

## 다목적댐유역에서의 증발산 보완관계기설 검증

김지훈\* · 강부식\*\* · 김진겸\*\*\*

Kim, Jihoon\* · Kang, Boosik\*\* · Kim, Jin-Gyeom\*\*\*

### Validation of Complementary Relationship Hypothesis for Evapotranspiration in Multipurpose Dam Basins

#### ABSTRACT

The complementary relationship hypothesis for areal evapotranspirations was validated in the regional-scale area of multipurpose dam basins in Korea and the long-term water balances were indirectly identified. Annual actual evapotranspiration ( $ET_A$ ) was assumed the difference between total annual precipitation and total annual inflow and the available moisture was assumed the total precipitation. The seasonally varying pan coefficient ( $kp$ ) is estimated as the ratio of the  $ET_{pan}$  and the evapotranspiration calculated by FAO Penman-Monteith equation ( $ET_{PM}$ ). The complementary relationships using ground observation data of  $ET_P$  and  $ET_A$  in the multipurpose dam basins follow generally the typical pattern that  $ET_P$  and  $ET_A$  is complementary and converges to equivalent evapotranspiration ( $ET_w$ ) under the extreme wet environment. However,  $ET_A$  of Juam dam was estimated relatively greater than other basins and exceeds even  $ET_P$  at certain range with high moisture availability, which can be understood as the results of possible over-estimation of precipitation or under-estimation of dam inflow. It is expected that the use of evapotranspiration complementary relationship for validating hydrological water balances will contribute to controlling uncertainties in estimating dam inflows during flood season in particular.

**Key words :** Complementary relationship, Evapotranspiration, Pan evaporation, Actual evapotranspiration, Potential evapotranspiration

#### 초 록

잠재증발산( $ET_P$ )과 실제증발산( $ET_A$ ) 사이의 보완관계 가설을 국내 다목적댐 유역에 적용하여, 각 유역의 기상·수문 관측자료를 기반으로 잠재 및 실제 증발산사이의 보완관계 성립을 검증하고자 하였다. 연단위 실제증발량( $ET_A$ )은 총강수량과 총유출량의 차이로서 간접추정하였으며, 가용수분량은 연강수량으로 대체하여 사용하였다. 이때, 팬증발량 보정에 사용된 팬계수( $kp$ )는 홍수기 및 비홍수기로 구분하여  $ET_{pan}$ 과 FAO Penman-Monteith 식으로 계산된 증발량( $ET_{PM}$ )의 비를 통해 산정하였다. 각 다목적댐 유역에서 관측자료 기반의 독립적으로 계산된  $ET_P$ 와  $ET_A$ 를 통해 보완관계를 산정한 결과, 대부분의 유역에서 가용수분량이 증가할수록  $ET_P$ 는 감소함과 동시에  $ET_A$ 는 증가하는 일반적인 보완관계의 패턴을 잘 보였고, 강수량의 증가에 따라 평형증발산량( $ET_w$ )의 수렴을 확인할 수 있었다. 하지만, 주암댐의 경우  $ET_A$ 가 다른 댐 유역에 비해 크게 산정되어 가용수분량이 큰 구간에서  $ET_P$ 를 초과하는 경우도 발생하였다. 이는 주암댐 유역의 강수량의 과다산정 혹은 유입량의 과소산정의 가능성을 보여주는 결과로 해석될 수 있다. 증발산 보완관계를 수문학적 물수지검증을 위한 기준으로 활용한다면 홍수기 다목적댐 유입량 산정의 불확실성을 제어하는데 도움이 될 것으로 기대한다.

**검색어 :** 보완관계, 증발산, 팬 증발량, 실제증발산량, 잠재증발산량

\* 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (Dankook University · 72150276@dankook.ac.kr)

\*\* 종신회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Dankook University · bskang@dankook.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사수료 (Dankook University · jg\_kim@dankook.ac.kr)

Received August 20, 2016/ revised September 26, 2016/ accepted February 16, 2017

## 1. 서론

과거 몇 년간 보완관계에 대한 이론적인 또는 경험적인 연구는 다양한 공간적 규모에서 수행되었지만(Brutsaert and Parlange, 1998; Golubev et al., 2001; Ozdogan and Salvucci, 2004; Yang et al., 2006; Pettijohn and Salvucci, 2009), 잠재 및 실제 증발산사이의 보완관계식을 기반으로하여 실제증발산량을 산정하는 Brutsaert and Stricker (1979)의 AA (Advection-Aridity) 모형과 Morton (1983)의 CRAE (Complementary Relationship Areal Evapotranspiration) 모형을 통한 연구가 대다수이며, 관측 자료를 통해 잠재 및 실제 증발산사이의 보완관계 가설이 유효함을 입증하는 연구는 매우 미진한 실정이다. 국외의 경우, Hobbins et al. (2001a)은 미국내 120개 유역에 대하여 CRAE 모형 및 AA 모형에 의해 산정된 실제증발산량과 장기 물수지법을 통해 산정된 실제증발산량을 비교하여 CRAE 모형은 과다산정, AA 모형은 과소 산정됨을 보였으며 AA 모형을 건조지역에 적용하기위해서는 매개변수 검보정이 필요함을 제시하였다. Hobbins et al. (2001b)은 AA 모형을 통해 산정된 실제증발산량이 과소산정되는 문제를 Priestley-Taylor (1972) 식의 매개변수( $\alpha$ )를 재산정하여 개선하여 입증하였다. Ramirez et al. (2005)은 보완관계에 관한 연구가 다수 수행되었으나, 이론적이고 개념적인 연구들이며 보완 관계를 입증하는 관측자료 기반의 자료세트가 없음을 언급하고 보완관계의 유효성을 입증할 강력한 증거를 제시하고자 잠재증발산은 팬증발량으로, 실제증발산은 강수와 유출의 차이로 정의하여 관측자료 기반의 보완관계를 산정함으로써 보완관계 가설을 입증하였다. Xu and Singh (2005)는 CRAE 모형, AA 모형, GG 모형(Granger and Gray, 1989)으로 계산된 실제증발산을 월유출 모형으로 계산된 실제증발산량을 이용하여 매개변수를 보정하였으며, 실제증발산을 일단위로 계산한뒤 월단위 및 연단위로 비교한 결과, 연단위 실제증발산은 잘 모의되었으나, 월단위 최고치 패턴을 재현하기에는 한계를 보였다. 세 모형 중 CRAE 모형이 가장 우수한 결과를 보였으며, 세 모형 모두 건조한 지역보다 습윤한 지역에서 우수함을 보였다. 최근에는 보완관계식으로 산정된 실제 증발산과 관측된 실제증발산을 비교하여 지역에 적합한 Priestley-Taylor 식의 매개변수( $\alpha$ ) 및 보완관계 비례상수를 추정하는 연구가 진행되고 있다(Wang et al., 2012; Yang et al., 2014; Ma et al., 2015; Zuo et al., 2016). 국내의 경우, Kim et al. (2004)은 보청천 유역의 물수지법으로 산정된 실제증발산량을 참값으로하여 Penman-Monteith 식(Monteith, 1981) 및 SWAT 모형을 통해 산정한 실제증발산과 CRAE 모형을 통해 산정한 실제증발산을 비교 검토하였다. Shin et al. (2010)은 충주댐 유역에서 CRAE 모형과 MODIS NDVI와의 관계식을 도출하여 공간적 실제증발산을 추정

하여 SLURP 모형에 의한 증발산량 값과 비교하여 그 적용성을 판단하고자 하였다. Kim et al. (2014)은 북하천 증상류 유역에 CRAE 모형 및 AA 모형을 적용하여 유역수문모형 SWAT-K로 모의한 실제증발산량과 비교를 통해 적정성 평가를 하여, CRAE 모형 및 AA 모형 모두 식생 성장기에 과다산정하며, 특히 AA 모형은 건조기간에 실제증발산량이 과소 모의 됨을 확인하였다. Kim et al. (2014)은 제주 한천 및 강정천 유역에 CRAE 모형 및 AA 모형을 적용하여 유역수문모형 SWAT-K에 의한 실제증발산량 산정 결과와의 비교를 통해 CRAE모형 및 AA 모형의 지역적 매개변수를 제안하였다. 이처럼 국외의 경우 보완관계 기반의 CRAE 모형과 AA 모형의 적용 연구가 다수 수행되고 있고, 최근 관측자료를 통해 보완관계를 산정하여 보완관계 비례상수 또는 잠재 및 실제 증발산을 산정하기 위한 매개변수를 추정하는 연구가 수행되고 있으나, 국내의 경우 보완관계를 주제로한 연구 자체가 매우 부족하며 관측자료를 통한 보완관계의 입증 및 개선에 대한 연구는 부재한 실정이다. 본 연구는 향후 수행될 보완관계 연구들에 대한 기초연구로서 보완관계 가설을 통해 잠재 및 실제 증발산사이의 상보성을 이해하고, 국내 다목적 댐 유역에서의 관측자료를 기반으로 보완관계 가설이 국내 지역적 규모에서도 유효함을 입증하고자 한다.

따라서, 본 연구에서는 보완관계 산정을 위한 국내 관측자료를 구축하기위해 기상청의 기상자료개발포털(<https://data.kma.go.kr>) 및 국가 수자원관리 종합정보 시스템(<https://www.wamis.go.kr>) 으로부터 기상 및 수문자료를 수집하였으며, 강수 및 유출 자료가 비교적 장기간 구축 되어 있는 국내 다목적댐 유역 6곳(소양강댐, 충주댐, 안동댐, 대청댐, 섬진강댐, 주암댐)을 대상유역으로 선정하여 관측자료를 통한 잠재 및 실제 증발산사이의 보완관계를 산정하고 분석하였다.

## 2. 연구방법 및 이론

### 2.1 Bouchet의 보완관계 가설

보완관계 가설은 경험적 관측을 기반으로하며, 지표와 대기 사이의 피드백 메커니즘으로 인한 잠재증발산(potential evapotranspiration,  $ET_p$ )과 실제증발산(actual evapotranspiration,  $ET_A$ )은 상호보완적인 관계에 있음을 Bouchet (1963)가 처음 제안하였다. 보완관계 가설의 관점에서,  $ET_p$ 는 일정한 대기조건하에서 최대 이용가능한 에너지가 충분히 증발현상으로 소진될 때의 총 증발산량,  $ET_A$ 는 대상지역에서의 실제 발생한 증발산량이며,  $ET_p$ 와  $ET_A$ 가 같아지는 조건에서는 충분히 습윤한 환경에서의 증발산량(wet environment evapotranspiration,  $ET_w$ )으로 나타난다. 일정한 지표-대기의 경계조건에서 증발산을 위한 가용수분량이 없다면,  $ET_A$

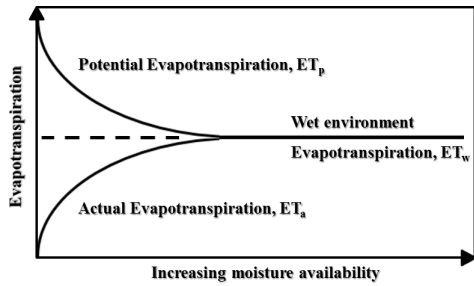


Fig. 1. Complementary Relationship between Potential and Actual Evapotranspiration (Hobbins et al., 2001a)

는 발생되지 못하며  $ET_P$ 는 최대가 된다. 반면에 증발산을 위한 가용수분량이 충분히 많다면,  $ET_A$ 는 최대가 되고  $ET_P$ 는 최소가 되어  $ET_W$ 로 수렴하게 된다(Fig. 1). 보완관계 개념에서  $ET_P$ 는 기온과 습도의 함수로 온도의 증가에 따라  $ET_P$ 가 증가하고 습도의 증가에 따라  $ET_P$ 가 감소한다는 것을 기초로하여,  $ET_A$ 가 많이 발생할수록 온도가 낮아지고 습도가 높아지기 때문에 결국  $ET_P$ 가 감소한다(Kim et al., 2014).

$$ET_A + ET_P = 2ET_W \quad (1)$$

대상구역의 관측자료를 통한 보완관계를 검증하기 위해 본 연구에서는 관측 잠재증발산량 자료인  $ET_{P_{an}}$ 에 팬계수(kp)를 곱하여 보정된 팬증발량 값( $ET_{P_{an}}(kp)$ )을 산정하였고,  $ET_A$ 는 연강수량과 연담유입량의 차, 가용수분량을 연강수량으로 각각 정의 하였다. 이때,  $ET_A$ 를 연강수량과 연담유입량의 차로 산정하는 것은 수문학적 물수지 개념을 바탕으로 충분히 긴 기간에 대하여 유역지류변화량이 0에 가까워질 때 유효한 산정방법이며, 본 연구에서는 시간단위를 연단위로 할 때, 유역지류변화량이 충분히 0에 가까워짐을 가정해 산정한 것이다. 또한, 보완관계 그래프에  $ET_W$ 를 반영하기 위해, 보정된 팬증발량인  $ET_{P_{an}}(kp)$ 와 물수지 법으로 계산된  $ET_A$ 를 Eq. (1)에 적용하여  $ET_W$ 를 산정하였다.

## 2.2 FAO Penman-Monteith 식

본 연구에서는 FAO Penman-Monteith (FAO P-M) 식을 통해 산정된 증발산량( $ET_{PM}$ )을 잠재증발산량의 기준 값으로 가정하고, 팬증발량의 원자료( $ET_{P_{an}}$ )를 보정하는 목적으로도 사용하였다. FAO P-M 식은 물리적 근거에 기초하여 유도되었으며(Allen et al., 1994; Droogers and Allen, 2002), 많은 기상자료를 입력변수로 사용하고 다른 증발산 산정식들을 평가하는 표준으로 사용토록 제시되고 있다(Walter et al., 2000; Droogers and Allen, 2002). 본 연구에서 사용된 FAO P-M 식은 다음과 같다(Allen et al., 1998; Zotarelli et al., 2010).

$$ET_O = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

여기서,  $ET_O$  = 기준증발산량(mm/day),  $R_n$  = 지구(작물)표면에서 순수하게 축적되는 순복사에너지(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $G$  = 토양 열 유속 밀도(soil heat flux density, MJ/m<sup>2</sup>/day)이며, 지표가 작물 등의 녹색실물로 피복되어 있을 때는 상대적으로 매우 작기 때문에 본 연구에서는 0으로 가정하였다.  $T = 2$  m 높이에서의 일평균기온(°C),  $u_2 = 2$  m 높이에서의 풍속(m/s),  $e_s$  = 포화증기압(kPa),  $e_a$  = 실제증기압(kPa),  $e_s - e_a$  = 포화증기압 결손량(kPa),  $\Delta$  = 증기압 곡선의 기울기(kPa/°C),  $\gamma$  = 건습계 상수(kPa/°C)이다.

### 2.2.1 순복사에너지( $R_n$ ) 산정

순 복사 에너지( $R_n$ )는 순단파 복사에너지( $R_{ns}$ )와 순장파 복사에너지( $R_{nl}$ )사이의 차로 Eq. (3)을 통해서 계산한다(Allen et al., 1998).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (3)$$

여기서,  $R_n$  = 일 순 복사에너지(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $R_{ns}$  = 일 순 단파 복사에너지(MJ/m<sup>2</sup>/day),  $R_{nl}$  = 일 순 장파 복사에너지(MJ/m<sup>2</sup>/day)이다.  $R_{ns}$ 는 Eq. (4)를 통해 계산되며,  $R_{nl}$ 은 Eq. (10)을 통해 계산한다.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$  = 지표면 반사율(albedo, 본 연구에서는 0.23을 사용-),  $R_s$  = 지구표면에 입사하는 태양 복사에너지(MJ/m<sup>2</sup>/day)이며, Eq. (5)을 통해 계산한다.

$$R_s = [0.25 + 0.5 \frac{n}{N}] R_a \quad (5)$$

여기서,  $n$  = 실제 일조시간(hour),  $N$  = 최대 가능 일조시간(hour),  $R_a$  = 대기권 밖에 입사하는 태양 복사에너지(MJ/m<sup>2</sup>/day)이며, Eq. (6)을 통해 계산한다.

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (6)$$

여기서,  $G_{sc}$  = 태양상수(solar constant, 0.0820MJ/m<sup>2</sup>/day),  $\varphi$  =

위도(rad),  $d_r$  = 태양과 지구 사이 거리의 상대적인 역수 값,  $\delta$  = 태양의 적위(rad),  $\omega_s$  = 일몰시간 태양의 각도(rad)이다.  $d_r$ 는 Eq. (7),  $\delta$ 는 Eq. (8),  $\omega_s$ 는 Eq. (9)를 통해 계산한다.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (7)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left[\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right] \quad (8)$$

여기서, J = 줄리안 데이트(1월 1일 J = 1, 12월 31일 J = 365 또는 366)이다.

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (9)$$

여기서,  $\varphi$  = 위도(rad)이며,  $\delta$  = 태양의 적위(rad)이다.

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{(T_{\max} + 273.16)^4 + (T_{\min} + 273.16)^4}{2} \right] \times (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left[ 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} \right] - 0.35 \quad (10)$$

여기서,  $\sigma$  = Stefan-Boltzmann 상수( $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ/K}^4/\text{m}^2/\text{day}$ ),  $T_{\max}$  = 일 최고온도( $^{\circ}\text{K}$ ),  $T_{\min}$  = 일 최저온도( $^{\circ}\text{K}$ ),  $e_a$  = 실제증기압(kPa),  $R_s$  = 지구표면에 입사하는 태양 복사에너지( $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ ),  $R_{so}$  = 맑은 날의 순 태양복사에너지( $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ )이며,  $e_a$ 은 Eq. (11)  $R_{so}$ 는 Eq. (13)을 통해 계산된다.

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} \left[ \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \right] \quad (11)$$

여기서,  $RH_{mean}$  = 일 평균 상대습도(%),  $e^0(T_{\max})$  = 일 최대기온에서의 포화증기압(kPa),  $e^0(T_{\min})$  = 일 최소기온에서의 포화증기압(kPa)이며,  $e^0$ 는 Eq. (12)를 통해 계산한다.

$$e^0(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right] \quad (12)$$

여기서, T = 기온( $^{\circ}\text{C}$ )이다.

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a \quad (13)$$

여기서, Z는 해수면으로부터의 높이(m),  $R_a$  = 대기권 밖에 입사하는 태양 복사에너지( $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ )이다.

## 2.2.2 풍속( $u_2$ ) 보정 및 포화증기압 곡선의 기울기( $\Delta$ )와 건습계 상수( $\gamma$ ) 산정

풍속은 2 m 높이에서 측정된 자료를 사용한다. 풍속이 2 m가 아닌 다른 높이에서 측정되었다면 Eq. (14)로 보정하여 사용할 수 있다. 또한, 포화증기압 곡선의 기울기( $\Delta$ )는 Eq. (15), 건습계 상수( $\gamma$ )는 Eq. (16)을 통해 계산한다.

$$u_2 = u_h \frac{4.87}{\ln(67.8h - 5.42)} \quad (14)$$

여기서,  $u_2$  = 2 m 높이에서 측정된 풍속(m/s),  $u_h$  = h높이에서 측정된 풍속(m/s), h = 지면으로부터의 풍속측정 높이(m)이다.

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 \times T_{mean}}{T_{mean} + 237.3}\right) \right]}{(T_{mean} + 237.3)^2} \quad (15)$$

여기서,  $\Delta$  = 증기압 곡선의 기울기(kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{mean}$  = 일 평균 기온( $^{\circ}\text{C}$ )이다.

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.000655 P \quad (16)$$

여기서,  $\gamma$  = 건습계 상수(kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ),  $c_p$  = 일정한 압력에서의 비열( $1.013 \times 10^{-3} \text{ MJkg}^{-1}\text{C}^{-1}$ ), P = 대기압(kPa),  $\epsilon$  = 건조한 공기와 수증기의 분자량비(0.622),  $\lambda$  = 증발잠열( $2.45 \text{ MJ/kg}$ )이다.

## 3. 대상유역 및 자료

본 연구에서는 국내 다목적댐 중 소양강댐, 충주댐, 안동댐, 대청댐, 섬진강댐, 주암댐 유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 2). 기상자료(일단위 최고온도, 최저온도, 평균온도, 강수량, 평균 상대습도, 평균 풍속, 소형팬증발량, 일조시간, 가조시간)는 각 유역의 기상관측소별(소양강댐 유역: 대관령, 인제, 춘천; 충주댐 유역: 영월, 제천, 충주; 안동댐 유역: 봉화, 안동, 태백; 대청댐 유역: 금산, 대전, 보은, 청주; 섬진강댐 유역: 임실, 주암댐 유역: 순천)로 수집하였으며, 수문자료는 각 유역의 월단위 댐 유입량자료를 수집하였다. 또한, 충분한 기간의 자료를 위해 1973~2014년을 기준 기간으로 하되, 각 댐 유역의 기상 및 수문자료의 관측 및 제공 시기에 따라 다르게 구축되었다.

유역별  $ET_{PM}$ 의 계산에는 각 유역의 기상관측소별로 수집된 일단위 기상자료로부터 일단위  $ET_{PM}$ 을 계산하고 타센가중치를 적용하여 유역별 일단위  $ET_{PM}$  값을 산정한 후 월단위 또는 연단위

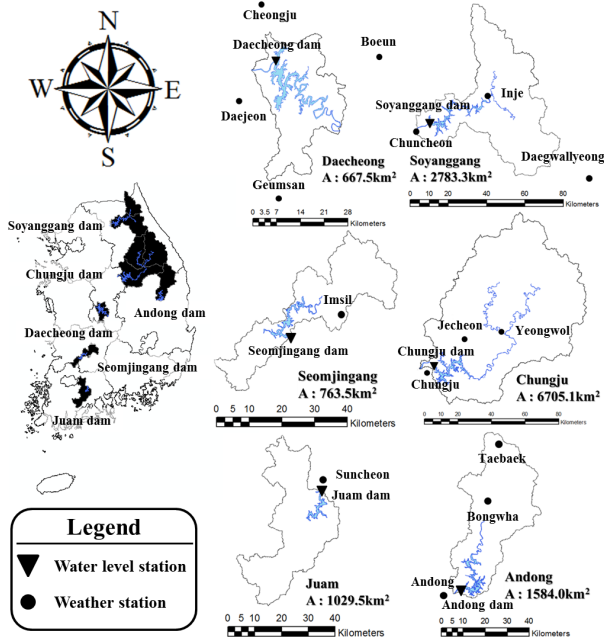


Fig. 2. Study Basins

로 합산하여 사용하였다.  $ET_{Pan}$ 의 경우, 각 댐 유역 내 소형팬증발자료가 구축된 기상관측소(소양강댐 유역: 춘천, 충주댐 유역: 충주, 안동댐 유역: 안동, 대청댐 유역: 금산, 대진, 보은, 청주, 섬진강댐 유역: 임실, 주암댐 유역: 순천)를 통해 수집하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 기상 및 수문자료의 기본적인 통계자료이다.

#### 4. 팬증발량 보정

팬증발량은 팬계수( $k_p$ )를 적용하여 보정하였으며,  $k_p$ 는 일단위 자료인  $ET_{PM}$ 과  $ET_{Pan}$ 를 월단위로 합산하여, 월단위 비를 통해 산정하였다. 섬진강댐 유역을 제외한 나머지 댐 유역에서는 증발산량이 클수록  $ET_{PM}$ 과  $ET_{Pan}$ 의 차이가 커짐을 보여주며, 6개 댐 유역 공통적으로는  $ET_{PM}$ 과  $ET_{Pan}$ 의 증발량 차이가 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 비교적 증발산량이 많은 홍수기(6~9월)와 비교적 적은 비홍수기(1~5월, 10~12월)로 구분하여  $k_p$ 를 산정하였다(Table 2).  $k_p$  산정 결과, 섬진강댐 유역의 홍수기를 제외하고 1보다 작게 산정되었으며,  $ET_{Pan}$ 은 증발접시의 온도영향 등으로 과다산정되므로 자료의 적용에 있어서 보정이 필요함을 확인하였다.

Table 1. Basic Statistics for Meteorological and Hydrologic Data (Unit : mm/yr)

		Han river		Nakdong river	Geum river	Seomjin river	
		Soyanggang	Chungju	Andong	Daecheong	Seomjingang	Juam
Precipitation	Year	1973-2014	1973-2014	1983-2014	1973-2014	1973-2014	1973-2014
	Average	1244.2	1288.5	1173.3	1295.1	1354.0	1523.2
	Stdev	283.6	300.1	219.4	278.3	300.0	343.7
	Max	1827.2	2132.7	1631.9	1868.3	1974.2	2175.0
	Min	763.9	782.7	875.6	817.0	684.1	786.8
Dam inflow	Year	1974-2014	1986-2014	1988-2014	1981-2014	1975-2014	1991-2014
	Average	750.0	769.2	608.7	541.5	712.1	648.5
	Stdev	217.9	278.5	215.8	215.9	261.3	302.8
	Max	1223.6	1361.9	1035.0	1126.2	1187.4	1163.3
	Min	332.9	330.8	328.9	195.3	205.5	261.0
$ET_A$	Year	1974-2014	1986-2014	1988-2014	1981-2014	1975-2014	1991-2014
	Average	478.1	565.2	581.2	673.1	614.1	875.8
	Stdev	86.6	99.4	69.2	72.3	86.0	97.7
	Max	683.5	770.8	714.2	827.1	741.3	995.4
	Min	343.1	427.1	444.7	563.9	445.9	696.5
$ET_{Pan}$	Year	1973-2014	1973-1996	1973-1977, 1983-1990, 1997-2014	1973-2014	1973-1990	1973-1990, 2001-2005, 2009-2014
	Average	1045.1	1034.3	1247.4	1051.4	982.9	1057.0
	Stdev	87.2	105.2	125.3	97.1	53.3	97.6
	Max	1220.7	1331.3	1451.7	1238.9	1107.3	1265.6
	Min	875.2	857.1	933.7	813.3	879.3	864.9

Table 1. Basic Statistics for Meteorological and Hydrologic Data (Unit : mm/yr) (Continue)

		Han river		Nakdong river	Geum river	Seomjin river	
		Soyanggang	Chungju	Andong	Daechong	Seomjingang	Juam
ET <sub>PM</sub>	Year	1973-2014	1973-2014	1973-1977, 1983-2014	1973-2014	1973-2014	1973-2014
	Average	840.8	850.1	856.1	890.3	859.6	861.6
	Stdev	37.0	36.5	994.3	1010.9	942.1	952.3
	Max	928.5	937.1	775.5	817.9	783.8	767.2
	Min	768.8	748.0	54.2	36.3	35.1	46.6
ET <sub>W</sub>	Year	1974-2014	1986-1996	1988-1990, 1997-2014	1981-2014	1975-1990	2001-2005, 2009-2014
	Average	653.8	717.7	730.1	782.5	752.2	829.5
	Stdev	45.6	51.7	52.7	42.2	45.3	51.6
	Max	751.9	817.4	848.8	868.5	815.9	897.3
	Min	546.7	651.1	641.3	695.0	661.9	738.9

Table 2. Results of Estimated kp by Flood and Non-flood Season in the 6 Multi-purpose Dam Basins

kp	Soyanggang (1973-2014)	Chungju (1973-1996)	Andong (1973-1977, 1983-1990, 1997-2014)	Daechong (1973-2014)	Seomjingang (1973-1990)	Juam (1973-1990, 2001-2005, 2009-2014)
Flood season	0.874	0.940	0.833	0.939	1.025	0.935
Non-flood season	0.743	0.720	0.607	0.772	0.762	0.723

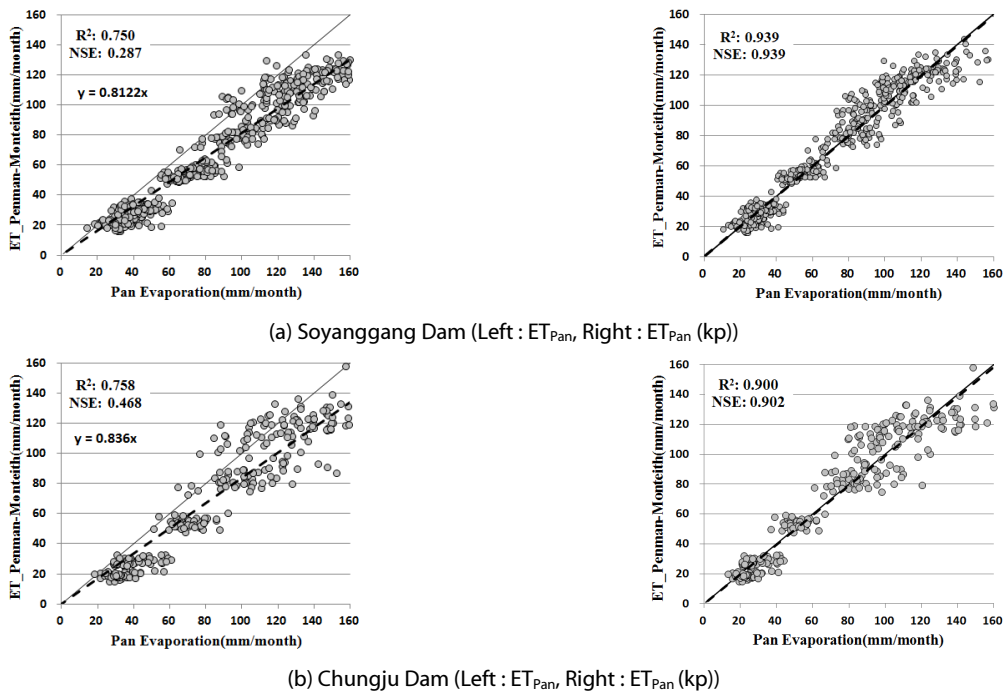


Fig. 3. Scatter Plots of ET<sub>PM</sub> and ET<sub>PAN</sub> of Pan Coefficients Applied Before (Left) · After (Right) in the 6 Multi-purpose Dam Basins

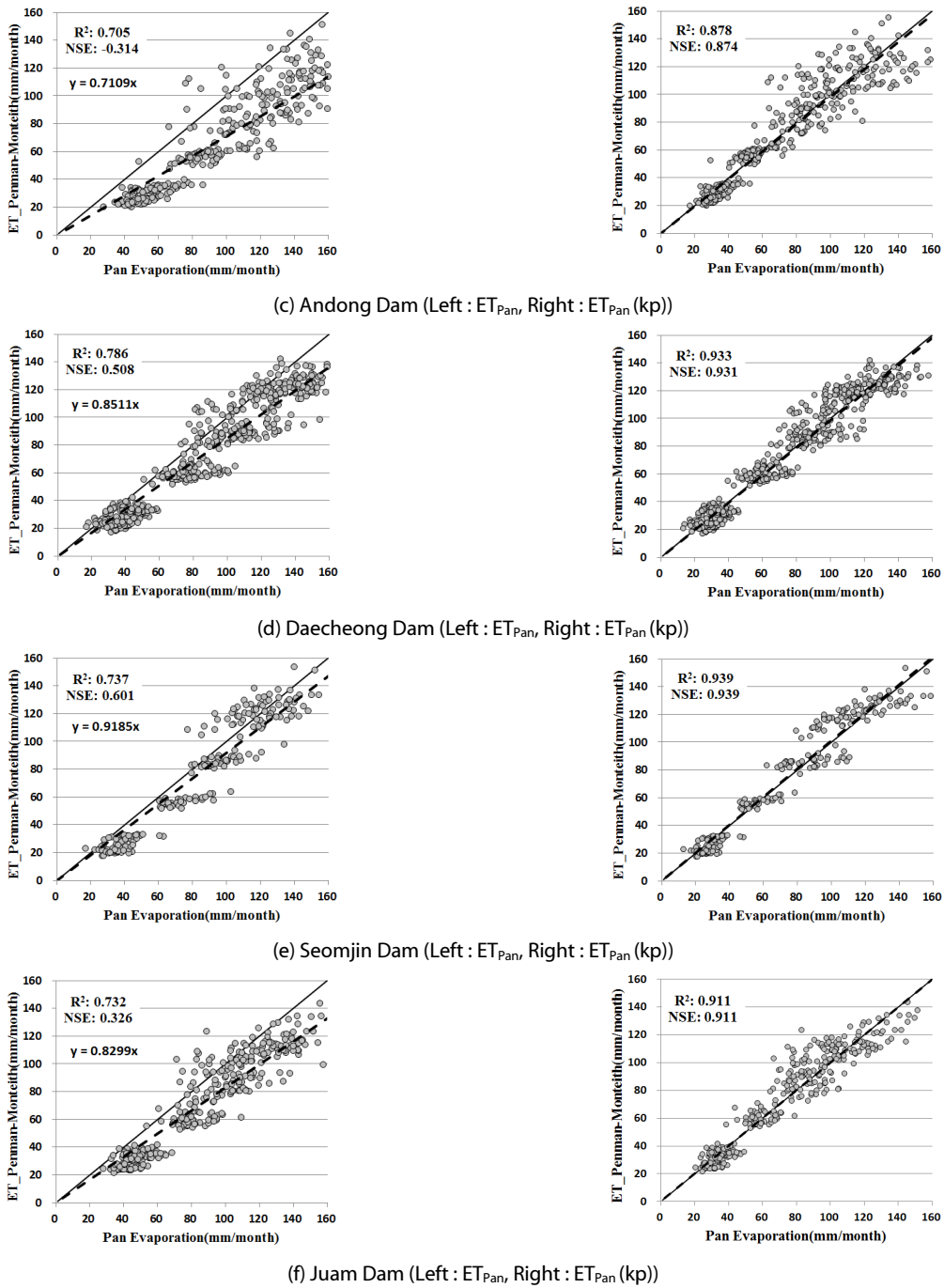


Fig. 3. Scatter Plots of  $ET_{PM}$  and  $ET_{PAN}$  of Pan Coefficients Applied Before (Left) · After (Right) in the 6 Multi-purpose Dam Basins (Continue)

또한, 6개 댐 유역 모두 홍수기에 산정된  $kp$ 에 비해 비홍수기에 산정된  $kp$ 가 작게 산정되어, 이 결과로  $ET_{Pan}$  값이 홍수기보다 비홍수기에 더 과다산정 되었음과 동시에 우리나라와 같이 홍수기/비홍수기적 특성이 뚜렷한 지역에서는  $kp$  산정에 있어서 홍수기/비홍수기적 특성을 고려한 보정법이 보다 정확한 보정 결과를 도출할 것으로 판단된다. 월단위  $ET_{PM}$ 에 대하여  $kp$  적용 전( $ET_{Pan}$ )과

후( $ET_{Pan}(kp)$ )를 비교 평가한 결과, 6개 댐 유역에서  $kp$  적용 전보다 적용 후  $R^2$  및 NSE 평가지수가 개선되었으며(Fig. 3), 각 댐 유역에서의  $ET_{PM}$ 과  $ET_{Pan}$ 의 산포도(Fig. 3의 왼쪽 그림)와  $ET_{PM}$ 과 보정된 관측발량( $ET_{Pan}(kp)$ )의 산포도(Fig. 3의 오른쪽 그림)의 비교를 통해  $kp$  적용 후 관측발량 자료가 개선되었음을 확인하였다.

### 5. 보완관계 계산 및 검증

Fig. 4는 다목적 댐 유역 6곳의 관측자료를 기반으로 하여 독립적으로 계산된  $ET_p$ 와  $ET_A$ 를 통해 얻은 보완관계 그래프이다. 일반적으로, 보완관계 그래프의 왼편은 비교적 가용수분량이 제한적인 환경으로,  $ET_p$ 의 최대값 및  $ET_A$ 의 최소값이 나타난다. 보완관계 그래프에서의 가용수분량으로 정의된 연강수량이 증가하면서 점점

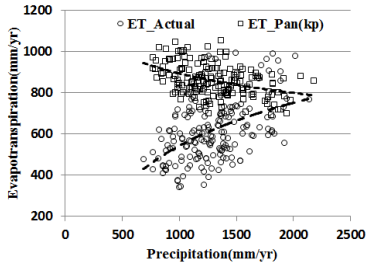


Fig. 4. The Combined Complementary Relationship Graph of 6 Multi-purpose Dam Basins

그래프의 오른편으로 이동하게 되며  $ET_p$ 는 감소, 그리고  $ET_A$ 는 증가하게 된다. 이처럼, Fig. 4에서도 가용수분량의 증가에 따라  $ET_p$ 와  $ET_A$ 사이의 관계가 일반적인 보완관계 패턴을 잘 따라가며,  $ET_w$ 로 수렴하는 것을 확인하였다. 하지만, Fig. 4는 공간적으로 서로 연결되지 않은 독립적인 유역에 대한 자료들을 하나의 그래프로 표현하였다는 한계를 가지고 있다. 따라서, Fig. 4에서 한 데 모아 표현하였던 보완관계 그래프들을 개별적인 다목적 댐 유역의 보완관계 그래프(Fig. 5)로 나타내었다.

각 댐 유역 자료를 한 데 모아 그린 보완관계 그래프(Fig. 4)에 비해 개별 댐 유역에서의 보완관계 그래프(Fig. 5)는 몇몇 댐 유역에서 보완관계 패턴이 보다 약해졌지만, 가용수분량이 제한적인 환경(그래프 왼편)에서부터 가용수분량의 증가에 따라 점점  $ET_p$ 는 감소하고  $ET_A$ 는 증가하여  $ET_p$ 와  $ET_A$ 가  $ET_w$ 에 수렴하는 일반적인 보완관계 패턴은 충분히 표현되었다. 하지만, 주암댐의 경우,  $ET_A$ 가 다른 댐 유역에 비해 크게 산정되어 가용수분량이 적을 때는 정상적으로  $ET_p$ 보다 아래에 표현되지만, 가용수분량이 증가함에 따라  $ET_p$ 를 초과해 버리는 결과도 나타났다. 이는 강수량의

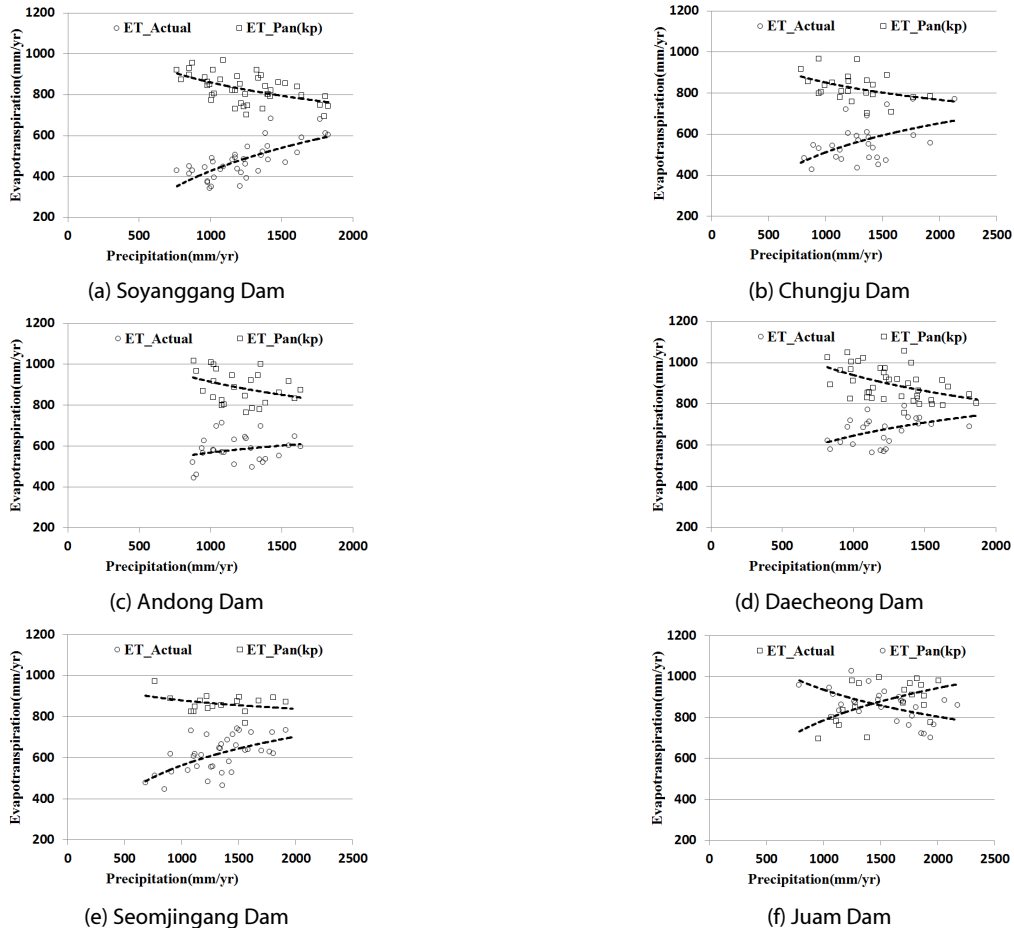


Fig. 5. The Individual Complementary Relationship Graph of 6 Multi-purpose Dam Basins



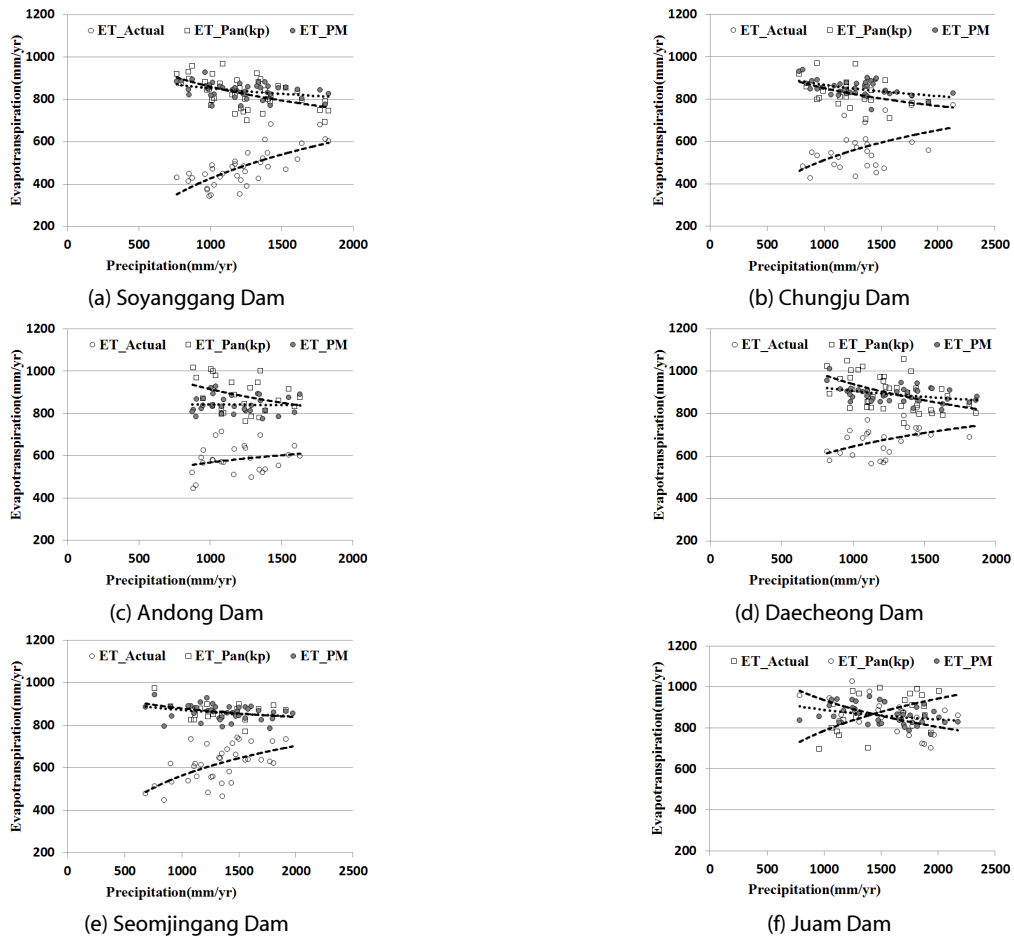


Fig. 6. Comparison of the Individual Complementary Relationship Graph Using the  $ET_{Pan}$  (kp) and the  $ET_{PM}$  in the 6 Multi-purpose Dam Basins

과다산정 혹은 유입량의 과소산정과 같은 관측치 오류 가능성이 지배적일 수 있으나, 유역 내 물 사용으로 인한 유량자료의 왜곡, 유역저류변화량의 변동성 등 다양한 요인들이 있을 수 있다.

Fig. 6은 보완관계 관점에서  $ET_{PM}$ 과  $ET_{Pan}$  (kp)를 비교한 결과로 등근 점선이  $ET_{PM}$ 의 추세선이며, 사각 점선이  $ET_{Pan}$  (kp)의 추세선 결과이다.  $ET_{PM}$ 은  $ET_{Pan}$  (kp)에 비해 가용수분량에 따라 그 변화양상이 둔감함을 보였다. 잠재증발산량 산정에 있어서 우수한 평가를 받고 있는 FAO P-M 식을 통해 계산된  $ET_{PM}$ 은 잠재증발산의 평균적인 수치 값 모의에는 우수할 수 있겠으나, 가용수분량에 따른 잠재 및 실제 증발산의 보완관계를 분석하는 연구에서는  $ET_{PM}$ 의 한계점을 확인한 것이라 판단된다.

## 6. 결론

잠재 및 실제 증발산사이의 보완관계는 유역 내 물 관리의 측면에서 매우 중요하다(Hobbins et al., 2001a, 2001b, 2004; Ozdogan and Salvucci, 2004). 국내에서는 잠재 및 실제 증발산사이의

보완관계 가설을 기반으로 하는 모형인 CRAE 모형 및 AA모형을 적용하는 사례(Kim and Kim, 2004; Kim and Lee, 2014)는 있으나, 잠재 및 실제 증발산사이의 보완관계를 관측자료를 통해 입증하는 단계의 연구는 미진하다. 본 연구에서는 Bouchet (1963)의 보완관계 가설을 바탕으로하여 국내 다목적댐 유역에서의 관측자료를 통해 잠재 및 실제 증발산사이의 보완관계를 검증하고자 하였다. 관측자료를 기반으로하는 보완관계 그래프를 계산하기 위해 본 연구에서는 잠재증발산량( $ET_P$ )을 팬계수(kp)를 통해 보정된 팬증발량( $ET_{Pan}$  (kp))으로, 실제증발산량( $ET_A$ )은 물수지법을 통해 연강수량과 연담유입량의 차이로, 가용수분량은 연강수량으로 각각 정의하였다. 이때, 관측자료인 팬증발량( $ET_{Pan}$ )을 보정하기 위한 팬계수(kp)는 FAO P-M 식을 통해 얻은 증발산량( $ET_{PM}$ )과  $ET_{Pan}$ 의 비를 통해 산정하되, 증발산량이 비교적 많은 홍수기(6~9월)와 비교적 적은 비홍수기(1~5월, 10~12월)로 구분하여 산정하였다. kp 적용 전보다 적용 후에  $R^2$  및 NSE 평가지수가 개선되었으며,  $ET_{Pan}$  (kp)와  $ET_{PM}$ 의 1 : 1 산포도를 그려본 결과, kp 적용 전보다 적용 후에  $ET_{PM}$ 과의 차이가 개선됨을 확인하였다.

각 다목적댐 유역에서 관측자료 기반의 독립적으로 계산된  $ET_p$ 와  $ET_A$ 를 통해 얻은 다목적 댐 유역 6곳의 보완관계가 합산된 보완관계 그래프에서는 가용수분량이 증가할수록  $ET_p$ 는 감소함과 동시에  $ET_p$ 는 증가하여  $ET_p$ 와  $ET_A$ 가  $ET_w$ 에 수렴하는 일반적인 보완관계의 패턴을 확인하였다. 하지만, 이는 공간적으로 서로 연결되지 않은 독립적인 유역에 대한 자료들을 하나의 그래프로 표현하였다는 한계를 가지고 있으므로, 각 댐유역에 대한 자료를 구분하여 개별 유역의 보완관계 그래프를 산정하였다. 각 댐유역의 보완관계 그래프를 산정한 결과, 다목적 댐 유역 6곳의 자료를 모두 한 데 모아 그린 보완관계 그래프에 비해 몇몇 개별 댐유역에서의 보완관계 그래프는 보완관계 패턴이 약해졌지만, 잠재 및 실제 증발산사이의 보완관계를 검증하는데에는 일반적인 보완관계 패턴을 충분히 보였기 때문에 관측자료를 기반으로하는 보완관계 가설이 국내 다목적댐 유역에서도 유효하다고 판단하였다.

또한, 각 댐 유역에서의  $ET_{PM}$ 을 이용해 산정한 보완관계와  $ET_{Pan}(kp)$ 을 이용해 산정한 보완관계의 비교를 통해  $ET_{PM}$ 이  $ET_{Pan}(kp)$ 에 비해 가용수분량의 변화에 둔감한 것을 확인하였으며, 이 결과는  $ET_{PM}$ 의 한계점으로  $ET_{PM}$ 을 이용한 잠재 및 실제 증발산의 보완관계 분석 연구결과는 이러한 한계점을 고려하여 해석되어야 한다고 판단된다. 예를들어, FAO P-M 식을 이용한 기후변화에 따른 보완관계 전망 연구 또는 미계측 지역에서의 보완관계 연구의 결과는  $ET_{PM}$ 의 보완관계 표현에 대한 한계점을 고려하여 해석해야한다.

본 연구에서는 대상유역을 여러 다목적 댐유역으로 하여 공간적 연결성의 한계와 잠재증발산을 계산하기 위해 점자료인 팬증발량 자료를 적용한 것에 한계점을 가지고 있다. 하지만, 후속 연구에서는 더 많은 정보와 양질의 자료가 구축된다면, 국내 전체를 아우르는  $ET_p$ 와  $ET_A$ 의 상보성을 입증하는데 더 확실하고 정확한 보완관계 그래프를 산정할 수 있을 것이다. 또한, 증발산 보완관계를 수문학적 물수지검증을 위한 기준으로 활용한다면 홍수기 다목적댐 유입량 산정의 불확실성을 제어하는데 도움이 될 것으로 기대한다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었습니다.

### References

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, L. S. and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 300 p.

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.

Bouchet, R. J. (1963). "Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique." *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 62, pp.134-142.

Brutsaert, W. and Parlange, M. B. (1998). "Hydrologic cycle explains the evaporation paradox." *Nature*, Vol. 396, No. 6706, pp. 30-30.

Brutsaert, W. and Stricker, H. (1979). "An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 443-450.

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

Golubev, V. S., Lawrimore, J. H., Groisman, P. Y., Speranskaya, N. A., Zhuravin, S. A., Menne, M. J. and Malone, R. W. (2001). "Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR : A reassessment." *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, No. 13, pp. 2665-2668.

Granger, R. J. and Gray, D. M. (1989). "Evaporation from natural nonsaturated surfaces." *J. Hydrol.*, Vol. 111, pp. 21-29.

Han River Flood Control Office (2003), *Water Resources Management Information System*, Available at : <https://www.wamis.go.kr> (Accessed : June 6, 2016).

Hobbins, M. T., Ramirez, J. A., Brown, T. C. and Claessens, L. (2001a). "The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration : The complementary relationship areal evapotranspiration and advection-aridity models." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 1367-1387.

Hobbins, M. T., Ramirez, J. A. and Brown T. C. (2001b). "The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration : An enhanced advection-aridity model." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 1389-1403.

Hobbins, M. T., Ramirez, J. A. and Brown, T. C. (2004). "Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous US : paradoxical or complementary?" *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, No. 13.

Kim, N. W. and Kim, C. K. (2004). "Comparison of Penman-Monteith method and morton CARE method for estimating areal evapotranspiration." *In 2004 Korea Water Resources Association Conference*, Incheon, Korea (pp. 14-15) (in Korean).

Kim, N. W. and Lee, J. (2014). "Assessment of complementary relationship evapotranspiration models for the Bokahcheon upper-middle watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, pp. 547-559 (in Korean).

Korea Meteorological Administration (2015). *Meteorological data open portal*, Available at : <https://data.kma.go.kr> (Accessed : June 10, 2016)

Ma, N., Zhang, Y., Szilagyi, J., Guo, Y., Zhai, J. and Gao, H. (2015). "Evaluating the complementary relationship of evapotranspiration in the alpine steppe of the Tibetan Plateau." *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 2, pp. 1069-1083.

Monteith, J. L. (1981). "Evaporation and surface temperature."

- Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 107, No. 451, pp. 1-27.
- Morton, F. I. (1983). "Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology." *Journal of Hydrology*, Vol. 66, No. 1, pp. 1-76.
- Ozdogan, M. and Salvucci, G. D. (2004). "Irrigation-induced changes in potential evapotranspiration in southeastern Turkey : Test and application of Bouchet's complementary hypothesis." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 4.
- Pettijohn, J. C. and Salvucci, G. D. (2009). "A new two-dimensional physical basis for the complementary relation between terrestrial and pan evaporation." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 10, No. 2, pp. 565-574.
- Priestley, C. H. B. (1972). *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters*. In Mon. Weather Rev.
- Ramírez, J. A., Hobbins, M. T. and Brown, T. C. (2005). "Observational evidence of the complementary relationship in regional evaporation lends strong support for Bouchet's hypothesis." *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, No. 15.
- Shin, H. J., Ha, R., Park, M. J. and Kim, S. J. (2010). Estimation of spatial evapotranspiration using the relationship between MODIS NDVI and morton ET-For Chungjudam watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 52, No. 1, pp. 19-24 (in Korean).
- Walter, I. A., Allen, R. G., Elliott, R., Mecham, B., Jensen, M. E., Itenfisu, D., Howell, T. A., Snyder, R., Brown, P., Echings, 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.
- Wang, T. and Zlotnik, V. A. (2012). "A complementary relationship between actual and potential evapotranspiration and soil effects." *Journal of Hydrology*, Vol. 456, pp. 146-150.
- Xu, C. Y. and Singh, V. P. (2005). "Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions." *Journal of Hydrology*, Vol. 308, No. 1, pp. 105-121.
- Yang, D., Sun, F., Liu, Z., Cong, Z. and Lei, Z. (2006). "Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based on the Budyko and Penman hypotheses." *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, No. 18.
- Yang, G., Pu, R., Zhao, C. and Xue, X. (2014). "Estimating high spatiotemporal resolution evapotranspiration over a winter wheat field using an IKONOS image based complementary relationship and Lysimeter observations." *Agricultural Water Management*, Vol. 133, pp. 34-43.
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W. and Morgan, K. T. (2010). "Step by step calculation of the Penman-Monteith evapotranspiration (FAO-56 Method)." *Institute of Food and Agricultural Sciences*, University of Florida.
- Zuo, H., Chen, B., Wang, S., Guo, Y., Zuo, B., Wu, L. and Gao, X. (2016). "Observational study on complementary relationship between pan evaporation and actual evapotranspiration and its variation with pan type." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 222, pp. 1-9.