

기후변화 영향에 따른 호두나무 재배지역 변화 예측

이상혁^{1,2} · 이상훈² · 이솔애¹ · 지승용¹ · 최재용^{1*}

¹충남대학교 산림환경자원학과, ²충남대학교 농업과학연구소

(2015년 10월 28일 접수; 2015년 12월 14일 수정; 2015년 12월 21일 수락)

Predicting the Changes in Cultivation Areas of Walnut Trees (*Juglans sinensis*) in Korea Due to Climate Change Impacts

Sang-Hyuk Lee^{1,2}, Peter Sang-Hoon Lee², Sol Ae Lee¹, Seung-Yong Ji¹ and Jaeyong Choi^{1*}

¹Department of Environment & Forest Resources, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseung-gu, Daejeon 34134, Korea

(Received October 28, 2015; Revised December 14, 2015; Accepted December 21, 2015)

ABSTRACT

The objective of our study was to predict future cultivation areas for walnut trees (*Juglans sinensis*), using the cultivation suitability map provided from Korea Forest Service and MaxEnt modelling under future climate conditions. The climate conditions in 2050s and 2070s were computed using the Regional Climate Prediction (RCP) 4.5 and 8.5 scenarios with the HadGEM2-AO model. As a result, compared to the present area, the cultivation area of the western Korea including Chungcheongnam-do, Jeollabuk-do, Jeollanam-do decreased on a national scale under RCP 4.5, and those of Gyeongsangbuk-do and part of Gyeongsangnam-do decreased under RCP 8.5. However, Gangwon-do which is located in higher altitude over 600 meters than other regions showed increases in cultivation areas of 18.3% under RCP 4.5 and of 56.6% under RCP 8.5 by 2070s. The predicted map showed large regional variations in the cultivation areas with climate change. From the analysis of current top ranking areas, the cultivation areas in Gimcheon-si and Yeongdong-gun dramatically decreased by 2070s under RCP 4.5 and 8.5; that of Gongju-si decreased more under RCP 4.5; and those of Muju-gun and Cheonan-si sustained the areas by 2070s under both scenarios. The results from this study can be helpful for providing a guide for minimizing the loss of walnut production and proactively improving productivity and quality of walnuts with regard to unavoidable climate change in South Korea.

Key words: Cultivation Area, MaxEnt Model, Regional Climate Prediction, Climate Change

I. 서 론

수실(樹實)류는 과실수확을 목적으로 산림의 장기투자에서 오는 경제적인 취약성을 극복하고 집약적 임지 활용에 의한 단기임업소득 향상을 도모할 수 있는 유리한 점을 가지고 있다. 특히 호두(Walnut)는 우리나라 수실류 가운데 가장 경제성이 높은 고부가가치 임

산물 중의 하나이며 밤, 잣 또한 마찬가지로 단기소득 임산물 중 상당히 높은 비율을 차지하고 있는 주요한 단기소득 수종으로 꼽히고 있다.

최근 FTA 등 대외개방화가 추진되면서 국내생산 및 소비시장에 많은 변화가 예상되며, 임산물의 자유 무역화가 확대되면서 국내산 임산물의 경쟁력 압박이 가중될 것이 확실시 됨에 따라 차별화된 품질과 더불



* Corresponding Author : Jaeyong Choi
(jaychoi@cnu.ac.kr)

어 더욱 향상된 재배기술이 요구되고 있다. 또한, 기온 상승, 강수량 변화 등 기후변화에 따른 농업 및 산림생태계 변화는 국내·외 많은 보고에서 이미 언급되고 있는데(Kim *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2015), 농·임업과 자연자원 관리 측면에서 변화된 기후조건에 대한 대응방안이 쟁점으로 떠오르고 있다. 이를 해결하기 위해서는 기본적으로 기후 변화와 기후요인을 분석하여 농작물과 수목의 재배적지를 구분하여 주는 연구가 필요하다(Shim *et al.*, 2004). 특히 한번 재식한 후 판매 가능한 임산물을 생산하는데는 상당한 시일이 소요되므로, 임산물소득산업에 관련한 계획을 수립할 때 해당 수종의 생육특성 및 재배적지에 대해 현재기후는 물론 미래기후의 변화양상을 예측한 정보가 필요하기 때문이다.

현재 지구온난화로 인하여 아열대 기후대가 북상하면서 자생지의 생육환경이 크게 변하고 있으며, 이로 인한 산림병해의 발생빈도와 발생형태 및 발생률도 달라질 것으로 예상하고 있다(KFRI, 2009). 특히, 기후가 변하면 작물의 재배환경에도 영향을 미쳐 과수의 생육기간 및 품질에 변화를 가져올 수 있으며(KMA, 2011; Kim *et al.*, 2010), 농작물의 재배 적지 또한 이동하게 되는데, 우리나라의 경우 국토가 좁고 재배에 열악한 지형조건을 갖춘 산지가 많아 적합한 면적이 넓지 않으므로 수요를 충족시키기 위한 가장 효율적인 정책은 수종별 적합한 지역을 찾아 미리 적절하게 배치하는 일이라고 판단된다. 따라서 단기임산물과 관련한 산주, 지방자치단체 등의 이해관계자가 앞으로 미래의 재배 계획을 수립할 때 해당 작물의 생육특성 및 재배적지에 대해 현재기후는 물론 미래기후에서의 변화 양상을 예측한 정보가 필요할 것으로 예상된다. 이러한 정보들을 바탕으로 기후변화의 영향에 따라 예상되는 피해를 최소화하고 경쟁력 있는 새로운 임산물 소비시장을 구축하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 단기임산물의 수실류 중 경제성이 높고 고부가가치의 임산물인 호두나무를 대상으로 미래 기후에 따른 지역별 재배적정성을 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 범위

연구대상인 호두나무는 가래나무속에 속하는 낙엽 교

목으로서 유럽, 아시아 및 아메리카대륙에 걸쳐 약 15종이 분포되어 있다(Lee *et al.*, 2008). 우리나라에서는 연평균 12°C 등온선을 중심으로 난대 중부에서 온대 중부에 걸쳐 재배되고 있는데, 배수가 양호하고 여름철에 서늘하며 겨울에 온화한 산간지방으로 강수와 습기가 적은 곳에서 재배하는 것이 적절하다(KFS, 2012). 현재 우리나라에서 재배되고 있는 호두나무는 페르시아 호두나무(*Juglans regia*)를 모수로 하고 가래나무(*J. mandshunica* Maxim)를 수분수로 하여 자연적으로 교배된 자연교잡종이며 학명은 *Juglans sinensis* Dode (*J. regia* × *J. mandshunica* Maxim) 이다(KFRI, 2011).

과거 10년간의 통계자료를 살펴보면 호두나무 재배 임가 수와 면적은 증가하는 추세이며, 이에 따라 호두의 생산량과 생산액이 매년 증가하고 있다(KFS, 2013; KFS, 2014; Kim *et al.*, 2013). 특히 경상남도에서 7,429ha로 가장 많은 재배면적을 나타내고 있지만, 생산량은 크게 못 미치는 것으로 나타났으며, 충청북도의 경우 단위면적 당 생산량이 가장 많은 것으로 나타났다(Table 1).

본 연구는 북위 33~39도, 동경 123.5~131.0도의

Table 1. Statistical status of forestry by walnuts

| Province | Cultivated Area(ha) | Production | |
|-------------------|---------------------|---------------|------------------|
| | | Quantity (kg) | Value (1,000won) |
| Seoul | 1 | - | - |
| Busan | - | - | - |
| Daegu | 20 | 368 | 5,108 |
| Incheon | 4 | - | - |
| Gwangju | 2 | - | - |
| Daejeon | 3 | - | - |
| Ulsan | - | - | - |
| Sejong | - | 787 | 15,501 |
| Gyeonggi-do | 17 | 838 | 14,409 |
| Gangwon-do | 28 | 9,882 | 168,617 |
| Chungcheongbuk-do | 240 | 291,017 | 5,556,789 |
| Chungcheongnam-do | 142 | 135,047 | 2,710,299 |
| Jeollabuk-do | 98 | 133,189 | 1,929,703 |
| Jeollanam-do | 24 | 2,574 | 81,505 |
| Gyeongsangbuk-do | 402 | 667,231 | 12,583,665 |
| Gyeongsangnam-do | 7,429 | 40,639 | 750,310 |
| Jeju-do | - | - | - |
| Total | 8,410 | 1,281,572 | 23,815,906 |

*source: Korea Forest Service(2014)

우리나라 전역을 대상으로 호두나무의 잠재적 재배가능지역을 예측하고자 한다. 기후변화에 따른 영향을 평가하기 위해 1950년부터 2000년까지의 기상 및 기후 데이터를 이용하여 현재 기후를 설정하고, 2050년대, 2070년대 재배가능지역의 변화에 따른 소멸 위험성과 새로운 재배 적지를 분석하였다.

2.2. 연구 방법

본 연구에서는 다양한 기후변화 예측모델(Global Climate Model, GCM) 중 우리나라 기후변화정보센터(Climate Change Information Center, CCIC)가 선정한 HadGEM2-AO를 적용하였다. NIMR(2011)에서는 RCP 8.5 배출 시나리오에 기초하여 전 지구 대기-해양-해빙-수문-에어로졸 결합모델인 영국 해들리 기후예측연구센터(Hadley Centre for Climate Prediction and Research)의 HadGEM2-AO를 통해 2100년까지 일별 기상을 전망하였다. 이에 따르면 21세기 말 한반도는 평균기온이 현재보다 6.0°C 상승, 강수량 20.4% 증가, 영하일은 28.4일 감소, 호우와 고온일의 발생확률 증가, 아열대 지역의 백두대간 일부지역을 제외한 전 지역으로 확대될 것으로 나타났다(NIMR, 2011).

임업진흥원에서는 지난 2013년부터 현재까지 ‘단기 임산물 재배적지도’를 품목별로 구축하여 맞춤형 산림정보 서비스를 제공하고 있다. 임업진흥원 ‘다드림’서

비스를 통해 내려받은 호두나무 재배적지를 바탕으로 위치자료를 추출하였다. 본 연구의 목표는 우리나라 전역을 분석하고자 하였으므로, 비출현자료에 대한 현장조사 자료구축에 한계가 있다. 이에 따라 출현자료만을 활용하는 MaxEnt 모형(Phillips and Dudik, 2008; Song and Kim, 2012)을 사용하여 호두나무 재배적지 변화를 분석하였다. MaxEnt 모형은 종 출현정보만을 활용하여 최고의 서식지 예측 결과를 도출하는 모형으로 최근 다양하게 활용되고 있다(Song, 2015). 또한, 모형 개발자가 설정한 변수와 제한요소를 이용하여 확률분포를 예측하는 기계학습모형으로 종의 출현과 변수의 선형, 비모수적인 관계들을 잘 표현하는 장점이 있다(Phillips *et al.*, 2006; Seo *et al.*, 2008).

2.2.1. 종속변수

본 연구에서는 호두나무의 생육조건에 따른 알고리즘(Table 2)을 통해 기후대 및 수종별 지위지수를 추정하여 산림청의 한국임업진흥원에서 제작한 ‘단기 임산물 재배적지도’에서 호두나무 재배적지 자료를 종속변수로 설정하였다. 재배적지의 위치 데이터는 Polygon 형태의 데이터를 환경변수의 해상도(30 arc seconds)에 맞게 변환하였다. 또한, 표집편향(sampling bias)에 의한 위치자료의 공간적 자기상관(spatial autocorrelation)을 고려하여(Dormann, 2007; Pearson *et al.*, 2007; Warren

Table 2. Algorithm of estimating suitable site for *Juglans sinensis*

| Classification | | Suitability | Inconsistence |
|----------------------|----------------------|-------------------------|--|
| Indispensable Factor | Annual mean Temp. | • 11~13°C | • Less than 11°C • Greater than 13°C |
| | Altitude | • 0~400m | • Greater than 400m |
| | Aspect | • S, SW, SE, E, W | • N, NW, NE |
| Major Factor | Soil type (A layer) | • Sandy Loam • Loam | • Silt Loam • Silty Clay Loam • Sandy Clay Loam • Silty Clay • Clay Loam • Clay • Loamy Sand • Sand • Humus soil • Gravel |
| | Soil depth (B layer) | • 60~90cm • 90~120cm | • Less than 30cm • 30~60cm |
| | Slope | • Less than 15° | • Greater than 15° |

*If two essential conditions and three major conditions are met the area is classified as a suitable site; two essential conditions and two major conditions are met the area is classified as a possible site

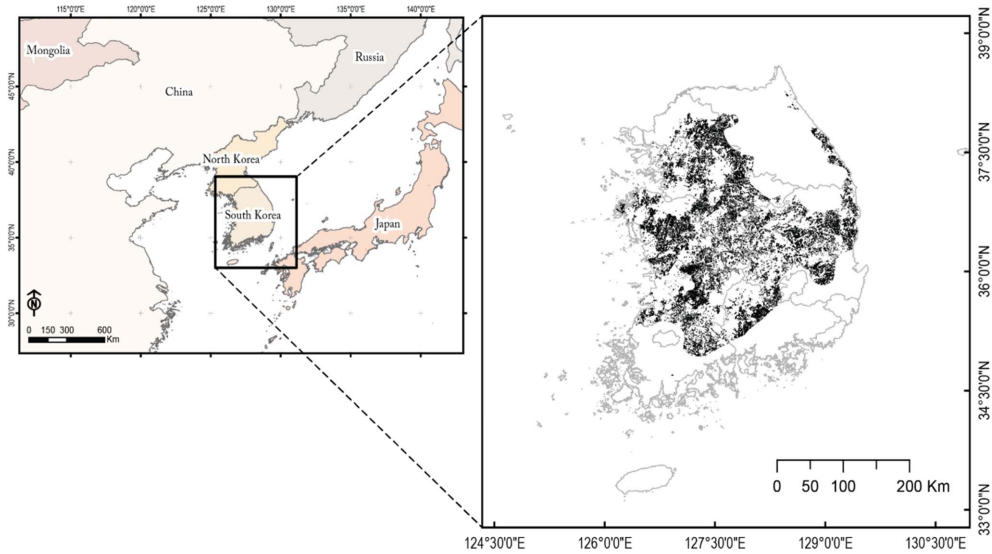


Fig. 1. Suitable Cultivation Area of *Juglans sinensis* on the map of forestry products.

Table 3. List of Bioclim and Environmental variables used in modeling. The selected variables are indicated

| Variable | Description | Selected variable | Reference |
|----------|-------------------------------------|-------------------|---|
| BIO1 | Annual mean temperature | X | Worldclim (Hijmans <i>et al.</i> , 2005) |
| BIO2 | Mean diurnal range | | |
| BIO3 | Isothermality (BIO1/BIO7) × 100 | X | |
| BIO4 | Temperature seasonality | | |
| BIO5 | Max temperature of warmest period | | |
| BIO6 | Min temperature of coldest period | | |
| BIO7 | Temperature annual range | | |
| BIO8 | Mean temperature of wettest quarter | | |
| BIO9 | Mean temperature of driest quarter | | |
| BIO10 | Mean temperature of warmest quarter | | |
| BIO11 | Mean temperature of coldest quarter | | |
| BIO12 | Annual precipitation | | |
| BIO13 | Precipitation of wettest period | X | |
| BIO14 | Precipitation of driest period | X | |
| BIO15 | Precipitation seasonality | X | |
| BIO16 | Precipitation of wettest quarter | | |
| BIO17 | Precipitation of driest quarter | | |
| BIO18 | Precipitation of warmest quarter | | |
| BIO19 | Precipitation of coldest quarter | | |
| DEM | Elevation, continuous values | X | SRTM |
| ASP | Aspect | | Derived from DEM |
| SLP | Slope | X | Derived from DEM |

and Seifert, 2011) 독립변수의 격자에 적지면적이 50% 이상 차지하는 위치를 103개의 포인트 좌표로 추출하였다(Fig. 1).

2.2.2. 독립변수

본 연구에 사용된 기후변수들은 Worldclim에서 제공하는 생물기후자료를 이용하였다. 현재기후변수는 1950년

에서 2000년까지 관측된 데이터를 바탕으로 제작된 생물 기후자료(Bioclim) 변수 19개를 분석에 적용하였다 (Hijmans, 2005). 또한, 셔틀레이더지형미션(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)의 90m급 수치표 고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 활용하여 사면방향(aspect), 경사(slope)를 추출하고, 이를 지리환경 변수로 적용하였다(Table 3). Bioclim의 19개 변수는 변수들간에 공선성(Collinearity)이 발생할 수 있으므로 (Watling *et al.*, 2012; Khanum *et al.*, 2013), 상관 분석 및 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA)을 통해(Dormann *et al.*, 2013; Syfert *et al.*, 2013) 연평균 기온(BIO1), 등온성(BIO3), 최고강수월의 강수량(BIO13), 최저강수월의 강수량(BIO14), 강수량의 계절성(BIO15), 고도, 경사의 7개 변수를 선정하여 분석하였다(Table 4, Table 5).

미래기후변수로는 IPCC 5차 평가보고서(AR5)의 RCP 시나리오 중 온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 경우인 RCP 4.5와 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP 8.5를 적용하였다. 예측의 범위는 2050년대(average for 2041-2060)와 2070년대(average

for 2061-2080)로 설정하였다. 잠재적 재배가능지역의 예측 정확도는 수신자 조작 특성(Receiver Operating Characteristic, ROC) 곡선의 하위 영역(Area Under Cover, AUC)값을 이용해 측정하였다. AUC값을 이용한 모의 정확도는 기준 값에 독립적인 장점을 가지고 있으며, 다양한 모형의 정확도 비교에 많이 이용된다. AUC값은 최소 0.5를 기준으로 모형이 완벽할 경우 1.0을 나타내며 일반적으로 0.8 이상이면 모형 예측력이 우수하다고 평가한다(Thuiller, 2003; Franklin, 2009).

III. 결과 및 고찰

3.1. 정확도 및 기여도 평가

MaxEnt 모형의 정확도는 10회 반복측정 후 평균값 적용한 10k-fold AUC value of ROC로 측정하였다. 그 결과 Training AUC값은 0.940으로 나타났으며, 무작위 25% test AUC는 0.917 (s.d. 0.016)로 나타나 모형의 정확도는 매우 높은 것으로 나타났다. 재배 가능/불가능 지역의 구분을 위해서, “Equal training sensitivity

Table 4. Pearson’s correlation r matrix of bioclim. All tests with $p \leq 0.10$ are indicated in bold; strongly correlating ($|r| > 0.7$) and $p \leq 0.01$

| | S | A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|----|------|-------|--------------|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| D | .516 | -.004 | -.448 | .310 | .051 | .243 | -.469 | -.410 | .277 | -.475 | -.399 | -.470 | -.409 | -.004 | -.032 | -.043 | .044 | .035 | -.059 | .049 | -.059 |
| S | | -.004 | -.893 | .474 | -.075 | .517 | -.913 | -.786 | .522 | -.918 | -.804 | -.925 | -.821 | -.217 | -.230 | -.199 | .080 | -.149 | -.237 | -.121 | -.237 |
| A | | | .010 | .014 | -.022 | .029 | .028 | -.005 | .027 | .025 | -.002 | .026 | -.002 | .023 | .043 | -.002 | .035 | .034 | -.006 | .040 | -.006 |
| 1 | | | | -.582 | .263 | -.762 | .941 | .955 | -.752 | .965 | .968 | .962 | .978 | .532 | .322 | .542 | -.355 | .343 | .595 | .325 | .593 |
| 2 | | | | | .326 | .703 | -.368 | -.717 | .801 | -.458 | -.662 | -.447 | -.656 | -.287 | -.007 | -.489 | .448 | -.056 | -.521 | -.011 | -.524 |
| 3 | | | | | | -.426 | .204 | .296 | -.295 | .181 | .327 | .164 | .328 | .298 | -.005 | .361 | -.447 | .130 | .396 | .149 | .390 |
| 4 | | | | | | | -.513 | -.909 | .985 | -.579 | -.887 | -.558 | -.881 | -.513 | -.023 | -.742 | .756 | -.170 | -.800 | -.139 | -.799 |
| 5 | | | | | | | | .809 | -.495 | .992 | .841 | .993 | .855 | .435 | .380 | .346 | -.127 | .342 | .391 | .339 | .389 |
| 6 | | | | | | | | | -.911 | .857 | .991 | .843 | .994 | .53 | .186 | .656 | -.555 | .258 | .711 | .233 | .710 |
| 7 | | | | | | | | | | -.571 | -.875 | -.551 | -.870 | -.479 | -.009 | -.727 | .732 | -.142 | -.778 | -.107 | -.777 |
| 8 | | | | | | | | | | | .880 | .995 | .893 | .454 | .359 | .398 | -.187 | .333 | .444 | .327 | .442 |
| 9 | | | | | | | | | | | | .87 | .995 | .56 | .225 | .638 | -.522 | .300 | .702 | .276 | .703 |
| 10 | | | | | | | | | | | | | .884 | .472 | .406 | .389 | -.139 | .373 | .431 | .363 | .430 |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | .551 | .24 | .636 | -.505 | .302 | .693 | .279 | .691 |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | .741 | .753 | -.215 | .896 | .768 | .886 | .765 |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | .255 | .449 | .935 | .228 | .939 | .223 |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | -.683 | .454 | .980 | .440 | .978 |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | .226 | -.734 | .236 | -.735 |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | .439 | .991 | .434 |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | .423 | .999 |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | .417 |

*D: DEM, S: slope, A: aspect, 1 to 19: the number of Bioclim (BIO#)

Table 5. Component Score Coefficient Matrix of principal component analysis

| Variable | PC1* | PC2 | PC3 | PC4 |
|----------------|---------------|---------------|--------------|--------|
| BIO1 | 0.130 | -0.017 | 0.000 | 0.035 |
| BIO2 | 0.016 | -0.134 | 0.016 | 0.508 |
| BIO3 | 0.031 | 0.001 | -0.068 | 0.656 |
| BIO4 | -0.007 | -0.129 | 0.060 | -0.004 |
| BIO5 | 0.174 | -0.092 | 0.017 | 0.105 |
| BIO6 | 0.083 | 0.050 | -0.031 | -0.020 |
| BIO7 | -0.001 | -0.138 | 0.057 | 0.103 |
| BIO8 | 0.163 | -0.070 | 0.013 | 0.056 |
| BIO9 | 0.092 | 0.035 | -0.022 | 0.020 |
| BIO10 | 0.163 | -0.075 | 0.026 | 0.047 |
| BIO11 | 0.098 | 0.029 | -0.020 | 0.025 |
| BIO12 | -0.062 | 0.082 | 0.187 | 0.006 |
| BIO13 | 0.000 | -0.054 | 0.258 | -0.058 |
| BIO14 | -0.088 | 0.173 | 0.048 | -0.009 |
| BIO15 | 0.058 | -0.182 | 0.149 | -0.103 |
| BIO16 | -0.043 | 0.004 | 0.252 | -0.019 |
| BIO17 | -0.078 | 0.172 | 0.035 | 0.009 |
| BIO18 | -0.041 | -0.002 | 0.253 | 0.008 |
| BIO19 | -0.078 | 0.172 | 0.034 | 0.005 |
| DEM | -0.190 | 0.096 | 0.027 | -0.003 |
| ASP | 0.004 | -0.010 | 0.019 | -0.018 |
| SLP | -0.129 | 0.066 | 0.045 | 0.102 |
| Total | 7.337 | 6.899 | 4.092 | 1.413 |
| % of Variance | 33.351 | 31.361 | 18.601 | 6.422 |
| Cumulative % | 33.351 | 64.711 | 83.312 | 89.734 |
| Contribution** | 54.114 | 37.422 | 2.522 | 1.752 |

*PC: Number of principal components from PCA with set variables. The acronyms at first column are indicated in Table 1. Highest values are highlighted in bold face.

**Contribution: Number of principal components retained and their relative contribution to modeling distribution from MaxEnt outputs.

and specificity” 값을 통해 산출된 값(threshold)을 기준(0.282~0.372, avg. 0.336 s.d. 0.019)으로 출현(1)비출현(0) 자료인 binary map 형태로 변환하였다(Liu *et al.*, 2005; Bean *et al.*, 2012). 또한, 불확실성 보완을 위해 threshold 값을 기준으로 나뉜 10개의 binary map을 중첩하여 60%이상으로 나타난 지역에 대하여 호두나무 재배가능지로 가능지로 판정하였다(Kim *et al.*, 2015).

독립변수에 대한 기여도 평가는 연평균 기온(38.6%), 고도(25.4%), 강수량의 계절성(10.8%) 순으로 나타났다(Fig. 2). 이는 실측자료를 이용한 모형의 훈련과정 중 각 변수가 최적 결과 도출에 기여하는

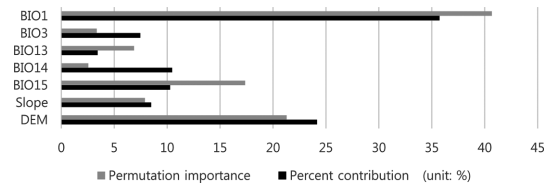


Fig. 2. Contribution of environment variables in the estimation of the distribution of suitable habitat by MaxEnt model (The Percent contribution values are only heuristically define, when there are highly correlated environmental variables, the percent contributions should be interpreted with caution. The permutation importance measure depends only on the final MaxEnt model, not the path used to obtain it. The contribution for each variable is determined by randomly permuting the values of that variable among the training points and measuring the resulting decrease in training AUC)

정도에 따라 일정량의 가중치를 증가시키는 방법으로 모형 알고리즘에 따라 달라질 수 있는 변수간의 상대적 기여도를 판단하는 방법이다.

3.2. 재배적지 분석 결과

현재 호두는 경북 김천시, 충북 영동군, 전북 무주군을 중심으로 재배되고 있으며, 향후 재배면적의 증가로 인해 호두 생산량이 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다(Kim *et al.*, 2013; Ko, 2013). 분석결과 현재 재배가능한 면적은 대전(DJ) 31,335ha (58.0%), 충청북도(CB) 399,108ha (53.9%), 전라북도(JB) 355,215ha (44.0%), 세종(SJ) 18,624ha (40.1%) 순으로 행정구역 단위면적 대비 높을 것으로 나타났으며, 경상북도(GB)가 553,446ha로 재배가능한 지역이 가장 넓을 것으로 분석되었다. 하지만 이 결과는 재배조건을 고려하지 않은 기후관련 데이터를 기반으로 분석된 결과로서 실제 통계적인 재배면적은 경상남도(GN)가 7,429ha로 가장 높지만(Table 1), 재배가능한 면적은 경상북도(GB)가 가장 클 것으로 나타났다(Fig. 3, Table 4). 본 결과의 재배가능지역 면적 및 면적비율은 단순 행정구역상의 면적 대비 재배가능한 지역으로 추정된 비율로서 실제 면적으로 적용하기엔 무리가 있으므로 현재를 반영하기 위해서는 기타 환경적인 요소를 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.3. 미래 재배가능지역 변화

3.3.1. 재배적지 변화 예측

지역별 잠재적 재배가능지역의 상대면적 감소를 비

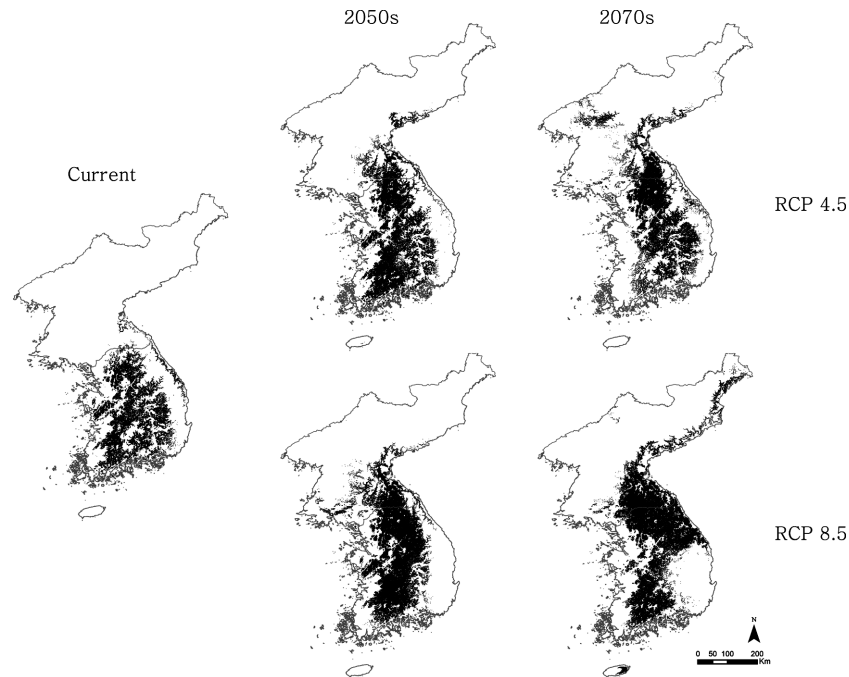


Fig. 3. Potential distributions of *Juglans sinensis* with estimated presence probability under RCPs.

Table 6. Potential area of *Juglans sinensis* by Province (unit: ha)

| Province* | ADA** | Present Area | Prop.*** | 2050s | | | | 2070s | | | |
|-------------|------------|--------------|----------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | | | | RCP 4.5 | Prop. | RCP 8.5 | Prop. | RCP 4.5 | Prop. | RCP 8.5 | Prop. |
| GW | 1,682,981 | 372,986 | 22.2% | 564,368 | 33.5% | 867,247 | 51.5% | 681,787 | 40.5% | 1,326,455 | 78.8% |
| GG | 1,017,263 | 356,791 | 35.1% | 447,618 | 44.0% | 496,983 | 48.9% | 462,525 | 45.5% | 511,960 | 50.3% |
| GN | 1,053,732 | 414,927 | 39.4% | 422,938 | 40.1% | 357,205 | 33.9% | 278,525 | 26.4% | 354,200 | 33.6% |
| GB | 1,902,898 | 553,446 | 29.1% | 455,632 | 23.9% | 379,970 | 20.0% | 708,784 | 37.2% | 109,928 | 5.8% |
| GJ | 50,118 | 6,194 | 12.4% | 8,376 | 16.7% | 3,801 | 7.6% | 634 | 1.3% | 2,323 | 4.6% |
| DG | 88,348 | 28,678 | 32.5% | 25,733 | 29.1% | 5,259 | 6.0% | 30,221 | 34.2% | 1,402 | 1.6% |
| DJ | 54,024 | 31,335 | 58.0% | 24,626 | 45.6% | 34,517 | 63.9% | 22,481 | 41.6% | 26,078 | 48.3% |
| BS | 76,986 | 593 | 0.8% | 74 | 0.1% | - | - | - | - | - | - |
| SU | 60,520 | 13,668 | 22.6% | 10,132 | 16.7% | 12,784 | 21.1% | 10,200 | 16.9% | 9,860 | 16.3% |
| SJ | 46,490 | 18,624 | 40.1% | 13,690 | 29.4% | 24,183 | 52.0% | 11,814 | 25.4% | 7,853 | 16.9% |
| US | 106,046 | 2,122 | 2.0% | - | - | - | - | - | - | - | - |
| IC | 104,088 | 1,307 | 1.3% | 7,839 | 7.5% | 6,446 | 6.2% | 5,139 | 4.9% | 436 | 0.4% |
| JN | 1,230,392 | 403,599 | 32.8% | 469,555 | 38.2% | 268,758 | 21.8% | 129,596 | 10.5% | 332,476 | 27.0% |
| JB | 806,644 | 355,215 | 44.0% | 422,572 | 52.4% | 453,485 | 56.2% | 97,773 | 12.1% | 384,852 | 47.7% |
| JJ | 184,926 | - | - | 658 | 0.4% | - | - | - | - | 40,770 | 22.0% |
| CN | 820,451 | 270,781 | 33.0% | 262,162 | 32.0% | 306,354 | 37.3% | 91,526 | 11.2% | 153,396 | 18.7% |
| CB | 740,719 | 399,108 | 53.9% | 449,865 | 60.7% | 588,311 | 79.4% | 463,689 | 62.6% | 398,008 | 53.7% |
| South Korea | 10,026,626 | 3,235,980 | 32.3% | 3,593,002 | 35.8% | 3,841,404 | 38.3% | 3,045,720 | 30.4% | 3,695,941 | 36.9% |

*Acronym: BS; Busan, CB; Chungcheongbuk-do, CN; Chungcheongnam-do, DG; Daegu, DJ; Daejeon, GB; Gyeongsangbukdo, GG; Gyeonggi-do, GJ; Gwangju, GN; Gyeongsangnam-do, GW; Gangwon-do, IC; Incheon, JB; Jeollabuk-do, JJ; Jeju-do, JN; Jeollanam-do, SJ; Sejong, SU; Seoul, US; Ulsan

**Administrative Division Area

***Proportion of cultivation area for Administrative Division Area

교하기 위해 재배적지면적의 변화를 비율로 비교한 결과, 현재 대비 미래재배가능지역의 변화 정도는 현재 주요 생산지역인 전라남도(JN), 전라북도(JB), 경상남도(GN) 등의 지역에서 2050년대에 재배가능지역이 일시적으로 증가했다가 2070년대에 이르러 현재보다 감소할 것으로 나타났다(Table 6). 하지만, 강원도(GW)의 경우 현재 22.1%의 재배가능 지역이 RCP 4.5 시나리오 상황에서 2050년대 11.4%, 2070년대는 현재 대비 18.4% 증가할 것으로 예측되었으며, RCP 8.5 시나리오 상황에서는 2050년대 29.4%, 2070년대 56.7%로 재배가능지역이 매우 증가할 것으로 나타났다. 연평균 기온이 12도 정도에서 생육하는 호두나무의 특성상 재배가능지역이 지구 온난화로 인해 점차 기온에 맞춰 점차 북상하는 것으로 판단되며, 연평균 기온 및 고도가 본 분석결과에 가장 큰 영향을 미친 것과 일치한다.

3.3.2. 주요 생산지에서의 변화 예측

현재 생산면적과 생산량이 높은 경상북도 김천시,

충청북도 영동군, 충청남도 천안시, 공주시, 전라북도 무주군을 대상으로 미래 재배가능 지역의 세부적인 변화를 모의하였다(Fig. 4). 분석결과 공주시가 59,261ha로 현재 재배적지가 가장 넓게 분포하고 있으나, RCP 4.5 시나리오에서 2070년대에 66.8%가 감소할 것으로 예상되었으며, RCP 8.5에서는 37.7%의 재배가능지역의 감소가 예상되었다(Table 7). 현재 호두 생산량이 가장 많은 대표적 호두 생산지인 경상북도 김천시의 경우 현재 재배적지의 면적이 김천시의 행정구역의 53.5%를 차지하는 것으로 나타났으며, 현재와 같은 기후변화 추세가 지속되었을 경우(RCP 8.5) 2050년대 시나리오에서 재배가능지가 33.2% 정도 증가하나 2070년대에 이르러 67.4%가 부적합 지역이 될 것으로 분석되었다. 전라북도 무주군의 경우 2070년대 RCP 8.5 시나리오에서 27.2%의 재배가능지역이 줄어들 것으로 나타났다. 전라북도 무주군과 충청남도 천안시의 경우 모든 시나리오에서 2070년대까지 재배가능지역의 큰 변화가 없을 것으로 분석되었다. 이를 통해 추후 호두

Table 7. Projection of the changes in suitable sites for *Juglans sinensis* within major production areas for Walnuts. The binary maps show the sites having the harvesting probability on walnuts of equal to or greater than threshold presenting the changes in their areas from the current situation to the near future (2050s) and the far future (2070s)

| Region | Present | | 2050s | | | | 2070s | | | |
|---------------|-----------|-----------------|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------|-----------|---|--------|
| | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | | | |
| | ADA* (ha) | PA**(ha) Prop. | PA(ha) Prop. | Variation*** | PA(ha) Prop. | Variation | PA(ha) Prop. | Variation | | |
| Gongju-si | 94,050 | 59,261 63.0% | C | 6,250 | C | 0 | C | 39,608 | C | 22,364 |
| | | | N | 53,011 | N | 59,261 | N | 19,653 | N | 36,897 |
| | | | E | 3,163 | E | 11,822 | E | 151 | E | 2,410 |
| Gimcheon-si | 100,900 | 53,999 53.5% | C | 5,149 | C | 8,629 | C | 3,479 | C | 36,394 |
| | | | N | 48,850 | N | 45,370 | N | 50,520 | N | 17,605 |
| | | | E | 1,948 | E | 17,953 | E | 2,088 | E | 1,253 |
| Muju-gun | 63,190 | 23,949 37.9% | C | 2,514 | C | 0 | C | 6,424 | C | 838 |
| | | | N | 21,436 | N | 23,949 | N | 17,526 | N | 23,111 |
| | | | E | 12,219 | E | 36,308 | E | 209 | E | 15,920 |
| Yeongdong-gun | 84,552 | 55,220 65.3% | C | 2,341 | C | 0 | C | 2,410 | C | 15,010 |
| | | | N | 52,879 | N | 55,220 | N | 52,811 | N | 40,210 |
| | | | E | 2,272 | E | 24,856 | E | 2,066 | E | 5,095 |
| Cheonan-si | 63,625 | 23,595 37.1% | C | 818 | C | 0 | C | 3,137 | C | 7,433 |
| | | | N | 22,777 | N | 23,595 | N | 20,458 | N | 16,162 |
| | | | E | 2,728 | E | 8,047 | E | 1,296 | E | 1,432 |

*Administrative Division Area

**PA: Projected Area

***C: Contraction, N: No change, E: Expansion

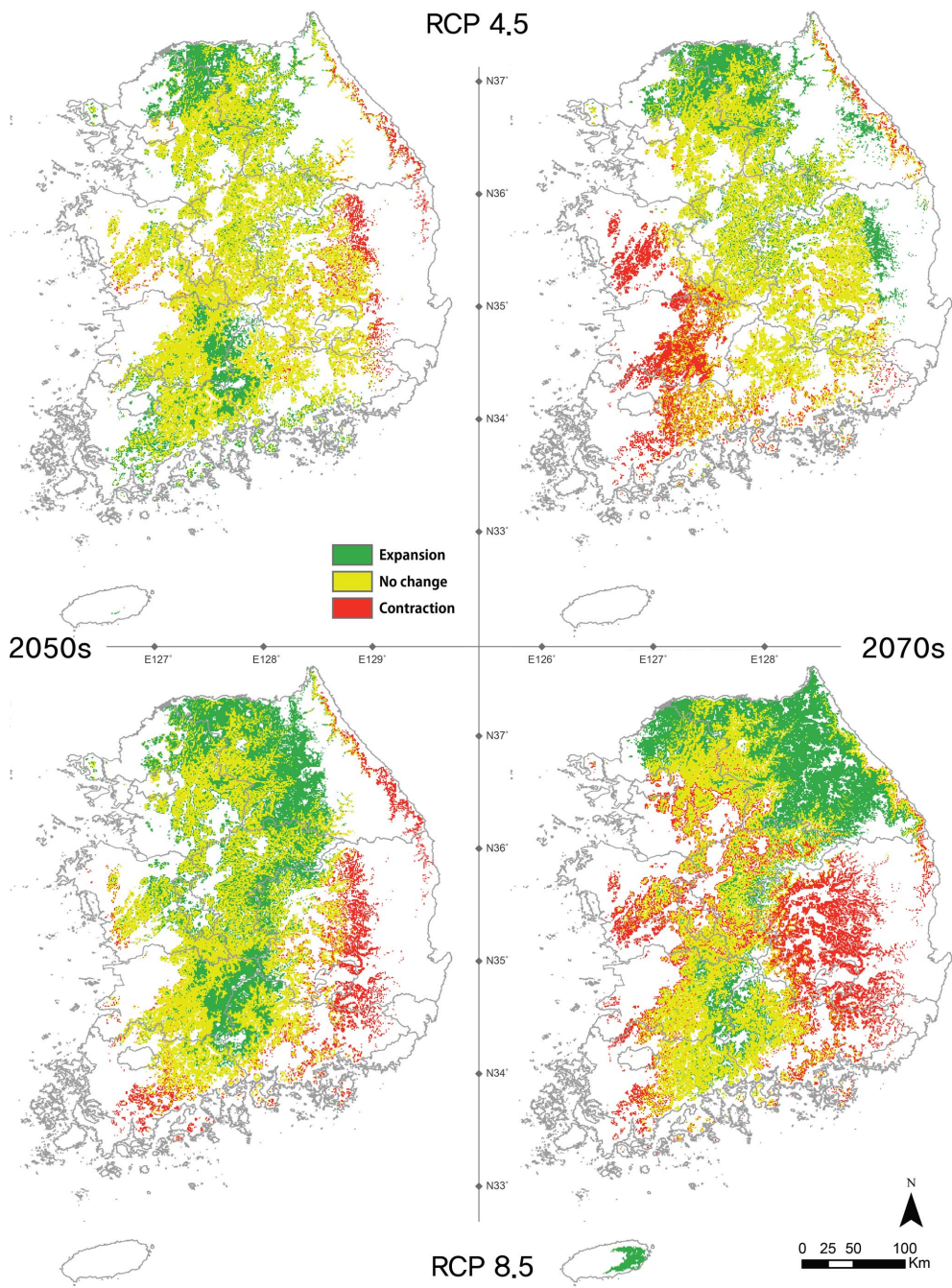


Fig. 4. Predicted maps of cultivation areas of walnuts in South Korea for two different time periods, 2050s and 2070s under two climate change scenarios, RCP 4.5 and RCP 8.5

생산을 위한 지역적 차원의 장기적인 재배계획 시 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 전체적으로 2050년대에는 모든 시나리오에서 소멸위험성은

나타나지 않고 오히려 확장할 것으로 나타났으며, 2070년대에는 RCP 8.5 시나리오에서 감소면적이 클 것으로 분석되었다(Table 7).

IV. 결 론

산림청에서 구축한 ‘맞춤형 조림지도’의 경우 현재의 임분 상태에 따라 적지여부를 평가하고, 조림 및 경영 계획에 필요한 기초정보도 함께 포함하고 있어 일반 산주는 물론 산림을 경영하는 전문 임업인들에게 매우 유용한 정보로 활용되고 있다. 토질을 비롯한 여러 입지조건을 가지고 수익을 창출하기 위한 경영목적에 가장 적합한 나무가 어떠한 것인지를 명확히 알 수 있도록 하고 있다. 하지만 동 지도는 현재를 기반으로 한 추정일 뿐이기 때문에 미래의 기후변화에 대응하기 위해서는 현재뿐만 아니라 미래의 재배적지변화를 예측하는 연구가 포함될 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 우리나라 전역을 대상으로 대표적 단기소득임산물인 호두나무의 기후변화 시나리오에 따른 재배가능성이 높은 지역을 예측하고자 하였다. 출현정보(presence data)만을 이용해 분포 예측을 할 수 있는 MaxEnt 모형을 선택하고 기후 및 지리적 환경변수를 이용한 분석을 통해 현재 재배가능지역을 분석하였으며, RCP 4.5와 8.5를 적용한 미래 기후에서의 잠재적 재배가능지역 분포의 예측을 시도하였다. 이를 위해 기후변화 영향을 평가하기 위해 1950년에서 2000년까지의 기후를 현재의 기후조건으로 설정하여 2050년대와 2070년대의 재배가능지역의 분포 변화와 이를 바탕으로 한 소멸위험성을 분석하였다.

선행적 연구에서 일반적으로 불확실성을 수반하게 되는 기후변화시나리오 관련 연구들은 예측성을 향상시키기 위하여 비기후적 요소를 포함하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 생물기후변수 및 기타 환경변수를 고려하여 이들의 상대적 중요도를 평가한 결과, 호두나무는 연평균 기온과 고도가 재배가능지역을 결정하는데 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 생물기후변수와 지형적인 환경변수를 사용한 결과, 기후변화에 따라 전국적인 분포가 높은 지역으로 이동한다는 것과, 2070년대에는 강원도 일부 지역으로 재배지역의 확장이 가능할 것으로 나타났다. 또한 현재 호두의 생산량이 가장 많은 5개지역을 선정하여 분석한 결과, RCP 8.5시나리오에서 공주시, 김천시, 영동군의 경우 먼 미래에 재배지역의 감소가 클 것으로 예상되었으며, RCP 4.5 시나리오에서는 공주시가 크게 감소할 것으로 나타났다. 무주군과 천안시의 경우 현재의 재배가능지역이 모든 시나리오에서 유지될 것으로 나타났다.

본 연구에서는 북한의 기후데이터에 접근이 어려워 Worldclim 기후데이터를 사용한 바, 한반도의 국지적 정보를 반영하지 못할 수 있는 문제가 있을 수 있는 한계가 있었다. 따라서 향후 기상청의 남한상세 RCP 시나리오를 이용하여 비교연구를 수행한다면 우리나라에서의 기후변화 예측가능성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

본 연구에서는 호두나무에 대하여 단기임산물 재배적지도를 바탕으로 기후변화를 고려한 전국의 재배가능지역을 MaxEnt 모형을 이용하여 추출하였다. RCP 4.5 및 8.5 시나리오와 HadGEM2-AO모형을 이용하여 2050년대와 2070년대의 기후변화에 따른 재배지역 변화를 예측하였다. 분석결과, 미래의 재배적지면적을 현재 수치와 비교하였을 때, RCP 4.5에서는 충청남도, 전라북도, 전라남도에 이르는 우리나라 서쪽 지역이 주로 감소할 것으로 나타났으며, RCP 8.5에서는 경상북도, 경상남도 일부 지역을 중심으로 감소할 것으로 나타났다. 하지만, 평균고도가 600m 이상으로 높은 지역인 강원도는 2070년대 RCP 4.5에서 18.3%, RCP 8.5에서 56.6%가 증가할 것으로 나타나 기후변화의 영향 정도에 따라 전국적으로 재배가능지역의 차이가 있는 것으로 나타났다. 현재 호두 생산량이 가장 많은 지역을 분석한 결과 공주시, 김천시, 영동군은 2070년대에는 RCP 8.5에서 재배지역의 감소가 클 것으로 예상되었으며, 공주시는 RCP 4.5에서 감소폭이 더 큰 것으로 나타났다. 무주군과 천안시는 현재의 재배가능지역이 모든 시나리오에서 유지될 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 미래 기후변화에 따른 영향이 불가피한 상황에서 예상되는 피해를 최소화하고 경쟁력 있는 임산물 생산을 위한 기후변화 영향평가 자료로 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 ‘임업기술개발사업(과제번호: S211415L010120)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

REFERENCES

Choi, J., P. S. Lee, and S. H. Lee, 2015: Anticipation of the

- future suitable cultivation areas for Korean pines in Korean peninsula with climate change. *Journal of Korean Society of Environmental Restoration Technology* **18**(1), 103-113. (In Korean with English abstract)
- Dormann, C. F., 2007: Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data. *Global Ecology and Biogeography* **16**(2), 129-138.
- Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl, G. Carre, J. R. Garcia Marquez, B. Gruber, B. Lafourcade, P. J. Leitao, T. Münkemüller, C. McClean, P. E. Osborne, B. Reineking, B. Schröder, A. K. Skidmore, D. Zurell, and S. Lautenbach, 2013: Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* **36**(1), 27-46.
- Franklin, J., 2009: Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge University Press.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, and A. Jarvis, 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**, 1965-1978.
- KFRI (Korea Forest Research Institute), 2009: History and the application of the suitable trees on a site. Research Report, 2009. Korea Forest Research Institute, Korea Forest Service.
- KFRI (Korea Forest Research Institute), 2011: Cultivation of Walnut tree. Korea Forest Research Institute, Korea Forest Service.
- KFS (Korea Forest Service), 2012: Forest products standard cultivate guide for Good Agricultural Practice, Korea Forest Service.
- KFS (Korea Forest Service), 2013: Statistics in Forest Products. (in Korean)
- KFS (Korea Forest Service), 2014: Statistical yearbook of forestry. no.44. (in Korean)
- Kim, S., U. Chung, S. H. Kim, I. M. Choi, and J. I. Yun, 2009: The suitable region and site for 'Fuji' apple under the projected climate in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(4), 162-173 (In Korean with English abstract)
- Kim, S. Y., I. H. Heo, and S. H. Lee, 2010: Impacts of temperature rising on changing of cultivation area of apple in Korea. *Journal of the Korean Association of regional geographers* **16**(3), 201-215. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y. K., W. K. Lee, Y. H. Kim, S. Oh, and J. H. Heo, 2012: Changes in potential distribution of *Pinus rigida* caused by climate changes in Korea. *Journal of Korean Forest Society* **101**(3): 509-516. (In Korean with English abstract)
- Kim, S. B., Y. W. Ko, D. K. Oh and H. K. Noh, 2013: A study on regional specialization of fruit trees to strengthen competitiveness. *Journal of Korean Forest Society* **102**(2), 292-299. (in Korean with English abstract)
- Kim, J. W., H. Jung, S. W. Jeon, and D. K. Lee, 2015: Predicting the potential distribution of Korean pine (*Pinus koraiensis*) using an ensemble of climate scenarios. *Journal of Korean Society of Environmental Restoration Technology* **18**(2), 79-88. (in Korean with English abstract)
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2011: *How to Utilize the Regional Climate Change Information*, 27pp.
- Ko, Y. W., 2013: A study of regional specialization for activation of non-timber forest products. M.A. dissertation, Chungnam National University. (in Korean with English abstract)
- Lee, U. K., M. S. Jung, M. H. Lee, K. N. Kang, J. O. Hyun, and Y. H. Kwon, 2008: A consideration on the pollen morphology of walnut trees (*Juglans* spp.) by using Scanning Electron Microscope(SEM). *Journal of Apiculture* **23**(2), 139-145. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. H., H. Jung, and J. Choi, 2012: Projecting climate change impact on the potential distribution of endemic Plants (*Megaleranthis saniculifolia*) in Korea. *Journal of Korean Society of Environmental Restoration Technology* **15**(3), 75-84. (In Korean with English abstract)
- Liu, C., P. M. Berry, T. P. Dawson, and R. G. Pearson, 2005: Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography* **28**, 385-393.
- NIMR (National Institute of Meteorological Research), 2011: *Report on the Climate Change Scenario in Response to IPCC 5th Assessment Report*, National Institute of Meteorological Research. (in Korean)
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire, 2006: Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**, 231-259
- Phillips, S. J., and M. Dudik, 2008: Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* **31**, 161-175
- Seo, C. W, T. Y. Choi, Y. S. Choi, and D. Y. Kim, 2008: A study on wildlife habitat suitability modeling for goral (*Nemorhaedus caudatus raddeanus*) in Seoraksan National Park. *Journal of the Korea Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology* **11**(3), 28-38. (in Korean with English abstract)
- Shim, K. M., J. T. Lee, Y. S. Lee, and G. Y. Kim, 2004: Reclassification of winter barley cultivation zones in Korea based on recent evidences in climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(4), 218-234. (in Korean with English abstract)
- Song, W. K., and E. Y. Kim, 2012: A comparison of machine learning species distribution methods for habitat analysis of the Korea water deer (*Hydropotes inermis argyropus*). *Korean Journal of Remote Sensing* **28**(1), 171-180. (in Korean with English abstract)
- Song, W. K., 2015: Habitat analysis of *Hyla suweonensis* in the breeding season using species distribution modeling. *Journal of Korean Society of Environmental Restoration Tehenology* **18**(1), 71-82. (in Korean with English abstract)
- Syfert, M. M., M. J. Smith, and D. A. Coomes, 2013: The

- effects of sampling bias and model complexity on the predictive performance of MaxEnt species distribution models. *PLoS ONE* **8**(7), e55158. doi:10.1371/journal.pone.0055158
- Thuiller, W., 2003: BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* **9**(10), 1353-1362.
- Warren, D. L., and S. N. Seifert, 2011: Ecological niche modeling in MaxEnt: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria, *Ecological Applications* **21**, 335-342.
- Watling, J. I., S. S. Románach, D. N. Bucklin, C. Speroterra, L. A. Brandt, L. G. Pearlstine, and F. J. Mazzotti, 2012: Do bioclimate variables improve performance of climate envelope models?. *Ecological Modelling*, **246**(10), 79-85.
- Bean, W. T., R. Stafford, and J. S. Brashares, 2012: The effects of small sample size and sample bias on threshold selection and accuracy assessment of species distribution models. *Ecography* **35**, 250-258.
- <http://www.forest.go.kr> (2015. 12. 01)
- <http://www.kfri.go.kr> (2015. 12. 01)