

산림의 임상구조 결정요인 분석과 기후변화에 따른 임상구조 변화 예측[†]

이홍림* · 권오상**

요약 : 본고는 기후변화가 우리나라 산림 구성에 미치는 영향을 파악하기 위해 분할자료 회귀 분석을 이용하여 임상모형을 구축하였으며, 기후 및 지형과 같은 자연적 요인 외에도 사회 정책적 요인들이 산림 구성에 어떠한 영향을 미치는지를 실증적으로 분석하였다. 또한 구축한 임상모형을 이용하여 기후변화가 미래 우리나라 산림을 어떻게 변화시킬지를 IPCC 시나리오를 바탕으로 예측해보았다. 분석결과 우리나라의 산림 구성은 자연적 요인 못지않게 사회 정책적 요인들의 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 미래의 모든 기후변화 시나리오하에서 현재보다 침엽수림 비중이 줄어드는 것으로 나타났다. 특히 IPCC의 RCP 8.5에 해당하는 기후변화가 실현될 경우 2090년대까지 전체 산림면적의 약 10% 정도가 침엽수림에서 활엽수림으로 전환될 것으로 예측되었다. 기후변화로 인한 임상변화는 지역별로 상당히 이질적인 결과를 가져올 것으로 보이며, 현재 침엽수림 비중이 상대적으로 낮은 내륙지역의 침엽수림 면적을 더욱 크게 감소시키는 것으로 나타났다.

주제어 : 기후변화, 임상, 사회 정책적 요인, 분할자료 회귀분석

JEL 분류 : C19, Q23, Q54

접수일(2017년 1월 27일), 수정일(2017년 3월 27일), 게재확정일(2017년 3월 27일)

[†] 본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업(과제번호: 2014001310010)”의 지원을 받아 수행된 연구임.

* 서울대학교 농경제사회학부 농업·자원경제학 전공, 박사과정, 주저자(e-mail: shineeye89@snu.ac.kr)

** 서울대학교 농경제사회학부 농업·자원경제학 전공, 교수 겸 농업생명과학연구원 겸무연구원, 교신저자(e-mail: kohsang@snu.ac.kr)

Analyzing the Impacts of Climate Change on Forest Composition in Korea[†]

Honglim Lee* · Oh Sang Kwon**

ABSTRACT : This study empirically estimates the impacts of climate change on forest composition in Korea using a fractional data regression model, and forecasts the change in forest composition in the 2040s and 2090s based on the IPCC climate change scenarios. Unlike the forest science studies that incorporate mostly only ecological variables as the determinants of forest composition, we take into account regional level socio-economic and forest management variables as well. Our estimation results found that not only environmental factors but also socio-economic and forest management related factors strongly affect the composition of Korean forest. Based on the estimation results and IPCC scenarios on climate change, we predict that the share of currently dominant coniferous forest will decline in the future under all scenarios. About 10% of total forest area is likely to be converted from coniferous forest into broadleaved forest until 2090s under the scenario RCP 8.5. It is also predicted that there will be a substantial regional variation in the effects of climate change on forest composition, and the coniferous forests in the inland regions will decline more dramatically.

Keywords : Climate change, Forest type, Fractional data regression

Received: January 27, 2017. Revised: March 27, 2017. Accepted: March 27, 2017.

[†] This subject is supported by Korea Ministry of Environment as “Climate Change Correspondence Program (project number: 2014001310010)”

* Graduate Student, Department of Agricultural Economics and Rural Development, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University(e-mail: shineeye89@snu.ac.kr)

** Professor, Department of Agricultural Economics and Rural Development, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University(e-mail: kohsang@snu.ac.kr)

I. 서론

우리나라는 불과 50년 전만 해도 산지의 대부분이 민둥산이었으나 제1차(1973~1978) 및 제2차(1979~1987) 치산녹화기 동안 대규모 조림을 성공적으로 수행함으로써 현재 국토 면적대비 63%의 산림률을 보유한 국가 주도의 모범적인 산림육성 사례로 기록되고 있다. 이렇게 조성된 산림은 목재와 임산물 생산을 통해 경제적 가치를 유발하는 동시에 대기정화, 수자원 함양, 휴양기능 제공, 동·식물 서식지 제공 등 다양한 환경적, 공익적 가치를 내포하고 있어 우리나라 국토에서 차지하는 넓은 면적의 산림은 국가 환경관리에 있어 대단히 중요한 역할을 담당하고 있다.

한편 산림은 그 절대적인 면적뿐 아니라 수종별로 시장적, 환경적 가치가 다르기 때문에 산림의 임상구조가 어떻게 되어 있는지의 문제 또한 중요하다고 할 수 있다. 현재 국내 산림녹화가 성공적으로 일단락된 상태에서 향후 산림면적의 변화는 경제성장과 국토개발 등 다분히 산림 외적인 요인에 의해 발생할 것이기 때문에, 산림을 관리하는 측면에서 볼 때 절대적인 산림면적 변화보다는 임상구조 변화에 좀 더 주목할 필요가 있다고 할 수 있다.

이와 같은 중요성으로 인해 지금까지 산림환경관련 분야에서 임상구조를 파악하고 그 변화를 분석하고자 하는 시도가 이미 다수의 연구를 통해 진행된 바 있다. 임상구조 분석은 크게 현장조사, 원격탐사, GIS 자료 이용, 지구통계분석, 환경변수 모델링 등의 방법을 이용할 수 있으며, 이들 방법을 사용한 다수의 연구들이 개별 수종 혹은 임상인 산림 내에서 차지하는 비중과 그 변화를 파악하고자 하였다(장동호·이승호, 2013; 김정민 외, 2014; 이동근 외, 2010 등).

특히 최근 연구에서는 임상구조 분석의 주목적 중 하나로 기후변화가 임상구조에 미치는 영향에 대한 연구가 주목받고 있다(장동호·이승호, 2013; 정현용 외, 2013; 변정연 외, 2012; 임종환 외, 2006; 이동근 외, 2010). 산림과 기후변화는 사실 복잡한 상호영향관계에 있는 것으로 알려져 있는데, 산림벌채(deforestation) 및 산림전용(forest conversion)은 기후변화를 야기하는 주요 원인 중 하나이지만(IPCC, 2007), 역으로 온도 상승과 강수량 감소 등의 기후변화는 산림 황폐화 및 사막화를 촉진하여 산림면적을 감소시키고 임상구조에 영향을 미치기도 한다. 특히 이러한 상호관계 중 기후변화에 따라

산림면적과 임상구조가 어떤 영향을 받는지에 대한 연구는 국내 환경관리 측면에서 주목해야 할 방향이라 할 수 있다.

기상청(2012)에 따르면 현재 한반도 남해안에 국한된 아열대 기후구가 점차 북상하여 가까운 미래에 우리나라 대부분의 지역이 아열대 기후를 가질 것으로 예측되며, 이로 인해 우리나라 산림에 기후변화가 미치는 영향이 상당할 것으로 예상된다. 우리나라의 경우 기후변화로 인한 사막화나 산림면적 감소를 크게 우려할 단계에 있지는 않으나, 대신 기후변화에 따른 산림의 구성 및 구조 변화는 상당할 것으로 예상된다. 실제로 기후변화로 인해 구상나무와 분비나무를 비롯한 우리나라 고유 침엽수종의 집단고사 및 쇠퇴 현상이 보고되고 있으며, 이에 따라 산림청에서는 전국 단위의 침엽수 피해현황 조사 등 고산 침엽수종의 지속가능한 보전을 위한 대책 추진 계획을 발표하기도 하였다(산림청, 2016).

기후와 임상 분포와의 관계에 대한 국내 연구를 살펴보면, 구경아 외(2001)는 상록활엽수를 분포 유형에 따라 7개 그룹으로 나누어 이들 분포와 기후요소와의 관계를 분석하였으며, 국립산림과학원(2005)은 기후변화에 따른 한반도 내 소나무림의 적정 생육 범위 변화를 연구한 바 있다. 그러나 구경아 외(2001)의 경우 임상 구분에 많은 공을 들이고 이를 세분화하였으나 기후변수별 등치선도를 통해서만 기후와 임상분포의 관계를 표현함으로써 변수가 임상에 미치는 영향이 명시적으로 표현되지 않으며, 구경아 외(2001)와 국립산림과학원(2005) 두 연구 모두 전체 산림이 아닌 일부 수종을 대상으로 분석을 시행했다는 한계를 가진다. 한화진(2007)은 기후변화에 따른 임상별 취약성을 평가하기 위해 CEVSA 모델을 사용하였으며, 기후 및 토양자료와 식생자료를 이용하여 분석을 시행하였다. 이 연구의 경우 임상을 상록침엽수림, 상록활엽수림, 낙엽활엽수림, 혼효림으로 나누어 분석하였으며 따라서 일부가 아닌 모든 임상 유형을 대상으로 분석을 시행하였다고 할 수 있다. 하지만 이 또한 취약성 등급으로 나타나는 모델의 결과를 추후에 임상별 잠재식생 분포도로 전환해주는 과정을 거쳐야 하기 때문에 기후변수를 포함한 투입변수 변화가 임상에 미치는 영향을 파악하기가 쉽지 않다. 한편 김재욱·이동근(2006)은 기후와 지형, 토양자료와 7개 군락 산림 식생 분포와의 관계를 다항로지모형을 통해 분석함으로써 식생분포와 변수들 간의 영향관계를 좀 더 명시적으로 도출하려는 시도를 하였다. 하지만 현실에서는 한 공간 내에 여러 가지 임상이 공존하는 것과

달리, 이 연구에서는 공간적인 분석단위인 1개의 픽셀 내에서 7개 군락 중 1개만이 선택 되는 식의 분석 결과를 도출하였다는 한계점이 존재하였다.

더불어 위의 모든 연구들은 기본적으로 자연과학적인 것으로서, 강수량이나 기온과 같은 기후변수와 토양 등의 자연적 요인이 임상구조에 미치는 영향만을 분석하였다고 할 수 있다. 하지만 우리나라의 경우 현재의 산림형성 과정에 국가 주도의 녹화사업이 큰 영향을 미쳤고 산림녹화 성공 이후 현재까지도 여전히 산림의 이용 및 관리에 있어 정부의 역할이 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서 자연적 요인 못지않게 사회·경제적 변수나 산림정책 관련 변수가 임상구조에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되나, 기존 연구들은 이들 변수들의 영향을 임상구조 분석에 직접적으로 반영하지 못하였다는 한계가 있다.

본고에서는 지금까지 진행된 다수의 산림환경관련 연구들과 마찬가지로 산림의 임상구조를 조사하고 기후변화에 따른 임상변화를 예측하는 것을 분석대상으로 하되, 기존 연구들과는 크게 두 가지 측면에서 차별성을 가진다. 먼저, 기존의 자연과학적 연구들과 달리 우리나라 산림조성의 역사적 배경과 산림정책 관련 특성을 반영할 수 있도록 산림이 위치한 지역의 사회·경제적 특성이나 산림정책 관련 변수를 명시적으로 고려하여 임상구조 결정요인을 파악하였다. 기존 연구들은 일반적으로 임상을 더욱 세부적으로 구분하거나 임상구조 분석을 세밀한 분석단위(예: 1km × 1km)로 시행했다는 장점이 있지만, 기후변수를 포함한 자연·환경적 특성 이외의 사회·경제적 변수나 산림관리 행위와 같은 사회 정책적 변수의 영향을 분석에 반영하지 못하고 있다. 본고는 사회 정책적 변수를 반영하기 위해 이들 변수 정보가 제공되는 최소 행정단위인 시군 자료를 사용했다는 한계가 있지만, 대신 국가 산림통계와 행정자료를 적절히 결합하여 지역단위의 기후 혹은 자연·환경적 변수 외의 사회·경제적 변수나 산림정책 관련 변수가 침엽수림, 혼효림, 활엽수림에 미치는 영향을 명시적으로 반영하는 임상구조 분석을 전국에 걸쳐 시도하였다. 이러한 사회 정책적 변수의 반영은 해당 변수들이 산림 구성에 미치는 영향력을 규명한다는 점에서 의미가 있을 뿐 아니라 임상모형의 신뢰도를 높이는 역할을 한다고 할 수 있다.

두 번째로 본고는 기존 연구들과 비교하였을 때보다 엄밀한 통계학적 혹은 계량경제학적 기반을 가진 임상구조 결정요인 분석을 시도하였으며, 그 결과를 이용하여 기후변화의 영향을 예측하였다. 기존 연구들은 기후변수 등이 임상에 미치는 영향을 분석함에

있어 취약성 등을 각 수준별로 분리하여 분석하거나, 기후·환경변수와 임상면적과의 상호관계를 단순회귀분석 또는 선택, 비선택의 이산적인 모형으로 분석을 시도하는 등의 한계를 보이고 있다. 보고는 특정 지역의 산림이 침엽수림, 활엽수림, 혼효림의 세 가지 임상으로 구성된다고 보고, 이들 구성비의 합이 1이 되어야 한다는 자료의 특성을 정확히 반영하되 각 임상에 대한 기후 및 환경변수와 사회·경제적 변수, 산림정책 관련 변수 등의 영향을 명시적인 함수형태로 도출하는 분석기법을 사용한다. 즉, 보고는 자료의 특성을 적절히 반영할 수 있도록 분할자료 회귀분석(fractional data regression) 기법을 임상구조 분석에 활용하였으며, 그 결과 임상구조 결정요인 및 영향을 명시적으로 파악함은 물론 각 결정요인이 임상구조에 미치는 한계적 영향의 통계적 유의성까지 파악하여 제시하였다. 나아가 추정된 임상모형에 IPCC 기후 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 미래 임상구조의 변화를 지역별로 제시하였다.

II. 분석모형 및 분석자료

산림의 생태적 특성은 크게 산림의 구성(composition), 구조(structure), 기능(function)의 세 가지 개념을 통해 살펴볼 수 있다(Franklin and Spies, 1991). 산림 구성은 산림이 어떠한 요소들로 이루어져 있는지에 대한 것으로서 유전자와 수종 수준부터 임상 및 생태계 수준에 이르기까지 다양한 수준에서 살펴볼 수 있다. 산림 구조의 경우 산림 구성이 어떠한 배열을 가지는지에 대한 것으로 산림 구성요소들의 수직적, 수평적 배열 및 산림 밀도 등이 이 개념에 해당된다. 마지막으로 산림 기능은 산림 구성요소들이 어떻게 상호작용을 하는지에 관한 것이다. 이들 세 가지 개념은 다양한 방식으로 서로 밀접하게 연관되어 있는데, 이 중 산림 구성 개념이 가시적 변화를 관측하는 데 있어 가장 용이하므로 산림 생태계에 미치는 영향을 연구하는 자료로 주로 사용되고 있다.

보고에서는 기후변화를 포함한 여러 가지 여건 변화가 우리나라 산림에 미치는 영향을 살펴보고 미래 기후변화에 따른 산림의 변화를 예측하기 위하여 산림 구성 중에서도 임상(forest type) 수준의 자료를 이용하였다. 이와 같은 임상별 산림 구분은 매년 산림 및 임업동향을 파악하고(산림기본법 제 12조) 산림관리 정책을 수립하기 위해서도 활용되고 있어 유용성 있는 구분 단위라고 할 수 있다.

다양한 임상으로 구성된 각 지역 산림의 임상별 면적 비율을 θ 라고 하자. 각 지역별로 J 개의 임상이 존재한다고 할 때, 지역 i 의 산림에서 임상 j 가 차지하는 비율을 θ_j^i 라 표기할 수 있다. 이는 비율이므로 0과 1 사이의 값을 가지며, 지역 i 의 모든 임상 비율을 합한 값은 1이 된다. 지역 i 에서 임상 j 가 차지하는 비중 θ_j^i 는 지역 i 의 기후변수를 포함하는 자연적 요인(z^i)과 더불어 사회·경제적 특성 및 산림관리 행위를 포함하는 사회 정책적 요인(x^i) 등에 따라 달라지며, 아래의 식 (1)과 같이 모형화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_j^i &= g_j^i(z^i, x^i), i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J \\ 0 &\leq \theta_j^i \leq 1, \sum_{j=1}^J \theta_j^i = 1 \end{aligned} \quad (1)$$

즉, 식 (1)에서 지역 i 가 보유한 임상 j 의 비중인 θ_j^i 는 사람의 간섭이 없을 경우 순전히 자연적 선택에 의해, 사람의 간섭이 있을 경우 자연적 선택과 더불어 사람의 간섭에 영향을 받아 선택이 되며, 지역 i 내에서 선택된 모든 임상 유형 j 에 대한 비중합 $\sum_{j=1}^J \theta_j^i$ 는 1이 되어야 한다.

따라서 본고에서는 기후를 포함한 산림의 임상구조 결정요인을 분석하기 위해 1차적으로 지역 내 임상별 비중을 결정하는 함수를 추정하였으며, 추정과정에서 비중 θ_j^i 가 0과 1사이에 존재하면서도 그 합이 1이 되어야 한다는 분할자료(fractional data 혹은 compositional data)의 특성을 반영하였다. 분할자료의 특성을 반영하여 추정하는 몇 가지 방법이 있지만(Murteira and Ramalho, 2016; Kwon et al., 2015), 본고에서는 그중 가장 간편하면서도 많이 사용되고 있는 분할자료 회귀분석(fractional data regression) 기법을 추정에 사용하였다.

분할자료 회귀분석은 Aitchison (1982)이 제안하고 Fry et al. (1996)이 경제학 분야에 최초로 도입한 것으로서, 다음의 식 (2)와 같이 특정 지역에서의 임상 j 비중인 θ_j^i 와 기준이 되는 또 다른 임상(base type) 비중 $\theta_{j_0}^i$ 의 비율을 취한 후 로그 변환한 값(이하 로그-비율, log-ratio)을 회귀분석의 종속변수 r_j^i 로 사용한다.¹⁾ 여기서 r_j^i 는 로그-비율 형태로 변

형된 종속변수를 의미하며, u_j^i 는 교란항을 나타낸다.

$$r_j^i = \ln\left(\frac{\theta_j^i}{\theta_j^i}\right) = h_j^i(z^i, x^i) + u_j^i, i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J-1 \quad (2)$$

전체 J 가지 종류의 임상이 존재할 경우 식 (2)는 기준 임상(base type) 하나를 제외한 $J-1$ 개의 추정식으로 구성되며, 본고는 식 (2)를 $h_j^i(z^i, x^i) = z^i\alpha_j + x^i\beta_j$ 와 같이 추정 파라미터에 대한 선형식의 형태로 설정하여 추정하였다. 이때, z^i 는 (상수항에 해당하는 1을 포함하는) 자연·환경적 특성 벡터이며 x^i 는 사회 정책적 변수 벡터, α_j 와 β_j 는 두 설명변수 벡터에 부여되는 파라미터 벡터를 나타낸다.²⁾ 지역 i 의 여러 가지 특성이 임상 비중에 미치는 영향은 임상별로 다르게 나타나므로, 두 파라미터 벡터 α_j, β_j 는 임상 j 에 따라 다른 값을 가지게 된다.

위 식의 추정을 통해 로그-비율 형태의 종속변수를 가진 임상모형 추정결과를 도출할 수 있으며, 종속변수를 다시 임상별 비중 θ_j^i 의 형태로 변환시키기 위해 다음과 같은 과정을 거칠 수 있다. 먼저, 식 (2)의 추정식은 $\frac{\theta_j^i}{\theta_j^i} = \exp(z^i\alpha_j + x^i\beta_j)$ 와 같이 변형할 수 있으며, 따라서 $\theta_j^i = \theta_j^i \exp(z^i\alpha_j + x^i\beta_j)$ 의 관계가 성립한다. 이를 분할자료의 특성인 $\sum_{j=1}^{J-1} \theta_j^i = 1 - \theta_j^i$ 에 대입하여 정리하면, 식 (3)과 같이 분할자료 회귀분석 결과를 바탕으로 한 임상별 비중 값 도출이 가능하다.

-
- 1) 식 (1)의 종속변수인 임상별 비중 자료 θ_j^i 는 0과 1사이의 값만을 가져 그 분포범위가 매우 제한되지만, 수식 (2)의 종속변수 r_j^i 는 $-\infty$ 부터 $+\infty$ 까지의 값을 가지는 연속변수이기 때문에 통상적인 회귀분석 추정기법을 사용할 수가 있다.
 - 2) 서문에 밝힌 바와 같이 산림의 구성이 자연적 요인뿐 아니라 사회 정책적 요인에 의해서도 영향을 받는 것이 사실이라면 후자의 변수를 누락하고 회귀식을 추정할 경우 자연적 요인의 영향 추정 파라미터가 편의성(biasness)과 불일치성(inconsistency) 문제를 가지게 될 것이다.

$$\theta_j^i = \frac{\exp(z^i \alpha_j + x^i \beta_j)}{1 + \sum_{j=1}^{J-1} \exp(z^i \alpha_j + x^i \beta_j)}, j = 1, \dots, J-1$$

$$\theta_J^i = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^{J-1} \exp(z^i \alpha_j + x^i \beta_j)} \quad (3)$$

따라서 식 (2)를 통상적인 회귀분석으로 분석한 후, 식 (3)과 같은 변수변환을 통해 도출한 임상별 비중 예측치인 $\hat{\theta}_j^i$ 는 정확하게 분할자료의 특성을 가지게 되며, 이 변환과정은 다항로짓(multinomial logit)의 종속변수 변환과정과 동일하게 나타난다.³⁾ 또한 회귀 분석의 결과를 이용하여 설명변수인 z^i 나 x^i 변화가 임상별 비중에 미치는 영향을 예측할 수 있다.

이러한 분할자료 회귀분석 기법은 공통된 명칭이 적용되고 있는 것은 아니지만 이미 경제학 분야의 많은 연구에서 이용되고 있다. 대표적으로는 Berry (1994)의 차별화된 상품수요모델 분석에 사용되기도 하였으며, Gardner et al. (2010)과 Wu (2005)는 이러한 기법을 통해 미국 토지의 다양한 이용 형태를 결정하는 토지이용모델을 구축하기도 하였다.

본고는 식 (2)와 같이 로그-비율을 이용하는 회귀분석을 시도함에 있어 여러 가지 임상 이 서로 경합하며 자연적, 사회 정책적 여건에 의해 면적 비율이 결정되도록 하였으며, 공간적인 분석단위는 사회 정책적 변수자료의 확보가 가능한 최소 행정구역 단위인 시군으로 하였다. 즉, 전국 163개 시군(2010년 기준 행정구역으로 통일)의 9개년(2001~2009년) 자료(관측치 수=163*9=1,467개)를 통합(pooling)하여 임상모형을 추정하였다.

산림통계 내 시군별 임상(forest type) 면적 자료는 침엽수림(coniferous forest), 활엽수림(broadleaved forest), 혼효림(mixed forest), 죽림(bamboo stand), 무림목지(unstocked forest)로 구분하여 제공되고 있는데, 이와 같은 우리나라의 임상 구분은 FAO (2000)와

3) 앞서 언급하였듯이 분할자료 회귀분석은 기존 모형에 비해 여러 가지 장점을 가지나 기본적으로는 로짓 모형의 방식을 따른다. 따라서 로짓 모형에서 요구되는 무관한 대안간의 독립(Independence of Irrelevant Alternatives, IIA) 가정이 필요하다는 한계가 있다. 본고의 경우 선택대안의 수가 3개에 불과하고, 현실적으로 침엽수림, 활엽수림, 혼효림의 세 가지 유형 외에는 산림유형 대안이 존재하기 어렵기 때문에 IIA문제는 심각하지 않을 것으로 예상된다.

동일한 기준을 따르고 있다.⁴⁾ 우리나라의 경우 임상 면적에서 죽림과 무림목지가 차지하는 비율이 매우 낮고(1995~2010년 평균 3% 미만) 아예 존재하지 않는 지역 또한 많으므로, 본고는 이 두 가지 임상을 제외한 침엽수림, 활엽수림, 혼효림 자료만을 임상모형의 추정에 활용하였다. 종속변수를 구성하는 θ_C^i , θ_B^i , θ_M^i 은 각각 지역 i 의 산림에서 침엽수림, 활엽수림, 혼효림이 차지하는 비중을 의미하며, 활엽수 비중 θ_B^i 를 기준임상(base type)으로 하여 보다 구체적으로 다음의 식 (4)와 같은 분할자료 회귀분석 모형을 설정하였다.

$$r_C^i = \ln\left(\frac{\theta_C^i}{\theta_B^i}\right) = \alpha_{C0} + z^i\alpha_C + x^i\beta_C + u_C^i$$

$$r_M^i = \ln\left(\frac{\theta_M^i}{\theta_B^i}\right) = \alpha_{M0} + z^i\alpha_M + x^i\beta_M + u_M^i, i = 1, \dots, 163 \quad (4)$$

임상모형 내 설명변수로는 온도, 강수와 같은 기후 변수와 고도 및 산림률과 같은 지형변수를 임상 선택에 영향을 미치는 자연적 요인(z^i)으로 반영하였고, 인구밀도, 임도 밀도, 사유림 비율, 시업지 비율, 벌채재적 변수를 임상 선택에 영향을 미치는 사회 정책적 요인(x^i)으로 반영하였다. 임상모형 추정에 사용한 이들 자료의 기초통계량 및 출처는 <표 1>과 <표 2>에 제시하였다.⁵⁾

4) 침엽수의 수관점유율(canopy area rate)이 75% 이상인 숲을 침엽수림, 활엽수의 수관점유율이 75% 이상인 숲을 활엽수림으로 구분하며, 침엽수와 활엽수 둘 중 어느 것도 75%를 넘지 못하는(25%~75%를 차지) 숲의 경우 혼효림으로 구분한다. 또한 대나무나 팜(palm), 양치식물의 수관점유율이 75%를 넘는 경우를 죽림으로 보며, 수관점유율이 매우 낮아 수목이 자라고 있지 않는 경우 무림목지로 구분한다.

5) 본고에서 최종적으로 임상모형 추정에 사용한 설명변수 외에도 기타 기후변수 및 지역 평균 경사 등의 자연적 요인과 조림면적, 목재가격 등의 정책 및 경제적 요인을 추가적으로 반영하고자 하였으나, 여타 설명변수와의 공선성이 높게 나타나거나 임상선택에 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 나타나 이들 변수를 제외하고 모형을 구축하였다. 한편 산림자원의 이용가치에 해당하는 목재가격 변수가 유의하지 않아 설명변수로 포함되지 못한 것에는 여러 가지 이유가 있을 수 있는데, 먼저 지역별 목재가격이 아닌 연도별 가격 자료만이 존재하여 동일년도 모든 지역에 같은 가격자료가 적용됨에 따라 해당 변수가 유의하지 않게 나왔을 수 있다. 또한 산림자원의 자율적인 이용보다는 산림보호에 초점을 맞춘 우리나라의 산림정책상 벌채를 포함한 산림자원의 이용은 가격과 같은 시장원리보다 정부 규제 등에 영향을 많이 받기 때문에 목재가격 변수가 임상변화에 영향을 미치지 않은 것이라 볼 수 있다.

〈표 1〉 추정자료의 기초통계량

변수	단위	평균	표준편차	최솟값	최댓값
침엽수림 비율	%	46.47	17.91	4.83	89.15
활엽수림 비율	%	23.93	16.16	1.22	79.84
혼효림 비율	%	29.60	13.86	2.73	73.40
연강수량	100mm	13.98	3.48	6.95	28.19
여름철 최고기온	°C	28.07	1.38	22.55	31.02
고도	10m	20.90	16.26	1.50	90.20
산림률	%	49.83	13.85	16.84	83.75
인구밀도	천 명/km ²	1.01	2.44	0.02	16.94
임도밀도	m/ha	3.24	3.07	0	24.11
사유림 비율	%	75.88	19.15	23.29	98.83
시업지 비율	%	70.40	32.44	0	98.74
벌채재적	1000m ³	10.50	10.70	0	96.22
침엽수림 비율 / 활엽수림 비율	-	4.65	7.48	0.10	64.14
혼효림 비율 / 활엽수림 비율	-	2.41	2.91	0.04	18.53

〈표 2〉 추정자료의 출처

변수	변수 설명	자료 출처(사용 자료)
침엽수림 비율	산림 면적대비 침엽수림 비율	산림청, 산림기본통계(지역별 침엽수림, 활엽수림, 혼효림 면적)
활엽수림 비율	산림 면적대비 활엽수림 비율	
혼효림 비율	산림 면적대비 혼효림 비율	
연강수량	일강수량의 누적	기상청(일강수량)
여름철 최고기온	6-8월 일최고기온의 평균	기상청(일최고기온)
고도	지역 평균 해발고도	국립환경과학원, CCGIS ⁶⁾ (지역별 해발고도)
산림률	지역 면적대비 산림면적 비율	산림청, 산림기본통계 (지역별 총 산림면적) 국토교통부, 지적통계연보 (지역별 면적)

6) 사용된 자료 중 CCGIS 자료인 지역별 해발고도와 지역별 임도연장 자료는 2010년 자료만이 존재하여, 시간에 따른 지역별 고도와 임도연장에 변화가 없다는 가정 하에 이를 2001년부터 2009년까지 동일하게 적용하였다.

〈표 2〉 추정자료의 출처 (Continued)

변수	변수 설명	자료 출처(사용 자료)
인구밀도	지역 단위면적당 인구 수	행정자치부, 주민등록인구현황 (지역별 인구 수) 국토교통부, 지적통계연보 (지역별 면적)
임도밀도	산림 단위면적당 임도연장	국립환경과학원, CCGIS (지역별 임도연장) 산림청, 산림기본통계 (지역별 총 산림면적)
사유림 비율	산림 면적대비 사유림면적 비율	산림청, 산림기본통계 (지역별 사유림면적, 총 산림면적)
시업지 비율	산림 면적대비 시업지면적 비율	산림청, 산림기본통계 (지역별 시업지면적, 총 산림면적)
벌채재적	해당연도 총 벌채재적 ⁷⁾⁸⁾	산림청, 목재수급통계 (지역별 입목벌채허가실적) 산림청, 산림기본통계 (지역별 총 산림면적)

본고의 임상모형에 포함된 자연적 요인들의 경우 기후변화에 따른 산림 구성 변화를 연구한 여타 연구들이 제시한 기후 및 지형변수를 참고하여 구성한 것이며, 모형의 분석 단위인 행정구역 단위로 적용할 수 있는 자료를 활용하였다. 이 중 산림률의 경우 선행연구에 제시되지는 않았으나 본고의 임상모형에는 지역의 지형적 특성을 나타내는 변수로 포함하였다.⁹⁾

반면 사회 정책적 요인이 임상 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 따로 찾아보기 힘들며, 본고는 다음과 같은 이유에서 여러 가지 산림관리 관련 요인들과 지역 특성변수를 임상 변화에 영향을 미칠만한 사회 정책적 요인으로 선정하였다. 먼저, 임도의 경우 효율적인 산림경영을 위해 법적으로 관리되는 대표적인 산림기반시설(산림자원법 제 9조)

7) 국유림 벌채재적 자료는 지방 산림청 단위로 되어 있어 행정구역이 명확히 나뉘지 않고, 사유림 벌채 비중이 80%를 넘으므로 사유림 벌채재적 자료를 해당 지역의 벌채재적 자료로 사용하였다.

8) 시도 내에서 해당 시군의 산림면적이 차지하는 비중을 이용하여 시도 단위의 자료를 시군 단위의 벌채재적 자료로 변환하여 사용하였다.

9) 산림을 제외한 지역이 대부분 개발지인 것을 고려할 때, 이는 지역의 도시화 정도를 나타내는 지역특성변수로서 사회적 요인의 성격을 지니기도 한다.

이므로, 전반적인 산림관리 효율성을 나타내는 정량적인 지표로 임도밀도를 사용하였다. 또한 사유림과 시업지 비율을 변수로 사용함으로써 산림관리의 주체 및 관리목적이 산림 구성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고자 하였다. 연간 벌채재적의 경우 산림의 물리적 이용을 통해 산림 구성에 직접적으로 외생적 충격을 가하는 변수이기 때문에 설명변수로 선정하였으며, 지역특성을 반영하는 변수로 인구밀도 또한 모형에 포함하였다. 임도밀도가 높아 산림관리의 효율성이 개선되고 사유림과 시업지 비율이 높아져 산림경영방식 및 경영목적에 가해지는 제약이 완화될 경우 임목 생산 용도로 선호되는 수종인 침엽수의 비율이 높아질 것으로 예상되며, 해당년도의 벌채재적이 높아질 경우 임목 생산 용도로 선호되는 침엽수의 비중이 일시적으로 낮아질 것으로 예상된다.

III. 분석 결과

1. 임상모형 추정 결과

본고에서는 다양한 자연적 요인과 사회 정책적 요인들이 우리나라 산림의 임상변화에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였으며, 그 결과는 다음의 <표 3>과 같다.¹⁰⁾ 모형 내 거의 모든 변수가 유의수준 1%에서 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며, 유의수준 5%에서는 모형 내 모든 변수가 임상변화에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다.¹¹⁾

10) 본고의 모든 추정과 시뮬레이션 및 지도화 작업은 Stata 14를 이용해 수행하였다.

11) 설명변수가 활엽수림 대비 침엽수림 면적과 활엽수림 대비 혼효림 면적에 미치는 영향의 부호가 동일하게 나타나는 것은 침엽수림, 혼효림, 활엽수림의 구분이 각각 침엽수의 수관점유율이 75% 이상(활엽수 25% 이하), 25~75%(활엽수 25~75%), 25% 미만(활엽수 75% 이상)일 때로 구분되는 임상의 정의와 관련이 있다. 이러한 정의 하에서 만약 설명변수가 숲 내의 침엽수를 늘리는 방향으로 작용할 경우 활엽수림 대비 침엽수림 면적과 활엽수림 대비 혼효림 면적에 미치는 영향 모두 양의 값을 가지게 되며, 반대로 설명변수가 숲 내의 활엽수를 늘리는 방향으로 작용할 경우 활엽수림 대비 침엽수림 면적과 활엽수림 대비 혼효림 면적에 미치는 영향 모두 음의 값을 가지게 된다.

〈표 3〉 모형 추정결과

설명변수	$\ln\left(\frac{\theta_C^i}{\theta_B^i}\right)$		$\ln\left(\frac{\theta_M^i}{\theta_B^i}\right)$	
	추정계수	Z 값	추정계수	Z 값
연강수량	-0.0406***	-5.19	-0.0612***	-7.38
여름철 최고기온	-0.1560***	-6.15	-0.1041***	-3.86
고도	-0.0147***	-6.26	-0.0099***	-3.98
산림률	-0.0183***	-9.16	-0.0047**	-2.23
인구밀도	-0.1022***	-7.84	-0.0367***	-2.65
임도밀도	0.0716***	8.03	0.0268***	2.83
사유림 비율	0.0108***	5.46	0.0090***	4.29
시업지 비율	0.0163***	16.22	0.0100***	9.33
벌채재적	-0.0222***	-9.50	-0.0323***	-13.00
상수항	5.1342***	6.91	3.4799***	4.41
R ²	0.4349		0.2252	
관측치 수	1,467		1,467	

주: ***는 1%, **는 5% 수준에서 통계적으로 유의함을 의미함

그러나 위 임상모형의 종속변수는 회귀모델이 가져야 할 여러 가지 가정들을 만족시키기 위해 각 임상별 선택확률을 로그-비율로 변환한 형태이다. 그렇기 때문에 <표 3>의 추정계수들을 설명변수가 임상선택확률에 미치는 영향으로 그대로 해석할 수는 없으며, 추정계수의 부호를 통해 설명변수가 임상선택확률에 어떠한 방향으로 영향을 미치는지 정도를 추측할 수 있다. 따라서 설명변수가 지역 내 각 임상 비율에 실제로 얼마만큼의 직접적인 영향을 미치는지 알아보기 위해서는 로그-비율 형태의 종속변수를 임상별 비율 형태로 복원하는 식 (3)과 같은 변환과정을 추가적으로 실시해야 한다.

식 (4)에서 제시한 두 식의 임상모형 추정 예측값(predicted value)을 순서대로 $\widehat{r}_C^i, \widehat{r}_M^i$ 이라고 하자. 이때, 추정된 로그-비율 값인 $\widehat{r}_C^i, \widehat{r}_M^i$ 을 바탕으로 침엽수림, 혼효림, 활엽수림의 세 가지 임상면적 비율을 도출하기 위해서는 구체적으로 다음의 식 (5)를 이용할 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_C^i &= \frac{\exp(\hat{r}_C^i)}{1 + \exp(\hat{r}_C^i) + \exp(\hat{r}_M^i)} \\ \hat{\theta}_M^i &= \frac{\exp(\hat{r}_M^i)}{1 + \exp(\hat{r}_C^i) + \exp(\hat{r}_M^i)} \\ \hat{\theta}_B^i &= \frac{1}{1 + \exp(\hat{r}_C^i) + \exp(\hat{r}_M^i)}\end{aligned}\quad (5)$$

나아가 식 (5)를 각 설명변수로 미분함으로써, 임상별 면적 비율에 각각의 설명변수가 미치는 직접적인 한계효과(marginal effect)를 도출할 수 있다. 임상별 비율에 영향을 미치는 모형 내 모든 설명변수가 163개 지역, 9개년 자료의 평균값을 기준으로 한 단위 변화하였다고 가정할 때¹²⁾ 각 임상의 면적 비율 변화를 계산하면 <표 4>와 같다.

<표 4> 설명변수 변화에 따른 임상별 비율의 한계효과

변수(변화 단위)	침엽수림 비율	혼효림 비율	활엽수림 비율
연강수량(100mm)	-0.0020***	-0.0114***	0.0134***
여름철 최고기온(1°C)	-0.0122***	-0.0164***	0.0287***
고도(10m)	-0.0011***	-0.0016***	0.0027***
산림률(1%)	-0.0017***	-0.0004	0.0021***
인구밀도(천 명/km ²)	-0.0091***	-0.0042	0.0133***
임도밀도(m/ha)	0.0063***	0.0032*	-0.0095***
사유림 비율(%)	0.0008***	0.0020***	-0.0023***
사업지 비율(%)	0.0013***	0.0034***	-0.0028***
벌채재적(1000m ³)	-0.0012***	-0.0030***	0.0071***

주: ***는 1%, **는 5%, *는 10% 수준에서 통계적으로 유의함을 의미함

<표 4>에 제시된 한계효과를 통해 침엽수림 비율과 혼효림 비율에 각 설명변수가 미치는 영향을 살펴보면, 종속변수 복원에 따라 설명변수가 미치는 영향의 크기는 달라졌

12) 기후변수인 연강수량과 여름철 최고기온의 경우, 본고의 후반부에서 미래 기후(2040년대, 2090년대) 하에서의 임상면적과 비교를 위해 9개년 자료의 평균값이 아닌 2001~2010년의 10개년 자료 평균값을 사용하였다.

으나 그 방향성이 <표 3>의 임상모형 추정결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 도출된 한계효과는 추정 파라미터에 대한 비선형함수이기 때문에, 그 통계적 유의성을 검정하기 위해 추가적으로 Krinsky and Robb (1986)이 제시한 방법을 이용하였다. 즉, <표 3>에서 제시한 임상모형 추정계수의 분산을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 1,000회 시행하고, 신뢰구간을 이용해 한계효과의 크기가 통계적으로 유의한지를 확인하는 방식으로 통계적 유의성을 검정하였다. 결과적으로 거의 모든 설명변수들이 각 임상비율에 미치는 한계효과가 통계적으로 유의하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

먼저 기후 및 여타 자연·환경적 요인이 임상구조에 미치는 영향을 살펴보면, 현재 상태에서 연강수량이 늘고 여름철 온도가 높아지게 될 경우 침엽수와 혼효림의 비중은 줄고 활엽수림 면적 비중이 높아지게 된다. 이는 침엽수가 활엽수에 비해 더 적은 강수량 하에서도 잘 서식하지만 열 피해에는 약하다는 특징과 일치하는 결과라 할 수 있다. 이때 기후변수 변화에 따른 임상비중 감소폭은 침엽수림보다 혼효림에서 크게 나타나고 있는데, 이는 임상 내 활엽수의 비율이 침엽수림에 비해 비교적 높게 나타나는 혼효림¹³⁾에서 활엽수종이 더욱 빠르게 확산되기 때문에 혼효림에서 활엽수림으로의 전환이 더 빠르게 나타난다고 해석할 수 있다.

또한 자연환경 변수 중 산림관리의 용이성과 관련된 여러 변수들이 임상구조에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이는 산림관리가 용이한 지역에서 일반적으로 목재자원으로서의 가치가 활엽수에 비해 높은 침엽수 우선의 조림이 진행되어왔다는 점을 반영하는 것이라고 할 수 있다.¹⁴⁾ 이와 같은 맥락에서 지역 평균고도가 낮고 지역 내 산림 비중이 낮아 산림관리가 더 용이하고 많은 자원을 산림관리에 투입할 수 있는 여건이 조성될수록 침엽수림과 혼효림 비중이 높아지며, 활엽수림 비중은 낮아지는 것을 확인할 수 있다.¹⁵⁾

13) 침엽수의 수관점유율(canopy area rate)이 75% 이상인 숲을 침엽수림, 활엽수의 수관점유율이 75% 이상인 숲을 활엽수림으로 구분하며, 침엽수와 활엽수 둘 중 어느 것도 75%를 넘지 못하는(25~75%를 차지) 숲의 경우 혼효림으로 구분한다.

14) 원목은 직경의 크기와 결점에 따라 재종이 구분되며, 특용재급, 1등급, 2등급, 3등급, 원주재급, 원료재급과 같은 재종에 따라 차별적인 가격이 형성되어 있다. 활엽수의 경우 목재로서의 가치가 낮아 원목 이용을 목적으로 벌채되는 경우가 적으며, 원목시장에서도 1, 2등급이 거래된 경우를 찾아보기 힘들고 대부분이 3등급 또는 원료재급으로 거래되고 있다. 이는 임산물 가격정보시스템(<https://fps.kofpi.or.kr>)의 원목시장 가격자료에서 확인할 수 있다.

15) 지역 평균고도의 경우 고도가 상승할수록 기온이 낮아져 침엽수림 비율을 높인다고 생각할 수도 있

아울러 사회 정책적 변수 중에서도 인간 행위에 의한 산림관리 관련 변수들이 존재하는데, 이들 변수들 또한 산림관리의 편의성을 높이거나 목재자원이용 실현 가능성을 높이는 경우 침엽수림 비중이 높아지는 것으로 나타났다. 즉, 산림 단위면적당 임도연장이 길고, 사유림 및 시업지 비율이 높아 산림의 자원으로서의 이용 및 관리가 활발하게 이루어지는 여건이 조성될수록 침엽수림과 혼효림의 비중이 높아지고 활엽수림 비중이 낮아지는 것으로 나타났다. 한편 별채재적이 커질수록 침엽수림과 혼효림 비중이 낮아지는 것으로 나타나는데, 이는 목재자원 이용을 위한 별채의 대부분이 침엽수종을 대상으로 이루어지기 때문이라고 할 수 있다.

마지막으로 여타 사회·경제적 변수 중 지역 인구밀도의 경우 침엽수림과 혼효림의 비중을 낮추고 활엽수림의 비중을 높이는 요인으로 작용하는데, 이는 인구밀도가 높은 도시지역의 경우 산림의 자원적인 이용가치보다도 그늘형성 및 경관조성의 역할이 더 중요하게 작용하기 때문에 활엽수림의 비중이 높은 것으로 해석할 수 있다.

2. 기후변화에 따른 임상변화 예측

앞서 <표 3>에서 제시한 임상모형 추정식을 바탕으로 여러 가지 자연적, 사회 정책적 변수가 임상별 비중에 어떤 영향을 미치는지를 살펴볼 수 있었다. 본 절에서는 앞서 추정된 임상모형을 이용하되, 기후변화가 미래 우리나라 임상에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보기 위해 임상모형 내에서 연강수량과 여름철 최고기온 변수를 제외한 나머지 설명변수인 지형 및 사회 정책적 변수에는 변화가 없다고 가정하였다. 미래 임상변화 예측에 사용된 기후변수는 IPCC의 시나리오 중 네 가지의 RCP 시나리오(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5)이며, 우리나라 기상청에서 제공하는 시군구 일별 기후자료를 이용하였고 이 중 구 단위 자료의 경우 평균값을 이용하여 시군 기후변수로 변환하여 사용하였다. 각각의 시나리오별 기후변수의 기초통계량은 <표 5>와 같다.

다. 실제로 다른 설명변수 없이 고도변수만을 임상모형에 넣을 경우 침엽수림 비율을 높이는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 본고의 임상모형에서는 여름철 최고기온을 설명변수로 투입하여 기온에 의한 임상변화와 고도 자체에 의한 임상변화의 영향이 분리되어 나타나고 있으며, 이 경우 고도는 침엽수림 비율과 음의 상관관계를 나타내는 것으로 나타났다.

〈표 5〉 시나리오별 미래 기후변수의 변화

		2000s (2001- 2010)	2040s (2040~2049)				2090s (2090~2099)			
			RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
연강 수량 (100mm)	평균	14.12	13.23	14.83	13.87	13.46	14.46	12.56	13.98	16.52
	표준편차	3.45	3.39	3.07	3.50	3.20	2.93	3.28	3.36	4.83
	최솟값	6.95	5.37	7.86	6.44	6.59	7.05	3.94	5.65	7.76
	최댓값	28.19	26.48	25.02	30.18	32.47	24.81	28.48	27.57	58.15
여름철 최고기온 (1°C)	평균	28.18	29.86	29.14	28.83	29.98	29.85	30.84	31.34	33.17
	표준편차	1.39	1.51	1.68	1.44	1.57	1.29	1.64	1.62	1.63
	최솟값	22.55	22.87	21.62	23.19	23.82	23.79	24.66	25.17	27.70
	최댓값	31.02	33.21	33.69	32.38	33.91	32.73	34.80	34.87	37.21

〈표 5〉의 시나리오별 미래 기후변수 변화를 살펴보면, 여름철 최고기온의 경우 모든 RCP 시나리오에서 2000년대와 비교하여 높아지는 것을 확인할 수 있다. RCP 2.6을 제외한 나머지 시나리오의 경우, RCP 숫자가 더 클수록 평균 온도가 더 높게 나타나며 2040년대에 비해 2090년대의 평균 온도가 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 연강수량의 경우 온도 변수와는 달리 시나리오와 시간 모두에서 일관된 방향성이 나타나지 않고 있었다.

본고에서는 기후변화가 우리나라 산림 구성을 어떻게 변화시키는지 알아보기 위해 임상모형에 투입될 기후변수로 〈표 5〉의 시나리오별 미래 기후변수를 사용하였으며, 임상모형의 종속변수를 도출한 후 이를 임상별 면적비로 환산함으로써 미래 각 지역의 임상별 산림면적을 계산하였다. 그 결과 〈표 6〉과 같이 2000년대와 2040년대, 2090년대의 총 임상별 산림면적 및 비율 변화를 살펴볼 수 있었으며, 지역단위(시군) 임상분석의 경우 온도 변수의 일관성이 존재하는 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 시뮬레이션을 시행하였다(〈그림 2〉, 〈그림 3〉).

<표 6> 기후변화에 따른 임상별 산림면적 및 비율 변화 (단위: 천 ha(%))

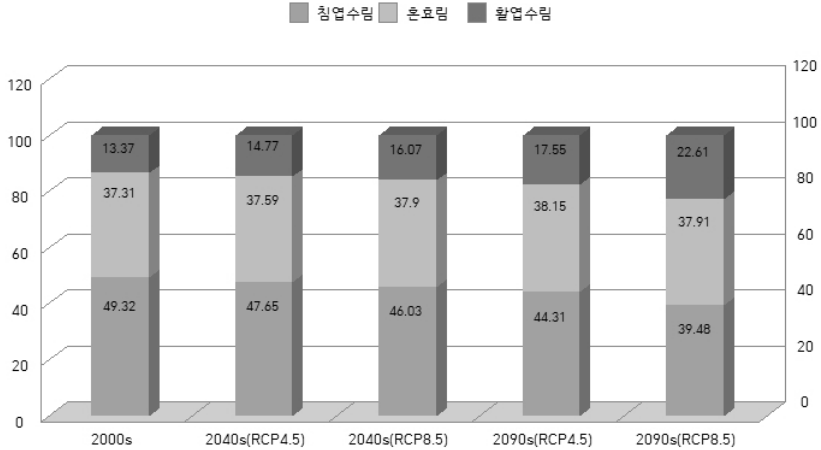
	2000s (2001-2010)	2040s (2040~2049)				2090s (2090~2099)			
		RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
침엽수림	2,454 (49.32)	2,300 (46.22)	2,371 (47.65)	2,395 (48.12)	2,291 (46.03)	2,298 (46.18)	2,205 (44.31)	2,251 (43.24)	1,964 (39.48)
혼효림	1,856 (37.31)	1,887 (37.92)	1,870 (37.59)	1,869 (37.57)	1,886 (37.90)	1,884 (37.86)	1,898 (38.15)	1,897 (38.13)	1,887 (37.91)
활엽수림	666 (13.37)	789 (15.86)	735 (14.77)	712 (14.31)	800 (16.07)	794 (15.96)	873 (17.55)	927 (18.63)	1,125 (22.61)

먼저, <표 6>은 각각의 기후 시나리오하에서 임상별 총 산림면적과 그 비율이 미래에 어떻게 변화할지를 보여준다. 이때 <표 6>에 제시된 미래의 임상별 산림면적은 2010년의 지역별 산림면적에 변화가 없다는 가정하에서 변화된 임상별 비중을 적용하여 도출한 것이라고 할 수 있다. <표 5>에서 살펴본 기후 시나리오에서는 시나리오 간 기후변수들의 일관성뿐만 아니라 시간에 따른 일관성 또한 잘 드러나지 않았으나, <표 6>의 결과에서는 시간이 지날수록 침엽수림 면적이 줄고 활엽수림 면적이 증가하는 비교적 일관된 결과가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 미래의 세부 기후변수는 기후변화가 일어나는 방향이나 정도가 변수별, 시나리오별로 차이가 존재하지만, 결과적으로 임상구조에 미치는 영향의 경우 모든 시나리오하에서 침엽수림 비중이 줄고 활엽수림 비중이 늘어나는 공통적인 방향성을 보여주고 있다. 이는 기후변화에 따른 소나무림 적정 생육 범위 변화를 연구한 국립산림과학원(2005)와 기후변화에 따른 임상별 산림 취약성을 연구한 한화진(2007) 등 기후변화가 향후 우리나라의 침엽수림에 대한 피해를 늘릴 것이라는 여타 생태학적 선행연구들의 결과와 일치하는 결과라고 할 수 있다.

나아가 <그림 1>은 <표 6>의 결과 중 RCP 4.5와 RCP 8.5의 결과를 보여주고 있는데, RCP 4.5에 비해서는 RCP 8.5가, 2040년대보다는 2090년대의 경우가 침엽수림 비중이 작고 활엽수림 비중이 커지는 것을 확인할 수 있다. 반면 총 산림면적에서 혼효림이 차지하는 비중은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 결과적으로 2000년대에 비해 연강수량이 240mm 높고 여름철 최고기온이 5도 높은 2090년대의 RCP 8.5 기후여건하에서, 2000년대에 비해 침엽수림이 총 산림면적의 10% 정도 감소하고 활엽수림이 10% 정도

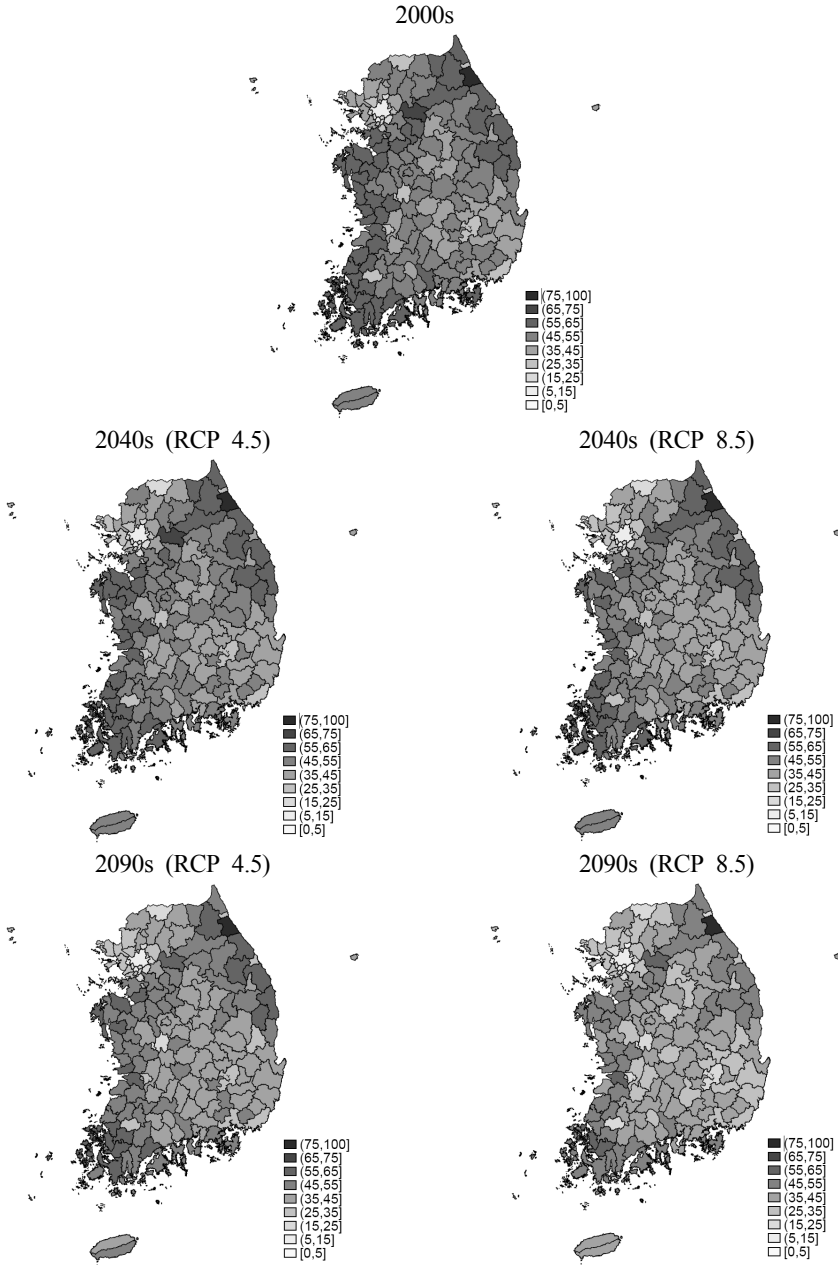
증가하는 큰 변화가 일어날 것임을 예측할 수 있다.

<그림 1>

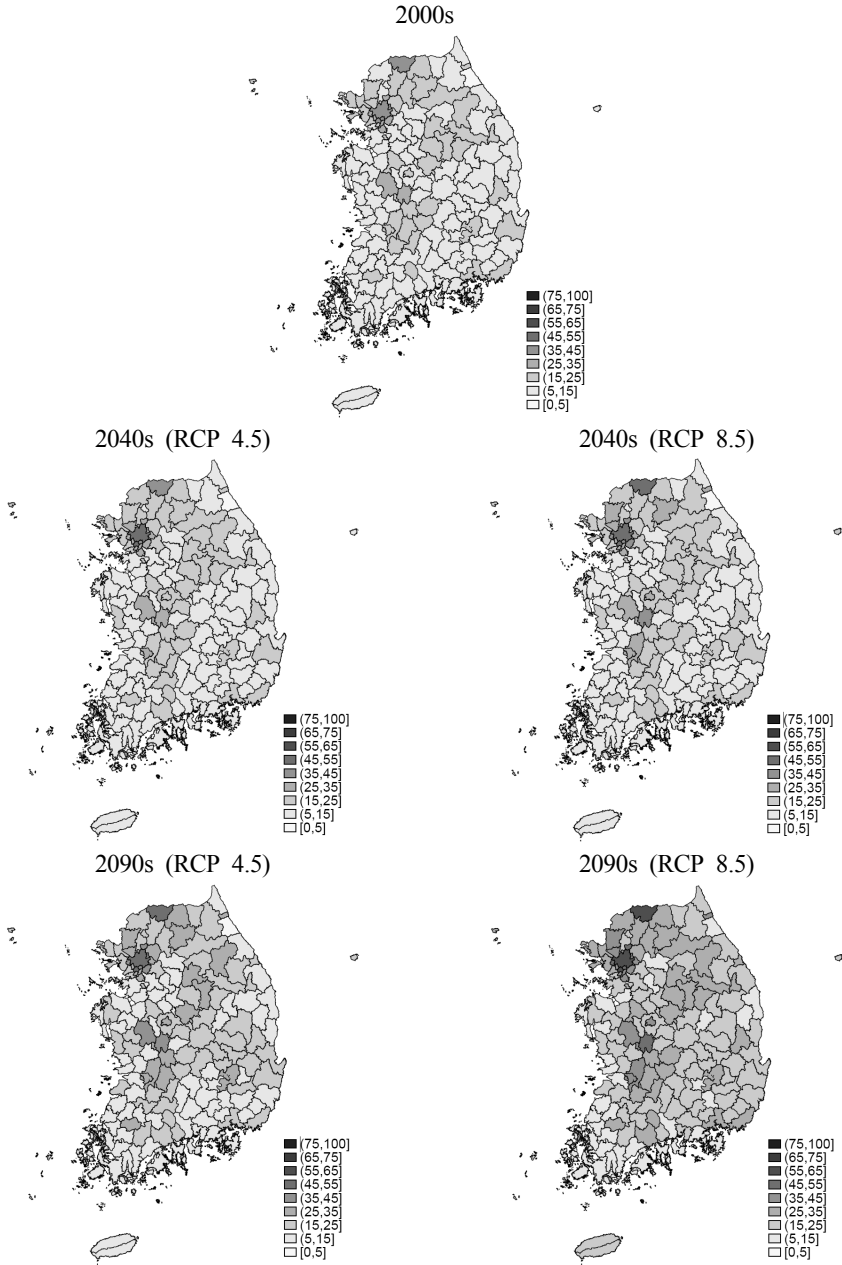


다음으로 기후변화에 따라 우리나라 산림의 임상별 비율이 어떻게 변화할지를 지역 단위(시군)로 분석한 결과는 <그림 2>, <그림 3>과 같다. 이는 시간별 시나리오별 임상 비율의 변화를 지역적으로 분석한 결과를 보여주고 있으며, 앞서 언급하였듯이 온도 변수의 일관성이 존재하는 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 시뮬레이션을 시행하였다. 먼저 <그림 2>와 <그림 3>에서 현재의 2000년대 임상비율을 살펴볼 때 동부 산림지역과 서부 해안지역에 침엽수림 비중이 높게 나타나고 있으며 반대로 내륙지역에는 활엽수 비중이 높게 나타남을 확인할 수 있다.

〈그림 2〉 기후변화에 따른 지역별 산림면적 대비 침엽수림 비율 변화(단위: %)



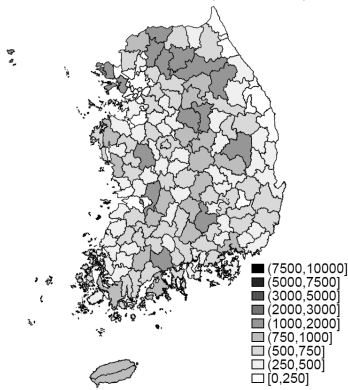
〈그림 3〉 기후변화에 따른 지역별 산림면적 대비 활엽수림 비율 변화(단위: %)



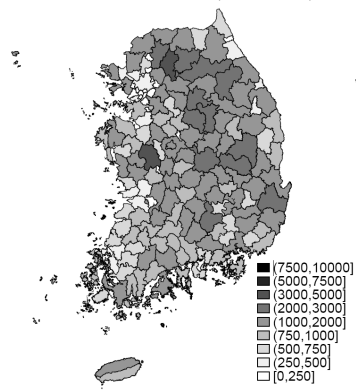
이처럼 지역별로 현재의 임상별 비중이 다를 뿐만 아니라 지역별 산림면적 및 미래 기후여건 변화 정도가 다르므로 지역별 이질성을 고려한 임상변화 예측이 필요하다고 할 수 있는데, 침엽수림의 경우 기후변화로 인해 전국적으로 고르게 그 비중이 감소될 것으로 예측되지만 현재의 침엽수림 비중이 높은 서해안지역과 동부 산림지역보다는 내륙 지역의 비중 감소율이 다소 높게 나타나는 것으로 보인다. 활엽수림의 비중 역시 전국적인 증가가 예상되나 현재의 활엽수 비중이 높은 내륙지역의 비중 증가율이 조금 더 높은 것을 확인할 수 있다.

〈그림 4〉 기후변화에 따른 지역별 침엽수림 감소 면적(단위: ha)

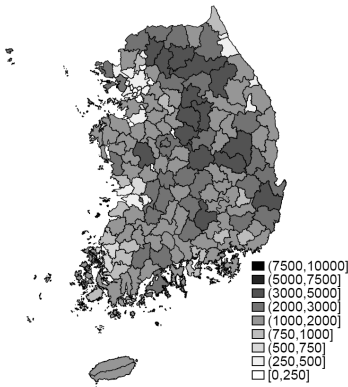
2000s ~ 2040s (RCP 4.5)



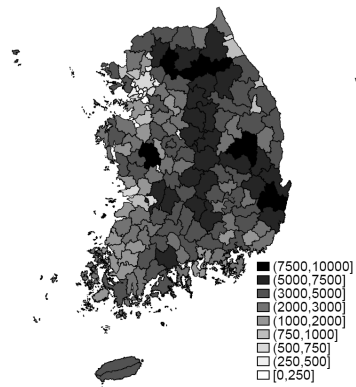
2000s ~ 2040s (RCP 8.5)



2000s ~ 2090s (RCP 4.5)



2000s ~ 2090s (RCP 8.5)



마지막으로, <그림 4>는 지역별 산림면적 및 초기 임상 비율, 그리고 미래 기후여건의 이질적 변화를 모두 고려하여 2000년대 대비 침엽수림의 실제 감소면적을 나타낸 결과이다. 2000년대에 침엽수림 비중이 높게 나타나고 있는 동부 산악지대와 서부 해안지대보다, 내륙지역 침엽수림의 절대적인 감소면적이 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 기후변화는 우리나라에서 침엽수림 비중이 현재에도 낮은 곳에 해당하는 지역의 침엽수림 면적을 더욱 줄여 지역 간 침엽수 임상 비율의 차이를 더 심화시키는 방향으로 영향을 미칠 것임을 예측할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본고는 기후변화에 따른 산림 변화를 연구한 선행연구들에서 자연적 요인으로만 구성된 모형을 사용한 것과 달리 추가적으로 여러 가지 사회 정책적 변수들을 반영하여 각 설명변수에 따른 임상변화의 영향을 실증적으로 분석하였다. 우리나라 산림조성의 역사적 배경과 현재까지의 산림정책 기조를 고려할 때 이러한 사회 정책적 요인을 반영하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 사회 정책적 요인의 반영은 해당 변수들이 산림 구성에 미치는 영향력을 규명한다는 점에서 의미가 있는 동시에 임상모형 추정결과에 대한 신뢰도를 높이는 데 중요한 역할을 한다.

본고에서 사용한 분석기법은 지역별 임상 비중자료의 분할자료로서의 특성을 반영할 수 있는 분할자료 회귀분석을 사용하였으며, 모형의 추정 결과 기후 및 지형 변수와 같은 자연적 요인뿐만 아니라 인구밀도와 같은 사회적 요인, 산림 관리와 관련된 여러 가지 정책적 요인 등이 임상변화에 미치는 영향이 매우 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

또한 기후변화로 인해 임상구조의 변화가 예상되는 상황에서 본고는 추정된 임상모형을 이용하여 IPCC의 다양한 RCP 시나리오 하에서 2040년대와 2090년대의 우리나라 산림 구성이 어떻게 변화할지를 지역별 임상비율 변화를 통해 살펴보았다. 추정된 임상모형과 기후 시나리오를 바탕으로 도출된 미래 임상별 비율변화를 살펴볼 때, 2000년대에 산림면적의 절반정도를 차지했던 침엽수림의 비중이 기후변화로 인해 상당한 정도로 축소될 것으로 예측되었다. 혼효림 비중에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 따라서 감소된 침엽수림의 비중만큼 우리나라 산림에서 활엽수림의 비중이 크게 높아질

것이 예상된다. 기후변화에 따른 미래의 임상변화는 지역별로도 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났는데, 현재 침엽수림의 비중이 높은 동부 산악지대나 서부 해안지대보다도 현재에도 활엽수림의 비중이 높은 내륙지역에서 침엽수림의 활엽수림으로의 대체가 더 크게 나타날 것으로 예측되었다. 즉, 기후변화는 우리나라의 지역별 임상비율 차이를 더 크게 만드는 방향으로 작용하는 것으로 나타났다. 이처럼 사회 정책적 요인을 반영한 보다 정확한 임상모형의 구축과 이를 바탕으로 한 지역별 임상변화 예측은, 지역별 이질성을 고려한 산림부문 기후변화 대응정책에 있어 의미 있는 역할을 할 것으로 기대된다.

본고가 제시하는 추정모형과 시뮬레이션 결과는 현재 관련 자료의 해상도나 정확도에 한계가 있어 더 엄밀한 분석의 시행이 어려우나, 향후 기후변화가 산림분야에 미치는 시장적, 비시장적인 경제적 가치와 가능한 적응조치의 편익 등을 분석하는 데에도 사용될 수 있을 것으로 보인다. 일단 본고가 예측한 침엽수림의 전반적 비중 감소는 침엽수의 상대적으로 높은 목재가치를 고려할 때 기후변화가 우리나라 산림자원의 시장적 가치를 감소시킬 것임을 의미한다. 그러나 현재 임상별 생태적 기능이나 경관기능 등의 가치가 충분히 파악되지 않은 상태이므로 이에 대한 추가 연구 등을 통해 기후변화가 산림분야에 미치는 경제적 영향을 종합적으로 파악하는 시도가 필요할 것이다.

[References]

- 구경아·공우석·김종규, “한반도 상록활엽수의 지리적 분포와 기후요소”, 대한지리학회지, 제36권, 제3호, 2001, pp. 247~257.
- 국립산림과학원, 『지구온난화, 기후변화협약, 산림』, 2005.
- 기상청, 『한반도 기후변화 전망보고서』, 2012.
- 김경민·김은숙·이정빈·이승호·박기호·허준·임정호, 『국가 산림자원조사 자료와 RS/GIS기술을 이용한 산림탄소지도 제작 모델 개발』, 국립산림과학원, 2014.
- 김재욱·이동근, “지역기후모형을 이용한 산림식생의 취약성 평가에 관한 연구”, 한국환경보존학회지, 제9권, 제5호, 2006, pp. 32~40.
- 변정연·이우균·최성호·오수현·유성진·권태성·성주한·우재욱, “시공간 정보기반 산

- 림 생태계의 기후변화 취약성 평가”, 대한원격탐사 학회지, 제28권, 제1호, 2012, pp. 159~169.
- 산림청, 『2015년 임업통계연보』, 제45호, 2015.
- 산림청, 멸종위기 한국 침엽수, 지속 가능한 보전 추진, [online] https://www.forest.go.kr/newkfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttId=3098891&bbsId=BBSMSTR_1036&pageUnit=10&pageIndex=16&searchtitle=title&searchcont=&searchkey=&searchwriter=&searchWr=&ctgryLrcls=&ctgryMdcls=&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&mn=KFS_03_02&orgId=kfs [Accessed 16 Jan. 2017], 2016.
- 이동근·김재욱·박 찬, “토지피복 변화를 반영한 미래의 산림식생 분포 예측에 관한 연구”, 환경영향평가, 제19권, 제2호, 2010, pp. 117~125.
- 임종환·신준환·이돈구·서승진, “기후변화에 따른 산림생태계 영향: 우리나라 연구현황과 과제”, 한국농림기상학회지, 제8권, 제3호, 2006, pp. 199~207.
- 장동호·이승호, “강원도 산지지역의 기후변화 취약성평가를 위한 임상 변화 분석”, 기후연구, 제8권, 제2호, 2003, pp. 169~183.
- 정현용·이우균·남기준·김문일, “기후변화에 따른 임상분포 변화 및 탄소저장량 예측: 용인시 산림을 기반으로”, 한국기후변화학회지, 제4권, 제2호, 2013, pp. 177~188.
- 한화진, 『기후변화 영향평가 및 적응 시스템 구축 III』, 한국환경정책·평가연구원, 경제·인문사회연구회 협동연구총서 07-24-01, 2007.
- 임산물 가격정보시스템, <https://fps.kofpi.or.kr>
- 통계청 국가통계포털, <http://kosis.kr>
- Aitchison, J., “The Statistical Analysis of Compositional Data,” *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1982, pp. 139~177.
- Berry, S. T., “Estimating Discrete-Choice Models of Product Differentiation,” *The RAND Journal of Economics*, 1994, pp. 242~262.
- FAO, *Global Forest Resources Assessment 2000 - main report*, FAO Forestry Paper, No. 140, 2000.
- Franklin, J. F., and T. A. Spies, “Composition, function, and structure of old-growth Douglas-fir forests,” *Wildlife and Vegetation of Unmanaged Douglas-fir Forests, USDA Forest Service General Technical Report PNW-GTR-285*, 1991, pp. 71~80.
- Fry, J. M., T. R. Fry, and K. I. R. McLaren, “The Stochastic Specification of Demand

- Share Equations: Restricting Budget Shares to the Unit Simplex,” *Journal of Econometrics*, Vol. 73, No. 2, 1996, pp. 377~385.
- Gardner, B., I. Hardie, I. Park, and P. J. Park, “United States Farm Commodity Programs and Land Use,” *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 92, No. 3, 2010, pp. 803~820.
- IPCC, *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K. and Reisinger, A. (Eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 2007.
- Krinsky, I., and A. L. Robb, “On Approximating the Statistical Properties of Elasticities,” *The Review of Economics and Statistics*, 1986, pp. 715~719.
- Kwon, O. S., H. Cho, and Y. Park, “Climate Change and Farmland Use: A Multivariate Fractional Data Analysis,” The 5th Congress of the East Asian Association of Environmental and Resource Economics, 5-7 August, 2015, Taipei, Academia Sinica, Taiwan.
- Murteira, J. M., and J. J. Ramalho, “Regression Analysis of Multivariate Fractional Data,” *Econometric Reviews*, Vol. 35, 2016, pp. 515~552.
- Wu, J. J., “Effects of Land-Use Change on Ecosystems,” *Ecology*, Vol. 86, No. 12, 2005, pp. 3420~3421.