

온난화 수준에 따른 남한 지역 여름배추 재배지 변화 전망

강수정* · 성현민**† · 김진옥** · 이재희*** · 정주용**** · 부경은*****

*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 주무관, **국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, ***국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원, ****국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관, *****국립기상과학원 기후변화예측연구팀 팀장

Projections of cultivation area for summer Kimchi cabbage in South Korea under different global warming levels

Kang, Su-Jeong* · Sung, Hyun Min**† · Kim, Jin-Uk** · Lee, Jae-Hee*** · Chung, Chu-Yong**** and Boo, Kyung-On*****

*Assistant Director, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju, Korea

**Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

***Researcher, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

****Senior Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

*****Director, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

ABSTRACT

Climate change affects regional climate patterns, directly impacting agriculture. Therefore, traditional cultivation areas may become less suitable for crop growth. This study investigates the changes in the cultivation areas of summer Kimchi cabbage in South Korea under global warming levels (GWLs) using high-resolution (1 km) simulations. The cultivation areas of summer Kimchi cabbage have been classified into three categories (suitable, possible, and unsuitable) based on climate indices (growth and heading temperatures). Analysis of present-day (2000 - 2019) data confirms that growth temperature is a key factor in determining suitability for summer Kimchi cabbage cultivation. The estimated suitable and possible areas for summer Kimchi cabbage in South Korea represent approximately 11.5% and 26.2% of present-day land area, respectively. The suitable (possible) area of cultivation decreases by approximately 46.9%(39.8%) and 70.7%(57.2%), respectively, under the 1.5°C and 2.0°C GWL compared to present-day. The result of this analysis indicates that suitable cultivation areas are more sensitive to the impacts of global warming than possible areas. Also, both suitable and possible cultivation areas are projected to decrease most significantly under the 2.0°C GWL. This means that limiting GWL to 2.0°C could be helpful for maintenance of continuous cultivation areas compared to other GWLs. Our findings will help support adaptation strategies for sustainable agriculture.

Key words : Summer Kimchi Cabbage, Cultivation Area, Global Warming Level, SSP Scenario, Climate Change

1. 서론

2015년 파리협정 이후, 국제사회는 지구온난화 수준을 산업화 이전(1850~1900) 대비 2.0°C 이하 수준으로 유지하며, 1.5°C 이하의 수준으로 제한하기 위해 노력하고 있다(UN, 2015; UNFCCC, 2022). 하지만 2024년은 전지구

평균기온이 산업화 이전 대비 약 1.55°C(±0.13°C) 상승하여 파리협정 목표를 초과하는 첫 단일연도로 기록되었다. 이는 이전까지의 최고 온난화 수준(1.45°C ± 0.12°C; 2023년)보다 약 0.1°C 상승한 값이며, 175년 관측 이래 가장 더웠음을 의미한다(WMO, 2025). 이러한 온난화 상승 추세는 평균기후 뿐만 아니라 극한기후 발생도 증가시켜 농

†Corresponding author : sunghm122@korea.kr (National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6784)

ORCID 강수정 0009-0002-3003-8491 이재희 0000-0003-3227-923X
성현민 0000-0003-3120-7912 정주용 0000-0001-5330-9456
김진옥 0000-0001-9892-9915 부경은 0000-0002-1505-578X

업, 생태계 등 다양한 분야에서 영향을 줄 것으로 예상되므로 기후변화 대응과 관련한 더 많은 노력이 필요한 시점이다(Copernicus Climate Change Service and World Meteorological Organization, 2025; IPCC, 2023; WMO, 2025).

KMA (2021, p. 18)에 따르면, 지난 109년간(1912 ~ 2020) 한반도의 연평균기온은 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 속도로 꾸준히 상승하고 있다. Kim et al. (2023c)은 연평균기온이 현재(2000 ~ 2019) 대비 1.5°C 온난화 시기에 $+0.7^{\circ}\text{C}$ 상승하고, 2.0°C (3.0°C) 온난화 시기에는 $+1.4^{\circ}\text{C}$ ($+2.6^{\circ}\text{C}$) 상승할 것으로 전망하였다. 뿐만 아니라, Sung et al. (2023)의 연구에서는 2.0°C 온난화 수준을 초과하게 되면 1년 중 절반이 여름과 유사한 날씨가 나타날 수 있다고 하였다. 이러한 기후변화는 여러 부문들 중 특히 농업 부문에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 미래 전망 연구를 통한 과학정보의 제공과 기후변화 영향 저감을 위한 적응대책이 절실한 실정이다(Bhadouria et al., 2019; Kim and Lee, 2009; Schmidhuber and Tubiello, 2007).

기후변화에 체계적인 대응을 위한 제3차 국가 기후변화 적응대책('21 ~ '25)이 수립되었고 제시된 기후리스크 6대 부문에 농업이 포함되었다(Government of Korea, 2020). NIMS (2022)에 따르면 기후변화는 농업 부문 전반에 걸친 다양한 리스크의 증가를 초래할 것으로 예상되었고, 생산성 변동, 재배지 변화 등이 전망되었다. 특히 재배지 변화는 토지 이용의 효율 관점에서 유용한 정보를 제공할 수 있기 때문에(Kim et al., 2020) 기후변화 시나리오에 기반한 미래 전망과 관련된 여러 선행연구들이 존재한다. RCP 시나리오를 사용한 연구로는 호두나무(Lee et al., 2015), 오미자(Lee et al., 2016b), 잣나무(Choi et al., 2015) 재배지 변화에 관한 연구들이 수행되어왔다. 또한, 농촌진흥청 국립원예특작과학원에서는 RCP, SSP 시나리오에 따른 과수작물(사과, 배, 복숭아, 포도, 감귤) 재배지 변화 전망을 홈페이지를 통해 제공하고 있다(NIHHS, 2016). 이러한 선행연구들은 작물 종류별로 생육에 필요한 적정 온도 범위, 재배 한계온도 등 여러 필요조건들이 다르지만 온도가 1°C 상승하면 재배가능지역이 위도상으로 북상하고, 해발고도가 높아진다고 보고하고 있다(Heo et al., 2013; Kim and Lee, 2017; Kim et al., 2023a; Kwon et al., 2012; Lee and Shim, 2011; Wi et al., 2015). 작물 재배지 변화 전망에 대한 연구는 미래 식량 자원에 대한 선제적인 적응대책을 수립하는 데 도움이 될 수 있기 때문에 커뮤니티의 니즈와 필요성이 높아지고 있다

(Easterling et al., 2004; Kim et al., 2020).

이에 본 연구에서는 한국의 대표적인 부식 채소 중 하나인 배추(Lee and Heo, 2018)를 대상으로 온난화 수준에 따른 재배지 변화 전망에 대해 분석하고자 한다. 배추는 여러 작형을 통해 연중 재배되고 있으며, 생육기에는 기온이 품질에 매우 중요한 영향을 미치기 때문에, 서늘하고랭지 지역(해발 600 m 이상)에서 주로 재배가 이루어지고 있다(Eum et al., 2013; HARI, 2000; Hwang et al., 2003; Kwon et al., 2019; NIHA, 2000). 기후변화에 따른 기온상승으로 인해 여름배추의 재배면적이 줄어드는 경향이 나타나면서 온도에 따른 배추의 생육 반응과 재배지 변화에 관련한 연구들이 이루어지고 있다(Ahn et al., 2008; Kim and Yun, 2016; Kim et al., 2014; Lee et al., 2016a; Son et al., 2015). 기온 뿐만 아니라, 강수, 일조시간, 습도 등과 같은 다른 기후요소에 대해서도 배추의 생육에 미치는 영향에 대해서 연구들이 이루어졌으나, 뚜렷한 상관성을 보이지 않는 것으로 나타났다(Kim et al., 2015a, 2015b). 최근에는 부문별 기후변화영향을 파악하기 위한 단계별 온난화 수준의 전망정보에 대한 니즈가 급증하고 있다(Gampe et al., 2024; Schleussner et al., 2016). 이러한 배경으로 본 연구에서는 국립기상과학원의 고해상도(1 km) 남한상세 시나리오 자료를 기반으로 온난화 수준별 여름배추 재배지 변화를 분석하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 고해상도(1 km) 남한상세 시나리오

본 연구에서는 여름배추의 재배지 변화 전망을 분석하기 위하여 국립기상과학원에서 산출한 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) 기반 고해상도(1 km) 남한상세 시나리오의 일 평균기온(TA) 자료를 사용하였다. 남한상세 시나리오는 통계모형인 PRISM-based Dynamic downscaling Error correction (PRIDE)에 기반하여 산출된다(Kim et al., 2016, 2023c). 현재기후(2000 ~ 2019)의 자료는 통계적 상세화 방법인 Modified Korean-Parameter elevation Regressions an Independent Slopes Model (MK-PRISM) 기법에 기반하여 기상청에서 제공하는 종관기상관측소(Automated Synoptic Observing System; ASOS) 97개소, 방재기상관측소(Automatic Weather System; AWS) 508개소의 관측 자료를 수평해상도 1 km의 격자자료로 변환하여 산출한다(Kim et al.,

2012, 2013b, 2013c). 미래기후(2021~2100) 자료는 PRIDE 통계모형을 이용하여 CMIP6 기반의 미래 시나리오 자료를 상세화하여 산출한다. 이때 입력자료로 사용되는 시나리오 자료는 135 km 해상도의 전지구 시나리오와 역학적 상세화 기법을 적용한 5종의 지역기후모델(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs) 결과자료이다. 또한, 현재기후 대비 미래 전망의 편차를 계산하는 산출과정에서 모델의 계절변동성을 관측의 계절변동성으로 대체하고 기후모델에 포함된 계통오차를 제거하는 과정도 포함된다(Kim and Kim, 2018; Kim et al., 2022c, 2023b).

이와 같이 산출되는 시나리오는 현재기후에 대한 과학적 모의검증 수행을 통해 미래 전망 분석결과에 대한 신뢰도를 확인할 수 있다(Eyring et al., 2016). 국립기상과학원의 고해상도(1 km) 남한상세 시나리오는 국가 기후변화 표준 시나리오로의 인증을 획득하였고, 국가 기후변화 적응대책의 이행 지원을 위한 과학적 기반 정보를 산출하는 연구에서 많이 활용되고 있기 때문에 현재기후에 대한 불확실성 검증결과도 많이 보고되고 있다(Kim et al., 2022c, 2023b, 2023c). 본 연구에서는 국립기상과학원의 선행연구(Kim et al., 2023c)에서 제시된 현재기후의 모의성능 검증 결과를 인용함으로써, 미래 전망 분석의 과학적 신뢰성과 사용된 시나리오 자료의 타당성을 제시하고자 한다. Kim et al. (2023c)에 따르면 일 평균기온의 오차(bias)는 추정된 관측값과 실제 관측값과 0.02~0.04°C 차이로, 큰 차이가 없고 유사하다고 판단할 수 있다. 또한 여름철(6~8월) 오차(bias)는 0.01~0.02°C로, 0.03~0.04°C의 범위를 가지는 나머지 계절과 비교했을 때 가장 작은 오차(bias)를 가진다. 이는 추정된 관측값이 실제 관측값과 유사하다고 해석할 수 있으며, 계산된 여름배추 재배지 분석에 대한 신뢰성을 뒷받침한다고 볼 수 있다.

2.2. 시나리오별 온난화 수준 도달 시기

파리협정 이후, 국제사회는 전지구 온난화 수준을 1.5°C 이내로 제한하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있으며, 온난화 수준에 따른 기후변화 미래 전망 연구가 필요하다는 공감대가 기후연구 커뮤니티에서 형성되어 있다. 이러한 니즈에 대응할 분석연구를 수행하기 위해서는 전지구 온난화 제한온도의 도달시점을 정의하는 과정이 선행되어야 한다.

본 연구에서 사용한 남한상세 시나리오 자료는 UK

Earth System Model (UKESM1) 지구시스템모델로부터 상세화 과정을 거쳐서 산출된 자료이기 때문에, UKESM1 자료를 이용하여 시나리오별 제한온도의 도달시점과 분석에 사용될 기간을 계산하였다. 먼저 전지구 평균기온을 21년 이동평균한 뒤, 산업혁명 이전시기(1850~1900년)의 평균기온을 기준으로 아노말리 시계열을 계산한다. 이동평균을 고려하는 배경은 단기적인 기후변동성을 줄이고 장기적인 기후변화에 의한 변화 경향을 파악하기 위함이다. 분석하고자 하는 온난화 수준은 1.5°C, 2.0°C, 3.0°C, 4.0°C, 5.0°C이며, 기준으로부터 전지구 평균기온이 제한온도에 도달하는 첫 번째 연도를 제한온도 도달시점으로 정의한다. 21년 이동평균한 평균기온의 아노말리를 이용하여 도달시점을 정의하였기 때문에, 정의된 연도로부터 전후 각 10년씩의 기간에(총 21년) 대한 데이터를 이용하여 해당 온난화 수준에서의 기후상태를 분석해야 한다(Kim et al., 2022a, 2022b).

사용한 시나리오는 공통사회경제경로(Shared Socio-economic Pathways; SSP) 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)으로, IPCC AR6 (Assessment Report)에서 도입된 온실가스 농도경로 시나리오이다. SSP1-2.6 시나리오는 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속 가능한 경제성장을 이루는 미래사회를 가정하는 저탄소 시나리오, SSP2-4.5 시나리오는 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계인 시나리오이다. SSP3-7.0 시나리오는 기후변화 완화 정책에 소극적이며 기후변화에 취약한 미래사회를 가정하며, SSP5-8.5 시나리오는 화석연료 기반의 산업기술 발전에 중점을 두면서 무분별한 개발이 확대될 미래사회를 가정하는 고탄소 시나리오이다(Eyring et al., 2016). 또한, 온실가스의 배출량이 시간에 따라 변화하는 것을 강조하기 위해 경로("Pathway")의 표현이 명명에 포함된다(Sung et al., 2020; Tebaldi et al., 2021).

SSP 시나리오별로 제한온도에 도달하는 분석 기간은 다르게 나타나고, 그 결과를 Table 1에 제시하였다. 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6 시나리오와 중간 단계인 SSP2-4.5 시나리오의 경우, 각각 3.0°C, 5.0°C 온난화에 도달하지 않는 것으로 나타났다. 또한 고탄소 시나리오일수록 제한온도에 도달하는 시점이 앞당겨지고 있음을 확인할 수 있다.

Table 1. Projected timings of 21-year running mean global surface temperature in UKESM1 reaching global warming level (1.5°C, 2.0°C, 3.0°C, 4.0°C, and 5.0°C) under four SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5)

Scenario	Global Warming Level (GWL, °C)				
	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
SSP1-2.6	2011 ~ 2031	2022 ~ 2042	-	-	-
SSP2-4.5	2011 ~ 2031	2021 ~ 2041	2046 ~ 2066	2076 ~ 2096	-
SSP3-7.0	2014 ~ 2034	2022 ~ 2042	2040 ~ 2060	2057 ~ 2077	2073 ~ 2093
SSP5-8.5	2011 ~ 2031	2019 ~ 2039	2036 ~ 2056	2050 ~ 2070	2062 ~ 2082

Table 2. Establishment of climate factors for determining cultivation regions in summer Kimchi cabbage

Climate factors	Cultivation region classifications		
	Suitable region	Possible region	Unsuitable region
Growth stage (6.1 ~ 8.15)	18°C ≤ T < 21°C (2 points)	15°C ≤ T < 18°C, 21°C ≤ T < 23°C (1 point)	T < 15°C, 23°C ≤ T (0 point)
Heading stage (6.1 ~ 6.30)	15°C ≤ T < 17°C (1 point)		T < 15°C, 17°C ≤ T (0 point)
Total score	2 ~ 3 points	1 point	0 point

2.3. 여름배추 재배지 판별방법

배추는 선선한 기후환경에서 재배되는 호냉성 채소로, 생육 초기에는 고온환경에서 잘 견디는 특성이 있으나 결구시기부터는 고온환경에 취약해 일 평균기온이 25°C 이상일 때 결구되기 어렵다(Kim and Yun, 2015; Kim et al., 2013a; Lagercrantz and Lydiate, 1996; Opena and Lo, 1979; Wi et al., 2020). 배추는 타 작물에 비하여 상대적으로 재배기간이 짧기 때문에 주년 생산이 가능하지만, 고온에 의해 생육이 저하되거나 생산량이 감소하기 때문에 기온이 서늘한 지역과 시기에 따라 주산지가 결정된다(Lee, 2018; NIHSS, 2020). 여름배추는 주로 강원도, 전라북도, 경상북도에서 재배되고 있으며, 최근 기후변화로 인한 기온 상승에 따라 현재보다 높은 곳으로 재배지가 이동하고 있고, 재배지 면적이 감소할 것으로 전망되고 있다(Lee et al., 2024). 기온은 배추의 생육에 영향을 미치는 주요 기후인자이며(Ahn et al., 2014) 기후변화가 기온 상승에 큰 특징을 가지기 때문에, 본 연구에서는 기온의 변화에 의한 재배지 변화 간의 관계를 중심으로 하였으며, 작물의 재배와 관련된 기타 영향요인(토양 및 재배적 요인, 물가, 대체작물 등)에 대한 관계는 고려하지 않았다.

여름배추 재배지와 관련하여, 국립원예특작과학원(NIHSS, 2020)은 기온을 기준으로 재배지를 판별할 수

있는 경험식을 구축한 바 있다. 본 연구에서는 이 경험식을 이용하여 여름배추의 재배지 변화를 분석하였다(Table 2). 여름배추 재배지는 생육(growth) 온도(6월 1일 ~ 8월 15일까지의 평균기온)와 결구(heading) 온도(6월 월평균 기온)의 두가지 조건을 바탕으로 각 항목에 해당하는 판별점수를 부여하여 구분한다. 각 항목별 부여되는 판별점수는 생육 온도가 18°C 이상 ~ 21°C 미만일 때 2점, 15°C 이상 ~ 18°C 미만 또는 21°C 이상 ~ 23°C 미만일 때 1점, 나머지 기온일 때 0점으로 평가하고, 결구 온도가 15°C 이상 ~ 17°C 미만일 때 1점, 나머지 기온일 때 0점으로 평가한다. 이러한 기준을 통해 부여된 항목별 판별점수를 최종적으로 합산하였을 때, 점수가 2~3점이면 ‘적지’, 1점이면 ‘가능지’, 그리고 ‘부적지’는 0점으로 구분된다.

미래 여름배추 재배지의 변화 전망은 지역기후모델 5종과 SSP 시나리오 4종을 앙상블 멤버로 구성하여 전지구 온난화 제한온도(1.5°C, 2.0°C, 3.0°C, 4.0°C, 5.0°C)의 분석 기간을 평균하여 계산하였다. 또한, 남한 전체의 격자 수 대비 적지·가능지 비율로 해당 면적을 계산하였다. 남한 지역을 6개 권역(수도권(Capital area; CP), 강원권(Gangwon-do; GW), 충청권(ChungCheong-do; CC), 전라권(Jeolla-do; JL), 경상권(GyeongSang-do; GS), 제주권(Jeju-do; JJ))으로 나누어 미래 재배지 변화를 상세히 분석하였다(Fig. 1).

3. 결과

3.1. 남한 지역의 현재기후(일 평균기온) 분석

Fig. 1은 현재기후(2000~2019)에 대한 일 평균기온(TA)의 공간 분포를 나타낸 그림이고, 남한 지역과 6개 세부 권역별 평균값을 Table 3에 제시하였다. 현재기후의 평균기온은 가장 저위도에 위치한 제주권에서 약 14.3℃로 가장 높았다. 강원권에서는 약 9.1℃로 가장 낮은 값을 보였으며, 이는 강원권이 주로 산악지형으로 이루어져 평균 고도가 높은 것의 영향이라고 해석할 수 있다. 마찬가지로, 경상권 동부 해안지역의 태백산맥, 경상권과 전라권 경계 부근지역의 노령산맥과 소령산맥, 제주권의 한라산 부근에서 주변 대비 현저히 낮은 기온의 분포 경향이 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 2는 현재기후에 대한 남한 지역의 일 평균기온 연간 변동성을 나타내며, 겨울철 최솟값은 -4.2℃, 여름철 최댓값은 26.3℃, 평균값은 11.5℃로 나타났다. Table 2에 제시한 여름배추 재배지 산출 방법에 따라 생육기(6월 1일~8월 15일)에 해당하는 기간을 회색 음영으로, 적온 범위(15℃~23℃)를 붉은색 음영으로 표시하였다. 평균적으로 6월 1일부터 7월 8일까지의 기간이 적온 범위에 포함되며, 생육기 내 최솟값은 약 18.8℃(6월 1일), 최댓값은 약 26.3℃(8월 5일)로 나타났다.

3.2. 현재 남한 지역의 여름배추 재배지 특성

Fig. 3은 현재기후의 생육 온도(6월 1일~8월 15일까지의 평균기온)와 결구 온도(6월 월평균기온) 분포를 나타낸 그림이다. 강원권(약 21.1℃)을 제외한 대부분의 권역에서 생육 온도가 약 23℃ 이상임을 확인할 수 있다. 이는 강원권이 대부분 산악지형인 것의 영향으로 다른 권역들에 비해 생육 온도가 낮게 나타난 것이라 해석할 수 있다. 또한 산악지형을 일부 포함하는 경상권(약 23.1℃)과 제주권(약 23.1℃)에서 타 권역 대비 상대적으로 낮은 생육 온도를 나타나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3a, Table 4). 결구 온

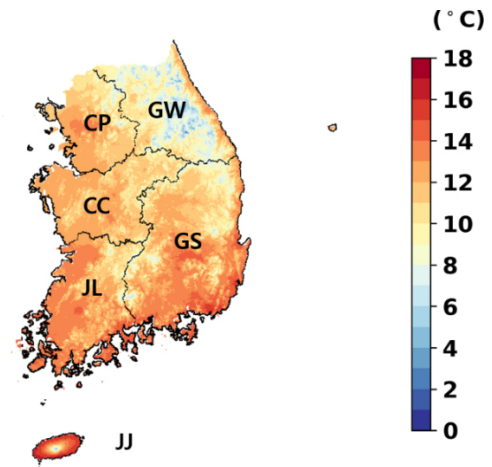


Fig. 1. Spatial distribution of averaged daily mean temperature (TA) over South Korea during present-day (2000 ~ 2019). Each abbreviation indicates six administrative division and detailed descriptions are explained in section 2.3

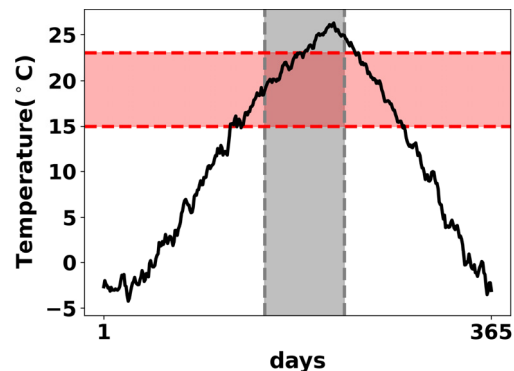


Fig. 2. The seasonal variation of daily temperature (TA) for present-day (2000 ~ 2019). Red and gray shading indicate the range of growth temperature and growth stage, respectively

도도 마찬가지로 강원권에서 약 18.9℃로 가장 낮았고, 경상권(약 20.8℃)과 제주권(약 20.3℃)에서 강원권 다음으

Table 3. The averaged daily mean temperature (TA) over South Korea and related six divisions during present-day (2000 ~ 2019)

Var.	KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
TA (°C)	11.5	11.5	9.1	11.6	12.7	12.0	14.3

* Administrative division acronym: KOR; South Korea, CP; Capital area, GW; GangWon-do, CC; ChungCheong-do, JL; Jeolla-do, GS; GyeongSang-do, JJ; JeJu-do

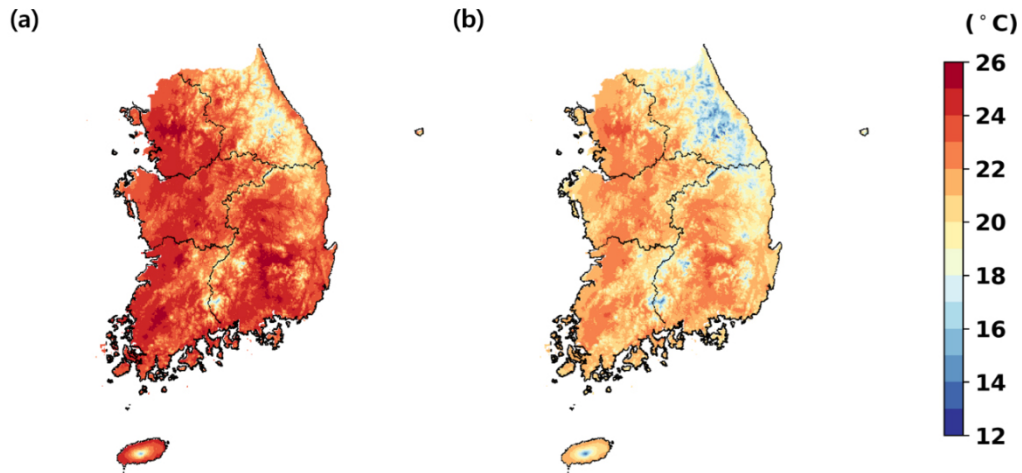


Fig. 3. Same as Fig. 1 except for (a) growth temperature and (b) heading temperature

Table 4. Same as Table 3 except for growth and heading temperature

Var.	Stage	KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
TA (°C)	Growth	23.0	23.7	21.1	23.6	23.7	23.1	23.1
	Heading	20.8	21.0	18.9	21.4	21.3	20.8	20.3

로 낮은 온도를 보였다(Fig. 3b, Table 4).

Fig. 4는 남한 지역과 6개 세부 권역별 평균 생육 온도의 일 변화를 나타낸 것이다. 여름배추의 적지에 해당하는 생육 온도 범위인 18~21°C는 진한 회색 음영으로, 가능지에 해당하는 생육 온도 범위인 15~18°C, 21~23°C는 연한 회색 음영으로 표시하였다. 먼저 생육기를 살펴 보면, 강원권은 약 17~24°C의 범위로 나타났고, 이는 23°C를 초과하는 일부 기간(7월 말~8월 초)을 제외한 나머지 기간의 일 평균기온이 적지 또는 가능지에 해당되는 생육 온도의 분포를 보인다. 강원권을 제외한 대부분의 권역에서는 생육기의 일 평균기온이 약 18~27°C 범위 내의 값을 보였으며, 7월 초까지만 적지 또는 가능지에 해당되는 생육 온도의 분포가 나타난다. 이를 통해, 생육기 내 여름배추의 재배가능지 이상으로 분류되는 일 평균기온 값의 출현일수는 다른 권역 대비 강원권에서 약 3주 정도 길게 나타남을 확인할 수 있다. 결국 온도 또한 강원권에서 약 17~21°C 범위로 가장 낮게 나타났고 나머지 권역에서는 약 19~24°C 범위 내의 값을 보임에 따라 강원권의 6월 일부 기간에 대해서만 결국 온도 조건을 만족함을 확인할 수 있다(not shown). 이는 생육 온도의 적지/가능지 판별점수가 여름배추의 재배지 판별에 지배적인 결정

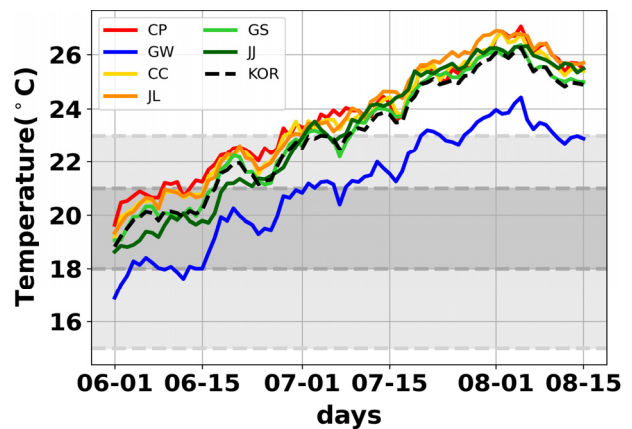


Fig. 4. Time series of daily mean temperature (TA) averaged over 20 years (2000~2019) during growth stage. Black dashed line indicates mean value for South Korea and other solid lines indicate each administrative district. Light and dark gray shading indicate optimum temperature ranges within suitable and possible regions, respectively

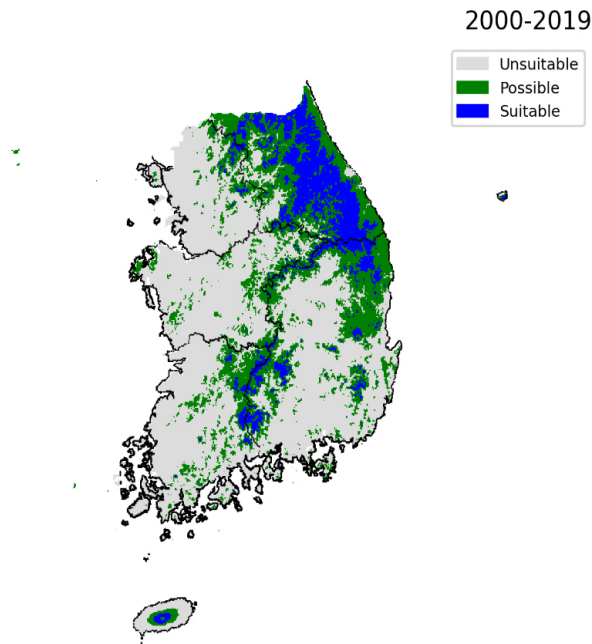


Fig. 5. Spatial distribution of summer Kimchi cabbage cultivation regions in South Korea during 2000 ~ 2019. Blue, green, and gray areas represent suitable, possible, and unsuitable regions, respectively

요소임을 말해주는 분석결과이다.

Fig. 5는 현재 남한 지역의 여름배추 재배지 분포를 나타낸 것으로, 적지(2~3점)는 파란색, 가능지(1점)는 초록색, 부적지(0점)는 회색으로 표현하였다. 생육 온도가 상대적으로 낮은 지역(Fig. 3a)과 유사하게 강원권 및 경상권과 제주권의 일부 산악지역에서 적지(파란색), 가능지(초록색)가 많이 분포해있음을 확인할 수 있다. 특히, 적지는 강원권에 집중적으로 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이를 정량적으로 살펴보기 위해 남한 전체 격자 수 대비 적지/가능지의 격자 수로 비율을 계산한 값을 Table 5에 나타내었다. 남한 전체를 기준으로 적지가 약 11.5%, 가능지가 약 26.2%로 분석되었다. 6개 권역으로 나누어보면 전체 적지 비율 약 11.5% 중 약 7.6%가 강원권에서 나타났고, 경상권에서 약 2.6%, 전라도에서 약 0.5% 정도

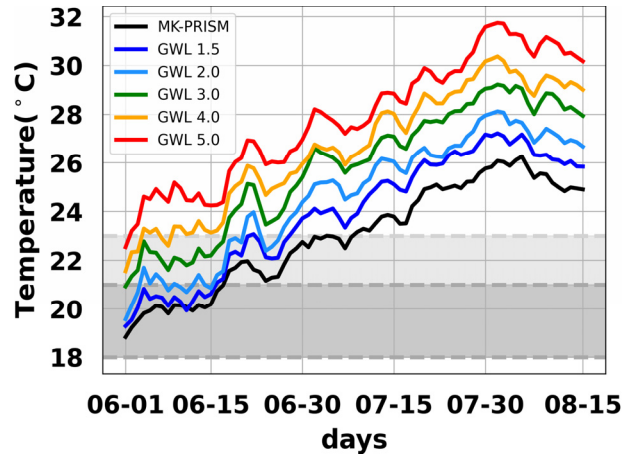


Fig. 6. Averaged daily mean temperature (TA) projections during growth stage under present-day (2000 ~ 2019, MK-PRISM) and five global warming level (GWL; 1.5°C, 2.0°C, 3.0°C, 4.0°C and 5.0°C). Light and dark gray shading indicate optimum temperature ranges within suitable and possible regions, respectively

분포하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 여름배추의 주산지인 강원권은 권역 면적 대비 적지가 약 43%, 가능지가 약 45%로, 강원권 전체 면적 중 약 88% 면적에서 여름배추 재배에 적합하게 나타났다. 반면, 가능지의 경우에는 남한 전체의 약 26.2% 중 경상권에서 약 9.5%로 가장 많이 나타났고, 강원권에서 약 7.9%로 2순위로 많이 나타났다. 이러한 분석결과는 분석기간이 다름을 고려하더라도 강원권과 경상권에서 여름배추의 재배적지/가능지가 분포하고 있다는 선행연구와 유사한 분석이다(Kim et al., 2013a).

3.3. 온난화 수준에 따른 재배지 변화 미래 전망

Fig. 6은 생육기의 온난화 수준별 기온 변화를 나타낸 것으로, 적지(가능지)에 해당하는 생육 온도 범위를 진한(연한) 회색 음영으로 표현한 그림이다. 생육 온도의 판별 점수가 재배지 판별에 지배적인 요소임을 3.2절에서 확인

Table 5. The proportion of cultivated area over South Korea and administrative district during present-day

	KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
Suitable (%)	11.5	0.3	7.6	0.3	0.5	2.6	0.2
Possible (%)	26.2	1.9	7.9	3.1	3.4	9.5	0.4

Table 6. Changes in the minimum, maximum, and mean values of daily mean temperature (TA) over South Korea under different global warming levels (GWL) compared to present-day

	GWL	Min	Max	Mean
TA (°C)	1.5	19.3(+0.5)	27.2(+0.9)	23.9(+0.9)
	2.0	19.5(+0.7)	28.1(+1.8)	24.7(+1.7)
	3.0	20.9(+2.1)	29.2(+2.9)	25.8(+2.8)
	4.0	21.5(+2.7)	30.3(+4.0)	26.7(+3.7)
	5.0	22.5(+3.7)	31.7(+5.4)	27.8(+4.8)

하였으므로, 이 절에서는 생육 온도를 판별하는 기간에 대해서만 제시하였다. 온난화 수준별 기온 변화 경향은 전반적으로 유사하게 나타났고, 현재기후와 5.0°C 온난화 수준의 평균기온을 비교해보면, 최솟(최댓)값의 차이가 약 3.7°C(약 5.4°C)로 나타났다(Table 6). 또한, 3.0°C 온난화(생육기 내 최솟값이 약 20.9°C 이상) 이후부터는 적지 조건에 포함되는 기간이 거의 없는 수준이며, 5.0°C 온난화(생육기 내 최솟값이 약 22.5°C 이상) 수준에서는 가능지 조건을 만족하는 기간이 없음을 확인할 수 있다. 또한 가능지 조건에 포함되는 기간은 현재기후 대비 2.0°C 온난화에서 약 10일 정도 앞당겨질 것으로 전망되었다.

Fig. 7은 온난화 수준별 여름배추 재배지 변화 전망에 대한 공간분포이며, 온난화 수준이 높아질수록 적지/가능지의 면적이 줄어들 것을 확인할 수 있다. 3.0°C 온난화 이상의 기후에서는 주로 강원권의 일부 지역에서만 여름배추 재배가 가능할 것으로 나타났다(적지는 강원권에 극소수 분포). 정량적 분석을 위해 남한 지역 전체를 기준으로 각 권역별 적지와 가능지에 해당하는 면적 비율을 계산하였고, 결과를 Table 7과 8에 제시하였다. 또한, 현재기후 대비 각 온난화 수준의 단계별 상승 시에 따른 변화를 괄호 안에 기술하였다.

남한 지역의 여름배추 재배적지는 현재기후 대비 1.5°C, 2.0°C 온난화 수준에서 각각 약 46.9%, 약 70.7% 감소할 것으로 전망되고, 3.0°C 온난화 수준에서는 약 91.4% 이상 감소할 것으로 전망된다. 이는 Ahn et al. (2008)의 연구결과와 유사한 감소 전망이며, 여름배추의 재배적지가 1.5°C 온난화 수준에서 가장 크게 감소하고, 온난화 진행에 따라 빠른 속도로 사라지게 될 수 있음을 확인할 수 있는 분석결과이다(Table 7). 강원권, 경상권에서도 온난화 수준별로 남한 지역 전체와 유사한 수준의 감소경향이 나타났다으며, 기타 권역에서 감소율이 높게 나타난 부분은 남한 전체 면적 대비 권역별로 분포하는 적지의 비중이 작음을 고려하여 유의미하지 않다고 판단하였다. 또한,

1.5°C를 초과하여 2.0°C 온난화에 도달할 경우에 나타나는 재배적지의 감소면적은 현재기후 대비 1.5°C 온난화에서 감소한 면적의 약 59%(약 43%) 수준으로 분석되었다(not shown). 이는 1.5°C 온난화를 초과하더라도 재배적지의 면적 감소 추세가 타 권역보다 클 것으로 전망되는 분석 결과이다.

남한 지역의 재배가능지는 1.5°C 온난화 수준에서 현재기후 대비 약 39.8% 줄어들 것으로 분석되었고, 온난화가 진행됨에 따라 지속적으로 감소되어 5.0°C 온난화 수준에서는 가능지 면적이 약 1% 수준까지 축소될 것으로 전망된다. 또한 1.5°C 대비 2.0°C 온난화 수준에서 현재 면적의 약 17.4%가 줄어들 것으로 계산되었고, 이는 현재 대비 1.5°C 온난화 수준에서 감소한 면적의 절반에 해당하는 크기이므로, 감소율 자체는 온난화 진행에 따라 줄어드는 것으로 확인하였다. 가능지 면적 비율이 높은 강원권과 경상권에서는 현재 대비 1.5°C 온난화 수준에서 감소한 면적만큼 2.0°C 온난화 수준에서 추가적으로 감소할 것으로 보인다. 3.0°C 온난화 수준에서는 가능지 면적이 남한 지역의 약 5.9% 수준으로 전망되었고, 그 중 70% 이상의 가능지 면적이 강원권에 위치할 것으로 분석되었다(약 4.3%). 특히, 강원권은 2.0°C 대비 3.0°C 온난화에서의 면적 감소가 1.5°C 대비 2.0°C 온난화에서의 면적 감소보다 약 3배 이상 더 크게 감소할 것으로 전망되었고, 이 분석 결과는 온난화가 심화(2.0°C 이상)될수록 여름배추 재배가능지의 면적감소 속도가 가속화될 것임을 시사한다. 4°C, 5°C 온난화 수준에서는 가능지 면적 비율이 매우 작아 거의 차이가 없었다.

이러한 분석결과는 Kim and Yun (2016)의 RCP 시나리오에서 나타난 적지의 변화 전망 결과와 유사하며, 온난화 수준에 따른 가능지 면적 변화가 적지 면적 변화보다 상대적으로 감소 폭이 크지 않음을 확인할 수 있다. 이는 재배적지가 재배가능지보다 온난화 수준 상승에 더 민감하다는 것을 의미한다. 특히, 남한 지역의 전체 면적 중

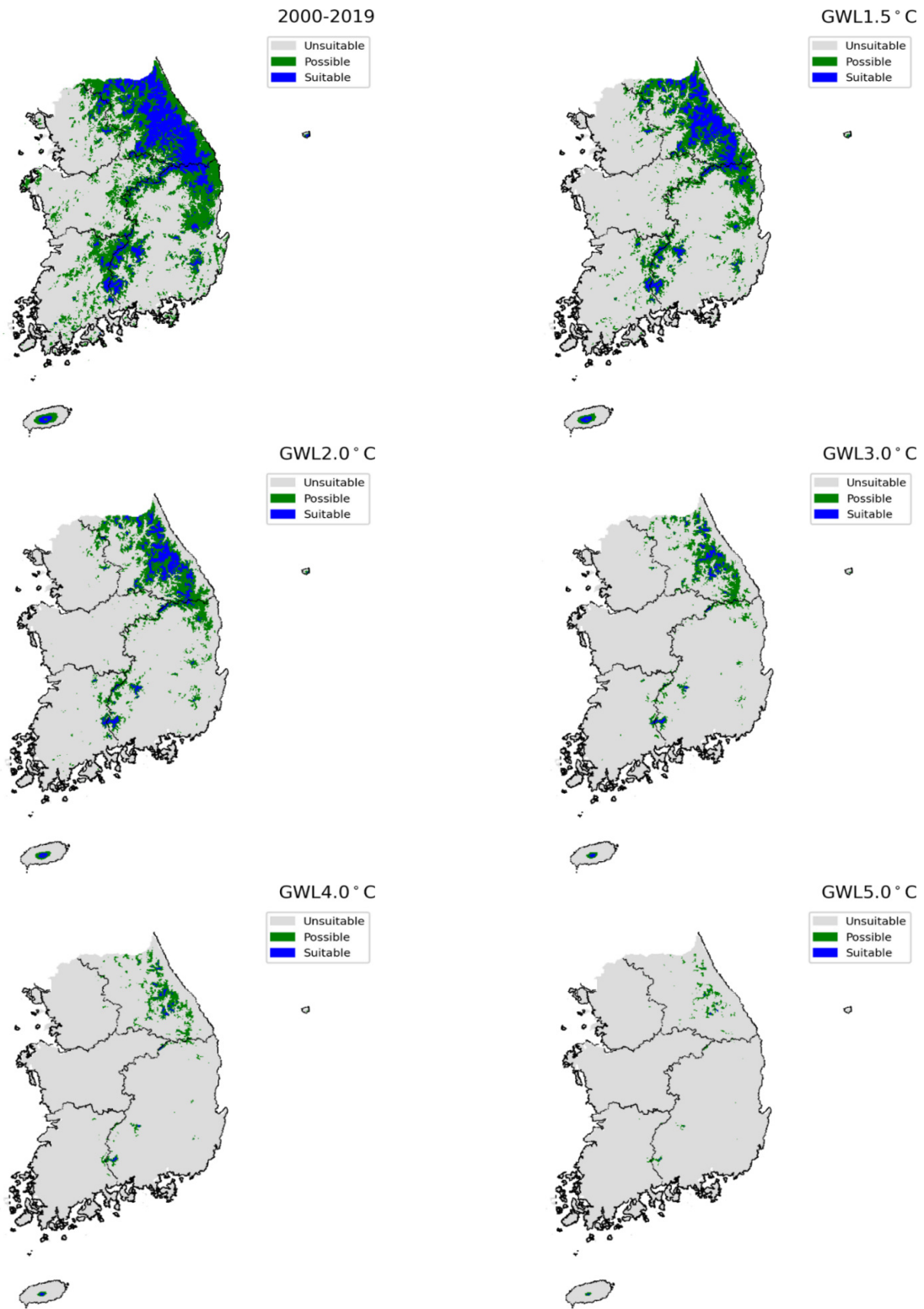


Fig. 7. Projected potential cultivation regions of summer Kimchi cabbage under different global warming levels (GWL)

Table 7. Predicted suitable areas for summer Kimchi cabbage by administrative district under different global warming levels (GWL)

GWL		KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
1.5	Suitable (%)	6.1(-46.9)	0.1(-67.7)	4.5(-41.2)	0.1(-75.7)	0.2(-59.9)	1.1(-57.1)	0.1(-27.3)
2.0	Suitable (%)	3.3(-70.7)	0.0(-87.6)	2.6(-65.4)	0.0(-90.3)	0.1(-81.5)	0.5(-81.6)	0.1(-49.4)
3.0	Suitable (%)	1.0(-91.4)	0.0(-97.0)	0.8(-89.9)	0.0(-98.6)	0.0(-95.6)	0.1(-94.8)	0.0(-72.7)
4.0	Suitable (%)	0.3(-97.3)	0.0(-100.0)	0.2(-97.0)	0.0(-99.7)	0.0(-99.6)	0.1(-97.8)	0.0(-83.8)
5.0	Suitable (%)	0.0(-99.6)	0.0(-100.0)	0.0(-99.6)	0.0(-100.0)	0.0(-100.0)	0.0(-99.7)	0.0(-94.2)

Table 8. Same as Table 7, but for possible areas

GWL		KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
1.5	Possible (%)	15.8(-39.8)	0.8(-59.8)	7.2(-8.5)	1.0(-69.6)	1.3(-61.3)	5.3(-35.7)	0.2(-35.7)
2.0	Possible (%)	11.3(-57.2)	0.4(-79.7)	6.5(-17.4)	0.4(-87.0)	0.6(-82.0)	3.2(-66.9)	0.1(-57.7)
3.0	Possible (%)	5.9(-77.6)	0.1(-95.4)	4.3(-45.8)	0.1(-97.0)	0.2(-93.3)	1.1(-88.6)	0.1(-73.9)
4.0	Possible (%)	3.2(-88.0)	0.0(-98.3)	2.5(-68.3)	0.0(-99.1)	0.1(-97.3)	0.4(-95.4)	0.1(-83.2)
5.0	Possible (%)	0.9(-96.5)	0.0(-99.7)	0.7(-90.9)	0.0(-99.9)	0.0(-99.4)	0.1(-98.7)	0.0(-89.9)

적지 조건에 해당하는 지역이 가장 많이 분포한 강원권에서는 현재 대비 1.5℃(2.0℃) 온난화 수준에서 적지와 가능지 면적 감소율의 차이가 약 4.8배(약 3.8배)로 계산되었다. 마찬가지로 두 번째로 많이 분포한 경상권에서는 현재 대비 1.5℃(2.0℃) 온난화 수준에서 그 차이가 약 1.6배(약 1.2배)로 가능지의 감소 폭이 더 작게 나타났다.

4. 결론

농업은 자연환경의 영향을 크게 받는 대표적인 산업 중 하나이며, 온난화 가속화로 인해 평균기후와 극한현상의 지역적 변화가 뚜렷해짐에 따라 재배 농작물의 종류와 품질, 생산안정성 등에 커다란 변화를 유발할 것으로 예상된다(Gamal et al., 2021; Hultgren et al., 2025; IPCC, 2023). 이에 따라, 본 연구에서는 온난화 수준에 따른 여름배추 재배지의 변화 전망에 대해 분석하였다. 분석을 위해 사용한 자료는 국립기상과학원에서 제공하는 고해상도(1 km) 남한상세 시나리오의 일 평균기온(TA) 자료이다. 국립원예특작과학원의 여름배추 재배지 판별식을 기반으로 생육 시기별(생육기, 결구기) 온도 값을 산출하여 재배지를 적지, 가능지, 부적지로 구분하였다. 현재기후(2000~2019)의 생육/결구 온도의 변화 경향 분석을 통해 생육 온도가 재배지 판별에 중요한 요소임을 확인하였다. 현재기후에서의 여름배추 재배적지는 약 11.5%, 재배

가능지는 약 26.2%로 나타났다. 이를 권역별로 살펴보면, 적지는 강원권에서 7.6%로 가장 많았고, 경상권이 약 2.6%, 전라권이 약 0.5%로 분석되었다. 또한, 가능지는 약 9.6%로 경상권에서 가장 넓었고 강원권에서 약 7.9%로 나타났다.

1.5℃ 온난화 수준의 적지(가능지) 면적은 남한 전체 면적의 약 6.1%(약 15.8%)로 현재 면적 대비 약 47%(약 40%) 감소할 것으로 전망된다. 하지만, 권역별로 살펴보면, 약 27.3~약 67.7% 범위로 국지적인 영향이 큰 것으로 나타났다. 2.0℃ 온난화 수준에서는 적지(가능지) 면적이 남한 전체 면적의 약 3.3%(약 11.3%)로 현재 면적 대비 약 71%(약 57%) 감소할 것으로 분석되었다. 또한 적지의 경우 3.0℃ 온난화 수준에서 약 1%, 가능지의 경우 5.0℃ 온난화 수준에서 약 1%로, 3.0℃ 이상 상승 시에는 재배면적이 현저히 감소할 것으로 전망된다. 종합해보면, 온난화 수준이 높아질수록 생육 적온을 만족하는 시기가 점차 앞당겨지며, 적지/가능지의 면적이 감소할 것으로 전망된다. 현재기후의 생육기간은 3.0℃(5.0℃) 온난화 수준에서의 적지(가능지) 조건을 만족하기 어려울 것으로 확인되었다.

5. 토의 및 고찰

본 연구결과에서 현재기후의 여름배추 생육기간이 2.

0℃ 온난화 이후부터는 생육 적온(18~21℃)의 범위를 만족하지 못할 것으로 전망되었고, 이는 온난화가 심화될수록 남한 지역에서 여름배추를 재배하기 어려워질 수 있음을 시사한다. 이러한 해석은 생육 기간 동안 고온에 더 많이 노출되면 생산량이 감소한다고 보고한 여러 선행연구(Hwang et al., 2003; Sim et al., 2021; Son et al., 2015) 결과들과 유사한 분석이며, 최신의 SSP 시나리오에서도 경향성이 유지됨을 보여준다. 적지와 가능지 모두 1.5℃ 온난화 수준에서 가장 크게 감소할 것으로 전망된 결과를 바탕으로 파리협정의 목표 달성이 중요함을 확인할 수 있다. 또한 주산지 배추 재배농가에서 기후변화 적응을 위해 내고온성 품종 개발, 평균기온의 변화 전망에 따른 생산량 예측을 통해 최적 재배시기를 추정하는 연구들이 활발히 진행 중이다(Lee et al., 2017; Sim et al., 2021). Kim and Yun (2016)은 미래 배추 생산 가능 시기가 이른 봄과 늦가을로 이동하고 있음을 보고하였다. 최신의 기후변화 시나리오 자료를 이용한 미래 전망 정보는 기후위기 적응 노력을 지원할 수 있는 과학적 근거를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구는 기후변화 시나리오에 따른 재배지 변화 전망에 대한 분석을 수행한 여러 선행연구들의 결과와 정성적으로 일치한다. 또한, 1.5℃, 혹은 2.0℃ 이하로 온난화를 제한할 경우 3℃ 이상 온난화의 경우보다 작물 재배기간이 연장되고 재배면적이 유지될 수 있음을 시사한다. 온난화에 따른 가능지 면적 감소가 적지 면적의 감소보다 상대적으로 감소 폭이 작음을 확인할 수 있고, 이는 여름배추의 재배적지가 온난화로 인한 공간적 변화의 영향을 더욱 크게 받는다고 해석할 수 있다. 이러한 결과는 기상청 인증 최신의 SSP 시나리오를 활용하여 분석한 정보이기 때문에, 향후 농업 분야의 기후변화 적응을 위한 과학적 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 역학적·통계적 상세화의 2단계를 거쳐서 산출되는 자료이고, 상세화 과정에 입력되는 전지구 또는 동아시아 시나리오 자료에 따른 불확실성이 내포되어 있고, 현재기후 대비 변화폭 범위를 사용하여 미래 전망을 분석하는 것이 필요하다. 본 연구에서 사용한 재배지 판별 방법은 배추의 생육에 가장 큰 영향을 미치는 온도의 기후학적 특성에 충족해야만 후보지로 판단할 수 있다는 연구결과 기반의 방법론이기 때문에, 강수, 습도 등과 같은 다른 기후요인들을 고려하는 방법론으로 재배지 변화가 전망되어야 한다. 향후 다양한 작물에 대해 종합적인 기후요인을 고려하여 분석하는 등 온난화에 따른 재배지 변화 전망에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술 개발연구」 “신기후체제 대응 기후변화시나리오 개발·평가(KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- Ahn JH, Kim KD, Lee JT. 2014. Growth modeling of Chinese cabbage in an alpine area. *Korea J Agric For Meteorol* 16(4): 309-315. doi: 10.5532/KJAFM.2014.16.4.309
- Ahn JH, Park CY, Ryu JS, Jin YI. 2008. Distribution mapping for optimal of highland agricultural zone in current and global warming future in Korea. *Proceeding of 10th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*; 2018 May 15~May 16; Gyeongsang National University. Jinju, Korea: The Korean Society for Bio-Environment Control. p. 82-86.
- Bhadouria R, Singh R, Singh VK, Borthakur A, Ahamad A, Kumar G, Singh P. 2019. Agriculture in the era of climate change: Consequences and effects. In: Choudhary KK, Kumar A, Singh AK (eds). *Climate change and agricultural ecosystems*. p. 1-23. doi: 10.1016/B978-0-12-816483-9.00001-3
- Choi J, Lee PSH, Lee S. 2015. Anticipation of the future suitable cultivation areas for Korean pines in Korean Peninsula with climate change. *J Korean Soc Environ Restor Technol* 18(1): 103-113. doi: 10.13087/kosert.2015.18.1.103
- Copernicus Climate Change Service, World Meteorological Organization. 2025. *European State of the climate 2024*. Switzerland. doi: 10.24381/14j9-s541
- Easterling WE III, Hurd BH, Smith JB. 2004. *Coping with global climate change: The role of adaptation in the United States*. Arlington: Pew Center on Global Climate Change.
- Eum H, Kim BS, Yang Y, Hong S. 2013. Quality evaluation and optimization of storage temperature with eight cultivars of Kimchi cabbage produced in

- summer at highland areas. *Korean J Hortic Sci Technol* 31(2): 211-218. doi: 10.7235/hort.2013.12170
- Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, Taylor KE. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev* 9(5): 1937-1958. doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016
- Gamal G, Samak M, Shahba M. 2021. The possible impacts of different global warming levels on major crops in Egypt. *Atmosphere* 12(12). doi: 10.3390/atmos12121589
- Gampe D, Schwingshackl C, Bohnisch A, Mittermeier M, Sandstad M, Wood RR. 2024. Applying global warming levels of emergence to highlight the increasing population exposure to temperature and precipitation extremes. *Earth System Dynamics* 15: 589-605. doi: 10.5194/esd-15-589-2024
- Government of Korea. 2020. The 3rd national climate change adaptation measures. Sejong, Korea: Ministry of Environment. 11-1480000-001715-13.
- HARI (Highland Agriculture Research Institute). 2000. Vegetable cultivation technology in highland. Pyeongchang, Korea. p. 562.
- Heo Y, Kim SH, Par EG, Son BG, Choi YW, Lee YJ, Park YH, Suh JM, Cho JH, Hong CO, Lee SG, Kang JS. 2013. The influence of abnormally high temperatures on growth and yield of hot pepper (*Capsicum annum* L.). *J Agric Life Sci* 47(2): 9-15.
- Hultgren A, Carleton T, Delgado M, Gergel DR, Greenstone M, Houser T, Hsiang S, Jina A, Kopp RE, Malevich SB, McCusker KE, Mayer T, Nath I, Rising J, Rode A, Yuan J. 2025. Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation. *Nature* 642: 644-652. doi: 10.1038/s41586-025-09085-w
- Hwang SW, Lee JY, Hong SC, Park YH, Yun SG, Park MH. 2003. High temperature stress of Summer Chinese cabbage in alpine region. *Korean J Soil Sci Fert* 36(6): 417-422.
- IPCC. 2023. Summary for policymakers. In: *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Kim CG, Lee SM. 2009. Economic impact assessment of climate change on agriculture in Korea. *Korean J Agric Econ* 50(2): 1-25.
- Kim DH, Kim JU, Kim TJ, Byun YH, Chang EC, Cha DH, Ahn JB, Min SK. 2022a. Future projection of temperature over the Korean Peninsula under global warming targets of 1.5 and 2.0°C, using the multi-RCM ensemble in CORDEX-EA phase 2. *J Clim Change Res* 13(5): 525-543. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.5.525
- Kim ES, Ahn JB, Shim KM, Hur J, Jo S, Suh MS, Cha DH, Min SK, Kang HS. 2023a. Projections of suitable cultivation area for major fruit trees and climate-type in South Korea under representative concentration pathway scenarios using the ensemble of high-resolution regional climate models. *Int J Climatol* 43(10): 4552-4571. doi: 10.1002/joc.8102
- Kim HJ, Lee S. 2017. The agricultural production and possibility of food security in North Korea. *J Clim Res* 12(4): 289-304. doi: 10.14383/cri.2017.12.4.289
- Kim JH, Yun J. 2016. Projecting the spatio-temporal change in yield potential of Kimchi cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*) under intentional shift of planting date. *Korean J Agric For Meteorol* 18(4): 298-306. doi: 10.5532/KJAFM.2016.18.4.298
- Kim JH, Yun JI. 2015. A thermal time - Based phenology estimation in Kimchi cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*). *Korean J Agric For Meteorol* 17(4): 333-339. doi: 10.5532/KJAFM.2015.17.4.333
- Kim JH, Yun JI, Moon YI, Ahn JH. 2013a. The suitable region for hot pepper and Chinese cabbage cultivation in summer. *Proceedings of the Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology Conference*.

- Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology. p. 92-96.
- Kim JU, Kim DH, Kim TJ, Chung CY, Byun YH, Suh MS. 2023b. Future projection of photovoltaic potential over South Korea based on high-resolution shared socioeconomic pathways (SSP) scenarios. *J Clim Change Res* 14(4): 465-480. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.4.465
- Kim JU, Kim MH, Chung CY, Byun YH, Kim TJ. 2023c. High-resolution projection of future climate change over South Korea under global warming levels of 1.5°C, 2°C, and 3°C based on shared socioeconomic pathways scenarios. *J Clim Change Res* 14(4): 501-520. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.4.501
- Kim JU, Kim MK, Kim YH. 2013b. Improvement of modified Korean parameter-elevation regressions an independent slopes model based on independent temperature lapse rate. *J Clim Res* 8(3): 203-215. doi: 10.14383/cri.2013.8.3.203
- Kim JU, Kim TJ, Kim DH, Byun YH, Chang EC, Cha DH, Ahn JB, Min SK. 2022b. Performance evaluation and future projection of East Asian climate using SSP scenario-based CORDEX-East Asia phase 2 Multi-RCM simulation. *J Clim Change Res* 13(3): 339-354. doi: 10.15531/KSCCR.2022.12.3.339
- Kim JU, Sang J, Kim MK, Byun YH, Kim DH, Kim TJ. 2022c. Future climate projection in South Korea using the high-resolution SSP scenarios based on statistical downscaling. *J Clim Res* 17(2): 89-106. doi: 10.14383/cri.2022.17.2.89
- Kim MK, Han MS, Jang DH, Baek SG, Lee WS, Kim YH, Kim S. 2012. Production technique of observation grid data of 1km resolution. *J Clim Res* 7(1): 55-68.
- Kim MK, Kim S, Kim J, Heo J, Park JS, Kwon WT, Suh MS. 2016. Statistical downscaling for daily precipitation in Korea using combined PRISM, RCM, and quantile mapping: Part 1, methodology and evaluation in historical simulation. *Asia-Pac J Atmos Sci* 52(2): 79-89. doi: 10.1007/s13143-016-0010-3
- Kim MK, Lee DH, Kim J. 2013c. Production and validation of daily grid data with 1km resolution in South Korea. *J Clim Res* 8(1): 12-25.
- Kim S, Kim MK. 2018. Verification of PRIDE model version 2.0. *J Clim Res* 13(1): 71-86. doi: 10.14383/cri.2018.13.1.71
- Kim TH, Park JY, Park YG. 2014. A study on factor and prospects of changes in highland vegetable acreage. Korea: KREI (Korea Rural Economic Institute). Research Reports 2014-01.
- Kim Y, Choi W, Hur J, Shim KM, Jo S. 2020. Study on land suitability assessment of grapes with regards to climate and soil conditions in South Korea. *Korean J Agric For Meteorol* 22(4): 250-257. doi: 10.5532/KJAFM.2020.22.4.250
- Kim Y, Shim K, Jung M, Choi I. 2015a. Study on meteorological factors affecting estimation of Chinese cabbage yield. *J Clim Change Res* 6(4): 277-281. doi: 10.15531/KSCCR.2015.6.4.277
- Kim Y, Shim K, Jung M, Choi I. 2015b. A trend analysis of meteorological elements in the main producing areas of vegetables. *J Clim Change Res* 6(4): 283-290. doi: 10.15531/KSCCR.2015.6.4.273
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2021. Assessment report of 109yr (1912-2020) climate change over Korea. Daejeon, Korea: Author. 11-1360000-001694-01.
- Kwon T, Kim R, Yoon S. 2019. The effect of highland weather and soil information on the prediction of Chinese cabbage weight. *J Environ Sci Int* 28(8): 701-707. doi: 10.5322/JESI.2019.28.8.701
- Kwon YS, Kim SO, Seo HH, Moon KH, Yun JI. 2012. Geographical shift in blooming date of kiwifruits in Jeju Island by global warming. *Korean J Agric For Meteorol* 14(4): 179-188. doi: 10.5532/KJAFM.2012.14.4.179
- Lagercrantz U, Lydiate D. 1996. Comparative genome mapping in *brassica*. *Genetics* 144: 1903-1910.
- Lee DB, Shim KM. 2011. Effects by climate change and counterplan for agriculture. *Outlook of Agriculture (I)*. Korea Rural Economic Institute. p. 319-344.

- Lee J, Lee H, Kim S, Lee S, Lee H, Choi C. 2017. Development of growth models as affected by cultivation season and transplanting date and estimation of prediction yield in Kimchi cabbage. *Prot Hortic Plant Factory* 26(4): 235-241. doi: 10.12791/KSBEC.2017.26.4.235
- Lee JS. 2018. Growth and salting properties influenced by culture methods, cultivars and storage packaging of kimchi cabbage (*Brassica rapa*) in spring. *Korean J Agric Sci* 45(4): 623-634. doi: 10.7744/kjoas.20180090
- Lee S, Heo I. 2018. Impact of climate on yield of highland Chinese cabbage in Gangwon Province, South Korea. *J Korean Geogr Soc* 53(3): 265-282.
- Lee S, Kim S, Lee H, Choi C, Park S. 2016a. Impacts of climate change on the growth, morphological and physiological responses, and yield of Kimchi cabbage leaves. *Hortic Environ Biotechnol* 57(5): 470-477. doi: 10.1007/s13580-016-1163-9
- Lee S, Lee SH, Ji SY, Choi J. 2016b. Predicting change of suitable plantation of *Schisandra chinensis* with ensemble of climate change scenario. *J Environ Impact Assess* 25(1): 77-87. doi: 10.14249/eia.2016.25.1.77
- Lee SH, Baek SH, Lee J, Jang YA, Seo TC, Moon JH, Jang S. 2024. Production of Kimchi cabbage (*Brassica rapa sub. pekinensis*) under high-temperature stress conditions: A review. *Korean J Breed Sci* 53(3): 237-255. doi: 10.9787/KJBS.2024.56.3.237
- Lee SH, Lee PSH, Lee S, Ji SY, Choi J. 2015. Predicting the changes in cultivation areas of walnut trees (*Juglans sinensis*) in Korea due to climate change impacts. *Korean J Agric For Meteorol* 17(4): 399-410. doi: 10.5532/KJAFM.2015.17.4.399
- NIHA (National Institute of Highland Agriculture). 2000. Highland vegetable cultivation technology.
- NIHHS (National Institute of Horticultural and Herbal Science). 2016. <http://www.fruit.nihhs.go.kr>
- NIHHS (National Institute of Horticultural and Herbal Science). 2020. Production impact assessment and high resolution agricultural climate information technique for Chinese cabbage, radish and green tea. Korea: RDA (Rural Development Administration). p. 104.
- NIMS (National Institute of Meteorological Sciences). 2022. Climate risk in Korean Peninsula under global warming levels. 11-1360620-000267-01.
- Opena RT, Lo SH. 1979. Genetics of heat tolerance in heading Chinese cabbage. *Hortic Sci* 14(1): 33-34. doi: 10.21273/HORTSCI.14.1.33
- Schleussner CF, Lissner TK, Fischer EM, Wohland J, Perrette M, Golly A, Rogelj J, Childers K, Schewe J, Frieler K, Mengel M, Hare W, Schaeffer M. 2016. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: The case of 1.5°C and 2°C. *Earth Syst Dyn* 7: 327-351. doi: 10.5194/esd-7-327-2016
- Schmidhuber J, Tubiello FN. 2007. Global food security under climate change. *Proc Natl Acad Sci* 104(50): 19703-19708. doi: 10.1073/pnas.0701976104
- Sim H, Jo W, Lee H, Moon Y, Woo U, Jung S, Ahn S, Kim S. 2021. Determination of optimal growing degree days and cultivars of Kimchi cabbage for growth and yield during Spring cultivation under shading conditions. *Hortic Sci Technol* 39(6): 714-725. doi: 10.7235/HORT.20210063
- Son IC, Moon K, Song E, Oh S, Seo H, Moon Y, Yang J. 2015. Effects of differentiated temperature based on growing season temperature on growth and physiological response in Chinese cabbage 'Chunkwang'. *Korea J Agric For Meteorol* 17(3): 254-260. doi: 10.5532/KJAFM.2015.17.3.254
- Sung H, Kim J, Shim S, Seo JB, Kwon SH, Sun MA, Moon H, Lee JH, Lim YJ, Boo KY, Kim Y, Lee J, Lee J, Kim JS, Marzin C, Byun YH. 2020. Climate change projection in the twenty-first century simulated by NIMS-KMA CMIP6 model based on new GHGs concentration pathways. *Asia-Pac J Atmos Sci* 57: 851-862. doi: 10.1007/s13143-021-00225-6
- Sung H, Kim JU, Lee JH, Kim MH, Shim S, Chung CY, Byun YH. 2023. A study on the future projections for climate change adaptation in Korea - Focusing on research reports from NIMS -. *J Clim Change Res* 14(6): 929-939. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.929

- Tebaldi C, Debeire K, Eyring V, Fischer E, Fyfe J, Friedlingstein P, Knutti R, Lowe J, O'Neill B, Sanderson B, van Vuuren D, Riahi K, Meinshausen M, Nicholls Z, Tokarska KB, Hurtt G, Kriegler E, Lamarque J-F, Meehl G, Moss R, et al. 2021. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth Syst Dyn* 12(1): 253-293. doi: 10.5194/esd-12-253-2021
- UN (United Nations). 2015. Paris Agreement.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2022. Decision -/CMA.3: Glasgow Climate Pact.
- Wi H, Kim S, Kim H, Yu H, Park J, Song Y, Yang A, Yoo H. 2015. A study of vegetation changes according to future climate change focus on crop of the warm temperate zone and crop of subarctic regions. *J Appl Geogr* 32: 1-25.
- Wi SH, Lee HJ, An SW, Kim SK. 2020. Evaluating growth and photosynthesis of Kimchi cabbage according to extreme weather conditions. *Agronomy* 10(12): 1846. doi: 10.3390/agronomy10121846
- WMO (World Meteorological Organization). 2025. State of the Global Climate 2024. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. doi: 10.18356/9789263113685