Kor. J. Hort. Sci. Technol. 30(4):392-399, 2012 DOI http://dx.doi.org/10.7235/hort.2012.11143

국내육성 주요 딸기 품종에서 발생하는 Mo 과잉 증상 및 영양진단을 위한 식물체 내 한계농도

최종명[1*] · 남민호[1] · Chiwon W. Lee[2] · 천종필[1]

[1]충남대학교 농업생명과학대학 원예학과, [2]미국 North Dakota 주립대 식물학과

Characterization of Toxicity Symptoms of Molybden and Determination of Tissue Threshold Levels for Diagnostic Criteria in Korean Bred Strawberries

Jong Myung Choi[1*], Min Ho Nam[1], Chiwon W. Lee[2], and Jong Pil Chun[1]

[1]Department of Horticulture, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
[2]Department of Plant Sciences, North Dakota State University, Fargo, ND 58108, USA

Abstract. This study was carried out to investigate the influence of molybden (Mo) concentrations in fertilizer solution on the growth of and nutrient uptake by domestically bred strawberries. Tissue analysis based on the dry weight was also conducted to determine the threshold levels in plants when Mo toxicity developed in strawberries. The leaf chlorophyll contents decreased lineally as Mo concentrations in the fertilizer solution were elevated. The differences among treatments in chlorophyll contents were statistically significant. The fresh and dry weights decreased significantly when the Mo concentrations in fertilizer solution were higher than 3.0 mM in 'Keumhyang' and 'Maehyang' strawberries and 1.0 mM in 'Seolhyang' strawberry. The elevation of Mo concentrations in fertilizer solution resulted in severe toxicity and crops developed the unique symptoms. The margin of older leaves became yellow and desiccated. Then, the margin of leaf blade rapidly became bronze colored and died as the symptoms spread up the plants. The interveinal area of the young leaves became yellowing. The elevation of Mo concentrations in fertilizer solution did not influence the tissue P, K, and Mg contents based on the dry weight. The tissue Ca contents were higher in 1.0 mM treatment than other treatments of 'Keumhyang' and 'Seolhyang' strawberries. The tissue Mo contents based on the dry weight of 'Keumhyang', 'Maehyang', and 'Seolyahng' strawberries were 76.5, 104.0, and 187.3 mg·kg^{-1}, respectively, in the 0.25 mM treatments and 4,155, 5,367, and 2,190 mg·kg^{-1}, respectively, in the 4.0 mM treatments. The contents increased lineally as Mo concentrations in fertilizer solution were elevated. When the concentration of Mo at which growth of crops were retarded by 10% is regarded as threshold level, the Mo contents based on dry weight of above ground plant tissue should be lower than 653.4, 686.2, and 589.7 mg·kg^{-1}, in 'Keumhyang', 'Maehyang', and 'Seolyahng' strawberries, respectively.

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

서 언

딸기를 양액재배할 경우 작물이 흡수하는 비료를 물에 용해시켜 주기적으로 공급하므로 토경재배에 비해 무기원소 과부족이 원인이 된 증상발현이나 생장억제 현상 등이 덜 나타날 것으로 많은 사람들이 예상한다. 그러나 실제 작물을 배지경 양액재배하면 토경재배에 비해 생리장해 발현빈도가 더 높은데 이는 토양의 양이온교환용량이 양액재배를 위한 인공 배지 보다 월등히 높아 무기원소 과부족에 대한 완충력이 높기 때문이다(Bunt, 1988; Nelson, 2003). 이 외에 무기원소의 식물체 내 이동, 근권부의 pH 변화, 관수장비의 오작동, 무기원소 상호 간 길항작용, 또는 근권부 저온

***Corresponding author:** choi1324@cnu.ac.kr

※ Received 4 December 2011; Revised 11 January 2012; Accepted 12 January 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.

등도 무기원소 과부족이 원인인 생리장해 발현의 원인이 될 수 있다(Gibson et al., 2007).

몰리브덴(Mo)은 작물이 생장하는데 반드시 필요한 16종류의 필수원소 중 식물체 내 농도가 가장 낮고 아주 적은 양만으로도 큰 문제 없이 작물이 생장할 수 있으며(Marschner, 1995), 결핍보다는 과다흡수에 의해 생리장해가 더 자주 발생하는 원소이다. Choi et al.(2010)은 Mo 함량이 높은 비료를 경엽처리하거나 관주처리할 때 또는 상토에 기비를 혼합하는 과정에서 미량원소복합제의 처리량이 너무 많을 경우 근권부 Mo 농도가 과도하게 높아질 수 있으며, 이로 인해 과잉증상 발현 및 작물 생장량 저하의 원인이 될 수 있다고 하였다.

재배하는 작물에서 생리장해가 발생할 때 정확한 진단이 이루어지면 쉽게 해결방법을 강구할 수 있으며 생장량이나 수확량 저하를 방지할 수 있다. 생리장해의 진단은 가시적인 판단, 토양 분석 결과 또는 식물체 분석결과를 기초로 이루어지며 선행 연구결과가 있을 때 그 결과와 새롭게 분석한 결과를 비교함으로써 진단의 목적을 달성할 수 있다(Hanan, 1998).

그러나 딸기에서 Mo 과잉에 의한 생리장해의 증상 또는 생리장해 진단을 위한 식물체 및 토양 중 한계농도와 관련한 연구결과가 없다. 특히 딸기의 경우 품종별로 흡비특성이 독특하여 기존에 수행된 연구결과라 하더라도 새롭게 육성된 품종에 적용하기에는 많은 문제점이 있다.

따라서 국내에서 육성되어 재배면적이 급증하는 신품종들을 대상으로 인위적으로 Mo 과잉피해를 발현시켜 증상의 특징과 과잉증상 유발시기의 식물체내 한계농도를 설정하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

대상 작물

본 연구는 논산딸기시험장에서 육성된 '금향' '매향' 및 '설향' 딸기를 대상으로 수행하였으며 모두 *Fragaria* × *ananassa* Duch에 포함되는 8배체 품종이었다. 딸기 묘는 논산딸기시험장에서 조직배양한 후 순화되고 저온처리를 한 상태로 수집하여 본 연구에 이용하였다.

상토 및 비료 용액

실험을 위하여 피트모스와 펄라이트를 7:3(v/v)의 비율로 혼합한 상토를 조제하였으며, 조제된 상토를 플라스틱 포트(용적 1,600mL)에 충전하고, 준비된 딸기묘를 정식하였다.

처리용액을 조제하기 위해 Hoagland 용액(Hoagland and Arnon, 1950)을 기본으로 다량원소의 농도를 NO_3 15, PO_4 1, K 6, Ca 5, Mg 2, 그리고 SO_4 2mM로 고정시켰다. 미량원소의 경우 5종류 미량원소(B, Cu, Fe, Mn와 Zn)를 포함한 H_3BO_3, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot H_2O$, 그리고 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$의 5종류 무기염을 확보하고, B 46.2, Cu 0.31, Fe 33.7, Mn 9.1 그리고 Zn 0.76μM로 농도를 조절하였다. Mo의 경우 $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$를 이용하여 농도를 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 그리고 4.0mM로 조절하여 처리용액을 조제하였다. 모든 처리용액은 처리 전 pH를 측정하였고 HCl과 NaOH를 이용하여 6.0으로 교정한 배양액을 점적관수 방법으로 공급하였다.

세 종류 딸기 품종을 대상으로 Mo의 농도에 따른 6처리, 그리고 각 처리당 5반복으로 하여 총 90개의 포트를 배치하였다.

재배 및 관리

정식 전 유묘의 뿌리 부분에 잔존한 상토를 물로 씻어내어 모두 제거한 후 준비된 플라스틱 포트에 정식하였다. 정식 후 45일간 증류수만 관수하여 식물체 내의 무기원소 함량을 최소한으로 낮추었고, 각 식물체는 신엽을 기준으로 3매만 남긴 채 하위엽을 모두 제거하였다. 정식 45일 후부터 120일까지 조성된 비료용액을 공급하였는데 처리 도중 발생하는 꽃자루와 런너는 수시로 제거하였다.

본 실험은 충남대학교에 위치한 유리온실에서 수행하였으며 재배기간 중 평균 온도는 주간 24℃, 야간 15℃였고, 상대습도 60-70%, 평균일장 15h, 그리고 광합성유효광양자속은 330-370$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$였다.

생육조사 및 무기원소 함량 분석

정식 120일 후에 작물 생육을 조사하고, 식물체를 수확하여 무기원소 함량을 분석하였다.

지상부 생육조사 항목은 초장, 초폭, 엽장, 엽폭, 엽수, 엽록소함량, 관부직경, 지상부 생체중 및 지상부 건물중이었다. 관부직경은 지제부 상단 1cm를 측정하였고, 지상부 생체중을 측정한 후 80℃ 건조기에서 48시간 건조시킨 후 무게를 측정하여 건물중으로 삼았다. 엽록소 함량은 신엽을 기준으로 3번째 엽을 Chlorophyll Meter(Minola, Model SPAD-502)를 사용하여 측정하였다. 기타 조사항목은 Choi et al.(2000)의 방법에 준하여 조사하였다.

정식 120일 후에 식물체를 수확하여 무기원소 함량을 분석하였으며 근권부를 제외한 지상부 전체를 분석 대상으로 삼았다. 수확된 식물체는 0.01N HCl 용액에 1분간 침지한 후 증류수로 수세하여 식물체의 잎에 묻어 있는 이물질을 제거

하였고, 80℃의 건조기에서 48시간 건조시킨 후 0.9mm체(20mesh screen)를 통과하도록 분쇄하여 무기원소 함량 분석에 이용하였다. 식물체 내 무기성분 함량의 분석은 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사분석기준(RDA, 2003)에 준하여 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (Thermo Elemental Tracescan, USA)를 사용하여 수행하였다.

통계분석

Mo 시비 농도가 식물의 생육, 무기물 함량 그리고 토양 pH 및 EC에 미치는 영향은 각 원소내의 처리별로 Duncan의 다중검정과 회귀분석을 하였으며, 다항회귀분석을 통해 얻어진 1-2차항 회귀선 중 최적예측함수를 결정하기 위해 R square 값과 Incremental F 값이 큰 회귀식을 적용하여 판단하였다. 통계분석은 Costat 통계프로그램(v. 6.3; Monterey, CA)으로 수행하였다.

결과 및 고찰

관비용액의 Mo 시비농도를 증가시킴에 따라 변화된 '금향', '매향' 및 '설향' 딸기의 지상부 생장을 Table 1에 나타내었다. 관비용액 속의 Mo 농도를 높여도 초장이 큰 영향을 받지 않아 Mo 처리간 통계적인 차이가 인정되지 않았고, 직선 및 2차곡선회귀가 성립하지 않아 뚜렷한 경향을 찾을 수 없었다. 초폭의 경우 '매향'과 '설향' 딸기는 Mo 시비농도에 영향을 받아 '매향'은 4.0mM 시비구에서, '설향'은 3.0mM 시비구에서 다른 처리보다 유의하게 초폭이 적었으며 각각 2차곡선회귀적 또는 직선적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 '금향'에서는 통계적인 차이가 인정되지 않았고 경향도 발견할 수 없었다. Mo 시비농도를 증가시키면 '금향'과 '매향' 딸기의 엽수가 뚜렷하게 감소하는 경향을 보였지만 '설향' 딸기에서는 경향을 찾을 수 없었다. 이는 '설향' 딸기의 경우 황화 또는 괴사된 하위엽이 탈락되지 않고 식물체에 붙은 상태로 남아 있어 생육조사를 하면서 엽수를 계산할 때 포함되었기 때문이라고 생각한다.

관비용액의 Mo 농도를 높일 경우 엽록소 함량이 뚜렷하게 감소하여 Mo 시비농도의 처리간 통계적인 차이가 인정되었으며 모두 직선적으로(0.1% 수준) 감소하는 경향을 보였다. '금향' 및 '매향' 딸기의 생체중은 3.0mM 이상의 고농도 Mo 시비구에서 통계적으로 유의하게 가벼웠지만 '설향' 딸기는 1.0mM 이상의 고농도 Mo 시비구에서 유의하게 생체중이 가벼웠다. '금향', '매향' 및 '설향' 딸기의 생체중은 각각 1%, 5% 및 0.1% 직선회귀가 성립하여 경향이 뚜렷함을 나타내고 있다. 건물중도 정도의 차이가 있지만 생체중과 유사한 경향을 보이며 통계적인 차이가 인정되었고, 관

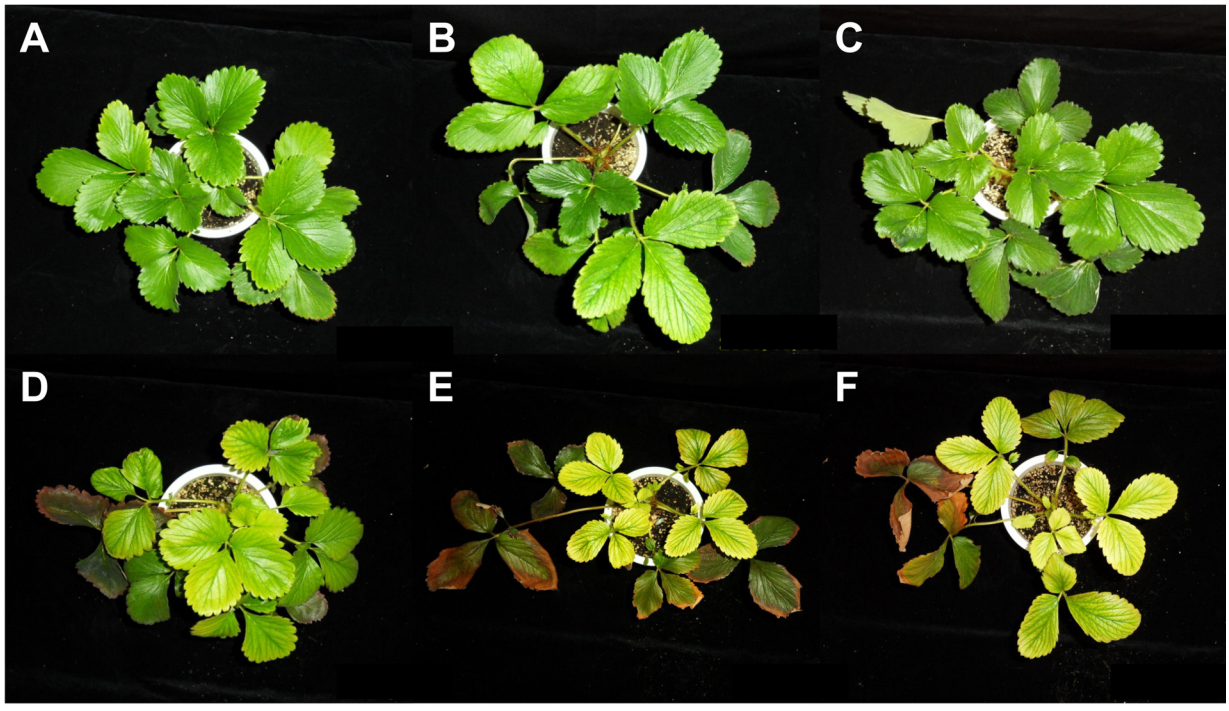

Fig. 1. Comparison of normal plants (A, B, and C) and the molybden excess plants (D, E, and F) of 'Keumhyang' (A and D), 'Maehyang' (B and E) and 'Seolhyang' (C and F) strawberries. The elevation of Mo concentrations up to 4 mM in fertilizer solution resulted in severe toxicity such as death of extensive areas of older leaves. The margin of older leaves became yellow and desiccated. Then, the margin of leaf blade rapidly became bronze color and died as the symptoms spread up the plants. The yellowing on the interveinal area of young leaves was appeared in molybden excess plants.

비용액의 Mo 시비농도가 높아짐에 따라 직선적으로 감소하는 경향을 보였다.

과잉증상의 특징

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 '금향', '매향' 및 '설향' 딸기에서 Mo 과잉증상은 최초에 하위엽부터 발현되었으며, 하위엽 가장자리가 황화되면서 말라 죽은 후 그 부위가 확대되는 양상으로 변화하였다. 또한 하위엽 가장자리가 구리색으로 변하면서 점차 그 부위가 상위엽으로 확대되었다. 신엽에서 발견되는 엽맥 간 황화현상은 Choi et al.(2010) 등이 보고한 Fe 결핍증상과 매우 유사하였다.

Fig. 2는 Mo 시비농도에 영향을 받은 '금향', '매향' 및 '설향' 딸기의 하위엽을 채취하여 그 증상을 비교한 것이다. 관비용액의 Mo 시비농도를 높일 경우 세 종류 딸기 모두 1.0mM 시비구에서 엽신이 황화되었고, 증상이 심화되면서 갈변하였다. 잎 가장자리에서 시작된 갈변현상은 Mo 시비농도가 높아질수록 엽신 내부로 확대되었다.

Mo 과잉증상과 관련하여 Windsor and Adams(1987)는 상추를 재배할 때 첫 번째 과잉증상이 뿌리에서 갈변하는 현상으로 나타나며, 증상이 심해지면 지상부 생장이 심하게 위축되고, 엽신에 황화현상이 나타난다고 하였다. Clark(1993)는 사탕수수에서 Mo 시비량이 과다할 경우 인산결핍과 매우 유사한 증상이 나타나며 두 증상의 차이를 구분하기가 매우 어렵다고 하였다. 본 연구에서 세 종류 딸기를 재배할 때 발현된 Mo 과잉증상은 Windsor and Adams(1987)가 보고한 바와 유사하게 지상부 생장이 심하게 위축되었고 신엽부위의 엽맥간 황화현상이 나타났다. 그러나 Clark(1993)는 Mo 과잉시비 시 신엽의 엽맥간 황화현상에 관해서는 보고

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

Mo (mM)		Plant height (cm)	Plant width (cm)	Number of leaves	Petiole length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Chlorophyll content (SPAD)	Crown diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
'Keum-hyang'	0.25	14.4 a[z]	40.4 a	10.0 a	8.1 a	8.9 a	8.64 a	38.1 ab	13.8 a	30.4 ab	7.74 ab
	0.5	18.6 a	39.9 a	10.0 a	7.6 ab	8.7 a	10.30 a	40.5 a	13.3 a	32.0 a	7.88 a
	1.0	17.4 a	44.1 a	9.0 ab	6.8 abc	8.6 a	10.16 a	39.1 ab	14.3 a	26.0 abc	6.30 abc
	2.0	14.6 a	43.4 a	8.6 ab	6.6 bc	8.0 ab	10.34 a	26.4 bc	13.0 a	28.9 abc	7.18 abc
	3.0	18.2 a	48.7 a	8.0 b	6.7 abc	8.5 a	10.12 a	22.9 c	12.8 a	23.4 bc	5.52 bc
	4.0	16.4 a	44.0 a	8.8 ab	6.0 c	6.9 b	8.30 a	25.0 c	13.1 a	21.4 c	5.08 c
Linear		NS	NS	*	***	**	NS	***	NS	**	**
Quadratic		NS	NS	*	**	*	NS	**	NS	*	**
'Mae-hyang'	0.25	18.6 a	39.9 ab	9.0 ab	11.3 a	9.7 a	6.18 a	37.5 a	13.8 a	29.6 a	5.54 a
	0.5	18.2 a	48.7 ab	10.0 a	12.6 a	9.3 a	5.90 a	39.4 a	14.3 a	20.9 ab	5.42 ab
	1.0	19.0 a	50.1 a	7.6 b	13.0 a	10.1 a	5.36 ab	26.2 b	14.0 a	24.6 ab	5.24 ab
	2.0	20.8 a	45.9 ab	7.4 b	12.3 a	9.8 a	5.96 a	32.4 ab	14.4 a	20.2 ab	4.94 ab
	3.0	17.9 a	41.5 ab	7.0 b	12.2 a	9.4 a	5.14 ab	14.5 c	13.4 ab	18.6 b	3.98 b
	4.0	16.3 a	38.0 b	7.4 b	9.9 a	7.4 b	4.70 b	13.4 c	12.0 b	15.1 b	3.24 b
Linear		NS	NS	*	NS	*	**	***	*	*	*
Quadratic		NS	*	*	NS	**	*	***	**	*	*
'Seol-hyang'	0.25	17.4 a	44.1 a	10.2 ab	9.1 a	9.2 a	7.44 a	41.0 a	13.8 a	32.3 a	8.90 a
	0.5	16.4 a	44.0 a	9.8 ab	9.2 a	8.5 a	6.52 ab	40.2 a	13.7 a	29.9 a	7.86 ab
	1.0	17.0 a	42.7 ab	10.4 a	10.0 a	9.2 a	7.80 a	43.0 a	12.3 a	25.5 b	7.76 ab
	2.0	15.9 a	43.3 ab	9.0 ab	9.1 a	8.8 a	7.20 ab	30.6 b	13.3 a	24.2 b	7.60 ab
	3.0	13.4 a	36.1 b	9.6 ab	8.1 a	7.4 a	6.48 ab	31.6 b	12.8 a	18.8 c	6.56 b
	4.0	15.0 a	36.9 ab	8.2 b	9.7 a	7.2 a	5.54 b	20.5 c	12.6 a	16.6 c	4.94 c
Linear		NS	**	NS	NS	*	*	***	NS	***	***
Quadratic		NS	*	NS	NS	NS	*	***	NS	***	***

[z]Mean 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.

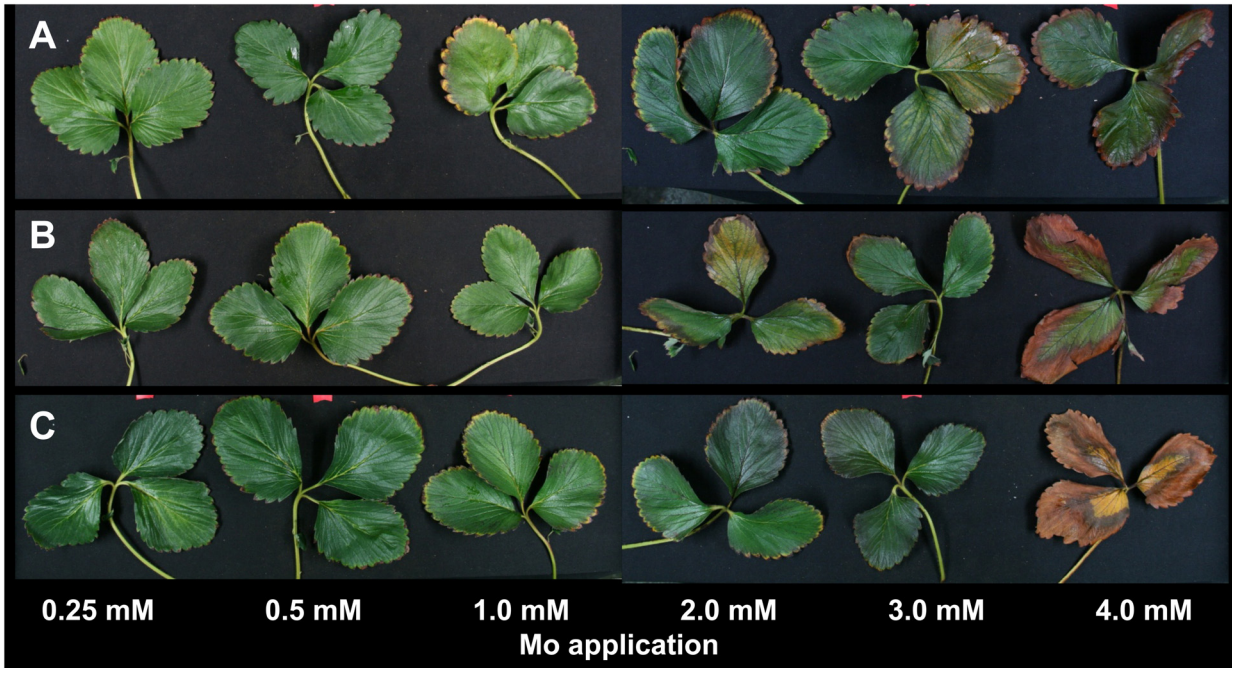

Fig. 2. Comparison of older leaves of 'Keumhyang' (A), 'Maehyang' (B), and 'Seolhyang' (C) strawberries. Initial symptoms of Mo toxicity were appeared when Mo concentrations in fertilizer solution were higher than 1.0 mM. The margins of leaf blade became yellowing and turned to browing as symptoms were severe. The browning area advanced from edge to toward center of leaf blade and finally died.

하지 않아 본 연구결과와 차이가 있었다. 또한 Mo 과잉증상은 Choi et al.(2010)이 보고한 인산결핍증상과 매우 유사하였지만 본 연구에서는 신엽에서 갈변현상이 나타나는 차이를 보였다.

식물체의 무기원소 함량

관비용액의 Mo 농도를 조절하여 시비하고 정식 120일 후 지상부 전체를 수확하여 무기물 함량을 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 식물체 내의 P와 K 함량은 산술적인 차이가 있었지만 통계적으로 유의한 차를 보이지 않았고, 직선 및 2차곡선회귀가 성립하지 않아 경향을 발견할 수 없었다.

식물체의 Ca 함량은 '매향' 딸기에서 처리간 차이가 인정되지 않았고 경향도 발견할 수 없었지만 '금향'과 '설향' 딸기에서는 Mo 시비농도의 처리간 차이가 인정되었다. '금향', '매향' 및 '설향' 딸기에서 식물체 내 Ca 함량이 가장 높았던 Mo 처리는 1.0mM 시비구였으며 1.0mM 시비구보다 Mo 시비농도가 높거나 낮을 경우 식물체 내 Ca 함량이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 '설향' 딸기에서는 2차곡선회귀가 성립하여 경향이 뚜렷하였지만 '금향' 딸기에서는 경향이 뚜렷하지 않았다. 식물체 내 Mg 함량도 세 종류 딸기 모두 처리 간 차이가 인정되지 않았고 '설향' 딸기에서만 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

관비용액의 Mo 농도를 조절하여 시비한 경우 '금향' 딸기의 식물체 내 Fe 함량에는 뚜렷한 영향을 미치지 않아 처리간 통계적인 차이가 인정되지 않았고 경향도 발견할 수 없었다. 그러나 '매향'과 '설향' 딸기의 경우 1.0mM Mo 시비구에서 Fe 함량이 가장 높고, 이보다 낮거나 높은 Mo 시비농도에서 식물체 내 Fe 함량이 낮아졌지만 통계적으로는 직선 또는 2차곡선회귀가 성립하지 않아 경향을 찾을 수 없었다. 식물체의 Mn 함량에서 '금향' 딸기는 0.5, 1.0 및 2.0mM 시비구에서, '설향' 딸기는 0.5 및 1.0mM의 Mo 시비구에서 다른 처리보다 유의하게 높았다.

건물중에 기초한 식물체의 무기물 함량에서 관비 용액의 Mo 농도가 높아질수록 식물체의 Mo 함량도 뚜렷하게 증가하였다. 0.25mM Mo 시비구에서 '금향', '매향' 및 '설향' 딸기의 식물체 내 함량이 각각 76.5, 104.0 및 187.3mg·kg^{-1}였으나 4.0mM 시비구에서 각각 4,155, 5,367 및 2,190mg·kg^{-1}으로 분석되었으며, Mo 시비농도에 따른 처리 별 통계적인 차이와 함께 뚜렷하게 직선적으로 증가하는 경향을 보였다. 본 실험에서 세 종류 딸기의 Mo 함량을 분석한 결과 '매향', '금향' 및 '설향' 딸기의 순으로 식물체 내 함량이 낮아졌다. 이는 Table 1에 나타낸 바와 같이 식물체의 지상부 생장량 차이에 따른 희석효과에서 그 원인을 찾을 수 있다. 즉, 동일한 농도로 Mo을 시비하여도 Mo 과다시비에 대한 내성이 강하여 지상부 생장량이 많았던 '설향' 딸기는 건물중에 기초하여 함량을 나타낸 본 연구에서 낮은 수준으로

Table 2. Influence of elevated Mo 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.

Mo (mM)		P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
		(%)				($mg \cdot kg^{-1}$)					
'Keum-hyang'	0.25	0.38 a[z]	1.94 a	0.40 b	0.40 a	58.4 a	51.5 b	39.5 a	4.0 a	16.6 ab	76.5 c
	0.5	0.43 a	2.22 a	0.47 ab	0.47 a	84.8 a	75.8 a	25.8 a	5.1 a	14.1 ab	234.2 c
	1.0	0.37 a	2.12 a	0.66 a	0.66 a	143.6 a	77.7 a	40.4 a	7.8 a	6.7 b	928.9 bc
	2.0	0.42 a	2.20 a	0.55 ab	0.55 a	140.7 a	77.8 a	56.1 a	6.5 a	7.0 b	1,344.9 bc
	3.0	0.35 a	2.01 a	0.42 b	0.42 a	58.3 a	46.8 b	25.0 a	7.6 a	13.5 a	2,375.4 b
	4.0	0.39 a	2.11 a	0.47 ab	0.47 a	59.6 a	51.7 b	33.6 a	7.6 a	17.0 ab	4,155.2 a
Linear		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***
Quadratic		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***
'Mae-hyang'	0.25	0.48 a	2.08 a	0.38 a	0.55 a	63.4 ab	75.4 a	44.3 a	6.3 a	19.0 a	104.0 e
	0.5	0.48 a	2.13 a	0.42 a	0.49 a	70.6 ab	73.4 a	41.3 a	10.3 a	22.3 a	222.6 e
	1.0	0.41 a	1.74 a	0.41 a	0.55 a	94.6 a	86.0 a	56.3 a	9.0 a	8.3 b	939.4 d
	2.0	0.50 a	2.23 a	0.46 a	0.54 a	56.6 b	84.0 a	45.0 a	7.0 a	18.7 a	1,681.4 c
	3.0	0.41 a	2.26 a	0.49 a	0.46 a	73.4 ab	66.6 a	55.0 a	7.3 a	8.0 b	2,797.4 b
	4.0	0.56 a	2.23 a	0.47 a	0.50 a	69.4 ab	62.6 a	61.0 a	10.7 a	19.3 a	5,366.6 a
Linear		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***
Quadratic		NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***
'Seol-hyang'	0.25	0.39 a	1.91 a	0.51 ab	0.44 a	94.7 ab	64.2 abc	43.9 a	8.8 a	12.0 ab	187.3 c
	0.5	0.36 a	1.88 a	0.51 ab	0.49 a	66.1 ab	79.6 a	44.8 a	7.6 a	21.5 a	123.7 c
	1.0	0.42 a	2.09 a	0.65 a	0.49 a	102.0 a	75.5 ab	45.9 a	7.7 a	9.9 b	786.7 bc
	2.0	0.39 a	2.02 a	0.50 ab	0.42 a	51.6 b	60.0 bc	40.0 a	6.5 a	15.3 ab	806.2 bc
	3.0	0.35 a	1.97 a	0.37 b	0.35 a	58.1 ab	57.5 bc	62.8 a	6.2 a	8.3 b	1,567.2 ab
	4.0	0.35 a	2.15 a	0.37 b	0.34 a	57.1 ab	46.4 c	60.8 a	11.0 a	6.2 b	2,189.5 a
Linear		NS	NS	NS	*	NS	**	NS	NS	NS	**
Quadratic		NS	NS	*	*	NS	**	NS	NS	NS	*

[z]Mean 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.

분석 결과가 도출되었지만 "Mo 함량 × 건물중"으로 계산하여 총 흡수된 Mo량을 계산할 경우 동일한 Mo 시비농도를 적용한 세 종류 딸기의 총 Mo 흡수량은 유사한 수준이었다(자료 미제시). Marschner(1995)도 건물중 변화에 따라 식물체의 성분 함량에 차이가 발생할 수 있다고 본 연구결과와 유사한 보고를 한 바 있다.

과잉피해 방지를 위한 식물체 내 한계 농도

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 Mo의 농도를 조절하여 시비한 경우 생장량이 가장 많았던 처리에서 금향', '매향' 및 '설향' 딸기의 지상부 건물중은 각각 7.88, 5.54 및 8.90g 였다. Ulrich(1993)가 보고한 바와 같이 최대생장의 90% 생장량을 정상적인 작물재배를 위한 최대한계점으로 간주할 경우 각각 식물체당 7.09, 4.99 및 8.01g에 해당한다.

'금향' 딸기의 경우 Mo 시비농도에 대한 건물중 변화의 회귀식인 $y = -0.643x - 0.013x^2 + 7.834$을 적용하면 90% 생장량에 해당하는 식물체당 건물중 7.09을 생산할 때의 Mo 농도는 0.46mM이며, 0.46mM을 식물체 Mo 함량에 대입할 경우 건물중에 기초한 Mo 함량이 $289.8mg \cdot kg^{-1}$이 된다. 따라서 건물중에 기초한 식물체 Mo 함량을 $289.8mg \cdot kg^{-1}$ 이하로 조절하여야 '금향' 딸기의 Mo 과잉피해를 방지할 수 있다고 판단한다.

이상과 같은 논리를 '매향' 딸기에 적용할 경우 최대 건물중 생산량인 5.54g의 90%에 해당하는 4.99g의 건물중이 한계점으로 간주될 수 있으며, 회귀식인 $y = 0.354x - 0.215x^2 + 5.176$의 공식을 적용하면 Mo 시비농도가 약 0.8mM에 해당한다. 따라서 0.8mM을 식물체 내 Mo 함량변화의 회귀식인 $y = 173.09x + 272.2x^2 + 166.4$에 대입하면 $522.5mg \cdot kg^{-1}$이 된다. 그러므로 '매향' 딸기의 Mo 과잉피해를 방지하기 위해서는 건물중에 기초한 Mo 함량이 $522.5mg \cdot kg^{-1}$이하가 되도록 시비농도를 조절해야 한다고 판단한다.

한편 본 연구에서 '설향' 딸기의 최대 건물중 생산량은

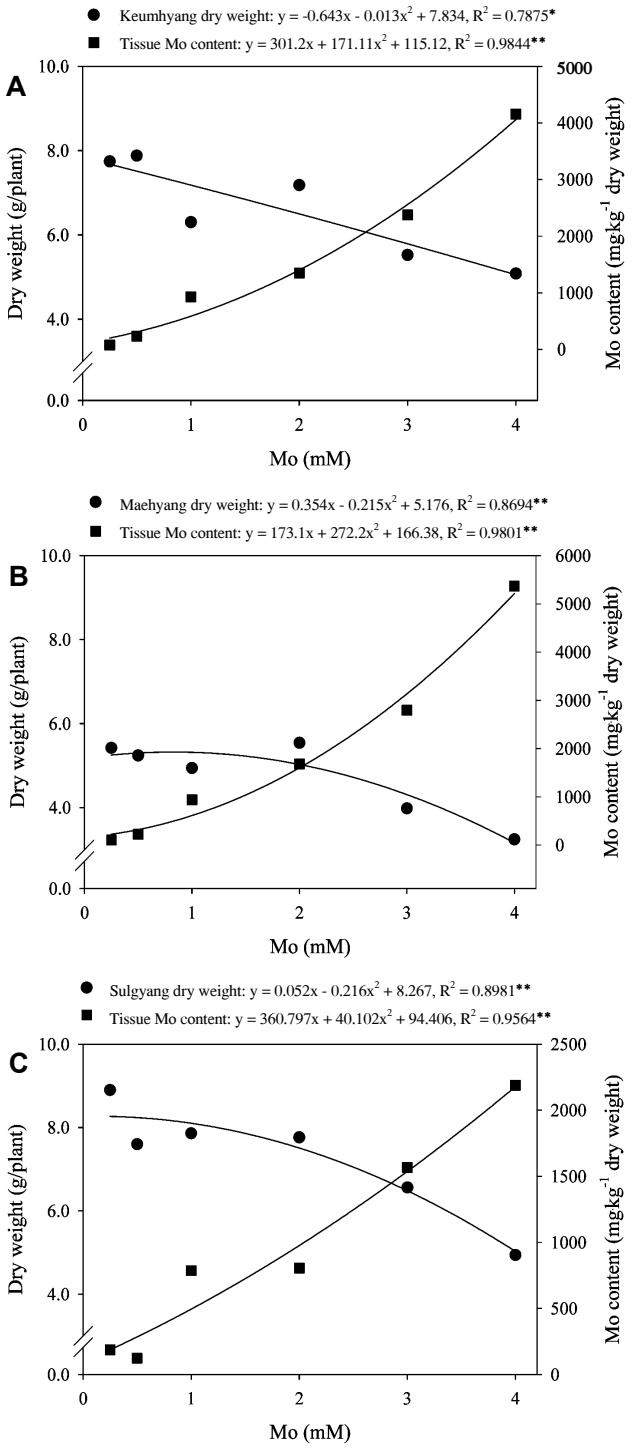

Fig. 3. Influence of elevated molybden concentrations in the fertilizer solution on the changes in dry weight of above-ground tissue and tissue molybden contents 120 days after transplanting (A, 'Keumhyang'; B, 'Maehyang'; C, 'Seolhyang').

식물체당 8.90였으며 90%에 해당하는 건물중은 8.01g이다. 건물중 변화의 회귀식인 $y = 0.052x - 0.216x^2 + 8.267$과 식물체 내 Mo 함량 변화인 $y = 127.6x + 62.7x^2 + 398.0$의 회귀식을 적용하여 계산하면 90%의 생장량을 보일 때의 Mo 시비농도는 1.21mM이며, 1.21mM을 Mo 함량 변화에 대입하면 628mg·kg^{-1}이 된다. 따라서 628mg·kg^{-1} 이하를 유지할 수 있도록 시비농도를 조절해야 Mo 과잉에 의한 피해를 방지할 수 있다고 판단하였다.

Lee et al.(1996)은 제라니움을 대상으로 Mo 시비농도가 작물 생육 및 과잉 피해 발생에 미치는 영향을 연구하였고, 지상부 전체의 건물중을 기준으로 485mg·kg^{-1}에서 식물생장이 저조하였다고 보고하였다. Choi et al.(1996)은 매리골드에서, 그리고 Park et al.(1992)은 페튜니아를 대상으로 연구한 내용을 보고하였으며 식물체 내 함량이 약 600mg·kg^{-1}일 때 생육이 저조하였다고 보고한 바 있다. 본 연구의 결과를 이들이 보고한 내용과 비교할 때 '금향' 딸기는 제라니움이나 매리골드보다 월등히 낮은 농도에서 과잉피해를 방지할 수 있는 한계점이 형성되나 '매향'과 '설향' 딸기는 매리골드와 유사하거나 약간 낮은 수준에서 한계점이 형성된다고 판단하였다.

초 록

미량원소인 Mo의 시비농도를 인위적으로 조절하여 '금향', '매향' 및 '설향' 딸기를 재배하면서 생장에 미치는 시비수준의 영향, 생육을 우수하게 유지할 수 있는 식물체의 한계농도, 그리고 과잉에 의해 발현되는 생리장해의 특징을 구명하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 관비용액의 Mo 농도를 높일 경우 엽록소 함량이 뚜렷하게 직선적으로 감소하여 세 종류 딸기에서 Mo 시비농도의 처리간 차이가 인정되었다. '금향'과 '매향'은 3.0mM 이상, 그리고 '설향' 딸기는 1.0mM 이상의 고농도 Mo 시비구에서 이보다 낮은 Mo 시비구보다 유의하게 생체중 및 건물중이 감소하였다. Mo이 과다하게 시비될 경우 최초의 Mo 과잉증상이 하위엽에서 발현되었으며, 하위엽 가장자리가 황화된 후 괴사하면서 그 부위가 점차 확대되는 양상으로 변화되었다. 또한 하위엽 가장자리가 점차 구리색으로 변하면서 그 부위가 상위엽으로 확대되었으며, 신생엽에서는 엽맥 간 황화현상이 나타났다. Mo 시비농도를 증가시켜도 세 종류 딸기의 식물체 내 P, K 및 Mg 함량은 처리간 통계적인 차이와 경향을 발견할 수 없었다. '금향'과 '설향' 딸기에서 Mo 시비농도에 따른 처리간 Ca 함량의 차이가 인정되었는데 1.0mM Mo 시비구에서 가장 높고, 이보다 높거나 낮은 Mo 시비농도에서 Ca 함량이 감소하였다. 관비용액의 Mo 농도를 0.25mM로 조절한 처리의 식물체 내 Mo 함량이 '금향', '매향' 및 '설향'이 각각 76.5, 104.0, 187.3mg·kg^{-1}였지만, 시비농도가 높아질수록 식물체내 Mo 함량이 직선적으로 증가하여 4.0mM 시비구에서 각각 4,155, 5,367 및 2,190mg·kg^{-1}으로 분석되었

다. 최대생장량의 90% 생장량과 이때의 식물체 내 Mo 함량을 정상적인 작물재배를 위한 최대한계점으로 간주하면 '금향', '매향' 및 '설향' 딸기의 건물중에 기초한 Mo 함량이 각각 653.4, 686.2, 그리고 589.73mg·kg^{-1} 이하를 유지하도록 Mo 시비농도를 조절해야 한다고 판단하였다.

추가 주요어 : 생장, 생리장해, 식물 영양, 가시적인 증상

인용문헌

Bunt, A.C. 1988. Media and mixes for container grown plants. Unwin Hyman, London.

Choi, J.M., C.H. Park, and C.W. Lee. 1996. Micronutrient toxicity in french marigold. J. Plant Nutrition 19:901-916.

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., T.I. Kim, S.K. Jeong, M.K. Yoon, D.Y. Kim, and K.W. Ko. 2010. Causes, diagnosises, and corrective procedures of nutritional disorders in strawberry. Mirae GiHock, 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.

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. Calif. Agri. Exp. Sta. Cirular 347.

Lee, C.W., J.M. Choi, and C.H. Park. 1996. Micronutrient toxicity in seed geranium (*Pelagonium* × *hortorum* Bailey). J. Amer. Soc. Hort. Sci. 121:77-82.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press Inc., San Diego, CA.

Nelson, P.V. 2003. Greenhouse operation and management. 6th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Park, C.H., C.W. Lee, and J.M. Choi. 1992. Induced micronutrient toxicity in Petunia hybrida. J. Plant Nutrition 15:327-339.

Rural Development Administration (RDA). 2003. Agricultural science technique research investigation and analysis standard. 4th ed. RDA, Suwon, Korea.

Ulrich, A. 1993. Potato, p. 149-156. In: W.F. Bennett (ed.). Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants. APS Press, St. Paul, Minn.

Winsor, G. and P. Adams. 1987. Diagnosis of mineral disorders in plants. Vol. 3. Glasshouse crops. Her Majesty's Stationery Office, London.