

미국 잠정종자이동구역(Seed transfer zone) 개념의 국내 적용 방안*

김채영¹⁾ · 김휘문²⁾ · 송원경³⁾ · 최재용⁴⁾

¹⁾ 단국대학교 환경원예·조경학부 학생 · ²⁾ 단국대학교 환경원예·조경학과 대학원 학생 ·

³⁾ 단국대학교 환경원예·조경학부 교수 · ⁴⁾ 충남대학교 산림자원학과 교수

A Study on the Domestic Application of the Concept of Seed Transfer Zone in the U.S*

Kim, Chae-Young¹⁾ · Kim, Whee-Moon²⁾ · Song, Won-Kyong³⁾ and Choi, Jae-Yong⁴⁾

¹⁾ School of Environmental Horticulture and Landscape Architecture, Dankook University, Student,

²⁾ Dept. of Environmental Horticulture and Landscape Architecture, Dankook University, Student,

³⁾ School of Environmental Horticulture and Landscape Architecture, Dankook University, Professor,

⁴⁾ Dept. of Environment and Forest Resources, Chungnam National University, Professor.

ABSTRACT

The seed zone is a map that describes the areas where plant material can be transferred with little risk for properly adapting to a new location. The seed zone study is largely divided into studies based on genetic data and studies based on climatic data. Can be. This study was conducted to establish a temporary domestic seed zone applicable to the entire Korean Peninsula and evaluate its possibility based on the US climate-based seed zone establishment methodology. The temporary seed zone was constructed in the same way as the US case by superimposing the data obtained by dividing the winter minimum temperature into 12 grades and the data obtained by dividing the annual heat: moisture index into 6 grades. As a result of the analysis, 65 temporary seed zones were formed throughout the Korean

* 본 결과물은 산림청의 산림생태계 회복력 증진을 위한 자생식물 종자활용 산림복원기술 연구의 지원을 받아 연구되었습니다.(2020201A00-2022-BA01)

First author : Kim, Chae-Young, School of Environmental Horticulture and Landscape Architecture, Dankook University, Student, 119, Dandae-ro, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-714, Korea,
Tel : +82-41-550-6273, E-mail : 32181148@dankook.ac.kr

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

Received : 20 January, 2021. **Revised** : 31 March, 2021. **Accepted** : 18 March, 2021.

Peninsula, and the areas of the seed zones representing the smallest and largest areas were 3.0km² and 29,423.0km², respectively, and it was confirmed that they had an average size of about 5,064.9km². Temporary seed zones applied in Korea show a pattern of changes in temperature according to the relatively horizontal forest zone, and it was confirmed that the area where the Baekdu-daegan ecological axis is located has a tendency to show lower dryness than other areas. This study applied the US climate-based seed zone methodology in Korea as a pilot, and confirmed the climatic similarity across the Korean Peninsula. Furthermore, it is expected to provide an optimal seed map that improves the success rate of restoration in the future by revising the seed zone grade suitable for the domestic environment in consideration of the results of this study and the possibility of seed adaptation to the field survey and environmental space.

Key Words : *Provisional seed zone, Land cover map, Climate variables, Genetic variation, Adaptation traits, Ecosystem*

I. 서 론

지난 2세기 동안 전 세계 생태계에 대한 인간의 영향이 증가하여 산림생태계가 훼손되고, 자연 서식지가 악화되었다(Mijnsbrugge *et al.*, 2010). 산림생태계는 생물군집 및 비생물환경이 공존하는 통합 시스템으로 복잡한 생태계를 구성하고 있어, 전 지구적 관점에서 반드시 생태계의 건강성이 유지되어야 할 장소이다. 산림생태계 건강성 회복을 위해 인위적인 조림으로 숲을 재조성하는 것이 일반적인 방법으로 통용되고 있다. 그러나 지역에 상관없이 묘목을 식재하여 산림생태계를 복원하는 기존의 방식이 산림의 건강성을 유지할 수 있는 올바른 방향인지 검토되어야 할 필요가 있다.

현재 국내 산림 복원 사업에서 사용되는 종자는 대부분 외국에서 수입되고 있으며, 2015년 이후 연간 약 56톤이 수입되고 있다(Park and Lee, 2017; 국립생태원, 2019). 외래종을 통한 산림생태계 복원은 오히려 지역생태계 내 교란 및 자생종 감소, 생태 복원 속도를 지연시킬 수 있어(Keller *et al.*, 1999), 산림생태계의 효과적인 생태 복원을 위해 외래종 및 자생종 이동 제한의 필요성이 대두되고 있다(Campbell, 1991).

과거 수십 년간 조경 설계자, 산림 복원 전문가 및 연구자들은 산림생태계 내 자생종 사용의 중요성을 언급하며 다양한 자생종 복원 관련 연구가 제안되었다(Mortlock, 2000). 대표적으로 캐나다에서는 재조림 지역이 증가함에 따라 종자 수집을 안내하는 기초 자료를 구축하였고(Ying *et al.*, 2006), 남아프리카에서는 외래종의 유입으로 토착종이 감소함에 따라 외래종의 서식분포와 토착종의 잠재 분포 지역을 묘사하였다(Bezeng *et al.*, 2017). 미국에서는 공공토지에 대한 교란의 심각성이 증가함에 따라 복원종자의 이동 지침 구역을 구축하였고(Doherty *et al.*, 2017), 국내에서는 지형 및 기후 환경이 주요 수종의 생장에 미치는 영향이 증가함에 따라, 기후변화를 예측하여 종의 잠재 분포를 예측하였다(Choi *et al.*, 2014). 이처럼 국내·외에서는 효율적인 산림 복원을 위해 종자가 이동 가능한 분포 지역을 규명하는 것을 목적으로 잠정종자이동구역(Seed transfer zone)의 개념이 도입되었다.

잠정종자이동구역은 식물 재료가 새로운 위치에 제대로 적응하는데 위험이 거의 없이 이전될 수 있는 영역을 묘사한 지도로서, 종자구역 내 상대적으로 기후가 유사한 영역을 나타내고 종자 이동 지침에 대한 가이드라인을 제공해주는

역할을 하며 식물재료의 복원율과 지역 적응의 가능성을 증가시킬 수 있는 정보를 제공해주는 역할을 한다 (Bower *et al.*, 2014). 잠정종자이동구역은 산림 복원지역에 적합한 종자를 판별하는 방법으로 종의 유전적 특성을 기반으로 지도를 구축하는 것이 기초가 되고 있다(Mijnsbrugge *et al.*, 2010). 자생종에 대한 유전적 자료 취득이 어려울 경우, 강수량 및 기온 등 기후 환경 요인 기반 잠정종자이동구역을 일차적으로 구축하여 산림생태계 복원 시 종자 부적응을 최소화하기 위한 일반화된 임시 종자구역(Generalized provisional seed zone)을 활용하고 있다(Youtie *et al.*, 2012). 1930년대 미국 산림청이 조림지 확보 및 복원을 실패한 것에 대응하여 기후, 지형(토양, 경사 등) 인자를 활용한 최초의 잠정종자이동구역 연구가 제안된 이래로 개념이 점차 확대 되고 있다(Bower *et al.*, 2014).

미국은 기후 환경 요인을 고려한 잠정종자이동구역 구축을 위해 월간 및 연간 강수량과 기온을 이용하여 미국 전역을 대상으로 생태지역(Ecoregion)을 구축한 연구(Bailey, 1983), 연평균 기온 및 강수량과 연간 열 : 수분지수를 이용하여 Whitebark pine (*Pinus albicaulis* Engelm.) 종자의 이동 지침을 제안한 연구(Bower, 2008), 연간 강수량과 연간 최고 기온을 이용하여 mountain brome(*Bromus carinatus* Hook. & Arn.) 종자 이동 지역을 제안한 연구(Johnson *et al.*, 2010), 겨울철 최저온도와 연간 · 성장기 강수량 지수를 이용하여 미국 동부의 종자 수집 구역을 묘사한 연구(Pike *et al.*, 2020) 등 식물 성장에 가장 중요한 요소인 기온과 수분, 생태적 환경 등을 고려한 기후 관련 잠정종자이동구역이 제안되어 미국 산림청(USFS) 등 정책적으로도 해당 잠정종자이동구역이 활용되고 있다 (Schubert *et al.*, 1973; Bower *et al.*, 2014).

국내에서는 자생종자 분포 확인을 위해 왕벚나무(*Prunus yedoensis* Matsumura)의 유전적 변이를 규명할 수 있는 RAPD(Relative Afferent

Pupillary Defect) 분석 연구(Kim, 1998), 자작나무속과 서어나무속 분포 규명을 위한 중간 유연 관계 분석 연구(Chang, 2000; Jeon and Chang, 2000), 민들레류의 자생종과 귀화종 분포 실태 파악을 위한 RAPD 분석 연구(An *et al.*, 2003), 자생종과 재배종 고분의 성분함량 비교를 위해 고속액체크로마토그래피(HPLC, High-Performance Liquid Chromatography) 분석을 진행한 연구(Lee, 2008) 등 대부분 종자 간 유전적 거리 차이에 기반을 둔 분포 특성에 관한 연구가 수행되었다. 최근 환경 및 기후변화에 따른 산림 분포의 변화가 중요하게 인식됨에 따라, Lee *et al.*(2005)는 기후 변화에 영향을 미치는 지형, 식생, 작물, 가옥 분포를 통해 상세 기후 지역을 구분하였다. 나아가 산림생태계 회복력 증진 방안 모색과(Byun *et al.*, 2010), 기후 변화 시나리오에 따른 식생분포 변화를 확인한 연구가 진행되었다(Lee *et al.*, 2011; Koo *et al.*, 2016; Choi *et al.*, 2019). Choi *et al.* (2017) 연구에서는 기후 환경에 적합한 생물 기후 변수에 대한 통계분석을 바탕으로 기후가 동일한 권역별로 환경적 특성을 규명하였다.

이러한 연구들은 남한 지역의 지형 및 기후의 변화 양상을 정확하게 파악하고 보다 정량적으로 적용 가능한 기후 권역 분석기법을 찾는 과정이라고 정리할 수 있다. 그러나 대부분 남한 지역에 한정되어 대상지를 분석하고 있기 때문에 분석결과를 한반도 범위로 확장하여 광범위하게 적용하는데 제한이 있으며, 국내 특성을 반영한 동일한 기후 지역을 평가하는 것에 중점이 되어, 식생이 생육하는데 동일한 기후 권역을 확인하는데 한계가 있다.

따라서 본 연구는 선행 연구가 진행된 미국의 잠정종자이동구역 도입 배경과 연구 동향에 대해 살펴보고, 미국의 기후 및 수분 기반 잠정종자이동구역 구축 방법을 국내에 시범 적용하여 해석해보고자 한다. 나아가 시범적으로 구축된 잠정종자이동구역이 국내 산림생태계에 실제

적용되기 위한 한계점 등을 파악하고, 생태복원 및 정책 분야에서 활용방안을 제시하여 미래 국내용 잠정종자이동구역 구축을 위한 밑거름으로 활용되고자 한다.

II. 미국 잠정종자이동구역의 연구 동향

생태계 질에 영향을 미치는 자연적 요인과 인위적 요인 간의 상호관계는 공간적으로나 시간적으로 다양하고 복잡하며, 특정한 토지 자원의 품질 관계를 예측하기 위한 수학적 및 기타모델이 불특정 영역에 적용될 경우 혼란이 발생할 수 있다(Omernik, 1987). 미국은 이러한 문제를 완화하고 생태계와 그 구성요소를 보다 효율적으로 관리할 수 있는 지리적 프레임워크를 제공하기 위해 생태지역지도(Ecoregion map)를 구축하였다(Olson *et al.*, 2001). 생태지역지도는 주요 토지 이용등급 및 지표면 형태, 잠재적 자연식생 및 토양지도를 활용하여 구축되었으며, 이는 향후 잠정종자이동구역 구축 연구에서 기후적으로 유사하나 생태학적으로 다른 지역을 식별할 때 지도의 경계를 나누는 역할을 한다(Omernik *et al.*, 2000).

잠정종자이동구역 경계에 대한 정확도 분석은 첫째, 기후 조건을 고려하는 방법, 둘째, Omernik level III 생태지도와 기후 조건을 병합하는 방법, 셋째, 유전적 분석을 기반으로 실증 연구를 진행하는 방법의 세 방향으로 진행할 수 있으며 유전적 분석을 기반으로 경계를 나누는 잠정종자이동구역의 정확도가 가장 높았고 다음으로는 기후 기반 잠정종자이동구역 내에서 종자 구역의 정확도를 높이기 위해 Omernik level III 생태지역을 중첩하여 경계를 설정한 잠정종자이동구역의 정확도가 높았다(Bower *et al.*, 2014). 이러한 연구 결과를 고려할 때, 잠정종자이동구역의 경계를 보다 정확하게 구축하기 위해서 크게 유전적 분석을 기반으로한 잠정종자이동구역과 기후 및 환경 변수를 기반으로한 잠

정종자이동구역으로 구분하는 것이 효과적이라고 판단된다.

1. 기후 기반 잠정종자이동구역

종자를 보다 효과적으로 사용하기 위해서는 종의 유전적 특성에 대한 자료가 기반이 되어야 하지만 초지 및 대초원과 같은 광대한 영역은 종자의 종류가 많고 적응지역을 구축하기 위한 자료의 취득이 어려울 수 있다(Vogel *et al.*, 2005). 기후 기반 잠정종자이동구역은 유전적 변이의 혼란이나 지역 적응의 부작용을 최소화할 수 있는 영역을 묘사한 지도로서 종자의 유전적 근거가 불충분할 때 지형, 기후 및 환경 요인이 종자의 서식 지역을 판별하는데 적합한 지표임을 확인하였다(Miller *et al.*, 2011). Bower *et al.*(2014)는 겨울철 최저기온과 연간 열 : 수분지수(건조도, AH : M)를 활용하여 잠정종자이동구역을 구축하였으며 연간 열 : 수분지수를 통해 따뜻하고 습한(low-moderate aridity), 춥고 습한(low aridity), 따뜻하고 건조한(high aridity), 춥고 건조한(moderate-high aridity) 지역으로 구분하였다. 구축한 잠정종자이동구역은 기후적으로 유사한 지역 내에서 생태학적으로 다를 수 있기 때문에, 생태학적 차이를 설명하기 위해 Omernik level III 생태지역(Omernik, 1987)지도를 잠정종자이동구역과 중첩하여 기후적으로 비슷할 수 있지만 생태학적으로 다른 지역을 식별하였다(Bower *et al.*, 2014). Doherty *et al.*(2017)는 기후 유사성 지수와 연 평균 기온 및 강수량 지표를 중심으로 복원 종자의 우선순위를 확인하고 산림생태계 회복 속도를 증진시키기 위한 중별이동지침을 구축하였다. 기후 유사성 지수는 종자의 지역 적응 가능성을 예측하는데 사용되는 지표로서 지역에 적합한 종자의 우선순위를 생성할 수 있다(Doherty *et al.*, 2017). Crow *et al.*(2018)는 연간 열 : 수분지수와 연평균 강수량 및 여름 고도 지수를 바탕으로 종분포모델(SDM, Species Distribution

Models)을 사용하여 alder leaf mountain mahogany(*Cercocarpus montanus*)종 분포지도를 구축하였다. 종분포모델(SDM)은 종에 대한 기후변화의 영향을 예측하는 방법론으로서 alder leaf mountain mahogany(*Cercocarpus montanus*)종의 발생 확률을 나타내는 역할을 한다(Crow *et al.*, 2018). Shryock *et al.*(2018)은 종자의 생육에 적합한 기후를 정량적으로 평가할 수 있는 기후 거리를 바탕으로 복원을 위한 잠정 종자 이동구역을 구축하였다.

2. 유전학 기반 잠정종자이동구역

유전적 구조는 종다양성 보전과 기후변화의 영향을 완화할 수 있는 역할을 하며 종자의 유전자 변이를 통해 지리적·환경적 상관관계를 확인할 수 있다(Heslop-Harrison, 1964). Clair *et al.*(2005)는 Douglas fir(*Pseudotsuga menziesii*)종의 유전적 데이터와 지형 및 기후 데이터와 상관분석을 통해 고도 및 위도, 겨울철 최저기온과 여름철 건조도가 가장 밀접한 관련이 있는 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 기후 지도를 제작하고 그 위에 Douglas fir(*Pseudotsuga menziesii*)의 종자 영역을 매핑하여 잠정종자이동구역을 구축하였다. Eckert *et al.*(2010)는 54개의 지역에서 loblolly pine(*Pinus taeda*)종을 샘플링하여 유전적 분석을 실시한 후, 월간 및 연간 최고·최저 기온과 강수량 지표를 바탕으로 각 지역에 적합한 종자를 확인하고 이를 표시한 지도를 구축하였다. Johnson *et al.*(2012)은 인도쌀풀(*Achnatherum hymenoides*)의 유전적 다양성과 월간 및 연간 강수량, 월 평균 온도, 월별 최고·최저 기온을 중심으로 잠정종자이동구역을 구축하였으며 지도의 경계는 Omernik level III 생태지역(Omernik, 1987)으로 제한하였다. Youtie *et al.*(2012)는 평균 일일 최대 생장기 온도(4월~9월)와 연간 강수량 지표를 사용하여 잠정종자이동구역을 구축하였으며 복원종으로 알려진 자생식물 dune penstemon (*Penstemon acuminatus*), royal penstemon

(*Penstemon speciosus*), Douglas 'dustymaiden (*Chaenactis douglasii*)의 개체군 분포를 잠정종자 이동구역 위에 표시한 후 복원이 가장 필요한 지역을 정의하였다.

잠정종자이동구역 구축을 위한 유전적 분석을 통해 종자의 기원이 유전적으로 멀어짐에 따라 종자의 성장이 감소하는 것을 확인하였다(Keller and Kollmann, 1999). 또한, 겨울철(12월~2월) 월평균 기온이 종자 생장의 예측에 가장 효과적이었으며 여름철 건조도 비율이 종자의 생존을 가장 잘 예측하는 기후 변수임을 확인하였다(Rehfeldt *et al.*, 1999).

이처럼 기후·환경 변수 및 유전자 정보를 활용한 잠정종자이동구역의 구축 방법이 종자 구역을 판별하기 위한 조사에서 그 활용성이 인정받고 있음을 확인하였다. 국내의 경우, 종자의 유전적 거리를 확인하는 연구가 진행된 바 있으나(Kim, 1998; Chang, 2000; Jeon and Chang; 2000; Lee, 2008), 국내 전역을 포함하는 유전적 연구는 미미한 실정이며 대부분 연구가 유전적 차이를 규정하는 것에 국한되어 있고 종자 구역을 정의하는 연구는 부족한 한계를 가지고 있다. 이를 토대로 국내 적용 가능성과 정확성을 고려할 때, 유전적 자료를 활용하는 것보다 정량적인 데이터를 확보할 수 있는 기후 변수를 활용하여 잠정종자이동구역을 구축하는 것이 효과적이라고 판단된다. 종자의 생장에 영향을 미치는 기후 변수를 확인하기 위한 문헌 고찰을 통해 겨울철 최저 기온과 연간 열 : 수분지수가 중요한 요인임을 확인하였으며 이 기후 변수를 활용한 선행연구로는 Bower *et al.*(2014)의 연구가 있다. Bower *et al.*(2014)가 구축한 잠정종자 이동구역은 종자의 개발, 유전자 보존 및 자생 식물 복원에 활용되고 있으며 종자 구역을 묘사하는 기초 자료의 역할을 하고 있다. 이에 따라, Bower *et al.*(2014)의 선행연구를 바탕으로 겨울철 최저온도와 연간 열 : 수분지수의 적용은 잠정종자이동구역을 정의하는데 효율적인 경계설

Table 1. Seed transfer zone related research and used data

Individual	Example citation	Seed transfer zone mapping data
Climate	Schubert, and Pitcher. 1973	Maximum temperature and humidity
	Baily. 1983	Monthly and annual precipitation and temperature
	Hamann and Wang. 2005	Monthly average temperature, monthly average minimum and average maximum temperature, monthly precipitation, summer heat: moisture index (SH: M), annual thermal moisture index (AH: M)
	Bower 2008	Annual average temperature and precipitation, annual heat: moisture index (AH: M)
	Johnson <i>et al.</i> 2010	Annual precipitation, annual maximum temperature
	Bower <i>et al.</i> 2014	Winter minimum temperature, annual heat: moisture index (AH: M)
	Doherty <i>et al.</i> 2017	Climate similarity index, annual average temperature and precipitation
	Crow <i>et al.</i> 2018	Annual heat: moisture index, annual average precipitation, summer altitude index
	Shryock <i>et al.</i> 2018	climate distance
	Pike <i>et al.</i> 2020	Minimum winter temperature, annual and growing precipitation
Genetic	Keller and Kollmann, 1999	Cornflower(<i>Centaurea cyanus</i>), Chicory(<i>Cichorium intybus</i>), Wild Carrot(<i>Daucus carota</i>), Perforate St John's-wort(<i>Hypericum perforatum</i>), Oxeye daisy(<i>Leucanthemum vulgare</i>), Red Poppy(<i>Papaver rhoeas</i>), White campion(<i>Silene latifolia</i>)
	Rehfeldt <i>et al.</i> 1999	lodepole pine(<i>pinus contorta</i>)
	Keller and Kollmann. 2000	Corncockle(<i>Agrostemma githago</i>), Common poppy(<i>Papaver rhoeas</i>)
	Clair <i>et al.</i> 2005	Douglas fir(<i>Pseudotsuga menziesii</i>)
	Ying <i>et al.</i> 2006	lodepole pine(<i>pinus contorta</i>)
	Eckert <i>et al.</i> 2010	loblolly pine(<i>Pinus taeda</i>)
	Miller. 2011	Oregon sunshine(<i>Eriophyllum lanatum</i>), denseflower willowherb(<i>Epilobium densiflorum</i>), Slender cinquefoil(<i>Potentilla gracilis</i>), Large-leaved lupine(<i>Lupinus polyphyllus</i>), Micranthes oregana(<i>Saxifraga oregana</i>)
	Johnson <i>et al.</i> 2012	Indian ricegrass(<i>Achnatherum hymenoides</i>)
	Youtie <i>et al.</i> 2012	dune penstemon (<i>Penstemon acuminatus</i>), royal penstemon (<i>Penstemon speciosus</i>), Douglas 'dustymaiden (<i>Chaenactis douglasii</i>)

정을 가능케 하며, 이러한 차원에서 국내의 잠정종자이동구역에 적용해보는 것은 의미 있는 접근이라 판단된다.

III. 연구 범위 및 방법

1. 연구대상지

잠정종자이동구역의 국내 적용 가능성 검토를

위해 모든 종자에 대한 정보를 포괄할 수 있는 한반도 전역을 대상으로 선정하였다. 한반도는 동해, 남해 그리고 황해에 둘러싸여 있고 북으로는 압록강과 두만강을 경계로 중국과 경계를 이루고 있으며 면적은 약 22만 km²이다(33°06'45" ~ 43°00'36"N, 124°10'47" ~ 131°52'22"E). 지형적으로 S자형을 띄고 있어 동서가 좁고 남북으로 길게 늘어진 형태를 지니고 있다.

태백산맥과 함경산맥이 동쪽에 치우쳐 있고 개마고원이 함경산맥 북쪽에 위치해, 동쪽과 북쪽이 높고 서쪽과 남쪽이 낮은 형상을 하고 있다. 기후적으로는 고도가 높고 대륙과 접해있는 북쪽에 비해 남쪽은 고도가 낮고 바다와 접해있어 남북 간의 기온 차이가 심하며, 연 강수량은 지역에 따라 큰 차이가 있으나 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 감소하는 경향이 있다. 한반도는 지리적 위치에 따라 고유한 기후 특성을 가지고 있어, 기후를 고려한 종자 이동 지침의 시범적인 구축을 위한 대상지로 적합하다고 판단된다.

2. 자료수집 및 분석

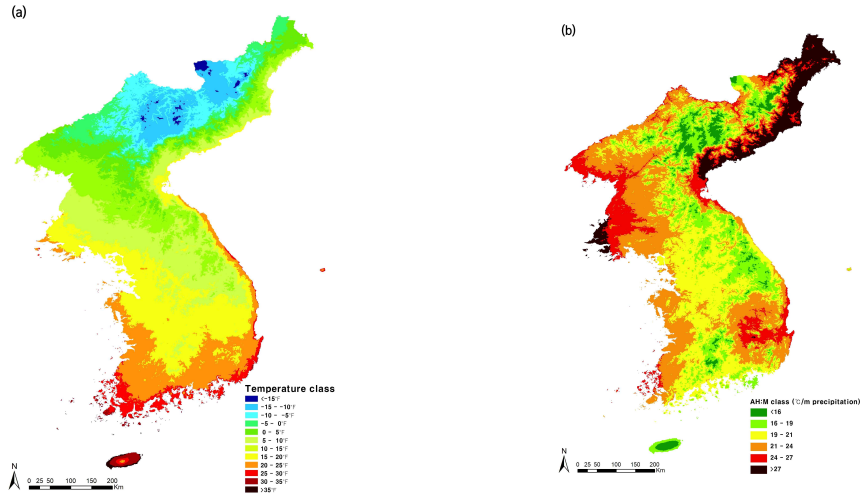
대상지의 기후적 특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 WorldClim에서 제공하는 기온 및 강수량 자료를 활용하였다. WorldClim 기후 자료는 미국 지질 조사국(USGS)에 의해 1895년부터 2009년까지 해마다 개발되었으며 래스터(raster) 파일로 제공되고 있다(O'Donnell and Ignizio, 2012). WorldClim 기후 자료는 1970년~2000년 월별자료를 바탕으로 제작되었다. 30'' (~1km²)에서 10' (~340km²) 사이의 4가지 해상도로 자료가 정규화되었기 때문에, 보다 정밀하고 시계열적인 기후의 변화를 반영할 수 있는 자료라 판단된다. WorldClim의 Historical climate data에서 제공하는 WorldClim ver2.1은 최저, 평균 및 최고 기온, 강수량, 총강수량 및 일사량에 대한 월간기후 데이터로 구분하여 구축되었으며 Bioclimate variables에서 제공하는 WorldClim ver2.0은 연평균 기온, 연간 강수량, 가장 춥고 더운 날의 기온, 습한 달의 강수량 등을 포함한 19개의 생물 기후 변수로 구분하여 구축되었다(O'Donnell and Ignizio, 2012). 본 연구에서는 잠정종자이동구역 구축에 관한 문헌 고찰을 통해 종자의 생장에 주요한 영향을 미치는 겨울철(12월~2월) 최저온도와 연간 열 : 수분지수 자료를 사용하였다. 연간 열 : 수분지수는 건조의 척도를 나타내는 지수로, 연평균 기온(°C)에서 양

수 값을 얻기 위해 15°C를 더하고 미터(m) 단위의 연간 강수량으로 나누어 건조도 지수를 계산할 수 있다(Hamann and Wang, 2005).

국내 겨울철 최저온도 지도를 구축하기 위해 Historical climate data에서 제공하는 자료 중 minimum temperature(°C)자료를 이용하였다. minimum temperature(°C)자료는 한 해에 매월 하나씩 구축하여 12개의 GeoTiff파일로 이루어져 있으며 제공되는 자료 중에서 가장 작은 해상도인 30'' (~1km²)의 해상도를 이용하였다. WorldClim에서 제공하는 자료는 전 세계 단위로 DIVA-GIS에서 south korea와 north korea의 경계 데이터를 다운로드하여 국내의 지도 경계로 사용하였다. 선행연구에 따라 ArcGIS 10.7의 Cell statistics tool을 이용하여 겨울철 온도(°C) 데이터에서 12월, 1월, 2월 자료의 월별 Minimum 값을 추출한 후, Extract by Mask tool을 이용하여 12월, 1월, 2월의 자료를 하나로 합쳐주었다(Bower *et al.*, 2014). WorldClim에서 제공하는 기온 데이터는 °C단위이고 USDA plant hardiness zone은 °F단위 이므로 이를 통일하고자 raster calculator tool에 섭씨·화씨 변환공식을 입력하여 °F단위로 통일시켜주었다.

이후, DIVA-GIS에서 다운로드한 각각의 south korea와 north korea의 경계 데이터를 ArcGIS 10.7의 Extract by Mask tool을 이용하여 하나로 병합하였다. 이렇게 구축된 국내의 경계를 통해 ArcGIS 10.7의 Clip tool을 이용하여 국내의 경계에 맞는 온도 지도를 구축하였다. 이후 ArcGIS 10.7의 reclassify tool을 이용하여 <-15 - >35°F (-26.1-1.6°C) 범위의 5°F(2.2°C) 대역으로 분류하여 12개의 등급으로 이루어진 국내의 겨울철 최저온도 지도를 구축하였다(Figure 1).

다음으로, 국내 건조도(연간 열 : 수분지수) 지도를 구축하기 위해 Bioclimate variables에서 제공하는 자료 중 Annual Mean Temperature(°C)와 Annual Precipitation(mm)자료를 이용하였다. Bioclimate variables 자료는 1970년~2000년의



(a) Map of the lowest temperature in winter in Korea (b) Domestic drying (annual heat: moisture index) map

Figure 1. The climate map needed for the seed zone

평균자료이다. 제공되는 자료 중에서 가장 작은 30" (~1km²) 해상도 자료를 이용하였고 전 세계 단위의 자료이므로 겨울철 최저온도 제작 시 사용한 국내 경계를 동일하게 사용하였다. 건조도 제작 시 필요한 자료는 양수 값을 얻기 위해 15°C를 더해진 온도 데이터와 m 단위의 연간 강수량 데이터가 필요하다(Hamann and Wang, 2005). ArcGIS 10.7의 raster calculator tool을 이용하여 15°C를 더한 온도 데이터를 구축하였으며 mm 단위의 강수량 데이터를 m 단위로 변환하였다. 이렇게 구축된 기온 데이터를 강수량 데이터로 나누어 전 세계 단위의 건조도 지도를 구축하였다. 여기서 국내에만 해당하는 데이터를 얻기 위해 겨울철 최저온도 지도 제작 시 구축한 국내 경계를 활용하였으며 ArcGIS 10.7의 Clip tool을 이용하여 국내의 건조도 지수 지도를 구축하였다. 선행연구에 따르면 건조도를 6개 척도로 나누었으며 분류 간격은 각 클래스의 범위가 거의 동일한 수의 값을 가지며 간격 간의 변화가 일정하도록 하였다(Bower *et al.*, 2014). 이에 따라 ArcGIS 10.7의 reclassify tool에서 nature breaks를 이용하여 국내 건조도를 6개의 대역으

로 나누고 각 클래스의 범위가 거의 동일한 수의 값을 가진 건조 지도를 구축하였다.

구축된 겨울철 최저온도 지도와 연간 열:수분지수 지도를 병합하여 기후를 기반으로 하는 잠정종자이동구역(온도-건조)을 구축할 수 있으며 이는, 지형의 차이를 반영하여 기후대의 수와 평균 크기가 다른 것을 확인할 수 있다(Bower *et al.*, 2014). 국내에 해당하는 잠정종자이동구역을 구축하기 위해 ArcGIS 10.7의 raster calculator tool을 이용하여 국내의 겨울철 최저온도 지도와 국내의 건조 지도를 중첩하여 국내용 기후 기반 잠정종자이동구역을 구축하였다.

구축된 잠정종자이동구역의 분류 정확성을 검증하기 위해 잠정종자이동구역과 생태 지역지도를 중첩하여 정규화하는 과정을 거치는데, 국내의 경우 생태지역지도가 제작되어 있지 않기 때문에 지형분포의 데이터를 포함하고 있는 대분류 토지 피복 지도를 사용하여 생태지역지도를 대체하였다. 사용된 토지 피복지도는 대분류 토지 피복지도로서 시가화건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역의 7개 분류 항목으로 구성되고 30m × 30m의 공간 해상도를 갖

는다. 본 연구에서는 산림지역에 해당하는 데이터를 추출하여 산림지역의 분포 특성을 파악하고 이를 잠정종자이동구역과 중첩하여 잠정종자이동구역의 분류 정확성을 검증하였다. 현재 토지 피복 지도는 대상지를 남한 지역으로 제한하여 데이터를 제공하기 때문에 이 과정에서는 남한 지역에 해당하는 경계만을 가지고 잠정종자이동구역의 정확성을 검증하였다. 추가적으로 남한 지역을 대상으로 생태 기후 권역을 분류한 국내의 선행연구를 통해 본 연구에서 구축한 잠정종자이동구역의 타당성을 검토하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 생물기후 변수의 공간분포 특성

겨울철 최저온도 분포 자료는 12월, 1월, 2월의 월별 데이터에서 최솟값을 추출한 후, 3개의 데이터를 중첩하고 이를 $<-15 \sim >35^{\circ}\text{F}$ ($-26.1 \sim 1.6^{\circ}\text{C}$) 범위의 5°F (2.2°C) 대역으로 분류함으로써 12개의 등급(<-15 , $-15 \sim -10$, $-10 \sim -5$, $-5 \sim 0$, $0 \sim 5$, $5 \sim 10$, $10 \sim 15$, $15 \sim 20$, $20 \sim 25$, $25 \sim 30$, $30 \sim 35$, >35)으로 이루어진 국내의 겨울철 최저 온도 지도를

Table 2. Area of winter minimum temperature(WMT) classification and area

WMT Classification($^{\circ}\text{F}$)	Area(Km^2)
<-15	1,723.0
$-15 \sim -10$	23,565.0
$-10 \sim -5$	23,635.0
$-5 \sim 0$	22,349.0
$0 \sim 5$	28,371.0
$5 \sim 10$	45,914.0
$10 \sim 15$	58,821.0
$15 \sim 20$	68,015.0
$20 \sim 25$	41,592.0
$25 \sim 30$	11,871.0
$30 \sim 35$	2,660.0
> 35	701.0

구축하였다(Figure 1). 이는 $15 \sim 20^{\circ}\text{F}$ 범위에서 $68,015.0\text{km}^2$ 의 면적으로 가장 많이 분포하고 있고 $>35^{\circ}\text{F}$ 범위에서는 701.0km^2 의 면적으로 가장 적게 분포하고 있음을 확인하였다(Table 2). 건조도 분포 자료는 연평균 기온($^{\circ}\text{C}$)에 15°C 를 더한 후 미터 단위의 연간 강수량으로 나누어 주었으며 이를 6개의 대역(<16 , $16 \sim 19$, $19 \sim 21$, $21 \sim 24$, $24 \sim 27$, >27)으로 나누어 건조도 자료를 제작하였다(Figure 1). 건조도는 $21 \sim 24^{\circ}\text{C}/\text{m}$ Precipitation 범위에서 $100,410.0\text{km}^2$ 로 가장 많이 분포하고 있으며, $>27^{\circ}\text{C}/\text{m}$ Precipitation 범위에서 $27,107.0\text{km}^2$ 의 분포로 가장 적은 분포를 띠고 있는 것을 확인하였다(Table 3). 겨울철 최저온도의 분포는 수평적 삼림대에 따라 변화하는 양상을 띠고 있으며, 건조도 분포는 백두대간 생태축이 위치한 지역이 다른 지역에 비해 낮은 경향을 보여주었다. 남한의 경우, 위도 경계를 기준으로 해안선 및 광역 생태축 일대에 잠정종자이동구역이 단조롭게 분포하였으며 북쪽 지역으로 올라갈수록 건조지수와 온도 지수의 변화 폭이 커져 상대적으로 남쪽 지역의 국토보다 잠정종자이동구역 다양성이 높아지는 것을 확인하였다.

2. 잠정종자이동구역 공간분포 특성

겨울철 최저온도 자료와 건조도 자료를 중첩한 결과, 한반도 전역에 걸쳐 65개의 잠정종자

Table 3. Area of annual heat : moisture(AH:M) index classification and area

AH:M Classification ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$ precipitation)	Area(Km^2)
<16	13,599.0
$16 \sim 19$	55,543.0
$19 \sim 21$	94,403.0
$21 \sim 24$	100,410.0
$24 \sim 27$	38,155.0
>27	27,107.0

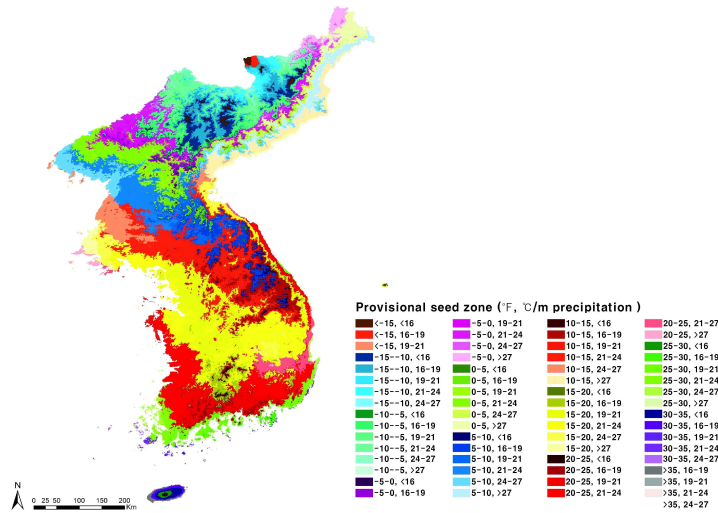


Figure 2. Domestic provisional seed zone

이동구역이 형성 되었다(Figure 2). <15°F와 16~19°C/m precipitation에 해당하는 잠정종자이동구역은 3.0km²로 가장 작은 면적을 차지하고 15~20°F와 19~21°C/m precipitation에 해당하는 잠정종자이동구역의 면적이 29,423.0km²로 가장 많은 면적을 차지하였으며 65개의 잠정종자이동구역은 평균적으로 5,064.9km²의 면적을 차지하고 있다(Table 4). 각 권역별 잠정종자이동구역 면적은 Appendix 1과 같다. 잠정종자이동구역은 위도 경계에 걸쳐 넓은 범위가 확인 되었으며, 이는 동서의 길이가 짧고 남북으로 길게 위치하는 한반도 지형 특성을 내포하고 있음을 보여준다. 제주특별자치도는 작은 면적에 비해 많은 잠정종자이동구역이 확인되어 밀도 대비 잠정종자이동구역이 복잡한 것으로 분석되었는데, 이는 국내 산맥 및 제주도 기후대(강수량 및 온도)의 다양한 특성을 포함하는 것으로 해석할 수 있다.

결과적으로, 본 연구를 통해 정의한 국내용 잠정종자이동구역이 기후적으로 유사한 지역을 나타내고 있음을 확인하였다. 특히, 생물기후변수 및 잠정종자이동구역의 공간 분포 특성이

한반도 지형 특성과 유사한 결과를 보여주었다. 그럼에도 불구하고, 면적이나 지형적으로 상이한 미국의 잠정종자이동구역 구축 기준을 국내에 동일하게 적용한 한계를 가지고 있다. 향후 연구를 통해 국내의 지형과 기후를 고려한 고유의 분류 기준을 마련하여 적용해본다면 보다 정량적인 잠정종자이동구역을 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 잠정종자이동구역 비교 및 검증

본 연구에서 구축한 잠정종자이동구역을 산림지역의 분포 특성과 비교 분석하기 위해 잠정종자이동구역과 남한의 토지피복지도를 중첩하여 남한의 산림지역을 32개 권역으로 구분하였다(Figure 3). 산림지역은 5~20°F와 19~21°C/m precipitation 구역에서 17,874.0km²로 가장 많은 분포를, >35°F와 19~21°C/m precipitation 구역에서 30km²로 가장 작은 분포를 나타내고 있다(Table 5). 각 권역별 산림지역 면적은 Appendix 2와 같다. 대분류 토지 피복 지도를 통하여 잠정종자이동구역 내 산림지역 분포 특성을 확인함으로써 기후 권역별 산림이 차지하는 정도를 확인하였

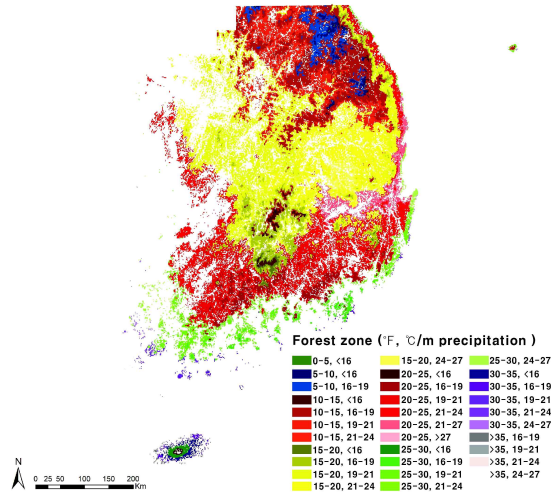


Figure 3. Forest area within provisional seed zone

으며, 이는 산림이 선호하는 기후의 특성을 나타내는 척도의 역할을 할 수 있다고 판단된다. 산림 지역의 분포와 잠정종자이동구역을 비교 분석한 결과, 산림지역과 잠정종자이동구역이 가장 많이 분포하는 권역이 동일 기후임을 확인하였다. 이를 통해 남한 지역에 해당하는 잠정종자이동구역의 경계가 생물이 선호하는 기후 권역을 적절하게 반영된 결과로 해석할 수 있다.

추가적인 검증방법으로 남한 지역을 대상으로 지형, 식생, 가옥 분포 활용하여 상세하게 기후 권역을 분류하고 있는 Lee *et al.*(2005)의 상세기후지도와 남한 지역을 대상으로 다양한 기후 변수를 활용하여 기후 권역을 분류하고 있는 Choi *et al.*(2017)의 생물기후권 권역 지도와 비교 분석하였다. Lee *et al.*(2005)는 식생과 작물 분포의 한계를 이용하여 남한 기후를 4개로 1차 구분하고 1차 기후 지역 내에서의 식생, 작물, 가옥의 분포 및 지리적 특성에 따라 14개 기후

지역으로 2차 구분을 하였으며 3차로 남한의 기후를 48개로 나누어 상세기후지도를 구축하였다. 송악의 북한 한계를 기준으로 서해안과 동해안의 해안지역과 내륙 지역을 구분하고, 월동배추의 분포 한계를 기준으로 남해안 및 도서지역과 남부 지역을 구분하였다. 이 구역은 본 연구의 25~30°F 온도에 해당하는 잠정종자이동구역의 경계와 유사한 형태를 보였다. 난지형과 한지형 마늘 분포 경계선을 기준으로 중부 지역 중 충청내륙과 전라내륙 기후 지역, 경북 내륙과 경남 내륙 기후 지역으로 내륙 지역의 기후를 세분화한 구역을 통하여 본 연구의 내륙 지역 경계가 Lee *et al.*(2005)에 비해 대별 된 것을 확인할 수 있었다.

Choi *et al.*(2017)는 27개의 생물기후변수를 바탕으로 상관분석과 주성분 분석을 진행하여 연평균 기온, 최한월의 최저기온, 온량지수, 최저 강수 분기의 강수량, 온난 분기의 강수량을

Table 4. Minimum, maximum, and mean area of Provisional seed zone

	Min	Max	Mean
Area(Km ²)	6.0	29,423.0	5,064.9

주요 변수로 선정하였고 주성분 분석을 이용하여 남한 기후를 21개로 구분한 생물기후권 권역 지도를 구축하였다. 남부 해안과 서부 평야 지역 및 제주도에 분포하는 온대 남해안형 권역과 본 연구의 해안선 기준과 유사한 형태를 보였다. 또한, 백두대간의 일부 산맥과 제주도의 한라산 등의 산악 지형을 포함하는 냉대 산악권 권역의 경계와 본 연구에서 태백산맥이 위치한 기후 경계가 유사한 형태를 보였다.

본 연구의 결과와 비교하였을 때, 기후 데이터 및 분류 기준이 상이함에 따라 내륙 지역을 구분하는 경계가 부정확한 결과를 보였으나 산맥 지역과 해안지역에 해당하는 경계는 유사한 형태로 분류되었음을 확인할 수 있었다. 하지만 정량적 방법이 아닌 정성적 방법을 통한 분석으로 직접적인 비교는 어려운 한계가 존재한다. 또한, 미국의 경우 지형조건을 반영한 생태지역 지도(Ecoregion)를 잠정종자이동구역과 중첩하여 정확성을 평가하였다. 국내의 경우, 생태지역 지도 대신에 지형적 조건을 포함하고 있는 대분류 토지 피복 지도를 사용하여 정확성 평가를 진행하였기에 신뢰성 높은 검증이 이루어지지 않은 한계가 존재한다.

남한 지역에 해당하는 산림 분포 특성 및 선행 연구의 비교 분석을 통해 생태지역 지도를 대체하여 국내 잠정종자이동구역의 경계 및 해안지역 경계의 정확성을 확인한 바 있으나 북한 지역의 분류 정확성이 입증되지 않았기 때문에 본 연구에서 구축한 잠정종자이동구역을 국내용 잠정종자이동구역으로 일반화하는 것은 오류 발생 가능성이 있다고 판단된다.

구축한 잠정종자이동구역의 정확성을 높이기

위해, 한반도 전역에 적용 가능한 생태지역 지도를 제작하는 기초연구에 대한 방안을 고민할 필요가 있다. 향후 생물 서식에 영향을 미치는 다른 자연적 요인(고도, 향 등) 및 사회 환경적 요인(토지이용 등)을 추가하여 권역을 구분한다면 국내에 적용 가능한 생태지역 지도를 구축할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 국내에 적용 가능한 생태지역 지도를 구축하여 본 연구에서 제작한 잠정종자이동구역과 중첩한다면, 보다 정밀하게 기후 권역을 분류할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 제작한 잠정종자이동구역은 복원에 대표적으로 활용되는 종자의 출현 지점 데이터를 활용하거나 토양환경 데이터 수집이 제안될 수 있다. 생태지역 지도를 활용한 잠정종자이동구역의 고도화는 종자 구역을 보다 정확하게 도출하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 나아가 지역 단위에서의 자생종 관리를 위한 참조자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며 복원 종의 부작용을 최소화하면서 효율적인 종자 이동 자료 수립 시 기본적인 척도로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결 론

산림생태계 및 자연 서식지의 악화는 생태계의 효과적인 생태복원과 함께 외래종 및 자생종자 이동에 대한 가이드라인의 필요성을 제기하고 있다. 본 연구에서는 겨울철 최저온도와 연간 열 : 수분지수를 활용하여 한반도 전역을 65개의 잠정종자이동구역으로 구축하였다. 잠정종자이동구역은 $<15^{\circ}\text{F}$ 와 $16\sim 19^{\circ}\text{C/m}$ precipitation 구

Table 5. Area of Forest area within provisional seed zone

	Min	Max
Individual ($^{\circ}\text{F}$, $^{\circ}\text{C/m}$ precipitation)	> 35, 19 ~ 21	15 ~ 20, 19 ~ 21
Area(Km^2)	3.0	17,874.0

역이 3.0km²로 가장 작은 면적을 차지하고 15~20°F와 19~21°C/m precipitation 구역의 면적이 29,423.0km²로 가장 많은 면적을 차지하였으며 65개의 잠정종자이동구역은 평균적으로 5,064.9km²의 면적을 차지하고 있음을 확인하였다. 잠정종자이동구역의 경계 분류 정확성을 검증하기 위해 대분류 토지 피복도의 산림지역 자료만 추출하였다. 이후 잠정종자이동구역과 중첩하여 잠정종자이동구역 내 산림지역의 분포 특성을 확인하였으며 결과적으로, 잠정종자이동구역에서 가장 많은 면적을 차지하고 있는 구역과 산림지역에서 가장 많은 면적을 차지하는 구역이 일치하였다. 또한, 선행연구와의 비교를 통해 산맥 및 해안지역의 경계 분류가 선행연구와 유사한 것을 확인하였으며, 내륙 지역의 경계는 대별 되어 분류된 것을 확인하였다. 대분류 토지 피복 지도 자료의 경우, 남한 지역에 국한되어 제공되기 때문에 북한 지역 경계의 정확성을 입증하지 못하였으며 선행연구 역시 남한 지역을 대상으로 하고 있어 북한 지역 경계 분류 결과의 정확성을 파악하지 못한 한계를 가진다. 본 연구는 기후 요소를 기반으로 한반도 전역에 대한 차원에서 제시한 선도 연구로서 의의가 있으나 북한 지역의 분류 정확성이 입증되지 않았기 때문에 본 연구에서 구축한 잠정종자이동구역을 국내의 잠정종자이동구역으로 일반화하는 것은 오류 발생 가능성이 있다고 사료된다.

본 연구를 토대로 지형적 차이를 반영한 기후대의 분포 양상을 확인할 수 있으며, 이를 생태지역지도와 연계하여 국내의 잠정종자이동구역을 고도화하는 계획 수립도 제안할 수 있다. 본 연구 결과는 초기 잠정종자이동구역을 정의하고 유사한 기후대에서 서식하는 종자 구역 확인 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 생태지역지도 연구와 연계된다면 보다 정확한 국내 잠정종자이동구역으로 고도화하는데 크게 기여할 수 있으리라 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업 지원을 받아 연구되었습니다 (2019002760001)

References

- An, YH · DS Park and KH Jung. 2003. Genetic Relationship among the Native *Taraxacum* and Naturalized *Taraxacum* species by the RAPD Analysis. 17(2): 169-176. (in Korean with English summary)
- Bezeng, BS · I Morales-Castilla · M Bank · K Yessoufou · BH Daru and TJ Davies. 2017. Climate change may reduce the spread of non-native species. *Ecosphere*. 8(3):e01694. 10.1002/ecs2.1694.
- Bailey, RG. 1983. Delineation of Ecosystem Regions. *Environmental Management*. 7(4): 365-373.
- Bower, AD. 2008. Ecological genetics and seed transfer guidelines for *Pinus albicaulis* (Pinaceae). *American Journal of Botany*. 95(1): 66-76.
- Bower, AD · J Bradley · St Clair and V Erickson. 2014. Generalized provisional seed zones for native plants. *Ecological Applications*. 24(5): 913 - 919.
- Byun, JG · WK Lee · DK Nor · SH Kim · JK Choi and YJ Lee. 2010. The Relationship Between Tree Radial Growth and Topographic and Climatic Factors in Red Pine and Oak in Central Regions of Korea. *Journal Korean For. Soc.* 99(6): 908-913. (in Korean with English summary)
- Byun, JY · YK Lee · SH Choi · SH Oh · SJ Yoo ·

- TS Kwon · JH Sung and Woo JW. 2012. Vulnerability Assessment for Forest Ecosystem to Climate Change Based on Spatio-temporal Information. *Korean Journal of Remote Sensing*. 28(1): 159-169. (in Korean with English summary)
- Campbell, RK. 1991. Soils, Seed-Zone Maps, and Physiography: Guidelines for Seed Transfer of Douglas-Fir in Southwestern Oregon. *Forest Science*. 37 : 4,973 - 4,986.
- Chang, JS. 2000. Foliar flavonoids of eastern Asian birch(*Betula*) -with respect to Korean plants-. *Kor. J. Plant Tax.* 30(1): 75-91. (in Korean with English summary)
- Choi YE · JY Choi · WM Kim · SY Kim and WK Song. 2019. Long-term Effects on Forest Biomass under Climate Change Scenarios Using LANDIS-II. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 22(5) : 27-43.
- Choi, KM · MI Kim · WK Lee · HU Gang · DJ Chung · EJ Ko · BH Yun and CH Kim. 2014. Estimating Radial Growth Response of Major Tree Species using Climatic and Topographic Condition in South Korea. *Journal of Climate Change Research*. 5(2): 127-137. (in Korean with English summary)
- Choi, YY · CH Lim · JE Ryu · P Dong · JY Kang · W Zhu · G Cui · WK Lee and SW Jeon. 2017. Bioclimatic Classification and Characterization in South Korea. *The Korea Society For Environmental Restoration And Revegetation Technology*. 20(3) : 1-18. (in Korean with English summary)
- Crow, TM · SE Albeke · CA Buerkle and KM Hufford. 2018. Provisional methods to guide species specific seed transfer in ecological restoration. *Ecosphere*. 9(1): 1-14.
- Doherty, KD · BJ, Butterfield and TE Wood. 2017. Matching seed to site by climate similarity: Techniques to prioritize plant materials development and use in restoration. *Ecological Applications*. 27(3): 1010 - 1023.
- Eckert, AJ · AD Bower · SC González-Martínez · JL Wegrzyn · G Coop · DB Neale. 2010. Back to nature: ecological genomics of loblolly pine (*Pinus taeda*, Pinaceae). *Molecular Ecology*. 19(17): 3789-3805.
- Hamann, A and TL Wang. 2005. Models of climatic normals for genecology and climate change studies in British Columbia. *Agricultural and Forest Meteorology*. 128(3 - 4): 211 - 221.
- Heslop-Harrison, J. 1964. Forty Years of Genecology. *Advances in ecological research*. 2: 159-247.
- Jeon, JI and JS Chang. 2000. Foliar flavonoids of genus *Carpinus* in eastern Asia - primarily based on native taxa to Korea-. *Kor. J. Plant Tax.* 30(2): 139-153. (in Korean with English summary)
- Johnson, RC · MJ Cashman and K Vance-Borland. 2012. Genecology and Seed Zones for Indian Ricegrass Collected in the Southwestern United States. *Rangeland Ecology & Management*, 65(5):523-532.
- Johnson, RC · VJ Erickson · NL Mandel · JB St Clair and KW Vance-Borland. 2010. Mapping genetic variation and seed zones for *Bromus carinatus* in the Blue Mountains of eastern Oregon, USA. *Botany*. 88: 725 - 736.
- Kangwon Research Institute. 2017. Research on efficient management of ecosystem disturbing plants. (in Korean)
- Keller, M and J Kollmann. 1999. Effects of seed provenance on germination of herbs for agricultural compensation sites. *Agriculture*,

- Ecosystems and Environment. 72(1): 87 - 99.
- Keller, M · J Kollmann · PJ Edwards. 2000. Genetic introgression from distant provenances reduces fitness in local weed populations. *Journal of Applied Ecology*. 37(4): 647 - 659.
- Kim, YS · JH Kim · CK Jang · SJ Park and KS Jung. 1998. A report on the self-growth and discrimination of native species of the Yoshino cherry tree (*Prunus yedoensis* Matsumura). Ministry of Culture and Tourism. (in Korean)
- Koo, KA · JU Kim · WS Kong · HC Jung and GH Kim. 2016. Projecting the Potential Distribution of *Abies koreana* in Korea Under the Climate Change Based on RCP Scenarios. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 19(6) : 19-30.
- Lee HW · JH Choi · SY Park · BK Choo · JM Chun · AY Lee and HK Kim. 2008. Constituents Comparison of Components in Native and Cultivated Species of *Angelica tenuissima* Nakai. *韓藥作誌(Korean J. Medicinal Crop Sci.)* 16(3) : 168 - 172. (in Korean with English summary)
- Lee, CS · WK Lee · JH Yoon and CC Song. 2006. Distribution Pattern of *Pinus densiflora* and *Quercus* Spp. Stand in Korea Using Spatial Statistic and GIS. *Jour. Korea For. Soc.* 95(6): 663-671. (in Korean with English summary)
- Lee, SH · IH Heo · KM Lee and WT Kwon. 2005. Classification of Local Climatic Regions in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 41(6) : 983-995. (in Korean with English summary)
- Mijnsbrugge, VK · A Bischoff and B Smith. 2010. A question of origin: where and how to collect seed for ecological restoration. *Basic and Applied Ecology* 11: 300 - 311.
- Miller, SA · A Bartow · M Gisler · K Ward · AS Young and TN Kaye. 2011. Can an Ecoregion Serve as a Seed Transfer Zone? Evidence from a Common Garden Study with Five Native Species. *Restoration Ecology*. 19(201): 268 - 276.
- Mortlock, W. 2000. Local seed for revegetation. *Ecological Management & Restoration*. 1(2): 93-101.
- National Institute of Ecology. 2019. Korea's list of alien organisms and information on ecological characteristics. (in Korea)
- O'Donnell, MS and DA Ignizio. 2012. Bioclimatic predictors for supporting ecological applications
- Olson, DM · E Dinerstein · ED Wikramanayake · ND Burgess · EC Underwood · JA D'amico · I Itoua · HE Strand · JC Morrison · CJ Loucks · TF Allnutt · TH Ricketts · Y Kura · JF Lamoreux · WW Wettengel · P Hedao and KR Kassem. 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*. 51(11): 933 - 938.
- Omernik, JM. 1987. Ecoregions of the Conterminous United States, *Annals of the Association of American Geographers*. 77(1): 118-125.
- Omernik, JM · SS Chapman · RA Lillie and RT Dumke. Ecoregions of Wisconsin. 2000. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters*. 88: 77-103
- Pike, C · KM Potter · P Berrang · B Crane · J Baggs · L Leites and T Luther. 2020. New Seed-Collection Zones for the Eastern United States: The Eastern Seed Zone Forum. *Journal of Forestry*. 118(4): 444-451.
- Rehfeldt, GE · CC Ying · DL Spittlehouse · DA Hamilton Jr. 1999. Genetic responses to

- climate in *Pinus contorta*: niche breadth, climate change, and reforestation. *Ecological Monographs*. 69(3): 375-407.
- Schubert, GH and JA Pitcher. 1973. A Provisional Tree Seed-Zone and Cone-Crop Rating System for Arizona and New Mexico. USDA Forest Service Research Paper RM-105.
- Shryock, DF · LA DeFalco and TC Esque. 2018. Spatial Decision-Support Tools to Guide Restoration and Seed-Sourcing in the Desert Southwest. *Ecosphere*. 9(10):e02453. 10.1002/ecs2.2453.
- ST Clair, JB · NL Mandel and KW Vance-borland. 2005. Genecology of Douglas Fir in Western Oregon and Washington. *Annals of Botany*. 96(7): 1199 - 1214.
- Vogel, KP · MR Schmer and RB Mitchell. 2005. Plant adaptation regions: ecological and climatic classification of plant materials. *Rangeland Ecology and Management*. 58(3): 315-319.
- Ying,CC and AD Yanchu. 2006. The development of British Columbia's tree seed transfer guidelines: Purpose, concept, methodology, and implementation. *Forest Ecology and Management*. 227: 1 - 13.
- Youtie, B · N Shaw · M Fisk and Scott Jensen. 2012. A strategy for maximizing nativeplant material diversity for ecological restoration, germplasm conservation and genecology research. 9-14.

Appendix 1. Area of provisional seed zone for 65 zones

Individual (°F, °C/m precipitation)	Area(Km ²)	Individual (°F, °C/m precipitation)	Area(Km ²)
<~15, 16 ~ 19	1,235.0	10 ~ 15, 16 ~ 19	12,438.0
<~15, 19 ~ 21	466.0	10 ~ 15, 19 ~ 21	20,008.0
<~15, 21 ~ 24	22.0	10 ~ 15, 21 ~ 24	9,825.0
-15 ~ -10, <~16	7,242.0	10 ~ 15, 24 ~ 27	8,301.0
-15 ~ -10, 16 ~ 19	10,253.0	10 ~ 15, >27	7,611.0
-15 ~ -10, 19 ~ 21	3,625.0	15 ~ 20, <~16	404.0
-15 ~ -10, 21 ~ 24	2,326.0	15 ~ 20, 16 ~ 19	4,981.0
-15 ~ -10, 24 ~ 27	119.0	15 ~ 20, 19 ~ 21	29,423.0
-10 -5, <~16	1,236.0	15 ~ 20, 21 ~ 24	23,325.0
-10 -5, 16 ~ 19	6,449.0	15 ~ 20, 24 ~ 27	6,559.0
-10 -5, 19 ~ 21	6,547.0	15 ~ 20, >27	3,323.0
-10 -5, 21 ~ 24	7,393.0	20 ~ 25, <~16	84.0
-10 -5, 24 ~ 27	1,978.0	20 ~ 25, 16 ~ 19	2,844.0
-10 -5, >27	32.0	20 ~ 25, 19 ~ 21	13,058.0
-5 ~ 0, <~16	152.0	20 ~ 25, 21 ~ 24	19,583.0
-5 ~ 0, 16 ~ 19	2,858.0	20 ~ 25, 24 ~ 27	5,092.0
-5 ~ 0, 19 ~ 21	6,162.0	20 ~ 25, >27	931.0
-5 ~ 0, 21 ~ 24	7,666.0	25 ~ 30, <~16	322.0
-5 ~ 0, 24 ~ 27	2,248.0	25 ~ 30, 16 ~ 19	1,079.0
-5 ~ 0, >27	3,263.0	25 ~ 30, 19 ~ 21	4,809.0
0 ~ 5, <~16	356.0	25 ~ 30, 21 ~ 24	3,842.0
0 ~ 5, 16 ~ 19	2,963.0	25 ~ 30, 24 ~ 27	1,772.0
0 ~ 5, 19 ~ 21	4,235.0	25 ~ 30, >27	47.0
0 ~ 5, 21 ~ 24	12,144.0	30 ~ 35, <~16	815.0
0 ~ 5, 24 ~ 27	3,566.0	30 ~ 35, 16 ~ 19	822.0
0 ~ 5, >27	5,107.0	30 ~ 35, 19 ~ 21	279.0
5 ~ 10, <~16	1,115.0	30 ~ 35, 21 ~ 24	477.0
5 ~ 10, 16 ~ 19	9,729.0	30 ~ 35, 24 ~ 27	267.0
5 ~ 10, 19 ~ 21	6,224.0	> 35, 16 ~ 19	661.0
5 ~ 10, 21 ~ 24	13,806.0	> 35, 19 ~ 21	11.0
5 ~ 10, 24 ~ 27	8,247.0	> 35, 21 ~ 24	23.0
5 ~ 10, >27	6,793.0	> 35, 24 ~ 27	6.0
10 ~ 15, <~16	638.0		

Appendix 2. Area of Forest zone for 32 zones

Individual (°F, °C/m precipitation)	Area(Km ²)	Individual (°F, °C/m precipitation)	Area(Km ²)
0 ~ 5, <~16	9.0	20 ~ 25, 24 ~ 27	2,489.0
5 ~ 10, <~16	898.0	20 ~ 25, >27	14.0
5 ~ 10, 16 ~ 19	2,173.0	25 ~ 30, <~16	285.0
10 ~ 15, <~16	630.0	25 ~ 30, 16 ~ 19	933.0
10 ~ 15, 16 ~ 19	10,226.0	25 ~ 30, 19 ~ 21	2,583.0
10 ~ 15, 19 ~ 21	8,688.0	25 ~ 30, 21 ~ 24	1,652.0
10 ~ 15, 21 ~ 24	102.0	25 ~ 30, 24 ~ 27	684.0
15 ~ 20, <~16	399.0	30 ~ 35, <~16	383.0
15 ~ 20, 16 ~ 19	4,577.0	30 ~ 35, 16 ~ 19	290.0
15 ~ 20, 19 ~ 21	17,874.0	30 ~ 35, 19 ~ 21	170.0
15 ~ 20, 21 ~ 24	11,052.0	30 ~ 35, 21 ~ 24	225.0
15 ~ 20, 24 ~ 27	1,427.0	30 ~ 35, 24 ~ 27	133.0
20 ~ 25, <~16	61.0	> 35, 16 ~ 19	82.0
20 ~ 25, 16 ~ 19	2,764.0	> 35, 19 ~ 21	3.0
20 ~ 25, 19 ~ 21	9,752.0	> 35, 21 ~ 24	10.0
20 ~ 25, 21 ~ 24	8,988.0	> 35, 24 ~ 27	4.0