

## 기후변화 시나리오를 이용한 미래 읍면동단위 기준증발산량 데이터베이스 설계 및 구축

김태곤 · 서교\* · 남원호\*\* · 이제명\*\*\* · 황세운\*\*\*\* · 유승환\*\*\*\*\* · 홍순욱\*\*\*\*\*

미네소타대학교 환경연구소 · \*서울대학교 국제농업기술대학원 및 그린바이오과학기술연구원

\*\*환경대학교 지역자원시스템공학과 · \*\*\*교토대학교 지역환경과학전공

\*\*\*\*경상대학교 지역환경기반공학과 · \*\*\*\*\*전남대학교 지역바이오시스템공학과 · \*\*\*\*\*한국농어촌공사 농어촌연구원

## Design and Implementation of Reference Evapotranspiration Database for Future Climate Scenarios

Kim, Taegon · Suh, Kyo\* · Nam, Won-Ho\*\* · Lee, Jemyung\*\*\* · Hwang, Syewoon\*\*\*\*  
Yoo, Seung-Hwan\*\*\*\*\* · Hong, Soun-Ouk\*\*\*\*\*

*Postdoctoral associate, Institute on the Environment, University of Minnesota, Saint Paul, Minnesota, USA*

*\*Associate Professor, Graduate School of International Agricultural Technology, Institute of Green Bio Science & Technology, Seoul National University*

*\*\*Assistant Professor, Department of Bioresources and Rural Systems Engineering, Hankyong National University*

*\*\*\*Postdoctoral associate, Division of Environmental Science and Technology, Kyoto University, Japan*

*\*\*\*\*Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering, Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University*

*\*\*\*\*\*Assistant Professor, Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University*

*\*\*\*\*\*Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation*

**ABSTRACT** : Meanwhile, reference evapotranspiration(ET0) is important information for agricultural management including irrigation planning and drought assessment, the database of reference evapotranspiration for future periods was rarely constructed especially at districts unit over the country. The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) provides several meteorological data such as precipitation, average temperature, humidity, wind speed, and radiation for long-term future period at daily time-scale. This study aimed to build a database for reference evapotranspiration using the climate forecasts at high resolution (the outputs of HadGEM3-RA provided by Korea Meteorological Administration (KMA)). To estimate reference evapotranspiration, we implemented four different models such as FAO Modified Penman, FAO Penman-Monteith, FAO Blaney-Criddle, and Thornthwaite. The suggested database system has an open architecture so that user could add other models into the database. The database contains 5,050 regions' data for each four models and four Representative Concentration Pathways (RCP) climate change scenarios. The developed database system provides selecting features by which the database users could extract specific region and period data.

**Key words** : Blaney-Criddle, Climate Change, Database, Reference evapotranspiration(ET0), Penman, Thornthwaite

### 1. 서 론

기준증발산량은 작물이 생육하는 과정에서 사용하는

물의 양을 계량한 지표로서, 농촌 용수 관리에 필수적인 기초자료이다. 최근에는 기후변화로 인한 이상 기후로 가뭄, 홍수가 빈번히 발생하고 있어, 이에 대한 적응 방안 마련을 위하여 기초자료인 기준증발산량의 수요 역시 증가하고 있다.

기준증발산량은 많은 연구자에 의하여 산정공식이나

Corresponding author : Hwang, Syewoon

Tel : +82-55-772-1934

E-mail : swhwang@gnu.ac.kr

계측 방법이 제안되었다. 대부분의 연구에서 산정공식을 이용한 모의치를 이용하고 있다. 실측자료의 경우, 계측 지점이 제한적이고, 충분한 시계열자료를 확보하지 못한 경우도 잦아서 양질의 실측자료를 구득하기 어렵다. 미래기상자료의 경우도 대부분 기상학 모델을 기반으로 하고 있기 때문에, 작물 생육에 따른 증산량이 반영된 기준증발산량을 제공하지 못하고 있는 실정이다.

산정공식을 이용한 기준증발산량을 다양한 연구에서 수행되었으며, 기준증발산량을 포함한 기후변화에 따른 영향을 비교 평가한 연구도 다수가 수행되었다. 유승환 등(2006)은 논벼를 대상으로 FAO Penman-Monteith와 FAO Modified-Penman식의 작물계수를 비교분석하였으며, 유승환 등(2015)은 기후변화에 따른 기준증발산량의 경향성 분석을 수행하였다. 남원호 등(2014b)은 기후변화에 따른 저수지의 이수가능성을 평가하는 과정에서 기준증발산량을 이용하였으며, 홍은미 등(2015)은 미래기후자료에 따른 밭작물의 가뭄 평가를 위하여 기준증발산량을 이용하였다. 김지혜 등(2015a)은 기후변화에 따른 토지이용변화를 모의함으로써 홍수 대비를 위한 기초자료를 마련하였다. 그러나 대부분의 연구가 시간적, 공간적 다양성을 확보하지 못한 한계가 지적되었다(임창수, 2008).

한편 기후변화에 대응하기 위하여 정보기술을 활용한 정보 수집과 활용의 효율성 제고를 통한 연구 기반을 구축하고자 하는 연구가 주목받고 있다. 박지훈 등(2015)은 IoT기술을 이용하여 자동으로 정보수집이 가능한 수위계측 플랫폼을 제안하였고, 배승중 등(2015)은 USN기술을 이용하여 정보 수집을 신속하게 처리함으로써 돌발재해 예경보 시스템을 구축하였다. 김성준 등(2015b)은 기후변화에 따른 분포형 수문분석 툴을 개발하였다. 김대식 등(2016)은 저수지의 효율적 관리를 위하여 물관리통합시스템의 필요성을 역설하였다. 기준증발산량은 산정공식을 이용하여 산정할 수 있으므로, 방대한 양의 시공간적 미래기상자료를 미리 처리하여 데이터베이스화하고, 이를 연구자에게 제공함으로써 관련 연구 기반을 조성할 수 있다.

국가 기관에서 수집하는 자료에 대해서는 데이터베이스를 구축하고, 관련 자료를 공개하고 있으나, 기준증발산량과 같은 특정 목적을 위하여 수집된 자료는 데이터베이스화하여 공개한 사례가 드물다. 대부분 특정 연구 대상지역의 자료를 수집하고, 이를 텍스트파일이나 스프레드시트 파일로 저장하여 관리하고 있으므로, 자료의 체계적 관리를 위해 데이터베이스가 요구된다(박지훈 등, 2013).

따라서 본 연구에서는 미래기상자료를 이용하여 기준증발산량을 산정하고, 계산결과를 데이터베이스로 구축

하여 연구자의 편의를 도모하고자 하였다. 미래기상자료는 기상청에서 제공하는 ‘고해상도 국가표준 기후변화 시나리오’를 이용하였고, 자료 활용성을 높이기 위하여 행정구역과 용수구역의 중첩이 가능한 읍면동 단위 5,050개 지점을 대상지역으로 선정하였다. 기준증발산량 모형은 비교적 널리 통용되고 있는 FAO Modified Penman 공식, FAO Penman-Monteith 공식, FAO Blaney-Cridde 공식, 그리고 Thornthwaite 공식을 이용하여 산정하였다. 계산된 결과는 데이터베이스로 구축하고, 특정 조건을 검색하여 계산 결과를 추출할 수 있도록 시스템을 개발하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 기후변화 기상자료

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 ‘고해상도 국가표준 기후변화 시나리오’를 단일 미래 기상정보로 적용하였다. 이 자료는 기상청에서 영국 Hadley 센터와 협력하여 생산한 고해상도 남한상세 미래기상 시계열자료로, 지역기후모델과 과거관측자료를 이용하여 통계적 기법과 연계 적용하여 구축되었다. 지역기후모델은 영국기상청에서 개발한 HadGEM3-RA(Atmospheric Regional climate model of Hadley Centre Global Environment Model version 3)를 이용하였으며, GCM(General Circulation Model) 중 하나인 영국기상청 해들리센터의 대기-해양/해빙 결합 지구시스템모델 HadGEM2-AO(Atmosphere-Ocean coupled model of Hadley Centre Global Environment Model version 2)를 기반으로, 초기조건 및 경계조건을 이용하여 역학적 상세화를 적용하여 개발되었다. 신뢰성 있는 국가기관으로부터 제공되는 이른바 ‘국가표준 시나리오’이라 불리는 이 자료는 국내 기후변화 연구의 미래기상정보로 널리 활용되고 그 적용성이 검증된 바 있다(박지훈 등, 2012; 남원호 등, 2014a, 2014b).

사용자 편의를 위해 다양한 시·공간 해상도에 대해 변환된 자료를 제공하고 있으며 해상도에 따라 확보 가능한 기상요소와 자료 기간이 상이하다. 본 연구에서 분석하고자하는 기준증발산량 산정을 위해 필요한 기상요소인 강수량, 평균기온, 풍속, 상대습도, 일사량에 대한 행정구역별 자료를 생산하기 위해 최고해상도인 1 km×1 km 자료의 활용을 기초로 하되 제공되지 않는 기상요소에 대한 자료는 역학적 상세화 과정만 거친 12.5 km×12.5 km 자료를 편이보정하여 적용하였다. Table 1은 기상요소별 미래자료의 해상도 및 기간을 정리한 것이다.

Table 1. Information of future data for each climate element required to estimate reference evapotranspiration

Climate element	Resolution		Data period	
	Temporal	Spatial	Historical	Future
Precipitation	daily	1km×1km	2000-2100	2011-2100
Temperature				
Wind speed		12.5km× 12.5km	1950-2005	2006-2100
Humidity				
Radiation				

강우량 및 기온에 대해 제공하는 1km 해상도 자료를 수집하여 읍면동단위로 변환하여 행정구역 최소단위 기상정보를 구축하였으며 12.5km 해상도 자료가 제공되는 풍속, 상대습도, 일사량 자료는 남한 전역 시군구 경계 GIS 자료를 이용하여 각 행정구역에 해당하는 격자정보를 면적 가중 평균하여 기상자료 생산하였다.

12.5km 해상도자료는 역학적 상세화 과정을 거친 결과로서 기후모델의 원시 모의결과가 가지는 계통적 오차(systematic bias)를 보정하기 위해 모의치의 백분위(prediction percentile)에 따른 편이 추정 방법(EquiDistance CDF-mapping, EDCDFm; 황세운 등, 2013)을 적용하여 편이보정(bias-correction)을 수행하였다. Fig. 1은 관측자료 대비 과거기간에 대한 모의 편차를 정의하고 미래기간 모의결과에 적용하는 편이보정 과정을 도식적으로 보이고 있다.

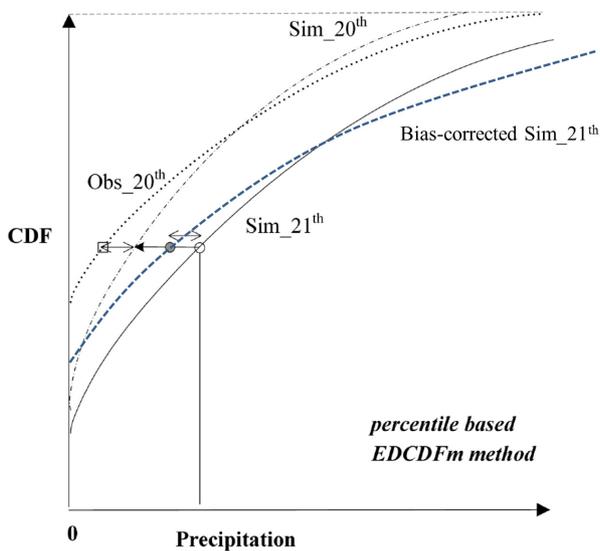


Figure 1. Schematic representation of bias-correction procedure using EDCDFm method (Hwang et al., 2013)

## 2. 기준 증발산량 산정방식

기준 증발산량을 산정하기 위하여 우리 분야에서 널리 이용되고 있는 네 가지 모델에 대하여 적용하였다. FAO Modified Penman 공식(이하 FAO-MP)은 Doorenbos & Pruitt(1977)에 의하여 소개되었으며, 많은 실험 결과를 바탕으로 산정된 계수를 제공하고, 많은 연구자에 의해서 활용되고 있다(Noh, 2004; 이주용 등, 2006; 김태철 등, 2010; 남원호 등, 2014b). FAO Penman-Monteith 공식(이하 FAO-PM)은 국제식량농업기구에서 추천하는 모형으로 기존 Penman 공식에서 공기동역학 항에 작물형에 따른 기공저항을 고려하도록 개선한 모형으로 Allen et al.(1998)이 소개하였다. FAO-PM은 최근 많은 분야에서 널리 쓰이고 있는 모델로, 저수지 용수공급량 모의(전상민 등, 2014), 기후변화 영향평가(김성준 등, 2015b), 물발자국(유승환 등, 2014; 이상현 등, 2015), 가뭄평가 연구(임창수와 김성엽, 2013; 남원호 등, 2014a) 등에 활용되었다. FAO Blaney-Criddle 공식(이하 FAO-BC)은 Doorenbos & Pruitt(1977)에 의해 소개된 방법으로 식이 간단하여 월별 증발산량 산정과 같은 간편법으로 널리 이용되고 있다(김현수와 정상욱, 2002; 홍은미 등, 2009). 그리고 Thornthwaite 공식은 Thornthwaite(1948)에 의해 소개된 방법으로, 가뭄평가모형인 표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index) 모형을 개량한 SPEI 모형(Vicente-Serrano et al., 2015)에서 잠재증발산량을 산정하기 위하여 내부적으로 이용하면서 널리 이용되고 있다(남원호 등, 2015).

FAO-MP과 FAO-PM은 모두 에너지항과 공기동역학항을 결합하여 증발산량을 산정하는데, 각 항의 가중치와 풍속함수를 달리 이용한다는 점이 다르며, 공식에서 사용하는 단위가 다른 점에 유의해야한다(유승환 등, 2006). FAO-MP 공식은 다음 식 (1)과 같다.

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

여기서,  $ET_0$ 는 기준증발산량(mm/day),  $W$ 는 온도로 계산되는 가중치( $\Delta / (\Delta + \gamma)$ ),  $\Delta$ 는 증기압 곡선의 기울기(mb/°C),  $\gamma$ 는 건습계 상수(mb/°C),  $R_n$ 은 지구표면에서 축적되는 순일사량(mm/day),  $f(u)$ 는 풍속함수로 보정함수  $0.27(1 + U_2/100)$ 를 이용하여 계산하며,  $U_2$ 는 2m 높이에서의 풍속(km/day),  $e_s$ 는 포화증기압(mb),  $e_a$ 는 실제증기압(mb),  $C$ 는 주야의 기후 차에 의한 보정계수이다.

FAO-PM 공식은 다음 식 (2)와 같이 정리된다.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots (2)$$

여기서,  $ET_0$ 는 기준증발산량(mm/day),  $\Delta$ 는 증기압 곡선의 기울기(kPa/°C),  $R_n$ 은 지구표면에서 축적되는 순일사량(MJ/m²/day),  $G$ 는 토양 열 유속밀도(MJ/m²/day),  $\gamma$ 는 건습계 상수(kPa/°C),  $T$ 는 일 평균 기온(°C),  $u_2$ 는 2m 높이에서의 풍속(m/s),  $e_s$ 는 포화증기압(kPa),  $e_a$ 는 실제증기압(kPa)이다.

FAO-BC 공식은 다음 식 (3)과 같이 정리된다.

$$ET_0 = p(0.46 T_{mean} + 8) \dots (3)$$

여기서,  $ET_0$ 는 월평균 기준증발산량(mm/day),  $p$ 는 위도에 따른 월별 일조시간비율,  $T_{mean}$ 은 일평균 기온(°C)을 의미하며, 만약 일평균 기온 대신 최고/최저 기온만 계속될 경우 최고 기온과 최저기온의 평균으로 같음한다.

마지막으로 Thornthwaite 공식은 식 (4)와 같다.

$$PET = 16 \left( \frac{L}{12} \right) \left( \frac{N}{30} \right) \left( \frac{10 T_a}{I} \right)^\alpha \dots (4)$$

여기서,  $PET$ 는 기준증발산량(mm/month),  $T_a$ 는 일평균 기온(°C, 음수일 경우는 0으로 치환),  $N$ 은 해당월의 일수 (day),  $L$ 은 평균 일조시간(hours),  $\alpha$ 는 회귀식  $aI^3 - bI^2 + cI + d$ 를 통해 계산하며,  $a = 6.75 \times 10^{-7}$ ,  $b = 7.71 \times 10^{-5}$ ,  $c = 1.792 \times 10^{-2}$ ,  $d = 0.49239$ 이다.  $I$ 는 열 지수로서,  $I = \sum_{i=1}^{12} (T_{ai}/5)^{1.514}$ 로 산정한다.  $T_{ai}$ 는 분석기간 동안의 월평균 기온을 의미한다.

### 3. 기준증발산량 산정 시스템 설계

본 연구에서 확장성을 고려하여 향후 다른 모형이 적용될 수 있도록 산정시스템을 설계하였다. 산정 시스템은 Fig. 2와 같은 과정으로 데이터를 처리한다. 기 구축된 텍스트파일 기반의 읍면동단위 미래기상자료를 읽어 들여 입력자료 데이터베이스를 구축하고, 이를 이용하여 기준증발산량 산정프로그램을 구동하도록 설계하였다. 산정 프로그램은 Java 7를 기반으로 작성하였으며, 객체지향개발 기법을 이용하여 모델을 추가, 확장할 수 있도록 개발하였다. 계산 결과는 데이터 결과 검토를 위하여 텍스트 파일 형태로 자료를 저장하고, 검수가 끝난 자료에 대하여 데이터베이스로 변환하였다. 대용량의 자료를 구축할 경우, 데이터를 한줄씩 삽입하는 것보다 데이터 덩치(bulk data)를 한꺼번에 업로드하는 방식이 효율적이다. 데이터베이스는 오픈소스인 MySQL Community Server 5.7를 이용하였으며, 데이터베이스 서버가 제공하는 기본기능을 이용해도 되지만, 연구자의 편의성을 고려하여, 필요한 자료를 추출할 수 있는 프로그램을 함께 개발하였다.

모델의 수정 및 확장을 위해서는 모델이 동일한 형태로 규정될 필요가 있다. 연구 방법으로 선택한 네 가지 모형 중 FAO-PM, FAO-MP, FAO-BC은 시계열 의존성이 없기 때문에 일별 기상자료 입력으로 기준증발산량을 산

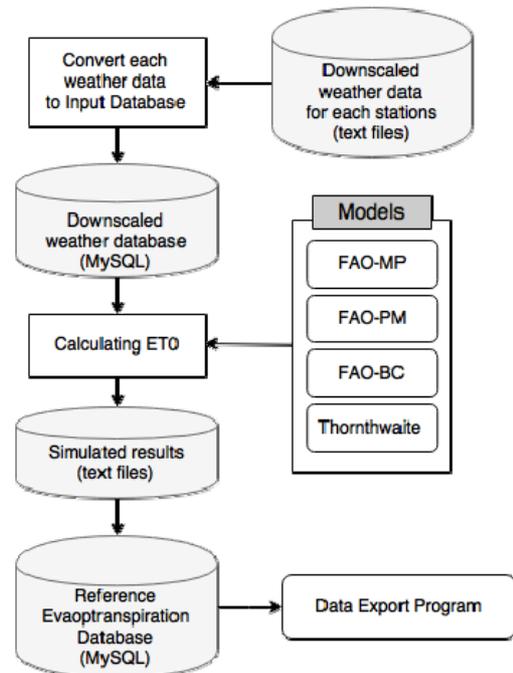


Figure 2. Flowchart of building reference evapotranspiration database

Table 2. IO features of the evapotranspiration models

Model	Time Unit	Metadata	Require Date	Input Data	Temporal Relation
FAO-MP	Daily	Latitude, Elevation,	Month	Tavg, Wind,	X
FAO-PM		Wind Height	Julian Date	Humid, sunhour	X
FAO-BC	Monthly	Latitude	Month	Tavg	X
Thornthwaite					O

※ Tavg: Average temperature, Wind: Wind speed, Humid: Humidity

정할 수 있는데 반해, Thornthwaite 모형은 식 내부의 열 지수(heat index)를 계산하는 과정에서 평년값을 이용하기 때문에 모형 구동을 위해서 분석 전 기간의 자료가 필요하다. 따라서 모든 모형은 전 기간의 기상자료에 접근 가능하도록 설계하였다. 모든 데이터를 읽어 들일 경우, 필요한 일별데이터만 읽어서 처리하는 방식에 비하여 메모리 사용량이 큰 단점이 있으나, 하드웨어의 메모리를 확충함으로써 문제를 해결하였다.

각 모형에서 요구하는 입력 자료 역시 상이한데, Penman 식을 기반으로 한 FAO-PM과 FAO-MP는 측후소의 위도, 고도, 풍속계의 높이 자료와 함께 평균 기온, 습도, 풍속, 일사량(혹은 일조시간)의 자료가 필요하다. 반면 FAO-BC 모형과 Thornthwaite 모형은 측후소의 위도와 평균기온 자료만 요구되므로 상대적으로 간편하게 이용할 수 있다. 본 연구의 대상이 되는 네 가지 모형들의 요구사항을 정리하여 Table 2와 같이 도시하였다.

본 연구에서 사용된 확장가능한 범용적인 계산 모듈은 날짜, 기상자료, 관측위치 정보 등을 사용할 수 있고,

전 시계열의 데이터에 접근할 수 있도록 개발하였다. 이러한 설계는 개별 구성요소(모형)를 구현하는 과정에는 일부 데이터가 중복되거나, 코드 규약(interface)에 따르기 위해 다소 코드량이 많아지고, 메모리 사용량이 증가하는 단점이 있다. 반면 모형의 확장성이 향상되기 때문에, 향후 기준잠재증발산량 산정모형의 추가 혹은 가뭄지표와 같은 다른 적용모형의 추가가 가능하다. 이러한 개발 방법은 여러 모형을 동시에 구동하거나, 구축된 시스템에서 다른 모형으로 개선, 교체할 때 추가 작업이 최소화되는 방식으로 소프트웨어공학분야에서 객체지향개발 기법이라는 이름으로 널리 이용되는 방법이다. 본 연구를 통해 구축된 데이터베이스 구축시스템은 산정모형 교체를 통해 다양한 분야에서 활용가능할 것으로 기대한다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 읍면동 단위 잠재증발산량 데이터베이스 구축

기상청은 미래 기상정보에 대하여 관측지점과 항목별로 텍스트 파일 형태로 자료를 제공하며, 각 파일은 일별 관측값을 일정한 규칙에 따라 저장하고 있다. 사람은 이러한 데이터를 손쉽게 구분할 수 있으나, 컴퓨터로 자동화하기 위해서는 파일을 파싱하여 적절한 형태로 변환할 필요가 있다(김태곤 등, 2014). 본 연구에서는 제공된 텍스트 파일을 읽어들이어 Table 3과 같이 정규화된 데이터베이스에 저장하였다. 이러한 전처리 과정을 통하여 본 연구에서 수행하고자 하는 기준증발산량 계산 공정을 표준화할 수 있었으며, 나아가 가뭄지수 산정과 같은 추가적인 연구의 기초자료로 활용할 수 있도록 입력자료 데이터베이스를 구축하였다.

데이터베이스는 관측지점, GCM, 시나리오, 앙상블, 연, 월, 일을 주키(Primary key)로 지정하여 인덱싱이 되도록 설계하였으며, 평균 기온, 풍속, 습도, 일조시간 등의 자료는 빈 값이 없도록 설계하였다. 일평균기온이 누

Table 3. Database schema to store input weather data

Column Name	Data Type	Remark
StationNo.	varchar	Primary Key
GCM	varchar	
scenario	varchar	
Ensemble	varchar	
year	int	
month	int	
day	int	
T_mean	double	NOT NULL
T_max	double	
T_min	double	
PREC	double	
Wind	double	NOT NULL
Humidity	double	NOT NULL
Rs	double	NOT NULL
Sunhour	double	NOT NULL

Table 4. Database schema to store simulated results

Column Name	Data Type	Remark
StationNo.	varchar	Primary Key
GCM	varchar	
scenario	varchar	
Ensemble	varchar	
year	int	
month	int	
day	int	
model	varchar	
ETO	double	

락된 경우에는 주로 일 최고기온과 최저기온이 제공되므로 이들 평균값을 산출하여 일평균기온값의 누락이 없도록 구축하였다. 강수량의 경우, 비강우일은 NULL값으로 기입하였으며, 일조시간과 일조량은 주로 두 관측값 중 하나의 값만 제공되므로, 누락된 값은 FAO PM식에 포함되어있는 관계식을 이용하여 추정 값을 삽입하였다.

구축된 입력자료 데이터베이스를 이용하여 4가지 기준증발산량모델을 구동하고, 결과를 Table 4의 형태로 저장하였다. 기준증발산량 데이터베이스는 입력자료 데이터베이스와 유사하나, 주기에 산정모델에 대한 키를 추가하여 인덱싱을 하였다. 두 데이터테이블은 주기를 공유하고 있어 쉽게 조인하여 결과를 이용할 수 있다. 연구자는 원하는 산정모델 결과를 선택하는 행위만으로 기준증발산량을 미래기상데이터와 결합하여 하나의 데이터셋으로 구축할 수 있으므로 데이터분석을 위한 전처리 과정이 간소화될 수 있다.

본 연구에서는 5,050개 측정 지점을 바탕으로 2000년부터 2100년까지 100년치 미래기상자료에 대하여 4가지 모델에 대하여 기준증발산량을 산정하였으며, 약 7.5억 레코드를 생성하여 데이터베이스를 구축하였다.

데이터베이스 구축과정은 CPU i7-6700 3.4Ghz, RAM 32Gb DDR4 (2,133Mhz), SSD 1Tb (Samsung 850 Pro, Read 550 MBps/Write 520 MBps) 환경에서 수행되었으며, 약 3일간의 계산을 통해 구축하였다. 연구수행과정에서 데이터량이 방대하기 때문에 저장장치의 읽기/쓰기 속도가 전체 계산 시간에 영향을 미치는 것으로 확인되어, 하드디스크형태의 저장장치에서 메모리타입의 저장장치(Solid-State Drive, SSD)로 구축환경을 개선하였다. 계산된 자료는 중간 작업형태인 텍스트 파일 형태로 저장을 하였으며, 배치작업을 통하여 파일명치를 데이터베이스에 업로드할 수 있는 DBMS(Database Management System) 내부 기능을 이용하여 최종 데이터베이스를 구축하였다.

## 2. 잠재증발산량 데이터베이스 시스템 활용

본 연구에서 구축한 바와 같이 데이터베이스는 간단한 쿼리를 통해서 원하는 자료를 추출하여 이용할 수 있다는 장점이 있다. 본 절에서는 구축된 자료를 이용하여 두 가지 분석을 수행하였다. 비교의 편의성을 위하여 용수구역별로 자료를 취합하였으며, 용수구역은 한강(10), 안성천(11), 한강서해(12), 한강동해(13), 낙동강(20), 형산강(21), 태화강(22), 화야·수영(23), 낙동강동해(24), 낙동강남해(25), 금강(30), 삼교천(31), 금강서해(32), 만경·동진(33), 섬진강(40), 섬진강남해(41), 영산강(50), 탐진강(51), 영산강남해(52), 영산강서해(53), 제주도 (60)과 같이 21개 대권역을 사용하였다. 본 연구에서 개발한 추출 프로그램을 이용하여 용수구역별 데이터를 생성하여 이용하였다. 용수구역별 데이터는 읍면동단위 데이터를 가중 평균함으로써 산출하였다.

먼저 기준잠재증발산량의 공간 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 3과 같이 1995년 대비 중기 미래(2040s, 2030년부터 2050년까지)의 평균 기준증발산량의 증가량을 지도로 도시하였다. 기준증발산량 산정 모델은 네 가지 모델 중 가장 활용도가 높은 FAO-PM를 선택하였으며, 시나리오는 RCP 4.5 시나리오를 선택하였다. 분석 결과를 살

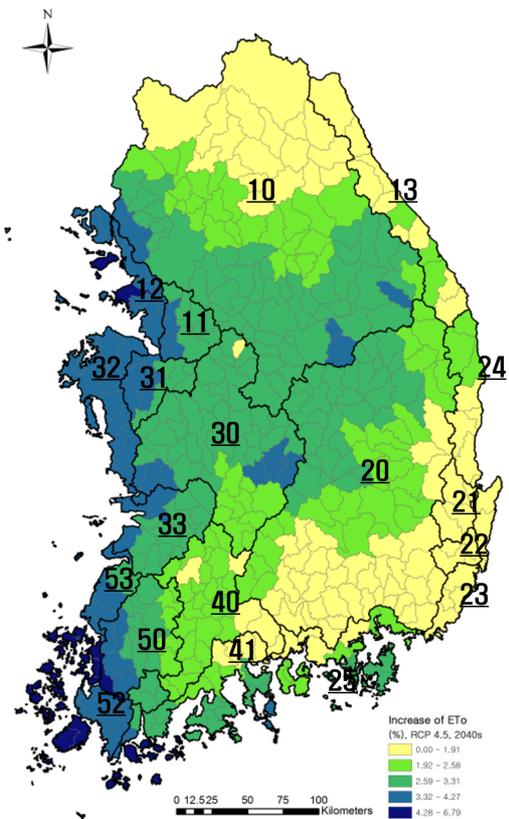


Figure 3. Increase of ETo (%) at 2040s compared to 1995s under RCP 4.5 scenario

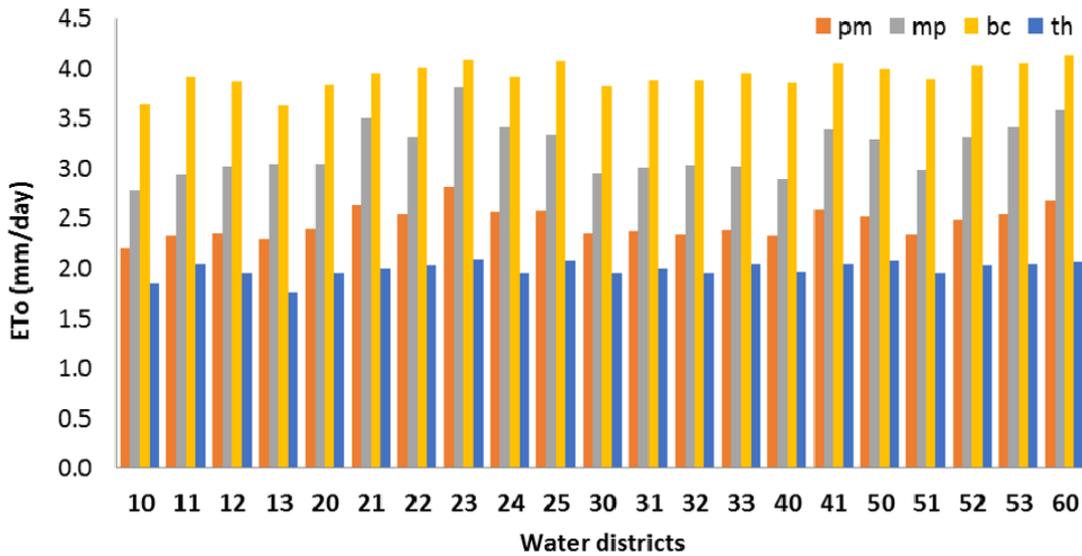


Figure 4. Comparison reference evapotranspiration among four models in watersheds during 2010-2015

펴보면, 전국적으로 기준증발산량이 증가하는 것으로 분석되었으며, 서해안을 따라 3.03%에서 최대 4.71%까지 상대적으로 높은 증가세를 보여주었다. 반면 경기 북부, 강원 북부, 경상남도 지역은 증가세가 크지 않은 것으로 분석되었다. 이 같은 기준증발산량의 공간분포 변화는 농작물 생산을 위한 관계계획 수립의 기초자료가 된다.

두 번째 분석은 본 연구에서 수행한 네 가지 모형간의 차이를 비교하기 위하여 2011-2015년 자료를 이용하여, 기준증발산량을 비교하였다. 분석결과는 Fig. 4와 같이 도시하였다. 공간적 차이를 무시할 정도로 모델간의 격차를 보이는 특징을 확인할 수 있었다. FAO BC가 가장 큰 결과 값을 보여주었으며, Thornthwaite 산정식이 가장 작은 결과 값을 제시하였다. FAO MP가 FAO PM에 비해 다소 높은 산정 값을 보여주는 결과도 확인할 수 있다. 또한 FAO MP 산정식이 지역별로 큰 편차를 보인 반면, Thornthwaite 산정식은 지역별 변동성이 크지 않았다.

반면 지역별 변동성을 살펴보면, 네 가지 산정식의 분석 결과가 비슷한 경향을 보이는 것으로 확인하였다. 화야-수영(23) 권역은 타 유역에 비해서 모든 산정식에서 가장 높은 값을 보여주었으며, 한강동해(13) 유역은 세 가지 산정식에서 가장 낮은 결과를 보여주었다.

### 3. 고찰

정보기술의 발달로 정보 처리속도가 빨라지고, 처리비용이 낮아지면서 개별 데이터 분석의 효율은 증가한 반면, 미래기후시나리오와 같이 분석이 필요한 입력 자료

의 수나 세분화된 분석 공간단위로 인한 대상지역의 수가 증가하면서 데이터 양은 크게 증가하여 전체적인 데이터 분석 기간은 단축되지 않고 있다. 이러한 연구환경에서 본 연구는 데이터 분석을 위한 전처리 과정을 단축하기 위하여 미래기후시나리오에서 미제공되고 있는 기준증발산량을 미리 산정하여 데이터베이스로 구축함으로써 연구 효율을 높이고자 하였다. 앞서 적용 예에서 살펴볼 수 있듯이 구축된 자료를 활용할 경우, 대량의 자료가 필요한 연구과정임에도 불구하고, 기 구축된 데이터베이스를 활용하여 공간 분포와 모델 간 산정 값을 비교를 수월하게 수행할 수 있었다.

본 데이터베이스는 오픈소스인 MySQL Community Server를 이용하여 구축하여, 데이터베이스관리시스템(DBMS)이 제공하는 기능을 통하여 활용 및 관리가 가능하다. 사용자 관리 및 권한 설정이 가능하고, 고유포트(TCP/UDP 3306)를 통하여 원격 접속을 허용할 수 있다. 그러나 네트워크 보안 및 과제 보안 규정 등의 이유로 현재는 오프라인 사용자만 이용 가능하도록 기능을 제한하였다. 허가된 이용자는 본 연구에서 개발한 데이터 추출 프로그램을 이용하여, 특정 조건에 만족하는 기상자료 및 기준증발산량을 선별적으로 이용할 수 있다. 앞서 활용사례에서 살펴본 바와 같이 추출 조건은 시기, 기상시나리오, 기준증발산량 산정방법, 대상지역(읍면동 혹은 용수구역)을 선택하면, 본 시스템은 해당 자료를 텍스트 파일로 제공한다.

향후, 본 연구에서 구축한 기준증발산량 데이터베이스는 지역별 농촌용수 수요량 예측, 지역별 가뭄 전망, 물발자국을 통한 농업의 환경영향 평가와 같은 기후변화에

적응하고 대응하기 위한 농업·농촌 정책 수립과정에 활용될 수 있다. 각 연구별로 수행되는 전처리과정을 생략함으로써 연구 효율 증대를 꾀할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 구축과정을 자동화하였기 때문에, 기준증발산량 산정모델 추가 뿐만 아니라, 동일한 기상자료를 사용하여 분석할 수 있는 다양한 모델을 추가 적용할 수 있기 때문에, 유사한 데이터베이스 구축 연구에 본 연구성과가 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 그러나 제한된 사용자를 대상으로 데이터베이스를 이용할 수 있도록 시스템을 구축한 점은 한계로 지적될 수 있으며, 활용성 증대를 위해서는 오픈 API 설계 및 마이크로 서비스 개발과 같은 후속연구가 필요하다.

#### IV. 결 론

기준증발산량은 관개계획의 기초자료일 뿐만 아니라, 농업 가뭄을 평가하기 위한 자료로도 활용되고 있다. 본 연구는 기후변화에 따른 농업수자원 계획을 위해 기준증발산량 데이터베이스를 구축하였다. 이를 통하여 관련 연구자가 동일한 작업을 반복하지 않고 구축된 기준증발산량 데이터베이스를 활용하여 필요한 자료를 손쉽게 구축하여 연구 효율을 높일 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

기준증발산량 데이터베이스 구축을 위하여 다양한 기준증발산량 산정 모델을 적용할 수 있도록 구축 시스템을 설계하였다. 널리 이용된다고 판단되는 네 가지 모형, FAO Modified Penman 공식, FAO Penman-Monteith 공식, FAO Blaney-Criddle 공식, 그리고 Thornthwaite 공식을 구현하여 기준증발산량을 계산하였다. 미래기상자료는 기상청에서 제공하는 ‘고해상도 국가표준 기후변화 시나리오’를 기반으로 2010년부터 2100년까지 기상자료에 대하여 5,050개 읍면동 지역으로 다운스케일링한 자료를 이용하여 기준증발산량 데이터베이스를 구축하였다.

구축된 데이터베이스는 검색 프로그램을 이용하여 특정 조건의 자료를 추출하여 텍스트 파일로 제공하도록 활용 시스템을 개발하였다. 관개 계획 및 농업 가뭄 평가의 기초자료로 활용되는 기준증발산량을 데이터베이스로 구축하여 제공함으로써 연구자는 손쉽게 지역별 혹은 시기별로 비교분석할 수 있다. 또한 연구자는 본 연구를 통해 구축된 데이터베이스를 활용함으로써 기준증발산량 계산 과정을 생략할 수 있다. 기준증발산량 계산 과정에서 측후소 위도, 고도, 풍속계 높이와 같은 메타정보가 필요하나, 데이터베이스를 통하여 중앙집중형 자료관리가 가능하므로 연구자 개별적으로 메타

자료를 수집해야 하는 과정을 생략할 수 있어 연구 효율성이 높아질 것으로 기대할 수 있다.

본 연구는 대용량의 미래기상자료를 이용하여 기준증발산량을 계산하고, 이를 데이터베이스로 구축함으로써 자료 활용성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다. 그럼에도 불구하고, 개발된 데이터베이스를 활용하기 위해서는 데이터 전송방식, 검색방법과 같은 활용기술에 관하여 개선 여지가 있다. 향후 연구에서 정보를 제공하기 위한 수단을 개선함으로써 사용자 접근성을 높일 수 있는 추가적인 방안 모색이 필요하다.

#### 사 사

본 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 운영되는 한국연구재단-이공분야 기초연구사업의 지원(No. 2016010074)을 받아 수행되었으며, 2016년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다. 더불어 한국농어촌공사 농어촌연구원의 『기후변화 시나리오 자료를 이용한 농어촌용구수역별 가뭄 취약성 분석 연구용역』의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. 이에 감사드립니다.

#### References

1. Allen, Richard G., Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith, 1998, Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO: Rome, Italy.
2. Bae, S.-J., W.-G. Bae, Y.-J. Bae, S.-P. Kim, S.-J. Kim, I.-H. Seo, and S.-W. Seo, 2015, Development of an Integrated Forecasting and Warning System for Abrupt Natural Disaster using rainfall prediction data and Ubiquitous Sensor Network(USN), Journal of Korean Society of Rural Planning 21(3): 171-179 (in Korean).
3. Doorenbos, J. and W. Pruitt, 1977, Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage 24. FAO: Rome, Italy.
4. Hong, E.-M., W.-H. Nam, and J.-Y. Choi, 2015, Climate Change Impacts on Agricultural Drought for Major Upland Crops using Soil Moisture Model -Focused on the Jeollanam-do, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 57(3): 65-76 (in

- Korean).
5. Hong, E.-M., J. Y. Choi, S. H. Lee, S. H. Yoo, M. S. Kang, 2009, Estimation of Paddy Rice Evapotranspiration Considering Climate Change Using LARS-WG, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(3): 25-35 (in Korean).
  6. Hwang, S., Y.G. Her, and S. Chang, 2013, Uncertainty in Regional Climate Change Impact Assessment using Bias-Correction Technique for Future Climate Scenarios, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 95-106 (in Korean).
  7. Jun, S. M., M. S. Kang, I. Song, J.-H. Song, J. Park, and W. Kee, 2014, Development of agricultural reservoir water supply simulation system, *Journal of Korean Society of Rural Planning* 20(2): 103-114 (in Korean).
  8. Kim, J., J. Park, I. Song, J.-H. Song, S. M. Jun, and M. S. Kang, 2015a, Analysis of Land Use Change Using RCP-Based Dyna-CLUE Model in the Hwangguji River Watershed, *Journal of Korean Society of Rural Planning* 21(2): 33-49 (in Korean).
  9. Kim, S. J., S. H. Kim, H. K. Joh, and S. R. Ahn, 2015b, Development of Distributed Hydrological Analysis Tool for Future Climate Change Impacts Assessment of South Korea, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineer* 57(2): 15-26 (in Korean).
  10. Kim D.-S., J.-T. Kim, J.-D. Kim, H.-D. Koo, and H.-J. Lim, 2016, System Analysis for Water Management Information Strategy of Agricultural Reservoir managed by City and County, *Journal of Korean Society of Rural Planning* 22(2): 165-173 (in Korean).
  11. Kim, H. S. and S. O. Chung, 2002, Prediction of Nutrient Loading from Paddy Field(I): Model Development, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(4): 51-61 (in Korean).
  12. Kim T., J.J. Lee, W.-H. Nam, and K. Suh, 2014, Development of RESTful Web Service for Loading Data focusing on Daily Meteorological Data, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(6): 93-102 (in Korean).
  13. Kim, T.-C., H.-C. Lee, and J.-P. Moon, 2010, Estimation of Return Flow Rate of Irrigation Water in Daepyeong Pumping District, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 41-49 (in Korean).
  14. Lee, J. Y., S. J. Sun, P.-S. Kim, 2006, Security of Upland Irrigation Water through the Effective Storage Management of Irrigation Dams, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(2): 13-23 (in Korean).
  15. Lee, S.-H., J.-Y. Choi, S.-H. Yoo, Y. D. Kim, A. Shin, 2015, Estimation of Water Footprint for Livestock Products in Korea, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(2): 85-92 (in Korean).
  16. Nam, W.-H., E. M., Hong, M. W., Jang, and J. Y., Choi, 2014a, Projection of consumptive use and irrigation water for major upland crops using soil moisture model under climate change, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 77-87 (in Korean).
  17. Nam, W.-H., E.-M. Hong, T. Kim, and J.-Y. Choi, 2014b, Projection of Future Water Supply Sustainability in Agricultural Reservoirs under RCP Climate Change Scenarios, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(4): 59-68 (in Korean).
  18. Nam, W.-H., Michael J. Hayes, Donald A. Whillite, Mark D. Svoboda, 2015, Projection of Temporal Trends on Drought Characteristics using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in South Korea, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(1): 37-45 (in Korean).
  19. Noh, J. K., 2004, A System for Estimating Daily Paddy Irrigation Water Requirements in Simulating Daily Streamflow, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(7): 71-80.
  20. Park, J., M. S. Kang, and I. Song, 2012, Bias correction of RCP-based future extreme precipitation using a quantile mapping method; for 20-weather stations of South Korea, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 133-142 (in Korean).
  21. Park, J., M. S. Kang, I. Song, S. H. Hwang, J.-H. Song, S. M. Jun, 2013, Development of Relational Database Management System for Agricultural Non-point Source Pollution Control, *Journal of Korean*

- Society of Rural Planning 19(4): 319-327 (in Korean).
22. Park, J., M. S. Kang, J.-H. Song, and S. M. Jun, 2015, Design and Implementation of IoT-Based Intelligent Platform for Water Level Monitoring, Journal of Korean Society of Rural Planning 21(4): 177-186 (in Korean).
  23. Thornthwaite, C.W., 1948, An approach toward a rational classification of climate, Geographical Review 38 (1): 55-94.  
<http://dx.doi.org/10.2307/21073>
  24. Vicente-Serrano, Sergio M. & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds), 2015. "The Climate Data Guide: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)." Last modified 18 Jul 2015. Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardize-d-precipitation-evapotranspiration-index-spei>.
  25. Rim, C.-S., 2008, Comparison of Evapotranspiration Estimation Approaches Considering Grass Reference Crop, Journal of Korea Water Resources Association 41(2): 212-228 (in Korean).
  26. Rim, C.-S., and S.-Y. Kim, 2013, Analysis for the Regional Characteristic of Climatic Aridity Condition in May, Journal of Korea Water Resources Association 46(6): 613-627 (in Korean).
  27. 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 56(4): 59-68 (in Korean).
  28. Yoo, S.-H., S.-H. Lee, and J.-Y. Choi, 2014, Estimation of Water Footprint for Upland Crop Production in Korea, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 56(3): 65-74 (in Korean).
  29. Yoo, S.-H., T. Kim, S.-H. Lee, and J.-Y. Choi, 2015, Trend Analysis of Projected Climate Data based on CMIP5 GCMs for Climate Change Impact Assessment on Agricultural Water Resources, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 57(5): 69-80 (in Korean).
- 
- Received 25 October 2016
  - First Revised 30 October 2016
  - Accepted 16 November 2016