韓國水資源學會論文集
第44卷 第12號·2011年 12月
pp. 915~928
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2011.44.12.915

유역 물수지를 이용한 연 실제증발산 산정에 미치는 수문기후 영향 연구

A Study on the Hydroclimatic Effects on the Estimation of Annual Actual Evapotranspiration Using Watershed Water Balance

임 창 수* / 임 가 희** / 윤 세 의***
Rim, Chang-Soo / Lim, Ga-Hui / Yoon, Sei-Eui

Abstract

The main purpose of this study is to understand the effects of hydroclimatic factors on annual actual evapotranspiration and to suggest the multiple linear regression (MLR) equations for the estimation of annual actual evapotranspiration from watershed. To accomplish this study purpose, 5 dam watersheds (Goesan dam, Seomjingang dam, Soyanggang dam, Andong dam, Hapcheon dam) were selected as study watersheds and annual actual evapotranspiration was estimated based on annual water balance analysis from each watershed. The estimated annual actual evapotranspiration from water balance analysis was used to evaluate the MLR equations. Furthermore, the possibility of the estimation of actual evapotranspiration using potential evapotranspiration equations (Penman equation, FAO P-M equation, Makkink equation, Preistley-Taylor equation, Hargreaves equation) was evaluated. It has turned out that it is not appropriate to use potential evapotranspiration for the estimation of actual evapotranspiration because the correlation between actual evapotranspiration and potential evapotranspiration is very low. The comparison of MLR equations with current actual evapotranspiration equations indicates that MLR equations can be used for the estimation of annual actual evapotranspiration. Furthermore, it has turned out that the effects of hydroclimatic factors on annual actual evapotranspiration from dam watersheds are different in each watershed; however, for all watersheds in common precipitation has turned out to be the most important climatic factor affecting on the estimation of annual actual evapotranspiration.

Keywords : dam watershed, water balance, actual evapotranspiration, potential evapotranspiration

요 지

본 연구에서는 댐유역의 연 실제증발산량에 영향을 미치는 주요한 수문기후요소를 파악하고 유역으로부터의 연 실제증발산량 산정을 위한 다변량회귀식을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 우리나라 5개 댐유역(괴산댐, 섬진강댐, 소양강댐, 안동댐, 합천댐)에서 연 물수지분석을 실시하여 연 실제증발산량을 산정하였고, 수문기후자료를 이용한 다변량회귀식으로부터 산정된 증발산량과 비교 검토함으로서 다변량회귀식의 타당성을 검토하였다. 또한 잠재증발산식들을 이용한 실제증발산량 산정 가능성을 파악하기 위하여 잠재증발산식들(Penman식, FAO P-M식, Makkink식, Preistley-Taylor식, Hargreaves식)로부터 산정된 잠재증발산량과 실제증발산량의 상관성을 검토하였다. 검토 결과 실제증발산량과 잠재증발

* 교신저자, 경기대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (e-mail: csrim@kgu.ac.kr)
Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University, Suwon, Korea
** 경기대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (e-mail: tory0504@naver.com)
Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University, Suwon, Korea
*** 경기대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: syyoon@kgu.ac.kr)
Professor, Dept of Civil Engineering, Kyonggi University, Suwon, Korea

산량 사이에 상관관계가 적어서 잠재증발산량을 이용한 실제증발산량 산정방법은 적절하지 않은 것으로 나타났다. 기존에 제안된 유역 실제증발산량 산정식들과 비교를 통하여 연 실제증발산량을 산정하는데 있어서 다변량회귀식의 적용성을 확인하였다. 또한 각 댐 유역의 실제증발산량에 영향을 미치는 주요 수문기후요소는 각기 다른 것으로 나타났으나, 공통적으로 강수량이 연 실제증발산량 산정을 위한 주요 기후요소인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 댐 유역, 물수지, 실제증발산, 잠재증발산

1. 서 론

증발산은 중요한 지구상의 물순환 과정의 하나로서 증발산 현상을 이해하는 것은 수문기후요소가 수자원에 미치는 영향을 파악하는데 필요하다. 본 연구에서는 댐 유역의 연 물수지분석 결과를 이용하여 유역 규모의 연 증발산량을 분석하고 증발산량에 영향을 미치는 수문기후학적 요인을 파악하고자 하였다. 국내의 경우 유역 물수지분석을 이용한 실제증발산량 산정에 관한 연구가 전무한 반면에 국외에서는 일부 연구자들(Pike, 1964; Milly, 1994; Leopoldo et al., 1995; Mac Nish et al., 2000; Zhang et al., 2001)에 의해서 유역 물수지분석을 이용하여 실제증발산량을 산정하려는 연구가 수행된 바 있다.

최근에는 기후변화가 유역 증발산에 미치는 영향을 분석하려는 연구가 많은 연구자들(Zhang et al., 2004; Ramirez and Hobbins 2005; Li et al., 2007; McVicar et al., 2007; Yoshiyuki et al., 2008; Boulian et al., 2009)에 의해서 수행된 바 있다. Ramirez and Hobbins (2005)는 미국 25개 유역에서 수행된 연구에서 강수량이 변함에 따라서 실제증발산량과 증발접시 증발량 그리고 Penman 증발산량사이에는 상호보완관계가 있음을 밝혔다. Boulain et al. (2009)에 의하면 나이지리아 서쪽 Sahel 지역에서 수행된 연구에서, Sahel 지역의 증발산량은 기후보다 토지이용도의 변화에 더 민감하지만, 변동은 10% 보다 적다고 발표하였다. 유역 실제증발산량 산정을 위하여 실제증발산에 영향을 미치는 가용에너지(잠재증발산량)와 강수량을 이용하여 실제증발산량을 산정하려는 시도가 Budyko (1958)에 의해서 최초로 시도된 이후 여러 연구 연구자들(Koster and Suarez, 1999; Arora, 2002; Zhang et al., 2001)에 의해서 시도된 바 있다. 또한 유역으로부터 장기유출분석 과정에서 수문순환의 중요한 한 성분으로서 증발산의 영향을 분석하기 위하여 장기유출모형을 적용한 연구들이 수행된 바 있으며(Liu and Yang, 2010; Kunkel and Wendland, 2002), Kunkel and Wendland (2002)는 독일의 엘베 강 유역에서 GROWA98 모델을 사용하여 유역 유출특성을 분석하기 위하여 유역증발산을 고려하여 물수지 분석을 실시하였다.

국내에서는 유역 장기유출분석에서 수문순환과정의 중요한 성분으로서 증발산이 연구된 바 있다(김남원과 김철겸, 2004; 이병주 등, 2008; 이상진 등, 2010). 김남원과 김철겸(2004)은 보청천 유역에서 FAO Penman-Monteith (FAO P-M)식을 이용하여 산정된 잠재증발산량을 SWAT 모형에 적용하여 유역 실제증발산량을 산정하고, 이를 Morton CRAE 방법에 의해서 산정된 실제증발산량과 비교 검토한 바 있다. 이병주 등(2008)은 기온 변화로 인한 유출수문성분의 변동성을 평가하고자 SWAT모형을 적용하였다. 이상진 등(2010)은 대청댐 유역을 대상으로 유역 유출모형을 활용하여 유역 내 장기유출량을 모의하고, 유역의 물수지 개념을 활용하여 유출성분을 분석하였다. 최근에는 기후변화가 유역 증발산에 미치는 영향을 분석하려는 연구가 수행된 바 있다. 양해근(2007)은 섬진강댐 유역과 소양강댐 유역에서 기후변화에 따른 유역의 물수지 변화를 파악하였는데, 증발산량은 지역 특성과 지역별 기후요소의 차이에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 박종철(2009)은 용담댐 구량천 유역을 대상으로 BROOK90모형을 이용해 기후변화, 토지이용변화, 산림 식생변화 등이 물수지에 미칠 영향에 대해 분석하였다.

과거 연구사례를 비교 분석한 결과 국외에서는 유역 물수지분석을 이용하여 수문기후요소와 실제증발산량간의 상관성을 분석하고 유역 실제증발산량을 산정하려는 연구가 수행된 바 있으나, 국내에서는 이에 대한 연구가 수행된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 5개 댐 유역으로부터 물수지분석을 실시하고 물수지분석 결과를 이용하여 유역규모에서 연 실제 증발산량 산정 방법을 검토하였다. 또한 유역 실제 증발산량에 영향을 미치는 수문기후요소의 영향 정도를 평가하기 위하여 수문기후요소들을 독립변수로 하고 연 실제증발산량을 종속변수로 하는 다변량회귀분석을 실시하였다.

2. 연구방법 및 결과

2.1 연구 지역 및 자료

본 연구에서는 한국수자원공사와 한국수력원자력에서 관리하는 5개 댐 유역을 연구유역으로 선정하였다(Fig. 1). 각 댐 유역의 수문기후 관측지점은 Fig. 2에 나타나 있다. 연구유역을 선정하기 위해, 장기간 유역물수지 분석을 위해 댐 유역 내의 수문기후자료 관측년도가 길어 적어도 20년 이상인 지역을 선정하였다. 또한, 유역으로부터 수자원의 이동이 없는 유역을 선정하였다. 대상 연구유역으로 괴산댐 유역, 섬진강댐 유역, 소양강댐 유역, 안동댐 유역, 합천댐 유역을 선정하였다. 괴산댐은 충북 괴산군 칠성면에 위치해 있는 댐으로 남한강 지류인 달천을 가로질러 만든 댐이다. 괴산댐의 유역면적은 671 km^2이며, 길이 171 m, 너비 45 m, 높이 28 m이다. 섬진강댐은 전북 임실군 강진면 옥정리와 정읍시 산내면 종성리 사이에 있으며, 유역면적은 763 km^2, 댐 높이는 64 m, 제방길이 344.2 m 댐이다. 소양강댐은 강원 춘천시 신북읍 소

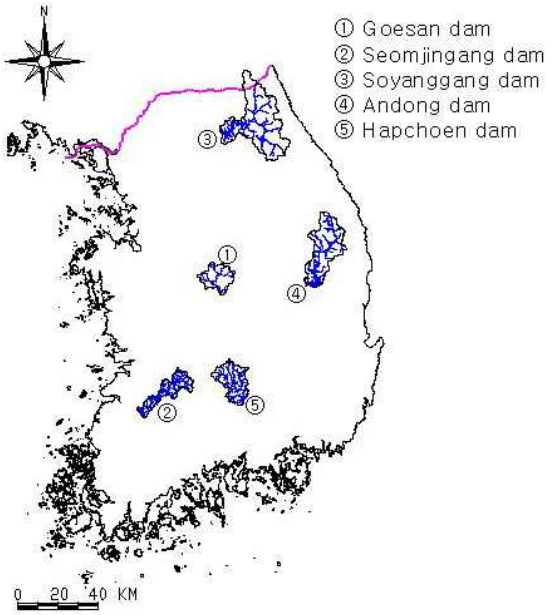
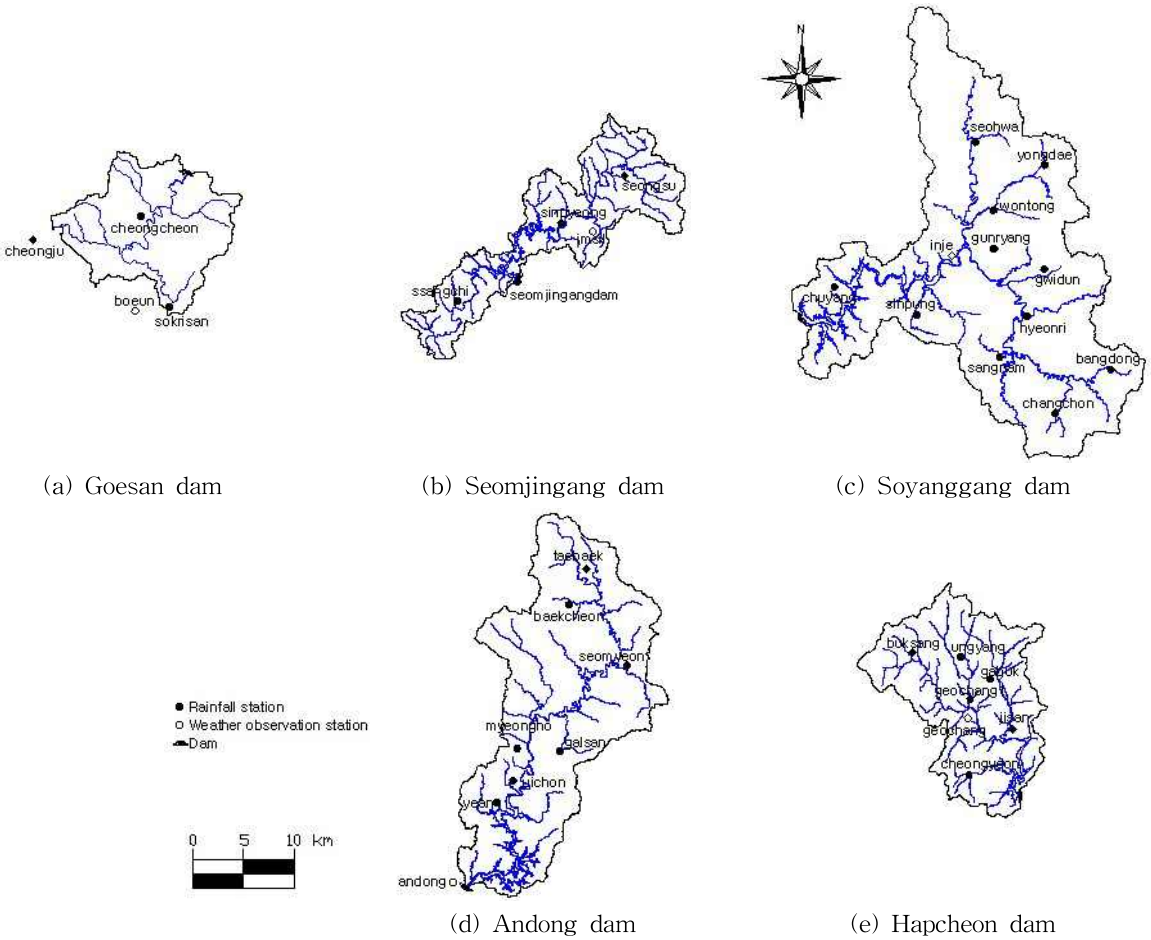


Fig. 1. Locations of Study Watersheds



(a) Goesan dam (b) Seomjingang dam (c) Soyanggang dam

(d) Andong dam (e) Hapcheon dam

Fig. 2. Hydroclimatic Measurement Stations

양강에 있는 다목적댐으로, 유역면적은 2,703 km^2, 높이 123 m, 제방길이 530 m이며, 안동댐은 경북 안동시 와룡면 중가구리에 위치해 있으며, 높이 83 m, 길이 612 m이며, 유역면적 1,584 km^2인 낙동강 본류를 가로막은 사력댐이다. 마지막으로 합천댐은 경상남도 합천군 대병면 회양리에 있는 댐으로 높이 96 m, 길이 472 m, 유역면적 925 km^2의 다목적 댐이다.

본 연구를 위한 기후자료는 기상청에서 관리하는 자료를 사용하였으며, 괴산댐 유역(보은), 섬진강댐 유역(임실), 소양강댐 유역(인제), 안동댐 유역(안동), 합천댐 유역(거창)에서 관측된 최저기온, 최고기온, 강수량, 풍속, 상대습도, 일조시간 등을 사용하였다. 그리고 댐 유역의 강우량 자료 및 유출량 자료는 국가수자원관리종합 시스템(WAMIS)에서 제공되고 있는 자료를 사용하였다. 괴산댐 유역은 1982~2010년(29년간), 섬진강댐 유역은 1975~2010년(36년간), 소양강댐 유역은 1978~2010년(33년간), 안동댐 유역은 1979~2010년(32년간), 합천댐 유역은 1989~2010년(22년간)까지의 자료를 분석하였다.

5개 연구유역 내 토지피복자료 분석을 위하여 국가수자원관리종합 시스템(WAMIS)에서 제공하고 있는 토지피복별 면적을 이용하였다. 본 연구를 위하여 유역 토지피복별 면적 자료와 기간이 일치하는 1975년부터 2005년까지 5년 간격(1975년, 1980년, 1985년, 1990년, 1995년, 2000년, 2005년)의 7개년 자료를 이용하였다. 5개의 유역의 토지피복자료를 분석한 결과 모두 시간이 지남에 따라 시가화가 진행되고 있다는 것을 알 수 있었다.

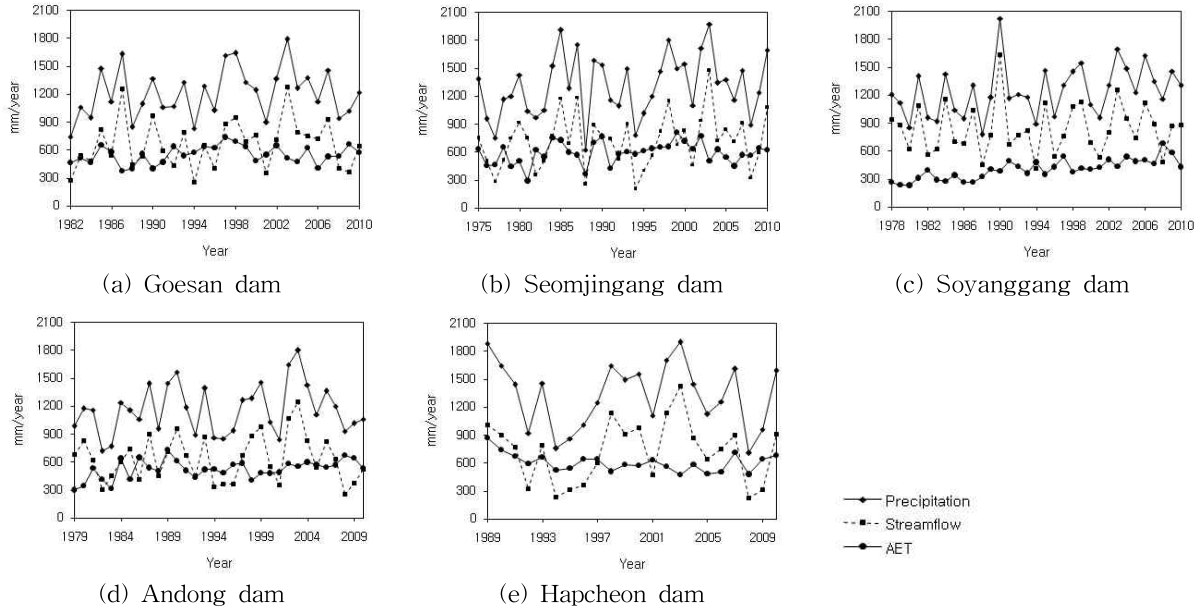
2.2 유역물수지 분석

실제증발산량 자료가 없는 경우 연 물수지분석을 통한 잠재증발산량으로부터 실제증발산량을 산정하는 방법은 일반적으로 유역규모에서 토양수분과 지하수함양량의 변화를 무시하는 조건으로 연구가 수행되어 왔다(Zhang et al. 2001; Lu et al., 2005). 유역 물수지는 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P - Q - \triangle S = AET \tag{1}$$

여기서, P는 연 강수량(mm/year), Q는 연 유출량(mm/year), AET는 연 실제증발산량(mm/year), $\triangle S$는 토양수분 변화량(mm/year)에 해당하며, 장기적인 측면에서는 토양수분 변화량은 0에 근접함으로 무시할 수 있다. 유역별 연 물수지분석 결과 강수량과 유출량 모두 연 편차가 심하다는 것을 알 수 있었다(Fig. 3).

각 유역의 평균강수량을 보면, 괴산댐유역은 1,210.9 mm/year, 섬진강댐 유역은 1,309.6 mm/ year, 소양강댐 유역은 1,241.0 mm/year, 안동댐 유역은 1,162.2 mm/year, 합천댐 유역은 1,331.7 mm/year로 5개의 유역 중 섬진강댐 유역의 평균 강수량이 가장 크게 나타났으며, 평균유출량의 경우 괴산댐 유역 661.4 mm/year, 섬진강댐 유역은 718.9 mm/year, 소양강댐 유역은 837.1 mm/year, 안동댐 유역은 638.8 mm/year, 합천댐 유역은 726.5 mm/year로서, 소양강댐 유역의 평균유출량이 가장 크게 나타났다. 또한 평균 증발량과 유출계수(=유역 평균유출량/유역 평



(a) Goesan dam (b) Seomjingang dam (c) Soyanggang dam

(d) Andong dam (e) Hapcheon dam

Fig. 3. Annual Water Balance in Each Watershed

균강수량)를 보면, 괴산댐 유역은 549.6 mm/year와 1.83, 섬진강댐 유역은 590.8 mm/year와 1.97, 소양강댐 유역은 403.9 mm/year와 1.54, 안동댐 유역은 523.4 mm/year와 1.96, 합천댐 유역은 605.2 mm/year와 2.07로 합천댐 유역의 평균 증발량과 유출계수가 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 그리고 괴산댐 유역에 내린 강수량 중 2003년에 1,787.4 mm/year로 가장 큰 수치를 보였으며, 1982년에 739.1 mm/year로 가장 적게 내린 것을 알 수 있었다. 섬진강댐 유역의 최고 강수량은 1973.4 mm/year로 2003년에 가장 많았고, 620.8 mm/year로 1988년에 가장 적었다. 소양강댐 유역의 경우 2,017.7 mm/year로 1990년에 가장 많은 비가 내렸으며, 775.1 mm/year로 1988년에 가장 적은 양의 비가 내렸다. 또한 안동댐 유역은 1,796.6 mm/year로 2003년에 최고 강수량을 보였고, 716.4 mm/ year로 1982년에 최저 강수량을 볼 수 있었으며, 합천댐 유역의 최고 강수량은 1,895.4 mm/ year로 2003년에 내린 강수량이었고, 705.4 mm/year로 2008년에 내린 강수량이 가장 적었다. 이것으로 2003년에 비가 많이 왔다는 것을 알 수 있고, 1982년과 1988년에 강수량이 적었다.

2.3 연 실제증발산량 산정

2.3.1 잠재증발산량식 적용성 검토

잠재증발산식들을 이용한 실제증발산량 산정 가능성을 파악하기 위하여 잠재증발산 산정식들의 적용성을 검토하였고, 검토된 잠재증발산량식은 Penman식, FAO P-M식, Makkink식, Preistley-Taylor식, Hargreaves식 등이다.

(1) FAO P-M식

Allen et al. (1998)에 의해서 제안된 FAO P-M식은 유도과정과 사용방법이 잘 알려져 있으며, 각종 증발산계(lysimeter)를 이용하여 측정된 증발산량과 비교 검증된 바 있다(Allen et al., 1994; Gavilan, 2002; Droogers and Allen, 2002).

$$PET = \frac{0.408\Delta Q_n + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \qquad (2)$$

여기서, PET=잠재증발산량(mm/day), Q_n=순방사(MJ/m^2/ ay), T_a=2 m 높이에서 일평균기온(˚C), u_2=지상 2 m 높이에서 풍속(m/sec), e_s=포화증기압(kPa), e_a=실제증기압(kPa), $(e_s - e_a)$ = 대기의 포화증기압 부족량(kPa), Δ=포화증기압과 온도곡선의 기울기(kPa/˚C), γz=건습계 상수(kPa/℃).

(2) Penman식

Penman (1948)은 지표면으로부터 기준증발산량을 산정을 위하여 잔디조건의 증발표면에서 발생되는 순복사에너지와 증발표면위의 공기움직임에 의한 증발효과를 고려하여 물리적 이론에 근거한 증발산 산정식을 제안하였다.

$$PET = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \qquad (3)$$

$$E_a = f(u)(e_s - e_a) = (a + bu_2)(e_s - e_a) \qquad (4)$$

$$f(u) = 0.263 + 0.141u_2 \qquad (5)$$

여기서, PET=잠재증발산량(mm/day), R_n=순방사(mm/day), 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=1, b=0.537), Δ=포화증기압과 온도곡선의 기울기(mb/℃), γ=건습계 상수(mb/℃), E_a는 건조력(drying power)항(mm/day)이다.

(3) Makkink식

Makkink (1957)는 잔디조건에서 기준증발산량을 산정하기 위한 식을 제안하였다.

$$PET = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Q_s}{H_v} - 0.12 \qquad (6)$$

여기서, PET=잠재증발산량(mm/day), Q_s=일사량(cal/cm^2/day), Δ=포화증기압과 온도곡선의 기울기(mb/℃), γ=건습계 상수(mb/℃), H_v=잠재증기화열(cal/g).

(4) Priestley-Taylor (P-T)식

Priestley and Taylor (1972)는 Penman식의 공기동력항을 특정 계수 값으로 가정하여 단순화 한 식을 제안하였다. Eq. (7)은 보다 적은 관측자료를 필요로 하고, 잔디조건에서의 기준증발산량 산정에 적용할 수 있고, 다습한 지역에서 적용하도록 제안되어졌다.

$$PET = \alpha \frac{\Delta Q_n}{\Delta + \gamma} \qquad (7)$$

여기서, PET=기준증발산량(mm/day), α=empirical coefficient (=1.26), Q_n=순방사(cal/cm^2/day), $\frac{\Delta Q_n}{\Delta + \gamma}$는 Pen-

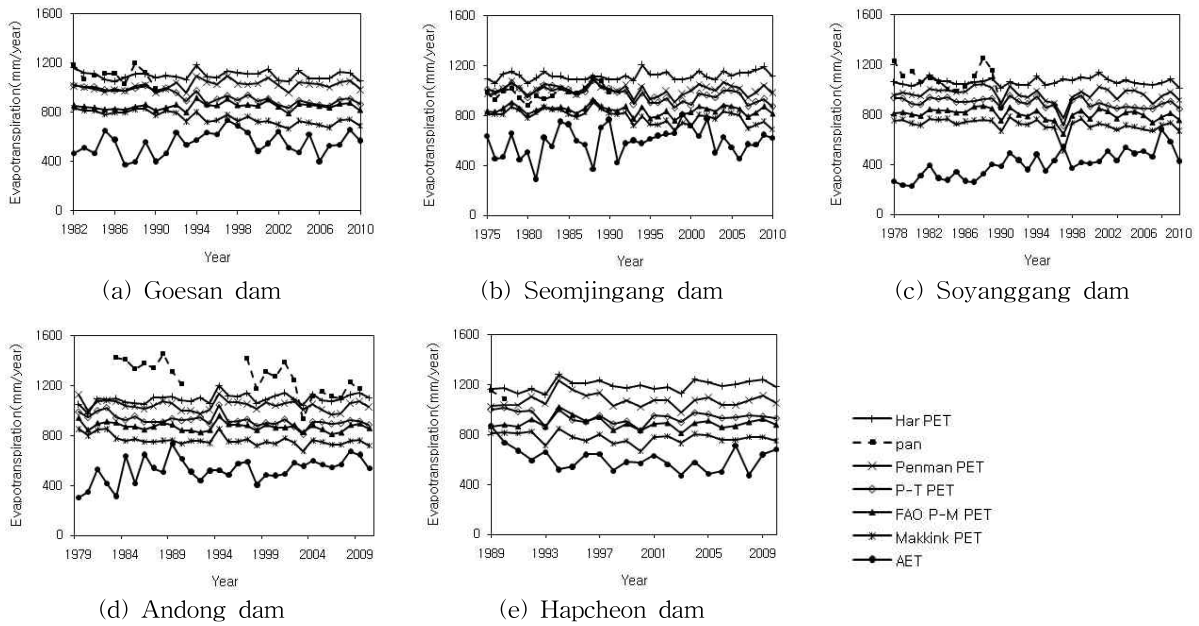
man 기준증발산식의 에너지항과 동일하고, 이류가 없는 습윤한 지표면에서 기준증발산량을 나타낸다.

(5) Hargreaves식

Hargreaves and Samani (1985)는 잔디조건에서 기준증발산량을 계산하는 식을 제안하였으며, 계산이 간단하고 최소한의 기후자료를 필요로 하는 장점이 있으며, 상대습도와 같은 지역적 특성을 고려하지 못하는 단점이 있다.

$$PET = aR_a TD^{1/2}(T_a + 17.8) \qquad (8)$$

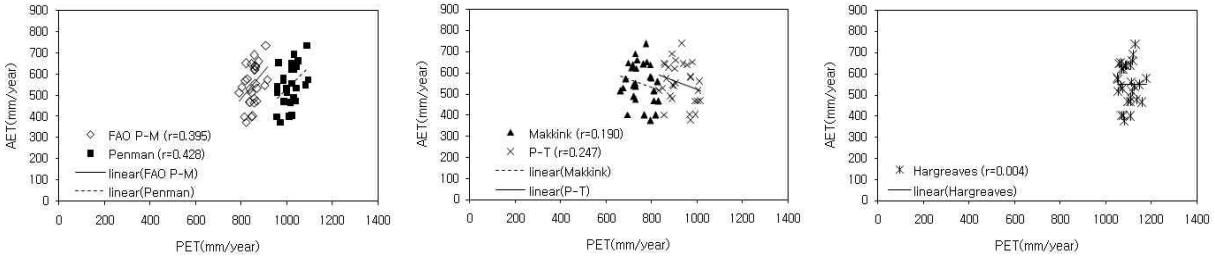
여기서, PET=잠재증발산량(mm/day),



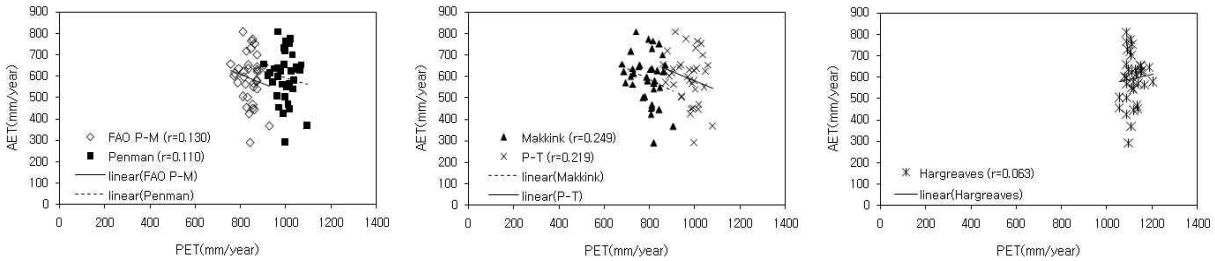
(a) Goesan dam (b) Seomjingang dam (c) Soyanggang dam

(d) Andong dam (e) Hapcheon dam

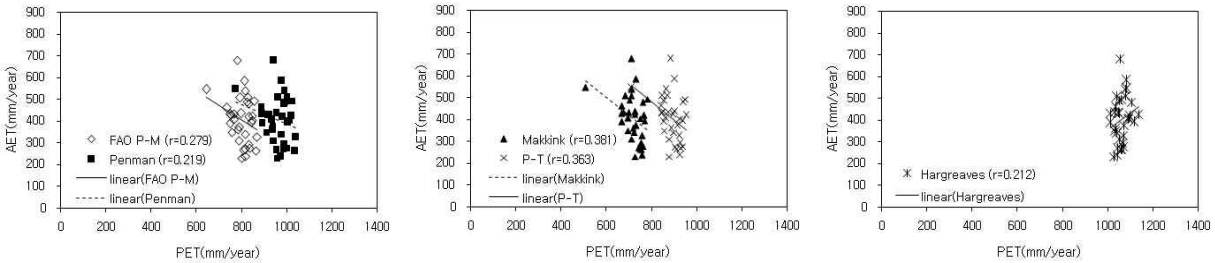
Fig. 4. Comparison of Annual Actual and Potential Evapotranspiration



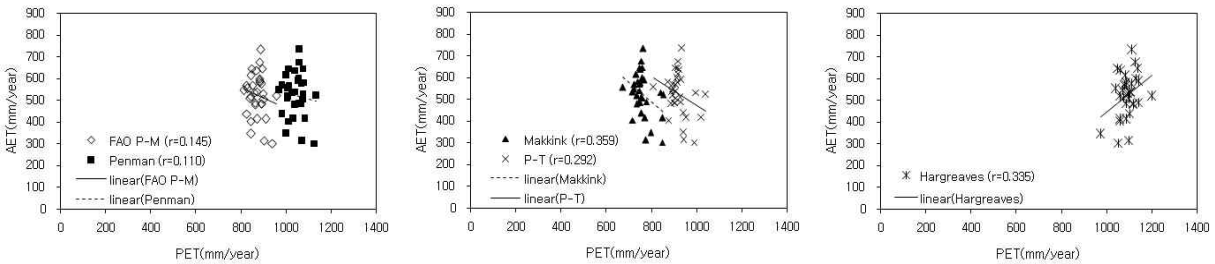
(a) Goesan dam



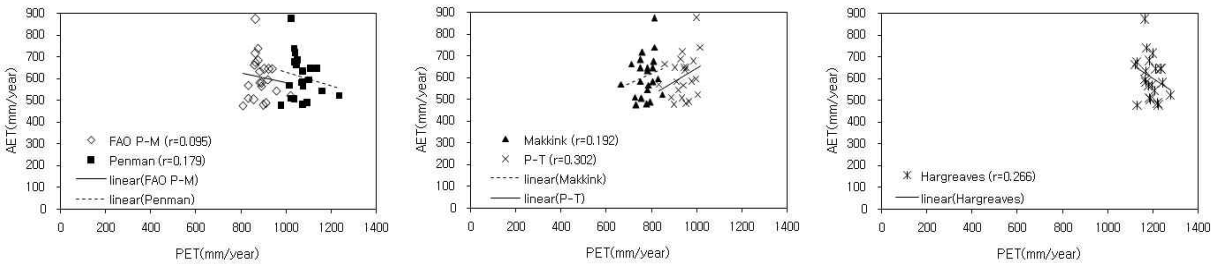
(b) Seomjingang dam



(c) Soyanggang dam



(d) Andong dam



(e) Hapcheon dam

Fig. 5. Comparisons of Actual Evapotranspiration with Potential Evapotranspiration according to the Variation of Precipitation

로 나타났다. 이 식들은 과거에 본 연구와 다른 유역과 다른 기간자료를 이용하여 Im et al. (2004)에 의해서도 적용된 바 있다. Schreiber식에서 유역실제증발산량은 강수량과 잠재증발산량의 함수로서 다음 식과 같이 나타낸다.

$$AET = P\left[1 - \exp\left(\frac{-PET}{P}\right)\right] \tag{9}$$

여기서, AET는 연 실제증발산량(mm/year), P는 연 강수량(mm/year), PET는 기준잠재증발산량(mm/year)으로 본 연구에서는 FAO P-M식을 이용하여 산정하였다.

Budyko (1958)에 의하면 유역으로부터의 증발산량은 물수지분석을 통한 유역 내 증발산 가용수분조건과 증발산에 영향을 미치는 기상요소를 동시에 고려함으로서 추정될 수 있다. 유역 내 증발산 가용수분조건은 강수량으로 결정될 수 있으며, 증발산에 영향을 미치는 기상요소의 영향은 잠재증발산량을 가정함으로서 결정될 수 있다. 매우 건조한 조건하에서는 잠재증발산량은 강수량을 초과하고, 실제증발산량은 강수량과 동일한 값을 갖는다. 매우 습한 조건하에서는 가용수분은 잠재증발산량을 초과하고, 실제증발산량은 잠재증발산량에 접근한다(Budyko, 1958). Zhang et al. (2001)은 Budyko (1958)의 가정을 전제로 전세계 250개 유역에서 장기간의 물수지 분석으로부터 다음과 같은 연 실제증발산량 산정식(10)을 유도하였다.

$$AET = \left(\frac{1+\omega\frac{PET}{P}}{1+\omega\frac{PET}{P}+\frac{P}{PET}}\right)\times P \tag{10}$$

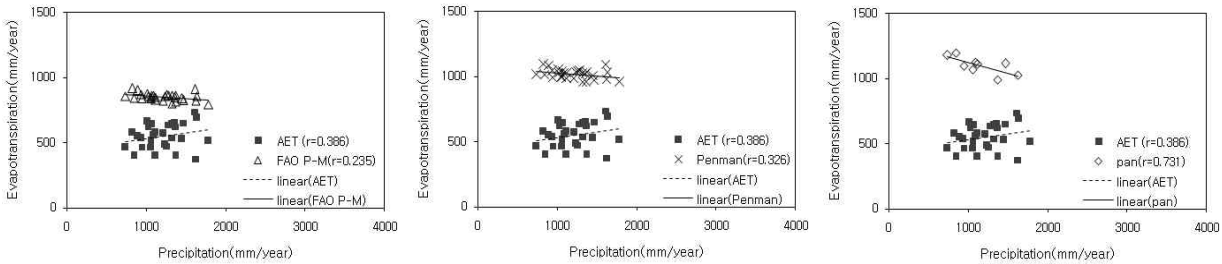
여기서, AET는 연 실제증발산량(mm/year), P는 연 강수량(mm/year), ω는 식생이 증산작용에 의한 물 사용 정도의 차이를 반영하는 계수이다. ω지수는 연구지역의 토지피복조건을 이용하여 산정하였으며, 주거지역의 경우 0, 나대지의 경우 0.2, 논, 밭, 초지의 경우 0.5, 산림의 경우 2.0, 수역의 경우 연 실제증발산은 연 기준 잠재증발산량의 1.076배로 간주하였다. PET는 기준잠재증발산량(mm/ year)으로 본 연구에서는 FAO P-M식을 이용하여 산정하였다. 본 연구에서 적용한 w지수는 Zhang et al. (2001)이 제시한 값을 적용하였으며, 수역의 실제증발산량의 경우 Allen et al. (1998)과 Xu et al. (2006)의 연구결과에 기초하여 FAO P-M 증발산량은 증발접시 증발량의 약 0.67배 정도이고, 또한 증발접시 증발량과 저수지 증발량과의 비는 약 0.72로 가정하여 결정하였다.

본 연구에서는 1975년, 1980년, 1985년, 1990년, 1995년, 2000년, 2005년의 7개년 자료를 이용한 토지 피복별 면적자료를 이용해 연 실제증발산량을 산정하였다. 강수량에 따라 실제증발산량과 잠재증발산량(FAO P-M, Penman, 증발접시)을 비교해 본 결과 강수량이 증가할수록 잠재증발산량은 감소하였고, 강수량이 감소할수록 실제증발산량은 증가하는 경향을 보였다. 그러나 상관계수가 낮아 단지 강수량과 잠재증발산량을 이용하여 실제증발산량을 추정하는 것은 오차를 포함할 것으로 판단된다(Fig. 6).

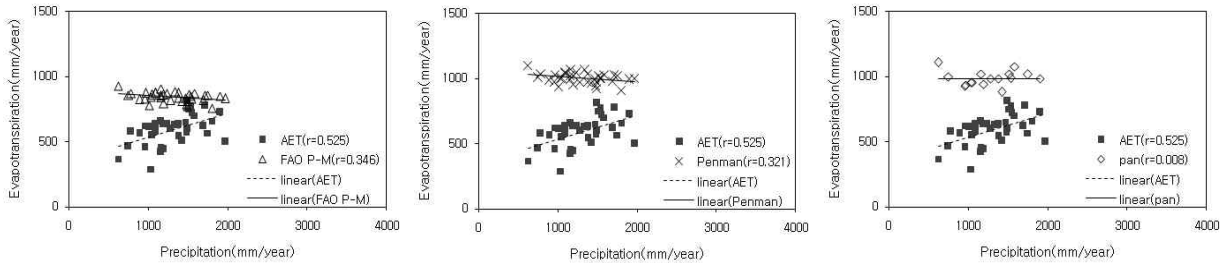
Fig. 7은 5개 유역의 토지이용에 따라 논, 밭, 초지와 산림, 수역, 주거지, 나대지로 나누어 5개 항목별로 각각 Zhang et al. (2001) 식으로부터 산정된 연 실제증발산량을 보여주고 있다. 괴산댐 유역의 산림 면적비(%)는 82.27%, 섬진강댐 유역은 78.91%, 소양강댐 유역은 93.11%, 안동댐 유역은 85.98%, 합천댐 유역은 78.83%로 5개 모두 산림이 증발산량의 대부분을 차지하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 산림 다음으로 논, 밭, 초지 는 괴산댐 유역은 15.56%, 섬진강댐 유역은 16.59%, 소양강댐 유역은 4.48%, 안동댐 유역은 11.23%, 합천댐 유역은 18.83% 정도여서 산림과 논, 밭, 초지를 합치면 90% 넘는 것을 알 수 있다.

2.3.3 연 실제증발산량 산정을 위한 수문기후 영향 검토

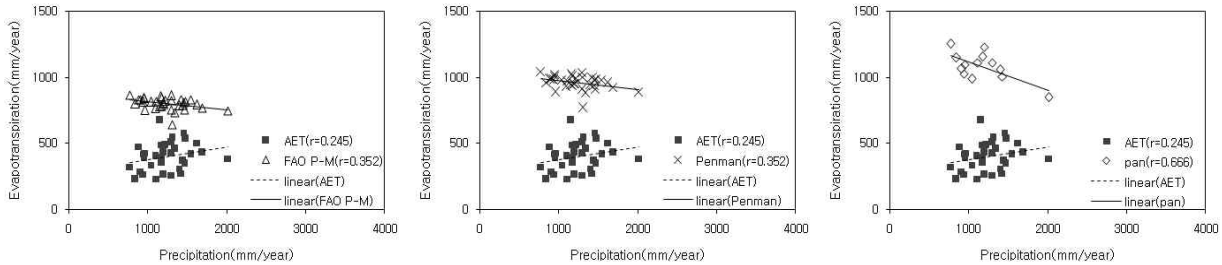
유역규모의 연 실제증발산량 산정에 영향을 미치는 수문기후요소를 분석하고, 각 수문기후요소가 연 실제증발산량에 미치는 중요도를 파악하였다. 또한 분석결과를 바탕으로 연 실제증발산량을 종속변수로 하고, 수문기후요소를 독립변수로 하는 다변량회귀식을 제안하였다. 연 실제증발산량 산정을 위한 다변량회귀식은 Table 1에 나타나 있다. 괴산댐 유역의 경우 강수량과 풍속만이 양측검정 유의수준 α=0.05에서 유의한 것으로 나타났으며, 소양강댐 유역은 온도가 양측검정 α=0.05에서 유의한 것으로 나타났다. 그리고 합천댐 유역의 경우 순방사량이 양측검정 α=0.05에서 유의한 것으로 나타났다. 표준화계수를 고려했을 때, 다변량회귀식을 통해서 강수량, 순방사량, 온도, 바람, 포화증기압이 증가할수록 실제증발산량도 증가하며, 상대습도가 감소할수록 실제증발산량은 증가한다는 것을 알 수 있었다. 각각의 변수들을 표준화했을 때, 괴산댐 유역의 경우 순방사량이 실제증발산량 산정에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 풍속, 강수량, 상대습도 순으로 영향력을 미치는 것으로 나타났다. 섬진강댐 유역의 경우 강수량이 실제증발산량 산정에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 온도, 바람, 포화증기압 순이었다. 소양강댐 유역은 온도, 상대습도, 강수량 순서대로 중요한 것으로 나타났다. 또한 안동댐 유역의 중요도는 강수량, 바



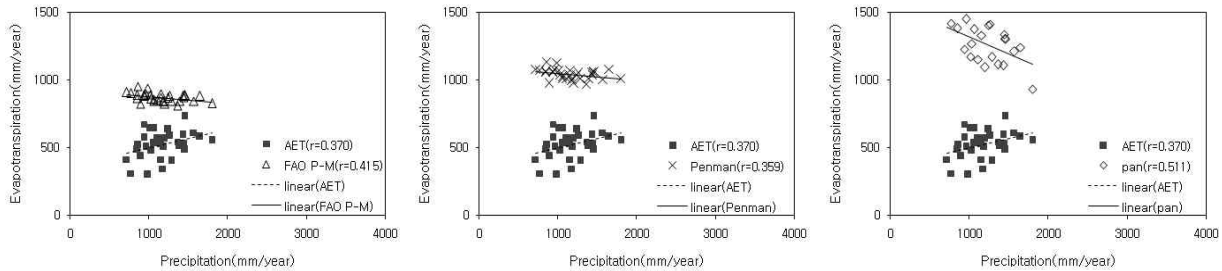
(a) Goesan dam



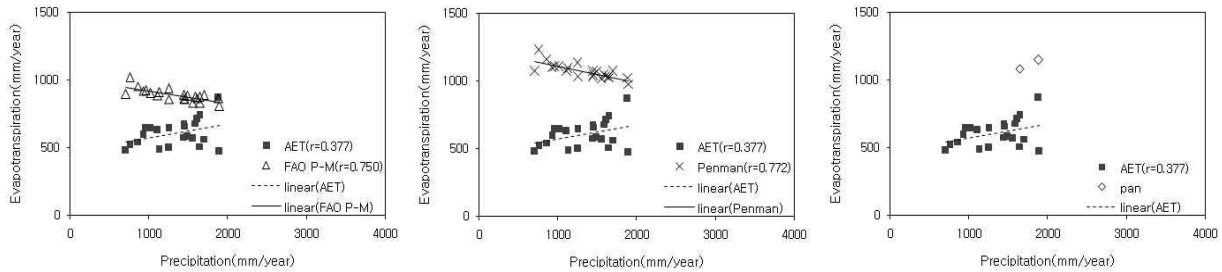
(b) Seomjingang dam



(c) Soyanggang dam

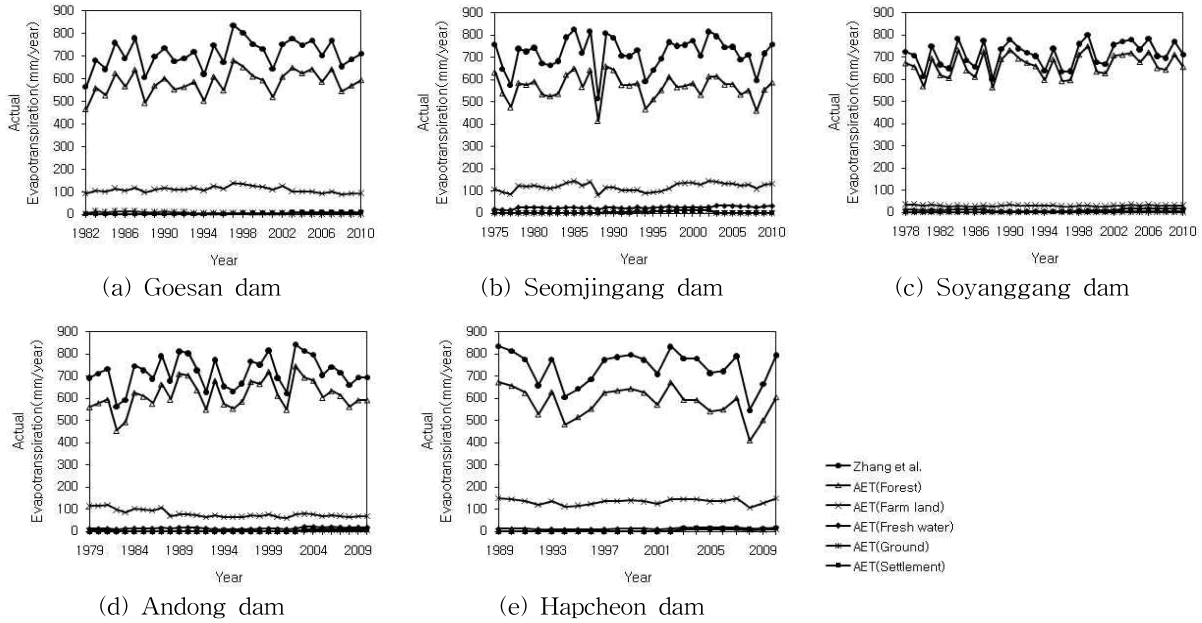


(d) Andong dam



(e) Hapcheon dam

Fig. 6. Comparisons of Actual Evapotranspiration with Potential Evapotranspiration according to the Variation of Precipitation



(a) Goesan dam (b) Seomjingang dam (c) Soyanggang dam

(d) Andong dam (e) Hapcheon dam

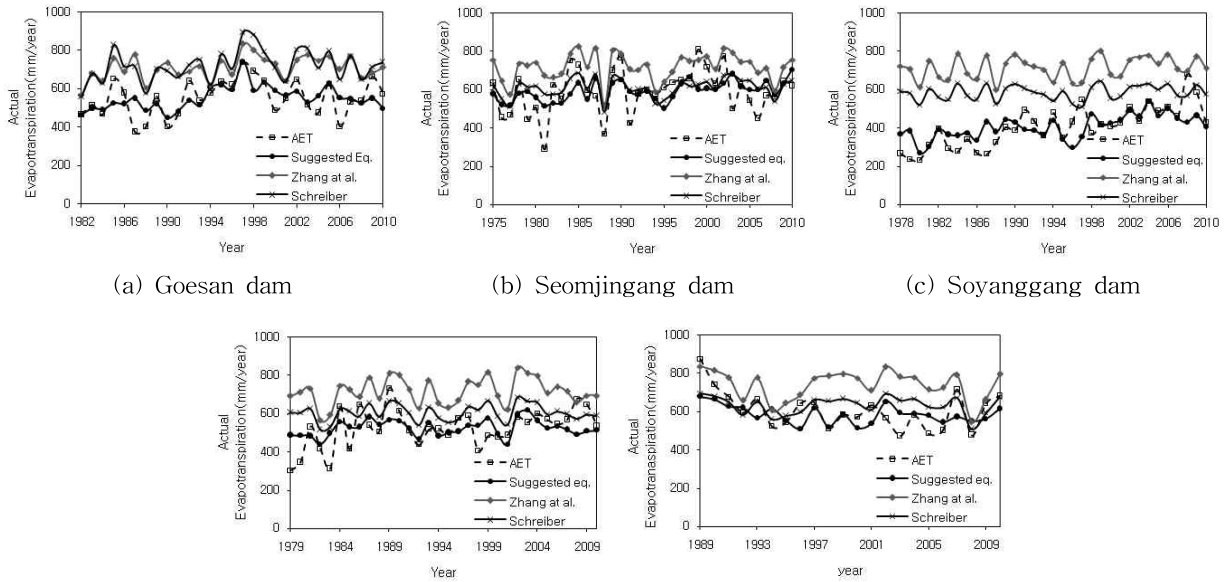
Fig. 7. Estimated Actual Evapotranspiration in Each Land Use Condition Based on Zhang et al.'s Equation (2001)

Table 1. Suggested MLR Equations for the Estimation of Actual Evapotranspiration

Dam waterhed	MLR Equation	R Sig. F	P	NR	T	W	RH	VPD
			Beta Sig.	Beta Sig.	Beta Sig.	Beta Sig.	Beta Sig.	Beta Sig.
Goesan dam	AET=-632.947+0.161(P)+198.176(NR) +227.841(W)-11.573(RH)	0.644 (0.010) [4.246]	0.453 (0.028)	0.937 (0.011)		0.719 (0.015)	-0.503 (0.083)	
Seomjingang dam	AET=-51.223+0.127(P)+28.837(T) +89.041(W)+142.946(VPD)	0.437 (0.148) [1.830]	0.331 (0.054)		0.150 (0.425)	0.107 (0.559)		0.069 (0.365)
Soyanggang dam	AET=-35.882+0.053(P)+88.245(T) -9.021(RH)	0.572 (0.008) [4.710]	0.134 (0.425)		0.458 (0.009)		-0.290 (0.071)	
Andong dam	AET=422.974+0.130(P)+135.474(W) -3.205(RH)	0.421 (0.135) [2.011]	0.343 (0.059)			0.208 (0.268)	-0.130 (0.493)	
Hapcheon dam	AET=-965.403+0.150(P)+312.767(W) +149.264(NR)	0.487 (0.172) [1.863]	0.506 (0.127)	0.546 (0.034)		0.324 (0.294)		

Numbers in bold indicate correlation at the significance level α=0.05 (two-tailed test); R=correlation coefficient of the multiple linear regression; AET=actual evapotranspiration; P=precipitation(mm/year); NR=net radiation(MJ/m^2/day); T=temperature (°C); W=wind speed(m/sec); RH=relative humidity(%); VPD=vapor pressure deficit(mb); Sig.=significance of multiple linear regression; Beta=standardized coefficient

람, 상대습도 순이었으며, 합천댐 유역은 순방사량, 강수량, 바람 순으로 영향력이 있는 것으로 나타났다. 이것은 각 댐 유역의 실제증발산량에 미치는 기후요소의 중요도 및 영향력이 유역의 지리 및 지형적 특성에 따라서 다르다는 것을 알 수 있으며, 강수량은 연 실제증발산량 산정을 위해 공통적인 요소인 것으로 나타났다.



(a) Goesan dam (b) Seomjingang dam (c) Soyanggang dam

(d) Andong dam (e) Hapcheon dam

Fig. 8. Comparisons of Observed and Estimated Actual Evapotranspiration

다변량회귀식의 적용성을 검토하기 위해 기존에 제안된 유역 실제증발산량 산정식들과 실제 증발산량 산정정도를 비교하였다. 이를 위해 본 연구에서 제안된 다변량회귀식을 이용하여 산정된 연 실제증발산량과 다른 식들(Ol′dekop식, Pike식, Budyko식)에 비하여 더 나은 실제증발산량 산정결과를 보이는 Schreiber식과 Zhang et al. 식을 이용하여 산정된 연 실제증발산량을 비교·분석하였다. 비교·분석을 위해 5개 유역으로부터 물수지분석을 통하여 구한 연 실제증발산량 자료를 이용하였다. 분석결과 다변량회귀식을 이용한 실제증발산량이 물수지를 이용한 실제증발산량과 더 근사한 값을 보였다(Fig. 8).

기준증발산 산정식들을 비교하기 위하여 월평균 일증발산량의 평균값(MET)과 표준편차(SD)를 계산하였으며, 평균백분율오차(MPE), 제곱평균오차(RMSE) 그리고 평균 절대오차(MAE) 등을 적용하였다(Fox, 1981).

$$MPE = \frac{\sum_{i=1}^{N} ET_{ai} - ET_{bi}}{N} \times 100(\%) \tag{11}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{N} | ET_{ai} - ET_{bi} |}{N} \tag{12}$$

$$RMSE = [\frac{\sum_{i=1}^{n} (ET_{ai} - ET_{bi})^2}{N}]^{0.5} \tag{13}$$

여기서, ET_{ai}=적용 검토된 기준증발산식으로부터의 연 증발산량(mm/year), ET_{bi}=증발산식으로부터 계산된 연 증발산량(mm/year) 그리고 i=year 그리고 N은 자료의 수(years)이다.

MAE는 극한 값에서 RMSE보다 덜 민감하나, RMSE가 일반적으로 수리 및 통계학적 분석에서 더 심층적으로 적용될 수 있다. RMSE나 MAE가 0에 가까울수록 유사한 결과를 나타낸다. ME는 산정된 잠재증발산량 값이 실제증발산량과 비교하여 평균적으로 크게 산정되는지 혹은 작게 산정되는지 등의 경향을 판단할 수 있다(Fox, 1981). 5개 유역의 물수지를 이용한 실제증발산량과 다변량회귀식(Model 1)의 실제증발산량, Zhang et al.식(Model 2)의 실제증발산량, 그리고 Schreiber식(Model 3)을 이용해 구한 실제증발산량의 평균값을 비교·분석한 결과 Model 2의 실제증발산량이 가장 큰 값을 보였다. 본 연구에서 제안된 다변량회귀식(Model 1)을 이용해 산정된 전체 연구기간의 평균 실제 증발산량이 물수지분석을 이용한 유역 실제증발산량과 매우 유사한 값을 보였다. Model 2와 Model 3을 비교 했을 때, Model 3이 더 나은 결과를 보였다. 표준편차의 경우 물수지를 이용한 연 실제증발산량이 가장 큰 값을 보였다(Table 2).

Table 2. Numerical Evaluation of Estimated Actual Evapotranspiration (unit: mm/year)

	Model	P	METM	METAET	SDM	SDAET	MaxM	MaxAET	MinM	MinAET	MPE (MAE) [RESE]
Goesan dam	1	1210.9	549.30	549.56	60.19	93.54	740.48	736.39	446.68	374.67	-1.910 (53.741) [71.580]
	2		708.86		60.78		833.03		563.13		-32.433 159.305 183.208
	3		719.11		80.96		893.41		555.51		-33.243 169.549 183.544
Seomjingang dam	1	1309.6	591.00	590.76	50.23	114.82	703.04	808.78	502.41	289.51	-3.796 (83.850) [103.268]
	2		716.75		70.74		823.50		513.59		-25.427 (129.017) [156.399]
	3		609.82		48.39		684.18		481.54		-7.054 (75.956) [99.006]
Soyanggang dam	1	1241.0	404.21	403.90	60.28	105.25	537.55	678.81	276.64	229.59	-4.861 (60.733) [86.305]
	2		712.92		55.41		800.27		598.98		-88.770 (309.017) [328.155]
	3		582.99		36.78		642.50		509.17		-54.625 (188.015) [208.837]
Andong dam	1	1162.2	523.00	523.39	41.82	99.52	616.87	732.37	437.50	301.90	-3.506 (71.835) [90.273]
	2		715.38		67.65		840.24		563.64		-41.398 (192.997) [213.938]
	3		604.10		42.11		683.67		515.36		-19.745 (99.398) [121.997]
Hapcheon dam	1	1331.7	584.40	605.16	46.38	95.96	677.93	872.19	509.60	473.86	1.641 (71.477) [86.072]
	2		739.38		75.13		834.80		546.60		-24.204 (137.618) [161.217]
	3		633.00		46.41		693.22		507.70		-6.535 (69.717) [88.371]

1=MLR Eq. 2=Zhang et al. Eq.; 3=Schreiber Eq.; METM=estimated mean AET (mm/year); METAET=observed mean AET (mm/year); SDM=standard deviation of estimated AET(mm/year); SDAET=standard deviation of observed AET (mm/year); MaxM=maximum estimated AET(mm/year); MaxAET=maximum observed AET (mm/year); MinM=minimum estimated AET (mm/year); MinAET=minimum observed AET (mm/year); MPE=mean percentage error (mm/year); MAE=mean absolute error (mm/year); RMSE=root mean square error (mm/year)

3. 결 론

본 연구에서는 우리나라 5개 댐 유역으로부터 물수지 분석을 실시하고 물수지분석 결과를 이용하여 유역규모에서 연 실제 증발산량 산정 방법을 검토하였다. 또한 유역 실제 증발산량에 영향을 미치는 수문기후요소의 영향 정도를 평가하기 위하여 수문기후요소들을 독립변수로 하고 연 실제증발산량을 종속변수로 하는 다변량회귀분석을 실시하였다. 분석결과는 아래와 같다.

첫째, 각각의 댐 유역별로 잠재증발산 산정식들(Penman식, FAO P-M식, Makkink식, Preistley-Taylor식, Hargreaves식)로부터 산정된 잠재증발산량과 실제증발산량을 비교한 결과, 실제증발산량과 잠재증발산량은 낮은 상관관계를 보여서 잠재증발산 산정식을 이용하여 연 실제증발산량을 산정하는 방법은 적절하지 않은 것으로 판단된다.

둘째, 기존에 발표된 유역 실제증발산량 산정식들과 비교한 결과 연 실제증발산량을 산정하는데 있어서 다변량 회귀식의 적용성을 확인할 수 있었다.

셋째, 괴산댐 유역의 경우 순방사량, 섬진강댐 유역은 강수량, 소양강댐 유역은 온도, 안동댐 유역은 강수량, 합천댐 유역은 순방사량이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 각 댐 유역에서의 실제증발산량에 영향을 미치는 수문기후요소들의 중요도는 각각 다른 것으로 나타났다. 하지만 공통적으로 강수량은 실제증발산량 산정을 위한 주요 기후요소인 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하는 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김남원, 김철겸(2004). "유역 증발산 산정을 위한 Penman-Monteith 방법과 Morton CRAE 방법의 비교." **한국수자원학회 2004년도 학술발표회**, 한국수자원학회, pp. 1077-1081.

박종철(2009). "환경변화가 구량천 유역의 물수지에 미치는 영향 예측." **한국지형학회지**, 한국지형학회, 제16권, 제3호, pp. 113-126.

양해근(2007). "기후변화에 따른 유역의 물수지 변화." **대한지리학회지**, 대한지리학회, 제42권, 제3호, pp. 405-420.

이병주, 정일원, 배덕효(2008). "기온변화가 유역 물수지에 미치는 영향 분석." **한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1048-1052.

이상진, 김주철, 노준우(2010). "대청유역 물수지 분석을 위한 장기 유출모의." **한국환경과학회지**, 한국환경과학회, 제19권, 제10호, pp. 1211-1217.

Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., and Periira, 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.

Arora, V.K. (2002). "The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff." *Journal of Hydrology*, Vol. 265, Issue: 1-4, pp. 164-177.

Boulain, N., Cappelaere, B., Seguis, L., Favreau, G., and Gignoux, J. (2009). "Water balance and vegetation change in the Sahel: A case study at the watershed scale with an eco-hydrological model." *Journal of Arid Environments*, Vol. 73, No. 12, pp. 1125-1135.

Budyko, M.I. (1958). *The heat balance of the earth's surface*. U.S. Dept. of Commer., Washington, D.C. 250 pp. 259

Droogers, P., and Allen, R.G. (2002). "Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions." *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 16, Issue 1, pp. 33-45.

Fox, D.G. (1981). "Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance." *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 62, Issue 5, pp. 599-609.

Gavilán, P.D. (2002). "*La advección de calor sensible en el Valle Medio del Guadalquivir y su influencia en la Medida y la estimación de la evapotranspiración*." Ph.D. Thesis, Córdoba University, Spain.

Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1985). "Reference crop evapotranspiration from temperature." *Appl. Engr. Agric.*, Vol. 1, No. 1, pp. 96-99.

Im, S.J., Kim, H.J., Kim, C.G., and Jang, C.H. (2004). "A simple approach for estimating annual evapotranspiration with climate data in Korea." *Water Engineering Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 185-193.

Koster, R.D., and Suarez, M.J. (1999). "A simple framework for examining the interannual variability of land surface moisture fluxes." *Journal of Climate*, Vol. 12, Issue 7, pp. 1911-1917.

Kunkel, R., and Wendland, F. (2002). "The GROWA98 model for water balance analysis in large river basins-the river Elbe case study." *Journal of Hydrology*, Vol. 259, Issue 1-4, pp. 152-162.

Leopoldo, P.R., Franken, W.K., and Villa Nova, N.A. (1995). "Real evapotranspiration and transpiration through a tropical rain forest in central Amazonia as estimated by the water balance method." *Forest Ecology and Management*, Vol. 73, Issue 1-3, pp. 185-195.

Li, L.J., Zhang, L., Wang, H., Wang, J., Yang, J.W., Jiang, D.J., Li, J.Y., and Qin, D.Y. (2007). "Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China." *Hydrological Processes*, Vol. 21, Issue 25, pp. 3485-3491.

Liu, Q., and Yang, A. (2010). "Quantitative estimation of the impact of climate change on actual evapotranspiration in the Yellow River Basin, China." *Journal of Hydrology*, Vol. 395, Issue 3-4, pp. 226-234.

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.

Mac Nish, R.D., Unkrich, C.L., Smythe, E., Goodrich, D.C., and Maddock III, T. (2000). "Comparison of riparian evapotranspiration estimates based on a water balance approach and sap flow measurements." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 105, Issue 1-3, pp. 271-279.

Makkink, G.F. (1957). "Testing the Penman formula by means of lysimeters." *J. Instit. Water Engineers*, Vol. 11, pp. 277-288.

McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Li, L.T., Hutchinson, M.F., Mu, X.M., and Liu, Z.H. (2007). "Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences." *Journal of Hydrology*, Vol. 338, Issue 3-4, pp. 196-220.

Milly, P.C.D. (1994). "Climate, soil water storage, and the average annual water balance." *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 7, pp. 2143-2156.

Ol''dekop, E.M., (1911). "*On evaporation from the surface of river basins.*" Trans. Met. Obs. lur-evskogo, Univ. Tartu 4 in Russian.

Penman, H.L. (1948). "Natural evaporatin from open water, bare soil, and grass." *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. 193. No. 1032, pp. 120-146.

Pike, J.G. (1964). "The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate." *Journal of Hydrology*, Vol. 2, pp. 116-123.

Preistley, 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, No. 2, pp. 81-92.

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.

Schreiber, P. (1904). "Uber die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserfuhrung der Fluße in Mitteleuropa." *Z. Meteorol.*, Vol. 21, No. 10, pp. 441-452.

Xu, C.Y., Gong, L., Jiang, T., Chen, D., and Singh, V.P. (2006). "Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment." *Journal of Hydrology*, Vol. 327, Issue 1-2, pp. 81-93.

Yoshiyuki, Y., Murugesu, S., and Taikan, O. (2008). "Investigating the roles of climate seasonality and landscape characteristics on mean annual and monthly water balances." *Journal of Hydrology*, Vol. 357, Issue 3-4, pp. 255-269.

Zhang, L., Dawes, W.R., and Walker, G.R. (2001). "Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 701-708.

Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W.R., Chiew, F.H.S., Western, A.W., and Briggs, P.R. (2004). "A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration." Water Resources Research, Vol. 40, W02502, doi:10.1029/2003WR002710.

논문번호: 11-083	접수: 2011.07.26
수정일자: 2011.10.04/10.17	심사완료: 2011.10.17