Micro-sprinkler Irrigation Uniformity as Affected by Different Water Pressure and Outlet Intervals

Sangho Jeon, Seonah Hwang, Yeonkyu Sonn, Byungkeun Hyun, Woori Go, Sungang Yun, and Kyunghwa Han*

Soil and Fertilizer Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, Jeonbuk 55365, Korea

*Corresponding author: bearthink@korea.kr

ABSTRACT

Received: November 16, 2018

Revised: December 3, 2018

Accepted: December 5, 2018

This study carried out to evaluate the water distribution uniformity of micro-sprinkler to improve water utilization efficiency. The water quantity and the water pressure were measured according to the spacing of micro-sprinkler and adjusting the applied water pressure. The results showed that the spacing of the micro-sprinklers a decisive influence on the distribution uniformity, but the change in hydraulic pressure did not have a significant effect. The water quantity was reduced by 22.7 ± 1.6 % when the water pressure dropped 100 kPa. Each micro-sprinkler has different spray pattern. The wetted radius was measured about 4 m. A peak was found within a meter radius from the center of the micro-sprinkler and gentle slope between 2 - 4 m. The appropriate spacing is 2 - 4 m depend on micro-sprinkler and purpose of the system. The results would be used in micro-sprinkler system guideline and design for best water distribution uniformity.

Keywords: Micro-sprinkler, Discharge uniformity, Hydraulic pressure loss, Irrigation uniformity

Spray distribution according to the hydraulic pressure of micro-sprinkler.

Introduction

관수 및 일년생 발작물은 작물의 생육시기와 기후, 수자원에 민감하고 토양수분을 흡수함으로써 생육하기 때문에 토양수분의 변화는 작물생산의 지표가 된다 (Nam et al., 2014). 토양수분은 일차적으로 강우에 의해 공급될 수 있으나, 강우의 발생 주기와 강우량이 일정하지 않은 문제점이 있다. 따라서 상시 최적 작물 생육환경을 유지하기 위해서는 적절하 관수시기와 관수량에 의한 수분 공급이 이루어져야 한다 (Shin, 2018). 필요이상의 과다한 관수는 토양 침식을 가중시키고 물의 이동과 양분유평에 의해 지표수와 지하수의 오염을 발생시킬 가능성이 있다. 반면 관수량 부족은 재배작물의 생산성과 품질을 저하시킬 수 있다 (Kim et al., 2013; Kim et al., 2011; Kim et al., 2009). 따라서 작물과 토양환경 보전을 위해 적절한 물 관리가 필수적이라 할 수 있다. 더욱이 우리나라는 강우의 연중 편차가 커서 관수시설을 통한 용수공급이 필수적이다 (Shin, 2018). 우리나라 관수시설은 주로 전기를 이용한 지하수 펌핑, 배관을 통한 물 분배로 이루어져 있으며, 관수는 양도 중요하지만 방법에 따라 토양에서 수분의 이동과 분포하는 양상이 다르게 되어 작물의 생산성과 관수되는 물량은 다르게 된다 (Park et al., 2012; Ryu et al., 1994). 이제까지 발작물에 대한 물 요구량 시험 등이 이루어져 관수 계획에 대한 물관리지침서 (NIAST, 1999; NAS, 2018)가 만들어져 있으나, 한정된 물량으로 균일하게 관수하는 방법에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 만약 균일하게 관수가 되지 않으면 토양 수분함량의 변이가 커져 작물의 생산성과 토양환경 특성이 불균일해질 수 있다. 토양특성이 불균일해지면 시비 및 병해충 방제 등에서도 관리의 어려움이 커져 농업인이 작물생산을 위해 투여하는 노동력 또한 증가하게 된다 (Choi et al., 2012). 우리나라에서 발작물의 관수방법으로 주로 이용되고있는 점적관수 및 분수호스에 관한 관수 균일도 평가가 일부 이루어 졌으나 (Nam and Kim, 2007; Nam et al., 2012) 미니스프링클러에 관한 연구는 아직 미흡한 상태이다. 미니스프링클러의 종류에는 ① 미립자 하향살수, ② 하향회전살수, ③ 상향 180° 회전살수 ④ 상향 광폭살수, ⑤ 상향 초광폭살수 등이 있다. 일반적으로 송수압이 1기압 떨어질 때마다 살수량은 약25%씩 감소한다고 알려져 있다 (Irrigation association, 2015). 따라서 본 시험에서는 우리나라 시설재배지에서 많이 사용하고 있는 하향회전살수 미니스프링클러 3종을 선정하여 송수압력과 설치간격에 따른 관수균일도를 평가하여, 관수균일도를 높이는 관수자재 선정과 설치 방법 등을 도출하고자 수행하였다.

Materials and Methods

실험 개요 관수설계에 필요한 관수요소는 FAO (1992)의 소규모 펌핑관수를 참조하여 분석하였으며 미니스프링클러 관수를 대상으로 시설을 설계하였다. 관수요소는 용수원 확보, 펌프, 배관, 작물에 대한 물 분출방법 (점적기, 스프링클러) 등이 있다. 이러한 관수요소를 선택하고 결정하는데 필요한 기본 정보는 작물, 재배면적, 토양이며, 결정하는 기준은 작물생육을 위한 충분한 물량과 균일하고 적절한 물공급력이다.

일정면적의 작물에 필요한 물량 계산과 관수방법별 관수효율, 펌프의 양수효율, 배관에서 수압손실 등에 대한 자료는 FAO (1992)에 제시한 방법을 활용하였다. 또한 미니스프링클러 관수에 따른 다른 물 공급 특성을 평가하기 위해 펌프에서 거리에 따른 관수균일도 및 미니스프링클러를 기준으로 물이 바닥으로 떨어지는 살수균일도를 평가하여 관수시설 설계의 기초자료를 마련하였다. 미니스프링클러 관수 균일도평가 시험은 충북 괴산에 위치한 단동형 하우스 (6 m × 97 m)에서 세 종류 (A, B, C) 미니스프링클러를 이용하여 수행하였다. 미니스프링클러 A는 국외산 B, C는 국내산을 시중에서 구입하여 실험에 이용하였다. 그 중 A, B 미니스프링클러는 적용 수압이 200 kPa이고 유량이 100

Fig. 1. Composition and scene of micro-sprinkler irrigation uniformity experiment (a: overview of the experiment site, b: disk filter, c: pressure gauge on the ground, d: pressure gauge on top, e: a scene of the wetted radius test).

L/hr인 반면, 미니스프링클러 C는 제조사에서 정확한 관수 특성이 제시되지 않은 제품을 사용하였다. 미니스프링클러는 지상 2 m에 설치하였고, 여과기는 50 mm, 120 mesh 체를 사용하였다. 용수 배관은 주관 40 mm, 지관 25 mm를 사용하였으며, 사용한 펌프는 출력 950 W, 온양정 29 m, 최대양수량 16, 140 L/hr 등의 특성을 가지고 있다 (Fig. 1). 미니스프링클러 설치간격은 2 m와 4 m 두 수준에서 수압 및 펌프로부터 거리에 따른 물 공급량을 분석하였다. 수압의 측정은 펌프에서 지관으로 들어가기 전 수압 그리고 미니스프링클러가 설치된 지상 2미터 지관에는 10 m 간격으로 측정하였다. 적용 수압의 처리는 스프링클러 간격이 4 m 실험에서는 150, 200, 250 kPa로 조정하였다. 2 m 간격은 emitter의 증가로 인한 펌프의 수압이 떨어지는 현상이 발생하였고, 펌프의 용량이 허용되는 범위 안에서 실험을 진행하였다. 수압의 변화에 따른 살수반경에 대한 분석을 위해 미니스프링클러를 중심으로 아크릴통 (10 cm × 10 cm × 10 cm)을 놓고 이에 담기는 물량을 저울로 측정하여 분석하였다 (Fig. 1-e).

관수균일도 평가 방법 관수균일도는 관수하고자 하는 일정면적의 경지에 관수가 균일하게 공급되고 있는가를 지수로서 평가하였다. 대표적인 평가 지표로는 균등계수 (Coefficient of uniformity, CUs), 분배 균등계수 (Distribution uniformity, DU), 통계적 균등계수 (Statistical uniformity, U_s)와 유출균등계수 (Emission uniformity, EU) 등이 있으며, 스프링클러의 관수분포 및 패턴에 대해 통계적 기법을 이용한 평가가 이루어져왔다. (Al-Ghobari, 2006; Karmeli, 1978; Nam et al., 2012). Christiansen (1942)은 처음으로 스프링클러 시스템에 관수균일계수를 도입하였으며, 현재 세계적으로 가장 보편적으로 수분의 분포 균일성을 나타내는 기준으로 이용되고 있다 (Karmeli, 1978; Topak et al., 2005). 분배 균등계수 (DU) 개념은 Merriam and Keller (1978)에 의해 제시 되었으며 하위 25%의 대한 전체 유량평균의 비율을 계산함으로써 평가되어 진다. 본 연구에서는 스프링클러 관수균일도를 통계적 방법에 의한 해석을 위해 Christiansen (1942)이 제안한 통계적 균등계수 CU (Christiansen's uniformity coefficient) 및 Merriam and Keller (1978)가 제시한 DU (Distribution uniformity)를 활용하였다.

$$CU(\%) = 100(1 - C_v) = 100(1 - S_q / \bar{q}) \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, C_v 는 변동계수 (coefficient of variation), S_q 는 미니스프링클러 emitter 유량의 표준편차, $\bar{q}$ 는 평균유량이다.

$$DU(\%) = 100 \times \left[\frac{D_{1q}}{\bar{q}} \right] \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서, D_{1q} 는 하이 25%의 평균유량, $\bar{q}$ 는 전체 평균유량이다

균등계수에 대한 평가기준은 95% 이상이면 매우양호 (excellent), 93-95%이면 양호 (average), 89-93%이면 보통 (marginal), 85-89%이면 불량 (poor), 85% 미만이면 사용불가 (unacceptable)이다 (Nam and Kim, 2007).

Results and Discussion

미니스프링클러 설치간격과 수압에 따른 관수량 및 수압의 변화 실험은 첫번째 미니스프링클러에 적용되는 수압을 기준으로 삼았으며, 펌프에서 부터 지상 2 m에 설치된 미니스프링클러까지 도달하게 되면서 Head loss가 발생하였고, Fig. 2, 3에 별도로 표시하였다. 미니스프링클러관수는 물 공급 펌프로부터 거리에 따라 유량이 감소하다가 지관이 끝나는 부분에서 역압으로 인해 유량이 약간 상승하는 경향을 보였다. 미니스프링클러 설치간격과 수압에 따른 미니스프링클러 종류에 따른 관수량의 변화는 1차 상관식으로 표시하였다 (Fig. 2). 미니스프링클러의 유량은 적용되는 수압이 200 kPa 기준으로 A, B, C는 각각 97, 102, 113 L/hr로 조사되었으며, 적용되는 수압이 높을수록 유량이 증가하였다 (Fig. 2-B, D, F). 거리에 따른 emitter에서 빠져나오는 분수량의 변화는 상관식의 slope를 기준으로 2 m 간격의 경우 미니스프링클러 B 수압 66 kPa에서 가장 작고 (Fig. 2-C), 미니스프링클러 C 수압 160 kPa에서 가장 높았으며 (Fig. 2-E), 4 m 간격의 경우 스프링클러 B 수압 250 kPa에서 가장 작고 (Fig. 2-D), 미니스프링클러 C 수압 200 kPa에가 가장 높았다 (Fig. 2-F). Fig. 2에서 제시된 일차식에서 제시된 slope는 거리에 따른 관수량 변화를 예측할 수 있는 중요한 식으로 활용될 것으로 기대된다. 예를 들어 100 m 미니스프링클러 설치를 가정으로 관수량의 변화는 2 m 설치 기준 미니스프링클러 A, B, C 는 각각 16.3 ± 3.0 , 16.4 ± 0.2 , $22.7 \pm 0.4\%$ 로, 4 m 설치 기준의 경우 미니스프링클러 A, B, C 는 각각 4.9 ± 2.2 , 1.9 ± 0.8 , $6.8 \pm 0.6\%$ 로 계산되었다.

Fig. 3은 미니스프링클러 설치간격과 적용수압차이에 따른 수압의 변화 양상을 보여준다. 유량의 변화 양상과 비슷하게 미니스프링클러를 2 m 간격으로 설치 할때 4 m 보다 수압의 변화폭이 컸다. 초기수압 변화에 따른 거리변화와 수압변화 양상은 초기 수압이 높을 수록 변화폭이 큰 것으로 나타났다. 4 m 간격으로 설치한 미니스프링클러의 경우 거리에 따른 완만한 수압의 변화를 보였다. Fig. 3에서 제시된 일차식을 이용하여 거리에 따른 수압의 변화를 예측할 수 있다. 예를 들어 100 m 거리를 가정하여 수압의 변화는 2 m 설치 기준 미니스프링클러 A, B, C 는 각각 35.3 ± 1.3 , 35.7 ± 3.6 , $39.5 \pm 4.0\%$ 로, 4 m 설치 기준의 경우 미니스프링클러 A, B, C 는 각각 10.9 ± 3.9 , 14.3 ± 1.0 , $15.6 \pm 1.1\%$ 로 수압이 변하는 것으로 계산하였다. 거리에 따른 수압의 감소는 유량의 감소 보다 큰 것으로 조사되었다. 거리에 따른 수압 및 관수량의 변화는 초기 적용 수압 보다 emitter의 설치간격 결정적인 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 수압이 100 kPa 변화함에 따른 살수량 감소는 4 m 설치 간격 실험의 첫번째 emitter에서 250 kPa과 150 kPa 유량 차이에서 확인 하였으며, $22.7 \pm 1.6\%$ 감소되는 것으로 보였다.

Fig. 2. Discharge variation of micro-sprinkler at different pressures and spacing (* Water pressure before headloss).

미니스프링클러의 설치간격에 따른 살수반경 및 살수양상 본 실험에서 이용된 하향분사식 미니스프링클러는 한개의 회전판 (spinner)에 경사를 가진 홈이 있고, 이 홈을 따라 압력수가 분수 되면서 그 힘에 의하여 회전함으로써 360° 관수가 되는 메카니즘이다. 따라서 회전축을 기점으로 동일한 살수패턴을 가지게 된다. 살수패턴 및 살수 균일도에 이용된 투명 아크릴로 제작된 용기는 실험 수행이 원활하게 진행될 수 있도록 하였다. 미니스프링클러 종류에 따른 살수분포 반경은 Fig. 4에 나타났다. 살수 반경은 약 4 m 정도로 조사되었으며, 회전 중심점을 기점으로 1 m 안쪽에서 살수량이 가장 높았고 거리가 멀어질수록 감소하는 양상을 보였다. 그 피크는 수압이 증가할 수록 높아지는 패턴을 가지고 있다. 또한 3-4 m 사이에서 작은 피크를 확인 할 수 있었다. 그 사이 1-3 m의 분무되는 물의 양은 비교적 완만한 패턴을 보였다. 미니스프링클러 종류에 따른 살수 균일도를 Table 1에서 확인할 수 있다. 미니스프링클러 B

Fig. 3. Water pressure variation of micro-sprinkler at different pressures and spacing (*Water pressure before headloss).

의 DU 값이 250 kPa에서 가장 높은 값을 보이는 것을 제외하면 모든 미니스프링클러에서 CU, DU 모두 150 kPa에서 상대적으로 높은 살수 균일도를 보였다.

조사된 살수 분포도를 기반으로 200 kPa 기준 미니스프링클러가 2, 3, 4 m 간격으로 설치되었을 때를 가정하여 살수 되는 물의 양을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 미니스프링클러의 설치간격에 따라 2 m 아래 토양에 떨어지는 물의 양과 양상이 다르게 나타났다. 미니스프링클러 A의 경우 4미터 간격으로 설치 시 살수가 많이 많이 되는 곳과 적게 떨어지는 곳의 차이가 다른 미니스프링클러에 비하여 적게 나타났다. 이러한 경향은 설치간격 변화에 따른 관수 균등계수 (Christiansen's uniformity coefficient, CU), 분배 균등계수(Distribution uniformity, DU) 결과에서도 동일한 결

Fig. 4. Spray distribution according to the hydraulic pressure of micro-sprinkler (200 cm high, upside-down stand).

Table 1. Splay uniformity of micro-sprinkler according to the hydraulic pressure of pump.

		150 kPa	200 kPa	250 kPa
Micro sprinkler - A	CU* (%)	42.7	39.3	31.5
	DU (%)	88.0	68.9	51.3
Micro sprinkler - B	CU (%)	55.4	46.5	42.1
	DU (%)	78.4	70.0	86.3
Micro sprinkler - C	CU (%)	38.4	33.9	32.2
	DU (%)	66.6	58.9	60.2

** CU: Christiansen's uniformity coefficient, DU: Distribution uniformity

Fig. 5. Spray distribution of micro-sprinkler according to spacing.

과를 보인다 (Table 2). 설치간격에 따른 살수 균일도는 2 m에서 가장 높을 값을 보였다. 설치 간격이 증가할 수록 살수 균일도는 감소하였으나, 스프링클러 A의 경우 감소의 폭이 크지 않아 4 m 간격에서도 균일한 살수가 가능 할 것으로 판단됐다. 이러한 미니스프링클러의 설치간격에 따른 살수 양상을 보여주는 정보는 실제 현장에서 설치 간격 결정 시 매우 유용하게 이용될 것으로 판단된다.

Table 2. Spray uniformity of micro-sprinkler according to the overlay distance.

		2 m	3 m	4 m
Micro sprinkler - A	CU* (%)	88.4	83.1	81.9
	DU (%)	86.1	86.3	83.1
Micro sprinkler - B	CU (%)	92.7	81.4	66.4
	DU (%)	90.2	76.3	63.5
Micro sprinkler - C	CU (%)	89.4	88.8	58.5
	DU (%)	90.4	88.0	61.8

* CU: Christiansen's uniformity coefficient, DU: Distribution uniformity

관수압력 변화에 따른 관수 균일도 관수 수압의 변화에 따른 관수 균등계수 (Christiansen's uniformity coefficient, CU), 분배 균등계수(Distribution uniformity, DU)는 Table 3을 통해 확인할 수 있다. 관수균일도 평가는 설치간격 2 m 보다 4 m 에서 높은 관수균일도를 나타내었다. 모든 압력에서 미니스프링클러가 2 m 간격으로 설치 될 시 양호에 해당되며 4 m 설치가 매우 양호에 해당된다. 따라서 미니스프링클러의 살수반경은 4 m 이지만, 반경 1 m 안에서 살수량이 많으므로 짧은 시간에 많은 양의 관수가 필요한 작물은 2 m 간격, 최소 관수량으로 넓은 면적 관수 시에는 4 m 간격으로 설치하는 것을 권장할 수 있다.

Table 3. Irrigation uniformity of micro-sprinkler according to the hydraulic pressure of pump.

		Water Pressure	157 (250*) kPa	120 (200*) kPa	90 (150*) kPa
Micro sprinkler - A	2 m spacing	CU (%)	94.5	93.5	92.2
		DU (%)	95.8	95.3	96.2
		Water Pressure	250 kPa	200 kPa	150 kPa
Micro sprinkler - B	4 m spacing	CU (%)	95.8	96.6	96.0
		DU (%)	97.5	97.9	98.4
		Water Pressure	175 (295*) kPa	118 (200*) kPa	66 (120*) kPa
Micro sprinkler - C	2 m spacing	CU (%)	93.6	93.8	93.6
		DU (%)	95.5	95.1	95.2
		Water Pressure	250 kPa	200 kPa	150 kPa
Micro sprinkler - B	4 m spacing	CU (%)	97.7	97.8	97.7
		DU (%)	98.7	98.4	98.0
		Water Pressure	160 (295*) kPa	118 (200*) kPa	66 (120*) kPa
Micro sprinkler - C	2 m spacing	CU (%)	91.8	91.8	91.7
		DU (%)	93.6	93.6	93.1
		Water Pressure	240 kPa	200 kPa	150 kPa
Micro sprinkler - C	4 m spacing	CU (%)	97.6	97.2	97.6
		DU (%)	98.6	98.2	98.7

* The water pressure before headloss

** CU: Christiansen's uniformity coefficient, DU: Distribution uniformity

Conclusions

본 연구는 미니스프링클러 관수시설의 물이용 효율을 높이고자 스프링클러의 관수균일도 조사 및 성능을 평가하였다. 적용 수압 및 미니스프링클러의 간격을 조절하여 거리에 따른 관수량과 수압의 변화를 조사하였다. 미니스프링클러의 설치 간격은 관수균일도에 결정적인 영향을 주었으며, 수압의 변화는 큰 영향을 주지 못하였다. 수압 100 kPa 감소에 따라 살수량은 $22.7 \pm 1.6\%$ 감소하는 결과를 가져왔다. 미니스프링클러의 설치간격에 따른 분무 양상은 미니스프링클러의 종류에 따라 다른 패턴을 가지고 있었으며, B, C의 경우 4 m 간격으로 설치시 낙수가 많은 곳과 적은 곳의 차이가 컸으나, A의 경우 상대적으로 적은 차이를 보였다. 미니스프링클러의 설치 간격은 재조사에 따라 차이가 있으며 2-4 m의 간격이 적절한 것으로 판단된다. 본 연구에서 조사된 결과는 시설재배지에서 미니스프링클러 설치 시 수압, 설치간격, 수분관리에 필요한 기초자료를 제공함으로써 농가의 소득에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 시험연구사업(과제번호: PJ012708)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Al-Ghobari, H.M. 2006. Effect of maintenance on the performance of sprinkler irrigation systems and irrigation water conservation. Food Science Agricultural Research Center, Research Bulletin. 141:1-16.
- Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by sprinkling. USDA.
- FAO. 1992. Small-scale pumped irrigation: energy and cost – FAO, Rome. Italy.
- Irrigation association. 2015. Principles of irrigation 3rd Edition.
- Karmeli, D. 1978. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. T Asae. 21:682-0686.
- Kim, H.-J., D.-W. Son, S.-O. Hur, M.-Y. Roh, K.-Y. Jung, J.-M. Park, et al. 2009. Comparison of wetting and drying characteristics in differently textured soils under drip irrigation. Journal of Bio-Environment Control.
- Kim, H.-J., M.-Y. Roh, D.-H. Lee, S.-H. Jeon, S.-O. Hur, J.-Y. Choi, et al. 2011. Feasibility test on automatic control of soil water potential using a portable irrigation controller with an electrical resistance-based watermark sensor. Journal of Bio-Environment Control.
- Kim, H.-J., S.-W. Ahn, K.-H. Han, J.-Y. Choi, S.-O. Chung, M.-Y. Roh, et al. 2013. Comparison study of water tension and content characteristics in differently textured soils under automatic drip irrigation. Protected Horticulture Plant Factory 22.
- Merriam, J.L. and J. Keller. 1978. Farm irrigation system evaluation: A guide for management. Farm irrigation system evaluation: a guide for management.
- Nam, S.-W. and Y.-S. Kim. 2007. Discharge variation of perforated hoses and drip irrigation systems for protected cultivation. Journal of Bio-Environment Control.
- Nam, W.H., E.M. Hong, M.W. Jang, and J.Y. Choi. 2014. Projection of consumptive use and irrigation water for major upland crops using soil moisture model under climate change. J Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers. 56:77-87.
- Nam, W.-H., J.-Y. Choi, S.-K. Choi, E.-M. Hong, S.-H. Jeon, and S.-O. Hur. 2012. Discharge Uniformity and Performance Assessment of Drip Irrigation System. Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers.

54:29-38.

- NAS. 2018. Crop water use in upland with different soils, crops, and regions. National Institute of Agricultural Sciences. RDA. Wanju, Korea.
- NIAST. 1998. Guideline of irrigation schedule for upland crop. National Institute of Agricultural Sciences and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Park, J.M., T.J. Lim, and S.E. Lee. 2012. Effect of Subsurface Drip Pipes Spacing on the Yield of Lettuce, Irrigation Efficiency, and Soil Chemical Properties in Greenhouse Cultivation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 45:683-689. doi:10.7745/kjssf.2012.45.5.683.
- Ryu, K.-S., S.-H. Yoo, and K.-C. Song. 1994. Movement of Applied Nutrients through Soils by Irrigation ; Ⅲ. Effect of Soil Water on the Movement of Nitrogen. *Korean. J. Soil. Sci. Fert.* 27:232-237.
- Shin, Y.H. 2018. Soil moisture simulation considering saturated water flow and irrigation requirement estimation in upland fields. MS Diss., Seoul National Univ.
- Topak, R., S. Suheri, N. Çiftçi, and B. Acar. 2005. Performance evaluation of sprinkler irrigation in a semi-arid area. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 8:97-103.