

# 유역증발산 산정을 위한 Penman-Monteith 방법과 Morton CRAE 방법의 비교

## Comparison of Penman-Monteith method and Morton CRAE method for estimating areal evapotranspiration

김남원\*, 김철겸\*\*

Nam Won Kim, Chul Gyum Kim

### 요 지

유역 수문순환 해석 및 수자원 관리와 계획에 있어서 증발산은 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 본 연구에서는 보청천 유역의 강수 및 유출자료와 두 가지 방법에 의해서 산정된 유역증발산을 이용하여 유역 물수지를 수행하고, 두 가지 방법을 비교 검토하였다. 첫 번째 방법은 Penman-Monteith를 이용하여 기준작물에 대한 잠재증발산량을 산정한 후, 이를 SWAT 모형을 이용하여 유역내 작물 및 토지피복과 가용토양수분을 고려하여 실제증발산량을 산정하였으며, 두 번째 방법은 잠재증발산량과 실제증발산량의 보완관계 개념을 이용한 Morton CRAE 방법으로부터 유역의 실제증발산량을 계산하였다. 비교 분석 결과, SWAT의 Penman-Monteith 방법을 이용하여 추정된 증발산이 실제 강수량과 유출량 사이의 물수지로부터 얻어진 증발산량과 좀 더 근사한 결과를 보였다. 그러나, Morton CRAE 방법의 경우 습도 자료가 결과치에 큰 영향을 주기 때문에, 보다 정확한 습도 자료 및 기상자료를 이용할 경우, 상대적으로 간편하게 유역내 실제증발산량을 추정할 수 있는 방법으로 이용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 증발산, Penman-Monteith, Morton CRAE, SWAT

### 1. 서론

증발산 과정은 토양수분, 식생형태, 토지피복 등에 대한 수문학적, 기상학적 많은 요인들에 의해 영향을 받으며 (Xu와 Li, 2003), 유역 수문순환 해석 및 수자원 관리와 계획에 있어서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 정확한 증발산 계측을 위해서는 숙련된 인력에 의한 지속적인 관측과 고가의 계측장비가 필요하고, 계측 지점값이라는 한계가 있기 때문에, 일반적으로 물수지법, 열수지법, 공기역학적방법 및 조합방법 등에 의해 간접적으로 추정하여 이용하고 있다. 지금까지 많은 잠재증발산 추정식이 개발되어 왔으며, 대표적인 조합방법을 이용한 것으로는 초기 Penman 방법의 여러 변형식들을 포함하여, 최근에는 Penman-Monteith (이하 P-M) 방법이 많이 이용되고 있다. 이 방법은 기준작물에 대한 증발산량으로부터 실제 유역내 토지피복에 따른 잠재증발산량을 계산하는데 널리 이용되고 있으며, 계산된 잠재증발산량으로부터 가용 토양수분 등을 고려하여 실제증발산량을 추정하고 있다. 반면에, Morton의 CRAE 증발산 산정법은 유역증발산량을 산정하는 방법으로서, 실제증발산량과 잠재증발산량 사이의 보완관계로부터 개발되어, 장기적인 측면에서의 유역내 실제증발산량을 추정하는데 이용할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 이 두 방법을 실제 유역에 적용하여 유역증발산량을 산정하고, 유역 물수지분석을 통해 그 적용성을 비교 검토하고자 한다.

### 2. 증발산 추정방법의 비교

#### 2.1 SWAT P-M 방법

P-M 식은 1990년에 기준작물에 대한 잠재증발산량을 추정하는 표준 방법으로 채택되었으며 (Allen 등, 1998), 복합적 기상 요인을 고려할 수 있어 비교적 정확성이 높고, 이용 목적에 따라 시간별, 일별, 순별, 월별 단위로 잠재증발산량을 산정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

FAO에서 제시한 P-M 식은, 표면저항이 70 s/m, 알베도 0.23인 높이 0.12 m의 잔디를 기준작물로 설정하여, 충분한 수분공급이 이루어진다고 가정할 때 잔디로 덮힌 지면으로부터의 일별 잠재증발산량을 다음과 같이 산정하고 있다.

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : [nwkim@kict.re.kr](mailto:nwkim@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [cqkim@kict.re.kr](mailto:cqkim@kict.re.kr)

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)}$$

여기서,  $ET_0$ 는 기준작물 증발산량 (mm),  $\Delta$ 는 온도에 따른 수증기압 변화율 (kPa/°C),  $R_n$ 는 순복사에너지 (MJ/m<sup>2</sup>),  $G$ 는 지열플럭스 (MJ/m<sup>2</sup>),  $\gamma$ 는 습도계상수 (kPa/°C),  $T$ 는 일평균 기온 (°C),  $u_2$ 는 2 m 높에서의 일평균 풍속 (m/s),  $e_s$ 는 포화수증기압 (kPa),  $e_a$ 는 실제수증기압 (kPa)이다.

그러나, 이 식은 기준작물에 대한 잠재증발산량을 산정하기 때문에 유역내에서의 실제증발산량을 산정하기 위해서는 작물 및 토지피복과 토양에서의 가용수분을 고려하여야 한다. 따라서, SWAT 모형을 이용하여 유역내 다양한 작물 및 토지피복에 따라 토양수분 추적을 통하여 실제증발산량을 계산하였다.

SWAT에서의 실제증발산량 산정은, 우선 식생 피복에 의해 차단되는 강우로부터 증발을 계산한 다음, 최대증발량, 최대승화/토양증발량을 산정한 후, 이에 따라 실제승화량과 토양으로부터의 실제증발량 및 식생증발산량을 계산한다 (Neitsch 등, 2001).

## 2.2 Morton CRAE 방법

지역 규모의 유역에 대해 잠재증발산량 ( $ET_p$ )과 실제증발산량 ( $ET_A$ ) 사이의 보완피드백 메커니즘이 있다는 가정 하에 경험적인 관측에 기초하여, Bouchet (1963)는 다음과 같은 관계를 제시하였다.

$$ET_A + ET_p = 2ET_w$$

여기서,  $ET_w$ 는 습윤상태에서의 증발량이다.

이 개념을 이용하여 Morton (1965)은 증발산 산정 모형을 제시하고, 이후 1983년 개선된 모형 CRAE (Morton, 1983)를 발표한 바 있다. 보완 개념은 잠재증발산량이 기온과 습도의 함수이며, 온도의 증가에 따라 잠재증발산량이 증가하고, 실제 습도에 따라 감소한다는 사실에 기초하고 있다. 그러나 이들 변수는 실제증발산에 의해 영향을 받게 된다. 즉, 실제증발산량이 많을수록 온도가 낮아지고 습도가 높아지기 때문에 결국 잠재증발산량의 감소를 초래하게 된다. 따라서, 실제증발산량을 추정하는데 있어서 잠재증발산량을 독립적인 변수로 간주할 수 없으며, 반대로 잠재증발산량을 추정하는데 실제증발산량이 영향을 주게 된다는 개념이다 (Kovács, 1987). 그림 1은 이러한 보완관계를 잘 나타내고 있다.

Morton의 CRAE 방법은 기존에 제시된 대부분의 방법들이 저수지 및 댐 유역 또는 작물에 대한 증발산량을 산정하는 것에 비해, 지역적인 인자 또는 가용 수분에 대한 어떠한 가정도 없이 온도, 습도, 일조시간 등의 기상자료로부터 넓은 유역에 대한 증발산량을 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다 (Morton, 1975). Morton CRAE 모형에서 잠재증발산량은 수정 Penman 식을 이용하며 풍속함수를 이송계수로 변환하여, 평형온도에서 에너지수지와 동력학적 방정식을 풀어서 산정하고, 습윤증발산량은 포화수증기압/온도 곡선의 기울기와 순복사량으로부터 Priestley-Taylor 식을 이용하여 계산한다 (Priestley와 Taylor, 1972; Kite 등, 1994). 실제증발산량은 보완관계에 이류항을 추가하여 다음과 같이 계산하고 있다.

$$E_a^{CRAE} = 2\Psi t_c \frac{R_n + M}{L} - t_c \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \lambda} \frac{R_n}{L} + \frac{\lambda}{\lambda + \Delta} \frac{F}{L} (e_s - e_a) \right]$$

여기서,  $E_a^{CRAE}$ 는 실제증발산량,  $\Psi$ 는 에너지 가중인자,  $t_c$ 는 시간계수 (=86.4),  $R_n$ 는 순복사에너지 (W/m<sup>2</sup>),  $M$ 는 이류에너지 (W/m<sup>2</sup>),  $L$ 은 기화잠열,  $\Delta$ 는 온도에 따른 수증기압 변화율 (mbar/°C),  $\lambda$ 는 잠열강도 (W/m<sup>2</sup>),  $F$ 는 수증기 이송계수 (W/m<sup>2</sup>/mbar),  $e_s$ 는 포화수증기압 (mbar),  $e_a$ 는 실제수증기압 (mbar)이다.

CRAE 모형의 단점은, 개념적으로 지중 열-저장 변화 및 열 저장 변화와 대기경계층에서의 수증기에 관련된 지체시간 때문에 짧은 시간 간격에 대해서 적용이 곤란하다는 것이다 (Doyle, 1990). 또한, 정확한 습도 자료와 유역을 대표할 수 있는 기상자료가 요청된다. 그리고, 모형의 특성상 토양-식생에 대한 정보가 필요 없는 대신, 환경적으로 매우 불연속적인 지역에 대한 적용이나 자연적/인위적인 변화를 예측하기 위한 적용이 곤란하다 (Morton, 1983).

## 3. 대상유역 선정

대상유역으로서 금강수계의 보청천 유역을 선정하였으며, 선정된 하천구간 및 유역은 그림 2에 나타난 바와 같이 기대교 수위관측소 상류 유역으로서 유역면적이 348.15 km<sup>2</sup>이며, 유역 중심에 보은 기상관측소가 위치하고 있다. 증발산 산정 및 유출 분석을 위해 1990~1999년 (1998년은 관측 유출자료가 불충분하여 제외함)의 기간에 대해 보은 지점의 일별 기상자료 및 유역 출구인 기대교 지점의 유출자료를 이용하였다.

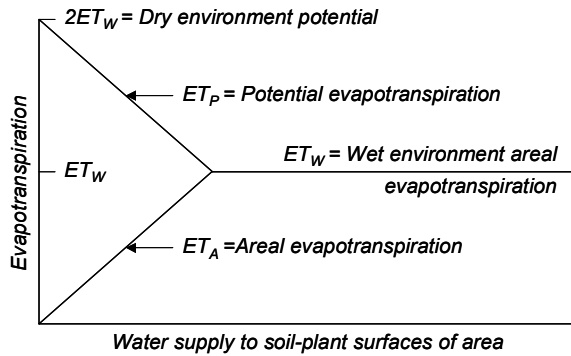


그림 1.  $ET_A$ 와  $ET_P$  사이의 보완관계 모식도

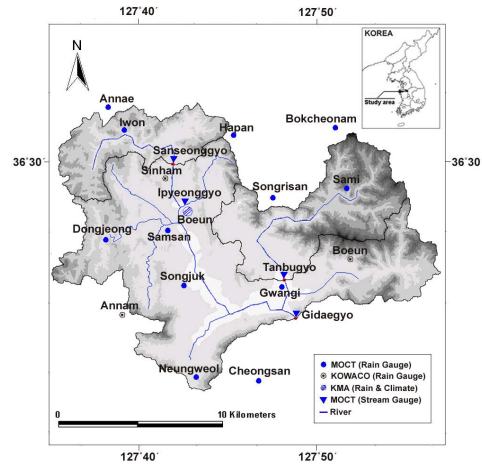


그림 2. 보청천 유역 유역도

#### 4. 유역증발산 산정

일반적으로 유역 내외로의 물이동이 없다고 가정하였을 경우, 유역내에서의 월물수지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_i = P_i - E_{ai} - \Delta S_i$$

여기서,  $Q$ 는 월유출량 (mm),  $P$ 는 월강수량 (mm),  $E_a$ 는 월증발산량 (mm),  $\Delta S (= S_i - S_{i-1})$ 는 월수분저류변화량 (mm),  $i$ 는 해당 월을 나타낸다.

그러나, 대상유역의 월수분저류변화량에 대한 자료가 없으므로, 증발산량과 수분저류변화량을 함께 고려하여 월손실량으로 보았다. 한편 보다 장기적인 관점에서 보았을 경우는 그림 3과 같이 수분저류변화량이 거의 0에 가까워지므로, 강수량과 유출량이 차이인 손실량이 유역내 증발산량과 같다고 볼 수 있을 것이다. 따라서, 표 1과 같이 각 연도별 강수량, 유출량으로부터 손실량을 구하고, 제시된 두 모형에 의해 산정된 증발산량과 비교해 본 결과, 증발산 산정 및 관측 유량에서 오는 여러 가지 오차를 고려하더라도 SWAT P-M 모형으로부터 산정된 증발산량이, 관측 강수량과 유출량의 물수지로부터 얻어진 손실량 (=증발산량)에 근접한 값을 나타내었다. 그러나, 표 1에서 Morton CRAE 결과를 살펴보면, 관측치나 SWAT P-M 결과에 비해, 1990~1994년과 1995~1999년의 결과가 상이하게 차이나는 것을 알 수 있는데, 이는 그림 4의 연도별 상대습도 변화량으로부터 원인을 파악할 수 있다. 두 기간에서의 상대습도 차이가 다소 크게 나타나는데, Morton CRAE 모형의 개념적 특성상 상대습도에 민감하게 반응하기 때문에, 이로 인한 유역증발산량의 차이가 분명하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서, 1990~1994년보다 그 이후 기간에서 Morton CRAE에 의해 추정된 증발산량이 관측치에 더 근접한 결과를 보여주고 있다. 따라서, Morton CRAE 방법을 이용하는데 있어서, 기상자료의 정확성이 보장된다면 SWAT P-M과 비슷한 수준의 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

표 1. 연도별 강수량, 유출량, 손실량, 유출계수, 증발산량

연도	강수량 P	유출량 Q	손실량 P-Q	유출계수 Q/P	증발산량, ET	
					SWAT P-M	Morton CRAE
1990	1,501	917	584	0.61	602	806
1991	1,007	622	385	0.62	530	818
1992	943	480	464	0.51	558	706
1993	1,342	823	520	0.61	531	750
1994	765	435	330	0.57	526	906
1995	984	533	451	0.54	581	491
1996	1,164	794	370	0.68	601	585
1997	1,664	1,065	599	0.64	624	515
1999	1,379	620	759	0.45	655	546
평균	1,194	699	496	0.58	579	680

표 2는 분석기간 전체에 대해 각 월별 평균 강수량, 유출량, 손실량, 월유출계수 및 증발산량을 나타낸 것인데, 8월을 제외하고는 대부분 물수지에 의한 손실량보다 모형에 의해 산정된 증발산량이 다소 높게 나타났으며, SWAT P-M 보다 Morton CRAE를 이용한 방법이 더 많은 증발산량을 모의하는 것으로 나타났다. 그림 5는 월별 평균 강수량, 유출량, 손실량을 나타낸 것이며, 그림 6은 손실량에서 모의된 월증발산량을 제외한 수분저류변화량을 나타낸 것으로서, 모의된 증발산량이 최대값을 보이는 7월에 유출 발생이 제일 크게 나타남에 따라 이에 따른 수분저류변화량이 최저치를 나타내고, 그에 따른 손실량도 감소 경향을 보이고 있다.

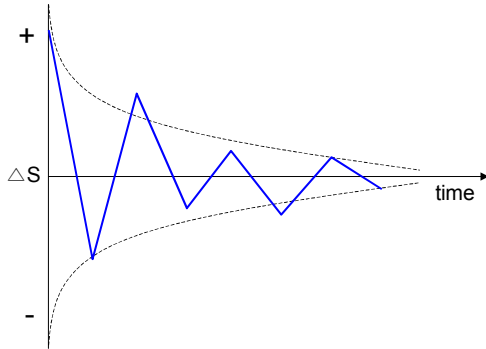


그림 3. 장기 물수지에서의 수분저류변화량

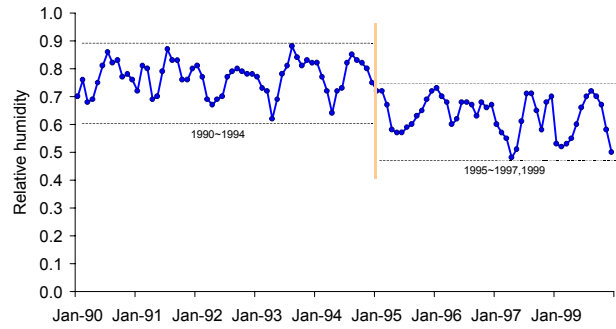


그림 4. 연도별 상대습도 변화

표 2. 월평균 강수량, 유출량, 손실량, 유출계수, 증발산량

월	강수량 P	유출량 Q	손실량 P-Q	유출계수 Q/P	증발산량, ET	
					SWAT P-M	Morton CRAE
1	19.8	22.87	(3.0)	1.15	15.2	16.5
2	38.1	36.34	1.8	0.95	20.2	23.9
3	52.7	35.02	17.6	0.66	42.7	37.3
4	67.8	36.32	31.5	0.54	59.2	61.8
5	104.1	49.70	54.4	0.48	71.3	85.1
6	173.4	83.91	89.5	0.48	71.1	98.6
7	236.3	176.74	59.5	0.75	93.9	114.5
8	251.9	119.82	132.1	0.48	76.3	108.7
9	112.4	65.97	46.4	0.59	54.3	66.7
10	56.5	25.55	31.0	0.45	35.6	34.5
11	52.4	20.52	31.9	0.39	24.1	17.9
12	29.1	25.95	3.1	0.89	14.7	15.0

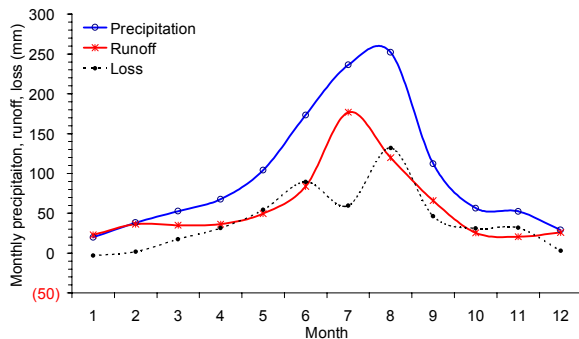


그림 5. 월평균 강수량, 유출량, 손실량 변화

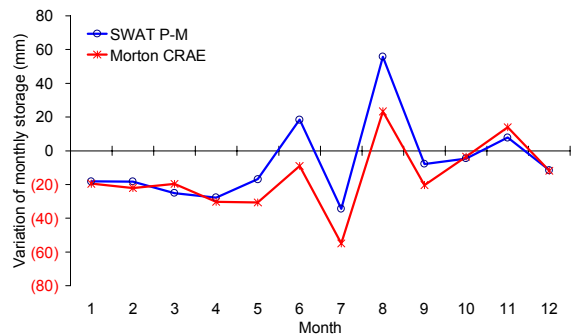


그림 6. 월평균 수분저류변화량

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 보청천 유역의 강수 및 유출자료로부터 산정된 관측 증발산량과 모형에 의해 모의된 증발산량을 비교 검토하여 그 적용성을 평가하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 유역증발산량 산정을 위해 두 가지 방법을 이용하였는데, 하나는 Penman-Monteith로부터 얻어진 기준작물 잠재증발산량을 SWAT 모형을 이용하여 실제 유역에서의 작물 및 토지피복과 가용토양수분에 따라 실제증발산량을 추정하였으며, 다른 하나는 실제증발산량과 잠재증발산량의 보완관계를 이용하는 Morton CRAE 방법으로부터 실제증발산량을 추정하였다.

(2) 1990~1997년, 1999년에 대해 위 두 가지 방법에 의해 모의된 증발산량과, 유역내 관측 강수와 유출을 이용한 장기 물수지분석으로 얻어진 관측 증발산량을 비교한 결과, SWAT P-M 방법이 관측치에 보다 근접한 결과를 보였다. 그러나, 관측 상대습도의 기간별 차이를 고려하여, 1995년 이후만을 대상으로 비교한 결과에서는 그 이전 기간에서보다 관측치에 더 근접한 것으로 나타났다.

(3) 월별 평균 강수량과 유출량을 비교한 결과, 8월을 제외하고는 물수지에 의한 손실량보다 모형에 의해 산정된 증발산량이 다소 높게 나타났으며, SWAT P-M 보다 Morton CRAE를 이용한 방법이 더 많은 증발산량을 모의하는 것으로 나타났다. 또한, 모의된 증발산량이 최대값을 보이는 7월에 유출 발생이 제일 크게 나타났으며, 상대적으로 수분저류변화량이 최저를 나타내고, 그에 따른 손실량도 감소 경향을 보였다.

이상의 결과로부터, 유역증발산 산정을 위한 방법으로 SWAT P-M이 Morton CRAE보다 상대적으로 관측치에 근접한 결과를 보여주지만, Morton CRAE의 경우 기상자료만을 이용하여 간편하게 유역증발산량을 산정할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 기상자료의 신뢰성만 보장된다면 충분히 양질의 유역증발산량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, SWAT 모형의 적용에 있어서도 아직까지는 현실적으로 국내 유역에서의 작물 및 토지피복, 토양특성에 대한 정확한 입력자료 구축의 한계로 인해 발생하는 모의결과에 오차가 있기 때문에, 이에 대한 향후 보완을 통한 비교 연구가 재고되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원 (과제번호 2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, FAO, Rome, Italy.
2. Bouchet, R. J. (1963). Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique, Proc. IAHS, Gen. Assem., Berkeley, IAHS Publ., 62, pp. 134-142.
3. Doyle, P. (1990). Modelling catchment evaporation: an objective comparison of the Penman and Morton approach, J. of Hydrology, 121, pp. 257-276.
4. Kite, G. W., A. Dalton, and K. Dion (1994). Simulation of streamflow in a macroscale watershed using general circulation model data, Water Resources Research, 30(5), pp. 1547-1559.
5. Kovács, G. (1987). Estimation of average areal evapotranspiration - proposal to modify Morton's model based on the complementary character of actual and potential evapotranspiration, J. of Hydrology, 95, pp. 227-240.
6. Morton, F. I. (1965). Potential evaporation and river basin evaporation, J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 91 (HY6), pp. 67-97.
7. Morton, F. I. (1975). Estimating evaporation and transpiration from climatological observations, J. of Applied Meteorology, 14, pp. 488-497.
8. Morton, F. I. (1983). Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology, J. of Hydrology, 66, pp. 1-76.
9. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams (2001). Soil and Water Assessment Tool: the theoretical documentation (version 2000). U. S. Agricultural Research Service.
10. Priestley, C. H. B. and R. J. Taylor (1972). On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters, Monthly Weather Review, 100, pp. 81-92.
11. Xu, Z. X. and J. Y. Li (2003). A distributed approach for estimating catchment evapotranspiration: comparison of the combination equation and the complementary relationship approaches, Hydrological Processes, 17, pp. 1509-1523.