디지털 농업기후도 해설

윤 진 일*

경희대학교 생태시스템공학과

(2010년 3월 1일 접수; 2010년 3월 27일 수락)

Agroclimatic Maps Augmented by a GIS Technology

Jin I. Yun*

Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University

(Received March 1, 2010; Accepted March 27, 2010)

ABSTRACT

A comprehensive mapping project for agroclimatic zoning in South Korea will end by April 2010, which has required 4 years, a billion won (ca. 0.9 million US dollars) and 22 experts from 7 institutions to complete it. The map database from this project may be categorized into primary, secondary and analytical products. The primary products are called “high definition” digital climate maps (HD-DCMs) and available through the state of the art techniques in geospatial climatology. For example, daily minimum temperature surfaces were prepared by combining the climatic normals (1971-2000 and 1981-2008) of synoptic observations with the simulated thermodynamic nature of cold air by using the raster GIS and microwave temperature profiling which can quantify effects of cold air drainage on local temperature. The spatial resolution of the gridded climate data is 30m for temperature and solar irradiance, and 270m for precipitation. The secondary products are climatic indices produced by statistical analysis of the primary products and includes extremes, sums, and probabilities of climatic events relevant to farming activities at a given grid cell. The analytical products were prepared by driving agronomic models with the HD-DCMs and dates of full bloom, the risk of freezing damage, and the fruit quality are among the examples. Because the spatial resolution of local climate information for agronomic practices exceeds the current weather service scale, HD-DCMs and the value-added products are expected to supplement the insufficient spatial resolution of official climatology. In this lecture, state of the art techniques embedded in the products, how to combine the techniques with the existing geospatial information, and agroclimatic zoning for major crops and fruits in South Korea will be provided.

Key words : Geospatial climatology, Agroclimatic zoning, Climatic change adaptation, Ecological climatology, Geographic information system

I. 강좌의 배경

농림수산식품부 농산경영과의 기획 및 지원에 의해 2006년 5월부터 한국농림기상학회에서 추진해온 “전자 기후도 기반 유역단위 농업기상예보시스템” 과제가 2010년 4월 종료됨에 따라 이 과제를 통해 제작된

고해상도 디지털 농업기후도의 특징에 대해 해설함으로써 사용자의 이해를 돕고자 한다.

고해상도 디지털 농업기후도는 농업환경의 급격한 변화에 적응하기 위하여 기획되었다. 우리나라 농업은 지난 반세기 동안 급변하는 사회적 수요에 부응하기 위하여 변모를 거듭해 왔는데, 이 과정에서 농업자체

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

가 환경오염과 파괴의 주범으로 몰리기도 했지만 빈발하는 자연재해의 희생자로 큰 대가를 치루고 있다. 농업분야 자연재해란 많은 부분이 인간의 힘으로는 어쩔 수 없는 자연현상에 의해 발생하지만, 자연의 순방향을 거슬러 인간의 이익만을 추구할 때 그 피해가 더욱 커진다. 작금의 기후변화는 기후평균값의 변화(온난화) 뿐 아니라 변동폭의 증대를 수반하므로 재해경감 대책은 기후변화 적응전략의 가장 중요한 부분이라 할 수 있다.

자연재해를 줄이기 위한 첫걸음은 당연히 자연에 순응하는 것이지만, 우리나라의 농업발전전략은 여기에 역행하여 왔다고 해도 과언이 아니다. 예컨대 농업소득의 핵심으로서 백색혁명이란 신조어를 만들며 농촌뿐 아니라 도시근교 경관까지 바꿀려는 비닐하우스는

사실 그 속에서 자라는 농작물에게 재배부적지를 가리키는 뚜렷한 지표이다. 하우스재배는 부적합한 환경을 개선하기 위해서 주어진 자연자원 외에 인위적인 재료와 에너지를 추가로 투입해야 하기 때문이다. 환경조절농업은 그렇다 치더라도 노지농업까지 이러한 자원과 투입-에너지소모성 농업이 일상화 되어 있다.

자연에 순응하는 농림업이란 작물 혹은 수목의 생리생태에 꼭 맞는 토양과 기후를 찾아내는 일에서 시작된다. 사실 야생식물의 원산지나 집단서식지와 유사한 환경을 찾아내는 일이 적지적작의 기본이다. 적합한 토양을 찾아내는 일은 일찍이 전국의 토양조사로부터 시작되어 '토양전자지도' 이름으로 제공되고 있으며 (<http://asis.rda.go.kr>), 토양과 함께 식물의 생육을 지배하는 소기후 역시 이번 과제를 통해 경관규모

Table 1. List of high definition digital climate maps available at <http://www.ncam.kr>

Products for Climatological Normal Year (1971-2000, 1981-2008)		Unit	Cell Resolution (m)
Primary	Monthly averages of daily maximum temperature	0.1°C	30
	Monthly averages of daily minimum temperature	0.1°C	30
	Monthly averages of daily solar irradiance	0.01MJ/m ²	30
	Monthly sum of daily precipitation	mm	270
Secondary	Daily temperature range	0.1°C	30
	Start date of growth	DOY	30
	End date of growth	DOY	30
	Lowest minimum temperature	0.1°C	30
	Lowest possible temperature at 10 year return period	0.1°C	30
	Lowest possible temperature at 30 year return period	0.1°C	30
	Date of first frost	DOY	30
	Date of last frost	DOY	30
	Cumulative solar irradiance (spring)	0.01MJ/m ²	30
	Cumulative solar irradiance (summer)	0.01MJ/m ²	30
	Cumulative solar irradiance (fall)	0.01MJ/m ²	30
	Cumulative solar irradiance (winter)	0.01MJ/m ²	30
	Cumulative solar irradiance (annual)	0.01MJ/m ²	30
	Cumulative precipitation (spring)	mm	270
	Cumulative precipitation (summer)	mm	270
	Cumulative precipitation (fall)	mm	270
	Cumulative precipitation (winter)	mm	270
	Cumulative precipitation (annual)	mm	270
	Number of rain days	NOD	270
Analytical	Growing degree days	0.1°C	30
	Physiological maturity	DOY	30
	Budburst date	DOY	30
	Flowering date	DOY	30
	Endo-dormancy release date	DOY	30
	Forced dormancy release date	DOY	30
	Cold hardiness duration	NOD	30
	Dormancy depth	-	30
	Freezing risk	%	30

DOY: Day of year (1 for January 1, 365 for December 31)

NOD: Number of days

(landscape scale) 수준의 정밀한 정보가 준비된 셈이다. 따라서 이들을 이용한 국토의 효율적 활용과 보전 계획 수립, 지구온난화에 따른 작목과 임분의 재배치 등 농림업의 허부구조개혁이 기대된다.

II. 디지털 농업기후도 개요

이번에 제작된 디지털 농업기후도는 우리나라 육상 생태계를 사방 30m 크기의 정방형 격자로 나누어 각 격자점에서 자라고 있는 식물이 1971-2000 및 1981-2008 기간 중 겪은 소기후를 일 최고기온, 일 최저기온, 일사량, 강수량 등 4개 기본기후요소의 월별 평균값으로 표현하고 있다(단 강수량은 기술상의 문제로 사방 270m 격자). 이들 자료의 통계처리에 의해 농림업에 유용한 기후지수 다수를 생성하였으며 여기에는 일교차, 재현기간별 극최저기온, 기준온도에 따른 생장 개시 및 종료일, 초상일 및 종상일, 기간별 적산 일사량 및 강수량이 포함된다. 격자점에 따라 '후지' 사과, '신고' 배, '장호원황도' 복숭아 등 지역 특산물에 재배되고 있음을 고려하여 가용 작물모형에 소기후자료를 입력하고 장기간 구동함으로써 작물의 반응을 모의하고 그 결과를 역시 30m 해상도로 표현하였다. 이들 최종산출물의 상세내역이 Table 1에 기술되어 있다.

III. 기본기후도 제작과정

3.1. 소기후모형

대류권 최하층 10% 정도, 즉 1km 높이까지는 24시간 주기의 태양복사 영향이 뚜렷이 나타나는 곳으로서 소위 행성경계층(planetary boundary layer, PBL)에 해당한다. 대부분 생명체는 PBL 내부에서 일생을 보내고 있는데 만약 PBL의 아래쪽 지표피복이 도시라면 도시경계층, 숲이라면 삼림경계층, 농작물이 자라고 있으면 작물경계층이라고 구분 할 수 있다. 지표면에는 작물이나 수목이 자라고 있고 이들 식물군락은 군락 내부의 미기후(예, 숲 속의 기후)를 생성할 뿐 아니라 군락을 감싸는 경계층대기의 성질을 바꾸어 독특한 국지기후를 만들어낸다. 하지만 종관기상학에서 다루는 대기의 특성은 이 지역의 경관(landscape)이 농작물이나 삼림 혹은 도시가 아닌 수평의 잔디밭(관측노장)으로 덮여있다고 가정했을 때 기대되는 값이며 이것이 소기후의 표준으로서 이질적인 다른 소기후를

추정하는 기준이 된다.

서로 다른 경관은 열수지의 시공간적 변이를 통해 각각의 소기후에 영향을 준다. 가장 흔한 경관인 산과 언덕은 태양과의 기하학적 관계에 의해 평지와는 다른 일사 수광량 분포를 만들어냄으로써 낮 시간대의 기온을 결정한다. 또한 평지보다 좁은 천공개방도(sky view factor) 때문에 하향장파(대기복사), 상향장파(지구복사) 등 적외선역의 복사수지를 변화시킨다. 복사구동력의 공간적 차이는 국지적인 대기순환을 일으켜서 찬 공기 집적과 온난대 형성을 통한 야간의 기온에도 영향을 준다. 여기에는 지표의 피복종류가 관측노장과 다르다면 그 양상이 더욱 복잡해진다. 지표의 알베도, 공기 역학적 거칠기, 토양특성, 식생군락의 발육 및 생리상태 등은 모두 소기후에 영향을 주게 된다.

주어진 중규모 기후조건 하에서 임의 지점에 임의 장소의 소기후를 예측하기 위해서는 이렇게 다양한 기후인자들의 영향정도를 정확하게 모사할 수 있어야 한다. 하지만 대기의 시공간적 규모가 작아질수록 기후인자들 사이의 복잡한 상호작용을 역학적으로 모사하는 일이 점점 더 어려워져서 전, 답, 과수원 규모에서는 사실상 불가능하다. 차선책은 기후요소별로 가장 영향력이 큰 지형-지표특성을 선택하여 이들을 중심으로 현실을 크게 단순화시킨 경험적 모형을 작성하는 것이다. 기본기후요소의 디지털지도 제작에는 표준 소기후(종관기상대 관측노장)를 임의지점의 지표특성편차에 의해 보정할 수 있는 소기후모형이 필요하다. 본 과제에 사용된 소기후모형을 간략히 설명한다.

일 최고기온의 결정에 고도 외에 한낮의 일사량이 중요한 역할을 한다는 사실은 오래 전부터 경험적으로 알려져 왔는데, 캐나다 산림청에서는 이것을 정량적인 모형으로 표현하였다(Regnier *et al.*, 1996). 이 방법은 주어진 경사면에 대해 오전 11시부터 오후 3시까지 4시간 동안의 일사량을 적산하여 평야지의 수평면 일사량과 비교하고 그 비율에 따라 표준관측소의 최고기온을 보정하는 것이다. 이 때 흐린 날은 일교차가 작고 맑은 날은 그 반대인 것을 감안하여 하나의 수식으로 표현하였다. 본 과제에서는 이 모형의 우리나라 적용시 실용성을 높이기 위하여 지표가 초지로 덮여 있고 전체적인 모양이 반듯한 원추형으로서 모든 방향에서 비슷한 경사도를 보이는 제주도의 기생화산(오름)에서 실측자료를 수집하였다(Chung *et al.*, 2009c).

Fig. 1. Distribution of daily minimum temperature for January (top) and annual total solar irradiance (bottom). Zoomed images are for the area around Mt. Jiri National Park.

Fig. 2. Distribution of annual total precipitation (top) and daily temperature range (max-min) for September (bottom). Zoomed images are for the area around Mt. Jiri National Park.

Fig. 3. Estimated dates for the first frost observation (top) and the potential risk of freezing injury for over-wintering of peach cultivar 'Janghowon Hwangdo' (bottom). Zoomed images are for the area around Mt. Jiri National Park.

도시열섬효과의 정량화를 위해 가장 흔하게 쓰이는 모형은 도시의 규모를 인구의 자연대수로 표현할 경우 도시열섬효과와 직선적인 관계를 갖는 것에 착안한 것이다(Landsberg, 1979). 하지만 인구조사자료는 행정구역 단위로 얻어지므로 이 모형에 의한 열섬효과는 행정경계를 따라 불연속적으로 표현할 수밖에 없다. 본 과제에서는 인구와 도시피복을 동시에 고려한 수치인구모형(digital population model, DPM)을 도시열섬효과의 대체변수(proxy)라고 가정하고, 경험적으로 얻은 기온편차와의 관계식을 기온보정에 적용하였다(Choi *et al.*, 2003).

일 최저기온의 경우 지표면의 복사냉각에 의해 일정 높이까지는 오히려 상승으로 갈수록 기온이 높아지는 소위 기온역전현상이 생기는데, 만약 관측지점이 평지가 아니라 찬 공기가 흘러들어오는 낮은 지역에 있다면 기온은 더욱 떨어진다. 표준기상관측소의 노장은 의도적으로 찬 공기가 흘러들어오지 않는 평지에 설치되므로 이러한 냉기집적효과는 거의 없다고 가정할 수 있다. 이러한 곳의 관측값을 기존의 고도차보정방법으로 추정할 경우 아래쪽은 냉기집적에 의한 오차를 갖게 되고, 위쪽은 온난대 효과만큼 오차를 갖게 된다. 본 과제에서는 집수역 규모에서 매 격자점의 지형특성이 갖는 찬 공기 유입가능성을 정량화 하고 이를 온도보정에 활용함으로써 오차를 줄이는 방법을 채택하였다(Chung *et al.*, 2006).

경사면에 도달하는 일사에너지 혹은 경사지에서 재배되는 농작물군락이 이용할 수 있는 최대 일사량, 즉 ‘일적산경사면일사량’을 알아내기 위해서는 기상청에서 발표하는 ‘일적산수평면일사량’을 해당토지의 경사도와 경사방향은 물론, 그 날의 태양고도와 방위각에 따라 적절하게 보정해야 한다. 그런데 토지의 경사도와 경사향은 고정되어있지만 태양의 고도와 방위각은 연중 날짜뿐 아니라 하루 중 시간대에 따라 변화하므로 정확한 ‘일적산경사면일사량’을 추정하기 위해서는 시간대별 ‘수평면전천일사량’ 자료를 수집해야 하며, 그 시간대의 태양위치를 계산해야 한다. 본 과제에서는 기상대에서 측정한 ‘일적산수평면일사량’에 적용하여 임의 경사면(경사도×경사방향)의 ‘일적산경사면일사량’을 비교적 정확하고 간편하게 알아낼 수 있는 지형보정계수를 고안하여 실제 지형에 적용하였다(Yun, 2009).

강수현상은 시공간적으로 불연속적이어서 다른 기상

요소에 비해 공간변이가 훨씬 크다. 특히 넓은 토지를 기반으로 하는 농업에 있어서는 면적강수량이 중요하기 때문에 기존 기상관측망에서 얻을 수 있는 지점(point) 강수량자료로부터 면적(areal) 강수량을 추정하거나 규칙적인 격자점의 값으로 변환하는 기법이 개발되어왔다. 이들을 정리해보면 기술의 진보에 따라 Thiessen polygon이나 등우량선도 작도와 같은 graphical method로부터, 관측된 강수량과 관측점 지형특성 간 상관관계를 이용하는 topographical method를 거쳐, IDW나 Krigging으로 대표되는 numerical method로 발전해 왔음을 알 수 있다. 이들 가운데 최근 10여 년간 가장 널리 이용된 방법은 DEM (digital elevation model)과 산악강수모형을 결합한 PRISM (Parameter-elevation Regressions an Independent Slopes Model)으로서 미국의 평년 아날로그 강수기후도는 이 방법을 적용한 디지털 강수기후도에 의해 대체되었다(Daly *et al.*, 1994). 산악강수모형은 강수량에 미치는 해발고도의 영향을 단순회귀식으로 표현하되, 산악의 경사방향, 거리, 고도, 해양도 등에 의해 가중회귀계수를 지점마다 달리 추정하도록 한 것이다. 우리나라에서도 25km 해상도의 수치예보모형 출력물을 5km 해상도(“동네예보”)로 변환하는 과정에 이미 성공적으로 적용한 것으로 보고되었으므로(Shin *et al.*, 2008), 본 과제에서는 PRISM을 기반으로 강수량 분포를 추정하였다.

3.2. 소기후모형과 지리공간정보 결합

전술한 소기후모형을 전국에 적용하여 고해상도의 디지털 기후도를 제작하기 위해서는 모형입력자료로서 지리공간정보를 필요로 한다. 이미 정부 각 부처에서 관련 지리정보 데이터베이스 대부분을 구축하여 수요자에게 무상으로 제공하고 있으므로 본 과제에서는 이들을 이용하여 필요한 입력자료를 준비하였다.

먼저 도시열섬효과 정량화에 의한 일 최저기온 보정방법을 전국에 적용하기 위해서 시군 인구조사자료와 지표피복정보를 이용하여 수치인구모형(DPM)을 작성하였다. 지표피복(시가지, 농지, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역)을 30m×30m의 정방형 격자 단위로 분류한 다음 피복분류상 “시가지”에 해당되는 픽셀만을 추출하고, 그 위에 행정구역수치지도도를 중첩시켜 해당 시·군 면적에 포함되는 시가지 픽셀(30m×30m)을 계수하였다. 각 시군구별로 시가지 픽셀 하나 당 평균 인구,

즉 “시가지인구밀도”를 계산하고 다시 ‘시가지’ 회복 위에 시군구 행정구역지도를 중첩시키고 시군 행정구역의 속성정보인 “시가지인구밀도”를 곱해줌으로써 한 반도에서의 실제 인구 분포를 DPM 값으로 표현하였다. DPM은 농경지, 산림, 하천, 호수는 물론, 도시안의 초지나 나대지 등도 제외하고 실제 사람이 살고 있는 지역을 대상으로 평균인구를 30m 간격의 픽셀로 나타낸 것이다. 도시열섬효과는 중심점의 인구뿐 아니라 주변 픽셀들의 인구에 의해서도 영향을 받으므로 반경 2.5km 평활화 DPM을 사용하였다.

복잡지형에서 일 최저기온에 미치는 찬 공기 유입과 온난대효과를 보정해주는 모형(Chung *et al.*, 2006)은 집수역 단위로 적용해야 한다. 남한 전역은 840개의 표준 집수역으로 분할되므로 본 과제에서는 각 표준유역에 대해 임의 격자점에 유입되는 냉기 집적량을 30m 해상도의 수치지형자료(DEM)에 의해 계산한 다음, 모형에 입력시켜 보정값을 산출하였다.

일사수광량 분포도는 주변에 장애물이 없는 수평면의 일사량이 아니라 주변 지형에 의한 그늘까지 고려한 임의 경사면의 실제 수광량으로서 그곳에 자라는 식물의 생육과 밀접한 관계가 있다. 일적산일사량 추정오차가 실용상 허용범위인 5%를 초과하지 않는 것으로 보이는 5월부터 10월까지 6개월에 대해 이 방법을 적용하여 월별 평균 일적산일사량을 해상도 30m의 경사면 일사량으로 변환하였다(Yun, 2009). 남한 전역 30m DEM을 이용하여 각 격자점의 경사도와 경사향을 계산한 다음 일별 일사보정계수를 추정하였다. 같은 기간 중 기상청의 20개 일사관측기상대에서 관측한 일별 적산일사량에 일별 일사보정계수를 적용하여 모든 격자점의 일적산일사량을 계산하였다.

산악강수량모형인 PRISM의 특징은 영역 내 모든 격자점에 동일한 회귀식이 적용되는 일반모형과는 달리 각 격자점의 강수량 추정에 사용되는 고도-강수량 회귀모형이 격자점마다 독립적으로 도출된다는 점이다. 회귀모형 도출에 필요한 관측점의 개수는 최소 3개이므로 PRISM에서는 원래 각 격자점을 중심으로 반경을 30, 40, 50km 등으로 늘리면서 이 범위 안에 최소 3개 관측소가 들어오도록 결정하였는데, 본 과제에서는 소기후추정모형의 적용단위가 이미 표준유역으로 결정되어 있으므로, 표준유역 몇 개씩을 합쳐서 최소 5개 관측소가 포함되는 중규모 유역(중권역)을 설정하였다. 유역의 범위가 확장되었을 뿐 아니라 강수량은

다른 기후요소에 비해 소지형에 따른 변이가 크지 않으므로, 30m 격자점을 기본으로 하는 다른 소기후모형과 달리 강수량추정모형의 적용단위를 270m 격자점으로 조정하였다(Chung *et al.*, 2009d). 전국 1,275,274개 격자점에 대하여 도출된 월별 최적회귀모형에 격자점의 DEM 고도를 입력시켜 격자점의 강수량을 순차적으로 추정하였다. 먼저 중권역의 강수량분포도를 제작한 다음, 이들 중권역 강수량 분포도를 모자이크식으로 결합하여 남한 전역의 강수기후도를 완성하였다.

IV. 디지털 기후도의 신뢰성 검증

일 최저기온모형의 정확한 모수 추정을 위해 야간경계층 기온연직구조 측정장비(MTP5H, Kipp & Zonen)를 각 시험유역 대표지점에 설치하여 1년씩 운영하였으며 계절별로 2-3일씩 같은 장소에서 테더존에 검증관측을 실시하였다. 일 최고기온모형의 정확도는 한라산 기생화산(‘오름’)에서 방위별 등고도면 8개 지점의 기온실측에 의해 검증하였다(Chung *et al.*, 2009c). 추정된 기온자료의 신뢰성 검증에는 기본적으로 기상청 자동기상관측망 자료를 이용하였으며(Chung *et al.*, 2009a), 이와는 별도로 표준유역 가운데 산간지, 중산간지, 평야지의 특성을 갖는 3개를 설정하여 검증관측망을 구축하여 운영하였다. 산간지는 강원도 평창군의 도암댐유역을, 중산간지는 충북 충주시의 충추댐하류유역을, 평야지로는 충남 예산군 지역으로서 기온/습도 자동관측장비(HOBO H8 Pro, Onset Computer)를 다수 설치하고 각 지점의 위치좌표를 수집하였다.

일사-일조 관계식의 신뢰성 검증을 위해 전국 10개 지역 일사미관측 기상대(철원, 동해, 충주, 상주, 울산, 마산, 천안, 정읍, 남원 및 안동, 안동은 기준관측소로 운영)에 전천일사 센서 및 기록계(Model SP-110-STL, STA Inc.)를 설치하여 1년간 운영하였다. 일사수광량의 검증관측은 제주도 기생화산(‘오름’)에서 방위별 등고도면 8개 지점에서 수행되었다(Yun, 2009).

강수량 추정모형(PRISM)의 모수추정을 위해 지리산 국립공원 지역의 함양군 마천면-세석산장-하동군 화개면으로 이어지는 고도편차 1,600m 경로를 따라 8개의 우량계를 설치하여 1년간 운영하였다. 격자점의 크기를 270m로 줄임에 따라 강수량 추정값에 반영될 것으로 기대되는 미세지형효과는 대부분 산악지역에 설치된 166개 한국수자원공사 우량관측소의 실측 강수량

에 의해 제한적으로 확인할 수 있었다. 이들 관측소의 자료에 의하면 동일한 방법으로 강수량을 추정하되 공간분해능을 270m로 높이면 추정오차(RMSE)는 월 강수량이 100mm가 넘는 경우 5km 해상도에 비해 추정오차를 8.2~15.4% 줄일 수 있었다. 월 강수량이 50mm 이하인 경우에는 추정오차의 변화에 일관성이 없거나 개선효과가 나타나지 않았다(Chung *et al.*, 2009d).

V. 소기후정보를 활용한 농업기후지대 구분

5.1. 농업기후지수 분포도 제작

각 격자점의 기본기후요소(기온, 일사, 강수) 산출물을 근거로 평균, 적산, 편차, 특정값 도달날짜 등 통계량을 계산함으로써 농업적 활용가치를 높인 소위 농업기후지수의 분포도를 제작하였다.

재현기간별 극최저기온은 56개 종관기상대 실측자료에 근거한 경험식을 토대로 전국의 평년 1월 최저기온의 표준편차 분포도로부터 산출하였다. 월 최저기온의 모집단이 정규분포에 가깝다고 가정하여 재현확률별 1월 최저기온의 하강분을 평년 1월 최저기온 표준편차에 재현확률에 해당하는 표준정규분포 확률변수(z) 값을 곱하여 산출하였다.

식물의 생장개시일은 기준온도 이상으로 일 평균기온이 올라가는 첫째 날이며, 생장종료일은 작물별 생장가능 최저온도 이하로 일 평균기온이 내려가는 첫째 날이다. 기본기후도는 월평균값만 제공되므로 평년의 일별값을 복원할 필요가 있으므로 조화분석법을 통해 일별 최고 및 최저기온 자료를 복원하였다(Seino, 1993).

생장유효적산온도(적산 GDD)는 작물별 생장개시온도 이상에서의 누적온도, 즉 생장에 유효한 온도의 1년간 적산값으로서 생장개시온도를 0, 5, 및 10°C에 두고 복원된 일 최고 및 최저기온에 의해 각각 계산하였다(Kim and Yun, 2008).

수확적기(생리적성숙기)는 작물의 생리적 성숙에 필요한 최소한의 생장유효온도에 도달한 날짜로서 생장개시온도 0, 5, 및 10°C에서 적산 GDD가 1,000에서 4,500까지 500 간격으로 도달한 날짜를 각 격자점에 대해 추정하였다.

5.2. 식물의 생태반응분포 지도 제작

사용자(예, 농민) 입장에서는 기본기후요소나 농업기

후지수처럼 작목 구분 없이 적용되는 일반정보보다는 본인이 재배중인 작목과 직접 관련된 기후정보가 더욱 요긴하다. 예를 들어 “내가 소유한 복숭아밭의 위치가 월동기간 중 동해에 취약하지는 않은지” 혹은 “새로 개원하려는 사과밭에 가장 알맞은 품종은 무엇인지” 등 실용적인 정보를 요구한다. 이 같은 “맞춤형” 수요는 해당 농업모형(예, 품종별 모수가 최적화된 작물생장모형)에 기후자료를 입력시켜 농작물의 반응을 예측하고 동일한 해상도로 표출함으로써 얻어질 수 있다. 특히 과수원은 한번 개원하면 최소 10년 동안 작목을 바꿀 수 없기 때문에 입지선정은 매우 중요한 일이다. 본 과제에서는 기후에 대한 생리생태반응이 알려진 몇 개 과수 품종에 대하여 1971-2000 및 1981-2008 평년의 기후조건에서 예상되는 생태반응 분포도를 제작하였다.

온대낙엽과수는 생장이 정지되는 월동기간 중 소위 휴면상태에 들어간다. 휴면상태는 월동기간 중 내동성, 월동 후의 발아, 출엽 등 중요한 생리적 과정과 깊은 연관이 있다. 일 최고 및 최저기온으로 구동되는 “휴면시계” 모형이 최근에 개발되어 휴면심도를 매일 추정할 수 있어 낙엽 이후 적산값은 온대낙엽수목의 휴면상태를 나타내는 지표로 사용될 수 있다(Kwon *et al.*, 2008). 본 과제에서는 사과(후지), 배(신고), 복숭아(장호원황도), 포도(캠벨얼리) 등 주요 과종에 대해 휴면심도를 계산하였다.

계산된 휴면심도가 식물별로 정해진 저온요구량(휴면해제에 필요한 최소량)에 도달한 날짜 즉 내생휴면해제일도 계산하였는데, 이 날부터는 더 이상 발아나 출엽에 장애가 되는 생리, 유전 등 내재적인 요인은 없다고 간주된다. 만약 이 날짜를 정확히 알 수 있다면 시설원예농가에서는 이 날짜부터 가온을 시작하여 가장 효율적으로 축성재배를 할 수 있다.

식물의 내동성(cold tolerance)은 원칙적으로 물려받은 유전정보에 의해 정해지지만 생리적 단기내동성은 기온경과에 따라 그 획득 정도가 달라진다. 대체로 휴면심도가 최대값에 도달하여 내생휴면이 해제된 날부터 시작하여 기온이 상승하여 “강제휴면”이 해제되기 직전까지를 최대내동성 유지기간으로 간주한다(Kwon *et al.*, 2006). 평년의 일 최고, 최저기온 전자기후도를 이용하여 강제휴면 및 내생휴면 해제일을 추정한다. 다음 이들 간의 차이를 표현하였다.

“강제휴면” 해제 이후 생장유효 적산온도(GDD)가

식물별로 정해진 수준에 도달하여 꽃눈/잎눈이 터지는 날짜가 발아일이다. 발아일을 정확하게 추정할 수 있다면 발아시기 전후의 동상해 예방에 도움이 된다 (Jung and Yun, 2006).

우리나라에서 지구온난화에 따른 “춥지 않은 겨울”이 지속되는 가운데서도 낙엽과수의 동해발생 건수가 증가되어왔는데, 특히 장기간에 걸쳐 월동 안전지대로 확인된 과수주산지의 동해발생을 설명하기 위해서는 온난화에 따른 단기 내동성의 악화를 주목해야 한다. 우리나라처럼 겨울이 추운 곳에서는 월동가능성 여부가 입지조건 가운데 특히 중요하므로, 안정적인 기후 조건에서는 기존의 내동성지도가 매우 유용한 의사지 원도구가 된다. 하지만 기후변화가 이미 가시화된 지금은 최저기온에만 근거한 내동성지도보다는 월동기간 중 휴면심도 등 생리적 가변내동성을 고려한 새로운 내동성지도가 필요하다. 본 과제에서는 평년(1971-2000 및 1981-2008)의 기온기후도와 휴면심도모형에 근거하여 주요 과수 품종의 월동기간 중 휴면심도를 추정하고, 같은 기간 중 발생한 극최저기온자료를 결합하여 동해위험 분포지도를 제작하였다(Chung *et al.*, 2009b).

VI. 활용방안 및 기대효과

본 과제를 통해 전국의 기후자원을 최대 30m 해상도의, 사실상 필지단위로 정밀하게 파악할 수 있는, 디지털 기후도 및 파생산물을 제작하였다. 이들 자료는 국가표준 지리정보규격에 맞추어 제작됨으로써 지리, 지형, 토양, 토지이용, 식생 등 기존의 공간자료와 중첩분석 및 통합관리가 가능하다. 따라서 타 공간자료와의 중첩분석을 통해 주요 작물의 기상재해 위험도, 품질등급, 재배적부 등 획기적인 농업지대 기후구분이 가능하여 기상정보 활용도를 크게 높일 것으로 기대된다.

디지털 농업기후도의 활용이 가장 기대되는 분야는 기후변화의 농림업 영향평가 쪽이라고 할 수 있다. 현재까지 관찰된 기후변화 가운데 가장 뚜렷하며 앞으로 그 변화경향을 가장 확실하게 예상할 수 있는 것은 기온뿐이다. 한편 다양한 생태계 반응들 가운데 기온자료의 해석을 통해 가장 확실하게 알아낼 수 있는 것은 휴면해제, 출아, 개화 등 봄철의 생물계절(phenology)이다. 특히 우리나라와 같은 온대기후권에서 식물의 생식생장은 온도와 일장에 의해 조절된다.

이른 봄 수목의 새순이 돌아나는 시기는 주로 온도가 결정짓는데, 먼저 겨울동안의 저온이 내생휴면으로부터 식물이 깨어나도록 하며, 이어서 따스한 날씨가 출아와 개화를 유도한다. 출아기와 개화기 등 봄철 생물계절에 비해 낙엽이나 단풍 같은 가을철 생물계절은 기후변화에 둔감한 것으로 알려져 있다. 이러한 생물계절 반응의 지리적인 분포는 디지털 농업기후도에 의해 가시화되며, 향후 기후변화 대응전략 수립에 훌륭한 길잡이가 될 것이다.

이들 가운데 기후변화시나리오에 따른 남한 GDD 분포 예측연구(Kim and Yun, 2008)는 생장개시온도 0°C에서 IPCC SRES A2 시나리오에 근거하여 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 기간의 GDD 분포 예상도를 제작한 것이다. 한 걸음 더 나아가 기후변화에 따른 작물 재배적지의 이동에 관한 정보는 농업분야 적응전략의 기초이기 때문에 연구자들뿐 아니라 정책결정자들도 큰 관심을 보인다. 본 과제를 통해 제작된 디지털 기후도는 토양전자지도, 수치지형정보, 농업기후 및 작물품질 예측모형 등과 중첩시켜 체계적인 적지판정 기법 구현에 활용될 수 있다. 사과품종 ‘후지’를 대상으로 한 Kim *et al.*(2009)의 활용연구에서 적지판정의 1차기준은 지표파복, 경사도, 토성이며, 2차기준은 월동기간 중 동해위험도, 늦서리 피해위험도, 생육기간 등 기후조건, 3차기준은 과피의 선택, 과형지수 등 품질조건이다. 이 방법을 현재평년(1971-2000)과 A1B 시나리오의 미래평년(2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) 기후에 적용하여 재배적지를 검색한 결과 전국규모에서 재배적지의 한계선 북상추세 감지는 물론, 현재의 주산지 내에서도 적지이동 양상을 정밀하게 추적할 수 있었다(Kim *et al.*, 2009).

본 과제에서 제작한 대부분 농업기후도는 과거에 관측된 기후자료에 근거한 것이지만, 동일한 기술을 기상실황에 적용하여 30m 해상도 혹은 필지단위로 전체 유역의 국지기상 실황이나 나아가 예보를 생산할 수 있을 것으로 판단된다. 현재 기상청에서 제공하는 동네예보의 공간해상도가 5km에 이르지만 지형이 복잡한 곳에서는 이마저도 미흡한 것이 사실이다. 소기후모형에 근거한 동네예보의 분해능 강화가 이루어진다면 농림업 뿐 아니라 시민생활에 미칠 파급효과가 상당할 것이다. 충분히 높은 공간해상도를 가진 기상자료를 이용하면 지금까지 점 단위(포장 혹은 개체)로 적용되어 온 농업모형을 지역규모로 확장시켜 유역 내

임의지점의 구동결과는 물론 공간변이를 알 수 있다. 즉 유역관리 의사지원수단으로 각광받는 각종 생태계 모형(토양, 수자원, 식생, 환경오염, 작황, 병해충 등)은 대부분 기상자료 입력에 의해 구동되는데, 그동안 기상의 공간변이를 무시하고 유역 대표값으로 처리하여 모의결과와 현실성이 낮았지만 격자형 기후자료의 상시공급에 의해 획기적인 개선이 기대된다.

디지털 농업기후도는 국가농림기상센터 홈페이지(www.ncam.kr)에서 조회 및 검색할 수 있다.

감사의 글

본 과제를 기획한 농림수산식품부 농산경영과, 경계층 관측용 특수장비를 대여해준 서울대학교 농생명과학공동기기원, 공간자료 및 소프트웨어를 제공한 (주)선도소프트, 전자기후도 활용연찬회에 참가한 농업기상전문지도연구회 여러분에게 감사드린다. 이 연구는 농림수산식품부 연구개발사업의 지원을 받아 이루어졌다.

REFERENCES

- Choi, J., U. Chung, and J. I. Yun 2003: Urban-effect correction to improve accuracy of spatially interpolated temperature estimates in Korea. *Journal of Applied Meteorology* **42**, 1711-1719.
- Chung, U., H. H. Seo, K. H. Hwang, B. S. Hwang, J. Choi, J. T. Lee, and J. I. Yun, 2006: Minimum temperature mapping over complex terrain by estimating cold air accumulation potential. *Agricultural and Forest Meteorology* **137**, 15-24.
- Chung, U., J. E. Jung, H. C. Seo, and J. I. Yun, 2009a: Using urban effect corrected temperature data and a tree phenology model to project geographical shift of cherry flowering date in South Korea. *Climatic Change* **93**, 447-463.
- Chung, U., J. H. Kim, S. O. Kim, H. C. Seo, and J. I. Yun, 2009b: Geospatial assessment of frost and freeze risk in 'Changhowon Hwangdo' peach (*Prunus persica*) trees as affected by the projected winter warming in South Korea: III. Identifying freeze risk zones in the future using high-definition climate scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(4), 221-232.
- Chung, U., H.-C. Seo, J. I. Yun, S.-J. Jeon, K. H. Moon, H.-H. Seo, and Y. S. Kwon, 2009c: Extrapolation of daily maximum temperature in a mountainous terrain. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 473-482.
- Chung, U., K. Yun, K. S. Cho, J. H. Yi, and J. I. Yun, 2009d: The PRISM-based rainfall mapping at an enhanced grid cell resolution in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(2), 72-78.
- Daly, C., R. P. Neilson, and D. L. Phillips, 1994: A statistical-topographical model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* **33**, 140-158.
- Jung, J. E., and J. I. Yun, 2006: Phenology and minimum temperature as dual determinants of late frost risk at vineyards. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(1), 28-35.
- Kim, J. H., and J. I. Yun, 2008: On mapping growing degree-days (GDD) from monthly digital climatic surfaces for South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(1), 1-8.
- Kim, S. O., U. Chung, S. H. Kim, I. M. Choi, and J. I. Yun, 2009: The suitable region and site for 'Fuji' apple under the projected climate in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(4), 162-173.
- Kwon, E. Y., J. E. Jung, U. Chung, S. J. Lee, G. C. Song, D. G. Choi, and J. I. Yun, 2006: A thermal time - driven dormancy index as a complementary criterion for grape vine freeze risk evaluation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(1), 1-9.
- Kwon, E. Y., J. E. Jung, U. Chung, J. I. Yun, and H. S. Park, 2008: Using thermal time to simulate dormancy depth and bud-burst of vineyards in Korea for the 20th century. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **47**, 1792-1801.
- Landsberg, H. E., 1979: Atmospheric changes in a growing community (the Columbia, Maryland experience). *Urban Ecology*, **4**, 53-81.
- Regnier, J., B. Cooke, and V. Bergeron, 1996: *BioSIM: A Computer-Based Decision Support Tool for Seasonal Planning of Pest Management Activities. User's Manual*. Canadian Forest Service Info. Rep. LAU-X-116. 50p.
- Seino, H., 1993: An estimation of distribution of meteorological elements using GIS and AMeDAS data. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)* **48**, 379-383. (In Japanese with English abstract)
- Shin, S. C., M. G. Kim, M. S. Suh, D. K. Rha, D. H. Jang, C. S. Kim, W. S. Lee, and Y. H. Kim, 2008: Estimation of high resolution gridded precipitation using GIS and PRISM. *Atmosphere* **18**, 71-81. (In Korean with English abstract)
- Yun, J. I., 2009: A simple method using a topography correction coefficient for estimating daily distribution of solar irradiance in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(1), 13-18.