



## Changing climate in our lifetime: A review

Paik, Kyungrock<sup>a\*</sup> · Woo, Yin San<sup>a</sup>

<sup>a</sup>School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

Paper number: 18-053

Received: 29 July 2018; Revised: 1 November 2018 / 16 November 2018; Accepted: 16 November 2018

### Abstract

During the last decades, considerable efforts have been spent for climate studies, in particular to better understand changing climate. In turn, several significant trends in climatic variables have been reported. Explaining such trends is challenging – some of them have been considered contradictory to another. Various hypotheses have also been suggested for general description of changing climate. At this point in time, it would be beneficial to look back and carefully recollect our knowledge about climate change. In this paper, we aim to provide a comprehensive review on our forefront knowledge in this context with focus on the trends in temperature, solar radiation, wind speed, evaporation, and precipitation. Major trends, namely warming, dimming, and stilling, are demonstrated together with evaporation paradox and increasing precipitation variability, using data at Seoul. On the basis of understanding these notions, we suggest four key implications to hydrologists and engineers.

**Keywords:** Climate change, Global warming, Global dimming, Stilling, Evaporation paradox

## 우리 시대의 기후 변화를 돌아보다

백경록<sup>a\*</sup> · Woo, Yin San<sup>a</sup>

<sup>a</sup>고려대학교 건축사회환경공학부

### 요 지

지난 수십 년 동안, 변화하는 기후를 이해하기 위해 많은 연구가 있었고, 여러 기후 변량의 변화추세가 발견되었다. 이들 추세를 설명하기는 쉽지 않고, 때로는 서로 모순적으로 보여지기도 한다. 다양한 기후 변량의 변화추세를 일반적으로 설명하기 위한 가설을 제시하기 위해 많은 시도도 있었다. 어느 정도 지식이 축적된 이 시점에서, 우리 시대에 진행되는 기후 변화에 대해 우리가 알고 있는 것을 되돌아보고 신중히 정리해볼 필요가 있다. 여기서는 기온, 일사량, 풍속, 증발, 강수에 초점을 맞추어 변화하는 기후에 대해 우리가 얻은 지식을 종합적으로 살펴보고자 한다. 온난화, 흐려짐, 잔잔하기로 대변되는 주요 변화추세 및 증발의 역설, 강수 변동성의 증가를 서울 지점 자료를 예시로 들어 설명한다. 이러한 변화에 대한 이해를 근거로 수문학자와 공학자들에게 네 가지 함의를 제시하려 한다.

**핵심용어:** 기후 변화, 지구 온난화, 흐려짐, 잔잔하기, 증발의 역설

## 1. 서 론

기후는 인류 사회와 생태계에 큰 영향을 끼치기에, 사람들은 언제나 기후의 현황과 변화에 관심을 가졌다. 사실, 대기가

처음 형성된(약 46억 년 전) 이래 기후는 항상 바뀌어왔다. 기후에 변화를 가져오는 요인은 다양하다. 우선, 운석의 충돌이나 태양 복사에너지의 변화와 같은 지구 밖(extra-terrestrial) 요인이 있다. 후자는 태양의 흑점 활동 및 Milankovitch 주기로 알려진 편심(eccentricity), 세차운동(precession), 자전축의 기울기 변화(tilt)와 같은 지구 회전운동과 관련이 있다. 대기 중으로 많은 양의 화산재와 이산화황(sulfur dioxide)을 방

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-3290-4860  
E-mail: paik@korea.ac.kr (K. Paik)

출하는 화산 폭발과 같은 지각의 움직임(tectonics)도 중요하다. 특히, 해류, 지표(landscape), 생물계(biome) 등과 대기권 사이의 상호작용을 포함한 지구 시스템 내의 되먹임(feedback) 작용이 결정적으로 중요하다. 이러한 요인들은 광범위한 시간 규모에 걸쳐 기후에 영향을 미치는데, 예를 들어 화산재와 운석 충돌은 거의 즉각적으로 영향을 주는 반면 열염(thermohaline)순환의 시간 규모는 약 1000년에 이른다.

우리가 특히 관심을 두는 기후변화는 지질학적 시간 규모(약 1000년 이상)에 걸친 변화보다는 우리가 살면서 겪는(약 100년의 시간 규모) 변화이다. 이런 측면에서, 지난 세기 동안 인류가 겪고 기록한 자료는 큰 의미가 있다. 20세기는 인류 역사상 가장 집중적으로 관측이 이루어진 시기이다. 이렇게 관측된 자료를 통해 우리는 기후가 빠르게 변하는 것을 깨닫게 되었고, 이러한 변화의 상당한 부분이 인간의 활동과 관련이 있는 것으로 간주하고 있다. 놀랄만큼 빠른 변화와 앞으로 닥칠 기후환경은 현대 사회의 중요한 관심사가 되었다. 기후변화에 적응하는 지혜와 더불어, 변화를 가급적 늦출 수 있는 전략 마련이 필요해졌다.

기후변화의 대표적 추세가 일반인에게 잘 알려진 '지구 온난화'라고 하겠다. 대중 매체가 이 문제를 반복해서 다룬 덕분에 기후변화에 대한 대중의 관심을 끌어낼 수 있었다. 그러나 온난화에 집중된 대중교육 탓에 상당수 일반인은 기후변화와 지구 온난화가 같은 것이라는 오해도 한다. 지구 시스템은 역동적이며 복잡한 체계여서 다른 환경 변수는 그대로 유지한 채 온도만 상승하는 것은 불가능하다. 실제로 기온의 증가 외에도 여러 기후 변량의 유의미한 추세가 지난 수십 년 동안의 연구를 통해 알려졌다.

이 원고는 기후변화에 대해 지금까지 알게 된 사실을 정리하고 이를 통한 함의를 과학자와 공학자에게 제공하기 위함이다. 기후변화는 한 편의 원고에서 다루기에는 너무 큰 주제이기여 여기서는 수문학자 및 수자원 전문가와 밀접하게 관련이 있는 기후 요소의 변화에 초점을 맞추었다. 아래 절에서는 온도(2절), 지표면 일사량(3절), 지표면 풍속(4절), 증발(5절) 및 강수(6절)의 추세에 대해 다룬다. 이어서 7절에서는 수문학자와 수자원 전문가에게 제언하며 원고를 마무리할 것이다.

## 2. 온난화(Global Warming)

의심의 여지없이, 지난 세기에 걸쳐 전 지구적 규모로 대기, 지표, 해수면의 온도가 상승했다(Fig. 1). 기온보다 해수면 온도의 상승률이 더 작은 것은 공기보다 물의 비열이 크기 때문

이다. 혹자는 대기와 해수 온도가 모두 급격히 상승하는 것보다는 해수라도 천천히 덥혀지는 것이 낫다고 생각할 수 있다. 그럴듯하지만, 대기와 해수 온도의 차이가 벌어지면 국지적인 기후 변동이 커질 가능성이 있으므로 간단히 '낫다'고 답하기는 어려운 문제다. 기온증가를 자세히 관찰해보면 1930년 대까지 꾸준히 계속된 뒤 1980년대까지 멈추었다가, 이후 급속한 증가가 다시 시작되었다. 이 휴식기는 다음 절에서 따로 논할 것이다.

온난화는 지표면의 식생에 큰 영향을 주어 생태계를 변화시킨다. 농업 및 어업에 영향을 주고, 폭염 및 열 관련 질환과 같이 직접적인 형태로 인류 사회에 영향을 준다. 또한, 해수면과 대기 순환에 변화를 가져오는데, 이 또한 궁극적으로 인류 사회에 큰 영향을 주게 되며, 이러한 영향은 때때로 자연재해의 형태로 나타난다.

온난화로 인해 빙하와 같은 지구 표면의 얼음이 줄어들었다(Chen *et al.*, 2009; Osipov and Osipova, 2017; Zheng *et al.*, 2018). 이것은 여러 가지 결과를 가져온다. 얼음으로 덮인 표면은 높은 반사율(albedo)을 가져 태양 복사의 상당량을 반사하는데, 얼음 표면의 감소로 인해 반사량이 줄어들면 지표면 온도가 상승할 수 있다. 얼음이 녹으면 해수면 또한 상승한다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014) 에 따르면 1901년부터 2010년까지 전 세계 평균 해수면이 19 cm 상승했고, 이는 연평균 1.7 mm의 상승률에 해당한다. 특히 최근 1993~2010년 기간만 살펴보면 상승률이 무려 3.2 mm/year라고 보고했다. 솔로몬 군도에서는 해수면 상승과 해안선 침식으로 인해 적어도 5개의 암초 섬이 사라졌다(Albert *et al.*, 2016; Nunn *et al.*, 2017). 빙하가 빠르게 녹으면

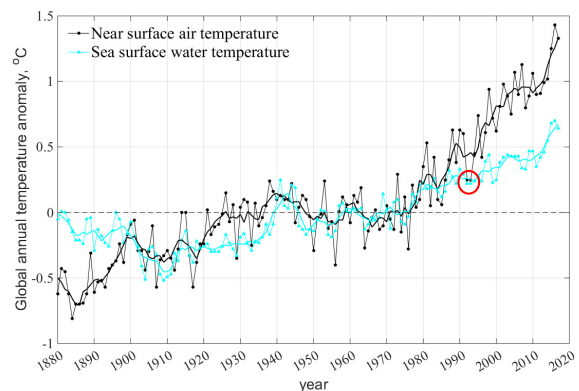


Fig. 1. Anomaly of global near-surface air temperature and sea surface temperature from 1880 to 2017 with base year from 1951 to 1980. Thick solid lines are 5-year moving averages. Red circle highlights air temperature in 1992 and 1993 (data from ASA Goddard Institute for Space Studies).

극적인 지형변화를 초래할 수도 있다. 캐나다 Yukon 강 상류는 Kaskawulsh 빙하가 막고서 그 지역에서 발생하는 유출을 Yukon 강을 통해 베링해로 이송하였다. 그런데, 온난화로 인해 Kaskawulsh 빙하가 녹으면서 정반대인 태평양 쪽으로 물이 흐를 수 있는 길을 터주게 되었다(Shugar *et al.*, 2017).

기온변화를 세부적으로 살펴보면 일 최저기온이 일 최대기온보다 훨씬 빠르게 상승하였다(Karl *et al.*, 1993) (Fig. 2(a)). 다시 말하면, 일 최대기온과 일 최저기온의 격차(DTR-Diurnal Temperature Range)가 줄어들었다는 뜻이다(Fig. 2(b)). 일 최대기온과 최저기온의 상승 추세가 평행하지 않은 이유로 도시화 등 지역적 요인에 주목한 연구가 많다. 도시화로 인한 열섬효과는 특히 밤 온도에 영향을 주기에 DTR을 줄이는 것으로 볼 수 있다. 또한 농업생산량의 증가를 가져온 관개시설

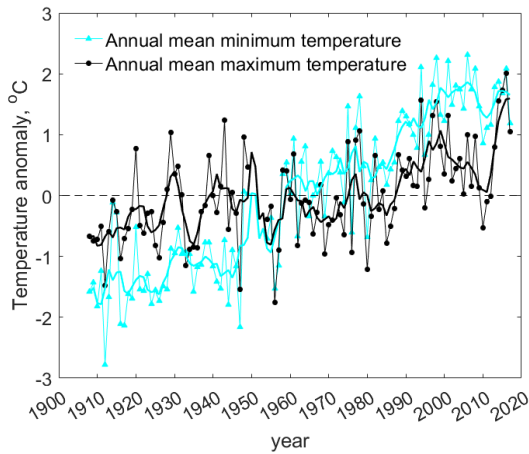
의 확장도 영향을 주었다. 관개수로 덕분에 낮 동안 작물의 증산(transpiration)이 늘어났고, 그만큼 현열(sensible heat)이 잠열(latent heat)로 바뀌었으므로 낮 기온의 상승이 억제되었다. 흥미로운 점은 사막화가 진행되면 관개시설 확장과 정반대 효과가 나타나므로 DTR을 키울 수도 있다 (이상은 Karl *et al.* (1993)의 내용을 요약하여 발췌함).

DTR감소의 원인으로 전술한 지역적 요인 외에 기후 요인도 중요하다. 예를 들어 눈 덮인 면적, 표면 경계층(boundary layer)의 변화가 DTR의 변화를 가져올 수 있다. 흥미롭게도 DTR의 감소는 구름량(또는 운량, cloud cover)의 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려졌다(Plantico *et al.*, 1990). 구름량이 늘어남에 따라 낮 동안 지표면에 도달하는 일사량이 감소하여 일 최대기온은 충분히 증가하지 못했을 것이다. 더욱이 구름의 증가는 야간에 대기 경계층에 더 많은 열을 가두어 야간 기온을 상승시킬 수 있다. 놀라운 점은 온난화와 함께 DTR의 감소가 진행되리라는 것을 이미 100년 전에 Arrhenius (1896)가 예언했다는 것이다.

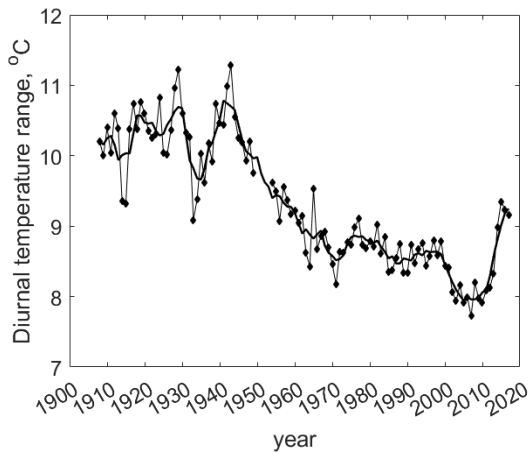
### 3. 지구 흐려짐과 밝아짐(Global Dimming and Brightening)

1950년대와 1980년대 사이의 지표면 일사량(surface solar radiation) 감소 추세가 이스라엘(Stanhill and Moreshet, 1992), 구 소련(Abakumova *et al.*, 1996), 독일(Liepert, 1997), 멕시코(Jáuregui and Luyando, 1999), 미국(Liepert, 2002), 노르웨이(Grimenes and Thue-Hansen, 2006), 중국(Qian *et al.*, 2006), 일본(Tanaka *et al.*, 2016) 등 세계 여러 곳에서 보고되었다(Stanhill and Cohen, 2001, Cohen, 2009, Kambezidis *et al.*, 2016; He *et al.*, 2018). 이 현상을 지구 흐려짐(global dimming) 또는 지구 음암화라고 한다. 이것이 인구 증가와 그에 따른 대기오염으로 인한 국지적 또는 지역적 현상이라는 주장도 있으나(예: Alpert *et al.*, 2005), 더 많은 연구에서 전 지구적 현상으로 간주했기에 여기서는 지구 흐려짐이라고 표현한다.

지표면 일사량의 감소는 얼핏 지구 온난화와 상충하는 것으로 여겨질 수 있다. 하지만 지구 흐려짐은 지구에 들어오는 태양복사에너지의 감소를 의미하는 것이 아니다. 지구 대기로 유입된 태양복사량(insolation 또는 incoming solar radiation)은 11년 태양 주기를 제외하고는 별다른 추세를 보이지 않는다. 지구 흐려짐은 지표면에 도달하는 일사량이 줄어들었다는 의미일 뿐이다. 요약하면, 비슷한 양의 일사량이



(a) Anomaly of annual mean maximum and minimum temperature using base year from 1908 to 2017



(b) Annual mean diurnal temperature range

Fig. 2. Minimum and maximum temperatures and diurnal temperature range at Seoul from 1908 to 2017 (data from KMA - Korea Meteorological Administration). 5-year moving average is given as thick solid line.

대기 상단(top of atmosphere)에 도달하지만, 지표면에 도달한 양은 줄어들었다.

따라서 지표면 일사량이 줄어든 원인은 대기권에서 찾아야 한다. 그 원인으로 주목을 받는 것은 구름량의 변화(Angell, 1990; Abakumova *et al.*, 1996; Liepert, 1997)와 에어로졸(aerosol) 농도의 변화다(Stanhill and Moreshet, 1992; Jáuregui and Luyando, 1999; Power, 2003; Alpert *et al.*, 2005; Streets *et al.*, 2006). 화산 폭발이나 인간의 경제활동은 이산화황이나 그을음(soot) 같은 에어로졸을 다량 방출한다. 흥미롭게도 흐려지는 현상은 남반구보다 북반구에서 더욱 명확하게 관찰되는데(Stanhill and Cohen, 2001) 이는 북반구에 인구가 집중됨으로 인해 더 많은 에어로졸이 배출되는 것과 관련이 있을 것으로 추정할 수 있다.

대기권으로 들어오는 에너지는 변하지 않았는데, 지표면에서 측정된 에너지가 줄었다는 데에는 두 가지 시나리오가 가능하다. 먼저, 태양 복사선이 대기권을 통과하는 도중에 포착(absorption)되는 양이 늘어났기에 지표면에 더 적게 도달했을 수 있다. 다른 가능성은 태양 복사선이 대기권을 통과하는 동안 대기 입자에 의해 우주로 반사(reflection)되는 양이 늘어났기에 지표면 일사량이 줄어들었을 수도 있다. 이 두 가지 시나리오는 전혀 다른 결과를 가져온다. 전자는 대기권에서 에너지를 흡수했으므로 지구 온난화를 가져올 것이나, 만약 후자가 사실이라면 지구를 식히는 데에 도움이 될 수 있다. 아래에서 이 두 가지 시나리오의 근거에 대해 더 자세히 살펴 보겠다.

에어로졸이나, 이에 의해 오염된 갈색 구름(brown cloud)은 태양에서 오는 단파복사(short wave radiation)에너지를 흡수할 수 있어서, 지표면에 도달하는 일사량을 감소시킨다고 알려졌다(Stanhill and Moreshet, 1992; Stanhill and Cohen, 2001; Andreae *et al.*, 2005; Romanou *et al.*, 2007). Ramanathan and Carmicheal (2008)은 이러한 과정이 대기를 덥힌다고 주장했으며, 기상 현상이 활발한 표면에서 3 km 고도까지의 경계층을 주로 덥힌다고 했다.

반면, 화산재(Haywood *et al.*, 2014; Santer *et al.*, 2014), 구름(Angell, 1990; Abakumova *et al.*, 1996; Liepert, 1997) 및 산란 에어로졸(Andreae *et al.*, 2005; Wild, 2009)은 거울처럼 작용하여 대기권에 입사하는 직사광선을 우주로 반사한다. 에어로졸은 구름 속의 물방울을 더 작게 만드는데, 물방울이 작아지면 그 자체로도 빛을 더 잘 반사할뿐더러 응결핵(nuclei) 생성이 더뎌져 구름의 수명이 길어짐(강수로 진행되는 것이 더뎌짐)으로 인해 결과적으로 더 많은 복사선을 반사한다(Andreae *et al.*, 2005).

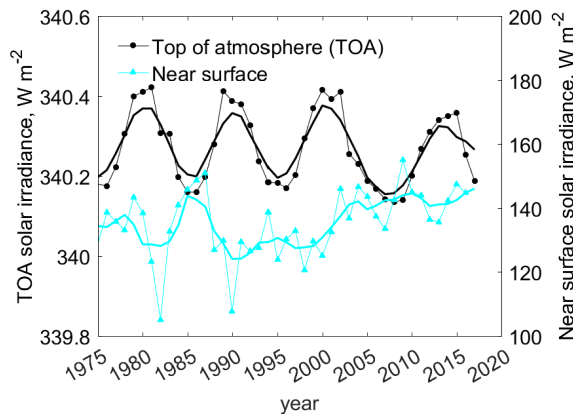
이러한 반사 과정은 지구 온난화를 늦출 수 있는 것으로 여겨진다(Wild *et al.*, 2005; Wild, 2009). 흥미롭게도, 지구 평균 기온의 상승세는 1950년대에서 1980년대 사이에 멈추었는데(Fig. 1), 이 기간은 지표면 일사량이 감소한 기간과 일치한다. 반사를 통한 지구 냉각 효과를 확실히 관찰할 수 있는 예는 화산 폭발이다. 1991년 필리핀 Pinatubo 화산의 폭발은 200만 ton의 이산화황을 대기 중으로 방출했는데, Hansen *et al.* (1992)은 폭발 이후 몇 년간 지구 평균 기온이 소폭 감소할 것이라는 예측을 했었다. 실제로 1992, 1993년 기록을 보면 전 세계적으로 기온이 떨어졌다 (Fig. 1의 동그라미).

이러한 사건에서 영감을 얻어 SPICE (Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering) 프로젝트(Pope *et al.*, 2012; Pidgeon *et al.*, 2013)와 같은 활동이 일어나고 있다. 이러한 움직임은 기후변화를 수동적으로 관찰하고 예측하는 데에 그칠 것이 아니라 '적극적으로' 기후를 조절하는 단계에까지 가야 한다는 생각을 하는 이들이 이끌고 있는데, 이 신생분야를 기후공학(geoengineering)이라고 부른다. 어쩌면 기후공학은 태고이래 추구해온 치산치수(治山治水)의 이상적 해법을 꿈꾸는 것이다.

현 단계에서 기후공학이 순수한 연구수준에서 발전하는 것은 환영할 일이지만, 실제 적용을 고려하는 것은 매우 위험할 수 있다. 먼저, 기후를 조작하는 시도를 하기엔 여전히 기초 지식이 부족하다. 위에서 예로 든 지구 흐려짐의 두 시나리오에 대해서만 보더라도 명확하게 어느 시나리오가 답이라고 말하기 쉽지 않다. 실제 지구 시스템은 매우 복잡하고, 에어로졸에 의한 반사, 흡착이 동시에 일어나며, 2차로 일어나는 되먹임(feedback) 현상도 있기에, 지식이 더 축적되어야 한다. 만약 기후공학적 시도가 바라던 결과를 주지 않고 예측하지 못했던 상황이 전개될 경우 해결책이 없다는 것도 문제다. 기후공학을 시도하기 위해서는 국가 간의 협조와 동의가 이루어져야 함도 중요하다.

이상에서 지구 흐려짐 현상에 대해서 논했으나, 지표면 일사량 감소 추세는 1980년대 중반 무렵에 멈추고 그 이후로는 오히려 증가하는 추세로 전환되었다. 즉, 지금에 와서는 지구 밝아지기(brightening)가 진행되고 있다(Wild *et al.*, 2005; Cohen, 2009; Ohmura, 2009). 밝아지기 현상은 뉴질랜드(Liley, 2009), 지중해(Kambeizidis *et al.*, 2016), 일본(Tanaka *et al.*, 2016) 등에서 이미 보고되었으며, Fig.3에 보이듯 우리나라에서도 나타난다.

밝아지기는 환경규제 강화와 경제성장 둔화(Cohen, 2009) 탓에 에어로졸 배출이 줄어든 덕분에 나타난다는 주장이 있다(Power, 2003; Streets *et al.*, 2006). 중국과 인도의 일부 지역



**Fig. 3.** Observed solar irradiance at the top of atmosphere and near surface (Seoul) (TOA solar irradiance data from SORCE (<http://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/>) project site and near surface solar irradiance data from KMA). 5-year moving average is given as thick solid line.

은 여전히 흐려지는 현상을 겪고 있다는 것도 주목할 점이다 (Cohen, 2009; He *et al.*, 2018). 밝아지기 현상은 그동안 어느 정도 지구 온난화를 늦춰줬던 가림막을 제거했다는 평을 받는데, 실제로 1990년대 중반 이후는 기온이 급격히 상승하고 있다 (Andreae *et al.*, 2005; Wild *et al.*, 2005; Cohen, 2009) (Fig. 1).

이 사실만 놓고 보자면, 에어로졸 증가가 온난화를 가져오는 효과보다 대기권 밖으로 태양복사선을 반사한 역할이 더 컸었다는 가정을 할 수 있다. 만약 그렇다면, 에어로졸 배출량을 줄이고 공기를 깨끗하게 하려고 실시한 여러 가지 인위적 노력이 역설적으로 지구 온난화를 가속하고 있는 셈이 된다. 그러나, 다르게 표현하면 실제로 온난화가 훨씬 빨리 진행되었을 것을 그 동안의 에어로졸 배출이 잠시 가려주었던 것뿐이라고 할 수도 있다.

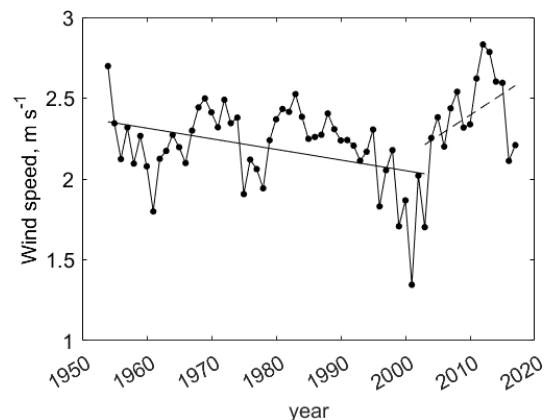
#### 4. 잔잔해짐(Stilling)과 회복

지상에서 풍속계를 이용해 지표면 풍속(surface wind speed)을 측정하는 자료는 세계적으로 상당히 오랜 기간의 것이 남아있다. 흥미롭게도, 이 자료를 들여다보면 지난 반세기 동안 세계 많은 지역에서 풍속이 점차 감소하였다. 지금까지 이런 현상이 보고된 지역은 네덜란드(Smits *et al.*, 2005), 체코(Brázdil *et al.*, 2009), 프랑스(Najac *et al.*, 2009), 독일(Bormann, 2011), 이베리아반도(Azarin-Molina *et al.*, 2014) 등 유럽 대부분과 캐나다 서부 및 남부(Tuller, 2004; Griffin *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2010), 중국의 대부분 지역(Xu *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2011), 호주(McVicar *et al.*, 2008), 아라비아해(Kumar

*et al.*, 2009), 미국(Pryor and Ledolter, 2010)을 망라하며 우리나라에서도 풍속 감소가 알려졌다(Kim and Paik, 2015). 이 현상은 잔잔해짐(stilling)으로 명명되며(Roderick *et al.*, 2007) 기후변화의 또 다른 중요한 추세로 인식된다(IPCC, 2014; Lin *et al.*, 2015). 풍속 감소는 지표면 물순환(증발 등), 수생태계, 식생발달(종자 확산 및 수분 작용) 등에 영향을 줄 수 있다(McVicar *et al.*, 2012a). 대기오염이 심한 지역에서 풍속이 감소하면 지표면 일사량 감소가 심화될 수 있다(Lin *et al.*, 2015).

잔잔해짐의 원인으로 여러 가지가 지목되었는데, 대기오염이 대기를 안정하게 한다는 설(Jacobson and Kaufman, 2006; Xu *et al.*, 2006), 식생 발달과 도시화로 인해 지구의 표면 조도계수가 증가했다는 설(Ryoo *et al.*, 2006; Vautard *et al.*, 2010) 등이 있다. Kim and Paik (2015)은 이러한 요인들은 국지적 풍속 감소만 설명 가능할 뿐, 전 세계적 추세를 설명하는 데에 한계가 있다고 주장하고, 장기간의 대규모 풍속 변화는 지역 또는 전 지구적 규모의 대기 순환의 변화와 관련이 있다고 보았다. 이는 해들리 순환(Hadley circulation)의 변화가 있음을 주목하는 일련의 연구(예: Lu *et al.*, 2007, Kang and Lu, 2012)와 맥을 같이하며, 앞으로 연구가 더 필요하다.

그런데, 2000년 무렵부터 풍속의 감소 추세가 애매해지고 심지어는 회복세로 돌아서는 것이 아닌가 하는 견해가 우리나라를 대상으로 한 연구에서 처음 발표되었다(Kim and Paik, 2015). 이러한 회복추세는 여름철에 특히 두드러진다(Fig. 4). 이 연구에서는 여름 풍속 회복의 원인으로 동아시아 지역에 따뜻한 기단이 영향을 끼친 것을 꼽았다. 동아시아 역내에 더운 공기가 들어와 기온의 공간 편차가 증가하였고, 이에 따라 지오폠펜셜(geopotential)의 공간 분산(spatial variance)이



**Fig. 4.** Trends of summer mean wind speed at Seoul from 1953 to 2017. Year 2003 is chosen as the break point, following Kim and Paik (2015). Data is from KMA.



증가하면서 기압경도력(pressure gradient force)이 강해지고 있다는 것이다. 이 주장이 의미하는 것은 풍속이 겉으로는 회복되는 것 같지만, 과거와는 다른 형태의 기후가 전개된다는 것이다.

## 5. 증발접시 증발량 감소

전술한 여러 기후변화 추세를 참작하면 지표면과 대기의 상호 작용도 변해왔을 것으로 합리적 추론이 가능하다. 지표면과 대기 사이의 물 교환은 증발(지표에서 대기로 수분의 상향 이동)과 강수(대기에서 지표로 하향 이동)로 수문순환의 핵심을 이루며 기후에서도 매우 중요하다. 이 절에서는 증발에 대해 다루고, 이어지는 절에서 강수를 다루기로 한다.

지구가 따뜻해지면 증발량이 증가할 것으로 생각하기 쉽다. 그런데, 이 예상을 깨고, 증발접시 증발량은 지난 수십 년 동안 줄어들었다(Peterson *et al.*, 1995). 이러한 감소 추세는 미국 및 구 소련(Peterson *et al.*, 1995), 인도(Chattopadhyay and Hulme, 1997), 중국(Liu *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2013), 멕시코(Breña-Naranjo *et al.*, 2017)를 포함해 우리나라(Kim and Yim, 2006)에서도 보고되었다. Fig. 5는 서울 지점에서 1940년부터 1990년까지 증발접시 증발량 변화를 보여주는데 뚜렷한 감소 추세를 보인다. 감소추세는 북반구뿐만 아니라, 호주와 뉴질랜드 등 남반구에서도 발견되었다(Roderick and Farquhar, 2004; 2005). 기온은 증가하는데 증발접시 증발량은 감소하는 이 현상은 증발의 역설(evaporation paradox)로 불린다(Brutsaert and Parlange, 1998).

증발량 추정에서 고려해야 할 두 핵심 사안은 증발할 물이 얼마나 있느냐 하는 점과 증발에 쓰일 태양 복사에너지가 얼

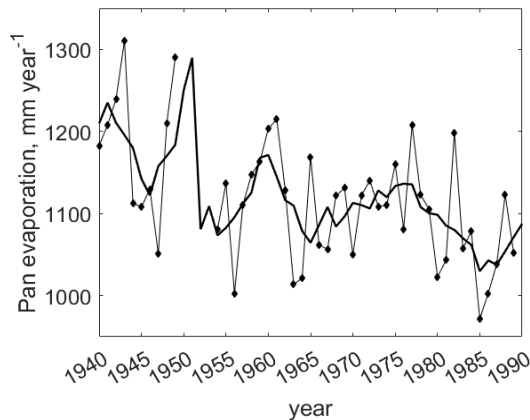


Fig. 5. Pan evaporation at Seoul from 1940 to 1990. Thick solid line is 5-year moving average (data from KMA).

마나 되느냐 하는 점이다. 건조한 환경(water-limited environments)에서는 에너지가 충분하므로 증발량은 물의 공급에 달려있다. 반대로 습윤한 환경(energy-limited environment)에서는 물의 공급이 충분하므로 증발량은 에너지양에 달려있다.

Bouchet (1963)의 이론을 바탕으로, Brutsaert and Parlange (1998)는 증발접시 증발량  $E_p$ 와 실제 증발량  $E$ 는 비례할 이유가 없고 건조한 환경(water-limited environment)에서는 오히려 서로 반대가 될 수 있다고 주장했다. 이 주장이 사실이면 증발접시 증발량은 감소했을지언정, 실제 증발산량은 늘어났을 거라는 의미가 된다. Szilagyi *et al.* (2001)은 Penman 공식을 Bouchet (1963)의 개념에 적용하여  $E_p$ 와  $E$ 가 반비례한다는 주장을 뒷받침했다. 또한 Hobbins *et al.* (2004)은 물수지 분석을 통해 얻은 유역 규모의 증발산자료를 활용해 이 관계를 입증했다. 이 반비례 이론을 요약하면 아래와 같다.

잠재증발산  $E_o$ 는 증발할 수 있는 지표면의 수분이 무한히 공급될 경우에 발생하므로  $E$ 는  $E_o$ 보다 작다. 한편  $E_o$ 의 크기는 에너지양에 따라 결정되는데,  $E$ 는  $E_o$ 보다 작으므로 실제 증발에 쓰인 에너지는 증발에 가용한 에너지보다 작다. 즉,

$$E = E_o - \Delta H \quad (1)$$

여기서  $\Delta H$ 는 잠재증발산에 쓰였을 에너지와 실제 증발에 쓰인 에너지의 차이에 해당하는 값이다. 이 식은 증발량(보통 mm단위)에 대해 썼지만, 거의 상수로 볼 수 있는 기화열(latent heat of vaporization)과 물의 밀도만 곱하면 에너지 방정식이 되므로 편의상  $\Delta H$ 를 남은 에너지라 생각해도 무방하다.  $\Delta H > 0$ 이면, 잠재증발량이 발생했을 때와 비교해 에너지가 남았다는 뜻이며, 이 남은 에너지는 잠열대신 현열을 높이는 데에 쓰일 것이다. 즉 기온이 상승한다(잠재증발량 발생 시와 비교해), 이는 그 지점의 증발접시 증발량을 키울 수 있다.

흔히 증발접시 증발량에 증발접시계수  $c$ (미국 Class A pan의 경우 보통 0.7)를 곱한 값  $cE_p$ 를  $E_o$ 로 여긴다. 하지만, 엄밀히 얘기하면  $cE_p$ 는  $E_o$ 와 다를 수 있는데, 이는 앞서 얘기한 남은 에너지  $\Delta H$ 의 역할 때문이다.  $\Delta H$ 가 증발접시 증발량에 이바지하는 부분을 간단히 선형함수로 가정하면

$$cE_p = E_o + b\Delta H \quad (2)$$

즉,  $\Delta H > 0$ 일 때  $cE_p$ 는  $E_o$ 보다 크다. Brutsaert and Parlange (1998)는  $cE_p$ 를 겉보기 잠재증발산(apparent potential evapotranspiration)이라 불렀다. Eq. (2)에서

$$\Delta H = (cE_p - E_o)/b \quad (3)$$

이를 Eq. (1)에 대입하면,

$$E = (bE_o + E_o - cE_p)/b \quad (4)$$

Eq. (4)의 의미는  $E_p$ 가 줄어들면  $E$ 가 늘어날 수 있다는 것이다. (이상 내용은 Brutsaert and Parlange (1998)에 소개된 내용을 독자의 이해가 쉽도록 풀이한 것이며, 다른 형태의 설명이 Szilagyi *et al.* (2001), Hobbins *et al.* (2004)에 등장하므로 관심 독자는 읽어보길 권함)

당연히 증발의 역설을 설명하는 것(왜 기온상승에도 불구하고  $E_p$ 가 줄어드는지는)은 수문학에서 중요한 문제가 되었다. 위에서 설명한  $E_p \sim E$  반비례 이론은 간접적으로 증발의 역설을 설명한다. 달리 서술하자면, 실제 증발산  $E$ 가 증가함으로 인해 증발접시 주변 공기가 습하고 차가워져  $E_p$ 는 줄어든다는 이야기이다. 이 설명은 건조환경에서는 설득력이 있다.

하지만, 우리나라와 같은 습윤환경에서도 증발접시 증발량이 줄어드는 것은 수수께끼로 남아있었다. 이에, 앞 절에서 소개한 지구 흐려짐을 증발접시 증발량 감소의 원인으로 지목하기도 했다(Liu *et al.*, 2004; Stanhill and Cohen 2001). Roderick and Farquhar (2002)는 지표면 일사량 감소와 이에 관련된 DTR의 감소를 동시에 고려하면 습윤, 건조환경 모두에서 증발접시 증발량 감소를 잘 설명할 수 있다고 주장했다.

Liu *et al.* (2004)도 중국 자료를 이용하여 지구 흐려짐(지표면 일사량 감소)이 중요한 원인이라는 주장을 옹호했다. 그러나, 이들의 연구는 왜 지표면 일사량이 줄어드는지 설명하지 못하는 한계가 있다. 앞서 DTR의 감소 및 지구흐려기가 구름량의 증가와 관련이 있다는 연구를 소개했다. 그런데, 세계 대부분 지역과 달리 중국에서는 1955년 이래 구름량이 감소한 것으로 알려졌다(Kaiser, 2000). 이것이 Liu *et al.* (2004)의 연구에서 명확한 결론을 내리지 못한 이유의 하나이다. 이후, McVicar *et al.* (2012b), Yang and Yang (2012) 등은 증발의 역설을 설명하는 데에 지구 흐려짐 외에 앞서 설명한 풍속 감소에도 주목하였다.

## 6. 강수 변동성 증가

다양한 기후 변수 중에서 수문학자가 특히 관심을 가지는 것은 증발과 강수일 것이다. 앞서 다룬 기온(2절), 일사량(3절), 풍속(4절), 증발(5절) 등과 비교해 강수량에서는 뚜렷한

경향을 감지하기가 어렵다. 이러한 어려움은 근본적으로 두 가지 상반된 논리에서 나온다고 볼 수 있다. 첫째, 더 따뜻한 기후 조건에서는, 수문 순환이 빨라질 수 있고, 이는 주어진 시간 내에 더 많은 강수가 발생한다는 논리다. 둘째, 따뜻해진 공기는 포화증기압(saturation vapor pressure)이 커져서 수증기를 더 많이 머금을 수 있다. 다시 말해, 기체상태인 증기로 존재하는 비율이 커지며, 강수가 되기 위해서는 액체로 상태 변화가 일어나야하는데, 이 응결(condensation) 작용이 더 더진다. 이 논리에 따르면 따뜻한 기후 조건에서는 대기 중 수증기만 늘어나고 강수는 줄어 들 수 있다. 실재는 이 두 효과가 모두 작용하므로 그때그때 상황에 따라 절충점을 찾아 귀결될 것이다. 포화증기압은 기온의 비선형 함수이기 때문에, 강수량의 변화추이는 계절(추위와 따뜻함)과 위도에 따라 서로 달라질 것이다.

분명한 추세를 장담하기는 여전히 어렵지만, 많은 연구에서 강수량은 대체로 증가한다고 보고했다(예: Folland *et al.*, 2001). 조심스럽지만, 이런 추세는 지표수문환경이 더 습윤해졌다는 의미로 자주 해석된다(Roderick and Farquhar, 2004). 최근 개발된 전 지구 수역 원격탐색기술도 지표 수역이 늘어났음을 보여주어(Pekel *et al.*, 2016) 이러한 주장을 뒷받침한다.

강수량 분포를 살펴보면 공간적, 시간적 변동성이 증가함을 볼 수 있다. 예를 들어, 호주는 북서부를 제외한 대부분 지역에서 강수량이 감소했다(Lavender and Abbs, 2013). 반면, 우리나라는 그러한 감소 추세가 관찰되지 않는다(Fig. 6). 고정된 지점에 대해 시간적 변동성을 살펴보면 습윤한 해와 건조한 해 사이의 강수량 폭이 넓어지고 있다(Fig. 6). 1953~2016년 기간 동안 서울의 연 강수량을 전후반으로 나누어 비교해보면, 전반 32년(1953~1984년)은  $1339 \pm 267$  (평균  $\pm$  표준편

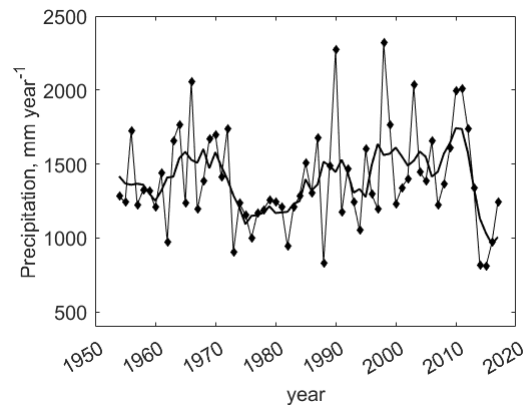


Fig. 6. Precipitation at Seoul from 1953 to 2017. Thick solid line is 5-year moving average (data from KMA).

차) mm/year, 후반 32년(1985~2016)은 1455±388 mm/year로 나타난다. 즉, 연평균 강수량은 10% 미만의 증가를 보이는 데 비해 표준편차는 40% 정도의 증가를 보인다. (여기서는 문맥의 이해를 돕기 위해 간단한 분석을 보인 것이며, 유의한 수치를 구하려면 통계적 가설검정을 거친 자세한 분석이 필요할 것인데 이 원고의 범위를 초과하므로 생략한다.)

시간적 변동성의 증가는 극심한 홍수나 가뭄의 발생 확률이 커진다는 의미이므로 수자원 관리에 어려움이 예상된다. 공간적 변동성의 증가 또한 큰 고민거리인데, 이미 여러 지역에서 더 큰 홍수의 위험을 겪고 있는 한편, 다른 지역에서는 사막화가 갈수록 심화되고 있다. Doocy *et al.* (2013)에 따르면 1980년부터 2009년까지 홍수로 인해 28억 명의 사람들이 영향을 받았으며 그중에는 약 54만 명의 사망자와 36만 명의 부상자가 있다. 특히 인구가 밀집된 아시아 지역은 홍수에도 취약한 것으로 알려졌다. 온난화로 인한 해수면 상승은 연안 도시에서 홍수위험을 더욱 높이고 있다. 해수면 상승과 사회경제적 변화는 홍수 피해액을 더욱 증가시킬 것으로 보이며 2050년에는 약 600~630억 달러에 이를 것으로 예상하기도 한다(Hallegatte *et al.*, 2013).

반면, 지구상 육지의 1/3에 달하는 면적에 걸쳐 사막화가 진행되고 이는 약 10억 명의 삶에 영향을 주고 있다(Wang and Yan, 2016). 사막화가 장기화되면 해당 지역의 식생이 영구적으로 손실되고 생물 자원 생산성에 돌이킬 수 없는 결과가 초래된다(Helldén and Tottrup, 2008; Hou'erou, 1996).

## 7. 수문학과 공학자에게

우리는 기후변화를 목격하고 기록으로 남기는 첫 세대라고 할 수 있다. 우리가 목격한 데에 따르면 기온, 일사량, 풍속, 증발, 강수는 시공간상에서 복잡한 가변성을 보이며 지난 세기 동안 확연히 변화했다. 기후변화가 사회에 미치는 중대한 영향을 생각하면, 이러한 변동성의 본질을 이해하고 미래를 예측하는 능력을 기르는 것은 매우 중요하다. 이상에서 살펴본 사실을 바탕으로, 수문학과 공학자에게 아래와 같이 네 가지 메시지를 전하고 원고를 마무리하려 한다.

1) 첫째, 기후를 이해하는 것은 관측에서 시작되고, 특히 장기간에 걸친 자료는 매우 유용하다. 따라서 현 관측망을 잘 유지하는 것은 물론이거니와, 관측의 범위를 넓히고 해상도를 높이는 등 많은 노력을 기울여야 한다. 모든 과학적 결정은 가능한 많은 자료 분석에 기초하여 이루어져야 하

로 최신 자료를 연구에 반영하는 것이 중요하다. 또한 변화하는 기후를 다양한 규모(국지적, 지역적, 전 지구적)에서 이해할 필요가 있다. 따라서, 다른 나라, 특히 중국, 일본 등 이웃 나라와 자료를 긴밀히 공유할 필요가 있다. 그중에서도 우리에게 가장 필요한 것은 북한의 기후 자료이다. 정치적 여건을 고려할 때 북한과 자료를 공유하기는 쉽지 않겠지만, 정부가 필요성을 인지하고 남북 대화의 의제로 삼고 추진한다면 좋을 것이다.

2) 둘째, 우리가 기후변화라는 용어를 쓴다는 것은 기후가 비정상(non-stationary)이라는 것을 전제하는 것이다. 그러나 현재의 설계 관행은 여전히 정상성(stationary) 가정에 기초하고 있다. 이것은 언젠가는 반드시 개선되어야 한다. 학계에서는 다양한 비정상성 빈도분석 방법을 제안하고 있다(Khaliq *et al.*, 2006; Leclerc and Ouarda, 2007; Lima and Lall, 2010; Gilroy and McCuen, 2012; Rosner *et al.*, 2014; Cheng and AghaKouchak, 2014; Salas and Obeysekera, 2014; Kwon and Lall, 2016; Bracken *et al.*, 2018). 그러나, 비정상시계열에 대해서는 근본적으로 생기빈도(生起貧道) 또는 재현기간(return period)을 정할 수 없다. 그래서 이 문제에 대한 근본적인 인식 전환이 필요하다.

정상이든 비정상시계열이든 소위 expected waiting time은 정할 수 있으며, 정상시계열인 경우 이 값은 재현기간과 동일할 것이다. 이를 이용해 재현기간의 개념을 확장하자는 의견이 많은데(Olsen *et al.*, 1998; Wigley, 2009; Chen *et al.*, 2017), 주목할 가치가 있다. 그러나, 그렇게 하더라도 시간에 따라 변하는 확률밀도함수를 예측하는 것은 여전히 난제이다. 글쓴이는 대안으로 구조물의 '설계 수명'을 고려해봄을 제안한다. 어떤 구조물이라도 수명은 유한한 것이다. 재현기간 개념을 쓴다는 것은 반복적으로 일어나는 사상의 평균 주기를 찾는 것인데, 실제 우리의 관심은 평균 주기가 아니라 우리가 예상하는 설계 수명 내에 사상이 발생하느냐 여부다. 예를 들어 사용 연한 50년에 맞춰 설계한 구조물이 있다면, 설계 용량을 초과하는 사상이 사용 연한 중에 과연 발생할 것인가 하는 점이 중요하지, 일단 한번 발생한 다음 그다음 얼마 간격으로 발생할지를 보는 것은 먼 미래의 일인 데다가 그때까지 구조물이 존재할지도 알 수 없기에 큰 의미가 없다. 설계수명에 해당하는 '상대적으로' 짧은 기간에 대해서만 수문학적 위험도(risk)를 확률적으로 구하고(예: Paik, 2008) 이 값을 설계에 사용하는 것도 연구해볼 필요가 있다.

3) 셋째, 수문해석에 있어서 그동안 발견된 과학적 사실과 지식을 충분히 활용해야 한다. 지난 수십 년 동안 새로운 지식



이 학계에서 많이 축적되었으나 설계기술자가 쓰지 않는다면 안타까운 일이다. 예를 들어 입력자료로 증발량이 필요한 장기 유출 모의에서는 증발접시 증발량을 흔히 사용한다. 그러나 앞 절에서 설명한 바와 같이, 실제 증발산량은 증발접시 증발량과 반비례할 수도 있다는 것이 알려졌으므로 강우-유출 모의에서 증발접시 자료를 쓰는 것은 피해야 할 것이다.

- 4) 넷째, 지금까지 살펴본 기후 변수의 주요 추세는 신재생 에너지원의 개발에도 큰 함의가 있다. 신재생 에너지원은 자연의 가변성에 취약할 수밖에 없다. 전술한 지구 흐려짐(dimming) 현상이 나타나면 태양광 발전에는 불리할 수밖에 없다. 마찬가지로, 잔잔해짐(stilling) 현상이 지속하면 풍력 발전 투자에 매우 유의해야 한다. 우리나라를 비롯한 많은 나라에서 태양광이나 풍력 발전에 대규모 투자를 하고 있으나, 햇볕이나 바람이 없으면 무용지물이다. 현재의 사절정권자들이 투자를 결정하는 데에 기후 변화 추이를 얼마나 고민하는지 의문이 든다. 기후 변화의 경향을 잘 이해하고, 가능한 한 미래 기후를 전망하는 것은 이런 투자에 가장 중요한 요소이다. 만약 이런 과정이 생략된다면, 그러한 기반 시설에 대한 투자는 도박과 다를 것이 없다.

## 감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1A2B2005772).

## References

- Abakumova, G. M., Feigelson, E. M., Russak, V., and Stadnik, V. V. (1996). "Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness, and surface temperature on the territory of the Former Soviet Union." *Journal of Climate*, Vol. 9, No. 6, pp. 1319-1327.
- Albert, S., Leon, J. X., Grinham, A. R., Church, J. A., Gibbes, B. R., and Woodroffe, C. D. (2016). "Interactions between sea-level rise and wave exposure on reef island dynamics in the Solomon Islands." *Environmental Research Letters*, Vol. 11, No. 5, 054011.
- Alpert, P., Kishcha, P., Kaufman, Y. J., and Schwarzbard, R. (2005). "Global dimming or local dimming?: Effect of urbanization on sunlight availability." *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L17802.
- Andreae, M. O., Jones, C. D., and Cox, P. M. (2005). "Strong present-day aerosol cooling implies a hot future." *Nature*, Vol. 435, pp. 1187-1190.
- Angell, J. K. (1990). "Variation in United States cloudiness and sunshine duration between 1950 and the drought year of 1988." *Journal of Climate*, Vol. 3, No. 2, pp. 296-308.
- Arrhenius, S. (1896). "On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground." *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 41, No. 251, pp. 237-276.
- Azorin-Molina, C., Vicente-Serrano, S. M., McVicar, T. R., Jerez, S., Sanchez-Lorenzo, A., Lopez-Moreno, J.-I., Revuelto, J., Trigo, R. M., Lopez-Bustins, J. A., and Espirito-Santo, F. (2014). "Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961- 2011." *Journal of Climate*, Vol. 27, No. 10, pp. 3692-3712.
- Bormann, H. (2011). "Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations." *Climatic Change*, Vol. 104, No. 3, pp. 729-753.
- Bouchet, R. J. (1963). "Evapotranspiration réelle et potentielle signification climatique." *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 62, pp. 134-142.
- Bracken, C., Holman, K. D., Rajagopalan, B., and Moradkhani, H. (2018). "A Bayesian hierarchical approach to multivariate nonstationary hydrologic frequency analysis." *Water Resources Research*, Vol. 54, No. 1, pp. 243-255.
- Brázdil, R., Chromá, K., Dobrovolný, P., and Tolasz, R. (2009). "Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961-2005." *International Journal of Climatology*, Vol. 29, No. 2, pp. 223-242.
- Breña-Naranjo, J. A., Laverde-Barajas, M. Á., and Pedrozo-Acuña, A. (2017). "Changes in pan evaporation in Mexico from 1961 to 2010." *International Journal of Climatology*, Vol. 37, No. 1, pp. 204-213.
- Brutsaert, W., and Parlange, M. B. (1998). "Hydrologic cycle explains the evaporation paradox." *Nature*, Vol. 396, p. 30.
- Chattopadhyay, N., and Hulme, M. (1997). "Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 87, No. 1, pp. 55-73.
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Blankenship, D., and Tapley, B. D. (2009). "Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements." *Nature Geoscience*, Vol. 2, pp. 859-862.
- Chen, P.-C., Wang, Y.-H., You, G. J.-Y., and Wei, C.-C. (2017). "Comparison of methods for non-stationary hydrologic frequency analysis: Case study using annual maximum daily precipitation in Taiwan." *Journal of Hydrology*, Vol. 545, pp. 197-211.
- Cheng, L., and AghaKouchak, A. (2014). "Nonstationary precipitation Intensity-Duration-Frequency curves for infrastructure design in a changing climate." *Scientific Reports*, Vol. 4, 7093.
- Cohen, S. (2009). *Climate change: Observed impacts on planet Earth*. Trevor, M. L. (ed), Elsevier, U.K.

- Doocy, S., Daniels, A., Murray, S., and Kirsch, T. D. (2013). "The human impact of floods: A historical review of events 1980-2009 and systematic literature review." *PLOS Currents Disasters*.
- Folland, C. K., Colman, A. W., Rowell, D. P., and Davey, M. K. (2001). "Predictability of Northeast Brazil rainfall and real-time forecast skill, 1987-98." *Journal of Climate*, Vol. 14, No. 9, pp. 1937-1958.
- Gilroy, K. L., and McCuen, R. H. (2012). "A nonstationary flood frequency analysis method to adjust for future climate change and urbanization." *Journal of Hydrology*, Vol. 414-415, pp. 40-48.
- Griffin, B. J., Kohfeld, K. E., Cooper, A. B., and Boenisch, G. (2010). "Importance of location for describing typical and extreme wind speed behavior." *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, L22804.
- Grimenes, A. A., and Thue-Hansen, V. (2006). "The reduction of global radiation in south-eastern Norway during the last 50 years." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 85, No. 1, pp. 37-40.
- Guo, H., Xu, M., and Hu, Q. (2011). "Changes in near-surface wind speed in China: 1969-2005." *International Journal of Climatology*, Vol. 31, No. 3, pp. 349-358.
- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J., and Corfee-Morlot, J. (2013). "Future flood losses in major coastal cities." *Nature Clim. Change*, Vol. 3, No. 9, pp. 802-806.
- Hansen, J., Lacis, A., Ruedy, R., and Sato, M. (1992). "Potential climate impact of Mount Pinatubo eruption." *Geophysical Research Letters*, Vol. 19, No. 2, pp. 215-218.
- Haywood, J. M., Jones, A., and Jones, G. S. (2014). "The impact of volcanic eruptions in the period 2000-2013 on global mean temperature trends evaluated in the HadGEM2-ES climate model." *Atmospheric Science Letters*, Vol. 15, No. 2, pp. 92-96.
- He, Y., Wang, K., Zhou, C., and Wild, M. (2018). "A revisit of global dimming and brightening based on the sunshine duration." *Geophysical Research Letters*, Vol. 45, No. 9, pp. 4281-4289.
- Helldén, U., and Tottrup, C. (2008). "Regional desertification: A global synthesis." *Global and Planetary Change*, Vol. 64, pp. 169-176.
- Hobbins, M. T., Ramírez, J. A., and Brown, T. C. (2004). "Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complementary?" *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L13503.
- Hou'erou, H. N. L. (1996). "Climate change, drought and desertification." *Journal of Arid Environments*, Vol. 34, No. 2, pp. 133-185.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.
- Jacobson, M. Z., and Kaufman, Y. J. (2006). "Wind reduction by aerosol particles." *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L24814.
- Jáuregui, E., and Luyando, E. (1999). "Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City." *International Journal of Climatology*, Vol. 19, No. 6, pp. 683-694.
- Kaiser, D. P. (2000). "Decreasing cloudiness over China: An updated analysis examining additional variables." *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, pp. 2193-2196.
- Kambeizidis, H. D., Kaskaoutis, D. G., Kalliampakos, G. K., Rashki, A., and Wild, M. (2016). "The solar dimming/brightening effect over the Mediterranean Basin in the period 1979-2012." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 150, pp. 31-46.
- Kang, S. M., and Lu, J. (2012). "Expansion of the Hadley Cell under global warming: Winter versus summer." *Journal of Climate*, Vol. 25, No. 24, pp. 8387-8393.
- Karl, T. R., Jones, P. D., Knight, R. W., Kukla, G., Plummer, N., Razuvayev, V., Gallo, K. P., Lindsey, J., Charlson, R. J., and Peterson, T. C. (1993). "A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 74, No. 6, pp. 1007-1024.
- Khalik, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Ondo, J. C., Gachon, P., and Bobee, B. (2006). "Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review." *Journal of Hydrology*, Vol. 329, No. 3, pp. 534-552.
- Kim, J., and Paik, K. (2015). "Recent recovery of surface wind speed after decadal decrease: A focus on South Korea." *Climate Dynamics*, Vol. 45, No. 5, pp. 1699-1712.
- Kim, K., and Yim, T. (2006). "Analysis of pan evaporation data from 1973 to 2004 in South Korea." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 6B, pp. 583-596.
- Kumar, S. P., Roshin, R. P., Narvekar, J., Kumar, P. K. D., and Vivekanandan, E. (2009). "Response of the Arabian Sea to global warming and associated regional climate shift." *Marine Environmental Research*, Vol. 68, No. 5, pp. 217-222.
- Kwon, H.-H., and Lall, U. (2016). "A copula-based nonstationary frequency analysis for the 2012-2015 drought in California." *Water Resources Research*, Vol. 52, No. 7, pp. 5662-5675.
- Lavender, S. L., and Abbs, D. J. (2013). "Trends in Australian rainfall: contribution of tropical cyclones and closed lows." *Climate Dynamics*, Vol. 40, No. 1-2, pp. 317-326.
- Leclerc, M., and Ouarda, T. B. M. J. (2007). "Non-stationary regional flood frequency analysis at ungauged sites." *Journal of Hydrology*, Vol. 343, No. 3, pp. 254-265.
- Li, Z., Chen, Y., Shen, Y., Liu, Y., and Zhang, S. (2013). "Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China." *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 4, pp. 2205-2212.
- Liepert, B. G. (1997). "Recent changes in solar radiation under cloudy conditions in Germany." *International Journal of Climatology*, Vol. 17, No. 14, pp. 1581-1593.
- Liepert, B. G. (2002). "Observed reductions in surface solar radiation in the United States and worldwide from 1961 to 1990." *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 10, pp.

- 61-64.
- Liley, J. B. (2009). "New Zealand dimming and brightening." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 114, D00D10.
- Lima, C. H. R., and Lall, U. (2010). "Spatial scaling in a changing climate: A hierarchical bayesian model for non-stationary multi-site annual maximum and monthly streamflow." *Journal of Hydrology*, Vol. 383, No. 3, pp. 307-318.
- Lin, C., Yang, K., Huang, J., Tang, W., Qin, J., Niu, X., Chen, Y., Chen, D., Lu, N., and Fu, R. (2015). "Impacts of wind stilling on solar radiation variability in China." *Scientific Reports*, Vol. 5, 15135.
- Liu, B., Xu, M., Henderson, M., and Gong, W. (2004). "A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955-2000." *Journal of Geographical Research*, Vol. 109, D15102.
- Lu, J., Vecchi, G. A., and Reichler, T. (2007). "Expansion of the Hadley cell under global warming." *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L06805.
- McVicar, T. R., Roderick, M. L., Donohue, R. J., and Van Niel, T. G. (2012a). "Less bluster ahead? Ecohydrological implications of global trends of terrestrial near-surface wind speeds." *Ecohydrology*, Vol. 5, No. 4, pp. 381-388.
- McVicar, T. R., Roderick, M. L., Donohue, R. J., Li, L. T., Van Niel, T. G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N. M., Mescherskaya, A. V., Kruger, A. C., Rehman, S., and Dinpashoh, Y. (2012b). "Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation." *Journal of Hydrology*, Vol. 416-417, pp. 182-205.
- McVicar, T. R., Van Niel, T. G., Li, L. T., Roderick, M. L., Rayner, D. P., Ricciardulli, L., and Donohue, R. J. (2008). "Wind speed climatology and trends for Australia, 1975-2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output." *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L20403.
- Najac, J., Boé, J., and Terray, L. (2009). "A multi-model ensemble approach for assessment of climate change impact on surface winds in France." *Climate Dynamics*, Vol. 32, No. 5, pp. 615-634.
- Nunn, P. D., Kohler, A., and Kumar, R. (2017). "Identifying and assessing evidence for recent shoreline change attributable to uncommonly rapid sea-level rise in Pohnpei, Federated States of Micronesia, Northwest Pacific Ocean." *Journal of Coastal Conservation*, Vol. 21, No. 6, pp. 719-730.
- Ohmura, A. (2009). "Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 114, D00D05.
- Olsen, J. R., Lambert, J. H., and Haines, Y. Y. (1998). "Risk of extreme events under nonstationary conditions." *Risk Analysis*, Vol. 18, No. 4, pp. 497-510.
- Osipov, E. Y., and Osipova, O. P. (2017). "Mountain glaciers of southeast Siberia: current state and changes since the Little Ice Age." *Annals of Glaciology*, Vol. 55, No. 66, pp. 167-176.
- Paik, K. (2008). "Analytical derivation of reservoir routing and hydrological risk evaluation of detention basins." *Journal of Hydrology*, Vol. 352 (1-2), pp. 191-201.
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., and Belward, A. S. (2016). "High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes." *Nature*, Vol. 540, pp. 418-422.
- Peterson, T. C., Golubev, V. S., and Groisman, P. Y. (1995). "Evaporation losing its strength." *Nature*, Vol. 377, pp. 687-688.
- Pidgeon, N., Parkhill, K., Corner, A., and Vaughan, N. (2013). "Deliberating stratospheric aerosols for climate geoengineering and the SPICE project." *Nature Climate Change*, Vol. 3, pp. 451-457.
- Plantico, M. S., Karl, T. R., Kukla, G., and Gavin, J. (1990). "Is recent climate change across the United States related to rising levels of anthropogenic greenhouse gases?" *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 95, No. D10, pp. 16617-16637.
- Pope, F. D., Braesicke, P., Grainger, R. G., Kalberer, M., Watson, I. M., Davidson, P. J., and Cox, R. A. (2012). "Stratospheric aerosol particles and solar-radiation management." *Nature Climate Change*, Vol. 2, pp. 713-719.
- Power, H. C. (2003). "Trends in solar radiation over Germany and an assessment of the role of aerosols and sunshine duration." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 76, No. 1, pp. 47-63.
- Pryor, S. C., and Ledolter, J. (2010). "Addendum to "Wind speed trends over the contiguous United States"." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 115, D10103.
- Qian, Y., Kaiser, D. P., Leung, L. R., and Xu, M. (2006). "More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000." *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L01812.
- Ramanathan, V., and Carmichael, G. (2008). "Global and regional climate changes due to black carbon." *Nature Geoscience*, Vol. 1, pp. 221-227.
- Roderick, M. L., and Farquhar, G. D. (2002). "The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years." *Science*, Vol. 298, pp. 1410-1411.
- Roderick, M. L., and Farquhar, G. D. (2004). "Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002." *International Journal of Climatology*, Vol. 24, No. 9, pp. 1077-1090.
- Roderick, M. L., and Farquhar, G. D. (2005). "Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s." *International Journal of Climatology*, Vol. 25, No. 15, pp. 2031-2039.
- Roderick, M. L., Rotstayn, L. D., Farquhar, G. D., and Hobbins, M. T. (2007). "On the attribution of changing pan evaporation." *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L17403.
- Romanou, A., Liepert, B., Schmidt, G. A., Rossow, W. B., Ruedy, R. A., and Zhang, Y. (2007). "20th century changes in surface solar irradiance in simulations and observations." *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L05713.
- Rosner, A., Vogel, R. M., and Kirshen, P. H. (2014). "A risk-based

- approach to flood management decisions in a nonstationary world." *Water Resources Research*, Vol. 50, No. 3, pp. 1928-1942.
- Ryoo, S.-B., Kim, Y.-H., Kwon, T.-H., and Park, I.-S. (2006). "Inhomogeneities in Korean climate data (I): due to site relocation." *Atmosphere*, Vol. 16, No. 3, pp. 215-223.
- Salas, J. D., and Obeysekera, J. (2014). "Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 554-568.
- Santer, B. D., Bonfils, C., Painter, J. F., Zelinka, M. D., Mears, C., Solomon, S., Schmidt, G. A., Fyfe, J. C., Cole, J. N. S., Nazarenko, L., Taylor, K. E., and Wentz, F. J. (2014). "Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature." *Nature Geoscience*, Vol. 7, pp. 185-189.
- Shugar, D. H., Clague, J. J., Best, J. L., Schoof, C., Willis, M. J., Copland, L., and Roe, G. H. (2017). "River piracy and drainage basin reorganization led by climate-driven glacier retreat." *Nature Geoscience*, Vol. 10, pp. 370-375.
- Smits, A., Klein, T. A. M. G., and Können, G. P. (2005). "Trends in storminess over the Netherlands, 1962-2002." *International Journal of Climatology*, Vol. 25, No. 10, pp. 1331-1344.
- Stanhill, G., and Cohen, S. (2001). "Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 107, pp. 255-278.
- Stanhill, G., and Moreshet, S. (1992). "Global radiation climate changes in Israel." *Climatic Change*, Vol. 22, No. 2, pp. 121-138.
- Streets, D. G., Wu, Y., and Chin, M. (2006). "Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition." *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L15806.
- Szilagyi, J., Katul, G., and Parlange, M. (2001). "Evapotranspiration Intensifies over the Conterminous United States." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127, No. 6, pp. 354-362.
- Tanaka, K., Ohmura, A., Folini, D., Wild, M., and Ohkawara, N. (2016). "Is global dimming and brightening in Japan limited to urban areas?" *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 16, pp. 13969-14001.
- Tuller, S. E. (2004). "Measured wind speed trends on the west coast of Canada." *International Journal of Climatology*, Vol. 24, No. 11, pp. 1359-1374.
- Vautard, R., Cattiaux, J., Yiou, P., Thépaut, J.-N., and Ciais, P. (2010). "Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness." *Nature Geoscience*, Vol. 3, pp. 756-761.
- Wan, H., Wang, X. L., and Swail, V. R. (2010). "Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds." *Journal of Climate*, Vol. 23, No. 5, pp. 1209-1225.
- Wang, Y., and Yan, X. (2016). "Climate change induced by Southern Hemisphere desertification." *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 102, pp. 40-47.
- Wigley, T.M. (2009). "The effect of changing climate on the frequency of absolute extreme events." *Climatic Change*, Vol. 97(1-2), pp. 67-76.
- Wild, M. (2009). "Global dimming and brightening: A review." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 114, D00D16.
- Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C. N., Dutton, E., G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., and Tsvetkov, A. (2005). "From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface." *Science*, Vol. 308, No. 5723, pp. 847-850.
- Xu, M., Chang, C. P., Fu, C., Qi, Y., Robock, A., Robinson, D., and Zhang, H. (2006). "Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969-2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 111, D24111.
- Yang, H., and Yang, D. (2012). "Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001." *Journal of Hydrology*, Vol. 414-415, pp. 184-193.
- Zheng, W., Pritchard, M. E., Willis, M. J., Tepes, P., Gourmelen, N., Benham, T. J., and Dowdeswell, J. A. (2018). "Accelerating glacier mass loss on Franz Josef Land, Russian Arctic." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 211, pp. 357-375.