

증발산 산정 방법들의 비교 - 잔디기준작물을 중심으로

Comparison of Evapotranspiration Estimation Approaches Considering Grass Reference Crop

임 창 수*

Rim, Chang-Soo

Abstract

Five representative reference evapotranspiration(RET) equations were selected, and these equations were compared with pan evaporation by correlation analysis. Pan coefficients were also estimated. Furthermore, five selected RET equations were compared to find the similarity among those at the 21 meteorological stations located in South Korea. Five RET equations selected from 4 different category were Penman(combination approach), FAO Penman-Monteith(FAO P-M) (single source approach), Makink and Priestley-Taylor (radiation approach) and Hargreaves(temperature approach) equations. In this study, the geographical and topographical conditions were considered for the selection of study stations. The daily meteorological data measured from 1970 at an interval of 5 years were applied in this study. The evapotranspiration estimates obtained by applying evapotranspiration equations were evaluated with numerical and graphical methods. The correlation coefficients between pan evaporation and RET in study stations were above 0.9 indicating very high correlation; however, the slopes of the individual regression lines show the values greater or less than 1.0. Hargreaves equation(temperature approach) shows the most similar evapotranspiration estimates to those of FAO P-M equation from 12 study stations, which are located near to seashore except Daegu station. On the other hand, Priestley-Taylor equation(radiation approach) shows the most similar evapotranspiration estimates to those of FAO P-M equation from 8 study stations, which are located in inland.

keywords : reference evapotranspiration, regional characteristics, pan evaporation, geographical conditions

요 지

본 연구에서는 과거 제안된 5가지의 기준증발산식으로부터 산정된 증발산량과 pan 증발량을 이용하여 상관분석을 실시하였고 pan 계수를 산정하였다. 또한 우리나라 21개 기상관측지점에서 과거 제안된 5가지의 기준증발산식들을 비교하고 그 유사성을 알아보았다. 비교 검토된 기준증발산식은 4가지 방법으로 분류하였으며, 분류된 방법 중에서 각기 대표적인 기준증발산량 산정식을 선정하여 적용하였다. 적용된 기준증발산식은 에너지와 공기동력항의 조합법에 근거한 Penman 식, 단일근원법에 근거한 FAO Penman-Monteith(FAO P-M) 식, 복사자료를 이용한 방법인 Makink 식과 Priestley-Taylor 식, 그리고 기온자료에 근거한 방법인 Hargreaves 식 등이다. 연구지역 선정을 위하여 기상관측지점이 있는 지역의 지리 및 지형조건을 고려하였다. 사용된 기상자료는 1970년부터 5년 간격으로 8개년의 일별 기상자료를 사용하였다. 적용결과는 수치 및 시계열 도시방법을 통하여 비교하였다. 분석결과에 의하면 대부분의 지역에서 기준증발산식과 pan 증발량과는 0.9 이상의 높은 상관관계를 보이고 있으나, pan 증발량과 비교하

* 청운대학교 철도행정토목학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Chungwoon University, Chungnam 350-701, Korea
(e-mail: csrim@chungwoon.ac.kr)

여 회귀식의 경사가 1.0보다 크거나 작은 경향을 보이고 있다. 전국 21개 연구지역 중에서 12개 지역에서 대기온도자료에 기초한 Hargreaves 식이 FAO P-M 식과 가장 유사한 것으로 나타났는데, 이들 지역은 대구지역을 제외하고 해안지역에 위치하고 있다. 반면에 내륙에 위치한 8개 지역에서 복사량자료에 기초한 Priestley-Taylor 식이 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 기준증발산, 지역 특성, pan 증발량, 지리적 조건

1. 서 론

증발산현상을 규명하는 것은 효율적인 물관리와 수문기상학적 현상을 규명하는 데 매우 중요하다. 따라서 과거 많은 연구자들에 의해서 수많은 증발산량 산정공식들이 제안되고 그리고 발전되어 왔다. 현재까지 제안된 증발산량 산정공식은 물수지방법, 공기동력학적 방법, 에너지와 공기동력학의 조합 방법, 복사에 기초한 방법 그리고 기온에 기초한 방법 등과 같이 크게 5가지 방법으로 구분될 수 있다. 이러한 다양한 증발산량 산정 방식 중에서 사용 가능한 기상자료를 이용하여 지형 및 지리적 조건에 적당한 증발산량 공식을 선정하는 것은 매우 중요하면서도 어려운 일이다.

현재까지 연구 발표된 기존의 기준증발산량 산정식들 중에서 Allen *et al.*(1998)에 의해서 제안된 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 기준증발산식은 전 세계적으로 다양한 기후조건에서 검증된 바 있고, 최근에 가장 널리 사용되고 있으며, 또한 다른 기준증발산 산정식들을 평가하는 표준으로 사용하도록 국제식량농업기구 (FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)는 제시하고 있다(Walter *et al.*, 2000; Droogers and Allen, 2002; Lage *et al.*, 2003; Fontenot, 2004; Chen *et al.*, 2005; Trajkovic, 2005). FAO P-M 식은 미국토목학회에서 제안된 ASCE P-M 식으로부터 구체적 지표면조건에 기초하여 매개변수를 지정하고 있다(Itenfisu *et al.*, 2003). FAO P-M 식은 다른 많은 방법들에 비해서 2가지의 장점을 지니고 있다. 첫째, FAO P-M 식은 물리적 근거에 기초하여 유도되었다. 따라서 추가적인 매개변수의 보정 없이 전 세계에서 사용될 수 있다. 둘째로 FAO P-M 식은 식의 유도과정과 사용방법이 잘 알려져 적용성이 있고, 전 세계에서 각종 증발산계(lysimeter)를 이용하여 측정된 증발산량과 비교 검증된 바 있다(Allen *et al.*, 1994; Howell *et al.*, 1998; Droogers and Allen, 2002; Gavilan, 2002; Burt *et al.*, 2002). 또한 FAO P-M 기준증발산식을 사용하는 경우 식생 및 토양요소의 차이를 고려하지 않음으로 서로 다른 지역 및 서로 다른 기

간에 산정된 기준증발산량은 각 지역의 특정기간 별로 대기의 증발산 생성력(evaporating power)을 비교 검토할 수 있다(Allen *et al.*, 1998). 하지만 FAO P-M 식의 경우 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량 등의 구체적 기상요소자료를 필요로 하고, 또한 식을 적용하는 과정에서 복잡한 단위변환이나 계산과정이 필요한 단점이 있다(Irmak *et al.*, 2003). Jensen *et al.*(1990)은 증발산계를 이용하여 건조지역 및 습윤지역에 대해서 P-M 식을 이용한 기준증발산 산정식과 다른 20 가지의 기준증발산 산정식을 비교 검토한 결과 모든 지역에서 P-M 기준증발산식이 가장 우수한 결과를 보였다고 보고하였다.

Lage *et al.*(2003)은 FAO P-M 식으로부터 산정된 증발산량과 pan측정 증발량자료의 가용성을 검증하기 위하여 모로코 Gharb지역에서 1995년과 1996년 여름기간에 증발산계를 이용하여 관측된 증발산자료와 비교 검토한 바 있으며, 그들은 연구결과에서 증발산계를 이용한 증발산량 측정치와 FAO P-M 증발산량 그리고 pan 증발량과는 각각 0.79와 0.78의 높은 상관관계를 보였으며, 특히 FAO P-M 식의 적용성이 뛰어난 것으로 발표하였다. Irmak *et al.* (2005)은 미국 플로리다 북중부지역에서 잔디로부터 기준증발산량을 실측하는 장치인 Bellani 증발계의 정확성을 검증하기 위하여 FAO P-M 식을 이용하여 비교 검토한 바 있다. Chen *et al.* (2005)은 1951년부터 2000년까지 중국 580곳의 기상관측지점에서 관측된 기상자료를 이용하여 Thornthwaite 식과 pan으로부터 얻어진 증발산량을 FAO P-M 식으로부터 얻어진 기준증발산량과 비교 검토한 바 있다. 그들은 FAO P-M 식을 가장 물리적 이론에 근거하고 신뢰할 수 있는 식이라 언급하였으며, 연구결과 연 평균 pan 계수는 약 0.6 정도이고, pan을 이용한 증발산량 산정은 FAO P-M 식을 대체하여 기준증발산량을 산정하는데 사용할 수 있다고 발표하였다.

많은 연구자들은 특정지역에 기상자료가 충분하지 않거나, 혹은 기상자료 관측의 효율성을 위하여 일부 기상자료를 생략하여 기준증발산량을 산정하고자 하는 경우에 보다 적은 기상요소 자료를 필요로 하는 기준증

발산정식들이 FAO P-M 식을 어느 정도 모사하는지 비교 연구한 바 있다(Amatya *et al.*, 1995; Howell *et al.*, 1998; George *et al.*, 2002; Irmak *et al.*, 2003; Xu and Singh, 2002; Fontenot, 2004; Trajkovic, 2005). Droogers and Allen (2002)은 FAO P-M 식과 수정된 Hargreaves 식을 이용하여 IWMI(International Water Management Institute)에서 제공되는 세계 기후자료(IWMI, 2000)를 이용하여 월별 증발산 산정결과를 비교 검토한 바 있으며, 비교 검토결과 수정된 Hargreaves 식이 FAO P-M 식과 매우 높은 상관성을 보이는 것으로 나타나서 기후자료가 부족한 지역에서 FAO P-M 식을 대체하여 기준증발산량을 산정하는데 유용하게 사용할 수 있는 것으로 나타났다. Alkaeed *et al.* (2006)은 일본 Itoshima반도 지역에서 7년간의 기후 자료를 이용하여 FAO P-M 식과 Thornthwaite, Hargreaves, Harmon, 일사량에 기초한 Irmak 식, 그리고 순방사에 기초한 Irmak 식 등 5가지의 기준증발산 식을 비교 검토한 바 있으며, 연구결과 기상자료의 부족으로 FAO P-M 식을 적용할 수 없는 경우 Hargreaves 식이나 일사량에 기초한 Irmak 식이 가장 유사한 값을 보인다고 보고한 바 있다.

국내에서는 여러 연구자들에 의해서 FAO P-M 식이 적용된 바 있다(김현수와 정상욱, 1999; 조재경, 2002; Im *et al.*, 2004; 허승오 등, 2006). 유승환 등(2006)은 증발산계를 이용하여 실측된 기준증발산량을 이용하여 FAO P-M 식과 비교한 바 있으며, Jensen *et al.* (1990)의 검증결과와 유사한 결과를 얻어, FAO P-M 식의 적용성을 언급한 바 있다. 임혁진 등(2006)은 소양강댐유역의 수문변화에 미치는 변화양상을 SLURP 수문모형을 이용하여 분석하기 위하여 FAO P-M 식을 통하여 기온, 일사량, 풍속에 대한 가상시나리오를 적용하여 분석한 바 있다. 김성원과 김형수(2007)는 우리나라 14개 기상관측지점에서 1985년부터 1992년까지 관측된 일별 기상자료를 이용하여 FAO P-M 식으로부터 산정된 알팔파 기준증발산량을 계측된 알팔파 기준증발산량으로 가정하여 비선형 증발량 및 증발산량 시계열 모형화를 위한 신경망 유전자 알고리즘 모형을 개발한 바 있다.

하지만 이러한 증발산 방법들의 비교 평가연구는 연구기간 및 연구지역에 있어서 다양성을 충분히 반영하지 못하고 있다. 기존 연구는 제한된 연구지역에 대해서 제한된 기간의 자료를 이용하고 있으며, 다양한 지리 및 지형적 조건을 고려한 증발산 산정방법들의 평가 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 지리 및 지형적 조건을 고려하여, 국내 21개 기상관측

지점에서 기존에 널리 사용되고 있는 기준증발산량 산정식들을 비교 검토하였다. 본 연구에서 적용 검토된 증발산식은 잔디를 기준작물로 가정하여 증발산량을 산정하도록 개발된 기준증발산(reference evapotranspiration)식들로서 기존의 잠재증발산(potential evapotranspiration) 정의와는 다소 차이가 있다. 기존의 잠재증발산은 기준작물을 설정하지 않고, 매우 모호한 개념의 키 작은 녹색작물로부터의 증발산을 의미하였으나, 이후 기준증발산은 대상 작물을 구체적으로 0.12m 높이의 잔디로 정의함으로써 증발 대상이 되는 식생조건을 보다 명확하게 명시하였다.

2. 연구 지역 및 자료

본 연구를 위하여 사용된 기상자료는 기상청에서 운영하는 서울, 인천, 수원, 청주, 대전, 포항, 전주, 부산, 목포, 여수, 제주, 서귀포, 진주 등 21개 지역에서 관측된 일별 최저기온, 최고기온, 풍속, 상대습도, 일조시간, 가조시간 등이다. 연구 분석을 위하여 가급적 장기간의 기상자료를 이용하여 증발산의 시간적 변화를 분석하고자 하였으나, 21개 연구지역에 대해서 일별 기상자료를 이용하여 분석하는 경우, 분석자료가 방대하여 국가수자원관리 종합시스템의 토지피복도 자료와 기간이 일치하는 1970년부터 2004년까지 5년 간격(1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2004년)의 8개년 자료를 사용하였다.

연구 지역을 선정하기 위하여 수문기상자료의 가용성을 검증하고, 검증된 결과를 바탕으로 기상관측지점을 중심으로 21곳의 연구 지역을 선정하였다(Fig. 1). 연구 지역을 선정하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였다. 첫째, 수문기상자료 관측지점의 지리 및 지형특성이 증발산에 미치는 영향을 판단하기 위하여 전체 면적에 대한 주거지 면적비를 이용하여 도시화율을 구분하였다. 둘째, 해안과의 근접성이 증발산에 미치는 영향을 파악하기 위하여 관측지점의 해안 근접성을 고려하였다. 셋째, 관측지점 인근에 호소 등 수역조건과 연구 지역의 평균경사 등의 지형적 조건이 증발산에 미치는 영향을 고려하였다. 선정된 21개의 연구지역은 우리나라 한반도 전역에 걸쳐서 해안지역 및 내륙지역에 고르게 위치하고 있으며, 또한 연구지역의 지형특성이 평야, 산악, 호소 등에 고르게 분포하여 지리 및 지형조건이 증발산량 산정에 미치는 영향을 고려할 수 있다.

한강 등 4대강 유역조사(건교부, 한국수자원공사) 결과로 국가수자원관리 종합정보시스템에서 제공되고 있는 자료를 활용하여 수치표고자료와 토지피복도에 대한

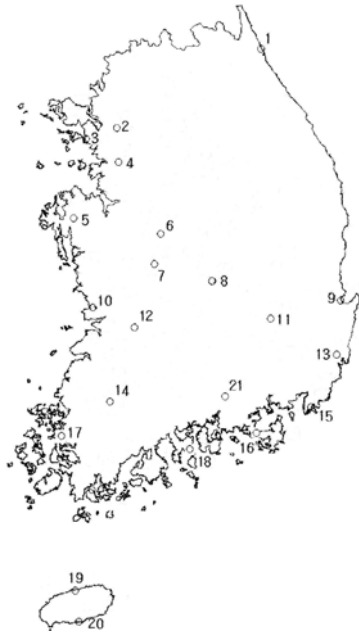


Fig. 1. Study stations

분석을 실시하였고, 1975년도부터 2000년도까지 6개 년도에 대한 토지피복도를 분석하였다. 1975년도 및 1980년도의 경우 Landsat MSS를 이용한 자료이며, 1985년

도, 1990년도 및 1995년도의 경우 Landsat TM, 그리고 2000년도의 경우에는 Landsat ETM를 이용하여 분석된 자료이다. 선정된 21개 연구 지역에 대해서 기상관측지점을 중심으로 반경 10km 범위의 314km²에 대해서 GIS분석을 실시하였다. 기상자료와 동일한 기간을 적용하는 것이 타당하나 1970년 및 2004년 자료의 경우 GIS분석을 위하여 토지피복현황자료 사용에 어려움이 있어 분석자료에서 제외하였다(Table 1).

3. 기준증발산 산정식 검토

비교 검토된 기준증발산식은 증발산량 산정에 필요한 기상자료에 근거하여 5가지 방법으로 분류하였으며, 분류된 방법 중에서 각기 대표적인 기준증발산량 산정식을 선정하여 사용하였다. 적용된 기준증발산식은 에너지와 공기동력항의 조합법(combination approach)에 근거한 Penman 식, 단일 근원법에 근거한 FAO P-M 식, 복사자료를 이용한 방법(radiation approach)인 Makkink 식과 Priestley-Taylor 식, 그리고 기온자료에 근거한 방법(temperature approach)인 Hargreaves 식 등이다.

Table 1. Geographical and topographical characteristics of 21 study stations

Station No.	Lat. (N)	Long. (E)	Elev. (m)	Geographical and topographical classification												
				Geographical location		Urbanization rate of year 2000 (%)		Area ratio of lake and wet land (6 year average) (%)			Area ratio of topographical gradient below 5 % (%)					
				coast	inland	~20	20~	10~	5-10	~5	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
Sokcho (1)	38°15'	128°34'	17.8	o		o					o					
Seoul (2)	37°34'	126°58'	86.0		o		o			o						o
Incheon (3)	37°28'	126°38'	68.9	o			o	o								o
Suwon (4)	37°16'	126°59'	33.6		o		o				o					
Seosan (5)	36°46'	126°30'	25.9		o	o					o				o	
Cheongju (6)	36°38'	127°27'	57.4		o	o					o				o	
Daejeon (7)	36°22'	127°22'	68.3		o		o				o				o	
Chupungnyong(8)	36°13'	128°00'	242.5		o	o					o	o				
Pohang (9)	36°02'	129°23'	1.9	o		o					o				o	
Gunsan (10)	36°00'	126°45'	26.9	o		o					o					o
Daegu (11)	35°53'	128°37'	57.6		o		o				o				o	
Jeonju (12)	35°49'	127°09'	53.5		o	o					o				o	
Ulsan (13)	35°33'	129°19'	34.7		o	o					o		o			
Gwangju (14)	35°10'	126°54'	70.5		o		o				o				o	
Busan (15)	35°06'	129°02'	69.2	o			o				o				o	
Tongyeong (16)	34°51'	128°26'	31.7	o		o					o	o				
Mokpo (17)	34°49'	126°23'	37.9	o		o		o							o	
Yeosu (18)	34°44'	127°45'	66.1	o		o					o	o				
Jeju (19)	33°31'	126°32'	20.0	o			o				o					o
Seogwipo (20)	33°15'	126°34'	50.5	o		o					o				o	
Jinju (21)	35°12'	128°07'	21.3		o	o					o		o			

3.1 조합법 (combination approach)

Penman 식은 수문기상분야에서 광범위하게 적용되었던 식으로써, Penman (1948)은 지표면으로부터 기준 증발산량을 산정을 위하여 물리적 근거에 기초한 증발산량식을 개발하였다. Penman은 잔디조건의 증발표면에서 발생하는 순복사에너지와 증발표면위의 공기움직임에 의한 증발효과를 고려하여 물리적 이론에 근거한 증발산식을 제안하였다. Penman 증발산식은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다. Rijtema (1965)는 Penman 식에 의해 계산된 잠재증발산량이 짧은 초지에서의 기준증발산량과 크게 차이가 없음을 제시하였다. 하지만 Penman 식의 경우 지역 특성에 따라서 풍속함수(wind function)를 보정해주어야 하는 단점이 있다.

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

$$E_a = f(u)(e_s - e_a) = (a + bu_2)(e_s - e_a) \quad (2)$$

$$f(u) = 0.263 + 0.141u_2 \quad (3)$$

여기서, RET = 기준증발산량(mm/day), R_n = 순방사(mm/day), G = 토양열 유동밀도(mm/day)이며 1일 단위로 계산하는 경우 무시될 수 있고, u_2 = 지상 2 m 높이에서 풍속(m/s), e_s = 포화증기압(mb), e_a = 실제증기압(mb), $(e_s - e_a)$ = 대기의 포화증기압 부족량(mb), a와 b는 경험적으로 얻어진 계수(a=0.263, b=0.141), Δ = 포화증기압과 온도곡선의 기울기(mb/°C), Y= 건습계 상수(mb/°C), E_a 는 건조력(drying power)항 (mm/day)이다.

3.2 단일 근원법 (single source approach)

Penman(1948)에 의해서 제안된 에너지수지와 물질 전달과정을 복합적으로 고려한 조합법(combination method)에 근거한 증발산식은 여러 연구자들에 의해서 수정 보완되어 왔으며, Monteith (1965)는 증발산 표면으로부터 증발을 억제하는 저항의 개념을 도입하여 P-M 실제증발산공식을 개발하였다. P-M 실제증발산량 공식은 다음 Eq. (4)와 같이 표시된다. Qiu *et al.* (2002)은 일본에서 수행된 증발산계 관측자료와 P-M식의 비교 분석 연구에서 P-M식의 적용성을 보고한 바 있다.

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Q_n - Q_g) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (4)$$

여기서, λET = 잠열 유동(MJ/m²/day), Q_n = 순방사(MJ/m²/day), Q_g = 토양열 유동밀도(MJ/m²/day), ρ_a = 일정한 대기압하의 평균대기밀도(kg/m³), C_p = 대기의 비열(MJ/kg/°C), r_s = 표면저항(sec/m), r_a = 공기동력학적 저항(sec/m).

Eq. (4)로부터 계산된 잠열유동(MJ/m²/day)을 0.408로 곱함으로써 수문학적인 증발산량(mm/day)을 얻을 수 있다. Eq. (4)에서 공기동력학적 저항 r_a 는 다음 식으로 계산된다.

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_w - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 u_z} \quad (5)$$

여기서, z_w = 풍속측정 높이(m), z_h = 상대습도 측정 높이(m), d = 제로면 변위 높이(zero plane displacement height (m), z_{om} = 바람과 관련된 조도길이(m), z_{oh} = 열과 수증기전달과 관련된 조도길이(m), k = von Karman 상수 (≈ 0.41), u_z = 높이 z에서의 풍속(m/sec)이다.

Eq. (5)의 경우 본 연구에서 설정한 기준작물이 잔디이므로 일정한 식생의 높이 h=0.12m를 가정하고, 풍속과 습도의 측정높이를 2 m라고 하면, 공기동력학적 저항 r_a 는 다음 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다. FAO는 다른 작물과 비교하여 잔디의 경우 증발산에 영향을 미치는 공기동력학적 특성이나 지표면특성에 대해서 많은 연구가 수행된 바 있고, 잔디는 전 세계에서 보편적으로 접할 수 있는 작물이라는 점에서 기준작물로서 추천하였다 (Allen *et al.*, 1998).

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (6)$$

또한, 표면저항 r_s 는 다음 식으로 계산된다.

$$r_s = \frac{r_c}{LAI_{active}} \quad (7)$$

여기서, r_c = 기공저항(sec/m), LAI_{active} = 엽면적지수(leaf area index=(잎면적, m²)/(토양표면적, m²)). 잔디를 기준작물로 간주하는 경우 일반적으로 LAI_{active} 는 0.5LAI이고 LAI = 24 h의 관계가 있다. 또한 작물높이 h=0.12m 그리고 작물에 충분한 수분이 공급되고 있다는 가정을 하는 경우에 기공저항 r_c = 100sec/m가 되고,

따라서 표면저항 $r_s = 70\text{sec/m}$ 가 된다.

기준증발산량을 계산하기 위하여 Allen *et al.*(1998)은 P-M Eq. (4)와 Eqs. (5~7)로부터 FAO P-M 공식을 다음 Eq. (8)과 같이 발표하였으며, FAO에 의해서 기준증발산량을 산정하기 위한 유일한 방식으로 추천되고 있으며, 많은 연구자들에 의해서 유용성이 입증되고, 적용된 바 있다(Howell *et al.*, 1998; Walter *et al.*, 2000; Burt *et al.*, 2002; Droogers and Allen, 2002; Qiu *et al.*, 2002; Lage *et al.*, 2003; Fontenot, 2004; Chen *et al.*, 2005; Trajkovic, 2005).

$$RET = \frac{0.408\Delta(Q_n - Q_g) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (8)$$

여기서, RET = 기준증발산량(mm/day), $T_a = 2$ m 높이에서 일평균기온 ($^{\circ}\text{C}$), $u_2 =$ 지상 2 m 높이에서 풍속 (m/sec), $Q_n =$ 순방사($\text{MJ/m}^2/\text{day}$), $Q_g =$ 토양열 유동밀도($\text{MJ/m}^2/\text{day}$), $e_s =$ 포화증기압(kPa), $e_a =$ 실제증기압(kPa), $(e_s - e_a) =$ 대기의 포화증기압 부족량(kPa), $\Delta =$ 포화증기압과 온도곡선의 기울기($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), $\gamma =$ 건습계 상수($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$). 여기서 토양열 유동밀도의 경우 일별 기준증발산량을 산정하는 경우 낮과 밤사이의 토양열 유동밀도의 증가와 감소로 인하여 일별 토양열 유동밀도가 미미하여 계산에서 제외하였다.

FAO P-M 식은 다른 많은 방법들에 비해서 2가지의 장점을 지니고 있다. 첫째, FAO P-M 식은 물리적 근거에 기초하여 유도되었다. 따라서 추가적인 매개변수의 보정 없이 전 세계에서 사용될 수 있다. 둘째로 FAO P-M 식은 식의 유도과정과 사용방법이 잘 알려져 적용성이 있고, 각종 증발산계(lysimeter)를 이용하여 측정된 증발산량과 비교 검증된 바 있다(Allen *et al.*, 1994; Gavilan, 2002; Droogers and Allen, 2002). 또한 FAO P-M 기준증발산식을 사용하는 경우 식생 및 토양요소의 차이를 고려하지 않음으로 서로 다른 지역 및 서로 다른 기간에 산정된 기준증발산량은 각 지역의 특정기간 별로 대기의 증발산 생성력(evaporating power)을 비교 검토할 수 있다(Allen *et al.*, 1998). 하지만 FAO P-M 식의 경우 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량 등의 구체적인 기상요소자료를 필요로 하고, 또한 식을 적용하는 과정에서 복잡한 단위변환이나 계산과정이 필요한 단점이 있다(Irmak *et al.*, 2003).

3.3 복사를 이용한 방법 (radiation-based approach)

복사자료를 이용하는 방법의 경우 공기동력항이 상

대적으로 작은 습윤한 기후지역의 경우 적절한 기준증발산량을 산정하는 것으로 연구 발표되고 있으나, 건조한 기후지역에서는 비교적 작은 증발산량을 산정하는 것으로 나타났다.

3.3.1 Makkink 식

Makkink 식은 1957년 네덜란드에서 Penman 식을 기초로 증발산계(lysimeter)와 비교 검토한 후, 수정되어 제안된 식으로 현재 서유럽과 미국 등지에서 적용되고 있다. Makkink (1957)는 잔디조건에서 기준증발산량을 산정하기 위하여 다음과 같은 Eq. (9)를 제안하였다.

$$RET = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Q_s}{H_v} - 0.12 \quad (9)$$

여기서 RET = 기준증발산량 (mm/day), $Q_s =$ 일사량 ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$), $\Delta =$ 포화증기압과 온도곡선의 기울기 ($\text{mb}/^{\circ}\text{C}$), $\gamma =$ 건습계 상수($\text{mb}/^{\circ}\text{C}$), $H_v =$ 잠재증기화열 (cal/g).

3.3.2 Priestley-Taylor 식

복사를 이용한 방법 중의 하나는 Priestley and Taylor (1972)에 의해서 제안된 Penman (1948) 식을 단순화한 형태의 식으로 이 식은 적용 지역의 기후조건이 습하여 증발산량 산정 과정에서 Penman에 의해서 제안된 조합법의 공기동력항 영향이 미미하다는 가정하에 Penman 식의 공기동력항을 특정 계수 값으로 가정하여 단순화한 식이다. 따라서 보다 적은 관측자료를 필요로 하고, 잔디조건에서의 기준증발산량 산정에 적용할 수 있고, 다습한 지역에서 적용하도록 제안되어졌으며, 식의 형태는 다음 Eq. (10)과 같다.

$$RET = a \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma} \quad (10)$$

여기서 RET = 기준증발산량 (mm/day), $a =$ empirical coefficient (=1.26), $R_n =$ 순방사 (mm/day), $\frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma}$ 은 Penman 기준증발산식의 에너지항과 동일하고, 이류(advection)가 없는 습윤한 지표면에서 기준증발산량을 나타낸다.

3.4 기온을 이용한 방법 (Temperature-based approach)

Hargreaves and Samani (1985)는 잔디조건에서 기준증발산량을 계산하는 다음과 같은 식을 제안한 바 있다. Eq. (11)은 FAO에 의해서 대기온도 자료만이 가용

한 경우에 적용하도록 채택된 바 있다(Allen *et al.*, 1998). Eq. (11)은 상대습도와 같은 지역적 특성을 고려하지 못하는 단점이 있으나, 계산이 간단하고 최소한의 기후자료를 필요로 하는 장점이 있다.

$$RET = \alpha R_a TD^{1/2} (T_a + 17.8) \quad (11)$$

여기서 RET = 기준증발산량 (mm/day), $\alpha=0.0023$, TD = 일 최고기온과 최저기온의 차(°C), R_a = 일별태양복사량 (mm/day), T_a = 2m 높이에서의 일 평균기온 (°C).

3.5 Pan 증발량

본 연구에서 이용한 Pan 증발량은 기상청에서 현재 운영하고 있는 직경 20cm의 소형증발접시로부터 관측된 월별 자료를 이용하였다. Pan 증발량과 기준증발산의 관계는 다음 Eq. (12)로 나타낼 수 있다.

$$k_p = \frac{RET}{E_{pan}} \quad (12)$$

여기서 k_p = pan 계수, RET = 기준증발산량(mm/day), E_{pan} = 소형 증발접시증발량(mm/day)이다.

잔디기준작물에 대해서 여러 연구자들에 의해서 pan 계수를 산정하는 식이 제시된 바 있다(Cuenca, 1989; Pereira *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 1998). Allen *et al.* (1998)은 다음과 같은 pan 계수 산정식을 제안한 바 있다.

$$k_p = 0.108 - 0.0286u_2 + 0.0422 \ln(FET) + 0.1434 \ln(RH_{mean}) - 0.000631 [\ln(FET)]^2 \ln(RH_{mean}) \quad (13)$$

여기서 u_2 = 지상 2m에서의 풍속(m/sec), RH_{mean} = 평

균상대습도 (%), FET= fetch 거리 (m)

Allen *et al.* (1998)에 의하면 10일 이상의 기간에 대하여 pan 계수를 적용하여 기준증발산량을 산정하는 경우에 pan을 이용한 기준증발산량 산정방법은 기상자료가 충분하지 않은 지역에서 실제적으로 그 적용성이 입증되었다. 또한 과거로부터 전 세계 여러 지역에서 실제적으로 pan을 이용하여 측정된 증발량을 이용하여 식생으로부터의 잠재증발산량을 추정하는 방법이 이용되고 있으며, 또한 많은 연구에서 pan 증발량과 기준증발산량사이에는 상당히 높은 상관관계가 있는 것으로 발표되었다. 하지만 pan 증발량을 이용하여 기준증발산량을 추정하는 경우에는 기준작물에서는 야간에 증산작용이 발생하지 않는 반면에 pan의 경우는 증발이 지속적으로 발생하여 기준증발산량과 비교하여 과다 산정되는 경향이 있다. Table 2는 본 연구를 위해서 선정된 증발산 산정방법들을 적용하는데 요구되는 자료들을 보여준다. 기준증발산량 산정을 위하여 계산과정은 저자에 의해서 작성된 FORTRAN program을 활용하였다. 증발산량을 산정하는 경우에 우리나라에서는 기온, 습도, 풍속, 일조시간 자료와는 달리 일사량자료의 경우 장기간에 걸쳐서 지속적으로 관측을 실시하는 기상관측소가 제한되어 있어 다양한 여러 지역에서 일사량자료를 이용한 장기간의 증발산 특성을 분석하기에는 제한적인 문제가 있다. 또한 pan 증발량자료의 경우 우리나라에서는 1990년 이후로 관측을 중단한 관측소가 많아 보다 다양한 지역에 대해서 장기간 분석을 수행하는 데는 어려움이 있다.

4. 분석 및 결과

과거 제안된 5가지의 기준증발산식으로부터 산정된 증발산량과 pan 증발량을 이용하여 상관성분석을 실시하고 pan 계수를 산정하였다. 또한 과거 제안된 5가지의 증발산식들을 비교하였다. 증발산식들을 비교하기

Table 2. Data requirements of selected methods

Variables \ Method	Penman	FAO P-M	Makkink	Priestley-Taylor	Hargreaves	Pan
temperature	○	○	○	○	○	
humidity	○	○				●
wind speed	○	○				●
radiation	○	○	○	○	○	
atmospheric pressure	○	○	○	○		
pan evaporation						○

● Needed to calculate pan coefficient

위하여 통계학적 방법으로 월평균 일 증발산량의 평균 값과 표준오차를 검토하였다. 수치적 방법으로 평균오차, 제곱평균오차 그리고 평균 절대오차 등을 산정하였고, 연별 기준증발산량들에 대해서 연별 비교를 실시하였다.

4.1 분석방법

기준증발산식으로부터 산정된 증발산량과 pan 증발량과의 상관성을 분석하였고, 기준증발산 산정식들을 비교하기 위하여 월평균 일증발산량의 평균값(MET)과 표준오차(SD)를 계산하였다. 또한 평균오차(ME), 제곱평균오차(RMSE) 그리고 평균 절대오차(MAE) 등을 적용하였다(Fox, 1981).

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N ET_{ai} - ET_{bi}}{N} \quad (14)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |ET_{ai} - ET_{bi}|}{N} \quad (15)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{ai} - ET_{bi})^2}{N} \right]^{0.5} \quad (16)$$

여기서 ET_{ai} = 적용 검토된 기준증발산식으로부터의 월평균 일증발산량 (mm/day), ET_{bi} = FAO P-M 식으로부터 계산된 월평균 일증발산량(mm/day) 그리고 i = month 그리고 N 은 자료의 수(months)이다.

Fox (1981)에 의하면 MAE는 극한 값에서 RMSE보다 덜 민감하며, 직관적으로 인위적인 제공근을 적용하지 않았다는 면에서 더 선호될 수 있으나, RMSE가 일반적으로 수리 및 통계학적 분석에서 심층적으로 적용될 수 있다. 하지만 RMSE나 MAE는 둘 다 혹은 하나만으로도 만족스러운 결과를 얻을 수 있다. 여기서 RMSE나 MAE가 0에 가까울수록 유사한 결과를 의미한다. 또한 적용된 기준증발산식들을 비교하기 위하여 적용된 식들로부터 산정된 연별 기준증발산량들에 대해서 시계열적 비교를 실시하였다. ME의 경우 각각의 검토된 기준증발산식으로부터 산정된 증발산량 값이 FAO P-M 식으로부터 얻어진 기준증발산량과 비교하여 평균적으로 크게 산정되는지 혹은 작게 산정되는지의 경향을 판단할 수 있다. 예를 들어 ME값이 양(+)의 값을 가지는 경우 계산치의 과다추정에 해당하는 것을 의미하며, 음(-)의 값을 가지는 경우는 계산치의 과

소추정에 해당하는 것을 의미한다.

4.2 pan 증발량과 기준증발산량과의 상관관계

Table 3과 Fig. 2는 9개 연구지역에서 1970년부터 2004년까지 8 개년(1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2004년)의 월 평균 일 pan 증발량과 기준증발량과의 상관관계와 pan 계수를 보여주고 있다. 상관분석을 실시한 결과에 의하면 대부분의 식들이 pan 증발량과 높은 상관관계를 보이고 있다. FAO P-M식의 경우 다른 식들과 비교하여 상대적으로 대부분의 지역에서 pan 증발량과의 회귀식에서 경사가 1.0보다 작으나 1.0에 가까운 경향을 보이고 있다. 또한 9개 연구지역으로부터 FAO P-M 식을 적용하여 산정된 pan계수는 0.74에서 0.93사이의 범위를 보이고 있다. Penman 식의 경우 다른 증발식과 비교하여 상대적으로 큰 pan 계수 값을 보이고 있으며 일부지역(대전, 부산, 목포)에서는 pan 계수가 1.0을 초과하고 있는 것으로 나타났다. 또한 pan 증발량과의 회귀식에서 경사가 1.0보다 작으나 1.0에 가까운 경향을 보이고 있다. Makkink 식의 경우 pan 증발량과 높은 상관관계를 보이고 있으며, 부산지역을 제외하고 대부분의 지역에서 pan 증발량과의 회귀식에서 경사가 1.0 보다 작은 경향을 보이고 있다. 반면에 Priestley-Taylor 식의 경우 모든 지역에서 pan 증발량과의 회귀식에서 경사가 1.0 보다 큰 경향을 보이고 있다. 또한 Hargreaves 식의 경우 제주지역을 제외하고 모든 지역에서 pan 증발량과의 회귀식에서 경사가 1.0 보다 큰 경향을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 9개 연구지역에서의 연평균 일 pan 증발량과 기준증발산량 식들로부터 산정된 증발산량의 변화를 보여주고 있다. 분석결과 Makkink 식이 가장 작은 연평균 일 증발산량을 보여주고 있다. Penman 식의 경우 부산지역에서는 모든 년에서 pan 증발량을 초과하고 있는 것으로 나타났으며, 수원지역을 제외하고 다른 지역의 일부 년에서도 pan 증발량을 초과하는 경향을 보이고 있다. 대부분의 지역에서 pan 증발량은 증발산 식으로부터 산정된 증발산량을 초과하고 있는 것으로 나타났다.

4.3 기준증발산량 산정식 비교

본 연구에서는 우리나라 21개 기상관측지점에서 측정된 일별 기상자료를 이용하여 과거 제안된 기준증발산식들을 비교하고 그 유사성을 알아보았다. 많은 연구자들은 특정지역에 기상자료가 충분하지 않거나, 혹은 기상자료 관측의 효율성을 위하여 일부 기상자료를 생략하여 기준증발산량을 산정하고자 하는 경우에 보다

Table 3. Pan coefficients estimated by RET Equations and pan (9 stations)

Station	Eq.	Regression Equation	r	M _{avg}	P _{avg}	k _p
Incheon	1	Y1 = 0.816 X - 0.059	0.947	2.440	3.060	0.797
	2	Y2 = 0.937 X + 0.088	0.953	2.958		0.966
	3	Y3 = 0.725 X - 0.198	0.956	2.203		0.661
	4	Y4 = 1.115 X - 0.958	0.928	2.455		0.802
	5	Y5 = 0.935 X - 0.462	0.903	2.401		0.784
Suwon	1	Y1 = 0.862 X - 0.346	0.952	2.253	3.015	0.747
	2	Y2 = 0.964 X - 0.221	0.958	2.687		0.891
	3	Y3 = 0.695 X - 0.117	0.959	1.977		0.655
	4	Y4 = 1.057 X - 0.762	0.941	2.424		0.803
	5	Y5 = 1.041 X - 0.440	0.948	2.698		0.894
Daejeon	1	Y1 = 0.902 X - 0.166	0.953	2.405	2.851	0.843
	2	Y2 = 1.012 X - 0.018	0.958	2.868		1.005
	3	Y3 = 0.702 X + 0.054	0.964	2.058		0.721
	4	Y4 = 1.056 X - 0.475	0.942	2.535		0.942
	5	Y5 = 1.032 X - 0.105	0.944	2.837		0.944
Busan	1	Y1 = 1.059 X - 0.385	0.930	2.893	3.095	0.934
	2	Y2 = 1.239 X - 0.363	0.927	3.472		1.121
	3	Y3 = 1.029 X - 0.989	0.911	2.197		0.709
	4	Y4 = 1.709 X - 2.652	0.888	2.637		0.852
	5	Y5 = 1.157 X - 1.072	0.856	2.509		0.810
Mokpo	1	Y1 = 0.833 X + 0.058	0.912	2.681	3.148	0.851
	2	Y2 = 0.937 X + 0.331	0.917	3.281		1.042
	3	Y3 = 0.747 X - 0.218	0.934	2.134		0.677
	4	Y4 = 1.158 X - 0.991	0.914	2.656		0.843
	5	Y5 = 0.900 X - 0.202	0.889	2.634		0.836
Yeosu	1	Y1 = 0.758 X + 0.067	0.914	2.928	3.771	0.776
	2	Y2 = 0.843 X + 0.330	0.913	3.513		0.931
	3	Y3 = 0.671 X - 0.319	0.876	2.214		0.587
	4	Y4 = 1.086 X - 1.447	0.838	2.651		0.702
	5	Y5 = 0.796 X - 0.593	0.844	2.411		0.639
Jeju	1	Y1 = 0.790 X + 0.125	0.965	2.800	3.382	0.827
	2	Y2 = 0.866 X + 0.415	0.962	3.345		0.989
	3	Y3 = 0.749 X - 0.392	0.960	2.141		0.633
	4	Y4 = 1.097 X - 0.985	0.951	2.727		0.806
	5	Y5 = 0.802 X - 0.235	0.928	2.477		0.732
Seogwipo	1	Y1 = 0.917 X - 0.324	0.920	2.821	3.429	0.822
	2	Y2 = 1.026 X - 0.188	0.922	3.331		0.971
	3	Y3 = 0.765 X - 0.418	0.895	2.205		0.643
	4	Y4 = 1.218 X - 1.465	0.846	2.714		0.791
	5	Y5 = 0.832 X - 0.336	0.841	2.518		0.734
Jinju	1	Y1 = 1.066 X - 0.703	0.951	2.437	2.945	0.827
	2	Y2 = 1.179 X - 0.577	0.955	2.897		0.983
	3	Y3 = 0.839 X - 0.359	0.949	2.112		0.717
	4	Y4 = 1.340 X - 1.354	0.926	2.594		0.880
	5	Y5 = 1.271 X - 0.747	0.931	2.999		1.018

Eq.: RET equation, 1: FAO P-M, 2: Penman, 3: Makkink, 4: P-T, 5: Hargreaves, r: correlation coefficient, M_{avg}: average RET estimated from model, P_{avg}: average evaporation from pan, k_p: pan coefficient, Y: RET, X: pan evaporation

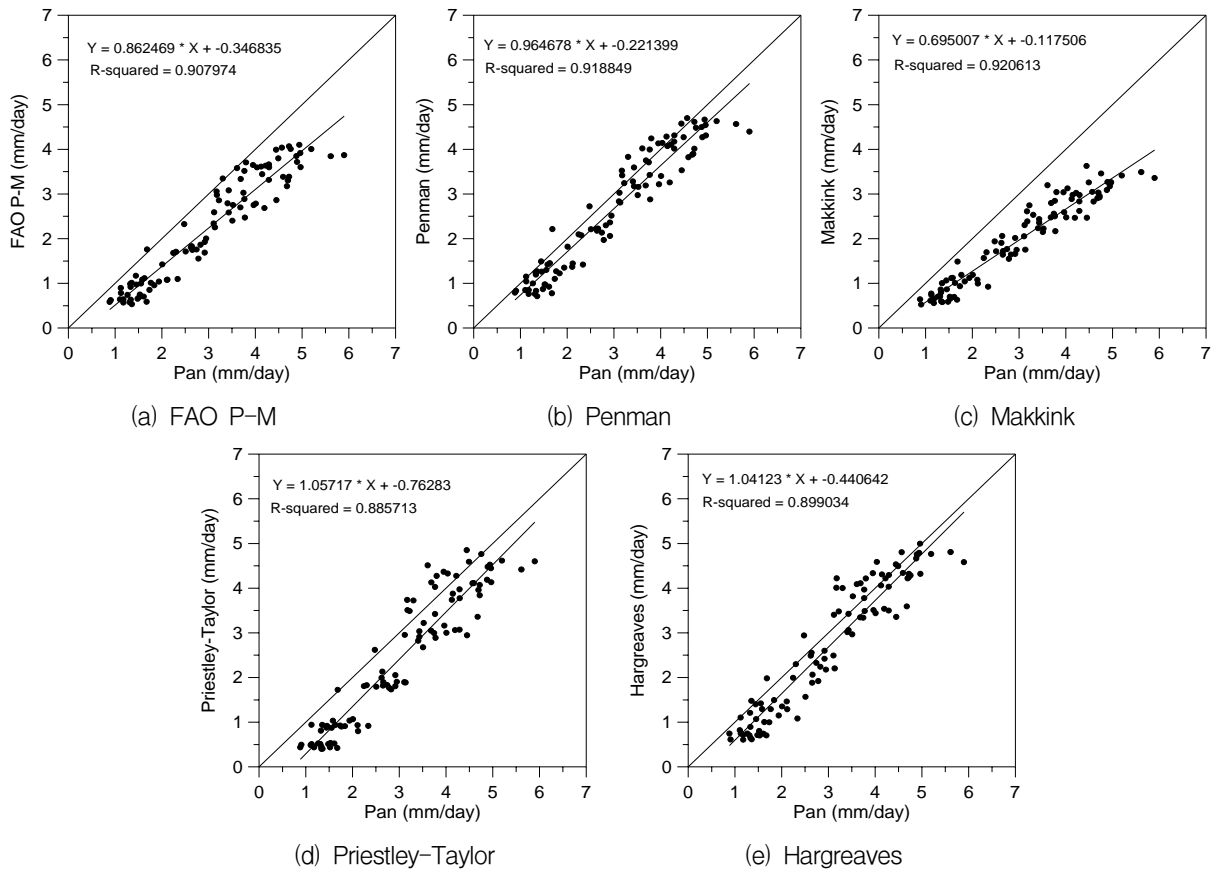


Fig. 2. Correlation between RET and pan evaporation (Suwon)

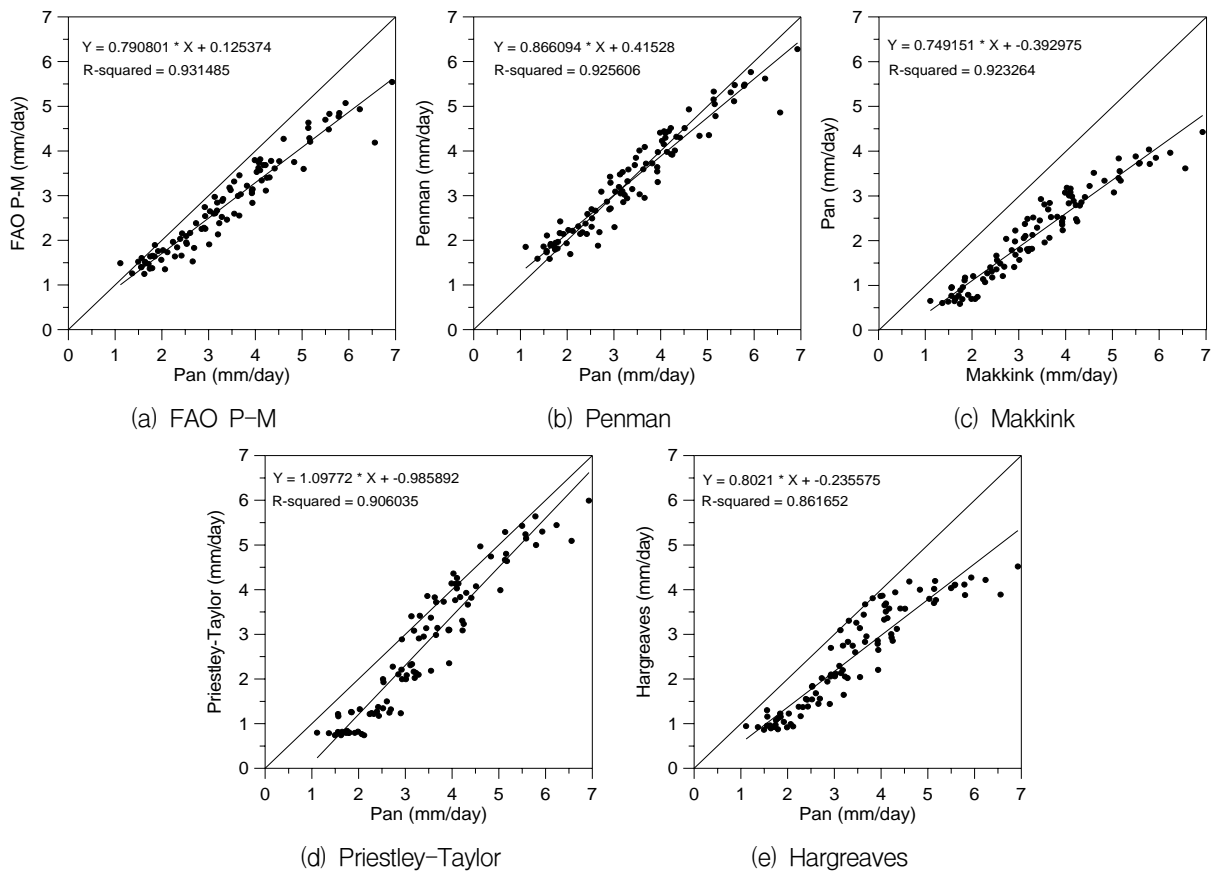


Fig. 2. Correlation between RET and pan evaporation (Jeju) (continued)

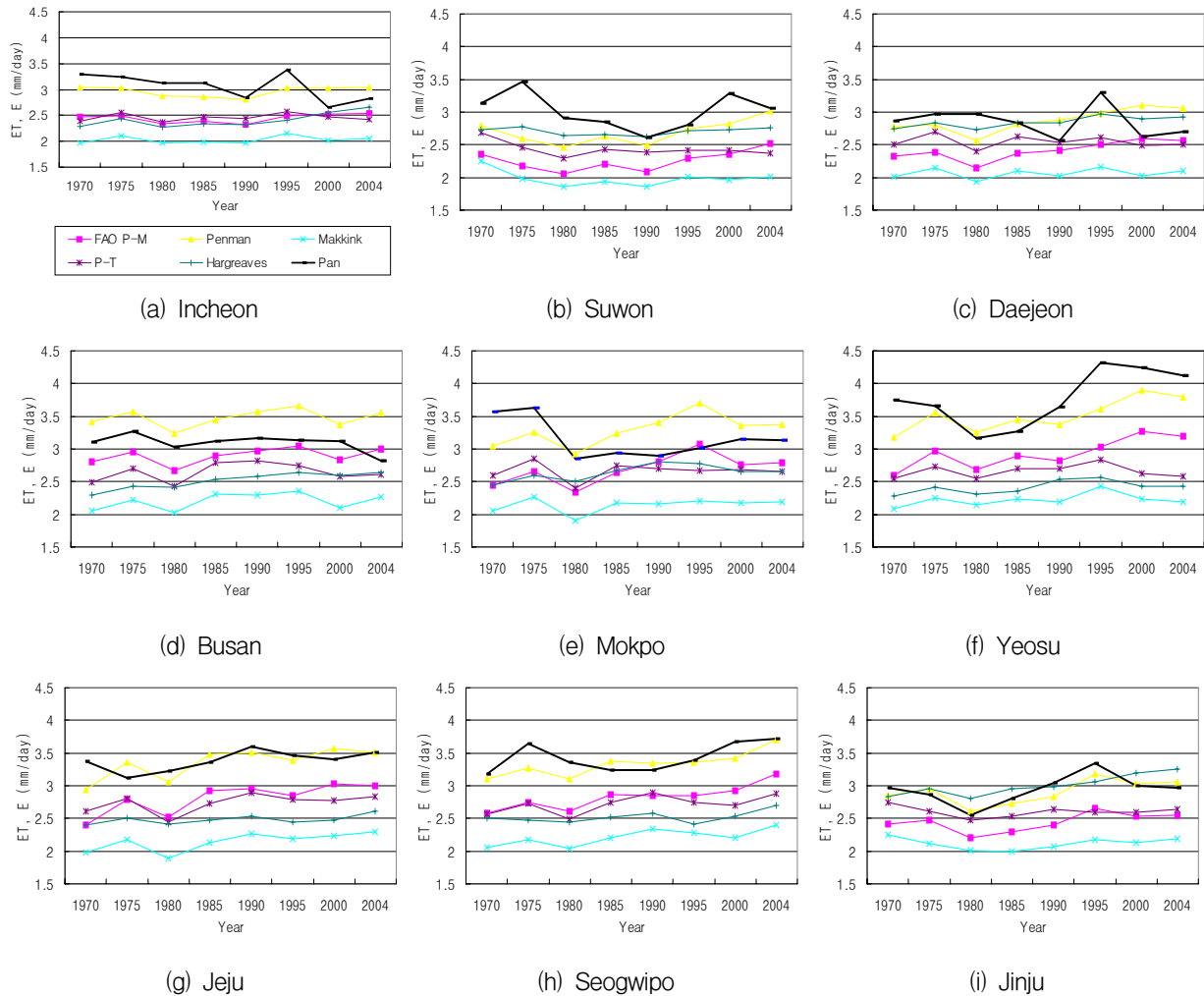


Fig. 3. Variation of average daily RET per year

적은 기상요소 자료를 필요로 하는 기준증발산정식들이 FAO P-M 식을 어느 정도 모사하는지 비교 연구한 바 있다(Amatya *et al.*, 1995; Howell *et al.*, 1998; George *et al.*, 2002; Irmak *et al.*, 2003; Xu and Singh, 2002; Fontenot, 2004).

8개년간의 월평균 일 기준증발산량(mm/day)의 평균 값을 비교분석한 결과 속초를 비롯한 16개 지역(속초, 서울, 인천, 서산, 대전, 추풍령, 포항, 군산, 대구, 울산, 부산, 통영, 목포, 여수, 제주, 서귀포)에서 Penman 식이 가장 큰 값을 보였고, 수원을 비롯한 5개 지역(수원, 청주, 전주, 광주, 진주)에서 Hargreaves 식이 가장 큰 값을 보였다. FAO P-M 식의 경우 여수지역이 가장 큰 월평균 일 기준증발산량을 보이고 있고, 반면에 수원지역이 가장 작은 월평균 일 기준증발산량을 보였다 (Table 4).

8개년간의 월평균 일 기준증발산량(mm/day)의 최고 값을 비교 분석한 결과 인천을 비롯한 13개 지역(속초,

인천, 청주, 대전, 포항, 대구, 울산, 광주, 부산, 목포, 여수, 제주, 서귀포)에서 조합법(combination approach)인 Penman 식이 최대 값을 보였으며, 서산을 비롯한 3개 지역(서산, 군산, 통영)에서 복사자료에 기초한 Priestley-Taylor 식이 최대값을 보였고, 서울을 비롯한 5개 지역(서울, 수원, 추풍령, 전주, 진주)에서 기온자료에 기초한 Hargreaves 식이 최대값을 보였다. FAO P-M 식의 경우 제주에서 최대 값을 보이고 있다. 8개년간의 월평균 일 기준증발산량(mm/day)의 최소값을 비교 분석한 결과 제주에서 Makkink 식이 최소값을 보인 것을 제외하고 그 이외의 20개 모든 지역에서 Priestley-Taylor 식이 최소값을 보였다. FAO P-M 식의 경우 대전지역에서 최소 값을 보이고 있다.

ME값을 비교 검토한 결과 Penman 식의 경우 모든 지역에서 산정된 증발산량 값이 FAO P-M 식으로부터 산정된 증발산량과 비교하여 평균적으로 양(+)의 값을 보이고 있으며, Makkink 식의 경우 21개 지역 모두에

Table 4. Quantitative measures of evapotranspiration model performance at 21 locations in South Korea (n=96)

Location	Model	MET _M	MET _P	SD _M	SD _P	Ma _{xM}	Ma _{xP}	Min _M	Min _P	ME	MAE	RMSE
Sokcho	1	2.995	2.513	1.066	0.937	5.682	4.841	1.200	0.941	0.481	0.481	0.504
	2	1.934		0.859		3.519		0.651		-0.580	0.580	0.616
	3	2.279		1.416		4.862		0.316		-0.235	0.559	0.646
	4	2.262		1.137		4.377		0.633		-0.252	0.381	0.455
Seoul	1	2.861	2.397	1.285	1.139	4.915	4.205	0.870	0.683	0.464	0.464	0.491
	2	1.900		0.902		3.389		0.496		-0.497	0.497	0.566
	3	2.327		1.402		4.606		0.377		-0.070	0.299	0.345
	4	2.582		1.428		5.164		0.561		0.185	0.323	0.422
Incheon	1	2.958	2.440	1.227	1.075	5.065	4.407	1.006	0.769	0.518	0.518	0.551
	2	2.023		0.947		3.675		0.555		-0.417	0.417	0.452
	3	2.455		1.498		4.973		0.391		0.015	0.410	0.471
	4	2.401		1.291		4.732		0.545		-0.040	0.265	0.311
Suwon	1	2.678	2.253	1.324	1.191	4.698	4.099	0.711	0.534	0.434	0.434	0.459
	2	1.977		0.953		3.627		0.525		-0.276	0.303	0.401
	3	2.424		1.478		4.851		0.404		0.171	0.308	0.387
	4	2.698		1.445		4.994		0.606		0.445	0.456	0.559
Seosan	1	2.755	2.295	1.304	1.150	4.815	4.251	0.770	0.586	0.460	0.460	0.492
	2	2.008		0.954		3.614		0.558		-0.287	0.292	0.367
	3	2.488		1.479		4.992		0.471		0.193	0.330	0.408
	4	2.697		1.395		4.873		0.641		0.402	0.412	0.504
Cheongju	1	2.796	2.343	1.402	1.255	5.183	4.451	0.758	0.561	0.453	0.453	0.482
	2	2.009		0.972		3.674		0.522		-0.334	0.346	0.452
	3	2.479		1.497		5.021		0.432		0.136	0.258	0.334
	4	2.848		1.515		5.139		0.634		0.505	0.507	0.598
Daejeon	1	2.868	2.405	1.434	1.284	5.232	4.487	0.686	0.520	0.463	0.463	0.493
	2	2.058		0.989		3.736		0.605		-0.347	0.370	0.479
	3	2.535		1.521		5.140		0.478		0.130	0.262	0.343
	4	2.837		1.482		5.179		0.712		0.431	0.441	0.517
Chupung- nyeong	1	2.987	2.491	1.212	1.084	5.042	4.226	1.085	0.838	0.497	0.497	0.522
	2	1.998		0.905		3.395		0.626		-0.493	0.493	0.547
	3	2.444		1.428		4.756		0.475		-0.047	0.397	0.446
	4	2.806		1.496		5.312		0.651		0.315	0.473	0.581
Pohang	1	3.242	2.749	1.206	1.078	5.429	4.837	1.298	1.045	0.493	0.493	0.514
	2	2.099		0.884		3.703		0.824		-0.649	0.649	0.697
	3	2.516		1.465		5.234		0.495		-0.233	0.464	0.552
	4	2.689		1.276		4.918		0.913		-0.060	0.278	0.340
Gunsan	1	3.032	2.473	1.309	1.143	5.640	4.891	0.993	0.761	0.556	0.556	0.593
	2	2.076		0.964		4.152		0.578		-0.397	0.400	0.457
	3	2.574		1.517		5.651		0.525		0.100	0.378	0.445
	4	2.526		1.306		4.514		0.706		0.052	0.225	0.297
Daegu	1	3.337	2.812	1.371	1.231	5.621	4.976	1.196	0.943	0.525	0.525	0.550
	2	2.164		0.929		3.714		0.783		-0.648	0.648	0.727
	3	2.588		1.507		5.035		0.507		-0.224	0.369	0.433
	5	2.924		1.486		5.199		0.835		0.112	0.304	0.359

Table 4. Quantitative measures of evapotranspiration model performance at 21 locations in South Korea (n=96) (continued)

Location	Model	MET _M	MET _P	SD _M	SD _P	Max _M	Max _P	Min _M	Min _P	ME	MAE	RMSE
Jeonju	1	2.778	2.338	1.338	1.212	4.922	4.358	0.768	0.563	0.440	0.440	0.462
	2	2.026		0.927		3.709		0.609		-0.312	0.347	0.450
	3	2.525		1.448		5.109		0.520		0.187	0.279	0.355
	4	2.914		1.486		5.135		0.747		0.575	0.575	0.665
Ulsan	1	3.117	2.630	1.158	1.051	5.450	4.814	1.362	1.038	0.487	0.487	0.503
	2	2.104		0.864		3.717		0.852		-0.526	0.526	0.577
	3	2.539		1.454		5.244		0.547		-0.090	0.418	0.486
	4	2.801		1.301		4.981		0.955		0.171	0.316	0.379
Gwangju	1	2.596	2.487	1.306	1.174	5.058	4.447	0.874	0.675	0.469	0.469	0.492
	2	2.080		0.904		3.550		0.683		-0.406	0.410	0.509
	3	2.577		1.441		4.938		0.588		0.091	0.278	0.342
	4	2.847		1.386		4.953		0.811		0.361	0.378	0.464
Busan	1	3.472	2.893	1.029	0.878	5.803	5.078	1.692	1.407	0.579	0.579	0.606
	2	2.197		0.870		4.083		0.873		-0.696	0.696	0.719
	3	2.637		1.482		5.607		0.592		-0.257	0.634	0.722
	4	2.509		1.041		4.255		0.939		-0.384	0.442	0.501
Tongyeong	1	3.125	2.623	1.069	0.955	5.383	4.746	1.470	1.170	0.502	0.502	0.520
	2	2.174		0.845		4.058		0.879		-0.448	0.448	0.481
	3	2.626		1.433		5.488		0.619		0.003	0.457	0.521
	4	2.591		1.085		4.499		0.951		-0.032	0.224	0.284
Mokpo	1	3.281	2.681	1.199	1.073	5.733	4.972	1.391	1.049	0.600	0.600	0.624
	2	2.134		0.940		4.142		0.644		-0.548	0.548	0.601
	3	2.656		1.488		5.675		0.619		-0.026	0.454	0.531
	4	2.634		1.189		4.674		0.868		-0.048	0.237	0.303
Yeosu	1	3.513	2.928	1.039	0.934	5.497	4.828	1.697	1.321	0.585	0.585	0.603
	2	2.214		0.863		3.942		0.842		-0.713	0.713	0.760
	3	2.651		1.459		5.485		0.612		-0.277	0.628	0.719
	4	2.411		1.061		4.316		0.846		-0.517	0.545	0.625
Jeju	1	3.345	2.800	1.187	1.081	6.279	5.540	1.583	1.246	0.545	0.545	0.563
	2	2.141		1.028		4.426		0.585		-0.659	0.659	0.694
	3	2.727		1.521		5.991		0.739		-0.073	0.457	0.530
	4	2.477		1.140		4.516		0.861		-0.323	0.409	0.472
Seogwipo	1	3.331	2.821	1.038	0.929	5.596	4.955	1.533	1.241	0.509	0.509	0.527
	2	2.205		0.797		3.855		0.962		-0.616	0.616	0.651
	3	2.714		1.342		5.329		0.813		-0.108	0.461	0.523
	4	2.518		0.923		4.052		1.107		-0.303	0.348	0.400
Jinju	1	2.897	2.437	1.248	1.133	5.016	4.415	0.985	0.755	0.461	0.461	0.480
	2	2.112		0.894		3.600		0.781		-0.325	0.344	0.425
	3	2.594		1.463		5.018		0.577		0.158	0.338	0.407
	4	2.999		1.380		5.223		0.965		0.563	0.570	0.662

1= Penman; 2= Makkink; 3= Priestley-Taylor; 4= Hargreaves; MET_M=mean ET of 4 different model (mm/day); MET_P=mean ET of FAO Penman-Monteith model (mm/day); SD_M=standard deviation of ET from 5 different model (mm/day); SD_P=standard deviation of ET from FAO Penman-Monteith model (mm/day); Max_M=maximum ET of 5 different models (mm/day); Max_P=maximum ET of FAO Penman-Monteith model (mm/day); Min_M=minimum ET of 5 different models (mm/day); Min_P=minimum ET of FAO Penman-Monteith model (mm/day); RMSE=root mean square error (mm/day); MAE=mean absolute error (mm/day); ME=mean error (mm/day); n= the number of months

서 음(-)의 값을 보이고 있다. Priestley-Taylor 식의 경우 10개 지역(인천, 수원, 서산, 청주, 대전, 군산, 전주, 광주, 통영, 진주)에서 양(+)의 값을 보이고 있다. Jensen et al. (1990)에 의해서 수행된 연구결과에 의하면 Priestley-Taylor 식은 증발산계(lysimeter) 관측치와 비교하여 습윤한 지역에서 증발산량을 3 % 적게 산정하고, 건조지역에서는 27 % 적게 산정하는 것으로 나타났다, 또한 상대습도가 높거나, 풍속이 적은 지역에서는 과대 산정되는 것으로 보고 되었다(Lee et al., 2004). Hargreaves 식의 경우 12개 지역(서울, 수원, 서산, 청주, 대전, 추풍령, 군산, 대구, 전주, 울산, 광주, 진주)에서 양(+)의 값을 보이고 있다. Jensen et al. (1990)의 연구결과에 의하면 Hargreaves 식의 경우 증발산계(lysimeter) 관측치와 비교하여 습윤한 지역에서 25 % 과다 산정하고, 건조지역에서 9 % 과소 산정하는 것으로 나타났다. 또한 상대습도가 높은 지역에서는 기준증발산량을 크게 산정하고, 반면에 풍속이 큰 지역에서는 기준증발산량을 작게 산정하는 경향이 있는 것으로 나타났다(Temesgen et al., 2005).

21개 지역 대부분에서 Penman 식의 경우 대개 4월과 5월에서 FAO P-M 식과 가장 큰 양(+)의 차이를 보이고, 12월과 1월에서 가장 작은 양(+)의 차이를 보이고 있으며, 매년 주기적인 경향을 볼 수 있다. Makkink 식의 경우 FAO P-M 식과 비교하여 대개 음(-)의 차이를 보이며, 7, 8월에 최대 차이를 보이고 있다. Priestley-Taylor 식의 경우 FAO P-M 식과 여름철에는 가장 큰 양(+)의 차이를 겨울철에는 가장 큰 음(-)의 차이를 보이며 매년 주기적인 경향을 보이고 있다. Hargreaves 식의 경우 해안에 위치한 도시지역에서 여름철에 가장 큰 양(+)의 차이를 보이고 겨울철에 가장 큰 음(-)의 차이를 보였다. 또한 대구를 제외한 육지지역에서는 대개 양(+)의 차이를 보이며, 주기적인 경향을 보이고 있다.

분석결과에 의하면 RMSE를 기준으로 하는 경우 전국 21개 연구지역 중에서 11개의 지역(속초, 인천, 포항, 군산, 대구, 울산, 부산, 통영, 목포, 제주, 서귀포)에서 그리고 MAE를 기준으로 하는 경우 여수를 추가하여 12개 지역에서 대기온도자료에 기초한 Hargreaves 식이 FAO P-M식과 가장 유사한 것으로 나타났는데, 이들 지역은 대구지역을 제외하고 해안지역에 위치하고 있다. Droogers and Allen(2002)은 IWMI(International Water Management Institute)에서 제시된 전 지구 기후자료를 이용하여 FAO P-M 식과 Hargreaves 식을 비교 검토한 바 있으며, 분석결과 Hargreave 식이 FAO P-M 식과 매우 유사한 결과를 보여주었다.

Alkaeed *et al.* (2006)이 일본 해안지역인 후쿠오카시에서 수행한 연구에서도 Hargreaves 식이 해안지역에 적합한 것으로 나타났다. 오남선과 이길하(2004)에 의하면 우리나라와 비슷한 위도상에 위치한 미국 일리노이주 Champaign에서 수행된 현장자료를 이용하여 Penman 식, Priestley-Taylor 식 그리고 Hargreaves 식을 비교 분석한 결과 Hargreaves 식, Penman 식이 대체로 기준 증발산량 산정에 적절한 것으로 나타났으며, Priestley-Taylor 식은 과다 산정하는 것으로 보고하였다. Lee *et al.* (2004) 의하면 Priestley-Taylor 식이 말레이시아 서부해안지역에서 높은 상대습도와 작은 풍속으로 인해 과대한 값을 산정하여 적합하지 않다고 보고한 바 있다.

반면에 내륙에 위치한 8개 연구지역(서울, 수원, 청주, 대전, 추풍령, 전주, 광주, 진주)에서 복사량자료에 기초한 Priestley-Taylor 식이 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났다. 독일 내륙지역에서 수행된 연구에서 Xu and Chen (2005)은 복사량에 근거한 Makkink 식이나 Priestley-Taylor 식이 기온에 근거한 Hargreaves 식보다 더 적합하다고 발표하였다. 또한, Lu *et al.* (2005)은 미국 남동부 지역에서 Hargreaves 식이나 Makkink 식 보다 Priestley-Taylor 식이 더 기준증발산량을 잘 모사하는 것으로 보고한 바 있다. 서산지역의 경우 복사량자료에 기초한 Makkink 식이 가장 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났으며, 에너지수지와 공기동력학적 방법에 근거한 Penman 식은 여수지역에서 RMSE 값을 기준으로 FAO P-M 식과 가장 유사한 것으로 나타났을 뿐 그 이외의 지역에서는 FAO P-M 식과 상이한 결과를 보이는 것으로 판단된다.

도시화율이 20% 이상인 대도시(서울, 인천, 수원, 대전, 대구, 광주, 제주)의 경우, 서울은 Priestley-Taylor 식, 인천은 Hargreaves 식, 수원은 Makkink 식(MAE 기준)과 Priestley-Taylor 식(RMSE기준), 대전은 Priestley-Taylor 식, 대구는 Hargreaves 식, 광주는 Priestley-Taylor 식, 제주는 Hargreaves 식이 가장 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타나서 도시화율을 기준으로 하는 경우, Priestley-Taylor 식과 Hargreaves 식이 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났다. 5 % 이하 경사면적이 20 % 이하인 지역 중 내륙지역에 위치한 추풍령의 경우 Priestley-Taylor 식이 그리고 해안지역에 위치한 통영과 여수의 경우 Hargreaves 식이 가장 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났다. 5 % 이하 경사면적이 60 % 이상인 지역 중 내륙지역에 위치한 서울의 경우 Priestley-Taylor 식이, 해안지역에 위치한 인천, 군산 그리고 제주의 경우 Hargreaves 식이 가장

FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났다. 저수지나 하천, 습지 등의 면적이 10 % 이상인 지역 중에서 내륙지역에 위치한 서울의 경우 Priestley-Taylor 식, 해안지역에 위치한 인천, 군산, 부산 그리고 목포의 경우 Hargreaves 식이 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 기준증발량 산정식은 연구지역의 도시화율보다는 해안 및 내륙의 위치에 더 영향을 받는 것으로 나타났고, 경사도 5% 이하의 면적이 차지하는 비율과도 거의 관계가 없는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 과거 제안된 5가지의 기준증발산식으로부터 산정된 증발산량과 pan 증발량을 이용하여 상관분석을 실시하였고 pan 계수를 산정하였다. 또한 우리나라 21개 기상관측지점에서 측정된 일별 기상자료를 이용하여 과거 제안된 기준증발산식들을 비교하고 그 유사성을 알아보았다. 적용된 대표적인 기준증발산량 산정식은 Penman 식, FAO P-M 식, Makkink 식과 Priestley-Taylor 식 그리고 Hargreaves 식 등이다. 기준증발산량과 pan 증발량과의 상관분석을 실시한 결과에 의하면 대부분의 식들이 pan 증발량과 높은 상관관계를 보이고 있다. 또한 9개 연구지역으로부터 FAO P-M 식을 적용하여 산정된 pan계수는 0.74에서 0.93사이의 범위를 보이고 있다.

기준증발산식들을 비교한 결과에 의하면 전국 21개 연구지역 중에서 12개의 지역에서 대기온도자료에 기초한 Hargreaves 식이 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났는데, 이들 지역은 대구지역을 제외하고 해안지역(속초, 인천, 포항, 군산, 울산, 부산, 통영, 목포, 여수, 제주, 서귀포)에 위치하고 있다. 반면에 내륙에 위치한 8개 연구지역(서울, 수원, 청주, 대전, 추풍령, 전주, 광주, 진주)에서 복사량자료에 기초한 Priestley-Taylor 식이 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났다. 단지 서산지역만 복사량자료에 기초한 Makkink 식이 FAO P-M 식과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 기준증발량 산정식은 연구지역의 도시화율보다는 해안 및 내륙의 위치에 더 영향을 받는 것으로 나타났고, 경사도 5% 이하의 면적이 차지하는 비율과도 거의 관계가 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 우리나라 21개 기상관측지점을 중심으로 10km 범위에서 토지이용조건과 지역경사도를 바탕으로 기준증발산식들의 유사성을 비교 검토하였다. 따라서 본 논문의 연구결과는 추후 지역특성을 고려한 실제증발산량 산정 방법 개발과 효율적 수자원 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 이후 연구에

서는 유역별 물수지분석 등을 위하여 본 연구결과를 바탕으로 유역별 실제증발산량 산정방법을 모색하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 청운대학교 학술연구조성비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설기술혁신사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단으로부터 일부 연구비를 지원받아 수행한 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 김성원, 김형수 (2007). “비선형 증발량 및 증발산량 시계열의 모형화를 위한 신경망-유전자 알고리즘 모형 1. 모형의 이론과 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제1호, pp. 73-88.
- 김현수, 정상옥 (1999). “우리나라 주요지점의 기준작물 증발산량 산정과 비교.” **한국관개배수**, 제6권, 제2호, pp. 37-46.
- 오남선, 이길하 (2004). “일단위 온도에 기초한 증발산량의 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 479-485.
- 유승환, 최진용, 장민원 (2006). “논벼에 대한 Penman-Monteith와 FAO Modified Penman공식의 작물계수 산정.” **한국농공학회논문집**, 한국농공학회, 제49권, 제1호, pp. 13-23.
- 임혁진, 권형중, 배덕효, 김성준 (2006). “CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 453-466.
- 조재경 (2002). “강우의 지표침투율 추정법.” **농어촌과 환경**, 제12권, 제3호, pp. 121-131.
- 허승오, 정강호, 하상건, 김정규 (2006). “FAO Penman-Monteith 모형의 증발산량 산정에 이용되는 기상요소의 평가.” **한국토양비료학회지**, 한국토양비료학회, 제39권, 제5호, pp. 274-279.
- Alkaeed, O., Flores, C., Jinno, K., and Tsutsumi, A. (2006). “Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area, Fukuoka, Japan.” *Memoirs of the Faculty of Engineering*, Kyushu University, Vol. 66, No. 1, pp. 1-14.

- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., and Perriera, L.S. (1994). "An update for the definition of reference evapotranspiration." *ICID Bull.*, Vol. 43, No. 2, pp. 1-34.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO.
- Amatya, D.M, Skaggs, R.W., and Gregory, J.D. (1995). "Comparison of methods for estimating REF-ET." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 121, No. 6, pp. 427-435.
- Burt, C.M, Mutziger, A.J., Allen, R.G., and Howell, T.A. (2002). *Evaporation from irrigated agricultural land in California*. Report No. 02-001, Irrigation and Research Training Center, CA., pp. 1-51.
- Chen, D., Gao, G., Xu, C.-Y., Guo, J., and Ren, G. (2005). "Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China." *Climate Research*, Vol. 28, pp. 123-132.
- Cuenca, R.H. (1989). *Irrigation system design: an engineering approach*. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, N.J., 133p.
- Droogers, P. and Allen, R.G. (2002). "Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions." *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 16, pp. 33-45.
- Fontenot, R.L. (2004). *An evaluation of reference evapotranspiration models in Louisiana*. M.S. thesis, Louisiana State University, Louisiana, pp. 83.
- Fox, D. G. (1981). "Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance." *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, No. 62, pp. 599-609.
- George, B.A., Reddy, B.R.S., Raghuwanshi, N.S., and Wallender, W.W. (2002). "Decision support system for estimating reference evapotranspiration." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 128, No. 1, pp. 1-10.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985). "Reference crop evapotranspiration from temperature." *Appl. Engr. Agric.*, Vol. 1, No. 1, pp. 96-99.
- Howell, T.A., Evette, S.R., Schneider, A.D., Todd, R.W., and Tolck, J.A. (1998). "Evapotranspiration of irrigated fescue grass in a semi-arid environment." *Paper No. 982117, ASAE meeting Presentation*, MI., pp. 1-23.
- Im, S., Kim, H., Kim, C., and Jang, C.. (2004). "A simple approach for estimating annual evapotranspiration with climate data in Korea." *Water Engineering Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 185-193.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G., and Jones, J.W. (2003). "Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 129, Vol. 5, pp. 336-347.
- Irmak, S., Allen, R.G., and Whitty, E.B. (2003). "Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 129, No. 5, pp. 360-370.
- Irmak, S., Dukes, M.D., and Jacobs, J.M. (2005). "Using modified Bellani plate evapotranspiration gauges to estimate short canopy reference evapotranspiration." *J. of Irrigation and Drainage Eng.*, Vol. 131, No. 2, pp. 164-175.
- Itenfisu, D., Elliot, R.L., Allen, R.G., and Walter, I.A. (2003). "Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort." *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 129, No. 6, pp. 153-159.
- IWMI, International Water management Institute. (2000). "World water and climate atlas." <http://www.iwmi.org>.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No. 70.
- Lage, M., Bamouh, A., Karrou, M., and Mourid, M. El. (2003). "Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and Pan evaporation methods under Moroccan conditions." *Agronomie*, Vol. 23, pp. 625-631.
- Lee, T.S., Najim, M.M.M., and Aminul, M.H. (2004).

- "Estimating evapotranspiration of irrigated rice at the west coast of the peninsular of Malaysia." *Journal of Applied Irrigation Science*, Vol. 39, No. 1, pp. 103-117.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., and Amatya, D.M. (2005). "A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States." *J. of the American Water Resources Association*, Vol. 41, No. 3, pp. 621-633.
- Makkink, G.F. (1957). "Testing the Penman formula by means of lysimeters." *J. Instit. Water Engineers*, Vol. 11, pp. 277-288.
- Monteith, J.L. (1965). "Evaporation and environment." *Symp. Soc. Exp. Biol.*, Vol. 19, pp. 205-234.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil, and grass." *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A193, pp. 120-146.
- Pereira, A.R., Villa Nova, N.A., Pereira, A.S., and Barbieri, V. (1995). "A model for the class A pan coefficient." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 76, pp. 75-82.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81-92.
- Qiu, G.Y., Miyamoto, K., Sase, S., Gao, Y., Shi, P., and Yano, T. (2002). "Comparison of the three temperature model and conventional models for estimating transpiration." *Japanese Agricultural Research Quarterly*, Vol. 36, No. 2, pp. 73-82.
- Rijtema, P.E. (1965). "An analysis of actual evaporation." *Agric. Res. Reports*, Vol. 659, p. 107.
- Temesgen, B., Eching, S., Davifoof, B., and Frame, K. (2005). "Comparison of some reference evapotranspiration equations for California." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 1, pp. 73-84.
- Trajkovic, S. (2005). "Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 316-323.
- Walter, I.A., Allen, R.G., Elliott, R., Mecham, B., Jensen, M.E., Itenfisu, D., Howell, T.A., Snyder, R., Brown, P., Eching, S., Spofford, T., Hattendorf, M., Cuenca, R.H., Wright, J.L., and Martin, D. (2000). "ASCE standardized reference evapotranspiration equation." *Proc. National Irrigation Symposium*, ASAE, Phoenix, AZ, pp. 209-215.
- Xu, C.-Y. and Chen, D. (2005). "Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany." *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 3717-3734.
- Xu, C.-Y. and Singh, V.P. (2002). "Cross comparison of experimental equations for calculating potential evapotranspiration with data from switzerland." *Water Resources Management*, Vol. 16, pp. 197-219.
- Gavilan, P. (2002). *La adveccion de calor sensible en el valle medio del Guadalquivir y su influencia en la medida y la estimacion de la evapotranspiracion de referencia*. Thesis Doctoral presentada en la Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agronomos y de Montes de Cordoba.

(논문번호:07-156/접수:2007.12.27/심사완료:2008.01.21)