

증발량 관련 기후인자와 팬증발량의 변화 분석

An Analysis of Changes in Pan Evaporation and Climate Values Related to Actual Evaporation

정 대 일* / 강 재 원**

Jeong, Dae-Il / Kang, Jaewon

Abstract

Evaporation over the world is expected to increase owing to increase in temperature by global warming. However, pan evaporation around the world has decreased in the past few decades. This study, which has been conducted in 18 meteorological gauging stations in Korean peninsula, investigates the changes in pan evaporation and climate variables such as precipitation, temperature, relative humidity, wind speed, sunshine hours, and percentage of sunshine, which can affect evaporation processes; the changes in these variables have been recorded between 1960 and 2007. At most gauging stations, pan evaporation shows statistically significant downward trends. The relative humidity, wind speed, sunshine hours, and percentage of sunshine also show downward trends. On the other hand, precipitation and temperature show upward trends. The spatial distribution of the downward trend in sunshine hours and percentage of sunshine correspond to that of the downward trend in pan evaporation. Scatter plots imply that pan evaporation has a strong positive correlation with the sunshine hours and percentage of sunshine, while it has a negative correlation with precipitation. At the Gangneung gauging station, the open water evaporation estimated using the Penman equation does not show the significant downward trend shown by pan evaporation. This result implies that pan evaporation is not a good indicator of potential or open water evaporations during the investigation of their long-term variability. Finally, this study explains the complementary relationship between pan and actual evaporations. Decreases in the pan evaporation can act as an evidence for the ever-increasing actual evaporation.

keywords : actual evaporation, global warming, pan evaporation, potential evaporation, sunshine hours

요 지

전지구적 기온상승으로 인해 증발량이 증가할 것으로 예견되었으나, 다양한 지역에서 관측된 팬증발량은 지난 수십 년간 뚜렷한 감소추세를 나타내고 있다. 본 연구에서는 1960년부터 2007년까지 관측된 국내 18개 기상관측소의 팬증발량과, 증발에 관련된 강수량, 온도, 상대습도, 풍속, 일조시간, 일조율에 대한 변화를 분석하였다. 분석결과 팬증발량은 뚜렷한 감소현상을 나타내었으며, 강수량과 온도는 증가추세를, 상대습도, 풍속, 일조시간, 일조율은 감소추세를 나타내었다. 특히, 일조시간과 일조율의 감소추세는 팬증발량과 지역적으로 상당히 일치하고 있음을 확인하였

* Post-doctoral Fellow, Institut national de la recherche scientifique(INRS-ETE), University of Quebec, 490, de la Couronne, bureau 5301, Quebec (QC), G1K 9A9, Canada

** 교신저자, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단 책임연구원

Corresponding Author, Research Fellow, Sustainable Water Resources Research Center, KICT, 2311 Dahwa-dong, Ilsanseo-gu Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-712, Korea
(e-mail: jwkang@kict.re.kr)

다. 산점도를 그려 상관관계를 확인해본 결과, 일조시간과 일조율은 팬증발량과 양의 상관관계를 강하게 나타내고 있으며, 강수량의 경우는 팬증발량과는 음의 상관관계가 존재하였다. 강릉관측소 사례연구에서 Penman공식에 의해 추정된 개방된 수면에서의 증발량은 팬증발량에서 보인 것 같은 뚜렷한 하향추세가 검증되지 않아, 기존에 팬증발량 관측값으로부터 증발량을 추정하는 것은 장기적인 증발량 변화를 검토하기 위해서는 부적절함을 확인하였다. 마지막으로 팬증발량이 실제증발량과 서로 상호보완적 관계를 갖기 때문에, 팬증발량이 감소하더라도 실제증발량은 증가할 수 있음을 설명하였다.

핵심용어 : 실제증발량, 일조시간, 잠재증발량, 지구온난화, 팬증발량

1. 서 론

지난 수십 년 동안 진행된 지구온난화(global warming)로 인해 세계 곳곳에서는 뚜렷한 기온상승이 관측되고 있으며, 이는 전지구적 기후시스템의 변화를 가늠케 하는 대표적인 증거로 여겨지고 있다. 즉 온도를 비롯한 강수량, 풍속, 증발량, 구름의 양 등의 기후학적, 수문학적 인자들이 각각 서로에게 영향을 주고받으며 복잡하게 변화할 것이고, 그 변화폭도 점점 커질 것이라는 예측이 가능한 대목이라 하겠다.

인과관계를 명확히 규명하는 것은 불가능하겠으나, 전지구적 기온상승은 결국 실제증발량(actual evaporation)을 증가시키는 원인으로 작용할 것이며, 장기적으로는 수문순환의 변화를 초래할 것이라고 많은 수문학자들이 예견하고 있다. 그러나 이러한 일반적인 예견에도 불구하고 잠재증발량 측정을 위해 가장 보편적으로 사용되는 팬(pan)증발량은 지난 40~50년간 다양한 기후대와 지역에서 뚜렷한 감소경향을 나타내고 있다. 인도(Chattopadhyay and Hulme, 1997), 북유럽과 미국(Brutsaert and Parlange, 1998; Lawrimore and Peterson, 2000; Roderick and Farquhar, 2002), 태국(Tebakari *et al.*, 2005), 중국(Liu and Zeng, 2004; Liu *et al.* 2004; Xu *et al.* 2005) 등은 물론, 호주(Rodrick and Farquhar, 2004)와 뉴질랜드(Rodrick and Farquhar, 2005) 등에 이르기 까지 지역적으로는 북반구와 남반구를, 기후학적으로는 한대, 온대, 열대기후에 걸친 지구 대부분의 지역에서 팬증발량의 감소현상이 관찰되었다.

이길하 등(2007)에 의하면 우리나라에서도 팬증발량의 감소추세가 관찰되고 있는데, 14개 기상관측소의 1970년도부터 2000년도까지의 팬증발량 관측자료의 추세분석을 통해 평균적으로 연간 1.6 mm/yr 감소추세를 보이고 있음을 확인하였고, 특히 내륙에 비해 해안에서의 감소폭이 약 10% 정도 크다고 설명하였다. 김광섭과 임태경(2006)도 1973년부터 2004년까지 32년간 4월

에서 10월까지 관측된 대형증발접시 증발량을 이용하여 월별 증발량에 대해 Mann-Kendall 검정을 통해 추세 분석을 실시하였으며, 증발과 관련된 기상요소들(기온, 강수량, 습도, 전운량, 풍정합)과의 상관관계도 분석하였다. 분석결과 대상유역으로 선정된 11곳 중에서 여수와 진주 관측소를 제외한 모든 지점에서 대형증발접시의 증발량이 감소하였다고 보고하였다.

증발에 영향을 주는 인자들에 대해서는 오래전부터 알려져 있는데, 온도를 비롯한 태양복사에너지, 풍속, 기압, 습도와 같은 기상학적 인자들뿐만 아니라, 증발 표면의 특성이나 수질까지도 복합적으로 영향을 미친다. 따라서 증발 과정에서 발생하는 각 인자들의 상호작용을 정확히 밝히는 것은 쉬운 일이 아니다. 잠재증발량은 수분공급에 제한을 받지 않는 토양 혹은 수표면에서 증발을 위해 주어진 증발환경에서 발생 가능한 증발량을 의미하는데, 잠재증발량 산정을 위한 가장 간단하고 흔한 방법이 증발접시(pan)를 이용해 팬증발량을 관측하고 여기에 증발접시계수(pan coefficient)를 곱하는 것이다. 이런 측면에서 본다면, 팬증발량의 감소는 잠재증발량의 감소를 의미한다고 할 수 있다. 이는 지구온난화에 따른 기온상승으로 인한 실제증발량이 증가하는 현상과는 서로 모순된다고 하여 과학자들은 이런 현상을 ‘증발량모순(evaporation paradox)’이라고 부르고 있다.

팬증발량 감소 원인에 대해서는 두가지 설명이 힘을 얻고 있는데, 하나는 증발접시 주위에서의 습도상황의 변화가 원인이라는 주장이고(Brutsaert and Parlange, 1998), 다른 하나는 구름과 에어로졸(aerosol)의 증가로 인한 일사량의 감소가 원인이라는 주장이다(Roderick and Farquhar, 2002). 먼저 Brutsaert and Parlange (1998)의 주장에 대해 살펴보면, 그들은 강우량과 구름량의 증가는 공기 중의 수증기의 증가를 의미하며, 이를 위해서는 지표면에서의 실제증발량이 증가해야 한다고 설명하였다. 강우량의 증가가 토양함수량의 증가를 가져오고, 증발량 발생에 필요한 토양함수량의 부족현

상의 빈도가 줄어들어 결국 실제증발산량이 증가하게 된다. 실제증발량이 증가하면 증발접시 주변에서 대기 중의 습도가 증가하게 되어 팬증발량이 감소하게 된다는 원리다. 또한 강수량과 구름량의 증가는 자연스럽게 증발량을 좌우하는 태양복사에너지의 감소를 가져오게 된다. 이런 원리에 따르면 대기의 수분공급에 의해 팬증발량이 감소하여도 실제증발량은 증가하는 원리를 설명하게 된다. Golubev *et al.*(2001)은 이러한 논쟁을 이어갔는데, 팬증발량과 실제증발량의 관측값을 동시에 관측된 러시아의 6개 지점, 미국과 라트비아의 각각 1개 지점의 두 자료간의 상관관계를 분석한 결과 대부분 지점에서 $-0.2 \sim -0.5$ 의 상관관계가 존재함을 확인하였다. Roderick and Farquhar(2002)는 팬증발량 감소가 모순이라기보다는 태양복사에너지와 낮 시간의 온도변화폭의 감소에 의한 결과라고 주장하였다. 증발량모순에 대해 이길하 등(2007)은 이론적 근거와 외국 연구사례에 대해 자세히 서술하였으므로 이를 참고하기 바란다. 김광섭과 임태경(2006)은 Brutsaert and Parlange(1998)의 해석을 예로 들어 그들의 연구결과에서 나타난 국내의 대형증발접시의 증발량 감소현상이 실제증발량의 증가를 의미하는 것이라고 언급하였다. 농업과 수자원관리를 위한 증발량과 증발산량 산정에 대한 연구도 국내에서 꾸준히 진행되고 있다(노재경, 2002; 유승환 등, 2006; 허승오 등, 2006; 임혁진 등, 2006; 김성원과 김형수, 2007; 임창수, 2008).

본 연구는 우리나라 소형 팬증발량의 추세분석 결과를 제시한 이길하 등(2007)의 연구에서 한걸음 더 나아가, 팬증발량 감소에 대한 원인과 인과관계를 유추할 수 있도록 증발에 영향을 미치는 기후인자들과 팬증발량의 관계를 살펴보았다. 이를 통해 강수량 증가와 일조시간의 감소가 팬증발량과 서로 상관관계가 있음을 제시하였다. 나아가 잠재증발량을 산정하는 가장 일반적인 방법인 Penman식을 이용하여 잠재증발량을 산정하고 이를 팬증발량과 서로 비교 제시하였다.

2. Penman 식에 의한 증발량 추정

증발량을 추정하는 방법으로는 물수지 방법, 에너지수지 방법, 공기동역학적 방법, 그리고 에너지수지와 공기동역학적 방법을 혼용한 혼합방법 등으로 크게 분류할 수 있다. 실제 증발이 발생하는 경우 태양복사에 의한 에너지수지와 공기의 동역학적 흐름이 복합적으로 이루어지는 경우가 대부분이므로 에너지방정식과 공기동역학적 공식을 혼용하여 단일공식으로 표현한 혼합방법의 사용이 일반적이며, Penman(1948)에 의해 제시된

Penman공식이 가장 대표적인 혼합방법이다. 저수지, 해양, 포화된 토양의 자유수표면에서 일단위 증발량을 산정하기 위한 Penman공식은 Eq. (1) 같다.

$$E_p = E_r + E_A = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_u}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{6.43(f_u)(e_s - e_a)}{\lambda} \quad (1)$$

여기서 E_p 는 Penman공식에 의한 증발량(mm/d)으로 물의 공급이 제한되지 않는 수표면과 토양의 증발량이나 잠재증발량 산정에 이용된다. E_r 은 에너지수지에 의한 증발량(mm/d), E_A 는 공기동역학적 작용에 의한 증발량(mm/d)을 의미한다. Δ 는 온도변화에 따른 증기압 변화 기울기(kPa/°C), γ 는 습도계상수(psychrometer constant)(kPa/°C), R_u 은 유입복사에너지에서 반사복사에너지를 뺀 순복사에너지(MJ/m²/d), λ 는 잠재증기화열(MJ/kg), e_s 는 포화수증기압(kPa), e_a 는 실제수증기압(kPa)을 의미한다. Eq. (1)은 일단위 증발량 산정을 위해서도 이용할 수 있다. f_u 는 바람의 함수로서 Eq. (2)와 같다.

$$f_u = a_u - b_u u \quad (2)$$

여기서 a_u 와 b_u 는 상수이고, u 는 2 m 높이에서 측정된 바람의 세기(m/s)를 의미한다. 처음 제안된 Penman공식에서 a_u 와 b_u 는 각각 1과 0.536이 이용되었다.

Penman이 제시한 Eq. (1)에 따르면 증발에 직접적으로 연관된 기후변수로는 순복사에너지, 온도, 풍속, 수증기압차, 상대습도 등을 꼽을 수 있다. 일반적으로 온도, 풍속, 상대습도 등의 변수들은 대부분의 기상관측소에서 측정되고 있으나, 순복사에너지나 수증기압차는 특별한 관측기구가 필요한 관계로 관측이 이루어지지 않은 경우가 많다. 따라서 순복사에너지와 수증기압차는 일조시간을 비롯한 관련 기후변수 측정값을 이용하여 추정하여 사용하는 것이 대부분이다.

Penman공식을 원형 그대로 적용하는 것이 쉽지 않아 이후 많은 연구자들에 의해 관측된 기후변수들을 이용해 쉽게 계산할 수 있도록 표준화 하려는 노력이 시도되었다(Shuttleworth, 1993; Allen *et al.*, 1998). 최근 Valiantzas(2006)는 기존의 표준화된 Penman공식들을 보다 단순화하여 정확하면서도 계산이 용이한 공식을 제시하였으며, 단순화된 공식은 Eq. (3)과 같다.

$$E_p \approx 0.051(1 - \alpha)R_s \sqrt{T + 9.5} - 2.4 \left(\frac{R_s}{R_A} \right)^2 + 0.0052(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) (a_u - 0.38 + 0.54u) \quad (3)$$

여기서 α 는 지표면에 도달한 태양복사에너지와 반사된 에너지간의 비를 나타내는 반사율(albedo) 상수이며, 일반 잔디로 피복된 경우 $\alpha = 0.23$, 수표면의 경우 $\alpha = 0.08$ 을 사용한다(Shuttleworth, 1993, Allen *et al.*, 1998). R_s 는 지점에서 관측된 혹은 추정된 유입태양복사에너지를, R_A 는 주어진 지점의 위도 상에서 반사를 배제하고 받을 수 있는 태양복사에너지로서 위도를 이용하여 계산하거나 표에서 찾아 사용하게 되는 값이다. T 는 온도(°C), RH 는 상대습도(%), u 는 풍속(m/s)을 의미하며, a_u 는 바람과 관련된 상수이다.

유입태양복사에너지(R_s)에 대한 관측값이 없을 경우에는 Eq. (4)와 같이 관측된 일조시간을 이용하여 추정할 수 있다.

$$R_s = R_A(a + b \frac{n}{N}) \quad (4)$$

여기서 a 와 b 는 대상지점에 대해 경험식으로 추정된 상수로서 지역에 따라 조금씩 차이를 보이나 본 연구에서는 Valiantzas(2006)에서 사용한대로 a 는 0.25를, b 는 0.5를 사용하였다. n 은 관측된 일조시간을, N 은 최대로 가능한 일조시간으로 경도와 태양력 날짜의 함수관계를 이용해 계산하거나 제시된 표를 통해 얻을 수 있다.

3. 기후자료의 경향성 분석

3.1 분석지점 및 자료

대상지역에서 실제증발량을 관측하는 것은 소요될 장비나 인력을 고려할 경우 현실적으로나 기술적으로 많은 어려움이 따른다. 따라서 실제증발량의 측정은 고도의 학문적 목적을 위해 특정 시험구역에서 드물게 행해지고 있다. 증발량 추정을 위해 광범위하게 사용된 방법은 증발접시를 이용하는 것으로 수자원과 농업분야에서 이용한 것은 상당히 오래된 일이다. 정도와 지역의 차이는 있으나 현재까지는 팬증발량과 개방된 수체(open water body)에서의 증발량의 비율이 상당히 일정한 것으로 알려져 있다.

증발접시는 크게 소형증발접시(지름 20 cm, 깊이 10 cm)와 대형증발접시(지름 120 cm, 깊이 25 cm)로 나눌 수 있고, 증발접시는 설치위치에 따라 다시 지상식, 매물식, 부유식으로 나눌 수 있다. 소형증발접시는 규모가 작아 온도변화 등 여러 가지 요인에 의해 신뢰도가 떨어지기 때문에 점차 사용이 줄어들고 있으며, 세계적으로 대형증발접시를 많이 사용하고 있다.

우리나라 기상청에서도 소형증발접시와 대형증발접

시(미기상청의 class A 증발접시와 유사)를 모두 사용하고는 있으나, 관측지점 수와 자료의 관리 측면에서 소형증발접시에 비해 대형증발접시의 관리가 소홀한 면이 있다. 대형증발접시는 겨울철에 수면이 얼면 증발량 측정이 불가능할 뿐더러 증발접시가 파손될 우려가 있어 동계(11~3월)에는 철거하여 실내에서 보존한다. 따라서 본 연구에서는 신뢰도에는 다소 문제가 있을 수 있으나 자료의 연속성과 공간적 분포를 고려해 소형증발접시자료를 사용하였다.

전국의 총 76개 기상관측소 중에서 1960년 이후부터 2007년에 이르기까지 35년 이상의 관측자료를 보유하고 있는 18개 지점을 선별하였으며, 이 지점들의 팬증발량, 강수량, 온도, 상대습도, 풍속, 일조시간을 분석에 이용하였다. Table 1은 분석에 사용된 관측지점과 자료길이를 정리한 것이다. 팬증발량의 경우 속초(Sokcho), 대구(Daegu), 울산(Ulsan), 통영(Tongyeong)은 1990년에 관측이 중단되었으며, 서울(Seoul), 청주(Cheongju), 포항(Pohang), 전주(Jeonju), 광주(Gwangju)는 1990년 이후 결측값이 존재하였으나 자료의 길이가 20년 이상으로 길고 신뢰할만하다고 판단되어 별도의 보정 없이 관측값만을 이용하여 분석하였다. 팬증발량 이외의 기상자료들은 관측이 시작된 이후 결측년이 없이 비교적 양질의 관측자료를 보유하고 있다. 한반도 내륙에 보다 집중하고자 울릉도, 제주, 서귀포 지점의 강수량은 이번 분석에서 제외하였다.

3.2 팬증발량

팬증발량 관측자료의 변동성을 확인하기 위해 연시계열 자료의 경향성에 대한 분석을 수행하였다. 추세분석은 이론적으로 이해하기 쉽고 간단하여 가장 많이 사용되는 Linear Regression 검정을 사용하였으며, 이 기법에 대한 구체적인 설명은 Salas(1993)를 비롯한 참고서적과 논문에서 쉽게 찾아볼 수 있으므로 생략하였다. 선정된 18개 기상관측소의 팬증발량 하향추세 기울기(mm/year)를 contour line을 이용해 공간적으로 그리면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 ▼은 하향추세가 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 지점들을 표시한 것이며, ●은 추세가 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의하지 않은 지점을 나타낸 것이다.

18개 지점 중에서 13개 지점에서 통계적으로 유의한 하향추세가 관찰되었는데, 이는 약 45년간 한반도에서 팬증발량의 감소경향이 매우 뚜렷하게 나타났음을 증명하고 있다. 지역적으로 서울, 수원, 청주 등 중서부 지방에 위치한 관측소에서의 팬증발량 감소현상이 관찰되지 않았으나 남서부와 동부에서는 감소현상이 뚜렷하였

Table 1. The Stations and Record Length of Their Climatological Data

site #	name	precipitation, temperature, relative humidity, wind speed, sunshine hours		pan evaporation	
		record period	record length	record period	record length
090	Sokcho	1968~2007	40	1968~1990	23
101	Chuncheon	1966~2007	42	1966~2007	42
105	Gangneung	1960~2007	48	1960~2007	48
108	Seoul	1960~2007	48	1960~1990, 1995~2007	44
112	Incheon	1960~2007	48	1960~2007	48
119	Suwon	1964~2007	44	1964~2007	44
127	Cheongju	1967~2007	41	1967~1990, 1997~2007	35
133	Daejeon	1969~2007	39	1969~2007	39
138	Pohang	1960~2007	48	1960~1990, 1995~2007	44
143	Daegu	1960~2007	48	1960~1990	31
146	Jeonju	1960~2007	48	1960~1990, 1997, 2001~2007	39
152	Ulsan	1960~2007	48	1960~1990	31
156	Gwangju	1960~2007	48	1960~1990, 1997	32
159	Busan	1960~2007	48	1960~2007	48
162	Tongyeong	1968~2007	40	1968~1990	23
165	Mokpo	1960~2007	48	1960~2007	48
168	Yeosu	1960~2007	48	1960~2007	48
192	Jinju	1970~2007	38	1970~2007	38

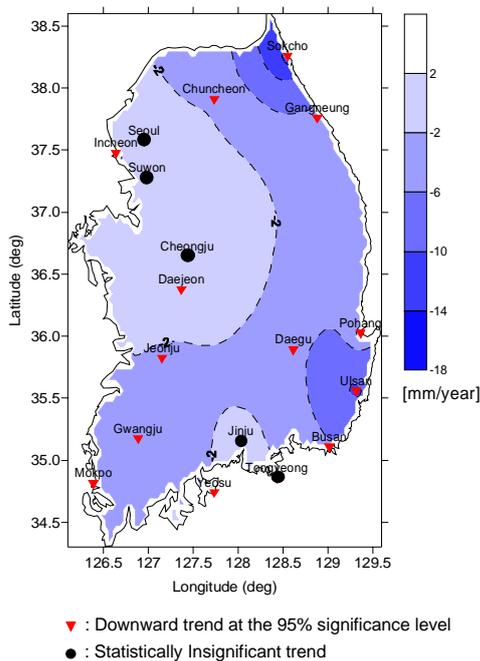


Fig. 1. Spatial Distribution of Trends in Annual Pan Evaporations of the 18 Gauging Stations (The trends were estimated using observed data from 1960 to 2007.)

다. 특히 속초, 강릉, 대구, 부산, 목포는 연간 팬증발량 감소량이 5 mm 이상으로, 45년간 꾸준히 5 mm가 매년 감소하였다면 225 mm가 넘는 큰 양이다.

Table 2는 18개 기상관측소 팬증발량의 연간과 계절별의 추세 기울기를 표로 정리한 것으로, 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 기울기는 굵게 표시하였다. 연간 총 증발량의 경우 대관령, 청주, 통영, 진주지점에서 상향 기울기를 보이고 있으나 통계적으로 유의하지 않으며, 서울과 수원지점에서의 하향 기울기 역시 통계적으로 유의하지 않은 것으로 확인되었다. 여수를 제외한 13개 지점에서는 연간과 계절별 모두에서 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 하향 기울기가 있음을 확인할 수 있다. 속초의 경우 연간 팬증발량 감소량이 약 19 mm인 것으로 나타났으나 Table 1에서 밝힌 바와 같이 팬증발량의 길이가 23년간으로 짧고 1991년 이후에는 관측이 이루어지지 않았음을 감안한다면 신뢰할 만한 결과는 아니다. 통영지점도 관측길이가 23년으로 비교적 짧고 1990년에 관측이 중단되었음을 감안하여 판단해야 할 것으로 생각된다.

3.3 기후학적 인자

Table 1에서 설명한 18개 지점들을 대상으로 증발에 결정적 역할을 하는 것으로 알려진 강수량, 온도, 상대습도, 풍속, 일조시간, 일조율 등의 기후학적 인자들에 대해 Linear regression을 이용하여 추세분석을 실시하였다. Fig. 2는 각 기후학적 인자들에 대한 18개 지점의 추세분석 결과를 공간적으로 나타낸 것이다. 앞에서와

Table 2. Trend Slopes in Annual and Seasonal Pan Evaporation Records

name	year (±mm/year)	spring (±mm/year)	summer (±mm/year)	autumn (±mm/year)	winter (±mm/year)
Sokcho	-18.87	-5.39	-7.26	-4.03	-1.77
Chuncheon	-2.60	-1.02	-0.40	-0.44	-0.71
Gangneung	-5.11	-1.76	-1.41	-0.87	-0.87
Seoul	-0.43	0.01	-0.40	-0.16	0.03
Incheon	-4.40	-1.08	-1.63	-1.18	-0.49
Suwon	-1.25	-0.13	-0.81	-0.10	-0.23
Cheongju	1.66	0.80	0.01	0.81	0.08
Daejeon	-3.32	-0.44	-1.66	-0.87	-0.47
Pohang	-8.89	-1.69	-4.19	-1.96	-0.86
Daegu	-5.09	-0.31	-2.92	-0.23	-1.60
Jeonju	-2.72	-0.24	-1.73	-0.46	-0.48
Ulsan	-10.43	-1.11	-4.27	-2.50	-2.55
Gwangju	-4.03	-0.41	-2.32	-0.42	-0.89
Busan	-5.25	-0.66	-1.77	-1.33	-1.45
Tongyeong	1.06	0.47	0.66	0.46	-0.12
Mokpo	-6.79	-0.90	-2.69	-2.08	-1.13
Yeosu	-0.71	0.11	-1.09	0.08	0.34
Jinju	0.09	0.63	-0.86	0.00	0.38

The bold numbers imply that they are significant at the 95% significance level using one-sided linear regression test

마찬가지로 Fig. 2에서 ▲과 ▼은 각각 상향 또는 하향 추세가 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 지점들을 표시한 것이며, ●은 추세가 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의하지 않은 지점을 나타낸다.

Fig. 2(a)는 연간 누적 강수량에 대한 분석결과로서, 전반적인 상향추세가 관찰되기는 하나 95% 신뢰수준에서 유의한 추세를 가지는 지점은 울산, 강릉, 속초로 동해안에 위치한 3곳뿐이었다. 수원지점에서는 통계적으로 유의하지는 않으나 상향추세도 관찰되었다.

Fig. 2(b)는 연 평균 온도에 대한 분석결과로서, 강수량에 비해 상향추세가 보다 뚜렷하였는데, 18개 모든 지점에서 통계적으로 유의한 상향추세가 관찰되었다. 지역별로는 수원, 대전, 청주 등의 중서부 지방에서 상향추세 경향이 매우 큰 것으로 나타났다.

Fig. 2(c)는 연 평균 상대습도를 도시한 것으로 온도와는 정반대로 18개 모든 지점에서 통계적으로 유의한 하향추세가 존재함을 확인하였다. Figs. 2(b) and 2(c)를 비교해 보면, 온도가 증가한 지점에서는 상대습도가 감소하는 정반대의 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 한반도 전역에 걸친 광대한 지역에서 발생한 상대습도의 감소를 온도 상승만으로 설명하기에는 다소 무리일 수 있으나, 온도가 증가하면 포화수증기압이 증가하고 따라서 상대습도가 감소할 것이라고 예상할 수 있다.

Fig. 2(d)는 연 평균 풍속의 추세분석 결과를 도시한

것이다. 바람의 세기는 전반적으로는 다소 감소현상을 나타내었는데 한반도를 양분해 동쪽의 하향추세가 서쪽에 비해 뚜렷하였다. 수원과 대전관측소에서 통계적으로 유의한 상향추세가 관찰되었고 충주, 청주, 진주, 여수, 통영에서는 통계적으로 유의한 추세가 검증되지 않았다.

Fig. 2(e)는 대상관측소의 연 누가 일조시간에 대한 추세분석 결과이다. 일조시간은 태양복사에너지가 직접 관측되지 않은 지점에서 이를 추정하기 위해 사용되는 자료로 증발산량 산정에 큰 영향을 미치는 관측값이다. 일조시간을 측정하는 측기의 종류로는 태양 빛의 열을 이용하는 캠프벨(Campbell) 일조계, 마빈(Marvin) 일조계, 바이메탈(Bimetal) 일조계와 태양 빛의 밝기를 이용한 태양전지식 일조계 및 태양 빛에 의한 화학변화를 이용한 줄단(Jordan) 일조계 등이 있다. 대전과 청주관측소가 위치한 중서부 지방을 제외한 대부분 지역에서 일조시간의 감소현상이 나타났음을 확인할 수 있다. 중부와 남부에 위치한 관측소들에서 통계적으로 유의한 하향추세가 관찰되었으며, 인천, 목포, 부산, 울산관측소에서도 통계적으로는 유의하지 않으나 상향추세가 관찰되었다.

Fig. 2(f)는 연 평균 일조율에 대한 추세분석 결과를 도시한 것으로 일조시간을 가조시간으로 나누어 백분율로 표시한 것을 의미한다. 여기서 가조시간은 지형에 관계없이 위도에 따라 결정되는데, 지평선을 기선으로

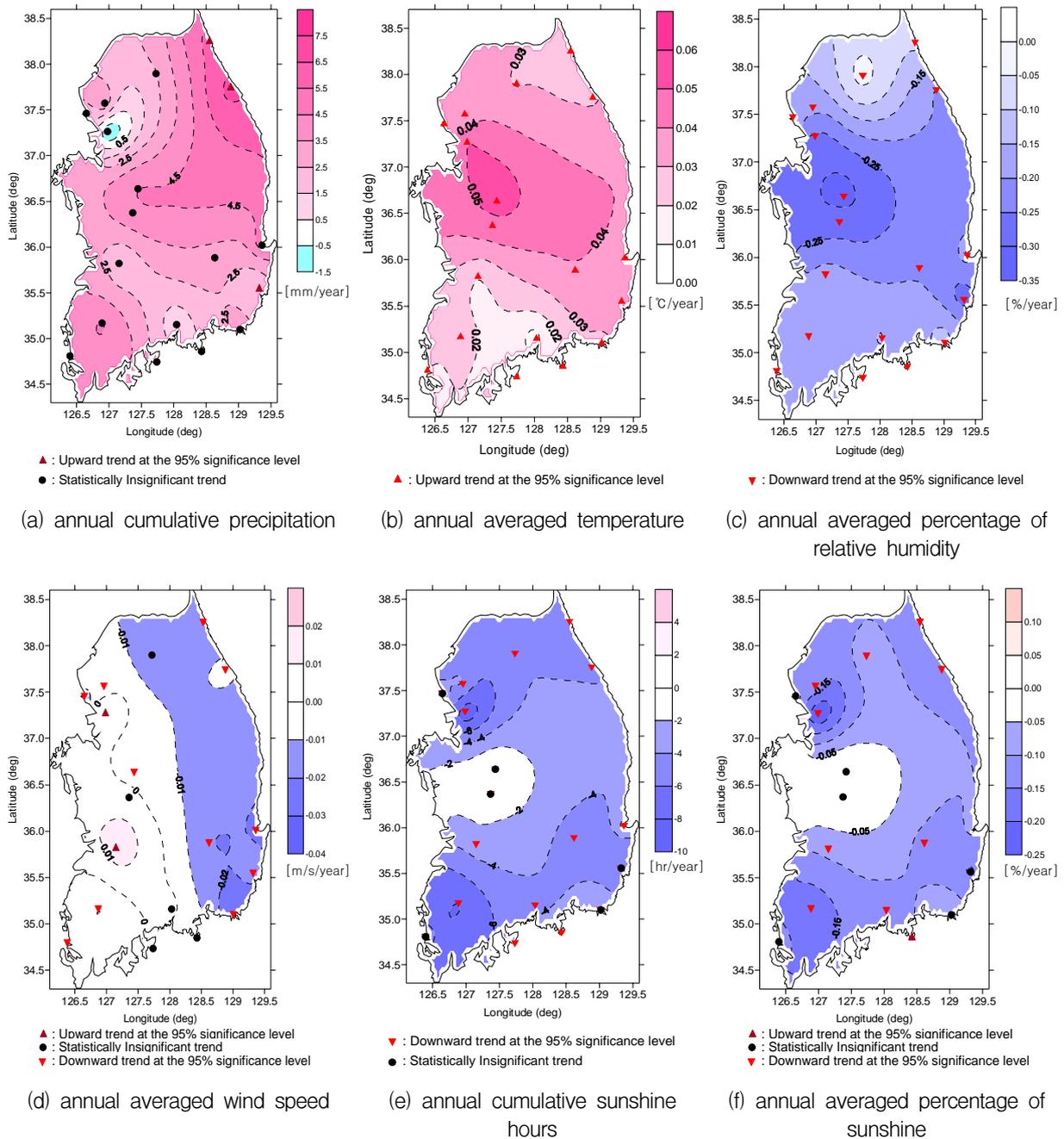


Fig. 2. Spatial Distributions of Trends in Annual Temperature, Relative Humidity, Precipitation, Wind Speed, Sunshine Hours, and Percentage of Sunshine (The trends were estimated using observed data from 1960 to 2007.)

일출에서 일몰까지의 시간을 의미한다. 일조율에 대한 추세분석 결과를 통해 앞에서 제시한 일조시간에 대한 결과를 다시 확인할 수 있는데 Figs. 2(e) and 2(f)를 비교해 보면 두 결과가 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

위 결과들을 정리해 보면, 강수량과 온도는 상승하고 있으며 강수량은 동해안 지역인 속초, 강릉, 울산에서 증가현상이 뚜렷한 반면 온도는 한반도 전역에서 통계적으로 유의한 증가현상이 관찰되었고 특히 수원, 청주,

대전 등의 서해안 중부지방에서 큰 상향추세를 나타내었다. 상대습도는 온도와 정반대로 모든 지점에서 감소하였으며 마찬가지로 수원, 청주, 대전에서 큰 하향추세를 나타내었다. 풍속도 동해안을 중심으로 감소하는 경향이 뚜렷하였으며, 일조시간과 일조율은 청주, 대전을 제외한 대부분의 지점에서 감소경향을 나타내었다.

Fig. 2(a)의 강수량 추세의 공간적 분포를 Figure 1의 팬증발량 추세 분포 그림과 비교해 보면 청주를 비롯한 중서부에서의 추세가 다른 지역에 비해 비교적 약

하다는 공통점을 발견할 수 있다. 또한 팬증발량 추세에 대한 공간적 분포는 Figs. 2(e) and 2(f)의 일조시간과 일조율의 공간적 분포와 상당부분 일치하는 것을 확인할 수 있다.

3.4 팬증발량과 기후학적 인자의 관계

서로 다른 두 변수들의 관계를 살펴보기 위한 일반적인 방법은 산점도(scatter plot)를 그려 두 변수간의 선형 또는 비선형적 관계를 살펴보는 것이다. 본 연구에서는 선정된 18개 기후관측소에 대해 팬증발량과 6개의 기후학적 인자들에 대한 산점도를 그려 상관성을 살펴보았다. 기후관측소 마다 서로 다른 평균과 분산을 가지고 있으므로 이를 통일하기 위해 각 지점의 자료는 각각 평균과 표준편차를 이용해 표준화한 후 분석에 사용하였다.

Fig. 3은 팬증발량에 대한 강수량, 온도, 상대습도, 풍속, 일조시간, 일조율의 산점도이다. Fig. 3(a)의 팬증발량과 강수량과의 산점도를 살펴보면, 두 변수가 음의 상관관계에 있음을 짐작할 수 있게 하는데, 실제로 상관계수를 계산해 보면 -0.4 정도로 상당히 강한 상관관계가 있음을 확인할 수 있다. 이는 한반도에서 발생한 강수량 증가현상과 팬증발량 감소현상이 통계적으로 유의한 상관관계를 가지고 있음을 의미한다. Figs. 3(b), 3(c), 3(d)의 팬증발량과 온도, 상대습도, 풍속과의 산점도에서는 별다른 상관성을 확인할 수 없었다. Figs. 3(e) and 3(f)의 팬증발량과 일조시간, 일조율과의 산점도에서는 양의 상관관계가 관찰되었고 상관계수 역시 각각 0.42와 0.47로 매우 높아 팬증발량 감소현상이 일조시간, 일조율의 감소현상과 무관하지 않음을 다시 한번 확인할 수 있었다.

Figs. 2 and 3의 분석결과를 근거로 주요 도시들이 밀집되어 있는 중서부 지방에 위치한 서울, 수원, 청주 관측소에서 팬증발량의 감소현상이 두드러지지 않은 이유를 추론해 보면 다음과 같다. 먼저 Fig. 3(a)에 제시한 팬증발량과 강한 음의 상관관계를 보인 강수량이 수원관측소에서는 오히려 감소하였고, 서울과 청주관측소에서도 다른 관측소들에 비해 강수량의 증가가 그리 크지 않음을 Fig. 2(a)에서 확인할 수 있다. 또한 청주관측소에서는 Figs. 2(e) and 2(f)에서와 같이 일조시간이나 일조율의 감소현상도 관찰되지 않았다. 그러나 이 지역은 고도로 도시화되었으며 공기오염으로 인한 부분적인 일사량 차단, 그리고 Figs. 2(b) and 2(c)에서 제시한 바와 같이 온도증가와 상대습도 감소현상까지 겹치면서 통계적으로 설명하기 어려운 조건에 있음을 짐작할 수 있다.

4. 강릉관측소 사례연구

4.1 팬증발량과 Penman식의 증발량 비교

강릉관측소에서 관측된 온도, 일조시간, 풍속, 상대습도 자료와 Eq. (3)의 단순화된 Penman공식을 이용하여 개방된 수체(open water body)에서의 증발량을 추정하고 이를 팬증발량과 비교하였다. 강릉관측소는 1912년에 관측을 시작하여 양질의 관측자료를 보유하고 있으며 특히 팬증발량 감소, 온도 증가, 일조시간 감소 등 본 연구에서 분석하고자 하는 현상을 가장 잘 나타낼 수 있는 관측소 중 하나라고 판단하여 선택하였다.

Fig. 4는 강릉관측소의 연단위 팬증발량(E_{pan}), 온도(T), 상대습도(RH), 풍속(u), 일조시간(n)을 표준화하여 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 4에서 팬증발량과 일조시간 시계열들이 서로 상관성이 뚜렷함을 확인할 수 있는데, 두 시계열의 상관계수는 0.68로 상당히 높았다. 풍속의 경우 팬증발량과의 상관계수가 0.28이고 p-value는 0.056으로 95% 신뢰수준으로 보면 유의할 만한 값은 아니다. 온도와 상대습도에서는 이보다 낮은 상관계수가 도출되었다.

Fig. 5는 강릉관측소에 대해 월단위 관측자료와 단순화된 Penman공식(Eq. (3))에 의해 추정된 저수지 수표면에서의 증발량(E_p)과 팬증발량(E_{pan})을 비교한 것이다. 두 시계열 모두 특정 연도에서 증발량이 함께 증가하거나 감소하는 것을 확인할 수는 있으나, 분석기간 동안의 추세에는 큰 차이를 보였다. E_p 의 경우 분석기간 중에 하향추세가 거의 관찰되지 않는 반면 팬증발량의 하향추세는 매우 뚜렷하였다. 따라서 팬증발량에 팬증발계수를 곱하여 수표면에서의 증발량을 추정하는 방법은 Penman공식과 기후변수를 이용하여 추정된 증발량과 큰 차이가 있을 수 있음을 확인하였으며, 특히 장기간에 걸친 잠재증발량이나 실제증발량의 변화 등을 검토하기 위해서 팬증발량을 이용하기 위해서는 세심한 주의가 필요함을 확인하였다.

Penman공식에 의한 추정량의 경우 일조시간 감소에 따른 감소량과 온도증가에 따른 증발량 증가량이 서로 상쇄작용을 일으켜 통계적으로 유의한 상향 또는 하향 추세를 보이지 않은 것으로 생각할 수 있다. Fig. 6은 강릉관측소에 대해 Eq. (3)을 이용하여 온도(T), 상대습도(RH), 풍속(u), 일조시간(n) 등 4개의 입력자료 중 3개를 평균으로 고정하고 나머지 1개의 입력값을 평균(μ)을 중심으로 표준편차(σ)의 2배만큼 증감시켜 가며 민감도를 살펴본 것이다. 증발량 추정값이 일조시간 n 의 변화에 대해 가장 민감하고, 다음으로 온도 T 에 민감한 것으로 나타났으며, 상대습도 RH 와 풍

속 u 에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 강릉관측소의 경우 일조시간이 감소하였으나 온도가 증가하여 서로 상쇄작용이 발생하여, 결과적으로 증

발량 추정값은 시간에 따라 약간 감소할 수 있으나 그 감소폭이 유의할 만하지 않은 결과로 도출되었음을 추론할 수 있다.

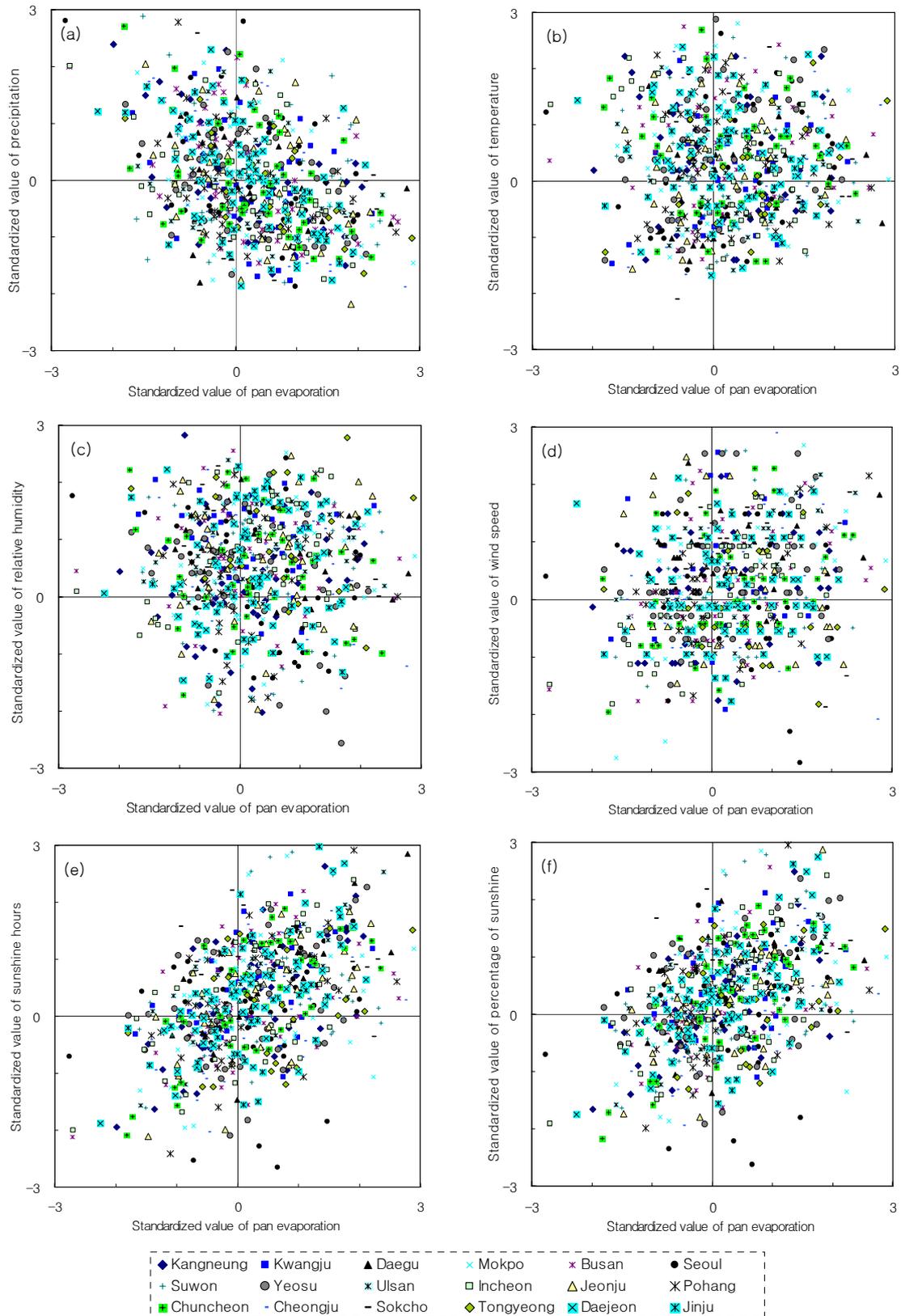


Fig. 3. Scatter Plots between Pan Evaporation and Six Climate Variables

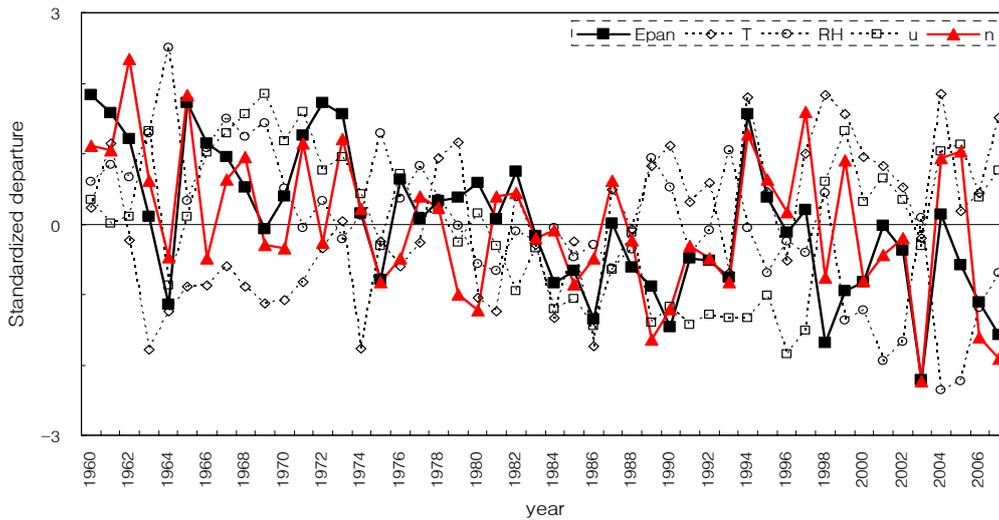


Fig. 4. Time Series of Standardized Departures of Annual Pan Evaporation, RH, Temperature, Relative Humidity, Wind Speed and Sunshine Hours for Gangneung

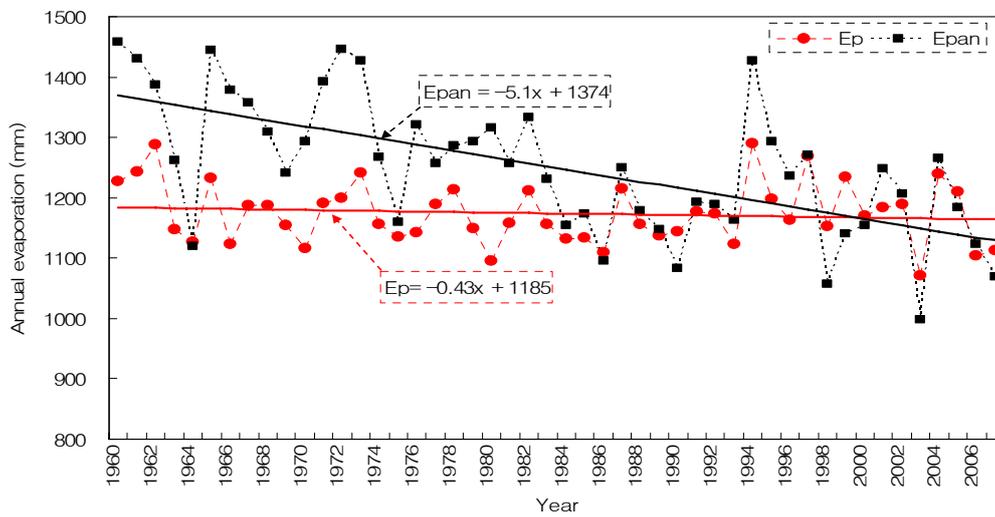


Fig. 5. Comparison between Estimated Evaporation by Simplified Penman Method and Pan Evaporation for Gangneung

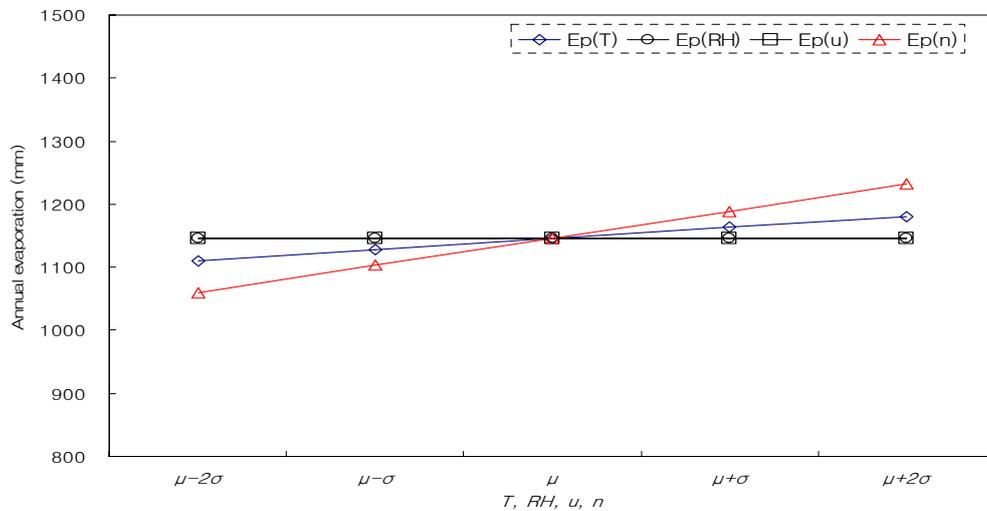


Fig. 6. Sensitivity Analysis of Estimated Evaporation by the Simplified Penman Equation

4.2 팬증발량과 실제증발량의 상호보완 관계

Brutsaert and Parlange(1998)은 토양에서 수분공급에 제한이 있는 비습윤지역에서 팬증발량은 잠재증발량을 설명하기에 적절하지 않다고 설명하고, 팬증발량의 감소가 실제 증발량의 증가를 입증하는 증거라고 주장하였다. 이론적인 측면에서 본다면 수분이 충분히 공급되는 표면에서 실제증발량(E)은 잠재증발량(E_0)과 같고 이는 또한 팬증발량(E_{pan})에 증발접시계수(ϵ)를 곱한 값과 같다고 생각할 수 있다.

$$E = E_0 = \epsilon E_{pan} \quad (5)$$

그러나 수분공급이 부족하게 되면 Eq. (5)는 더 이상 성립하지 않고 실제증발량은 잠재증발량보다 작아지게 되며, 증발에 사용되지 못한 에너지는 주위의 열흐름(heat flux, ΔH)을 증가시키게 된다. 따라서 수분공급이 부족한 지역에서는 다음과 같은 공식이 성립하게 된다.

$$E = E_0 - \Delta H \quad (6)$$

이러한 현상은 결국 팬증발량과 계수의 곱인 ϵE_{pan} 을 잠재 증발량보다 크게 만드는 요인이 되어 Eq. (7)과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$\epsilon E_{pan} = E_0 + \eta \Delta H \quad (7)$$

여기서 η 는 팬의 종류에 따라 다를 수 있으나 1보다 약간 큰 상수값이 된다. 따라서 팬증발량(E_{pan})은 더 이상 잠재증발량(E_0)을 직접적으로 설명하지 못한다. 이 설

명에서 가장 중요한 핵심은 실제증발량과 팬증발량은 서로 비례하는 것이 아니라 서로 상호보완적이라는 것이다. Brutsaert and Parlange(1998)는 이것에 대해서 사막에서의 실제증발량은 0에 가깝지만 팬증발량은 최대가 되는 이치와 같다고 설명하였다.

Eq. (6)과 Eq. (7)에서 ΔH 를 제거하면 아래와 같은 실제증발량에 관한 Eq. (8)을 얻을 수 있다.

$$E = [(1 + \eta) E_0 - \epsilon E_{pan}] / \eta \quad (8)$$

Brutsaert and Parlange(1998)는 Eq. (8)을 통해 비습윤지역에서 팬증발량(E_{pan})의 감소가 결국 실제증발량(E)의 증가를 설명하는 것이라고 주장하였다. Golubev *et al.*(2001)은 강수량의 증가가 유출량과 토양함수비를 증가시키고, 결국 실제증발량이 증가하는 현상을 광범위한 지역에서의 관측을 통해 위 이론을 뒷받침하기도 하였다.

Fig. 7은 Eq. (8)에 의해 강릉관측소 지점의 잠재증발량(E_0), 팬증발량(E_{pan}), 실제증발량(E)에 대해 Eq. (8)의 관계를 이용하여 구성해본 것이다. 잠재증발량은 Eq. (3)에서 일반잔디로 피복된 경우를 가정해 $\alpha = 0.23$ 으로 하였으며, 실제증발량을 계산하기 위한 Eq. (8)의 상수값들은 $\epsilon = 0.9$, $\eta = 1.1$ 로 가정하여 계산하였다. 상수 ϵ 와 η 는 선행연구가 없어 팬증발량과 실제증발량의 상호보완적 관계를 잘 설명할 수 있는 적당한 값을 가정하였다. 따라서 이를 통해 계산된 실제증발량이 참값이라고는 볼 수 없으며, 실제로 Fig. 7과 같은 추세가 계속된다면 가까운 미래에는 실제증발량이 팬증발량이나 잠재증발량보다 커지는 역전현상이 발생하게 되는 모순을 초래할 수 있다. 따라서 Fig. 6에 도시한 결과를

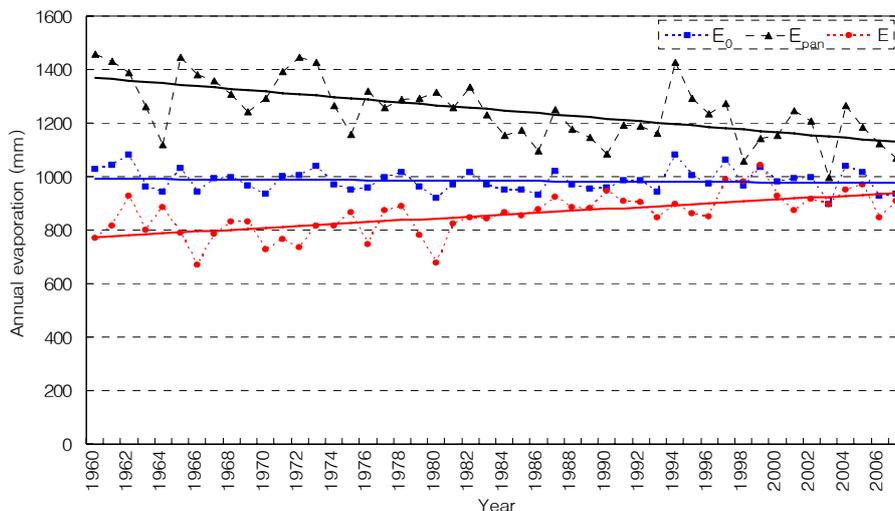


Fig. 7. Comparison among Potential, Pan, and Actual Evaporations

통해서는 Brutsaert and Parlange(1998)가 지적한 대로 강릉지점에서의 팬증발량이 감소하고 있으나 이와 반대로 실제증발량은 증가할 수 있다는 점과, 팬증발량과 실제증발량이 상호보완적 관계에 있음을 살펴보기 위한 분석으로 이해하기 바란다.

5. 결 론

지구온난화에 따른 전지구적 기온상승으로 증발량 역시 증가할 것으로 예견되었으나, 잠재증발량이나 개방된 수표면 증발량을 추정하기 위해 일반적으로 사용되던 팬증발량은 지난 수십 년간 세계 곳곳에서 통계적으로 유의한 감소추세를 나타내었다. 우리나라에서도 지역적인 편차와 정도의 차이는 있으나 최근 수십년간 팬증발량이 통계적으로 유의한 수준에서 감소하였음이 보고되었다(이길하 등, 2007).

본 연구에서 선정한 18개 지점 중에서 13개 지점에서 통계적으로 유의한 하향추세가 관찰되었으며, 특히 속초, 강릉, 대구, 부산, 목포는 연간 팬증발량 감소량이 5 mm 이상으로, 전체 분석기간인 45년간 꾸준히 5 mm 가 매년 감소하였다면 225 mm가 넘는 큰 양이었다. 팬증발량의 감소현상을 확인하는 차원에서 한걸음 더 나아가, 이러한 감소현상을 설명할 수 있는 증발에 관련된 기후학적 인자들에 대해 지난 수십 년간의 변화를 함께 관찰하였다. 이미 잘 알려진 강수량과 온도의 증가현상을 재확인 하였으며, 상대습도, 일조시간, 일조율이 분석기간 동안 감소하였음을 확인하였다. 강수량, 일조시간, 일조율의 증감은 팬증발량의 감소와 지역적인 분포로도 상관성이 있음을 확인하였다. 일조시간과 일조율의 감소는 증발에 결정적인 영향을 미치는 기후변수로서, 태양복사에너지의 감소를 의미하는 것이다. 표준화된 연자료들의 상관관계를 살펴본 결과, 팬증발량과 강수량은 -0.4 정도의 강한 음의 상관관계가, 팬증발량과 일조시간, 일조율은 각각 0.42와 0.47로 강한 양의 상관관계가 관찰되었다. 따라서 강수량의 증가와 일조시간의 감소는 곧 팬증발량의 감소를 의미하는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 온도, 상대습도, 풍속과 팬증발량과의 상관관계는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

증발량의 변화를 보다 자세히 살펴보기 위해 강릉관측소 자료를 이용한 사례연구를 수행하였다. Penman공식에 의한 수표면의 잠재증발량을 구하고 이를 팬증발량과 비교하였는데, 기후학적 인자들을 입력하여 Penman공식에 의해 추정된 증발량에서는 아주 미세한 감소현상을 보일 뿐이었으며, 이는 팬증발량 관측값에서 보여준 뚜렷한 감소추세와는 매우 상반된 결과였다.

따라서 팬증발량 관측값과 Penman공식에 의해 추정된 증발량과는 큰 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 비습윤지역인 우리나라에서 기존에 팬증발량 관측값에 일정한 증발접시계수를 곱하여 잠재증발량이나 저수지 수표면에서의 증발량을 추정하는 방식에 큰 위험성을 내포하고 있음을 확인한 것이라 할 수 있다. 강릉관측소에 대해 Penman공식과 입력변수들을 이용하여 민감도 분석을 실시한 결과 일조시간(태양복사에너지)에 의한 증발량의 변화가 가장 크고, 온도에 의한 변화가 다음으로 민감하였다. 상대습도, 풍속에 의한 증발량의 변화는 미미하였다. 따라서 일사량의 감소와 온도의 증가는 잠재증발량을 서로 감소 또는 증가시키는 역할을 하여 일부 상쇄되어 전체적인 감소현상은 거의 없음을 확인할 수 있었다.

Brutsaert and Parlange(1998)가 비습윤지역에서 팬증발량의 감소와 실제증발량의 증가를 설명하기 위해 제안한 공식을 이용하여 강릉지점에서 팬증발량이 감소하고 실제증발량은 증가하며 서로 상호보완적인 상태에 있음을 보였다. 팬증발량의 감소가 실제증발량의 증가현상을 증명한다는 주장은 어느 정도 설득력이 있어 보이나, 보다 정확한 분석을 위해서는 향후 시험유역을 선정하여 실제증발량을 관측하고 이 관측결과를 팬증발량이나 잠재증발량과 비교, 분석하는 등의 보다 자세한 연구가 이어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 통합수자원관리 시스템 구축 및 실용화(과제번호: 1-0-3) 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김광섭, 임태경 (2006). "1973년부터 2004년까지의 관측된 대형증발량 자료 분석." **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제26권, 제6B호, pp. 583-596.
- 김성원, 김형수 (2007). "비선형 증발량 및 증발산량 시계열의 모형화를 위한 신경망-유전 알고리즘 모형: 1. 모형의 이론과 적용." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회 제40권, 제1호, pp. 73-88.
- 노재경 (2002). "기상자료를 이용한 일 증발량 추정." **한국수자원학회 학술발표회논문집(II)**, 한국수자원학회, pp. 1167-1172.
- 유승환, 최진용, 장민원 (2006). "논벼에 대한 Penman-Monteith와 FAO Modified Penman공식의 작물계수

- 산정." **한국농공학회논문집**, 한국농공학회, 제49권, 제1호, pp. 13-23.
- 이길하, 오남선, 정신태 (2007). "우리나라 연안의 팬증발량 변화 양상 분석." **한국해안·해양공학회지**, 한국해안·해양공학회, 제19권, 제3호, pp. 244-252.
- 임창수 (2008). "증발산 산정방법들의 비교 - 잔디기준 작물을 중심으로." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp. 212-228.
- 임혁진, 권형중, 배덕효, 김성준 (2006). "CA-Markov기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 453-466.
- 허승오, 정강호, 하상건, 김정규 (2006). "FAO Penman-Monteith 모형의 증발산량 산정에 이용되는 기상요소의 평가." **한국토양비료학회지**, 한국토양비료학회, 제39권, 제5호, pp. 274-279.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). "Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements." *Irrigation and Drainage Paper 56*, United Nations-Food and Agricultural Organization (FAO), Rome, Italy.
- 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, pp. 55-73.
- Golubev, V.S., Lawrimore, J.H., Groisman, P.Y., Speranskaya, N.A., Zhuravin, S.A., Menne, M.J., Peterson, T.C., and Malone, R.W. (2001). "Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment." *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, pp. 2665-2668.
- Lawrimore, J.H. and Peterson, T.C. (2000). "Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 1, No. 6, pp. 543-546.
- Liu, B.H., Xu, M., Henderson, M., and Gong, W.G. (2004). "A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955-2000." *Journal of Geophysical Research- Atmospheres*, Vol. 109, D15102, DOI:10.1029/2004JD004511.
- Liu, C.M. and Zeng, Y. (2004). "Changes of pan evaporation in the recent 40 years in the Yellow River Basin." *Water International*, Vol. 29, pp. 510-516.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare, and grass." *Proceedings of the Royal Meteorological Society*, Vol. 193A, pp. 120-146.
- 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 1970-2002." *International Journal of Climatology*, Vol. 24, pp. 1077-1099.
- Roderick, M.L. and Farquhar, G.D. (2005). "Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s." *International Journal of Climatology*, Vol. 25, pp. 2031-2039.
- Salas, J.D. (1993). Analysis and modeling of hydrologic time series, Chapter 19, *Handbook of Hydrology*, D. Maidment (ed.), McGraw-Hill, Inc., N.Y., USA.
- Shuttleworth, W.J. (1993). "Evaporation." in *Handbook of Hydrology*, Maidment D.R. (editor), McGraw-Hill Inc., New York.
- Tebakari, T., Yoshtani, J., and Suvanpimol, C. (2005). "Time-space trend analysis in pan evaporation over kingdom of Thailand." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 10, pp. 205-215.
- Valiantzas, J.D. (2006). "Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data." *Journal of Hydrology*, Vol. 331, pp. 690-702.
- Xu, J.Q., Haginoya, S., Saito, K., and Motoya, K. (2005). "Surface heat balance and pan evaporation trends in Eastern Asia in the period 1971-2000." *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 2161-2186.

(논문번호:08-89/접수:2008.08.20/심사완료:2009.01.02)