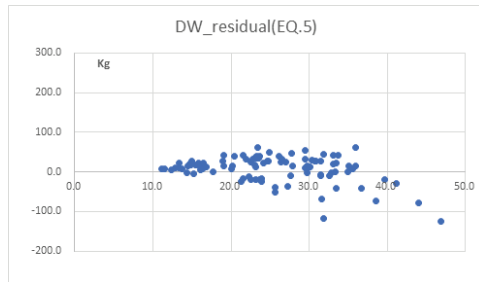
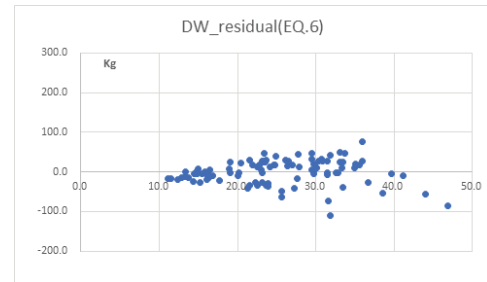
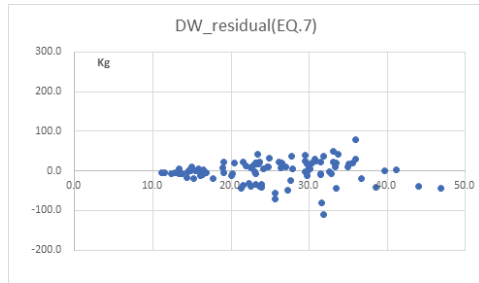
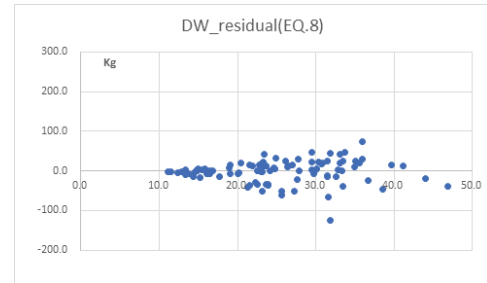
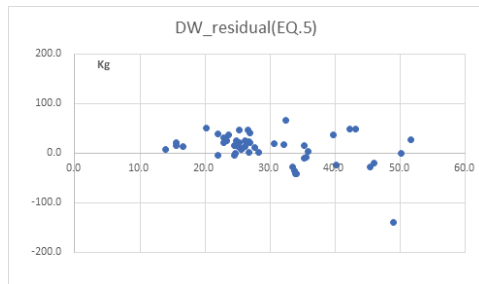
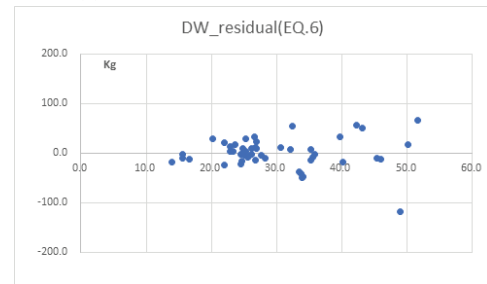
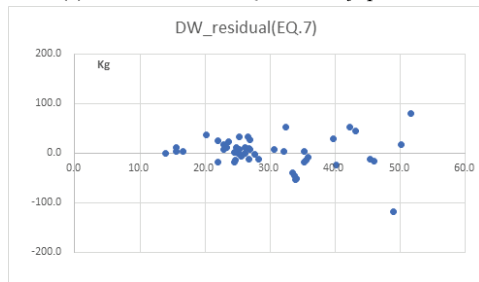
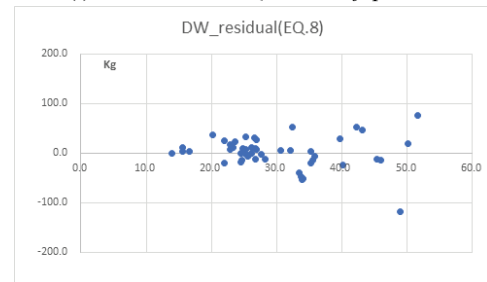

 (a) Residual on EQ.5 in *C. obtusa*

 (b) Residual on EQ.6 in *C. obtusa*

 (c) Residual on EQ.7 in *C. obtusa*

 (d) Residual on EQ.8 in *C. obtusa*

 (e) Residual on EQ.5 in *C. japonica*

 (f) Residual on EQ.6 in *C. japonica*

 (g) Residual on EQ.7 in *C. japonica*

 (h) Residual on EQ.8 in *C. japonica*

 Figure 7. Residual scatter diagram for dry weight estimation equations using DBH and Height in *C. obtusa* and *C. japonica*.

추정식에서 제외하였다는 판단 결과(Kang et al., 2023)가 있었는데 추정식 (6)은 과소치 또는 과대치가 나타날 가능성이 있어 최적식에서 제외함이 적절하다고 판단하였다. 또한, 현실에서 사용하는 추정식 (8)은 현재 사용하고 있는 중량표를 만들 때 최적의 식으로 도출된 식으로(NIFoS, 2001), 본 연구에서도 편백과 삼나무의 건중량 산정을 위한 최적식으로 확인되었다. 기존 연구 결과, 소나무, 일본잎갈나무, 리기다소나무에서도 식 (8)이 가장 적합한 것으로 밝힌 바(Kang et al., 2022; 2023)와 동일한 결과가 나타났다. 이들 식에 대한 실측치와 추정치 간 잔차도는 Figure 7과 같다. 잔차도 분석에 있어 추정식 (5)~(8)의 잔차 패턴은 중경급 이상에서 잔차 폭이 증가하는 경향을 보였다. 이는 대경급 이상의 표준목이 고르게 분포하지 않아 나타난 결과로 판단된다. 편백과 삼나무는 경급이 증가할수록 잔차 폭이 증가하는 경향을 보였으나, 추정식 (5)~(8)간에는 모두 유사한 경향을 보였다.

2. 줄기밀도

줄기밀도는 줄기의 건중량(바이오매스)을 재적으로 나타내는 값($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)으로서 줄기의 건중량에 대한 줄기 재적비로 표현된다. 편백과 삼나무의 평균 줄기밀도는 각각 $0.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $0.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 로 나타났다(Figure 8). 임목의 줄기밀도는 연료폭과 연령 등에 밀접한 관련이 있으며 기후조건 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는 것으로 확인된다(Tobin and Nieuwenhuis, 2007). 기존 연구 결과와 비교하면, 편백은 기존 연구에서 0.427 로 본 연구에서 낮은 것으

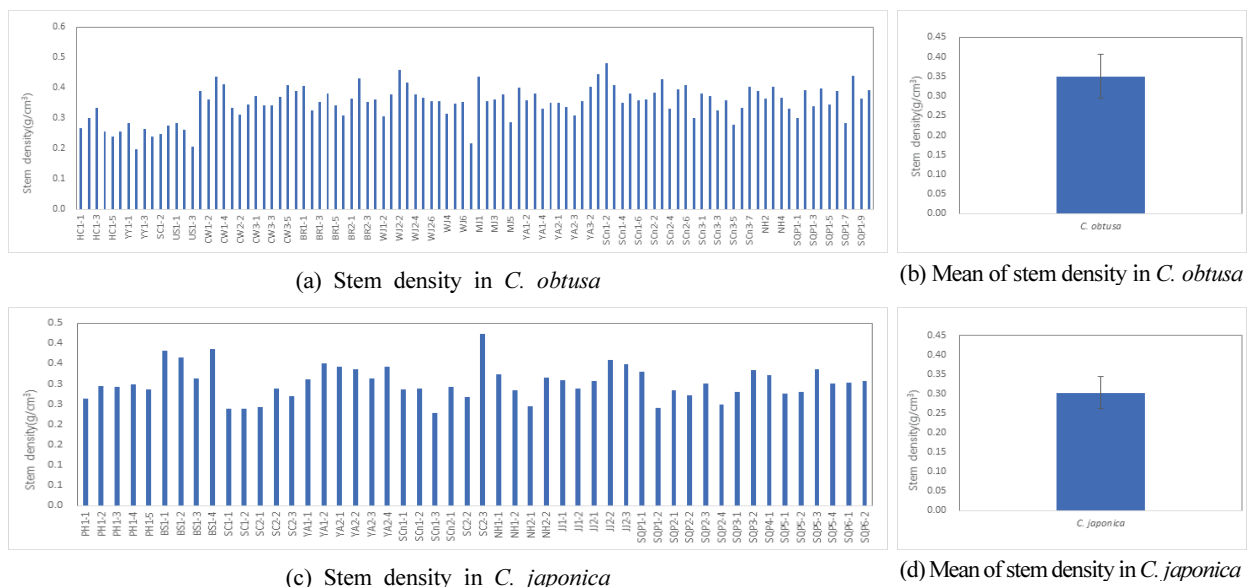
로 확인되었으며(NIFoS, 2014) 삼나무는 $0.24 \sim 0.41$ (Kim et al., 2011; Lim et al., 2013; Seo and Lee, 2013; Gwon et al., 2014)로 본 연구와 비슷한 수치거나 높은 것으로 확인되었다. 이는 조사 대상지의 임령과 임분밀도 등 차이가 원인인 것으로 판단된다. 또한 건중량 대 생중량 비를 분석한 결과 편백은 0.53 , 삼나무는 0.43 인 것으로 확인되었다(Figure 9).

3. 중량표 개발

1) 생중량표

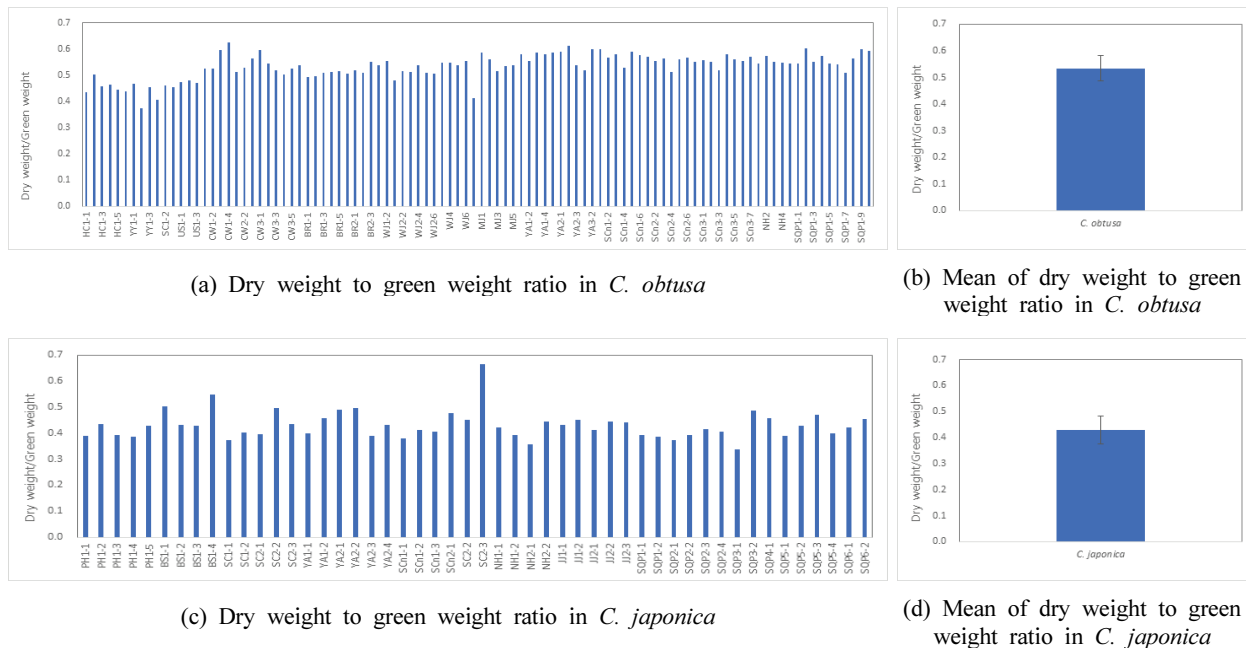
(1) 편백

편백의 생중량 추정에 가장 적합한 식($W = a + bD + cD^2$)을 이용하여 중량표를 도출한 결과는 Table 7과 같다. Table 8에서는 흉고직경 1변수만 사용하는 이용자를 위하여 흉고직경 1변수 생중량을 추정하여 중량값을 제시하였으며, 흉고직경과 수고 2변수에 의한 최적의 생중량 추정식의 중량값 모두 제공한다. 중량표의 값들 중 청서로 표시한 범위내의 값들은 제8차 국가산림자원조사 자료의 편백 자료를 분석하여 현실임분에서 확인되고 있는 흉고직경과 수고 범위의 실질적인 생중량의 범위를 표시한 자료이다. 흉고직경 범위는 $6 \sim 59 \text{ cm}$ 로 나타났으며 40 cm 이상의 대경급도 다수 분포하고 있으나 주로 사용하는 흉고직경급까지의 범위로 중량표를 제시하였다.



* Mean±standard Deviation

Figure 8. Stem density in *C. obtusa* and *C. japonica*.



* Mean±standard Deviation

Figure 9. Dry weight to green weight ratio in *C. obtusa* and *C. japonica*.

(2) 삼나무

삼나무도 흉고직경 1변수와 흉고직경과 수고 2변수를 이용한 생증량을 추정하여 나타냈으며, 그 결과는 Table 8과 같다. 삼나무도 편백과 동일하게 제8차 국가산림자원 조사 삼나무 자료를 분석하여 현실임분에서 확인되고 있는 흉고직경과 수고 범위의 실질적인 생증량을 청서로 표시하였다. 삼나무의 흉고직경 분포는 6~81 cm까지 분포하고 있어 대경급이 다수 분포하고 있기는 하나 주로 사용하는 흉고직경급까지의 범위로 증량표를 제시하였다. 다만, 40 cm 이상의 증량표가 필요한 경우 추정식을 사용하여 산출이 가능하기 때문에 이용자들이 사용함에는 어려움이 없을 것으로 판단된다.

2) 건증량표

(1) 편백

편백의 건증량 산정을 위해 도출된 최적식 $8(W = aD^bH^c)$ 을 이용하여 건증량을 산정하였으며 그 결과는 Table 9와 같다.

(2) 삼나무

Table 10은 삼나무의 건증량 추정식 $8(W = aD^bH^c)$ 이 더 적합한 것으로 나타나 8개 식을 이용하여 건증량표를 도출하였다.

결론

편백과 삼나무는 우리나라 주요 조림수종으로 지금까지 건축재, 가구재 등으로 지속적으로 사용되어 왔다. 현재 사용되고 있는 편백과 삼나무의 생증량 및 건증량표는 편백류로 분류된 자료를 사용하고 있어 현재의 임분 상태를 반영하지 못하고 있는 한계가 있었다. 현재 우리나라 산림의 영급과 경급 등 임분 상태를 고려, 성숙한 산림구조를 현실 임분에 반영하여 증량표를 개발하고자 하였다.

편백과 삼나무의 벌기령은 국유림의 경우 각각 60년, 50년이며 공사유림의 경우 40년, 30년으로 1960년 이후 조림된 상황으로 현재 벌기령에 도달하여 벌채 등이 활발하게 진행되며 생산된 원목과 부산물에 대한 거래 등이 재적 및 증량단위로 판매되고 있다. 증량 단위의 거래도 증가하고 있어 임목의 증량단위에 대한 정보 제공이 지속적으로 필요한 실정이다. 특히 개체목 생증량 및 건증량에 대한 8개 추정식 산출 이후에 활용 범위가 다양함에도 불구하고 편백 및 삼나무는 편백류로 통합되어 사용되고 있어 현장에서 필요한 주요 수종에 대한 정보를 정확하게 제공해 주지 못하는 한계가 있었다. 따라서 본 연구는 편백과 삼나무의 생증량과 건증량을 흉고직경 1변수, 흉고직경과 수고 2변수로 구분하여 전국에 고르게 분포한 자료를 활용하여 증량 정보를 취득하고 실무현장에서 이용할 수 있

Table 7. Green weight table in *C. obtusa*.

(Unit : kg)

DBH(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
DBH variable only	-	-	6.8	47.3	88.7	131.2	174.7	219.3	264.8	311.4	359.0	407.6	457.2	507.9	559.5	612.2	665.9	720.7
3	5.4	8.4	11.7	15.4	19.5	23.8	28.4	33.3	38.5	43.9	49.5	55.4	61.5	67.7	74.2	80.9	87.8	94.8
4	7.4	11.5	16.1	21.2	26.7	32.7	39.0	45.7	52.8	60.2	67.9	75.9	84.3	92.9	101.8	110.9	120.4	130.0
5	9.5	14.7	20.5	27.0	34.1	41.7	49.8	58.4	67.4	76.9	86.7	97.0	107.6	118.6	130.0	141.7	153.7	166.1
6	11.6	17.9	25.1	33.0	41.7	51.0	60.9	71.3	82.4	93.9	106.0	118.5	131.5	144.9	158.8	173.1	187.8	202.9
7	13.7	21.2	29.7	39.1	49.3	60.3	72.1	84.5	97.5	111.2	125.5	140.3	155.7	171.6	188.1	205.0	222.4	240.3
8	15.9	24.6	34.4	45.3	57.1	69.9	83.4	97.8	112.9	128.8	145.3	162.5	180.3	198.7	217.7	237.3	257.5	278.2
9	18.1	27.9	39.1	51.5	65.0	79.5	95.0	111.3	128.5	146.5	165.3	184.9	205.1	226.1	247.8	270.1	293.0	316.6
10	20.3	31.4	43.9	57.8	73.0	89.2	106.6	124.9	144.3	164.5	185.6	207.5	230.3	253.8	278.1	303.2	328.9	355.4
11	22.6	34.8	48.8	64.2	81.0	99.1	118.3	138.7	160.2	182.6	206.0	230.4	255.7	281.8	308.8	336.6	365.2	394.6
12	24.8	38.3	53.7	70.6	89.1	109.0	130.2	152.6	176.2	200.9	226.7	253.5	281.3	310.0	339.7	370.3	401.8	434.1
13	27.1	41.8	58.6	77.1	97.3	119.0	142.1	166.6	192.4	219.4	247.5	276.8	307.1	338.5	370.9	404.3	438.6	473.9
14	29.4	45.4	63.5	83.7	105.5	129.1	154.2	180.7	208.7	237.9	268.5	300.2	333.1	367.2	402.3	438.5	475.8	514.1
15	31.7	49.0	68.5	90.2	113.8	139.2	166.3	194.9	225.1	256.6	289.6	323.8	359.3	396.1	434.0	473.0	513.2	554.5
16	34.0	52.5	73.6	96.9	122.2	149.5	178.5	209.3	241.6	275.5	310.8	347.6	385.7	425.1	465.8	507.7	550.9	595.2
17	36.4	56.2	78.6	103.5	130.6	159.7	190.8	223.6	258.2	294.4	332.2	371.5	412.2	454.4	497.8	542.7	588.8	636.1
18	38.7	59.8	83.7	110.2	139.1	170.1	203.1	238.1	274.9	313.5	353.7	395.5	438.9	483.8	530.1	577.8	626.9	677.3
19	41.1	63.4	88.8	116.9	147.6	180.5	215.6	252.7	291.7	332.6	375.3	419.7	465.7	513.3	562.5	613.1	665.2	718.7
20	43.5	67.1	94.0	123.7	156.1	190.9	228.0	267.3	308.6	351.9	397.0	444.0	492.7	543.0	595.0	648.6	703.7	760.3
21	45.9	70.8	99.1	130.5	164.7	201.4	240.6	282.0	325.6	371.2	418.9	468.4	519.8	572.9	627.8	684.3	742.4	802.1
22	48.3	74.5	104.3	137.4	173.3	212.0	253.2	296.8	342.6	390.7	440.8	492.9	547.0	602.9	660.6	720.1	781.3	844.1
23	50.7	78.2	109.6	144.2	182.0	222.6	265.8	311.6	359.8	410.2	462.8	517.6	574.3	633.0	693.6	756.1	820.3	886.3
24	53.1	82.0	114.8	151.1	190.7	233.2	278.5	326.5	377.0	429.8	485.0	542.3	601.8	663.3	726.8	792.2	859.5	928.7
25	55.6	85.7	120.0	158.0	199.4	243.9	291.3	341.5	394.2	449.5	507.2	567.2	629.4	693.7	760.1	828.5	898.9	971.2
26	58.0	89.5	125.3	165.0	208.2	254.6	304.1	356.5	411.6	469.3	529.5	592.1	657.0	724.2	793.5	865.0	938.4	1013.9
27	60.5	93.3	130.6	172.0	217.0	265.4	317.0	371.5	429.0	489.1	551.9	617.1	684.8	754.8	827.1	901.5	978.1	1056.8
28	62.9	97.1	135.9	179.0	225.8	276.2	329.9	386.7	446.4	509.0	574.3	642.3	712.7	785.5	860.7	938.2	1017.9	1099.8
29	65.4	100.9	141.3	186.0	234.7	287.0	342.8	401.8	464.0	529.0	596.9	667.5	740.7	816.4	894.5	975.1	1057.9	1143.0
30	67.9	104.7	146.6	193.0	243.6	297.9	355.8	417.1	481.5	549.1	619.5	692.8	768.7	847.3	928.4	1012.0	1098.0	1186.3

* Indicated colors: Used of real stand range in dbh and height range

Table 8. Green weight table in *C. japonica*.

(Unit : kg)

DBH(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
DBH variable only	-	-	92.0	105.0	123.7	147.9	177.8	213.3	254.3	301.0	353.3	411.1	474.6	543.7	618.3	698.6	784.5	876.0
3	4.6	7.6	11.2	15.4	20.2	25.5	31.4	37.7	44.6	51.9	59.8	68.1	76.8	86.1	95.7	105.8	116.3	127.3
4	6.1	10.1	14.9	20.5	26.9	34.0	41.7	50.2	59.4	69.2	79.6	90.6	102.3	114.6	127.4	140.9	154.9	169.5
5	7.6	12.6	18.6	25.6	33.5	42.4	52.1	62.7	74.1	86.4	99.4	113.2	127.7	143.1	159.1	175.9	193.4	211.6
6	9.1	15.1	22.3	30.7	40.2	50.8	62.5	75.2	88.9	103.5	119.1	135.7	153.2	171.5	190.8	210.9	231.9	253.7
7	10.6	17.6	26.0	35.8	46.9	59.3	72.9	87.7	103.6	120.7	138.9	158.2	178.5	200.0	222.4	245.9	270.3	295.8
8	12.1	20.1	29.7	40.8	53.5	67.7	83.2	100.1	118.3	137.9	158.6	180.7	203.9	228.4	254.0	280.8	308.7	337.8
9	13.6	22.5	33.4	45.9	60.2	76.1	93.6	112.6	133.0	155.0	178.4	203.1	229.3	256.8	285.6	315.7	347.1	379.8
10	15.1	25.0	37.0	51.0	66.8	84.5	103.9	125.0	147.8	172.1	198.1	225.6	254.6	285.1	317.2	350.6	385.5	421.8
11	16.6	27.5	40.7	56.1	73.5	92.9	114.2	137.4	162.5	189.2	217.8	248.0	279.9	313.5	348.7	385.5	423.9	463.8
12	18.1	30.0	44.4	61.2	80.1	101.3	124.6	149.9	177.1	206.4	237.5	270.5	305.3	341.9	380.2	420.4	462.2	505.7
13	19.6	32.5	48.1	66.2	86.8	109.7	134.9	162.3	191.8	223.5	257.2	292.9	330.6	370.2	411.8	455.2	500.5	547.7
14	21.1	35.0	51.8	71.3	93.4	118.1	145.2	174.7	206.5	240.6	276.9	315.3	355.9	398.6	443.3	490.1	538.8	589.6
15	22.6	37.5	55.5	76.4	100.1	126.5	155.5	187.1	221.2	257.7	296.5	337.7	381.2	426.9	474.8	524.9	577.1	631.5
16	24.1	40.0	59.1	81.4	106.7	134.9	165.9	199.5	235.9	274.8	316.2	360.1	406.5	455.2	506.3	559.7	615.4	673.3
17	25.6	42.5	62.8	86.5	113.3	143.3	176.2	211.9	250.5	291.9	335.9	382.5	431.7	483.5	537.8	594.5	653.7	715.2
18	27.1	44.9	66.5	91.5	120.0	151.7	186.5	224.3	265.2	308.9	355.5	404.9	457.0	511.8	569.2	629.3	691.9	757.1
19	28.6	47.4	70.2	96.6	126.6	160.0	196.8	236.8	279.8	326.0	375.2	427.3	482.3	540.1	600.7	664.1	730.2	798.9
20	30.1	49.9	73.8	101.7	133.2	168.4	207.1	249.1	294.5	343.1	394.8	449.6	507.5	568.4	632.2	698.9	768.4	840.8
21	31.6	52.4	77.5	106.7	139.9	176.8	217.4	261.5	309.2	360.1	414.5	472.0	532.8	596.6	663.6	733.6	806.6	882.6
22	33.1	54.9	81.2	111.8	146.5	185.2	227.7	273.9	323.8	377.2	434.1	494.4	558.0	624.9	695.1	768.4	844.8	924.4
23	34.6	57.4	84.8	116.8	153.1	193.6	238.0	286.3	338.4	394.3	453.7	516.7	583.2	653.2	726.5	803.1	883.1	966.2
24	36.1	59.8	88.5	121.9	159.8	201.9	248.3	298.7	353.1	411.3	473.4	539.1	608.5	681.4	757.9	837.9	921.3	1008.0
25	37.6	62.3	92.2	126.9	166.4	210.3	258.6	311.1	367.7	428.4	493.0	561.4	633.7	709.7	789.3	872.6	959.4	1049.8
26	39.1	64.8	95.9	132.0	173.0	218.7	268.9	323.5	382.4	445.4	512.6	583.8	658.9	737.9	820.8	907.3	997.6	1091.6
27	40.6	67.3	99.5	137.0	179.6	227.0	279.2	335.9	397.0	462.5	532.2	606.1	684.1	766.2	852.2	942.1	1035.8	1133.4
28	42.1	69.8	103.2	142.1	186.2	235.4	289.5	348.2	411.6	479.5	551.8	628.5	709.3	794.4	883.6	976.8	1074.0	1175.1
29	43.6	72.2	106.9	147.1	192.9	243.8	299.7	360.6	426.3	496.6	571.4	650.8	734.6	822.6	915.0	1011.5	1112.2	1216.9
30	45.1	74.7	110.5	152.2	199.5	252.1	310.0	373.0	440.9	513.6	591.0	673.1	759.8	850.9	946.4	1046.2	1150.3	1258.6

Table 9. Dry weight table in *C. obtusa*.

(Unit : kg)

DBH(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
DBH variable only	-	-	4.5	25.0	46.3	68.5	91.6	115.5	140.3	165.9	192.4	219.8	248.0	277.1	307.0	337.8	369.4	401.9
3	2.7	4.3	6.1	8.1	10.4	12.8	15.5	18.3	21.2	24.4	27.7	31.1	34.7	38.5	42.4	46.4	50.6	54.8
4	3.7	5.8	8.3	11.1	14.1	17.5	21.1	24.9	29.0	33.2	37.7	42.4	47.4	52.5	57.8	63.2	68.9	74.7
5	4.7	7.4	10.5	14.1	18.0	22.2	26.8	31.6	36.8	42.3	48.0	54.0	60.2	66.7	73.4	80.4	87.6	95.0
6	5.7	9.0	12.8	17.1	21.9	27.0	32.6	38.5	44.8	51.4	58.4	65.7	73.3	81.2	89.3	97.8	106.6	115.6
7	6.7	10.6	15.1	20.2	25.8	31.9	38.5	45.5	52.9	60.7	68.9	77.5	86.5	95.8	105.5	115.5	125.8	136.5
8	7.8	12.3	17.5	23.3	29.8	36.8	44.4	52.5	61.0	70.1	79.6	89.5	99.8	110.6	121.8	133.3	145.2	157.6
9	8.8	13.9	19.8	26.5	33.8	41.8	50.4	59.6	69.3	79.5	90.3	101.6	113.3	125.5	138.2	151.3	164.9	178.8
10	9.9	15.6	22.2	29.7	37.9	46.8	56.5	66.7	77.6	89.1	101.2	113.8	126.9	140.6	154.8	169.5	184.7	200.3
11	11.0	17.3	24.6	32.9	42.0	51.9	62.6	73.9	86.0	98.7	112.1	126.1	140.6	155.8	171.5	187.8	204.6	221.9
12	12.0	19.0	27.0	36.1	46.1	57.0	68.7	81.2	94.4	108.4	123.1	138.4	154.4	171.1	188.4	206.2	224.7	243.7
13	13.1	20.7	29.5	39.4	50.3	62.1	74.9	88.5	102.9	118.2	134.2	150.9	168.3	186.5	205.3	224.8	244.9	265.7
14	14.2	22.4	31.9	42.6	54.4	67.3	81.1	95.8	111.5	128.0	145.3	163.4	182.3	202.0	222.3	243.4	265.2	287.7
15	15.3	24.1	34.4	45.9	58.6	72.5	87.3	103.2	120.1	137.8	156.5	176.0	196.4	217.5	239.5	262.2	285.7	309.9
16	16.4	25.9	36.9	49.2	62.8	77.7	93.6	110.6	128.7	147.7	167.7	188.7	210.5	233.2	256.7	281.0	306.2	332.2
17	17.5	27.6	39.3	52.5	67.1	82.9	99.9	118.1	137.4	157.7	179.0	201.4	224.7	248.9	274.0	300.0	326.8	354.5
18	18.6	29.4	41.8	55.9	71.3	88.2	106.3	125.6	146.1	167.7	190.4	214.1	238.9	264.7	291.4	319.0	347.6	377.0
19	19.7	31.1	44.3	59.2	75.6	93.4	112.6	133.1	154.8	177.7	201.8	227.0	253.2	280.5	308.8	338.1	368.4	399.6
20	20.8	32.9	46.9	62.6	79.9	98.7	119.0	140.7	163.6	187.8	213.3	239.9	267.6	296.4	326.3	357.3	389.3	422.3
21	22.0	34.7	49.4	65.9	84.2	104.1	125.4	148.2	172.4	198.0	224.8	252.8	282.0	312.4	343.9	376.6	410.3	445.1
22	23.1	36.4	51.9	69.3	88.5	109.4	131.9	155.9	181.3	208.1	236.3	265.8	296.5	328.4	361.6	395.9	431.3	467.9
23	24.2	38.2	54.5	72.7	92.9	114.8	138.3	163.5	190.2	218.3	247.9	278.8	311.0	344.5	379.3	415.3	452.5	490.8
24	25.4	40.0	57.0	76.1	97.2	120.1	144.8	171.2	199.1	228.5	259.5	291.8	325.6	360.7	397.1	434.8	473.7	513.8
25	26.5	41.8	59.6	79.5	101.6	125.5	151.3	178.8	208.0	238.8	271.1	304.9	340.2	376.9	414.9	454.3	495.0	536.9
26	27.6	43.6	62.1	83.0	106.0	130.9	157.8	186.5	217.0	249.1	282.8	318.1	354.9	393.1	432.8	473.9	516.3	560.0
27	28.8	45.4	64.7	86.4	110.3	136.4	164.4	194.3	226.0	259.4	294.5	331.3	369.6	409.4	450.7	493.5	537.7	583.3
28	29.9	47.2	67.3	89.9	114.7	141.8	170.9	202.0	235.0	269.8	306.3	344.5	384.3	425.8	468.7	513.2	559.1	606.5
29	31.1	49.1	69.9	93.3	119.2	147.3	177.5	209.8	244.0	280.2	318.1	357.7	399.1	442.1	486.8	532.9	580.7	629.9
30	32.2	50.9	72.5	96.8	123.6	152.7	184.1	217.6	253.1	290.6	329.9	371.0	413.9	458.6	504.8	552.7	602.2	653.3

 Table 10. Dry weight table in *C. japonica*.

(Unit : kg)

DBH(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
DBH variable only	-	-	66.4	66.9	70.2	76.3	85.2	96.8	111.2	128.3	148.2	170.9	196.4	224.6	255.7	289.4	326.0	365.3
3	2.0	3.4	5.0	7.0	9.2	11.7	14.5	17.5	20.8	24.3	28.1	32.1	36.4	40.8	45.5	50.5	55.6	61.0
4	2.6	4.4	6.6	9.1	12.1	15.3	18.9	22.9	27.2	31.8	36.7	42.0	47.5	53.4	59.5	65.9	72.7	79.7
5	3.2	5.4	8.1	11.2	14.8	18.9	23.3	28.2	33.5	39.1	45.2	51.6	58.5	65.6	73.2	81.1	89.4	98.1
6	3.8	6.4	9.6	13.3	17.6	22.3	27.6	33.4	39.6	46.3	53.5	61.2	69.2	77.8	86.7	96.1	106.0	116.2
7	4.4	7.4	11.1	15.4	20.3	25.8	31.9	38.5	45.7	53.5	61.8	70.6	79.9	89.8	100.1	110.9	122.3	134.1
8	5.0	8.4	12.5	17.4	23.0	29.2	36.1	43.6	51.8	60.6	69.9	79.9	90.5	101.6	113.3	125.6	138.4	151.8
9	5.6	9.4	14.0	19.4	25.6	32.6	40.3	48.7	57.8	67.6	78.0	89.2	100.9	113.4	126.4	140.1	154.4	169.4
10	6.2	10.3	15.4	21.4	28.3	35.9	44.4	53.7	63.7	74.5	86.1	98.3	111.3	125.0	139.4	154.5	170.3	186.8
11	6.7	11.3	16.8	23.4	30.9	39.2	48.5	58.6	69.6	81.4	94.0	107.4	121.6	136.6	152.4	168.9	186.1	204.1
12	7.3	12.2	18.3	25.4	33.5	42.6	52.6	63.6	75.5	88.3	101.9	116.5	131.9	148.1	165.2	183.1	201.8	221.3
13	7.8	13.2	19.7	27.3	36.1	45.8	56.7	68.5	81.3	95.1	109.8	125.5	142.1	159.6	177.9	197.2	217.4	238.4
14	8.4	14.1	21.1	29.3	38.6	49.1	60.7	73.4	87.1	101.9	117.6	134.4	152.2	170.9	190.6	211.3	232.9	255.4
15	9.0	15.0	22.5	31.2	41.2	52.4	64.7	78.2	92.9	108.6	125.4	143.3	162.3	182.3	203.3	225.3	248.3	272.3
16	9.5	16.0	23.9	33.1	43.7	55.6	68.7	83.1	98.6	115.3	133.2	152.2	172.3	193.5	215.8	239.2	263.6	289.1
17	10.1	16.9	25.3	35.1	46.3	58.8	72.7	87.9	104.3	122.0	140.9	161.0	182.3	204.7	228.3	253.1	278.9	305.9
18	10.6	17.8	26.6	37.0	48.8	62.0	76.7	92.7	110.0	128.7	148.6	169.8	192.2	215.9	240.8	266.9	294.1	322.6
19	11.2	18.7	28.0	38.9	51.3	65.2	80.6	97.5	115.7	135.3	156.3	178.5	202.1	227.0	253.2	280.6	309.3	339.2
20	11.7	19.7	29.4	40.8	53.8	68.4	84.6	102.2	121.3	141.9	163.9	187.3	212.0	238.1	265.6	294.3	324.4	355.8
21	12.3	20.6	30.7	42.7	56.3	71.6	88.5	107.0	127.0	148.5	171.5	195.9	221.8	249.2	277.9	308.0	339.4	372.3
22	12.8	21.5	32.1	44.5	58.8	74.8	92.4	111.7	132.6	155.0	179.1	204.6	231.6	260.2	290.2	321.6	354.4	388.7
23	13.3	22.4	33.4	46.4	61.3	77.9	96.3	116.4	138.2	161.6	186.6	213.2	241.4	271.1	302.4	335.1	369.4	405.1
24	13.9	23.3	34.8	48.3	63.7	81.0	100.2	121.1	143.7	168.1	194.1	221.8	251.2	282.1	314.6	348.7	384.3	421.5
25	14.4	24.2	36.1	50.2	66.2	84.2	104.1	125.8	149.3	174.6	201.7	230.4	260.9	293.0	326.8	362.2	399.2	437.7
26	14.9	25.1	37.5	52.0	68.7	87.3	107.9	130.4	154.8	181.1	209.1	239.0	270.6	303.9	338.9	375.6	414.0	454.0
27	15.5	26.0	38.8	53.9	71.1	90.4	111.8	135.1	160.4	187.5	216.6	247.5	280.2	314.7	351.0	389.0	428.8	470.2
28	16.0	26.9	40.1	55.7	73.6	93.5	115.6	139.7	165.9	194.0	224.0	256.0	289.8	325.5	363.1	402.4	443.5	486.4
29	16.5	27.8	41.5	57.6	76.0	96.6	119.4	144.4	171.4	200.4	231.5	264.5	299.5	336.3	375.1	415.7	458.2	502.5
30	17.1	28.7	42.8	59.4	78.4	99.7	123.3	149.0	176.9	206.8	238.9	273.0	309.0	347.1	387.1	429.0	472.9	518.6

도록 수요자 측면에서 자료를 개발하였다. 그 결과, 생중량은 추정식 3($W = a + bD + cD^2$)이 두 수종 모두 최적 생중량 추정식으로 개발되었다. 건중량은 편백과 삼나무에서 추정식 8($W = aD^bH^c$)이 최적 건중량 추정식으로 개발되었다. 이러한 정보는 현재 우리나라의 성숙한 산림변화에 적용 가능하며 다양한 산림 현장에 정보를 제공할 것으로 기대된다. 또한, 추후 수요가 필요한 수종에 대해 지속적인 중량표 개발이 추진되어야 할 것으로 판단된다.

References

- Aldred, A.H. and Alemdag, I.S. 1988. Guidelines for forest biomass inventory. Canadian Forest Service, Information Report PI-X-77. pp. 134.
- Avery, T.E. and Burkhardt, H.E. 2002. Forest measurements. 5th Edition. McGraw-Hill, INC. pp. 321-347.
- Dorado, F.C., Dieguez-Aranda, U., Anta, M.B., Rodriguez, M.S. and Gadow, K.V. 2006. A generalized height diameter model including random components for radiata pine plantation in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management* 229: 202-213.
- Gwon, J.H., Seo, H.Y., Lee, K.S., You, B.O., Park, Y.B., Jeong, J.Y. and Kim, C.S. 2014. Allometric equations and biomass expansion factors by stand density in *Cryptomeria japonica* Plantations. *Journal of Korean Forest Society* 103(2):175-181.
- Husch, B., Beers, T.W. and Jr. Kershaw, J.A. 2003. Forest mensuration. Kohn Wiley and Sons, INC. pp. 162-201.
- 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.
- Kang, J.T., Go, C.W., Park, J.M., Yim, J.S. Lee, S.J. and Won, M.S. 2023. Development of weight estimation equations and weight tables for *Larix kaempferi* and *Pinus rigida* Stands. *Journal of Korean Society of Forest Science* 112(4): 472-489.
- Kang, J.T., Yim, J.S., Go, C.W., Sung, S.M. and Son, Y.M. 2022. Development of weight estimation equation and weight table in *Pinus densiflora* stand (Kangwon and Central Districts).
- KFS (Korea Forest Service). 2024. 53th Statistical yearbook of forestry. pp. 439.
- Kim, C.M., Chung, Y.K., Kim, D.H., and Son, Y.M. 2011. Biomass production and carbon factor development for *Cryptomeria japonica* in Jeju island. *Proceeding of Forest Science Conference* at 2011. Gyeongju, pp. 1085-1087.
- Kim, C.S., Baek, G.W., Choi, B.G., Ha, J.S., Bae, E.J., Lee, K.S. and Son, Y.M. 2020. Carbon stocks of tree, forest floor, and Mineral soil in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands, *Journal of Korean Society of Forest Science* 109(2): 169-178.
- Kim, C.S., Lee, J.S. and Cho, K.J. 1987. Biomass and net production of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* plantation in Changsong district, Chonnam, *Journal of Korea Forestry Energy* 7(1):1-10.
- Kim, J.H. and Yoon, S.M. 1972. Studies on the productivity and the productive structure of the forests. *Journal of Korean Plant Biology* 15(3): 71-78.
- Kozak, A. 1970. Methods for ensuring additivity of biomass components by regression analysis. *The Forestry Chronicle*. pp. 402-404.
- Kwon, K.C. and Lee, D.K. 2006. Biomass and energy content of *Quercus mongolica* stands in Gwangyang and Jeju areas. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 34(4): 54-65.
- Lavigne, M.B. and von Nostrand R.S. 1981. Biomass equations for six tree species in Central Newfoundland. Environment Canada, Forestry Service, Information Report N-X-199. pp. 43.
- Lee, K.H., Son, Y.M., Rho, D.K. and Kwon, S.D. 2002. Stem weight equations for six major tree species in Korea. *Journal of Forest Science and Technology* 91(2): 206-212.
- Lee, K.S. and Chung, Y.G. 2003. Aboveground biomass of 30 years old *Chamaecyparis obtusa* plantation in Jinhae. *Journal of Korea Forestry Energy* 22(1): 49-57.
- Lee, S.O. and Park, G.H. 1986. Biomass and organic energy production in pine and oak natural forest ecosystem in Korea. *Journal of Korea Forestry Energy* 6(1): 46-58.
- Lim, H., Lee, K.H., Lee, K.H., and Park, I.H. 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *Journal of Forest Research* 18: 316-322. Figure 6.
- Marshall, P.L. and Wang, Y. 1995. Above ground tree biomass of interior uneven-aged douglas-fir stands. FRDA II, Canada. pp. 23.
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 2001. Volume and weight table. pp. 253.
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 2005. Seminar on the sustainable management and utilization of Japanese Cedar. pp. 141.
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 2006. Seminar on the utilization and prospect of Japanese Cedar in Jeju pp. 115.

- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2007. Survey manual for forest biomass and soil carbon. pp. 74.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2014. Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea. pp. 97.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2018. Practical Forest Measurement and Survey pp. 191.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2021. 2020 Forest Resources of Korea. pp. 244.
- Ouellet, D. 1985. Biomass equations for six commercial tree species in Quebec. The Forestry Chronicle 61(3): 218-222.
- Park, I.H. and Lee, S.M. 1990. Biomass and net production of *Pinus densiflora* natural forests of four local forms in Korea. Journal of Korean Forest Society 79(2): 196-204.
- Parresol, B.R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. Forest Science 45(4): 572-593.
- Schlaegel, B.E. 1984. Green ash volume and weight tables. U.S. U.S. Department of Agriculture, Forest Service Research Paper SO-206. pp. 5.
- Seo, Y.O., and Lee, Y.J. 2013. Estimation of above- and belowground biomass with consideration of age classes for *Cryptomeria japonica* stands. Journal of Agriculture & Life Science 47: 17-23.
- Sharma, M. and Parton, J. 2007. Height-diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach. Forest Ecology and Management. 249: 187-198.
- Son, Y.M. Lee, K.Y. and Pyo, J.K. 2011. Development of biomass allometric equations for *Pinus densiflora* in Central region and *Quercus variabilis*. Journal of Agriculture & Life Science 45(4): 65-72.
- Son, Y.M., Kim, J.C., Lee, K.H., Kim, R.H. 2007. Forest biomass assessment in Korea. Korea Forest Institute Research report 07-22. pp. 105.
- Son, Y.M., Lee, K.H., Kim, R.H., Pyo, J.K., Park, I.H., Son, Y.H., Lee, Y.J., and Kim, C.S. 2010. Carbon factors in major species for forest green gas inventory. National Institute of Forest Science, Research report 11-25. pp. 89.
- Tobin, B. and Nieuwenhuis, M. 2007. Biomass expansion factors for Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Ireland. European Journal of Forest Research 126: 189-196.

Manuscript Received : November 5, 2024
First Revision : February 6, 2025
Second Revision : March 11, 2025
Accepted : March 12, 2025