

공간기후모형을 이용한 농업기상정보 생산

윤진일

경희대학교 생명과학부/생명자원과학연구원

(수락 2004년 12월 6일)

Visualization of Local Climates Based on Geospatial Climatology

Jin I. Yun

Faculty of Life Sciences/Institute of Life Science and Natural Resources, Kyung Hee University, Suwon, Korea

(Accepted December 6, 2004)

ABSTRACT

The spatial resolution of local weather and climate information for agronomic practices exceeds the current weather service scale. To supplement the insufficient spatial resolution of official forecasts and observations, gridded climate data are frequently generated. Most ecological models can be run using gridded climate data to produce ecosystem responses at landscape scales. In this lecture, state of the art techniques derived from geospatial climatology, which can generate gridded climate data by spatially interpolating point observations at synoptic weather stations, will be introduced. Removal of the urban effects embedded in the interpolated surfaces of daily minimum temperature, incorporation of local geographic potential for cold air accumulation into the minimum temperature interpolation scheme, and solar irradiance correction for daytime hourly temperature estimation are presented. Some experiences obtained from their application to real landscapes will be described.

Key words : Local climate, Spatial interpolation, Geospatial climatology, Topography, Cold air drainage, Thermal belt

I. 서 언

요즘 신문, 방송 등 대중매체를 보면 예외 없이 기상정보코너가 준비되어있다. 그곳에는 오늘과 내일의 날씨를 물론 예보에 따라 세차를 해야 할지 말아야 할지, 외출복의 코다는 어떻게 해야 할지, 김장은 언제 담가야 할지 등 시민생활에 맞춘 기상정보가 가득하다. 우리나라 백성들은 대개 모여 사는 것을 좋아해 십중팔구는 도회지에 살고 있고 기상업무는 이들이 낸 세금으로 운영되니, 기상정보서비스가 도시지역을 중심으로 펼쳐지는 건 지극히 당연하다. 요즘은 사람의 활동범위가 넓어짐에 따라 항공기상, 해양기상 등 전문기상정보도 추가되기도 한다. 즉 사람 가는 곳이면 기상서비스는 따라다니는 세상이 되었고, 그만큼 기상

청에 대한 정부예산 배정액이 늘어나고 있다. 한편, 골프장이나 낚시터, 건설현장 등 민간수요가 있는 곳에는 기상청 대신 민간예보업자가 특별한 기상정보를 만들어 유료로 제공한다.

그런데 농작물은 사람과 달리 도시에서 멀리 떨어진 곳에서 재배되며, 대체로 농민들 외에는 농작물 기상정보를 얻고자 하는 이가 거의 없다. 선진국 농업의 경우 국립기상관서나 민간사업자에 의해 농작물 전용 기상정보가 제공되지만 우리나라에서는 농업 자체가 돈 되는 산업이 아니어서 신경 쓰는 이가 없는 것이 당연하다. 오히려 기상을 조금 안다는 사람들은 농작물의 기상을 사람의 기상과 혼동하여 이 땅의 농작물이 제공받아야 마땅한 기상서비스를 가로막아온 측면도 있다. 기상청에서 미처 예측하지 못한 저온에 의해

배 과수원이 피해를 입었을 때 주인은 금전적인 보상으로 회복할 수 있겠지만, 배나무는 전혀 보상받지 못하고 이듬해에도 또 다음 해에도 똑같은 스트레스를 반복해서 당할 수 있다. 사실 농작물을 위한 기상정보는 사람을 위한 것보다 훨씬 적은 돈으로 쉽게 만들어 쓸 수 있다. 식물이란 씨앗이 떨어진 그 자리에서 발아하고 기껏해야 좌우로 수 m, 아래위로 수 m 범위의 좁은 공간에서 일생을 마친다. 사람처럼 따라다니며 기상정보를 만들 필요가 없는 것이다.

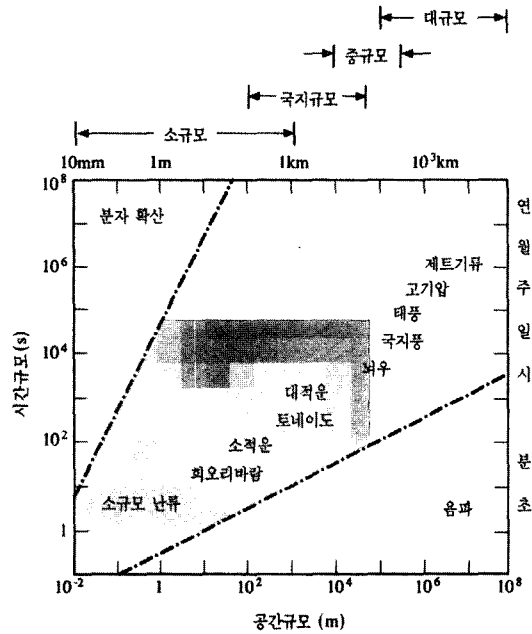
최근에 농업분야에서 그 활용이 보편화되고 있는 작물생육, 토양환경, 병해충발생 예측모델이 돌아가기 위해 공통적으로 입력해 줘야 할 자료가 바로 농업기상에 관한 것이다. 기상과는 무관해 보이는 이들 분야 전문가들이 한국농림기상학회(<http://www.ksafm.org>) 회원들인 점이 이제 조금은 이해될 것이다. 이 강좌를 통해 이러한 농업생태계 모사를 위해, 충분한 신뢰도와 시공간적 정밀성을 갖춘 농업기상자료를 어떻게 생산할 것인지 논의하고자 한다. 먼저 농경지의 기후, 즉 소기후가 어떻게 형성되는지, 일반적인 도시의 기후와 무엇이 다른지 살펴보고, 몇 가지 소기후모형을 소개하며, 그 활용법에 대해 얘기하겠다.

II. 소기후

2.1. 규모에 따른 기후

우리 주변의 날씨를 만들어내는 대기시스템은 시간이나 공간적으로 매우 다양한 규모이지만(Fig. 1), 일기예보나 기후전망을 작성하는 데 사용하는 대기모형은 이들 가운데 규모가 큰 순서로 2~3종만이 실용화된 상태이다. 예를 들어 기후변화를 추정하는 데 쓰고 있는 대순환모형(GCM; General Circulation Model)은 수평거리 수백 km의 해상도, 국내에서 지역별 예보를 만들어주는 중규모모형(MM5: Meso-scale Model version 5)은 수십 km의 해상도를 갖고 있다. 반면 농경지의 국지기상을 모사할 수 있는 해상도 1km 이내의 경계층 모형은 아직은 현업용으로 쓰기에 제약요인이 너무 많아 연구용으로만 사용될 뿐이다.

따라서 중규모모형의 출력결과, 즉 시민들에게 통보되는 일기예보로부터 국지적인 기후결정인자를 고려하여 해상도를 높이고 적절히 수정하기 위한 소기후모형, 즉 down-scaling 과정이 필요하다. GIS에 기반을 둔 소기후모형은 중규모 대기모형이나 경계층 모형과 달



• 그늘로 표시한 부분이 대기경계층 특성의 범주임.

Fig. 1. Time and space scales for various atmospheric phenomena. The shaded area represents the characteristic domain of boundary layer features.

리 인접 격자점 간에 시간경과에 따른 열과 수증기의 교환이 없는 비역학적 down-scaling 과정이다. 예를 들어 한 개 격자점의 기온은 오로지 그 격자에 해당하는 지표특성이나 복사조건에 의해 결정되며 상하층간 대류, 주변지역으로부터 이류(advection)¹⁾의 영향은 무시한다.

2.2. 소기후의 정의

자주 언급되는 국지기후(local climate)나 미기후(microclimate)는 모두 규모가 작은 “소기후”(small-scale climate)를 일컫는다. 절대규모로 봐서 얼마나 작은지에 대한 정답은 없고 다만 중규모기후에 비해 상대적으로 작다는 뜻이다. 중규모기후는 기상청 종관망²⁾으로 관측되는 기후로서 우리가 흔히 말하는 서울, 수원, 추풍령의 기후, 즉 내 고장의 기후 혹은 지역기후이다. 종관망에 속하는 관측소의 특징은 표준적인 관측조건이다. 바람은 지상 10m, 기온과 습도는 잔디

1) 수평대류, horizontal convection

2) 종합관측 또는 정시관측이라는 의미의 synoptic observation 을 위한 network

발 위 1.5m의 통풍차광상태 등 관측여건이 세계 어느 나라나 동일하다. 여기서 관측된 자료가 중규모 대기 모형에 초기자료로 입력되고 출력된 계산결과는 또한 이들 지역을 중심으로 해석되고 최종예보가 만들어진다. 국토의 크기에 따라 종관망 대신 더욱 조밀한 자동기상관측망(automated weather station network, AWS망)을 중규모기후용으로 사용하는 경우도 있지만, 우리나라의 AWS망은 설치조건이 표준화 되어있지 않아 사실상 국지기상관측망에 해당한다. 눈치 챌지만 국지기후는 지표상태가 잔디밭으로 통일된 표준조건이 아니라, 있는 그대로의 조건에서 관측값을 얻으므로 중규모기후에 비해 훨씬 시공간적인 변이가 크다. 따라서 여러 지점의 관측값을 동시에 놓고 비교하는 종관기후분석에는 적합하지 못하다. 그래도 바람은 지상 10m, 기온은 지표면 (옥상 혹은 노장) 위 1.5m 등으로 정해져 있으므로 주어진 지표피복에 의해 생기는 경계층대기(boundary layer)의 특성을 잘 나타낸다. 예를 들어 과수원에 설치된 AWS는 과수군락에 의해 만들어지는 경계층대기를 감시하기 위해 항상 군락의 평균높이보다 더 높은 관측탑에 센서가 장착된다. 이 경우 수집된 기상자료는 과수원의 국지기후특성을 나타낸다. 만약 AWS가 군락 속에 파묻힐 정도로 낮은 타워에 설치되었다면 그 목적이 국지기후 관측이 아니라 군락 내 미기후를 감시하는 것이다. 미기후관 군락의 평균높이와 같은 접지층(canopy layer)의 기후를 일컫는다. 당연히 작물의 종류에 따라 접지층의 깊이는 달라지는데 삼림의 경우 평균수고, 도시의 경우 빌딩의 평균높이까지가 바로 접지층이다. 도시기후의 특징 역시 도시경계층과 접지층에 따라 크게 다르며 연구에 있어서 각기 다른 접근방법을 사용한다. 광릉수

목원 기상타워의 경우 수관 바깥으로 최소한 2m 높이에서 플렉스를 측정하며, 수관 내부의 미기후 측정을 위해 층위별로 센서를 설치한 것을 상기하면 좋을 것이다.

다시 한번 정리해보자. 지구표면으로부터 100km만 올라가면 거의 거의 공기가 없는 상태이며 여기까지만 대기권이라고 부를 수 있다. 유일한 열원인 햇빛은 지구표면을 데우고 그 영향은 지구를 둘러싼 대기권 가운데 아래 쪽 10% 정도까지 미친다. 이곳을 대류권이라 부르며 구름이 끼는 등 다양한 날씨가 연출되는 곳이다. 이 가운데 최하층 10% 정도, 즉 1km 높이까지는 24시간 주기의 태양복사 영향이 뚜렷이 나타나는 곳으로서 행성경계층(planetary boundary layer, PBL)이라고 부른다. 대부분 생명체는 이 PBL 내부에서 일생을 보내고 있는데 만약 PBL의 아래쪽 지표피복이 도시라면 도시경계층, 숲이라면 삼림경계층, 농작물이 자라고 있으면 작물경계층이라고 구별 짓는다(Fig. 2). PBL의 높이는 주야간에 따라 크게 차이가 있는데 지표면 에너지가 풍부한 주간에는 약 1km까지 확장되나, 야간에는 300m 이내로 축소된다.

지표면에는 작물이나 나무가 자라고 있고 이들 식물 군락은 군락 내부의 미기후(예, 숲 속의 기후)를 생성할 뿐 아니라 군락을 감싸는 경계층대기의 성질을 바꾸어 독특한 국지기후를 만들어낸다. 하지만 경계층대기의 평균적인 특성은, 이 지역이 농작물이나 삼림이 아닌 잔디밭(관측노장)으로 덮여있다고 가정했을 때 기대되는 값이며 이것이 종관망에 의해 감지되는 중규모 기후이다. 특히 같은 소기후로 분류되지만 국지기후와 미기후는 수직적인 규모에서 뚜렷이 구분되며, 관측된 자료의 해석과 활용 시 주의를 기울여야 한다.

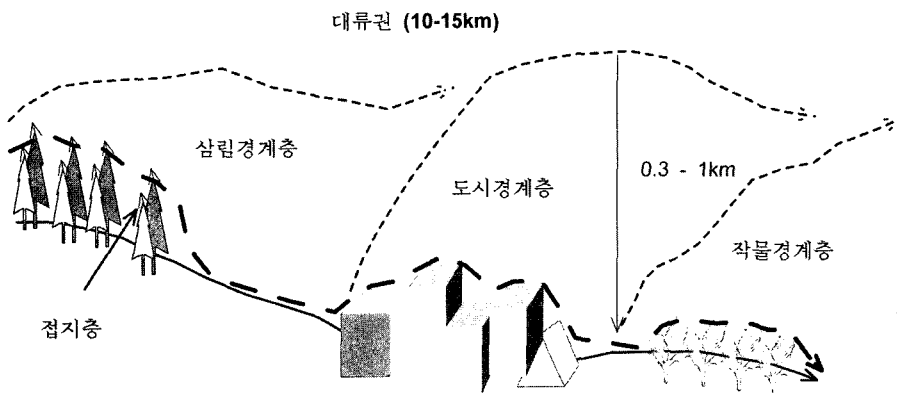


Fig. 2. Schematic representation of troposphere, planetary boundary layer, and surface layer over various land surfaces.

2.3. 소기후가 아닌 것 몇 가지

일본에서는 1970년대 초반부터 “AMeDAS”라고 불리는 자동기상관측망을 전국에 구축하였는데, 생산되는 자료의 활용성을 높이기 위해 “Mesh 기후도”라는 초보적인 공간정보를 제작하기 시작하였다(Seino, 1993). 자동기상관측망은 기존의 종관망에 비해 관측밀도가 훨씬 높기 때문에 Mesh 기후도는 농림업분야에서 새로운 도구로 각광받게 되었다. 일반적인 기후시대 구분(climatic zoning)은 인간생활에 미치는 영향을 중심으로 행해지지만, 농작물을 주체로 한 기후구분은 이외는 달리 주어진 기후에 대한 생리생태적 반응을 중심으로 별도의 농업기후시대 구분(agroclimatic zoning)을 하게 마련이다. 우리나라에서도 오래 전부터 주작물인 벼의 경우 봄철 강수량, 여름철 기온, 가을철 일조시수 등을 비교분석하여 이미 남북한을 19개의 기후시대로 구분한 바 있다(Yoo *et al.*, 1996). 그러나 이들은 종관기후자료에 기반을 둔 조방적인 것으로서 등온선, 등우량선 등 아날로그 형태로 만들어져 실제 이 것을 지역별 신품종 도입과 같은 농업기술 이전 프로그램에 적용하기는 곤란하다. 따라서 미리 준비한 경험적 통계모형(지리지형-기후통계값 간 회귀식)을 수평거리 1km 해상도로 수치화된 국토에 적용하여, 가상의 기후를 복원하려는 시도가 바로 Mesh 기후도 제작으로 이어졌다.

한반도의 경우에도 Mesh 기후도 제작과 유사한 기법이 많이 소개되었는데, Shin *et al.*(1999)은 남북한의 기상대급 51개 지점 관측자료와 1×1km 격자점 해발고도자료 즉 DEM을 이용해 최초의 전국규모 수치기후도를 만들었다. 우선 기상관측소가 위치한 픽셀의 국지기후에 영향을 미치는 총 17 종류 162개 지형변수를 DEM으로부터 추출하고, 여기에 각 관측소의 기후자료(월별 평년값)를 회귀시켜 최적 중회귀식을 선별하였다. 비관측지점의 기후값은 DEM으로부터 추출된 지리지형변수를 이들 회귀식에 대입하여 얻을 수 있었다. 이 방법을 통해 북한과 같이 접근이 어려운 지역의 기후를 알아내고 이를 토대로 작황분석 혹은 기후시대 구분이 가능하였다(Yun and Lee, 2000). 강수량의 경우 기온에 비해 공간변이가 훨씬 크기 때문에 기상청 자료 외에 건설교통부자료를 추가하여 총 277개 지점으로 구성된 월별 강수량자료세트를 확보하고, 관측소 포함 격자의 경사방향에 따라 8개 그룹으

로 나눈 후 각각에 대해 기온과 동일한 방법으로 강수량-지형요인간 중회귀식을 작성하였다(Yun, 2000). 미국의 서부 산악지대 기후구분을 위해 개발된 PRISM 등 공간통계학적 기후추정기법도 수 km 해상도의 수치기후도 제작에 활용되어왔다(Daly *et al.*, 1994; Holdaway, 1996; Phillips *et al.*, 1992). 그러나 우리나라 농경지의 일반적인 규모를 생각해보면 사방 1km 즉 30만평 단위의 기후정보로는 국지기후특성을 보여주기 곤란하다. 예를 들어 30만평 면적의 과수원이 있다면 그 안에서도 경사, 표고, 지형, 토성 등의 변이가 있을 것이며 이것이 국지기후의 공간변이로 나타날 것이기 때문이다. 따라서 오늘 발표에서는 이들 Mesh 기후도 및 아류기법은 제외한다.

III. 소기후모형

3.1. 연구현황

경관의 특징(landscape features)에 의해 열수지가 어떻게 달라지며 이것이 국지기후에 무슨 영향을 주는 지 생각해보자. 우리주변의 가장 흔한 경관인 산과 언덕은 태양과의 기하학적 관계에 의해 평지에 비해 사뭇 다른 일사량 분포를 만들어냄으로써 낮 시간대의 기온을 결정한다. 또한 평지와는 다른 천공개방도(sky view factor) 때문에 하향장파(대기복사), 상향장파(지구복사) 등 적외선역의 복사수지를 변경한다. 복사구동력의 공간적 차이는 국지적인 대기순환을 야기하여 결국 찬 공기 집적과 온난대 형성을 통한 야간의 기온변이도 가져온다. 여기에서 지표의 피복종류가 표준관측소의 잔디밭과 다르다면 그 양상이 더욱 복잡해진다. 지표의 알베도, 공기역학적 거칠기, 토양특성, 식생군락의 발육 및 생리상태 등은 모두 미기후, 나아가 국지기후에 영향을 주게 된다. 미기후는 시공간적 변이가 매우 크기 때문에 실용적인 추정이 곤란하므로 우리의 관심거리인 식생상부 경계층의 대기특성, 즉 국지기후 추정에 쏠린다.

주어진 중규모 기후조건 하에서 임의 시점에 임의 장소의 국지기후를 정확히 추정하기 위해서는 이렇게 다양한 기후인자들의 영향정도를 모두 정량화 시켜야 한다. 하지만 기후인자들 사이의 복잡한 상호작용, 기후인자에 대한 기후의 비선형적 반응 등 현실적으로 넘어야 할 난관이 아직은 극복되지 않은 상태이다. 따라서 기후요소별로 가장 영향력이 큰 지형-지표특성을

선택하고, 이들을 중심으로 현실을 크게 단순화시킨 모형을 작성하는 것이 차선책이다. 최근에는 수평해상도 10~30m 급의 정밀 수치고도모형(digital elevation model, DEM)이 전국적으로 구축되었으며, 이를 이용한 사면 일사수광량 계산 및 매시 기온과 일 최고기온 예측모형, 냉기침강과 온난대효과를 구현한 일 최저기온 모형, 수치인구모형(digital population model, DPM)에 의한 도시효과 모의 및 이를 이용한 시골기온 복원모형 등이 속속 개발되었다(Chung *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2003; Chung and Yun, 2004).

이 강좌에서는 이들 가운데 일 최저기온, 최고기온, 시간별 기온 등 시간규모에 따른 기온의 공간변이를 추정할 수 있는 방법을 소개한다.

3.2. 일 최저기온 내삽모형

대류권 내에서 기온은 상층으로 갈수록 낮아지며 이를 건조공기의 온도 체감율 곡선, 즉 건조단열선(dry adiabats)으로 표현한다(Fig. 3). 하루 중 최저기온은 주로 해뜨기 직전에 관측되며 지표면의 복사냉각에 의해 일정 높이까지는 오히려 상층으로 갈수록 기온이 높아지는 소위 기온역전현상이 생겨 건조단열선이 활처럼 굽게 된다(그림의 점선). 만약 관측지점이 평지가 아니라 찬 공기가 흘러들어오는 낮은 지역에 있다면 주변으로부터 밀려드는 찬 공기에 의해 기온은 더욱 떨어진다(그림 좌측곡선). 표준기상관측소의 노장은 의도적으로 찬 공기가 흘러들어오지 않는 평지에 설치되므로 이러한 냉기집적효과는 없으며 이곳의 관측값을

기존의 방법으로 추정할 경우 아래쪽은 냉기집적에 의한 오차를 갖게 되고, 위쪽은 온난대 효과만큼 오차를 갖게 된다. 따라서 이 그림에 표현된 곡선을 모형화하면 일 최저기온의 합리적인 보정이 가능해진다.

이것을 기온의 공간내삽에 흔히 사용하는 거리지승역산가중(inverse distance squared weighting, IDSW) 모형으로 표현하면

$$T = \frac{\sum \frac{T_i}{d_i^2} + \left(z - \frac{\sum z}{d_i^2} \right) \Gamma^{-\epsilon_1 + \epsilon_2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

이 된다. 여기서 T_i 는 지점 'i'의 실측 기온, d_i 는 내삽지점으로부터 관측점 'i'까지의 거리, z 및 z_i 는 각각 내삽지점과 관측점 'i'의 해발고도, Γ 는 해발고도에 따른 기온감율, ϵ_1 과 ϵ_2 는 각각 냉기집적효과와 온난대효과이다. 이 식에 따르면 비관측지점의 기온을 IDSW 내삽에 의해 추정할 경우 추정오차의 많은 부분은 고도편차에 의해 발생하게 된다. 여기서 고도편차란 관측지점들의 해발고도(z_i)를 이용하여, 역시 IDSW 내삽에 의해 만든 "가상지형"과 비관측점의 실제고도(z)간 편차를 가리킨다. 고도편차에 의해 생기는 기온추정오차는 이 고도편차에 기온감율(T)을 곱해서 보정하는 방법으로 해소시킬 수 있는데, 나머지는 온난대효과와 냉기집적에 의한 영향을 정량화함으로써 줄일 수 있다.

3.2.1. 냉기유입량의 계산

공간해상도를 10m 급으로 높이면 웬만한 지형의 복잡성은 충분히 표현할 수 있으므로 표고차와 찬 공기 집적을 동시에 고려한 변형 IDW모형이 가능해진다. 이 장에서는 냉기집적효과의 모의를 위해 격자점별 냉기유입량 계산을 토대로 한 실용적인 방법을 제시한다. 냉기유입량의 계산과정은, 대상지역의 지형특성을 10m 해상도의 DEM으로 표현하고, 냉기의 흐름방향을 인접한 8개 격자점과의 최대 고도편차로부터 계산하며, 흐름방향으로부터 판정되는 유입격자점의 수를 적산하는 것으로 이루어진다(Fig. 4).

3.2.2. 모형의 정립

경남 하동군의 배 과원지대를 대상으로 이 모형의 모수를 도출하였다. 이 지역은 섬진강 중하류의 사질 토양에 온화한 기후로 예로부터 배 주산지로 알려져 왔는데, 봄철 만개기에 종종 서리피해를 입는 곳이다.

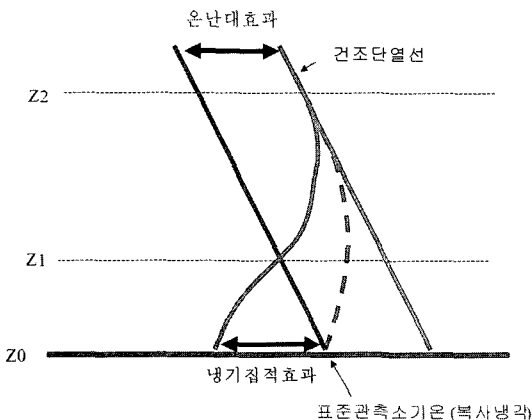


Fig. 3. Hypothetical profiles of minimum temperatures caused by the nocturnal radiative cooling.

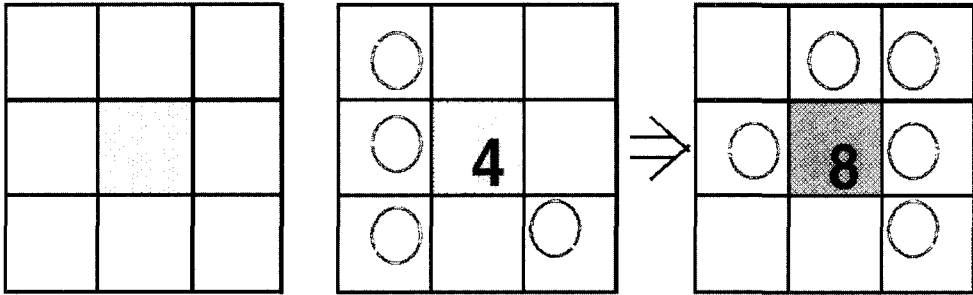


Fig. 4. Schematics for computation of flow direction and accumulation from a digital elevation model.

농업과학기술원에서 연구용으로 6개 지점에 HOBO를, 1개 지점에 AWS를 설치하였고, 원예연구소에서 AWS 1 개소, 경희대에서 8개 지점에 HOBO를 설치하여 운영하였다(Fig. 5).

기온 관측점에 대해 냉기유입량을 독립변수로, 기존 공간내삽법(고도보정 IDSW)에 의한 최저기온 추정오차를 종속변수로 둔 경험식을 도출한 바, 냉기집적에 의한 기온하강분은 냉기유입량(사방 5개 격자점의 평균값)의 상용대수에 비례하는 것으로 확인되었다.

같은 지점에서 경계층 기상관측용 계류기구(테더존데)를 이용한 야간 경계층 관측자료를 분석하여 온난대효과도 정확화 할 수 있었다. 따라서 미관측지점의 최저기온 추정값은 기존의 고도보정-IDSW에 의한 추

정오차를 다음과 같은 정의 온난대효과와 부의 냉기집적효과로 분할함으로써 크게 줄일 수 있었다.

$$\epsilon_1 = \left(\frac{R}{R_{max}} \right) \cdot \log_{10}(FA_5) \tag{2}$$

$$\epsilon_2 = \left(\frac{R}{R_{max}} \right) \cdot I_{max} [1 - \exp\{-0.03(Z-Z_1)\}] \tag{3}$$

여기서 R 은 일교차, R_{max} 는 일교차의 최대값으로서 18°C로 간주하였다. 온난대 효과에 의한 온도상승분의 최대값(I_{max})은 4°C 정도로 관측되었지만 매일 달라지는 값이다. 편의상 당일 기온 일교차의 상대비율에 직선적으로 비례한다고 가정하였다.

이 방법은 기상청 예보구역 혹은 자동기상관측지점 단위로 발표되는 일 최저기온자료를 이용하여 과원, 농경지 등 관심지역의 최저기온분포를 좀더 세밀하고 현실적으로 보여주는 용도에 쓰일 수 있다. Fig. 6은 실제로 이 모형을 하동군 만지의 과원지대에 적용하기 위해 각 격자점별 냉기 집적량을 계산한 것이다.

기존의 최저기온 공간내삽기법이 대개 통계모형 구동에 의해 비관측점의 추정값으로서 실측자료범위 안에 드는 “보수적인” 값을 제시하는데 그치지만, 우리가 사용한 방법은 통계적인 방법임에도 불구하고 기온 공간변이의 비선형성을 토대로 실측값의 범위를 벗어나는 공간극값의 추정이 가능하다. 예를 들어 하나의 과수주산단지든 동일한 시군으로서 기상청의 최저기온 예보 역시 같은 값이 발표된다. 그러나 늦서리에 의한 피해지역의 분포는 매우 다양할 수 있으며, 이 방법은 이러한 다양성을 표현해주는 좋은 수단이 될 수 있다.

3.2.3. 모형의 검증

이 방법이 당초 모형개발이 이루어졌던 경남 하동지역 뿐 아니라 타 지역에서도 이용할 수 있는지 여부

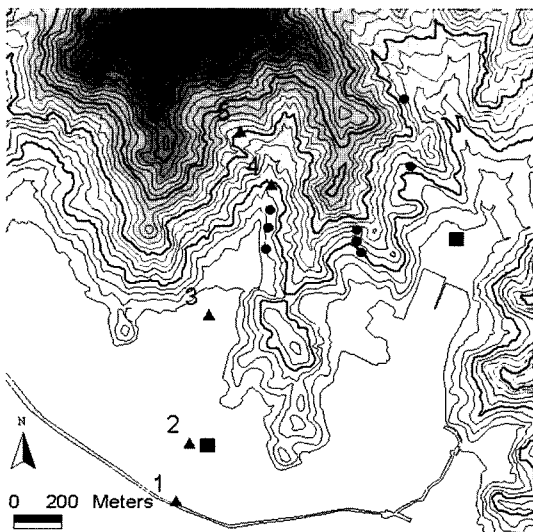


Fig. 5. Locator map for the Manji study area with locations of 8 micro-loggers for model development (circle) and 6 micro-loggers for the model validation (triangle).

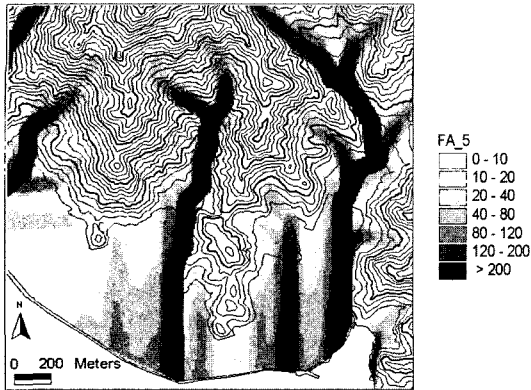


Fig. 6. A cold-air accumulation pattern over the study area represented by the flow direction and accumulation calculated from a 10m digital elevation model with 5 cell-radius smoothing.

를 알아보기 위해 경기도 연천지역에 이 모형을 적용해 보았다(Chung *et al.*, 2004). 연천군 차탄천 유역 4개 과원 후보지에 기온 관측장비를 설치하여 2004년 4월 1일부터 6월 30일까지 1분 간격으로 연속 측정하였다(Fig. 7). 사용된 센서는 로저 일체형 써미스터(Model HOBO H8 Pro, Onset Computer Corporation, U.S.A.)로서 제작사의 사양에 의하면 측

정오차가 -30°C 에서 $+50^{\circ}\text{C}$ 범위에서 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이며, 상온에서의 정확도는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이다. 4개 관측지점의 위치좌표를 위성측위계(Model GeoExplorer III 및 Pathfinder 2.80, Trimble Inc., U.S.A.)에 의해 측정하고 기준국(인천 팔미도)의 보정값으로 후처리하여 정확한 위치좌표를 얻었다.

기상 관측지점에 유입되는 냉기 집적량의 계산을 위해 한국수자원공사에서 제정한 840개 남한지역 수문단 위치도(Hydrologic Unit : HU) 가운데 4개 관측지점을 모두 포함하는 차탄천 수문단위(HU102214)를 계산범위로 하였다. 각 관측지점의 냉기 집적량을 환경부에서 제공한 30m DEM을 이용하여 계산하였으며, 선행연구(Chung *et al.*, 2003a)에서 최저기온 추정에 가장 효과적인 면적으로 밝혀진 셀 중심으로부터 반경 75m 범위의 냉기 집적량을 평활화 하였다(Fig. 8).

수집된 동두천 기상대 일 최저기온자료에, 기온관측지점의 표고와 동두천 기상대의 표고 간 편차를 감안한 표준대기 기온감률($-0.0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$)을 적용하여 4 지점의 기온을 추정하고 이를 고도보정기온으로 두었다. 이것이 현재 관행적으로 사용되는 기온추정법이다. 앞서 만들어 둔 평활화 냉기집적량 자료로부터 각 기상 관측지점의 찬 공기 집적량을 발취하고 그 상용대수를

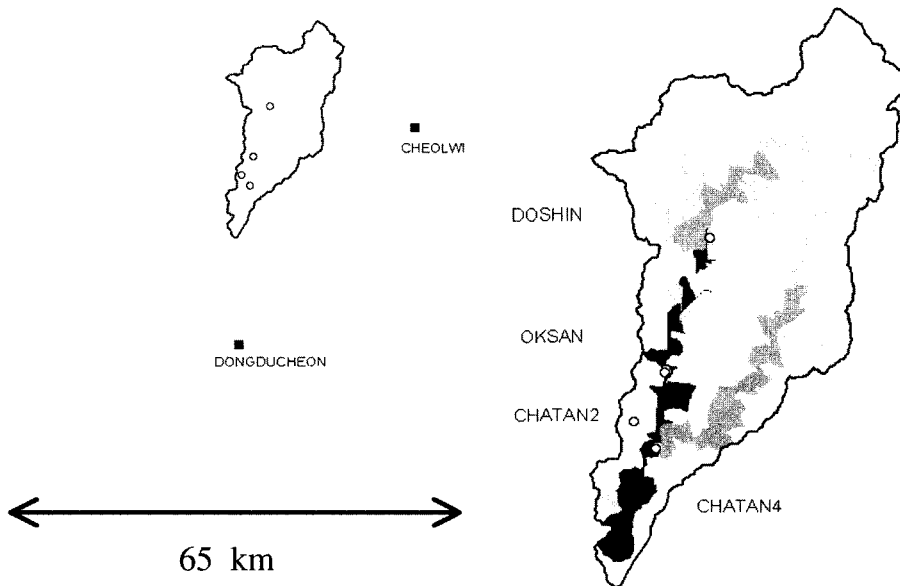


Fig. 7. Map of the study area with the location of 2 synoptic weather stations operated by Korea Meteorological Administration, Cheolwon and Dongducheon(left). The study area, which is one of the 840 standard hydrologic unit(HU) in South Korea, is subdivided into several small catchments(SHU) for calculating flow accumulation potential of 4 temperature measurement sites(right).

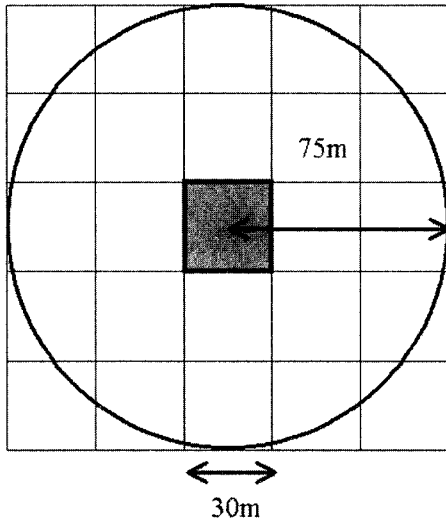


Fig. 8. A schematic description of the cell-based calculation and smoothing for the cold-air accumulation potential. Smoothing is done for the flow accumulation values of surrounding cells falling in the circle of 75-m radius from the center of the 30-m grid cell.

적용한 냉기침강 보정을 실시하였다. Chung *et al.*(2002)에 의하면 주변으로부터 유입되는 찬 공기 집적량(grid cell 단위)에 따른 최저기온의 하강폭은 1,000 cell에서 3°C, 100 cell이면 2°C, 그리고 10 cell이면 최고 1°C이다.

총 91일간 기온 관측자료 가운데 인근 동두천 기상대의 관측자료를 근거로 하여 강우가 없었던 45일간 자료만 분석대상으로 하였는데, 옥산리의 최저기온이 5°C 이하였던 12일간에 대하여 냉기보정방법에 의해 추정된 기온을 고도보정법에 의한 기온추정값과 비교한 것이 Fig. 9이다. 고도보정에 의한 추정값은 전체 범위에서 실측기온보다 2°C 가량 높은 값을 보이지만 냉기보정에 의한 추정값은 거의 일치하며, 특히 실측기온이 낮아질수록 더욱 정확해지는 경향이다. 이처럼 서리피해가 우려되는 저온영역에서의 높은 신뢰도는 이 방법이 실용적인 서리경보시스템 구축의 기반이 될 수 있음을 암시한다.

실제로 이 기간 중 동두천기상대 관측노장에서 3°C 이하로 기온이 떨어진 날은 4일이었지만 옥산리 과원 지대에서는 3일이 많은 7일이었다. 만약 과수농가에서 기상청 발표에 의존해서 상해 대비를 한다면 대상 지역 내 과원 중 옥산리와 같이 찬 공기 집적이 심한 곳에서는 이 기간 중 3번 정도 경고 없이 서리피해를

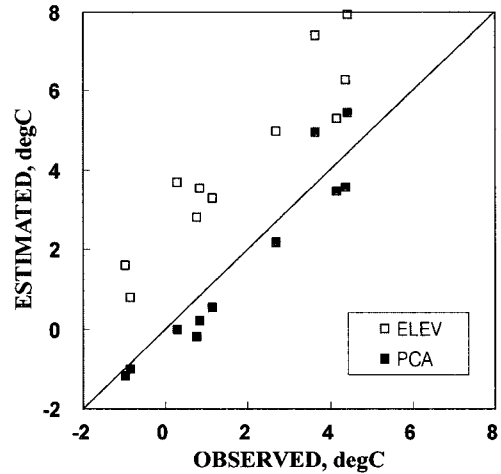


Fig. 9. Goodness of fit for the minimum temperature estimated by the potential cold-air accumulation(PCA) and the conventional elevation correction(ELEV). Selected data at Oksan site for days with minimum temperature below 5°C in spring 2004.

당할 수 있다는 뜻이다. 한편 관행적인 고도보정방법에 의해 동두천기상대의 공식 최저기온을 공간내삽하여 옥산리 과원의 기온을 추정된 결과 이 기간 중 단 3일만 3°C 이하로 내려갔다. 즉 관행적인 기온내삽법은 기상관서의 예보값과 별 차이가 없거나 오히려 더 못할 수도 있다. 반면 냉기모형을 적용하여 계산한 최저기온은 실측치와 거의 비슷하였을 뿐 아니라 7일 모두 정확히 3°C 이하의 서리피해 위험을 예측할 수 있었다. 이 결과로부터 당초 모형개발이 이루어졌던 경남 하동지역 뿐 아니라 경기 연천지역에서도 적용가능함을 알 수 있다.

3.3. 일 최고기온 내삽모형

3.3.1. BioSIM

일 최고기온의 추정모형 가운데 캐나다 산림청에서 개발한 BioSIM은 기존의 표고차 보정에 의한 방법에 비해 방법 자체가 매우 탁월하다(Regnier *et al.*, 1996). 이 모형에서는 일 최고기온의 결정에 고도 외에 한낮의 일사량이 중요한 역할을 하는데 착안하여, 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 영향정도

를 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

$$\varepsilon = v \cdot R \cdot \Delta T_R \quad (4)$$

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. 이 식에 의하면 일교차가 28°C인 맑은 날 경사면의 최고기온은 평지에 비해 4°C까지 높아질 수 있다. v 는 과열지수(overheating index)로 불리며, 4시간 동안 수평면 일사수광량(ϕ_0)과 경사면 일사수광량(ϕ)간의 차이를 표준화한 것이다 (Regniere, 1996).

$$v = \frac{\phi_r - \phi_0}{\Delta \phi_{\max}} \quad (5)$$

이 식에서 분모는 북반구에서 관측되는 수평면과 경사면간의 오후 4시간 동안 일사수광량 편차 가운데 최대값 (15 MJ m⁻²)으로서, 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.

3.3.2. 과열지수의 계산

과열지수 grid는 태양의 위치-사면 형태 사이의 기하학적 관계에 따라 연중 변화하므로 매일의 grid를 별도로 제작해야 한다. 경사면과 수평면 사이의 일사량 차이, 즉 식 (5)의 분모에 해당하는 값은 일사성분별로 계산할 수 있다. 우선 지표면에 도달하는 일사량은 대기외일사량(태양상수의 한 시간 적산값, S_0)으로부터 추정하는데, 이 때 관측지점의 태양고도(α)에 따라 직달성분(S_{b0}) 및 산란성분(S_{d0})으로 구분한다.

$$S_{b0} = S_0 \tau \frac{1}{\sin \alpha} \sin \alpha \quad (6)$$

$$S_{d0} = S_0 \left(0.271 - 0.294 \tau \frac{1}{\sin \alpha} \right) \sin \alpha \quad (7)$$

여기서 τ 는 태양복사의 대기 투과율 상한값으로서 대

기권 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.

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

$$S_{b1} = S_{b0} \frac{\{\cos \alpha \cos(\beta - b) \sin a + \sin \alpha \cos a\}}{\sin \alpha} \quad (8)$$

산란일사는 광학적 등방성(isotropy)이 적용될 수 있으므로 수광량은 수광면의 각도에 무관하며 천공의 개방도(sky view factor)에만 의존한다. 따라서 경사면의 산란일사 수광량은

$$S_{d1} = S_{d0} \cos^2 \left(\frac{a}{2} \right) \quad (9)$$

로 표현된다. 여기서 $\cos^2 \left(\frac{a}{2} \right)$ 는 1을 최대값으로 하는 sky view factor를 가리킨다.

두 가지 성분을 합치면 각각 수평면과 경사면이 받는 시간대별 일사량을 구할 수 있으며, 이들을 오전 11시부터 오후 3시까지 적산하여 양자의 차이를 계산한 것이 식 (5)의 분자에 해당한다.

그러나 과열지수 계산과정이 꽤 복잡하여 GIS 기술 없이는 넓은 지역에 실제 적용이 어렵기 때문에 BioSIM에서는 과열지수 대신 순수한 지형변수로서, 계산이 용이하고 한번 작성되면 연중 수정 없이 쓸 수 있는 개방도(Exposure Index, λ)를 이용한다. 중위도 지방에서 개방도와 과열지수의 관계를 2차함수로 표현할 경우 월별로 결정계수가 0.75 - 0.92 사이에 드는 것으로 보고 되었고, 다음 식으로 계산할 수 있다 (Regniere, 1996).

$$\lambda = a[c \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \cos(b - 15)] \quad (10)$$

여기서 ϕ 는 사면의 위도, a 는 사면 경사도, b 는 사면의 경사향이다. c 는 1 혹은 -1의 값을 갖는데, b 가 135보다 크고 255보다 작을 경우만 -1이며, 다른 경우에는 1이다. 경사향 b 에서 15도를 빼는 것은 과열지수 계산시 13:00 (정오로부터 15도)을 중심으로 11:00 - 15:00 시간대의 일사량을 적산하는 것을 감안한 것이다.

어떤 지점에 이 식을 적용하여 계산된 개방도 값이 0보다 크면 이 지점은 대체로 북향으로 많이 열려있고, 0보다 작으면 남향으로 열려있다고 생각할 수 있다. BioSIM에서는 개방도의 범위가 -45도에서 +45도까지 허용되는데, 모형구동 시 주어진 개방도 값을 만들어 내는 *a*와 *b*의 조합 8개를 찾아서 각각의 과열지수를 계산하고 이들을 산술평균하여 식 (4)에서 최고기온 보정에 사용한다.

하지만 Chung *et al.*(2003b)은 사면개방도를 과열 지수 대신에 우리나라 지형에 적용할 수 있는지 여부를 검토하기 위해 전라북도 순창군 동계면을 대상으로 사면 개방도와 과열지수를 각각 계산하여 비교한 결과, 지형이 복잡한 곳에서는 일 최고기온 추정시 과열지수 대신 사면개방도를 사용할 수 없다고 보고하였다.

3.4. 낮시간대 매시 기온의 내삽

3.4.1. 모형해설

기단, 해발고도 등 종관기상 조건이 동일한 지역에서 지점간 나타나는 국지기온의 차이는 주어진 순복사 에너지의 소모요인 가운데 현열의 크기에 의해 설명할 수 있다. 하지만 일사 수광량 가운데 어떤 비율만큼 현열로 소모되는지, 혹은 관측된 기온편차 중 과열 열마가 수광량의 차이에 기인한 것인지 알기 위해서는 보다 정밀한 미기상학적 관측이 선행되어야 한다. 더욱이 실용성을 염두에 둔 연구라면 현실세계에서 예상되는 모든 대기 및 지표조건에서 시공간적으로 방대한 실험을 수행해야 할 것이다. 이것은 현실적으로 불가능한 일이므로 본 연구에서는 대기 및 지표조건이 유사한 두 지점에서 기온과 일사 수광량을 시간대별로 측정해서 수광량의 차와 기온의 차 사이에 얻어지는 경험식을 이용하고자 하였다.

Chung and Yun(2004)에 따르면 비관측점의 IDW 내삽오차는 주로 관측점과의 고도편차 및 지형의 이질성, 두 가지 원인에 의해 생긴다. 관측점의 표고값만으로 복원한 '가상지형'으로부터 비관측점의 표고차를 얻어 여기에 기온감율을 적용하면 첫 번째 오차의 크기를 추정할 수 있다. 지형의 이질성은 바로 일사 수광량 차이를 유발하며 평지 관측점에 대한 경사지 비관측점의 현열 차이로 연결된다. 만약 일사량 차이를 기온의 차이로 변환할 수 있는 경험계수가 주어진다면 IDSW 내삽모형을 토대로 임의 비관측점의 기온내삽 오차를 정량적으로 표현할 수 있다.

$$T - \frac{\sum \frac{T_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} = \left[z - \frac{\sum \frac{z_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \right] \Gamma + \left[S - \frac{\sum \frac{S_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \right] \Delta + \varepsilon \quad (11)$$

여기서 *T*는 지점 '*i*'의 실측 기온, *d_i*는 내삽지점으로부터 관측점 '*i*'까지의 거리, *z* 및 *z_i*는 각각 내삽지점과 관측점 '*i*'의 해발고도, *Γ*는 해발고도에 따른 기온감율, *S*는 내삽지점의 경사도와 경사방위를 고려해 계산된 일사 수광량, *S_i*는 관측점 '*i*'의 실측 일사량, 그리고 *Δ*는 일사에너지의 기온당량, 즉 수평면과의 일사 수광량 차이를 기온변화량으로 변환하기 위한 계수이다. 고도와 지형인자만으로는 해석할 수 없는 나머지 오차가 *ε*이다.

식(11)의 좌변 두 번째 항은 IDSW 내삽에 의한 추정기온이며, 우변 첫 항의 괄호 안은 IDSW 내삽으로 복원한 '가상지형'과 실제 표고간 편차를 의미한다. 따라서 우변 첫 항은 해발고도의 국지적 변이로부터 생기는 오차를 나타내며, 표고차 보정에 이용될 수 있다. 두 번째 항의 괄호 안에 있는 계산식은 표준관측 지점 또는 수평면 전천일사량에 대한 경사면의 일사 수광량 차이를 나타낸다. 이유가 없는 조건이라면 지상 1.5m 높이에서 시간대별로 관측되는 기온값은 지표로부터 관측위치에 이르는 현열의 크기에 의해 결정되며, 다른 조건이 모두 같다면 지표 순복사에너지와 밀접한 관련이 있다. 낮시간대의 순복사에너지 경시변화는 거의 일사 수광량의 변화를 따르므로, 일사 수광량은 낮 시간 동안의 기온을 결정하는 매우 중요한 인자가 된다. 따라서 지형에 따른 일사 수광량 분포를 정확히 계산하고, 일사 수광량의 공간변이를 기온의 변이로 표현할 수 있는 적절한 변환계수 *Δ*를 찾아낸다면, 이 항은 지형의 복잡성에 기인한 오차를 보정하는데 이용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내의 주요 식생조건에서 변환계수 *Δ*를 찾아내고자 하였다.

기단, 해발고도 등 종관기상 조건이 동일한 지역에서 지점간 나타나는 국지기온의 차이는 주어진 순복사 에너지의 소모요인 가운데 현열의 크기에 의해 설명할 수 있다. 하지만 일사 수광량 가운데 어떤 비율만큼 현열로 소모되는지, 혹은 관측된 기온편차 중 과열 열마가 수광량의 차이에 기인된 것인지 알기 위해서는 보다 정밀한 미기상학적 관측이 선행되어야 한다. 더욱이 실용성을 염두에 둔 연구라면 현실세계에서 예상

되는 모든 대기 및 지표조건에서 시공간적으로 방대한 실험을 수행해야 할 것이다. 이것은 현실적으로 불가능한 일이므로 우선 대기 및 지표조건이 유사한 두 지점에서 연중 기온과 일사 수광량을 시간대별로 측정해서 일사 수광량의 차와 기온의 차 사이에 얻어지는 경험식을 이용하기로 하였다.

초지의 경우 제주도, 벼논의 경우 강원도 평창, 과수원(밭)의 경우 경북 봉화를 실험장소로 선택하였다(Fig. 10). 제주도는 한라산을 중심으로 남북으로는 경사가 급하고 면적이 좁아 기후나 식생에 차이가 크지만, 동서방향으로는 넓고 경사가 완만한 평지로 이루어져 있어 위도, 해발고도, 지표피복 등 관측여건이 유사하다. 동쪽(제동목장, 해발 380m)과 서쪽(이시들목장, 해발 350m)의 초지에 AWS를 설치하고 시간대별 자료를 수집하여 두 지점간 기온과 일사량 편차를 계산하였다. 주어진 시각에 관측된 임의의 두 지점간 기온 편차를 직전 한 시간 동안의 적산일사량 편차에 대응시켜 직선 회귀식을 얻으면 그 기울기가 일사기온당량 Δ 에 해당한다. 강원도 평창 지역에서는 농촌진흥청 고령지농업연구소 관할 6개 농업기상관측소에서 수집한

매시 기온과 일사량 자료를 토대로 이 값을 도출하고자 하였다. 경북 봉화의 경우 원예과학연구소에서 설치한 AWS로부터 매시 기온 및 일사량 자료를 수집하여 동일한 방법에 의해 변환계수를 도출하였다.

각 계절별 자료들 가운데 임의의 두 지점의 일사량 차이가 0.1 MJ m^{-2} 이상인 것만 발췌하여 그 시간대의 기온차를 구하여 비교하였다(Fig. 11). 일사기온당량은 지표식생 뿐 아니라 계절에 따라서 조금씩 차이를 보였다. 제주도 초지에서 얻은 변환계수는 겨울 1.6 , 여름 1.8 , 봄 $1.9^\circ\text{C/MJ m}^{-2}$ 로서, 기준점에 비대한 시간 동안 평방미터 당 일사 수광량이 1 MJ 증가함에 따라 기온은 기준점보다 $1.6\sim 1.9^\circ\text{C}$ 상승하는 것이 보통이라는 의미이다. 평창자료의 분석 결과 회귀식의 결정계수(r^2)는 $0.3\sim 0.5$ 정도로 높지 않으나, 겨울철(12, 1, 2월)에는 비교지점에 따라 $2.5\sim 3.0^\circ\text{C/MJ m}^{-2}$, 여름철(6, 7, 8월)에는 $1.3\sim 1.6^\circ\text{C/MJ m}^{-2}$ 로서 계절별로 뚜렷이 다른 값을 얻었다. 즉 겨울철에는 제주도의 초지에 비해 거의 두 배 가까운 값을 보였고, 여름에는 초지에 비해 오히려 약간 낮은 값을 보였다. 작물 생육기간 중 관개를 하는 점이 제주도의 초지와 다른데, 관개수의 증발잠열이 여름철의 낮은 값에 대한 하나의 이유가 될 것이다. 한편 겨울철의 높은 값에 대한 이유는 겨울에도 생장을 지속하는 제주도의 목초지에 비해 거의 나대지와 다를 바 없는 벼논의 지표특성에서 찾을 수 있을 것이다. 과수원의 경우 계절별 변이가 벼논보다 덜한데, 겨울에 $2.5\sim 2.9^\circ\text{C/MJ m}^{-2}$, 여름에 $0.9\sim 1.5^\circ\text{C/MJ m}^{-2}$, 그리고 봄 가을에는 $1.3\sim 2.2^\circ\text{C/MJ m}^{-2}$ 를 보였다.

본 연구에서는 각 식생에 대하여 계절별 평균값을 구하여 변환계수로 활용하였는데, 야외실험을 수행하지 못한 삼림에 대해서는, 활엽수림은 과수원에서 얻은 값을, 침엽수림은 초지에서 얻은 값을 준용하였다.

모형의 신뢰성을 검증하기 위해 지형특성과 자료 수집 가능성을 고려하여 경남 하동군 하동읍 만지리의 남북 2.1km , 동서 2.1km 구역을 선정하였다. 이 구역은 동일 집수역으로서 경사를 따라 벼논, 초지, 과수원이 혼재되어있으며, 농업과학기술원의 AWS 6개 및 경희대학교의 간이기온관측소 8개가 설치되어 매시 기온과 일사량을 관측하고 있다(Fig. 12). 간이기온관측소에는 로저 일체형 써미스터(Model HOB0 H8 Pro, Onset Computer Corporation, U.S.A.)가 설치되어있다. 이 지역으로부터 반경 50km 이내에는 모두

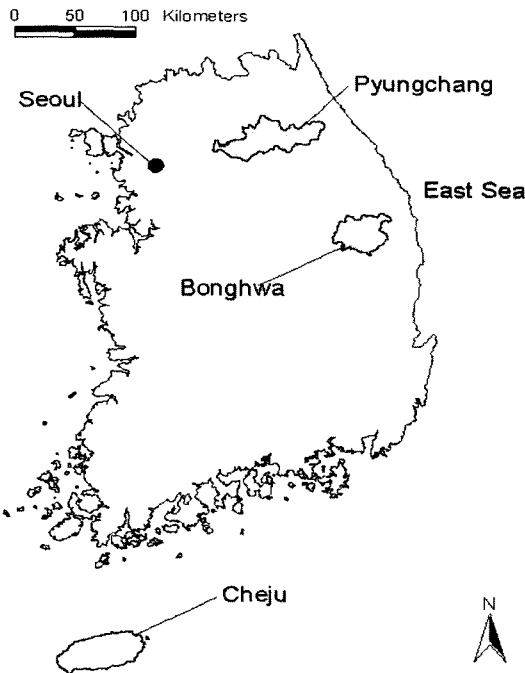


Fig. 10. Locations of 3 regions where the solar - thermal relationship was derived. Major land cover type for each region is rice paddy for Pyungchang, apple orchards for Bonghwa, and grasslands for Cheju.

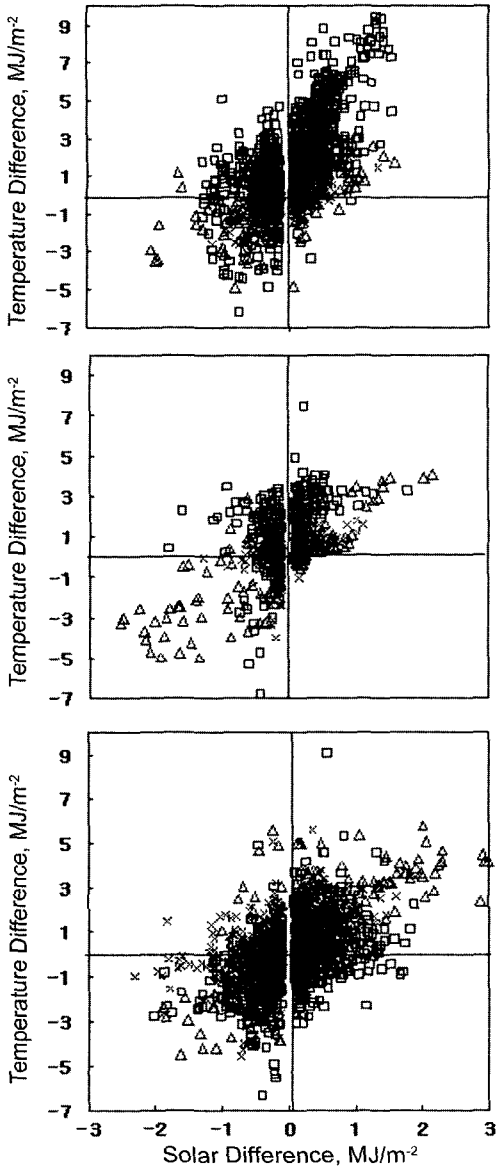


Fig. 11. Effects of solar irradiance difference at any two locations on the corresponding temperature difference in winter(December through February, top), in spring(March through May, middle), and in the summer season(June through August, bottom). Symbols represent rice paddy (□), orchards (×), and grasslands (△).

6개의 기상청 표준관측소가 위치하고 있다.

국립지리원으로부터 이 지역 25,000 : 1 수치지형도를 얻어 주곡선 layer로부터 TIN(triangulated irregular network) 표면을 생성하고, 이것을 10m 격자간격의 DEM 으로 변환하였다. 기상 지형은 6개

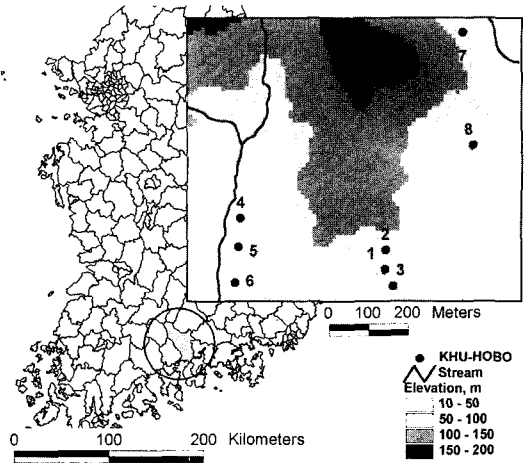


Fig. 12. Map of the Manji study area with the locations of 8 HOBO sites for the model validation.

표준관측소 고도값을 DEM과 같은 해상도로 IDSW 내삽에 의해 생성하였고, 준비된 10m DEM의 해발고도 면과 기상 지형의 해발고도 면의 차이를 구했다. 기온감율 T 는 $0.0065^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 를 사용하였다. DEM으로부터 경사도와 사면방위각을 계산하였고, 2002년 9월부터 2003년 8월까지 기간 중 임의의 90일을 선정하여 시간대별 태양고도 및 방위각을 이용해 지형에 의한 그늘지역(hill shade)을 찾았다. 이들을 관련 식에 대입하여 각 grid cell의 매시 일사량 3요소를 계산하였다. 지형에 기인한 오차의 보정량은 여름철 Δ 값에 수평면 일사량에 대한 각 grid cell의 일사량 편차를 곱하여 얻었다.

일사 수광량 보정이 된 최종 기온표면에서 기온관측 지점의 좌표에 해당하는 grid cell의 값을 추출하였다. 기온 검증관측지점의 지표 피복상태, 개방도 등 관측 여건이 표준화되어있지 않은 점을 감안하여 실측값과 계산값간 직접 비교 대신 8개 지점 가운데 임의의 두 지점간 기온편차를 비교하는 상대적인 방법을 선택하였다. 즉 간이장치에 의한 실측 기온값들은 국지성이 강하여 다른 지점들과 시공간적으로 함께 비교할 수 있는 “총관”(synoptic) 자료는 아니지만, 지점들 상호간의 기온편차는 항상 보존될 것으로 가정하는 것이다. 시간대별로 추정기온값의 28개 편차쌍을 계산한 다음, 실측값의 편차쌍 28개와 비교하였다. 대조값으로는 일사보정을 하기 전의 추정기온(거리역산가중에 고도차 보정만 실시)을 사용하였다.

추정된 기온차를 실측기온차와 일대일로 비교한 결과 상관계수 0.7 정도의 느슨한 관계를 얻을 수 있었다(Fig. 13). 그러나 이 정도의 상관이라 할지라도 관행적인 방법에 비하면 월등히 우수한 결과임을 알 수 있다. 기존의 방법대로 기온감율에 의한 고도차 보정만 실시할 경우 지점 상호간의 기온변이는 거의 찾기 힘들며, 따라서 실측편차와의 상관도 매우 낮다. 즉 이 모형을 이용하면 복잡한 지형에 의해 생기는 낮 시간대의 기온변이를 어느 정도 정확하게 예측할 수 있다.

3.5. 도시열섬효과의 보정

만약 농경지나 삼림이 도시와 인접해 있다면 지금까지 설명한 방법에 의해 추정된 기온자료에는 도시열섬(urban heat island, UHI) 효과가 포함될 수 있다. 우리나라의 경우 도시화 및 산업화에 의해 최근 50년간 종관자료 자체가 UHI 효과에 의해 왜곡되었음이 확인되었으므로(Chung *et al.*, 2004), 종관자료를 이용하는 공간내삽기술을 농림업 분야에 적용한다면 반드시 UHI의 영향을 제거해야 한다.

앞서 설명한대로 비관측지점의 기온을 IDSW 내삽에 의해 추정할 경우 추정오차의 많은 부분은 고도편차에 의해 발생하게 된다. 여기서 고도편차란 관측지점들의 해발고도(z_i)를 이용하여 역시 IDSW 내삽에 의해 만든 “기상지형”과 비관측점의 실제고도(z)간 편차를 가리킨다. 고도편차에 의해 생기는 기온추정오차는 이 고도편차에 기온감율(Γ)을 곱해서 보정하는 방

법으로 해소시킬 수 있다. UHI 효과 역시 관측지점의 “열섬효과”를 이용하여 IDSW 내삽에 의해 작성한 “가상열섬효과”로부터 비관측지점의 실제 “열섬효과”간 편차를 구하여 적절한 계수를 곱해줌으로써 표현할 수 있을 것이다. 예를 들어 “열섬효과”의 크기를 인구의 자연대수로 표현할 수 있다면, 기온의 IDSW 내삽모형은 다음 식으로 고쳐 쓸 수 있다(Choi *et al.*, 2003).

$$T = \frac{\sum \frac{T_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} + \left[z - \frac{\sum \frac{z_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \right] \Gamma + \text{LOG} \left[p - \frac{\sum \frac{P_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \right] \Pi \quad (12)$$

- T_i : observed temperature at station ‘ i ’,
- d_i : distance from the site to station ‘ i ’,
- z : elevation of the site
- z_i : elevation of the station ‘ i ’
- Γ : temperature change per unit change in the elevation
- P : population of the site
- P_i : population of the city where station ‘ i ’ locates
- Π : an empirical conversion coefficient for urban heat island effect

식 (12)에서 도시열섬효과를 모의하기 위한 “인구”는 행정구역단위의 전체인구나 인구밀도와는 다른 뜻

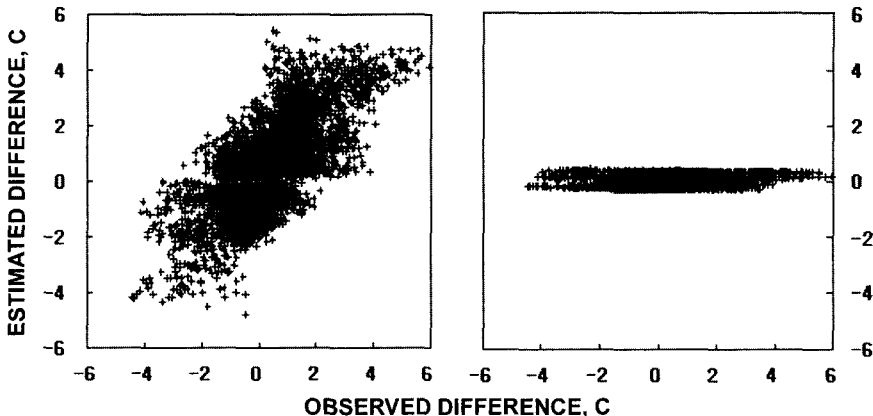


Fig. 13. Temperature difference between any pair of 8 validation sites estimated by solar irradiance - corrected(left) and conventional lapse rate - corrected(right) interpolation in the Manji area for randomly selected 90 days. Estimated differences are plotted against observed difference.

을 갖는데, 공간내삽과정에서 자연스럽게 확산되는 도시열섬효과와 표현을 위해서는 시·군의 인구를 행정구역이 아닌 규칙적인 격자점 단위로 변환하는 작업이 필요하다. 이 작업을 위해 필요한 것은 환경부에서 제작한 전국의 지포피복도(시가지, 농지, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역)를 30m×30m의 정방형 격자 단위로 분류)와 통계청의 인구자료이다. 도시지역일지라도 녹지나 산림은 제외하고 순수하게 주거지역, 상업지역, 도로 등 도시열섬효과를 창출할 수 있는 지역만을 발췌하기 위해 지포피복도로부터 피복분류상 “시가지”에 해당되는 픽셀만을 추출하였다. 다음에는 통계청으로부터 제주도를 제외한 서울특별시와 6대 광역시(부산, 울산, 대구, 대전, 인천, 광주), 그리고 시·군의 인구 자료를 수집하여 행정자치부에서 작성한 시·군 행정구역수치지도에 속성정보로 부가하였다. 다음에 ‘시가지’ 피복 위에 행정구역수치지도를 중첩시키고 해당 시·군 면적에 포함되는 시가지 픽셀(30m×30m)을 카운트한 다음, 시·군 인구를 해당 시가지 픽셀 수로 나누어 시가지 픽셀 하나 당 평균 인구, 즉 “시가지 인구밀도”를 시·군별로 계산하였다. “시가지인구밀도”는 각 시군별로 고유의 값을 갖는다. 다시 ‘시가지’ 피복 위에 시군 행정구역지도를 중첩시키고 시군 행정구역 형상의 속성정보인 “시가지인구밀도”를 곱해 줌으로써 한반도에서의 실제 인구 분포를 ‘디지털’ 값으로 바꾸어 표현하였다. 이 디지털 인구분포도는 농경지, 산림, 하천, 호수는 물론, 도시 안의 초지나 나대지 등도 제외하고 실제 사람이 살고 있는 지역을 대상으로 평균인구를 30m 간격의 픽셀로 나타낸 것이다. 계산편의를 위해 이들 평균인구 픽셀 9개씩을 묶어서 90m×90m 픽셀로 변환하고 이를 수치인구모형(digital population model, DPM)이라 명하였다. 그 결과 DPM 한 개 픽셀당 최대 510명까지 인구를 갖는 것으로 나타나며 이는 평당 0.2명(1km² 환산시 6만 명)에 이르는데, 고층 아파트 밀집지역이 여기에 해당될 것이다.

한편, 도시열섬효과는 중심점의 인구뿐만 아니라 주변 픽셀들의 인구에 의해서도 영향을 받는다. 기온관측값의 경우 관측소가 위치한 단 하나의 픽셀이 아니라 이 관측소를 둘러싼 각 방위별 주변 픽셀에 의해서 생기는 열섬효과가 반영된다는 점을 고려해야 한다. 그러나 얼마나 많은 주변픽셀들이 영향을 주는지 명확히 밝혀져 있지 않다. 따라서 식 (12)의 인구 ‘P’는

DPM 자체가 아니라 반경 500m, 1,500m, 2,500m, 3,500m 및 5,000m 이내의 DPM을 합한 값으로 대치하고, 이들과 도시열섬효과간의 관계를 탐색하였다. 원래의 DPM을 반경 500m, 1,500m, 2,500m, 3,500m 및 5,000m로 각각 평활화(smoothing)할 경우 오염물질의 확산처럼 인구밀집도가 붙어지는 동시에 그 영역이 확대되는 것을 볼 수 있다(Fig. 14).

기상청 소속 56개 표준기상관측소 가운데 무작위로 25개를 선택하여 관측소가 포함된 픽셀의 인구(DPM)를 반경별로 하나씩 추출하고, 이를 “실제인구”로 삼았다. 이들 인구자료를 이용하여 IDSW 내삽에 의해 가상인구지도를 역시 반경별로 생성하였다. 56개 기상관측소 위치 가운데 나머지 31개 지점에 해당되는 픽셀의 가상인구를 읽고 이들의 실제인구를 DPM으로부터 추출하여 그 차이를 “인구편차”로 간주하였다. 기상청에서 발행한 ‘한국기후표’로부터 1971년부터 2000년까지 56개 지점에서 관측된 평년의 월별 일 최저기온자료를 수집하여 이들 중 25개소의 자료를 이용해 단순 IDSW 및 고도보정 IDSW 내삽법으로 남한 전역의 월별 추정기온을 250m 해상도로 계산하였다. 나머지 31개 기상관측소 위치의 픽셀을 동정하고 추정기온을 추출한 다음, 이들 지역에서 실제로 관측된 기온값과의 편차, 즉 추정오차를 계산하였다. 추정오차를 반경별 인구편차값에 회귀시켜 회귀식을 도출하였다. 이때 독립변수로 사용된 인구편차는 자연대수로서, 인구편차값이 0보다 작은 경우, 즉 가상인구가 실측인구

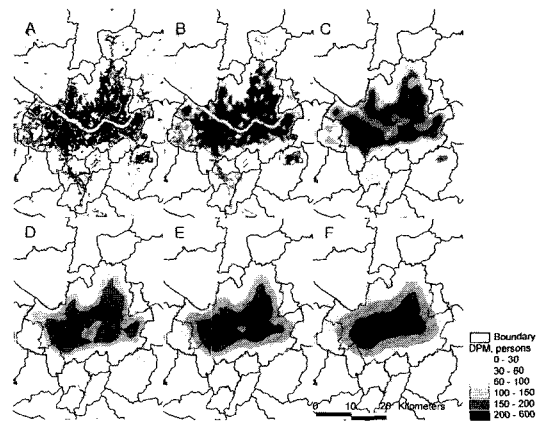


Fig. 14. (a) Population distribution pattern simulated by the 90-m DPM for the Seoul metropolitan area. Also shown are the DPM surfaces smoothed for the radial extent of (b) 500m and (c) 1.5, (d) 2.5, (e) 3.5, and (f) 5 km.

(DPM)에 비해 적은 곳은 제외하였다.

표준기상관측소 56개소 중 순차적으로 한 곳씩을 제외한 나머지 55개 지점으로 구성된 일 최저기온 자료세트 56개를 준비하였다. 다음에 55개소 표준기상관측소의 해발고도를 이용하여 가상의 해발고도표면을 생성하고 월별 기온감을값을 곱하여 해발고도 보정값을 생성하였다. 여기에 단순내삽을 하여 추정된 초기 기온표면에 해발고도 보정값을 빼어 해발고도가 보정된 월평균 일최저기온 표면을 얻었다. 5개 반경별 DPM 가운데 앞서 선발된 최적회귀식에 해당되는 DPM으로부터 55개 지점의 픽셀인구를 추출하였다. 추출된 인구값을 이용하여 IDSW 내삽에 의해 가상의 인구표면을 만들고 실제 인구와의 편차를 계산하였다. 인구편차의 자연대수를 취한 후, 최적회귀식에 대입하여 기온보정값을 월별로 산출하였다. 가상 DPM과 실제 DPM을 비교하여 가상인구가 큰 경우에는 해발고도보정 기온에 도시열섬효과 보정량을 빼고, 작은 경우에는 더해줌으로써 최종 기온표면을 생성하였다.

고도편차 보정과 도시열섬효과 보정이 완료된 일 최저기온 표면으로부터 기온추정에서 제외된 나머지 한 개 기상관측소 위치의 픽셀값을 추출하고 실제기온과 비교하여 추정오차를 산출하였다. 이러한 방법으로 월별로 각각 56개씩의 추정오차 세트를 획득하였다. 비교를 위해 단순 IDSW 내삽 및 고도보정 내삽에 의한 기온표면에도 동일한 과정을 적용하였다. 이 방법의 신뢰성은 각 추정값 세트의 ME(Mean Error), MAE(Mean Absolute Error), RMSE(Root Mean Squared Error)를 비교함으로써 검증하였다.

반경 500m, 1,500m, 2,500m, 3,500m 및 5,000m로 평활화한 DPM의 31개 지점 편차(자연대수)에 기온추정오차를 회귀시켜보면 연중 결정계수가 가장 높게 나타나는 것은 반경 2,500m임을 알 수 있다 (Fig. 15A). 500m, 1,500m, 3,500m는 현저히 낮은 결정계수를 보이며, 2,500m와 5,000m를 비교하면 한 후기에는 양자가 비슷한 값을 보이나 난후기에는 2,500m 반경에서 평활화 한 경우가 높다. 이것은 DPM을 반경 2,500m 정도로 평활화 한 변수가 도시 열섬효과를 가장 잘 표현할 수 있음을 의미한다.

결정계수의 계절적 변동을 보면, 평활화 반경에 관계없이 겨울철에는 낮고 여름철에는 높아지는 경향이 있다. 즉, 여름철에는 도시열섬효과에 의해 일최저기온 추정오차의 많은 부분을 설명할 수 있지만 겨울철에는

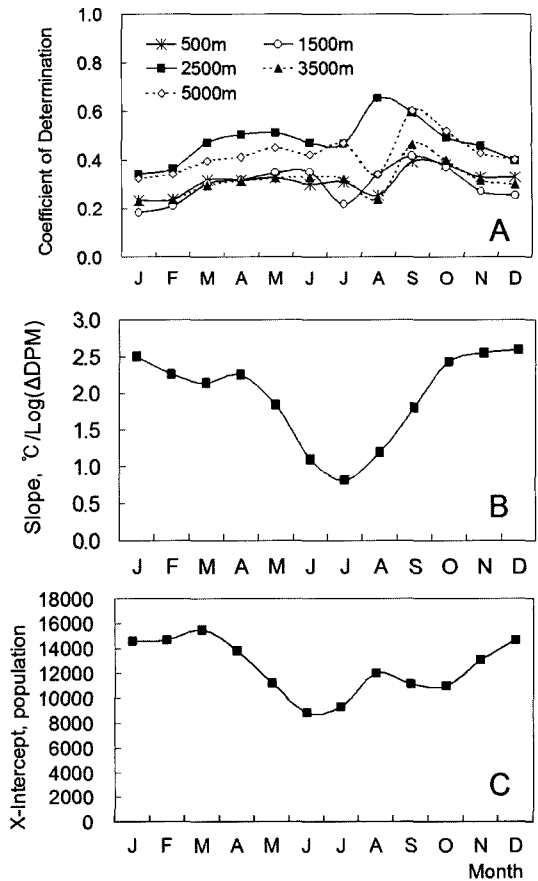


Fig. 15. (a) Seasonal variation in the coefficient of determination (r^2) for the regression equations with different smoothing. The (b) slope of regression coefficient and the (c) x-axis intercept for the regression equation with the 2.5-km smoothing radius.

여름철보다는 그 영향이 상대적으로 적다는 것이다. 반경 2,500m일 때의 월별 회귀식을 보면, 결정계수가 가장 높은 달은 8월로 0.653이었으며 가장 낮은 달은 1월로 0.342였다. 즉, 8월은 기존방법(고도보정 IDW)에 의한 일최저기온 추정오차의 65%를 도시열섬효과를 보정함으로써 제거할 수 있지만, 1월은 그 절반인 34%만을 제거할 수 있음을 의미한다. 하지만 추정오차의 절대값이 여름철보다는 겨울철에 훨씬 크다는 사실을 상기하면 겨울철 열섬효과 보정이 기여하는 바가 적다고는 할 수 없다. 또한 이미 잘 알려진 겨울철에 크고 여름철에 작은 도시열섬효과 계절별 강도와 이 실험의 결과와는 전혀 무관하다. 실제로 회귀식의 기울기는 겨울철에 오히려 크고 여름철에 작음을 알 수 있

다(Fig. 15B). 여기서 기온기는 인구편차에 따른 기온의 변화이므로, 같은 인구편차에 의해 나타나는 도시열섬강도라 할지라도 겨울철에는 큰 반면 여름철에는 작음을 의미한다. 즉, 인구편차가 10,000명이라 하면 기온기가 큰 12월은 0.4°C가 변하는 반면에 기온기가 작은 7월은 0.02°C로서 거의 변화가 없음을 의미한다.

회귀식의 x축 절편은 기온변화에 영향을 주지 않는 인구의 규모로서 시골과 도시를 구분하는 기준인구라고 할 수 있다. 겨울철에 14,000명 정도이며 여름철에는 8,000명 정도로서 평균 12,000명이다. 바꾸어 말하면 도시열섬효과는 반경 2,500m내의 상주인구가 최소한 12,000명 이상은 되어야 나타난다고 할 수 있다(Fig. 15C).

일 최저기온 추정과 관련된 많은 보고에서 예외 없이 겨울철의 추정오차가 여름철보다 훨씬 크게 나타난다. DPM을 토대로 한 도시열섬효과 모형에 의해 계산된 최저기온 추정값의 오차 역시 1월에 가장 커서 RMSE로 표현하여 1.33°C이며 가장 작은 달은 0.37°C의 7월이었다. 대조구인 단순내삽이나 고도보정내삽의 계절변동과 유사하지만 추정오차의 범위는 연중 1°C 내외로 현저하게 감소하였다(Fig. 16).

이 방법은 한반도 지표피복도와 수치지형도 등 용이하게 구할 수 있는 공간정보를 기존의 인구통계자료와 적절히 결합함으로써 DPM 개념을 구현하고, UHI 효과를 성공적으로 모의함으로써 향후 다양한 분야의 활용가능성을 시사한다.

IV. 소기후정보의 활용

소기후모형의 활용이 가장 기대되는 분야는 기후변화의 농림업 영향평가 쪽이라고 할 수 있다. 그 가운데서도 기후변화가 생물계절에 미치는 영향은 소기후모형의 1차적인 활용분야이다. 사실 현재까지 관찰된 기후변화 가운데 가장 뚜렷하며 앞으로도 그 변화경향을 가장 확실하게 예상할 수 있는 것은 기온뿐이다. 한편 다양한 생태계 반응을 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 나무의 새순이 돋아나는 시기는 주로 온도가 결정짓는데, 먼저 겨울 동안의 저온이 내생휴면으로부터 식물이 깨어나도록

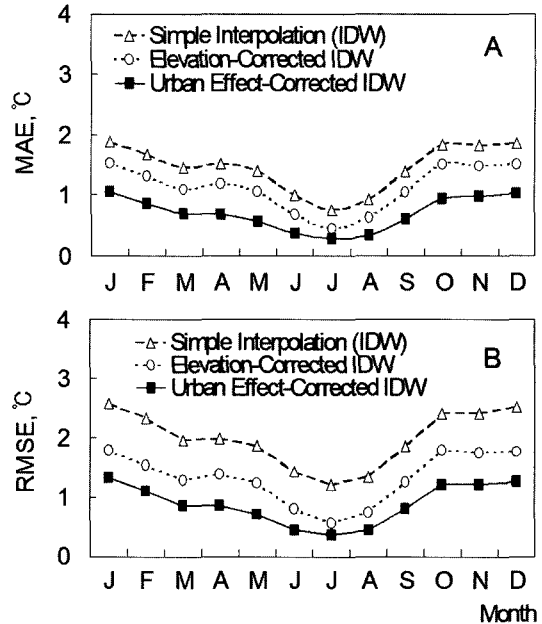


Fig. 16. Seasonal change in (a) MAE and (b) RMSE of the estimated temperature by the DPM-based urban heat island effect model. Results of existing methods (a simple IDSW and the elevation-effect corrected IDSW) are shown for comparison.

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 소기후모형에 의해 가시화되며, 향후 기후변화 대응전략 수립에 훌륭한 길잡이가 될 것이다. 생물계절 반응이 밝혀진 다음에 기후시나리오에 따른 농작물의 생육 및 수량반응을 연구하는 것이 순서이다.

기후변화를 감지할 수 있을 정도의 기상관측소는 종관기상관측망(synoptic observation network)에 속하며 관측소 간 거리가 평균 30km 이상이다. 하지만 기후변화의 충격을 직접 받는 농작물의 재배규모는 이보다 훨씬 작은 수백 m 이내이며 대규모 농업지대에서도 대개 1km 미만이다. 즉 영농차원에서는 작물의 생장 반응은 최소한 수백 m 이내, 가능하면 수십 m 이내의 공간해상도로 판별할 수 있어야 실용성이 있다. 당연히 기온 정보도 같은 수준의 공간해상도를 가져야 하지만 현재의 역학적 down-scaling 기술수준에서 제공할 수 있는 기후변화 정보의 공간해상도는 종관망과 마찬가지로 30km 정도가 그 한계이다.

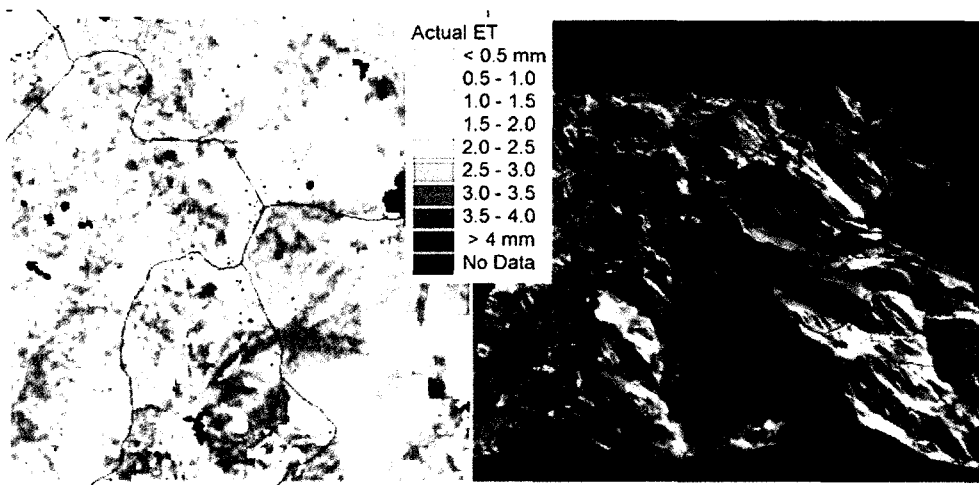


Fig. 17. Daily accumulated evapotranspiration for the study area of 6 by 6 km at a 30m resolution on 31 July 2003. Right panel is the same data superimposed with the 3-dimensional terrain of the study area. Flux tower locations are represented by vertical red lines.

기상관서에서 발표되는 기온자료의 공간해상도를 높이기 위한 연구는 두 방향에서 추진되어왔다. 기상감시위성 혹은 환경/자원탐사위성에 탑재된 원격의선 센서를 이용해 지표면 및 대기로부터 복사되는 장파복사 에너지를 측정하여 온도를 추정할 수 있다. 최근에는 상업용 고해상도 위성이 등장하여 실용화 전망이 더욱 밝아졌지만 아직은 위성의 재방문 주기와 그 때의 날씨 등 미해결점이 많고 무엇보다도 사용자의 접근성이 나쁘다는 치명적인 결점을 갖고 있다. 다른 방법은 기상관서의 저해상도 기온자료를 토대로 공간내삽에 의해 추정하되, 대상지역의 지형, 지표피복, 고도 등 소기후 결정인자를 고해상도로 준비하여 내삽과정에 활용하는 것으로서, 앞에서 이미 언급한 내용들이다.

지금까지 논의된 소기후 추정방법은 이미 여러 분야에서 활용되기 시작하였다. 한국농림수산정보센터(AFFIS)가 소기후모형의 초보적인 기술을 이용하여 기상청 예보를 바탕으로 읍면별 상세날씨를 만들어 전국의 농민들에게 제공한지 벌써 5년이 흘렀다. Yun (2003)은 이렇게 매일 만들어지는 읍면 단위 기상자료를 작물모형 CERES-rice에 입력시켜 남한의 벼 작황을 진단하고 쌀생산량을 예측하는 데 이용하였다. 경기도 농업기술원에서는 한걸음 나아가 북한 서부지대의 남한 벼품종 적응성 평가에 이 기술을 활용하였다 (Kim *et al.*, 2002). 소기후모형과 작물모형의 결합은 벼 외에도 콩의 재배적지 판정에도 사용되었는데, 경

기북부농업시험장에서는 경기도 연천군의 청정환경을 이용한 콩 재배단지 조성을 위해 이 방법을 이용하였다(Kim *et al.*, 2004). 과수분야의 소기후모형 활용은 식량작물에 비해 그 역사가 훨씬 오래 되었는데, 최근에는 고품질 사과 생산에 적합한 지역을 30m 공간해상도로 검색할 수 있는 시스템이 영주, 봉화, 의성, 예산, 장수 등 주산지를 대상으로 개발되었다(Kwon *et al.*, 2004). 아직은 품질-기후 모델링 분야가 취약하여 소기후 정보를 충분히 활용하기 어렵지만 오늘 행사와 같은 모델링 연구 활성화를 통해 향후 과수산업에 크게 기여할 수 있을 것으로 본다. 병해충 예찰 분야는 시간별 기상자료의 활용에 있어 거의 유일한 성과를 내고 있는데, 기존에 축적된 식물병 혹은 해충 발생예측기술이 타 분야에 비해 풍족하며 농업경영측면에서 직접효과가 크기 때문이다. 최근의 느닷없는 “웰빙바람”과 함께 친환경농산물에 대한 수요증대는 앞으로 병해충 관리에서 기상정보의 중요성을 더욱 부각시킬 것이다.

덧붙여 시간별 기상자료를 이용한 증발산 추정 등 식생관련 정보의 생산은 기상, 환경, 토목 등 농업 이외의 분야에서 다목적으로 이용될 수 있다. Fig. 17은 소기후모형에 의해 추정된 광릉수목원 부근 매시 기상자료(공간해상도 30m)를 토대로 SVAT 모형이 예상한 2003년 7월 31일 하루 동안 실제증발산의 분포이다 (Yun *et al.*, 2004).

감사의 글

이 강좌는 2004년 11월 3일 서울대학교 농업과학 공동기기센터에서 열린 “농업생산 의사결정지원 모델링 연구현황과 발전방향” 워크숍에서 발표한 내용을 간추린 것이다. 워크숍을 주관한 농촌진흥청 농업경영 정보관실에게 감사드린다.

인용문헌

- 원에연구소, 2003: 복숭아 동해위험지대 구분. 원에시험연구 사업연보(2002) pp 31.
- 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., J. Choi, J. I. Yun, 2004: Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951-1980 and 1971-2000 in Korea. *Climatic Change* **66**, 127-136.
- Chung, U., B. S. Hwang, H. H. Seo, and J. I. Yun, 2003b: Relationship between Exposure Index and Overheating Index in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(3), 200-207
- 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. H. Seo, and J. I. Yun, 2004: Site-specific frost warning based on topoclimatic estimation of daily minimum temperature. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(3), 164-169.
- Chung, U, H. H. Seo, J. I. Yun, and K. H. Lee, 2003a: An optimum scale for topoclimatic interpolation of daily minimum temperature in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(4), 261-265.
- Chung, U., and J. I. Yun, 2004: Solar irradiance - corrected spatial interpolation of hourly air temperature in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 129-139.
- 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.
- Holdaway, M. R., 1996: Spatial modeling and interpolation of monthly temperature using kriging. *Climate Research* **6**, 215-225.
- Kim, S. K., J. S. Park, Y. S. Lee, H. C. Seo, K. S. Kim, and J. I. Yun, 2004: Development and use of digital climate models in northern Gyunggi Province II. Site-specific performance evaluation of soybean cultivars by DCM-based growth simulation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(1), 61-69.
- Kim, Y. H., H. D. Kim, S. W. Han, J. Y. Choi, J. M. Koo, U. Chung, J. Y. Kim, and J. I. Yun, 2002: Using spatial data and crop growth modeling to predict performance of South Korean rice cultivars grown in western coastal plains in North Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**(4), 224-236.
- Kwon, E. W., 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**(3), 170-176.
- 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., J. I. Yun, and A. S. Suh, 1999: Estimation of daily maximum and minimum temperature distribution over the Korean Peninsula by using spatial statistical technique. *Journal of the Korean Society of Remote Sensing* **15**(1), 9-20.
- Yoo, I. S., D. H. Choi, and S. H. Yun, 1996: Agroclimatic zones for rice cultivation in North Korea. *Korean Journal of International Agriculture* **8**(3), 206-215.
- 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., 2003: Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agricultural Systems* **77**, 23-38.
- Yun, J. I., and K. H. Lee, 2000: Agroclimatology of North Korea for paddy rice cultivation : Preliminary results from a simulation experiment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **2**(2), 47-61.
- Yun, J. I., J. C. Nam, S. Y. Hong, J. Kim, K. S. Kim, U. Chung, N. Y. Chae, and T. J. Choi, 2004: Using spatial data and land surface modeling to monitor evapotranspiration across geographical areas in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(3), 149-163.