

냉기침강효과를 고려한 복잡지형의 최저기온 분포 추정

정유란¹ · 서형호² · 황규홍³ · 황범석⁴ · 윤진일¹

¹경희대학교 생태시스템공학과/생명자원과학연구원

²원예연구소 과수재배과 기상생태연구실, ³농업과학기술원 환경생태과 농업기상실

⁴가평군농업기술센터

(2002년 6월 3일 접수; 2002년 7월 24일 수락)

Minimum Temperature Mapping in Complex Terrain Considering Cold Air Drainage

Uran Chung¹, Hyeong-Ho Seo², Kyu-Hong Hwang³, B.S. Hwang⁴, and Jin I. Yun¹

¹Department of Ecosystems Engineering/Institute of Life Science and Natural Resources, Kyung Hee University

²Fruit Tree Cultivation Division, National Horticultural Research Institute, RDA

³Agricultural Meteorology Lab., National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA

⁴Gapyong Agricultural Technology Center, Gapyong, Gyunggi-Do

(Received June 3, 2002; Accepted July 24, 2002)

ABSTRACT

Site-specific minimum temperature forecasts are critical in a short-term decision making procedure for preventive measures as well as a long-term strategy such as site selection in fruits industry. Nocturnal cold air pools frequently formed in mountainous areas under anticyclonic systems are very dangerous to the flowering buds in spring over Korea, but the spatial resolution to detect them exceeds the current weather forecast scale. To supplement the insufficient spatial resolution of official forecasts, we developed a GIS - assisted frost risk assesment scheme for using in mountainous areas. Daily minimum temperature data were obtained from 6 sites located in a 2.1 by 2.1 km area with complex topography near the southern edge of Sobaek mountains during radiative cooling nights in spring 2001. A digital elevation model with a 10 m spatial resolution was prepared for the entire study area and the cold air inflow was simulated for each grid cell by counting the number of surrounding cells coming into the processing cell. Primitive temperature surfaces were prepared for the corresponding dates by interpolating the Korea Meteorological Administration's automated observational data with the lapse rate correction. The cell temperature values corresponding to the 6 observation sites were extracted from the primitive temperature surface, and subtracted from the observed values to obtain the estimation error. The errors were regressed to the flow accumulation at the corresponding cells, delineating a statistically significant relationship. When we applied this relationship to the primitive temperature surfaces of frost nights during April 2002, there was a good agreement with the observations, showing a feasibility of site-specific frost warning system development in mountainous areas.

Key words : frost warning, minimum temperature, nocturnal cold air pool, spatial interpolation, cold air drainage

I. 서 언

봄철 늦서리는 과수재배농가에 피해를 끼치는 수가

흔한데, 특히 이상난동으로 개화시기가 앞당겨진 2002년에는 그 피해가 더욱 컸다(조선일보 2002년 4월 30일자 기사 참조). 영년생인 과수는 재배적지 여부에 따라 피해빈도가 크게 달라져 잘못된 선정된 과원은 상습 피해지가 될 가능성이 높다. 우리나라처럼 복잡한 지

형에 재배규모가 작은 곳에서는 기후자원의 정밀 심층 분석을 통한 과원 적지선정 시스템이 매우 유용할 것이다. 일단 조성된 과수 주산단지인 경우 일 최저기온 예보를 활용한 과원 서리경보시스템의 실시간 운영 역시 검토할 가치가 있을 것이다.

서리 피해와 관련이 깊은 일 최저기온은 식물의 생육단계 추정, 식물 병해충 예찰, 증발산량 추정, 농업용 시설물 관리 등 그 용도가 다양하므로 강수량과 함께 농장 기상관측의 기본요소이다. 기상청 일기예보 가운데서도 다음 날의 최저기온 예보는 농업상의 재해 예방 차원에서 요긴하게 활용되고 있다. 기상청의 관측 및 예보구역인 70여 개 지점을 제외한 실제 영농현장의 최저기온값은 다양한 방법에 의해 공간적으로 내삽, 추정되는 것이 보통이다. 특히 국지기온 결정인자로서 고도의 영향이 현저하므로 비관측점과 공간내삽에 사용되는 주변 관측점간 표고편차를 기온감율에 의해 보정해 주는 간단한 방법이 많이 쓰이고 있다 (Nalder and Wein, 1998). Dodson and Marks(1997)는 표준대기의 기온감율을 미국 북서 태평양 연안 산악지역의 일 최저기온 내삽에 이용함으로써 총 830,000 km²의 일별 기온분포를 1km×1km 공간 해상도로 작성하였다. 우리 나라에서는 표준대기의 기온감율 대신 산악지역에서 경사를 따라 이동할 때 관찰되는 경험적 기온변화양상을 최저기온 추정에 활용한 사례가 있는데, Yun *et al.*(2000)은 먼저 거리역산가중에 의해 관측소 해발고도값에 근거한 가상지형과 기온관측값에 근거한 초기기온표면을 각각 만들고, 각 격자점의 실제 지형과 가상지형간 고도편차에, 관찰된 기온감율의 계절변동을 적용하여 초기기온표면을 보정해 주는 방법을 제안하였다.

그러나 상대적으로 넓은 지역에서 낮은 해상도로 추정할 경우에는 기온감율만 고려하는 이들 방법이 어느 정도 실용성이 있지만, 실제로 정밀추정이 필요한 좁고 복잡한 지형에서는 적합치 못하다. 그 이유는 고도에 따른 기온감율이 계절이나 시간, 감율계산에 쓰이는 기준관측소의 위치 등에 따라 항상 변화할 뿐 아니라, 그 변화양상이 선형적이지 않다는 사실에서 찾을 수 있다(Bolstad *et al.*, 1998). Yun *et al.*(2000)의 남한 전역 일 최저기온 추정오차를 계절별로 비교했을 때 여름철을 제외한 전 기간에 걸쳐 나타나는 양의 편의(positive bias), 특히 고도가 낮은 지역에서 실제보다 항상 높은 기온이 예측되는 현상은 고도-기

온 관계의 비선형성을 쉽게 대변한다. Jarvis and Stuart (2001)는 영국 전역을 대상으로 공간해상도를 50 m로 두고 분지지형의 “집수역”을 검색하여 이를 일 최저기온 공간내삽모형에 후보변수로 이용하였지만 아쉽게도 통계적인 유의성을 얻는데는 실패하였다. 그밖에도 방위별 해안으로부터의 거리, 육지와 바다 비율, 편 효과 등이 고려되었지만 사방 1 km 해상도의 공간내삽모형에 최종적으로 선발된 변수는 기온감율(고도), 도시효과, 그리고 위도였다.

농작물의 피해를 가져오는 서리는 다른 곳으로부터 찬 공기가 흘러 들어오거나 같은 곳의 공기가 지표의 복사에너지 교환에 의해 냉각되는 두 가지 기작에 의해 주로 생긴다. 찬 공기의 이류조건에서는 당연히 높은 곳일수록 기온이 낮아지는 기온감율이 적용되며, 서리피해 역시 높은 곳에서 관찰된다. 반면에 복사서리는 바람이 잔잔하고 하늘이 맑은 조건에서 발생하며 높은 곳보다는 낮은 곳에서 저온이 관찰된다. 즉 기존의 최저기온 추정방법이 실패하는 조건과 일치한다. 따라서 최저기온 추정오차를 줄이기 위해서는 복사냉각에 의한 찬 공기의 흐름과 집적에 대한 정보를 우선 얻어야 한다. 나아가 저지대의 냉기 집적량과, 이런 곳에 기존의 최저기온 공간내삽기법을 적용해서 얻어지는 추정오차 사이의 정량적인 관계를 도출해야 한다. 이 경우에 실용성이 적은 수치대기모형의 적용보다는 실측자료에 근거한 공간내삽모형을 개발해야 할 것이다.

본 연구에서는 고도가 낮은 지역에서의 추정오차를 줄이기 위해서는 복사서리 발생 조건에서, (1) 기존의 방법에 의한 추정오차를 관측지점의 “냉기유입량”에 회귀시켜 상호관계를 정량화하고, (2) 이 경험식을 추가한 공간내삽모형에 의해 추정된 최저기온값의 신뢰성을 독립자료에 의해 검증하며, (3) 이 방법을 실제 과원지대에 적용하여 일 최저기온 분포를 작성함으로써 실용화를 도모하였다.

II. 공간내삽모형

기존의 일 최저기온 공간내삽모형은 거리역산가중기법에 고도-기온 관계를 추가한 것이다(Yun *et al.*, 2000). 다른 조건이 대상지역 내 관측점들과 같고 오직 표고만 다르다면 지역 내 임의지점의 추정기온 T 는

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

으로 표현된다. 여기서 T_i 는 임의지점 주변의 관측소 i 에서 실측된 기온값이며 d_i 는 이 관측소와 임의지점 간 거리로서 식 (1)의 우변 첫째 항은 거리자승역산가중(Inverse distance squared weighting; IDSW) 내삽에 의한 기온 추정값이 된다. z 는 임의지점의 실제 표고이며, 괄호 안의 둘째 항은 IDSW에 의해 추정된 가상지형상의 표고 추정값으로서 괄호 안은 임의지점의 표고편차를 나타낸다. Γ 는 내삽시점의 고도에 따른 기온감률로서, 일최저 기온의 경우

$$\Gamma = 0.00685 + 0.00135 \cos \{0.0172(J-15)\} \quad (2)$$

으로 추정할 수 있다(Yun *et al.*, 2001). 여기서 J 는 연중 날짜(1월 1일=1, 12월 31일=365)를 가리킨다.

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 이 모형만으로도 좋은 결과를 얻을 수 있다. 하지만 우리 나라에서 늦서리 피해가 예상되는 날은 대개 고기압권에 들어서 바람이 약하고 구름이 적은 조건에 놓인다. 이러한 조건하에서는 이 모형에 의해 추정가능한, 주변을 포함한 넓은 지역의 최저기온 평균값보다는 미세한 지형특성의 차이에 따라 찬 공기가 유입되거나 집적되는 곳의 기온 편차가 농작물의 피해로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 모형의 적용시간대를 복사서리가 발생하는 시기로 한정하고 지형적 변이에 따른 기온변화율을 도출하고자 하였다.

III. 냉기유입량과 추정오차 관계 도출

야간 장파복사교환에 의해 지표면이 냉각되면 대상 지역 내에서 가장 높은 위치(예, 언덕이나 산 정상)의 공기가 가장 먼저 중력에 의해 아래쪽으로 흐를 것이다. 무거워진 공기가 지표면의 한 개 격자점에 놓이면 땅 속으로 스며들지 않고 모두가 8개 방위의 인접한 격자점들 중 한 개로 흘러간다고 가정하였다. 이 때 8개의 인접 격자점들 가운데 중심 격자점과의 고도차

가 가장 큰 격자점 쪽이 흐름의 방향이 되는데, 동향을 기준으로 시계방향으로 $2^0 = 1$ (동), $2^1 = 2$ (남동), $2^2 = 4$ (남), $2^3 = 8$ (남서), $2^4 = 16$ (서), $2^5 = 32$ (북서), $2^6 = 64$ (북), $2^7 = 128$ (북동)의 값을 부여하여 계산의 편의를 도모하였다. 흐름 방향의 계산을 위해서는 대상지역의 고도를 격자점의 해상도로 나타낸 수치고도모형(digital elevation model, DEM)만 있으면 된다.

다음에는 이 흐름의 방향을 토대로 각 격자점에 흘러 들어오는 공기의 량을 계산하였다. 임의 격자점 주변에는 항상 8개의 인접 격자점들이 각각의 흐름 방향을 갖고 에워싸고 있다. 이들 가운데 흐름 방향이 중심 격자점을 향한 것들만 선택하여 그 개수를 합친다. 이 합산과정을 대상지역 내 모든 격자점에 대해 수행하면 찬 공기의 축적양상, 즉 냉기유입량의 분포를 격자점의 해상도로 작성할 수 있다. 결과적으로 격자점은 누적된 냉기 유입량을 격자점의 개수로 표현한 숫자를 속성값으로 갖게 된다.

이제 어떤 격자점의 냉기 유입량과 관측된 최저기온 간 관계, 정확하게는 식 (1)에 의해 계산된 최저기온 추정오차와의 관계를 정량화해야 한다. 이를 위해 늦서리의 발생이 빈번하였던 2001년 4월 한 달 동안 경남 하동에 현지 관측망을 운영하였다. 고품질의 배를 생산하지만 서리피해 상습지로 알려진 경남 하동군 하동을 화심리의 만지 배 주산단지를 대상으로 6개 지점에 기온 관측장비를 설치하여 1분 간격으로 연속 측정하였다(Fig. 1). 사용된 센서는 로저일체형 씨미스터(Model HOBO H8 Pro, Onset Computer Corporation, U.S.A.)로서 제작사의 사양에 의하면 측정오차가 -30°C 에서 $+50^{\circ}\text{C}$ 범위에서 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이며, 상온에서의 정확도는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이다. 기상관측지점을 포함하는 $2.1 \text{ km} \times 2.1 \text{ km}$ 정방형 지역을 가로, 세로 10 m 간격의 격자로 재구성하고 냉기 흐름의 방향을 결정하였다. 6개 관측지점의 위치좌표를 위성측위계(Model GeoExplorer III 및 Pathfinder 2.80, Trimble Inc., U.S.A.)에 의해 측정하고 기준국(경남 진주)의 보정값으로 후처리하여 정확한 위치좌표를 얻었다. 이들 좌표와 흐름방향 정보를 토대로 관측지점 해당 격자점의 냉기 유입량을 계산하였다. 6개 관측지점의 냉기유입량은 격자점의 개수로 표현하여 6번 관측점의 0에서부터 1번 관측점의 90에 달했다(Table 1).

관측된 기온자료 가운데 강우가 없고 야간 운량이 2 이하이며 풍속이 1 m/s 이하로 복사냉각에 의한 서

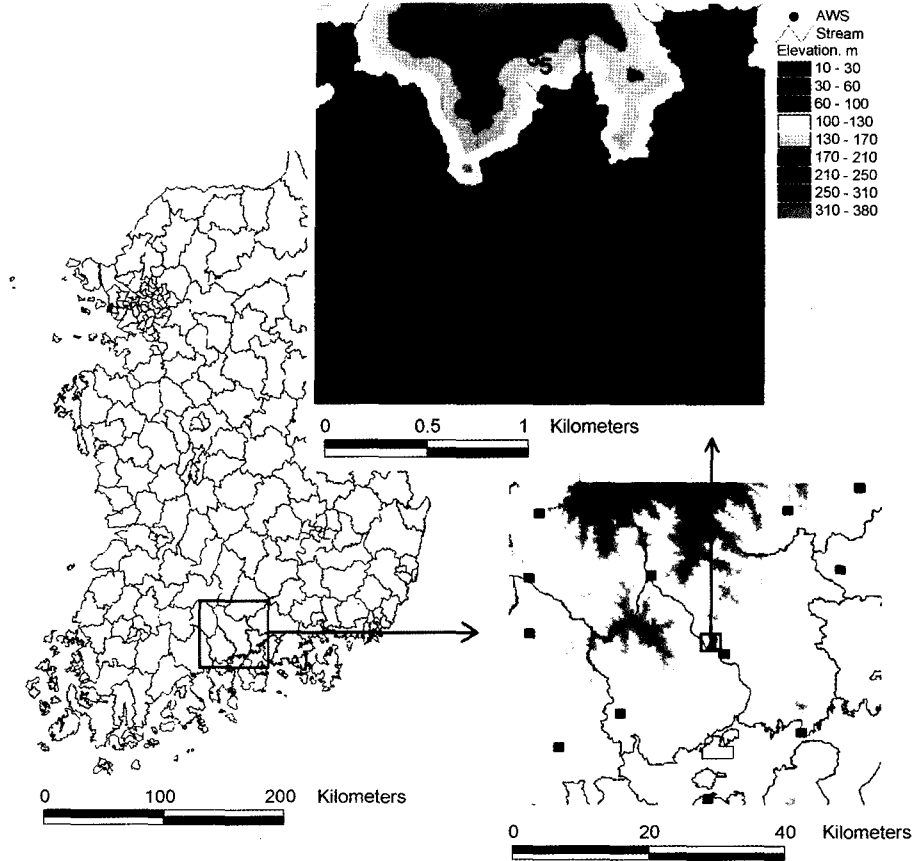


Fig. 1. Map of the study area with the locations of 12 KMA-AWS (Korea Meteorological Administration's Automated Weather Stations, ■) and the 6 temperature observational sites (●).

Table 1. Flow accumulation at 6 sampling sites in the study area and the observed daily minimum temperature during the late frost period in April 2001

Station ID	Elevation (m)	Latitude (DD)*	Longitude (DD)*	Flow Accumulation (Number of cells)	Daily Minimum Temperature (°C)									
					7	8	10	13	15	16	17	18	19	23
1	10	35.0818	127.7249	90	2.1	2.0	7.4	-1.5	-0.6	2.5	2.5	3.3	3.7	1.6
2	10	35.0840	127.7255	69	3.0	3.7	8.7	-0.4	0.1	3.7	3.7	4.0	4.4	2.2
3	10	35.0888	127.7264	12	3.7	4.2	9.4	0.7	1.2	4.6	4.2	4.6	5.4	4.2
4	49	35.0936	127.7293	2	4.6	5.4	10.6	2.9	3.3	6.2	5.4	5.8	6.6	4.6
5	104	35.0956	127.7279	1	5.4	6.2	12.6	2.9	4.2	6.2	5.4	6.2	7.0	5.0
6	253	35.0985	127.7273	0	7.4	9.0	15.6	3.7	5.0	8.6	7.8	10.2	10.2	6.2

* DD: decimal degree

리 발생이 기대되는 열흘 간(4월 7-9, 10, 13, 15-19, 23일) 자료를 발췌하였다(Table 1). 연구대상지역을 중심으로 반경 50 km 내에 위치한 기상청 자동기상관측소는 모두 14개인데(Fig. 1), 이들로부터 해당 날짜 최저기온 실측자료를 수집하였다. 수집된 14개 자동기

상관측소 최저기온값을 거리지승역산가중법으로 내삽하여 배경기온표면(background temperature surface, BTS)을 250 m 해상도로 작성하였다. 사방 2.1 km 연구대상지역에 한해 10 m 수치지도모형을 이용하여 250 m 해상도 기상지형과의 고도편차를 산출하고 해당 날짜

의 기온감율을 적용하여 고도보정 기온표면(elevation-corrected temperature surface, ETS)을 생성하였다. 고도보정 기온내삽에 관한 자세한 설명은 Yun *et al.* (2000)에 수록되어 있다.

관측소가 위치한 6개 격자점으로부터 해당 날짜별 추정기온을 산출하고, 이 값으로부터 실제 관측된 기온값을 뺀 추정오차를 구했다. 이들 추정오차를 각 격자점의 냉기유입량에 회귀시켜 지형효과 보정에 쓰일 수 있는 관계식을 얻었다.

같은 지역에서 2002년 4월 한 달 동안 기온을 관측하고, 이 기간 중 실제 서리가 발생한 4월 18일과 20일 이틀간의 지형보정 기온표면(topography-corrected temperature surface, TTS)을 위에서 언급한 관계식에 의해 계산하였다. 관측소가 위치한 격자점의 추정값을 발췌하여 실측치와 비교하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 관측지점별 냉기유입량과 최저기온 추정오차간 관계

기존의 방식대로 거리자승역산가중에 의해 내삽된 기온값을 고도 편차만큼만 기온감율에 의해 보정한 ETS로부터 6개 관측점 해당격자값을 발췌하여 실측값과 비교해 보면, 날짜 및 장소에 따라 -7°C에서 +6°C 범위의 추정오차(ϵ)가 발생한다. 산등성이 해발 253 m에 위치한 6번 관측점은 이론상 주변으로부터 전혀 냉기의 유입이 없는 지점인데, 기온감율에 의한 추정치보다 날짜에 따라 최소 2°C, 최대 7°C 만큼 높은 기온이 관측되었다. 반면 해발 10 m의 저지대에 위치한 1, 2, 3번 관측점은 추정값에 비해 최대 6°C 나 낮은 기온이 관측되었다. 이러한 추정오차를 관측점의 냉기유입량(x)과 비교해 보면 비선형적인 규칙성이 있음을 알 수 있다(Fig. 2a).

만약 주변으로부터 냉기의 유입이 전혀 없는 6번 관측점을 제외한다면 이 규칙성은 다음과 같은 간단한 로그함수로 표현할 수 있다.

$$\epsilon = 2.07 \log(x) + 0.73 \tag{3}$$

여기서 ϵ 는 추정오차, x 는 유입되는 격자점의 개수로서 냉기유입량을 가리키는데, 이 식은 결정계수(r^2)가 0.88로서 어느 정도 유의성이 있다(Fig. 2b). 즉 이 식을 기존의 방법에 의한 최저기온 내삽표면 가운데 야

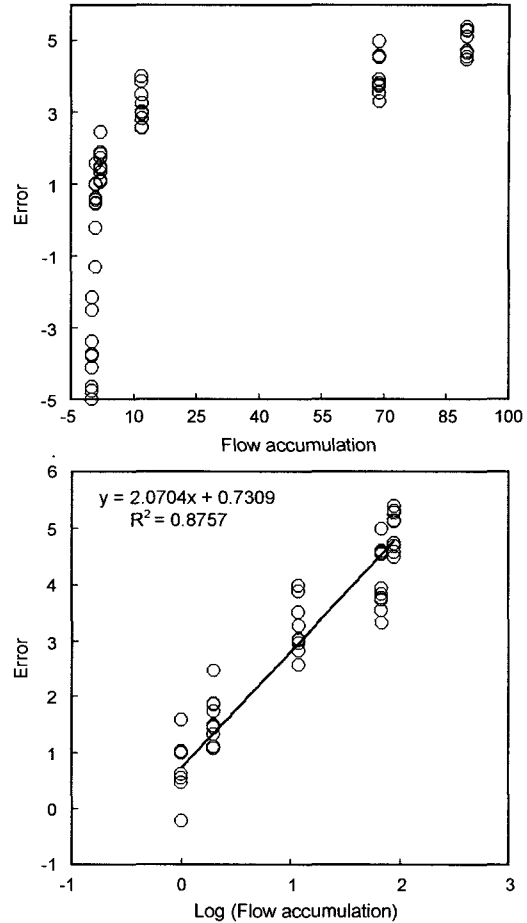


Fig. 2. Estimated minimum temperature errors (predicted minus observed) at 6 sampling sites with different flow accumulation (number of cells flowing-in) during the radiative cooling nights in April 2001 (upper panel). Relationship between the estimated minimum temperature errors at the sampling sites and the logarithm of the number of cells flowing into those locations (lower panel).

간복사냉각에 의한 냉기유입지역으로 판정되는 격자점에 적용할 경우 기대되는 추정오차의 88%까지 감소시킬 수 있다는 의미이다. 물론 이 관계식은 공간적으로는 연구대상지역에, 시간적으로는 2001년 4월에 한정하여 순전히 경험적으로 얻어졌기 때문에 이러한 오차감소효과의 기대치 역시 시공간적으로 제한적일 것이다. 하지만 시공간적으로 독립적인 자료에 의해 철저한 검정을 거친다면 예단적 목적으로 사용하는 데 큰 무리는 없을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 우선 이 관계식을 동일한 지역이지만 다른 시기의 최저기온 추정에 적용하여 부분적인 검정을 시도하였다.

4.2. 지형보정 최저기온의 신뢰도 및 실제 적용

식 (3)을 2002년 4월 18일과 20일의 최저기온 추정표면(TTS) 작성에 적용하고 냉기 유입량이 1 이상인 5개 관측점에서 추정값과 실측값을 비교한 결과, 회귀식의 결정계수(r^2)는 0.84로서 관계식 도출 때보다 크게 낮아지지 않았다(Fig. 3).

냉기 유입이 전혀 없는 6번 관측점의 경우 ETS 추

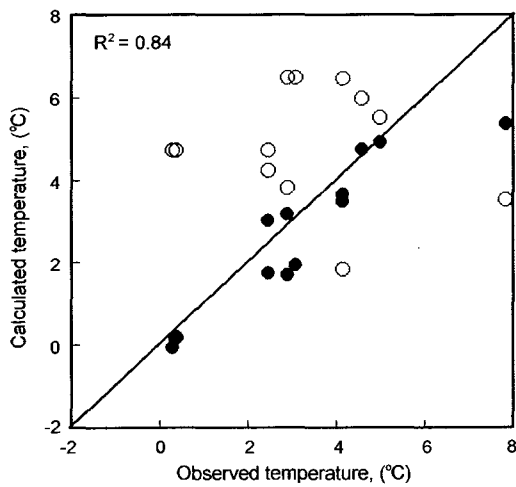


Fig. 3. Minimum temperature estimates with (solid circle) and without (empty circle) the flow accumulation function in comparison with the observed minimum temperature on 18 and 20 April 2002.

정값과 실측값간 편차가 각각 3.8°C, 3.5°C로서 2001년도의 6번 관측점 추정오차의 10일간 관측범위(2~5°C)에 들었다. Hwang(2002)이 동일한 지역을 대상으로 테더존대를 이용하여 야간기온의 연직분포를 관측한 결과에 의하면 기온역전에 의한 온난대(thermal belt)의 생성은 계곡기저로부터 150~270 m 범위에 한정되었다. 이 범위에서의 고도에 따른 온도변화는 Y축 최대값을 5°C로 하고 X축과의 교점이 각각 150 및 270 m 인 이차함수로 표현된다. 실용적으로는 이 범위에 해당되는 격자점 가운데 냉기유입이 전혀 없는 곳은 ETS 추정기온값에, 냉기유입이 있는 곳은 TTS 추정기온값에 이 함수에 의한 계산값을 더해줌으로써 온난대 효과를 모의할 수 있을 것이다.

지금까지 얻어진 결과를 토대로 연구대상 지역 내 441,000개 격자점을 대상으로 2002년 4월 20일 최저기온을 계산하여 3차원 지형도 위에 해당 색상으로 표현한 것이 Fig. 4이다. 이를 만들기 위해 우선 전체 격자점을 냉기유입량 유무에 따라 두 집단으로 나누고, 냉기유입량이 있는 격자점에 대해서만 로그관계식을 적용하여 ETS를 보정하였다. 이 때 냉기유입량(격자점의 수)이 100 이상인 격자점은 100으로 상한선을 제한하였다. 이는 본 실험에서 기온 관측점의 최대 유입량이 90이었으며, 도출된 경험식은 이 범위를 벗어날 경우 비현실적인 기온값을 계산하기 때문이다.

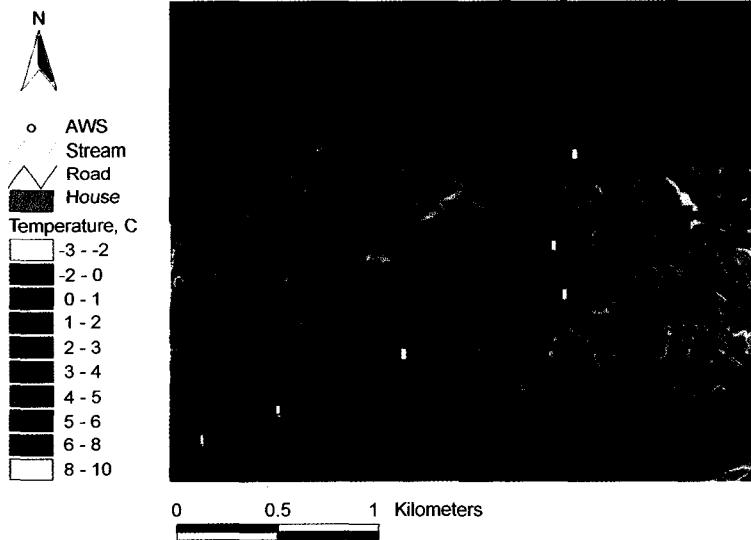


Fig. 4. The minimum temperature surface calculated by an inverse distance squared weighting of 14 KMA-AWS (Korea Meteorological Administration's Automated Weather Station) point observations with the flow accumulation function on 20 April 2002.

냉기유입량이 없는 격자점은 초기값으로 ETS 추정값을 갖고 있다. 다시 모든 격자점의 고도로부터 계곡기저고도(여기서는 10 m)를 뺀 고도편차를 얻어, 150~270 m에 해당되는 것에 한해 전술한 고도-기온변화식(이차함수)을 적용하였다. 만약 주어진 격자점이 온난대에 놓여 있으면서 동시에 냉기가 유입되는 지형이라면 냉기유입에 의한 감소분과 온난대에 의한 상승분을 합친 값으로 최종기온이 결정된다. 계산 및 그림 작성은 ArcView 8.1 GIS 소프트웨어 패키지(Spatial Analyst 및 3D Analysis extension 포함, ESRI Inc., U.S.A)를 이용하여 수행하였다.

이 방법은 기상청 예보구역 혹은 자동기상관측지점 단위로 발표되는 일 최저기온자료를 이용하여 과원, 농경지 등 관심지역의 최저기온분포를 좀더 세밀하고 현실적으로 보여주는 용도에 쓰일 수 있다. 기존의 최저기온 공간내삽기법이 대개 통계모형 구동에 의해 비관측점의 추정값으로서 실측자료범위 안에 드는 “보수적인” 값을 제시하는데 그쳤지만, 본 연구에서 제시한 방법은 통계적인 방법임에도 불구하고 기온공간변이의 비선형성을 토대로 실측값의 범위를 벗어나는 공간극값의 추정이 가능하다. 예를 들어 하나의 과수주산단지 같은 동일한 시군으로서 기상청의 최저기온예보 역시 같은 값이 발표된다. 그러나 늦서리에 의한 피해지역의 분포는 매우 다양할 수 있으며, 우리의 방법은 이 다양성을 표현해 주는 좋은 수단이 될 수 있다.

과거에도 지형특성의 정량화를 통해 최저기온을 추정하거나 서리위험지를 판별하는 방법들이 많이 제시되었다. 최근에는 지리정보시스템 기술을 이용하여 더욱 정교하면서도 사용하기 쉬운 방법으로 변신하고 있다(Lindkvist et al., 2000). 본 연구에서 제시한 방법은 최저기온 형성과정에 간접적으로 영향을 미치는 지형특성 그 자체의 정량화가 아니라, 직접 최저기온을 형성하는 찬 공기의 흐름을 모의했다는데서 다른 연구들과 차별성이 있다.

지형의 특성과 그에 따른 찬 공기의 흐름을 정확하게 모사하기 위해서는 높은 해상도의 수치고도모형이 필수적이다. 이 연구에서 얻은 식 (3)의 계수들은 격자 해상도가 10 m일 때에 한해 적용되며, 해상도가 달라질 경우 당연히 변한다. 국내의 농경지 규모나 지형조건으로 보아 10 m 이상의 격자간격으로는 냉기흐름의 정확한 모사가 어려울 것으로 보인다. 아직 격자 해상도에 따른 냉기흐름 모사의 정확도나 실용적인 한

계에 대한 연구는 수행된 적이 없지만, 현실적으로 수치고도모형의 해상도를 무한히 높일 수는 없으며, 계산기의 성능이나 실용성을 고려한다면 실제 그럴 필요성도 없다고 본다.

이 연구에서 얻은 최저기온 공간내삽기법은 국내 다른 지역에 적용하여 보완, 개선될 수 있는 여지가 많다. 특히 강원도의 산악지역이나 주요 과수 주산단지에서의 실측자료에 의한 관계식의 검증실험은 이 방법의 실용화를 촉진하고 보다 나은 방법의 개발을 위해 필수적이다.

V. 결론 및 요약

본 연구에서는 복잡한 산악지형에서의 최저기온 공간내삽 시 어려운 문제로 제기되는 냉기침강효과와 구현을 위해 격자점별 냉기유입량 계산을 토대로 한 실용적인 방법을 제시하였다. 냉기유입량의 계산과정은, 대상지역의 지형특성을 10 m 해상도의 수치고도모형으로 표현하고, 냉기의 흐름방향을 인접한 8개 격자점과의 최대 고도편차로부터 계산하며, 흐름방향으로부터 판정되는 유입격자점의 수를 적산하는 것으로 이루어진다. 경남 하동군의 배 과수원 지대에 설치된 6개 기온 관측점에 대해 냉기유입량(x)을 독립변수로, 기존 공간내삽법에 의한 최저기온 추정오차(ε)를 종속변수로 둔 경험식을 도출한 바, $\epsilon = 2.07 \log(x) + 0.73$ 를 얻었다. 이 식을 2002년 4월의 서리 발생일에 6개 관측점에 적용한 결과 기존의 기온감률 내삽법에 의한 추정오차를 80% 이상 줄일 수 있었다.

감사의 글

두 심사위원의 예리한 지적과 충실한 조언이 논문의 품위를 높이는데 크게 기여하였다. 본 연구는 농촌진흥청 대형공동연구사업(과제명: 사과 저수고 밀식재배 과원 종합관리기술 개발) 지원으로 수행되었음.

인용문헌

Bolstad, P.V., L. Swift, F. Collins, and J. Regniere, 1998: Measured and predicted air temperatures at basin to regional scales in the southern Appalachian mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, **91**, 161-176.
 Dodson, R. and D. Marks, 1997: Daily temperature

- interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Climate Research*, **8**(1), 1-20.
- Hwang, K.H., J.T. Lee, J.I. Yun, S.O. Hur, and K.M. Shim, 2001: Characteristics of nocturnal cooling at a pear orchard in frost-prone area. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **3**, 206-214.(In Korean with English abstract)
- Hwang, K.H., 2002: Nocturnal cooling characteristics as influenced by topography and temperature inversion layer development : A case study in frost-prone area, Hwashim-ri, Hadong-gun, Kyungnam Province. Ph.D. dissertation, Kyung Hee University.
- Jarvis, C.H. and N. Stuart, 2001: A comparison among strategies for interpolating maximum and minimum daily air temperatures. Part I: The selection of "Guiding" topographic and land cover variables. *Journal of Applied Meteorology*, **40**, 1060-1074.
- Lindkvist, L., T. Gustavsson, and J. Bogren, 2000: A frost assessment method for mountainous areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, **102**, 51-67.
- 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.
- Yun, J.I., J.Y. Choi, Y.K. Yoon, and U. Chung, 2000: A spatial interpolation model for daily minimum temperature over mountainous regions. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **2**, 175-182.(In Korean with English abstract)
- Yun, J.I., J.Y. Choi, and J.H. Ahn, 2001: Seasonal trend of elevation effect on daily air temperature in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **3**, 96-104.(In Korean with English abstract)