

담액 수경재배시 근권제한이 엽채류의 생육 및 식물 영양소 함량에 미치는 영향

서태철¹ · 이한철² · 윤형권¹ · 전창후^{3,4*}

¹국립원예특작과학원 채소과, ²국립원예특작과학원 시설원예시험장, ³서울대학교 식물생산과학부, ⁴서울대학교 농업생명과학연구원

Effect of Root Zone Restriction on the Growth Response and Phytonutrients Contents of Leafy Vegetables Grown in a DFT System

Tae Cheol Seo¹, Han Cheol Rhee², Hyung Kwon Yun¹, and Changhoo Chun^{3,4*}

¹Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Suwon 440-706, Korea

²Protected Horticulture Research Station, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Busan 618-800, Korea

³Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

⁴Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract. Two leaf lettuces, chicory, endive, edible chrysanthemum, and pak-choi were hydroponically cultured under root restricted conditions in a deep flow technique system and their growth and nutritional values were investigated. Cylindrical plastic tubes with 100 mm height and diameters of 20, 25 or 30 mm were used for root restriction. Growth of all species was retarded by 25-95% as the roots zone was restricted. Pak-choi and edible chrysanthemum showed greater reduction in growth as compared with chicory and endive. Percent dry matter, C/N ratio, and contents of total ascorbic acid and total anthocyanin increased in the root restricted treatments. Contents of P and K decreased in the root restricted treatments, while contents of Mg, Fe, Mn, and Zn were not consistent among the tested species. Optimized root volumes to improve the nutritional values and to reduce the growth retardation varied depending on species of leafy vegetables. Tubes of $\Phi 25$ mm \times 100 mm and $\Phi 30$ mm \times 100 mm were suitable for chicory, endive and lettuce, and edible chrysanthemum and pak-choi, respectively. Results indicate that nutritional values of hydroponically-cultured leafy vegetables can be improved by root restriction.

Additional key words: anthocyanin, ascorbic acid, C/N ratio, tube

서 언

최근의 채소 소비 증가는 전 지구적 현상으로 받아들여지고 있다. 미국에서는 2004년 기준 1인당 203.1kg의 채소를 소비하고 있고(Lucier와 Alberto, 2005) 한국에서는 채소가 부식으로 널리 이용되어 왔으며, 최근에는 상추, 엔디브, 치커리, 썩갓, 청경채 같은 엽채류가 쌈채소로 많이 이용되고 있다. 한국인들은 고기를 먹을 때 채소류를 이용하여 쌈을 싸서 먹는 독특한 식문화가 있다. 녹색 엽채류는 가격은 싸지만 미량원소와 항산화 기능을 가지는 생체물질을 풍부하게 제공한다(Goldman, 2003; Tarwadi와 Agte,

2003). 또한 Welch와 Graham(2005)은 작물 생체의 섭취가 인체에 이용 가능한 미량원소를 개선하는 실질적인 수단이라고 하였다. 또한 Feeney(2004)는 소비자의 건강을 개선하기 위해 과학자들은 특별한 물질뿐만 아니라 소비자 개인의 맞춤형 음식을 선택할 수 있도록 노력해야 한다고 제안하였다.

근권제한은 뿌리 형태(Hurley와 Rowarth, 1999; Lee 등, 1996; Leskovar와 Stoffella, 1995), 지상부와 뿌리의 생장(Ferree와 Steeter, 2004; Liu and Latimer, 1995; Thomas, 1993), 양분과 수분의 흡수(Ferree와 Steeter, 2004; Singh와 Blanke, 2000), 가스 교환(Campostrini와 Yamanishi, 2001; Psarras와 Merwin, 2000), 그리고 탄수화물 분배(Bar-Tal 등, 1995; Chen과 Reynolds, 1996; Nishizawa와 Saito, 1998) 등에 영향을 미친다. 이러한 관점에서 근권제한은 생육, 수

*Corresponding author: changhoo@snu.ac.kr

※ Received 16 December 2009; Accepted 11 March 2010.

량, 양분흡수, 그리고 내외적 품질요소들의 변화를 가져올 수 있다. 따라서 연구자들은 근권제한에 의한 부정적인 효과 외에 과실의 품질과 토지의 이용효율 향상 등의 이유로 많은 작물에서 연구를 하고 있다. 그러나 원예작물 중에서 수경재배 엽채류의 근권제한에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 수경재배 엽채류는 토양재배에 비해 성장속도가 빠르고 수분함량이 높아 수확후 저장성이 떨어지며, 자색이 있는 엽채류의 경우 색깔 발현이 잘 되지 않는 단점이 있다. 따라서 쌈용 엽채류의 영양적 가치를 향상시키는 연구는 가치가 크다고 생각한다.

본 연구는 쌈채소 수경재배 시 근권제한이 성장과 식물 영양적 가치에 미치는 효과를 검토하고자, 6가지 쌈채소류를 담액 수경법으로 재배하면서 원통형의 플라스틱 튜브로 근권을 제한하였을 때 생육, 체내 무기물, 총비타민 C 및 총안토시아닌의 함량 변화를 조사하였다.

재료 및 방법

본 실험은 농촌진흥청 원예연구소에서 폴리카보네이트 온실에서 3월 22일부터 5월 6일까지와 9월 24일부터 11월 23일까지 봄과 가을에 각각 수행되었다. 적치마 상추 ‘뚝섬적축면’(동부하이텍, 서울), 청치마 상추 ‘한밭청치마’(농우바이오, 수원), 엔디브 ‘중엽엔다이브’(농우바이오, 수원), 치커리 ‘농우치커리’(농우바이오, 수원), 쪽갓 ‘중엽쪽갓’(농우바이오, 수원), 그리고 청경채 ‘서울청경채’(신젠타종묘, 서울) 등 6가지 엽채류를 공시하였다. 봄 실험에서는 부피 비율로 피트모스 7: 펄라이트 3(v/v)인 배지를 채운 162공 플러그 트레이에서 봄 실험에서는 25일간, 가을 실험에서는 30일간 육묘하였다. DFT 수경재배 압축 스티로폼(두께 30mm) 정식판에 가로 20cm, 세로 20cm 간격으로 길이 100mm의 근권제한용 플라스틱 튜브를 삽입하였다. 봄 실험에서는 근권제한용 플라스틱 튜브의 직경을 각각 20, 25, 또는 30mm로 하였으며, 가을 실험에서는 25mm로 하였다. 엽채류 묘

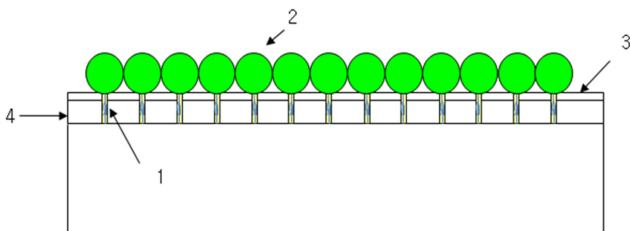


Fig. 1. Simple diagram of a deep flow technique (DFT) system equipped using cylindrical tubes for root restriction. 1, cylindrical plastic tube for root restriction; 2, plant; 3, planting bed made of styrofoam; 4, DFT bench.

를 부직포로 싸서 튜브 안에 정식하였다(Fig. 1). 대조구는 부직포로 싸서 스티로폼 정식판에 정식하였다.

정식 후 재배에는 Hoagland액(Hoagland와 Arnon, 1952) 조성의 양액($EC\ 2.4\ dS \cdot m^{-1}$)을 사용하였으며, 농도는 0.5배액을 사용하였다. 자동양액공급장치(Agronic 7000, Agronic, Spain)로 주간(06:00-18:00)에는 1시간에 10분, 야간(18:00-06:00)에는 2시간에 10분 간격으로 양액을 순환시켰다. 봄에는 정식 20일 후에 식물체 생육, 무기성분 함량, C/N율, 그리고 총비타민C 함량 등을 조사하였다. 가을에는 정식 30일 후에 6가지 엽채류 식물체의 생육, 총비타민C 함량을 조사하였고, 엽색이 붉은 적치마 상추와 치커리는 총안토시아닌 함량을 조사하였다. 정식 방법과 양액 공급 방법 등은 모두 봄 실험과 동일하게 하였다.

식물체 무기성분과 C/N율을 조사하기 위하여 생육조사 시에 채취한 생체를 $80^{\circ}C$ 의 건조기에서 48시간 동안 건조시켰다. C/N율은 건조시료 0.2g을 평량하여 CNS 분석기(CNS-2000, Reco, USA)로 분석하였다. 무기성분은 식물체 시료 0.5g을 유리 삼각플라스크에 평량하여 넣고 분해액인 ternary solution($HNO_3 : HClO_4 : H_2SO_4, 10 : 4 : 1, v/v$) 10mL를 넣어 습식 분해하여 냉각시킨 후, 플라스크 안의 분해된 시료를 $50-70^{\circ}C$ 뜨거운 증류수로 씻어 100mL로 정량한 다음, P는 vanadate 법으로 비색제(Lambda 18, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 각각 측정하였고, 양이온들은 원자흡광분광도계(Model 3300, Perkin Elmer, USA)로 분석하였다.

총비타민C 함량을 분석하기 위하여 잘게 썬 잎 조직 0.5g을 50mL 플라스틱 용기에 평량하여 넣고 2.5% meta-phosphoric acid용액 25mL를 넣은 후 균질하였다. 균질된 시료를 원심분리용 튜브에 넣고 원심분리기 $4^{\circ}C$, 10,000rpm으로 10분간 원심분리하였다. 상정액을 0.45 PVDF μ m filter(Whatman)로 여과하여 HPLC용 샘플병에 담았다. 분석은 HPLC(Breeze system, Waters, USA)로 하였으며, 분석조건은 Symmetry C_{18} ($5\mu m, 3.9 \times 150mm$) 칼럼(W12191L-028, Waters, USA), 파장 254nm, 유속 $0.5mL \cdot min^{-1}$, 전개용매는 $20\mu m\ KH_2PO_4$ 액과 메탄올(90:10, v/v)로 하였다. KH_2PO_4 액은 H_3PO_4 로 pH 2.8로 맞추어 진공펌프에 FP-Verticel™ membrane filter(FP-450, PALL, USA)로 여과한 후 초음파로 가스를 제거하여 사용하였다. 비타민C 표준 용액은 $100\ mg \cdot L^{-1}$ L-ascorbic acid(A-5960, Sigma, USA)로 하였다.

안토시아닌 분석은 Kim 등(1989a, 1989b)의 방법을 수정하여 사용하였다. 5g의 생체를 50mL 원심분리용 튜브에 넣고 2N-HCl 30mL를 넣어 $60^{\circ}C$ 진탕항온수조에서 2시간 동안 추출하였다. 1% HCl-methanol 용액과 1% HCl- H_2O 용

액이 C₁₈여과 카트리지(Sep-Pak[®] Plus C₁₈, Waters, USA)를 활성화와 추출물 정제를 위해 각각 준비하였다. 1% HCl-methanol용액으로 C₁₈여과 카트리지를 활성화한 후, 여과지(Whatman No.1)를 사용하여 여과한 시료 5mL를 C₁₈여과 카트리지에 투입하여 안토시아닌을 함유하는 붉은 물질을 수집하였다. 이것을 1% HCl-H₂O 용액으로 C₁₈ 카트리지의 안토시아닌 혼합물을 한번 세척한 후 다시 1% HCl-methanol로 완전히 씻어 모았다. 이 수집된 액을 HPLC(Breeze system, Waters, USA)로 분석하였다. 분석조건은 Symmetry C₁₈(5 μ m, 3.9 \times 150mm) 칼럼, 파장 530nm, 유속 1mL \cdot min⁻¹, 전개용매는 10% formic acid + 90% H₂O와 10% formic acid + 10% H₂O + 80% methanol을 step-gradient로 하였다. 표준용액은 100mg \cdot L⁻¹ cyanidin-3,5-diglucoside로 사용하였다.

실험구 배치는 완전임의배치법 3반복으로 하였다. 통계 분석은 SAS 프로그램(SAS 9.1, SAS Institute Inc., USA)을 이용하였으며, 봄 실험은 던컨의 다중범위검정으로, 가을 실험

은 t-test로 분석하였다.

결 과

생체중과 건물중은 근권제한 용기에 의해 영향을 받았다 (Table 2). 20일 동안의 근권제한은 용기가 작을수록 지상부 생육이 억제되었는데, 억제 정도는 대조구에 비해 공시 식물 및 근권제한 정도에 따라 25-93% 범위였다. 그러나 건물 율은 용기 크기가 작을수록 증가하였다. 근권제한에 따른 생육억제는 썩갯이나 청경채 > 상추 > 엔디브 순으로 영향을 많이 받았으나, 치커리에서는 대조구와 유의적 차이를 나타 내지 않았다. 봄 실험에서 다량원소 중에 P와 K의 함량은 근권제한용 튜브에 의해 모든 종류의 엽채류에서 감소하였다 (Table 1). Ca 함량은 엔디브와 썩갯을 제외한 4 작물은 감소 하였다. Mg함량은 치커리, 엔디브, 썩갯, 청경채에서 약간 증가하였다. 미량원소 중에서는 Fe함량은 상추 2종류, 치커리,

Table 1. Mineral contents of shoot tissues of 6 leafy vegetables grown for 20 days after transplanting in DFT systems as affected by root restriction using cylindrical tube.

Crop	Tube size (dia. \times ht.)	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
		(% , dry wt)				(mg \cdot kg ⁻¹ dry wt)			
Red leaf lettuce	Φ 20 \times 100	0.44 d ²	2.84 d	0.71 a	0.28 a	153 b	43 c	48 a	14 b
	Φ 25 \times 100	0.66 b	6.04 b	0.90 a	0.32 a	262 a	51 a	56 a	15 b
	Φ 30 \times 100	0.54 c	4.39 c	0.83 a	0.35 a	257 a	47 b	41 a	16 b
	Control	0.88 a	8.28 a	0.89 a	0.30 a	263 a	46 b	59 a	24 a
Green leaf lettuce	Φ 20 \times 100	0.39 d	2.32 b	0.67 b	0.23 c	143 b	46 a	56 b	18 a
	Φ 25 \times 100	0.42 c	2.74 b	0.78 ab	0.26 b	199 a	43 b	49 c	20 a
	Φ 30 \times 100	0.49 b	3.38 b	1.02 a	0.31 a	206 a	42 b	48 c	23 a
	Control	0.77 a	8.03 a	0.98 a	0.31 a	204 a	44 b	69 a	20 a
Chicory	Φ 20 \times 100	0.45 b	1.45 b	2.45 c	0.61 a	155 b	71 a	153 a	20 a
	Φ 25 \times 100	0.44 b	1.68 b	2.72 bc	0.59 a	260 a	61 b	94 b	19 a
	Φ 30 \times 100	0.44 b	1.66 b	2.78 b	0.59 a	259 a	55 c	76 c	20 a
	Control	0.69 a	5.85 a	3.29 a	0.53 b	270 a	54 c	81 c	16 a
Endive	Φ 20 \times 100	0.32 c	2.04 d	1.02 b	0.47 b	157 b	87 a	98 a	20 a
	Φ 25 \times 100	0.45 b	3.78 c	1.20 a	0.49 a	167 b	63 c	88 b	20 a
	Φ 30 \times 100	0.46 b	4.17 b	1.25 a	0.42 c	165 b	69 b	75 b	19 a
	Control	0.69 a	7.23 a	0.89 c	0.38 d	196 a	59 d	90 c	23 a
Edible chrysanthe- mum	Φ 20 \times 100	0.55 b	4.81 b	1.17 a	0.41 a	380 a	69 a	106 a	23 a
	Φ 25 \times 100	0.53 bc	4.35 b	1.14 a	0.39 a	304 b	68 a	90 b	22 a
	Φ 30 \times 100	0.51 c	4.40 b	0.94 b	0.31 b	328 b	49 c	71 c	21 a
	Control	0.61 a	6.34 a	0.95 b	0.27 c	304 b	52 b	84 b	24 a
Pak-choi	Φ 20 \times 100	0.45 d	3.48 c	0.97 b	0.42 a	290 a	75 a	90 a	19 a
	Φ 25 \times 100	0.58 b	4.52 bc	1.20 a	0.33 b	265 b	65 b	69 b	19 a
	Φ 30 \times 100	0.54 c	4.67 b	1.36 a	0.38 a	291 a	62 c	69 b	19 a
	Control	0.76 a	7.52 a	1.23 a	0.24 c	188 c	65 b	69 b	19 a

²Mean separation within columns for each crop by Duncan's multiple range test, P<0.05

Table 2. Fresh weight, % dry weight, and C/N ratio of shoot tissues as affected by root restriction using cylindrical tubes 20 days after transplanting.

Crops	Tube size (dia. ×ht.)	Fresh weight (g/plant)	% dry weight	C/N		C/N ratio
				C	N	
				(% dry wt)		
Red leaf lettuce	Φ20×100	20.9 c ^z	10.0 a	43.4 a	2.64 d	16.4 a
	Φ25×100	48.9 b	6.1 b	41.1 b	4.86 b	8.5 c
	Φ30×100	48.8 b	6.4 b	43.4 a	4.03 c	10.8 b
	Control	81.4 a	4.7 c	37.6 c	6.09 a	6.2 d
Green leaf lettuce	Φ20×100	16.0 c	12.1 a	43.2 b	2.35 d	18.4 a
	Φ25×100	29.2 bc	9.5 b	43.5 ab	2.86 c	15.2 b
	Φ30×100	34.6 b	8.6 c	44.0 a	3.35 b	13.1 c
	Control	63.9 a	5.7 d	39.2 c	5.31 a	7.4 d
Chicory	Φ20×100	12.9 b	9.5 a	42.7 a	3.29 c	13.0 a
	Φ25×100	22.1 a	8.1 b	41.4 b	4.14 b	10.0 b
	Φ30×100	21.7 a	8.3 b	41.6 b	4.20 b	9.9 b
	Control	29.6 a	7.8 b	39.1 c	4.76 a	7.8 c
Endive	Φ20×100	13.9 c	8.9 a	40.8 a	4.44 b	9.2 b
	Φ25×100	17.6 c	8.4 a	41.1 a	4.15 c	9.9 a
	Φ30×100	28.6 b	8.3 a	41.1 a	4.12 c	10.0 a
	Control	49.1 a	6.8 b	39.1 b	4.76 a	8.2 c
Edible chrysanthemum	Φ20×100	4.7 c	14.6 a	41.9 a	1.75 d	23.9 a
	Φ25×100	12.3 bc	10.9 b	41.2 b	2.91 c	14.1 b
	Φ30×100	15.9 b	9.3 c	41.3 b	3.59 b	11.5 c
	Control	36.1 a	6.6 d	39.1 c	4.76 a	7.4 d
Pak-choi	Φ20×100	7.4 c	11.1 a	41.5 a	2.21 c	18.8 a
	Φ25×100	16.0 b	10.4 b	41.6 a	2.71 bc	15.4 b
	Φ30×100	17.5 b	9.2 c	41.5 a	2.54 b	16.4 b
	Control	103.2 a	4.4 d	37.9 b	5.13 a	5.4 c

^zMean separation within columns for each crop by Duncan's multiple range test, P<0.05

엔디브에서 근권제한 용기가 가장 작은 Φ20×100mm 처리구에서 감소하였으나 썩갓과 청경채는 반대로 증가하였다. Mn과 Zn의 함량은 Mg과 같이 상추 2종류를 제외하고 4작물에서는 약간 증가하였다. Cu함량은 근권제한 용기에 영향을 받지 않았다 C/N을 역시 근권제한의 영향을 받았으며 근권제한 정도가 클수록 N함량은 감소하고 C함량은 증가하였는데 N의 함량 변화 정도가 더 컸다. 따라서 C/N율은 근권제한 정도가 클수록 증가하는 결과를 나타내었다. 총비타민C 함량은 모든 작물에서 근권제한 정도가 클수록 증가하였으며(Fig. 2) 변화 양상은 C/N율과 유사하였다. 근권제한에 따른 총비타민C 함량의 변화는 썩갓과 청경채에서 가장 커서 대조구에 비해 2.1-5.8배 증가하였다.

가을 실험에서는 봄 실험에서 심한 생육 억제없이 탄수화물과 비타민C의 함량을 높일 수 있었던 Φ25×100mm 튜브만 공시하여 근권제한 처리를 10일 연장하여 대조구와 비교하였다. 무기성분 중 P와 K의 함량은 근권제한에 의해 모든

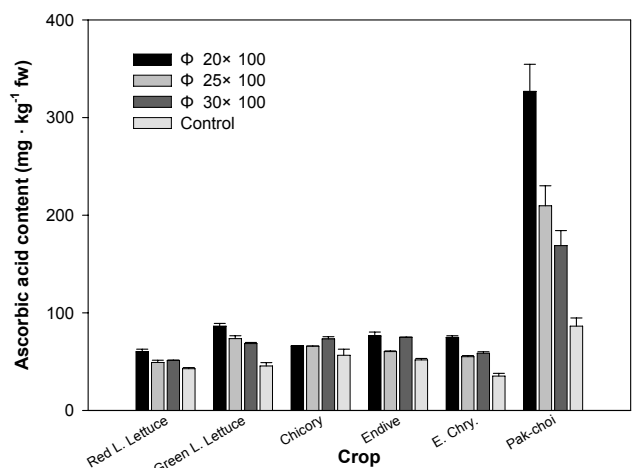


Fig. 2. Ascorbic acid content of shoot tissues as affected by root restriction using cylindrical tubes 20 days after transplanting. Vertical error bars mean standard errors, n=3.

작물에서 감소하였고 Ca함량은 치커리와 썩갓을 제외한 작물에서 감소하였으나, Mg함량은 차이가 없었다. Fe함량은

근권제한에 의해 썩갓과 청경채에서는 증가하였으나, 다른 작물에서는 차이가 없었다. Mn과 Zn의 함량은 치커리에서만 증가하였으며 Cu함량은 근권제한 처리에 따른 일정한 경향이 없었다(Table 3). 30일간 근권제한의 영향을 받아 상추 2종류, 썩갓 및 청경채의 지상부 생체중이 대조구에 비해 1.7-3.7배 감소하였으나(Table 4). 이들의 건물율은 대조구에 비해 1.4-2.1배 증가하였다. N함량은 감소하였고 C함량은 증가하여 C/N율은 대조구에 비해 1.3-1.6배 증가하였다.

총비타민C 함량은 근권제한 처리에 의해 증가하였는데(Fig. 3). 썩갓, 청경채, 청치마 상추, 적측면 상추, 엔다이브, 치커리 순으로 증가 폭이 컸다. 썩갓에서는 대조구에 비해 90%의 높은 증가율을 보였으나 치커리는 4%의 증가율을 보였다. 적측면 상추와 치커리의 총안토시아닌 함량 역시 근권제한 처리에 의해 증가하여(Fig. 4), 치커리에서는 대조구에 비해 97.7% 높은 증가율을 보였으며 적측면 상추에서는 15.5%의 증가율을 보였다.

Table 3. Mineral contents of shoot tissues of 6 leafy vegetables grown for 30 days after transplanting in DFT systems as affected by root restriction using cylindrical tubes.

Crop	Tube size (dia. ×ht.)	Mineral contents (mg·kg ⁻¹ dry wt)							
		P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
Red leaf lettuce	Φ25×100	0.74 b ^z	8.15 b	0.49 a	0.35 a	115 a	48 a	45 b	14 b
	Control	0.97 a	10.1 a	0.42 a	0.33 a	137 a	49 a	64 a	20 a
Green leaf lettuce	Φ25×100	0.69 a	7.49 a	0.49 b	0.36 a	118 a	31 a	53 a	14 a
	Control	0.85 a	7.87 a	2.04 a	0.43 a	114 a	29 a	106 a	9 b
Chicory	Φ25×100	0.77 a	8.08 a	0.78 a	0.40 a	140 a	152 a	153 a	22 a
	Control	0.94 a	8.55 a	0.80 a	0.36 a	142 a	110 b	94 b	19 a
Endive	Φ25×100	0.58 a	7.96 a	0.59 a	0.28 a	107 a	110 a	94 a	22 a
	Control	0.61 a	8.77 a	0.77 a	0.29 a	142 a	142 a	108 a	24 a
Edible chrysanthemum	Φ25×100	0.48 a	6.19 b	1.80 a	0.41 a	127 a	30 a	50 a	21 a
	Control	0.66 a	10.2 a	0.86 b	0.33 b	87 a	39 a	70 a	19 a
Pak-choi	Φ25×100	0.61 b	6.94 a	2.11 b	0.69 a	126 a	36 a	48 b	20 a
	Control	0.83 a	8.50 a	2.56 a	0.65 a	102 a	34 a	81 a	16 a

^zMean separation within columns for each crop by t-test, P<0.05.

Table 4. Fresh weight, % dry weight and C/N ratio of shoot tissues of 6 leafy vegetables grown for 30 days after transplanting in DFT systems as affected by root restriction using cylindrical tubes.

Crops	Tube size (dia. ×ht.)	Fresh weight (g/plant)	% dry weight	C/N ratio	
				C (%)	N (%)
Red leaf lettuce	Φ25×100	88.0 b	5.7 a	38.7 a	4.94 b
	Control	165.8 a	4.0 b	35.9 b	6.03 a
Green leaf lettuce	Φ25×100	75.9 b	5.6 a	39.3 a	4.96 b
	Control	128.8 a	5.0 a	33.1 b	6.02 a
Chicory	Φ25×100	84.2 a	7.1 a	39.1 a	4.47 a
	Control	84.5 a	6.6 a	37.6 a	4.67 a
Endive	Φ25×100	79.0 a	7.0 a	37.6 a	4.10 b
	Control	94.3 a	6.7 a	38.2 a	4.24 a
Edible chrysanthemum	Φ25×100	35.4 b	9.8 b	40.7 a	4.22 b
	Control	131.4 a	6.2 a	35.1 b	5.37 a
Pak-choi	Φ25×100	56.2 b	7.2 a	41.2 a	4.64 b
	control	227.5 a	3.4 b	33.2 b	6.10 a

^zMean separation within columns for each crop by t-test, P<0.05.

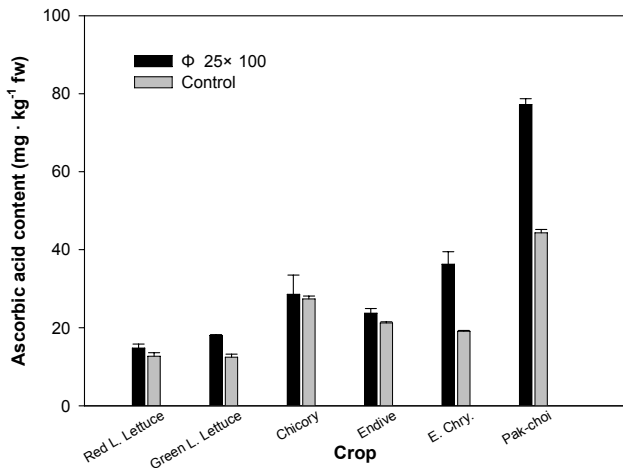


Fig. 3. Total ascorbic acid content of shoot tissues of 6 leafy vegetables grown for 30 days after transplanting in DFT systems as affected by root restriction using cylindrical tubes. Vertical error bars mean standard error, n=3.

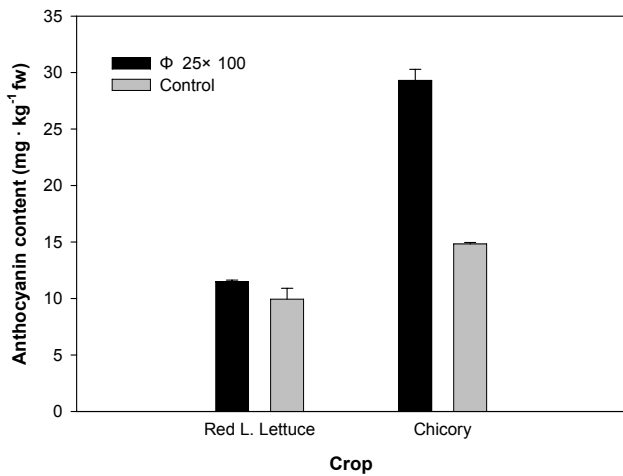


Fig. 4. Total anthocyanin content of shoot tissues of red leaf lettuce and chicory grown for 30 days after transplanting in DFT systems as affected by root restriction using cylindrical tubes. Vertical error bars mean standard error, n=3.

고 찰

근권제한 처리에 의해 정도의 차이는 있었지만 6가지 작물 모두 생육을 억제하였다(Table 2, 4). 그 중에서도 썩갯과 청경채가 다른 작물에 비해 근권제한에 더 영향을 많이 받았고, 반면에 치커리는 근권제한에 대해 상당히 둔감하였다. 근권제한 용기 $\Phi 25 \times 100\text{mm}$ 과 $\Phi 30 \times 100\text{mm}$ 처리 간에는 차이를 보이지 않았지만 $\Phi 20 \times 100\text{mm}$ 로 근권제한 정도가 커지면 모든 작물에서 심한 생육 억제를 보였다. Lescovar와 Stoffella(1995)는 뿌리의 크기와 형태가 신초의 크기와 생장율을 조절할 수 있다고 하였는데, 본 실험에서 근권제한은 뿌리와 양액과의 직접적인 접촉을 제한하여 생장과 호흡에 필요한 물과 산소의 원활한 공급이 억제되어 물질이동

속도(mass flow rate)가 감소하였기 때문인 것으로 생각된다. 뿌리 생장의 억제가 20일간 근권제한 처리한 봄 실험보다 30일간 처리한 가을 실험에서 낮았던 원인은 생육 후반의 10일이 더 경과함에 따라 원통형튜브 밖으로 자라난 뿌리와 양액과의 접촉이 용이하였기 때문이라고 생각된다.

근권제한은 공시한 모든 작물에서 N, P, 그리고 K의 함량을 낮추었지만(Table 1, 3) C함량을 높이는 효과가 있었다(Table 2, 4). Ca과 Mg의 함량은 작물에 따라 다른 양상을 보였다. 썩갯에서는 두 실험에서 공히 Ca과 Mg의 함량이 근권제한에 의해 높아졌다. 엔디브에서의 Ca과 Mg의 함량은 봄 실험에서는 근권제한에 의해 증가하였지만 가을 실험에서는 증가하지 않았다. 미량원소 Fe와 Mn의 함량은 근권제한에 의해 썩갯과 청경채를 제외하고 낮은 함량을 보였다. 이것은 토양의 경화가 사과 잎의 P, K, B, Fe함량은 증가시켰지만 N, Ca, Mg, Mn, 그리고 Na는 감소시켰다는 보고(Ferree와 Streeter, 2004)와, 근권제한은 토마토에서 N의 함량에는 영향을 주지 않았지만 K의 함량을 감소시켰다는 보고(Bar-Tal 등, 1995) 등과 유사한 결과였다. 또한 Hurley와 Rowarth(1999)은 뿌리의 생장에 저항이 증가할 때 식물체 지상부로 미량의 물질을 수송하는 기작을 제안하였는데, 이는 썩갯과 청경채에서의 Ca, Mg 및 Fe의 함량 증가를 설명할 수 있을 것이다.

근권제한에 의해 건물율과 C/N율은 생육억제와 반비례하여 증가하였다(Table 2, 4). N이 C보다 더 많은 함량 변화가 있었고, 20일 처리 보다는 30일 처리에서 근권제한에 의한 억제효과가 둔화되었다. 수분 공급의 제한이 과채류의 탄수화물을 증가시킨다고 알려져 있는데, Nishizawa와 Saito(1998)는 작은 용기에서 재배하면 큰 용기에서 재배한 것 보다 줄기에서 수용성 당과 전분 함량이 높았다고 보고하였다. 또한, Chen과 Reynolds(1996)도 C의 분배와 수분 스트레스를 설명하는 전체 식물체 탄소 모델에서 생장은 식물체 자체의 탄소와 수분 공급의 의해 조절되는 종속변수라고 한 바와 같이 본 실험의 결과에서도 근권제한에 의해 수분 공급이 충분히 되지 않았음을 확인할 수 있었다. 근권제한은 작물 간에 차이는 있지만 총비타민C와 총안토시아닌의 함량을 전체적으로 증가시켰다. 그러나 생체중의 감소율보다 이들 항산화물질의 함량의 증가율은 낮았다. 잘 알려진 바와 같이 이들 물질은 식물체 2차대사 산물로 천연 항산화물질이며, 식물체내 함량은 작물의 종류나 환경조건에 의해 좌우된다(Tarwadi와 Agte, 2003). 일반적으로 비타민C는 배추과 채소들이 다른 부류의 채소들에 비해 높는데 본 실험에서도 청경채가 다른 작물에 비해 높음을 알 수 있었다. 또한 Miller 등(2003)은 식물체내 총비타민C 함량은 스트레스 반

응으로서 호흡에 의해 변화될 수 있다고 보고하였다. 이러한 점에서 근권내 산소 농도를 측정하지 않았지만 근권제한에 의한 저산소 스트레스가 총비타민C 함량을 증가시킨 것으로 사료된다. 그러나 총비타민C 함량의 증가는 식물체 수분 함량과 관련하여 희석효과도 있기 때문에 완전한 설명은 할 수 없다고 판단된다. 안토시아닌은 붉은색, 보라색, 또는 자주색을 띠는 색소로 식물체의 광보호 역할을 하는 carotenoids 류 중의 한가지로(Gross, 1987; Kong 등, 2003) 주로 광과 온도의 영향을 받아 P흡수가 억제되는 조건에서 잘 발현이 된다. 또한 최근 Rajapakse와 He(2007)는 저산소 조건에서 상추의 자주색 발현이 촉진되었다고 보고한 바 있어 본 실험에서 적치마 상추나 치커리의 총안토시아닌의 함량이 근권제한에 의해 높아진 것은 근권제한에 의해 수분과 산소 스트레스를 동시에 받아 식물체내 P흡수가 억제되어 P함량이 낮아진 결과로 판단된다.

이상의 결과를 요약하면, 6가지 엽채류를 DFT 수경재배 시스템에서 원통형의 상하가 개방된 플라스틱 용기로 근권을 제한한 결과, 생육억제, 작물체내 N, P, K의 함량 감소, C/N을 증가, 항산화물질인 총비타민C 및 총안토시아닌의 함량이 증가됨을 알 수 있었다. 또한 근권제한 용기의 크기는 상추, 엔디브, 치커리는 $\Phi 25 \times 100\text{mm}$, 쑥갓, 청경채는 이보다 더 큰 $\Phi 30 \times 100\text{mm}$ 정도가 적정할 것으로 사료되었다.

우리 나라는 엽채류를 씹으로 많이 이용하기 때문에 현재 잎이 손바닥 크기가 되었을 때 하나씩 따서 수확하고 있으나 앞으로는 노동력 부족 및 샐러드 이용 확대 등의 이유로 포기 수확이 확대될 것으로 작물과 계절에 따른 차이는 있겠지만 정식 후 20-25일 후에는 수확이 가능할 것이다. 따라서 수경재배 시 원통형의 튜브를 이용한 근권제한을 통해서 생육은 다소 억제되더라도 건물율과 C/N율이 높고 항산화물질 함량이 높은 엽채류를 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

초 록

상추 2종, 쑥갓, 청경채, 엔디브, 그리고 치커리의 엽채류 담액 수경 재배 시 높이 100mm, 직경 20, 25, 30mm의 원통형의 플라스틱 튜브를 이용하여 근권제한 처리를 한 후 생육과 식물영양소를 조사하였다. 근권제한은 용기 크기에 따라 엽채류의 지상부 생체중이 25-95% 범위에서 감소하였으며, 쑥갓과 청경채가 가장 영향을 많이 받았고 엔디브나 치커리는 적게 받았다. 건물율, C/N율 및 총비타민C와 총안토시아닌의 함량은 근권제한에 의해 증가하였다. 무기성분 중 P와 K함량은 근권제한에 의해 모든 작물에서 감소하였지만, Mg, Fe, Mn, Zn 등은 작물에 따라 차이가 있었다. 식물

영양적 가치를 증가시키고 생육 억제를 감소하기 위한 적절한 근권 용적은 엽채류 종류에 따라 달랐다. 치커리, 엔디브, 그리고 상추는 $\Phi 25 \times 100\text{mm}$, 쑥갓과 청경채는 $\Phi 30 \times 100\text{mm}$ 튜브 처리에서 각각 가장 좋은 결과를 보였다. 이상의 결과, 수경재배 시 원통형의 플라스틱 튜브를 이용한 근권제한 처리가 엽채류의 영양적 가치를 향상시킬 수 있다는 것을 시사하였다.

추가 주요어 : 안토시아닌, 비타민C, C/N율, 튜브

인용문헌

- Bar-Tal, A., A. Feigin, S. Sheinfeld, R. Rosenberg, B. Strenbaum, I. Rylski, and E. Pressman. 1995. Root restriction and $\text{NO}_3\text{-N}$ solution concentration effects on nutrient uptake, transpiration and dry matter production of tomato. *Sci. Hort.* 63:195-208.
- Camprostrini, E. and O.K. Yamanishi. 2001. Influence of mechanical root restriction on gas-exchange of four papaya genotypes. *R. Bras. Fisiol. Veg.* 13:129-138.
- Chen, J.L. and J.F. Reynolds. 1996. A coordination model of whole-plant carbon allocation in relation to water stress. *Ann. Bot.* 80:45-55.
- Feeney, M.J. 2004. Fruits and the prevention of lifestyle-related diseases. *Clinical and experimental pharmacology and physiology.* 31:11-13.
- Ferree D.C. and J.G. Streeter. 2004. Response of container-grown grapevines to soil compaction. *HortScience* 39:1250-1254.
- Ferree, D.C., J.G. Streeter, and Y. Yuncong. 2004. Response of container-grown apple trees to soil compaction. *HortScience* 39:40-48.
- Goldman, I.L. 2003. Recognition of fruit and vegetables as healthful: Vitamins and phytonutrients. *HortTechnol.* 13:252-258.
- Gross, J. 1987. Pigments in fruits. Hebrew University of Jerusalem. Academic Press. p. 1-85.
- Hoagland, D.R. and D.J. Arnon. 1952. The water culture method for growing plants without soil. *Circular of the Californian Agricultural Experiment Station* p. 347.
- Hurley, M.B. and J.S. Rowarth. 1999. Resistance to root growth and changes in the concentrations of ABA within the root and xylem sap during root-restricted stress. *J. Expt. Bot.* 50:799-804.
- Ismail, M.R. and W.J. Davies. 1998. Root restriction affects leaf growth and stomatal response: the role of xylem sap ABA. *Sci. Hort.* 74:257-268.
- Kim, J.H., G.I. Nonaka, K. Fujieda, and S. Uemoto. 1989a. Anthocyanidin malony glucosides in flowers of *Hibiscus syriacus*. *Phytochemistry* 28:1503-1506.
- Kim, J.H., I. Miyajima, K. Fujieda, and S. Uemoto. 1989b. Anthocyanidin 3-glucosides and in vitro unstable anthocyanins from *Hibiscus syriacus*. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.* 33:243-251.
- Kong, M.J., L.S. Chia, N.K. Goh, T.F. Chia, and R. Brouillard. 2003. Analysis and biological activities of anthocyanins. *Phytochemistry* 64:923-933.

- Lee, S.G., S.I. Shin, and B.H. Kang. 1996. Effect of space limitation of rhizosphere on morphology and development of root system in tobacco seedlings. *Kor. J. Crop. Sci.* 41:475-481
- Leskovar, D.I. and P.J. Stoffella. 1995. Vegetable seedling root systems: morphology, development, and importance. *HortScience* 30:1153-1159.
- Liu, A. and J.G. Latimer. 1995. Root cell volume in the planter flat affects watermelon seedling development and fruit yield. *HortScience* 30:242-246.
- Lucier, G. and J. Alberto. 2005. Vegetables and melons outlook. April 21, 2005. USDA/ERS. Electric outlook report from the economic research service. (available on-line at <http://www.ers.usda.gov>).
- Miller, A.H., V. Mittova, G. Kiddle, J.L. Heazlewood, C.G. Bartoli, F.L. Theodoulou, and C.H. Foyer. 2003. Control of ascorbate synthesis by respiration and its implication for stress responses. *Plant Physiol.* 122:107-111.
- Nishizawa, T. and K. Saito. 1998. Effects of rooting volume restriction on the growth and carbohydrate concentration in tomato plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 123:581-585.
- Psarras, G. and I.A. Merwin. 2000. Water stress affects rhizosphere respiration rates and root morphology of young 'Mutsu' apple trees on M.9 and MM. 111 rootstocks. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 125:588-595.
- Rajapakse, N. and C. He. 2007. Hypoxia effects on phytochemical compounds and antioxidant capacity in lettuce. *HortScience* 42:923.
- Singh, P. and M.M. Blanke. 2000. Deficiency of potassium but not phosphorus root respiration. *Plant Growth Regulation* 32:77-81.
- Tarwadi, K. and V. Agte. 2003. Potential of commonly consumed green leafy vegetables for their antioxidant capacity and its linkage with the micronutrient profile. *Int. J. Food Sci. Nutri.* 54:417-425.
- Thomas, T.H. 1993. Effects of root restriction and growth regulator treatments on the growth of carrot (*Daucus carota* L.) seedlings. *Plant Growth Regulation* 13:95-101.
- van Irsel, M. 1997. Root restriction effects on growth and development of salvia (*Salvia splendens*). *HortScience* 32: 1186-1190.
- Welch, R.M and R.D. Graham. 2005. Agriculture: the real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops. *J. Trace Elements in Medicine and Biology* 18:299-307.