

기후변화 시나리오에 따른 산림분포 취약성 평가

이상철¹ · 최성호¹ · 이우균^{1,2*} · 박태진¹ · 오수현² · 김순아¹

¹고려대학교 환경생태공학과, ²고려대학교 기후환경학과

Vulnerability Assessment of Forest Distribution by the Climate Change Scenarios

Sangchul Lee¹, Sungho Choi¹, Woo-Kyun Lee^{1,2*}, Taejin Park¹,
Suhyun Oh² and Su-Na Kim¹

¹Division of Environment Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

²Department of Climatic Environment, Korea University, Seoul 136-713, Korea

요약: 본 연구에서는 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) 기후변화 시나리오 A2와 B1에 따른 산림 분포 취약성을 평가하였다. 산림분포 취약성은 한국형 산림 생태계 분포 모델 Thermal Analogy Groups(TAG)의 산림분포예측 방법과 Hydrology Thermal Analogy Groups(HyTAG)에서 정의한 식생유형을 이용하여 기후 변화에 따른 잠재 식물상(Plant Functional Type: PFT)의 분포 변화를 기후변화 민감성과 적응성으로 나누어 평가되었다. 그 결과, 산림분포가 취약한 지역의 면적은 A2 시나리오에서 전체 국토 면적의 30.78%, B1에서는 2.81%로 나타났다. 행정구역별 취약성 평가 결과는 부산이 A2 시나리오에서 가장 취약하고 대구가 B1 시나리오에서 가장 큰 취약성을 나타냈다. 미래 발전 방향에 따라서 상이하게 구축된 시나리오 별 산림 분포 취약성 결과는 앞으로 산림 분야 적응대책 수립에 중요한 자료로 이용될 것이다.

Abstract: This study was aiming at assessing the vulnerability of forest distribution by the A2 and B1 climate change scenarios of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The vulnerability of forest distribution was assessed using its sensitivity and adaptation to climate change with the help of the simulations of Korean-specific forest distribution model, so-called the Thermal Analogy Group (TAG), and the Plant Functional Type (PFT) defined in the HyTAG (Hydrological and Thermal Analogy Groups) model. As a result, the vulnerable area occupied 30.78% and 2.81% of Korea in A2 and B1 scenario, respectively. When it comes to the administrative districts, Pusan in A2 and Daegu in B1 appeared the most vulnerable area. This study would be employed into preparation of adaptative measures for forest in future in terms of using climate change scenarios reflecting different future development conditions.

Key words : climate change scenario, forest distribution, sensitivity, adaptation, vulnerability

서론

기후 변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) 4차 평가 보고서에 따르면 ‘기후변화 현상은 명백히 일어나고 있으며, 이는 인간의 활동에 의한 결과이다’라고 명시함으로써 인간의 무분별한 산업 활동으로 인해 현재 자연 및 인간 시스템이 영향을 받고 있음을 강조하였다(IPCC, 2007a; 유가영과 김인애, 2008). IPCC는 기후변화가 직·간접적으로 영향을 미치는 가운데 그 영향 및 취약성을 평가하여 악영향을 최소화

화하기 위한 적응 조치의 중요성을 강조하고 있다(IPCC, 2007a). 기후변화 대응을 위해 발표된 교토의정서(2005년 02월)는 국제적으로 온실가스 감축이행이 불가피한 실정임을 알려준다. 이런 상황에서 이산화탄소의 유일한 흡수원으로 인정되는 산림은 국가별 온실가스 감축량을 이행함에 있어 매우 중요한 역할을 한다(윤여창과 차준희, 2007). 그에 따라 국내외에서는 전 지구적 모델을 이용하여 기후변화가 산림생태계에 미치는 영향을 평가하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Bachelet 등(2001)은 생물지리학, 생물지리화학, 화제 모듈로 구성된 MAPSS-CENTURY(MC1) 모델을 이용하여 기후변화에 따른 미국 캘리포니아 지역의 산림 생태계를 평가하였고, 중국에서

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

는 Carbon Exchange between Vegetation, Soil and Atmosphere(CEVSA) 모델을 이용하여 식생분포, 순일차 생산량, 토양탄소저장량 등의 변화를 연구하였고, 일본에서는 Multilayered Integrated Numerical Model of Surface Physics-Growing Plants Interaction(MINoSGI) 모델을 적용하여 기후변화에 따른 산림생태계의 변화 양상을 평가한 바 있다(Yu, 2006; Watanabe 등, 2004).

국내에서는 산림 생태계의 기후변화 취약성 평가를 위해 Holdridge(김재욱과 이동근, 2006), CEVSA(Lee 등, 2007), MC1(Choi 등, 2010a) 모델과 같은 기존의 전 지구 모델을 이용하였다. 그러나 전 지구 모델을 이용한 방법은 우리나라와 같이 위도차가 적은 나라에서는 기후변화의 영향이 정확하게 예측되기 어렵다. 따라서, 산지가 많고 복잡한 지형인 한반도 산림 생태계 평가를 위해서는 한국형 산림 생태계 모델이 필요하다. Choi 등(2010b, 2010c)은 한국형 산림분포 모델인 Thermal Analogy Group (TAG)와 Hydrological and Thermal Analogy Group (HyTAG)를 개발하여 기후변화에 따른 산림 생태계 취약성 평가에 적용한 바 있다.

현재 온실가스 증가로 인한 기후변화의 탐지 및 예측을 위해 온실가스 증가 시나리오를 이용하여 미래의 기후변화에 대한 전망자료의 산출이 활발히 이루어지고 있다(IPCC, 2001). 그리고 미래 기후변화 전망은 사용하는 온실가스 증가 시나리오 종류에 따라 다른 결과를 나타낸다(Min 등, 2004). 기후변화 시나리오를 이용한 산림분야 미래예측 연구가 국내에서는 IPCC 특별보고서(2000)에서 제공하는 Special Report on Emission Scenario(SRES) 시나리오 중 A2, A1B를 사용하여 미래 산림생태계 변화 양상 및 기후변화에 따른 취약성을 분석한 바 있다(김재욱과 이동근, 2006; Lee 등, 2007; Choi 등, 2010a; 2010b; 2010c). IPCC에서 제공하는 기후변화 시나리오는 예측 불가능한 미래의 상황에 대응하여 다양한 발전 방향에 따라

Table 1. Increasing Amount of Average Temperature by Climate Change Scenarios.

Scenario	Temperature change		Notes
	Optimal estimate (°C)	Range (°C)	
B1	1.8	1.1 - 2.9	Nature-friendly(Global)
A1T	2.4	1.4 - 3.8	Predominantly non-fossil fuel
B2	2.4	1.4 - 3.8	Nature-friendly(Regional)
A1B	2.8	1.7 - 4.4	Balanced
A2	3.4	2.0 - 5.4	Development-oriented
A1FI	4.0	2.4 - 6.4	Fossil fuel intensive

미래 기후가 변화되는 정도 및 그 영향을 제시하여 정책 결정자에게 기본 자료를 제공한다(IPCC, 2007c).

산림분야는 국제적으로 기후변화에 따라 그 역할이 중요시되는 점에서 다양한 미래의 발전방향, 즉 기후변화 시나리오에 따른 산림 생태계 취약성 연구를 통한 그 적응 대책수립에 필요한 다양한 자료 축적이 필요하다. 다양한 변화양상에 따라 취약한 부분을 미리 예측하면 앞으로 다가 올 문제에 대하여 융통성 있는 적응 방안 수립이 가능해진다.

본 연구는 한국형 산림분포 모델을 이용하여 A2와 B1 시나리오에 따른 한반도 산림분포에 대한 기후변화 영향 및 취약성에 대한 정량적인 평가를 실시했다. 또한, 두 시나리오에 따른 한반도 전체의 산림 생태계 취약성 비교 및 국가단위에서 기후변화 적응정책의 우선순위를 판단하기 위해 행정구역 단위로 결과를 비교 분석하였다.

연구내용 및 방법

1. 연구 대상지

본 연구에서 자료의 시간적 범위는 각 시나리오 별로 과거(1980-1999년), 가까운 미래(2046-2065년), 먼 미래

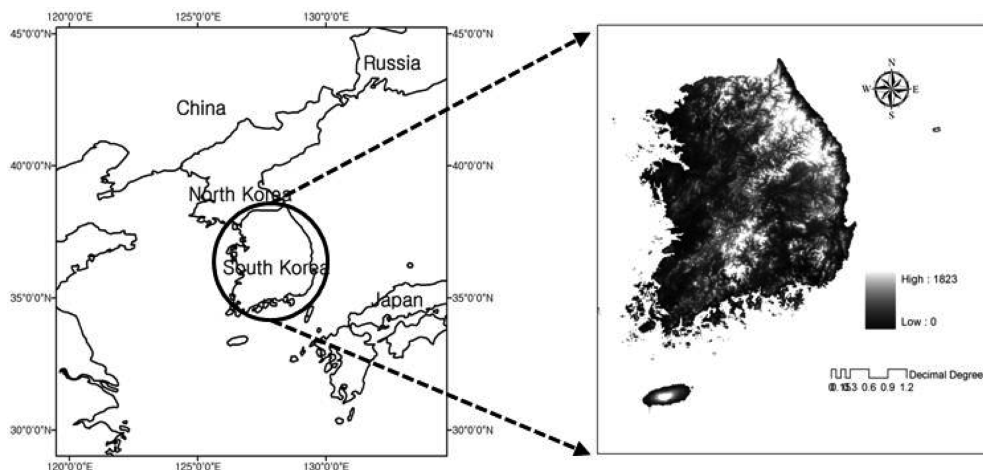


Figure 1. Study area and elevation.

Table 2. HyTAGs and Tree Species Composition (Choi et al., 2010c).

General PFTs	HyTAG	Tree species composition and description			
		*EN	**DN	#DB	##EB
Subalpine coniferous forest	HyTAG-N	Subalpine type not in this study species (WI < 75° Cmonth)			
Cool-temperate mixed forest	HyTAG-A	<i>Abies koreana</i> , <i>A. nephrolepis</i> , <i>Pinus koraiensis</i> , <i>Taxus cuspidata</i>		<i>Betula ermanii</i> , <i>Cornus controversa</i> , <i>Juglans mandshurica</i> ,	
Cool-temperate deciduous forest	HyTAG-AB	Both in HyTAG A and B			
Temperate mixed-forest	HyTAG-B	<i>P. densiflora</i> , <i>P. rigida</i> ,	<i>Larix kaempferi</i>	<i>Acer mono</i> , <i>Carpinus laxiflora</i> , <i>C. tschonoskii</i> , <i>Castanea crenata</i> , <i>Q. acutissima</i> , <i>Q. aliena</i> , <i>Q. dentata</i> , <i>Q. mongolica</i> , <i>Q. variabilis</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i>	
Temperate deciduous forest	HyTAG-BC	Both in HyTAG B and C			
Warm-temperate mixed forest	HyTAG-C	<i>P. thunbergii</i>		<i>C. turczaninovii</i> , <i>Fagus crenata</i> , <i>Zelkova serrata</i>	<i>Camellia japonica</i> , <i>Castanopsis sieboldii</i> , <i>Q. acuta</i>
Warm-temperate evergreen forest	HyTAG-T	Warm temperate type not in this study species (75°C·month < WI < 125°C·month)			
Suntropical evergreen forest	HyTAG-S	Subtropic type not in this study species (125°C·month < WI)			

*EN: Evergreen Needle-leaved tree; **DN: Deciduous Needle-leaved trees; #DB: Deciduous Broad-leaved trees; ##EB: Evergreen Broad-leaved trees

(2080-2099년)로 각각 20년 동안으로 하였다. 연구 공간적 영역은 경위도 124°54'-131°6', 33°9'-38°45'로 남한을 대상으로 하였다.

2. 잠재 산림분포 모델

TAG 모델은 한국형 산림분포 모델로 잠재 분포 모의 과정에서 기후지수로 온량지수(WI: Warmth Index)와 최저온도지수(MTCI: Minimum Temperature Index of the Coldest month)를 이용하여 잠재산림분포를 예측한다(Choi 등, 2010b).

1) 온량지수(WI)

온량지수(WI: Warmth Index)는 식물이 잘 자라기 위해서는 일정한 기준 이상의 온도가 일정 기간 동안 유지되어야 한다는 생각에서 Kira(1945)가 제안한 기후를 표시하는 지수 중 하나이다. 국내에서 Yim(1977)이 우리나라의 식생분포를 설명하기 위해 사용하였으며 식물생장의 유효 열량(Effective heat for plants)과 관계가 있다. 온량지수는 5°C보다 높은 월 평균 기온의 합으로 계산할 수 있다(식 1).

$$WI = \sum(t-5) \tag{1}$$

여기서, t: 5°C보다 높은 월 평균 기온

2) 최저온도지수(MTCI)

Neilson(1995)의 연구에 따르면 월 평균 최저기온에 따

라서 산림 식생대가 달라진다고 한다. 월 평균 최저기온이 18°C 이상인 경우 상록활엽수가 존재할 가능성이 높고, -15°C 이하인 경우 상록침엽수가 존재할 가능성이 높다. 또한, 월 평균 최저기온이 약 1.5°C인 곳에서는 낙엽 활엽수가 존재할 가능성이 높다. 이러한 이론적인 배경에 따라서 Bachelet 등(2001)은 월 평균 최저기온을 이용하여 최저온도지수를 계산하였다(식 2, 3). 최저온도지수(MTCI: Minimum Temperature Index of the Coldest month)는 식생의 내한성(Cold resistance)를 표현하는 지표로서 Bachelet 등(2001)이 동적식생모델(Dynamic Vegetation Model)에 적용한 바 있다.

$$MTCI = \frac{MTC - t_{mid}}{t_{hi} - t_{mid}} \times 100 \quad MTC \geq t_{mid}(1.5^\circ C) \tag{2}$$

$$MTCI = \frac{MTC - t_{mid}}{t_{hi} - t_{low}} \times (-100) \quad MTC < t_{mid}(1.5^\circ C) \tag{3}$$

여기서, t_{hi} : 18°C, t_{mid} : 1.5°C, t_{low} : -1.5°C

Choi 등(2010c)의 HyTAG 모델은 TAG에서 기존에 사용한 기후지수에 유효강우지수를 추가하여 기후 조건에 따른 잠재 생물상(Plant Functional Type: PFT)을 분류하였다. 통계적인 방법으로 산림 유형을 8개로 나타내었으며 아고산림, 냉온대 혼효림, 냉온대 활엽수림, 온대 혼효림, 온대 활엽수림, 온난대 혼효림, 온난대 상록수림, 아열대림 8가지로 분류하였다(Table 2).

HyTAG 모델에서 정의한 온량지수와 최저온도지수를 벗어난 범위는 Yim(1977)이 표본조사를 통해 구축한 지역별 주요 수종의 온량지수 및 분포를 적용하여 모델에서

정의한 식생유형으로 분류 되었다.

3. 취약성 평가 자료 구축

모델의 입력 자료는 서울대학교 지역기후모델(Seoul National University Regional Model: SNURCM)로 모의된 과거 및 미래의 월 평균 기온, 월 평균 최저 기온을 이용하였다. 27 km 격자크기로 된 원시 자료를 모델의 적용에 적합한 크기인 1 km의 공간 해상도로 규모 변환 시에는 크리깅(Kriging)을 이용하였다. 공간 내삽방법의 하나인 크리깅은 주위에 알려진 값들의 가중 선형조합으로 미지의 값을 예측하는 기법이다(최종근, 2007). 기상자료는 기온감율에 따른 차이를 보여주기 위해 원 자료 그대로 사용하여 모델에 적용하고 고도에 따른 기온감율을 고려한 윤진일 등(2001)이 제안한 기온감율 보정식(식 6)을 적용시켜 자료를 구축하여 산림분포를 예측하였다. 고도자료는 국토지리정보원에서 제공한 수치고도모델(Digital Elevation Model: DEM)에서 추출하였다.

$$|\tau_{avg}| = 0.00688 + 0.0015 \cos 0.0172(i-60) \quad (4)$$

$$|\tau_{min}| = 0.00695 + 0.0013 \cos 0.0172(i-30) \quad (5)$$

$$T = T_i + \text{Elevation}(m) \times \text{기온감율} \quad (6)$$

여기서, $|\tau_{avg}|$: 평균기온 기온감율, $|\tau_{min}|$: 최저기온 기온감율, $|T|$: 연중 날짜에 따른 기온감률 절대값, i : 연중 날짜(1/1일 = 1, 12/31일 = 365)

4. 산림분포 취약성 방법

본 연구에서는 IPCC 보고서에 근거하여 기후변화에 따른 산림생태계의 취약성은 민감성이 높을수록, 그리고 적응성이 낮을수록 높다고 가정하여 민감성과 적응성의 합수로 정의하였다. 민감성은 기후변화에 따른 식생분포 변화빈도로 나타낼 수 있고, 기후변화에 따른 변화빈도가 높을수록 기후변화에 대한 민감성이 높은 것을 의미한다(Lee 등, 2007; Yu, 2006). 적응성은 변화의 방향으로 나타낼 수 있고 그 방향이 식생분포 측면에서 긍정적인 때 기후변화에 대한 적응성이 높다고 볼 수 있다(Lee 등, 2007; Yu, 2006).

1) 산림분포의 민감성 평가

산림분포에서 민감성은 기간별로 기후변화에 따라 식생유형의 변화가 일어날 수 있는 가능성, 즉 변화빈도를 이용하여 평가하였다. 기후조건이 잠재 분포범위에 맞지 않을 경우, 모델에 의해 모의되는 잠재식생분포가 변화하게 된다. 이러한 가능성의 변화빈도(Changing Frequency)를 식생분포의 민감성으로 평가하였다. 모의 기간별 기후조건의 변화에 따라 잠재 산림 분포가 변화하면 변화빈도

Table 3. Sensitivity and Adaptation for Potential Forest Distribution (Choi 등, 2010a).

Index	Sensitivity (Changing Frequency)	Adaptation (Changing Direction)
High /(+)	Change	Subalpine coniferous forest
		▼
		Cool-temperate mixed forest
		▼
▼	▼	Cool-temperate deciduous forest
		▼
		Temperate mixed forest
		▼
Low/(-)	Non-change	Temperate deciduous forest
		▼
		Warm-temperate mixed forest
		▼
		Warm-temperate evergreen forest
		▼
		Subtropical evergreen forest

가 1씩 증가하게 되어 최종 변화 빈도수가 높을수록 민감성이 높은 것으로 평가하였다(Table 3).

식생분포 민감성 = 식생유형 변화가능성의 횡수 또는 빈도

2) 산림분포의 적응성 평가

산림분포의 적응성은 기후변화에 따라 산림유형의 변화가 어느 방향으로 이루어지는 가로 평가한다. 즉, 기후변화에 따른 산림유형의 변화가 낮은 방향에서 높은 방향 [아열대 상록수림에서 아고산 침엽수림 방향]으로 이루어지면 방향이 긍정적인(+) 것으로 하여 1씩 더하고, 반대의 경우에는 방향이 부정적인(-) 것으로 하여 1씩 감하여 그 누적 값을 적응성으로 한다. 임종환과 신준환(2005) 및 공우석(2005)에 의하면 우리나라에서 기온이 증가함에 따라 침엽수종이 감소하게 된다. 활엽수 또는 혼효림에서 침엽수종으로 변화 할 경우, 적응성은 양의 값을 갖고 반대로 변화할 경우 음의 값을 갖는다. 따라서 적응성은 높은 경우에는 양의 값을 가지게 되고, 반대로 적응성이 낮은 경우에는 음의 값을 갖게 된다 (Table 3).

3) 산림분포의 취약성 평가

산림분포의 취약성은 변화횟수 및 빈도로 평가되는 민감성에서 변화방향으로 평가되는 적응성을 감하여 평가하였다(식 7). 이를 바탕으로 지형, 기상 및 환경 인자를 고려한 산림분포의 시·공간 취약성 분포를 분석하였다.

$$\text{Vulnerability}(V) = \text{Sensitivity}(S) - \text{Adaptation}(A) \quad (7)$$

여기서, Vulnerability: 취약성, Sensitivity: 민감성, Adaptation: 적응성

연구결과

1. 잠재 산림 분포

모델로 모의된 우리나라 산림생태계의 과거와 미래 잠재 산림분포는 Figure 2, 3과 같다. 과거(1980-1999)의 기상자료에 근거한 잠재 산림 분포 결과는 한반도 중부지방에서 남부 및 제주도 지역에 걸쳐 아고산 침엽수림, 냉온대 혼효림, 냉온대 활엽수림, 온대 혼효림, 온대 활엽수림, 온난대 혼효림, 온난대 상록수림, 아열대 상록수림이 분포하는 양상을 보였다. 아고산 침엽수림이 강원도 산간지방, 지리산, 한라산 등에 분포하며 전체 면적의 22.2%를 차지하며 냉온대 혼효림은 44%, 냉온대 활엽수림은 16.7%를 차지하며, 이 세 수종 집단이 전체의 82% 면적에 분포하는 것으로 나타났다(Figure 2). 남해 및 서해안지역에 분포하는 온대 혼효림과 온대 활엽수림은 각각 6,790 km²(약 6.7%)과 8,950 km²(약 8.83%)의 면적을 차지하였다. 또한, 온난대 혼효림(0.57%), 온난대 상록수림(0.62%), 아열대 상록수림(0.38%)은 제주도 지역에만 분포하는 것으로 나타났다.

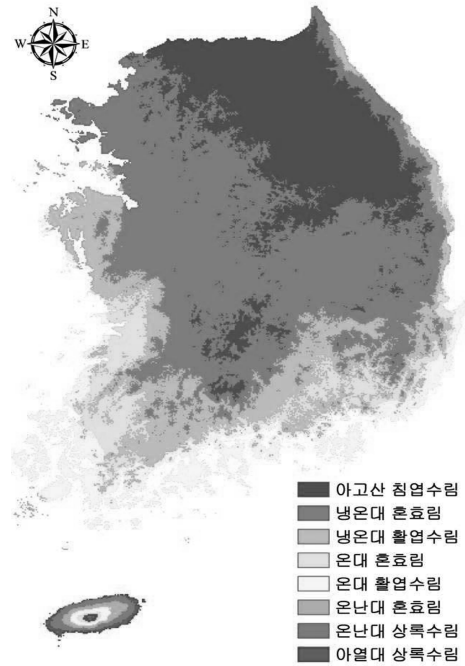


Figure 2. The Forest Distribution of the Past (1980-1999).

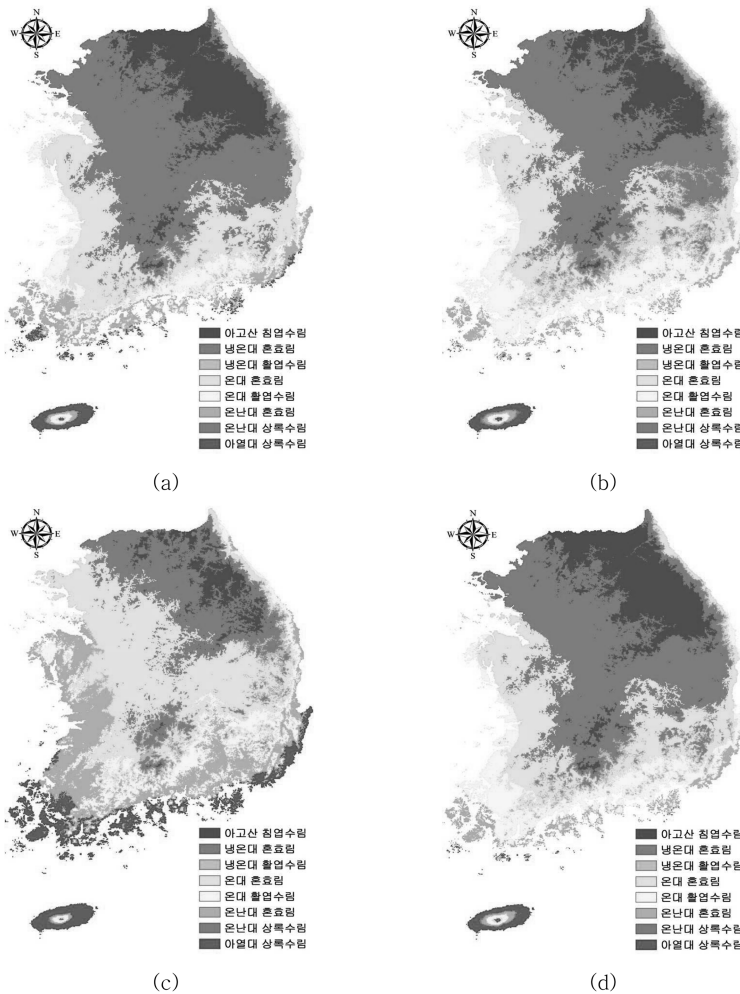


Figure 3. The Forest Distribution of (a) Near Future (2046-2065) under A2 Scenario, (b) Near Future (2046-2065) B1 scenario (c), Far Future(2080-2099) under A2 Scenario, (d) Far Future (2080-2099) under B1 Scenario.

과거에 비해 미래에는 수종분포가 A2, B1 시나리오 모두에서 다양하게 나타났다(Figure 3). 전체적으로 아고산 침엽수림, 냉온대 혼효림, 냉온대 활엽수림, 온대 혼효림이 북상하면서 남서해안을 중심으로 온대 활엽수림, 온난대 혼효림이 분포하는 것으로 나타났다. A2 시나리오의 경우, 가까운 미래에 온난대 및 아열대 상록수림이 제주도와 남해안 일부지역 분포하던 범위가 먼 미래에 남서해안 지역에 북상하여 그 분포 범위가 증가하였고 아고산 침엽수림은 먼 미래에 강원도 산간지방 일부에서만 분포

하는 것으로 나타났다. B1 시나리오에서는 과거와 비교하여 온대 활엽수림의 분포 영역이 확장되었지만, 가까운 미래와 먼 미래에는 아열대 상록수림은 제주도에만 분포하는 등 8가지 산림유형 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 두 시나리오에서 서해안이 동해안보다 온난대 수종의 분포면적이 증가하였다. 박종철 등(2010)의 연구에 의하면 난온대 상록활엽수림대의 북상 면적이 서해안에서 두드러지게 나타난다는 연구와 유사한 양상을 보이는 것으로 나타났다.

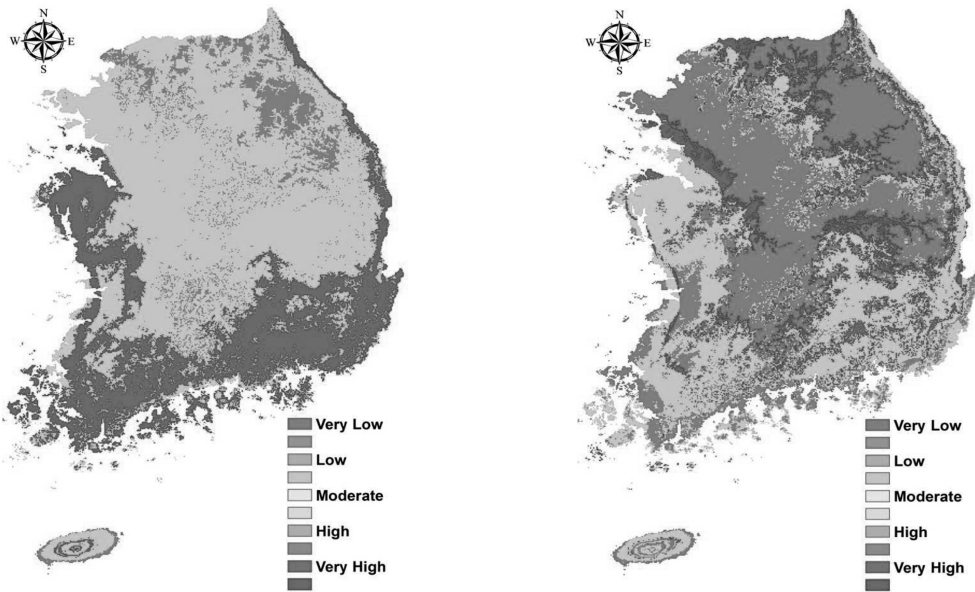


Figure 4. Sensitivity under (a) A2 Scenario, (b) B1 Scenario.

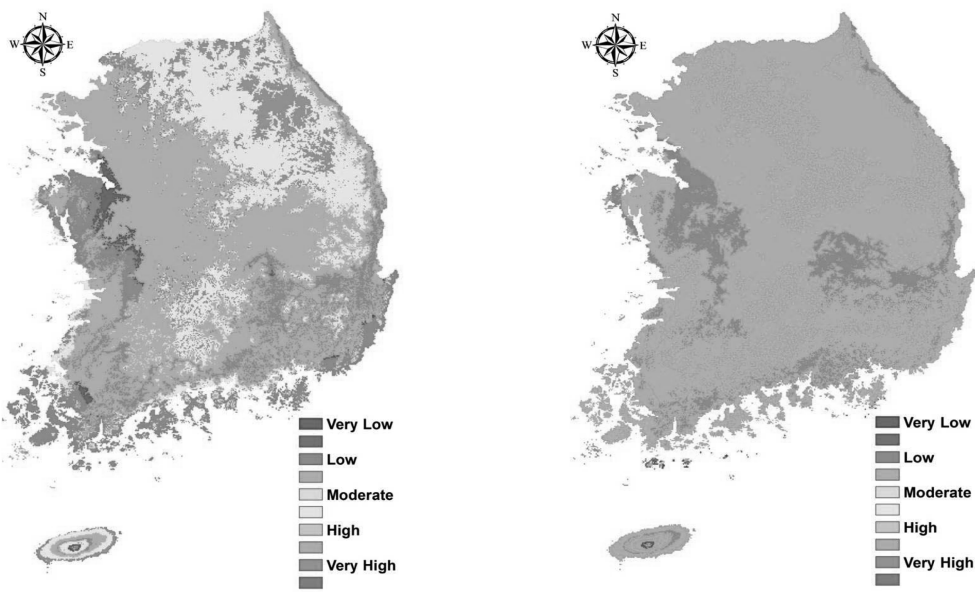


Figure 5. Adaptation under (a) A2 Scenario, (b) B1 Scenario.

가까운 미래에서 먼 미래로 갈수록 A2 시나리오에서는 아고산림은 14.98%(15,185 km²)에서 4.79%(4,854 km²)로, 냉온대 혼효림은 42.07%(42,642 km²)에서 20.64%(20,917 km²)로 감소했지만, 냉온대 활엽수림(1.74% → 4.20%), 온대 혼효림(23.94% → 33.16%), 온대 활엽수림(9.09% → 11.91%), 온난대 혼효림(6.02% → 17.35%), 온난대 상록수림(0.07% → 0.10%), 아열대 상록수림(2.08% → 7.85%)은 증가하는 것으로 나타났다. B1 시나리오에서는 냉온대활엽수림(8,493 km² → 3,927 km²), 온대활엽수림(15,757 km² → 12,386 km²), 아열대 상록수림(1,183 km² → 13,12 km²)의 면적이 감소하였고, 아고산림(11.15% → 15.67%), 냉온대 혼효림(38.90% → 40.28%), 온대 혼효림(21.72% → 22.91%), 온난대 혼효림(2.92% → 3.63%), 온난대 상록수림(0.21% → 0.13%)이 증가하는 것으로 나타났다. A2 시나리오는 냉온대림이 감소하고 온난대림의 증가하는 경향을 보였으나 B1 시나리오에서는 산림유형이 증감하는 경향이 다양하게 나타났다(Figure 3).

2. 잠재 산림분포 기후변화 민감성 분석

기후변화 민감성은 과거에서 가까운 미래(2046-2065) 그리고 먼 미래(2080-2099)로의 산림분포 변화를 가지고 평가하였다. A2와 B1 시나리오에서는 각각 과거에서 가까운 미래로는 약 44,841 km²(44.24%)와 51,689 km²(51.00%)의 면적이, 가까운 미래에서 먼 미래로는 77,985 km²(76.94%)와 15,336 km²(15.13%)의 면적이 산림분포 변화가 발생하는 것으로 나타났다. 이 변화빈도를 공간적

으로 분석하여 식생분포 민감성을 나타내었다(Figure 4). 전체적으로 A2 시나리오가 B1 시나리오보다 민감성이 높았으며 공간적으로 두 시나리오에서 민감성이 높은 지역의 분포가 다른 양상을 보였다. A2 시나리오에서 산림분포 변화가 많았던 남서해안과 동해안 해안지역 일부에서 민감성이 높았고 내륙지방은 전반적으로 민감성이 낮았으며, 특히 강원도 산간지역에서 민감성이 가장 낮은 지역이 분포하는 것으로 나타났다. B1 시나리오의 경우 전국에 걸쳐 국지적으로 민감성이 높은 지역이 분포하였다. 산림분포의 양상이 아고산림에서 냉온대림으로 혹은 냉온대림에서 온대 및 온난대림으로 변하는 경계지역에서 민감성이 높고 그 외의 지역에서는 전반적으로 민감성이 낮은 것으로 나타났다.

A2 시나리오에서는 29.79%(30,195 km²)의 면적이 민감성이 높은 것으로 나타났는데 주로 서해안 지역과 남해안 지역에 분포하였고 중간이거나 낮은 민감도를 보이는 71,159 km²(70.21%)의 면적이 내륙지방에 분포하였다. B1 시나리오에서는 약 13.86%(14,049 km²)의 면적이 높은 민감성을, 약 38.41%(38,927 km²)의 면적이 중간 정도의 민감성을, 47.73%(48,378 km²)의 낮은 민감성을 가지는 것으로 나타났다.

3. 잠재 산림 분포 기후변화 적응성 분석

산림분포의 변화방향을 공간적으로 나타낸 적응성은 전체적으로 남서해안보다는 동부지방에서 적응성이 높은 것으로 나타났으며, B1 시나리오 보다는 A2 시나리오에서 적응성이 낮은 것으로 파악 되었다(Figure 5). A2 시나리

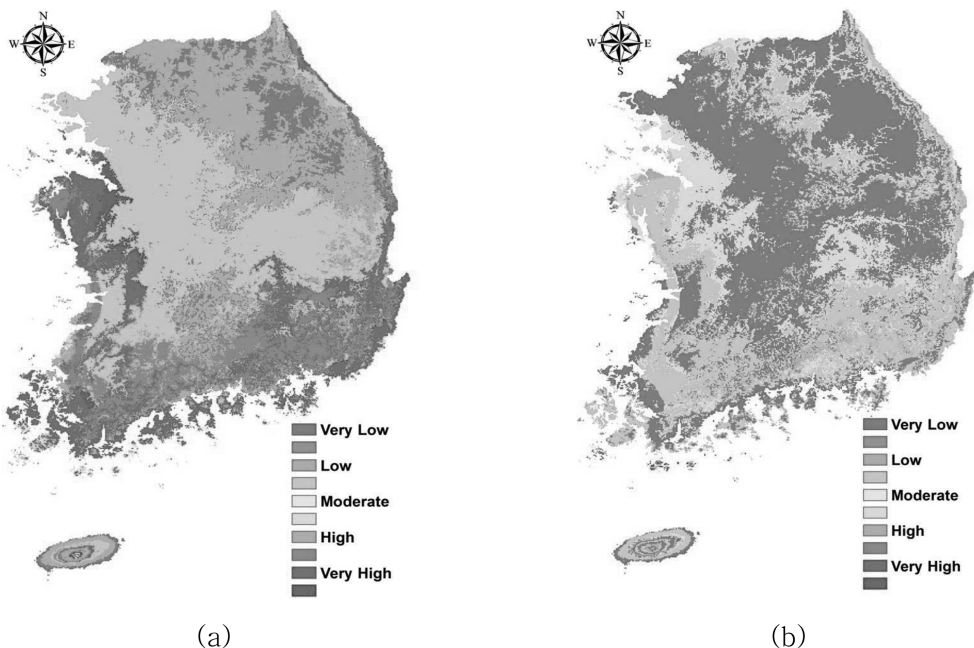


Figure 6. Vulnerability under (a) A2 Scenario, (b) B1 Scenario.

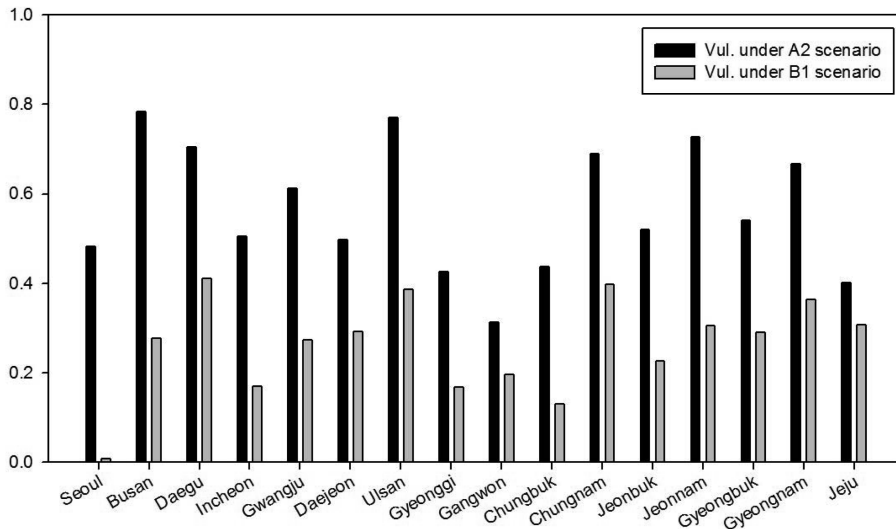


Figure 7. Forest Vulnerability by Administrative Districts.

오에서는 과거에서 가까운 미래 및 먼 미래에 걸쳐 냉대림, 온대림, 온난대림으로 변화한 서해안 일부 지역에서 적응성이 가장 낮았고 지리산 일대 및 강원도 산간지방에서 적응성이 높은 것으로 나타났다. B1 시나리오의 경우 내륙지방이 적응성이 높고 남서해안 및 동해안 지역에서 중간정도의 적응성을 나타냈다.

두 시나리오에서 모두 강원도 산간지방 및 지리산 일대에서 적응성이 높은 지역이 분포하였고, A2 시나리오에서는 적응성이 높은 면적이 33.61%(35,062 km²)이고 B1 시나리오에서는 58.87%(59,660 km²)의 면적이 높은 적응성을 나타냈다. A2 시나리오가 B1 시나리오보다 미래로 갈수록 온도 증가율이 높아 적응성이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

4. 잠재 산림 분포 기후변화 취약성 분석

Figure 6은 A2 및 B1 시나리오에서의 산림분포 취약성을 나타낸다. 전체적으로 동부보다는 서해안 및 남해안에서 취약성이 높은 것으로 나타났으며, B1 시나리오 비해 A2 시나리오에서 취약성이 높은 것으로 파악되었다. A2 시나리오에서는 내륙지역이 취약성이 낮고 남서해안 지역과 동해안 해안선 부분에서 취약성 높은 결과를 보였고, B1 시나리오 높은 취약성을 나타내는 지역은 극히 일부 지역이었고, 전반적으로 취약성이 낮으며 중부지역에서 중간정도의 취약성을 보였다. A2는 30.78%(31,190 km²), B1은 2.81%(2,851 km²)의 면적이 취약성이 높은 것으로 나타났다.

미래로 갈수록 월 평균기온 및 최저기온은 A2 시나리오가 B1 시나리오보다 온도가 약 7배 증가하여 취약성 결과가 상이하게 나타난 것으로 사료된다. 그리고 과거에서 미래로 갈수록 월 평균기온 및 최저기온의 증가 양상이 A2 시나리오에서는 기온이 북부지방이 낮고 남부지방이

높은 경향을 보이지만, B1 시나리오는 충청북도와 경상북도 경계지역에서만 높거나 강원도 산간지역 및 남부지방에서만 높게 나타나는 등 일정한 변화 양상을 나타내지 않아서 취약한 지역의 분포가 다르게 나타난 것으로 판단된다.

5. 행정구역 별 잠재 산림 분포 기후변화 취약성 분석

16개 시도에서 모두 A2 시나리오가 B1 시나리오보다 취약성이 높은 것으로 나타났고 서울에서 두 시나리오의 취약성이 가장 큰 차이를 보였다. 남서해안 지역과 인접한 울산, 충남, 경남 등에서 공통적으로 취약성이 높은 양상을 보였다. A2와 B1 시나리오에서 부산과 대구가 가장 취약성이 높았고, 가장 취약성이 낮은 행정구역은 강원도와 서울로 분석되었다. A2 시나리오에서 부산은 과거에서 먼 미래로 시간이 흐름에 따라 주변 남서해안 행정구역과 유사한 수종변화 빈도 및 방향을 보였지만 주변 행정구역은 내륙지방도 포함하여 그 평균적인 취약성이 낮고, 면적이 해안일대에 국한된 부산지역이 취약성이 높은 것으로 나타났다. 강원도는 산간지방을 많이 포함하여 온도변화 적고 산림유형의 변화가 적은 아고산림 및 냉온대림의 분포 면적이 넓어서 취약성이 낮은 것으로 판단된다. 과거에서 미래로 갈수록 온도변화가 적은 B1 시나리오에서 국지적으로 온대 및 온난대림의 변화가 많은 대구가 가장 취약성이 높고, 서울은 온도 및 수종의 변화가 적고 협소한 지역으로 넓은 면적을 포함한 행정구역과 비교하여 취약성이 낮은 면적만 포함하여 가장 취약성이 낮은 것으로 판단된다(Figure 7).

결론

본 연구에서는 A2와 B1 기후변화 시나리오에 따른 산

림분포 취약성을 산림분포의 변화빈도(민감성), 변화방향(적응성)을 지수화 시켜 정량적으로 평가하였다. 한국형 산림분포 모델인 TAG와 HyTAG 모델을 이용하여 A2 및 B1 기후변화 시나리오에 따라 미래의 잠재 산림분포를 예측하고 그에 따른 산림분포의 민감성과 적응성을 계산하여 취약성을 평가하였다. A2 시나리오에서는 시간이 지남에 따라서 아고산림 및 냉온대림의 분포가 줄어들면서 먼 미래에 강원도 산간지방, 지리산, 한라산 일대에서만 분포하고 온난대림이 북상하여 분포하는 것으로 나타났다. 민감성은 내륙지역에서만 낮았고 서해, 남해, 동해안 일부 지역에서 대체적으로 높게 나타났으며, 적응성은 서해안 일부 지역을 제외하고 낮거나 중간정도인 것으로 나타났다. B1 시나리오에서는 과거와 비교하여 아고산림의 면적이 감소하고 온난대 상록수림의 면적이 증가하는 것으로 나타났지만 가까운 미래와 먼 미래에는 삼림 유형의 큰 변화를 보이지는 않았다. 민감성은 전반적으로 낮았고, 민감성이 높은 지역은 전국에 수종변화가 일어나는 경계 부분에 분포하는 경향을 보였다. 적응성이 낮은 지역은 나타나지 않았으며, 대부분 높거나 중간정도로 분포하였다. 민감성과 적응성으로 계산된 취약성은 A2 시나리오에서 남서해안 지역과 동해안 해안선 일부지역을 포함한 30.78%, B1 시나리오에서는 49.45%의 면적에서 높게 나타났다.

IPCC에서 제공하는 기후변화 시나리오 자료에서 발전 지향적인 A2 시나리오는 자연 친화적인 B1 시나리오 보다 온도 증가율이 높다. 본 연구의 결과에서도 A2 시나리오가 B1 시나리오와 비교했을 때, 미래로 갈수록 온도 증가율이 더 높았고 그에 따라 산림생태계의 민감성은 높고 적응성은 낮은 지역의 분포면적이 넓어 취약한 지역이 더 넓게 나타났다.

그러나 본 연구는 모의된 잠재식생분포에 대한 검증결과 없이 취약성을 평가하고 두 가지 시나리오만 적용하여 그 경향을 비교한 한계점이 있다. 이 부분은 향후에 현존 식생도와 비교를 통하여 모델을 검증하고 6가지 시나리오를 모두 적용하여 보완해야 할 것으로 판단된다. 또한, 모델에서 정의되지 않은 산림유형을 기존의 연구에 근거하여 분류하였는데 다양한 수종을 고려한 식생유형 분류 방법 및 모델을 적용 할 필요가 있다.

우리나라와 같이 위도차가 적고 산지가 많이 분포하는 국지적인 지역을 대상으로 산림생태계 모델을 적용하기 위해서는 기상 요소뿐만 아니라 고도, 경사, 향 등의 지형적 요소가 수종의 생육조건에 주요한 영향을 미친다. 본 연구에 적용된 한국형 산림생태계 모델은 온도만 고려되어 산림유형을 예측하였다. 따라서 국내 수종 생육조건 변화에 유발하는 다양한 인자가 고려된 모델의 개발 및 연구가 필요하다.

국내 산림 생태계 취약성 평가를 여러 시나리오 자료를 적용 및 비교한 것이 최초인 점에서 본 연구의 의의가 있다고 할 수 있다. 본 연구의 절차 및 연구는 불확실한 미래 변화에 대하여 국가단위 및 지자체 별 산림생태계 적응대책 수립에 필요한 기본 자료로 이용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(07첨단도시 A01) 및 고려대학교 연구년(2010) 활동에 의해 수행되었습니다.

인용문헌

1. 공우석. 2005. 지구온난화에 취약한 지표식물 선정. 한국기상학회지 41(2-1): 263-273.
2. 김재욱과 이동근. 2006. 지역기후모형을 이용한 산림식생의 취약성 평가에 관한 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 9(5): 32-40.
3. 박종철, 양금철, 장동호. 2010. 기후변화에 따른 난온대 상록활엽수림대의 이동에 관한 연구. 기후연구 5(1): 29-41.
4. 유가영, 김인애. 2008. 기후변화 취약성 평가 지표 개발 및 도입방안. 한국환경정책평가연구원 연구보고서.
5. 윤여창, 차준희. 2007. 기후변화협약 대응을 위한 산림부문의 역할과 경기도의 대응. 경기논단 9(4): 117-140.
6. 윤진일, 최재연, 안재훈. 2001. 일별 국지기온 결정에 미치는 관측지점 표고영향의 계절변동. 한국농림기상학회지 3(2): 99-104.
7. 임종환, 신준환. 2005. 지구온난화에 따른 산림식생대 이동과 식물계절 변화. 자연보존 130: 8-17.
8. 최종근. 2007. 지구통계학. 시그마프레스. 서울.
9. Bachelet, D., Lenihan, J.M., Daly, C., Neilson, R.P., Ojima, D.S. and Parton, W.J. 2001. MC1: A Dynamic Vegetation Model for Estimating the Distribution of Vegetation and associated Carbon, Nutrients, and Water-Technical Documentation. Version 1.0. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
10. Choi, S., Lee, W.K., Kwak, H.B., Yoo, S., Choi, H.A., Park, S. and Lim, J.H., 2010a. Vulnerability Assessment of Forest Ecosystem to Climate Change in Korea using MC1 model. Journal of Forest Planning. (In press)
11. Choi, S., Lee, W.K., Son, Y., Yoo, S. and Lim, J.H., 2010b. Changes in the Distribution of South Korean Forest Vegetation simulated using Thermal Gradient Indices. Science in China Series C-Life Sciences 53(7): 784-797.
12. Choi, S., Lee, W.K., Kwak, D.A., Lee, S.C., Lim, J.H. and Saborowski, J. 2010c. Predicting Forest Cover Changes in Future Climate using Hydrological and Thermal Indices in Korea. Climate Research. (In review)
13. IPCC. 2000. IPCC Special Report Emission Scenario.

- Cambridge University Press, Cambridge, UK.
14. IPCC. 2001. Climate change 2001. The scientific basis. Contributions of Working group to the Third Assessment Report of the Governmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
 15. IPCC. 2007a. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds) Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA. pp. 996.
 16. IPCC. 2007c. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, and to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. pp. 104.
 17. Kira T. 1945. A new Classification of Climate in Eastern Asia as the basis for Agricultural Geography. Horticultural Institute. Kyoto Univ, Kyoto.
 18. Lee, M.A., Lee, W.K., Son, Y., Cho, Y.S., Song, C.C., Kim, T.M., Yu, L. and Tao, B. 2007. Sensitivity and Adaptability of Vegetation and Soil Carbon Storage to Climate Change with CEVSA Model in Korea. A3 Foresight Program. Proceeding.
 19. Min, S.K., Park, E.H. and Kwon, W.T. 2004. Future Projections of East Asian Climate Change from Multi-AOGCM ensembles of IPCC SRES Scenario Simulations. Journal of the Meteorological Society of Japan 82: 1187-1211.
 20. Neilson, R.P. 1995. A Model for Predicting Continental-Scale Vegetation Distribution and Water Balance. Ecological Applications 5(2): 362-385.
 21. Watanabe, T., Yokozawa, M., Emori, S., Takata, K., Sumida, A. and Hara, T. 2004. Developing a Multilayered Integrated Numerical Model of Surface Physics-Growing Plants Interaction (MINoSGI). Global Change Biology 10: 963-982.
 22. Yim, Y.J. 1977. Distribution of Forest Vegetation and Climate in the Korean Peninsula III. Distribution of Tree Species Along the Thermal Gradient. Japanese Journal of Ecology 27: 177-189.
 23. Yu, L. 2006. Assessment the Vulnerability of Natural Ecosystem to Climate Change in China. Ph.D thesis, Chinese Academy of Science.
-
- (2011년 3월 4일 접수; 2011년 4월 11일 채택)