

유역단위에서의 임목평균흉고직경과 기온 간의 관계: 안동댐 유역을 중심으로

문주연¹ · 김문일^{1,2} · 임윤진³ · Piao Dongfan¹ · 임철희¹ · 김세진¹ · 송철호¹ · 이우균^{1*}

¹고려대학교 환경생태공학과, ²국제응용시스템분석연구소,

³국립기상과학원 응용기상연구과

(2016년 8월 4일 접수; 2016년 12월 5일 수정; 2016년 12월 17일 수락)

The Relationship between Stand Mean DBH and Temperature at a Watershed Scale: The Case of Andong-dam Basin

Jooyeon Moon¹, Moonil Kim^{1,2}, Yoonjin Lim³, Dongfan Piao¹, Chul-Hee Lim¹,
Seajin Kim¹, Cholho Song¹ and Woo-Kyun Lee^{1*}

¹Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Anam-dong 5ga, Seongbuk-gu, Seoul, 136-713, Room No. 322, East Bldg., College of Life Sciences and Biotechnology, Korea University

²International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA Schlossplatz 1. A-2361 Laxenburg, Austria, Europe

³Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, Korea

(Received August 4, 2016; Revised December 5, 2016; Accepted December 17, 2016)

ABSTRACT

This study aims to identify the relationship between climatic factors and stand mean Diameter at Breast Height (DBH) for two major tree species; *Pinus densiflora* and *Quercus mongolica* in Andong-dam basin. Forest variables such as age, diameter distribution and number of trees per hectare from the 5th and 6th National Forest Inventory data were used to develop a DBH estimation model. Climate data were collected from six meteorological observatory station and twelve Automatic Weather System provided by Korea Meteorological Administration to produce interpolated daily average temperature map with Inverse Distance Weighting (IDW) method. Andong-dam basin reflects rugged mountainous terrain, so temperature were adjusted by lapse rate based correction. As a result, predictions of model were consistent with the previous studies; that the rising temperature is negatively related to the growth of *Pinus densiflora* whereas opposing trend is observed for *Quercus mongolica*.

Key words: *Pinus densiflora*, *Quercus mongolica*, DBH growth, Climatic factors

I. 서 론

2015년 파리협약 채택 후 신기후체제 하에서 모든 당사국은 5년 단위로 감축 기여방안(Nationally Determined

Contribution, NDC)을 제출해야 하며, 이에 따라 온실가스 감축을 위해 산림부문의 중요성이 부각되었다. 국내에서도 신기후체제에 대응하여 산림이 국가감축목표 달성에 기여할 수 있도록 산림관리를 위한 계획수립의 중



* Corresponding Author : Woo-Kyun Lee
(leewk@korea.ac.kr)

요성이 증대되고 있다(KFS, 2016). 우리나라 산림관리의 기본 단위는 임분(Stand)이며, 임분의 축적, 탄소저장량 및 흡수량을 추정하기 위해 기본적으로 필요한 인자는 임분평균 흉고직경이다(Whittaker and Marks, 1975; Navar, 2009; KFRI, 2010). 종속변수가 많을수록 모형의 정확도가 높은 것이 일반적이지만, 수고의 경우 직경보다 측정오차가 발생할 확률이 높고 직경과 수고간에 긴밀한 상관관계가 존재하므로 흉고직경만을 독립변수로 하는 바이오매스 상대성장식도 현장에서 주요하게 사용되고 있다. 따라서 임분단위의 흉고직경을 정확하게 추정하고 예측하는 것은 국가 산림 자원의 현황 파악과 미래 예측, 관리 계획 수립 차원에서 중요한 것으로 인식되고 있다(KFRI, 2010). 임목의 직경생장은 다양한 환경 인자의 영향을 받으며 유전적 요인과 임령, 밀도, 지위지수 등의 입지 환경요인 이외에도, 해당 지역의 기온과 강수량과 같은 기후관련 인자가 중요한 역할을 한다(Park, 1993; Gavilán, 2005; Lee *et al.*, 2005; Grigorieva *et al.*, 2010; Lim *et al.*, 2016). 또한, 지형의 변이가 심한 산악지대에서는 고도에 따라서 기상차이가 크기 때문에 기온의 차이가 임목 생장에 미치는 영향을 알아보고 각 수종의 성장 전략을 파악하는 것이 매우 중요하다(KFS, 2011). 특히 기온은 토양온도, 일사량과 같은 다른 기후 지표와 달리 식생의 분포와 중, 단기적인 성장과도 직·간접적으로 연계되기 때문에 기상조건과 임목생장의 관계 파악과, 기후변화에 따른 미래 산림자원 변화 예측을 위해서도 중요하게 고려해야 할 요소이다(Kramer, 1982, Bae *et al.*, 2010).

우리나라에서도 온도, 강수량 등의 기상조건과 이에 따른 임목 성장과의 관계를 규명하는 연구는 지속적으로 수행되어 왔으며 지역별, 수종별로 다양한 측면에서 이루어지고 있다(Byun *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2014; Moon *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2016). Shin *et al.*(2008)은 입지유형별 미기후가 임목 생장에 미치는 영향을 분석하였고, Byun *et al.*(2013)은 전국단위에서 기후와 지형조건에 따른 주요 수종의 연년 직경성장량을 예측하였다.

그러나 산림생장과 기상인자의 관계를 규명하고, 기상인자를 고려한 성장모형을 개발하는데 있어 성장인자들과 기상자료의 공간적 속성 차이는 영향관계를 파악하는데 한계점으로 작용한다. 기상자료는 공간적으로 연속적인 분포패턴을 보이며 이에 따라 공간자기상관성을 갖는 반면 다른 성장영향인자(임령, 지위지수, 밀도)는 비공간적인 속성을 가지고 있다. 이와 같은 자료적 한계를 극복하기 위해 공간통계분석이 활용되고 있다. 공

간통계 분석은 공간자료와 비공간자료를 함께 분석할 때 발생할 수 있는 통계적인 오류들을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 결과해석에도 많은 도움을 주며, 이미 다양한 분야에서 적용되고 있다. 국내에서는 생태지역 분류(Jeong *et al.*, 2012), 성장영향인자 분포(Kim *et al.*, 2013), 기상인자 공간분포(Lim *et al.*, 2015) 등의 연구 분야에서 공간통계적인 방법이 적용되어왔으며, 공간적 분포 속성이 다른 산림생장인자와 기상인자의 관계를 복합적으로 규명하기 위한 연구에도 공간통계학적 방법이 활용되고 있다(Byun *et al.*, 2013).

본 연구에서는 자료의 속성과 공간성을 함께 고려하는 공간통계기법을 적용하여 자료가 가진 속성적 한계를 극복하고, 비슷한 기후적 특성을 가진 유역단위에서 임분평균흉고직경과 기상인자의 관계를 파악하고자 하였다. 이를 위해 제 5, 6차 국가산림자원조사(KFRI, 2011)의 표본점별 임분평균 흉고직경(Stand mean Diameter at Breast Height: DBH), 임령(age), 임분밀도(Number of trees per ha, Nha)를 바탕으로 직경추정모형을 구축하였으며, 안동댐유역에 조밀하게 설치된 수문기상관측소의 관측자료를 바탕으로 유역 단위의 상세한 미기후를 추정하고 이를 기반으로 기상인자가 직경생장에 미치는 영향을 파악하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지

본 연구의 대상지는 안동댐 유역으로 지리적으로 낙동강 유역 북동쪽인 동경 128°43'32", 북위 36°12'52" 사이에 위치하며 강원도 태백시 황지천에서 발원하였다. 행정구역별로는 경상북도 봉화군, 안동시, 태백시, 울진군, 영양군을 포함하는 유역이다(Fig. 1(a)). 낙동강 발원지에서 가장 가까운 곳에 위치하고 있으며 면적은 낙동강 전체 유역의 6.9% 정도에 해당하는 1,682km²이다. 권역 내 총 산림면적은 131,484ha로 북동쪽으로 형성된 태백산맥 일부를 포함하고 있으며 최고 고도가 1,564m에 이르는 산악지형이다(Ji *et al.*, 2012). 임분 유형은 소나무림이 전체 산림면적의 약 30%(40,006ha)를 차지하고 있으며, 침활혼효림 26%(35,349ha), 활엽수림 27%(34,902ha), 낙엽송림 10%(13,719ha) 순으로 구성되어 있다. 최근 10년간 평균기온은 10.25°C, 평균 최고기온은 16.44°C 및 평균최저기온은 6.44°C이며 연평균 강수량은 1,258mm 정도이다(KMA, 2016).

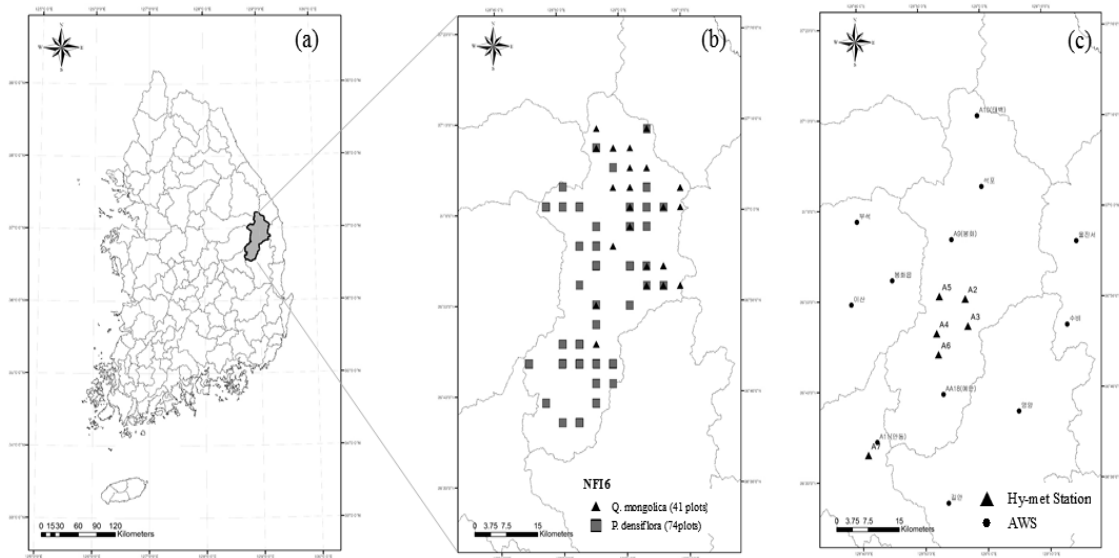


Fig. 1. (a) Location of study area (b) NFI 5, 6 investigation plots (c) Hy-met Station and AWS.

2.2. 제 5, 6차 국가산림자원조사 자료

본 연구는 NFI5, NFI6 자료를 사용하였으며, NFI5를 기반으로 안동댐 유역의 주요수종에 대해 흉고직경 추정모형을 구축하고 NFI6으로 검증을 실시하였다. NFI5는 2006년부터 2010년까지 수행되었으며, 전국 산림을 대상으로 계통추출법에 의해 배치된 약 4,000개의 고정표본점을 대상으로 조사하였다. NFI6은 NFI5에서 조사된 고정표본점을 대상으로 시간 경과에 따른 산림자원 및 산림생태계의 변화를 모니터링하기 위하여 2011년부터 2015년까지 시행되었다. 각 표본점은 5년 주기로 조사되었으며 모형의 정확도를 높이기 위해 자연적 교란(재해, 병해충 등)이나 인위적 교란(벌채, 간벌 등)이 관측된 임분은 본 연구에서 제외하였다. NFI5 표본점 조사자료 중 안동댐 유역의 주요수종인 소나무와 신갈나무의 임분자료는 각각 75개와 41개(Fig. 1(b))이

며, 자료의 수종별 통계량은 Table 1과 같다.

임분 내 임목의 직경생장은 임분의 환경과 매우 밀접한 관련이 있으며, 본 연구에서는 이를 대표할 수 있는 환경인자 중 임령(age), 지위지수(Site Index, SI), 임분밀도(Number of trees per hectare, Nha)를 사용하여 직경 추정모형을 구축하였다(식 (1)).

$$DBH = a \cdot age^b \cdot SI^c \cdot Nha^d \quad (1)$$

2.3. 기상자료

기상 환경이 직경 생장에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해 안동댐 유역의 NFI 조사지점에서 취득한 임분평균흉고직경 자료를 기상자료와 일치시켜 통계적 분석을 실시하였다. 기상자료는 연구 대상지의 정밀한 수문기상 관측을 위해 국립기상과학원에서 2011-2012

Table 1. The 6th National Forest Inventory data used for DBH prediction model

Variables	<i>Pinus densiflora</i>			<i>Quercus mongolica</i>		
	mean	min	max	mean	min	max
Age (year)	41.81	24	85	46.54	24	70
DBH (cm)	18.11	10.6	33.5	18.28	7.6	33
Elevation (m)	471.4	159	1129	828.0	364	1307
Nha	1450.02	375	3375	1109.82	287.5	2287.5
Site Index	12.91	8.04	20.30	12.36	6.85	18.50

년에 설치하여 운영 중에 있는 6개 수문기상관측망의 일별 기온자료를 사용하였으며, 임분 단위의 평균홍고직경과 상세하게 구축한 기상인자와의 분석을 위해 주변 지역의 기상청 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS) 자료를 추가적으로 사용하였다(Fig. 1(c)).

기후에 대한 성장반응은 수중에 따라 다양하지만 본 연구에서는 기상 인자 중 평균 기온만을 고려하였다. Kramer(1982)에 따르면 임분의 수분 공급이 충분할 경우, 1년 정도의 단기 직경 성장량은 강수량보다 기온 및 일조와 뚜렷한 관련이 있다고 밝혔다. 따라서 본 연구에서는 각 조사구의 재조사기간이 5년인 것을 고려하여 강수량, 습도 등의 수문인자보다는 기온 인자만을 고려하여 홍고직경과의 관계를 분석하였다.

본 연구에서는 기상자료에 따른 차이를 확인해보기 위해 안동댐 유역에 설치된 수문기상관측소(Hydro-meteorological Station, 이하 Hy-met Station) 6개소와 주변지역의 자동관측장비(AWS) 12 곳의 두 가지 기상자료와, 두 기상자료를 합친 자료를 포함하여 총 3가지 기상DB를 구축하였다. 이러한 관측점 기반 점 형태의 자료를 사용하여 보간 기법 중 대표적인 거리역산가중(Inversed Distance Weighted, IDW)기법을 적용하여 공간해상도 100m의 격자형(Raster)구조의 기상 자료를 구축하였다. 또한 기온자료 보간 시 안동댐 유역의 복잡한 지형에 따라 기상요소의 공간적 변동성이 큰 점을 고려하여 기온감률을 적용하였다(Yun *et al.*, 2000; Park and Jang, 2011; Lee *et al.*, 2011; Baek *et al.*, 2011).

특히 고해상도의 기상자료를 산출하는 방법 중 지형을 반영하는 기온감률 적용은 미관측 지점에 대해 비교적 정확도가 높은 결과를 보이는 것으로 밝혀진 바 있으며, 몇 백 미터 고도 차이에 따라 수종 분포나 기상조건이 급격하게 변화하는 산림환경에서는 특히 고해상도 기상자료 사용이 필요하다(Hamann and Wang, 2006; DeLong *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2012). 또한 기상관측망이 드문 산악지대에서 취득한 자료를 단순한 거리역산가중에 의한 내삽을 실시할 경우 실제와 다른 기온분포를 보이기 쉽기 때문에, 기존의 거리역산가중 기법을 토대로 고도-기온 관계를 결합한 공간내삽모형을 사용해 공간변이를 보다 정확하게 추정할 필요성이 있다(KEI, 2001).

따라서 본 연구에서는 일별로 제공된 기상자료에 기온감률을 적용하기 위해 식 (2)로 일별 기온감률을 계산한 후, 식 (3)에서 IDW 보간법을 이용하여 구축한 기

온자료에서 고도와 기온감률을 곱한 값을 감하여 공간 해상도 100m의 격자형(Raster)기온자료를 구축하였다(Yun *et al.*, 2000).

$$|T_{avg}| = 0.00688 + 0.0015 \cos 0.0172(i - 60) \quad (2)$$

$$T = T_i - \text{Elevation(m)} \times |T_{avg}| \quad (3)$$

* $|T_{avg}|$: Average temperature lapse rate

i = Julian day (Jan 1st = 1, Dec 31st = 365)

T_i : Daily temperature

2.4. 홍고직경추정모형의 적합도 및 잔차의 공간자 기상관분석

NFI5의 홍고직경, 임령, 임분밀도, 지위지수를 기본 자료로 통계프로그램인 SAS의 비선형회귀분석 모듈(Proc Nlin)을 이용하여 임분 평균홍고직경과 인자들간의 관계식을 구축하고(식 (1)), 모형을 통해 추정된 임분 평균홍고직경 추정치와 NFI6의 실제 관측치를 통해 모형의 적합도를 판단하였다. 이 때 모형 추정치와 실측 값의 차이에 해당하는 잔차는 설명변수가 설명하지 못하는 부분이다. 일반적으로 잔차는 추정오차 값으로 특정 규칙 없이 분포하며, 잔차에서 유사성(패턴)이 발견된다면 모형 설정에 문제가 있다고 보아야 한다.

본 연구에서는 잔차의 위치적 의존성을 검토하기 위해 베리오그램(Variogram) 분석을 사용하여 잔차의 공간자기상관성(Spatial autocorrelation)을 파악하였다. 베리오그램 분석시에는 일반적으로 베리오그램의 1/2인 세미베리오그램(Semivariogram)이 이용되며, 이는 일정한 거리에 있는 자료의 유사성을 나타내는 척도로 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

h 는 두 지점 사이의 거리로 분리거리를 나타내며, n 은 거리 h 만큼 떨어져 있는 표본점 쌍의 개수, $z(x_i)$ 는 임의의 위치 x_i 에서의 자료 값을 나타낸다. 따라서 베리오그램($\gamma(h)$)은 거리가 가까울수록 작게 나타나고 거리가 멀어질수록 값이 크게 나타나며 이를 통해 일정거리 만큼 떨어져 있는 자료들이 평균적으로 얼마나 다른지 파악할 수 있다(Choi, 2007; Kim *et al.*, 2013). 이렇듯 베리오그램은 자료들의 공간적 위치를 바탕으로 공간적인 분포 속성을 그래프상에 도식화할 수 있으며, 베리오그램

분석의 핵심적인 요소로는 공간자기상관이 미치는 영향 범위한 상관거리(Range), 자료간의 상관성이 없는 일정한 값에 수렴하는 문턱값(Sill), 그리고 분리거리가 0에서도 베리오그램이 0이 아닌 상수 값을 나타내어 자료의 불확실성을 보여주는 너겟(Nugget)값, 문턱값에서 너겟을 뺀 값인 부분문턱값(partial sill)이 있다(Fig. 2) (Choi *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2013).

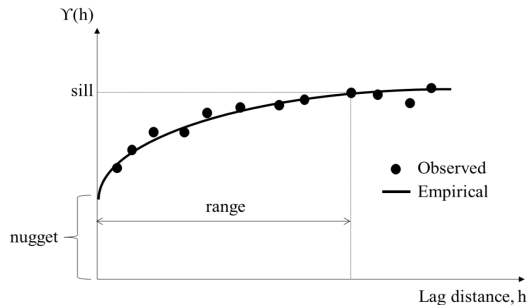


Fig. 2. Semivariogram.

Fig. 2에 도식된 바와 같이 Sill 이후로는 거리가 증가해도 베리오그램 값이 변하지 않으므로 이를 넘어서는 거리에서는 더 이상 공간적 자기상관성이 나타나지 않는 것을 말한다.

따라서 본 연구에서는 모형 잔차의 공간자기상관성이 기상인자의 공간자기상관과 연관성이 있을 수 있다는 가정 하에 잔차를 식 (5)와 같이 연평균기온(T_y)의 함수로 하는 회귀분석을 실시하였으며, 각 수종에 대한 기온인자의 공간자기상관거리를 파악하였다. 이때 가장 적합한 분리거리를 찾기 위해 S-PLUS의 실험적 베리오그램 모듈을 이용하여 분석하였다.

$$e = a + b \cdot T_y \tag{5}$$

* T_y : Annual average temperature(°C)

e : Residual

III. 결과 및 고찰

3.1. 흉고직경추정모형의 수종별 적합도 분석 및 잔차분석

3.1.1. 흉고직경추정모형의 계수추정 결과

NF15의 표본점별 흉고직경, 임령, 밀도 자료와, 지위 지수를 기반으로 임분의 평균흉고직경과 인자들간의 관계식을 추정하였다. 회귀분석결과는 Table 2와 같으며, 수종별로 추정된 계수들의 대부분은 0.05의 유의 수준에서 유의성을 나타내었다. 신갈나무의 계수 a는 신뢰도 0.05 수준에서 유의성이 인정되지 않았으나, 다른 생장 영향변수인 임령(b), 지위지수(c), 밀도(d)의 유의성이 모두 인정되어 모형의 전체적인 적합도 결과에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

본 연구에서 적용한 모형은 계수들과 변수들이 복합적으로 임분 평균흉고직경을 설명하고 있으며, 일부 계수에서 유의성이 인정되지 않았으나 전체적인 모형의 결정계수(R^2)값은 모든 수종에서 0.80 이상으로 높은 적합성을 보여 모형의 전체적인 적합성은 문제가 없는 것으로 판단된다(Fig. 3). 따라서 본 연구에서 고안한 생장 모형은 안동댐 유역에서 임분의 평균흉고직경을 추정하기에 적합한 것으로 사료된다.

모형의 계수는 통계적인 유의성도 중요하지만 각 인자에 적합한 계수가 도출되는 것도 중요하다. 즉, 변수사이에 상관되는 정도와 방향성을 판단할 수 있는 상관계수(correlation coefficient)에서 추정된 부호는 양(+)

Table 2. Parameter estimates and statistics for DBH prediction model by tree species

Tree species	Parameter	Estimate	Std Error	t-value	p value
<i>Pinus densiflora</i>	a	15.9885	7.5989	2.104	0.038823
	b	0.493	0.0578	8.529	<.00001
	c	0.2969	0.0702	4.229	0.000067
	d	-0.3459	0.031	-11.158	<.00001
<i>Quercus mongolica</i>	a	3.7188	2.1642	1.718	0.093286
	b	0.5889	0.0843	6.985	<.00001
	c	0.5111	0.0911	5.610	<.00001
	d	-0.2833	0.0362	-7.825	<.00001

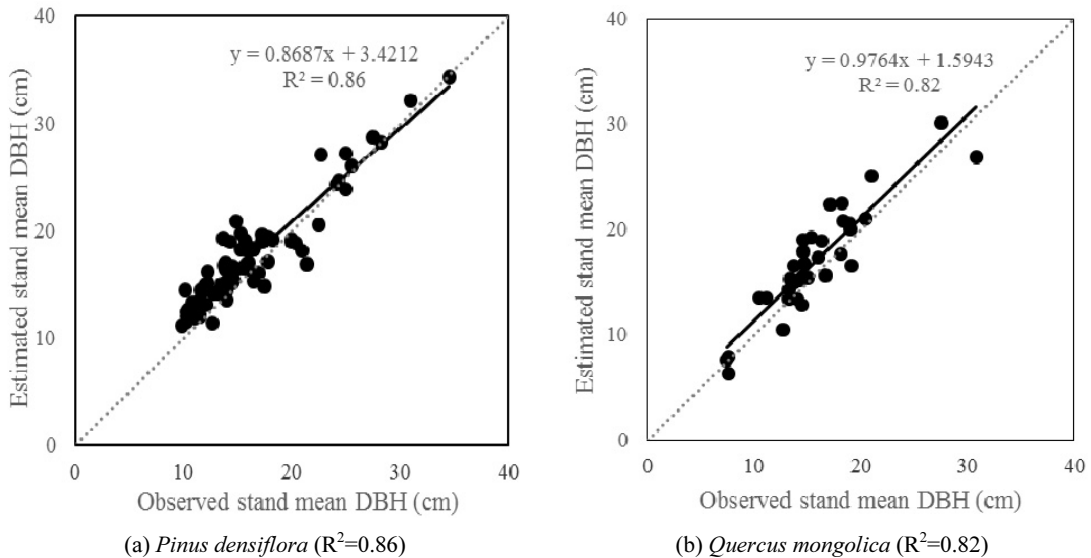


Fig. 3. Comparison between the distributions of predicted and observed DBH for *Pinus densiflora* and *Quercus mongolica*.

방향 또는 음(-)의 방향으로 표현되는데, 이를 논리적 판단을 통해 계수의 적합도를 판단하게 된다(NIMS, 2015). 본 연구에서는 일반적으로 직경의 크기와 양(+)의 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있는 임령과 지위지수의 계수는 양(+)의 부호를 갖는 것으로 나타났으며, 임분 내 임목간 경쟁을 설명해주는 Nha에 대한 계수는 음(-)의 값이 추정되어 자연현상을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

3.1.2. 모형잔차의 공간적 자기상관(Spatial Autocorrelation)분석

실제 관측값과 모형 추정치의 차이를 통해 잔차를 도출하고, 잔차의 공간자기상관성을 검토하기 위해 베리오그램 분석을 실시하였다. Table 3은 수종별 모형 잔차에 대한 베리오그램 분석결과이며, 두 수종 모두 잔차에서 뚜렷한 공간자기상관성이 관측되었다(Table 3).

베리오그램 분석 결과 중 공간자기상관성이 관측되는 범위를 의미하는 상관거리(Range) 값이 소나무는

3.9km, 참나무는 16.0km로 추정되었다(Fig. 4). 이는 기상과 같이 공간자기상관이 있는 인자가 임목의 성장에 유의미한 영향을 미치며 임목 성장을 예측할 시에는 임령, 지위지수, 밀도와 같은 임분 단위의 인자뿐 아니라 공간적인 인자도 복합적으로 고려할 필요성이 있다는 것을 의미한다.

우리나라 산림은 일반적으로 수직, 수평적으로 복잡한 지형에 위치하고 있어 공간적으로 반경 4km의 산림이 같은 임분적 특성을 갖는 것은 매우 드물다. 따라서 본 연구에서 관측된 공간자기상관성은 지형이나 임분적 특성 때문에 야기된 것은 아닌 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서 분석된 수종별 잔차의 공간자기상관성은 기존 연구결과와도 일치한다. Byun *et al.*(2013)은 우리나라 전체 산림지역을 대상으로 소나무와 참나무류의 연년 직경생장과 기후인자와의 관계를 분석하였으며, 임령에 대해 표준화시킨 소나무와 참나무류의 직경생장량에 공간자기상관성이 있음을 확인했다. 이때 소나무와 참나무류의 상관거리는 각각 약 30, 50km 정도로 나타

Table 3. Statistics of semivariogram of residuals for each tree species

Tree Species	Range (km)	Partial Sill	Sill	Nugget
<i>P.densiflora</i>	3.919	0.45	2.02	1.57
<i>Q.mongolica</i>	15.97	0.38	3.01	2.63

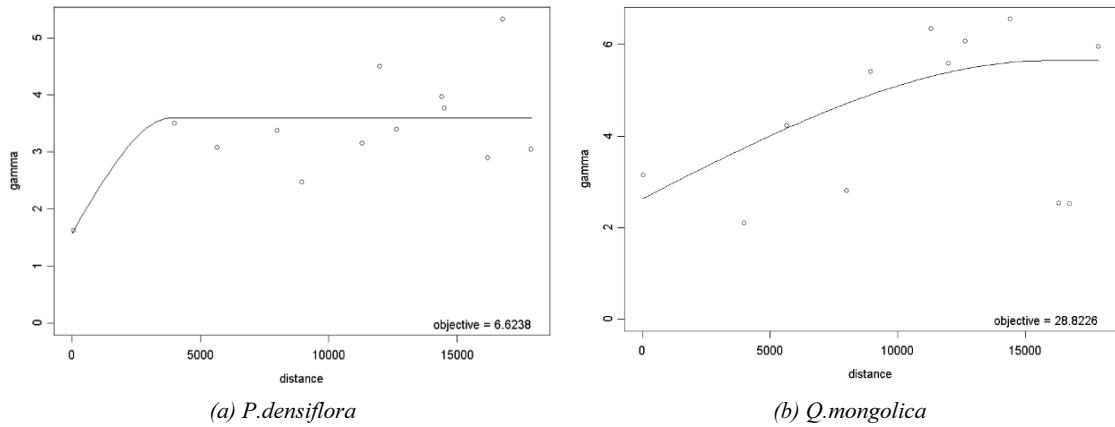


Fig. 4. Semivariogram of DBH prediction model residuals for each tree species.

났다. 본 연구에서는 안동댐 유역의 산림만을 대상으로 했기 때문에, 공간자기상관거리의 값이 비교적 짧게 추정된 것으로 판단되며, 기존 연구와 마찬가지로 소나무보다 참나무류의 공간자기상관거리가 더 길게 추정되었다.

3.2. 임분평균흉고직경과 기온과의 상관관계

모형의 잔차를 3종류의 기상자료로 나누어 각각 분석을 실시하였으며 두 수종 모두 수문기상관측망을 자료를 바탕으로 구축된 100m 공간해상도의 상세한 기상자료에서 통계적으로 유의미한 결과가 도출되었다. 또

한 식 (4)의 기온인자에 대한 계수의 부호도 일정하며, 3종류 기상자료의 추정된 계수 값들 간의 차이가 작고 전체적으로 결과의 신뢰도가 높은 것으로 나타났다 (Table 4).

그러나 신갈나무의 경우 수문기상관측자료(이하 Hy-met Station)와 주변의 AWS를 동시에 사용했을 시에는 0.05 수준에서 유의성을 만족하지 못했으며, 조밀하게 설치된 수문기상관측망 자료인 Hy-met Station 자료만이 0.05 수준에서 유의성을 확보하여 잔차와 기온인자간의 관계를 설명하는데 적합한 것을 알 수 있다. 이러한 통계적 유의성의 차이는 기상자료를 구축하는 보

Table 4. Parameter estimates and statistics for residual model for each tree species

Tree species	Observatory Station	Parameter	Estimate	Std Error	t-value	p value
<i>P. densiflora</i>	Hy-met Station(6)	a	4.4857	1.4191	3.160947	0.00229
		b	-0.4432	0.1381	-3.20927	0.00198
	AWS(12)	a	4.9401	1.4248	3.467223	0.000885
		b	-0.4933	0.1402	-3.51854	0.000752
	Hy-met Station +AWS(18)	a	5.2818	1.5267	3.459619	0.000907
		b	-0.5452	0.1556	-3.50386	0.000789
<i>Q. mongolica</i>	Hy-met Station(6)	a	-5.4363	1.9895	-2.7325	0.009324
		b	0.6907	0.2516	2.745231	0.009015
	AWS(12)	a	-5.2844	2.639	-2.00243	0.050209
		b	0.6525	0.3259	2.002148	0.050208
	Hy-met Station +AWS(18)	a	-5.5621	2.8808	-1.93075	0.060719
		b	0.7029	0.3644	1.928924	0.06089

간법도 영향을 미친 것으로 해석된다. 즉, 본 연구에서 사용한 보간법은 일반적으로 영향반경 내의 모든 자료값에 동일한 가중치를 부여하는 지역평균법의 한계를 개선한 역거리 가중법(Inverse Distance Weighting, IDW)으로 거리에 따른 주변 값들의 가중값을 산정하여 가중평균을 통해 추정하고자 하는 지점의 값을 보간하는 방법이다(Kim *et al.*, 2013). IDW 보간법은 관측점간의 거리에 반비례하여 가중치를 할당하기 때문에 거리가 멀어짐에 따라 지수적으로 감소한다. 따라서 신갈나무에서 수문기상관측망 이외의 자료를 함께 분석에 포함했을 경우 보간하는 과정에서 미관측 지점에 대한 값이 과도하게 추정되어 통계오차가 생긴 것으로 파악된다.

관측기구와 분석방법의 고도화는 다양한 분야에서 공간자료를 활용할 수 있도록 지원하고 있으며, 이들을 활용할 때에 적정 공간해상도를 고려하는 것이 중요하다. 기존에 우리나라 산림의 성장, 분포, 탄소량, 재해 등과 기상인자를 함께 고려하여 연구한 연구들은 대부분 1km² 이상의 공간해상도를 갖는 기상자료를 활용하여 연구를 수행하였다(Kwak *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2011; Byun *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2014; Nam *et al.*, 2015; Cui *et al.*, 2014). 이들 연구들은 기후가 산림에 미치는 영향을 정량적, 정성적으로 추정했다는 것에 의의가 있으나, 우리나라 산림의 특성상, 임분단위의 미기후에 대한 공간적인 이질성과 다양성을 충분히 반영하지 못했다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 AWS자료뿐만 아니라 Hy-met Station에서 획득한 자료를 함께 사용하여 기상자료를 보다 고도화하고자 하였다. 우리나라 산림의 임분 평균면적이 13.2ha라는 것을 고려했을 때, 본 연구에서 적용한 공간해상도는 각 임분의 환경적인 이질성을 설명하는데 적합한 것으로 사료되며, 실제로 통계적인 신뢰성도 높게 나타났다.

본 연구에서 추정된 회귀계수의 부호에 따르면 소나무의 평균흉고직경은 연평균온도와 반비례 관계(-)인 것으로 나타난 반면 참나무류는 연평균온도가 임목의 직경생장에 긍정적인 영향(+)을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 우리나라 주요 수종인 소나무는 기온이 상승할 경우 생장에 부(-)의 영향을 신갈나무를 포함한 참나무류는 정(+)의 영향을 준다는 기존의 연구결과들과도 일치한다(Byun *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2014). Seo *et al.*(2013)은 소나무의 경우 최고기온에 대한 내성 범위가 좁기 때문에, 향후 소나무의 성장 및 계절 현상 등 생태적인 반응에 가장 큰 영향을 미치는 기상인자는 기

온이라는 것을 보고한 바 있다. 또한 기온의 상승과 정(+)의 관계를 갖는 신갈나무는, 소나무와 달리 기온상승에 따라 상대적으로 생장이 촉진되는 것으로 밝혀진 바 있다(Way and Oren., 2010). 비슷한 맥락에서 Byun *et al.*(2013)은 소나무와 신갈나무가 분포하는 지역의 온량지수(Warmth Index)분포의 차이를 통해 기온상승에 따른 연년생장량의 차이를 밝힌바 있으며, 결과적으로 소나무의 연년생장량은 이미 대부분의 분포 지역에서 기온에 따른 생장감소 영향을 받는 것으로 나타난 반면, 참나무류는 현재 기후조건에서는 평균기온이 높은 지역일수록 생장이 활발한 것으로 나타났다. 계수의 절대값 측면에서는 기존의 연구들과 차이를 보이는 것으로 나타났다. 전국 산림을 대상으로 진행된 기존의 연구들에서는 온도에 대한 계수의 절대값이 참나무류보다 소나무의 값이 상대적으로 더 컸으나, 본 연구에서는 보다 작게 추정되었는데 이는 지역적인 산림분포와 기후적 특성이 반영된 결과로 사료된다.

결과적으로 본 연구에서는 기상자료와 흉고직경의 관계를 파악함에 있어, 식(3)을 적용하는 것이 최종 흉고직경추정모형의 적합성을 높이는데 적합하다고 판단하였다. 잔차 성분에 대한 통계적인 분석 결과에 따르면, 수종별로 상세하게 구축한 기온자료에 대한 잔차를 포함하여 직경을 추정하였을 때, 소나무의 최종 모형 결정계수(R²)는 0.878인 것으로 나타났고, 신갈나무는 0.868로 나타나 기존의 흉고직경모형에 잔차모형을 포함했을 시에 적합도가 향상된 것으로 사료된다.

모형의 적합도는 종속변수가 많을수록 높은 것이 일반적이라는 점을 고려했을 때, 복잡한 자연 현상을 설명하기 위해서는 기온인자 이외에도 잔차를 구성하는 성분에 대한 통계적 분석이 필요하다. 따라서 미래의 산림 변화를 예측할 시에는 기상인자와 같은 공간인자들의 영향이 산림 자원의 관리 계획 수립에 반영되어야 한다.

IV. 결 론

본 연구는 안동댐 유역의 주요 수종인 소나무와 신갈나무를 대상으로 임분 평균흉고직경과 기온과의 관계를 규명하고자 수행하였다. 흉고직경추정모형 구축을 위해 NF15 자료 중 임령, 평균흉고직경, ha당 본수 자료를 사용하였으며, NF16 자료로 검증을 실시하였다. 이에 따라 임분평균흉고직경의 생장에 대한 기온의 영향을 파악하기 위해 모형 잔차값에 대한 베리오그램 분석과 통계적 분석을 실시하였다.

또한 본 연구에서는 흉고직경과 기온과의 관계를 규명함에 있어, 수문기상관측소와 주변 AWS 자료를 함께 사용하고, 기온감률과 IDW 보간 기법을 적용하여, 미기 후적 특성을 최대한 반영하고자 하였다. 결과적으로 소나무에 대해서는 연평균온도와 반비례의 관계를, 참나무류에 대해서는 정(+)의 관계를 갖는 것으로 모의하여 기존의 연구들과도 일치하는 결과를 보였다. 이는 소나무의 경우 최고기온에 대한 내성 범위가 좁기 때문에 연평균 기온이 높을수록 생장이 더더지는 현상이 반영된 결과인 것으로 보인다. 반대로 기온 상승과 정(+)의 관계를 갖는 신갈나무는 온대수종에 해당하기 때문에 소나무에 비해 상대적으로 높은 기온에서도 생장이 잘 이루어지는 것으로 나타났다.

기상인자와 산림생장의 관계 규명이 더욱 중요해지고 있음을 고려할 때, 생태환경의 특성과 기상인자와의 관계를 분석하는데 있어서 기상인자의 영향에 대한 설명력을 높이기 위해서는 모형 구축 시 미기후 요소를 상세하게 반영하여야 유역 단위의 산림관리에도 더 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 안동댐 유역의 주요 수종인 소나무와 신갈나무를 대상으로 임분평균흉고직경과 기상인자의 관계를 규명하고자 수행되었다. 본 연구는 제5차 국가산림자원조사(NFI5)자료 중 임령, 임분평균흉고직경, ha당 본수 자료를 사용해 임분단위의 평균흉고직경을 추정하는 모형을 개발하고, NFI6 자료로 검증을 실시하였다. 또한 안동댐 유역 수문기상관측소 6개소와 주변지역의 Automatic Weather System (AWS)의 관측자료에서 취득한 기온 자료를 사용하여 100m 공간해상도를 갖는 상세한 기상자료를 구축하였다. 연구대상지가 복잡한 산악 지형임을 고려하여 기온감률을 적용 후 Inverse Distance Weighted (IDW) 보간법을 적용하여 점 형태의 기상자료를 면 형태로 재구축하였다. 이와 같이 구축된 정밀기상인자와 직경생장간의 관계를 분석하였다. 분석결과 기온 상승은 소나무에 부(-)의 영향을 주며, 참나무류인 신갈나무에는 정(+)의 영향을 주는 것으로 나타나 기존 연구들과 일치하는 결과를 보였다. 본 연구는 수문기상관측소와 AWS 자료를 연계하여 세밀한 기후지도를 구축하고, 이를 통해 유역규모의 임목생장과 기후인자와의 관계를 파악했다는 것에 의미가 있으며 지역규모의 산림변화 예측 및 관리 계획 수립을 지원할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 수문기상모델 개선을 위한 요소기술 개발(IV)과 환경부 기후변화대응 환경기술 개발사업(20140013100008)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- Bae, S. W., J. Hwang, S. T. Lee, H. S. Kim, and J. C. Lee, 2010: Changes in soil temperature, moisture content, light availability and diameter growth after thinning in Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation. *Journal of Korean Forest Society* **99**(3), 397-403. (in Korean with English abstract)
- Byun, J. G., W. K. Lee, D. K. Nor, S. H. Kim, J. K. Choi, and Y. J. Lee, 2010: The relationship between tree radial growth and topographic and climatic factors in red pine and oak in central regions of Korea. *Journal of Korean Forest Society* **99**(6), 908-913. (in Korean with English abstract)
- Baek, G. H., M. G. Lee, and B. J. Kang, 2011: Development of spatial statistical downscaling method for KMA-RCM by using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* **14**(3), 136-149. (in Korean with English abstract)
- Byun, J. G., W. K. Lee, M. Kim, D. A. Kwak, H. Kwak, T. Park, W. H. Byun, Y. Son, J. K. Choi, Y. J., Lee, and J. Saborowski, 2013: Radial growth response of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. to topographic and climatic factors in South Korea. *Journal of Plant Ecology* **6**(5), 380-392.
- Choi, J., 2007: *Geostatistics*. Sigma Press.
- Choi, J. H., and J. S. Um, 2011: Comparative evaluation among different kriging techniques applied to GOSAT CO₂ map for North East Asia. *Journal of Environmental Impact Assessment* **20**(6), 879-890. (in Korean with English abstract)
- Choi, K., M. Kim, W. K. Lee, H. Gang, D. J. Chung, E. Ko, B. H. Yun, and C. H. Kim, 2014: Estimating radial growth response of major tree species using climatic and topographic condition in South Korea. *Journal of Climate Change Research* **5**(2), 127-137. (in Korean with English abstract)
- Cui, G., W.K. Lee, D. Kim, E.J. Lee, H. Kwak, H.A. Choi, D.A. Kwak, and S. Jeon, 2014: Estimation of forest carbon budget from land cover change in South and North Korea between 1981 and 2010. *Journal of*

- Plant Biology* **57**(4), 225-238.
- DeLong, S. C., H. Griesbauer, W. Mackenzie, and V. Foord, 2010: Corroboration of biogeoclimatic ecosystem classification climate zonation by spatially modelled climate data. *BC Journal of Ecosystem & Management* **10**(3), 49-64.
- Gavilán, R. G., 2005: The use of climatic parameters and indices in vegetation distribution. A case study in the Spanish Sistema Central. *International Journal of Biometeorology* **50**(2), 111-120.
- Grigorieva, E. A., A. Matzarakis, and C. R. Freitas, 2010: Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude. *Climate Research* **42**, 143-154.
- Hamann, A., and Wang T., 2006: Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology* **87**(11), 2773-2786.
- Jeong, G. Y., H. M. Yang, S. K. Kim, and S. J. Park, 2012: Ecoregion classification using multi-hierarchy of environmental factors. *Journal of the Korean Geographical Society* **47**(5), 654-676. (in Korean with English abstract)
- Ji, U., M. H. Hwang, G. S. Lim, and S. U. Kang, 2012: The analysis of land use and characteristics of basin along 4 major river basin area using GIS. *Magazine of Korea Water Resources Association* **45**(10), 26-33. (in Korean)
- KEI, 2001: Research on ecosystem assessment and adaptation plan to climate change – developing ecology – climate model in forestry. Research Report, Korea Environment Institute, 20pp.
- KFRI, 2010: Carbon emission factors for major tree species for forest inventory Data. KFRI Research Report, Korea Forestry Research Institute, 83pp.
- KFRI, 2011: The 5th National Forest Inventory Report. Korea Forest Research Institute, 2011.
- KFRI, 2016: The 6th National Forest Inventory Report. Korea Forest Research Institute, 2016.
- KFS, 2011: Climate Change Adaptation Plan for Forestry. Korea Forest Service Report, 11pp.
- KFS, 2016: 2016 Forest Management Plan. Korea Forest Service. [http://www.law.go.kr/\(13025,20150120\)](http://www.law.go.kr/(13025,20150120))
- Kim, K. M., and K. H. Park, 2013: Spatial estimation of the Site Index for *Pinus densiflora* using kriging. *Journal of Korean Forest Society* **102**(4), 467-476. (in Korean with English abstract)
- Kim, M., W. K. Lee, Guishan, C., K. Nam, H. Yu, S. E. Choi., C. G. Kim, and T. S. Gwon, 2014: Estimating stand volume *Pinus densiflora* forest based on climate change scenario in Korea. *Journal of Korean Forest Society* **103**(1), 105-112. (in Korean with English abstract)
- KMA, 2016: http://www.kma.go.kr/weather/climate/average_regional08.jsp (accessed on 15 Nov 2016)
- Kramer, H., 1982: Kurzfristige Zuwachsreaktionen bei Buche in Abhängigkeit von Witterung und verschiedenen Baummerkmalen. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* **153**(4), 57-67. (in German, summary in English)
- Kwak., H. B., W. K. Lee, S. Y. Lee, M. S. Won, K. S. Koo, M. Lee, and M. B. Lee, 2010: Cause-specific spatial point pattern analysis of forest fire in Korea. *Journal of Korean Forest Society* **99**(3), 259-266. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. T., S. L. Yoon, E. H. Park, J. K. Kim, and Y. G. Chung, 2005: The dendrochronological characteristic of *Pinus densiflora* in Gyeongbuk region. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(4), 289-295. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. C., S. H. Choi, W. K. Lee, S. J. Yoo, and J. G. Byun, 2011: The effect of climate data applying temperature lapse rate on prediction of potential forest distribution. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System* **19**(2), 19-27. (in Korean with English abstract)
- Lim, C. H., J. Y. Moon, Y. J. Lim, S. J. Kim, and W. K. Lee, 2015: Estimating spatio-temporal distribution of climate factors in Andong dam basin. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System* **23**(4), 57-65. (in Korean with English abstract)
- Lim, J. H., K. E. Park, and M. Y. Shin, 2016: Effect of yearly changes in growing degree days on the potential distribution and growth of *Quercus mongolica* in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(3), 109-119. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Environment, 2013: Mid-term Assessment of Water resources management in Andong-dam basin.
- Moon, N. H., J. H. Sung, J. H. Lim, K. E. Park, and M. Y. Shin, 2015: Analysing the relationship between tree-ring growth of *Quercus acutissima* and climatic variables by dendroclimatological method. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(2), 93-101. (in Korean with English abstract)
- Nam, K., W. K. Lee, M. Kim, D. A. Kwak, W. H. Byun, H. Yu, H. Kwak, T. Kwon, J. Sung, D. J. Chung, and S. H. Lee, 2015: Spatio-temporal change in forest cover storage considering actual and potential forest cover in South Korea. *Science China Life Sciences* **53**(7), 784-797.
- Navar, J., 2009: Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico.

- Forest Ecology and Management* **257**, 427-434.
- Park, W. K., 1993: Increasing atmospheric carbon dioxide and growth trends of Korean subalpine conifers. *Journal of Korean Forest Society* **82**(1), 17-25. (in Korean with English abstract)
- Park, N. W., and D. H. Jang, 2011: Use of space-time autocorrelation information in time-series temperature mapping. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers* **17**(4), 432-442. (in Korean with English abstract)
- Seo, D. J., C. Y. Oh, K. S. Woo, and J. C. Lee, 2013: A study on ecological niche of *Pinus densiflora* forests according to the environmental factors. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(3), 153-160. (in Korean with English abstract)
- Shin, M.Y., S. Y. Chung, W. S. Han, S. J. Kim, and D. K. Lee, 2008: Effects of microclimate of different site types on tree growth in natural deciduous forest. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(1), 9-16. (in Korean with English abstract)
- Sun, M. A., D. H. Lim, Y. B. Lee, and Y. H. Byun, 2015: Data analysis by using partial correlation analysis. NIMS Technical Memo 2015-022, National Institute for Mathematical Sciences, 11 pp.
- Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D. L. and Murdock, T. Q., 2012. ClimateWNA-high-resolution spatial climate data for western North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **51**(1), 16-29.
- Way, Danielle A., and Oren. R., 2010: Differential responses to change in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. *Tree Physiology* **30**, 669-688. (in Korean with English abstract)
- Whittaker, R. H., and P. L. Marks, 1975: Methods of assessing terrestrial productivity. *Primary Productivity of the Biosphere*, H. Lieth and R. H. Whittaker (ed), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York., 55-118.
- Yun, J. I., J. Y. Choi, Y. K. Yoon, and U. Chung, 2000: A spatial interpolation model for daily minimum temperature over mountainous regions. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **2**(4), 175-182. (in Korean with English abstract)