



## 수정 Penman 및 Penman-Monteith 논벼 증발산량 방법 적용에 따른 농업용 저수지 용수공급능 분석

### Analysis of Water Supply Reliability of Agricultural Reservoirs Based on Application of Modified Penman and Penman-Monteith Methods

조건호<sup>a</sup> · 한경화<sup>b</sup> · 최경숙<sup>c, †</sup>

Gun Ho Cho · Kyung Hwa Han · Kyung Sook Choi

#### ABSTRACT

This study aims to analyze the influences of applications of two different evapotranspiration (ET) estimation methods on the irrigation water requirements (IWR) for paddy rice and water supply reliability of agricultural reservoirs. The modified Penman (MP), traditional method, and the Penman-Monteith (PM), the new adopted method, were applied on 149 reservoirs located in Honam province for this study. The weather data was used from 1987 to 2016, and analysed the trends of temperature and rainfall during rice growing season between past and current 10 years respectively. The increased average temperature and rainfall were observed from the current 10 years compared to the past years. This phenomena impacts on the results of ET and IWR estimations with decreased IWR obtained from high rainfall regions and increased ET obtained high temperature regions. For the comparisons of application results of two ET approaches, the PM method showed lower ET and IWR, and hence more reliable storage capacity of the reservoirs respect to water supply to paddy fields. The results also showed that the influences of different ET methods applications on the water supply reliability of reservoirs are negligible for the cases of over 3.7 watershed ratio and 670 mm unit reservoir storage, while significant variations of the results obtain from the applications between two ET approaches for the opposite cases. Further studies are necessary to consider various field conditions for practical applications of the PM method estimating ET in the fields of paddy farming.

**Keywords:** Evapotranspiration; modified Penman; Penman-Monteith; crop coefficient; rice water demand; agricultural reservoir; reliability

#### 1. 서 론

농업용 저수지의 저수용량 결정에 기준이 되는 수해면적의 작물 관개용수량 산정은 논벼의 경우 국내에서는 수정 Penman (Modified Penman: MP) 방법에 의한 증발산량을 산정하여 구하고 있다 (KRC, 1995). 그러나 세계적인 추세는 유엔 식량농업기구 (FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)에서 추천하는 Penman-Monteith (PM)

방법을 사용하고 있다. FAO에 의하면, MP 방법은 건조한 지역에서 관측 값과 비교할 경우 증발산량이 20% 정도 과다 측정되는 경향을 나타내는 것으로 조사되었다 (Allen et al., 1989). 이 후 FAO에서는 기존에 사용되던 증발산량 산정방법을 검정한 후 그 중 건조 및 습윤 기후에서 비교적 정확하고 일정한 경향을 나타내는 PM 방법을 벼를 포함한 모든 작물의 증발산량 산정에 사용할 것을 추천하였다 (Allen et al., 1998).

국내에서도 논벼 증발산량 산정에 PM 방법을 적용한 연구들이 진행되었다. Chung (1997)은 3년간 대구지역에서 직파 재배에 의한 논벼 증발산량 실측을 통해 PM 방법을 포함한 9가지 증발산량 산정방법을 이용하여 작물계수를 산정하였으며, Jung et al. (2003)은 2년간 청주 지역에서 이앙재배에 의한 논벼 증발산량 실측을 통해 PM 방법을 기반으로 작물계수를 산정하였다. Yoo et al. (2006)은 전국 9개 시험포장에서 5년간 이앙재배에 의한 논벼 증발산량을 실측한 실험 (KRC, 1986)과 3년간 수원과 대구 지역에서 직파재배에 의한 논벼 증발산량을 실측한 실험 (KRC, 1997)을 기반으로 MP 및 PM 방법에 의한 증발산량을 산정하고 작물계수를 제안하여 두 방법의 결과들을 비교분석하였다. 또한 Yoo et al. (2012)은 PM 방법에 의한 작물계수 (Yoo et al., 2006)를 적용하여 미래

<sup>a</sup> MS Student, Department of Agricultural Civil Engineering, Kyungpook National University, E-mail: wshh1212@naver.com

<sup>b</sup> Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, E-mail: bearthink@korea.kr

<sup>c</sup> Professor, Department of Agricultural Civil Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology, Kyungpook National University, E-mail: ks.choi@knu.ac.kr

† **Corresponding author**

Tel.: +82-53-950-5731 Fax: +82-53-950-6752

E-mail: ks.choi@knu.ac.kr

Received: August 19, 2019

Revised: October 30, 2019

Accepted: October 30, 2019

기후변화에 따른 10년 빈도 논용수 수요량을 산정하였다.

그러나 기존에 수행된 연구들은 최근의 기후변화 조건을 반영하지 못하는 한계를 가지며, 소형 라이시미터를 이용한 증발산량 실측은 감수심 측정방법으로서 최근에 많이 활용되고 있는 토양내 물과 용질의 이동을 무계변화로 직접 측정할 수 있는 증량식 라이시미터 보다는 정확도가 낮은 경향이 있다. 따라서 증량식 라이시미터의 활용이 점차 확대되고 있으며, 이를 이용한 증발산량 측정 연구가 활발히 진행되고 있다 (Young et al., 1997; Yang et al., 2000; López-Urrea et al., 2006; Meißner et al., 2010). 이러한 추세에 따라 국내 농촌진흥청에서도 전주 지역을 토대로 최근 4년간 벼와 노지 발작물을 대상으로 증량식 라이시미터를 이용한 증발산량 현장실측을 수행하였으며, 이를 통해 PM 방법에 의한 생육단계별 작물계수를 새롭게 제안하였다 (RDA, 2019).

한편, 증발산량의 산정방법은 논벼 생육에 필요한 소비수량 산정 및 용수공급량 산정에 영향을 끼치며, 궁극적으로는 논 필지의 용수수요를 충족시킬 수 있는 물 공급의 안정성을 나타내는 농업용 저수지의 용수공급능 평가에도 영향을 미친다. 농업용 저수지의 용수공급능은 저수지에서 수해구역의 논벼 관개용수량을 공급할 수 있는 확실성을 빈도개념으로 나타내며, 물 공급의 안정성에 대한 평가는 이수분야 설계기준인 10년 한발빈도를 기준으로 한다. 즉, 10년 빈도의 가뭄에도 물 부족 없이 용수공급이 가능한 저수지 유효저수량을 기준으로 용수공급능력의 안정성을 평가한다.

따라서 본 연구에서는 논벼 관개용수량 산정에 있어 최근 농촌진흥청에서 제안한 PM 방법에 의한 작물계수를 적용하여 기존의 MP 방법에 의한 결과와 비교 분석하고, 논벼 증발산량 산정방법에 따른 저수지 이수분야 용수공급 안정성에 미치는 영향에 대해 평가해 보고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 논벼 증발산량 산정 방법 및 작물계수 적용

본 연구에서 논벼 증발산량 산정을 위해 적용한 잠재증발산량 산정방법은 식 (1)과 식 (2)와 같다. 먼저 식 (1)에 나타난

MP 방법에 의한 잠재증발산량 공식은 열수지법과 공기역학적 방법인 Dalton법을 조합하여 제시된 것으로, 습윤 지대에서 기온, 습도, 일조시간, 증기압 및 풍속 등의 기상요소를 테이터로 잠재증발산량을 구하는데 적합한 방법으로 알려져 있다 (Doorenbos and Pruitt, 1977). 식 (2)에 나타난 PM 방법에 의한 잠재증발산량 공식은 Penman 증발산량 산정방법 (Penman, 1948)에 공기역학적 저항과 기공저항 혹은 균락저항의 개념을 적용하여 제시되었다 (Allen et al., 1998). 식 (1)과 식 (2)에 의해 산정된 잠재증발산량은 논벼 작물계수와 곱하여 논벼 증발산량을 산정하며, 이는 식 (3)과 같다.

$$ET_o = C \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(U_2)(e_a - e_d) \right] \quad (1)$$

여기서,  $ET_o$ : 잠재증발산량 (mm/d), C: 주·야간의 기후차에 의한 보정계수,  $\Delta$ : 온도~포화증기압곡선의 기울기 (mb/°C),  $\gamma$ : 건습계 정수,  $R_n$ : 순복사량 (mm/d),  $f(U_2) = 0.27(1 + U_2/100)$  풍속함수,  $U_2$ : 2 m 높이에서 풍속 (km/day),  $e_a$ : 포화수증기압 (mb),  $e_d$ : 실제수증기압 (mb)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{890\gamma U_2(e_a - e_d)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.339 U_2)} \quad (2)$$

여기서,  $ET_o$ : 잠재증발산량 (mm/d),  $\Delta$ : 포화 수증기압곡선 경사 (kPa/°C),  $\gamma$ : 건습계 상수 (kPa/°C),  $R_n$ : 순복사량 (MJ/m<sup>2</sup>/d), G: 토양 열 유속 밀도 (MJ/m<sup>2</sup>/day<sup>-1</sup>),  $U_2$ : 2 m 높이에서의 풍속 (m/s),  $e_a$ : 포화수증기압 (kPa),  $e_d$ : 실제증기압 (kPa), T: 2 m 높이에서의 일평균기온 (°C)

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (3)$$

여기서,  $ET_c$ : 논벼 증발산량 (mm),  $ET_o$ : 잠재증발산량 (mm),  $K_c$ : 논벼 작물계수

본 연구에서는 논벼 증발산량 산정을 위해 적용한 작물계

Table 1 Rice crop coefficients of the MP method (KRC, 1997) and the PM method (RDA, 2019)

ET Method	April			May			Jun		
	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late
MP	-	-	0.56	0.56	0.56	0.56	0.75	0.95	1.06
PM	-	-	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
	July			August			September		
	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late
MP	1.09	1.17	1.39	1.53	1.58	1.47	1.42	1.32	-
PM	0.97	1.15	1.15	1.15	1.34	1.34	1.34	1.34	-

수는 MP 방법의 경우 기존에 활용되어온 계수 (KRC, 1997)를 적용하였으며, PM 방법의 경우에는 앞서 언급한 최근 농촌진흥청이 제안한 계수 (RDA, 2019)를 적용하였다. Table 1은 논벼 증발산량 산정에 적용한 두 방법의 작물계수를 각각 나타낸다. 작물계수의 평균치는 MP 방법의 경우 1.06, PM 방법의 경우 1.1로 나타나, 평균치 기준으로 PM 방법의 작물계수가 MP 방법 보다 조금 더 높은 것으로 나타났다.

## 2. 논벼 관개용수량 산정

농업용 저수지에서 공급해야할 논벼 관개용수량은 앞 절에서 언급한 논벼 증발산량에 필지단위의 논토양 침투량과 생육기별 물 관리 방법을 고려한 재배관리용수량에서 유효우량을 배제한 값에 용수공급과정에서 발생하는 수로손실 등을 고려한 시설관리용수량을 합한 용수량을 기준으로 한다 (MAF, 1982). 식 (4)는 논벼 관개용수량 산정공식을 나타낸다. 여기서, 필지단위의 침투량과 재배관리용수량은 농업생산기반정비사업계획설계기준 관개편 (MAF, 1998)에서 제안한 평균 침투량 5 mm/day과 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구 (KRC, 1995)에서 제안한 140 mm를 각각 적용하였다. 또한 시설관리용수량은 일반적인 송수손실률을 의미하며, 농업생산기반정비사업계획설계기준 관개편 (MAF, 1998)에서 제안한 콘크리트 수로 5%~7%, 토공 수로 10%~25%의 손실률을 적용하였다.

$$IWR = (ET_c + I + IR - ER) \div (1 - \frac{L}{100}) \quad (4)$$

여기서, IWR (Irrigation Water Requirement): 관개용수량 (mm),  $ET_c$ : 논벼 증발산량 (mm), I: 침투량 (mm), IR: 재배관리용수량 (mm), ER: 유효우량 (mm), L: 시설관리용수 (%)

본 연구에서는 작물이 이용 가능한 유효우량 산정은 식 (5)와 식 (6)에 나타난 일별담수심법을 이용하여 산정하였다. 여기서 최대담수심은 80 mm, 최소담수심은 20 mm로 적용하였다 (KRC, 1995).

$$ER_t = RF_t \text{ for } SR_t = 0 \quad (5)$$

$$ER_t = RF_t - SR_t \text{ for } SR_t > 0$$

$$PD_t = PD_{t-1} + IR_t + RF_t - ET_{et} - I_t - SR_t \quad (6)$$

여기서, ER: 유효우량 (mm), RF: 강우량 (mm), SR: 논에서 유출량 (mm), PD: 담수심 (mm), IR: 재배관리용수량 (mm),  $ET_c$ : 논벼 증발산량 (mm), I: 침투량 (mm), t: 당일 (day), t-1: 전일 (day)

본 연구에서는 농업용 저수지 용수공급능 산정 결과에 미치는 증발산량 산정인자의 민감도를 파악하기 위해 용수공급능 산정에 영향을 미치는 용수량 산정 인자들의 민감도를 분석해 보았다. 그 결과, 관개면적, 증발산량, 침투량, 담수심, 수로손실 순으로 민감한 것으로 나타났으며, 이중 관개면적은 실질적으로 고정값이므로, 이를 제외하면 증발산량 산정인자가 용수공급능 산정에 미치는 영향이 타 인자에 비해 매우 높은 것으로 나타났다.

## 3. 농업용 저수지 용수공급능 산정

저수지 용수공급능은 저수지의 유효저수량과 수혜구역 논벼 관개용수량에 근거한 연 최대 필요저수량과의 관계를 나타내는 것으로, 연 최대 필요저수량은 한국농어촌공사 (KRC, 1995)에서 제안한 식 (7)을 활용하여 산정하였다.

여기서, 저수지 유입량은 탱크 모형을 이용하며, 방류량은 수혜구역에서의 논벼 관개용수량을 의미한다. 지하수 유입량, 지중침투량 및 제방침투량의 경우에는 실측이 거의 불가능하므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 연 최대 필요저수량의 확률빈도 분석은 식 (8)의 Gumbel-Chow 방법 (Chow, 1951)을 적용하였다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t + U_t + P_t - (R_t + O_t + E_t + G_t + D_t) \quad (7)$$

$$P_t = C \times RF_t \times A_f, \quad E_t = C \times A_t \times E_v \times P_c,$$

$$O_t = S_t - S_f \text{ for } S_t > S_f$$

여기서, S: 저수량 ( $m^3$ ), I: 유입량 ( $m^3$ ), U: 지하수 유입량 ( $m^3$ ), P: 수면 강우량 ( $m^3$ ), R: 방류량 ( $m^3$ ), O: 여수토 월류량 ( $m^3$ ), E: 수면 증발량 ( $m^3$ ), G: 지중침투량 ( $m^3$ ), D: 제방침투량 ( $m^3$ ), C: 단위환산계수,  $RF$ : 강우량 (mm),  $A_f$ : 저수지 만수면적 ( $m^2$ ), A: 저수지 수면적 ( $m^2$ ),  $E_v$ : 측후소 증발량 (mm),  $P_c$ : Pan 계수,  $S_f$ : 저수지 만수량 ( $m^3$ ), t: 당일 (day), t-1: 전일 (day)

$$X_t = X + k \times \delta_{n-1} \quad (8)$$

여기서,  $X_t$ : 재현기간 t년의 기대치, X: 표본의 평균치,  $\kappa$ : 빈도계수,  $\delta_{n-1}$ : 표본의 표준편차 (여기서, 표본은 빈도분석 기간에 대한 연 최대 필요저수량)

## 4. 연구 대상지구

본 연구의 대상지구는 농촌진흥청에서 제안한 PM 방법에 의한 작물계수가 전주지역 일대를 중심으로 개발되었으

므로, 이 지역의 기상여건과 벼의 생육여건이 유사한 호남지역을 대상으로 한국농어촌공사 관할지역 중 100만톤 이상의 주수원공 저수지 149개 지구로 선정하였다. 이 중 전북지역은 65개 지구, 전남지역은 84개 지구가 각각 포함된다. Fig 1은 본 연구에서 선정한 대상지구와 관련지역 기상관측소의 위치를 나타낸다. 본 연구에서 증발산량 산정에 필요한 기상자료는 1987년부터 2016년까지 최근 30년 자료를 활용하였다.

Table 2는 연구 대상지구에 대한 유역배율 및 단위저수량에 대한 분포를 나타낸다. 전체 저수지의 유역배율은 0.18~28의 범위로, 평균 3.54의 유역배율을 나타내었으며, 전북지역은 1.7~28의 범위로, 평균 5.06의 유역배율을, 전남지역은 0.18~7.5 범위로, 평균 3.09의 유역배율을 나타내었다. 또한 대상지구 전체 저수지의 단위저수량은 46.9 mm~27,628.3 mm의 범위를 나타내었으며, 평균 단위저수량은 1,269.7 mm로 나타났다. 전북지역은 158.7 mm~27,628.3 mm의 범위로, 평균 1,702 mm의 단위저수량을, 전남지역은 46.9 mm~11,090 mm의 범위로, 평균 1,115 mm의 단위저수량을 나타내

어, 전남지역보다는 전북지역이 전체적으로 단위면적당 저수능력이 높게 나타났다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 기상 특성

본 연구 대상지구의 기상 특성을 분석한 결과는 Table 3과 같다. 최근 30년간 호남지역의 벼 생육기간 평균 기온은 22.6°C, 강우량은 943 mm로 나타났으며, 전남지역이 전북지역에 비해 평균적으로 기온은 0.2°C, 강우량은 30 mm정도 높게 나타났다. 10년 단위의 벼 생육기간 평균기온을 비교한 경우, 과거 10년 (1987년~1996년)에 비해 최근 10년 (2007년~2016년)간의 기온이 평균 0.4°C로 3.4% 증가했으며, 전남지역은 0.5°C, 전북지역은 0.3°C가 각각 증가 하였다. 그러나 목포지역은 대상지구 중 유일하게 과거 10년에 비해 최근 10년의 기온이 감소한 경향을 나타내었다. 또한 10년 단위의 벼 생육기간 평

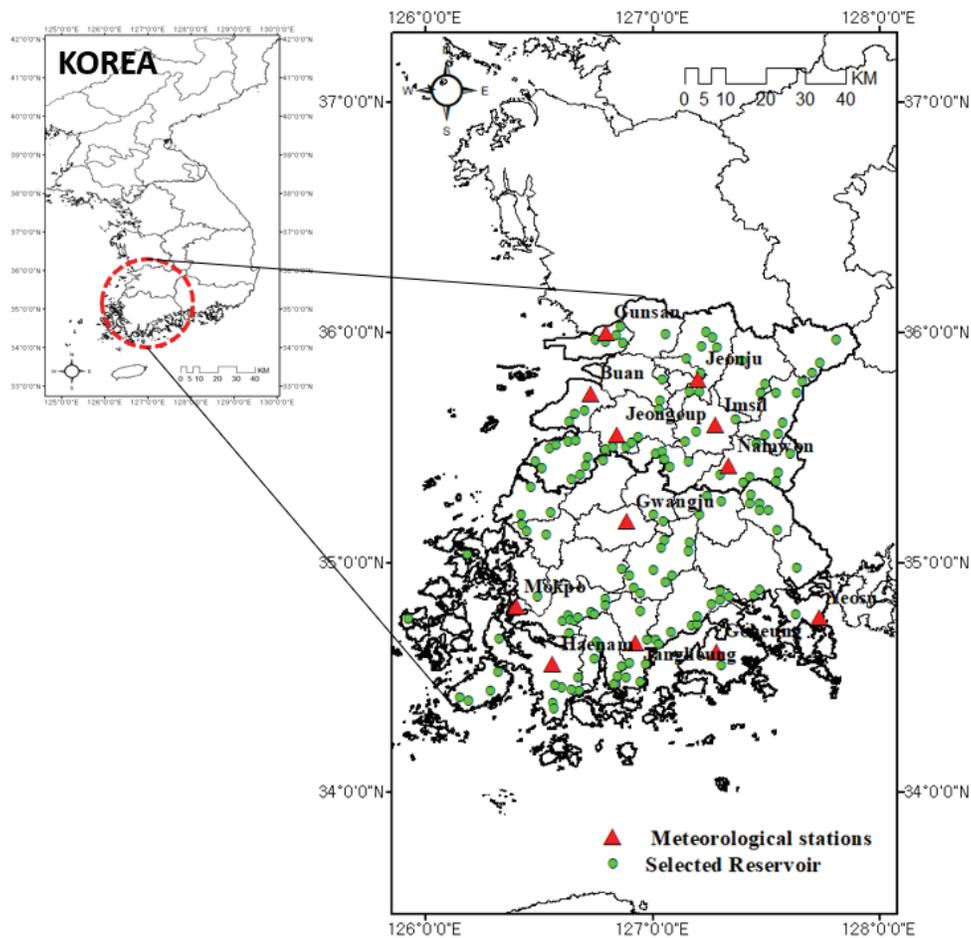


Fig. 1 Locations of the selected agricultural reservoirs and meteorological stations

**Table 2** Characteristics of the selected agricultural reservoirs

Region	KRC branch	Number of reservoirs	Average watershed ratio	Average unit water storage (mm)	Meteorological station
Jeollabuk -do	Gunsan	5	1.7	464.7	Gunsan
	Iksan	1	1.6	362	
	Gokseong	4	4.05	683.2	Namwon
	Gurye	5	7.2	583.3	
	Namwon	6	2.5	827.1	
	Sunchang	3	3.6	668.8	
	Buan	2	2.3	648.01	Buan
	Dongjin	2	2.3	416.1	Jeonju
	Jeonju	8	6.3	4,011.9	
	Gochang	10	2.81	523.6	Jeongeup
	Jangseong	2	5.3	5,413.9	
	Jeongeup	7	2.56	825.1	
Mujinjang	10	5.82	1,982.87	Imsil	
Sub-total		65			
Jeollanam -do	Yeosu	6	3.62	1,598.9	Yeosu
	Goheung	9	4.56	862.9	Goheung
	Gangjin	9	2.6	852.9	Haenam
	Yeongam	7	3.2	886.2	
	Jindo	5	2.9	986.0	
	Haenam	9	3.2	3,419.8	
	Naju	2	1.6	1,069.2	Gwangju
	Damyang	2	2.5	634.2	
	Yeonggwang	5	2.0	620.4	
	Hampyeong	2	2.5	1,114.6	
	Bosung	10	2.6	780	Jangheung
	Jangheung	6	3	1,006.5	
	Hwasun	8	3.5	884.2	
	Muan	4	4.4	640.3	
Sub-total		84			
Total		149			

**Table 3** Meteorological characteristics of the study areas

Region	Temperature(°C)			Precipitation(mm)			Meteorological station
	Growing season Avg.	Annual Avg.	%*	Growing season	Annual	%*	
Jeollabuk-do	22.2	13	170.7	888.3	1,244.5	71.4	Gunsan
	22.3	12.4	179.8	988.7	1,347.7	73.4	Namwon
	22.6	12.9	175.1	855.5	1,219.8	70.1	Buan
	23.3	13.6	171.3	928.3	1,292.5	71.8	Jeonju
	23.3	13.3	175.1	926.1	1,323.5	70	Jeongeup
	21.4	11.2	191	984.6	1,351.9	72.8	Imsil
Sub-total	22.5	12.7	177.1	928.5	1,296.6	71.5	
Jeollanam-do	23.5	14.5	162	1,017.6	1,442.7	70.5	Yeosu
	22.3	13.7	162.7	994.2	1,438.4	69.1	Goheung
	22.4	13.5	165.9	889.1	1,298.7	68.5	Haenam
	23.5	14	167.8	1,004.6	1,396.8	71.9	Gwangju
	22.4	13.2	169.6	1,054.6	1,482.7	71.1	Jangheung
	22.4	14	160	794.7	1,159.9	68.5	Mokpo
Sub-total	22.7	13.8	164.4	959.1	1,369.8	69.9	
Total	22.6	13.2	171.2	943.8	1,333.2	70.7	

\*: Ratio between growing season and annual precipitation and temperatures

균 강우량을 비교한 경우, 과거 10년에 비해 최근 10년간의 강우량이 평균 30.5 mm로 11.1% 증가했으며, 전남지역은 평균 9.2%, 전북지역은 평균 12.8% 증가하였다. 일반적으로 기온의 증가는 벼의 증발산량 증가를 야기해 관개용수량을 증가시키는 요인이 되며, 반대로 강우량의 증가는 논벼의 관개용수량을 감소시키는 역할을 하였다.

## 2. 논벼 증발산량

Fig. 2는 MP 및 PM 방법 적용에 따른 호남 지역별 잠재증발산량을 산정한 결과를 나타낸다. MP 방법에 따라 산정된 잠재증발산량은 606 mm~728 mm의 범위로, 평균 653 mm를 나타내었으며, PM 방법은 505 mm~587 mm의 범위로, 평균 538 mm를 나타내었다. 따라서 MP 방법에 비해 PM 방법이 16.6%~19.3% 범위로 평균 17.6% 낮게 산정되는 경향을 나타내었다. 기존의 국내 증발산량에 관한 연구 (Yoo et al., 2006)에서와 같이 PM 방법이 MP 방법에 비해 평균적으로 낮게 산정되는 유사한 결과를 보였다.

지역별로는 벼 생육기간동안 평균기온이 14.5°C로 가장 높은 여수지역의 증발산량이 MP 및 PM 방법 모두 대상지역 중 가장 높은 값을 보였으며, 도별로도 평균기온이 대체적으로 높았던 전남지역이 전북지역에 비해 MP 및 PM 방법 적용에 따른 잠재증발산량이 1%와 4.5% 정도로 높은 경향을 나타내었다. 과거 10년과 최근 10년간의 평균 잠재증발산량은 MP 방법을 적용할 경우 최근 1.8% 증가했으며, PM 방법을 적용할 경우에서도 최근 1.1% 증가한 것으로 나타났다. 그러나

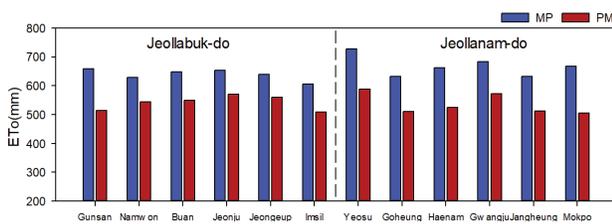


Fig. 2 Comparison of ET<sub>c</sub> computed by using MP and PM methods during the rice-growing season

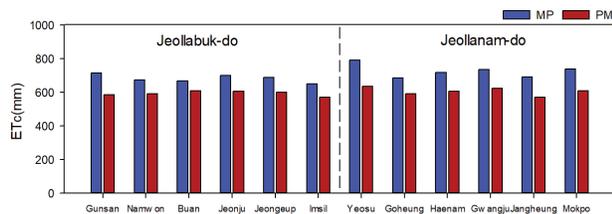


Fig. 3 Comparison of ET<sub>c</sub> computed by using MP and PM methods during the rice-growing season

최근 평균 기온이 감소한 목포지역은 잠재증발산량이 MP 방법과 PM 방법 모두 과거에 비해 13% 및 12%로 각각 감소하여 나타났다.

작물계수를 적용한 논벼 증발산량의 산정 결과는 Fig. 3에 나타내었다. MP 방법을 적용한 논벼 증발산량은 650 mm~790 mm의 범위로, 평균 702 mm를 나타내었으며, PM 방법을 적용한 경우에는 569 mm~635 mm의 범위로, 평균 599 mm로 나타내어 PM 방법이 MP 방법보다 12.4%~19.6% 범위로, 평균 14.6% 낮게 산정되는 경향을 나타내었다.

또한 논벼 증발산량 대비 잠재증발산량이 차지하는 비율을 파악한 결과, MP 방법은 평균 92.5%로 나타났으며, PM 방법은 평균 88.5%를 나타냈다. 두 방법의 작물계수에 의한 논벼 증발산량 대비 잠재증발산량이 차지하는 비율을 비교하면, PM 방법을 적용한 경우가 MP 방법을 적용한 경우보다 4% 크며, 이는 평균적으로 PM 방법의 작물계수가 MP 방법의 작물계수 보다 상대적으로 크기 때문에 나타난 결과로 파악된다. 또한 두 방법 적용에 의한 잠재증발산량 차이가 작물계수 적용에 의한 논벼 증발산량의 차이 보다 훨씬 크기 때문에, 논벼 증발산량은 작물계수의 영향 보다는 잠재증발산량 산정 방법 차이에 의한 영향을 더 크게 받는 것으로 파악되었다. 과거 10년 대비 최근 10년간의 평균 논벼 증발산량의 비교에서는 기온의 증가에 따라 잠재증발산량이 증가하는 경우와 유사하게 논벼 증발산량도 증가하는 경향을 나타내었다.

## 3. 논벼 관개용수량

Fig. 4는 MP 및 PM 방법에 따른 대상지구의 지역별 논벼 관개용수량을 산정한 결과를 나타낸다. 논벼 관개용수량은 MP 방법을 적용한 경우 626 mm~792 mm 범위로, 평균 702 mm를 나타내었으며, PM 방법은 516 mm~634 mm 범위로, 평균 571 mm를 나타내어, MP 방법에 비해 PM 방법에서 17.5%~20.0% 범위로 평균 18.6% 낮게 산정되었다.

과거 10년과 최근 10년간의 비교에서, 기온에만 영향을 받는 증발산량과는 달리, 관개용수량은 기온 및 강우량의 영향을 모두 받기 때문에 평균적으로 기온과 강우량은 증가하였으나

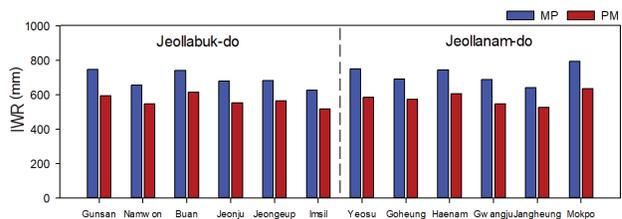


Fig. 4 Comparison of IWR based on MP and PM methods during the rice-growing season

관개용수량의 증가요인인 기온의 상승과 감소 요인이 되는 강우량의 상승이 서로 상쇄 작용하여 논벼 관개용수량은 거의 변화가 없었다. 지역별로는 기온의 증가가 크고 강우량의 증가가 작은 지역은 관개용수량이 대체적으로 감소하는 경향을 보였는데, 남원, 부안 등을 포함한 8개 지역이 여기에 속하며, 기온과 강우량이 평균 2.3%와 12%로 각각 증가함으로써 관개용수량이 평균 4.9% 감소한 경향을 나타내었다. 또한 기온의 증가가 작고 강우량의 증가가 큰 지역은 관개용수량이 대체적으로 증가하는 경향을 보였으며, 군산, 정읍 등을 포함하는 4개 지역이 여기에 속하며, 기온과 강우량이 평균 3.5%와 8.4%로 각각 증가함으로써 관개용수량이 평균 5.6% 증가하는 경향을 나타내었다.

30년간의 평균 기온은 비슷하나, 강우량의 차이를 나타낸 목포와 장흥지역의 경우에는 논벼 증발산량이 비슷하게 산정되었으나, 관개용수량은 강우량이 더 큰 장흥지역에서 더 낮게 산정되었다.

#### 4. 농업용 저수지 용수공급능 분석

본 연구에서 산정한 농업용 저수지 10년 한발빈도 연 최대 필요저수량은 MP 방법을 적용한 경우보다 PM 방법을 적용한 경우 6.4%~34.3%의 범위로 낮게 나타났으며, 평균적으로는 22.3% 정도 낮게 나타났다. MP 및 PM 방법에 의한 논벼 관개용수량을 기준으로 산정한 농업용 저수지의 용수공급능 결과는 Fig. 5와 같다. 두 방법 모두 농업용 저수지 용수공급능이 변화하는 경향은 앞 절에서 언급한 관개용수량 산정 결과와 비슷한 패턴을 보였다. 농업용 저수지 이수설계기준인 10년 한발빈도 이하의 저수지는 전체 대상지구 중 MP 방법 적용 시 20.8%에 해당하는 31개 지구, PM 방법 적용 시 15.4%에 해당하는 23개 지구가 각각 이에 속하여, PM 방법을 적용할 경우 전체 대상지구 중 5.4%에 해당하는 8개 지구가 추가적으로 10년 한발빈도 연 최대 필요저수량을 충족하는 것으로 나타났다. 도별로는 MP 및 PM 방법 적용에 따라 전북지역은 23% 및 20%에 해당하는 15개 및 13개 지구가 각각 10년 이하

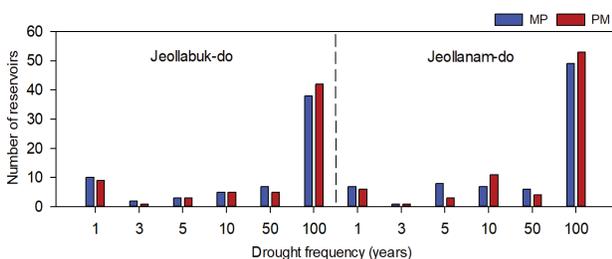


Fig. 5 Comparison of water supply reliability based on MP and PM methods during the rice-growing season

의 한발빈도를 나타내었으며, 전남지역은 19% 및 12%에 해당하는 16개 및 10개 지구가 각각 10년 이하의 한발빈도를 나타내어 용수공급능이 불안정한 지구로 나타났다.

MP 및 PM 방법에 따라 10년 한발빈도에 대한 관개용수량 대비 저수지 유효저수량의 부족량을 산정하여 지사별로 나타낸 결과는 Fig. 6과 같다. MP 및 PM 방법에 의해 산정된 유효저수량 대비 부족저수량은 전북지역의 경우 60.9백만<sup>3</sup> 및 38.1백만<sup>3</sup>로 각각 나타났으며, 전남지역의 경우 19.8백만<sup>3</sup> 및 13.4백만<sup>3</sup>로 각각 나타났다. 따라서 전체 호남지역의 10년 이하 한발빈도 기준 저수지의 부족저수량은 전북지역이 전남지역 보다 더 많은 것으로 나타났다.

다음은 MP 및 PM 방법별로 산정된 저수지 용수공급능과 유역배출 및 단위저수량과의 관계를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 7에 도시하였다. MP 및 PM 방법 모두 10년 이상의 한발빈도에 대해 용수공급능이 안정한 저수지들의 유역배출과 단위저수량은 3.7 혹은 690 mm 이상인 것으로 나타났다. 반면 두 방법 모두 이수 설계기준 이하의 낮은 용수공급능을 나타낸 경우는 유역배출이 1이하 이거나, 단위저수량이 250 mm 이하의 저수지들이었다. 유역배출이 1.8~4로서 단위저수량이 400 mm~700 mm 범위에 속하는 저수지들은 논벼 증발산량 산정방식을 MP 방법에서 PM 방법으로 전환할 경우 저수지 용수공급능이 안정한 범위에 속하였다. 따라서 논벼 증발산량 산정방법의 선정에 따라 농업용 저수지의 용수공급능 평가에도 영향을 미치게 되며, 특히 저수지 유역배출과 단위저수량 규모에 따라 미치는 영향이 다양하게 나타났다.

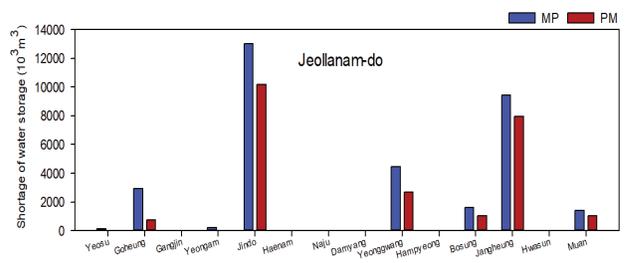
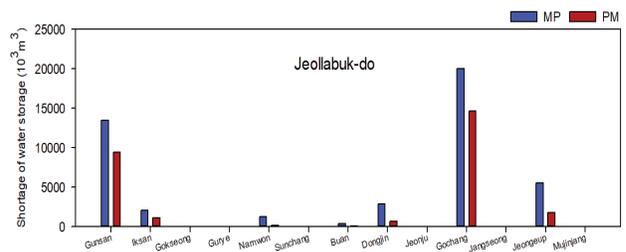


Fig. 6 Comparison of shortage of water storage capacity based on MP and PM methods during the rice-growing season

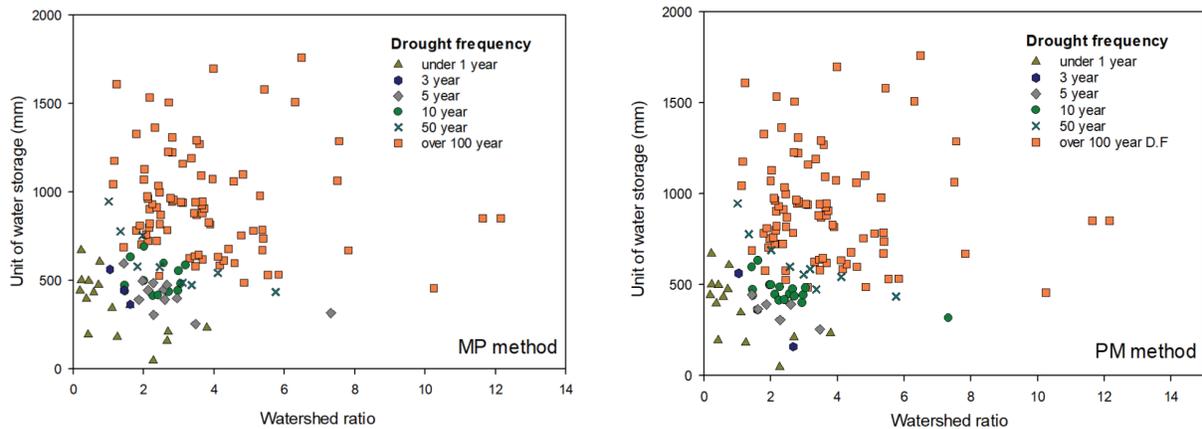


Fig. 7 Distribution of reservoirs water supply reliability depend on unit of water storage & watershed ratio

#### IV. 결 론

본 연구에서는 호남지역 일정 규모 이상의 농업용 저수지를 대상으로 논벼 증발산량 산정에 기존의 MP 방법과 최근에 많이 활용되고 있는 PM 방법을 적용하여 논벼 관개용수량의 변화를 비교 분석하고, 농업용 저수지 용수공급능에 미치는 영향을 파악하였다.

관개용수량 산정에 영향을 미치는 기온 및 강우량은 과거 대비 최근에 모두 증가추세를 보였으며, 이러한 변화는 실제 논벼 증발산량과 관개용수량 산정결과에도 영향을 미쳤다. MP 방법을 적용한 경우 보다 PM 방법을 적용한 경우에 증발산량 및 관개용수량 모두 낮게 산정되는 경향을 보였다. 기상 요소와의 관계에서는 벼 생육기간동안 평균기온이 높은 지역에서 증발산량도 높게 나타난 반면, 강우량이 높은 지역에서 대체적으로 관개용수량이 낮게 나타났다.

농업용 저수지의 용수공급능에서도 논벼 증발산량 산정방법에 따른 변화를 나타내었는데, MP 방법을 적용한 경우 보다 PM 방법을 적용한 경우에 증발산량과 관개용수량이 감소함으로 인해, 저수지 용수공급능의 안정성이 더 높게 나타났다. 유역배율 및 단위저수량과 저수지 용수공급능과의 관계에서는 유역배율과 유효저수량이 크고 충분할 경우에는 증발산량 산정 방법의 변화에 크게 영향을 받지 않으나, 유역배율과 유효저수량이 작고 충분하지 않을 경우에는 증발산량 산정방법에 따라 용수공급능의 변화가 크게 나타나는 것으로 파악되었다.

본 연구의 결과는 논벼 증발산량 산정방법의 변화에 따른 관개용수량의 변화와 저수지 용수공급능에 미치는 영향에 국한하여 나타낸 것으로, 수로 노후화에 의한 송수손실수량 증대 및 영농여건 변화에 의한 배분관리용수량 증대, 기후변화에 의한 영농패턴 변화, 수해면적 변화 및 이모작 증대, 농민

의 용수이용 패턴 변화 등 실제 저수지 용수공급능에 영향을 미치는 다양한 현장 여건 및 영농환경 변화 요소들은 고려하지 않았기 때문에, 본 연구의 결과가 실질적인 저수지 용수공급능과는 상이할 수 있으리라 판단된다. 따라서 농업용 저수지 용수공급능 분석을 위해 본 연구에서 적용한 PM 방법을 현장에 활용하기 위해서는 위에서 언급한 다양한 현장요소들을 고려하여 장기적인 현장 검증을 통해 이루어질 필요가 있겠다.

#### REFERENCES

- Allen, R. G., M. E. Jensen, J. L. Wright, and R. D. Burman, 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal* 81(4): 650-662. doi:10.2134/agronj1989.00021962008100040019x.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*.
- Chow, V. T., 1951. A general formula for hydrologic frequency analysis. *Transactions American Geophysical Union* 32(2): 231-237. doi:10.1029/TR032i002p00231.
- Chung, S. O., 1997. Variation of crop coefficient with respect to the reference crop evapotranspiration estimation methods in ponded direct seeding paddy rice. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 39(4): 114-121. (in Korean).
- Doorenbos, J., and W. O. Pruitt, 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper no. 24*.
- Jung, G. Y., J. S. Kim, J. W. Cho, and S. Y. Oh, 2003.

- Crop coefficients of rice using the Penman-Monteith method in central South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 276-279. (in Korean).
7. Korea Rural Community Corporation (KRC), 1986. A study on consumptive use of paddy field, Naju, Jeolla (in Korean).
  8. Korea Rural Community Corporation (KRC), 1995. A study on the water requirement variation with the farming conditions in paddy field.1., 144-146. Naju, Jeolla, Korea (in Korean).
  9. Korea Rural Community Corporation (KRC), 1997. A study on the water requirement variation with the farming conditions in paddy field, Naju, Jeolla, Korea (in Korean).
  10. López-Urrea, R., F. Martín de Santa Olalla, C. Fabeiro, and A. Moratalla, 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management* 85(1-2): 15-26. doi: 10.1016/j.agwat.2006.03.014.
  11. Meißner, R., M. N. V. Prasad, G. Du Laing, and J. Rinklebe, 2010. Lysimeter application for measuring the water and solute fluxes with high precision. *Current Science* 99(5): 601-607.
  12. Ministry of Agriculture and Forestry (MAF), 1982. Design criteria of land and water development plan for agriculture: Dam, Sejong, Korea (in Korean).
  13. Ministry of Agriculture and Forestry (MAF), 1998. Design criteria of land and water development plan for agriculture: Irrigation, 102-111. Sejong, Korea (in Korean).
  14. Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Royal Society* 193(1032): 120-145. doi:10.1098/rspa.1948.0037.
  15. Rural Development Administration (RDA), 2019. Evaluation of soil water movement and nutrient availability with weighing lysimeter, 1, 36-37. Jeonju, Jeolla, Korea (in Korean).
  16. Yang, J., B. Li, and S. Liu, 2000. A large weighing lysimeter for evapotranspiration and soil-water-groundwater exchange studies. *Hydrological Processes* 14(10): 1887-1897. doi:10.1002/1099-1085(200007)14:10<1887::AID-HYP69>3.0.CO;2-B.
  17. Young, M. H., P. J. Wierenga, and C. F. Mancino, 1997. Monitoring near-surface soil water storage in Turfgrass using time domain reflectometry and weighing lysimetry. *Soil Science Society of America Journal* 61(4): 1138-1146. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100040021x.
  18. Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2006. Estimation of Paddy Rice Crop Coefficients for FAO Penman-Monteith and modified Penman Method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(1): 13-23. doi:10.5389/KSAE.2006.48.1.013 (in Korean).
  19. Yoo, S. H., J. Y. Choi, S. H. Lee, Y. G. Oh, and N. Y. Park, 2012. The impacts of climate change on paddy water demand and unit duty of water using high-resolution climate scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2): 15-26. doi:10.5389/KSAE.2012.54.2.015 (in Korean).