ISSN 0367-6315 (Print) / ISSN 2288-2162 (Online)
Korean J. Soil Sci. Fert. 48(1), 50-56 (2015)
http://dx.doi.org/10.7745/KJSSF.2015.48.1.050

Article

Responses of *Lactuca Sativa* (Lettuce) to Fertilization Rates at Various Soil Moisture Conditions at Protected Cultivation

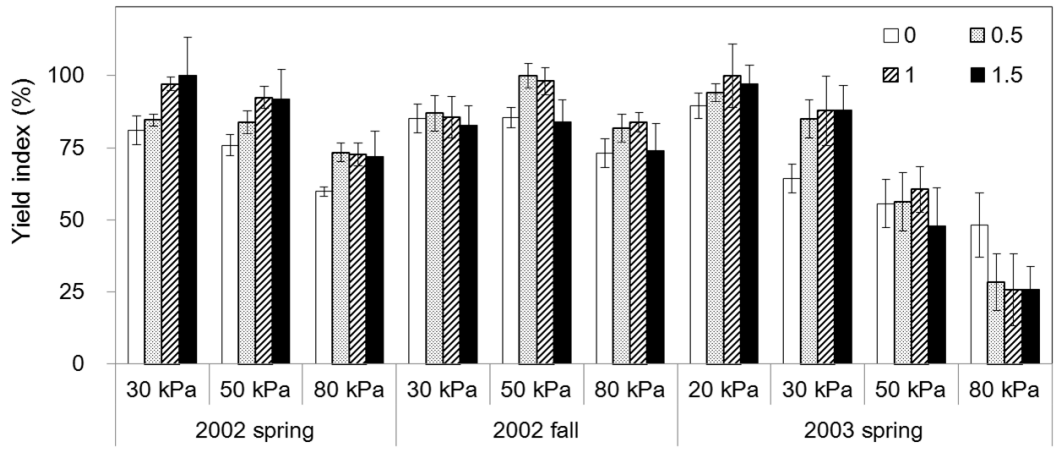
Kang-Ho Jung, Yeon-kyu Sonn*, Kyoung-hwa Han, and Yong-seon Zhang

Soil and Fertilizer Division, National Academy of Agricultural Science, Wanju, Rep. of Korea

(Received: November 18 2014, Revised: February 16 2015, Accepted: February 17 2015)

This research was performed to test the hypothesis that the optimal fertilization rate for lettuce is various with soil moisture conditions. The experiment was conducted under a rainfall-intercepted facility in Suwon, South Korea from 2002 to 2003. Soil was irrigated at 30, 50, or 80 kPa of soil moisture tension at 15 cm soil depth in 2002 spring and fall and 20, 30, 50, or 80 kPa in 2003 spring. Fertilization was performed with four levels in spring for both years: none, 0.5, 1.0, and 1.5 times of the recommended N, P, and K fertilization rate. The irrigation amount increased with decreased irrigation starting point as soil moisture tension. The maximum yield was found at the lowest soil moisture tension in spring while irrigation at 50 kPa resulted in the greatest yield in fall. The yield responses of lettuce to fertilization rates were various with soil moisture condition. In spring, maximum yield was found at 1.0 or 1.5 times of the recommended fertilization rate at 20, 30, and 50 kPa irrigation while 0.5 or 1.0 times of fertilization rate resulted in the maximum yield in fall. Especially for 80 kPa irrigation in 2003 spring, yield was decreased by fertilization. It suggested that the optimum fertilization rate for lettuce is affected by soil moisture condition and that lower fertilization rate should be suggested when soil is managed in drier condition.

Key words: Lettuce, Soil moisture, Fertilization, Irrigation



Yield responses of lettuce to the ratio of a fertilization rate to the recommended fertilization rate at different soil moisture conditions.

*Corresponding author : Phone: +82632382425, Fax: +82632383822, E-mail: sonnyk@korea.kr
§Acknowledgement: This research was supported by Rural Development Administration (PJ010899).

Introduction

토양 수분 조건은 식물체의 생장과 밀접한 관계가 있으며 대부분의 작물은 수분이 부족할 때 생장량 또는 수량이 급격히 감소한다 (Steduto et al., 2012). 따라서 식물체의 생장량과 수량에 따라 좌우되는 양분 흡수량은 수분이 적정한 조건과 건조한 조건에서 다를 수 있다 (Eom et al., 1983; Kreuzwieser and Gessler, 2010). 토양 수분 조건의 관리를 위해 활용되는 대표적인 지표가 토양 수분 장력이며, 이는 식물 뿌리가 토양 매질로부터 물을 흡수하는데 필요한 힘을 나타낸다. 개념적으로 토양 수분 장력은 매트릭 퍼텐셜과 삼투 퍼텐셜의 합의 절대값을 의미하나 건조하지 않은 비염류 토양에서는 삼투 퍼텐셜의 영향이 작기 때문에 보편적으로 매트릭 퍼텐셜의 절대치가 토양수분 장력으로 활용된다 (Shock and Wang, 2011).

관개일정을 관리하는 방법은 다양하나 일반적인 방법은 특정 깊이의 특정 토양수분 장력을 관개시점으로 설정하고 토양수분 조건이 관개시점에 도달하였을 때 토양이 보유할 수 있는 물의 양을 공급하는 것이다 (Cary, 1981). 상추는 천근성 식물로 연구에 따라 다소 편차가 있으나 20-60 kPa에서 물을 공급할 때 최적의 생산이 가능하다고 알려져 있다. 20 kPa (Sammis, 1980), 30 kPa 또는 33 kPa (Aggelides et al., 1999; Sutton and Merit, 1993), 33-50 kPa (Eom et al., 1994), 40-60 kPa (March, 1961; Taylor, 1972). 따라서 이보다 건조하게 토양을 관리할 경우 수량이 감소한다. 예를 들어, 100 kPa 관개시 수량은 20-30% 감소할 수 있으며 (Aggelides et al., 1999; Eom et al., 1994), 300 kPa 관개시 수량이 50%까지 감소할 수 있다. 이와 같은 수량의 감소는 양분 흡수량의 감소를 동반하며 이 때 잉여로 공급된 양분은 토양 용액의 삼투 퍼텐셜을 낮추어 수분 스트레스가 증가한다 (Atwell et al., 1999).

우리나라의 강우량은 연간 1300 mm에 이르지만 여름철 강우가 집중되어 엽채류의 주재배기간인 봄, 가을에는 한발이 빈번하다. 더욱이 한발 피해는 세계적인 기후변화와 함께 증가하는 추세이다 (Lee and Kim, 2011). 2012년 중부지방에 발생한 봄 가뭄의 경우 1908년 기상관측 이래 104년만의 최대 가뭄으로 5월 1일 이후 60일간 강우량이 83 mm로 평년 강수량의 31%에 불과하였다. 현재 우리나라 농작물의 추천 시비량은 토양의 양분 함량을 검정하여 이를 기준으로 평가하고 있으며 토양의 수분 조건은 고려하고 있지 않다 (RDA, 2014). 적습한 조건에서 식물 생육을 지원하는 양분 관리 방안은 토양 수분이 부족한 조건에서는 잉여의 양분을 공급하게 되며 잉여의 양분은 토양의 삼투퍼텐셜을 낮추어 수분 스트레스의 증가를 유발할 수 있다 (Jung et al., 2014). 따라서 본 연구에서는 '토양 수분 조건에 따라 시비량에 따른 상추의 생육반응이 달라진다'는 가설을 검정하고자 하였으며, 이를 근거로 적습 상태를 유지하기 어려운 물 부족 조건에서 상추의 적정 양분 관리방안을 도출하고자 하였다.

Materials and Methods

시험토양 및 포장조건 본 연구는 경기도 수원 소재 국립농업과학원 구내 포장에서 2002년과 2003년에 수행하였으며 공시토양은 본량통이었다. 시험전 토양의 특성은 유기물 함량이 적고 교환성 양이온의 농도가 낮아 비교적 비옥도가 불량한 토양이었으며, 특히 교환성 마그네슘과 칼륨의 함량이 상추의 적정범위인 마그네슘 2.0~2.5 $cmol_c\ kg^{-1}$, 칼륨 0.40~0.60 $cmol_c\ kg^{-1}$ 보다 낮았다 (Table 1) (RDA, 2014). 토성은 사양토였으며 포장용수량과 유효수분함량은 중량수분함량 기준 16.8%, 11.3%로 보수력이 약한 토양이었다. 인위적으로 토양수분 조건을 조절하기 위하여 비가림 시설에서 시험을 수행하였다.

재료 및 처리 토양수분 조건은 토심 15 cm를 기준하여 특정 토양수분 장력이 되면 관개하는 방식으로 조절하였다. 생육 초기 30 kPa 관개로 관리한 후 정식 후 15일 후부터 2002년 30, 50, 80 kPa의 3수준으로 관개방법을 처리하였으며 2003년에는 20 kPa 관개를 추가하였다. 관개량은 20, 30, 50 kPa의 경우 15 cm에서 관개 후 토양 수분이 10 kPa이 되는 것을 목표로 하여 설정하였으며, 80 kPa에서는 포장 용수량을 목표로 하여 설정하였다 (Fig. 1). 관개는 점적관개를 이용하였다. 시비수준은 2002년과 2003년 모두 질소, 인산, 칼리를 대상으로 검정시비량의 0, 0.5, 1, 1.5배를 처리하였다. 검정시비량은 질소 151 kg ha^{-1}, 인산 128 kg ha^{-1}, 칼리 239 kg ha^{-1}이었다. 유기물 함량이 20 g kg^{-1} 이하이므로 퇴비는 볏짚퇴비로 매년 20 Mg ha^{-1}를 투입하였다. 비종은 질소, 인산, 칼리를 대상으로 요소, 용과린, 염화칼륨을 선택하였으며, 밑거름과 웃거름의 비율은 작물별 시비처방 기준에 준하였다 (RDA, 2014). 시험구는 토양 수

Table 1. Physicochemical properties of studied soil.

pH	EC	Organic matter	Av.P_2O_5	Exchangeable cation				Texture (USDA)	Soil moisture characteristics				
				Ca	Mg	K	Na		10 kPa	30 kPa	50 kPa	100 kPa	1500 kPa
	dS m^{-1}	g kg^{-1}	mg kg^{-1}	---------- $cmol_c\ kg^{-1}$ ----------					---------- w/w, % ----------				
6.5	0.24	7.8	361	3.52	0.73	0.21	0.06	SL	23.2	16.8	13.8	9.9	8.8

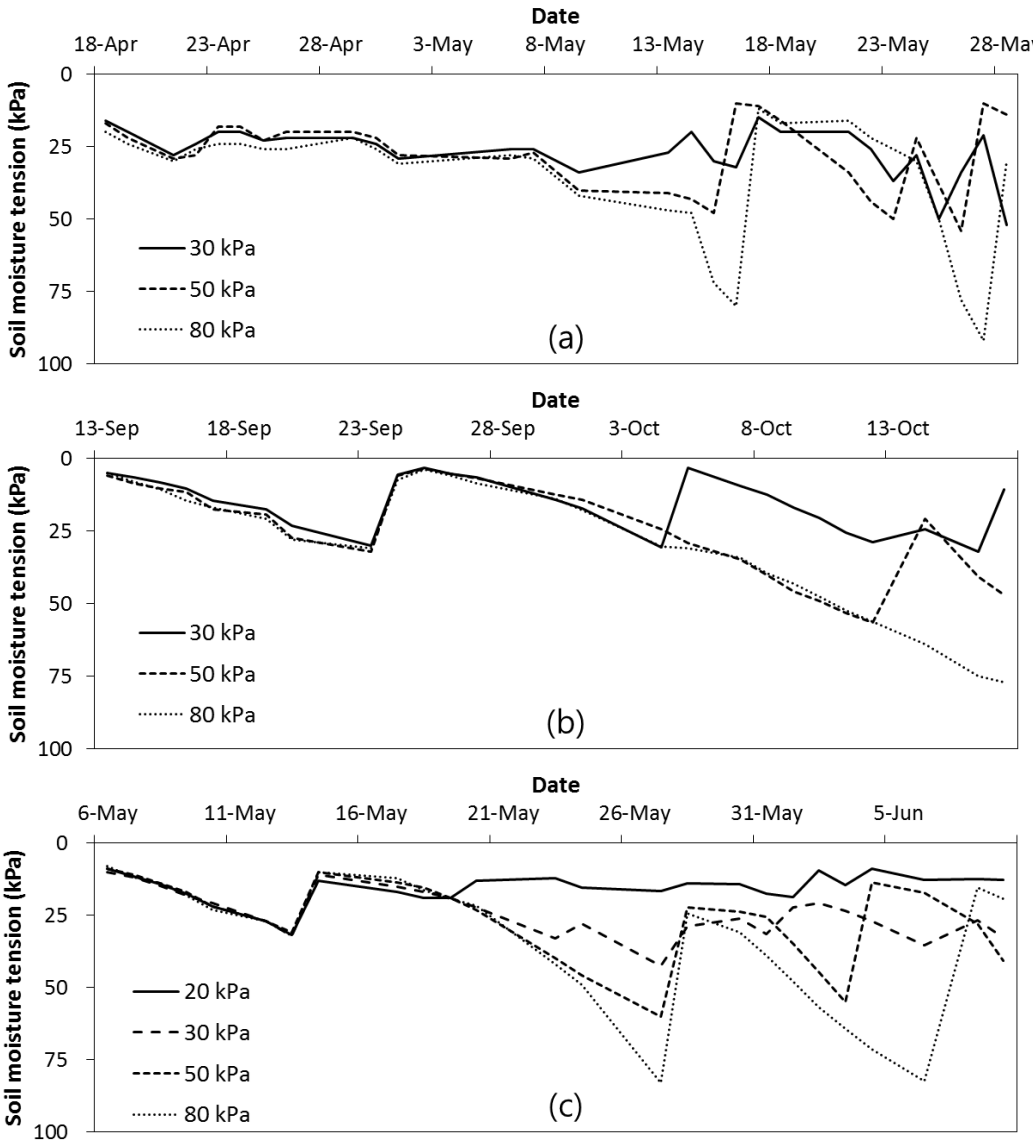


Fig. 1. Changes in soil moisture tension with irrigation methods in Suwon in 2002 spring (a), 2002 fall (b) and in 2003 spring (c). Water was added when soil moisture tension reached at proposed values of soil moisture tension.

분 처리구를 주구로 시비처리구를 세구로 배치하였다. 토양 수분 처리구는 2반복이었으며, 시비처리구는 4반복을 두었다. 2002년 봄 재배는 4월 17일 정식하여 5월 29일 수확하였고, 2002년 가을 재배는 9월 13일 정식하여 10월 17일 수확하였으며, 2003년 봄 재배는 5월 6일 정식하여 6월 10일 수확하였다.

토양 및 식물체 분석 토양 수분 장력은 2002년은 토양 수분 장력계 (Tensiometer, Soil moisture, USA)를 15 cm 깊이에 매설하여 측정하였다. 관개량은 수도용 유량계를 이용하여 측정하였다. 수량지수는 30 kPa 관개, 검정시비구를 기준하여 계산하였다. 관개량에 대한 수량의 비율로 수량대비 물이용 효율을 계산하였으며 관개량에 대한 지상부 건중량의 비율로 건중대비 물이용 효율을 산정하였다. 상추의 수분민감도는 아래의 식으로 계산하였다 (Steduto et al., 2012).

위의 식에서 Y_a와 ET_a는 실제 조건에서의 수량과 증발산량이며, Y_m과 ET_m은 최대 수량과 그 때의 증발산량이다. 작물의 증발산량은 비닐 멀칭시 점적관개의 관개효율을 100%로 가정하고 관개량으로 대체하였다.

토양 및 식물체 특성의 분석은 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하였다. 토성은 비중계법으로 분석하였으며, 토양 수분 특성은 압력챔버 (Soil Moisture, USA)를 이용하여 분석하였다. pH는 토양과 증류수를 1:5(v:v)로 하여 초자전극법으로 분석하였고 유기물 함량은 Walkey-Black법으로, 교환성 Ca, Mg, K, Na는 1N-NH_4OAc (pH 7.0) 용액으로 침출하여 유도결합플라즈마분광계 (ICP) (CINTRA6, GBC, AU)로 분석하였다. 식물체는 줄기, 잎, 과실로 나누어 생중량과 건중량을 측정하였으며, 황산으로 습식 분해 후 질소는 켈달법, 인은 분광광도계 (U-3000, Hitachi, JP), 칼륨의 함량은 ICP로 분석하였다.

통계분석 토양수분 조건과 시비수준의 식물 생육과 수량에 대한 영향은 분산분석 (ANOVA)을 통해 검정하였다. 모든 처리간 비교 (pair-wise comparison)은 Bonferroni 보정을 이용하였다. 수량에 대한 관개량의 영향은 비선형 회귀분석을 통해 분석하였다. 유의성은 α=0.05를 기준으로 검정하였으며 통계프로그램은 SAS 9.2 (SAS Institute, US)를 이용하였다.

Results

검정시비 조건에서 관개 처리에 따른 상추의 생육반응 검정시비를 한 조건에서 관개량은 토양 수분 장력을 낮게 관리할 수록 증가하였다 (Table 2). 검정시비 조건에서 관개시점에 따른 수량의 변화는 봄 재배와 가을 재배가 상이하였다. 봄 재배시 토양수분 장력을 낮게 관리할 수록 수량이 증가하였으나 가을 재배시 50 kPa 관개에서 가장 높은 수량을 기록하였다. 지상부 건중량은 2002년 봄 재배시 30 kPa에서 유의하게 높았으나 ($p<0.05$), 2002년 가을 및 2003년 봄 재배시 20~50 kPa 관개구 간에 지상부 건중량에 대한 유의한 차이는 발견되지 않았으며, 2003년 봄 재배시 80 kPa 관개구에서 유의하게 낮은 건중량을 기록하였다 ($p<0.01$). 수량대비 물이용 효율 역시 봄 재배와 가을 재배가 상이한 결과를 나타내었다. 봄 재배시 수분 장력을 낮게 관리할수록 수량대비 물이용 효율이 높았으나 가을 재배시 수분 장력을 높게 관리할수록 수량대비 물이용 효율이 증가하였다. 상추의 수량은 관개량 감소에 따라 감소하였다 (Fig.

Table 2. Irrigation amount and water use efficiency of lettuce with irrigation methods in Suwon in 2002 and 2003. Nutrient was supplied with the recommended fertilization rate.

Season	[1]Soil moisture tension	Irrigation amount	Yield[2]	Dry weight	[3]Yield Water use efficiency	[4]Biomass Water use efficiency
	kPa	mm	Mg ha^{-1}	Mg ha^{-1}	g kg^{-1}	g kg^{-1}
2002 spring	30	120a	46.5a	2.9a	38.9a	2.5a
	50	116a	44.3a	2.4b	38.2ab	2.7a
	80	95b	34.8b	2.2b	36.7b	1.8b
2002 fall	30	110a	60.3b	3.8a	54.8c	2.0a
	50	93.5b	69.2a	3.8a	74.0b	2.1a
	80	67.3c	59.1b	3.7a	87.8a	2.0a
2003 spring	20	118a	30.0a	1.4a	25.4a	1.9b
	30	109b	26.3b	1.5a	24.2a	2.1ab
	50	95c	18.2c	1.2ab	19.2b	2.3ab
	80	45d	7.7d	0.8b	17.3b	2.4a

[1]Irrigation was applied at proposed soil moisture tension.
[2]Plant density was 11,111 ha^{-1}.
[3&4]Yield water use efficiency and biomass water use efficiency mean water use efficiency based on fresh yield and dry weight of lettuce, respectively. Lowercase letters indicate statistical differences.

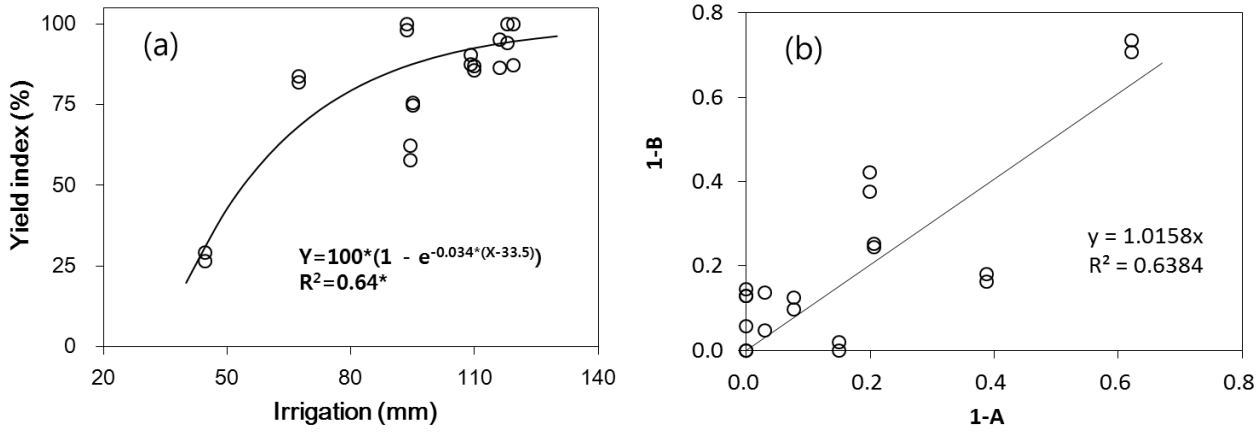


Fig. 2. Yield responses of lettuce to irrigation amount (a) and soil water deficit (b). A is a ratio of actual evapotranspiration to maximum evapotranspiration and B is a ratio of actual yield to maximum yield.

2(a)). 관개량을 이용한 수량지수 회귀식에 따르면 81 mm 이상의 물을 소모할 수 있을 때 최대수량의 80% 이상의 수확이 가능하며, 최대수량의 50% 이상을 수확하기 위해서는 54 mm 이상의 물이 필요한 것으로 나타났다. 상추의 수분부족에 대한 민감도는 1.02였다 (Fig. 2(b)).

토양수분 조건별 시비수준에 따른 생육반응 상추 재배시 최대 수량을 유도한 시비 수준은 재배시기와 관개방법에 따라 상이하게 나타났다 (Fig. 3). 봄 재배시 20, 30 kPa 관개시 검정시비의 1배구 또는 1.5배구의 수량이 최대수량이었으며, 1배구와 1.5배구 수량간의 유의차는 없었다. 봄 재배시 50 kPa 관개구의 시비수준에 따른 수량 변화는 2002년 30 kPa 관개구와 유사하였으나, 2003년의 경우 1.5배구의 수량이 크게 감소하였다. 봄 재배시 80 kPa 관개구에서는 2002년 검정시비 0.5배구, 2003년 무비구의 수량이 가장 높았으며, 2003년 봄 재배 80 kPa 관개시 검정시비구의 수량은 무비구 수량의 53%에 불과하였다. 가을 재배시 30 kPa 관개구는 시비처리간 유의한 차이가 없었으며, 50, 80 kPa 관개구에서는 검정시비 및 검정시비의 0.5배구의 수량이 무비구와 검정시비의 1.5배구에 비해 유의하게 높았다 ($p<0.05$).

상추의 질소 농도는 시비수준에 영향을 받았으나 ($p<0.01$) 인과 칼륨의 농도는 시비수준에 따른 유의한 영향이 없었다 (Table 3). 질소, 인, 칼륨 모두 관개처리간 유의한 차이는 없었다. 질소 농도는 봄 재배시 14.9 g kg^{-1}에서 26.2 g kg^{-1}에 분포한 반면 가을 재배시 24.3 g kg^{-1}에서 33.6 g kg^{-1}으

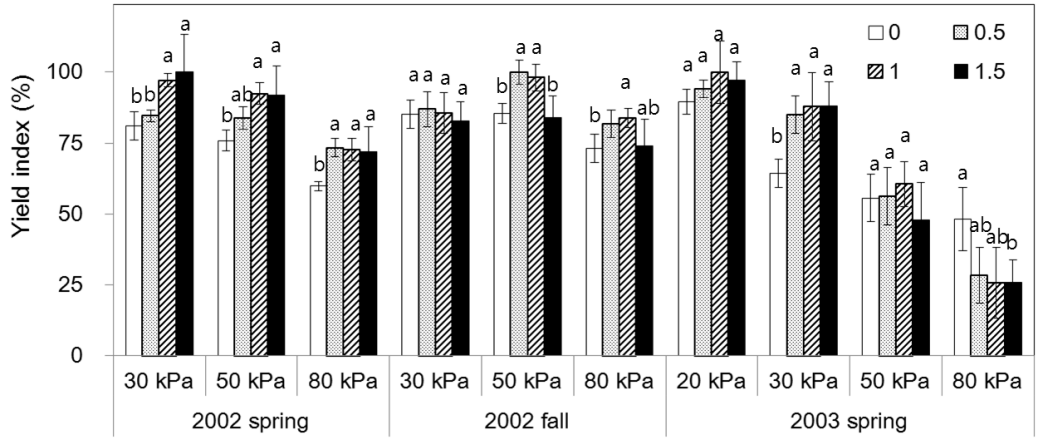


Fig. 3. Yield of lettuce responding to fertilization rate at different soil moisture condition in 2002 spring (a), 2002 fall (b), and 2003 (b). Soil moisture condition was controlled to irrigate at the proposed soil moisture tension and fertilization was performed with 0, 0.5, 1, and 1.5 times of the recommended fertilization rate based on soil testing data.

Table 3. Nitrogen (N), phosphor (P), and potassium (K) concentration of lettuce responding to fertilization rate and irrigation in Suwon in 2002 and 2003.

Year	Season	Irrigation	N				P				K			
			[1]Fertilization treatment				Fertilization treatment				Fertilization treatment			
			0	0.5	1	1.5	0	0.5	1	1.5	0	0.5	1	1.5
		kPa	---------- g kg^{-1} ----------				---------- g kg^{-1} ----------				---------- g kg^{-1} ----------			
2002	Spring	30	14.9c	18.9b	19.3b	26.2a	0.44a	0.44a	0.41a	0.32b	1.83b	1.79b	1.80b	2.84a
		50	18.3b	20.1ab	21.6a	21.8a	0.42a	0.42a	0.43a	0.41a	2.19b	2.45b	2.86a	2.75a
		80	15.9c	22.1b	25.9ab	27.2a	0.34a	0.36a	0.35a	0.32a	2.09b	1.81c	1.86c	2.49a
2002	Fall	30	28.6b	29.3b	28.7b	33.6a	0.77b	0.91a	0.64b	0.69b	2.31b	2.77a	2.21b	2.29b
		50	32.7a	24.3b	32.1a	30.1a	0.77b	1.15a	1.09a	1.02a	2.86a	2.89a	2.67a	2.84a
		80	27.1b	30.1a	30.3a	31.9a	0.88ab	0.98a	0.79b	0.72b	2.14b	2.43a	2.01b	2.32a
2003	Spring	20	15.2b	16.2ab	17.0a	17.2a	0.56b	0.71a	0.52b	0.53b	4.40a	4.44a	3.78b	2.10c
		30	15.9a	14.8a	15.5a	14.7a	0.53a	0.52a	0.50a	0.55a	3.43a	3.09ab	2.87b	3.21a
		50	14.6ab	14.9ab	16.7a	13.2b	0.35b	0.51a	0.47a	0.41ab	3.00a	3.15a	3.31a	3.37a
		80	15.6ab	14.5b	14.8b	16.7a	0.48a	0.45a	0.46a	0.48a	3.59a	3.32ab	3.06b	3.41ab

[1]Fertilization treatment indicates the ratio of the fertilization rate in each treatment to the recommended fertilization rate of the studied site. Lowercase letters indicate statistical differences.

로 가을 재배에서 농도가 높았으며 ($p<0.05$), 인 농도 역시 봄 재배시 0.32 g kg^{-1}에서 0.71 g kg^{-1}에 분포한 반면 가을 재배시 0.64 g kg^{-1}에서 1.15 g kg^{-1}로 가을 재배에서 농도가 높았다 ($p<0.001$). 칼륨 농도는 1.79 g kg^{-1}에서 4.44 g kg^{-1}에 분포하였으며, 재배 시기에 따른 유의한 경향은 나타나지 않았다.

Discussion

작형별 관개시점 본 연구의 결과 상추의 적정 관개시점은 봄과 가을이 상이하게 나타났다. 검정시비를 통해 적절하게 양분이 관리된 조건에서 수량을 기준한 상추의 봄 재배 적정 관개시점은 20 kPa이었으며, 가을 재배의 적정 관개시점은 50 kPa이었다 (Table 2). 상추는 천근성 엽채류로 관개요구량이 많다고 알려져 있으나 기후, 지역에 따라 적정 관개시점은 20–60 kPa로 다양하게 보고되어 왔다 (Aggelides et al., 1999; Eom et al., 1994; Sutton and Merit, 1993). 낮은 토양 수분 장력에서 관개를 하면 식물체가 수분을 흡수하는 데 적은 에너지가 소비되는 반면 기상률이 낮아지기 때문에 산소의 공급속도가 떨어져 뿌리의 활력이 저해될 수 있다 (Atwell et al., 1999; Lower and Orians, 2002). 반면 높은 토양 수분 장력에서 관개를 하면 토양 수분을 흡수하는 데 많은 에너지가 필요하므로 생육이 약화된다. 봄 재배와 가을 재배의 가장 큰 차이는 생육단계에 따른 일사량의 변화이다. 북반구에서 일사량은 하지 (6월 22일)에 최대량을 기록하며 동지 (12월 22일)에 최소량을 기록한다. 수원지역의 소형 증발량계 기준 30년 평균 월평균 일증발량은 4월 3.9 mm, 5월 4.5 mm, 6월 4.7 mm, 7월 3.9 mm, 8월 4.1 mm, 9월 3.5 mm, 10월 2.8 mm이다 (KMA, 2014). 증발량계로 측정한 증발량은 기준 증발산량과 고도의 상관관계를 나타내므로 봄철인 4월과 5월에 가을철인 9월과 10월에 비해 기준 증발산량이 30% 가량 많을 수 있다. 식물의 최대 증발산량은 기준 증발산량에 비례한다고 가정할 때 (Allen et al., 1998), 봄 재배시 물 요구량은 가을 재배시 물 요구량보다 30% 가량 많으므로 봄 재배는 산소의 공급속도가 다소 떨어지더라도 낮은 토양 수분 장력에서 관개하는 것이 유리할 수 있다. 반면, 가을 재배는 물 요구량이 적기 때문에 과다 관개시 산소 공급의 부족, 병 발생 위험 증가 등으로 수량이 떨어질 수 있다.

토양 수분 조건과 양분 관리 본 연구결과 상추의 수분부족 민감도는 1.02로 같은 지역에서 연구한 고추 (수분부족 민감도 0.61)보다 수분부족에 민감하였다 (Jung et al., 2014). 수분 부족에 민감하다는 것은 수분 퍼텐셜이 낮을 때 쉽게 한발 피해를 입을 수 있다는 것을 내포한다. 토양 내의 수분 퍼텐셜은 크게 매트릭 퍼텐셜, 삼투 퍼텐셜, 중력 퍼텐셜로 구성되나 뿌리와 토양 용액은 같은 높이에 위치하므로 식물체의 입장에서 실제로 작용하는 것은 매트릭 퍼텐셜과 삼투 퍼텐셜이다 (Hillel, 1998). 본 연구에서 가을 재배시 50 또는 80 kPa에서 검정시비보다 양분을 과다하게 공급한 경우 상추의 수량이 감소하였으며, 2003년 봄 재배의 경우 80 kPa 관개시 시비구는 모두 무비구에 비해 수량이 감소하였다 (Fig. 3). 양분이 토양에서 뿌리로 이동하는 주요 경로는 질량 이동이며, 이때 대개의 양분은 물에 용해된 용질의 형태이다 (Atwell et al., 1999). 토양용액에 전해질이 증가하면 삼투 퍼텐셜이 하락하는데 이는 식물체가 물을 흡수하기 위해 보다 많은 에너지를 소비해야 함을 함축한다. 식물체의 증산이 활발할 경우에는 토양 수분이 뿌리털의 투수성 세포벽을 통해 들어온 후 세포간극을 통해 이동하는 것이 주경로이므로 삼투 퍼텐셜의 영향이 상대적으로 작으나 기준 증발산량이 적거나 토양 수분 장력이 높을 때는 삼투 퍼텐셜이 뿌리가 수분을 흡수하는 주요 구동력이기 때문에 삼투 퍼텐셜에 의한 수분 스트레스가 클 수 있다 (Atwell et al., 1999). 이는 남사면에 위치한 사질 토양과 같이 쉽게 건조해 지는 농경지에서 과다시비를 할 경우 한발시 피해가 악화될 것을 의미한다. 따라서 수분부족에 민감한 상추와 같은 작물은 과다시비를 하지 않도록 유의하여야 하며, 토양 수분 부족이 우려되는 농경지 또는 한발이 진행되는 기상 조건에서는 시비량을 감축할 필요가 있다.

References

Aggelides, S., I. Assimakopoulos, P. Kerkides, and A. Skondras. 1999. Effects of soil water potential on the nitrate content and the yield of lettuce. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 30: 235-243.

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56: Crop evapotranspiration. FAO, Rome, Italy.

Atwell, B.J., P.E. Kriedeman, and C.G.N. Turnbull. 1999. Plants in action. Macmillan Education Australia Pty Ltd, Melbourne, Australia.

Cary, J.W. 1981. Projecting irrigation with soil instruments: Error levels and microprocessing design criteria, p.81-91. In: Irrigation scheduling for water and energy conservation in the 80's. American Society of Agricultural Engineers. Madison, WI, U.S.

Eom, K.C., E.U. Son, and S.H. Yoo. 1983. Fertilizer responses of Chinese cabbage to soil water potential. J. Kor. Soc. Soil Sci. Fer. 16:98-105.

Eom, K.C., K.C. Song, and S.H. Kim. 1994. Irrigation guideline of leaf-vegetable under protected cultivation. p.140-143. In: NIAST Research Report 1993. Suwon, Korea.

Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations. Academic

Press, CA, USA.

Jung, K., Y. Sonn, K. Han, and Y. Zhang. 2014. Responses of *Capsicum annum* (red pepper) to fertilization rates at various soil moisture conditions. J. Kor. Soc. Soil Sci. Fer. 47:332-339.

Kreuzwieser, J. and A. Gessler. 2010. Global climate change and tree nutrition: influence of water availability. Tree Physiol. 30: 1221-1234.

Lee, J.H. and C.J. Kim. 2011. Derivation of drought severity-duration-frequency curves using drought frequency analysis. J. Kor. Water Res. Assoc. 44(11):889-902.

Lower, S.S. and C.M. Orians. 2002. Soil nutrients and water availability interact to influence willow growth and chemistry but not leaf beetle performance. Entomol. Exp. Appl. 107:69-79.

March, A.W. 1961. Tensiometers: Key to increased profits. Western Grower and Shipper 34:15-17.

National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST). 2000. Analysis method of soil and plant. NIAST, Suwon, Korea.

Rural Development Administration (RDA), 2014. Fertilizer recommendation for crop production, RDA, Suwon, Korea.

Sammis, T.W. 1980. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface, and furrow irrigation methods for row crops. Agron. J. 72:701-704.

Shock, C.C. and F-X. Wang. 2011. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. HortScience 46: 178-185.

Steduto, P., T.C. Hsiao, E. Fereres, and D. Raes. 2012. Crop yield response to water, FAO, Rome, Italy.

Sutton, B.G. and N. Merit. 1993. Maintenance of lettuce root zone at field capacity gives best yields with drip irrigation. Sci. Hort. 56:1-11.

Taylor, S.A. 1972. Physical edaphology: The physics of irrigated and nonirrigated soils. Freeman and Co., San Francisco, CA, U.S.