

공간정보기술의 생태기후학적 활용

윤진일

경희대학교 생태정보연구실

GIS-RS Techniques Applied to Ecological Climatology

Jin I. Yun

Ecosystem Informatics Lab., Kyung Hee University

1. 서언

생태/농업모형의 적용범위는 대체로 기후, 토양 등 환경조건이 동일한 실험포장이거나 한 개 기상관측소가 대표할 수 있는 지역으로 제한되므로, 넓은 지역에 걸쳐 생태계 반응의 공간변이를 알아내기 위해서는 지리정보시스템 (geographic information system: GIS)과의 결합이 불가피하다. GIS는 불규칙하게 분포된 토양조사 및 기상관측자료로부터 규칙적인 격자단위의 자료평면을 생산할 수 있도록 해주며, 이들을 공간적으로 연결함으로써 효율적으로 저장, 관리할 수 있도록 해준다.

작물모형 등 농업생태계 관리를 위한 의사지원체계 (decision support system)를 구동시키거나 포장내 생산환경의 공간변이를 고려한 소위 정밀농법 (precision farming)을 도입하기 위해서는 필연적으로 대량의 정보를 취급해야 한다. 농업상의 정보라는 것은 공간적인 위치에 따라 분류되는 속성을 갖고 있다. 예컨대 한 지역의 농업생산 계획을 수립하고 합리적인 경영을 하기 위해서는 토양의 물리화학적 특성, 지역의 기후조건, 농경지의 지형 등이 필수적인 정보인데 이들은 모두 하나의 공통인자, 즉 지리좌표에 의해 연계되어 있다. 따라서 농업에 관련된 데이터베이스는 지리좌표라는 공통의 검색수단에 의해 관리되는 것이 가장 효율적이다. 지리정보시스템은 이러한 공간정보를 생성, 저장, 검색, 가공 및 출력하는 기능을 가진 특수한 데이터베이스 관리체계이다.

GIS에서 취급하는 데이터베이스는 한 지역의 지리좌표와 여기에 속한 각종 데이터로 구성된다. 이때 자료를 표현하는 기본단위에 따라 raster와 vector양식으로 구분하는데, raster는 원격탐사자료, 화상, 수치해발고도 등 좌표에 해당되는 cell이 기본단위이며, vector는 기상관측소, 하천, 토양통 등을 쉽게 표현할 수 있도록 점, 선, 다각형을 기본단위로 한다.

GIS는 자료저장 및 처리에 필요한 컴퓨터, 지도정보를 디지털 형태로 변환하는 디지털타이저와 스캐너, 처리결과를 하드카피로 만드는 플로터나 프린터, 그리고 고해상도 모니터와 같은 하드웨어로 구성된다. 여기에 자료의 입력, 저장, 변환, 가공, 검색 및 사용자 인터페이스 기능을 갖춘 프로그램, 즉 소프트웨어가 결합되어 하나의 시스템으로 구축된다.

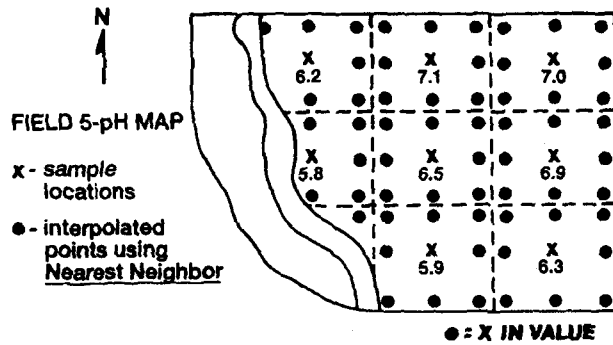
우리나라에서도 공간정보기술의 근간이 되는 국가기본도 제작사업이 국토지리정보원(구 국립지리원)의 주도로 진행되고 있으며, 이미 정밀토양도를 수치화한 농업과학기술원에서는 필지단위 토양정보의 수치화 작업을 추진하고 있어 곧 다양한 활용성파가 나올 것으로 기대된다. 본고에서는 기상청 기후자료에 범용 GIS 소프트웨어의 공간분석기법을 적용하여 고품질의 사과 생산에 적합한 지역을 탐색하는데 필요한 해상도 10m 급의 일 최고/최저기온도 제작과정을 소개한다.

2. 공간분석(Spatial Analysis)의 기초이론

공간분석이란 주어진 공간을 채우고 있는 "entity" 가 무엇인지(속성), 어디에 위치하고 있는지(좌표), 그리고 다른 entity 들과는 공간적으로 어떤 관계에 있는지(위상)를 알아내기 위한 과정이

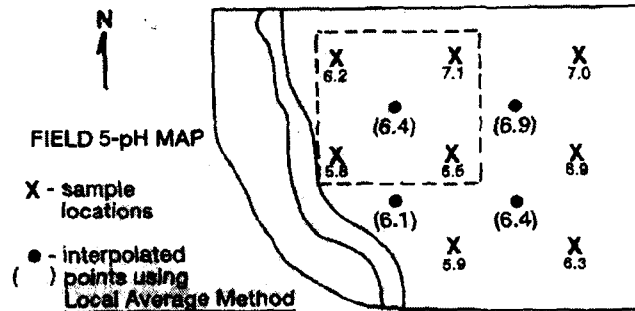
다. 공간분석을 위한 데이터 모형은 연속적인 공간변이를 잘 나타내는 raster 형식이 적격이다. 그러나 농업생태계 관리 측면에서 흔히 수행하는 토양조사, 기상관측, 식생 조사 및 시료분석으로부터 얻는 정보는 대부분 point 단위이다. 따라서 측정값 사이의 빈 공간을 채우기 위해서는 흔히 측정값을 “확장”하는 방법(내삽 혹은 외삽, inter- / extrapolation)을 사용한다. 즉 빈 공간 주변의 알고 있는 값들을 이용하여 미지의 값을 추정하는 과정인데 다음의 여러 가지 방법들이 쓰이고 있다.

1) Nearest neighbor : 가장 가까이 있는 실측값을 변형하지 않고 그대로 빈 공간의 추정값으로 받아들임. 예를 들어 토양시료로부터 pH를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다면 주변의 8개 빈 공간은 실측치와 동일한 값을 갖게 된다. 즉 시료채취 지점을 포함한 9개 격자점은 모두 같은 값을 갖는다.



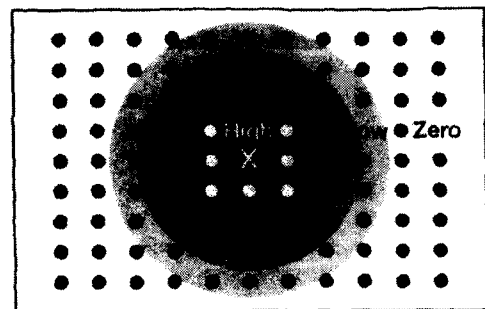
Grid points interpolated using the nearest neighbor method

2) Local average : 빈 공간 주변에 흩어져있는 측정값들 가운데 정해진 수만큼, 혹은 주어진 거리 안에 들어있는 측정값을 산술평균하여 빈 공간의 값으로 삼는다. 앞서 토양 산도의 분석결과를 토대로 이 방법을 적용하면 다음 그림과 같아진다.



Grid points interpolated using the local average method. Four points averaged to estimate the value of 6.4 in their center

3) Inverse distance weighting (IDW) : 가까이 있는 측정값일수록 빈 공간의 값에 큰 영향을 미치므로 이를 빈 공간과 측정값이 얻어진 지점간 거리에 반비례하는 가중치(weighting factor)로 환산한 후 local average를 계산하는 과정에 반영한다. neighbors 의 개수와 weighting 정도에 따라 계산값이 달라진다. 추정값의 최대 및 최소값은 실측값의 범위를 벗어날 수 없다. 다음 그림은 토양 산도 사례를 적용한 것이다.



X - Unknown Value
High-weighting
Low-weighting
Zero-weighting

Grid points interpolated using inverse distance weighting. Weighting decreases as points are further away from the interpolation point

4) Contouring : 측정값이 같은 점들을 연결하여 등치선을 그린다. 추정된 최대 혹은 최소값이 실측값의 범위를 벗어날 수 있다. 육안으로 등치선을 그리는 방법 대신 고무로 만든 자와 같이 신축성이 있는 도구를 이용해 측정값 사이를 fitting 하는 방법도 사용할 수 있다. 이것을 수학적으로 표현한 것이 Splining이다.

5) Kriging : 측정값에 존재하는 변이(variability)를 추정하고 이 변이를 토대로 거리에 따른 가중치를 부여하는 방법으로서 광물 탐사에 이 방법을 처음 적용했던 D. L. Krige 라는 사람의 이름을 따서 명명함. 먼저 반분산(semi-variance)을 계산한다. 임의의 두 관측값을 취하여 이들간의 편차를 제곱한 다음 둘로 나눔. 즉

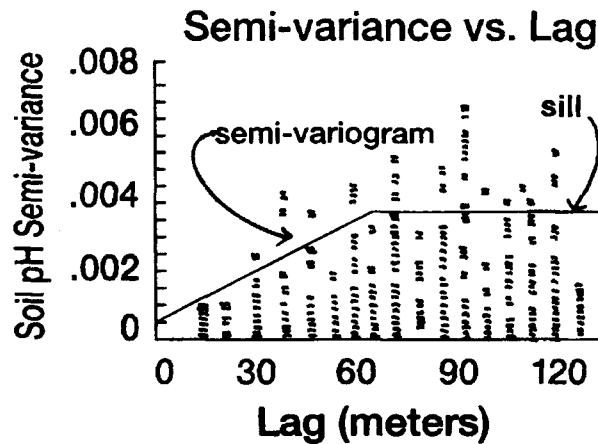
$$\frac{(pH_i - pH_j)^2}{2}$$

을 계산하여 이 것을 y축에, 계산에 사용된 두 지

점간의 거리를 x축에 두고 산포도(semi-variogram)를 작성한다. 두 지점간의 거리가 짧을 때에는 거리가 멀어질수록 반분산 값이 커지며, 어느 정도에 도달하면 분산의 증가는 멈춘다. 이 때의 최대 반분산값을 sill 이라고 한다. 이 경향을 주관적으로 두 직선에 의해 표현한 것이 semi-variogram이다. 분산의 증가기울기와 sill을 이용하여 내삽. 경사부분과 수평부분의 교점을 얻은 다음 이 교점보다 짧은 거리에 위치한 측정값에는 기울기를 이용한 IDW, 먼 거리에 있는 측정값에는 sill 값을 이용한 equal weighting 에 의해 전체 평균값을 얻어 이를 빈 공간의 추정값으로 삼는다.

3. 일 최저기온의 공간내삽

미관측점의 최저기온 공간내삽에는 평지의 경우 주변의 관측값들로부터 거리에 따른 가중치를 달리하여 평균한 IDW를 사용하나 복잡지형에서는 표고차와 찬 공기 집적을 고려한 변형 IDW를 사용한다. 선행연구에서는 복잡한 산악지형에서의 최저기온 공간내삽시 어려운 문제로 제기되는 냉기침강효과의 구현을 위해 격자점별 냉기유입량 계산을 토대로 한 실용적인 방법을 제시하였다. 냉기유입량의 계산과정은, 대상지역의 지형특성을 10m 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 냉기유입량을 독립변수로, 기존 공간내삽법에 의한 최저기온 추정오차를 종속변수로 둔 경험식을 도출한 바, 기존의 기온감율 내삽법에 의한 추정오차를 80% 이상 줄일 수 있었다.



Plot of semi-variances versus the distance (lags) between points used to calculate values. The Sill is a measure of the amount of variability. The sloped portion is a measure of the rate at which values change when moving from one point to another in the field

이 방법에서 미관측지점의 최저기온 추정값은 IDW에 의한 추정값에 정의 온난대효과와 부의 냉기집적효과가 더해진 것으로서 식 (1)로 표현할 수 있다.

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

테더존데를 이용한 야간 경계층 관측자료에 의하면 온난대효과는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_1 = \Delta T_{\max} [1 - \exp\{-0.01 \cdot (Z - 300)\}] \quad \text{-----} \quad (2)$$

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

$$\Delta T_{\max} = R \cdot \left(\frac{1}{R_{\max}} \right) \cdot 4 \quad (R : \text{일교차}, R_{\max} : \text{일교차의 최대값으로서 } 18^\circ\text{C})$$

냉기집적에 의한 기온하강분은 냉기유입량(사방 5개 격자점의 평균값)의 상용대수에 비례하며 역시 기온 일교차의 상대비율을 비례상수로 갖는다.

$$\varepsilon_2 = R \cdot \left(\frac{1}{R_{\max}} \right) \cdot \log_{10}(FA_5) \quad \text{-----} \quad (3)$$

여기서 FA_5 는 “5 cell average flow accumulation”이고, $\frac{1}{R_{\max}} \rightarrow \tau$, $FA_5 \rightarrow \varphi_5$ 로 두면 최저기온추정식 (1)은 다음 식으로 바뀐다.

$$\begin{aligned} T_{\min} &= T_{idw} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \\ &= T_{idw} + 4 \cdot R \cdot \tau (1 - e^{-0.01(Z-300)}) - R \cdot \tau \cdot \log_{10} \varphi_5 \quad \text{-----} \quad (4) \end{aligned}$$

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 그치지만, 우리가 사용한 방법은 통계적인 방법임에도 불구하고 기온공간변이의 비선형성을 토대로 실측값의 범위를 벗어나는 공간극값의 추정이 가능하다. 예를 들어 하나의 과수주산단지 동이한 시군으로서 기상청의 최저기온예보역시 같은 값이 발표된다. 그러나 늦서리에 의한 피해지역의 분포는 매우 다양할 수 있으며, 우리의 방법은 이 다양성을 표현해주는 좋은 수단이 될 수 있다.

과거에도 지형특성의 정량화를 통해 최저기온을 추정하거나 서리위험지를 판별하는 방법들이 많이 제시되었으며, 최근에는 GIS 기술을 이용하여 더욱 정교하면서도 사용하기 쉬운 방법으로 변신하고 있다. 하지만 거의가 최저기온 형성과정에 간접적으로 영향을 미치는 지형특성의 정량화를 통해 구현하고 있는데, 우리의 방법은 최저기온을 형성하는 찬 공기의 흐름과 집적을 직접 모의했다는 데 차별성이 있다.

4. 일 최고기온의 공간내삽

일 최고기온의 추정은 캐나다 산림청에서 개발한 BioSIM을 이용한다. 기존의 표고차 보정에 의한 방법에 비해 BioSIM에서 일 최고기온을 추정하는 방법은 매우 탁월하다. 일 최고기온의 결정에는 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 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

$$\varepsilon = U \cdot R \cdot \Delta T_R \text{ ----- (5)}$$

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

$$U = \frac{\varphi_t - \varphi_0}{\Delta \varphi_{\max}} \text{ ----- (6)}$$

이 식에서 분모는 북반구에서 관측되는 수평면과 경사면간의 오후 4시간 동안 일사량 수광편차 가운데 최대값 (15 MJ m²)으로서, Regniere (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.

과열지수 $grid$ 는 태양의 위치-사면 형태 사이의 기하학적 관계에 따라 연중 변화하므로 매일의 $grid$ 를 별도로 제작해야 한다. 경사면과 수평면 사이의 일사량 차이, 즉 식 (6)의 분모에 해당하는 값은 정과 윤(2002)의 방법에 따라 일사성분별로 계산할 수 있다. 우선 지표면에 도달하는 일사량은 대기외일사량(태양상수의 한 시간 적산값, S_0)으로부터 추정하는데, 이 때 관측시점의 태양고도(α)에 따라 직달성분(S_{b0}) 및 산란성분(S_{a0})으로 구분한다.

$$S_{b0} = S_0 \tau \frac{1}{\sin \alpha} \sin \alpha \text{ ----- (7)}$$

$$S_{a0} = S_0(0.271 - 0.294\tau \frac{1}{\sin \alpha}) \sin \alpha \text{ ----- (8)}$$

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.

$$S_{b1} = S_{b0} \frac{\{\cos \alpha \cos(\beta - b) \sin a + \sin \alpha \cos a\}}{\sin \alpha} \text{ ---- (9)}$$

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

$$S_{a1} = S_{a0} \cos^2\left(\frac{a}{2}\right) \text{ ----- (10)}$$

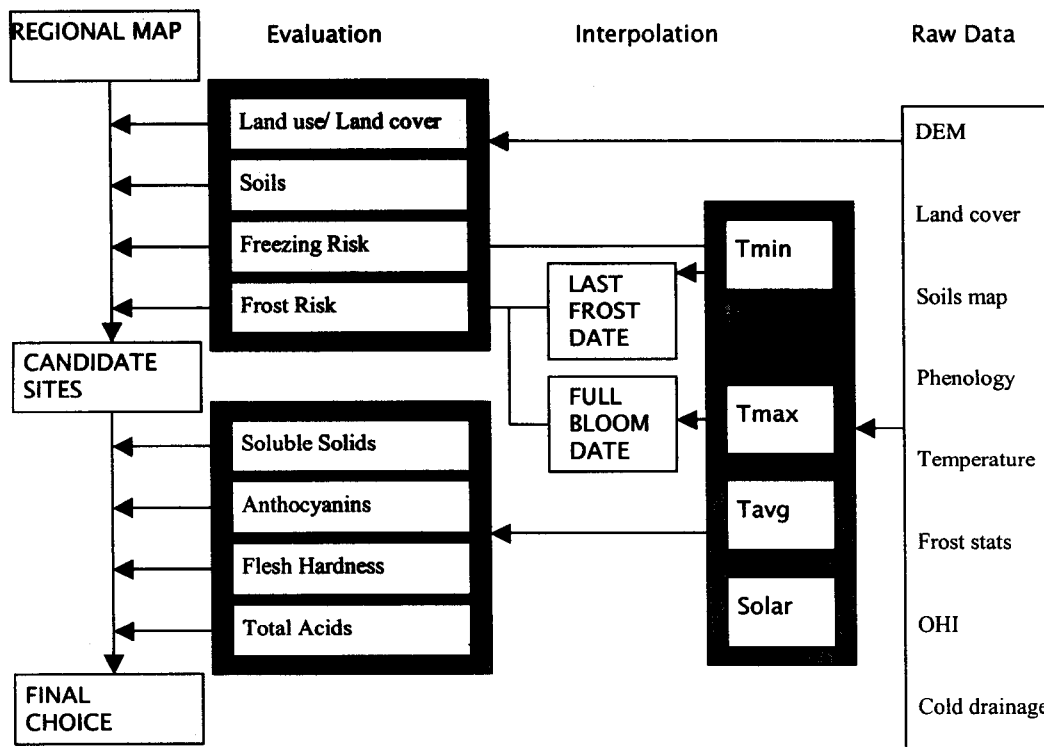
로 표현된다. 여기서 $\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$ 는 1을 최대값으로 하는 sky view factor를 가리킨다.

두 가지 성분을 합치면 각각 수평면과 경사면이 받는 시간대별 일사량을 구할 수 있으며, 이들을 오전 11시부터 오후 3시까지 적산하여 양자의 차이를 계산한 것이 식 (6)의 분자에 해당한다.

5. 일 최고/최저기온 수치기후도의 활용

일 최고기온과 최저기온이 알려지면 웬만한 생태기후도는 모두 만들 수 있다. 우선 각종 과수의 만개기를 예측할 수 있으며, 마지막 서리가 온 날도 추정할 수 있다. 이들로부터 만개기에 늦서리에 의한 피해가 있을 것인지 그 위험도를 계산할 수 있다. 또한 극최저기온 분포를 재현기간에 따라 작성하면 동해위험을 파악할 수 있다. 나아가 일 최고-최저기온으로부터 시간별 기온을 내삽할 수 있으므로 시간별 Chill Unit을 계산하여 많은 온대과수의 휴면해제일을 예측하는 것도 가능하다.

경험적이긴 하나 과일의 품질과 기온과의 관계가 정립되어있으면 품질영향인자별로 재배적지를 선별할 수도 있다. 다음 그림은 공간분석에 의한 기온기후도 작성 및 고품질 과수 재배가능지역의 탐색에 이들을 활용하는 과정을 표현한 것이다.



인용문헌

정유란, 윤진일, 2002: 일사 수광량 보정에 의한 산악지대 매시기온의 공간내삽. 한국농림기상학회지 4(2), 95-102

Regnier, J., 1996: A generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models. *Environmental Entomology* 25(5), 869-881.