Evaluation of the Uniformity and Distribution of Water Spray Due to Type of Lay Flat Sprinkler Hose and Pumping Pressure

Sangho Jeon*, Kyunghwa Han, Byungkeun Hyun, Yeonkyu Sonn, Woori Go, and Byunghwan Seo

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

*Corresponding author: jeon45@korea.kr

ABSTRACT

Received: October 23, 2019

Revised: November 19, 2019

Accepted: November 25, 2019

Lay flat sprinkler hoses are widely use in S. Korea due to its reasonable price and flexibility. However, it applies a lot of water for a short time in a field that potentially causing unbalanced irrigation. In addition, there have been not many studies on characteristics such as irrigation uniformity. In this regards, the purpose of this study was to provide fundamental data for the design and operation of lay flat sprinkler by evaluating the irrigation uniformity and the watering pattern according to the change of water pressure. The most important characteristics for the uniformity were a pattern, number, and diameter of the holes on the lay flat sprinkler hoses. The amount of irrigation was different up to 2.3 times under the same (or about same) water pressure. Statistical uniformity (CV) of the sprinkler hose A, B, C showed good to fair, good, and fair respectively. Emission uniformity (EU) of the sprinkler hose A, B, and C classified good, excellent to good, and fair individually. The results of this study would be useful for proper water management by providing fundamental data such as water pressure level, spacing, and water management when installing lay flat sprinkler hoses in crop cultivating sites.

Keywords: Lay flat sprinkler hose, Discharge uniformity, Irrigation uniformity

These figures show perforation pattern and interval on lay flat sprinkler hose. These Patterns, interval, and holes' diameter are critical characteristics for Irrigation uniformity.

Introduction

관수는 토양수분 부족으로 인한 작물의 생산성이 저해되지 않도록 적절한 물을 공급하는 것을 목적으로 한다. 그러므로 가뭄이 심한 지역 및 강수가 차단된 시설재배지에서 관수는 필수적이다. 또한 관수를 하기 위한 관수시스템의 최대 목적은 균일한 관수와 물 이용 효율을 증진시키는 것이다 (Hezarjaribi et al., 2008). 균일하지 않은 관수는 작물의 수량을 감소시키는 주요한 원인 (Wu, 1997; Bhatnagar and Srivastava, 2003)일 뿐만 아니라 토양 수분 변이가 증가하여 작물의 생산성과 토양환경 특성이 불균일해지며, 시비 및 병해충 방제 등에서도 관리의 어려움이 커져 농업인이 작물생산을 위해 투입하는 노동력 또한 증가시킨다 (Choi et al., 2012). 또한 관수시스템을 통해 수용성 비료를 공급 시 양분의 불균형을 초래하게 된다.

관수 시 토양수분 불균형의 원인은 시스템 설계 및 관수방법을 들 수 있다. 관수시스템의 경우 1) 물의 공급량 2) 적절한 관수자재 (펌프, 주관, 지관, 배관형태 등)의 사용 그리고 3) 설치 및 이용방법에 따라 영향을 받는다. 또한 어떤 관수방법을 사용함에 따라 균일도에 큰 차이가 있다. 우선 점적관수는 높은 관수 균일도를 나타내며, 집중적으로 많은 연구가 이루어진 반면 (Wu and Gitlin, 1983; Nam and Kim, 2007; Hezarjaribi et al., 2008; Nam et al., 2012a), 분수호스와 살수관수는 (미니스프링클러) 상대적으로 낮은 관수 균일도를 보이며 몇몇 연구만 이루어 졌다 (Topak et al., 2005; Nam and Kim, 2007; Jeon et al., 2018). 관수방법의 선택은 1) 재배작물 (과채류는 대부분 점적관수 방법 그리고 엽채류는 살수 및 분수호스), 2) 두둑의 폭 및 재식거리, 그리고 3)경제성이 고려된다. 우리나라 시설재배지에서 가장 많이 이용하는 관수방법은 점적관수로 전체 46%를 차지하며 그 뒤를 이어 분수호스, 미니스프링클러가 각각 23%, 19%를 차지한다 (Nam and Kim, 2007; MAFRA, 2017).

분수호수는 주로 엽채류 시설재배지에서 많이 이용하고 있으며 측설분수호스, 저설분수호스, 고설분수호스, 멀칭용관수호스, 수막호스 등으로 분류된다. 분수호스 관수는 경제적이며, 관수폭이 넓고, 여러 작물에 적용가능하며, 짧은 시간에 많은 양의 관수가 이루어지며, 이용형태에 따라 사람과 농기계출입이 자유로움 등 장점이 있지만, 관수 균일도가 낮은 단점도 있다. 국내에는 분수호스에 관한 관수시스템의 구성 및 운영에 관한 기준이나 지침이 설정되지 않아 (NIHHS, 2015) 시설재배 농가의 관수시스템 설계는 자재회사의 사양서나 재배자의 경험에 의존하는 경우가 많다 (Choi et al., 2012). Nam and Kim (2007)에 의해 분수호스의 관수 균일도가 보고된 바가 있으나 분수호스의 분출공 패턴을 고려하지 않고 관수 균일도를 평가하였으며, 아직 분수호스의 살수패턴은 보고된 바 없다.

본 연구는 국내에서 시판되는 분수호스 3종 (A, B, C)에 대해 펌프에서의 거리와 펌프압력에 따른 관수 균일도 및 수압변화에 따른 살수패턴을 평가하여 분수호스를 이용한 관수시스템 설계 및 운영에 필요한 기초자료로 활용하고자 수행하였다.

Materials and Methods

실험 개요 본 연구에서는 분수호스 관수에 따른 물 공급 특성을 평가하기 위해 적용 압력 변화에 따른 관수 균일도 및 분수호스가 설치된 열을 기준으로 좌우로 물이 바닥으로 떨어지는 살수 균일도를 평가하였다.

관수설계에 필요한 관수요소는 FAO (1992)의 소규모 펌핑관수를 참조하였으며, 관수방법은 분수호스 관수시스템을 설계하였다. 본 시험에 이용된 관수시스템 설계는 Jeon et al. (2018)에서 제시된 시스템과 동일하며, 펌프, 배관, 필터 등의 실험에 사용된 구성요소는 Fig. 1에 제시하였다.

Fig. 1. Composition and scene of lay flat sprinkler hose uniformity experiment.

시험에 사용한 분수호스는 국내에서 생산되는 3층을 지면에 설치하여 상향으로 관수하는 저설용이며, 튜브가 접힌 상태에서 직경 6 cm 이었다, 그리고 적용수압은 오직 A 분수호스에서 40 kPa을 제시하였으며, 다른 분수호스는 어떠한 정보도 제공하지 않았다. 분수호스는 연질 플라스틱 튜브에 작은 관수구멍을 뚫어 살수 할 수 있도록 만든 관수 자재이다. 그래서 분출공의 수 및 형태는 분수호스 성능에 결정적인 영향을 미치게 된다. 실험에 이용된 분수호스 A, B, C의 분출공의 형태를 현장 시험에 앞서 평가하였다 (Fig. 2).

Fig. 2. Perforation pattern on each lay flat sprinkler hose.

시험은 단동형 하우스 (6 m × 97 m)에서 세 종류의 (A, B, C) 분수호스를 이용하여 수행하였다. 실험의 측정을 위해 시설 바닥에 비닐하우스용 비닐 (두께 0.1 mm)을 두 겹으로 설치하였으며, 분수호스는 그 위 중앙에 설치하였다. 여과기는 50 mm, 120 mesh 체를 사용하였으며 용수 배관은 40 mm 사용한 펌프는 출력 950 W 온양정 29 m 최대양수량 140 L/hr 등의 특성을 가지고 있다 (Fig. 1). 균일도 시험을 위한 압력 조절은 펌프의 배출구에 우회배관과 밸브를 설치하여 조절하였다. 그러나 펌프의 용량과 각기 다른 특성을 가진 분수호스의 특성으로 인해 분수호스마다 일정한 압력을 적용하는데 어려움이 있었다. 예를 들어 분수호스 A, B에 가할 수 있는 최대 수압은 80 kPa인 반면 C는 63 kPa이다. 그러므로 본 실험에서는 수압에 따른 관수 균일도 평가는 압력조절밸브를 0, 50, 75% 조절 함으로써 수행되었다. 펌프로부터 거리에 따른 분수량을 측정하기 위해 특수 제작된 직경 20 cm의 아크릴통 (Fig. 1e)을 이용하였다. 이 용기는 물이 모이는 집수 파트와 분무되는 물을 막는 커버로 이루어져 있으며, 용기의 위쪽 양쪽 측면과 커버의 아래 양쪽 측면에 위아래 반원으로 홈을 만들어 물의 유실을 최소화 하도록 하였다. 또한 온실 바닥에 집수용기가 들어갈 수 있는 공간을 만들어 분수호스가 집수용기에 의해 위로 올려서 꺾이지 않게 조절하였다. 분수호스 수압의 변화에 따른 살수변경 분석을 위해 분수호스 라인을 기점으로 아크릴통 (10 cm × 10 cm × 10 cm)을 놓고 이에 담기는 물량을 저울로 측정하여 분석하였다 (Fig. 1f).

관수 균일도 평가 방법 관수 균일도를 평가를 위한 지표로는 균등계수 (Coefficient of variation, CV), 유출 균등계수 (Emission uniformity, EU), 이미터 유출 편차계수 (Emitter flow variation, q_{var})로 평가하였다. 통계적 균등계수 (Eq. 1)는 이미터의 유량의 변이정도를 나타내는 계수로서 처음 스프링클러 시스템에 관수균일계수를 도입하였으며, 현재 세계적으로 수분의 분포 균일성을 나타내는 가장 보편적인 기준이다 (Karmeli, 1978; Topak et al., 2005).

$$CV = 100(1 - S_q/\bar{q}) \quad (1)$$

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

유출균등계수는 이미터 유량의 변이도를 의미하고 Keller and Karmeli (1974)에 의해 제안되었으며 Eq. 2으로 나타낼 수 있다.

$$EU = 100(\bar{q}/D_{1q}) \quad (2)$$

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

q_{var} 은 이미터의 최대 유출량과 최소 유출량을 비교함으로써 얻어지고 Wu and Gitlin (1983)가 제안하였으며, Eq. 2으로 나타낼 수 있다.

$$q_{var} = 100(q_{max} - q_{min})/q_{max} \quad (3)$$

여기서, q_{max} 은 최대 유량, q_{min} 은 최소유량이다.

그 동안 적정 관수 균일도 범위와 관련된 많은 제안이 제시되었다 (Hezarjaribi et al., 2008). 예를 들면 ISO의 CV

Table 1. Comparison of assessment standard of uniformity (ASAE, 1996).

Acceptability	Statistical uniformity, CV	Emission uniformity, EU
Excellent	100 - 95	100 - 94
Good	90 - 85	87 - 81
Fair	80 - 75	75 - 68
Poor	70 - 65	62 - 56
Unacceptable	< 60	< 50

(균등계수)에 대한 평가기준은 95% 이상이면 좋음 (Good), 90 - 95%이면 중간 (Medium), 90% 미만이면 불량 (Poor)으로 평가한다. 그러나 본 연구에서는 Table 1에서 제시된 ASAE (미국농공학회)기준을 주로 이용하였으며, 또한 ASAE (1996)기준으로 평지에서 허용되는 범위는 85 - 95%이다.

Results and Discussion

분수호스의 형태 분수호스란 연결호스 표면에 물이 분출될 수 있는 미세한 분출구를 구성하여 펌프에서 물을 압송하면 분출구를 통해 물이 분사되도록 만들어진 호스를 총칭한다. 분수호스의 영문 표기 시 “perforated hoses”로 표기되는 경우가 있으나 perforated hoses는 배수를 목적으로 PVC등에 구멍을 낸 배수관을 칭하며, 분수호스를 호칭하는 영어 표현으로는 lay flat sprinkler hose, ground sprinkler hose, tube sprinkler, rain pipe, micro rain spray hose, rain spray hose 등 다양하게 이용되고 있으며, 본 논문에서는 lay flat sprinkler hose로 호칭하였다. 우리나라에서 분수호스는 접힌 폭이 5 cm, 6 cm, 6.5 cm, 7 cm가 주종을 이루고 있고 본 실험에서는 6 cm 분수호스 3종을 분석하였다. 분수호스 분출구의 형태 및 개수는 관수 시 분수되는 물의 각도, 거리 및 양에 결정적인 영향을 미치는 요소이다. 그렇기 때문에 시험에 앞서 본 실험에서 이용된 A, B, C 분수호스의 분출구의 형태는 Fig. 2와 같았다. 분수호스의 분출구 형태는 1열의 2 - 7개의 구멍이 직선으로 4.9 - 5.6 cm 간격으로 나타나며 A, B 분수호스는 2개, C는 5개의 열이 반복되는 패턴으로 되어있다. 이는 기존에 알려져 있던 1열에 2 - 3개의 분출공과 10 - 20 cm 간격과 다르게 조사되었다 (NIHHS, 2015). 분수호스 1 m 안에 분출공의 수는 A, B, C 각각 56 - 58, 50 - 52, 108개/m로 분수호스 C는 A, B보다 약 2배 많게 조사되었다.

적용 수압에 따른 관수량 변화 Fig. 3은 펌프로부터 거리와 적용수압에 따른 분수호스로부터 분출되는 유량의 변화를 나타내고 있다. 펌프로부터 거리가 멀어질수록 수압이 작아지고 수압이 작을수록 유량이 작아지는 경향을 보였다. 이 관계는 점적관수, 미니스프링클러와 동일한 경향이다. 그러나 펌프로부터 거리에 따른 유량의 감소크기는 다른 관수방법과 비교하여 크게 나타났다 (Nam and Kim, 2007; Nam et al., 2012b; Jeon et al., 2018). 분수호스 거리에 따른 관수량 변화는 일정 길이 안에 분출공의 개수와 분출공의 직경이 결정적인 영향을 미치게 된다. 따라서 분출공 패턴을 고려하지 않으면 유량의 경향을 파악하기 어렵다 (Nam and Kim, 2007). 그렇기 때문에 본 실험에서는 20 cm 길이의 집수용기의 제작과 더불어 거리에 따른 분출수의 포집 시 집수용기에 동일한 패턴이 들어가도록 실험을 설계하였다. 1 m 간격으로 설치된 집수용기에 포집된 최대유량과 최소유량의 차이는 적용압력 20 - 40 kPa에서 A, B, C 분수호스 각각 평균 34, 17, 53% 차이가 나는 것으로 조사되었다 (Table 2). 특히 분수호스 C의 30 kPa 수압조건에

Fig. 3. Discharge variation of lay flat sprinkler hose with different pressures application.

서 초기유량 (20 L/h)과 마지막 유량 (9.5 L/h)로 53%가량 감소하여 펌프에서 가까운 곳과 먼 곳의 물공급량 차이가 큼을 알 수 있었고, 분수호스 B는 동일한 수압조건에서는 가장 작은 차이를 보였다. 이는 분수호스 C가 B보다 두배 많은 분출구를 가지고 있기 때문으로 해석된다. 분출공의 수가 비슷한 A와 B가 유량이 차이가 보이는 것은 거리에 따른 분출되는 물의 양은 분출공의 수뿐만 아니라 패턴간격과 분출공의 직경 등이 영향을 미치기 때문으로 판단된다. NIHHS (2015)에 의하면 분출공의 직경은 0.3 - 1.0 mm로 보고되고 있으며, 본 연구에서는 조사되지 않았다. 95 m의

Table 2. Spray uniformity of lay flat sprinkler hose according to the hydraulic pressure of pump.

Lay flat sprinkler hose - A	Water pressure	40 kPa	60 kPa	80 kPa
	CV	85.7	84.7	83.2
	EU	85.0	86.6	82.6
		34.2	34.6	39.5
Lay flat sprinkler hose - B	Water pressure	30 kPa	60 kPa	80 kPa
	CV	93.7	89.3	87.6
	EU	90.5	89.1	85.7
		17.6	29.4	29.9
Lay flat sprinkler hose - C	Water pressure	30 kPa	50 kPa	63 kPa
	CV	72.1	75.8	72.7
	EU	71.7	74.8	78.4
		53.3	57.0	49.3

분수호스 압력 변화에 따른 물 소비량은 비슷한 압력하에 분수호스 A는 9.3 ton/h (40 kPa), B는 4.3 ton/h (40 kPa), C는 10.2 ton/h (30 kPa)로 분수호스 B가 약 1/2가량 적게 조사되었다 (Table 3). 이 결과는 예를 들어 2열 분수호스가 넓이 6 m, 길이 100 m 단동하우스에 설치되었다고 가정 시, NAS (2018)의해 제시된 수박 G2 시기 추천 관수량은 12 mm이다. 제시된 양의 물을 관수하기 위하여 관수효율은 고려하지 않고 A, B, C 각각 23, 50, 21 분 관수를 하여야 하며, 관수 시간은 B와 C는 2.3배 차이가 나게 된다. 이러한 정보는 분수호스 이용 시 반드시 알아야만 하는 기본적인 정보임에도 불구하고 제조회사를 비롯한 어떠한 곳에서도 제공되고 있지 않다. 그렇기 때문에 분수호스 이용자 (농업인)는 경험에 의해 관수시간을 조절하는 것이 현실이다. 이러한 문제로 토양에서 수분의 이동과 분포하는 양상이 다르게 되어 작물의 생산성에 영향을 주게 된다 (Ryu et al., 1994; Park et al., 2012). 또한 같은 업체류에 이용되는 스프링클러와 비교하여도 (단동형하우스에 분수호스 2줄과 미니스프링클러를 2 m간격으로 1줄 설치를 가정함) 분수호스가 미니스프링클러 보다 시간당 유량이 2 - 8배 많게 나타났다 (Jeon et al., 2018).

적용 수압에 따른 관수 균일도 Table 2는 분수호스 A, B, C 관수 균일도를 표시하였다. 수압이 높을수록 대체로 낮은 관수 균일도를 나타내었다. 통계적 균등계수 (CV) 평가기준에 의한 분수호스 A는 양호 ~ 보통, B는 양호, C는 보통 ~ 불량 등급으로 조사되었다. 유출균등계수 (EU) 기준에 의해 분수호스 A는 양호, B는 매우양호 ~ 양호, C는 보통으로 분류된다. 본 시험에서는 분수호스 B가 가장 양호한 관수 균일도를 보였다 (Table 2). 그러나 다른 관수시스템 (점적, 미니스프링클러)의 국내 관수 균일도 선행연구와 비교해서 분수호스의 관수 균일도가 낮게 조사되었다 (Nam and Kim, 2007; Nam et al., 2012b; Jeon et al., 2018).

평지에서 허용되는 관수시스템의 관수 균일도 범위는 85 - 95%이다 (ASAE, 1996). 분수호스 C는 기준을 만족하지 못하고, A는 일부 압력 조건에서 가능하다. 이러한 결과는 분수호스 제작과 판매에 어떠한 규정이 존재하지 않음을 지적할 수 있다.

적용 수압에 따른 살수양상 Fig. 4는 분수호스에 수압에 따른 분수호스를 기준으로 한쪽 방향으로 살수되는 바닥에 떨어지는 물을 10 cm 간격으로 포집하여 표시하였다. 살수되는 거리는 각 적용된 최대압력에서 분수호스 A,

B는 3 m, C는 2 m로 조사되었고, 이는 살수반경이 약 5 m인 미니스프링클러의 반 정도로 조사되었다 (Jeon et al., 2018). 회전체가 회전하며 물 입자를 만드는 미니스프링클러와 다르게 분수호스는 분출구에서 물이 선형 형태로 분수되며 적용된 수압에 따라 거리가 결정되었다. 또한 분수호스 종류에 따른 수압별 분수호스의 살수형태가 비정형으로 나타났다. 분수호스 A는 두 개의 피크를 보였으며, A는 분수호스에 가까운 쪽, B는 먼 쪽에서 더 많은 물이 살수되는 경향을 보였다.

Fig. 4. Spray distribution according to the hydraulic pressure of lay flat sprinkler hose.

Table 3. Water consumption by different water pressure application with 95 m of the lay flat sprinkler hose.

Lay flat sprinkler hose - A	Water pressure	15 kPa	30 kPa	40 kPa
	Water amount (ton/h)	6.0	8.1	9.3
Lay flat sprinkler hose - B	Water pressure	40 kPa	60 kPa	80 kPa
	Water amount (ton/h)	4.3	6.7	7.9
Lay flat sprinkler hose - C	Water pressure	15 kPa	25 kPa	30 kPa
	Water amount (ton/h)	6.3	7.8	10.2

Conclusions

본 연구는 국내에서 시판되는 분수호스에 대해 관수 균일도 및 수압변화에 따른 살수패턴을 평가함으로써 관수시스템 설계 및 운영에 필요한 기초자료를 제공하고자 수행되었다. 분수호스의 분출공의 패턴, 수, 직경은 분수호스의 관수 특성 및 균일도에 영향을 미친다. 같은 폭 (6 cm)의 분수호스임에도 불구하고 관수되는 양은 2.3배까지 차이를 보였으며, 분수호스의 관수 균일도는 분수호스 B > 분수호스 A > 분수호스 C 순으로 조사되었고, 관수 균일도 등급의 경우 매우양호 ~ 불량으로 종류와 적용 압력에 따라 결과가 차이를 보였다. 결론적으로 분수호스 C 그리고 A는 일부 조건에서 ASAE기준을 만족하지 못한다. 관수 균일도가 높지 않은 관수자재의 이용은 작물의 수량감소 및 노동력 증가의 원인이 된다. 그러므로 분수호스의 판매 및 설치와 관련된 규정 및 지침이 요구되며, 시중에 판매되는 분수호스의 성능을 평가하여 구매자에게 알려줌으로써 분수호스를 선택할 시 참고할 수 있는 정보를 제공하여야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 조사된 결과는 시설재배지에서 분수호스 설치 시 수압, 설치간격, 수분관리에 필요한 기초자료를 제공함으로써 농가의 적절한 물관리에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- ASAE, E.P. 1996. 458. Field evaluation of microirrigation systems. ASAE Standards. St. Joseph:792-797.
- Bhatnagar, P. and R. Srivastava. 2003. Gravity-fed drip irrigation system for hilly terraces of the northwest Himalayas. *Irrigation science*. 21(4):151-157.
- Choi, S.K., J.Y. Choi, W.H. Nam, S.O. Hur, H.J. Kim, S.O. Chung, and K.H. Han. 2012. Uniformity assessment of soil moisture redistribution for drip irrigation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(3):19-28.
- Christiansen, J.E. 1942. *Irrigation by sprinkling*. USDA.
- FAO. 1992. *Small-scale pumped irrigation: Energy and cost* – FAO.
- Hezarjaribi, A., A.A. Dehghani, M. Meftah Helghi, and A. Kiani. 2008. Hydraulic performances of various trickle irrigation emitters. *J. Agron*. 7(3):265-271.
- Jeon, S., S. Hwang, Y. Sonn, B. Hyun, W. Go, S. Yun, and K. Han. 2018. Micro-sprinkler irrigation uniformity as affected by different water pressure and outlet intervals. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 51(4), 666-676.
- Karmeli, D. 1978. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. *Transactions of the ASAE*. 21(4):682-0686.
- Keller, J. and D. Karmeli. 1974. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE* 17(4):678-0684.
- MAFRA. 2017. *Greenhouse Status and Production of Vegetables in 2017 (2017 시설채소 온실현황 및 채소류 생산*

- 실적), Hanlla Publisher.
- 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., 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(4):29-38.
- NAS. 2018. The technology of irrigation schedule according to soil, crops, and regions (토양, 작물, 지역에 따른 밭작물 물 사용기술).
- NIHHS. 2015. Guidelines for irrigation components and technology of on-site soil analysis (시설채소 관수호스 사용 및 토양 현장진단 기술).
- 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. 45(5):683-689.
- 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(3):232-237.
- Topak, R., S. Suheri, N. Ciftci, and B. Acar. 2005. Performance evaluation of sprinkler irrigation in a semi-arid area. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 8(1):97-103.
- Wu, I.-P. 1997. An assessment of hydraulic design of micro-irrigation systems. *Agricultural Water Management*. 32(3):275-284.
- Wu, I.-P. and H.M. Gitlin. 1983. Drip irrigation application efficiency and schedules. *Transactions of the ASAE*. 26(1):92-0099.