

博士學位論文

不知火 柑橘의 水耕栽培와 無機養分
吸收 및 榮養障害



濟州大學校 大學院

農化學科

姜 兌 雨

2006年 8月

부지화 감귤의 수경재배와 무기양분 흡수 및 영양장해

지도교수 유 장 결

강 태 우

이 논문을 농학 박사학위 논문으로 제출함

2006년 8월

강태우의 농학 박사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

제주대학교 대학원

2006년 8월

Mineral Nutrient Absorption and
Disorder of Shiranuhi Mandarin[(*C.*
unshiu Marc.×*C. sinensis* Osb.)×*C.*
reticulata Bla.] in Hydroponic Culture

Tae-Woo Kang

(Supervised by professor Zang-Kual U.)



A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Doctor of Philosophy

2006. 8.

Department of Agricultural Chemistry
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary

I. 서론	1
II. 연구사	3
1. 수경재배 연구	3
2. 감귤나무 영양생리 특성	5
III. 재료 및 방법	8
1. 식물재료	8
2. 수경재배 시스템	8
1) 재배용기(포트)의 설치	8
2) 영양액 공급 용기	9
3) 영양액 공급 시간 조절 장치	9
3. 영양액 조제	11
1) 부지화 수경재배용 영양액 조제	11
2) 다량원소 결핍을 유도하기 위한 영양액 조제	12
4. 영양액 농도 처리와 결핍의 유도 및 회복 실험	13
1) 부지화 수경재배를 위한 적정 영양액 농도	13
2) 다량원소 결핍의 유도 및 회복 처리	13
5. 생육인자 측정 및 무기양분 분석	16
1) 생체중 증가량, 물 흡수량 및 엽록소 SPAD 값 측정	16
2) 영양액 분석	16

3) 양분 흡수량 계산	16
4) 식물체 채취 및 분석	17
5) 품질 및 수량 조사	18
IV. 결과 및 고찰	19
1. 부지화 수경재배시스템 확립	19
2. 부지화 수경재배를 위한 영양액의 적정 농도 결정	21
1) 생체중 증가량과 물 흡수량	21
2) 엽록소 SPAD 값	23
3) 양분 흡수 특성	25
(1) NO ₃ -N 및 NH ₄ -N	25
(2) PO ₄ -P 및 K	27
(3) Ca 및 Mg	29
4) 양분 총 흡수량	31
5) 엽, 줄기, 뿌리 중 무기성분 함량	32
6) 품질 및 수량	34
3. 다량원소 결핍 증상 및 결핍의 회복	40
1) 질소	40
(1) 질소 결핍 증상	40
(2) 생체중 증가량과 물 흡수량	42
(3) 엽록소 SPAD 값	44
(4) 질소 결핍 증상의 회복	46
(5) 엽 중 무기성분 함량	48

2 인산	50
(1) 인산 결핍 증상	50
(2) 인산 결핍 증상의 회복	52
(3) 엽 중 무기성분 함량	54
3) 칼륨	56
(1) 칼륨 결핍 증상	56
(2) 칼륨 결핍 증상의 회복	58
(3) 엽 중 무기성분 함량	60
4) 칼슘	62
(1) 칼슘 결핍 증상	62
(2) 칼슘 결핍 증상의 회복	64
(3) 엽 중 무기성분 함량	66
5) 마그네슘	67
(1) 마그네슘 결핍 증상	67
(2) 마그네슘 결핍 증상의 회복	69
(3) 엽 중 무기성분 함량	71
V. 요약	72
VI. 참고문헌	76

Summary

This study was carried out to investigate the nutritional physiology and disorders of Shiranuhi mandarin [(*C. unshiu* Marc. × *C. sinensis* Osb.) × *C. reticulata* Bla.] by the hydroponic culture system which was developed in this study.

The optimum concentration of culture solution for Shiranuhi mandarin was determined by examining increase of fresh weight, amount of nutrient uptake, water uptake, SPAD value of chlorophyll, fruit quality, and fruit yield. The deficiency symptoms of macro elements were displayed by supplying the culture solution excluding specific macro element, and their contents in the leaves were measured. Also the foliar application of mineral compounds and the root application with the standard culture solution were treated to recover the deficiency symptoms and their effectiveness were compared. Antagonistic and synergistic relation between the deficient-element and the other elements were investigated under the deficient condition of each macro element.

1. Establishment of hydroponic culture system for Shiranuhi mandarin

To develop the hydroponic culture system for Shiranuhi mandarin, the temperature control of the system was examined as one of the most important environmental factors. The results showed that the temperature of root zones as well as nutrient solution in the culture system was stable and very similar to that of natural soils in the summer and the

winter time. This system could provide proper amount of water and nutrient solution using automatic timer and water-logged pump successfully. Therefore, it is suggested that this hydroponic culture system could be used for the purpose of nutritional physiological research and be modified for cultivating Shiranuhi mandarin practically.

2. Determination of the optimum concentration of nutrient solution for Shiranuhi mandarin hydroponics.

1) Increased fresh weight and water uptake of tree, and SPAD values were increased with the concentration of culture solution until 2 times concentration of the standard solution. But the 4 times concentration of the standard solution did not influence growth factors and fruit quality, indicating that the 2 times concentration of the standard solution can be optimal.

2) The amounts of $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, K, Ca, and Mg uptake showed two peak values at the vegetative and the fruit growth stage. The amount of mineral absorption by trees at the 2 times concentration of the standard solution was in order of $\text{NO}_3\text{-N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{NH}_4\text{-N} > \text{PO}_4\text{-P} > \text{Mg}$.

3) Mineral contents in the leaves, stems and roots were proportionally increased with the concentration of supplied nutrient solutions, but there was no difference between 4 times and 2 times concentration of the standard solution.

3. Symptoms of macro element deficiency and their recovery by the foliar application of the elemental source compounds and the root application of the standard culture solution.

1) Nitrogen

(1) The visual deficiency symptom of nitrogen on the spring and summer leaves appeared light green in 40 days after -N treatment. In 50 days, the chlorosis symptom on the spring leaves was shown at first in the vein and midribs, and the summer leaves discolored continuously light green. At that time the nitrogen contents were 1.30% in the spring leaves and 1.41% in the summer leaves.

(2) Increased fresh weight, water uptake and SPAD values tended to be decreased under the -N treatment.

(3) Nitrogen contents of the leaves were recovered by the foliar application of 0.5% urea solution and the resupply of the standard culture solution to the roots. Deficiency recovery was more effective by the resupply to the roots than the foliar application.

(4) When nitrogen deficiency symptom occurred, the contents of P, K, and Mg in the spring leaves and the contents of P and Mg in the summer leaves were higher than those of the control, while the Ca content in the spring leaves and the K and Ca content in the summer leaves were lower than those of the control.

2) Phosphorous

(1) The visual deficiency symptom of phosphorous on the old (12-month

old) and the matured leaves (15-month old) appeared discolored dark green in 300 days after $-P$ treatment. Deficiency symptom on the old and matured leaves in 330 days progressed to reddish purple. Phosphorous contents of those were 0.06% and 0.06%, respectively. However, the new leaves (3-month old) with 0.16% of P content did not give the deficiency symptom.

(2) Phosphorus deficiency of the leaves was recovered by the foliar application of 1.0% NaH_2PO_4 solution and the resupply of the standard culture solution to the roots. Deficiency recovery was more effective by the foliar application than the resupply to the roots.

(3) When phosphorus deficiency symptom occurred, the contents of Ca and Mg in the new leaves and the contents of Mg in the old leaves were higher than those of the control, while the N and K content in the new leaves and the N, K and Ca content in the old leaves were lower than those of the control.

3) Potassium

(1) The visual deficiency symptom of potassium on the old (12-month old) and the matured leaves (15-month old) showed scorching on the edge of the leaves in 300 days after $-K$ treatment. In 330 days, deficiency symptoms on the old and the matured leaves became yellowish on the edge of the leaves. Potassium contents were 0.23% in the old leaves and 0.31% in the matured leaves. However, the new leaves (3-month old) with 0.56% of K content did not show the deficiency symptom.

(2) Potassium deficiency of the leaves was recovered by the foliar

application of 1.0% KCl solution and the resupply of the standard culture solution to the roots. Deficiency recovery was more effective by the foliar application than the resupply to the roots.

(3) When potassium deficiency symptom occurred, the contents of Mg in the new leaves and the contents of N, P, Ca and Mg in the old leaves were higher than those of the control, while the N, P and Ca contents in the new leaves were lower than those of the control.

4) Calcium

(1) The visual deficiency symptom of calcium on the autumn flush leaves occurred burning on the edge of the leaves after -Ca treatment. Deficiency symptom brought a like red-dot on the leaf-tip of the autumn flush leaves with 0.12% of calcium content, and dieback burnt.

(2) Calcium deficiency of the leaves were recovered slightly by the foliar application of 1.2% CaCl₂ solution, however the resupply of the standard culture solution to the roots did not cure the deficiency.

(3) When calcium deficiency symptom occurred, the contents of N, P, K, and Mg in both the spring and summer leaves were higher than those of the control.

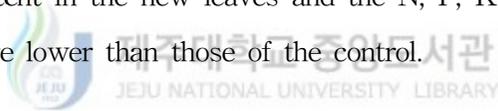
5) Magnesium

(1) The visual deficiency symptom of magnesium on the old (12-month old) and the matured leaves (15-month old) appeared yellowish between the midrib and the outer edge on the leaves in 300 days after -Mg treatment. In 330 days, the deficiency symptoms on the old and the

matured leaves showed a characteristic pattern of yellowing which started near the edge and towards the apex of the leaf with a triangle of green remaining at its base. The magnesium contents were 0.05% in the old leaves and 0.04% in the matured leaves. However, the new leaves (3-month old) with 0.14% of Mg content did not show the deficiency symptom.

(2) Magnesium deficiency of the leaves was recovered by the foliar application of 2.0% $MgCl_2$ solution and the resupply of the standard culture solution to the roots. Deficiency recovery was more effective by the foliar application than the resupply to the roots.

(3) When magnesium deficiency symptom occurred, the contents of P and Ca in the new leaves were higher than those of the control, while the N, K and Mg content in the new leaves and the N, P, K and Ca content in the old leaves were lower than those of the control.



I. 서 론

온주 감귤은 제주지역의 대표적인 과실이며 주요 소득원으로써 지역 경제 발전에 꾸준히 기여하여 왔다. 최근 감귤 산업은 WTO/DDA 협상, 한·칠레 FTA 체결 및 한·미 FTA 협상 개시 선언 등으로 그 위기감은 점점 증대되고 있으며, 급격하게 변화하는 국제 통상 환경에 대응하여 지속가능한 제주 생명산업으로 생존하기 위해서는 품질 경쟁력을 확보하는 것이 무엇보다 필요한 실정이다. 그동안 노지 또는 하우스 온주 밀감 재배기술로는 점점 높아지는 소비자 기호에 맞는 고품질 감귤을 생산하기에는 한계가 있어 왔다. 따라서, 새로운 품종의 육성과 도입 뿐 만 아니라 재배방법의 획기적인 개선은 감귤의 경쟁력 제고에 본질적인 문제가 되고 있다.

부지화 감귤[(*C. unshiu* Marc. × *C. sinensis* Osb.) × *C. reticulata* Bla.]은 1972년 일본 농림성 과수시험장에서 육성되었으며, 1990년대 초반 일부 독농가와 농업기술센터의 시범사업으로 도입 재배되기 시작하였으며, 최근 재배면적도 급격히 증가하고 실정이다. 특히, 부지화는 온주밀감에 비해 당도가 높고, 향기가 좋아서 소비자의 선호도가 매우 큰 편이다(제주도 농업기술원, 2003 ; 제주도 농업기술원, 2006).

부지화 감귤은 미결실과 결실기간에 수세 특성이 일반 온주 밀감과 크게 다른 특성을 지니고 있다. 수세는 유목인 경우 다소 약하고, 고접인 경우는 미결실기에 약간 강하다가 착과가 시작되면 다시 약하게 보이는 생육 특성을 지너(河瀬憲次, 1999 ; 제주도 농업기술원, 2003 ; 제주도 농업기술원, 2006) 과학적인 비배관리가 필요하다.

특히, 부지화 감귤의 왕성한 생육 특성은 일반 온주 밀감에 비해 양분 요구도가 크고 익년 2월에 까지 수체에 과일을 달리기 때문에 온주밀감에서 잘 나타나지 않는 양분의 과부족 장애나 과실에 여러 가지의 생리장애가 발

생하기 쉽다(河瀨憲次, 1999). 따라서 비배 관리기술은 수세 및 과실의 생산량과 품질에 커다란 영향을 줄 수 있으므로 수체의 영양 생리와 과일 생산량과 품질에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

일반적으로 토양조건에서 무기양분을 결제시키거나 조절이 어려워 식물에 대한 무기양분이 영양생리에 미치는 영향을 알아보기 위해서는 사경 또는 수경재배기술을 이용하고 있으며, 온주 밀감나무의 경우에는 비료 형태와 감귤 품질과의 관계(송, 1985), 영양진단법(송, 1992) 그리고 무기양분 흡수 특성 연구(Anh 등, 2003)에서 단기간 이용된 바 있으나, 수체의 영양생리, 결핍증상 및 회복, 과일 생산과 품질관계를 좀더 자세히 연구하기 위해서는 다년간 실시할 수 있는 수경재배 시스템의 개발이 필요하다.

그러므로, 본 연구에서는 부지화 감귤을 토양을 매개체로 하지 않는 수경재배방식으로 재배 할 수 있는 시스템과 적정 영양액을 개발하여 수체 영양생리에 대한 체계적인 연구를 수행하고, 다량원소 결핍 증상과 엽 중 농도를 확인함으로써 비배관리 기준을 마련하고 영양장해를 신속히 회복시키는 방법을 확립하고자 하였다. 본 연구에서 제시된 부지화 감귤의 수경재배방법은 생육시기에 따른 영양원소의 적절한 공급을 통해서 과실 품질을 향상시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

II. 연 구 사

1. 수경재배 연구

수경재배(水耕栽培)란 시설재배의 한 형태로서 토양 대신에 생육에 요구되는 무기양분을 골고루 용해시킨 영양액으로 작물을 재배하는 형태를 말하며, 작물의 뿌리를 지지하는 방법과 양·수분 또는 산소를 공급하는 방법에 따라 분무경, 분무수경, 수경, 고품배지경 등의 여러 가지 방식이 개발되어 있다. 수경재배는 복잡한 토양환경을 배제하고 작물을 재배하는 형태로서 노동력 절감과 품질향상을 통한 수익성 증대와 고도의 기술집약적인 생산기술의 도입이 가장 용이한 생산형태이다.

수경재배는 1648년 van Helmont에 의해 기초연구가 수행된 이래 1930년대 이후 급격히 발전되어 왔다(Adams와 Ei-Gizawy, 1986). 특히, 오늘날 원예 및 화훼 작물의 수경재배의 효시는 1921년 Pember와 Adams의 카네이션에 대한 사경재배 그리고 1926년 미국 캘리포니아 대학의 Gericke 등이 물을 이용한 수경재배와 모래를 이용한 사경재배에서 여러 작물의 재배 실용화 가능성을 모색한데서 찾아 볼 수 있다. 그 이후 1935년 미국의 캘리포니아에서 역경재배법과 이에 따른 저면급액법이 개발되었고(Withrow와 Biebel, 1936), 1938년에 Hoagland 영양액이 개발됨으로써 실용적인 수경재배의 계기가 마련되었다. 그 이후 山崎(1947)와 Cooper(1973) 등이 영양액의 조성을 발전시켰으며 다방면에서 연구가 이루어졌는데 우리나라에서는 1954년 수원에 있는 농사원에서 1 ha의 수경재배가 최초로 시작되었고, 1964년에는 수도(水稻)를 수경재배하여 철분흡수에 관한 동적인 연구가 이루어져 우리나라에서는 처음으로 수경재배에 관한 연구가 이루어졌다(Shim, 1964). 70년대 후반 원예시험장(현 원예연구소)을 중심으로 수경재배 연구가 본격화 되었고, 80년대 말에

는 간이형 식물공장 형태까지 등장하여 급성장하기 시작하였다(RDA, 2003).

1960년 이전까지는 고품 수경재배 배지로 주로 자갈과 모래가 이용되어 왔다. 1960년대 말에 유럽에서 peatmoss를 이용한 자루 재배가 등장하였으며, 1968년 덴마크의 Grodan사가 암면 배지를 개발하면서 유럽의 주된 고품배지 방식으로 자리를 잡았을 뿐만 아니라(Benoit와 Ceustermans, 1986) 전 세계적으로 제일 많이 보급되어 있다. 또한, 수경재배 방식도 다양하게 개발되었는데, 1970년대 초 영국의 온실작물연구소에서 순수 수경재배법인 NFT (Nutrient Film Technique) 방식이 고안되었고, 특히 벨기에와 네덜란드를 중심으로 기존의 수경재배 기술이 더욱 발전되어 왔다(Graves, 1983).

또한, 수경재배 방식에 의한 작물의 생육 촉진, 수량 증대, 시설비와 운영비의 절감 및 병해충의 감소 등 해결해야 할 문제들이 대두되고 재배 시스템 및 생육 조절에 관한 근본적인 해결 방안이 요구되면서(小創, 1986) 네덜란드를 중심으로 복합 환경 자동 조절 시스템을 도입한 식물 공장형 수경재배 방식으로 변화되어 왔다(이, 2003).

영년생 작물에서의 수경재배는 주로 나무 수체의 영양 생리에 대한 체계적인 연구를 위하여 지금까지 많이 행하여 왔다. 미국에서는 1930년 후반에서 1950년 초반까지 감귤류의 영양생리 특성을 구명하기 위하여 수경재배 기술을 이용하였다(Haas, 1937 ; Chapman, 1942 ; Smith와 Reuther, 1951). 또한, 일본에서도 수경재배기술은 감귤 등 과수와 기타 목본류의 영양생리 및 생육 특성을 이해하기 위하여 사용한 바 있다. Yokomizo(1975)는 수경재배기술을 이용하여 질소질비료의 종류가 감귤의 생육과 품질에 미치는 영향을 조사하였고, Kato 등(1982)은 온도가 낮은 겨울철에 질소 흡수에 관한 연구를 수행하였다. Hiroshi와 Yutaka(1988)는 수경재배에서 온도가 감귤나무의 양분 흡수와 생육에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 차나무와 포도나무의 생육에 대한 연구에서도 수경재배법을 이용하였으며(Morita, 1992 ; Kato, 1996), 그리고 일본에서 과수의 수경재배연구는 주로 1980년대에 다양한 과수에 대해 활발히 진행되었다(今井, 1988 ; 吉田, 1998).

하지만, 우리나라에서는 포도나무와 무화과나무 그리고 감귤류 등 몇몇 과수에 대해서만 수정재배법을 활용하여 연구되었을 뿐 아직까지 기초 단계를 벗어나지 못하고 있는 실정이다(윤 등, 1998 ; 김, 2000 ; 박 등, 1997 ; Anh 등, 2003 ; 박, 2003).

2. 감귤나무 영양생리 특성

질소는 감귤나무 수체의 생장, 과실 품질과 생산량에 가장 밀접한 관계를 가지는 영양소로 알려져 있다(Bennett, 1993). 石原(1982)은 온주 밀감에서 엽 중 질소 함량이 2.8~2.9%일 때 적당하다고 보고하였고, Embleton 등(1973)은 오렌지에서 2.2~2.7%일 때 적당하나, 2.2%이하 일 때는 결핍이라고 하였다. 질소가 결핍되면 수체의 생육이 불량하며 수형이 잘 갖춰지기 어렵고 가지의 생장도 짧을 뿐만 아니라 불균일하게 된다. 질소가 결핍된 수체의 잎은 황색으로 변하여 노화하고 낙엽이 된다. 또한, 과실의 수량은 감소하고, 과피의 색은 명확하지 못하며, 과육은 단단하고 산미가 적어 저장성이 좋지 않다. (石原, 1982 ; Chapman, 1967 ; Reitz and Koo, 1959 ; Stephen과 Tucker, 2001 ; Bennett, 1993).

인산의 경우는 시비반응이 느려 수체, 품질 및 수량에 미치는 영향은 잘 나타나지 않으며(Reuther 등, 1958 ; 김과 오, 1971 ; 홍과 정, 1976 ; 송, 1992), 특히 토양 재배에서는 거의 나타나지 않는다고 알려져 있다(Reuther 등, 1958). 石原(1982)은 온주 밀감나무에서 엽 중 인산 함량은 0.15~0.17%일 때 적당하다고 보고하였고, Embleton 등(1973)은 오렌지 나무에서 0.12~0.18%일 때 적당하나, 0.12%이하 일 때는 결핍이라고 하였다. 인산이 결핍되면 새로운 잎은 발육이 잘되지 않아 적어지고 광택이 없는 담갈녹색을 나타내고 연약해져 낙엽되기 쉽다고 했다. 그리고 과피가 두꺼워지는 반면 거칠어지고 과육의 충실도가 적어 과즙이 감소되고 산 함량을 증가시켜 감미비를

떨어뜨리는 경향이 있다고 했다(石原, 1982 ; Chapman, 1967 ; Reitz와 Koo, 1959 ; Stephen과 Tucker, 2001 ; Bennett, 1993).

칼륨은 과실의 크기 및 수량 그리고 품질에 다른 성분들보다 많은 영향을 미치는 원소로 알려져 있다(Reitz와 Koo, 1959 ; Smith, 1966 ; 石原 등, 1965 ; Reese와 Koo, 1975 ; Berger 등, 1996 ; Stephen과 Tucker, 2001). 石原(1982)은 온주 밀감나무에서 엽 중 칼륨 함량은 1.42~1.95%일 때 적당하다고 보고하였고, Embleton 등(1973)은 오렌지 나무에서 1.00~1.70%일 때 적당하나, 1.70%이하 일 때는 결핍이라고 하였다. 칼륨이 부족하면 잎 주위 및 엽맥 사이가 황변되고 그 중 잎선단 부분이 황갈색 내지 적갈색으로 타들어 가며, 과실의 껍질은 두껍고 육질이 거칠고 색택이 불량하며 당 함량은 가리를 사용한 정상과 보다 높지만 과형이 적고 수량이 떨어진다고 하였다. 그리고 칼륨은 이동성이 쉬워 오랜 된 잎에서 새로운 잎으로 이동되기 때문에 결핍 증상은 오랜 된 잎에서 나타난다고 하였다(石原, 1982 ; Chapman, 1967 ; Reitz and Koo, 1959 ; Stephen과 Tucker, 2001 ; Bennett, 1993).

칼슘은 인산의 경우와 비슷하여 토양 재배에서는 잘 나타나지 않으며, 石原(1982)은 온주 밀감나무에서 엽 중 칼슘 함량은 2.21~3.87%일 때 적당하다고 보고하였고, Embleton 등(1973)은 오렌지 나무에서 3.00~6.00%일 때 적당하나, 3.00%이하 일 때는 결핍이라고 하였다. 칼슘이 부족하면 잎 주위와 주맥 사이 부분의 엽록소가 퇴색되고 작은 괴저(壞疽)가 발생하여 고사한 반점이 형성된다. Lemon 잎에서는 반점이 발달해서 일소현상과 같은 증상이 나타난다고 하였다(石原, 1982 ; Chapman, 1967 ; Bennett, 1993 ; Stephen과 Tucker, 2001). 그리고 칼슘은 식물체내 조직 간에 이동이 어려워 어린잎이나 생장점에서 먼저 발생하며, 특히 부지화 감귤의 신초에서 아주 많이 발생한다고 하였다(Song 등, 2006).

마그네슘은 엽록소의 구성원소이며 광합성 작용과 인산대사에 관여하는 효소 활성화에 중요한 역할을 하는 것으로 알려졌다(石原, 1982 ; Chapman, 1967 ; Bennett, 1993 ; Stephen과 Tucker, 2001). 石原(1982)은 온주 밀감나무에서 엽

중 마그네슘 함량은 0.31~0.46%일 때 적당하다고 보고하였고, Embleton 등 (1973)은 오렌지 나무에서 0.30~0.60%일 때 적당하나, 0.30%이하 일 때는 결핍이라고 하였다. 마그네슘이 부족하면 엽맥 사이 및 중륵(中肋)의 양측에 황변이 생기고 이 황변은 엽병 반대방향으로 V자 형으로 된다. 마그네슘은 식물 체내 조직 간에 이동이 용이하여 구엽에서 결핍 증상이 먼저 발생한다고 알려져 있다(石原, 1982 ; Chapman, 1967 ; Bennett, 1993 ; Stephen과 Tucker, 2001).



Ⅲ. 재료 및 방법

1. 식물재료

본 연구에 사용된 3년생 부지화 감귤나무[(*C. unshiu* Marc.× *C. sinensis* Osb.) ×*C. reticulata* Bla.]는 2002년 11월부터 2005년 2월까지 하우스 내에 설치된 수경재배시스템(Fig. 1)에 재배하여 정상적인 생육을 유도한 뒤 식물 재료로 활용하였다. 한편, 실험 처리 전 정상적인 생육을 유도하기 위한 재배 기간에는 Ca 결핍에 의한 신엽(新葉)의 괴사를 방지하기 위하여 0.2% 질산칼슘[5(Ca(NO₃)₂ · H₂O) · NH₄NO₃]을 3일 간격으로 엽면시비 하였다.

2. 수경재배 시스템



수경 재배 시스템은 순간담액식 재배방법으로 재배용기와 영양액 공급 장치 및 영양액 공급 시간 조절 장치로 구성되어있다(Fig. 1). 여기서 순간담액식이라 함은 펌프를 이용하여 영양액을 재배용기로 일정시간 공급한 뒤 펌프가 꺼지면 중력의 힘으로 재배용기속의 영양액은 즉시 역류되어 영양액공급 용기로 되돌려 보내짐으로써 순간적인 담액조건을 제공하고, 펌프가 동작되지 않는 시간 동안은 재배용기 내부가 공기로 채워져서 감귤뿌리가 뿌리 표면의 영양액을 흡수함과 동시에 호흡도 할 수 있는 조건을 만들어 주는 방법을 뜻한다.

1) 재배용기(포트)의 설치

수경재배를 위한 포트는 폴리에틸렌 재질의 15 L 원통형 용기를 사용하였으며, 5 cm 두께의 스티로폼으로 박스(60×60×35 cm)를 제작하여 중심부에

포트를 넣은 뒤 주변은 토양을 채웠고, 재배용기 아랫부분에는 영양액의 공급과 배수를 할 수 있도록 호스를 영양액 공급용기와 연결하였으며, 영양액 공급 펌프의 오동작으로 영양액이 넘쳐흐르는 것을 방지하기 위하여, 포트의 상부와 영양액 공급용기 사이를 호스로 연결하였다(Fig. 1). 그리고 수정 재배 시스템의 근권과 영양액의 온도 변화를 알아보기 위하여 data logger(Thermor recorder, TR-71FS, Korea)와 연결된 온도 센서를 나무주변(하우스 실내 온도 측정), 재배 용기(근권 온도), 영양액 공급 용기 그리고 하우스 내 토양 20 cm 깊이에 설치하여 주기적으로 온도 변화를 관찰하였다.

2) 영양액 공급 용기

수중 펌프에 의해서 재배용기에 공급된 영양액이 자연적으로 영양액 공급용기 쪽으로 배수되고, 영양액의 온도를 안정되게 유지하기 위하여 지면으로부터 50 cm 정도 깊이에 스티로폼 박스(35×45×50 cm)를 설치한 후 그 안에 20 L 영양액 공급 용기를 설치하였다. 그리고 이 용기의 내부에 수중 전기 펌프(ID-7, In-Dy Electronics)를 설치하여 영양액을 포트에 공급하였다(Fig. 1).

3) 영양액 공급 시간 조절 장치

영양액 공급 시간 조절은 24시간 타이머와 분단위의 시간을 조절할 수 있는 IC 타이머를 결합하여 회로를 구성함으로써 낮에는 40분, 밤에는 70분 간격으로 2분 30초 동안 7 L 정도의 영양액을 자동 공급하도록 하였다(Fig. 1).

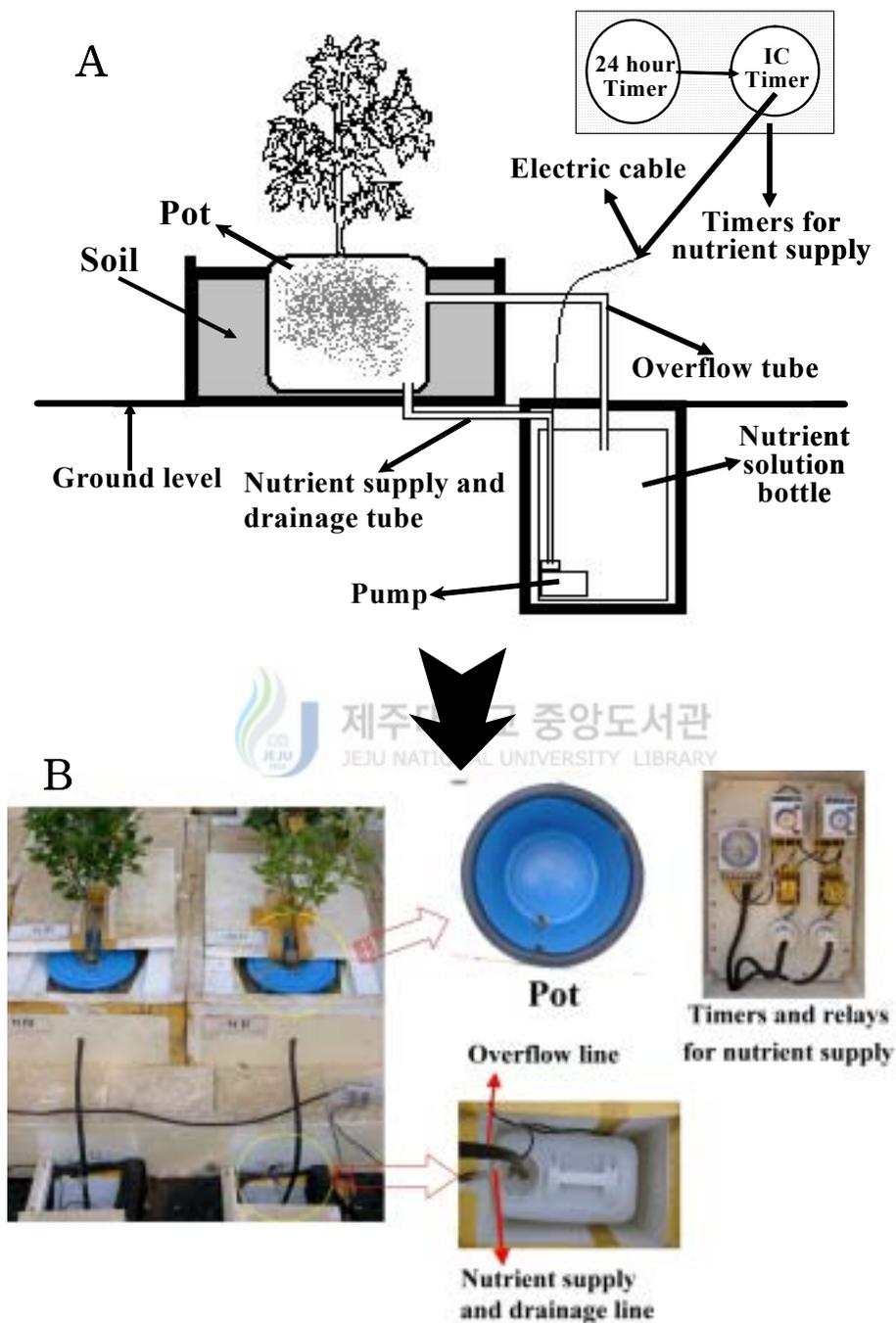


Fig. 1. The diagram of hydroponic culture system (A) and photo of the system (B).

3. 영양액 조제

1) 부지화 수경재배용 영양액 조제

부지화 수경재배를 위하여 사용된 표준 영양액은 제주대학교 식물영양학 연구실에서 개발된 것(Anh 등, 2003)을 기본적으로 사용하였으며(Table 1), 영양액 1 L을 만들기 위해서는 다량원소 화합물로 KNO_3 162.8 mg, $5[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}] \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3$ 390 mg, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 180 mg, KH_2PO_4 91.2 mg, NH_4NO_3 73.6 mg과, 미량원소 화합물로 Fe-EDTA 8.17 mg, H_3BO_3 1.5 mg, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.7 mg, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.88 mg, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.1 mg, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.015 mg를 사용하였다.

부지화 수경재배에서의 적정 영양액 농도를 알아내기 위하여 표준 영양액 농도를 기준으로 1/2배, 1배, 2배, 4배의 영양액을 조제하여 처리하였다, 그리고 모든 영양액은 1 N NaOH와 HCl 용액을 가지고 pH가 약 6정도 되도록 조절하였다.



Table 1. The inorganic nutrient composition of the standard culture solution (mg/L)

Macro nutrient	Concentration	Micro nutrient	Concentration
$\text{NH}_4\text{-N}$	18.0	Fe	1.08
$\text{NO}_3\text{-N}$	91.0	B	0.26
$\text{PO}_4\text{-P}$	20.8	Mn	0.23
K	89.2	Zn	0.25
Ca	72.3	Cu	0.025
Mg	17.8	Mo	0.006
$\text{SO}_4\text{-S}$	23.6		

2) 다량원소 결핍을 유도하기 위한 영양액 조제

다량원소 결핍 증상을 유도하여 이를 확인하기 위한 영양액의 농도는 Table 1의 표준 영양액의 농도와 동일하며, 각각의 다량원소 결핍 처리구는 Table 2에서 보는바와 같이 조제하였다.

Table 2. The inorganic nutrient compositions of control and nutrient absent culture solution (mg/L)

Nutrient source	Conc.	Treatments					
		Control	-N	-P	-K	-Ca	-Mg
KNO ₃	162.8	+	-	+	-	+	+
5(Ca(NO ₃) ₂ · H ₂ O) · NH ₄ NO ₃	390.0	+	-	+	+	-	+
MgSO ₄ · 7H ₂ O	180.0	+	+	+	+	+	-
KH ₂ PO ₄	91.2	+	+	-	-	+	+
NH ₄ NO ₃	73.6	+	-	+	+	+	+
CaCl ₂ · 2H ₂ O	264.6	-	+	-	-	-	-
KCl	120.0	-	+	-	-	-	-
	137.7	-	+	-	+	-	-
NaNO ₃	306.9	-	-	-	-	+	-
	125.0	-	-	-	-	-	+
NaH ₂ PO ₄ · 2H ₂ O	104.1	-	+	-	+	-	-
K ₂ SO ₄	127.0	-	-	-	-	-	+

[†] 8 mg/L of Fe-EDTA, 1.5 mg/L of H₃BO₃, 0.7 mg/L of MnSO₄ · H₂O, 0.88 mg/L of ZnSO₄ · 7H₂O, 0.1 mg/L of CuSO₄ · 5H₂O and 0.015 mg/L of Na₂MoO₄ · 2H₂O were supplemented in the nutrient solution.

+ ; Nutrient source included, - ; Nutrient source excluded.

4. 영양액 농도 처리와 결핍의 유도 및 회복 실험

1) 부지화 수경재배를 위한 적정 영양액 농도

2002년 11월부터 약 1년 동안 수경재배를 실시하여 수세의 안정을 유도한 뒤 생육이 균일한 나무개체만을 선정하여 2004년 3월부터 2005년 2월까지 표준 영양액 조성(Table 1) 농도의 1/2배, 1배, 2배, 4배인 영양액을 4처리 3반복으로 재배하였다. 영양액의 공급은 봄, 가을, 겨울철에는 15일에 한번 주기로 교체해 주었고, 여름철에는 1주일 간격으로 교체하였다. 재배 기간동안 영양액의 pH는 주기적으로 점검하여 약 6정도를 유지할 수 있도록 1 N NaOH를 가지고 조절해 주었다. 그리고 봄과 여름철 신엽(新葉)이 발생하는 시기에 Ca 결핍에 의한 엽의 괴사를 방지하기 위하여 1.2% CaCl₂를 3일 간격으로 엽면시비하였다.

2) 다량원소 결핍의 유도 및 회복 처리

다량원소 결핍 증상 확인 실험은 2002년 11월부터 약 8개월 동안 표준 영양액을 공급하여 정상적인 수체의 생육을 유도하기 위하여 3반복으로 재배하였고, 각 다량원소의 결핍 처리는 하엽(夏葉) 발생(2003년 6월 20일) 후 20일이 경과한 7월 12일에 각각의 다량원소를 결제시켜 재배하였다.

Table 3에서 보는 것처럼 질소 결핍 처리구는 질소를 결제시켜 2003년 9월 2일까지 52일간 양분을 공급하였고, 질소 결핍증상이 나타났을 때, 3반복으로 재배한 나무 중 한 나무는 계속하여 결핍을 유지하기 위하여 질소를 결제시킨 영양액(Table 2)을 공급하였고 나머지 두개의 나무 중 하나는 0.5% Urea를 이틀 간격으로 재배기간 동안 엽면시비를 하였고, 다른 하나는 대조구와 같은 표준 영양액 농도를 공급하였다.

Table 3에서 보는 것처럼 칼슘 결핍 처리구는 질소를 결제시켜 2003년 9월 10일까지 60일간 양분을 공급하였고, 칼슘 결핍증상이 나타났을 때, 3반복으로 재배한 나무 중 한 나무는 계속하여 결핍을 유지하기 위하여 칼슘을 결제

시킨 영양액(Table 2)을 공급하였고 나머지 두개의 나무 중 하나는 1.2% CaCl_2 를 이틀 간격으로 재배기간 동안 엽면시비를 하였고, 다른 하나는 대조구와 같은 표준 영양액 농도를 공급하였다.

Table 3에서 보는 것처럼 인산, 칼륨, 마그네슘 결핍 처리구는 각각의 성분들을 결제시켜 2004년 6월 5일까지 330일간 양분을 공급하였고, 각각의 성분들의 결핍증상이 나타났을 때, 3반복으로 재배한 나무 중 한 나무는 계속하여 결핍을 유지하기 위하여 각각의 성분들을 결제시킨 영양액(Table 2)을 공급하였고 나머지 두개의 나무 중 하나는 1.0% NaH_2PO_4 (인산 결핍구), 1.0% KCl (칼륨 결핍구), 2.0% MgCl_2 (마그네슘 결핍구)를 이틀 간격으로 재배기간 동안 엽면시비를 하였고, 다른 하나는 대조구와 같은 표준 영양액 농도를 공급하였다.



Table 3. Experimental treatments to induce elemental deficiency and recovery

Deficiency and recovery treatments	Nutrient solutions used	Period of supply (days)	Recovery method		
			Foliar application	Resupply to roots	
N	Control ^a	Standard	120	- ^e	-
	C ^b -N	N absent	"	-	-
	F ^c +N	"	"	0.5% urea after 52 days	-
	R ^d +N	N absent Standard	52 68	-	after 52 days
P	Control	Standard	370	-	-
	C-P	P absent	"	-	-
	F+P	"	"	1.0% NaH ₂ PO ₄ after 330 days	-
	R+P	P absent Standard	330 40	-	after 330 days
K	Control	Standard	370	-	-
	C-K	K absent	"	-	-
	F+K	"	"	1.0% KCl after 330 days	-
	R+K	K absent Standard	330 40	-	after 330 days
Ca	Control	Standard	100	-	-
	C-Ca	Ca absent	"	-	-
	F+Ca	"	"	1.2% CaCl ₂ after 60 days	-
	R+Ca	Ca absent Standard	60 40	-	after 60 days
Mg	Control	Standard	370	-	-
	C-Mg	Mg absent	"	-	-
	F+Mg	"	"	2.0% MgCl ₂ after 330 days	-
	R+Mg	Mg absent Standard	330 40	-	after 330 days

^aContinual supply of the standard culture solution, ^bAbsent treatment for maintaining the deficiency, ^cFoliar application for elemental deficiency recovery, ^dResupply of the standard culture solution to the roots for elemental deficiency recovery, ^eNot treated.

5. 생육인자 측정 및 무기양분 분석

1) 생체중 증가량, 물 흡수량 및 엽록소 SPAD 값 측정

생체중 증가량은 일정기간별로 나무의 생체중을 현장에서 저울로 측정한 뒤 재배 기간동안의 증가된 생체중으로 나타냈다. 물의 흡수량은 영양액의 공급전과 후의 무게 차로부터 산정하였다. 엽록소 SPAD 값은 일정기간별로 동일한 위치의 춘엽(春葉)과 하엽(夏葉) 또는 신엽(新葉)과 구엽(舊葉)으로 구분하여 각각 10개씩을 선정하여 엽록소 측정기(SPAD-502, Minolta, Japan)로 측정하였다.

2) 영양액 분석

공급 전후 영양액 중 일부를 채취하여 여과지(Advantec-Toyo, 5C)로 여과한 다음 NH_4 , NO_3 , PO_4 , K, Ca, Mg의 농도는 이온 크로마토그래프(Methron 790, Swiss)로 측정하였고, B, Mn, Zn, Fe, Cu는 유도결합 플라즈마 원자방출분광계(JY panorama, Jobin Yvon, France)로 측정하였다.

3) 양분 흡수량 계산

공급 전후 영양액의 양과 그 중 각 성분의 농도 그리고 나무의 생체중을 측정하여 아래 식에 의해 단위 생체중 kg 당 다량원소의 양분 흡수량을 계산하였다.

$$A = (B-C) / D$$

A : 생체중 kg 당 양분 흡수량(mg/kg · fresh weight)

B : 공급 전 영양액 양(L)×공급 전 원소의 농도(mg/L)

C : 공급 후 영양액 양(L)×공급 후 원소의 농도(mg/L)

D : 시기별 생체중(kg)

4) 식물체 채취 및 분석

영양액 농도에 따른 부지화 수경재배에서 식물체는 엽, 줄기 그리고 뿌리를 구분하여 실험이 종료된 2005년 2월 말에 채취하였으며, 다량원소 결핍 증상 확인을 위한 엽 시료는 각 처리 원소의 결핍 증상이 확인 되었을 때 따라 다르게 채취하였다. 질소와 칼슘 결핍구인 경우는 결핍을 유도한 같은 년도에 결핍 증상을 확인할 수가 있었기 때문에 춘엽(春葉)과 하엽(夏葉)을 채취하였고, 그리고 인산, 칼륨, 마그네슘 결핍구는 결핍을 유도하여 약 1년이 경과한 뒤 결핍 증상을 확인할 수가 있었기 때문에 성엽(成葉)과 그리고 구엽(舊葉)과 신엽(新葉)으로 구분하여 채취하였다(Table 4).

Table 4. Part and age of leaf sampling to diagnose the deficiency symptoms

Element absent	Days after deficiency treatment	Sampling time	Leaf sampled	Leaf age
N	60	Sep. 2003	Spring leaf	6 months old
			Summer leaf	3 months old
P	330	Jun. 2004	Matured leaf	15 months old
			Old leaf	12 months old
			New leaf	3 months old
K	330	Jun. 2004	Matured leaf	15 months old
			Old leaf	12 months old
			New leaf	3 months old
Ca	60	Sep. 2003	Spring leaf	6 months old
			Summer leaf	3 months old
Mg	330	Jun. 2004	Matured leaf	15 months old
			Old leaf	12 months old
			New leaf	3 months old

채취한 엽, 줄기 그리고 뿌리 시료는 수돗물로 깨끗이 씻은 후 약 70℃ 건조기에서 24시간 동안 건조시켰다. 건조된 시료는 삼각플라스크에 무게를 정확히 취하여 H₂SO₄-H₂O₂법으로 hot plate에서 분해시켰다. 분해액의 일부를 직접 취하여 Kjeldahl 방법에 의해 총 질소 분석을 하였고(Bremner와 Mulvaney, 1982), 나머지 시료는 여과 및 회석을 한 뒤, 유도결합 플라즈마 원자방출분광계를 이용하여 P, K, Ca, Mg, B, Mn, Zn, Fe, Cu 함량을 측정하였다.

5) 품질과 수량 조사

영양액 농도에 따른 수경재배 실험에서 품질과 수량 조사는 실험이 종료된 2005년 2월 말에 각 나무로부터 모든 과실을 채취하여 수행하였다. 채취된 과실의 크기와 무게는 버어니어 캘리퍼스와 저울을 사용하여 확인하였고, 과즙의 가용성 고형물과 산 함량은 과피를 제거한 후 깨끗한 망사에 넣어 압착하여 즙을 채취한 뒤에 당산 자동 측정기(NH-100, Horiba Co., Japan)를 사용하여 측정하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 부지화 수경재배시스템 확립

2002년 11월부터 2003년 10월까지 나무주변(하우스 실내 온도 측정), 재배 용기(근권 온도), 양액 공급 용기 그리고 하우스 내 토양 20 cm 깊이에서 일주일 평균 온도 변화를 조사한 결과는 Fig. 2와 같다.

수경재배용 포트 근권 주변의 온도 변화는 겨울철인 경우 하우스 대기 중 온도가 10℃이하로 떨어지거나 여름철에 25℃이상임에도 불구하고 토양의 온도와 비슷한 경향을 보였다. 이러한 결과는 본 수경재배시스템의 재배 조건이 토양재배의 경우와 유사한 환경을 제공할 수 있다는 것을 잘 설명해 주었다.

일반적으로, 수경재배에서는 토양과 격리된 채 재배되기 때문에 근권온도가 주변 환경에 쉽게 영향을 받아 작물의 양수분 흡수, 뿌리생육과 호흡작용 그리고 잎의 생육과 증산작용에 영향을 준다고 알려져 있다(한국양액재배연구회, 1998).

따라서 본 실험에서 설계되어 사용된 수경재배시스템은 부지화 감귤의 영양생리와 장해 특성 실험을 수행하는데 적당하였다고 생각된다.

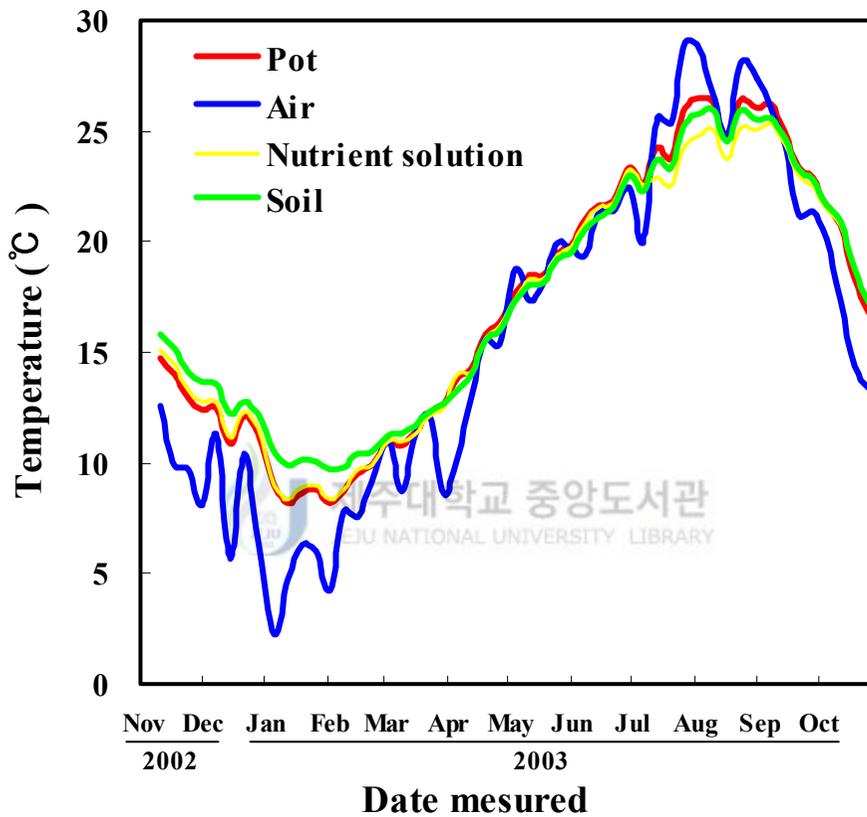


Fig. 2. Weekly average temperature changes of air and soil in the greenhouse, cultivating pot, and supplying nutrient solution from Nov. 2002 to Oct. 2003.

2. 부지화 수경재배를 위한 적정 영양액 농도 결정

1) 생체중 증가량과 물 흡수량

영양액의 공급 농도를 달리하였을 때 부지화 감귤나무의 생체중 증가량과 물의 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 3과 같다.

재배기간 동안 표준 영양액의 1/2배, 1배, 2배, 4배액을 공급한 후 월별로 조사한 결과 생체중 증가량은 영양액의 농도가 높을 때 큰 경향이나, 4배액 처리인 경우는 2배액 처리와 비슷하였다. 생체중의 변화를 시기별로 비교하면 가지와 엽 그리고 뿌리가 발생하여 성장하는 영양생장시기인 5월과 7월 그리고 과일을 맺어 성장하는 8월과 9월 사이에 증가하였는데, 이는 부지화와 온주밀감의 시기별 수체 성장 특성이 비슷함을 나타낸 결과이다(Chapman 과 Parker, 1942 ; Hirobe와 Ogake, 1968 ; 石原, 1982 ; Hiroshi와 Yutaka, 1988 ; Mataa 등, 1996 ; Anh 등, 2003).

물 흡수량은 생체중 증가량과 반대로 영양액 처리농도가 높을수록 적게 흡수하였고, 1/2배액 처리와 1배액 처리는 생체중의 변화와 밀접한 관계를 보여 시간이 경과할수록 증가하였다. 그리고 2배액 처리는 7월 이후 거의 일정하게 유지되다가 9월 이후 약간 증가하였으나, 4배액 처리는 7월 이후 감소하는 경향을 보였다. 이러한 것은 온도가 높을 때 뿌리에 공급된 영양액의 농도가 높을수록 물 흡수량이 감소하였다는 보고와 비슷하였다(Rodriguez 등, 1997 ; Romero 등, 2001 ; Anh 등, 2003).

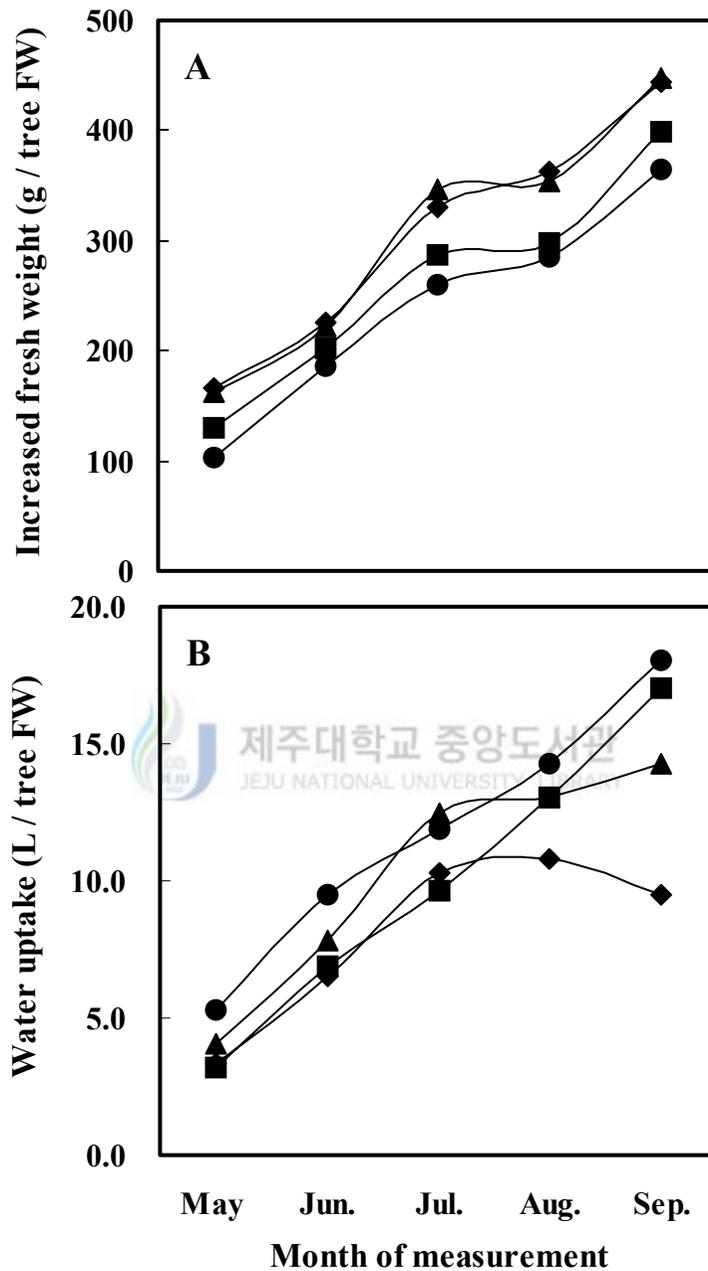


Fig. 3. Monthly changes of fresh weight (A) and water uptake (B) of Shiranuhi mandarin cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture. ● : half strength of the standard solution (1/2×), ■ : standard solution (1×), ▲ : 2 times of standard solution (2×), ◆ : 4 times of standard solution (4×).

2) 엽록소 SPAD 값

영양액의 공급 농도를 달리하였을 때 부지화 감귤나무 엽의 엽록소 SPAD 값을 조사한 결과는 Fig. 4와 같다.

재배기간 동안 표준 영양액의 1/2배, 1배, 2배, 4배액을 공급한 후 월별로 조사한 결과 신엽(新葉)과 구엽(舊葉) 중 엽록소 SPAD 값은 영양액 처리농도에 따라 일정한 경향은 없었으나 2배액 처리가 가장 높았고, 4배액 처리에서 다소 낮았다. 2배액 처리에서 6월에 측정된 엽록소 SPAD 값은 신엽인 경우 67.7이었고, 구엽은 75.9로 양호한 하우스 토양재배의 부지화의 그 값과 비슷하였다(제주도농업기술원, 2006). 신엽은 시간이 경과할수록 증가하였으나, 구엽은 7월 이후 일정하게 유지되는 경향을 보였다.

엽록소와 질소 함량 간에는 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 알려졌으며(한, 1997; Kim 등 2002; Rodriguez와 Miller, 2000), 온주밀감에서도 SPAD 값으로 나타낸 엽록소량은 엽록소 함량과 질소 함량사이에는 고도의 상관관계를 나타낸다고 하였으나, 질소 함량이 2.90% 이상에서는 SPAD 값과 엽록소 함량간에는 차이가 없었다고 하였다(한, 1997). 그러므로 본 연구 결과에서도 SPAD 값으로 나타낸 엽록소량은 질소 함량이 높은 신엽 중에서는 계속 높아졌고, 구엽에서는 질소함량의 변화가 없었기 때문에 엽록소 함량의 값이 일정하게 유지되었다고 생각된다.

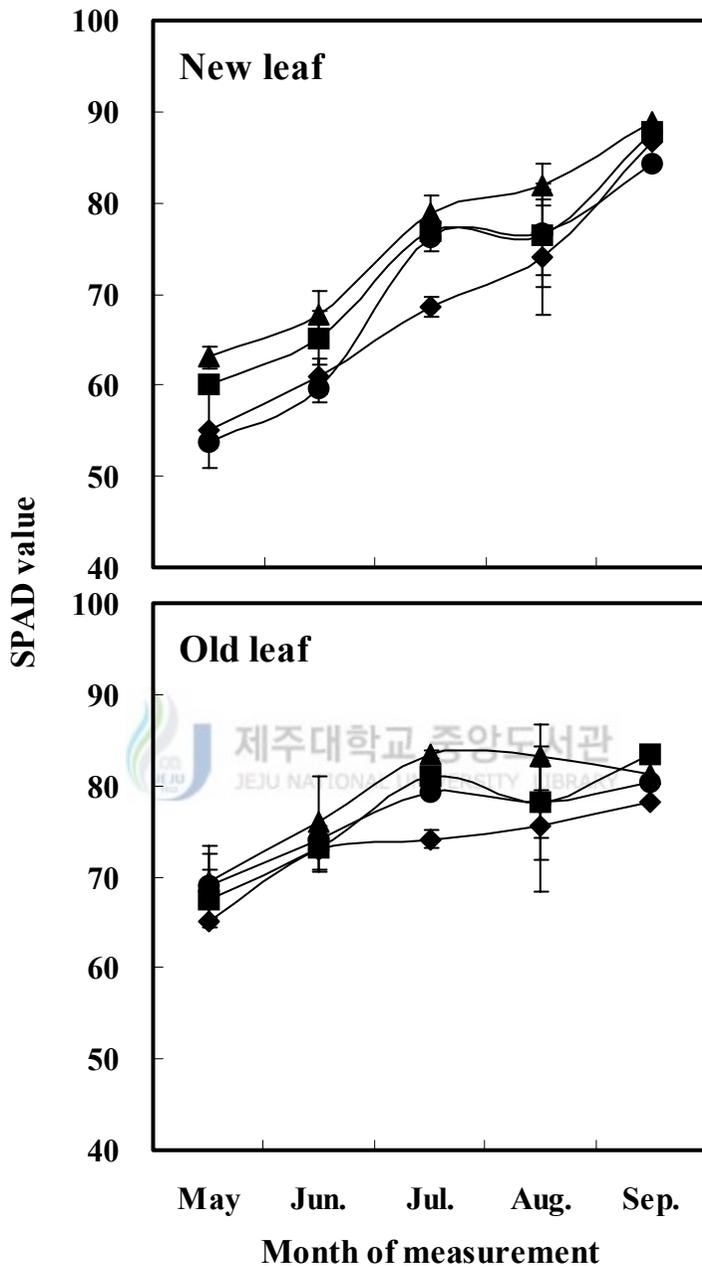


Fig. 4. Monthly changes of SPAD value of Shiranuhi mandarin leaves cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture. ● : half strength of the standard solution (1/2×), ■ : standard solution (1×), ▲ : 2 times of standard solution (2×), ◆ : 4 times of standard solution (4×).

3) 양분 흡수 특성

(1) $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{NH}_4\text{-N}$

영양액의 공급 농도를 달리하였을 때 부지화 감귤나무 생체중 단위 kg 당 월별 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 5와 같다.

재배기간 동안 표준 영양액의 1/2배, 1배, 2배, 4배액을 공급한 후 월별 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 흡수량은 영양액 처리농도가 높을수록 증가하였으나 2배액과 4배액 간에는 비슷하였다.

$\text{NO}_3\text{-N}$ 흡수량은 생체중의 증가량이 큰 7월과 9월에 가장 많이 흡수되었고, $\text{NH}_4\text{-N}$ 흡수량도 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 같은 경향이었으나, 7월 이후에 그 흡수량이 더 많았다. 이것은 계절별 부지화의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 $\text{NH}_4\text{-N}$ 흡수양상도 온주 밀감 나무와 크게 다르지 않음을 나타낸 결과이다(Anh 등, 2003).

또한, 질소의 흡수는 감귤의 수체성장, 온도와 밀접한 관계를 갖는다고 알려져 있듯이(Chapman과 Parker, 1942), 부지화의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 흡수가 9월에 가장 높은 것은 다른 계절에 비해 높은 온도와 과실성장과 하지 및 엽 성장이 동시에 이루어져 그 만큼 질소 요구도가 컸기 때문인 것으로 사료된다(石原, 1982 ; 한과 권, 1983). $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 흡수량이 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 비해 약 1/2배 정도 적었으나 공급된 양에 비해 흡수율이 높은 것은 일반적으로 목본류에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 더 잘 흡수한다는 사실과는 다르게 부지화가 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 흡수도 높다는 사실을 의미한다.

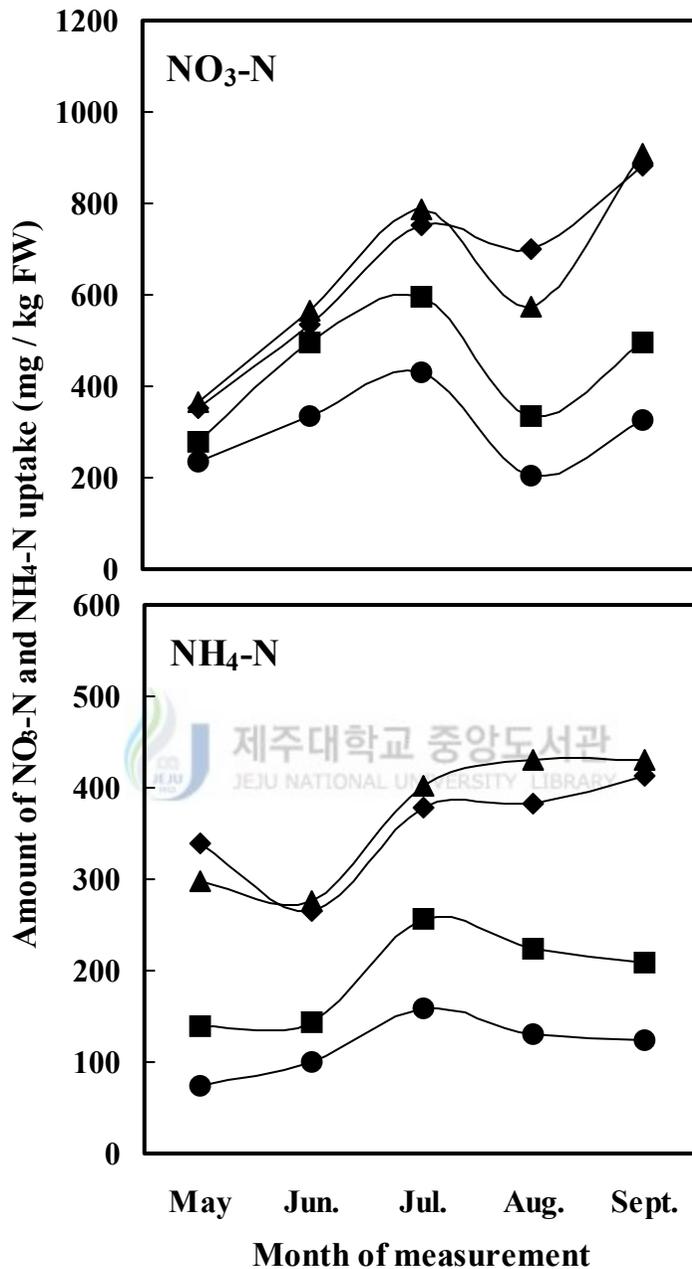


Fig. 5. Monthly absorptions of NO₃-N and NH₄-N of Shiranuhi mandarin cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture. ● : half strength of the standard solution (1/2×), ■ : standard solution (1×), ▲ : 2 times of standard solution (2×), ◆ : 4 times of standard solution (4×).

(2) PO₄-P 및 K

영양액의 공급 농도를 달리하였을 때 부지화 감귤나무의 월별 PO₄-P와 K의 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 6과 같다.

재배기간 동안 표준 영양액의 1/2배, 1배, 2배, 4배액을 공급한 후 월별 PO₄-P의 흡수량은 영양액 처리농도가 높을수록 증가하였으나, 2배액과 4배액 간에는 차이가 없었다. K 흡수량은 PO₄-P와 비슷하였으나, 7월 이후에는 영양액 농도가 1/2배 보다 높은 1배, 2배, 4배액 사이에서는 큰 차이가 없었다.

PO₄-P와 K 흡수량은 NO₃-N 및 NH₄-N과 마찬가지로 생체중 증가량에 기인하는 영양생장 및 생식생장과 매우 관계가 깊었으며, 7월과 9월에 가장 많이 흡수되었다. 이러한 결과는 온주 밀감나무 수경재배에서 조사한 흡수 특성과 유사하였고(Anh 등, 2003), 온주 밀감나무 묘목의 토경 재배에서도 PO₄-P의 흡수양상은 비슷하였으나, K의 흡수는 8월에 많았다. 한편, 성목인 경우에 PO₄-P는 5~6월에 가장 많았고, K는 7월에 가장 많이 흡수하였다는 보고와는 다소 다른 경향을 보이는 것은 유목과 수세가 안정된 성목 간에 영양생리적인 특성(石原, 1982 ; 한과 권, 1983) 차이에 기인한 것으로 사료된다.

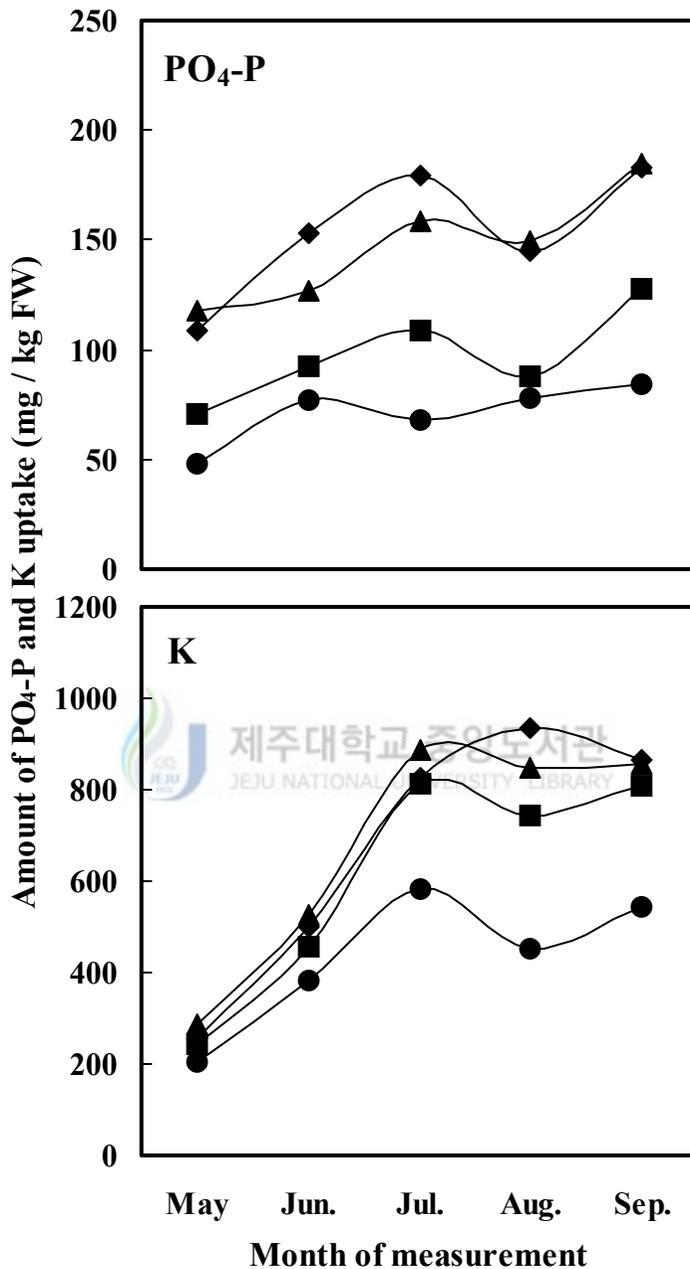


Fig. 6. Monthly absorptions of PO₄-P and K of Shiranuhi mandarin cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture. ● : half strength of the standard solution (1/2×), ■ : standard solution (1×), ▲ : 2 times of standard solution (2×), ◆ : 4 times of standard solution (4×).

(3) Ca 및 Mg

영양액의 공급 농도를 달리하였을 때 부지화 감귤나무의 월별 Ca와 Mg 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 7과 같다.

재배기간 동안 표준 영양액의 1/2배, 1배, 2배, 4배액을 공급한 후 월별로 조사한 결과 Ca의 흡수량은 영양액 처리농도가 높을수록 증가하였고, 4배액 처리인 경우가 가장 높았다. Mg 흡수량도 처리농도에 따라 Ca과 비슷하였으나, 4배액 처리인 경우는 2배액 처리와 차이가 없었다.

Ca와 Mg 흡수량 또한 다른 성분들과 마찬가지로 생체중 증가량에 기인하는 영양생장 및 과일생장과 매우 관계가 깊었으며, 7월과 9월에 가장 많이 흡수되었다. 이러한 결과는 온주 밀감나무의 수경재배에서 Ca과 Mg 흡수 특성과 유사하였으나(Anh 등, 2003), 토경 재배의 8월과 10월과는 차이가 있는 것은(石原, 1982 ; 한과 권, 1983) 지역적인 환경 차이에서 기인했다고 생각된다.

그리고 Ca과 Mg 흡수는 K 흡수와 같이 과실 형성기와 생장기에 증가하였다. 네블오렌지 과실의 계절별 무기양분 농도변화에서도 Ca과 Mg 농도가 K 다음으로 높았다는 사실(Storey와 Treeby, 2000)은 과실의 생장기에 Ca과 Mg 요구가 크다는 것은 암시하였다.

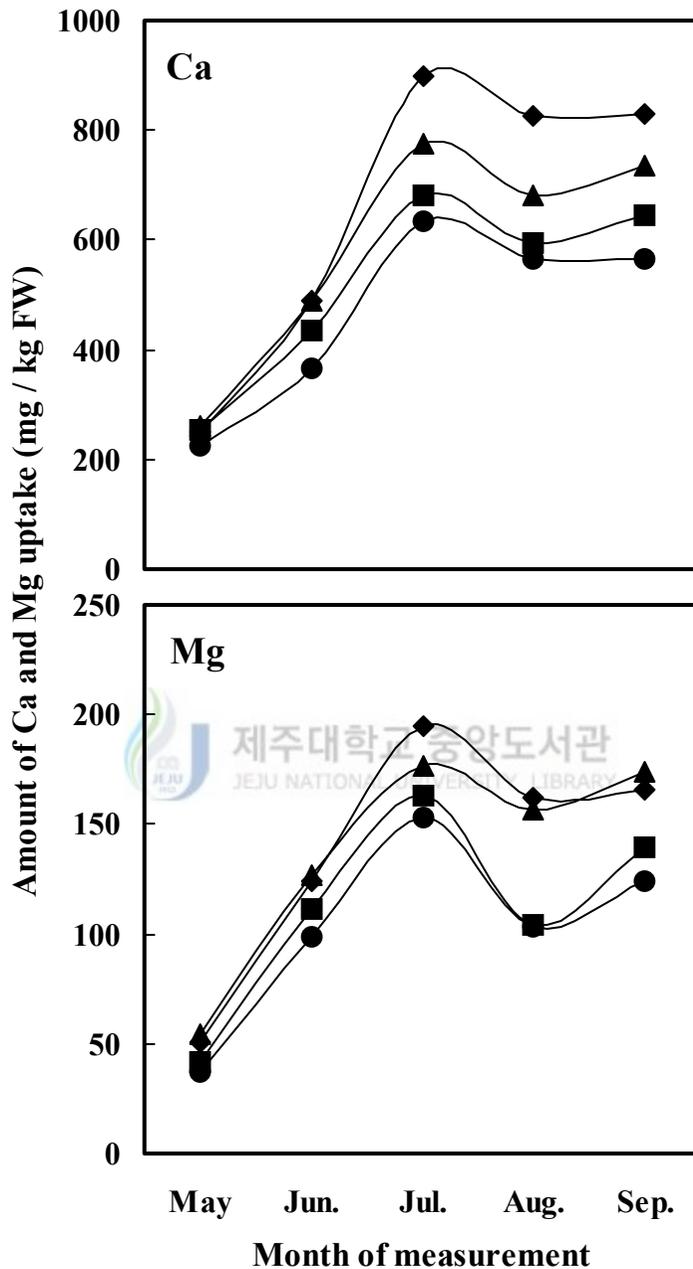


Fig. 7. Monthly absorptions of Ca and Mg of Shiranuhi mandarin cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture. ● : half strength of the standard solution (1/2×), ■ : standard solution (1×), ▲ : 2 times of standard solution (2×), ◆ : 4 times of standard solution (4×).

4) 양분 총 흡수량

영양액의 공급 농도를 달리하였을 때 부지화 감귤나무의 무기양분 총 흡수량을 조사한 결과는 Table 5와 같다.

재배기간 동안 표준 영양액의 1/2배, 1배, 2배, 4배액을 공급한 후 무기양분의 총 흡수량은 영양액 처리농도가 높을수록 증가하였으나, 2배액과 4배액 처리 간에는 유의적인 차이를 보이지 않았다. 무기양분별 총 흡수량을 비교하면 온주밀감나무와 마찬가지로(Hirobe와 Ogake, 1968 ; 石原, 1982 ; Anh 등, 2003) 부지화 감귤나무도 NO₃-N의 흡수량이 가장 컸으며 K, Ca, NH₄-N, PO₄-P 그리고 Mg 순으로 나타났다. 이는 부지화 감귤나무의 생장을 위해 NO₃-N, K, Ca과 NH₄-N의 요구도가 크다는 것을 시사하는 것이다.

Table 5. Total nutrient absorptions of Shiranuhi mandarin cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture from April to October, 2004

Treatments	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg
	mg/kg FW					
1/2× ^a	1,529c ^z	584c	356c	2,162c	2,276c	516c
1× ^b	2,198b	972b	488b	3,064b	2,608b	560b
2× ^c	3,201a	1,837a	737a	3,403a	2,944a	688a
4× ^d	3,223a	1,777a	769a	3,379a	3,180a	698a

^aHalf strength of the standard solution, ^bStandard solution, ^c2 times of standard solution, ^d4 times of standard solution.

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

5) 엽, 줄기, 뿌리 중 무기원소 함량

영양액의 공급 농도를 달리하여 부지화 감귤나무를 수경 재배한 후 엽, 줄기 및 뿌리 중 무기원소 함량을 조사한 결과는 Table 6과 같다.

표준 영양액의 1/2배, 1배, 2배, 4배액을 공급하여 과실을 수확한 다음 엽과 줄기 그리고 뿌리를 채취하여 무기원소 함량을 분석한 결과 신엽 중 Ca과 Mg을 제외한 다량원소는 영양액 처리농도에 따라 높아졌으나, 미량원소는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 또한, 구엽의 경우도 신엽과 같은 경향을 나타냈다. 기관별로 보면 대부분의 무기원소 함량은 뿌리에서 많았으며, Fe 함량이 특이적으로 높았다. 줄기 중에 무기원소 함량은 Mg과 Fe을 제외하고는 엽들과 비슷하였다.

온주 밀감과 오렌지 나무의 경우 엽 중 다량원소들의 적정 범위는 N인 경우 각각 2.5~2.8%와 2.2~2.7%, P 0.15~0.17%와 0.12~0.18%, K 0.8~1.7%와 1.0~1.78%, Ca 2.6~5.0%와 3.0~6.0%, Mg 0.19~0.5%와 0.3~0.6% 임을 감안할 때(Chapman, 1967 ; Bennett, 1993) 수경재배한 부지화 감귤나무의 엽 중 N, P, K, Ca, Mg 적정 함량은 2배액의 처리농도에서 나타났다.

Table 6. Mineral contents in leaf, stem and root of Shiranuhi mandarin cultured with the different concentration of culture solution in hydroponic culture from Mar. 2004 to Feb. 2005

Plant part	Treatment	T-N	P	K	Ca	Mg	Zn	B	Mn	Fe	Cu
		---		%		---	---	mg/kg DW			---
New leaf	1/2 ^a	1.91c ^z	0.08c	0.41d	2.81b	0.43a	59.1a	169a	411a	249c	6.60a
	1 ^b	2.55b	0.22b	0.94c	1.96c	0.39b	62.4a	203a	436a	250c	10.6a
	2 ^c	3.25a	0.35a	2.08b	2.73b	0.37b	59.7a	229a	356a	394b	11.1a
	4 ^d	3.49a	0.21b	2.49a	3.24a	0.39b	76.0a	213a	433a	504a	6.67a
Old leaf	1/2 ^x	1.98c	0.06c	0.69c	4.36a	0.40a	59.8a	226a	365a	269c	5.40a
	1 ^x	2.25b	0.08c	0.88c	3.06b	0.36a	66.5a	214a	371a	486a	7.60a
	2 ^x	2.43b	0.18b	1.83b	3.42b	0.31b	45.8a	240a	295b	466a	7.60a
	4 ^x	3.19a	0.25a	2.73a	2.61c	0.41a	37.5a	207a	248c	320b	5.11a
Stem	1/2 ^x	0.63c	0.04b	0.25b	0.39c	0.14a	19.1a	8.50a	32.0a	15.2a	3.78a
	1 ^x	0.66c	0.07b	0.32b	0.54b	0.07b	22.6a	10.0a	27.5a	29.5a	4.51a
	2 ^x	1.19b	0.15a	0.95a	0.63a	0.08b	21.8a	16.2a	38.0a	42.3a	5.37a
	4 ^x	1.56a	0.18a	1.07a	0.61a	0.15a	21.9a	17.5a	48.9a	48.9a	3.30a
Root	1/2 ^x	2.71c	0.05c	0.05c	0.27d	0.05c	84.7c	17.1c	56.7c	921b	54.8b
	1 ^x	3.09b	0.10b	0.08c	0.48c	0.06c	119b	26.3b	75.1c	1168b	52.3b
	2 ^x	3.42a	0.15b	0.25b	0.75b	0.10b	131b	29.6b	137b	1284b	71.1a
	4 ^x	3.07b	0.31a	0.40a	1.11a	0.20a	164a	40.5a	678a	1777a	75.5a

^aHalf strength of the standard solution, ^bStandard solution, ^c2 times of standard solution, ^d4 times of standard solution.

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

6) 품질 및 수량

영양액의 공급 농도를 달리하였을 때 부지화 감귤 과실의 평균크기, 나무 당 과실 수량, 당도 및 산 함량과 당산비를 조사한 결과는 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12와 같다.

부지화 감귤나무를 영양액을 공급하여 재배한 후 다음해 2월말에 과실을 수확하여 크기를 조사한 결과, 영양액 1배액 처리의 평균 과실 크기는 48.3 mm, 1/2배액 처리는 51.5 mm, 2배액 처리는 68.8과 4배액 처리는 57.2 mm로 양액 처리 농도에 따라 차이를 보였으나, 2배액을 처리한 경우에 통계적으로 유의성이 있게 가장 컸다. 부지화 감귤나무 당 총 수량도 평균 과실 크기 결과와 마찬가지로 2배액을 처리한 경우에 가장 많았다.

과실 중 당도와 산 함량은 영양액 처리 농도에 따라 차이를 보였는데, 영양액 1/2배액 처리의 당도와 산 함량은 24.2 °Bx와 2.3%, 1 배액 24.0 °Bx와 2.3%, 2배액 16.4 °Bx와 1.0%, 4배액 20.9 °Bx와 1.6%였다. 비록 영양액의 처리 농도가 높은 경우에 당도는 낮았지만 산 함량도 함께 낮아져 당산비는 오히려 높아지는 경향을 나타냈다.

부지화 과실의 적정 출하 규격 중 과실의 크기는 80~95 mm, 과실 한 개 당 무게는 250 g 이상, 당도는 13 °Bx이상, 산 함량은 1.0% 내외일 때 품질이 가장 우수하다고 하였다(농업기술원, 2003). 본 연구에서 수정재배에서 가장 컸던 과실의 크기는 68.8 mm, 평균 무게는 153 g로 적정 출하 규격과 많은 차이를 보였으나, 당과 산 함량은 16.4 °Bx와 1.0%로 규격이상의 값을 나타냄으로써 수정재배는 당도를 높이는 데 유리한 기술임을 입증했다. 그러나 평균 과실크기 또는 무게가 적었던 것은 수체 연령이 낮아 수세의 안정성이 결여된 것 때문인 것으로 판단되며 성목에서 엽과비를 잘 조절할 경우에 출하기준에 맞는 과실생산을 할 수 있을 것으로 생각된다.

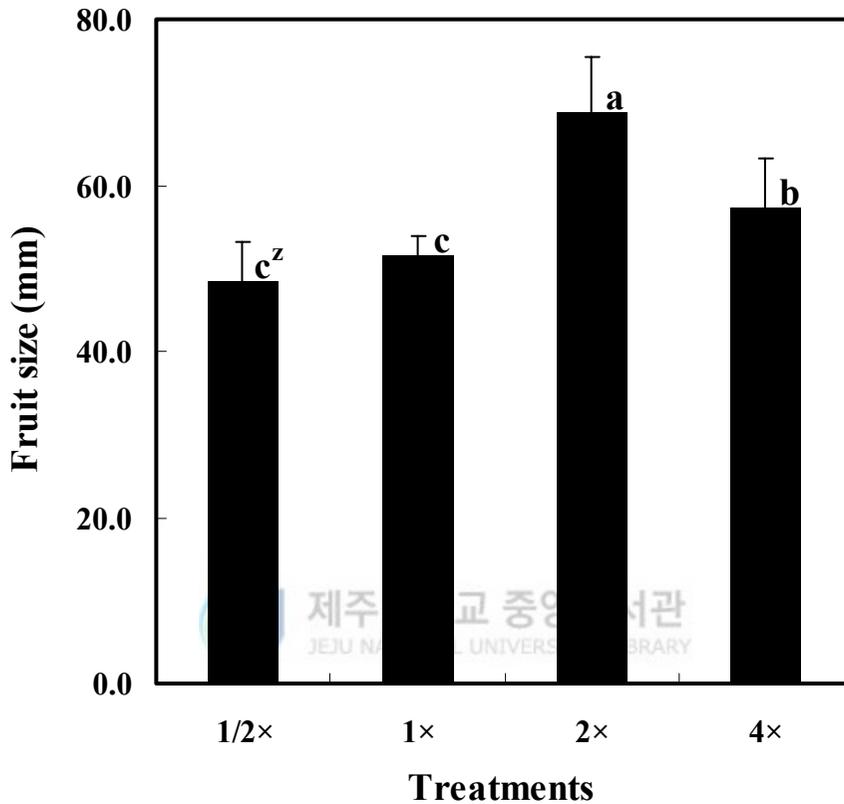


Fig. 8. Average size of Shiranuhi mandarin fruit cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture.

1/2× : half strength of the standard solution, 1× : standard solution, 2× : 2 times of standard solution, 4× : 4 times of standard solution.

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

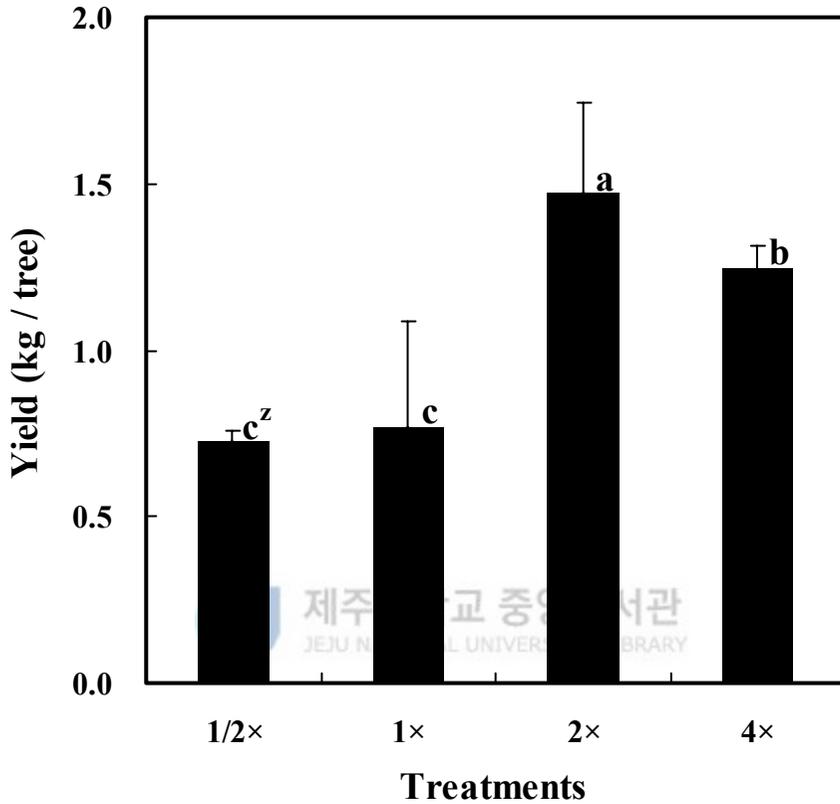


Fig. 9. Total yield of Shiranuhi mandarin fruit cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture.

1/2× : half strength of the standard solution, 1× : standard solution, 2× : 2 times of standard solution, 4× : 4 times of standard solution.

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

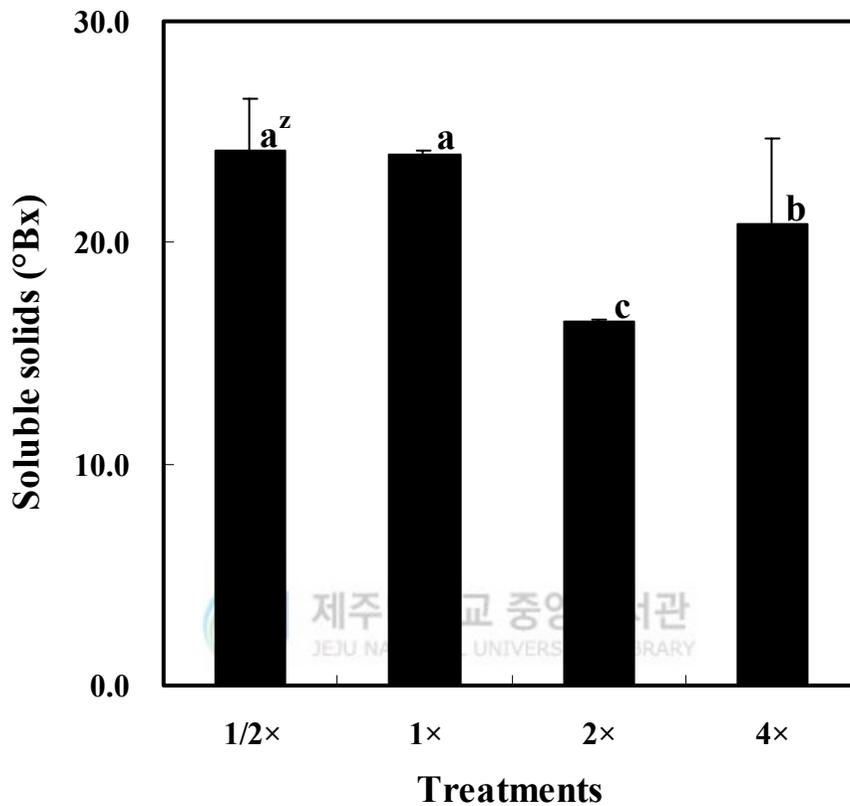


Fig. 10. Soluble solids content in Shiranuhi mandarin fruit cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture.

1/2× : half strength of the standard solution, 1× : standard solution, 2× : 2 times of standard solution, 4× : 4 times of standard solution.

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

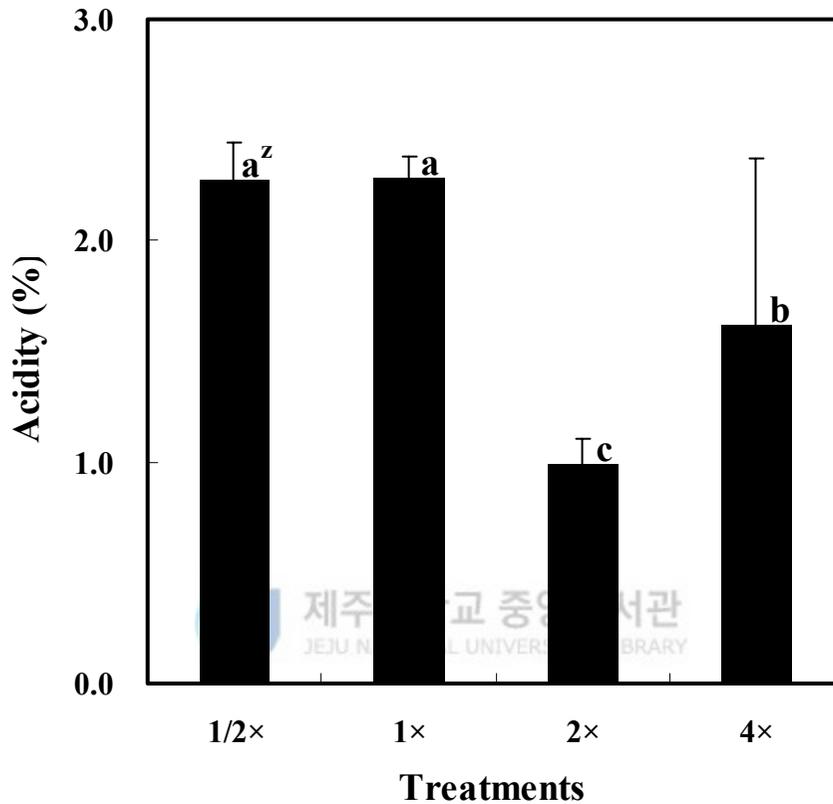


Fig. 11. Acid content in Shiranuhi mandarin fruit cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture.

1/2× : half strength of the standard solution, 1× : standard solution, 2× : 2 times of standard solution, 4× : 4 times of standard solution.

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

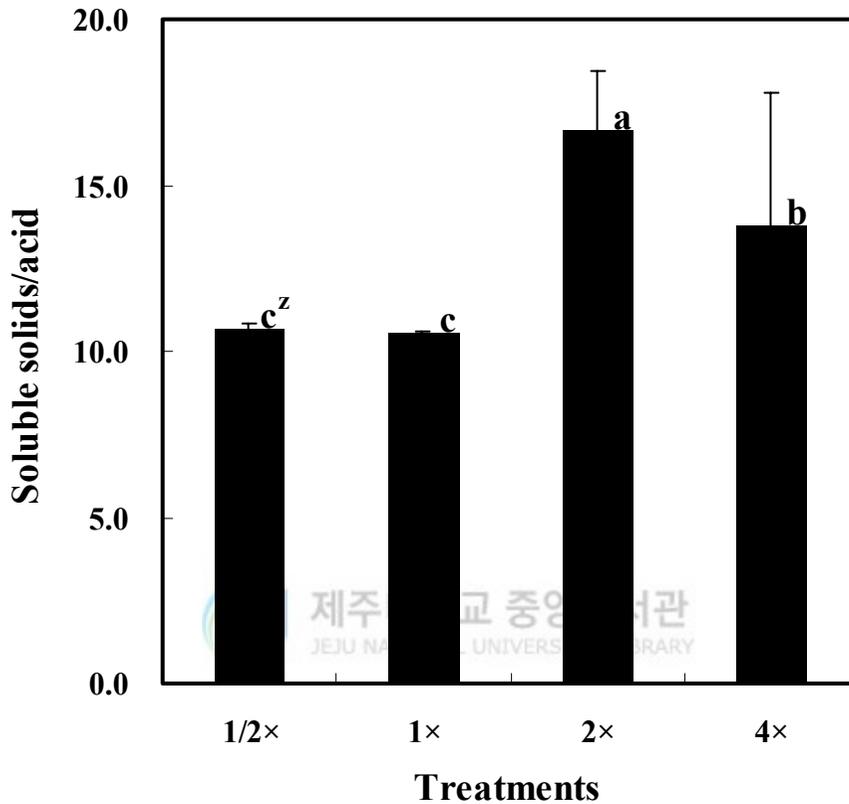


Fig. 12. Ratio of soluble solids to acids in Shiranuhi mandarin fruit cultured with the different concentration of culture solution in the hydroponic culture.

1/2× : half strength of the standard solution, 1× : standard solution, 2× : 2 times of standard solution, 4× : 4 times of standard solution.

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at P = 0.05.

3. 다량원소 결핍 증상 및 결핍의 회복

1) 질소

(1) 질소 결핍 증상

질소 결핍시 부지화 감귤나무의 춘엽(春葉)과 하엽(夏葉)에 발생한 결핍 증상과 질소 함량을 조사한 결과는 Photo 1에 나타내었다.

질소 결핍은 결핍 유도 후 40일경부터 육안으로 관찰할 수 있었으며, 초기 증상은 엽색이 연한 녹색으로 변하는 특징을 지녔다. 그 후 50일경에 춘엽에서 먼저 엽맥과 중륜(中肋)에 황변 현상이 나타났으며, 그 증상은 시간이 경과할수록 엽 전체로 확대되었고 최종적으로 낙엽 되었다. 이러한 결핍 증상은 온주밀감과 오렌지에 나타나는 결과와 비슷하였다(Chapman, 1967 ; Smith, 1969 ; Weir와 Creswell, 1993 ; Wutscher와 Smith, 1993 ; Stephen과 Tucker, 2001 ; 한, 2006). 결핍된 춘엽 중 질소 함량은 1.30%이었고, 정상적인 엽 중 질소 함량은 2.85%이었다. 또한, 하엽의 경우도 질소 결핍시 연한 녹색으로 변화하기 시작하였으며, 그 질소 함량은 1.41%로 정상적인 엽 중 질소 함량인 3.15%와는 큰 차이를 보였다.

온주 밀감나무와 오렌지 나무의 경우 엽 중 적정 질소 함량은 2.5~2.8%와 2.2~2.7% 범위였고, 2.5%이하와 0.6~1.9%범위 일 때는 결핍이라고 하였는데(Chapman, 1967 ; Bennett, 1993), 부지화 감귤나무의 경우도 비슷한 함량 일 때 결핍 증상이 나타났다.

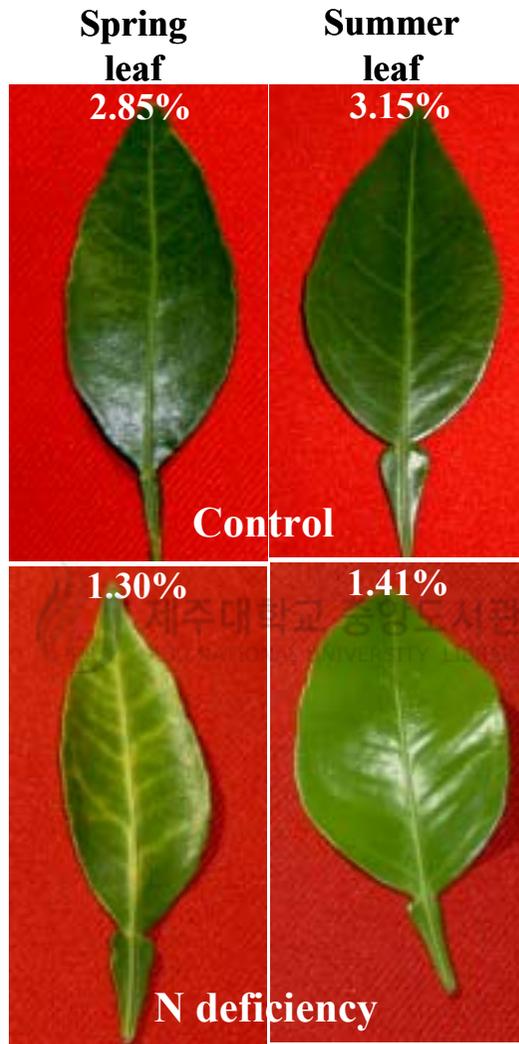


Photo 1. N deficiency symptom and N contents in the leaves of Shiranuhi mandarin tree cultured for 52 days under the absence of N in the culture solution (Spring leaf : 6 months old, Summer leaf : 3 months old).

(2) 생체중 증가량과 물 흡수량

질소 결핍이 부지화 감귤나무의 생체중 증가량 및 물의 흡수량에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 13과 같다.

대조구의 생체중 증가량은 주로 영양 성장을 하는 시기인 7월에서 9월 사이에 증가하였으나, 10월부터 감소한 이유는 과실 부피성장이 멈추고 당 축적이 시작되어 생체중의 증가량이 점점 적어졌기 때문이라고 사료된다. 한편, 질소 결제구는 시간이 경과할수록 결핍 증상이 심해짐에 따라 대조구의 양상과는 달리 영양생장과 과일성장시기에 관계없이 그 증가량은 점점 감소하였다. 따라서, 삼요소 중 질소는 식물의 성장에 가장 큰 영향을 주는 원소이며 요구량도 가장 크다고 알려진 것처럼 부지화의 경우도 질소 결제는 수체의 성장뿐만 아니라 과일의 성장에 가장 큰 영향을 줄 것으로 사료된다.

대조구의 물 흡수량은 생체중 증가량의 변화와 밀접한 관계를 보였는데, 7월과 9월 사이에 증가하였고 10월 이후에는 감소하였다. 질소 결제구는 7월에서 10월까지 일정하게 유지한 것은 질소의 공급 제한으로 수체의 영양생장 및 과일생장이 거의 일어나지 않았기 때문으로 사료된다.

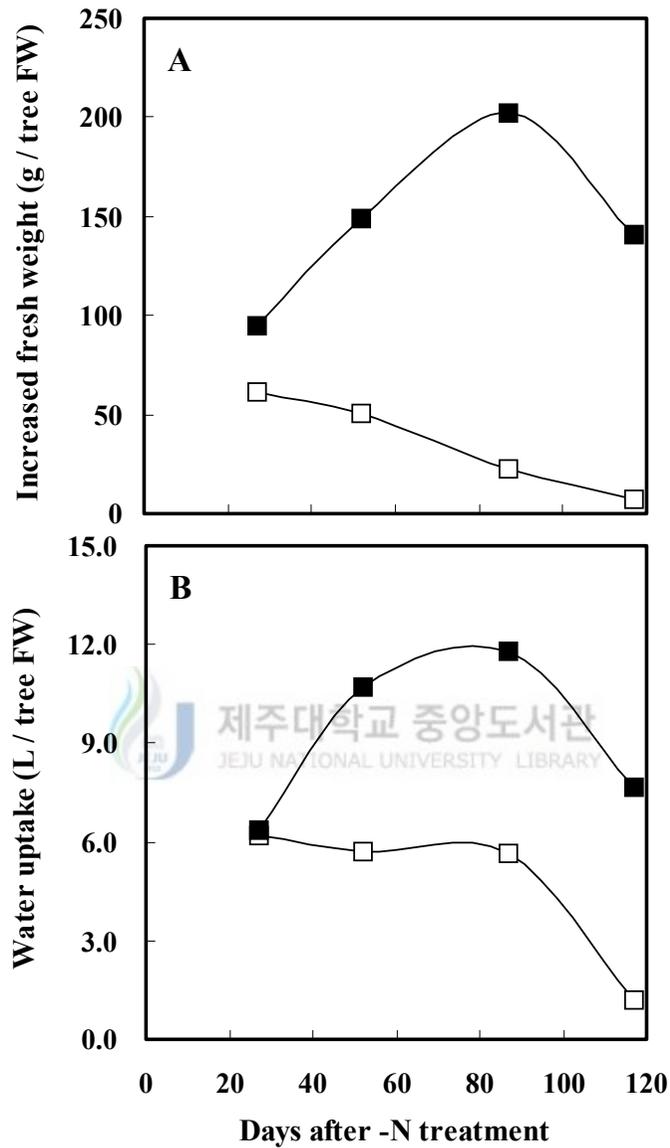


Fig. 13. Changes of fresh weight (A) and water uptake (B) of Shiranuhi mandarin tree cultured for 52 days under the absence or the presence of N in the culture solution. ■ : Control (Continual supply of the standard culture solution), □ : C-N (N absent treatment for maintaining the deficiency).

(3) 엽록소 SPAD 값

질소 결핍이 부지화 엽의 엽록소 SPAD 값에 미치는 영향을 조사한 결과는 Fig. 14와 같다.

대조구의 경우 이미 성엽으로 발달된 춘엽의 엽록소 SPAD 값은 일정한 반면에, 하엽의 그 값은 엽의 성장과 함께 증가하였다. 질소 결제 직후 춘엽의 엽록소 SPAD 값은 80으로 대조구와 비슷한 값을 보였으나, 결제 처리 후 약 50일 경과하여 결핍 증상이 육안으로 확인될 때 엽록소 SPAD 값은 급격히 감소하여 20으로 낮아졌다. 그리고 하엽은 질소 결제 처리 전 20일 경에 발생하여 완전한 성엽이 아니었기 때문에 그 엽록소 SPAD 값은 춘엽의 대조구에 비해 적은 값을 보였으며, 육안으로 질소 결핍 증상을 확인할 수 없었으나 엽록소 SPAD 값은 서서히 감소하는 것으로 보아 결핍이 진행되고 있음을 확인할 수 있었다.

질소 결핍은 엽록소 합성을 저해함으로써 엽을 황화시켜 낙엽을 조장시키므로(Bennett, 1993), 엽록소와 질소 함량 간에는 상호 상관관계를 갖게 된다(한, 1997 ; Rodriguez와 Miller, 2000 ; Kim 등 2002). 부지화 감귤나무에서도 질소 결핍이 진행될수록 SPAD로 나타낸 엽록소양이 점점 감소하는 것으로 보아 엽록소 SPAD 값은 부지화 감귤 수체의 질소영양상태를 잘 반영하고 있다고 생각된다.

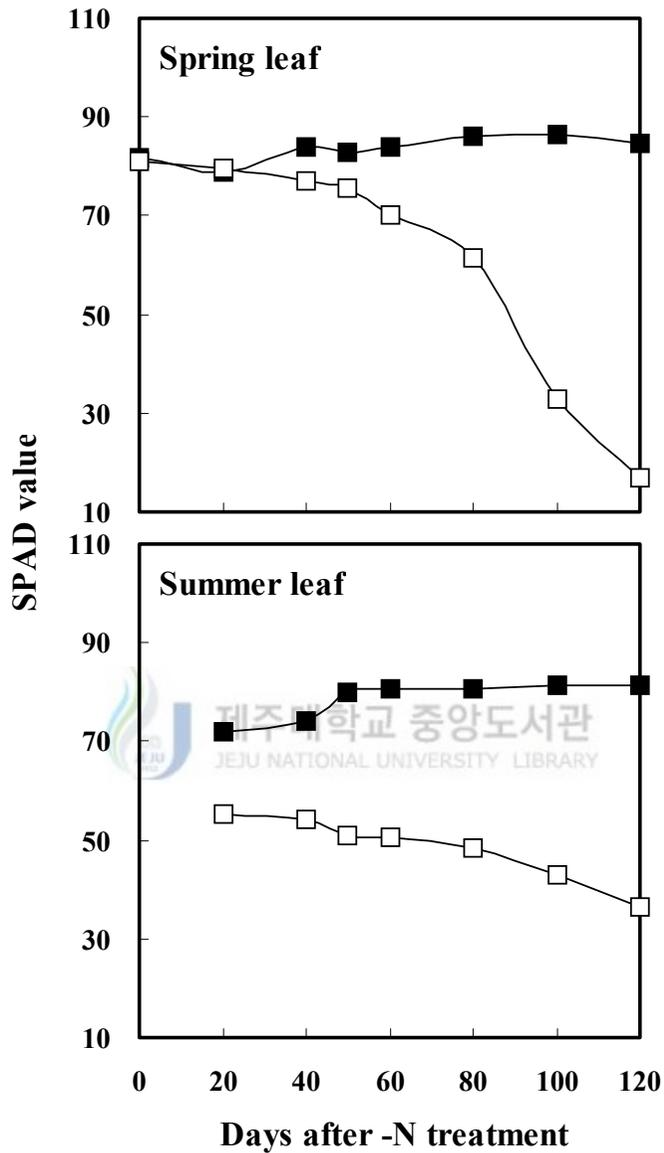


Fig. 14. Changes of SPAD value in the spring and summer leaves from Shiranuhi mandarin tree cultured for 52 days under the absence of N in the culture solution. ■ : Control (Continual supply of the standard culture solution), □ : C-N (N absent treatment for maintaining the deficiency).

(4) 질소 결핍 증상의 회복

엽 중 질소 결핍을 회복시키기 위하여 질소의 엽면시비와 뿌리에 의한 공급방법을 비교한 결과는 Fig. 15와 같다.

대조구의 엽 중 질소 함량은 점차 증가하였고, 질소 결제구는 반대로 감소하였다. 질소 결제구에서 결핍이 현격히 진행된 경우에 춘엽과 하엽 중 질소 함량은 1.30% 정도까지 낮아졌다. 결핍 증상은 춘엽에서 먼저 나타나기 시작하였는데, 이러한 것은 질소가 결핍될 경우 성엽(成葉)이나 구엽의 질소가 신엽으로 이동하기 되기 때문에 구엽이나 성엽에서 먼저 결핍 증상이 발생되기 때문이다(Embleton 등, 1963 ; Chapman, 1967 ; Smith, 1969 ; Wutscher와 Smith, 1993 ; Marschner, 1995).

초기 질소 결핍 시 0.5% 요소 엽면시비나 대조구 조성의 표준 영양액을 뿌리에 공급하여 결핍을 회복시켰을 경우 춘엽 중 질소 함량은 신속히 증가되어 10일 후에 대조구와 같은 수준으로 회복되었으나, 하엽은 서서히 증가되었다. 질소 결핍의 회복속도는 엽면시비보다는 뿌리에 질소를 공급한 경우에 더 빨랐다. 토양에 시비한 질산 칼슘 비료는 15일 내에 엽 중 질소 함량을 증가시킬 만큼 질소의 흡수는 신속하며, 일반적으로 질소를 토양에 시비할 경우보다 엽면시비를 했을 경우에 훨씬 더 빨리 흡수된다고 알려져 있다(Hilgeman, 1941). 특히, 네블 오렌지에서 0.5% 요소를 엽면시비 할 경우 시비한 요소의 70~80%가 30시간 내에 흡수하며, 온주감귤에서도 48시간 내에 그 만큼 흡수할 수 있을 정도로 요소의 엽면 흡수율은 아주 빠르다고 하였다(Impey와 Jones, 1960; 오, 1997). 그러나 본 연구 결과에서 뿌리를 통한 양분 공급에 의한 질소 결핍 회복이 엽면시비보다 빠른 것은 토양과는 달리 수경재배법은 뿌리를 통한 양분공급이 토양에서 보다 더 적극적으로 이루어 질 수 있기 때문이라고 생각된다.

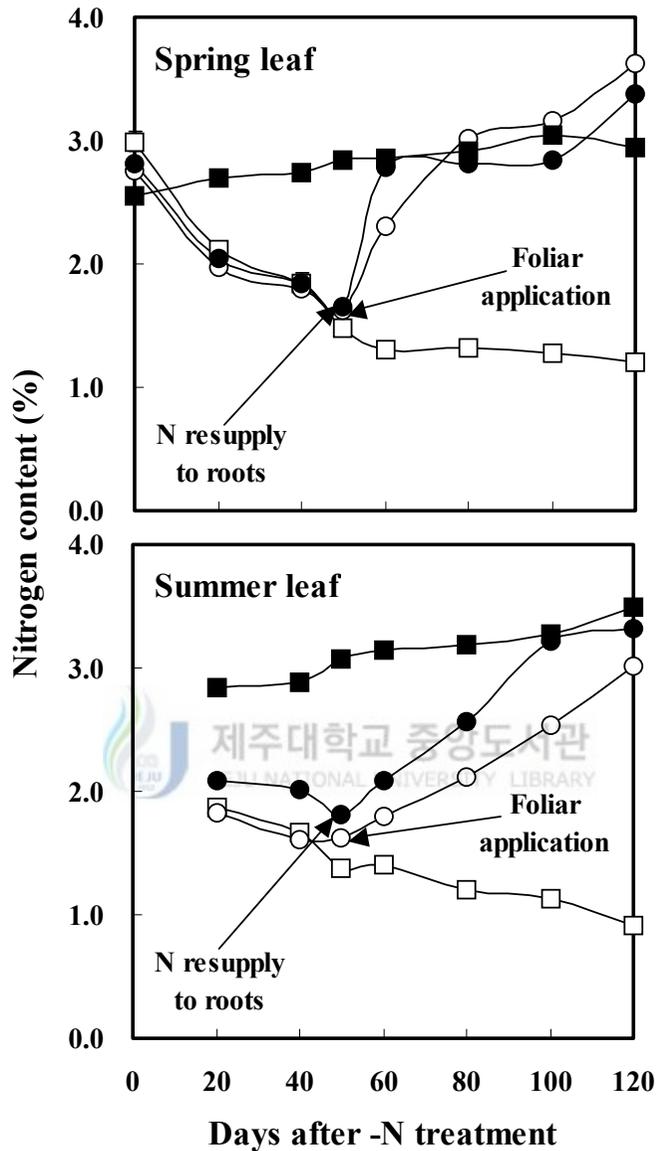


Fig. 15. Comparisons of the foliar application with 0.5% urea solution and the resupply of standard culture solution to the roots for the purpose of N deficiency recovery after N deficiency induction for 52 days in the hydroponic culture. ■ : Control (Continual supply of the standard culture solution), □ : C-N (N absent treatment for maintaining the deficiency), ○ : F+N (Foliar application for N deficiency recovery), ● : R+N (Resupply of the standard culture solution to the roots for N deficiency recovery).

(5) 엽 중 무기성분 함량

대조구와 질소 결제구로부터 채취된 엽 중 무기성분 함량을 분석한 결과는 Table 7과 같다.

질소 결제구의 춘엽 또는 하엽 중의 P, Mg 함량은 대조구에 비해 높았으며, Ca 함량은 낮았다. 또한, 질소 결제구의 K와 미량원소 함량은 춘엽과 하엽 모두 대조구와 차이가 없었다.

질소는 과수에서 다른 무기 성분들의 흡수에 영향을 미친다고 알려져 있으며(Smith, 1962b), 인산 또는 칼륨과는 길항작용 그리고 칼슘 또는 마그네슘 사이에는 상조작용을 한다고 하였다. 특히, 질소와 인산은 아주 밀접한 관계가 있기 때문에 질소 시비율에 따라 인산 흡수량이 민감하게 반응한다고 보고되었는데(Anderssen, 1937 ; Chapman과 Rayner, 1951 ; Haass, 1947 ; Heyman-Hershberg, 1952 ; Smith 등, 1954), 부지화 감귤나무의 질소 결제시 춘엽과 하엽 중 인산 함량은 질소와의 길항작용 때문에 높아진 것으로 추측되나 칼슘과는 상조작용 그리고 마그네슘과는 길항작용을 보인 것은 다른 과수와는 반대의 경향인데, 과연 부지화의 영양특성 때문 인지는 확인 할 수가 없었다.

Table 7. Mineral contents in the spring and summer leaves from Shiranuhi mandarin tree cultured for 120 days under the presence or the absence of N in culture solution

Leaf part	Treatment	T-N	P	K	Ca	Mg	Zn	B	Mn	Fe	Cu
		---		%		---	---	mg/kg DW		---	
Spring leaf	Control ^a	2.94	0.13	1.84	2.29	0.17	18.6	50.1	43.6	38.4	2.89
	C-N ^b	1.21	0.15	2.01	1.54	0.19	17.3	62.6	35.0	27.0	2.96
Summer leaf	Control	3.49	0.20	2.29	1.91	0.23	18.2	56.6	48.1	38.5	3.45
	C-N	0.92	0.30	1.82	1.18	0.29	10.9	40.2	30.0	20.0	1.60

^aContinual supply of the standard culture solution, ^bN absent treatment for inducing and maintaining N deficiency for 120 days.

2) 인산

(1) 인산 결핍 증상

인산 결제시 부지화 감귤나무의 엽 중 발생된 결핍 증상과 인산 함량을 조사한 결과는 Photo 2와 같다.

인산 결핍은 결핍 유도 후 300일경에 육안으로 관찰되었으며, 그 초기 증상은 엽색이 암록색으로 변하는 특징을 보였다. 그 후 330일경에는 구엽(12개월령)과 성엽(15개월령)에서 암록색이 진전되어 자주색을 띠는 현상을 나타냈다. 이러한 결핍 증상은 온주밀감과 오렌지에 나타나는 경향과 비슷하였다(Chapman, 1967 ; Smith, 1969 ; Weir와 Creswell, 1993 ; Wutscher와 Smith, 1993 ; Stephen과 Tucker, 2001). 인산이 결핍된 구엽과 성엽 중 인산 함량은 각각 0.06%였으며, 정상적인 엽은 각각 0.27%와 0.13%이었다. 그러나 신엽(3개월령)의 결핍 증상은 확인할 수 없었으며, 엽 중 인산 함량은 0.16%이었고, 정상적인 인산 처리구의 인산 함량은 0.46%이었다.

온주 밀감나무와 오렌지 나무의 경우 엽 중 적정 인산 함량은 각각 0.15~0.17%와 0.12~0.18% 범위이며, 0.10% 와 0.07% 이하 되면 결핍 증상이 나타난다고 알려져 있는데(Chapman, 1967 ; Bennett, 1993) 부지화 감귤나무인 경우도 비슷한 함량일 때 결핍 증상을 나타냈다.

일반적으로 과수에서 인산 결핍 증상은 거의 나타나지 않는다고 알려져 있으며(Jones 등, 1968), 온주 밀감나무를 다년간 인산을 시용하지 않고 재배한 경우에도 관찰할 수 없었다고 하였다(한, 2006). 하지만 수경재배는 토양과는 달리 인산 공급의 제한을 확실히 할 수 있기 때문에 인위적인 인산 결핍 유도가 가능하였고 결핍 증상이 나타난 것이라 생각된다.

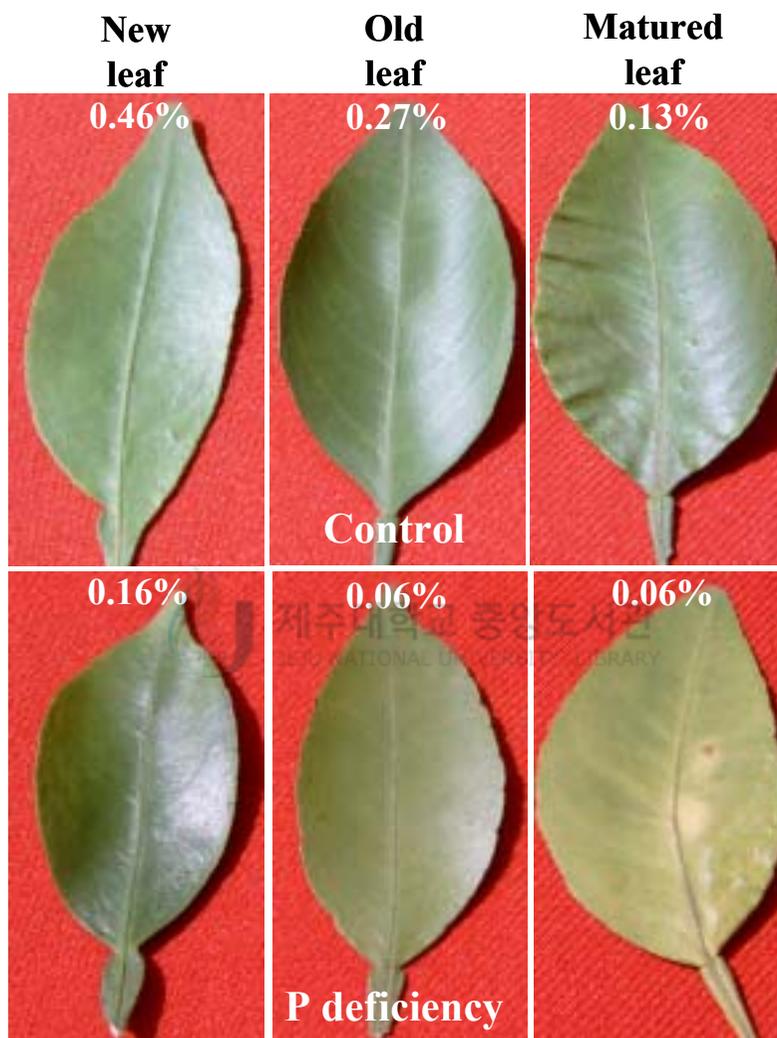


Photo 2. P deficiency symptom and P contents in the leaves of Shiranuhi mandarin tree cultured for 330 days under the absence of P in the culture solution (New leaf : 3 months old, Old leaf : 12 months old, Matured leaf : 15 months old).

(2) 인산 결핍 증상의 회복

엽 중 인산 결핍에 대한 엽면시비와 뿌리공급 회복 처리의 효과를 조사한 결과는 Table 8과 같다.

대조구의 엽 중 인산 함량은 신엽인 경우 0.36%이었고, 구엽은 0.26%였으나, 인산 결핍 발생했을 때 그 함량은 각각 0.06%와 0.05%로 떨어졌다. 초기 인산 결핍 시 1.0% NaH_2PO_4 를 엽면시비하거나 대조구와 같이 인산을 정상적으로 함유한 표준 영양액을 뿌리에 공급하게 되면 신엽 중 인산 함량은 엽면시비한 경우에는 0.30%로 그리고 표준 영양액을 뿌리로 공급한 경우에는 0.13%로 높아졌고, 구엽의 인산 함량도 0.38%와 0.18%로 각각 회복되는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 엽면시비를 처리하였을 경우 엽 중에 대조구와 비슷한 인산 함량을 보인 것은 인산인 경우 엽면시비가 뿌리로 공급한 경우보다 더 많은 인산을 흡수할 수 있음을 나타낸 결과이며, 인산 결핍 회복속도도 신엽보다는 구엽에서 빨랐다. 이는 감귤나무 토양재배에서 인산을 엽면시비한 후 구엽 중 인산 함량은 무인산구보다 약간 높았고, 과린산석회 처리구보다도 높은 경향이었던 보고와 비슷한 결과였다(石田, 1971).

Table 8. Comparisons of the foliar application with 1.0% NaH₂PO₄ solution and the resupply of standard culture solution to the roots for the purpose of P deficiency recovery after P deficiency induction for 330 days in the hydroponic culture

Treatment	Content of phosphorus (%)	
	New leaf	Old leaf
Control ^a	0.36	0.26
C-P ^b	0.06	0.05
R+P ^c	0.13	0.18
F+P ^d	0.30	0.38

^aContinual supply of the standard culture solution, ^bP absent treatment for maintaining the deficiency, ^cResupply of the standard culture solution to the roots for P deficiency recovery, ^dFoliar application for P deficiency recovery.

(3) 엽 중 무기성분 함량

대조구와 인산 결제구로부터 채취한 엽 중 무기성분 함량을 분석한 결과는 Table 9와 같다.

인산 결제구는 대조구에 비해 신엽의 Ca과 Mg 함량은 높았으나 N와 K 함량은 낮았고, 구엽의 Mg 함량은 높았으나 N, K 그리고 Ca 함량은 낮았다.

인산은 질소 또는 칼륨과 길항작용을 하며, 마그네슘과는 상조작용을 한다고 알려져 있고(Chapman, 1951 ; Embleton 등, 1952), 특히 감귤류에서 인산이 결핍되면 질소의 축적이 정상적인 엽보다 두 배 정도 높다고 하였다(Bar-Akiva 등, 1968 ; Embleton 등, 1952 ; Chapman과 Raynor, 1951 ; Achituv와 Bar-Akiva, 1973). 부지화 감귤나무에서는 신엽과 구엽 모두 질소와 칼륨 함량이 낮았고, 마그네슘 함량은 높게 나타나 다른 감귤류와는 반대의 결과를 보였다. 그리고 인산은 Fe, Zn 그리고 Cu과 같은 미량원소의 함량을 낮춰 Fe 백화현상(Chapman 등, 1939), Zn 결핍(Bryan, 1940 ; Chapman 등, 1939 ; Reuther and Crawford, 1936 ; West, 1938)과 그리고 Cu 결핍(Bryan, 1940 ; Forsee와 Neller, 1944 ; Young와 Forsee, 1949)에 영향을 미친다고 하였으나, 본 연구에서는 미량원소의 함량에 별다른 영향을 주지 않았다.

Table 9. Mineral contents in the new and old leaves from Shiranuhi mandarin tree cultured for 370 days under the presence or the absence of P in culture solution

Leaf part	Treatment	T-N	P	K	Ca	Mg	Zn	B	Mn	Fe	Cu
		---		%		---	---	mg/kg DW			---
New leaf	Control ^a	2.38	0.35	2.75	1.69	0.33	46.1	329	50.0	203	8.27
	C-P ^b	1.85	0.16	1.62	3.40	0.38	43.1	348	97.8	211	4.60
Old leaf	Control	2.25	0.21	2.14	2.89	0.27	49.2	478	120	282	5.47
	C-P	1.92	0.06	2.03	1.27	0.31	30.6	381	47.2	186	7.40

^aContinual supply of the standard culture solution, ^bP absent treatment for inducing and maintaining P deficiency for 370 days.

3) 칼륨

(1) 칼륨 결핍 증상

칼륨 결제시 부지화 감귤나무의 엽 중 발생된 결핍 증상과 칼륨 함량을 조사한 결과는 Photo 3과 같다.

칼륨 결핍은 결핍 유도 후 300일경부터 육안으로 관찰되었으며, 그 초기증상은 엽선단 부분이 황화되는 특징을 보였다. 그 후 330일경에 구엽(12개월령)과 성엽(15개월령)에서 황화가 확대되는 현상이 나타났다. 이러한 결핍 증상은 온주밀감과 오렌지에 나타나는 경향과 거의 유사하였다(Chapman, 1967 ; Smith, 1969 ; Weir와 Creswell, 1993 ; Wutscher와 Smith, 1993 ; Stephen과 Tucker, 2001 ; 한, 2006). 칼륨이 결핍된 구엽과 성엽 중의 칼륨 함량은 각각 0.23%와 0.31%였으며, 정상적인 엽은 각각 2.61%와 2.33%이었다. 그러나 신엽(3개월령)은 결핍 증상을 확인할 수가 없었으며, 칼륨 함량은 0.56%이었고, 정상적인 엽은 3.83%이었다.

온주 밀감나무와 오렌지 나무의 경우 엽 중 적정 칼륨 함량은 0.8~1.7%와 1.0~1.78% 범위였고, 0.8%이하와 0.15~0.30%범위 일 때는 결핍이라고 하였다(Chapman, 1967 ; Bennett, 1993). 부지화 감귤나무인 경우도 비슷한 함량 일 때 결핍 증상이 나타났으나 신엽의 경우 결핍 증상이 나타나지 않은 것은 이동성이 큰 칼륨이 성엽 또는 구엽에서 신엽으로 이동되기 때문이라 생각된다.

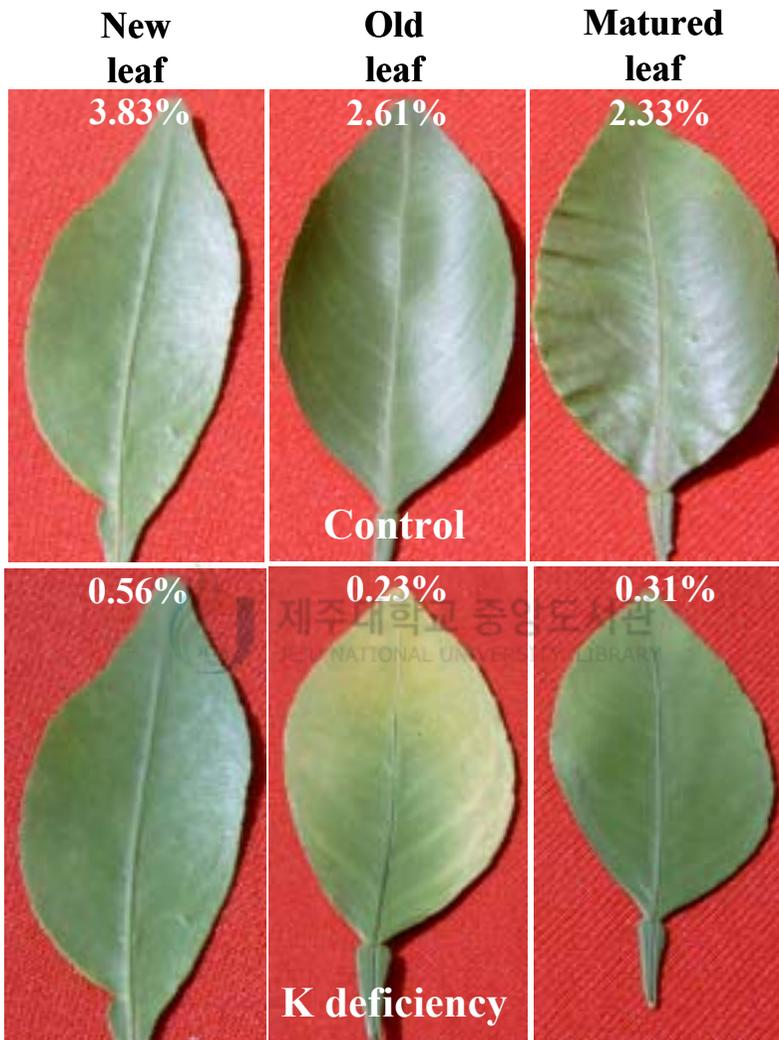


Photo 3. K deficiency symptom and K contents in the leaves of Shiranuhi mandarin tree cultured for 330 days under the absence of K in the culture solution (New leaf : 3 months old, Old leaf : 12 months old, Matured leaf : 15 months old).

(2) 칼륨 결핍 증상의 회복

엽 중 칼륨 결핍에 대한 엽면시비와 뿌리공급 회복 처리의 효과를 조사한 결과는 Table 10과 같다.

대조구의 엽 중 칼륨 함량은 신엽인 경우 3.28%이었고, 구엽은 2.40%였으나, 칼륨 결핍을 계속 유도한 경우는 각각 0.44%와 0.33%로 떨어졌다. 초기 칼륨 결핍 시 1.0% KCl를 엽면시비하거나 대조구와 같이 칼륨을 정상적으로 함유한 표준 영양액을 뿌리에 공급하였을 경우, 신엽 중 칼륨 함량은 엽면시비를 한 경우에는 1.14%로 그리고 표준 영양액을 뿌리로 공급한 경우에는 0.56%로 높아졌고 구엽은 1.49%와 0.72%로 결핍이 회복되는 것을 알 수가 있었다. 특히, 엽면시비를 처리하였을 경우에 대조구보다 엽 중 칼륨 함량이 낮았으나 뿌리에 공급한 것 보다 더 빠르게 엽의 결핍 증상이 회복되었으며 신엽보다 구엽이 더 빨랐다. 이처럼 엽면시비 시 엽 중 칼륨 함량이 낮은 것은 총 시비량이 영양액을 뿌리로 공급한 양보다 적었기 때문이라고 생각되거나 가시적인 결핍 증상을 해결할 수 있었다.

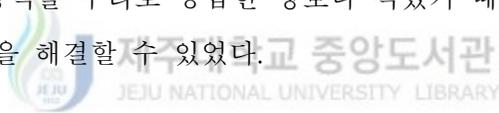


Table 10. Comparisons of the foliar application with 1.0% KCl solution and the resupply of standard culture solution to the roots for the purpose of K deficiency recovery after K deficiency induction for 330 days in the hydroponic culture

Treatment	Content of potassium (%)	
	New leaf	Old leaf
Control ^a	3.28	2.40
C-K ^b	0.44	0.33
R+K ^c	0.56	0.72
F+K ^d	1.14	1.49

^aContinual supply of the standard culture solution, ^bK absent treatment for maintaining the deficiency, ^cResupply of the standard culture solution to the roots for K deficiency recovery, ^dFoliar application for K deficiency recovery.

(3) 엽 중 무기성분 함량

대조구와 칼륨 결제구로부터 채집된 엽 중 무기성분 함량을 분석한 결과는 Table 11과 같다.

칼륨 결제구는 대조구에 비해 신엽의 Mg 함량이 높았으나, N, P와 Ca 함량은 낮았다. 또한, 구엽의 다량원소 함량인 경우 칼륨 결제구가 대조구에 비해 높았으며, 미량원소 중 Mn과 Fe 함량은 신엽과 구엽 모두 칼륨 결제구에서 낮았고, 그 외 다른 미량원소들은 처리 간에 차이가 없었다.

칼륨은 암모니아태 질소, 칼슘 또는 마그네슘과 길항작용을 하며, 망간과는 상호작용을 한다고 알려졌으며(Chapman, 1951 ; Embleton 등, 1952), 특히 칼슘과 길항작용이 아주 크다고 하였다(Smith, 1966 ; Stephen과 Tucker, 2001). 감귤나무 가리영양진단에서 K 처리수준을 달리하여 공급한 후 엽 분석 결과 N, P, Mg 함량은 K 처리수준이 높아짐에 따라 낮아졌고, Ca 함량은 변화가 없었다고 하였는데(유 등, 1994), 부지화 엽에서는 길항작용으로 Ca과 Mg 함량이 높아졌다. 말렌시아 오렌지 나무에서도 K 처리수준을 달리하여 시비한 후 엽 분석 결과 다량원소 함량인 경우는 본 실험 결과와 비슷한 경향을 보였다(Smith 등, 1954).

Table 11. Mineral contents in the new and old leaves from Shiranuhi mandarin tree cultured for 370 days under the presence or the absence of K in culture solution

Leaf part	Treatment	T-N	P	K	Ca	Mg	Zn	B	Mn	Fe	Cu
		---		%		---	---		mg/kg DW	---	
New leaf	Control ^a	2.38	0.35	2.75	1.69	0.33	46.1	329	50.0	203	8.27
	C-K ^b	2.29	0.31	0.56	1.49	0.35	41.6	505	28.0	133	7.47
Old leaf	Control	2.25	0.21	2.14	2.89	0.27	49.2	478	120	282	5.47
	C-K	2.42	0.29	0.23	3.60	0.62	50.7	349	80.3	152	5.30

^aContinual supply of the standard culture solution, ^bK absent treatment for inducing and maintaining K deficiency for 370 days.

4) 칼슘

(1) 칼슘 결핍 증상

칼슘 결제시 부지화 감귤나무의 엽 중 발생한 결핍 증상과 칼슘 함량을 조사한 결과는 Photo 4와 같다.

칼슘이 결핍되었을 때 초기에는 엽선단 부분이 타는 특징을 나타냈으며, 그 후 추엽(秋葉) 선단 부분에 붉은 반점이 발생되고 결핍이 더욱더 진행된 엽은 낙엽이 되었다. 이러한 결핍 증상은 온주밀감과 오렌지에 나타나는 결과와 비슷하였다(Chapman, 1967 ; Smith, 1969 ; Weir와 Creswell, 1993 ; Wutscher와 Smith, 1993 ; Stephen과 Tucker, 2001 ; 한, 2006). 칼슘이 결핍된 추엽 중 칼슘 함량은 0.12%로 정상적인 엽의 0.54%보다 훨씬 적었다. 이는 칼슘이 수체내 재이동이 잘 이루어지지 않는다는 것을 나타낸 결과이다.

온주 밀감나무와 오렌지 나무의 경우 엽 중 적정 칼슘 함량은 2.6~5.0%와 3.0~6.0% 범위였고, 2.6%와 2.0%이하 일 때는 결핍이라고 하였는데(Chapman, 1967 ; Bennett, 1993), 부지화 감귤나무의 추엽 중 칼슘 함량은 이들 범위보다 훨씬 낮은 0.12%일 때 결핍 증상이 나타났다. 이러한 것은 감귤나무의 엽령(葉齡)에 따라 칼슘 함량이 증가한다고 하였는데(Wutscher와 Smith, 1993), 부지화 감귤나무의 엽령은 1~2개월 정도로 정상적인 성엽보다 그 엽령이 훨씬 적었기 때문에 결핍 시 그 함량도 낮아진 것으로 사료된다.

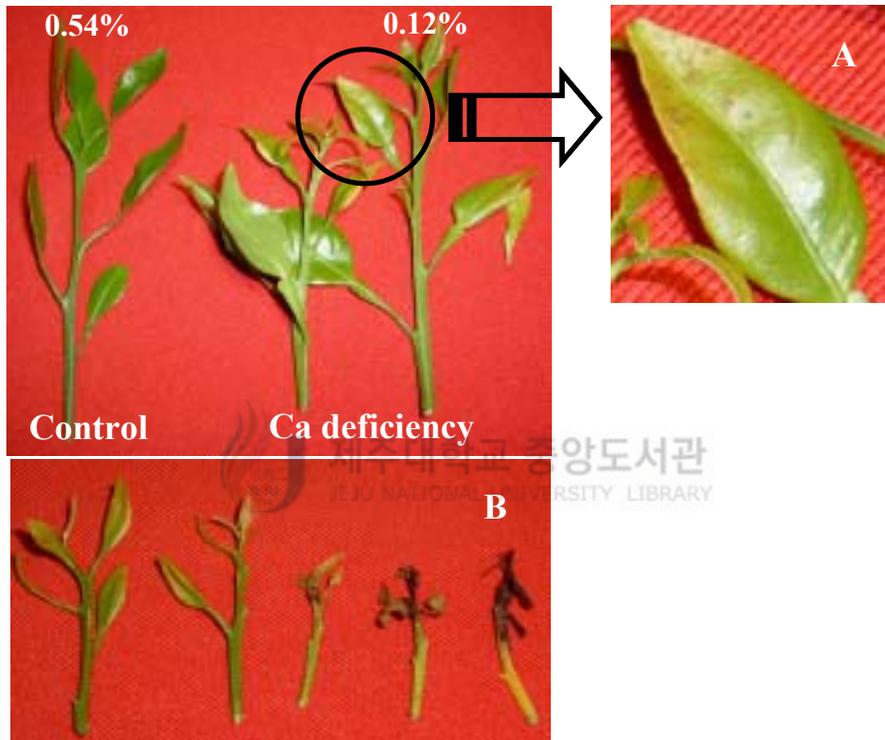


Photo 4. Ca deficiency symptom and Ca contents in the autumn flush leaves of Shiranuhi mandarin tree cultured for 60 days under the absence of Ca in the culture solution. A: Red-dot on leaf tip was observed, B: Leaves burned and finally fell down.

(2) 칼슘 결핍 증상의 회복

엽 중 칼슘 결핍에 대한 엽면시비와 뿌리공급에 의한 회복 처리의 효과를 조사한 결과는 Fig. 16과 같다.

대조구의 춘엽 중 칼슘 함량은 시간이 경과함에 따라 크게 변화하지 않았으나, 하엽은 결핍 처리 후 40일경(8월 21일)에 현격히 감소하다가 다시 증가하였는데, 이는 8월 21일에 시료 채취에서 오차가 있었던 것으로 판단된다. 칼슘 결제구에서 춘엽 중의 칼슘 함량은 점차 감소하였고, 하엽은 결핍유도 초기부터 낮은 함량을 유지하였다. 결핍 처리 후 약 60일이 경과 되었을 때 춘엽과 하엽 중 칼슘 함량은 1.58%와 0.72%까지 낮아졌으나 결핍 증상은 육안으로 관찰할 수가 없었다. 이는 칼슘 함량이 1.5~7.0% 범위에서는 육안으로 관찰할 수 없는 잠재적인 결핍 상태를 의미하며, 관찰이 가능한 칼슘 결핍 함량은 1.0%이하라고 하였다(Wutscher와 Smith, 1993).

결핍 처리 약 60일 경과 후 엽 분석을 통하여 칼슘 함량이 낮았기 때문에 결핍 초기 단계라고 판단하였으며, 이때 1.2% CaCl_2 엽면시비를 하거나 칼슘을 정상적으로 함유한 표준 영양액을 뿌리에 공급하여 결핍을 회복시켰다. 그 결과 춘엽과 하엽 중의 칼슘 함량에는 그다지 큰 영향을 미치지 않았으며, 엽면시비를 한 경우에는 서서히 증가한 반면 뿌리를 통해 공급한 경우는 거의 변화가 없었다. 칼슘의 엽면시비 효과 여부는 많은 논쟁이 되어왔으나 염화칼슘을 사과에 엽면시비 했을 때 엽 또는 과실 중에 칼슘 함량을 높인 사례가 있었고(Bramlage 등, 1985), 칼슘의 흡수량은 그 제재별로도 흡수량이 차이를 보인다고 알려져 있으며 부지화 감귤에서 칼슘 화합물 종류에 따른 흡수율을 조사한 결과 염화칼슘은 질산칼슘에 비하여 약 6.5배정도 낮았다고 하였다(Song 등, 2006). 따라서 부지화의 칼슘 결핍 회복의 경우도 염화칼슘보다 질산칼슘을 사용한다면 더 효과적일 수 있다고 사료된다.

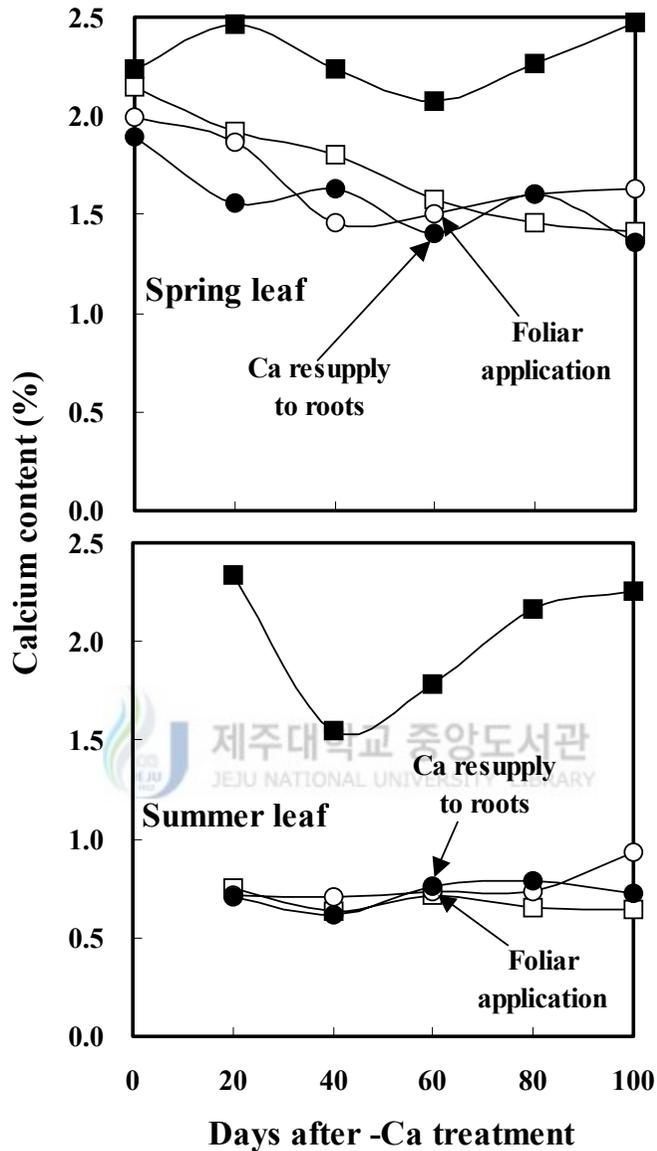


Fig. 16. Comparisons of the foliar application with 1% CaCl₂ solution and the resupply of standard culture solution to the roots for the purpose of Ca deficiency recovery after Ca deficiency induction for 60 days in the hydroponic culture. ■ : Control (Continual supply of the standard culture solution), □ : C-Ca (Ca absent treatment for maintaining the deficiency), ○ : F+Ca (Foliar application for Ca deficiency recovery), ● : R+Ca (Resupply of the standard culture solution to the roots for Ca deficiency recovery).

(3) 엽 중 무기성분 함량

대조구와 칼슘 결제구로부터 채집된 엽 중 무기성분 함량을 분석한 결과는 Table 12와 같다.

칼슘 결제구의 N, P, K, Mg의 함량은 춘엽과 하엽 모두 대조구보다 높았으며 미량원소 함량은 처리 간에 차이가 없었다.

칼슘은 NH₄, K, Mg 및 Na와 같은 양이온 원소들과 길항작용을 하는 것으로 잘 알려져 있다(Smith와 Rasmussen, 1959a). 감귤나무에서 칼슘을 인위적으로 결제시켜 수경재배 후 정상적인 영양액을 공급한 엽 중 무기성분 함량과 비교했을 때 대부분의 다량원소 함량은 낮았으나(Yokomizo, 1974), 토양에서 재배된 감귤나무인 경우 칼슘 결핍 증상이 나타난 엽과 정상적인 엽을 비교했을 때 결핍된 엽 중에 K와 Mg 함량은 높았다는 상반된 보고가 있었다(Spencer와 Koo, 1962). 이러한 것은 길항 또는 상조작용이 항상 일관되게 발생하지는 않고 다양한 요인에 의해 좌우될 수 있음을 시사하는 것이다.



Table 12. Mineral contents in the spring and summer leaves from Shiranuhi mandarin tree cultured for 100 days under the presence or the absence of Ca in culture solution

Leaf part	Treat-ment	T-N	P	K	Ca	Mg	Zn	B	Mn	Fe	Cu
		---		%		---	---	mg/kg DW			---
Spring leaf	Control ^a	2.92	0.12	1.92	2.48	0.25	17.8	48.6	48.6	40.6	3.38
	C-Ca ^b	3.27	0.14	2.42	1.41	0.28	17.3	62.6	35.0	27.0	2.96
Summer leaf	Control	3.19	0.16	2.23	2.26	0.24	15.0	38.5	52.0	40.0	3.16
	C-Ca	3.50	0.25	2.22	0.64	0.50	10.9	40.2	30.0	20.0	1.60

^aContinual supply of the standard culture solution, ^bCa absent treatment for inducing and maintaining Ca deficiency for 100 days.

5) 마그네슘

(1) 마그네슘 결핍 증상

마그네슘 결핍시 부지화 감귤나무의 엽 중 발생한 결핍 증상과 마그네슘 함량을 조사한 결과는 Photo 5에 나타내었다.

마그네슘 결핍의 초기 증상은 결핍 유도 후 300일경에 엽맥 사이 및 중륜(中肋)의 양측에 황변이 생기는 특징을 보였으며, 그 후 결핍이 진행되면 330일경에 구엽(12개월령)과 성엽(15개월령)에서 황변이 확대되어 역삼각형 모양을 띠는 현상을 나타냈다. 이러한 결핍 증상은 온주밀감과 오렌지에 나타나는 결과와 비슷하였다(Chapman, 1967 ; Smith, 1969 ; Weir와 Creswell, 1993 ; Wutscher와 Smith, 1993 ; Stephen과 Tucker, 2001 ; 한, 2006). 결핍된 구엽과 성엽 중의 마그네슘 함량은 각각 0.05%와 0.04%였으며, 정상적인 엽은 각각 0.38%와 0.30%이었다. 신엽(3개월령)은 결핍 증상을 확인할 수 없었으나, 마그네슘 결핍구의 엽 중 마그네슘 함량은 0.14%이었고, 대조구의 정상적인 엽은 0.43%이었다.

온주 밀감나무와 오렌지 나무의 경우 엽 중 적정 마그네슘 함량은 각각 0.19~0.5%와 0.3~0.6% 범위였고, 0.19%이하와 0.05~0.15%범위 일 때는 결핍이라고 하였는데(Chapman, 1967 ; Bennett, 1993), 부지화 감귤나무의 경우도 비슷한 함량일 때 결핍 증상을 나타냈다.

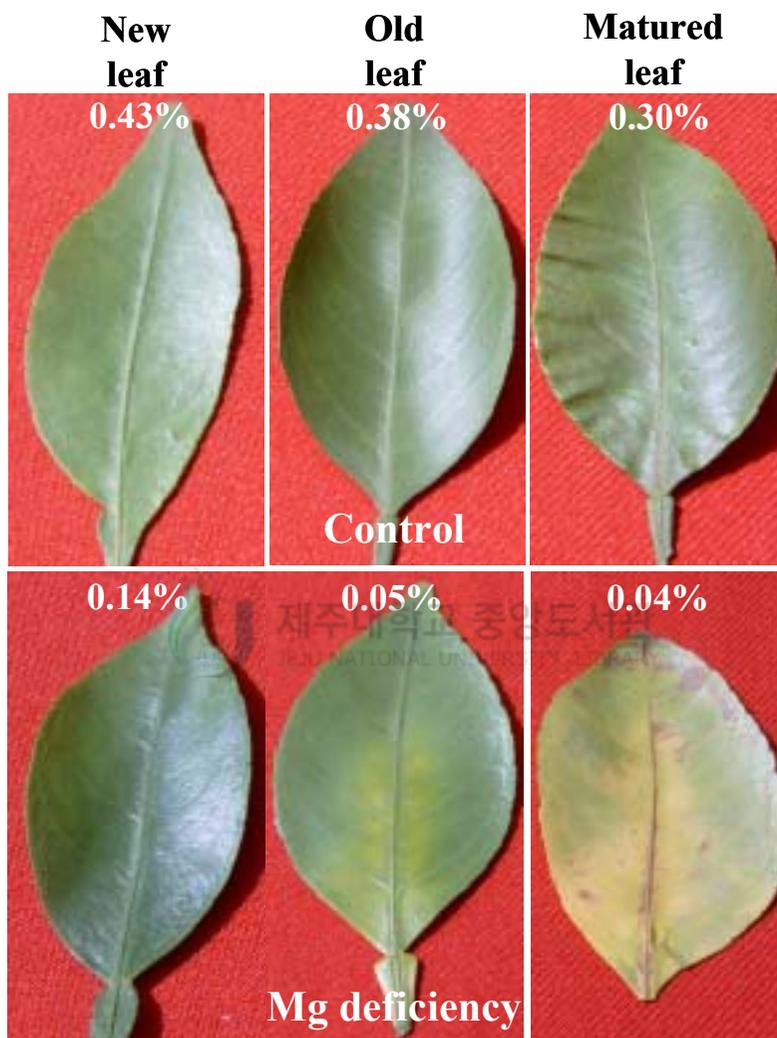


Photo 5. Mg deficiency symptom and Mg contents in the leaves of Shiranuhi mandarin tree cultured for 330 days in the absence of Mg in the culture solution (New leaf : 3 months old, Old leaf : 12 months old, Matured leaf : 15 months old).

(2) 마그네슘 결핍 증상의 회복

엽 중 마그네슘 결핍에 대한 엽면시비와 뿌리공급 회복 처리의 효과를 조사한 결과는 Table 13과 같다.

대조구의 엽 중 마그네슘 함량은 신엽인 경우 0.48%이었고, 구엽은 0.39%였으나, 마그네슘 결핍을 계속 지속시킨 경우 그 함량은 각각 0.09%와 0.06%이었다. 그리고 초기 마그네슘 결핍 시 2.0% $MgCl_2$ 를 엽면시비하거나 대조구와 같은 정상적인 Mg를 함유한 표준 영양액을 뿌리에 공급하였을 경우에 신엽 중 마그네슘 함량은 엽면시비의 경우에 0.20%이었고 표준영양액을 뿌리에 공급한 경우 0.17%로 높아졌고 구엽의 마그네슘 함량도 각각 0.19%와 0.05%로 결핍이 회복되는 것을 알 수 있었다. 특히, 엽면시비를 하였을 경우에 엽 중 마그네슘 함량이 대조구의 경우에 미치지 못하는 못하였으나 표준 영양액을 뿌리에 공급한 경우보다 더 빠르게 회복되었고 그 효과는 구엽보다는 신엽에서 더 빠른 경향이었다.

엽면시비에 의한 엽 중 마그네슘 함량은 대조구보다 낮은 것은 칼슘의 경우와 마찬가지로 마그네슘 제재, 처리양 및 처리횟수에 의해 좌우되기도 하지만 완전한 회복을 위해서는 좀 더 기간이 필요할 수 있으며, 또한 육안으로 결핍이 확인된 경우는 이미 결핍 정도가 많이 진행된 경우이므로 정상적인 수준까지 엽 중 마그네슘 함량의 회복은 다소 곤란할 수 있음을 암시하는 결과라고 사료된다.

Table 13. Comparisons of the foliar application with 2.0% MgCl₂ solution and the resupply of standard culture solution to the roots for the purpose of Mg deficiency recovery after Mg deficiency induction for 330 days in the hydroponic culture

Treatment	Content of magnesium (%)	
	New leaf	Old leaf
Control ^a	0.48	0.39
C-Mg ^b	0.09	0.06
R+Mg ^c	0.17	0.05
F+Mg ^d	0.20	0.19

^aContinual supply of the standard culture solution, ^bMg absent treatment for maintaining the deficiency, ^cResupply of the standard culture solution to the roots for Mg deficiency recovery, ^dFoliar application for Mg deficiency recovery.

(3) 엽 중 무기성분 함량

대조구와 마그네슘 결제구로부터 채집된 엽 중 무기성분 함량을 분석한 결과는 Table 14와 같다.

마그네슘 결제구는 대조구에 비해 신엽의 P와 Ca 함량은 높았으나, N, K, Mg 함량은 낮았고, 구엽의 N, P, K, Ca, Mg 함량이 낮았다. 미량원소 함량은 신엽과 구엽 모두 처리 간에 차이가 없었다.

마그네슘은 칼륨, 칼슘 또는 망간과 길항작용을 하며, 질소 또는 인산과는 상호작용을 한다고 알려져 있다(Chapman, 1951 ; Embleton 등, 1952 ; Smith 등, 1954 ; Wutscher와 Smith, 1993). 발렌시아 오렌지 나무에서 Mg 처리수준을 달리하여 시비한 후 엽 분석 결과 시비량이 적어질수록 다량원소 함량들은 모두 높았다고 보고되었으나(Smith 등, 1954), 본 연구 결과에서 신엽의 P와 Ca 함량인 경우는 같은 경향이었으나 N, K, Mg 함량은 다르게 나타났고, 구엽 중 다량원소 함량은 모두 반대의 경향을 보였다.



Table 14. Mineral contents in the new and old leaves from Shiranuhi mandarin tree cultured for 370 days under the presence or the absence of Mg in culture solution

Leaf part	Treat-ment	T-N	P	K	Ca	Mg	Zn	B	Mn	Fe	Cu
		---		%		---	---	mg/kg DW			---
New leaf	Control ^a	2.38	0.35	2.75	1.69	0.33	46.1	329	50.0	203	8.27
	C-Mg ^b	2.11	0.40	2.72	1.99	0.14	43.3	363	49.4	151	8.40
Old leaf	Control	2.25	0.21	2.14	2.89	0.27	49.2	478	120	282	5.47
	C-Mg	1.85	0.18	2.09	2.20	0.05	35.7	339	70.8	183	4.33

^aContinual supply of the standard culture solution, ^bMg absent treatment for inducing and maintaining Mg deficiency for 370 days.

V. 요약

본 연구는 부지화 감귤의 수경재배시스템을 확립하고, 영양생리 및 장해 특성을 조사하기 위하여 수행되었다. 부지화 수경재배를 위한 적정 영양액 농도는 생체중 증가량, 양·수분 흡수량, 엽록소 함량, 과실의 품질과 수량을 조사하여 결정했다. 그리고 각각의 다량원소를 결제시켜 그들의 결핍 증상과 엽 중 함량을 확인하였고, 또한, 이들 결핍 증상을 회복시키는 방법으로 엽면 시비 했을 때와 뿌리에 공급했을 때의 효과를 비교했다. 특정원소의 결핍으로 인하여 다른 원소들의 함량이 증가하거나 감소되는 것을 조사하여 길항과 상호 관계를 논의하였다.

1. 부지화 수경재배시스템 확립



부지화 감귤의 수경재배시스템을 개발하기 위하여 수경재배에서 가장 중요한 환경 인자 중 하나인 온도 변화를 관찰하였다. 본 실험에서 사용된 수경재배시스템의 근권 주변 온도는 안정적이었으며 겨울철과 여름철에 자연적인 토양 조건과 아주 유사하였으며, 수중펌프와 타이머를 결합한 영양액의 자동공급 장치는 적절한 양의 물과 영양액을 성공적으로 공급할 수 있었다. 그러므로 본 수경재배시스템은 부지화 감귤의 영양생리연구에 사용됨은 물론 부지화 감귤의 재배를 위해서도 활용되어 질 수 있을 것으로 기대된다.

2. 부지화 수경재배를 위한 적정 영양액 농도 결정

- 1) 생체중 증가량, 물 흡수량 그리고 엽록소 SPAD 값은 표준 영양액의 2배

액 처리까지는 공급 농도가 높을수록 증가하였으나, 4배액 처리에서는 2배액 처리와 차이가 없었다. 이는 표준액의 2배액이 적정농도라는 사실을 말해준다.

2) $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, K, Ca, Mg의 흡수는 수체와 과실의 생장시기에 컸으며, 양분 흡수량의 크기는 $\text{NO}_3\text{-N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{NH}_4\text{-N} > \text{PO}_4\text{-P} > \text{Mg}$ 의 순이었다.

3) 엽, 줄기, 뿌리 중 무기원소 함량은 영양액의 공급 농도가 높을수록 증가하였으나, 4배액과 2배액 처리간에는 차이가 없었다.

3. 다량원소의 결핍 증상 및 결핍의 회복

1) 질소

(1) 결핍 유도 후 40일경에 엽색이 연한 녹색으로 변하는 초기 증상을 육안으로 관찰할 수가 있었고, 그 후 50일경에 춘엽에서 먼저 엽맥과 중륜(中肋)에 황변현상이 나타났고 하엽은 연한 녹색으로 변화하기 시작하였으며, 이때 엽 중 질소 함량은 각각 1.30%와 1.41%였다.

(2) 질소 결핍시에는 생체중 증가량, 물 흡수량 및 엽록소 SPAD 값이 감소하였다.

(3) 엽 중 질소 함량은 0.5% 요소를 엽면시비하거나, 표준 영양액을 뿌리로 공급한 경우 모두 정상적으로 회복되었는데, 뿌리에 공급한 경우가 더 효과적이었다.

(4) 질소가 결핍되었을 때 춘엽에서 P, K, Mg 함량이 하엽에서는 P와 Mg의 함량이 대조구보다 높았고, 반면 춘엽의 Ca 함량과 하엽의 K, Ca 함량은 대조구보다 낮았다.

2) 인산

(1) 결핍 유도 후 300일경에 엽색이 암록색으로 변하는 초기 증상을 육안으로 관찰할 수 있었고, 그 후 330일경에 구엽(엽령 12개월)과 성엽(엽령 15개월)에서 암록색이 진전되어 자주색을 띠는 현상이 나타났고, 이때 엽 중 인산 함량은 구엽과 성엽 모두 0.06%였다. 하지만 신엽(엽령 3개월)은 결핍 증상을 확인할 수 없었으며, 이때 엽 중 인산 함량은 0.16%였다.

(2) 엽 중 인산 함량은 1.0% NaH_2PO_4 를 엽면시비하거나 표준 영양액을 뿌리로 공급한 경우 모두 정상적으로 회복되었는데, 엽면시비를 처리한 경우가 더 효과적이었다.

(3) 인산이 결핍되었을 때 신엽에서 Ca, Mg 함량이 구엽에서는 Mg 함량이 대조구보다 높았고, 반면 신엽의 N, K 함량과 구엽의 N, K, Ca 함량은 대조구보다 낮았다.



3) 칼륨

(1) 결핍 유도 후 300일경에 엽선단 부분이 황변되는 초기 증상을 육안으로 관찰할 수 있었고, 그 후 330일경에 구엽(엽령 12개월)과 성엽(엽령 15개월)에서 황화가 진전되는 현상이 나타났고, 이때 엽 중 칼륨 함량은 각각 0.23%와 0.31%였다. 하지만 신엽(엽령 3개월)에 대한 결핍 증상은 확인할 수 없었고, 신엽의 칼륨 함량은 0.56%였다.

(2) 엽 중 칼륨 함량은 1.0% KCl를 엽면시비하거나, 표준 영양액을 뿌리로 공급한 경우 모두 정상적으로 회복되었는데, 엽면시비를 처리한 경우가 더 효과적이었다.

(3) 칼륨이 결핍되었을 때 신엽에서 Mg 함량이 구엽에서는 N, P, Ca, Mg의 함량이 대조구보다 높았고, 반면 신엽의 N, P와 Ca 함량은 대조구보다 낮았다.

4) 칼슘

- (1) 결핍 유도 후 추엽 선단 부분이 타는 초기 증상을 육안으로 관찰할 수 있었고, 그 후 추엽 선단 부분에 붉은 반점이 발생되고 결핍이 더 진전되면 낙엽되는 현상이 나타났다. 이때 엽 중 칼슘 함량은 0.12%였다.
- (2) 엽 중 칼슘 함량은 1.2% CaCl_2 를 엽면시비 했을 때 서서히 증가한 반면 뿌리를 통해 공급한 경우는 거의 변화가 없었다.
- (3) 칼슘이 결핍되었을 때 춘엽과 하엽 모두 N, P, K와 Mg의 함량이 대조구보다 높았다.

5) 마그네슘

- (1) 결핍 유도 후 300일경에 엽맥 사이 및 중륵(中肋)의 양측에 황변이 생기는 초기 증상을 육안으로 관찰할 수 있었고, 그 후 330일경에 구엽(엽령 12개월)과 성엽(엽령 15개월)에서 황변이 진전되어 역삼각형 모양을 띠는 현상이 나타났고, 이때 엽 중 마그네슘 함량은 각각 0.05%와 0.04%였다. 신엽(엽령 3개월)인 경우는 결핍 증상을 확인할 수 없었고, 마그네슘 함량은 0.14%였다.
- (2) 엽 중 마그네슘 함량은 2.0% MgCl_2 를 엽면시비하거나, 표준 영양액을 뿌리로 공급한 경우 모두 정상적으로 회복되었는데, 엽면시비를 처리한 경우가 더 효과적이었다.
- (3) 마그네슘이 결핍되었을 때 신엽에서 P와 Ca의 함량이 대조구보다 높았고, 반면 신엽의 N, K, Mg 함량과 구엽의 N, P, K와 Ca 함량은 대조구보다 낮았다.

VI. 참고문헌

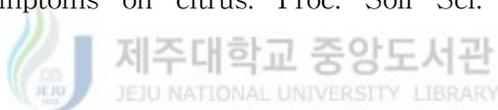
- Achituv, M. and A. Bar-Akiva. 1973. Nitrogen accumulation induced by phosphorus deficiency in citrus plants. *Scientia Hort.*, 1 : 251-262.
- Adams, P. and A. M. Ei-Gizawy. 1986. Effect of salinity and watering level on the calcium content of tomato fruit. *Acta Hort.*, 190 : 253-259.
- Anderssen, F. G. 1937. Citrus manuring - its effect on cropping and on the composition and keeping quality of oranges. *Jour. Pomol. and Hort. Sci.*, 15 : 117-159.
- Anh, N. T., T. W. Kang, S. J. Song, W. P. Park, N. N. Nong and Z. K. U. 2003. Nutrient absorption by *Citrus unshiu* Marc. grown in out-door solution culture. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 36(4) : 225~232.
- Bar-Akiva, A., V. Hiller, and J. Patt. 1968. Effect of phosphorus and chicken manure on yield, fruit quality and leaf composition of grapefruit trees, *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.*, 93 : 145-157.
- Benoidt, F. and N. Ceustermans. 1996. 토양 양액재배에 있어 피망 배꼽썩음과 발생에 미치는 요인들. 한국양액재배연구회 pp. 66-74. 96 정기총회 및 국제심포지움, 실용적 양액재배기술.
- Berger, H., J. Opazo, S. Orellana and L. Galletti. 1996. Potassium fertilizers

and orange postharvest quality. Proc. Int. Soc. Citriculture, pp.759-761.

Bondada, B. R., J. P. Syvertsen and L. G. Albrigo. 2001. Urea nitrogen uptake by citrus leaves. Hort. Science, 36(6) : 1061-1065.

Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-Total. pp. 595-624. In "Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties (2nd ed.)" (ed. Page, A. L. et al.). Soil Sci. Soc. Amer., Madison, Wisconsin, USA.

Chapman, H. D., G. F. Liebig, Jr. and A. P. Vanselow. 1939. Some nutritional relationships as revealed by a study of mineral deficiency and excess symptoms on citrus. Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 4 : 196-200.



Chapman, H. D. and E. R. Parker. 1942. Weekly absorption of nitrate by young bearing orange trees out of door in solution culture. Plant Physiol., 17 : 366-375.

Chapman, H. D. and D. S. Rayner. 1951. Effect of various maintained levels of P on the growth, yield, composition, and quality of Washington navel oranges. Hilgardia, 20 : 325-358.

Chapman, H. D. 1967. The mineral nutrition of citrus(chapter 3). pp. 127-298. In "The citrus industry Vol. III Anatomy, Physiology, Mineral Nutrition, Seed Propagation, Genetics, Growth Regulators" (ed. Reuther, W., L. D. Batchelor and H. J. webber). Univ. Calif. Div. Agr.

Sci., Berkley, California.

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 concentrations in fertilizer solution. J. Kor. Soc. Hort. Sci., 41(4) : 339-344.

Cooper, A. J. 1976. Crop production with nutrient film technique. IWOSC, 4 : 121-136.

Cox, D. A. and J. G. Seeley. 1983. The effect of nitrogen and potassium fertilization and sample date on the macronutrient composition of poinsettia leaves. Hort. Science, 18 : 751-752.

Dole, J. M. and H. F. Wilkins. 1991. Relationship between nodal position and plant age on the nutrient composition of vegetative poinsettia leaves. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 116 : 248-252

Embleton, T. W., J. D. Kirkpatrick, H. R. Parker. 1952. Visible response of phosphorus-deficient orange trees to phosphatic fertilizers and seasonal changes in mineral constituents of leaves. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 60 : 55-64.

Embleton, T. W., W. W. Jones, C. K. Labanauskas and W. Reuther. 1973. Leaf analysis as a diagnostic tool and guide to fertilization(chapter 6). pp. 183-210. In "The citrus industry Vol. III Anatomy, Physiology, Mineral Nutrition, Seed Propagation, Genetics, Growth Regulators" (ed.

Reuther, W., L. D. Batchelor and H. J. webber). Univ. Calif. Div. Agr. Sci., Berkley, California.

Embleton, T. W., C. K. Labanauskas, W. W. Jones and C. B. Cree. 1963. Interrelations of leaf sampling methods and nutritional status of orange tree and their influence on the macro-and micronutrient concentratins in orange leaves. Proc. Amer Soc. Hort. Sci., 82 : 131-141.

小創祐.幸 1986. NFTとロックウール栽培の實際. 農業および園藝, 62 : 175-184.

Gericke, W. F. 1929. Aquaculturem a means of crop production. Amer. J. Bor., 16 : 826.



Graves, C. J. 1983. The nutrient film technique. Hort. Rev., 5 : 2-44.

河瀬憲次. 1999. デコポンをつくりこなす. 農文協, p. 213.

한국양액재배연구회. 1998. 최신 양액 재배, pp. 1-5, 80-81.

한승갑. 1997. 시비량이 감귤원 토양 화학성 및 감귤의 생육에 미치는 영향. 제주대학교 대학원 석사 학위 논문, pp 26-29.

한승갑, 2006. 감귤원에서 질소, 인산, 칼리의 다년간 무시용이 토양화학성, 수 체영양 및 과실품질에 미치는 영향. 제주대학교 대학원 박사 학위 논문, pp. 48-69.

한해룡, 권오균. 1983. 감귤원예신서. 선진문화사, pp 361-401.

Haas, A. R. C. 1937. Nitrogen in relation to the growth of citrus cuttings in solution cultures. *Plant Physiol.*, 12 : 163-172.

Haas, A. R. C. 1947. Effects of fertilizer and rootstock on total P of citrus flowers. *Soil Sci.*, 64 : 47-59.

Harry, W. F., W. Reuther and P. F. Smith. 1956. Effect of nitrogen on root development of valencia orange trees. *Amer. Soc. Hort. Sci.*, 70 : 237-244.

Heyman-Hershberg, Lotte. 1952. Soil and leaf analyses as indicators of fertilizer requirements in Shamouti orange groves. *Bul. Res. Council of Israel*, 1 : 20-37.

Hilgeman, R. H. 1941. Nitrogen uptake by grapefruit trees in the salt river valley. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 39 : 19-24.

Hirobe, M. and C. Ogaki. 1968. Experiment on the absorption of nutrient elements by unshiu orange tree. Report of Kanagawa Prefecture. Horticultural Experimental Station, Japan. 16 : 4-11.

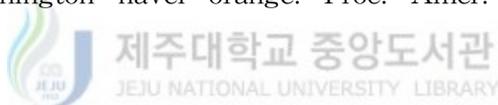
Hiroshi, I. and H. Yutaka. 1988. Tree growth and nutrient absorption of young satsuma mandarins under different temperature conditions. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 57(1) : 1-7.

Hiroshi, I. and K. Ikuo. 1992. Effects of nutrition and temperature on flower bud differentiation of Satsuma Mandarin. J. Japan. Soc. Hort. Sci., 60(4) : 771-776.

Hoagland, D. R. 1917. The effect of hydrogen and hydroxyl ion concentration on the growth of barley seedlings. Soil Sci., 3 : 547.

Hoagland, D. R. and D. I. Arnon. 1950. The water culture method for growing plants without soil. Circ. 347. Berkely : Calif. Agri. Exp. Sta., Univ. of Calif. p. 32.

Impey, R. L. and W. W. Jones. 1960. Rate of absorption of urea by intact leaves of Washington navel orange. Proc. Amer. Hort. Sci., 76 : 181-185.



Jones, W. W., T. W. Embleton and R. G. Platt. 1968. Leaf analysis and nitrogen fertilization of oranges. Calif. Citrog., 53(10) : 367-376.

제주도 농업기술원. 2003. 한라봉 재배기술, pp. 11-30, 46-52, 109-111.

제주도농업기술원. 2006. 만감류 부지화 연중생산 및 품질향상에 관한 연구. 농촌진흥청, pp. 73-94.

Kang, Y. K., Z. K. U. and B. K. Kang. 1998. Nitrogen recovery and application method in a Satsuma mandarins orchard. Korean J. Soil Sci. Fert., 31(2) : 143-150.

Kang, Y. K., Z. K. U. and Y. C. Kim. 2000. Distribution of fall-applied N in various parts of Satsuma mandarins. Korean J. Soil Sci. Fert., 33(5) : 325-332.

강호준, 이신찬, 허태현, 현승원, 유장걸, 송성준. 1998. 하우스감귤에서 제1인산칼리 엽면살포가 과실품질에 미치는 영향. 한국토양비료학회 춘계학술 발표논문집, p. 79.

Kato H., H. Uemastu, K. Ishikawa, K. Sakae and M. Sato. 1996. Effect on concentration of different culture solution on growth of nursery plant and nutrient absorption of grapevine 'Kyoho' by rockwool culture. J. Jap. Soc. Hort. Sci., 65 : 134-135.

Kato, T., S. Kubota and S. Bambang. 1982. Uptake of ^{15}N -nitrate by citrus trees in winter and repartitioning in spring. J. Japan. Soc. Hort. Sci., 50(4) : 421-426.

김병삼. 2000. 양액농도와 배지종류가 Black Olympia (*Vitis labruscana*) 포도 나무의 생육과 과실품질에 미치는 영향. 전남대학교 대학원 석사 학위 논문, pp. 2-7.

김경제, 김진한, 강영식, 나상욱, 우인식, 이광원. 1998. 단고추 자루식 고품배지 재배시 양액농도가 생육 및 수량에 미치는 영향. 원예논문집 40 : 131-135.

Kim, D. S., Y. H. Yoon, J. C. Shin, J. K. Kim and S. D. Kim. 2002. Varietal difference in relationship between SPAD value and chlorophyll

and nitrogen concentration in rice leaf. Korean J. Crop Sci., 47(3) 263-276.

김형옥, 오현도. 1971. 비료반응이 감귤생육에 미치는 영향. 제주대학교 논문집, 3 : 241-253.

今井後治. 1988. ブドウ根域制限栽培の考え方とその効果. 果實日本, 50 : 64-65.

吉田安伸. 1998. モモにおける根域制限栽培. 果實日本, 52 : 76-78.

吉田亮. 1997. 循環式 パーライト耕でのナツゴールド二十世紀の養液栽培. 農耕と園芸, 52 : 153-156.

Labanauskas, C. K., W. W. Jones and T. W. Embleton. 1959. Seasonal changes in concentrations of micronutrients(Zinc, Copper, Boron, Manganese and Iron)in leaves of Washington Navel Orange. Amer. Soc. Hort. Sci., 74 : 300-307.

Lea-Cox, J. D. and J. P. Syvertsen. 1995. Nitrogen uptake by citrus leaves. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 120(3) : 505-509.

이정현. 2003. 화란의 최신기술동향. 한국생물환경조절학회 추계학술발표논문집 pp. 67-81. 국내의 시설원예 최신기술동향 심포지움.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic press. Inc., San Diego, pp. 436-478.

Mattaa, Mebelo, S. Tominaga and I. Kozaki. 1996. Seasonal changes of carbohydrate constituents in ponkan (*Citrus reticulata* Blanco). J. Japan. Soc. Hort. Sci., 65(3) : 513-523.

Miriam, A. and A. Bar-Akiva. 1973. Nitrogen accumulation induced by phosphorus deficiency in citrus plants. Sci. Hort., 1: 251-262

Morita, A. 1992. Study of influence of different levels of nitrogen in solution culture on the growth and nutrient composition of xylem sap of tea plants. Bull. Shizuoka Tea Exp. Stn., 16 : 27-34.

오상호. 1997. 동위원소 질량분석기에 의한 식물체중 ^{15}N 측정법 확립 및 온주밀감의 요소 엽면흡수량 측정. 제주대학교 대학원 석사 학위 논문, pp. 1-4, 19.



Park, S. G., B. S. Lee, Y. S. Park, and S. J. Chung. 1997. Effects of cultivars and substrates on the growth and development of hydroponically grown fig trees. Agri. Sci. & Tech. Rev. 32 : 41-45.

박원표. 2003. 질소 결핍이 부지화[(*C. unshiu* Marc. × *C. sinensis* Osb.) × *C. reticulata* Bla.]의 생육과 양분흡수에 미치는 영향. 제주대학교 대학원 석사 학위 논문, pp. 1-30.

Reese, R. L. and R. C. J. Koo. 1975. Effect of N and K fertilization on internal and external fruit quality of three major florida orange cultivars. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 100(4) : 425-428.

Rodriguez, I. R. and G. L. Miller. 2000. Using a chlorophyll meter to determine the chlorophyll concentration, nitrogen concentration, and visual quality of St. Augustinegrass. Hort. Sci., 35(4) : 751-754.

Reitz. H. R. and R. C. J. Koo. 1959. Effect of nitrogen and potassium fertilization on yield, fruit quality, and leaf analysis of Valencai orange. Amer. Soc. Hort. Sci., 75 : 244-252.

石原正義 1971. 果樹の 榮養診斷. 農業と園藝, 46(1).

石原正義 1982. 果樹の 榮養生理. 農文協.

Reuther, W., T. W. Embleton and W. W. Jones. 1958. Mineral nutrition of tree crops. Ann. Rev. Plant Physiol., 9 : 175-206.

Rural Development Administration (RDA). 2003. Statistical data of soilless culture area in Korea.

Shim, S. C. 1964. Kinetic studies on iron-uptake by rice varieties. J. Kor. Soc. Appl. Biol. Chem., 5 : 61.

Smith, P. F. and G. K. Rasmussen. 1959a. The relation of K nutrition to citrus fruit size and quality. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 74 : 261-265.

Smith, P. F. and Reuther W. 1951. The response of young Valencia orange trees to differential boron supply in sand culture. Plant Physiol., 26(1) : 110-114.

- Smith, P. F., W. Reuther, A. W. Specht, and G. Hrcnciar. 1954. Effect of differential N, P, and Mg supply to young Valencia orange trees in sand culture on mineral composition especially of leaves and roots. *Plant Physiol.*, 29 : 349-355.
- Smith, P. F. 1962b. Mineral analysis of plant tissues. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 13 : 81-108.
- Smith, P. F. 1966. Citrus nutrition(chapter VII), pp 174-199. In " Fruit Nutrition (2nd Ed.)"(ed Childers, N. F.). Hort. Publications, Rutgers Univ., New Brunswick, N. J.
- Smith, P. F. 1966. Leaf analysis of citrus(chapter VIII), pp 208-225. In " Fruit Nutrition (2nd Ed.)"(ed Childers, N. F.). Hort. Publications, Rutgers Univ., New Brunswick, N. J.
- Smith, P. F. 1969. Nitrogen stress and premature leaf abscission in citrus. *Hortscience*, 4(4) 326-327.
- 송성준. 1985. Cl과 SO₄처리가 감귤의 무기물과 당 및 유기산의 조성에 미치는 영향. 제주대학교 대학원 석사 학위 논문.
- 송성준. 1992. ³²P Bioassay에 의한 감귤나무의 인산 영양진단법 개발. 제주대학교 대학원 박사 학위 논문.
- Song, S. J., Y. R. Kim, S. G. Han and Y. G. Kang. 2006. Foliar absorption rates of ⁴⁵Ca-labeled calcium compounds applied on tomato and citrus

- leaves. Korean J. Soil Sci. Fert., 39(2) : 80-85.
- Spencer, W. F. and R. C. J. Koo. 1962. Calcium deficiency in field-grown citrus trees. Amer. Soc. Hort. Sci., 81 : 202-208.
- Stephen, H. F. and David P. H. Tucker. 2001. A Guide to citrus nutritional deficiency and toxicity identification. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, pp. 1-3.
- Tucker, D. P. H., A. K. Alva, L. K. Jackson, and T. A. Wheaton. 1995. Nutrition of florida citrus trees. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- U. Z. K., H. R. Han, D. Y. Moon, C. M. Kim, H. C. Lim, D. K. Moon, and S. J. Song. 1994. Development of K-bioassay for the efficient potassium fertilization of citrus tree. J. Kor. Soc. Appl. Biol. Chem., 37(3) : 182-188.
- Yeh, D. M., L. Lin and C. J. Wright. 2000. Effects of mineral nutrient deficiencies on leaf development, visual symptoms and shoot-root ratio of Spathiphyllum. Sci. Hort., 86 : 223-233.
- Yokomizo, H. 1975. Studies on the mineral nutrition of fruit trees by sand and water culture. II. Effect of the Ca concentration in nutrient solution on the growth of satsuma mandarin trees. Bull. Fruit Tree Res. Stn. A, 2 : 57-78.

Yokomizo, H. 1975. Studies on the mineral nutrition of fruit trees by sand and water culture. IV. Influence of the nitrogen sources and concentrations on the growth of satsuma mandarin trees. Bull. Fruit Tree Res. Stn. A, 2 : 57-75.

Withrow, R. B. and J. P. Biebel. 1936. A subirrigation method of supplying nutrient to plants growing under commercial and experimental conditions. J. Agri. Res., 53 : 693-701.

Withrow, R. B. and J. P. Biebel. 1936. A subirrigation method of supplying nutrient to plants growing under commercial and experimental conditions. J. Agri. Res., 53 : 693-701.

Wutscher, H. K. and P. F. Smith. 1993. Citrus. Chapter 17. In ; W. F. Bennett(ed). Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. APS Press, American Phytopathological Society, St. Paul, MN.

Withrow, R. B. and J. P. Biebel. 1936. A subirrigation method of supplying nutrient to plants growing under commercial and experimental conditions. J. Agri. Res., 53 : 693-701.

감사의 글

이 논문을 완성하기까지 항상 옆에서 지켜봐 주시고 인도해 주신 고마운 분들에게 지면을 통해 감사의 말씀을 드리고자 합니다.

10여년간 저에게 학문의 길을 가르쳐 주시면서 어려움을 극복할 수 있도록 항상 옆에서 지켜봐주신 유장걸 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 가운데서도 부족한 논문의 심사를 맡아 부족한 부분을 바로잡아 주신 전북대학교 한강완 교수님, 제주대학교 김찬식 교수님, 제주도농업기술원 이신찬 박사님과 처음부터 끝까지 세심하게 검토해 주신 제주대학교 방사선응용과학연구소 송성준 박사님께 진심으로 감사의 글을 올립니다. 또한 항상 관심을 가지시고 격려하여 주신 고정삼 교수님, 류기중 교수님, 현해남 교수님, 이효연 교수님께도 감사를 드립니다. 또한 항상 옆에서 선배이면서 누님 같이 귀중한 조언과 충고를 아낌없이 베풀어 주신 제주대학교 방사선응용과학연구소 홍경애 박사님께 진심으로 감사를 드립니다.

본 논문을 수행하기 위하여 수경재배시스템 설계 및 자료 정리를 옆에서 묵묵히 도와준 박원표, 양석봉, 허재호, 김병주, 김형섭 후배들에게도 고마움의 뜻을 전합니다. 시험을 수행하는 동안 많은 도움을 주셨던 제주도농업기술원 황재중 연구사님, 양상호 연구사님, 강호준 박사님, 난지농업연구소 한승갑 박사님과 그 외 비료·식물영양 연구실 졸업생 김양록 박사님, 오상호 선배님, 부창호 선배님, 정영수, 김기혁, 장규성 후배들에게 감사를 드리며, 대학원에서 같이 동고동락한 부경환 선배님과 이도승 동기, 그리고 학과 조교 선생님들과 여러 후배들에게도 고마움의 뜻을 전합니다.

오늘이 있기까지 항상 말없이 저를 지켜봐 주신 부모님과 미경, 정임 누님들과 매형 그리고 친우 정윤과 원철, 혼디미아 친우 안길, 동한, 현승, 이권, 경찬, 진우회 친우 및 후배 광섭, 은아, 태현, 정미, 재호, 희정, 상준, 은숙, 성철, 은주, 도위, 진녀, 성훈, 혜경과 함께 기쁨을 나누고 싶습니다.

끝으로 지금 간암을 이겨내기 위해 애쓰고 계신 아버님께 작게나마 보탬이 되었으면 하는 바람으로 이 논문을 드립니다.