

산림경관천이모델(LANDIS-II)를 이용한 기후변화 시나리오에 따른 산림의 생물량 장기변화 추정 연구*

- 충청북도 영동군 학산면 봉소리 일대 산림을 중심으로 -

최영은¹⁾ · 최재용¹⁾ · 김휘문²⁾ · 김성열²⁾ · 송원경²⁾

¹⁾ 충남대학교 산림자원학과 · ²⁾ 단국대학교 녹지조경학과

Long-term Effects on Forest Biomass under Climate Change Scenarios Using LANDIS-II*

- A case study on Yeongdong-gun in Chungcheongbuk-do, Korea -

Choi, Young-Eun¹⁾ · Choi, Jae-Yong¹⁾

Kim, Whee-Moon²⁾ · Kim, Seoung-Yeal²⁾ and Song, Won-Kyong²⁾

¹⁾ Dept. of Environment & Forest Resources, Chungnam National University,

²⁾ Dept. of Green & Landscape Architecture, Dankook University.

ABSTRACT

This study applied the LANDIS-II model to the forest vegetation of the study area in Yeongdong-gun, Korea to identify climate effects on ecosystems of forest vegetation. The main purpose of the study is to examine the long-term changes in forest aboveground biomass(AGB) under three different climate change scenarios; The baseline climate scenario is to maintain the current climate condition; the RCP 4.5 scenario is a stabilization scenario to employ of technologies and strategies for reducing greenhouse gas emissions; the RCP 8.5 scenario is increasing greenhouse gas emissions over time representative with 936ppm of CO₂ concentration by 2100. The vegetation survey and tree-ring analysis were conducted to work out the initial vegetation maps and data for operation of the LANDIS model. Six types of forest vegetation communities were found including *Quercus mongol-*

* 본 연구는 2018년도 정부(산림청)의 재원으로 지원을 받아 수행된 신기후체제 대응 연구사업임 (2017046A00-1819-BB01)

First author : Choi, Young-Eun, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea,
Tel : +82-42-821-7835 E-mail : victoryeun@gmail.com

Corresponding author : Choi, Jae-Yong, Professor, Dept. of Environment & Forest Resources, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea,
Tel : +82-42-821-5750, E-mail : jaychoi@cnu.ac.kr

Received : 6 September, 2019. **Revised** : 20 October, 2019. **Accepted** : 17 October, 2019.

ica - Pinus densiflora community, *Quercus mongolica* community, *Pinus densiflora* community, *Quercus variabilis-Quercus acutissima* community, *Larix leptolepis* afforestation and *Pinus koraiensis* afforestation. As for changes in total AGB under three climate change scenarios, it was found that RCP 4.5 scenario featured the highest rate of increase in AGB whereas RCP 8.5 scenario yielded the lowest rate of increase. These results suggest that moderately elevated temperatures and CO₂ concentrations helped the biomass flourish as photosynthesis and water use efficiency increased, but huge increase in temperature (above+4.0°C) has resulted in the increased respiration with increasing temperature. Consequently, Species productivity(Biomass) of trees decrease as the temperature is elevated drastically. It has been confirmed that the dominant species in all scenarios was *Quercus mongolica*. Like the trends shown in the changes of total AGB, it revealed the biggest increase in the AGB of *Quercus mongolica* under the RCP 4.5 scenario. AGB of *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis* decreased in the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios after 2050 but have much higher growth rates of the AGB starting from 2050 under the baseline scenario. Under all scenarios, the AGB of coniferous species was eventually perished in 2100. In particular they were extinguished in early stages of the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. This is because of natural selection of communities by successions and the failure to adapt to climate change. The results of the study could be expected to be effectively utilized to predict changes of the forest ecosystems due to climate change and to be used as basic data for establishing strategies for adaptation climate changes and the management plans for forest vegetation restoration in ecological restoration fields.

Key words : Forest Landscape Model, Succession, RCP Scenarios, CO₂, Aboveground Biomass(AGB)

I. 서 론

기후변화로 인해 이상기후 현상이 잦아지면서 집중호우, 사막화, 태풍, 산불 등의 발생 빈도가 증가함에 따라 산림생태계에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 보고서에 따르면 모든 배출 시나리오에서 표면온도는 21세기 전반에 걸쳐 상승할 것으로 전망하였으며 21세기 후반(2081~2100년)의 지표 온도변화는 RCP 4.5에서 1.1~2.6°C 상승하며 강수량의 변화는 일정하지 않을 것으로 예측하였다(IPCC, 2013). 지구온난화에 의한 기온상승, 강수량 변화는 유출량의 변화와 증발산량 증가의 원인이 되는데 이러한 현상으로 인하여 북반구의 온대

지역에 위치한 한반도에는 급속한 기후변화와 더불어 생태계의 변화가 진행되고 있는 것으로 보고된 바 있다(Yun et al., 2011). 일반적으로 급격한 기온 상승은 야생 생물의 6종 중 1종을 멸종위험에 직면하게 하고, 점차적으로 고지대와 고위도로 이동을 초래하기 때문에 생태계전반에 걸쳐 크고 작은 교란을 야기 시킬 것이다(Urban, 2015). 궁극적으로 기후변화로 인한 산림생태계의 기능 및 구조의 변화는 1차적으로 산림식생의 변화를 유도하여 식생 천이의 경향, 속도, 종 구성 등에 큰 영향을 미칠 것이다.

천이(succession)는 어느 지역에서 식생이 자연히 변해 가는 현상으로(Lim, 1985), 각 기후조건에서 천이에 따른 식물군락의 교대가 일정한 순서를 거치는데 이 순서를 천이계열(sere)이라

하고 천이의 유형과 천이가 일어나는 물리적, 생물적 조건에 따라 다양하게 나타난다(Kim, 1992; Kim, 2003). 식물군락은 천이계열을 따라 각각 천이의 종국인 극상(climax)에 도달하며 극상에 달하기 전에 천이의 진행에 어떠한 방해가 있으면 중도에 정체하거나 진행을 더디게 한다. 이러한 천이는 최소 수십년 혹은 수백년 이상 오랜 기간 서서히 진행되고 천이 과정상 환경 특성, 교란의 유무 및 정도가 다르기 때문에 단순히 반복적인 현장조사 등을 통한 천이를 해석하기에 시간적 한계가 있다(Kim et al, 2019).

많은 연구자들은 이러한 천이 과정의 시간적 한계를 고려하여 식생의 특성 및 토지이용 등 환경 변수를 기반으로 수학적이며 통계학적 방법론이 고려된 자연적 혹은 인위적 과정을 예측한 다양한 천이모델들을 개발하고 연구해 왔다. Nakawatase and Peterson(2006)은 미국 워싱턴 주 올림픽산맥의 산림을 대상으로 상관분석 및 요인분석을 통하여 산림의 성장-기후 관계를 구명하였으며, Albert and Schmidt(2010)는 노르웨이 가문비나무와 너도밤나무를 대상으로 토양과 기후 변화모델을 이용한 과거와 미래 기후변수를 사용하여 해당 임지에서의 산림생산성 변화를 분석하였다. 그러나 산림의 변화는 공간의 특이성에 따른 상호작용과 수종간의 경쟁, 그리고 기후에 의한 영향을 받는 등 그 변화 양상을 파악하는 것이 매우 어렵다(Urban, 2005). 기후변화에 따른 산림의 구조 변화를 파악하기 위해서는 기온의 상승과 강수량의 변동성을 고려해야하고 수종간의 양분경쟁과 수종별 종자확산 방식, 그리고 공간이 갖는 지형적 특징 등 고려해야할 요소가 많아 현장조사 방법으로는 한계가 있기 때문에 모형을 통한 접근이 대안으로 제시된다(Ko et al., 2015). 생태학자 및 산림 관리자들은 경관의 공간과 시간적 규모, 특히 교란 등에서 산림생태계를 구성하는 대부분의 요인들을 고려하기 때문에 미래 산림 역학을 예측하기 위해 유용한 산림경관모델(FLMs)들을 연

구해왔으며 산림의 관리 전략이 생태계 서비스의 목표를 달성할 수 있을지 등을 예측하기 위한 다양한 모델들을 개발하였다.

산림천이모델 관련 국외 연구는 1970년대 개발된 JABOWA 모델을 시작으로, 개체목 단위로 천이를 예측하는 IBMs (Individual-Based Models) 과 경관 단위의 천이 예측 모델인 FLMs(Forest Landscape Model)로 파생되어 발전하였다(Larocque, 2016). 산림경관모델은 대규모의 경관 단위 스케일에서 나타나는 산림 생태계의 변화를 예측한다(Ko et al., 2015). 특히 LANDIS와 같은 산림천이모델(FLMs)은 경관의 시공간적 규모에서 산림생태계를 구성하는 다양한 요인들을 고려하기 때문에 미래의 산림 동태를 예측하기에 유용하다(He, 2008). LANDIS-II는 기후와 환경요소에 의한 식생의 성장과 경쟁관계를 모사할 수 있는 모형으로써, 시공간적 상호작용을 모두 고려할 수 있는 산림 경관 모형으로 평가 받고 있다(Scheller and Mladenoff, 2004).

국내의 기후변화에 의한 식생변화에 대한 연구로 Kim et al.(2015)은 기후변화에 따른 소나무림 분포 변화를 예측하고 영급별 분포면적과 생물기후변수의 영향을 분석한 바 있으며, Choi et al.(2018)은 기후변화가 고산수목 생태계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 기후변화 시나리오에 따른 현재 분비나무의 잠재적 서식가능 지역의 변화를 모델링하였다. 또한, Shin et al.(2012)은 강수, 온도, 지형, 토양 등의 환경변수 자료를 다항로지 회귀분석을 이용하여 미래 기후변화 시나리오 MIROC3.2A1B에 따른 우리나라 산림식생분포의 변화를 전망한 결과 활엽수림과 혼효림은 증가하고 침엽수림은 감소하는 것으로 예측하였다. 하지만 산림의 장기간의 변화를 파악하는 산림 천이 관련 국내 연구는 대부분 산림 군집 생태 연구에서 부분적으로 산림 천이에 대한 현상 과정을 다룬 수준에 머물러 있다. 따라서 장기간의 산림 구조 및 기능의 변화를 파악하고 이에 적절한 지속가능한 산림

관리 방안의 필요성이 대두되고 있다. 또한 국내 다양한 생태복원 관련 사업들이 진행되어지고 있고 생물다양성협약(CBD)에 따른 아이치 생물다양성 목표가 구체화·정량화됨에 따라 사후관리의 중요성이 대두되고 있으나 생태계의 천이 방향을 고려하지 못하거나 복원 후 진행과정을 예측하지 못해 이상적인 사후관리가 미흡한 실정이다.

이러한 관점에서 산림경관모델은 다양한 시공간 규모의 경관에서 산림의 구조와 기능의 동태를 연구하며 다양한 지역에 속해있는 산림생태계의 변화를 연구의 목적에 따른 다양한 시나리오를 적용하여 예측하고 평가하는데 유용하다(Forman and Godron, 1981; Baker and Mladenoff, 1999). 특히, LANIDS-II 모델은 산불, 경작, 도시개발, 바람 등과 같은 다양한 교란과 군집의 종에 따라 천이 시기를 적용하며, 개별 수목의 밀도와 재적을 모사하지 않고 하나의 격자에 존재하는 수종별 영급데이터를 적용한 군집 및 임분의 정보와 생태역(ecoregion) 등의 공간 정보가 단일 임상 이상의 공간 규모에 레스터 기반의 격자 단위 공간데이터를 적용하면서 천이 및 교란 등 각각의 시나리오에 다양한 공간해상도와 시간단계(Time step)을 유동적으로 설정할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 LANDIS-II 모델의 연구의 목적에 따라 다양한 조건에서의 모델 활용 가능성이 높다는 장점과 국외 산림천이모델 전문가 자문을 통해 국내 시범 적용모델로 선정하고 기후변화에 따른 산림식생의 변화를 예측하기 위해 빛과 수분의 경쟁으로 천이를 모사하는 PnET extension을 적용하였다. 충북 영동군 학산면의 산림식생을 대상으로 연구대상지의 식생의 특성과 다양한 기후요인들을 반영한 산림생태계의 장기(2020~2100년) 변화를 모사하고 현재 기후를 유지하는 시나리오(Baseline scenario) 및 기후시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 기반으로 한 산림 생물량에 대한 기후변화의 영

향을 파악하여 향후 기후변화에 따른 산림천이 예측을 통한 산림 생태계 관리계획 및 복원계획을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

산림경관모델은 다양한 자연적, 인위적 현상이 경관의 공간적 구조에 의해 영향을 받으므로 (With, 1997; He et al., 2011; Gustafson and Loehle, 2006) 모델 적용 대상지역의 물리적 구조가 복잡하거나 대상지 내 생태적 이질성이 클 경우 결과에 영향을 미칠 수 있으며, LANDIS-II 모델의 연구가 주로 미국 중서부지역의 비교적 고른 지역에서 주로 이루어져 복잡한 지형의 우리나라 산악지역에 적용성이 검증되지 않은 점을 고려하여 본 연구의 대상지는 토양, 경사, 향, 표고 등 공간적 특성과 생태적 특성이 큰 차이가 나타나지 않는 단일 생태역의 범위 내에서 선정하였다. 또한, PnET extension은 생장의 예측을 위해 개별 종들의 생태적 특성을 반영한 많은 모수를 반영하여 군집변화를 직접 모사하므로 대상 수종들의 특성 모수화와 군집 특성에 관한 데이터 수집에 한계가 있어 현장조사가 가능한 규모의 지역을 본 연구의 대상지로 선정하였으며 현실적인 국내 적용을 위하여 한국 산림의 주요 식생인 신갈나무군락, 소나무군락, 굴참나무군락 등과 대표적 조림식생인 잣나무, 일본잎갈나무 조림지가 대상지 내 고르게 분포하는 지역을 선정하였다.

연구 대상지는 충북 영동군 남서쪽에 위치한 백하산(634m)의 서쪽 능선(압재) 하부산림이다. 대상지의 전체 면적은 46,200m²이며, 대상지의 서측에 국도 19호선이 지나고 있으며 남쪽에는 압치터널이 위치한다(Figure 1). 본 대상지 내 산림식생 경관은 침엽수림과 활엽수림, 인공림과 자연림 등 다양한 식생 유형이 존재하며 비산림지역을 포함한다. 연구대상지는 LANDIS-II

모델 적용의 용이성을 위해 21×22개의 10m 격자로 이루어진 방사형 경계를 설정하였다. 본 연구의 수행과정은 Figure 2와 같다.

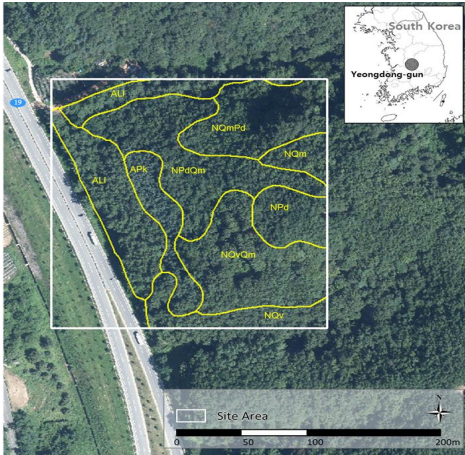


Figure 1. Map of study area

2. LANDIS-II 모델 구조

LANDIS-II(LANDscape Disturbance and Succession) 모델은 산림경관모델(FLM)로서 천이, 종자의 산포, 교란을 포함한 생태적 과정과

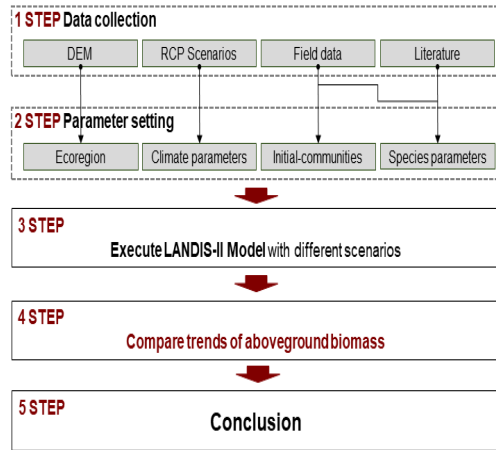


Figure 2. Flow chart of the study

기후변화 등의 교란이 시간이 경과함에 따라 산림 경관에 어떠한 영향을 주는지 추정한다. 이 모델은 경관단위 규모의 천이를 예측하고 산불, 토지 이용변화 및 기후변화 등 외부 교란조건을 수용하여 군집단위의 천이 예측과 레스터 기반의 시공간적 표현이 가능하다(Figure 3). 수종의 생리적 특성과 산불, 바람, 경작, 도시개발 등 다양한 교란을 동시에 고려하여 천이를 예측하고 천이 및 교란

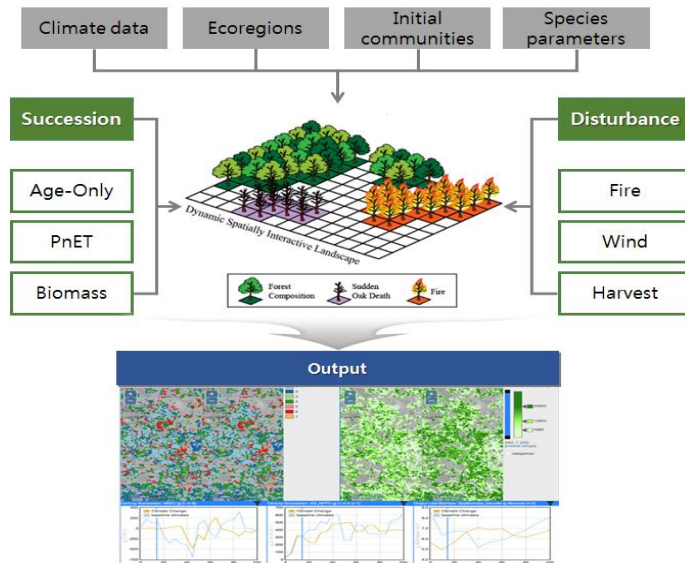


Figure 3. Conceptual scheme of LANDIS-II

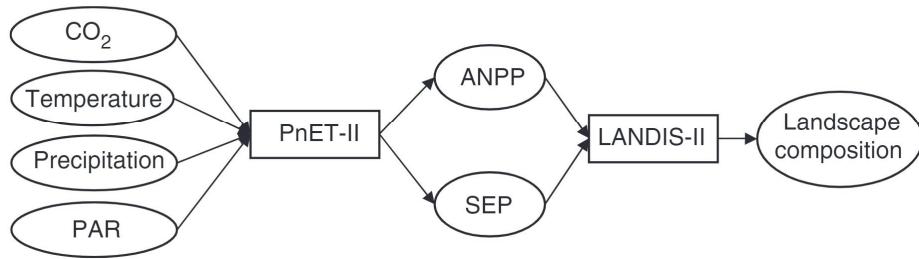


Figure 4. Conceptual scheme of the PnET Succession of LANDIS-II(Xu et al., 2009)

PAR, photosynthetically active radiation; SEP, species establishment probability; ANPP, above ground primary production.

등 각각의 시나리오에 대한 시간 단계(Time step) 및 다양한 공간해상도를 유동적으로 설정할 수 있다. 래스터 형태의 자료를 기반으로 구동되는 LANDIS는 격자별로 환경적 특성을 반영하고 격자간의 공간적 상호작용을 고려하며 격자에 존재하는 수종들을 영급을 바탕으로 그룹(cohort)으로 묶어 모사한다(Mladenoff et al., 1996; Keane et al., 2002). 모델은 크게 천이(Succession), 교란(disturbance), 출력(output)의 세 가지 확장기능(extension)으로 구성되어 있는데, 적용되는 확장기능(extension)에 따라 다양한 결과 값을 얻을 수 있다.

본 연구에서 적용된 Landis-II 모델의 확장기능 ‘PnET-Succession’(De Bruijn et al., 2014)은 산림 생태계 내의 광합성과 수분을 통해 생산되는 탄소의 변화를 추정하는 모델이다(Figure 4). 물과 빛의 경쟁을 천이에 반영하고 식생의 다층 구조에 하층부를 포함한 캐노피를 고려하여 입면적지수(Leaf Area Index)가 계산되어지며 모델에서 내음성을 반영한 잎의 광포화도를 나타내는 HalfSat(Half saturation), 잎의 질소함량비를 의미하는 FoIN(Foliar Nitrogen content), 그리고 최상위 수관층의 잎의 무게를 나타내는 SLWmax(Maximum Specific Leaf Weight) 등을 주요 모수로 성장 현황을 추정한다(Bruijn et al., 2014; Gustafson et al., 2017). 뿐만 아니라 최고 온도, 최저온도, CO₂, 강수량 등 월 단위 기후자

료와 생태역의 환경정보를 담은 토성, 토심, 생태역별 토양 수분 유출비 등을 반영하여 지형적 특성과 기후적 특성에 따라 산림 생태계의 동적 변화를 모사할 수 있으며, 기후변화가 산림 생태계에 끼칠 영향을 평가하는데 적절한 방법의 하나로 평가된다(Bruijn et al., 2014). 따라서 PnET extension의 구조는 기후변화에 따른 수목 성장에 대한 반응을 밝히는데 매우 유용하게 활용될 수 있으며 특히 토지이용변화 등의 교란과의 상호작용의 영향을 평가하는데 유용하다.

3. 데이터 구축 및 초기값 설정

LANDIS-II 모델을 구동하는 데는 격자단위로 입력된 환경정보를 바탕으로 지역을 분류한 생태역(ecoregions), 식생군집(cohort)의 구성을 반영한 초기 식생형(initial-communities), 군집의 분포를 나타내는 초기 식생형지도(initial-communities map), 식생을 구성하는 각각의 수종들에 대한 종생활사 특성 데이터가 요구된다.

1) 생태역(ecoregions) 지도 및 초기 식생 지도 구축

연구 대상지의 생태역은 대상지의 규모를 고려하여 전체 대상지를 단일 생태역으로 간주하였으며 2020년부터 2100년까지 80년 동안의 시간적 범위와 10m X 10m의 공간 해상도에서 구동하였다. 기초 식생형태를 반영하는 초기 식생형지

도 작성을 위해 국토지리정보원 발행 수치지형도 (1/5,000), 고해상도 항공사진(㈜삼아항업 제공) 및 산림공간정보서비스에서 제공하는 임상도 등을 바탕으로 일차적으로 상관식생구분도상 상관식생의 유형을 그 경계를 확정하고 ArcGIS Desktop version 10.6 프로그램(ESRI, 2018)을 이용하여 현존식생도를 작성하였다. 1차 작성된 도면을 바탕으로 현장조사를 통해 군락의 유형 확인 및 경계 수정 후 현존식생도를 완성하였으며 LANDIS-II 입력 데이터인 초기 식생지도 구축을 위해 래스터화하였다(Figure 5).

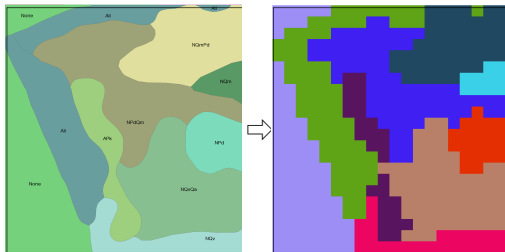


Figure 5. Conversion from the vegetation map to the initial communities map for LANDIS-II Input data

2) 종의 생활사 및 PnET 모수 설정

LANDIS-II 모델은 종의 생리·생태적 특성을 반영한 생활사 모수들을 적용하여 천이를 예측한다. 종의 생활사 모수는 종의 수명(longevity), 개화가 가능한 성숙시기(sexual maturity), 내음성(shade tolerance), 종자의 실질적 분산거리 및 최대 분산거리(Dispersal distance) 등이 포함되며 현재 국내 관련 연구의 한계 및 실측자료 부재로 인해 국내외 문헌연구를 바탕으로 적용하였다(Appendix 1).

PnET-Succession은 생물량을 통해 산림생태계의 변화를 모사한다. 모델에서 바이오매스(생물량) 성장은 time step에 따라 빛, 토양습도, 그리고 잎의 생물량에 의한 광합성량에 의해 계산되어지는데 수종의 성장과 경쟁을 반영하는 수종별 성장속도, 최대생물량, 내음성 등과 관련된

FolN, SLWmax, HalfSat 등의 모수들이 적용되었고 이는 모델에서 권장하는 주로 많이 사용되어지고 있는 모수값(Appendix 2)을 적용하였다.

3) 식생조사

식생조사는 앞서 작성된 기본지도를 이용하여 식물사회학적 조사를 실시하였다(Muller-Dombois and Ellenberg, 1974). 현장조사는 2019년 5월 11일 실시하였으며 작성된 현존식생도의 군락경계를 현장에서 확인하고 연구 대상지 내의 주요 군락의 전형적인 지역에 15m X 15m의 표본구를 설치하였다. 표본구 내에서 출현하는 식물종의 기록은 관속식물에 한 하였으며, 계층별로 종의 목록과 수고, 식피율, 우점종과 군락의 우점종 흉고직경을 기록하였다. 각 계층에서 출현하는 종에 대하여 Braun-Blanquet (1964)의 전추정법(全推定法)에 따라 피도(cover)와 군도(sociability)를 측정하여 기록하였다(Werger, 1974). 식물의 분류와 동정은 이창복(2003)의 대한식물도감, 이영노(1996)의 한국식물도감 그리고 이우철(1996)의 원색한국기준식물도감을 참조하였다.

모델 입력을 위한 초기 식생데이터는 각 군락의 주요종 및 영급을 모수로 하는데 이를 위해 군락의 우점도를 고려하여 군락의 주요 종 중 천이를 유도하는 주요 교목성 수종을 선정하였으며, 선정된 수종의 영급 추정을 위해 성장추를 활용한 군락 내 주요 종들의 연륜분석을 시행하였다(Appendix 3).

4) 기후변화 시나리오

기후변화에 따른 산림의 생물량 장기 변화 모의를 위해 기상청에서 제공하는 앙상블 모델의 지역기후모형(Regional Climate Model, RCM)의 모의결과 값을 이용하였다. 앙상블모델은 RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 시나리오기반의 2021년부터 2100년까지의 기온(최고, 최저, 평균), 강수, 극한기후지수(열대야일수, 폭염일수, 서리일수 등)

등을 제공하고 있으며, 공간해상도는 1km이다 (KMA, 2019). 본 연구에서 과거 기후데이터는 연구대상지 인근 기상관측점(충남 금산군)의 1973년부터 2019년 현재까지의 월평균 기상자료를 활용하였다. 미래 기후데이터는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현된 경우의 기후 시나리오 RCP 4.5(CO₂ 기준 540ppm)와 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우의 기후 시나리오 RCP 8.5(CO₂ 기준 940ppm)를 적용한 2100년까지 영동군 학산면 지역의 월별 최고기온, 최저기온, 월별 강수량, CO₂를 추출하였다. 월평균 PAR(Photosynthesis Active Radiation)값은 문헌 조사를 통해 적용되었다(KFRI, 2015).

III. 결과 및 고찰

1. 산림식생 현황

연구대상지의 식생조사 결과 신갈나무-소나무군락, 신갈나무군락, 소나무군락, 굴참나무-상수리나무군락, 일본잎갈나무식재림, 잣나무식재림 등 총 6개 유형의 산림식생 군락이 조사되었다(Appendix 4). 주요 군락의 종조성 및 구조적 특징을 살펴보면 신갈나무군락, 신갈나무-소나무군락, 굴참나무-상수리나무군락 등 활엽수종의 군락은 교목층 식피율이 85%의 4층 구조의 군락의 온전성을 보였다. 특히 신갈나무-소나무군락은 철쭉, 진달래, 생강나무, 둥굴레 등 신갈나무군락의 전형적인 수반종이 나타나 소나무군락에서 신갈나무군락으로 대체가 일어나고 있는 것으로 판단되며 아교목층, 관목층, 초본층의 신갈나무의 후계목은 신갈나무군락으로 천이가

진행되고 있음을 의미한다. 소나무군락의 계층 구조는 교목층의 식피율이 80%이며 4층 구조로 조사되었다. 소나무군락의 주요 구성종은 소나무, 신갈나무, 진달래, 굴참나무, 원추리 등이다. 일본잎갈나무식재림의 계층구조는 교목층 식피율이 80%의 4층 구조이며 교목층, 아교목층의 구성종으로 신갈나무가 나타나고 있을 뿐만 아니라 신갈나무군락의 수반종인 철쭉, 생강나무, 진달래, 꽃머느리밥풀 등이 나타나고 있어 일본잎갈나무식재림은 신갈나무군락으로 대체가 진행되고 있음을 예측할 수 있다. 잣나무식재림의 교목층 식피율은 90%이고 2층 구조를 보였으며 벌목 등의 교란 및 산림식생 천이 초기에 주로 나타나는 청미래덩굴 등이 분포하며 산림천이 도중 상의 종구성을 보이고 있다.

2. 기후변화 시나리오

양상블 모델 지역기후모형(Regional Climate Model, RCM)의 기후변화 시나리오에 따른 충청북도 영동군 학산면의 기후요인들의 모의결과값을 추출한 결과는 다음과 같다(Figure 6). 기온은 RCP 4.5 기반 2021년부터 2100년까지 최고온도 약 2.75℃, 최저온도 약 2.31℃ 상승하고, RCP 8.5 시나리오에서는 최고온도 약 4.54℃, 최저온도 약 4.27℃ 상승할 것으로 예측되었다(Table 1). 연평균 강수량은 RCP 4.5 시나리오 기반 232.62mm가 감소하고 RCP 8.5 시나리오에서는 198.06mm 증가하는 것으로 추정되었다. CO₂ 농도 540ppm을 기준으로 하는 RCP 4.5 시나리오의 경우 현재 CO₂농도에서 약 129ppm 상승하는 시나리오이며 RCP 8.5는 현재의 추세

Table 1. Changes of climate factors by Scenarios

Scenarios	ΔTmax(°C)	ΔTmin(°C)	ΔPrecipitation(mm)	ΔCO ₂ (ppm)
Baseline Climate	+0	+0	+0	+0
RCP 4.5	+2.75	+2.31	-232.62	+129
RCP 8.5	+4.54	+4.27	+198.06	+529

Tmax, maximum temperature; Tmin, minimum temperature; Δ, changes of climate factors from present to future scenarios

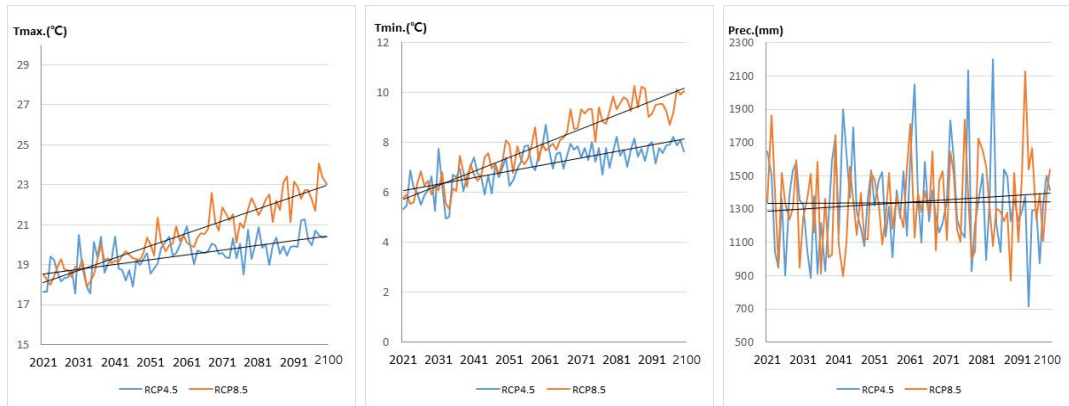


Figure 6. Climate trends of RCP 4.5 and 8.5 scenarios; (a) maximum temperature, (b) minimum temperature, (c) annual precipitation

Table 2. Change rate of Biomass under three climate scenarios

Year	Scenarios		
	Baseline climate	RCP 4.5	RCP 8.5
2050	203%	863%	94%
2100	544%	1674%	155%

로 온실가스가 배출되어 CO₂농도 940ppm에 도달하여 약 529ppm이 상승하였다.

3. 기후변화 시나리오에 따른 지상부생물량의 장기변화

1) 총 지상부생물량

(Aboveground Biomass) 변화

영동균 학산면 일대 연구 대상지역의 전체 지상부생물량 변화를 현재의 기후가 유지되는 조건인 시나리오와 RCP 4.5, RCP 8.5 기후시나리오에 따라 2020년부터 2100년까지의 장기 변화를 시뮬레이션 한 결과 지상부 생물량은 적용된 모든 시나리오에서 시간이 지남에 따라 증가하는 것으로 예측되었다(Figure 7). 가장 많은 지상부생물량의 증가를 보인 시나리오는 RCP 4.5였으며 2050년까지 급격한 기율기의 상승률을 보인 후 그 증가율이 점차 감소하는 것으로 예측되었다. 현재의 기후 및 CO₂가 지속될 경우 (Baseline climate scenario) 지상부생물량이 2050년 256% 증가하며 2100년에는 535%가 증

가하는 것으로 나타났다(Table 2). 저감 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 기후시나리오 RCP 8.5에서는 지상부생물량이 증가하나 그 증가율이 적어 2100년 지상부생물량이 2020년 대비 114% 증가하면서 세 가지 기후 시나리오 중 가장 낮은 지상부생물량의 증가를 나타내는 것으로 예측되었다.

이러한 결과는 기존의 연구와 비슷한 현상을 나타내는 것으로, Gustafson et al.(2017) 등은 기온이 3 °C 증가하면 수목 성장에 긍정적인 영향을 미치나 6 °C가 증가하면 매우 높은 호흡율을 보이면서 부정적인 영향을 미친다고 밝혔다. 이는 최고온도가 약 2.75°C 증가하고 CO₂ 농도가 약 129ppm 증가하는 기후시나리오 RCP 4.5의 경우 기온의 상승으로 인한 생장기간의 증가와 CO₂의 증가로 인한 광합성량의 증가에 따라 지상부생물량이 크게 증가하는 것으로 보인다. 하지만 온도가 약 4.5°C이상 증가하고 CO₂ 농도가 529ppm이 증가하는 RCP 8.5 시나리오의 경우 온도 증가와 함께 수목의 호흡에 의한 손실이

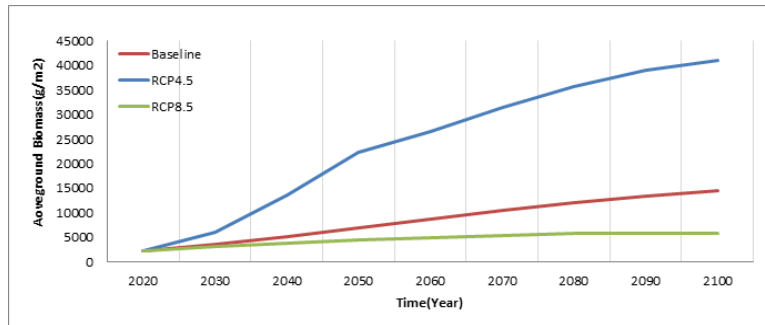


Figure 7. The aboveground biomass over time under climate scenarios for the entire study area

유지되므로 결과적으로 온도가 크게 증가하면 수목의 생물량의 증가가 크지 않으며 같은 이유로 온도 증가와 함께 군락(cohort)의 생존률 또한 감소하여 지상부생물량의 변화에 낮은 증가율을 보인 것으로 사료된다(Gustafson et al, 2018).

2) 수종별 지상부생물량

(Aboveground Biomass) 변화

주요 수종별 생물량의 변화를 살펴보면 기후 변화 시나리오에 의해 생물량이 증가하는 수종은 신갈나무, 굴참나무, 졸참나무, 떡갈나무, 상수리나무 등 활엽수종이며 소나무, 잣나무, 일본잎갈나무 등 침엽수종은 결과적으로 감소하는 것으로 예측되었다(Table 3). 그러나 2050년까지 소나무와 일본잎갈나무를 제외한 모든 수종은 지상부생물량의 증가율을 보이나 이후 대부분의 활엽수종들은 그 증가율이 감소 추세를 나타내고 침엽수종은 감소하기 시작하여 2100년에는 현재 기후를 유지하는 시나리오의 소나무를 제외한 모든 침엽수종이 소멸되는 것으로 추정되었다. 이는 2050년까지는 수목성장에 의해 지상부생물량이 증가하나 이후부터는 성장률 및 재발아률이 고사율보다 낮은 결과로 판단된다. 이들은 양수 및 극양수로써 자연적 천이에 의해 군락이 도태되고 높아진 기온과 CO₂에 적응하지 못한 결과로 보인다. 그 과정은 RCP 4.5

와 RCP 8.5시나리오에서 빠르게 나타나며 온도 상승에 따라 활엽수종의 성장 및 활력도가 높아지고 침엽수종에서 활엽수종으로의 천이과정이다 빠르게 진행되는 결과로 추정된다. 이러한 결과는 기온과 강수량이 증가함에 따라서 활엽수림이 북상하고 남쪽 지역의 침엽수림이 활엽수와 혼효림으로 변화할 것이며, 미래에는 활엽수림과 혼효림이 증가하고 침엽수림은 감소할 것으로 예상한 기존의 연구 결과(Shin et al., 2012)와도 유사하다.

모든 기후시나리오에서 가장 우세한 경향을 보인 수종은 신갈나무이며 대부분의 활엽수종은 모든 기후시나리오에서 지상부생물량이 증가하였으며 특히 RCP 4.5 기후시나리오의 2020년부터 2050년까지 약 700%~1000%의 높은 증가율을 보이나 전체 지상부생물량 그래프 기울기(Figure. 6)에서도 나타나듯이 2050년 이후 그 증가율이 현저히 낮아졌다. 두 번째로 높은 증가율을 보인 시나리오는 현재 기후를 유지하는 시나리오이며 특이점은 신갈나무와 굴참나무의 증가율이 다른 활엽수종들과 달리 2050년 이후 더 높은 증가율을 나타냈다(Figure. 8). 특히 신갈나무의 경우 우리나라 식생의 일반적인 천이과정에서 우세를 보일 뿐만 아니라 극상수종(Kim, 1991)으로서 굴참나무 등과 함께 현재 기후를 유지하는 시나리오에서 2100년까지 지속적으로 군락이 발달하는 것으로 판단된다.

Table 3. Change rates of aboveground biomass of species from 2020 to 2050 and from 2050 to 1200

Year	Scenarios					
	Baseline climate(%)		RCP 4.5(%)		RCP 8.5(%)	
	2050	2100	2050	2100	2050	2100
<i>Quercus acutissima</i>	240.50	131.19	772.16	144.86	105.79	28.59
<i>Quercus variabilis</i>	177.48	416.75	798.37	121.41	88.97	26.65
<i>Quercus dentata</i>	256.60	142.08	885.72	-29.02	111.57	37.79
<i>Quercus mongolica</i>	203.17	678.99	1028.87	83.54	110.06	41.57
<i>Quercus serrata</i>	249.52	138.82	899.27	51.69	108.73	37.05
<i>Pinus koraiensis</i>	502.63	-100.00	638.90	-100.00	97.10	-100.00
<i>Pinus densiflora</i>	34.17	-99.27	164.90	-100.00	-30.19	-100.00
<i>Larix leptolepis</i>	399.58	-100.00	392.20	-100.00	-88.02	-100.00

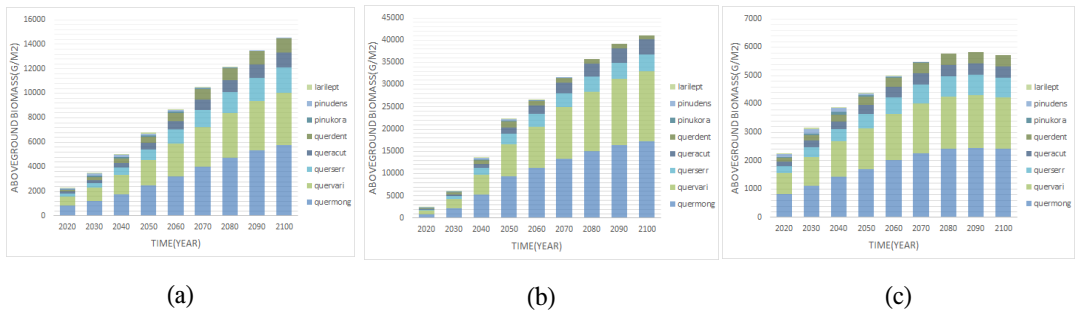


Figure 10. The aboveground biomass of species under different climate scenarios; (a) Baseline Climate, (b) RCP 4.5, (c) RCP 8.5; quercacut, *Quercus acutissima*; quervari, *Quercus variabilis*; querdent, *Quercus dentata*; quermong, *Quercus mongolica*; querserr, *Quercus serrata*; pinukora, *Pinus koraiensis*; pinudens, *Pinus densiflora*; larilept, *Larix leptolepis*.

V. 결 론

본 연구는 기후변화에 따른 산림식생의 생태적 변화를 파악하기 위하여 충북 영동군 학산면 일대의 산림식생을 대상으로 LANDIS-II 모델을 적용하여 기후변화 시나리오에 따른 산림의 총 지상부생물량 및 수종별 지상부생물량의 장기변화를 예측하고 한국 산림에서의 산림경관 모델 적용가능성을 살펴보았다. LANDIS 모델 구동을 위한 초기식생지도 및 데이터 구축을 위해 현지 식생조사를 시행하였으며 군락의 주요 우점종들의 연륜분석을 실시하였다. 식생조사결과 신갈나무-소나무군락, 신갈나무군락, 소나무군락, 굴참나무-상수리나무군락, 일본잎갈나무식재림, 잣나무식재림 등 총 6개 유형의 산림식생

군락이 조사되었다.

기후변화 시나리오에 따른 총 지상부생물량의 변화는 RCP 4.5 시나리오에서 가장 많은 생물량이 증가하였으며 RCP 8.5 시나리오에서는 가장 낮은 생물량의 증가율을 보였다. 이는 적당히 높아진 온도와 CO₂의 증가는 광합성량과 물의 사용 효율이 증가하면서(Franks et al, 2013) 생물량을 증가시키지만 큰 온도의 변화(약 +4.0℃ 이상)는 온도 증가와 함께 호흡 손실을 지속되므로 결과적으로 온도가 증가하면 수목의 생물량이 감소하였다.

모든 기후변화시나리오에서 우세한 경향을 보인 수종은 신갈나무이며 총 지상부생물량 변화 추세와 같이 신갈나무는 RCP 4.5 시나리오에서 가장 많은 지상부생물량 증가율을 보였다.

신갈나무와 굴참나무는 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 2050년 이후 그 증가율이 점차 줄어들었으나 현재 기후를 유지하는 시나리오에서는 2050년 이후 더 높은 지상부생물량의 증가율을 나타냈다. 침엽수종의 경우 2100년 결과적으로 지상부생물량이 모두 소멸하는 것으로 나타났는데 이는 천이에 의한 군락의 도태와 기후변화에 적응하지 못한 결과로 사료된다. 특히 이들은 RCP 4.5와 RCP 8.5 기후시나리오에서 가장 빨리 소멸되었다.

본 연구의 결과는 기후변화에 따른 산림 생태계의 변화를 예측하는데 유용하게 적용될 수 있고 생태복원 분야에서 산림 식생복원과 관련된 기후변화 적응 대책 및 관리계획 수립에 기초자료로 활용될 것으로 기대된다. 특히 본 연구는 연구대상지의 현지조사를 통해 영급과 주요 우점수종을 파악하여 대상지 내의 모든 식생군락의 구조적 특성을 반영한 실질적인 초기식생데이터를 적용하여 한국의 산림의 기후변화 영향을 파악하기 위해 산림경관모델의 적용을 시도했는데 그 의의가 있다. 다만 군집의 구조적 특성 단순화 및 RS자료를 활용한 데이터 추출 등의 방식으로 현지조사 및 데이터 수집 등의 한계를 극복하여 향후 더 넓은 면적의 경관단위 수준의 모델 구동이 연구되어야 한다. 뿐만 아니라 수종별 생리적 특성을 반영하는 모수 등 실험적 데이터를 통한 적용이 이루어진다면 본 연구 결과의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 차후 기후변화에 따른 성장뿐만 아니라 LANDIS-II 모형의 Land Use Change+ extension을 활용하여 토지이용변화 시나리오 적용을 통한 개발에 의한 식생천이과정 시뮬레이션 등 LANDIS 모형의 다양한 시도가 가능해질 것이다.

References

- Albert, M. and Schmidt, M. 2010. Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management*, 259(4) : 739-749.
- Braun-Blanquet, J. 1964. *Plant sociology*. New York: Translated by GD Fuller and HS Conard Mc-Graw-Hill Book Co. Inc. New York.
- Choi JY · Lee SH. 2018. Climate Change Impact Assessment of *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim. in Subalpine Ecosystem using Ensemble Habitat Suitability Modeling. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 21(1) : 103-118. (in Korean with English summary)
- De Bruijn, A. · Gustafson, E. J. · Sturtevant, B. R. · Foster, J. R. · Miranda, B. R. · Lichti, N. I. and Jacobs, D. F. 2014. Toward more robust projections of forest landscape dynamics under novel environmental conditions: embedding PnET within LANDIS-II. *Ecological Modelling*. 287: 44-57.
- ESRI. 2017. *ArcGIS Desktop: Release 10.6* Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Gustafson, E. J. · Miranda, B. R. · De Bruijn, A. M. · Sturtevant, B. R. and Kubiske, M. E. 2017. Do rising temperatures always increase forest productivity? Interacting effects of temperature, precipitation, cloudiness and soil texture on tree species growth and competition. *Environmental modelling & software*. 97 : 171-183.
- Gustafson, E. J. and Miranda, B. 2018. PnET-suc-

- cession v3.1 extension user guide. New York: John Wiley & Sons. pp. 65
- Gustafson, E. J. · Miranda, B. and Sturtevant, B. 2018. Can future CO₂ concentrations mitigate the negative effects of high Temperature and longer droughts on forest growth? *Forests*. 9(11): 664.
- He, H.S. 2008. Forest landscape models: Definitions, characterization, and classification. *Forest Ecology and Management* 254: 484-498.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report-Changes to the Underlying Scientific /Technical Assessment.*
- Keane, R.E. · Parsons, R. and Hessburg, P. 2002. Estimating historical range and variation of landscape patch dynamics: limitations of the simulation approach. *Ecological Modelling* 151: 29-49.
- Kim, JH. 1992. Analysis of successional trend by transition matrix model in the mixed broad-leaved - Abies forest of Mt. Odae. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 81(4):325-336. (in Korean with English summary)
- Kim, JH. 2003. The analysis of forest successional trend by species replacement model in the natural forest. *Forest Bioenergy*. 22(3):1-10. (in Korean with English summary)
- Kim, TG · Cho, YH and Oh, J.G. 2015. Prediction Model of Pine Forests Distribution Change according to Climate Change. *Korean Journal of Ecology and Environment*. 48(4) : 229-237. (in Korean with English summary)
- Kim, WM · Kim, SY · Song, WK · Lee, YJ · Choi YE and Choi JY. 2019. A study on the introduction of forest succession model, LANDIS-II. *Proceedings of the 2019 symposium on environmental restoration technology*. Seoul : Korea Society of Environmental Restoration Technology. pp. 20-30.(in Korean)
- Ko, DW · Joo, HS · Lee, YG and Park. CH. 2015. Review : The Current Status and Challenges of Forest. Landscape Models. *Journal of Korean Forestry Society*. 104(1) : 1-13. (in Korean with English summary)
- Kroes Forest Research Institute(KFRI). 2015. *Impact Assessment and Adaptation of Climate Changes on Forest Ecosystem.* (in Korean)
- Larocque, G.R. 2016. *Ecological Forest Management Handbook*. CRC Press.
- Lee CB. 2003. *Coloured flora of Korea*. Seoul: Hyang Moon Sa. (in Korean)
- Lee WC. 1996. *Coloured flora of Korea*. Seoul: Academic book. (in Korean)
- Lee YN. 1996. *Flora of Korea*. Seoul: Kyo Hak Sa. (in Korean)
- Lim YJ. 1985. *General Ecology*. Seoul: Ewoo press. (in Korean)
- Mladenoff, D.J. and He, H.S. 1999. Design, behavior and application of LANDIS, an object-oriented model of forest landscape disturbance and succession. in *Spatial modeling of forest landscape change: approaches and applications.* (Mladenoff, D.J., Baker, W.L, eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK: 125-162.
- Muller-Dombois, D. and H. Ellenberg. 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Nakawatase, J.M. and Peterson, D.L. 2006. Spatial variability in forest growth-climate relationships in the Olympic Mountains, Washington. *Canadian Journal of Forest Research* 36(1):

- 77-91.
- National Institute of Meteorological Research (NIMR). 2011. Climate change scenario report 2011 to respond to the IPCC 5th Assessment Report. (in Korean)
- Scheller, R.M. and Mladenoff, D.J. 2004. A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS:design, validation, and application. *Ecological Modelling* 180: 211-229.
- Shin HJ · Park GA · Park MJ and Kim SJ. 2012. Projection of Forest Vegetation Change by Applying Future Climate Change Scenario MIROC 3.2 A1B. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 15(1) : 64-85.
- Urban, D.L. 2005. Modeling ecological processes across scales. *Ecology* 86: 1996-2006.
- Urban, M. C. 2015. Accelerating extinction risk from climate change. *Science*. 348 : 571-573.
- Werger, M. G. A. 1974. Study on concepts and techniques applied in the Zurich-Montpellier method of vegetation survey. *Bothalia*. 11 : 309-323.
- Yun JH · Kim JH · Oh KH and Lee BY. 2011. Distributional Change and Climate Condition of Warm-temperate Evergreen Broad-leaved Trees in Korea, *Korea Journal of Environmental Ecology*. 25(1) : 47-56. (in Korean with English summary)
- Xu, C · Gertner, G. Z and Scheller, R. M. 2009. Uncertainties in the response of a forest landscape to global climatic change. *Global Change Biology*. 15(1) : 116-131.
<http://fgis.forest.go.kr/> Forest Geographical Information System(FGIS)
- <http://www.climate.go.kr/> Korea Meteorological Administration(KMA)

Appendix 1. Species Parameters for LANDIS-II

Species	Longevity (Years)	Sexual Maturity (Years)	Shade tolerance*	Dispersal(m)	
				Effective Distance	Maximum Distance
<i>Quercus acutissima</i>	350	25	3	30	150
<i>Quercus variabilis</i>	350	25	3	30	150
<i>Quercus dentata</i>	350	25	3	30	150
<i>Quercus mongolica</i>	350	25	3	30	150
<i>Quercus serrata</i>	350	25	3	30	150
<i>Pinus koraiensis</i>	300	10	2	50	100
<i>Pinus densiflora</i>	275	10	2	90	300
<i>Larix leptolepis</i>	250	15	1	100	400

*: Value is interger between 1 (lowest tolerance) and 5 (highest tolerance)

Appendix 2. PnET Generic Parameters for PnET-Succession extension

Parameters	Definition(units)	Value
BFolResp	Respiration as a fraction of maximum photosynthesis	0.1
TOroot	Turnover of Root/Wood-Fraction of root/wood biomass lost per year to damage, breakage or death	0.02
TOwood	Turnover of Root/Wood-Fraction of root/wood biomass lost per year to damage, breakage or death	0.01
DNSC	target NSCfraction	0.05
MaintResp	Turnover of Root/Wood-Fraction of root/wood biomass lost per year to damage, breakage or death	0.002
EstMoist	Tuning parameter to control the sensitivity of establishment (Pest) to soil moisture	2.6
EstRad	Tuning parameter to control the sensitivity of establishment (Pest) to light level (radiation)	2.6
Prevent Establishment	Boolean variable turning establishment on or off	False
MaxCanopyLayers	the number of canopy layer	4
MaxDevLyrAv	to lump species-age cohorts into canopy layers	6000
IMAX	Each cohort is subdivided into a number of layers	5
Wythers	Boolean variable turning the Wythers correction on or off. The Wythers algorithm accounts for acclimation of foliar respiration to elevated temperatures	True
PrecipEvents	Monthly total precipitation is evenly divided among this number of events to allow cohorts more opportunities to compete stochastically for incoming water	11
FracBelowG	Fraction of non-foliar biomass that is belowground (root pool)	0.33
Dtemp	Temperature reduction factor	True

Sources from Gustafson et al. 2018

Appendix 3. Age, DBH, and heights of dominant species investigated for initial community data

No.	Vegetation types	Code	Species	DBH(cm)	Height(cm)	Age(yr)
1	<i>Larix leptolepis</i> Afforestation	Ll-01	<i>Larix leptolepis</i>	16.2	15	35
		Ll-02	<i>Larix leptolepis</i>	12.4	15	30
		Ll-03	<i>Quercus variabilis</i>	23.2	10	35
2	<i>Pinus koraiensis</i> Afforestation	Ll-04	<i>Quercus variabilis</i>	31.0	12	41
		Pk-01	<i>Pinus koraiensis</i>	19.4	13	32
		Pk-02	<i>Pinus koraiensis</i>	16.6	13	30
3	<i>Quercus mongolica</i> - <i>Pinus densiflora</i> Community	QmPd-01	<i>Pinus Densiflora</i>	25.1	8	31
		QmPd-02	<i>Pinus Densiflora</i>	17.2	6	24
		QmPd-03	<i>Quercus mongolica</i>	17.8	5	39
		QmPd-04	<i>Quercus mongolica</i>	10.5	8	30
4	<i>Quercus mongolica</i> Community	QmPd-05	<i>Quercus mongolica</i>	13.1	5	18
		Qm-01	<i>Quercus variabilis</i>	31.2	15	40
		Qm-02	<i>Quercus mongolica</i>	12.4	17	40
5	<i>Pinus Densiflora</i> Community	Pd-01	<i>Pinus Densiflora</i>	16.9	18	56
		Pd-02	<i>Pinus Densiflora</i>	9.5	17	55
		Pd-03	<i>Pinus Densiflora</i>	14.0	14	28
		Pd-04	<i>Pinus Densiflora</i>	22.9	12	35
6	<i>Quercus variabilis</i> - <i>Quercus acutissima</i> Community	QvQa_01	<i>Quercus variabilis</i>	27.7	12	40
		QvQa-02	<i>Quercus variabilis</i>	35.3	20	40
		QvQa-03	<i>Quercus acutissima</i>	14.3	17	41
		QvQa-04	<i>Quercus acutissima</i>	14.0	11	30

Appendix 4. Structures of vegetation communities in the study area

Vegetation types	Strata	Cover (%)	Dominant species	Height (m)	DBH(cm) of Dominant Species		
					Max.	Mean	Min.
<i>Larix leptolepis</i> Afforestation	Canopy	80	<i>Larix leptolepis</i>	15	18	16	12
	Subcanopy	10	<i>Quercus mongolica</i>	8	-	-	-
	Understory	65	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	1.6	-	-	-
	Ground layer	45	<i>Convallaria keiskei</i>	0.4	-	-	-
<i>Pinus koraiensis</i> Afforestation	Canopy	90	<i>Pinus koraiensis</i>	14	20	17	15
	Subcanopy	5	<i>Quercus variabilis</i>	12	-	-	-
	Understory	15	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	1.5	-	-	-
	Ground layer	10	<i>Smilax china</i>	0.4	-	-	-
<i>Quercus mongolica</i> - <i>Pinus densiflora</i> Community	Canopy	85	<i>Quercus mongolica</i>	12	17	13	10
	Subcanopy	40	<i>Quercus mongolica</i>	6	-	-	-
	Understory	65	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	1.7	-	-	-
	Ground layer	35	<i>Calamagrostis arundinacea</i>	0.4	-	-	-
<i>Quercus mongolica</i> Community	Canopy	80	<i>Quercus mongolica</i>	15	32	15	8
	Subcanopy	75	<i>Quercus mongolica</i>	8	-	-	-
	Understory	35	<i>Quercus serrata</i>	1.4	-	-	-
	Ground layer	70	<i>Polygonatum odoratum</i> var. <i>pluriflorum</i>	0.4	-	-	-
<i>Pinus Densiflora</i> Community	Canopy	85	<i>Pinus Densiflora</i>	18	23	16	8
	Subcanopy	65	<i>Quercus mongolica</i>	8	-	-	-
	Understory	45	<i>Rhododendron mucronulatum</i>	1.5	-	-	-
	Ground layer	40	<i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>	0.4	-	-	-
<i>Quercus variabilis</i> - <i>Quercus acutissima</i> Community	Canopy	85	<i>Quercus variabilis</i>	18	35	27	24
	Subcanopy	20	<i>Quercus dentata</i>	7	-	-	-
	Understory	40	<i>Quercus mongolica</i>	1.4	-	-	-
	Ground layer	25	<i>Quercus mongolica</i>	0.4	-	-	-