기후변화에 따른 생태권역별 · 임상별 산림 바이오매스 변화량 예측

신진영¹ · 원명수² · 김경하² · 신만용^{1*}

¹국민대학교 산림환경시스템학과, ²국립산림과학원 산림방재연구과
(2013년 6월 10일 접수; 2013년 7월 3일 수정; 2013년 7월 9일 수락)

Predicting the Effect of Climate Change on Forest Biomass by Different Ecoprovinces and Forest Types in Korea

Jin Young Shin¹, Myoung Soo Won², Kyongha Kim² and Man Yong Shin^{1*}

¹Department of Forest, Environment, and System, Kookmin University, Seoul 130-702, Korea

²Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute, dongdaemun-gu, South Korea

(Received June 10, 2013; Revised July 3, 2013; Accepted July 9, 2013)

ABSTRACT

This study was conducted to predict the changes in forest biomass in different ecoprovinces and forest types under climate change scenario based on cumulative data (i.e., digital forest site and climate maps, National Forest Inventory data) and various prediction models. The results from this study showed that predicted changes over time in biomass varied according to ecoprovince and forest type in Korea. A reduction in biomass was predicted for all forest types associated with the mountain, southeastern hilly, and southwestern hilly ecoprovinces. On the other hand, the biomass was predicted to increase for the coniferous forest and mixed-forest types in the central hilly ecoprovince. Furthermore, increases in biomass are predicted for all forest types, except coniferous forests, in the coastal ecoprovince. The results from this study provide a basis for developing technology to predict forest impacts due to climate change by predicting changes in forest biomass based on the estimation of site index.

Key words: Climate change scenario, Forest biomass, Ecoprovince, Site quality, National forest inventory

I. 서 론

무분별한 인간활동의 결과로 대기 중의 온실가스 농도가 높아짐에 따라 21세기는 20세기에 비해 기후변화가 더 크게 증가할 전망이다(IPCC, 2007). IPCC의 온실가스 배출 시나리오에 관한 특별보고서(SRES; Special Report on Emission)에 따르면 2000년에서 2030년까지 전 세계의 온실가스는 25~90% 정도 증가할 것이라고 전망하였다(Korea Forest Service, 2009). 이처럼 대기 중 온실가스 농도의 증가로 생태계의 구

조와 역할 그리고 종의 상호 연계와 관련하여 많은 부정적인 예측이 나오고 있다. IPCC-WG II (IPCC-Working Group II)에서도 기후변화로 인한 영향에 대하여 경고하였는데, 임업부문에서는 화재 및 산불의 위험성 증가, 토양 침수 및 침식, 난대지역 수확량 감소 등을 예상하고 있다(IPCC, 2007). 특히 전 세계적으로 지구온난화에 따른 기상이변으로 인해 산림재해가 대형화되는 추세이며, 산불 등과 같은 자연 재해에 대응할 수 있는 예측기술의 개발이 필요한 실정이다.

이러한 현실에서 기후변화에 따른 산림 재해를 예측

* Corresponding Author : Man Yong Shin
(yong@kookmin.ac.kr)

하기 위해서는 산림을 구성하는 임목자원의 변화를 예측하는 작업이 선행되어야 한다. Sykes and Colin (1996)의 연구에 따르면 스웨덴의 경우 기후변화에 의해 침엽수종이 퇴보하는 동안 온대 활엽수종이 북쪽으로 확장되고 있으며, 이러한 식생대의 이동 속도가 지나치게 빠르게 진행되고 있는 문제를 지적하였다. Lee *et al.*(2011)은 IPCC의 기후변화 시나리오 A2와 B1에 따른 산림 분포 취약성을 평가한 결과, A2 시나리오를 적용할 경우 시간이 지남에 따라 아고산림 및 냉온대림의 분포가 줄어들어, 미래에는 강원도 산간지방, 지리산, 한라산 일대에만 분포하고 온난대림이 북상하여 분포하는 것으로 예측하였다. 한편 B1시나리오에서는 과거와 비교하여 아고산림의 면적이 감소하고 온난대 상록수림의 면적이 증가하는 것으로 나타났다. Kong(1998)에 의하면 기온이 올라가면서 식물의 개화시기가 빨라지고 난대성 식생의 분포는 확장되지만, 한대성 식생은 활기를 잃고 쇠퇴하는 등 생태적 부작용이 나타난다고 보고하였다. 이처럼 기후변화로 인한 산림의 식생대 변화에 관한 연구는 많이 이루어졌지만 산림 바이오매스의 증감을 정량적으로 구명하는 연구는 수행되지 않은 실정이다.

2012년 기상청에서는 IPCC 5차 평가보고서에 사용될 새로운 기후변화 시나리오인 RCP (Representative Climate Pathways) 시나리오를 기반으로 우리나라에 대한 상세기후변화 시나리오를 개발하여 배포하였다. 이는 이전에 제공된 기후변화 시나리오보다 100배 더 상세해진 것으로, 이를 활용하면 기후변화에 의한 영향을 더 정확하게 예측할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구는 기후변화 시나리오인 RCP 8.5에 따른 미래 산림 바이오매스 변화량을 예측하여 기후변화에 의한 산림재해의 위험성을 평가하고자 하였다. 즉, 본 연구에서는 생태권역별·임상별 지위지수 추정식을 개발하고 기후변화 시나리오를 적용함으로써 시간 경과에 따른 산림 바이오매스의 변화량을 예측하기 위해 수행하였다. 이를 통해 기후변화가 산불확산 연료인 산림 바이오매스 변화량에 미치는 영향을 평가할 수 있는 정보를 제공하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 자료

본 연구에서는 우리나라 전체 산림을 대상으로 5개

Fig. 1. Ecoprovince classification in South Korea.

생태권역으로 구분하여(Shin and Kim, 1996) 기후변화에 따른 산림 바이오매스 변화량을 예측하였다(Fig. 1). 생태권역은 우리나라를 자연 지리적 특성과 생태적 연계성, 문화적 동질성을 기준으로 산악, 남동산야, 남서산야, 중부산야, 그리고 해안도서의 5개로 구분한 것이다. 먼저 기후변화에 의한 산림 바이오매스 변화량 예측을 위해 생태권역별·임상별 지위지수 추정식을 개발하였다. 이를 위해 수치산림입지도 및 수치기후도로부터 생태권역별·임상별 환경인자를 정리하였으며, 중회귀분석 기법에 의해 생태권역별·임상별 지위지수 추정식을 도출하였다. 또한 제5차 국가산림자원조사(NFI) 자료에 근거하여 임상별 임분수확 예측식을 도출하고, 기후변화 시나리오에 의한 지위지수의 변화량을 적용하여 임목축적 변화량을 추정하였다. 임목축적 변화량에 바이오매스 전환계수와 확장계수를 적용하여 기후변화에 따른 산림 바이오매스의 변화를 예측하였다.

환경요인에 의한 생태권역별·임상별 지위지수 추정식을 개발하기 위해 수치산림입지도와 수치기후도를 중첩하여 지위에 영향을 미칠 것으로 판단되는 19개의 지형, 토양인자($X_1 \sim X_{19}$) 그리고 18개의 기후인자($X_{20} \sim X_{37}$)를 도출하여 정리하였다(Table 1). 한편 지위지수 추정식의 종속변수인 기준임령 30년의 지위지수는 수치산림입지도에 나타난 임령과 우세목 수고 자료에 근거하여 추정하였다. 이를 위해 Chapman-Richards의 모형(Clutter, 1983)을 이용하여 국립산림과학원에

Table 1. Topography, soil and climate variables used in this study to estimate site index by ecoprovinces and forest types

Variables	Variable Name	Variables	Variable Name
X ₁	Topography	X ₂₀	Annual mean temperature
X ₂	Climatic Zone	X ₂₁	Annual maximum temperature
X ₃	Parent Rock	X ₂₂	Annual minimum temperature
X ₄	Slope	X ₂₃	The monthly mean temperature for 3~5 month
X ₅	Altitude	X ₂₄	The monthly mean temperature for 3~9 month
X ₆	Relief	X ₂₅	The monthly mean temperature for 4~6 month
X ₇	Aspect	X ₂₆	The monthly mean temperature for 4~10 month
X ₈	Ratio of Valley to Hill	X ₂₇	Monthly mean of precipitation
X ₉	Wind Exposure	X ₂₈	Annual total precipitation
X ₁₀	Distance to the Coast	X ₂₉	Total precipitation for 3~5month
X ₁₁	Available Soil Depth	X ₃₀	Total precipitation for 3~9month
X ₁₂	Soil Depth in Horizon A	X ₃₁	Total precipitation for 3 months in the early growing season
X ₁₃	Soil Depth in Horizon B	X ₃₂	Total precipitation for the growing season
X ₁₄	Organic Matters in Horizon A	X ₃₃	Monthly mean of relative humidity
X ₁₅	Organic Matters in Horizon B	X ₃₄	Monthly mean of relative humidity for 3~5 month
X ₁₆	Soil Moisture in Horizon A	X ₃₅	Monthly mean of relative humidity for 3~9 month
X ₁₇	Soil Moisture in Horizon B	X ₃₆	Monthly mean of relative humidity for 3 months in the early growing season
X ₁₈	Soil Consistency in Horizon A	X ₃₇	Monthly mean of relative humidity for the growing season
X ₁₉	Soil Consistency in Horizon B		

서 개발한 수종별 임령·수고 지위지수 모형의 모수 추정치를 사용하였다. 생태권역별·임상별로 정리된 자료는 7:3의 비율로 추정자료와 검증자료로 무작위 분류하였다. 추정자료는 회귀기법에 의해 수종별 지위지수 추정식을 조제하기 위한 것이며, 검증자료는 추정자료에 기초하여 얻어진 추정식의 통계적 검증에 사용되었다(Snee, 1977; Song, 2003).

기후변화는 2012년 기상청에서 제공한 RCP 4.5(복사강제력 4.5W/m², 해수면 72.7cm 상승 예측)와 RCP 8.5(복사강제력 8.5W/m², 해수면 90cm 상승 예측) 시나리오 가운데 RCP 8.5의 고농도 시나리오를 채택하였다. 이는 극한 상황에서 기후변화에 의한 산림 바이오매스의 변화량을 예측하기 위함이다. 기후변화 자료는 2012년~2100년까지의 월 단위 자료를 ARC-GIS 프로그램을 이용하여 추출하였으며, 앞에서 정리한 18개의 기후인자를 2012년부터 2100년까지 연도별로 정리하였다.

본 연구의 최종목표인 기후변화 시나리오에 의한 생태권역별·임상별 산림 바이오매스 변화량을 예측하기 위해서는 임분수확 예측식이 필요하다. 또한 예측능력이 뛰어난 임분수확 예측모형을 이용하기 위해서는 임상별 회귀계수를 산출해야 하고 고정 표본점에서 오랜 기간 동안 수집한 자료가 필요하며(Kim, 2011), 이를

위해서는 표본점별 임령, 지위지수, 임분밀도에 대한 정보가 요구된다. 본 연구에서는 전국 단위의 고정표본점 자료가 누적되어 있는 제5차 국가산림자원조사 자료를 이용하여 생태권역별·임상별 임분수확 예측식을 개발하였다.

2.2. 생태권역별·임상별 지위지수 추정식의 개발

5개 생태권역을 대상으로 환경요인에 의한 생태권역별·임상별 지위지수 추정식을 도출하기 위해 먼저 기준임령 30년에 대한 지위지수와 37개의 환경인자 간의 상관분석을 실시하였다. 다음 단계에서는 임상별 지위지수와 상관이 비교적 높은 환경인자를 선택한 후, 이들 변수 중에서 중회귀분석의 단계별 회귀기법(stepwise regression)에 의하여 지위지수 추정에 필요한 최적 변수의 조합을 선택하였다. 이 과정에서 상관분석에 의해 선택된 독립변수간의 내부상관이 있는지를 검증하고(Belsley *et al.*, 1980; Myers, 1990; Judge *et al.*, 1988), 내부 상관의 문제를 제거하면서 최적 변수의 조합에 의하여 결정계수가 높은 지위지수 추정식을 작성하였다.

이상과 같은 방법으로 도출된 수종별 지위지수 추정식의 적합성을 검증하기 위해 모형의 추정편의(model's estimation bias), 모형의 정도(model's precision), 그

리고 이 두 가지를 고려한 측정치에 대한 오차의 평균평방화(mean square error type of measure)인 모형의 표준오차의 3가지 평가통계량을 사용하였다(Shin, 1990; Arbatzis and Burkhardt, 1992). 앞에서 작성된 생태권역별·임상별 지위지수 추정식의 검증 결과를 평가한 후 문제가 없을 경우 추정자료와 검증자료를 합친 통합자료에 근거하여 최종 지위지수 추정식을 개발하였다.

2.3. 기후변화 시나리오에 의한 지위지수 변화량 파악

생태권역별·임상별 지위지수 추정식에 의해 산출한 지위지수는 현재의 지위지수 추정치이다. 또한 기후변화에 따른 산림 바이오매스 변화량을 예측하기 위해서는 기후변화 시나리오에 따른 지위지수 추정치가 필요하다. 본 연구에서 개발한 지위지수 추정식에는 독립변수로 기후인자가 포함되기 때문에 기후변화에 따라 기후인자의 값을 변화시키면 기후변화에 의한 지위지수 추정치를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 현재의 생태권역별·임상별 지위지수에서 기후변화 이후의 지위지수 추정치를 뺀 값을 기후변화에 의한 지위지수 변화량으로 간주하였다.

2.4. 생태권역별·임상별 임목축적 변화량 예측

본 연구에서는 기후변화 시나리오에 의해 지위지수가 변할 때 임분 수확량의 변화를 효율적으로 예측하기 위해 Bennett(1970)가 개발한 아래와 같은 식 (1)의 임분 수확예측 모델을 이용하였다. 일반적으로 단위면적당 임분수확량은 임분변수인 임령, 지위지수, 그리고 임분밀도에 의해 추정하는데, 본 연구에서 사용한 Bennett의 모델은 널리 알려져 있는 임분수확예측 모델 중의 하나이다.

$$\ln(V) = b_0 + b_1 SI^{-1} + b_2 A^{-1} + b_3 \ln(BA) \quad (1)$$

위 식에서 V =ha당 재적, SI =지위지수, A =임령, BA =ha당 흉고단면적, 그리고 b_0, b_1, b_2, b_3 =회귀분석을 통해 추정하여야 할 회귀계수이다. 이 식은 현재 임분의 지위지수, 임령, 흉고단면적을 알 때 현재의 단위면적당 임분재적을 추정할 수 있는 임분수확 예측 모델이다. 본 연구의 최종 목표는 기후변화에 따른 생태권역별·임상별 산림 바이오매스의 변화량을 예측하는 것이다. 이 경우 기후변화는 미래 시점에 발생하는 것으로 간주하기 때문에 임분수확 예측모델의 ha당 흉

고단면적도 미래 시점에 어떻게 변화하는지를 추정하여야 한다. 따라서 특정 시점의 임분재적을 예측할 수 있는 식 (1)과 임령에 따른 흉고단면적의 변화를 예측할 수 있는 흉고단면적 예측모델을 이용하였다(식. 2).

$$BA = b_0 e^{b_1 A^{-1}} \quad (2)$$

여기서 BA =ha당 흉고단면적, e =지수, A =임령, b_0, b_1 는 회귀분석을 통해 추정하여야 할 회귀계수이다.

2.5. 생태권역별·임상별 산림 바이오매스 변화량 추정

산림 축적을 바이오매스로 전환하기 위해서는 목재 기본밀도와 바이오매스 확장계수(Biomass expansion factor)를 적용하여야 한다(Son *et al.*, 2007). 본 연구에서는 온실가스종합정보센터에서 발간한 '2010년도 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침' (Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 2012)에서 제시한 계수를 사용하였다. 목재기본밀도는 임상별 차이가 있으며, 침엽수 0.49, 활엽수 0.58, 혼효림은 침엽수와 활엽수의 평균인 0.535를 이용하고 있다. 또한 확장계수(BEF)의 경우에는 침엽수 1.3, 활엽수 1.4, 혼효림 1.35를 이용하여 지상부 바이오매스를 산출하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 생태권역별·임상별 지위지수 추정식의 개발

추정자료를 사용하여 작성한 생태권역별·임상별 지위지수 추정식은 통계검증을 통해 문제가 없는 것으로 판명되었다. 따라서 추정자료와 검증자료를 합친 통합자료에 근거하여 최종 지위지수 추정식을 도출하였다. 환경인자의 조합에 의해 생태권역별·임상별로 개발된 최적 지위지수 추정식은 Table 2와 같다. 생태권역별·임상별 최종 지위지수 추정식은 5~7개의 환경요인에 의해 지위지수를 추정하는 것으로 평가되었다. 생태적 특성에 따라 구분한 5개 권역의 임상별 지위지수 추정식을 보면 B층 토심(X_{13})이 산림생산력 추정에 가장 많이 사용되는 것으로 분석되었다. 이 결과는 수목의 생장은 토심의 영향을 크게 받기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이 변수는 단독으로 사용되기 보다는 모두 기후인자와의 조합에 의해 하나의 변수를 구성하는 것으로 나타났다. 즉, 대부분의 기후인자는 단독으로 산림생산력에 영향을 미치지 보다는 B층 토심과

Table 2. Regression coefficients of site parameters to enviromental factors by ecoprovinces and forest types

Eco province	Forest type	n	Estimated equation of forest productivity	R ²
Mountainous	Coniferous	33,726	$SI = 5.7075 + 0.9301 \times X_6 - 0.5302 \times X_{17} - 0.4338 \times X_{22} + 0.0085 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) + 0.0040 \times (X_{13} \times \ln(X_{33}))$	0.38
	Hard wood	10,935	$SI = 15.6776 + 0.1273 \times X_{11} - 0.3294 \times X_{16} + 0.4867 \times (X_{33}/X_{20}) - 0.0670(X_{13}/\ln(X_{29}))$	0.32
	Mixed	20,209	$SI = 8.3452 - 0.5770 \times X_{16} - 0.4578 \times X_{22} + 0.0021 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) + 0.0056 \times (X_{13} \times \ln(X_{33}))$	0.37
South eastern hilly	Coniferous	11,519	$SI = 3.7576 + 0.5576 \times X_9 - 0.1090 \times X_{12} + 5.3455 \times (X_{13}/X_{21}) - 0.6611 \times (X_{13}/\ln(X_{32})) + 0.0223 \times (X_{13} \times \ln(X_{33}))$	0.44
	Hard wood	2,461	$SI = 74.1045 + 0.1060 \times X_{11} - 0.4585 \times X_{16} - 0.4160 \times X_{21} - 0.9721 \times X_{37} + 0.0411(X_{20} \times \ln(X_{27}))$	0.34
	Mixed	10,838	$SI = 8.6266 + 0.1259 \times X_{11} - 0.5222 \times X_{17} + 0.5129 \times (X_{13}/X_{20}) - 0.0254 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) + 0.0275 \times (X_{13} \times \ln(X_{33}))$	0.37
South western hilly	Coniferous	16,391	$SI = 11.9993 + 0.3657 \times X_7 - 0.7424 \times X_{16} + 1.6148 \times (X_{13}/X_{20}) + 0.0541 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) - 0.0865 \times (X_{13} \times \ln(X_{33}))$	0.41
	Hard wood	3,529	$SI = 16.3884 - 0.2641 \times X_8 - 0.4668 \times X_{16} + 0.5415 \times (X_{13}/X_{20}) - 1.1684 \times (X_{13}/\ln(X_{33})) + 1.2571 \times (X_{13}/\ln(X_{29}))$	0.38
	Mixed	12,923	$SI = 12.3037 + 0.4108 \times X_9 - 0.6903 \times X_{16} + 1.1462 \times (X_{13}/X_{20}) + 0.0394 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) - 0.0638 \times (X_{13} \times \ln(X_{33}))$	0.35
Central hilly	Coniferous	7,974	$SI = 10.2528 + 1.0582 \times X_6 - 0.7075 \times X_{16} - 4.1018 \times (X_{13}/X_{21}) + 0.1190 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) - 1.4666 \times (X_{13}/\ln(X_{33}))$	0.41
	Hard wood	3,318	$SI = 11.3413 + 0.6823 \times X_9 - 0.5371 \times X_{17} - 0.0717 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) - 0.2040 \times (X_{33}/X_{20}) + 0.0853 \times (X_{13} \times \ln(X_{33}))$	0.40
	Mixed	6,757	$SI = 13.5510 - 0.3967 \times X_8 - 0.2975 \times X_{16} - 0.6097 \times (X_{13}/X_{20}) + 0.0531 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) - 1.1209 \times (X_{13}/\ln(X_{33}))$	0.35
Coastal	Coniferous	33,292	$SI = 12.8655 - 0.6750 \times X_2 - 0.5943 \times X_{16} + 5.3774 \times (X_{13}/X_{21}) - 0.0380 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) + 0.0093 \times (X_{13} \times \ln(X_{33}))$	0.31
	Hard wood	5,166	$SI = 19.8364 - 1.0503 \times X_2 - 0.6899 \times X_{17} - 0.0127 \times X_{29} + 0.0162 \times (X_{20} \times \ln(X_{27})) + 0.0148(X_{36}/\ln(X_{21}))$	0.37
	Mixed	15,477	$SI = 14.9927 - 1.4113 \times X_2 - 0.5995 \times X_{16} + 0.0252 \times (X_{13} \times \ln(X_{27})) + 0.1140 \times (X_{33}/X_{20}) - 0.0215 \times (X_{13} \times \ln(X_{33}))$	0.33

같은 토양인자 또는 다른 기후인자와의 조합에 의해 독립변수를 구성하는 것이 훨씬 설명력이 높은 추정식을 도출하는 것으로 분석되었다. 기후인자는 월평균 상대습도(X_{33}), 월평균 강수량(X_{27}), 그리고 연 평균기온(X_{20})이 독립변수로 많이 사용되어 산림생산력 추정에 중요한 역할을 하고 있는 것으로 나타났다.

생태권역별 · 임상별 지위지수 추정식의 결정계수는 0.31~0.44의 범위로 추정식의 설명력이 다소 낮은 것으로 평가되었다. 통계 모형을 이용하여 추정식을 개발할 경우 가능하면 설명력이 높은 추정식을 개발하는 것이 바람직하지만 다양한 요인이 작용하는 산림생산력을 몇 가지 환경요인에 의해 높은 결정계수를 갖는 추정식을 개발하는 것은 한계가 있다. 임목의 생육에 다양한 입지조건과 생물환경 인자들이 복합적으로 작용하기 때문에 대부분의 연구(Corona *et al.*, 1998;

Curt *et al.*, 2001; Kabrick *et al.*, 2004)에서도 환경인자를 이용하여 지위지수를 추정하는 경우 높은 설명력을 보이지 못하는 것이 사실이다. Albert and Schmidt(2010)는 토양 및 기후인자를 사용하여 노르웨이 가문비나무와 너도밤나무의 지위지수 변화를 분석하였지만 그 설명력은 각각 39%와 34%에 불과한 것으로 보고하였다. 또한 스코틀랜드에서는 기상 및 토양, 그리고 입지인자 이외에 시업년도를 추가하여 미송 조림지의 지위 추정식을 개발하였으나 45.5%의 설명력을 보였다(Tyler *et al.*, 1996). 이와 함께 Corona *et al.*(1998)은 이탈리아 미송의 지위지수 추정을 위해 토양 및 기상인자를 이용한 지위지수 추정식을 조제하였는데, 그 설명력이 39%이었음에도 불구하고 수목의 생장에 입지토양환경인자가 복합적으로 작용하는 산림생태계 내에서는 적절한 추정식으로 판정한 바 있다.

Table 3. Prediction of the change in site index over time by ecoprovinces and forest types

Ecoprovince	Year	Coniferous	Hardwood	Mixed
Mountainous	2030	-0.59	0.002	-0.63
	2050	-0.89	-0.05	-0.93
	2100	-1.67	-0.14	-1.74
Southeastern hilly	2030	0.45	-1.04	-0.07
	2050	0.25	-1.02	-0.13
	2100	-0.26	-1.08	-0.33
Southwestern hilly	2030	0.19	0.13	0.12
	2050	-0.07	-0.35	-0.06
	2100	-0.61	-1.56	-0.43
Central hilly	2030	0.52	-0.33	0.30
	2050	0.61	-0.24	0.46
	2100	1.19	-0.13	1.00
Coastal	2030	0.003	0.12	0.08
	2050	-0.20	0.42	0.05
	2100	-0.89	0.46	0.02

3.2. 기후변화 시나리오에 의한 지위지수 변화량 추정

Table 3은 RCP 8.5의 고농도 기후변화 시나리오에 따라 정리한 기후인자를 앞에서 개발한 생태권역별·임상별 지위지수 추정식에 적용하여 시간 경과에 따른 지위지수 변화량을 산출하여 비교한 결과이다. 지위지수 변화량은 2012년 현재를 기준으로 2030년, 2050

년, 그리고 2100년의 추정치를 비교하였다. 산악권역의 지위지수는 시간이 경과함에 따라 모든 임상에서 감소하는 것으로 나타났다. 특히 침엽수림과 혼효림은 매우 흡사한 패턴으로 지위지수가 감소하는 것으로 예측되었다. 활엽수림은 2030년 이후에는 감소하는 양상을 보이고 있지만 침엽수림과 혼효림에 비해 감소 정도는 미미한 것으로 나타났다. 남동산악권역의 지위지수 변화는 임상별로 다른 형태를 보이는 것으로 예측되었다. 침엽수림은 초기부터 2050년까지는 증가하는 추세를 보이지만 장기적으로는 산림생산성이 감소하는 것으로 예측되었다. 하지만 활엽수림과 혼효림은 시간이 경과하면서 감소하는 추세를 보이며, 활엽수림의 산림생산성 감소가 혼효림에 비해 더 큰 것으로 추정되었다.

남서산악권역은 임상별로 2030년까지는 지위지수가 증가하는 것으로 예측되었으나 그 이후에는 모두 감소하는 것으로 예측되었다. 특히 침엽수림과 혼효림은 유사한 경향을 보이고 있으며, 활엽수림의 경우 2030년까지 지위지수가 증가하다가 그 이후에는 감소하는 패턴으로 바뀌며 침엽수림과 활엽수림에 비해 감소의 폭이 다소 큰 것으로 나타났다. 중부산악권역의 침엽수림은 기후변화에 의해 지위지수가 증가하는 것으로 예측되었다. 반면에 활엽수림은 불규칙적인 패턴으로 지위지수가 감소하는 것으로 나타났으며, 혼효림은 시

Table 4. Estimates of regression coefficients by forest types for the stand yield prediction model used in this study

Ecoprovince	Forest type	n	Regression coefficients				R ²
			b_0	b_1	b_2	b_3	
Mountainous	Coniferous	1,575	3.0780	-8.5430	-13.4785	0.9795	0.98
	Hardwood	2,228	2.6385	-7.4587	-7.6367	1.0019	0.98
	Mixed	1,578	2.9150	-8.0504	-11.0912	0.9838	0.98
South eastern hilly	Coniferous	720	2.9519	-8.2936	-13.6658	1.0116	0.98
	Hardwood	470	2.7938	-8.3999	-8.3139	0.9929	0.98
	Mixed	511	2.8031	-7.9636	-9.5410	0.9965	0.98
South western hilly	Coniferous	552	3.1725	-8.4845	-17.0017	0.9793	0.99
	Hardwood	574	2.7596	-8.0618	-8.4819	0.9890	0.98
	Mixed	486	2.8215	-8.3045	-9.5593	1.0020	0.97
Central hilly	Coniferous	260	3.1477	-7.3981	-17.7449	0.9665	0.98
	Hardwood	764	2.6943	-8.4962	-7.1775	1.0128	0.99
	Mixed	439	2.9571	-8.5928	-11.0454	0.9852	0.98
Coastal	Coniferous	1,377	2.7863	-6.8416	-12.7457	1.0018	0.99
	Hardwood	1,538	2.5747	-6.9888	-7.2743	1.0026	0.98
	Mixed	1,054	2.6796	-6.5363	-10.2180	0.9963	0.98

간이 지남에 따라 기후변화에 의해 지위지수가 지속적으로 증가하는 양상을 보이고 있다. 해안도서권역은 임상별로 다른 결과를 나타냈다. 침엽수림은 시간이 경과함에 따라 일정한 비율로 감소하는 결과를 보이지만, 활엽수림은 2100년까지 불규칙적으로 지위지수가 변화하는 양상을 보이는데 시간 경과에 따라 지속적

로 양의 값을 유지하고 있어 결과적으로는 지위지수가 증가 추세를 유지하는 것으로 평가되었다.

3.3. 생권역별 · 임상별 임분수확 예측식의 조제

Table 4는 생태권역별 · 임상별 임분수확 예측식의 작성을 위해 제5차 국가산림자원조사의 표본점 자료를

Table 5. Estimates of forest biomass over time in mountainous ecoprovince by climate change

Ecoprovince	Forest type	Year	Growing stock (m ³ /ha)			Biomass (Dry Ton/ha)		
			Not change (a)	Climate change (b)	a-b	Not change (c)	Climate change (d)	c-d
Mountainous	Coniferous	2012	164.9	164.9	0.0	105.0	105.0	0.0
		2030	260.8	248.9	11.9	166.2	158.6	-7.6
		2050	331.0	307.8	23.2	210.8	196.1	14.8
		2100	424.7	366.4	58.3	270.5	233.4	37.1
	Hardwood	2012	118.2	118.2	0.0	75.3	75.3	0.0
		2030	186.1	186.1	0.0	118.5	118.6	0.0
		2050	238.1	237.2	-0.9	151.7	151.1	-0.5
		2100	310.0	306.8	-3.2	197.5	195.4	-2.0
	Mixed	2012	138.6	138.6	0.0	88.3	88.3	0.0
		2030	225.7	214.6	11.1	143.8	136.7	-7.0
		2050	290.7	269.4	21.3	185.2	171.6	13.6
		2100	378.5	324.1	54.5	241.1	206.4	34.7
Southeastern hilly	Coniferous	2012	162.3	162.3	0.0	103.4	103.4	0.0
		2030	272.6	282.3	9.7	173.7	179.8	6.2
		2050	355.0	362.1	7.1	226.1	230.7	4.5
		2100	466.5	456.5	10.0	297.1	290.8	-6.4
	Hardwood	2012	106.9	106.9	0.0	86.8	86.8	0.0
		2030	184.0	168.1	15.8	149.4	136.5	12.9
		2050	242.4	221.9	20.5	196.8	180.2	16.7
		2100	321.6	292.5	29.1	261.1	237.5	23.6
	Mixed	2012	133.1	133.1	0.0	96.1	96.1	0.0
		2030	234.2	233.2	-1.0	169.2	168.4	-0.7
		2050	311.0	308.0	-3.0	224.6	222.5	-2.2
		2100	415.5	405.3	10.2	300.1	292.7	-7.4
Southwestern hilly	Coniferous	2012	157.5	157.5	0.0	100.3	100.3	0.0
		2030	250.7	254.4	3.7	159.7	162.1	2.4
		2050	318.6	316.8	-1.8	203.0	201.8	-1.1
		2100	409.4	388.8	20.6	260.8	247.6	13.1
	Hardwood	2012	99.9	99.9	0.0	63.7	63.7	0.0
		2030	163.3	165.0	1.7	104.0	105.1	1.1
		2050	209.6	203.6	-6.0	133.5	129.7	-3.8
		2100	270.9	233.6	37.3	172.5	148.8	23.7
	Mixed	2012	122.9	122.9	0.0	78.3	78.3	0.0
		2030	221.3	223.4	2.1	141.0	142.3	1.3
		2050	298.1	296.7	-1.4	189.9	189.0	-0.9
		2100	404.7	390.5	14.2	257.8	248.7	-9.0

Table 5. Continued

Ecoprovince	Forest type	Year	Growing stock (m ³ /ha)			Biomass (Dry Ton/ha)		
			Not change (a)	Climate change (b)	a-b	Not change (c)	Climate change (d)	c-d
Central hilly	Coniferous	2012	161.9	161.9	0.0	103.1	103.1	0.0
		2030	284.7	294.1	9.5	181.3	187.4	6.0
		2050	385.2	400.3	15.1	245.4	255.0	9.6
		2100	531.4	570.8	39.4	338.5	363.6	25.1
	Hardwood	2012	116.4	116.4	0.0	74.1	74.1	0.0
		2030	184.3	179.9	-4.4	117.4	114.6	-2.8
		2050	232.9	228.9	-4.1	148.4	145.8	-2.6
		2100	296.5	293.8	-2.8	188.9	187.1	-1.8
	Mixed	2012	140.1	140.1	0.0	89.2	89.2	0.0
		2030	229.8	235.0	5.2	146.4	149.7	3.3
		2050	296.0	306.3	10.3	188.6	195.1	6.5
		2100	385.0	413.2	28.2	245.2	263.2	17.9
Coastal	Coniferous	2012	144.1	144.1	0.0	91.8	91.8	0.0
		2030	243.8	243.8	0.1	155.3	155.3	0.0
		2050	321.5	316.7	-4.8	204.8	201.7	-3.0
		2100	429.6	399.6	-30.0	273.7	254.5	-19.1
	Hardwood	2012	118.1	118.1	0.0	75.2	75.2	0.0
		2030	191.8	193.6	1.8	122.2	123.3	1.1
		2050	248.9	256.9	8.0	158.6	163.6	5.1
		2100	328.5	340.0	11.5	209.2	216.6	7.3
	Mixed	2012	124.1	124.1	0.0	79.1	79.1	0.0
		2030	215.0	216.2	1.2	137.0	137.7	0.8
		2050	285.2	286.2	1.0	181.7	182.3	0.6
		2100	381.9	382.4	0.5	243.2	243.6	0.3

식 (1)에 적용하여 회귀계수를 추정한 결과이다. 각 생태권역별·임상별로 개발된 임분수확 예측식의 설명력을 나타내는 결정계수를 보면 실측 표본점 자료를 사용하였음에도 불구하고 1에 가까운 높은 추정능력을 보이고 있다.

본 연구에서 개발된 임분수확 예측식을 보면 생태권역별·임상별로 다소 다른 특성을 보이고 있다. 임분수확 예측식에 포함된 각 독립변수의 회귀계수는 생태권역별·임상별로 거의 유사한 것으로 추정되었다. 하지만 임령의 역수(A^{-1})에 해당하는 회귀계수 b_2 는 다른 변수의 계수에 비해 편차가 큰 것으로 나타났다. 전체적으로 부호가 음수이기 때문에 임령이 커짐에 따라 임분 재적이 증가하는 일반적인 경향을 잘 표현하고 있는 것으로 보인다. 그러나 이 변수에 대한 회귀계수 추정치는 임상별로 일정한 패턴을 보이면서 편차가 큰 것을 알 수 있다. 즉, 절대 값의 관점에서 보

면 모든 생태권역에서 침엽수림의 회귀계수가 가장 크며, 다음은 혼효림이 크고 활엽수림은 가장 작은 것으로 추정되었다. 이는 침엽수림이 임령에 따른 임분 수확량의 추정치가 더 예민하게 반응한다는 것을 의미하는 결과이다. 한편 지위지수의 역수로 표현된 변수(SI^{-1})의 회귀계수인 b_1 의 경우에는 해안도서권역의 임상별 추정치가 다른 권역에 비해 절대 값이 다소 작은 것으로 분석되었다.

3.5. 생태권역별·임상별 바이오매스 변화량 예측

지위지수 변화량과 임분수확 예측모델에 의해 얻은 생태권역별·임상별 임목축적에 목재기본밀도와 바이오매스 확장계수를 적용하여 생태권역별·임상별 바이오매스 변화량을 산출한 결과는 Table 5와 같다. 산악권역은 모든 임상에서 바이오매스가 감소하는 결과를 보였다. 침엽수림과 혼효림의 경우 시간이 경과함

에 따라 감소 추세가 점차 증가하는데, 특히 침엽수림은 5개 생태권역 가운데 바이오매스의 변화량이 가장 큰 것으로 추정되었다. 결과적으로 산악권역의 침엽수림은 기후변화에 가장 취약한 것으로 평가된다. 활엽수림의 경우 장기(2100년)적인 관점에서는 산림 바이오매스가 감소하는 것으로 평가되었지만, 현재(2012년)와 비교하였을 때 감소량이 크지 않아 기후변화에 의한 영향을 덜 받는 것으로 평가되었다.

남동산야권역의 경우 장기적으로 보면 임상별 산림 바이오매스가 기후변화에 의해 감소하는 것으로 나타났다(Table 5). 하지만 시간 경과에 따른 각 임상별

산림 바이오매스 변화 패턴은 시기별로 다소 차이가 있다. 침엽수림의 경우 2050년까지는 증가세를 유지하지만 그 이후에는 산림 바이오매스가 감소하기 시작하여 장기적으로는 감소하는 추세를 보였다. 활엽수림과 혼효림의 경우에는 현재(2012년)부터 2100년까지 바이오매스 변화량의 감소가 지속적으로 일어나고 있으며, 특히 활엽수림은 다른 임상과 비교하여 산림 바이오매스 감소량이 상대적으로 큰 것으로 예측되었다. 남서산야권역은 임상별로 시간경과에 따라 바이오매스 변화량은 다르게 나타났지만 초기에는 증가하다가 중기 이후에는 감소하는 유사한 패턴을 보이고 있다. 모든

Fig. 2. Prediction of forest biomass distribution over time due to climate change.

임상에서 2030년 까지는 증가 추세를 보이지만 2050년부터는 변화량이 감소 추세로 전환되어 2100년까지 지속적으로 감소하는 결과를 보였다. 특히 활엽수림의 경우 침엽수림과 혼효림에 비해 감소량이 큰 것으로 예측되었다.

중부산악권역의 침엽수림과 혼효림은 시간이 경과할수록 바이오매스 변화량이 증가하는 등 다른 생태권역과 다른 변화 패턴을 보이고 있다. 두 임상 모두 현재(2012년)부터 2100년까지 꾸준한 증가세를 보이고 있으며, 특히 침엽수림은 다른 임상에 비해 변화의 폭이 커 기후변화의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 반면에 활엽수림은 감소패턴을 보이고 있으나 변화량이 크지 않아 다른 두 임상에 비해 기후변화의 영향을 덜 받는 것으로 예측되었다. 마지막으로 기후변화에 따른 해안도서권역의 바이오매스 변화량 패턴은 임상별로 차이를 보이고 있다. 감소 추세를 보일 것으로 예상된 침엽수림은 초기에는 증가하다가 2030년 이후에는 꾸준히 감소하는 것으로 분석되었다. 활엽수림의 경우에는 작은 양이지만 시간이 경과하면서 지속적으로 바이오매스가 증가하는 것으로 추정되었다. 혼효림도 현재의 바이오매스 추정치와 비교하여 기후변화에 의해 전체적으로 바이오매스가 증가할 것으로 예측되었다. 특히 2100년에 +0.3 Dry ton/ha의 변화량 보여 증가량 자체는 매우 적은 것으로 예측되었다.

앞에서 분석한 5개 생태권역의 바이오매스 변화량을 취합하여 전국 단위의 산림 바이오매스 분포를 현재(2012년), 2030년, 2050년, 그리고 2100년 기준으로 비교한 결과는 Fig. 2와 같다. 시간이 경과함에 따라 지역적 편차는 있지만 전반적으로 시간이 경과하면서 산림 바이오매스는 줄어드는 경향을 보였다. 특히 이러한 현상은 산림면적이 넓고 임목축적이 가장 많은 산악권역에서 두드러지게 나타났다. 전체적으로 기후변화 시나리오를 적용한 초기인 2030년에는 현재의 분포와 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 하지만 중기인 2050년에는 전반적으로 기후변화에 의해 바이오매스 감소 현상이 뚜렷하게 나타나며, 장기인 2100년에 이르면 현재의 분포와 현격한 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

적 요

본 연구는 수치산림입지도, 수치기후도, 제5차 국가

산림자원조사 등의 누적된 자료와 다양한 통계모형을 이용하여 기후변화에 따른 생태권역별·임상별 산림 바이오매스 변화를 예측하였다. 그 결과 시간 경과에 따른 산림 바이오매스 변화량은 생태권역별·임상별로 서로 다른 패턴을 보였다. 산악권역, 남동산악권역, 남서산악권역에서는 시간이 경과함에 따라 모든 임상에서 산림 바이오매스가 감소하는 것으로 예측되었다. 반면에 중부산악권역의 침엽수림과 혼효림은 기후변화의 영향으로 바이오매스가 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 해안도서권역에서는 침엽수림을 제외한 임상에서 산림 바이오매스가 증가하는 것으로 추정되었다. 본 연구는 기후변화 시나리오에 따른 지위지수 추정치 변화에 근거하여 산림 바이오매스 변화량을 산출함으로써 기후변화에 따른 산림재해 변화 패턴을 예측할 수 있는 정보를 마련하였다. 본 연구의 결과는 산림재해 대응전략 수립에 필요한 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2012년 국립산림과학원 산림방재연구과 위탁과제 ‘기후변화에 따른 산림 바이오매스 변화량 예측’ 연구 결과의 일부입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Albert, M., and M. Schmidt, 2010: Climate-sensitive modeling of site-productivity relationships for Norway spruce and common beech. *Forest Ecology and Management* **259**, 739-749.
- Arbatzis, A. A., and H. E. Burkhart. 1992: An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in loblolly pine plantation. *Forest Science* **38**(1), 192-198.
- Belsley, D. A., E. Kuh, and R. E. Welsch, 1980: *Regression diagnostics*. John Wiley & Sons. New York. 292pp.
- Bennett, F. A., 1970: *Yield and stand structural patterns for old-field plantation of slash pine*. USDA foreign agricultural service. Paper SE-60.
- Clutter, J. L., 1983: Compatible growth and yield models for loblolly pine. *Forest Science* **9**, 354-371.
- Corona, P., R. Scotti, and M. H. Kutner. 1998: Relationship between environmental factors and site index in Douglas-fir plantation in central Italy. *Forest Ecology and Management* **110**, 195-207.

- Curt, T. M., B. Bouchaud, and G. Agrech, 2001: Predicting site index of Douglas-fir plantations from ecological variables in the Massif central area of France. *Forest Ecology and Management* **149**, 61-74.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 2012: *Guide book of computation, reporting, and validation for national greenhouse gas statistics. in 2010*, 75pp.
- IPCC, 2007: *Summary for Policymakers, In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge. UK. 7-22.
- Judge, G. G., R. C. Hill, W. E. Griffiths, H. Lutdipohl, and T. Lee, 1988: *Introduction to the theory and practice of econometrics*. John Wiley & Sons. New York. 1024pp.
- Kabrick, J. M., S. R. Shifley, R. G. Jensen, J. Fan, and R. Larsen, 2004: *Factors associate with oak mortality in Missouri Ozak forest*. USDA Forest Service General Technical Reports NE **316**, 27-35.
- Kim, T. W., 2011: Comparing the optimum forest timber production for eight tree species under ten thinning scenarios. Master's Thesis, Graduate School, Kookmin University, 62pp. (in Korean with English abstract)
- Kong, W. S., 1998: Distribution characteristics of alpine plants in Mt. Halla. *Journal of Korean Geographical Society* **33**, 1-18. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Service, 2009: *Climate change and forests*. 241pp.
- Myers, R. H., 1990: *Classical and modern regression with applications*. Duxbury Press, 488pp.
- Lee, S. C., S. H. Choi, W. K. Lee, T. J. Park, S. H. Oh, and S. N. Kim, 2011: Vulnerability assessment of forest distribution by the climate change scenarios. *Journal of Korean Forest Society* **100**(2), 256-265. (in Korean with English abstract)
- Shin, M. Y., 1990: The use of ridge regression for yield prediction models with multicollinearity. *Journal of Korean Forest Society* **79**(3), 260-268.
- Shin, J. W., and C. M. Kim, 1996: The ecosystem classification in Korea(1): Ecoprovince classification. *Journal of Forest Science* **54**, 188-189. (in Korean with English abstract)
- Snee, R. D., 1977: Validation of regression models: Methods and examples. *Technometrics* **19**, 415-428.
- Son, Y. M., K. H. Lee, and R. H. Kim, 2007: Estimation of forest biomass in Korea. *Journal of Korean Forest Society* **96**(4), 477-482. (in Korean with English abstract)
- Song, M. H., 2003: Development of regional site index equations for main tree species based on environmental factors. Master's thesis, Graduate School, Kookmin University, 53pp. (in Korean with English abstract)
- Sykes, M. T., and P. Colin, 1996: Climate change, tree species distributions and forest dynamics: a case study in the mixed conifer/northern hardwoods zone of northern europe. *Climate Change* **34**, 161-177.
- Tyler, A. L., D. C. Macmillian, and J. Dutch, 1996: Models to predict the general yield class of Douglas-fir, Japanese larch and Scots pine on better quality land in Scotland. *Forestry* **1**, 13-24.