

증발산량 산정에 관한 연구

임 창 수 *

1. 서론

수문순환과정 중의 하나인 증발산과정은 강수를 발생시키는 주요 원천인 동시에 가장 큰 지구상의 수자원의 손실과정이다. 그럼에도 불구하고 미기상학적자료의 관측이 다른 수문관측항목보다도 용이하지 않은 관계로 많은 연구가 수행되어오지 못하였다. 특히 우리 나라에서는 미기상학적 자료를 이용한 실제증발산량의 산정은 거의 전무한 상태이며, 주로 풍속이나 습도와 같은 기초적인 기상학적 자료를 이용한 Penman 공식의 적용을 통한 잠재증발산량 산정과 증발접시계를 이용한 잠재증발산량을 산정하는 수준이다.

본 연구에서는 미국 애리조나주에 위치한 준건조기후지역에서 관측되어진 flux 및 기상학적 자료를 이용하여 일별 미기상학적자료의 변화를 분석하였다. 또한 관측된 증발산량과 기존의 증발산 모형들을 운영하여 산정된 증발산량을 비교 검토함으로써 증발산량의 일별 변화과정을 알아보고, 또한 최적의 증발산량 산정 방법을 선정하려 하였다.

2. 연구지역의 개괄

본 연구목적을 위하여 선정되어진 유역으로는 미국애리조나주에 위치한 Walnut Gulch 실험유역 (31° 43'N, 110° 41'W)으로서 이 실험유역은 미농무성산하(U.S. Department of Agriculture)에 있는 농업연구부(Agricultural Research Service)에 의해서 오랜 기간 동안 운영되어지고 있다. 본 연구를 위해서 선정되어진 연구유역은 Walnut Gulch유역 내에 부속되어있는 소유역인 Lucky Hills 소유역과 Kendall 소유역으로서 Lucky Hills 소유역은 면적이 약 0.08 km²이고, Walnut Gulch유역의 서쪽지역에 위치해 있으며 보다 완만한 지형이며, 주된 식생조건은 사막관목이다. 또한 Kendall소유역은 유역면적이 약 0.48km²이고 Walnut Gulch 유역의 동쪽에 위치해 있으며 완만한 구릉을 이루고 있고, 주된 식생조건은 주로 잔디로 이루어져 있다.

3. 관측자료

본 연구를 위해서 적용되어진 flux 및 기상자료는 겨울기간(DOY 92015 - DOY 92055) 동안에 Lucky Hills 소유역과 Kendall 소유역에서 관측되어진 flux 및 기상학적자료이다.

3.1 기상학적 관측자료

기상학적 관측자료는 대기온도(T_a , °C), 풍속(u , m/sec), 상대습도 (RH, %) 그리고 토양온도 (T_s)등이다. 자료는 기상자료 자동측정장비(Cambell Scientific, INC, Logan, UT)를 이용하여 미농무성 농업연구부(USDA, ARS)에 의해서 관측 수집되어졌으며, 모든 자료는 한시간 평균치로 변환 저장되었다.

3.2 Flux 관측

잠열flux(latent heat flux)는 여러 가지 방법에 의해서 관측되어질 수 있다. 하지만, 연구결과에

* 청운대학교 토목환경공학과 전임강사

의하면 보다 쉽게 관측되어질 수 있는 flux값들 (Q_n , Q_H , 그리고 Q_G)로부터 에너지수지방법 ($Q_E = Q_n - Q_H - Q_G$)에 근거하여 잠열flux를 산정하는 것이 장기간의 관측을 위해서 바람직한 것으로 알려져 있다. 따라서 우선 순방사($Q_n, W/m^2$), 현열 flux($Q_H, W/m^2$) 그리고 지중열 flux($Q_G, W/m^2$)를 관측한 후 에너지수지방법을 이용하여 잠열flux를 산정하고, 이를 이용하여 실제증발산량을 산정하였다. 잠열 flux(Q_E)와 실제증발산량(ET)의 차이는 ET는 증발된량의 깊이를 나타내며(in mm/period), 반면에 Q_E 는 W/m^2 의 단위를 가진다.

4. 분석 및 결과

4.1 증발산모형의 적용

4.1.1 에너지수지에 의한 방법

Penman에 의해서 제안된 잠재증발산 산정 모형은 에너지수지를 이용한 전형적인 예라고 할 수 있으며, 미기상학적 분야에서 가장 많이 적용되고 있다. Penman(1948)은 자연조건에서 산정되어지기 어려운 증발산량을 구하는데 물리적으로 타당성 있는 식 (1)과 같은 관계를 제안하였다. 그가 제안한 식은 증발산량을 증발표면에서의 발생하는 순복사에너지와 바람의 영향과 연계시킴으로서 증발산량을 결정하려 하였다.

$$ET = W(R_n + G) + (1 - W)E_a \quad (1)$$

식 (1)에서 R_n 은 순방사 (mm/day)이며, G 는 지중열유동 (mm/day), W 는 Doorenbos와 Pruitt에 의해서 제안된 무차원 가중치[$= \Delta / (\Delta + \gamma_z)$]이고, Δ 은 포화증기압곡선의 경사 ($mb/^\circ C$)이며, γ_z 는 평균해수면 위의 psychometric constant ($= 0.55 mb/^\circ C$) (z, m) ($mb/^\circ C$)이다.

4.1.2 복사에너지를 이용한 방법

복사에너지를 이용한 증발산량 산정방법 중에 하나는 Priestley-Taylor에 의해서 제안된 방법이다. Priestley와 Taylor (1972)는 증발산량 산정을 위해서 Penman 방법에 의해서 요구되어지는 관측 기상자료를 줄이려고 노력하였으며, 그들이 제안한 공식은 다음 식 (2)와 같다.

$$ET = \alpha \cdot W(R_n + G) \quad (2)$$

식 (2)에서 α 는 경험에 의한 계수이며, $W(R_n + G)$ 는 Penman 증발산공식의 에너지항과 같으며, 이는 대기의 이류현상이 없는 경우에 충분한 수분을 포함하고 있는 표면으로부터 발생하는 증발산량으로 간주될 수 있다.

Priestley-Taylor식에서 핵심적인 매개변수는 α 이다. Priestley와 Taylor는 증발표면으로부터 수분공급이 충분한 경우에 α 값으로 1.26을 제안하였으며 이는 Penman공식에서 공기동력학적인 요소를 고려하는 항이 복사에너지를 관련된 항의 0.26배 정도임을 나타낸다.

4.1.3 질량전이에 의한 방법

증발산량을 산정하기 위한 방법 중에 하나인 질량전이에 의한 방법은 증발량이 증발표면과 대기사이의 증기압차와 풍속에 의해서 통제된다는 가정에 기초하고 있다. 따라서 기준작물(reference crop)로부터 발생하는 증발량과 증기압미함량과의 상관관계식을 경험적 방법에 의하여

얻음으로서 식생으로부터의 증발산량을 계산할 수 있으며, 이러한 상관관계식은 Dalton(1802)에 의해서 최초로 제안되어진 이래 다음 식 (3)과 같은 일반적인 형태로 나타내진다.

$$ET = f'(u)(e_s - e_a) \quad (3)$$

여기서 $f'(u)$ 는 증발산량을 산정하기 위한 지역으로부터 유도된 경험식이다. 식 (4)는 식 (3)의 $f'(u)$ 의 계산을 위해서 적용되어졌다.

$$f'(u) = 0.071 + 0.038u_2 \quad (4)$$

4.1.4 공기동력학 및 canopy저항을 고려한 방법

Penman에 의해서 제안된 증발산량 산정식 (1)의 연장선상에서 Monteith (1965)는 Penman-Monteith 공식을 제안하였다. 그는 증발산 산정을 위해서 현열 및 잠열에 대한 대기의 저항은 동일하다고 간주하였으며, 대기저항과 경계층저항을 함께 고려하여 이를 공기동력학적 저항(r_a)으로 나타내었다. 따라서 현열의 전이는 이러한 공기동력학적 저항에 의해서 통제되어진다. 반면에 잠열의 전이는 식생이 건조한 환경에서 성장하는 경우 또 다른 저항(r_c), 즉 canopy저항에 의해서 통제되어진다. 이러한 가정들 하에서 Monteith는 실제증발산량을 산정하기 위한 식 (5)를 제안하였다.

$$ET = \frac{\Delta(R_n + G) + \frac{\rho c_p}{r_a}(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (5)$$

여기서 ET 는 실제증발산량(mm/day)이며, ρ 는 공기의 밀도(kg/m^3)이고, c_p 는 일정한 압력에서의 공기의 비열(J/kg/K)이며, r_c 는 canopy저항(s/m)이고, 그리고 r_a 는 공기동력학적저항(s/m)이다. r_a 및 r_c 는 식 (6)과 (7)로부터 구해진다.

$$r_a = \frac{(\ln \frac{z-d}{z_0})^2}{k^2 u_2} \quad (6)$$

여기서 k 는 von Karman 상수(=0.41)이고, z 는 풍속, 대기온도, 증기압측정을 위한 표면으로부터의 높이이며, z_0 는 표면의 거친 정도를 나타내는 조도장(surface roughness length, mm)이며, Lucky Hills 소유역에 대해서 40 mm를 적용하였고 Kendall 소유역에 대해서 10 mm를 적용하였다. d 는 제로면변위(zero plane displacement height, mm)를 나타내며, Lucky Hills 소유역에 대해서 50 mm를 Kendall 소유역에 대해서 30 mm를 적용하였다.

$$r_c = \frac{400 - 0.412Q_n}{LAI} \quad (7)$$

여기서 Q_n 은 일별 순복사량(W/m^2)이고, LAI는 엽면적지수[leaf area index (= 0.5)]이다.

4.1.5 대기온도를 이용한 방법

Thornthwaite와 Wilm (1944)에 의해서 제안된 경험적인 증발산공식은 증발산과정을 설명하기 위하여 대기온도를 유효에너지의 지표로서 사용하고 있다. 이 방법은 대기온도가 순방사와 그리고 증발산과정에 영향을 미치는 다른 요인들과 통합된 상관관계를 가지고 있다는 가정에 근거하며, 또 한편으로는 유효에너지에 의해서 대기가 데워지는 것과 증발산이 발생하는 비율에는 일정한 비례관계가 존재한다는 가정에 근거하고 있다. 이 방법에서는 증발산산정을 위해서 다른 식생조건에 대한 고려가 없으며 다음 식 (8)과 같다.

$$ET = 1.6 \left[\frac{10T_a}{I} \right]^a \quad (8)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{T_{ai}}{5} \right]^{1.5} \quad (9)$$

$$a = 0.49 + 0.0179I - 0.0000771I^2 + 0.000000675I^3 \quad (10)$$

여기서 ET 는 잠재증발산량 (cm/month)이고, T_a 는 월평균 대기온도(°C)이며, I 는 연열지수 (annual heat index)이다. 본 연구에서는 일증발산량(mm/day)을 산정하기 위하여 월증발산량을 그 달의 일수로 나누어 계산하였다.

5. 증발산산정 모형의 검증

본 연구에서는 준건조기후유역(Lucky Hills와 Kendall)에서 겨울기간 41일 동안 관측된 기상학적자료와 flux자료를 이용하여 일 증발산산정을 위해 개발된 방법들 즉, Penman모형, Priestley-Taylor모형, 조절된 Dalton모형, 조절된 Penman-Monteith모형, 그리고 Thornthwaite모형을 평가하였다. 증발산산정 방법들의 평가를 위하여는 수치적인 방법과 도표를 이용한 방법을 적용하였다. 수치적인 모형의 평가를 위하여, 제곱평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)과 평균절대오차 (mean absolute error, MAE)를 적용하였다. 또한, 도표를 이용한 방법으로는 시간에 따른 증발산량의 변화를 도시함으로써 각각의 증발산산정 방법을 검증하였다.

5.1 수치분석

수치적인 방법을 이용한 모형의 정확도를 검증하기 위하여 관측된 증발산량의 평균값 (MET_o), 산정된 증발산량의 평균값(MET_e), 관측된 증발산량의 표준편차 (SD_o), 산정된 증발산량의 표준편차 (SD_e), 제곱평균제곱근오차 (RMSE) 그리고 평균절대오차 (MAE) 등을 적용하였다.

표 1은 Lucky Hills소유역과 Kendall소유역에서 측정된 자료를 이용하여 각 증발산모형에 적용함으로써 산정된 증발산값과 관측된 증발산값을 정량적으로 비교 검토하여 보여주고 있다.

5.2 도표를 이용한 평가

본 연구에서는 도표를 이용한 모형의 평가를 위해서 관측된 증발산량과 산정된 증발산량을 시간에 따른 변화상태로 분석하였다. 그림 1과 그림 2는 Lucky Hills소유역과 Kendall소유역에서의 관측된 증발산량과 산정된 증발산량 사이의 시간적 변화도표를 보여준다. Penman모형, Priestley-Taylor모형, 조절된 Dalton모형 그리고 조절된 Penman-Monteith모형으로부터 산정된 증발산량의 변화양상은 모두 비슷하였으며, 이는 적용된 모형들이 에너지 항과 공기동력학적 항을 공통적으로 내포하고 있기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 Thornthwaite의 잠재증발산모형은 다른 모형들과 아주 다른 양상을 보여주고 있으며, 심지어는 실제증발산량보다도 훨씬 작은 값을 산정하고 있었다.

표 1. Lucky Hills 소유역과 Kendall 소유역에서 증발산보형의 정량적 평가

소유역	N	산정방법 (모형)	MET _e	MET _o	SD _e	SD _o	Max _e	Max _o	Min _e	Min _o	RMSE	MAE
Lucky Hills	42	Energy Balance (Penman)	7.827	3.198	2.395	1.264	12.145	6.399	2.166	1.116	5.316	4.673
		Radiation (Priestley-Taylor)	5.133		1.420		7.848		1.574		2.392	2.165
		Mass Transfer (adjusted Dalton)	2.927		1.376		6.057		0.734		2.056	1.711
		Single Source (adjusted Penman-Monteith)	2.465		1.157		5.10		0.544		2.031	1.645
		Temperature (Thornthwaite)	0.827		0.148		0.930		0.620		2.681	2.371
		Kendall	42		Energy Balance (Penman)		7.667		2.716		2.786	1.311
Radiation (Priestley-Taylor)	4.290	1.441	6.819	1.278	2.023	1.765						
Mass Transfer (adjusted Dalton)	2.602	1.405	6.040	0.472	1.984	1.744						
Single Source (adjusted Penman-Monteith)	2.734	1.475	5.722	0.468	2.132	1.851						
Temperature (Thornthwaite)	0.827	0.148	0.930	0.620	2.267	1.890						

N : 관측자료의 수; MET_o : 관측된 증발산의 평균값 (mm/day); SD_o : 관측된 증발산값의 표준편차 (mm/day); SD_e : 산정된 증발산값의 표준편차 (mm/day); Max_o : 관측된 증발산의 최고값 (mm/day); Min_o : 관측된 증발산의 최소값 (mm/day); Max_e : 산정된 증발산의 최고값 (mm/day); Min_e : 산정된 증발산의 최소값 (mm/day); RMSE : 제곱평균제곱근오차 (mm/day); MAE : 평균절대오차 (mm/day)

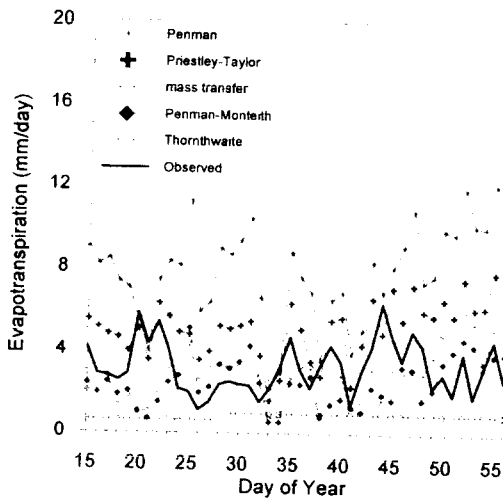


그림 1. Lucky Hills 소유역에서 관측되고 산정된 일별 증발산량의 변화

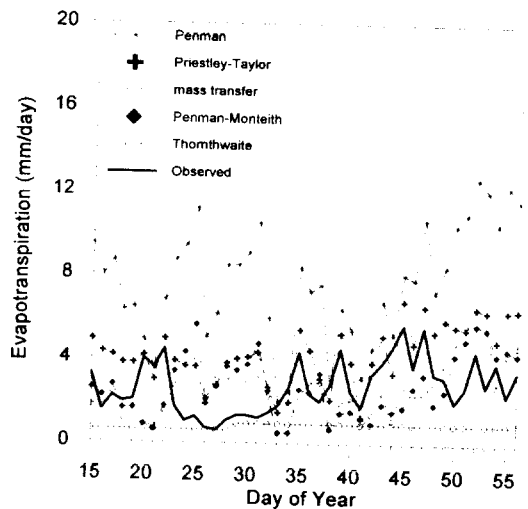


그림 2. Kendall 소유역에서 관측되고 산정된 일별 증발산량의 변화

6. 결론

본 연구의 결과에 의하면 Monteith에 의해서 제안된 Penman-Monteith모형(single source approach)이 본 연구지역에 대해서 일별 실제증발산량 산정을 위하여 만족스러운 결과를 보이지 않았으며, 이유 중에 하나는 준건조지역에 주로 분포하는 식물의 특성에 기인하는 것으로 사료된다. Lucky Hills소유역에 대해서 조절된 Penman-Monteith모형의 RMSE는 2.031이었고, MAE는 1.645였으며, Kendall소유역에 대해서 RMSE는 2.132, MAE는 1.851이었다. 또한, 조절된 Dalton모형은 조절된 Penman-Monteith모형과 비교하여 Kendall소유역에 대해서 보다 정확한 증발산량산정값을 보여주었다(RMSE=1.984; MAE=1.744).

Penman모형(energy balance approach)으로부터 산정된 증발산량은 Priestley-Taylor모형(radiation approach) 그리고 Thornthwaite모형(temperature approach)으로부터 산정된 잠재증발산보다도 더 큰 값을 보여주었다. 또한, Priestley-Taylor모형이 Penman모형과 비교하여 보다 작은 증발산량을 산정한다는 점을 고려할 때, Priestley-Taylor모형에서 주요한 매개변수인 α 값이 1.26이라는 것은 본 연구에서 적용된 연구지역에서는 타당하지 않은 것으로 나타났다. 더군다나, Thornthwaite모형이 Penman모형과 비교하여 보다 작은 증발산량을 산정한다는 것을 고려할 때 이 지역에서 증발산량을 산정하기 위하여는 대기온도를 유효에너지의 지표로서 적용할 수 없으며, 또 다른 증발산과 관련된 중요 조절변수(기상자료)들이 필요한 것으로 사료된다.

7. 참고문헌

1. Dalton, J. (1802). "Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of stream or vapor from water and other liquids, both in a Torricellian vacuum and in air; on evaporation; and on the expansion of gases by heat." *Proceedings of Manchester Literary and Philosophical Society*, Vol 5, pp. 536-602.
2. Doorenbos, L.J., and Pruitt, W.O. (1975). "Guideline for predicting crop water requirements." *Irrig. Drain. Pap. 24* (FAO), Rome.
3. Monteith, J.L. (1964). "Evaporation and environment." *Symp. Soc. Exp. Biol.*, Vol. XIX, pp. 205-234.
4. Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc. Roy. Soc. London*, A193, pp. 120-146.
5. Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Mon. Weather Rev.*, Vol. 100, pp. 81-92.
6. Thornthwaite, C.W., and Wilm, H.G. (1944). "Report of the committee on transpiration and evaporation, 1943-1944." *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 25, pt. V, pp. 683-693.