

유역일증발산 추정모형 개발

김 남 원, 김 승
한국건설기술연구원 수자원연구소

요 지

한정된 수자원을 관리하기 위한 물관리시스템을 구축운영하는데 수문학적 물손실의 관점에서 증발산은 매우 중요한 요소이다.

본 연구에서는 이러한 증발산이 실제유역에서 변화하는 것을 일별로 추정하기 위해서 유역일증발산 모형을 개발하여 실제증발산을 추정하였다. 실제증발산은 잠재증발산을 먼저 산정하고 이를 이용하여 강우차단에 의한 증발, 토양증발, 지표하 증산으로 나누어 추정하였다. 잠재증발산 추정방법은 토양-식생-대기의 관계를 정교히 모식할 수 있는 Penman-Monteith 방법을 채택하였고, 강우차단에 의한 증발은 Bultot와 Dupriez가 제안한 모형을, 토양증발은 Ritchie가 제시한 모형을 채택하였다. 증산은 토양층을 상부·하부층으로 나누어 상부층증산과 하부층 증산으로 분리 추정하였으며, 증발산과 토양수분의 관계는 Thornthwait-Mather의 관계를 이용하여 추정하였다.

이 모형의 타당성을 임업연구원에서 운영하고 있는 2개의 시험유역을 대상으로 검토하였다. 그결과 실제일증발산을 년단위로 계산한 실제증발산값은 물수지 개념에 의한 실제증발산결과와 비교할 때 약 8~30% 오차를 수반하고 있었다. 이러한 결과는 모형의 실제유역의 적용에 있어서 입력되는 여러 매개변수가 가정에 의해 결정된 것이기 때문일 것이라고 판단된다.

1. 서 론

수자원 관리는 한정된 수자원을 어디에, 어떻게, 얼마만큼 개발하고 사용할 것인지를 결정하는 것이라고 할 수 있으며, 이를 위해서는 각 수

계 또는 유역별로 물관리 시스템을 구축하여 운영할 필요가 있다. 물관리시스템은 수문학적 측면에서 볼 때 물수지에 기초하고 있으며, 물수지의 주요성분은 강수, 증발산, 유출, 침투 등이다. 이러한 물수지 구성 성분중 증발산은 물순환계에 있어 매우 중요하며, 증발산의 결정은 수자원 부존량 파악, 저수지설계 및 평가, 그리고 홍수예경보 등 수자원 제 분야에서 요구된다. 또한 지구상의 연평균강수량의 약 70% 이상이 증발과 증산에 의해 대기로 되돌아가는 것(Singh, 1989)을 고려하면, 증발산의 중요성을 아무리 강조해도 지나치지 않다.

국내의 경우 증발산의 연구는 주로 농업분야에서 작물에 대한 연구를 통해 활발히 수행되어 왔다. 그러나 유역내의 수자원을 운영관리하는 측면에서의 증발산 연구는 아직 초기단계라고 할 수 있으며, 이에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 증발산의 제현상을 이론적으로 규명하기 보다는 지금까지 연구된 증발산 추정방법을 문헌을 통하여 고찰하고 이를 이용하여 실제증발산 추정모형을 유역물관리시스템의 근간이 되는 장기일유출량 추정모형의 부모형으로서 개발 제시하고자 한다.

2. Penman-Monteith 방법과 실제증발산 추정 개념

일반적으로 실제유역은 여러가지 식생이 분포되어 있고, 물의 공급상태와 기상조건은 매우 다양하게 변화하기 때문에 해석적 측면에서의 증발산 추정시 토양-식생-대기 관계를 명쾌히 정의할 수 있어야 한다. 그러므로 본연구에서는 증발산을 추정하기 위해, 토양-식생-대기의 관계로써 유도된 Penman-Monteith 공식을 채택하였다.

Penman-Monteith 공식은 다음과 같다.

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

$$\gamma^* = \gamma \left[1 + \frac{\gamma_c}{\gamma_{av}} \right] \quad (2)$$

$$E_a = \frac{\rho C_p (e_a - e_d)}{\lambda \gamma \gamma_{av}} (8.64 \times 10^7) \quad (3)$$

여기서, ETP는 잠재증발산량 (mm/day)

- Δ : 평균기온에서 계산되는 포화 증기압곡선경사 (mb/° C)
 γ : 습도계상수 (mb/° C)
 R_n : 순복사에너지 (mm/day)
 G : 흙속으로 유입하는 열에너지 (mm/day)
 γ_c : 수관저항 (canopy resistance) (s/m)
 $\gamma_{a,v}$: 공기동역학 저항 (aerodynamic resistance) (s/m)
 C_p : 공기의 비열 (cal/g/° C)
 ρ : 공기의 밀도 (g/cm³)
 λ : 잠재증기화열 (cal/g)

식(1)은 실제적으로 Penman 공식과 아주 유사하나 공기동역학적 저항과 수관저항이 다를 뿐이다. 공기동역학적 저항은 수관표면과 높이 Z_m 사이의 증발산 전달 저항으로 정의되며 대기안정조건을 가정함으로써 높이 Z 에서의 풍속과 수관의 높이로써 추정할 수 있다.

한편 수관저항(γ_c)은 엽면기공을 통한 증기유동에 대한 저항을 나타내며, 주로 생리학적 매개변수로써 추정된다. 따라서 수관저항은 식생-토양의 측면에서 볼때 토양수분부족량, 빛의 강도, 증기압차 등을 고려한 환경학적 변수들의 복합함수이며, 또한 식생의 종류와 특성에 따라 변화된다. 이와 같이 수관저항을 여러가지 인자로 정의할 수 있으나 토양수분부족량을 대표적인 인자로 볼 수 있으며, 수관저항과의 관계설정으로 예를 들면 토양수분을 나무가 흡수할 수 있는 능력 이상으로 앞에서 증발이 일어날 때 기공은 닫히게 되고 수관저항은 크게 되어 결과적으로 증산이 작아진다(Jensen and Touch-Clausen, 1982; Russell, 1988).

이와 같이 여러 매개변수와의 관계해석으로 수관저항이 해석될 경우 잠재증발산의 개념없이 실제증발산을 직접 추정할 수 있다. 그러나 불행히도 본 연구에서는 수관저항과 기타매개변수와의 함수적 관계를 정립한 문헌을 찾지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 Federer(1975)와 같이 엽면기공의 열림이 최대로 되고 식생수분 흡수상태가 최대일 때의 저항, 즉 수관저항을 최소로하는 상태를 가정하는 잠재증발산을 고려하였다. 이 상태의 잠재증발산은 증발표면적 측면에서의 잠재증발산에 해당하며, 이는 주어진 기상학적 조건에 식생종류 및 피복상태 등에 따른 최대증발산으로 대략 정의할 수 있다.

3. 유역증발산 추정 모형

전술한 바와 같이 잠재증발산을 주어진 기상조건과 식생조건에 따른 최대 증발산으로 정의하였기 때문에 실제증발산은 잠재증발산보다 작거나 같은 상태를 유지할 수 있어야 한다. 다시말하면 식(1)에 의해 계산된 잠재증발산은 주어진 기상조건과 식생조건에 따라서 증발시킬 수 있는 최대 값이기 때문에 잎증발, 토양증발, 증산의 합보다 크거나 같아야 한다. 이러한 개념을 이용 그림 1과 같은 유역증발산 추정모형을 구성하였으며, 유출량을 직접 모의하는 모형이 아니고 실제증발산량을 일별로 추정하기 위한 모형이기 때문에 유역의 조건을 가급적 단순화 하였다. 따라서 그림 1의 잎증발, 상층토양과 하층토양의 수분은 다음과 같이 가정하였으며 또한 직접유출관계는 경험적 선형관계로 구성하였다.

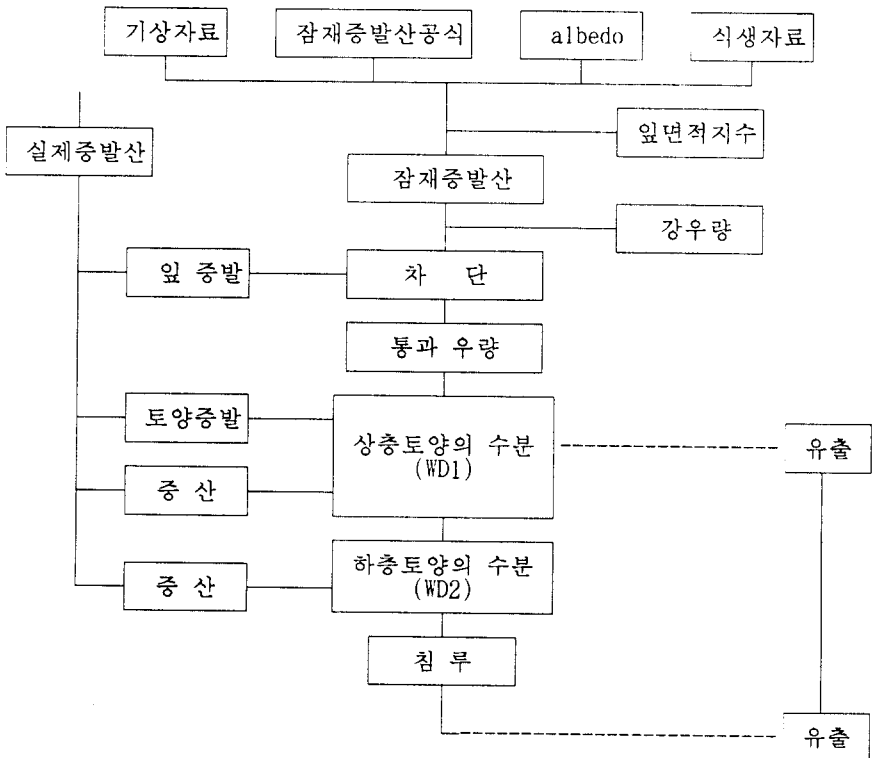


그림 1. 유역일증발산 추정모형의 구성도

1) 수관으로부터 증발

식생에 의해 차단된 강우량의 일부분은 직접 증발되고, 남아있는 차단량도 다음날 증발되며, 계속되는 강우가 있는 경우 수관위에 있는 증발량과의 관계에 의해 다음날의 차단량이 결정된다.

2) 토양상부층

지표하 식생의 뿌리 깊이 정도까지의 구역으로서 강우사상후 유출이 있기전까지 이 구역은 완전히 포화된다고 가정한다. 따라서 증발산의 관점에서 볼때 이 구역은 잘 발달된 뿌리조직으로, 대부분 증산으로 인한 물손실이 있다고 가정한다. 따라서 이 층의 표면에서는 증발과 증산에 의해 물손실이 동시에 발생한다. 또한 이 구역이 완전히 포화될 때까지 토양하부층으로의 침투량은 없다고 가정한다.

3) 토양하부층

토양상부층의 아래층으로서 대개는 비포화구역이다. 토양상부층이 건조상태로 있을때 이 구역으로부터 증산이 발생한다고 가정하였으며 이 층이 완전히 포화되기 전에는 浸漈量이 없다고 가정하였다.

그림 1의 증발산 추정모형은 먼저 잠재증발산을 계산하고, 이를 이용하여 증발과 증산으로 성분별로 분리 계산함으로써 실제증발산을 추정하도록 구축된 것이다. 이를 개념적으로 고찰할 때 증발은 차단에 의한 증발과 토양증발로 구성되어 있고, 증산은 상층과 하층토양으로부터의 증산으로 구성되어 있다.

그림 1를 이용하여 실제증발산을 추정하는 절차를 간단히 설명하면 식(2)에 의해 잠재증발산을 계산한 후 浸漈발량을 강우 차단모형에 의해 계산한다. 만약 浸漈발량이 없으면 계산된 잠재증발산량이 토양에서의 증발산必要량이 되며, 차단량이 잠재증발산량보다 크면, 토양에서의 증발산必要량은 없게 된다. 그리고 토양증발율을 계산하여 토양증발산 必要量으로부터 이 양을 빼게 되면 토양증산必要량이 남게 된다. 이렇게 산정된 토양증산必要량을 이용하여 상하부층의 토양수분 상태에 따라 실제증산량을 결정한다.

이상에서 강우차단모형은 Bultot와 Duprieze(1985)가 제안한 모형을, 토양증발을 계산하기 위해서는 Ritchie(1972)가 제안한 모형을 채택하였으며 상세한 내용은 생략한다.

강우가 시작되고 유출이 발생하기 위하여는 토양상부층은 포화되어야 하며, 포화된 후 남은 剩餘雨量 중 일부분은 직접 유출되고 다른 부분은 토양하부층으로 浸透하게 된다고 가정하였다. 이 층에서는 증발과 증산이 동시에 일어나며, 이 층이 萎蕪點까지 완전히 건조될 경우, 하부층에서만 증산이 일어난다. 이 부분에서 유출 및 증산을 위해서는 다음의 두개의 변수를 미리 추정하여야 한다.

1) 표면유출율 : Pr

2) 상부층에서 이용할 수 있는 最大水分量 : WD1X

여기서 표면유출율이란 강우가 시작한후 상부층이 완전히 포화될 때, 즉 수분량이 WD1X에 있을때, 剩餘雨量(SS)이 생성되며 이 잉여우량중 유출될 수 있는 비율을 의미한다. 따라서 剩餘雨量은 다음 2부분으로 나누어진다.

1) 직접유출에 기여하는 우량 : RF = Pr SS

2) 浸透에 기여하는 우량 : RECH = SS - RF

차단 후 강우량과 앞에서 증발량, 토양표면에서 증발량을 제외한 증산必要量이 이 부분에서 취급되며 토양상부층의 증산량(ET1) 추정은 다음 thornthwaite와 Mather(1955) 관계에 의해 결정된다.

$$ET1 = PME1 \left(\frac{WD1_{d-1}}{WD1X} \right) \quad (12)$$

ET1은 상부층에서의 실제증산량이며 PME1는 잠재증발산량에서 잉증발량, 토양증발량을 뺀 증산必要量이다. 또한 WD1X는 最大水分量이며 $WD1_{d-1}$ 은 전날의상부층 수분량이다

토양하부층의 증산량(ET2)은 토양상부층의 증산량(ET1) 추정식과 동일한 관계식을 갖는다고 가정하였다.

4. 모형의 적용

본 연구에서 개발된 유역일증발산 모형을 시험 적용하기 위해서는 기상 및 토양자료 식생의 조건이 완전히 구비되고 증발산 측정자료가 있는 것이 바람직하다. 그러나 국내의 경우 이러한 유역은 없기 때문에, 강우와 유출자료가 비교적 정교하게 수집되어온 임업연구원에서 운영하고 있는 시험유역을 본 연구의 대상유역으로 선정하였다. 선정된 시험유역은 수종의 변화를 연구하기 위해 광릉 2개곳에 설치된 것이다. 한 유역은

잣나무와 전나무를 재배한 인공조림지로서 유역의 방위가 정남을 향하고 있으며 유령림 단계에 있으므로 수분요구도가 매우 높고 편의상 여기에서는 침엽수림유역이라 칭한다. 다른 한 유역은 활엽수림 유역으로서 참나무와 서어나무 외에 까치박달나무, 단풍나무 등이 자생하고 있는 천연림이 임관 밀도 95%를 나타내고 있으며, 유역 중간부근에는 낙엽송과 리기다소나무의 인공조림지가 포함되어 있다. 여기에서는 활엽수림유역이라 칭한다. 이상의 2개 유역에 대한 지형학적 조건을 표시하면 표 1과 같다.

표 1. 시험유역의 지형학적 조건

유역		면적 (ha)	높이 (m)	경사 (%)	토성분류	기타
경봉	침엽수	13.60	160-290	13-35	사양토	76년 이식
	활엽수	22.00	280-470	5-35	사양토	

표 2. 채택된 실험 저항계수

월		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
공기동역학 저항 을 위한 계수(r_{av})	침엽수	150	150	150	33	6	6	6	6	6	150	150	150
	활엽수	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
수권저항 (s/m)	침엽수	200	200	200	150	150	150	150	150	150	150	200	200
	활엽수	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150

주) 계수(r_{av})는 $r_{av} = r_{s/v}$ 의 관계를 위한 것이다. 여기서, u 는 풍속(m/s)이다.

4.1 잠재증발산량 추정을 위한 매개변수의 추정

Penman-Monteith 방법을 연구대상유역에 적용하기 위해서는 유역에 알맞은 변수, 즉 공기동역학적 저항, 수관저항을 결정하여야 한다. 그러나 이러한 변수를 결정할 수 있는자료가 없기 때문에 가용한 문헌을 통하여 변수를 추정하였다. 본 연구에서 채택한 공기동역학적 저항과 수관저항의 관계를 표 2에 수록하였다.

4.2 실제증발산 추정을 위한 매개변수 추정

본 연구에서 개발한 모형에 의해 실제증발산을 추정하기 위해서는 몇 가지 매개변수를 먼저 결정하여야 한다. 먼저 토양증발을 계산하기 위

실제토양수분에 영향을 주는 유출율을 결정하여야 한다.

토양최대수분량은 침엽수 유역인 경우 토양상부층 40mm, 하부층 300mm로, 활엽수인 경우는 토양상부층 40mm, 하부층 214mm로 각각 가정하였다. 또한 가정된 유출율과 잎면적 지수(LAI)는 표 3과 같다.

5. 분석결과

그림 3와 4는 본 연구에서 결정한 변수를 이용하여 산정한 결과를

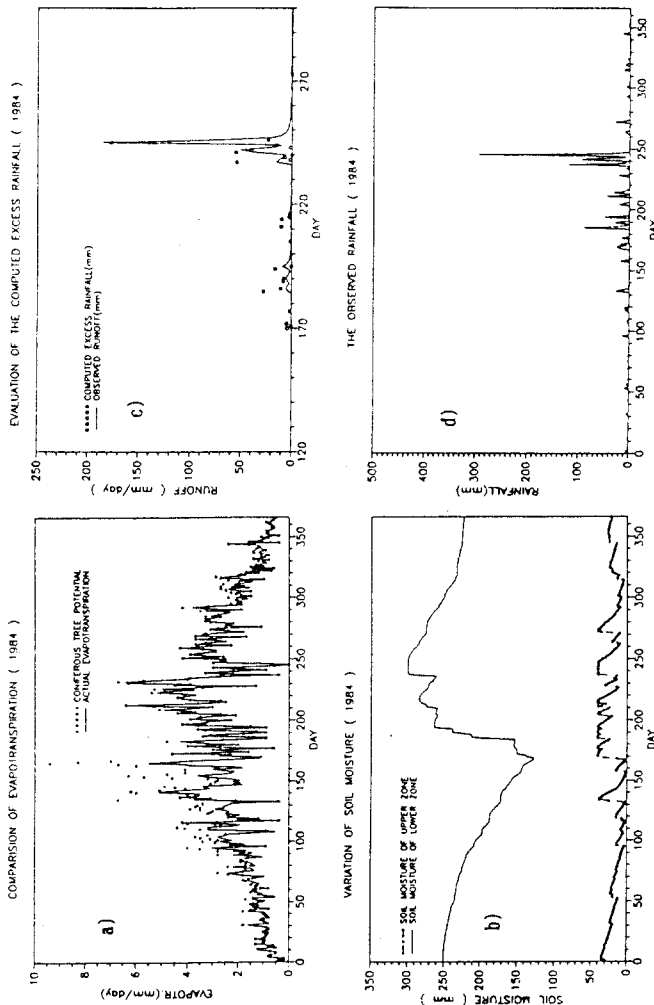


그림 3 침엽수림구역의 분석결과 (1984)
 a) 잠재증발산과 실제증발산, b) 토양수분의 변화,
 c) 계산된 유출고와 실제유출고, d) 강우량

표 3. 가경된 일면적 지수와 유출율

실	일												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
LAI	첨입수	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	활입수	0.2	0.2	0.2	3	4	4	4	4	4	3	0.2	0.2
유출율 (%)	첨입수	30	30	30	30	30	30	40	60	60	40	30	30
	활입수	40	40	40	40	40	40	50	70	70	50	40	40

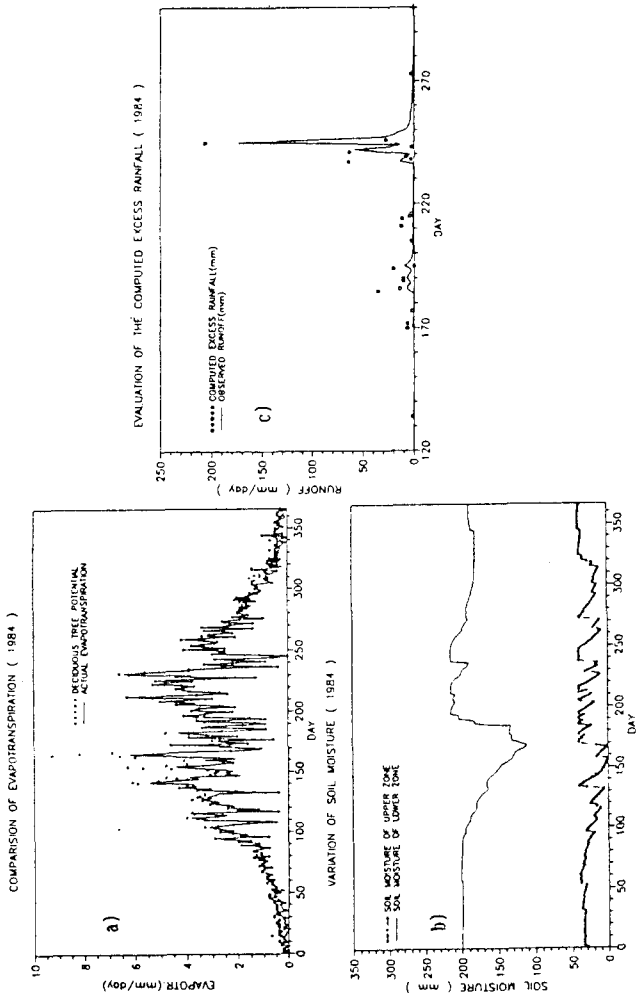


그림 4. 활입수범위외의 분석결과 (1984)
 a) 잠재증발산과 실제증발산, b) 토양수분의 변화,
 c) 계산된 유출고와 실제유출고

침엽수림과 활엽수림 유역에 대해 1984년에 한하여 일별로 각각 도시한 것이다. 그림에서 (1)은 일별로 실제증발산과 저항(resistance)이 최소인 증발산과의 관계를, (2)는 토양상하부의 수분량의 변화를 도시한 것이다. 또한 (3)은 결정된 유출율과 증발산 값을 이용하여 계산된 직접유출에 기여한 유량과 관측유량을 비교한 것이다. 또한 (4)는 두 유역에 공히 이용된 강우량이다. 각 유역의 토양수분의 변화로서 실제증발산을 고찰할 경우, 토양상부층 수분량의 증발산에 대한 영향은 매우 미미하나, 토양하부층의 수분량이 증발산에 지대한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

토양수분의 변화는 본 연구에서 가정한 유출율 및 최대수분량과 밀접한 관계를 가지고 있다고 볼 수 있다. 유출율은 무강우시 혹은 상부층의 토양수분이 포화되기전까지 유출이 발생되지 않으므로, 상부층 토양수분과는 무관하며, 하부층토양수분의 변화와만 관계를 가지고 있다. 따라서 실제증발산 추정시 상부층토양에서의 증발산을 먼저 고려하고 나머지 증산 필요량을 하부층에서 고려하는 본 모형의 경우에서는 유출율의 영향이 실제증발산 산정에 있어서 상대적으로 적은 부분을 차지하고 있다고 할 수 있으며, 다만 토양 상하부층에서 최대수분량이 항상 일정하다고 가정되어 있기때문에 이들의 결정이 매우 중요하다. 토양상부층의 최대수분량 결정은 유역의 실제유출량을 이용하여 결정하여 할 것으로 판단되며, 토양하부층의 최대수분량의 결정은 민감도를 분석하거나 혹은 최적화 기법을 이용하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.

한편 계산된 실제일증발산량은 물수지 개념에 의해 계산된 증발산량을 연단위로 비교하면 표 4와 같다.

표 4. 물수지로 추정한 실제증발산과 계산된 실제증발산의 비교단위 (mm)

분 류	증발산 종류	1984	1985	1986	1987	1988	평균
침엽수	실제유역증발산	771	664	650	681	630	679
	계산된 유역증발산	774	760	733	771	683	744
활엽수	실제유역증발산	565	556	472	321	423	467
	계산된 유역증발산	660	643	618	643	598	632

계산된 증발산과 실제증발산의 연평균 값을 비교한다면 침엽수 유역은 9.6%, 활엽수 유역은 약 32% 정도 계산된 증발산이 실제증발산 보다

높게 추정되었다. 그러나 연평균상대오차는 여기에는 나타나 있지 않지만 82년부터 모의한 자료와 실측자료를 비교할 때 침엽수는 8%, 활엽수는 20% 정도로 낮아진다. 이러한 실제증발산과 계산된 증발산의 차이는 토양속의 수분의 저류량에서도 그 원인을 찾을 수 있지만, 모형에 입력되는 여러 변수의 정확성에도 문제가 있는 것으로서 사료된다. 따라서 이러한 차이를 줄이기 위해서는 본 연구에서 고려한 여러 변수를 세밀히 분석 고찰하여야 할 것이다.

6. 요약 및 결론

한정된 수자원을 관리하기 위한 물관리 시스템을 구축 운영하는데 수문학적 물 손실의 관점에서 증발산을 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 이러한 증발산을 추정하는 모형을 구축하여 장기일출증량 추정모형의 부모형으로 사용하고, 증발산 추정의 제반사항을 고찰하고 실제증발산 추정모형을 개발하여 실제유역에 적용하였다.

실제증발산의 추정을 위해서는 잠재증발산이 매우 중요하기 때문에 잠재증발산의 정의에 관하여 논의하였으며, 이를 기상학적 증발표면적 측면으로 분류하여, 증발표면적 측면의 정의가 타당함을 제시하였다. 이에 따라 Penman-Monteith 방법을 선정하여 수관저항이 최소가 되는 잠재증발산 모형을 구축하였다.

잠재증발산과 실제증발산의 복합적 함수관계로 인하여 강우차단에 의한 증발, 토양표면 내외의 증발, 토양내에서의 증산의 각 성분과 잠재증발산과의 관계로 유역일 증발산 모형을 구축하였다. 강우차단에 의한 증발은 Bullot와 Dupriez가 제안한 모형을 토양증발은 Ritchie가 제시한 모형을 채택하였고, 증산은 토양층을 상·하부층으로 나누어 상부층과 하부층의 증산으로 분리 추정하며, Thornthwaite-Mather 관계를 이용하였다.

이 모형의 타당성을 위해 임업연구원에서 운영하고 있는 2개의 시험유역을 대상으로 검토하였다. 그결과 실제일증발산을 년단위로 계산한 값을 실제유역의 물수지 개념에 의한 결과와 약 8~30% 오차를 수반하고 있었다. 이러한 결과는 모형의 실제유역의 적용에 있어서 입력되는 여러 매개변수가 이 가정에 의해 결정된 것이기 때문일 것이라고 판단된다.

따라서, 좀더 정확한 실제증발산을 얻기 위해서는 좀더 세밀한 식생의 조사, 토양수분의 결정 투수계수와 강우강도의 관계 등 각종 매개변수의 정확한 산정이 요구된다.

참 고 문 헌

1. Bultot, F. and Dupriez, G.L. (1985), "Daily Effective Evapotranspiration from a River Basin, "World Meteorological Organization, Operational hydrology Report, No. 22, PP. 80-105.
2. Federer, C.A.(1979). " A Soil-Plant-Atmosphere Model for Transpiration and Availability of Soil Water, " Water Resources Research, Vol. 15, No. 3, PP. 555-562.
3. Jensen, K.H. and Tonch-Clausen, T.(1982), "Unsaturated Flow and Evapotranspiration Modeling as a Component of the European Hydrologic System (SHE), " Proceeding '81 of the International Symposium on Rainfall Runoff Modeling, Edited by V.P. Singh, Water Resources Publications, PP. 235-252.
4. Monteith, J.L.(1965), "Evaporation and Environment," Symposium, Society for Experimental Biology, Vol. 19, PP. 205-234.
5. Penman, H.L.(1948), "Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass, " Proceeding of the Royal Society of London, A. 193, PP. 120-145
6. Ritchie, J.T.(1972), " Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover, " Water Resources Research, Vol. 8, No. 5, PP. 1204-1213.
7. Russell, G.(1980), "Crop Evaporation, Surface Resistance and Soil Water Status," Agricultural Meteorology, Vol. 21, PP. 213-226.8. Singh, V.P.(1989), Hydrologic Systems, Volume II, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
9. Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R.(1955), "The Water Balance." Publ. in Climatology, 8(1), Lab. of Climat., Centron, N.J.