

## 우리나라 연안의 팬증발량 변화 양상 분석 Analysis on the Change in the Pan Evaporation Rate in the Coastal Zone

이길하\* · 오남선\*\* · 정신탉\*\*\*  
Khil-ha Lee\*, Nam-Sun Oh\*\*, and Shin Taek Jeong\*\*\*

**요 지 :** 장기간에 걸친 증발량의 변화는 지표-대기간의 수문반응을 변화시키고, 농작물의 경작에도 영향을 미치며, 해안지방에서는 하천유입량 등의 변화로 생태계의 변화를 가져올 수 있다. 최근의 기후 상승에 따라 실제 증발량이 증가할 것으로 판단되나, 외국의 다양한 연구는 남반구와 북반구에 걸쳐 팬증발량이 감소하는 추세를 보여주었다. 이러한 현상은 기후 변화와 어느 정도 관련이 있을 가능성이 충분히 있으므로 외국의 연구 결과에 부응하여 우리나라에서도 팬증발량이 감소하는 추세를 보여 왔는가를 확인할 필요가 있다. 이 연구에서는 우리나라 14개 지점에서의 1970년도부터 2000년도까지의 증발량 관측치를 선정하여 심도있게 분석하였으며, 우리나라 해안지역과 내륙지역의 팬증발량 변화를 비교하였다. 증발량 1차 추세선 분석 결과 14개의 지점 중 청주, 여수, 진주를 제외한 11개 지점이 감소하는 추세를 보여주었다. 14개 지점의 총 평균에서는 연간 1.6 mm/yr 감소하는 추세를 보여주었으며, 이는 전체 자료의 기간인 30년 동안 연평균 팬증발량 약 50 mm의 감소한 것이다. 연평균증발산량의 값은 내륙지역에 비하여 해안지역에서 10% 가량 큰 값을 보이는 것으로 나타났으며, 증발산량의 연변화량은 내륙지방의 연간 -0.82 mm/yr에 비하여 해안지방에서 연간 -2.46 mm/yr으로 훨씬 빠르게 감소하는 경향을 보였다. Mann-Kendall trend test 결과는 95% 유의수준 내에서 4개 지점이 감소를 보여주며 10개 지점은 95% 유의수준 내에서 변하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 전 지역에 대한 평균값은 감소추세를 보이는 것으로 나타났다. 이 결과는 외국의 기존 연구 결과와 일치하는 것으로 앞으로 우리나라 기후변화에 따른 다양한 연구에 기여할 것으로 기대한다.

**핵심용어 :** 증발량, 팬증발량, Mann-Kendall trend test, 기후변화

**Abstract :** A long-term change in the evaporation rate have an influence on the hydrologic processes at the interface between the land surface-air and crop yield. Several previous studies have reported declines in pan evaporation rate, while actual evaporation rate is expected to increase due to anthropogenic global change in the future. The decreasing trend of pan evaporation rate might be involved with global warming and accordingly the trend of annual pan evaporation rate also needs to be checked here in Korea. In this study, 14 points of pan evaporation observation are intensively studied to investigate the trend of pan evaporation for the time period of 1970-2000. Annual pan evaporation is decreasing at the rate of 1.6mm/yr, which corresponds to approximately 50mm for 30 years. Annual pan evaporation rate is larger by ~10% at the coastal area and decreasing rate is faster as -2.46 mm/yr per year, while that is -0.82 mm/yr per year at the in-land area. The results of the Mann-Kendall trend test shows 4 points are decreasing and 10 points are unchanged with 95% confidence interval. But national annual average values show the decreasing trend of pan evaporation rate as a whole, which corresponds to general trend all over the world. This study will contribute to a variety of studies on water resources, hydrology, agricultural engineering, meteorology, and coastal engineering in association with future global climate change.

**Keywords :** Evaporation rate, Pan Evaporation rate, Mann-Kendall trend test, Climate change

\*경원대학교 GIS 연구소 연구원(GIS Research Institute, Kywongwon University, Seongnam, Korea. Khil\_ha@yahoo.com

\*\*목포해양대학교 해양토목공학과 부교수(Ocean Civil Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea. sun@mmu.ac.kr

\*\*\*원광대학교 토목환경도시공학부(School of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang University, 344-2, Shinyong-Dong, Iksan, 570-749, Korea. stjeong@wonkwang.ac.kr)

## 1. 연구배경 및 목적

기후 변화에 따른 장기간에 걸친 증발량의 변화는 지표-대기간의 수문반응뿐만 아니라 농작물의 경작에도 영향을 미치므로 이에 따른 다양한 연구가 전 세계적으로 있어왔다. 특히 해안지방에서의 증발량 변화는 하천에서의 유입량에 변화를 초래하여 해안생태계에 변화를 가져올 수 있다. 화석연료의 소모로 야기된 기온의 상승은 실제 증발량의 증가를 초래한다고 알려져 왔으며 실제 대기모형에 의한 미래의 기후모의에서도 실제 증발산량은 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 사실에도 불구하고 과거 팬증발량 관측치는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 팬증발량은 지역에 따라 부분적으로는 증감을 보여주고 있으나 총 평균의 감소 추세를 전 세계에 걸쳐 일반적인 현상으로 받아들여지고 있는데 이미 미국(Peterson et al., 1995), 구소련(Peterson et al., 1995; Golubev et al., 2001), 일부 아시아 지역(Chattopadhyay and Hulme, 1997; Liu et al., 2004; Tebaraki et al., 2005)을 포함한 북반구뿐만 아니라 호주(Rodeck and Farquhar, 2004)와 뉴질랜드(Rodeck and Farquhar, 2005)를 포함한 남반구에서도 감소 추세를 보여 주었다(Peterson et al., 1995). 기후적인 측면에서 보면 이들 지역은 온대, 냉대 및 열대 기후 등 다양한 기후 영역에 걸쳐 있어 온대 기후에 속하는 우리나라도 팬증발량이 감소하는 추세를 보여줄 것으로 예상된다.

팬증발산의 감소는 잠재증발산량의 감소를 의미하는데 기후 변화에 따른 대기온도 상승을 고려할 때 실제 증발산량의 증가와는 서로 상충하며 모순에 빠지는 것처럼 보인다. 그러나, 잘 알려진 대로 기후변화에 따른 수문-기상인자의 변화는 온도에만 국한된 것이 아니다. 기후변화에 가장 영향을 미치는 것으로 수문-기상 인자는 강우의 증가로서 이는 토양 수분의 공급에 변화를 가져오며 잇따른 증발산과 구름형성에 영향을 미치며 다시 강우형성의 변화로 되돌아온다. 과학자들에 의하면 기후 변화에 따라 구름의 형성이 증가하였으며 이로 인하여 지구표면에 도달하는 복사열이 감소하는 추세를 보여 왔다(Abakumova et al, 1996; Gilgen et al., 1998; Redeck and Farquhar, 2005). 이와 같이 실제 증발산을 지배하는 기상 인자가 온도만이 아니라 습도, 풍속, 복사열의 상호작용(Penman-Montheith 증발산량 산정 공식을 되새겨보면 쉽게 이해가 된다.)이 복합적으로 만들어내는 물리현상이므로 팬증발산의 감소와 실제 증발산량의 증가가 동시에 발생하는 것이 가능할 수 있다. 이에 대한 물리적 설명은 아직 명확히 밝혀지지 않았으나 이론적인 근거와 외

국의 연구에 대하여 2장에서 설명하기로 한다.

이 연구에서는 전국에 걸쳐 분포한 우리나라의 팬증발량 자료의 시간에 따른 변화 경향을 해안지방을 중심으로 점검해 보았다. 기상청에서 운영하고 있는 팬증발산 측정 지점은 약 76개인데, 이 중 신뢰성이 상대적으로 높다고 판단되며 장기간에 걸쳐 관측된 14개 지점(이들은 대부분 대도시에서 편중된다.)에서 1970년에서 2000년까지의 관측값을 선택하여 시간에 따른 증감 추세를 살펴 본 결과 청구, 여수, 진주를 제외한 11개 지점이 감소하는 추세를 보여주었으며 14개 지점의 총 평균에서는 연간 1.6 mm 감소하는 추세를 보여주었다. 이 결과는 미국, 중국, 호주, 뉴질랜드, 구소련 등의 기존 연구 결과와 일치하는 것이다. 이 연구는 앞으로 우리나라 기후변화에 따른 수문-기상학적인 대처를 위한 다양한 기후변화와 이에 따른 지속적 수문-수자원 개발 및 보존 연구에 기여할 것으로 기대되며, 해안지방에서의 증발산량 변화에 따른 생태계의 변화에 대한 연구의 기초자료가 될 것이다.

다음 절에서는 증발량 모순 이론에 대한 간략한 설명이 있으며, 3절에서는 이 연구에 사용된 연구 자료 및 대상 지점에 대하여 간단한 설명을 하였으며, 4절에서는 연구 결과를 설명하였다. 이어지는 절에서는 결론 및 요약으로 논문을 끝맺음하였다.

## 2. 증발량 모순(evaporation paradox)

팬증발은 복잡한 기상현상 중에서 가장 간단한 관측중의 하나이다. 팬증발 관측 자체는 광대한 호수의 증발현상이나 지표면과 대기의 상호 작용으로 인해서 일어나는 지표면 식생의 증발산을 완전히 나타낼 수 없다 할지라도 최근의 기후변화에 대한 직감이나 간접적인 지식을 전달해 줄 수 있어 수자원 분야나 농업 분야에 중요한 단서를 제공할 수 있다. Peterson and Golubev (1995)는 전 지구를 5개의 광역(미국 746개 지점, 구소련 190개 지점, 유럽, 중동, 시베리아 등)으로 나누어 20세기 후반기의 팬증발량 변화 추세를 연구하였는데 전 지역이 감소 추세를 보이며 중동을 제외하고는 99%의 유의수준에서 감소하는 것으로 나타났다. 이 연구에서 팬증발량이 감소하는 원인의 하나로 구름의 양이 증가함을 들었는데 해양까지를 고려한다면 구름의 양의 증가가 전 지구적인 추세인 지만 국부적인 추세인지를 확신할 수 없다고 하였다. Table 1은 Peterson and Golubev (1995)의 연구에 의한 전 지구적인 팬증발량과 실제증발산량의 변화 추세를 보여준다.

**Table 1.** Trends in pan evaporation and their interpretation of trend for actual evapotranspiration (Peterson and Golubev, 1995)

Region	Period	Trend in pan evaporation (%/10 yrs)	Interpretation of trend for actual evaporation
러시아북부	1951-1990	-5.8	감소 ~3-4%/10년
유럽남부	1951-1987	-8.9	증가 ~4-6%/10년
시베리아 침엽지대	1951-1988	-3.0	감소 ~2%/10년
시베리아 초원	1951-1988	-1.8	증가
중앙아시아 초원·사막	1952-1989	0.2	불변
미국북동부	1957-1998	0.8	확인안됨
미국남동부	1957-1998	0.8	감소
오대호지역	1957-1998	-2.1	확인안됨
미국중서부	1957-1998	-3.4	증가 ~1-2 %/10년
미국중부 대평원	1957-1998	-1.6	증가 ~0.8%/10년
미국서부	1961-1998	3.0	증가
미국서부산악지역	1957-1998	-2.1	증가~1%/10년

Table 1에서 보는 것처럼 기후변화에 따라 실제증발산량이 증가할 것이라 기대됨에도 불구하고 전 세계적 추세로 증발산량은 감소하는 추세를 보이고 있으며 이는 과학자들에게 물리적으로 이해하기 어려운 난제를 던져주었다. 1990년대 중반에 제기된 이러한 의문에 많은 과학자들이 해답을 내놓으려고 노력을 해오고 있으나(Peterson et al., 1995; Brutsaert and Parlange, 1998; Szilagyi, 2001; Rodeck and Farquhar, 2002), 아직 일반적으로 인정받는 물리적 설명이 나오지 않고 있다.

이러한 실제증발산량이 증가와 증발산량은 감소를 과학자들은 “증발량모순”(evaporation paradox)이라 부르는데 이를 설명하기 위한 기초적 이론적 근거는 1960년대 Bouchet 상호보완가정(complimentary hypothesis, 1963)이라 할 수 있으며 다음과 같다.

$$E + E_p = Const \quad (1)$$

여기에서  $E$ 는 실제증발산량이며  $E_p$ 는 잠재증발산량을 나타낸다. Bouchet 상호보완가정(1963)은 Morton(1965)에 의하여 다시 언급이 되었으나 이 가정은 상당히 경험에 의존하고 있는 편이다. 잠재증발산량은 에너지와 대기조건의 변화가 없고 증발이 발생하는 표면에 수분이 충분한 상태에서 일어날 수 있는 증발산량을 말한다. 이러한 잠재증발산량은 실제증발산량이 증가함에 따라 감소해야 물리적으로 바람직 할 것 같다. 왜냐하면 실제증발산량의 증가로 인하여 대기 중에 수분의 증가를 초래하고 지표면과 대기 중의 수증기압의 차이가 감소하므로 잠재적인 증발산량의 소모량이 감소한다는 설명이다. Brutsaert and Parlange(1998)은 잠재증발산량의 감소는 실제증발산량의 증가로 이어지며, 실제증발산량의 증가

는 다시 강수량의 증가로 이어지는데 전 세계적으로 관찰되는 강수량의 증가가 이를 뒷받침해준다고 주장하고 있다. 그러나 실제로 지역에 따라서 잠재증발산량은 감소하는 추세를 보이나 강수량은 변화하지 않는 현상을 보이는 곳도 있다(Tebaraki et al., 2005).

### 3. 연구 자료 및 대상 지점

수문인자 중에서 관측이 상대적으로 가장 쉬운 것은 유량이며, 가장 어려운 것은 증발산량이라는 것은 대부분의 수문학자가 공감하는 바이다. 우리나라에서는 지속적인 실제증발산량의 관측은 이루어지지 않고 있으나 증발산량은 부족하나마 지속적으로 이루어져 오고 있다. 이는 미국이나 유럽 같은 선진국도 마찬가지로 실제 증발산은 특별히 관심 있는 지역이나 이슈가 있을 때 측정 장비를 설치하여 관측하는 것이 일반적이며 지속적인 증발량 관측은 선진국이나 후진국 구별없이 A형(지름 120 cm) 증발접시를 설치하여 관측한다.

Table 2에서 보듯이 전국적으로 보면 약 76개 지점에서 증발량 관측이 이루어지고 있는데 기간은 각 관측소에 따라 서로 다르며 많은 관측 지점이 70년대 이후부터 관측을 시작하였다. 또 많은 관측소에서 90년대 초반에 관측을 중지한 상태라 실제로 사용 가능한 관측지점은 많지 않은 실정이다. 2000년 현재 76개 지점에서 증발량이 관측되는 지점은 23개 지점이며 이 연구에서는 관측기간이 충분히 길고 관측이 꾸준히 이루어져 상대적으로 신뢰도가 높은 14개의 관측 지점을 선택하였으며 연구에 사용된 연 평균 증발량값은 부록1에 보여준다. 14개의 지점 중 관측기간이 가장 긴 것은 목포와 서울로 1900년대 초반으로 거슬러

**Table 2.** The station No. and location of meteorological observation

Station No.	Location	Station No.	Location	Station No.	Location	Station No.	Location
090	속초	133	대전	185	고산	248	장수
095	철원	135	추풍령	189	서귀포	256	순천
098	동두천	136	안동	192	진주	261	해남
099	문산	137	상주	201	강화	262	고흥
100	대관령	138	포항	202	양평	265	성산포
101	춘천	140	군산	203	이천	271	춘양
102	백령도	143	대구	211	인제	272	영주
105	강릉	146	전주	212	홍천	273	문경
106	동해	152	울산	216	태백	277	영덕
108	서울	155	마산	221	제천	278	의성
112	인천	156	광주	226	보은	279	구미
114	원주	159	부산	232	천안	281	영천
115	울릉도	162	통영	235	보령	284	거창
119	수원	165	목포	236	부여	285	합천
121	영월	168	여수	238	금산	288	밀양
127	충주	169	흑산도	243	부안	289	산청
129	서산	170	완도	244	임실	294	거제
130	울진	175	진도	245	정읍	295	남해
131	청주	184	제주	247	남원	260	장흥

**Table 3.** No. of missing data for each station for the study period

	춘천	서울	수원	청주	대전	울릉도	인천	강릉	목포	여수	제주	서귀포	부산	진주
결측수	0	78	1461	1	52	3	2192	0	0	3	12	27	9	3

올라가지만 전 14개 지점에서 공통으로 관측된 기간과 결측값을 고려하여 1970년도에서 2000년도 까지 31년간의 자료를 선택하였다(www.kma.go.kr). 이 기간 중에 결측자료의 수는 Table 3과 같으며 약간의 결측값이 있는 지점은 내삽으로 처리하였으며 수원지점은 1991-1994년, 인천 지점은 1991-1996년의 장기간 결측값이 있어 연평균값으로 대체하여 분석하였다.

14개 관측지점 중 9개 관측지점은 해안지역에 위치하며 나머지 5개 관측지점은 내륙지역에 위치한다.

기상청에서는 두 가지의 다른 모형의 펜을 이용하여 관측하는데 하나는 소형펜(지름 20 cm, 깊이 10 cm) 이고 또 다른 하나는 대형펜(지름 120 cm, 깊이 25 cm) 이다. 소형펜과 대형펜이 동시에 설치되어 있는 관측 지점은 관측이 일정하거나 지속적이지 않으며 많은 지점에서 소형펜만 설치되어 있어(앞서 언급하였듯이 전 세계적으로 대형펜이 널리 이용되고 있으나 우리나라에서 대형펜에 대한 관측을 소홀히 하고 있는 이유를 저자는 알 수 없음) 이 연구에서는 소형펜으로 관측된 팬증발량 값을 사용하였다.

Table 4은 이 연구에 사용된 14개의 관측 지점에 대한 제원을 보여준다. 대부분의 지점이 대도시에 해당하며 제주

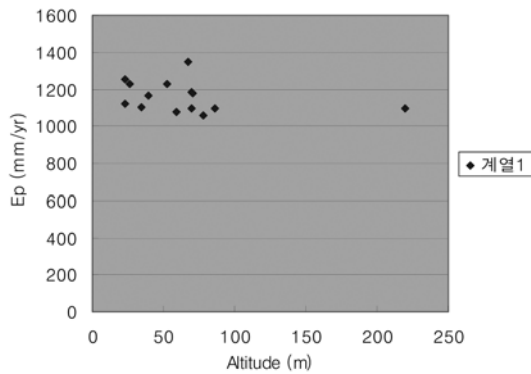
도의 2개 관측소와 울릉도의 관측소와 같은 섬에 위치한 관측소 또 강릉, 인천, 부산, 여수와 같은 해안 도시가 다수 포함한다. 해발고도는 진주 지점이 22.6 m로 가장 낮으며 울릉도 관측소가 219.9 m로 가장 고지대에 위치한다. 관측값 중에서 비현실적으로 지나치게 큰 값(예: >10 mm/day)은 결측값으로 처리하여 연구에서 제외시켰으며 이들 값들은 앞서 언급한 듯이 내삽으로 처리하였다. 이 연구에서는 전체 연구 기간 중 일관측값을 연평균값으로 산정하였다.

#### 4. 연구 결과

1970년도부터 2000년도까지 시간의 함수로 이루어진 14개 지점의 팬증발량의 증감 추세는 지점에 따라 달리 나타난다. 14개 지점 중 11개 지점에서 감소 추세를 보이는데 뚜렷한 지역적 분포는 찾아볼 수 없으며 또한 고도에 대한 분포도 Fig. 1에서 보듯이 일정한 경향을 보이지는 않는다. 고도가 높으면 일반적으로 온도와 기압이 낮고 일사량이 높으나 증발산량은 이들 기상조건의 조합으로 인해 영향을 받으므로 지역적인 지형과 식생의 분포 및 종류에 의해서도 동역학적인 영향을 미치므로 일정한 패턴을 가지리라고는

**Table 4.** The characteristics of station and annual evaporation rate

Station	Latitude (°E)	Longitude (°N)	Altitude (m)	Annual Evaporation Rate (mm/yr)	Annual Evaporation Change ((mm/yr)/yr)	Remarks
춘천	127.74	37.90	77.7	1059	-2.6	내륙지방 평균
서울	126.97	37.57	86.2	1093	-0.9	1.증발산량
수원	126.99	37.27	34.8	1103	-1.9	1,085(mm/yr)
청주	127.44	36.64	59.2	1075	+2.9	2.연변화량
대전	127.37	36.67	69.4	1095	-1.6	-0.82([mm/yr]/yr)
울릉도	130.90	37.48	219.9	1094	-3.2	
인천	126.63	37.47	70.3	1176	-5.1	
강릉	128.89	37.75	26.5	1228	-4.8	해안지방 평균
목포	126.38	34.81	39.0	1168	-7.2	1.증발산량
여수	127.74	34.74	67.3	1346	+3.7	1,200(mm/yr)
제주	126.53	33.5	22.6	1253	-1.8	2.연변화량
서귀포	126.57	33.25	52.4	1230	-3.1	-2.47([mm/yr]/yr)
부산	129.03	35.10	69.9	1186	-3.1	
진주	127.12	35.20	22.6	1121	+2.4	



**Fig. 1.** The pan evaporation rate versus altitude.

기대되지 않는다.

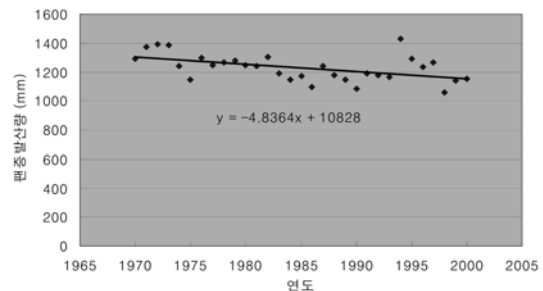
Table 4에서 연평균 증발산량값은 여수에서 1,346 mm로 가장 크게 나타나며 춘천에서 1,059 mm로 가장 작게 나타난다. 연변화율은 1차 추세선에 의하여 결정된 값으로 목포 지점이 연간 -7.2 mm/yr로 가장 크게 감소하는 것으로 나타났으며 여수 지점에서 연간 +3.7 mm/yr로 가장 큰 증가량을 보였다. 지역별로는 여수, 청주, 진주에서는 연간 3.7, 2.9, 2.4 mm/yr씩 증가하는 경향을 보여주었으며 나머지 지역은 감소하는 것으로 나타났다. 연평균증발산량의 값은 내륙지방에 비하여 해안지방에서 10% 가량 큰 값을 보이는 것으로 나타났으며, 증발산량의 연변화량은 내륙지방의 연간 -0.82 mm/yr에 비하여 해안지방에서 연간 -2.46 mm/yr로 훨씬 빠르게 감소하는 경향을 보였다. 2-표본 t 테스트는 두 개의 표본 그룹으로 이루어진 독립변수의 평균을 비교할 때 적합하여 가장 널리 사용되는 방법(Maidment, 1993)으로서

다음과 같이 t-통계량을 구한다.

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n'} + \frac{s_y^2}{m'}}} \tag{2}$$

여기에서  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $s_x$ ,  $s_y$ ,  $n'$ ,  $m'$ 은 내륙지방의 평균, 해안지방의 평균, 내륙지방의 표준편차, 해안지방의 표준편차, 내륙지방의 자료의 크기, 해안지방의 자료의 크기를 나타내며, 각각 1085 mm, 1200 mm, 96.24 mm, 116.59 mm. 155개, 27개로 주어진다. 99%의 유의 수준에서 내륙지방과 해안지방의 연평균 증발량값은 서로 다른 것으로 나타난다.

Fig. 2~4는 각각 강릉, 인천, 목포 지역에 대한 증발량의 시간에 따른 변화를 보여준다. Table 4와 Fig. 2~4에서 보듯이 강릉, 인천, 목포는 증발량이 시간에 따라 뚜렷한 감소 추세를 보여주는 지역으로서 기울기가 각각 -4.8, -5.1, -7.2이다.



**Fig. 2.** The pan evaporation rate change in Gang-Reung.

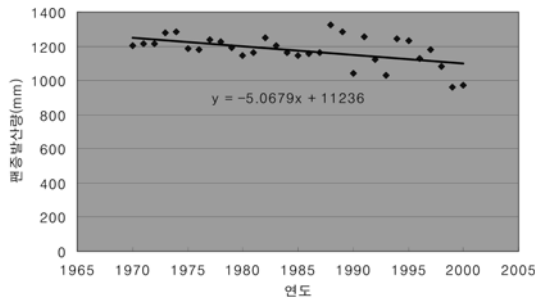


Fig. 3. The pan evaporation rate change in In-cheon.

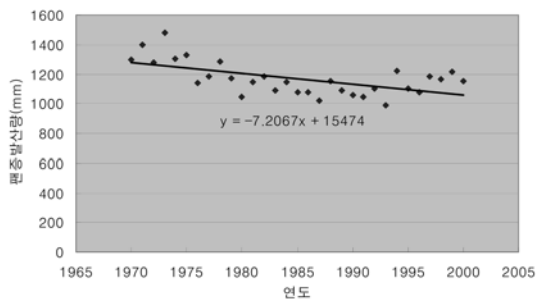


Fig. 4. The pan evaporation rate change in Mokpo.

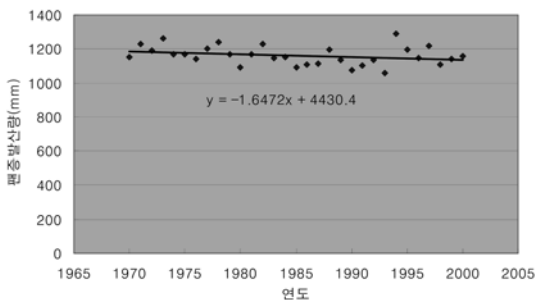


Fig. 5. The national average of pan evaporation rate(Average of 14 points) change.

14개 지점에 대한 관측값은 같은 기간인 1970년도에서 2000년도까지를 일정하게 추출하였다. 그래서 전체 14개의 지점에 대한 개략적인 증감 경향을 보여주기 위하여 동시에 각 지점에 대한 값을 더하여 평균을 구한 후 1차 추세선을 구하였다. 그 결과 연변화율이 -1.6 mm/yr로 이는 전세계적으로 일반적인 감소값인 연간 -2.0 mm/yr와 비슷한 값을 보여주었다. Fig. 5의 전국 평균값에 대한 1차 추세선에서는 기울기가 -1.6으로 나타났다.

1차 추세선으로는 팬증발량의 증감추세를 확인하기에는 충분하지가 않으므로 팬증발량의 시간에 따른 증감을 확인하기 위하여 이 연구에서는 Mann-Kendall Trend Test(이하

MK 테스트라 한다)(Kendall, 1938; Hirsh et al., 1982; Hirsh and slack, 1984; Helsel and Hirsch, 1992)를 실시하였다. MK테스트는 변화 경향 추세를 위해서 가장 많이 이용하는 기법으로 시계열 강우, 하천 유량, 수질의 변화 추세를 판단하는데 널리 이용된다(Hamed and Rao, 1998). MK테스트는 변화 추세에 따라 단지 -1, 0, 1(예: 감소, 유지, 증가)의 부호값으로만 평가하므로 이상값(outlier)이 존재한다 하더라도 정상적인 값과 같이 -1, 0, 1 만이 부여되므로 결과에 영향을 거의 미치지 않는다는 장점이 있으며, 다음과 같이 실시되었다.

연구 대상 기간인 1970년에서 2000년까지에서 해당 년도의 연평균 팬증발량은 일련의 벡터 형태로 나타나며, 이러한 벡터 형태의 연평균 팬증발량은 연도 순으로(예: 1970=1150mm, 1971=1231 mm, 1972=1188 mm, ..., 2000=1155 mm) 정렬이 된다. 다음으로 MK의 통계값 S는 다음의 식으로부터 계산된다.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(P_i - P_j) \tag{3}$$

여기에서

$$\text{sign}(P_i - P_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } P_i > P_j \\ 0 & \text{if } P_i = P_j \\ -1 & \text{if } P_i < P_j \end{cases} \tag{4}$$

또  $i$ 와  $j$ 는 해당연도를 나타내는 인자이다.

S값이 크다는 것은 팬증발량의 증감을 판단한 결과가 일관성이 크다는 것을 의미한다. 또 변수 Var를 계산한 후 테스트 통계값(Z)을 다음과 같이 계산할 수 있다. 팬증발량의 테스트는 표준 정규분포 유의수준 95%에서 실시되었으며, 각 지점의 테스트 통계값과 증감 추세 결과는 Table 5에서 보여준다.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{5}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } P_i < P_j \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \tag{6}$$

여기에서  $n$ 은 자료측정 기간을 나타내며 이 연구에서는 31년이 사용되었다.

청주 지역은 1차 추세선에 의해서는 약간의 증가(기울기 +2.9)를 보여주고 있으나 MK테스트에서는 미미하게 감소추세를 보여준다. 이것은 청주 지역의 자료에서 이상치의 영향

**Table 5.** The Result of Mann-Kendall Trend Test(유의수준 95%에서 실시된 각 지점의 테스트 통계값과 증감 추세결과. “감소” 또는 “증가”는 유의수준 95%에서의 감소 또는 증가를 의미하며 “미미한 감소 또는 미미한 증가”는 95%보다 작은 유의수준에서의 증감을 의미한다.)

Station	S (식3)	Var(S) (식5)	Z (식6)	Annual Evaporation Rate (mm/yr)	Variation
춘천	89	3461	1.50	1059	미미한 감소
서울	67	3461	1.12	1093	미미한 감소
수원	95	3461	1.60	1103	미미한 감소
청주	35	3461	0.58	1075	미미한 감소
대전	47	3461	0.78	1095	미미한 감소
울릉도	101	3461	1.70	1094	미미한 감소
인천	161	3461	2.72	1176	감소
강릉	173	3461	2.92	1228	감소
목포	159	3461	2.69	1168	감소
여수	-61	3461	-1.02	1346	미미한 증가
제주	43	3461	0.71	1253	미미한 감소
서귀포	113	3461	1.90	1230	미미한 감소
부산	119	3461	2.01	1186	감소
진주	-65	3461	-1.09	1121	미미한 증가
평균값	103	3461	1.73	1121	미미한 감소

으로 1차 추세선과 MK테스트의 결과가 서로 다르게 나타난 것으로 추측되나 전반적인 경향 분석에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 나머지 지역의 분석결과는 추세선 분석에 의한 결과와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

## 5. 결론 및 요약

최근의 기후 상승에 따른 실제 증발량의 증가 기대에도 불구하고 여러 연구 결과는 전 세계에 걸쳐 증발량이 감소하는 추세를 보여주었다. 우리나라에서 이러한 현상을 확인하기 위하여 이 연구에서는 1970년도에서 2000년도에 걸쳐 신뢰성이 상대적으로 높은 14개 관측지점의 증발량을 선정하였으며 이들 지역의 증발산량과 그 변화량을 내륙지역과 해안지역으로 구분하여 비교하였다. 1차 추세선 분석을 한 결과 청주, 여수, 진주를 제외한 11개 지점이 감소하는 추세를 보여주었으며 14개 지점의 총 평균에서는 연간 1.6 mm/yr 감소하는 추세를 보여주었다. 연평균증발산량의 값은 내륙지방에 비하여 해안지방에서 10% 가량 큰 값을 보이는 것으로 나타났는데, 이는 증발에 미치는 기상 조건이 해안과 내륙이 서로 다르기 때문인 것으로서 미국이나 유럽의 관측 결과에서도 같은 결과를 보여주고 있으며 증발산량 공식의 검토정시에도 해안과 내륙을 서로 분리하여 다른 매개변수를 적용하는 것이 합리적이다. 증발산량의 변화량은 내륙지방의 연간 -0.62 mm/yr에 비하여 해안지방에서 연간 +2.46 mm/yr로 훨씬 빠르게 감소하는 경향을 보

였다. Mann-Kendall trend test 결과는 95% 유의수준 내에서 4개 지점이 감소를 보여주며 10개 지점은 변하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 전 지역에 대한 평균값은 감소 추세를 보이는 것으로 나타났다. 이 연구에서 보여준 결과는 외국에서 이루어진 다양한 기존 연구와 일치하며 우리나라도 증발발량이 적어도 1970년 이후에는 감소하는 추세를 보이는 것으로 나타났다.

이 연구는 앞으로 우리나라 기후변화에 따른 다양한 해안지역의 환경 변화, 수문-수자원, 농업 및 기상 변화 연구 등에 기여할 것으로 기대한다. 또한 이와 동시에 여러 기상 인자들을 이용한 실제 증발산량의 변화를 산정하여 물의 순환 과정이 어떻게 변화하는지를 규명하는데 도움이 될 것이며, 가까운 미래에 닥칠 해양 생태계의 변화, 우리나라 수자원의 재분배 그리고 온도 변화에 따른 농작물의 지역적 이동 등에 대한 연구에도 크게 도움이 될 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Abakumova, G.M., Feigelson, E.M., Russak, V and Stadnik, V.V. (1996). Evaluation of long-term change in radiation,

- cloudiness, and surface temperature on the territory of the former Soviet Union. *Journal of Climate*, 9, 1319-1327.
- Brutsaert, W. and Parlange, M.B. (1998). Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 396, 30-30.
- Bouchet, R.J. (1963). Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 62, 134-142.
- Chattopadhyay, N. and Hulme M. (1997). Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 55-73.
- Gilgen, H., Wild, M. and Ohmura, A. (1998). Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. *Journal of Climate*, 11, 2042-2061.
- Golubev, V.S., Laerimore, J.H., Groisman, P.Y., Speranskaya, N.A., Zhuravin, S.A., Mennin, M.J., Peterson, T.C., and Malone, R.W. (2001). Evaporation changes over the contiguous United State and the former USSR. a reassessment. *Geophysical Research Letters*, 28, 2665-2668.
- Hamed, K.H. and Rao, A.R., (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data, *Journal of Hydrology*, 204(1), 182-196.
- Helsel, D.R. and Hirsch, R.M., (1992). *Statistical methods in water resources*. Amsterdam, Elsevier Publishers, p529.
- Hirsch, R.M., and Slack, J.R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20, 727-732.
- Hirsch, R.M., Slack, J.R., and Smith, R.A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18, 107-121.
- Kendall, M.G. (1938). A new measure of rank correlation, *Biometrika*. 30, 81-93.
- Liu, B., Xu, M., Henderson, M. and Gong, W. (2004). A spatial analysis of pan evaporation trends in China 1955-2000. *Journal of Geophysical Research*, 109, D15102doi, 10.1029/2004JD004511.
- Maidment, D.R. (1993). *Handbook of Hydrology*, McGraw-hill Inc.
- Morton, F.I. (1965). Potential evaporation and river basin evaporation. *Journal of Hydraulic division, Proceedings of ASCE*, 92(HY6), 67-97.
- Peterson, T.C., Golubev, V.S., Groisman P.Y. (1995). Evaporation losing its strength. *Nature*, 377, 687-688.
- Rodeck, M.L. and Farquhar, G.D. (2004). the cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 years. *Science*, 298, 1410-1411.
- Rodeck, M.L. and Farquhar, G.D. (2004). Changes in Australian pan evaporation from 1970-2002. *International Journal of Climatology*, 24, 1077-1090.
- Rodeck, M.L. and Farquhar, G.D. (2005). Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970's. *International Journal of Climatology*, 25, 2031-2039.
- Szilagyi, J. (2001). On Bouchet's complimentary hypothesis. *Journal of Hydrology*, 246, 155-158.
- Tebakari, T., Yoshtani, J. and Suvanpimol, C. (2005). Time-space trend analysis in pan evaporation over kingdom of Thailand. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10, 205-215.

---

Received March 12, 2007

Accepted June 4, 2007



부록 1. 연구에 사용된 연평균 팬증발량 (1/10 mm)

연도	춘천	강릉	서울	인천	울릉도	수원	청주	대전	부산	목포	여수	제주	서귀포	진주
1970	10467	12882	10592	12051	9870	11479	10313	10477	11335	12963	13692	12328	11627	10863
1971	10587	13755	11133	12132	11919	11194	10442	10319	12880	13989	14848	14139	13105	11945
1972	10790	13914	11287	12164	11345	12019	10036	10643	11928	12789	13174	14578	10616	11028
1973	11054	13879	11290	12789	12089	12614	11194	11736	13204	14809	14210	12690	12969	12225
1974	10139	12438	10871	12863	11558	11999	10120	10341	11914	13059	12914	11069	13537	10548
1975	10121	11469	11633	11849	10996	12644	10576	10841	11965	13282	13425	11446	13222	10506
1976	11053	13004	10908	11776	11033	11106	10501	11384	11882	11422	12420	10946	12563	9916
1977	11990	12481	12102	12360	12040	11132	11633	11779	12223	11841	13441	12351	12466	10743
1978	11201	12647	11301	12273	12504	9485	11105	12497	13222	12856	14168	14755	13828	11543
1979	10758	12792	10935	11895	10788	10840	10122	11824	11976	11733	13130	13246	12791	10466
1980	10913	12499	10450	11465	10126	10681	9354	10856	11065	10448	11570	11814	12285	9323
1981	10785	12416	10175	11608	11283	10808	9859	11467	12775	11450	12747	13354	13284	11802
1982	11573	13052	12086	12500	12520	11360	11732	12294	12365	11869	13021	12914	13018	11663
1983	10653	11881	10565	12048	12093	10422	10865	11189	11643	10913	12497	12512	11643	11372
1984	10841	11493	10887	11616	10960	10654	10631	10936	12440	11445	12854	12497	12577	11625
1985	10334	11689	9644	11450	10288	10445	10248	10379	11420	10769	11944	12241	11842	10271
1986	9773	10959	10018	11593	10267	10485	9991	10839	12405	10769	12732	12371	12217	10804
1987	11634	12407	10196	11639	11224	10473	10833	10012	11369	10204	11876	11884	11374	10772
1988	11744	11786	11434	13269	10097	11374	11731	11378	12161	11546	13523	12438	13954	11310
1989	11191	11478	10661	12820	10239	10882	11085	10824	11044	10890	13098	12048	11715	10903
1990	8752	10834	8805	10428	10566	9566	10064	9396	11606	10605	13356	13201	11840	11162
1991	10674	11879	0	12580	9557	10444	0	9828	10636	10482	12662	11446	11104	10939
1992	9262	11792	0	11218	9157	10458	0	10678	11498	11032	14173	12747	12431	11893
1993	9505	11632	0	10283	8887	10331	0	9684	10199	9870	12700	12108	10997	11100
1994	11238	14271	0	12415	11019	11720	0	11952	12959	12209	15650	13910	13287	14059
1995	9991	12925	11481	12314	11049	10234	0	12044	11447	11007	15622	12555	12400	12237
1996	10043	12322	11392	11270	10256	9622	0	11498	11784	10741	13982	12530	11684	12058
1997	10296	12658	11749	11820	12411	12225	11982	12143	11981	11870	14994	12730	12107	11826
1998	10056	10569	10839	10793	10932	10982	10907	9984	11166	11637	13463	11813	10922	10823
1999	10536	11405	11662	9596	11345	12273	12009	10603	11756	12177	13969	11412	10404	10659
2000	10309	11550	11002	9728	10680	12016	11391	9634	11431	11537	15515	12489	13463	11000