

소나무(강원지방·중부지방) 중량추정식 및 중량표 개발

강진택¹ · 임종수¹ · 고치웅¹ · 성상민² · 손영모^{1,2*}

¹국립산림과학원 산림ICT연구센터, ²한국산지보전협회 산지연구본부

Development of Weight Estimation Equation and Weight Table in *Pinus densiflora* Stand (Kangwon and Central Districts)

Jintaek Kang¹, Jongsu Yim¹, Chiwung Go¹, Sangmin Sung² and Yeongmo Son^{1,2*}

¹Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

²Forest Research Bureau, Korea Forest Conservation Association, Daejeon 35262, Korea

요약: 본 연구는 소나무의 생중량 및 건중량 추정식을 도출하고, 이를 이용하여 중량표를 작성하기 위해 수행되었다. 생중량 및 건중량을 산정하기 위해 이용한 식은 흉고직경만을 이용하는 1변수식, 흉고직경과 수고를 이용하는 2변수식을 적용하였다. 생중량 및 건중량을 산정하기 위해 각 식은 적합도 지수, 표준오차, 잔차도 등의 통계량을 이용하여 검증하였다. 또한 최적식은 통계적 검증을 거쳤으며, 도출된 계수로서 중량을 계산하여 적용성을 검토하였다. 분석결과, 1변수식에서는 $W = bD+cD^2$ 이 선정되었으며, 2변수식에서는 $W = aD^bH^c$ 가 선정이 되었다. 1변수 최적추정식의 적합도지수는 0.87~0.92 범위였으며, 2변수 중량추정식 적합도지수는 0.94~0.98 범위로, 두 가지 식 모두 적합도가 높았다. 최적 추정식을 이용하여 새로운 중량표를 작성하고 이전 중량표와 비교 분석하였다. 분석결과, 강원지방소나무는 이전 중량표의 값이 더 높은 반면, 중부지방소나무는 새롭게 작성된 중량표의 값이 더 높았다.

Abstract: This study was conducted to derive the fresh weight and dry weight estimation formulas of *Pinus densiflora* and prepare a weight table using them. A one-variable formula using only the diameter at breast height (DBH) and a two-variable formula using DBH and height were used to calculate the fresh and dry weight. Each equation was verified using statistics, such as fit index, standard error, and residuals. The optimal equation was evaluated for applicability by calculating the weight as a coefficient derived from a statistical verification. $W = bD+cD^2$ was selected for the one-variable equation, while $W = aD^bH^c$ was selected for the two-variable equation. The fit index of the former was 0.87–0.92, while that of the latter was 0.94–0.98, both of which showed a good fit. A new weight table was prepared using the optimal estimation formula, and it was compared and analyzed with a previous weight table. Analysis results showed that Gangwon pine had higher values in the previous weight table, while pines in the central region had higher values in the newly created weight table.

Key words: dry weight, green weight, *Pinus densiflora*, weight estimation equation, weight table

서론

산림에서 생산되는 목재의 매각은 주로 부피 즉, 재적 (m^3) 단위로 거래가 되나 일부 소경재, 활잡목 또는 펄프재의 매각 시는 중량(kg, ton) 단위로 거래되고 있다. 재적은

임목거래의 기본단위로 오랫동안 대중적으로 사용되어 오고 있지만, 중량단위의 임목거래에서 일반화되지 못하면서 연구 또한 활발하지 못하였다. 점차 과학자들은 산림생태계에 있어 생물적 생산성에 지속적인 관심을 가지면서, Boysen-Jensen(1932) 이래 육상식물의 생산성(biomass)에 관한 연구가 수행되었다(Baskerville, 1972; Cunia, 1964; Kwon et al., 2006; Lee et al., 2003).

이러한 연구는 20세기 중반 이후에 미국, 일본, 벨기에, 캐나다를 중심으로 활발하게 진행되었으며, 대부분의 연

* Corresponding author

E-mail: pine21c@kfca.re.kr

ORCID

Yeongmo Son  <https://orcid.org/0000-0002-9346-4351>

구가 Biomass의 생산구조 및 측정방법에 초점을 맞춰 수행되었다(Kozak, 1970; Lavigne et al., 1981; Ouellet, 1985; Nautiyal & Belli, 1987; Marshall, 1995). 특히 캐나다 임산 에너지 프로젝트(ENFOR)에서는 산림 바이오매스 조사 표준화를 위하여 일련의 활동과 이에 관련된 많은 문헌을 발표한 바 있다(Pardé, 1980; Son et al., 1998).

우리나라 Biomass 연구는 김준호(1970)의 육상식물 생산력 추정으로 관련 연구를 시작으로 Kim et al.(1983, 1989), Yim et al.(1984), Lee et al.(1986), Lee et al.(1988), Park et al.(1990) 등 지속적으로 활발하게 연구가 진행되었다.

지금까지 선행연구들은 대부분 생태계 식물들을 건중량 개념 중심으로 연구하였으며, 산림현장에서 바로 거래될 수 있는 생중량은 국립산림과학원(2001)에서 강원지방소나무 등 8수종 임목증량표를 개발하면서 국내의 기준을 세운 바 있다(National Institute of Forest Science, 2001).

생중량은 건중량을 나타내는 바이오매스는 아니지만 현장에서는 펄프용 원자재 등으로 원목을 거래할 때 사용하고 있으므로 임업 현장에서 매우 중요한 정보이다(Son et al., 2007). 일반적으로 증량산출은 흉고직경 만을 이용하는 1변수식과, 흉고직경과 수고를 모두 이용하는 2변수식을 이용하여 산출한다. 1변수를 이용한 증량식은 수고변수가 추가된 2변수식보다 설명력이 낮을 수 있으나, 현장조사 상황에 따라 수고를 측정하지 못하는 상황이 발생할 경우 1변수식이 유용하게 이용된다. 이에 대하여 캐나다의 산림 바이오매스 지침서(Guidelines for forest biomass inventory)에서는 수고를 직접 측정하지 않고 일반적으로 알려진 특정 수고곡선 추정으로 적용하고 있으며, 2변수식을 이용하는 것보다는 오히려 측정이 가능한 흉고직경만의 1변수식을 이용하라고 권장한 바 있다(Aldred et al., 1988).

본 연구는 2001년 국립산림과학원에서 국내 처음 만들어진 증량표의 가치는 정보의 한계를 보완 개선하기 위하여 새로운 증량표 개발 목적으로 수행되었다. 현재 사용하고 있는 증량표 개발에 사용된 자료는 주로 중경목 이하에서 표본목이 선발되었으며, 또한 표본목의 본수가 너무 적어 우리나라 전체 임목을 대표하지 못하고 있어 원목 거래에 민원이 빈번히 발생하고 있다. 따라서 현재 사용하고 있는 증량표의 한계를 보완하고 더욱 정확한 증량단위의 거래를 위하여 전국단위의 표본을 균일하게 선정하여 새로운 소나무 증량표를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 신규 소나무 증량표는 소나무 원목거래 현장에서 주로 사용되고 있는 생중량(green weight)과 탄소흡수량 계산 등에 활용할 수 있는 건중량(dry weight)에 대한 정보를 제공할 수 있는 최적의 증량추정식을 도출하고 이를 기반으로 증량표를 작성하였다.

Table 1. Characteristic of growth factors in *Pinus densiflora* stand.

Growth factors Region	No. of sample trees	DBH (cm)	Height (m)
Kangwon	100	$\frac{27.8}{6-58}$	$\frac{17.2}{7.3-29.7}$
Central	200	$\frac{28.4}{6-52}$	$\frac{17.0}{5.7-27}$

재료 및 방법

1. 공시재료

본 연구를 위해 이용한 표준목은 총 300본으로 임상도(1:5,000)의 지역별 분포면적을 고려하여 강원지방소나무 100본, 중부지방 소나무 200본을 지위별(상, 중, 하), 경급별(소경목, 중경목, 대경목)로 구분하여 각 조사지별 현장 조사를 통한 표준목을 선정, 별채하였다(Table 1). 또한 제7차 국가산림자원조사의 영급별 비율을 고려하여 강원지방소나무는 소경급 7본, 중경급 53본, 대경급 40본의 표준목 100본, 중부지방소나무는 소경급 15본, 중경급 94본, 대경급 91본을 표준목 200본을 선정, 조사하였다. 소나무의 생중량은 현장에서 수간의 무게를 측정하였으며, 건중량은 수간의 높이별 원판(disk) 시료를 수집하여 대형 건조기에서 105°C로 설정하여 향량에 도달할 때까지 건조한 후, 건중량을 측정하였다(National Institute of Forest Science, 2007).

2. 분석방법

1) 증량 추정식 도출

(1) 생중량 및 건중량 추정식 도출 및 통계적 검증

임목의 증량을 추정할 수 있는 추정식은 2001년 사용하였던 흉고직경만을 이용하는 1변수식 4개와 흉고직경과 수고를 이용하는 2변수식 등 Table 2와 같은 8개식을 그대로 원용하였다(Lee et al., 2002). Table 2와 같이 기존의 식을 그대로 원용한 것은 기존 증량표 개발을 위해 분석한

Table 2. Used stem weight equations on *D* alone, and *D* and *H* together.

Equations (variable <i>D</i> only)		Equations (variables <i>D</i> and <i>H</i>)	
$W = a+bD^2$	(1)	$W = bD^2H$	(5)
$W = bD+cD^2$	(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

결과와의 상호 비교 검증을 위한 것이다.

그리고 추정식에 대한 적합성을 파악하기 위하여 아래 식과 같이 적합도 지수(Fitness Index, FI)를 계산하였으며, 그 외 표준오차와 잔차도 등을 도출하여 최적식을 선정하였다(Kim, 2000, Lee et al., 2002; Parresol, 1999; Schlaegel, 1984).

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

여기서 Y_i , \hat{Y}_i , \bar{Y} = 각각의 중량 측정치, 추정치, 평균값

2) 중량표 작성

(1) 생중량 및 건중량표 작성

홍고직경 그리고 홍고직경과 수고를 이용하여 중량을 추정하는 최적의 식을 도출한 후, 소나무(강원지방소나무 및 중부지방소나무로 구분)의 생중량과 건중량표를 작성하였다. 표는 사용자의 편의를 위하여 홍고직경만을 측정하거나, 홍고직경과 수고 모두를 측정하여도 중량을 산출할 수 있게, 두가지 중량 정보를 제공할 수 있게끔 구성하였다.

(2) 지역 및 기준 중량표와의 비교

도출된 소나무(강원지방소나무 및 중부지방소나무)의 중량표 상호간 차이가 있는지를 아래와 같이 t-test 처리하여 검증하고자 하였으며, 또한 기존 국립산림과학원에서 2011년 만든 중량표와의 차이를 t-test로 검증하고자 하였다(Kim, 2000).

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{s^2(1/n_1 - 1/n_2)}}, \quad s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)}$$

여기서, $\bar{X}_{i,j}$ = 집단간 측정치 평균값, $n_{i,j}$ = 측정 개수, s^2 = 합동 분산(pooled variance), $s_{i,j}^2$ = 각 집단의 분산

결과 및 고찰

1. 중량 추정식의 도출

1) 생중량 추정식 도출 및 통계적 검증

(1) 홍고직경을 이용하는 1변수 추정식 도출 및 검증
강원지방소나무와 중부지방소나무에 대한 생중량을 추정하기 위하여 홍고직경만을 이용한 4가지 추정식의 계수(parameter) 및 적합도 검증 결과는 Table 3과 같다.

홍고직경만을 이용한 4가지 생중량 추정식의 적합도는 강원지방소나무 91.7%, 중부지방소나무 87.5% 였으며, 추정오차는 각각 34.7~37.4, 24.7~24.9 범위에 있다. 추정식에 대한 적합도지수가 가장 높은 식 3이 두 수종의 생중량을 추정하는데 가장 적합한 것으로 나타났으나, 식 1과 3은 상수(a)로 인하여 적은 경급(6 cm 이하)에서 “-”값을 가져 이를 사용한 데는 적합하지 않은 것으로 나타나, 최종적으로 식 2를 소나무의 생중량을 산정하는 최적식으로 선택하였다.

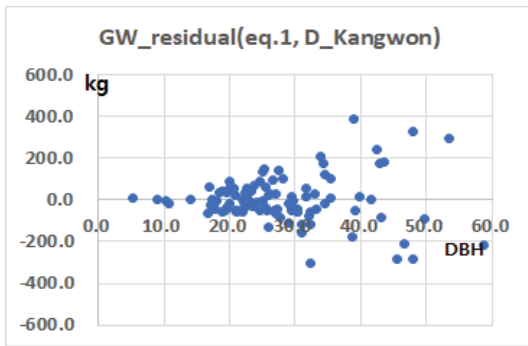
Lee et al.(2002)은 강원지방소나무 중량표 분석에 있어 식 1, 2, 3은 가산성(additivity)을 만족시키나, 식 4는 지수적인 관계로 직경급 이외로 확장(extrapolation)할 경우 중량값이 우리가 생각하는 일반적 범위를 벗어날 수 있어 식으로는 타당하지 않다고 한 바 있다. 이 가산성은 중량 추정모형에 반드시 갖추어야 할 요건은 아니나 논리적으로 보았을 때 따름이 타당한 것으로 받아들여지고 있다(Aldred et al., 1988).

Figure 1은 이들 4가지 식에 대해 실측치와 추정치 간 잔차도를 도식화한 것이다.

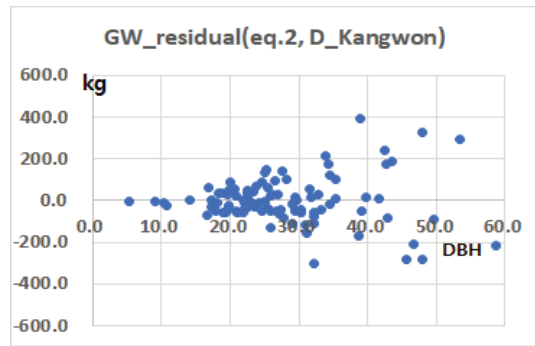
4개식 모두 “0”을 중심으로 대부분 잔차가 고르게 분포하고 있으나, 식 1과 3은 상기에서도 언급하였지만, “-”값을 보이므로 적합한 추정식이 아닌 것으로 나타났다. 따라서 잔차도를 종합 고려해 볼 때, 추정식 2가 소나무의 중량 추정에 있어 가장 적합한 식으로 판단된다. Lee et al.(1999)

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

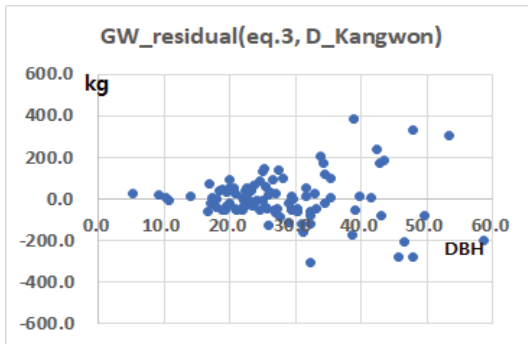
Equations	Species (Districts)	Parameters			Statistic	
		a	b	c	FI	SEE
W = a+bD ²	Kangwon	-15.3046	0.6023	-	0.9175	34.72
	Central	-36.1718	0.6394	-	0.8747	24.90
W = bD+cD ²	Kangwon	-	-0.8722	0.6136	0.9174	37.40
	Central	-	-2.5674	0.6810	0.8747	24.86
W = a+bD+cD ²	Kangwon	-42.2062	1.8409	0.5742	0.9176	37.42
	Central	-23.9921	-0.8992	0.6544	0.8747	24.90
W = aD ^b	Kangwon	0.5259	2.0315	-	0.9173	37.11
	Central	0.3925	2.1219	-	0.8743	24.69



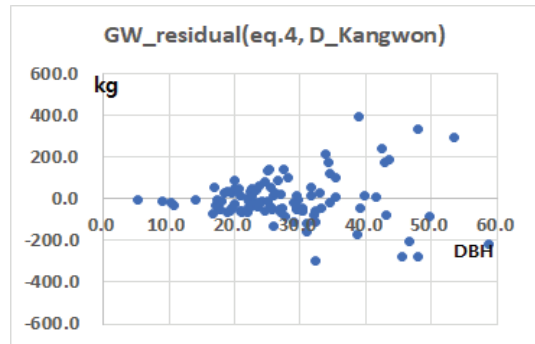
(a) Residual on eq.1 in Kangwon pine



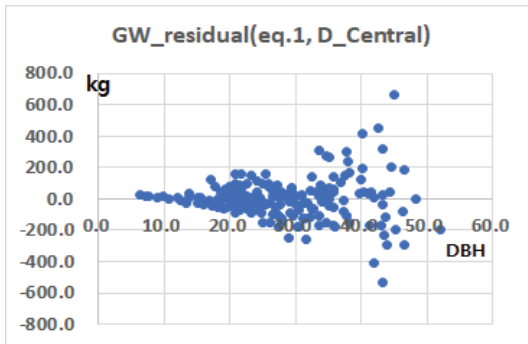
(b) Residual on eq.2 in Kangwon pine



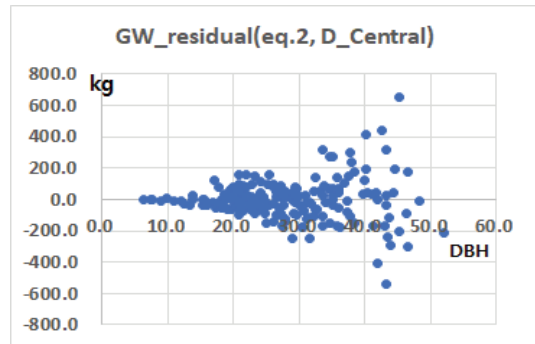
(c) Residual on eq.3 in Kangwon pine



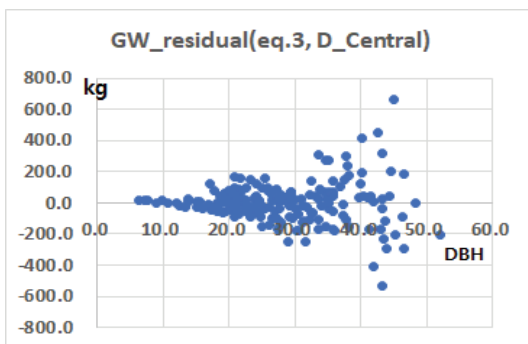
(d) Residual on eq.4 in Kangwon pine



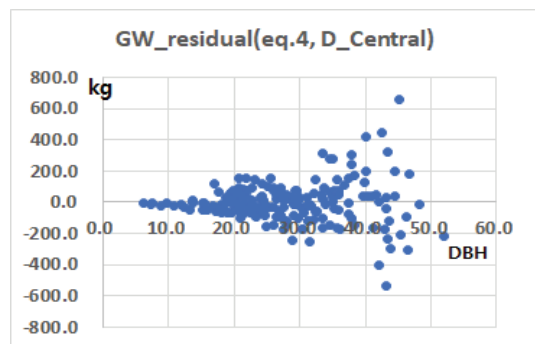
(e) Residual on eq.1 in Central pine



(f) Residual on eq.2 in Central pine



(g) Residual on eq.3 in Central pine



(h) Residual on eq.4 in Central pine

Figure 1. Residual scatter diagram for green weight estimation equations using DBH in *Pinus densiflora* forest (Kangwon and Central pine).

은 강원지방소나무의 생중량 최적식으로 식 3의 형태가 가장 적합하다고 밝혀, 본 연구의 결과와는 약간 다른 결과를 제시한 바 있다.

(2) 흉고직경과 수고를 이용하는 2변수 추정식 도출 및 검증

강원지방소나무와 중부지방소나무에 대한 생중량을 도출하기 위하여 흉고직경과 수고 변수를 이용한 4가지 추정식의 계수 및 적합도 검증 결과는 Table 4와 같다.

흉고직경과 수고를 모두 이용하는 4가지 생중량 추정식의 적합도는 강원지방소나무 97.4~98.2%, 중부지방소나무 95.1~95.4% 였으며, 추정오차는 각각 38.6~42.0, 25.9~27.3 범위로 산출되었다. 흉고직경만을 갖는 추정식보다는 적합도가 높았으며, 이는 수고변수가 추가됨에 따라 설명력이 다소 높아진 것으로 판단된다. 적합도에 있어서는 강원지방소나무가 식 7과 8에서 가장 높으며, 중부지방소나무는 유의적인 차이가 없었다. 오차는 강원지방소나무가 식 1이 가장 커서 4개 식 중에서는 추정식으로 적합하지 않은 것으로 나타났으며, 중부지방소나무 역시 강원지방소나무와 동일한 결과로 나타났다.

흉고직경과 수고를 이용하는 2변수 추정식의 적합도와

오차를 고려할 때 식 8이 두 수종의 생중량을 도출하는데 가장 적합한 식으로 도출되었다. 이러한 결과는 Lee et al. (2002)에서도 우리나라 주요 7개 수종에 대해 생중량을 추정하는데 흉고직경과 수고를 이용한 2변수 추정식이 가장 적합하다고 보고한 바와 유사한 결과를 보였다.

Table 4에서 제시한 식에 대한 실측지와 추정치 간 잔차도를 도식화한 바 Figure 2와 같다.

흉고직경과 수고를 이용한 2변수 중량추정식의 잔차도는 식 5가 두 수종 모두 중경급 이상에서 과소 추정, 대경목에서는 과대 추정되었으며, 식 6은 소경목일 때 과대 추정하고 있음을 알 수 있었다. 식 7과 8의 잔차도 그림을 보면, 강원지방 소나무 및 중부지방 소나무 모두 식 8의 잔차도가 “0”을 중심으로 잔차가 균형적으로 분포하고 있어, 식 8이 상기에서 언급한 소나무의 생중량을 추정하는 2변수 최적식인 것으로 분석되었다.

2) 건중량 추정식 도출 및 통계적 검증 도출 및 검증

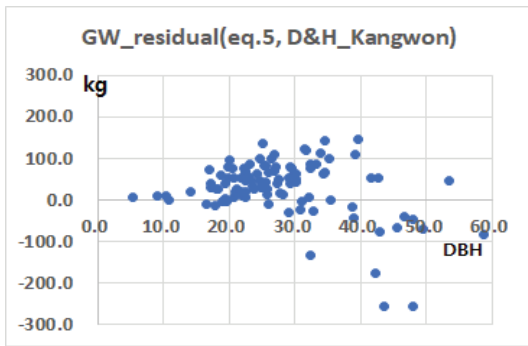
(1) 흉고직경을 이용하는 1변수 추정식 도출 및 검증
강원지방소나무와 중부지방소나무에 대한 건중량을 도출하기 위하여 흉고직경만을 이용한 4가지 추정식의 계수 및 적합도 검증 결과는 Table 5와 같다.

Table 4. Green weight equation and statistic information using variables DBH and height.

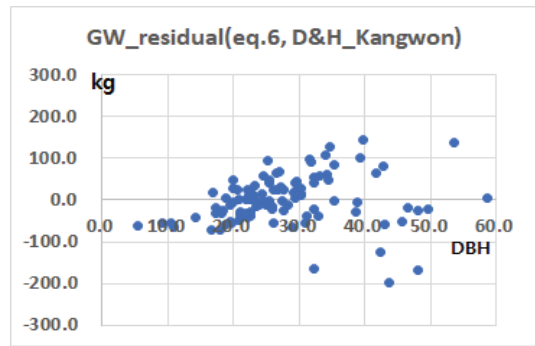
Equations	Species (Districts)	Parameters			Statistic	
		a	b	c	FI	SEE
W = bD ² H (5)	Kangwon	-	0.0296	-	0.9769	42.01
	Central	-	0.0318	-	0.9508	27.28
W = a+bD ² H (6)	Kangwon	68.2904	0.0272	-	0.9739	38.61
	Central	38.1494	0.0303	-	0.9508	25.96
W = a(D ² H) ^b (7)	Kangwon	0.1099	0.8746	-	0.9807	38.54
	Central	0.0719	0.9206	-	0.9520	25.94
W = aD ^b H ^c (8)	Kangwon	0.1192	1.7962	0.7905	0.9816	38.60
	Central	0.0564	1.7392	1.1257	0.9545	25.98

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

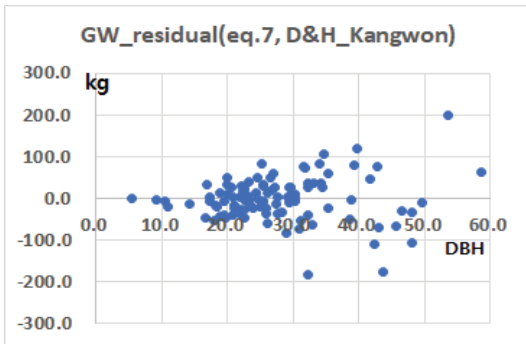
Equations	Species (Districts)	Parameters			Statistic	
		a	b	c	FI	SEE
W = a+bD ² (1)	Kangwon	-12.4920	0.2948	-	0.9193	18.35
	Central	-15.9578	0.3159	-	0.8638	12.30
W = bD+cD ² (2)	Kangwon	-	-0.9035	0.3091	0.9196	18.35
	Central	-	-1.1619	0.3351	0.8639	12.30
W = a+bD+cD ² (3)	Kangwon	11.7226	-1.6570	0.3201	0.9196	18.32
	Central	-3.7610	-0.9004	0.3309	0.8639	12.30
W = aD ^b (4)	Kangwon	0.2027	2.0928	-	0.9196	18.32
	Central	0.1999	2.1149	-	0.8637	12.07



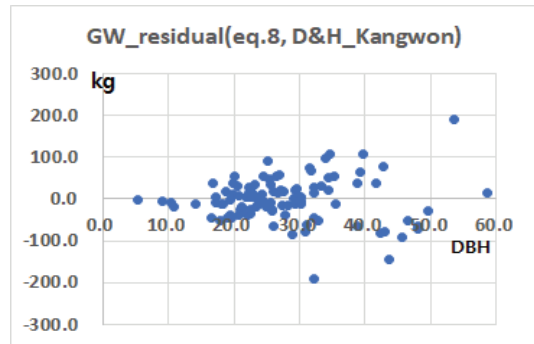
(a) Residual on eq.5 in Kangwon pine



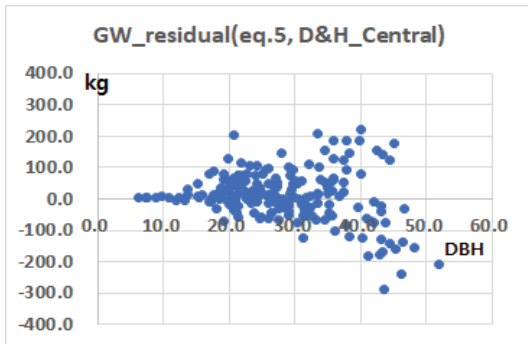
(b) Residual on eq.6 in Kangwon pine



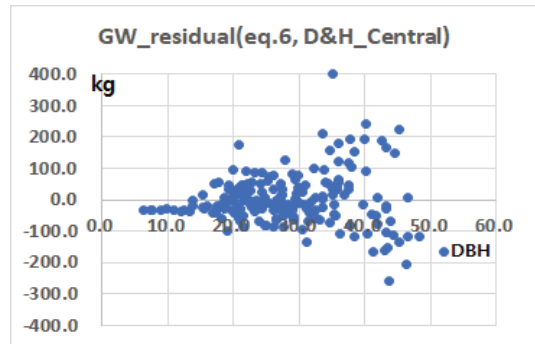
(c) Residual on eq.7 in Kangwon pine



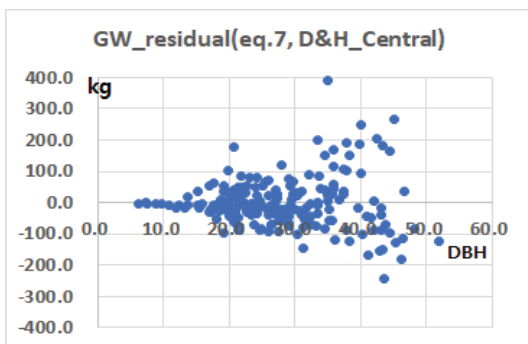
(d) Residual on eq.8 in Kangwon pine



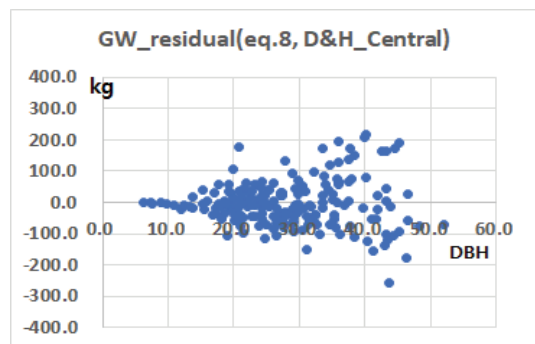
(e) Residual on eq.5 in Central pine



(f) Residual on eq.6 in Central pine

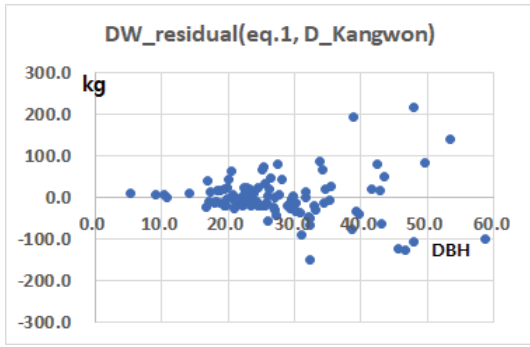


(g) Residual on eq.7 in Central pine

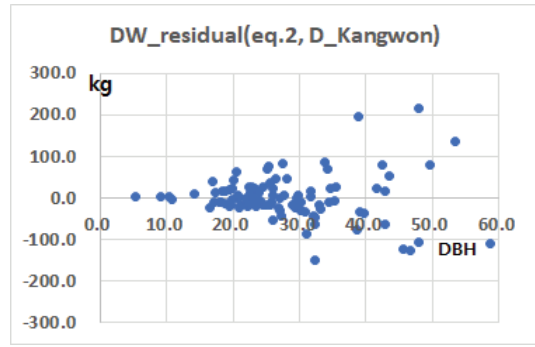


(h) Residual on eq.8 in Central pine

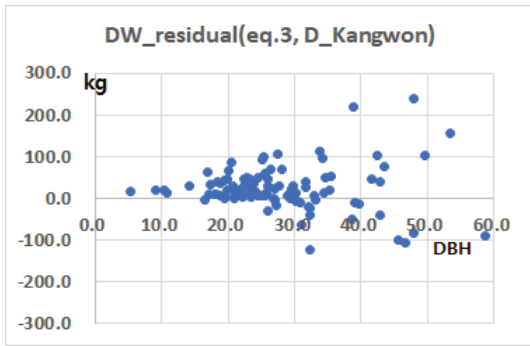
Figure 2. Residual scatter diagram for green weight estimation equations using DBH and height in *Pinus densiflora* forest (Kangwon and Central pine).



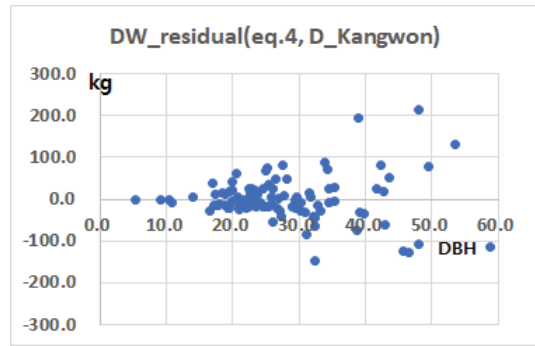
(a) Residual on eq.1 in Kangwon pine



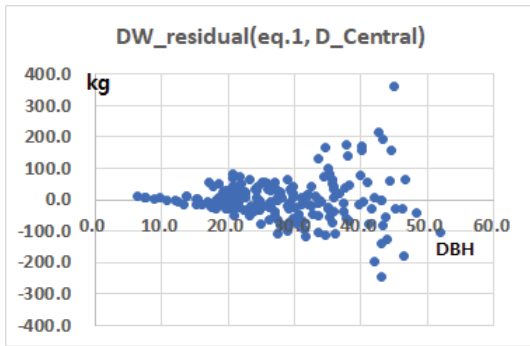
(b) Residual on eq.2 in Kangwon pine



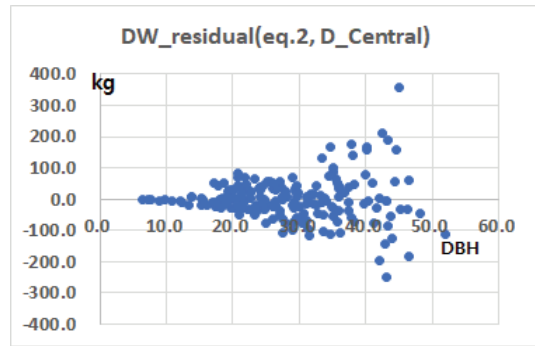
(c) Residual on eq.1 in Kangwon pine



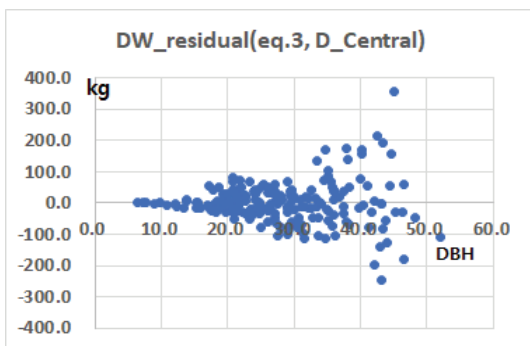
(d) Residual on eq.2 in Kangwon pine



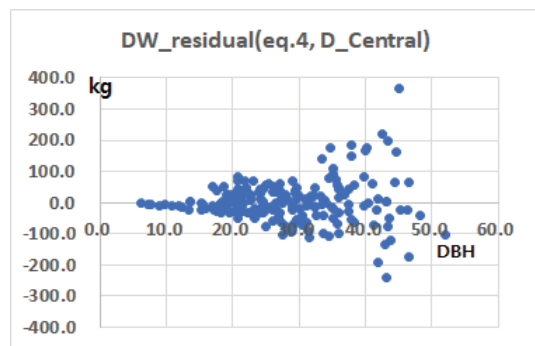
(e) Residual on eq.1 in Central pine



(f) Residual on eq.2 in Central pine



(g) Residual on eq.3 in Central pine



(h) Residual on eq.4 in Central pine

Figure 3. Residual scatter diagram for dry weight estimation equations using DBH in *Pinus densiflora* forest (Kangwon and Central pine).

기후변화 시대에 온실가스 흡수원으로서 산림부문의 탄소흡수량 산정을 위한 건증량 산정 추정식 도출은 줄기의 바이오매스 추정할 수 있는 기본 자료이다(Kwon et al., 2006; Lee et al., 2003; Son et al., 2010). Table 5에서 건증량 산정을 위한 4가지 추정식 중 적합도와 오차를 고려하여 최적식을 선정하여야 하나, 추정식 1과 3이 역시 생증량 추정과 마찬가지로 실제 적용 결과, 일부 “-” 값을 가져 건증량 추정에 부적합한 것으로 나타났다. 따라서 생증량 추정식의 결과와 동일하게 모두 식 2를 강원지방 및 중부지방소나무의 건증량을 추정하는데 가장 최적식인 것으로 판정되었다..

Table 5에서 제시하고 있는 추정식에 대한 실측지와 추정치 간 잔차도를 도식화한바 Figure 3과 같다. 강원지방 소나무의 건증량을 추정할 수 있는 4가지 식 중, 식 1과 3은 낮은 경급에서 과소치를 보이는 것으로 나타났으며, 중부지방소나무의 잔차는 식 1이 6 cm 이하에서 과소값을 나타낼 것으로 보이며, 그 외는 모두 “0”을 중심으로 고르게 분포하고 있음을 보여 주었다.

(2) 흉고직경과 수고를 이용하는 2변수 추정식

강원지방소나무와 중부지방소나무에 대한 생증량을 도출하기 위하여 흉고직경과 수고 변수를 이용한 4가지 추정식의 계수 및 적합도 검증 결과는 Table 6과 같다.

흉고직경과 수고를 이용하여 건증량 추정식 중에서 식 (5)는 오차가 다른 3가지 식과 비교할 때 큰 것으로 나타나 최적식 선정 대상에서 제외하였으며, 나머지 3개식은 적합도와 오차부문에 있어 서로 큰 차이를 보이지 않았다. 식 8은 National Institute of Forest Science(2001)에서 증량표를 만들 때 최적의 식으로 도출되어 적용한 식이므로, 본 연구에서도 건증량 산정을 위한 최적식으로 선정하였다. 또한 2001년에 개발되어 현재 사용하고 있는 소나무 증량표와 본 연구에서 새롭게 만든 증량표를 상호 비교에도 식 8을 적용하였다.

Table 6의 추정식에 대한 실측지와 추정치 간 잔차도를 도식화한바 Figure 4와 같다.

잔차도 분석에 있어 식 5는 중경급 이상에서 과소값을 도출할 것으로 예측되었으며, 식 6은 경급 20 cm 이하에서 과대값을 도출할 것으로 예상되어 이들 식은 건증량 추정을 위한 최적식의 후보군에서 제외하는 것이 적절하다고 판단된다. 중부지방소나무의 건증량 산정을 위한 추정식의 잔차도는 식 6이 소경목일 때 과대값을 산정하는 것을 제외하면, 나머지 3개 식은 모두 “0”을 중심으로 잔차가 고르게 분포하고 있음을 알 수 있었다.

2. 증량표 개발

1) 생증량표

강원지방소나무와 중부지방소나무의 생증량 최적식($W = bD+cD^2$)을 이용하여 이 정보를 알 수 있는 증량표를 Table 7, Table 8과 같이 도출하였다.

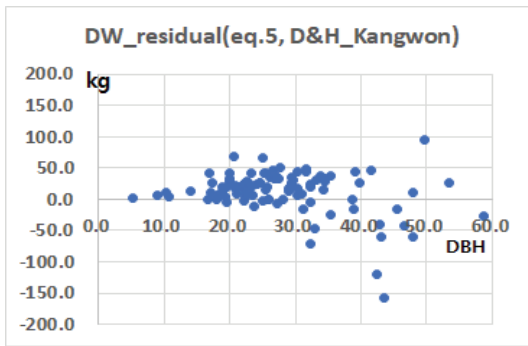
Table 7과 Table 8에서는 흉고직경 30 cm, 수고 20 m까지의 증량표 일부만 제시하였으나, 추정식을 이용하면 더 이상 확장된 생증량 정보를 얻을 수 있었으며, 흉고직경 정보만 수집한 이용자를 위하여 “DBH variable only” 로서 생증량 정보를 알 수 있도록 하였다. 또한 최적의 생증량 추정식으로 현실임분에서 나타나기 어려운 경급과 수고에 대해서도 제시하는 가능하다. 다만, 국가산림자원조사 등 현실임분에서 나타나는 실질적인 경급과 수고 정보를 알기 쉽게 증량표에서 음영으로 처리하였다. 강원지방소나무와 중부지방소나무의 경급 및 수고에 따른 생증량을 비교한 결과, 경급 26 cm 이상에서부터 중부지방소나무의 증량이 더 커지는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 이후 다른 분석결과에서도 유사한 경향을 보였다.

2) 건증량표

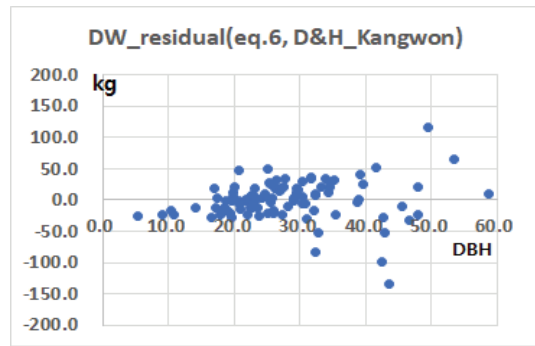
강원지방소나무와 중부지방소나무의 건증량 산정을 위한 최적식($W = aD^bH^c$)을 이용하여 이 수종의 건증량표를

Table 6. Dry weight equation and statistic information using variables DBH and height.

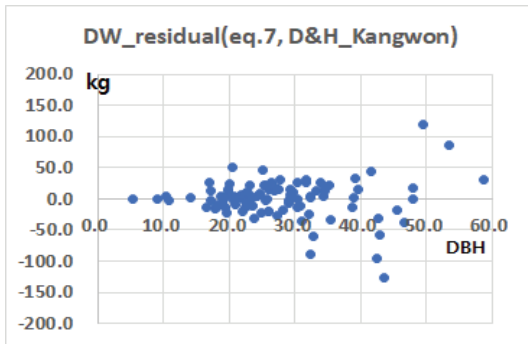
Equations	Species (Districts)	Parameters			Statistic	
		a	b	c	FI	SEE
$W = bD^2H$ (5)	Kangwon	0.0143	-	-	0.9733	20.30
	Central	0.0158	-	-	0.9398	13.54
$W = a+bD^2H$ (6)	Kangwon	29.0308	0.0133	-	0.9733	18.85
	Central	20.6549	0.0150	-	0.9398	12.83
$W = a(D^2H)^b$ (7)	Kangwon	0.0420	0.8970	-	0.9742	18.93
	Central	0.0368	0.9177	-	0.9405	12.86
$W = aD^bH^c$ (8)	Kangwon	0.0481	1.8735	0.7557	0.9767	18.98
	Central	0.0286	1.7298	1.1306	0.9432	12.88



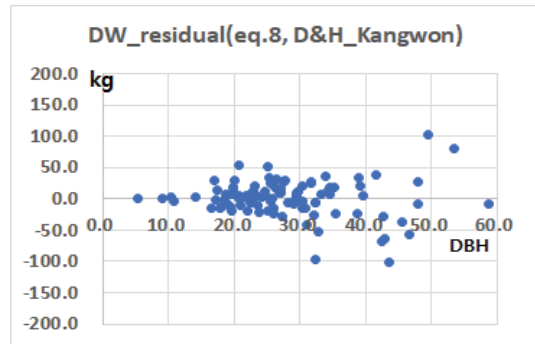
(a) Residual on eq.5 in Kangwon pine



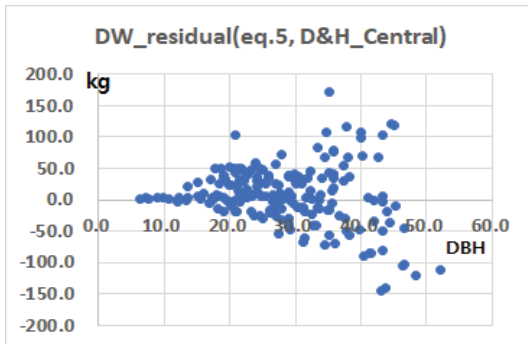
(b) Residual on eq.6 in Kangwon pine



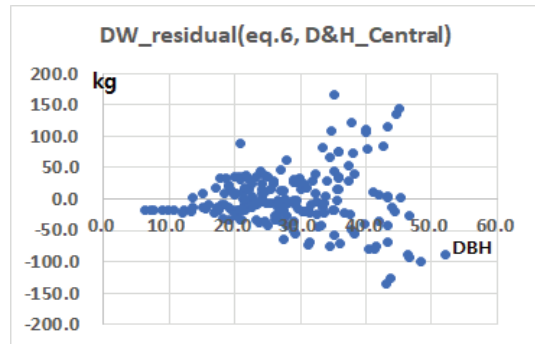
(c) Residual on eq.7 in Kangwon pine



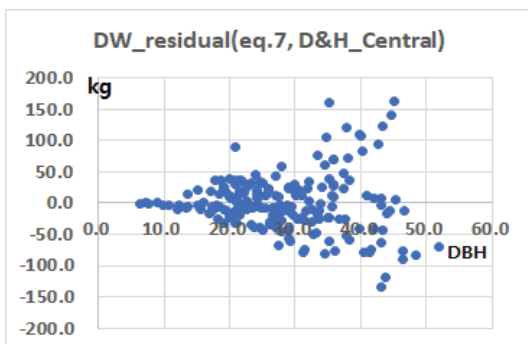
(d) Residual on eq.8 in Kangwon pine



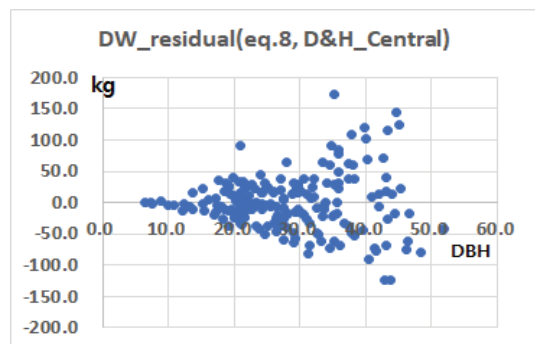
(e) Residual on eq.5 in Central pine



(f) Residual on eq.6 in Central pine



(g) Residual on eq.7 in Central pine



(h) Residual on eq.8 in Central pine

Figure 4. Residual scatter diagram for dry weight estimation equations using DBH and height in *Pinus densiflora* forest (Kangwon and Central pine).

Table 7. Green weight table in *Pinus densiflora* forest (Kangwon pine)

(Unit : kg)

DBH(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
DBH variable only	16.9	32.3	52.6	77.9	108.1	143.1	183.1	228.0	277.8	332.5	392.1	456.6	526.1	
Height (m)	3	7.1	11.9	17.8	24.6	32.5	41.3	51.1	61.7	73.2	85.6	98.8	112.9	127.8
	4	8.9	14.9	22.3	30.9	40.8	51.9	64.1	77.5	91.9	107.5	124.1	141.7	160.4
	5	10.6	17.8	26.6	36.9	48.7	61.9	76.5	92.4	109.6	128.2	148.0	169.1	191.4
	6	12.3	20.6	30.7	42.6	56.2	71.5	88.3	106.7	126.6	148.1	171.0	195.3	221.1
	7	13.9	23.2	34.7	48.2	63.5	80.7	99.8	120.5	143.1	167.3	193.1	220.6	249.7
	8	15.4	25.8	38.6	53.5	70.6	89.7	110.9	134.0	159.0	185.9	214.6	245.2	277.5
	9	16.9	28.4	42.3	58.7	77.5	98.5	121.7	147.0	174.5	204.0	235.6	269.1	304.6
	10	18.4	30.8	46.0	63.8	84.2	107.0	132.3	159.8	189.7	221.7	256.0	292.5	331.1
	11	19.8	33.2	49.6	68.8	90.8	115.4	142.6	172.3	204.5	239.1	276.1	315.4	357.0
	12	21.2	35.6	53.1	73.7	97.3	123.6	152.8	184.6	219.1	256.1	295.7	337.8	382.4
	13	22.6	37.9	56.6	78.6	103.6	131.7	162.7	196.6	233.4	272.8	315.0	359.9	407.4
	14	24.0	40.2	60.0	83.3	109.9	139.7	172.6	208.5	247.4	289.3	334.0	381.6	431.9
	15	25.3	42.5	63.4	88.0	116.0	147.5	182.2	220.2	261.3	305.5	352.8	403.0	456.1
	16	26.7	44.7	66.7	92.6	122.1	155.2	191.8	231.7	275.0	321.5	371.2	424.1	480.0
	17	28.0	46.9	70.0	97.1	128.1	162.8	201.2	243.1	288.5	337.3	389.4	444.9	503.6
	18	29.3	49.0	73.2	101.6	134.0	170.3	210.5	254.3	301.8	352.9	407.4	465.5	526.9
	19	30.5	51.2	76.4	106.0	139.9	177.8	219.7	265.4	315.0	368.3	425.2	485.8	549.9
	20	31.8	53.3	79.6	110.4	145.7	185.1	228.8	276.4	328.0	383.5	442.8	505.9	572.6

Table 8. Green weight table in *Pinus densiflora* forest (Central pine).

(Unit : kg)

DBH(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
DBH variable only	9.1	23.0	42.4	67.3	97.5	133.3	174.4	221.1	273.1	330.6	393.6	462.0	535.9	
Height (m)	3	4.4	7.2	10.7	14.6	19.1	24.1	29.6	35.6	42.0	48.9	56.2	63.9	72.1
	4	6.1	10.0	14.7	20.2	26.5	33.4	41.0	49.2	58.1	67.6	77.7	88.3	99.6
	5	7.8	12.9	18.9	26.0	34.0	42.9	52.7	63.3	74.7	86.9	99.8	113.6	128.0
	6	9.6	15.8	23.3	31.9	41.8	52.7	64.7	77.7	91.7	106.6	122.6	139.4	157.2
	7	11.4	18.8	27.7	38.0	49.7	62.7	76.9	92.4	109.0	126.9	145.8	165.9	187.0
	8	13.2	21.8	32.2	44.2	57.7	72.8	89.4	107.4	126.7	147.4	169.5	192.8	217.3
	9	15.1	24.9	36.7	50.4	65.9	83.2	102.1	122.6	144.7	168.3	193.5	220.1	248.1
	10	17.0	28.0	41.3	56.8	74.2	93.6	114.9	138.0	162.9	189.5	217.8	247.8	279.4
	11	18.9	31.2	46.0	63.2	82.6	104.2	127.9	153.7	181.4	211.0	242.5	275.9	311.0
	12	20.9	34.4	50.8	69.7	91.1	115.0	141.1	169.5	200.0	232.7	267.5	304.3	343.0
	13	22.8	37.7	55.5	76.3	99.7	125.8	154.4	185.5	218.9	254.6	292.7	332.9	375.4
	14	24.8	41.0	60.4	82.9	108.4	136.7	167.8	201.6	237.9	276.8	318.1	361.9	408.0
	15	26.8	44.3	65.3	89.6	117.2	147.8	181.4	217.9	257.1	299.2	343.8	391.1	441.0
	16	28.9	47.6	70.2	96.4	126.0	158.9	195.1	234.3	276.5	321.7	369.7	420.6	474.2
	17	30.9	51.0	75.1	103.2	134.9	170.1	208.8	250.8	296.0	344.4	395.9	450.3	507.7
	18	33.0	54.4	80.1	110.0	143.9	181.5	222.7	267.5	315.7	367.3	422.2	480.2	541.5
	19	35.0	57.8	85.2	116.9	152.9	192.8	236.7	284.3	335.5	390.4	448.7	510.4	575.4
	20	37.1	61.2	90.2	123.9	162.0	204.3	250.8	301.2	355.5	413.6	475.3	540.7	609.6

Table 9. Dry weight table in *Pinus densiflora* forest (Kangwon pine).

(Unit : kg)

DBH(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
DBH variable only	5.7	12.6	21.9	33.7	47.9	64.7	83.9	105.6	129.7	156.4	185.5	217.1	251.1	
Height (m)	3	3.2	5.4	8.2	11.6	15.5	19.9	24.8	30.2	36.1	42.5	49.3	56.7	64.5
	4	3.9	6.7	10.2	14.4	19.2	24.7	30.8	37.5	44.9	52.8	61.3	70.5	80.2
	5	4.7	8.0	12.1	17.1	22.8	29.2	36.5	44.4	53.1	62.5	72.6	83.4	94.9
	6	5.3	9.2	13.9	19.6	26.1	33.6	41.8	51.0	60.9	71.7	83.3	95.7	108.9
	7	6.0	10.3	15.6	22.0	29.4	37.7	47.0	57.3	68.5	80.6	93.6	107.6	122.4
	8	6.6	11.4	17.3	24.3	32.5	41.7	52.0	63.3	75.7	89.1	103.6	119.0	135.4
	9	7.3	12.4	18.9	26.6	35.5	45.6	56.8	69.2	82.8	97.4	113.2	130.1	148.0
	10	7.9	13.5	20.5	28.8	38.4	49.4	61.5	75.0	89.6	105.5	122.6	140.8	160.3
	11	8.4	14.5	22.0	30.9	41.3	53.0	66.1	80.6	96.3	113.4	131.7	151.4	172.2
	12	9.0	15.5	23.5	33.0	44.1	56.7	70.6	86.1	102.9	121.1	140.7	161.6	183.9
	13	9.6	16.4	24.9	35.1	46.9	60.2	75.0	91.4	109.3	128.6	149.5	171.7	195.4
	14	10.1	17.4	26.4	37.1	49.6	63.7	79.4	96.7	115.6	136.1	158.1	181.6	206.7
	15	10.7	18.3	27.8	39.1	52.2	67.1	83.6	101.9	121.8	143.3	166.5	191.3	217.7
	16	11.2	19.2	29.2	41.1	54.8	70.4	87.8	107.0	127.9	150.5	174.9	200.9	228.6
	17	11.7	20.1	30.6	43.0	57.4	73.7	91.9	112.0	133.9	157.6	183.0	210.3	239.3
	18	12.3	21.0	31.9	44.9	59.9	77.0	96.0	116.9	139.8	164.5	191.1	219.6	249.9
	19	12.8	21.9	33.2	46.8	62.4	80.2	100.0	121.8	145.6	171.4	199.1	228.8	260.3
	20	13.3	22.7	34.6	48.6	64.9	83.3	103.9	126.6	151.3	178.1	207.0	237.8	270.6

Table 10. Dry weight table in *Pinus densiflora* forest (Central pine).

(Unit : kg)

DBH(cm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
DBH variable only	5.1	12.1	21.9	34.3	49.4	67.2	87.7	110.8	136.6	165.1	196.3	230.2	266.7	
Height (m)	3	2.2	3.6	5.3	7.3	9.5	12.0	14.7	17.6	20.8	24.1	27.7	31.5	35.5
	4	3.0	5.0	7.4	10.1	13.2	16.6	20.3	24.4	28.8	33.4	38.4	43.6	49.2
	5	3.9	6.4	9.5	13.0	16.9	21.3	26.2	31.4	37.0	43.0	49.4	56.2	63.3
	6	4.8	7.9	11.6	15.9	20.8	26.2	32.1	38.6	45.5	52.9	60.7	69.0	77.8
	7	5.7	9.4	13.8	19.0	24.8	31.2	38.3	45.9	54.1	62.9	72.3	82.2	92.6
	8	6.7	10.9	16.1	22.1	28.8	36.3	44.5	53.4	63.0	73.2	84.1	95.6	107.7
	9	7.6	12.5	18.4	25.2	32.9	41.5	50.8	61.0	71.9	83.6	96.0	109.2	123.0
	10	8.6	14.1	20.7	28.4	37.1	46.7	57.3	68.7	81.0	94.2	108.2	123.0	138.6
	11	9.5	15.7	23.1	31.6	41.3	52.0	63.8	76.5	90.3	104.9	120.5	137.0	154.3
	12	10.5	17.3	25.5	34.9	45.6	57.4	70.4	84.4	99.6	115.8	132.9	151.1	170.3
	13	11.5	18.9	27.9	38.2	49.9	62.8	77.0	92.4	109.0	126.7	145.5	165.4	186.4
	14	12.5	20.6	30.3	41.5	54.2	68.3	83.8	100.5	118.5	137.8	158.3	179.9	202.7
	15	13.5	22.3	32.8	44.9	58.6	73.9	90.6	108.7	128.2	149.0	171.1	194.5	219.2
	16	14.6	24.0	35.2	48.3	63.1	79.5	97.4	116.9	137.9	160.3	184.0	209.2	235.7
	17	15.6	25.7	37.7	51.7	67.6	85.1	104.3	125.2	147.6	171.6	197.1	224.1	252.5
	18	16.6	27.4	40.3	55.2	72.1	90.8	111.3	133.6	157.5	183.1	210.3	239.0	269.3
	19	17.7	29.1	42.8	58.7	76.6	96.5	118.3	142.0	167.4	194.6	223.5	254.1	286.3
	20	18.7	30.8	45.4	62.2	81.2	102.3	125.4	150.5	177.4	206.2	236.9	269.3	303.4

Table 11. T-test results for comparison between previous weight table and new weight table.

Weight	Kangwon pine			Central pine		
	DF	T-value	p<0.01	DF	T-value	p<0.01
Green weight	467	2.9915	0.0029	467	15.2378	0.0000
Dry weight	467	5.3499	0.0000	467	20.7644	0.0000

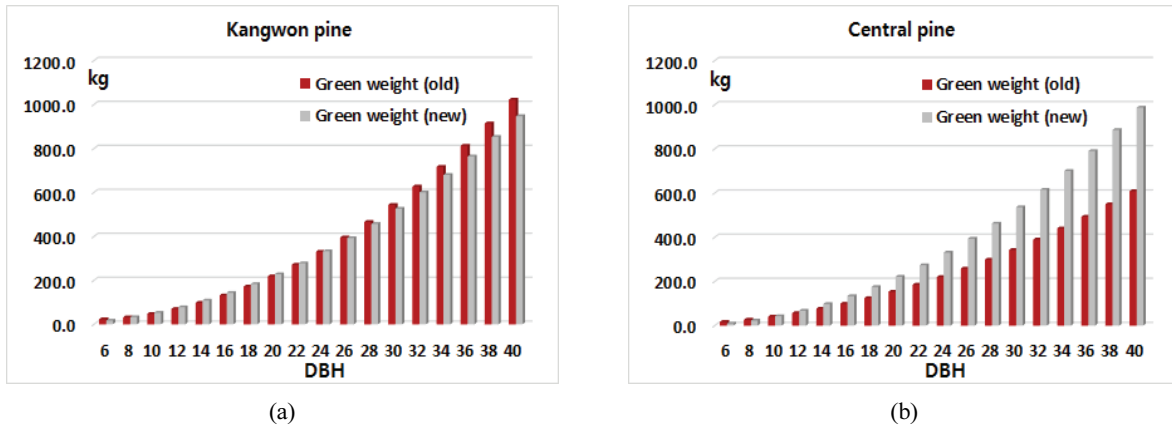


Figure 5. Comparison between previous green weight table and new green weight table in *Pinus densiflora* forest (Kangwon, a and Central pine, b).

Table 9와 Table 10과 같이 도출하였다. 강원지방 및 중부지방소나무 건증량 차이를 비교해 본 결과, 생증량표에서와 마찬가지로 중부지방소나무의 건증량이 동일 등급에서 더 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

3. 기존 증량표와의 비교

현재 사용하고 있는 2001년 국립산림과학원에서 작성한 증량표와 이번 연구에서 현실림을 반영하여 조사, 측정된 자료로서 도출된 신규 증량표를 상호 비교(t-test)하였다. Table 11에서 기존에 사용하고 있는 생증량과 건증량표 모두 새롭게 만들어진 증량표와는 통계적인 유의적 차이가 있는 것으로 나타났다.

강원지방소나무와 중부지방소나무에 대한 기존의 생증량표와 이번 새롭게 만들어진 생증량 정보에 대한 차이를 확인하기 위하여 생증량만을 비교한 결과 Figure 5과 같다.

강원지방소나무의 경우 생증량은 신규 증량표가 현재 사용하고 있는 증량표의 값보다 낮은 것으로 나타났으나, 중부지방소나무의 경우는 그 반대로 기존 증량표 값보다 높게 나타났다. 특히 중부지방소나무는 등급이 증가함에 따라 증량의 차이가 더 많이 벌어짐을 알 수 있었다. 이러한 결과는 기존 소나무 증량표 개발을 위하여 수집한 자료는 표본설계 시 전국적으로 고르게 수집되지 않고 일부 지역에 편중되거나 누락된 지역이 많고 대부분 중, 소등급의 자료로 증량표가 개발되었기 때문인 것으로 확인할 수 있

었으며, 이번에 새롭게 개발된 증량표는 임상도 및 국가산림자원조사를 바탕으로 분포면적 및 경급 비율을 고려하여 최대한 지역 편중이 없도록 표본설계 하였고 기존 증량표보다 더욱 신뢰할 수 있는 자료라고 판단된다.

결론

본 연구는 현재 사용하고 있는 20년 전 유령림, 중경목 이하의 소나무림에서 조사, 측정한 생증량 및 건증량표를 현실림을 반영하여 새롭게 작성하기 위하여, 소나무림을 강원지방과 중부지방소나무림으로 구분하여 연구를 수행한 결과를 제시하고 있다.

이러한 연구는 산림현장에서 임목이 부피인 재적 단위로 거래되기도 하지만, 요즘은 미이용산림바이매스, 각종 재해 피해목, 활엽수 원목 거래 등 증량 단위 거래가 증가하고 있어 현실에 맞는 기준이 필요하며, 또한 도로 신설, 대단지 건축공사 등에서 발생하는 산림폐기물의 처리 작업공정도 임목의 증량 단위 정보가 필수적으로 사용되는 등, 그 범위가 다양해질 것으로 기대한다.

본 연구는 최적의 생증량 및 건증량 추정식으로 강원지방 및 중부지방소나무림의 증량에 대한 정보를 흉고직경만을 측정할 때와 흉고직경과 수고 모두를 측정하였을 때로 구분하여, 증량에 대한 정보를 획득할 수 있도록 증량표를 개발하였다.

현재 사용하고 있는 중량표와 이번 새롭게 작성한 중량표를 상호 비교한 결과, 강원지방소나무는 생중량, 건중량 모두 현재 사용중인 중량표가 경급별로 약간 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 중부지방소나무의 경우는 이번 개발한 신규 중량표가 생중량 및 건중량 모두 현재 사용하고 있는 중량표의 값보다 높은 값을 갖는 결과를 보였다. 특히 중부지방소나무는 경급이 커질수록 현재 중량표의 값과 더 큰 차이를 보여 주었다. 이와 같은 결과는 2000년 중량표 개발 당시 현지 조사는 주로 중경목 이하를 대상으로 표준목을 별목, 중량 측정과 소나무의 분포면적 및 경급비율을 고려하여 균일한 자료수집이 이루어지지 못했기 때문에 판단된다. 따라서 본 연구에서는 전국을 대상으로 체계적으로 표본설계하여 수집한 자료를 바탕으로 개발된 중량표로서 다양한 산림경영 활동 혹은 산업 현장에서 중량단위로 사용될 기준이 될 것으로 기대된다.

현재 사용하고 있는 중량표와 새롭게 만든 중량표 비교에서 강원지방 및 중부지방소나무의 결과가 경급 증가에 따른 상호 차이를 볼 수 있었는데, 향후 산림이 더욱 성숙해지고 산림구조가 변화하면 새로운 중량표 개발이 필요하다. 그러므로 국가산림자원조사 등의 자료를 지속적으로 분석·모니터링 하여 10년 주기 또는 20년 주기로 산림경영 및 입목 매각에 중요한 기준이 되는 중량표의 갱신이 필요하며, 재적표와 마찬가지로 소나무 외 주요 산림수종에 대해서도 전국단위의 새로운 중량표 개발 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산림청 국립산림과학원 일반연구과제 연구비로 수행되었음(과제번호: FM0000-2020-01-2021).

References

- Aldred, A.H. and Alemdag, I.S. 1988. Guidelines for forest biomass inventory. Canadian Forest Service, Information Report PI-X-77. pp. 134.
- Baskerville, G.L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. Canadian Journal of Forest Research 2(1): 49-53.
- Boysen-Jensen, P. 1932. Die Stoffproduktion der pflanzen. Jena, G. Fischer. pp. 108.
- Cunia T. 1964. Weighted least square method and construction of volume tables. Forest Science 10: 180-191.
- Kim, C.R. 2000. SAS, a statistic box. Data Plus. pp. 592.
- Kim, G.D. and Kim, C.M. 1988. Analysis of studies on production of forest biomass in Korea, Journal of Korea Forestry Energy 8(2): 94-107.
- Kim, G.D. and Lee, K.J. 1983. A study on the biomass of 63 years old *Larix leptolepis* stands. Research Bulletin of Seoul National University Forest (19): 30-36.
- 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.
- Kim, K.D., Park, I.H. 1989. Biomass and net production of *Sasa purpurascens* at a vally in Mt. Baeun area. Research Bulletin of Seoul National University Forest (25): 15-21.
- 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 Nostrandm R.S. 1981. Biomass equations for tree species in Central Newfoundland. Environment Canada, Forestry Service, Information Report N-X-199. pp. 43.
- Lee, K.H., Chung, Y.G. and Son, Y.M. 1998. A study on the biomass of 35 years old *Pinus koraiensis* plantation, Pochun, Gyeonggi-do. The Journal of Korean Forest Measurement 1(1): 61-68.
- 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.H., Son, Y.M. and Chung, Y.G. 1999. Tree stem weight equations for *Pinus densiflora* in Kangwon Province. Korea Forest Research Institute Journal of Forest Science (63): 41-50.
- 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.
- Marshall, P.L. and Wang, Y. 1995. Above ground tree biomass of interior uneven-aged douglas-fir stands. FRDA II, Canada. pp. 23.
- National Institute of Forest Science. 2001. Volume and weight table. pp. 253.
- National Institute of Forest Science. 2007. Survey Manual for Forest Biomass and Soil Carbon. pp. 74.
- Nautiyal, J.C. and Belli, K.L. 1989. Study of production function for modelling forest biomass: an area for research.

- Forest Science 35(3): 843-849.
- Ouellet, D. 1985. Biomass equations for six commercial tree species in Quebec. The Forestry Chronicle 61(3): 218-222.
- Pardé, J. 1980. Forest biomass. Forestry Abstracts Review Article 41(8): 343-362.
- 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.
- Park, I.H., Seo, Y.K., Kim, D.Y., Son, Y.H., Yi, M.J. and Jin, H.O. 2003. Biomass and net production of *Quercus mongolica* stand and a *Quercus variabilis* stand in Chuncheon, Kangwon-Do. Journal of Korean Forest Society 92(1): 52-57.
- 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. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, Research paper SO-206. pp. 4.
- Son, Y.M., Lee, K.H. and Kim, R.H. 2007. Forest biomass estimation in Korea. Journal of Korean Forest Society 96(4): 477-482.
- 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.
- Yim, K.B., Lee, K.J. and Kwon, T.H. 1984. Spatial distribution of biomass and production in *Pinus rigida* × *taeda* plantation in Korea. Journal of Korea Forestry Energy Research Society 4(1): 1-8.

Manuscript Received : October 12, 2022
 First Revision : November 17, 2022
 Second Revision : December 1, 2022
 Third Revision : December 5, 2022
 Accepted : December 6, 2022