

기후와 지형 조건을 반영한 우리나라 주요 수종의 반경 성장 반응 예측

Estimating Radial Growth Response of Major Tree Species using Climatic and Topographic Condition in South Korea

최고미* · 김문일** · 이우균***,† · 강현우* · 정동준*** ·

고은진*** · 윤병현*** · 김찬회****

Choi, Komi*, Kim, Moonil**, Lee, Woo-Kyun***,†, Gang, Hyeon-u*,
Chung, Dong-Jun***, Ko, Eun-jin***, Yun, Byung-Hyun***
and Kim, Chan-Hoe****

*고려대학교 기후환경학과, **고려대학교 환경생태공학과

산림조합중앙회 산림자원조사센터, *산림청 정보통계담당관실

*Dept. of Climatic Environment, Korea University, Seoul, Korea

**Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering,
Korea University, Seoul, Korea

***Forest Inventory Center, National Forestry Cooperative Federation,
Daejeon, Korea

****Information and Statistics Division, Korea Forest Service, Daejeon, Korea

요 지

본 연구는 우리나라 산림의 주요 수종을 대상으로 기후와 지형 조건에 따른 반경 성장 반응 및 잠재 분포를 예측하기 위해 수행되었다. 기후와 지형 인자에 따른 반경 성장 반응을 분석하기 위해 제5차 국가산림자원조사 표본점의 임목조사 및 연륜 정보, 지형습윤지수, 기온, 강수량 자료를 반영한 성장모형을 적용하였으며, 잠재 분포를 예측하기 위해 RCP8.5 시나리오를 활용하였다. 성장 반응을 분석한 결과, 기온 상승은 소나무, 일본잎갈나무, 밤나무 성장에 부(-)의 영향을 주는 반면, 신갈나무를 포함한 참나무류 성장에는 정(+)의 영향을 주며, 강수량의 증가는 소나무와 신갈나무 성장에 정(+)의 영향을 주는 것으로 나타났다. 이처럼, 기후인자에 의한 수종별 성장 반응이 다르게 나타나는 것은 온도 및 강수량이 임목의 수분스트레스, 성장기간 등에 영향을 주기 때문인 것으로 보인다. 모형에 기후변화 시나리오를 적용한 결과, 소나무, 일본잎갈나무, 밤나무의 생장이 참나무류에 비해 기후변화에 취약한 것을 알 수 있었으며, 특히, 소나무

† Corresponding author : E-mail: leewk@korea.ac.kr

의 경우 내륙보다 해안지역을 중심으로 생장이 저조해질 것으로 나타났다. 반면, 참나무류는 기후변화의 영향으로 그 분포가 크게 넓어질 것으로 예측되었다. 본 연구 결과를 통해 기후변화에 따른 우리나라 주요 수종의 성장 변화를 예측할 수 있었으며, 이는 기후변화에 대응한 지속가능한 산림관리 방안을 수립하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

키워드 : 기후변화, 반경 성장, 주요 수종, 잠재 식생 분포, 국가산림자원조사

ABSTRACT

The main purpose of this study is to estimate radial growth response and to predict the potential spatial distribution of major tree species (*Pinus densiflora*, *Quercus mongolica*, *Quercus* spp., *Castanea crenata* and *Larix kaempferi*) in South Korea, considering climate and topographic factors. To estimate radial growth response, 5th National Forest Inventory data, Topographic Wetness Index (TWI) and climatic data such as temperature and precipitation were used. Also, to predict the potential spatial distribution of major tree species, RCP 8.5 Scenario was applied. By our analysis, it was found that the rising temperature would have negative impacts on radial growth of *Pinus densiflora*, *Castanea crenata* and *Larix kaempferi*, and positive impacts on that of *Quercus mongolica*, *Quercus* spp.. Incremental precipitation would have positive effects on radial growth of *Pinus densiflora* and *Quercus mongolica*. When radial growth response considered by RCP 8.5 scenario, it was found that the radial growth of *Pinus densiflora*, *Castanea crenata* and *Larix kaempferi* would be more vulnerable than that of *Quercus mongolica* and *Quercus* spp. to temperature. According to the climate change scenario, *Quercus* spp. including *Quercus mongolica* would be expected to have greater abundance than its present status in South Korea. The result of this study would be helpful for understanding the impact of climatic factors on tree growth and for predicting the distribution of major tree species by climate change in South Korea.

Key words : Climate Change, Radial Growth, Major Tree Species, Potential Vegetation Distribution, National Forest Inventory

1. 서론

우리나라 전체 국토 면적 대비 산림면적의 비율은 FRA 2010 기준으로 225개 국가 중 29위에 해당하며, 33개 OECD 국가 중 4위에 해당한다(FAO, 2011). 우리나라 산림의 기능을 경제적 가치로 환산하면 약 109조 70억 원으로 추정되며, 그 중 이산화탄소 흡수 및 산소 생성·대기정화 기능이 가장 큰 비중을 차지하고, 그 경제 가치는 약 22조원에 이른다(전현선 등, 2013). 이처럼 산림은 육상생태계의 유일한

탄소흡수원으로써 기후변화 저감과 완화에 기여하지만, 다른 생태계와 마찬가지로 기후변화로 인한 영향을 받는다(Dale et al., 2001). 기후변화는 크게 온도와 강수량 변화로 나타나며, 이는 산림 생태계를 구성하는 임목의 성장 변화에 따른 산림의 구조와 생산성의 변화, 수종의 공간적 분포 변화 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Fang and Lechowicz, 2006; 윤미혜 등, 2013).

임목의 생장은 일반적으로 지형, 토양과 관련된 지위와 기온, 강수량과 같은 기후 인자 등

주변 환경에 영향을 받으며(Schweingruber, 1988), 임목의 연륜 성장 정보는 이러한 주변 환경에 따른 임목의 성장반응을 규명할 수 있는 핵심 요소이다(Fritts, 1976). 임목의 성장에 영향을 주는 환경 조건 중 기후 인자는 산림의 상태를 결정하는 중요한 인자 중 하나로, 기후변화에 대응한 산림자원 관리를 위하여 임목의 성장과 기후인자 간의 관계를 밝히는 것은 매우 중요하게 인식되고 있다. Hughes *et al.*(1982)은 임목의 연륜 생장이 임지의 연간 기후 조건의 변화(월별 강수량, 기온의 변화 등)를 반영한다고 밝혔다. 또한, 지형적 특성도 수종 분포, 임목 성장 등의 공간적 변이를 결정하는 주요 요인이다(Byun *et al.*, 2013; 김문일, 2012). 특히, 지형 인자 가운데 토양 수분과 임목 성장의 관계는 단위면적당 흉고 단면적과 토양 수분 저장과의 상관관계(Fralish, 1994), 임지 생산력과 유효 토양 수분과의 관계(White, 1958) 등 다수의 연구 결과를 통해서 규명되었다.

기후는 임목 성장을 결정하는 주요 인자이지만, 수종 및 임지에 따라 기후 인자에 반응하는 정도가 달라질 수 있다(Lo *et al.*, 2010). 특히, 우리나라는 복잡한 지형조건에 의하여 기상적 공간적 변이가 크며, 산림을 이루는 수종 구성이 다양하다. 또한, 우리나라 평균기온 상승폭은 전 지구적인 온난화 추세를 상회하는 것으로 평가되었고, 이러한 추세가 계속된다면 우리나라 산림은 다른 지역들보다 빠르게 기후변화에 영향을 받을 것이다(이정택, 2011).

따라서 우리나라 산림을 구성하는 주요 수종의 성장에 지형 및 기후 환경이 미치는 영향을 파악하는 것은 매우 중요하나, 이와 관련된 연구는 충분하게 이루어지지 않고 있는 실정이다. 지형적 특성과 소나무 연륜 성장에 관한 연구(서정욱 등, 2000), 기후와 신갈나무 연륜 성장에 관한 연구(서정욱과 박원규, 2010) 그리고 소나무와 참나무류의 반경 성장과 지형, 기후

인자의 관계를 규명(변재균 등, 2010)한 연구 등이 수행되었으나, 이들 연구의 연륜 분석은 성장 기반 모델이 아니거나, 연구 대상 수종과 대상지가 한정적이라는 한계가 존재한다. 김문일(2012)과 Byun *et al.*(2013)은 우리나라 산림 전체를 대상으로 기후와 지형에 따른 주요 수종의 성장을 예측하였으나, 그 대상이 침엽수종 일부에 국한되었으며, 참나무류를 통합하여 분석했다는 한계가 있다. 그러나 우리나라의 산림은 다양한 참나무과 수종으로 구성되어 있기 때문에, 분포 특성과 성장 패턴 및 생리적 특성의 이질성을 감안하여 수종별 반경 성장을 분석할 필요가 있다. 또한, 1:5,000 임상도에 따르면 우리나라 산림의 47%가 활엽수림이며, 그 중 참나무류를 제외한 기타 활엽수 임상이 절반을 차지하는 점을 고려할 때 활엽수류의 성장도 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 1:5,000 임상도와 제5차 국가산림자원조사자료, 우리나라 임업현황에 따른 수종별 중요성을 감안하여 주요 수종을 선정하고, 기후변화에 따른 성장을 예측하였다. 우리나라 임상의 약 22%를 차지하는 소나무, 대표적인 용재 수종인 일본잎갈나무, 우리나라 전역에 분포하는 유실 수종인 밤나무, 그리고 참나무류는 생육 분포 특성(해발고, 온도, 분포지역 등)을 기준으로 신갈나무와 그 외 참나무(졸참나무, 갈참나무, 떡갈나무, 굴참나무, 상수리나무)로 구분하여 기후변화에 따른 성장 변화와 그에 따른 분포 변화를 예측하였다. 본 연구의 목적은 기후, 지형 조건에 따른 우리나라 주요 수종의 반경 성장을 분석하고, 이를 활용하여 기후변화 시나리오에 따른 미래 잠재식생분포 변화를 예측하는데 있다. 이를 위해 제5차 국가산림자원조사 결과 및 성장목편 DB, RCP8.5 시나리오 자료를 사용하였다.

2. 연구재료

2.1 연구대상지

본 연구는 위도 33°09'~38°45'N, 경도 124°54'~131°06'E에 위치한 우리나라 산림 전체를 대상으로 하였다. 우리나라 산림면적은 약 640만 ha이며, 이 중 활엽수림이 47.0%, 침엽수림이 37.8%, 혼효림이 11.6%, 죽림 등이 3.6%를 차지한다(국립산림과학원, 2013). 활엽수림은 강원도에, 침엽수림은 경상북도에 가장 많이 분포하며, 특히 강원도 활엽수림은 면적 비율이 54.9

%로 1995년 산림기본통계의 면적(32.38%)과 비교 시 증가하고 있다(국립산림과학원, 2013).

2.2 제5차 국가산림자원조사 및 성장목편 자료

제5차 국가산림자원조사(5th National Forest Inventory; NFI5)를 통해 전국 산림을 대상으로 계통추출법에 의해 배치된 약 4,000개의 고정

Table 1. Descriptive statistics of size, topographic and climatic factors in sample plots by tree species

Species		Age	Size			Topography			Climate	
		(year)	Radial Growth (mm)	DBH (cm)	Height (m)	Elevation (m)	Slope (°)	TWI	Temperature (°C)	Precipitation (mm)
<i>Pinus densiflora</i>	Mean	33.9	2.1	20.0	11.0	311	28.4	5.8	11.4	1,291
	Min.	15.0	0.3	6.0	2.2	10	4.0	3.8	5.1	987
	Max.	119.0	6.5	75.0	36.5	1,174	50.0	11.0	14.9	2,093
	Std	11.6	0.9	8.3	3.5	184	9.1	1.0	1.7	149
<i>Quercus mongolica</i>	Mean	36.8	1.8	16.4	10.9	562	33.1	5.5	9.3	1,243
	Min.	15.0	0.3	6.0	3.0	23	5.0	4.0	3.4	987
	Max.	108.0	6.1	58.0	30.5	1,480	50.0	11.3	14.7	1,887
	Std	14.4	0.9	6.6	3.0	272	8.3	0.8	1.9	125
<i>Quercus</i> spp.	Mean	30.7	2.2	16.9	11.7	322	30.3	5.7	11.2	1,287
	Min.	15.0	0.3	6.0	2.4	10	4.0	3.8	5.6	1,010
	Max.	85.0	6.3	55.0	30.2	1,140	46.0	11.0	14.9	2,093
	Std	9.8	1.0	6.3	3.5	173	9.1	1.0	1.5	134
<i>Larix kaempferi</i>	Mean	31.8	2.5	22.7	17.5	423	28.9	5.7	9.8	1,249
	Min.	15.0	0.5	6.0	5.0	40	5.0	4.2	5.3	1,045
	Max.	75.0	6.1	61.0	36.3	1,110	49.0	11.6	14.3	1,842
	Std	8.4	1.0	7.8	4.8	221	9.0	1.0	1.6	96
<i>Castanea crenata</i>	Mean	26.7	2.9	17.1	10.3	211	24.9	6.1	11.6	1,332
	Min.	15.0	0.7	6.0	2.9	10	4.0	3.8	6.8	1,036
	Max.	62.0	6.6	44.0	22.1	967	47.0	10.3	14.5	1,814
	Std	7.5	1.1	6.5	3.2	135	8.6	1.1	1.2	110

DBH: Diameter at Breast Height, Min: Minimum, Max: Maximum, Std: standard deviation.

표본점을 조사하였다. 표본점별 임분 개황 조사로부터 표본점 위치(좌표), 지황(해발고도, 경사 등), 임황(임상, 경급, 영급 등)을 조사하고, 기본 조사원과 대경목 조사원에서 임목을 조사하였다. 임목조사는 개체목의 수종, 흉고직경 등을 조사하고, 이 중 표준목을 선정하여 수고, 지하고를 측정하였다. 표준목 중에서 5분 이상에 대하여 성장목편(Core)를 추출하고, 수령, 성장량 등의 정보를 얻었다(산림청과 국립산림과학원, 2008). 본 연구에서는 NF15에서 채취한 목편의 측정 정보로 구축된 연륜 성장 데이터베이스의 소나무(17,343본), 일본잎갈나무(1,828본), 신갈나무(8,753본), 그 외 참나무류(9,993본), 밤나무(1,324본)에 대한 연륜 정보를 활용하였다.

2.3 기상 및 지형 자료

각 목편 자료를 획득한 위치정보를 기반으로 한 기상 및 지형자료를 반경성장모형(Radial growth model)에 적용하기 위해 과거 기상 자료는 기상청에서 제공하는 전국 75개 기상 관측 지점의 1996~2005년의 평균 연년 기상자료를 활용하고, 미관측 지점의 기상자료는 Kriging, 거리자승역가산가중(Inverse Distance Squared Weighting; IDSW) 기법 등의 보간법을 적용하여 구축하였다. 미래 기상자료는 RCP 8.5 시나리오를 활용하였으며, 지형 자료는 국토교통부에서 제공하는 30m 해상도의 Digital Elevation Model (DEM) 자료로부터 추출한 Topographic Wetness Index (TWI)를 사용하였다. TWI는 사

면방향, 해발고, 경사에 의해 결정되는 토양 수분의 공간적 분포를 알 수 있는 인자로, 지형과 공간적 분석에 널리 사용되는 지수이다(식 1) (Hengl *et al.*, 2009).

$$TWI = \ln(As / \tan \beta) \quad (1)$$

여기서, As 는 집수 면적, $\tan \beta$ 는 라디안 단위로 표현되는 경사를 의미한다.

Table 1은 수종별 성장, 지형, 기상 인자의 통계량을 나타낸 것이다.

3. 연구방법

3.1 성장모형(Growth Model)

본 연구에서는 Byun *et al.*(2013)이 고안한 성장모형을 적용하였다(Table 2). Byun *et al.*(2013)은 NF15의 목편자료로부터 구축된 반경 성장량과, 각 목편 자료를 획득한 위치정보를 기반으로 한 기상 및 지형자료를 이용하여 성장모형을 개발하였다. 측정된 연륜폭 자료 중 NF15기준 최근 10년간(1996~2005년)의 평균성장량을 반경성장량으로 하여 표준성장모형에 적용하고, 이를 활용하여 미래 성장을 예측하기 위해 5년 단위(1996~2000, 2001~2005)의 평균반경성장 데이터를 마련하였다. Byun *et al.*(2013)이 고안한 모형은 과거 성장, 수령(Tree age), 크기(Size), 지형습윤지수를 통해 성장에 있어 개체 및 임분의 조건을 반영하고, 기온와 강수량을 변수로 포함하여 환경 및 기후를 고

Table 2. The forms of radial growth model(Byun *et al.*, 2013)

Model name	Regression form
Climate factors	$eSG = f(TWI, T, P) = \beta_0 + \beta_1 \cdot TWI + \beta_2 \cdot T + \beta_3 \cdot P$
Radial Growth	$\Delta \hat{r}_i = \Delta \hat{r}_{i-5} \cdot \left(\frac{age_i}{age_{i-5}} \right)^b \cdot \left(\frac{eSG}{meSG} \right)$

r_i =radial growth when i year; age_i =tree age when i year; TWI=topographic wetness index; T =annual mean temperature; P =annual precipitation; eSG : estimated Standard Growth; $meSG$: mean of eSG .

려한 임목의 성장을 예측할 수 있는 성장모형이다. 반경 성장에서 수령의 영향을 제거하기 위해 일정 수령일 때의 반경성장량을 기준으로 동등한 성장량으로 표준화하고자 수령 30년일 때의 반경 성장량을 표준성장(Standard Growth; SG)으로 정의하고, 이를 활용하여 반경 성장과 기후, 지형 간의 관계를 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기후조건에 따른 반경성장반응 분석

Table 3은 기후인자모형(Climate factors mo-

del)을 활용하여 표준 성장(Standard Growth; SG)과 TWI, 강수량, 기온의 관계를 분석한 결과이다. 추정된 계수들은 통계적으로 비교적 유의한 결과를 보였다. 추정된 계수에 따르면 기온 상승은 소나무, 일본잎갈나무, 밤나무의 성장에 부(-)의 영향을 주는 반면, 신갈나무와 그 외 참나무류 성장에는 정(+)의 영향을 주는 것으로 나타났다. 강수량의 증가는 소나무와 신갈나무 성장에 정(+)의 영향을 주는 것으로 분석되었다. 높은 기온과 낮은 강수량은 소나무 생육에 부정적인 영향을 미치는데, 이는 토양

Table 3. Parameter estimates and statistics for climate factors model of SG

Species	Parameter	Estimate	Std Error	t-value	Prob> t
<i>Pinus densiflora</i>	Intercept	1.849577	0.071798	25.76	<.0001
	TWI	0.033409	0.007017	4.76	<.0001
	TEM	-0.04229	0.004827	-8.76	<.0001
	PRE	0.000455	0.000053	8.58	<.0001
<i>Quercus mongolica</i>	Intercept	1.192091	0.107748	11.06	<.0001
	TWI	0.041677	0.011157	3.74	0.0002
	TEM	0.029905	0.004713	6.35	<.0001
	PRE	0.000197	0.0000713	2.77	0.0057
<i>Quercus spp.</i>	Intercept	1.4934	0.09583	15.58	<.0001
	TWI	0.04192	0.00905	4.63	<.0001
	TEM	0.02482	0.00687	3.61	<.0001
	PRE	0.000088	0.00007606	1.16	0.2449
<i>Larix kaempferi</i>	Intercept	3.094949	0.321943	9.61	<.0001
	TWI	0.011651	0.022153	0.53	0.599
	TEM	-0.08996	0.01417	-6.35	<.0001
	PRE	0.000197	0.000236	0.84	0.4036
<i>Castanea crenata</i>	Intercept	2.988744	0.333025	8.97	<.0001
	TWI	-0.01902	0.022933	-0.83	0.407
	TEM	-0.08362	0.026773	-3.12	0.0018
	PRE	0.00053	0.000293	1.81	0.071

수분 감소로 인한 수분 스트레스를 야기하기 때문인 것으로 보인다(이상태 등, 2009). 참나무류의 경우, 기온의 증가가 성장에 정의 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 이는 성장기간의 증가와 순광합성량의 증가와 관련이 있는 것으로 보인다(이선정 등, 2012). 본 연구에서 생육 분포 특성을 기준으로 구분한 신갈나무와 그 외 참나무류의 분석 결과는 큰 차이가 없었다.

한편, 추정된 표준 성장(eSG)의 분포에 따르면 온도와 강수량은 표준 성장을 충분히 설명하지 못하는 것을 알 수 있다(Fig. 1). 이는 일반적으로 개체목의 반경 성장은 온도와 강수량 등의 인자보다 일반적인 성장인자인 수령, 흉고 직경, 수고, 밀도, 지위 등에 영향을 받는다는 것과 관련이 있다(Fritts, 1976; Tappeiner *et al.*, 1997).

본 연구에서 활용한 반경성장모형은 통계적으로 높은 설명력을 갖는 것으로 분석되었다

(Table 4). 또한, 모형의 검정을 위하여 실제로 측정된 성장량과 개발한 모형을 통해 추정된 값을 비교해 본 결과, 분포가 매우 유사하게 나타났다(Fig. 2). 이러한 모형의 검정을 통해 TWI, 기온, 강수량을 포함한 정규화된 표준생장과 수령을 독립 변수로 사용하여 기후 조건에서 반경 성장의 연간 변이를 추정할 수 있음을 입증하였다.

4.2 기후변화에 따른 성장 변화 예측

기후인자 모형에 의한 분석 결과인 Table 3을 보면 소나무, 일본잎갈나무, 밤나무의 반경 성장은 온도 증가에 취약한 것을 알 수 있다. 각 수종별 성장이 온도의 영향을 받는 것에 차이가 존재하는 것은 현재와 미래의 반경 성장 패턴에 차이를 야기할 수 있다. 따라서 반경 성장 모형을 활용하여 RCP8.5 시나리오에 따른 미래(2050년)의 수종별 연년 반경 성장을 예측한 값

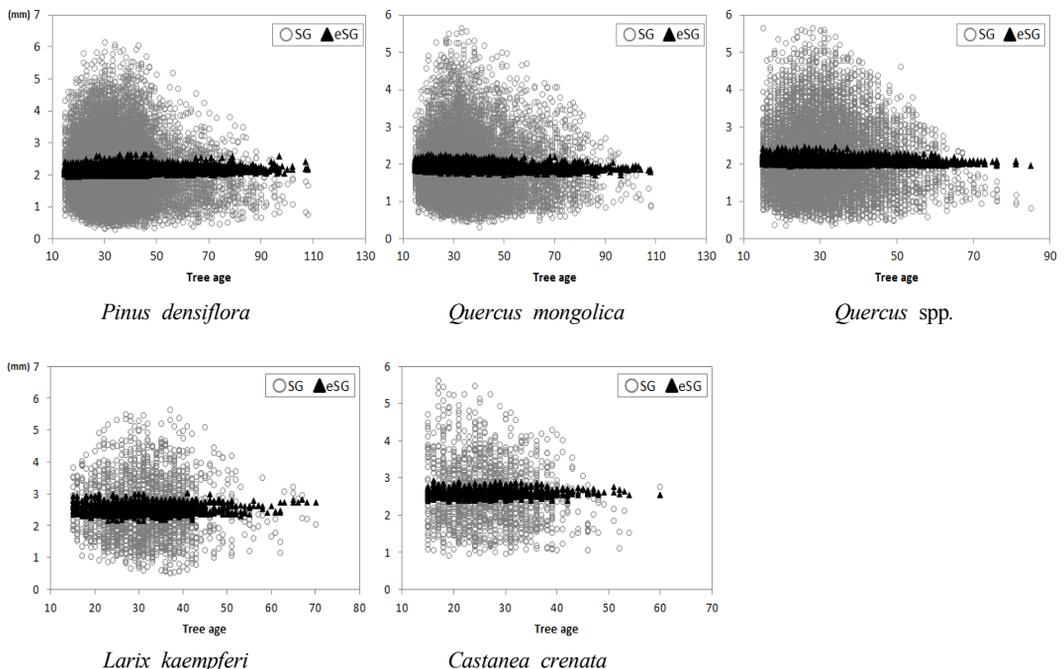


Fig. 1. Standard Growth(SG) and estimated Standard Growth(eSG) using Climate factors model.

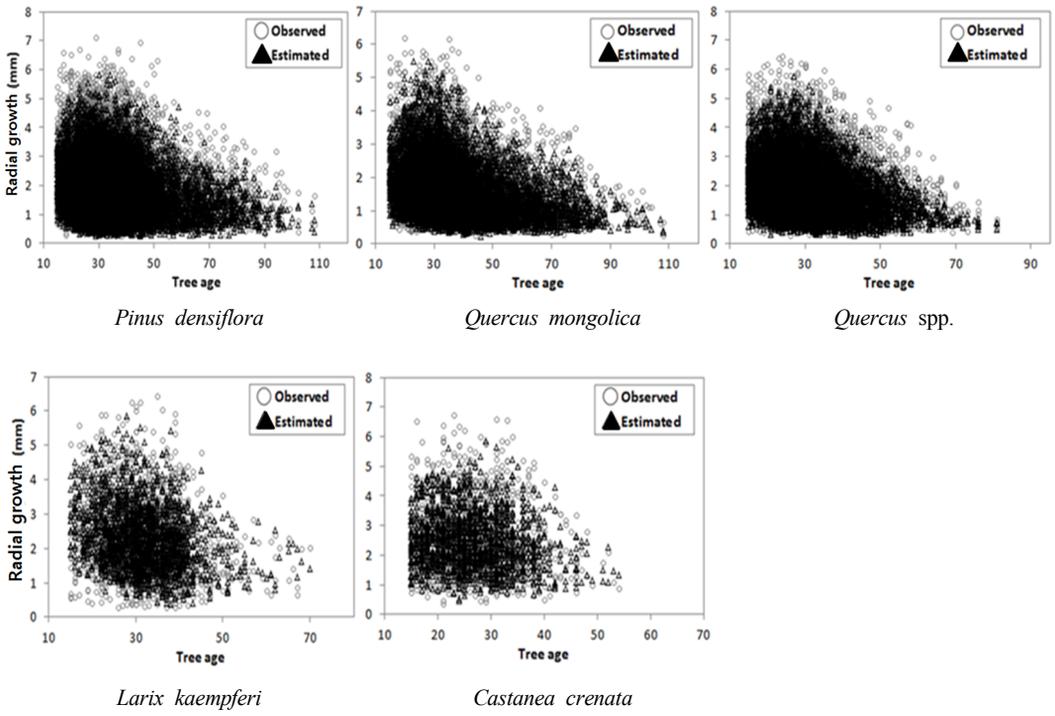


Fig. 2. Clouds of observed and estimated radial growth for each species.

Table 4. Statistics on assessment of radial growth model

Species	RMSE	R ²
<i>Pinus densiflora</i>	1.0195	0.80
<i>Quercus mongolica</i>	0.8050	0.83
<i>Quercus spp.</i>	0.9385	0.83
<i>Larix kaempferi</i>	0.9948	0.84
<i>Castanea crenata</i>	1.2868	0.80

RMSE=Root Mean Square Error.

과 현재(2010)의 연년 반경 생장의 차를 구하여, 기후변화 유·무에 따른 시·공간적 성장 변화를 살펴보았다(Fig. 3). 기후변화 시나리오에 따르면 소나무, 밤나무, 일본잎갈나무는 전반적으로 현재보다 생장이 저조해질 것으로 예측되었다. 특히, 소나무, 밤나무의 생장은 상대

적으로 크게 저하되는데, 내륙지역보다 해안지역을 중심으로 생장이 저조해질 것으로 보인다. 반면, 신갈나무를 포함한 참나무류 수종의 생장은 증가할 것으로 예측되었다. 이 같은 결과에 따르면 참나무류는 현재 우리나라 산림의 자연천이와 함께(Lee et al., 2007) 기후변화에 의해 그

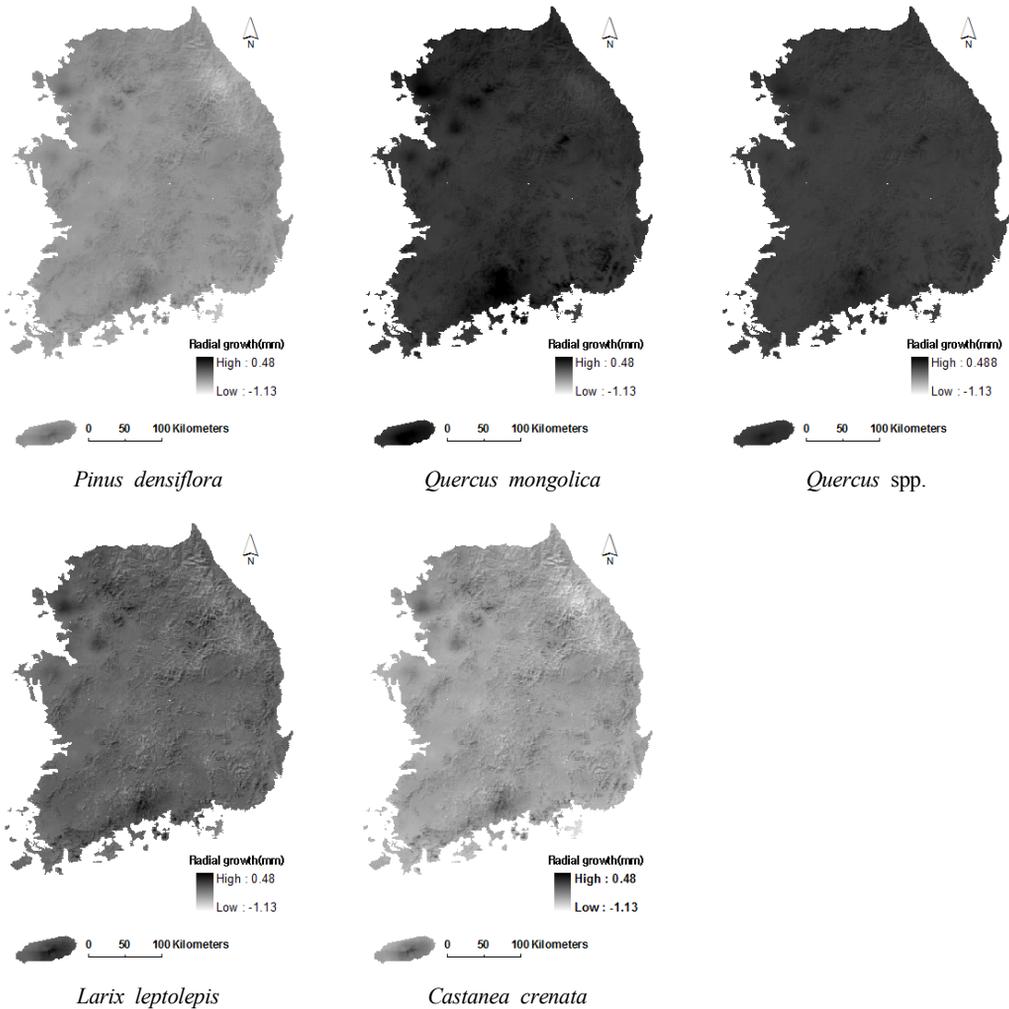


Fig. 3. Differences of radial growth in present(2010) and future(2050) for each tree species.

분포가 크게 넓어질 것으로 예측된다(Fig. 3).

5. 결론

본 연구의 목적은 IPCC의 미래 기후 자료와 제5차 국가산림자원 조사의 연륜 측정 자료를 활용하여 우리나라 주요 수종인 소나무, 신갈나무, 그 외 참나무류(졸참나무, 갈참나무, 떡갈나무, 굴참나무, 상수리나무), 밤나무, 일본잎갈나무의 반경 성장 변화 및 임상의 변화를 예측하

는데 있다. 환경 및 기후에 따른 임목의 성장을 예측할 수 있도록 고안된 성장모형을 본 연구에 적용하여 반경생장과 기온, 강수량과의 관계를 분석한 결과, 기온의 상승은 소나무, 밤나무, 일본잎갈나무의 성장에 부(-)의 영향을 주며, 신갈나무를 포함한 참나무류에는 정(+)의 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 강수량의 증가는 수종별로 통계적 유의성에 차이가 있으나, 대부분의 수종에 정(+)의 영향을 주는 것으로 나타났

다. 따라서, 소나무, 밤나무, 일본잎갈나무의 생장은 신갈나무를 포함한 참나무류에 비해 기후 변화에 민감하게 반응하여, 우리나라 남부 및 해안지역 산림을 중심으로 대부분 지역에서 이들 수종의 생육 분포가 참나무류 생육지로 대체될 것으로 예측되었다.

그간 기후 및 지형과 임목 성장 간의 관계에 관한 연구는 다양하게 이루어졌으나, 대부분 한정된 지역에서 단일 수종을 대상으로 하였으며, 다양한 수종과 우리나라 산림 전역을 대상으로 한 연구는 본 연구를 포함하여 매우 드물었다. 따라서, 본 연구의 결과는 다양한 수종과 지역을 대상으로 기후변화에 따른 임목 성장과 이에 따른 생육 분포 변화를 밝히는데 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 향후 지속되는 국가산림자원조사 모니터링 결과를 활용하여 본 연구에서 활용한 성장모형과 본 연구의 결과를 검증 및 고도화한다면 기후변화에 따른 임목 성장과 수종 분포를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

다만, 본 연구는 기후변화로 인한 병해충의 증가, 산불 및 산사태의 발생 등과 같은 산림재해의 영향은 고려하지 못했다는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 다양한 연구를 통해 보완한다면 기후변화에 대응한 지속가능한 산림관리 방안을 수립하는데 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

사사

본 논문은 산림청 ‘제5차 국가산림자원조사’ 및 ‘생장목편 DB 구축 사업’의 결과에 의해 이루어진 연구 결과임.

참고문헌

국립산림과학원, 2013, 1:5,000 임상도기반 한국의 주요 수종분포.

김문일, 2012, 기후와 지형인자를 반영한 우리나라 주요 수종의 반경 성장모형 개발, 고려대학교 환경생태공학과 석사학위논문.

변재균, 이우균, 노대균, 김성호, 최정기, 이영진, 2010, 중부지방 소나무와 참나무류의 반경성장량과 지형, 기후 인자의 관계, 한국임학회지, 99권 6호, 908-913.

산림청, 국립산림과학원, 2008, 제5차 국가산림자원조사 -현지조사지침서 Version1.2-.

서정욱, 김재수, 박원규, 2000, GIS 기법을 이용한 지형적 특성에 따른 월악산 소나무 연륜생장의 이질성 규명, 한국생태학회지, 23권 1호, 25-32.

서정욱, 박원규, 2010, 지형적 특성에 따른 월악산 신갈나무의 연륜생장과 기후와의 관계, 한국환경복원녹화기술학회지, 13권 3호, 36-46.

윤미혜, 이우균, 김문일, 2013, 기후인자가 임목의 연륜생장에 미치는 영향, 한국기후변화학회지, 4권 3호, 255-267.

이상태, 배상원, 장석창, 황재홍, 정준모, 김현섭, 2009, 지역별 잣나무의 연륜생장과 기후인자와의 관계연구, 한국임학회지, 98권 6호, 733-739.

이선정, 한새롬, 윤태경, 정혜근, 노남진, 조우용, 박찬우, 고수인, 한승현, 손요환, 2012, 실외 실험적 온난화 처리가 굴참나무 묘목의 생장에 미치는 영향, 한국임학회지, 101권 4호, 722-728.

이정택, 2011, 기후변화교과서, 한반도의 농업과 육상생태계, 최재천과 최용상 엮음, 도요새, 317-358.

전현선, 주린원, 전철현, 박찬우, 김통일, 이정희, 김래현, 박찬열, 천정화, 윤호중, 이창우, 최형태, 이호상, 이승우, 2013, 산림공익기능 가치평가, 한국임학회, 산림과학 공동학술발표논문집, 675-677 pp.

- 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, J. Saborowski, D. J. Chung, and J. H. Jung, 2013, Radial growth response of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. to topographic and climatic factors in South Korea, **Journal of Plant Ecology**, **6**, 380-392.
- Choi, S. H., W. K. Lee, D. A. Kwak, S. Lee, Y. Son, J. H. Lim, and J. Saborowski, 2011, Predicting forest cover changes in future climate using hydrological and thermal indices in South Korea, **Climate Research**, **49**, 229-245.
- Dale, V. H., L. A. Joyce, S. McNulty, R. P. Neilson, M. P. Ayres, M. D. Flannigan, P. H. Hanson, L. C. Irland, A. E. Lugo, C. J. Peterson, D. Simberloff, F. J. Swanson, B. J. Stocks, and B. M. Wotton, 2001, Climate change and forest disturbances, **Journal of BioScience**, **51**, 723-734.
- Fang, J., and M. J. Lechowicz, 2006, Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus L.*) species in the world, **Journal of Biogeography**, **33**, 1804-1819.
- FAO, 2011, State of the World's Forests.
- Fralish, J. S., 1994, The effect of site environment on forest productivity in the Illinois Shawnee Hills, **Ecological Applications**, **4**, 134-143.
- Fritts, H. C., 1976, Tree Rings and Climate, Academic New York.
- Hengl, T., H. Sierdsema, A. Radovic, and A. Dilo, 2009, Spatial prediction of species distributions from occurrence-only records: combining point pattern analysis, ENFA and regression-kriging, **Ecological Modelling**, **220**, 3499- 3511.
- Hughes, M. K., P. M. Kelly, J. R. Pilcher, V. C. LaMarche, 1982, Climate from Treerings, Cambridge University Press.
- Lee, M. A., W. K. Lee, Y. Son, and Y. Cho, 2007, Sensitivity and adaptability of vegetation and soil carbon storage to climate change with CEVSA model in Korea, **Proc. A3 Foresight Program**: **24**.
- Lo, Y. H., A. B. Juan, S. Brad, W. Clive, and J. P. H. Kimmin, 2010, Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada, **Forest Ecology and Management**, **259**, 932-942.
- Schweingruber, F. H., 1988, Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology. Dordrecht, the Netherlands: D. Reidel. Publishing Company Bostamp. 276.
- Tappeiner, J. C., D. W. Huffman, D. Marshall, T. A. Spies, and J. D. Bailey, 1997, Density, ages, and growth rates in old-growth and young-growth forests in coastal Oregon, **Canadian Journal of Forest Research**, **27**, 638-648.
- White, D. P., 1958, Available water: the key to forest site evaluation. In Proceedings, 1st Forest Soils Conference. pp. 6-11. Edited by T. D. Stevens and R. L. Cook. Michigan State University, Department of Forestry, East Lansing.