

국내육성 주요 딸기 품종에서 발생하는 구리(Cu) 과잉 증상 및 영양진단을 위한 식물체 내 한계농도

최종명^{1*} · 남민호¹ · Chiwon W. Lee²

¹충남대학교 원예학과, ²미국 North Dakota 주립대학교 식물과학과

Characterization of Copper Toxicity Symptoms and Determination of Tissue Critical Concentration for Diagnostic Criteria in Korean Bred Strawberries

Jong Myung Choi^{1*}, Min Ho Nam¹, and Chiwon W. Lee²

¹Department of Horticulture, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Department of Plant Sciences, North Dakota State University, Fargo, ND 58108, US

Abstract. This study was carried out to investigate the influence of copper concentrations in fertilizer solution on the growth of and nutrient uptake by domestically bred strawberries. The characterization of toxicity symptoms as well as tissue analyses based on dry weight of above ground tissue were also conducted to determine the threshold levels in plants when toxicity developed in copper. The dry weights of the above ground tissue were not significantly different among the treatments of 0.25 mM to 1.0 mM in ‘Keumhyang’ and ‘Maehyang’ strawberries and that of 0.25 mM to 3.0 mM in ‘Seolhyang’ strawberry. This indicates that the ‘Seolhyang’ strawberry is more tolerant to copper toxicity than ‘Keumhyang’ or ‘Maehyang’ strawberries. Application of copper at high concentrations resulted in severe toxicity such as death of extensive areas of leaves. The lower leaves became yellow and die rapidly as the symptoms spread up the plants. The leaf blades and petioles died back to the crown and hang on by mechanical attachment. Symptoms of copper toxicity in lower leaves developed as browning on leaf margins and in patches between leaf veins that became necrotic. The elevation of copper concentrations in fertilizer solution did not influence the tissue phosphorus, potassium, calcium, and magnesium contents based on the dry weight of the above ground tissue. The tissue copper contents increased lineally as the copper concentrations in fertilizer solution were elevated. But the tissue iron, manganese and boron contents were not influenced by the concentrations. When the concentration of copper at which growth of a plant is retarded by 10% is regarded as threshold level, the copper contents based on dry weight of above ground plant tissue should be lower than 71.4, 57.9 and 74.8 mg·kg⁻¹ in ‘Keumhyang’, ‘Maehyang’ and ‘Seolhyang’ strawberries, respectively. The symptom characterization and established threshold level in copper toxicity would help growers to prevent the reduction of crop growth and yield in ‘Seolhyang’ strawberry cultivation.

Additional key words: growth, nutrient disorder, plant nutrition, visual symptom

서 언

재배하는 작물의 성장 또는 수량을 극대화하기 위하여 무기원소 흡수량과 시비를 통한 공급량이 균형을 이루도록 시비의 시기 및 농도를 조절한다. 그러나 작물을 재배하면서

균형된 시비를 하여도 무기원소 과부족이 원인이 되어 성장량을 저하시키고 생리장해가 발생하는 경우가 많다. 따라서 성장상태 및 외관상 발생하는 증상, 또는 식물체 분석이나 토양분석을 하고 그 결과를 선행 연구결과와 비교하여 작물의 영양 상태를 판단하고(Bennett, 1993), 이를 근거로 시비

*Corresponding author: choi1324@cnu.ac.kr

※ Received 17 November 2011; Revised 12 March 2012; Accepted 12 March 2012. This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ0066752010)”, Rural Development Administration, Republic of Korea.

방법을 변화시킨다.

무기원소의 과부족이 원인이 되어 발생하는 증상은 작물 종류 또는 각 작물 내의 품종별로 독특하게 나타나는 경우가 많으며, 가시적인 진단이 어려운 원인이 된다. 또한 품종별로 흡비 특성이 다를 경우 보편적으로 각종 무기원소의 식물체내 함량의 적정 범위에서 차이가 발생한다. 딸기의 경우에도 국내 육성 신품종의 재배 면적이 확대되면서 생리장애로 추정되는 다양한 증상이 나타나고 있지만 관련 연구가 충분히 수행되지 않아 그 원인을 파악하고 해결방법을 강구함에 있어 많은 재배농가가 어려움을 겪고 있다. 특히, 국내 육성 신품종들의 경우 생리적 특성, 재배조건 및 흡비 특성에 관한 연구가 충분히 수행되지 않은 상황에서 재배면적이 급증하였고, 기존의 일본에서 육성된 품종들과 유사한 재배관리 및 시비방법을 적용하고 있어서 우려할 수준으로 생리장애 발생빈도가 많다(Choi et al., 2010).

정상 생육을 하는 식물 조직의 구리(Cu) 함량은 다른 다량 및 미량원소들에 비해 매우 낮으며, 재배하는 작물에서 Cu 결핍증상이 발현되는 경우가 많지 않다(Bennett, 1993; Marschner, 1995; Scaife and Turner, 1983). 그러나 Cu 함량이 높은 비료나 살균제의 처리, 과다하게 많은 미량원소복합제를 혼합상토의 기비로 혼합한 경우, 또는 축분 등을 상토의 구성재료로 이용할 경우 근권부의 Cu 농도가 과도하게 높아진다(Gibson et al., 2007). 근권부의 Cu 농도가 높을 경우 또는 근권부의 pH가 지나치게 산성 쪽으로 변하여 Cu의 가용성이 높아지면(Hanan, 1998; Nelson, 2003) 식물체의 Cu 흡수량이 많아지고 지나치게 흡수량이 많을 경우 과잉피해가 유발된다. 그러나 국내에서 육성된 딸기 신품종들의 경우 다량원소에 관해서는 수편의 논문(Choi et al., 2009a, 2009b, 2010a)이 발표되었지만 Cu 과잉과 관련한 생리장애에 관하여는 연구결과가 없다.

따라서 국내 육성 품종인 ‘금향’, ‘매향’ 및 ‘설향’ 딸기를 대상으로 미량원소인 Cu 농도를 변화시켜 과잉증상을 인위적으로 유발시킨 후 증상의 특징을 밝히며, 과잉증상 발현 시기의 식물체내 무기원소 함량을 분석하여 Cu 과잉과 관련한 생리장애를 진단할 수 있도록 기초 자료를 확보하고자 본 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

국내에서 육성된 ‘금향’ ‘매향’ 및 ‘설향’ 딸기를 대상으로 수행하였으며 모두 *Fragaria × ananassa* Duch.에 해당하는 종이었다. 충남 논산딸기시험장에서 조직배양한 후 순화되고 저온처리를 한 딸기묘를 본 연구에 이용하였다.

본 실험은 충남대학교에 위치한 유리온실에서 수행하였다. 재배기간 중 주·야간의 평균 온도는 각각 24°C 및 15°C였고, 상대습도 60-70%, 평균일장 15h, 그리고 광합성 유효광양자속은 330-370 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 였다.

혼합 상토[피트모스 + 펄라이트, 7:3(v/v)]를 플라스틱 포트(용적 1,600mL)에 충전하였으며, 딸기묘의 뿌리 부분에 잔존한 상토를 물로 씻어내어 모두 제거한 후 플라스틱 포트에 정식하였다. 정식 후 45일간 증류수만 관수하여 식물체 내의 무기원소 함량을 낮추었고, 각 식물체의 신엽을 기준으로 3매만 남긴 채 하위엽을 모두 제거하였다. 정식 45일 후부터 120일까지 조성된 비료용액을 공급하였고 처리도중 발생하는 화방과 런너는 수시로 제거하였다.

처리용액 조제과정에서 Hoagland 용액(Hoagland and Arnon, 1950)과 동일하게 다량원소와 Cu를 제외한 미량원소의 농도를 고정시켰다. Cu는 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 를 사용하였고, Cu의 농도를 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 그리고 4.0mM로 조절한 처리용액을 만들었다. 모든 용액은 HCl과 NaOH를 이용하여 pH를 6.0으로 조정한 후 점적관수 방법으로 공급하였다.

세 종류 딸기 품종을 대상으로 Cu 농도를 조절하여 6처리, 그리고 각 처리당 5반복, 반복당 2식물체로 총 180개의 포트를 배치하였다.

정식 120일 후에 작물 생장 조사 및 식물체 무기원소 함량 분석을 하였다. 식물 생장은 지상부의 초장, 초폭, 엽장, 엽폭, 엽수, 엽록소함량, 관부직경, 지상부 생체중 및 지상부 건물중을 조사하였으며, Choi et al.(2000)의 방법에 준하였다. 무기원소 함량은 근권부를 제외한 지상부 전체를 분석 대상으로 삼았다. 수확된 식물체를 0.01N HCl 용액에 1분간 침지한 후 증류수로 수세하여 잎에 묻어 있는 이물질을 제거하였고, 80°C의 건조기에서 48시간 건조시켰다. 이 후 0.9mm체(20mesh screen)를 통과하도록 분쇄하여 무기원소 함량 분석에 이용하였다. 식물체 무기성분 함량 분석은 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사분석기준(RDA, 2003)에 준하여 inductively coupled plasma optical emission spectrometer (Trace Scan; Thermo Elemental, Franklin, MA, USA)를 사용하여 수행하였다.

구리의 시비 농도가 식물 생장과 무기물 함량에 미치는 영향은 각 원소내의 처리별 Duncan의 다중검정과 회귀분석을 하였다. 다항회귀분석을 통해 얻어진 1 및 2차항 회귀선 중 최적에측함수를 결정하기 위해 R^2 값과 incremental F 값이 큰 회귀식을 적용하여 판단하였다. 통계분석은 CoStat 통계프로그램(v. 6.3, Monterey, CA, USA)으로 수행하였다.

결과 및 고찰

구리 시비농도가 ‘금향’, ‘매향’ 및 ‘설향’ 딸기의 생장에 미치는 영향을 Table 1에 나타내었다. ‘금향’ 딸기의 초장은 0.25mM 시비구부터 2.0mM 시비구까지 통계적인 유의차가 없었고, 3.0mM 이상의 고농도 Cu 시비구에서 유의하게 작아졌다. 그러나 ‘매향’ 딸기의 초장은 2.0mM 이상의 Cu 시비구에서 1.0mM 이하의 저농도 시비구 보다 작아졌다. ‘설향’ 딸기의 초장은 각 처리의 반복간 값의 차이가 커서 Cu 시비농도에 대한 통계적인 유의차는 없었다. Cu 시비농도가 증가할수록 ‘금향’과 ‘매향’ 딸기의 초폭이 직선적으로 감소하였고, ‘설향’ 딸기는 2차곡선회귀적으로 감소하는 경향을 보였다.

구리 시비농도가 증가할수록 ‘금향’ 및 ‘매향’ 딸기의 엽수는 직선 또는 2차곡선회귀적으로 뚜렷하게 감소하는 경향

을 보였고, Cu 농도의 처리 간 통계적인 유의차가 있었다. 그러나 ‘설향’ 딸기의 경우 처리간 통계적인 차이도 인정되지 않았고 경향도 발견할 수 없었다. 이와 같은 결과는 Cu 시비농도가 높아짐에 따라 ‘금향’과 ‘매향’ 딸기의 하위엽이 고사하고 탈락되었지만 ‘설향’ 딸기의 경우 고사한 채로 식물체에 붙어 있었고 생육조사에 이들이 포함되었기 때문이다.

세 종류 딸기 품종의 엽병장, 엽장 및 엽폭은 Cu 농도의 처리 간 차이가 분명하였고, 직선 및 2차곡선회귀적으로 짧거나 좁아지는 경향이었다. Cu가 고농도로 시비된 경우 하위엽에서 과다증상이 발현되어 노엽부터 점차 고사하였다 (Fig. 1). 딸기를 비롯한 대부분 식물체에서 상위엽보다 하위엽의 엽병장, 엽장, 엽폭이 길거나 넓으며(Choi et al., 2010), Cu가 고농도로 시비된 경우 하위엽이 고사하여 상위엽만 조사 대상에 포함되었기 때문에 세 종류 딸기 품종의 엽병장, 엽장 및 엽폭 값이 작아진 원인이 되었다고 판단한다.

Table 1. Influence of elevated copper concentrations in the fertilizer solution on the growth characteristics of ‘Keumhyang’, ‘Maehyang’, and ‘Seolhyang’ strawberries 120 days after transplanting.

Cu (mM)	Plant height (cm/plant)	Plant width (cm/plant)	Number of leaves	Petiole length (cm/plant)	Leaf length (cm/plant)	Leaf width (cm/plant)	Chlorophyll content (SPAD)	Crown diameter (mm/plant)	Fresh weight (g/plant)	Dry weight (g/plant)	
‘Keumhyang’	0.25	22.6 a ^z	42.1 a	10.6 a	11.1 ab	11.6 ab	8.52 a	39.8 a	15.7 a	42.2 a	8.79 a
	0.5	24.0 a	43.4 a	8.6 b	12.3 a	13.8 a	8.50 a	39.6 a	13.9 ab	33.2 b	7.21 a
	1.0	20.6 ab	34.3 b	7.8 bc	9.1 bc	11.0 ab	6.94 b	38.2 a	13.2 b	25.6 bc	6.80 a
	2.0	18.3 ab	33.6 b	7.6 bc	9.4 bc	10.1 ab	6.18 b	36.0 ab	11.8 bc	18.1 cd	4.42 b
	3.0	16.5 b	26.3 c	5.8 cd	7.4 c	8.6 b	5.62 b	29.4 bc	10.2 cd	13.3 d	3.00 b
	4.0	8.9 c	13.4 d	5.0 d	4.4 d	5.0 c	2.92 c	27.5 c	9.3 d	3.9 e	0.91 c
	Linear	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Quadratic	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	
‘Maehyang’	0.25	27.1 a	46.9 a	8.0 ab	11.4 a	13.8 a	6.38 ab	45.3 a	14.6 a	33.8 a	8.04 a
	0.5	28.5 a	45.8 a	8.0 ab	12.0 a	16.1 a	6.48 ab	43.2 a	14.7 a	31.5 a	7.84 a
	1.0	25.7 a	47.7 a	8.8 a	12.0 a	16.2 a	6.62 a	42.0 a	13.8 a	22.4 ab	5.65 ab
	2.0	17.7 b	32.3 b	5.8 bc	8.5 b	11.4 ab	5.08 abc	32.2 b	11.6 b	16.1 bc	4.08 bc
	3.0	15.1 b	26.2 b	6.8 abc	7.1 b	8.8 b	4.74 bc	39.3 ab	10.8 b	12.3 bc	2.77 bc
	4.0	15.2 b	28.1 b	5.6 c	6.3 b	8.8 b	3.86 c	31.9 b	10.3 b	8.2 c	1.48 c
	Linear	***	***	**	***	***	***	***	***	**	***
Quadratic	***	***	*	***	**	***	**	***	**	***	
‘Seolhyang’	0.25	21.8 a	42.7 ab	9.2 a	10.2 a	11.7 ab	8.80 a	42.7 ab	13.9 a	30.7 a	7.77 ab
	0.5	24.2 a	41.1 ab	8.4 a	11.5 a	12.5 a	8.86 a	41.1 ab	14.1 a	33.6 a	8.91 a
	1.0	22.6 a	42.1 ab	9.4 a	10.1 a	11.9 ab	7.88 ab	42.1 ab	12.8 ab	30.4 a	7.57 ab
	2.0	20.2 a	42.9 a	7.6 a	9.0 a	8.7 bc	6.92 ab	42.9 a	11.8 ab	21.0 ab	5.69 ab
	3.0	18.6 a	41.2 ab	9.0 a	8.9 a	8.7 bc	6.86 ab	41.2 ab	11.3 b	23.2 ab	5.90 ab
	4.0	16.7 a	36.0 b	7.6 a	8.5 a	7.4 c	6.06 b	36.0 b	13.0 ab	17.3 b	4.66 b
	Linear	*	NS	NS	*	***	*	NS	*	**	**
Quadratic	*	*	NS	NS	**	*	NS	*	*	*	

^zMean separation by Duncan's multiple range test at $P \leq 0.05$. Values followed by the same letter within columns are not significantly different.

NS, *, **, *** Nonsignificant or significant at $P \leq 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

Cu 시비농도에 영향을 받은 세 종류 딸기 품종의 건물중을 비교할 때 ‘금향’과 ‘매향’은 0.25mM부터 1.0mM 시비구 간 처리 간 통계적인 유의차가 없었으나 ‘설향’ 딸기의 경우 0.25mM부터 3.0mM Cu 시비구까지 통계적인 유의차가 없었다. 이는 ‘설향’ 딸기가 ‘금향’이나 ‘매향’ 딸기보다 Cu 과다 시비에 대한 내성이 더 강함을 의미한다.

Cu 시비농도를 인위적으로 높이고 과잉피해의 증상을 조사한 결과 ‘금향’ 딸기는 정상 식물체 보다 지상부의 생장이 빈약하였고, 하위엽에서 엽 전체의 갈변 및 괴사 증상이 관찰되었다. ‘매향’ 딸기의 경우 Cu 시비 농도가 높아짐에 따라 지상부 식물체의 생장이 빈약하였고, 신엽에서 철 결핍과 유사한 엽맥 간 황화현상이 나타났으며, 하위엽은 갈변 및 괴사하는 증상이 나타났다. ‘매향’ 딸기에서 발현되는 엽맥간 황화현상은 Choi et al.(2010) 이 보고한 철 결핍 증상과 매우 유사하였다. ‘설향’ 딸기에서도 Cu 과다 시비에 의해 피해를 받은 식물체(Cu 4mM 시비구)는 지상부 생장이 빈약하였고 하위엽에서는 갈변 및 괴사증상이 나타났다. Cu 시비 농도가 높은 처리에서 신엽에 엽맥간 황화현상이 나타나는 것은 특정 미량 양이온의 근권부 농도가 높아질 때 다른 미량 양이온의 흡수량 저하와 결핍증상 발현의 원인이 되는 길항작용(Marschner, 1995; Nelson, 2003)으로 나타난 Fe 결핍증상으로 판단되지 않는다. Clark(1993)는 수수의 식물영양에 관한 보고에서 Cu가 과다하게 시비되어 식물체의 흡수량이 증가하면 Fe 부족과 유사한 엽맥 간 황화현상이 발현되며 엽맥 사이에 직선형태의 황화현상과 함께 잎의 가장자리에 직선형태의 붉은색 줄이 형성된다고 하였다. 그

가 보고한 신엽의 엽맥 간 황화현상은 본 연구의 결과와 매우 유사하였으며, 잎 가장자리가 붉은색으로 변한다고 보고한 내용은 본 연구의 하위엽이 주황색으로 변하는 현상과 유사하였다.

세 종류 딸기 품종들의 하위엽에서 발현되는 Cu 과잉증상을 Fig. 2에 나타내었다. 0.25mM과 0.5mM Cu 시비구에서는 뚜렷한 증상이 나타나지 않았지만 1.0mM 시비구는 하위엽 선단에 갈변현상이 나타났다. 2.0mM 이상의 고농도 Cu 시비구에서는 하위엽 선단부가 주황색으로 변하면서 괴사하는 증상이 나타남과 동시에 엽병에 인접한 부위에서 엽맥간 갈변현상이 나타났다. ‘매향’ 딸기는 0.25 및 0.5mM 시비구에서 뚜렷한 증상이 나타나지 않았지만 1.0mM 시비구는 하위엽 선단에 갈변현상이 나타났고, 2.0mM 이상의 고농도 Cu 시비구에서 하위엽 선단부가 주황색으로 변하면서 괴사하는 증상이 나타났다. 4.0mM 시비구에서는 엽병에 인접한 부위에서 엽맥간 갈변현상이 나타났으며, ‘설향’ 딸기는 ‘매향’ 딸기보다 고농도에서 Cu 과잉 피해가 나타났고, ‘설향’이 ‘매향’보다 고농도 Cu 에 대한 내성이 강하다고 판단할 수 있었다.

세 종류의 딸기 품종의 재배를 위한 관비 용액에 Cu의 농도를 증가시켜도 식물체 내 P, K, Ca 및 Mg 함량은 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다(Table 2). 또한 ‘매향’ 딸기의 Ca 함량과 ‘매향’과 ‘설향’ 딸기의 Mg 함량 외에 기타 분석한 원소의 식물체 내 함량에서 Cu 시비농도에 대한 처리간 통계적인 유의차가 없었다.

식물체의 Cu 함량은 관비용액의 Cu 농도에 직접적인 영향을 받아 직선적으로 증가하였으며 4.0mM Cu 처리의 Cu 함량이 ‘금향’ 688.7, ‘매향’ 902.6, 그리고 ‘설향’ 343.1mg·kg⁻¹으로 분석되었다. ‘매향’은 식물체 내 Cu 함량이 ‘설



Fig. 1. Comparison of normal plants (A, B, and C) and the copper excess plants (D, E, and F) of ‘Keumhyang’ (A and D), ‘Maehyang’ (B and E) and ‘Seolhyang’ (C and F) strawberries. Application of copper at high concentrations resulted in the severe toxicity such as a death of extensive areas of leaves. The lower leaves became yellow and die rapidly as the symptoms spread up the plants. The leaf blades and petioles died back to the crown and hang on by mechanical attachment.

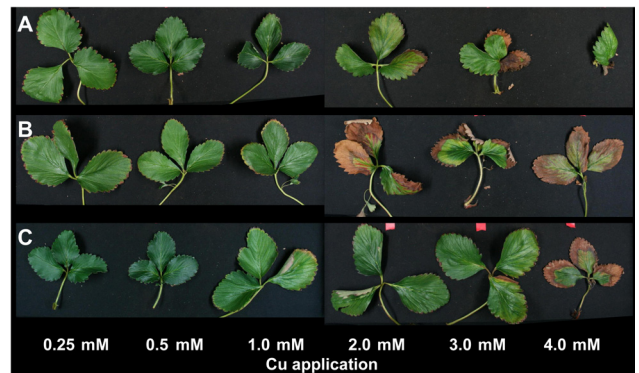


Fig. 2. Comparison of the older leaves of ‘Keumhyang’ (A), ‘Maehyang’ (B), and ‘Seolhyang’ (C) strawberries. Symptoms of the copper toxicity developed as browning on leaf margins and in patches between leaf veins that became necrotic.

향' 딸기의 약 2.6배에 해당할 정도로 높았다. 이러한 차이가 발생한 원인은 먼저 품종 별 흡비 특성에서 원인을 찾을 수 있었다. Marschner(1995)는 동일한 근권부 및 지상부 환경조건에서 작물을 재배하여도 작물에 따라 또는 각 작물 내에서 품종에 따라 각 원소별로 흡수량에 차이가 난다고 보고한 바 있으며 본 연구에서도 품종별 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 또 다른 가능한 원인은 세 품종의 지상부 성장량 차이에서 원인을 찾을 수 있다. Table 1에 나타낸 바와 같이 관비용액의 Cu 농도를 4.0mM로 조절하여 시비한 경우 지상부의 건물중이 '금향' 0.91g/plant, '매향' 1.48g/plant였으나 '설향'은 4.66g/plant였다. 동일한 양의 Cu를 흡수하여도 지상부 건물중 생산량이 많을 경우 희석효과에 의해 상대적인 식물체 내 농도가 낮아지며 성장량 차이가 Cu 함량에 영향을 미쳤다고 판단한다. Cassaman(1993)도 목화의 식물영양을 위한 보고에서 식물체 부위별, 분석시기별 그리고 지상부 성장량 차이에 따라 무기원소 함량의 차이가 발생한다고 하였으며 본 연구의 지상부 성장량 차이에 따른 Cu 함량 차이에 관한 이론적인 뒷받침을 하고 있었다.

미량원소 중 식물체 내 Fe, Mn 및 B 함량은 관비용액 속의 Cu 농도에 영향을 덜 받아 뚜렷한 경향을 발견할 수

없었다(Table 2). 그러나 관비용액의 Cu 농도가 높아짐에 따라 식물체내 Zn 함량은 뚜렷하게 직선적으로 증가하는 경향을 보였지만, Zn과 Cu 함량의 상관관계에 관한 문헌을 찾을 수가 없고 추후 정밀한 보완 연구가 필요한 부분이라고 판단하였다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 Cu의 농도를 조절하여 시비한 경우 성장량이 가장 많았던 처리의 '금향', '매향' 및 '설향' 딸기의 지상부 건물중은 각각 식물체당 8.79, 8.04 및 8.91g/plant였으며, 일반적으로 최대성장량보다 10% 성장량이 적은 90% 성장을 정상적인 작물 재배를 위한 한계점으로 간주한다(Ulrich, 1993). '금향' 딸기에서 지상부 건물중이 2차곡선적으로 감소하였으며($y = -2.328x + 0.090x^2 + 8.918$) 성장량이 가장 많았던 0.25mM 시비구의 건물중이 식물체당 8.79g/plant였고, 10% 감소한 성장량은 식물체당 건물중 7.91g/plant에 해당한다. Fig. 4에서 제시한 식물조직 내 Cu 함량에 관한 2차곡선회귀식을 적용하여 식물체당 건물중 7.91g/plant를 생산할 때의 Cu 시비농도는 0.44mM에 해당하며, 0.44mM의 Cu 농도를 '금향' 딸기의 Cu 함량에 관한 2차회귀식 $y = 26.344x + 44.957x^2 + 51.074$ 에 대입하면 71.4mg·kg⁻¹이 된다. 따라서 '금향' 딸기에서 수용가능

Table 2. Influence of elevated copper concentrations in the fertilizer solution on the tissue nutrient contents of 'Keumhyang', 'Maehyang', and 'Seolhyang' strawberries based on the whole above ground plant tissue 120 days after transplanting.

Cultivar		P K Ca Mg (%)				Fe Mn Zn Cu B Mo (mg·kg ⁻¹)					
'Keumhyang'	0.25	0.37 a ^z	1.86 a	0.57 a	0.57 a	76.0 a	78.8 a	36.6 bc	23.4 b	22.7 a	0.02 a
	0.5	0.42 a	2.4 a	0.50 a	0.51 a	76.6 a	67.7 a	39.2 bc	66.9 b	17.2 a	0 a
	1.0	0.44 a	2.2 a	0.46 a	0.46 a	63.3 a	75.4 a	31.7 b	70.2 b	14.4 a	0 a
	2.0	0.33 a	2.06 a	0.46 a	0.46 a	69.3 a	91.2 a	43.7 abc	222.2 b	14.2 a	0 a
	3.0	0.33 a	3.28 a	0.54 a	0.54 a	76.1 a	80.9 a	52.8 ab	314.6 b	14.5 a	0 a
	4.0	0.45 a	1.82 a	0.49 a	0.49 a	64.5 a	71.2 a	59.0 a	688.7 a	17.0 a	0 a
	Linear	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	***	NS	NS
Quadratic	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	***	NS	NS	
'Maehyang'	0.25	0.41 a	2.02 a	0.45 ab	0.52 ab	71.4 a	77.4 bc	40.0 b	35.4 d	23.3 a	0 a
	0.5	0.47 a	2.28 a	0.54 ab	0.55 ab	69.4 a	76.6 bc	49.0 b	69.4 d	19.3 ab	0 a
	1.0	0.48 a	2.20 a	0.49 ab	0.29 b	71.4 a	103.4 ab	41.7 b	96.6 d	21.0 ab	0 a
	2.0	0.32 a	1.83 a	0.29 b	0.52 ab	72.6 a	73.4 bc	65.3 ab	392.6 c	13.7 b	0 a
	3.0	0.58 a	2.09 a	0.59 a	0.68 a	74.0 a	112.6 a	54.0 b	621.4 b	19.3 ab	0 a
	4.0	0.34 a	2.18 a	0.59 a	0.55 ab	68.0 a	70.0 c	84.0 a	902.6 a	17.3 ab	0 a
	Linear	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	***	NS	NS
Quadratic	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	***	NS	NS	
'Seolhyang'	0.25	0.41 a	2.25 a	0.41 a	0.51 a	89.2 a	127.3 a	53.0 b	25.2 b	19.3 a	0 a
	0.5	0.33 a	1.64 a	0.44 a	0.34 b	67.1 a	93.8 a	31.2 d	26.5 b	14.6 ab	0 a
	1.0	0.36 a	2.05 a	0.60 a	0.46 ab	70.3 a	85.0 a	36.4 cd	61.4 b	8.8 b	0 a
	2.0	0.33 a	1.55 a	0.40 a	0.39 ab	65.3 a	75.9 a	39.3 bcd	94.7 b	15.1 ab	8.88 a
	3.0	0.34 a	1.94 a	0.56 a	0.48 ab	71.2 a	114.4 a	47.9 bc	132.7 ab	16.1 ab	0 a
	4.0	0.49 a	1.87 a	0.63 a	0.51 a	77.6 a	127.8 a	83.6 a	343.1 a	14.9 ab	0 a
	Linear	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	**	NS	NS
Quadratic	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	***	NS	NS	

^zMean separation by Duncan's multiple range test at $P \leq 0.05$. Values followed by the same letter within columns are not significantly different.

NS, **, *** Nonsignificant or significant at $P \leq 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

한 식물체 내 Cu 함량은 $71.4\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이하의 범위라고 판단한다.

이상과 같은 방법으로 ‘매향’과 ‘설향’ 딸기의 식물체내 Cu 함량과 건물중 생산에 관한 회귀식을 적용하여 최대 건물중 생산의 90%를 생산할 때의 식물체 내 Cu 함량을 계산

하면 ‘매향’은 $57.9\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 그리고 ‘설향’은 $74.8\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 계산된다. 따라서 건물중에 기초한 Cu 함량을 상기한 범위 이하로 유지하여야 Cu 과잉피해를 방지할 수 있다고 판단하였다.

Bennett(1993)은 대부분 작물에서 Cu 과잉피해를 방지하기 위해서는 $20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이하의 식물체 내 Cu 함량을 갖도록 시비농도를 조절해야 한다고 하였다. Clark(1993)는 수수에서 $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 을, Gascho et al.(1993)은 사탕수수에서 $9\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 을, 그리고 Locascio(1993)는 오이에서 $10\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 을 Cu 과잉방지를 위한 최대한계점으로 설정하였다. 상기한 식물체내 함량과 본 연구의 결과를 비교할 때 딸기는 수수, 사탕수수 또는 오이보다 높은 식물체 내 Cu 함량에서 과잉피해가 나타난다고 판단하였다.

초 록

미량원소인 Cu 시비농도를 인위적으로 조절하여 ‘금향’, ‘매향’ 및 ‘설향’ 딸기를 재배하면서 시비수준이 생장에 미치는 영향을 구명하였다. 또한 생육을 우수하게 유지할 수 있는 식물체의 Cu 한계농도를 밝혀 딸기 재배 시 영양장해를 진단할 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있도록 하기 위하여 본 연구를 수행하였다. Cu 시비농도에 영향을 받은 세 종류 딸기 품종의 건물중에서 ‘금향’과 ‘매향’은 0.25mM - 1.0mM 시비구 간, ‘설향’ 딸기의 경우 0.25mM - 3.0mM 시비구 간 통계적인 유의차가 없었고, ‘설향’이 ‘금향’이나 ‘매향’보다 Cu 과다시비에 대한 내성이 강함을 알 수 있었다. Cu가 과다하게 시비되어 식물체의 흡수량이 증가하면 신엽에서 엽맥 간 황화현상이나 엽맥 사이에 직선형태의 황화현상이 그리고 하위엽에서는 잎 가장자리가 주황색으로 변하는 증상이 나타났다. 관비용액의 Cu 시비농도를 증가시켜도 세 종류 딸기의 식물체 내 P, K, Ca 및 Mg 함량은 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 미량원소 중 Cu 함량은 시비농도가 높아짐에 따라 식물체 내 함량이 직선적으로 증가하였으며, Fe 및 Mo 함량은 관비용액의 Cu 농도에 대한 반응이 뚜렷하지 않았고, 경향도 발견할 수 없었다. ‘금향’, ‘매향’ 및 ‘설향’ 딸기의 최대생장량보다 10% 적은 성장량과 이 때의 식물체 내 Cu 함량을 정상 생장을 위한 최대한계점으로 간주하면 ‘금향’ $71.4\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, ‘매향’ $57.9\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 그리고 ‘설향’ $74.81\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이하를 유지하도록 Cu 시비농도를 조절해야 한다고 판단하였다.

추가 주요어 : 생장, 식물영양, 영양장해, 가시적인 증상

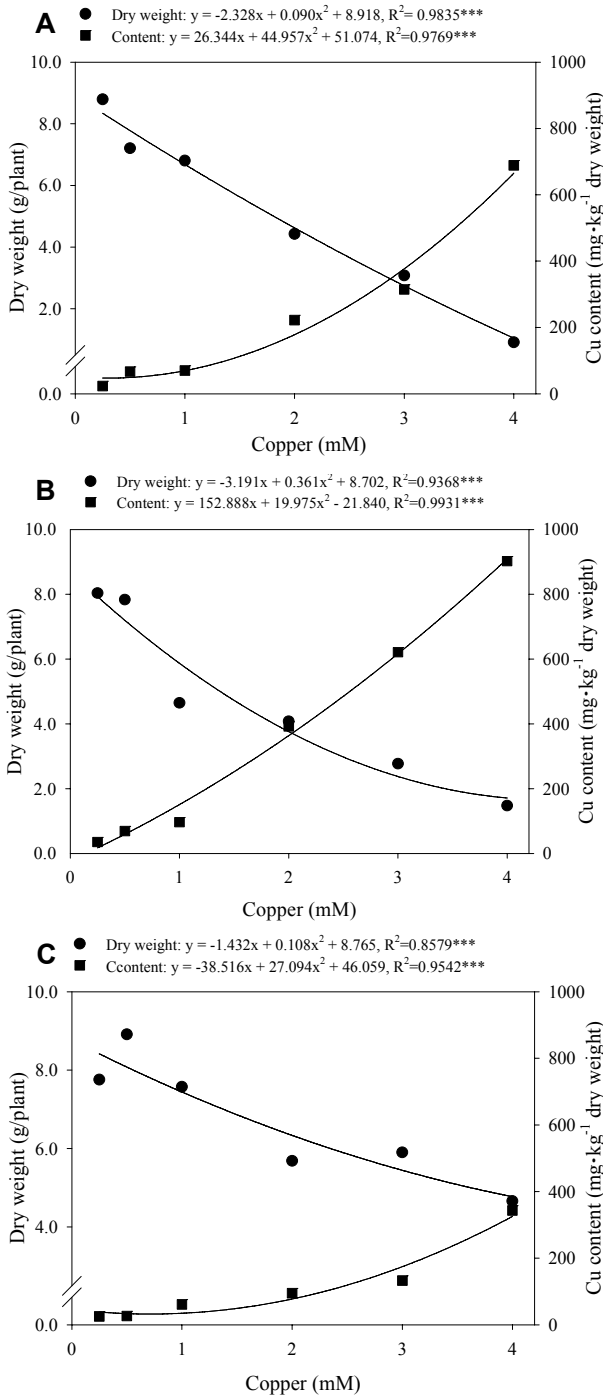


Fig. 3. Influence of elevated copper concentrations in the fertilizer solution on the changes in dry weight of above-ground tissue and tissue copper contents 120 days after trans-planting of strawberries (A: 'Keumhyang'; B: 'Maehyang'; C: 'Seolhyang').

인용문헌

- Bennett, W.F. 1993. Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. AS Press, St. Paul, Minn.
- Cassaman, K.G. 1993. Cotton, p. 111-119. In: W.F. Bennett (ed.). Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants. APS Press, St. Paul, Minn.
- Choi, J.M., S.K. Jeong, K.H. Cha, H.J. Chung, and K.S. Seo. 2000. Deficiency symptom, growth characteristics, and nutrient uptake of 'Nyoho' strawberry as affected by controlled nitrogen concentration in fertilizer solution. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 41:339-344.
- Choi, J.M., S.K. Jeong, and K.D. Ko. 2009a. Characterization of symptom and determination of tissue critical concentration for diagnostic criteria in 'Maehyang' strawberry as influenced by phosphorus concentrations in the fertigation solution. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 27:55-61.
- Choi, J.M., S.K. Jeong, and M.K. Yoon. 2009b. Characterization of symptom and determination of tissue critical concentration for diagnostic criteria in 'Maehyang' strawberry as influenced by potassium concentration in the fertigation solution. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 27:226-232.
- Choi, J.M., A. Latigui, and M.K. Yoon. 2010a. Growth and nutrient uptake of 'Seolhyang' strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch) responded to elevated nitrogen concentrations in nutrient solution. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 28:777-782.
- Choi, J.M., T.I. Kim, S.K. Jeong, M.K. Yoon, D.Y. Kim, and K.W. Ko. 2010b. Causes, diagnoses, and corrective procedures of nutritional disorders in strawberry. Miraegihoeck. Suwon, Korea.
- Clark, R.B. 1993. Sorghum, p. 21-26. In: W.F. Bennett (ed.). Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants. APS Press, St. Paul, Minn.
- Gascho, G.J., D.L. Anderson, and J.E. Bowen. 1993. Sugarcane, p. 37-42. In: W.F. Bennett (ed.). Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants. APS Press, St. Paul, Minn.
- Gibson, J.L., D.S. Pitchay, A.M. Williams-Rhodes, B.E. Whipker, P.V. Nelson, and J.M. Dole. 2007. Nutrient deficiencies in bedding plants. Ball Publishing, Batavia, IL.
- Hanan, J.J. 1998. Greenhouses: Advanced technology for protected horticulture. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Hoagland, D.R. and D.I. Arnon. 1950. The water culture method for growing plants without soil. Univ. of Calif. Agri. Exp. Sta. Circular 347.
- Locascio, S.J. 1993. Curcubit, p. 123-130. In: W.F. Bennett (ed.). Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants. APS Press, St. Paul, Minn.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press Inc., San Diego, USA.
- Nelson, P.V. 2003. Greenhouse operation and management. 6th ed. Prentice Hall, NJ.
- Rural Development Administration (RDA). 2003. Agricultural science technique research investigation and analysis standard. 4th ed. RDA, Suwon, Korea.
- Scaife, A. and M. Turner. 1983. Diagnosis of mineral disorders in plants. Vol. 2. Vegetables. Her Majesty's Stationary Office, London.
- Ulrich, A. 1993. Potato, p. 149-156. In: W.F. Bennett (ed.). Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants. APS Press, St. Paul, Minn.