

Study Note

정주지 주요 관목의 탄소저장량 분석을 위한 상대성장식 개발

– 세종시 개나리, 수수꽃다리를 중심으로 –

김학구* · 이정민** · 강지우* · 최다연* · 강지영* · 황유경* ·
박다은* · 피정훈* · 권용진* · 진병철*** · 김찬범*

한국수목원정원관리원 도시생물다양성실*, 고려대학교 생명환경과학대학원**, SK임업(주)***

Development of Allometric Equations for Carbon Storage Analysis of Shrubs in Settlement

– *Forsythia koreana* and *Syringa oblata* var. *dilatata* in Sejong-si –

Hakkoo Kim* · Jungmin Lee** · Jiwoo Kang* · Dayeon Choi* · Jiyoung Kang* ·
Yugyeong Hwang* · Daeun Park* · Junghun Pi* · Yongjin Kwon* ·
Byungcheol Jin*** · Chan-Beom Kim*

Urban Biodiversity Division, Korea Arboreta and Gardens Institute*

Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University**
SK Forest Co. Ltd.***

요약: 이 연구는 정주지에서 흔히 식재되는 개나리와 수수꽃다리를 대상으로 상대성장식을 개발하고, 이에 적합한 변수를 제시하기 위한 목적으로 수행되었다. 개나리와 수수꽃다리는 대한민국 전역의 정주지에 식재되며, 조경이나 옥상녹화 등에 활용되는 수종이다. 상대성장식은 주로 수목의 직경, 수고, 수관면적 등의 생육 특성에 기반해 탄소저장량을 추정하는 식이다. 개나리와 수수꽃다리는 직경, 수고, 수관폭 등 다양한 변수를 측정하고, 식물체를 부위별(잎, 가지, 줄기, 뿌리)로 구분하여 건중량을 측정하였다. 측정값과 탄소함량비를 활용하여 탄소저장량을 산정하고 각 변수의 중요도와 상관성을 평가하여 적합한 변수로 근원직경을 채택하였다. 수고와 수관폭도 일부 지표에서 유의미한 상관성을 확인하였다. 상대성장식 개발결과, $DW=ax^b$ 형태의 모델에서 가장 높은 설명력을 확인하였다. 이러한 연구결과는 정주지에서의 탄소저장량을 정량화하고, 국가 탄소중립 정책에 기여할 기초자료로 활용될 것이다.

주요어: 관목, 상대성장식, 탄소저장량, 정주지

First Author: Hakkoo Kim, Tel: +82-44-251-0218, E-mail: hakkoo1@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-4300-7590

Corresponding Author: Chan-Beom Kim, Tel: +82-44-251-0211, E-mail: misdb83@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-3373-2000

Co-Authors: Jungmin Lee, Tel: +82-02-3290-4112, E-mail: snowbunting@korea.ac.kr, ORCID: 0000-0002-6730-6034

Jiwoo Kang, Tel: +82-44-251-0220, E-mail: wo902@naver.com, ORCID: 0000-0001-6780-4845

Dayeon Choi, Tel: +82-44-251-0220, E-mail: son0375666@naver.com, ORCID: 0000-0002-5817-0953

Jiyoung Kang, Tel: +82-44-251-0299, E-mail: pingu045@koagi.or.kr, ORCID: 0009-0007-5946-6103

Yugyeong Hwang, Tel: +82-44-251-0251, E-mail: aragonjr@koagi.or.kr, ORCID: 0009-0006-6399-0816

Daeun Park, Tel: +82-44-251-0295, E-mail: ecology@koagi.or.kr, ORCID: 0009-0004-8310-0513

Junghun Pi, Tel: +82-44-251-0173, E-mail: ecopjh@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-2383-3991

Yongjin Kwon, Tel: +82-44-251-0197, E-mail: yjk072@koagi.or.kr, ORCID: 0009-0006-9760-9358

Byungcheol Jin, Tel: +82-31-637-3606, E-mail: trustjin90@sk.com, ORCID: 0009-0005-9338-1336

Received: 9 November, 2024. Revised: 25 November, 2024. Accepted: 28 November, 2024.

Abstract: This study was conducted to develop an allometric equation for *Forsythia koreana* and *Syringa oblata* var. *dilatata*, commonly planted in settlements, and to identify suitable variables for this model. *F. koreana* and *S. oblata* var. *dilatata* are widely planted across Korea and are used in landscaping and rooftop greening. The allometric equation is primarily based on growth characteristics such as tree diameter, height, and canopy area to estimate carbon storage. For *F. koreana* and *S. oblata* var. *dilatata* variables like diameter, height, and canopy width were measured. The plants were divided into sections (leaves, branches, stems, and roots) for biomass measurement. Using these measurements and carbon content ratios, carbon storage was calculated, and the importance and correlations of each variable were evaluated, with Root collar diameter identified as the primary variable. Height and canopy width also showed significant correlations in some indicators. The developed allometric equation achieved the highest explanatory $DW=ax^b$ of the power form based allometric model. These findings can serve as foundational data for quantifying carbon storage in settlements and supporting national carbon neutrality policies.

Keywords: Shrub, Allometric Equation, Carbon Storage, Settlement

I. 서론

개나리와 수수꽃다리는 정주지에서 흔하게 식재되는 낙엽 활엽 관목이다. 개나리는 내서성, 내건성이 좋고, 증식이 쉬워 대한민국 전역에 다량으로 식재된다(Park 2023). 수수꽃다리는 건조지역에서의 적응성이 강해 옥상녹화 소재로도 활용될 수 있으며(Shin & Li 2014), 경관적으로 아름다운 특징을 가지고 있어 조경 공사 등에 많이 활용되고 있다(Jung 2019). 또한 내서성, 내건성이 좋고, 증식이 쉬워 대한민국 전역에 식재되고 있다(Lee et al. 2011).

상대생장식은 수목의 성장 패턴을 예측하는 데 사용되며(Ali et al. 2015), 수목의 직경, 높이와 같은 현장 측정자료를 이용해 복잡한 건중량 산정과정을 생략하고 산출물을 얻을 수 있다. 상대생장식은 주로 직경, 수고, 수관면적과 같은 생육특성 자료에 기반하여 수목의 건중량을 추정한다. 다만 수종, 개체마다 생육특성이 상이하여 상대생장식 개발에 요구되는 변수는 다양하다. 일반적으로 상대생장식으로 건중량을 추정할 때에는 직경, 수고, 수관면적이 가장 많이 사용된다. 이는 나무의 생리적 상태와 탄소저장 잠재력에 직접적인 영향을 미치거나, 직경이 클수록 줄기 부피가 커지고 탄소저장량이 증가하기 때문이다(Nowak & Crance 2002). 수관면적은 나무의 가지와 잎이 차지하는 공간을 의미하며, 나무의 광합성 능력을 반영하는 중요한 지표이다. 수

관면적이 클수록 더 많은 양의 이산화탄소를 흡수할 수 있으며, 이는 수목의 탄소저장 능력에 직접적인 영향을 미친다. 특히, 수관면적은 나무의 생리적 특성뿐만 아니라, 나무가 자라는 환경에 따라 크게 달라지기 때문에 상대생장식 개발 시 중요한 변수로 고려된다. 최근 연구에서는 원격탐사와 수관면적 측정 자료를 결합하여 탄소저장량을 간접 추정하는 방법도 고려되고 있다(Wang et al. 2021b).

상대생장식을 개발할 때는 직경, 수고, 수관면적 외에도 나무의 뿌리, 잎 면적 등의 추가 변수를 고려할 수 있다. 이러한 변수들은 수목의 성장특성과 탄소저장 능력을 비교할 수 있는 요소로 작용되며, 이를 통해 더 정확한 상대생장식을 개발할 수 있다(Navarro et al. 2013).

교목은 상대생장식 개발 시 생육특성 상 줄기의 비율이 높아 수고와 흉고직경(Diameter of breast height; DBH)를 채택하여 사용하고 있다. 다만, 관목은 수고가 낮은 경우가 많아 DBH 대신 근원직경(Root collar diameter; R)값을 사용하고 있다(Wang et al. 2021a).

IPCC(2006)에서는 정주지에서 탄소저장량 산정을 위한 상대생장식 개발 방법론으로 Tier 2a: 수관면적방법과 Tier 2b: 단일개체생장방법을 제시하고 있다. 본 연구에서는 단일개체생장방법을 채택하여 개나리와 수수꽃다리의 상대생장식을 제시하고자 한다. 또한 다양한 변수 선택 과정을 거쳐 관목 상대생장식 개발 시

활용할 수 있는 가이드라인을 제시하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 세종시 전의면 일대의 양묘장에서 생산한 동일 환경의 식물체로 상대생장식 개발 연구를 수행하였다. 식물체는 병해충 등 생육 이상이 확인되지 않은 정상적인 개체를 샘플링하여 굴취하였다. 선행연구(Weber et al. 2017)를 참고하여 3년생 미만의 식물체는 증식방법에 따라 탄소함량비에 차이가 있어 3년생 이상의 다양한 수령(3-15년생)의 식물체를 확보하여 연구를 수행하였다. 공시재료는 개나리(*F. Koreana*), 수수꽃다리(*S. oblat*) 등 2종이며, 각각 51개체, 52개체 총 103개체를 확보하여 수행하였다.

상대생장식 개발을 위해 측정된 변수는 근원직경(Root collar diameter; R), 수고, 수관폭, 잎면적, 뿌리폭, 뿌리길이 등이다. 근원직경은 소수점 둘째자리까지 측정하였으며, 근원직경을 제외한 각각의 변수들은 소수점 첫째자리까지 현지조사표에 기록하였다. 근원직경은 버니어캘리퍼스도 뿌리와 줄기가 분기되는 근원부를 측정하였다. 수고는 줄기 끝 초두부 또는 잎 끝부터 근원부까지를 측정하였다. 수관폭과 뿌리폭은 장측과 단측을 측정하여 평균하였다. 잎면적은 분석스캐너(Perfection. V700, Epson, Japan)와 소프트웨어(Winseedle, Regent Instruments Inc, Canada)를 활용하여 개체당 임의추출 방법으로 잎 10개를 채취하여 평균하였다. 뿌리길이는 근원부로부터 뿌리 끝까지를 측정된 값을 평균하였다.

부위별 상대생장식 개발을 위해 식물체를 4부위(잎+소지, 가지, 줄기, 뿌리)로 구분하여 건중량을 측정하였다. 각 시료는 이물질을 에어건 등으로 제거하고, 고온 건조기에서 85°C로 향량될 때까지 건조하였다. 건조한 시료는 부위별로 무게를 g단위로 측정하였다. 건조한 시료는 미세입자(2mm) 크기 이하로 분쇄하였다(KFRI 2007).

분쇄한 시료는 탄소함량비 산정을 위해 원소분석기(Vario Macro Cube, Elementar, Germany)를 통해 1,000°C 이상의 고온으로 연소시킨 다음 기체를 가스 크로마토

그래피 과정을 통해 이산화탄소를 포집하였다. 산출된 부위별 탄소함량비는 3회 반복값을 평균하였다.

2. 선행연구 검토

관목 상대생장식 개발은 교목과 달리 미미한 실정이며, 소수의 연구자들을 중심으로 연구가 수행되고 있다. 기존에는 산림 교목 연구를 중심으로 수행되었지만, 최근 정주지 등에 활용할 수 있는 생활권 녹지 관목을 대상으로 상대생장식 개발이 수행되고 있다(Wang et al. 2021a; Kim et al. 2022; Kim et al. 2024). 특히, 변수 선택 알고리즘 과정을 거쳐 근원직경을 상대생장식 개발 시 가장 적합한 변수로 제시하였다. Wang et al. (2021a)은 중국 내 관목을 대상으로 원격탐사 등에 활용 가능한 수관면적-건중량 간 상대생장식을 개발하였으며, 기존 문헌에서 제시된 상대생장식과 비교하였다. Miranda et al.(2022)은 알고리즘으로 변수 선택과 검증 과정을 거쳤으며, Ye et al.(2021)과 Huy et al.(2022)는 머신러닝을 활용하여 상대생장식의 적합도를 높였다.

유엔식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAO)는 교목의 건중량 상대생장식 개발을 위한 가이드라인을 제시하였으며, 모델 변수 선택과 성능 평가를 위한 방법으로 R^2 , RMSE, AIC(BIC) 등을 제시하였다(FAO 2012).

상대생장식은 나무의 나이, 군락 형태, 서식지 요인에 따라 달라질 수 있으며(Slik et al. 2013), 강수량, 온도, 지리적 범위, 층위단계, 샘플링, 현장 변화, 토양환경, 교란, 생물다양성 등과 같은 요인에 의해서도 변화된다는 것이 제시되었다(Muller-Landau, 2004; Mani & Parthasarathy 2007; Woodcock 2000; Keduolhouvonuo & Kumar 2017). 대부분의 교목 수종은 DBH를 독립변수로 사용한 상대생장식에서 충분한 설명력을 나타냈다. 수고를 독립변수로 추가하면, 일부 수종에서 설명력을 높이는 결과를 확인하였다(Pati et al. 2022).

선행연구와 같이 교목은 상대생장식 개발을 위해 일반적으로 DBH와 수고를 변수로 사용하며, 관목은 근원직경을 사용하는 것으로 확인되었다. 또한, 모델 선정을 위해 R^2 , RMSE 등을 지표로 활용하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 선행연구 결과를 참조하여, 상대생장식 개발을 위해 변수 선택 과정을 거쳐

Table 1. Results of Growth Chariterics for Variables Selections

Species	R ^a (mm)	H ^b (cm)	CW ^c (cm)	RL ^d (cm)	LA ^e (cm ²)
<i>F. koreana</i> ^f	10.69±5.32	95.3±52.5	98.2±50.3	25.3±7.4	6.9±1.5
	3.50-25.88	19.5-254.0	11.0-226.5	14.0-51.5	3.4-10.0
<i>S. oblata</i> var. dilatata	17.27±7.46	142.0±51.2	50.2±25.8	16.7±6.0	23.7±9.3
	5.30-29.27	32.0-234.5	14.0-114.0	8.5-46.0	4.9-50.3

Note: ^aRoot collar diameter, ^bHeight, ^cCrown width, ^dRoot length, ^eLeaf area, ^f $\frac{M \pm SD}{Min-Max}$

관목 상대생장식 개발 시 가장 적합한 변수가 무엇인지 확인하는 절차를 거쳤다. 또한, 모델 선정을 위해 R², RMSE 값을 비교하는 평가 과정을 거쳤다.

3. 분석모형 및 자료

본 연구는 수종별, 개체별 생육특성을 정확히 반영하고 부위별 상대생장식 개발을 위해 식물체를 4부위로 구분하였다. 구분한 시료의 건중량에 각 부위별 탄소함량비를 곱한 후 전체 탄소저장량을 산정하였다. 정리하면 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Total carbon storage(g·C)} = \\
 & + [\text{leaf and twig of Dry-weight(g)} \times \text{CF(C)}] \\
 & + [\text{branch of Dry-weight(g)} \times \text{CF(C)}] \\
 & + [\text{stem of Dry-weight(g)} \times \text{CF(C)}] \\
 & + [\text{root of Dry-weight(g)} \times \text{CF(C)}] \quad \text{식(1)}
 \end{aligned}$$

상대생장식의 변수 선택과정을 위해 생육특성 등 측정자료를 수집하고, 탄소저장량 간에 미치는 영향을 확인하였다. 변수 선택을 위한 방법으로는 1. 적합도 비교, 2. 요인분석 두 가지 방식을 채택·비교하였다.

적합도 비교는 머신러닝 등의 과정에서 예측모델 개발 시에 사용하는 알고리즘 과정 중 하나이며, 대표적으로 MRMR, F-test, RRelieff 등을 사용한다(Kim et al. 2024). MRMR은 탄소저장량과 관련성이 높고, 변수 간 중복된 요인을 최소화하여 변수를 추출하는 변수 선택 알고리즘이다(Yun & Yang 2008; Togacar et al. 2020). F-test는 변수와 탄소저장량 간의 상관성을 비교하는 수치이다(Dhanya et al. 2019). RRelieff는 변수들과 탄소저장량의 상대적 거리를 수치화한 지표이다(Robnik-Sikonja & Kononenko 1997). 요인분석은 변수 간 분산을 비교하기 위한 통계방법으로 변수들의 적합성과 상관성을 확인하는 과정이다(Kaise & Rice 1974). 본 연구

에서는 상관계수 0.5 미만인 결과는 불필요한 변수로 제외하였으며, 추출방법은 주성분 분석, 요인회전 방법은 배리맥스를 채택하였다. 변수들 간의 상관성을 확인하여 그룹핑하는 변수 선택과정을 거쳤으며, 고유 값 1이상의 성분 수로 요인 추출하였다.

선택된 변수는 변수-탄소저장량 간의 상대생장식을 부위별로 산정하였다. 상대생장식은 가장 대표적인 다항식($aD+b$), 지수($a \exp(bD)$), 로그($\ln D+b$), 멱급수(aD^b) 등 다양한 형태의 식을 선형·비선형의 반복 접근을 시도하는 방법으로 적합도(R²) 및 성능(RMSE)을 비교하여 가장 적합한 상대생장식을 선정하였다.

상대생장식 개발 등 모델 추정에는 Matlab R2024b (MathWorks, USA), 통계 및 검증에는 SPSS29.0(IBM, USA) 프로그램을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 생육특성 측정 및 변수 선택 결과

상대생장식의 변수 선정을 위한 생육특성 측정결과 (Table 1), 개나리와 수수꽃다리의 근원직경은 각각 $10.69 \pm 5.32\text{mm}$, $17.27 \pm 7.46\text{mm}$ 로 측정되었으며, 수고는 각각 $95.3 \pm 52.5\text{cm}$, $142.0 \pm 51.2\text{cm}$ 로 측정되었다. 수관폭은 각각 $98.2 \pm 50.3\text{cm}$, $50.2 \pm 25.8\text{cm}$ 로 측정되었으며, 뿌리길이는 각각 $25.3 \pm 7.4\text{cm}$, $16.7 \pm 6.0\text{cm}$ 로 측정되었다. 한편 잎면적은 각각 $6.9 \pm 1.5\text{cm}^2$, $23.7 \pm 9.3\text{cm}^2$ 로 측정되었다.

측정된 변수를 활용하여 상대생장식 개발을 위한 변수 선택과정 결과(Table 2), 개나리는 뿌리길이, 수관폭, 근원직경에서 높은 분석값을 나타냈다. 수수꽃다리는 근원직경, 수고, 수관폭에서 높은 분석값을 나타냈다.

Table 2. Comparison of Importance Scores for Variable Selection

Species	Type	Variable						
		R ^a	H ^b	CW ^c	RL ^d	RW ^e	LA ^f	
<i>F. koreana</i>	MRMR	0.00	0.00	0.00	2.22e-16	1.11e-16	-	
	F-Test	4.88	7.34	6.07	3.54	8.48	-	
	RReliefF	0.004	0.01	0.02	0.01	0.01	-	
	Fator Analysis	Commonality	0.83	0.81	0.71	0.51	0.80	-
		Component	0.91	0.90	0.90	0.84	0.82	-
KMO : 0.82		Barlett	$\chi^2 : 189.62, df : 15, p < 0.001$			No. of Ingredient : 1		
<i>S. oblata</i> var. <i>dilatata</i>	MRMR	0.21	0.03	0.12	0.00	0.00	-	
	F-Test	8.80	12.39	8.00	3.36	0.97	-	
	RReliefF	0.01	0.009	0.02	0.00	0.00	-	
	Fator Analysis	Commonality	0.80	0.77	0.64	-	-	0.60
		Component	0.89	0.88	0.80	0.77	0.63	0.61
KMO : 0.85		Barlett	$\chi^2 : 140.68, df : 15, p < 0.001$			No. of Ingredient : 1		

Note: ^aDiameter of root, ^bHeight, ^cCrown width, ^dRoot length, ^eRoot width, ^fLeaf area

개나리의 경우 뿌리의 중요도가 높게 나타났으나, 매우 낮은 값이며, 실제 현장에서 뿌리측정자료 획득에 어려움이 있어 활용성이 떨어진다. 수관폭은 RReliefF에서 가장 높은 값으로 나타나, 상대생장식 개발을 위한 변수로 고려해 볼 수 있을 것이다. 한편 잎면적은 상관성이 낮아 통계적 결과를 확인하지 못하였다. 수수꽃다리의 경우 개나리와 달리 뿌리의 중요도가 낮게 나타났으며, 전반적으로 근원직경이 가장 높고, 다음으로 수고와 수관폭이 높게 나타났다. 요인분석 결과는 근원직경의 상관성이 가장 높게 나타났다. 한편 개나리와 달리 잎면적에서 약간의 상관성이 확인되었으나, 다른 변수와 비교하여 높게 나타나진 않았다. 중요도와 요인을 종합적으로 검토해본 결과, 연구 대상종인 관목 2종은 근원직경에서 가장 높은 상관성과 중요도를 확인하였다. 또한 수고와 수관폭에서 일부 양의 상

관성을 확인하여 활용 가능성을 확인하였다. 반면, 선행연구(Forrester et al. 2017; Lee et al. 2024)와 같이 잎면적을 활용한 상대생장식 개발은 공시재료에 한정해서 통계적 상관성이 낮아 활용 가능성이 낮은 것으로 나타났다. 한편 수고, 수관폭은 Wang et al.(2021b)의 연구결과와 같이 상관성이 높게 확인되어 변수의 활용 가능성을 확인하였다.

2. 부위별 건중량 및 탄소함량비 산정 결과

상대생장식 개발을 위한 부위별 건중량 산정 결과(Table 3), 동일한 수령인 3-11년생 구간에서 개나리는 평균 89.06±98.51g, 수수꽃다리는 166.33±144.03g으로 측정되었다. 특히, 개나리는 식물체 건중량 비율이 뿌리(39.44%)에서 가장 높게 나타났으며, 수수꽃다리는 줄기(36.69%)에서 가장 높게 나타났다.

Table 3. Biomass by Parts

Species (y)	Biomass (g)				
	Total	Leaf · Twig	Brunche	Stem	Root
<i>F. koreana</i> (3-11)	$\frac{89.06 \pm 98.51}{2.93-520.26}$	$\frac{20.19 \pm 21.05}{22.67\%*}$	$\frac{16.67 \pm 31.10}{18.72\%}$	$\frac{18.32 \pm 23.33}{20.57\%}$	$\frac{35.12 \pm 32.32}{39.44\%}$
<i>S. oblata</i> var. <i>dilatata</i> (3-11)	$\frac{166.33 \pm 144.03}{5.46-566.79}$	$\frac{22.91 \pm 25.12}{13.78\%}$	$\frac{40.14 \pm 53.29}{24.14\%}$	$\frac{61.02 \pm 49.54}{36.69\%}$	$\frac{42.25 \pm 32.57}{25.40\%}$

* Percentage by part

Table 4. Carbon Fraction and Storage of Dry Matter by Species

Species (y)	Type*	Mean	Leaf Twig	Brunche	Stem	Root
<i>F. Koreana</i> (3-11)	CF(%)	44.42±1.80	46.20±0.71	45.97±1.29	45.79±1.21	42.66±1.16
	CS(gC)	18.25±20.29	4.14±4.32	3.39±6.50	3.86±4.91	6.86±6.31
<i>S. oblata</i> var. <i>dilatata</i> (3-11)	CF(%)	44.97±0.80	43.29±1.07	45.56±0.53	45.28±0.67	43.79±1.40
	CS(gC)	32.87±28.87	4.39±4.91	7.97±10.61	12.38±10.21	8.13±6.28

* CF : Carbon fraction (%), CS : Carbon storage (gC)

수종별 탄소함량 산정 결과(Table 4), 개나리의 탄소 함량비는 44.42%로, IPCC(2006) 기준(50%)보다는 낮고, 선행연구(Kim et al. 2022; Kim et al. 2023; Kim et al. 2024) 결과 범위(42-48%) 안에는 포함되는 것으로 확인되었다. 한편 개나리는 잎에서 가장 높은 탄소함량을 나타냈으며, 수수꽃다리는 가지에서 가장 높은 탄소함량을 나타냈다.

부위별 탄소저장량 산정 결과, 개나리는 수령 3-11년 생 기준 평균 18.25±20.29gC를 저장하는 것으로 나타났다. 수수꽃다리는 수령 3-11년생 기준 평균 32.87±28.87gC를 저장하는 것으로 확인되었다. 한편 개나리

는 잎의 탄소함량비가 가장 높았으나, 저장량은 뿌리에서 가장 높게 산정되었다. 따라서 뿌리 쪽으로 갈수록 탄소함량비가 낮아지고, 탄소저장량은 잎과 뿌리에서 높아지는 경향성이 확인되었다. 수수꽃다리는 잎의 탄소 함량비가 낮고, 뿌리로 갈수록 탄소 함량비가 낮아지는 경향을 보였으며, 탄소저장량은 줄기가 가장 많은 것으로 확인되었다.

3. 상대생장식 산정 결과

개체별 탄소저장량을 근원직경 변수를 활용한 상대생장식 모델링 결과(Table 5, Figure 1), 개나리 및 수수

Table 5. Allometric Equations by Species

Species (R range, mm)	Parts (n)	Allometric equation	a^a	b^b	R^{2c}	RMSE ^d	p^c	
<i>F. koreana</i> (3.5-25.9)	Leaf-Twig (35)	$DW=ax^b$	0.13	1.80	0.98	2.10	***	
	Branch (38)	$DW=ax^b$	0.002	3.42	0.99	2.58	***	
	Stem (39)	$DW=ax^b$	0.03	2.35	0.98	2.40	***	
	Root (37)	$DW=ax^b$	0.34	1.60	0.97	3.30	***	
	A-B ^f (36)	$DW=ax^b$	0.10	2.33	0.99	6.08	***	
	Total ^g	I. (46)	$DW=a \exp(bx)$	9.16	0.14	0.86	26.06	***
		II. (35)	$DW=ax+b$	11.10	-63.16	0.98	9.13	***
		III. (43)	$DW=a \log(x)+b$	56.66	-87.94	0.88	24.10	***
		IV. (34)	$DW=ax^b$	0.34	2.04	0.98	8.79	***
	<i>S. oblata</i> var. <i>dilatata</i> (5.3-29.3)	Leaf-Twig (49)	$DW=a \exp(bx)$	0.61	0.13	0.64	6.70	***
Branch (34)		$DW=ax^b$	-	4.63	0.97	4.35	***	
Stem (32)		$DW=ax^b$	0.16	1.73	0.97	4.16	***	
Root (35)		$DW=a \exp(bx)$	2.40	0.09	0.96	3.07	***	
A-B (34)		$DW=a \exp(bx)$	3.69	0.13	0.97	8.95	***	
Total		V. (44)	$DW=a \exp(bx)$	4.69	0.13	0.89	22.20	***
		VI. (49)	$DW=ax+b$	5.64	-29.41	0.56	43.76	***
		VII. (49)	$DW=a \log(x)+b$	81.85	-151.20	0.60	41.73	***
	VIII. (36)	$DW=ax^b$	0.02	2.64	0.97	11.17	***	

Note: ^{a,b} Parameters, ^c Coefficient of determination, ^d Root mean squared error, ^e * <0.05, ** <0.01, ***<0.001, ^f Above-ground,

^g I, II, IV (R : 3.5-23.8mm), III (R : 3.5-18.3mm), V, VI, VII, VIII (R : 5.3-29.3mm)

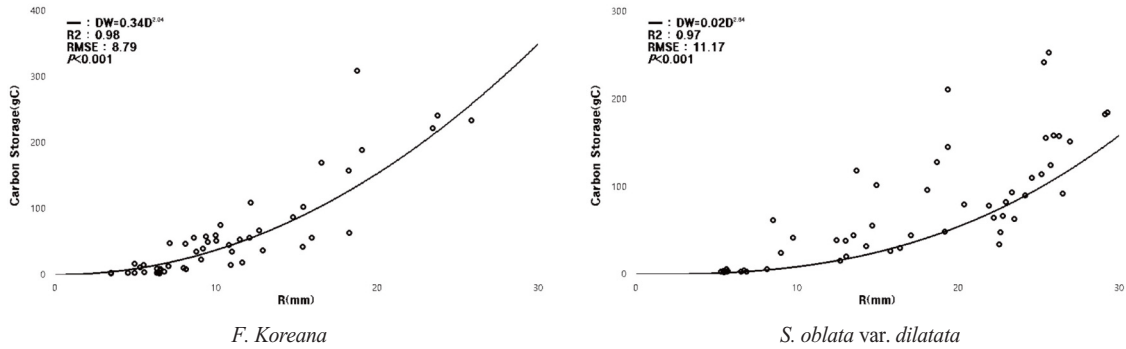


Fig. 1. Results of Allometric Equation of Shrubs in Settlement

꽃다리는 $DW=ax^b$ 형태에서 가장 높은 R^2 값과 가장 낮은 RMSE 값을 확인하였다($p < 0.001$). 한편 부위별로 R^2 값이 가장 높은 모델 형태가 다르게 확인되었는데, 이는 식물 종마다 갖는 고유의 생육특성에 기인한 것으로 판단된다(Weber et al. 2017).

IV. 결론

본 연구는 정주지 주요 관목 2종을 대상으로 상대생장식을 개발하였다. 또한 변수 선택과정을 거쳐 관목 상대생장식 개발 시 가장 적합한 변수를 제시하였다. 연구결과, 관목은 낮은 수고를 가진 생장특성으로 인해 상대생장식 개발 시 사용되는 변수로 근원직경이 가장 적합하였다. 다만 수종에 따른 생육특성의 차이가 있어 상대생장식 개발 시 수종별 변수선택 과정이 필요하다고 판단된다(Kim et al. 2024). 한편 근원직경과 탄소저장량 간 상대생장식 모델링 결과, $DW=ax^b$ 의 형태에서 R^2 값이 가장 높게 산정되었다.

현재까지 국내에서 정주지 부분 탄소저장량 산정 시 관목은 개발된 상대생장식과 활동자료의 부족으로 제외되었다. 선행연구에 의하면, 관목을 활용한 다층 식재 시 탄소흡수량이 약 18% 증진된다는 연구결과가 있어 수종별 상대생장식 개발이 요구되고 있다(Jo et al. 2020). 본 연구에서 개발한 상대생장식을 활용하면 정주지 부분의 관목 탄소저장량 산정에 근거자료로 활용될 수 있어, 향후 정주지 탄소흡수원의 기능 및 효과 증진에 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 자발적 탄소거래시장인 산림탄소상쇄제도에서도 식생복구 사

업지에 활용되어 정주지의 탄소흡수 기능을 정량화하는데 기여할 것으로 판단된다.

References

- Ali A, Xu MS, Zhao YT, Zhang QQ, Zhou LL, Yang XD, Yan ER. 2015. Allometric Biomass Equations for Shrub and Small Tree Species in Subtropical China, *Silva Fennica*. 49(4): 1275.
- Dhanya D, Paul IR, Akula SS, Sivakumar M, Nair JJ. 2019. A Comparative Study for Breast Cancer Prediction Using Machine Learning and Feature Selection, *IEEE* 19587779.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2012. "Manual for Building Tree Volume and Biomass Allometric Equations" from Field Measurement to Prediction.
- Forrester DI, Tachauer IHH, Annighoefer P, Barbeito I, Pretzsch H, Ruiz-Peinado R, Stark H, Vacchiano G, Zlatanov T, Chakraborty T, Saha S, Sileshi GW. 2017. Generalized Biomass and Leaf Area Allometric Equations for European Tree Species Incorporating Stand Structure, Tree Age and Climate, *Forest Ecology and Management*. 396: 160-175.
- Huy B, Truong NQ, Kheim NQ, Poudel KP, Temesgen H. 2022. Deep Learning Models for Improved

- Reliability of Tree Aboveground Biomass Prediction in the Tropical Evergreen Broadleaf Forests, *For. Ecol. Manag.* 508: 120031.
- IPCC. 2006. "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories". Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. 4.7-4.79.
- Jo HK, Park HM, Kim JY. 2020. Carbon Reduction and Enhancement for Greenspace in Institutional Lands, *J Korean Inst Landsc Archit.* 48(4): 1-7.
- Jung YJ. 2019. A Comparative Study of Species of Tree Applied to Scientific Name Questions of Engineer Landscape Architecture Examination and Landscape Planting Construction. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture.* 47(2): 1-12. [Korean Literature]
- Kaiser HF, Rice J. 1974. Little jiffy, mark IV, Educational and Psychological Measurement. 1974(34): 111-117.
- Keduolhouvonuo KH. 2017. Variation in Wood Specific Gravity of Selected Tree Species of Kohima District of Nagaland North Eastern Parts of India, *J. Pharmacogn. Phytochem.* 6(6): 70-74.
- Kim HK, Kim HS, Hong YS, Yun IS, Lim YK, Kang SK, Kim CB. 2022. Sequestration Factors Development and Comparison of Carbon Storage and Uptake by Shrubs for Urban Forests and Gardens, *Korean Institute of Forest Recreation and Welfare.* 26(4): 131-139. [Korean Literature]
- Kim HK, Kwon GW, Kim SH, Mun HJ, Hyung SJ, Hong YS, Pee JH, Kim CB. 2023. Comparison of Carbon Uptake of 50 Shrubs for the Promotion of Forest Welfare Services in Neighborhood Green Space to Climate Crisis, *Korean Institute of Forest Recreation and Welfare.* 27(4): 117-132. [Korean Literature]
- Kim HK, Kim HS, Kwon GW, Mun HJ, Kim SH, Hyung SJ, Jin BC, Kim CB. 2024. Development of Shrub Carbon Sequestration Factors to Improve Forest Welfare Services in Gardens and Urban Forests, *Korean Institute of Forest Recreation and Welfare.* 28(1): 13-28. [Korean Literature]
- KFRI (Korea forest Research Institute). 2007. Survey Analysis Standards of Forest Biomass and Soil Carbon, *Korea Forest Research Institute Res. Rep.*, p.74. Korean Literature]
- Lee JY, Park JS, Kim HR, Kim DY, Noh HS, Lee KE. 2011. Analysis of Landscape Planting in Gangwon-do. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture.* 39(2): 113-126. [Korean Literature]
- Lee JH, Baek GW, Lee JM, Kim CS. 2024. Allometric Equations for Estimating Carbon Stocks of *Thuja occidentalis* L. *Journal of Agriculture & Life Science.* 58(2): 91-99. [Korean Literature]
- Mani S, Parthasarathy N. 2007. Above-ground Biomass Estimation in Ten Tropical Dry Evergreen Forest Sites of Peninsular India. *Biomass Bioenergy.* 31: 284-290.
- Miranda EN, Barbosa BHG, Silva SHG, Monti CAU, Tng DYP, Gomide LR. 2022. Variable Selection for Estimating Individual Tree Height Using Genetic Algorithm and Random Forest. *Forest Ecology and Management.* 504: 119828.
- Muller-Landau HC. 2004. Interspecific and Inter-site Variation in Wood Specific Gravity of Tropical Trees. *Biotropica.* 36(1): 20-32.
- Navarro M, Moya M, Chazdon R, Ortiz E, Vilchez B. 2013. Successional Variation in Carbon Content and Wood Specific Gravity of Four Tropical Tree Species. *Environmental Science Bosque.* 34(1): 33-43.
- Nowak DJ, Crane DE. 2002. Carbon Storage and Sequestration by Urban Trees in the USA. *Environmental Pollution.* 116(3): 381-389.
- Park JY. 2023. Analysis of Planted Trees to Improve

- the Landscape and Naturalness of Seoul Forest. *Journal of the Korean Institute of Traditional Landscape Architecture*. 41(2): 19-25. [Korean Literature]
- Pati PK, Kaushik P, Khan ML, Khare PK. 2022. Allometric Equations for Biomass and Carbon Stock Estimation of Small Diameter Woody Species from Tropical Dry Deciduous Forests: Support to REDD+. *Trees, Forests and People*. 9: 100289.
- Robnik-Sikonja M, Kononenko I. 1997. An Adaptation of Relief for Attribute Estimation in Regression, *Machine Learning: Proceedings of the Fourteenth International Conference*. IcmL'97: 296-304.
- Shin CS, Li HX. 2014. Drought Resistance Assessment of Four Shrub Species Including *Nandina Domestica* for Extensive Green Roof. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 16(4): 267-273. [Korean Literature]
- Togacar M, Ergen B, Comert Z, Ozyurt F. 2020. A Deep Feature Learning Model for Pneumonia Detection Applying a Combination of MRMR Feature Selection and Machine Learning Models. *IRBM*. 41(4): 212-222.
- Ye Q, Yu S, Liu J, Zhao Q, Zhao Z. 2021. Aboveground Biomass Estimation of Black Locust Planted Forests with Aspect Variable Using Machine Learning Regression Algorithms. *Ecological Indicators*. 129: 107948.
- Yun CM, Yang JH. 2008 . Performance Improvement of Feature Selection Methods Based on Bio-Inspired Algorithms. *KTSDE*. 15(4): 331-340. [Korean Literature]
- Wang Y, Xu W, Tang Z, Xie Z. 2021a. A Biomass Equation Dataset for Common Shrub Species in China. *Earth System Science Data*. 2021-44.
- Wang W, Fang J, Tang Z, Zhu B. 2021b. Shrub Biomass and Carbon Storage in the Northern Part of China. *Ecological Applications*. 15(5): 1804-1814.
- Weber JC, Montes CS, Abasse TA, Sanquetta CR, Silva DA, Mayer S, Muniz GIB, Garcia RA. 2017. Variation in Growth, Wood Density and Carbon Concentration in Five Tree and Shrub Species in Niger. *New Forests*. 2017.
- Woodcock DW. 2000. Wood Specific Gravity of Trees and Forest Types in Southern Peruvian Amazon. *Acta Amaz*. 30: 589-599.