



노지 작물의 적정 관개계획을 위한 토양수분의 공간변이성 분석

Spatial Variability of Soil Moisture and Irrigation Scheduling for Upland Farming

최용훈* · 김민영*[†] · 김영진* · 전종길* · 서명철**

Choi, Yonghun · Kim, Minyoung · Kim, Youngjin · Jeon, Jonggil · Seo, Myungchul

Abstract

Due to droughts and water shortages causing severe damage to crops and other vegetations, much attention has been given to efficient irrigation for upland farming. However, little information has been known to measure soil moisture levels in a field scale and apply their spatial variability for proper irrigation scheduling. This study aimed to characterize the spatial variability and temporal stability of soil water contents at depths of 10 cm, 20 cm and 30 cm on flat (loamy soil) and hill-slope fields (silt-loamy soil). Field monitoring of soil moisture contents was used for variogram analysis using GS+ software. Kriging produced from the structural parameters of variogram was applied for the means of spatial prediction. The overall results showed that the surface soil moisture presented a strong spatial dependence at the sampling time and space in the field scale. The coefficient variation (CV) of soil moisture was within 7.0~31.3 % in a flat field and 8.3~39.4 % in a hill-slope field, which was noticeable in the dry season rather than the rainy season. The drought assessment analysis showed that only one day (Dec. 21st) was determined as dry (20.4 % and 24.5 % for flat and hill-slope fields, respectively). In contrary to a hill-slope field where the full irrigation was necessary, the centralized irrigation scheme was appeared to be more effective for a flat field based on the spatial variability of soil moisture contents. The findings of this study clearly showed that the geostatistical analysis of soil moisture contents greatly contributes to proper irrigation scheduling for water-efficient irrigation with maximal crop productivity and environmental benefits.

Keywords: Soil moisture; Irrigation scheduling; Spatial variation; Variogram; Kriging

1. 서론

기상청이 발간한 이상기후보고서에 따르면 2015년 발생한 가뭄피해 면적은 총 7,513 ha로 그 중 논물마름 면적은 2,977 ha로, 밭작물 시들음 면적은 4,536 ha으로 조사되었다. 특히 5~9월의 극심한 강수부족 (548.6 mm, 평년대비 53.8 %) 현상으로 인해 남부 일부지역을 제외한 대부분의 농경지에서 농작물 시들음 현상 등 가뭄 피해가 발생하기도 했다 (KMA, 2015). 이렇듯 이상 기후 현상의 발생이 빈번하고, 그에 따른 사회, 경제적 피해가 점차 증가하고 있어 이에 대한 종합적인 평가와 선제적인 대응이 필요하다.

기후변화와 더불어 수자원 환경이 급격히 변화하면서 제한된 용수원을 효율적으로 사용하는 등 적정 관개계획 수립에 관한

연구들이 많이 이루어지고 있다 (Clemmens and Bos, 1990; Bandara, 2003; FAO, 2011; Nam et al., 2013). 작물성장에서 관개계획은 가장 중요한 요인으로 평가되며, 관개계획에서 가장 중요한 것은 근권부의 토양수분량을 적절히 관리하는 것이다. 작물이 잘 자랄 수 있는 토양수분환경을 조성하는 것은 농작물 생산량을 증대시킬 뿐만 아니라 품질을 향상시키며, 더 나아가 농업수자원을 효율적으로 활용함으로써 농업수자원을 보전할 수 있기 때문이다.

토양은 수직적 또는 수평적으로 불균일성을 갖는 이질성의 자연체이다. 따라서 다양한 지형과 토양 그리고 작물 재배조건 등 다양한 요인에 따른 토양수분환경의 정확한 구명은 쉽지 않다. 따라서 현장 모니터링 자료의 수집과 함께 신뢰성 높은 공간정보 구축을 통해 토양 수분의 시·공간적 변이를 이해하고 이러한 자료를 바탕으로 관개 계획을 수립하는 것이 중요하다 (Ladson and Moore, 1992; McKenzie and Austin, 1993; Grayson and Western, 1998; Lark, 1999).

Bernardo (1988)은 관개를 통한 토양수분의 공간변이 분석결과를 통해 물 집약형 농업에 있어서 관개효율의 중요성을 강조하고, 관개법의 개선에 대해서 논하였다. Qui et al. (2001)은 토양 수분변화와 주변 환경변수 (기상, 토지이용형태, 지형요소 등)간의 상관관계를 분석하여, 선행강우 및 사면경사의 영향이 크다는

* Disaster Prevention Division, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration

** Crop Production and Physiology Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration

† Corresponding author

Tel.: 82-63-238-4156 Fax: 82-63-238-4145

E-mail: mykim75@korea.kr

Received: August 24, 2016

Revised: September 23, 2016

Accepted: September 26, 2016

연구결과를 발표하였다. Reichardt et al. (2001)은 토양수분 공간변이를 통해, 농경지 적정 관개량을 산정하기 위해서는 포장용 수량이 아닌 평균 관개심 (irrigation water depth)을 기반으로 하는 것이 더 정확하다는 연구결과를 발표하기도 하였다. Al Zayed et al. (2015)은 원격탐사자료를 바탕으로 시·공간 분석을 실시하여, 낙후된 급수 및 관개시설로 인해 물 생산성이 저하되었음을 밝혔다. 뿐만 아니라 강우 및 관개잉여수를 추가 용수원으로 활용하는 방안을 제안하기도 하였다. 이와 같이 토양수분의 이동 기작을 시·공간적으로 분석하여 적절한 관개계획 (관개시간, 관개량 등)을 확립하는 연구들이 주를 이루어 왔다.

우리나라에서도 보수력이 낮은 밭에서 작물 생육과 물 절약을 위한 간이 관개 방법 연구 (Kim et al., 1980), 채소재배에 효과적인 관개방법 연구 (Lee et al., 1982), 밭의 관개방법별 관개 효율 분석 연구 (Eom et al., 1990; Oh et al., 1992) 그리고 작물종류 및 생육시기에 따른 적정 관개량 및 관개시기에 관한 연구 (Eom et al., 1999) 등 밭의 효과적인 관개를 위한 연구들이 많이 진행되어 왔다. 그러나 이들의 연구는 밭을 하나의 균일한 토양으로 보기 때문에 밭의 공간적 변이에 대한 특성을 고려할 수 없는 단점을 가지고 있다. 관개용수 부족이나 용수원 고갈 등 한정적인 관개용수를 사용해야 한다면 밭 전체를 균일하게 관개하는 것보다 밭에서 가장 건조한 범위를 찾아 집중적으로 관개하는 방법이 보다 효과적인 수밖에 없다. 더욱이 우리나라에서 토양수분의 시·공간 분석에 대한 연구는 위성영상 및 수문 모델을 활용한 유역단위 연구가 주를 이루고 있기 때문에 필지 단위의 연구가 더욱 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 필지단위의 밭에서 재배되는 노지 채소 작물을 대상으로 작물 재배기간 동안 밭을 토양수분함량을 관측하였다. 또한 관측된 자료를 바탕으로 Variogram modeling 및 Kriging 등 지구통계적 기법을 통하여 공간변이성을 분석하고, 밭의 토양수분 분포 특성을 파악하여 최적 관개를 위한 밭의 공간 정보를 제공하는 것을 목표로 하였다.

II. 연구방법

1. 연구지역

평지밭과 경사밭의 토양수분 측정은 전라북도 고창군 대신면 춘산리에서 진행하였다. 토양수분은 강우량, 토성, 지형, 재배작물 등의 영향을 받기 때문에 가까운 거리에서, 같은 작물을 재배하며, 평지밭과 경사밭을 동시에 같은 방법으로 운영 및 관리할 수 있는 농업인의 밭을 선정하였다 (Fig. 1). 평지밭과 경사밭에서는 가을배추를 9월 7일 정식하여 11월 20일에 수확하였으며, 이 기간 동안을 간헐적으로 토양수분함량을 측정하였다.

농업활동은 실제로 경작을 수행하는 농업인의 판단에 따랐으며, 관개는 스프링클러를 이용하여 평지밭과 경사밭의 관개일자와 관개깊이가 동일하도록 수행하였다. 평지밭의 경사는 약 2%, 크기는 약 40 m × 40 m, 토성은 양토로 조사되었다. 경사밭의 경사는 약 7%, 크기는 약 85 m × 32 m, 토성은 미사질양토로 조사되었다. 평지밭에는 남서쪽으로 상시 물이 흐르는 폭 50 cm, 깊이 30 cm의 작은 규모의 흠수로가 있으며, 경사밭에는 서쪽으로 간헐적으로 물이 흐르는 폭 1 m, 깊이 1 m 이상의 큰 규모의 흠수로가 존재한다 (Fig. 2).



Fig. 1 Geographical description of study area (a: flat field, b: hill-slope field)

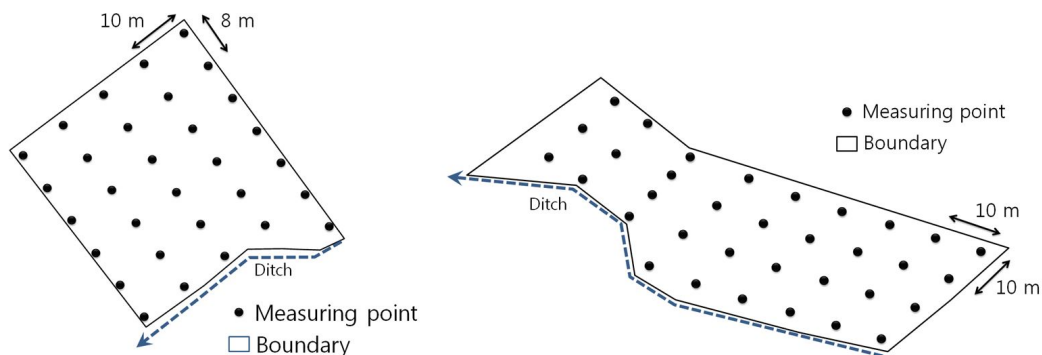


Fig. 2 Location of measurement points on flat field (left) and hill-slope field (right)

2. 측정방법

토양수분의 공간적 변이를 측정하기 위하여 밭을 일정 간격의 격자형태로 구분하였다(Fig. 2). 토양수분 측정은 휴대용 토양수분 측정장치인 WT-2000 (미래센서, 한국)을 사용하였으며, 표토 아래 10 cm와 20 cm 그리고 30 cm 지점의 토양수분함량을 측정하였다. 연구기간동안 토양수분함량의 측정은 기본적으로 주 1회 계획하였으며, 강우 및 관개시기 이후에는 토양수분이 안정화되는 기간을 갖는 등의 과정을 통하여 측정시기를 조절하였다. 11월부터는 표토가 굳어 측정할 수 없었으며, 총 7회(1차: 9월 16일, 2차: 9월 23일, 3차: 9월 30일, 4차: 10월 2일, 5차: 10월 8일, 6차: 10월 12일, 7차: 10월 21일)에 걸쳐 토양수분함량을 측정하였다. 강우량은 평지밭에 설치한 자기우량계 측정 자료를 활용하였고, 관개수는 펌프능력과 가동시간을 이용하여 산정하였다.

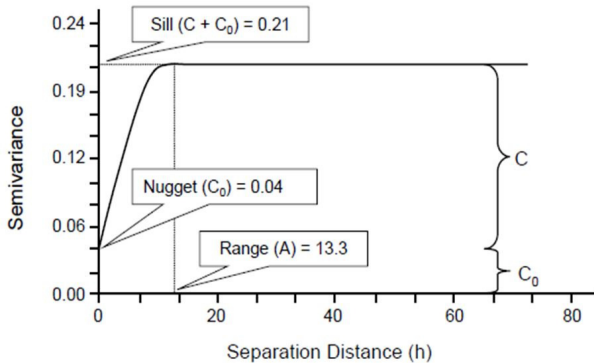


Fig. 3 Generalized variogram model (Gamma design software, 2015)

Table 1 Soil texture and its classification of soil moisture contents (Unit: %)

Soil texture	Sandy loam	Loam	Silt loam	Clay loam
33 kPa	17.0	22.5	27.1	26.2
1,500 kPa	6.3	8.7	10.4	12.8

Table 2 Drought assessment index defined by available water rates (Unit: %)

Available water rate	> 100	81~100	61~80	41~60	0~40
Level of soil dryness	Wet	Suitable	Little dry	Dry	Very dry
Flat field (Loam)	> 27.0	23.7~27.0	20.4~23.7	17.1~20.4	< 17.1
Sloping field (Silt loam)	> 32.5	28.5~32.5	24.5~28.5	20.5~24.5	< 20.5

3. 가뭄정도 산정방법

유효수분은 식물이 이용할 수 있는 물로서 식물이 물을 흡수하는 힘보다 약한 힘으로 토양에 저장되어 있는 물을 의미하며, 유효수분량에 따라 작물이 느끼는 가뭄의 정도를 평가할 수 있다. 유효수분율(effective soil moisture rate)은 총 유효수분량(포장용수량과 위조계수 사이의 수분량)에 대한 현재 상태에서 토양이 보유한 유효수분량의 백분율로 표현하며, 본 연구에서는 유효수분율을 이용하여 가뭄 정도를 평가하기 위하여 RDA (2012)에서 제시한 식 (1)을 식 (2)로 변환하였다.

$$\begin{aligned} \text{Effective soil moisture rate} (\%) \\ = \frac{(\text{soil moisture content} - \text{wilting coefficient})}{(\text{field capacity} - \text{wilting coefficient})} \times 100 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Soil moisture content} (\%) = \text{wilting coefficient} + \\ \frac{\text{effective soil moisture rate} \times (\text{field capacity} - \text{wilting coefficient})}{100} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 포장용수량(field capacity)은 중력에 의해 자유수가 근권 밖으로 투수된 후 토양수분함량으로 토양에 따라 10~33 kPa의 수분장력에서 중량수분함량을 의미하며, 본 연구에서는 33 kPa에 해당하는 값을 사용하였다. 위조계수(wilting coefficient)는 작물이 시들고 말라서 회복될 수 없는 상태의 토양 내 수분함량으로 약 1,500 kPa의 수분장력에서 중량수분함량을 의미한다. 토양수분함량(Soil moisture content)은 식 (1)에서 현재 토양의 토양수분 함량을 의미하고, 식 (2)에서는 임의의 유효수분율에 해당하는 토양수분 함량을 의미한다.

Eom et al. (1995)은 토성에 따라 토양수분 특성곡선은 매우 다르며, 사토 < 사양토 < 양토 < 식양토 < 식토 순으로 많은 수분함량을 지니고 있으며, 토양수분장력이 33 kPa (포장용수량), 1,500 kPa (위조계수)일 때의 토성별 토양수분함량을 제시하였다(Table 1).

MPSS (2015)는 농업용수의 가뭄 단계별 시기 판단 기준으로 토양의 유효수분 현황에 따라 가뭄극심(0~40%), 가뭄발생(41~60%), 가뭄징후(61~80%) 단계로 제시하였다. 본 연구에서 추가적으로 80~100%는 적정단계, 100% 이상은 과습단계로 구분하였으며, 가뭄극심은 매우건조, 가뭄발생은 건조, 가뭄징후는 약간 건조한 것으로 정의하였다. 식 (2)에 유효수분율 경계 조건(100%, 80%, 60%, 40%)과 Table 1에 나타난 토양별 포장용수량(33 kPa)과 위조계수(1,500 kPa)을 대입하여 토양의 건조/습윤 등급에 해당하는 토양수분함량을 산정하였다(Table 2). 평지밭(양토)에서는 토양수분함량이 20.4% 이하일 때, 경지밭(미사질양토)에서는 24.5% 이하일 때 건조한 상태인 것으로 나타났다.

4. 분석방법

토양에서 화학성과 물리성 등이 자연적 또는 인위적 인자에 의해서 공간적 변이를 나타내는 것을 공간 변이성이라고 한다. 그러나 공간상의 모든 지점에 존재하고 있는 공간정보는 데이터를 얻을 수 있는 관측지점의 수가 제한되어 있거나, 측정이 불가능한 경우가 많다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 공간통계학 (geostatistics)을 통해 한정된 지점의 자료를 바탕으로 미측측 지역의 특성을 판단 하기도 하며, 이러한 분석을 공간 변이성 분석이라고 한다. 공간 상에 존재하는 측정 자료 사이의 거리가 가까우면 높은 상관관계를, 서로 멀면 낮은 상관관계를 갖는 특성을 바탕으로 많은 분야의 연구에 사용되어 왔다 (Jung et al., 2010; Jafari et al., 2012; Sonn et al., 2012; Kang et al., 2014).

평지밭과 경사밭의 토양수분함량의 분포는 GeoStatistics for the Environmental Sciences Version 10 (GS⁺, Gamma design software) 프로그램을 이용하여, Variogram modeling 및 Kriging 등 통계적인 방법으로 공간변이성 분석을 수행하였다. 공간변이성 분석의 토양수분 경계조건은 유효수분율에 따른 기묘의 정도 평가에서 제시된 수분함량을 사용하였다.

GS⁺는 측정된 자료의 공간적 관계를 쉽게 설명할 수 있도록 도와주는 통계 분석 프로그램으로써 불완전한 데이터에서 생성된 정보를 통계적으로 유의한 공간정보로 변환할 때 사용하며, 공간 자료를 분석하여 자기상관 (autocorrelation)의 등급을 평가하고 통계적으로 최적화된 정보를 제공한다. 베리오그램 (variogram)은 지구통계학에서 관측값들의 공간적/시간적 연관성을 표현하는 함수로써 실제 관측자료를 이용해서 작성되는 실험적 베리오그램 (experimental variogram)과 또 이에 가장 근접한 이론적 곡선을 만드는 베리오그램 모델링 (variogram modeling) 과정을 거쳐 크리깅(kriging) 보간법에 의해 방법에 공간정보를 시각적으로 제공한다.

베리오그램 분석은 공간분석을 위한 첫 번째 단계이며, 분리거리가 h만큼 떨어진 자료의 개수가 n개일 때, 식 (3)에서 정의된 Journel and Huijbregts (1978)이 제안한 세미베리오그램 공식으로 산정된다. 베리오그램 모델링은 일정거리만큼 떨어져 있는 자료들의 평균적 차이를 보여주는 정량적 지표이며, 주요 인자는 문턱값 (nugget), 상관거리 (separation distance), 문턱값 (sill) 등으로 나타낸다. 문턱값은 두 공간위치 간의 거리가 0이 되기 직전의 세미베리오그램 값으로 정의되며, 보통 측정 오차 (measurement error)를 의미한다. 상관거리가 멀어지면서 세미베리오그램은 일정한 값을 가지게 되는 구간의 값을 문턱값이라고 하며, 이때의 상관거리를 range로 정의된다 (Fig. 3). 문턱값은 자료의 분산과 같고, range는 공간적 연속성이 있는 거리의 한계를 의미한다 (Kang et al., 2014).

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} z(x_i) - z(x_i + h) \quad (3)$$

여기서, r(h)은 세미 베리오그램이며, z(x)는 임의의 지점 x에 있는 자료의 값이다. z(x) + h는 z(x)에서 h만큼 떨어져 있는 지점의 자료값이며, h는 자료사이의 거리를 나타낸다. N(h)는 서로 다른 원소의 개수자료의 수를 의미한다.

지구통계학에서 크리깅은 이미 알고 있는 지점의 값을 사용하여 미관측지점의 값을 추정하는 보간법이며, 베리오그램 모델링을 활용하여 편향되지 않은 추정값과 최소 오차분산을 갖는 조건을 만족하는 가중치를 산정하고, 산정된 가중치를 바탕으로 관측 지점의 자료를 선형적으로 합성하여 공간자료를 추정하여 공간을 보간하는 기법이다 (Kang et al., 2014). GS⁺ 프로그램에서 크리깅은 다양한 통계적 가정에 따라 하나의 변수로 선언되는 단순크리깅 (simple kriging), 범용크리깅 (ordinary kriging)과 변이도가 유사한 두 변수를 이용하여 공간변이성 확인하는 공동크리깅 (cokriging)을 제공한다. 본 연구에서는 토양수분이라는 단일 변수를 사용하였고, 단순 크리깅의 현실 결여성이 보완된 범용크리깅을 사용하였다.

III. 결과 및 분석

1. 선행강우 및 관개 현황

측정일자에 대한 밭의 토양수분 변화 요인 등을 우선적으로 파악하여 토양 수분 변화에 밀접한 관련이 있는 강우량과 관개심을 조사하였다. 9월 7일 정식 이후 9월 하순까지 큰 강우가 발생하지 않았다. 이 기간 동안 어린 배추의 원활한 활착과 생장을 위해 농업인이 1일 30 mm 정도의 많은 관개를 수행하였다. 10월 1일에 61.0 mm의 강우가 발생하였으며, 10월 7일과 15일에 8 mm의 관개를 수행하였다. 무강우일수가 증가하는 기간 사이 사이에 관행적으로 관개를 수행하는 경향이 나타났으며, 그 기간은 대략 7 일 정도로 나타났다. 2차 조사시기인 9월 23일의 선행 무강우일수가 11.4일로 가장 크게 나타났으나, 관개를 포함하면 7차 조사시기인 10월 21일이 9.2일로 가장 크게 나타났다 (Fig. 4). 따라서 가장 건조한 토양상태는 10월 21일 (7차 조사시기)로 예상되고, 가장 습한 토양상태는 10월 2일 (4차 조사시기)로 판단된다.

2. 토양수분 분포에 대한 기초통계분석

조사된 기간 동안 평지밭과 경사밭의 토양수분함량과 관련된 기초통계분석은 Fig. 5에 나타났다. 토양수분함량의 최솟값, 최댓값 그리고 평균값은 평지밭과 경사밭에서 큰 차이를 나타내지는 않았다. 밭의 규모와 주변 환경의 영향이 다르기 때문인 것으

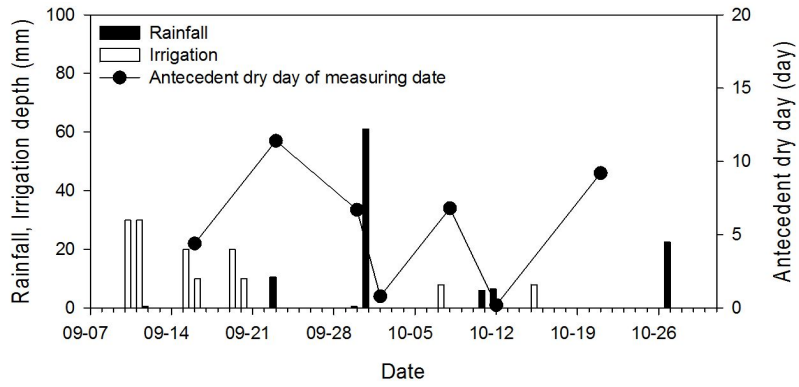


Fig. 4 Time variant rainfall and irrigation depths, and Antecedent dry day

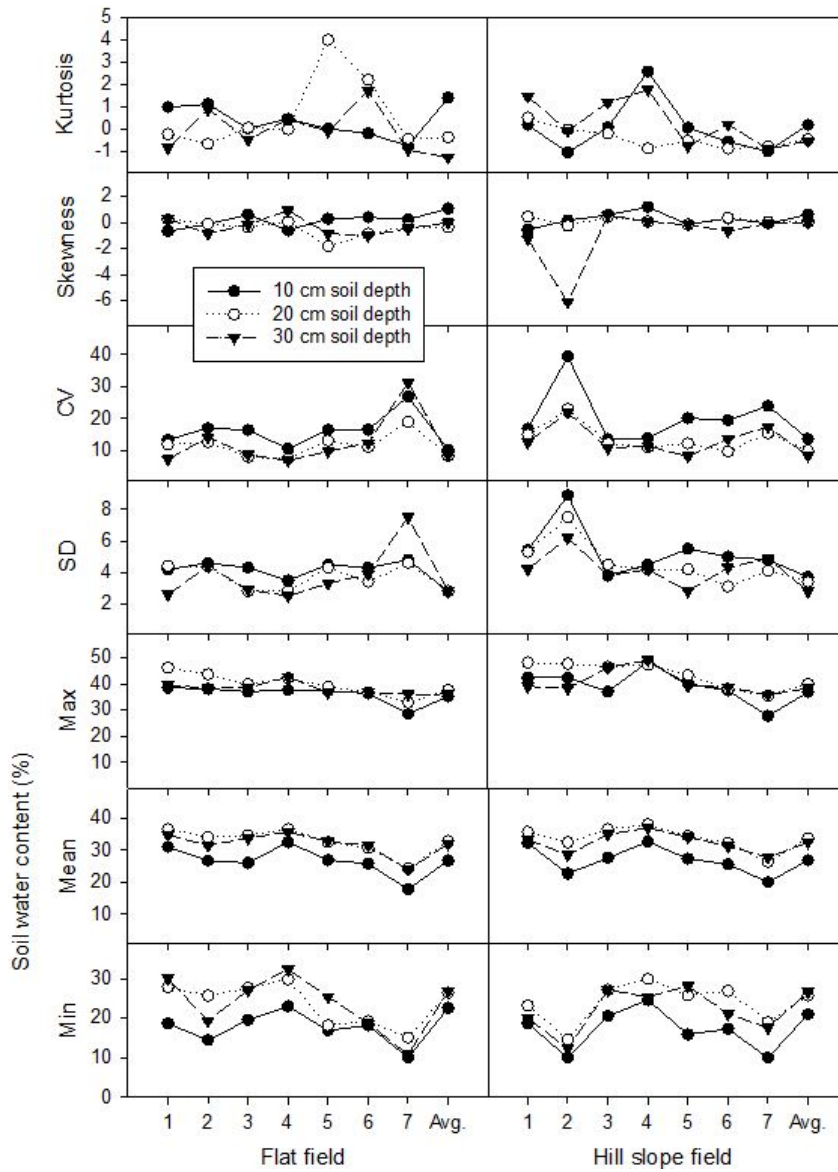


Fig. 5 General statistics of soil water content at depths of soil

로 판단된다. 특히 평지밭의 흙수로는 경사밭의 흙수로는 다르게 항상 물이 흐르기 때문에 평지밭의 토양수분 상승에 영향을 주는 인자로 평가된다.

변동계수는 대부분 10 % 내외로 산정되었으며, 왜도와 첨도로 살펴보았을 때 대부분 -1과 1사이의 값으로 측정된 토양수분 함량이 정규분포와 비슷한 분포를 나타냈다. 이러한 결과는 밭이 비교적 균등한 토양수분 분포를 가지고 있는 것으로 판단되며, 대부분의 토양수분함량이 평균 근처에 밀집되어 있다는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 평지밭이 건조한 상태로 판단되는 7차 조사시기의 변동계수가 높아지는 경향이 나타났고, 경사밭에서는 2차 조사시기에 최댓값과 평균값에 비하여 최솟값이 너무 낮아지는 경향이 나타났기 때문에 변동계수가 증가한 것으로 보인다. 경사밭의 7차 조사시기도 최솟값이 많이 낮아지는 경향이 나타났는데 최댓값과 평균도 함께 낮아지는 경향이 나타나 변동계수가 크게 증가하는 경향이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 밭

에서 토양의 수분함량이 일부 지역에서 집중적으로 낮아질 때 토양수분 분포에 변동성이 크게 나타난다고 볼 수 있다. 강우나 관개로 인한 토양수분변화는 밭의 토양수분함량을 전체적으로 상승시키는 효과 가져오지만 토양 내부에서 발생하는 배수와 같은 토양수분의 감소 요인에 의한 토양수분변화가 균등하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 효율적인 밭의 관개 및 배수 계획을 세우기 위해서는 밭의 토양이 습한 상태보다 건조한 상태의 공간 정보를 파악하는 것이 더욱 효과적으로 밭을 관리할 수 있는 기초 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

3. Variogram modeling

GS⁺ 프로그램에서는 대표적으로 사용하는 이론적 베리오그램 모델링인 구형모델 (spherical model), 지수모델 (exponential model), 선형모델 (linear model), 가우시안 모델 (gaussian model)을 선택적으로 적용할 수 있다. 평지밭과 경사밭의 실험

Table 3 Result of variogram calculation fitted by the spherical method

Location		Flat field		Hill-slope field			
Date	Soil depth (cm)	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (A ₀)	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (A ₀)
9-16	10	1.03	16.99	17.63	0.10	31.79	16.80
	20	5.79	28.07	71.00	0.01	27.00	10.70
	30	0.45	6.58	18.34	0.01	19.53	19.10
9-23	10	1.34	19.85	18.46	0.10	76.28	13.40
	20	0.01	14.33	10.69	0.50	56.53	12.30
	30	4.65	20.90	32.24	0.10	45.12	18.20
9-30	10	0.50	16.84	14.49	0.01	14.03	11.00
	20	0.15	6.90	13.78	0.40	20.88	10.70
	30	1.02	9.72	26.37	0.01	14.10	10.70
10-2	10	0.30	11.19	14.19	0.01	18.95	10.70
	20	0.30	6.45	15.93	0.01	15.85	10.70
	30	1.51	7.24	24.80	6.01	17.91	28.70
10-8	10	1.13	20.55	17.05	1.00	31.48	15.00
	20	0.01	16.52	27.23	5.46	19.16	30.70
	30	0.01	12.06	33.37	0.01	7.58	18.00
10-12	10	5.84	19.21	31.70	0.01	24.04	10.70
	20	1.81	13.67	16.51	0.01	9.48	10.70
	30	3.63	19.14	25.56	0.15	18.47	16.10
10-21	10	2.24	25.38	19.21	0.01	22.71	11.60
	20	1.34	22.42	17.60	0.38	17.35	19.80
	30	11.20	59.00	24.07	0.01	22.38	10.70
Avg.	10	0.61	8.02	19.68	0.01	13.45	13.70
	20	2.33	8.23	41.28	0.01	11.02	10.70
	30	0.01	8.85	26.47	0.29	8.086	16.90

적 베리오그램에 가장 근접한 베리오그램 모델링 곡선은 다양한 모델로 구현되었다. 그러나 각각 다른 형태로 토양 수분 분포를 표현하기 때문에 상호 비교에 적합하지 않다고 판단되어 다양한 모델 중에서 가장 많은 빈도수가 나타난 구형모델을 베리오그램 모델링의 대표모델로 선정하였다.

Nugget값은 측정오차를 나타내며, 평지밭에서 0.01~11.2, 경사밭에서 0.01~6.01로 나타났다. 전체 자료의 측정 일자별 및 깊이별 nugget값을 보았을 때는 10월 21일에 평지밭 30 cm 깊이에서 가장 크게 나타났다. 또한 평지밭과 경사밭의 평균적인 nugget값을 비교하였을 때는 경사밭보다 평지밭에서 더 크게 나타났다. Sill은 자료의 분산으로써, 평지밭에서 6.45~59.00, 경사밭에서 7.58~76.28로 나타났다. 전체자료의 평균적인 sill값을 볼 때 평지밭은 10 cm에서 30 cm로 내려가면서 분산이 커지는 경향이 나타났고, 경사밭은 반대로 작아지는 경향이 나타났다. 또한 nugget과는 반대로 평지밭의 분산이 경사밭보다 작게 나타났다.

Range는 각 모형에 대한 공간적 연속성이 있는 거리를 나타내며, range를 벗어난 거리의 자료는 각각 독립적인 자료라 할 수 있

다. Park et al. (2006)은 동일한 토양에서 같은 시기에 조성한 포장에서도 다양한 range 분포가 나타난다고 보고하였고, Sonn et al. (2012)은 range 값이 작을수록 더 많은 측정지점이 선택해야 된다고 하였다. 평지밭 수직 분포에 대한 평균 range를 살펴보면 10 cm (19.68) < 30 cm (26.47) < 20 cm (41.28)의 순으로 나타났고, 경사밭에서는 20 cm (10.70) < 10 cm (13.70) < 30 cm (16.90)의 순으로 산정되었다 (Table 3).

표토 밑 10 cm 토양층을 기준으로 할 때, 임의의 측정점에서 토양수분의 공간적 연속성이 나타나는 한계거리가 평지밭에서 19.68 m, 경사밭에서 10.70 m라는 의미이다. 따라서 연구지역의 밭에서 토양수분 분포 특성 조사를 위한 적절한 토양수분 관측 거리는 평지밭에서 약 20 m, 경사밭에서 약 10 m라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 평지밭은 8 m와 10 m 간격, 경사밭은 5 m와 10 m 간격으로 측정되었기 때문에 임의의 측정점에 대하여 인접한 관측점들 사이에는 공간적 연속성이 있다고 할 수 있다. 그리고 대부분의 range 값이 평지밭보다 경사밭에서 더 작게 나타났다. 이는 두 밭의 면적과 측정 위치에 따른 원인이 있겠지만 대체

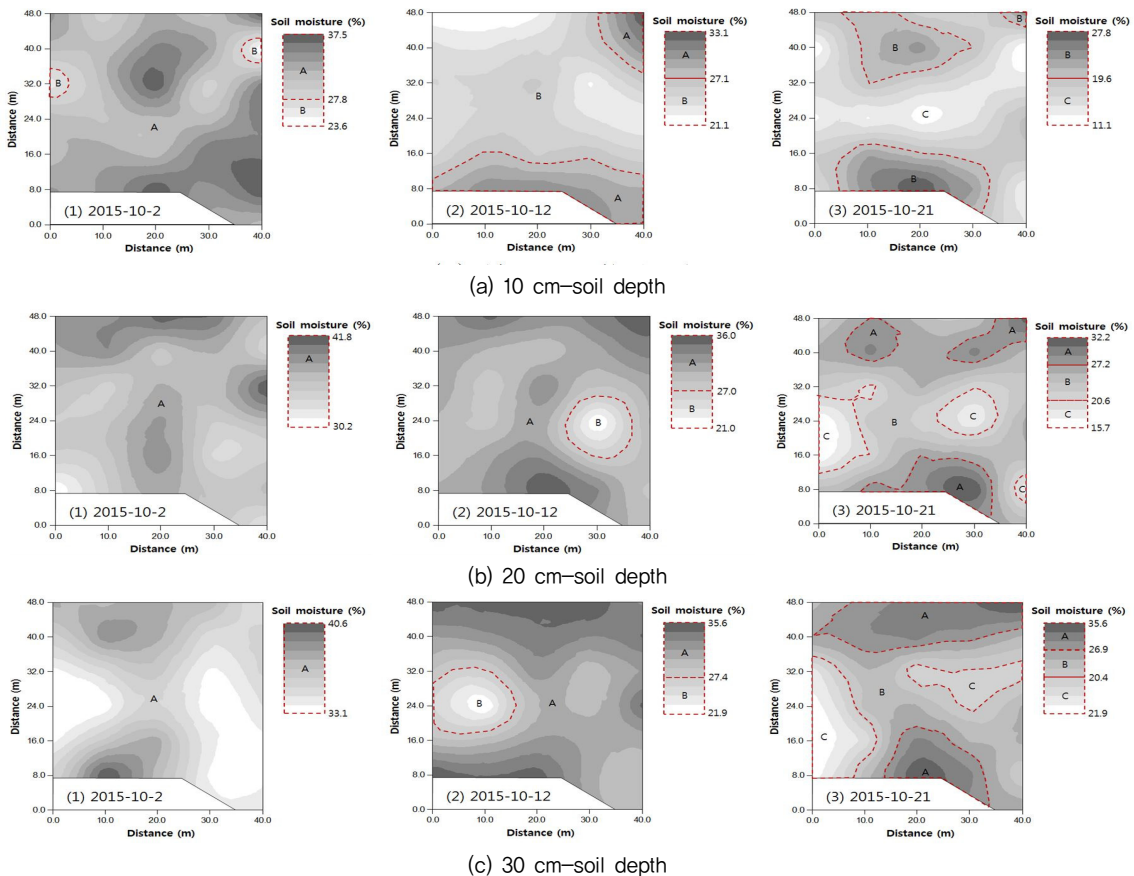


Fig. 6 Distribution of soil moisture contents at depths on a flat field (Zone A: wet area, Zone B: suitable and little dry area, Zone C: Dry and Very Dry area)

적으로 평지밭의 공간적 연속성이 경사밭보다 더 좋다는 의미로 해석할 수 있다. 또한 평지밭에서는 주로 수직적 토양수분의 이동이 발생하지만 경사밭에서는 수평적 토양수분의 흐름도 많이 발생할 수 있기 때문에 평지밭과 다른 공간적 특성을 보이는 것으로 판단된다.

4. 토양수분 분포

평지밭과 경사밭의 토양수분측정 결과를 GS⁺ 프로그램에 적용하여 공간보정을 수행하였다 (Fig. 3, Fig. 4). 측정 날짜별로 토양분토는 매우 다양하게 나타났으나, 주로 10월 12일 조사와 같이 적습등급 (B)을 주로 나타냈다. 이는 현지 농업인이 물 관리에 많은 관심을 기울인 결과로 판단된다. 7회의 조사시기 중에서 적습이상 (1)/적습 (2)/건조등급 (3)에 대하여 대표적인 경우를 도시하여 경향을 확인하였다.

10월 1일 내린 강우의 영향으로 10월 2일 (4차 측정시기)에 평지밭과 경사밭에서 대부분의 토양이 적습이상 등급 (A)으로 가장 높게 나타났다. 토양층이 깊어질수록 최소 수분함량이 높아지는 특징이 있었고, 경사밭에서는 10 cm 토양층에서 적습등급 (B)이 평지밭에 비하여 많이 존재하는 것으로 나타났다. 이는 경사의

영향으로 평지밭보다 배수가 더 빨랐던 것으로 판단된다.

10월 12일은 적습단계의 토양상태를 주로 보이는 것으로 나타났다. 평지밭의 10 cm층에서는 대부분의 지역이 적습과 약간 건조 등급이 많이 분포해있는 것으로 확인 할 수 있었다. 그러나 경사밭에서는 적습 등급과 건조 등급이 서로 비슷한 양상으로 분포해 있는 것을 확인 할 수 있다. 많은 비가 내린 4차 조사시기에 적습등급 (B)의 분포가 6차 조사시기에 건조등급 (C)의 분포로 변경된 경향이 나타났다. 그리고 평지밭과 경사밭에서 토양층이 깊어질수록 가뭄에 대한 영향성은 크지 않은 것으로 나타났다.

10월 21일은 조사기간 중 가장 건조한 상태로 조사되었다. 평지밭과 경사밭 10 cm 토양층에서 건조등급 (C)의 분포가 매우 광범위하게 나타났다. 특히 경사밭에서는 일부 구간을 제외하고 모든 지역에서 건조등급으로 평가되었다. 평지밭에서는 세로방향 40 m 이상인 구간과 배수로가 흐르는 구간이 적습등급 (B)으로 나타났고, 나머지 지역은 건조등급 (C)으로 구분되었다. 토양층이 깊어질수록 건조등급 (C)지역은 감소하는 경향이 나타났다.

이상의 결과로 볼 때 연구지역은 주로 토양층 10 cm에 대한 관개 계획이 매우 중요할 것으로 판단된다. 또한 건조와 습윤 공간이 일정한 경향을 가지고 분포해 있는 것으로 보이기 때문에 습한

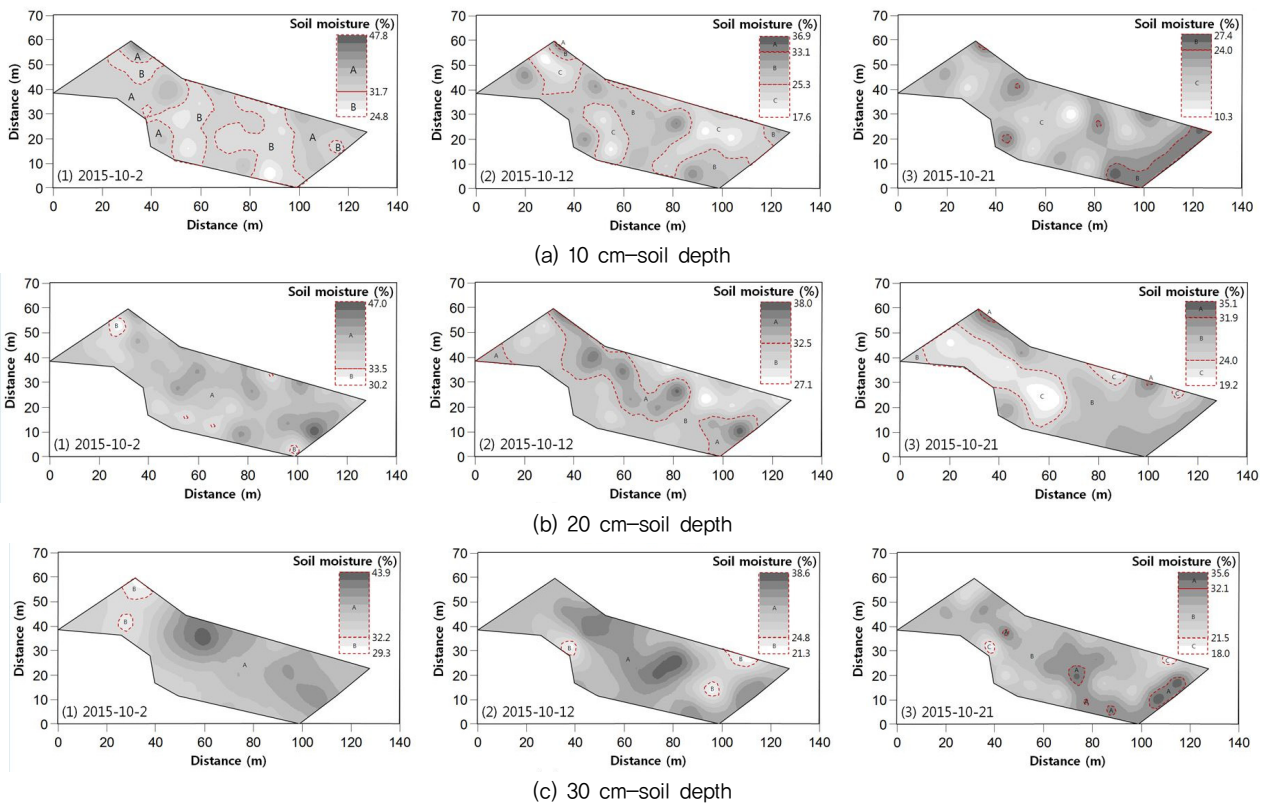


Fig. 7 Distribution of soil moisture contents at depths on a hill-slope field (Zone A: wet area, Zone B: suitable and little dry area, Zone C: Dry and Very Dry area)

구간에 대해서는 배수에 대한 관리와 관개를 배제하는 관리가 필요할 것으로 판단된다. 한정적인 용수로 밭을 관개해야한다면 평지밭에서는 밭의 중심부를 기점으로 H 형태의 관개가 요구되며, 경사밭에서는 밭의 전체적인 관개가 필요할 것으로 판단된다.

이렇듯 관개 계획을 세울 때는 밭의 전체를 관개하기보다는 필요한 부분만 관개할 수 있도록 밭의 토양수분함량 특성을 조사하고, 관개계획을 세우는 것이 관개 용수를 절약하고, 습해 등으로부터 작물 손상을 방지하는 방법이 될 수 있을 것으로 기대되며, 이러한 지구통계적 기법을 활용하면 효과적인 관개계획을 세울 수 있을 것으로 예상된다.

추가적으로 평지밭 하단에 위치한 물이 흐르는 배수로의 영향으로 10 cm와 20 cm 그리고 30 cm 토양층 모두 높은 토양수분함량이 분포되어 있는 것으로 나타났다. 반면 경사밭에서는 밭에 비하여 배수로가 깊고 간헐적으로 물이 흐르기 때문에 비교적 낮은 토양수분함량이 분포하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 밭 주변의 배수로 위치, 상시 흐름의 유무 등이 토양수분함량에 중요한 인자로 작용할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 연구지역의 평지밭과 같이 상시 물의 흐름이 있는 흠수로가 밭의 경계에 존재한다면 작물이 습해를 받을 수 있기 때문에 조금 더 적극적인 배수 계획이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

평지밭과 경사밭의 토양수분에 대한 공간변이성 분석을 위하여 실제 농업인이 가을배추를 경작하는 밭을 대상으로 10 cm, 20 cm 그리고 30 cm 토양층의 토양수분함량을 조사하였고, GS⁺ 프로그램을 이용하여 통계적인 방법으로 분석하여 노지작물을 위한 관개계획 수립에 도움이 되고자 하였다.

토양수분분포의 변동성은 평지밭 7.0~31.3 %, 경사밭 8.3~39.4 %의 범위이며, 밭이 습할 때보다 건조할 때 크게 나타났다. 밭의 특성에 따라 밭의 수분이동(배수 등)이 다르기 때문에 밭의 위치에 따라 수분함량의 차이가 심한 것으로 판단되며, 밭이 건조할 때 밭의 토양 수분함량을 조사하는 것이 밭이 습할 때 조사하는 것보다 밭의 토양수분분포 특성 파악에 더욱 효과적인 것으로 나타났다.

실험적 베리오그램 (experimental variogram)에 구형모델 (spherical model)을 적용한 상관거리 (range)는 평지밭보다 경사밭에서 더 작은 값으로 관측되어, 경사밭보다 평지밭의 토양수분분포의 연속성이 좋은 결과를 얻었다. 또한 10 cm 토양층을 기준으로 평균 range 간격이 평지밭 19.68 m, 경사밭 13.70 m로서 상대적으로 경사밭에서 더 많은 측정 지점이 필요한 것으로 나타났다.

조사 시기 중에서 10월 21일만 밭이 건조등급인 것으로 분석

되었고, 토양수분의 분포도 상당히 불균일한 것으로 나타났다. 평지밭과 경사밭 10 cm 토양층에서 건조등급의 분포가 매우 광범위하게 나타났다. 특히 경사밭에서는 일부 구간을 제외하고 모든 지역에서 건조등급으로 평가되었다.

한정적인 관개용수로 밭을 관개해야 할 때 밭의 전면을 관개하는 것은 매우 비효율적일 수밖에 없다. 연구지역의 경사밭과 같이 밭 전체가 건조해지는 밭도 있지만 평지밭과 같이 일부 지역만 건조등급이 나타나는 밭도 존재한다. 본 연구와 같이 밭의 토양수분 조사와 지구통계적인 방법으로 공간분석을 수행하면 밭의 토양수분 분포특성을 파악할 수 있고, 밭의 필요한 부분에 집중적으로 관개할 수 있기 때문에 농업용수를 절약하고, 가뭄 피해 및 습해 방지 등 농업 생산성을 증대시킬 수 있는 하나의 방법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (세부과제번호: PJ0100832016)의 지원에 의해 이루어진 것이다.

REFERENCE

1. Al Zayed, I.S., N.A. Elagib, L. Ribbe, and J. Heinrich, 2015. Spatio-temporal performance of large-scale gezira irrigation shceule. Sudan. *Agricultural Systems*, 133: 131-142.
2. Bandara, K.M.P.S., 2003. Monitoring irrigation performance in Sri Lanka with high frequency satellite measurements during the dry season. *Agricultural water management*, 58(2): 159-170.
3. Bernardo, D.J., 1988. The effect of spatial variability of irrigation applications on rick-efficient irrigation strategies. *Southern Journal of Agricultural Economics*, 20(01): 77-86.
4. Clemmens, A.J., and M.G. Bos, 1990. Statistical methods for irrigation system water delivery performance evaluation. *Irrigation and Drainage Systems*, 4(4): 345-365.
5. Eom, K.C., and J.N. Im, 1990. Irrigation efficiency and yield response of irrigation methods in vegetable crop cultivation. *Res. Rept. RDA(S&F)*, 34(2): 8-14 (in Korean).
6. Eom, K.C., D.S. Oh, K.C. Song, I.S. Jo, and D.W. Seo, 1999. A guide book irrigation for upland crop in Korea. Rural development administration, Suwon, Korea (in Korean).
7. Eom, K.C., K.C. Song, K.S. Ryu, Y.K. Sonn, and S.E. Lee, 1995. Model equation to estimate the soil water characteristics curve using scaling factor. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 28(3): 227-232 (in Korean).

8. FAO, 2011. Climate change, water and food security. FAO Water Reports 36. Rome, Italy.
9. Gamma design software, 2015. GS⁺ user's guide version 10.
10. Jafari, M., M. Tahmoures, H.M. Asgari, and M. Biniiaz, 2012. Assessment of soil property spatial variation based on the geostatistical simulation. *Desert*, 16(2): 87-100.
11. Jung, K.Y., E.S. Yun, K.D. Park, and C.Y. Park, 2010. Evaluation of drainage improvement effect using geostatistical analysis in poorly drained sloping paddy soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 43(6): 804-811 (in Korean).
12. Kang, T.G., H. Lee, I.S. Kang, and T.Y. Heo, 2014. A study on spatial prediction of water quality constituents using spatial model. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(4): 409-417 (in Korean).
13. Kim Y.S., M.D. Cho, and W.S. Kim, 1980. Studies on effective drainage in apricot orchard with heavy caly soil. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science*, 21(2): 152-157 (in Korean).
14. Korea meteorological administration (KMA), 2015. Abnormal climate report. 36-42. Seoul, Korea (in Korean).
15. Ladson, A.R., and I.D. Moore, 1992. Soil water prediction on the Konza Prairie by microwave remote sensing and topographic attributes. *Journal of Hydrology*, 138(3): 385-407.
16. Lark, R.M., 1999. Soil-landform relationships at within field scales an investigation using continuous classification. *Geoderma*, 92(3): 141-145.
17. Lee, S.S., D.C. Yang, and Y.T. Kim, 1982. Effect of soil water on photosynthesis, growth and development of ginseng plant (*Panax ginseng* C.A. meyer). *Korean Journal of Crop Science*, 27(2): 175-181 (in Korean).
18. McKenzie, N.J., and M.P. Austin, 1993. A quantitative Australian approach to medium and small scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation. *Geoderma*, 57(4): 329-355.
19. Ministry of public safety and security (MPSS), 2015. 2015 Joint guidance of the relevant authorities against drought. 4. Seoul, Korea (in Korean).
20. Nam, W.H., J.Y. Choi, E.M. Hong, and J.T. Kim, 2013. Assessment of irrigation efficiencies using smarter water management. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 55(4): 45-53 (in Korean).
21. Oh, D.S., 1992. Irrigation efficiency of irrigation methods. Annual research report (RDA), 34(1): 23-27 (in Korean).
22. Park, C.S., S.C. Yang, G.J. Lee, J.T. Lee, H.M. Kim, S.H. Park, D.H. Kim, A.Y. Jung, and S.W. Hwang, 2006. Spatial variability of soil moisture content, soil penetration resistance and crop yield on the leveled upland in the reclaimed highland. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 39(3): 123-135 (in Korean).
23. Qiu, Y., B. Fu, J. Wang, and L. Chen, 2001. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environment*, 49(4): 723-750.
24. Reichardt, K., J.C.A. Silva, L.H. Bassoi, L.C. Timm, J.C.M. Oliveira, O.O.S. Bacchi, and J.E. Pilotto, 2001. Soil spatial variability and the estimation of the irrigation water depth. *Scientia Agricola*, 58(3): 549-553.
25. Rural development administration (RDA), 2012. Agricultural science technology research analysis standard reference. 11-273. Suwon, Korea (in Korean).
26. Sonn, Y.K., Y.S. Zhang, C.W. Park, Y.H. Moon, B.K. Hyun, K.C. Song, and H.C. Chun, 2012. A comparison of spatial variation on anthropogenic soils. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 45(6): 897-899 (in Korean).
27. Western, A.W., and R.B Grayson, 1998. The Tarrawarra data set: Soil moisture patterns, soilcharacteristics, and hydrological flux measurements. *Water resources research*, 34(10): 2765-2768.