

경기북부지역 정밀 수치기후도 제작 및 활용 - I. 수치기후도 제작

김성기¹ · 박종수¹ · 이은섭¹ · 장정희¹ · 정유란² · 윤진일²

¹경기도 농업기술원 북부농업시험장

²경희대학교 생태시스템공학과/생명자원과학연구원

(접수 2004년 1월 12일; 수락 2004년 3월 2일)

Development and Use of Digital Climate Models in Northern Gyeonggi Province - I. Derivation of DCMs from Historical Climate Data and Local Land Surface Features

S. K. Kim¹, J. S. Park¹, E. S. Lee¹, J. H. Jang¹, U. Chung² and Jin I. Yun²

¹Northern Agriculture Research Station, Gyeonggi-Do Agricultural Research and Extension Service

²Department of Ecosystem Engineering/Institute of Life Science and Natural Resources, Kyung Hee University

(Received January 12, 2004; Accepted March 2, 2004)

ABSTRACT

Northern Gyeonggi Province(NGP), consisting of 3 counties, is the northernmost region in South Korea adjacent to the de-militarized zone with North Korea. To supplement insufficient spatial coverage of official climate data and climate atlases based on those data, high-resolution digital climate models(DCM) were prepared to support weather- related activities of residents in NGP. Monthly climate data from 51 synoptic stations across both North and South Korea were collected for 1981-2000. A digital elevation model(DEM) for this region with 30m cell spacing was used with the climate data for spatially interpolating daily maximum and minimum temperatures, solar irradiance, and precipitation based on relevant topoclimatological models. For daily minimum temperature, a spatial interpolation scheme accommodating the potential influences of cold air accumulation and the temperature inversion was used. For daily maximum temperature estimation, a spatial interpolation model loaded with the overheating index was used. Daily solar irradiances over sloping surfaces were estimated from nearby synoptic station data weighted by potential relative radiation, which is the hourly sum of relative solar intensity. Precipitation was assumed to increase with the difference between virtual terrain elevation and the DEM multiplied by an observed rate. Validations were carried out by installing an observation network specifically for making comparisons with the spatially estimated temperature pattern. Freezing risk in January was estimated for major fruit tree species based on the DCMs under the recurrence intervals of 10, 30, and 100 years, respectively. Frost risks at bud-burst and blossom of tree flowers were also estimated for the same resolution as the DCMs.

Key words : topoclimatology, temperature, solar radiation, precipitation, spatial interpolation, cold air drainage

I. 서 언

경기북부 접경지역은 청정환경에 기후자원이 다양하

여 고품질 농산물 생산 및 환경친화형 농업이 유망한 곳이다. 그러나 생산환경과 시장성을 종합적으로 고려한 경쟁력 있는 농업을 위해서는 지역 인문자연환경의

정보화가 선결되어야 한다. 특히 이 지역의 특징인 천혜의 기후자원도 최소한 수치토양도 수준에서 정밀 공간정보로 표현되어야만 한다.

1904년 최초의 근대적 기상관측을 시작한 우리나라의 경우 국가기상조직인 기상청을 통해 여러 지점(주로 도시)의 기후정보를 제공하고 있다. 하지만 관측자료가 없는 지역의 기후를 추정하기 위해서는 기상청 발표자료를 토대로 지도상에 각 기후요소별로 등치선을 작도한 '기후도'를 사용하고 있다. 기후도를 만드는 과정은 숙련된 기상전문가의 육안판정 및 수작업에 의존하였지만, 최근에는 정보기술의 발전에 힘입어 컴퓨터에 의해 기후의 공간변이를 객관적으로 추정할 수 있는 단계에 와 있다. 공간내삽이라 불리는 통계학적 기술을 컴퓨터 상에서 구현하면 주변 몇 개 지점에서 얻은 장기 기후자료를 이용하여 삼림지대처럼 관측자료가 없는 넓은 지역의 기후를 추정하는 작업도 가능해진다(Phillips *et al.*, 1992; Holdaway, 1996). 미국에서는 서부 산악지대의 기후학적 강수량 분포도를 이 방법에 의해 작성하여 기존의 아날로그형 강수기후도를 대체하였고(Daly *et al.*, 1994), 캐나다 북부 삼림지대의 평년 기온값 추정(Nalder and Wein, 1998), 미국 북서태평양 연안 산악지대 일별 기온값 추정에 이 기술이 적용되었다(Dodson and Marks, 1997).

일본에서는 1,300여 개로 이루어진 자동기상관측망과 수치지형도를 이용하여 열도 전역은 물론 각 현 단위로 '그물망 기후도'라고 불리는 수치기후도를 작성하여 다방면에 활용하고 있다(Nakai, 1990; Seino, 1993). 이 방법은 관측값을 직접 이용하는 일반적인 공간내삽과는 달리 관측지점의 지형변수와 관측된 기후값간 관계를 회귀모형으로 표현한 다음, 모든 격자점의 지형특성을 이 모형에 입력시켜 새로운 '기후표면'을 작성한다.

국내에서는 일본의 그물망 기후도 작성기법을 토대로 남한 전역을 1 km×1 km 격자로 나누어 각각의 월 평균기온과 강수량을 추정한 바 있다(Shin and Yun, 1992). 하지만 일본 그물망 기후도 작성에 사용된 1,300개 관측소에 비해 훨씬 적은 수의 관측소, 그것도 시군 농촌지도소 간이 관측소 등 조악한 품질의 기후자료를 근거로 작성되었기 때문에 널리 활용되지는 못했다. 이후 지리정보시스템기술의 급속한 보급에 힘입어 지형특성의 공간모형화 작업이 간편해지고 공간자료와 기후자료간 연계분석이 가능해짐에 따라 거

리와 고도차를 고려한 지형기후모형이 실용화되었다. 관측밀도가 비교적 높은 남한에서 얻어진 경험식을 북한지방에 적용하여 자료접근이 곤란한 북한의 강수기후도를 작성하였고(Yun, 2000), 최근에는 시골지역의 기온내삽시 도시효과를 제거하는 기술도 개발되어 삼림, 농경지 등 광역생태계를 대상으로 다양한 기후자료를 만들 수 있게 되었다(Choi *et al.*, 2003).

그러나 영농현장 기후자원의 탐색을 위해서는 1 km 해상도로는 미흡하며, 고해상도 기후도 작성을 위해서는 그 동안 사용해 온 방법으로는 한계가 있다. 특히 해발고도 등 지형변이가 극심한 산악지대에서 현실에 가까운 기후분포를 만들기 위해서는 훨씬 밀도가 높은 관측자료와 새로운 내삽기법의 도입이 불가피 하다. 일본의 그물망 기후도 작성기법은 장기간의 누적 혹은 평균기온값에 대해서는 양호한 기후표면 생성이 가능하나, 시간적 해상도를 높일 경우, 예를 들어 순별 혹은 일별 기온값 정도만 되면 실용성이 거의 없어지는 단점이 있다. 이를 타개하기 위해 경사면의 매 시간 일사 수광량을 정밀하게 계산함으로써 복잡지형상의 기온 및 지온분포를 추정하였고(Chung and Yun, 2002; Yun and Taylor, 1998), 찬 공기의 흐름을 정밀하게 모의하고 각 지점별 찬 공기의 집적량과 국지적인 최저기온 변이 사이의 경험식을 작성함으로써 최저기온의 내삽오차를 크게 줄이는 기술도 개발되었다(Chung *et al.*, 2002). 최근에는 표준관측망에 비해 훨씬 높은 관측밀도를 갖는 자동기상관측망의 자료수집 성공율이 95%이상으로 안정화되었으며, 농촌진흥청의 농업기상관측망 역시 자료의 신뢰성이 높아지고 있어 이러한 지형기후모형에 의한 내삽결과의 검증에 사용될 수 있다.

본 연구의 목적은 지금까지 개발된 기후 공간내삽기술을 경기북부 접경지역에 적용하여 다목적으로 활용할 수 있는 30×30 m 해상도의 정밀 수치기후도를 작성하는 데 있다.

II. 재료 및 방법

2.1. 기후자료 수집 및 지형기후학적 변량정보 생산

기상청으로부터 1981년부터 2000년까지 20년간 남 북한 51개 지점의 일별 기온, 일사량, 강수량 자료를 수집하여 월별 평균값을 계산하였다(Fig. 1). 보다 정

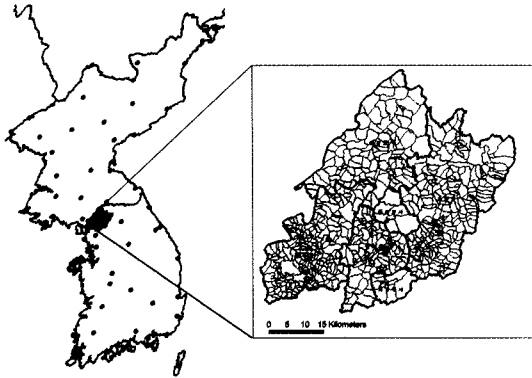


Fig. 1. Locator map of the study area with locations of 51 synoptic stations in Korea.

밀한 남한 관측망 대신 남북한 전역의 조방적인 관측망을 이용한 것은 경기북부지역이 남북한의 경계에 놓여있기 때문이다. 이러한 경계지역에서 양 지역의 기후 자료가 균형적으로 사용되지 않으면 공간내삽에 의한 추정기후가 실제와 크게 달라질 우려가 있기 때문이다. 국토지리정보원으로부터 경기북부지역 25,000:1 수



Fig. 2. Digital elevation model for the northern Gyeonggi province with a 30 m cell spacing.

치지형도를 얻어 주곡선 정보로부터 TIN(triangulated irregular network) 표면을 생성하고, 이것을 수평거리 30 m, 수직해상도 1 m의 DEM(digital elevation model)으로 변환하였다(Fig. 2). 이 그림의 확대부분은 DEM에 하천, 도로, 취락을 중첩시킨 것이다.

이 DEM으로부터 국지적인 기후에 영향을 줄 수 있는 지형기후인자들인 지형음영(hill shade), 경사도, 경사방향 등을 계산하였다. 지형음영은 매시간대별로 변하는 태양의 위치와 함께 직달일사의 도달여부를 결정짓는 주요 변수이다. 그림에 보여주는 것은 저녁시간대의 그늘양상이며, 이러한 주제도가 시간대별로 계

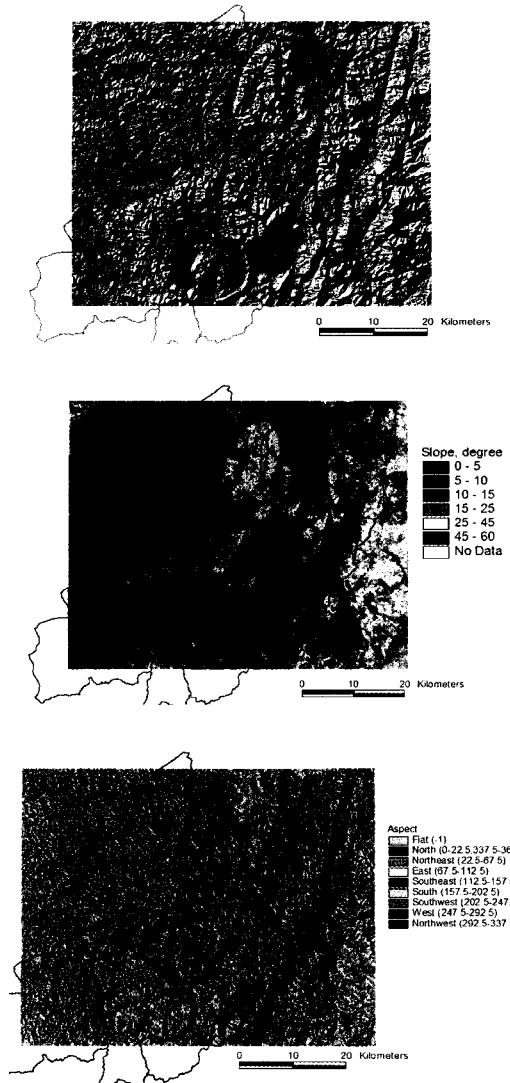


Fig. 3. The hill shade, slope and aspect derived from the 30 m digital elevation model.

산되었다(Fig. 3). 30 m 해상도로 경사도를 표현할 경우 경기북부지역에는 45도 이상의 급경사 지역도 국지적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 경사도와 경사 방향은 주간에는 일사수광량의 분포 및 일 최고기온의 결정에 크게 영향을 끼치며, 야간에는 찬 공기의 흐름을 조정함으로써 일 최저기온의 결정에 또한 중요하다.

2.2. 일 최저기온의 공간내삽

만약 야간복사냉각을 무시할 수 있는 기상조건(예, 구름이 많이 끼거나 강풍이 부는 날)이거나 세밀한 지형효과를 무시할 수 있는 공간규모(예, 1 km 이상 공간해상도의 남한 전역)라면 기존의 고도보정-거리역산 가중 내삽모형만으로도 좋은 결과를 얻을 수 있다. 하지만 우리나라에서 늦서리피해가 예상되는 날은 대개 고기압권에 들어서 바람이 약하고 구름이 적은 조건에 놓인다. 이러한 조건하에서는 이 모형에 의해 추정 가능한, 주변을 포함한 넓은 지역의 최저기온 평균값보다는 미세한 지형특성의 차이에 따라 찬 공기가 유입되거나 집적되는 곳의 기온편차가 농작물의 피해로 이어질 수 있다. Fig. 4는 이런 조건하에 기대되는 최저기온의 연직구조를 표현한 것이다. 직선 A는 표준대기의 일 최저기온 연직구조로서 건조단열감율을 따른다. 기상청 정규관측소, 예를 들어 경기북부지역에서 가까운 철원기상대에서 관측되는 일 최저기온은 관측소 대기 자체의 복사냉각에 의해 이보다 낮아지고 따라서 연직구조는 B로 변형될 것이다. 정규기상관측소는 관측조건이 좋은 곳에 위치하므로 주변으로부터 찬 공기가 유입되거나 축적되는 일은 거의 없다. 하지만 농작물이 재배되는 대부분의 농경지는 지형적인 영향으로 계곡에서는 찬 공기가 축적될 것이고 산 중턱에는 소위 “온난대”가 형성되므로 기온 연직구조는 D와 흡사할 것이다. 만약 주변 정규관측소 자료를 기존의 고도보정 공간내삽과정을 거쳐 농경지의 기온으로 변환한다면 D 대신 C를 이용하게 되므로 고도 Z1을 기준으로 아래쪽은 과다추정, 위쪽은 과소추정 경향이 나타난다. 즉 기존 방법에 의한 일 최저기온 추정값은 위치에 따라 E1 및 E2만큼 보정해야 한다.

본 연구에서는 Chung *et al.*(2002)의 방법에 따라 모형의 적용시간대를 복사서리가 발생하는 시기로 한정하고 지형에 따른 기온변이를 감안기로 하였다. 이 방법에서는 ArcGIS(ESRI Inc., U.S.A.)의 수문합수인 flow accumulation을 사용하되, 현지실측에 의해 경험

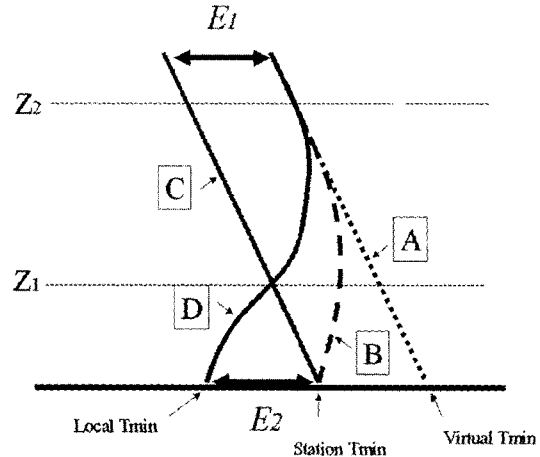


Fig. 4. Hypothetical profiles of minimum temperatures caused by nocturnal radiative cooling. The profile depicted by “A” is that of the standard atmosphere, formed by an adiabatic lapse rate. Daily minimum temperature observed at a surface synoptic station could be lower than the potential temperature predicted from the lapse rate because of the in situ air cooling by radiation. Consequently, the temperature profile will bend towards the land surface, forming a curved line “B”. Most synoptic stations are free from cold air inflow from the surroundings, preventing enhanced cooling associated with cold air accumulation. Since the synoptic station observations are used in spatial interpolation, the conventional elevation-effect correction should follow the profile “C”. However, sites in topographically complex regions usually have cold-air inflow from or outflow to the surrounding area in addition to the cooling of in situ air. The combined cooling effect may resemble the observed minimum temperature(profile “D”). The majority of data-empty sites, which need temperature estimation by spatial interpolation, belong to this case. When we estimate the daily minimum temperature at these holes by the conventional method using profile “B”, errors may arise from two parts divided by the altitude Z1. The so-called thermal belt is assumed to start from Z1 and to end at Z2(inversion cap). From the valley bottom to Z1, the spatially interpolated temperatures could be overestimated by E1, while those from Z1 to Z2 underestimated by E2.

식, 즉 어떤 격자점의 냉기 유입량과 관측된 최저기온 간 관계, 정확하게는 기존모형에 의해 해석되지 않는 추정오차와의 관계를 도출한다. 냉기유입량의 계산과정은, 대상지역의 지형특성을 30 m 해상도의 수치고도 모형으로 표현하고, 냉기의 흐름방향을 인접한 8개 격자점과의 최대 고도편차로부터 계산하며, 흐름방향으로부터 판정되는 유입격자점의 수를 적산하는 것으로 이루어진다. 이 방법에서 미관측지점의 최저기온 추정값은 IDW에 의한 추정값에 정의 온난대효과와 부의

냉기집적효과가 더해진 것으로서 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$T_{min} = T_{idw} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (1)$$

테더존데 등 특수장비를 이용한 야간 경계층 관측자료에 의하면 온난대효과는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_1 = \Delta T_{max} [1 - \exp\{-0.03 \cdot (Z - 200)\}] \quad (2)$$

여기서 온난대효과에 의한 온도상승분의 최대값은 4°C로서 당일의 기온 일교차의 상대비율에 직선적으로 비례한다고 가정한다.

$$\Delta T_{max} = R \cdot \left(\frac{1}{R_{max}} \right) \cdot 4$$

(R : 일교차, Rmax : 일교차의 최대값으로서 18°C)

냉기집적에 의한 기온하강분은 주변 1 ha 정도의 면적에서 유입되는 찬 공기 축적량(CA)의 상용대수에 비례하며, 역시 기온 일교차의 상대비율을 비례상수로 갖는다(Chung et al., 2003).

$$\varepsilon_2 = R \cdot \left(\frac{1}{R_{max}} \right) \cdot \log_{10}(CA) \quad (3)$$

이 방법을 경기북부지역에 적용하여 기후학적 평년의 월별 일 최저기온 분포도 작성을 위해서 (사)한국농림기상학회에서 제작한 1 km 해상도의 한반도 평년 기후도(1981-2000)를 배경기온으로 사용하였다. 해당 지역의 월별 일 최저기온분포도(통계모형에 의한 기온 표면)를 발췌하고, 여기에 30 m 해상도의 고도편차 보정 및 냉기침강 보정, 그리고 온난대 보정을 거쳐 최종적인 일 최저기온분포도를 30×30 m 해상도로 작성하였다.

이렇게 해서 작성된 최저기온 기후도의 신뢰성을 검증하기 위해서 2003년 4월 7일부터 경기도 연천군 군남면 옥계 1리 523-6 번지 소재 “상춘농원” 인근에 10개소의 기온 관측망을 설치하여 4월 25일까지 운영하였다. 센서는 로거일체형 씨미스터(Model HOB0 H8 Pro, Onset Computer Corporation, U.S.A.)로서 제작사의 사양에 의하면 측정오차가 -30°C에서 +50°C 범

위에서 ±0.5°C이며, 상온에서의 정확도는 ±0.2°C이다.

4월 25일에는 대기경계층 연직구조 측정장비를 차탄리 시험포장 건물 옥상에 설치하여 야간 대기경계층의 기온 연직구조를 관측하였다. 이 장비는 두 가지 기기로 구성되는데 하나는 독일 Scintec 사의 phased array SODAR(sonic radar) 모델 가운데 중간규모인 MFAS로서 1,650-2,750 Hz 대의 음파를 발사하여 지상 500 m까지 대기경계층의 바람구조(난류특성)를 분석할 수 있다. 다른 하나는 역시 독일 Scintec 사의 RASS(radio acoustic sounding system)로서 1,270-1,295 MHz 대의 전파를 발사하여 SODAR가 만들어 둔 음파와 충돌시켜 산란되는 양상을 토대로 최대 400 m 고도까지의 기온연직구조를 보여준다. 이 장비를 이용하면 야간 기온역전층 및 온난대의 위치를 정확하게 찾아낼 수 있다.

상춘농원을 중심으로 기상관측지점을 포함하는 일정 지역의 고도를 앞서 만든 30 m 해상도 DEM으로부터 추출하였다. DEM을 이용하여 냉기 흐름의 방향을 결정하고 임의지점으로 유입되는 찬 공기의 양을 계산하였다. 이 때 중심격자 cell로부터 반경을 1, 2, 3, . . . , 10 cell로 증가시키면서 공간평균(zonal mean)을 계산하였다. 10개 관측지점에 대해서는 위성측위계 (Model GeoExplorer III 및 Pathfinder 2.80, Trimble Inc., U.S.A.)에 의해 측정하고 기준국(팔미도)의 DGPS 보정값으로 후처리하여 정확한 위치좌표를 얻었다. 이들 좌표를 이용해 관측지점 해당 격자점을 정확히 찾아내고 이 격자점의 냉기 유입량을 발췌하였다. 이것을 식 (3)에 대입하여 냉기집적에 의한 지점별 오차를 보정하고 실측값과 비교하였다.

2.3. 사면 일사수광량의 계산

경사지의 일사 수광량은 시간에 따른 태양고도 및 방위각의 변화가 수광면의 기하학적 형태와 반응하여 평지와는 크게 다른 양상을 보인다. 흔히 사용되는 경사면의 일사 수광량 계산방법은 수평면 전천일사량을 대상으로 하지만, 수평면 전천일사량에는 직달일사, 산란일사, 그리고 주변으로부터의 반사성분이 섞여 있으므로 지형에 따른 정확한 일사 수광량을 계산하기 위해서는 전천일사량을 이들 성분별로 분류하고, 각 성분별로 적합한 계산식이 만들어져야한다. 엄밀하게는 기존의 계산방법이 적용될 수 있는 성분은 직달일사

하나에 한정된다고 할 수 있다. 기존의 방법이 갖는 또 하나의 취약점은 주변 지형에 의한 직달일사 성분의 차단효과를 반영할 수 없다는 것이다. 복잡한 산악 지형에서는 주변 지형이 만드는 그늘에 의해 직달일사 성분이 차단되어 실제 수광량이 계산값보다 적은 경우가 생길 수 있다. 따라서 정밀한 태양위치와 지형간 기하학적 관계를 토대로 그늘진 지역의 수광량을 보정할 수 있는 방법도 강구되어야 한다.

우선 지표면에 도달하는 일사량은 대기외일사량(태양상수의 한 시간 적산값, S_0)으로부터 추정하였는데, 이 때 관측시점의 태양고도(α)에 따라 직달성분(S_{b0}) 및 산란성분(S_{d0})으로 구분하였다.

$$S_{b0} = S_0 \tau \frac{1}{\sin \alpha} \sin \alpha \quad (4)$$

$$S_{d0} = S_0 \left(0.271 - 0.294 \tau \frac{1}{\sin \alpha} \right) \sin \alpha \quad (5)$$

여기서 τ 는 태양복사의 대기 투과율 상한값으로서 대기권 최외각에 도달한 복사에너지 가운데 약 80%까지 산란되지 않고 직접 지구표면에 도달한다고 가정하여 0.8로 두었다. 대기 투과율은 태양고도가 낮아짐에 따라 함께 낮아져 직달일사 성분을 감소시킨다.

관측시점의 태양방위각이 β 일 때 경사향이 b 이고 경사도가 a 인 지면이 받는 직달일사량은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{b1} = S_{b0} \frac{\cos \alpha \cos(\beta - b) \sin a + \sin \alpha \cos a}{\sin \alpha} \quad (6)$$

그러나 주변지형에 의해 생기는 그늘이 이 시간대와 겹친다면 이 값은 당연히 0이 된다. 그늘이 생기는지 여부는 일반 GIS 기능 가운데 "hillshade" 함수를 이용하면 쉽게 계산된다.

산란일사는 광학적 등방성이 적용될 수 있으므로, 수광량은 수광면의 각도에 무관하며 천공의 개방도에만 의존한다. 따라서 경사면의 산란일사 수광량은

$$S_{d1} = S_{d0} \cos^2 \left(\frac{a}{2} \right) \quad (7)$$

로 표현된다. 여기서 $\cos^2 \left(\frac{a}{2} \right)$ 는 1을 최대값으로 하는 천공개방도를 가리킨다. 두 가지 성분을 합치면 각각 수평면과 경사면이 받는 시간대별 일사량을 구할

수 있으며, 일 적산일사량은 시간대별 일사량을 합치면 된다.

평년의 날짜별 기후학적 일사 수광량을 계산하기 위해서는 이보다 단순한 상대일사량지수, 즉 PRR(Potential Relative Radiation)을 이용하는 것이 편리하다. 대부분의 생태모형에서 요구하는 기후자료의 시간규모가 하루단 위임을 감안하면 오히려 일별 일사수광량 분포가 더욱 실용적이다. 하지만 단순히 매시 수광비율을 누적시키면 시간대(태양고도)에 따른 일사강도의 영향이 전혀 고려되지 못하므로 어떤 가중치를 부여한 유사변량, 즉 proxy가 필요하다. 날짜상태를 무시한다면 시간대 별로 항상 일정한 것은 태양상수이며 이것이 지구표면에 도달할 때 입사각에 따라 강도가 변하는 것을 쉽게 모형화 할 수 있다. 이러한 proxy를 날짜별로 계산해두면 이미 작성된 수평면 일사분포도에 적용하여 사면의 일사수광량 분포도로 변환할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 proxy의 일종으로서 W_d 를 고안하여 사용하였다. W_d 는 하루 단위의 일사수광비율로서 수평면의 1.0에 대한 상대적인 지수인데, 매 시간대별 수광비율(W_h)의 합이다.

$$W_d = \sum_{i=1}^n W_h \quad (8)$$

매시 수광비율은 수평면에 대한 경사면의 일사수광비율에 하루 적산일사량에 대한 그 시간대의 일사량 비율 즉 상대일사강도를 곱한 것이다.

$$W_h = k_i R_i = \frac{x_i}{X} R_i \quad (9)$$

여기서 X 는 수평면의 하루 적산일사량으로서 일사 실측값이 아닌 태양상수로부터 계산된다. 즉

$$k_i = \frac{x_i}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} = \frac{x_i}{\sum x_i} \quad (10)$$

이며, R_i 는 Chung and Yun(2002)의 방법으로 계산되는데 역시 실측일사량이 아니라 태양상수를 이용하므로 다음 식으로 계산된다.

$$R_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (11)$$

여기서 $x_i = x_b + x_d$ 이며 앞에서 이미 계산방법을 제시하였다.

이 방법에서는 매 시간대별 수평면 일사강도와, 수평면에 대한 경사면의 일사수광비율을 동시에 고려하여 하루 동안의 잠재적인 일사량을 계산하고, 이를 수평면의 기준값에 대한 비율로 표현하였다. 일단 365일간의 W_d 즉 상대수광비율을 계산해 두면 인근 기상대의 일사 실측값을 곱해서 복잡한 기하학적 계산을 하지 않고도 정확한 일사량의 공간분포를 알아낼 수 있다.

2.4. 일 최고기온의 공간내삽

지표면의 균질성을 전제로 할 때, 가장 보편화된 공간내삽기법인 거리역산가중법, 즉 IDW(inverse distance weighting)에 의한 비관측점의 일 최고기온 추정오차는 주로 관측지점과의 고도편차 및 지형의 이질성, 두 가지 원인에 의해 생긴다. 고도편차에 따른 오차는 기온감소에 의해 어느 정도 보정이 가능하다. 지형의 이질성에 의한 오차는 대부분 복잡지형 상의 일사 수광양상과 관련이 있으며, 수평면에 대한 경사면의 일사 수광량 차이, 엄밀하게는 현열 과부족을 고려함으로써 그 크기를 추정할 수 있다. 이것을 감안한 지형기후모형이 BioSIM 인데 다음과 같은 방법으로 일 최고기온을 추정한다(Regnier *et al.*, 1996).

일 최고기온의 결정에는 고도 외에 한낮의 일사량이 중요한 역할을 하므로 주어진 경사면에 대해 오전 11시부터 오후 3시까지 4시간 동안의 일사량을 적산하여 인근 기상대의 수평면 일사량과 비교하고 그 비율에 따라 기상대 최고기온을 보정하게 된다. 이 때 흐린 날과 맑은 날의 영향정도를 차별화하기 위해 당일의 기온일교차를 이용한다. 즉 흐린 날은 일교차가 작고, 맑은 날은 그 반대인 것을 감안한 것이다. 이것을 종합적으로 표현하면 일 최고기온 보정값 ε 은

$$\varepsilon = v \cdot R \cdot \Delta T_R \quad (12)$$

이 되는데, 여기서 R 은 기온일교차, ΔT_R 은 수평면과 경사면간 일사량 편차에 의한 기온상승분의 상한값으로, 일교차 1°C 당 기온으로 표현하면 산림군락에서 0.1429라고 알려져 있다(Regnier, 1996). 이 식에 의하면 일교차가 28°C인 맑은 날 경사면의 최고기온은 평지에 비해 4°C까지 높아질 수 있다. v 는 overheating index, 즉 과열지수로 불리며, 4시간 동안 수평면 일사수광량(ϕ_0)과 경사면 일사수광량(ϕ_1)간의

차이를 표준화한 것이다.

$$v = \frac{\phi_1 - \phi_0}{\Delta \phi_{max}} \quad (13)$$

이 식에서 분모는 북반구에서 관측되는 수평면과 경사면간의 오후 4시간 동안 일사량 수광편차 가운데 최대값 (15 MJm⁻²)으로서, Regnier(1996)에 의하면 3월 중 북위 78도에서 남동쪽으로 45도 경사진 사면에서 나타난다. 이 식에 의해 계산되는 과열지수는 최대값이 1.0이며, 최소값은 북위 64도에서 북쪽으로 45도 경사진 사면 상에서 7월 중에 관측되며 그 값은 -1.935이다.

이 모형을 대상지역에 적용하기 위해 매일 15일의 과열지수를 계산하였는데 일교차는 가장 가까운 기상 관서(철원)의 평균값을 사용하였다. (사)한국농림기상학회에서 제작한 1 km 해상도 한반도 평년기후도(1981-2000) 중 해당 지역의 월별 일 최고기온분포도(통계모형에 의해 작성)를 발췌하고, 여기에 나머지 오차를 더해 줌으로써 최종적인 일 최고기온분포도를 30×30 m 해상도로 작성하였다.

2.5. 재현기간별 과수 동해 및 개화기 상해 위험도 예측

기상청 56개 관측소의 1971-2000 기간의 월별 기온평균값과 표준편차를 이용하여 지역별 계절별 기온변이를 분석하였다. 같은 기간 중 1월의 저극기온자료를 수집하여 기존 일 최저기온 평균값과의 편차를 계산하고, 이를 근거로 이미 사용중인 일 최저기온 전국 분포도를 저극기온 전국분포도로 변환하였다. 일 최저기온의 1월 표준편차 가운데 0.67, 1.65, 및 2.33을 이용하여 재현기간 4년, 20년, 100년의 저극기온 주제도를 250 m 해상도로 제작하였다. 이들 가운데 경기 북부지역에 해당하는 자료를 발췌한 다음, 찬 공기 침강 및 온난대 효과를 고려한 지형기후모형과 경기북부 지역 30 m DEM을 이용하여 30 m 해상도의 1월 극저저기온 분포도를 역시 재현확률별로 작성하였다. 이 최저기온 확률분포도와 주요 과종별 휴면중 동해유발온도(사과 -28, 배 -20, 복숭아 -18, 포도 Campbell Early -25, 거봉 -15)를 토대로 동해위험도를 산정하였다.

배, 사과, 복숭아 등 이른 봄에 꽃이 피는 과일나무는 때늦은 서리때문에 수분, 수정 장애가 일어나 결실이 불량해지고 심하면 한 해 농사를 망치는 수도 있다. 이런 피해는 같은 지역 내에서도 찬 공기가 가라

있는 지형에서 피해가 자주 나타난다. 전국 56개 지점에서 최근 30년 동안 관측된 “마지막 서리가 내린 날”(종상일)의 통계자료를 기상청으로부터 수집하여 4월의 일 최저기온과 정량적인 관계를 얻었다. 그 결과 종상일(D_{frost} , year-day)은 4월의 최저기온(T_{min})을 이용해서 다음 식으로 추정할 수 있었다.

$$D_{frost} = 135 - 6.38T_{min} \quad (14)$$

배(“신고”품종)의 만개기는 일 평균기온(T)을 이용해서 다음 식으로 계산되는 “발육속도”(S)가 누적되어 1에 도달하는 날짜이다(농업과학기술원, 1990). 다른 과종에 대해서도 유사한 관계식이 정립되어 있다.

$$S = \frac{1}{107.94 \times 0.9^{T_i}} \quad (15)$$

따라서 만개기와 종상일을 추정하기 위해 필요한 자료는 4월부터 5월까지 일별 평균기온과 4월의 일최저기온이다. 이미 만들어 둔 경기북부지역 정밀기후도를 토대로 종상일, 주요 과종별 만개기 및 상해위험도 분포를 작성하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 경기북부지역 정밀 수치기후도

평년의 일 최고기온, 최저기온, 적산일사량, 강수량, 강수일수 등 농작물의 생육에 중요한 기후변수들에 대해 기후학적 월별 평년값이 30m 격자점 단위로 추정되었다. 이 기후도는 기상청의 공식 기후자료를 토대로 정밀 지형도 및 최신 지형기후모형에 의해 작성되었으므로 현재까지 만들어진 어떤 기후도보다도 정밀하고 그 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 모든 수치기후도는 ArcGIS GRID 형식으로 만들어졌으며 표준좌표계에 투영되었으므로 기존의 지리정보(행정구역도, 하천수계, 도로망, 등고선, 토양도 등)와 중첩시킬 수 있다. 향후 기후정보를 토대로 여러 가지 다른 지리정보와 연계한 다목적의 공간분석이 가능하다.

Fig. 5는 평년 8월의 일 최고기온 분포도이다. 한여름이지만 산간지대를 중심으로 25°C 이하의 냉량한 지역이 나타나는 한편 낮은 지대에는 30°C 이상의 고온역도 눈에 띈다. 이 값들은 일 최고기온의 8월 한

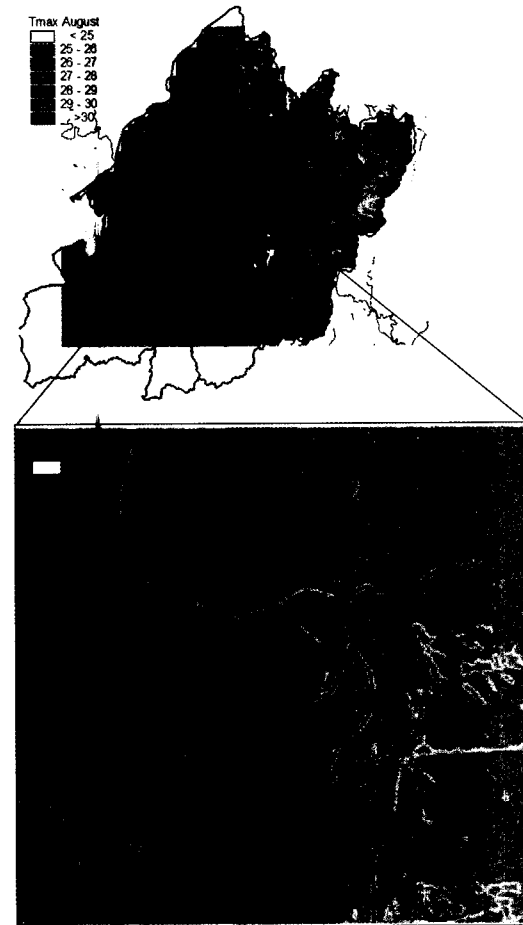


Fig. 5. Daily maximum temperature pattern over the study area for August. A portion is enlarged to show other overlaid themes such as streams, roads, and buildings with the temperature background.

달간 평균값이므로 실제 최고기온은 이보다 더 높은 날과 낮은 날이 불규칙하게 섞여 있을 것이다.

Fig. 6는 평년 5월의 일 최저기온 분포도이다. 계곡이나 하천유역 등 저지대를 중심으로 저온역이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 매년 9월 15일 경 주변에 장애물이 없는 수평면의 하루 동안 적산 일사량에 대한 임의 지표면의 상대수광비율을 표현한 것이다. 기대했던 대로 남향사면의 일사량은 수평면에 비해 증가하지만 나머지 대부분의 지형조건에서는 수평면에 비해 일사량이 훨씬 적음을 알 수 있다. 이 상대수광지수를 알고 있으면 기상대에서 관측한 일간 적산 수평면 일사량으로부터 임의 지역의 실제 일사량을 손쉽게 추정할 수 있다.

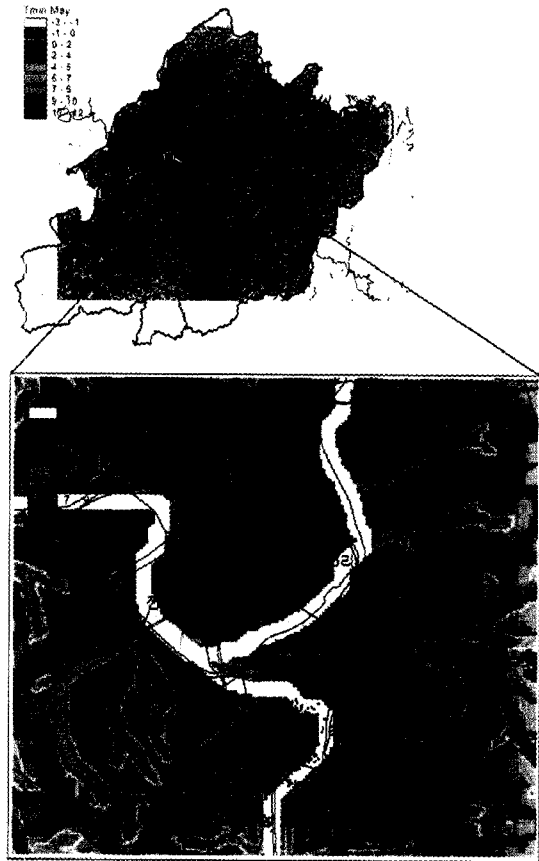


Fig. 6. Daily minimum temperature pattern over the study area for May. A portion is enlarged to show other overlaid themes such as streams, roads, and buildings with the temperature background.

이상과 같은 정밀 수치기후도는 그 자체만으로도 기존의 아날로그 등치선형 기후도를 대체하여 기후관련 지지체 업무에 획기적인 개선효과를 가져올 수 있다. 일상생활이 기후와 밀접하게 연계된 점을 감안하면 현행 업무를 면밀히 검토하여 기후와의 연관성을 찾아내고 그에 따라 수치기후도를 활용하는 지체를 발휘해야 할 것이다.

3.2. 동해위험지역 판별

기상청 표준기상관측소의 극 최저기온 통계자료와 본 과제에서 작성한 평년 1월의 30 m 해상도 일 최저기온 분포도를 결합하여 생성한 경기북부지역 극 최저기온 분포도가 Fig. 8이다. 최근 20년간 평균으로 볼 때 극 최저기온은 -27°C 이하까지 내려가는 곳이 있는가 하면, 이보다 15°C나 높은 지역도 나타난다. 대체로 산악지역에서 저온이 예상되지만 의외로 표고

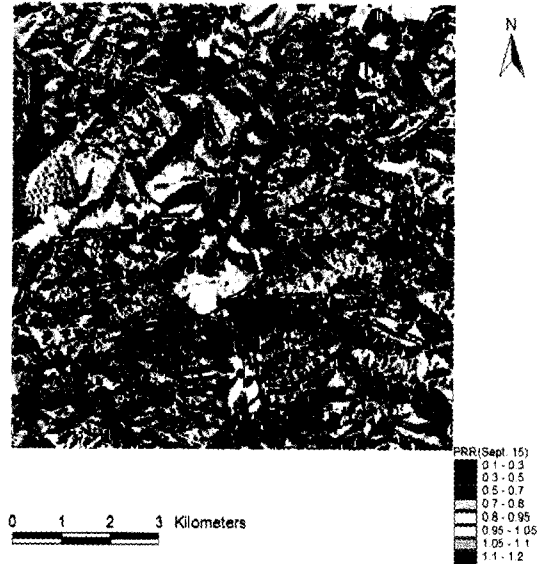


Fig. 7. Potential relative radiation (PRR) pattern over the study area for 15 September. Horizontal surface has PRR value of 1.

가 낮은 계곡유역에서도 저온역이 많이 발견된다. 하지만 -20°C 아래로 내려가는 지역은 전체의 절반에 미치지 못한다.

지난 20년간 기온 연차변이를 토대로 10년에 한번 찾아오는 한파, 즉 재현기간 10년의 극 최저기온 분포를 추정해보면 거의 전 지역이 -20°C 이하의 추위를 겪게 된다(Fig. 8). 포도, 배, 사과 등 온대과수의 휴면기간 중 동해 유발온도를 기준으로 10년 재현확률의 극 최저기온 분포도 상에서 동해위험지역을 찾을 수 있다. 경기북부지역 내에서 겨울철에 포도원의 동해를 걱정해야 하는 곳은 그렇게 많지 않다. 그러나 -20°C 인 신고 배의 동해 유발온도를 기준으로 한다면 대부분 지역이 피해를 입을 수 있다.

3.3. 늦서리 피해 위험지역 판별

만개기 서리피해를 추정하기 위해서 먼저 이 지역의 봄철 “마지막 서리 온 날”, 즉 종상일 분포도를 작성한 것이 Fig. 9이다. 계산된 결과에 의하면 경기북부지역 내에서 종상일의 변이폭은 4월 초부터 6월 초까지 2개월에 이르는 것으로 보인다.

다음에는 이 지역에서 배(신고 품종)를 재배할 경우 예상되는 만개일 분포도를 작성하였다(Fig. 10). 만개일의 변이폭은 4월 하순부터 5월 하순까지 약 한 달

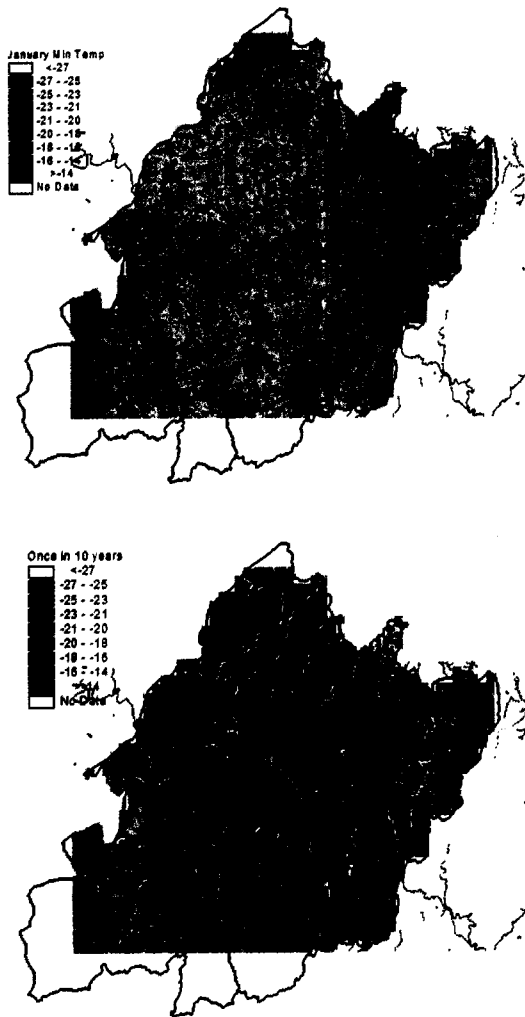


Fig. 8. The low temperature extremes in January(top) and the same pattern with the recurrence interval of 10 years(bottom).

간이다. 앞서 작성한 종상일 분포도와 만개일 분포도를 중첩시켜 날짜 차이를 구한 다음 6단계의 상해 위험도로 표현하였다(Fig. 10). 이 방법에 의해 과원의 국지적인 위치와 지형에 따른 상해 위험도를 정밀하게 예측할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

과주, 연천, 포천 등 경기북부 접경지역에 대해 30 m 해상도의 수치기후도를 제작하였다. 사용된 기후 자료는 남북한 51개 표준기상관측소에서 1981-2000

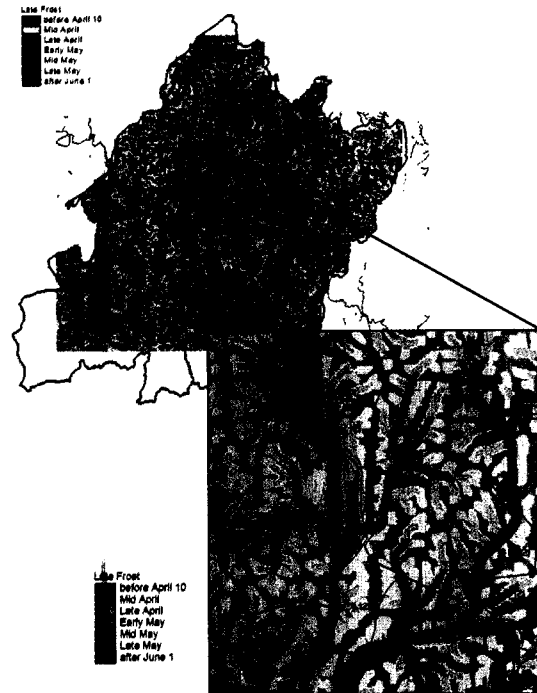


Fig. 9. Estimated dates for the last frost in spring.

기간중 관측된 일 최고/최저기온, 강수량, 일사량의 월별 평균값이며, 공간내삽을 위해 사면의 냉기침강 및 온난대(최저기온), 일시수광량(최고기온), 표고차 및 거리(모든 요소) 보정항을 갖는 지형기후모형을 이용하였다. 공간변이 추정값의 신뢰도는 최저기온에 대해서만 현지에 관측망을 구성하여 검증하였고, 나머지 요소에 대한 검증은 실시하지 않았다. 수치기후도를 활용하여 재현확률에 따른 겨울철 동해위험도를 과종별로 작성하였고, 종상일과 과종별 만개기를 추정하여 봄철 늦서리 위험도를 계산하였다.

신뢰성 있는 고해상도 수치기후자료가 경기북부 접경지역에 대하여 처음으로 제작되었지만 수치기후도 그 자체만으로는 이 지역의 농가소득을 증대시키거나 비용을 경감하는 효과는 기대하기 어렵다. 만들어진 수치기후도를 어떻게 활용하느냐에 따라 자치단체의 친환경적 국토이용계획 수립, 농가 생산비용 절감 및 수익성 증대에 기여 여부가 결정될 것이다. 활용도를 높이기 위해서는 수치기후도가 궁극적으로 지역의 농업기상 감시체제로 발전되어야 한다. 현재 전국 400여 개 지점에 설치된 기상청 자동기상관측망과 200개에 달하는 농진청 무인기상관측망에서는 10분 혹은 매 시

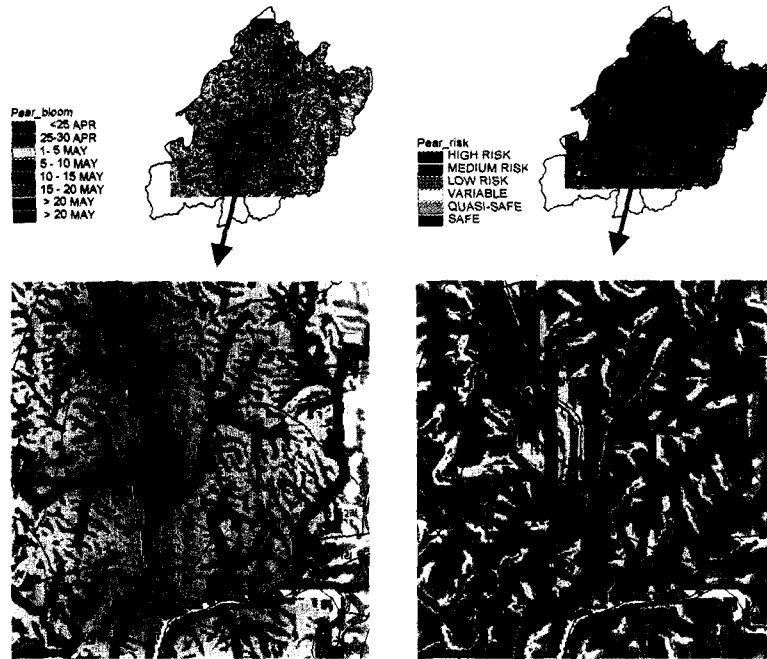


Fig. 10. Estimated dates for the full-bloom of pear trees in the study area(left) and the frost risk indices calculated from the temporal distance between the full-bloom and the last frost(right).

간대별 기상자료를 실시간으로 생산하고 있으며, 이들 중 일부가 경기북부지역에도 설치되어있으므로 수치기후도와 결합되면 30 m 해상도의 기상실황 감시체제로 전환된다. 그렇게 되면 단순한 적지판정 수준을 벗어나 시간별 혹은 일별 수치기상자료를 활용하는 동적인 생태계 관리모형의 실용화가 기대된다.

본 연구에서 이용된 기술은 전국의 나머지 시군 지역에도 동일하게 적용될 수 있으므로, 중앙정부 차원에서 전국적인 사업으로 추진한다면 단시일 내에 수치기후도의 실용화가 이루어질 수 있다. 나아가 통일을 대비한 북한지방의 농림업, 중국 서부 개발계획에의 참여, 동북아 생태계 보전 및 기후변화 대응기술 등에 필요한 수치기후도의 작성에도 우리의 기술이 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 경기도 농업기술원 학술용역으로 수행되었으며, 실험에 사용된 정밀 수치도양도는 농업과학기술원, 경제층 관측장비는 서울대학교 농업과학공동기기센터, 지표피복도는 환경부에서 각각 지원받았다.

인용문헌

농업과학기술원, 1990: 주요과수재배지역의 기후특성. 정부간행물 (농촌진흥청). 205pp.

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., and J. I. Yun, 2002: Spatial interpolation of hourly air temperature over sloping surfaces based on a solar irradiance correction. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **4**(2), 95-103.

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**(3), 133-140.

Chung, U., H. C. Seo, J. I. Yun, and K. H. Lee, 2003: An optimum scale for topoclimatic interpolation of daily minimum temperature in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **5**(4), 261-265.

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.

- Dodson, R. and D. Marks, 1997: Daily temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Climate Research* **8**(1), 1-20.
- Gates, D. M., 1980: *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag, New York.
- Holdaway, M. R., 1996: Spatial modeling and interpolation of monthly temperature using kriging. *Climate Research* **6**, 215-225.
- Nakai, K., 1990. Japanese system of the meteorological information service to user communities including education and training. In A. Price-Budgen(ed.) *Using Meteorological Information and Products*. Ellis Horwood, UK. 257-274.
- Nalder, I. A., and R. W. Wein, 1998: Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **92**, 211-225.
- Phillips, D. L., J. Dolph, and D. Marks, 1992: A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* **58**, 119-141.
- Regniere, J., 1996: Generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models. *Environmental Entomology* **25**(5), 896-881.
- Regniere, 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**(4), 379-383.
- Shin, M. Y., and J. I. Yun, 1992: Estimation of monthly temperature distribution in Cheju Island by topoclimatological relationships. *Journal of Korean Forestry Society* **81**, 40-52.
- Yun, J. I., 2000: Estimation of climatological precipitation of North Korea by using a spatial interpolation scheme. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **2**(1),16-23.
- Yun, J. I., and S. E. Taylor, 1998: Modelling soil temperature of sloped surfaces by using a GIS technology. *Korean J. Crop Science* **43**(2), 113-119.