

20세기 후반 한반도 극한 기온 사상(Extreme Temperature Events)의 변화 추이

최영은¹, 민승기¹, 권원태²

기상연구소 기후연구실 기상연구사¹, 기상연구소 기후연구실장²

1. 연구배경 및 목적

인류의 활동으로 인해 전구적으로 일어나고 있는 기후 변화를 탐지하고 원인을 규명하는 것은 중요한 기후 연구 주제이다. 2001년에 발간된 IPCC 보고서는 기후에 대한 인류의 영향으로 19세기 후반 이후 지구의 평균기온이 약 0.7 °C 상승 했다고 결론지었다. 그러나 이러한 경향은 시공간적으로 일정하지 않을 뿐만 아니라, 평균 변화가 극한 사상의 변화를 반드시 이끌어 내는 것은 아니다. 하지만, 평균 변화는 사회나 생태계 전반에 걸쳐서 영향을 미치게 될 기후 행태를 변화시킨다.

기온이나 강수 극한 사상의 변화를 이해하는 것은 과거나 미래 기후변화 예측에 매우 중요하다. 점차적으로 기후변화에 관한 연구는 일 관측 자료를 요구 하는 극한 사상에 초점이 맞추어지고 있다. 극한 사상을 연구하는데 있어서 문제점은 신뢰할만하고 장기간의 자료가 매우 제한적으로 존재한다는 것이다. 최근 관측 기간이 축적됨에 따라 일 관측 자료를 이용한 강수량과 기온 극한 사상의 분석이 여러 지역에서 이루어지고 있다. 대부분의 연구 결과는 최저 기온의 극한 사상은 빈도가 줄어들고, 최고기온의 극한 사상이 나타나는 빈도는 변화가 없다는 것을 보여준다(Bonsal *et al.*, 2001; DeGaetano and Allen, 2002).

한반도에 대해서는 기온과 강수량의 평균 상태의 변화를 분석하는 연구가 많이 시행되어져 왔다. 남한에 위치한 관측지점을 분석했을 때 한반도의 연평균 기온은 최근에 약 0.23 °C 정도 증가했다(Jung *et al.*, 2002). 계절별로도 모든 계절에 기온의 증가 경향이 나타나는데, 그 폭은 여름에 작고 겨울에 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구의 목적은 STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions) project에서 제안한 10개 기후 감시 지시자(indicator)중 기온과 관련된 5개를 이용하여 한반도에서 최근에 극한 기후 사상의 빈도나 강도에 변화가 있는지를 밝히는 것이다. 변화 경향은 분석 기간, 분석에 포함된 관측 지점의 수, 분석에 사용된 통계 기법에 따라 차이가 있을 수 있다. 그러므로, STARDEX에서 제안된 지시자와 동일한 통계 기법을 이용함으로써 보다 일관성 있고, 객관적인 결과를 얻어 낼 수 있을 것으로 사료된다.

2. 연구방법

극한 기후 사상을 정의할 수 있는 많은 지시자들이 여러 연구소와 워크숍을 통해서 세계적으로 공동 개발되어 왔다. 지시자를 개발할 때는 지시자간에 상관성이 높지 않아야 하고, 독립적인 정보를 얻을 수 있어야 한다. 그리고, 분석을 위해서는 지시자에 대한 지역 간의 비교가 선행되고 난 후에 변동성에 대한 고려가 있어야 한다. 일반적으로, 빈도가 빈번하지 않은 사상의 선형 경향 분석을 시도하는 것은 의미있는 결과를 얻어내기 어렵기 때문에, 보다 러버스트(robust)한 결과를 얻어내기 위해서는 덜 극한 지시자를 선택하여 샘플수를 늘리는 것이 권장되고 있다.

본 연구는 기온 영역에 초점이 맞추어져 있기 때문에, Table 1에 제시된 10개의 지시자중 5개에 대한 분석이 이루어졌다. 여기에 제시된 지시자들은 기후변화에 대한 여러 측면을 보여줄 수 있다. 서리일(frost day, Fd)은 중위도에서 겨울철에 나타나고, 연 극한 일 기온차(intra-annual extreme temperature range, ETR)는 여름의 가장 더운 날과 겨울철의 가장 추운 날의 기온차로 구해진다.

열파 지속 기간(heat wave duration index, HWDI)은 낮 최고 기온을 이용하여 산출되고, 온난야율(percent of time $T_{min} > 90$ th percentile of daily T_{min} , T_{n90})은 연중 온난한 밤을 추출한다. 성장계절(growing season length, GSL)은 봄과 가을의 기온 변화에 의해서 영향을 받게 된다.

Table 1. Suggested 10 indicators for monitoring change in climate extremes (after Frich et al., 2002).

Indicator	Definition	Unit
Fd	Total number of frost days (days with daily low minimum temperature $\leq 0^\circ\text{C}$)	days
FDI	Index of frost days: number of days with minimum temperature of any given calendar day $\leq 0^\circ\text{C}$ and the number of days with minimum temperature $> 0^\circ\text{C}$	1/d K
GSL	Growing season length: number of days with mean temperature $\geq 5^\circ\text{C}$	days
HS	Heat stress sum: sum of days with mean temperature $> 30^\circ\text{C}$	days
HSI	Percentage of time	%
R10	No. of days with precipitation $\geq 10 \text{ mm d}^{-1}$	days
CDD	Maximum number of consecutive dry days ($R_{\text{day}} < 1 \text{ mm d}^{-1}$)	days
R5d	Maximum 5 d precipitation totals	mm
SDII	Simple daily intensity index: annual total/number of $R_{\text{day}} > 1 \text{ mm d}^{-1}$	mm d^{-1}
R95T	Fraction of annual total precipitation due to events exceeding the 1961-1990 95 th percentile	%

1954년에서 1999년까지 적어도 40년 이상의 자료를 보유하고 있는 14개 관측지점이 선택되었고, 일자료가 20%이상 결측된 것이 3개월이 넘거나, 연 결측이 10% 이상이면 그 해는 분석에서 제외되었다. 우선 각 지시자의 공간 패턴을 살펴보고, 변화 경향의 규모나 방향을 알아보았는데, Kendall-tau 검정법이 변화경향의 유의성을 검증하기 위해서 사용되었다. 또한 t-검정을 이용해서 전기 23년과 후기 23년의 평균을 비교하였고, 각 지시자의 한반도, 남부, 중부 시계열을 1961-1990년 평년값을 이용하여, 아노말리를 구한 후에 공간적으로 평균하여 구축하였다.

3. 연구결과

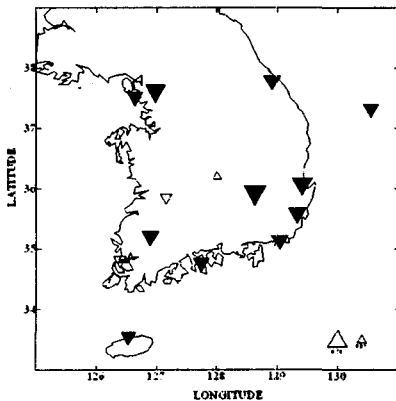


Fig. 1. spatial distribution of frost days over Korea (▲: significant increase, ▼: significant decrease, △: insignificant increase, ▽: insignificant decrease)

서리일(Fd)은 일 최저기온이 0°C 이하인 날의 빈도로 정의되는데, 이것은 농업, 원예, 레저 등 많은 산업에서 중요한 기준이 된다. 이 지시자의 최대 장점은 기후전문가가 아닌 일반 국민들이 개념을 잘 이해하고 있다는 것이다. 중

위도에서 특히 중요한 지시자이고, 지구 온난화로 인해서 Fd의 발생빈도는 감소하게 될 것이라고 기대된다. Fig. 1은 20세기 후반에 한반도에서 서리일수가 현저하게 감소하고 있는 것을 보여준다. 이것은 다른 나라의 연구결과와 잘 일치하고 있다. Fig. 2는 서리일수의 지역 시계열을 구축한 것인데, 한반도, 남부, 중부 지방의 변화 경향은 매우 유사하게 나타나고 있다. 전반기와 후반기를 비교한 t-값의 결과도 뚜렷한 감소를 나타내고 있다.

연 극한 일 기온차(ETR)는 1년 중 기온이 가장 낮은 날과 높은 날의 기온차로, 가장 간단한 지시자이다. ETR은 야간의 기온 상승과 권운 증가로 인한 태양복사의 입사량이 줄어들기 때문에 감소가 기대된다. 한반도에서 ETR은 전체적으로 감소하고 있다. Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 한반도의 일교차가 경향이 지역적 일관성이 없는 반면에 ETR은 보다 일관성 있는 경향을 보여주고 있다.

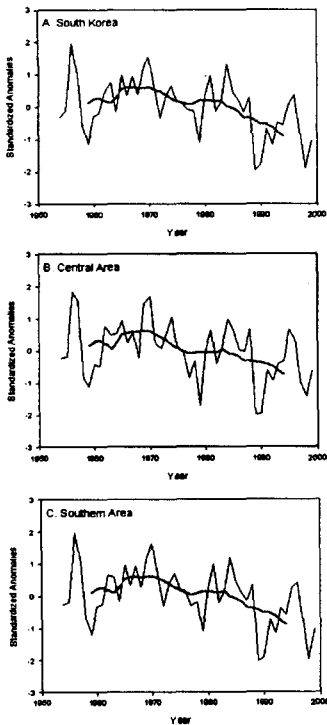


Fig. 2. The standardized anomalies of frost day(Fd).

열과 지속 기간(HWDI)은 30년(1961-1990년) 평년 최고 기온 보다 최저 기온이 5 °C 이상 높은 날이 5일 이상 연속적으로 나타나는 기간으로 정의하는데, 사망률과 밀접한 관계가 있다고 보고되고 있다. HWDI는 토양수분의 양이 감소함에 따라 길어지고, 극심해질 것으로 기대된다. 한반도 전체에 걸쳐서 증가경향이 나타나고 있지만, 통계적으로 유의한 곳은 서울, 인천, 부산을 포함하는 대도시 세계 지점이었다(그림 제시하지 않음). 이는 HWDI의 증가에 지구온난화와 함께 도시화 현상이 크게 기여하고 있다는 것을 뒷받침하고 있다.

성장 계절(GSL)은 최저 기온이 5 °C 이상인 날이 5일 이상 지속되는 시기부터 5 °C이하의 최저 기온이 5일 이상 지속되는 시기까지의 기간으로 정의되며, 기온이 상승함에 따라 증가가 기대된다. 북반구의 대부분의 지역에서 나타난 바와 같이 한반도에서도 GSL은 증가하고 있다.

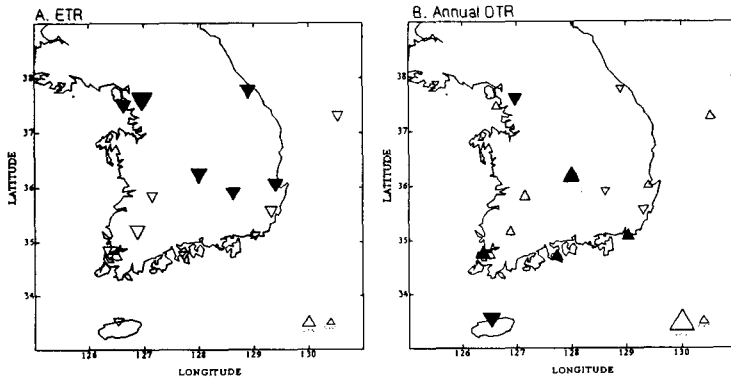


Fig. 3. The trends of inter-annual extreme temperature range (left panel) and annual diurnal temperature range (right panel) over Korea.

온난화율(Tn90)은 온난한 밤을 직접 측정할 수 있는 지시자로, 야간냉각이 없어짐으로 생기는 영향을 반영한다. 지구 온난화는 주로 야간 온난화를 증가시키는데, 이것은 맑은 하늘 복사 효과와 야간 응결로 인한 운량의 증가에서 초래된다(Frich *et al.*, 2002). 야간 온난화의 변화 경향은 한반도에서, 전반적으로 증가경향이 나타나고 있는데,(그림 제시되지 않음) 이것은 세계적으로 나타나는 경향이다(Frich *et al.*, 2002).

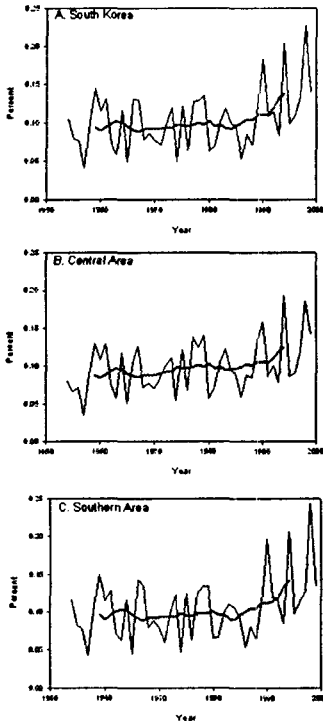


Fig. 4. The variation of annual percent of time $T_{min} > 90^{th}$ Percentile of daily minimum temperature.

사사

본 연구는 기상청 주요사업인 “기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발(II)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Bonsal BR, Zhang, Z, Vincent LA and Hogg WD. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. *Journal of Climate* 14: 1959-1976.
- Changnon SA, Pielke Jr. RA, Changnon D, Sylves RT, Pulwarty R. 2000. Human factor explain the increased losses from weather and climate extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81: 437-442.
- Degaetano AT, Allen RJ. 2002. Trends in twentieth-century temperature extremes across the United States. *Journal of Climate* 15: 3188-3205.
- Frich P, Alenxander LV, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Klein Tank, AMG, Peterson, T, 2002, Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century, *Climate Research* 19: 193-212.
- Jung HS, Choi Y, Oh JH and Lim GH. 2002. Recent trends in temperature and precipitation over South Korea. *International Journal of Climatology* 22: 1327-1337.

4. 요약 및 결론

한반도 대부분의 지역에서 온난야와 성장계절이 증가하고 있는 반면, 서리 일수의 빈도는 현저하게 감소하고 있다. 연 극한 일 기온차는 2개의 관측치 만을 이용하지만, 극한 기온 사상의 변동성을 나타내는 매우 러버스트한 지시자이다. 이 지시자는 대기에 대한 인류의 영향을 직접적으로 보여줄 수 있고, 겨울철의 복사 손실의 감소와 여름철 태양 입사량의 감소가 이 지시자의 현저한 감소를 유도한다.

전구적으로 예측된 전망을 보면 21세기 중반과 후반에 최고기온은 각각 1.8°C, 3.9°C, 최저기온은 각각 2.4°C, 5.2°C 증가할 것으로 예측하고 있다. 또한 극한 기후 사상이 사회 전반에 걸치는 피해는 계속 증가하고 있다는 보고가 있다. 최근의 연구는 기후변화로 인한 극한 기후 사상의 증가가 나타나지 않더라도, 도시성장과 인구증가로 기상재해로 인한 인명과 재산 손실은 계속적으로 증가할 것이고 주장 한다 (Changnon *et al.*, 2000). 거기에 기후변화가 더해지면 피해는 더욱 커진다는 것을 전망할 수 있다. 향후 연구는 상세 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 한반도 극한 기상의 미래 전망에 대한 연구가 수행될 것이다.