한국농림기상학회지, 제11권 제4호(2009)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 11, No. 4, (2009), pp. 162~173

미래 시나리오 기후조건하에서의 사과 '후지' 품종 재배적지 탐색

김수옥[1] · 정유란[1] · 김승희[2] · 최인명[2] · 윤진일[1]*
[1]경희대학교 생태시스템공학과, [2]농촌진흥청 국립원예특작과학원 과수과
(2009년 12월 6일 접수; 2009년 12월 17일 수정; 2009년 12월 18일 수락)

The Suitable Region and Site for 'Fuji' Apple Under the Projected Climate in South Korea

Soo-Ock Kim[1], Uran Chung[1], Seung-Heui Kim[2], In-Myung Choi[2] and Jin I. Yun[1]*
[1]Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea
[2]National Institute of Horticultural and Herbal Sciences, Rural Development Administration, Suwon 440-706, Korea
(Received December 6, 2009; Revised December 17, 2009; Accepted December 18, 2009)

ABSTRACT

Information on the expected geographical shift of suitable zones for growing crops under future climate is a starting point of adaptation planning in agriculture and is attracting much concern from policy makers as well as researchers. Few practical schemes have been developed, however, because of the difficulty in implementing the site-selection concept at an analytical level. In this study, we suggest site-selection criteria for quality Fuji apple production and integrate geospatial data and information available in public domains (e.g., digital elevation model, digital soil maps, digital climate maps, and predictive models for agroclimate and fruit quality) to implement this concept on a GIS platform. Primary criterion for selecting sites suitable for Fuji apple production includes land cover, topography, and soil texture. When the primary criterion is satisfied, climatic conditions such as the length of frost free season, freezing risk during the overwintering period, and the late frost risk in spring are tested as the secondary criterion. Finally, the third criterion checks for fruit quality such as color and shape. Land attributes related to these factors in each criterion were implemented in ArcGIS environment as relevant raster layers for spatial analysis, and retrieval procedures were automated by writing programs compatible with ArcGIS. This scheme was applied to the A1B projected climates for South Korea in the future normal years (2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100) as well as the current climate condition observed in 1971-2000 for selecting the sites suitable for quality Fuji apple production in each period. Results showed that this scheme can figure out the geographical shift of suitable zones at landscape scales as well as the latitudinal shift of northern limit for cultivation at national or regional scales.

Key words **: Site-selection, Global warming, Fuji apple, GIS**

I. 서 론

기온 상승에 따른 농림생태계 변화는 국내·외 보고에서 언급되고 있는데, 외국에서는 온대수목의 개화시기가 앞당겨지는 것이 관측되고 있으며(Nordli *et al.,* 2008; Eccel *et al.,* 2009), 국내 기상관서의 생물계절 관측자료에서도 지난 100년간 봄꽃의 개화가 빨라진 경향이 명백해져 늦서리에 의한 꽃눈의 피해 증가가 우려된다(Lee *et al*., 2008; Eccel *et al*., 2009). 또한 기온 상승은 눈의 휴면단계에서부터 영향을 미쳐

* Corresponding Author : Jin I. Yun (jiyun@khu.ac.kr)

발아를 불량하게 할 수 있다(Jacobs *et al.*, 2002; Naor *et al.*, 2003). 따라서 농업과 자연자원 관리 측면에서 변화된 기후조건에 어떻게 대응할 것인지가 쟁점으로 떠오르고 있으며, 이를 해결하기 위해서는 기후변화와 기후요인을 분석하여 농작물과 수목의 재배적지를 구분하여 주는 연구가 기본적으로 필요하다(Shim *et al.*, 2004). 과수산업에 관련한 계획을 수립할 때 해당 과수의 생육특성 및 재배적지에 대해 현재기후는 물론 미래기후에서의 변화 양상을 예측한 정보가 필요할 것이다.

기후가 변하면 농작물의 재배적지가 이동하게 되는데(Seo and Kim, 2005), 우리나라의 경우 국토가 좁고 산지가 많아 농경을 하기에 적합한 면적이 넓지 않으므로 수요를 충족시키기 위한 가장 효율적인 정책은 각 작물-품종에 적합한 지역을 찾아 적절하게 배치하는 일이라고 판단된다. 사과 등 과수는 산림과 마찬가지로 한 장소에서 수십 년 이상 뿌리를 뻗고 생장하며, 묘목을 재식 한 뒤 판매 가능한 과실을 생산하는데 상당한 시일이 소요되므로 과수산업에 관련한 계획을 수립할 때 해당 과수의 생육특성 및 재배적지에 대해 현재기후는 물론 미래기후에서의 변화 양상을 예측한 정보가 필요할 것이다.

작물의 생육 및 과실품질은 토양특성, 비료, 강수량 및 관수, 일조시간, 병해충 등 여러 요인들의 복합적인 영향을 받는다(Westwood, 1993; 농촌진흥청, 2002). 최적의 재배적지를 판정하기 위해서는 여러 요인들을 함께 고려해야 하는데 이러한 중첩분석을 용이하게 하는 것이 GIS(Geographic Information Systems) 기술이다. GIS 기술은 점 단위의 데이터를 연속적인 공간분포로 표현할 수 있으며 고해상도의 GIS 레이어는 정밀한 지역 정보를 산출한다. 이를 이용하여 작물 및 과수의 재배적지 요소를 설정하고 각 조건들에 모두 부합되는 지역을 출력하여 사용자가 쉽게 이해할 수 있는 지도로의 표현이 가능하다.

재배적지 요인과 작물의 생육 반응을 디지털 값으로 표현하고 GIS layer로 변환하기 위해서는 모델링 기술이 필요하다. 현재 우리나라는 남한 전역 30m 해상도의 최고 및 최저기온 전자기후도가 제작되어있어(Chung *et al.*, 2002; Choi and Yun, 2002; Chung *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2004; Yun, 2004) 기온기후도를 바탕으로 온대과수의 만개기 분포도 작성, 동해위험지역 및 서리피해지역과 숙기 등을 예측할 수 있으며 기온-품질 간의 관계를 통해 재배적지를 알 수 있다.

사과는 우리나라에서 재배되고 있는 대표적인 온대과수 중 하나로서 만생종인 '후지'는 1970년대부터 1990년대까지 재식비율이 꾸준히 증가하여 가장 많이 재배되는 품종으로 자리잡았다. 또한 '후지'의 고품질 조건인 anthocyanin 함량, L/D 비 및 hunter A 값과 기온과의 관계식이 정립되어 있다. 이를 바탕으로 Kwon *et al.*(2004)은 전북 장수군의 '후지' 고품질 생산 가능 지역을 예상하였다. 이때 만개기 이후 늦서리 위험지역을 검색하기 위해 국립농업과학원(1990)에서 제시한 '후지'의 발육속도 모형(development stage, DVS)으로 만개기를 예측하였다. 발육속도 모형의 경우 저온의 영향을 고려하지 않는 반면 Cesaraccio *et al.*(2004)의 휴면시계모형은 겨울 동안 눈의 휴면을 기반으로 발아 및 개화에 필요한 온도시간(thermal time)을 정량화하므로 겨울기온상승에 기인한 생물계절의 영향을 추정하는데 유용할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 현재 기후와 미래 변화된 기후조건에서 '후지'의 재배적지를 판정할 수 있는 주 요인에 대해 GIS layer를 제작하는 것을 첫째 목적으로 하고 이들 layer를 이용한 중첩분석을 통해 현재 및 미래 사과 주산지 내의 재배적지 이동양상을 필지 단위로 파악하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 개요

주어진 지역이 '후지'의 재배적지인지 여부를 판단하기 위하여 3단계의 기준을 설정하였다(Fig. 1). 1단계에는 토양, 지형, 지표피복과 같은 토지의 불변속성에 대하여 사과원 개원가능 여부를 판단하였는데, 농경지 및 삼림피복 가운데 경사도 15% 이하인 지역을 대상으로 하여 토성이 사양토와 식양토, 식토, 미사질양토인 지역을 선발하였다. 2단계에는 1단계의 조건을 만족하는 지역에 한해 기후적 요건을 적용한 것으로서 연중 생장유효적산온도(growing degree days, GDD) 및 동상해 위험도를 판정하는 과정이다. 동해위험지역은 재현기간 10년의 극 최저기온이 -28°C 이하인 곳, 상해위험지역은 꽃눈이 개화한 이후에 늦서리가 오거나 숙기 도달 전 첫서리가 오는 지역을 가리킨다. 3

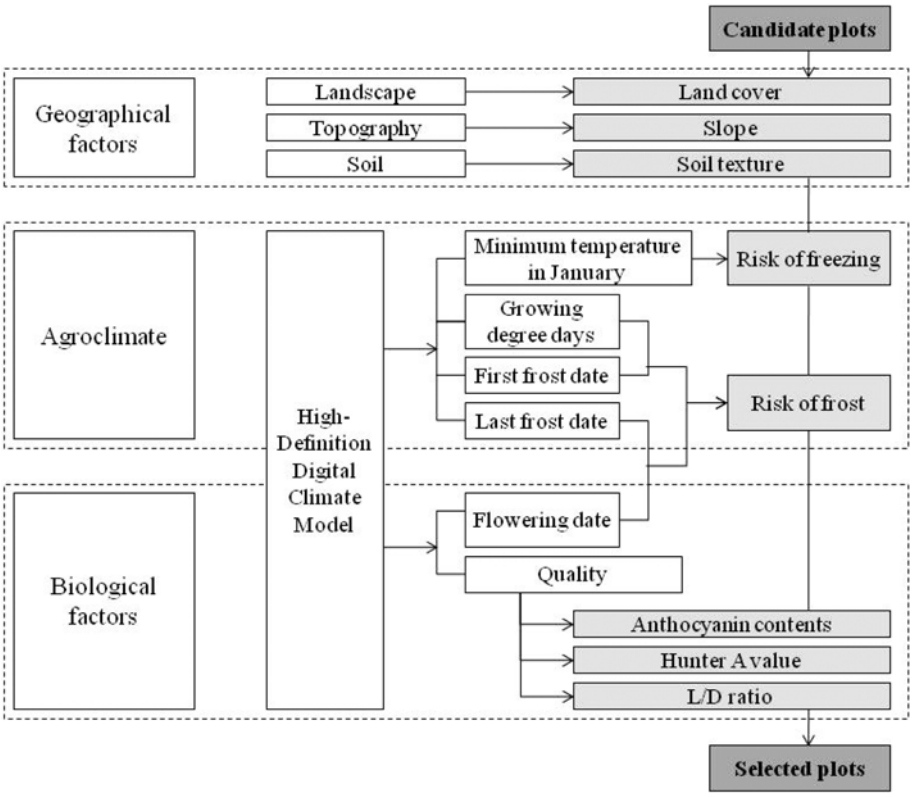

Fig. 1. A schematic of land search process suitable for quality 'Fuji' apple production under the changed climate based on digital climate maps and other geospatial information layers.

단계에서는 기후적인 요건을 갖춘 지역 가운데 고품질 '후지' 생산이 가능한 지역을 선발하였다. 품질요건으로서 기온과의 관계식이 정립된 anthocyanin 함량, hunter A 값 및 L/D 비를 선정하였다. 각 요소의 속성을 앞서 제시된 방법에 의해 GIS 주제 레이어로 구현하여 중첩분석을 실시하였는데 후지의 생물계절정보 등 알려지지 않은 부분은 포장 및 챔버 실험을 통해 확인하였다.

2.2. 공간정보 확보

2.2.1. 토지의 불변속성

환경부에서 제공하는 해상도 30m의 지표피복도 상에서 농경지와 삼림으로 분류된 곳을 대상으로 동일한 해상도의 수치고도모형(digital elevation model, DEM)에 의해 경사도를 계산하여 경사도 15% 이하인 지역을 선발하였다. 또한 국가수자원관리 종합정보시스템(http://www.wamis.go.kr)에서 제공하는 토양도로부터 토성이 사양토와 식양토, 식토, 미사질양토인 지역을 선발하였고 자갈이 섞인 경우는 제외하였다.

2.2.2 기후변화 및 파생정보

1) 전자기후도

국가농림기상센터(http://www.ncam.kr)에서 제공하는 전자기후도 가운데 평년의 월별 평균 일 최고 및 최저기온을 30m 해상도로 나타낸 격자형 자료를 수집하였다. 대부분의 농림업모형 구동에 필요한 입력 기온자료는 일별 시간간격으로 1971-2000 기간의 기온기후도로부터 조화분석법을 통해 일별 최고 및 최저기온자료를 복원하였다(Seino, 1993).

기상청 기후변화정보센터(www.climate.go.kr)에서 제공하는 IPCC의 SRES(Special Report on Emission Scenarios) A1B 시나리오에 의한 미래평년(2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년)의 월별 최고 및 최저기온 격자형 자료를 조화분석법을 통해 일별 자료로 변환하였다. 준비된 4개 평년에 대한 일별 기온자료는 GDD와 '후지'의 발아기 및 만개기 계산에 이용하였다.

2) 늦서리 예상일 분포도

우리나라에서는 주로 4월에 마지막 서리가 발생하는데 4월 최저기온과 종상일간의 관계는

$$D_{frost} = 135 - (6.38 \times T_{\min 4}) \quad (1)$$

로 표현된다(Kwon *et al.*, 2004). 여기서 $T_{\min 4}$는 일 최저기온의 4월 평균값이고 D_{frost}는 Julian day(1월 1일=1, 12월 31일=365)이다. 이 관계식을 통해 우리나라 전역의 종상일 분포도를 제작하였다.

3) 적산온도 도달 및 첫서리 날짜 분포도 제작

사과 만생종의 경우 수확기까지 10°C 이상의 적산온도(GDD_{10})가 1,300°C이다. 일별 자료로 변환한 평년기후도를 통해 일 평균기온이 10°C 이상이 된 시점부터 적산온도가 1,300°C에 도달하는 날짜를 계산하였고 최저기온이 0°C 이하로 내려가는 첫 번째 날짜를 초상일로 간주하였다.

4) 극최저기온 분포도

Jung *et al.*(2004)에 따르면 우리나라의 30년 평년의 1월 최저기온 연차변이를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Sd = 1.36 - 0.0018 \times Z - 0.032 \times T \quad (2)$$

*Sd*는 1월 최저기온의 30년간 표준편차(°C)이고 *Z*는 해발고도(m), *T*는 일 최저기온의 1월 평균값이다. 위 근사식에서 계산한 30년 평년의 연차변이를 구하고 10년에 한 번 발생할 수 있는 재현확률을 적용하였다. 표준정규분포에서 10년 재현기간(p=0.1)에 해당하는 z값이 -1.28이므로 아래의 식과 같이 10년에 한번 발생할 수 있는 1월 최저기온(T_{10})을 계산할 수 있다(Jung *et al.*, 2004).

$$T_{10} = T_{ext} - (Sd \times 1.28) \quad (3)$$

T_{ext}는 30년 평년의 1월 최저기온이다. A1B 시나리오에 대한 미래평년 1월 최저기온의 경우는 국립기상연구소로부터 제공받은 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년 등 3개 미래평년의 현재평년(1971-2000년) 평균에 대한 편차를 현재평년 값에 더하는 방식으로 제작하였다.

2.2.3. 과수생장 및 품질

1) 생물계절

Cesaraccio *et al.*(2004)가 작성한 온대낙엽과수의 발아기 예측모형에서는 눈이 발아하기 위한 온도의 영향을 내생휴면과정(period of rest)과 환경휴면과정(period of quiescence)으로 나누어 표현한다. 과수의 수확 시기 또는 낙엽이 진 시기로부터 매일의 최고 및 최저기온에 따라 계산된 chill day(C_d)를 누적하고 적산된 C_d가 저온요구도에 도달한 시기를 내생휴면이 타파된 것으로 본다. 그 다음날부터는 C_d의 반대인 anti-chill day(C_a)를 계산하고 저온요구도를 차감하여 0이 된 날짜를 발아기로 간주한다. 이때 품종 별로 고유한 기준온도를 갖는데, 기준온도에 따라 저온요구도가 달라진다. 또한 최초의 C_a를 적산하기 시작한 시점으로부터 개화기까지 C_a를 누적한 값을 개화기 고온요구도로 한다(Jung *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2009).

'후지'를 대상으로 2007년(1차년도)과 2008년(2차년도) 12월부터 이듬해 봄까지 발아유도실험을 2회 실시하였다. 2007년 12월 12일과 2008년 12월 10일에 경기도 수원 소재 국립원예특작과학원 포장에서 '후지'/M.26 품종의 1년생 가지를 일괄적으로 채취하여 3°C 저온저장고에 보관하였다. 3일 후부터는 매주 저온저장고에 보관된 시료를 꺼내 25°C 생장상에 수삽처리하였다(실험 1). 이와 함께 매주 포장에서 '후지'의 1년생 가지를 채취하여 생장상에서 발아를 유도하였다(실험 2). 2차년도의 실험 2의 시료는 국립원예특작과학원의 시료가 부족하여 경기도농업기술원의 '후지'/M.26으로 대체하였다. 실험 1에서는 시료가 충분히 저온에 노출되어 내생휴면이 타파되면 발아에 이르기까지 걸리는 기간이 거의 일정해진다고 보고 그 기간을 최소발아일수로 가정하였고 실험 2에서 최소발아일수가 처음으로 나타나는 시기를 내생휴면해제일로 간주하였다.

Kim *et al.*(2009)과 같이 매일의 C_d 및 C_a 계산을 통하여 기준온도와 저온요구도 조합을 찾아내었다. 이를 경기도농업기술원의 포장 내 자동기상관측소에서 측정된 기온자료에 대입하여 예상 발아기를 계산한 뒤 2001-2008년간 실측값과의 예측 오차를 확인하고 가장 RMSE(root mean square error)가 적은 모수조합을 선택하였다. 이 모수 조합을 통해 계산된 휴면해제일부터 실측 만개기까지의 C_a를 적산한 뒤 평균한 값을 만개기 고온요구도 모수로 간주하였다.

이들 모수로 후지에 최적화 시킨 모형에 전자기후도로부터 도출한 일별 기온자료를 입력하여 만개기 분포

도를 기간 별로 제작하였다.

2) 과일품질

Kwon *et al.*(2004)은 '후지'의 고품질 상품 기준으로서 anthocyanin 함량 15μg cm^{-3} 이상, L/D 비는 0.85이상(Seo, 2003), hunter A 값은 25이상(Choi, 1998)을 제시하고 각 요소에 대해 다음과 같은 예측식을 도출하였다.

$$Antocyanin\ \ content = 28.2 - T_{avg10} \quad (4)$$

$$Hunter\ \ A\ \ value = 49.1 - 1.8 \times T_{avg10} \quad (5)$$

$$L/D\ \ Ratio = 1.166 - 0.012 \times T_{\max 48} \quad (6)$$

이들 식에서 T_{avg10}은 10월의 평균기온이고 $T_{\max 48}$은 4월부터 8월까지의 5개월간 최고기온 평균값이다.

이들 식에 전자기후도로부터 추출한 해당 기간의 기온자료를 입력하여 요소 별 예상품질 분포도를 30m 해상도로 제작하였다.

2.3. 분석

준비된 토지피복도, 경사도, 수치토양도를 중첩시켜 필요한 조건을 모두 만족하는 지역을 선발하였다. 다음에는 이들 토지에 대한 농업기후학적 2단계 선발과정을 거쳤는데 먼저 IPCC SRES A1B 배출시나리오에 근거하여 미래평년(2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년) 기후조건에서 추정된 만개기와 종상일 간의 차이를 계산하여 만개기보다 종상일이 같거나 늦은 지역을 찾아내었다. 그와 같은 방식으로 첫서리가 발생한 날에 사과 만생종의 적산온도가 채워지지 않은 경우 즉 생육기간이 부족한 지역 역시 위험지역으로 판단하였다. 현재평년과 미래 3개 평년에 대하여 일최저기온 1월 평균값과 1월 최저기온 분포도로 연차변이 및 10년 재현확률의 1월 최저기온을 계산하고 '후지'의 동해유발온도 이하의 온도가 발생하는 지역을 동해위험지역으로 출력하였다. 이러한 동·상해위해조건에 하나도 포함되지 않는 지역을 재배안전지대로 판정하였다. 마지막으로 과일 품질정보에 근거한 3단계 선발과정을 거쳤는데 먼저 anthocyanin 함량과 hunter A 값, L/D 비 기준에서 '후지' 고품질 재배조건에 해당하는 지역을 각각 제작하였다. 다음에는 이들을 중첩시켜 3가지 조건을 모두 만족하는 지역을 추출하는 방식으로 현재평년과 미래평년에 대하여 품질조건 재배적지를 작성하였다. 분포도 제작과정은 ArcGIS 9.2(ESRI, Redlands, California, USA) 공간분석 소프트웨어로 수행하였다.

III. 결 과

3.1. 생물계절모형

2회에 걸친 발아유도실험을 통해 기준온도 6.1°C, 저온요구도 -100.5 day, 만개기 고온요구도 275.1 day의 모수조합을 도출하였다. 1992-2008년 기간의 경기도농업기술원 및 국립원예특작과학원 실측자료에 의해 모형의 만개기 추정능력을 검증한 결과, 각각 1.7일 및 2.8일의 RMSE 값을 보였다. 기존 발육속도 모형에 의해 추정해서 얻은 RMSE(2.5일 및 4.1일)에 비해 우수한 것으로 판단된다(Fig. 2).

3.2. 재배적지 판정요소의 분포

3.2.1. 토지의 불변속성

우리나라에서 토지의 불변속성, 즉 경관, 지형, 토성에서 과수원 개원에 적합한 지역을 30m 해상도로 분석했을 때, 국토의 27% 정도가 이에 해당되었다. 경기도 남·북부 및 충청북도 북부, 경상북도의 예천, 의성, 상주, 영천 주변 및 경상남도 창녕, 함안 주변과 특히 충청남도와 전라도의 서해안에 가까운 지역에 적

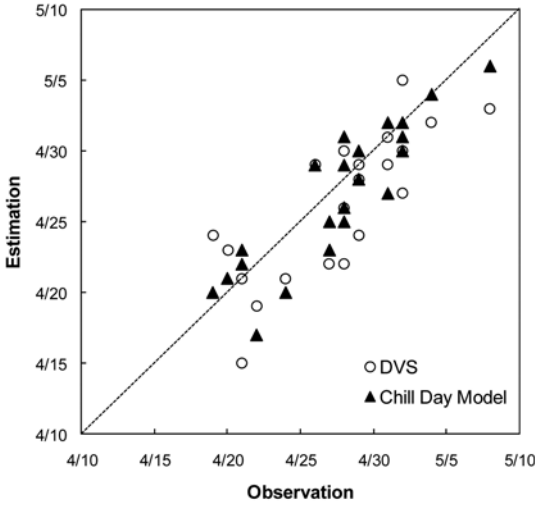

Fig. 2. Comparison of the model calculated flowering dates of 'Fuji' apple with the observations at experimental orchards of Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Service (GARES) and National Institute of Horticultural and Herbal Sciences (NIHHS) in 1992-2008.

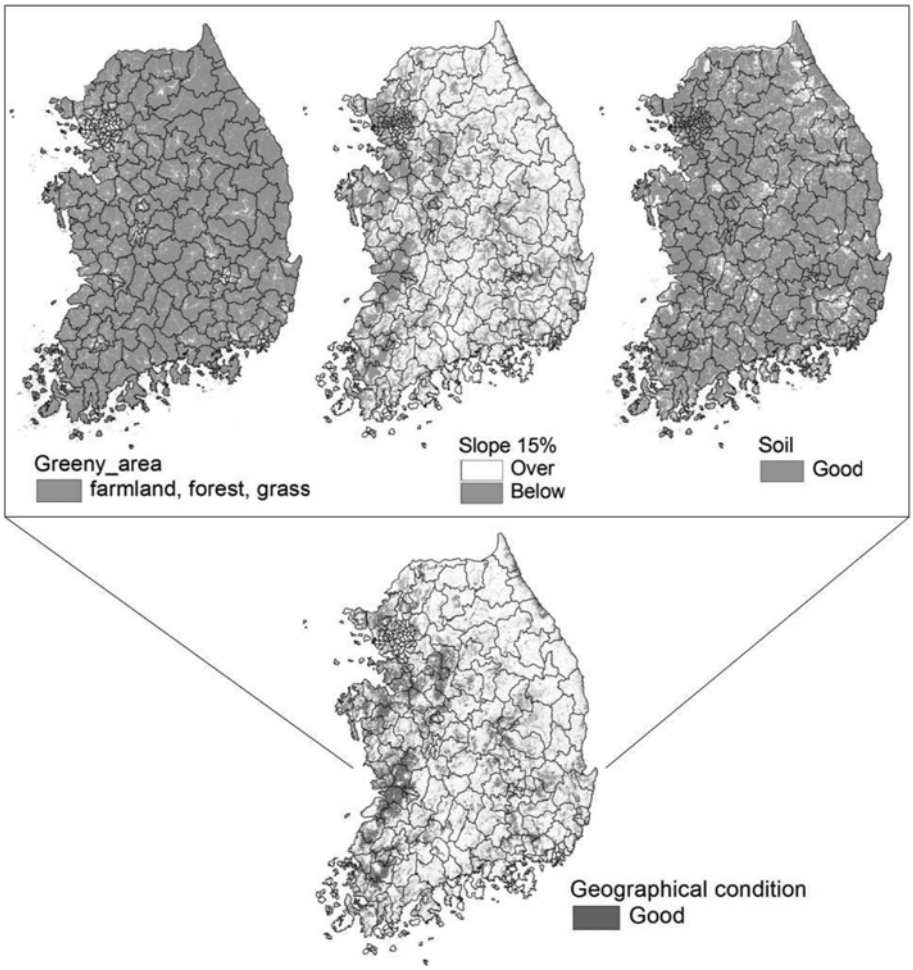

Fig. 3. Searching for the lands suitable for growing crops based on judgment of geographical conditions like land cover/land use, topography (slope) and soil texture.

지가 많이 분포하고 강릉, 고성의 동해안 부분도 다소 포함되었다(Fig. 3). 이 분포양상은 2100년까지 불변이라고 가정하였다.

3.3.2. 농업기후학적 요소

1) 만개일 분포 변화

남한 전역에 사과 '후지'가 재식되었다고 가정할 때 북쪽 지역 및 산악 지역과 같이 기온이 낮은 지역에서는 만개시기가 더 늦게 나타났다(Fig. 4). 현재평년 기후조건에서는 4월 말에서 5월 중순까지 대부분의 지역에서 만개가 되나 A1B 시나리오의 기후조건을 적용하면 기온 상승에 따라 점차적으로 만개시기가 앞당겨진다. 또한 현재에는 4월에 만개하는 지역이 전국의 31%인 반면 2011-2040년 평년기후에는 전국의 약 55%, 2041-2070 평년에는 전국의 약 77%, 2071-2100년 평년에서는 전국의 86% 정도로 점차 확대되고 반면 5월에 만개하는 지역은 68%에서 45%, 23%, 10%정도로 감소할 것으로 예상된다(Fig. 4). 만개기의 변화를 전국 평균으로 보면 현재평년에 비해 2011-2040년 평년에는 4.5일 정도 앞당겨지지만 2041-2070년 평년에는 10일 가량 빨라지며 2071-2100년 평년에는 18일 정도가 더 앞당겨질 것으로 추정된다. 이는 '후지'의 숙기 역시 빨리 찾아올 수 있음을 시사한다. 또한 늦겨울이나 초봄에 갑작스러운 저온현상에 의한 휴면타파 혹은 발아 지연 피해가 발생할 가능성도 증가할 것이다. 만개기는 남쪽지역 및 해안일수록 북쪽 및 내륙지역보다 더 많이 앞당겨지는 경향이 나타났다. 남해안 일부 지역에서는 저온 부족으로 인해 발아 및 만개를

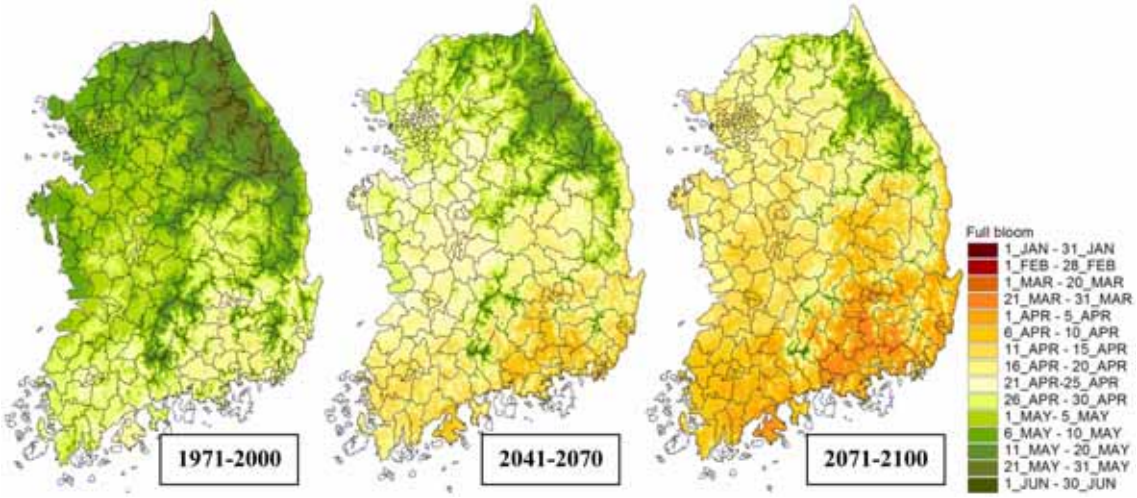

Fig. 4. Dates of full bloom in 'Fuji' apple in South Korea expected for the current (1971-2000) and future climatic conditions projected by A1B scenario.

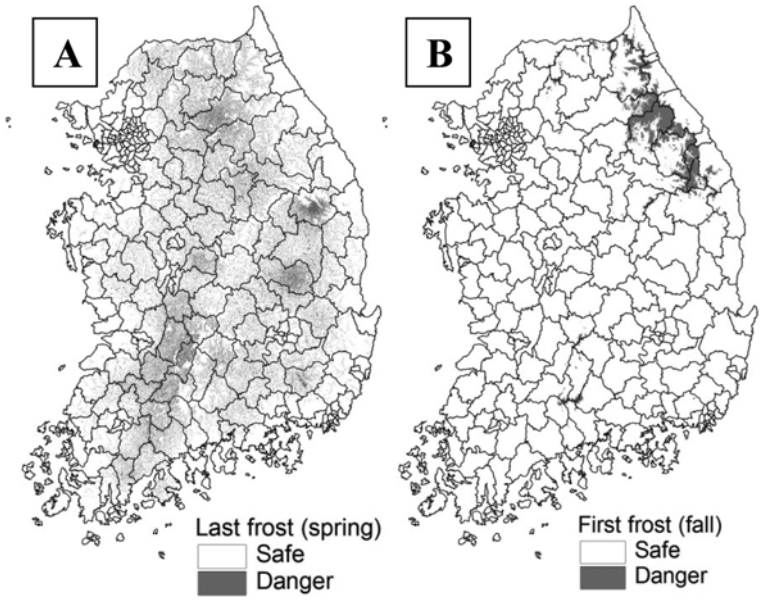

Fig. 5. Locations of frost prone areas for the last frost in spring (A) and the first frost in fall (B), which are expected in the current climatological normal year (1971-2000).

하지 못하는 지역이 발생할 수 있을 것으로 보인다.

2) 상해위험 분포

우리나라에서는 고도가 높은 지대를 제외한 내륙 일부 지역이 '후지'의 만상해가 발생할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 5A). 기온이 높은 해안 지대 및 대도시 주변은 만개기가 빨라진 만큼 종상일 역시 일찍 나타나기 때문에 서리피해를 피할 수 있으며, 고지대의 경우는 만개기가 늦기 때문에 상해안전지대로 나타났다. 상해위험지역의 지리적 분포양상은 미래 시기별로 큰 변화가 없지만 전체 면적에는 변화가 있을 것으로 보인다. 현재평년기후에서는 전국의 12% 정도가 상해위험지대에 포함되고 A1B 시나리오의 2011-2040년 평년에서는 전국의 9%, 2041-2070년 평년에는 전국 7% 정도로 감소된다. 반면 2071-2100년 평년에는 상해위험지역이 전국의 9% 가량으로 다시 증가되는데

이는 겨울기온 상승으로 만개시기가 앞당겨지는 것이 원인일 것으로 생각된다.

한 해 동안 생육가능기간의 부족으로 적산온도가 채워지지 않거나 지연되어 미숙과 상태에서 첫서리를 맞아 수확에 실패하게 될 예상지역은 주로 강원도와 같은 산간지대에 해당하며, 현재평년기후에서 우리나라 전체 면적의 4% 가량이 해당된다(Fig. 5B). 미래에 기온이 상승할수록 위험 지역은 축소되어 2011-2040년 평년에는 전국의 1.6%, 2041-2070년 평년에는 0.3%, 2071-2100년 평년이 되면 거의 0%에 가까워질 것으로 추정되어 점차 더 높은 고도에서도 첫서리가 오기 전에 숙기에 도달할 수 있을 것으로 나타났다.

3) 동해위험 지역

10년에 한번 발생할 수 있는 최저기온만으로 판정한 월동기간 중 동해위험지역은 북부 내륙의 일부 지역에 해당할 것으로 보이며(Fig. 6), 현재평년기후에서 전국의 약 0.5%에 불과할 것으로 추정되었다. 또한 미래에 기온이 상승함으로써 2011-2040 평년기후에서는 전국의 0.2%로 감소하고 2041-2070년 평년기후에서는 동해위험지역이 더 이상 나타나지 않을 것으로 보인다.

Fig. 6. Locations of high freeze risk areas in the current climatological normal year (1971-2000), with -28°C or below for the lowest minimum temperature at a 10 year return period.

3.3.3. 품질요인의 분포

현재평년기후에서 '후지'의 고품질 재배 조건에 해당하는 지역은 남부 및 해안을 제외한 전국의 약 60% 면적에서 나타난다(Fig. 7). A1B 미래기후시나리오에 따라 기온이 상승하게 된다면 점차 남쪽의 재배지가 북상하면서 고품질 재배가능지역이 크게 축소되어 2011-2040년 평년에는 전국의 약 34%, 2041-2070년 평년에는 약 10%, 2071-2100년 평년기후에서는 3% 정도가 되어 주로 강원도 산간지대에만 분포할 것으로 추정되었다.

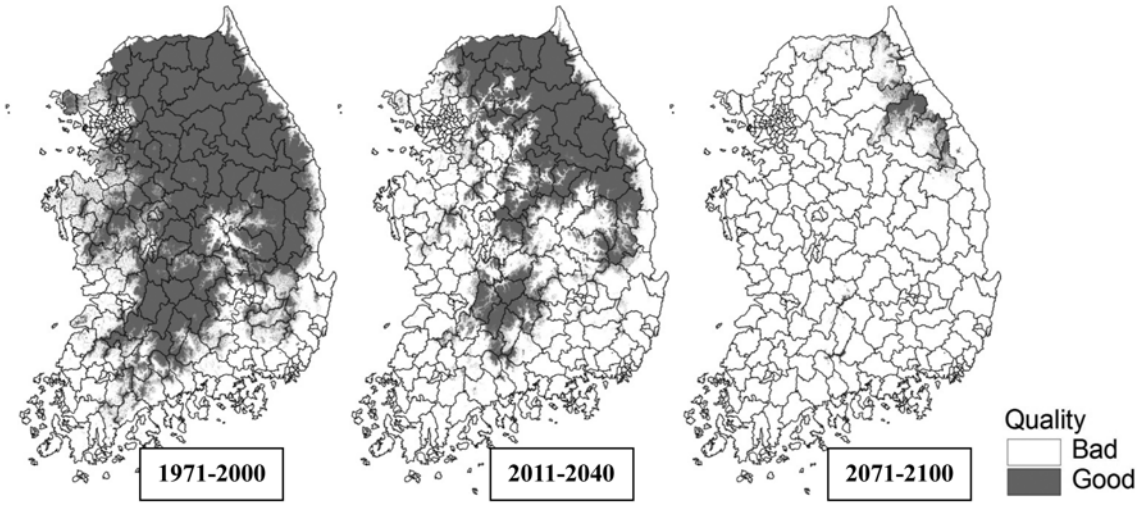

Fig. 7. Decrease in the potential land area satisfying the fruit quality criterion for 'Fuji' apple under the projected climatic change in the future.

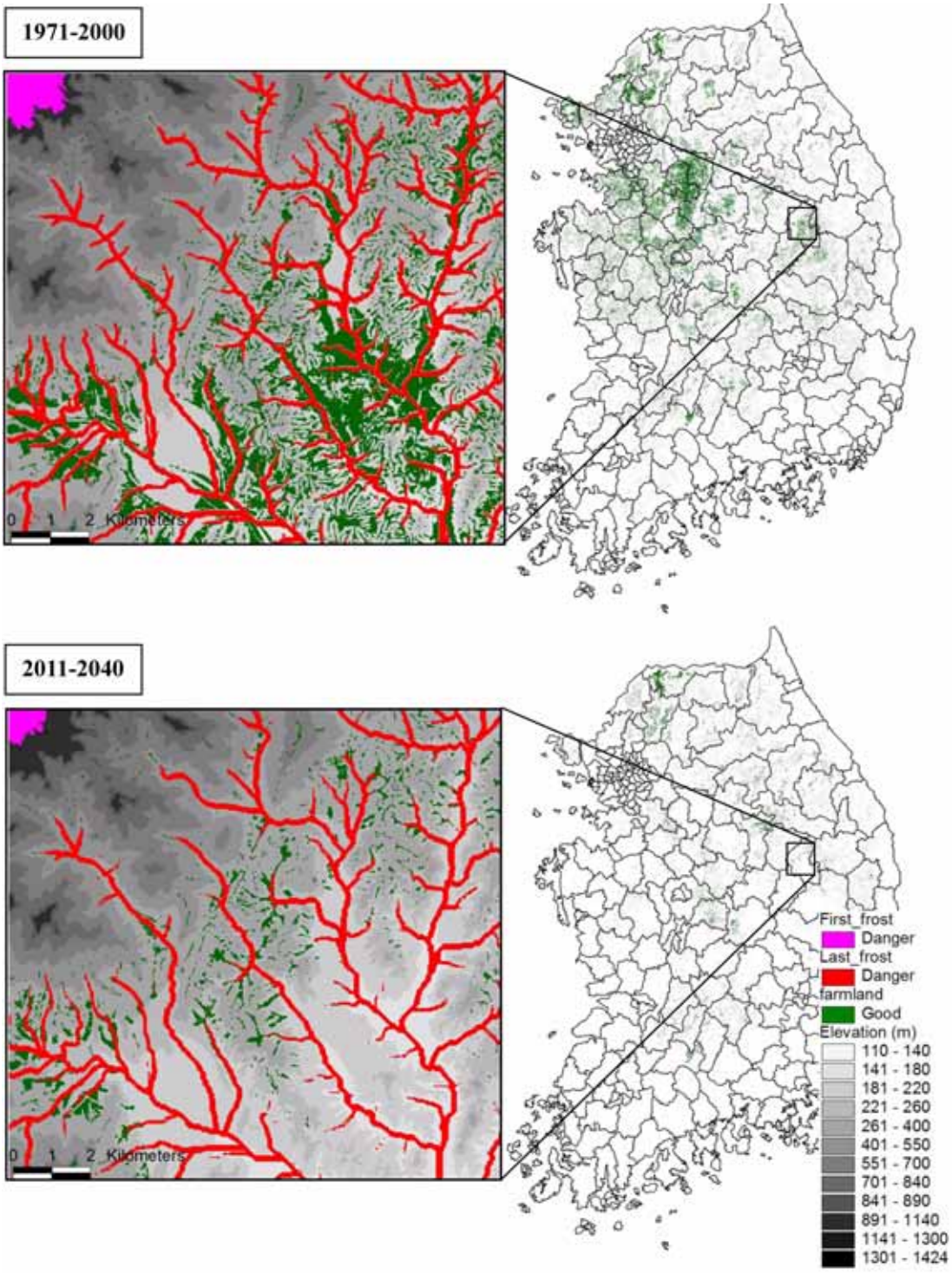

Fig. 8. Predicted shift of geographical locations of farmland suitable for quality 'Fuji' apple production from the current climate (1971-2000) to the near future climate (2011-2040) projected by A1B scenario. Zoomed images show the exact locations (green) as well as frost prone areas (pink and red) for Yeongju county, the biggest apple production area in South Korea, at a landscape scale.

IV. 고 찰

4.1. 전국규모의 재배적지 변동

우리나라의 지형, 토지, 기후 및 품질 조건을 종합적으로 보았을 때 현재평년의 경우 '후지'의 재배적지는 전국의 약 6.5% 정도인 것으로 추정되었다(Fig. 8). 또한 2011-2040년 평년에서는 전국의 1.8%, 2041-2070년 평년기후에는 0.3%, 2071-2100년 평년기후에서는 0.1%까지 점차 태백 산간지역으로 축소될 것으로 보인다. 재배적지 감소의 주된 원인은 고품질 후지의 anthocyanin 함량과 hunter A 값, L/D 비 조건을 모두 만족하는 지역이 기온 상승에 따라 크게 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

4.2. 주산지 내 경관(landscape) 규모의 재배적지 변동

고해상도의 전자기후도를 이용하면 좁은 지역에 대해서도 정밀하게 재배적지를 판정할 수 있기 때문에 지방의 농민이나 농촌지도기관에서 재배지 결정을 하는 데 실용적으로 쓰일 수 있을 것으로 판단된다. 우리나라에서 사과를 가장 많이 재배하는 영주시의 경우 현재평년기후에서 상해위험지역을 제외한 경사도 15% 이하 임야 및 농경지의 대부분이 고품질 '후지' 과실 생산이 가능한 재배적지로 나타났다(Fig. 8). 그러나 2011-2040 평년기후에서는 재배적지가 크게 줄어들 수 있고 앞으로 50년 뒤에는 고품질 '후지' 과실생산이 어려워질 가능성이 있다.

통계청에서 조사한 2005년도 행정구역별 사과 재배면적 순위 10위 안에 드는 지역에 대해 현재평년 및 미래평년기후에서의 고품질 '후지' 재배가능면적을 비교하면 2011-2040년 평년기후에서는 2005년 수준으로 고품질 '후지'를 재배하기 힘든 지역들이 발생하기 시작한다. 현재의 사과 생산지 대부분이 미래에는 재배적지 면적이 급격히 감소하여 2041-2070년 평년에는 상품가치가 높은 후지 재배가 어려울 것으로 추정된다 (Fig. 9, left). 대신 강원도 산간지역 일부에서 고품질 '후지'의 재배면적을 확보할 수 있을 것으로 보인다 (Fig. 9, right). 현재 사과 재배가 많이 이루어지고 있는 지역 중 봉화군은 2041-2070년 평년까지도 고품질 '후지' 재배가 가능할 것으로 추정된다. 현재 철원, 평창, 횡성, 홍천 등에서는 사과 재배가 거의 이루어지지 않고 있으나 미래기후조건에서는 '후지' 재배적지에 해당한다고 볼 수 있다. 철원의 재배적지 면적은 2011-2040년 평년기후에서 강원도 지역 중 월등히 넓게 되

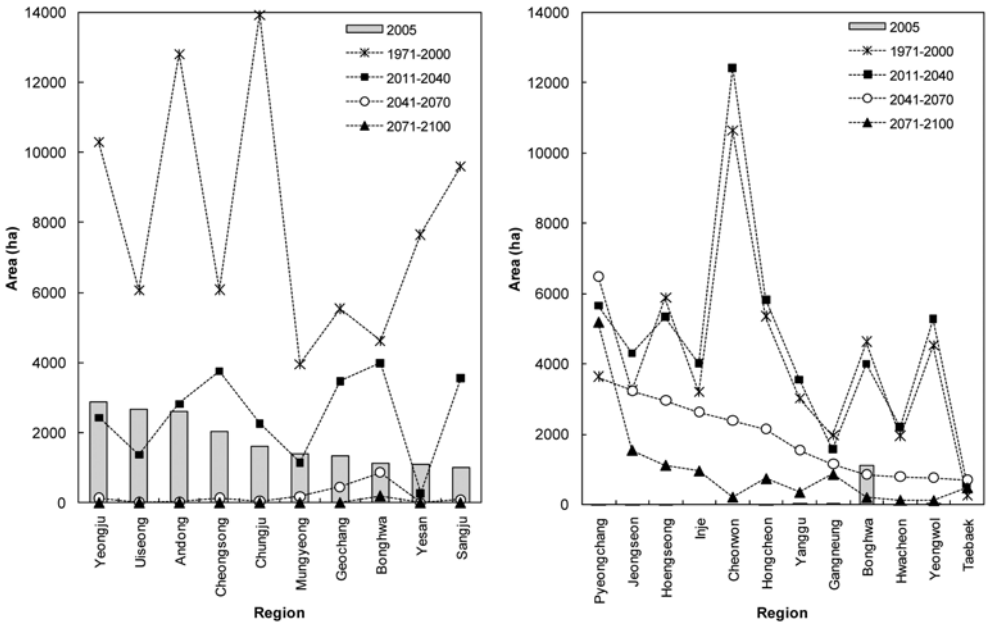

Fig. 9. Estimated change in potential acreage for quality 'Fuji' apple production at current major production counties as affected by the projected climate change in South Korea (left). Reported acreage of actual apple production in each county for 2005 is represented by a shaded bar. Estimated change in potential acreage for quality Fuji apple at top 12 candidate counties in the future (right). Bonghwa is the only county included in both period.

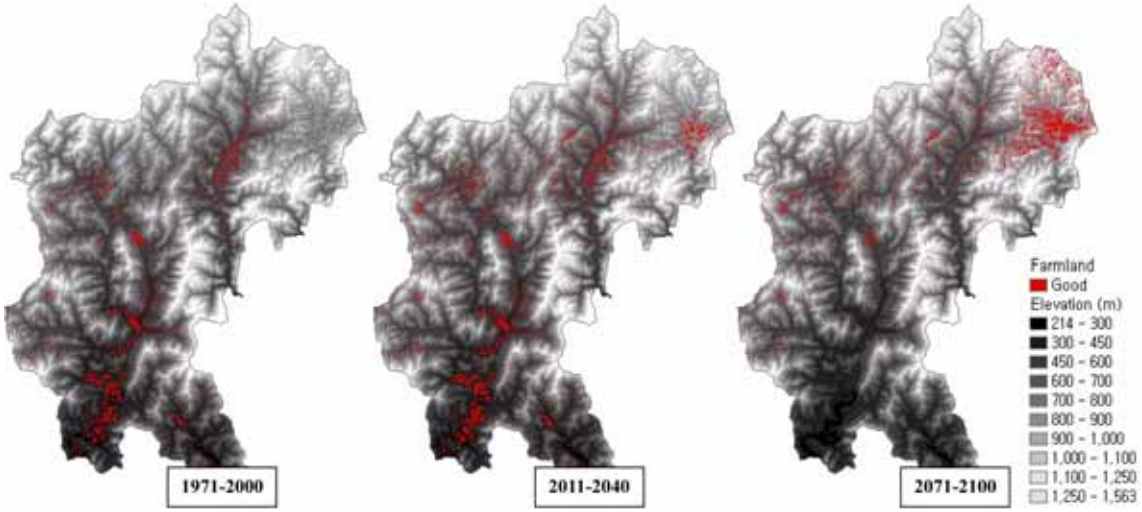

Fig. 10. Geographical locations of the farmland suitable for quality 'Fuji' apple production in Pyeongchang county for the current climate (1971-2000) and for the projected future climates under A1B scenario.

지만 2041-2070년 평년기후에서는 타 지역 수준으로 크게 감소될 것이다. 평창과 정선, 홍천, 인제 철원 등은 2041-2070년 평년기후에서도 최대 2,000 ha 이상의 재배면적을 확보할 수 있을 것으로 보인다. 특히 평창은 이들 중 유일하게 2071-2100년 평년기후에서도 상당한 재배적지면적을 보유하며 현재평년기후보다는 미래 3개 평년기후에서 '후지' 재배가 더 유리할 것으로 보여 미래 주산지가 될 것이다(Fig. 9, right). 또한 평창의 남쪽 및 저지대에 분포하던 현재의 재배적지가 미래로 갈수록 점차 북쪽으로 옮겨지고 보다 높은 고도의 지역으로 진출할 것으로 예상된다(Fig. 10).

이러한 결과물들과 함께 사용자 인터페이스를 만들어 다른 공간정보(예 지적도)와 중첩시켜 분석할 수 있도록 한다면 지방 자치단체 수준에서 재배적지 검색 및 대응기술 준비에 유용한 의사지원도구가 될 것이다.

적 요

기후변화에 따른 작물 재배적지의 이동에 관한 정보는 농업분야 적응전략의 기초이기 때문에 연구자들뿐 아니라 정책결정자들도 큰 관심을 보인다. 하지만 재배적지의 개념을 분석차원에서 구체적으로 구현하는 일이 어렵기 때문에 아직 실용적인 적지판정법이 개발된 적이 없다. 본 연구에서는 미래 시나리오 기후조건에서 사과 '후지'의 재배적지를 조사하기 위해 GIS 기반의 탐색기법을 이용하여 전자기후도, 토양전자지도, 수치지형정보, 농업기후 및 작물품질 예측모형 등을 종합적으로 활용, 체계적인 적지판정기법을 구현하였다. '후지'를 대상으로 한 적지판정 1차기준은 지표파복, 경사도, 토성이며, 2차기준은 월동기간 중 동해위험도, 늦서리 피해위험도, 생육가능기간 등 기후조건, 3차기준은 과피의 색택, 과형지수 등 품질조건이다. 이들 조건을 지리정보시스템의 속성 레이어로 구현하고 중첩분석을 통해 재배적지를 검색하였다. 이 방법을 현재평년(1971-2000년)과 A1B 시나리오의 미래평년(2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년) 기후에 적용하여 남한 전역을 대상으로 재배적지를 검색한 결과 현재평년의 경우 전국의 6.5%가 후지 재배적지에 해당하였고 2011-2040년 평년기후에는 전국의 약 1.8%, 2041-2070년 평년에는 0.3%, 2071-2100년 평년에는 전국의 0.1%까지 감소하여 전국규모에서 재배적지의 한계선 북상추세를 감지할 수 있었다. 뿐만 아니라 개별 주산지 내에서도 적지이동 양상을 정밀하게 추적할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 2009년도 농촌진흥청 농업과학기술개발공동연구사업(과제명: 기온상승이 주요과수의 생물계절 변화에 미치는 영향평가)의 지원으로 수행되었다. 연구에 사용된 기후변화시나리오는 국립기상연구소 기후연구실로부터 제공받았다.

REFERENCES

Cesaraccio, C., D. Spano, R. L. Snyder, and P. Duce, 2004: Chilling and forcing model to predict bud-burst of crop and forest species. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 1-13.

Choi, S. T., 1998: Improvement of packing and marketing in horticultural product : Establishment of the quality grades in fruits. *Annual Research Report*, National Horticulture Research Institute, RDA. p86-92.

Chung, U., B. S. Hwang, H. H. Seo, and J. I. Yun, 2003: Relationship between exposure index and overheating index in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 200-207. (In Korean with English abstract)

Chung, U., H. H. Seo, K. H. Hwang, B. S. Hwang, and J. I. Yun, 2002: Minimum temperature mapping in complex terrain considering cold air drainage. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 133-140. (In Korean with English abstract)

Choi, J. Y., and J. I. Yun, 2002: Implementing the urban effect in an interpolation scheme for monthly normals of daily minimum temperature. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 203-212. (In Korean with English abstract)

Eccel, E., R. Rea, A. Caffarra, and A. Crisci, 2009: Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phonological acclimation. *International Journal of Biometeorology* **53**, 273-286.

Jacobs, J. N., G. Jacobs, and N. C. Cook, 2002: Chilling period influences the progression of bud dormancy more than does chilling temperature in apple and pear shoots. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **77**, 333-339.

Jung, J. E., U. Chung, J. I. Yung, and D. K. Choi, 2004: The observed change in interannual variations of January minimum temperature between 1951-1980 and 1971-2000 in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 235-241. (In Korean with English abstract)

Jung, J. E., E. Y. Kwon, U. Chung, and J. I. Yun, 2005: Predicting cherry flowering date using a plant phenology model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**, 148-155. (In Korean with English abstract)

Kim, S. K., J. S. Park, E. S. Lee, J. H. Jang, U. Chung, and J. I. Yun, 2004: Development and use of digital climate models in Northern Gyunggi province – I. Derivation of DCMs from historical climate data and local land surface features. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 49-60. (In Korean with English abstract)

Kim, S. O., J. H. Kim, U. Chung, S. H. Kim, G. H. Park, and J. I. Yun, 2009: Quantification of temperature effects on flowering date determination in Niitaka pear. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**, 61-71. (In Korean with English abstract)

Kwon, E. Y., J. E. Jung, H. H. Seo, and J. I. Yun, 2004: Using digital climate modeling to explore potential sites for quality apple production. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 170-176. (In Korean with English abstract)

Lee, S. G., I. H. Heo, K. G. Lee, S. Y. Kim, Y. S. Lee, and W. T. Kwon, 2008: Impacts of climate change on phenology and growth of crops: In the case of Naju. *Journal of The Korean Geographical Society* **43**, 20-35. (In Korean with English abstract)

Naor, A., M. Flaishman, R. Stern, A. Moshe, and A. Erez, 2003: Temperature effects on dormancy completion of vegetative buds in apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **128**, 636-641.

Nordli, O., F. E. Wielgolaski, A. K. Bakken, S. H. Hjeltnes, F. Mage, A. Sivle, and O. Skre, 2008: Regional trends for bud burst and flowering of woody plants in Norway as related to climate change. *International Journal of Biometeorology* **52**, 625-639.

Seino, H., 1993: An estimation of distribution of meteorological elements using GIS and AMeDAS data. *Journal of Agricultural Meteorology* **48**, 379-383. (In Japanese with English abstract)

Seo, H. H., 2003: Site selection criteria for the production of high quality apples based on agroclimatology in Korea, Ph. D. Dissertation. Kyung Hee University.

Seo, H. H., and J. K. Kim, 2005: Cultivation of fruit trees in Korea under the changing climate. *Proceedings of the Seventh Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology, Sangju, 103-106.

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**, 218-234. (In Korean with English abstract)

Westwood, M. N., 1993: *Temperate-zone Pomology: Physiology and Culture* (3rd ed.). Timber Press Inc., 523pp.

Yun, J. I., 2004: Visualization of local climates based on geospatial climatology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 272-289. (In Korean with English abstract)

국립농업과학원, 1990: 주요과수재배지역의 기후특성. 농촌진흥청. 205pp.

농촌진흥청, 2002: 농업과학기술대전. 농촌진흥청. 805pp.