

# 일별 기상자료를 이용한 농경지 물 수지 및 토양수분 예측모형 (AFKAE0.5) 개발

서명철\* · 허승오<sup>1</sup> · 손연규 · 조현숙 · 전원태 · 김민경 · 김민태

농촌진흥청 국립식량과학원, <sup>1</sup>농촌진흥청 국립농업과학원

## The Development of Estimation Model (AFKAE0.5) for Water Balance and Soil Water Content Using Daily Weather Data

Myung-Chul Seo\*, Seung-Oh Hur<sup>1</sup>, Yeon-Kyu Sonn, Hyeon-Suk Cho, Weon-Tai Jeon, Min-Kyeong Kim, and Min-Tae Kim

National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea

<sup>1</sup>National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea

As the area of upland crops increase, it is become more important for farmers to understand status of soil water at their own fields due to key role of proper irrigation. In order to estimate daily water balance and soil water content with simple weather data and irrigation records, we have developed the model for estimating water balance and soil water content, called AFKAE0.5, and verified its simulated results comparing with daily change of soil water content observed by soil profile moisture sensors. AFKAE0.5 has two hypothesis before establishing its system. The first is the soil in the model has 300 mm in depth with soil texture. And the second is to simplify water movement between the subjected soil and beneath soil dividing 3 categories which is defined by soil water potential. AFKAE0.5 characterized with determining the amount of upward and downward water between the subjected soil and beneath soil. As a result of simulation of AFKAE0.5 at Gongju region with red pepper cultivation in 2005, the water balance with input minus output is recorded as -88 mm. the amount of input water as precipitation, irrigation, and upward water is annually 1,043, 0, and 207 mm, on the other, output as evapotranspiration, run-off, and percolation is 831, 309, and 161 mm, respectively.

**Key words:** AFKAE0.5, Soil water content, Water balance, Soil water potential, Soil model

### 서 언

우리나라 쌀 소비량은 점차 감소하고 있어 쌀 생산량이 평년수준만 되어도 공급량이 초과되는 현상이 최근 문제가 되고 있어 정부는 “논 소득기반 다양화 사업” 등을 통해 밭작물 재배를 유도하고 있어 밭작물 재배면적이 지속적으로 늘어날 전망이다. 물을 담수하여 재배하는 벼와는 달리 콩, 옥수수, 고추 등 밭작물의 경우 토양내 수분조건에 따라 생육반응이 민감하게 반응하여 때로는 시비 요인보다 더 수량성에 영향을 미치기 때문에 적절한 토양수분 관리가 더욱 중요하다.

토양에서 작물이 흡수하기 좋은 적정 수분을 유지하였을 경우 양분 유효도도 함께 증가하여 생산량이 증가한다. 그러나 한발 조건에서 적절한 시점에 관개를 하지 않아 위조

점에 도달하거나 과습한 토양에서 배수를 하지 않아 토양수분이 오래 포화되어 있을 경우 작물의 생육기작이 손상되고 회복이 안 되어 수확을 올바르게 기대하기 어렵게 된다. 밭작물마다 관개에 따른 반응이 상이한데 Jung et al. (2003)에 의하면 상추는 토양수분장력이 80 kPa 이상 올라갔음에도 불구하고 관개를 하지 않으면 30~70%까지 수량이 감소한 반면 고추의 경우 100 kPa 정도까지 수분이 감소되어도 수량감소는 10%내외라고 보고하였다. 한편 토양내 수분함량은 토성에 따라 작물에 유효한 유효수분 함량이 상이하여 한발을 평가하는데 토성이 매우 중요한 인자이며 Oh et al. (1996)에 따르면 식양토에서는 포장용수량 토양수분량에서 56%정도가 남아도 위조점에 도달하지만 식양토는 33%정도가 되어야 위조점에 도달한다고 하였다.

따라서 밭작물 재배시에는 작물과 토양의 특성을 파악하는 것과 이에 따른 적정 토양수분을 유지하여 주는 것이 생산성에 매우 중요한 요소이다. 그러나 토양수분을 실제로 측정하는 방법은 건조 중량법 등 실험실에서 측정하는 것과

포장에서 텐시오메타 (tensiometer)를 이용한 토양수분 포텐셜을 측정하거나 중성자나 전자기파로 용적수분함량을 측정하는 방법 등이 있다. 최근에는 전자기파를 이용한 용적수분함량을 측정하는 센서들이 다수 보급되어 있어 비교적 쉽게 토양수분함량을 측정할 수 있으나 센서장비가 고가이고 작물반응을 평가하기 위해서는 토양수분 포텐셜 (Soil Moisture Potential)과의 상관관계를 알아야만 하기 때문에 농가에서 접근이 쉽지 않은 부분이 있다.

한편, 기후변화에 따라 전 세계적으로 가뭄, 호우 등 이상기상의 빈도가 증가하고 피해규모도 커지는 양상을 보이고 있는 가운데 우리나라도 피해가 커지는 양상을 보이고 있어 농경지 재해액이 1990년대 10년간 약 4,900억에 비해 2000년대에는 약 1조를 넘어서고 있는 실정이다 (National Emergency Management Agency, 2012). 우리나라는 산이 많고 지형이 복잡하여 이상기상에 의한 재해발생이 국지적이며 재해종류가 한발, 호우, 냉해, 폭염, 태풍 등 다양한 것이 특징으로 작물재배적인 측면에서 대응하기가 쉽지 않다.

이상기상 가운데 한발, 습해는 농경지에서 재배되고 있는 작물의 피해시점이 태풍, 폭우, 냉해 등과 같이 단기간으로 명확하지 않고 토양조건, 작물 등에 따라 편차도 많지만 재해조건이 심화되었을 때에는 작물의 손실면적이 매우 크다는 특징을 가지고 있다. 가뭄의 정도를 표시하는데에는 강수량, 무강수일수, 하천유량 등 다양한 인자들이 사용될 수 있으며 Kim et al. (1996)은 우리나라 농업한발지수를 수문학적 가뭄으로서 저수지의 저수율 발생빈도 개념을 도입하여 비가 적게 오는 과우 (寡雨)일수를 기준으로 가뭄정도를 판단한 바 있다. Shim et al. (2008)은 과거 전국 기상자료를 이용하여 비 이양기의 한발지수를 평가하여 한발이 점차 개선되고 있다고 하였다.

위와 같이 토양수분과 관련한 많은 연구들이 수행되어 왔으며 Aydindil (1994)은 이론적 모형을 만들어 목화를 재배하는 식질토양에서의 토양수분특성과 물 수지를 평가를 하였고 Song et al. (2001)은 경사도와 경사장이 다른 라이시메타에서 콩-보리 등을 재배하며 토양수분 수지를 평가하였는데 토양수분의 보유 변화량을 평가하기 위하여 유입요소로는 강우량, 관개량, 모세관 상승량으로 유출요소로는 유거량, 증발산량, 배수량으로 산정하였으나 이를 계수화하여 다른 포장에 적용하지는 못하였다. 이 외에도 많은 연구들에서 토양수분 및 농경지 물수지에 대한 모형을 개발하고 연구되어 왔으나 실제 농가에서 실용적으로 사용하고 있는 토양수분모형은 매우 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구는 최근 인터넷의 보편화에 따른 지역별 기상정보가 실시간 또는 일별로 일반인들에게 제공되고 있어 이를 활용할 경우 농가에서 별도로 고가의 토양수분센서 등을 구입하지 않아도 자신의 토양특성과 재배이력을 알면 일별로 토양수분을 평가할 수 있는 토양수분예측 모형을 개

발하고자 하였다.

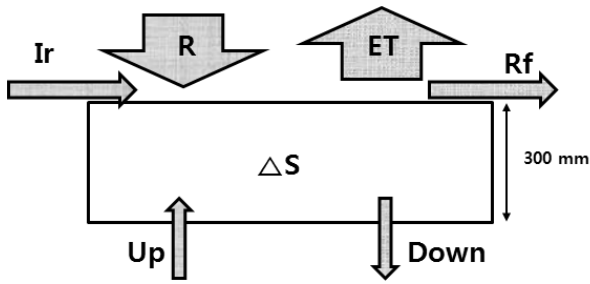
## 재료 및 방법

**토양 특성에 대한 가설** 개발된 농경지 물수지 및 토양수분 변화량 예측 모델은 AFKAE0.5 (Assessment program for Korean Agricultural Environment V. 0.5)으로 명명하였다. 작물이 재배되고 있는 농경지 토양은 지역, 지형, 토성 등 매우 다양한 특성을 가지고 있으며 심지어 같은 작물이 재배되고 있는 동일포장에서도 이질성이 크기 때문에 토양수분의 이동과 수지를 세부적으로 표현하기는 매우 어려운 측면이 있다. 따라서 본 연구는 농가에서 사용할 수 있는 실용적인 측면을 강조하고자 하였기 때문에 포장내의 다양성과 이질성을 반영하기 보다는 AFKAE0.5에서는 2가지의 가설을 적용하여 토양의 수분이동을 정의하였다.

첫 번째로는 작물의 뿌리가 가장 많이 존재하고 있는 표토와 심토를 합쳐 300mm의 깊이의 토양을 수분이동 및 저장의 대상으로 설정하였고 동일포장에서는 균질한 토성을 가지고 있는 것으로 가설을 설정하고 토양수분 수지 및 이동모형을 개발하였다. 지금까지 우리나라에서 연구되어온 토양분야에서 얻을 수 있는 자료의 경우 토양조사 등을 통해 포장의 토성 자료를 얻을 수 있기 때문에 대상 포장의 토성을 알 수 있으면 토양수분이동을 좀 더 정밀하게 계산할 수 있기 때문이다.

두 번째로 토양수분의 이동은 토양의 수분포텐셜의 차이에 따라 이동방향과 속도가 결정된다. 그러나 실제 포장의 토양에서 정확하게 이를 일별로 산출하는 것은 쉽지 않다. 따라서 이러한 문제들을 해결하기 위하여 대상 토양 내 수분이동은 무시하였으며 토양 내 수분함량에 따라 영역을 3가지로 설정하고 토층 300 mm 이하의 토양과 대상 토양과의 토양수분 이동의 방향성을 정의하여 토양 내 수분이동을 단순화하였다. 제1수분영역은 토양의 포화수리전도도에 의해 물 이동이 영향을 받는 범위로서 대상 300 mm 토양에 존재하는 수분이 아래로 이동하는 범주를 말한다. 이 영역은 토양 내 수분이 거의 포화상태에 있는 영역으로 중력수가 많이 존재하는 상태를 의미하고 있다. 제2수분영역은 포장용수량 전후의 포장의 토양수분 상태를 정의하고 있으며 설정된 추정모형에 의해 토양수분이 위로 이동하는 영역으로 정의한다. 제3수분영역은 토양 내 유효수분함량이 매우 작아 대상 토양층 이하에도 수분량이 적어 이동을 거의 안 하는 영역으로 정의하였다.

**토양 물수지 모형 정의** 위에서 정의한 가설을 토대로 토양내 수분함량은 토층 300 mm의 토양내 수분함량으로 정의할 수 있으며 토양의 구성비율이 토양 (고상) 50%, 공기 (기상) 20%, 수분 (액상) 25%, 유기물 (고상) 5%라 하면



**Fig. 1. Suggested model for estimating water balance in agricultural land.**

(\*  $\Delta S$  : The amount of change of soil moisture content, R : The amount of precipitation, Ir : The amount of irrigation, Up : The amount of soil moisture moved upward, ET : The amount of evapo-transpiration, Rf : The amount of run-off, Down : The amount of soil moisture moved downward)

본 모형에서 토양수분함량은 용적비로 75 mm가 있는 것이라 할 수 있다. 개발된 모형은 기상청, 농진청 등에서 제공되는 일별 기상자료를 근거로 토양수분함량을 추정할 수 있도록 설계가 되어 있기 때문에 전일의 토양수분함량을 최종적으로 표현하게 된다. 이를 위해 전전일의 토양수분함량을 근거로 하여 기상 등을 고려한 물수지를 계산하여 전일 토양수분함량을 계산하여 다음 날로 다시 돌려주는 모형이다. 본 모형은 일별 기상자료를 기반으로 토양 내 수분이동, 작물재배 시 영농활동 등을 고려하여 당일의 토양에 투입되는 물과 계의 밖으로 빠져나가는 산출량을 계산하는 물 수지 모형을 Fig. 1과 같이 설정하고 이를 Eq. (1)과 같이 수식화하여 토양수분함량을 산출하였다.

$$\Delta S = (R + Ir + Up) - (ET + Rf + Down) \quad (1)$$

- $\Delta S$  : The amount of change of soil moisture content
- R : The amount of precipitation
- Ir : The amount of irrigation
- Up : The amount of soil moisture moved upward
- ET : The amount of evapo-transpiration
- Rf : The amount of run-off
- Down : The amount of soil moisture moved downward

여기서  $\Delta S$ 는 토양수분함량 변화량 (mm), R은 강우량, Ir은 관개량, Up은 수분상승량, ET는 증발산량, Rf는 표면 유출량, Down은 수분투수량이고 이다. 물의 유입요인으로는 강우량, 관개량 등을 설정하였으며 가설에서 정의된 비와 같이 토양수분이 제2수분영역에 있을 때 지하토양에서 계로 상승하는 토양수분량을 추가하였으며 유출요인으로는 증발산량 및 수분 투수량과 함께 토양수분이 제1수분영역에 있을 때 지하 토양으로 투수되는 수분의 양으로 설정하였다.

Eq. (1)은 하루의 토양수분함량의 변화량을 정의하고 있기 때문에 전일까지의 토양수분함량을 누적한 양을 기반으로 하여야 현재의 토양수분 함량을 산출 할 수 있어 당일의 토양수분함량은 Eq. (2)와 같은 수식으로 설정할 수 있다.

$$\Delta SMC_n = \Delta SMC_{n-1} + \Delta S \quad (2)$$

- $\Delta SMC_n$  : Soil moisture content at present
- $\Delta SMC_{n-1}$  : Soil moisture content at yesterday
- $\Delta S$  : The amount of change of soil moisture content at present

여기서  $\Delta SMC_n$ 은 현재의 토양수분함량 (mm),  $\Delta SMC_{n-1}$ 은 전일의 토양수분함량,  $\Delta S$ 는 당일의 토양수분함량 변화량이다. 실제로 특정일의 토양수분함량을 알기 위해서는 Eq. (2)의 과정이 과거부터 계속 반복되어야 연속적인 산출에 의해 정확한 토양수분함량을 알 수 있을 것이다.

**토양 물수지 인자 산출** Eq. (1)에서 제시된 토양수분 변화량을 산출하기 위해서는 좌변에 정의되어 있는 각 인자에 대한 물량을 계량화 하여야 하며 각각의 인자별로 계량화된 물량을 근거로 Eq. (1)과 Eq. (2)에 대입하여 토양수분함량을 평가 할 수 있다.

먼저, 관측자료에 의해 정의되는 물량으로서 R로 표시된 강수량은 일별 기상자료를 기반으로 토양에 유입되는 물의 양을 알 수 있으며 본 모형에서 이용 가능한 기상자료로는 해당 포장에 포함되어 있는 기상청, 농진청 등에서 제공하는 해당지역의 일별 강수량 자료를 사용할 수 있다. 만일 해당 포장에 기상관측 장비를 설치하여 일 단위 이하로 측정을 하였을 경우 더 정확한 물량을 산출 할 수 있을 것이다. Ir로 표시되는 관개량은 실제 작물재배시 포장에 관개되는 물량으로 현지 농가에 의해 계산되는 물량이다.

ET는 일 증발산량을 말하며 증발산을 추정하기 위해 많은 모형들이 제안되었으나 Blaney-Criddle 모형이나 Penman 모형 등이 1주일에서 10일 이상의 평균 기상자료를 이용하는 반면 FAO Penman-Monteith 모형은 1일 증발산량이나 시간 단위의 증발산량 예측이 가능하기 때문에 본 모형에 적용하였다. FAO Penman-Monteith 모형의 산출모형식은 Hur et al. (2006)에서 제안된 모형을 도입하여 사용하였다.

한편, 본 모형에서 다른 토양 물수지 모형과 달리 토양수분함량 변화량 산출식에서 Up (상향)과 Down (하향)으로 표시된 수분 상승량 및 투수량은 현재의 토양수분함량을 가설에서 정의된 영역에 포함되었을 경우 방향성을 결정하고 그 양을 산출하였다. 토양에서 지하로 배수되는 경우는 정의된 가설과 같이 대상 토양이 제1수분영역에 있을 경우이며 이 경우는 점토, 모래 함량을 이용한 Saxton의 포화수리

전도도 추정모형을 이용하여 투수되는 1일 물량을 산정하였다. 토양수분 상승량을 결정하기 위해 Oh et al. (1997)에서 제시된 토양수분장력에 따라 토양의 토성별 지하수 모세관 상승 잠재력을 이용하여 아래와 같은 Eq. (3)을 만들어 상승량을 결정하였다.

$$\text{LN}((\theta/0.0662)/0.3912)/7 \quad (3)$$

$\theta$  : soil moisture tension at yesterday

여기서  $\theta$ 는 전일의 토양수분 장력을 말한다. 한편 토양수분장력은 토양내 수분함량과 토성에 따라 차이가 있으며 직접적인 측정을 하지 않고 알기가 어렵다. 기본적으로 본 모형에서 사용하고 있는 토양수분의 단위는 용적수분함량이 사용되기 때문에 토양내 용적수분함량을 토양수분포텐셜로 변환하여 주는 과정이 필요하다. Eom et al. (1995)은 scaling factor를 이용하여 토성과 유기물 함량 값을 가지고 토양수분장력을 추정하는 모형식을 제안한 바 있으며 본 모형에도 이 모형을 적용하여 토양수분함량과 토양수분장력을 변환하여 정의된 가설의 토양수분영역을 3가지 영역으로 결정하였으며 이 영역에 따라 토양수분의 지하 이동량을 산출하였다.

물 유출량은 강우량이 많을 때 발생하는 것으로 가정하였으며 포장의 토성별로 과포화 될 수 있는 토양수분장력을 설정하고 이를 초과하는 물은 유출되는 것으로 산정하였다.

한편, 본 모형은 일별 토양수분함량을 추정하기 때문에 일별 기상자료와 함께 Eq. (2)와 같이 전일 토양수분함량을 순차적으로 당일로 되돌리는 루프 수식을 포함하고 있다. 각 요소별로 얻어진 값들을 계산하기 위하여 MS Excel 프로그램을 이용하여 작성하였다.

**모형의 모의 및 검증** 2006년 공주시 지역내 고추포장을 대상으로 개발모형을 모의하였으며 이를 검증하기 위하여 각각의 물 수지 요소 및 토양수분 변화량을 측정하였다. 먼저 투입요인으로 강수량은 포장 주위에 기상관측기를 설치하여 직접 측정을 하였으며 토양수분변화량을 측정하기 위해 층위별 토양수분센서 (Sentek, EasyAG, Austrailia)를 설치하여 작물재배기간 중 10cm 간격으로 토양수분함량을 1시간 간격으로 측정하여 10, 20, 30cm 층위에서 나온 값을 1일로 평균한 후 합하여 해당일의 토양수분함량을 설정하여 모의한 값과 비교를 하였다. 모의 및 검증된 대상 포장은 세부정밀 토양도에 근거하였을 때 안룡통 (Anryong-series)으로 경사가 2~7% 이내로 과거 벼를 재배하였던 토양으로 사양질 토양으로 평가되었다. 모의된 기간은 1월 1일부터 12월 31일까지 모의되었으며 토양수분함량의 변화량은 작부기간인 5월 20일에서 9월 23일까지 토양수분센서로 측정

된 값이 있어 이 기간에 대해 모형 검증을 수행하였다.

본 모형에서는 일반적인 농경지의 물수지를 평가하는 것도 중요하지만 토양수분함량의 변화가 가장 중요한 요인으로 판단되었으며 증발산량 및 유출량도 토양수분함량 변화에 따라 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 결과 및 고찰

AFKAE0.5가 다른 토양 물수지 또는 수분변화량 추정모형과 다른 부분은 국내 연구결과들을 모아 나름의 가설을 정의하여 모형을 단순화시켜 적용했다는 점이다. 토양의 토성, 유기물 등에 따라 토양의 작물에 유용한 수분함량의 차이가 크기 때문에 물의 이동도 차이가 난다. 이를 대표적으로 해결하기 위해서는 토양수분함량을 수분포텐셜로 표현하여 방향성과 양을 결정하는 방법이 사용되어야 한다. 수분함량 대표적으로 대상 토양 300 mm와 아래 토양과의 수분이동의 방향성을 규정하고 그 양을 산출하여 일별 물 수지 및 토양 수분함량을 표현할 수 있도록 하였다. 제1수분영역은 토양이 포화수준에 있을 경우를 말하는데 토양수분장력이 10 kPa 미만 때를 말하며 이 상태에서는 토양수분이 지하로 투수되는 것으로 정의한다. 제2수분영역은 토양수분장력이 10 kPa 이상에서 150 kPa 이하에 있는 토양수분함량을 말하고 있으며 이 영역에서는 지하에서 수분이 대상 토양내로 모세관 현상 등에 의해 위로 상승하는 것으로 정의하며 대체적으로 포장용수량에서 어느 정도 건조한 상태의 토양수분조건이다. 제3수분영역은 토양수분장력이 150 kPa 초과하고 있는 토양수분함량으로서 건조상태가 매우 심해지는 상태이며 이 경우 지하 토양에도 수분이 많지 않은 것으로 판단되기 때문에 위로 상승하는 토양수분이 없으며 당연히 지하로 침투되는 토양수분도 없다. 이를 수식화하여 나타내면 제 1, 2, 3 수분영역은 각각 Eq. (4), Eq. (5), Eq. (6)과 같다.

$$\text{SWC}_{n-1} + R_n + \text{Ir}_n < 10 \text{ kPa} \quad (4)$$

제1수분영역

$$10 \text{ kPa} \leq \text{SWC}_{n-1} + R_n + \text{Ir}_n < 150 \text{ kPa} \quad (5)$$

제2수분영역

$$\text{SWC}_{n-1} + R_n + \text{Ir}_n > 150 \text{ kPa} \quad (6)$$

제3수분영역

여기서,  $\text{SWC}_{n-1}$ 은 전일 토양수분함량,  $R_n$ 은 당일 강수량,  $\text{Ir}_n$ 은 당일 관개량이다.

토양의 수리전도특성을 추정하기 위해서는 우선 토양 유형별 토양수분 포텐셜 또는 장력과 토양수분 ( $\theta$ )과의 관계

인 토성별 토양수분특성곡선 (Soil Water Characteristics Curve : SWCC)을 구해야 한다. 그러나 토양의 특성이 매우 다르기 때문에 모형에 적용하기에는 어려움이 있어 Eom, K.C. et al. (1995)이 제안한 수식인 Eq. (7)을 적용하여 사용하였으며 이 수식으로 토양별 별도의 SMCC를 구할 필요 없이 대상 포장에서의 수분함량 및 10 kPa과 150 kPa에서의 수분함량을 알면 토양수분장력을 알 수 있다.

$$H = 0.13 \times (\theta^*)^{2.04} \quad (7)$$

여기서 H는 토양수분장력,  $\theta^*$ 는 scale을 변환시킨 수분함량으로 현재 토양수분함량에서 150 kPa 때의 수분함량을 뺀 값을 10 kPa 수분함량에서 150 kPa 때의 수분함량을 뺀 값으로 나누어준 값으로 정의된다.

토양에서 유출량 (Rf)을 산정하기 위하여 토양에서 일정 토양수분장력의 과포화 수준을 9 kPa을 설정하였으며 토성별로 9 kPa일때의 수분함량을 산정하여 아래와 같은 수식을 적용하였다.

$$(SWC_{n-1} + R_n + Ir_n) - (\theta(9kPa)_n + ET_n + Down_n) \quad (8)$$

여기서,  $SWC_{n-1}$ 은 전일 토양수분함량,  $R_n$ 은 당일 강수량,  $Ir_n$ 은 당일 관개량이며  $\theta(9kPa)_n$ 은 해당토양에서 9 kPa일 때 토양수분함량,  $ET_n$ 은 당일 증발산량,  $Down_n$ 은 당일 지하침투량이다. 만일 강우량이 없거나 Eq. (8)의 값이 음의 값을 가지게 되면 유출량은 없는 것으로 산출되도록 하였다.

Eq. (1)에서 제시된 토양수분함량의 추정을 위한 각 요소에 대해 일별 산출을 위해 강우량은 일별기상자료, 관개는 농가 관개량, 증발산량은 FAO Penman-Monteith 추정식, 수분상승량은 Eq. (3), 지하투수량은 Saxton 모형, 유출량은 Eq. (8)에 의해 추정하였다.

구축된 AFKAE0.5 모형의 모의를 위해 2006년 공주에 있는 안롱통 고추재배 포장을 대상으로 하였다. 포장에 고추 정식은 5월 10일이었으며 수확은 8월 30일이었다.

모의를 위한 입력자료로 해당 지역의 기상자료를 기상청 인터넷 서비스로 강수량, 최고기온, 최저기온, 평균기온, 평균풍속, 평균상대습도, 일조시간 등을 일 단위로 제공받아 사용하였다 (KMA, 2006).

공주지역 일별 강우양상은 Fig. 2와 같았으며 연 1,043 mm의 강우량을 기록하였고 작부기간인 5월부터 10월까지의 강우량은 841 mm로 연간 강우량의 80.1%에 해당하였으며 AFKAE0.5 모형에 입력 요소로 일별로 적용되었다. 고추는 다른 발작물에 비하여 상대적으로 건조에 강한 작물이고 재배기간 동안 강우의 빈도가 양이 많았기 때문에 농가에서는 특별히 관개를 하지 않은 것으로 조사되어 관개량은 0 mm로 산정하였다.

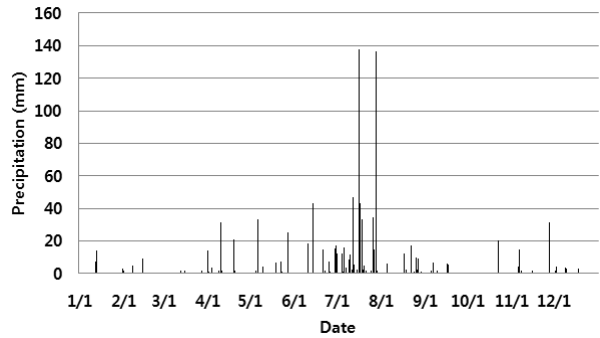


Fig. 2. The daily precipitation cited from KMA (Korea Meteorological Administration) at Gongju region in 2006.

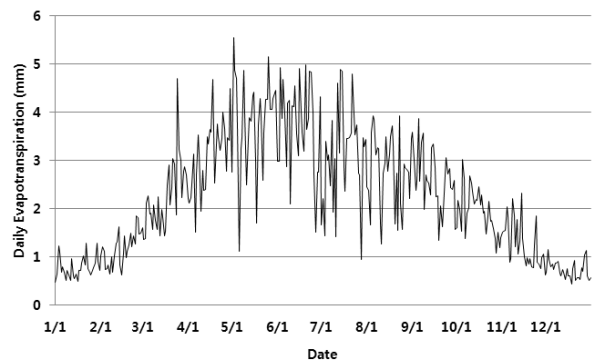


Fig. 3. The estimation of daily evapotranspiration at subjected field of Gongju region in 2006.

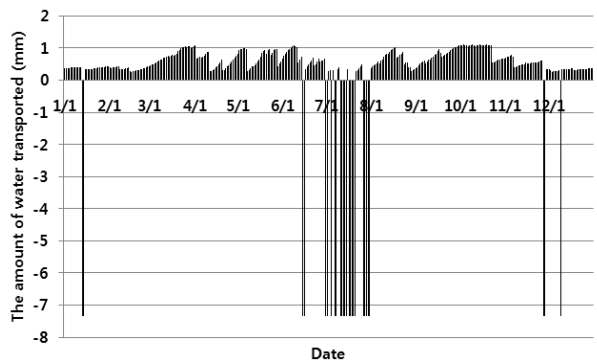


Fig. 4. The estimation of the amount of water transported upward or downward between subjected soil and its lower soil. (\*\* (+) value and (-) value mean that water in subjected soil moved upward and downward, respectively.)

FAO Penman-Monteith 추정식과 작물계수를 초기, 중기, 후기로 적용하여 추정된 실제증발산량의 일별 변화양상은 Fig. 3과 같았다. 고추포장에서 추정된 연 증발산량의 합은 831 mm이었으며 5월부터 10월까지 증발산량은 552 mm이었다.

대상 토양 아래에서의 수분이동량을 추정된 결과는 Fig. 4와 같았다. 토양수분장력에 따라 3개의 수분영역을 일별로 구분한 결과 제3수분영역에 포함되는 날은 없었으며 이는 조

사된 해의 심한 한발조건에 이른 시기가 없었다고 판단할 수 있었다. 토양 내 수분이 지하로 투수되는 제1수분영역에 포함된 부분은 Fig. 5에서 음의 값으로 표시되어 있으며 연간 198 mm이며 작부기간인 5월에서 10월까지의 161 mm이었다. 제1수분영역은 강우나 관개시 토양을 포화시킬 정도의 토양 수분함량이 되어야 지하투수가 발생하는 것으로 산출되기 때문에 개발된 모형이 다소 기계적인 측면이 많지만 현재 토양수분상태를 고려하기 때문에 하루 강우량이 많아도 투수는 때로 2일 이상 지속될 경우도 발생할 수 있으며 단기, 장기적 측면에서 모형 모의로 산출된 각 요소의 물량을 고려할 때 본 모형의 방식이 실용적인 것으로 판단되었다. 일부 제1수분영역을 제외하고 대부분의 토양수분 상태는 제2수분영역에 포함되어 있으며 모의에 의해 계산된 수분 상승량은 연간 207 mm이며 작부기간인 5월에서 10월까지의 119 mm이었다. 작부기간동안 증발산량과 비교하였을 때 일별 차이가 있지만 토양수분량은 평균적으로 증발산량의 24.7%를 차지하였다. 실제로 설치된 층위별 토양수분센서를 30분 또는 1시간 간격으로 모니터링을 한 결과를 보면 일중 토양수분 상승량이 관측되며 그 양은 모의된 토양수분 상승량과 비슷하였다. 많은 토양 물수지 모형의 경우 대부분 토양의 수분 상승량을 고려하고 있지 못하기 때문에 개발된 AFKAE0.5 모형은 작물 생육과 관련된 토양수분 함량을 더욱 정확하게 추정하는데 있어 장점을 가지고 있다고 할 수 있다.

모형의 모의에서는 관개량 입력이 없었기 때문에 물 유출량은 강우의 양과 강도와 토양내 토양수분함량과 밀접한

관계를 가지고 있다. 모형 모의에 의해 산출된 물 유출량은 Fig. 5와 같았으며 연간 309 mm이며 작부기간도 309 mm로서 물의 유출은 작부기간에 이루어진 것으로 평가되었다. 또한 7월에 계속적인 강우에 따른 토양에서 강우를 흡수할 여력이 없게 되면 다음 집중 강우시 대부분의 강우가 유출되는 것으로 평가되었다.

모형의 모의에 의해 일별로 산출된 각 요소의 물량을 연간, 작부기간을 구분하여 종합한 결과는 Table 1과 같았다. 연간 수지로 보았을 때 투입되는 물량이 산출되는 물량보다 88 mm가 적었으며 작부기간 중에는 62 mm가 적어 전체적으로는 계 내에서 포장, 지하, 대기로 유출되는 양이 더 많았다. 토양내 수분함량을 고려하지 않고 단순 물 수지의 경우 발생하는 차이는 초기와 말기 토양내 수분함량에 반영되어 있으며 다음으로는 토양수분의 투수와 상승에 따라 일치하지 않는 결과를 나타내고 있다.

한편 토양내 일별 수분함량의 변화는 일별 물수지 과정을 거쳐 용적수분함량으로서 산출되었으며 그 변화양상은 Fig. 6과 같았다. 본 모형은 토양이 가질 수 있는 최대 수분함량이 9 kPa로 한정되어 있기 때문에 집중강우가 연속적으로 올 경우에는 최대 토양수분함량 값에서 연속적인 수평직성으로 나타남을 알 수 있었다. 연간 토양수분함량은 작부기간 이외에도 강우에 토양수분함량이 영향을 받으며 시험 포장의 경우 토양수분의 감소 기온기가 강우가 많이 온 직후와 계속적으로 건조해지는 상태와 차이가 발생하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 양상은 강우에 의해 토양이 포화

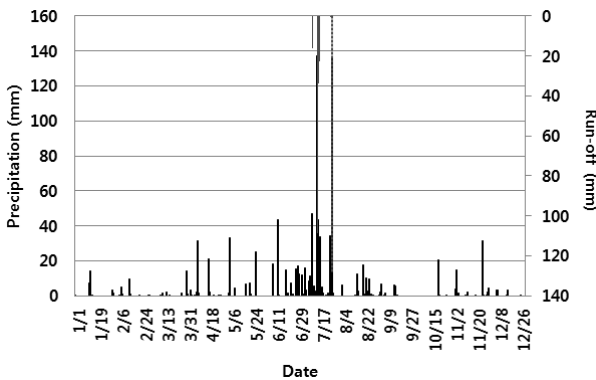


Fig. 5. The comparison between precipitation and run-off simulated from AFKAE0.5.

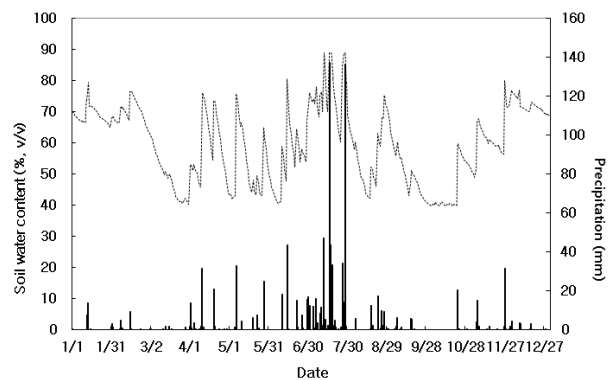
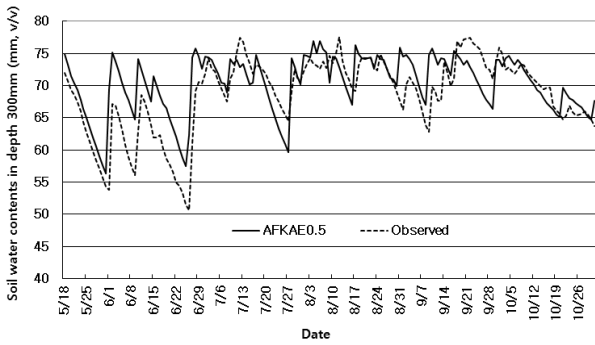


Fig. 6. The changes of soil water contents simulated by AFKAE0.5 against subjected field.

Table 1. The water balance estimated with simulation of AFKAE0.5 against subjected area.

	Input (mm)(A)			Output (mm)(B)			Balance (A-B)
	R	Ir	Up	ET	Rf	Down	
Year	1043	0	207	831	309	198	-88
Cultivated Periods	841	0	119	552	309	161	-62

\*R : The amount of precipitation, Ir : The amount of irrigation, Up : The amount of soil moisture moved upward, ET : The amount of evapo-transpiration, Rf : The amount of run-off, Down : The amount of soil moisture moved downward.



**Fig. 7.** The comparison of soil water contents between estimated by AFKAE0.5 and observed by electric sensor against subjected field.

된 후 일정기간 동안 투수에 영향을 미치지 때문인 것으로 사료되었다.

AFKAE0.5 모형의 검증은 기상이나 관개량의 경우 입력 자료이므로 별도의 조사가 필요 없으며 유출량, 증발산, 상승량, 투수량 등은 정확하게 측정을 하기 위해서는 많은 노력이 필요하지만 그마저 일반 농가포장에서는 정확하게 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 물수지에 대한 검증은 토양내 수분함량을 주기적으로 측정된 자료를 일별로 분석할 수 있으며 모형에서도 토양수분함량을 일별로 표현할 수 있기 때문에 이들을 비교하면 개발된 AFKAE0.5 모형의 타당성을 검증할 수 있을 것으로 판단되었다. 따라서 본 시험에서도 층위별 토양센서를 작부기간동안 대상 포장토양에 설치하여 모니터링한 결과를 AFKAE0.5 모형 모의에 산출된 토양수분함량 변화를 일별로 비교하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같았다.

본 모형은 토성에 따른 토양수분곡선에서 과포화 수준을 토양의 최대 용수량으로 설정하였기 때문에 토성에 따라 최대 수분함유량이 결정되어 있는데 센서에서 측정된 값과 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 강우나 관개가 없어 건조가 진행되는 동안 수분감소가 되는 경사가 모형과 측정치간 절대적인 수분함량에서는 차이가 있지만 전반적으로 잘 일치하고 있다. 본 모형은 단순하게 수학적으로 계산하여 가기 때문에 토양의 다양하고 세부적인 특성을 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 그러나 일별 나타나는 경향은 매우 비슷한 것으로 평가되며 특히, 토양이 건조기에 들어설 때 잘 맞는 경향이 있어 한발 등의 예측이나 관개시점 설정에 매우 유용할 것으로 사료되었다.

일부 토양수분 추정 모형의 경우 토양의 층위를 수 mm 단위로 구분하여 순차적인 토양수분장력에 따른 이동을 해석하기도 하지만 실제 작물을 재배하는 농가에서는 관개시점 및 가물의 시작 등이 중요한 관심사항이기 때문에 본 모형을 프로그램화 하여 보급한다면 고가의 토양수분 측정장치가 없어도 손쉽게 포장의 수분상태를 판단하고 작물에 따

른 적정 관개 및 포장관리가 가능할 것으로 기대된다.

## 요 약

밭 재배면적이 증가하면서 토양내 수분함량에 따른 적정 관개가 작물생산성에 중요한 역할을 하기 때문에 손쉽게 농가에서 포장의 토양수분함량을 파악하고 대처하는 것이 중요하다.

본 시험은 농경지에서 간단한 일 기상자료와 관개이력으로 물 수지 및 토양수분함량을 일단위로 추정하기 위하여 AFKAE0.5 토양수분추정모형을 개발하고 이를 검증하고자 하였다. 다양한 토양의 특성을 단순화 하기 위해 대상토양을 300mm의 균일한 토양으로 가정하였고 대상 토양지하에서 물 이동을 정의하기 위하여 토양수분장력에 따른 3개의 수분영역을 설정하여 투수량과 상승량을 산출하여 물 수지에 반영하였다. 토양 물수지에서 투입요인으로는 강우, 관개, 수분 상승량을 설정하였고 산출요인으로는 증발산, 유거, 투수량을 설정하여 모형을 개발하였다. 각 요인의 물량 산출을 위한 추정모형은 문헌 및 보고서를 이용하여 작성하였으며 모형을 검증하기 위해 공주지역 고추포장을 대상으로 작부기간 동안 AFKAE0.5 모형을 이용하여 모의하여 물 수지를 산출하였으며 모형의 검증을 위하여 실제 포장에서 층위별 센서를 이용하여 측정된 토양수분함량 변화 값을 비교하였다.

대상 포장에 대해 AFKAE0.5 모형의 모의 결과 투입부분으로 연간 강우, 관개, 수분상승량은 각각 1,043, 0, 207 mm이었으며 산출요인으로 증발산, 유거, 투수량은 각각 831, 309, 161 mm로 산출되어 투입된 물보다 산출된 물의 양이 88 mm 많았다. 또한 작부기간중 증발산량에 대해 지하에서 상승하는 수분량이 24.7%에 해당되어 건조기에 지하에서 모세관 등을 통해 상승하는 양도 상당한 것을 알 수 있었다. 작부기간 중 토양수분 측정값과 AFKAE0.5 모형의 모의 값과 토양수분함량의 변화를 일별로 비교한 결과 포화되었을 때의 수분함량이 유사하였으며 건조에 따른 수분함량 일별 감소비율이 매우 유사하게 나타나고 있어 모형이 적합한 것으로 평가되었다.

개발된 AFKAE0.5 토양 물수지 및 수분추정 모형은 농가에서 손쉽게 자가 포장에 대한 기본적인 영농이력을 알고 있으며 포장의 수분상태를 알 수 있고 적정관개를 할 수 있는 유용한 도구로서 역할을 할 것으로 기대된다.

## 인 용 문 헌

National Emergency Management Agency. 2012. Annual report of disaster, 2011. p.864-866. Recovery support

- Division, NEMA, Korea.
- Kim, H.Y., Y.J. Suh, and S.H. Oh. 1996. Determination of Agricultural Drought Index in Korea. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference. pp. 291-296.
- Mehmet, A. 1994. Hydraulic properties and water balance of a clay soil cropped with cotton. *Irrig. Sci.* 15:17-23.
- Song, K.C., D.S. Oh, and L.Y. Kim. 2001. Soil water balance in the sloped farm land. p. 288-302. In Research report of agro-environment research. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
- Hur, S.O., K.H. Jung, S.K. Ha, and J.G. Kim. 2006. Evaluation of meteorological elements used for reference evapotranspiration calculation of FAO Penman-Monteith Model. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(5): 274-279.
- Oh, Y.T., K.C. Song, D.S. Oh, K.C. Eom, J.W. Hong, Y.S. Jung, and S.H. Yoo. 1997. Interrelation of ground water table with vertical steady flow of soil moisture and the distribution of its suction head in soil. *RDA, J. Agro-Envir. Sci.* 39(1). 1-8.
- Eom, K.C., K.C. Song, K.S. Ryu, Y.K. Sonn, and S.E. Lee. 1995. Model equations to estimate the soil water characteristics curve using scaling factor. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(30): 227-232.
- KMA(Korea Meteorological Administration), <http://www.kma.go.kr/weather/observation>
- Jung, K.H., D.S. Oh, S.O. Hur, and S. K. Ha. 2003. Fertilizer response of upland crops with soil moisture condition. p. . In Research report of agro-environment research. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
- Oh, D.S., Y.T. Oh, K.C. Song, and J.S. Shin. 1996. Establishment of drought evaluation according to soil moisture contents. p. 206-209. In Research report of agro-environment research. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea. (In Korean)
- Shim, K.M., G.Y. Kim, K.A. Roh, H.C. Jeong, and D.B. Lee. 2008. Evaluation of agro-climatic indices under climate change. *Korean J. Agricultural and Forest Meteorology.* 10(4): 113-120.