

우리 나라의 기온상승 - 도시효과인가 지구온난화인가

윤진일

경희대학교 생태시스템공학과

(2002년 1월 10일 접수; 2002년 2월 27일 수락)

Urbanization Effect on the Observed Warming in Korea during the Recent Half Century

Jin I. Yun

Department of Ecosystem Management and Engineering, Kyung Hee University, Suwon 449-701, Korea

(Received January 10, 2002; Accepted February 27, 2002)

ABSTRACT

Since the rapid urbanization period coincides with the start of global warming, climate data might be contaminated with urbanization effect in Korea. Monthly normals of daily minimum, maximum, and mean temperature of 14 stations were calculated for 1951-1980 and 1971-2000 periods. Differences in two temperature normals were regressed to the natural logarithms of population increase at corresponding 14 cities from 1966 to 1990. The regression models were used to remove potential effects of urbanization from the apparent warming, and to determine the net contribution of global warming to the temperature change in Korea during the recent half century. According to the model calculation, there was little evidence of global warming in the warm season (May through November), while urbanization effect was common in all season except April. Up to 0.5°C warming of nighttime temperature was found to be induced by urbanization. Cool season temperature was increased by up to 0.6°C due mainly to the global warming of daytime temperature.

Key words : global warming, urbanization, climatological normals, urban heat island

I. 서 론

1971년부터 2000년까지 최근 30년 동안의 기상관측 자료로부터 남한 내 68개 지점의 평균값이 계산되어 이들이 앞으로 10년간의 공인된 기후학적 평년값으로 사용된다(KMA, 2001). 68개 지점 가운데 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 울산, 전주, 포항, 제주, 강릉, 목포, 여수, 울릉도, 추풍령 등 14개는 1950년 이전에 관측을 개시하였으므로 이들 자료만 별도로 정리하면 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 등 3개의 평년값 자료세트를 얻을 수 있어 최근 50년간 각 시기별 평년값의 직접 비교에 의해 남한의 기후변화 감지가 가

능하다. 즉 지난 반세기 동안의 지구온난화가 남한 14개 지점에 미친 영향을 실증적으로 밝힐 수 있게 된 것이다. 특히 14개 관측소가 위치한 곳은 울릉도와 추풍령을 제외하고는 인구밀집지역으로서 남한 인구의 과반수를 수용하므로 생활기후 측면에서 매우 중요한 정보로 이용될 수 있다.

반면 기후변화가 삼림, 농경지 등 우리 나라의 자연 및 농업생태계에 미치는 영향을 분석하고 예측하는데 이용하기 위해서는 고려해야 할 문제점도 있다. 울릉도와 추풍령을 제외한 12개 관측소는 그 소재도시의 인구가 60년대 이후 지금까지 최저 7만(여수)에서 최고 680만(서울)까지 증가하였는데, 이는 곧 관측소 주

변의 토지형질 변경, 건축, 에너지 소비 등 도시화 과정을 통해 관측값이 “오염” 되었음을 의미한다. 산업혁명이 먼저 시작된 유럽의 경우 최장 250년에 이르는 57개 관측소의 기온자료를 근거로 온난화 추세를 분석해보면 다른 대륙과는 달리 최근 50년간 기온상승은 미미한 반면, 1950년 이전 60년간, 즉 도시화 및 산업화가 급격히 진행된 기간에 가파른 기온상승을 경험하였다(Balling Jr. *et al.*, 1999). 우리 나라를 포함한 동아시아 지역의 기온상승 역시 상당부분 도시화에 기인한다는 것이 보고되었다(Hulme *et al.*, 1994). 따라서 전 세계의 기상기온자료를 인공위성에서 관측한 야간의 전등불빛 밝기에 따라 대도시, 중소도시, 촌락으로 분류하여 촌락자료만으로 기온변화 추세를 재분석하는 등 지구온난화 연구에 있어서 도시효과의 제거는 필수적이다(Peterson *et al.*, 1999; Hansen *et al.*, 2001).

세계적으로 지구온난화가 표면화된 시기에 우리 나라는 유례를 찾기 힘든 급격한 도시화를 겪었으며, 다행히 이 기간 동안 14개 지점에서 연속적인 기상관측이 이루어졌다. 만약 1971년 이후 30년간의 새로운 기후평년값을 도시효과 제거조치 없이 사용한다면 삼림이나 농업지역의 기온값까지 도시화의 영향으로부터 자유롭지 못할 것이며, 나아가 이렇게 오염된 기온자료를 토대로 평가한 생태계 반응결과 역시 신뢰성이 훼손될 수 밖에 없다. 기후변화에 따른 생태계 영향 평가를 위해서는 이 기간 동안의 외전상 기온변화로부터 도시화에 기인된 부분을 제거해야 한다.

본 연구에서는 지난 반세기를 1951년부터 1980년까지의 30년과 1971년 이후 2000년까지 30년으로 나누어 14지점의 기온변화량을 얻고, 같은 기간 중 각 지점별 인구증가 추세를 동시에 비교함으로써 도시화에 따른 기온상승 경향을 정량적으로 밝히고자 하였다. 또한 이를 토대로 월별 기온변화량을 지구온난화(global warming)에 의한 부분과 도시화(urbanization)에 기인한 부분으로 나누고자 하였다.

II. 자료 및 방법

기상청에서 발간한 한국기후표(KMA, 1982; KMA, 2001)로부터 14개 관측소의 일최저, 일최고, 일평균기온값의 월별 평년값(1951-1980 이하 “과거” 및 1971-2000 이하 “현재”)을 발췌하였다. 각 지점에 대해 과거의 기온값을 기준으로 두고 현재의 기온값 변동분을

산출하여 두 시기간 기온변화량으로 삼았다. 이 기온변화량에는 지구온난화에 따른 한반도 지역의 기온상승분 외에 같은 기간 중 도시화에 따른 국지적인 열섬효과까지 포함되어 있다고 가정하였다. 14개 관측소 가운데 광주와 목포는 관측소의 지리적인 위치가 변경되었지만 그 변경시점이 각각 1992년 1월과 1997년 10월로서 비교적 최근이었고, 관측여건에 큰 변화는 없는 것으로 알려져(기상청 관측담당관실의 회신), 기후평년값 결정에 특기할 만한 영향은 주지 않은 것으로 판단하였다.

도시효과에는 두 시기간 지표피복 변화, 토지형질 변경, 건축허가건수, 차량등록대수 등 도시규모 변천 및 그에 따른 에너지 사용량의 증가효과가 섞여있다고 볼 수 있다. 그러나 이들 자료를 모두 수집하더라도 개별적인 영향정도를 파악하는 것은 불가능하므로, 이들 대부분과 관련이 깊고 사실상 모두를 함축하고 있는 “인구”를 도시효과의 대표변수로 간주하였다. 우리나라의 인구 총 조사는 1966년부터 시작되어 매 5년 간격으로 11월 1일 0시 기준으로 실시되고 있다(<http://www.nso.go.kr>). 통계청 사회통계국 인구조사과로부터 14개 기상관서 소재지 시군의 1966년과 1990년의 인구자료를 수집하여 변동인구수를 산출하였다(Table 1).

도시와 시골간 기온차의 최대값, 즉 열섬강도(Heat Island Intensity)는 도시인구가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 일정 수준 이상에서는 그 증가추세가 둔화

Table 1. Population change at 14 cities where climate data are available during the recent half century (1951-2000)

Station Location	Population		
	1966	1990	Change
Seoul	3,793,280	10,603,250	6,809,970
Busan	1,426,019	3,795,892	2,369,873
Daegu	845,189	2,227,979	1,382,790
Incheon	525,827	1,816,328	1,290,501
Gwangju	403,495	1,138,717	735,222
Ulsan	112,848	682,030	569,182
Jeonju	220,432	516,965	296,533
Pohang	65,927	317,648	251,721
Jeju	87,369	232,553	145,184
Gangneung	65,206	152,580	87,374
Mokpo	162,166	243,035	80,869
Yeosu	101,851	173,135	71,284
Ulleungdo	22,016	15,283	-6,733
Chupungnyeong	123,564	76,802	-46,762

되므로 열섬효과에 미치는 도시의 규모는 종종 인구의 자연대수로 표현된다(Oke, 1987). 본 연구에서는 두 시기간 인구변화량의 자연대수를 독립변수로, 두 시기간 기온변화량을 종속변수로 두고 이들간의 직선회귀식을 구하였다. 울릉도와 추풍령(영동군)은 이 기간중 오히려 인구가 감소하여 그 자연대수를 얻을 수 없으므로 분석대상이 될 수 없지만 도시화의 영향이 배제된 지역의 자료로서 분석목적을 위해 중요하므로 포함시키는 방안을 강구하였다. Table 1의 인구증가추이를 보면 이 두 지역의 실제 인구감소 대신 10,000명 정도의 인구증가로 대체하더라도 분석결과에 심각한 오류를 초래하지는 않을 것으로 판단된다. 즉 25년간 인구가 10,000명 정도 늘어난 것은 인구가 증가하지 않거나 오히려 감소한 경우와 비교했을 때 기온에 미치는 도시화의 영향에 있어 차이가 없을 것이라는 가정이다. 이 가정에 따라 울릉도는 11,500명 그리고 추풍령(영동군)은 11,000명의 인구증가를 적용하였다.

언어진 회귀식을 토대로 인구증가 10,000명일 때의 기온상승분(Y축의 절편)을 계산하여 지구온난화에 의한 부분으로 간주하였다. 회귀식에 인구증가 최대값(즉 서울의 약 680만명)을 대입하여 도시화에 의한 최대기온상승폭을 산출하였다. 계산된 지구온난화에 의한 기온상승분과 도시화에 의한 최대기온상승폭을 월별로 정리, 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

한 해 평균으로 봤을 때 최근 반세기 동안의 일최저기온 상승은 관측소 소재지의 인구증가와 밀접한 정 상관관계를 보였다(Fig. 1A). 도시화되지 않은 울릉도와 추풍령에서는 겨우 0.1°C 상승하거나 오히려 0.1°C 하락한 반면, 인구증가폭이 가장 컸던 서울에서는 0.7°C 상승을 보였다. 인구증가량의 자연대수를 독립변수로 둔 직선회귀식은 결정계수가 0.43으로 통계적인 유의성이 인정된다. Y축 절편값으로부터 추측해 보면, 만약 도시화가 진행되지 않았다면 지난 반세기동안 일최저기온의 연 평균값 상승, 즉 밤 시간대의 기온상승은 무시할 만 하다. 지금까지 알려진 한반도의 일최저기온 상승은 전 지구적인 온난화의 일환이기보다는 급격한 도시화에 따른 국지적인 현상일 수도 있음을 암시한다.

반면 일최고기온의 상승에 미치는 도시화의 영향은

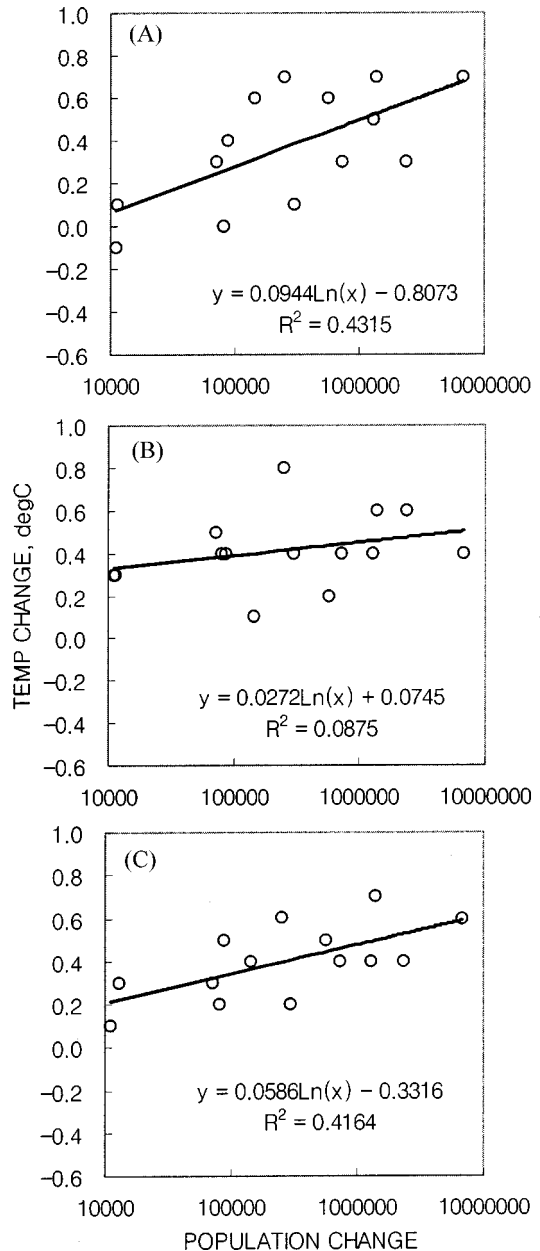


Fig. 1. Effects of urbanization (expressed as the natural logarithm of population increase from 1966 to 1990) on the observed warming (expressed as the difference of two temperature normals, 1951-1980 and 1971-2000) at 14 sites in Korea. Each panel represents annual trend of daily minimum (A), maximum (B), and mean (C) temperature, respectively.

크지 않은 것으로 나타났다. 680만의 인구가 증가한 서울에서 0.4°C의 상승을 보였으나, 인구가 오히려 감

소했던 울릉도와 추풍령에서도 0.3°C의 상승추세를 보였다(Fig. 1B). 도시열섬효과는 주로 야간에 큰 것으로 알려져 있으며 따라서 일최저기온의 상승을 주도하였을 것이나, 주로 한낮에 관측되는 일최고기온에 대해서는 큰 영향이 없었다고 생각된다.

일최저기온과 최고기온에 관한 이들 관측결과에 따르면 시골의 경우 밤기온(최저기온)은 거의 변화가 없는 반면 낮기온(최고기온)은 지구온난화 영향으로 상당히 올라간다. 따라서 기온의 일교차가 과거에 비해 오히려 커지는 현상을 기대할 수 있다. 반면 대도시의 경우 밤기온은 도시열섬효과 때문에 크게 상승하나, 낮기온은 상승폭이 크지 않아 일교차는 줄어든다. 그러나 이러한 경향은 계절에 따라 크게 차이날 수 있다.

두 시기간 일평균기온의 상승은 역시 최저기온과 최고기온 상승추세의 평균에 해당하여 지구온난화에 의한 자연상승분이 0.2°C, 도시화에 의한 상승효과는 인구증가폭에 따라 변하며 최대 0.4°C에 달한다(Fig. 1C).

하지만 이런 도시화의 영향이 계절별로 동일하게 나타나지는 않았다. 월별로 일평균기온의 상승을 인구증가의 자연대수와 직선회귀식으로 표현했을 때 회귀식의 결정계수가 가장 큰 것은 6월로서 0.83이었고 가장 작은 것은 4월의 0.04였다. 야간기온(일최저기온)의 경우 3월과 6월의 결정계수가 0.60과 0.53으로 컸고 8월에 0.05로서 가장 작았다. 한낮의 기온(일최고기온)은 계절별로도 도시화의 영향정도가 뚜렷하지 않아서 결정계수값이 모두 0.3 미만이었다.

14개 지점의 인구증가와 기온상승간 회귀식을 토대로 Y축 절편과 최대값을 구하여 월별로 비교해보면, 지난 반세기 동안 정규기상관측소에서 관측한 기온상승을 도시화에 의해 오염된 부분과 순수한 지구온난화 부분으로 분리할 수 있다. 먼저 지난 50년간 일최저기온이 범지구적 온난화에 의해 상승한 것으로 판단되는 계절은 12월부터 이듬해 4월까지의 한후기로서 최대 0.4°C가 상승하였다(Fig. 2A). 난후기에는 6월만 제외하고는 변화가 없거나 오히려 기온이 떨어진 것으로 나타났다. 반면 7월, 8월을 제외한 모든 계절에 도시화에 의한 야간기온 상승이 통계적으로 유의하며, 상승폭도 0.8°C에 달하는 것으로 계산되었다. 두 효과를 더해서 나타나는 외견상 야간기온의 상승은 1월, 3월, 2월의 순으로 컸으며, 8월, 7월 5월의 순으로 작았다. 1월의 야간기온 상승이 대도시에서 현저한 것은 이미 잘 알려져 있는데, 일본 Kansai 지역 13개 관측소의

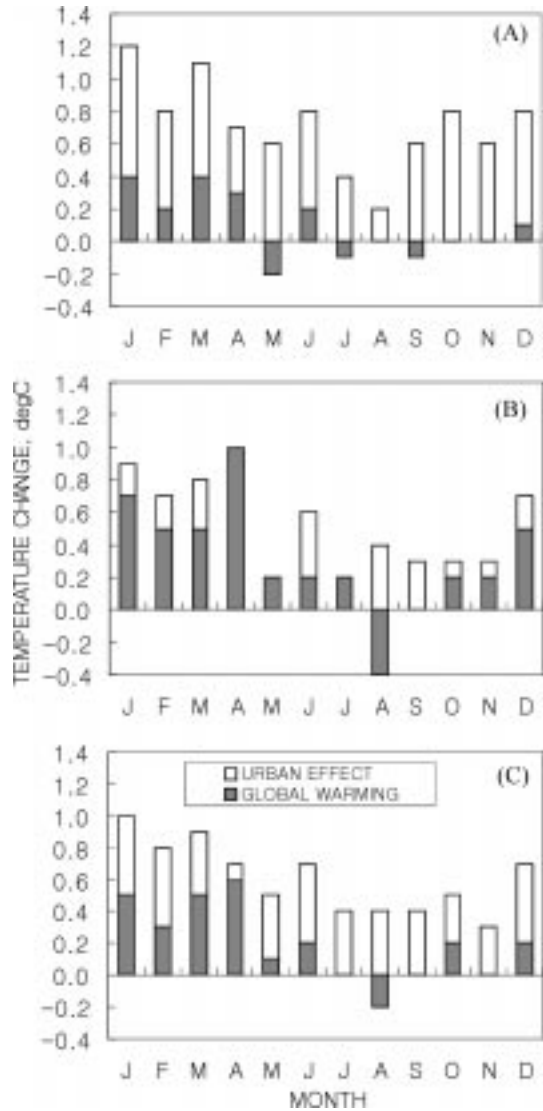


Fig. 2. Simulated proportion of the global warming and the urbanization effects contributing the half-century change in monthly average of daily minimum (A), maximum (B), and mean (C) temperature in Korea. The urbanization effect is the maximum warming obtainable from the regression model with the fastest population increase during the same period (i.e., 6.8 million in Seoul).

100년간 자료분석에서도 도시화에 의한 최저기온 상승이 1월의 경우 최대 4°C에 달한다고 보고된 바 있다 (Nakatsuji *et al.*, 1997).

지난 반세기 동안의 일최고기온 상승은 12월부터 이듬해 4월까지 한후기 동안에는 최소한 0.5°C에서 최고 1.0°C의 지구온난화 영향이 기여한 것으로 추정

되었다(Fig. 2B). 나머지 계절에는 0.2°C 미만의 미미한 영향만이 나타나며 8월에는 오히려 0.4°C 하강한 것으로 보인다. 반면 도시화의 영향은 전 계절에서 거의 없거나 매우 적었다. 두 효과를 합쳐서 나타낸 외견상 낮 시간대 기온상승은 12월부터 이듬해 4월까지 평균 0.8°C에 이르나 나머지 계절에는 0.3°C에 그친다.

하루 동안의 평균기온 상승에 미친 지구온난화 영향은 4월, 3월, 1월 및 2월에만 인정되며 그 크기는 0.6°C에 이른다(Fig. 2C). 나머지 계절에는 지구온난화 영향이 0.2°C 미만으로 적었는데 7월, 9월, 11월에는 전혀 영향이 없었고 8월에는 오히려 0.2°C 가량 냉각된 것으로 분석된다. 반면 도시화에 따른 최대승온효과는 4월을 제외한 전 계절에서 뚜렷하고 그 크기는 0.3°C에서 0.5°C로 비교적 균일하다.

종합적으로 일최저, 최고, 평균기온 등 모든 범주에서 범지구적 온난화에 따른 남한의 지역기온이 영향을 받은 것은 1월부터 4월 사이에 가장 뚜렷하다. 물론 도시화의 영향 때문에 외견상의 기온은 연중 상승하였으며, 하루 동안의 기온상승분 가운데 낮시간에는 지구온난화, 밤시간에는 도시화의 기여가 많았던 것으로 나타났다. 지난 반세기 동안 여름철 기온, 특히 야간 기온이 상승한 것은 지구온난화 탓이 아니라 급격한 도시화에 따른 에너지 소비 증가, 지표피복 변화, 자연식생 제거, 건물 증가 등에 의한 것으로 판단된다. 인구유입 및 도시화가 진행되지 않은 농촌의 경우 여름철(8월)에는 오히려 한랭화가 진행되었을지도 모르며, 이는 시골지역 관측자료의 축적이 이루어지면 밝혀질 수 있을 것이다.

이 연구결과를 토대로 급격한 도시화가 진행된 12개 지점의 기온 관측값으로부터 각 지점별 도시효과에 의한 상승분을 뺀 나머지를 “시골평년기후값(rural climatic normals)”으로 두고 격자형 평년기온분포도를 작성할 수 있다. 과거(1951-1980)의 기후평년값으로부터 역시 격자형 기온분포도를 만들면 이들을 이용해 최근 50년간 한반도 남부에서 일어난, 도시화에 의해 오염되지 않은 기후변화를 추적할 수 있을 것이다. 그 결과는 같은 기간중 육상생태계에 미친 지구온난화의 영향을 보다 사실적으로 묘사하는데 사용될 수 있다.

본 연구에서는 지구온난화가 남한 지역 기온에 미친 영향을 분석하기 위해 도시화에 의한 승온효과를 제거하고자 하였으며, 도시화의 영향을 표현하기 위해 인구증가량의 자연대수를 이용하였다. 그러나 관측된 기

온변화량에 포함된 “오염”은 단순히 인구증가만으로 표현하기 어려운 부분도 있을 것이다. 예컨대 다목적댐 건설이나 간척사업 같은 대규모 토목공사, 차량증가, 발전소나 공장가동 같은 대량 에너지 방출 등 관측여건이 변화할 수 있는 요인 모두가 변수로 작용할 수 있으므로 이들을 척도로 이용한 분석도 시도할 수 있을 것이다.

IV. 적 요

1951-1980 평년기온 대비 1971-2000 평년기온 상승을 남한지역 14개 관측소 소재 시군의 1966년 대비 1990년의 인구증가 자연대수값에 회귀시켜 통계적으로 유의한 관계식을 얻었다. 이 관계식을 이용하여 도시화에 따른 승온효과를 제거할 경우, 순수한 지구온난화 효과는 12월부터 4월 사이의 한후기에만 인정되며, 나머지 계절에는 나타나지 않았다. 남한지역의 한후기 일평균기온은 지구온난화에 의해 최대 0.6°C 까지 상승하였으며 일최저기온보다 일최고기온 상승폭이 컸다. 도시화에 따른 승온효과는 최대 0.3°C에서 0.5°C로 연 중(4월 제외) 고르게 나타났지만, 주로 일최저기온의 상승을 주도하였고 일최고기온 상승에는 거의 영향이 없었다.

감사의 글

기후자료를 사용하도록 허락한 기상청 관계자 및 자료정리를 도와준 김재영군에게 감사드린다. 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수지원의 지속적 확보 기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 M101KI010001-01K090101012)에 의해 수행되었다.

인용문헌

- Balling Jr., R. C., R. S. Vose, and G. -R. Weber, 1999: Analysis of long-term European temperature records: 1751-1995. *Climate Research* **10**(3), 193-200.
- 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.
- KMA, 1982: *Climatic Table of Korea 1951-1980 (Volume 1)*. Korea Meteorological Administration, 368pp.
- KMA, 2001: *Climatological Normals of Korea 1971-2000*. Korea Meteorological Administration, 632pp.
- Nakatsuji, K., A. Yamaji, 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.
- 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.