

우리나라 증발접시 증발량과 Penman 증발량 추세 비교분석

Comparisons of the Pan and Penman Evaporation Trends in South Korea

임창수*

Rim, Chang-Soo

Abstract

The effects of geographical and climatic factors on annual and monthly pan and Penman evaporation were analyzed. 52 climatological stations were selected and trend analyses were performed. Furthermore, cluster analysis and multiple linear regression analysis were performed to understand the effects of geographical and climatic factors on pan and Penman evaporation. Based on stepwise multiple linear regression analysis, annual pan evaporation is proved to be mainly controlled by urbanization as geographical factor, and annual pan evaporation is also controlled by temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation as climatic factor. Especially wind speed is considered to be most significant climatic factor which affects pan evaporation. Meanwhile, Penman evaporation is not affected by geographical factors but it is affected by climate factors such as temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation except precipitation. Furthermore, the study results show that only proximity to coast affects pan evaporation trend on July; however, geographical and climatic factors do not affect pan evaporation trends in annual basis and monthly basis (January, April, and October). On the other hand, Penman evaporation trends were not affected by geographical factors in annual and monthly bases.

Keywords : Pan evaporation, Penman evaporation, Trend analysis, Geographical characteristics

요 지

본 연구에서는 연 및 월별 기후요소와 지역특성이 증발접시 증발량과 Penman 증발량에 미치는 영향 차이를 분석하였다. 이를 위하여 우리나라 전국 52개 기상관측지점에서 관측된 연 및 월별 기후자료를 수집하여 추세분석을 실시하였고, 다변량 회귀분석 등을 실시하여 연구지역의 지리적 요소와 기후요소가 증발접시 및 Penman 증발량에 미치는 영향을 비교분석하였다. 단계입력방식의 다변량회귀분석 결과에 의하면 년별 증발접시 증발량의 경우 지리적 요소로서 도시화율이, 기후요소로서 기온, 습도, 풍속, 일사량 등이 포함되어 이들 지리적 및 기후요소의 영향을 받는 것으로 나타났고, 풍속에 의해서 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 한편 Penman 증발량은 지리적 요소가 회귀식에 포함되지 않아서 지리적 요소의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으나, 강수량을 제외한 다른 기후요소(기온, 습도, 풍속, 일사량)가 회귀식에 포함되어 이들 기후요소에 의해서 유의한 수준에서 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 풍속에 의해서 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 증발접시 증발량 추세의 경우 7월에 지리적 요소로서 해안근접성이 회귀식에 포함되어 증발접시 증발량 추세에 영향을 미치는 것으로 나타났지만 연별 및 다른 계절에서는 지리적 요소 및 기후요소가 회귀식에 포함되지 않아서 증발접시 증발량 추세에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 한편 Penman 증발량 추세는 년별 및 월별 모두에서 지리적 요소가 회귀식에 포함되지 않아서 이들 지리적 요소에 의해서 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 증발접시 증발, Penman 증발, 추세 분석, 지역특성

1. 서 론

기후변화는 증발과 같은 수문기후요소에 직접적인 영향을 주고, 지구온난화는 인류에게 꼭 필요한 수자원의 양적변화에 심각한 영향을 줄 것으로 예상된다(IPCC, 2007). 또한 기후변화뿐만 아니라 지리지형적 특성도 수문순환과정에서 중요한 요소 중의 하나인 증발량에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Roderick와 Farquhar, 2002; Hobbins 등, 2004; Liu 등, 2004; Ozdogan과 Salvucci, 2004). 이러한

기후요소와 지역의 지리지형적 특성이 증발에 미치는 영향을 파악하는 것은 수자원 관리 측면에서 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서는 기후요소와 지역의 지리지형적 특성에 따른 우리나라의 증발량 변화를 분석하고자 한다. 기후요소와 지역의 지리지형적 특성에 따른 증발량변화를 파악하기 위하여 실측 증발량 자료인 증발접시 증발량과 Penman 증발량을 비교분석하였다.

과거에 수행된 기후요소가 증발량에 미치는 영향연구를 검토한 결과 Mckenny와 Rosenberg(1993)는 증발접시 증발량

*정회원 · 경기대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : csrim@kyonggi.ac.kr)

과 Penman 증발량 변화에 미치는 기후요소들의 영향력이 다르다고 발표한 바 있다. 또한 Cohen 등(2002)이 이스라엘 Bet Dagan에서 수행한 연구결과에 의하면 증발접시 증발량은 작지만 통계학적으로 유의한 수준에서 시간적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 증가요인은 주로 수증기압 부족분과 풍속의 증가에 기인한다고 결론지었다. 한편 Penman식에 의해서 산정된 증발량은 변화가 없는 것으로 나타났는데 이는 Penman식의 입력자료 중의 하나인 일사량 감소영향이 수증기압 부족분과 풍속의 증가 영향과 상쇄되기 때문이라고 하였다. Ozdogan과 Salvucci(2004)는 터키에서 수행된 연구에서 증발접시 증발량의 시간적 감소는 풍속의 감소가 주요 원인이라고 하였다. Chattopadhyay와 Hulme (1997)은 인도에서 수행된 연구결과에서 상대습도가 pre-monsoon기간과 monsoon 기간 중에 증발접시 증발량 변화에 가장 큰 영향을 미치는 기후요소이며, 증발접시 증발량과 마찬가지로 Penman 증발량도 특히 겨울철과 monsoon기간 이전의 상대습도 변화에 매우 밀접한 영향을 받는다고 발표하였다. Burn과 Hesch(2006)는 캐나다 평원에서 수행된 연구결과에서 증발접시 증발량은 남부지역의 경우 시간적으로 감소추세를 보이고, 북부지역의 경우 시간적으로 증가추세를 보인다고 발표하였다. 또한 기후요소 중에서 풍속은 증발접시 증발량의 감소추세에 더 큰 영향이 있으며, 증기압 부족분은 증가추세에 더 큰 영향이 있다고 발표하였다.

Brutsaert와 Palange(1998)는 강수량이 시간적으로 증가함에 따라서 실제증발량은 증가하고, 따라서 일사량의 감소와 대기 중의 습도가 증가됨에 따라서 증발접시 증발량은 감소한다고 주장한 바 있다. 이는 증발접시 증발량과 실제증발량 사이에 상호보완관계(complimentary relationship)가 적용될 수 있다는 것을 의미한다(Lawrimore와 Peterson, 2000; Golubev 등, 2001; Hobbins 등, 2004). 또한 Ramirez와 Hobbins(2005)는 미국 25개 구역에서 수행된 연구에서 강수량이 변함에 따라서 실제증발량과 증발접시 증발량 그리고 Penman 증발량사이에는 상호보완관계가 있음을 밝혔다. 반면에 전 세계적으로 관찰되고 있는 증발접시 증발량의 시간적 감소추세는 하늘을 덮고 있는 구름 양의 비율(전운량)이 증가하고 도시화에 따른 대기오염으로 인한 에어로졸의 증가에 의해서 일사량이 감소하기 때문이라는 연구결과가 발표된 바 있다(Petersen 등, 1995; Cohen 등, 2002; Roderick와 Farquhar, 2002; Liu 등, 2004).

과거 도시화가 기후변화에 미치는 영향에 대한 연구결과에 의하면 도시화는 도시기온을 상승시키는 반면에 풍속과 상대습도 그리고 안개일수와 일조시간을 감소시키는 것으로 보고된 바 있다(Bornstein과 Johnson, 1977; Yague 등, 1991; Chow, 1992). 또한 Dow와 DeWall(2000)은 미국 51개 구역에서 도시화와 실제증발산량간의 상관관계를 분석한 결과, 도시화가 진행됨에 따라서 실제증발산량이 시간적으로 감소하고 있음을 발표하였다. Adebayo(1991)는 나이지리아 열대지역인 이바단시 도시지역의 경우 시골지역보다 증발접시 증발량이 더 큰 값을 보인다고 발표하였으며, Balling과 Brazel(1987)은 건조기후지역인 미국 피닉스에서 증발접시 증발량의 시간적 증가는 기온과 풍속의 증가가 원인이라고 발표하였다. Jauregui와 Luyando(1998)는 멕시코에서 수행된

연구에서 건조한 기후조건인 도시와 습한 기후조건인 도시 사이에 증발량을 비교한 결과 건조한 도시지역이 습한 도시지역보다 더 큰 증발량을 보인다고 발표하였다. 우리나라에서는 기후자료와 대형증발계와 소형증발계를 이용한 증발량 추세분석 연구에서 도시화지역이 비도시화지역보다 강수량과 기온은 시간적 증가추세를 보이고 있으며, 도시화 정도가 큰 지역의 경우 더 큰 증가추세를 보이고, 대형증발계 증발량은 감소추세를 보이고 있다고 발표한 바 있다(김광섭과 임태경, 2005, 2006). 정대일과 강재원(2009)이 증발에 미치는 영향 인자와 증발접시 증발량 추세와의 상관성을 분석한 바 있다.

과거 수행된 연구들에 대해서 검토한 결과 대부분의 경우 일부 한정된 지역의 관측자료를 이용하여 지역적 특성에 따른 국지적인 증발량변화를 분석하거나, 혹은 구체적인 지역적 특성자료를 고려하지 않고 기후변화에 따른 증발량 변화에 대하여 연구를 수행하였다. 또한 단지 지역특성이나 기후요소가 증발접시 증발량에 미치는 영향이나 혹은 Penman 식을 이용한 증발량에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 다양한 지역적 특성을 반영하지 않고 제한된 수의 연구지역을 적용하여 증발량 변화를 분석하거나 혹은 지역적 특성을 고려하지 않고 기후변화와 증발량의 상관성을 분석하는 것은 연구결과를 일반화하는데 오류를 범할 수 있다. 또한 지역특성이나 기후요소가 증발접시 증발량에 미치는 영향만을 분석하는 것보다는 기후물리학적으로 입증된 Penman 증발식을 동시에 적용하여 분석함으로써 수문학적 분석에 활용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 다양한 지리 및 지형적 특성과 기후요소가 증발접시 증발량과 Penman 증발량에 미치는 영향을 비교분석하였다.

2. 연구 방법

연구지역을 선정하기 위하여 기후관측지점을 중심으로 반

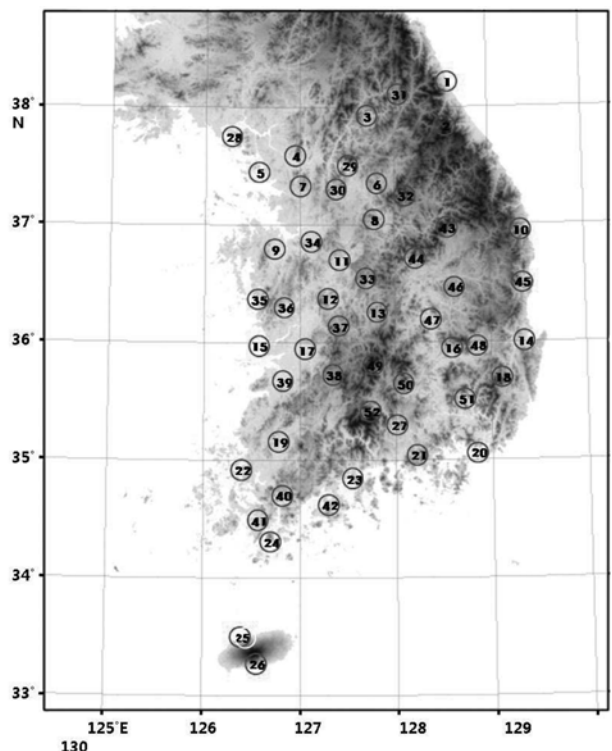


그림 1. 52개 연구지역

표 1. 52개 연구지역의 지리적 특성

연구지역 (No.)	표고 (m)	지리적 특성에 따른 분류				
		지리적 위치	도시화율 (%)		담수면적 (%)	
			육지 비율 (%)	6년 평균	4년 평균	6년 평균
속초 (1)	115.0	53	3.52	2.24	0.71	0.7
대관령 (2)	654.8	100	0.26	0.24	0.27	0.27
춘천 (3)	212.5	100	5.63	4.44	6.67	6.74
서울 (4)	69.6	100	51.23	47.29	6.15	6.35
인천 (5)	26.3	61	36.67	29.33	13.71	18.81
원주 (6)	295.3	100	3.07	1.61	0.2	0.19
수원 (7)	72.6	100	12.96	8.8	1.18	1.28
충주 (8)	182.3	100	3.43	2.75	7.04	7.04
서산 (9)	52.7	100	3.71	2.55	2.49	3.07
울진 (10)	105.0	51	1.46	1.21	0.75	0.81
청주 (11)	83.2	100	8.33	6.18	1.35	1.66
대전 (12)	112.8	100	15.32	12.97	0.61	0.65
추풍령 (13)	317.6	100	0.4	0.33	0.25	0.26
포항 (14)	51.2	74	8.02	5.73	2.99	3.47
군산 (15)	15.7	80	9.78	7.59	7	7.39
대구 (16)	110.9	100	17.67	14.48	1.27	1.27
전주 (17)	107.4	100	8.75	7.59	1.01	1.03
울산 (18)	77.9	100	4.69	2.29	1.72	1.88
광주 (19)	84.9	100	13.59	10.29	1.3	1.31
부산 (20)	85.8	63	32.51	29.12	6.26	7.33
통영 (21)	80.7	56	2.07	1.53	4.09	4.84
목포 (22)	23.9	56	9	5.31	13.98	17.22
여수 (23)	106.3	41	10.3	8.24	2.33	3.07
완도 (24)	91.7	59	3.17	2.17	6.78	8.15
제주 (25)	177.2	53	10.93	7.35	0.41	0.54
서귀포 (26)	270.1	52	5.24	2.93	0.35	0.47
진주 (27)	72.4	100	3.04	2.36	2.18	2.13
강화 (28)	58.1	86	4.16	3.8	1.52	1.47
양평 (29)	204.0	100	0.81	0.63	2.9	2.9
이천 (30)	79.9	100	2.63	1.56	0.03	0.03
인제 (31)	488.1	100	0.97	0.69	2.1	2.67
제천 (32)	365.3	100	2.89	2.59	0.16	0.16
보은 (33)	269.7	100	1.86	1.52	0.38	0.38
천안 (34)	87.3	100	5.63	4.26	0.69	0.68
보령 (35)	81.8	69	5.66	5.04	4.26	4.97
부여 (36)	43.8	100	4.42	3.09	2.88	2.93
금산 (37)	253.8	100	3.03	2.37	0.37	0.42
임실 (38)	271.4	100	1.88	0.54	0.61	0.66
정읍 (39)	123.2	100	3.99	3.37	0.62	0.57
장흥 (40)	153.7	100	2.29	1.68	0.81	0.85
해남 (41)	69.0	100	2.56	2.28	8.36	10.86
고흥 (42)	81.3	76	3.59	2.76	2.49	3.04
영주 (43)	458.1	100	0.48	0.29	0.15	0.11
문경 (44)	215.0	100	0.90	0.71	0.36	0.31

표 1. 계속

연구지역 (No.)	표고 (m)	지리적 특성에 따른 분류				
		지리적 위치	도시화율 (%)		담수면적 (%)	
			육지 비율 (%)	6년 평균	4년 평균	6년 평균
영덕 (45)	119.0	63	0.31	0.33	0.74	0.71
의성 (46)	178.2	100	0.36	0.26	0.32	0.25
구미 (47)	132.2	100	2.22	1.4	1.6	1.69
영천 (48)	124.6	100	0.66	0.39	0.86	0.79
거창 (49)	363.8	100	0.26	0.22	0.17	0.15
합천 (50)	150.7	100	0.18	0.12	1.52	1.54
밀양 (51)	137.2	100	1.08	0.95	1.15	1.16
산청 (52)	368.9	100	0.18	0.09	0.43	0.5

*육지비율은 연구지역의 총 영향권 면적(314 km²) 중 육지면적에 해당하는 비율을 의미함.

경 10 km(314 km²)의 영향권역 52곳을 선정하였다. 선정된 52개의 연구지역은 우리나라 전역에 걸쳐서 해안 및 내륙지역에 고르게 위치하고 있으며, 또한 평야, 산악, 호소 등의 지역에 고르게 분포하고 있다(그림 1, 표 1). 지리 및 기후 특성이 증발접시 및 Penman 증발량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기후자료(증발접시 증발량, 강수, 기온, 습도, 풍속, 최고기온, 최저기온, 가조시간)의 경우 서울을 포함하여 전국 52개 기후관측지점에서 1973년부터 1990년까지의 자료를 수집하여 분석을 실시하였다.

지리 및 기후 특성이 증발접시 및 Penman 증발량 추세에 미치는 영향을 분석하기 위하여 가능하면 여러 관측지점에서 장기간의 증발접시 증발량과 Penman 증발량의 추세 비교 분석을 하는 것이 바람직하나 증발접시 증발량 자료의 경우 대부분의 기후관측지점에서 1991년 이후 관측이 수행되지 않아 1991년 이후에도 증발접시 증발량 관측자료가 가용한 11개 연구지역(춘천, 서울, 인천, 수원, 대전, 부산, 목포, 여수, 제주, 서귀포, 진주)에 대해서 1973년부터 2006년까지의 기후자료를 수집하여 분석을 실시하였다. 본 연구에서 적용된 증발접시 증발량 자료는 원자료를 적용하였다.

연구지역의 선정 및 분류를 위하여 국가수자원관리 종합정보시스템에서 제공되고 있는 자료를 활용하여 2004년 수치표고자료에 대한 분석을 실시하였고, 1975년도부터 2000년도까지 6개년도(1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000년)에 대한 토지피복도를 분석하였다. 1975년도 및 1980년도의 경우 Landsat MSS를 이용한 자료이며, 1985년도, 1990년도 및 1995년도의 경우 Landsat TM, 그리고 2000년도의 경우에는 Landsat ETM을 이용하여 분석된 자료이다(임창수와 채효석, 2007). 연구 지역의 도시화정도를 판단하기 위하여 토지이용현황을 분석하였고, 52개 지역에 대해서 GIS분석을 이용하여 토지이용조건과 지역 평균고도자료 등을 분석한 결과를 바탕으로 연구지역을 분류하였다. 1973년부터 1990년까지의 도시화율은 4개년도(1975, 1980, 1985, 1990년) 도시화율의 평균치를 이용하였고, 1973년부터 2006년까지의 분석을 위하여 6개년도(1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000년) 도시화율의

평균치를 이용하였다. 도시화율을 산정하기 위하여 반경 10 km 이내에 위치한 주거지역의 면적을 육지면적으로 나눈 값을 도시화율로 결정하였다(임창수와 채효석, 2007). 표 1에서 언급된 육지비율은 연구지역의 총 영향권 면적(314 km²) 중 육지면적에 해당하는 비율을 의미한다. 표 1의 담수면적 비율은 육지면적에 대한 담수면적의 비율을 의미한다.

2.1 Penman 식

Penman 식은 수문기상분야에서 광범위하게 적용된 식으로써, Penman(1948)은 수표면으로부터 증발량 산정을 위하여 물리적 근거에 기초한 증발식을 개발하였다. Penman은 수표면에서 발생하는 순복사에너지와 증발표면 위의 공기유속임에 의한 증발효과를 고려하여 물리적 이론에 근거한 증발식을 제안하였다. Penman 증발식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_p = \frac{\Delta(R_n - S) + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

$$Q_n = Q_{ns} - Q_{nl} \quad (2)$$

$$Q_{ns} = (1 - \alpha) Q_s \quad (3)$$

$$Q_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{Q_s}{Q_{so}} - 0.35 \right) \quad (4)$$

$$Q_s = \left(0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) Q_n \quad (5)$$

$$Q_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} Z) Q_a \quad (6)$$

여기서, E_p 는 Penman식을 이용하여 산정된 증발량(mm/day), R_n 는 순방사(mm/day)이고 Allen 등(1998)에 의해서 제안된 방법을 적용하였으며, Q_n 는 순방사(MJ/m²/day), Q_{ns} 는 순단파복사량(MJ/m²/day), Q_{nl} 는 순장파복사량(MJ/m²/day), Q_s 는 입사태양복사량(MJ/m²/day), α 는 태양복사에너지의 반사율, Q_{so} 는 맑은 날 지구표면에 도달하는 태양복사에너지(MJ/m²/day), Q_a 는 지구 대기권에 도달하는 태양방사열량(MJ/m²/day), Z 는 해수면으로부터의 지반고(m), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, $T_{max,K}^4$ 는 24시간 동안 최대 절대 온도, $T_{min,K}^4$ 는 24시간 동안 최소 절대 온도, Δ 는 포화증기압과 온도곡선의 기울기(mb/°C), γ 는 건습계 상수(mb/°C). 여기서 S 는 증발접시 내부에서의 열저류향으로써 일평균이나 월평균 일 자료를 사용하는 경우 무시할 수 있다(Linacre, 1993; Valiantzas, 2006).

$$E_a = f(u_2)(e_s - e_a) = c(a + bu_2)(e_s - e_a) \quad (7)$$

$$f(u_2) = c(a + bu_2) \quad (8)$$

여기서 u_2 는 지상 2 m 높이에서 풍속(m/s), e_s 는 포화증기압(mb), e_a 는 실제증기압(mb), $(e_s - e_a)$ 는 대기의 포화증기압 부족량(mb), a , b 그리고 c 는 Penman(1956)에 의해서 저수지로부터의 증발을 고려한 경험적으로 얻어진 계수로서 ($a = 0.5$, $b = 0.54$, $c = 0.26$), E_a 는 건조력(drying power)항(mm/day)이다.

2.2 다변량 분석

증발접시 증발량과 Penman 증발량에 미치는 지리지형 및

기후요소의 중요성을 파악하기 위하여 다변량회귀분석을 수행하였다. 두 가지 다른 요소가 설명변수(독립변수)로 고려되었으며, 변수들은 지리지형적 요소(평균고도, 평균담수면적, 평균도시화율, 해안근접성)와 기후요소(기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 강수량)이다. 가장 큰 R² 값을 제공하는 증발접시 증발량과 Penman 증발량에 대한 다변량회귀식의 독립변수를 결정하기 위하여 종속변수(증발접시 증발량, Penman 증발량)와 독립변수(지리지형적 요소, 기후요소) 사이에 다변량회귀분석을 실시하였다. 다변량회귀식은 다음 식 (9)와 같이 나타내고

$$Y = A + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_k X_k \quad (9)$$

여기서 계수 A, B₁, B₂, ..., B_k는 모집단의 매개변수를 나타내고, B₁은 모든 다른 독립변수를 일정하다고 간주하고, 독립변수 X₁과 종속변수 Y 사이에 관계의 경사인 부분경사계수이다. B₁은 다변량회귀식의 다른 독립변수들이 일정한 경우 독립변수 X₁이 한 단위 증가에 따른 Y의 변화를 나타낸다. A는 회귀식의 절편으로서 독립변수가 0인 경우 Y의 값을 나타낸다. 이 연구에서 종속변수 Y는 증발접시 증발량과 Penman 증발량 그리고 그들의 추세를 나타낸다. 독립변수 X는 기후요소(기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 강수량)와 지리지형적 요소(평균 고도, 평균 담수면적, 평균 도시화율, 해안 근접성)를 나타낸다. 다변량회귀식의 독립변수들간의 상관성은 낮은 것으로 나타나서 다변량회귀분석에 문제가 없는 것으로 나타났다.

2.3 Mann-Kendall 추세분석

만일 x_j 와 x_k 를 관측점에서 측정된 j 번째와 k 번째 시기의 관측값이라 하고, $x_j - x_k$ 가 양(+)의 값을 갖는지 혹은 음(-)의 값을 갖는지에 따라서 $sgn(x_j - x_k)$ 을 1, 0, -1을 취하는 함수라고 한다면 다음 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 Mann-Kendall 통계치는 식 (11)로 구할 수 있으며, 식 (11)은 양의 값을 갖는 수와 음의 값을 갖는 수의 차이를 나타낸다.

$$sgn(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n sgn(x_j - x_k) \quad (11)$$

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (12)$$

여기서 q 는 동일한 값을 가지는 자료 수이고, t_p 는 p 번째 계열의 자료 수이다. 따라서 S 와 $VAR(S)$ 를 이용하여 다음 통계값 Z 를 산정할 수 있다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[VAR(S)]^{1/2}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{[VAR(S)]^{1/2}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (13)$$

따라서 만일 Z 값이 큰 양의 값을 갖는다면 이는 자료계열

의 후반에 관측된 자료가 초반에 관측된 자료보다 더 크다는 것을 의미한다. 반대로 Z값이 큰 음의 값을 갖는다면 이는 자료계열의 후반에 관측된 자료가 전반에 관측된 자료보다 작은 것을 의미한다. 따라서 만일 분석하고자 하는 자료가 상승추세라는 대립가설을 H_A 라 하고, 상승추세가 없다는 귀무가설 H_0 를 검증하고자 한다면 Z값이 양의 값을 갖고 그리고 Z값이 검증하고자 하는 유의수준에서의 Z값보다 크다면 귀무가설 H_0 는 기각된다.

2.4 Sen 분석

만일 자료에 선형적인 추세가 존재한다면 단위시간당 변화(true slope)는 최소자승법을 적용하여 산정될 수 있다. 하지만, 자료의 오류로 인하여 이상적으로 크거나 혹은 작은 값이 포함되어 있다면 단위시간당 변화는 크게 다른 값을 산정할 것이다. 따라서 이러한 경우 Sen(1968)에 의해서 제안된 방법을 적용함으로써 단위시간당 변화를 산정할 수 있다. Sen(1968)에 의해서 제안된 방법은 자료의 오류로 인하여 이상적으로 크거나 혹은 작은 값들에 영향을 받지 않고, 또한 자료가 부족한 경우에도 적용할 수 있다.

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right) \quad i < j \quad (14)$$

여기서 X_j 와 X_i 는 관측점에서 측정된 j 번째와 i 번째 시기의 관측값이고, β 는 산정된 경사이다. 만일 강수량의 추세가 선형관계가 있다고 가정하면, 관측지점 k 에서 자료기간 T 동안의 총 강수량의 평균 증가나 감소량은 다음 식 (15)로부터 구할 수 있다.

$$B_k = T\beta \quad (15)$$

3. 분석결과

3.1 지리 및 기후 특성이 증발접시 및 Penman 증발량에 미치는 영향

52개 연구지역들의 지리적 특성이 증발접시 및 Penman 증발량에 미치는 영향을 비교분석한 결과 7월을 제외하고 년별 및 1, 4, 10월에서 해안근접성이 가장 중요한 지리적 요소인 것으로 나타났으며, 유의수준 0.05(양측검증)에서 모두 유의한 영향이 있는 것으로 나타났다. 반면에 다른 지리적 요소들은 도시화율이 4월에 Penman 증발량에 유의한 영향을 미치는 것을 제외하고 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(표 2). 표 2에서 보여주는 표준화계수는 입력자료를 표준화시켜 얻어진 계수로서 회귀식의 종속변수에 대한 독립변수의 영향력을 판단하기 위하여 적용된다. 따라서 표준화계수의 절대값이 클수록 영향력이 큰 변수이다. 본 연구에서는 귀무가설을 기각하고 대립가설을 채택할 수 있는 비율을 의미하는 유의수준을 0.05(양측검증)로 설정하였으며 통계처리 결과 얻어진 유의도가 유의수준 0.05보다 작으며 대립가설을 채택할 수 있다. 또한 F값은 회귀식에 의해서 설명된 분산과 회귀식에 의해서 설명되지 못하는 분산의 비율을 나타내며, 이 값이 커질수록 설명력이 높은 회귀식이 된다.

연구지역들의 기후요소가 증발접시 및 Penman 증발량에 미치는 영향을 비교분석한 결과 1월의 경우 증발접시 증발량은 상대습도가 Penman 증발량은 기온이 가장 중요한 기후요소로 나타났다. 4월의 경우 증발접시 증발량은 상대습도가 Penman 증발량은 풍속이 가장 큰 영향을 미치는 기후요

표 2. 증발접시 및 Penman 증발에 대한 지리적 요소의 영향 비교 (동시입력방식)

	증발	상관계수	F 값 (유의도)	도시화율	해안근접성	평균고도	담수면적
				표준화 계수 (유의도)	표준화 계수 (유의도)	표준화 계수 (유의도)	표준화 계수 (유의도)
1월	증발접시	0.682	10.225 (0.000)	-0.001 (0.992)	-0.744* (0.000)	0.088 (0.466)	-0.245 (0.065)
	Penman	0.784	18.727 (0.000)	0.133 (0.202)	-0.815* (0.000)	0.003 (0.980)	-0.188 (0.095)
4월	증발접시	0.351	1.654 (0.177)	0.011 (0.944)	-0.107 (0.476)	0.260 (0.098)	-0.197 (0.241)
	Penman	0.505	4.019 (0.007)	0.399* (0.008)	-0.403* (0.005)	0.061 (0.671)	-0.257 (0.100)
7월	증발접시	0.257	0.830 (0.513)	0.003 (0.986)	-0.129 (0.407)	-0.225 (0.165)	-0.133 (0.443)
	Penman	0.280	0.999 (0.418)	-0.194 (0.229)	0.159 (0.305)	-0.237 (0.141)	-0.024 (0.890)
10월	증발접시	0.703	11.462 (0.000)	0.068 (0.565)	-0.721* (0.000)	0.036 (0.758)	-0.060 (0.636)
	Penman	0.837	27.431 (0.000)	0.195 (0.037)	-0.780* (0.000)	-0.083 (0.364)	-0.064 (0.513)
년	증발접시	0.519	4.341 (0.005)	0.046 (0.749)	-0.564* (0.000)	0.049 (0.730)	-0.193 (0.209)
	Penman	0.732	13.551 (0.000)	0.208 (0.072)	-0.685* (0.000)	-0.109 (0.338)	-0.143 (0.242)

*볼드 이탤릭체의 숫자는 가장 큰 영향을 보이는 경우임. 별표의 숫자는 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 보이는 변수임(양측검증).

표 3. 증발접시 및 Penman 증발량에 대한 기후요소의 영향 비교 (동시입력방식)

	증발	상관계수	F 값 (유의도)	기온	상대습도	풍속	일사량	강수량
				표준화 계수 (유의도)	표준화 계수 (유의도)	표준화 계수 (유의도)	표준화 계수 (유의도)	표준화 계수 (유의도)
1월	증발접시	0.915	47.606 (0.000)	0.344* (0.000)	-0.372* (0.000)	0.319* (0.000)	0.266* (0.000)	0.011 (0.872)
	Penman	0.992	597.998 (0.000)	0.465* (0.000)	-0.339* (0.000)	0.418* (0.000)	0.068* (0.002)	0.034 (0.123)
4월	증발접시	0.734	10.744 (0.000)	0.109 (0.376)	-0.633* (0.000)	0.382* (0.003)	0.371* (0.005)	-0.085 (0.513)
	Penman	0.989	410.355 (0.000)	0.579* (0.000)	-0.610* (0.000)	0.840* (0.000)	0.439* (0.000)	0.007 (0.795)
7월	증발접시	0.606	5.352 (0.001)	0.373* (0.005)	-0.299 (0.053)	0.485* (0.011)	0.277 (0.064)	-0.177 (0.203)
	Penman	0.995	983.297 (0.000)	0.406* (0.000)	-0.392* (0.000)	0.546* (0.000)	1.047* (0.000)	-0.001 (0.957)
10월	증발접시	0.853	24.544 (0.000)	0.312* (0.005)	-0.235 (0.034)	0.402* (0.001)	0.275* (0.002)	0.072 (0.447)
	Penman	0.994	806.638 (0.000)	0.443* (0.000)	-0.220* (0.000)	0.503* (0.000)	0.181* (0.000)	0.020 (0.298)
년	증발접시	0.753	12.017 (0.000)	0.328* (0.004)	-0.375* (0.001)	0.467* (0.000)	0.292* (0.010)	-0.081 (0.455)
	Penman	0.986	329.480 (0.000)	0.560* (0.000)	-0.325* (0.000)	0.626* (0.000)	0.381* (0.000)	-0.038 (0.165)

*볼드 이탤릭체의 숫자는 가장 큰 영향을 보이는 경우임. 별표의 숫자는 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 보이는 변수임(양측검증).

표 4. 증발접시 및 Penman 증발량에 대한 지리적 및 기후요소의 영향 비교 (단계입력방식)

	증발	상관계수 F 값 (유의도)	도시화율	해안근접성	평균고도	담수면적	기온	상대습도	풍속	일사량	강수량
			표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)
1월	증발 접시	0.927 56.016 (0.000)	-	-	0.168* (0.012)	-	0.443* (0.000)	-0.381* (0.000)	0.277* (0.000)	0.233* (0.001)	-
	Penman	0.992 724.350 (0.000)	-	-	-	-	0.480* (0.000)	-0.333* (0.000)	0.426* (0.000)	0.066* (0.003)	-
4월	증발 접시	0.638 34.237 (0.000)	-	-	-	-	-	-0.638* (0.000)	-	-	-
	Penman	0.990 464.633 (0.000)	-	0.078* (0.018)	-	-	0.604 (0.000)	-0.589* (0.000)	0.895* (0.000)	0.452* (0.000)	-
7월	증발 접시	0.514 8.791 (0.001)	-	-	-	-	0.405* (0.002)	-	-	-	-0.356* (0.006)
	Penman	0.996 1072.292 (0.000)	-	0.040 (0.048)	-	-	0.406* (0.000)	-0.383* (0.000)	0.573* (0.000)	1.054* (0.000)	-
10월	증발 접시	0.859 33.195 (0.000)	-	-	0.260* (0.009)	-	0.588* (0.000)	-	0.470* (0.000)	0.218* (0.008)	-
	Penman	0.996 1223.434 (0.000)	-	-	0.083* (0.000)	-	0.503* (0.000)	-0.206* (0.000)	0.504* (0.000)	0.175* (0.000)	-
년	증발 접시	0.773 13.684 (0.000)	-0.215 (0.045)	-	-	-	0.313* (0.003)	-0.431* (0.000)	0.510* (0.000)	0.244 (0.029)	-
	Penman	0.986 402.851 (0.000)	-	-	-	-	0.550* (0.000)	-0.339* (0.000)	0.624* (0.000)	0.383* (0.000)	-

*볼드 이탤릭체의 숫자는 가장 큰 영향을 보이는 경우임. 별표의 숫자는 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 보이는 변수임(양측검증).

소로 나타났다(표 3). 7월의 경우 증발접시 증발량은 풍속이 Penman 증발량은 일사량이 가장 큰 영향을 미치는 기후요소로 나타났으며, 증발접시 증발량의 경우 기온과 풍속만이 유의한 기후요소로 나타났고, Penman 증발량의 경우 기온, 풍속, 상대습도, 일사량이 유의한 기후요소로 나타났다. 10월 증발접시 증발량의 경우 기온, 풍속, 일사량이 유의한 기후요소로 나타났고, 년별 증발접시 증발량 및 Penman 증발량의 경우 강수량을 제외한 다른 기후요소들이 유의한 기후요소로 나타났다.

연구지역들의 지리적 요소 및 기후요소가 증발접시 및 Penman 증발량에 미치는 영향을 단계입력방식의 다변량회귀 분석을 이용하여 분석하였다(표 4). 분석결과에 의하면 1월에는 연구지역의 지리적 요소로서 평균고도가 회귀식에 포함되어 증발접시 증발량에 영향을 미치는 것으로 나타난 반면에 Penman 증발량은 지리적 요소가 회귀식에 포함되지 않았으며, 기후요소는 증발접시 증발량과 Penman 증발량 모두에서 기온, 상대습도, 풍속, 일사량이 유의수준 0.05(양측 검정)에서 유의한 요소로서 나타났고, 특히 기온이 증발접시 증발량이나 Penman 증발량 모두에서 가장 중요한 기후요소로서 나타났다.

4월에는 증발접시 증발량의 경우 상대습도만이 유의한 요소로서 나타났으나, Penman 증발량의 경우 지리적 요소로서 해안근접성이, 기후요소로서 기온, 상대습도, 풍속, 일사량이 중요한 요소로서 나타났고, 그 중에서 풍속이 가장 중요한 기후요소로서 나타났다. 7월의 경우 증발접시 증발량

은 기온과 강수량이 유의한 요소로서 나타났고 특히 기온이 가장 큰 유의성을 보였으며, Penman 증발량은 지리적 요소로서 해안근접성이, 기후요소로서 기온, 상대습도, 풍속, 일사량이 유의한 요소로서 나타났고, 특히 일사량이 가장 큰 유의성을 보였다. 10월의 경우 증발접시 증발량은 지리적 요소로서 평균고도가, 기후요소로서 기온, 풍속, 일사량이 회귀식에 포함되어 유의한 요소로서 나타났고 특히 기온이 가장 큰 유의성을 보였으며, Penman 증발량은 지리적 요소로서 평균고도가, 기후요소로서 기온, 상대습도, 풍속, 일사량이 유의한 요소로서 나타났고 특히 풍속이 가장 큰 유의성을 보였다.

년별 증발량의 경우 증발접시 증발량은 지리적 요소로서 도시화율이, 기후요소로서 기온, 상대습도, 풍속, 일사량이 회귀식에 포함되었으나 일사량은 유의수준 0.05(양측검정)에서 유의한 요소로서 나타나지 않았으며, 풍속이 가장 큰 유의성을 보였다. 한편 Penman 증발량에 영향을 미치는 유의한 지리적 요소가 없는 것으로 나타났으나, 기후요소들이 회귀식에 포함되어 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났고 특히 풍속이 가장 큰 유의성을 보였다.

표 5에는 우리나라 52개 관측지점에서 관측된 기후자료와 지리특성자료를 이용한 다변량 회귀분석으로부터 증발접시 증발량과 Penman 증발량 회귀식을 유도하여 비교하였다. 증발접시 증발량이나 Penman 증발량 모두 회귀식이 유의한 것으로 나타났다. 특히 증발접시 증발량 회귀식의 경우 1월, Penman 증발량 회귀식의 경우 연 및 월별자료에서 Penman

표 5. 기후자료와 지리특성자료를 이용한 증발접시 및 Penman 증발량 다변량 회귀식

월	상관계수 (유의도)	다변량 회귀식
1	0.915 (0.000)	pan = 1.315 + 0.04846X1 + 0.145X2 - 0.0216X3 + 0.149X4 + 0.01651X5
	0.927 (0.000)	(pan) = 1.504 + 0.06240X1 + 0.126X2 - 0.0221X3 + 0.130X4 + 0.0005187X8
	0.992 (0.000)	Penman = 1.693 + 0.05673X1 + 0.165X2 - 0.0170X3 + 0.03280X4 + 0.04228X5
	0.992 (0.000)	(Penman) = 1.721 + 0.05856X1 + 0.168X2 - 0.0167X3 + 0.03171X4
4	0.734 (0.000)	pan = 3.866 + 0.03253X1 + 0.195X2 - 0.0529X3 + 0.153X4 - 0.0365X5
	0.638 (0.000)	(pan) = 7.490 - 0.0533X3
	0.989 (0.000)	Penman = 1.854 + 0.105X1 + 0.259X2 - 0.0308X3 + 0.110X4 + 0.001904X5
	0.990 (0.000)	(Penman) = 1.562 + 0.109X1 + 0.276X2 - 0.0297X3 + 0.113X4 + 0.0002866X7
7	0.606 (0.001)	pan = 2.771 + 0.118X1 + 0.246X2 - 0.0347X3 + 0.06363X4 - 0.0385X5
	0.514 (0.001)	(pan) = 1.551 + 0.128X1 - 0.0774X5
	0.995 (0.000)	Penman = 1.239 + 0.09349X1 + 0.203X2 - 0.0332X3 + 0.176X4 - 0.000144X5
	0.996 (0.000)	(Penman) = 1.094 + 0.09350X1 + 0.213X2 - 0.0324X3 + 0.177X4 + 0.0001592X7
10	0.853 (0.000)	pan = 1.113 + 0.06471X1 + 0.217X2 - 0.0262X3 + 0.173X4 + 0.05731X5
	0.859 (0.000)	(pan) = -1.218 + 0.122X1 + 0.254X2 + 0.137X4 + 0.0007635X8
	0.994 (0.000)	Penman = 1.124 + 0.08432X1 + 0.250X2 - 0.0225X3 + 0.104X4 + 0.01466X5
	0.996 (0.000)	(Penman) = 0.882 + 0.09592X1 + 0.250X2 - 0.0210X3 + 0.101X4 + 0.0002223X8
Year	0.753 (0.000)	pan = 2.814 + 0.05623X1 + 0.174X2 - 0.0288X3 + 0.102X4 - 0.0476X5
	0.773 (0.000)	(pan) = 3.265 + 0.05362X1 + 0.190X2 - 0.0332X3 + 0.08522X4 - 0.00675X6
	0.986 (0.000)	Penman = 1.537 + 0.07749X1 + 0.188X3 - 0.0202X3 + 0.108X4 - 0.0180X5
	0.986 (0.000)	(Penman) = 1.550 + 0.07606X1 + 0.188X2 - 0.0210X3 + 0.108X4

pan = 기후자료를 이용한 증발접시 증발량, (pan) = 기후자료와 지리특성 자료를 이용한 증발접시 증발량 (단계입력방식), Penman = 기후자료를 이용한 Penman 증발량, (Penman) = 기후자료와 지리특성 자료를 이용한 Penman 증발량 (단계입력방식), X1 = 기온, X2 = 풍속, X3 = 상대습도, X4 = 일사량, X5 = 강수량, X6 = 도시화율, X7 = 해안근접성, X8 = 평균고도, X9 = 담수면적

표 6. 증발접시 및 Penman 증발량 추세에 대한 지리적 요소의 영향 비교

	증발추세	상관계수	F 값 (유의도)	도시화율	해안 근접성	평균고도	담수면적
				표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)
1월	증발접시	0.288	1.060 (0.387)	-0.265 (0.102)	-0.147 (0.341)	-0.011 (0.944)	-0.025 (0.882)
	Penman	0.166	0.333 (0.854)	-0.099 (0.549)	-0.123 (0.437)	-0.064 (0.693)	0.021 (0.905)
4월	증발접시	0.192	0.449 (0.773)	-0.132 (0.422)	-0.060 (0.703)	0.030 (0.853)	0.182 (0.300)
	Penman	0.214	3.204 (0.021)	0.312 (0.039)	-0.376* (0.011)	0.156 (0.291)	-0.042 (0.789)
7월	증발접시	0.329	1.431 (0.239)	-0.130 (0.412)	-0.313 (0.043)	-0.067 (0.668)	-0.043 (0.800)
	Penman	0.478	3.488 (0.014)	0.268 (0.072)	-0.328* (0.024)	-0.163 (0.266)	-0.137 (0.382)
10월	증발접시	0.100	0.118 (0.975)	-0.051 (0.756)	-0.055 (0.728)	0.029 (0.861)	-0.053 (0.767)
	Penman	0.305	1.205 (0.321)	0.250 (0.120)	-0.237 (0.125)	0.066 (0.677)	-0.212 (0.216)
년	증발접시	0.213	0.560 (0.693)	-0.157 (0.337)	-0.098 (0.532)	0.126 (0.438)	0.116 (0.506)
	Penman	0.492	3.745 (0.010)	0.298 (0.045)	-0.372* (0.010)	0.044 (0.762)	-0.005 (0.972)

*볼드 이탤릭체의 숫자는 가장 큰 영향을 보이는 경우임. 별표의 숫자는 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 보이는 변수임(양측검증).

표 7. 증발접시 및 Penman 증발량 추세에 대한 기후요소의 영향 비교

	증발추세	상관계수	F 값 (유의도)	기온	상대습도	풍속	일사량	강수량
				표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)
1월	증발접시	0.313	0.996 (0.431)	0.033 (0.852)	0.013 (0.945)	0.077 (0.667)	0.239 (0.140)	0.160 (0.345)
	Penman	0.393	1.684 (0.157)	0.009 (0.961)	-0.208 (0.243)	0.144 (0.405)	-0.026 (0.868)	0.192 (0.242)
4월	증발접시	0.275	0.753 (0.588)	0.079 (0.650)	0.277 (0.095)	-0.033 (0.849)	0.078 (0.666)	-0.026 (0.886)
	Penman	0.563	4.280 (0.003)	-0.001 (0.994)	-0.116 (0.411)	0.295 (0.051)	-0.307 (0.053)	0.186 (0.240)
7월	증발접시	0.486	2.852 (0.025)	0.334 (0.019)	0.345 (0.043)	0.020 (0.921)	0.159 (0.325)	-0.316 (0.041)
	Penman	0.673	7.614 (0.000)	0.391* (0.002)	0.193 (0.176)	0.210 (0.225)	-0.275 (0.049)	-0.295 (0.025)
10월	증발접시	0.272	0.733 (0.602)	-0.097 (0.619)	0.044 (0.824)	0.130 (0.550)	0.241 (0.129)	0.070 (0.689)
	Penman	0.450	2.332 (0.057)	-0.032 (0.860)	-0.224 (0.229)	0.026 (0.896)	-0.062 (0.668)	0.337 (0.042)
년	증발접시	0.231	0.519 (0.761)	-0.038 (0.812)	0.147 (0.363)	0.157 (0.350)	0.170 (0.299)	-0.034 (0.831)
	Penman	0.598	5.113 (0.001)	0.051 (0.700)	0.039 (0.768)	0.390* (0.007)	-0.291 (0.034)	0.048 (0.718)

*볼드 이탤릭체의 숫자는 가장 큰 영향을 보이는 경우임. 별표의 숫자는 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 보이는 변수임(양측검증).

식과 높은 상관관계를 보여주었다.

3.2 지리 및 기후 특성이 증발접시 및 Penman 증발량 추세에 미치는 영향

Mann-Kendall 추세분석 방법을 이용하여 증발접시 및

Penman 증발추세를 52개 연구지역에 대해서 실시하였으며, 산정된 추세정도(Z-score)를 이용하여 52개 연구지역들의 지리적 요소가 증발접시 및 Penman 증발추세에 미치는 영향을 비교분석하였다. 분석 결과 1월 증발접시 증발량 추세의 경우 도시화율이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고,

Penman 증발량 추세의 경우 해안근접성이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(표 6). 4월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 담수면적이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타

났고, Penman 증발량 추세의 경우 해안근접성이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 7월에는 증발접시 증발량 추세와 Penman 증발량 추세 모두에서 해안근접성이 가장

표 8. 증발접시 및 Penman 증발량 추세에 대한 지리적 및 기후요소의 영향 비교(단계입력방식)

	증발추세	상관계수 F 값 (유의도)	도시화율	해안근접성	평균고도	담수면적	기온	상대습도	풍속	일사량	강수량
			표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)	표준화계수 (유의도)
1월	증발접시	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Penman	0.313 5.415 (0.024)	-	-	-	-	-	-	0.313* (0.024)	-	-
4월	증발접시	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Penman	0.492 15.926 (0.000)	-	-	-	-	-	-	-	-0.492* (0.000)	-
7월	증발접시	0.298 4.873 (0.032)	-	-0.298 (0.032)	-	-	-	-	-	-	-
	Penman	0.599 13.696 (0.000)	-	-	-	-	0.357* (0.004)	-	0.549* (0.000)	-	-
10월	증발접시	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Penman	0.380 8.438 (0.005)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.380* (0.005)
년	증발접시	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Penman	0.591 13.161 (0.000)	-	-	-	-	-	-	0.403* (0.003)	-0.290 (0.029)	-

*볼드 이탤릭체의 숫자는 가장 큰 영향을 보이는 경우임. 별표의 숫자는 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 보이는 변수임(양측검증).

표 9. 증발접시 증발 및 Penman 증발량 추세 비교 (1973~2006)

연구지역 (No.)	Mann-Kendall Z-score					추세 정도 (mm/34 years)				
	년	1월	4월	7월	10월	년	1월	4월	7월	10월
춘천 (3)	-2.594*	-2.550*	0.133	-1.527	-1.230	-0.321	-0.385	0.052	-0.612	-0.228
	-1.705*	0.993	-0.266	-2.016*	-1.052	-0.124	0.069	-0.022	-0.455	-0.090
서울 (4)	0.232	-0.517	1.338	-0.749	0.481	0.030	-0.086	0.544	-0.240	0.148
	1.260	2.757*	0.889	-0.207	1.156	0.097	0.175	0.156	-0.052	0.188
인천 (5)	-4.077*	-0.859	-1.097	-3.691*	-2.461*	-0.736	-0.136	-0.340	-1.817	-0.729
	0.222	0.192	1.808*	-0.148	-0.118	0.015	0.011	0.317	-0.034	-0.018
수원 (7)	-0.889	0.504	0.622	-0.845	1.038	-0.146	0.060	0.170	-0.456	0.140
	4.389*	4.388*	3.439*	0.400	4.537*	0.410	0.313	0.655	0.160	0.524
대전 (12)	-3.202*	-1.274	-0.044	-1.778*	-1.571	-0.536	-0.201	-0.009	-0.864	-0.354
	3.113*	4.388*	2.742*	-0.237	3.083*	0.266	0.296	0.593	-0.081	0.366
부산 (20)	-3.513*	-3.840*	0.222	-1.630	-2.550*	-0.464	-0.706	0.026	-0.791	-0.568
	0.014	0.504	1.334	-1.393	1.037	0.000	0.026	0.264	-0.426	0.122
목포 (22)	-2.862*	-3.884*	0.311	-0.830	-1.897*	-0.539	-0.601	0.047	-0.531	-0.439
	1.334	1.408	3.039*	-0.177	1.734*	0.172	0.211	0.655	-0.044	0.273
여수 (23)	2.490*	2.980*	2.342*	0.385	4.032*	0.418	0.510	0.714	0.188	1.219
	2.120*	4.077*	2.031*	-0.489	2.920*	0.189	0.442	0.454	-0.160	0.386
제주 (25)	-0.889	-2.357*	0.074	-0.355	1.304*	-0.159	-0.378	0.012	-0.283	0.392
	2.579*	1.823*	2.846*	0.400	1.897*	0.257	0.162	0.522	0.325	0.302
서귀포 (26)	-1.734*	-1.349	0.400	-0.785	0.800	-0.306	-0.185	0.131	-0.481	0.247
	3.320*	2.372*	3.646*	0.237	3.395*	0.264	0.195	0.615	0.085	0.548
진주 (27)	0.163	0.830	1.735*	-0.696	1.438	0.032	0.162	0.480	-0.413	0.340
	1.571	3.468*	1.867*	0.296	1.512	0.184	0.220	0.326	0.080	0.187

*볼드나 별표 볼드 숫자는 각각 유의수준(양측검증) 0.2 및 0.1에서 유의한 증가추세(+)나 감소추세(-)를 나타냄. 위에 숫자는 증발접시 증발량 추세를 나타내고 아래 숫자는 Penman 증발량 추세를 나타냄.

큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 10월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 해안근접성이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, Penman 증발량 추세의 경우 도시화율이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 년별 증발접시 증발량 추세의 경우 도시화율이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, Penman 증발량 추세의 경우 해안근접성이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 유의수준 0.05(양측검증)에서 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 1월의 경우 증발접시 증발량이나 Penman 증발량 회귀식 모두 높은 상관계수를 보였다.

연구지역들의 기후요소가 증발접시 및 Penman 증발량 추세에 미치는 영향을 비교분석한 결과 1월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 일사량이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, Penman 증발량 추세의 경우 상대습도가 가장 큰

영향을 미치는 것으로 나타났다(표 7). 증발접시 및 Penman 증발량 추세 모두에서 유의수준 0.05(양측검증)에서 유의한 기후요소가 존재하지 않는 것으로 나타났다. 4월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 상대습도가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, Penman 증발량 추세의 경우 일사량이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 증발접시 및 Penman 증발량 추세 모두에서 유의수준 0.05에서 유의한 기후요소가 존재하지 않는 것으로 나타났다. 7월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 상대습도가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, Penman 증발량 추세의 경우 기온이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 증발접시 및 Penman 증발량 추세 모두에서 기온이 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 10월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 일사량이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났

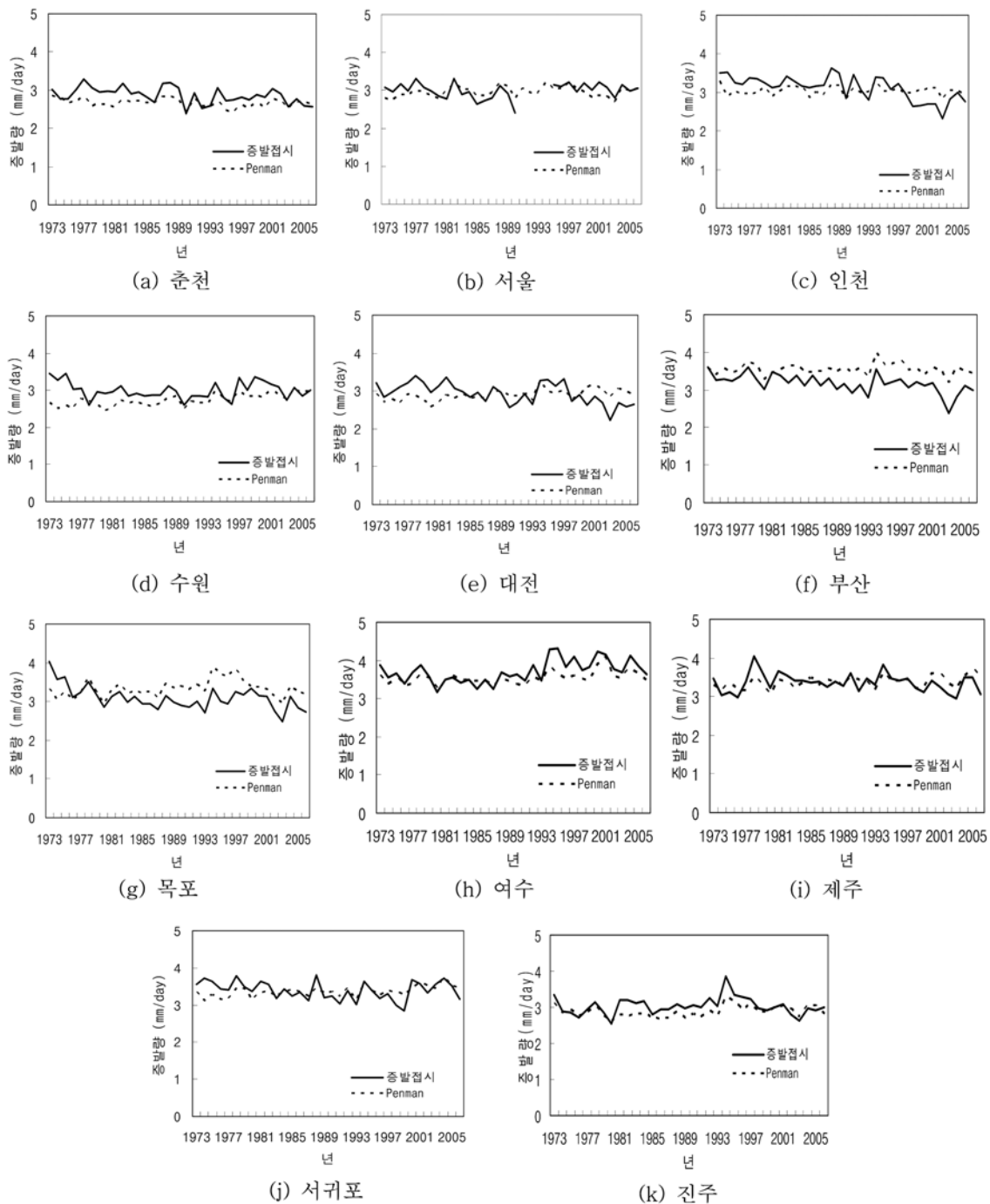


그림 2. 11개 연구지역에서의 연별 증발접시 증발량 및 Penman 증발량 변화 (1973-2006)

고, Penman 증발량 추세의 경우 강수량이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 년별 증발량에서는 증발접시 증발량 추세의 경우 일사량이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, Penman 증발량 추세의 경우 풍속이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 증발접시 증발량 추세의 경우 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 미치는 기후요소가 없는 것으로 나타난 반면에 Penman 증발량 추세의 경우 풍속만이 유의수준 0.05에서 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 증발접시 및 Penman 증발량 추세에 영향을 미치는 기후요소는 모든 계절과 연별자료에서 서로 다르게 나타났다.

연구지역들의 지리적 요소 및 기후요소가 증발접시 및 Penman 증발량 추세에 미치는 영향을 단계입력방식의 다변량회귀분석을 실시하였다(표 8). 분석결과에 의하면 1월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 연구지역의 지리적 특성 및 기후요소가 포함되지 않았으며, Penman 증발량 추세는 연구지역의 지리적 요소가 포함되지 않았고 기후요소로서 풍속만이 포함되었다. 4월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 연

구지역의 지리적 요소 및 기후요소가 포함되지 않았으며, Penman 증발량 추세는 연구지역의 지리적 요소가 포함되지 않았고 기후요소로서 일사량만이 포함되었다. 7월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 연구지역의 지리적 요소로서 해안근접성이 포함되었고 기후요소가 포함되지 않았으며, Penman 증발량 추세는 연구지역의 지리적 요소가 포함되지 않았으며 기후요소로서 기온과 풍속이 포함되었다. 10월에는 증발접시 증발량 추세의 경우 연구지역의 지리적 요소 및 기후요소가 포함되지 않았으며, Penman 증발량 추세는 연구지역의 지리적 요소가 포함되지 않았고 기후요소로서 강수량만이 포함되었다. 연별자료는 증발접시 증발량 추세의 경우 연구지역의 지리적 요소 및 기후요소가 포함되지 않았고, Penman 증발량 추세는 연구지역의 지리적 특성이 포함되지 않았고 기후요소로서 풍속과 일사량이 포함되었다.

3.3 증발접시 증발량 추세와 Penman 증발량 추세 비교 증발접시 증발량과 Penman 증발량 추세를 비교분석한 결

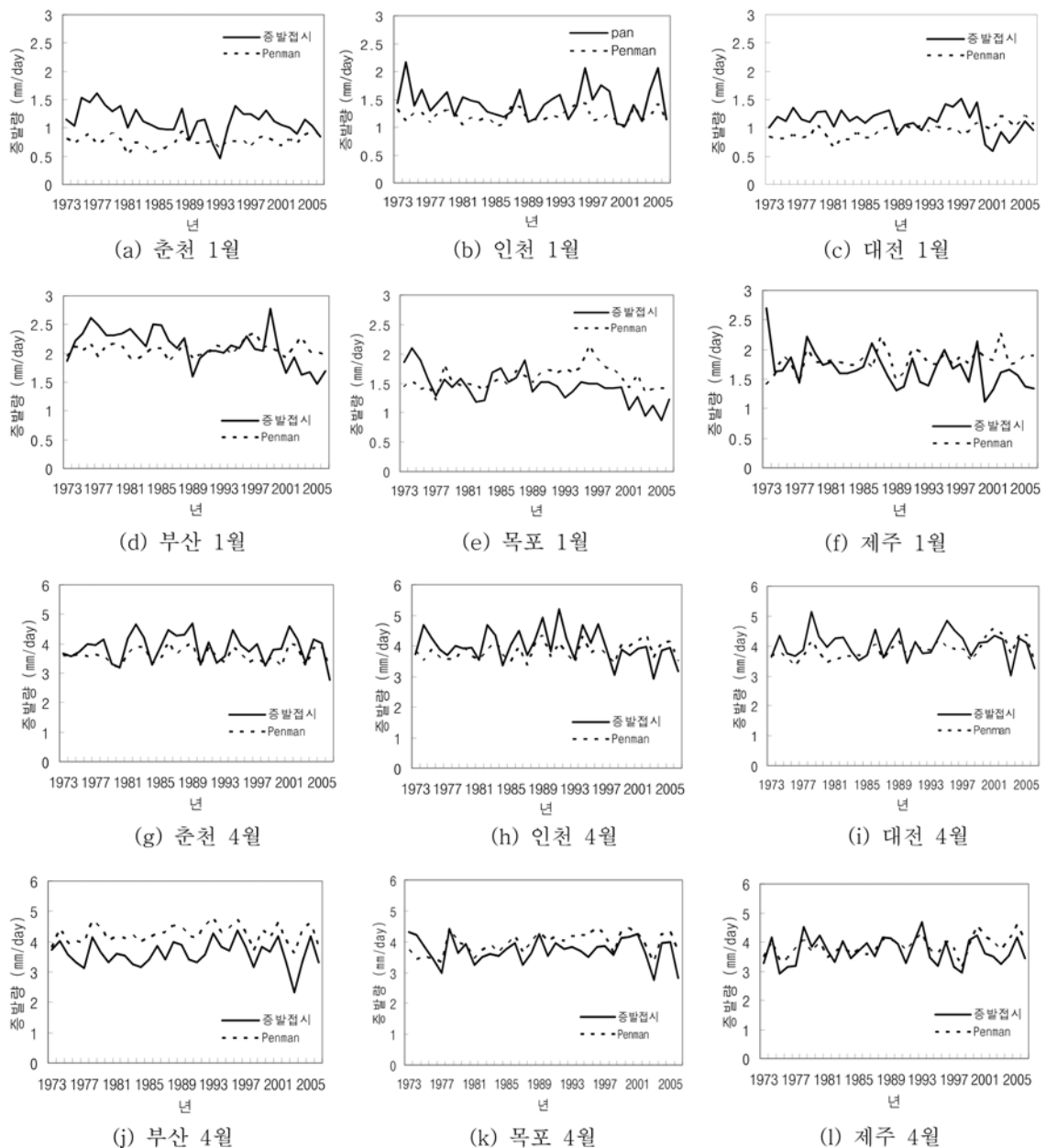


그림 3. 월별 증발접시 증발량 및 Penman 증발량 변화 (1973-2006)

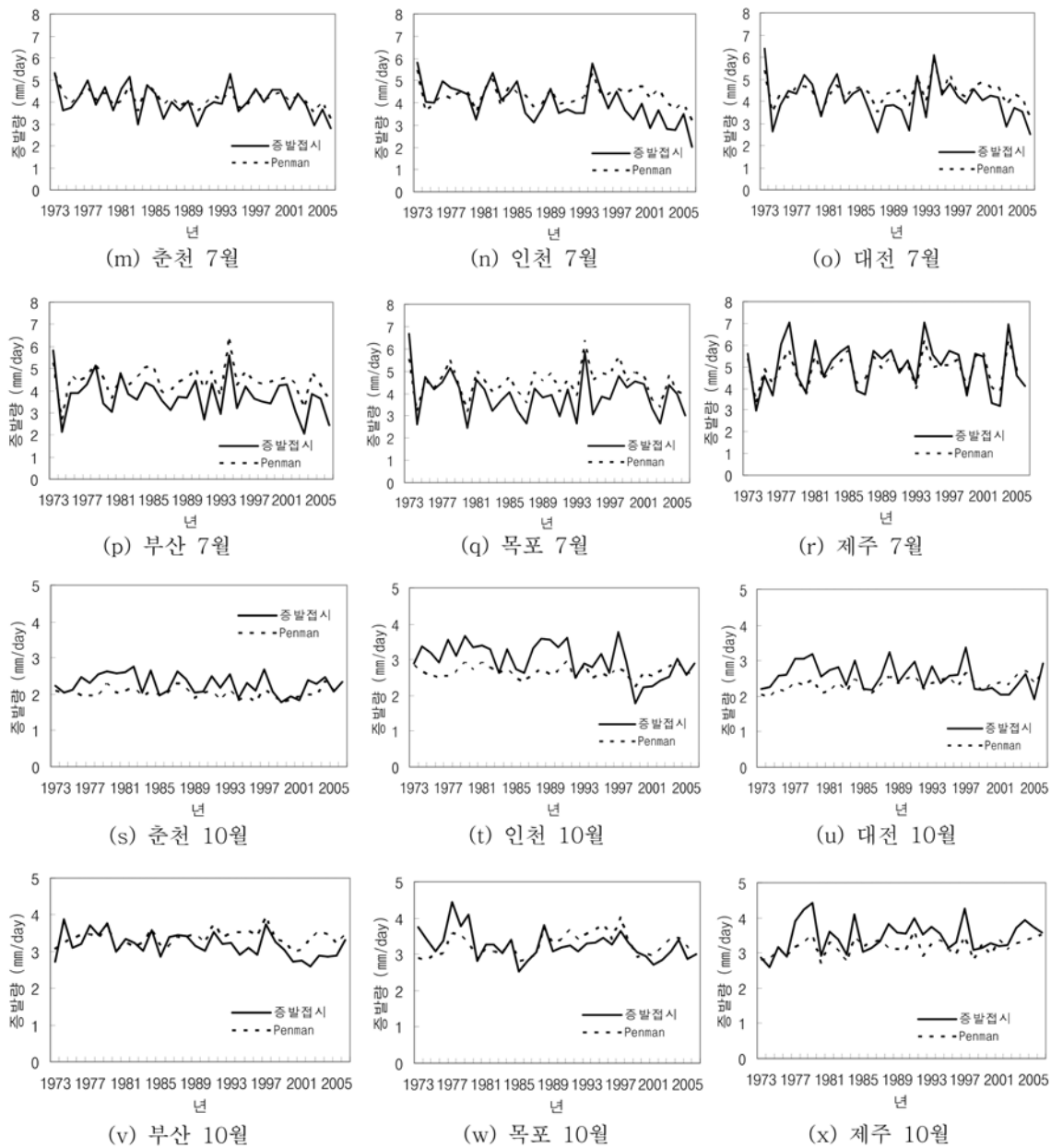


그림 3. 계속

과 분석기간 34년 동안 Sen 분석을 이용한 증발 변화는 대부분의 지역(인천, 대전, 부산, 목포, 제주, 서귀포)에서 연별과 1월의 경우 증발점시 증발량은 음(-)의 추세를 보이는 반면에 Penman 증발량은 양(+)의 추세를 보이고 있어서 각기 다른 추세를 보이는 것으로 나타났으며, 같은 추세를 보이는 4월, 7월 그리고 10월의 경우도 추세는 같으나 그 정도는 다른 것으로 나타났다(표 9).

표 9에서 보는 바와 같이 대부분의 지역에서 연 및 월별 증발자료에서 Penman 증발량 추세가 증발점시 증발량 추세보다 더 큰 양(+)의 값을 보이고 있다. 이는 기후요소의 변화가 증발점시 증발량이나 Penman 증발량에 미치는 영향 정도에 따라서 증발점시와 Penman 증발량의 추세에 차이가 나타나는 것으로 판단된다. 계절에 따라서 차이는 있지만 Penman 증발량의 증가원인은 거의 대부분 지역이 도시화로 인하여 강수의 유출증가와 실제증발산의 감소에 따른 기온증가와 상대습도의 감소(VPD 증가)에 기인하며, 반면에 증발점시 증발량의 감소는 도시화에 따라서 기온이나 VPD의 증가에도 불구하고 감

소하고 있어서 도시화가 진행됨에 따라서 나타나는 대기오염과 강수량의 증가에 기인한 일조시간의 감소(일사량의 감소)와 풍속의 감소가 주된 원인으로 판단된다.

도시화지역에서는 기온이 증가하고 풍속이 감소하고, 강수의 유출이 증가함에 따라서 지표면의 수분감소로 인하여 실제 증발산량이 감소하는 결과를 초래한다. 따라서 이러한 현상은 Brutsaert and Palange(1998)가 언급한 강수 증가에 따른 실제증발량의 증가 그리고 대기 중 수분 증가와 운량증가에 따른 증발점시 증발량(잠재증발량)의 감소 즉, 보완관계(complimentary) 이론을 따르지 않는다. 우리나라의 경우 대부분의 기후관측지점에서 크고 작은 차이는 있으나 일사량 감소와 풍속의 감소는 증발점시 증발량의 감소를 초래하고 있다. 이는 도시화지역의 증발점시 증발량의 경우 기온증가나 상대습도 감소에 따른 포화미흡량 감소에 민감하게 반응하지 않는 것으로 판단된다. 반면에 기온 증가와 상대습도 감소에 따라서 Penman 증발량은 증가하고 있는데, 이는 도시화지역의 경우 기온증가와 상대습도 감소가 발생하고, Penman 증발량은

이들 변수에 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 연 및 월별 기후변화와 지역특성이 증발접시 증발량과 Penman 증발량에 미치는 영향 차이를 분석하였다. 이를 위하여 우리나라 전국 52개 기상관측지점에서 관측된 연 및 월별 기후자료를 수집하여 추세분석을 실시하였고, 다변량회귀분석 등을 실시하여 연구지역의 지리적 특성과 기후요소가 증발접시 및 Penman 증발량에 미치는 영향을 비교분석하였다. 분석결과는 다음과 같다.

1. 연별 증발접시 증발량의 경우 지리적 요소로서 도시화율이, 기후요소로서 기온, 습도, 풍속, 일사량 등이 포함되어 이들 지리적 및 기후요소의 영향을 받는 것으로 나타났고, 풍속에 의해서 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 한편 Penman 증발량은 지리적 요소가 회귀식에 포함되지 않아서 지리적 요소의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으나, 강수량을 제외한 다른 기후요소(기온, 습도, 풍속, 일사량)가 유의한 수준에서 Penman 증발량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 풍속이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
2. 증발접시 증발량 추세의 경우 7월에 지리적 요소로서 해안근접성이 영향을 미치는 것으로 나타났지만 연별 및 다른 계절에서는 지리적 요소 및 기후요소가 증발접시 증발량 추세에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 한편 Penman 증발량 추세는 연별 및 월별 모두에서 지리적 요소에 의해서 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
3. 증발접시 증발량과 Penman 증발량 추세를 비교분석한 결과 분석기간 34년 동안 Sen 분석을 이용한 증발량 변화는 연 및 월별 증발자료에서 Penman 증발량 추세가 증발접시 증발량 추세보다 더 큰 양(+)의 값을 보이고 있으며, 기후요소가 증발접시나 Penman 증발량에 미치는 영향 정도에 따라서 증발접시와 Penman 증발량의 추세에 차이가 나타나는 것으로 판단된다.
4. 우리나라의 경우 대부분의 기후관측지점에서 크고 작은 차이는 있으나 일사량 감소와 풍속의 감소는 증발접시 증발량의 감소를 초래하고 있다. 이는 도시화지역의 증발접시 증발량의 경우 기온 증가나 상대습도 감소에 따른 포화미흡량 감소에 민감하게 반응하지 않는 것으로 판단된다. 반면에 기온 증가와 상대습도 감소에 따라서 Penman 증발량은 증가하고 있는데, 이는 도시화지역의 경우 기온증가와 상대습도 감소가 발생하고, Penman 증발량은 이들 변수에 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.
5. 우리나라 52개 관측지점에서 관측된 기후자료와 지리특성 자료를 이용한 다변량 회귀분석을 이용하여 증발접시 증발량과 Penman 증발량 회귀식을 유도한 결과, 증발접시 증발량이나 Penman 증발량 회귀식 모두 높은 상관계수를 보였으며 유의한 것으로 나타났다.

참고문헌

김광섭, 임태경(2005) 도시화 등 환경변화에 따른 지역기후변화

특성 분석, 2005년 한국수자원학 회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회.

김광섭, 임태경(2006) 1973년부터 2004년까지의 관측된 대형증발량 자료 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권 제6호, pp. 583-396.

임창수, 채효석(2007) 도시화에 따른 수문기후변화와 II(도시화가 기준 증발산량에 미치는 영향), 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제40권 제7호, pp. 571-583.

정대일, 강재원(2009) 증발량 관련 기후인자와 팬증발량의 변화 분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제42권 제2호, pp. 117-129.

Adebayo, Y. (1991) Heat island in a humid tropical city and its relationship with potential evaporation, *Theor. Appl. Climatology*, Vol. 43, pp. 137-147.

Balling, R.C. and Brazel, S.W. (1987) Diurnal variation in Arizona monsoon precipitation frequencies, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 115, pp. 342-346.

Bornstein, R. and Johnson, D.S. (1977) Urban-rural wind velocity differences, *Atmospheric Environment*, Vol. 11, pp. 597-604.

Brutsaert, W. and Palange, M.B. (1998) Hydrological cycle explains the evaporation paradox, *Nature*, Vol. 396, pp. 30.

Burn, D.H. and Hesch, N.M. (2006) Trends in evapotranspiration for the Canadian Prairies, *J. of Hydrology*, Vol. 336, pp. 61-73.

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. 55-74.

Chow, S.D. (1992) The urban climate of Shanghai, *Atmospheric Environment*, Vol. 26B, No. 1, pp. 9-15.

Cohen, S., Ianetz, A., and Stanhill, G. (2002) Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998, *Argic. For. Meteorol.*, Vol. 111, pp. 83-91.

Dow, C.L. and DeWall, D.R. (2000) Trends in evaporation and Bowen ration on urbanizing watersheds in eastern United States, *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 7, pp. 1835-1843.

Golubev, V.S., Lawrimore, J.H., Groisman, P.Y., Speranskaya, N.A., Zhuravin, S.A., Menne, M.J., Peterson, T.C., and Malone, R.M. (2001) Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment, *Geophys. Res. Lett.* Vol. 28, pp. 2665-2668.

Hobbins, M.T., Ramirez, J.A., and Brown, T.C. (2004) Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complimentary? *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, pp. 1-5.

IPCC (2007) Climate change 2007: the physical science basis. Contributions of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge

Jauregui, E. and Luyando, E. (1998) Long-term association between pan evaporation and the urban heat island in Mexico City, *Atmosfera*, Vol. 11, pp. 45-60.

Lawrimore, J.H. and Peterson, T.C. (2000) Pan evaporation trends in dry and humid regions of United States, *J. Hydrometeorol.*, Vol. 1, pp. 543-546.

Linacre, E.T. (1993) Data sparse estimation of potential evapotranspiration using a simplified Penman equation. *Agric. Forest Meteorol.* Vol. 64, pp. 225-237.

Liu B., Xu, M., Henderson, M., and Gong, W. (2004) A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955-2000, *J. of Geophysical Research*, Vol. 109, No. D15: D15102, doi: 10.1029/2004JD004511.

McKenny, M.S. and Rosenberg, N.J. (1993) Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 64, pp. 81-

- Ozdogan, M. and Salvucci, G.D. (2004) Irrigation induced changes in potential evapotranspiration in southeastern Turkey: Test and application of Bouchet's complimentary hypothesis, *Water Resources Research*, Vol. 40, W04301 doi:10.1029/2003WR002822.
- Penman, H.L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A193, pp. 120-146.
- Peterson, T.C., Golubev, V.S., and Groisman, P.Y. (1995) Evaporation losing its strength, *Nature*, Vol. 377, pp. 687-688.
- Ramirez, J.A. and Hobbins, M.T. (2005) Observational evidence of the complementary relationship in regional evaporation lends strong support for Bouchet's hypothesis, *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L15401, doi:10.1029/2005GL023549.
- 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.
- Sen, P.K. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63, pp. 1379-1389.
- Valiantzas, J.D. (2006) Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data. *J. of Hydrology*, Vol. 331, pp. 690-702.
- Yague, C., Zurita, E. and Martinez, A. (1991) Statistical analysis of the Madrid urban heat island, *Atmospheric Environment*, Vol. 25B, No. 3, pp. 327-332.

(접수일: 2010.4.9/심사일: 2010.6.10/심사완료일: 2010.7.22)