

공간통계기법을 이용한 전국 일 최고/최저기온 공간변이의 추정

신만용* · 윤진일** · 서애숙***

국립대학교 산림자원학과*, 경희대학교 생명자원과학 연구원/농학과**, 기상청 수원기상대***

Estimation of Daily Maximum/Minimum Temperature Distribution over the Korean Peninsula by Using Spatial Statistical Technique

Man-Yong Shin*, Jin-Il Yun**, and Ae-Sook Suh***

Department of Forest Resources, Kookmin University*, Institute of Life Science and Natural Resources/
Department of Agronomy, Kyung Hee University**, Suwon Meteorological Office, KMA***

Abstract : The use of climatic information is essential in the industrial society. More specialized weather services are required to perform better industrial activities including agriculture. Especially, crop models require daily weather data of crop growing area or cropping zones, where routine weather observations are rare. Estimates of the spatial distribution of daily climates might complement the low density of standard weather observation stations.

This study was conducted to estimate the spatial distribution of daily minimum and maximum temperatures in Korean Peninsula. A topoclimatological technique was first applied to produce reasonable estimates of monthly climatic normals based on 1km × 1km grid cell over study area. Harmonic analysis method was then adopted to convert the monthly climatic normals into daily climatic normals. The daily temperatures for each grid cell were derived from a spatial interpolation procedure based on inverse-distance weighting of the observed deviation from the climatic normals at the nearest 4 standard weather stations. Data collected from more than 300 automatic weather systems were then used to validate the final estimates on several dates in 1997. Final step to confirm accuracy of the estimated temperature fields was comparing the distribution pattern with the brightness temperature fields derived from NOAA/AVHRR.

Results show that differences between the estimated and the observed temperatures at 20 randomly selected automatic weather systems(AWS) range from -3.0°C to +2.5°C in daily maximum, and from -1.8°C to +2.2°C in daily minimum temperature. The estimation errors, RMSE, calculated from the data collected at about 300 AWS range from 1.5°C to 2.5°C for daily maximum/minimum temperatures.

Key Words : topoclimatological technique, daily maximum/minimum temperature, inverse distance weighting

요약 : 농업을 비롯한 산업활동을 효율적으로 수행하기 위해서는 전문 기상정보의 활용이 필수적이다. 영농활동에 있어서 의사지원시스템의 핵심으로 떠오르고 있는 작물 성장모형은 부단히 변화하는 대기환경에 대한 공간정보를 요구하기 때문에, 모형의 실용화를 위해서는 기상 관측밀도가 낮은 광범위한 작물 생육지역을 대상으로 일별 기상요소에 대한 공간분포를 추정해야 한다. 이러한 취지

에서 본 연구는 미관측 지점을 포함하는 우리 나라 전국을 대상으로 작물모형의 구동에 필요한 최소 기상요소들 중에서 일 최고 및 일 최저기온의 공간적인 분포를 추정하고 그 추정 精度를 검증하고자 하였다. 이를 위해 먼저 58개 지점의 23년간 실측 기온자료로부터 지형기후학적 방법에 의하여 격자단위의 월별 기온평년값을 추정하고, 조화해석법에 의하여 일별값으로 변환하였다. 66개 기상청 관측소에서 수집된 일의 날짜의 최고/최저기온값과 관측소 해당 격자점의 평년값간 편차를 구한 다음, 미관측 격자점을 포함하는 한반도 전역의 기온 편차를 거리역산가중법에 의하여 내삽·추정하였다. 각 격자점의 최종적인 기온 추정값은 기온 평년값에 이 편차를 더함으로써 얻었다. 얻어진 온도 분포는 위성자료로부터 추정된 지표온도분포 양상과 크게 다르지 않았다. 300 여개의 자동기상관측 장비들로부터 수집된 자료와 비교한 결과, 추정오차는 $1.5^{\circ}\text{C} \sim 2.5^{\circ}\text{C}$ 였다.

주요어 : 지형기후학적 기법, 일 최고/최저 기온, 거리역산 가중법

I. 서론

오늘날의 세분화된 산업사회에서는 각 분야의 전문 기상정보의 활용이 필수적이다. 기상자료의 관측밀도가 낮은 산립이나 농촌지역의 농업 활동에는 미관측 지점에 대하여 필요한 기상정보를 얼마나 정확하게 추정하여 사용할 수 있는가 하는 점이 중요하다. 특히 농업분야에서는 기상자료가 작물의 생육상황과 병충해 발생 등, 농업생태계 반응을 예측할 수 있는 중요한 정보로 활용된다. 이는 대기환경과 농업생태계의 상호작용에 대한 정확한 정보가 개별 농가의 영농관리대책으로부터 국가의 농정시책에 이르기까지 농업상의 의사 결정에 매우 중요한 수단이기 때문이다. 결국 작물 재배지역에 대한 국지기상을 정확하게 추정하여 이를 작물 생장모형에 적용한다면 농업기상 감시 및 농작물 작황정보 생산의 토대를 마련할 수 있을 것이다. 하지만 작물 생장모형은 부단히 변화하는 대기환경에 대한 공간정보를 요구하기 때문에, 작물 생육지역을 대상으로 최소한 몇 가지 일별 기상요소에 대한 실시간 공간분포 추정이 요구된다.

지금까지의 미관측 지점에 대한 기상정보는 주로 조사 지점 근처의 기상관측소 자료를 이용하는 것이었고, 최근에 자동기상관측장비(Automatic Weather System : AWS) 자료를 활용하려는 움직임이 있으나, 미관측 지점을 포함하는 작물 재

배구역의 국지기후를 정확히 예측하기에는 역시 관측밀도가 낮은 문제가 있는 것이 사실이다. 그물망 기후추정법(Nakai, 1990)은 미관측 지점에 대한 국지기상 실황을 일정한 격자단위로 추정할 수 있는 통계적 방법으로 우리 나라에서도 최근에 많이 활용되고 있다(윤 등, 1989; 과학기술처, 1992; 신과 윤, 1992; 신과 천, 1996; 윤 등, 1997). 이 기법은 미관측 격자점을 포함하는 국지 기상정보를 추정하기 위하여 전국 70 여개의 정규기상관측소가 설치된 격자의 지형인자와 실측 기후치로부터 지형-기후 관계식을 도출·적용함으로써 월별 기후치별 평년값을 제공하는 것이다. 이러한 정보를 작물모형에 적용하기 위해서는 각 격자점별로 얻어진 월별 기후치 12개로부터 365개의 일별 기후치로 변환한 후, 정규기상관측소에서 수집된 일 기상자료와 미관측 격자점과 정규기상관측소간의 거리가중치를 고려한 공간통계기법에 의하여 공간변이가 추정되어야 한다. 또한 그 실용성이 검증되어야 하는데 공간적 기상분포의 패턴을 비교적 정확하게 표현하는 기상위성자료나 현재 전국적으로 약 380개소의 AWS에서 수집되고 있는 자료가 기상 실황치의 검증에 적합한 독립자료로 활용될 수 있다.

본 연구는 이러한 취지에서 미관측 지점을 포함하는 우리 나라 전국을 대상으로 작물모형의 구동에 필요한 최소 기상요소들 중에서 일 최고 및 일 최저기온의 공간적인 분포를 추정하고 그 추정 精度를 검증하고자 하였다.

II. 자료 및 방법

1. 일 최고/최저기온의 월별 공간분포의 산출

도서 지방을 제외한 남한 내 정규기상관측소 중 1973년부터 1995년까지 23년간의 자료가 모두 관측되어 있는 58개 기상관측소로부터 월별 일 최고/최저기온 평균값을 한국기후표를 이용하여 월별·관측소별로 정리하였다.

이들을 토대로 남한 전역에 적용할 수 있는 월별 일 최고/최저기온의 지형기후학적 평년값 계산식을 도출하기 위하여, 기온값이 수집된 정규 기상관측소가 위치한 지점에 대하여 국지기온값에 영향을 미치는 총 17 종류 162개 지형변수를 정량화하였다(과학기술처, 1992; 신과 윤, 1992; 수자원공사, 1993). 지형인자를 정량화하기 위하여 필요한 해발고도 자료는 USGS(United States Geological Service)에서 제공한 GTOPO30 DEM(Digital Elevation Model)으로부터 북위 34~39°까지와 동경 126~130°까지의 범위에서 매 30 arc second(약 900m) 간격으로 고도값을 발췌하였다. 이 범위에 포함되는 남북방향 600개, 동서방향 480개의 총 288,000개 격자별 해발고도 자료를 이용하여 58개 정규기상관측소를 포함하는 격자점을 중심으로 사방 2'30"(약 4.5km) 범위까지의 격자점에 대한 지형변수를 계산하였다.

정규기상관측소를 포함하는 격자(grid cell)의 월별 기온평년값과 해당 격자점의 정량화된 지형자료를 이용하여 월별 지형-기온 최적 중회귀식을 선택하였다. 월별 평년기온값 추정회귀식은 최소자승법을 이용한 다중선형회귀분석 기법에 의하여 작성하였으며, 월별·기온별 최적 독립변수의 조합을 선택하기 위하여 전향선택법을 채택하였다. 이와 같이 얻어진 24개의 월별 최고/최저기온 추정식을 기상관측소가 없는 미관측 격자에 적용시키기 위하여 전 국토를 대상으로 30' 격자단위의 지형인자를 정량화했다. 일부 지형인자는 사방 5개 격자(2'30")의 지형을 고려하므로 최종적으로 정량화된 격자점은 남북방향 590개, 동서방향 470

개로 총 277,300개이며, 각 격자점에 대하여 모두 162개씩의 지형인자를 수치화하여 파일로 저장하였다. 이상과 같이 수치화된 지형인자를 위에서 얻은 평년 최고/최저기온값 산출 회귀식 모형에 대입함으로써 남한 전역 격자점별 일 최고기온과 일 최저기온의 월별 공간분포를 산출하였다.

2. 격자점별 일 최고/최저기온 추정

위에서 얻은 각 격자점별 12개 달의 기온자료를 통합하여 조화해석법(清野, 1993)에 의하여 월별 최고 및 최저기온 평년값을 추정하였다. 이 방법은 주기가 1/6~1년의 6개 사인곡선의 합으로 기후값을 표현할 수 있는 것으로 판정하여, 월별 기온값 12개로부터 365개의 일별 기온으로 변환하는 것이다. 결과적으로 도서지방을 제외한 남한내 277,300개의 격자점을 대상으로 평년의 일별 최고/최저기온 공간분포를 생산하였다.

임의날짜의 최고/최저기온을 추정하기 위해 전국 정규기상관측소 중에서 제주도와 울릉도 등 일부 도서지방에 설치된 관측소를 제외한 총 66개 지점으로부터 1997년 한 해 동안 관측된 일 최고기온과 일 최저기온 자료를 기상월보로부터 수집하였고, 관측소 포함 격자의 일별 최고/최저기온 실측값과 위의 방법으로 구한 평년의 같은 날 기온과의 편차를 토대로 277,300개 전체 격자의 편차분포를 거리역산가중(Inverse Distance Weighting)에 의해 추산하였다(식 1).

$$d_0 = \sum_{j=1}^n [(T_j - A_j) (1/R_j)] / \sum_{j=1}^n (1/R_j) \quad (1)$$

여기서, d_0 = 대상 미관측 격자점의 기온 편차값, T_j = j 번째 기상관측소의 기온 실측값, A_j = j 번째 기상관측소 해당 격자점의 기온 평년값, R_j = 미관측 격자점에서 j 번째 기상관측소까지의 거리이다. 한편 식 (1)에 의하여 추산된 각 격자점별 편차값을 앞에서 얻은 해당 격자의 평년 기온값에 더하여 각 격자점별 일별 최고/최저 기온값을 산출하였다(식 2).

$$T_0 = d_0 + A_0 \quad (2)$$

여기서, T_0 = 해당 격자점의 일별 기온 실태값, 그리고 A_0 = 미관측 격자점의 기온 평년값이다. 결과적으로 일 최고/최저기온에 대하여 각각 365개(1월 1일부터 12월 31일까지)씩의 일별 기상실태 추정 파일이 만들어졌다.

3. 기온 추정값의 검증

1) AWS 자료에 의한 검증

기상청 산업기상과로부터 수집한 1997년 전국 380개소 AWS 자료를 독립자료로 간주하여 위의 방법으로 보정된 해당 격자점의 기온 추정값과 AWS 자료를 비교하여 추정값 자체의 정확도를 검증하였다. 미관측 격자점 중에서 AWS 자료가 존재하는 격자를 대상으로 실측 기온자료를 앞의 방법으로 계산된 기온실태 자료와 1 : 1 비교를 하는 것이다. 이를 위하여 같은 날 AWS에 의해 관측된 제주도 등 도서지방을 제외한 전국 300여 개 지점의 일 최고/최저기온값을 수집하고 아래 식 (3)에 의하여 추정오차인 RMSE(Root Mean Squared Error)를 계산하여 정확도를 판정하였다.

$$RMSE = [\sum(Y_e - Y_o)^2/N]^{0.5} \quad (3)$$

여기서, Y_e = 추정된 일별 기온값이고 Y_o = AWS에 의하여 수집된 실측 기온값이다.

2) 위성자료를 이용한 기온분포 패턴의 비교

위의 방법에 의하여 얻어진 일별 최고/최저기온 분포는 국지기온의 결정인자 가운데 지리지형 특성만 고려된 것으로서 농경지, 산림, 주거지역 등 지표특성의 영향은 무시되었다. 이러한 조건에서 얻어진 기온분포 양상이 과연 실제분포와 얼마나 다른지 알아보기 위해 공간 분해능이 약 1.1km 인 극궤도 기상위성자료(NOAA/AVHRR)를 이용하여 지표면 온도를 산출, 본 연구에서 얻어진 일별 기온실태와 분포패턴의 유사성을 비교하였다. 이 위성의 오전궤도 자료는 일 최저기온, 그리고 오후궤도 자료는 일 최고기온 분포와 밀접한 관계가 있다. 수신된 위성자료로부터 정확한 지표 온

도값을 산출하기 위해서는 기하보정과 복사량 보정의 전처리 과정을 거쳐야 한다. 기하보정은 왜곡이 있는 영상으로부터 그 왜곡을 제거하는 것으로 영상의 픽셀좌표(i, j)와 대상물의 지리좌표(θ, ϕ)와의 대응관계를 좌표변환식을 통해 재배열 및 내삽을 실시하는 것이다. 위성에 탑재된 AVHRR 센서로 측정된 복사량은 실제 대상물의 분광반사율 또는 분광반사 휘도값과 일치하지 않는다. 따라서 원시자료(C)에 G 및 I 보정계수값을 이용하여 복사량(N) 값을 산출하였다. 전처리 과정을 거친 후 복사에너지(N)로부터 온도 T(K)를 산출하기 위해 Planck 공식을 이용하고, 복사량이 센서에 도달하기까지 대기에 의한 흡수와 산란 영향을 제거하는 대기보정은 Price(1983)의 방법을 적용하였다. 최종적으로 default 상태인 polar stereographic map projection의 픽셀값을 경위도 좌표계로 변환하였다.

앞에서 얻어진 일별 기온 분포의 패턴을 위성자료와 비교하기 위해 작물 생육기간 중 임의의 날짜를 계절별로 선택하였다. 1997년도에 수신된 위성자료를 예비적으로 판독하여 구름이 없는 맑은 날 자료만을 선택하였다. 여기에는 3월 24일의 최고기온과 최저기온, 7월 22일의 최고기온, 7월 23일의 최저기온, 그리고 9월 8일의 최고기온과 최저기온이 포함되었다.

NOAA/AVHRR에 의한 온도는 지표면을 흑체로 간주하여 얻은 것이므로 지상 관측소에서 측정된 기온과 상당한 편차를 보이는 것이 현실이다. 따라서 격자점별 기온값을 직접 비교하기보다는 분포패턴의 유사성을 비교하기 위해 먼저 전체 격자점으로부터 얻은 해당 날짜의 기온평균치와 표준편차를 이용하여 표준화시켰다(식 4).

$$Z = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (4)$$

여기서, Z=표준단위, x_i =i 번째 격자의 기온값, \bar{x} =전체 격자점의 평균치, 그리고 s=표준편차이다. 한편 각 격자점별로 일별 기온 추정값과 위성자료간에 차이가 있는지를 통계적으로 검증하기 위하여 표준단위로 변형된 자료를 이용하여 t-검정

을 실시하였는데 사용된 통계량은 식 (5)와 같다.

$$t = \frac{\bar{D}}{s\bar{D}} \quad (5)$$

여기서, \bar{D} = 표준화된 격자점별 기온 추정치와 지표 흑체온도 차이를 평균한 값이고 $s\bar{D}$ = 표준화된 격자점별 기온차의 표준오차이다. 기온분포 패턴의 유사성을 검증하는 통계적 기법은 일단 두 자료간의 분포패턴을 확률에 근거하여 비교하는 것으로, 본 연구에서 작성된 기온 추정모형의 적합성을 간접적으로 검증한다는 것 외에는 큰 의미가 없다. 하지만 위성자료는 해당 날짜의 기온 공간분포 패턴을 비교적 정확하게 보여준다고 가정할 수 있어, 만일 t-검정을 통하여 기온 분포 패턴의 유사성이 입증된 경우에는 본 연구에서 사용된 기온 추정모형이 월별 기온의 공간분포를 추정하는데 문제가 없는 것으로 간주할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 최고/최저기온의 기후학적 평년값

한반도 전역에 적용할 수 있도록 지형기후학적 추정기법에 의하여 얻어진 월별 일 최고/최저기온의 최적 다중회귀식은 표 1과 같다. 이 식들에 의하면 일 최고기온은 총 8개의 지형변수에 의해 결정되는데, 월별로는 2~3개의 지형변수만이 채택되었다. 추정능력을 나타내는 결정계수(R^2)는 월별로 0.68~0.86의 범위에 있는데 겨울철이 다른 계절에 비하여 상대적으로 낮은 추정능력을 보이고 있다. 추정식에 포함된 지형변수 중에서 해발고도(ELEV)는 모든 달의 일 최고기온에 영향을 미치고 있다. 이는 해발고도가 높아짐에 따라 일정한 비율로 일 최고기온이 감소하고 있음을 나타내는 것으로, 특히 겨울철이 다른 계절에 비하여 감소의 폭이 큼을 알 수 있다. 다음으로 중요한 지형변수는 방위별 개방도로 북사면개방도(OPNP11)가 4월과 6월을 제외한 10개의 달에서 일 최고기온에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

월별 일 최고기온에 영향을 미치는 다른 지형변수로는 육도(LDR)와 해안거리(CODI)로 각각 6달과 3달의 추정식에 관여하고 있다.

일 최저기온의 경우에는 총 10개의 지형변수가 월별로 영향을 미치고 있는데, 거리에 따른 평균표고(AVAL) 또는 해발고도가 모든 달에 영향을 미치고 있다. 평균표고는 해발고도를 변형시킨 변수이기 때문에 일 최고기온과 마찬가지로 해발고도가 올라감에 따라 일정한 비율의 기온감율이 월별 최적식에 의하여 설명되고 있음을 알 수 있다. 다음으로 중요한 지형변수는 육도(LDR)로 9개 달에 영향을 미치고 있고, 다음은 북사면개방도(OPNP11)가 6개 달의 일 최저기온을 추정하는데 사용되고 있다. 월별로는 2~4개의 지형변수가 영향을 미치고 있으며 결정계수는 0.66~0.90으로 여름철의 결정계수가 다른 계절에 비하여 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 특히 1월과 3월을 제외하고는 모두 0.8 이상을 나타내 일 최저기온의 추정식은 비교적 잘 작성된 것으로 판단할 수 있다.

월별 최고/최저기온 회귀식을 이용하여 제주도 등 도서지방을 제외한 전 국토를 대상으로 30" 격자단위(약 900m) 남북방향 590개, 동서방향 470개로 총 277,300개의 격자점에 대한 월별 평년값이 추정되었다.

2. 일별 최고/최저기온 추정값

일별 기온 평년값은 각 격자점별 12개 달의 자료를 통합하여 조화해석법에 의해 월별 기온값 12개로부터 365개의 일별 기온으로 변환한 것이다. 일본의 연구결과(河野 등, 1984)에 의하면 조화해석법을 이용하여 구해진 일별 평년치는 30년 정도의 장기간일 경우 0.2~0.3°C의 오차범위에 있다고 한다. 이 기법을 이용하여 일별 최고/최저기온 평년치를 추정하여 총 730개의 파일로 저장하였다. 이 과정에서 일별 기온값의 자료는 좌측 상단을 기준으로 남쪽과 동쪽의 방향으로 각각 3개씩(약 2.7km), 즉 9개의 격자를 묶어 그 평균치를 기록·저장하였다. 이는 본 연구의 목적이 단위계배 구역별 국지기상에 대한 정보를 추정하기 위한 것

Table 1. Monthly regression equations of maximum/minimum temperature by topoclimatological relationships.

Month	Monthly Regression Equations of Maximum Temperature	R ²
January	Tmax 1 = 10.3316-0.0081*ELEV-0.0187*CODI-0.0529*OPNP11	0.71
February	Tmax 2 = 11.9416-0.0086*ELEV-0.0521*OPNP11-0.0058*CODI	0.71
March	Tmax 3 = 16.1665-0.0076*ELEV-0.0443*OPNP11	0.67
April	Tmax 4 = 17.8189-0.0057*ELEV+0.0472*LDR4	0.80
May	Tmax 5 = 21.6286-0.0054*ELEV+0.0544*LDR5-0.0319*OPNP11	0.86
June	Tmax 6 = 22.4424-0.0060*ELEV+0.0675*LDR5-0.0200*OPEP12	0.73
July	Tmax 7 = 27.6326-0.0063*ELEV+0.0511*LDR3-0.0307*OPNP11	0.79
August	Tmax 8 = 30.5850-0.0078*ELEV+0.0418*LDR3-0.0419*OPNP11	0.78
September	Tmax 9 = 29.7881-0.0038*ELEV-0.0864*OPNM15-0.0392*OPNP11	0.74
October	Tmax 10 = 26.2322-0.0078*ELEV-0.0519*OPNP11	0.76
November	Tmax 11 = 19.3978-0.0080*ELEV-0.0126*CODI-0.0527*OPNP11	0.70
December	Tmax 12 = 13.1341-0.0101*ELEV-0.0579*OPNP11	0.68
Month	Monthly Regression Equations of Minimum Temperature	R ²
January	Tmin 1 = 1.8797-0.0103*ELEV-0.0800*LDR5	0.66
February	Tmin 2 = 9.6402-0.0126*AVAL5-0.0527*LDR5-0.0569*OPNP11-0.0260*OPWP13	0.82
March	Tmin 3 = 4.7387-0.0074*ELEV-0.0399*LDR5-0.0120*CODI	0.79
April	Tmin 4 = 15.6395-0.0085*AVAL5-0.0365*LDR5-0.0567*OPNP11	0.85
May	Tmin 5 = 16.0119-0.0089*AVAL5-0.0226*LDR5-0.0361*OPPI5+0.0146*OPSP15	0.82
June	Tmin 6 = 20.0629-0.0077*ELEV-0.0356*OPNP11+0.0108*OPWM05	0.89
July	Tmin 7 = 24.9643-0.0072*ELEV-0.0385*OPNP11+0.0105*OPWM05	0.90
August	Tmin 8 = 27.6238-0.0087*AVAL5-0.0568*OPNP11+0.0051*OPWM05	0.88
September	Tmin 9 = 25.6709-0.0100*AVAL5-0.0317*LDR5-0.0634*OPNP11	0.86
October	Tmin 10 = 16.6362-0.0108*AVAL5-0.0671*LDR5-0.0108*OPNP15	0.80
November	Tmin 11 = 9.5503-0.0094*AVAL5-0.0700*LDR5	0.85
December	Tmin 12 = 4.0516-0.0101*AVAL5-0.0717*LDR5	0.82

*Independent variables used in regression equations :

ELEV : Elevation of a grid cell (m).

CODI : Linear distance to the nearest coast from a grid cell (km).

AVAL5 : Average elevation of the 11x11 grid cells with the base cell at the center.

LDR3, LDR4, LDR5 : Ratio of the grid cells falling on land (above 0 elevation) to the total cells of (2R+1) square grid; R is 3, 4, and 5 cell radius.

OPXPhR : Ratio of the X-directional (2R+1) cells whose elevations are not higher than the center cell by h x 100m; X is N(north), S(south), E(east) and W(west), respectively.

OPXMhR : Ratio of the X-directional (2R+1) cells whose elevations are lower than the center cell by h x 100 m.

OPPI5 : Ratio of (2R+1)²-1 cells constituting (2R+1) grids on one side except the center cell, whose elevations are not higher than the center cell by 100m. In this case, R is 5 so total 120 cells except the center one are used for calculation

이기 때문에, 추정능력을 훼손하지 않는 범위 내에서 자료를 단순화하여 계산과 분석의 효율성을 높이기 위함이다. 따라서 하나의 파일은 남북방향으로 197개, 동서방향으로 157개의 격자로 구성되어 있다.

임의의 날짜에 대한 일별 최고/최저기온 추정

값은 식 (1)과 (2)에 의하여 한반도 전역의 각 격자점별로 추산하였다. 표 2는 임의로 선택된 10개 격자점을 대상으로 1997년 9월 8일의 기상관측소 실측치와 기상관측소 해당 격자점의 평년 기온값, 그리고 10개의 미관측 격자점에서 가장 가까운 4개의 기상관측소까지의 거리 등을 이용하여 해당

Table 2. Minimum temperature estimates of September 8 for randomly selected 10 grid cells.

Coordinates		Variables*														
X	Y	A _i (°C)				T _i (°C)				R _i (Km)				A ₀ (°C)	D ₀ (°C)	T ₀ (°C)
		A1	A2	A3	A4	T1	T2	T3	T4	R1	R2	R3	R4			
134	122	18.4	17.9	18.9	17.8	18.3	17.0	14.6	15.5	3.0	16.0	23.2	30.6	16.1	-0.7	15.4
37	112	17.7	17.6	18.1	18.0	15.3	19.4	18.5	16.8	3.0	12.7	17.5	21.0	18.6	-1.3	17.3
26	36	17.4	17.2	18.3	13.9	18.2	19.6	20.7	14.2	17.9	24.7	25.0	27.1	18.7	1.4	20.1
14	82	17.7	18.3	16.9	17.7	16.3	20.7	16.3	18.0	8.6	23.7	26.0	28.2	18.0	-0.3	17.7
73	34	16.8	13.9	18.3	16.8	15.8	14.2	16.6	14.7	10.8	20.0	28.3	30.0	14.9	-1.0	13.9
25	45	17.4	18.3	17.2	17.7	18.2	20.7	19.6	18.0	9.9	16.0	18.4	27.8	18.4	1.5	19.9
20	115	17.6	18.0	17.7	17.7	19.4	16.8	15.3	16.3	10.0	17.9	18.0	26.0	19.0	-0.3	19.6
57	50	16.8	16.8	13.9	17.2	14.7	15.8	14.2	19.6	11.4	13.4	16.5	19.3	16.9	-0.4	16.5
141	176	19.9	17.9	20.7	17.8	19.9	17.0	20.4	15.5	38.3	38.8	44.4	46.8	14.7	-0.8	13.9
22	156	17.9	17.3	17.2	18.0	20.8	19.2	16.6	16.8	13.0	13.3	22.0	25.7	13.9	1.2	15.1

*A_i: Calculated minimum temperature of station i on September 8 in normal year.

T_i: Observed minimum temperature of station i on September 8 in 1997.

R_i: Distance to the station i from grid cell(x, y).

A₀: Calculated minimum temperature of grid cell on September 8 in normal year.

D₀: Deviation between the normal estimate and the observed minimum temperature of grid cell.

T₀: Estimated minimum temperature of grid cell on September 8 in 1997.

격자점의 9월 8일 최저기온을 추정하는 과정을 나타낸 것이다.

거리역산가중치를 이용하여 격자점의 기온을 정밀하게 추정하기 위해서는 각 격자점별로 30km 이내에 존재하는 4~6개의 기상관측소 정보가 필요한 것으로 알려져 있다(淸野, 1993). 표 2에서 보면 무작위로 선택된 10개 격자점에서 최단거리에 있는 4개의 기상관측소까지의 거리(R_i)는 1개의 격자점(X=141, Y=176)을 제외하고 대부분 30km 이내에 존재하여 문제가 없는 것으로 나타났다. 현재 우리 나라 전국에 분포한 기상관측소의 수가 70여개에 불과한 현실에서 이 공간통계기법을 효율적으로 이용하기 위해서는 각 격자점별로 4개 이상의 기상관측소를 선택하는 것은 무리가 있을 것으로 보인다. 1997년 9월 8일의 최저기온 실측치(T_i)와 해당 격자의 평년값(A_i)의 편차와 거리를 고려하여 임의로 선택된 10개 격자점에서 계산된 기온 편차값은 -1.3~1.5°C의 범위에 있는 것으로 나타났다. 이 편차를 평년값에 더하여 얻은 10개 격자점의 1997년 9월 8일 최저기온은 13.9~20.1°C로 추정되었다.

그림 1은 한반도 전역의 9월 8일의 최저기온 평년값 분포와 거리역산가중치에 의하여 추정된 1997년 9월 8일의 공간분포를 비교한 것이다. 조화해석법에 의하여 일별 기온자료로 변환된 9월 8일의 최저기온은 바다 및 도서지방을 제외한 총 19,060개의 격자에 대하여 평균 16.5°C를 나타내고 표준편차는 2.0°C이다. 반면에 거리역산가중치에 의하여 추정된 1997년 9월 8일의 최저기온 분포는 평균 15.4°C로 평년치에 비하여 1.1°C 낮아진 반면, 표준편차는 0.7°C 올라간 2.7°C를 기록하여 평년값보다 격자점별 변이의 폭이 다소 증가하였음을 알 수 있다. 이러한 다소간의 편차는 평년값과 1997년의 실측값을 적용하여 추정한 공간분포의 당연한 차이로 해석되며, 그 차이가 큰 의미를 가지는 것은 아니나 그림에서 보는 바와 같이 전체적인 9월 8일 최저기온의 공간분포 변이는 평년값과 추정치 간에 다소 다른 분포를 보이고 있다.

2. 기온 추정값의 실용성

1) AWS 자료를 이용한 검증

이상과 같이 추정된 일별 기온실황 분포는 정

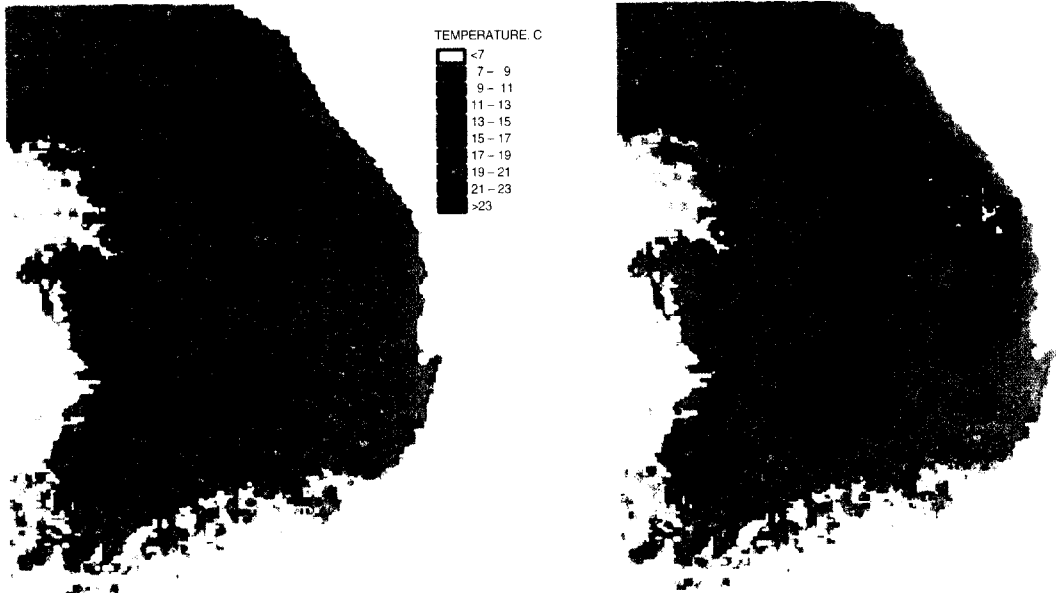


Fig. 1. Comparison of normal estimates (left) with topoclimatological estimates (right) for the spatial distribution of minimum temperature in September 8, 1997.

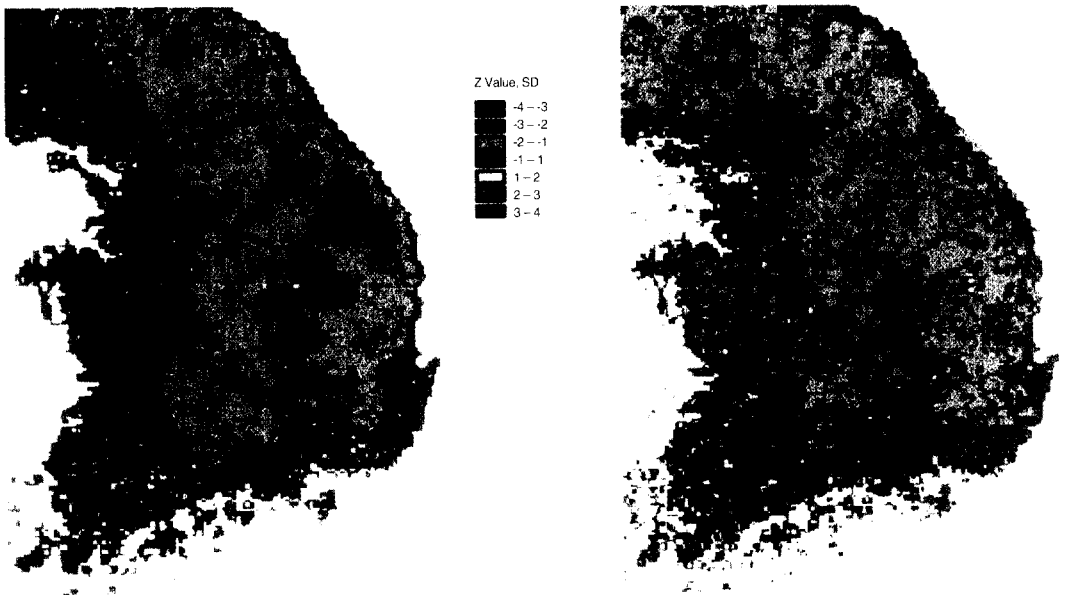


Fig. 2. Comparison of standardized topoclimatological estimates (left) with the standardized NOAA remote sensing data (right) for the spatial distribution of minimum temperature of September 8, 1997.

규기상 관측망이 없는 미관측 격자점에 설치, 운영 중인 AWS에서 수집된 자료와 비교함으로써

그 실용성을 검증하였다. AWS 자료에 의한 검증은 3월 24일의 일 최고기온과 최저기온, 7월 22일

의 일 최고기온, 7월 23일의 일 최저기온, 그리고 9월 8일의 일 최고기온과 일 최저기온을 대상으로 하였다. 표 3은 이들 6개 기온자료에 대하여 300여 개 AWS 관측 격자점의 온도자료를 이용하여 추정오차를 계산한 것이다.

날짜와 온도별로 검증에 사용된 AWS 관측소의 수가 다른 것은 일별 또는 요소별로 결측치의 수가 다르기 때문이다. 이러한 조건하에서 수행된

검증결과는 날짜와 요소별로 약간의 차이가 있으나 1.5°C~2.5°C의 범위로 추정오차가 계산되었다. 일 최저기온의 추정오차가 일 최고기온에 비해 상대적으로 작았다. 일 최고기온은 지표 순복사에너지가 최대이고 따라서 대기가 불안정한 조건에서 나타나기 때문에 상대적으로 지형인자의 기온 결정력이 약하지만, 새벽이나 동틀녘에 측정되는 일 최저기온은 대기가 하루 중 가장 안정된 시기라서 지형의 영향이 뚜렷하여 이러한 결과가 나타난 것으로 추정된다.

표 4는 20개 AWS 설치지점을 무작위로 추출하여 1997년 3월 24일의 일별 기온실황 추정치와 AWS 관측치간의 편차를 계산한 결과이다. 최종적으로 추산된 일 최고기온의 실황치는 AWS 자료와 비교하여 -3.0°C~+2.5°C까지의 차이를 보이고 있다. 한편 일 최저기온은 -1.8°C~+2.2°C의 편차를 보이고 있는데, 3월 24일의 추정오차 RMSE(표 3)를 보면 일 최고기온은 1.9°C이고 일 최저기온

Table 3. Results of reliability test based on AWS data for the estimated daily temperatures.

Date	Variables	Number of AWS	RMSE(°C)
March 24	Max. Temp.	309	1.9
March 24	Min. Temp.	305	1.8
July 22	Max. Temp.	301	2.2
July 23	Min. Temp.	300	1.5
September 8	Max. Temp.	292	2.5
September 8	Min. Temp.	298	1.7

Table 4. Reliability test of the estimated maximum and minimum temperature by using 20 AWS data collected in March 24, 1997.

AWS Num.	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Max. Temp.(°C)			Min. Temp.(°C)		
			Estimates	AWS	Diff*.	Estimates	AWS	Diff.
505	37.82	127.35	11.5	12.1	-0.6	-6.7	-8.4	+1.7
531	37.87	127.55	11.7	13.7	-2.0	-7.6	-7.6	+0.0
538	38.15	127.10	12.7	13.2	-0.5	-6.0	-7.9	+1.9
539	37.90	127.07	11.3	12.3	-1.0	-7.2	-6.1	-1.2
545	37.30	126.80	9.4	10.2	-0.8	-5.0	-5.0	+0.0
548	37.30	127.62	12.1	14.4	-2.3	-6.0	-8.2	+2.2
554	38.22	128.43	6.1	5.7	+0.4	-7.8	-6.7	-1.1
569	37.60	127.13	11.5	12.1	-0.6	-3.1	-3.4	+0.3
602	36.85	127.45	12.7	12.4	+0.3	-5.3	-4.2	-1.1
614	36.05	126.70	11.5	10.0	+1.5	-2.4	-3.8	+1.4
619	36.93	127.68	11.9	12.2	-0.3	-7.2	-7.0	-0.2
623	36.78	127.58	13.2	13.3	-0.1	-5.3	-5.4	+0.1
728	35.48	126.70	12.7	12.9	-0.2	-4.3	-3.3	-1.0
732	34.77	127.08	15.0	13.0	+2.0	-4.6	-5.1	+0.5
741	35.05	126.98	10.8	13.8	-3.0	-5.0	-4.2	-0.8
788	35.13	127.00	13.0	12.1	+0.9	-5.0	-3.7	-1.3
802	36.42	128.17	11.5	14.1	-2.6	-5.3	-3.5	-1.8
811	35.56	129.11	16.5	14.0	+2.5	-6.9	-7.3	+0.4
920	35.30	128.40	17.0	17.0	+0.0	-5.0	-4.4	-0.6
916	35.33	129.93	15.3	13.8	+1.5	-4.6	-4.5	-0.1

*Difference between topoclimatological estimates and observations from AWS.

은 1.8°C로 거의 비슷한 경향을 나타내고 있지만 20개 지점의 편차는 일 최저기온을 더 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 그밖에 7월 22일의 일 최고기온, 그리고 7월 23일 일 최저기온, 9월 8일의 일 최고기온 및 최저기온도 3월 24일의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 이상의 검증 결과는 淸野(1993)의 연구 결과와 유사하거나 추정오차가 약간 높은 것으로 본 연구에서 사용한 지형기후학적 방법이 일별 기온실황을 추정하는데 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

2) 위성자료를 이용한 기온분포패턴 비교

육지에 해당하는 총 19,060개의 격자점을 대상으로 지형기후학적 방법에 의해 추정된 기온값과 위성자료에 의해 계산된 지표온도 평균치와 표준편차를 계산한 결과는 표 5와 같다. 전체적으로 3월 24일 일 최고기온을 제외하고는 NOAA 위성 관측에 의한 지표온도 추정값이 지형기후학적 일별 기온값에 비하여 과소 추정되었음을 알 수 있다. 전체 격자점에 대한 평균치를 보면 3월 24일의 일 최저기온을 제외하고 비교적 큰 편차를 보이고 있는데, 특히 위성관측치의 경우에는 9월 8일을 제외하고 격자점간의 변이가 상당히 심해 특정 격자점에서는 비현실적인 측정치를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 위성관측에 의한 온도가 일반 관측소에서 측정하는 방법과는 달리 지표면의 흑체온도를 산출한 것에 기인한다. 결과적으로 이 두 가지 방법에 의하여 얻어진 기온의 공간분포를 직접 비교하는 것은 의미가 없고, 큰 차이를 보이고 있는 두 자료를 합리적으로 비교하기 위해

서는 두 자료를 동일한 표준단위로 변환하여 같은 날짜의 온도가 공간적으로 유사한 분포를 나타내고 있는지를 검증하는 것이 타당할 것이다.

그림 2는 공간통계 기법에 의하여 추정된 1997년 9월 8일 최저기온의 공간분포와 동일한 날짜의 새벽 3시경 기상 위성자료의 분포를 표준단위로 변환하여 비교한 예이다. 두 방법에 의하여 얻어진 공간분포는 충청도 일부 지역을 중심으로 다소 다른 분포패턴을 보이고 있지만 전체적으로는 유사한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만 시각적인 비교만으로는 분포패턴의 유사성을 객관적으로 입증하기 어렵기 때문에, 두 분포에 대하여 각 격자점의 표준화된 기온값을 1:1로 비교하는 통계적 방법에 의존하여 유사성을 입증할 수밖에 없다.

표 6은 두 자료의 분포를 평균 0과 분산 1로 같게 만든 후, 동일한 격자점의 편차를 이용하여 두 가지 방법으로 산출된 온도의 공간분포 유사성을 t-검정한 결과이다. 이 결과를 보면 정도의 차이는 있으나 검정에 사용된 6개 모든 자료가 5% 유의수준에서 지형기후학적 방법에 의한 일별 기온 추정치와 위성자료에 의한 일별 기온 관측치가 공간적 분포에서 차이가 없음을 알 수 있다. 이러한 결과는 일별 기온 추정치와 위성자료간의 공간분포의 유사성을 인정하는 것으로, 위성자료는 기온의 절대값을 표현하는 데는 한계를 가지고 있지만 평균치를 중심으로 공간분포 양상을 정확하게 나타내고 있는 것으로 판단된다. 결과적으로 본 연구에서 사용된 모형이 일별 기온실황의 분포를 추

Table 5. Comparison of topoclimatological estimates for maximum/minimum temperature with NOAA remote sensing data.

Date	Classification	Topoclimatological Estimates		NOAA Remote Sensing Data	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.
March 24	Max. Temp.	11.7	2.1	14.0	4.2
March 24	Min. Temp.	-5.1	3.2	-5.8	4.7
July 22	Max. Temp.	32.4	2.2	25.7	7.2
July 23	Min. Temp.	22.5	1.6	20.0	5.2
September 8	Max. Temp.	29.0	3.1	22.7	2.8
September 8	Min. Temp.	15.4	2.7	8.0	2.6

Table 6. Results of t-test for similarity between topoclimatological estimates and NOAA remote sensing data.

Date	Classification	\bar{D}	S_D	t
March 24	Max. Temp.	0.0136	1.17	1.60 ^{NS}
March 24	Min. Temp.	0.0097	0.90	1.48 ^{NS}
July 22	Max. Temp.	-0.0036	1.08	-0.46 ^{NS}
July 23	Min. Temp.	-0.0125	1.30	-1.32 ^{NS}
September 8	Max. Temp.	0.0032	1.10	0.39 ^{NS}
September 8	Min. Temp.	-0.0035	0.93	-0.51 ^{NS}

^{NS} Non-significant.

정하는데 문제가 없는 것으로 간주할 수 있다.

IV. 결론

제주도 등 도서지방을 제외한 전 국토를 대상으로 작물모형 구동에 필요한 최소 기상요소인 일 최고/최저기온을 30" 간격의 등거리 격자단위로 추정코자 하였다. 평년 기온-지형 회귀식의 작성에 의해 월별 기온을 추정하고, 이를 조화해석법에 의하여 일별 평년치로 변환한 다음 전국 66개 정규기상관측소로부터의 실측치와 평년값 간의 편차와 거리에 의한 공간통계 기법을 적용하여 내삽한 결과를 AWS 자료 및 기상 위성자료와 비교함으로써 그 정확성과 실용성을 검증하였다.

공간통계 기법에 의하여 추정된 일별 기온의 공간분포는 미관측 지점에 설치된 300여개 AWS 설치지점의 실측치와 비교하여 실용성을 검증하였는데 동일한 날짜에 수집된 6개의 기온에서 1.5°C~2.5°C의 범위로 추정오차가 계산되었다. 그러나 농업적으로 더욱 중요한 일 최저기온의 경우에는 상대적으로 작은 추정오차를 나타내 전체적으로 만족할만한 결과를 얻은 것으로 결론내릴 수 있다. 하지만 AWS 설치지점이 30" 격자를 대표하는 위치라고는 할 수 없으며, 더욱이 건물 옥상 등 관측여건이 불량한 곳도 많아 실질적인 검증자료로서의 역할에 다소 문제가 있었던 것으로 생각된다. 현 단계에서 독립자료로 간주할 수 있는 검증자료로 AWS 자료를 제외하고는 찾아볼 수 없

기 때문에 객관성 있는 결과를 얻기 위해 AWS 자료를 합리적으로 관리하는 것이 필요하다. 또한 본 연구에서 국지기온 추정에 이용한 기형-기후 관계식은 국지기온의 결정인자 가운데 해발고도 등 지형요소만 고려하였다. 만약 지표 특성을 분류하여 그 영향을 추가한다면 보다 정확한 추정이 가능할 것이다. 또한 위성자료에 의한 검증은 맑은 날에만 제한적으로 가능하므로 실용화를 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

사 사

이 연구는 농림부의 1995년도 첨단농업기술 개발과제 "전국 농업기상 감시 및 실시간 작황진단 체계 구축"(분류번호 295133-4)의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드린다. 또한 예리한 지적으로 본 논문의 질을 높여주신 두 분의 심사 위원께도 감사드린다.

참고문헌

- 과학기술처, 1992. 전국 그물망 기후값 추정 및 기 후도 작성 연구(3). 중앙기상대 기상연구소 주관 특정연구과제. 379pp.
- 수자원공사, 1993. 임하 및 주암 다목적댐 건설에 따른 기상환경 변화조사. 306 p.
- 신만용, 윤진일, 1992. 지형-기후 관계식에 의한 제

- 주도의 월별 기온분포의 추정. 한국임학회지 81(1):40-52.
- 신만용, 천정화. 1996. 임하담 주변지역의 기상환경 변화가 수목생장에 미치는 영향에 관한 정량적 분석. 한국임학회지 85(3):462-471.
- 윤진일, 유근배, 이민영, 정귀원. 1989. 제주도의 농업기상. I 지형기후 추정법과 동계 일 최저 기온의 분포. 한국작물학회지 34(3):261-269.
- 윤진일, 황규홍, 정현향, 신만용, 임준택, 신진철. 1997. 주암 다목적댐 건설에 따른 국지 기후 변화가 농작물 생산성에 미치는 영향. 한국기상학회지 33(3):409-427.
- 河野富香, 森 康明, 房尾一宏, 上原由子. 1984. 廣島縣農試報告 48:113-122.
- 清野 豁. 1993. AMeDAS 資料の Mesh化. 農業氣象 48(4):379-383.
- Nakai, K. 1990. Japanese system of the meteorological information service to user communities including the education and training. In: A. Price-Budgen(ed.), Using Meteorological Information and Products. Ellis Horwood Ltd., U.K., 259-274.
- Price, J. C. 1983. Estimating surface temperatures from satellite thermal infrared data: A simple formation for the atmospheric effect, Remote Sens. Environ., 13:353-361.