

# 논벼에 대한 Penman-Monteith와 FAO Modified Penman 공식의 작물 계수 산정

## Estimation of Paddy Rice Crop Coefficients for FAO Penman-Monteith and Modified Penman Method

유 승 환\* · 최 진 용\*\* · 장 민 원\*\*\*

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 and FAO modified Penman methods in the manner of comparing two equations. To estimate the crop coefficients, measured evapotranspiration data during 1982-1986 and 1995-1997 were used. The average Penman-Monteith crop coefficients ranged from 0.78 to 1.58 for translated paddy rice and from 0.87 to 1.74 for flood-direct seeded paddy rice. The average FAO Modified Penman crop coefficients ranged from 0.65 to 1.35 for translated paddy rice and from 0.70 to 1.58 for flood-direct seeded paddy rice.

*Keywords : PET, Crop coefficient, Penman-Monteith, FAO Modified-Penman*

### I. 서 론

우리나라 전체 수자원에 대한 용수요는 1998  
년을 기준으로 연간 331억m<sup>3</sup>에 이르며, 이 중

48%를 차지하는 농업용수는 자연적, 사회적 및 인  
위적인 요인에 의해 가용수자원의 공급비율이 감소  
하는 추세에 있으며, 이러한 현상은 앞으로 더욱  
가속될 전망이다. 우리나라의 농업용수관리는 답작  
을 주 대상으로 한해를 방지하고, 효율적인 용수공  
급을 위하여 새로운 수자원의 개발에 주력해 왔으  
나 근래에 들어 신규 수자원의 개발에는 막대한 비  
용이 투자되어야 하고, 또한 개발가능지역도 기존  
의 개발지역과 비교해 볼 때 개발가능지역이 상대적으  
로 불리한 상태이다. 따라서 이러한 문제를 개선하

\* 서울대학교 조경·지역시스템공학부 대학원  
\*\* 서울대학교 조경·지역시스템공학부  
\*\*\* 서울대학교 조경·지역시스템공학부 박사후 과정  
\*\* Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4583  
Fax: +82-2-873-2087  
E-mail address: iamchoi@snu.ac.kr

기 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 논비에 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 Pan 증발계 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 논비에 대하여 직파 재배에 따른 필요수량 변화 연구에서 수원과 대구 지역에서 라이시미터를 이용한 실제증발산량을 측정하였다 (Kim, 1997). 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, 1998)에서는 기존의 연구에서 추천했던 Modified Penman 공식의 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 국제식량농업기구에서는 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 지난 30년간의 잠재증발산량을 FAO Modified Penman 공식과 Penman-Monteith 공식을 이용하여 산정한 후, 그 차이에 대하여 고찰하였다. 그리고 1980년대에 이루어진 논비의 작물소비수량 산정연구와 1990년대에 이루어진 직파재배에 따른 소비수량 산정연구에 활용된 실제 소비수량의 실측 자료를 근거로 하여 FAO Modified Penman 공식과

Penman-Monteith 공식으로 부터 각각 산정된 작물계수에 대해 비교 분석하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 증발산량 산정 공식

FAO Modified Penman 공식 (FMP; Doorenbos & Pruitt, 1977)은 많은 실험을 통하여 산정된 계수들이 제시되고, 유용성이 입증되어 지금까지 많이 사용되고 있다. 이 공식은 복합적인 제반 기상 요인 뿐만 아니라 주간과 야간의 기상상태의 차이를 고려하기 때문에 정확성이 비교적 높다. 여름의 경우 ±10%인 최소의 오차를 가진 비교적 좋은 결과를 제공하고, 낮은 증발 조건에서는 20%이상의 오차를 가지는 것으로 일단위 잠재증발산량을 산정할 수 있어 관계계획, 수문모형 등에 많이 이용되는 공식이다 (Choi, 1996).

$$ET_0 = C [ W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d) ]$$

$$= C [ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d) ]$$

..... (1)

여기서,  $ET_0$ =기준잠재증발산량 (mm/day),  $W = \Delta / (\Delta + \gamma)$ , 온도로 계산되는 가중치,  $\Delta$ =증기압 곡선의 기울기 (mb/°C),  $\gamma$ =건습계 상수 (mb/°C),  $R_n$ =지구(작물)표면에서 순수하게 축적되는 에너지 (mm/day),  $f(u) = 0.27(1 + U_2/100)$ , 풍속함수,  $U_2$ =2 m 높이에서 풍속 (km/day),  $e_s$ =포화증기압 (mb),  $e_a$ =실제증기압 (mb),  $C$ =주야의 기후차에 의한 보정계수

그리고 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. 기공 저

항은 엽온과 밀접한 관련이 있는 것으로 공기동역학항에 온도에 의한 식이 추가되어 있다. 이 방법은 이 공식을 사용하기 위해서는 대기온도, 습도, 복사량 및 풍속에 관한 일별, 일주일 단위 혹은 1개월 단위의 기상자료가 필요하다. 이 공식은 다음과 같다 (Allen et al., 1998).

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

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

..... (2)

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

두 공식 모두 에너지항과 공기동역학항을 결합하여 증발산량을 산정하게 되는데 각 항의 가중치와 풍속함수 있어서 서로 다른 식을 사용하고 있다. 먼저 에너지항을 살펴보면 증기압 곡선의 기울기와 건습계 상수로 이루어지는 가중치에 있어서 PM 공식의 경우 풍속 인자가 추가적으로 포함되어 있다. PM 공식에서는 0.408이라는 상수값이 에너지항에 포함되어 있는데 이 값은 에너지 단위인 MJ/m<sup>2</sup>day를 mm/day로 바꾸어 주기 위한 단위 환산 계수이다.

공기동역학항의 경우, PM 공식의 경우 FMP 공식에는 없는 온도에 의한 가중치가 포함되어 있고, 에너지항과 유사하게 증기압 곡선의 기울기와 건습계 상수로 이루어지는 가중치에 풍속 인자가 포함되어 있다. 증기압의 경우 두 공식이 서로 다른 단위를 사용하고 있는데 FMP 공식에서는 mb, PM

공식에서는 kPa를 사용하고 있다.

본 연구에서는 일평균 기온, 풍속, 습도, 일조시간 등 4가지 기상 요인을 이용하여 산정하였다.

## 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, 만생종에 대하여 소비수량 측정 실험을 실시하였다. 이양일은 경우 벼의 품종과 지역에 따라 다르지만 과중과 수확시기에 따라 5월 하순-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 바다에 있는 유저형, 무저개방형, 무저 밀폐형 라이시미터로 구분하여 측정하였다. 시험구 배치는 3개 품종(조생종, 중생종, 만생종)의 수도를 심은 유저형과 무저형 라이시미터를 사용하였으며, 담수심은 각 조건에 맞게 일정하게 유지시켰다.

또한, 1995년에서 1997년까지 3개년에 걸쳐 우리나라의 중부지역과 남부지역에 대해 대표적인 지역을 선정하고, 직파재배에 적합한 품종을 선택하여 생육기간별 증발산량을 측정하였다. 이를 이용하여 잠재증발산량 공식의 작물계수를 산정하였다. 시험포장은 중부지방에서는 수원(수원시 서울대학교 농생대 부속농장), 남부지방에서는 대구(대구시 경북대학교 농생대 부속농장)를 선정하였다. 과중시기는 지역에 따라 다소 차이는 있으나 5월 중하

순에 실시하였고 9월 하순에는 두 지역 모두 완전 낙수를 실시하였고, 10월초에 수확하였다.

시험구 배치는 수원 지역의 경우 담수직파의 증발산량을 측정하기 위하여 유저형 라이시미터를 사용하였다. 조생종, 중생종, 만생종에 대하여  $\phi 20$  cm의 원형 유저 라이시미터를 6반복으로 측정할 수 있도록 모두 18개를 설치하였으며, 담수심은 6 cm를 기준으로 하여 소비수량을 조사하였다. 또한 교차검증을 위하여 사각형 라이시미터를 조생종, 중생종, 만생종에 대해 각각 1개씩 배치하여 측정하였다. 대구 지역의 경우는 담수직파의 증발산량을 측정하기 위해 조생종, 중생종, 만생종의 품종별로 3반복으로 측정하도록 9개의 유저 라이시미터를 시험 포장에 배치하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 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 살펴보면 각각 1982년에 602 mm, 1983년에 478 mm, 1984년에 506 mm, 1985년에는 508 mm, 1986년에는 453 mm로 나타났다. 따라서 생육기간 동안의 평균 일 증발산량은 4.4~5.9 mm사이의 값을 나타내었으며, 1984년 8월 초순에 실험기간 중 가장 큰 순별 평균 일 증발산량을 나타내었다. Table 2는 시험 기간 5개년 동안의 PM 공식과 FMP 공식으로 산정된 잠재증발산량 결과이다.

또한 유저형 라이시미터를 이용하여 수원과 대구 지역에서 1995~1997년의 순별 평균 증발산량 산정하였는데 Table 3은 그 중 수원 지역의 결과를 나타낸 것이다. 수원 지역의 작물 생육 기간 동안에 순별 평균 증발산량 관측치의 평균값은 조·중·만생종 각각 1995년에는 측정되어 생육기간

Table 1 Measured 10-days ET in Suwon (1982-1986)

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 (1982-1986)

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	
	FMP	46.9	48.5	48.7	49.2	53.6	47.3	43.5	46.1	33.7	36.6	36.4	35.2	34.8	560.5
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
	FMP	48.5	56.0	49.5	42.6	36.1	38.3	35.2	44.7	53.2	37.1	29.3	33.5	30.5	534.4
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
	FMP	47.3	46.5	50.1	43.4	34.5	43.7	50.3	46.5	46.0	34.0	30.5	33.8	27.7	534.5
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
	FMP	51.0	44.0	51.5	44.5	32.5	37.9	58.4	34.1	46.4	47.5	32.7	21.8	28.4	530.7
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
	FMP	52.1	46.1	41.4	40.2	43.7	34.0	40.2	42.1	27.5	39.1	32.2	31.2	28.3	498.0

\*PM: Penman-Monteith Method, \*\*FMP: FAO Modified Penman Method

동안의 평균 일 증발산량이 4.8~5.8 mm 사이의 값을 나타내었으며, 1997년에는 조·중생종이 8월 중순에 9.6 mm, 9.7 mm로 측정되어 실험기간 중 가장 큰 순평균 증발산량을 나타내었다. Table 4는 위 시험 기간 동안의 PM 공식과 FMP 공식으로 산정된 잠재증발산량 결과이다.

## 2. 잠재증발산량 비교

PM 공식과 FMP 공식의 잠재증발산량의 일반적 경향과 차이를 알기 위하여 전국 9개 지역을 대상으로 1974년 1월 1일부터 2003년 12월 31일까지 지난 30년간의 잠재증발산량을 두 공식을 이용하여 각각 산정하였다. Fig. 1은 9개 지역의 평균 값을 1월부터 12월까지의 잠재증발산량을 순별에

Table 3 Measured average 10-days ET in Suwon (1995-1997)

Year	Time Variety	5-M	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	Ave.
		1995	Early	-	-	-	4.3	4.4	4.4	5.3	-	-	6.1	5.4	5.0	-
	Middle	-	-	-	5.0	5.7	5.1	4.6	-	-	6.1	7.2	5.2	-	-	5.6
	Late	-	-	-	3.9	4.6	5.7	5.4	-	-	5.1	6.8	5.4	-	-	5.3
1996	Early	-	-	2.7	4.3	3.9	6.3	4.5	4.1	6.1	7.1	5.1	4.6	4.2	-	4.8
	Middle	-	-	3.5	4.9	5.0	6.4	5.6	5.2	7.1	7.9	6.2	6.0	6.0	-	5.8
	Late	-	-	3.6	4.6	4.0	6.2	5.8	5.7	6.6	7.9	5.8	4.7	5.1	-	5.5
1997	Early	2.2	2.6	3.4	4.8	3.2	2.9	6.2	7.3	5.5	9.6	5.7	5.7	6.6	-	5.1
	Middle	2.3	2.9	3.1	4.8	2.9	2.2	4.8	7.4	5.1	9.7	6.1	6.7	6.9	-	5.0
	Late	2.3	2.1	3.2	4.9	2.9	2.5	4.6	7.3	5.8	8.7	7.3	6.7	6.8	4.6	5.0

\*Early: Early season rice, \*\*Middle: Middle season rice, \*\*\*Late: Late season rice

Table 4 Estimated average 10-days PET in Suwon (1995-1997)

Year	Time Method	5-M	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	Ave.
		1995	PM	3.3	3.7	3.6	4.0	3.7	3.4	3.0	4.6	3.8	4.0	2.8	2.6	3.0
	FMP	4.2	4.6	4.4	4.9	4.5	4.1	3.5	5.4	4.5	4.6	3.2	3.1	3.6	2.8	4.1
1996	PM	3.5	4.1	3.8	3.2	2.7	4.2	3.3	3.5	4.1	4.5	2.7	3.3	3.0	2.8	3.5
	FMP	4.3	4.8	4.5	3.7	3.1	4.9	3.8	4.0	4.7	5.1	3.2	3.8	3.5	3.4	4.1
1997	PM	3.2	3.3	4.1	4.7	3.8	3.1	3.8	4.6	3.8	4.7	3.7	3.4	3.1	2.5	3.7
	FMP	4.0	4.2	5.0	5.6	4.4	3.6	4.5	5.3	4.3	5.7	4.3	4.0	4.0	3.2	4.4

\*PM: Penman-Monteith Method, \*\*FMP: FAO Modified Penman Method

따라 평균값을 나타낸 결과이다. 두 공식 모두 우리나라 잠재증발산량의 전형적인 모습인 6월에 가장 큰 값을 나타내고 있다. 두 공식 모두 5월 하순에 가장 큰 값인 4.9 mm와 4.0 mm가 나왔다. 이는 잠재증발산량은 온도, 일조시간, 풍속 및 습도의 영향을 받는데 5월 하순의 경우 비교적 기온이 높으면서 습도는 상대적으로 낮고, 일조시간이 가장 많기 때문인 것으로 사료된다. 7월과 8월의 경우 온도가 높고 일조시간이 많지만, 습도가 높기 때문에 6월에 비하여 상대적으로 낮게 산정된다. 12월 하순에 가장 작은 값인 1.0 mm와 0.7 mm가 산정되었는데 이는 기온이 낮고, 일조 시간이 가장 적은 시기에 해당하기 때문인 것으로 판단된다. 관개 기간에 해당하는 5~9월 기간 중에서는 9월 하순에 3.2 mm와 2.6 mm로 가장 작은 값을 나타내었다. 관개 기간을 비롯한 모든 기간 동안에 FMP 공

식으로 산정된 잠재증발산량이 PM 공식으로 산정된 값보다 더 큰 값을 나타내었다. 두 공식간의 최고 차이를 나타낸 기간은 4월 하순이었고, 최저 차이를 나타낸 기간은 12월 하순으로 FMP 공식으로 산정된 값보다 각각 1.0 mm, 0.3 mm 정도 더 크게 나왔다. 관개 기간 동안 전체적으로는 FMP 공식에 의한 값이 평균 17.2% 정도 크게 나타내었다. 미국토목학회 (ASCE, 1990)의 라이시미터를 이용한 실측 데이터를 바탕으로 잠재증발산량 공식에 따른 정확도 연구에 의하면 평균적으로 가장 높은 값을 나타내는 기간에서는 실측값에 비해 FMP 공식은 122%, PM 공식은 97%이고, 계절별로 비교할 경우에는 FMP 공식은 127%, PM 공식은 101%로 조사되었다 (Jensen et al., 1990). 따라서 우리나라의 경우에도 외국의 연구 사례와 같은 비슷한 경향을 보이는데 이는 FMP 공식이 실제

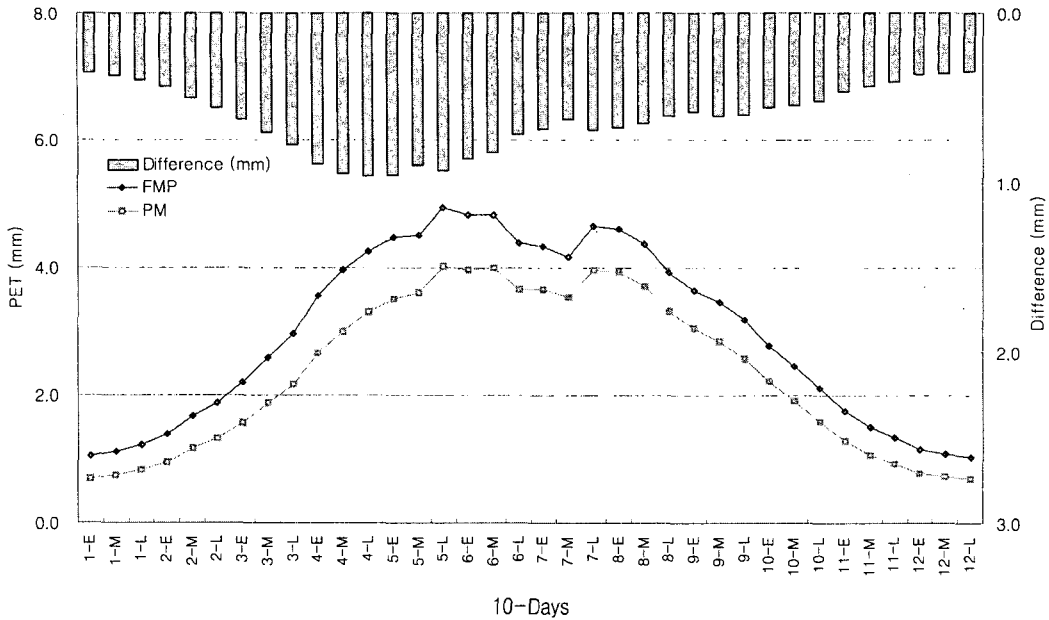


Fig. 1 Estimated of normal average PET in 9 Regions

증발산량보다 과다 산정되는 것임을 확인할 수 있다.

PM 공식으로 산정된 잠재증발산량이 FMP 공식으로 산정된 값보다 작은 이유를 살펴보면 다음과 같다. Table 5는 수원 지방을 대상으로 하여 지난 30년간의 두 공식의 각 항 (term)에 따른 최대, 최소 및 평균값과 그 상대적인 비율을 나타낸 것이다.

먼저 에너지 (Energy) 항을 살펴보면, 증기압 곡선의 기울기와 건습계 상수로 이루어지는 가중치 부분에서 PM 공식에서 풍속이 분자에 포함되어 있기 때문에 산술적으로 FMP 공식에 의해 산정된 값보다 더 작게 산정된다. 따라서 Table 6에서 보는 바와 같이 수원 지방의 경우 평균적으로 PM 공식이 FMP 공식보다 약 86% 더 작게 산정되는 것으로 나타났다.

공기동역학 (Aerodynamics) 항의 경우, 증기압이 단위의 차이로 인하여 산술적으로 FMP 공식이 10배 정도 큰 값을 나타나게 된다. 반면에 PM 공식의 경우 온도에 의한 가중치 식에 의하여 평균적으로 316%, 풍속함수가 아닌 풍속값을 이용함으로써 평균적으로 214% 정도 크게 산정된다. 증기압

곡선의 기울기와 건습계 상수로 이루어지는 가중치 부분에서는 86% 정도로 낮게 산정되었다. 따라서 두 항에서 모두 PM이 공식 FMP 공식보다 더 작게 산정되는 것을 알 수 있다.

### 3. 작물계수 산정 - 이양재배

1982년부터 1986년까지 5년 동안 전국 9개 지역을 대상으로 이루어진 작물 소비수량 산정방법연구 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, 순별에 따른 작물계수를 제시하였는데 본 연구에서는 이양 후 경

Table 5 Comparison of terms in PET estimation methods at Suwon

Method	Penman-Monteith				FAO Modified Penman			
	Term	Max.	Min.	Avg.	Term	Max.	Min.	Avg.
Adjustment factor	-	-			C	= 1		
Energy	constant	0.408			-	-		
	$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	0.761 (0.95)	0.102 (0.59)	0.491 (0.86)	$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$	0.797 (1.0)	0.172 (1.0)	0.569 (1.0)
	$R_n^{11}$	2.45 (MJ/m <sup>2</sup> day)			$R_n$	1.0 (mm/day)		
	G	zero in daily PET			-	-		
Aero-dynamics	$\frac{\gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	0.754 (0.91)	0.181 (0.89)	0.369 (0.86)	$\frac{\gamma}{\Delta + \gamma}$	0.828 (1.0)	0.203 (1.0)	0.431 (1.0)
	900/(T + 273)	3.52	2.95	3.16	-	-		
	$u_2$	5.11 (3.45)	0.07 (0.24)	1.16 (2.14)	$f(u)$	1.482 (1.0)	0.286 (1.0)	0.543 (1.0)
	$e_s - e_a^{21}$	1.0 (kPa)			$e_s - e_a$	10.0 (mb)		

1). 2) difference of convert unit, ( ) : relative ratio between term

Table 6 Estimated crop coefficients of transplanted paddy rice

Method	Days													Avg.
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120		
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	
FMP	0.65	0.80	0.90	0.98	1.09	1.25	1.30	1.35	1.24	1.22	1.06	0.83	1.07	

과 일수에 따라 10일 단위로 나누어 전국 9개 지역을 평균하여 하나의 작물 계수를 산정하였다. 그 결과는 Fig. 2~3, Table 6과 같다. 새롭게 산정된 결과를 살펴보면 PM 공식으로 산정된 평균 작물 계수는 1.27로 FMP 공식으로 산정된 평균 작물 계수가 1.07로 더 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 잠재증발산량이 PM 공식으로 산정한 방법이 더 작게 나오기 때문인 것으로 판단된다. 지역별로 살펴보면, PM 공식과 FMP 공식 모두 대전 지역이 각각 평균 1.59, 1.35로 가장 큰 값을, 서울 지역이 각각 평균 0.87, 0.71로 가장 작은 값을 나타내었다. 또한 가장 큰 작물계수를 나타낸 시기는 두 공식 모두 이양 후 80일로 1.58과 1.35로 각각 나타났다.

#### 4. 작물계수의 산정 - 담수직파재배

1995년부터 1997년까지 3년 동안 수원과 대구 2개 지역을 대상으로 이루어진 영농 방식 변화에 따른 산정방법연구 중 일부분으로 중부 지역과 남부 지역의 작물계수 산정이 포함되었는데, 이를 위하여 이루어진 직파 재배에 따른 논벼의 증발산량 실측치와 해당 3년간의 PM 공식으로 산정된 잠재 증발산량을 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 3개년 동안 나온 결과를 평균하여 최종적으로 직파재배에 따른 작물계수를 산정하였는데 기존 연구에서는 지역별, 순별에 따른 작물계수를 제시하였는데 본 연구에서는 파종



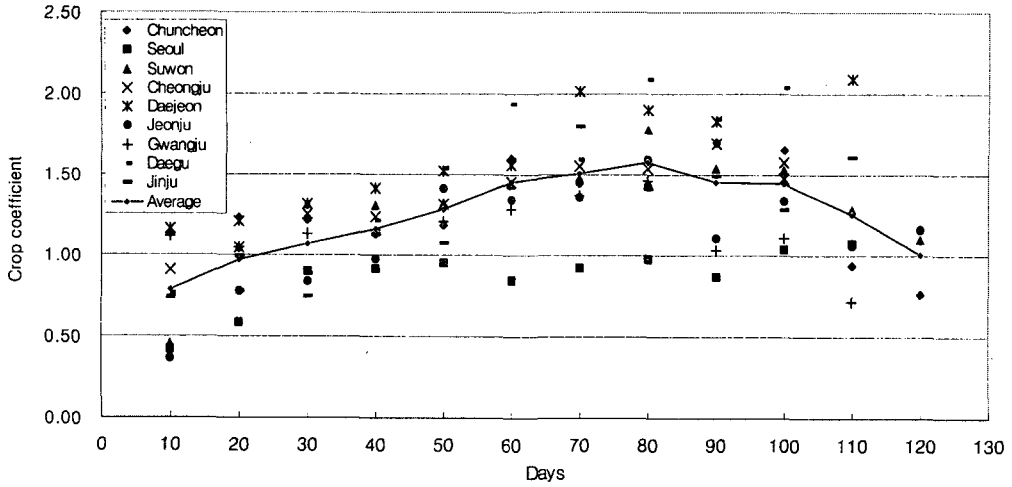


Fig. 2 Distribution of crop coefficients of transplanted paddy rice for Penman-Monteith Method.

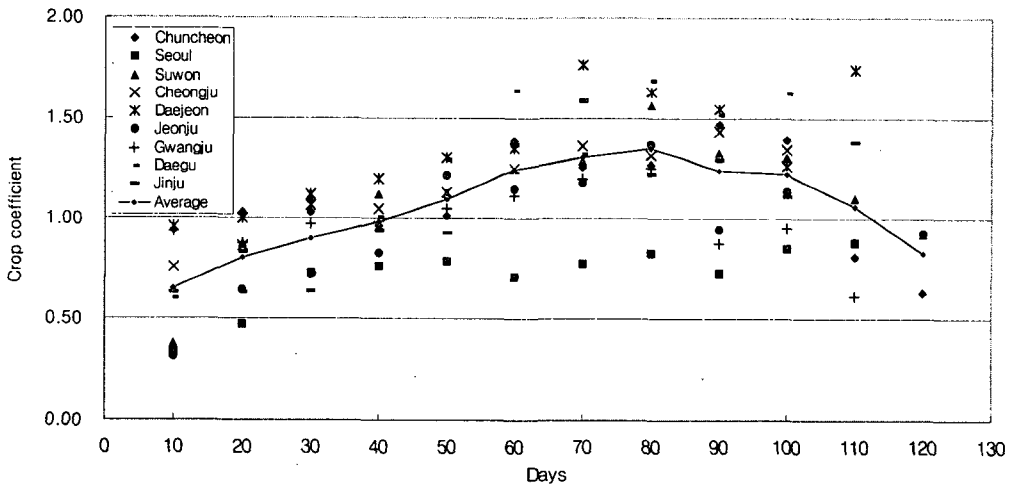


Fig. 3 Distribution of crop coefficients of transplanted paddy rice for FAO Modified Penman Method.

후 경과 일수에 따라 10일 단위로 나누어 두 지역을 평균하여 하나의 작물 계수를 산정하였다. 그 결과는 Fig 4, Table 7과 같다. 산정된 결과를 살펴보면 직파 재배 방법의 경우도 이양 재배와 마찬가지로 PM 공식으로 산정된 평균 작물 계수는 1.33으로 FMP 공식으로 산정된 평균 작물 계수가 1.11보다 더 큰 값을 나타냈다. 지역별로 살펴보면 PM 공식과 FMP 공식 모두 대구 보다는 수원 지

역이 전반적으로 큰 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한 가장 큰 작물계수를 나타낸 시기는 두 공식 모두 이양 후 110일로 1.74와 1.58로 각각 나타났다.

#### IV. 결 론

우리나라 각 도를 대표할 수 있는 9개 지역을 선

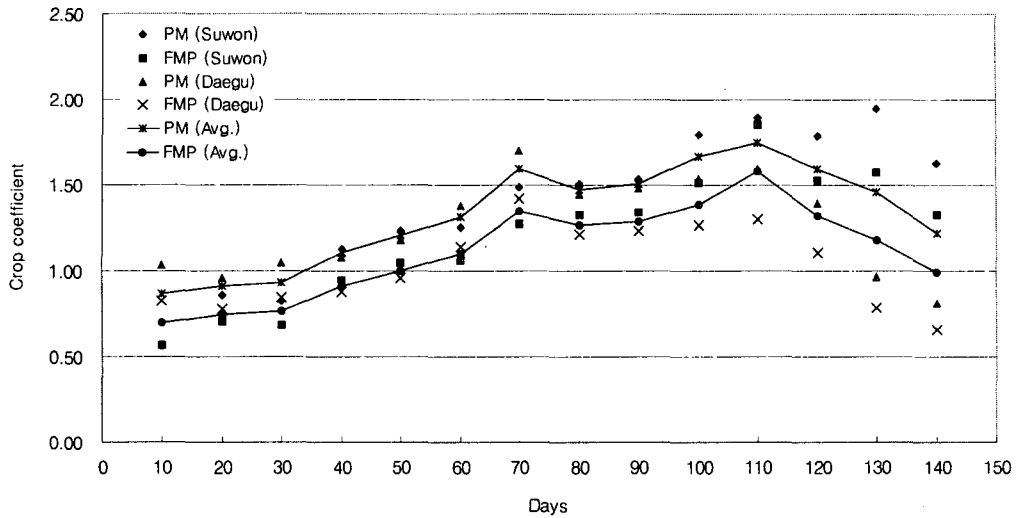


Fig. 4 Distribution of crop coefficients of flood-direct seeded paddy rice.

Table 7 Estimated crop coefficients of flood-direct seeded paddy rice

Method \ Days	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	Avg.
PM	0.87	0.91	0.93	1.10	1.21	1.31	1.59	1.48	1.51	1.67	1.74	1.59	1.46	1.22	1.33
FMP	0.70	0.74	0.76	0.92	1.00	1.10	1.35	1.27	1.29	1.39	1.58	1.32	1.18	0.99	1.11

정하고 이 지역에 대한 지난 30년간의 잠재증발산량을 FMP 공식과 PM 공식을 이용하여 산정한 후, 그 차이에 대하여 고찰한 결과 모든 기간 동안에 걸쳐 FMP 공식으로 산정된 결과가 PM 공식으로 산정된 결과보다 큰 값을 보였다. 가장 큰 차이는 습도가 낮고, 비교적 온도가 높은 4~6월에, 가장 작은 차이는 기온이 제일 낮은 12월과 1월에 나타났다. FMP 공식은 관개기 기간 동안에는 평균적으로 0.73 mm(17.2%)정도 크게 산정되었다.

또한 1980년대에 이루어진 논벼의 작물소비수량 산정연구와 1990년대에 이루어진 직파재배에 따른 소비수량 산정연구에 활용된 실제 소비수량의 실측 자료를 근거로 하여 FMP 공식과 PM 공식으로 부터 각각 작물계수를 산정하고 비교 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 두 공식을 이용하여 작물 계수를 산정하였는

데, 지역별, 순별 작물계수를 산정했던 기존 연구와 달리 이앙 또는 파종 후 경과 일수를 기준으로 9개 지역의 작물계수를 이용하여 하나의 작물 계수를 산정하였다.

2. 이앙 재배의 경우, FMP 공식으로 산정된 작물 계수가 PM 공식으로 산정된 값보다 더 작은 값을 보였다. PM 공식의 경우에는 0.78~1.58의 범위를 나타내었고, 평균적으로 1.27로 산정되었고, FMP 공식의 경우에는 0.65~1.35의 범위를 나타내었고, 평균적으로 1.07로 산정되었다. 두 공식 모두 이앙 후 80일째에 가장 큰 값을 나타내었다.

3. 답수 직파 재배의 경우, PM 공식의 경우에는 0.87~1.74 범위를 나타내었고, 평균적으로 1.33로 산정되었고, FMP 공식의 경우에는 0.70~1.58의 범위를 나타내었고, 평균적으로 1.11로 산정되었다. 두 공식 모두 파종 후 110일째에 가장 큰 값을

을 나타내었다. 이양 재배법에서 산정된 결과보다 더 큰 작물 계수가 산정되었다. 이는 영농 방식에 변화에 따른 차이 때문인 것으로 사료된다.

### References

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. (in Korean)
3. Choi, J. Y. 1996. Development of a cell-based long-term hydrologic model using geographic information system, Ph.D Thesis, Seoul National Univ. (in Korean)
4. Chung, H. W. 1987. A Study on consumptive use of paddy field, Ministry of Agricultural & Fisheries, Agricultural Development Corporation (in Korean)
5. Chung, H. W. 1990. A Study on consumptive use of upland crops, Ministry of Agricultural & Fisheries, Agricultural Development Corporation (in Korean)
6. 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
7. 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
8. 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 (in Korean)
9. 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 (in Korean)
10. Park, K. W. 2004. Development of a simulation model for automatic irrigation management (SIMA) in paddy land, Ph.D Thesis, Seoul National Univ. (in Korean)