

우리나라 지중온도 변동의 기후학적 특성

김승옥¹ · 서명석^{2*} · 광종흠²

¹제주지방기상청, 690-801, 제주시 건입동

²공주대학교 대기학과, 314-701, 충남 공주시 신관동

Climatological Characteristics in the Variation of Soil Temperature in Korea

Seung-Ok Kim¹, Myoung-Seok Suh² and Chong-Heum Kwak²

¹Jeju Regional Meteorological Office, Jeju 690-801, Korea

²Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

Abstract: Climatological characteristics in the variation of soil temperatures in Korea were investigated using Korea Meteorological Administration's observation data. And the impacts of soil moisture on the variation of soil temperature were examined using observed precipitation data. The climatological averages of soil temperatures are ranged from 14.4 to 15.0°C regardless of depths. And they showed an latitudinal gradient with a warm temperature at the southern region and "U" shape as in the air temperature with a high value along the coastal region. The relatively higher heat capacity and low conductivity of soil compared to those of the air resulted in the significant delay of the maximum and minimum date with depth. As a results, soil acts as a heat source during winter while a heat sink during summer. Global warming and urban heat island have increased the soil temperatures with an average rate 0.3~0.5°C/10-year as in the air temperature during last 30 years (1973~2002). However, the warming rate is maximized during spring contrary to the winter in the air temperature. The temporal variation of soil temperatures is strongly affected by that of soil moisture through an modification of the heat capacity and heat convection. In general, the increased soil moisture clearly decreased the temporal variations and increased the deep layer soil temperatures during cold season.

Keywords: soil temperature, temporal variations, heat source/sink, trend, soil moisture

요 약: 본 연구에서는 기상청에서 운용중인 지중온도 관측소 자료를 이용하여 지중온도의 기후학적 변동 특성을 분석하였다. 또한 지중온도의 변동에 중요한 인자중의 하나인 강수(토양수분)가 지중온도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 습윤 해와 건조 해로 나누어 지중온도의 변동 특성에 대해서 분석하였다. 지중온도의 30년 평균값은 대부분 지역에서 깊이에 관계없이 14.4~15.0°C를 보이고 있으며 공간적으로는 남부와 해안지역에서 상대적으로 높게 나타나 기온의 공간분포와 같이 U자 형태의 분포를 보이고 있다. 대기에 비하여 상대적으로 높은 열용량과 낮은 열전도도의 영향으로 깊이별 연 최고와 최저온도가 발생하는 날이 깊이에 따라 지연되어 5.0 m 깊이에서는 지표에 비하여 약 3개월 정도 늦게 나타나고 있다. 그 결과 1.0 m 이하의 심부토양은 여름에는 열 흡수원으로, 겨울에는 열원으로 작용하여 전체적으로 기온의 연 변동폭을 조절하는 역할을 한다. 도시열섬과 지구온난화의 영향으로 지중온도도 전체 깊이에서 기온과 같이 지난 30년 동안(1973~2002) 약 0.3~0.5°C/10년으로 상승하였다. 하지만 계절별 상승경향에서는 기온(겨울)과 달리 봄철에 최대상승이 일어나고 있다. 또한 토양수분은 지중온도의 일 변동과 계절변동에 영향을 미치는데 지중온도의 변동성에 미치는 영향은 계절과 깊이에 따라 다르게 나타나고 있다. 봄에는 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 낮을 뿐만 아니라 변동성도 작게 나타나고 있다. 여름에 천부토양에서는 봄과 유사하게 나타났으나 1.0 m 깊이 이하의 심부토양에서는 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 높을 뿐만 아니라 변동성도 크다. 하지만 겨울에는 전 지층에서 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 온도는 1.0°C 이상 높게 나타나고 있으나 변동성은 작게 나타나고 있다.

주요어: 지중온도, 시간변동, 열원/열 흡수원, 변동경향, 토양수분

*Corresponding author: sms416@kongju.ac.kr

Tel: 82-41-850-8533

Fax: 82-41-856-8527

서 론

기후의 형성 및 변동은 기후시스템을 구성하는 대기권, 수권, 지권, 생물권, 그리고 빙권 등 5개 권역 사이의 상호작용, 즉, 이들 상호간의 현열, 잠열, 운동량 및 온실기체의 교환 등의 복잡한 상호작용에 의해 조절된다. 따라서 기후 변화는 대기권 자체만으로는 일어날 수가 없으며, 다른 권과 함께 복합적으로 상호작용을 하면서 발생함을 제시한다(Frederick et al., 1998; Zhang et al., 2001). 예를 들어 날씨와 기후변화에 영향을 미치는 지면-대기 상호작용은 대기와 지면상태에 의하여 조절된다. 이 중에서 지면상태는 지면피복, 지중온도와 토양수분을 포함한 여러 요소들에 의해 결정된다. 지중온도와 토양수분을 포함한 지면상태 값들은 지면에서의 가용에너지를 현열과 잠열로 분배하는 역할을 함과 동시에 그 일부를 지중과 교환한다. 날씨 및 기후규모에서 지중온도와 토양수분의 역할이 중요함에도 불구하고 장기간의 관측 자료의 부족 등으로 인하여 아직까지 체계적인 연구가 이루어지지 못하고 있다(Qr Hu and Song Peng, 2003; Zhang et al., 2001).

일반적으로 지중온도의 변동은 일주기 또는 연주기의 변동을 나타내는 지표면의 열에너지가 하부로 전달(transport: 전도 + 토양수분에 의한 대류)되면서 발생하며, 이러한 열전달 기작은 주로 토양의 열 특성과 기후 특성에 의하여 지배된다. 즉, 지중온도는 해당지역의 기후, 지면피복 및 토양환경과 밀접하게 관련되어 변동한다(이부용, 1993; Pan and Machrt, 1987; Peters Lidard et al., 1998). 또한 지중에서의 열전달 기작은 주로 전도이기 때문에 그 속도가 대기에 비하여 상대적으로 느려서 대기온도의 일변동 및 계절변동과는 시간적 차이가 발생하며 이러한 현상은 깊이가 깊어질수록 크게 나타난다. 그 결과 지중온도는 여러 시간규모에서 지표의 열 흐름에 영향을 준다(Beltrami and Harris, 2001, 2002; Lachenbruch and Marshall, 1986). 예를 들어 여름철에는 심부토양의 온도가 천부토양보다 낮기 때문에 열의 흡수체로 작용하지만 겨울에는 반대로 심부토양의 온도가 천부토양보다 높기 때문에 열 에너지원으로 작용하여 기온의 연 변화 강도를 조절한다.

기상청(2002)의 보고에 의하면 19세기 후반 이후 전 지구 평균기온은 $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 상승하였다. 그리고 그 대부분은 1910~1945년, 1976~2000년에 발생하였

고, 이 두 기간 중에 기온 상승률은 10년에 약 0.15°C 이다. 이러한 최근의 기온 상승 경향은 해양보다는 중·고위도 육지에서, 성층권에서보다는 대류권하부에서, 여름보다는 겨울에 그리고 최고기온보다는 최저기온에서 높게 나타나고 있다. 이와 같이 지구온난화의 영향이 지리적 위치, 고도, 계절 및 시간에 따라 다르게 나타나고 있으므로 지구온난화가 지중 온도의 변동에 미치는 영향도 깊이 또는 계절에 따라 다를 수 있을 것이다. 기온의 상승과 같이 지중온도의 변화도 우리 생활환경에 여러 가지 영향을 주고 또 다른 지구환경 시스템과도 영향을 주고받을 것이다. 예를 들어 토양수분 및 지중온도의 변화는 미생물의 활동, 식물의 생육 및 토양생성 작용에 중요한 요소이다. 특히 천부 토양의 온도는 종자의 발아와 생장에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한 관측 지중온도는 지역기후 및 전구 기후모델의 지중온도 모의 결과에 대한 검증 자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 식생의 계절성 모수화에도 활용되고 있다. 하지만 아직까지 장기간의 관측 자료를 이용한 지중온도의 시·공간적 변동 특성 및 경향에 대한 연구는 많지 않다(구민호외, 2003; Huang et al., 2000; Qr Hu and Song Peng, 2003; Zhang et al., 2001).

우리나라의 지중온도관측은 1910년대 중반부터 서울, 대구, 부산, 목포, 강릉 등에서 시작되었다. 초기에는 0.1~1.0m의 일부 깊이에서만 관측하였으나 정부의 정책에 따라 지중온도 관측 지점수도 많은 변화가 있었다. 1970년대 중반에는 정부의 농업근대화 정책으로 지중온도 관측지점이 100여소에 이르렀으나, 1991년 이후부터는 그 지점수가 현저히 줄어들어 현재는 단지 20여 지점에서만 지중온도를 관측하고 있다. 그 결과 다른 기상요소와 달리 지중온도는 관측지점, 깊이 및 자료기간 등에서 불연속이 존재하기 때문에 활용 시 주의해야 할 점이 많다. 농업기상, 지역기후, 및 지면-대기상호작용 등에서의 지중온도의 역할에 대한 중요성이 인식됨에 따라 지중온도에 대한 체계적인 연구가 시작되고 있다(Qr Hu and Song Peng, 2003). 그러나 우리나라에서는 기온의 변동 또는 변동요인에 대한 연구는 많았으나 아직까지 지중온도의 시·공간적 변동특성에 대한 체계적인 연구는 많지 않은 것으로 저자는 이해하고 있다(강인식, 1994; 곽종흠 외, 1997; 류상범외, 1993; 이명인과 강인식, 1997).

본 논문에서는 우리나라 지중온도 관측의 변천현황

을 조사하고, 비교적 관측기간이 긴 관측 지점들의 최근 자료에 대해서 사·공간적 분포특성과 지중온도의 변동경향에 대해서 분석하였다. 지중온도의 깊이 별 공간분포는 관측기간이 적어도 20년 이상인 속초 등 22개 지점들의 관측 값을 이용하였으며 지중온도의 변동경향은 관측기간이 적어도 30년 이상인 춘천 등 10개 지점의 관측 값을 이용하였다. 또한 지중온도의 변동에 중요한 인자중의 하나인 강수(토양수분)가 지중온도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 습윤해와 건조 해로 나누어 지중온도의 변동 특성에 대해서 분석하였다.

자료 및 연구 방법

자료

우리나라에서 근대 기상관측은 19세기말(조선조 말) 우리나라 주계 외국공사와 조전정부 고분 등에 의해서 시작되었으나, 공식적으로 관측소를 설치하고 기상관측을 시작한 것은 1904년에 목포(3.25), 부산(3.26), 인천(4.6), 원산(4.10) 순으로 시작되었다. 황해도 온도의 지중온도 관측은 1913년 8월부터 묵포에서 시작된 것으로 알려져 있으나, 현재 보존된 관측 자료는 1916년부터 서울, 대구, 부산, 강릉 및 목포에서 나타난다.

지중온도는 다른 기상요소와 달리 시대적 필요성에 따라 관측 깊이, 관측주기는 물론이고 관측 지점 수에서 많은 변화가 있었다(Fig. 1). 특히 1970년대 초 정부의 농업근대화정책에 힘입어 76개의 농업기상관측소(농관) 분석가 설치되었으며 그 후 1976년에는 100여 지점에 이르렀다. 그러다가 1991년부터는 지중온도의 사회적 필요성 감소로, 기후관측소 9개 지점과 농업기상관측소 11개 지점을 제외한 다른 기상관측소의 지중온도 관측이 중지되었다. 현재 0.05~5.0 m의 지중온도를 관측하는 지점은 기후기본관측소인 서울, 부산, 포항, 목포, 여수, 대전, 강릉, 춘천, 울릉도와 제주, 농업기본관측소인 수원과 인천이고, 또 0.05~1.0 m의 지중온도를 관측하는 관측소는 농업보조관측소인 안동, 전주, 천주, 순천, 청주, 서산, 철원과 서귀포(춘천은 농업보조관측소이지만 기후관측소로 5.0 m까지 관측)로 총 20개 지점이다(기상청, 2003).

농업기상 또는 토양특성 관련 일부 연구를 제외하고는 기상청 관측 지중온도를 이용한 연구는 많지가 않다(김영복, 2000; 구빈호, 2003). 또한 1997년

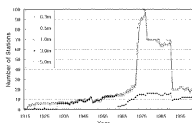


Fig. 1. Variation of the number of stations that observed soil temperatures in KMA.

기상자료 DB 구축과정에서 일부 오류가 있는 것으로 나타나 본 연구에서는 기상청의 기상통계자료 관리 기준인 자동품질검사(AQC)법을 이용하여 지중온도의 품질을 검사하였다. AQC에서 지중온도에 대한 품질검사는 1) 같은 관측시간의 근접 깊이 간 상호비교와 전일 같은 관측시기 값과 비교하는 사·공간적 연속성 검사와, 2) 계절에 따라 설정된 범위 값과 비교하는 비정상적 온도 검사 방법이다(기상청, 2003). 본 연구에서는 먼저, 2)의 기준 값 기준을 조금 완화하여(기준값±2°C) 분석 대상인 1943년부터 2002년까지 22개 지점 자료의 품질을 검사하여 점검 대상 리스트를 작성하였고, 해당 자료를 그래프로 도식한 후 1) 기준에 의거 하나 하나 직접 분석하였다. 여기서 2)의 기준을 완화하여 적용한 것은 품질검사과정에서 절대적인 기준이 없기 때문에 여기서는 가급적 관측 자료를 최대한 활용하기 위함이다. 위의 AQC과정에서 명백히 오류가 있는 자료로 검출된 값들은 3차원 선형내삽법(시간 변동 연속성 + 공간 연속성 + 연직방향 연속성)을 이용하여 수정한 후 사용하였으며 이 과정에서 최종 수정된 자료 수는 22개 지점에서 총 114개이다. 관측지점 중에서는 대구, 서울 등에서, 관측 깊이에서는 주로 천부(0.0~0.2 m)에서 비정상 값들이 많이 발생하였다.

지중온도의 관측주기도 깊이 및 연도에 따라 변동이 있었다. 즉, 천부(0.0~0.3 m)의 지중온도의 관측은 1964년 이전에는 1일 3회(05, 09, 15LST), 이후에는 1일 4회(03, 09, 15, 21 LST) 관측을 하고 있으며 심부토양의 경우 1일 1회 관측을 하고 있다. 따라서 1일 평균을 구하는 과정에서 자료의 연속성을 유지하기 위하여 1965~1972년의 자료는 1일 3회 관측 값(03, 09, 15 LST)을 평균해서 일 평균값으로 사용하

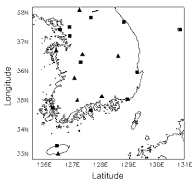


Fig. 2. Geographical distribution of surface observing stations of the KMA where soil temperatures are currently being observed (●: 0.05-5.0 m, ▲: 0.05-1.0 m).

었다. 또한 1973년 이후에 대해서는 1일 4회 관측한 자료를 모두 평균하여 일 평균값으로 사용하였다.

본 연구에서 사용한 자료는 1943년부터 2002년까지 기상청에서 관측한 지중온도, 기온 및 강수량이다. 강수량 자료는 토양수분이 지중온도의 변동특성에 미치는 영향을 분석하는 데 토양수분의 과다류 구분하기 위한 근거자료로 이용하였다. 지중온도는 앞에서 설명한 바와 같이 연도에 따라 관측지점 수 및 관측 깊이가 다양하기 때문에 연구 목적에 따라 적절한 지점들을 선택하여 활용하였다(Fig. 2).

- 공간분포 분석(20년간, 1971-1990년)
 - 속초, 춘천, 강릉, 서울, 인천, 울릉도, 수원, 부산, 청주, 대전, 우정령, 구산, 대구, 전주, 광주, 부산, 목포, 통영, 여수, 제주, 서귀포, 전주(22개 지점)
- 시간적 특성 및 건·습에 따른 변동특성 분석(최근 30년간, 1973-2002)
 - 춘천, 강릉, 인천, 울릉도, 수원, 대전, 부산, 목포, 여수, 제주(10개 지점)
- 변동경향 분석
 - 최근 30년간(1973-2002): 춘천, 강릉, 인천, 울릉도, 수원, 대전, 부산, 목포, 여수, 제주(10개 지점)
 - 과거 30년간(1943-1972): 대구, 전주, 목포(3개 지점)

연구 방법

우리나라 지중온도의 관측현황, 공간분포 및 시간

변동경향을 알아보기 위하여 지중온도 관측 지점, 관측기간, 깊이 등에 대한 문헌자료조사와 기초적인 통계분석을 하였으며 분석결과의 신뢰수준을 높이기 위하여 간단한 자료품질 검사유 적용하였다. 지중온도의 공간분포 분석은 관측지점 수가 최대이었던 1971년부터 1990년까지 속초 등 22개 지점들의 관측 값을 이용하여 계절별과 깊이별로 분석하였다.

지중온도의 변화는 주로 일사태양복사, 강수, 기온 및 식생의 계절 변동, 그리고 토양복성(토양조직, 깊이)에 영향을 받는다. 이 중에서 강수는 시간적으로 변동성이 클 뿐만 아니라 토양의 열전도 특성 및 열용량이 많은 영향을 미친다. 여기서는 관측지점별로 깊이에 따른 열 확산 지연효과류 깊이별 최고/최저 온도 발생 지연시간 분석을 통하여 알아보았다. 또한 각 관측지점의 토양 및 기후특성을 토양복성 자료가 없기 때문에 지중온도의 연교차/피준면차 등을 이용하여 간접적으로 분석하였다. 지구온난화가 지중온도의 변동경향에 미친 영향을 알아보기 위하여 분석기간을 과거(1943-1972)와 현재(1973-2002)로 구분하여 지중온도의 변동경향을 각 깊이 별 계절별로 1차 선형 회귀식을 이용하여 분석하였다.

우리나라와 같이 온순기후의 영향으로 강수량의 계절 및 경년변동이 큰 지역에서는 강수량의 계절 및 경년변동이 토양수분의 변동성에 많은 영향을 미칠 것이다. 토양수분은 토양의 열용량을 증가시킨 뿐만 아니라 수분의 침투에 의한 열의 전달을 통하여 지중온도의 변동성에 영향을 준다. 토양수분이 지중온도의 변동성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 강수량의 과다류 기준으로 하여 습윤한 해와 건조한 해의 계절별 깊이별 지중온도의 변동성을 분석하였다.

연구 결과

지중온도의 공간분포

Fig. 3은 1.0 m 깊이에서의 지중온도의 계절별 공간 분포를 나타낸 것이다. 지중온도의 공간분포도 기온과 같이 남과 북, 겨울과 여름 내륙에서는 저온 및 해안가 지역에서는 고온 현상을 보여 여름을 제외하고 U자형 분포를 보이고 있다. 평균편적으로 봄과 여름은 동고서저, 가을과 겨울에는 남고북저의 분포를 보이고 있는 데 봄과 여름에는 강수의 과다가 중요한 인자로 작용하고 가을과 겨울에는 태양 고도각 차에 의한 복사차이가 중요하게 작용하는 것으로 보인다.

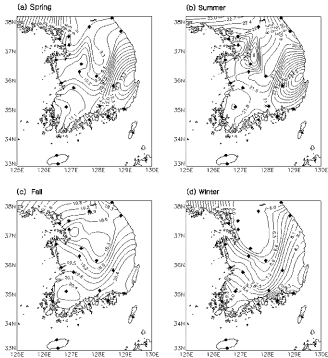


Fig. 3. Spatial distribution of seasonally averaged soil temperature (1.0 m) using 22 stations from 1971 to 1990: (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall and (d) Winter.

지리적 위치에 따른 지중온도의 차도 기온과 같이 여름철에는 약하고(20.9~23.2°C) 겨울과 봄에는 강하게(5.8~14.3°C) 나타나고 있다. 또한 기온의 연교차에서와 같이 해안지역에 위치한 관측지점에서는 상대적으로 연교차가 작게 나타나 내륙과 달리 해양성기후의 특성을 보이고 있다. 그림에는 나타내지 않았지만 다른 깊이에서도 유사한 공간분포를 보이고 있다. 즉, 원부토양에서는 기온과 유사하게 공간경도 및 계절변화도 크게 나타나고 있으나 깊이가 깊어질수록 그 강도가 약해지고 있다.

Table 1은 최근 30년 평균 깊이별 지중온도의 연교차를 나타낸 것이다. 전체적으로 지표면에서의 지중온도 연교차는 기온보다 크게 나타나고 있으며 이러

한 현상은 특히 제주, 부산 및 울릉도와 같이 해안지역에서 크게 나타나고 있다. 지리적으로 지중온도의 연교차는 춘천(30.5°C, 0.05 m)과 수원(29.5°C, 0.05 m) 등 내륙지방에서 크고, 제주와 울릉도와 같은 해안가에서 각각 26.6°C와 26.7°C로 작게 나타나고 있다. 또한 연교차는 지표면에서 29.1°C로 최대로 나타난 후 깊이가 깊어질수록 연교차는 급격히 감소하여 1.0 m와 1.5 m에서 각각 18.6°C와 15.7°C, 3.0 m와 5.0 m에서는 8.8°C와 4.3°C로 작아지고 있다. 연교차가 깊이에 따라 감소하는 것은 상대적으로 큰 토양의 열용량과 낮은 전도도의 영향으로 깊이가 깊어질수록 최고온도는 낮아지고 최저온도는 높아지기 때문이다. 5.0 m에서의 30년 평균 연교차가 3.9~

Table 1. Annual range of 30-year mean air and soil temperatures from 1973 to 2002. Ave_Range was calculated using 9 stations except Jeju and the unit is °C.

Station Depth	T _a	Depth (m)									
		Stc	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	3.0	5.0
Chungcheong	32.1	32.8	30.8	30.3	28.9	27.6	26.0	21.7	17.7	9.9	4.1
Gangneung	27.2	29.4	28.1	27.5	26.4	24.9	22.6	18.5	16.0	9.4	5.1
Incheon	29.5	31.2	29.4	28.7	27.4	26.3	23.6	19.8	15.9	8.5	4.5
Ulleungdo	25.2	28.2	26.7	25.9	24.2	22.9	21.0	16.4			
Suwon	30.9	30.5	29.5	28.9	27.3	26.2	24.5	19.9	15.9	8.7	4.0
Daejeon	29.9	30.5	29.2	28.5	27.3	26.2	24.4	20.3	17.0	10.5	4.6
Busan	24.6	28.6	26.8	26.0	24.6	23.6	21.9	16.9	12.8	6.7	3.9
Mokpo	26.4	28.3	27.3	26.7	25.7	24.5	21.9	18.0			
Yeosu	25.2	28.7	27.0	26.4	25.3	24.3	21.4	17.8			
Jeju	23.5	28.0	26.6	25.6	24.5	23.1	20.5	18.0			
Ave_Range	27.2	29.1	27.9	27.3	26.0	24.8	22.7	18.6	15.7	8.8	4.3
Max_Ave	26.4	29.3	28.6	28.4	27.8	27.2	26.3	24.4	22.7	19.4	17.1
Min_Ave	-0.8	0.2	0.7	1.1	1.8	2.4	3.6	5.8	7.0	10.6	12.8

5.1°C인 점은 대기대순환모델 또는 지역기후모델의 지중온도 초기화 및 하단 경계조건 처방시 하단(3.0 m 또는 5.0 m)에서의 열속을 0으로 하는 것은 적고하여야 함을 제시한다.

지중온도의 시간변동

Fig. 4는 지중온도류 5.0 m까지 관측하는 9개 지점의 깊이별 30년 평균과 표준편차를 일반적으로 나타낸 것이다. 연 최저와 최고온도는 기온과 같이 지표면에서 1월말과 8월중에 나타나고 있으며 깊이가 깊어질수록 최저 및 최고온도가 발생하는 일이 토양의 열적 특성으로 인하여 지연되고 있으며 연교차도 현저하게 감소하고 있다. 즉, 최고 및 최저온도 모두 지면과 5.0 m 사이에는 약 3개월의 지연이 발생하고 있으며 연교차도 약 25°C에서 4°C로 감소하고 있다. 그 결과 토양이 겨울에는 열위(heat source)으로 작용하고 여름에는 열 흡수원(heat sink)으로 작용하는 이중역할을 통하여 온도 조절기능을 함을 알 수 있다. 또한 지중온도의 일별 변화폭은 계절이 변하는 봄과 가을에 지표면에서 최대로 나타나고 있으며 계절이 극상에 이르는 여름과 겨울에 가장 작게 나타나고 있다. 지중온도의 깊이별 변동성은 대가상태(기온, 강수 등)의 영향을 많이 받는 지표면에서 최대로 나타나고 있으며 계절별로는 봄과 가을에 변동성이 크게 나타나고 있다. 지중온도의 변동성이 봄에는 크고 여름에 작은 것은 강수량의 과다와 함께 봄에 우 리나리를 통과하는 지베 기압계의 변동성에도 관련이

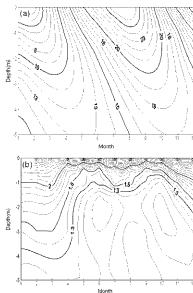


Fig. 4. Month-depth sections of (a) mean soil temperatures and (b) their standard deviations using 9 stations from 1973 to 2002.

있는 것으로 보인다. 즉, 여름에는 많은 강수량의 영향으로 토양수분이 많아져 열용량 및 열전도가 증가

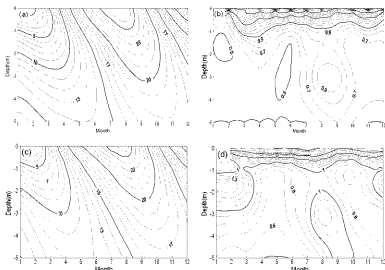


Fig. 5. Same as in Fig. 4 except for the selected station: (a) and (b) for Chuncheon, (c) and (d) for Gangneung.

것과 관련된 것으로 추정된다. 또한 봄과 가을에 우리나라를 지배하는 기압계의 규모가 작고 변동성이 큰 점이 지중온도의 변동성에도 영향을 준 것으로 추정된다.

Fig. 5는 5.0 m까지 지중온도를 관측하는 9개 지점 중 임의로 선정한 춘천과 강릉지점에서의 지중온도의 변동특성을 Fig. 4에서와 같이 나타낸 것이다. 춘천과 강릉 지점에서도 9개 지점 평균과 같이 최고 및 최저 지중온도의 발생일이 깊이에 따라 지연되고 있으며 전체적으로 1.0 m 이내의 천부토양에서 지중온도의 변동성이 강하게 나타나고 있다. 하지만 두 지점에서 1.0 m 이하의 깊이에서의 지중온도 및 그의 변동성은 큰 차이를 보이고 있다. 강릉지점의 경우 춘천에 비해 깊이가 깊어질수록 최저 및 최고기온이 현저히 낮게 나타나고 있다. 또한 심부토양에서의 지중온도 변동성도 춘천의 경우에는 다른 계절에 비하여 여름철에 강한 변동성을 보이고 있으나 강릉지점의 경우 전 계절에 걸쳐 변동성이 크게 나타나고 있으며 특히 겨울과 여름에 변동성이 강하게 나타나고 있다.

Fig. 6은 춘천과 수원의 깊이에 따른 평균 지중온도의 경년변동을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지리적 위치 및 깊이에 따라 지중온도의 경년변동 패턴이 매우 다르게 나타남을 볼 수가 있다. 춘천의 경우 지중온도의 연평균이 깊이에 따라 다른 뿐만 아니라 변동폭도 크게 나타나고 있으나 수원의 경우 깊이별 연평균온도가 매우 유사할 뿐만 아니라 경년 변동폭도 상대적으로 작게 나타나고 있다. 또한 1.0 m까지는 지중온도의 경년변동이 가온의 그것과 매우 유사하게 나타나고 있으나 1.5 m 이하의 깊이에서는 일정한 지연효과와 영향으로 경년 변동폭이 작을 뿐만 아니라 변동패턴의 위상차도 발생하고 있다. 두 지점 모두 지중온도의 경년변동이 기존의 경년변동과 유사하게 나타나고 있으나 완벽하게 일치하지는 않고 있다. 이는 Zhang et al.(2001)이 밝혔듯이 지중온도의 경년변동에 영향을 주는 인자가 대기온도뿐만이 아니라 강수량 및 토양특성 등의 영향도 받음을 제시한다. 또한 Figs 5와 6은 각 관측지점별로 지중온도의 일련도 특성이 다를 것을 제시함으로써 지중온도의 변동성을 예측하기 위해서는 각 관측소별 토양특성(도

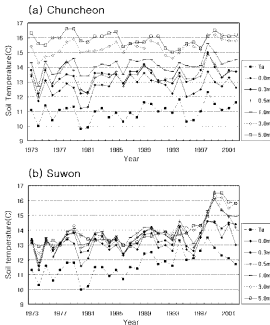


Fig. 6. Secular variations of the annual mean air and soil temperatures at (a) Chuncheon and (b) Suwon.

양중유, 광각유, 일견도도 등) 자료 확보가 필요함을 제시한다.

지중온도의 변동경향

이병인 등(1997)에 의하면 지난 20년간(1973~1992년) 한반도의 평균기온은 약 0.47°C 상승한 것으로 알려지고 있다. 또한 유상범 등(1993)에 의하면 해안보다는 내륙에서, 남부지역보다는 중북부지역에서 상대적으로 기온상승이 뚜렷하게 발생하였다. 여기서는 지중온도의 변동경향을 최근 30년(1973~2002)과 과거 30년(1943~1972)으로 나누어 변동경향을 분석하였다.

Table 2는 수원, 춘천 등 10개 지점의 최근 30년 동안의 연평균 지중온도의 깊이별 변동경향과 대구, 전주 및 목포 3개 지점에서의 과거 30년 동안의 변동경향을 나타낸 것이다. 지중온도를 관측하는 10개

지점들의 기온과 지중온도의 최근 변동경향은 각각 0.4°C/10년과 0.3(0.3 m)~0.5(3.0 m)/C/10년으로 나타나고 있다. 기온은 수도권인 인천, 수원을 중심으로 하여 중남부 내륙인 대전에서 0.5~0.6°C/10년으로 상승경향이 크게 나타나고 있으나 춘천, 목포 및 울릉도 등 해안가 지역에서는 상승경향이 작게 나타나고 있다. 지중온도도 기온의 상승경향이 높은 대도시 지역에서 높게 나타나고 있으며, 인천, 춘천, 강릉지역에서는 상대적으로 상승폭이 작게 나타나고 있다. 이러한 지중온도의 변동경향은 지구온난화 또는 도시열섬의 영향이 지중온도까지 미치고 있음을 제시한다. 지중온도의 변동경향에서 특이한 지점은 제주와 춘천이다. 제주에서는 깊이가 깊어질수록 지중온도의 상승경향이 커져서 1.0m에서 1.2°C/10년으로 강하게 나타난 반면 춘천에서는 지중온도의 상승경향이 깊이에 관계없이 거의 일정하게 상승하다가 5.0m에서는

Table 2. Temporal trends of annual mean air and soil temperatures ($^{\circ}\text{C}/10\text{-year}$) during 30 years for each station

a) The recent 30 years (1973 to 2002).

Station/Depth	Ta	Depth (m)									
		Sfc	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	3.0	5.0
Ulleungdo	0.28	0.30	0.40	0.32	0.36	0.25	0.37	0.27			
Gangneung	0.39	0.28	0.30	0.26	0.16	0.16	0.15	0.30	0.33	0.41	0.43
Chuncheon	0.25	0.17	0.21	0.20	0.22	0.26	0.20	0.28	0.08	0.26	-0.06
Suwon	0.64	0.42	0.32	0.50	0.55	0.46	0.76	0.70	0.71	0.86	0.89
Daejeon	0.56	0.62	0.52	0.55	0.46	0.42	0.29	0.41	0.41	0.53	0.66
Incheon	0.54	0.24	0.49	0.11	0.31	0.24	0.29	0.21	0.38	0.29	0.34
Mokpo	0.22	0.73	0.46	0.32	0.32	0.36	0.07	0.18			
Yeosu	0.36	0.30	0.50	0.39	0.26	0.35	0.36	0.44			
Busan	0.41	0.53	0.39	0.32	0.33	0.33	0.29	0.29	0.29	0.38	0.48
Jeju	0.37	0.40	0.31	0.54	0.44	0.60	0.88	1.18			
Ave.	0.40	0.41	0.40	0.33	0.3	0.31	0.31	0.35	0.38	0.47	0.45

b) The past 30 years (1943 to 1972).

Station/Depth	Ta	Depth (m)									
		Sfc	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	3.0	5.0
Daegu	0.24	-0.17	-0.36	-0.32	0.17	0.33	0.10	0.07	-0.06	-0.14	-0.02
Jeonju	0.26	0.17	-0.13	-0.20	-0.09	-0.07	0.26	0.20	0.22	0.21	0.16
Mokpo	0.03	-0.67	-0.64	-0.65	-0.60	-0.40	-0.26	-0.11			
Ave.	0.17	-0.23	-0.38	-0.39	-0.17	-0.05	0.04	0.04	0.11	0.10	0.09

$-0.1^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 으로 오히려 하강한 것으로 나타나고 있다. 최근 미국의 지중온도 변동경향에 대한 연구에서도 지리적 위치 및 깊이에 따라 변동경향이 다르게 나타남을 보이고 있다. 즉, 미국 남동부지방 일부 지역에서는 지중온도가 하강하고 있으나 그 외 대부분 지역에서는 약 $0.2\sim 0.5^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 수준으로 상승하는 것으로 나타나고 있다(Qr Hu and Song Peng 2003).

과거 30년 동안 기온은 지역적으로 $0.0\sim 0.3^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 상승하여 평균적으로 $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 온난화되었으나, 지중온도는 대부분 관측지점 및 깊이에서 하강한 것으로 나타나고 있다. 이 기간은 우리나라가 본격적으로 경제성장을 하기전이기 때문에 도시화 및 지구온난화의 영향이 상대적으로 작았던 점과 도시열섬/지구온난화의 영향이 지중온도에까지 영향이 미치지 못하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 5.0m까지 지중온도를 관측하는 9개 지점의 최근 30년간 깊이별 변동경향을 계절별로 나타낸 것이다. 기온은 이미 알려진 바와 같이 겨울철에 상승폭이 가장 크고 가을에 가장 작게 나타나고 있다. 하지만 지중온도의 경우 1.5m까지는 봄에 상승폭이 가장 크게 나타나고 여름과 가을에 상대적으로 작게 나타나고 있다. 또한 3.0m 이하에서는 계절에 관계

없이 상승폭이 $0.4\sim 0.5^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 정도로 거의 일정하게 나타나고 있다. 이와 같이 깊이에 따라 온도 상승 패턴에 계절차가 발생하는 것은 지표에서는 지구온난화와 도시열섬의 영향으로 겨울에 기온의 상승이 최대로 일어났지만 이 영향이 지중으로 전달되는 과정에서 소요되는 시간지연의 영향으로 지중에서는 봄에 최대 상승이 일어난 것이다. 최근 기상위성자료로부터 도출한 식생지수의 분석결과 봄철에 식생의 발아 및 성장시기가 빨라진 것도 천부토양의 지중온도가 봄철에 뚜렷하게 상승한 결과와 관련된 것으로 보인다(서명석과 남재철, 2003). 여름과 가을에 지중온도의 상승폭이 작게 나타난 것은 최근 늦여름에 크게 증가한 강수량과도 관련이 있는 것으로 보인다(정지현, 2004). 즉, 늦여름의 강수량 증가가 지상온도 상승폭을 약화시켰을 뿐만 아니라 토양수분의 증가시켜 토양의 열용량이 증대되었기 때문이다. 그림에는 나타나지 않았지만 과거 30년 동안에는 주로 0.2 m 이상의 천부토양에서 여름과 봄에 강한 하강경향을 보이고 있다.

토양수분의 영향

지중온도는 지표면에서의 열수지 항목 중 지중열속

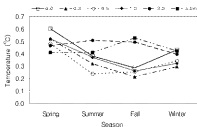


Fig. 7. Trend of seasonally averaged soil temperature for each depth during 30 years (1973 to 2002).

에 의한 일전도와 토양수분에 의한 일의 전달의 영향을 받는다. 즉, 토양수분은 토양의 열용량, 확산계수 등에 영향을 줄 뿐만 아니라 지표면에서의 보편비(Bowen ratio) 조절을 통하여 에너지 수지에도 영향을 준다. 여기서는 토양 수분을 강수량의 함수로 가정하여 강수량의 과다가 지중온도의 변동특성에 주는 영향을 분석하였다. 강수량의 과다가 지중온도의 변동성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1973~2002년 최근 30년 동안 관측지점별로 계절별 강수량(Seas_P)과 변동성(Seas_SD)을 구하여, 강수량이

Seas_P + Seas_SD보다 많이 온 해를 습윤한 해, Seas_P - Seas_SD보다 적게 온 해를 건조한 해로 분류하였다.

Fig 8은 각 계절별로 습윤한 해와 건조한 해의 지중온도 평균과 표준편차의 차, 즉 $Temp = T_{wet} - T_{dry}$, $SD = SD_{wet} - SD_{dry}$ 를 나타낸 것이다. 토양수분의 차가 지중온도와 지중온도의 변동성에 미치는 영향이 계절과 깊이에 따라 다르게 나타나고 있다. 즉, 봄에는 전체적으로 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 낮을 뿐만 아니라 변동성도 작게 나타나고 있다. 여름에는 천부토양에서 봄과 유사하게 나타났다. 1.0 m 이하의 심부토양에서는 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 높을 뿐만 아니라 변동성도 크게 나타나고 있다. 토양수분의 영향이 가장 적은 가을에는 전 층에서 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 높으나 변동성은 큰 차이를 보이지 않고 있다. 하지만 겨울에는 전 층에서 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 1.0°C 이상 매우 높게 나타나고 있으나 변동성은 작게 나타나고 있다. 토양수분의 차이가 지중온도에 미치는 영향이 계절 및 깊이에 따라 다른 것은 토양수분의 증가에 의한 비열 증가와 토양수분에 의한 일전달의 효과로 설명할 수가 있다. 일반적으로 봄과 여름에는 맑은 날보다 강수기 온

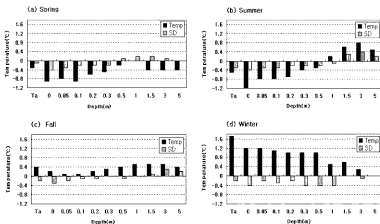


Fig. 8. Anomalies of the wet period air and soil temperatures, and their standard deviation from the 30-year averaged seasonal mean air and soil temperatures: (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall and (d) Winter.

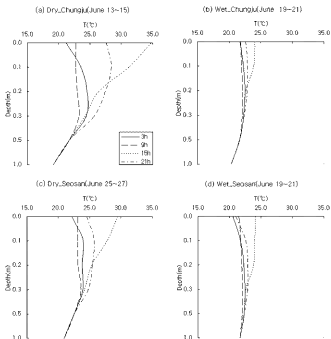


Fig. 9. Diurnal variation of soil temperatures according to the dry and wet conditions at Chungju (a) and (b) and Seosan (c) and (d).

이 낮으므로 열전도(확산계) 의한 지중온도의 열전달의 감소와 토양수분 증가에 의한 비열증기가 복합적으로 작용하여 지중온도와 변동성을 모두 작게 한 것으로 추정된다. 여름철 심부 토양층에서 습윤한 해에 지중온도와 변동성이 모두 높게 나타난 것은 토양수분에 의한 열대류로 천부토양의 열에너지가 심부로 빨리 전달되어 심부토양의 온도가 빨리 상승한 것에 의한 것으로 보인다. 이것은 건조한 여름과 습윤한 여름 해와 심부토양의 최고온도 발생 날짜 차이에서도 알 수 있다. 습윤한 겨울철의 지중온도가 건조한 겨울철보다 매우 높고 변동성은 작게 나타난 것은 겨울철에는 강수(강설) 발생시 맑은 날보다 대기중으로의 열손실이 감소하는 점(Fig. 4에서 보는 바와 같이 겨울철에는 심부토양이 열위일)과 눈 덮임에 의한 은신효과가 복합적으로 작용한 결과로 판단

된다. 이러한 현상은 Zhang et al.(2001)의 연구에서 밝힌 바와 같다.

Fig. 9는 청주와 서산지점에서 강수가 있었던 날과 없었던 날들을 평균한 지중온도의 일 변동을 나타낸 것이다. 여기서 “Wet” 사례는 일 강수량이 50 mm 이상 연속적으로 3일간 발생했던 날들의 평균이며 “Dry” 사례는 적어도 3주일 이상 강수현상이 없었던 때의 평균이다. 지중온도의 일 변동은 깊이에 반비례하여 지표에서 가장 강하게 발생하고 있으며 강수가 없을 경우의 일 변동이 크게 발생하고 있다. 강수현상은 그림에서 보는 바와 같이 지중온도의 일 변동폭을 깊이 및 지점에 관계없이 뚜렷하게 감소시키고 있다. 하지만 두 지점에서의 일 변동폭 변화량이 다르게 나타난 것에서 볼 수 있듯이 강수가 지중온도의 일 변동에 미치는 깊이 및 강도는 강수의 특성(강

도, 강수량, 지속시간) 및 토양특성에 따라 차이를 보이므로 이 부분에 대한 정량적 연구가 필요하다.

요약 및 결론

본 연구에서는 기상청의 지중온도 관측현황(지점, 관측주기, 깊이) 및 1943년부터 2002년까지의 지중온도의 기후학적 변동특성에 대해서 조사하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 1910년대 중반부터 시작된 지중온도 관측은 다른 기상요소와 달리 시대적 필요에 따라 관측 지점 수, 깊이 및 관측주기에서 많은 변동이 있었다. 1970년도 초 농업근대화 정책에 의해 지중온도의 필요성이 증대되어 지중 1.0m까지의 지중온도를 측정하는 농업기상관측소가 크게 증가하여 1976년에는 100여 개 지점에 달하였으나, 1991년부터는 기후관측소 9개 지점과 농업기상관측소 11개 지점을 제외하고는 관측을 중지하였다. 현재 지중온도를 관측하는 관측소는 1) 0.05~5.0m 깊이를 관측하는 기후기본관측소(서울, 부산, 포항, 목포, 여수, 대전, 강릉, 춘천, 울릉도, 제주)와 농업기본관측소(수원) 그리고 인천, 2) 0.05~1.0m에서 관측하는 농업보조관측소(안동, 진주, 전주, 순천, 청주, 서산, 철원, 서귀포) 등 총 20개 지점이다.

2. 지중온도의 공간분포는 기온과 같이 남북경도를 보이며 내륙에서 낮고 해안지역에서 높은 U자형 분포를 보이며 변동성은 반대로 내륙지방에서 크고 해안지역에서 작게 나타나고 있다. 연평균 지중온도는 깊이에 관계없이 약 14.4~15.0°C 분포를 보이고 있으며 서울, 청주 및 춘천에서만 1월과 2월에 0.2m까지 지중온도가 영하로 내려간다. 0.3m 이상에서는 모든 지역에서 겨울에도 영하로 내려가지 않는다.

3. 대기에 비해 상대적으로 낮은 토양의 열전도도와 열용량 효과의 영향으로 연중 최고/최저 온도 발생시기가 깊이가 깊어질수록 지연되어 5.0m 깊이에서 10월말에서 11월초(최고)와 4월말에서 5월초에 나타나고 있다. 지중온도의 변동성은 일반적으로 깊이에 반비례하며 계절적으로는 가을에 작고 봄에 크게 나타나고 있다. 지중온도의 깊이에 따른 지연현상, 계절변동 및 경년변동이 관측지점에 따라 서로 상이하게 나타나고 있는데 이는 각 관측지점의 기후환경과 함께 토양특성에 대한 자료조사의 필요성을 제시한다.

4. 최근 30년간(1973~2002년)의 지중온도에 대한

변동경향을 분석한 결과 지중온도의 변동경향은 지리적 위치, 깊이 및 계절에 따라 다양하나 평균적으로 +0.3~0.5°C/10년 상승한 것으로 나타나고 있다. 지역별로는 대체적으로 수도권인 수원과 대전을 축으로 하는 중부내륙지방과 저위도 남해에 위치한 제주도에서 상승경향이 크다. 계절별로는 기온과 달리 봄에 크고, 가을에 낮은 상승 경향을 보이고 있다. 이것은 토양의 낮은 열전도성에 의한 지연효과와 토양이 열저장고(heat storage) 역할을 한 것이 복합적으로 작용한 결과로 추정된다.

5. 우리나라는 동아시아 몬순기후의 영향으로 계절적으로 강수량의 편차가 클 뿐만 아니라 경년변동도 강하게 나타나고 있다. 강수량의 과다 즉, 토양수분의 차가 지중온도와 지중온도의 변동성에 미치는 영향이 계절과 깊이에 따라 다르게 나타나고 있다. 즉, 봄에는 전체적으로 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 낮을 뿐만 아니라 변동성도 작게 나타나고 있다. 여름에는 천부토양에서 봄과 유사하게 나타났으나 1.0m 이하의 심부토양에서는 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 높을 뿐만 아니라 변동성도 크게 나타나고 있다. 하지만 겨울에는 전 지층에서 습윤한 해의 지중온도가 건조한 해보다 1.0°C 이상 매우 높게 나타나고 있으나 변동성은 작게 나타나고 있다.

본 연구에서는 우리나라 지중온도 관측 현황 및 관측 자료의 기후학적 변동 특성에 대해서 분석하였다. 다른 기상요소와 달리 지중온도의 관측에는 관측 지점 수, 주기 등 여러 가지 변동이 있었다. 여기서는 지중온도 관측에 내재된 변동성 및 자료의 QC에 대해서 깊이 있게 논의하지 않았다. 지중온도가 지면-대기 상호작용 및 기후변화의 연구에 정량적으로 활용되기 위해서는 이 부분에 대한 깊이 있는 연구가 선행되어야 할 것이다. 또한 지중온도의 시·공간 변동 특성에 많은 영향을 주는 토양특성, 강수량, 적설 등과의 관계에 대해서도 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 하나인 “충청지방 악기상 예측시스템 개발” 과제에서 수행된 것입니다. 지중온도 및 많은 문헌자료를 제공해 준 기상청 관계자 분들과 논문의 원고를 상세하게 심사해주신 심사위원회에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 강인식, 1994, 지구온난화에 동반된 한반도 기온변화의 시나리오 연구, 한국기상학회지, 30, 247-260.
- 곽종흠, 김희수, 김맹기, 1997, 우리나라 대도시 기후변수들의 변동성과 그 연관성, 한국지구과학회지, 18, 207-216.
- 구민호, 김용제, 서만철, 서명석, 2003, 온도 시계열 자료를 이용한 국내 토양의 열확산계수 산정, 한국지질학회지, 39, 301-317.
- 기상청, 2002, 기후변화 2001(IPCC 2001 번역서), 991 p.
- 기상청, 2003, 관측업무규정, 기상업무법령집, 433-462.
- 김영복, 이승규, 김성태, 2000, 한국의 지온예측과 지리적 영향 분석, 한국농업기계학회지, 25, 497-502.
- 류상범, 문승의, 조병길, 1993, 남한의 도시화에 따른 기후 변동, 한국기상학회지, 29, 429-443.
- 서명석, 남재철, 2003, 기상위성 탐사자료(PAL: 1982-2000)에 나타난 동아시아 지역 식생의 시간변동, 한국기상학회지, 39, 139-150.
- 이명인, 강인식, 1997, 한반도 기후 변동성과 온난화, 한국기상학회지, 33, 99-116.
- 이부용, 1993, 토양 내부에서의 잠열 효과에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문, 52 p.
- 정지현, 2004, 한반도 강수의 최근 특성과 시간변동, 공주대학교 이학석사논문, 51 p.
- Beltrami and Harris, 2001, On the relationship between ground temperature histories and meteorological records: A report on the Pomquet station, Global Planet Change 29, 327-348.
- Beltrami and Harris, 2002, Earth's long-term memory, Science, 297, 206-207.
- Frederick K. Lutgens, Edward J. Tarbuck, 1998: The Atmosphere, Simon & Schuter/A Viacom Company, New Jersey, 434 p.
- Huang, S., H. M. Pollack, and P.-Y. Shen, 2000, Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures, Nature, 403, 756-758.
- Lachenbruch A, and B. V. Marshall, 1986, Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic, Science, 234, 689-696.
- Pan, H.-L., and L. Macht, 1987, Interaction between soil hydrology and boundary-layer development, Boundary-Layer Meteorology, 38, 185-202.
- Peters-Lidard, C. D., E. Blackburn, X. Ling, and E. F. Wood, 1998, The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures, Journal of Atmospheric Science, 55, 1209-1224.
- Qr Hu and Song Peng, 2003, A Daily soil temperature and soil temperature Climatology of Contiguous United States, Journal of Applied Meteorology, 42, 8, 1139-1156.
- Zhang, T., R. G. Barry, D. Gilichinsky, S. S. Bykhovets, V. A. Sorokovikov and J. Ye, 2001, An Amplified signal of climatic change in soil temperatures during last century at Irkutsk, Russia, Climatic Change, 49, 41-76.

2004년 12월 3일 원고 접수
 2005년 1월 21일 수정원고 접수
 2005년 1월 21일 원고 채택