

논벼에 대한 Penman-Monteith 공식의 작물 계수 산정

Estimation of Paddy Crop Coefficients for Penman-Monteith Method

유 승 환*·최 진 용·장 민 원(서울대)

Yoo, Seung-Hwan · Choi, Jin-Yong · Jang, Min-Won

Abstract

In 1998, Food and Agriculture Organization addressed that FAO Modified Penman method possibly overestimates consumptive use of water comparing to the measured reference crop evapotranspiration (PET) and Penman-Monteith method can be better choice for accurate PET estimation. Nevertheless it is still difficult to find research efforts about paddy rice crop coefficient for Penman-Monteith method. This study aims to estimate paddy rice crop coefficients for Penman-Monteith method. To estimate the crop coefficients, measured evapotranspiration data during 1982-1986 were used. The average Penman-Monteith crop coefficients for transplanted paddy rice were ranged in 0.78 ~ 1.58.

I. 서론

우리나라 전체 수자원에 대한 용수수요는 1998년을 기준으로 연간 331억 m^3 에 이르며, 이 중 48%를 차지하는 농업용수는 자연적, 사회적 및 인위적인 요인에 의해 가용수자원의 공급비율이 감소하는 추세에 있으며, 이러한 현상은 앞으로 더욱 가속될 전망이다. 우리나라의 농업용수관리는 답작을 주 대상으로 한해를 방지하고, 효율적인 용수공급을 위하여 새로운 수자원의 개발에 주력해 왔으나 근래에 들어 신규 수자원의 개발에는 막대한 비용이 투자되어야 하고, 또한 개발가능 지역도 기존의 개발지역과 비교해 볼 때 개발여건이 상대적으로 불리한 상태이다. 따라서 이러한 문제를 개선하기 위하여 농업용수의 실제사용량에 대한 효율성을 높이는 관리방식의 개선과 함께 종합적인 물관리의 필요성이 강조되고 있는 실정이다(Park, 2004).

관개는 농작물의 생산을 목적으로 경지에 인공적으로 물을 공급하는 것이기 때문에 그 필요한 시기와 필요수량을 정확히 안다는 것은 농업용수개발과 물의 효율적인 관리계획수립에 있어서 대단히 중요한 사항이다. 관개수량의 결정에는 증발산량, 침투량, 재배관리용수량, 시설관리용수량 유효수량 등의 여러 인자를 고려해야 하지만 이 중에서도 생육 단계나 기상 조건에 따라 그 변화가 심한 증발산량을 정확히 산정할 수 있다면 관개계획을 수립하는데 용이할 것이다(Cho, 1987). 1960년대로부터 증발산량에 대한 연구는 기관별로 여러 지역에서 수행되었다. 서울대 농업개발연구소에서는 1982년부터 1986년까지 5개년 동안 논벼에 대하여 조생종, 중생종, 만생종으로 분류하고, 다시 통일계와 일반계로 나누어 서울, 수원을 포함한 전국 9개 지역에서 소비수량을 산정하였다. 그 결과를 Blaney-Criddle 공식, FAO Modified Penman 공식, A Pan증발계 등에 의해 지역별로 잠재증발산량을 산정하여, 각각의 작물계수를 산정하였다(Chung, 1987).

밭작물에 대한 소비수량연구를 위해 1987년부터 1990년까지 4개년 동안에 수원 지방에서 고추, 콩, 배추 등의 토양수분량의 변화량을 측정치를 근거로 하여 실제증발산량으로 산정한 후, FAO Modified Penman 공식을 이용하여 작물계수를 산정하였다(Chung, 1990). 이후 1995년부터 1997년까지 영농 방식 변화 따른 작물계수를 산정하기 위해 3개년 동안 논벼에 대하여 직파 재배에

다른 필요수량 변화 연구에서 수원과 대구 지역에서 라이시미터를 이용한 실제증발산량을 측정하였다(Kim, 1990). 침투량을 제외한 실제 증발산량만을 측정하기 위하여 유저형 라이시미터를 사용하였다. 그 결과를 근거로 FAO Modified Penman 공식과 수정 Blaney-Criddle 공식을 이용하여 작물계수를 산정하였다(Kim, 1997).

특정작물의 증발산량을 정하는 것은 기후적 조건, 토양수분, 작물의 종류와 생육조건 등의 복잡한 관계를 함께 규명하여야 하는 어려움 때문에 일반적으로 알팔파 또는 잔디 등 기준작물의 잠재증발산량에 해당 작물계수를 곱하여 구한다. 지금까지 우리나라에서는 Blaney-Criddle 공식이나 FAO Modified Penman 공식(Doorenbos & Pruitt, 1977)을 이용하여 잠재증발산량을 구한 후, 각각의 공식에 맞는 작물 계수를 곱하여 실제증발산량을 산정하였다.

그러나 1998년 국제식량농업기구(FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)에서는 기존의 연구에서 추천했던 FAO Modified Penman 공식이 과다 산정되는 점을 지적하고, 각 지역의 조건에 따른 적합한 방법을 비교, 검토하였다. 기존에 사용되던 20여 종류의 증발산량 공식을 검정들을 하였는데, 그 중 Penman-Monteith 공식이 건조 및 습윤 기후에서 비교적 정확하고 일정한 경향을 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 FAO에서는 Penman-Monteith 공식을 통일하여 사용하기로 결정하였다(Allen *et al.*, 1998). 현재 이 공식은 세계관개배수위원회(ICID), 세계기상기구(WMO) 등에서 추천하고 여러 연구에서 정확한 것으로 인정받고 있다. 그러나 우리나라에서는 Penman-Monteith 공식에 따른 작물계수에 대한 연구가 부족하여 기존의 작물 계수를 사용하거나 외국의 작물 계수를 사용하고 있는 실정이다(Koo *et al.*, 1998).

본 연구에서는 우리나라 9개 지역에 대한 1980년대에 이루어진 논벼의 작물소비수량 산정연구에 활용된 실제 소비수량의 실측 자료를 근거로 하여 Penman-Monteith 공식으로 부터 각각 산정된 작물계수에 대해 비교 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 증발산량 산정 공식

국제식량농업기구에서 추천한 Penman-Monteith 공식(PM)은 1965년에 처음으로 제안된 방법으로 Penman 공식의 공기동역학 조건에 작물형(crop type)에 따른 기공저항(stomatal resistance)을 포함하여 수정한 방법이다. 이 방법은 이 공식을 사용하기 위해서는 대기온도, 습도, 복사량 및 풍속에 관한 일별, 일주일 단위 혹은 1개월 단위의 기상자료가 필요하다. 본 연구에서는 일평균 기온, 풍속, 습도, 일조시간 등 4가지 기상 요인을 이용하여 산정하였다. 이 공식은 다음과 같다(Allen *et al.*, 1998).

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

여기서, ET_0 =기준잠재증발산량(mm/day), Δ =증기압 곡선의 기울기(kPa/°C), R_n =지구(작물)표면에서 순수하게 축적되는 에너지(순일사량) ($MJm^{-2} day^{-1}$), G =토양 열 유속 밀도 ($MJm^{-2} day^{-1}$), γ =건습계 상수(kPa/°C), T =2m 높이에서 일평균기온(°C), u_2 =2m 높이에서 풍속(m/s), e_s =포화증기압(kPa), e_a =실제증기압(kPa)

Table 1 Measured 10-days ET in Suwon (1982-1987)

Year	Time Variety	5-L	6-E	6-M	6-L	7-E	7-M	7-L	8-E	8-M	8-L	9-E	9-M	9-L	Total
		1982	Early	-	40.4	55.9	69.4	68.5	76.4	59.4	78.4	48.4	49.4	55.8	
	Middle	-	41.0	56.2	48.3	73.4	73.4	55.5	83.7	44.5	48.4	57.0	-	-	581.4
	Late	-	42.6	62.2	63.9	71.4	75.8	54.5	84.6	53.2	55.7	67.7	-	-	631.6
1983	Early	-	52.2	53.1	47.9	38.9	43.9	45.1	64.2	86.4	42.9	26.7	-	-	501.3
	Middle	-	53.9	49.6	52.2	34.9	41.5	40.7	58.7	88.3	35.2	20.1	-	-	475.1
	Late	-	46.4	51.6	51.8	38.5	43.7	39.6	64.5	89.5	35.3	25.5	-	-	486.4
1984	Early	-	51.2	59.7	51.5	37.2	54.0	59.8	84.0	55.4	33.0	30.1	-	-	515.9
	Middle	-	48.0	55.6	49.5	33.5	51.7	58.0	82.3	59.5	30.6	31.7	27.0	-	527.4
	Late	-	50.3	61.7	56.0	36.5	58.7	62.7	85.1	60.8	36.6	31.6	33.6	-	573.6
1985	Early	-	36.5	57.6	45.6	30.7	39.0	77.1	44.4	60.1	61.5	26.0	-	-	478.5
	Middle	-	34.1	59.4	45.3	35.2	39.5	83.1	52.0	68.4	70.7	46.0	33.4	-	567.1
	Late	-	36.4	64.4	48.5	33.3	35.4	80.7	46.2	68.0	76.2	45.1	39.7	-	573.9
1986	Early	-	28.1	36.8	38.1	54.4	43.6	60.3	62.5	24.0	68.6	25.6	-	-	442.0
	Middle	16.9	37.8	37.2	38.0	50.4	40.6	50.9	56.3	24.9	58.1	26.9	5.8	-	443.8
	Late	22.2	36.0	38.0	37.0	55.0	43.8	52.5	65.4	22.6	67.4	25.4	6.6	-	471.9

* Early : Early Season Rice

** Middle : Middle Season Rice

*** Late : Late Season Rice

Table 2 Estimated 10-days PET in Suwon (1982-1987)

Year	Time Method	5-L	6-E	6-M	6-L	7-E	7-M	7-L	8-E	8-M	8-L	9-E	9-M	9-L	Total
		1982	PM	39.8	41.5	41.0	41.6	45.7	40.8	37.3	40.6	29.2	31.3	30.8	
1983	PM	41.4	46.6	41.5	36.6	30.6	33.5	30.0	39.7	45.6	31.0	25.5	29.0	25.0	455.9
1984	PM	39.3	39.0	41.3	37.7	29.7	38.5	43.9	41.2	40.1	29.3	25.9	28.9	22.8	457.4
1985	PM	41.6	36.6	42.9	38.1	28.2	32.7	51.4	29.8	40.1	41.4	27.8	18.2	22.5	451.3
1986	PM	42.9	38.8	34.4	34.7	37.0	29.1	35.2	36.7	23.9	32.9	27.9	26.1	23.5	423.1

* PM : Penman-Monteith Method

2. 실측 증발산량

가. 증발산량 측정 방법

본 연구에서는 서울대학교 농업개발연구소 측정한 증발산량을 사용하였다. 1982년에서 1986년까지 5개년에 걸쳐 우리나라의 도를 대표할 수 있는 9개 지역을 선정하고, 각 지역에 시험포를 설치하고 소비수량 측정 실험을 실시하였다(Chung, 1987). 이에 따라 춘천, 서울, 수원, 청주, 대전, 전주, 광주, 대구, 진주로 선정하고, 조생종, 중생종, 만생종 등 2품종에 대하여 소비수량 측정 실험을 실시하였다. 이양일은 경우 벼의 품종과 지역에 따라 다르지만 파종과 수확시기에 따라 5월 하

순-6월 초순에 이양하도록 하여 시험하였다. 벼의 품종과 지역에 따라 다소 차이는 있으나, 8월 하순-10월 중하순경에 수확하도록 하였다. 시비량 및 기타 재배 방법은 농촌진흥청에서 시행하는 표준재배법에 의해 실시하였다.

감수심, 증발산량, 삼투량을 각각 구하기 위하여 바닥이 있는 유저형, 무저개방형, 부저 밀폐형

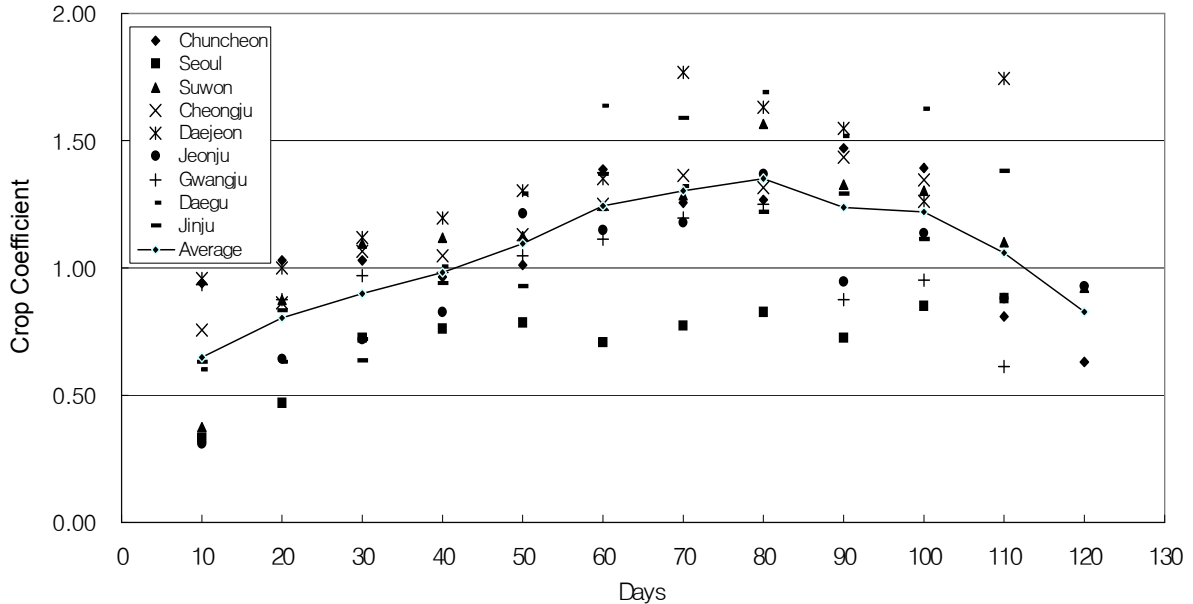


Fig. 1 Distribution of transplanted paddy rice crop coefficients for Penman-Monteith Method.

라이시미터로 구분 측정하였다. 시험구 배치는 3개 품종(조생종, 중생종, 만생종)의 수도를 심은 유저형(6cm의 답수심)고 무저형(2cm, 4cm, 6cm 및 8cm의 답수심)의 라이시미터를 사용하였으며, 답수심은 각 조건에 맞게 일정하게 유지시켰다.

나. 증발산량 측정 결과

전국 9개 지역에서 순별 증발산량 산정하였는데 Table 1은 전체 지역 중 대표적으로 수원 지역의 결과를 나타낸 것이다. 수원 지역의 작물 생육 기간 동안에 1982~1986년의 총증발산량을 살펴 보면 각각 1982년에 602mm, 1983년에 478mm, 1984년에 506mm, 1985년에는 508mm, 1986년에는 453mm로 나타났다. 따라서 생육기간 동안의 평균 일 증발산량은 4.4~5.9mm사이의 값을 나타내었으며, 1984년 8월 초순에 실험기간 중 가장 큰 순평균 일 증발산량을 나타내었다. Table 3은 시험 기간 5개년 동안의 PM 공식으로 산정된 잠재증발산량 결과이다.

III. 결과 및 고찰

1. 작물계수 산정

1982년부터 1986년까지 5년 동안 전국 9개 지역을 대상으로 이루어진 작물 소비수량 산정방법

연구 중 일부분으로 지역에 따른 작물계수 산정이 포함되었는데, 이를 위하여 이루어진 논벼의 증발산량 실측치와 해당 5년간의 PM 공식으로 산정된 잠재증발산량을 가지고 PM 공식에 적합한 작물계수를 산정하였다. 기존 연구에서는 증발산량을 조생종, 중생종, 만생종으로 나누어서 관측하였지만 본 연구에서는 이를 나누지 않고 작물 계수를 산정하였다. 지역별, 순별로 나온 5개년 동안 나온 결과를 평균하여 최종적으로 논벼의 작물계수를 산정하였는데 기존 연구에서는 지역별, 순별로 따른 작물계수를 제시하였는데 본 연구에서는 이양 후 경과 일수에 따라 10일 단위로 나

Table 3 Estimated transplanted paddy rice crop coefficients

Method \ Days	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	평균
PM	0.78	0.97	1.07	1.16	1.28	1.45	1.50	1.58	1.46	1.45	1.25	1.01	1.27
FAO	1.09	1.13	1.17	1.20								0.90	0.80

누어 전국 9개 지역을 평균하여 하나의 작물 계수를 산정하였다. 그 결과는 Fig 1, Table 3과 같다. 결과를 보면 이양 후 재배까지의 전체 120일 기간 동안의 작물계수의 평균은 1.27로 나타났고, 이양 직후 10일은 0.78을 시작으로 점점 증가하여 이양 90일 후에 1.58로 정점으로 가장 큰 값을 나타내었고, 이후 감소하여 이양 후 120일에 1.01이 나타났다.

2. FAO 작물 계수와 비교

국제식량농업기구(FAO)에서는 벼에 적합한 작물계수를 추천하였는데 이 작물계수는 우리나라의 연구와 달리 생장단계에 따라 생육초기(30일)를 5월을 시작으로 분화기(30일), 생육중기(80일), 생육말기(40일)로 나누어 작물계수를 산정하였는데 Penman-Monteith 공식의 작물계수는 생육 초기 단계에는 1.05, 생육 중기 단계에는 1.20, 생육 말기 단계에서는 0.60 - 0.90이고 분화기에는 선형적으로 증가한다고 가정하게 된다(Allen *et al.*, 1998). 외국의 경우 이양 재배가 보편화 되어 있지 않을 점을 고려하여 못자리에서 육묘를 재배하는 시기를 생육초기 30일로 가정하고 이양 직후를 분화기의 시작으로 생각하고 본 연구에서 산정된 결과와 비교하면, 10-40일까지는 FAO의 작물계수가 더 큰 값이 나타나지만 50일 이후부터는 FAO의 작물계수가 더 작은 값을 나타나고 있다. 이러한 작물 계수의 차이는 영농 방식의 차이로 인하여 발생하는 것으로 판단된다.

IV. 결론

우리나라 각 도를 대표할 수 있는 9개 지역을 선정하고 1980년대에 이루어진 논벼의 작물소비수량 산정연구에 활용된 실제 소비수량의 실측 자료를 근거로 하여 FMP 공식로 부터 각각 작물계수를 산정하고 비교 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 두 공식을 이용하여 작물 계수를 산정하였는데, 지역별, 순별 작물계수를 산정했던 기존 연구와 달리 이양 또는 파종 후 경과 일수를 기준으로 9개 지역의 작물계수를 이용하여 하나의 작물계수를 산정하였다.

2. 이양 재배법에 따른 작물 계수를 산정하였는데 생육기간 120일 동안에 0.78-1.58의 범위를 나타내었고, 평균값은 1.27로 나타났다. FAO에서 추천한 작물 계수와 비교를 하였는데 우리나라와

의 영농 방식의 차이로 인하여 상이한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

Reference

1. Allen, R. G., L. S. Periera, D. Raes, and M. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements, Irrigation and Drainage Paper No. 56*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy
2. Cho, K. S. 1987. Analysis of Time Period for Evapotranspiration Formulas -Mainly on Paddy Crops-, Master diss., Seoul National Univ.
3. Choi, J. Y. 1996. Development of a cell-based long-term hydrologic model using geographic information system, Ph.D Thesis, Seoul National Univ.
4. Chung, H. W. 1987. A Study on Consumptive Use of Paddy Field, Ministry of Agricultural & Fisheries, Agricultural Development Corporation
5. Chung, H. W. 1990. A Study on Consumptive Use of Upland Crops, Ministry of Agricultural & Fisheries, Agricultural Development Corporation
6. Doorenbos, J., A. H. Kassam. 1979. *Yield response to water, FAO irrigation and drainage paper No. 33*, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome
7. Doorenbos, J., and W. O. Pruitt. 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper no. 24*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
8. Jensen, M. E., R. D. Burman, and R. G. Allen. 1990. *Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices*, No. 70
9. Kim, H. Y. 1997. A Study on the Water Requirement Variation with the Farming Conditions in the Paddy Field, Ministry of Agriculture and Forestry, Agricultural Development Corporation
10. Koo, J. W., S. K. Kwun, T. C. Kim, and K. H. Lee. 1998. *Design criteria of agricultural land and water development(Irrigation)*. Ministry of Agriculture and Forestry.
11. Park, K. W. 2004. Development of a simulation model for automatic irrigation management(SIMA) in paddy land, Ph.D Thesis, Seoul National Univ.