

도시효과를 고려한 일 최저기온의 월별 평년값 분포 추정

최재연¹ · 윤진일²

¹경기도 화성시농업기술센터, ²경희대학교 생태시스템공학과/생명자원과학연구원
(2002년 9월 6일 접수; 2002년 10월 15일 수락)

Implementing the Urban Effect in an Interpolation Scheme for Monthly Normals of Daily Minimum Temperature

Jae-Yeon Choi¹ and Jin I. Yun²

¹Hwasung City Agricultural Technology Center, KARES, Hwaseong 445-890, Korea
²Department of Ecosystems Engineering/Institute of Life Science and Natural Resources,
Kyung Hee University, Suwon 449-701, Korea

(Received September 6, 2002; Accepted October 15, 2002)

ABSTRACT

This study was conducted to remove the urban heat island effects embedded in the interpolated surfaces of daily minimum temperature in the Korean Peninsula. Fifty six standard weather stations are usually used to generate the gridded temperature surface in South Korea. Since most of the weather stations are located in heavily populated and urbanized areas, the observed minimum temperature data are contaminated with the so-called urban heat island effect. Without an appropriate correction, temperature estimates over rural area or forests might deviate significantly from the actual values. We simulated the spatial pattern of population distribution within any single population reporting district (city or county) by allocating the reported population to the "urban" pixels of a land cover map with a 30 by 30 m spacing. By using this "digital population model" (DPM), we can simulate the horizontal diffusion of urban effect, which is not possible with the spatially discontinuous nature of the population statistics for each city or county. The temperature estimation error from the existing interpolation scheme, which considers both the distance and the altitude effects, was regressed to the DPMs smoothed at 5 different scales, i.e., the radial extent of 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 and 5.0 km. Optimum regression models were used in conjunction with the distance-altitude interpolation to predict monthly normals of daily minimum temperature in South Korea for 1971-2000 period. Cross validation showed around 50% reduction in terms of RMSE and MAE over all months compared with those by the conventional method.

Key words : global warming, urbanization, urban heat island, digital population model

I. 서 언

우리나라 기상청에서 운영하고 있는 표준기상관측소는 70여 개 정도이며 이 중 제주도를 포함한 도서지방을 제외하면 56개소이다. 이들 표준기상관측소의 기

후값을 이용하여 비관측 지점의 기후값을 추정하는 공간내삽방법으로는 거리역산가중법(Inverse Distance Weighting : IDW)이 주로 이용되고 있다. 우리나라와 같이 지형의 기복이 심한 곳에서는 IDW에 의한 비관측점의 기온추정오차 가운데 가장 큰 부분이 해발

고도의 편차에 의한 것이다. 따라서 추정에 사용된 지점들의 고도값으로부터 기온추정과 동일한 IDW 내삽에 의해 생성한 “가상지형”과, 비관측지점의 실제 고도간 편차를 구하여 기온감율을 보정해 주면 상당부분 개선이 이루어진다(Yun *et al.*, 2000; 2001).

그러나 일 최저기온의 경우에는 고도편차를 보정하여도 2°C 이상 과다 추정되는 것이 보통이다(Choi, 2002). 이것은 표준기상관측소의 위치가 대부분 도시지역으로서 도시열섬효과가 비도시 지역에도 동일하게 적용되어 왜곡된 기온을 나타내기 때문이다. 따라서 도시열섬효과를 제거하지 않은 평년기후도를 농업 혹은 삼림생태계 연구에 사용한다면 그 결과의 신뢰성이 훼손될 가능성도 있다. 한반도에서 진행되는 온난화의 경향을 지역적으로 파악하고, 궁극적으로 장기 기후변화에 대한 올바른 예측과 대응을 위해서는 “전원지역 평년기후” (Rural Climatic Normals)의 작성이 시급하다 할 것이다.

도시열섬효과를 정량적으로 추정하려는 연구가 국내외에서 활발히 진행되어 왔다. Fujibe(1988)와 Kato(1996)는 일본, 중국 및 미국의 자료를 이용하여 기온 상승에 기여하는 도시효과를 정량적으로 추정하였으며, Jones *et al.*(1989)은 미국의 경우 1901년부터 1984년까지 도시화에 의한 기온편향이 20세기 기온상승을보다 다소 작은 0.1°C라고 하였고, Hansen and Lebedeff(1987)는 그보다 큰 0.3~0.4°C의 도시화 편향을 제시하였다. Nakatsuji *et al.*(1997)은 일본 Kansai 지역 13개 관측소의 100년간 자료분석에서 도시화에 의한 최저기온 상승이 1월의 경우 최대 4°C에 달한다고 보고하였다. Kang(1995)은 도시화에 의한 미국의 기온 상승율이 평균 0.15°C 정도라고 하였다.

우리 나라를 포함한 동아시아 지역의 기온상승 역시 상당부분 도시화에 기인한 것으로 보고 있다(Hulme *et al.*, 1994). 1904년부터 1990년까지 우리나라의 연평균기온은 약 1°C 올라갔는데, 서울은 1.5°C가 상승한 반면 추풍령과 울릉도는 변함이 없다는 사실에서 도시열섬효과가 한반도 기온변화에서 상당 부분을 차지하고 있다는 것을 알 수 있다. 특히 1950년대 이후 도시화가 급격히 진행된 수십년 동안에 평균기온 증가 추세가 뚜렷하게 나타난다(Chung and Yoon, 1999).

Ryoo *et al.*(1993)은 장기간의 기온자료를 이용하여 우리나라의 대도시별 기온상승경향을 조사하여 내륙도시가 해안도시보다 기온상승경향이 강하며, 같은 해안

도시, 혹은 내륙도시끼리 비교했을 때 도시규모가 클 경우 기온상승경향이 강하다고 하였다. Rho(1973)는 서울의 기온이 상승하고 있음을 표준기온관측자료의 분석을 통해 처음으로 보고하였는데, 최근에는 대도시 지역에서 고밀도 관측망을 구성하여 지역 내의 기온변이와 도시열섬효과를 본격적으로 연구하고 있다. 부산에서 관측된 계절별 도시열섬효과와 최대값은 봄철에 6.1°C, 여름철에 3.0°C, 가을철에 7.0°C, 그리고 겨울철에 9.8°C 였으며(Han *et al.*, 1993), 대구에서는 임의의 날 야간에 나타난 도시열섬효과와 최대값이 봄의 경우 6.9°C, 여름의 경우 4.7°C, 가을의 경우 6.6°C 그리고 겨울의 경우 4.4°C로 나타났다(Yoon *et al.*, 1994). 최근에는 Lee and Kang(1997)과 Kim *et al.*(1999)이 한반도 기온 자료에 경험적 적고함수를 적용하여 도시화 효과에 의한 승온량을 정량적으로 표현하고, 대도시와 인접 소도시 사이의 기온차를 이용하여 도시화 승온을 추정한 결과 한반도 평균 도시화 경향이 지난 20년간 0.3°C 정도임을 제시하였다. Ryoo and Moon(1995)은 40년 간 포항의 평균 기온 시계열을 이용하여 산업화에 의한 기온상승을 탐지하였다. 이들은 포항제철이 설립된 이후 18년간의 도시화 편향을 약 0.69°C로 추정하였다.

이러한 도시열섬효과를 제거하기 위해 일반적으로 인구 등급이나 인구 증가율을 이용하는 방법이 많이 이용되고 있다. 도시와 인접한 전원지역간 기온차의 최대값(열섬강도)은 도시인구가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 일정 수준 이상에서는 그 증가 추세가 둔화된다. 도시의 규모를 인구의 자연대수로 표현할 경우 도시열섬효과와 직선적인 관계를 갖는다(Oke, 1987). 또한 도시화에 의한 기온상승은 인구 증가율 뿐만 아니라 도시의 인구수에도 관련이 있어 인구가 1만명만 되어도 도시화 효과가 있다고 하였으며, 미국에서 운영중인 1,000여 개 관측망 자료를 이용하여 도시와 인접한 비도시의 온도차가 인구수의 0.45승에 비례하는 관계를 얻기도 하였다(Karl *et al.*, 1988). Hulme *et al.*(1994)은 지난 40년간 중국인구의 변화에 따른 기온변화를 조사하여 약 0.33°C의 도시화 효과를 추정하였다.

우리 나라에서도 최근 75년간 서울의 기온자료를 분석하여 기온상승 경향과 도시의 성장률 사이에 밀접한 관련이 있고, 서울 근교 전원지역과 도심 사이의 기온차이가 뚜렷하다는 사실이 보고되었다(Cho *et al.*,

1988). Park(1986)은 서울 및 주변도시들의 최대 열섬 효과에 대한 체계적인 연구를 통하여 도시의 인구수와 최대 도시 열섬효과간의 관계를 나타내는 회귀 방정식을 유도하고 도시의 최대 열섬효과에 있어서 인구 30 만명을 기준으로 그 회귀식의 기울기가 크게 다르다고 하였다.

그러나 이들 연구결과를 실제에 적용하여 전원지역 평년기후도를 작성하는 데는 몇 가지 선결조건이 있다. 일반적으로 도시열섬효과를 대표하는 인구자료는 시·군 행정구역 단위로 얻어지는데, 같은 시·군내에서는 어느 곳이나 동일한 인구를 갖고 있어 도시열섬효과와 공간적 변이를 표현할 수 없다. 또한 각 시·군의 도시열섬효과는 행정구역상의 경계선을 따라 불연속적인 값을 가지게 되어 비현실적인 기온분포를 그리게 된다. 즉, 현재의 방법으로는 수평공간에서 자연스럽게 확산되는 도시열섬효과의 정확한 표현이 불가능한 것이다. 이러한 문제점을 해결하는 방법중의 하나로 인공위성에서 관측한 야간의 불빛 밝기에 따라 대도시, 중소도시, 촌락으로 분류하여 도시열섬효과를 추정하는 방법이 제안되기도 하였다(Peterson *et al.*, 1990; Hansen *et al.*, 2001).

본 연구에서는 시군별 인구자료를 규칙적인 격자점 단위의 인구로 변환하고 이를 도시열섬효과와 최소공간단위로 간주하여, 기존의 고도보정 IDW 내삽에 의한 기온추정오차를 설명할 수 있는 모형을 작성하였다. 1971-2000 기간 남한 전역의 일 최저기온 월별 평년값 내삽과정에 이 모형을 적용하고 추정기온의 신뢰성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 일 최저기온의 내삽모형

비관측 지점의 기온을 IDW 내삽에 의해 추정할 경우 추정오차의 많은 부분은 고도편차에 의해 발생하게 된다. 여기서 고도편차란 관측지점들의 해발고도(z_i)를 이용하여 역시 IDW 내삽에 의해 만든 “가상지형”(Virtual Digital Elevation Model: VDDEM)과 비관측점의 실제고도(z)간 편차를 가리킨다(Yun *et al.*, 2000). 고도편차에 의해 생기는 기온추정오차는 이 고도편차에 기온감률(Γ)을 곱해서 보정하는 방법으로 해소시킬 수 있다.

일 최저기온의 경우 해발고도 뿐만 아니라 도시열섬

효과에 의해서도 오차가 발생하게 되는데, 도시열섬효과 역시 관측지점의 “열섬효과”를 이용하여 IDW 내삽에 의해 작성한 “가상열섬효과”로부터 비관측 지점의 실제 “열섬효과”간 편차를 구하여 적절한 계수를 곱해줌으로써 표현할 수 있을 것이다. 예를 들어 “열섬효과”의 크기를 인구의 자연대수로 표현할 수 있다면, 기온의 IDW 내삽모형은 다음 식으로 고쳐 쓸 수 있다(Yun *et al.*, 2001).

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

- 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

2.2. 수치인구모형(Digital Population Model: DPM)

식 (1)에서 도시열섬효과를 모의하기 위한 “인구” P 는 행정구역단위의 전체인구나 인구밀도와는 다른 뜻을 갖고 있다. 앞서 언급한 것처럼 공간내삽과정에서 자연스럽게 확산되는 도시열섬효과와 표현을 위해서는 시·군의 인구를 행정구역이 아닌 규칙적인 격자점 단위로 변환하는 작업이 필요하다.

먼저 전국의 지표피복(시가지, 농지, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역)을 30 m×30 m의 정방형 격자 단위로 분류한 “대분류” 지표피복도를 환경부(<http://www.me.go.kr>) 환경지도 서비스로부터 입수하였다. 기준연도는 1980년으로서 본 연구에서는 이 시기의 전국토 면적 가운데 도시에 해당되는 지역만 발췌하기 위해서 피복분류상 “시가지”에 해당되는 픽셀만을 추출하였다. 서울과 같은 대도시 지역이라도 녹지나 산림은 제외되고 순수하게 주거지역, 상업지역, 도로 등 도시열섬효과를 창출할 수 있는 지역만이 해당된다(Fig. 1).



Fig. 1. Urbanized areas with a 30×30 m pixel spacing extracted from the land cover classification map.

다음에는 시·군별 인구자료를 통계청(<http://www.nso.go.kr>)의 통계정보시스템으로부터 수집하였다. 우리나라 인구 총 조사는 1925년부터 시작되었으며 5년마다 통계청 사회통계국 인구조사과에서 실시하고 있다. 제주도를 제외한 1985년의 인구를 1971년~2000년 기간의 평균인구로 삼아 서울특별시와 6대 광역시(부산, 울산, 대구, 대전, 인천, 광주), 그리고 시·군으로 정리하였다. 시·군으로 정리된 인구를 각 시·도의 홈페이지에 나와 있는 연혁을 참고하여 2000년의 행정구역에 맞춰 다시 정리하고, 행정자치부(<http://www.mogaha.go.kr>)에서 작성한 시·군 행정구역수치지도에 속성정보로 추가하였다. '시가지' 피복 위에 행정구역 수치지도 중첩시키고 해당 시·군 면적에 포함되는 시가지 픽셀($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$)을 카운트하였다(Fig. 2).

1985년의 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

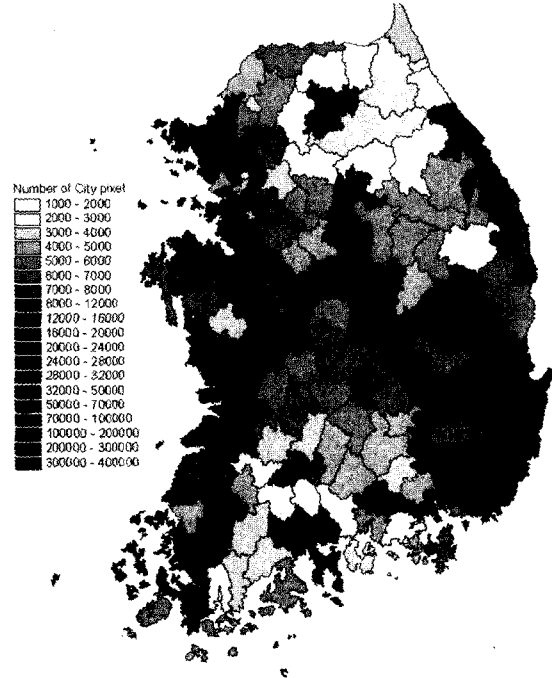


Fig. 2. Number of urban pixels with a 30×30 m spacing falling within each administrative boundary.

행정구역 형상의 속성정보인 "시가지인구밀도"를 곱해줌으로써 한반도에서의 실제 인구 분포를 '디지털' 값으로 바꾸어 표현하였다. 이 디지털 인구분포도는 농경지, 산림, 하천, 호수는 물론, 도시 안의 초지나 내대지 등도 제외하고 실제 사람이 살고 있는 지역을 대상으로 평균인구를 30 m 간격의 픽셀로 나타낸 것이다. 계산편의를 위해 이들 평균인구 픽셀 9개씩을 묶어서 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 픽셀로 변환하고 이를 수치인구모형(DPM)이라 명하였다.

한편, 도시열섬효과는 중심점의 인구 뿐만 아니라 주변 픽셀들의 인구에 의해서도 영향을 받는다. 기온 관측값의 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 (1)의 인구 'P'는 DPM 자체가 아니라 반경 500 m , $1,500 \text{ m}$, $2,500 \text{ m}$, $3,500 \text{ m}$ 및 $5,000 \text{ m}$ 이내의 DPM을 포함한 값으로 대치하고 이들과 도시열섬효과간의 관계를 탐색하였다.

2.3. 기온추정오차와 인구편차간 관계식 도출

기상청 산하 56개 표준기상관측소 가운데 무작위로 25개를 선택하여 관측소가 포함된 픽셀의 인구(DPM)를 반경별로 하나씩 추출하고, 이를 “실제인구”로 삼았다. 이들 인구자료를 이용하여 IDW 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(Climatological Normals of Korea)’로부터 1971년부터 2000년까지 56개 지점에서 관측된 평년의 월별 일 최저기온자료를 수집하였다. 이들 중 25개소의 자료를 이용해 단순 IDW 및 고도보정 IDW 내삽법으로 남한 전역의 월별

추정기온을 250 m 해상도로 계산하였다(Yun *et al.*, 2001). 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(DPM)에 비해 작은 곳은 제외하였다. 제외된 지역은 반경 500 m일 때 ‘양평’과 ‘홍천’ 등 두 곳이며, 1,500 m일 때는 ‘홍천’ 한 곳이다. 양평의 인구편차는 반경 500 m일 때 1,193명이며, 홍천은 500 m일 때 1,168명, 1,500 m일 때 3,757명이다. 반경별 회귀식 5개 가운데 결정계수가 가장 큰 것을 최적회귀식으로 선발하였다.

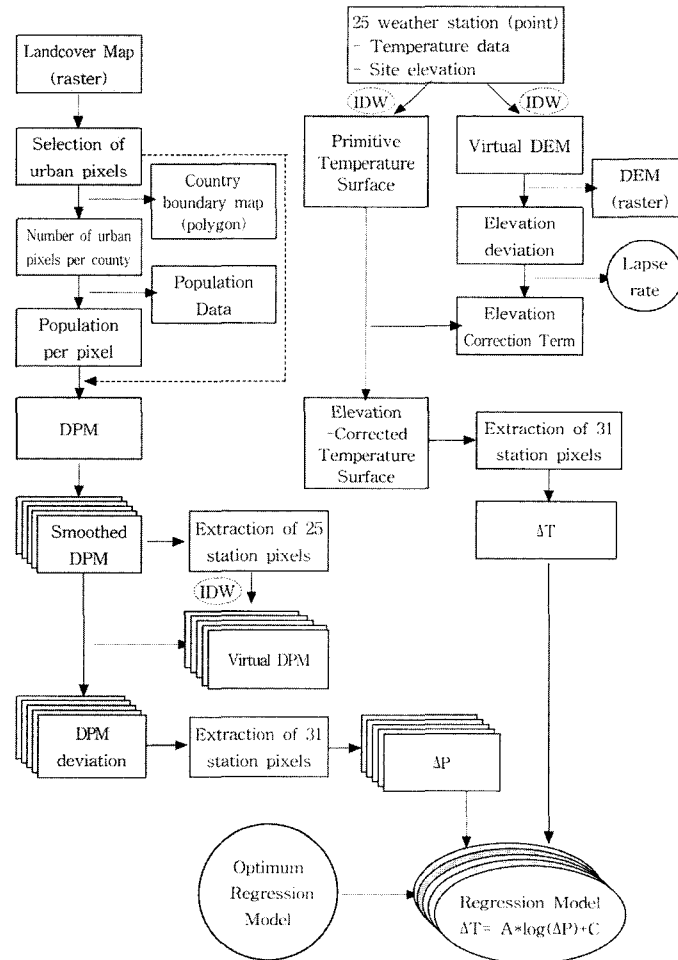


Fig. 3. Selection procedure for the optimum regression equation of urban heat island based on the digital population model.

상기 과정을 흐름도로 요약한 것이 Fig. 3이다.

2.4. 모형의 검증

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 기온감율값을 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 최적화귀식에 해당되는 DPM으로부터 55개 지점의 픽셀인구를 추출하였다. 추출된 인구값을 이용하여 IDW 내삽에 의해 가상의 인구표면을 만들고 실제 인구와의 편차를 계산하였다. 인구편차의 자연대수를 취한 후, 최적화귀식에 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 실측기온과 비교하여 추정오차를 산출하였다. 이러한 방법으로 월별로 각각 56개씩의 추정오차 세트를 획득하였다. 비교를 위해 단순 IDW 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.

III. 결과 및 고찰

3.1. 수치인구모형

시가지 픽셀 하나 당 평균인구를 지표 피복도 상에 시가지로 분류된 곳에만 배치하여 실제 인구분포를 모의한 수치인구모형(DPM)을 생성하였다(Fig. 4). DPM의 픽셀 크기는 90 m×90 m이며, 픽셀당 최대 510명까지의 인구를 갖는다. 이 모형에 따르면 우리나라 실제 인구밀도는 지역에 따라 평균 4.8명(1 km² 환산 시 144만 명)에 이르는데, 고층 아파트 밀집지역이 여기에 해당될 것이다. 원래의 DPM을 반경 500 m,

1,500 m, 2,500 m, 3,500 m 및 5,000 m로 각각 평활화(smoothing) 할 경우에는 오염물질의 확산처럼 인구밀집도가 묽어지는 동시에 그 영역이 확대되는 것을 볼 수 있다. 반경 2,500 m로 평활화 한 경우 최대 거주인구는 548,000명으로 평균주거밀도는 평당 0.1명 정도로 줄어든다.

3.2. 도시열섬효과 모형

반경 500 m, 1,500 m, 2,500 m, 3,500 m 및 5,000 m로 평활화한 DPM의 31개 지점 편차(자연대수)에 기온추정오차를 회귀시켜 보면 연중 결정계수가 가장 높게 나타나는 것은 반경 2,500 m임을 알 수 있다(Fig. 5A). 500 m, 1,500 m, 3,500 m는 현저히 낮은 결정계수를 보이며, 2,500 m와 5,000 m를 비교하면 한후기에는 양자가 비슷한 값을 보이나 난후기에는 2,500 m 반경에서 평활화 한 경우가 높다. 이것은 DPM을 반경 2,500 m 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 여름철보다는 그 영향이 상대적으로 적다는 것이다. 반경 2,500 m일 때의 월별 회귀식을 보면, 결정계수가 가장 높은 달은 8월로 0.653 이었으며 가장 낮은 달은 1월로 0.342 였다. 즉, 8월달은 기존방법(고도보정 IDW)에 의한 일최저기온 추정오차의 65%를 도시 열섬효과를 보정함으로써 제거할 수 있지만, 1월달은 그 절반인 34% 만을 제거할 수 있음을 의미한다. 하지만 추정오차의 절대값이 여름보다는 겨울철에 훨씬 크다는 사실을 상기하면 겨울철 열섬효과 보정이 기여하는 바가 적다고는 할 수 없다. 또한 이미 잘 알려진 겨울철에 크고 여름철에 작은 도시열섬효과와 계절 별 강도와 이 실험의 결과와는 전혀 무관하다. 실제로 회귀식의 기울기는 겨울철에 오히려 크고 여름철에 작음을 알 수 있다(Fig. 5B). 여기서 기울기는 인구편차에 따른 기온의 변화이므로, 같은 인구편차에 의해 나타나는 도시열섬강도라 할지라도 겨울철에는 큰 반면 여름철에는 작음을 의미한다. 즉, 인구편차가 10,000명이라 하면 가을기가 큰 12월달은 0.4°C가 변하는 반면에 기울기가 작은 7월달은 0.02°C로서 거의 변화가 없음을 의미한다.

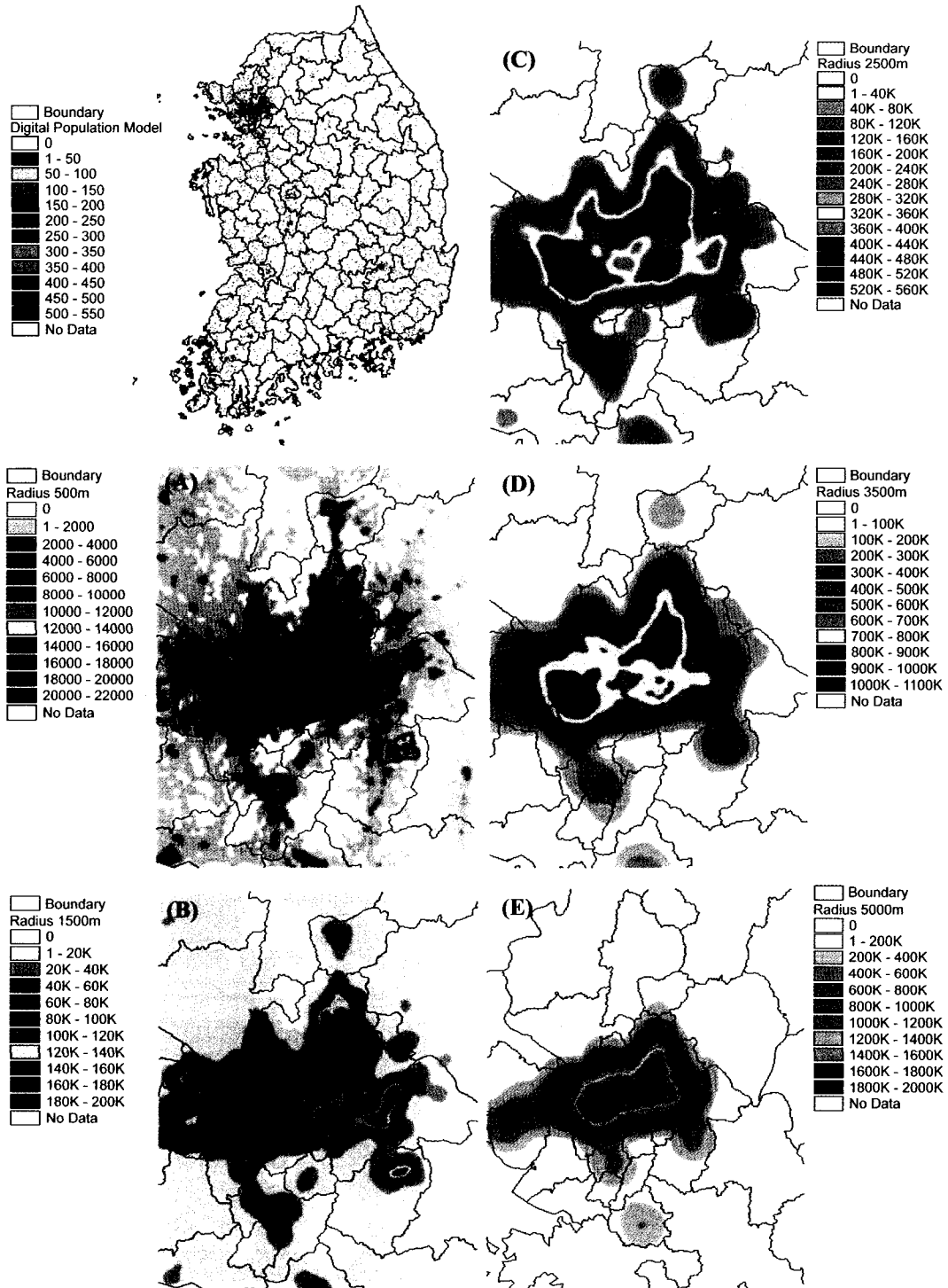


Fig. 4. A digitized pattern of population distribution simulated by the 90 m DPM (Digital Population Model). Also shown are zoomed DPM images of Seoul metropolitan area smoothed for the radial extent of 500 m (A), 1.5 km (B), 2.5 km (C), 3.5 km (D) and 5 km (E).

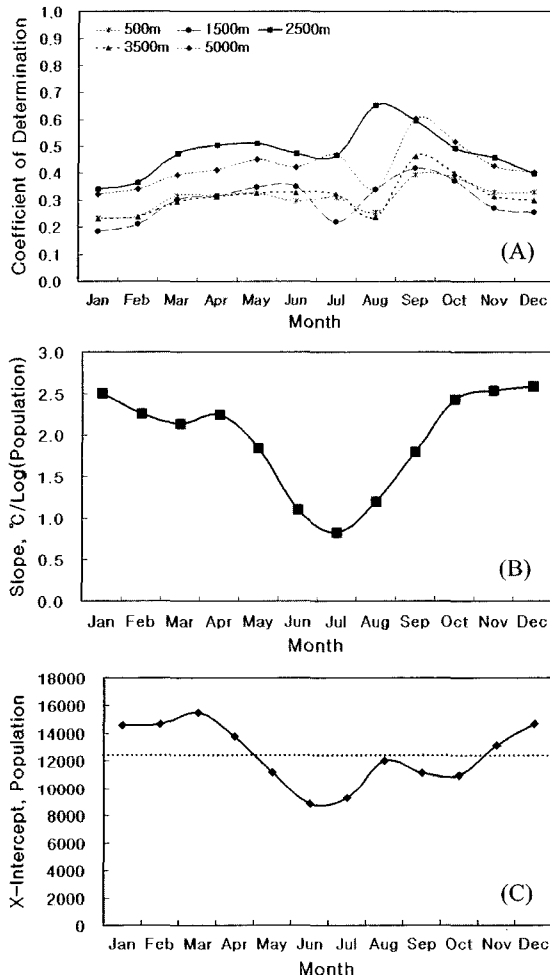


Fig. 5. Seasonal variation in the coefficient of determination (A), the slope of regression coefficient (B), and the X-axis intercept (C) for the regression equations with different smoothing extent.

회귀식의 x 축 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 2,500 m 내의 상주인구가 최소한 12,000명 이상은 되어야 나타난다고 할 수 있다(Fig. 5C).

3.3. 모형의 신뢰성

기존의 추정법(고도보정 내삽)에 의해 일 최저기온을 추정해 보면 예외 없이 겨울철의 추정오차가 여름철보다 훨씬 크게 나타난다(Yun *et al.*, 2001). DPM을

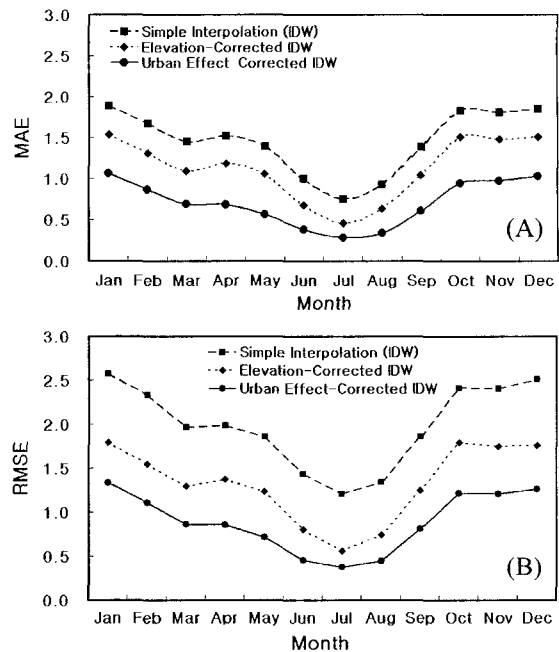


Fig. 6. Seasonal change in MAE (A) and RMSE (B) of the estimated temperature by the DPM-based urban heat island effect model. Results of existing methods (a simple IDW and the elevation effect corrected IDW) are shown for the comparison purpose.

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 단순 내삽이나 고도보정 내삽의 계절변동과 유사하지만 추정오차의 범위는 연중 1°C 내외로 현저하게 감소하였다(Fig. 6).

이 모형을 이용하여 산출한 1971-2000 평년 1월의 일 최저기온 분포도가 Fig. 7 이다. 250 m 수평 격자 간격으로 계산된 기온값으로서 기존의 거리만 고려한 내삽 결과, 혹은 거리와 고도를 동시에 보정한 결과에 비해 대도시 부근의 변화가 현저하다.

표준기상관측자료의 공간 내삽에 의한 기온추정은 그 목적이 삼림, 농경지 등 인구밀도가 낮은 지역의 정확한 기후를 파악하기 위함이다. 특히 이들 지역에서의 일 최저기온 정보는 냉해, 동상해 등 기상재해는 물론, 생물계절과 밀접한 관련이 있어 농업 분야 활용가치가 매우 크다. 따라서 일 최저기온의 공간내삽 과정에서 발생하는 추정오차를 줄여 최소한의 실용성을 확보하기 위한 연구가 많이 수행되었지만, 근본

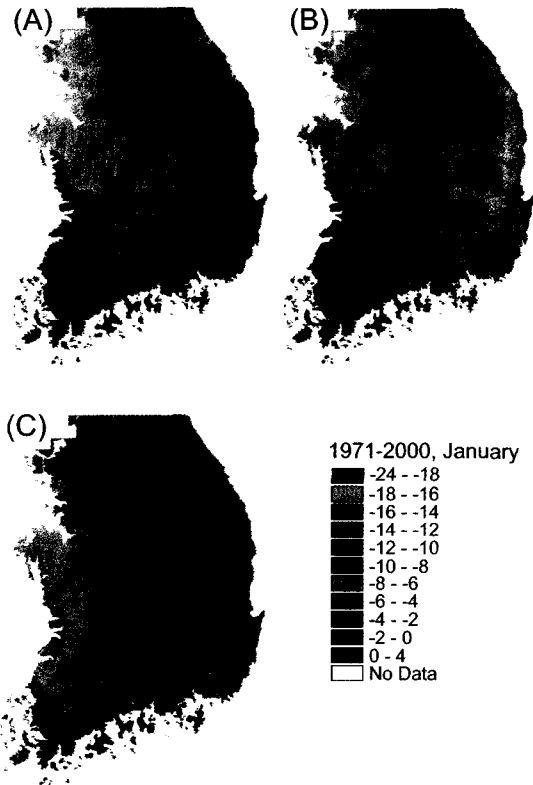


Fig. 7. Daily minimum temperature normals of January (1971-2000) estimated by a simple IDW (A), the elevation effect corrected IDW (B), and the population effect corrected IDW (C).

적인 오류, 즉 편측자료에 포함된 도시열섬효과의 제거방법을 제시하지는 못했다.

본 연구에서는 한반도 지표피복 분류도와 수치지형도 등 용이하게 구할 수 있는 공간정보를 기존의 인구통계자료와 적절히 결합함으로써 “수치인구모형”(DPM)을 제작하였다. DPM과 유사한 개념의 공간정보가 만들어지거나 사용되었다는 보고는 아직 없는 것으로 보이며, DPM 창안만으로도 연구의 가치를 인정받을 수 있을 것이다. 나아가 DPM의 첫 번째 용도로서 도시열섬효과를 성공적으로 모의하였다는 것은 기후변화 시대를 맞이하여 앞으로의 다양한 활용가능성을 시사한다. 본 연구를 통해 작성된 250 m 해상도의 평년 월별 일 최저기온분포도는 정밀도와 신뢰성에 있어서 지금까지 제작된 전국규모의 기온분포도 가운데 가장 우수하다고 할 수 있다. 나아가 과거의 인구자료를 이용하면 유사한 방법에 의해 1951년~1980년, 1961년~1990년의 전원지역평년기후도가 작성될 수 있

을 것이다. 따라서 검증되지 않은 미래의 기후시나리오에 의존해 온 이론적 기후변화연구에 획기적인 기후변화의 실증자료로서 사용될 수 있을 것이며, 이를 이용하여 농업지대의 정밀구분, 농업지대 및 삼림의 증발산량 추정, 삼림 생태계의 변화와 같은 생태계 영향평가에 이용될 수 있을 것이다.

하지만 본 연구에서 제시한 250 m 해상도는 동상해 경감이나 작물재배적지 탐색용으로는 부적당하다. 냉기의 유입이나 온난대 효과 등 미세지형에 의해 형성되는 국지적인 기온분포를 추정하기 위해서는 훨씬 고해상도의 기온추정모형이 요구된다. 또한 영농활동과 농작물의 생육에 미치는 대기운동이나 기상현상의 공간적 규모가 작아질수록 시간적 규모 역시 축소되는 점을 감안한다면, 본 연구에서 대상으로 삼은 30년 평년기후값에서 더 나아가 실시간 지표 기상장의 공간내삽기술도 개발되어야 할 것이다.

IV. 적 요

주로 도시에 소재하는 표준기상관측소 자료의 공간내삽에 의해 일 최저기온의 평년값을 추정할 때, 도시열섬효과의 전이에 의해 전원지역에서 과다추정되는 오류를 수정하기 위해 본 연구를 수행하였다. 도시열섬효과의 공간적인 확산을 모의하기 위해 먼저 불연속적인 변량인 시군 행정구역단위 인구를 지표피복도 상의 시가지 픽셀에만 할당하여 규칙적인 격자점 단위의 평균인구로 변환함으로써 연속적인 변량인 수치인구모형(DPM)으로 표현하였다. 다섯 가지 평활화 DPM 가운데 최적으로 판명된 사망 2.5 km DPM과 기온추정오차간 회귀식을 기존의 거리-고도 보정 내삽과정에 결합하였다. 이 방법을 적용하여 추정된 평년(1971-2000) 월별 일 최저기온의 추정오차는 기존방법에 비해 최소 50%가 개선되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-1999-000-00175-0) 지원으로 수행되었음.

인용문헌

Cho, H. M., C. H. Cho and K. W. Chung, 1988: Air

- temperature changes due to urbanization in Seoul area. *Journal of Korean Meteorological Society*, **24**, 27-37 (In Korean with English abstract).
- Choi, J. Y., 2002: Interpolating monthly normals of daily minimum temperature over South Korea based on urban heat island correction. *Proceedings of 4th Conference of Agricultural and Forest Meteorology*. Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology (Nov. 1, Suwon, Korea) 81-84.
- Chung Y. S. and M. B. Yoon, 1999: Recent climate change and related factors observed in Korea. *Journal of Korean Meteorological Society*, **35**(3), 309-318.
- Fujibe, F., 1988: Weekday-weekend differences of urban climates. Part 2 Detection of temperature differences for medium- and small-sized sites. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **66**(2), 373-376.
- Han, Y. H., B. H. Kim and D. I. Lee, 1993: A study on the urban heat island in Pusan, Korea. *Journal of Korean Meteorological Society*, **29**(3), 205-216 (In Korean with English abstract).
- Hansen, J. and S. Lebedeff, 1987: Global trends of measured surface air temperature. *Journal of Geophysical Research*, **92**, 637-658.
- Hansen, J., W. Lawrence, D. Easterling, T. Peterson, T. Karl, R. Ruedy, M. Sato and M. Imhoff, 2001: A closer look at United States and global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research (D: Atmospheres)*, **106**(20), 23947-23963.
- Hulme, M., Z. -C. Zhao and T. Jiang, 1994: Recent and future climate change in East Asia. *International Journal of Climatology*, **14**(6), 637-658.
- Jones, P., P. M. Kelly and C. M. Goodess, 1989: The effect of urban warming on the Northern hemisphere temperature average. *Journal of Climate*, **2**, 285-290.
- Kang, I. S., 1995: Examination of the uncertainties of global warming. *Journal of Korean Meteorological Society*, **31**(2), 187-190 (In Korean with English abstract).
- Karl, T. R., H. F. Diaz and G. Kukla, 1988: Urbanization: its detection in the United States climate record. *Journal of Climate*, **1**, 1099-1123.
- Kato, H., 1996: A statistical method for separating urban effect trends from observed temperature data and its application to Japanese temperature records. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **74**(5), 639-653.
- Kim, M. K., I. S. Kang and C. H. Kwak, 1999: The estimation of urban warming amounts due to urbanization in Korea for the recent 40 years. *Journal of Korean Meteorological Society*, **35**(1), 118-126 (In Korean with English abstract).
- KMA, 2001: *Climatological Normals of Korea 1971-2000*. Korea Meteorological Administration, 632pp.
- Lee, M. I. and I. S. Kang 1997: Temperature variability and warming trend in Korea associated with global warming. *Journal of Korean Meteorological Society*, **33**(3), 429-443 (In Korean with English abstract).
- Nakatsuji, K., A. Yamaki, H. Minami, A. Sato and K. Muraoka, 1997: Effects of urbanization on ground surface temperature in the Kansai District, Japan, based on meteorological data. *Journal of Global Environment Engineering*, **3**, 183-197.
- Oke, T. R., 1987: *Boundary Layer Climates (2nd Edition)*, Methuen, 291-292.
- Park, H. S., 1986: Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. *Atmospheric Environment*, **20**, 1859-1866.
- Peterson, T. C., A. Huang, D. A. Mckittrick, K. P. Gallo, J. Lawrimore and T. W. Owen, 1999: Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters*, **26**(3), 329-332.
- Rho, C. S., 1973: On the rising trend of air temperature in Seoul area. *Journal of Korean Meteorological Society*, **9**(2), 49-58 (In Korean with English abstract).
- Ryoo, S. B. and S. E. Moon, 1995: Detection of warming effects due to industrialization: An accumulated intervention model with an application in Pohang, Korea. *Journal of Applied Meteorology*, **34**, 1466-1471.
- Ryoo, S. B., S. E. Moon and B. G. Cho, 1993: Air temperature change due to urbanization in South Korea. *Journal of Korean Meteorological Society*, **29**(2), 99-116 (In Korean with English abstract).
- Yoon, I. H., K. D. Min and K. E. Kim, 1994: A study on the meteorological characteristics of Taegu area and its application to the atmospheric dispersion modelling II. Characteristic features of the urban heat island : Case study. *Journal of Korean Meteorological Society*, **30**(2), 303-313 (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).
- 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).