

# 비선형 증발량 및 증발산량 시계열의 모형화를 위한 신경망-유전자 알고리즘 모형

## 1. 모형의 이론과 적용

### Neural Networks-Genetic Algorithm Model for Modeling of Nonlinear Evaporation and Evapotranspiration Time Series

#### 1. Theory and Application of the Model

김성원\* / 김형수\*\*

Kim, Sungwon / Kim, Hung-Soo

---

#### Abstract

The goal of this research is to develop and apply the generalized regression neural networks model (GRNNM) embedding genetic algorithm (GA) for the estimation and calculation of the pan evaporation (PE), which is missed or ungaged and of the alfalfa reference evapotranspiration ( $ET_r$ ), which is not measured in South Korea. Since the observed data of the alfalfa  $ET_r$  using lysimeter have not been measured for a long time in South Korea, the Penman-Monteith (PM) method is used to estimate the observed alfalfa  $ET_r$ . In this research, we develop the COMBINE-GRNNM-GA (Type-1) model for the calculation of the optimal PE and the alfalfa  $ET_r$ . The suggested COMBINE-GRNNM-GA (Type-1) model is evaluated through training, testing, and reproduction processes. The COMBINE-GRNNM-GA (Type-1) model can evaluate the suggested climatic variables and also construct the reliable data for the PE and the alfalfa  $ET_r$ . We think that the constructive data could be used as the reference data for irrigation and drainage networks system in South Korea.

**keywords** : GRNNM-GA, Pan evaporation, Alfalfa reference evapotranspiration, Penman-Monteith method

---

#### 요 지

본 연구의 목적은 결측 혹은 미계측 증발접시 증발량과 우리나라에서 계측되고 있지 않은 알팔파 기준증발산량의 산정을 위하여 유전자 알고리즘이 내재된 일반화된 회귀신경망모형을 개발하고 적용하는데 있다. 우리나라에서는 장기간동안 증발산계를 이용하여 알팔파 기준증발산량의 관측이 시행되지 않고 있으므로, 본 연구에서는 Penman-Monteith (PM) 공식을 이용하여 산정된 값을 계측된 알팔파 기준증발산량으로 가정하였다. 본 연구를 통하여 최적 증발접시 증발량과 알팔파 기준증발산량의 산정을 위한 COMBINE-GRNNM-GA (Type-1) 모형을 개발하였으며, 훈련, 테스트 및 재현과정을 통하여 COMBINE-GRNNM-GA (Type-1) 모형을 평가하였다. COMBINE-

---

\* 동양대학교 철도토목학과 조교수

Ph.D./P.E., Assistant Professor, Dept. of Rail. and Civil Engr., Dongyang University, Yeongju, 750-712, South Korea.  
(e-mail: swkim68@phenix.dyu.ac.kr)

\*\* 인하대학교 환경토목공학부 부교수

Ph.D., Associate Professor, School of Civil and Environ. Engr., Inha University, Incheon, 402-751, South Korea.  
(e-mail: sookim@inha.ac.kr)

GRNNM-GA (Type-1) 모형은 제시된 기상인자를 평가할 수 있으며, 증발접시 증발량과 알팔파 기준증발산량에 대한 신뢰성 있는 자료를 구축할 수 있다. 더 나아가서 우리나라에서 관개배수 시스템 구축을 위한 참고자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : GRNNM-GA, 증발접시 증발량, 알팔파 기준증발산량, Penman-Monteith 방법

## 1. 서론

대기와 육지는 상호 연속적인 물분자의 교환이 이루어지고 있지만 일반적으로 증발 및 증발산의 수문학적 정의는 대기로 이송하는 물의 순 비율에 한정되어 있다. 증발과 증발산은 대상유역에 대한 습윤효율 (Moisture efficiency)의 지표적인 변화이며, 그 크기는 하천에서 유출량을 추정하는데 사용되기도 한다. 증발량은 수문학적 순환의 한 요소로써, 일반적으로 질량 이송법, 에너지 수지법 및 물수지법과 같은 간접적인 방법에 의해 추정될 수 있다. 직접적인 측정기법 중 하나인 증발접시 증발량은 증발산량의 지표로 사용되고 있으며, 호수 및 저수지의 증발량을 추정하는데 가장 광범위하게 사용되고 있다(Hargreaves, 1966; Kohler et al., 1955). 많은 연구자들이 기상인자로부터 증발량을 추정하기 위하여 많은 시도를 하였지만, 이들 대부분의 기법들이 쉽게 이용할 수 없는 자료를 필요로 하고 있다(Burman, 1976; Christiansen, 1966; Veihmeyer, 1964). Howell et al.(1983)은 미국 캘리포니아 주의 프레스코시 인근의 2개 지점에서 풍속, 상대습도, 태양열 방사와 평균온도에 대한 관측된 일 자료를 이용하여 변형된 Penman 공식과 증발접시 증발량을 서로 상관시켰다. 강우량이 적은 건조지역에서 1년 동안 208개의 증발접시 증발량의 일자료를 이용하였으며, 분석결과 잠재 증발산량과 관측된 증발접시 증발량사이의 상관계수의 값은 0.95이상을 나타내었다. Linacre(1977)은 오스트레일리아에서 증발접시 증발량을 예측하기 위하여 기상인자 중에서 온도를 사용하였다. 연구결과를 통하여 기상인자 중에서 일평균기온과 이슬점온도가 1.7mm/day의 평균절대오차를 나타내며 증발접시 증발량을 추정할 수 있는 것을 알 수 있었다. 따라서 자연상태에서 증발과정은 강한 비선형이기 때문에 많은 연구자들은 수문학적 모형연구에 있어서 정확한 증발량의 추정을 강조하고 있는 실정이다.

식물표면으로부터 증발산량의 추정은 물수지를 계산하고 용수수요와 공급을 추정하는데 있어서 기본적인 요소라고 할 수 있다. 세계인구의 절반 이상이 관개농업에 의한 생산에 의존하고 있으므로, 농작물 증발산량

의 정량화는 매우 중요하다. 증발산량은 증발산계(Lysimeter)를 이용하여 관측하거나 물수지 기법 혹은 기상변수를 이용하여 추정한다. 그러나 증발산계를 이용한 증발산량의 측정은 필요없이 많은 시간이 요구되는 작업이고, 정확하고 주의깊은 경험이 필요하기 때문에 항상 가능한 방법은 아니다. 따라서 기상자료를 기초로 하는 경험적인 접근법이 증발산량을 추정하는데 일반적으로 사용된다(Allen et al., 1989; Monteith, 1965; Penman, 1948). Jensen et al.(1990)은 세계 각 지역의 서로 다른 기후대에 위치한 11개의 지점에서 증발산계로 측정한 증발산량을 20여개의 서로 다른 경험공식 및 방법론을 이용하여 산정한 값과 비교분석하였다. 그 결과 Penman-Monteith(PM) 공식이 모든 기후대에 대하여 가장 최적의 결과치를 나타내는 것으로 분석되었다. PM 공식을 제외하고는 지역적인 보정방법이나 기후조건에 따라서 순위가 변화하는 것으로 나타났다. 따라서 PM 공식은 증발산량 실측자료가 존재하지 않을 경우에 다른 공식과의 비교를 위한 하나의 기준방법론으로 고려될 수 있다(FAO, 1990).

최근에 신경망이론을 이용한 모형화 기법의 출현은 수문학과 수자원분야에서 기대되는 결과치들을 나타내었다. 간단한 응용과 단순한 구조로 인하여 신경망이론을 이용한 모형화 기법은 이미 많은 잠재력과 더불어서 전도유망한 연구 분야가 되어가고 있다. 많은 연구자들은 증발량과 증발산량의 문제에 있어서 신경망이론을 이용한 모형화 기법의 적용성을 증명하여 왔다. Sudheer et al.(2002)은 신경망이론을 이용하여 Class A 증발접시 증발량의 예측을 검토하였으며, 예측 결과치는 기존의 공식 중에서 Stephens and Stewart 공식과 비교되었다. 그들은 이용할 수 있는 기상인자로부터 증발과정을 모형화 하는데 신경망기법의 이용을 제시하였으며, 온도, 상대습도, 일조시간 및 풍속과 같은 관측된 기상인자들의 적절한 조합을 이용하였다. Bruton et al.(2000)은 입력자료로서 관측된 기상인자들을 이용하여 일 증발접시 증발량을 산정하는데 신경망기법을 이용하였다. 또한 일 증발접시 증발량을 다중선형회귀분석 및 Priestley-Taylor 공식을 이용하여 산정하였으며, 신경망모형의 결과치와 비교하였다. 그들은 강우, 온도,

태양열 방사 및 풍속과 같은 관측된 기상인자들의 적절한 조합을 이용하였다. Kumar et al.(2002)은 일 잔디 기준증발산량의 추정을 위하여 신경망모형을 개발하였으며, PM 공식과 같은 보편적인 경험공식을 이용하여 신경망모형의 수행능력을 비교 검토하였다. 그들은 태양열 방사, 온도, 상대습도 및 풍속과 같은 관측된 기상인자들의 적절한 조합을 이용하였다. 그리고 Sudheer et al.(2003)은 제한된 기상인자로부터 실제의 작물 기준증발산량을 추정하기 위하여 신경망모형을 이용하여 그 잠재성을 검토하였다. 그들은 벼 작물에 대한 증발산량의 일 값을 산정하기 위하여 반경기초함수(Radial basis function, RBF) 신경망모형을 이용하였다. 신경망모형의 결과는 증발산계를 이용하여 관측된 실제 증발산량 값과 비교되었다. 그들은 온도, 상대습도, 일조시간 및 풍속과 같은 관측된 기상인자들의 적절한 조합을 이용하였다. 그러나 앞에서 언급한 기존의 연구 성과들 중에서 신경망모형을 이용하여 증발접시 증발량과 기준증발산량을 동시에 산정하는 연구가 진행된 경우는 없었다. 그리고 Jain and Srinivasulu(2004)는 비선형 강우-유출현상을 신경망모형을 이용하여 수행할 때 모형훈련에 역전파 훈련알고리즘(BackPropagation algorithms, BPA)과 유전자 알고리즘(Genetic algorithms, GA)을 각각 적용시켜 분석한 결과 유전자 알고리즘을 적용하는 것이 역전파 훈련알고리즘을 적용하는 경우보다 유출량을 추정하는데 통계학적 및 유출수문곡선의 측면에서 많은 이점이 있는 것으로 분석하였으며, 기존의 훈련 방법론의 대안으로 유전자 알고리즘을 제시하였다. 즉 신경망모형을 이용한 많은 비선형 문제해석에서 유전자 알고리즘의 적용이 해결책 및 개선점의 대안이 될 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 우리나라에서 결측 및 미계측 증발접시 증발량과 측정 자료가 전무한 알팔과 기준증발산량을 산정하기 위하여 유전자 알고리즘기법이 내제된 일반화된 회귀신경망모형(Generalized regression neural networks model, GRNNM)을 개발하고 적용하는 것이다. 일반적으로 증발산량을 측정하는 최종목표 중 하나는 주어진 시간간격에 대하여 특정작물의 증발산량을 산정하는 것이라 할 수 있다. 특정작물 증발산량을 계산하는 방법론은 일반적으로 기후적인 효과를 고려하는 것이고, 알팔과 혹은 잔디와 같은 기준작물의 조건보다 더 양호하게 수분공급이 이루어진 작물에 대한 증발산량은 작물계수(Crop coefficient,  $K_c$ ), 즉 알팔과 혹은 잔디와 같은 기준작물의 사용수량과 특정작물의 사용수량에 대한 비를 기준증발산량에 곱함으로써 산정되어 진다. 따라서 임의지점의 기준증발산량을 산

정하는 것은 정확한 농작물 생산량의 검토 및 관개배수 시스템의 구축에 있어서 가장 기초적인 자료를 형성하는 것이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구보고서 및 참고문헌을 검토한 결과 비교적 기준증발산량을 산정하는 연산과정이 명확하게 제시되어 있어서 적용이 용이한 알팔과를 기준작물로 선정하였다. 또한 알팔과 기준증발산량의 경우에는 증발산계를 이용하여 실측된 알팔과 기준증발산량 자료가 전혀 존재하지 않기 때문에 미국토목학회(ASCE)에서 증발산량 실측자료가 존재하지 않을 경우에 기준방법론으로 고려될 수 있을 정도로 그 신뢰성을 인정받은 PM 공식에 의해 산정된 알팔과 기준증발산량을 관측자료로 가정하였다. 따라서 본 연구를 통하여 증발접시 증발량과 알팔과 기준증발산량 산정을 위한 최적 GRNNM-GA를 개발하였으며, 우리나라에서 관개배수 시스템 구축을 위한 기준자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 신경망모형과 유전자 알고리즘

신경망은 뉴런이라는 기초적인 단위로 구성되어 있으며, 각 뉴런은 입력자료를 받아들이고, 그 입력된 자료를 처리하며 출력형태로 전환한다. 입력형태는 순수 자료일 수도 있고 다른 뉴런의 출력결과 일 수도 있으며, 출력형태는 마지막 처리과정의 결과치이거나 다른 뉴런의 입력자료일 수도 있다. 신경망은 이러한 뇌와 동일한 계산방식을 사용한 연결론(Connectionism)에 기반을 둔 수학적인 모형(Mathematical model)이다 (Gallant, 1993; Haykin, 1994).

### 2.1 일반화된 회귀신경망모형의 구성

본 연구에 적용된 일반화된 회귀신경망모형 (GRNNM)은 반경기초함수 신경망모형(Radial basis function neural networks model, RBFNNM)의 변형된 형태의 신경망모형이다. GRNNM은 입력층, 은닉층, 합산층 및 출력층의 4개의 층으로 구성되었으며, 비선형 회귀이론에 기초를 둔 신경망모형이다. 입력층, 은닉층 및 합산층노드는 완전히 연결된 구조로 형성되어 있으나, 출력층의 노드는 합산층의 노드 중 몇 개로만 연결이 되어있다. 합산층(Summation layer)은 여러 개의 합산노드(Summation node)와 하나의 제법노드(Division node)의 2종류의 노드로 구성되어 있다. 합산노드수는 출력층 노드수와 동일하다. 제법노드는 어떤 전이함수를 사용하지 않고 은닉층노드의 가중전이값(Weighted transfer value)을 합한 것과 같다. GRNNM의 각 출력층노드는 합산층의 합산노드와 제법노드로 연결되어 있으며, 합산층과 출력층 사이는 연결강도로 구성되어 있

지 않다. 각 출력층노드의 계산은 합산층의 합산노드로부터 계산된 값을 제법노드로부터 계산된 값으로 나누어 산정한다. GRNNM의 훈련과정은 다층 퍼셉트론 신경망모형(MLPNNM)과는 상당히 다른 양상을 가지고 있다. 입력층과 은닉층 사이에서의 훈련과정은 반경기초함수 신경망모형의 경우처럼 자율훈련(Unsupervised training)으로 구성되어서 K-means나 OLS 알고리즘과 같은 특별한 군집알고리즘을 필요로 하며, 군집알고리즘의 반경은 훈련이 시작하기 전에 결정되어져야 한다. 또한 은닉층과 합산층 사이에서의 훈련과정은 은닉층에서의 출력값에 대하여 평균제곱오차의 최소화과정에 기초를 둔 지도훈련(Supervised training)으로 구성된다(김성원 등, 2001; Kim and Kim, 2006; Kim and Jee, 2006; Specht, 1991; Tsoukalas and Uhrig, 1997; Wasserman, 1993).

GRNNM의 입력층과 은닉층사이의 연결함수는 입력 벡터인  $x_i$ 에서 중심인  $u_{ji}$ 를 제한 값의 제공에 대한 평방향으로 나타내고 있으며, 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - u_{ji})^2} \quad (1)$$

여기서 아랫첨자  $i, j$ 는 각각 입력층과 은닉층을 나타내고 있으며,  $R_j$ 는 입력벡터들 사이의 반경거리를 나타내며 입력벡터는 다음 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \quad (2)$$

여기서 반경중심  $U^{(j)}$ 는 다음 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U^{(j)} = [u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{jm}]^T \quad (3)$$

그리고 Eq. (1)은 다음 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_j = \|X - U^{(j)}\| \quad (4)$$

여기서  $\| \cdot \|$ 은 유클리드거리(Euclidean length)이다.  $R_j$ 를 은닉층의 전이함수  $\phi_1(\cdot)$ 에 적용하면 다음 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_j = \phi_1(R_j) = \phi_1(\|X - U^{(j)}\|) \quad (5)$$

은닉층의 전이함수  $\phi_1(\cdot)$ 는 반경기초함수가 주로 광범위하게 사용된다. 일반적으로 반경기초함수의 종류로는 Thin Plate Function(TPF), Gaussian Kernel Function(GKF), Multiquadric Function(MF), 그리고 Inverse-Multiquadric Function(IMF)등이 있다. 이들 모두가 서로 다른 실제적인 문제해법에 적용되었으며, 대부분의 경우에서 비교할 만한 효용성을 나타내는 것으로 판단된다(Powell, 1987). 본 연구에서는 가우시안 핵함수(GKF)가 사용되었으며, 입력벡터값이 0일 경우에 최대값은 1이고 입력벡터와 중심사이의 거리가 감소함에 따라 출력벡터의 값은 증가한다. GKF는 다음 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_1 = \exp(-B_1 R_j^2) = \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - u_{ji})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

여기서  $B_1$ 는  $\frac{1}{2\sigma^2}$ 으로 나타내고 보통 일정한 값을 가지며,  $\sigma$ 는 반경기초함수의 폭을 나타내고 있다. 합산층은  $S_j$ 와 은닉층과 합산층의 연결강도벡터의 연산 결과를 받으며 다음 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_k = \sum_{j=1}^n W_{kj} \cdot S_j = \sum_{j=1}^n W_{kj} \cdot \Phi_1(\|X - U^{(j)}\|) \quad (7)$$

여기서 아랫첨자  $k$ 는 합산층을 나타내고 있으며  $W_{kj}$ 는 은닉층과 합산층 사이의 연결강도를 나타내며 Eq. (7)로부터 합산층에서의 합산노드와 제법노드는 Eqs. (8) ~ (10)으로 나타낼 수 있다.

$$S_1 = \phi_2\left(\sum_{j=1}^n W_{1j} \cdot \Phi_1(\|X - U^{(j)}\|)\right) \quad (8)$$

$$S_2 = \phi_2\left(\sum_{j=1}^n W_{2j} \cdot \Phi_1(\|X - U^{(j)}\|)\right) \quad (9)$$

$$D_1 = \sum_{j=1}^n W_{3j} \cdot \Phi_1(\|X - U^{(j)}\|) \quad (10)$$

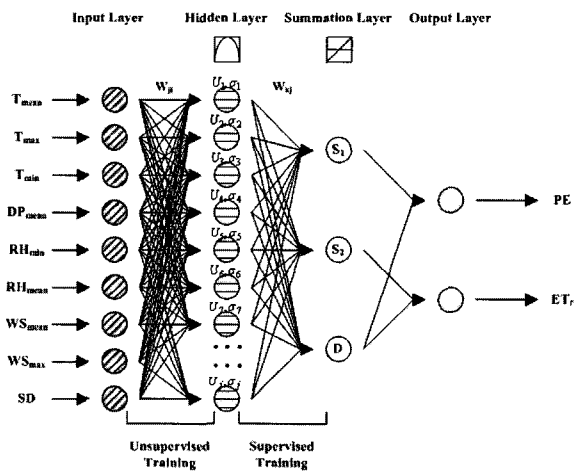
여기서  $\phi_2(\cdot)$ 는 합산층의 전이함수이며, 본 연구에서는 선형전이함수(Pure linear transfer function, PLTF)를 사용하였다. 또한  $S_1$ 는 첫 번째 합산노드의 연산된

값,  $S_2$ 는 두 번째 합산노드의 연산된 값이고  $D_1$ 는 제법 노드의 연산된 값을 나타내고 있다. 마지막으로 출력층 노드의 함수는 각 합산노드의 연산된 값을 하나의 제법 노드의 연산된 값을 단순히 나누어서 구성되어 지며, Eqs. (11) and (12)로 나타낼 수 있다.

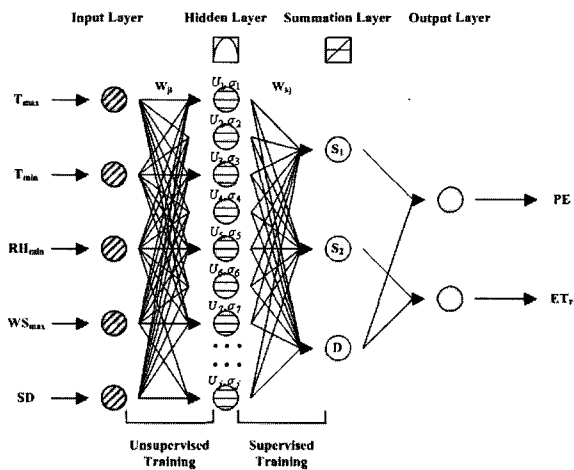
$$PE = \frac{S_1}{D_1} \quad (11)$$

$$ET_r = \frac{S_2}{D_1} \quad (12)$$

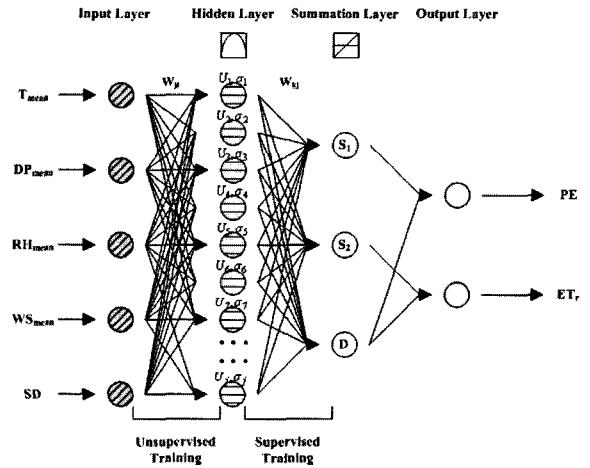
여기서 PE는 계산된 증발접시 증발량이고  $ET_r$ 은 계산된 알팔파 기준증발산량을 나타내고 있다. 다음 Fig. 1의 (a), (b) 및 (c)는 구축된 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1), EXTREME-GRNNM-GA(Type-2) 및 AVERAGE-GRNNM-GA(Type-3)의 구조를 나타내고 있다. 여기에서 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)은



(a) COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)



(b) EXTREME-GRNNM-GA(Type-2)



(c) AVERAGE-GRNNM-GA(Type-3)

Fig. 1. The developed architecture of the GRNNM-GA

일단위의 평균기온, 최대기온, 최소기온, 평균이슬점온도, 최소 상대습도, 평균 상대습도, 평균풍속, 최대풍속 및 일조시간으로 구성되었으며, EXTREME-GRNNM-GA (Type-2)는 일단위의 최대기온, 최소기온, 최소 상대습도, 최대풍속 및 일조시간으로 구성되었고, AVERAGE-GRNNM-GA(Type-3)는 일단위의 평균기온, 평균이슬점온도, 평균 상대습도, 평균풍속 및 일조시간으로 구성되었다.

## 2.2 유전자 알고리즘

혼합최적화에서 탐색기법으로 유전자 알고리즘의 이용은 Holland에 의해 처음 제시되었다(Holland, 1975). 그는 자연도태(Natural selection), 진화(Evolution) 및 적자생존(Survival of the fittest)의 원리에 기초한 인위적인 과정의 이용을 제시하였다. 많은 종류의 전통적인 탐색기법과는 차이가 있는 유전자 알고리즘은 단 하나의 해법보다는 해법의 모집단으로서 운용된다. 모집단의 각 객체 혹은 염색체는 문제의 선택된 결정변수에 대하여 완벽한 특성치이다. 염색체(Chromosome)들은 평가(Evaluation), 선택(Selection) 그리고 세대(Generation)라고 불리어지는 순환을 통하여 재조합(Recombination)의 과정을 경험한다. 염색체들은 많은 세대들을 거치면서 생존할 수도 있고 혹은 유전자 알고리즘의 설계자에 의하여 영향을 받아서 세대차 정책에 의하여 바로 다음 세대에서 교배(Crossover)될 수도 있다. 유전자 알고리즘은 최종 임계치에 도달할 때까지 많은 세대에 대하여 염색체의 모집단을 진화시킨다. 따라서 유전자 알고리즘은 모집단 적자생존과 재현(Reproduction)에 있어서 객체를 결정하는 적합도를 검

토하는데 사용된다(Liong et al., 1995).

본 연구에서 유전자 알고리즘에 의한 신경망모형의 훈련과정은 입력층 노드와 매개변수인 연결강도의 초기화 과정으로부터 시작한다. 그때 신경망모형의 출력층에서의 전반적인 오차는 목적함수의 최적치로서 계산되어 진다. 또한 충분한 수의 세대가 진행된 후에 광역 해(Global solution)에 도달하는 것을 목표로 하여 하나의 세대에서 다음 세대로 반복되어 진다. 일반적으로 유전자 알고리즘에서의 세대는 역전파 훈련알고리즘의 반복 횟수와 유사한 개념이다. 유전자 알고리즘이나 역전파 훈련 알고리즘에서의 목적은 연결강도 행렬의 갱신을 통하여 목적함수의 최적치를 계산하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 연결강도 갱신을 위하여 세대의 모집단의 크기는 100으로 설정하였으며, 최적값이 1%라도 개선되지 않는 20세대에 대하여 자동으로 종료하는 과정 및 신경망모형의 출력층에서 선정된 허용오차의 수렴에 도달할 때까지 한 세대에서 다음 세대로 반복되는 과정을 설정하였다. 다음 Fig. 2는 유전자 알고리즘을 이용한 신경망모형의 훈련과정을 나타내고 있다. Fig. 2에 의하면 특정 수의 염색체로서 첫 번째 모집단 세대를 발생시킨 후 각 염색체의 목적함수와 적정값을 평가한다. 그 후 적절한 염색체를 선택한 후에 교배와 돌연변이(Mutation) 연산자들을 이용하여 다음 세대의 염색체를 발생시킨다. 마지막으로 최적조건에 도달하면 종료하고, 그렇지 않은 경우에는 다시 각 염색체의 목적함수와 적정값을 평가하는 순환과정을 나타낸다.

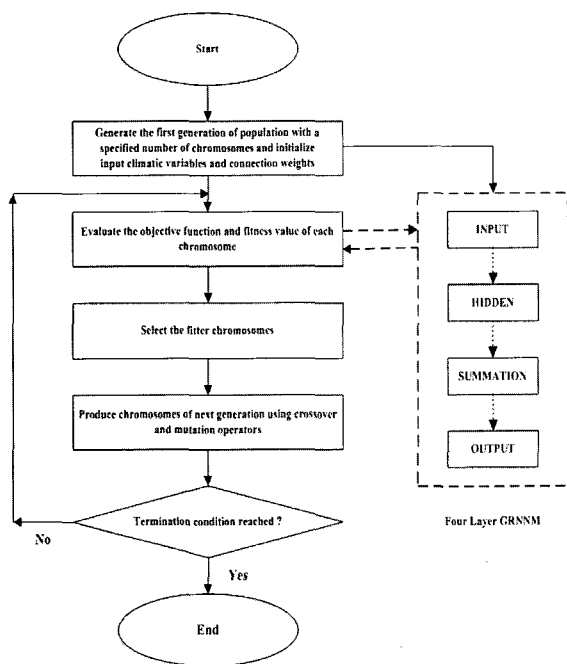


Fig. 2. Neural networks model training using genetic algorithm

또한 본 연구에서 유전자 알고리즘은 각 입력층 노드에 대한 적절한 개별적인 평활인자(Smoothing factor)뿐만 아니라 전반적인 평활인자를 결정하는데 사용된다. 유전자 알고리즘을 이용한 GRNNM에 대한 훈련 수행과정은 크게 두 부분으로 진행되어 진다. 첫 번째는 훈련자료를 이용하여 GRNNM을 훈련시키는 것이며, 두 번째는 첫 번째 과정에서 형성된 GRNNM을 이용하여 테스트자료에 대하여 가장 최적운명을 위한 평활인자의 전 범위를 테스트하는 것이다. 유전자 알고리즘은 각 입력층 노드에 대한 평활인자 승수(Multiplier)를 찾고 있으며, 비록 훈련에 대하여 탐색기법으로 유전자 알고리즘을 사용하지 않은 경우보다 시간은 좀 더 걸리지만 테스트자료에 대하여 가장 양호하게 운영될 수 있는 GRNNM을 생산할 수 있다(Neuroshell 2, 1993).

### 3. Penman-Monteith 공식과 알팔파 기준증발산량의 추정

작물 증발산량의 산정을 위한 경험공식 중에서 이용된 기준작물은 각 경험공식에 따라서 설정되어 지고, 특정 기준작물에 대한 작물계수는 각 경험공식에 따라서 사용되어 진다. 알팔파의 경우 다수의 연구자들에 의하여 기준작물로서 잔디의 경우보다 더 호의적인 경향을 나타내고 있다(Jensen, 1974; Wright, 1982). Jensen(1974)에 의하면 알팔파가 잔디와 비교해서 가지는 주요 이점은 알팔파의 동역학적인 특성이 대부분 농작물의 동역학적 특성보다 양호하고, 뿌리시스템이 잔디의 경우보다 깊이에 있어서 더 깊을 뿐만 아니라, 식물임판(Plant canopy)이 깊어서 잔디보다 대양열방사를 좀 더 많이 흡수하는 것 등을 제시하였다. 본 연구에서 연구대상으로 선정된 14개 기상관측소에서는 증발산계를 이용한 알팔파 기준증발산량의 관측자료는 존재하지 않는다. 따라서 기존의 연구를 통하여 그 신뢰성을 검증받은 Penman-Monteith(PM) 공식을 이용하여 산정한 값을 알팔파 기준증발산량의 관측치로 가정하였다. 본 연구에서 PM 공식은 Penman 공식을 Monteith가 변형한 공식을 의미하고 있으며, PM 공식을 이용하여 알팔파 기준 증발산량을 산정한 연산과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 또한 연산과정은 Monteith(1965), Allen et al.(1989) 및 Jensen et al.(1990)의 제시된 식들을 기본으로 한다.

[Step 1] 포화수증기-온도곡선의 경사(Slope of the saturation vapor pressure-temperature curve)  $\Delta$  (kPa/°K), 기화잠열(Latent heat of vaporization)  $\lambda$  (kJ/kg), 건습구습도계의 계수(Psychrometer coefficient)

$\gamma$  (kPa/°K)을 각각 다음 Eqs. (13) ~ (15)와 같이 산정한다. 또한 일정압력하에서 비열  $C_p = 1.004 \text{ kJ/kg} \cdot \text{°K}$ 로서 일정한 값으로 제시한다.

$$\Delta = \frac{2,503}{(T_{\text{mean}} + 237.3)^2} \exp\left[\frac{17.27 \cdot T_{\text{mean}}}{(T_{\text{mean}} + 237.3)}\right] \quad (13)$$

$$\lambda = 2,501 - (2.3601 \cdot T_{\text{mean}}) \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{C_{\text{pm}} \cdot P}{\epsilon \cdot \lambda} \quad (15)$$

여기서  $T_{\text{mean}}$ 은 일평균기온(°C),  $C_{\text{pm}}$ 은 습윤공기의 일정압에서의 비열(Specific heat, kJ/kg · °K),  $P$ 는 습윤공기의 대기압(kPa) 그리고  $\epsilon$ 는 방사율(Emissivity)를 나타낸다.

[Step 2] 엽면적지수(Leaf area index, LAI)를 다음 Eq. (16)과 같이 산정한다.

$$\text{LAI} = 5.5 + 1.5 \ln(z_v) \quad (16)$$

여기서  $z_v$ 는 목초높이(m)를 나타내고 있으며, 구체적으로 알팔파의 평균높이를 나타내고 있다.

[Step 3] 기준작물인 알팔파에 대한  $z_{\text{om}}$ ,  $z_{\text{ov}}$  및  $d$ 에 대하여 다음 Eq. (17)과 같이 산정한다.

$$z_{\text{om}} = \frac{z_v}{8.15} = 0.123z_v, \quad z_{\text{ov}} = 0.1z_m, \quad d = 0.67z_v \quad (17)$$

여기서  $z_{\text{om}}$ 은 바람에 대한 조도길이(Roughness length, m),  $z_{\text{ov}}$ 는 수증기, 열전도 및 습도에 대한 조도길이(m) 및  $d$ 는 조도길이(m)를 나타낸다.

[Step 4] 공기동역학적 저항(Specific aerodynamic resistance)  $\gamma_a$ (sec/m) 및 특정 식물저항(Specific plant resistance)  $\gamma_c$ (sec/m) 및 상대 건습구습도계의 계수(Relative psychrometer coefficient)  $\gamma^*$ (kPa/°K)는 다음 Eqs. (18) ~ (20)과 같이 산정한다.

$$\gamma_a = \frac{\ln\left[\frac{z_w - d}{z_{\text{om}}}\right] \cdot \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{\text{ov}}}\right]}{\kappa^2 u_z} \quad (18)$$

$$\gamma_c = \frac{\gamma_1}{0.5 \cdot \text{LAI}} \quad (19)$$

$$\gamma^* = \gamma \left[1 + \frac{\gamma_c}{\gamma_a}\right] \quad (20)$$

여기서  $\gamma_1$ 은 각 엽의 평균저항(sec/m),  $z_w$ 는 풍속계의 높이(m),  $z_h$ 는 습도계의 높이(m),  $\kappa$ 는 무차원의 von Karman의 상수(0.41) 그리고  $u_z$ 는  $z$  고도에서의 풍속(m/sec)를 나타내고 있다.

[Step 5] 증기압부족(Vapor pressure deficit) VPD (kPa) 과  $\gamma_a$ 의 비율에 해당되는  $Q$ (kPa · m/sec)를 다음 Eq. (21)과 같이 산정한다.

$$Q = \frac{\text{VPD}}{\gamma_a} = \frac{1}{\gamma_a} \left[ \frac{e_{\text{max}}^0 + e_{\text{min}}^0}{2} - e_a \right] \quad (21)$$

여기서  $e_{\text{max}}^0$ 는 일 최대온도에 해당되는 포화수증기압(kPa),  $e_{\text{min}}^0$ 는 일 최저온도에 해당되는 포화수증기압(kPa) 그리고  $e_a$ 는 이슬점온도에서의 수증기압(kPa)을 나타내고 있다.

[Step 6] 기화잠열과 기준 증발산량의 곱에 해당되는  $\lambda \text{ET}_r$ (MJ/day · m<sup>2</sup>)를 다음 Eq. (22)와 같이 산정한 후에 기준잠열을 나누어서 기준 증발산량을 산정한다.

$$\lambda \text{ET}_r = \frac{\Delta \cdot H + \rho \cdot C_p \cdot Q}{\Delta + \gamma^*} \quad (22)$$

여기서  $H$ 는 순 방사열(Net radiation)과 토양 열플럭스(Soil heat flux)의 합을 나타내고 있다. 기준 증발산량을 산정할 경우 단위환산에 있어서 주의해야 하며, 본 연구에서는 엑셀(Excel)을 이용하여 연산과정을 나타내었다.

## 4. 연구범위 및 자료

### 4.1 연구범위

본 연구에서는 제주도를 포함한 기상청의 관리 하에 있는 71개의 기상관측소중에서 우리나라의 전 국토를 대표할 수 있는 기상관측소를 선정하였다. 선택된 기상관측소는 먼저 전 국토에 골고루 분포되어 있어서 그 지역을 대표할 수 있는 지점이어야 하며, 최소 30년 이상의 기상관측 자료를 보유하고 있어야 한다. 그리고 급속한 산업개발 및 도시화의 영향으로 인하여 많은 도

시의 경우에는 농업생산량에 큰 영향을 끼치는 변수 중 하나인 소형 증발접시 증발량의 지속적인 관측으로 인한 농업생산량의 증감에 대한 의미는 상당히 퇴색하여 1990년 이후 한때 많은 기상관측소에서 관측이 중단되었다가 그 이후에 재 관측이 실시되었다. 따라서 본 연구의 미계측 혹은 계측이 중단된 증발접시 증발량자료의 보완 및 확장을 위해서 선정할 기상관측소는 1990년 이후로 소형 증발접시 증발량의 측정이 몇 년 동안 중단되고 다시 관측이 재개된 기상관측소이어야 한다. 따라서 이러한 조건에 부합되는 기상관측소로서 광주, 군산, 대구, 부여, 서울, 성산포, 울산, 원주, 인제, 전주, 청주, 통영, 포항 및 해남 기상관측소로 총 14개소로 파악되었다. 다음 Fig. 3은 본 연구에서 선정된 14개 기상관측소의 위치를 나타내고 있다.

#### 4.2 자료의 수집

본 연구에 개발된 GRNNM-GA를 적용하기 위하여 필요한 기상자료는 국가 '수자원관리종합정보 시스템 (Water Management Information System, WAMIS)의 홈페이지(www.wamis.go.kr)와 기상청 홈페이지(www.kma.go.kr)의 무료 공개자료로부터 필요한 자료를 이용하였다. 자료의 종류는 기상자료, 계기자료 및 작물자료로 구분되는데, 증발접시 증발량의 산정에는 기상자료만으로 충분하나, PM 공식을 이용한 알팔파 기준증발산량의 산정을 위하여 기상관측소의 계기자료 및 작물자료가 필요하다. 기상자료의 경우

COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)는 일단위의 평균기온, 최대기온, 최소기온, 평균이슬점온도, 최소 상대습도, 평균 상대습도, 평균풍속, 최대풍속 및 일조시간을 필요로 한다. 또한 PM 공식을 이용하기 위해서는 평균기온, 최대기온, 최소기온, 평균이슬점온도, 평균 상대습도, 평균풍속, 및 일조시간의 기상자료에다가 기상관측소의 위도, 기압계 해발표고, 풍속계 및 온도계의 표고와 같은 계기자료를 필요로 한다. 물론 알팔파의 높이를 포함하여 선택 작물기준에 대한 여러 작물자료도 필요하나, PM 공식을 이용하여 산정할 때 제시된 참고값들을 이용하였다. 따라서 1985년부터 1992년까지 일단위의 기상자료를 이용하여, 훈련자료, 테스트자료 및 재현자료로 구성하였다.

#### 5. GRNNM-GA의 적용

신경망을 이용한 문제해석에서 결정되지 않은 문제들 중 하나가 어떠한 형태의 신경망구조가 주어진 문제에 대하여 가장 적절하게 사용되는가의 문제라고 할 수 있다. 일반적으로 바람직한 신경망구조는 적은 수의 은닉층 노드를 포함하고 있으며, 실제 함수의 양호한 접근성에 대한 연결강도가 필요하다. 신경망모형의 구조는 시산법의 과정 후에 결정되어 진다. 모형의 구조가 너무 작은 경우에는 정확하게 학습하기 위한 충분한 자유도를 가지지 않으며, 신경망모형의 구조가 너무 큰 경우에는 훈련동안에 수렴이 되지 않거나 자료를 과대평가하는 경향이 있다.

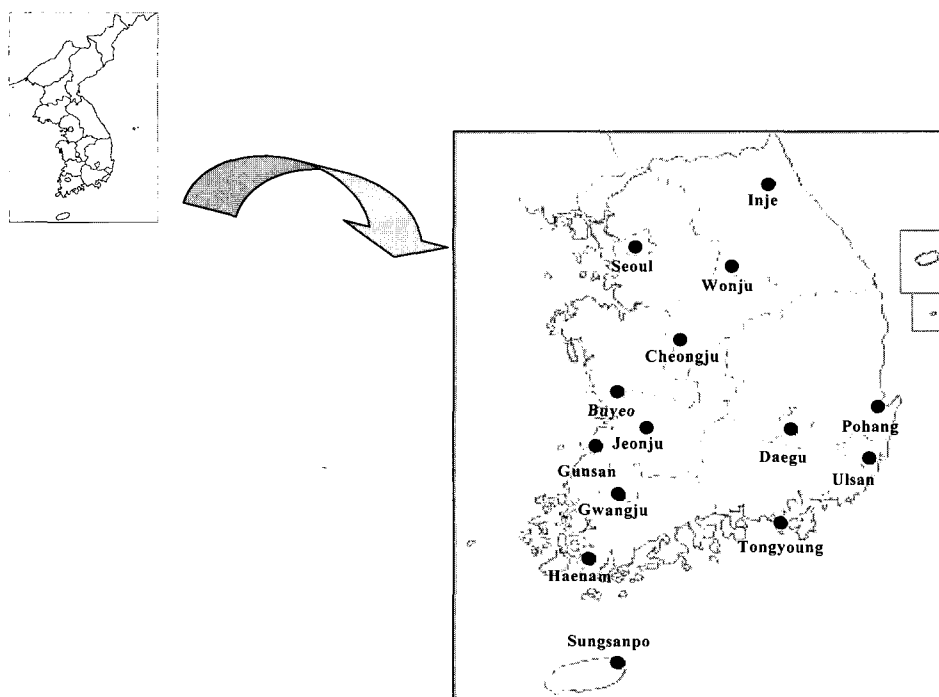


Fig. 3. The locations of 14 meteorological stations



## 5.1 훈련과정

본 연구에서는 14개 기상관측소의 1985년부터 1992년의 일 기상자료 중에서 1985년부터 1989년까지의 5년 자료를 GRNNM-GA의 훈련자료로 설정하였다. 따라서 훈련에 사용된 총 자료의 수는 1,826개의 자료시계열로 구성되어 있다. 그리고 GRNNM-GA의 훈련에 따른 선행과정으로서 모든 입력층의 입력변수들은 표준화하여 적용하였다. 입력변수들을 표준화하는 주요한 이유 중 하나는 각 입력변수들이 서로 다른 단위로서 관측된 값들을 나타내고 있기 때문에 이러한 입력변수들을 표준화하고 무차원단위에서 입력변수들을 재배치함으로써, 각 변수들의 상사성의 효과를 제거하기 위한 것으로 판단된다. 본 연구에서 GRNNM-GA의 수행능력을 검토하기 위한 통계학적 지표로서 상관계수(Correlation Coefficient, CC), 평균제곱오차의 평방근(Root Mean Square Error, RMSE) 및 모형편차(Modeling Bias, MB)을 선정하였다. 다음 Table 1은 COMBINE-, EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 훈련결과에 대한 증발접시 증발량의 통계분석을 나타낸 것이고, 다음 Table 2는 알팔파 기준증발산량의 통계분석 결과를 나타낸 것이다. Table 1에 의하면 증발접시 증발량의 경우 극치 및 평균값의 기상인자를 모두 이용한 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)의 통계분석 결과가 CC가 0.939~0.970, RMSE가 0.433~0.705 및 MB가 -0.015~0.004로서 극치 혹은 평균값의 기상인자만을

이용하는 경우인 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 통계분석 결과인 CC가 0.903~0.952, 0.910~0.950, RMSE가 0.564~0.766, 0.579~0.741 및 MB가 -0.023~0.263, -0.018~0.215보다 양호한 것으로 분석되었다. 그러나 극치 혹은 평균값의 기상인자를 이용한 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 통계분석을 서로 비교한 결과는 큰 차이를 나타내지는 않았다. 또한 Table 2에 의하면 알팔파 기준증발산량의 경우 극치 및 평균값의 기상인자를 모두 이용한 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)의 통계분석 결과가 CC가 0.976~0.991, RMSE가 0.264~0.404 및 MB가 -0.019~-0.002로서 극치 혹은 평균값의 기상인자만을 이용하는 경우인 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 통계분석 결과인 CC가 0.971~0.984, 0.963~0.987, RMSE가 0.342~0.471, 0.320~0.538 및 MB가 -0.022~-0.006, -0.019~0.002보다 미소하게 양호한 것으로 분석되었다. 그러나 극치 혹은 평균값의 기상인자를 이용한 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 통계분석을 서로 비교한 결과는 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 증발접시 증발량과 알팔파 기준증발산량의 비교는 알팔파 기준 증발산량의 통계분석 결과가 증발접시 증발량보다 좀 더 양호한 것으로 나타났다. 그 이유로는 증발접시 증발량의 경우 실측자료로서 강한 비선형 및 서로 다른 크기의 불확실성을 포함하는 자연현상을 나타내고 있으나, 알팔파 기준 증발산량의 경우 PM 공식, 즉 일정한 연산과정으로 추

Table 1. The statistical analysis of pan evaporation for the training results

Station	Statistical Index								
	COMBINE-GRNNM-GA (Type-1)			EXTREME-GRNNM-GA (Type-2)			AVERAGE-GRNNM-GA (Type-3)		
	CC	RMSE (mm)	MB (mm)	CC	RMSE (mm)	MB (mm)	CC	RMSE (mm)	MB (mm)
Gwangju	0.942	0.705	0.004	0.932	0.766	-0.006	0.937	0.736	-0.002
Gunsan	0.948	0.564	-0.011	0.927	0.661	-0.009	0.940	0.603	-0.012
Daegu	0.956	0.604	-0.012	0.941	0.698	-0.019	0.945	0.678	-0.017
Buyeo	0.950	0.642	-0.007	0.903	0.762	0.263	0.910	0.724	0.215
Seoul	0.970	0.433	-0.005	0.949	0.564	-0.010	0.947	0.579	-0.014
Seongsanpo	0.946	0.572	-0.009	0.923	0.679	-0.012	0.928	0.655	-0.013
Ulsan	0.950	0.558	-0.001	0.947	0.575	-0.008	0.937	0.624	-0.004
Wonju	0.961	0.596	-0.011	0.947	0.691	-0.008	0.950	0.673	-0.013
Inje	0.955	0.611	-0.012	0.947	0.674	-0.018	0.932	0.741	-0.008
Jeonju	0.955	0.589	-0.001	0.952	0.610	-0.008	0.950	0.620	-0.004
Cheongju	0.958	0.552	-0.009	0.950	0.603	-0.004	0.950	0.604	-0.018
Tongyoung	0.939	0.572	-0.015	0.926	0.626	-0.020	0.925	0.628	-0.016
Pohang	0.943	0.666	-0.013	0.927	0.749	-0.023	0.928	0.740	-0.016
Haenam	0.954	0.565	-0.007	0.949	0.592	-0.012	0.948	0.597	-0.011

Table 2. The statistical analysis of alfalfa reference evapotranspiration for the training results

Station	Statistical Index								
	COMBINE-GRNNM-GA (Type-1)			EXTREME-GRNNM-GA (Type-2)			AVERAGE-GRNNM-GA (Type-3)		
	CC	RMSE (mm)	MB (mm)	CC	RMSE (mm)	ME (mm)	CC	RMSE (mm)	ME (mm)
Gwangju	0.984	0.335	-0.002	0.976	0.405	-0.006	0.981	0.362	-0.004
Gunsan	0.985	0.336	-0.017	0.976	0.418	-0.016	0.979	0.389	-0.016
Daegu	0.988	0.325	-0.010	0.979	0.431	-0.012	0.984	0.377	-0.015
Buyeo	0.984	0.374	-0.011	0.974	0.471	-0.009	0.969	0.538	0.002
Seoul	0.991	0.264	-0.004	0.978	0.419	-0.011	0.982	0.386	-0.012
Seongsanpo	0.980	0.343	-0.013	0.971	0.407	-0.016	0.973	0.392	-0.018
Ulsan	0.979	0.374	-0.007	0.975	0.413	-0.007	0.975	0.415	-0.012
Wonju	0.989	0.289	-0.005	0.981	0.387	-0.006	0.987	0.320	-0.006
Inje	0.989	0.273	-0.006	0.984	0.342	-0.009	0.984	0.339	-0.004
Jeonju	0.983	0.355	-0.003	0.980	0.379	-0.012	0.980	0.376	-0.004
Cheongju	0.987	0.327	-0.009	0.982	0.389	-0.008	0.984	0.368	-0.017
Tongyoung	0.979	0.376	-0.017	0.972	0.439	-0.022	0.978	0.388	-0.019
Pohang	0.982	0.359	-0.019	0.972	0.446	-0.020	0.963	0.511	-0.013
Haenam	0.976	0.404	-0.006	0.971	0.440	-0.013	0.971	0.433	-0.013

정된 자료에 해당되므로 자연계의 강한 비선형이 일정한 패턴의 선형화형태로 나타내어, 일정한 불확실성을 포함하는 결과를 유도함으로써 실제로는 증발접시 증발량보다는 불확실성이 상당히 저감된 것으로 판단된다.

## 5.2 테스트과정

본 연구에서는 14개 기상관측소의 1985년부터 1992년의 일 기상자료 중에서 1990년의 1년 자료를 GRNNM-GA의 테스트자료로 설정하였다. 본 연구의 테스트과정은 GRNNM-GA의 과적합문제(Overfitting problem)를 극복하기 위하여 교차검증법(Cross-validation method)을 적용하였다. 교차검증법은 GRNNM-GA가 최소 RMSE에 도달할 때까지 모든 훈련자료를 훈련시키게 하는 것이 아니고, 각 훈련단계의 마지막에 테스트자료로서 교차검증하는 방법이다. 일반적으로 테스트자료는 총 훈련자료의 최대 40% 정도 사용하고 있으며, 본 연구에서는 총 훈련자료의 20%에 해당되는 1년 자료를 이용하였고, 1990년의 365개의 자료시계열로 구성되어 있다. 만약 과적합문제가 발생되면 테스트자료의 평균제곱오차의 수렴과정은 훈련자료가 여전히 훈련되고 있는 경우에도 감소하지 않고 증가하는 경향을 나타낼 것이다(Bishop, 1994; Haykin, 1994; 김성원, 2005). 다음 Table 3은 COMBINE-, EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 테스트결과에 대한 증발접시 증발량의 통계분석을 나타낸 것이고, 다음 Table 4는 알팔파 기준증발산량의 통계분석

결과를 나타낸 것이다. Table 3에 의하면 증발접시 증발량의 경우 전반적으로 테스트결과가 Table 1의 훈련결과만큼 통계학적 결과치가 양호하지 못한 것으로 나타났으며, 극치 및 평균값의 기상인자를 모두 이용한 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)의 통계분석 결과가 CC가 0.885~0.929, RMSE가 0.643~0.976 및 MB가 -0.279~0.353로서 극치 혹은 평균값의 기상인자만을 이용하는 경우인 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 통계분석 결과인 CC가 0.878~0.924, 0.802~0.925, RMSE가 0.689~1.017, 0.654~1.330 및 MB가 -0.260~0.328, -0.290~0.364보다 양호한 것으로 분석되었다. 그러나 극치 혹은 평균값의 기상인자를 이용한 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 통계분석을 서로 비교한 결과는 큰 차이를 나타내지는 않았다. 또한 Table 4에 의하면 알팔파 기준증발산량의 경우 전반적으로 테스트결과가 Table 2의 훈련결과만큼 통계학적 결과치가 양호하지 못한 것으로 나타났으며, 극치 및 평균값의 기상인자를 모두 이용한 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)의 통계분석 결과가 CC가 0.958~0.979, RMSE가 0.351~0.544 및 MB가 -0.057~0.070로서 극치 혹은 평균값의 기상인자만을 이용하는 경우인 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 통계분석 결과인 CC가 0.949~0.975, 0.954~0.977, RMSE가 0.437~0.593, 0.364~0.566 및 MB가 -0.166~-0.134, -0.045~0.075보다 미소하게 양호한 것으로 분석되었다. 그러나 극치 혹은 평균값의

Table 3. The statistical analysis of pan evaporation for the testing results

Station	Statistical Index								
	COMBINE-GRNNM-GA (Type-1)			EXTREME-GRNNM-GA (Type-2)			AVERAGE-GRNNM-GA (Type-3)		
	CC	RMSE (mm)	MB (mm)	CC	RMSE (mm)	MB (mm)	CC	RMSE (mm)	MB (mm)
Gwangju	0.929	0.723	0.113	0.924	0.751	0.126	0.925	0.739	0.097
Gunsan	0.885	0.905	-0.279	0.878	0.922	-0.260	0.881	0.920	-0.290
Daegu	0.927	0.809	0.353	0.916	0.847	0.328	0.914	0.873	0.364
Buyeo	0.924	0.648	0.121	0.882	0.962	-0.016	0.802	1.330	-0.036
Seoul	0.909	0.673	0.128	0.900	0.712	0.154	0.899	0.704	0.136
Seongsanpo	0.904	0.835	0.195	0.901	0.857	0.212	0.908	0.826	0.202
Ulsan	0.911	0.798	0.049	0.901	0.839	-0.021	0.903	0.830	0.066
Wonju	0.928	0.758	0.053	0.917	0.816	0.123	0.924	0.780	0.042
Inje	0.891	0.804	0.141	0.885	0.828	0.166	0.884	0.834	0.159
Jeonju	0.903	0.761	0.055	0.892	0.804	0.047	0.897	0.786	0.052
Cheongju	0.922	0.643	-0.001	0.914	0.689	0.047	0.919	0.654	-0.018
Tongyoung	0.917	0.721	-0.028	0.914	0.735	-0.031	0.912	0.743	-0.054
Pohang	0.898	0.976	-0.175	0.883	1.017	-0.095	0.896	0.980	-0.160
Haenam	0.921	0.732	0.076	0.902	0.740	0.098	0.917	0.751	0.074

Table 4. The statistical analysis of alfalfa reference evapotranspiration for the testing results

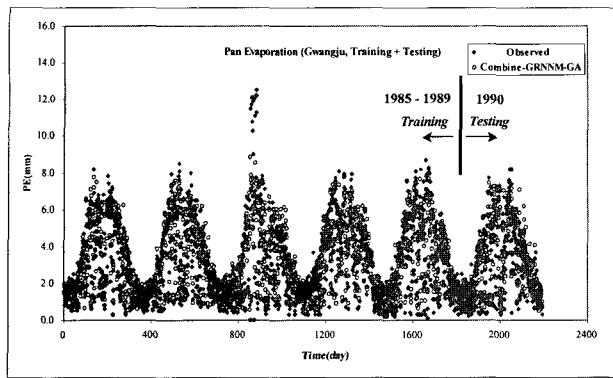
Station	Statistical Index								
	COMBINE-GRNNM-GA (Type-1)			EXTREME-GRNNM-GA (Type-2)			AVERAGE-GRNNM-GA (Type-3)		
	CC	RMSE (mm)	MB (mm)	CC	RMSE (mm)	MB (mm)	CC	RMSE (mm)	MB (mm)
Gwangju	0.974	0.432	-0.021	0.957	0.556	0.003	0.972	0.453	-0.030
Gunsan	0.971	0.410	0.070	0.964	0.466	0.099	0.969	0.431	0.068
Daegu	0.979	0.441	-0.017	0.965	0.573	-0.031	0.977	0.469	0.005
Buyeo	0.977	0.422	-0.057	0.975	0.437	0.020	0.973	0.474	-0.016
Seoul	0.970	0.439	0.064	0.961	0.506	0.099	0.964	0.482	0.075
Seongsanpo	0.960	0.508	0.016	0.950	0.567	0.031	0.954	0.543	0.020
Ulsan	0.970	0.441	0.026	0.949	0.585	-0.067	0.967	0.463	0.044
Wonju	0.978	0.351	-0.017	0.964	0.457	0.069	0.976	0.364	-0.008
Inje	0.967	0.417	-0.010	0.964	0.437	0.023	0.962	0.447	-0.001
Jeonju	0.965	0.436	0.026	0.954	0.502	-0.002	0.964	0.442	0.028
Cheongju	0.977	0.390	0.001	0.972	0.442	0.067	0.977	0.395	-0.015
Tongyoung	0.958	0.544	-0.006	0.951	0.593	-0.005	0.960	0.535	-0.035
Pohang	0.966	0.502	0.039	0.956	0.581	0.116	0.958	0.566	0.046
Haenam	0.964	0.494	-0.031	0.953	0.587	-0.134	0.961	0.518	-0.045

기상인자를 이용한 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 통계분석을 서로 비교한 결과 큰 차이를 나타내지는 않았다. 다음 Fig. 4의 (a)~(d)는 14개 기상관측소 중에서 주요 관측소인 광주, 대구, 서울 및 성산포관측소에 대한 COMBINE-GRNNM-GA (Type-1)의 훈련 및 테스트결과 증발접시 증발량의 관측치와 계산치의 비교결과를 나타내고 있으며, Fig. 5의 (a)~(d)는 14개 기상관측소 중에서 주요 관측소인 광주, 대구, 서울 및 성산포관측소에 대한 COMBINE-

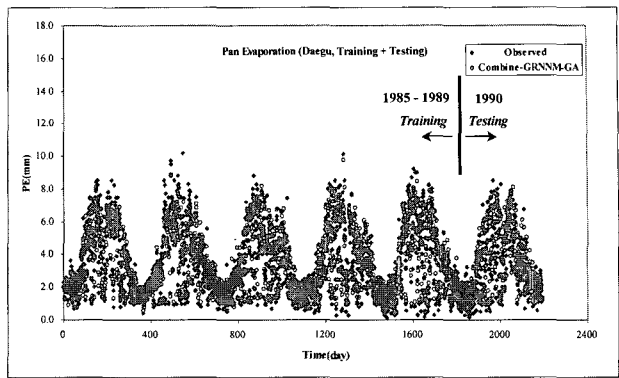
GRNNM-GA(Type-1)의 훈련 및 테스트결과 알팔파 기준증발산량의 관측치와 계산치의 비교결과를 나타내고 있다.

### 5.3 재현과정

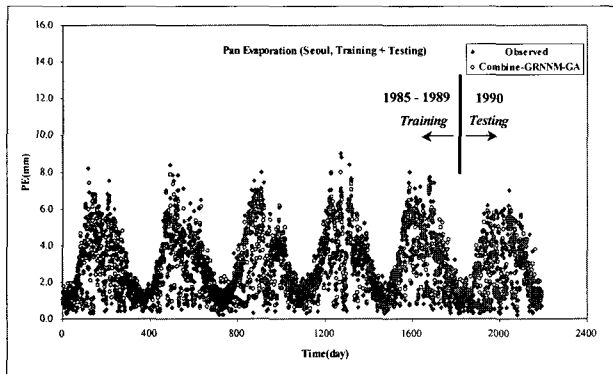
본 연구에서는 1990년 이후에 증발접시 증발량의 관측이 중단된 14개의 기상관측소에서 결측된 자료를 보완하고 확장하기 위한 방법으로 재현과정을 실시하였다. 훈련 및 테스트과정을 통하여 극치 및 평균값의 기



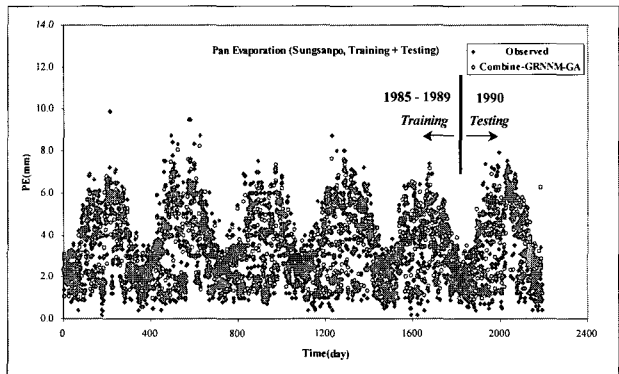
(a) Gwangju



(b) Daegu

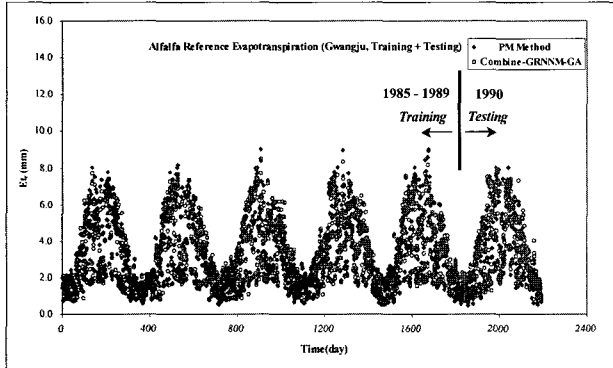


(c) Seoul

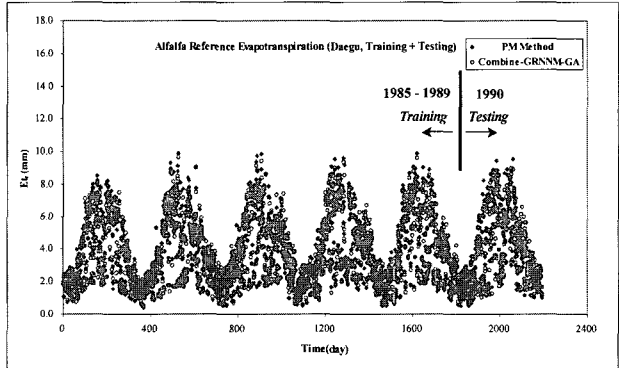


(d) Seongsanpo

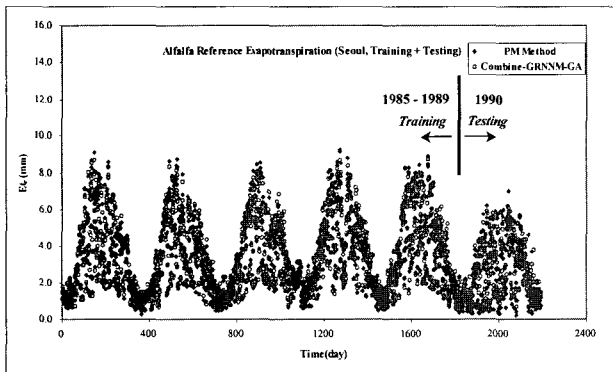
Fig. 4. The comparison of the observed and calculated data of pan evaporation



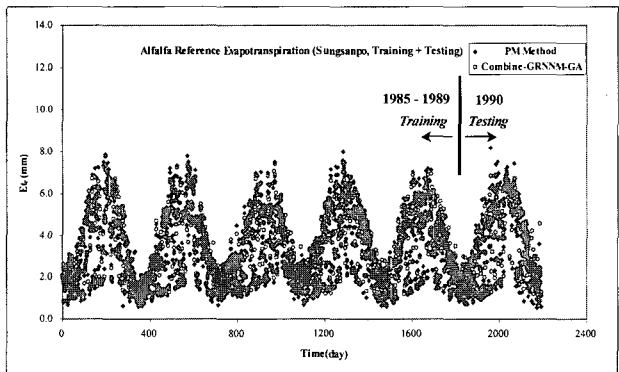
(a) Gwangju



(b) Daegu



(c) Seoul



(d) Seongsanpo

Fig. 5. The comparison of the observed and calculated data of alfalfa reference evapotranspiration

상인자를 모두 이용한 COMBINE-GRNNM-GA (Type-1)가 극치 혹은 평균값의 기상인자만을 이용하는 경우인 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA 보다 양호한 결과치를 나타내는 것으로 분석되었다. 따라서 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1) 훈련 및 테스트 결과로부터 산정된 최적 매개변수를 이용해 예측된 시계열에 대하여 증발접시 증발량의 경우 재현시키고, 알팔파 기준증발산량의 경우 PM 공식에 의해 산정된 값과 비교하여 PM 공식의 신뢰성을 검토하는 과정을 가졌다. 또한 다음 Fig. 6의 (a)~(d)는 14개 기상관측소 중에서 주요 관측소인 광주, 대구, 서울 및 성산포관측소에 대한 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)의 재현된 증발접시 증발량을 나타내고 있으며, Fig. 7의 (a)~(d)는 14개 기상관측소 중에서 주요 관측소인 광주, 대구, 서울 및 성산포관측소에 대한 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)의 재현된 알팔파 기준증발산량의 관측치와 계산치의 비교결과를 나타내고 있다. 그리고 다음 Table 5는 재현결과 알팔파 기준증발산량의 통계분석 결과를 나타낸 것이다. Table 5에 의하면 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)의 재현된 알팔파 기준증발산량의 경우 통계분석결과가 CC가 0.951~0.980, RMSE가

0.298~0.562 및 MB가 -0.201~0.008 로 나타나서, CC가 0.976~0.991, RMSE가 0.264~0.404 및 MB가 -0.019~-0.002 나타난 훈련결과 보다는 양호하지 않으나, CC가 0.958~0.979, RMSE가 0.351~0.544 및 MB가 -0.057~0.070 나타난 테스트결과 만큼은 양호한 것으로 나타났다.

## 6. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 우리나라에서 급속한 경제성장과 도시화로 인하여 증발접시 증발량의 관측이 중단된 주요 14개 기상관측소에서 증발접시 증발량의 확충과 알팔파 기준증발산량의 산정을 위하여 유전자 알고리즘 연산과정이 내재되어 있는 GRNNM-GA를 개발하여 적용하였다. 적용된 GRNNM-GA는 입력층 노드를 형성한 기상인자의 종류에 따라서 COMBINE-GRNNM-GA (Type-1), EXTREME-GRNNM-GA(Type-2) 및 AVERAGE-GRNNM-GA(Type-3)으로 구성되었다. 각 모형에 대하여 출력층 노드는 증발접시 증발량과 알팔파 기준증발산량으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 선택된 14개 기상관측소에서 알팔파 기준증발산량의 실측

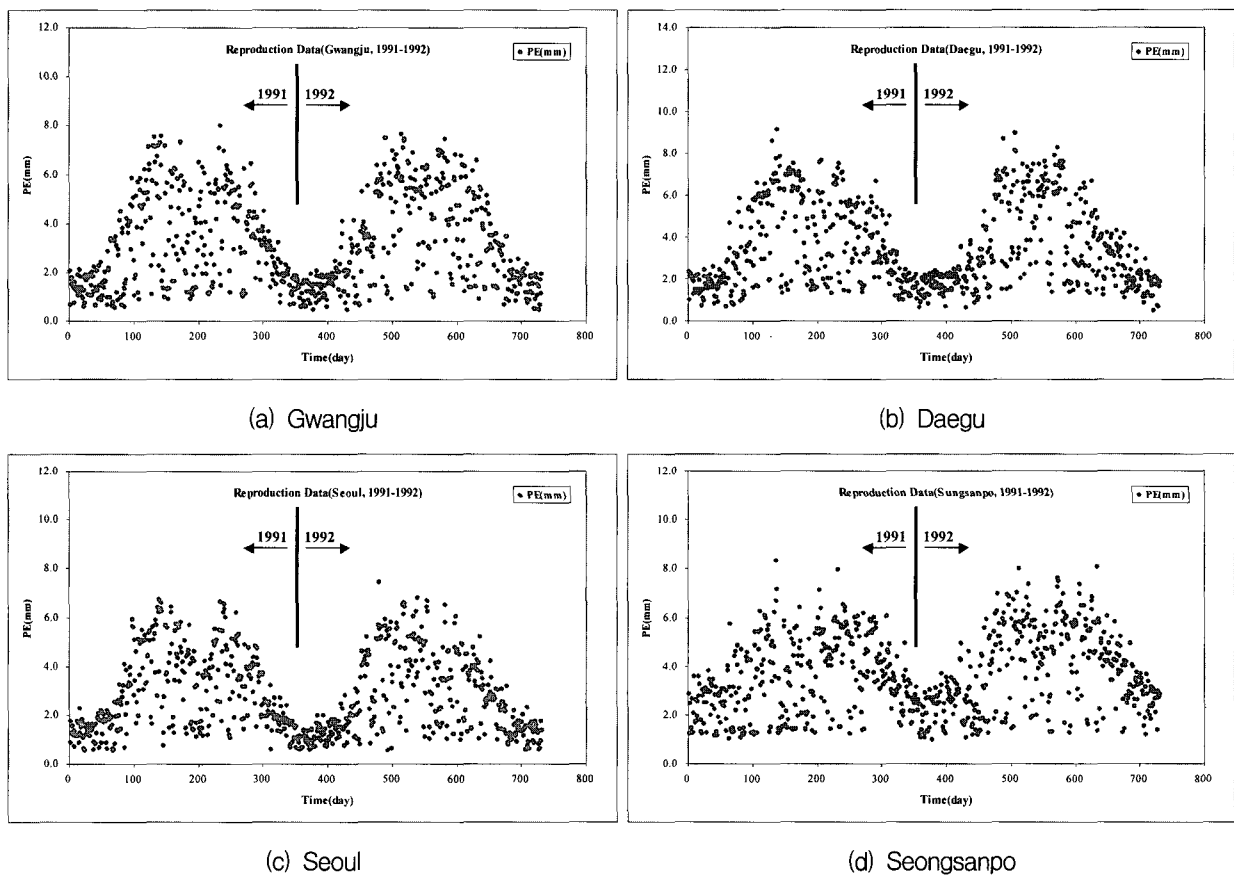


Fig. 6. Reproductive pan evaporation

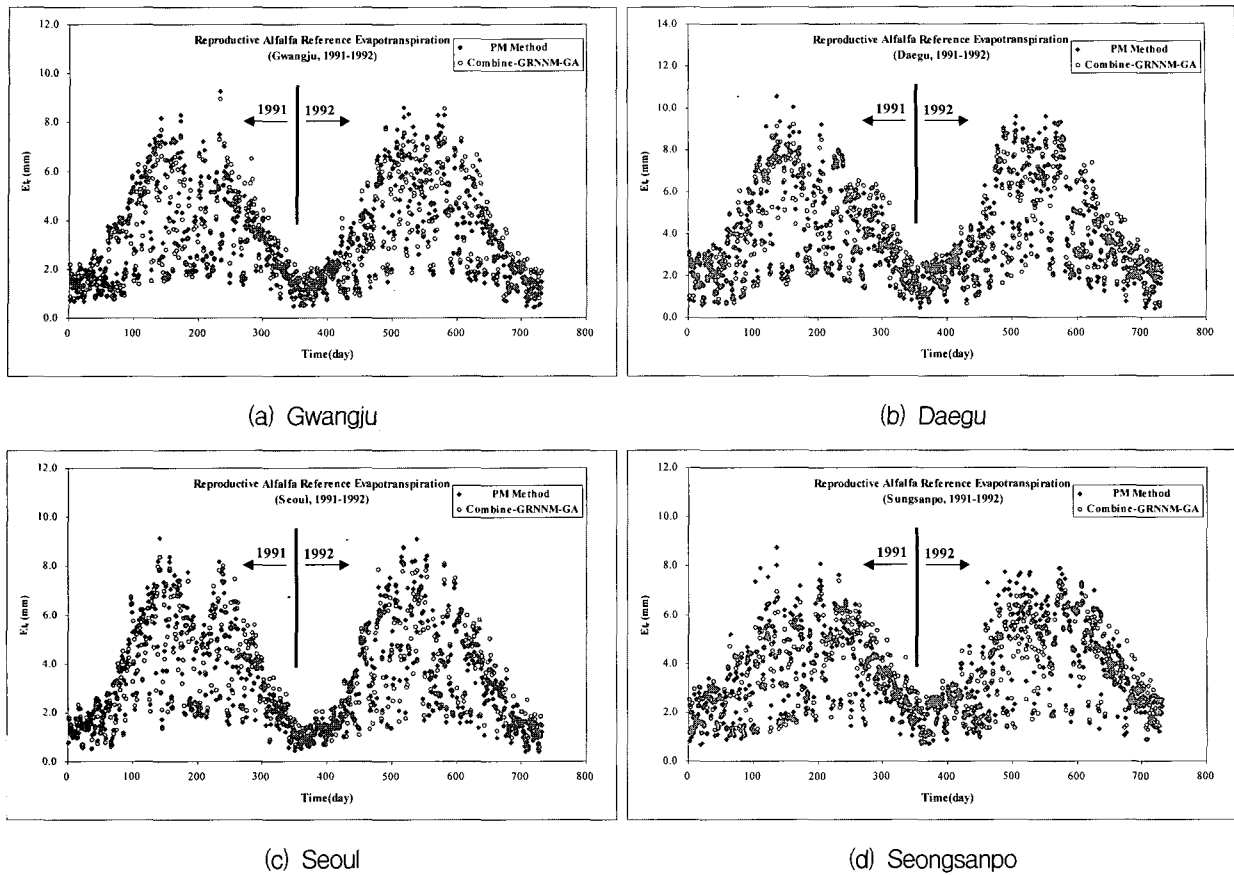


Fig. 7. Reproductive alfalfa reference evapotranspiration

Table 5. The statistical analysis of alfalfa reference evapotranspiration for the reproduction results

Station	Statistical Index								
	COMBINE-GRNNM-GA (Type-1)			EXTREME-GRNNM-GA (Type-2)			AVERAGE-GRNNM-GA (Type-3)		
	CC	RMSE (mm)	MB (mm)	CC	RMSE (mm)	MB (mm)	CC	RMSE (mm)	MB (mm)
Gwangju	0.976	0.434	-0.041	0.965	0.527	-0.027	0.970	0.492	-0.052
Gunsan	0.971	0.428	0.008	0.965	0.475	0.043	0.962	0.489	-0.006
Daegu	0.979	0.463	-0.034	0.964	0.615	-0.029	0.975	0.504	-0.031
Buyeo	0.970	0.528	-0.201	0.969	0.510	-0.111	0.964	0.573	-0.161
Seoul	0.978	0.417	0.001	0.966	0.522	0.025	0.974	0.458	-0.003
Seongsanpo	0.952	0.562	-0.087	0.952	0.558	-0.008	0.951	0.566	-0.081
Ulsan	0.966	0.477	-0.037	0.954	0.567	-0.065	0.963	0.495	-0.007
Wonju	0.979	0.366	-0.026	0.974	0.411	0.003	0.980	0.357	-0.022
Inje	0.951	0.298	-0.039	0.920	0.382	0.001	0.937	0.347	-0.063
Jeonju	0.963	0.502	-0.057	0.960	0.519	-0.030	0.942	0.619	-0.045
Cheongju	0.980	0.412	-0.012	0.975	0.491	-0.129	0.977	0.443	-0.034
Tongyoung	0.956	0.550	-0.150	0.945	0.617	-0.158	0.956	0.561	-0.180
Pohang	0.970	0.482	-0.032	0.963	0.541	-0.003	0.966	0.518	0.029
Haenam	0.958	0.526	-0.056	0.889	0.868	-0.192	0.959	0.517	-0.072

자료가 없으므로, 많은 선행연구자들에 의해 검증과정을 통하여 그 신뢰성을 인정받은 PM 공식을 이용해 산정한 값을 실측자료로 선정하였다. GRNNM-GA의 혼

련, 테스트 및 재현과정의 분석결과 아주 양호한 통계 분석결과를 나타내고 있으나, 알팔과 기준증발산량의 경우가 증발접시 증발량보다 좀 더 양호한 것으로 나타

났다. 또한 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)의 결과치가 EXTREME- 및 AVERAGE-GRNNM-GA의 결과치보다 양호한 결과를 유도하여서, 이용할 수 있는 기상자료의 수가 많을수록 그 결과치는 양호한 것으로 분석되었다. 그러나 증발접시 증발량 자체에도 많은 오차를 포함하고 있으며, PM 공식의 경우 많은 변수들의 산정에 있어서 오차를 포함하는 것이 사실이다. 따라서 증발량 및 증발산량이 관개시설 및 농업용 저수지의 설계 등에는 아주 중요한 인자중 하나이므로 정확한 증발량 및 증발산량의 실측을 통한 신뢰성 있는 자료의 확보를 위하여 자동계측장치의 보급이 시급한 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 가장 양호한 결과치를 유도한 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)의 입력층 노드의 불확실성 분석을 통하여 최적의 COMBINE-GRNNM-GA(Type-1)를 재구성한 후에 증발접시 증발량과 알팔파 기준증발산량의 상관성을 유도하고, 우리나라의 연간 증발접시 증발량 및 알팔파 기준증발산량의 지도를 구축하는 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

### 참고 문헌

건교부 (2006). 수자원 관리 종합정보 시스템 홈페이지 <http://www.wamis.go.kr>.

기상청 (2006). 기상청 홈페이지 <http://www.kma.go.kr>.

김성원 (2005). "신경망모형에 의한 홍수위예측의 신뢰성분석 1. 모형의 개발 및 적용." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제6B호, pp. 473-482.

김성원, 이순탁, 조정석 (2001). "중소하천유역에서 Hybrid Neural Networks에 의한 수문학적 예측." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 303-316.

Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., and Burman, R.D. (1989). "Operational estimates of reference evapotranspiration." *Agrono. J.*, Vol. 81, No. 4, pp. 650-662.

Bishop, C.M. (1994). "Neural networks and their applications." *Rev. Scien. Instru.* Vol. 65, pp. 1803-1832.

Bruton, J.M., McClendon, R.W., and Hoogenboom, G. (2000). "Estimating daily pan evaporation with artificial neural networks." *Trans. of the ASAE*, ASAE, Vol. 43, No. 2, pp. 491-496.

Burman, R.D. (1976). "Intercontinental comparison of evaporation estimates." *J. of Irrig. and Drain. Engr.*, ASCE, Vol. 93, No. 1, pp. 61-79.

Christiansen, J.E. (1966). "Estimating pan evaporation and evapotranspiration from climatic data." *In Irrigation and drainage Special Conference*, ASCE, Las Vegas, NV, pp. 193-231.

Food and Agriculture Organization(FAO). (1990). *Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirement*. Land and Water Devel. Div., Rome, Italy.

Gallant, S.I. (1993). *Neural network learning and expert systems*. MIT Press, Cambridge, MA.

Hargreaves, G.H. (1966). "Consumptive use computations from evaporation pan data." *In Irrigation and Drainage Special Conference*, ASCE, Las Vegas, NV, pp. 35-62.

Haykin, S. (1994). *Neural networks : A comprehensive foundation*. Macmillan College Pub. Comp., Inc., MA.

Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University Michigan Press, Ann Arbor, MI.

Howell, T.A., Phene, C.J., and Meek, D.W.(1983). "Evaporation from screened Class A pans in a semi-arid environment." *Agric. Met.*, Vol. 29, No. 1, pp. 111-124.

Jain, A., and Srinivasulu, S. (2004). "Development of effective and efficient rainfall-runoff models using integration of deterministic, real-coded genetic algorithms and artificial neural network technique." *Water Resour. Res.*, Vol. 40, No. 4, W04302.

Jensen, M.E. (1974). *Consumptive use of water and irrigation water requirement*. Report Tech. Comm. on Irrigation Water Requirements, Irrigation and Drainage, ASCE.

Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manual and Report on

- Engineering Practice No. 70, ASCE, NY.
- Kim, S., and Kim, H.S. (2006). "Estimation of the reference evapotranspiration using neural networks model and limited climatic variables." *Proc. World Environmental & Water Resources Congress 2006*, ASCE/EWRI, Omaha, NE. [ Printed in CD ]
- Kim, S., and Jee, H. (2006). "An expansion of the unguarded pan evaporation using neural networks model in rural regions, South Korea." *Proc. World Environmental & Water Resources Congress 2006*, ASCE/EWRI, Omaha, NE. [ Printed in CD ]
- Kohler, M.A., Nordenson, T.J., and Fox, W.E. (1955). *Evaporation from pans on lakes*. US Department of Commerce, Weather Bureau Research Paper 38, Washington, DC.
- Kumar, M., Raghuvanshi, N.S., Singh, R., Wallender, W.W., and Pruitt, W.O. (2002). "Estimating evapotranspiration using artificial neural network." *J. of Irrig. and Drain. Engr.*, ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 224-233.
- Linacre, E.T. (1977). "A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone." *Agric. Met.*, Vol. 23, No. 6, pp. 409-424.
- Liong, S.Y., Chan, W.T., and ShreeRam, J. (1995). "Peak-flow forecasting with genetic algorithm and SWMM." *J. of Hydraul. Engr.*, ASCE, Vol. 121, No. 8, pp. 613-617.
- Monteith, J.L. (1965). "The state and movement of water in living organism." *Proc., Evaporation and Environment, XIXth Symp.*, soc. For Exp. Biol., Swansea, Cambridge Univ. Press, NY, pp. 205-234.
- Neuroshell 2 (1993). Ward systems group. Inc., MD.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc. R. Soc. London*, 193, pp. 120-146.
- Powell, M.J.D. (1987). "Radial basis functions for multivariable interpolation: A review." *In Algorithms for the Approximation of Functions and Data*, Mason, J.C., and Cox, M.G., eds., Oxford, England : Clarendon Press, pp. 143-167.
- Specht, D.F. (1991). "A general regression neural network." *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 2, No. 6, pp. 568-576.
- Sudheer, K.P., Gosain, A.K., and Ramasastri, K.S. (2003). "Estimating actual evapotranspiration from limited climatic data using neural computing technique." *J. of Irrig. and Drain. Engr.*, ASCE, Vol. 129, No. 3, pp. 214-218.
- Sudheer, K.P., Gosain, A.K., Rangan, D.M., and Saheb, S.M. (2002). "Modeling evaporation using an artificial neural network algorithm." *Hydro. Process.*, Vol. 16, pp. 3189-3202.
- Tsoukalas, L.H. and Uhrig, R.E. (1997). *Fuzzy and neural approaches in engineering*. John Wiley & Sons Incorporated, New York.
- Veihmeyer, F.J.(1964). *Evaporation : Handbook of applied hydrology*. Chow, V.T.(ed.), McGraw-Hill Book Co., New York.
- Wasserman, P.D. (1993). *Advanced methods in neural computing*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Wright (1982). "New evapotranspiration crop coefficients." *J. of Irrig. and Drain. Engr.*, ASCE, Vol. 108, No. 2, pp. 57-74.

(논문번호:06-90/접수:2006.08.23/심사완료:2006.12.22)