

博 士 學 位 論 文

汁液 分析에 의한 養液栽培
토마토(*Lycopersicum esculentum*
Mill.)의 無機榮養 診斷



濟州大學校 大學院

農化學科

金 良 錄

2003年 12月

汁液 分析에 의한 養液栽培
토마토(*Lycopersicum esculentum*
Mill.)의 無機榮養 診斷

指導教授 柳 長 杰

金 良 錄

이 論文을 農學博士學位 論文으로 提出함



金良錄의 農學博士學位 論文으로 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

濟州大學校 大學院

2003年 12 月

Inorganic Nutrients Diagnosis of Hydroponic Culture Tomato Using a Sap Analysis

Yang-Rok Kim

(Supervised by professor Zang-Kual U.)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR DEGREE OF DOCTOR OF
AGRICULTURE

2003. 12

DEPARTMENT OF AGRICULTURAL CHEMISTRY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary	i
I. 서 론	1
II. 재료 및 방법	5
1. 즙액분석을 위한 엽과 엽병 위치 선정 및 생육기간 동안 토마토 즙액과 건물체 화학성분의 상관관계	5
1) 실험 재료 및 양액 조성	5
2) 식물체 위치에 따른 엽과 엽병의 즙액 내 무기원소 농도	5
3) 본엽을 구성하는 소엽 위치별 즙액 내 무기원소 농도	7
4) 본엽의 성장에 따른 엽장 및 엽폭 변화	8
5) 생육기간 동안 토마토 엽과 엽병의 즙액분석과 건물체 화학분석값과 의 상관관계	8
2. 양액 공급 농도에 따른 엽과 엽병 즙액내의 무기원소 농도	9
1) 실험 재료 및 양액 공급	9
2) 양액 공급 농도	9
3) 양액 공급 농도별 엽 및 엽병 즙액의 무기원소 농도	9
4) 양액 공급 농도별 토마토 수확량과 품질 비교	10
3. 양분 결제와 과잉 공급에 따른 즙액중의 무기원소 농도 및 식물체 영양 생리적 반응 조사	11
1) 실험 재료 및 양액 공급	11
2) 무기이온 결핍 유도	11

3) 무기이온 과잉 유도	11
4) 양분 결핍과 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 중 무기 이온 분석	12
5) 양분 결핍과 과잉에 따른 영양 생리적 반응 조사	12

III. 결과 및 고찰 13

1. 즙액분석을 위한 엽과 엽병 위치 선정 및 생육기간 동안 토마토 즙액과 건물체의 화학성분의 상관관계	13
1) 식물체 위치에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도	13
2) 본엽을 구성하는 소엽 위치별 즙액 내 무기원소 농도	15
3) 본엽의 성장에 따른 엽장 및 엽폭 변화	15
4) 생육기간 동안 토마토 엽과 엽병의 즙액분석과 건물체 화학분석값과의 상관관계	18
(1) 생육기간 동안 엽과 엽병 즙액 및 엽 건물체내 무기원소 농도	18
(2) 생육기간 동안 엽과 엽병 즙액 및 엽 건물체와의 상관관계	23
2. 양액 공급 농도에 따른 엽과 엽병 즙액중의 무기원소 농도	25
1) 양액 공급 농도 차이에 따른 연간 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도	
(1) 연간 엽 즙액 중 무기원소 농도	25
(2) 연간 엽병 즙액 중 무기원소 농도	26
2) 양액 공급 농도 차이에 따른 연간 수확량과 토마토의 품질 비교	32
(1) 연간 수확량 비교	32
(2) 토마토의 평균 과중 비교	33
(3) 토마토의 Brix 당도 비교	34
(4) 배꼽썩음과 발생율 비교	34
(5) 열과 발생율 비교	36

3. 필수 영양원소의 결핍과 과잉에 따른 즙액 내 무기원소 농도와 식물체 생육 상황	38
1) 토마토의 정상 생육	38
2) 질소	39
3) 인산	43
4) 황산	47
5) 칼륨	51
6) 칼슘	55
7) 마그네슘	59
8) 붕소	63
9) 아연	67
10) 망간	71
11) 철	75
12) 구리	79
13) 몰리브덴	83
4. 즙액 분석법에 의한 양액재배 토마토의 엽과 엽병 즙액 내 연중 기준 농도	87
IV. 요약	90
V. 참고문헌	93



Summary

The proper recipe of nutrient solution through the rapid and correct diagnosis of nutrition in the hydroponic culture of tomato is essential for better plant growth, fruit quality as well as productivity. Since the chemical analysis of plant is time-consuming and may not represent the present status of nutrition, this study was conducted to establish the leaf and petiole sap test to diagnose real-time nutritional status of tomato. The optimal sampling position for the leaf and petiole sap test of hydroponic tomato plant (*Lycopersicon esculentum* Mill. var. momotaro york) grown in the typical cultivation period in Korea "from July to June of next year" was determined and the relations between sap test and plant analysis were investigated for the adaptability of sap test. The optimal range of concentrations of inorganic ions in the leaves and petioles for sap test were also determined, as based on effects of different concentrations of nutrient solution on the concentrations of inorganic ions in the leaf and petiole sap, plant growth, fruit quality and yield, and physiological responses under the deficiency or excess of inorganic nutrients.

1. The optimal leaf sampling position for sap test, and the relationship between the inorganic ions in the leaf and petiole sap and their corresponding nutrient contents in the leaves.

Tomato hydroponic culture was made by supplying PTG nutrient

solution. The concentrations of NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} and MoO_4^{2-} ions squeezed from the leaves and petioles at the different positions in a plant were measured and compared with their corresponding inorganic contents in the leaves analyzed by the chemical method. The ion concentrations in the leaf and petiole sap showed the different values depending on their positions in a plant. The leaves and petioles at the lower positions of a plant had higher concentrations of NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} and SO_4^{2-} ions. However, there was less change of ion concentration in saps and no changes of leaf length and width from the 9th compound leaf. On the other hand, all the leaflets in a compound leaf had the same ion concentrations. Therefore, the leaflets of the 9th compound leaf down from the uppermost flower cluster can be taken as the optimal sampling position of leaf and petiole for the sap test. A good correlation ($r = \text{more than } 0.8$) between the sap test and the chemical analysis of plant showed that the ion concentrations in the leaf and petiole sap reflect the nutritional condition of tomato.

2. The concentrations of inorganic ions in the sap of leaves and petioles depending on the different levels of nutrient solution.

Tomato hydroponic culture was made under the four different treatments of nutrition solution ($0.5\times$, $1.0\times$, $1.5\times$ of PTG and farmer's practice). The concentrations of inorganic ions in the sap of leaves and petioles, quality and yield of tomato were compared between the

treatments. There were no differences in the concentrations of NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} and MoO_4^{2-} ions in the sap of leaves and petioles and fruit yields between the treatments.

Considering that the supply of 0.5× PTG nutrient solution brought heavier fruit, less occurrence of radial cracking and blossom end rot the supply of lower concentration than 1.0× PTG nutrient solution (EC 2.30 mS/cm) can be recommended for tomato hydroponic culture.

3. The concentrations of inorganic ions in the sap of leaves and petioles and physiological responses under the deficient or excess condition of nutrition



Tomato hydroponic culture was made in the absence or in the excess presence of NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} or MoO_4^{2-} ion, with reference to the PTG nutrient solution. The purpose of this experiment is to learn concentrations in the sap of leaves and petioles under the deficient or excess condition of nutrition and also physiological responses.

The typical deficient and excess symptoms of NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} or MoO_4^{2-} ion were observed as reported by other investigators. The deficient concentration of NO_3^- , K^+ or Ca^{2+} ion in the sap of leaves and petioles was less than -30% of normal one and the excess one of them was more than +30% of normal one, which are closely related with leaf length/width, chlorophyll SPAD

value, plant height, stem diameter and fruit yield under the nutritional stresses. The deficient and excess concentration of PO_4^{3-} , SO_4^{2-} or Mg^{2+} was less than -20% and more than +20% of normal one, respectively. On the other hand the deficient concentration of BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} or MoO_4^{2-} ion in the sap of leaves and petioles was less than -30% of normal one and the excess one of them was 2 or 3 times higher than normal one.

In conclusion, the recipe of nutrient solution should be corrected before the sap concentrations become below -15% or above +15% of normal sap concentrations of leaves and petioles for macro nutrients, and below -20% or above +20% of normal sap concentrations for micro nutrients, to prevent the physiological disorders caused by the inappropriate management of nutrient solution.



I. 서 론

토마토(*Lycopersicon esculentum* Mill.)는 가자과(茄子科)에 속하는 초본성식물로서 남아메리카의 서부 고원지대가 원산지이고, 18세기부터 식용으로 재배되기 시작하였다. 우리나라 토마토 재배면적은 꾸준히 증가하는 추세이며, 2002년 기준으로 3,530 ha의 면적에서 23만 톤 정도가 생산되고 있고, 전체 토마토 생산량 가운데 95% 이상이 시설재배를 통하여 토마토를 생산하고 있다. 제주도의 경우 토마토 재배면적은 약 23 ha이고 생산량은 3,350톤 정도이며(국립농산물 품질 관리원, 2003), 이중 20% 정도가 양액재배 방법으로 토마토를 생산하고 있다.

토마토는 채소류 중에서 뿌리의 신장력과 흡비력이 매우 강한 작물로써, 서리나 온도가 영하로 떨어지는 저온 조건만 아니면 뿌리와 잎 줄기의 재생력이 강하여 다년생 초목으로 계속하여 생육할 수 있기 때문에 온실에서 장기재배가 가능하다. 오늘날 토마토 재배는 이러한 특성을 이용하여 필요한 양분을 인위적으로 공급하여 장기간에 걸쳐 토마토를 수확할 수 있는 양액재배 기술이 이용되고 있다.

양액재배 기술은 원래 식물의 양분과 수분 연구를 위해 개발되었으나 1950년대부터 청청 채소 생산을 시발로 하여 과채류와 채소, 화훼 등의 상업적 생산에 많이 활용되고 있다.

양액재배는 토양에서 작물을 재배하는 것과는 달리 지하부 뿌리 환경을 인위적으로 정밀하게 조절할 수 있기 때문에 비교적 균일한 상태로 작물을 재배할 수 있다. 그러므로 배지와 배양액 이외의 조건만 균일하게 유지할 수 있다면 고른 생육을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 노력 절감과 품질향상을 통한 수익성 증대와 고도의 기술 집약적인 생산 기술의 도입이 가장 용이한 생산형태이다. 그러나, 배양액의 완충능력이 대단히 약하므로 양분농도나 산도(pH) 변화의 영향을 받기 쉽고 작물의 영양생리와 양액관리에 등에 대한 전문적 지식이 요구된다. 특히, 재배자가 토마토를 재배함에 있어

서 가장 어렵게 생각하고 있고, 경험에 의한 차이가 가장 많이 나타나는 문제 중 하나는 생육단계와 시기별로 어떻게 적절하게 양분을 공급하느냐 하는 것이다. 그러나, 양분공급 조절을 정확하게 하기 위해서는 현재 양분의 요구도를 파악해야 하는 것이 중요하다.

이러한 양분의 공급의 가감 여부는 식물체의 화학 분석을 통하여 알 수 있다. 정확히 식물의 영양 상태를 파악하는 것은 토마토의 생육과 생산성에 관여하는 중요한 요인 중의 하나이다(Snyder, 1993). 특히, 식물체내의 무기양분은 식물의 생육단계, 조직, 양분간의 상호작용 등에 의하여 그 조성이 영향을 받기 때문에 양액재배에서는 그 특성상 주기적으로 식물체의 화학분석을 실시하여 부족 또는 과잉인지 신속히 파악하여 양분 공급을 조절하여야 한다(Bouma, 1983).

영양진단을 위하여 식물을 분석하는 방법에는 식물체를 건조시켜 화학 분석을 실시하는 방법과 식물체내의 즙액을 짜서 분석하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자의 경우 식물체를 건조시켜 분해하고, 이를 화학 분석을 실시한 후 그 결과를 얻는데까지는 적어도 일주일 정도 소요되기 때문에 그 분석 결과는 현재의 양분 상태가 아니라 적어도 일주일전의 양분 상태를 나타내는 것이므로 양분관리를 위한 실시간 정보를 제공할 수 없다는 결점이 있다(Westcott, 1993). 양액재배 같이 양분 이동이 빠르게 변화하는 재배방식에서의 식물 영양 진단에는 식물체 화학분석이 적당한 방법이 아니다(Ikeda 등 1998).

따라서, 현재의 양분 상태를 가능한 신속하게 측정할 수 있는 분석법이 이용되어야 한다. 비교적 최근에는 보다 신속한 간이 영양진단법인 즙액분석법을 원예작물에 이용하는 연구가 진행되고 있다. 이는 식물체내의 즙액을 착즙하여 분석하는 것으로, 식물체내에 수액의 형태로 이동하고 있는 가용성 무기성분을 그대로 측정하여 식물이 현재의 양분 공급에 어떻게 반응하고 있는지를 알 수 있는 장점이 있다(Prasad와 Spiers, 1985). 이러한 식물 즙액 분석법을 이용하여 현재 식물체내의 양분 상태를 진단하고 이

진단을 바탕으로 양분의 공급을 조절하면 적절한 시기에 필요한 양만큼의 양분을 공급할 수 있어 양분 스트레스의 영향을 최소화시킬 뿐 만 아니라 양분 사용 능력을 증가시켜 공급된 양분의 배수로 인한 환경 오염 문제의 예방에도 도움을 줄 수 있다(Bierman, 1999). 또한, 즙액내의 무기원소 농도는 식물의 양수분 흡수와 증산, 뿌리의 활성 등을 반영하므로 식물의 생리적인 상태의 파악이 가능하다(Smith, 1987).

식물체내의 즙액을 추출하는 방법에는 식물 조직을 마늘 착즙기와 같은 도구에 넣어 착즙하거나(Hochmuth, 1994), (Johnson, 1999)), 물을 가한 후 homogenizer 등으로 파쇄하고 여액을 취하는(Smith, 1987) 방법이 있다. 착즙액의 무기이온 농도는 Cardy Meter (Hartz 등 1997), Merck RQ flex(Nagarajah 등 1999), Hach meter 등을 이용하여 현장에서 측정하거나, 실험실내에서 AAS(Atomic Absorption Spectrometry), UV-Vis spectrophotometer, 비색계, IC(Ion Chromatography), ICP(Inductively Coupled Plasma) 등을 이용하여 측정한다.

이러한 즙액 분석법을 이용한 영양진단에 관한 연구는 과채류, 화훼류 등 많은 분야에 이용되고 있다. 이들 연구 중 토마토에서는 엽 위치에 따른 다량원소의 변화를 조사한 연구와(Yiqing 등 1998), Sap $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 $\text{HOAc-NO}_3\text{-N}$ 및 Total N과의 관계를 규명한 연구(Prasad와 Spiers, 1985)가 있다. 또한 토마토, 오이, 카네이션, 거베라, 장미 등에서 즙액 목표치를 제시한 것과(Smith, 1987), 토마토와 장미에서 즙액과 물의 희석 비율, 즙액 추출시의 파쇄 시간, 여과액에 HCl 첨가에 따른 무기원소 농도 변화를 조사한 연구(Ikeda 등 1998)가 있다. 채소류의 즙액분석에 대한 연구는 각 채소별로 즙액목표치를 제시한 것(Hochmuth, 1994)을 비롯하여, 브로콜리(Castellanos 등 1999), 감자(Westcott, 1993), 유채(Hocking, 2001) 등에서, 섬유작물인 하나인 목화(Smith 등 1998)에서도 즙액 내 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 건물체 중 T-N의 상관 관계에 대한 연구가 수행되었다. 식량작물에서는 밀과 보리(Riley 등 1998)에서 즙액 내 질소를 측정하는 연구가 수행되었

고, 과실수에서도 엽 분석을 실시하여 영양진단을 하는(Stebbins, 1988)등, 즙액분석을 이용한 연구는 다양한 식물에서 수행되어 왔다. 국내의 경우 즙액분석을 이용한 연구는 온실멜론(장과 정, 1997), 오이(임 등 2001), 토마토(김 등 2003)에 대한 연구가 전부이다.

식물의 양분은 그 자체의 특성뿐만 아니라, 지역 환경과 작물 재배 방식, 작물 재배시기, 성장 단계에 따라서도 크게 달라지므로 이에 대한 각 원소의 적정 농도 범위가 제시되는 등의 기준점이 마련된 후야 즙액분석법의 사용이 가능하다(Lorenz, 1999). 특히, 토마토 재배에 있어서 즙액분석에 이용할 기준값은 여러 연구자에 의하여 보고된 바 있으나(Smith, 1987), (Hochmuth, 1994), (Ikeda 등 1998), 이는 봄부터 겨울까지 재배기간 동안에 조사된 것으로, 우리나라 대부분의 토마토 암면 양액재배 시기(7월에 종자를 파종하여 다음해 6월에 작기 종료)와는 재배시기에 차이가 있다. 또한 우리나라에서 재배되는 품종이나 기후 조건의 차이가 있기 때문에 우리나라의 환경에서 즙액분석을 이용하여 영양진단을 실시하기 위해서는 우리가 재배하고 있는 품종과 우리 기후 조건에 알맞은 기준치를 마련하지 않으면 안되며, 그 기준치에 대한 검토가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 첫째 토마토의 즙액 분석 시료로 이용할 엽(葉) 및 엽병(葉柄)의 최적 채취 위치 그리고 기존의 식물체 화학분석법과의 상관관계를 알아봄으로써 즙액분석법이 식물 영양진단 방법으로 타당한지를 조사하고, 둘째 생육단계 및 계절별로 엽 및 엽병 즙액 중 각 원소의 적정 농도 범위를 결정하고, 또한 양액 공급 수준이 엽 및 엽병 즙액 중 무기 이온 농도, 토마토의 생육, 품질과 생산량에 미치는 영향을 조사하고, 셋째 각각 무기양분이 결핍이거나 과잉일 때 엽과 엽병 즙액 중 그 무기이온의 농도와 토마토의 영양 생리적인 반응을 알아봄으로써 생육 단계 또는 계절별로 엽 및 엽병 즙액 중의 각 무기이온의 적정 농도 범위를 결정하여 즙액분석법에 의한 양액재배 토마토의 영양진단법을 확립하는데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 즙액분석을 위한 엽과 엽병의 위치 선정 및 생육기간동안 토마토 즙액과 건물체의 화학 성분의 관계

1) 실험 재료 및 양액 조성

본 실험에 사용한 토마토 품종은 Momotaro York(Takii Co., Japan)로 토마토(*Lycopersicon esculentum* Mill.) 종자를 파종하여 본엽(compound leaf)이 4~5매가 되었을 때 10×10 cm 큐브에 이식하였다. 그 후 1 화방이 전개되었을 때, 슬라브에 정식하여 325일 동안 양액재배를 실시하면서 엽과 엽병 시료를 채취하여 실험 재료로 사용하였다. 이때 공급된 양액은 네덜란드 PTG(Proefstation voor tuinbouw onder glas te Naaldwijk) 원예작물연구소의 토마토 표준 양액 조성(Sonneveld와 Straver, 1994)이었으며 (Table 1), 양액 공급 횟수 및 농도는 생육단계와 광량에 따라 조절하였으며, 이때 배액율은 $15 \pm 5\%$ 이었고, 1회 공급량은 100 mL 이었다. 온실 환경제어는 Innovative Sensors Inc. (Spain)의 환경 제어 프로그램 (Ambitrol 500 PC)을 이용하여 조절하였으며 재배 주수는 120주였다.

2) 식물체 위치에 따른 엽과 엽병의 즙액 내 무기원소 농도

(1) 엽과 엽병 시료 채취

식물 위치별 엽과 엽병 시료는 파종 후 100일 이후부터 2주 간격으로 상위 첫 번째 화방 밑의 첫 번째 본엽과 19번째 본엽 사이에서 홀수번째만을 채취하였다(Fig. 1). 모든 엽과 엽병 시료는 오전 9~11시 사이에 10반복으로 채취하였다(Hochmuth, 1994).

Table 1. Composition of nutrient solution supplied for the hydroponic culture of tomato in rockwool. (Sonneveld and Straver, 1994)

Elements	Nutrient solutions	Unit
NO ₃ ⁻	13.75	
NH ₄ ⁺	1.25	
P	1.25	
S	3.75	mM
K	8.75	
Ca	4.25	
Mg	2.0	
Fe	15	
Mn	10	
Zn	5	
B	30	μM
Cu	0.75	
Mo	0.5	
EC	2.30	mS/cm(25°C)

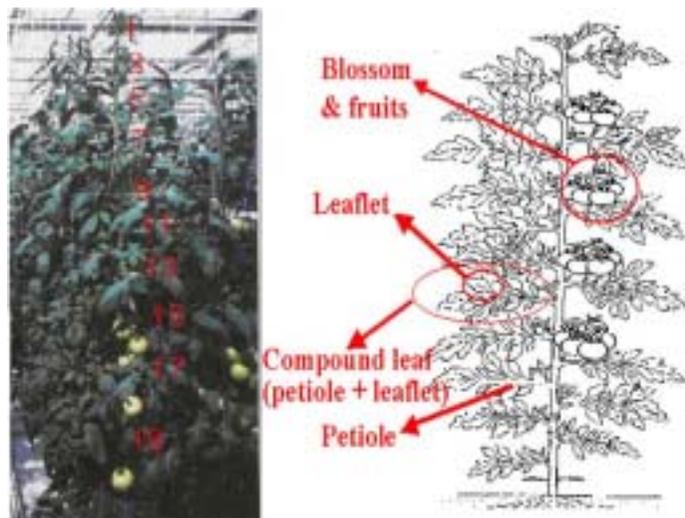


Figure 1. Sampling positions of leaves and petioles for their sap test in tomato plant.

(2) 즙액 분석

즙액은 현장에서 시료를 채취한 즉시 1 cm 간격으로 잘라 마늘 착즙기 (대호산업, 3.5×3.5×3.5 cm, 한국)에 넣은 후, 눌러서 취했다. 이때 얻어진 즙액 중 1 mL를 취하여 증류수 49 mL에 넣어, 50배로 희석한 뒤 실험실로 옮겨 여과하였다. 여과한 즙액 중의 NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} 이온은 IC(Ion Chromatography, DX 4500, Dionex, USA)로 측정하였고, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , MoO_4^{2-} 이온은 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma - Absorption Emission Spectrometer, JY Panorama, Jobin Yvon, France)로 분석하였다.

3) 본엽을 구성하는 소엽 위치별 즙액 내 무기원소 농도

본엽 중의 소엽(leaflet)별 엽 시료(Fig. 2)는 상위 첫 화방에서 아래로 9번째 위치에 있는 본엽에서 A~J까지 각각 채취하였고, 2)의 (2)방법으로 분석하였다.



Figure 2. Sampling positions of leaflets in a compound leaf of tomato plant.

4) 본엽의 성장에 따른 엽장 및 엽폭 변화

첫 번째 화방의 바로 아래에 위치한 어린 엽이 성엽으로 성장하는 동안 3일 간격으로 엽장과 엽폭의 변화를 측정하였다.

5) 생육기간 동안 토마토 엽과 엽병의 즙액분석과 건물체 화학분석 값과의 상관관계

(1) 시료채취

엽과 엽병 시료는 파종 후 10일부터 325일까지 생육 전 기간 동안에, 수확 전까지는 주 1회 그리고 수확 후에는 2주 1회 채취하였다. 특히 파종 후 10~30일까지는 전체 엽을 채취하였고, 37~51일까지는 가장 왕성한 5~7번째 본엽을, 58일 이후에는 열매의 직경이 2~3 cm 크기에 위치한 곳의 상위 첫 번째 화방에서 아래로 9번째 본엽에서 엽과 엽병을 채취하였다.

(2) 즙액 분석

착즙한 엽과 엽병의 즙액은 2)의 (2) 방법에 기준하여 분석하였다.

(3) 건물체 분석

채취한 식물체는 즉시 실험실로 옮겨 엽과 엽병으로 나누어 70℃에서 48시간 건조 분쇄한 후 습식분해(황산-과산화수소)를 시켰다. 식물체 중 총 질소는 분해액 중 20 mL를 취하여 Kjeldahl 증류법으로 증류 적정하여 분석하였다. P, K, Ca, Mg, B, Zn, Mn, Fe, Cu, Mo은 분해액을 100배로 희석 여과한 후 ICP-AES로 분석하였다.

(4) 즙액 분석과 건물체 화학분석 값과의 상관 관계

파종 후 10일부터 325일까지 2주에 1회 무기원소 농도를 조사한 자료를 바탕으로 즙액 및 건물체 상호간의 상관관계를 조사하였다.

2. 양액 공급 농도에 따른 엽과 엽병 즙액중의 무기원소 농도

1) 실험 재료 및 양액 공급

토마토 유묘의 본엽이 4~5매가 되었을 때 10×10 cm 큐브에 이식한 후 1화방이 전개되었을 때 슬라브에 정식하여 316일 동안 1장의 1) 방법에 준하여 토마토 양액재배를 실시하면서 엽과 엽병 시료를 채취하여 실험 재료로 사용하였다. 1일 양액 공급 횟수 및 총 공급량은 생육 단계에 따라 다르게 조절하였으며, 이때 배액율은 $15 \pm 5\%$ 이었고, 1회 공급량은 100 mL 이었다.

2) 양액 공급 농도

양액의 공급 농도는 네덜란드 PTG 농업연구소의 토마토 표준 양액을 기준으로 0.5배, 1.0배, 1.5배였다(Table 2). 또한 현재 농가에서 공급하는 농도를 대조구(봄, 가을 1.0배, 여름 0.7배, 겨울 1.3배)로 하였다.

3) 양액 공급 농도별 엽 및 엽병 즙액의 무기원소 농도

(1) 시료 채취

엽과 엽병 시료는 파종 후 10일부터 325일까지 생육 전 기간 동안에, 수확 전까지는 주 1회 그리고 수확 후에는 2주 1회 채취하였다. 특히, 파종

후 10~30일까지는 전체 엽을 채취하였고, 37~51일까지는 가장 왕성한 5~7번째 본엽을, 58일 이후에는 열매의 직경이 2~3 cm 크기에 위치한 곳의 상위 첫 번째 화방에서 아래로 9번째 본엽에서 엽과 엽병을 채취하였다.

(2) 즙액 분석

착즙한 엽과 엽병의 즙액은 1장의 2)의 (2) 방법에 준하여 분석하였다.

Table 2. Three different concentrations of nutrient solution supplied for hydroponic culture of tomato plant.

Elements	Treatments			unit
	0.5 ×	1.0 ×	1.5 ×	
NO ₃ ⁻	6.88	13.7	20.63	mM
NH ₄ ⁺	0.63	1.25	1.88	
P	0.63	1.25	1.88	
S	1.88	3.75	5.63	
K	4.38	8.75	13.1	
Ca	2.13	4.25	6.38	
Mg	1.00	2.00	3.00	
Fe	7.50	15.0	22.5	
Mn	5.00	10.0	15.0	
Zn	2.50	5.00	7.50	
B	15.0	30.0	45.0	
Cu	0.38	0.75	1.13	
Mo	0.25	0.5	0.75	

4) 양액 공급 농도별 토마토 수확량과 품질 비교

토마토 수확량은 수확 전 기간에 걸쳐 농도별로 전체 수확량을 합쳐 계

산하였고, 이를 과일수로 나누어 1개 과종의 무게를 산정하였다. 토마토의 Brix 당도는 3월부터 5월까지 3개월에 걸쳐 양액의 처리 농도별로 10반복을 실시하여 조사하였으며, 배꼽썩음과울은 배꼽썩음이 발생한 시기부터 수확 종료시까지, 열과울은 열과 발생시부터 종료시까지 수확한 과일의 전체량을 대상으로 하여 조사하였다.

3. 양분 결제(缺除)와 과잉 공급에 따른 즙액 중의 무기원소 농도 및 식물체 영양 생리적 반응 조사

1) 실험 재료 및 양액 공급

토마토 유묘의 본엽이 4~5매가 되었을 때 10×10 cm 큐브에 이식한 후 1화방이 전개되었을 때 슬라브에 정식하여 120일부터 180일까지 1장의 1) 방법에 준하여 토마토 양액재배를 실시하면서 엽과 엽병을 실험재료로 사용하였다. 1일 양액 공급 횟수 및 총 공급량은 생육단계에 따라 다르게 조절하였으며, 이때 배액율은 $15 \pm 5\%$ 였고, 1회 공급량은 100 mL이었다.

2) 무기이온 결핍 유도

과종 후 120일된 식물체에 네덜란드 PTG 원예작물연구소의 토마토 표준용액 중 NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} 와 MoO_4^{2-} 성분을 각각 제외시킨 양액을 제조 공급하여 특정 양분의 결핍을 유도하였다. 식물체 반복수는 12반복이었다.

3) 무기이온 과잉 유도

과중 후 120일된 식물체에 네덜란드 PTG 원예작물연구소의 토마토 표준용액 중 NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} 와 MoO_4^{2-} 성분을 각각 기준 농도 보다 5배 높게 양액을 제조 공급하여 특정 양분의 과잉을 유도하였다. 식물체 반복수는 12반복이었다.

4) 양분 결핍과 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 중 무기 이온 분석

엽과 엽병 즙액 중 무기이온 농도는 양액을 결핍 또는 과잉 처리한 후 일정기간별로 열매가 2~3 cm 크기에 위치한 곳의 상위 첫 번째 화방에서 아래로 9번째 본엽에서 엽과 엽병을 채취하여, 1장의 2)의 (2) 방법으로 분석하였다.

5) 양분 결핍과 과잉에 따른 영양 생리적 반응조사

양분의 결핍 또는 과잉 시 나타나는 엽색의 특징, 초장, 개화수, 줄기직경, 엽장, 엽폭, 수확량, 엽록소 함량(SPAD meter, Minolta, Japan)은 양분의 결핍 또는 과잉 유도 후 일주일 간격으로 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 즙액분석을 위한 엽과 엽병의 위치 선정 및 생육기간 동안 토마토 즙액과 건물체의 화학성분의 상관관계

1) 식물체 위치에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도

토마토 식물체 위치별로 채취한 엽과 엽병의 즙액 중의 NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} 와 MoO_4^{2-} 이온 농도는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

엽과 엽병 중의 NO_3^- 농도는 각각 $1,500 \sim 2,500 \text{ mg L}^{-1}$, $5,800 \sim 8,000 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 평균은 각각 $2,000 \text{ mg L}^{-1}$, $7,370 \text{ mg L}^{-1}$ 이었다. 농도의 변화는 하엽으로 갈수록 그 농도가 증가하였다. NO_3^- 농도는 9번째 본엽까지 꾸준히 증가하였고, 그 이후 증가율은 감소하였다. PO_4^{3-} 의 경우 엽 즙액 농도는 $1,700 \text{ mg L}^{-1}$, 엽병 즙액 농도는 $1,500 \text{ mg L}^{-1}$ 범위였다. 엽과 엽병 즙액 중의 SO_4^{2-} 농도는 각각 $5,000 \sim 8,000 \text{ mg L}^{-1}$, $2,500 \text{ mg L}^{-1}$ 범위였고, 평균은 엽 $7,040 \text{ mg L}^{-1}$, 엽병 $2,410 \text{ mg L}^{-1}$ 이었다. 엽의 SO_4^{2-} 농도는 하엽으로 갈수록 증가하였지만, 엽병의 농도는 위치에 관계없이 일정하였다. K^+ 농도는 각각 $3,600 \text{ mg L}^{-1}$, $4,800 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 위치에 관계없이 농도가 일정한 경향이였다. 엽 즙액 중의 Ca^{2+} 는 $1,800 \sim 5,800 \text{ mg L}^{-1}$ 이고, 엽병 즙액 중의 Ca^{2+} 의 농도는 $700 \sim 1,800 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 엽 $4,520 \text{ mg L}^{-1}$, 엽병 $1,310 \text{ mg L}^{-1}$ 이었다. 엽과 엽병의 즙액 중 Ca^{2+} 농도는 하엽으로 갈수록 증가하는 경향이였다. Mg^{2+} 의 경우 엽 즙액 농도는 500 mg L^{-1} 이었고, 엽병 즙액 농도는 $200 \sim 800 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위로 평균 510 mg L^{-1} 을 나타내었다. BO_3^{3-} 의 경우 엽과 엽병 즙액 중 농도는 각각 5.30 mg L^{-1} ,

1.83 mg L⁻¹으로 위치에 관계없이 일정하였다. 엽 즙액 중 Zn²⁺는 3.85 mg L⁻¹이었고, 엽병 즙액 중 Zn²⁺는 2.0~6.0 mg L⁻¹의 범위로 평균은 3.87 mg L⁻¹이었다.

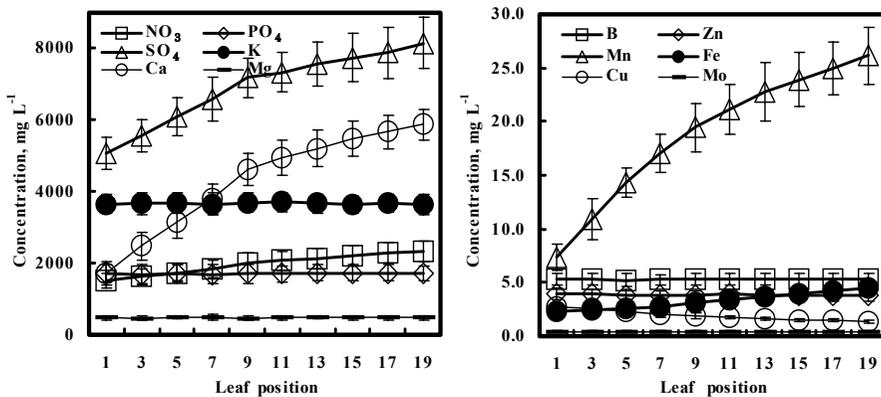


Figure 3. The concentrations of macro and micro nutrients in the leaf sap from the different compound leaf positions of hydroponic tomato.

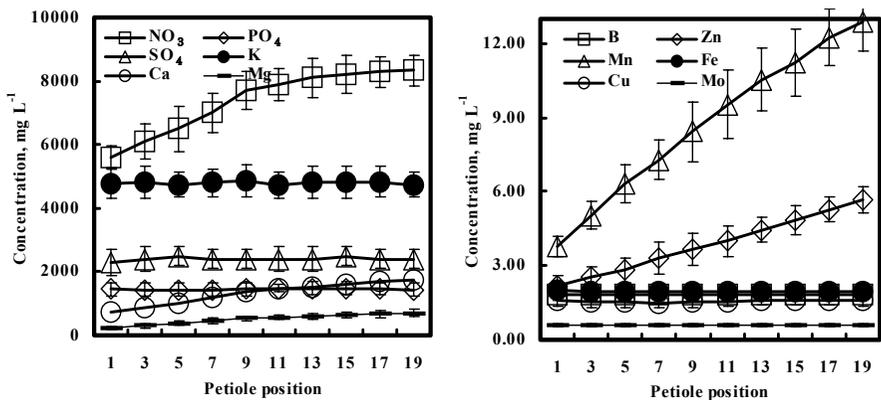


Figure 4. The concentrations of macro and micronutrients in the petiole sap from the different compound leaf positions of hydroponic tomato.

Mn²⁺의 경우에는 엽 7.35~26.17 mg L⁻¹, 엽병 3.78~12.87 mg L⁻¹의 범위로 평균은 엽 18.80 mg L⁻¹, 엽병 8.73 mg L⁻¹을 나타내었다. 엽 즙액 중

의 Fe^{2+} 농도는 $4.5 \sim 2.3 \text{ mg L}^{-1}$ 범위였고, 평균은 3.27 mg L^{-1} 이었다. 엽병은 2.0 mg L^{-1} 이었다. Cu^{2+} 의 경우는 엽 즙액 농도는 $1.4 \sim 2.7 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 1.95 mg L^{-1} 이었고, 엽병 즙액 농도는 1.55 mg L^{-1} 이었다. 엽과 엽병 즙액중의 MoO_4^{2-} 은 엽 0.46 mg L^{-1} , 엽병 0.59 mg L^{-1} 이었다.

위치별 엽과 엽병의 즙액내 무기원소 농도 차이를 보면 NO_3^- 와 K^+ 는 엽병이 엽에 비하여 3.5배, 1.3배 각각 높게 나타났고, SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , BO_3^{3-} 의 농도는 엽이 엽병에 비해 각각 2.9배, 3.5배, 2.2배, 1.6배, 1.3배, 2.9배 높은 경향이였다. PO_4^{3-} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , MoO_4^{2-} 농도는 엽과 엽병간 농도 차이가 없었다.

2) 본엽을 구성하는 소엽 위치별 엽 즙액 내 무기원소 농도

본엽 중의 소엽 위치별 엽 즙액 내 NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} 와 MoO_4^{2-} 농도는 소엽의 위치에 관계없이 같은 농도를 나타내었고(Table 3), 그 농도는 다음과 같다. NO_3^- 는 $2,000 \text{ mg L}^{-1}$, PO_4^{3-} 는 $1,700 \text{ mg L}^{-1}$, SO_4^{2-} 는 $7,000 \text{ mg L}^{-1}$, K^+ 는 $3,500 \text{ mg L}^{-1}$, Ca^{2+} 는 $4,300 \text{ mg L}^{-1}$, Mg^{2+} 는 500 mg L^{-1} 이었고, BO_3^{3-} 는 5.80 mg L^{-1} , Zn^{2+} 은 2.50 mg L^{-1} , Mn^{2+} 은 16.0 mg L^{-1} , Fe^{2+} 은 2.40 gm L^{-1} , Cu^{2+} 는 2.00 mg L^{-1} , MoO_4^{2-} 은 0.50 mg L^{-1} 이었다.

이처럼, 본엽을 구성하고 있는 소엽(leaflet)들의 무기이온 농도는 위치에 따라 차이를 보이지 않아, 어느 위치에 있는 엽병을 채취하여 즙액분석을 하여도 무방하리라 사료된다.

Table 3. The contents of macronutrients in the different leaflet in a compound leaf of tomato.

Leaflet position	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	mg L ⁻¹					
A	2,000	1,650	6,830	3,410	4,300	530
B	2,000	1,670	6,943	3,614	4,100	523
C	2,000	1,700	6,848	3,340	4,300	510
D	2,100	1,670	7,164	3,303	4,300	507
E	2,100	1,680	6,960	3,377	4,300	513
F	2,200	1,690	7,206	3,290	4,200	520
G	2,000	1,670	6,880	3,270	4,100	500
H	2,000	1,700	6,910	3,330	4,100	504
I	2,000	1,660	7,010	3,560	4,300	530
J	2,000	1,670	7,300	3,510	4,200	500
Mean	2,040	1,676	7,005	3,400	4,220	514
LSD(0.01)	ns [‡]	ns	ns	ns	ns	ns

[‡] : not significant



Table 4. The contents of micro nutrients in the different leaflet in a compound leaf of tomato.

Leaflet position	BO ₃ ³⁻	Zn ²⁺	Mn ²⁺	Fe ²⁺	Cu ²⁺	MoO ₄ ²⁻
	mg L ⁻¹					
A	5.82	2.62	15.9	2.46	2.07	0.49
B	5.86	2.61	16.4	2.60	1.98	0.51
C	5.83	2.47	16.0	2.33	1.98	0.50
D	5.87	2.45	15.9	2.42	1.95	0.50
E	5.91	2.53	16.1	2.35	2.07	0.50
F	5.78	2.56	15.7	2.47	2.03	0.50
G	5.82	2.54	15.3	2.38	1.96	0.50
H	5.84	2.59	16.6	2.40	2.01	0.50
I	5.81	2.58	16.1	2.44	2.02	0.51
J	5.92	2.52	16.3	2.43	1.97	0.52
Mean	5.85	2.57	16.2	2.43	2.00	0.50
LSD(0.01)	ns [‡]	ns	ns	ns	ns	ns

[‡] : not significant

3) 본엽의 성장에 따른 엽장과 엽폭 변화

본엽의 성장에 따른 엽장 및 엽폭 변화를 조사한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 엽장과 엽폭 모두 9번째 본엽까지 증가하였고 그 이후는 일정하였다. 이는 상위 첫 번째 화방에서 9번째 본엽이 가장 최근에 완전 전개된 성엽임을 나타내 주는 실험 결과로 판단된다.

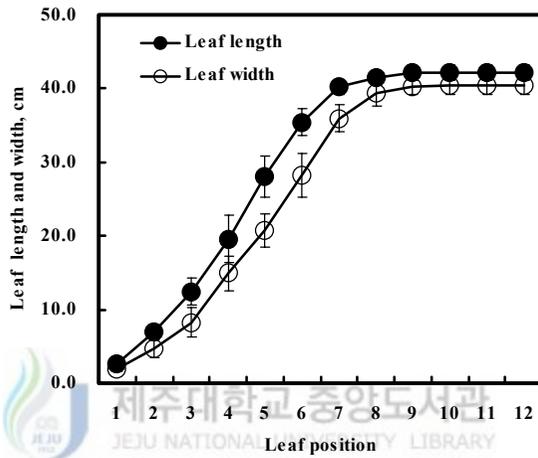


Figure 5. Positional changes of the length and width of a compound leaf during growth.

이러한 토마토 엽병 즙액중의 NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 미량원소(BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+})의 농도는 Smith (1987)가 제시한 값과 비슷한 경향을 나타냈으며, 토마토에서 $\text{NO}_3\text{-N}$, Ca, Mg의 농도는 하엽으로 갈수록 높아졌고, P와 K의 농도는 엽 위치에 관계없이 농도가 일정하였다는 보고(Yiqing 등 1998)와, 식물체에서 신엽보다 구엽에서 Ca의 농도가 높다는 보고(Manson 등 2000), 온실 멜론에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 Ca의 농도는 하엽으로 갈수록 농도가 높다는 보고(장과 정, 1997)는 본 연구의 결과와 유사한 경향이였다.

지금까지의 실험결과를 종합해 보았을 때 토마토 엽과 엽병 즙액 중의 무기 이온의 농도는 위치에 따라 다르게 나타났으며, 식물체 전체의 평균

농도는 9번째 본엽의 농도와 비슷하였다. 특히 첫 번째 본엽에서 부터 9번째 본엽까지 농도의 변화율이 컸으나 그 이후에는 변화율이 작아진 것과, 9번째 본엽 이후 엽장과 엽폭의 크기가 증가하지 않았다는 실험 결과를 고려해 보았을 때 9번째 위치의 본엽이 가장 발달한 성엽임을 보여주고 있다. 따라서 양액재배 토마토의 즙액분석을 위한 시료는 상위 첫 화방에서 아래로 9번째에 해당하는 본엽(열매크기 직경 2~3 cm 바로 윗 부분)에서 엽과 엽병을 채취하는 것이 바람직하다고 사료된다.

4) 생육기간 동안 토마토 엽과 엽병의 즙액분석과 건물체 화학분석 값의 상관관계

(1) 생육기간 동안 엽과 엽병 즙액 및 엽 건물체 내 무기원소 농도

토마토 생육기간 동안 엽과 엽병 즙액 및 엽 건물체 내 무기원소 농도를 조사한 결과는 Fig. 6, 7, 8, 9에 나타나 있다. 엽과 엽병 즙액의 NO_3^- 및 엽 건물체의 T-N은 유묘기에서 영양생장기를 걸쳐 1~2단 열매 비대기까지 농도가 증가하였고, 그 이후는 서서히 감소하였다. PO_4^{3-} 의 경우는 즙액 및 건물체 모두 유묘기에서 수확초기까지 농도가 증가하였고, 수확이 본격적으로 이루어지면서부터 수확이 끝날때까지 농도가 감소하였다. 엽과 엽병 즙액 중 K^+ 는 영양생장기까지 농도가 증가하다 그 이후는 일정한 농도를 나타냈고, 엽 건물체 K^+ 는 유묘기부터 수확말기까지 일정한 농도를 나타냈다. Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 경우는 즙액과 건물체의 변화 양상이 같게 나타났는데, 이들은 유묘기에서 수확초기까지 농도가 증가하다 수확 중기에 감소하였고, 수확 후기에는 다시 농도가 증가하는 현상을 보였다.

엽과 엽병 즙액 및 엽 건물체 미량원소들의 변화를 보면 BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} 등은 Ca^{2+} , Mg^{2+} 와 마찬가지로 유묘기에서 수확초기까지 농도가 증가하다 수확 중기에 감소하였고, 수확 후기에는 다시 농도가 증가하는 현상을 나타냈고, MoO_4^{2-} 은 유묘기에서 수확말기까지 즙액 및 건물체 모두 농도가 꾸준히 증가함을 보였다.

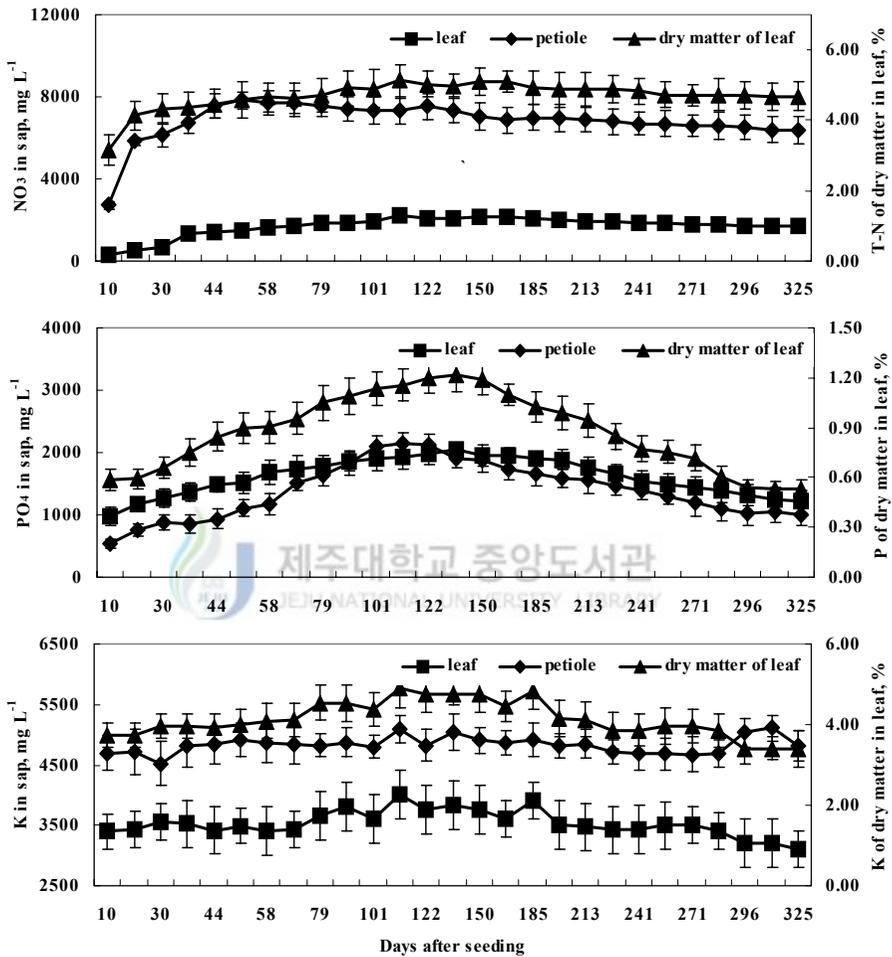


Figure 6. The concentrations of NO_3^- , PO_4^{3-} and K^+ ions in the leaf or petiole sap and the contents of T-N, P and K in the dry matter of leaves.

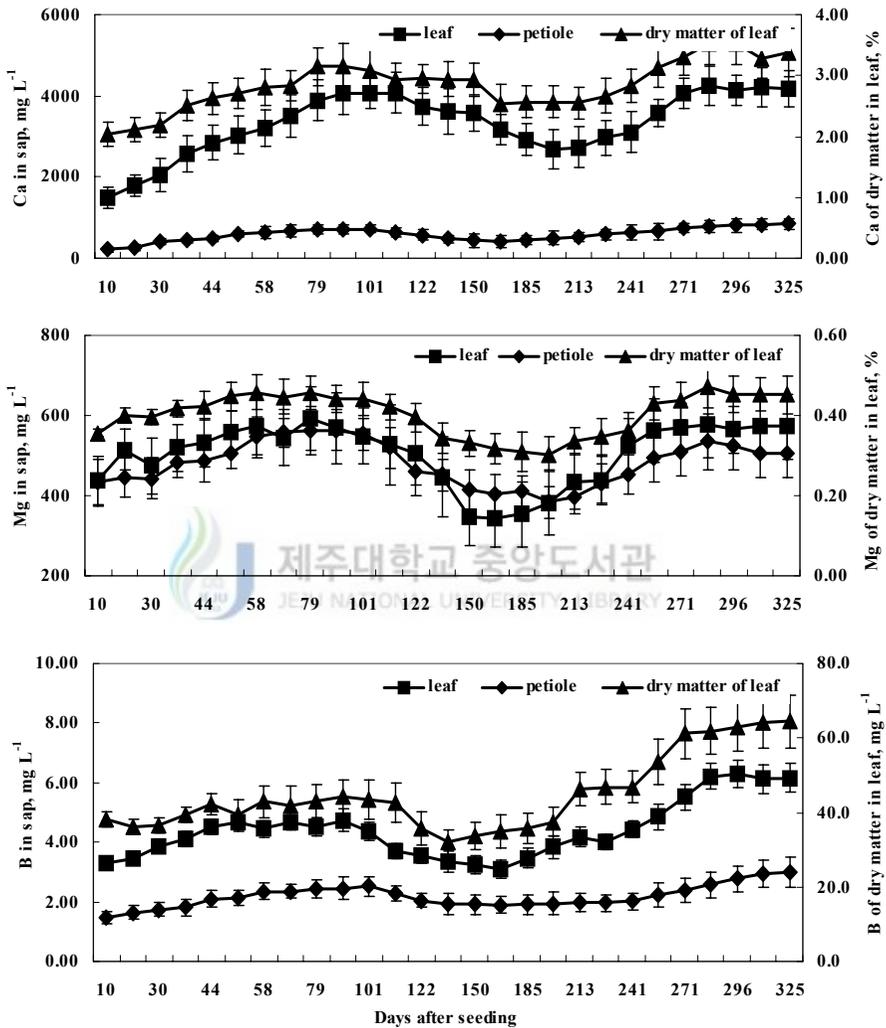


Figure 7. The concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} and BO_3^{3-} ions in the leaf or petiole sap and the contents of Ca, Mg and B in the dry matter of leaves.

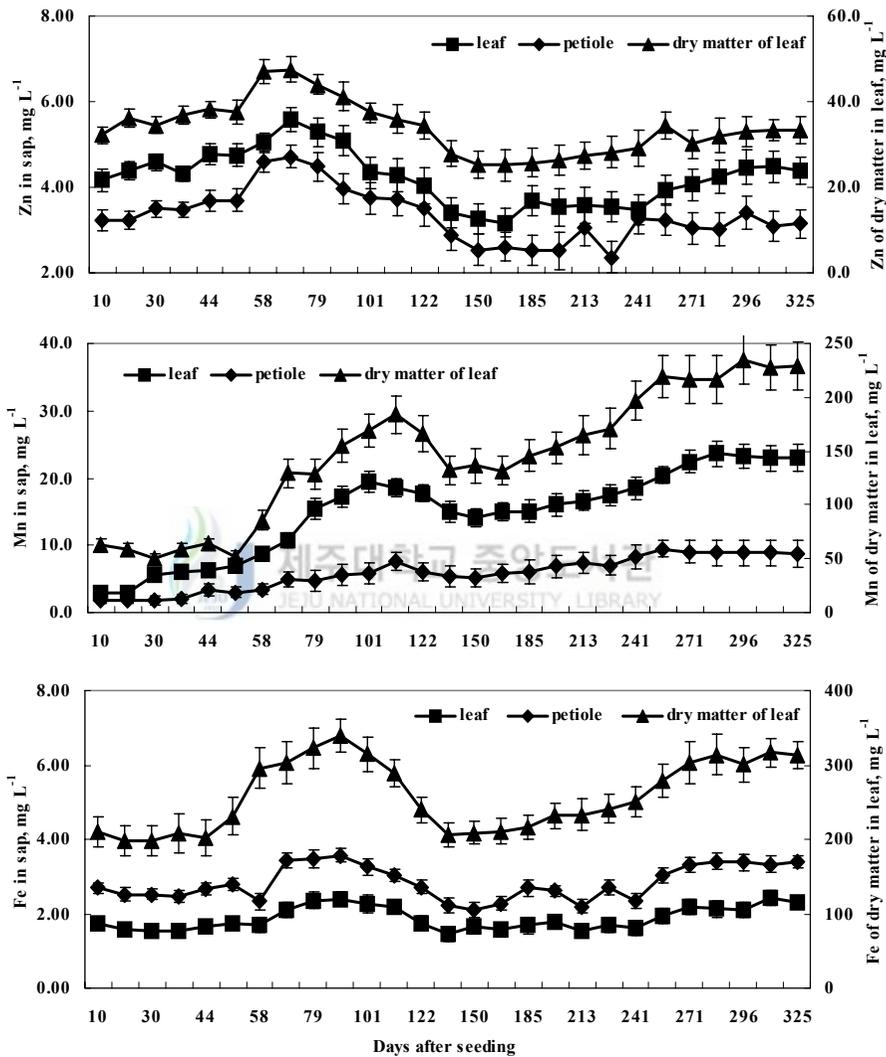


Figure 8. The concentrations of Zn²⁺, Mn²⁺ and Fe²⁺ ions in the leaf or petiole sap and the contents of Zn, Mn and Fe in the dry matter of leaves.

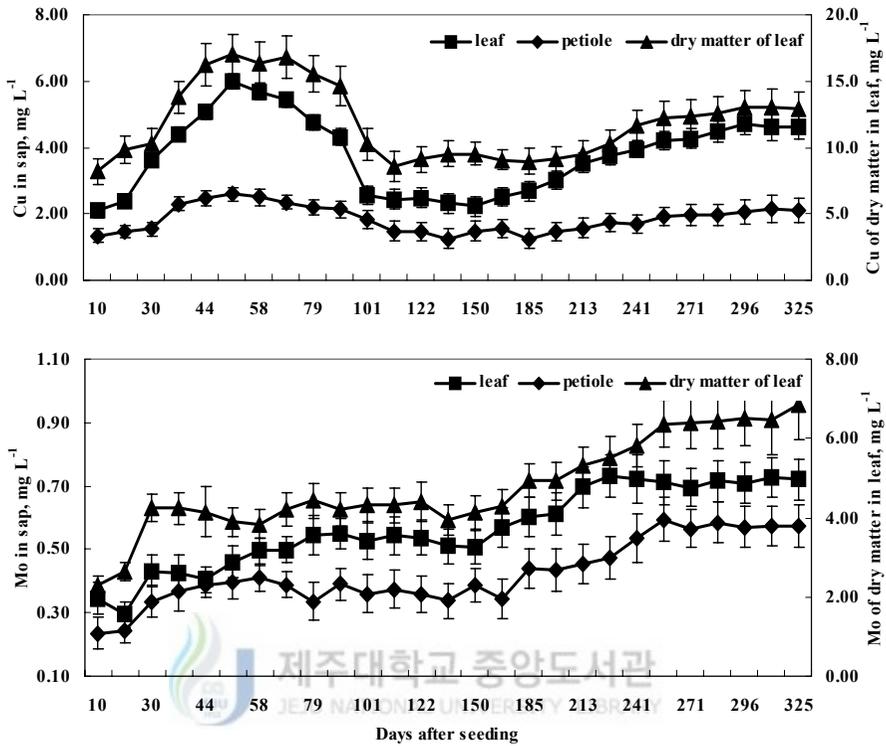


Figure 9. The concentrations of Cu²⁺ and MoO₄²⁻ ions in the leaf or petiole sap and the contents of Cu and Mo in the dry matter of leaves.

토마토 즙액 중 PO₄³⁻ 농도는 건물체 농도의 1/8, K⁺ 농도는 건물체의 1/9, Mg²⁺ 농도는 건물체의 1/8 수준으로 존재한다는 보고(Smith, 1987)와 토마토 엽병 즙액 내 NO₃⁻의 농도는 5,000~8,000 mg L⁻¹ 범위라고 한 보고(Reuter와 Robinson, 1986), (Prasad와 Spiers, 1985), 토마토 엽병 즙액 중 K⁺ 농도는 4,000~5,000 mg L⁻¹ 범위에 있다고 한 보고(Hochmuth, 1994))는 본 연구 결과와 일치하는 경향이였다. 또한 엽 건물체 중 무기원소 농도는 Reuter와 Robinson (1986), Hochmuth (1991), Snyder (1993) 등

이 제시한 농도와 유사한 경향을 나타냈다.

이상의 결과에서와 같이 엽과 엽병 즙액 및 엽 건물체 무기원소들의 생육시기에 따른 변화 양상은 같은 경향을 나타내었다. 이들 중 Ca^{2+} , Mg^{2+} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} 이온 등은 유묘기에서 수확초기까지 농도가 증가하였다가 수확중기에 감소하였으며 수확말기에 다시 증가하는 현상이 나타났는데, 이는 수확중기가 겨울철, 그리고 수확후기가 이듬해 봄철에 해당하는 시기이므로 성장 단계에 따른 영향이라기 보다는 환경조건(광량, 온도)의 영향 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 본 실험과 같은 재배 작기를 선택하여 토마토를 재배할 경우에는 즙액분석에 사용할 기준 농도는 위와 같은 계절적인 변화가 고려되어야 할 것으로 사료된다.

(2) 생육기간 동안 엽 및 엽병 즙액과 엽 건물체와의 상관관계

토마토 생육기간중 엽 및 엽병 즙액과 엽 건물체의 무기원소간 상관관계는 Table 5, 6에 나타나 있다. 엽 즙액과 엽 건물체 및 엽병 즙액과 엽 건물체간 상관분석을 이용하여 구한 상관 계수를 보면 T-N과 NO_3^- 는 각각 $r=0.93$, $r=0.80$ 를 나타내었고, P와 PO_4^{3-} 의 상관계수는 각각 $r=0.95$, $r=0.89$ 를 나타냈다. K^+ 의 상관계수는 각각 $r=0.96$, $r=0.94$ 를 나타내었고, Ca^{2+} 은 각각 $r=0.95$, $r=0.91$ 를, Mg^{2+} 은 각각 $r=0.95$, $r=0.92$ 를 나타내었다. 미량원소(BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , MoO_4^{2-})의 상관 계수 또한 모든 원소에서 $r=0.80$ 이상을 나타내어 즙액과 건물체 화학성분 분석간에는 고도의 정 상관 관계가 있음을 알 수 있었다.

토양재배 토마토의 엽병 즙액 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 엽중 N 농도간의 상관계수는 $r^2=0.69$ 라는 보고(Coltman, 1987)와 토마토의 즙액과 건물체 사이에 2차 방정식을 이용하여 구한 상관 관계는 $r^2=0.70\sim 0.78$ 범위에 있다고 한 보고(Prasad와 Spiers, 1985), 양액재배 토마토의 즙액과 건물체간의 상관관계를 T-N과 NO_3^- 는 $r^2=0.77$, P와 PO_4^{2-} 는 $r^2=0.91$, K는 $r^2=0.87$ 이라고 한 보

고(김 등 2003)등과 본 연구 결과가 일치하였다.

이처럼 즙액중의 무기원소 농도는 대응하는 식물체의 무기물 농도와 매우 밀접한 관계를 보여 식물체의 영양상태를 잘 반영하고 있음을 시사했으며 즙액분석법은 양액 재배 작물의 경우 더 정확하게 영양진단을 할 수 있음을 보였다.

Table 5. Relationship between the concentrations of NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} or MoO_4^{2-} ions in the leaf sap and the contents of N, P, K, Ca, Mg, B, Zn, Mn, Fe, Cu or Mo in the dry matter of leaf.

Dry matter of leaf	Leaf sap	Correlate coefficient (r)
T-N	NO_3^-	0.93**
P	PO_4^{3-}	0.95**
K	K^+	0.96**
Ca	Ca^{2+}	0.95**
Mg	Mg^{2+}	0.95**
B	BO_3^{3-}	0.94**
Zn	Zn^{2+}	0.94**
Mn	Mn^{2+}	0.97**
Fe	Fe^{2+}	0.92**
Cu	Cu^{2+}	0.94**
Mo	MoO_4^{2-}	0.93**

** Significant at 1 % level

Table 6. Relationship between the concentrations of NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} or MoO_4^{2-} ions in the petiole sap and the contents of N, P, K, Ca, Mg, B, Zn, Mn, Fe, Cu or Mo in the dry matter of leaf.

Dry matter of leaf	Petiole sap	Correlate coefficient (r)
T-N	NO_3^-	0.80**
P	PO_4^{3-}	0.89**
K	K^+	0.94**
Ca	Ca^{2+}	0.91**
Mg	Mg^{2+}	0.92**
B	BO_3^{3-}	0.80**
Zn	Zn^{2+}	0.96**
Mn	Mn^{2+}	0.98**
Fe	Fe^{2+}	0.84**
Cu	Cu^{2+}	0.96**
Mo	MoO_4^{2-}	0.96**

** Significant at 1 % level

2. 양액 공급 농도에 따른 엽과 엽병 즙액 중의 무기원소 농도

1) 양액 공급 농도 차이에 따른 연간 엽과 엽병내 무기원소 농도

(1) 연간 엽 즙액 중 무기원소 농도

양액 공급수준을 달리하여 생육기간 동안 일정 주기별로 엽 즙액 중 무기원소 농도를 조사한 결과는 Table 7, 8에 나타나 있다. 양액 공급 농도를

PTG 원예작물연구소의 토마토 표준 양액의 0.5배, 1배, 1.5배 비율로 다르게 처리한 결과와 대조구로 농가 관행재배법으로 양액을 공급한 결과를 비교하였을 때, 엽 즙액 내 무기 원소 농도는 최소유의차 검정을 이용하여 분석한 결과 95% 유의수준에서 공급 농도 처리간에 유의적인 차이를 보이지 않았다.

생육 기간 동안의 다량원소의 엽 즙액 농도를 보면, NO_3^- 는 800~2,400 mg L^{-1} 범위로 평균 1,864 mg L^{-1} 이었고, PO_4^{3-} 는 1,000~2,000 mg L^{-1} 범위로 평균은 1,604 mg L^{-1} 이었다. SO_4^{2-} 는 4,000~7,500 mg L^{-1} 범위로 평균 6,174 mg L^{-1} 이었고, K^+ 는 4,000~5,300 mg L^{-1} 범위로 평균 4,645 mg L^{-1} 이었다. Ca^{2+} 는 1,400~3,500 mg L^{-1} 범위로 평균 2,280 mg L^{-1} 이었으며, Mg^{2+} 는 300~1,000 mg L^{-1} 범위로 평균은 620 mg L^{-1} 이었다. 미량원소의 엽 즙액 농도의 경우 BO_3^{3-} 는 4.00~10.0 mg L^{-1} 범위로 평균 5.8 mg L^{-1} 이었고, Zn^{2+} 는 3.00~9.00 mg L^{-1} 범위로 평균 5.1 mg L^{-1} 이었으며, Mn^{2+} 는 5.00~18.0 mg L^{-1} 범위로 평균 13.1 mg L^{-1} 이었다. Fe^{2+} 는 2.00~5.00 mg L^{-1} 범위로 평균은 2.8 mg L^{-1} 이었고, Cu^{2+} 는 1.50 ~5.00 mg L^{-1} 범위로 평균은 2.9 mg L^{-1} 이었으며, MoO_4^{2-} 는 0.30~0.50 mg L^{-1} 범위로 평균 0.4 mg L^{-1} 이었다.

(2) 연간 엽병 즙액 중 무기원소 농도

공급 농도를 달리한 엽병 즙액내 무기원소 농도를 조사한 결과는 Table 9, 10에 나타나 있다. 엽의 경우와 마찬가지로 엽병에서도 양액 공급 수준에 따른 즙액 내 무기원소 농도는 최소유의차 검정을 이용하여 분석한 결과 95% 유의수준에서 공급 농도간에 유의적인 차이를 보이지 않았다.

생육 기간 동안의 다량원소의 엽병 즙액 농도를 보면 다음과 같다. NO_3^- 는 6,000~7,500 mg L^{-1} 범위로 평균 6.986 mg L^{-1} 이었고, PO_4^{3-} 는 800~2,000 mg L^{-1} 범위로 평균은 1,331 mg L^{-1} 이었으며, SO_4^{2-} 는 800~2,000 mg L^{-1} 범위로 평균은 1,453 mg L^{-1} 이었다. K^+ 는 4,000~6,000 mg L^{-1} 범

위로 평균은 5,482 mg L⁻¹이었고, Ca²⁺는 300~800 mg L⁻¹ 범위로 평균 529 mg L⁻¹이었으며, Mg²⁺는 200 ~500 mg L⁻¹ 범위로 평균 363 mg L⁻¹이었다. 또한, 미량원소의 엽병 즙액 농도를 보면 BO₃³⁻는 1.50~3.00 mg L⁻¹, 범위로 평균 2.1 mg L⁻¹이었고, Zn²⁺은 3.00~9.00 mg L⁻¹ 범위로 평균은 5.4 mg L⁻¹이었으며, Mn²⁺은 2.00~8.00 mg L⁻¹ 범위로 평균은 4.9 mg L⁻¹이었다. Fe²⁺는 1.50~4.00 mg L⁻¹ 범위로 평균은 2.1 mg L⁻¹이었고, Cu²⁺는 0.80~3.50 mg L⁻¹, 범위로 평균은 2.1 mg L⁻¹이었으며, MoO₄²⁻는 0.30~0.60 mg L⁻¹ 범위로 평균은 0.4 mg L⁻¹이었다.

생육기간 내 엽과 엽병 즙액의 무기원소 농도 차이는 1) 엽병이 엽에 비하여 NO₃⁻는 3.5배, K⁺는 1.3배, 2) 엽이 엽병에 비하여 SO₄²⁻는 4.0배, Ca²⁺는 4.0배, Mg²⁺는 1.7배, Mn²⁺은 2.7배, Fe²⁺과 Cu²⁺는 1.4배, BO₃³⁻는 2.7배 높았다. 3) 그 외 PO₄³⁻, Zn²⁺, MoO₄²⁻은 엽과 엽병간 농도 차이가 없었다.

이상의 결과는 다른 연구 결과와(Smith, 1987), (Hochmuth, 1994), (Bierman 등 1999), (Hartz, 1998) 비교해 볼 때, NO₃⁻, PO₄³⁻, K⁺의 원소에서는 같은 결과를 나타냈지만, Ca²⁺, Mg²⁺, BO₃³⁻, Zn²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺에서는 다른 결과를 보였다. SO₄²⁻와 MoO₄²⁻의 원소는 분석이 일상적으로 행해지고 있지 않고, 신뢰 가능한 목표치를 설정할 만큼의 충분한 자료가 없어 표준 농도로 제시하지 않았는데(Smith, 1987), 본 연구에 의하면 이 두 성분에 대한 표준 농도 제시도 충분히 가능하리라 사료된다. 또한 Ca²⁺, Mg²⁺, BO₃³⁻, Zn²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺ 원소들의 농도 차이를 보인 것은 작물 재배 시기(7월 파종, 익년 6월 종료)가 다름으로 인한 것으로, 재배 환경이 열악한 저온기에 이들 양분들의 흡수가 제대로 되지 않아서 농도가 다른 것으로 사료된다. 이는 저온기간에 재배되는 경우에는 다른 영양 상태를 보인다고 한 보고(Smith, 1987)와 같은 결과를 보였다. 따라서 7월에 종자를 파종하고, 익년 6월에 재배를 종료하는 재배 방식에서 토마토 영양진단은 위의 자료에 근거하여 진단을 하는 것이 바람직하다고 사료된다.

Table 7. Concentrations of inorganic elements in the leaf sap of tomato plant as supplied with the three different concentrations of nutrient solution. (unit : mg L⁻¹)

Sampl- ing date	Treat- ment	NO ₃	PO ₄	SO ₄	K	Ca	Mg	B	Zn	Mn	Fe	Cu	Mo
2000. 8.10	0.5	512.0*	1459.2	727.0	4192.0	360.0	568.4	4.6	4.8	5.8	3.9	2.5	0.3
	1	512.0	1459.2	727.0	4192.0	360.0	568.4	4.6	4.8	5.8	3.9	2.5	0.3
	1.5	512.0	1459.2	727.0	4192.0	360.0	568.4	4.6	4.8	5.8	3.9	2.5	0.3
	CF [†]	512.0	1459.2	727.0	4192.0	360.0	568.4	4.6	4.8	5.8	3.9	2.5	0.3
8.24	0.5	806.0	1436.0	615.3	4004.0	400.0	482.0	4.8	5.1	5.7	4.0	2.3	0.3
	1	814.0	1459.0	640.0	4012.0	410.0	458.2	4.6	5.2	6.1	3.8	2.4	0.3
	1.5	961.0	1397.0	698.8	4520.0	420.0	543.4	4.8	5.4	6.4	4.1	2.5	0.3
	CF	1077.0	1445.0	739.0	4311.0	410.0	517.2	4.4	5.1	6.3	4.2	2.5	0.3
9.7	0.5	1277.0	1506.2	752.0	5115.0	470.0	758.6	4.6	7.8	6.1	4.9	2.5	0.3
	1	1363.0	1633.0	778.9	5206.0	480.0	689.8	4.7	7.7	6.5	4.7	2.5	0.3
	1.5	1395.0	1609.0	749.9	5246.0	470.0	739.0	4.5	7.5	6.7	4.7	2.4	0.3
	CF	1351.0	1565.0	810.5	5047.0	470.0	807.0	4.1	7.3	6.2	4.6	2.2	0.3
9.21	0.5	1305.0	1620.1	823.8	4910.0	500.0	734.0	5.1	7.5	8.0	5.0	2.1	0.3
	1	1408.0	1612.0	863.0	5067.0	490.0	718.3	5.4	7.7	7.6	4.8	2.2	0.3
	1.5	1378.0	1673.0	830.2	5138.0	510.0	755.5	5.3	7.8	8.3	5.1	2.2	0.3
	CF	1409.0	1539.0	797.5	4962.0	520.0	823.0	5.3	7.5	7.6	5.0	2.0	0.3
10.13	0.5	1602.7	1766.0	835.6	5067.0	580.0	426.2	5.3	7.9	11.5	3.0	1.7	0.3
	1	1645.0	1732.0	967.6	5191.0	590.0	430.6	5.3	7.7	11.5	3.0	1.7	0.3
	1.5	1619.0	1809.0	979.4	4962.0	590.0	423.9	5.2	7.5	11.9	3.1	1.7	0.3
	CF	1621.0	1692.0	916.2	5047.0	600.0	428.0	4.9	7.6	12.3	3.1	1.6	0.3
10.27	0.5	1798.0	1885.0	1062.6	5295.0	676.8	463.0	5.7	7.1	13.5	2.5	1.4	0.3
	1.5	1783.0	1914.0	1075.9	5345.0	639.4	444.9	5.8	7.3	13.7	2.5	1.5	0.3
	1.5	1831.0	1966.0	976.4	5261.0	654.8	429.3	5.9	7.6	14.1	2.3	1.4	0.3
	CF	1827.0	1943.0	1029.6	5293.0	683.0	509.0	5.7	7.1	13.7	2.3	1.4	0.3
11.17	0.5	2154.1	2050.0	1156.4	5024.0	522.8	384.0	6.1	5.6	14.9	2.0	1.5	0.2
	1	2112.0	2048.0	1254.7	5230.0	494.5	339.0	6.2	5.9	15.2	2.0	1.6	0.2
	1.5	2273.0	2011.0	1182.1	5132.0	497.0	403.6	6.1	5.8	16.2	2.1	1.4	0.3
	CF	2123.0	1910.0	1182.2	5033.0	539.2	446.7	6.1	6.0	15.8	2.1	1.5	0.2
12.1	0.5	2332.8	2065.4	1212.5	4964.0	534.4	423.2	4.9	5.6	17.2	2.1	1.8	0.3
	1	2235.0	1949.0	1279.2	4927.0	463.1	414.6	5.0	5.8	17.5	2.2	1.8	0.3
	1.5	2319.0	2102.0	1147.1	5075.0	464.0	413.9	4.7	5.2	17.8	2.0	1.9	0.3
	CF	2282.0	1985.0	1227.2	4900.0	453.0	520.7	4.7	5.1	17.4	2.0	1.8	0.3

* LSD_(0.05) = ns (not significant), CF[†] = conventional fertilization

Table 8. Concentrations of inorganic elements in the leaf sap of tomato plant as supplied with the three different concentrations of nutrient solution. (unit : mg L⁻¹)

Sampl- ing date	Treat- ment	NO ₃	PO ₄	SO ₄	K	Ca	Mg	B	Zn	Mn	Fe	Cu	Mo
12.15	0.5	2219.0*	1901.2	1172.2	4951.0	492.0	539.0	3.9	4.4	15.3	1.6	2.6	0.3
	1	2176.0	1953.0	1139.7	4883.0	445.8	508.0	4.1	5.1	15.8	1.7	2.5	0.3
	1.5	2376.0	1926.0	1103.9	5150.0	486.0	609.3	4.2	4.8	16.1	1.6	2.6	0.3
	CF [†]	2365.0	1895.0	1151.0	4835.0	405.8	614.3	3.9	5.0	16.2	1.6	2.5	0.3
2001. 1.12	0.5	2131.9	1744.8	1676.5	5126.0	363.8	884.5	4.1	2.7	11.7	1.6	3.9	0.5
	1	2240.0	1790.0	1724.6	5257.0	319.8	919.0	4.5	2.9	11.0	1.8	4.1	0.5
	1.5	2280.0	1760.0	1575.0	5385.0	324.4	920.0	4.4	3.0	12.0	1.7	4.1	0.5
	CF	2265.0	1790.0	1496.0	5235.0	370.8	909.6	4.2	3.4	12.7	1.9	3.9	0.5
2.1	0.5	2204.4	1696.9	1891.7	4838.0	404.9	883.5	4.6	3.1	12.7	1.8	4.5	0.5
	1	2176.0	1645.0	1924.4	4872.0	389.8	856.0	5.0	3.0	12.5	1.8	4.6	0.5
	1.5	2164.0	1653.0	1800.0	4980.0	373.2	985.5	5.0	3.1	12.6	1.9	4.6	0.5
	CF	2210.0	1666.0	1839.4	4876.0	404.5	797.5	4.8	3.3	13.7	1.7	4.3	0.5
2.22	0.5	2090.5	1516.0	1967.7	4592.0	513.9	617.4	5.5	4.1	13.0	2.3	4.6	0.5
	1	2138.0	1547.0	1976.4	4517.0	474.1	692.0	5.6	4.0	12.7	2.3	4.7	0.5
	1.5	2271.0	1539.0	1887.0	4612.0	484.3	678.5	5.8	4.3	13.2	2.4	4.6	0.5
	CF	2250.0	1552.0	1947.8	4629.0	499.7	644.5	5.5	4.3	13.3	2.2	4.6	0.5
3.15	0.5	2091.3	1479.0	1785.8	4310.0	638.5	592.0	6.5	3.5	14.8	2.0	4.0	0.4
	1	2172.0	1433.0	1775.4	4383.0	628.2	573.0	6.7	3.4	15.0	2.1	4.1	0.4
	1.5	2220.0	1485.0	1895.9	4407.0	695.0	550.7	6.6	3.8	15.3	1.8	4.3	0.5
	CF	2280.0	1456.0	1764.0	4552.0	711.9	508.4	6.4	3.8	15.4	1.8	4.3	0.4
3.29	0.5	2212.8	1397.0	1862.4	4199.0	771.0	543.4	8.0	4.7	16.6	3.1	3.5	0.4
	1	2222.0	1380.0	1827.8	4210.0	780.0	589.5	8.0	4.1	17.1	2.9	3.4	0.4
	1.5	2165.0	1398.0	1866.4	4385.0	804.0	573.0	7.8	4.3	17.5	2.8	3.4	0.4
	CF	2278.0	1394.0	1819.0	4353.0	830.0	657.5	7.5	4.7	17.8	2.8	3.6	0.4
4.19	0.5	2115.9	1302.0	1795.0	4039.0	848.0	609.5	8.0	4.8	16.9	3.4	3.3	0.4
	1	2188.0	1312.0	1857.0	4130.0	794.5	602.0	8.3	4.4	16.9	3.1	3.5	0.4
	1.5	2175.0	1297.0	1825.8	4216.0	831.6	562.3	7.8	4.2	17.2	3.3	3.4	0.4
	CF	2169.0	1287.0	1766.0	4173.0	883.0	597.0	8.0	4.5	17.1	3.3	3.5	0.4
5.3	0.5	2189.3	1282.0	1833.0	3712.0	814.5	800.0	8.2	4.1	16.9	3.2	2.9	0.4
	1	2123.0	1256.0	1840.0	3714.0	809.0	769.0	8.0	3.9	17.3	3.0	3.2	0.4
	1.5	2171.0	1199.0	1890.3	3825.0	794.0	697.0	8.1	3.8	17.8	3.3	3.1	0.4
	CF	2061.0	1213.0	1839.0	3911.0	804.0	730.5	8.4	3.7	17.6	3.0	3.0	0.4
5.24	0.5	2042.6	1213.0	1814.0	3663.0	751.0	754.0	7.9	4.1	16.9	3.2	3.0	0.4
	1	2003.0	1215.0	1827.0	3603.0	744.0	766.0	8.1	4.3	17.1	3.0	3.1	0.4
	1.5	2097.0	1175.0	1840.2	3654.0	751.0	696.5	8.0	3.8	17.3	3.1	3.1	0.4
	CF	2069.0	1195.0	1780.0	3665.0	724.0	716.0	8.4	3.8	17.4	3.1	3.0	0.4
Mean		1864.0	1604.4	1356.9	4645.5	560.8	619.8	5.8	5.1	13.1	2.9	2.9	0.4

* LSD_(0.05) = ns (not significant), CF[†] = conventional fertilization

Table 9. Concentrations of inorganic elements in the petiole sap of tomato plant as supplied with the three different concentrations of nutrient solution. (unit : mg L⁻¹)

Sampl- ing date	Treat- ment	NO ₃	PO ₄	SO ₄	K	Ca	Mg	B	Zn	Mn	Fe	Cu	Mo
2000. 8.10	0.5	6910.0*	871.6	850.0	4788.0	252.4	210.0	1.3	3.2	1.8	2.3	0.9	0.2
	1	6910.0	871.6	850.0	4788.0	252.4	210.0	1.3	3.2	1.8	2.3	0.9	0.2
	1.5	6910.0	871.6	850.0	4788.0	252.4	210.0	1.3	3.2	1.8	2.3	0.9	0.2
	CF*	6910.0	871.6	850.0	4788.0	252.4	210.0	1.3	3.2	1.8	2.3	0.9	0.2
8.24	0.5	6915.8	784.6	878.0	5286.1	289.3	230.0	1.7	3.5	2.3	2.0	0.8	0.2
	1	7161.0	852.0	900.0	5342.5	290.2	220.0	1.7	4.0	2.5	1.8	0.8	0.3
	1.5	7033.3	731.1	874.0	5544.4	300.0	230.0	1.8	3.7	2.4	1.9	0.9	0.3
	CF	7180.0	779.0	887.0	5134.4	291.1	220.0	1.6	3.8	2.3	1.8	0.8	0.3
9.7	0.5	7285.3	1010.4	1206.0	5495.0	403.4	270.0	2.3	5.1	2.9	1.8	0.9	0.3
	1	7629.0	1105.3	1246.0	5493.0	397.4	290.0	2.4	6.0	3.0	1.8	0.9	0.3
	1.5	7841.3	1154.0	1198.0	5645.0	430.1	290.0	2.4	6.0	3.1	1.8	1.0	0.3
	CF	7508.5	1072.0	1187.0	5674.8	380.0	280.0	2.4	6.1	3.0	1.8	1.0	0.2
9.21	0.5	7295.3	1169.0	1283.0	5565.0	421.0	309.6	2.6	6.7	4.3	2.0	1.3	0.3
	1	7204.8	1172.0	1255.0	5663.0	432.7	320.0	2.7	6.5	4.3	2.2	1.3	0.3
	1.5	7255.4	1263.0	1221.0	5618.0	459.3	330.0	2.7	7.4	4.6	2.3	1.3	0.3
	CF	6930.0	1279.0	1278.0	5582.0	402.8	310.0	2.5	6.9	4.2	2.2	1.3	0.3
10.13	0.5	7037.0	1712.0	1610.0	5770.9	544.4	467.4	1.6	8.3	6.8	2.1	1.2	0.3
	1	7184.0	1832.0	1586.0	6046.0	552.6	479.9	1.6	8.4	7.0	1.9	1.3	0.3
	1.5	7525.8	1817.0	1517.0	6068.5	542.2	457.6	1.5	8.9	7.2	2.0	1.2	0.3
	CF	7485.8	1722.0	1580.0	5793.5	540.1	503.9	1.5	8.8	6.8	2.0	1.1	0.3
10.27	0.5	6966.0	2020.0	1571.0	6227.8	600.0	507.7	1.5	7.6	6.1	1.8	1.4	0.3
	1	7133.0	2092.0	1553.0	6221.1	620.0	496.9	1.4	7.6	6.4	1.7	1.4	0.3
	1.5	7156.0	2136.0	1562.0	6367.0	608.5	490.0	1.4	7.8	6.5	1.7	1.4	0.3
	CF	7338.7	2065.0	1599.0	6277.8	590.0	494.4	1.4	7.6	6.5	1.8	1.4	0.2
11.17	0.5	7215.0	2121.0	1571.0	5795.0	650.0	401.9	1.7	6.1	5.9	1.6	1.3	0.3
	1	7279.0	2157.0	1592.0	5840.0	670.0	410.9	1.7	6.2	5.9	1.6	1.4	0.3
	1.5	7851.4	2167.0	1665.0	6050.0	660.0	420.0	1.8	6.1	6.4	1.6	1.3	0.2
	CF	7801.3	2147.0	1649.0	6113.0	670.0	422.1	1.7	6.0	6.2	1.6	1.5	0.2
12.1	0.5	7044.4	2075.0	1605.0	6095.0	510.0	277.5	1.6	5.4	4.8	1.5	1.7	0.3
	1	7218.7	2123.0	1598.0	5905.0	560.0	264.4	1.6	5.4	4.8	1.4	1.7	0.3
	1.5	7508.5	2099.0	1595.0	6070.0	540.0	255.1	1.7	5.0	4.9	1.5	1.6	0.3
	CF	7667.7	2110.0	1649.0	5826.0	540.0	284.5	1.7	5.0	4.7	1.6	1.6	0.3

* LSD_(0.05) = ns(not significant), CF* = conventional fertilization

Table 10. Concentrations of inorganic elements in the petiole sap of tomato plant as supplied with the three different concentrations of nutrient solution. (unit : mg L⁻¹)

Sampl- ing date	Treat- -ment	NO ₃	PO ₄	SO ₄	K	Ca	Mg	B	Zn	Mn	Fe	Cu	Mo
12.15	0.5	6680.0*	1657.0	1446.0	6010.0	460.0	258.3	1.5	5.1	3.3	1.6	2.0	0.3
	1	6701.2	1801.0	1417.0	6090.0	440.0	241.5	1.5	4.6	3.5	1.6	1.9	0.3
	1.5	7153.0	1701.0	1499.0	6205.0	430.0	250.0	1.7	4.8	3.4	1.5	1.9	0.3
	CF [†]	7124.0	1713.0	1534.0	5963.0	440.0	240.0	1.6	4.4	3.5	1.7	1.9	0.3
2001. 1.12	0.5	6731.0	994.0	1309.0	5527.0	420.0	210.0	1.8	3.2	2.7	1.6	2.3	0.5
	1	6687.0	1069.0	1361.0	5585.0	410.0	214.1	1.9	3.0	2.8	1.7	2.3	0.5
	1.5	6994.3	1073.0	1440.0	5705.0	400.0	220.0	1.9	3.1	2.7	1.5	2.3	0.5
	CF	6434.1	966.0	1436.0	5457.0	410.0	220.0	1.8	2.9	2.7	1.6	2.3	0.5
2.1	0.5	6943.8	1215.0	1323.0	5401.0	430.0	243.8	1.7	3.2	3.5	1.6	2.8	0.6
	1	7239.9	1231.0	1378.0	5465.0	430.0	250.0	1.7	3.1	3.4	1.6	3.0	0.6
	1.5	7009.1	1259.0	1377.0	5454.0	420.0	260.0	1.8	3.4	3.3	1.5	2.9	0.6
	CF	6921.0	1242.0	1359.0	5513.0	470.0	240.0	1.6	3.4	3.4	1.5	3.1	0.6
2.22	0.5	6870.0	1070.0	1325.0	5341.0	450.0	279.2	2.0	4.4	3.9	1.7	3.0	0.6
	1	6932.0	1115.0	1353.0	5434.0	460.0	280.0	2.1	4.1	3.9	1.7	3.2	0.6
	1.5	7256.0	1187.0	1364.0	5340.0	440.0	280.0	2.2	4.3	4.1	1.7	3.0	0.6
	CF	7222.0	1163.0	1333.0	5515.0	490.0	285.6	2.1	4.0	4.2	1.6	3.0	0.6
3.15	0.5	6904.0	1031.0	1477.0	5256.0	530.0	401.0	2.1	5.3	5.3	1.8	3.2	0.6
	1	6846.0	1097.0	1503.0	5266.0	536.6	410.0	2.2	5.4	5.4	1.8	3.4	0.6
	1.5	7030.0	1143.0	1517.0	5105.0	550.0	420.0	2.1	5.6	5.8	1.8	3.3	0.6
	CF	7062.0	1049.0	1487.0	5234.0	550.3	433.2	2.2	5.5	5.9	1.8	3.1	0.6
3.29	0.5	6754.0	1020.4	1599.0	5104.0	738.0	520.0	2.9	5.5	6.9	2.6	3.2	0.5
	1	6696.0	1098.0	1595.0	4944.5	732.0	525.7	2.7	5.6	7.1	2.9	3.2	0.6
	1.5	6829.0	1105.0	1613.0	5074.0	750.0	550.0	2.9	5.7	7.0	2.9	3.0	0.6
	CF	6889.0	1146.0	1569.0	4894.0	726.3	545.8	2.8	6.0	6.9	2.8	3.1	0.6
4.19	0.5	6544.0	1018.0	1739.0	5100.0	730.0	490.0	3.1	5.9	7.7	3.0	3.3	0.5
	1	6427.0	1017.0	1780.0	5327.0	752.0	519.0	2.9	6.0	7.8	3.1	3.6	0.5
	1.5	6637.0	972.0	1740.0	5221.0	770.0	510.0	2.9	5.8	7.9	2.9	3.4	0.6
	CF	6758.0	1051.0	1695.0	5013.0	740.0	502.3	3.1	6.2	7.5	2.9	3.5	0.5
5.3	0.5	6254.0	1154.8	1875.0	5016.0	719.0	485.3	3.0	5.9	6.5	3.5	2.9	0.5
	1	6337.0	1050.0	1855.0	4984.0	775.1	513.6	2.9	5.9	6.8	3.4	3.1	0.6
	1.5	6356.0	1102.0	1869.0	5084.0	750.0	520.0	2.9	6.2	6.7	3.3	2.9	0.5
	CF	6534.0	1181.0	1834.0	4958.5	730.0	496.0	2.9	5.9	6.5	3.4	2.9	0.5
5.24	0.5	6214.0	1142.0	1885.0	4910.5	748.0	520.0	2.8	5.8	6.7	3.6	3.0	0.5
	1	6141.0	1105.0	1871.0	4816.0	780.2	527.1	2.9	5.8	6.9	3.6	3.1	0.5
	1.5	6271.0	1167.0	1859.0	4865.5	722.0	520.0	2.8	6.3	6.8	3.5	3.0	0.5
	CF	6340.0	1141.0	1847.0	4929.5	715.0	510.0	2.7	6.0	6.5	3.4	2.9	0.5
Mean		6506.8	1208.8	1379.0	5139.6	500.1	339.0	2.0	5.1	4.7	2.0	2.1	0.5

* LSD_(0.05) = ns(not significant), CF[†] = conventional fertilization

2) 양액 공급 농도 차이에 따른 연간 수확량 및 토마토의 품질 비교

(1) 연간 수확량 비교

양액 공급농도를 달리하였을 때 토마토의 수확량을 조사한 결과는 Table 11에 나타냈다. 월별로 토마토 수확량은 많은 차이를 보였으나 양액 공급 농도별로는 그 차이는 나타나지 않았다. PTG 원예작물 연구소의 토마토 표준양액의 0.5배 농도에서는 연간 총 1,517 kg이 생산(주당 12.6 kg)되었고, 1배 농도와 대조구 농도에서는 1,400 kg이 생산(주당 11.7 kg)되었으며, 1.5배 농도에서는 1,348 kg이 생산(주당 11.2 kg)되었다. 하지만 이들 간에는 통계분석을 해 본 결과 95%의 유의수준에서 유의차가 없었다.

Table 11. Monthly production of tomatoes as supplied with three different concentrations of nutrient solution. (unit : kg/120plants)

Months	Treatments			
	0.5 ×	1.0 ×	1.5 ×	CF [†]
2000. 10	118.6	106.1	112.8	98.4
11	144.7	117.6	121.7	131.0
12	140.3	117.0	114.4	106.9
2001. 1	87.4	77.1	67.3	69.7
2	65.5	62.6	59.0	58.4
3	97.1	83.3	72.1	68.5
4	156.9	136.5	124.5	128.8
5	239.4	228.9	220.3	248.1
6	229.7	242.1	226.9	261.1
7	111.9	113.9	117.0	120.7
Total	1517 ^a	1401 ^a	1348 ^a	1407 ^a

*. To compare total production of tomato between the treatments, LSD_{0.05} = 181 kg/120plants, CF[†] = conventional fertilization(0.7~1.3 ×)

(2) 토마토의 평균 과중 비교

토마토의 평균 과중 변화를 조사한 결과는 Table 12에 나타났다. 토마토 평균 과중은 PTG 원예작물 연구소의 토마토 표준 양액의 0.5배 농도는 평균 185 g이었고, 1배 농도는 184 g, 1.5배 농도는 175 g이었으며, 대조구는 181 g으로 나타났으나 통계분석을 해 본 결과 95 %의 유의수준에서 유의차가 없었다. 이러한 결과는 1배 수준에서 과중이 제일 무거웠고, 농도가 증가할수록 무게가 가벼워 졌다고 한 보고(이 등 1994)와 본 실험 결과와는 약간 상이하게 나타났다.

Table 12. Average weight of tomato as supplied with three different concentrations of nutrient solution. (unit : g/fruit)

Date	Treatments				Date	Treatments			
	0.5 ×	1 ×	1.5 ×	CF [†]		0.5 ×	1 ×	1.5 ×	CF [†]
12.14	158.4	173.7	153.7	165.7	1.10	189.2	177.5	176.9	180.6
12.16	159.3	174.9	156.5	171.0	1.12	188.4	188.8	183.0	180.0
12.18	168.1	171.2	170.6	175.4	3.6	191.3	188.1	181.7	185.4
12.20	173.5	178.4	173.3	170.8	3.12	190.4	187.6	180.5	181.2
12.22	172.6	179.6	176.1	170.3	3.16	191.3	187.9	181.8	188.0
12.24	175.8	173.1	177.3	175.2	3.21	193.3	188.4	177.4	181.2
12.26	172.2	176.0	177.3	177.4	4.17	191.1	189.5	183.5	186.7
12.28	183.3	190.5	183.5	176.3	4.23	199.9	189.6	179.4	196.3
12.31	179.8	179.8	176.2	173.9	5.4	202.1	201.8	180.6	204.8
1.2	167.4	175.5	155.1	170.0	5.8	211.7	205.5	186.8	197.0
1.4	168.3	169.4	170.3	168.9	5.14	219.3	199.5	187.9	201.5
1.6	162.4	161.8	150.8	155.5	5.18	214.7	203.3	190.2	206.4
1.8	176.5	173.8	170.9	171.9	5.24	211.7	206.1	193.8	207.9
Ave.						185.1 ^a	184.3 ^a	176.0 ^a	181.5 ^a

*. To compare average weight of tomato between the treatments, $LSD_{0.05} = 23.2$ g/fruit, $CF^{\dagger} =$ conventional fertilization(0.7~1.3 ×)

(3) 토마토의 Brix°당도 비교

양액 공급 농도 차이에 따른 과일의 당도는 Table 13에 나타냈다. Table 13에서와 같이 3월부터 5월까지 과일의 Brix°당도는 양액의 공급 농도가 높을수록 높았지만 통계분석을 해 본 결과 99 %의 유의수준에서 유의차가 없었다. 이는 양액 농도가 증가할수록 당도가 증가하였다는 보고 (이 등 1994)와는 약간 상이하게 나타났다.

Table 13. Soluble solid content of tomato as supplied with three different concentrations of nutrient solution. (unit : Brix°)

Date	Treatments			
	0.5 ×	1 ×	1.5 ×	CF [†]
3.6	5.54	5.80	5.90	5.84
3.12	5.50	5.48	5.88	5.82
3.16	5.68	5.80	6.16	6.20
3.21	5.68	5.80	6.16	6.20
4.17	5.72	6.18	6.26	6.26
4.23	6.06	6.04	6.24	6.16
5.4	5.74	5.58	5.86	5.76
5.8	5.90	5.88	6.24	5.88
5.14	5.80	5.60	5.90	5.60
5.18	5.56	5.50	5.60	5.52
5.24	5.60	5.62	5.80	5.66
Ave.	5.71 ^a	5.75 ^a	6.00 ^a	5.86 ^a

*. To compare soluble solid content of tomato between the treatments, LSD_{0.01} = 0.30 Brix° CF[†] = conventional fertilization(0.7~1.3 ×)

(4) 배꼽썩음과 발생을 비교

토마토의 여러 품종 가운데 모모타로 품종에서 배꼽썩음과(꽃이 떨어

진 부분에 갈색 작은 반점이 생겨 점차 과잉 내부가 암갈색으로 변하여 배꼽 부분이 썩는 것)의 발생은 수확량에 영향을 미칠 수 있는 요인중의 하나이다. 양액 공급 농도별로 배꼽썩음과의 발생율을 보면(Table 14) PTG 원예작물 연구소의 토마토 표준양액의 0.5배 농도에서는 1.7 %가 발생하였고, 1배 농도에서는 3.2 %, 1.5배 농도에서는 7.5 %, 대조구에서는 3.8 %가 발생하여 양액 공급 농도가 높을수록 배꼽썩음과 발생율이 높았다. 이는 양액 농도가 증가할수록 배꼽썩음과가 많아졌다는 보고(이 등 1994)와 일치하였다. 특히, 0.5배 농도가 다른 처리구보다 수확량이 다소 많은 것은 배꼽썩음과의 발생율이 상대적으로 적어 상품 수확량을 높일 수 있었던 가장 큰 요인이 되었다.

Table 14. Occurrence rate of Blossom end rot of tomato fruit, as supplied with the three different concentrations of nutrient solution. (unit : %)

Date	Treatments			
	0.5 ×	1 ×	1.5 ×	CF [†]
4.21	1.73	2.89	2.08	1.41
4.23	1.10	2.05	7.47	2.43
4.30	1.15	4.82	4.72	2.91
5.4	1.12	4.00	9.84	6.43
5.8	1.72	4.16	6.58	3.03
5.12	1.93	2.79	7.21	3.37
5.14	1.04	4.71	13.5	8.34
5.18	1.85	1.90	14.0	3.06
5.22	1.01	2.14	4.01	3.59
5.28	1.54	2.73	3.40	3.52
Ave.	1.42 ^a	3.22 ^{ab}	7.29 ^c	3.81 ^b

*. To compare average occurrence rate of blossom end rot of tomato between the treatments, $LSD_{0.05} = 1.22 \%$
 CF[†] = conventional fertilization(0.7~1.3 ×)

(5) 열과 발생을 비교

열과가 많이 발생하는 시기인 4월 30일부터 5월 28일까지 한달간 조사한 열과 발생율은 PTG 원예작물 연구소의 토마토 표준양액의 0.5배 농도에서 2.3 %, 1배 농도에서 3.4 %, 1.5배 농도에서 4.7 %, 대조구에서 4.3 % 를 나타내었다(Table 15). 이러한 열과의 발생은 당도로 인한 삼투압 즉, 확장압에 의하여 껍질이 파열한다고 보고(박상근 등 1987)되어 있는데 열과 현상을 감소시키기 위해서는 영양 성분의 공급 농도 조절을 통한 삼투압을 낮추는 것이 효과적일 것이라고 판단된다.

Table 15. Occurrence rate of radial cracking of tomato fruit, as supplied with the three different concentrations of nutrient solution.

(unit : %)

Date	Treatments			CF [†]
	0.5 ×	1 ×	1.5 ×	
4.30	3.85	5.00	6.25	4.26
5.4	3.85	4.84	6.15	4.29
5.8	1.16	2.41	4.17	4.03
5.12	1.64	2.86	1.69	5.56
5.14	3.23	3.70	3.64	3.45
5.18	2.33	2.38	8.57	5.56
5.22	1.92	3.92	4.26	3.77
5.28	2.67	4.82	6.25	3.57
Ave.	2.35 ^a	3.44 ^{ab}	4.72 ^{bc}	4.31 ^b

*. To compare average occurrence rate of radial cracking of tomato between the treatments, $LSD_{0.05} = 1.25 \%$
 CF[†] = conventional fertilization(0.7~1.3 ×)

이상의 결과와 같이 양액 공급 농도에 따라 엽 또는 엽병 즙액 중의 무기 이온의 농도, 수확량에서 차이를 보이지 않았으며, 0.5배 공급에서 과일의 평균 무게가 가장 컸고, 열과 발생율, 배꼽썩음과 발생율이 적은 것을 감안할 때 현재의 양액 공급 관행(1.0배)은 다소 높은 것으로 사료된다. 따라서, 본 실험과 같은 양액재배 조건이라면 0.5배 수준으로 낮추어 양액재배를 실시하는 것이 화학비료 시비량 절감 절약과 환경 문제 등을 고려해 볼 때 바람직하다고 생각된다. 과채류의 재배과정에서 당도 저하 문제가 발생할 경우 엽화나트륨이나 엽화칼륨을 보조제로 첨가하여 당도를 개선할 수 있다는 보고(김영철 등 2002)도 있는데, 추후 토마토의 양액재배 과정에서 당도 문제가 제기될 경우 이러한 점을 고려해 보아야 할 것이다.



3. 필수 영양원소의 결핍과 과잉에 따른 즙액내 무기원소 농도와 식물체 생육 상황

1) 토마토의 정상 생육



Figure 10. Leaves and fruits of tomato making the normal growth.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 정상적인 생육을 하는 토마토의 엽은 색깔이 맑은 녹색을 띠며, 엽맥과 엽신의 구별이 뚜렷하였다. 또한 화방 간격은 23 cm였으며, 과일은 타원형으로 표면에 윤기가 났다.

2) 질소

(1) 토마토의 질소결핍 증상



Figure 11. N-deficient tomato leaves.

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 질소 결핍 증상은 생육초기에는 늙은 잎이 먼저 황화되기 시작하여 상위엽이 담황색을 나타낸 후 잎 전체가 황화현상을 나타내었다(Fig. 11). 또한 전반적으로 토마토의 생장이 불량하였는데, 개화 및 착과의 불량과 함께 과일 성숙이 지연되었다. 이 증상은 농촌진흥청(2001)에서 제시한 것과 유사한 경향이였다.

(2) 토마토의 질소 과잉 증상



Figure 12. N-excess tomato leaves.

토마토의 생육 과정 중 질소 과잉증상을 조사한 결과, 잎이 진한 녹색을 띠었고, 과번무 현상, 엽 뒤틀림 현상과 함께 엽병의 방향이 줄기 쪽으로 향하고 있었다. 또한 줄기의 비대 현상과 함께 토마토 열매가 왜소하게 나타났고, 화방간격은 17 cm로 정상간격인 23 cm보다 약 30% 정도 짧게 나타났다(Fig. 12).

(3) 질소 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도와 생리적인 반응

질소 결핍과 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 NO_3^- 농도는 Fig. 13에 나타내었다. 질소 결핍 시 즙액 내 NO_3^- 농도는 엽의 경우 1,460~1,610 mg L^{-1} 범위로 평균은 1,540 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 3,640~4,920 mg L^{-1} 범위로 평균은 4,282 mg L^{-1} 이었다. 과잉 시 즙액 내 NO_3^- 농도는 엽의 경우 2,660~2,860 mg L^{-1} 범위로 평균 2,760 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 7,950~8,550 mg L^{-1} 범위로 평균은 8,250 mg L^{-1} 이었다. 질소 결핍 시에는 엽 또는 엽병 즙액 중의 NO_3^- 의 농도가 정상치보다 30% 이하였고 그리고 질소 과잉 시에는 그 값이 정상치보다 30% 이상이었다.

질소 결핍 및 과잉에 따른 다른 무기원소의 농도 변화를 보면, 결핍시에는 즙액 중 Mn^{2+} , Fe^{2+} 의 농도가 정상농도 보다 낮았고, 과잉시에는 즙액 중 Ca^{2+} , Mn^{2+} 의 농도가 정상농도 보다 낮았다. 또한 질소의 결핍과 과잉에 따른 생리적인 특징을 보면(Fig. 14) 결핍시에는 초장, 엽록소 SPAD 값, 줄기직경, 엽장 및 엽폭, 화방수, 수확량 모두 감소하였고, 과잉시에는 초장의 성장율은 감소하고, 엽록소 SPAD 값은 증가하였다. 줄기직경, 엽장 및 엽폭, 화방수, 수확량은 정상적인 생육과 차이가 없었다.

이는 토마토의 수경재배시 질소의 농도가 높을 때 엽면적이 감소하였다는 보고(정 등 1992)와 유사한 경향이었다.

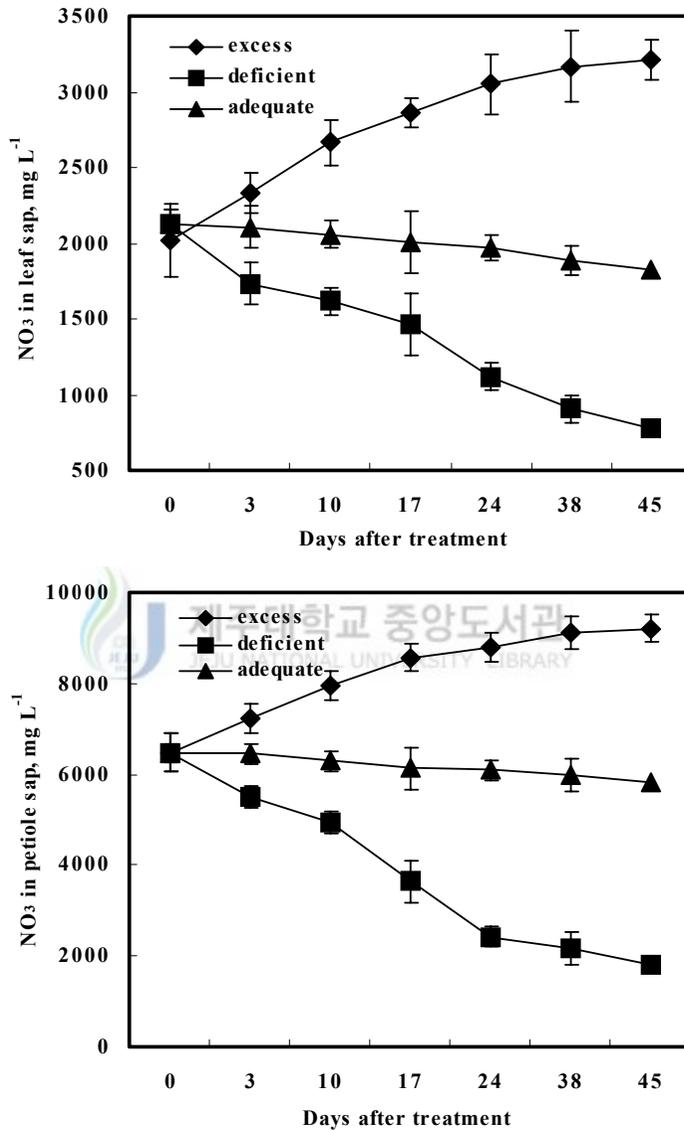


Figure 13. Change of NO₃⁻ concentrations in the leaf or petiole sap when cultured under the N-deficient or excess condition.

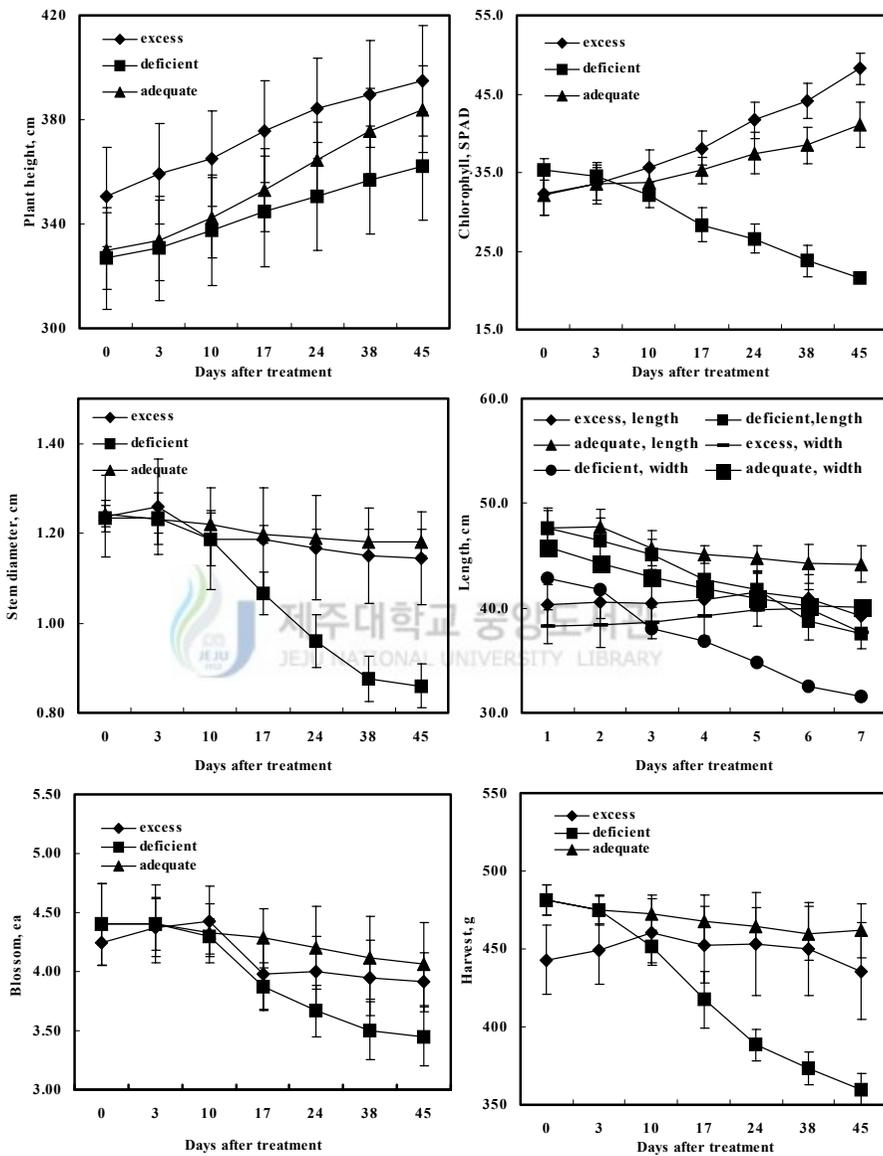


Figure 14. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the N-deficient or excess condition.

2) 인산

(1) 토마토의 인산 결핍 증상



Figure 15. P-deficient tomato leaves.

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 인산 결핍 증상은 초기에 엽색이
열어졌고, 연한 녹자색을 보였다. 결핍 증상이 진전되면서 잎이 소형화되었
고, 엽색은 적자색을 띠었다(Fig 15). 과일은 크기가 작고, 숙기도 늦어졌으
며, 수량이 감소하였다.

(2) 토마토의 인산 과잉 증상



Figure 16. P-excess tomato leaves.

토마토의 생육 과정 중 인산 과잉 증상을 조사한 결과, 화방 간격이 정

상에 비하여 2 cm 정도 짧았고, 화방이 가늘었다. 또한, 칼륨과 길항 작용을 일으켜 칼륨 결핍 증상이 나타났다(Fig. 16).

(3) 인산 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생리적인 반응

인산 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 PO_4^{3-} 농도는 Fig. 17에 나타내었다. 결핍 시 즙액 내 PO_4^{3-} 농도는 엽의 경우 1,430~1,560 $mg L^{-1}$ 범위로 평균 1,490 $mg L^{-1}$ 이었고, 엽병의 경우 1,230~1,386 $mg L^{-1}$ 범위로 평균은 1,310 $mg L^{-1}$ 이었다. 과잉 시 즙액 내 PO_4^{3-} 농도는 엽의 경우 2,530~2,610 $mg L^{-1}$ 범위로 평균은 2,570 $mg L^{-1}$ 이었고, 엽병의 경우는 1,870~2,010 $mg L^{-1}$ 범위로 평균은 1,940 $mg L^{-1}$ 이었다. 인 결핍 시에는 엽 또는 엽병 즙액중의 PO_4^{3-} 의 농도가 정상치보다 20% 이하였고, 인 과잉 시에는 값이 정상치보다 20% 이상이였다.

인산 결핍 및 과잉 시 다른 무기원소들의 농도 변화를 보면, 결핍 시에는 즙액 중 Fe^{2+} 의 농도가 정상농도보다 10% 낮게 나타났고, 과잉 시에는 즙액 중 K^+ 농도가 정상 농도보다 낮게 나타났고, Fe^{2+} 의 농도는 증가하였다. 또한 인산 결핍과 과잉에 따른 생리적인 특징을 보면(Fig. 18) 인 결핍 시 초장 및 엽록소 SPAD 값은 감소하였지만 과잉시에는 그 값은 정상 생육과 같게 나타났다. 줄기직경, 엽장 및 엽폭, 화방수, 수확량은 결핍 및 과잉 시 모두 감소하였다.

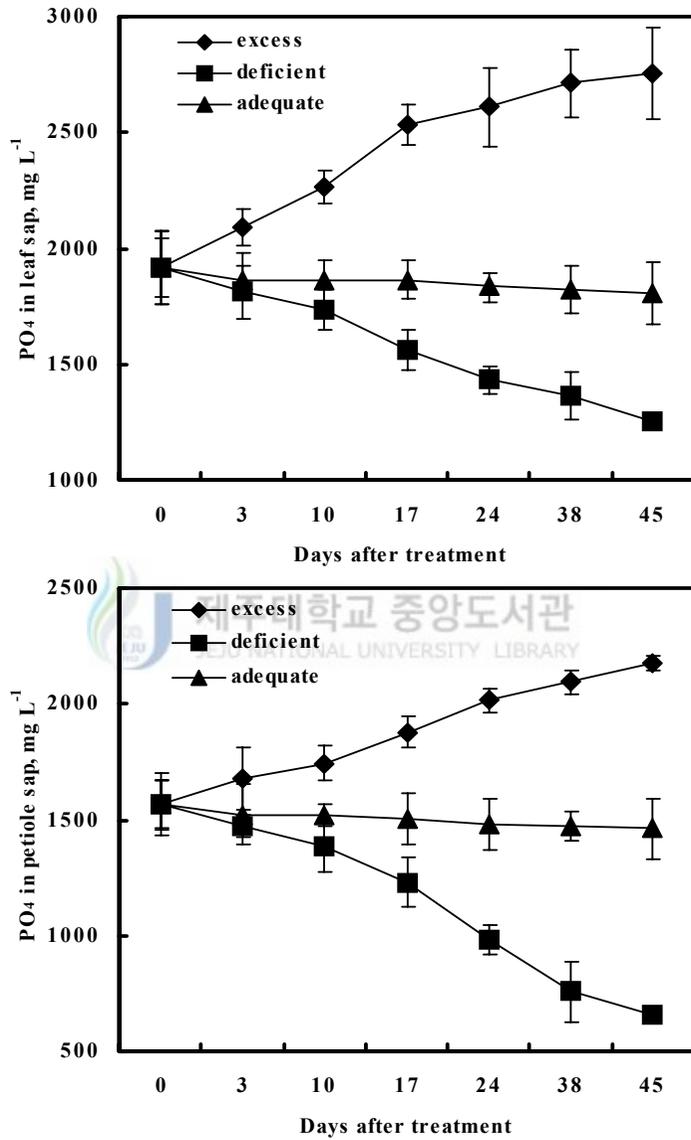


Figure 17. Change of PO₄³⁻ concentrations in the leaf or petiole sap when cultured under the P-deficient or excess condition.

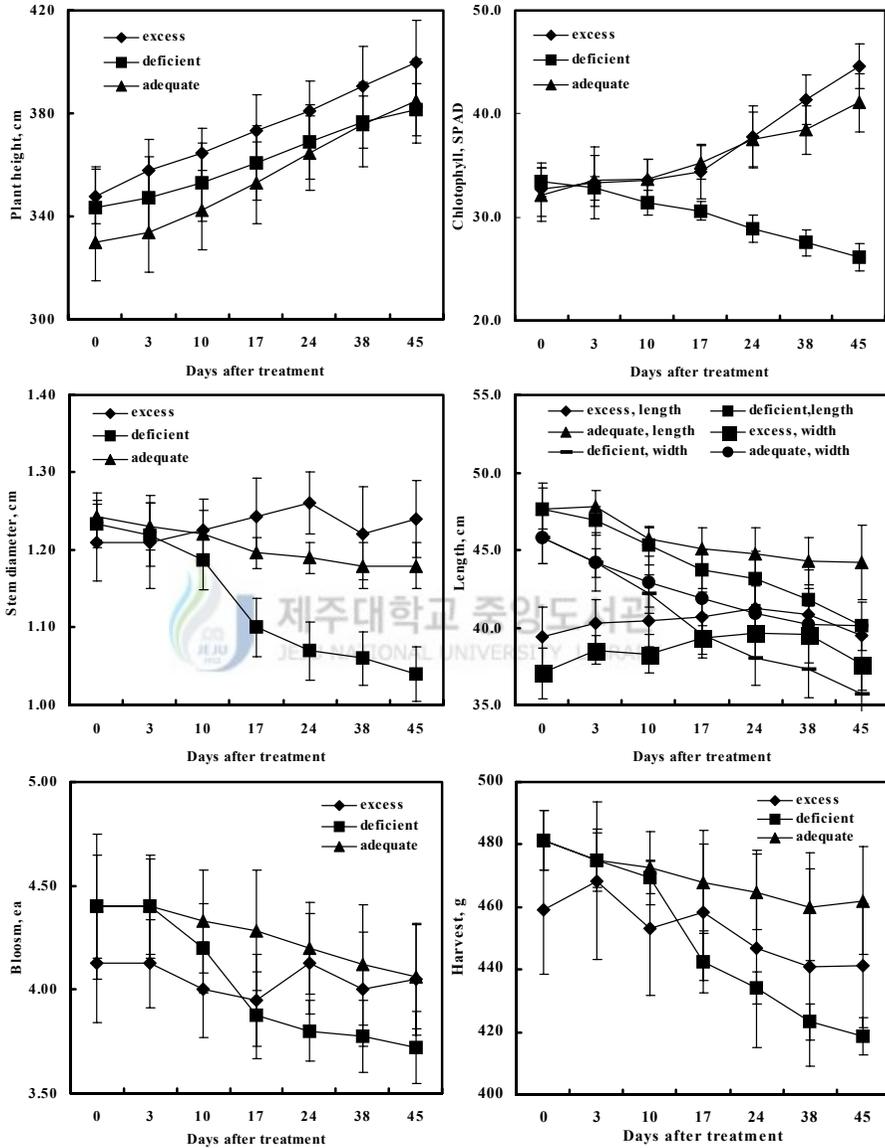


Figure 18. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the P-deficient or excess condition.

3) 황

(1) 토마토의 황 결핍 증상



Figure 19. S-deficient tomato leaves.

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 황 결핍 증상을 보면 엽색은 담녹색을 띄었고, 엽맥이 엽신보다 밝았다. 결핍 초기에는 상위엽에서 엽맥이 적자색을 띄었다가 결핍이 진전되면서 엽 전체가 황화 되었다. 질소의 결핍 증상과 비슷하였다(Fig 19).

(2) 토마토의 황 과잉 증상



Figure 20. S-excess tomato leaves.

토마토의 생육 과정 중 황 과잉 증상을 조사한 결과, 엽은 진한 녹색을

떡었고, 이후 성장점 부위의 엽 끝부분이 황화되었다가 고사하였다. 또한 화방 출현이 비정상적으로 나타났고 토마토 열매에 배꼽썩음이 나타났으며, 화방 간격은 19 cm로 정상 간격 23 cm에 비하여 약 20% 짧게 나타났다(Fig. 20).

(3) 황 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생리적인 반응

황 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도는 Fig. 21에 나타냈다. 황 결핍 시 즙액 내 SO_4^{2-} 농도는 엽의 경우 3,920~4,990 mg L^{-1} 범위로 평균은 4,450 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 1,240~1,360 mg L^{-1} 범위로 평균은 1,280 mg L^{-1} 이었다. 과잉 시 즙액 내 SO_4^{2-} 농도는 엽의 경우 7,640~7,910 mg L^{-1} 범위로 평균은 7,770 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우는 2,080~2,650 mg L^{-1} 범위로 평균은 2,360 mg L^{-1} 이었다. 엽과 엽병 즙액 중의 결핍 농도는 정상 농도보다 20% 이하의 농도였고, 과잉 농도는 정상 농도보다 20% 이상의 농도였다.

황 결핍 및 과잉 시 다른 무기원소들의 농도 변화를 보면, 황 결핍 시 즙액 내 NO_3^- 농도가 증가하였고, 과잉 시에는 즙액 내 PO_4^{3-} 의 농도가 증가하였고 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} 의 농도는 감소하였다. 이는 황 결핍 시 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 축적된다는 보고(박과 김, 1998)와 유사한 경향이였다. 또한, 황 결핍 및 과잉 시 생리적인 변화를 보면(Fig. 22), 결핍 시에는 엽록소 SPAD 값과 줄기직경, 엽장 및 엽폭, 화방수, 수확량 모두 감소하였고, 과잉 시에는 엽록소 SPAD 값과 줄기직경은 증가하였고, 엽장, 엽폭, 화방수, 수확량은 감소하였다.

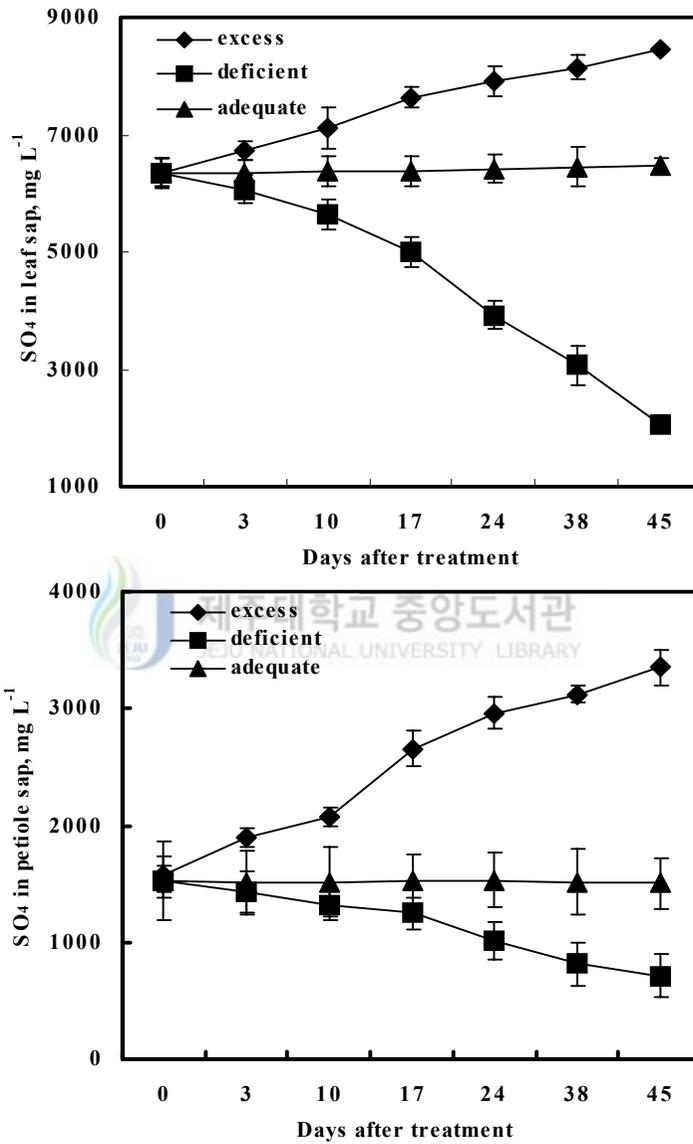


Figure 21. Change of SO_4^{2-} concentrations in the leaf or petiole sap when cultured under the S-deficient or excess condition.

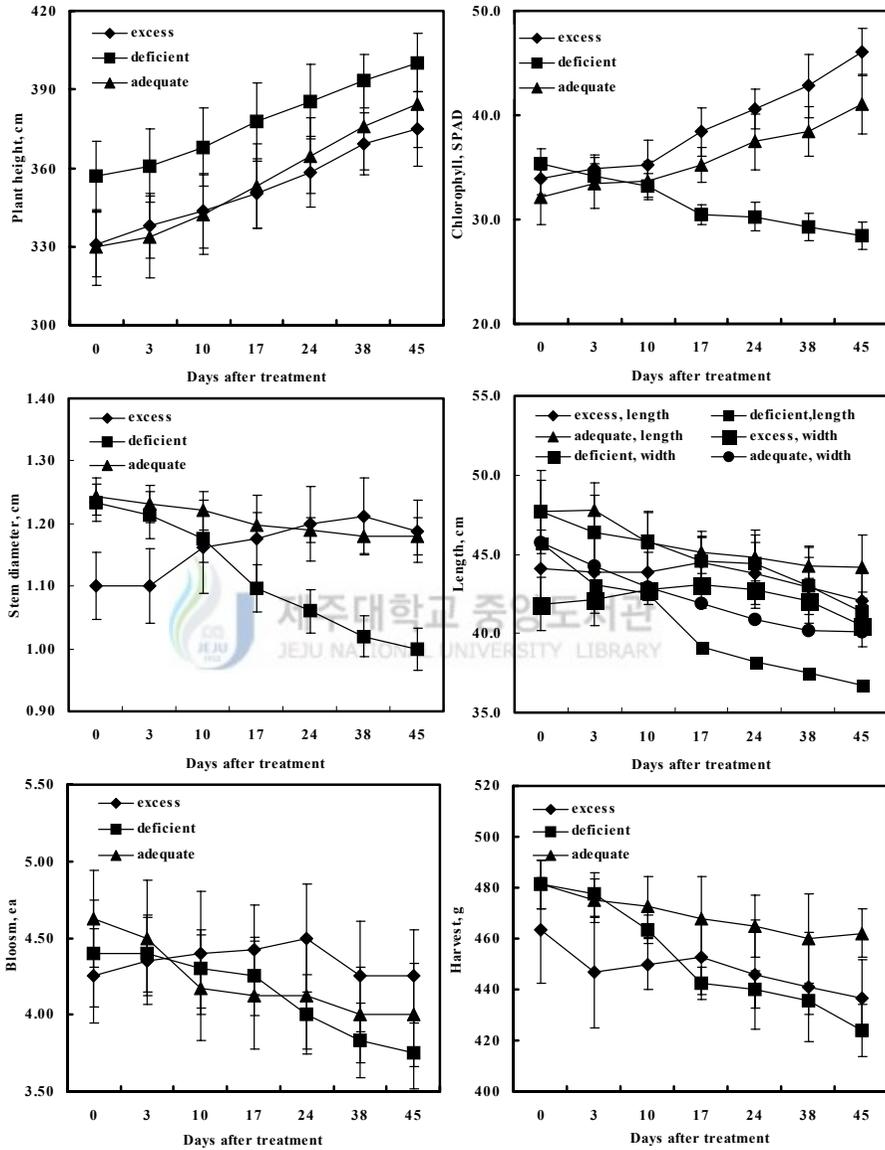


Figure 22. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the S-deficient or excess condition.

4) 칼륨

(1) 토마토의 칼륨 결핍 증상



Figure 23. K-deficient tomato leaves.

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 칼륨 결핍 증상은 하엽에서 엽의 선단부터 위축되기 시작하여 엽 전체가 위축되었다. 엽 가장자리에 황화 현상이 나타났고, 정상적인 부위와 경계가 뚜렷하였다. 증상이 더욱 진행되면서 엽연은 황갈색으로 변하였고 결국 고사하였다(Fig. 23).

(2) 토마토의 칼륨 과잉 증상



Figure 24. K-excess tomato leaves.

토마토의 생육 과정 중 칼륨 과잉 증상을 조사한 결과, 엽의 끝 부분이

안쪽으로 말리는 현상이 나타났고, 엽병 색깔은 적자색으로 변화였다. 과일
은 표면에 초록색 띠가 형성되어 착색이 불량하였다.

(3) 칼륨 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생
리적인 반응

칼륨 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 K^+ 농도는 Fig. 25에 나
타내었다. 칼륨 결핍 시 즙액 내 K^+ 농도는 엽의 경우 3,540~3,930 mg
 L^{-1} 범위로 평균은 3,740 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 4,230~5,030 mg L^{-1}
범위로 평균은 4,630 mg L^{-1} 이었다. 칼륨 과잉 시 즙액 내 K^+ 농도는 엽의
경우 5,950~6,550 mg L^{-1} 범위로 평균은 6,250 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우
는 6,690~7,300 mg L^{-1} 범위로 평균 7,000 mg L^{-1} 이었다. 칼륨 결핍은 엽
과 엽병 즙액 중의 K^+ 농도가 정상치보다 20% 이하였고, 과잉은 정상 농
도보다 30% 이상이었다.

칼륨 결핍 및 과잉에 따른 다른 무기원소의 농도 변화를 보면, 결핍 시
에는 즙액 내 Fe^{2+} 의 농도가 10% 감소하였고, PO_4^{3-} 의 농도가 20% 증가하
였다. 과잉 시에는 즙액 내 NO_3^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 농도가 감소하였다. 또
한, 칼륨 결핍 및 과잉에 따른 생리적인 반응을 보면(Fig. 26), 결핍 시에는
엽록소 SPAD 값이 감소하였고, 과잉 시에는 그 값이 변하지 않았다. 초장
의 성장율, 줄기직경, 엽장 및 엽폭, 화방수, 수확량은 결핍 및 과잉 시 모
두 감소하였다.

이는 K 과잉 시 N, Ca, Mg 등의 양이온의 흡수를 방해한다는 보고
(Vetanoveta, 1996)와 K의 저농도 및 고농도에서 엽 면적과 수량의 감소하
였다는 보고(정 등 1992)와 유사한 경향을 나타냈다.

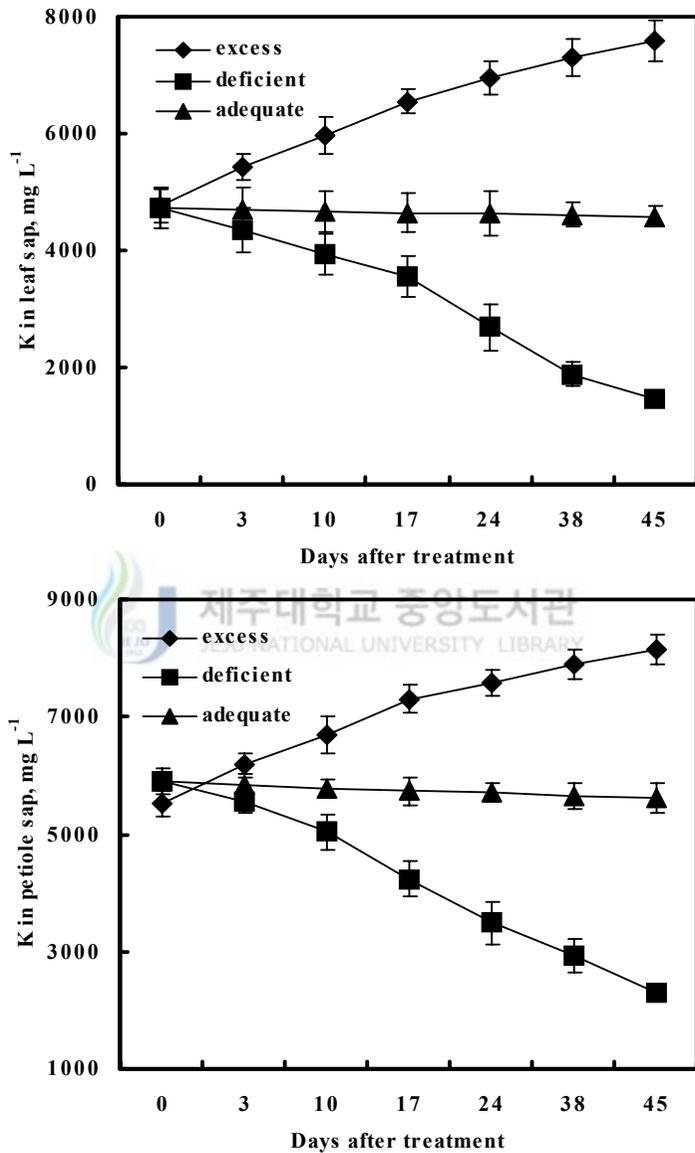


Figure 25. Change of K⁺ concentrations in the leaf or petiole sap when cultured under the K-deficient or excess condition.

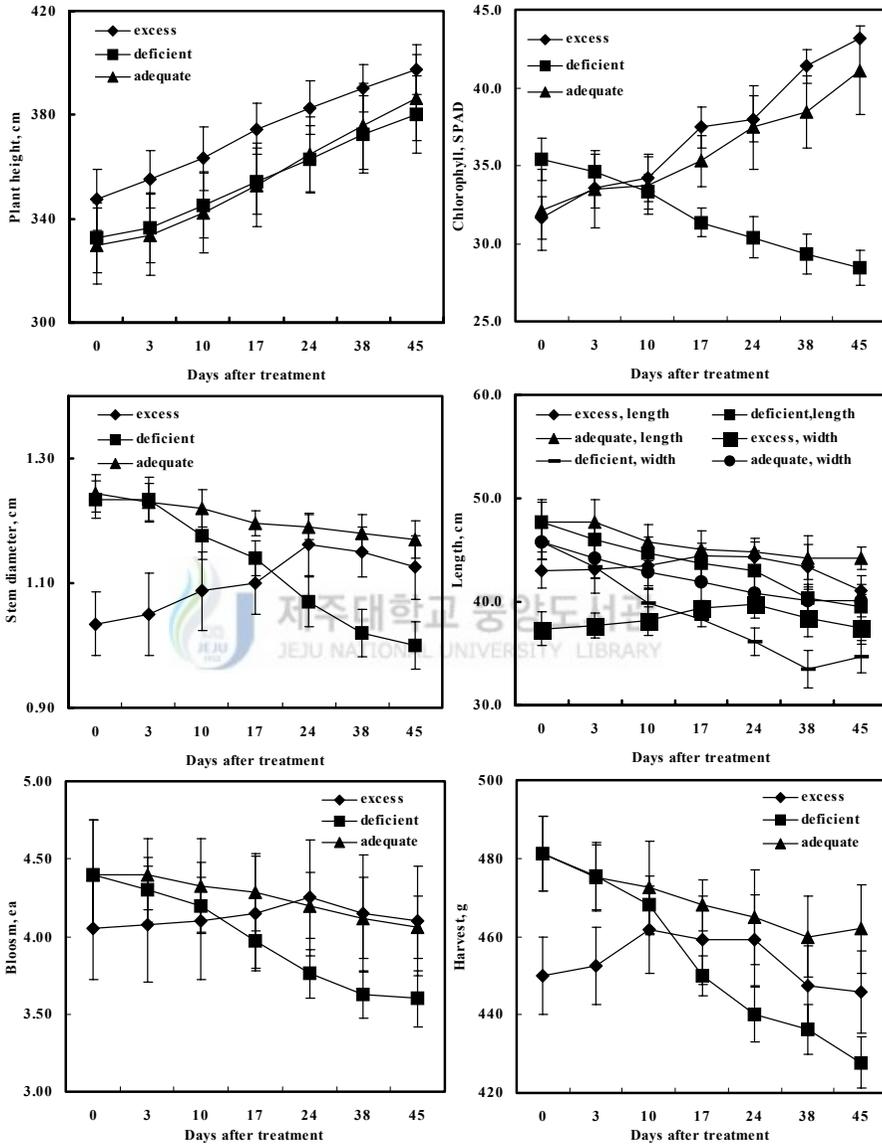


Figure 26. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the K-deficient or excess condition.

5) 칼슘

(1) 토마토의 칼슘 결핍 증상



Figure 27. Ca-deficient tomato leaves

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 칼슘 결핍 증상은 초기에 어린 잎 위쪽 끝이 황백화 되었다가 갈색으로 변화하였다. 결핍 증상이 진전되면서 엽 줄기 전체가 소형화되고 경화되었으며 일부는 고사하였다. 과일은 꽃이 붙어 있었던 부위가 흑색으로 변하는 배꼽썩음 증상이 나타났다.

(2) 토마토의 칼슘 과잉 증상



Figure 28. Ca-excess tomato leaves

토마토의 생육 과정 중 칼슘 과잉증상을 조사한 결과, 엷은 인산이 흡

수가 방해되어 나타나는 현상인 엽병 색이 보라색을 띄었고, 열매는 화아 분화기에 양분 과잉으로 인하여 난형과(국화형)가 많이 발생하여 비상품과 발생(38%)을 맞게 하는 원인이 되었다(Fig. 28).

(3) 칼슘 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생리적인 반응

칼슘 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 Ca^{2+} 농도는 Fig. 29에 나타나 있다. 결핍 시 즙액 내 Ca^{2+} 농도는 엽의 경우 $1,410\sim 1,550 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균 $1,480 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 엽병의 경우 $350\sim 390 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 370 mg L^{-1} 이었다. 과잉 시 즙액 내 Ca^{2+} 농도는 엽의 경우 $2,830\sim 3,400 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 $3,120 \text{ mg L}^{-1}$ 이었고, 엽병의 경우는 $700\sim 830 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 770 mg L^{-1} 이었다. 칼슘 결핍 시 엽 또는 엽병 즙액 중의 Ca^{2+} 농도는 정상치보다 30% 이하였고, 과잉 시 농도는 정상치보다 50% 이상이었다.

칼슘 결핍 및 과잉에 따른 다른 무기원소들의 농도 변화를 보면, 결핍 시 즙액 중 PO_4^{3-} 농도가 정상농도보다 높게 나타났고, Mn^{2+} , Fe^{2+} 등의 농도는 정상농도보다 감소하였다. 과잉 시에는 즙액 중 Mg^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} 와 MoO_4^{2-} 의 농도가 정상 농도 보다 낮게 나타났다. 또한 칼슘 결핍 및 과잉에 따른 생리적인 변화를 보면(Fig. 30), 엽록소 SPAD 값 및 줄기직경은 결핍 시 값이 감소하였고 과잉 시에는 그 값이 증가하였다. 엽장 및 엽폭, 화방수, 수확량은 결핍 및 과잉 시 모두 감소하였다.

이는 Ca이 P, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn 등이 흡수를 방해한다고 하였는데 (박과 김, 1998), 본 실험의 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

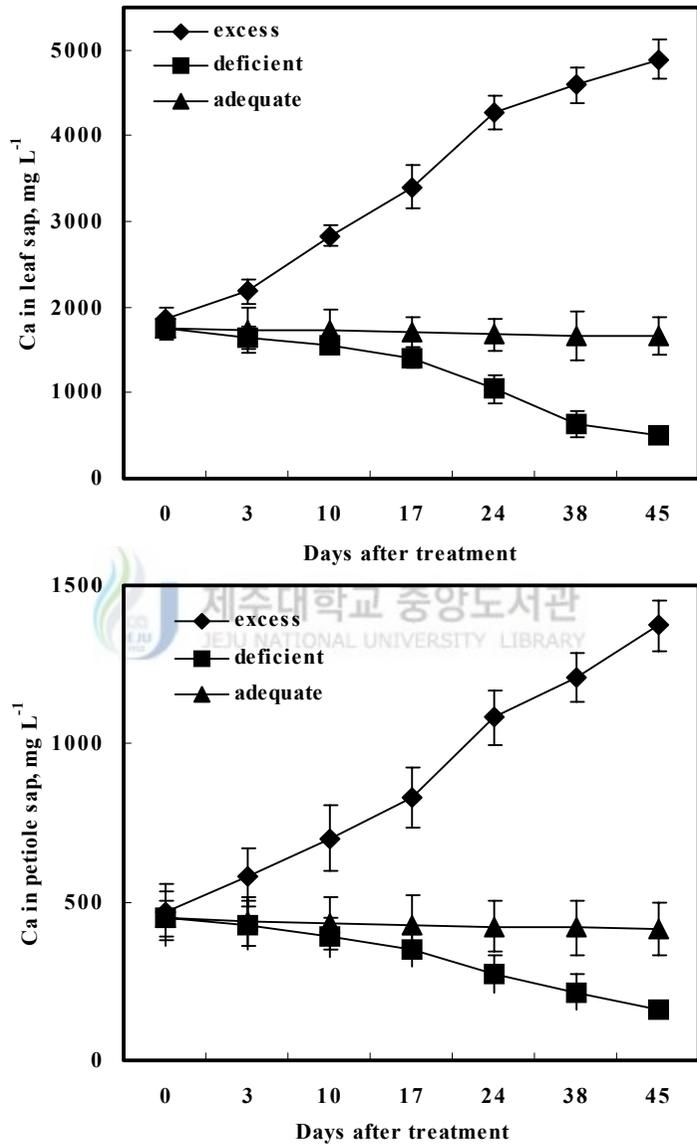


Figure 29. Changes of Ca²⁺ concentrations in the leaf or petiole sap cultured Ca-deficient or excess conditions.

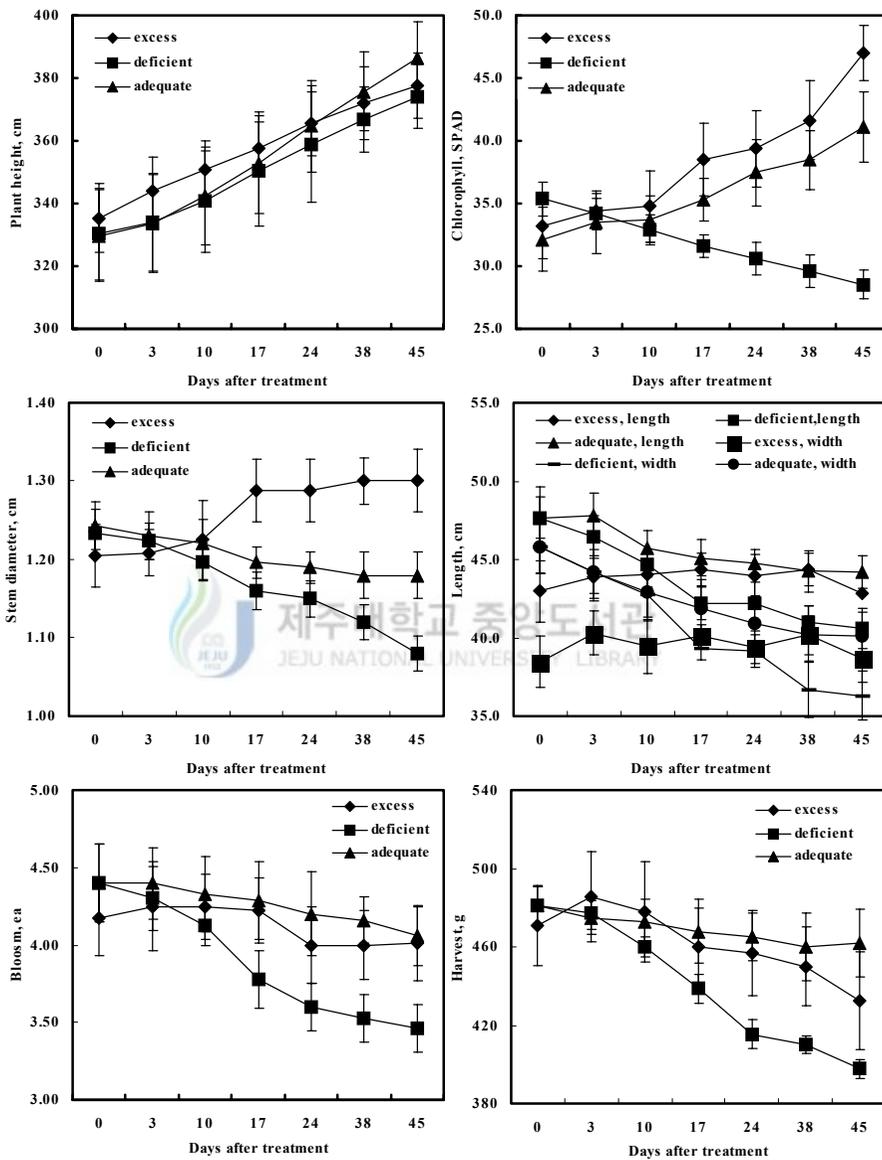


Figure 30. Changes of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the Ca-deficient or excess condition.

6) 마그네슘

(1) 토마토의 마그네슘 결핍 증상



Figure 31. Mg-deficient tomato leaves

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 마그네슘 결핍 증상은 초기에 늙은 엽이 엽맥간 불규칙한 흑색 반점이 나타났고, 결핍 증상이 진전되면서 중앙 부위가 황화되었고, 엽연은 녹색을 띠었다가 황화 되었다(Fig. 31).

(2) 토마토의 마그네슘 과잉 증상



Figure 32. Mg-excess tomato leaves

토마토의 생육 과정 중 마그네슘 과잉 증상을 조사한 결과, 엽맥 사이의 색이 얼어지고, 엽 끝은 안으로 말렸다. 또한 줄기의 비대 현상과 함께

토마토 열매가 작아졌으며, 화방 간격은 19 cm로 정상 간격보다 20% 짧게 나타났다(Fig. 32).

(3) 마그네슘 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생리적인 반응

마그네슘 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 Mg^{2+} 농도는 Fig. 33에 나타냈다. 결핍 시 즙액 내 Mg^{2+} 농도는 엽의 경우 390~410 $mg L^{-1}$ 범위로 평균 400 $mg L^{-1}$ 이었고, 엽병의 경우 220~240 $mg L^{-1}$ 범위로 평균 230 $mg L^{-1}$ 이었다. 과잉 시 즙액 내 Mg^{2+} 농도는 엽의 경우 570~710 $mg L^{-1}$ 범위로 평균 640 $mg L^{-1}$ 이었고, 엽병의 경우는 450~550 $mg L^{-1}$ 범위로 평균은 500 $mg L^{-1}$ 이었다. 마그네슘 결핍 시 엽 또는 엽병 즙액 중의 Mg^{2+} 농도는 정상치보다 20% 이하였고, 과잉시 농도는 정상치보다 50% 이상이었다.

마그네슘 결핍 및 과잉에 따른 다른 무기원소들의 농도 변화를 보면, 결핍 시 즙액 내 PO_4^{3-} 농도는 증가하였고, Ca^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} 의 농도는 정상 농도보다 감소하였다. 과잉 시에는 즙액 내 K^+ , Ca^{2+} , Cu^{2+} , MoO_4^{2-} 의 농도가 정상 농도보다 낮게 나타났다. 또한 마그네슘 농도 결핍 및 과잉 시 토마토의 생리적인 반응을 살펴보면(Fig. 34) 초장은 결핍 및 과잉 시 성장이 둔화되었고, 엽록소 SPAD 값과 줄기 직경은 과잉 시 값이 증가하였으나, 결핍 시에는 값이 감소하였다. 그 외 엽장, 엽폭, 화방수, 수확량은 결핍 및 과잉 시 모두 감소하였다.

Mg은 K, Ca, Mn 과는 길항 작용을, PO_4 와는 상호작용을 한다고 하였는데(박과 김, 1998) 이는 본 실험의 내용과 유사한 경향이였다.

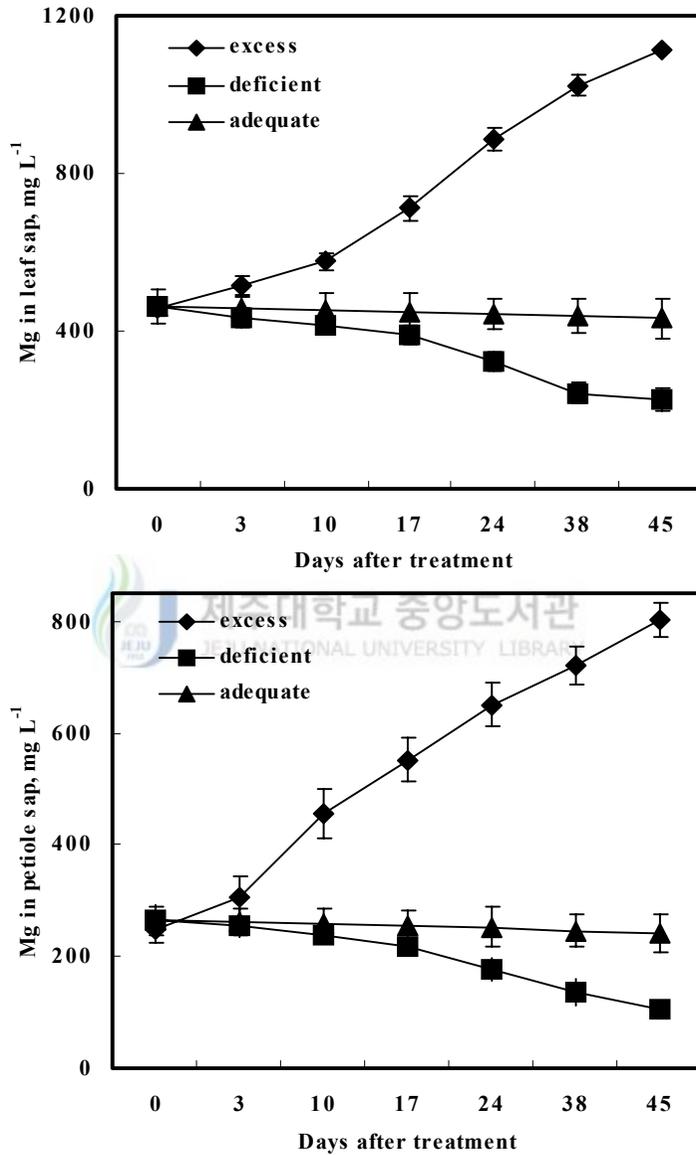


Figure 33. Change of Mg²⁺ concentrations in the leaf or petiole sap when cultured under the Mg-deficient or excess condition.

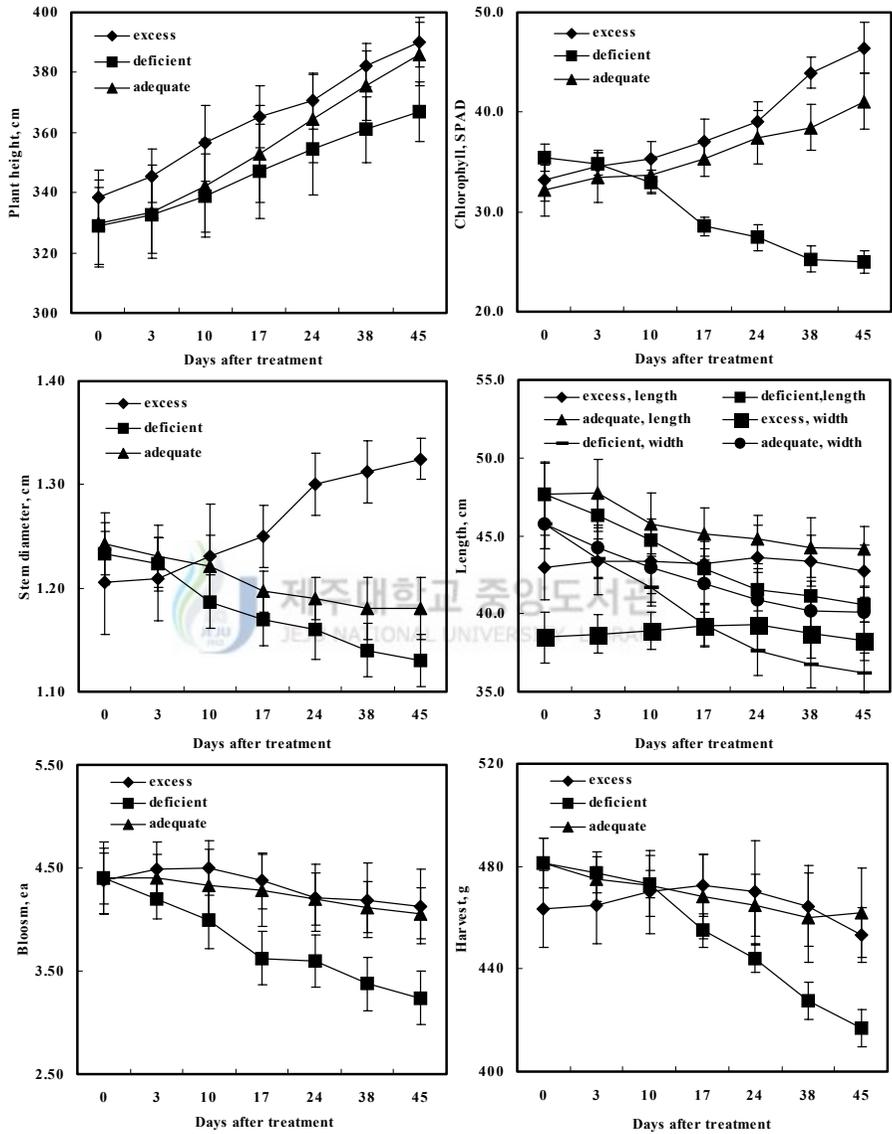


Figure 34. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the Mg-deficient or excess condition.

7) 붕소

(1) 토마토의 붕소 결핍 증상



Figure 35. B-deficient tomato leaves

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 붕소 결핍 증상은 초기에 어린 잎이 황화되었고, 결핍 증상이 진전되면서 소엽 부위가 노란색에서 오렌지색으로 변색되었다. 또한 줄기의 선단이나 엽병이 약하여 쉽게 부러졌으며, 화방 위에 잎, 줄기가 생성되었다(Fig. 35).

(2) 토마토의 붕소 과잉 증상



Figure 36. B-excess tomato leaves

토마토의 생육 과정 중 붕소 과잉증상을 조사한 결과, 초기에 늙은 엽

표면에 갈색반점이 나타났다. 결핍이 진전되면서 잎 가장자리가 탈색되었으며, 잎이 안쪽으로 말리는 현상이 나타났고, 나중에 괴사하였다. 이러한 증상은 清水 武(1993)가 발표한 내용 유사하였다.

(3) 붕소 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생리적인 작용

붕소 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도는 Fig. 37에 나타내었다. 결핍 시 즙액 내 BO_3^{3-} 농도는 엽의 경우 5.38~5.85 mg L^{-1} 범위로 평균 5.61 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 1.94~2.26 mg L^{-1} 범위로 평균은 2.10 mg L^{-1} 이었다. 과잉 시 즙액 내 BO_3^{3-} 농도는 엽의 경우 27.18~42.6 mg L^{-1} 범위로 평균 34.90 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우는 4.43~5.53 mg L^{-1} 범위로 평균은 4.98 mg L^{-1} 이었다. 붕소 결핍 시 엽 또는 엽병 즙액 중의 BO_3^{3-} 농도는 정상치보다 30% 이하였고, 붕소 과잉시 값은 정상치보다 2배 이상이었다.

붕소 결핍 및 과잉 시 다른 무기원소들의 농도 변화를 보면, 결핍 시 즙액 내 Mg^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} 의 농도는 정상농도보다 감소하였고, 과잉 시에는 NO_3^- 농도는 정상농도보다 증가하였고, K^+ 의 농도는 감소하였다. 또한 붕소 결핍 및 과잉에 따른 생리적인 변화를 살펴보면(Fig. 38), 엽록소 SPAD 값은 결핍 시에, 수확량은 결핍과 과잉 시에 모두 정상농도보다 감소하였고, 엽장, 엽폭, 화방수, 줄기직경은 결핍 및 과잉 시에 따른 생리적인 변화는 없었다.

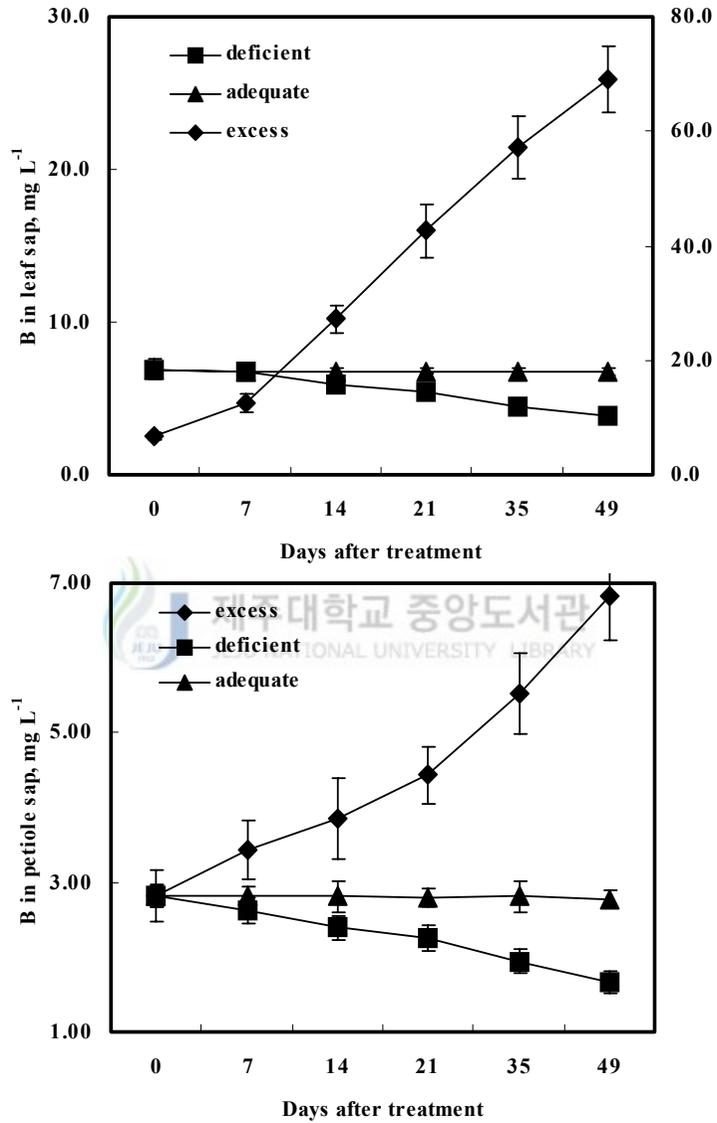


Figure 37. Change of BO_3^{3-} concentrations in the leaf or petiole sap when cultured under the B-deficient or excess condition.

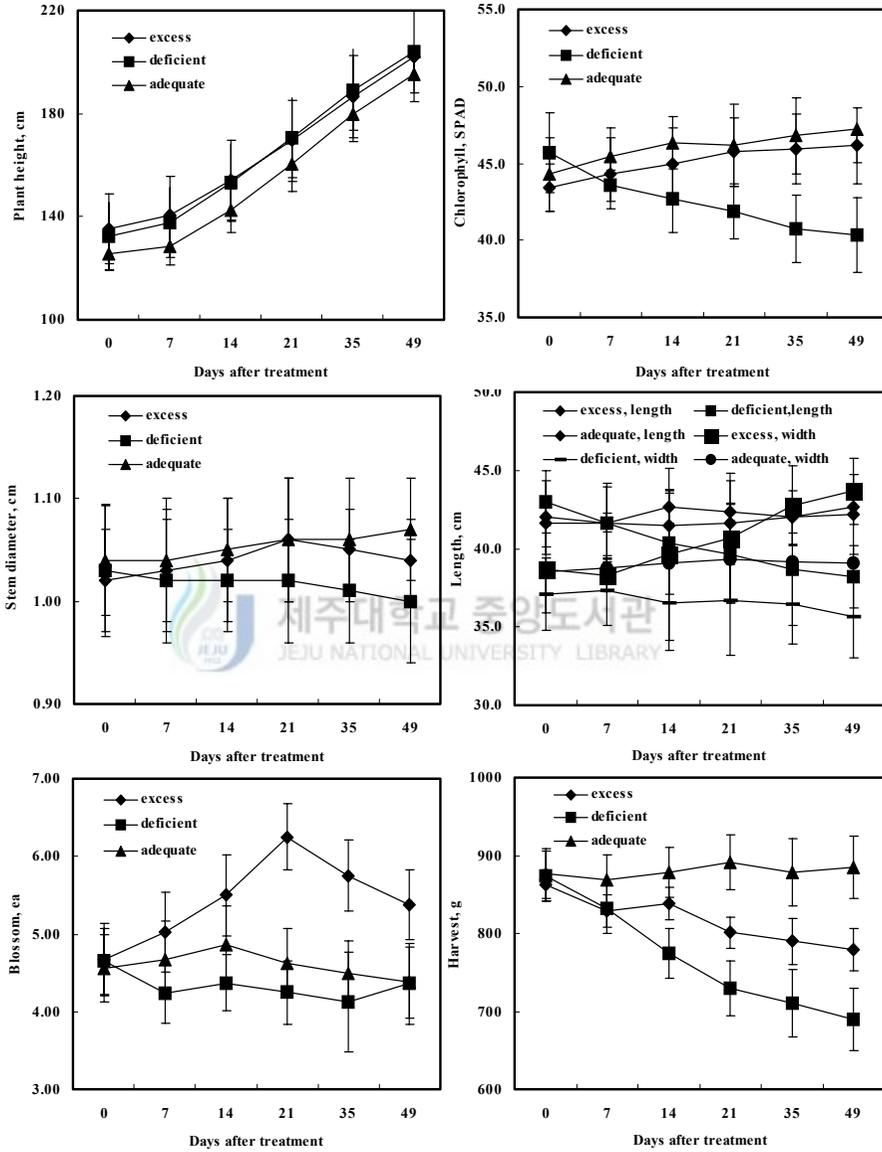


Figure 38. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the B-deficient or excess condition.

8) 아연

(1) 토마토의 아연 결핍 증상



Figure 39. Zn-deficient tomato leaves

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 아연 결핍 증상은 초기에 잎은 녹색과 황화된 부분이 경계가 뚜렷한 황백화 현상이 나타났다. 결핍이 진전되면서 소엽은 엽맥간 보라색을 띄었고, 엽병 또는 엽맥은 끝 부분이 구부러져 안으로 감기는 현상이 나타났다(Fig. 39).

(2) 토마토의 아연 과잉 증상



Figure 40. Zn-excess tomato leaves

토마토의 생육 과정 중 아연 과잉 증상을 조사한 결과, 엽은 엽면에 갈

색의 반점이 생기고, 전체적으로 뒤틀리고 심각하게 생장이 위축되었다. 어린 엽은 몹시 작아졌고, 엽맥간에는 황화현상이 나타났으며, 아래쪽이 자주 빛으로 변하였다. 과잉이 진행되면서 적갈색의 엽맥을 제외하고 낙엽전에 황화되었다(Fig. 40). 이러한 증상은 清水 武(1993)가 발표한 증상 현상과 유사하였다.

(3) 아연 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생리적인 반응

아연 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도는 Fig. 41에 나타내었다. 결핍 시 즙액 내 Zn^{2+} 농도는 엽의 경우 $3.13\sim 3.80\text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균 3.46 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 $2.95\sim 3.53\text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 3.24 mg L^{-1} 이었다. 과잉 시 즙액 내 Zn^{2+} 농도는 엽의 경우 $8.71\sim 9.95\text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균 9.33 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 $9.11\sim 15.91\text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 12.51 mg L^{-1} 이었다. 아연 결핍 시 엽 또는 엽병 즙액 내의 Zn^{2+} 의 농도는 정상치보다 30% 이하였고, 과잉 시 그 값은 정상치보다 2배 높았다.

아연 결핍 및 과잉에 따른 다른 무기원소들의 농도 변화를 보면, 결핍 시 즙액 내 PO_4^{3-} 농도는 증가하였고, Fe^{2+} 농도는 감소하였다. 과잉 시에는 즙액 내 NO_3^- 농도가 증가하였고, PO_4^{3-} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} 의 농도는 정상농도보다 감소하였다. 또한 아연 결핍 및 과잉에 따른 생리적인 변화를 보면(Fig. 42), 결핍 증상이 나타났을 때 엽록소 SPAD 값 및 수확량이 감소하였고, 그 외 초장, 엽장, 엽폭, 화방수, 줄기직경은 결핍 및 과잉에 따른 생리적인 변화는 없었다.

이는 Zn 과잉 시 Mn, Fe 등의 흡수를 방해한다고 한 보고(Vetanoveta, 1996)와 유사한 경향이였다.

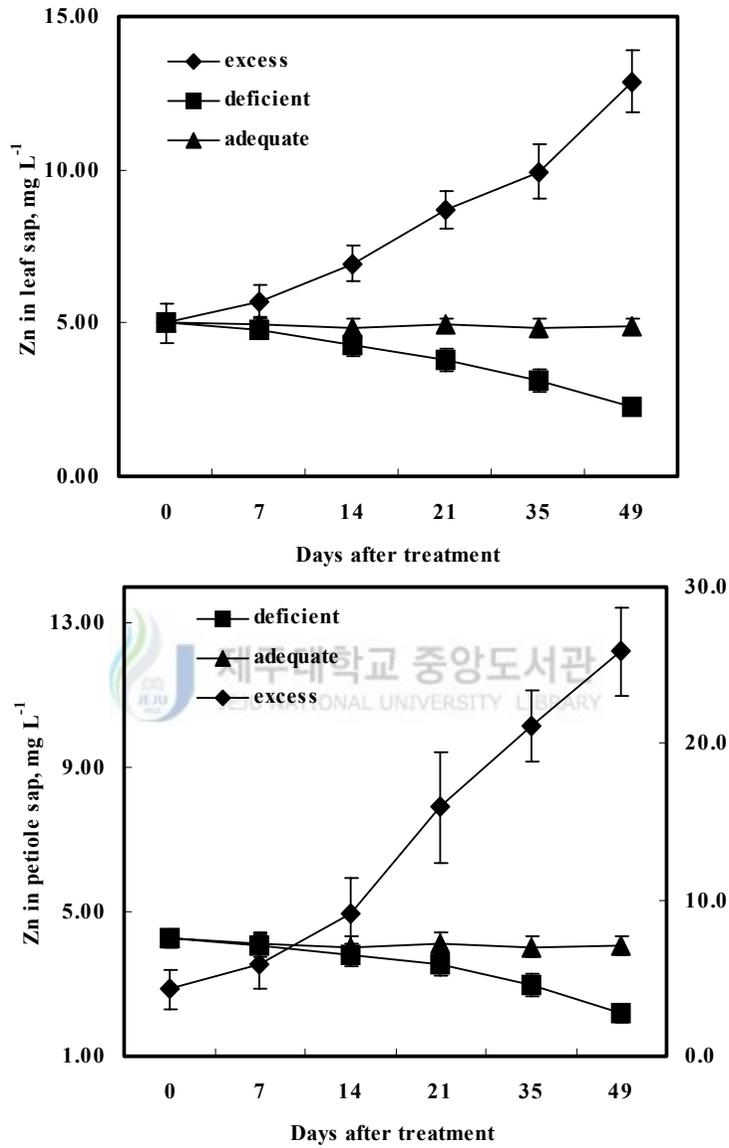


Figure 41. Changes of Zn²⁺ concentrations in the leaf or petiole sap, cultured Zn-deficient or excess conditions.

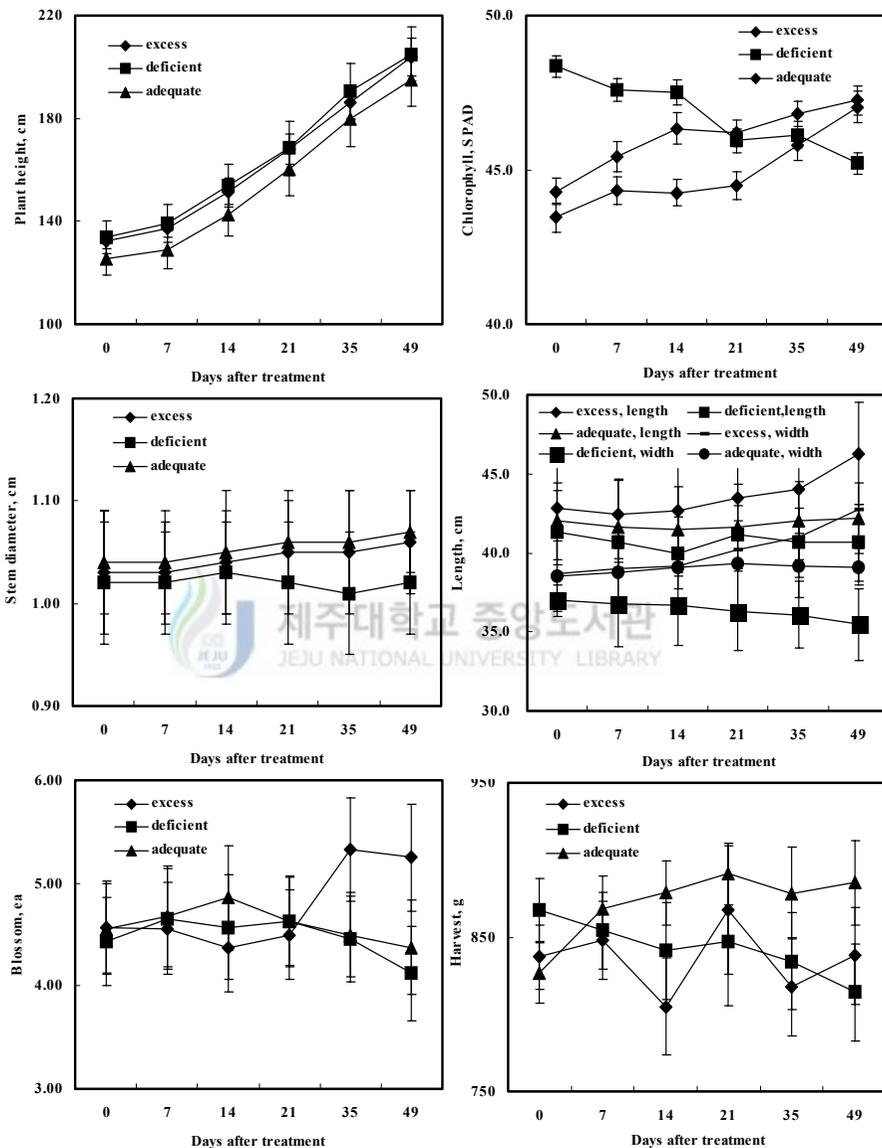


Figure 42. Changes of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato cultured Zn-deficient or excess conditions.

9) 망간

(1) 토마토의 망간 결핍 증상



Figure 43. Mn-deficient tomato leaves

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 망간 결핍 증상은 아래 부분의 엽이 소형화되었고, 엽색은 연녹색으로 변화하였다. 결핍이 진전되면서 엽맥 사이가 황화되었고, 체크무늬 형태를 나타냈으며, 황화된 부분은 곧 갈변하였다. 이러한 증상은 清水武 (1993)가 발표한 증상과 유사하였다.

(2) 토마토의 망간 과잉 증상



Figure 44. Mn-excess tomato leaves

토마토의 생육 과정 중 망간 과잉 증상을 조사한 결과, 엽의 색깔은 엽

맥을 따라 황갈색을 띄었고, 하위엽에서 상위엽으로 진행하였다. 하위 엽병의 기관에 자색 반점이 나타났고, 엽록소 분포가 고르지 않았다. 철 결핍과 비슷한 증상이 나타났으며, 생장이 제한되었다. 이러한 증상은 清水武(1993)가 발표한 증상과 유사하였다.

(3) 망간 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생리적인 변화

망간 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도는 Fig. 45에 나타내었다. 망간 결핍 시 즙액 중 Mn^{2+} 농도는 엽의 경우 6.93~7.40 $mg L^{-1}$ 범위로 평균 7.20 $mg L^{-1}$ 이었고, 엽병의 경우 3.65~4.96 $mg L^{-1}$ 범위로 평균은 4.30 $mg L^{-1}$ 이었다. 과잉 시 즙액 중 Mn^{2+} 농도는 엽의 경우 33.83~55.63 $mg L^{-1}$ 범위로 평균 45.23 $mg L^{-1}$ 이었고, 엽병의 경우 13.47~16.7 $mg L^{-1}$ 범위로 평균은 15.10 $mg L^{-1}$ 이었다. 망간 결핍시에는 엽 또는 엽병 즙액중의 Mn^{2+} 의 농도가 정상치보다 30% 이하였고, 과잉시에는 그 값이 정상치보다 3배 높았다.

망간 결핍 및 과잉에 따른 다른 무기원소의 농도 변화를 보면, 결핍 시 즙액 중 PO_4^{3-} 와 Ca^{2+} 의 농도는 정상농도보다 증가하였다. 과잉 시 즙액 중 PO_4^{3-} , K^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} , MoO_4^{2-} 의 농도는 감소하였고, NO_3^- 농도는 증가하였다. 또한 망간 결핍 및 과잉에 따른 생리적인 변화를 보면(Fig. 46) 결핍시에는 엽록소 SPAD 값이 감소하였지만 과잉 시에는 증가하였다. 그 외 초장, 엽장, 엽폭, 화방수, 줄기직경, 수확량은 결핍 및 과잉 시 모두 일정하였다.

이는 Mn 과잉 시 Fe, Cu가 결핍된다는 보고(Vetanoveta, 1996)와 유사한 경향이었다.

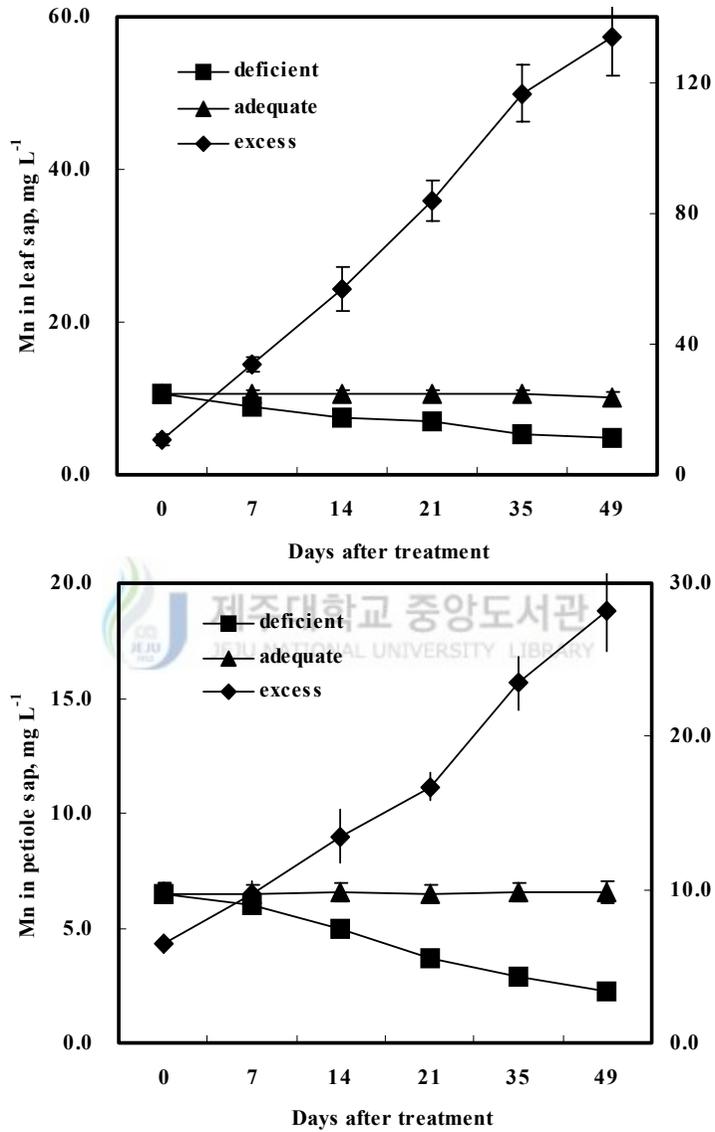


Figure 45. Change of Mn²⁺ concentrations in the leaf or petiole sap, when cultured under the Mn-deficient or excess condition.

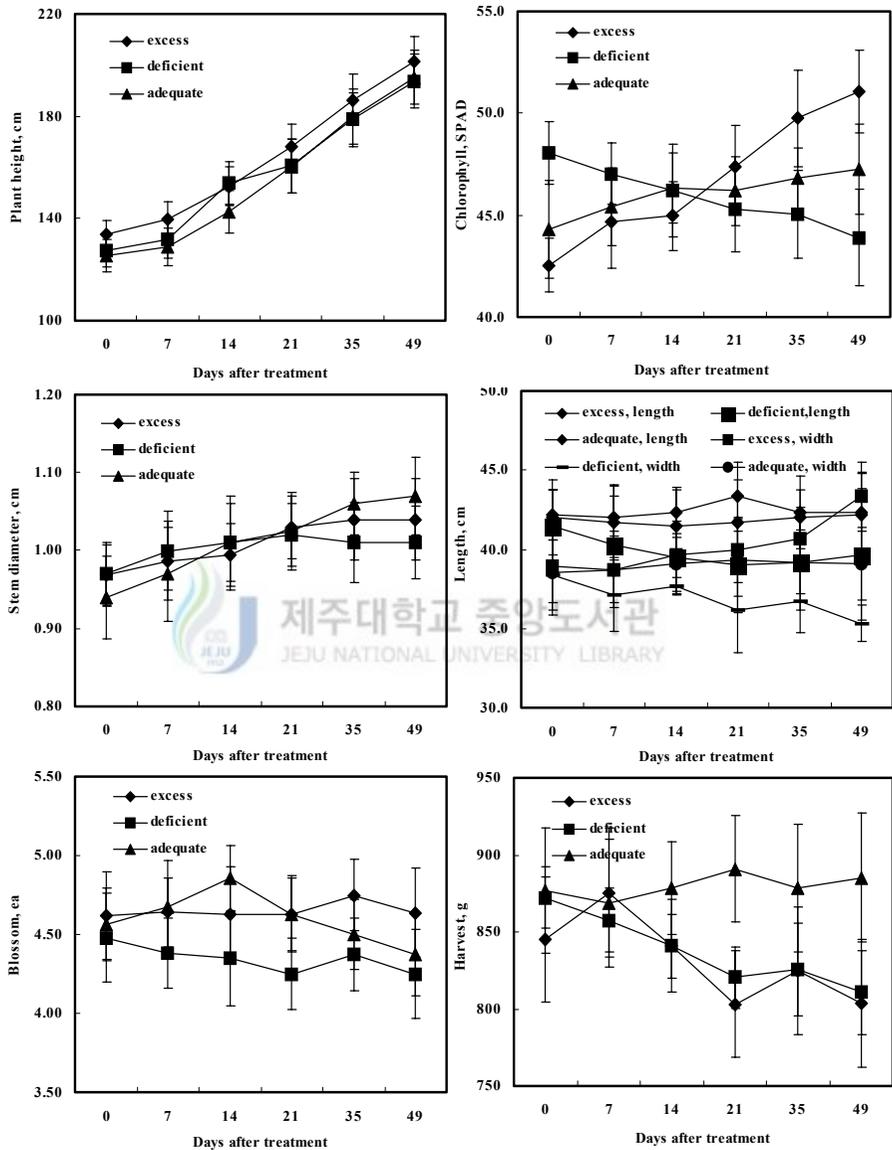


Figure 46. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the Mn-deficient or excess condition.

10) 철

(1) 토마토의 철 결핍 증상



Figure 47. Fe-deficient tomato leaves

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 철 결핍 증상은 초기에 어린 엽에서 나타났고, 엽맥은 농록색, 엽맥 사이에는 황화 현상이 나타났다. 결핍이 진전되면서 작은 엽맥들은 누렇게 변한 엽 조직에 녹색의 미세한 그물모양을 이루다가 후에 엽록소 탈색 현상이 일어났다.

(2) 토마토의 철 과잉 증상



Figure 48. Fe-excess tomato leaves

토마토의 생육 과정 중 철 과잉 증상을 조사한 결과, 엽면에 체크 모양

의 황화 현상이 나타났고 엽병은 적자색을 띄었으며, 망간과 인산 결핍증을 유발시켰다. 이러한 증상은 清水武 (1993)가 발표한 증상과 같았다.

(3) 철 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도

철 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도는 Fig. 49에 나타내었다. 결핍 시 즙액 중 Fe^{2+} 농도는 엽의 경우 $2.26\sim 2.65\text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 2.46 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 $1.58\sim 1.69\text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 1.63 mg L^{-1} 이었다. 과잉 시 즙액 중 Fe^{2+} 농도는 엽의 경우 $6.49\sim 9.11\text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균 7.48 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우는 $3.24\sim 4.41\text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 3.83 mg L^{-1} 이었다. 철 결핍시에는 엽 또는 엽병 즙액중의 Fe^{2+} 의 농도가 정상치보다 30% 이하였고, 과잉시에는 그 값이 정상치보다 2배 높았다.

철 결핍 및 과잉에 따른 타 무기원소의 농도 변화를 보면, 결핍 시 즙액 내 K^+ 와 Zn^{2+} 의 농도는 정상농도보다 증가하였다. 과잉 시 즙액 내 PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , BO_3^{3-} , Mn^{2+} 의 농도는 감소하였고, NO_3^- 농도는 증가하였다. 또한 철 결핍 및 과잉에 따른 생리적인 변화를 보면(Fig. 50), 결핍시에는 엽록소 SPAD 값이 감소하였으나, 과잉시에는 변화가 없었다. 그 외 초장, 엽장, 엽폭, 화방수는 결핍 및 과잉에 따른 변화는 나타나지 않았다. 이는 Fe 과잉시 Mn가 결핍된다는 보고(Vetanoveta, 1996)와 유사한 경향을 보였다.

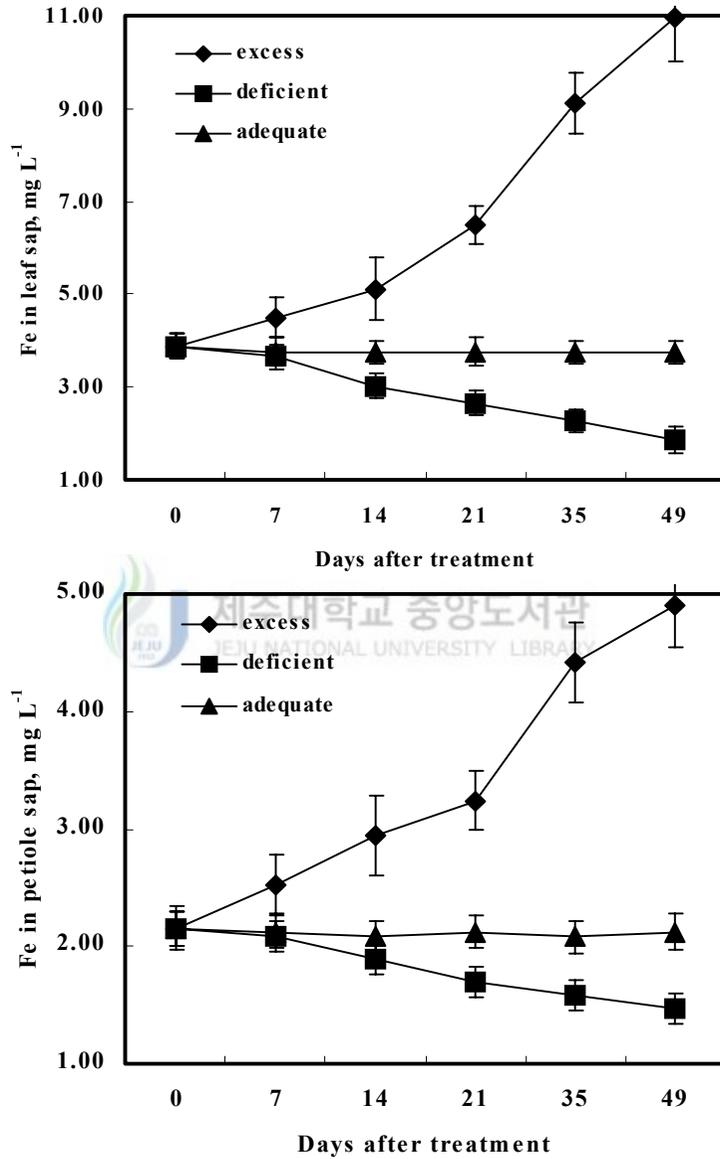


Figure 49. Change of Fe²⁺ concentrations in the leaf or petiole sap, when cultured under the Fe-deficient or excess condition.

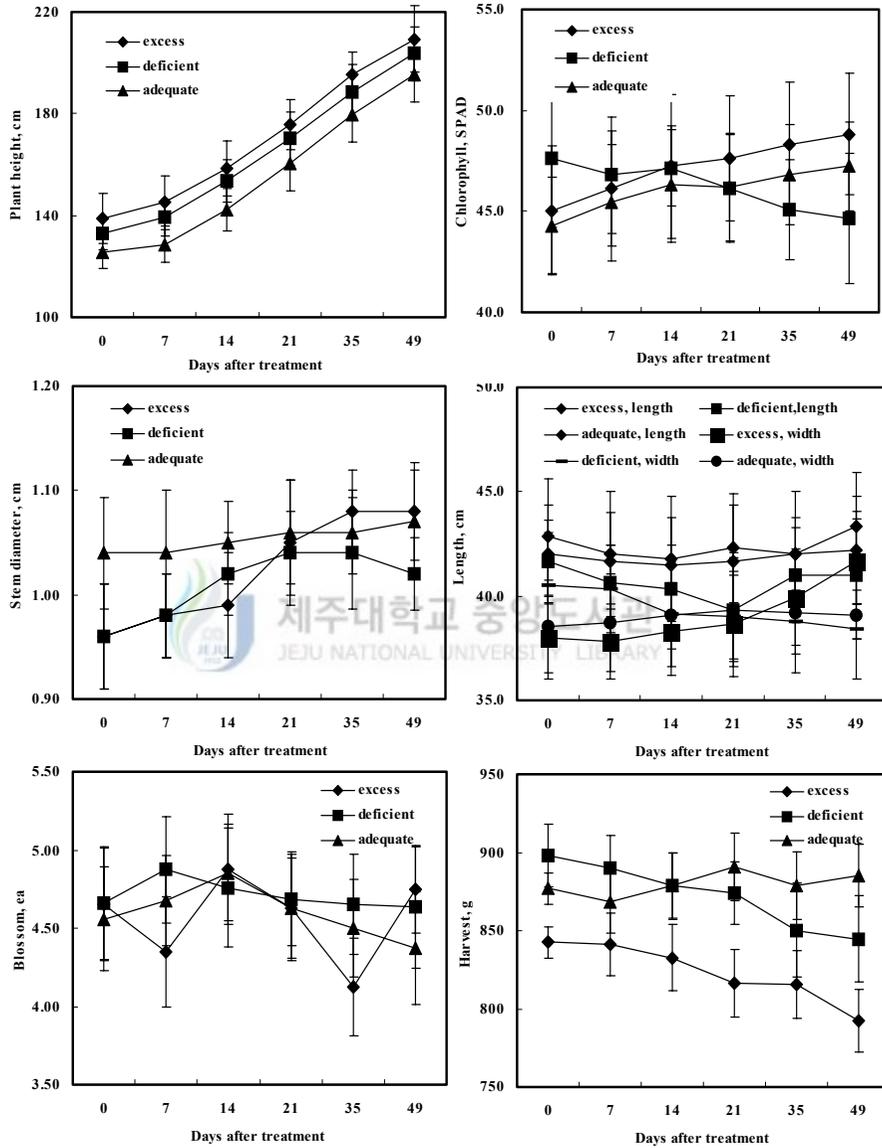


Figure 50. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the Fe-deficient or excess condition.

11) 구리

(1) 토마토의 구리 결핍 증상



Figure 51. Cu-deficient tomato leaves

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 구리 결핍 증상은 어린 엽에 황화 현상이 나타났고, 엽색은 농녹색을 띠었으며, 안쪽으로 말렸다. 중간부위의 엽과 신생엽의 소엽 가장자리가 뒤틀려 엽은 주맥을 향하고, 전체적인 엽 줄기가 아래쪽으로 말렸다(Fig. 51).

(2) 토마토의 구리 과잉 증상



Figure 52. Cu-excess tomato leaves

토마토의 생육 과정 중 구리 과잉 증상을 조사한 결과, 엽면에 셀 모양의 황화 반점이 생기고, 과잉이 진전되면서 엽면 전체가 탈색되어 나중에는 시들었다.

(3) 구리 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생리적인 반응

구리 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도는 Fig. 53에 나타내었다. 결핍 시 즙액 중 Cu^{2+} 의 농도는 엽의 경우 $1.63\sim 1.86 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균 1.74 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 $1.46\sim 1.61 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균 1.54 mg L^{-1} 이었다. 과잉 시 즙액 중 Cu^{2+} 의 농도는 엽의 경우 $2.92\sim 3.46 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 3.20 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 $2.78\sim 3.22 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 3.00 mg L^{-1} 이었다. 구리 결핍시에는 엽 또는 엽병 즙액중의 Cu의 농도가 정상치보다 30% 이하였고, 과잉시에는 그 값이 정상치보다 2배 높았다.

구리 결핍 및 과잉에 따른 타 무기원소의 농도 변화를 보면, 결핍 시 즙액 내 K^+ 와 Zn^{2+} 의 농도는 정상농도보다 증가하였고, Mg^{2+} 의 농도는 감소하였다. 과잉 시에는 PO_4^{3-} , K^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} 의 농도가 감소하였다. 또한 구리 결핍 및 과잉에 따른 생리적인 반응을 보면(Fig. 54), 결핍시에는 엽록소 SPAD 값이 감소하였으나 과잉시에는 그 값이 변화가 없었다. 수확량은 결핍 및 과잉 시 모두 감소하였고, 엽장 및 엽폭, 화방수, 줄기직경은 결핍 및 과잉에 따른 변화는 없었다.

이는 Cu 과잉 시 인산과 침전 현상이 생기고, Zn과 길항 작용을 한다는 보고(박과 김, 1998)와 유사하였다.

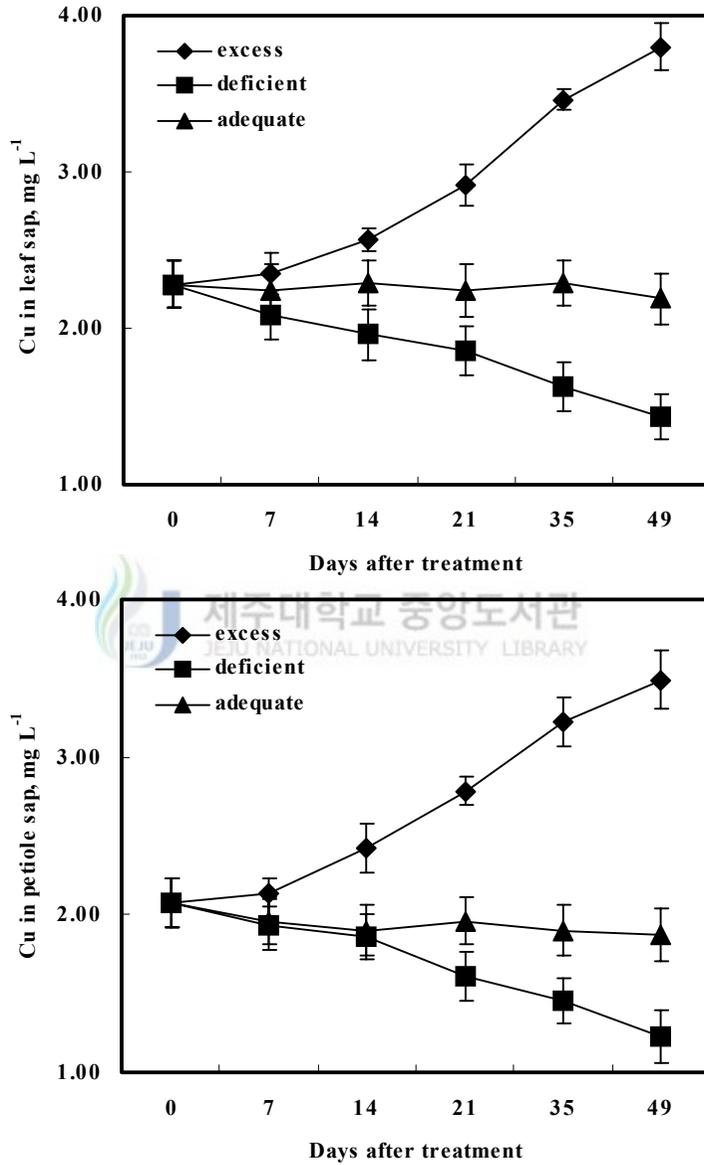


Figure 53. Change of Cu²⁺ concentrations in the leaf or petiole sap, when cultured under the Cu-deficient or excess condition.

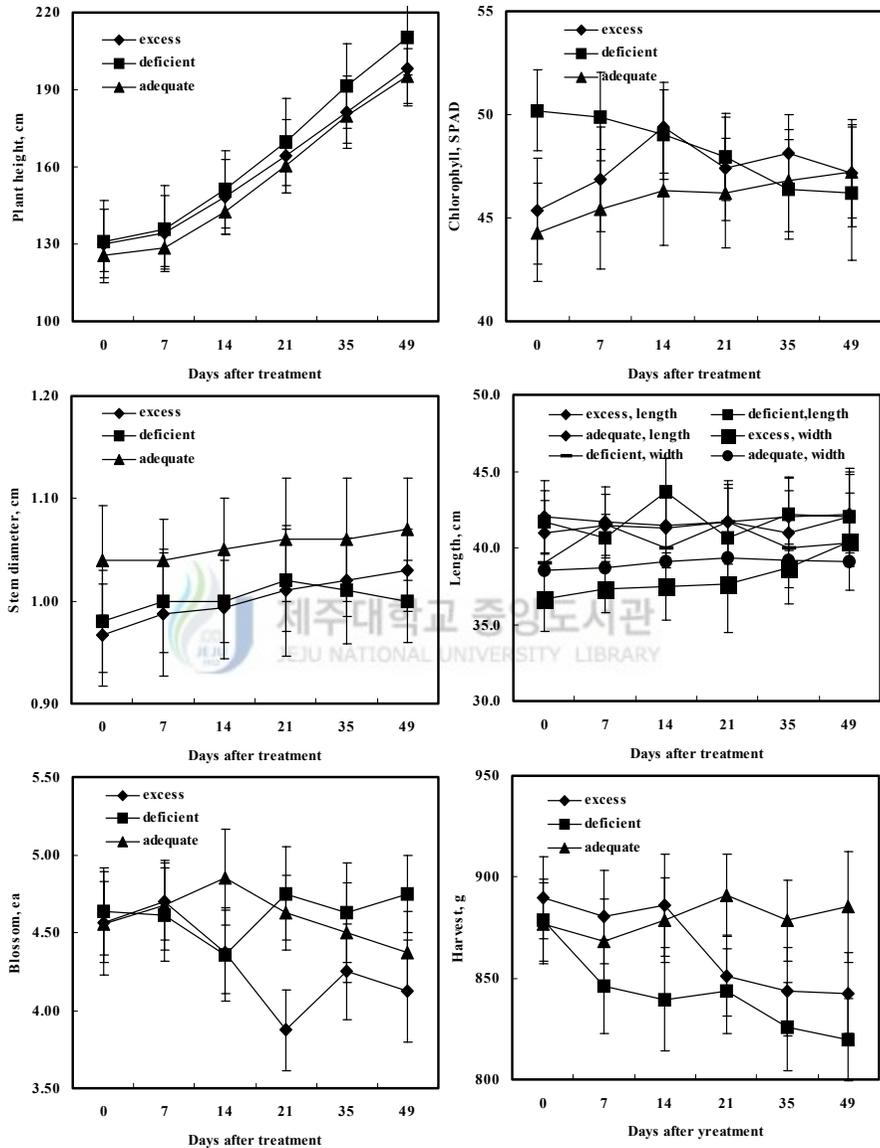


Figure 54. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the Cu-deficient or excess condition.

12) 몰리브덴

(1) 토마토의 몰리브덴 결핍 증상



Figure 55. Mo-deficient tomato leaves

본 연구 결과 토마토의 생육 과정 중 몰리브덴 결핍 증상은 늙은 엽에서 황화 현상이 나타났다. 엽맥 사이에 황색 반점이 생겨났고 안쪽으로 감겨 컵 모양이 되었다(Fig. 55).

(2) 토마토의 몰리브덴 과잉 증상



Figure 56. Mo-excess tomato leaves

토마토의 생육 과정 중 몰리브덴 과잉 증상을 조사한 결과, 잎에 회백색의 불규칙한 반점이 생겼고, 망간, 구리 결핍증이 유도되었다. 엽맥은 농록

색 이었고, 엽맥간에는 황화되었다가 과잉이 진전되면서 백화현상이 나타났다(Fig. 56).

(3) 몰리브덴 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도 및 생리적인 반응

몰리브덴 결핍 및 과잉에 따른 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 농도는 Fig. 57에 나타내었다. 결핍 시 즙액 내 MoO_4^{2-} 의 농도는 엽의 경우 $0.33 \sim 0.39 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 0.36 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우 $0.30 \sim 0.36 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균 0.33 mg L^{-1} 이었다. 과잉 시 즙액 내 MoO_4^{2-} 의 농도는 엽의 경우 $1.42 \sim 1.82 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 1.62 mg L^{-1} 이었고, 엽병의 경우는 $1.30 \sim 1.71 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 평균은 1.50 mg L^{-1} 이었다. 몰리브덴 결핍시에는 엽 또는 엽병 즙액내의 MoO_4^{2-} 의 농도가 정상치보다 30% 이하였고, 과잉시에는 그 값이 정상치보다 3배 높았다.

몰리브덴 결핍 및 과잉에 따른 타 무기원소의 농도 변화를 보면, 결핍 시 즙액 내 BO_3^{3-} 와 Zn^{2+} 의 농도는 정상농도보다 증가하였고, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} 농도는 감소하였다. 과잉 시 즙액 내 PO_4^{3-} , K^+ , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} 의 농도는 감소하였고, NO_3^- , Zn^{2+} 농도는 증가하였다. 또한 몰리브덴 결핍 및 과잉에 따른 생리적인 변화를 보면(Fig. 58), 결핍 시에는 엽록소 SPAD 값과 수확량이 감소하였고, 과잉 시에는 그 값이 변화가 없었다. 그 외 초장, 엽장, 엽폭, 화방수, 줄기직경은 결핍 및 과잉에 따른 변화는 나타나지 않았다. 이는 Mo 과잉 시 Cu가 결핍된다는 보고(Vetanoveta, 1996)와 유사한 경향이었다.

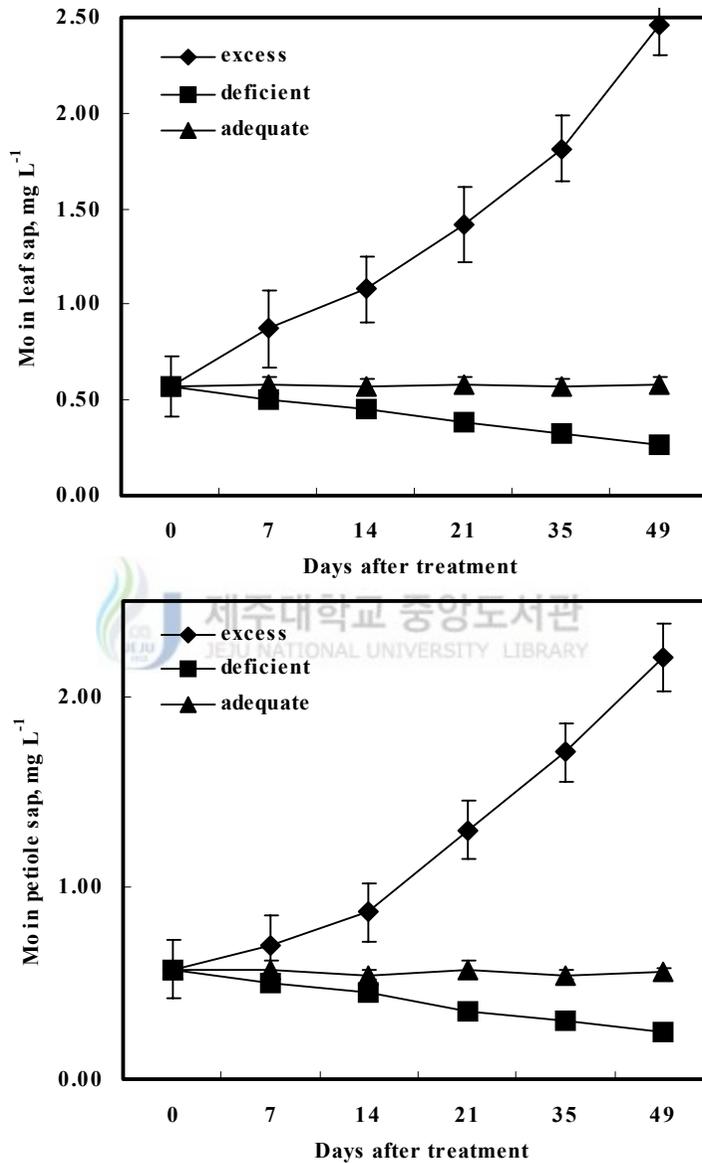


Figure 57. Change of MoO_4^{2-} concentrations in the leaf or petiole sap, when cultured under the Mo-deficient or excess condition.

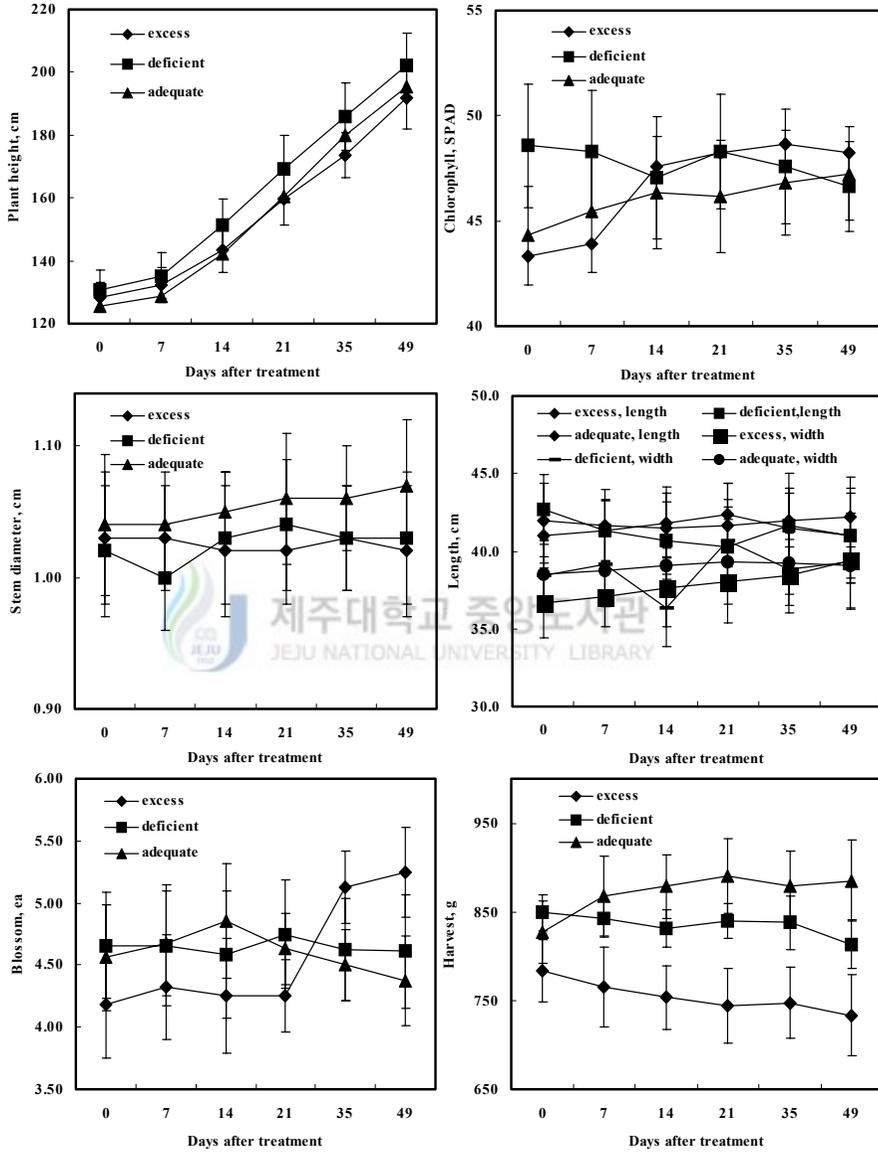


Figure 58. Change of plant height, chlorophyll SPAD value, stem diameter and stem length, number of blossom, yield of tomato when cultured under the Mo-deficient or excess condition.

4. 즙액분석법에 의한 양액 재배 토마토의 엽과 엽병 즙액 내 연중 기준 농도

실험 1(즙액분석을 위한 엽과 엽병의 위치 선정 및 연중 생육기간 내 즙액과 건물체 화학 분석값과의 관계)의 결과에서 처럼 상위 첫 번째 화방에서 아래로 9번째 본엽의 엽과 엽병 즙액 농도는 토마토의 영양생리 상태를 잘 나타냈다.

또한, 실험 2(양액 공급 농도에 따른 엽과 엽병 즙액 중의 무기원소 농도)의 양액 공급 수준(0.5 ×, 1.0 ×, 1.5 ×) 또는 농가 관행(대조구)의 양액 공급 농도간에 엽 및 엽병 즙액 중에 무기이온 농도, 식물체 생육 및 토마토 수량이 차이가 없었고 특히, 토마토의 수량이 일반적으로 알려진 경우와 같은 양을 보였다는 점은 본 실험에서의 엽 및 엽병 즙액 중의 농도가 적정범위에 있다는 것을 암시하는 것이다.

실험 3(양분 결핍과 과잉 공급에 따른 즙액 중의 무기원소 농도 및 식물체 영양 생리적 반응 조사)에서 즙액분석을 이용한 엽과 엽병 즙액 내 무기원소의 결핍과 과잉농도는 질소, 칼륨, 칼슘에서는 적정 농도의 ± 30% 범위였고, 인산, 황산, 마그네슘에서는 적정 농도의 ± 20 %범위였다. 미량 원소의 결핍 농도는 붕소, 아연, 망간, 철, 구리, 몰리브덴 모두 적정 농도보다 30% 낮은 농도였고, 과잉 농도는 망간은 3배, 그 외 원소는 2배 높을 때 초기 과잉 증상이 나타났다. 이러한 세 가지 실험 결과를 토대로 7월에 과중하여 8월에 정식하고 다음해 6월까지 양액재배를 실시하는 토마토의 엽과 엽병 즙액 내 무기원소 기준 농도를 산정하여 Table 16, 17에 제시하였다.

그러나, 결핍 또는 과잉이 진행된 후에는 영양장해로 피해를 보기 때문에 이를 예방하기 위해서는 다량원소에 있어서 즙액분석을 통하여 즙액 중 농도가 정상농도보다 ± 15% 차이를 보이기 전에 미량원소는 20% 부족하거나 또는 1.5배 많기 전에 양액을 처방하여야 할 것으로 사료된다.

Table 16. Concentrations of inorganic elements in the leaf sap of hydroponic tomato. (unit : mg L⁻¹)

Elements	Months	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
NO ₃	Deficient	350	700	1100	1500	1500	1500	1500	1450	1400	1400	1400
	Adequate	500~ 800	1000~ 1400	1600~ 1800	2200~ 2400	2200~ 2300	2200~ 2300	2200~ 2300	2100~ 2200	2100~ 2200	2000~ 2100	2000~ 2100
	Excess	1040	1800	2300	3100	3000	3000	3000	2900	2900	8900	2800
PO ₄	Deficient	960	1200	1300	1500	1500	1300	1200	1100	1050	1000	800
	Adequate	1200~ 1400	1400~ 1600	1600~ 1800	1800~ 2000	1800~ 2000	1600~ 1800	1500~ 1600	1400~ 1500	1300~ 1400	1200~ 1300	1000~ 1200
	Excess	1700	1900	2100	2400	2400	2100	1900	1800	1700	1600	1500
SO ₄	Deficient	2000	4000	4800	5200	5200	4800	4800	5200	5600	5600	5600
	Adequate	2500~ 4500	5000~ 6000	6000~ 6500	6500~ 7000	6500~ 7000	6000~ 6500	6000~ 6500	6500~ 7000	7000~ 7500	7000~ 7500	7000~ 7500
	Excess	5400	7200	7800	8400	8400	7800	7800	8400	9000	9000	9000
K	Deficient	2800	3100	3500	3500	3500	3500	3100	3000	2900	2800	2700
	Adequate	4000~ 4500	4500~ 5000	5000~ 5200	5000~ 5200	5000~ 5200	5000~ 5200	4500~ 5000	4300~ 4500	4200~ 4300	4000~ 4200	3800~ 4200
	Excess	5800	6500	6700	6700	6700	6700	6500	5800	5600	5400	5400
Ca	Deficient	400	960	1600	2000	1400	1400	1400	2000	2400	2600	2600
	Adequate	500~ 1200	1200~ 2000	2000~ 3000	2500~ 3000	1700~ 2000	1700~ 1800	1800~ 2100	2500~ 3000	3000~ 3300	3300~ 3500	3300~ 3500
	Excess	1800	3000	4500	4500	3000	2700	3000	4500	4800	5000	5000
Mg	Deficient	240	320	400	480	320	280	320	400	480	640	560
	Adequate	300~ 400	400~ 500	500~ 600	600~ 700	400~ 500	350~ 400	400~ 500	500~ 600	600~ 700	800~ 900	700~ 800
	Excess	600	750	900	1000	750	600	750	900	1000	1300	1200
Fe	Deficient	2.5	2.8	3.0	2.0	1.4	1.3	1.3	1.3	2.0	2.0	2.0
	Adequate	3.5~ 4.0	4.0~ 5.0	4.5~ 5.0	3.0~ 4.0	2.0~ 3.0	1.8~ 2.0	1.8~ 2.0	1.8~ 2.0	3.0~ 3.5	3.0~ 3.5	3.0~ 3.5
	Excess	8.0	10.0	10.0	8.0	6.0	4.0	4.0	4.0	7.0	7.0	7.0
Zn	Deficient	3.5	4.2	4.5	4.2	3.5	2.0	2.0	2.0	2.8	2.8	2.8
	Adequate	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.5~ 9.0	6.0~ 8.0	5.0~ 6.0	3.0~ 5.0	3.0~ 4.0	3.0~ 3.5	4.0~ 4.5	4.0~ 4.5	4.0~ 4.2
	Excess	12.0	14.0	18.0	16.0	12.0	10.0	8.0	7.0	9.0	9.0	8.0
Mn	Deficient	2.0	4.2	7.0	9.0	9.0	8.0	8.0	9.0	10.0	10.0	10.0
	Adequate	3.0~ 6.0	6.0~ 8.0	10.0~ 14.0	14.0~ 16.0	14.0~ 16.0	12.0~ 14.0	12.0~ 14.0	14.0~ 16.0	16.0~ 18.0	17.0~ 18.0	17.0~ 18.0
	Excess	18.0	24.0	42.0	48.0	48.0	42.0	42.0	48.0	54.0	54.0	54.0
B	Deficient	3.0	3.5	4.0	4.2	2.8	2.8	3.0	3.5	4.2	4.5	5.6
	Adequate	4.3~ 5.0	5.0~ 5.5	5.5~ 6.0	6.0~ 6.5	4.0~ 6.0	4.0~ 4.5	4.5~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 6.5	6.5~ 8.0	8.0~ 8.2
	Excess	10.0	11.0	12.0	13.0	12.0	9.0	10.0	12.0	13.0	16.0	16.0
Cu	Deficient	1.7	1.5	1.4	1.0	1.0	1.7	2.8	3.0	2.8	2.5	2.0
	Adequate	2.5~ 3.0	2.2~ 2.5	2.0~ 2.2	1.5~ 1.7	1.5~ 1.7	2.5~ 4.0	4.0~ 4.5	4.3~ 4.5	4.0~ 4.5	3.5~ 4.0	3.0~ 3.5
	Excess	6.0	5.0	4.5	3.5	3.5	8.0	9.0	9.0	9.0	8.0	7.0
Mo	Deficient	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	Adequate	0.3~ 0.35	0.3~ 0.33	0.3~ 0.32	0.3~ 0.30	0.2~ 0.28	0.2~ 0.45	0.4~ 0.50	0.4~ 0.50	0.4~ 0.45	0.3~ 0.40	0.3~ 0.40
	Excess	1.00	1.00	1.00	0.90	0.90	1.30	1.50	1.50	1.30	1.20	1.20

Table 17. Concentrations of inorganic elements in the petiole sap of hydroponic tomato. (unit : mg L⁻¹)

Elements	Months	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
NO ₃	Deficient	2500	5000	5000	4900	4900	4800	4800	4600	4500	4300	4200
	Adequate	3700~ 7000	7200~ 7500	7200~ 7300	7100~ 7200	7000~ 7100	6800~ 7000	6800~ 7000	6500~ 6800	6400~ 6500	6200~ 6400	6000~ 6200
	Excess	9100	9700	9500	9400	9300	9100	9100	8800	8500	8300	8100
PO ₄	Deficient	400	640	960	1400	1300	960	800	800	800	800	800
	Adequate	500~ 800	800~ 1200	1200~ 1700	1700~ 2200	1700~ 2000	1200~ 1700	1000~ 1200	1000~ 1200	1000~ 1200	1000~ 1200	1000~ 1200
	Excess	960	1400	2000	2600	2400	2000	1400	1400	1400	1400	1400
SO ₄	Deficient	160	640	960	1300	1200	1100	1000	1100	1300	1400	1400
	Adequate	200~ 800	800~ 1200	1200~ 1600	1600~ 1700	1500~ 1600	1400~ 1500	1300~ 1400	1400~ 1600	1600~ 1800	1700~ 1800	1700~ 1800
	Excess	960	1400	1900	2000	1900	1800	1700	1900	2200	2200	2200
K	Deficient	3000	3500	3800	4100	4100	3900	3700	3500	3400	3400	3400
	Adequate	4200~ 4800	5000~ 5400	5400~ 5800	5800~ 6000	5800~ 6000	5500~ 5800	5200~ 5500	5000~ 5200	4800~ 5000	4800~ 5000	4600~ 4800
	Excess	6200	7000	7500	7800	7800	7500	7200	6800	6500	6500	6200
Ca	Deficient	160	240	400	560	560	400	320	480	640	720	720
	Adequate	200~ 300	300~ 500	500~ 700	700~ 900	700~ 900	500~ 600	400~ 500	600~ 800	800~ 1100	900~ 1100	900~ 1100
	Excess	360	600	840	1080	960	720	600	960	1300	1300	1300
Mg	Deficient	160	200	240	400	320	240	240	280	320	400	400
	Adequate	200~ 250	250~ 300	300~ 500	500~ 600	400~ 500	300~ 400	300~ 350	350~ 400	400~ 500	500~ 600	500~ 600
	Excess	300	360	600	720	600	480	420	480	600	720	720
Fe	Deficient	1.8	1.6	1.6	1.6	1.4	1.4	1.4	1.6	2.0	2.3	2.3
	Adequate	2.5~ 3.5	2.0~ 2.5	2.0~ 2.5	2.0~ 2.5	1.8~ 2.0	1.8~ 2.0	1.8~ 2.0	2.0~ 3.0	3.0~ 3.5	3.4~ 3.6	3.4~ 3.6
	Excess	7.0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0	6.0	7.0	7.0	7.0
Zn	Deficient	2.0	2.8	4.0	5.0	4.0	3.5	2.0	2.8	3.5	3.5	3.5
	Adequate	3.0~ 3.5	4.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 7.5	6.0~ 7.0	5.0~ 6.0	3.0~ 5.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	5.0~ 6.0	5.0~ 6.0
	Excess	7.0	12.0	14.0	15.0	14.0	12.0	10.0	10.0	12.0	12.0	12.0
Mn	Deficient	1.5	1.7	2.5	4.2	2.0	2.0	2.8	4.2	5.0	5.0	5.0
	Adequate	2.0~ 2.5	2.5~ 3.5	3.5~ 6.0	6.0~ 7.0	3.0~ 5.0	3.0~ 4.0	4.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 7.5	6.8~ 7.0	6.8~ 7.0
	Excess	7.5	10.0	18.0	21.0	15.0	12.0	18.0	21.0	21.0	21.0	21.0
B	Deficient	0.9	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.6	2.0	2.0	2.0
	Adequate	1.2~ 1.5	2.0~ 3.5	1.5~ 2.0	1.5~ 1.7	1.5~ 1.7	1.5~ 2.0	2.0~ 2.3	2.3~ 3.0	2.8~ 3.0	2.8~ 3.0	2.8~ 3.0
	Excess	3.0	7.0	4.0	3.5	3.5	4.0	4.5	6.0	6.0	6.0	6.0
Cu	Deficient	0.3	0.3	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.0	2.0	2.0
	Adequate	0.5~ 1.0	0.5~ 1.2	1.2~ 1.5	1.5~ 1.8	1.8~ 2.0	2.0~ 2.3	2.5~ 3.0	3.0~ 3.5	3.0~ 3.5	3.0~ 3.5	2.8~ 3.0
	Excess	2.0	2.5	3.0	4.0	4.0	5.0	6.0	7.0	7.0	7.0	6.0
Mo	Deficient	0.14	0.14	0.16	0.16	0.20	0.28	0.35	0.40	0.37	0.35	0.35
	Adequate	0.20~ 0.25	0.20~ 0.25	0.25~ 0.30	0.25~ 0.30	0.30~ 0.35	0.40~ 0.50	0.50~ 0.60	0.55~ 0.60	0.52~ 0.55	0.50~ 0.52	0.50~ 0.52
	Excess	0.75	0.75	0.90	0.90	1.00	1.50	1.80	1.80	1.60	1.50	1.50

VI. 요약

토마토 양액재배에서 적절한 양액 관리는 식물체의 생육, 과일 품질 및 생산성과 매우 밀접한 관련을 가지며, 이를 위해서는 보다 신속 정확한 영양진단법이 요구되고 있다. 식물체 화학분석법은 시간이 다소 소요되기 때문에 실시간 영양상태를 신속하게 분석할 수 있는 즙액분석법을 확립하기 위하여 연구를 수행하였다. 국내에서 토마토 재배 작기로 많이 이용하고 있는 양액 재배 방식을 대상(7월 종자파종-익년 6월 작기 종료)으로 즙액 분석 시료로 이용할 엽 및 엽병의 최적 채취 위치 그리고 기존의 식물체 화학분석법과의 상관관계를 조사하여 즙액분석법의 타당성을 검토하였다.

또한, 양액 공급 수준이 엽 및 엽병 즙액 중의 무기 이온 농도, 토마토의 생육, 품질과 생산량에 미치는 영향을 조사하고 각각의 무기양분이 결핍되거나 과잉일 때의 엽과 엽병 즙액 중의 그 무기이온의 농도와 토마토의 영양 생리적인 반응을 조사하였다. 그리고 생육 단계 또는 계절별로 엽 및 엽병 즙액 중의 각 무기이온의 적정 농도 범위를 결정하여 즙액분석법에 의한 양액재배 토마토의 영양진단법을 확립하였다.

1. 즙액분석을 위한 엽 위치 선정 및 생육기간 동안 토마토 즙액과 건물체의 화학성분의 상관관계

즙액분석을 위한 엽과 엽병의 위치를 선정하고 즙액과 건물체 화학분석값과의 관계를 조사하기 위하여 네덜란드 PTG 원예작물연구소의 토마토 표준 양액을 공급하여 토마토의 양액재배를 실시하였다. 상이한 위치별로 엽과 엽병을 채취하여 즙액 중 다량원소(NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ,

SO₄²⁻) 및 미량원소(BO₃³⁻, Zn²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺, MoO₄²⁻) 농도를 조사하였고, 즙액분석 값이 식물체 화학분석 값과 상관을 갖고 있는지를 조사하였다. 조사 결과, 엽과 엽병의 위치별로 무기이온 농도는 차이를 보였으며, NO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻ 농도는 식물체의 아래쪽에 위치한 엽 또는 엽병의 경우에 높은 경향을 보였다. 특히, 엽 중 NO₃⁻, Ca²⁺, SO₄²⁻ 그리고 엽병 중의 NO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ 농도는 상위 첫 화방에서 아래로 9번째 본엽(compound leaf)까지 증가율이 컸으나 그 이후는 증가율이 감소하였고, 엽장 및 엽폭의 크기도 9번째 본엽까지는 크기가 증가하였지만 9번째 이후는 증가하지 않았다. 한편, 본엽을 구성하고 있는 소엽(leaflet) 중의 무기 이온 농도는 위치별로 차이를 보이지 않았다. 따라서, 토마토의 즙액분석을 하기 위해서는 식물체의 상위 첫 화방에서 아래로 9번째 본엽 중의 소엽의 일부를 분석시료로 사용하는 것이 타당하다고 판단된다. 또한, 엽과 엽병 즙액 및 엽 건물체의 연중 무기 이온의 변화 형태는 성장 단계별 또는 계절별로 유사한 경향을 나타내었다. 즙액분석과 건물체 화학 분석값과의 상관관계는 다량원소 및 미량원소 모두에서 고도의 정의 상관관계(r = 0.80 이상)를 나타내어 즙액분석 값이 토마토의 무기 영양 상태를 충분히 반영할 수 있음을 시사하였다.

2. 양액 공급 농도에 따른 엽과 엽병 즙액 중의 무기원소 농도

네덜란드 PTG 원예작물연구소의 토마토 표준 양액의 0.5배, 1.0배, 1.5배 그리고 농가관행(대조구)으로 양액을 공급하여 양액재배를 실시하였을 때의 엽과 엽병 즙액 중의 무기원소 농도와 토마토 수확량 및 품질을 비교하였다. 엽과 엽병 즙액 내 NO₃⁻, PO₄³⁻, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, BO₃³⁻, Zn²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺, MoO₄²⁻ 농도와 토마토 수확량은 공급 농도별로 차

이를 보이지 않았으며, 특히, 0.5배 공급에서 과일의 평균 무게가 가장 컸고, 열과 발생율, 배꼽썩음과 발생율이 적은 것을 감안할 때, 1.0배 이상이 되는(EC 2.30 mS/cm) 현재의 양액 공급 관행은 다소 높은 것으로 사료된다.

3. 양분 결핍과 과잉 공급에 따른 즙액 중의 무기원소 농도 및 식물체 영양 생리적 반응 조사

NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , MoO_4^{2-} 양분이 각각 결핍되거나 과잉일 때의 엽과 엽병 즙액 중의 해당 무기이온 농도와 영양 생리적인 반응을 알아보기 위하여 네덜란드 PTG 원예작물연구소의 토마토 표준 양액을 기본으로 각각의 무기원소를 결제시키거나 과잉으로 공급하여 토마토 양액재배를 실시하였다.

NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , MoO_4^{2-} 을 결핍 또는 과잉 시켰을 때 엽색의 반응은 일반적으로 알려져 있는 사실과 유사한 경향을 나타내었다. 그 밖의 엽장, 엽폭, 엽록소 SPAD 값, 초장, 줄기직경, 수확량 등 생리적인 반응을 비교 검토한 결과, NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} 의 결핍 또는 과잉되었을 때 엽과 엽병 즙액 중 해당이온의 농도는 $\pm 30\%$ 범위를 보였으나, PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} 의 경우는 $\pm 20\%$ 를 나타내었다.

BO_3^{3-} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , MoO_4^{2-} 이 결핍되었을 때 엽과 엽병 즙액 내 해당 이온의 농도는 모두 적정 농도 보다 30% 낮게 나타났으나, 과잉 공급일 때에는 해당 원소의 농도가 2~3배 높게 나타났다. 결론적으로 양분 결핍/과잉에 따른 영양생리 장애를 방지하기 위해서는 다량원소의 경우에는 즙액 중 농도가 정상농도보다 $\pm 15\%$ 차이를 보이기 전에 그리고 미량원소는 $\pm 20\%$ 차이를 보이기 전에 양액을 처방하여야 할 것으로 사료된다.

V. 참 고 문 헌

- Bierman, P. M., T. A. Wall and L. Fuhrmann. 1999. Quick tests to monitor plant N & K status and manage fertilizer applications. Proc. Ohio Fruit and Vegetable Grower Congress, pp. 62-64.
- Belec, C., S. Villeneuve, J. Coulombe and N. Tremblay. 2001. Influence of nitrogen fertilization on yield, hollow stem incidence and sap nitrate concentration in broccoli. Can. J. Plant Sci., 81 : 765-772.
- Bevacqua, R. F. and T. R. Cardenas. 2002. Nitrogen monitoring techniques for vegetable crops. New Mexico State University, Cooperative Extension Service, 579, pp. 1-8.
- 부여 토마토 시험장. 2000. 품질향상과 생산비 절감을 위한 토마토 재배 기술. 충청남도 농업기술원 부여 토마토 시험장, pp. 11-19.
- Bouma, J. 1983. Hydrology and soil genesis of soils with aquic moisture regimes, pp. 253-281. In "Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concepts and Interactions" (eds. Wilding, L. P.,; N. E. Smecky; G. F. Hall). Elsevier, Amsterdam.
- Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total, pp. 575-624. In "Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties(2nd ed.)" (ed. Page, A. L. et al.). Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Campbell, C. R., M. M. Owenby and C. C. Carter. 1998. Sampling for plant analysis. NCDA&CS Agronomic Sampling Folder, No. 5, pp. 1-4.
- Castellanos, J. Z., I. Lazcano, A. S. Baldibia, V. Badillo, and S. Villalobos, 1999. Nitrogen fertilization and plant nutrient status

- monitoring - the basis for high yields and quality of broccoli in potassium-rich vertisols of central Mexico. Better Crops International, 13(2) : 25-27.
- 정순주, 서범석, 이범선. 1992. 수경재배 토마토의 생장과 발육에 미치는 질소와 칼리수준 및 상호작용에 관한 연구. 한국원예학회지, 33(3) : 244-251.
- 清水武. 1993. 원색 요소장해진단 사전. 한국원예정보기술센터, pp. 13-15.
- Coltman, R. R. 1987. Sampling considerations for nitrate quick tests of greenhouse grown tomatoes, J. Amer. Soc. Hort. Sci., 112(6) : 922-927.
- Hartz, T. K. 1998. Efficient nitrogen management for cool-season vegetables. UC Davis, Vegetable Research and Information Center, UC ANR Publication, 8097, pp. 1-13.
- Hochmuth, G. J. 1994. Plant petiole sap-testing for vegetable crops. Univ. Fla. Hort. Sci. Dept. Circular, 1144.
- Hochmuth G. J., D. Maynard, C. Vavrina, E. A. Hanlon. 1991. Plant tissue analysis and interpretations for vegetable crops in Florida. University of Florida Cooperative Extension Service, Special Series, SS-VEC-42.
- Hocking, P. J. 2001. Effects of sowing time on nitrate and total nitrogen concentration in field-grown canola(*Brassica Napus* L.) and implications for plant analysis. Journal of Plant Nutrition 24(1) : 43-59.
- Ikeda H., M. Urushima, S. Oi, K. Toi, J. Oka, Y. Inubushi, T. Moriyama, and T. Wada. 1998. Diagnosis and recommendation integrated system by sap analysis for horticultural crops. 1) A study on the standardzation of preparing samples for analysis. J. Japan. Soc.

- Hort. Sci., 67(3) : 413-419.
- Jang H. G. and S. J. Chung. 1997. A study of sap analysis for the establishment of nutrient diagnosis method. J. Bio. Fac. Env., 6(4) : 310-316.
- Johnson J. R. and J. R. Saunders. 1999. Nitrogen rates and cover crops for no-till cotton in the mississippi brown loam. North Mississippi Research & Extension Center, Arkansas Agricultural Experiment Station Special Report, 186, pp. 1-6.
- Jones J. B. 1997. Hydroponics. A practical guide for the soilless grower. St. Lucie Press, Boca Raton, Florida New York Washington, pp. 146-164.
- 김권래, 정한울, 김계훈. 2003. Test strip과 chlorophyll meter를 이용한 토마토의 신속한 영양진단. 한국농화학회지, 46(2) : 140-143.
- 김영철, 김광용, 윤형권, 서태철, 서효덕, 이상규. 2002. 저단밀식 토마토 재배 시 당도 향상을 위한 NaCl 처리농도. 원예과학기술지 학술발표자료집, p. 50.
- Klock, K. A., H. G. Taber, and W. R. Graves. 1997. Root respiration and phosphorus nutrition of tomato plants grown at a 36°C root-zone temperature. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 122(2) : 175-178.
- Kreij, C. D., C. Sonneveld, M. G. Warmenhoven, and N. A. Straver, 1992. Guide values for nutrient element contents of vegetables and flowers under glass. Proefstation Voor Tuinbouw Onder Glas Te Naaldwijk, pp. 1-13.
- 이용범, 이한철, 유창재, 이병일. 1994. 배양액 농도가 토마토의 품질, 수량 및 경엽의 양분 흡수에 미치는 영향. 한국원예과학기술지, 12(2) : 30-31.
- 임재현, 이인복, 김홍림. 2001. 시설 오이의 관비재배를 위한 토양용액과 엽병 즙액 중 질산태 농도 기준 설정. 한국 토양비료학회지. Vol. 34(5) :

316-325.

- Lorenz, O. A. and K. B. Tyler. 1983. Plant tissue analysis of vegetable crops, pp. 24-29. In "Soil and plant tissue testing in California" (ed. Reisenauer, H. M.). Div. of Agr. Sci., Univ. of Calif., Berkeley, Bulletin, 1879.
- Manson, A. D., N. Miles, V. G. Roberts and V. Katusic. 2000. Plant analysis. Soil Fertility Course Notes, KZN Dept of Agriculture and Environmental Affairs, pp. 1-7.
- Nagarajah, S. 1999. A petiole sap test for nitrate and potassium in sultana grapevines. Sunraysia Horticultural Centre, 432 : 21-23.
- 농촌진흥청. 2001. 농업기술정보 자료집 토마토. 농촌진흥청, 142 pp.
- 박권우, 김영식. 1998. 양액재배. 아카데미 서적, pp. 13-51.
- 박상근, 김병수, 정범윤. 1987. 원색도감 시설채소의 생리장해와 진단. 서울종묘 출판부, pp. 174-176.
- Plank, C. O. 1992. Plant analysis reference procedures for the southern region of the United States. Plant Anal. Ref. Proc. for S. US(SCSB #368), pp. 34-37.
- Prasad, M. and T. M. Spiers. 1985. A Rapid nitrate sap test for outdoor tomatoes. Scientia Horticulture, 25 : 211-215.
- Reuter D. J. and J. B. Robinson. 1986. Plant analysis : an interpretation manual. Inkata Press, Australia, pp. 449-455.
- Riley, E. A., T. L. Thompson, S. A. White, and M. J. Ottman. 1998. Developing sap nitrate tests for wheat and barley. Plant Physiology, 3 : 128-129.
- Rosen, C. J., M. Errebhi, and W. Wang. 1996. Testing petiole sap for nitrate and potassium : a comparison of several analytical procedures. HortScience, 31 : 1173-1176.

- Shishido, Y. and Y. Hori. 1991. The role of leaf as affected by phyllotaxis and leaf histology on the development of the fruit in tomato. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 60(2) : 319-327.
- Smith, D. L. 1987. *Rockwool in horticulture*. Grower Books · London, pp. 86-114.
- Smith, J. H., J. C. Silvertooth, and E. R. Norton. 1998. Comparison of the two methods for the analysis of petiole nitrate nitrogen concentration in irrigated cotton. *Cotton, A College of Agriculture Report. Series P-112, Arizona*, pp. 476-479.
- Snyder, R. G. 1993. *Injector Planner - A spreadsheet approach to fertilization management for greenhouse tomatoes*. Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station, Research Bulletin, 1003, pp. 1-8.
- Snyder, R. G. 1992a. *Greenhouse Tomato Handbook*. Mississippi Cooperative Extension Service Publication, 1828 : 24 pp.
- Sonneveld, C. 1989. A method for calculating the composition of nutrient solutions for soil cultures. *Glasshouse Crops Research Station Naaldwijk the Netherlands*, pp. 1-7.
- Sonneveld, C., C. de Kreij, M. G. Warmenhoven, and N. A. Straver. 1992. Guide values for nutrient element contents of vegetables and flowers under glass. *Proefstation Voor Tuinbouw Onder Glas Te Naaldwijk*, p. 13.
- Sonneveld, C. and N. Straver. 1994. Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. *Proefstation Voor Tuinbouw Onder Glas Te Naaldwijk*, pp. 22-23.
- Stebbins, R. L. and K. L. Wilder. 1988. Leaf analysis of nutrient disorders in tree fruits and small fruits. *Oregon State University*

- Extension Service, FS, 118, pp. 1-2.
- Taber, H. G. 2001. Petiole sap nitrate sufficiency values for fresh market tomato production. *J. Plant Nutr.*, 24 : 1-10.
- Vetanovetz, R. P. 1996. Tissue analysis and interpretation. part 9. pp. 197-219. In "Water, media and nutrition for greenhouse crops" (ed. Reed, D. W.). Ball Publishing, Batavia, USA.
- Vitosh, M. L. and G. H. Silva. 1994. A rapid petiole sap nitrate-nitrogen test for potatoes. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25 : 183-190.
- Warren, S. L., T. J. Monaco, and W. A. Skroch. 1987. Effect of vegetation management on soil nutrients and nutrient content of herbaceous vegetation. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 112(6) : 962-968.
- Westcott, M. 1993. Petiole tissue testing for nitrogen management in potatoes. Western Agricultural Research Center Montana State University, Fertilizer Facts : No. 6, pp. 1-3.
- Westerman, R. L. 1990. Soil testing and plant analysis. Third Edition. Soil Science Society of America Inc., pp. 389-427.
- Yiqing H., T. Satoshi, and N. Takakazu. 1998. The Effects of leaf position and time of sampling on nutrient concentration in the petiole sap from tomato plants cultured hydroponically. *J. Japan, Soc. Hort. Sci.*, 67(3) : 331-336.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 아낌없는 사랑과 지도로 이끌어 주신 유장걸 교수님께 마음 깊이 감사 드립니다. 그리고 바쁘신 중에도 본 논문의 심사를 맡아 지도해주신 전북대학교 한강완 교수님, 전남대학교 김용웅 교수님, 제주대학교 이효연 교수님, 방사능이용연구소 송성준 박사님, 아울러 평소 늘 가르침을 주셨던 김형옥 교수님, 강순선 교수님, 고정삼 교수님, 류기중 교수님, 현해남 교수님, 김찬식 교수님께도 깊이 감사 드립니다.

또한 본 논문의 실험을 수행할 수 있도록 장소와 여건을 제공하여 주신 삼환농산 장언조, 송성준 사장님과 관계자 여러분, 공동실험실습관 고정은 선생님, 그리고 많은 충고와 지도를 주셨던 이신찬 박사님, 홍경애 박사님, 실험수행과 자료 정리에 많은 도움을 준 오상호, 부창호, 강태우, 정영수, 이창훈, 김기혁, 박원표, 정승원 후배님들과 늘 지켜보며 격려를 해 준 친구와 선후배님 모두에게 감사를 드립니다.

오늘이 있기까지 자식하나 잘되기를 바라시는 아버님, 어머님 그리고 장인, 장모님, 긴 세월동안 불평 없이 참아주고 응원해준 딸민향과 사랑하는 아내 이경화에게 작은 결실인 이 논문을 드립니다.