



## Improvement of agricultural water demand estimation focusing on paddy water demand

Park, Chang Kun<sup>a</sup> · Hwang, Junshik<sup>b</sup> · Seo, Yongwon<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Catholic Kwandong University, Gangneung, Korea

<sup>b</sup>Research Professor, Institute of Industrial Technology, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

<sup>c</sup>Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

Paper number: 20-046

Received: 13 May 2020; Revised: 8 September 2020; Accepted: 8 September 2020

### Abstract

Currently, the demand for farmland is steadily decreasing due to changes in the agricultural environment and dietary life. In line with this, the government adopted an integrated water management with the enactment of the Framework Act on Water Management on June 2019. Therefore, it is required to take a closer look at agricultural water demand that accounts for 61% of water use for efficient water resources management. In this study, the overall process was evaluated for estimating agricultural water demand. More specifically, agricultural water demand for paddy field, which comprises 67% to 87% of agricultural water demand, was reviewed in detail. The biggest issue in estimating the paddy field water demand is the selection of the method for potential evapotranspiration. FAO recommends Penman-Monteith, but, currently, our criteria suggest a modified Penman equation that shows over estimation. Also, the crop coefficient, which is the main factor in evaluating evapotranspiration, has an issue that does not consider the current climate and crop varieties because it was developed 23 years ago. Comparing the Modified Penman and Penman-Monteith equations using the data from Jeonju National Weather Service, the modified Penman equation showed a big difference compared to the Penman-Monteith equation. When the crop coefficient was applied, the difference between late May and late August increased, where the amount of evapotranspiration was high. The estimation process was applied to four study reservoirs in Gimje. Comparing the estimated water demand with the supplied water record from reservoirs, the results showed that the estimation accuracy depends on not just the potential evapotranspiration, but also the standard water storing level in paddy fields.

**Keywords:** Penman-monteith, Modified penman, Crop coefficient, Paddy water, Agricultural water demand

## 논용수 수요량 산정을 중심으로 한 농업용수 수요량 산정방법의 개선

박창근<sup>a</sup> · 황준식<sup>b</sup> · 서용원<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>가톨릭관동대학교 토목공학과 교수, <sup>b</sup>영남대학교 공과대학 공업기술연구소 연구교수, <sup>c</sup>영남대학교 공과대학 건설시스템공학과 부교수

### 요 지

현재 농업환경 및 식생활 변화 등으로 인하여 농지 수요는 꾸준히 감소하고 있다. 이러한 현상과 맞물려 정부에서는 2019년 6월에 물관리기본법을 제정함으로써 지속가능한 통합 물 관리시대를 본격화 하고 있다. 따라서 효율적인 통합 물 관리를 실현하기 위해서는 61%라는 가장 많은 용수를 사용하고 있는 농업용수에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 할 시점이다. 금회 연구에서는 현재 농업용수 사용량 현황을 분석함과 동시에 농업용수 중 67% ~ 87%의 비율을 차지하고 있는 논 용수 산정법을 검토한 후 문제점을 분석하였다. 논 용수 산정방법의 가장 큰 문제점은 잠재증발산량 산정식 선정에 있다. 현재 사용하고 있는 잠재증발산량 방법은 식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations: FAO)에서 권장하고 있는 Penman-Monteith 식이 아닌 과거부터 사용되고 있는 수정 Penman 식이다. 또한 실제 증발산량 산정의 주요 인자인 작물계수는 23년 전의 작물계수를 이용함으로써 현재 기후 및 작물품종 변화를 반영할 수 없다는 문제점을 가지고 있다. 전주기상청의 자료를 이용하여 Penman 및 Penman-Monteith 식을 비교한 결과 수정 Penman 식이 Penma-Monteith 식에 비하여 2배 이상의 큰 값을 보였다. 작물계수를 적용할 경우 증발산량이 높게 발생하는 5월 하순에서 8월 하순까지 두 산정방식에 의한 결과 차이가 크게 나타났다. 또한 전북 김제지역 4개 농업용 저수지 용수공급량 자료를 이용하여 실제 사용량과 산정된 농업용수 수요량을 비교 검토하였다. 잠재증발산량 뿐 아니라 담수심법에 따라 최적 수요량 산정방법에는 차이를 보였다.

**핵심용어:** Penman-Monteith, modified Penman, 작물계수, 논용수, 농업용수 사용량

\*Corresponding Author. Tel: +82-53-810-2883

E-mail: yseo@ynu.ac.kr (Y. Seo)

# 1. 서론

농업환경 및 식생활 변화 등으로 인하여 농지 수요는 꾸준히 감소하고 있다(Park *et al.*, 2017). 농업용수 수요는 경지면적과 밀접한 관련이 있으며, 2009년 이후 지속적인 감소 추세를 보이고 있다. 특히 통계청의 2018년 경지면적 조사결과에 따르면 2009년을 기준으로 논의 면적은 점차 감소하고 있으며 밭의 면적은 증가추세를 띄고 있다. 2018년 기준 논 면적은 844천 ha (52.9%)이고 밭 면적은 751천 ha (47.1%)로 구성되어 있으며, 밭의 면적이 논의 면적에 근접하고 있다. 2018년 기준 전체 경지면적은 2009년에 비하여 14만 1천 ha로 감소하고 있으며, 논 비율은 58.1%에서 52.9%로 5.2% 감소한 반면 밭의 비율은 41.9%에서 47.1%로 5.2% 증가하였다. 이러한 변화가 의미하는 것은 논의 경작면적이 감소하면서 감소한 논의 밭으로 전환되어 사용되었다는 것이다. 또한 매년 전체 경작면적은 1~2% 씩 감소하고 있다. 현재 국내 논, 밭 전환은 밭이 논으로 전환되는 면적 보다 논이 밭으로 전환되는 면적이 2.5배 높은 수준이며, 농지범용화 사업으로 논, 밭, 시설재배지의 전화이 더 활발해 질 것이다(Kim *et al.*, 2019).

이러한 현상과 맞물려 정부에서는 2019년 6월에물관리기본법을 제정함으로써 지속가능한 통합 물 관리를 실현하려는 움직임을 보이고 있다. 물관리기본법은 물을 효율적으로 관리하기 위한 목적을 가지고 있으며, 효율적인 물관리를 통해 국민의 생활의 질을 향상시키는데 있다고 할 수 있다(Lee, 2019). 통합물관리는 유역전체를 하나로 통합관리하여 물관리의 효율성 및 가치를 높이는 것이며, 유역에 내린 빗물에서부터 가정, 공장, 농업지대 등에서 사용하고 다시 바다로 흘러들어가는 물순환 전 과정에서 물의 지속가능성, 효율적 활용, 공평성을 달성하는 과정이다(Kim, 2019). 또한 2002년 Rio 결의를 통해 물 관리의 복잡성과 불확실성에 대한 솔루션으로 통합물관리 강화를 권고하였고, 통합물관리가 현재 당면한 물 문제 및 물관리의 해결책으로 삼고 있다(Park, 2018). 따라서 효율적인 통합 물 관리를 실현하기 위해서는 61%라는 가장 많은 용수를 사용하고 있는 농업용수에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 할 시점이다. 농업용수 수요량 산정과 관련된 연구는 Lee (2007)가 농업용수 수요량 산정에 대한 전반적인 문제점 및 개선방향을 제안하였다. Cho *et al.* (2018)은 기후변화 및 현장여건의 변화를 반영하기 위하여 기후인자인 벼 생육시기 및 작부시기변화, 작물계수의 변화 등이 있으며, 현장여건 변화인자로는 논경지 비율의 변화, 영농방법변화, 담수심변화 등이 포함된다고 하였다. 또한 통합물관리 차원에서 유역단위 물관리체제로 전환시 객관적이고 합리적인 농업용수 산정

방법론의 제시가 필요하다고 제시하였다.

금회 연구에서는 현재 농업용수 사용량 현황을 분석함과 동시에 농업용수 중 67~87%의 비율을 차지하고 있는 논용수 산정법을 검토한 후 문제점을 분석하였으며, 이를 통하여 통합수자원관리하 농업용수 수요량의 합리적 산정방안에 대하여 제시하고자 한다. 특히 현재 사용하고 있는 잠재증발산량 방법인 수정 Penman 식을 대신하여 UN식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations: FAO)에서 권장하고 있는 Penman-Monteith 식을 이용하여 전북지역 저수지 4개소에 적용, 실제 농업용수 공급량과 수요량 예측치를 비교 검토하였다. 또한 순용수량 산정 방법인 논 물수지 방법에서 적용하고 있는 60 담수심 법과 금회 개선안으로 제시한 50 담수심 법과의 순용수량 산정결과를 비교 분석하였다.

## 2. 농업용수 현황 및 문제점

### 2.1 농업 관련 주요지표 현황

국내 연평균 이용 가능한 수자원은 760억 m<sup>3</sup>으로 수자원 총량 1,323억 m<sup>3</sup>의 57%이며, 나머지는 증발산 등으로 손실되고 있다(MOLIT, 2016). 이중 바다로 유출되는 양을 제외한 372억 m<sup>3</sup>을 생활, 공업, 농업용수 등으로 이용하고 있다. 수자원장기종합계획(MOLIT, 2016)에 따르면(Table 1) 전체 이용 용수 중 농업용수가 전체 용수 사용량의 61%로서 가장 많이 사용하고 있다.

또한 농지면적은 농업용수 수요량과 밀접한 관계가 있으므로, 최근 농지면적 변화를 통계청 자료를 활용하여 검토하였다. 2018년 농업생산기반정비 통계연보(MOAFRA and KRCC, 2019)에 따르면 2018년 기준 경지면적은 전라남도, 경상북도, 충청남도, 전라북도의 순으로 나타나며, 경기도와 경상남도의 경우 비슷한 경지면적을 보이고 있다. 전라남도의 경우 논이 59.8%, 밭이 40.2%이며, 경상북도의 경우 논이 45.4%,

Table 1. Water resource usage

	Usage (Billion m <sup>3</sup> /year)	Ratio (%)
Water Demand, Industrial Water Demand, Irrigation Water Demand	251	100
- Water Demand	76	30
- Industrial Water Demand	23	9
- Irrigation Water Demand	152	61
River Management Flow	121	
Sum	372	

밭이 54.6%의 비율을 보이고 있다. 2018년 기준 논·밭의 비중이 가장 높은 곳은 충청북도와 전라북도이며 각각 69.3%, 64.6%로 구성되어 있다. 10년간(2009~2018년) 농지변화 추세는 지속적으로 전체 농경지 면적이 감소하고 있으며, 이 중 논·밭의 면적은 5.2% 감소하였으며, 밭의 면적은 5.2% 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

**2.2 농업용수 관련 주요지표 현황**

현재 농업용수 사용량에 대한 실측값을 제공하고 있지는 않지만 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서는 농업용수 수요량 산정방법을 이용하여 계산된 농업용수 이용량을 제공하고 있다. 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 농업용수 수요량은 수자원장기종합계획 수립 시 농업용수 산정 방법을 이용하여 계산하고 있으며, 논, 밭, 축산용수를 구분하여 제공하고 있다.

국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 자료를 이

용하여 전국 농업용수 사용률을 분석한 결과 2016년을 기준으로 전국에서 가장 많은 농업용수를 이용하는 곳은 Fig. 1과 같이 전라남도, 경상북도, 충청남도, 전라북도의 순으로 나타났다. 전체 농업용수 사용량 중 충청남도, 전라북도, 전라남도, 경상북도에서 전체 농업용수의 62.72%를 사용하고 있는 것으로 분석되었다

지역별 논·밭용수 및 밭용수 사용비율(Fig. 2)을 살펴보면 2016년 기준 전체 농업용수 사용량 중 제주도를 제외한 나머지 지역의 논·밭용수 수요량은 67~87%를 차지하고 있다. 밭용수에서는 제주도를 제외한 지역이 11~33%를 차지하고 있으며, 제주도를 포함한 논·밭용수 전체 사용율은 78.3%이며, 제주도를 제외할 경우 79.8%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 이와 같은 수치는 논이 국내 농업용수 수요량의 대부분을 차지하고 있다는 것을 의미하며, 수자원 총 이용량 중 농업용수의 논·밭용수가 차지하는 비율이 49.5%로서 수자원 총량의 50%가 논·밭용수로 이용되고 있음을 의미하고 있다. 단위면적당 논·밭

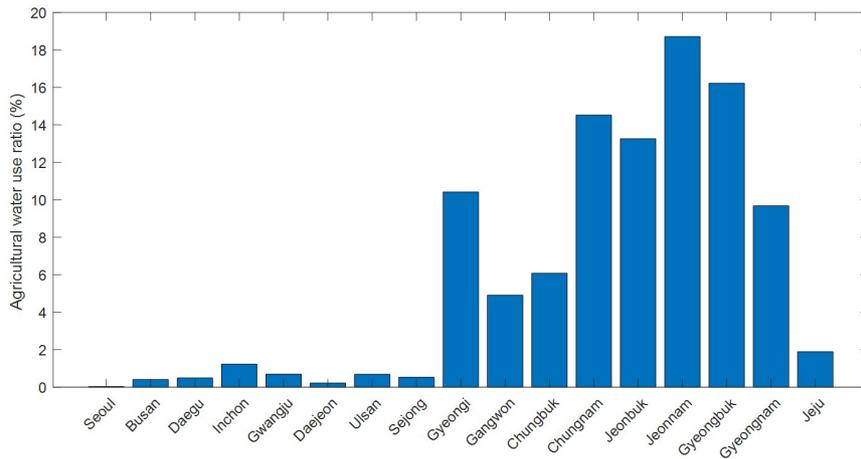


Fig. 1. National agricultural water use rate (2016)

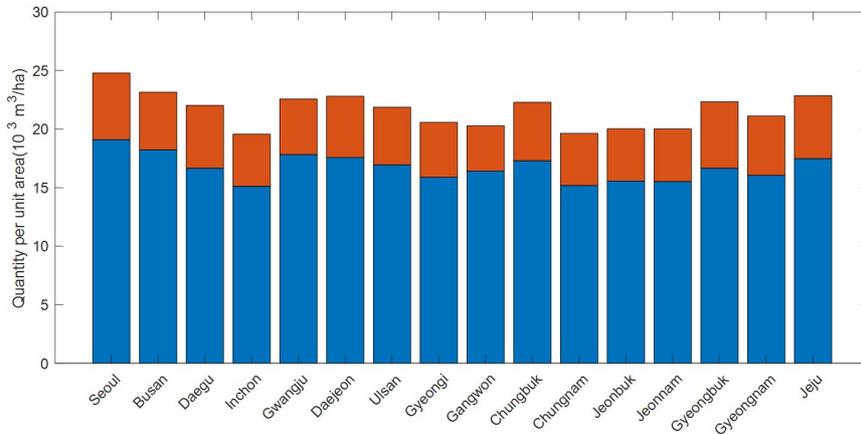


Fig. 2. Paddy and field water consumption per unit area

수 및 발용수 사용수량(Fig. 2)은 대부분의 지역에서 논용수의 단위면적당 사용량이 발용수의 3~4배 높은 값을 보이고 있으며, 논용수 단위면적당 사용량 평균은 16,712 m<sup>3</sup>/ha 로 분석되었다.

농업용수 수요량 측면에서 발농사 중심인 제주도를 제외할 경우 전체 농업용수량 중 논용수량이 차지하는 비율이 80%이며, 발용수는 19%, 축산용수는 1%인 것으로 조사되었다. 경지면적 기준으로 논과 밭의 경지면적 차이가 93천 ha로서 과거에 비하여 큰 차이가 나지 않음에도 농업용수 수요량에서 논용수가 차지하는 비율이 절대적인 상황이다. 앞서 언급한 바와 같이 농업용수 수요량에 대한 정확한 실측값이 제공되고 있지 않으며, 현재 제공하고 있는 농업용수 수요량의 대부분이 논 물수지 방법을 사용하여 추정된 값이다. 즉 농업용수의 효율적인 활용방안 및 통합 수자원관리를 실현하기 위해서는 농업용수의 대부분을 차지하고 있는 논용수 산정방법에 대한 면밀한 검토가 필요한 시점이다.

### 3. 연구대상 및 방법

농업용수 수요량은 장기계획 수립 및 연간 용수 수급계획 수립에 있어 중요한 요소이다. 하지만 생활용수 및 공업용수는 실측값에 기반한 수요량 산정식이 활용되는 반면, 농업용수는 실측값이 존재하지 않아 수요량 산정에 있어 수요량산정식에 전적으로 의존하고 있는 실정이다. 즉 농업용수 수요량은 검·보정 과정 없이 수요량산정식을 통하여 산정된 값을 수요량으로 정의하고 실무에 반영하고 있는데, 이는 수요량산정식에 적용되고 있는 다양한 매개변수들 및 식의 개념과 구성에 따라 수요량이 크게 변동될 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 문제점은 수요량을 과대로 예측할 수 있는 문제점이 있으며, 이는 가뭄과 같은 극한 상황발생시 용수 수급계획에 대한 문제점들이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 용수수요량의 50%를 차지하며, 농업용수 수요량의 80%를 차지하고 있는 논용수 수요량 산정방법에 대한 면밀한 검토를 통하여 현재 사용하고 있는 수요량 식의 문제점을 분석하고자 한다. 또한 개선된 방법들을 적용하여 산정된 수요량과 기존 방법을 이용하여 산정된 수요량을 비교검토를 수행하고자 한다.

#### 3.1 논용수 수요량 산정방법

논용수 수요량은 기상, 비의 품종, 물관리 등 여러 가지 인자에 의하여 영향을 받게 된다. 수요량을 발생시키는 주요인자는 비의 증발산량과 침투량 및 유효수량 등으로 구분되어

진다(MOST and MOLIT, 2001). 논용수 수요량 산정에서 의미하는 유효수량은 논에 내린 강우 중 비의 성장에 직접 이용되는 강우량으로 정의할 수 있으며, 한 필지의 필요수량은 다음과 같이 나타낼 수 있다(MOAF, 1998).

$$R_{eq}(t) = ET(t) + I - R_c(t) \quad (1)$$

여기서  $R_{eq}(t)$ 는 논에 대한 필요수량,  $ET(t)$ 는 증발산량,  $I$ 는 일 침투량,  $R_c(t)$ 는 유효수량을 의미한다. 또한 생육기간별 필요수량은 기상 상태에 따라 변하는 증발산량과 유효수량의 관계에 따라 시간의 함수로 나타낼 수 있다. 일반적으로 유효수량을 고려한 논에서의 물수지 식은 다음과 같이 정의할 수 있다(MOAF, 1998).

$$D(t) = D(t-1) + R_c(t) + R_{eq}(t) - U(t) \quad (2)$$

여기서  $D(t)$ 는  $t$ 일의 담수심(mm),  $D(t-1)$ 은 전일의 담수심,  $R_c(t)$ 는  $t$ 일의 유효수량(mm),  $U(t)$ 는 당일의 소비수량을 의미한다. 당일의 소비수량은 실제증발산량과 침투량의 합으로 나타낼 수 있으며, 실제증발산량은 작물계수와 잠재증발산량의 곱으로 산정할 수 있다.

강우량을 제외할 경우 증발산량과 침투량이 논용수 수요량의 주요 인자이므로, 증발산량과 침투량의 산정결과에 따라 논용수 수요량이 크게 변할 수 있다는 것을 의미한다. 침투량의 경우 한국의 전토양(MOAF and ADC, 1986)자료를 이용하여 산정할 수 있다(Maeng, 2006). 논에 대한 실제증발산량은 수정 Penman 식을 이용하여 산정한 잠재증발산량에 수정 Penman 식에 적합한 작물계수 값을 곱하여 산정하고 있다. 하지만 FAO에 따르면 수정 Penman 식의 경우 잠재증발산량이 과다 산정되는 점을 지적하고 건조 및 습윤 기후에 비교적 정확하고 일정한 경향을 가지고 있는 Penman-Monteith 식을 통일하여 사용하기로 결정하였다(Allen *et al.*, 1998). 이와 같은 FAO의 결정은 국내 논 용수량 산정에 적용하고 있는 수정 Penman 식을 사용할 경우 용수수요량이 과다산정 될 수 있다는 것을 의미한다.

#### 3.2 잠재증발산량

국내 증발산량에 대한 연구는 기관별로 1960년대부터 여러 지역에서 수행되었다(Yoo *et al.*, 2006). 서울대 농업개발 연구소에서는 1982년부터 1986년까지 5개년 동안 논벼의 품종에 대하여 서울, 수원을 포함한 전국 9개 지역에 대하여 소비수량을 산정하였다. 그 결과를 Blaney-Criddle, 수정

Penman, A Pan 증발계 등에 의해 지역별로 잠재증발산량을 산정하여 각각의 작물계수를 산정하였다(Chung, 1987). 특정작물의 증발산량을 산정하는 것은 기후조건, 토양수분, 작물 종류와 생육조건 등의 복잡한 관계를 함께 규명하여야 하는 어려움 때문에 일반적으로 알팔파 또는 잔디 등 기준작물의 잠재증발산량에 해당 작물계수를 곱하여 구한다(Yoo *et al.*, 2006).

현재 논용수 산정에 사용되고 있는 수정 Penman 식(Doo-renbos and Pruitt, 1977)은 여름의 경우  $\pm 10\%$ 인 최소오차를 가지고, 낮은 증발 조건에서는  $\pm 20\%$ 이상의 오차를 가지며, 관계계획, 수문모형 등에 많이 이용되는 공식이다(Choi *et al.*, 1997).

$$ET_0 = C[W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d)] \\ = C\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_n + \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d)\right] \quad (3)$$

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),  $e_s$  포화수증기압(mb),  $e_a$  실제 증기압(mb),  $C$  주야의 기후차에 의한 보정계수를 의미한다.

그리고 FAO에서 추천한 Penman-Monteith 공식은 1965년에 처음으로 제안된 방법으로 Penman 공식의 공기동역학 조건에 작물형에 따른 기공저항(stomatal resistance)를 포함하여 수정한 방법이며(Allen *et al.*, 1998) 아래의 식과 같다.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \\ \approx 0.408 \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \cdot (R_n - G) + \\ \frac{900}{T+273} \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \quad (4)$$

여기서  $ET_0$  기준잠재증발산량(mm/day),  $\Delta$  증기압 곡선의 기울기(kPa/°C),  $R_n$  지구(작물) 표면에서 순수하게 축적되는 에너지(MJ/m<sup>2</sup>day),  $\gamma$  건습계 상수(kPa),  $u_2$  2 m 높이에서 풍속(m/s),  $e_s$  포화수증기압(kPa),  $e_a$  실제 증기압(kPa)을 나타낸다.

### 3.3 작물계수 및 담수심

실제증발산량 산정은 잠재증발산량 값에 작물계수 값을

곱하여 산정하게 된다. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 웹사이트에서 제공하고 있는 메뉴얼에 의하면 작물계수 산정방법은 크게 직접계산법과 작물계수 접근법으로 구분되어진다. 90년대 경우 국내에서 작물계수에 대한 많은 연구들이 이루어 졌으며, 대부분 라이시미터(lysimeter)를 이용하는 직접계산방법을 이용하여 실제 증발산량을 측정한 후 작물계수를 산정하였다. 「작물소비수량 산정방법의 정립」(MOAF and ADC, 1986)에서는 5개년(82~86년) 동안의 전국 9개 시험포장에 지역에서 생육기별 증발산량을 실측하여 작물계수를 산정하였다. 이 연구에서는 국내를 크게 북부, 중부, 남부로 나누어서 관개기간별 작물계수를 제공하고 있다. 「농업생산기반 정비사업 계획설계기준 관계편」(MOAF, 1998)에서는 두 개의 잠재증발산량 값을 제공하고 있다. 첫 번째는 「소비수량 산정방법 실용화 연구」(ADC, 1989) 자료로서 작물소비수량 산정방법의 정립의 연구결과와 같은 형태의 자료를 제공하고 있으나 계수값은 다소 차이가 있다. 두 번째는 농업용수개발 필요수량 산정기준(RDC, 1980) 자료로서 재래종과 신품종에 대한 작물계수 값을 제공하고 있다. 현재 수자원장기종합개발계획 및 WAMIS의 농업용수 수요량 산정 등에 이용하고 있는 작물계수 값은 「영농방식변화에 따른 필요수량 변화연구」(MAF, 1997)의 연구결과에서 제공하고 있는 작물계수 값을 사용하고 있다. 이 연구는 기존의 농업용수개발 필요수량 산정기준과 소비수량 산정방법 실용화 연구를 고려하여 수정 Blaney-Criddle 방법과 수정 Penman 방법의 작물계수를 제공하고 있다. 2000년대 전까지는 대부분의 작물계수는 수정 Penman 식에 대한 것을 제공하였다. Yoo *et al.* (2006)은 Penman-Monteith 식과 수정 Penman 식에 대한 작물계수를 산정하여 품종별로 나누지 않고 지역별 순별에 따른 작물계수 값을 제시하였다.

담수심은 벼 재배시 논에 일정량의 물을 저류하게 되며, 이때 저류되는 물의 수심을 의미한다. 담수심은 벼의 생육단계별로 변하게 되며, 특정 월에는 논물의 물을 완전히 배수하여 벼의 발육상태를 조절하게 된다. 담수심은 논물수지 산정방법에 적용하고 있으며, 현재 일반적으로 적용하고 있는 담수심법은 60 담수심법으로 최대 담수심 80 mm, 최소담수심 20 mm를 기준으로 하고 있다. 농사로 일반벼 기계이앙 재배 물관리편(RDA, 2020)의 벼 생육단계별 물관리 방법을 분석할 경우 최대 담수심은 70 mm, 최소 담수심은 20 mm로 제시하고 있다. 금회 연구에서는 과거부터 적용해온 60 담수심법과 농사로에서 제시하고 있는 50 담수심법 적용에 따른 논용수 수요량 변화를 분석하였다.

### 3.4 대상지역 및 관측자료

본 연구의 최종목적은 논용수 수요량 산정방법 개선에 따른 논용수 수요량 결과를 분석하는 것이다. 이에 따라 선정된 지역은 크게 네 가지 기준에 의하여 선정되었다. 첫 번째 주로 논용수 위주로 사용하는 지역으로 시설재배지가 최소인 지역이다. 두 번째는 취수목적이 농업용수 공급으로 한정된 지역으로 취수장 및 양수장의 간섭이 최소화된 곳이다. 세 번째는 저수지의 수위 자료 등 확보를 위해 농촌용수 종합정보시스템을 활용할 수 있는 지역이며, 마지막 네 번째는 농촌 용수시설의 정보가 많이 부족함으로 이를 보완할 수 있는 최신 연구보고서 자료 활용이 가능한 지점을 선정하였다. 이러한 기준에 선정된 지역은 전라북도 김제시의 4개 저수지(대화, 금평, 당월, 선암 저수지)로서 금회분석에 사용된 기상자료는 위의 4개 저수지와 가장 근접한 지역인 전주기상청 자료를 활용하였다. 기상자료는 최근 10개년(2009 ~ 2018년) 자료를 활용하였으며, 잠재증발산량 산정을 위하여 최저기온, 최대기온, 풍속, 최저습도, 최대습도, 일조시간 자료를 이용하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 잠재증발산량 산정

전주기상청의 10개년 자료를 이용하여 수정 Penman 식과 Penman-Monteith 식에 대한 잠재증발산량을 산정하였다. Penman-Monteith 식과 수정 Penman 식의 전주지역에 대한 경향과 차이를 알기 위하여 Fig. 3은 2009년 1월 1일부터 2018

년 12월 31일까지 10년간 잠재증발산량을 순별로 평균한 결과를 도시한 것이며, 여기서 E, M, L은 early, mid, late의 약자로 각 월의 초순, 중순, 하순을 의미한다. 두 개의 식 모두 5월에 가장 큰 값인 43.2 mm와 52.5 mm로 나타났다. 이러한 원인은 5월이 상대적으로 습도가 낮으며 온도는 높기 때문인 것으로 사료된다. 6월 하순에서 7월 중순까지 잠재증발산량이 낮은 원인은 장마기간 및 높은 습도 등의 원인으로 5월에 비하여 잠재증발산량이 낮게 산정된다. 또한 관개기간에 해당하는 5월에서 9월은 잠재증발산량이 가장 많은 시기에 해당하며, 이때 산정된 잠재증발산량의 값에 따라 논용수의 수요량이 결정된다고 할 수 있다.

Table 3은 논농사 기간을 고려하여 순별로 산정된 잠재증발산량을 정리한 것이다. 2009년부터 2018년까지 Penman-Monteith 식을 적용하여 산정한 잠재증발산량은 최대 498.6 mm에서 최소 412.1 mm이며, 최대와 최소의 차는 86.5 mm 나타났다. 관개기간 중 수정 Penman 식과 Penman-Monteith 식을 이용하여 산정한 잠재증발산량 최대값과 최소값 차이의 평균은 14.2 mm와 6.8 mm이며, 최대값의 경우 수정 Penman 식이 Penman-Monteith 식에 비하여 20% 가량 크게 산정되는 경향을 보이고 있다. 최소값은 최소 27.5%에서 최대 47.3%까지의 차이를 보이고 있다. 관개기간동안의 이러한 차이는 실제용수 수요량 추정을 과대산정하게 되는 원인이 될 수 있다. Jensen *et al.* (1990)에 의하면 라이시미터를 이용한 실측 데이터를 기반으로 잠재증발산량 산정 방법에 따른 정확도를 연구한 결과에 의하면, 평균적으로 가장 높은 값을 나타내는 기간에서는 실측값에 비해 수정 Penman 식은 122%, Penman-

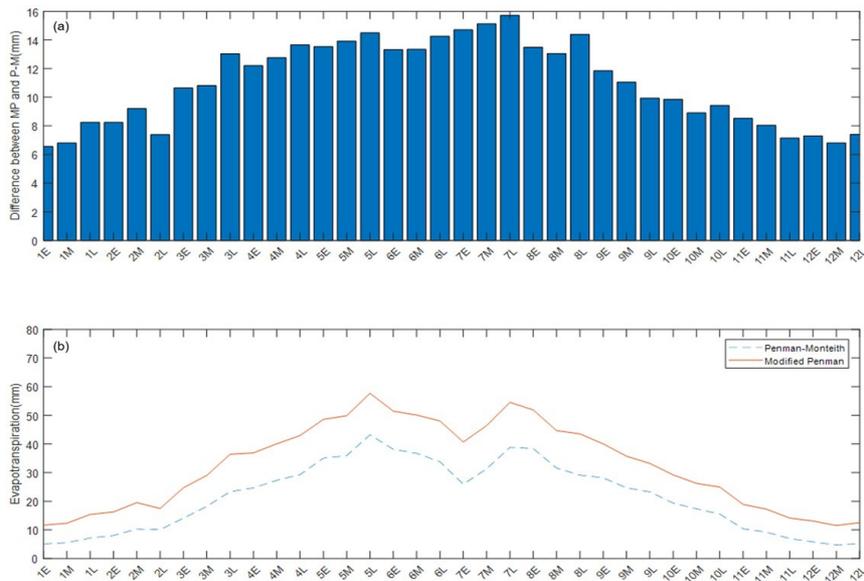
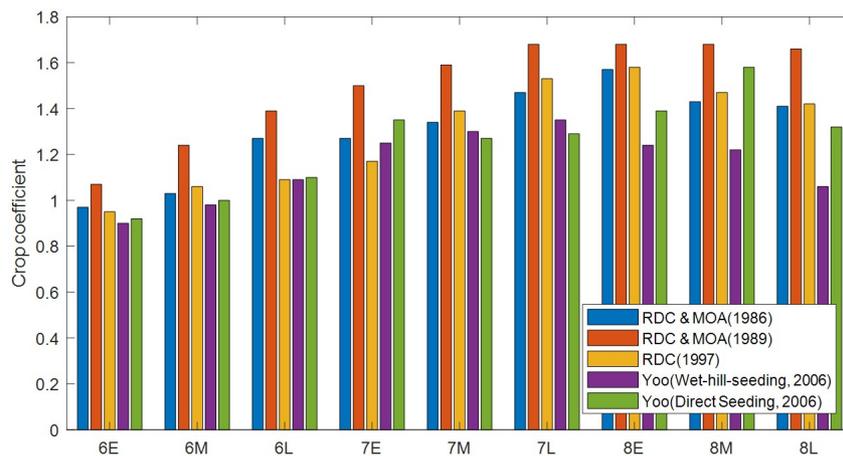


Fig. 3. Estimated of evapotranspiration in Jeonju

**Table 3.** Estimated 10-days PET in Jeonju

		5M	5L	6E	6M	6L	7E	7M	7L	8E	8M	8L	9E	9M	9L	total
2009	P-M	32.3	44.3	32.9	45.9	39.7	29.9	19.0	29.5	35.4	27.3	35.1	36.1	29.2	19.2	455.8
	M-P	45.9	60.1	48.1	60.8	54.4	45.6	36.6	44.3	47.8	41.3	49.3	47.8	40.3	28.7	651.1
2010	P-M	34.8	30.3	47.8	28.6	34.8	29.6	32.0	34.6	32.2	25.4	25.2	25.2	27.2	21.1	428.7
	M-P	48.9	46.5	60.7	42.3	48.7	43.9	49.2	52.4	46.6	41.4	41.4	40.1	40.2	32.6	634.9
2011	P-M	38.1	35.0	37.8	43.4	24.6	20.1	34.3	28.0	29.4	18.1	25.9	27.9	23.4	26.1	412.1
	M-P	52.7	49.5	51.8	57.0	43.9	36.3	50.8	45.9	46.4	32.3	35.8	40.3	35.3	37.0	614.9
2012	P-M	32.0	48.3	35.5	37.6	39.9	24.8	18.6	49.4	48.6	22.9	22.4	25.3	14.2	25.3	444.9
	M-P	45.4	62.1	48.9	51.5	55.6	40.8	34.1	65.2	61.9	38.0	40.9	37.2	27.0	35.0	643.6
2013	P-M	41.9	37.9	44.6	28.4	35.3	25.0	43.2	32.3	42.4	52.2	35.2	27.7	27.8	24.7	498.6
	M-P	55.7	52.6	57.7	41.3	48.1	42.3	61.8	51.4	56.1	64.7	48.0	38.3	38.6	34.3	691.0
2014	P-M	39.6	51.1	32.7	36.5	39.0	28.9	28.9	42.5	24.3	22.0	28.5	28.7	29.4	22.4	454.6
	M-P	52.3	64.9	45.1	48.6	52.0	40.0	40.7	57.3	38.8	31.4	40.0	38.8	38.5	31.0	619.4
2015	P-M	37.9	53.0	43.0	34.5	28.6	32.5	27.3	30.1	44.6	28.0	28.5	30.1	28.3	26.3	472.7
	M-P	52.3	65.5	54.8	47.1	41.3	46.1	43.2	45.9	59.0	40.3	43.4	42.5	39.3	36.2	657.0
2016	P-M	40.8	44.6	34.1	31.7	28.5	24.2	29.1	50.2	38.0	44.1	35.2	26.5	22.8	19.0	468.6
	M-P	55.0	59.0	46.4	45.4	43.2	38.6	43.1	66.7	50.4	56.5	51.9	38.8	32.2	28.7	656.1
2017	P-M	38.4	47.5	34.1	46.7	34.9	20.3	29.7	35.7	41.5	26.5	34.6	27.7	25.4	25.5	468.4
	M-P	52.6	62.7	49.5	60.1	47.1	35.4	41.5	45.7	51.4	37.0	48.3	36.7	37.2	35.0	640.5
2018	P-M	23.6	40.1	38.7	34.2	32.4	24.6	51.0	55.7	47.5	49.5	20.7	26.8	19.1	23.2	487.1
	M-P	37.9	54.0	51.4	46.8	46.0	37.8	63.2	70.3	60.4	63.5	36.4	39.9	28.8	33.6	670.1

P-M: Penman-Monteith method, M-P: Modified Penman method



**Fig. 4.** Comparison of crop coefficient

Monteith 식은 97%의 정확도를 보이며, 계절별로 비교할 경우에는 Penman 식은 127%, Penman-Monteith 식은 101%의 정확도를 보이고 있는 것으로 조사되었다. 금회 분석지역 결과에 있어서 Penman-Monteith 식과 수정 Penman 식을 비교한 결과 수정 Penman 식이 20% 이상의 과대 산정 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2 작물계수 비교

앞서 언급된 작물계수 산정 연구결과 중 Penman 식에 적용하는 작물계수 값을 비교 검토하였으며 Fig. 4와 같다. 각 연구 결과에 따라 관개시작 기간이 상이하어 최대 잠재증발산 기간인 6월 상순에서 8월 하순까지의 작물계수를 비교하였다. Yoo *et al.* (2006)이 제시한 이앙재배의 작물계수 값과 현재

농용수 수요량 산정에 적용하고 있는 1997년 농어촌진흥공사에서 제시한 값을 비교할 경우 7월 상순, 8월 상순에서 하순까지의 작물계수 값의 차이가 크다. 또한 소비수량 산정방법 실용화 연구(ADC, 1989) 값의 경우 다른 식들에 비하여 매우 크게 산정되었다. 두 연구자료에서 사용한 실제증발산량 측정자료는 수원과 대구지역에서 1995~1997년 자료를 이용하였으나, 기상자료의 경우 Yoo *et al.* (2006)은 1974년 1월 1일부터 2003년 12월 31일까지 자료를 이용하였다. 즉 작물계수는 기상자료의 조건에 따라 크게 바뀔 수 있다는 것을 나타내는 것이며, 작물계수 산정은 신중히 이루어져야 한다는 것을 의미한다.

**4.3 실제증발산량 산정**

실제증발산량 산정은 수정 Penman 식의 작물계수 값과 Penman-Monteith 식의 작물계수 값을 적용하여 계산하였다. 수정 Penman 및 Penman-Monteith 식에 적용하는 작물계수 값은 동일한 조건에서 산정된 Yoo *et al.* (2006)이 제안한 이앙 재배에 대한 작물계수 값을 적용하였다(Table 4).

작물계수 값은 Penman-Monteith 식이 수정 Penman 식에 비하여 크게 산정된 결과를 보여주고 있다. 이는 작물계수 산정 방법에 기인하는 것으로 수정 Penman 식의 값이 실제 증발

산량보다 크게 산정되기 때문이다. 이론상으로 작물계수 값을 기준으로 할 때 수정 Penman 식과 Penman-Monteith 식을 이용하여 산정한 실제증발산량은 같아야 한다. 하지만 현재 농용수 수요량 산정에 사용하는 작물계수 값은 과거에 산정된 값을 그대로 사용하고 있으므로, 산정시점에 대한 기후조건 및 작물생육 조건 등을 완전히 동일하게 유지할 수 없기에 이에 따른 차이가 발생하게 된다. Fig. 5는 이러한 차이를 보여주고 있다.

수정 Penman 식과 Penman-Monteith 식에 사용되는 작물계수를 적용하여 실제증발산량 차이를 분석한 결과 최대값의 경우 2010년에서 16.10 mm의 가장 큰 차이를 보이고 있다. 2017년은 3.17 mm로서 가장 작은 차이를 보이고 있으며, 최소값의 경우 2011년이 7.13 mm, 2017년에서 2.50의 차이를 보였다. 또한 증발산량이 많은 기간인 6월 상순에서 8월 하순까지 두 식의 실제증발산량 차이가 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 과거에 산정된 작물계수 값을 적용하는 시점의 기후환경, 작물생육환경, 품종 등의 특성을 완전히 반영하지 못하고 있기 때문이다. 즉 이러한 차이는 수정 Penman 식과 Penman-Monteith 식의 실제증발산량 산정 결과의 차이를 발생하게 되고 농업용수 수요량의 과대추정이 발생할 수 있는 원인이 된다.

Table 4. Crop coefficient (Wet-hill-sedding)

	MAY		JUN			JUL			AUG			SEP
	5M	5L	6E	6M	6L	7E	7M	7L	8E	8M	8L	9E
P-M	0.78	0.97	1.07	1.16	1.28	1.45	1.5	1.58	1.46	1.45	1.25	1.01
M-P	0.65	0.8	0.9	0.98	1.09	1.25	1.3	1.35	1.24	1.22	1.06	0.83

P-M: Penman-Monteith, M-P: Modified Penman

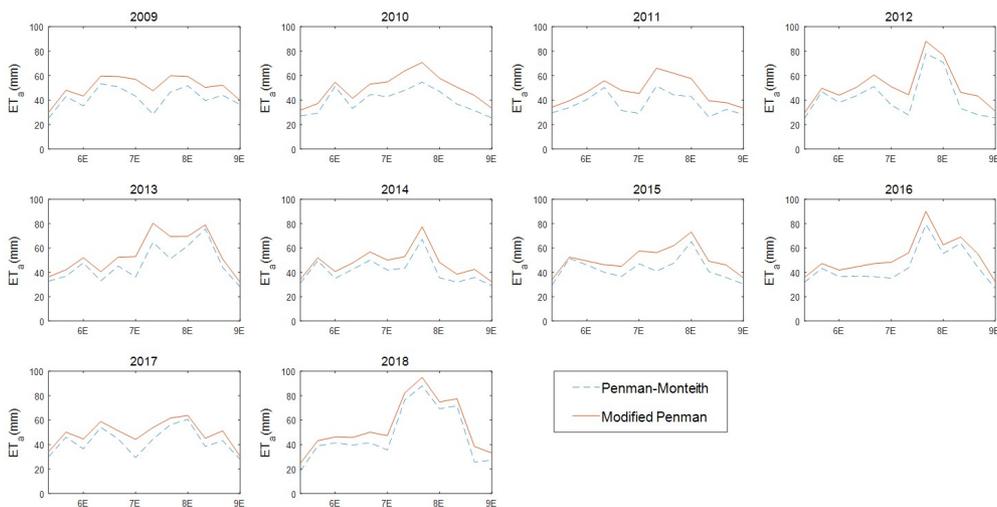


Fig. 5. Comparison of actual evaporation of P-M and M-P

#### 4.4 논용수 수요량 산정비교 검토

본 연구에서는 위 논의된 농업용수 산정과정을 실제 공급량 자료를 추산할 수 있는 전북 김제지역 4개 농업용 저수지에 적용, 실제 공급량과 수요량 산정치를 비교, 검토하였다. 논용수 여유수량 산정은 Eqs. (1) and (2) 및 앞서 산정한 잠재증발산량 값을 이용하여 산정하였다. 산정된 결과는 농촌용수 물순환 종합해석 모형기술 개발보고서(MOAFRA, 2015)의 2011년과 2012년 평균 농업용수 공급량과 최근 한국농어촌공사에서 발간한 2019년 저수지 수문조사연보에서 제공하고 있는 저수율과 수위자료를 이용하였다. Table 5는 농촌용수 물순환 종합해석 모형기술 개발보고서에서 제공하고 있는 농업용수 공급량과 수문조사연보의 수위자료 및 저수율 자료를 이용하여 환산한 저수지 공급량을 나타낸 것이다.

2011 ~ 2012년 평균 농업용수 공급량과 비교하면 2019년도 실측자료를 이용하여 산정한 공급량은 금평저수지는 1.9배, 대화저수지는 3.7배, 당월저수지는 3.7배, 선암저수지는 2배 차이가 발생하였다. 2011년도 강우량은 1621.8 mm, 2012년도 강우량은 1359.7 mm, 2019년 강우량은 968.9 mm로서 2019년 강우량은 2011년 대비 40.2%, 2012년 대비 28.7% 감소한 양이다. 관개기간은 5월에서 9월까지로 볼 수 있으며, 관개기간 동안의 강우량은 2011년이 1290.6 mm, 2012년이 1024.0 mm, 2019년이 623.4 mm로 계산되었다. 2011 ~ 2012년 평균 농업용수 공급량과 2019년 공급량의 차이가 발생하는 원인이 강우량에 기인한다고 볼 수 있다. 그러나, 저수지 수

위자료를 검토할 경우 강우량 감소로 인하여 저수지의 수위가 제한수위까지 내려가지 않았으므로 공급량의 감소가 전적으로 강우량 감소로 인한 것이라 볼 수 없다.

연구대상 지역의 논용수 수요량 산정은 수자원장기종합계획에서 적용하고 있는 방법을 이용하였으며, 조용수량 산정은 송수손실율 7%, 배분관리용수율 11%를 적용하였다.

금회 제시하고 있는 논용수 수요량 산정의 개선방법은 잠재증발산량 산정방법과 논 물수지 방법에서 적용하고 있는 60 담수심이다. 잠재증발산량 산정방법은 현재 사용하고 있는 수정 Penman 식과 Penman-Monteith 식을 적용하여 잠재증발산량 산정방법 차이로 발생하는 용수량 차이를 분석하였다. 담수심법의 경우 농촌진흥청에서 운영하고 있는 농사로의 일반비 기계이양 재배 물관리 정보인 벼 새육단계별 물관리 방법을 분석하여 기존 60 담수심 법에서 50 담수심법을 적용하여 분석하였다. 분석결과는 Table 6과 같다.

송용수량 산정결과에 송수손실율 및 배분관리용수율을 적용하여 계산한 공급량을 앞서 계산한 실측 공급량과 비교를 수행하였다. 저수지 4개소에 대해 산정한 수요량과 저수지 공급량을 2011 ~ 2012년 평균 공급량과 비교한 결과(Table 7) 평균 오차는 최소 1.2 ~ 최대 6.6%로 수요량과 공급량이 10% 이내로 근사한 것으로 검토되었다. 금평, 선암 저수지의 경우 Penman-Monteith 식을 적용한 계산한 50담수심법이 공급량과 가장 유사한 수요량 산정결과를 나타내었으며, 대화, 당월 저수지의 경우 수정 Penman 60담수심법과 가장 유사한 산정

Table 5. Reservoir agricultural water demand

Unit: ten thousand m<sup>3</sup>

	Geumpyeong		Daehwa		Dangwol		Seonam	
	①	②	①	②	①	②	①	②
January	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
February	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.02
March	0	1.58	0	0.62	0	0.00	0	0.00
April	0	0.00	10.7	1.24	0	0.00	0	0.60
May	56.6	97.97	97.6	70.15	17.2	18.64	10.1	26.11
June	320.9	131.69	126.6	38.43	63.2	22.53	48.1	15.62
July	15.6	17.38	66.8	1.96	24.3	0.00	6.4	1.28
August	79.1	52.67	99.5	18.90	23.7	1.07	14.3	4.52
September	74.4	0.00	118.3	34.66	29.4	0.54	24.9	2.56
October	72.3	0.00	87.1	0.00	0	0.00	0	0.09
November	0	1.05	0	0.00	0	0.00	0	0.43
December	0	27.92	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Sum	618.9	330.27	606.7	165.95	157.7	42.77	103.9	51.23

① : Development of a Rural Water Resources Assessment Tool (MOAFRA, 2015)

② : Reservoir Hydrological Survey Yearbook (KRC, 2020)

**Table 6.** Net duty of water result according to ponding depth and evapotranspiration calculation method

Unit: mm

	Penman-Monteith (PM)					Modified Penman (MP)					rainfall
	60 ponding depth	Effective rainfall	50 ponding depth	Effective rainfall	Evapo-ration	60 ponding depth	Effective rainfall	50 ponding depth	Effective rainfall	Evapo-ration	
2009	629.3	737.9	593.1	754.0	579.5	692.4	789.0	757.1	666.5	698.8	955.4
2010	474.5	582.1	469.7	566.9	548.9	541.8	619.1	613.1	579.4	686.1	1071.7
2011	466.8	507.6	449.7	504.7	514.1	463.3	631.8	454.1	618.1	654.1	1290.6
2012	678.6	562.4	635.6	585.4	576.4	742.8	602.8	694.1	631.5	699.3	1024.0
2013	542.4	514.9	514.0	518.3	635.5	609.4	584.5	673.8	464.7	746.8	908.1
2014	606.5	497.7	558.3	525.9	573.0	665.8	511.0	577.9	572.1	661.8	795.1
2015	757.3	295.5	707.3	351.0	590.4	834.3	334.6	828.8	327.0	696.8	372.9
2016	725.9	353.4	741.5	317.7	599.1	864.7	305.6	778.7	371.5	710.9	613.1
2017	663.6	458.4	619.7	537.1	585.3	670.6	522.1	691.9	533.1	676.1	732.1
2018	684.6	365.9	636.3	383.6	636.0	733.8	392.2	751.2	340.2	736.3	899.1
2019	605.6	489.9	582.6	484.3	547.5	637.1	537.5	643.0	511.5	655.6	623.4
Average	621.4	487.8	591.6	502.6	580.5	677.8	530.0	678.5	510.5	693.0	844.1

**Table 7.** Comparison of paddy water demand calculation results and reservoir water supply

Unit: 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

	Development of a Rural Water Resources Assessment Tool (2011-2012 average)					Reservoir Hydrological Survey Yearbook				
	PM(60)	PM(50)	MP(60)	MP(50)	Supply	PM(60)	PM(50)	MP(60)	MP(50)	Supply
Geumpyeong	670.1	635.0	705.6	671.7	618.9	708.6	681.6	745.4	752.3	304.1
Daehwa	541.4	513.0	570.1	542.8	606.6	572.5	550.7	602.3	607.8	166.0
Dangwol	92.4	87.6	97.3	92.7	157.8	97.8	94.1	102.8	103.8	42.8
Seonam	150.1	142.3	158.1	150.5	103.8	158.8	152.7	167.0	168.5	51.4
Average	363.5	344.5	382.8	364.4	371.8	384.4	369.8	404.4	408.1	141.1

결과를 나타냈다. 하지만 2019년도 공급량 자료와 비교한 결과 수요량 대비 공급량이 약 50%에 불과한 것으로 나타났다.

### 5. 결론

농업용수는 전체용수량의 61%를 차지하는 가장 큰 용수 수요원이며, 이 중 논용수는 49%로서 용수공급의 절반을 차지하고 있다. 본 연구에서는 현재 이용하고 있는 논용수 산정법을 중심으로 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. 첫째 논용수 산정식이 개발된 이래로 현재까지 잠재증발산량 산정은 수정 Penman 식을 이용하고 있다. 이는 논용수 수요량을 과대 추정할 수 있다는 문제점이 있다. 따라서 FAO에서 권고하고 있는 Penman-Monteith 식을 적용할 필요성이 있다. 두 번째는 작물계수로서 90년대에 개발된 작물계수를

20년이 지난 현시점에 사용하고 있는 것이다. 주요 연구에서 산정된 작물계수를 비교검토한 결과 동일한 실측 증발산량을 이용하더라도 분석기간에 사용한 기후자료에 따라 작물계수가 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 실제 전북 김제 지역 4개 저수지에 수요량 예측과 실제 공급량을 비교 검토한 결과 담수심법에 따라서도 실제 공급량과 비교한 추정량의 오차가 크게 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 농업용수는 용수공급에 있어 가장 큰 부분을 차지하고 있음에도, 상대적으로 증발산산정공식 뿐 아니라 작물계수, 수로 손실율, 배분손실율, 담수심 등 많은 기준들의 개발 년도가 1990년대 후반에 머물러 있다. 앞으로 많은 관심과 연구, 그리고 적극적인 투자를 통해 이러한 기준들을 변화된 영농환경, 기후환경에 맞추어 개선해 나가야 할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국수자원공사의 지원으로 수행되었습니다. 상세하게 논문을 검토하여 논문의 보완에 도움을 주신 모든 심사자 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

## References

- Agricultural Development Corporation (ADC) (1989). *A study of the estimation water demand*. pp. 3-184.
- Allen R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, xxvi, p. 300.
- Cho, G.H., Choi, K.S., Lee, J.N., and Kwon, H.J. (2018). "Study on the improvement of the calculation method of agricultural water." *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, pp. 80-80.
- Choi, J.Y., Chung, H.W., and Kim, D.S. (1997). "Development of a cell-based long-term hydrologic model using geographic information system-(2)-pre and post processor development." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 39, No. 2, pp.103-112.
- Chung, H.W. (1987). *A study on consumptive use of paddy field*. Ministry of Agriculture-Forestry-Fisheries.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements, irrigation and drainage*. Paper no. 24. Food and Agriculture Organisation, Rome.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 70, ASCE, N.Y.
- Kim, B.J. (2019). "Creation of a new growth engine in Korea through Integrated Water Resources Management (IWRM)." *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 67, No. 4, pp. 12-13.
- Kim, S.H., Kang, M.S., Kim, K., and Lee, H. (2019). "The analysis of land use change impact in agriculture land on hydrology and water quality" *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, p. 37.
- Korea Rural Community Corporation (KRC) (2020). *2019 Reservoir Hydrological Survey Yearbook*. pp. 2-833.
- Lee, G.-H. (2007). "Agricultural water demand estimation method and improvement plan." *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 49, No. 3, pp. 4-14.
- Lee, Y.-G. (2019). "A study on the law of the framework act on water management." *Water for future*, Vol. 52, No. 3, pp. 48-52.
- Maeng, S.-J., (2006). "Investigation of factors for estimating agricultural water demand." *The Korean Society of Agricultural Engineer*, Vol. 48, No. 2, pp. 9-14.
- Ministry of Agriculture and Forestry (MOAF) (1998). *Design criteria for the agricultural infrastructure development project: Irrigation part*. pp. 9-562.
- Ministry of Agriculture and Fisheries (MOAF), Agricultural Development Corporation (ADC) (1986). *Establishment of crop consumptive use estimation*. pp. 3-190.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MOAFRA) (2015). *Development of a rural water resources assessment tool*.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MOAFRA) Korea Rural Community Corporation (KRCC) (2019). *Statistical yearbook of land and water development for agriculture*, pp. 4-752.
- Ministry of Agriculture and Forestry (MAF) (1997). *Study on water demand for the variation of farming conditions in paddy field*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *Water Vision 2020(2001-2020) 3<sup>rd</sup> revised plan*. pp. 7-131.
- Ministry of Science and Technology (MOST) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2001). *Water demand forecasting guidelines (proposal)*. pp. 1-142.
- Park, S. (2018). *Unified Water Management (IWRM) unification policy and major countries' cases*. Ministry of Environment, KEITI, pp. 2-13.
- Park, S., Jung, M., and Min, K. (2017). *The current status of changes in Korean rural villages and direction for mid- and long-term development (Year 3 of 5)*. Report 830, No.17-35-01, Korea Rural Economic Institute, pp.174
- Rural Development Administration (RDA) (2020). General rice-machine transplanting rice (water management), accessed 26 August 2020, <<http://www.nongsaro.go.kr>>.
- Rural Development Corporation (RDC) (1980). *Criteria for evaluating the water demand for agricultural water development*.
- Yoo, S.H., Choi, J.Y., and Jang, M.W. (2006). "Estimation of paddy rice crop coefficients for FAO penman-monteith and modified penman method." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 48, No. 1, pp. 13-23.