

분포형 장기유출모형 구축을 위한 증발산모형 검토



황 필 선 |
K-water 물관리센터 실장
jesus@kwater.or.kr



박 인 혁 |
K-water 물관리센터 연구원
ihpark@kwater.or.kr



허 영 택 |
K-water 물관리센터 선임연구원
korcivil@hanmail.net



박 진 혁 |
K-water 연구원 책임연구원
park5103@kwater.or.kr

의한 효과들을 들 수 있으며, 인위적인 요인으로 녹지 감소, 온실효과 등을 들 수 있다. 최근 문제가 되는 것은 인간 활동에 의한 기후변화가 체감할 수준까지 접근했다는 데 있으며, 이는 그간의 이상한 파, 계절라성 폭우, 극심한 가뭄 등으로 나타나고 있다. 실제로 과거 100년동안 지구의 평균온도는 0.7℃ 상승하였으며, 지구평균 해수면은 15cm 상승하였다(IPCC, 2008). 우리나라의 경우, 연간 강수량은 '73년도에 평균 1,160mm 이었으나 '07년에는 1,450mm로 증가하였다. 그러나 증가된 강수량은 강우일수 감소로 인해 국지성, 돌발성 경향이 커지고 가뭄 빈도의 증가로 인해 수자원관리에 어려움이 더욱 더 가중되고 있다.

기후변화로 인해 과거 수문특성을 고려하여 설계된 물 관리 정책은 변화된 특성을 고려한 과학적인 물 관리정책수립으로의 방향전환을 필요로 하고 있으며, 이를 위한 장기적인 유출정보가 절실히 요구되고 있다. 장기유출정보는 저수지와 댐의 용량결정, 가뭄대책, 하천유지유량 등과 같은 이수계획과 댐 및 저수지의 관리, 수리권의 허가 및 조정, 용수 분쟁 조정 등의 물 관리 실무에서 필수적인 요소이다(김병식 등, 2008). 특히 우리나라와 같이 사계절의 변화가 뚜렷한 지역에서 장기간에 걸친 유출모형을 구축하기 위해서는 강수, 증발산, 침투, 토양수분의 변화 등의 고려가 필요하다. 이 중 증발산은 수문순환 과정에서 중요한 인자중의 하나이며, 에

1. 서론

태초이래로 우리가 사는 지구는 다양한 요인에 의해 기후변화를 겪어왔다. 자연적인 요인으로는 화산활동, 밀라노비치 싸이클, 엘리뇨, 라니냐 등에

너지 순환으로 설명될 수 있는 증발산량의 순환은 수자원의 이용과 관리계획에 본질적인 요소이다. 이러한 요인들에 의해 국내실정에 적합한 장기 유출모의 모형의 개발이 시급한 실정이다.

본고에서는 국내외에서 사용되고 있는 증발산 산출모형을 소개하고 장기유출모형 구축 시, 적용 가능한 유역단위의 증발산모형을 검토 하였다.

2. 증발산의 정의와 산출방법

우리가 일상생활에서 사용하는 증발산은 증산과 증발에 의해 수증기가 대기 중으로 방출되는 현상을 말한다. 증발산은 전 지구적으로 볼 때 총 육상 강수량의 60%로 물순환 과정에 매우 중요한 부분을 차지한다.

증발산은 증발과 증산으로 구분되며, 증산은 식물의 뿌리로부터 흡수된 액체상태의 물이 물관부를 거쳐 잎의 기공으로 통해 기체 상태로 대기 중에 방출되는 현상이다. 증발산량의 산출은 증발산에 영향을 미치는 인자들(기온, 기압, 풍속, 습도, 식생종류, 일조량 및 일조시간, 광합성 작용 등)이 동시에 복합적으로 작용하기 때문에 정량적인 양을 산출한다는 것은 거의 불가능에 가깝다. 과거부터 사용되는 고전적인 방법으로 증발접시를 활용하여 산출하거나 기상학적 요인들을 활용하는 간접적인 방법이 있다. 최근에는 미기상학적인 방법으로 에디 공분산 장비 등을 활용하여 에너지 flux를 계측하고 이를 통해 증발산량을 측정하고 있다. 그러나 이와 같은 방법은 점단위의 계측이므로 유역단위의 증발산량의 산출은 여전히 해결해야 할 과제로 남아있다.

증발산에 관한 용어는 다양하게 사용되고 있으며 사용 빈도가 높은 용어를 정리하면 다음과 같다.

실제 증발산(actual evapotranspiration)

: 어떤 지역에서 실제 일어나는 증발산

기준 증발산(reference evapotranspiration)

: 0.12m의 잔디에서 물 공급이 제한받지 않는 상태에서 일어날 수 있는 최대 증발산

잠재 증발산(potential evapotranspiration)

: 키 작은 녹색식물로 토지 피복된 어떤 지역에서 물 공급이 제한받지 않는 상태에서 일어날 수 있는 최대 증발산

평형 증발산(equilibrium evapotranspiration)

: 어떤 지역에서 물 공급이 제한 받지 않고 대기가 포화된 상태에서 일어나는 증발산

증발산량을 측정하는 방법에는 크게 실측에 의한 측정방법, 물수지 방법, 에너지 수지 방법 및 기상 자료에 의한 방법으로 구분된다. 우리나라와 같이 지형과 지표피복이 복잡하고 다양한 곳에서 실제증발산량을 산출하기 위해서 직접 측정을 하는 것이 가장 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 이는 관측지점 주변 지역의 공간평균적인 증발산 뿐이며 정점관측이기 때문에 조밀한 관측망이 구성되기 전까지는 증발산의 공간적인 변이를 이해하기 어렵다.

이와 같은 이유로 증발산의 공간분포는 직접 측정보다 증발산과 밀접한 관련 있는 기상-식생변수들을 이용하여 간접적으로 추정하는 것이 현실적인 방법이며, 전술한 방법 외에도 위성원격탐사자료와 기상자료를 활용하여 증발산을 산출하는 연구도 활발히 진행 중이다. 특히, 미국 NASA의 MODIS 위성영상을 활용하여 증발산량을 산출하는 연구가 많이 진행되고 있는데, MODIS를 활용한 증발산량 추정은 기술적으로 거의 가능한 단계에 이르렀으며, 지역 규모의 지표 및 기후특성을 반영하여 높은 예측력을 가진 증발산 알고리즘 등이 개발되었다. 실제로 신사철 등(2004)은 NOAA/AVHRR 위성 영상자료를 통한 NDVI와 기온자료를 이용하여 광역증발산량을 추정함에 있어 Brutsaert와 Stricker가 제안한 식에 Morton법의 이류항을 고려하여 증발산량을 산출하고 이를 NDVI와 온도를 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 분석결과 보완식에 의한 증발산량과 회귀식에 의한 증발산량 사이

에 10%내외의 오차가 발생하고 있음을 제시하고 비교적 합리적인 것으로 결론을 내렸다. 또한 B. Bois 등 (2008)은 기준 증발산량의 산출 시 원격탐사자료의 태양복사에너지를 이용하는 방법을 제안하고, FAO56 Penman-Monteith 모형과 복사에너지 기반의 증발산량 산출법인 Turc, Priestley-Taylor, Hagreave법 등을 비교하면서, 증발산량 산출 시, 지표 기온 데이터만 활용가능하다면 원격탐사자료를 활용하는 것이 기준 증발산량의 정확도를 높일 수 있다고 제시하였다.

그러나 위성원격탐사자료를 활용한 증발산량 추정기법에서 새롭게 대두되는 문제는 구름 혹은 눈 등이 지표를 피복한 경우에 발생하는 자료 결손의 문제와 위성영상의 공간해상도가 비교적 낮아 대규모 유역의 증발산량을 산출하고자 할 경우, 공간 해상도를 크게 한다고 해서 결과가 향상되는 것은 아니므로 적절한 수준의 공간 해상도를 설정해야하는 문제가 있다. 실제로 건설기술연구원에서 제작 중인 “실측 기반 한반도 증발산 지도 제작(김수진 등, 2009)” 과정 중에서도 이러한 결손 등으로 인해 증발산량이 과대 산출되는 문제점을 보고하였다.

3. 증발산 산출 모형

기준증발산량으로부터 실제 증발산량을 산출하는 과정은 전적으로 기준증발산량 산출방법에 따라 다르지만, 해당 방법에서 실제증발산량을 산출하는 과정이 없다면, 일반적인 방법을 사용할 수 있다. 일반적인 실제증발산량의 추정은 실제증발산(ET_A)/기준증발산(ET_R)과 토양의 함수율로부터 산출하게 되며, 이외에도 기준증발산량을 Pan 증발산량과 같다고 간주하고 증발접시계수(ω)를 곱하여 산출하기도 한다.

1) 물수지 방법

토양, 잎, 스프링클러에 의한 증발과 식생에 의

한 증산량을 산출하기 위한 일반적인 물수지방법은 다음과 같다.

$$E+T = P+I+\Delta S-D-R$$

여기서, E는 증발, T는 증산, P는 강우, I는 관개, ΔS 는 식생대 토양수분 저류량, D와 R은 식생대의 배수 혹은 유출손실

토양대에서 증발량 E는 침투계에 의한 계측, 식물에서 증산량 계측 혹은 식생이 없는 지역의 계측을 통해 증발산으로부터 분리될 수 있다.

2) 에너지수지 방법

에너지수지(Energy balance) 방정식은 저수지 시스템 내에 저장된 에너지의 양에 의해 저수지 시스템으로 유입되고 유출되는 에너지간의 수지를 나타내는데, 관측자료의 신뢰성과 정확성에 따라 많은 차이를 나타낼 수 있으며, 양호한 조건에서 산정치의 평균오차는 여름철에 10%, 겨울철에는 20%를 보인다. 에너지수지 방법에 의한 증발산 산출식은 다음과 같다.

$$E = \frac{Q_s - Q_r - Q_b - Q_\theta + Q_v}{\rho L_e (1+B)}$$

여기서, E는 증발량(cm/day), Q_e 는 증발에 사용된 에너지(cal/cm²/day), ρ 는 증발된 물의 밀도(g/cm³), L_e 는 잠재기화열(597.3-0.564T_o, T_o는 수표면 온도(°C)), B는 Bowen비(Bowen ratio)

3) 공기동력학적 방법

공기동력학적 방법은 증발표면으로부터 대로의 난류이송개념에 기본바탕을 두고 있으며 대부분이 다음과 같이 Dalton에 의해 처음 제시된 증발량과 증기압 사이의 관계와 비슷한 형태를 가지고 있다.

$$E = C(e_o - e_a)(a + bW)$$

여기서, E는 증발률(mm/day), e_o 는 수표면에서의 포화증기압(mb), e_a 및 W는 수면으로부터 임의의 높이에서의 실제증기압(mb) 및 풍속(m/sec) 그리고 a, b, c는 상수

Harbeck은 수표면적이 120km²에 이르는 여러 저수지에 대해 분석한 결과 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$E = 0.29A^{-0.05}W_2(e_o - e_a)$$

여기서, E는 저수지 수표면에서의 증발률(cm/day), A는 저수지 수표면적(m²), e_o 는 수표면에서의 포화증기압(kPa), e_a 는 공기의 실제증기압(kPa), W_2 는 수면으로부터 2m 높이에서의 풍속(m/sec)

Dunne과 Leopold(1978)는 공기동력학적 방법에 의한 증발량 E_a 를 구하는 식을 다음과 같이 제시하였다.

$$E_a = (0.013 + 0.00016W_2)(e_s - e_a)$$

여기서, E_a 는 공기동력학적 방법에 의한 증발량(cm/day), W_2 는 수표면으로부터 2m 상공에서의 풍속(km/day), e_s 는 수표면에서의 포화증기압(mb), e_a 는 대기온도에서의 실제증기압(mb)

4) 에너지수지 및 공기동력학적 방법 혼합

실제 증발산은 에너지수지 방법과 공기동력학적 방법의 상호작용에 의해 발생하는 경우가 대부분이다. 따라서 이 두 방법을 조합하여 단일 공식을 유도하여 적용하게 되며, 가장 대표적인 것이 Penman 모형으로 다음과 같다.

$$E_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$$

여기서, E_o 는 저수지 증발량(cm/day), E_n 및 E_a 는 에너지수지방법 및 공기동력학적 방법에 의해 산정한 증발량(cm/day), γ 는 습도계 상수(kPa/°C), Δ 는 온도 대 포화증기압 곡선의 기울기

CIMIS-Penman 모형은 Pruitt에 의해 제안된 방법으로 시간단위 기준 증발산량을 예측하기 위해 a_w 와 b_w 의 계수를 개발하였다. 이 계수는 California Irrigation Management System에 표준 증발산량 산출시 사용되고 있다.

$$ET_o = \frac{[\Delta/(\Delta + \gamma)](R_n - G) + 0.268[\gamma/(\Delta + \gamma)](a_w + b_w U_2) VPD}{\lambda}$$

여기서, ET_o 는 기준증발산(mm/h), U_2 는 2m 높이에서의 풍속(m/sec), R_n 순일사량(MJ/m²h), $G=0$, γ 는 습도계 상수(kPa/°C), VPD는 포차(kPa), Δ 는 포화 수증기압 곡선의 기울기(kPa/°C), λ 는 잠재증발산열(MJ/kg)

Priestley-Taylor 모형은 물리적인 법칙에 기초한 방법으로, 이 방법은 에너지수지 개념과 육지상의 에너지흐름은 복사열에 의해 좌우된다는 가정에 전제하고 있다.

$$E_o = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n$$

여기서, α 는 경험상수이며, R_n 은 순일사량(MJ/m²), Δ 는 포화 수증기압 곡선의 기울기, γ 는 습도계 상수(kPa/°C))

Priestley-Taylor 모형은 많은 연구자에 의해 검증되었고 습한 지역의 증발과 기준증발산량 산출

시 신뢰할 만한 결과를 도출하였다. 경험상수 α 의 보정을 위해서는 많은 지역 데이터를 필요로 하며, 지표면과 공기동력학적 저항 계수에 기초한 α 의 계산은 Pereira(2004)가 제안한 방식을 일반적으로 따른다.

Thornthwaite 모형은 잠재증발산량을 산정하기 위한 주요변수로 월평균기온을 사용하고 있으며, 이 방법은 단순하지만 월평균기온 자료를 쉽게 구할 수 있기 때문에 많은 지역에서 광범위하게 사용되고 있다. Thornthwaite는 북위 29°~30° 사이의 미국 전역에 걸쳐 증발산계 측정에 의해 자료를 수집하여 평균기온 및 일조시간과 잠재증발산량과의 관계를 연구하여 다음과 같은 경험식을 제시하였다.

$$E_{tp}' = 16 \left(\frac{10t_n}{J} \right)^a$$

여기서, E_{tp}' 는 실제일수 및 일조시간으로 보정하지 않은 잠재증발산량(mm/month), J 는 연열지수(yearly heat index), a 는 다음과 같이 산정한다.

$$a = 0.49 + 0.0179J - 0.000077J^2 + 0.000000675J^3$$

따라서 실제일수(D) 및 일조시간(T)을 고려하여 보정한 임의 월의 잠재증발산량은 다음과 같다.

$$E_{tp} = E_{tp}' \frac{DT}{30 \times 12} = CE_{tp}'$$

여기서, E_{tp} 는 잠재증발산량(mm/mon), E_{tp}' 는 보정하지 않은 잠재 증발산량(mm/mon), C 는 보정계수

Blaney-Criddle 모형은 계절단위의 실제증발산량을 산정하는 방법으로 미국 자연자원보전국(NRCS)에서 농작물 경작지에 대한 관개용수를 산정할 때 추천하고 있는 방법이다. 이 방법은 미국

서부지역의 작물소비수량자료와 월평균기온 그리고 백분율로 나타낸 일조시간 사이의 상관관계를 기본으로 하여 개발되었다. 수요량은 식물의 성장에 필요한 소비수량과 관계수로를 통해 도수하는 과정에서의 증발 및 침투로 인한 손실량을 더한 것이다.

Blaney-Criddle 방법에 의한 소비수량(증발산량)의 산정은 다음과 같다.

- 해당지역의 월평균기온 T_a (°F)취득
- 연간 총 일조시간에 대한 일조시간의 백분율 P(%)를 산정
- 각 월의 소비수량 인자 f 산정

$$f = \frac{t_n \times P}{100}$$

- 월 소비수량 인자에 작물별 계절 소비수량 계수 K를 곱해 월별 소비수량 u를 산정

$$u = K \times f$$

- 작물 성장 전 기간에 대한 소비수량(U(in)는 월별 소비수량을 합산

$$U = \sum_{i=1}^n u = \sum_{i=1}^n (K \times f) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{K \times T_n \times P}{100} \right)$$

Penman-Monteith 모형은 실질적인 농업용수 수요량 산정에서 증발산량을 계산하기 위해세계식량기구(FAO)에서 추천하는 방법으로 산정식은 다음과 같다.

$$E_{tr} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(W)(e_s - e_a)$$

여기서, E_{tr} 은 기준 증발산량(mm/day), R_n 은 순일사량(MJ/day), Δ 는 포화 수증기압 곡선의 기울기(mb/°C), $F(W)$ 는 풍속함수, e_s 및 e_a 는 대기온도에서의 포화증기압 및 실제증기압(mb)

FAO56 Penman-Monteith 모형(이후 FAO56 P-M법)은 기존의 Penman-Monteith 방법의 단점을 개선한 것으로 식물성장에 필요한 수분의 데이터를 일관적이고 실질적인 것으로 고려할 수 있도록 하였다. 기존 방법의 문제점은 증발산량의 산정과정 풍속고려, 포차, 장파복사의 고려가 쉽지 않다는 것이었다(S. Alexandris 등, 2003).

이를 개선한 기준증발산량을 산출하는 식은 다음과 같다.

$$ET_o = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma[37/(T_h + 273.16)]U_2VPD}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

여기서, ET_o 는 기준 증발산량(mm/h), T_h 는 대기온도의 시간 평균(°C), U_2 는 2m 상공의 풍속(m/sec), R_n 은 순일사량 플럭스(MJ/m²h), G 는 지열 플럭스(MJ/m²h), VPD 는 포차(kPa), Δ 는 포화 수증기압 곡선의 기울기(kPa/°C), γ 는 습도계 상수

현재의 수증기압 산출시, 해발고도에 따른 대기압의 변화를 Kelvin 온도로부터 환산하여 산출하게 되며, 건습도계 상수는 현재의 대기압을 고려하여 산출하게 된다.

한편, FAO56 P-M 법은 기준작물에 대한 잠재 증발산량을 산정하기 때문에 유역내에서 실제 증발산량을 산정하기 위해서는 작물 및 토지피복과 토양에서의 가용수분을 고려하여야 한다. 그러나 유역단위의 상기 데이터를 구축하는 것은 많은 시간과 노력을 필요로 하기 때문에, FAO56 P-M 방법으로 유역단위의 실제 증발산량을 산출하고자 할 때는, 유역의 특성(피복, 식생 등)을 추적할 수 있는 유역모형과의 연계가 필요하다.

Morton CRAE(Complementary Area Evapotranspiration) 모형은 1965년에 발표된 Morton의 법을 1983년 개선한 모형으로, 보완 개념은 잠재증발산량이 기온과 습도의 함수이며, 온도의 증가에 따라 잠재증발산량이 증가하고, 실제

습도에 따라 감소한다는 사실에 기초하고 있다. 이 방법은 지역적인 인자 또는 가용 수분에 대한 어떠한 가정도 없이 온도, 습도, 일조시간 등의 기상자료로부터 넓은 유역에 대한 증발산량을 추정할 수 있는 장점을 갖고 있다. Morton CRAE 모형에서 잠재증발산량은 수정 Penman식을 이용하고 풍속 함수를 이송계수로 변환하여, 평형온도에서 에너지 수지와 동력학적 방정식을 풀어서 산정하고 습윤증발산량은 포화수증기압/온도 곡선의 기울기와 순복사량으로부터 Priestley-Taylor식을 이용하여 계산한다.

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

여기서, E_a^{CRAE} 는 실제증발산량, Ψ 는 에너지 증인자, t_c 는 시간계수(=86.4), R_n 는 순복사에너지(W/m²), M 는 이류에너지(W/m²), L 은 기화잠열, Δ 는 포화 수증기압 곡선의 기울기(mbar/°C), λ 는 잠열강도(W/m²), F 는 수증기 이송계수(W/m²/mbar), e_s 는 포화수증기압(mbar), e_a 는 실제수증기압(mbar)

김남원 등(2004)은 보청천 유역의 실제 증발산량 산정 시, FAO56 P-M모형과 Morton CRAE 모형을 비교한 연구에서, 상대습도가 비교적 정확히 제공되는 시점 이후의 증발산량은 Morton CRAE 모형이 FAO56 P-M보다 실측값에 근사한 결과가 도출되는 것으로 보고하였다. 이는 FAO56 P-M모형을 위한 유역의 식생 및 토지피복, 토양수분데이터 등이 유역모형을 통해 산출되었기 때문이며, 만일 정확한 기상자료만 확보할 수 있다면 Morton CRAE 모형을 이용하여 비교적 정확한 증발산량을 산출할 수 있다고 보고하였다. 그러나 Morton-CRAE 모형의 단점은, 개념적으로 지중

열-저장 변화 및 열 저장변화와 대기경계층에서의 수증기에 관련된 지체시간 때문에 짧은 시간 간격에 대해서 적용이 곤란하다는 것이다(Doyle, 1990). 또한 정확한 습도자료와 유역을 대표할 수 있는 기상자료가 요청되며, 모형의 특성상 토양-식생에 대한 정보가 필요 없는 대신 환경적으로 매우 불연속적인 지역에 대한 적용이나 자연적/인위적인 변화를 예측하기 위한 적용이 곤란한 단점이 있다(Morton, 1983).

Turc 모형은 일사량을 고려하여 증발산량을 산출하는 방법으로 상대습도가 50%보다 큰 서부유럽의 지역에서 사용하기 위해 개발되었다. 이 방법은 최초로 10일 동안의 증발산량을 산출하기 위해 개발되었다. 산출식은 아래와 같다.

$$E_{TU} = 0.013(23.88R_s + 50) \left(\frac{T}{T+15} \right)$$

여기서, E_{TU} 는 기준증발산량(mm/h), R_s 는 일사량(MJ/m²), T는 대기의 온도(°C)

Hargreaves 모형은 1975년 미국의 Davis 토양의 수분 데이터와 5일간 기온과 일사량간의 회귀식을 통해 산출된 경험식이다. 산출식은 다음과 같다.

$$E_{HR} = 0.0136 \frac{R_s}{\lambda} (T+17.8)$$

여기서, E_{HR} 은 기준 증발산량(mm/h), λ 는 증발 잠열-2.45MJ/kg(20°C), T는 대기의 평균온도(°C), R_s 는 일사량(MJ/m²)

일사량을 사용하는 Hargreaves 법은 거의 검증되지 않았으나, 추천할만한 결과를 도출한다. 이 방법이 제안되었을 당시 일사량은 거의 활용되지 않았기 때문에, Hargreaves는 이 방법을 기온의 최대값과 최소값을 이용하여 증발산을 산출할 수 있도록 수정하였으며, 산출식은 아래와 같다.

$$E_{HT} = 0.0023 \frac{R_a}{\lambda} (T + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}}$$

여기서, E_{HT} 는 기준증발산량(mm/h), T_{min} 과 T_{max} 는 기온의 최대값과 최소값(°C), R_a 외기복사량(MJ/m²)

이외에도 SVAT(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) 모형에 근간한 SiB2 모형, 중국에서 개발된 TSAR 모형 등이 있다.

표 1은 주요 증발산 모형별 입력 자료를 비교한 것이다.

표 1. 주요 증발산모형별 입력자료 비교

입력자료	Penman	C-P ¹⁾	P-T ²⁾	Thornthwaite	FAO56 P-M	Morton CRAE	Hargreaves
순일사량		●	●	●	●	●	●
지열		●			●		
이류에너지	●					●	
풍속	●	●			●		
잠재증발산열	●	●		●		●	●
온도	●				●		●
포차	●	●			●	●	
Δ ³⁾	●	●	●		●		
γ ⁴⁾	●	●	●		●		
경험상수	●		●	●		●	
기타	물의 밀도 Bowen 비			연열지수		시간계수잠열 강도이송계수	

1) CIMIS Penman, 2) Priestley-Taylor 모형, 3) 포화 수증기압 곡선의 기울기(kPa/°C), 4) 습도계 상수

4. 유역모형별 증발산량 산출기법

기후변화에 의한 유역의 유출특성을 모의하기 위해서는 유역의 수문순환과정을 정량적으로 모의할 수 있는 모형이 필요하다. 특히 수문순환과정에서 중요한 역할을 담당하는 증발산량의 산출은 장기유출모형에서 반드시 필요한 요소 중의 하나이다. 표 2는 전세계적으로 사용되고 있는 유역모형 중 국내에서 사용빈도가 높은 모형의 종류 및 각 모형별 증발산량 산출기법을 정리한 결과이다.

비교적 최근에 개발된 모형에서는 Penman-Monteith모형을 사용하며, 일부에서는 입력 자료가 비교적 간단한 Priestley-Taylor, Thornthwaite, Morton-CRAE모형 등을 사용한 유역모형도 확인할 수 있었다. SLURP모형을 이용한 증발산량 추정에 관한 국내 연구에서 김병식 등(2008)은 FAO56 P-M 모형은 토양의 함수율을 제대로 고려하지 못하기 때문에 유출량 모의 시 기저유량 값에 대한 재현성이 부족하고, Morton CRAE 법이 비교적 증발산량을 잘 모의하는 것으로 제시하였다. 특히 증발산모형은 증발량과 증산량으로 구분되어 지는데 모형별 증발량은 차이가 없으나 증산량에서 모형별로 차이가 크게 나타남을 지적하면서 증발산

표 2. 주요 유역모형별 증발산량 산출기법

수치모형	증발산 산출기법	개발사
CAT	Penman-Monteith	한국건설기술연구원, 한국
HEC-HMS	Gridded Priestley-Taylor Priestley-Taylor Monthly Average	US Army Corps of Engineers, 미국
HSPF	Pan Evapotranspiration 물수지법	EPA, USGS, 미국
Hydro-Beam Mike-SHE	Thornwaite Penman-Monteith The Kristensen-Jensen 실제증발산량 - 엽면적지수(LAI), 토양수분함수 - 식물에 의한 증산 - 토양증발 - 차단지류 증발 - 수면 증발	교토대학, 일본 DHI, 덴마크
PRMS	Pan Evapotranspiration Hamon 수정 Jensen-Haise Priestley-Taylor Zahener	USGS, 미국
SWAT	Priestley-Taylor Penman-Monteith Hargreaves	EPA, USDA, 미국
SLURP	Morton CRAE Penman-Monteith Granger Spittlehouse-Black Linacre	Hydrologic-Solutions, 영국
SSARR	Pan Evapotranspiration Thornthwaite	US Army Corps of Engineers, 미국

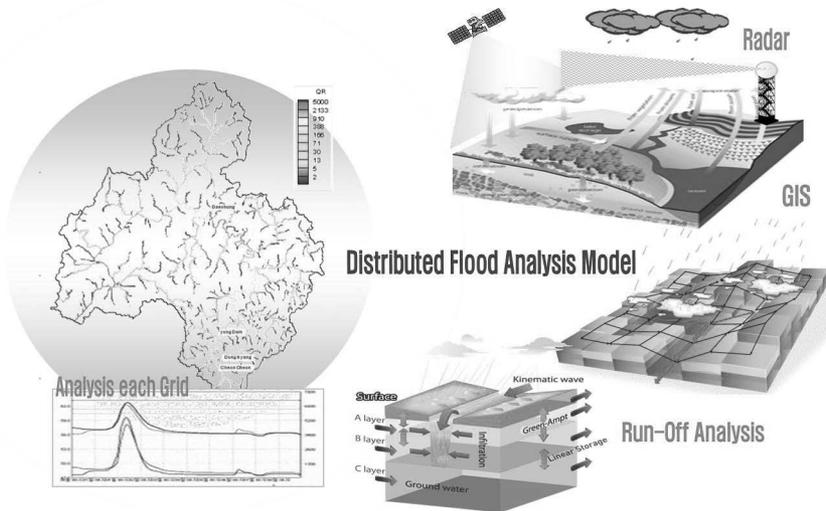


그림 1. K-DRUM(박진혁 등, 2008, 2009, 2010)의 모식도

모형은 토양의 함수율과 밀접한 연관관계가 있고 유출량 모의 시, 토양의 함수조건을 고려해야한다고 명시하였다.

이와 같이 유역의 유출모형은 해당 지역의 지형적, 생물학적 특성이 많은 영향을 미치고 있으므로, 대중적인 것보다는 국내 실정에 적합한 모형을 사용하는 것이 더 바람직할 것으로 판단된다.

현재 K-water에서는 기후변화에 따른 과학적인 물관리를 위해 격자기반의 분포형 강우유출모형(K-DRUM: K-water Distributed Rainfall Runoff Model)을 개발(박진혁 등, 2008, 2009, 2010) 중에 있으며, 그림 1은 K-DRUM의 모식도를 나타낸다. 현재는 수문자료와 지형자료를 입력하여 홍수 또는 1개월 이내의 강우사상을 대상으로 유출량 계산에 적합하도록 알파버전이 개발된 상태이며, 지속적인 성능개선을 통해 기후변화를 대비하고 있다. 향후 성능개선 시, 현재까지 검토된 다양한 증발산량 추정모형 중 국내실정에 적합한 방법을 선별하여 장기유출모형을 개발할 예정이다.

5. 결론 및 제언

본고에서는 장기유출모형 구축을 위한 증발산량 추정모형을 검토하였으며, 그 결과 국내 적용 시 가장 합리적인 모형은 FAO56 P-M, Morton-CRAE 모형으로 판단된다. 장기유출모형을 위한 증발산량 추정 모형은 전세계 연구자들에 의해 FAO56 P-M 모형이 가장 적합한 것으로 알려졌으

나, 증발산이라는 요소 자체가 지역특화적인 요소이고 고려해야할 요소가 많기 때문에 어느 모형이 정답이라고 제시하기는 사실상 어렵다. 특히 모형이 정교해질수록 요구하는 데이터의 양과 수준이 높아질 수밖에 없으며, 계산절차도 복잡해질 수밖에 없다. 정교한 증발산모형과 정확도 높은 데이터를 사용하여 장기유출모형을 구축하는 것이 이상적이긴 하지만, 모형 입력자료 구축 및 구동시간의 증가는 분석자가 감수해야할 몫이다. 반면, 비교적 간단한 계산과정과 데이터만으로 증발산량을 추정하고자 한다면 전술한 모형 중 Priestley-Taylor, Hagreaves, Thornthwaite 모형 등도 합리적인 모형이 될 수 있을 것이다. 물론 이러한 간단한 모형은 지역상수를 포함하고 있으므로 이 지역상수를 우리나라 실정에 맞게끔 계산할 필요가 있으나, 이러한 경험상수들은 분석데이터의 준비와 계산과정이 지루할 뿐, 경험상수가 산출된 뒤에는 간단하면서도, 만약 산출된 경험상수의 신뢰수준이 높다면, 추정된 증발산량 신뢰도도 높다는 장점이 있으므로 장기유출모형 구축 시 고려해볼 필요가 있다.

한편, 최근의 연구에서는 FAO56 P-M모형, Morton-CRAE모형을 그대로 사용하기 보다는 목적에 맞게끔 식생지수 등과 결합하여 증발산량을 산정하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서 기후변화를 고려한 장기유출모형 구축 시, 국내 실정에 적합한 증발산량 추정모형의 개발이 필요하며, 특히 우리나라와 같이 4계절이 뚜렷한 경우, 적설과 융설에 따른 영향도 병행하여 검토되어야 할 것이다. ☞

참고문헌

1. 김남원, 김철겸(2004). “유역증발산 산정을 위한 Penman-Monteith 방법과 Morton CRAE 방법의 비교”, 한국수자원학회 학술발표회, pp. 1-5
2. 김병식, 장대원, 서병하, 김형수(2008). “용설을 고려한 물수지 모형을 이용한 소양강 댐 상류 유역의 월 유출량 산정”, 한국습지학회지, 제10권, 1호, pp 1-9
3. 김병식, 조두찬, 김형수, 서병하(2004). “SLURP모형에서 증발산 모형의 평가”, 한국수자원학회 학술발표회, pp 1-6
4. 김수진, 김준, 김승(2009), “HydroKorea-실측 기반 한반도 증발산 지도 제작”, 한국수자원학회지, VOL. 42, NO. 5, pp 50-57
5. 박진혁, 허영택(2008), “홍수유출해석을 위한 운동과기반의 분포형모형 개발 및 적용”, 한국수자원학회지, VOL. 41, NO. 5, pp 455-462
6. 박진혁, 허영택(2008), “초기토양조건에 대한 분포형모형 유출민감도 분석”, 대한토목학회지, VOL. 28, NO. 4B, pp 375-381
7. 박진혁, 허영택(2009), “K-DRUM 개선을 위한 초기토양함수 자동보정기법 개발”, 한국지형공간정보학회지, VOL. 17, NO. 2, pp 71-79
8. 박진혁, 허영택(2009), “물리적기반의 분포형모형을 활용한 임진강유역 홍수유출모의”, 한국수자원학회지, VOL. 42, NO. 1, pp 51-60
9. 박진혁, 허영택(2010), “GIS기반 K-DRUM을 이용한 금강권 대유역 홍수유출적용”, 한국지형공간정보학회지, VOL. 18, NO. 1, pp 11-20
10. 신사철, 안태용(2004). “NDVI와 기온자료를 이용한 광역증발산량의 추정”, 한국지리정보학회지, 7권, 3호, pp 79-89
11. Bois, B., Pieri, P., Van Leeuwen, C., Wald, L., Huard, F., Gaudillere, J.-P., Saur, E.(2008), “Using Remotely Sensed Solar Radiation Data for Reference Evapotranspiration Estimation at a Daily Time Step”, Agricultural and Forest Meteorology, 1(48), pp 619-630
12. Doyle, P. (1990), “Modeling Catchment Evaporation: an Objective Comparison of the Penman and Morton Approach”, Journal of Hydrology, 121, pp 257-276
13. Morton, F.I.(1983) “Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and Their Significance to the Science and Practice of Hydrology”, Journal of Hydrology, 66, pp 1-76
14. Pereira, A.R. Pruitt, W.O.(2004). “Adaptation of the Thornthwaite Scheme Estimating Daily Reference Evapotranspiration”, Agricultural Water Manage, 66 (3), pp 251-257
15. S. Alexandris, P. Kerkides(2003). “New Empirical Formula for Hourly Estimations of Reference Evapotranspiration”, Agricultural Water Management, Vol.50(3), pp 157-180
16. IPCC(2008). Climate Change and Water, IPCC Technical paper VI.