

# 농업용수 수요량 분석을 위한 잠재증발산량 공간 분포 추정

## Estimation of Spatial Distribution of PET for Agricultural Water Demand Analysis

유 승 환\*      최 진 용\*\*  
Yoo, Seung Hwan · Choi, Jin Yong

### Abstract

Weather station based PET (Potential Evapotranspiration) analysis has often been inadequate to meet the needs of regional-scale irrigation planning. A map of continuous PET surface would be better a solution for the spatial interpolation considering spatial variations. Using a normal PET data collected at the 54 meteorological stations in Korea, 10-days spatial distribution PET map was created using universal Kriging (UK). These estimation methods were evaluated by both visual assessments of the output maps and the quantitative comparison of error measures that were obtained from the cross validation. The universal Kriging method showed appropriate results in spatial interpolation from weather station based PET to spatial PET with low statistical errors.

### I. 서 론

토양이나 식물 혹은 자유 수면으로부터 발생하는 증발산은 이론적으로 혹은 실질적인 측면에서 지표면 열수지의 중요한 요소이다. 또한 증발산은 대기 순환 모델의 구성요소로서 뿐만 아니라 전 지구적 규모의 기후 변화에 많은 영향을 주고 있으며, 수자원의 순환 과정에 있어서도 중요한 부분을 차지하고 있다(채효석 등, 2000). 따라서 선진국에서는 오래 전부터

장기적이고 종합적인 연구를 통해 증발산량 산정기술을 축적해왔다(Penman, 1948; Monteith, 1965). 특히 농업 분야의 경우 관개수량을 결정함에 있어서 증발산량, 침투량, 재배관리용수량, 시설관리용수량, 유효수량 등의 여러 인자를 고려하게 되는데, 이 중에서도 생육 단계나 기상 조건에 따라 그 변화가 심한 증발산량을 정확히 산정해야 관계계획을 수립하는데 용이할 것이다.

지형과 지표피복이 복잡하고 다양한 곳에서

\* 서울대학교 지역시스템공학부 대학원(crom97@snu.ac.kr)  
\*\* 서울대학교 지역시스템공학부 조교수(iamchoi@snu.ac.kr)

키워드 : 농업용수, 잠재증발산량, 공간분포

실제증발산의 변이를 실시간으로 파악하기 위해서는 에디공 분산 장비 등을 이용한 미 기상학적 방법이 관측지점 주변의 공간평균적인 증발산량을 직접 측정할 수 있는 좋은 방법이기도 하나 점관측이기 때문에 조밀한 관측망이 구성되기 전에는 증발산량의 공간변이를 알 수 없다. 따라서 증발산량의 공간 분포를 확인하기 위해서는 직접 측정보다는 증발산과 밀접한 관련이 있는 기상-식생변수들을 이용하여 간접적으로 추정하는 것이 더욱 현실적이다(윤진일 외, 2004).

지금까지 증발산량의 공간분포 추정하는 방법으로 위성 원격탐사 자료를 이용하는 방법, 지상기상자료-GIS를 연계하여 추정하는 방법, 점관측 자료를 보간 하는 방법 등이 연구되었다.

1970년대 이후 각종 인공위성의 성공적인 발사를 계기로 지구에 대한 광역적인 정보 획득과 주기적인 관측이 가능해짐에 따라 증발산량을 추정하기 위한 다양한 연구가 시도되었다. 1990년대 이후에는 Landsat TM과 같은 고해상도 자료와 NOAA와 같은 시간해상도가 뛰어난 자료를 이용하여 증발산량을 산정하였다(채효석 등, 2000). 이러한 방법은 증발산량의 현장성과 지속성이 필요한 분야에서 집중적인 조명을 받고 있다.

실용성을 높이기 위하여 지상 기상자료와 GIS 기법을 혼용하여 증발산량을 산정하는 경우도 있다. Naoum & Tsanis (2003)는 그리스 크레타섬을 대상으로 30m 해상도의 DEM 자료와 54개 기상관측소의 일별 기상 데이터 및 Penman-Monteith 공식을 이용하여 잠재증발산량을 산정하였다. 또한 윤진일 등 (2004)은 위 연구에 사용된 모형 수준의 실제증발산을 추정하고 계산결과의 신뢰성을 평가할 수 있는

실측 증발산량을 확보하고자 하였다.

한편, 기상 관측소를 이용하여 증발산량을 산정할 경우 자료의 특성상 한정된 지점에서의 점관측자료(point observation)에 의존하게 된다. 이 자료를 이용하여 전체 대상 지역의 지리적 분포를 추정하는 보간법(spatial interpolation)을 이용하여 수치지도의 형태로 변환되는 경우가 많다. 보간법의 경우 거리반비례평균법(Inverse Distance Weighting)과 지구통계학적 기법 등을 사용하게 된다(이규성, 1995). 외국에서는 GIS와 지구통계학을 연계한 연구가 많이 진행되고 있다. 지구통계학적 기법인 Kriging기법을 이용하여 기준증발산량을 공간확인하기 위하여 미국 오레곤주를 대상으로 연구한 결과, 기준증발산량의 값의 추정에는 좋은 결과를 얻지 못하였지만, Kriging variance에 있어서는 유사한 경향을 찾아낼 수 있었다(Cuenca and Amegee, 1987).

본 연구에서는 우리나라의 순별 공간분포의 경향을 살펴보기 위하여 전국 54개 기상 측후소의 기상자료를 이용하여 측후소별 잠재증발산량 평년값을 산정한 후, 이 결과를 바탕으로 GIS와 지구통계학적 기법을 이용하여 우리나라의 잠재증발산량의 전국적인 공간분포를 추정하고 비교, 분석하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. Penman-Monteith 공식

본 연구에서는 국제식량농업기구에서 1998년에 추천한 Penman-Monteith 공식을 이용하여 증발산량을 산정하였다. Penman 공식은 1965년에 제안된 증발산량 산정방법으로 널리

사용되었으나 (증발산량 과다산정, 공간적 분포 추정값 차이) 등의 문제가 있어 이를 보완하기 위하여 공기동역학 조건에 작물형(crop type)에 따른 기공저항(stomatal resistance)을 포함하여 수정한 방법이다. 기공 저항은 엽온과 밀접한 관련이 있는 것으로 공기동역학항에 온도에 의한 식이 추가되어 있다. 이 공식은 다음과 같다(Allen et al., 1998).

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

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

## 2. 지점 선정 및 기상자료

일별 잠재증발산량을 산정하기 위해서는 일평균기온, 일평균습도, 평균풍속, 일조시간의 기상자료와 기상측후소의 위도, 노장해발고도, 풍속계 지표 고도가 필요하게 된다.

우리나라 전체 77개 측후소 중 지리적, 환경적 차이가 있는 섬 지역을 제외한 한반도 내에 위치한 측후소 중 30년 이상 기상 관측이 이루어진 지역으로 제한하여 대상 측후소 지점을 선정하였다. 따라서 제주도에 위치한 측후소 4개소, 기타 도서에 위치한 7개소, 30년 미만 관측이 이루어진 12개소를 제외한 54개소를 대상 측후소로 선정하였다. Fig. 1은 본 연구에서 선정된

측후소를 나타내고 있는 그림이다. 기상 자료는 각 측후소에서 1975~2004년간의 일별 평균기온, 평균습도, 평균풍속, 일조시간을 수집하였고, 지상관측 기상상수(위·경도, 노장해발고도, 풍속계지상고도)는 1975~2004년의 기상연보를 참조하였다.

## 3. 공간분포 추정

잠재증발산량의 공간 분포를 추정하기 위해서는 측후소별로 관측된 점 데이터를 공간 데이터로 보간(interpolation)이 필요하다. 보간은 이산 분포된 기지점과 기지점 사이의 알지 못하는 점 또는 면 데이터에 대한 값을 추정하는 과정이다.(김영섭 등, 1998). 본 연구에서는 작물의



Fig. 1. Location map of meteorological stations

필요수량을 연구하기 위하여 적용된 적이 있는 지구통계학적 보간법인 범용 크리깅(Universal Kriging, UK) 방법을 이용하였다. 범용 크리깅 방법은 공간적으로 변화하거나 특정한 경향을 갖는 평균을 제거하지 않고 크리깅 가중치를 계산할 때 이를 고려하여 자료 분포의 불변성을 가정하지 않은 방법이다(Sousa & Pereira, 1999). 주위의 알려진 자료들의 선형 조합을 이용하여 미지의 값을 예측하게 되는데 이 방법은 불변성을 만족하지 않고 변화하는 경향을 고려하기 위한 수학적 기법이 가미된 가장 일반화된 크리깅 기법이다. 일반 크리깅을 적용하기 위해서는 그 평균을 알 수는 없지만 공간적으로 부드럽게 변화한다고 가정한다. 부드럽게 변화한다는 말은 우리가 알 수 있는 간단한 함수들의 선형조합으로 그 변화하는 곡면을 기술할 수 있다는 의미이다(최종근, 2004).

범용 크리깅을 적용하기 위한 함수 모델을 식(2)와 같은 구형 모델로 선정하여, 적용하였다.

$$Y(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right] \quad (2)$$

여기서,  $C_0$ : nugget value,  $C$ : the difference between sill and nugget value,  $a$ : range showing the influence zone,  $h$ : the distance apart in the computational direction

#### 4. 교차 검증

일반적으로 크리깅 방법에서 semi-variogram은 실측 데이터의 공간적 변이를 대략적으로 나타낸 함수로써 실측값에 대한 현실세계 조건을 모두 표현하지는 못하며, 실제 조건을

명확히 알지 못하기 때문에 보간 결과와 실제 조건이 얼마나 일치하는지 정확성을 증명할 방법이 없다. 유일한 방법은 실제 조건을 표현할 수 있을 정도의 부가적인 조사를 통해 평가하는 것이다. 이 방법은 현실적으로 어려움이 많으므로 보간 시 기준이 되는 함수모델의 적합성을 평가하는 교차검증(cross-validation)이라는 검증 과정을 거치게 된다(이상훈, 2002).

교차검증은 보간 대상이 되는 표본 중에서 하나의 측정값을 제외하여 semi-variogram을 작성하고, 함수모델을 작성하여 샘플이 제거된 위치의 값을 추정하게 된다. 추정된 값은 제외한 측정값에 근접해야 한다. 이상적으로는 각각 추정된 값의 표준오차가 동일하거나 작아야 하며, 이 오차비율을 error statistic이라 한다. 만일 추정된 semi-variogram 모델이 표본의 공간변이를 가장 잘 표현한다면, error statistic은 통계학적으로 정규분포를 나타나게 된다(최종근, 2004; 이상훈, 2002). 본 연구에 사용된 크리깅 방법의 타당성을 검증하기 위하여 교차검증(cross-validation)을 실시하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 잠재증발산량 산정

평년 잠재증발산량을 산정하기 위하여 연구 대상 측후소로 선정된 54개 측후소에 대하여 Penman-Montetih 공식을 이용하여 1975년부터 2004년간의 일별 잠재증발산량을 산정하였다. Fig. 2는 54개 측후소별로 작물 생육기간에 해당하는 4월부터 9월까지 순별 평년 잠재증발산량을 전국 8개 도별로 나타낸 그림이다. 이 결과를 보면 순별로 차이가 있지만 일반적으로

Table 1. Summary statistics of normal PET

(unit: mm)

	Total	6-E	6-M	6-L	7-E	7-M	7-L	8-E	8-M	8-L	9-E
Avg.	428.64	19.44	19.55	18.06	18.23	17.86	19.90	19.68	18.30	18.17	15.15
	465.36	21.92	22.54	21.45	21.18	20.76	23.66	22.91	21.63	20.82	17.42
Max.	Daegu	Buyeo	Buyeo	Buyeo	Buyeo	Buyeo	Buyeo	Buan	Buyeo	Imsil	Buan
	349.76	15.84	14.80	13.70	14.38	14.47	15.24	15.09	12.89	13.12	0.98
Min.	Daegwal-lyeong	Sokcho	Sokcho	Sokcho	Sokcho	Daegwal-lyeong	Sokcho	Daegwal-lyeong	Daegwal-lyeong	Daegwal-lyeong	Daegwal-lyeong

중부 지방의 충청남도가 가장 큰 값을 나타내었고, 강원도가 가장 작은 값을 나타내었다. 순별로 살펴보면 4월 초순부터 하순까지는 충청북도 지역과 경상북도 지역이, 5월 초순부터 7월 중순까지는 충청남·북도 지역이 가장 큰 증발산량을 나타내었다. 또한 7월 하순부터 9월 하순까지는 충청남도과 전라북도가 가장 큰 값을 나타내었다. 반면에 4월 초순부터 7월 중순까지는 전라남도 지역이 가장 작은 값을 나타내었고, 7월 하순부터 9월 하순의 경우에는 강원도 지역이 현저히 작은 값을 나타내었다.

## 2. 공간분포 산정

우리나라 잠재증발산량의 공간분포를 산정하기 위해 각 측후소별로 산정된 평년 잠재증발산량의 점 데이터를 공간 데이터로 나타내기 위하여 범용 크리깅 기법 이용하여 보간을 실시하였다. Table 1은 보간을 실시하기 위하여 각 측후소별로 평년 잠재증발산량의 순별 최대, 최소, 평균값과 1년 동안의 최대, 최소, 평균값을 나타낸 것이다. 관개 기간 동안에 평균적으로 6월 하순이 가장 큰 값을 나타내었고, 9월 초순이 가장 작은 값을 나타내었다. 6월 하순의 경우, 일조시간이 가장 길고, 비교적 높은 기온을 나타내기 때문에 가장 큰 값을 가지는 것으로 판단되지만 9월

하순의 경우에는 관개 기간 중에서 가장 짧은 일조시간과 낮은 온도를 나타내기 때문에 잠재증발산량 가장 작게 산정된 것으로 보인다. 또한 대구 지역의 경우, 관개 기간 동안에는 가장 큰 값을 나타내지 못했지만 비관개기간을 포함한 모든 기간에 걸쳐 전반적으로 큰 값을 나타내어 1년 동안의 총합에 있어서는 가장 큰 값을 나타내었다.

범용 크리깅 기법을 적용하기 위하여 구형 모델을 이용하였는데, 각 순별 sill, nugget, range는 Table 2와 같다. 이 구형 모델을 바탕으로 범용 크리깅 기법을 적용한 각 순별(6월 초순~9월 초순) 공간분포 산정 결과는 Fig. 3~12와 같다. 그 결과를 살펴보면 6월 초순부터 7월 중순까지는 청주와 부여를 중심으로 한 중부 지방이 큰 값을 나타내었고, 강원도 지역이 작은 값을 나타내고 있다. 또한 추풍령 지역의 경우 국지적으로 주변 지역보다 작은 값을 나타내었다. 7월 하순부터 9월 초순까지는 충청남도과 전라남도 지역을 중심으로 한 서해안 지역에 높은 값을 보여주고 있다. 또한 대구 지역의 경우 국지적으로 주변보다 큰 값을 나타내었다. 강원도 지역의 경우 전 기간 동안 작은 값을 나타내고 있는데 이는 북부 지방에 위치하여 상대적으로 온도가 낮고 산악 지형으로 인하여 일조 시간이 짧기 때문인 것으로 판단된다. 결과를 요약해보면 7월 중, 하순을 중심으로 하여 두 가지

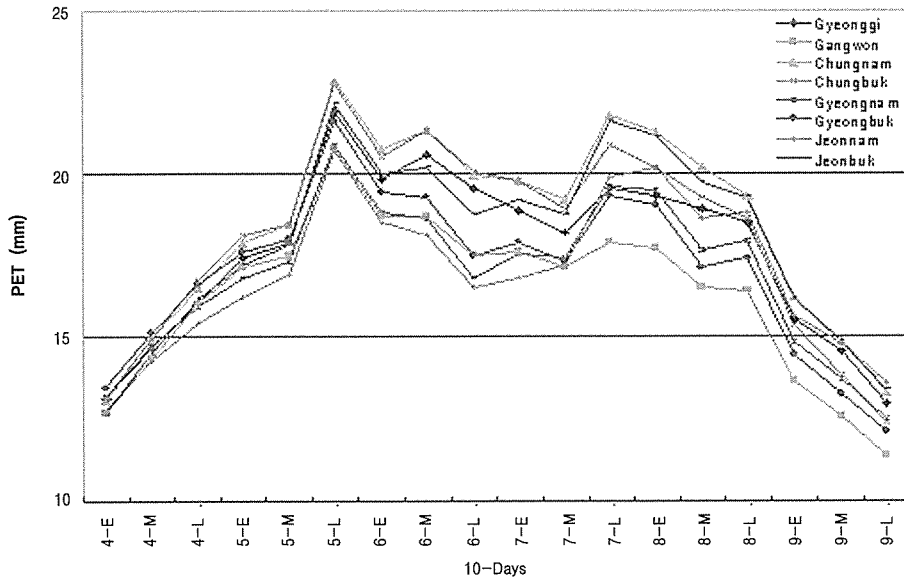


Fig. 2. Estimation of PET by province (1975~2004)

경향을 나타내는데 7월 중순 이전까지는 중부 내륙 지방을 중심으로 큰 값을 나타내지만, 7월 하순 이후부터는 서해안 남부 지역을 중심으로 큰 값을 나타내었다. 또한 경상북도 일부 지역의 경우, 분지 지형의 영향으로 인하여 국지적으로 주변 지역과 다른 경향을 보였다.

관개 기간이 아닌 1년 전체 기간 동안의 잠재

증발산량의 분포(Fig. 13)를 살펴보면, 충청남도 지역과 서해안 지역, 남해안 지역이 높은 값을 나타내었고, 대구 지역을 중심으로 한 일부 지역이 높은 값을 나타내었다. 반면에 강원도가 가장 작은 값을 나타내었고, 산청과 추풍령 지역을 중심으로 한 일부 지역이 주변 지역보다 국지적으로 작은 값을 나타내었다.

Table 2. Variogram model value of universal Kriging

Value	Range ( <i>a</i> )	Sill value ( <i>C</i> )	Lag size ( <i>h</i> )	Nugget ( <i>C<sub>0</sub></i> )
6 E	307,510	1.9998	34,301	0.481
6 M	329,940	4.3776	34,301	0.56
6 L	347,720	5.2742	34,301	0.64
7 E	323,070	3.1384	34,301	1.07
7 M	395,520	1.9601	34,301	1.28
7 L	406,580	3.8892	34,301	3.89
8 E	406,580	3.1491	34,301	0.61
8 M	406,580	4.4249	34,301	0.47
8 L	406,580	2.6895	34,301	0.43
9 E	406,580	1.9350	34,301	0.23
Total	406,580	339.96	34,301	151.89

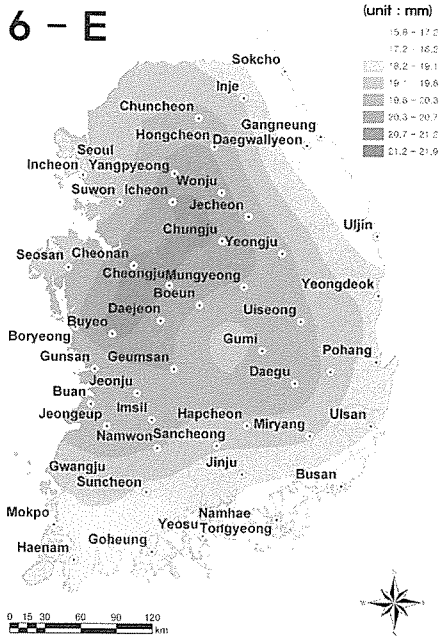


Fig. 3. Normal PET in early June

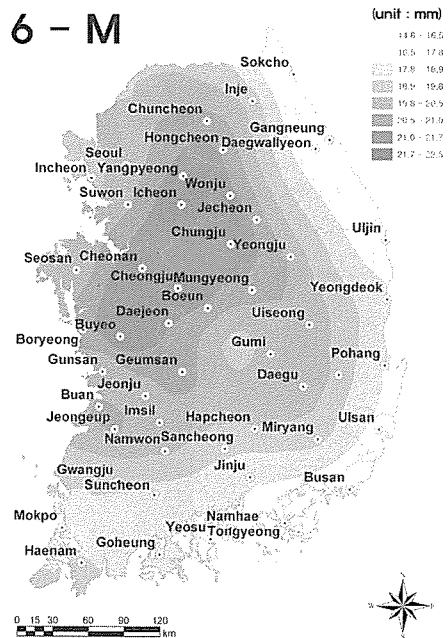


Fig. 4. Normal PET in middle June

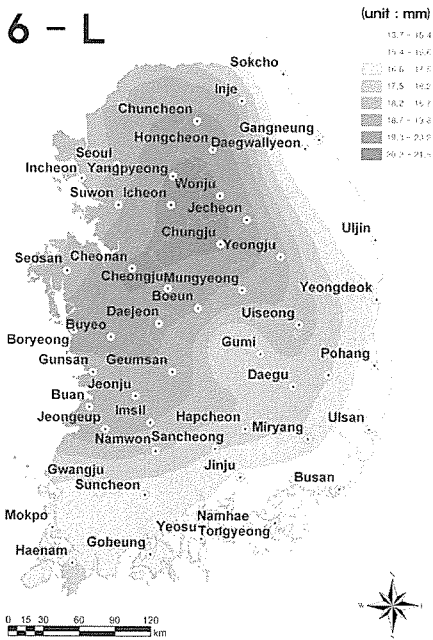


Fig. 5. Normal PET in late June

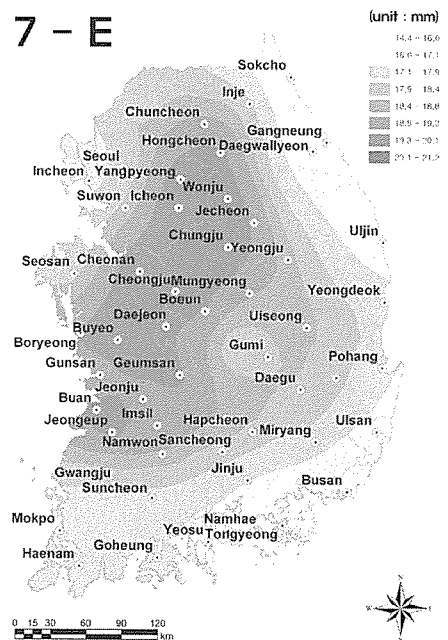


Fig. 6. Normal PET in early July

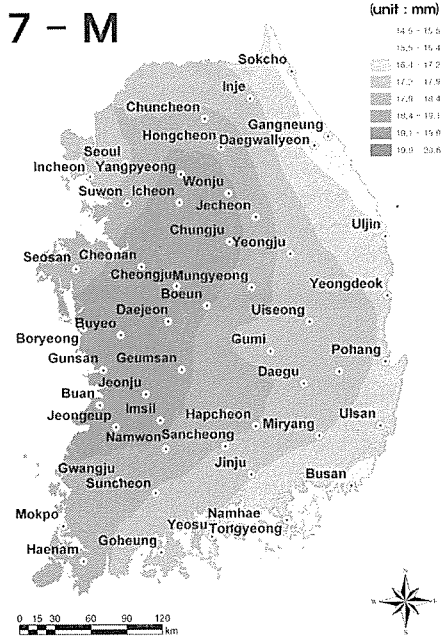


Fig. 7. Normal PET in middle July

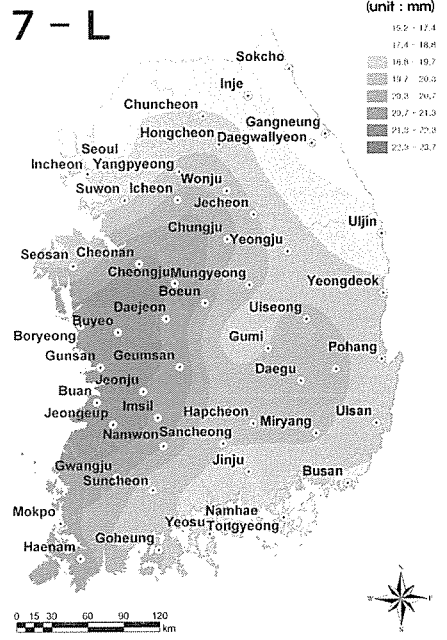


Fig. 8. Normal PET in late July

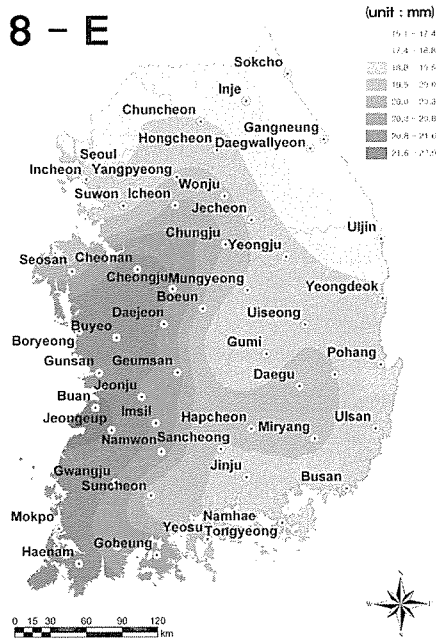


Fig. 9. Normal PET in early August

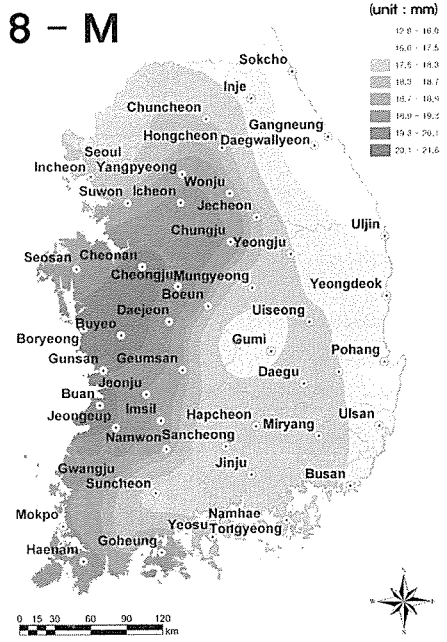


Fig. 10. Normal PET in middle August



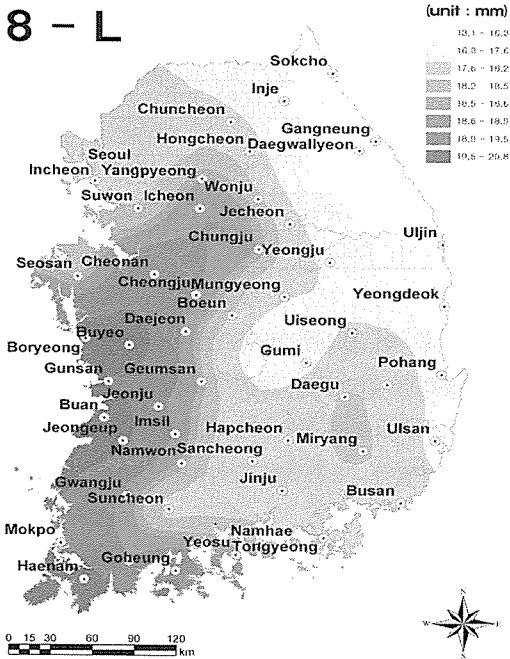


Fig. 11. Normal PET in late August

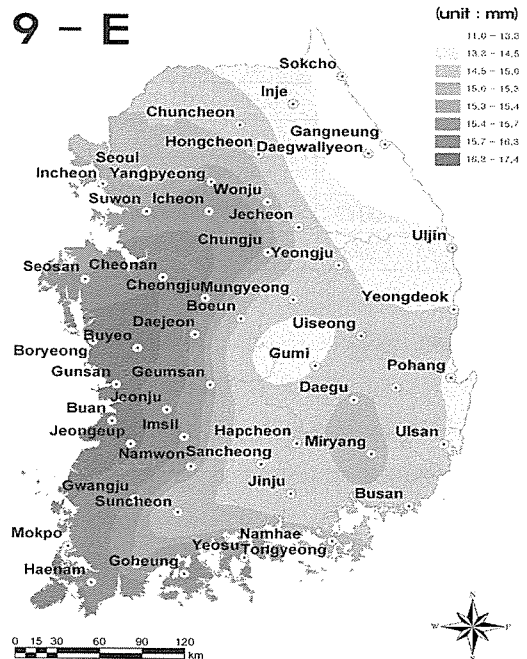


Fig. 12. Normal PET in early September

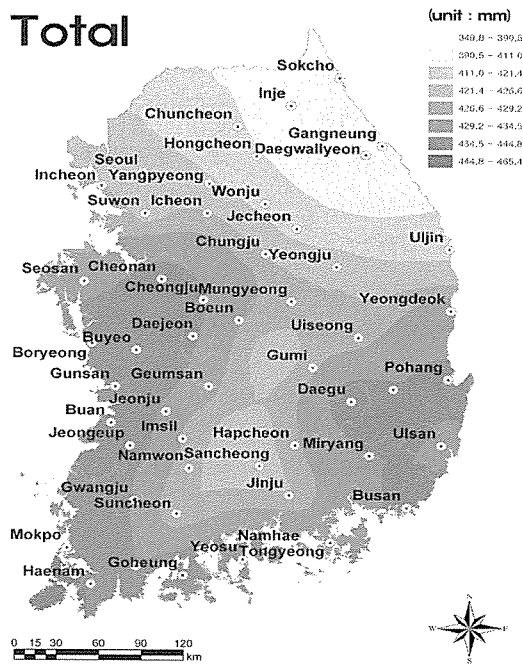


Fig. 13. Normal total PET

Table 3. Summary statistics of estimation error using cross-validation

Error	6-E	6-M	6-L	7-E	7-M	7-L	8-E	8-M	8-L	9-E
ME	0.0266	0.0339	0.0303	0.0318	0.0312	0.0125	0.0047	0.0059	0.0020	-0.0003
RMSE	1.038	1.281	1.355	1.419	1.386	1.27	1.088	1.058	0.9582	0.7214
ASE	0.9754	1.197	1.278	1.354	1.328	1.264	1.083	1.091	0.9443	0.7365
MS	0.0077	0.0060	0.0034	0.0068	0.0122	-0.0016	-0.0031	-0.0021	-0.0028	-0.0023
RMSS	1.042	1.042	1.04	1.033	1.036	1.003	1.007	0.969	1.018	0.9901

### 3. 교차 검증

산정된 공간 분포의 정확성을 평가하기 위해 크리깅 기법에 적용된 함수 모델의 교차검증(cross-validation)을 실시하였는데 결과는 Table 3과 같다.

ME(Mean Error)는  $-0.0003 \sim 0.0339$ 의 범위를, RMSE(Root-Mean-Square Error)의 경우는  $0.7214 \sim 1.419$ 의 범위를, ASE(Average Standard Error)는  $0.7365 \sim 1.354$ 의 범위를 나타내었다. 일반적으로 RMSE와 ASE를 비교하여 비슷한 값을 가지면 정확한 결과를 얻은 것을 의미하고 ASE가 RMSE보다 큰 경우에는 더 작은 추정치를, 반대로 작은 경우는 더 큰 추정치를 얻은 것이다. RMSSE (Root-Mean-Square Standardized Error)는 RMSE와 ASE의 비율을 나타낸 값으로 본 연구에서는  $0.969 \sim 1.042$ 의 범위를 나타내었다. 즉, 상대적인 오차의 정도가  $-3.1 \sim 4.2\%$ 의 값을 나타내는 것으로 추정되었다. 따라서 순별 잠재증발산량의 공간분포가 비교적 정확하게 산정되었다고 할 수 있다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 Penman-Monteith 공식을 이용하여 54개 측후소별 잠재증발산량의 평년값을

산정한 후, 이 결과를 바탕으로 범용 크리깅 기법을 이용하여 관개기간 동안 우리나라 순별 잠재증발산량의 전국적인 공간분포를 추정하고, 교차검증을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 6월 초순부터 7월 중순까지는 청주와 부여를 중심으로 한 중부 지방에서 가장 큰 값을 나타내었고, 강원도 지역이 가장 작은 값을 나타내었다. 또한 추풍령 지역의 경우 국지적으로 주변 지역보다 작은 값을 나타내었다.

2. 7월 하순 이후부터 9월 초순까지는 서해안 남부 지역을 중심으로 큰 값을 나타내었다. 대구 지역의 경우 분지 지형의 영향으로 인하여 국지적으로 주변 지역보다 큰 경향을 보였다.

3. 1년 동안의 전체 잠재증발산량 분포를 살펴보면, 충청남도 지역과 서해안 지역, 남해안 일부 지역이 높은 값을 나타내었고, 대구 지역을 중심으로 한 일부 지역이 높은 값을 나타내었다. 반면에 강원도가 가장 작은 값을 나타내었고, 산청과 추풍령 지역을 중심으로 한 일부 지역이 국지적으로 작은 값을 나타내었다.

4. 산정된 공간 분포의 정확성을 평가하기 위해 크리깅 기법에 이용된 함수 모델의 교차검증(cross-validation)을 실시하였는데 그 결과 상대적인 오차의 정도가  $-3.1 \sim 4.2\%$  범위를 가지는 것으로 보아 각 순별 잠재증발산량의 공간분포가 비교적 정확하게 산정된 것을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. 김영섭 외, 1998, 원격탐사개론, 동화기술.
2. 유승환, 2006, GIS를 이용한 논벼의 소비수량 산정, 서울대학교 석사학위 논문.
3. 윤진일, 남재철, 홍석영, 김준, 김광수, 정유란, 채남이, 최태진, 2004, 공간자료와 지면모형을 이용한 면적증발산 추정, 한국농림기상학회지, 제6권 제3호, pp.149-163.
4. 이규성, 1995, 점관측 환경 인자의 공간 추정 - 남한 지역의 강우 산도 분포도 작성, Journal of the Korean Society of Remote Sensing, Vol. 11, No.3, pp.33-47.
5. 이상훈, 2002, 클러스터링과 지구통계학적 기법을 이용한 지하지리정보 모델 개발, 서울대학교 석사학위논문.
6. 채효석, 송영수, 박재영, 2000, Landsat TM 자료를 이용한 광역 증발산량 추정, 한국수자원학회논문집, 제33권 제4호, pp.471-482.
7. 최중근, 2004, 공간정보 모델링 - 크리깅과 최적화 기법, 구미서관.
8. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998, Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirement, FAO irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United States.
9. Cuenca, R. H. and K. Y. Amegee, 1987, Advances in irrigation, Academic Press, pp.181-220.
10. Monteith, J. L., 1965, Evaporation and Environment, 19th, Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, Cambridge, 19, pp.205-234.
11. Naoum, S., and I. K. Tsanis, 2003, Hydroinformatics in evapotranspiration estimation, Environmental Modelling and Software 18, pp.261-217.
12. Penman, H. L., 1948, Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proceedings of the Royal Society of London, A, 194, pp.120-145.
13. Sousa, V. and L. S. Pereira, 1999, Regional analysis of irrigation water requirements using kriging: Application to potato crop (*Solanum tuberosum* L.) at Tra Â s-os-Montes, Agricultural Water Management, Vol.40, pp.221-233.