

증발산량 추정식의 발달

Advancement of ET Estimation Equations

박 기 중*, 정 상 옥**
Park, Ki-jung, Chung, Sang-ok

1. 머리 말

지구 전체를 대상으로 볼 때 수분은 공급과 손실이 순환되어 평형을 이루고 있으며, 전체 손실의 약 3/4은 증발산 과정에 의한 손실이 차지하고 있다(James 등, 1982).

증발산이란 물의 수증기화에 의한 손실을 나타내는 두 가지 물리적 과정의 총칭으로서, 토양 표면, 수면 및 엽면의 수분이 태양이 방사하는 열에너지를 얻어 액체 상태에서 기체 상태로 변환하는 증발과정과, 토양의 수분이 식물이란 매개체를 통하여 대기 중으로 방출되는 증산과정을 통칭한다. 특히 토양 수분의 필요시기에 충분한 공급, 그리고 적정 성장환경 아래에 증발산에 의하여 토양 시스템으로부터 방출되어지는 이론적인 최대 수분의 양을 잠재증발산량이라 하며, 이는 관개배수분야 연구의 주요 관심사가 되고 있다.

이러한 증발산에 대한 연구의 관점은 크게 두 가지, 즉 공간적인 관점과 시간적인 관점으로 나누어서 생각할 수 있다. 전술한 공간적인 견지에서의 증발산의 연구는 포장 전체를 대상으로 했을 때, 이론적으로 침투 및 하천 유량 등을 고정적인 유지, 보수수량으로 보고, 공급되는 강수 총량과 수분 손실량인 증발산량이 같음으로 보는 것을 말하며, 이러한 측면

에서의 연구는 생태계 물 수지 분석, 수자원 개발 계획 및 관리 측면에 매우 큰 영향을 끼친다고 할 수 있다. 두 번째로 시간적인 견지에서의 증발산의 연구는 비교적 단기간 동안에 발생하는 호우시의 증발산량은 강우 강도에 비하여 대단히 적음으로 이때의 증발산량은 거의 무시할 수 있다. 그러나 식물 전체 생육 기간이라는 장기간의 연구에 있어서는 전술한 지역적인 관점에서와 함께 수분 손실 판단에 지배적인 고려 사항이라 할 수 있다. 공간적 측면 및 장기간의 측면으로 볼 때, 증발산의 연구는 이수 측면에서는 매우 중요한 고려 사항이나, 치수 측면에 있어서는 무시하여도 별 문제가 없음을 알 수 있다.

증발산의 지배인자는 크게 환경적 인자와 생물적 인자로 분류될 수 있으며, 환경적 인자로는 태양 복사, 기온, 습도, 바람, 토양 수분 등이, 또한 생물적 인자로서는 식생종, 엽밀도, 엽형상 등이 있다. 실제 포장에 있어 증발산량은 생육 초기에는 단지 지표면의 수분 증발에 의해 지배되어 그 값이 매우 낮다가, 점차 성장이 진행됨에 따라 증산 요인에 의해 지배되어 증발산량이 증대되며, 출수 개화기에 그 피크를 이루고, 그 후 점차 감소되는 특성을 나타낸다. 이를 미루어 포장에서의 증발산량은 증산량을 결정짓는 요인에 의해 더욱 크게 지

* 경북대학교 대학원

** 경북대학교 농과대학

배뒀을 알 수 있다.

물 순환 과정의 정량화에 있어서 공급에 해당하는 강수의 수량화는 우량계, 인공위성, 레이다 등의 관측기기의 발달로 쉽게 정확한 측정이 가능하나, 수분 손실의 대부분을 차지하는 증발산량의 정량화는 관측 기기, 추정공식 등의 한계성으로 인하여 어려움이 따른다. 반면 증발산량의 정량화에 대한 요구는 최근 농학, 수리학, 수문학, 환경공학, 생물학 등 여러 분야에서 계속되고 있다. 이러한 요구에 대하여 1900년대 초반부터 시작된(Hagan 등, 1967) 증발산에 대한 연구는 정량화를 위하여 끊임없이 노력하고 있으며, 최근 우리나라에서는 위성자료를 이용하여 증발산 측정에 점 측정 개념의 단점을 극복하는 면적 측정의 개념을 도입하기도 하였다(오 등, 1999).

본 고에서는 증발산량 추정방법들을 분류하고, 이들의 발달과정을 조사하여 진화도를 작성하였으며, 주요 추정공식들을 소개함으로써 이 분야에 관심 있는 독자들에게 참고 자료를 제공하고자 한다.

2. 분 류

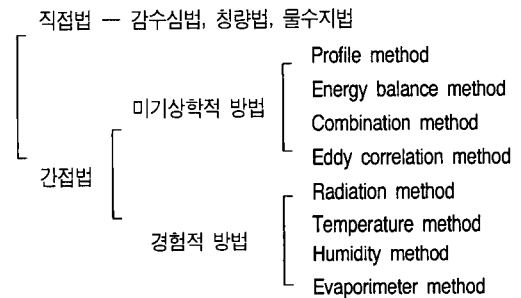
증발산량 산정방법은 실측에 의한 직접법과 추정공식을 이용한 간접법이 있다. 직접법에는 담수채배를 하는 벼에 주로 적용되는 감수심법, 생체가 너무 큰 작물에는 적당하지 않은 칭량법, 물수지법, 포장수분추적법, 체임버법, 라이시미터법 등이 있다. 이들 방법은 증발산량을 측정하는 데 많은 노동과 시간이 소요되는 결점이 있지만, 작물의 실제 증발산량을 비교적 간단하게 측정할 수 있으며, 또한 추정공식에 의한 추정 값과 비교할 수 있는 척도로써 이용할 수 있다.

간접법은 크게 태양 복사, 대기 복사, 기온, 습도 및 풍속 등의 미기상학적 인자를 이용하

여 이론적으로 증발산량을 산정하는 미기상학적 방법(Micrometeorological method)과 이러한 기상인자를 이용하여 경험식을 개발하여 증발산량을 추정하는 경험적 방법(Empirical method)으로 분류할 수 있다.

미기상학적 방법은 물질 이동에 기초하는 Profile method, 지표면에서 에너지의 유·출입량에 의존하는 Energy balance-Bowen ratio method, 그리고 이들의 조합으로 이루어진 Combination method, 공기에 의해 순간적으로 상향하는 수분의 양을 측정 장치를 통하여 구하는 Eddy correlation method로 세분할 수 있다. 또한 경험적 방법은 에너지 수지에 기초를 두는 Radiation method, 평균 기온의 관측으로부터 구하여진 Temperature method, Dalton's equation을 수정한 Humidity method, 그리고 Pan이나 Atmometer 증발량으로부터 증발산량을 추정하는 Evaporimeter method로 세분할 수 있다.

<그림 - 1>은 증발산량 산정방법의 분류를 보여주고 있다.



<그림 - 1> 증발산량 산정방법의 분류

3. 발달 과정

증발산에 관한 연구는 1900년대 초(Hagan 등, 1967)부터 타 연구에 대한 기초연구로, 혹은 독립적인 연구로 지속적으로 발달되고 있다. 이 절에서는 증발산량 추정공식들에 대하

여 이론적인 배경 및 발달 과정과 주요 공식들을 소개하였으며, 진화도를 도시하였다.

가. 미기상학적 방법

(1) Profile Method

이는 증발이 발생하는 토양 표면과 그 주변 공기와의 증기압의 차에 의하여 수증기가 대기로 방출되는 점에 착안하여 개발된 방법으로, 가장 오래된 초기 방정식으로서 Dalton's equation을 들 수 있으며, Sverdrup(1937), Thornthwaite & Holzman(1939), Köhler(1954), Sheppard(1958)와 Deacon & Swinbank(1958), Penman & Löng(1960), Slatyer & Mclroy(1961)와 Mclroy(1961) 등이 증발산 산정에 관한 추정식을 발표, 수정하였다.

아래에는 Dalton method(James, 1988)를 제시했다.

$$ET_0 = (e_s - e) * f(u) \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, ET_0 : Reference crop evapotranspiration rate
- e : Vapor pressure at some height above the plant
- e_s : Vapor pressure at the plant surface
- $f(u)$: Function of the horizontal wind speed

(2) Energy Balance-Bowen Ratio Method

이 방법은 지면과 대기와의 경계면에서 에너지의 유·출입량을 측정함으로써 증발산량을 구할 수 있는 방법으로, 작물 생육기간 동안의 증발산량을 계산할 수 있으며, 기본식은 다음과 같다.

$$ET_p = R_n + (AD) - (S') - A - (C') - (P') \dots\dots\dots (2)$$

여기서, ET_p : Potential evapotranspiration

- rate
- A : Heat flux to the air
- AD : Advection
- C' : Heat storage in crop
- P' : Photosynthesis
- R_n : Net radiation
- S' : Heat flux to the soil

여기에서 () 내의 항들은 미소하여 무시할 수 있으므로, 결국 증발산량은 순방사량 R_n 과 대기의 열 흐름량 A 로 간략화 시킬 수 있다.

이러한 Energy balance-Bowen ratio method에 대한 연구는 1926년 Bowen의 추정식 이후, Funk(1959), Tanner(1960), Fritschen(1963), 그리고 Hagen(1967), Haise & Edminster 등(1967)이 추정공식을 발표하였으며, 또 Samuel 등(1995)은 '65 Penman method와 비교하기 위하여 BREB(Bowen ratio-energy balance) method를 수정 발표하였다(Samuel 등, 1995).

이 방법에 속하는 주요 추정식은 다음과 같다.

Bowen ratio(β) method (1926 : James, 1988)

$$\beta = A/ET_0 = \gamma * K_n / K_w * [(T_s - T) / (e_s - e_a)] \dots\dots (3)$$

BREB method (1995)

$$ET_0 = 3,600 * LE / (L_v * \rho_w) \dots\dots\dots (4)$$

여기서, ET_0 : Reference crop evapotranspiration

A : Sensible heat flux, it can be estimated using the soil surface air temperature (Jensen et. al. 1990, p38)

K_n, K_w : Eddy diffusivities for heat and water vapor, respectively

- LE : Latent heat flux
- Lv : Latent heat of vaporization
- T, e_a : Temperature and vapor pressure of the air, respectively
- T_s, e_s : Temperature and vapor pressure at the soil surface, respectively
- β : Bowen ratio
- γ : Psychrometric constant
- ρ_w : Water density

(3) Combination Method

이 방법은 미기상 항과 에너지 수지 항을 혼합하여 증발산량을 산정하는 방법으로, 1948년 original Penman 공식 발표 이후 지금까지 가장 많이 연구되고, 이용되는 추정방법들 중의 하나이다. 특히 이 방법의 가장 중요한 인자들 중의 하나인 미기상 항 중에서 풍속함수는 가장 활발하게 연구되고 있다.

그 발달과정을 살펴보면, Penman은 1948년에 다시 FAO-Penman 추정공식을 발표 (Hussein 등, 1989)하였으며, 이후 Ferguson (1952), Businger(1956) 등이 추정공식을 발표하였고, Tanner는 1960, 1961, 1963년에 각각 Penman equation을 수정하였다. 1963년도에는 Penman VPD#3 method, Penman-Monteith method, 그리고 같은 해 Monteith는 증기압의 차에 대한 수정을 통하여 Modified Penman-Monteith method를 발표하였다. 또한 1966년 van Bavel은 Businger-van Bavel method를, 1967년에는 Hagen, Haise & Edminster의 연구, 발표가 있었다. 또한 1972년 Priestley와 Taylor는 original Penman method의 풍속함수를 수정하였으며, 같은 해 습지에서 쉽게 증발산량을 구할 수 있는 Priestley-Taylor method를 발표

하였다. Wright와 Jensen은 1972년과 1982년에 각각 Penman 추정식의 풍속함수를 수정한 Kimberly-Penman 공식을 발표하였으며, 1974년에 Jensen은 Businger-van Bavel 공식을 수정하여 발표하였다.

또한 1977년 Doorenbos와 Pruitt는 풍속함수와 VPD(Vapor Pressure Deficit) 산정방법을 수정한 FAO-24 corrected Penman 공식을 발표하였으며, 1979년에는 Frère와 Popov가 FAO-PPP-17 Penman equation을 발표하였다. 1983년 Frevert 등은 original Penman 공식에서 계수 c값을 수정하였으며, 1985년 Snyder와 Pruitt는 CIMIS modified Penman equation을 발표하였다. 1986년에는 CIMIS modified Penman equation과 비교하여 순복사량을 실측하지 않고 추정공식을 사용하여 구하는 AZMET modified Penman equation이 발표되었다. 또한 Allen은 1986년과 1989년에 각각 corrected 1965 Penman-Monteith 공식을 발표하였으며, Salih는 1986년 Penman 추정공식을 수정, 발표하였으며, 1990년 Jensen 등은 ASCE Penman-Monteith 추정공식을 발표하였고, 1994년 Allen 등은 Penman-Monteith의 추정공식에서 순복사량 등의 매개변수에 대한 기준을 재 설정하였다.

아래에 주요 추정공식인 FAO-24 corrected Penman, Penman-Monteith method, CIMIS modified Penman equation에 대하여 소개하였다.

FAO-24 corrected Penman equation (Doorenbos & Pruitt, 1977)

$$ET_0=C*[W*R_n+(1-W)*f(u)*(e_a-e_a)] \dots\dots\dots (5)$$

Penman-Monteith method (1965)

$$ET_p=[\{R_n*\Delta+(\rho_a*C_{pa}/r_a)*(e_s-e_a)\}/\{\Delta+\gamma*(1+r_s/r_a)\}]/(\rho_w*LE) \dots\dots\dots (6)$$

CIMIS modified Penman equation (Snyder & Pruitt, 1985)

$$\text{hourly } ET_0 = W \cdot R_n + (1 - W) \cdot VPD \cdot f(u) \dots\dots (7)$$

$$\text{daily } ET_0 = 24 \cdot \text{hourly } ET_0 \dots\dots\dots (8)$$

여기서, ET_0 : Reference crop evapotranspiration

ET_p : Potential evapotranspiration

e_a : The mean saturation water vapor pressure [’77 FAO-24 corrected Penman equation]

e_a : Actual vapor pressure of the air [’65 Penman-Monteith]

e_d : Mean actual water vapor pressure

e_s : Saturation vapor pressure of the air

$f(u)$: Wind-related function

r_a : Average aerial resistance of the crop canopy

r_s : Stomatal resistance of the plant

C : Adjustment factor to compensate for the effect of day and night weather conditions

C_{pa} : Specific heat of dry air at constant pressure

LE : Latent heat of vaporization

R_n : Net radiation

U : 24-h wind run in km/day at 2m height

VPD : Vapor pressure deficit

W : Temperature-related weighting factor

ρ_a : Density of the air

ρ_w : Density of water

Υ : Psychrometric constant

Δ : Slope of the saturation vapor pressure versus temperature curve

(4) Eddy Correlation Method

이 방법은 미기상학적 방법 중 가장 정확한 방법으로, 대기중의 한 지점에서의 공기 밀도가 ρ , 비습도 q , 그리고 수직 속도가 w 일 때, 그 공기가 순간적으로 수분을 상향으로 이동시키는 량이 $\rho \cdot q \cdot w$ 가 된다는 점에서부터 출발한 방법이다. 발달과정을 살펴보면 Swinbank (1951), Dyer(1961), McIlroy(1961), Goddard & Priutt(1966), Businger 등(1967), Hagan 등(1967), McBean(1972), Rosenberg 등(1983)과, Weaver 등(1986)에 의하여 지속적인 연구가 진행되고 있다.

아래에는 주요 공식인 Swinbank(1951)가 발표한 추정공식을 나타낸다.

$$E_* = 0.622 / P \cdot (\rho \cdot \overline{w' \cdot e'}) \dots\dots\dots (9)$$

여기서, E_* : Evaporative heat flux

e' : Instantaneous deviation of the partial water vapor pressure from the mean e at the height z

w' : Instantaneous deviation of vertical wind speed from the mean vertical wind w at height z

P : Atmospheric pressure

ρ : Density of air

나. 경험법

(1) Radiation Method

이 방법은 풍속이나 습도를 측정하지 않고

도 복사량, 운량, 일조량, 혹은 대기 온도를 이용하여 잠재증발산량을 구하는 방법이다.

이에 관한 연구에는 Hargreaves(1948), Makkink(1957), Turc(1961), Bryson-Kuhn(1962), Jensen-Haise(1963), corrected McIlroy (1964), corrected Turc(1966년, Jensen), Haise-Christiansen(1969), corrected Jensen-Haise (1971, Jensen et al.), Priestley-Taylor(1972) 등이 있었다.

또한 Jensen은 1974년에 corrected Makkink, Stephens-Stewart, Christiansen R_s , corrected Jensen-Haise 공식을 각각 발표하였으며, 같은 해 Oliver method, corrected Turk method, Behnke-Maxey 공식이 발표되었다. 1975년과 1977년도에 각각 1957년 Makkink 공식을 응용한 Doorenbos와 Pruitt의 공식이 발표되었고, 1980년 Hargreaves 등의 연구가 있었으며, Burman 등은 1983년 Jensen-Haise 추정공식에 관한 수정공식을 발표하였으며, 그리고 1986년 Samani와 Pessarakli는 Jensen-Haise 추정공식을 수정하였다.

주요 공식은 다음과 같다.

Jensen-Haize equation (1963)

$$ET_0 = CT * (T - T_x) * R_s \dots\dots\dots (10)$$

FAO-24 Radiation method (Doorenbos & Pruitt, 1977)

$$ET_0 = c * (W * R_s) \dots\dots\dots (11)$$

여기서, ET_0 : Reference crop evapotranspiration

c : Adjustment factor which depends on mean humidity and daytime wind conditions

CT : Temperature coefficient, 0.025 in °C and 0.014 in °F

T_x : Temperature coefficient, -3 in °C and 26.4 in °F

R_s : Solar radiation

T : Air temperature

W : Weighting factor of temperature and altitude [Doorenbos and Pruitt, 1975, 1977]

(2) Temperature Method

이 방법은 월별 혹은 작물 생육 전기간의 증발산량을 구하는 방법으로 적당하며, 평균 기온만으로 또는 평균 기온과 상대 습도 두 가지를 이용하여 증발산량을 추정할 수 있음으로써 매우 광범위하게 이용되고 있다.

그 발달과정을 살펴보면, Briggs-Shantz (1916), Lowry-Johnson(1942: Hansen 등, 1962), Blaney-Morin(1942), Thornthwaite (1948)의 추정공식이 발표되었으며, 1950년에는 1942년의 Blaney-Morin 공식의 증발산량과 평균 기압, 평균 상대 습도, 및 평균 낮시간의 비율에 대한 관계를 수정한 original Blaney-Criddle 공식이 발표되었다.

또한 Halstead(1951), Thornthwaite-Mather (1955), Hargreaves method(1956), Cochrane method(1956), Hamon(1961), corrected Hargreaves method(1965)가 발표되었으며, Tanner (1967), SCS-modified Blaney-Criddle (1967), Blaney-Criddle, SCS TR-21(1970, USDA), FAO-Blaney-Criddle method (Doorenbos and Pruitt, 1977)가 발표되었고, 1981년에는 Shin에 의해서 Blaney-Criddle method가 수정되었다. 1984년에는 Salih와 Sendil의 Blaney-Criddle (local) 공식이, 1985년도에는 Merva & Fernandez, Hargreaves & Samani 등의 연구, 발표가 있었고, 1986년에는 Blaney-Criddle 공식을 수정한 Allen-Pruitt method가 발표되었고, 1986년 Samani와 Pessarakli는 Hargreaves의 추정공식을 수정, 발표하였다.

이 방법의 주요 추정공식은 다음과 같다.

FAO-24 Blaney-Criddle method (1977)
 $ET_0 = C * [P * (0.46 * T + 8)] \dots\dots\dots (12)$

1985 Hargreaves-Temperature method
 (Hargreaves et. al. 1985)
 $ET_0 = 0.0023 * R_A * TD * (T + 17.8) \dots\dots\dots (13)$

- 여기서, ET_0 : Reference crop evapotranspiration
 C : Constant
 P : Percentage of mean daily daytime hours for the time period in the annual daytime hours
 R_A : Extraterrestrial radiation
 TD : Difference between mean monthly maximum and mean monthly minimum temperatures
 T : Average daily temperature during the time period

(3) Humidity Method

Dalton's equation의 증기압 변화량 항을 수정한 이 방법은 Prescott(1945, 1949), Van der Bijl(1957) 등이 추정공식을 발표하였고, 1974년에는 Papadakis, Ostromecki, Ivanov 공식이 각각 발표되었다. Prescott 공식은 아래와 같다.

$ET_p = C * (e_a - e_z)^{0.75} \dots\dots\dots (14)$

- 여기서, ET_p : Potential evapotranspiration
 e_a : Vapor pressure of the air
 e_z : Vapor pressure at z hight above the soil surface
 C : Constant

(4) Evaporimeter Method

이 방법은 잠재증발산량과 pan 증발량의 비례관계에 의하여 잠재증발산량을 추정하는 방법이다. 발달과정을 살펴보면, 1948년 Penman에 의한 연구(Hagan 등, 1967) 이후 Prescott와 Butler(1955), Rijtema(1959)의 연구가 있었으며, 1961년에는 Stanhill, Pruitt와 Angus등의 연구 발표가 있었다. 1962년에는 British sunken tank를 이용하여 Stanhill이 공식을 발표하였으며, 1964년에 Pruitt 등의 연구가 있었고, 또한 같은 해 McLroy와 Angus는 potential evapotranspiration이 복사량보다는 물의 증발량에 더 관계된다는 연구결과를 발표하였다.

또한 1966년에는 van Bavel은 class A pan을 이용한 공식을, 1968년에는 Christiansen's original equation이 발표되었고, 1969년에는 Christiansen-Hagreaves 공식이, 1974년에 Jensen에 의하여 Christiansen Pan evaporation 공식이, 1977년에 Doorenbos와 Pruitt는 FAO-24 Pan method와 adjusted class A pan에 대하여 각각 발표하였고, 1984년에는 class A pan에 대한 Salih와 Sendil의 연구결과가 발표되었다. 다음 식은 Christiansen's original equation(1968)을 나타낸다.

$ET_p = 0.755 * E_{pan} * C_T * C_U * C_H * C_S \dots\dots\dots (15)$

- 여기서, ET_p : Potential evapotranspiration
 E_{pan} : Pan evaporation
 $C_H : 0.499 + 0.62 * (RH/0.6) - 0.119 * (RH/0.6)^2$
 $C_S : 0.904 + 0.008 * (S/0.8) + 0.008 * (S/0.8)^2$
 $C_T : 0.862 + 0.179 * (T_c/20) - 0.041 * (T_c/20)^2$
 $C_U : 1.189 - 2.40 * (U/6.7) + 0.051 * (U/6.7)^2$

지금까지 증발산량 추정공식에 대한 분류와 발달과정, 그리고 주요 공식을 알아보았다.

<그림 - 2>는 미기상학적인 방법과 경험법에 대

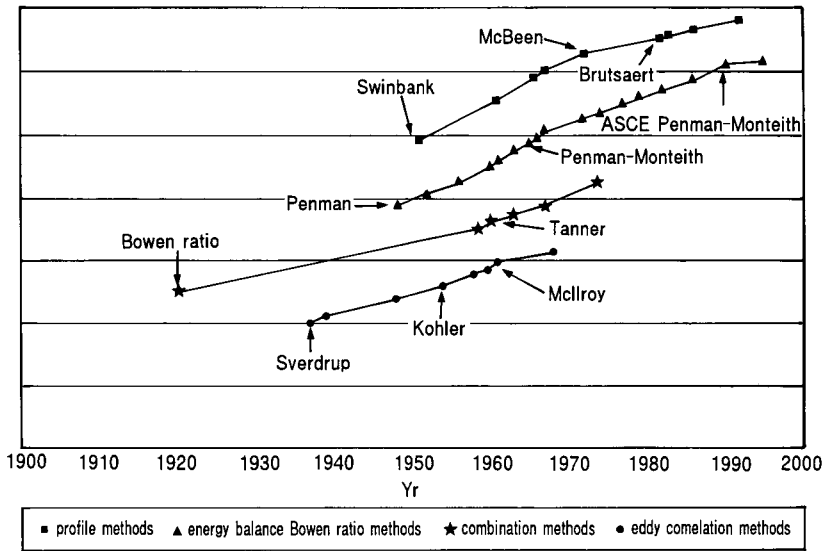
한 증발산량 추정공식의 진화도를 보여주고 있다.

4. 추정식의 비교

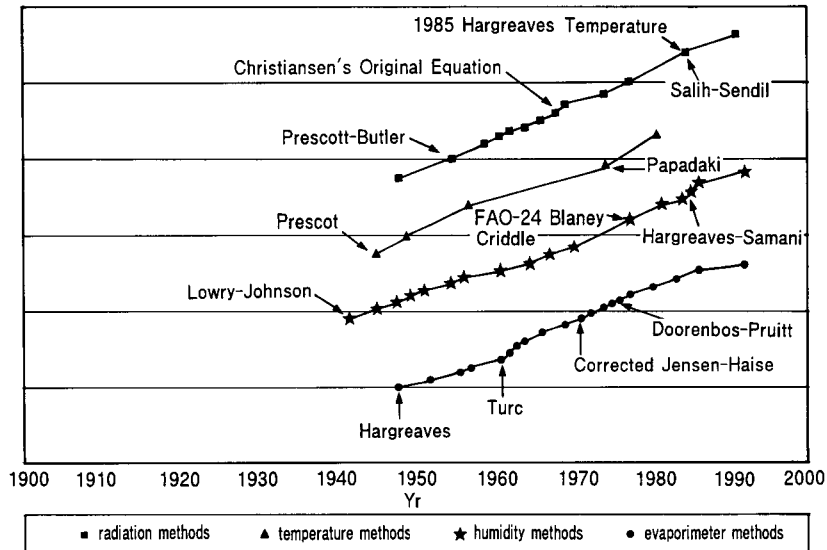
이 장에서는 각 지역별 연구결과를 토대로 Lysimeter 관측치와 19개 공식들이 추정한 결

과를 비교(Jensen 등, 1989)함으로써 앞으로 관련연구의 참고자료로 이용되기를 바란다.

지역별 구분으로서는 증발산량이 최고인 달의 일 평균 상대습도를 기준으로 60% 미만인 지역은 건조지역으로, 60% 이상인 지역은 습윤지역으로 구분하였다. 건조지역으로는 Australia



(a) 미기상학적 방법



(b) 경험적 방법

〈그림 - 2〉 증발산량 산정방법의 진화도

의 Aspendale(1959~1961), California의 Brawley(1971)와 Davis(1959~1963, 1967~1969), Idaho의 Kimberly(1969~1971), Nebraska의 Scotts-bluff(1977), Colorado의 South Park(1969)를 대상지역으로 하였으며, 습윤지역으로는 Denmark의 Copenhagen(1955~1966), Ohio의 Coshoc-ton(1977~1979), California의 Lompoc(4년간), New Jersey의 Seabrook(1949~1959), Zaire의 Yangambi(1959) 등 전체 11개 지역을 대상으로, 월 평균 증발산량을 Lysimeter에 의한 실측치와 19개의 추정공식들의 결과치와 비교하였다. 여기서 () 내의 연도는 관측기간을 나타낸다.

공식 추정값과 Lysimeter 관측값의 가중 평균치를 비교한 결과, 건조지역에서는 Penman-Monteith, 1982년 Kimberly-Penman, FAO-24 Radiation, 1963년 Penman VPD#3, FAO-PPP-17 Penman의 순으로 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 습윤지역에서는 Penman-Monteith, Turc, 1963년 Penman, FAO-PPP-17 Penman, Priestley-Taylor의 순으로 나타났다.

또한 모든 지역에서의 월별 잠재증발산량 추정공식들을 비교하였을 때에는 Penman-Monteith, 1982년 Kimberly-Penman, FAO-PPP-17 Penman, 1963년 Penman, 1963년 Penman VPD#3의 순으로 실측치와 잘 일치하였다.

5. 우리나라의 증발산량 산정

우리나라의 증발산량 산정에 관한 연구는 1909년 일본인에 의하여 최초로 시작되었으며(농수산부, 농업진흥공사, 1985), 1970년 이전에는 일반적으로 Evaporimeter method를 사용하였다(농림부 1970). 1970년말부터 시작된 대규모 농업개발사업에서는 평균 기온과 일조시

간만으로 잠재증발산량을 산정할 수 있는 Blaney-Criddle 공식을 농업진흥공사에서 처음으로 공인하여 사용하였다(농수산부, 농업진흥공사, 1985). 이 방법은 건조지역에서 개발되어 우리 나라와 같은 습윤지역에서는 잠재증발산량 값이 높게 나타난다(진영화 등, 1976 : 농수산부, 농업진흥공사, 1985).

1970년대 중반이후부터는 FAO에서 채택한 4가지 증발산량 추정공식이 도입되었으며, 1989년에 농업진흥공사의 소비수량 산정방법 실용화연구에서는 기상 관측자료의 충분한 축적과 급변하는 농업수리 형태에 대응하기 위하여 기존에 주로 이용되던 Blaney-Criddle 공식을 FAO corrected Penman 공식으로 대체할 것을 주장하였다. 최근 농어촌진흥공사의 농촌용수 수요량 조사연구에서 논에서는 FAO corrected Penman 공식을 사용하고, 밭에서는 Penman-Monteith 공식을 사용하였다.

우리나라에서는 대체적으로 FAO corrected Penman 식이 좋은 추정 값을 주는 것으로 알려져 있다. 그러나 이 방법은 여러 가지 기상인자를 필요로 한다. 따라서, 지역적으로는 보다 간단한 Temperature 방법이나 Evaporimeter 방법이 적절할 수도 있으므로 추정 방법은 지역의 여러 가지 여건을 고려하여 선정하는 것이 바람직 하다고 하겠다.

6. 맺 는 말

작물의 필요수량 산정, 수자원 관리 등에 있어서 중요한 증발산 과정에 대한 연구는 1900년대 초반부터 대두되기 시작하여 현재에는 전자계산기의 발달과 더불어 더욱 심도 있게 발전되고 있다. 그러나 공간적 및 시간적 차이와 다른 자연 환경적인 요인 등으로 인하여 어떠한 공식이 가장 정확하다고 단정할 수는 없다. 앞으로 지속적인 연구를 통하여 증발산

량 추정공식의 편리성과 용이성 및 정확성은 더욱 개선될 수 있을 것이다.

본 고에서는 증발산량 산정을 위한 추정공식들을 분류하고 발달과정 및 주요 공식들을 소개 및 비교하였으며, 앞으로 관련분야 연구의 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김시원, 김철기, 이기춘, 1984. 신고 농업수리학, 향문사.
2. 농림부, 농업진흥공사, 1972. 농업용수개발 필요수량 기준 : 단위용수량, 단위저수량, pp.267.
3. 농수산부, 농업진흥공사, 1799. 금강·평택지구 준공지, pp.77~140.
4. 농수산부, 농업진흥공사, 1985. 작물 소비수량 산정방법의 정립, pp.124.
5. 농업진흥공사, 1982. 발관개이론 및 관개계획수립, pp.173.
6. 농업진흥공사, 1989. 소비수량 산정방법 실용화 연구, pp.184.
7. 오재호 1999. 우리나라 증발산량 분포 특성, 기상연구소 연구보고서, pp.1~73.
8. 임정남, 유수호, 1988. 기상자료에 의한 배추 생육시기별 토양수분, 증발산량 및 수량의 추정모형, 한국토양비료학회지, 21(4), pp.386~408.
9. 정상옥, 1998. 관개계획을 위한 기준작물 증발산량 산정, 한국농공학회지, 40(1), pp.43~48.
10. 정하우, 김선주, 김진수, 안병기, 이근후, 이남호, 정상옥, 1999. 관개배수공학, 동명사, pp.376.
11. 진영화, 황계순, 1976. 수원지방의 증발산량 분석, 한국토양학회지, 9(1), pp.47~55.
12. Allen, R. G., 1986. A Penman for All Seasons, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 112(4), pp.348~368, ASCE.
13. Allen, R. G. and Pruitt, W. O., 1992. FAO-24 Reference Evapotranspiration Factors. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117(5), pp.758~773, ASCE.
14. Amatya, D. M., Skaggs, R. W., and Gregory, J. D., 1995. Comparison of Method for Estimating REF-ET, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 121(6), pp.427~435, ASCE.
15. Black, P. E., 1991. Watershed Hydrology, pp.82~138, Prentice-Hall, Inc.
16. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirement, Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO, Rome, Italy.
17. Goodrich, D. C., Moran, M. S., Sco, R., Qi, J., Williams, D., 1998. Seasonal Estimates of Riparian Evapo-Transpiration (Consumptive Water Use) Using Remote and In-Situ Measurement, pp.2~16, Salsa AMS Hydrology Symposium Paper.
18. Hagan, R. M., Haise, H. R., Edminster, T. W., 1967. Irrigation of Agricultural Lands, AGRONOMY No.11, pp.483~574, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
19. Hanks, J. and Ritchie, J. T., 1991. Modeling Plant and Soil System AGRONOMY No. 31, pp.205~271, ASA, Madison Wisconsin, USA.
20. Hansen, V. E., Israelsen, O. W., and Stringham, G. E., 1979. Irrigation Principles and Practices, 4th ed., Wiley & Sons, New York, pp.417.
21. Hoffman, G. J., Howell, T. A., and Solomon, K. H., 1990. Management of Farm Irrigation Systems, ASAE Monograph Number 9, pp.13~60.
22. Hussein, S. A. and Daw, K. E., 1989. Evapotranspiration in Sudan Gezira Irrigation

- Scheme, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 115(6), pp.1018~1033.
23. James L. G., 1988. *Principle of Farm Irrigation System Design*, John Wiley & Sons, New York.
 24. Jensen, D. T., Hargreaves, G. H., Temesgen, B., Allen, R. G., 1997. Computation of ET₀ under Nonideal Conditions, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(5), pp.394~400.
 25. Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G., 1990. *Evapotranspiration and Irrigation water Requirements*, ASAE Manual No. 70, ASAE, pp.332.
 26. Ramírez, J. A. and Finnerty, B., 1996. CO₂ and Temperature Effects on Evapotranspiration and Irrigated Agriculture, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(3), pp.155~163.
 27. Samuel O. O., Samuel, O. O., Richard, H. C., M, English., 1995. Hourly Grass Evapotranspiration in Modified Maritime Environment, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(6), pp.369~373.
 28. Schwab, G. O., Schwab, G. O., Frevert, R. K., Edminster. T. W., Barnes. K. K., 1981. *Soil and Water Conservation Engineering*, 3th ed., pp.49~67, John Wiley & Sons, New York.
 29. USGS, Center for Coastal Geology, 1999. *Evapotranspiration Measurements and Modeling in the Everglades*, South Florida Ecosystem Program-FS-168-967 pp.(<http://sflwww.er.usgs.gov/publications/fs/168-96/pri nt.html>).
 30. Zhang, M., Geng, S., Ransom, M., Ustin, U.S., 1996. *The Effects of Global Warming on Evapotranspiration and Alfalfa Production in California*, Department of Land, Air and Water Resources, University of California, Davis.