



Assessment of paddy rice evapotranspiration estimation methods based on comparisons of agricultural water supply

Kim, Sanghyun^a · Cho, Gunho^b · Choi, Kyungsook^{c*}

^aMS student, Department of Agricultural Civil Engineering, Kyungpook National University, Deagu, Korea

^bPh.D student, Department of Agricultural Civil Engineering, Kyungpook National University, Deagu, Korea

^cProfessor, Department of Agricultural Civil Engineering, Kyungpook National University, Deagu, Korea

Paper number: 20-096

Received: 12 October 2020; Revised: 29 October 2020; Accepted: 29 October 2020

Abstract

This study assessed evapotranspiration (ET) methods applying for estimation of paddy rice water demand based on agricultural water supply. The Modified Penman (MP) method and the Penman-Monteith (PM) method recently suggested by Rural Development Administration (RDA) were considered. The 6 Korea Rural Community Corporation (KRC) command areas located in Honam province were selected in this study. The climate characteristics were also analysed with the average annual and the growing season temperatures and rainfalls. As a result, the annual average and the growing season temperature showed the increased trend while the rainfall tended to decrease during 30 years. The paddy rice water demand found to be directly influenced by these climate trends as ET also affected by them. The higher values of paddy rice water demand were obtained from applying MP method compared to the one applying PM method. The lower differences were also obtained from MP method for the comparisons between the paddy rice water demand estimated by both methods with agricultural water supply. Therefore, these results suggest that the MP method is more desirable to use for estimating paddy rice water demand in order to achieve stability of irrigation designs and plans.

Keywords: ET, Modified-penman, Penman-monteith, Paddy water demand, Agricultural water supply

농업용수 공급량과의 비교를 통한 논벼 증발산량 산정 방법 평가

김상현^a · 조건호^b · 최경숙^{c*}

^a경북대학교 농업생명과학대학 농업토목공학과 석사과정, ^b경북대학교 농업생명과학대학 농업토목공학과 박사과정,

^c경북대학교 농업생명과학대학 농업토목공학과 교수

요 지

본 연구에서는 농업용수 공급계획 및 수리시설설계에 적용하기 위한 논벼 수요량 추정에 있어서 증발산량 산정 방법을 농업용수 공급량을 기반으로 평가해 보았다. 증발산량 산정 방법은 기존의 논벼 수요량에 적용 되어온 Modifeid-Penman (MP) 방법과 최근에 농촌진흥청에서 작물계수 개발에 적용한 Penman-Monteith (PM) 방법이 고려되었다. 호남지역 한국농어촌공사 관할지구를 선정하여 기상특성을 분석하고, MP 방법과 PM 방법에 의한 논벼 수요량을 산정하여 현장의 용수 공급량과 비교분석하여 증발산량의 적용성을 평가해 보았다. 대상지구의 기상특성은 30년 기간 연평균 및 논벼 생육기간 평균기온은 증가하고 연평균 강우량과 논벼 생육기간 강우량은 감소하는 경향을 보였다. 이러한 기상특성은 증발산량 산정과 논벼 수요량 결과에 직접적인 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 두 증발산량 산정방법 적용에 의한 수요량 결과 비교분석에서 MP 방법의 한 논벼 수요량이 PM 방법 보다 더 높게 산정되는 경향을 보였으며, 농업용수 공급량과의 비교분석에서 MP 방법이 PM 방법 보다 더 적은 격차를 나타내었다. 따라서 현장여건이 반영된 농업용수 공급량 기반 평가에서 논벼 수요량 산정에 MP 방법을 적용하는 것이 농업용수 관리계획 및 용수 공급 안정성 확보에 유리할 것으로 사료된다.

핵심용어: 증발산량, Modified-Penman, Penman-Monteith, 논벼 수요량, 농업용수 공급

*Corresponding Author. Tel: +82-53-950-5731

E-mail: ks.choi@knu.ac.kr (K. Choi)

1. 서론

논벼 수요량은 국내의 경우 논벼의 증발산량, 침투량, 재배관리용수량, 시설관리용수량 등의 인자들을 고려하여 산정한다(MAF, 1998). 여기서 논벼 수요량 산정을 위한 증발산량 산정 방법은 Modified-Penman (MP) 방법을 채택하고 있으나(KRC, 1995), 국제식량농업기구(Food and Agriculture Organization, FAO)에서는 기존에 사용되던 증발산량 산정 방법을 서로 비교하여 다양한 기후에서 비교적 정확하고 일정한 경향을 나타내는 Penman-Monteith (PM) 방법을 작물의 증발산량 산정 시 적용할 것을 추천하였다(Allen *et al.*, 1998). 이에 따라 국내에서도 최근 농촌진흥청에서 PM 방법을 기반으로 작물계수를 개발하여 제안하였다(RDA, 2019).

Cho *et al.* (2019)는 농촌진흥청에서 개발한 PM 방법에 의한 작물계수를 적용한 논벼 수요량과 기존의 MP 방법에 의해 산정된 논벼 수요량을 이용하여 농업용 저수지의 용수공급능력 산정 결과를 비교 분석하여 이수안전도 측면에서 유리한 MP 방법의 적용을 추천하였다. 그러나 아직까지 PM 방법은 실무에 적용되고 있지 않으며, 실무 적용을 위해서는 보다 다양한 현장여건을 반영하는 면밀한 평가를 요구하고 있다.

한편, 농업용수 공급량은 작물의 수요량을 기반으로 수립된 관계계획에 의하여 농업용 저수지, 소류지, 양수장 등의 수원공을 통하여 실제 필지에 공급된 수량을 의미하며, 용수공급 계측을 통해 파악하고 있다(Yoo *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2008; Hong *et al.*, 2015; Cho *et al.*, 2020). 합리적인 용수 계획 및 관리를 위해서는 증발산량을 이용하여 추정된 농업용수 수요량과 실제 현장에서 공급된 물의 양과의 차이가 최소화되어야 하며, 이를 위해 농업용수 수요량에서 대부분을 차지하는 논벼 수요량 산정의 설계인자 중 주요한 증발산량 산정 방법에 대한 평가가 중요하다.

기존 국내 연구의 경우, 농업용수 수요량 및 공급량에 대한 다양한 조사 분석들이 수행되었다. PM 방법을 적용하여 수요량을 산정한 연구(Chung, 2012; Yoo *et al.*, 2012)와 MP 방법을 적용한 논벼 수요량 산정 결과와 공급량을 비교 분석한 연구(Lee, 2005; Lee *et al.*, 2006; Yoo *et al.*, 2008; Cho *et al.*, 2020)들이 있다. 또한 앞서 언급한 MP 방법과 최근에 개발된 작물계수를 활용한 PM 방법을 각각 적용한 논벼 수요량 결과만을 비교 분석한 연구(Cho *et al.*, 2019)가 있으나, 실제 공급량을 기준으로 하여 논벼 수요량 산정에 필요한 증발산량에 대해 평가한 사례는 전무하다.

따라서 본 연구에서는 필지단위의 논벼 수요량 산정에 있어 가장 근본적인 필요수량 구성요소가 되는 증발산량의 산정

기법을 평가하기 위해 기존의 MP 방법과 최근 제안되고 있는 PM 방법을 적용한 논벼 수요량을 산정하고, 실제 현장에서의 농업용수 공급량과 비교 분석을 실시하여 우리나라 농업환경에 적합한 논벼 증발산량 산정방법을 제안하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 논벼 수요량 산정 방법

논벼 수요량은 논벼 증발산량과 토양 침투량 그리고 논벼 생육기별 재배관리용수량을 고려한 필지용수량에서 유효우량을 제외한 순용수량에 수로에서 발생하는 송수손실을 등을 포함하는 시설관리효율을 고려하여 산정하게 된다. 논벼 수요량 산정 공식은 아래 Eq. (1)과 같다.

$$PWD = \frac{(ET_c + I) + WR - ER}{1 - \frac{L}{100}} \quad (1)$$

여기서, PWD (Paddy water demand) : 논벼 수요량(mm), ET_c : 논벼 증발산량(mm), I (Infiltration) : 침투량(mm), WR : 논벼 재배관리용수량(mm), ER (Effective Rainfall) : 유효우량(mm), L : 시설관리효율(%)

논벼 수요량 산정 Eq. (1)에서 논벼 증발산량은 Eq. (2)와 같이 기준증발산량에 작물계수를 곱하여 산정한다.

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (2)$$

여기서, ET_o : 기준증발산량(mm/day), K_c : 논벼 작물계수

기준증발산량은 논벼의 경우 우리나라에서는 MP 공식을 사용하고 있으나, 최근 FAO와 국내 농촌진흥청 등에서는 PM 공식을 추천하고 있다. MP 방법은 Penman 방법(Penman, 1948)을 기초로 하였으며, 열수지법 그리고 공기역학을 고려하여 만들어진 Dalton 방법을 서로 조합하여 기온, 습도, 일조시간, 증기압 그리고 풍속 등 기상특성 인자들의 자료를 바탕으로 기준증발산량을 구한다(Doorenbos and Pruitt, 1977). PM 방법은 기본적인 Penman 방법(Penman, 1948)에 일정한 높이에 있는 임의의 수목에서도 증발산량을 추정할 수 있도록 하는 식생피복저항과 공기역학저항의 개념을 도입하여 수정한 방법이다(Allen *et al.*, 1998). Eqs. (3) and (4)는 MP 공식과 PM 공식을 각각 나타낸다.

$$ET_o = C \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(U_2)(e_a - e_d) \right] \quad (3)$$

여기서, C : 주·야간의 기후 차이에 의한 보정계수, Δ : 기온 ~ 포화증기압곡선의 기울기(kPa/°C), γ : 건습계 상수(kPa/°C), R_n : 순복사량(mm/day), $f(U_e) = 0.27(1 + U_2/100)$: 풍속함수, U_2 : 2 m 높이에서 풍속(m/s), e_a : 포화증기압(kPa), e_d : 실증기압(kPa)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{890\gamma U_2(e_a - e_d)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.339U_2)} \quad (4)$$

여기서, G : 토양 열 유속 밀도(MJm²/day), T : 2 m 높이에서의 평균기온(°C)

논벼 증발산량 산정을 위해 필요한 작물계수(K_c)는 MP 방법의 경우 한국농어촌공사(KRC, 1997)의 자료를 적용하였으며, PM 방법은 최근 농촌진흥청(RDA, 2019)에서 제안한 작물계수를 적용하였다. Table 1은 MP 방법과 PM 방법에 의한 논벼 실제증발산량에 적용한 순별 작물계수를 각각 나타낸다.

논벼 수요량 산정 Eq. (1)에서 토양 침투량은 농업기반정비사업설계기준 관개편(MAF, 1998)에서 제안한 평균 침투량 5 mm/day를 적용하였으며, 재배관리용수량은 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구(KRC, 1995)에서 제안한 140 mm와 시설관리용수량은 농업기반정비사업설계기준 관개편(MAF, 1998)에서 제안한 콘크리트 및 아스팔트 수로 5 ~ 7%, 토공 수로 10 ~ 25%의 손실률을 각각 적용하였다.

유효수량은 강우량에 지표유출량을 뺀 실제 작물이 이용할 수 있는 물을 의미하며, 본 연구에서는 Eqs. (5) and (6)의 일별 담수심법을 적용하였다. 여기서 최대 담수심 및 최소 담수심은 영농방식 변화에 따른 수요량 변화 연구(KRC, 1995)를 기준으로 80 mm 및 20 mm를 각각 적용하였다.

$$ER_t = RF_t - PR_t \quad (5)$$

$$PD_t = (PD_{t-1} + WR_t + RF_t) - (ETC_t - I_t - PR_t) \quad (6)$$

여기서 ER : 유효수량(mm), RF : 강우량(mm), PR : 지표유출량(논 유출량) (mm), PD : 담수심(mm), WR : 논벼 재배관리용수량(mm), I : 침투량(mm), t : 금일(day), $t-1$: 전일(day)

2.2 농업용수 공급량 산정 방법

농업용수 공급량은 기본적으로 자연 상태에서 강우량의 유효수량 등에 의해 공급되는 수량을 제외하고, 필지에서 필요한 물을 저수지 등의 수원공에서 공급하는 수량을 말한다. 본 연구에서는 농업용수 공급량을 저수지의 경우에는 저수율을 활용하여 저수량을 산정한 후, 저수량의 일별 차이를 파악하여 산정하였으며, 양수장의 경우에는 펌프의 전력량을 이용하여 가동시간을 파악하고 여기에 펌프유량을 곱하여 산정하였다. 이를 식으로 표현하면, 저수지의 공급량은 Eq. (7)과 같으며, 양수장의 공급량은 Eq. (8)과 같다.

$$RWS_t = RC_{t-1} - RC_t, RC_t = TRC \cdot \frac{SR_t}{100} \quad (7)$$

여기서, RWS : 공급량(mm), RC : 저수량(mm), t : 금일(day), $t-1$: 전일(day), TRC : 총수량(mm), SR : 저수율(%)

$$PWS = \frac{60h \cdot PD}{BA}, h = \frac{PE}{PP} \quad (8)$$

여기서 PWS : 양수장 공급량(mm), h : 양수장 가동시간(h), PD : 펌프 유량(m³/min), BA (Benefited area): 저수지의 수혜면적(ha), PE : 펌프 전력량(kWh), PP : 펌프 동력(kW)

Table 1. Paddy rice crop coefficients (Cho et al., 2019)

Methods	April			May			Jun		
	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late
MP (KRC, 1997)	-	-	0.56	0.56	0.56	0.56	0.75	0.95	1.06
PM (RDA, 2019)	-	-	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
Methods	July			August			September		
	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late	Early	Middle	Late
MP (KRC, 1997)	1.09	1.17	1.39	1.53	1.58	1.47	1.42	1.32	-
PM (RDA, 2019)	0.97	1.15	1.15	1.15	1.34	1.34	1.34	1.34	-

2.3 연구 대상지구 선정

연구 대상지구는 본 연구에서 적용한 PM 방법의 작물계수가 전주지역에서 개발(RDA, 2019) 되었으므로 전주지역의 기상여건과 벼 생육여건이 유사한 지역인 호남지역의 논벼 용수공급지역을 선정하였다. 호남지역 내 한국농어촌공사 관할지구 중 100만 톤 이상 저수지 지구를 대상으로 주수원공과 보조수원공의 농업용수 공급량 자료의 유무를 파악하고, 자료가 있을 경우 공급량 자료의 신뢰성을 검토한 후 최종적으로 전북지역 3개 지구, 전남지역 3개 지구를 각각 선정하여 총 6개 지구를 대상으로 본 연구를 수행하였다. Fig. 1은 본 연구

에서 선정한 대상지구와 관련 기상관측소의 위치를 각각 나타내었다.

대상지구별 농업용수 공급원이 되는 주수원공인 저수지와 보조수원공인 양수장의 수해면적과 관련 기상관측소명은 Table 2에 나타낸 바와 같다. 대상지구의 수해면적 대비 주수원공의 면적 범위는 45.8 ~ 69.0%로, 평균 56.5%를 나타내며, 보조수원공의 면적 범위는 22.2 ~ 54.2%로, 평균 40.8%를 나타내었다. 본 연구에서는 논벼 수요량 대비 농업용수 공급량을 비교 분석하기 위해 농업용수 공급량은 주수원공과 보조수원공 자료가 모두 가용한 2019년 자료를 적용하여 산정하였다.

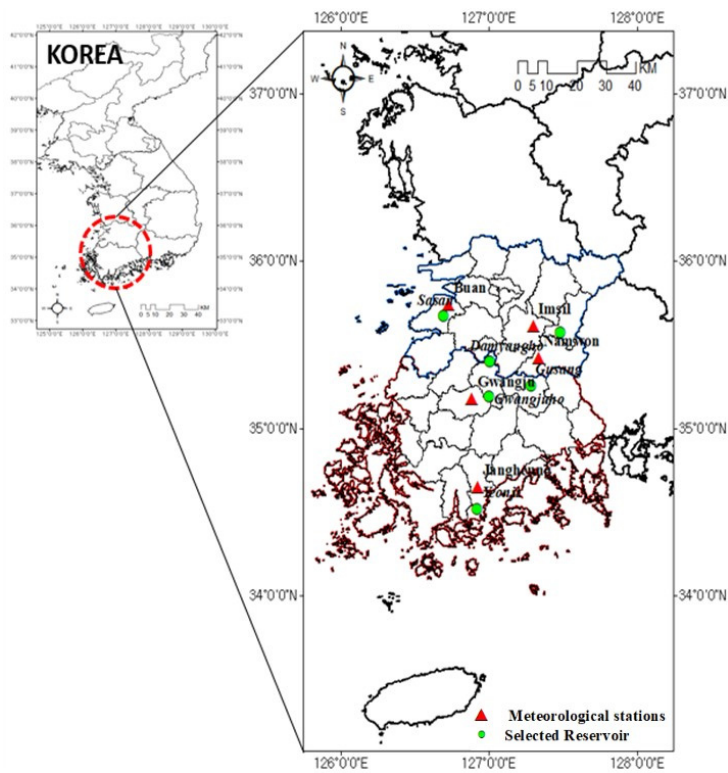


Fig. 1. Location of the selected agricultural reservoirs and meteorological stations

Table 2. The Command area and meteorological station of selected study areas

Region	Name	Command area					Meteorological station
		Total	Reservoir		Pumping station		
		ha	ha	%	ha	%	
Jeollabuk-do	Gusung	595.7	272.7	45.8	323.0	54.2	Namwon
	Sasan	466.0	240.0	51.5	226.0	48.5	Buan
	Jangnam	826.0	570.1	69.0	255.9	31.0	Imsil
Jeollanam-do	Gwangju-ho	2,338.0	1,165.2	49.8	1,172.8	50.2	Gwangju
	Damyang-ho	6,245.0	3,824.5	61.2	2,420.5	38.8	
	Yunji	202.0	124.1	61.4	44.8	22.2	Jangheung

3. 결과 및 고찰

3.1 기상 특성

본 연구에서는 연구 대상지구의 기상특성을 분석하기 위해 1990년부터 2019년까지 30년간 4월~9월 논벼 생육기간의 기온 및 강우량 자료를 활용하여 전체 변화 추이를 파악하고, 5년 단위로 기상변화를 비교 분석해 보았다. 또한 논벼 수요량 대비 농업용수 공급량 비교 분석을 위해 논벼 수요량 산정에 적용된 2019년 기상자료에 대한 연평균 및 논벼 생육기간의 수치도 비교 분석해 보았다.

3.1.1 기온

대상지구의 최근 30년 동안 논벼 생육기간 기온특성을 분석한 결과는 Fig. 2에, 5년 단위로 논벼 생육기간 월별 평균기온의 변화는 Fig. 3에 각각 나타내었다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 최근 30년간 대상지구의 논벼 생육기간 평균 기온은 22.6°C로 나타났으며, 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 과거 10년(1990~1999) 대비 최근 10년(2010~2019)의 기온 변화는 전북지역에 속하는 남원,

부안, 임실은 0.8°C 증가하였으며, 전남지역에 속하는 광주, 장흥은 0.9°C 증가하여, 전남지역이 전북지역에 비해 0.1°C 더 증가한 것으로 나타났다. 대상지구 중 30년간 평균기온이 가장 낮은 지역은 임실지역으로 19.6°C로 나타났으며, 가장 높은 지역은 광주지역으로 22.2°C를 나타내어 호남지역 내에서 2.6°C의 큰 차이를 보여주었는데, 이는 광주가 인구밀집도가 다른 대상지구에 비해 높은 광역도시인 것으로 인해 나타난 현상으로 판단된다.

Fig. 3에 나타낸 5년 단위로 논벼 생육기간 평균기온 비교분석 결과에서는 5년 단위로 평균 0.2°C씩 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 5월에는 지속적인 증가 경향을 보여 과거 대비 가장 증가 폭이 컸으며, 5년 단위 평균 0.3°C씩 증가하는 경향을 나타냈었다. 그러나 9월의 경우에는 앞에서 언급한 경향과는 반대로 과거 대비 최근 평균기온이 미소하게 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 3과 Fig. 4는 2019년 연평균 기온과 논벼 생육기간 평균기온을 비교분석한 결과를 각각 나타낸다. Table 3에 나타낸 바와 같이 2019년의 연평균 기온 및 논벼 생육기간 평균기온은 13.8°C와 22.6°C를 각각 나타내었다. 전북지역은 연평균

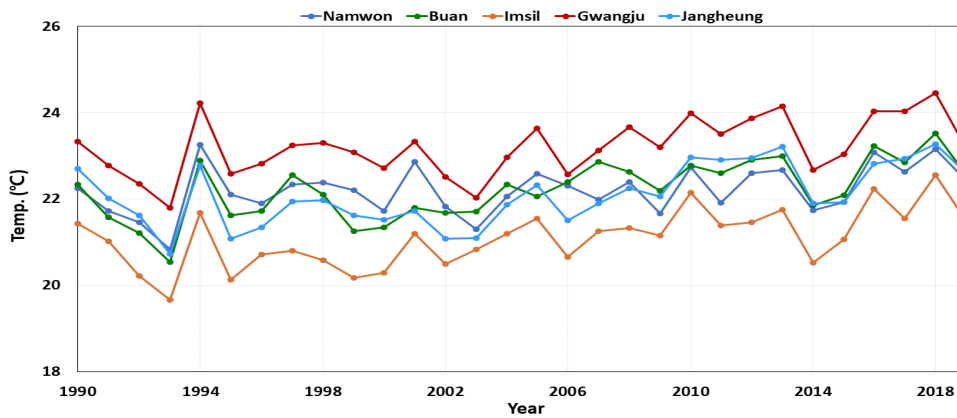


Fig. 2. Average temperature variability during rice growing seasons

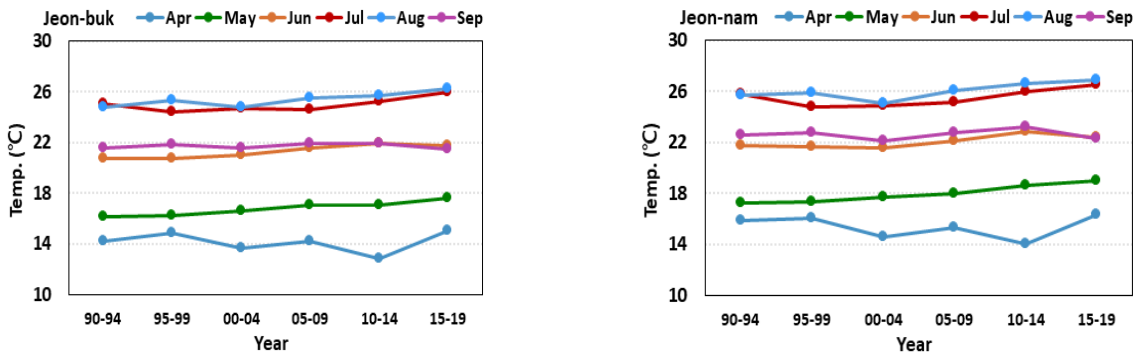


Fig. 3. Monthly average temperature changes during rice growth seasons

기온 및 논벼 생육기간 평균기온은 13.1°C와 22.2°C로서 9.1°C 차이를 보였으며, 전남지역은 연평균 기온 및 논벼 생육기간 평균기온이 14.5°C와 23.0°C로서 8.5°C 차이를 보였다. 전남 지역과 전북지역의 연평균 기온 및 논벼 생육기간 평균기온을 비교하였을 때 남쪽에 위치한 전남지역이 전북지역에 비해 1.4°C와 0.8°C 각각 높게 나타났다.

Table 3. Comparisons of annual and rice-growing season temperature (°C)

Region	Reservoir	Annual	Growing season	Difference
Jeollabuk-do	Gusung	13.3	22.4	9.1
	Sasan	13.7	22.6	8.9
	Jangnam	12.2	21.5	9.3
	Sub-total Avg.	13.1	22.2	9.1
Jeollanam-do	Gwangju-ho	14.7	23.2	8.5
	Damyang-ho	14.7	23.2	8.5
	Yunji	14.2	22.6	8.4
	Sub-total Avg.	14.5	23.0	8.5
Total Avg.		13.8	22.6	8.8

Fig. 4에 나타난 바와 같이 대상지구별 2019년 평균기온과 논벼 생육기간 평균기온은 30년 기간의 기상 경향 분석결과와 동일하게 임실지역이 12.2°C와 21.4°C로 가장 낮게 나타났으며, 광주지역은 14.7°C와 23.2°C로 가장 높게 나타났다.

3.1.2 강우량

대상지구의 최근 30년 동안 논벼 생육기간 강우량 특성을 분석한 결과는 Fig. 5에 나타내었으며, 5년 단위 논벼 생육기간 월별 강우량의 변화는 Fig. 6에 각각 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 최근 30년간 대상지구의 논벼 생육기간 평균 강우량은 934.6 mm로, 30년간 변화의 진폭이 매우 크게 나타났다. 과거 10년(1990~1999) 대비 최근 10년(2010~2019)의 논벼 생육기간 평균 강우량은 19.7 mm 증가하여, 과거 대비 2.3% 증가한 것으로 나타났다. 대상지구 중 가장 높은 증가폭을 나타낸 남원지역은 과거대비 69.3 mm의 8.8% 증가율을 보였으나, 대상지구 중 광주지역만 유일하게 17.5 mm 감소하여 과거 대비 2.0% 감소한 경향을 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 5년 단위 논벼 생육기간 평균 강우량 비교 분석 결과에서는 기온의 경향과는 반대되는 결과를 나타내었

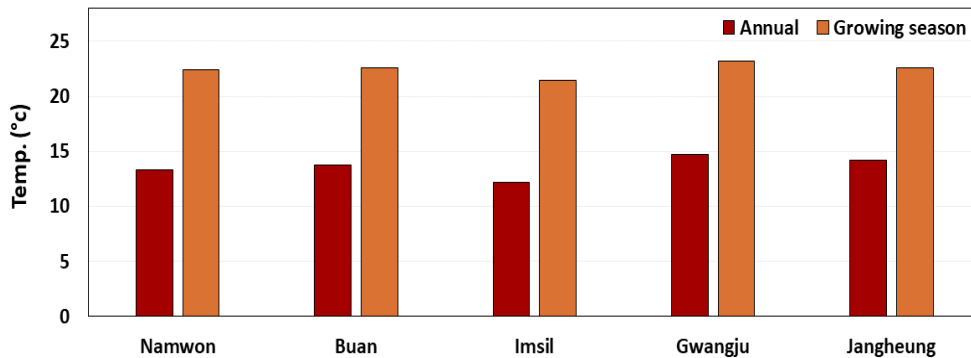


Fig. 4. Comparisons of annual and rice-growing season temperature

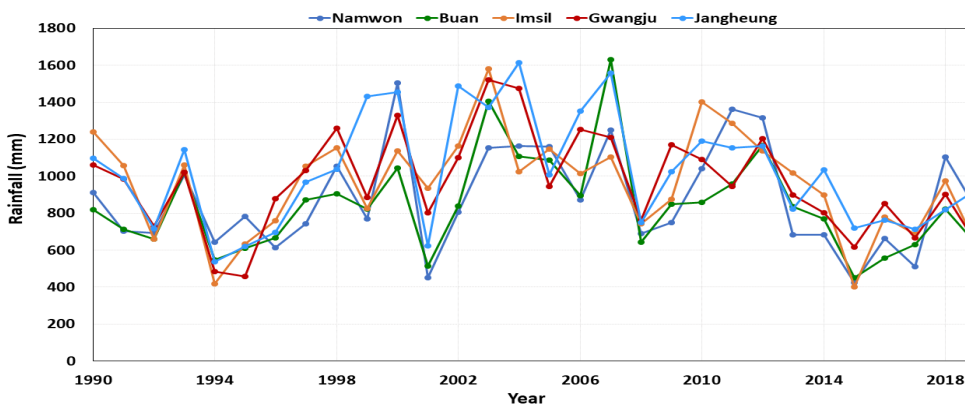


Fig. 5. Average rainfall variability during rice growing season

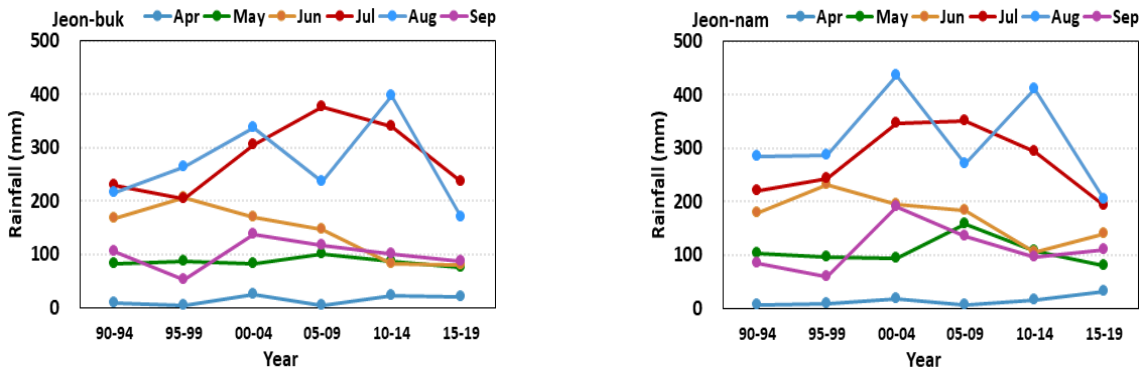


Fig. 6. Monthly average rainfall changes during rice growth

Table 4. Comparisons of annual and rice-growing season rainfall of 2019

Region	Reservoir	Annual (mm)	Growing season			
			Total		Effective	
			mm	%*	mm	%**
Jeollabuk-do	Gusung	1,332.8	824.4	61.9	637.8	77.4
	Sasan	1,087.5	637.6	58.6	544.0	85.3
	Jangnam	1,069.7	634.2	59.3	502.8	79.3
	Sub-total Avg.	1,163.3	698.7	59.9	561.6	80.7
Jeollanam-do	Gwangju-ho	1,085.9	640.5	59.0	490.4	76.6
	Damyang-ho	1,085.9	640.5	59.0	490.4	76.6
	Yunji	1,517.4	923.7	60.9	703.9	76.2
	Sub-total Avg.	1,301.7	734.9	59.6	561.6	76.5
Total Avg.		1,234.4	716.8	59.8	561.6	78.6

* Ratio between growing season and annual rainfall

** Ratio between growing season effective rainfall and growing season rainfall

는데, 30년 기간 동안 평균적으로 5년 단위 4.5 mm 씩 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 6월은 지속적인 감소 경향을 보여 과거 대비 가장 감소폭이 컸으며, 이 기간에는 평균적으로 5년 단위 12.9 mm 씩 감소하는 경향을 나타냈었다. 그러나 4월의 경우에는 이러한 감소 경향과는 반대로 과거 대비 최근 평균 강우량이 미소하게 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 4와 Fig. 7는 2019년 연평균 강우량과 논벼 생육기간 평균 강우량을 비교 분석한 결과를 각각 나타낸다. Table 4에 나타낸 바와 같이 2019년의 연평균 강우량 및 논벼 생육기간 평균 강우량은 1,234.4 mm와 716.8 mm를 각각 나타내어, 논벼 생육기간 평균 강우량이 연평균 강우량의 59.8%를 차지하였다. 전북지역은 연평균 강우량 및 논벼 생육기간 평균 강우량이 1,163.3 mm 및 698.7 mm로서 논벼 생육기간 평균 강우량이 연평균 강우량의 59.9%를 차지하며, 전남지역은 연평균 강우량 및 논벼 생육기간 평균 강우량이 1,301.7 mm와 734.9 mm로서 논벼 생육기간 평균 강우량이 연평균 강우량

의 59.6%를 차지하였다. 전남지역과 전북지역의 연평균 강우량 및 논벼 생육기간 평균 강우량을 비교하였을 때, 전남지역이 전북지역에 비해 138.4 mm와 83.4 mm 각각 높게 나타났다.

또한 Table 4에 나타낸 논벼 생육기간의 강우량에 대한 유효우량 산정 결과에서 대상지구 전체적으로 논벼 생육기간 유효우량은 561.6 mm이며, 이는 논벼 생육기간 강우량의 78.6%를 차지한다. 전북지역과 전남지역의 유효우량 비교에서는 전북지역이 전남지역에 비해 논벼 생육기간 강우량의 유효우량이 차지하는 비율이 더 높게 나타났다.

Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 대상지구별 2019년 연 강우량과 논벼 생육기간 강우량은 최근 30년간의 경향과 동일하게 임실지역이 1069.7 mm과 634.2 mm를 각각 나타내어 대상지구 중 가장 낮은 강우량을 나타내었으며, 장흥지역은 1517.44 mm, 923.7 mm를 각각 나타내어 대상지구 중 가장 높은 강우량을 나타내었다.

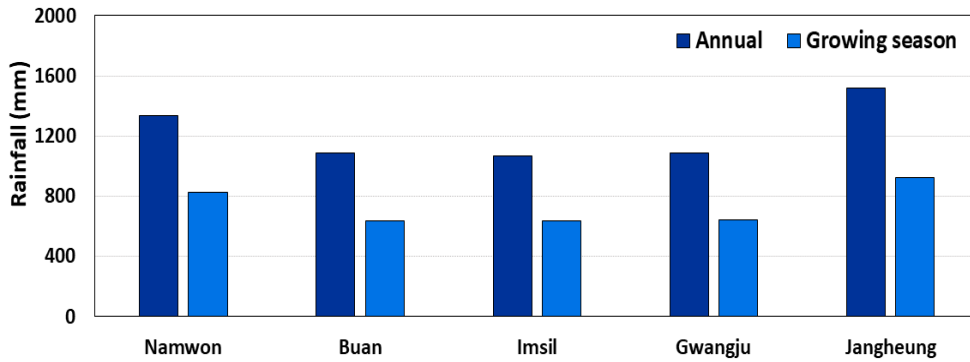


Fig. 7. Comparisons of annual and rice-growing season rainfall of 2019

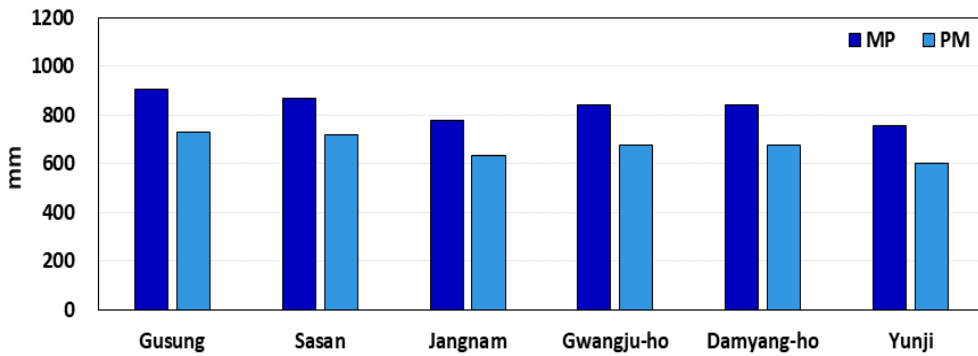


Fig. 8. Paddy water demand based on MP and PM methods

3.2 논벼 증발산량 산정기법에 따른 수요량 산정

Fig. 8은 증발산량 산정기법인 MP 방법과 PM 방법에 의한 논벼 수요량 산정 결과를 나타낸다. MP 방법으로 산정된 논벼 수요량은 754.6 mm ~ 906.6 mm로, 평균 832.6 mm를 나타냈으며, PM 방법으로 산정된 논벼 수요량은 603.7 mm ~ 729.8 mm로, 평균 673.7 mm를 나타내었다. 따라서 PM 방법이 MP 방법에 비해 150.9 mm ~ 176.8 mm 정도 논벼 수요량이 낮게 산정되어, 평균 19.1% 낮은 수요량이 산정되었다.

대상지구별로는 구성지구의 논벼 수요량이 가장 높게 나타났으며, 연지지구가 가장 낮게 나타났다. 또한 MP 방법과 PM 방법에 의한 논벼 수요량의 차이가 가장 많은 지구는 구성으로서 176.8 mm의 차이를 보였고, MP 방법 대비 PM 방법에 의한 논벼 수요량의 차이가 가장 낮은 지구는 장남으로서 144.9 mm의 차이를 보였다.

논벼 수요량은 기상, 강수량 등의 기상특성에 따라 결정되며, 일반적으로 기온의 증가는 증발산량의 증가를 야기하여 논벼 수요량의 증가를 유발하는 반면, 강수량의 증가는 유효우량의 증가로 논벼 수요량의 감소를 유발한다. 대상지구 중 구성지구와 사산지구의 경우 논벼 생육기간 평균기온이 사산지구가 0.2℃ 정도 미비하게 높은 반면, 강수량은 사산지구가

구성지구에 비해 논벼 생육기간 대비 강우량이 현저히 낮게 나타나, 사산지구의 논벼 수요량이 구성지구에 비해 적은 결과를 보였다. 또한 사산지구와 연지지구의 경우, 논벼 생육기간 평균기온은 동일하나, 사산지구의 강우량이 연지지구보다 높아 연지지구의 논벼 수요량이 사산지구에 비해 낮은 결과를 도출하였다.

3.3 농업용수 공급량 산정

Table 5는 대상지구별 농업용수 공급량과 공급일수를 나타낸다. 대상지구의 농업용수 공급량은 평균 1,216.4 mm를 나타내며, 대상지구별 큰 폭의 차이를 나타내었다. 전북지역의 평균 공급량은 1,265.5 mm이며, 전남지역의 평균 공급량은 1,167.2 mm로서, 전북지역이 전남지역에 비해 8.4% 높게 나타났다. 농업용수 공급일수는 평균적으로 약 84일이었으며, 전북지역은 약 81일, 전남지역은 약 86일로 나타났다.

일반적으로 강우량의 영향을 직접적으로 받는 농업용수 공급량은 강우량이 많을수록 농업용수 공급량이 적게 나타나는 경향을 보인다. 그러나 대상지구의 강우량과 공급량의 관계성을 분석한 결과에서는 이와 같은 원리가 항상 적용되는 것은 아닌 것으로 나타났다. 구성지구와 연지지구의 비교에

Table 5. Agricultural water supply during rice growing season in 2019

Site name		Growing season	Total water supply (mm)	Days of supply (day)	
Gusung		Apr	0	1841.7	91
		May	196.6		
		Jun	577.6		
		Jul	325.5		
		Aug	536.2		
		Sep	205.8		
Sasan	Jeollabuk-do	Apr	1.1	921.6	71
		May	243.1		
		Jun	342.9		
		Jul	107.5		
		Aug	129.3		
		Sep	97.7		
Jangnam		Apr	1.2	1,033.3	80
		May	202.8		
		Jun	498.8		
		Jul	130.1		
		Aug	175.2		
		Sep	25.2		
Sub-total Avg.			1,265.5	80.7	
Gwangju-ho		Apr	0.0	1,031.4	89
		May	245.4		
		Jun	383.2		
		Jul	89.3		
		Aug	296.2		
		Sep	17.4		
Damyang-ho	Jeollanam-do	Apr	0.0	868.0	76
		May	214.6		
		Jun	316.4		
		Jul	150.2		
		Aug	124.9		
		Sep	62.0		
Yunji		Apr	0.0	1,602.1	94
		May	122.1		
		Jun	491.1		
		Jul	234.3		
		Aug	702.8		
		Sep	51.7		
Sub-total Avg.			1,167.2	86.3	
Total Avg.			1,216.4	83.5	

서는 논벼 생육기간 강우량이 연지지구가 구성지구에 비해 더 높게 나타나 논벼 수요량과 마찬가지로 공급량에서도 연지

지구가 구성지구 보다 낮은 공급량을 나타낸 반면, 이와 다른 경향을 나타내는 지구도 있어 강우량을 기준으로만 단순하게 공급량의 추이를 판단하기는 어려운 것으로 판단된다. 공급량과 공급일수는 그 해의 기상조건과 더불어 수원공의 용수 공급능과 연관이 있으며, 다양한 현장여건과 수요자의 물이용 특성과의 연관이 있을 것으로 판단된다.

3.4 농업용수 공급량 기반 논벼 증발산량 산정 방법 평가

Fig. 9는 월단위의 논벼 생육기간 MP 방법과 PM 방법에 의해 산정된 논벼 수요량 및 농업용수 공급량과 강우량을 비교분석한 결과를 나타낸다. 월별 논벼 수요량 및 공급량과 강우량의 패턴은 대체적으로 비슷한 경향을 나타내었다. 논벼 생육기간 MP 방법과 PM 방법에 의해 산정된 논벼 수요량과 농업용수 공급량의 비교에서는 MP 방법에 의한 수요량이 PM 방법에 의한 수요량 보다 공급량과 적은 차이를 나타내었다.

월별 논벼 수요량과 농업용수 공급량은 유사한 패턴을 보였으나 대상지구에 따라서는 월별 논벼 수요량과 농업용수 공급량의 편차를 크게 나타내었는데, 구성지구와 연지지구가 여기에 속한다. 이러한 차이는 물을 많이 필요로 하는 6월과 8월에 가장 크게 나타났는데, 이는 이양기가 본격적으로 시작되어 이양 및 벼가 활착되는 시기인 6월과 벼의 수잉기·개화기 동안 심수관개를 필요로 하는 8월에 물 사용량이 많으며, 이러한 시기에 현장 물 사용이 많아질수록 수요량과 공급량의 차이가 크게 벌어지는 경향을 보이는 것으로 사료된다.

Table 6은 농업용수 공급량과 MP 방법과 PM 방법에 의해 산정된 논벼 수요량을 비교 분석한 결과를 나타낸다. MP 방법을 적용한 경우 논벼 수요량은 농업용수 공급량의 47.1 ~ 97.1%로, 평균 68.4%를 차지하는 것으로 나타났으며, PM 방법을 적용한 경우 농업용수 공급량의 37.7 ~ 78.2%로, 평균 55.4%를 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 현재의 설계기준에서 제시하고 있는 설계인자의 수치를 그대로 반영할 경우 PM 방법의 적용에 의해 산정된 논벼 수요량은 농업용수 공급량과의 격차를 더 넓히게 되어 현장에서의 용수공급 불안정을 야기하게 되는 경우가 발생하게 된다. 따라서 현재의 논벼 수요량 산정기준으로는 용수계획의 안정성과 관리상의 이수안전도 확보 측면에서 최근 제안되고 있는 PM 방법보다는 기존의 MP 방법을 적용하여 논벼 수요량을 산정하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

실질적으로 논벼 수요량과 농업용수 공급량 차이는 현재의 논벼 수요량 산정 방법이 수로 노후화에 의한 송수손실 증대와 작부시기 변화 및 영농형태 변화, 공급자의 물 공급 패턴 및 수요자 물이용 형태, 복잡한 용수계통 등의 현장여건 등을 충분히

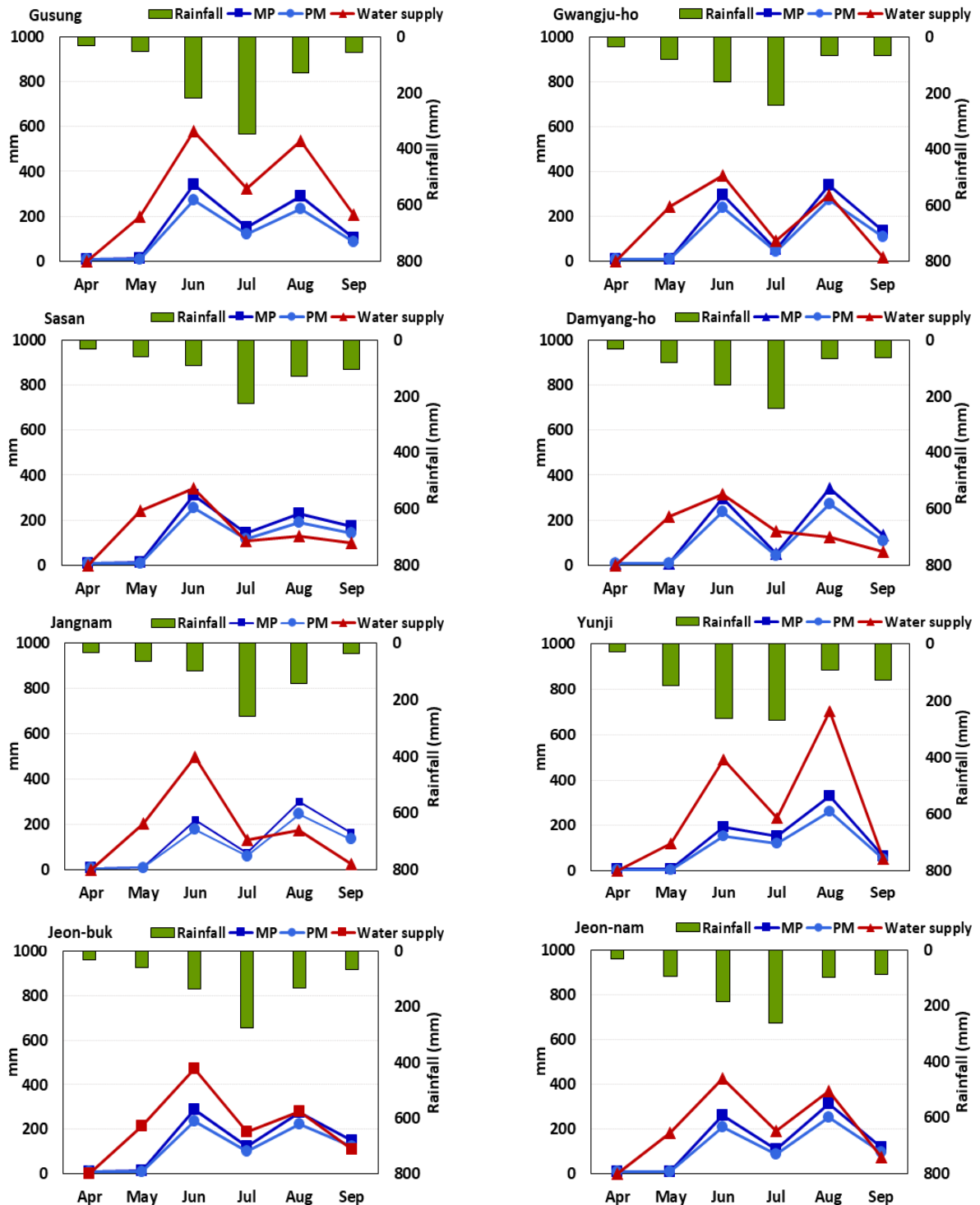


Fig. 9. Comparisons of agricultural water supply and paddy water demand with rainfall

히 반영하지 못하는 현실적인 문제로 인한 것으로 판단된다. 따라서 현재 사용하고 있는 수요량 설계인자의 개선 없이는 공급량과 차이를 적게 나타내는 MP 방법의 적용이 더 적합한

것으로 사료되며, 향후 현장 조건에 대한 면밀한 연구를 통해 설계인자의 개선이 이루어진다면, PM 방법의 재평가를 통해 현장 적용 여부를 재고려하는 절차가 필요할 것으로 판단된다.

Table 6. Comparisons of agricultural water supply and paddy water demand with MP and PM methods

Name	Regaion	Water supply (A) (mm)	MP (B) (mm)	B/A (%)	PM (C) (mm)	C/A (%)
Gusung	Jeollabuk-do	1841.7	906.6	49.2	729.8	39.6
Sasan		921.6	869.2	94.3	717.1	77.8
Jangnam		1033.3	779.0	75.4	634.1	61.4
Sub-total Avg.		1265.5	851.6	67.3	693.7	54.8
Gwangju-ho	Jeollanam-do	1031.4	843.0	81.7	678.6	65.8
Damyang-ho		868.0	843.0	97.1	678.6	78.2
Yunji		1602.1	754.6	47.1	603.7	37.7
Sub-total Avg.		1167.2	813.5	69.7	653.6	56.0
Total Avg.		1216.4	832.6	68.4	673.7	55.4

4. 결론

본 연구에서는 농업용수 공급계획 및 수리시설 설계에 적용하기 위한 논벼 수요량 추정에 이용되는 증발산량 산정 방법의 적용성 평가를 위해 농업용수 공급량과 기존의 MP 방법과 최근에 제안된 PM 방법을 적용하여 산정된 논벼 수요량을 비교·분석해 보았다. PM 방법에 의한 작물계수가 개발된 호남지역을 중심으로 대상지구를 선정하여 기상특성을 분석하고, 두 증발산량 산정 방법에 의한 논벼 수요량과 농업용수 공급량의 비교분석을 통해 증발산량 산정 방법을 평가하였다.

대상지구의 기상특성은 30년 동안 연평균 및 논벼 생육기간 평균기온은 증가하는 반면, 연평균 강우량과 논벼 생육기간 강우량은 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 논벼 증발산량과 논벼 수요량 산정에 직접적인 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 대상지구의 강우량과 논벼 수요량, 농업용수 공급량 및 공급일수를 비교분석한 결과 농업용수 공급량 패턴 및 공급일수는 강우량 패턴과 관계성을 보이지 않았다.

MP 방법과 PM 방법을 적용한 논벼 수요량 산정 결과의 비교·분석에서는 MP 방법에 의한 논벼 수요량이 PM 방법에 의한 수요량보다 더 높게 산정되는 경향을 보였으며, 두 증발산량에 의한 논벼 수요량과 농업용수 공급량과의 비교 분석에서는 MP 방법에 의한 수요량이 PM 방법에 의한 수요량보다 농업용수 공급량과 적은 차이를 보였다.

따라서, 논벼 수요량 산정에 필요한 설계인자들의 개선이 없는 현재의 조건에서는, 농업용수 공급량과의 비교평가를 기준으로 기존의 MP 방법을 적용하는 것이 용수공급 및 관계계획의 안정성 확보를 위해 더 적합한 것으로 평가된다. 단, 본 연구는 자료의 제한으로 충분한 기간의 공급량 자료를 활용하지 못하고, 용수로 유량 자료 없이 저수율과 양수장 전력량만을 활용하여 산출한 공급량을 기준으로 분석한 한계성이

있기 때문에 향후 논벼 수요량 산정의 신뢰성 확보를 위해 실제 현장 요소들을 반영한 종합적인 증발산량 산정 방법의 현장 적용성 평가가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2020R1A2C101394711).

References

- Allen, R.G., Periera, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Cho, G.H., Hwan, G.H., and Choi, K.S. (2019). "Analysis of water supply reliability of agricultural reservoirs base on application of modified Penman and Penman-Monteith methods." *The Korea Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 61 No. 6, pp. 93-101.
- Cho, G.H, Moon, J.K, and Choi, K.S. (2020). "Analysis of channel water loss of the agricultural water supply in a Gyeongcheon drought area." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 62, No. 2, pp. 53-62.
- Chung, S.O. (2012), "Projection of paddy rice consumptive use in the major plains of the Korean peninsula under the RCP scenarios." *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 54, pp. 35-34.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. (1977). "Guidelines for predicting crop water requirements." FAO Irrigation and drainage paper, No. 24, Food and Agriculture Organization of the United

Nations, Rome, Italy.

- Korea Rural Community Corporation (KRC) (1995). *A study on the water requirement variation with the farming conditions in paddy field*. pp. 144-146.
- Korea Rural Community Corporation (KRC) (1997). *A study on the water requirement variation with the farming conditions in paddy field*.
- Lee, Y.J. (2005). *An investigative study for the estimation of irrigation water require-ment in paddy land*. Ph.D. dissertation, Konkuk University.
- Lee, Y.J., Kim, P.S., Kim, S.J., Jee, Y.G., and Joo, U.J. (2008). "Estimation of water loss in irrigation canals through field measurement." *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 50, pp. 13-21.
- Lee, Y.J., Kim, S.J., Kim, P.S., Jee, Y.G., and Lee, J.Y. (2006). "Study on the calculation method of irrigation water considering farming conditions in paddy field." *Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 923-927.
- Ministry of Agriculture and Forestry (MAF) (1998). *Design criteria of land and water development plan for agriculture: Irrigation*. pp. 102-111.
- Rural Development Administration (RDA) (2019). *Evaluation of soil water movement and nutrient availability with weighing lysimeter*. pp. 35-37.
- Yoo, G.Y., Kim, J.T., and Kim, J.E. (2008). "Development of an adaptive capacity indicator to climate change in the agricultural water sector." *Journal of Environmental Policy*, JEP, Vol. 7, pp. 35-55.
- Yoo, S.H., Choi, J.Y., Lee, S.H., Oh, Y.G., and Park, N.Y. (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*, KSAE, Vol. 54, pp. 15-26.