

GOVP1200133815

(19th)

628.1684

L 293人

최 중
연구 보고서

시설재배지 폐양액의 재활용 및 정화 기술 개발

Development of procedures for recycling and cleaning of waste
nutrient solution from hydroponic culture systems

연구기관
충북대학교

농림부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “시설재배지 폐양액의 재활용 및 정화 기술 개발” (세부과제 “미생물을 이용한 폐양액 정화 및 활용기술 개발”)의 최종보고서로 제출합니다.

2001. 10. .

주관연구기관명 : 충북대학교
총괄연구책임자 : 사 동 민
세부연구기관명 : 충북대학교
세부연구책임자 : 사 동 민
연 구 원 : 양 진 철
박 명 수
최 승 주
김 충 우
정 희 경

- 1 -

요 약 문

I. 제 목

시설재배지 폐양액의 재활용 및 정화기술개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

토양오염 증가로 소비자의 안전 농산물 요구도 증가와 무토양재배기술의 확대로 시설 하우스 양액배지형 재배 면적이 '93년 23 ha에서 '99년 648.4 ha로 급증하고 있다. 이에 따라 폐양액의 배출량이 급증하여 폐양액 처리기술 개발이 시급하며 점차 강화되는 폐수처리 규제에 대응하기 위하여 시설양액 재배시 사용한 폐양액의 방류에 따른 부영양화 등 수질오염 증가로 적절한 방지기술이 요망된다. 그러므로 본 과제에서는 광합성을 하는 독립영양 세균인 cyanobacteria을 국내 토양에서 분리하여 생육과 양분 흡수능 및 보유능이 우수한 균주를 선발하고, 탄소원을 제외한 광합성균의 생장에 필요한 각종 영양 물질(다량의 N, P)과 미량 필수원소를 충분히 함유한 폐양액을 이용하여 부영양화와 지하수 오염을 일으키는 질소 및 인의 효율적 제거와 배양한 광합성 세균을 미생물비료로서 이용방안을 연구하고자 한다.

III. 연구개발 내용 및 범위

토양 및 퇴비로부터 생육이 우수한 cyanobacteria를 선발하기 위하여 충남 아산지역의 비옥 토양 및 퇴비 등을 시료로 채취하여 고체배지(변형된 BG-II, 표1)에 도말한 후 배양하고, colony발생 후 single trichome method를 수차례 반복하여 순수 배양을 시도한 후 70여종의 균주를 순수분리 하였으며 생육이 우수한 19균주를 대

상으로 특성 분석하였다.

생육속도와 질소 및 인산의 흡수능이 우수한 균체를 선발하기 위하여 순수 분리된 19종의 cyanobacteria를 고체배지에서는 질산태 질소의 농도에 따른 생육상태를 조사하였고, 액체배지에서는 균체의 생육속도와 질소 및 인산의 흡수능을 비교하였다. 또한 순수 분리된 토착균 중 양분 보유능이 우수한 균체를 선발하기 위하여 액체배지에 배양, 건조시켜 습식 산분해 한 후 균체 내의 전질소 및 전인산 함량을 측정 비교하였다.

탄소원을 제외한 광합성 미생물의 영양소를 다량 함유하고 있는 폐양액을 이용하여 cyanobacteria의 대량 배양을 위해 최종 선발된 균체는 질소원에 따른 생육율과 폐양액의 pH 조절에 따른 성장특성을 비교하였다. 자연광을 이용한 온실에서 제작된 15L-photobioreactor에 최종 선발된 우수한 균체를 배양시켜 공기 주입량에 따른 생육속도와 질소 및 인산의 흡수능을 조사하였다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

충남 및 경기 지역의 비옥토양, 농업용수 등에서 순수 분리된 광합성 미세조류는 18균주로서 filamentous form의 cyanobacteria 18종 (Genus : *Anabaena*, *Nostoc*, *Calothrix*, *Sytonema*, *Cylindrosprum*, *Hepalosiphon*) 및 unicellular form cyanobacteria 1종 (Genus : *Synechococcus*)으로 각각 표 1와 같이 명명하였다. 순수 분리된 19종의 균주를 고체 및 액체배지에 접종시켜 배양기에서 배양하면서 성장특성을 비교한 결과 *Nostoc* HN601과 HN701이 다른 균주에 비해 성장율과 인산 및 질산태 질소의 흡수능이 우수할 뿐만 아니라 배양된 균체의 전 질소 및 전 인산 함량도 다른 균체에 비해 높아 균체의 생물비료로서의 활용이 가능하리라 생각된다. 이 두균체 중 환경적응력과 생육이 우수한 *Nostoc* HN601을 본 연구를 위한 공시 선발균주로 폐양액 처리에 활용하였다. 폐양액을 이용해 균체를 대량배양하기 위해서는 폐양액에 별도의 완충제(HEEPS)를 처리하지 않고 pH만을 8.0으로 조절하여 배양하는 것이 더 경제적이며 효과적인 것으로 나타났다. 또한 폐양액을 이용한

Nostoc HN601의 대량배양과 폐양액 내 인산제거를 위해 제작한 15L-photo bioreactor에서 공기량을 4L/min 공급하여 온실에서 자연광을 이용해 배양한 결과 균체의 성장속도가 0.32 mg·Chl a/L로 생육이 우수하였고, 접종 후 9일만에 폐양 개의 인산 농도를 100% 제거되었고 이때 흡수속도는 1.3 mg/L/day로 실험실 조건에서 배양된 균체보다 제거율이 매우 우수하였다. 따라서 본 연구결과 제작한 photobioreactor을 이용하여 시설양액 재배시 사용한 폐양액의 방류에 따른 부영양 화와 토양 및 지하수의 수질오염을 일으키는 인산 및 질소 제거와 광합성 세균의 대량 생산을 할 수 있으리라 본다.

SUMMARY

Even though recycling nutrient solution system in the green house was introduced recently, most of the hydroponic systems in Korea is open system of nutrient solution. The waste nutrient solution contains high concentration of all nutrients including nitrogen and phosphorous and sometimes the nutrient concentrations in waste nutrient solution are higher than those of supplied nutrient solution. The remaining nutrient in waste nutrient solution may contaminate the ground the water and could be responsible for the eutrophication of the water flow. But the amount and kind of nutrients in waste nutrient solution might be enough to grow photosynthetic microorganism, which may be developed as biofertilizer.

Photosynthentic filamentous cyanobacteria(*Anabaena*, *Nostoc*, *Calothrix*, *Sytonema*, *Cylindrosprum* and *Hepalosiphon*), which have high nitrogen and phosphate uptake activity, were isolated from composts and soils around Chungnam province to develop new procedure to recycle waste nutrient solution from hydroponic culture system and to develop it as biofertilizer. Pigment contents, nitrogen and phosphorus concentration in the isolates growing pattern under different sources and concentrations of nitrogen and nitrogen and phosphate uptake rate were compared to select suitable isolate for nitrogen and phosphorus removal from waste nutrient solution. *Nostoc* HN601 and HN701 showed highest nitrogen and phosphate uptake rate not only in BG-11 medium but also in waste nutrient solution. Optimum initial pH of this microorganism growing was pH 8.0 and buffering system was not required for *Nostoc* HN701 in bioreactor under green house condition. After one week growing of *Nostoc* HN701 in bioreactor, the nitrogen and phosphorous concentrations in waste nutrient solution were decreased by 40 and 100 per cent, respectively and the nitrogen and phosphorous

concentration of microorganisms grown under waste nutrient solution were 61.1 mg-N/GDW and 13.3 mg-P/GDW, respectively, which are enough high concentrations to use this microorganism as biofertilizer.

Collectively, cyanobacterial mass production using waste nutrient solution under green house condition might be suitable for recycling and cleaning of waste nutrient solution from hydroponic culture system and these cell might be suitable for development of biofertilizer due to their high nitrogen and phosphorus content.

CONTENTS

Abstract	2
Summary	5
Contents (English)	7
Contents	8
I. State of art and Research Goal	9
II. Research Scopes and Contents	14
III. Research Results and Application plan	21
IV. References	60

목 차

요 약 문	2
Summary	5
Contents (영문)	7
목 차	8
제 1 장 연구개발의 목적 및 중요성	9
제 2 장 연구개발 내용 및 범위	14
제 3 장 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의	21
제 4 장 참고문헌	60

시설재배지 폐양액의 재활용 및 정화기술개발

제 1 장 연구개발의 목적 및 중요성

제 1 절 서 론

산업혁명 이후 급속한 산업발달과 폭발적인 인구증가는 자연생태계에 심각한 부작용을 야기하고 있다. 시설내 토양재배에서 다수확을 추구하는 과정에서 비료의 장기간 과다 사용은 토양 생산성의 감퇴, 작물의 수량의 감소 및 품질의 저하 등의 부작용을 초래하고 있다. 특히, 다량의 질소와 인산 비료의 사용은 유실되는 비료 성분량을 증대시켜 하천 등 지표수의 부영양화와 지하수의 오염을 유발시키는 것으로 알려져 있다. 인구 증가와 산업의 발달에 따른 지표수 이용율의 증대에 따른 이러한 “부영양화 현상”은 매우 심각하며, 오늘날 근해 적조현상 등은 부영양화된 지표수의 유입이 그 한 원인으로 알려져 있다¹⁾. 최근 우리 나라에서는 이러한 시설지 재래 토양재배의 문제점인 환경오염에 의한 농작물의 증급속 축적, 연작장해, 지력의 악화, 병해충 방제를 위한 농약의 과다 사용으로 인한 생태환경 파괴, 화학비료의 남용으로 인한 토양의 지속적 산성화 및 부영양화 등을 극복하려는 방편으로 양액재배가 적용되고 있다. 우리나라의 양액재배는 재배역사가 매우 짧음에도 불구하고 농업구조개선을 위한 국가 예산 투자확대로 재배면적의 증가, 작물의 다양화, 수경재배 시스템 자재의 국산화, 재배시설의 현대화 등에서 많은 발전을 이루어 왔다. 원예작물의 고품질 연중생산이 가능한 양액재배는 1960년대 초에 처음으로 시도된 이래 1980년대에 본격적으로 연구되기 시작해서 1990년대 초반부터 그 재배면적이 급증하여 '93년 23 ha에서 '99년 648.4 ha로 급속히 증가되었는데, 이중 약 20%가 담액경이나 박막수경의 순수 수경재배 방식이 차지하고 있다. 국내에서는 1980년대 역경, 훈탄경, 수기경을 이용한 채소작물 재배에서 1990년 필라이트와 암면을 중심으로한 과채류와 화훼류의 재배면적이 점점 늘어나고 있는 추세다. 즉 우리나라와 같은 좁은 국토에서의 양액 재배 기술은 노동력 경감,

수량증대, 고품질화로 현대 농업생산 기술을 주도해나가는 기술이 되고 있다.

그러나 수정재배는 많은 이점을 갖는 재배방식임에도 불구하고, 결정적인 단점을 갖고 있는데, 우선 주변 환경과의 친화성 문제이다. 그 중 대표적인 문제는 양액재배 시 식물의 영양분으로 공급되는 배양액 중 식물의 생육환경과 성장 단계에 따라 선호하는 이온량이 달라서 식물체가 이용하지 못한 배양액이 외부로 배출되는 것인데, 국내에서는 재처리 시설의 부족으로 인하여 대부분 한번 사용한 배양액은 주변의 포장에 시비하거나 또는 그냥 방출하고 있는 실정으로서 자원의 낭비뿐만 아니라 특히 지표수의 부영양화와 지하수 등 환경오염 등의 여러 가지 문제를 야기하고 있다. Van Os²⁾ (1994)에 따르면 비순환식재배로 인한 비료의 손실량은 토마토 재배시 배액량을 20%로 하는 경우 연간 ha당 질소 147 kg, 인산 71 kg, 칼리 282 kg, 칼슘 126 kg, 마그네슘 60 kg 정도라고 보고 되었다. 또한 순환식 담액수경 상추재배를 기준으로 할 때 농가 300평 재배시 약 100 ton의 양액이 소요되며 이 양액은 1회 재배가 끝난 후 상당량이 폐기되고 있고 고품 배지경 양액 재배의 경우에도 대부분 비순환식 재배로 1회 급액 후 나오는 20%의 배액이 그대로 방출되고 있다고 한다. 현재 우리 나라는 양액재배와 관련한 직접적인 규제는 없지만 수질환경보전법(제8조 제1항)에서 산업체 폐수 배출기준을 총 질소 60 ppm, 총 인 8 ppm 이하로 규정하고 있는 실정이다. 현재 우리나라의 양액재배 면적은 수질환경에 영향을 줄 정도로 많은 면적이 아니므로 아직은 문제가 되지 않고 있으나 양액재배 면적이 급속히 확대되고 배출하는 폐양액의 양이 증가될 경우 허용기준을 넘을 우려가 있기 때문에 멀지않은 장래에 우리나라에서도 양액재배시 양액의 외부유출에 대한 규제가 시행될 것이다. 또한 네덜란드에서는 토양 이외에 재배할 때에 배양액은 순환 재활용해야 함을 법제화하고 있으며 그 밖의 유럽 여러 나라에서도 양액재배시 버려지는 폐양액이나 배지 등을 재사용하기 위한 연구가 다양하게 이루어지고 있다.

이러한 연구 중 폐양액의 잔여비료성분을 재활용하고 배출수에 의한 수질 토양오염을 방지할 수 있는 양액재배의 재순환 시스템은 양액 이용률의 극대화 추구 및 재배지역 주변의 환경문제 해결이라는 점에서 각광받고 있다. 그러나 이 재순환 시스템은 재배 후 재활용되는 양액 내의 무기이온 농도가 센서 등을 통해 정확하게 측정되어야 다시 부족한 이온을 보충할 수 있는 점과, 재사용 시 기존양액이 병원균에 오염되어 있

는 경우 이를 최대한 제거해주어야 하는 문제점이 있다. 특히, 후자의 경우에는 병원균의 제거가 확실히 이루어지지 않으면 재순환 수경재배의 특성상, 동일 재배지에서는 식물병원균의 만연으로 이어질 수 있는 최적의 환경을 갖추고 있다고 할 수 없다. 이와 같은 문제점 때문에 재순환 양액재배는 반드시 양액여과기의 장치가 필요하다. 현재 재순환 수경재배는 물론이고, 비순환 수경재배에 있어서도 원수의 병원균 제거 그리고, 모종에서의 병원균 오염으로 인한 병의 만연을 억제하기 위하여 열처리 소독기, 자외선 소독기, 오존 소독기, 박막여과법, 요오드 이용법 등의 많은 양액여과기가 이용되고 있다. 그러나, 대부분의 경우 우리나라 실정에 맞는 표준화된 모델로 설정하기에는 고가인 경우가 많으며 농민들에게는 상당한 부담을 주고 있는 현실이다. 따라서 최근에는 부영양화를 일으키는 폐양액의 질소와 인을 제거하기 위해 생물학적, 생물·화학적, 화학적 그리고 물리적 방법에 대해서 연구가 진행 중에 있는데, 근래에 세계적 추세는 처리 단가가 비교적 낮으며 2차 오염물이 될 수 있는 슬러지의 발생이 적은 생물학적 처리³⁾, 또는 생물학적 처리와 화학적 처리를 병행하는 경향이 있다.

그중 광합성 세균은 다른 미생물과는 달리 여러 조건에서 고농도의 유기물을 이용할 수 있어 고농도 유기성 폐수 처리에 이용이 가능할 뿐만 아니라, 생성된 슬러지는 사료 및 비료로서의 가치가 높아 사료, 토양 개량제, 유기질 비료 등으로 재활용이 가능한 장점을 가지고 있어^{4~6)} 최근 새로운 생물학적 폐수처리 공법으로 주목을 받고 있다. 각종 산업의 발달과 양액재배 면적의 증가로 수반되는 환경오염을 막기 위하여 방류수에 포함된 질소와 인의 규제가 강화되면서 조류를 이용한 산업폐수⁷⁾, 축산폐수⁸⁾, 도시하수⁹⁾, 지하수¹⁰⁾에서 질소와 인의 제거를 위한 연구 및 기술개발이 선진 외국에서도 활발히 수행되고 있다¹¹⁾. 또한 Guterstam과 Todd¹²⁾에 의하면 광합성능이 있는 미세조류를 이용한 폐양액처리의 장점은 첫째 생태적 원칙을 이용한 방법이고, 둘째 환경친화적이고, 셋째 이차 오염을 발생시키지 않고, 넷째 생성된 미세조류를 수거해 생물자원으로 재 이용할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 단점으로는 첫째 세대시간이 길고, 둘째 조류를 수거하는데 어려움과 비용이 많이 소모되고, 셋째 빛이 필수적이고, 넷째 조류의 농도가 낮고, 다섯째 그들의 생리학적 연구가 많이 수행되지 않았다고 하였다. 小林達治¹³⁾는 광합성 세균을 이용하여 BOD 10,000 ppm 이상의 고농도 유기성 폐수를 희석하지 않고 단시간 내에 처리함으로써 활성오니법에 비해 처리장치가 소형화

될 수 있고 부지, 건설비, 운전 경비 등이 크게 절감되었다고 보고하였으며, BOD 부하량의 변동에 따른 영향이 적고, 이용되는 미생물군의 생리적 특성이 비교적 단순하므로 운전관리가 용이하며 악취가 발생하지 않은 장점이 있다고 보고하였다^{14~16)}. 또한 광합성 세균은 영양 요구성이 다른 미생물보다 단순하고 혐기, 호기 및 명, 암조건의 어떠한 환경에서도 산소의 확산 속도에 관계없이 활발히 생육할 수 있으며¹⁷⁾ 활발한 운동성을 가지고 있고 유기물질의 섭취 속도가 높은 특성을 가지고 있다¹⁸⁾. 광합성 세균세포에는 색소체(color pigment)로 4종류(phycoerythrin, phycocyanin, allophycocyanin, phycoerythrocyanin)가 있다. 이들 색소의 주된 역할은 빛 에너지를 흡수하여 화학 에너지로 바꾸는 것인데 cyanobacteria는 빛의 환경에 따라 피코빌리솜(phycobilisome)의 조성을 바꿈으로서 열악한 환경에도 적응하는 것으로 보고되고 있다. 또한 대부분의 조류는 세포벽에 셀룰로스(cellulose), 펙틴(pectin), 다당류(polysaccharide)등을 기본 물질로하는 비교적 견고한 막을 가지고 있으며 점성의 차이가 큰 각종 점액성 고분자 물질을 분비¹⁹⁾하고 있으므로 어느 정도의 pH 변화에서도 완충능을 가지고있어서 특정한 환경에서도 세포체의 기능을 유지 할 수 있다. 그러나 우리나라에서는 이렇게 광범위한 서식지와 환경 적응능이 우수한 조류를 이용한 폐양액 내 질소와 인의 제거에 대한 연구가 깊이 있게 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

또한 광합성 세균(cyanobacteria)는 다양한 토양조건 및 탄소의 영향하에서도 질소 고정능을 계속 가지고 있어서 연간 생태계에서 연간 3천5백만톤의 질소를 고정하여 토양의 비옥도 유지 및 증진에 큰 기여를 하고 있으며 온도, 염분 등에 내성이 있고 기타 균체에 비하여 고농도의 질소를 보유함으로써 국내에서도 화학비료를 대체할 생물비료로써 이용 가능성이 매우 높다. Cyanobacteria에 의한 질소고정은 토양의 유효 질소 함량을 늘여 적은 량의 화학비료로 작물 생산량을 늘릴 수 있는 방법이다. 몇몇 cyanobacteria종은 적은 양을 눈에 풀어놓아도 빠르게 번성하여 토양 비옥화의 주체가 된다. Cyanobacteria가 암모니아와 적은 양의 질소를 함유한 polypeptide로 능동적인 성장을 하는 동안 고정된 산물의 대부분은 자기 분해와 부패를 통해 식물체가 이용할 수 있게 만들어지며, 탈질 작용에 의하여 결합된 질소를 잃어 평형을 이룬다. 1939년에 최초로 De는 일부 cyanobacteria가 눈에서 능동적인 질소 고정 3자의 역할을 하며, 그 결과 이들의 활성은 눈 토양을 비옥하게 한다고

보고하였다. 이후 많은 질소고정 cyanobacteria가 분리되어 질소 고정에 의한 토양 내의 질소함량이 증가됨이 확인되었으며, 수 세기동안 화학 질소비료 없이 어떻게 벼가 자랄 수 있었는가를 설명할 수 있게 되었다. cyanobacteria는 외부의 환경 변화 및 stress에 내성이 강하고 적응력이 좋아 벼농사를 비롯한 여러 작물 생산 체계에 생물학적 비료로써 이용 가능성이 매우 높다. 세계적으로 여러 나라에서 cyanobacteria가 생물비료로 사용되어 200만 ha 이상의 논을 비옥하게 만든다고 보고되어 있다. 몇몇 벼 재배 국가에서 수많은 cyanobacteria 군주가 연못과 탱크에서 단독 또는 혼합되어 자란 후 건조되어, 논 토양에 널리 투여되어 왔다. 생물학적 비료로서 사용하기 위해서 생체(100kg/ha) 또는 건조된(10kg/ha) cyanobacteria가 모내기 후 간단히 논 토양에 처리되면 그곳에서 cyanobacteria는 자라면서 질소를 고정하게 된다. 생물학적 비료로 흔히 사용되는 cyanobacteria 군주는 *A. fertilissimas*, *Anabaena* sp., *Nostoc* sp., *Calothrix* sp., *Scytonema* sp., *Cylindrospermum* sp., *Gloeotrichia* sp.를 포함해서 광범위한 종이 이용되었다. 논에서 자라 건조된 *A. fertilissimas*매트는 생물학적 비료로서 광범위하게 사용되었다. 질소와 인산은 모든 식물이 가장 많이 요구하는 다량 원소이다. 많은 energy가 요구되는 화학 질소비료와 인산비료의 사용을 줄이면 경제적인 효과와 더불어 최근에 비료성분 유출에 따른 환경친화적 영농방법 개발에도 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

따라서, 본 실험에서는 시설양액 재배시 사용한 폐양액의 방류에 따른 부영양화와 토양 및 지하수의 수질오염 증가로 적절한 폐양액 처리 기술이 요구됨에 따라 국내 토양에서 분리된 많은 광합성 독립영양 세균인 cyanobacteria 중 우수한 군주를 선발하여 이의 생장에 필요한 각종 영양 물질(다량의 N, P)과 미량 필수원소를 충분히 함유한 폐양액을 이용해 폐양액 내의 질소 및 인의 효율적 제거와 성장한 광합성 세균을 미생물비료로서 이용방안을 연구하고자 한다.

제 2 장 연구개발 내용 및 범위

제 1 절 미생물 배지 및 분리

1) 배지의 조제

본 실험에서 사용된 배지는 M.M Allen(1969)에 의해 개발된 BG-11을 이용하였고, 조성은 표 1에 나타나 있다²⁰⁾. 이 배지는 증류수를 제외한 모든 시약을 미리 stock 용액으로 만들어 냉장 보관하여 사용하였고, 모든 시약은 Sigma사 제품을 사용하였다. 또한 실험에 사용된 모든 기구와 시약들은 고압증기멸균기를 이용하여 120℃, 1.5atm에서 15분간 멸균하여 사용하였다.

미생물의 분리 및 보관을 위한 고체배지는 cyanobacteria가 질소고정을 할 수 있는 독립영양균의 특성을 감안하여 700ml의 증류수에 질소원만을 빼고 각각의 stock 용액을 1ml씩 가하고 2.5233g의 완충용액(HEPPS)을 넣어서 녹인 후 pH meter를 이용하여 2N NaOH로 pH를 8.0으로 맞추었다. 그리고 탄소원으로서 1g의 활성탄(Activate carbon)을 첨가하고 12g의 한천배지(agar)을 넣은 후 증류수로 1L을 맞추고 멸균하여 평판배지와 사면배지를 만들어 사용하였다.

미생물의 대량배양과 계대배양을 위한 액체배지는 700ml의 증류수에 1.78g의 KNO₃와 각각의 stock 용액을 1ml씩 가하고 2.5233g의 완충용액(HEPPS)을 넣어서 녹인 후 pH meter를 이용하여 2N NaOH로 pH를 8.0으로 맞추고 증류수로 1L을 정량한 후 각각의 Erlenmeyer flask에 나누어 면전으로 막고 호일을 씌워서 멸균하여 사용하였다.

2) 미세조류의 분리원

본 실험에 사용한 광합성 미세조류는 토양 및 퇴비로부터 생육이 우수한 cyanobacteria를 선별하기 위하여 충남 아산지역의 비옥 토양 및 퇴비 등을 시료로 채취하였다.

3) 미세조류의 분리 및 생리적 특성분석

분리배지는 cyanobacteria가 광합성과 질소고정을 할 수 있는 독립영양균의 특성을 감안하여 탄소원과 질소원이 전혀 포함되지 않고 약간의 무기염과 미량의 mineral이 포함되어있는 기본배지(M.M Allen)를 변형시킨 고체배지를 사용하였다. 채취된 시료는 고체배지에 도달한 후 형광등 조명을 이용한 배양기 안에서 30℃로 수일간 배양하였다. Colony 발생 후 single trichome method를 수차례 반복하여 순수배양 시켰으며, 이 과정을 수 차례 반복하였다. 분리된 균주의 동정은 colony형태, morphological 특성, cell size, 성장속도 등을 비교하는 방법 등으로 시도하였다. 선별한 10균주의 특성을 colony형태, cell모양, colony색깔, color pigment (phycocyanine, phycoerythrin, allophycocyanine)의 함량을 비교·측정하였고 absorption spectrum을 측정하였다.

제 2 절 흡수능이 우수한 균체 선발실험

1) 계대배양 및 접종 균주의 준비

본 실험에서 재현성 있는 실험 결과를 얻기 위해서 중요한 것은 여러 차례의 실험에서 동일한 상태의 접종량을 확보하는 것이다. 따라서 많은 량의 접종균주를 확보하기 위해 20ml cap tube에 2ml씩 액체배지를 넣고 멸균시켜 냉각시킨 후 균체를 접종하여 형광등 조명을 이용한 배양기에서 15일간 정치배양 하였다. 이 중 성장이 우수한 균체를 선발해 멸균된 200ml Erlenmeyer flask의 50ml 액체배지에 계대배양시킨 후 15일간 shaking-incubator을 이용하여 배양하여 이것을 접종원으로 사용하였다. 배양조건은 형광등조명을 이용한 명(12시간)/암(12시간)으로 처리했고, 온도는 28℃이며 120rpm으로 shaking시켜 배양하였다.

2) 미세조류의 선발 및 처리

미세조류의 생육과 질소 및 인산의 흡수능이 우수한 균체를 선발하기 위하여 멸균된 BG-11(NO_3) 고체배지와 액체배지에서 각각 실험하였다.

고농도 질산태 질소의 환경에서도 생육이 우수한 균체를 선발하기 위해 질산태 질소의 농도를 250ppm, 500ppm, 750ppm으로 달리 처리한 고체배지에 순수 분리된 균주를 화염 멸균된 백금으로 평판도말 하여 3반복 처리하였다. 처리된 균체는 형광등 조명을 이용해 명(12시간)/암(12시간) 조건으로 온도가 28℃인 배양기에서 20일간 배양시킨 후 생육상태를 조사하였다.

질소원(암모니아태와 질산태 질소)에 따른 균체의 생육율과 흡수능을 비교하기 위해서 액체배지에 동일한 상태의 접종량으로 처리하는 것은 무엇보다도 중요하다. 따라서, 4주전에 2차례 계대배양 시켜 생육된 균체를 각각 100ml 원심분리 tube에 넣고 고속원심분리기를 이용해 10,000 rpm에서 10분간 원심분리 후 상정액만을 분리하고, 균체는 멸균한 증류수 2차례 세척하였다. 분리된 균체에 20ml의 증류수를 가하여 잘 흔들어준 후 혼합된 균체는 20cc 멸균된 주사기(syringe)에 부어서 3차례 통과시켜 잘게 분쇄시키고, 준비된 250ml Erlenmeyer flask의 100ml 액체배지에 비슷한 양으로 접종하였다.

모든 균체는 2반복 처리했으며 처리된 균체는 형광등을 이용한 shaking-incubator에서 온도는 28℃로 유지시켰고, 광처리는 명(12시간) / 암(12시간)조건으로 20일간 배양하면서 생육상태와 질소 및 인산 제거율을 조사하였다.

3) 시설 재배지의 폐양액

질소와 인산의 흡수능이 우수한 토착 균체를 배양하기 위해 본 실험실에서 사용한 폐양액은 토마토와 장미를 양액재배한 서울시립대학교 환경원예학과 온실로부터 공급받았고, 실온에서 보관하였으며 후속 실험에서 미생물의 배양액으로 사용하였다.

4) 선발균주의 폐양액 처리

본 실험은 온실에서 자연광을 이용하여 2L와 15L reactor에서 폐양액을 이용한 선발균주의 최적배양 실험을 수행했다. 균체배양은 폐양액을 멸균하지 않은 상태로 배양액으로 사용하였고, air의 공급을 위해 배양기의 외부에 유량이 약 3L/min 정도인 air pump를 설치하고, 배양기의 유속량을 각각 조절하였다. 균체의 배양시 pH의 조절, 완충용액의 효과, 폭기량의 차이에 따른 각각의 균체 생육상태를 조사하였다.

제 3 장 분석방법

1) 균체의 엽록소 a 함량

균체내의 엽록소 a 함량은 배양중인 처리구에서 시료 1ml을 Eppendoff tube에 취해 10,000 rpm으로 10분간 원심분리하여 상징액과 균체를 분리하였다. 분리한 상징액은 배지내 인산과 질소를 분석하기 위해 다른 tube에 넣어서 냉장 보관하였다. 상징액이 완전히 제거된 균체(pellet)에 100% 메탄올 1ml을 넣고서 30초간 vortex 시킨 후 10분간 70℃로 중탕처리 하였다. 메탄올에 우려나온 엽록소 a 함량을 측정하기 위해서 다시 10,000 rpm으로 10분간 원심분리하여 상징액만을 취해서 spectrophotometer(Model U-2000, HITACHI)을 이용하여 663nm와 730nm에서 흡광도를 측정하였다. 엽록소 a 함량은 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{엽록소 a (ug/ml)} = (A_{663} - A_{730}) / 78.74$$

2) 균체 건물량

균체의 건물량(dry weight)은 20일간 배양된 100ml 균체를 배양액과 함께 250ml 원심분리용 tube에 가한 후 10,000 rpm에서 25℃로 15분간 원심분리하고 상징액은

완전히 제거한 후 침전된 균체(pellet)를 증류수로 세척한 후 원심분리를 반복하였다. 원심분리 후 무게를 알고 있는 filter paper (Whatman No. 2)에 여과시킨 후 고형물을 건조기에서 80℃로 12시간 건조하여 무게를 측정하였다.

3) 세포내의 총인산 함량과 총질소 함량

세포내 총인 함량과 총질소 함량 분석은 균체를 건조시켜 습식 산분해 후 Kjeldahl(전질소 함량) 및 ammonium-molybdate법(전인산 함량)을 이용하였다.

건조세포 중량을 측정한 후 건조된 시료를 Kjeldahl tube에 넣고 5ml 진한 H₂SO₄와 촉매제를 넣고서 잘 혼합한다. Kjeldahl tube를 block digester(Tecator 2040 digester)에서 처음에는 낮은 온도로 가열한 후 점차 온도를 높여서 약 360℃~400℃에서 2시간정도 무색이 될 때 까지 분해시킨 후 냉각 시켜서 20ml의 증류수를 가하여 vortex 시킨다. 인산분석을 위해서 분해된 25ml의 시료 중 5ml을 취해서 다른 tube에 담아서 보관하고, 나머지 시료는 Kjeldahl 증류장치(Tecator 1030 analyzer)를 이용하여 총 질소함량을 측정하였다.

세포내 총 인산은 분해된 시료 중 1ml에 증화용액(4N NaOH) 1ml를 넣고 발색시약(ammonium-molybdate와 ascorbic acid의 혼합액) 2ml와 증류수 6ml를 가하여 vortex 시켜 30분간 실온에서 발색시킨 후 spectrophotometer(Model U-2001, HITACHI)을 이용하여 663nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다.

4) 배양액내 질산태 질소와 인산분석

배양액과 폐양액내에 존재하는 질산태 질소와 인산의 함량은 자동분석기(FIASTAR 5000, Foss Tecator)을 이용하여 측정하였다. 인산과 질소분석은 염색소 a 측정시 분리된 상정액을 증류수를 가하여 희석한 후에 인산은 720nm에서 질소는 540nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다.

5) 폐양액의 성분분석

폐양액의 성분분석을 위해서 filter paper(Whatman No. 42)를 사용하여 여과시킨 후 여과된 폐양액은 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, pH을 분석하였다. 질산태 질소와 인산의 함량은 자동분석기(FIASTAR 5000, Foss Tecator)을 이용하여 측정하였다. 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 나트륨, 철, 아연, 망간, 구리와 같은 무기이온은 원자흡광도계(Perkin Elmer model AA100)로 측정하였고, pH는 pH meter(Model 71 P, ISTEK)로 측정하였다.

표 1. Cyanobacteria의 BG-11 배지조성

No	Component	Stock g/100mL	g/ℓ
1	NaNO ₃ (KNO ₃)		1.5 (1.78)
2	K ₂ HPO ₄	4.0	0.04
3	MgSO ₄ · 7H ₂ O	7.5	0.075
4	CaCl ₂ · 2H ₂ O	3.6	0.036
5	Citric Acid	0.6	0.006
6	Ferric ammonium citrate	0.6	0.006
7	EDTA(disodium magnesium salt)	0.1	0.001
8	Na ₂ CO ₃	2.0	0.02
9	Trace Metal Mix A6(see below)		1.0(mL)
	Agar(if needed)		10
	Distilled water		1.0(L)
Trace Metal Mix A6			
1	H ₃ BO ₄		2.86
2	MnCl ₂ · 4H ₂ O		1.81
3	ZnSO ₄ · 7H ₂ O		0.222
4	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O		0.39
5	CuSO ₄ · 5H ₂ O		0.079
6	Co(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O		0.0494
	Distilled water		1.0(L)

• HEPPS (0.01M : pH 8.0) ⇒ 2.5233g/L

• Activated carbon (0.1%) ⇒ 1g/L

제 3 장 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

제 1 절 토착균의 동정

다양한 토양시료로부터 무질소, 무탄소 영양상태에서 생육 가능한 균주를 선별해서 균주의 형태와 크기 및 현미경관찰(heterocyst의 유무, 위치, trichome의 모양 및 길이, 분자의 유무)을 통하여 동정한 결과 filamentous form의 cyanobacteria 18종 (Genus: *Anabaena*, *Nostoc*, *Calothrix*, *Sytonema*, *Cylindrosprum*, *Hepalosiphon*) 및 unicellular form cyanobacteria 1종(Genus : *Synechococcus*)을 동정하여 각각 표 2와 같이 명명하였다.

제 2 절 폐양액의 성분 분석

시설재배지(토마토 및 장미, 상치 온실에 진드기 및 흰가루병이 발생하여 장미 재배지로 대체)의 폐양액 농도를 살펴보기 위하여 영양액 및 폐양액의 질소, 인산, 가리 등을 분석한 후 각각 성분농도를 영양액 및 폐양액의 비율로 계산하였다(표3, 표 4). 장미재배의 경우 NO₃, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu등은 재배 후 농도가 5~32% 감소하였으나 P은 3배, Na는 3.3배, Mg은 4배정도 높게 나타났으며 토마토 재배의 경우 모든 양분의 농도가 배액이 급액 보다 높았으며 이는 재배시 수분흡수량이 양분흡수량 보다 매우 높은 것에 따른 것으로 사료되며 재활용 기술이 반드시 필요한 것으로 확인되었다. 또한 폐양액은 미생물의 성장에 필요한 영양소를 다량 함유하고 있어서 cyanobacteria를 대량배양하기에 충분할 것으로 사료된다.

표 1. 국내 논 토양에서 분리한 cyanobacteria.

	<i>Anabaena</i>	HA101, HA201, HA301, HA401, HA701
	<i>Nostoc</i>	HN101, HN206, HN301, HN601, HN701
Filamentous cyanobacteria	<i>Calothrix</i>	HC101, HC201, HC301, HC601, WR115
	<i>Sytonema</i>	HS101
	<i>Cylindrosprum</i>	HY101
	<i>Hepalosiphon</i>	HH101
Unicellular cyanobacteria	<i>Syneochoccus</i>	RF-7

표 3) 토마도 수경재배 영양액 및 폐양액의 양분농도 변화

	영양액	폐양액	폐양액/영양액
	----- ppm -----		(%)
NO ₃ -N	119.196	156.84	131.6
PO ₄ -P	13.097	41.584	371.5
K	109.59	282.396	257.7
Ca	219.141	368.064	168.0
Mg	31.155	128.226	411.6
Na	7.676	24.139	314.5
Fe	0.958	1.750	182.7
Mn	0.088	0.338	384.1
Zn	0.248	0.610	246.0
Cu	0.057	0.173	303.5

표 4) 장미 수정재배 급액 및 배액의 양분농도 변화

	영양액	폐양액	폐양액/영양액
	----- ppm -----		(%)
NO ₃ -N	76.0	62.0	81.6
PO ₄ -P	24.93	17.48	596.6
K	90.2	86.41	95.8
Ca	112.3	102.38	91.2
Mg	50.85	44.823	88.1
Na	11.644	38.766	332.9
Fe	1.582	1.492	94.3
Mn	0.537	0.404	75.2
Zn	0.171	0.150	87.7
Cu	0.231	0.157	68.0

제 3 절 흡수능이 우수한 균체 선발 및 생리적 특성

1) 질산태 질소의 농도에 따른 생육비교

토양으로부터 순수분리, 동정한 19종의 균주(*Calothrix* 5종, *Anabaena* 5종, *Nostoc* 5종 및 기타 4종)를 대상으로 질산태 질소가 포함된 고체배지에서 생육상태를 비교한 결과는 표 5와 같다. 질소농도가 1배($\times 1$)인 고체배지에서 2차례 반복 실험한 결과 대체로 *Anabaena* sp. (5종)과 *Calothrix* sp. (5종)의 매우 우수한 생육상을 보였고, *Nostoc* sp.에서는 HN601, HN701이, 기타 종에서는 RF-7, *Hepalosiphon*이 우수한 것으로 나타났다. 고체배지의 질산염 농도를 2배($\times 2$)로 처리한 배지에서는 *Anabaena* sp.와 *Nostoc* sp.이 매우 우수한 생육상을 보였지만 *Calothrix* sp.는 다소 생육이 부진하였다. 또한 기타 종에서는 1배($\times 1$)배지에서와 같은 결과로 *Synechococcus* RF-7와 *Hepalosiphon*의 생육이 우수하였다. 고체배지의 질소염 농도를 3배($\times 3$)로 처리한 배지에서는 다소 모든 균주들의 생육이 억제되었고 이는 고농도 질산염에 따른 염류 영향 때문에 억제된 것으로 판단된다. 고농도 질소 배지에서는 *Synechococcus* RF-7, *Anabaena* HA301, *Nostoc* HN701, HN601만이 우수한 생육상태를 보였고, *Calothrix* sp.는 배지내의 질소농도가 높아짐에 따라 생육이 급격히 저하되었다. 따라서 폐양액의 질소농도가 대체로 1배에서 2배정도인 점을 고려한다면 *Anabaena* 계통과 *Nostoc* 계통 및 RF-7 등이 본 연구에 적합한 것으로 판단된다.

2) 분리 균주의 생리적 특성

고농도 질소배지에서 생육이 우수한 것으로 나타난 *Anabaena*(5종) sp.와 *Nostoc*(5종) sp.를 선발해 이들 균주의 생리적 특성을 조사하였다. 선발된 *Nostoc* 5종(HN101, HN206, HN301, HN601, HN701)과 *Anabaena* 5종(HA101, HA205, HA301, HA401, HA701)의 color pigment의 함량은 표 6과 같다. 색소체(color pigment)는 조

류세포 내 틸라코이드(thylakoid) 막 표면에 분포한 피코빌리솜(phycobilisome)에 존재하며, 색소체(color pigment)는 phycoerythrin, phycocyanin, allophycocyanin, phycoerythrocyanin 등 4종류가 있다. 이들 색소체의 역할은 조류세포의 색소체(color pigment)안에 엽록소(chlorophyll)가 들어있어서 조사된 빛 에너지를 흡수하여 화학 에너지로 바꿔주는 중요한 역할을 한다. 피고시아닌(phycocyanin)의 함량은 대체로 *Anabaena* 계통에서 높게 나타났고, phycocyanin과 allophycocyanin의 함량은 *Nostoc* 계통에서 높게 나타났다. 남조류는 빛의 환경에 따라 피코빌리솜(phycobilisome)의 조성을 바꿈으로서 적응하는 것으로 보고되고 있어서, 환경적응력은 *Nostoc* 계통이 우수한 종으로 판단되었다. 특히 *Nostoc* HN601, HN206, HN101은 색소체 함량이 높을 뿐만 아니라 4종의 색소체 중 3성분을 적당량 함유하고 있어서 적응력이 우수한 종으로 판단된다.

3) 질소원에 따른 균체의 성장특성

일반적으로 과채류 및 엽채류 수경재배에 사용되는 영양액은 질소원으로 NO_3^- 를 사용하지만 특별한 경우에는 NH_4^+ 도 많이 사용된다. 분리균주(*Nostoc* 5종, *Anabaena* 5종)을 $\text{BG}_0 + \text{NH}_4$ 및 $\text{BG}_0 + \text{NO}_3$ 액체배지에서 7일 동안 배양한 후 질소원에 따른 균주의 생육을 조사한 결과는 표(7~8)와 같다. 질소원의 효과(NH_4 또는 NO_3)는 각 균주에서 크게 나타나지 않았지만 균주에 따른 생육은 크게 나타나 *Anabaena* HA301, HA401과 *Nostoc* HN601과 HN701이 다른 균주에 비하여 생육이 우수하였다. 균주의 생육에 따른 배지의 인산농도 변화는 *Nostoc* HN601 및 HN701이 타 균주에 비하여 크게 저하되어 균의 인산흡수능이 우수한 것으로 판단되었다(표 11~14). *Anabaena* 종은 질소원에 따른 인산의 흡수능이 큰 차이를 보이지 않았지만, *Nostoc* 종은 NH_4^+ 를 첨가했을 때 모든 균체에서 흡수능이 우수하였다. 특히 *Nostoc* HN601 및 HN701의 인산흡수는 질소원을 NH_4^+ 로 첨가하였을 때 더욱 우수하였다.

4) 분리균주의 양분흡수 및 보유능력 분석

분리균주 내 질소 및 인산함량을 측정하기 위하여 10종의 균주(*Nostoc* 5종, *Anabaena* 5종)를 각각 3주간 배양한 후 여과, 건조시켜 균체의 총 질소 및 총 인산함량을 각각 Kjeldahl법 및 Ammonium Molybdate법으로 측정하여 정량 하였다(표 15). 액체배지에 배양된 균체의 생육상태는 *Anabaena* HA101와 *Nostoc* HN601, HN701이 다른 균체들에 비해 우수하였다. 균체의 총 질소함량은 *Anabaena* sp.에서 32~61 mg·N/GDW이었고, *Nostoc* sp.에서는 33~63 mg·N/GDW로 높게 나타났다. 이들 균체 중 질소 함량은 *Nostoc* HN701이 63.3 mg·N/GDW로 가장 높게 나타났다. 균체의 총 인산함량은 *Anabaena* sp.와 *Nostoc* sp. 사이에 큰 차이가 없었으나, 조사균주 중 인산함량은 *Nostoc* HN601이 14.1 mg·P/GDW로 가장 높게 나타났다.

5) BG-11(NO₃) 액체배지에서 균체의 생육비교

국내 토양에서 순수 분리된 19종의 균주 중 생육율과 질소 및 인산 흡수율이 우수한 균주를 선발하기 위해서 250ml Erlenmeyer flask의 100ml 액체배지에 각 균주를 접종시켜 생장 특성을 조사한 결과는 그림(1~4)과 같다.

분리된 *Anabeana* HA101, HA201, HA301, HA401, HA701을 액체배지에 접종시켜 생리적 특성을 조사하였다(그림 1). 5종의 *Anabeana* sp. 접종량은 0.7~0.9mg Chl a/L이었고, 액체배지에서 21일동안 배양하면서 생육을 조사한 결과 *Anabeana* HA101, HA401, HA701이 다른 균주에 비해 점진적인 증가율을 나타냈고, 이중 *Anabeana* HA101의 엽록소 a 함량이 0.7에서 4.3 mg Chl a/L로 크게 증가하였다. 균주의 생육에 따른 배지의 인산농도 변화는 *Anabeana* HA101과 HA701이 배양 초기에 4.72 mg/L에서 배양 21일 후에는 0.68 mg/L과 0.27 mg/L로 크게 저하시켜 타 균주에 비해 흡수능이 매우 우수하였다. 배지 내 질소의 농도는 *Anabeana* HA401만이 배양 초기 197.7 mg/L에서 배양 후 132.1 mg/L로 3 mg/L/day씩 흡수하였다. *Anabeana* HA101, HA301, HA701도 배양 21일 동안 총 32 mg/L에서 42 mg/L씩 제거하였지만 흡수율이 매우 낮았다. 5종

의 *Anabeana* 중 HA101, HA701은 생육율과 인산 제거율이 우수하였지만 질소 제거율이 낮아서 폐양액 처리에는 효과적이지 못한 것으로 판단된다.

분리된 *Nostoc* HN101, HN206, HN301, HN601, HN701을 액체배지에 접종시킨 후 균주 생육상태와 배지 안에 인산 및 질소제거율을 조사한 결과는 그림 2와 같다. 5종의 *Nostoc* 중 특히 HN601과 HN701은 생육율과 질소 및 인산 제거율이 타 균주들에 비해 매우 우수한 것으로 나타났다. *Nostoc* HN701의 엽록소 a 함량은 배양 9일까지 급속히 증가하였고 이때 균체 성장속도는 0.32 mg chl a/L/day이었다. 9일 이후부터 21일까지는 다소 linear growth를 보였지만 최종 엽록소 함량이 4.8 mg Chl a/L로 최대값을 나타냈다. 또한 *Nostoc* HN701은 배지 내의 인산농도를 배양 초기 4.41 mg/L에서 배양 후 9일만에 0.26 mg/L로 거의(99%) 모두 제거하였고, 이때 흡수속도는 0.50 mg/L/day로 매우 우수하였다. 배지 내 질소 농도변화는 배양 초 197.7 mg/L에서 배양 후 21일만에 89.3 mg NO₃-N/L로 급속히 제거해 흡수속도가 5.23 mg/L/day로 타 균주들에 비해 높은 제거율을 나타냈다. 또한 *Nostoc* HN601은 배양 도중에 오염되어 14일 동안 배양되었지만 점진적으로 증가하는 우수한 생육을 나타내었고, 배지 내 질소와 인산 제거율도 *Nostoc* HN701과 비슷한 경향의 제거율을 나타냈다.

Nostoc HN301, HN206에서도 인산 농도가 배양초기 4.99 mg/L에서 배양 후 21일에 각각 0.94 mg/L와 0.75mg/L로 높은 인산 제거율을 보였지만 장시간의 배양시간이 요구되며 이 균주들의 질소 흡수율과 생육이 부진해서 본 실험 적합하지 않았다. 5종의 *Nostoc* 중 HN601과 HN701은 생육율과 인산 및 질소 제거율이 우수하여 단시일 내에 폐양액의 질소와 인산을 제거하기 위한 본 실험 목적에 적합한 것으로 판단된다.

5종의 *Calothrix* HC101, HC201, HC301, HC601, *Calothrix* WR115와 기타 4종의 균주 *Synechococcus* RF-7, *Hepaloshipon*, *Sytonema*, *Cilindrosprum*을 액체배지에 접종하여 배양시 균주의 생육과 균주에 의한 배지 내 인산 및 질소 제거율의 경시적 변화를 측정하였다(그림 3, 4). 배양 후 균주에 따른 생육율은 *Calothrix* HC101, HC301과 *Synechococcus* RF-7, *Hepaloshipo*가 다른 처리균주 보다 우수하였다. 균주의 생육에 따른 배지 내 인산 제거율은 HC201이 배양 15일째에 95%이상의 제거율을 보였고, HC301, HC101과 RF-7은 배양 20일째에 60%이상의 제거율을 보였다. 또한 균주의 생육에 따른 배지 내 질소 제거율은 HC301만이 배양 초기에 247.1 mg/L에서 배

양 20일 후에 149.1 mg/L로 대략 100mg의 제거율을 보였다. *Calothrix* HC301은 생육율과 질소 제거율이 우수하였지만 인산 흡수능이 저조했고, RF-7은 생육율과 인산 제거율은 우수하였지만 질소 흡수능이 다소 저조했다.

6) 균주에 의해 제거된 배양액 내의 인산 및 질소함량과 균체에 흡수된 인산 및 질소 함량 비교

분리 균주(*Nostoc* 5종, *Anabaena* 5종)를 액체배지에 10일간 배양한 후 여과, 건조시켜 균체의 총 질소 및 총 인산함량을 분석하고 여과된 배양액 내의 총 인산과 총 질소를 측정된 결과는 표 16과 같다. 균체에 의해 제거된 배양액 내의 인산 및 질소 함량과 균체에 흡수된 인산 및 질소 함량은 *Anabaena* HA101, HA301, HA701과 *Nostoc* HN101, HN301, HN701에서 매우 비슷한 결과치로 나타났다. *Anabaena* sp.와 *Nostoc* sp.는 이형세포(heterocyst)를 갖는 cyanobacteria로 질소가 부족한 환경에서는 이형세포(heterocyst)를 만들어서 대기중의 질소를 이용해 질소고정을 하고 질소가 풍부한 환경에서는 이형세포를 만들지 않고 주위의 질소성분을 이용한다고 한다. 본 실험 결과도 균체가 대기중의 질소를 이용하기보다는 배양액 내의 질소를 흡수해 성장함을 확인할 수 있었다. 배양액 내의 질소 흡수량은 *Anabaena* HA401이 제일 높았고, 인산 흡수량은 *Nostoc* HN206이 제일 높았다. 균체의 총 질소함량은 *Anabaena* sp.는 5.99~7.61 mg-N이고, *Nostoc* sp.는 7.24~10.01 mg-N로 높게 나타났으며 *Nostoc* HN701이 10.01 mg-N로 가장 높게 나타났다. 균체의 총 인산함량은 *Anabaena* 종에서 비슷한 함량을 함유하고 있고, *Nostoc* 종에서는 0.25~0.53 mg-P으로 다소 차이를 보였다. 광합성 미생물의 성장시 탄소와 물 다음으로 중요한 성분이 질소이다. 일반적으로 cyanobacteria는 건조 중량당 질소가 4~9%를 차지하는데 분리균주의 총 질소함량을 분석한 결과 질소함량이 높은 것으로 나타나 균체의 생물비료로서의 이용이 가능할 것으로 사료된다.

7) 선발된 균체의 흡수능 비교

국내 토양에서 순수 분리된 19종의 균주를 액체배지에 접종시켜 배양된 균주의 생육과 배지 내 인산 및 질소 흡수율을 조사한 결과 생육율과 흡수능이 우수한 4종 (*Anabaena* HA101, *Nostoc* HN601, HN701, *Synechococcus* RF-7)의 균주를 선발하였다. 4종의 균체를 250ml Erlenmeyer flask의 100ml배지(BG-II-NO₃)에 각각 접종량을 증가시켜 배양기간 중 균주의 생육율과 배지 내 질소 및 인산 제거율을 조사해 흡수능이 우수한 균체를 최종 선발하였다(그림 5). 4종의 균주를 액체배지에서 18일 동안 배양 후 균체의 생육율을 조사한 결과 *Nostoc* HN601, HN701, *Synechococcus* RF-7은 접종 후 5일까지는 다소 느린 생육율을 보이다가 9일부터 12일 사이에 4배 정도의 급속한 생육율을 보였다. 균주의 생육에 따른 배지 내 인산 흡수능은 선발된 4종의 균주에서 높은 제거율을 보였고, 특히 *Nostoc* HN601, HN701은 배양 초기 5.3 mg/L에서 배양 후 12일에 거의 100%로 급속히 제거하였고 이때 흡수속도는 0.44mg /L/day로 인산의 흡수능이 매우 우수한 것으로 나타났다. 배지 내 질소의 흡수능은 생육율과 매우 흡사한 경향을 보여 주었다. 접종 후 배양 초기에는 다소 큰 차이를 보이지 않았지만 9부터 12일 사이에 질소가 거의 240 mg/L에서 150 mg/L로 급속히 흡수되었다. 따라서 균체의 생육은 접종 후 일정 기간이 경과하면 이들 균체들이 배지 및 주변 환경에 적응한 후 최대신장을 위해 질소와 인산을 흡수하는 것으로 판단된다. 선발된 4종(*Anabaena* HA101, *Nostoc* HN601, HN701, *Synechococcus* RF-7)의 균체 중 생육율과 배지 내 질소 및 인산 제거율을 조사한 결과 *Nostoc* HN601은 단시일 내에 폐양액의 질소와 인산을 제거함으로써 본 연구의 목적에 적합한 것으로 판단되어 폐양액 처리를 위한 균체로 최종 선발하였다. 또한 가용성인산이온(PO₄⁻)은 세포 내 에너지로서 중요한 역할을 담당하는 ATP의 성분이며, nitrate 환원과정 중 세포대사의 중요한 역할을 담당하며, 조류가 질산염을 흡수 할 때 가용성인산에 의해서 영향을 받는다^{21, 22})고 한다. 본 연구에서는 인의 농도를 5mg/L로 고정해서 수행했는데 배양이 장기화되는 경우 인의 부족에 의한 성장 둔화에 대해서 더 고려 해야하고, 향후 연구가 추가되어야 한다고 사료된다.

표 5. 다양한 농도의 BG-11(KNO₃) 교체배지 조건에서 분리 균주의 생육 비교

Strain	NO ₃ -N		
	250 ppm	500 ppm	750 ppm
HC101	+++	++	++
HC201	++++	+	+
HC301	+++++	++	+
HC605	+++	++	+
Calothrix WR 115	+	+	•
HN101	+++	+++	++
HN206	++	++	-
HN301	+	+++	++
HN601	++++	++++	+++
HN701	++++	++++	+++
HA101	+++++	+++++	++
HA205	++++	+++++	+
HA301	+++++	+++++	+++
HA401	+++++	++++	-
HA701	+++++	++++	+
Sytonema	+	+++	-
RF-7	+++++	+++++	+++
Hepalosphon	++++	++++	+
Cylindrosprum	+	+ -	•

표 6. 분리균주의 color pigment (phycocyanine, allophycocyanine 및 phycoerythrin)의 특성

Strain	phycocyanine	allophycocyanine	phycoerythrine
	----- ug/ml Cell -----		
<i>Anabaena</i> HA101	61.1 (0.9)	29.1 (1.5)	4.1 (0.4)
<i>Anabaena</i> HA205	71.3 (3.2)	18.8 (3.2)	3.7 (0.3)
<i>Anabaena</i> HA301	67.2 (2.8)	12.1 (0.9)	5.4 (0.3)
<i>Anabaena</i> HA401	75.3 (4.2)	15.9 (0.3)	2.1 (0.2)
<i>Anabaena</i> HA701	77.2 (0.9)	24.1 (0.3)	2.9 (0.2)
<i>Nostoc</i> HN101	41.2 (5.2)	29.5 (4.2)	41.3 (3.7)
<i>Nostoc</i> HN206	60.1 (2.1)	31.2 (2.1)	32.2 (0.9)
<i>Nostoc</i> HN301	42.2 (0.9)	29.2 (2.1)	22.7 (1.8)
<i>Nostoc</i> HN601	61.2 (5.1)	84.0 (0.7)	12.2 (3.3)
<i>Nostoc</i> HN701	71.1 (3.1)	4.0 (0.9)	32.2 (2.1)

() : Standard deviation (n=3)

표 7. 분리균주 *Anabaena*의 질소원에 따른 생육(배지: BG 11-NH₄)

		Days after Inoculation			
Inoculum	질소원	0	1	2	7
		----- relative growth (%) -----			
<i>Anabaena</i> HA101	NH ₄	100	100.22 (1.77)	104.67 (0.30)	107.90 (0.24)
<i>Anabaena</i> HA205	NH ₄	100	100.39 (5.68)	112.75 (1.22)	118.98 (3.34)
<i>Anabaena</i> HA301	NH ₄	100	90.62 (15.97)	109.80 (3.19)	169.31 (14.06)
<i>Anabaena</i> HA401	NH ₄	100	96.27 (9.43)	118.41 (8.47)	134.91 (2.46)
<i>Anabaena</i> HA701	NH ₄	100	95.09 (2.88)	97.44 (3.99)	102.51 (0.56)

() : Standard deviation (n=3)

표 8. 분리균주 *Anabaena*의 질소원에 따른 생육(배지: BG 11-NO₃)

		Days after Inoculation			
Inoculum	질소원	0	1	2	7
		----- relative growth (%) -----			
<i>Anabaena</i> HA101	NO ₃	100	100.36 (3.48)	108.65 (4.00)	111.25 (4.2)
<i>Anabaena</i> HA205	NO ₃	100	98.68 (1.51)	106.73 (2.12)	111.25 (9.3)
<i>Anabaena</i> HA301	NO ₃	100	106.34 (2.79)	111.63 (0.95)	162.5 (9.2)
<i>Anabaena</i> HA401	NO ₃	100	97.88 (4.93)	102.38 (1.38)	111.21 (8.3)
<i>Anabaena</i> HA701	NO ₃	100	104.57 (1.95)	109.03 (3.96)	110.21 (9.2)

() : Standard deviation (n=3)

표 9. 분리균주 *Noctoc*의 질소원에 따른 생육(배지: BG 11-NH₄)

Inoculum	질소원	Days after Inoculation			
		0	1	2	7
		----- relative growth (%) -----			
<i>Noctoc</i> HN101	NH ₄	100	103.87 (10.24)	101.71 (2.90)	102.81 (11.02)
<i>Noctoc</i> HN206	NH ₄	100	91.59 (21.37)	112.47 (1.25)	113.02 (8.48)
<i>Noctoc</i> HN301	NH ₄	100	96.02 (36.77)	97.89 (13.17)	111.12 (4.66)
<i>Noctoc</i> HN601	NH ₄	100	96.81 (0.46)	97.91 (0.79)	163.73 (4.38)
<i>Noctoc</i> HN701	NH ₄	100	100.80 (1.16)	102.68 (0.26)	173.73 (0.78)

() : Standard deviation (n=3)

표 10. 분리균주 *Noctoc*의 질소원에 따른 생육(배지: BG 11-NO₃)

Inoculum	질소원	Days after Inoculation			
		0	1	2	7
		----- relative growth (%) -----			
<i>Noctoc</i> HN101	NO ₃	100	96.32 (12.49)	110.45 (1.77)	121.41 (8.2)
<i>Noctoc</i> HN206	NO ₃	100	104.47 (1.96)	109.87 (3.60)	129.50 (4.1)
<i>Noctoc</i> HN301	NO ₃	100	106.38 (5.17)	103.23 (2.68)	130.51 (4.7)
<i>Noctoc</i> HN601	NO ₃	100	102.06 (3.17)	104.93 (49.29)	158.92 (9.3)
<i>Noctoc</i> HN701	NO ₃	100	98.83 (1.05)	108.58 (2.78)	162.23 (7.8)

() : Standard deviation (n=3)

표 11. 분리균주 *Anabaena*의 질소원에 따른 인산제거 효과(배지: BG 11-NH₄)

		Days after Inoculation			
Inoculum	질소원	0	1	2	7
		----- relative growth (%) -----			
<i>Anabaena</i> HA101	NH ₄	100	92.41 (2.55)	85.21 (0.60)	80.47 (8.01)
<i>Anabaena</i> HA205	NH ₄	100	94.20 (6.55)	91.77 (3.06)	85.24 (3.86)
<i>Anabaena</i> HA301	NH ₄	100	97.99 (0.31)	92.32 (2.56)	85.04 (2.11)
<i>Anabaena</i> HA401	NH ₄	100	94.73 (0.43)	93.42 (6.13)	94.29 (18.84)
<i>Anabaena</i> HA701	NH ₄	100	94.95 (9.04)	86.98 (5.27)	81.31 (7.36)

() : Standard deviation (n=3)

표 12. 분리균주 *Anabaena*의 질소원에 따른 인산제거 효과(배지: BG 11-NO₃)

		Days after Inoculation			
Inoculum	질소원	0	1	2	7
		----- relative growth (%) -----			
<i>Anabaena</i> HA101	NO ₃	100	95.36 (3.19)	92.81 (8.40)	77.00 (3.98)
<i>Anabaena</i> HA205	NO ₃	100	98.67 (3.15)	90.87 (2.73)	78.22 (4.01)
<i>Anabaena</i> HA301	NO ₃	100	99.64 (5.31)	89.50 (1.47)	82.84 (3.68)
<i>Anabaena</i> HA401	NO ₃	100	96.32 (3.10)	90.80 (1.87)	76.30 (7.10)
<i>Anabaena</i> HA701	NO ₃	100	97.75 (4.38)	92.16 (10.86)	87.95 (2.24)

() : Standard deviation (n=3)

표 13. 분리균주 *Noctoc*의 질소원에 따른 인산제거 효과(배지: BG 11-NH₄)

		Days after Inoculation			
Inoculum	질소원	0	1	2	7
		----- relative growth (%) -----			
<i>Noctoc</i> HN101	NH ₄	100	96.95 (0.39)	92.74 (0.90)	86.64 (6.51)
<i>Noctoc</i> HN206	NH ₄	100	97.98 (4.93)	94.15 (0.93)	86.22 (5.68)
<i>Noctoc</i> HN301	NH ₄	100	93.51 (0.54)	96.42 (2.58)	88.08 (8.63)
<i>Noctoc</i> HN601	NH ₄	100	53.35 (11.12)	45.68 (4.53)	15.14 (9.84)
<i>Noctoc</i> HN701	NH ₄	100	53.12 (0.75)	22.84 (0.87)	2.06 (1.94)

() : Standard deviation (n=3)

표 14. 분리균주 *Noctoc*의 질소원에 따른 인산제거 효과(배지: BG 11-NO₃)

		Days after Inoculation			
Inoculum	질소원	0	1	2	7
		----- relative growth (%) -----			
<i>Noctoc</i> HN101	NO ₃	100	96.32 (12.49)	110.45 (1.77)	121.41 (8.2)
<i>Noctoc</i> HN206	NO ₃	100	104.47 (1.96)	109.87 (3.60)	129.50 (4.1)
<i>Noctoc</i> HN301	NO ₃	100	106.38 (5.17)	103.23 (2.68)	130.51 (4.7)
<i>Noctoc</i> HN601	NO ₃	100	102.06 (3.17)	104.93 (49.29)	158.92 (9.3)
<i>Noctoc</i> HN701	NO ₃	100	98.83 (1.05)	108.58 (2.78)	162.23 (7.8)

() : Standard deviation (n=3)

표 15. 분리균주의 생육 및 질소, 인산 함량

Strain	Growth	Nirogen	Phosphorus
		--- mg-N/GDW---	--- mg-P/GDW---
<i>Anabaena</i> HA101	+++	41.2 (3.1)	6.2 (0.9)
<i>Anabaena</i> HA205	+++	51.3 (2.9)	3.3 (2.5)
<i>Anabaena</i> HA301	++	44.7 (1.7)	5.8 (3.0)
<i>Anabaena</i> HA401	++	32.3 (0.7)	12.1 (2.5)
<i>Anabaena</i> HA701	++++	61.1 (2.5)	13.3 (1.1)
<i>Nostoc</i> HN101	++	55.7 (4.7)	4.3 (4.1)
<i>Nostoc</i> HN206	+++	33.9 (2.9)	2.2 (3.2)
<i>Nostoc</i> HN301	+++	41.2 (0.3)	13.8 (1.1)
<i>Nostoc</i> HN601	+++++	59.4 (2.7)	19.1 (2.1)
<i>Nostoc</i> HN701	+++++	63.3 (3.2)	14.3 (1.1)

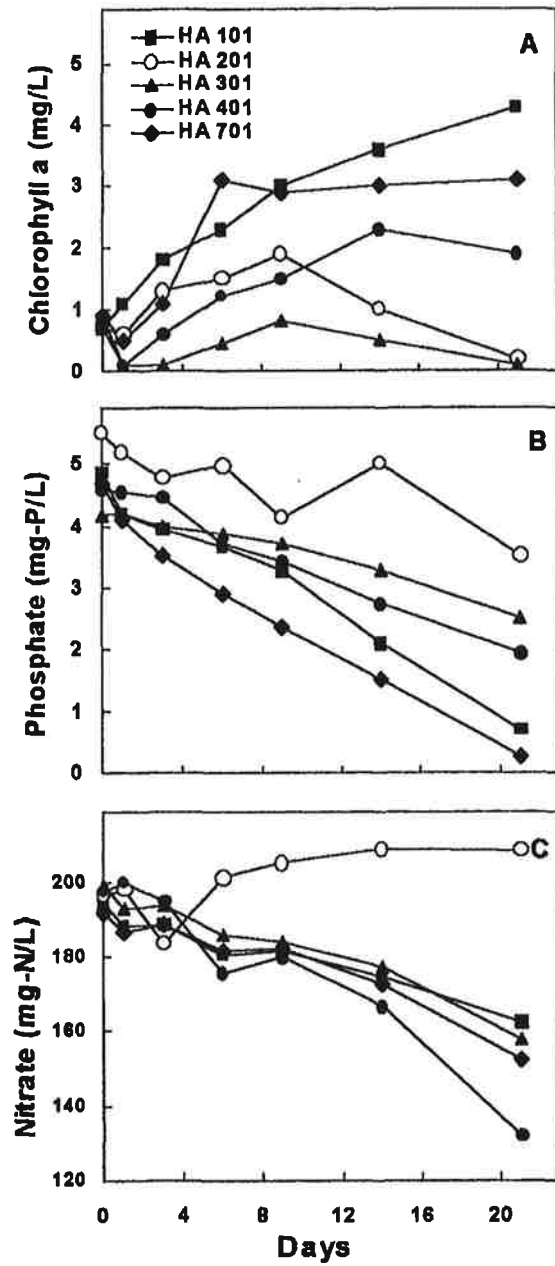


그림 1. 국내 토양에서 분리한 *Anabaena* HA101, HA201, HA301, HA401, HA701의 생육상태(A)와 인산(B) 및 질소(C)의 흡수능 비교.

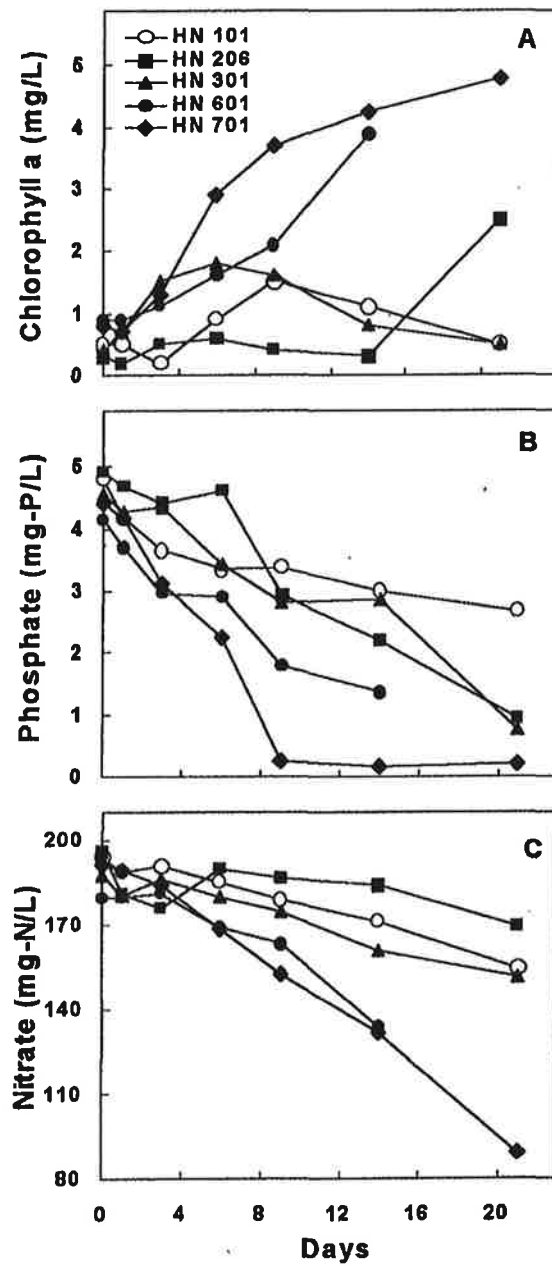


그림 2. 국내 토양에서 분리한 *Nostoc* HN101, HN206, HN301, HN601, HN701의 생육상태(A)와 인산(B) 및 질소(C)의 흡수능 비교.

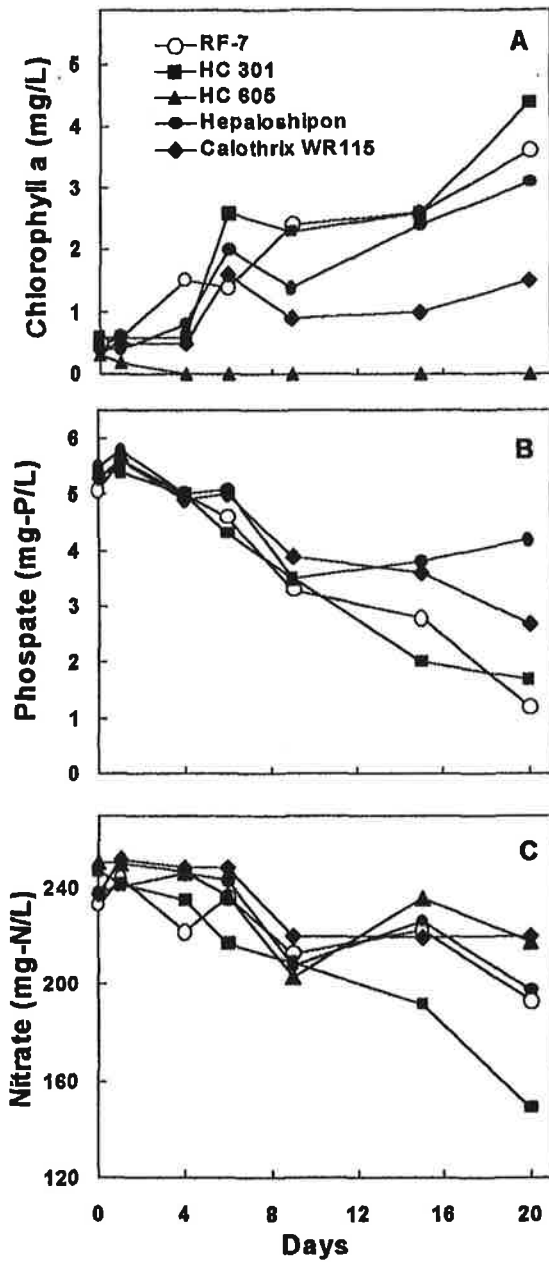


그림 3. 국내 토양에서 분리한 *Synechococcus* RF-7, *Calothrix* HC301, HC605, WR115, *Hepaloshipon*의 생육상태(A)와 인산(B) 및 질소(C)의 흡수능 비교.

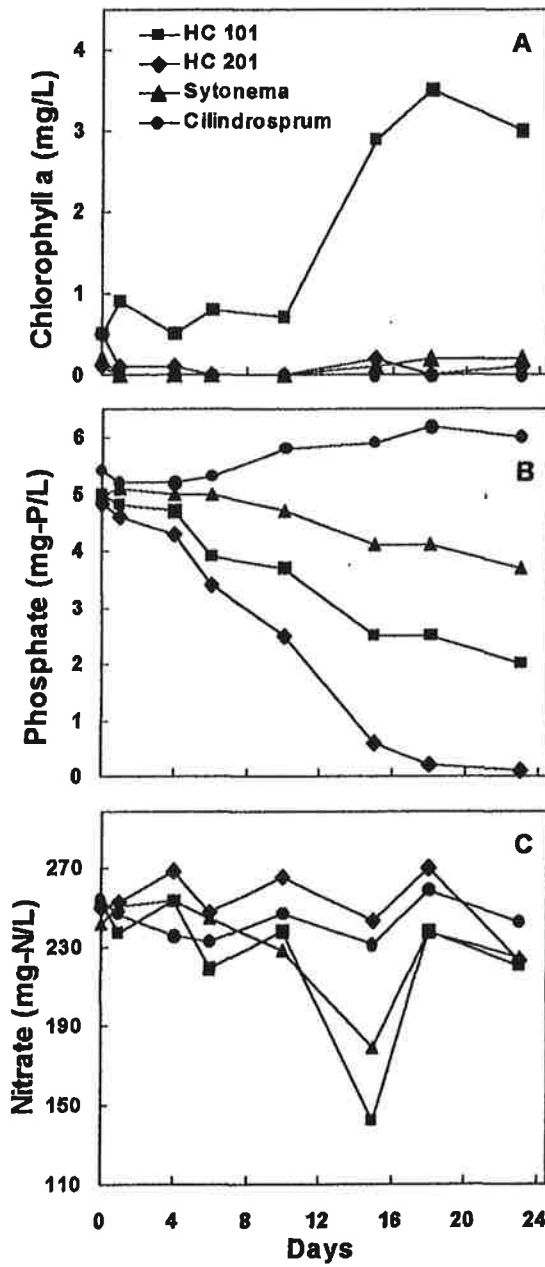


그림 4. 국내 토양에서 분리한 *Sytonema*, *Cilindrosprum*, *Calothrix* HC101, HC201의 생육과 인산 및 질소의 흡수능 비교 (A: 생육 상태, B: 인산제거, C: 질소제거).

표 16. 균체에 의해 제거된 배양액 내의 인산 및 질소함량과 균체에 흡수된 인산 및 질소함량 비교.

Genus	Strain	Uptake from Medium		Accumulation in the Cell	
		NO ₃ -N mg	PO ₄ -P mg	Nitrogen mg-N	Phosphate mg-P
<i>Anabaena</i>	HA101	5.04 (0.80)	0.42 (0.04)	5.99 (0.25)	0.47 (0.05)
	HA201	2.50 (0.67)	0.28 (0.01)	7.60 (0.61)	0.34 (0.02)
	HA301	7.14 (0.19)	0.24 (0.11)	7.10 (0.58)	0.46 (0.08)
	HA401	9.55 (1.37)	0.32 (0.04)		0.55 (0.02)
	HA701	7.07 (0.35)	0.42 (0.01)	7.61 (0.23)	0.58 (0.03)
<i>Nostoc</i>	HN101	6.36 (0.49)	0.28 (0.01)	7.24 (0.38)	0.40 (0.03)
	HN206	8.26 (1.93)	0.43 (0.00)		0.53 (0.02)
	HN301	7.17 (0.16)	0.27 (0.01)	8.08	0.33 (0.01)
	HN701	8.88	0.28	10.01	0.25

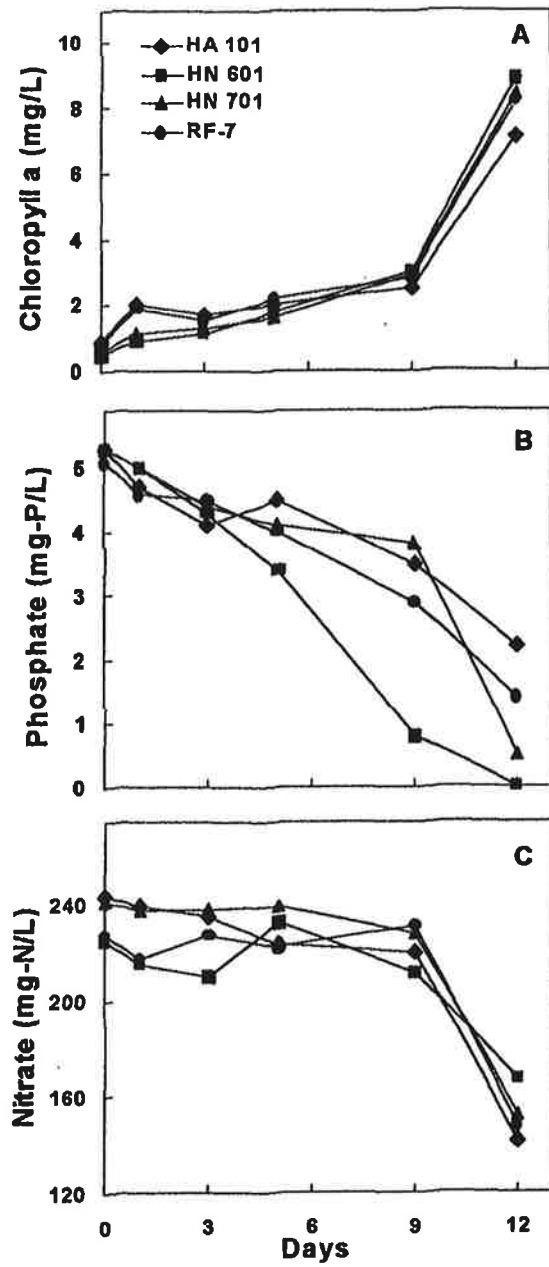


그림 5. 선발된 *Nostoc* HN601, HN701 *Synechococcus* RF-7, *Anabaena* HA101의 생육과 인산 및 질소의 흡수능 비교 (A: 생육상태, B: 인산제거, C: 질소제거).

제 4 절 최종 선발된 균체의 최적배양 및 폐양액 처리 효과

1) pH에 따른 *Nostoc* HN601의 성장특성

국내 토양에서 분리한 19종의 균주 중 생육 및 인산 흡수 효율이 우수한 것으로 판단된 *Nostoc* HN601을 BG-11(NO_3) 액체배지에 배양하면서 배지의 pH 조절에 따른 생육율과 인산 및 질소의 제거율 변화를 경시적으로 조사한 결과는 그림 6와 같다. pH 변화에 따른 선발 미생물의 생육 변화는 그림 6(A)와 같다. 각각의 harvesting 시기에서 pH 8.0의 chlorophyll a 함량을 100%으로 하여 각 처리구 균체의 상대적 생육량을 %로 계산하였다. *Nostoc* HN601의 경우 pH 7.5 buffering system에서 pH 8.0보다 약간 우세한 생육율(5~7%)을 나타내었으나 유의성 있는 차이는 아니었다. 반면 pH 8.5 buffering system에서는 생육 초기에는 유의성 있는 생육저해(20~30%)를 나타내었다. 이러한 생육저해는 접종후 14일까지 계속되었으며 접종 후 18일이 지나면서 pH 8.0과 같은 생육을 나타내었다. 단 접종 후 18일째 측정치의 경우 차이가 매우 심해 유의성은 인정되지 않았다.

배지의 pH에 따른 균체에 의한 인산 제거율에 미치는 영향은 그림 6(B)와 같다. *Nostoc* HN601의 경우 인산 제거율이 pH 7.5 buffering system에서 생육초기에 증가하였으나 그 후(접종 4일 후)계속하여 줄어들어 처리 14일 후의 인산제거율은 pH 8.0 buffering system에 비하여 18%까지 감소하는 것으로 나타났다. pH 8.5 buffering system에서는 *Nostoc* HN601의 인산 제거율이 pH 8.0 buffering system과 비교하였을 때 유의성 있는 차이를 나타내지 못하였다. 균의 생육이 pH 8.5 buffering system에서 평균적으로 20%정도 감소한 경우와 비교하면 균주 당 인산 흡수율은 크게 증가한 것으로 나타났다.

배지의 pH에 따른 배지의 질소 제거율은 그림 6(C)와 같다. pH 7.5 buffering system에서 *Nostoc* HN601에 의한 질소제거율은 pH 8.0 buffering에 비하여 전반적으로 10%이상 늘어난 것으로 나타났으며, 반면에 pH 8.5 buffering system에서는 평균 20%정도가 감소한 것으로 나타났다. 이 같은 결과로 *Nostoc* HN601의 생육과 질소 및 인산 흡수율의 최적 pH는 8.0로 설정하였다.

2) 선발균주의 질소원에 대한 특성

선발균주인 *Nostoc* HN601의 생육 및 인산 흡수에 대한 질소원의 효과는 그림 7과 같다. 일반적으로 과채류 및 엽채류 수경재배에 사용되는 영양액은 질소원으로 NO_3^- 를 사용하지만, 특별한 경우에는 NH_4^+ 도 많이 사용된다. 따라서 기존배지(BG-11)에 질소원으로 NH_4^+ 와 NO_3^- 를 첨가하고 *Nostoc* HN601를 1.2 mg·Chl a/L로 접종하였고, 배양기 내의 공기 주입량(폭기량)을 2L/min으로 조절하여 13일간 배양하였다. 질소원으로 NH_4^+ 를 첨가하였을 경우 NO_3^- 를 첨가했을 때 보다 초기 생육이 현저하게 억제되었다. NO_3^- 첨가시 접종 후 2일에서 4일 사이에 생육이 1.7 mg·Chl a/L에서 5.7 mg·Chl a/L으로 크게 증가하였으나 NH_4^+ 경우에는 접종 후 13일 후에 생육이 5.9 mg·Chl a/L에 이르렀다. 인산의 흡수량도 질소원이 NO_3^- 인 경우가 NH_4^+ 를 첨가했을 때보다 우수하게 나타났다. 인산의 농도는 질소원으로 NO_3^- 를 첨가한 경우에 초기 농도가 5.0 mg/L에서 10일째에는 1.86 mg/L로 감소하였고 11일째부터 거의 100%로 제거되었다. 질소원으로 NH_4^+ 를 첨가한 경우에 초기 인산 농도는 5.9 mg/L이었으나 10일 후에 인산농도는 5.5 mg/L로 초기농도와 큰 차이가 없었으나, 11일째에 NO_3^- 를 첨가한 경우와 마찬가지로 인산함량이 거의 100%로 제거되었다.

3) 폐양액의 pH 조절시 완충제의 효과

본 실험에서는 선발된 균체를 폐양액에 배양하기 위해서 폐양액의 pH를 조절할 때 완충제(HEPPS)를 이용한 buffering system과 완충제를 사용하지 않고 NaOH만으로 pH를 조절한 Non-buffering system 방법을 비교하였다(그림 8). 선발 균주인 *Nostoc* HN601은 1.1 mg Chl a/L로 접종하였고, 배양기 내의 공기 주입량(폭기량)을 2L/min으로 조절하여 8일간 배양하면서 폐양액 내 생육율과 인산 제거율을 조사하였다. 두 처리구에서 *Nostoc* HN601의 생육은 접종 1일 후부터 급속도로 증가하여 배양 8일째에는 엽록소 함량이 6.98 mg·Chl a/L로 생육이 우수하였다. 인산의 흡수는 배양초기에 buffering system에서 더 빠른 흡수율을 보였지만 3일 후부터 non-buffering

system에서 더 빠른 흡수율을 나타냈고 5일 후부터는 거의 97%이상 인산을 제거하였으며, buffering system에서는 8일째에 95.%의 제거율을 나타냈으나 흡수능에서는 큰 차이가 없었다. 이때 두 system의 인산 제거율은 1.5 mg/L/day로 매우 우수하였다. 따라서 두 system을 이용하여 *Nostoc* HN601을 8일간 배양하였을 때 균의 성장 및 인산 흡수율은 큰 차이가 없어서 폐양액을 이용해 균체를 대량배양 하기 위해서는 폐양액의 pH만 조절하여 주는 non-buffering system이 본 연구의 목적에 적합한 것으로 나타났다. Non-buffering system은 buffering system에 비하여 매우 경제적이나 배양기간 중 pH가 조금씩 변하여 높아지기 때문에 pH에 민감한 미생물 배양에는 적합하지 않다. 하지만 일반적으로 Filamentous cyanobacteria는 생육 온도, pH 변화, 영양 조건 등 각종 환경 stress에 강한 내성을 갖는 것으로 알려져 있으며 또한 이러한 성질 때문에 다양한 이화학적 성질의 토양에서 생육이 왕성한 것으로 보고 되고있어서 본 연구의 결과와 같은 것으로 판단된다.

4) 폐양액의 pH 조절에 따른 균체의 생육과 pH 변화

본 실험에서는 앞의 실험결과에 따라 non-buffering system 방법으로 토마토 수경 재배 후 폐양액의 pH를 원액자체(5.0)와 pH 7.0 및 pH 8.0으로 조절한 다음 *Nostoc* HN601을 접종해 10일간 배양하면서 생육을 및 폐양액 내 pH 변화를 조사한 결과는 그림 9와 같다. 폐양액 초기 pH를 7.0 및 8.0으로 조절하였을 경우 원액 자체(pH 5.0)로 재배하는 경우보다 생육율이 우수하였고 성장율은 pH 8.0 > pH 7.0 > pH 5.0(원액) 순으로 나타났다. pH를 조절한 경우 생육율은 대략 0.74 mg·Chl a/L/day 이었고, 원액자체인 경우에는 0.3 mg·Chl a/L/day로 성장율이 두 배이상 차이가 났다. 초기 pH를 7.0과 8.0로 조절시 두 처리에 따른 생육율은 큰 차이를 보이지 않아 약알칼리의 범위에서는 pH 변화에 민감하지 않는 것으로 보였다. 이는 Gordon 등⁴⁰⁾의 보고와 같이 대부분의 조류는 약알칼리에서 최대 성장을 보이는데, 본 미세조류도 약알칼리에서 조류의 생육이 우수하였다. 원액(pH 5.0)과 초기 pH를 달리한 조건에서 *Nostoc* HN601은 배양시간이 경과함에 따라 배지 내 pH가 증가하였는데, 이와 같

은 pH의 증가는 cyanobacteria의 성장에 따른 일반적인 현상으로서 cyanobacteria 대사산물의 분비에 의한 것으로 생각된다. 또한 폐양액에는 다른 균이 포함되어 있을 수 있으므로 가능한한 pH를 높여주는 것이 bacteria등 타종의 미생물 생육을 억제하면서 cyanobacteria를 배양하는데 유리한것으로 사료된다.

5) 배양기에서 선발균주의 특성

2L-bioreactor를 이용한 선발된 *Nostoc* HN601의 생육과 생육 중 배지(BG-II-NO₃) 내의 인산 제거율을 조사한 결과는 표 5와 같다. 배양기내의 공기 주입량(폭기량)은 2L/min으로 조절하였으며 접종량은 2.8 mg·Chl a/L이었다. 배양조건은 형광등조명을 이용한 배양기에서 명(12시간)/암(12시간)으로 처리했고, 온도는 28℃로 7일간 배양하였다. 배양기내에서의 생육은 접종 후 24H까지는 큰 차이를 나타내지 않았으며 접종 후 2~5일 사이에 1.3 mg·Chl a/L 속도로 단시일 내에 가장 많이 증가하였다. 반면에 인산 제거율은 접종 후 초기(10시간 이내)에 7.6 ppm에서 5ppm로 가장 크게 나타났으며 접종 2일 후에 초기 농도의 절반으로 줄어든 후 접종 7일에 배지의 인산 농도가 거의 100%로 제거되었다. 이러한 결과는 *Nostoc* HN601의 생육과 인산 흡수율이 반드시 일치하는 것이 아니고 *Nostoc* HN601이 인산을 초기 다량으로 흡수하고 이를 이용하여 생육이 활성화됨을 나타내는 것으로 사료된다.

6) 선발균주에 의한 폐양액 처리

폐양액을 이용한 *Nostoc* HN601의 대량배양과 폐양액 내 인산제거를 위해서 15L-photobioreactor를 설계, 제작하여 배양한 결과는 그림 10과 같다. 본 실험에서 는 앞의 실험결과에 따라 최적 배양조건인 non-buffering system 방법으로 토마토 수경재배 후 폐양액의 pH를 8.0으로 조절한 다음 *Nostoc* HN601을 접종했다. 초기 접종량은 0.1 mg·Chl a/L로 실험실 배양조건(1~2 mg·Chl a/L)보다 낮은 수준으로 처

리하여 11일간 배양하였다. 본 실험의 조건은 작물을 재배하는 온실에서 자연광을 이용하여 수행되었고 배양기내의 공기 주입량(폭기량)은 4L/min으로 조절하였다. 배양기간 중 평균 광도 및 온도는 표 17과 같다. 이러한 조건에서 균의 생육은 접종 후 5일까지는 다소 linear growth를 보였지만 5일후부터 매우 크게 증가하는 경향을 보였고, 접종 11일 후에는 초기 접종량의 50배에 달하는 생육율을 보였으며 이때 균체 성장속도는 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{Chl } a/\text{L}/\text{day}$ 로 생육이 우수하였다. 인산의 흡수는 배양초기에 더욱 왕성하여 접종 후 3일 후에 초기 인산 농도의 40%로 감소하였으며 접종 후 9일후에 폐양액 배지의 인산 농도는 100% 제거되었고 이때 흡수속도는 $1.3 \text{ mg}/\text{L}/\text{day}$ 로 실험실 조건에서 배양된 균체보다 제거율이 매우 우수하였다. 폐양액에 *Nosto* HN601을 배양한 경우 인산농도는 배양초기 11.5 mg/L에서 배양 9일후에는 거의 고갈되었으나, 9일 후에도 엽록소의 함량이 계속 증가하는 경향을 나타냈다. 즉 *Nosto* HN601은 세포내에 다량의 다중인산염(polyphosphate)을 저장하여 배지내에 인산이 고갈된 상태에서도 세포생장이 당분간 계속되는 것으로 보인다. 이러한 결과는 설계한 photobioreactor가 별도의 보조광 없이도 본 연구의 목적인 폐양액에서의 인산 제거 및 균체 생산에 가능한 방법으로 판단되었다.

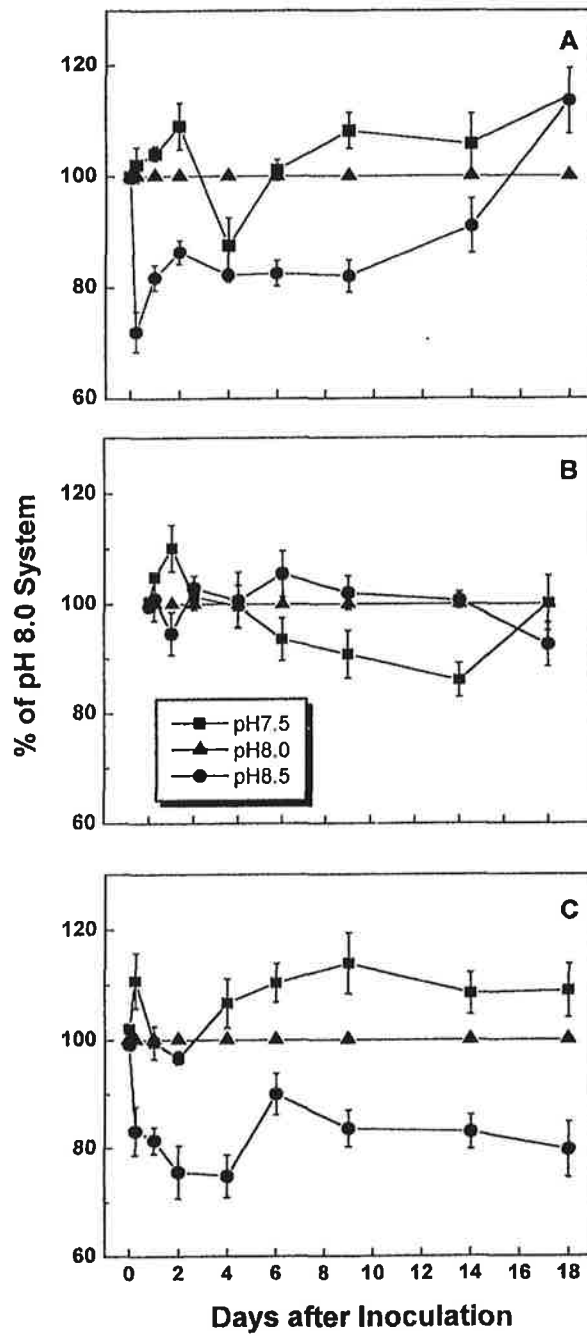


그림 6. 배지내의 pH가 *Nostoc* HN601의 생육(A) 과 인산 제거율(B) 및 질소 제거율(C)에 미치는 영향

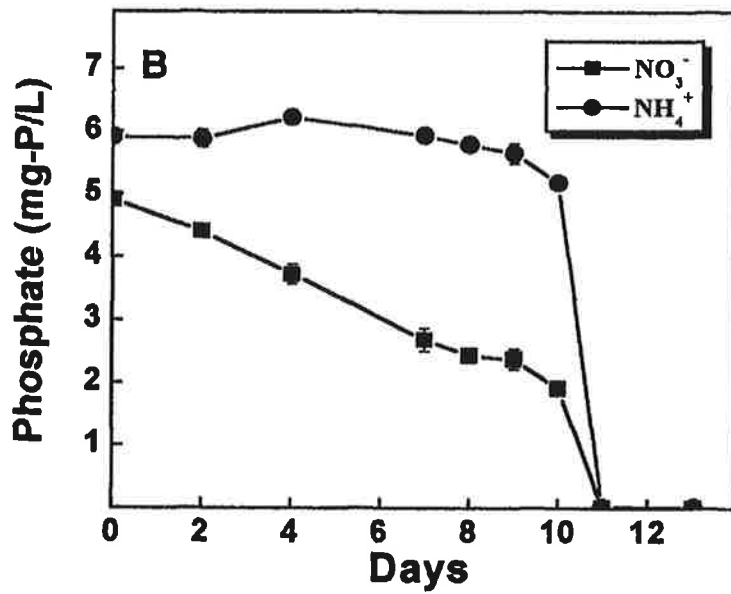
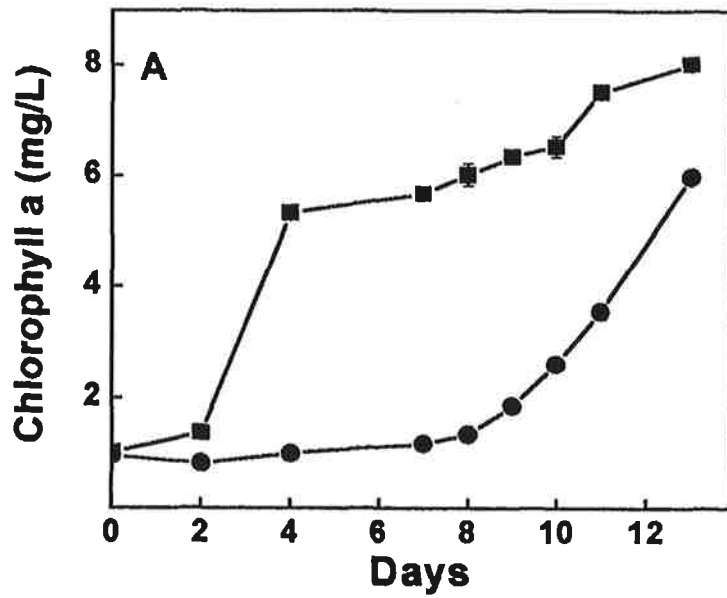


그림 7. 2L 배양기에서 *Nostoc* HN601의 생육(A) 및 인산 제거(B)에 미치는 질소원(NO_3^- , NH_4^+)의 영향 (폭기량 2L/min).

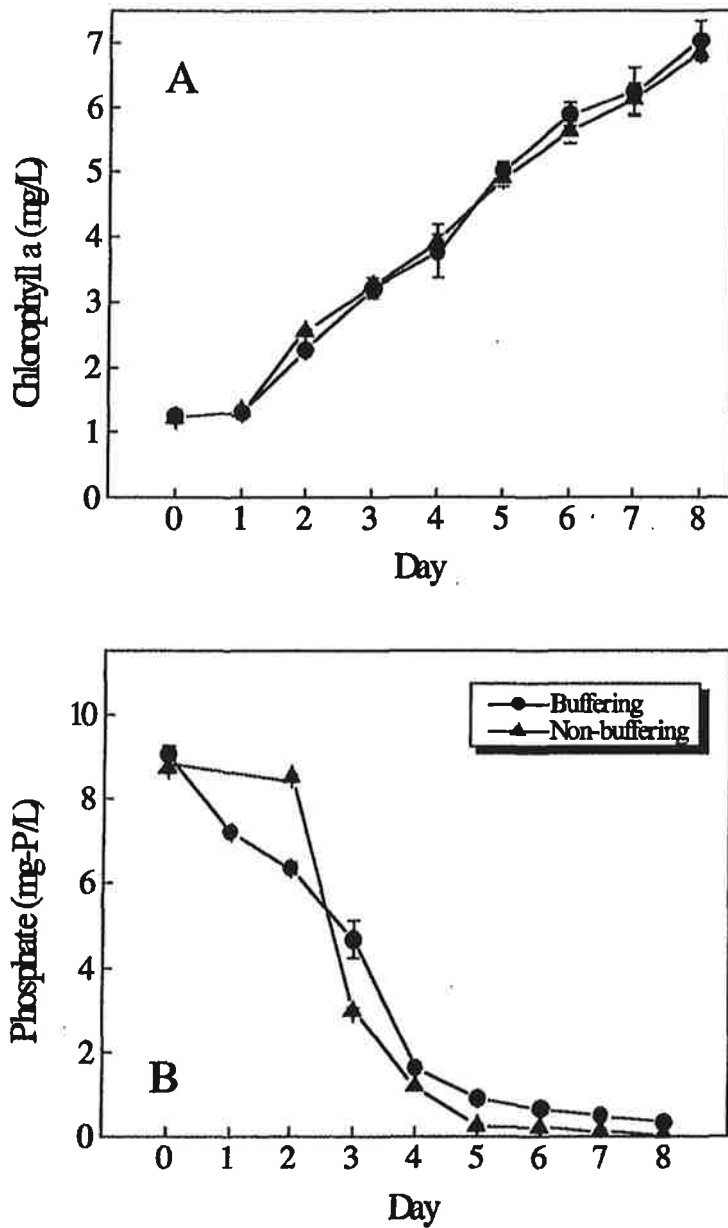


그림 8. 폐양액 pH 조절 방법(Buffering system, Non-buffering system)에 따른 2L 배양기에서 HN 601의 생육(A) 및 인산제거(B) 효과 (배지: 폐양액, 초기 pH: 8.0, 폭기량: 100ml/min)

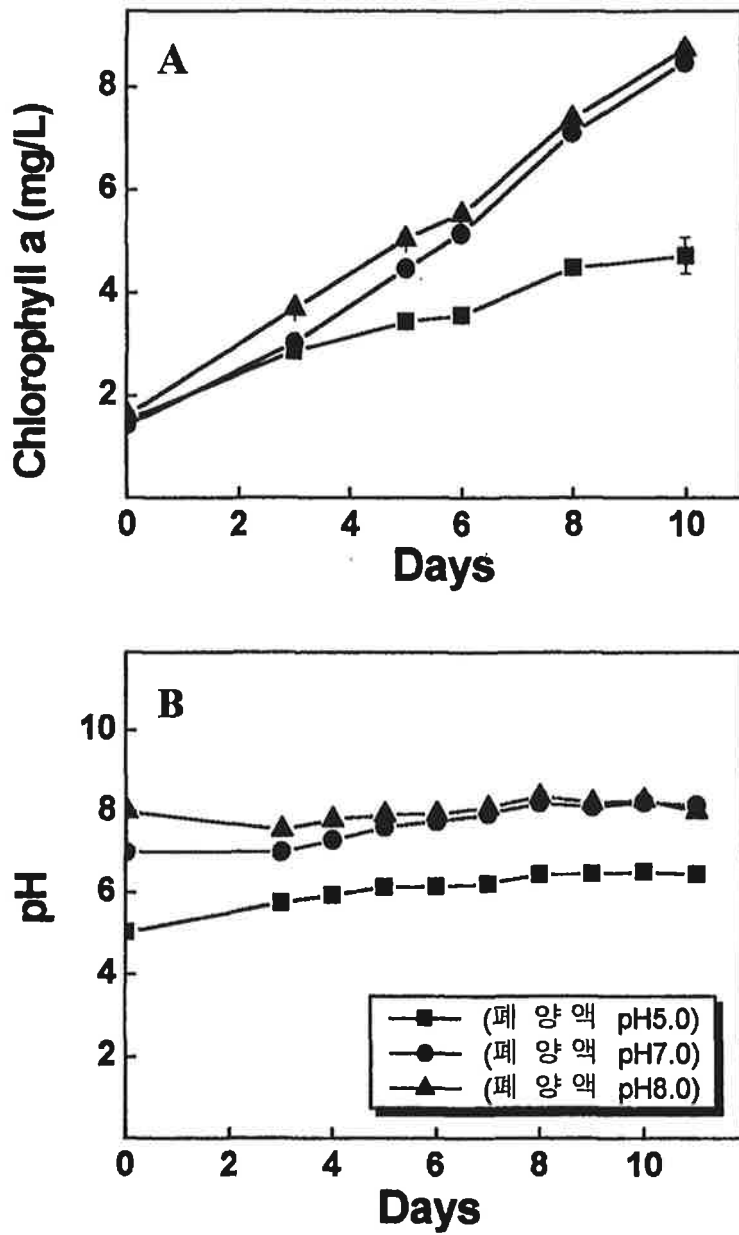


그림 9. 초기 폐양액 pH가 선발균주 *Nostoc* HN601의 생육에 미치는 영향(A) 및 생육 중 폐양액 내의 pH 변화(B) (배지: 토마토 폐양액, 폭기량 2L/min).

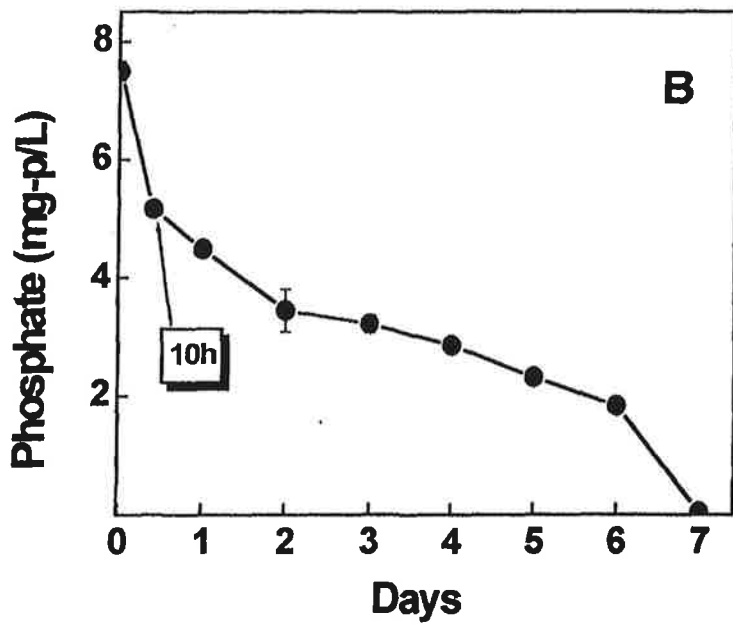
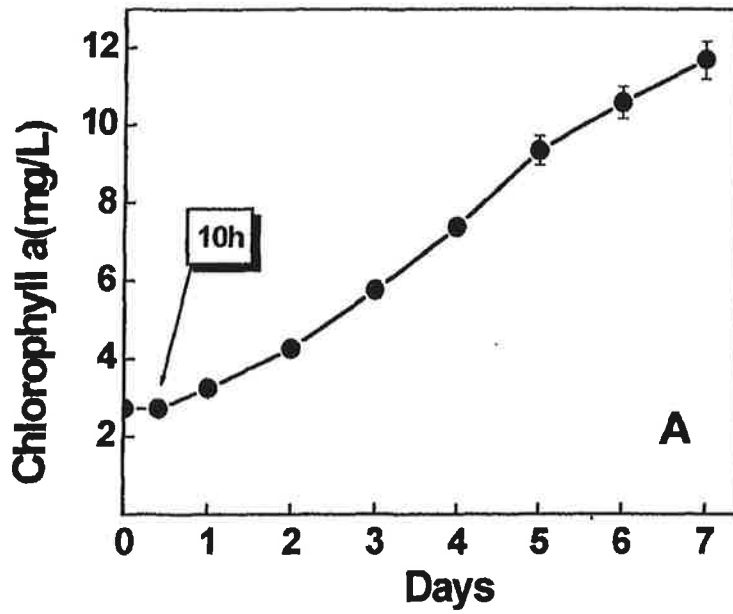


그림 10. 2L 배양기에서 선발된 *Nostoc* HN601의 생육(A) 및 인산제거 효과(B) (배지: BG-11(NO_3^-), 폭기량: 2L/min, pH: 8.0으로 조절).

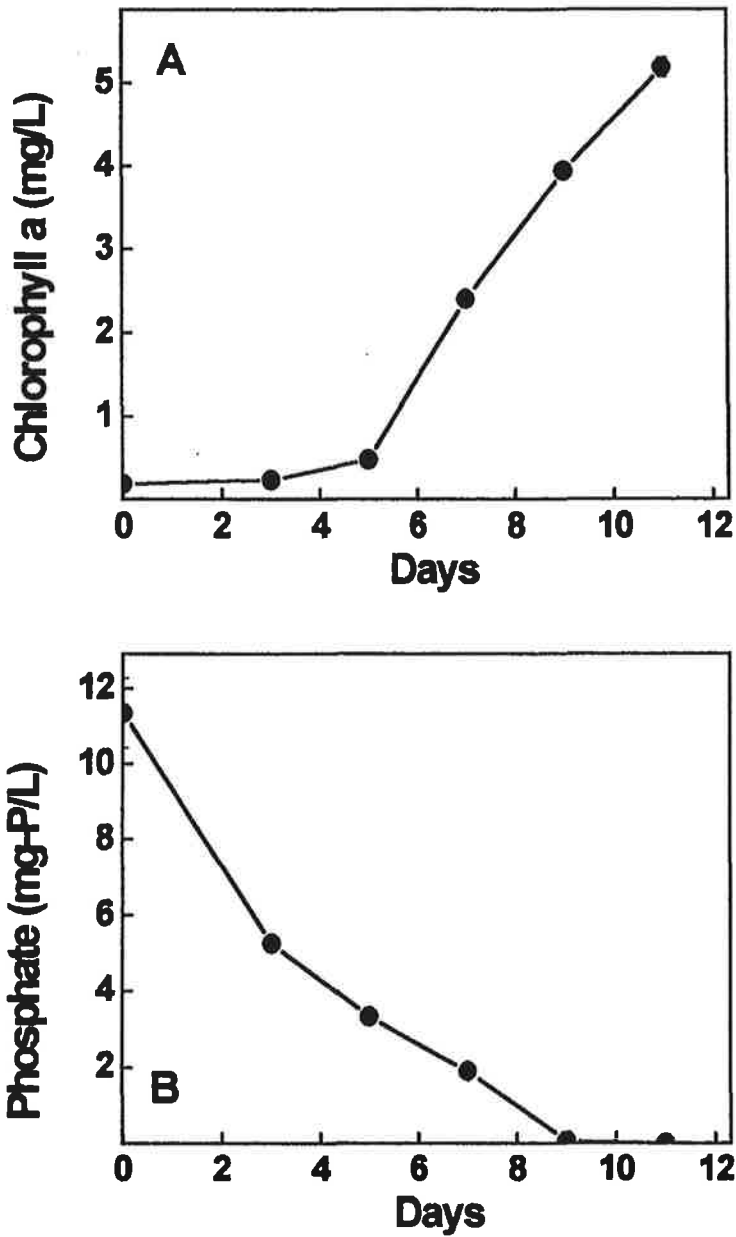


그림 11. 자연광 상태에서 15L 배양기를 이용한 *Nostoc* HN601의 생육 (A) 및 인산 제거 효과(B) (배지: 폐양액, pH: 8.0으로 조절, 폭기량: 4L/min).

표 17. 일중 대기, 배양온도 및 광도 변화

시간	대기온도 ℃	배양온도 ℃	광도 ×100 Lux
08 : 00	26	23	129
11 : 00	36	24	633
14 : 00	33	26	531
17 : 00	27	27	112
20 : 00	24	27	-
23 : 00	21	27	-
02 : 00	20	26	-
05 : 00	18	25	0.05

제 4 장 참고문헌

1. Shwleif, G. and C. J. Soeder, 1980. *Algal Biomass: Production and Use*, Elsevier North-Holland Biomedical Press, Amsterdam.
2. Van Os, E. A. 1994. Closed growing systems for more efficient and environmental friendly production. *Acta Horticulturae*(in press).
3. Chevalier, P. and J. de la Noüe, 1985. Effet of immobilized hyperconcentrated algae for ammonium and orthophosphate removal from wastewater. *Biotechnol. Lett.* 7:395-400
4. De la Noüe, J. and D. Proulx, 1988. Biological tertiary treatment of urban wastewaters with chitosan-immobilized *Phormidium*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 29: 292-297.
5. D'Elia, C. F., P. A. Steudler, and N. Corwin, 1977. Determination of total nitrogen in aqueous samples using persulfate digestion. *Limnol. Oceanogr.* 22: 760-764.
6. Guterstam, B. and J. Todd, 1990. Ecological engineering for wastewater treatment and its application in new England and Sweden. *Ambio* 19: 173-175.
7. Aziz, M. A. and W. J. Ng. 1993. Industrial wastewater treatment using an activated algae-reactor. *Water Sci. Technol.* 28: 71-76.
8. De la Noüe, J. and A. Basseres, 1989. Biotreatment of anaerobically digested swine manure with microalgae. *Biological Wastes* 29: 17-31.
9. De la Noüe, J. and D. Proulx, 1988. Biological tertiary treatment of urban wastewaters with chitosan-immobilized *Phormidium*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 29: 292-297.
10. Hu, Q., Westerhoff, P. and Vermaas W. 2000. Removal of nitrate from groundwater by cyanobacteria: Quantitative assessment of factors influencing nitrate uptake. *Appl. environ. Microbiol.* 66(1): 133-139.
11. Nora, F. Y. T. and W. Y. Shan, 1994. Feasibility of using *Chlorella pyrenoidosa* in the removal of inorganic nutrients from primary settled sewage, pp. 291-299. In S. M. Phang (ed.), *Algal Biotechnology in the Asia-Pacific Region*, Institute of Advanced Studies, University of Malaya.
12. 小林達治. 1978. 化學微生物. pp 8-6042.
13. Kobayshi, M. and Y. T. Tchan, 1973. Treatment of industrial waste solution

- and production of useful by-products using a photosynthetic bacteria method. *Water Res.*, 7: 1219-1224.
14. American Type Culture Collection. *Catalogue of Bacteria and Phages*, pages 363, 438. 18th edition, 1992.
 15. Ahlgren, G. 1988. Phosphorus as growth-regulating factor relative to other environmental factors in cultured algae. *Hydrobiologia* 170:191-210.
 16. Herrero, A., and E. Flores. 1997. Nitrate metabolism, p. 1-33. In A. K. Rai(ed.), *Cyanobacterial nitrogen metabolism and environmental biotechnology*. Narosa P publishing House, New Delhi, India.
 17. Bohumil Volesky, *Biosorption of Heavy Metals*(Montreal : CRC Press, 1990). p. 177
 18. Ronald Atlas, Richard Bartha, *Microbial Ecology*(London:Benjamin/Cummings Publishing Co. Inc., 1995). pp. 232~233.
 19. Gordon, D. M., P. B. Birdh, and A. J. McComb. 1981. Effects of inorganic phosphorus and nitrogen on the growth of and Estuarine *Cladophora* in culture. *Bot. Mar.* 24: 93-106.
 20. Walter. M. R. J. Bauld. D. J. Des Marais and J. W. Schopf (1992) A general comparison of microbial mats and microbial stromatolites bridging the gap between the modern and the fossil. In *The Proterozoic Biosphere* (Edited by J. W. Schopf and C. Klein). PP. 335-338. University Press, Cambridge.
 21. Fay, P. (1992) Oxygen relations of nitrogen fixation in cyanobacteria. *Microbiol. Rev.* 56, 340-373.
 22. Tandeau de Marsac. N. and J. Houmard (1993) Adaptation of cyanobacteria to environmental stimuli: new steps towards molecular mechanisms. *FEMS Microbiol. Rev.* 104, 119-190.
 23. Sinha, R. P. and A. Kumar (1992) Screening of blue-green algae for biofertilizer. In *Proceedings of the National Seminar on Organic Farming* (Editde by P. S. Patil), pp. 95-97. Pune, India.
 24. Banerjee, M. and H. D Kumar (1992) Nitrogen fixation by *Aulosira fertilissima* in rice fields. *Naturalia* 17, 51-58.

25. Büdel, B. and D. C. J. Wessels (1991) Rock inhabiting blue-green algae/cyanobacteria from hot arid regions. *Algal. Stud.* 64, 385-398.
26. Lange, O. L., G. J. Kidron, B. Büdel, A. Meyer, E. Kilian and A. Abeliovich (1992) Taxonomic composition and photosynthetic characteristics of the 'biological soil crusts' covering sands dunes in the western Negev Desert. *Funct. Ecol.* 6, 519-527.
27. Johansen, J. R. (1993) Cryptogamic crusts of semiarid and arid lands of North America. *J. Phycol.* 29, 140-147.
28. Whitton, B. A. (1992) Diversity, ecology and taxonomy of the cyanobacteria. In *Photosynthetic Prokaryotes*(Edited by N. H. Mann and N. G. Carr), pp. 1-51. Plenum Press, New York.
29. Stal, L. J. (1995) Physiological ecology of cyanobacteria in microbial mats and other communities. *New Phytol.* 131, 1-32.
30. Dodds, W. K., D. A. Gudder and D. Mollenhauer (1995) The ecology of Nostoc. *J. Phycol.* 31, 2-18.
31. Rai, A. N. (1990) Cyanobacteria in symbiosis. In *Handbook of symbiotic Cyanobacteria* (Edited by A. N. Rai), pp. 1-7. CRC Press, Boca Raton, FL.
32. Peter, G. A (1991) Azolla and other plant-cyanobacteria symbioses: aspects of form and function. *Plant Soil* 137, 25-36.
33. Lindblad, P., A. Atkins and J. S. Pate(1991) N₂ - fixation by freshly isolated *Nostoc* from coralloid roots of the cycad *Macrozamia riedlei* (Fisch. ex Gaud.) Gardn. *Plant Physiol.* 95, 753-759.
34. Bergman., B. C. Johansson and E. Soderback(1992) The *Nostoc* - *Gunnera* symbiosis. *New Phytol.* 122, 379 - 400.
35. Gantar, M., N. W. Kerby and P. Rowell(1991) Colonization of wheat (*Triticum vulgare* L.) by N₂ - fixing cyanobacteria: II An ultrastructural study. *New*

Phytol. 118, 485 - 492.

36. Haselkorn, R. (1992) Developmentally regulated gene rearrangements in prokaryotes. *Annu. Rev. Genet.* 26, 111 - 128.
37. Wolk, C. P., A. Earnst and J. Elhai (1994) Heterocyst metabolism and development. In *The Molecular Biology of Cyanobacteria* (Edited by D. A. Bryant). pp. 769-823. Kluwer Academic, Dordrecht.
38. Georgiadis, M. M., H. Komiya, P. Chakrabarti, D. Woo, J. J. Kornuc and D. C. Rees (1992) Crystallographic structure of the nitrogenase iron protein from *Azotobacter vinelandii*. *Science* 257, 1657 - 1659.
39. Kim, J. and D. C. Rees (1992) Structural models for the metal centers in the nitrogenase molybdenum-iron protein. *Science* 257, 1677 - 1682.
40. Gordon, D. M., P. B. Birch, and A. J. McComb. 1981. Effects of inorganic phosphorus and nitrogen on the growth of an Estuarine *Cladophora* in culture. *Bot. Mar.* 24: 93-106.
41. Thiel, T. (1993) Characterization of genes for an alternative nitrogenase in the cyanobacterium *Anabaena variabilis*. *J. Bacteriol.* 175, 6276 - 6286.
42. Storch, T. A., G. W. Saunders and M. L. Ostrofsky (1990) Diel nitrogen fixation by cyanobacterial surface blooms in Sanctuary Lake, Pennsylvania. *Appl. Environ. Microbiol.* 56, 466 - 471.
43. Gallin, J. R., M. A. Hashem and A. E. Chaplin (1991) Nitrogen fixation by *Oscillatoria* spp. under autotrophic and photoheterotrophic conditions. *J. Gen. Microbiol.* 137, 31 - 39.
44. Janson, S., E. J. Carpenter and B. Bergman (1994) Compartmentalisation of nitrogenase in a non-heterocystous cyanobacterium: *Trichodesmium contortum*. *FEMS Microbiol. Lett.* 118, 9 - 14.
45. Sinha, R. P. and D. P. Hader (1996) Response of a rice field cyanobacterium *Anabaena* sp. to physiological stressors. *Environ. Exp. Bot.* 36, 147 - 155.

46. Subramanian, G. and S. Shanmugasundaram(1986) Uninduced ammonia release by the nitrogen-fixing cyanobacterium *Anabaena*. *FEMS Microbiol. Lett.* 37, 151 - 154.
47. Ladha, J. K., A. T. Padre, G. C. Punzalan and I. Watanabe (1987) Nitrogen-fixing (C_2H_2 -reducing) activity and plant growth characters of 16 wetland rice varieties. *Soil Sci. Plant Nutr.* 33, 187-200.
48. Donkor, V. and D.-P. Hader (1993) Effects of tropical solar radiation on the motility, photomovement and pigmentation in filamentous, gliding cyanobacteria. *FEMS Microbiol. Ecol.* 86, 159-168.
49. Donkor, V. D., H. A. K. Amewor and D.-P. Hader (1993) Effects of tropical solar radiation on the *rw* Castenholz motility of filamentous cyanobacteria. *FEMS Microbiol. Ecol.* 12, 143-148
50. Sinha, R. P., H. D. A. K. Amewor and D.-P. Hader (1995) Effect of UV-B irradiation solar growth, survival, pigmentation and nitrogen metabolism enzyme in cyanobacteria. *Acta Protozool.* 34, 187-192.
51. Vincent, W. F. and S. Roy (1993) Solar ultraviolet-B radiation and aquatic primary production: damage, protection, and recovery. *Environ. Rev.* 1, 1-12.
52. Sinha, R.P., N. Singh, A. Kumar, H. D. Kumar and D.-P. Hader (1996) Impacts of ultraviolet-B irradiation on nitrogen-fixing cyanobacteria of rice paddy fields. *J. Plant Physiol.* 32, 107-113.
53. Sinha, R. P., M. Lebert, A. Kumar, H. D. Kumar and D.-P. Hader (1995) Disintegration of phycobilisomes in a rice field cyanobacterium *Nostoc* sp. following UV irradiation. *Biochem. Mol. Biol Int.* 37, 697-706.
54. Hader, D.-P. and R. C. Worrest (1991) Effects of enhanced solar-ultraviolet radiation on aquatic ecosystems. *Photochem. Photobiol.* 53, 717-725.
55. Sinha, R. P., M. Lebert, A. Kumar, H. D. Kumar Anand Hader (1995) Spectroscopic and biochemical analyses on phycobiliproteins of *Anabaena* sp. and *Nostoc carmum*. *Bot. Acta* 180, 87-92.

56. Grossman A. R., M. R. Schaefer, G. G. Ching and J. L. Collier (1993) Phycobilisome, a light harvesting complex responsive to environmental conditions. *Microbiol. Rev.* 57, 725-749.
57. Sinha, R.P., N. Singh, A. Kumar, H. D. Kumar, M. Hader and D.-P. Hader (1996) Effects of UV irradiation on certain physiological and biochemical processes in cyanobacteria. *J. Photochem Photobiol B Biol.* 32, 107-114.
58. Blakefield, M. K. and D. O. Harries (1994) Delay of cell differentiation in *Anabaena aequalis* cause by UV-B radiation and the role of photoreactivation and excision repair. *Photochem. Photobiol.* 59, 204-208.
59. Kumar, A., R. P. Sinha and D.-P. Hader (1996) Effect of U-B on enzymes of nitrogen metabolism in the cyanobacterium *Nostoc calcicola*. *J. Plant Physiol.* 148, 86-91.
60. Reynolds C.S., R. L. Oliver and, A. E. Waslsby (1987) Cyanobacteria dominance: the role of buoyancy regulation in dynamic lake environments. *N. Z. J. Mar Freshwater Res.* 21, 379-390.
61. Garcia-Pichel, F. and R. W. Castenholz (1991) Characterization and biological implication of scytonemin a cyanobacterial sheath pigment. *J Phycol.* 27, 395-409.
62. Garcia- Pichel F, C. E. Wingard and R. W. Castenholz (1993) Evidence regarding the UV sunscreen role of a mycosporin-like compounds in the cyanobacterium *Gloeocapsa* sp *Appl. Environ Microbiol.* 59, 170-176.
63. Weiner, D. (1992) Cyanobacteria symbioses(except lichen). In *symbiosis of plants and microbes*(Edited by D werner), pp. 220-247. Chapman and Hall, London.
64. Beardsell, D.V., D.G. Nicholas (1982) *Scientia Horticulturae*, 17, pp.49-59.
Berkowitz, N. (1964) *Engineering Journal*, 47, pp.16-29.

65. Choudry, G.G. (1983) "Humic Substances", Gordon and Breach Science Publication.
66. Pang, L.S.K., A.M. Vassallo, and M.A. Wilson (1990) *Organic Geochemistry*, 16, pp.853-864.
67. Patti, A.F., R. Levi-Minzi, R. Riffaldi, and G. Guidi (1988) *Proceedings of Science, Technology and Utilization of Humic Acid Seminar, Sydney*, pp.6-105.
68. Tan, K.H., and A. Binger (1986) *Soil Science*, 141, pp.20-25.
69. Kurtiz, T., A. Ernst, T. A. Black and C. P. Wolk (1993) High-resolution mapping of genetic loci of *Anabaena* PCC 7120 required for photosynthesis and nitrogen fixation. *Mol. Microbiol.* 8, 101 - 110.

모래여과장치(Sandfilter)를 이용한 폐양액 정화

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “시설재배지 폐양액의 재활용 및 정화기술 개발에 관한 연구”과제 (세부과제 “humate/sandfilter를 이용한 폐양액의 재활용 및 정화기술 개발에 관한 연구”)의 최종보고서로 제출합니다.

2001년 10월 일

주관연구기관명 : 충북대학교

총괄연구책임자 : 사 동 민

협동연구기관명 : 서울시립대

협동연구책임자 : 김 계 훈

연 구 원 : 강 지 영

김 권 래

박 순 남

정 창 욱

요 약 문

1. 제 목

Humate/sandfilter를 이용한 폐양액 정화 및 활용

2. 연구개발의 목적 및 중요성

양액재배는 우리나라와 같은 좁은 국토에서 농업을 국내외적으로 경쟁력 있는 산업으로 발전시켰고 생산비 절감과 품질 향상 및 수량을 증대시킬 수 있는 방안을 제시해 주었다. 그런데 양액재배는 많은 잇점을 갖는 재배방식임에도 불구하고, 결정적인 단점을 갖고 있는데 그 대표적인 문제는 양액재배 시 식물의 영양분으로 공급되는 배양액 중 식물체가 이용하지 못한 배양액이 외부로 배출되어 양액재배 지역의 인근 하천 및 토양, 지하수의 오염이 심각히 우려된다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 많은 정화 방법들이 개발되어 사용되고 있는데 이 중 모래여과장치는 다른 여과방법과는 달리 소규모의 생산시설에서도 실용적으로 이용할 수 있으며 화학적인 처리 없이 작물에 병을 일으키는 병원균을 제거하는 효과와 함께 높은 경제성을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 모래여과장치에 양이온 흡착능력이 높은 zeolite를 첨가하여 폐양액으로 낭비되어 오염을 유발하는 비료성분의 유출을 최소화하고 일정기 기간 사용하고 난 후 여과장치 내용물을 고급 상토로 이용할 수 있는 가능성을 구명하고자 수행하였다.

3. 연구개발 내용 및 범위

모래여과장치의 길이를 다르게 하여 여과전과 여과후 무기이온 차이를 비교해 보았

고 zeolite의 배합비율에 따라 여과전과 여과후의 차이를 비교해 보았다. 일정기간 모래여과기로 폐액을 여과시킨 후 여과기의 기능이 다한 모래여과기의 내용물을 이용하여 식물을 생육시킬 수 있는 상태로 만들었는데 이 상토에 상추종자를 파종하여 발아율, 발아세, 평균발아일수를 조사하였고 오이와 상추묘를 이식하여 식물의 생육을 비교하였다.

4. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

모래만 처리하여 여과기를 통과시킨 후 폐액의 무기이온 함량을 보면 여과전과 여과 후 이온간의 차이는 별로 없었는데 zeolite가 처리된 여과기를 통과한 폐액의 이온에는 차이가 있었다. 토양을 부영양화시켜 오염의 주 원인이 되고 있는 암모니아태 질소 제거에 효과적이었고 인, 칼륨, 칼슘, 아연, 망간의 함량도 여과전에 비해 여과후 낮아졌다. zeolite 함량이 높은 상토일수록 상추의 발아율, 발아세가 높았고 평균발아일수는 짧게 나타났다. zeolite 함량이 높은 상토에서 발아율과 발아세가 높았고 평균발아일수는 짧았으며 상추와 오이의 생육이 양호했음을 알 수 있다. 따라서 본 연구결과 기존의 모래여과기내에 양이온 흡착능력이 높은 zeolite를 처리한다면 폐액으로 버려지는 다량의 비료성분을 흡착하여 토양과 수질오염을 방지할 수 있고 여과효과가 없어진 모래여과기의 내용물을 버리지 않고 상토로 다시 이용한다면 식물생육에 효과적인 배지로 이용할 수 있는 가능성을 알 수 있었다. 앞으로도 모래여과기를 이용한 폐양액 정화방법 개발은 지속적인 학문적 연구가 수행될 것으로 기대된다.

SUMMARY

Many researchers have reported that growing horticultural crops with hydroponics has many advantages over those with soil. With optimized root absorption, this system can improve crop quality and productivity resulting in high-income. The benefit might have expanded agricultural lands with hydroponics in Korea over 50% compared to 275 ha in 1996. Most of the farmers engaged in hydroponics in Korea are still using the open system which drains solutions of high nutrient level. The drained solution from the open system causes not only soil and water contamination but also waste of money. A closed system for hydroponics has been introduced relatively recently as an alternative which is environmentally safe and reduces managing cost. The drained solution from the closed system should be filtered for controlling potential pathogens originated from water and removing highly toxic minerals using both chemical and physical disinfection methods.

There are many commercially available filtering systems developed for the recycling system. However, most of the systems do not meet the minimum requirements, low cost and good disinfection. The slow sand filtration is one of the most popular purification methods with high efficiency in removing bacteria at low cost. In this research, a slow sand filtration system was developed using sand and zeolite, a crystalline mineral which plays a key role in buffering ions and has high cation exchange capacity (CEC).

In this study, the concentrations of the nutrients in the solution filtered were compared with those non-filtered from the different depth(50cm, 70cm, 90cm, 110cm) of the filter system and varying rates of sand to zeolite ratios. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) seeds were sown in the mixed media (sand+zeolite), which were formerly used for the filter system, and the germination rates were determined. The early growth of both lettuce and cucumber (*Cucumis sativus* L.)

with the used media was also examined.

The contents of NH_4 , K, Ca, Zn and Mn in the wastewater after filtration decreased compared to those before filtration. The cation removing rates of the filter system increased with increasing percentage of the zeolite in the mixture. The higher the rate of the zeolite in the reused media, the higher the germination rates and the early growth rates.

In conclusion, the slow sand filtration system using sand and zeolite mixture was efficient in reducing nutrient levels of the used solution from the hydroponics. The system also showed a potential for reusing the media from the filtering system for growing crops resulting in lower managing cost.

CONTENTS

1. Research Goal and Importance	74
2. Research Scopes and Contents	80
3. Research Results and Application plan	87
4. References	138

목 차

제 1장 서론	74
제1절 연구개발의 목적과 범위	
제 2장 연구개발 내용 및 범위 (실험방법)	80
제1절 실험 재료 및 방법	
제 3장 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의	87
참고문헌	138

모래여과장치(Sandfilter)를 이용한 폐양액 정화

제 1장 서론

제 1절 연구개발의 목적과 범위

우리나라의 양액재배는 재배역사가 매우 짧음에도 불구하고 농업구조개선을 위한 국가 예산 투자확대로 재배면적의 증가, 작물의 다양화, 수경재배 시스템 자재의 국산화, 재배시설의 현대화 등에서 많은 발전을 이루어 왔다. 양액재배는 토양재배의 고질적 문제점인 환경오염에 의한 농작물의 증급속 축적, 연작장해, 지력의 악화, 병해충 방제를 위한 농약의 과다사용으로 인한 생태환경의 파괴, 화학비료의 남용으로 인한 토양의 지속적 산성화 및 부영양화 등을 극복하려는 방편으로 채택되어 적용되고 있다. 특히, 양액재배는 우리나라와 같은 좁은 국토에서 농업을 국내외적으로 경쟁력 있는 산업으로 발전시켰고 생산비 절감과 품질 향상 및 수량을 증대시킬 수 있는 방안을 마련해 주었다. 농업인구의 감소와 고령화에 따른 노동력 감소로 인하여 농업 노동을 경량화시켜 최소의 노동력으로 최대의 생산을 필요로 하는 농민과 보건적 고품질 생산물을 요구하는 소비자 모두가 21세기에는 주요 시설원예작물에 있어서는 피할 수 없는 선택으로 여겨진다. 그런데, 수경재배는 많은 이점을 갖는 재배방식임에도 불구하고, 결정적인 단점을 갖고 있는데, 우선 주변 환경과의 친화성 문제이다(박, 1999). 그 중 대표적인 문제는 양액재배 시 식물의 영양분으로 공급되는 배양액 중 식물체가 이용하지 못한 배양액이 외부로 배출되는 것인데, 국내에서는 재처리 시설의 부족으로 인하여 대부분이 한번 사용한 배양액은 주변의 포장에 시비하거나 또는 그냥 방출하고 있다.

양액재배 선진국인 네델란드를 비롯한 유럽 각국에서는 농업생산에 의해 야기되는 환경문제를 감소시키기 위하여 여러 가지 측면에서 논의가 진행되고 있다. 시설원예산업에서는 시설 내부에서 사용된 농약이나 화학비료가 시설외부로 배출되는 것을 규제하는 방안이 마련되고 있으며, 재배방법도 규제의 대상이 되고 있다. 유럽과 일본의 경우, 양액재배시 주변환경으로 배출되는 양액을 90년대부터 철저히 규제해오고 있는데 이것은 폐양액으로 배출되는 질소, 인산 등 다량 비료 성분의 유실에 따른 경제적 피해와 함께 양액재배 지역의 인근 하천 및 호수의 부영양화와 토양 및 지하수의 오염이 심각히 우려되는 현실을 반영하는 것이라고 할 수 있다. 유럽의 비순환 고품배지경

의 경우, 방출되는 폐양액은 1ha당 최소 2,000m³의 양액이 토양으로 흘러 들어가고 그에 따라 5톤의 비료손실과 지하수의 오염을 유발시켰는데, 이러한 환경 문제가 대두되면서, 유럽의 경우, 배양액과 다른 화학제가 지표면으로 유출되어 지하수가 오염되는 것을 막기 위하여 2002년까지 모든 수경재배를 재순환 시스템(recycling system)으로 채택하도록 명시하였다(Runia, 1994).

폐양액의 잔여비료성분을 재활용하고 배출수에 의한 수질 토양오염을 방지할 수 있는 양액재배의 재순환 시스템은 양액 이용률의 극대화 추구 및 재배지역 주변의 환경 문제 해결이라는 점에서 각광받고 있다. 그러나 이 재순환 시스템은 재배 후 재활용되는 양액 내의 무기이온 농도가 센서 등을 통해 정확하게 측정되어야 다시 부족한 이온을 보충할 수 있는 점과, 재사용시 기존양액이 병원균에 오염되어 있는 경우 이를 최대한 제거해주어야 하는 문제점이 있다. 특히, 후자의 경우에는 병원균의 제거가 확실히 이루어지지 않으면 재순환 수경재배의 특성상, 동일 재배지에서는 식물병원균의 만연으로 이어질 수 있는 최적의 환경을 갖추고 있다고 할 수 있다. 이와 같은 문제점 때문에 재순환 양액재배는 반드시 양액여과기의 장치가 필요하다. 현재, 재순환 수경재배는 물론이고, 비순환 수경재배에 있어서도 원수의 병원균 제거 그리고, 모종에서의 병원균 오염으로 인한 병의 만연을 억제하기 위하여 열처리 소독기, 자외선 소독기, 오존 소독기 등의 많은 양액여과기가 이용되고 있다. 그러나, 대부분의 경우 우리나라 실정에 맞는 표준화된 모델로 설정하기에는 고가인 경우가 많으며 농민들에게는 상당한 부담을 주고 있는 현실이다. 21세기를 맞이하는 현 시점에서 양액재배가 당면하고 있는 현실적인 문제인 양액여과 및 정화의 문제는 충분히 검토되어야 하며, 이에 대한 정확한 실험자료가 구비되어야 한다고 본다. 과거의 연구들을 살펴보면, 바이러스 및 진균류의 전염으로 인한 양액재배에서의 병원균 만연을 막기 위해서는 배양액을 재사용하기 전에 반드시 정화, 소독이 요구되며, 빗물이나 지표수를 이용 할 경우에도 정화과정은 필수적이라고 논술하고 있다.

순환방식 시스템의 양액을 사용시 배양액 내의 병원균과 불순물을 걸러내기 위한 여러 가지 소독장치나 여과 장치를 이용한 배양액 소독 방법으로는 주로 모래여과, 열처리, 자외선 처리, 오존 처리, 박막여과, 요오드 처리, 과산화수소 처리, 염소 처리, 브롬 처리 등이 개발되어 사용되고 있다.

열처리 시스템을 살펴보면 배양액 탱크에 모아진 배양액의 유기물 입자를 여과한 후 탱크에서 첫 번째 열 교환기로 이동시키는데, 갑자기 열을 올리기가 사실상 어려워 소독된 물로 일정온도까지 예열하는 과정이 요구된다. 두 번째 열 교환기에서는 외부 열 공급원으로 사용하여 소독온도까지 가열하게 되는데, 대체로 95℃에서 30초간 소독한다. 소독된 물은 다시 첫 번째 열 교환기로 돌아와 냉각되는 과정을 거치며, 분리된

수통에 저장된다. 이러한 저장통으로부터 중앙 혼합탱크로 이동되어 표준배양액과 혼합되어 소독과정이 끝나게 된다.

오존을 이용한 정화시스템은 다음과 같다. 오존은 매우 강력한 산화제로 식수, 산업용, 도시하수의 소독에 사용된다. 오존은 전자 공여체로서 다른 물질을 산화시키며, 오존 자체는 산소로 환원된다. 낮은 pH 조건에서 잔존 오존의 양이 많기 때문에 소독하기 전 양액을 산성조건으로 맞추기 위하여 산의 공급장치가 필요하다.

자외선은 파장이 100~400nm의 전자기 광선으로 200~280nm범위의 광선은 매우 강력한 살균효과를 가지며 특히 253.7nm에서 가장 효과적이다. 병원균 살균을 위한 2가지 종류의 자외선 램프가 있는데 고압등은 200~280nm의 파장을 발산하는 반면, 저압등은 주로 253.7nm의 파장을 발산한다. 상업적인 설비에서는 100mJ/cm²의 UV 조사가 곰팡이의 제거에 효과적이거나 바이러스를 포함한 완전한 소독을 위해서는 250mJ/cm²이 필요하다. 자외선을 배양액에 조사하면 철 킬레이트를 분해하여 용액속으로 철을 방출시켜 불용화시켜 철 결핍을 유발하게되고 자외선 처리는 용기내 미생물에만 효과가 있기 때문에 화학적인 소독도 같이 해 줄 필요가 있다.

박막여과법은 제염처리 방법으로 역삼투압을 이용하여 여과하나, 배양액을 여과할 때는 비료성분까지 여과되어 배양액의 소독에 적합하지 않은 것으로 밝혀져 있다. 미세여과박막은 역삼투압 여과법보다 막의 구조가 느슨하여 비료의 통과가 가능하고 배양액의 조성을 변화시키지 않는다. 다만, 박막의 구멍이 막히기 쉽고, 여과의 효과에 대한 신뢰성이 떨어져 실용적으로 이를 이용하는 경우는 거의 없다.

요오드 이용법은 염소와 비교해서 요오드의 안정성과 실효성 때문에 식수소독에도 많이 이용되고 있다. 담배모자이크 바이러스는 요오드에 저항력을 가진다고 판명되어 배양액 소독방법으로는 적합하지 않은 것으로 보고 있다. 요오드 0.7ppm이상 농도에서는 시들음병균의 분생포자가 죽었으나 그보다 낮은 농도에서의 효과는 미미한 것으로 연구되었다.

과산화수소는 오존과 비슷한 산화제이다. 오존은 상당히 높은 산화력을 가지고 있는 반면에 과산화수소는 매우 높은 농도로 장시간 처리가 필요한 특성을 보인다. 담배모자이크 바이러스는 활성 과산화수소 400ppm농도에서 99.97%가 제거된 것으로 보고되었다.

모래여과법은 역병균은 잘 걸러지고, 그 외 시들음병균의 경우는 포자의 크기가 상대적으로 작아 대체로 하루 3~7m의 속도로 석영모래 90cm층을 통과하도록 하고 있다. 이는 모래여과층의 두께와 혼합하는 매질 그리고 여과속도에 의한 것으로, 앞으로 많은 가능성을 보여 주고 있어 많은 개발의 여지를 남겨놓고 있다.

모래여과법을 제외한 위와 같은 방법들은 고가의 장비가 필요하고 순환되는 배양액

속에 들어있는 미립자 상태의 불순물들을 제거하기 위하여 부가적으로 모래여과장치를 부착해야 한다. 부담되는 시설 투자비와 많은 에너지 소모량을 고려한다면 대규모의 온실에서만 경제적인 반면에 모래여과법은 전통적으로 식수를 얻기 위해 사용되어온 방법으로 소규모의 생산시설에서도 실용적으로 이용할 수 있으며 화학적인 처리 없이 작물에 병을 일으키는 병원균을 제거하는 효과와 함께 높은 경제성을 보여주고 있어 최근 많이 이용되고 있다(Van Os, 1996; Wohanka, 1995; Widrig, 1996).

불순물이 여과층을 통과할 때에 사층표면에서 불순물이나 미생물이 제거된다. 이러한 불순물의 제거는 사층표면의 5mm정도의 부분에서 증식하는 호기성 미생물 작용에 의해 이루어진다. 이것은 산소의 존재하(호기성)에서 광합성작용을 하는 조류나 유기물을 분해하거나 암모니아를 산화하는 세균의 혼합 미생물 군집으로 구성되어 있다. 이 미생물들이 젤라틴 상의 막을 형성하여 유입하는 불순물을 물리적, 물리화학적으로 분리한다. 이와 같이 완속여과는 사층 표면에 성장한 호기성 생물 여과막의 존재에 의해서 현탁성 물질을 억류함과 동시에 환원성 무기물을 산화하기도 하고 생물분해성의 물질을 분해, 제거하기도 한다. 이 같은 생물막을 생물 여과막 또는 슈뮤츠데키(Schmutzdecke)라고 부른다. 완속여과는 이러한 얇은 여과막의 작용에 의존하므로 생물 화학적으로 여러 대상 성분을 제거할 수 있다는 잇점을 지니고 있다(유, 1995; Martin, 1991). 본 연구에서는 이러한 장점을 지닌 저속모래여과법을 이용하였는데 여기에 zeolite를 처리하였다. zeolite는 광물학적으로 분류하면 tectosilicate에 속하는 함수 규산염으로 제 2차적으로 생성된 광물질이며 주로 화성암에서 발견되거나 아니면 화강암이나 편마암과 함께 발견되는 경우도 있다. 1756년 스웨덴의 광물학자인 Cronsted에 의해 발견되어 끓는 돌이라는 의미로 명명된 광석이다. zeolite는 내부 세공 속에 보통 물분자들이 가득 채우고 있는데 이 광석을 가열하면 내포된 물분자가 증발하여 수증기를 발생하여 수분이 증발되고 식히면 잃었던 수분을 다시 흡수하게 되는데 이때 수분 이외에 암모니아, 알콜, 요오드 등의 다른 물질로 대치되어질 수도 있다. 일반적인 zeolite의 화학성분 함량을 보면 아래 표 1과 같은데 zeolite 종류에 따라 약간 차이는 있으나 주성분은 Si(58~69%), Al(11~13%)이고 Ca의 함량도 상당히 높아서 1.3~2.6%에 이른다.

표 1. 화학적 성분

(단위 : %)

CEC (me 100g ⁻¹)	수분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	건조감량
135	11.3	71.35	11.94	1.67	0.97	1.96	1.83	2.90	6.54

zeolite는 신생대 3기층의 화산재가 속성작용을 받아 생성된 미세한 다공질로 물리적 흡착력(질소, 인산, 칼리 등)과 화학적 양이온 치환작용이 뛰어나 수분 외 다른 물질, gas 등을 20배까지 흡수, 흡착하였다가 보관하고 있다가 서서히 배출하는 특이한 능력을 지니고 있다. zeolite의 기본구조는 규소와 알루미늄 사면체로 이루어진 다공성 알루미늄 실리케이트 결정이다. 정사면체의 기하학적 구조를 갖는 규소이온은 +4가의 양전하를 띠기 때문에 4개의 산소원자에 의해서 전기적으로 균형을 이루며 중성을 나타낸다. 그러나 +3가의 알루미늄 이온들은 4개의 산소원자들에 의해 결합되어 정사면체의 구조를 형성하기 때문에 -1가의 음전하를 갖는다. 따라서 각 알루미늄 사면체는 전기적으로 중성을 유지하기 위해서 주위에 +1또는 +2가의 전하를 갖는 금속 양이온이 존재하므로 구조적으로 안정되어 있고 이들 양이온은 zeolite의 고유한 특성인 이온교환능을 가지고 있기 때문에 필요에 따라 적절한 양이온으로 쉽게 치환될 수 있다(Ming, 1989). zeolite는 최근 들어 농업용, 수산용, 축산용, 공업용 등 다양하게 개발되어 사용되고 있는데 농업에서는 토양개량제, 비료혼합제, 농약중량제, 상토혼합제 등에서 이용되고 있고 수산용으로는 해양오염방지제, 적조현상방지제, 잉어사료용 등으로 축산용으로는 악취제거제, 정수제, 사료첨가제로 사용되어지고 공업분야에서는 제지충진제, 폐수처리제, 건조제, 요업원료, 의약품원료, 조경제, 담배필터용 등 다양하게 개발되어 사용되어지고 있다(Haung, 1992; 이, 1987; 이, 1998; 김, 1991).

이온교환능력이 매우 높은 zeolite는 세공 속에 존재하는 양이온들은 수용액 중에서 다른 여러 가지 금속 및 유기 양이온으로 용이하게 교환되므로 이러한 성질을 이용하여 물속의 칼슘과 마그네슘이온을 나트륨 이온으로 교환시켜 경수를 연수로 변환시키는데 널리 사용되고 있다. 또한 고온에서도 안정성을 유지하기 때문에 원유를 절단하여 가솔린 등 작은 탄화수소 분자를 생성하는 다양한 반응의 촉매로 활발하게 쓰이고 있다. zeolite를 고온에서 진공 탈수시키면 세공내에 세공입구를 통과할 수 있는 다양한 분자들을 흡착시킬 수 있게 되는데 내부의 넓은 표면을 이용한 흡착제로 활발히 사용되어지고 있다. 그 밖에도 zeolite는 여러 가지 용도로 사용되어 왔는데 위에서 언급한 바와 같이 가축용 사료의 첨가제로 사용하여 가축의 성장을 촉진시킬 수 있는데 zeolite가 장을 통과하면서 장속의 유해한 이온을 교환시켜 외부로 배출하기 때문에 체중을 3~40% 정도까지 높일 수 있다. 또한 토양에 배합하면 zeolite에 들어있는 미

양원소들은 식물의 성장을 촉진시키며 미생물들이 비옥한 땅속에서 오래동안 생존할 수 있는 환경을 만들어 농작물 수확률을 높이고 골프장에서는 그린에 있는 모든 종류의 진균들을 조정하여, 일년 내내 그린을 푸르게 유지하고 잔디의 뿌리조직에 습기를 유지시켜 줌으로 잔디가 잘 자라게 하여 겨울철 발육정지 기간에도 푸르름을 유지하도록 도와준다. 또한 토양속의 과도한 염류를 조절하고 토질이 경화됨을 방지하고 토양의 공기순환을 개선하며 수분을 기하학적인 새장 모양의 구조를 통해 흡수하고 식물뿌리조직에 서서히 물을 공급해 주는 역할과 함께 미생물이 살기 좋은 환경을 만들어 준다. zeolite에는 천연 zeolite와 합성 zeolite 그리고 인공 zeolite가 있는데 천연 zeolite는 규산염광물이 화산작용을 받아 생성된 응회암이라는 암석을 잘게 부순 것으로 상토, 농약제조 등에 이용되고 있다. 합성 zeolite는 무기계 화합물질인 규산과 산화알루미늄을 알칼리용액중에서 혼합 후 가열 반응시킨 것으로서, 석유화학공업에서의 촉매나 유지공업에서 세제용 필터 등으로 쓰이고 있다. 인공 zeolite는 석탄회와 같이 규산과 알루미늄이 주성분인 규산염물질을 알칼리액으로 가열처리하여 얻어진 것으로써 오페수 정화제, 탈취제, 토양개량제 등에 활용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 많은 이용 가능성을 지닌 천연 zeolite와 인공 zeolite를 이용하여 기존의 모래여과장치에 혼합하여 폐양액 중의 불순물을 제거하고 폐양액 중의 양이온뿐만 아니라 음이온을 흡착함으로써 폐양액으로 낭비되어 오염을 유발하는 비료성분의 유출을 최소화하고, 일정 기간 사용하고 난 후 여과장치 내용물을 고급 상토로 이용할 수 있는 가능성을 구명하고자 수행하였다.

제 2 장 실험방법

제 1절 실험 재료 및 방법

1. 실험 1

본 실험은 서울 시립대학교 환경원예학과 온실에서 수행하였다. 1시간당 100~300 ℓ / m² 정도의 유속으로 모래여과층을 통해 흘려보내 소독하는 저속모래여과법을 이용하였다. 저속모래여과장치는 모래를 채운 여과부와 배양액 침전조로 구성되어 있다. 배양액이 여과장치를 통해 흘러 내려오는 동안 배양액 중의 고형물질은 침전되어 침전조 아랫부분의 밸브로 배출되고, 배양액의 상부 즉 고형물질을 걸러낸 배양액은 천천히 모래여과층으로 들어간다. 모래여과층의 길이는 110cm이며 그 상층부는 0.15~2mm의 가는 모래로 채우고 아래 배수층은 세겜의 자갈층 즉, 16~32mm, 8~16mm, 2~8mm의 굵은 자갈로 채웠으며 배수층의 하층부는 최종적으로 배액부와 연결되어 있다(그림 1). 여과된 폐양액은 pH, EC, N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, F, Cl, NO₂, Br, NO₃, PO₄, SO₄을 분석하였다. pH와 EC는 pH meter(Nieuwkoop BV, Digital pH-93)와 EC meter(Nieuwkoop BV, Digital EC-93)로 측정하였다. 질소는 분석할 시료 25ml에 MgO(magnesium oxide)와 Devarda 합금을 첨가하여 질소 증류기(Buchi 323)로 증류하였다. 수기에는 H₃BO₃-indicator mixture 5ml를 넣고 냉각관 밑에 놓고 증류한 것을 받아 0.005N 표준 황산용액으로 적정하였다. 인산은 Vanadate법에 따라 측정하였는데 폐양액 3ml와 발색시약(Ammonium paramolybdate vandate 용액) 3ml를 가하여 30℃에서 30분간 정치한 후 UV-Spectrophotometer를 이용하여 470nm에서 흡광도를 측정하였다. 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 나트륨, 철, 아연, 망간, 구리와 같은 무기이온은 원자흡광도계(Shimadzu AA-6800)로 측정하였고 음이온(F, Cl, NO₂, Br, NO₃, PO₄, SO₄)은 이온 크로마토그래피(Dionex, Dx-120)으로 측정하였다. 폐양액은 시립대 온실에서 실험하고 있는 장미 폐양액을 사용하였다.

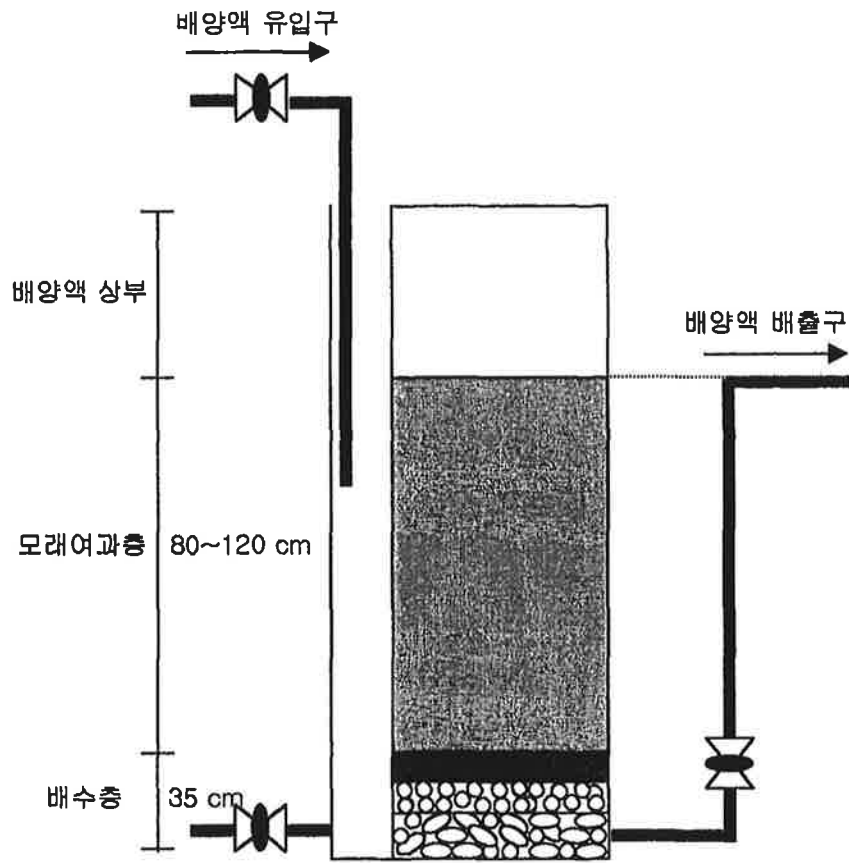


그림 1. 모래여과장치 구조

2. 실험 2

모래 여과 장치의 구조는 실험 1과 같은 구조로 하였으며 모래여과층의 길이는 50, 70, 90, 110cm로 하였다. 모래여과 장치는 직경 11cm의 PVC관에 0.15~2mm의 가는 모래로 채우고 아래 배수층은 25cm로 하여 세겹의 자갈층(16~32mm, 8~16mm, 2~8mm)으로 채웠다(그림 2). 유속은 실험 2와 같이 1시간당 100~300 ℓ/㎡정도의 유속으로 모래여과층을 통해 흘려 보냈다. 여과된 폐양액은 실험 1과 같이 pH, EC, N, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu을 분석하였다.

3. 실험 3

모래 여과 장치의 구조는 실험 1, 2와 같은 구조로 제작하였다. 배양액 유입구를 밖으로 처리하였고 모래여과층의 길이는 50, 90cm로 하여 각각 4개씩 제작하였다. 여기에 1mm이하의 가는 zeolite와 0.15~2mm의 모래를 혼합하였는데 모래와 zeolite의 배합비율을 10:1, 5:1, 2:1로 각각 달리하였다. 배수층은 30cm로 하여 세겹의 자갈층(16~32mm, 8~16mm, 2~8mm)으로 채웠다. 유속은 1시간당 100~300 ℓ/㎡정도의 유속으로 모래여과층을 통해 흘려 보냈고 여과된 폐양액은 pH, EC, N, 양이온(K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu), 음이온(F, Cl, NO₂, Br, NO₃, PO₄, SO₄)을 분석하였다.

4. 실험 4

모래 여과 장치의 구조는 실험 3과 동일하였다. 모래여과층의 길이를 50, 90cm로 하여 각각 4개씩 제작하였다. 여기에 직경 1~3mm의 zeolite와 0.15~2mm의 모래를 혼합하였는데 모래와 zeolite의 배합비율을 5:1, 2:1, 1:1로 각각 달리하였다. 아래 배수층은 30cm로 하여 세겹의 자갈층(16~32mm, 8~16mm, 2~8mm)으로 채웠다. 유속은 실험 2와 같이 1시간당 100~300 ℓ/㎡정도로 양액을 모래여과층을 통해 흘려 보냈고 여과된 폐양액은 pH, EC, N, 양이온(K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu), 음이온(F, Cl, NO₂, Br, NO₃, PO₄, SO₄)을 분석하였다. 시간이 지남에 따라 모래 여과기의 여과 효율을 알아보기 위해 폐액을 35 ℓ씩 20회에 걸쳐 여과하면서 양이온과 음이온의 성분 변화를 조사하였다. 본 실험에 이용한 천연 zeolite는 우리나라에서 가장 많이 생산되고 CEC가 높은 clinoptilolite를 이용하였는데 구성 성분은 표 1과 같다.

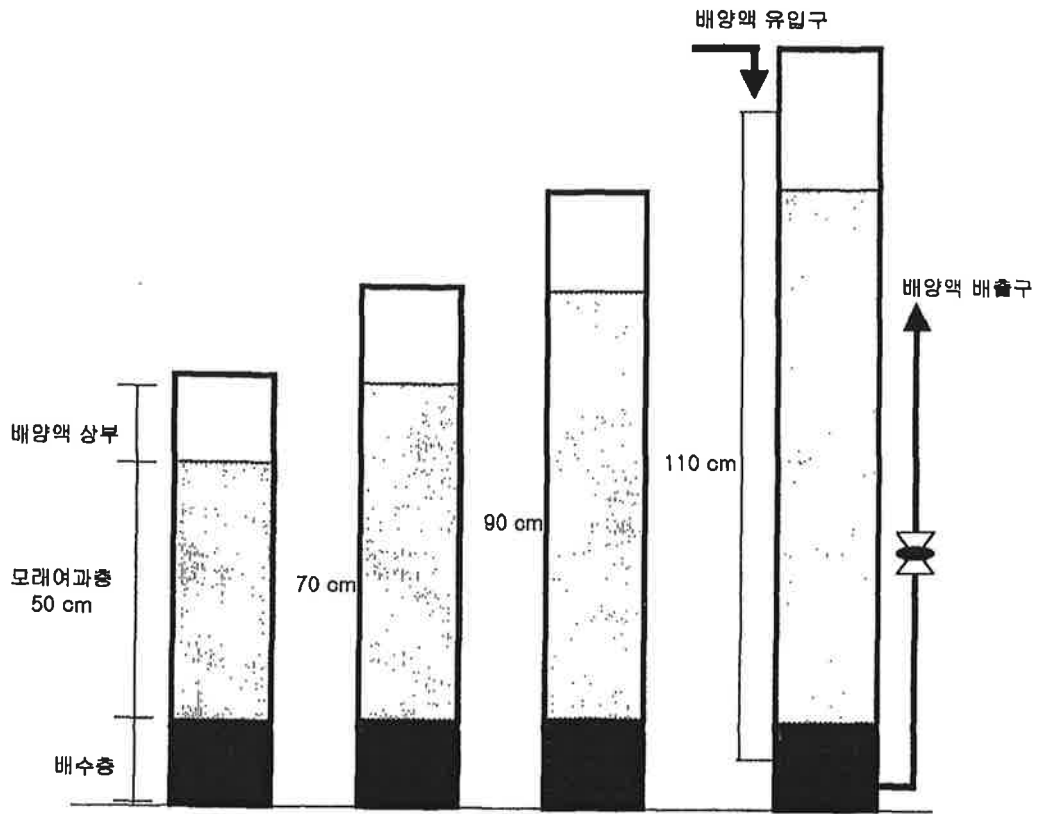


그림 2. 모래여과장치 구조

표 1. 화학적 성분

(단위 : %)

CEC (me 100g ⁻¹)	수분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	건조감량
135	11.3	71.35	11.94	1.67	0.97	1.96	1.83	2.90	6.54

5. 실험 5

모래 여과 장치의 구조는 실험 3, 4와 같은 구조로 하였다. 모래여과층의 길이는 90 cm로 하여 제작하였다. 모래여과기내에 직경 2~3mm의 구형 인공 zeolite와 0.5~1mm 무정형 zeolite를 처리하였고 모래와 zeolite의 배합비율을 1:1로 하였다. 유속은 실험 2와 같이 1시간당 100~300 ℓ / m²으로 하여 양액을 모래여과층을 통해 흘러 보냈고 여과된 여과된 폐양액은 pH, EC, N, 양이온(K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu), 음이온(F, Cl, NO₂, Br, NO₃, PO₄, SO₄)을 분석하였다. 인공 zeolite를 첨가한 모래 여과기의 여과 효능을 알아보기 위해 폐액을 35 ℓ씩 20회에 걸쳐 여과하면서 양이온과 음이온의 성분 변화를 조사하였다. 천연 zeolite를 2만배 확대하여 보면 판상의 구조가 겹쳐진 구조를 띠고 있으며 인공 zeolite는 천연에 비해 미세공극이 매우 잘 발달되어 있어서 악취 및 유독가스 제거능이 매우 우수하다(그림 3, 4). 입상 인공 zeolite는 잘 발달된 구멍 구조외에도 입상 과정 중 대공극도 잘 발달되어 있으며 수중에서도 붕괴되지 않으며, 양이온인 중금속, 암모니아는 물론 음이온인 인산까지 동시 제거할 수 있는 유용한 폐수처리용 자재로 많이 이용된다. 본 실험에 이용한 인공 zeolite는 (주) 하나화학에서 구입하였으며 본 실험에서 이용된 직경 2~3mm의 열 처리를 한 구형 인공 zeolite와 열 처리를 하지 않은 0.5~1mm 무정형 zeolite의 성분은 표 2와 같다.

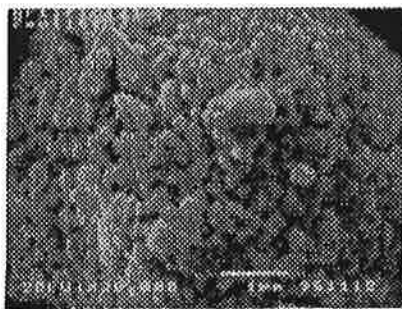


그림 3. 인공제올라이트

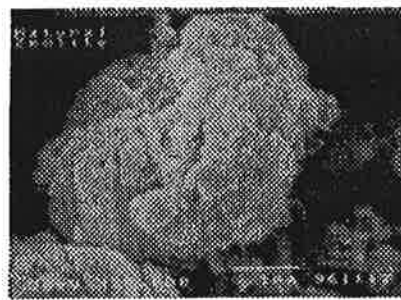


그림 4. 천연제올라이트

표 2. 화학적 성분

(단위 : %)

CEC (me 100g ⁻¹)	수분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	건조감량
112	8.7	12.12	12.12	2.10	0.89	1.67	1.85	2.84	5.85

6. 실험 6

여과효과는 여과횟수가 증가함에 따라 낮아졌다. 더 이상 여과효과가 없는 50cm의 모래 여과기의 내용물(sand, zeolite)을 이용하여 식물을 생육시킬 수 있는 상태로 만들었다. 이 상태에 상추(*Lactuca sativa* L.)의 발아시험을 실시하였고 상추묘를 이식하여 생육을 비교분석하였다. 모래 여과기는 모래만 들어있는 처리구와 모래와 zeolite의 배합비율이 5:1, 2:1, 1:1인 4개의 처리구를 만들어 실험했는데 이 4개의 모래여과기 내용물을 가지고 모래여과기의 내용물만을 사용한 상토와 모래 여과기의 내용물과 부엽토를 1:1로 혼합하여 만든 상토로 나누어 모두 9개의 처리구를 만들었다. 2001년 3월 20일에 상추('화홍') 종자를 파종하여 파종 후 11일동안 발아율, 평균 발아일수, 발아세를 조사하였다. 시험은 30립씩 3반복으로 하였으며 초생근을 포함한 근계가 잘 발육한 것을 발아된 묘로 판명했다. 발아율은 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

◦ 발아율(Percent germination: PG): 총 공시 종자에 대한 발아종자의 백분율로 식은 다음과 같다.

$$PG = (N/S) \times 100$$

위 식에서 N은 총 발아수이고 S는 총 공시종자수 이다.

◦ 발아세(Germinative energy: GE): 치상 후 일정기간까지의 발아율 혹은 표준 발아 검사에서 중간 발아조사일까지의 발아율로 이 백분율이 높은 종자일수록 파종 시 발아력이 좋다고 볼 수 있다.

◦ 평균발아일수(Mean germination time: MGT): 발아상에 파종 후 매일 그날의 발아한 종자수를 조사하고 파종 후 각각의 일수를 곱하여 그 합계를 총발아한 종자수로 나눈 것으로 계산식은 다음과 같다.

$$MGT = \sum(ti \cdot ni) / N$$

위 식에서 t_i 는 치상후 조사일수이고 n_i 는 조사당일의 발아수이며 N 은 총 발아수이다.

상추묘(‘화홍’)는 파종 후 한달된 묘를 (주) 임진농원에서 구입하였다. 모래여과기의 내용물로 만든 상토는 직경 15cm, 높이 15cm인 pot에 담아 상추 묘를 정식하였다. 생육조사는 정식 후 1주일이 지난 다음 2001년 3월 27일부터 4월 20일까지 1주일 간격으로 4회에 걸쳐 실시하였다. 생육은 초장, 초폭, 엽수를 조사하였고 처리구에 따른 생육을 비교하였다. 최종 생육조사 후 지상부 생체중과 지하부 생체중을 나누어 조사하였고 상추가 식재된 상토를 분석하였다. 식물체는 전질소(T-N), 인, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 나트륨, 철, 망간, 구리, 아연을 분석하였고 토양은 pH, EC, 전질소, 인, 유기물, 양이온 치환용량, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 나트륨을 분석하였다.

7. 실험 7

실험 7은 더 이상 여과 효과가 없는 90cm의 모래 여과기의 내용물(sand, zeolite)을 이용하여 오이(*Cucumis sativus* L.) 생육을 비교 분석하였다. 모래 여과기는 모래만 들어있는 처리구와 모래와 천연 zeolite의 배합비율이 5:1, 2:1, 1:1인 4개의 처리구를 만들어 실험했는데 이 4개의 모래여과기 내용물을 가지고 모래여과기의 내용물만을 사용한 상토와 모래 여과기의 내용물과 부엽토를 1:1로 혼합하여 만든 상토를 이용하여 모두 9개의 처리구를 만들었다. 또한 모래와 인공 zeolite의 배합비율이 1:1로 되어있는 모래여과기의 내용물을 가지고 상토 실험을 하였는데 상토는 모래여과기의 내용물만을 사용한 상토와 모래 여과기의 내용물과 부엽토를 1:1로 혼합하여 만들었다. 상토는 직경 20cm, 높이 25cm인 pot에 담아 오이묘(‘청장오이’)를 정식하였는데 오이 묘는 (주) 오일종묘에서 파종후 한달된 묘를 구입하여 정식하였다. 생육조사는 정식하고 한달 후인 2001년 7월 2일, 7월 20일에 실시하였고 초장, 엽장, 엽폭, 경경을 조사하였다. 최종 생육조사를 마친 후 생체중(줄기, 엽)과 건물중도 조사하였고 식물체와 상토를 각각 분석하였는데 식물체는 질소(T-N), 인, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 나트륨, 철, 망간, 구리, 아연을 분석하였고 토양은 pH, EC, 전질소, 인, 유기물, 양이온치환용량, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 나트륨을 분석하였다.

제 3 장 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

제 1 절 실험결과

1. 결과 1

모래여과층의 깊이가 80~120cm인 모래여과기를 이용한 여과 전후 폐양액 조성의 변화는 다음과 같다. 2회에 걸쳐 여과시켜 분석한 결과 pH, EC는 1회(표 3, 4), 2회(표 5, 6) 모두 여과전이나 여과 후 차이가 없었다. 무기이온의 함량을 비교하면 1회 여과 결과 질소, 칼륨, 나트륨, 철, 망간, 구리의 함량은 다소 높아졌고 그 외 칼슘, 마그네슘, 아연은 낮아졌으나 칼륨을 제외하고는 처리간 큰 차이는 없었다(표 4). 두 번째 여과 결과 양이온 함량을 분석한 결과는 표 6과 같다. 질소와 칼슘, 철, 망간, 구리의 함량은 여과 전에 비교하여 여과된 후에 수치가 다소 높았으나 큰 차이는 없었고, 인, 칼륨, 마그네슘, 나트륨, 아연은 낮아졌다. 2회에 걸쳐 여과된 폐양액을 분석한 결과 여과전이나 여과시킨 후 무기이온 함량에는 별 차이가 없음을 알 수 있다.

표 3. pH, EC의 변화

처리	pH	EC(mS cm ⁻¹)
1	4.41	1.90
2	5.94	1.88

1: 여과전 폐양액

2: 여과된 폐양액

표 4. 무기이온 농도 변화

처리	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu
1	11.72	18.84	193.92	43.71	0.99	64.18	2.02	1.21	0.97	0.20
2	13.34	15.70	260.34	41.65	0.98	70.16	2.46	0.23	1.15	0.23

1: 여과전 폐양액

2: 여과된 폐양액

표 5. pH, EC의 변화

처리	pH	EC(mS cm ⁻¹)
1	4.43	1.86
2	5.42	1.85

1: 여과전 폐양액

2: 여과된 폐양액

표 6. 무기이온 농도 변화

처리	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu
	ppm									
1	9.55	19.91	281.16	86.93	0.92	37.99	1.77	1.23	0.91	0.28
2	9.64	14.37	260.45	91.46	0.91	37.79	2.28	0.26	0.92	0.30

1: 여과전 폐양액

2: 여과된 폐양액

2. 결과 2

모래여과장치의 길이를 50, 70, 90, 110cm로 하여 여과장치 길이에 따른 pH, EC, 양이온함량을 비교분석 하였다(표 7, 8). pH는 여과하기전의 값이 여과후보다 낮았고 그 외 처리구에서는 전체적으로 여과전과 비교하여 다소 높았으며 모래여과장치의 길이가 길어질수록 pH는 높아졌다. EC는 여과전이나 여과된 후나 차이가 없었고 여과장치 길이에 따라서도 차이가 없었다. 양이온 함량을 비교해 보면 질소는 여과전이나 모래여과장치를 통해 여과된 후에 별 차이를 나타내지 않았고, 칼륨은 여과되기 전이 더 높았고 여과장치의 길이에 따른 차이는 보이지 않았으며 칼슘, 마그네슘의 함량은 처리간 차이를 거의 나타내지 않았다. 나트륨의 함량은 여과전이 가장 낮았고 여과장치의 길이가 길어짐에 따라 다소 높아졌다. 철과 구리는 처리간 큰 차이를 나타내지 않았고 아연과 망간은 여과된 후, 특히 여과장치의 길이가 길어짐에 따라 낮아졌음을 알 수 있다. 양이온 함량에는 여과전이나 여과된 후에 큰 차이를 나타내지는 않았는데 여과된 후는 여과전에 비해 아연의 함량은 낮아졌고 모래여과장치의 길이가 길어짐에 따라서 아연과 망간, 구리의 함량이 다소 낮아졌다.

표 7. 모래여과장치 길이에 따른 pH, EC의 변화

처리	pH	EC(mS cm ⁻¹)
여과전 폐양액	4.31	2.01
1	5.38	2.00
2	6.11	2.00
3	6.24	2.01
4	6.43	2.04

1: 50cm, 2: 70cm, 3: 90cm, 4: 110cm

표 8. 양이온 농도의 변화

처리	NH ₄ -N	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu
	ppm								
여과전 폐양액	9.85	329.71	98.79	0.85	52.50	1.10	1.45	1.09	0.31
1	9.92	297.44	104.32	0.85	58.41	1.39	0.48	1.04	0.29
2	9.82	283.60	111.02	0.85	61.48	1.61	0.10	0.85	0.26
3	9.86	288.42	106.79	0.85	62.44	1.92	0.05	0.69	0.27
4	9.75	266.46	109.70	0.85	69.15	1.69	-	0.57	0.33

1: 50cm, 2: 70cm, 3: 90cm, 4: 110cm

3. 결과 3

양이온 치환 능력이 높은 1mm이하 입자크기의 천연 zeolite를 처리한 결과는 표 9, 10, 11과 같다. pH는 대조구에 비하여 모래여과기를 통과한 폐양액이 높았는데 zeolite의 비율을 높을수록 pH도 높아졌고 EC는 처리간 큰 차이를 보이지 않았다. NH₄-N의 함량은 모래여과기를 통과하기전의 수치에 비해 여과된후에는 전부 낮아졌고 zeolite의 함량이 높아질수록 높은 제거 능력을 나타냈으며 처리구 7, 8에서는 NH₄-N는 여과후 거의 검출되지 않았다. NH₄-N와 같이 칼륨도 비슷한 경향을 나타냈는데 여과전에 비하여 여과된 후 폐액에서 칼륨의 함량은 낮아졌고 zeolite의 비율이 높고 모래여과기의 길이가 길어질수록 낮은 수치를 보였다. 칼슘은 처리구 6, 7을 제외하고는

표 9. 모래여과장치 따른 pH, EC의 변화

처리	pH	EC(mS cm ⁻¹)
여과전 폐양액	5.14	2.16
1	6.00	2.23
2	6.73	2.17
3	6.71	2.15
4	7.20	2.29
5	6.84	1.81
6	6.80	2.23
7	7.24	2.29
8	7.18	2.10

1: 50cm, sand 100%	5: 90cm, sand 100%
2: 50cm, sand:zeolite=10:1	6: 90cm, sand:zeolite=10:1
3: 50cm, sand:zeolite= 5:1	7: 90cm, sand:zeolite= 5:1
4: 50cm, sand:zeolite= 2:1	8: 90cm, sand:zeolite= 2:1

표 10. 양이온 농도의 변화

처리	NH ₄ -N	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu
	ppm								
여과전 폐양액	6.44	349.62	141.43	1.55	45.90	4.38	0.87	0.94	0.26
1	6.78	358.50	145.46	1.53	53.12	3.18	0.48	1.35	0.29
2	2.96	89.50	156.06	1.51	204.56	2.98	0.34	0.91	0.30
3	2.52	85.41	107.06	1.52	250.18	2.92	0.33	1.11	0.29
4	1.48	76.14	138.29	1.55	254.72	2.38	0.32	0.01	0.25
5	3.48	152.75	152.85	1.59	65.05	2.06	0.19	0.76	0.38
6	0.35	74.57	30.92	1.49	212.34	2.94	0.20	0.68	0.40
7	-	81.03	28.05	1.97	379.71	2.98	0.40	0.17	0.37
8	-	72.26	132.47	1.55	214.69	2.64	0.27	0.30	0.29

1: 50cm, sand 100%	5: 90cm, sand 100%
2: 50cm, sand:zeolite=10:1	6: 90cm, sand:zeolite=10:1
3: 50cm, sand:zeolite= 5:1	7: 90cm, sand:zeolite= 5:1
4: 50cm, sand:zeolite= 2:1	8: 90cm, sand:zeolite= 2:1

처리간 큰 차이를 나타내지 않았다. 칼슘의 함량은 여과기의 길이가 길고 zeolite의 함량이 높은 처리구에서 낮게 나타났다. 나트륨 함량은 zeolite 배합비율이 높을수록 높은 수치를 나타냈다. 아연은 여과전과 비교하면 여과후 함량이 낮아졌고 구리는 처리간 큰 차이는 없었다.

표 11. 음이온 농도의 변화

처 리	Cl	NO ₃	PO ₄	SO ₄
여과전 폐양액	26.09	1063.97	81.15	277.90
1	48.69	1088.00	70.61	306.07
2	64.27	1095.42	38.87	335.65
3	49.01	1097.49	54.96	333.02
4	97.04	1116.81	-	369.15
5	81.88	790.31	25.13	269.22
6	76.43	1136.01	36.44	366.33
7	59.65	1126.57	25.10	361.018
8	54.37	1124.28	12.08	314.75

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1: 50cm, sand 100% | 5: 90cm, sand 100% |
| 2: 50cm, sand:zeolite=10:1 | 6: 90cm, sand:zeolite=10:1 |
| 3: 50cm, sand:zeolite= 5:1 | 7: 90cm, sand:zeolite= 5:1 |
| 4: 50cm, sand:zeolite= 2:1 | 8: 90cm, sand:zeolite= 2:1 |

폐양액의 음이온을 분석한 결과는 표 11과 같았다. F, Br의 함량은 거의 없었기 때문에 4가지 음이온만 나타났다. Cl의 함량은 처리간 균일한 양상을 보이지는 않았고 여과전 폐액에서 가장 낮았다. 여과기의 길이와 zeolite의 배합비율을 다르게 하여 Cl의 함량을 측정한 결과 Cl에는 큰 영향을 미치지 않았음을 알 수 있다. NO₃는 모래 여과기의 길이가 90cm이고 모래만 처리한 여과기를 통과한 폐액에서 가장 낮았고 그 외 처리구를 보면 여과전에 비해 큰 차이를 보이지 않았으나 zeolite의 비율이 높아짐에 따라 NO₃의 수치가 다소 높아짐을 알 수 있다. PO₄는 처리간 뚜렷한 차이를 나타냈는데 여과기의 길이가 50cm에 비하여 90cm를 통과한 폐액에서 PO₄ 함량은 더 낮게 나타났고 zeolite 배합비율이 높을수록 낮아졌다. SO₄ 함량은 여과전에 비해 여과후 다소 높아졌고 zeolite를 처리한 구가 모래만 처리한 구에 비하여 다소 높음을 알 수 있다.

4. 결과 4

실험 4는 1~3 mm 입자의 zeolite를 이용해 모래여과기를 제작하여 실험을 실시하였다. 입자크기가 다른 zeolite를 이용하여 폐액을 여과한 결과 실험 3결과와 유사하였다. 2회에 걸쳐 여과한 결과 1, 2회 모두 비슷한 결과를 나타냈는데 pH는 여과전에 비하여 모두 높아졌고 zeolite의 함량이 많아질수록 pH가 높아졌다. EC의 함량은 처리간 차이가 별로 없었으나 여과전과 그냥 모래만 통과한 폐액의 EC가 다른 처리구에 비하여 다소 낮았다(표 12). 양이온 농도의 변화를 보면 표 14와 같다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 여과전에서 가장 높았다. 모래여과기의 길이가 길어짐에 따라 낮아졌고 zeolite의 배합비율이 높아짐에 따라 낮아졌는데 여과기의 길이가 50cm에서 sand:zeolite의 배합비율이 1:1 일 때는 거의 없었고 여과기의 길이가 90cm에서는 zeolite를 첨가한 6, 7, 8 처리구 모두 여과후 $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 거의 나타나지 않았다. 칼륨과 칼슘의 함량도 처리구에 따라 뚜렷한 차이를 나타냈는데 zeolite의 비율이 높아지고 여과기의 길이가 길어질수록 매우 낮은 수치를 보였다. 마그네슘은 zeolite의 배합비율이 높아질수록 약간 높아졌으나 거의 차이를 나타내지는 않았고 철 함량도 처리구에 따라 차이를 나타내지 않았다. 나트륨 함량은 zeolite를 처리한 여과기에서 매우 높게 나타났으며 여과기가 길고 모래와 zeolite의 비율이 1:1인 처리구 8에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 아연과 망간의 함량을 보면 zeolite를 처리한 구에서 낮아졌고 여과기의 길이가 길수록 zeolite의 함량이 높을수록 낮아졌으며, 구리는 처리간 큰 차이를 보이지 않았으나 처리구 8에서 다소 낮은 수치를 보였다.

1회 여과결과 폐양액의 음이온을 분석한 결과이다(표 14). 음이온의 함량은 입자가 미세한 zeolite를 처리한 실험 3의 결과와도 비슷한 경향을 나타냈다. Cl의 함량은 zeolite를 처리한 구간에는 균일한 양상을 보이지는 않았고 여과전에서 가장 낮았다. zeolite를 처리하지 않은 처리 1, 5에서 낮았고 여과전의 함량이 가장 낮았다. NO_3 는 여과전과 비교하면 그 외 처리구에서 높았는데 여과기의 길이가 길고 zeolite의 함량이 가장 높은 처리구 8에서 가장 높은 수치를 나타냈다. zeolite의 비율이 높아짐에 따라 NO_3 의 함량이 높아짐을 알 수 있다. PO_4 는 길이가 긴 처리구의 함량이 다소 낮았고 zeolite의 배합비율이 높을수록 다소 감소하였다. SO_4 의 함량을 보면 여과전에 비하여 다른 처리구에서 높았는데 zeolite를 처리한 구가 여과전 폐양액과 모래만 처리한 구에 비하여 높았고 처리구 8에서 가장 높은 수치를 나타냈다.

표 12. 모래여과장치에 따른 pH, EC의 변화

처리	pH	EC(mS cm ⁻¹)
여과전 폐양액	4.50	2.22
1	6.52	2.20
2	6.54	2.22
3	6.49	2.21
4	6.57	2.27
5	6.57	2.14
6	6.88	2.41
7	6.74	2.50
8	6.57	2.66

1: 50cm, sand 100%

2: 50cm, sand:zeolite=5:1

3: 50cm, sand:zeolite=2:1

4: 50cm, sand:zeolite=1:1

5: 90cm, sand 100%

6: 90cm, sand:zeolite=5:1

7: 90cm, sand:zeolite=2:1

8: 90cm, sand:zeolite=1:1

표 13. 양이온 농도의 변화

처리	NH ₄ -N	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu
	ppm								
여과전 폐양액	9.76	333.16	126.11	1.38	52.63	3.84	0.90	0.99	0.29
1	6.77	317.45	142.29	1.39	53.17	2.70	1.15	1.40	0.23
2	2.25	110.74	115.67	1.37	231.15	3.22	0.34	1.39	0.30
3	0.43	68.21	74.88	1.39	307.85	3.33	0.19	1.32	0.30
4	-	69.98	60.63	1.43	350.59	3.27	0.17	1.05	0.28
5	4.99	283.10	126.11	1.38	53.76	3.18	0.23	1.12	0.32
6	-	73.35	81.02	1.40	372.49	3.22	0.15	0.83	0.31
7	-	63.64	39.92	1.49	433.81	3.37	0.11	0.57	0.28
8	-	112.85	36.53	1.53	462.11	3.28	0.10	0.47	0.26

1: 50cm, sand 100%

2: 50cm, sand:zeolite=5:1

3: 50cm, sand:zeolite=2:1

4: 50cm, sand:zeolite=1:1

5: 90cm, sand 100%

6: 90cm, sand:zeolite=5:1

7: 90cm, sand:zeolite=2:1

8: 90cm, sand:zeolite=1:1

표 14. 음이온 농도의 변화

처리	Cl	NO ₃	ppm	
			PO ₄	SO ₄
여과전 폐양액	19.87	633.64	46.86	178.40
1	24.60	691.27	31.20	200.64
2	35.03	755.79	39.41	242.76
3	30.57	793.49	42.47	262.09
4	35.42	816.60	39.14	298.73
5	28.30	876.94	43.38	243.89
6	65.81	952.23	32.36	382.64
7	56.86	993.03	37.28	435.208
8	60.08	1014.43	35.13	532.86

1: 50cm, sand 100%

2: 50cm, sand:zeolite=5:1

3: 50cm, sand:zeolite=2:1

4: 50cm, sand:zeolite=1:1

5: 90cm, sand 100%

6: 90cm, sand:zeolite=5:1

7: 90cm, sand:zeolite=2:1

8: 90cm, sand:zeolite=1:1

두 번째 여과 결과도 1회 여과 결과(표 12, 13)와 비슷한 결과를 나타냈는데 다음 표 15, 16과 같다. 2회 결과에서도 pH는 여과 전에 비하여 높아졌고 zeolite의 함량이 높을수록 높아졌다. EC는 처리간 큰 차이는 없었으나 zeolite 함량이 높을수록 다소 높아졌다. EC는 zeolite 배합비율이 가장 높은 처리구 8에서 가장 높은 수치를 나타냈다. NH₄-N의 함량은 여과전에 비해 여과후 낮게 나타났고 여과기의 길이가 길고 zeolite 함량이 높은 처리구 6, 7, 8,에서는 거의 나타나지 않았다. 칼륨과 칼슘의 함량도 zeolite가 첨가된 처리구가 zeolite가 첨가되지 않은 처리구에 비해 낮게 나타났는데 zeolite의 배합비율이 높을수록 여과전에 비해 여과후 이온의 함량이 매우 낮아졌음을 알 수 있다. 마그네슘과 철은 처리간 차이를 별로 나타내지 않았는데 처리구 8에서 다소 높게 나타났고 아연과 망간은 여과기의 길이가 길고 zeolite의 함량이 높을수록 여과전에 비해 여과후 낮은 수치를 보였다.

2회 여과 결과 폐양액의 음이온을 분석한 결과이다(표 17). 2회 분석결과 1회와 비슷한 양상을 나타냈다. 여과후 Cl의 함량은 여과전에 비하여 약간 높아졌으나 큰 차이

가 없었고 zeolite의 배합비율에는 영향을 받지 않았다. NO₃의 함량은 여과전과 비교하여 높아졌으나 처리간 뚜렷한 차이는 나타내지 않았다. PO₄ 함량은 여과전에 비해 여과된 후에 함량이 낮아졌고 여과기의 길이가 50cm보다는 90cm를 통과한 폐양액에서 낮게 나타났으며 zeolite 비율이 높을수록 다소 낮아지는 경향을 보였다. SO₄는 여과전에 비해 여과후 수치가 높게 나타났고 zeolite를 처리한 구가 대조구나 모래만 처리한 구에 비하여 높았는데 처리구 8에서 가장 높은 수치를 나타냈다.

표 15. 모래여과장치에 따른 pH, EC의 변화

처리	pH	EC(mS/cm)
여과전 폐양액	4.64	2.15
1	5.95	2.16
2	6.25	2.07
3	6.31	2.06
4	6.51	2.08
5	6.36	2.16
6	6.86	2.11
7	7.00	2.22
8	7.05	2.26

1: 50cm, sand 100%

2: 50cm, sand:zeolite=5:1

3: 50cm, sand:zeolite=2:1

4: 50cm, sand:zeolite=1:1

5: 90cm, sand 100%

6: 90cm, sand:zeolite=5:1

7: 90cm, sand:zeolite=2:1

8: 90cm, sand:zeolite=1:1

표 16. 양이온 농도의 변화

처리	NH ₄ -N	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu
	ppm								
여과전 폐양액	6.16	345.50	141.84	1.40	72.24	2.45	0.85	0.85	0.31
1	5.40	333.01	129.91	1.40	74.34	2.76	0.59	1.38	0.34
2	2.38	130.88	111.59	1.38	189.94	2.72	0.42	1.48	0.32
3	0.64	69.42	77.40	1.38	264.45	2.70	0.32	1.49	0.32
4	-	63.04	46.76	1.39	314.87	2.79	0.29	1.44	0.30
5	4.08	314.56	140.13	1.39	70.56	2.87	0.21	1.31	0.35
6	-	63.72	49.50	1.40	318.17	2.70	0.22	1.19	0.33
7	-	61.34	15.58	1.52	396.40	2.75	0.20	0.59	0.29
8	-	61.89	8.85	1.59	407.35	2.76	0.18	0.52	0.28

1: 50cm, sand 100%

2: 50cm, sand:zeolite=5:1

3: 50cm, sand:zeolite=2:1

4: 50cm, sand:zeolite=1:1

5: 90cm, sand 100%

6: 90cm, sand:zeolite=5:1

7: 90cm, sand:zeolite=2:1

8: 90cm, sand:zeolite=1:1

표 17. 음이온 농도의 변화

처리	Cl	NO ₃	PO ₄	SO ₄
여과전 폐양액	29.01	978.62	72.16	261.82
1	29.78	999.16	73.66	267.48
2	30.78	1015.93	64.21	279.15
3	31.18	1035.76	64.53	292.00
4	31.64	1029.71	60.81	297.95
5	30.73	1046.49	60.82	280.47
6	32.27	1052.56	53.81	312.07
7	33.84	1062.47	46.06	349.10
8	32.59	1074.54	50.65	367.33

1: 50cm, sand 100%

2: 50cm, sand:zeolite=1:5

3: 50cm, sand:zeolite=1:2

4: 50cm, sand:zeolite=1:1

5: 90cm, sand 100%

6: 90cm, sand:zeolite=1:5

7: 90cm, sand:zeolite=1:2

8: 90cm, sand:zeolite=1:1

다음은 길이가 90cm인 모래여과기로 20회에 걸쳐 여과시키면서 여과전과 여과후 pH, EC, 양이온, 음이온의 변화율을 측정하였다. 초기에는 여과 후 pH는 여과전과 비교하여 높았으나 여과횟수가 증가함에 따라 낮아졌고 처리간 차이도 별로 없었다. zeolite의 함량이 가장 높은 처리구 4는 다른 처리구보다 여과후 높은 수치를 나타냈으나 마지막여과결과를 보면 4개의 처리구 모두 거의 같게 나타냈다. EC는 모래만 들어있는 처리구 1이 다른 처리구와 비교하여 다소 높았으나 처리간 큰 차이는 없었다. 여과횟수가 증가함에 따라 EC 변화율은 14, 16회 만 제외하고 비슷한 양상을 보였다. EC는 여과횟수가 증가함에 따라 여과후가 여과전과 비교하여 다소 높았으나 큰 차이는 없었다(그림 5, 6).

그림 7, 8은 암모니아태 질소(NH₄-N)와 칼륨 함량의 변화를 나타낸 것이다. 모래만 처리한 처리구 1에서 암모니아태 질소 제거 효과는 가장 낮았고 zeolite의 혼합비율이 높을수록 여과효율이 높게 나타났다. 초기 여과시 높은 제거율을 보인 처리구 3, 4는 14회 여과할때까지 높은 여과효능을 나타냈으나 계속하여 여과횟수가 증가함에 따라

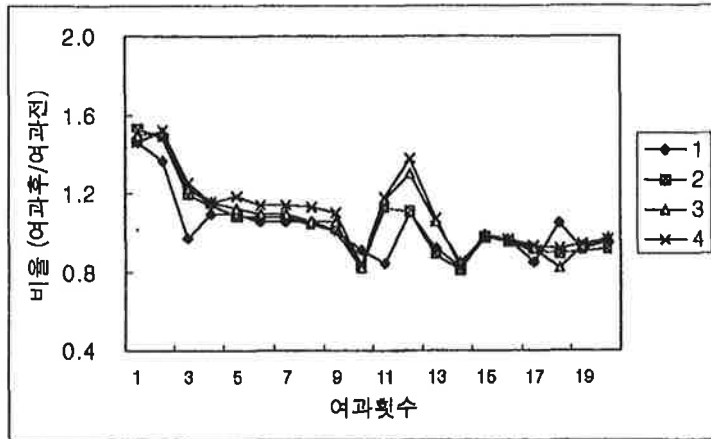


그림 5. 여과횟수에 따른 여과전후 pH 변화율.
 1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
 3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

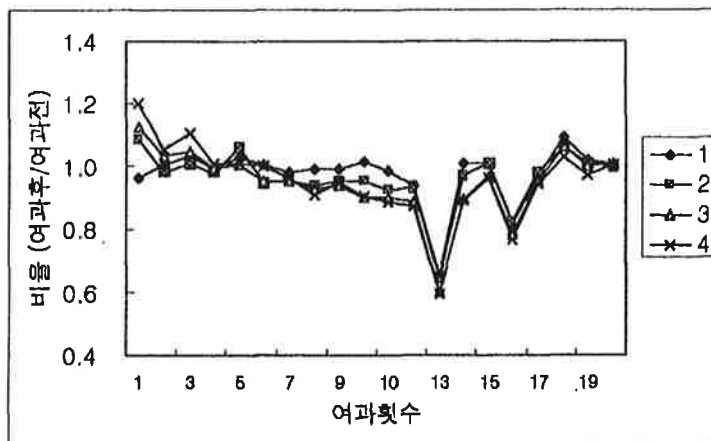


그림 6. 여과횟수에 따른 여과전후 EC 변화율.
 1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
 3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

암모니아태 질소 제거율은 낮아졌다. 여과횟수가 증가함에 따라 여과전과 여과후 수치의 차이가 거의 없었고 처리간 차이도 보이지 않았다(그림 7).

여과전과 비교하여 여과된 후 칼륨 함량을 보면(그림 8) 처리간 뚜렷한 차이를 나타냈다. 모래만 처리한 처리구 1은 다른 처리구에 비하여 칼륨의 제거 효과가 가장 낮았고 처리구 4가 가장 높았는데 zeolite가 많이 첨가된 처리구일수록 여과후 칼륨의 함량이 낮게 나타났다. 처리구 1은 여과횟수가 증가함에 따라 여과전에 비해 여과후 수치가 높게 또는 낮게 나타나 일관성있는 경향을 나타내지 않았다. 처리구 2, 3, 4는 여과전과 비교하여 비해 여과후 칼륨의 함량이 낮게 나타났으나 여과 횟수가 증가함에 따라 여과후 측정되는 칼륨의 함량이 높아졌고 여과 후반에는 처리간 차이가 적게 나타났다.

여과전과 여과후 칼슘의 변화율을 보면(그림 9) 처리간 뚜렷한 차이를 나타냈는데 초기에는 모래만 처리한 처리구 1의 경우 여과전과 여과후 변화가 거의 없었고 zeolite의 함량이 높아질수록 여과후 칼슘의 함량은 낮아졌다. 여과횟수가 증가할수록 칼슘 제거율은 감소되었고 처리간 차이가 적어졌다. 마지막 여과 결과를 보면 4개의 처리구 모두 비슷한 수치를 나타냈는데 초기 여과 결과와는 반대로 처리구 4에서 칼슘의 제거율이 가장 낮았다.

마그네슘 함량의 변화율은(그림 10) 13, 14회인 두 번의 여과 결과를 제외하고는 실험기간 동안 거의 여과전과 여과후 차이가 거의 없었다. 여과횟수가 증가함에 따라 처리간 뚜렷한 차이를 나타내지는 않았으나 zeolite가 가장 많이 첨가된 처리구 4가 다른 처리구에 비해 여과후 높은 마그네슘 함량이 측정되었고 특히 10, 12, 13회 여과결과 여과전에 비해 현저히 높은 마그네슘 함량이 측정되었다.

여과기간 동안 아연의 변화율은 그림 11와 같다. 초기에는 여과전과 비교하여 여과된 후 아연의 함량이 감소되었는데 zeolite 함량이 높을수록 아연 제거율은 높았다. 그러나 여과횟수가 증가함에 따라 처리간에 따른 차이도 거의 없었고 4개 처리구 모두 여과기간동안 여과전에 비해 여과후 아연의 함량이 높거나 낮게 나타나 규칙적인 경향을 나타내지 않았다.

음이온인 NO_3^- 의 함량의 변화율을 보면(그림 12) 여과 초기에는 여과후의 값이 여과전에 비해 높았고 중반부로 갈수록 낮아지다가 다시 높아지는 경향을 보였고 처리간 큰 차이는 없었다. PO_4 의 함량을 보면(그림 13) 초기에는 4개의 처리구 모두 여과전과 여과후에 측정되는 PO_4 함량간에는 규칙적인 경향을 나타내지 않았고 여과횟수에 따른 처리간 차이도 없었으나 처리구 3, 4에서 다소 낮게 나타났다. 그리고 후반부로 갈수록 PO_4 의 제거율은 낮아졌다.

1회, 4회 여과결과 Cl의 함량은 여과전은 여과후와 비교하여 매우 높게 나타났다. 처리간에 따라 차이는 거의 없었고 여과횟수가 증가함에 따라서도 여과후 함량이 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있었는데 이와같이 일정하고 규칙적인 양상은 나타내지 않았고 비교할 만한 처리간의 차이도 없었다(그림 14).

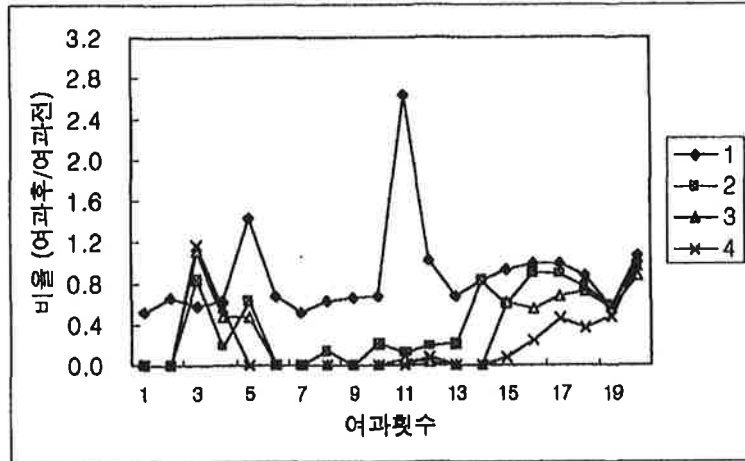


그림 7. 여과횟수에 따른 여과전후 $\text{NH}_4\text{-N}$ 변화율.

1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
 3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

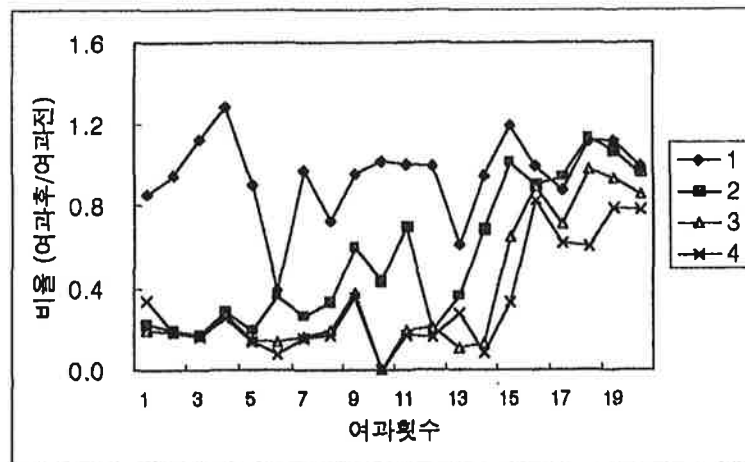


그림 8. 여과횟수에 따른 여과전후 K 변화율.

1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
 3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

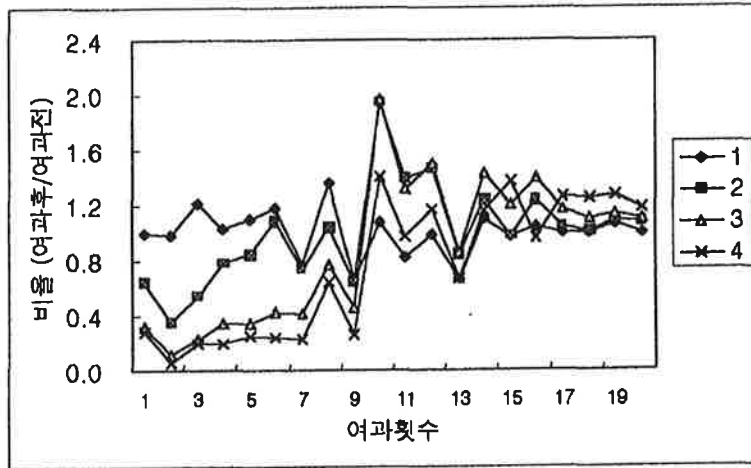


그림 9. 여과횟수에 따른 여과전후 Ca 변화율.

1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

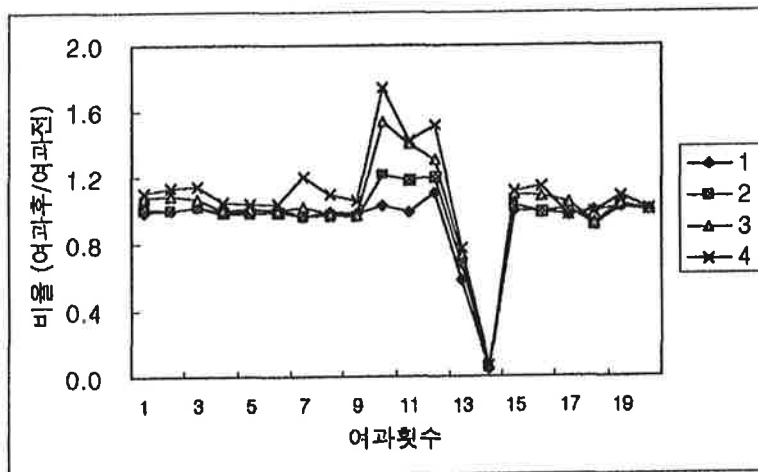


그림 10. 여과횟수에 따른 여과전후 Mg 변화율.

1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

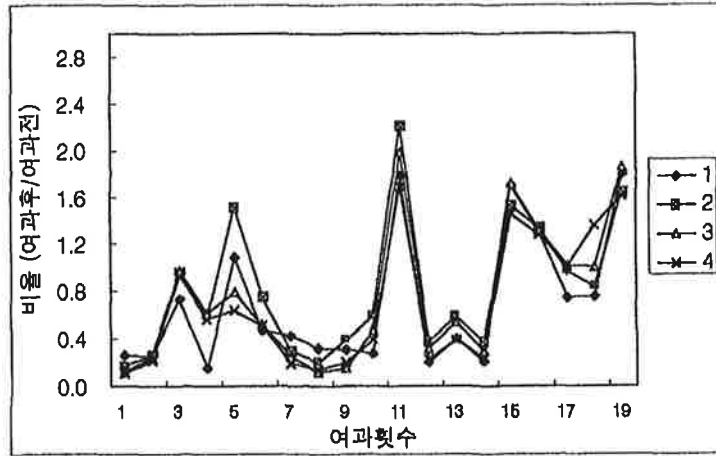


그림 11. 여과횟수에 따른 여과전후 Zn 변화율.

1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
 3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

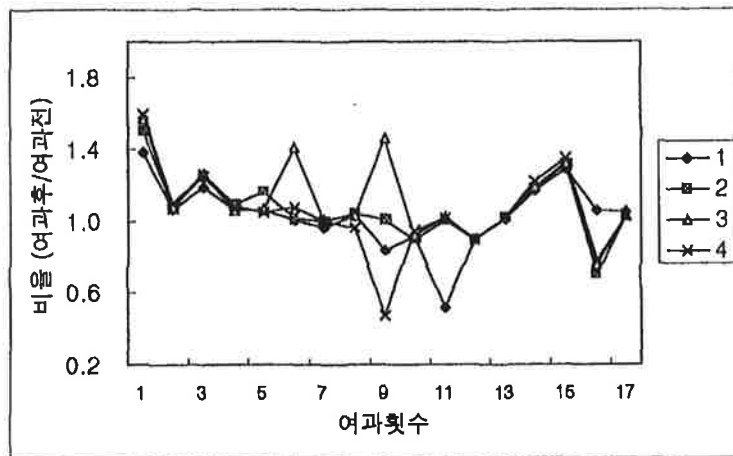


그림 12. 여과횟수에 따른 여과전후 NO₃ 변화율.

1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
 3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

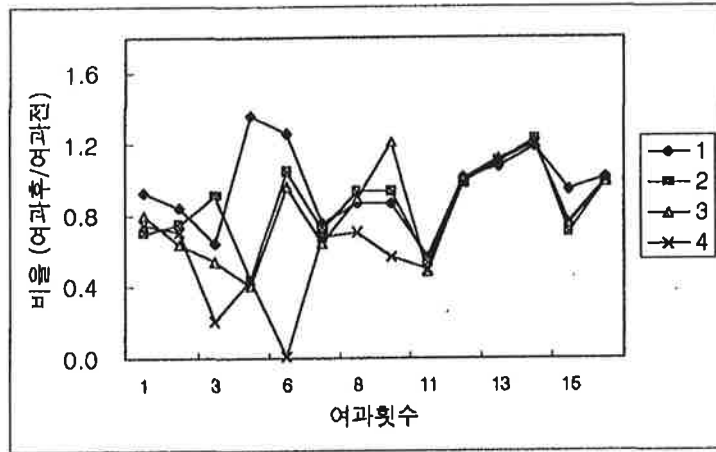


그림 13. 여과횟수에 따른 여과전후 PO₄ 변화율.

1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
 3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

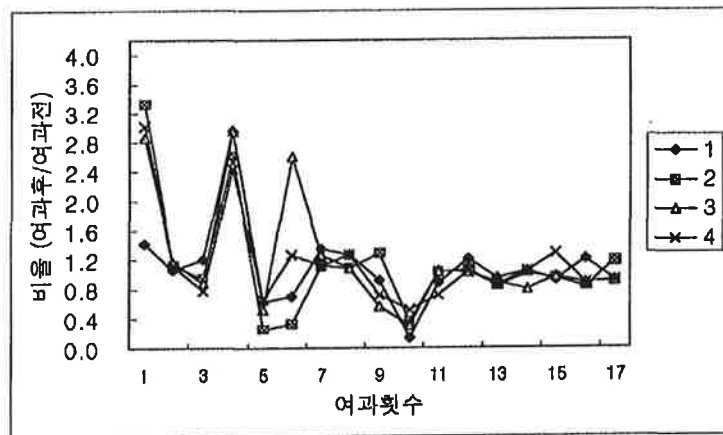


그림 14. 여과횟수에 따른 여과전후 Cl 변화율.

1: sand 100%, 2: sand:zeolite=5:1,
 3: sand:zeolite=2:1, 4: sand:zeolite=1:1

5. 결과 5

인공 zeolite를 처리하여 2회에 걸쳐 여과전과 여과후 양이온 농도 변화를 조사하였다(표 18, 19, 21, 22). 1, 2회 여과 결과 2~3mm의 구상 zeolite를 처리한 구에서 pH, EC가 가장 높게 나타났다. 양이온 농도를 보면 나트륨을 제외하고는 암모니아태 질소, 칼륨, 칼슘, 아연, 망간, 구리의 함량은 여과전과 비교하여 낮게 나타났는데 특히 암모니아태 질소와 칼륨, 칼슘의 함량은 매우 낮아졌다. PO₄는 처리구 3에서 가장 낮았고 그 외 음이온 함량은 양이온에 비하여 처리간 뚜렷한 차이는 없었다(표 20, 23).

표 18. pH, EC의 변화

처리	pH	EC(mS cm ⁻¹)
여과전 폐양액	4.63	1.82
1	6.28	1.89
2	9.41	2.29
3	7.07	1.85

- 1: 90cm, sand 100%
- 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1
- 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

표 19. 양이온 농도의 변화

처리	NH ₄ -N	K	Ca	Mg	Na	Zn	Mn	Cu
	ppm							
여과전 폐양액	5.59	291.22	102.96	8.14	54.54	0.48	1.01	0.25
1	7.45	233.31	110.24	8.05	39.39	0.11	1.48	0.24
2	-	-	5.98	-	770.63	0.04	0.33	0.12
3	-	-	13.52	3.99	279.77	0.22	0.52	0.12

- 1: 90cm, sand 100%
- 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1
- 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

표 20. 음이온 농도의 변화

처리	Cl	NO ₃	ppm	
			PO ₄	SO ₄
여과전 폐양액	33.44	784.08	80.30	143.44
1	38.06	754.49	64.79	143.88
2	30.14	758.67	91.51	143.33
3	27.83	748.11	59.95	143.99

- 1: 90cm, sand 100%
 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1
 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

표 21. pH, EC의 변화

처리	pH	EC(mS cm ⁻¹)
여과전 폐양액	5.06	1.78
1	6.40	1.82
2	9.43	2.32
3	6.82	1.78

- 1: 90cm, sand 100%
 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1
 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

표 22. 양이온 농도의 변화

처리	NH ₄ -N	K	Ca	Mg	Na	Zn	Mn	Cu
여과전 폐양액	7.49	219.17	100.10	8.26	35.35	0.53	0.63	0.22
1	7.73	216.14	107.64	8.15	44.44	0.05	1.19	0.20
2	-	32.32	12.48	-	726.19	-	-	0.12
3	-	30.30	3.12	4.74	750.43	-	-	0.15

- 1: 90cm, sand 100%
 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1
 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

표 23. 음이온 농도의 변화

처리	Cl	NO ₃	ppm	
			PO ₄	SO ₄
여과전 폐양액	34.54	771.54	72.93	142.12
1	19.14	518.21	42.02	107.91
2	19.80	527.56	47.30	107.58
3	40.48	545.60	22.88	118.47

- 1: 90cm, sand
- 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1
- 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

다음은 모래여과기내에 입자크기가 다른 인공 zeolite를 처리하여 20회에 걸쳐 여과한 후 여과횟수가 증가함에 따라 pH, EC, 양이온, 음이온의 성분 변화를 조사하였다. 초기 여과할 때는 여과전과 비교해 여과후의 pH는 3개의 처리구 모두 높게 나타나다가 처리구 1, 2의 경우 여과횟수가 증가함에 따라 다소 낮아졌다. 처리구 3은 처리구 1, 2에 비해 높은 수치를 보였고 규칙적인 경향을 보이지 않았다(그림. 15).

EC의 변화율을 보면(그림 16) 초기 여과할 때 처리구 3은 처리구 1, 2와 비교하여 높게 나타났으나 여과가 증가함에 따라 다른 처리구에 비해 낮아지다가 후반부에 가서는 다른 처리구와 비슷한 수치를 나타냈다. 4개의 처리구 모두 13회 여과할 때 여과전에 비해 여과후 매우 낮은 수치를 나타냈는데 그 외 여과기간 동안을 보면 여과전과 여과된 후 큰 차이는 없었다.

암모니아태 질소의 변화율을 보면(그림 17) 모래만 첨가된 처리구 1에서는 암모니아태 질소는 거의 제거되지 않았고 여과횟수가 8회와 12회를 제외하고는 여과전에 비해 여과된 후의 비율은 큰 차이가 없었다. 처리구 2, 3은 후반부로 갈수록 여과후의 함량이 여과전에 비해 다소 높아지기는 했으나 여과기간 동안 계속해서 여과전에 비해 여과된 후 암모니아태 질소는 거의 측정되지 않았다. 따라서 인공 zeolite는 암모니아태 질소제거에 매우 효과적임을 알 수 있다.

그림 18은 칼륨의 변화율을 나타낸 것이다. 모래만 처리한 처리구 1은 여과횟수가 증가함에 따라 어느 정도의 차이는 있었으나 13회 여과기간 동안 일정한 경향을 보였다. 칼륨의 함량은 여과전이 여과후에 비해 높을 때도 있고 낮은 경우도 있었지만 여과전과 여과후 비율의 폭은 작았다. 인공 zeolite를 처리한 처리구 2, 3에서는 1과 비교하여 여과후 칼륨의 함량이 여과전에 비교하여 매우 낮게 나타났는데 처리구 2는 후반

부로 갈수록 높아졌고 처리구 3은 계속해서 낮게 나타나다가 후반부로 갈수록 다소 높아졌다.

칼슘의 변화율(그림 19) 또한 칼륨과 같이 처리구간 뚜렷한 차이를 나타냈다. 모래만 처리한 처리구 1은 여과전후 변화가 거의 없었고 여과기간동안 여과전후 비율도 일정하게 나타났으나 처리구 2는 8회까지는 여과기를 통과한 후 여액의 칼슘함량은 여과전에 비교하여 매우 낮게 나타났으나 8회가 지나면서 부터는 오히려 여과전에 비해 여과후에 높게 나타났다. 처리구 3은 여과기간동안 줄곧 여과전에 비해 여과후 매우 낮은 칼슘의 함량을 나타냈는데 이것으로 보아 처리구 3은 폐양액의 칼슘, 칼륨 함량을 낮추는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

그림 20은 여과횟수가 증가함에 따라 여과전과 여과후의 마그네슘 변화율을 나타낸 것이다. 처리구 1에서는 7회 여과할 때만 제외하고는 여과전과 여과후 마그네슘 함량에는 큰 차이가 없었다. 처리구 2를 보면 처음에는 여과후 매우 낮은 마그네슘 함량을 나타냈으나 여과횟수가 증가함에 따라 여과전과 여과후 수치의 차이는 별로 없었다. zeolite를 처리한 처리구 3은 초기 여과할 때는 여과기간 중 계속하여 높은 마그네슘의 제거 효과를 나타냈지만 여과횟수가 증가함에 따라 여과후 마그네슘의 함량은 다소 높아졌다.

아연의 변화율을 보면(그림 21) 8회 여과할 때까지는 여과할 때까지 3개의 처리구 모두 여과전에 비해 여과후 아연의 함량은 매우 낮게 나타났고 그 중 처리구 3이 아연의 제거효과가 가장 높았다. 그러나 여과횟수가 증가함에 따라 아연의 제거능은 낮아졌는데 처리구 2를 보면 9회부터는 오히려 여과전에 비해 여과된 후 아연의 함량이 매우 높게 검출됨을 알 수 있었다.

음이온인 Cl 함량의 변화율을 보면(그림 22) 처리구 1, 2는 여과횟수가 증가함에 따라 비슷한 경향을 나타냈다. 처리구 1을 통과한 Cl의 함량은 2, 6, 11회를 제외하고는 여과후의 값은 여과전과 비교하여 낮게 나타났으나 여과횟수가 증가함에 따라 일정한 경향은 보이지 않았다. 처리구 2는 처리구 1, 3과 비교하여 Cl의 제거 효율이 낮았고, 여과전과 여과후의 비율도 일정하지 않았는데 여과전후 비율은 3회 여과할 때 가장 높았고 다시 낮아지다가 여과횟수가 증가함에 따라 높아졌다.

여과기간 동안 NO₃ 함량의 변화율을 보면 다음과 같다(그림 23). NO₃ 함량은 여과전과 비교하여 여과후에 높게 나타나는 경우도 있었고 여과후에 더 낮게 나타날 때도 있었는데 3개의 처리구 모두 비슷하게 증감을 반복하였다.

여과횟수에 따른 여과전후 PO₄ 변화율을 보면(그림 24) 처리구 3은 8회 여과할 때만 제외하고는 처리구 1과 비슷한 경향을 나타냈으며 처리구 3에서 8회 여과한 결과 PO₄ 함량은 매우 낮게 나타났다. 모래만 처리한 처리구 1의 PO₄ 비율은 여과기간동안 계속

해서 여과전과 여과후의 비율이 일정하지 않았고 처리구 2의 경우에는 3회 여과부터 6회까지는 여과후 PO_4 가 거의 검출되지 않았다. 그러나 7회부터는 높게 나타나기 시작했다. 처리구 2를 통과한 폐액의 PO_4 함량은 다른 두 처리구와 비교하여 볼 때 일관성 있는 경향은 보이지 않았다.

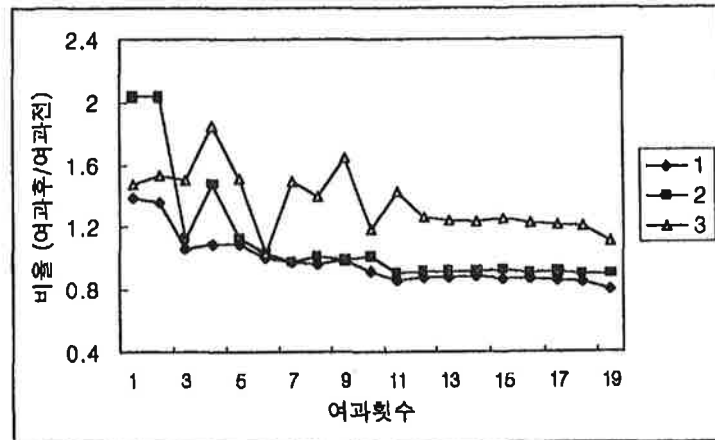


그림 15. 여과횟수에 따른 여과전후 pH 변화율.

1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

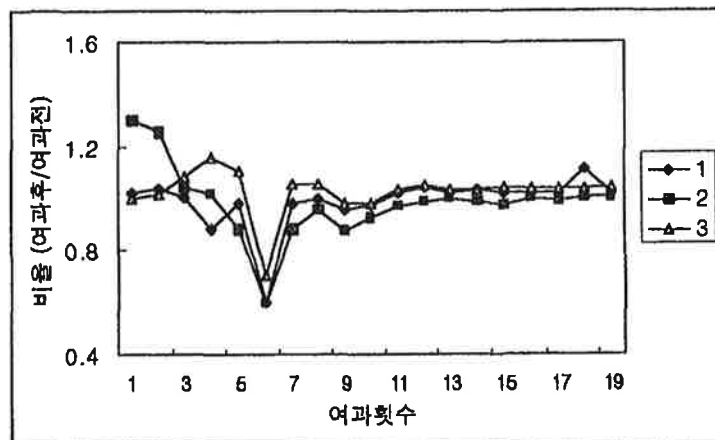


그림 16. 여과횟수에 따른 여과전후 EC 변화율.

1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

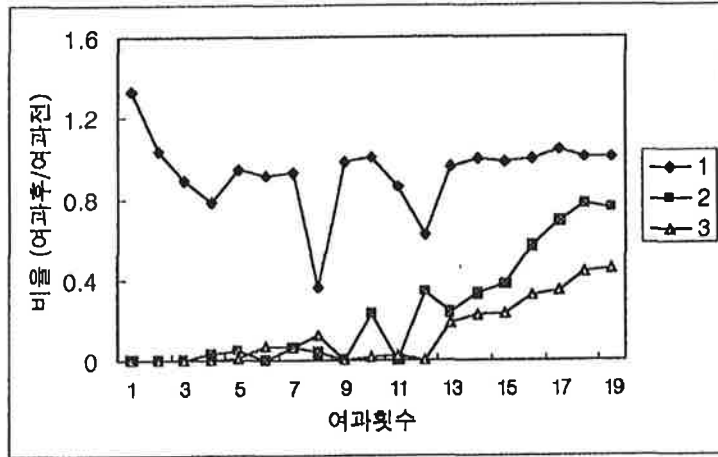


그림 17. 여과횟수에 따른 여과전후 NH₄ 변화율.
 1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

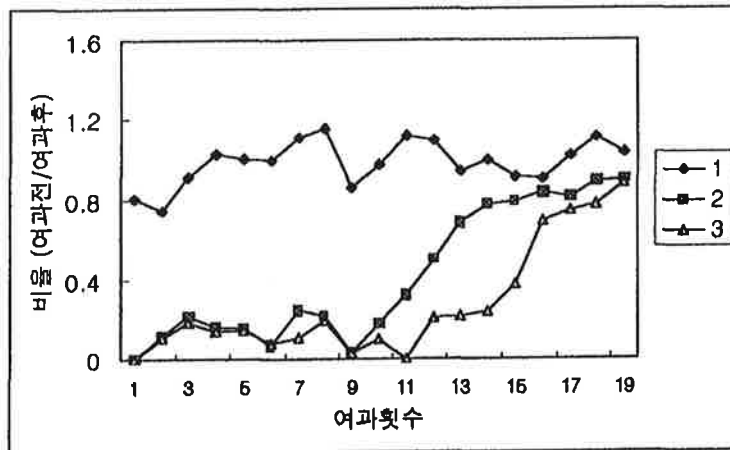


그림 18. 여과횟수에 따른 여과전후 K 변화율.
 1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

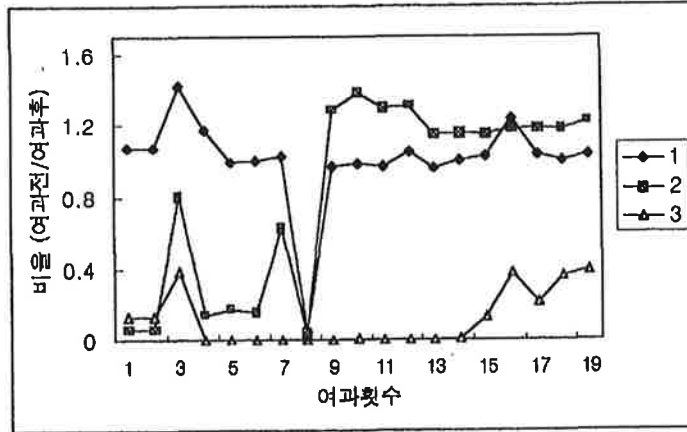


그림 19. 여과횟수에 따른 여과전후 Ca 변화율.

1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

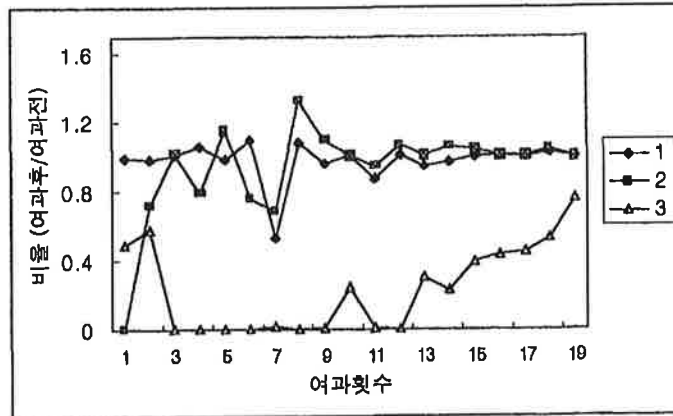


그림 20. 여과횟수에 따른 여과전후 Mg 변화율.

1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

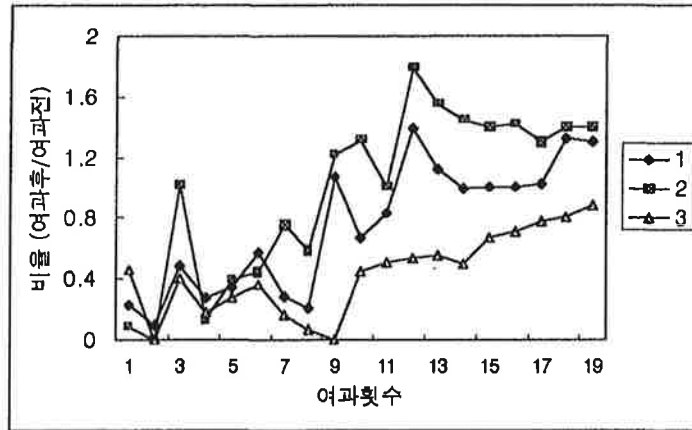


그림 21. 여과횟수에 따른 여과전후 Zn 변화율
 1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

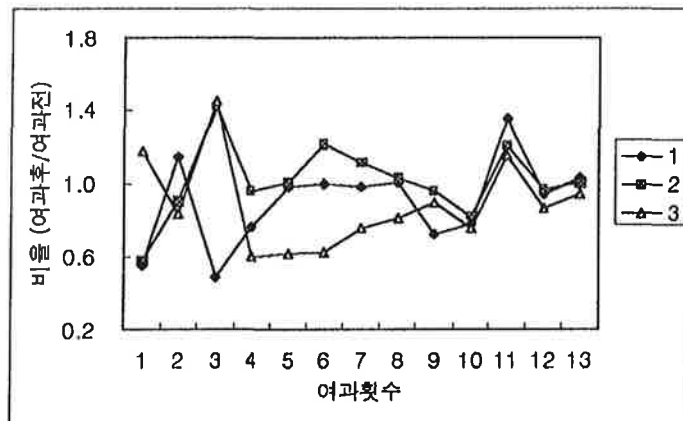


그림 22. 여과횟수에 따른 여과전후 Cl 변화율
 1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

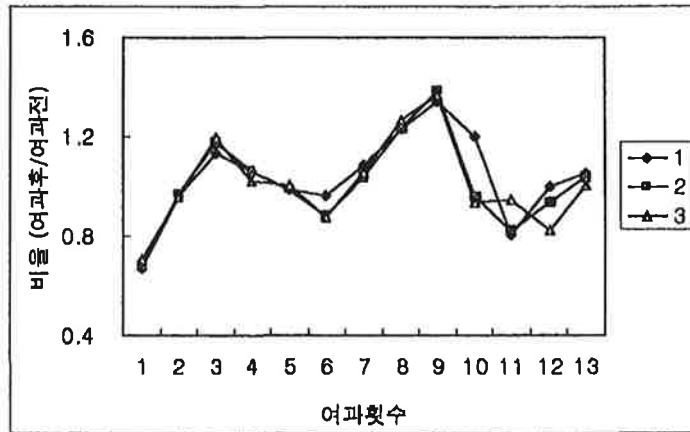


그림 23. 여과횟수에 따른 여과전후 NO₃ 변화율.
 1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

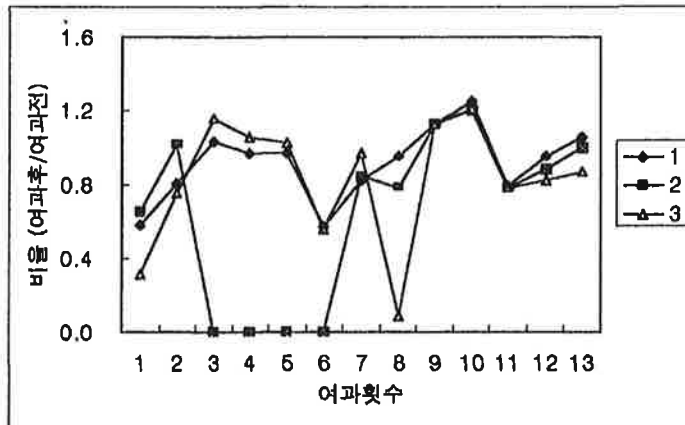


그림 24. 여과횟수에 따른 여과전후 PO₄ 변화율.
 1: sand 100%, 2: 90cm, sand:zeolite(2~3mm)=1:1,
 3: 90cm, sand:zeolite(0.5~1mm)=1:1

6. 결과 6

모래여과기는 모래만 100%인 처리구와 sand와 천연 zeolite의 비율이 5:1, 2:1, 1:1로 배합된 처리구로 되어있는데 이러한 모래여과기내에 들어있는 내용물을 가지고 상토로 이용하기 위해 상추 종자의 발아율과 생육을 비교 실험하였다. 본 실험에서 이용된 상토는 모래여과기의 내용물만을 사용한 상토와 부엽토만을 이용한 상토, 모래여과기의 내용물과 부엽토를 1:1로 혼합하여 만든 상토로 나누어 모두 9개의 처리구를 만들어 실험하였으며 모래만 100%인 모래여과기 내용물을 이용한 상토를 대조구로 하였다. 발아조사기간동안 시간이 경과함에 따라 당일의 발아율을 보면 다음과 같다(표 24). 처리구 모두 파종후 5, 6일째 되는 날 발아율이 가장 높았다. 발아율은 파종후 4일째 되었을 때 zeolite 함량이 가장 높은 처리구 7과 부엽토만 처리한 처리구 8에서 발아율이 가장 높았고 대조구와 처리 1에서 가장 낮았다. 시간 경과에 따른 발아율을 보면 zeolite 함량이 높은 처리구 6, 7에서는 발아조사를 끝낸 마지막 날까지 발아되었다.

상토 처리구에 따른 발아세, 평균발아율, 평균발아일수를 보면(표 25) 발아세는 처리 2, 3, 6, 7이 높았는데 특히 zeolite가 가장 많이 첨가된 처리구 6, 7에서 발아세가 가장 높았으며, 처리 4에서 가장 낮았다. 평균 발아율은 zeolite 함량이 가장 높은 처리구 7에서 92.22%로 가장 높은 수치를 나타냈고 처리 5에서 가장 낮은 발아율을 나타냈다. 대조구와 처리구 4, 5에서는 다른 처리구에 비해 낮은 발아율을 보였는데 처리 4, 5는 평균 발아율이 50% 미만으로 매우 낮은 발아율을 나타냈다. 이와같이 11일 동안 발아조사결과는 다음과 같다. 평균발아일수는 보면 6일에서 11일까지였고 대조구에서 가장 낮았으며 그 다음은 처리구 6, 7에서 낮았다. 평균발아일수는 처리구 5에서 가장 길게 나타났다.

3월 27일과 4월 3일 2회에 걸쳐 실시한 생육조사 결과는 표 26과 표 27에 나타냈다. 표 26은 보면 한달된 상추묘를 정식한 후 1주일이 되었을 때 처리구에 따라 초장, 초폭, 엽수를 조사한 결과이다. 상추의 초기 생육은 처리구간에 따라 큰 차이를 나타내지는 않았으나 초장은 처리구 zeolite 함량이 높은 처리구 6에서 가장 높았고 처리구 1에서 가장 낮았다. 엽폭은 처리구 3에서 가장 낮았고 처리구 6, 7이 다른 처리구에 비교하여 높게 나타났다. 엽수도 처리구간 큰 차이를 보이지는 않았으나 처리구 3에서 가장 낮았고 대조구와 처리구 2에서도 낮은 수치를 나타냈다.

표 27은 2001년 4월 3일 2회 생육조사를 실시한 결과이다. 1회 생육조사 결과와 같이 처리구간 큰 차이는 없었다. 초장은 처리구 6에서 가장 낮았고 초폭은 처리구 6, 7이 다른 처리구에 비해 높은 수치를 나타냈으며 처리구 1에서 가장 낮았다. 엽수는 처

리구 5, 6, 7, 8, 9 모두 같았고 대조구와 처리구 1, 2, 3은 다소 낮은 수치를 보였다.

표 24. 시간 경과에 따른 발아율

처 리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율 (%)	발아일수							
			4	5	6	7	8	9	10	11
대조구	sand 100%	0%	3.33	13.33	22.22	10.00	8.89	11.67	6.67	0
1	sand 100%	50%	15.00	18.89	8.89	10.00	5.56	3.33	0	0
2	sand:zeolite(5:1)	0%	5.00	36.67	16.67	6.67	10.00	6.67	3.33	0
3	sand:zeolite(5:1)	50%	0	35.00	14.44	22.22	10.00	3.33	0	0
4	sand:zeolite(2:1)	0%	0	3.33	16.67	10.00	10.00	6.67	3.33	0
5	sand:zeolite(2:1)	50%	0	16.67	28.33	8.33	13.33	3.33	3.33	0
6	sand:zeolite(1:1)	0%	8.33	51.11	14.44	13.33	10.00	3.33	0	3.33
7	sand:zeolite(1:1)	50%	8.33	45.56	14.44	3.33	0	3.33	10.00	3.33
8	부엽토	100%	13.33	36.67	10.00	3.33	3.33	3.33	3.33	6.67

표 25. 처리에 따른 발아세, 평균발아율, 평균발아일수

처 리	모래여과기 내용물	부엽토첨가율 (%)	발아세	평균발아율 (%)	평균발아일수
대조구	sand 100%	0%	40.74	70.00	7.52
1	sand 100%	50%	43.98	54.44	6.47
2	sand:zeolite(5:1)	0%	54.17	75.56	6.93
3	sand:zeolite(5:1)	50%	59.72	70.00	7.53
4	sand:zeolite(2:1)	0%	25.00	48.33	7.45
5	sand:zeolite(2:1)	50%	44.00	43.33	11.12
6	sand:zeolite(1:1)	0%	72.69	88.89	6.92
7	sand:zeolite(1:1)	50%	74.07	92.22	6.58
8	부엽토	100%	52.78	63.33	7.63

표 26. 1회 상추 생육조사 결과

처 리	모래여과기 내용물	부엽토첨가율 (%)	초장 (cm)	초폭 (cm)	엽수 (개수)
대조구	sand 100%	0%	7.93	11.501	4.67
1	sand 100%	50%	6.43	11.00	5.00
2	sand:zeolite(5:1)	0%	6.87	12.83	4.67
3	sand:zeolite(5:1)	50%	6.83	9.88	4.25
4	sand:zeolite(2:1)	0%	7.01	11.30	5.50
5	sand:zeolite(2:1)	50%	7.13	11.38	5.00
6	sand:zeolite(1:1)	0%	8.27	13.17	5.00
7	sand:zeolite(1:1)	50%	5.77	12.33	5.00
8	부엽토	100%	6.65	10.58	4.75

표 27. 2회 상추 생육조사 결과

처 리	부엽토첨가율		초장 (cm)	초폭 (cm)	엽수 (개수)
	모래여과기 내용물	(%)			
1	sand 100%	0%	11.33	16.17	5.33
2	sand 100%	50%	12.10	17.17	5.33
3	sand:zeolite(5:1)	0%	11.83	19.00	5.67
4	sand:zeolite(5:1)	50%	10.38	17.13	5.75
5	sand:zeolite(2:1)	0%	12.63	18.50	6.00
6	sand:zeolite(2:1)	50%	11.67	17.75	6.00
7	sand:zeolite(1:1)	0%	13.50	20.00	6.00
8	sand:zeolite(1:1)	50%	11.50	19.67	6.00
대조구	부엽토	100%	12.13	17.25	6.00

생육조사는 모두 4회에 걸쳐 실시하였고 생육기간 동안 초장, 초폭, 엽수의 변화는 다음과 같다(그림 24, 그림 25, 그림 26). 초장은 모래만 100% 처리한 대조구와 처리 3에서 가장 낮았는데 생육기간동안 대조구와 처리 3에서 생육된 상추의 초장은 다른 처리구에 비해 낮은 수치를 나타냈다. zeolite 함량이 가장 높은 처리구 7은 마지막 생육조사기간까지 지속적인 초장의 증가를 나타냈다. 초폭은 생육기간 동안 대조구가 다른 처리구에 비해 매우 낮은 생육상태를 나타냈고 그 외 처리구에서는 비슷한 성장 변화를 나타냈다. 특히 zeolite 함량이 가장 높은 처리구 7에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 상추의 생육기간 중 초장과 초폭의 변화와 같이 엽수도 비슷한 결과를 나타냈다. 시간이 경과함에 따라 엽수도 모두 증가되었으나 모래만 처리한 대조구의 엽수가 가장 낮았고 그 외 처리구 모두 비슷한 수치를 나타냈다. 초장, 초폭, 엽수를 처리간 비교해 보면 모두 대조구에서 가장 저조한 성장을 나타냈으며 zeolite 함량이 높고 모래여과기의 내용물과 부엽토를 1:1로 배합한 상토에서 가장 생장이 좋았음을 알 수 있었다.

최종적으로 생육조사를 끝낸 후 생체중과 근장, 엽면적을 조사하였다(표 28). 생중은 지상부와 지하부(뿌리)로 나누어 조사하였다. 지상부의 생체중은 부엽토가 첨되지 않고 모래만 100%인 모래여과기 내용물을 이용한 처리구에서 가장 낮았고 zeolite의 함량이 가장 높고 부엽토를 배합한 처리구 7에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 지하부의 생체중은 대조구에서 가장 낮았고 zeolite의 함량이 높고 부엽토를 배합한 처리구 7과 부엽토 100%인 처리구 8에서 생체중이 높게 나타났다. 엽면적을 보지상부 생체중과 지하부 생체중 결과와 비슷한 경향을 나타냈는데 대조구에서 가장 높은 수치를 보였고 zeolite의 함량이 가장 높고 부엽토가 첨가된 처리구 7에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 생체중과 엽면적도 zeolite 함량이 높고 모래여과기의 내용물 부엽토를 1:1로 배합한 상토에서 높게 나타남을 알 수 있었다.

각각의 처리구에서 생육시킨 상추를 가지고 식물체내에 있는 무기이온 성분을 분석해 보았다(표 29, 표 30). 식물체내의 전질소는 대조구에서 생육시킨 상추에서 가장 낮은 수치를 나타냈고 그 다음으로는 처리구 1인 모래만 100%인 상토에 부엽토 첨가시킨 상토에서 생육한 상추에서 낮게 나타났다. 처리구에 따른 상추의 전질소량을 보면 모래여과기의 내용물만을 가지고 상토로 만들어 생육시켰을 때 보다 이 용물에 부엽토를 첨가하여 상추를 생육시켰을 때 전질소 함량이 더 높게 나타났다. zeolite의 함량이 가장 높고 부엽토를 첨가한 처리구 7에서 가장 높게 나타났고 모래여과기의 내용물에 부엽토를 첨가시키지 않은 처리구가 부엽토를 첨가한 처리구 비해 다소 높게 나타났다. 그 외 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 나트륨 함량을 보면 처리구 따른 규칙적인 경향을 나타내지는 않았다. 식물체내 칼슘의 함량을 보면 대조구와 처리구 5, 처리구 8에서 높게 나타났고 zeolite의 함량이 가장 높은 처리구 7에서는 낮은 수치를 보였다. 마그네슘의 함량은 처리구 모두 비슷한 수치를 나타냈는데 처리구 4에서 다소 높은 수치를 나타냈다. 칼륨은 처리구 5에서 가장 높게 나타났고 zeolite의 함량이 높고 부엽토를 첨가한 처리구 7에서 가장 낮은 수치를 나타냈다. 나트륨의 함량은 처리구 1에서 가장 낮은 수치를 나타냈고 zeolite 함량이 높은 처리구 6, 7에서는 높은 수치를 나타냈다. 식물체내 포함된 망간의 함량을 조사해보면 처리구에서 가장 높게 나타났고 부엽토만을 처리한 처리구 8에서 가장 낮게 나타났다. 식물체내 들어있는 망간의 함량을 비교해 보면 부엽토를 첨가하지 않은 처리구가 부엽토를 첨가한 배지에 비교하여 매우 높은 수치를 나타냈다. 구리의 함량은 처리구 큰 차이는 없었으나 처리구 4에서 다소 높게 나타났다. 식물체내 아연은 처리구 4에서 가장 높았고 처리구 1에서 가장 낮게 나타났다.

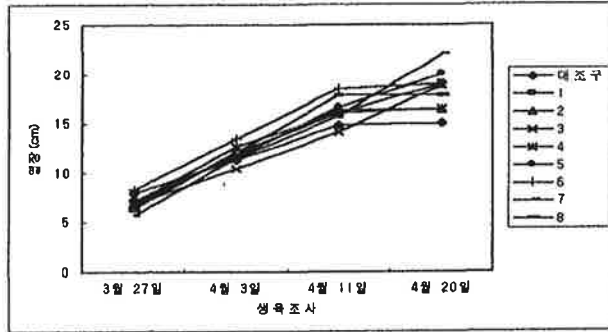


그림 24. 생육기간 중 초장의 변화

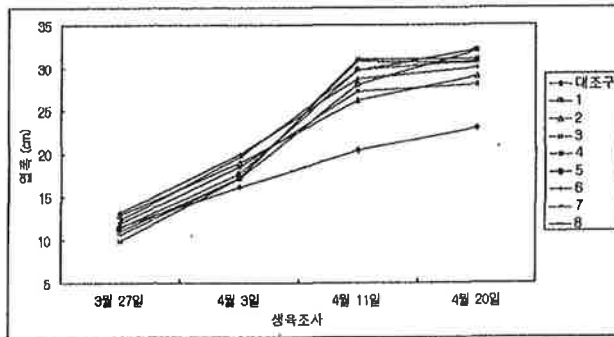


그림 25. 생육기간 중 초폭의 변화

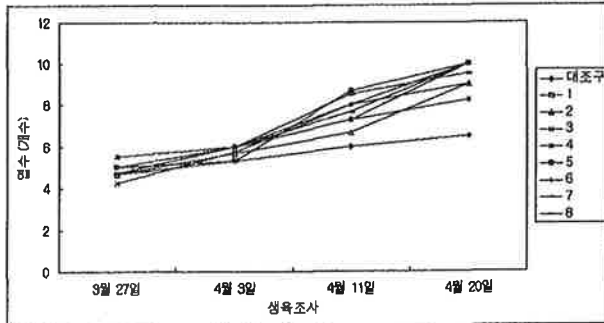


그림 26. 생육기간 중 엽수의 변화

- 대조구: sand 100% + 부엽토 첨가율 0%,
 1: sand 100% + 부엽토 첨가율 50%
 2: sand:zeolite(5:1) + 부엽토 첨가율 0%
 3: sand:zeolite(5:1) + 부엽토 첨가율 50%
 4: sand:zeolite(2:1) + 부엽토 첨가율 0%
 5: sand:zeolite(2:1) + 부엽토 첨가율 50%
 6: sand:zeolite(1:1) + 부엽토 첨가율 0%
 7: sand:zeolite(1:1) + 부엽토 첨가율 50%
 8: 부엽토 100%

표 28. 최종 생육 조사 결과(생체중, 근장, 엽면적)

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율 (%)	생체중 (g)		근장 (cm)	엽면적 (cm ²)
			지상부	지하부		
대조구	sand 100%	0%	11.66	4.65	25.30	53.42
1	sand 100%	50%	32.67	9.19	18.83	91.28
2	sand:zeolite (5:1)	0%	22.55	9.31	15.40	72.18
3	sand:zeolite (5:1)	50%	31.25	9.19	19.50	75.86
4	sand:zeolite (2:1)	0%	17.75	3.16	16.67	67.51
5	sand:zeolite (2:1)	50%	33.00	9.93	19.38	89.90
6	sand:zeolite (1:1)	0%	25.00	7.20	13.30	88.26
7	sand:zeolite (1:1)	50%	36.00	10.20	16.67	95.37
8	부엽토	100%	32.75	12.28	14.00	90.12

표 29. 상추 분석 결과(식물체 분석 결과)

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율 (%)	T-N	P ₂ O ₅	Ca Mg K Na			
					%			
대조구	sand 100%	0%	1.333	0.88	1.86	0.34	6.42	0.42
1	sand 100%	50%	1.467	0.95	1.07	0.29	4.07	0.43
2	sand:zeolite(5:1)	0%	1.744	0.82	0.96	0.37	5.57	0.15
3	sand:zeolite(5:1)	50%	1.687	0.96	1.57	0.31	6.83	0.29
4	sand:zeolite(2:1)	0%	2.171	0.98	1.05	0.41	5.93	0.14
5	sand:zeolite(2:1)	50%	1.980	1.11	1.76	0.34	7.14	0.21
6	sand:zeolite(1:1)	0%	1.900	0.83	0.70	0.33	5.17	0.11
7	sand:zeolite(1:1)	50%	1.879	1.15	0.93	0.29	3.39	0.14
8	부엽토	100%	1.949	1.05	1.66	0.31	6.47	0.50

표 30. 상추 분석 결과(식물체 분석 결과)

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율 (%)	Fe	Mn	Cu	Zn
			—————	ppm	—————	
대조구	sand 100%	0%	661.08	99.82	27.00	161.36
1	sand 100%	50%	489.72	38.46	24.60	102.98
2	sand:zeolite(5:1)	0%	647.22	385.14	24.60	227.94
3	sand:zeolite(5:1)	50%	773.22	49.90	20.98	124.54
4	sand:zeolite(2:1)	0%	542.22	309.90	27.68	236.88
5	sand:zeolite(2:1)	50%	677.04	53.98	18.78	120.24
6	sand:zeolite(1:1)	0%	880.74	302.16	20.76	171.88
7	sand:zeolite(1:1)	50%	871.50	65.02	23.40	106.54
8	부엽토	100%	632.10	31.48	20.98	107.60

모래여과기의 내용물(sand, zeolite)을 가지고 상토로 이용하여 상추를 생육시키기 전과 생육후 상토의 화학적 특성 변화를 나타낸 것이다(표 31). pH는 처리간 큰 차이는 보이지 않았고 생육전과 생육후 일정한 경향을 보이지 않았다. EC는 생육전에 비하여 생육후에 EC의 수치가 낮아졌고 zeolite의 함량이 높고 부엽토가 첨가된 상토가 부엽토가 첨가되지 않은 상토와 비교하여 EC가 높게 나타났다. 상토의 전질소 함량은 상추를 생육시키기전의 경우 대조구에서 가장 낮았고 부엽토만을 처리한 처리구 8에서 가장 높게 나타났으며 zeolite의 함량이 높을수록 전질소 함량이 높게 나타났다. 상추 생육후 상토의 전질소 함량을 비교해 보면 식물을 생육시킨 상토가 생육전 상토에 비해 전질소 함량이 낮아졌고 생육전후 상토 모두 대조구에서 수치가 가장 낮게 나타났다. 또한 부엽토가 첨가되고 zeolite의 성분이 높을수록 식물을 재배한 후 상토에서 전질소 성분이 높게 나타남을 알 수 있다. 상추를 재배하기전 상토의 인 함량은 재배 후 인 함량보다 높게 나타났고 zeolite 함량이 높고 부엽토가 첨가된 상토에서 높은 수치를 나타냈다. 유기물 함량은 생육전 상토에 비해 생육후에 낮아졌으며 상추를 재배하기전 유기물 함량은 zeolite의 함량이 높고 부엽토를 첨가한 처리구 5와 7에서 높았고 부엽토만 처리한 처리구 8에서 가장 높게 나타났다. 처리구 8은 생육전이나 생육 후 모두 높은 수치를 나타냈다. 양이온 치환용량은 생육전과 후를 비교할 때 규칙적인 경향을 나타내지는 않았으나 대체로 생육전이 생육시킨후 상토에 비해 다소 높았다. 양이온 치환용량은 zeolite의 함량이 높은 처리구가 대조구나 zeolite 함량이 낮은 처

리구에 비해 높게 나타났고 대조구는 생육전과 생육후 모두 낮은 수치를 나타냈다. 칼슘의 함량은 생육전과 비교하여 생육후 다소 낮아졌다. 대조구의 칼슘의 함량은 상추를 재배하기전과 재배한 후 모두 가장 낮은 수치를 나타냈고 부엽토만 처리한 처리구 8에서 가장 높은 수치를 보였다. 또한 zeolite 함량이 높고 부엽토가 첨가된 상토에서 칼슘의 함량이 높게 나타났다. 마그네슘 함량은 생육전이 생육후에 비하여 다소 낮아졌고 부엽토만을 이용한 처리구 8에서 가장 높은 수치를 보였다. 모래여과기의 내용물을 상토로 이용하여 상추를 재배한 후 상토의 성분을 분석한 결과 무기이온의 함량은 대조구에서 가장 낮은 수치를 나타냈고 zeolite의 함량이 높고 여기에 부엽토를 1:1로 혼합한 상토에서 생육전후 모두 비교적 높은 수치를 나타냈다.

표 31. 상토 분석 결과(생육전 후)

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율(%)		pH (1:5)	EC (dS cm ⁻¹)	T-N (%)	P (ppm)
대조구	sand 100%	0%	생육전	6.44	0.05	0.007	145.27
	sand 100%		생육후	6.45	0.03	0.001	109.18
1	sand 100%	50%	생육전	7.14	0.40	0.100	475.87
	sand 100%		생육후	7.48	0.02	0.072	420.52
2	sand:zeolite (5:1)	0%	생육전	6.09	0.09	0.006	145.21
	sand:zeolite (5:1)		생육후	6.04	0.01	0.004	130.55
3	sand:zeolite (5:1)	50%	생육전	7.18	0.57	0.094	507.96
	sand:zeolite (5:1)		생육후	7.25	0.07	0.070	455.80
4	sand:zeolite (2:1)	0%	생육전	6.29	0.10	0.009	160.54
	sand:zeolite (2:1)		생육후	6.04	0.01	0.006	125.89
5	sand:zeolite (2:1)	50%	생육전	7.23	0.35	0.140	536.76
	sand:zeolite (2:1)		생육후	7.02	0.07	0.078	420.40
6	sand:zeolite (1:1)	0%	생육전	5.99	0.11	0.013	150.55
	sand:zeolite (1:1)		생육후	6.09	0.02	0.008	115.37
7	sand:zeolite (1:1)	50%	생육전	7.15	0.52	0.116	504.67
	sand:zeolite (1:1)		생육후	7.05	0.06	0.082	362.33
8	부엽토	100%	생육전	6.68	0.85	0.306	562.57
	부엽토		생육후	7.35	0.18	0.283	514.25

표 32. 상추 생육 전 후 상토 분석 결과

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율(%)	OM (%)	CEC	cmol kg ⁻¹				
					Ca	Mg	K	Na	
대조구	sand 100%	0%	생육전	1.37	1.52	0.76	0.19	0.40	0.07
	sand 100%		생육후	1.05	2.27	0.75	0.20	0.86	0.11
1	sand 100%	50%	생육전	3.33	4.23	5.51	1.64	3.75	0.66
	sand 100%		생육후	3.25	4.61	5.10	1.25	1.97	0.28
2	sand:zeolite (5:1)	0%	생육전	1.28	7.60	3.07	0.65	9.38	0.35
	sand:zeolite (5:1)		생육후	0.37	8.04	3.61	0.57	10.22	0.38
3	sand:zeolite (5:1)	50%	생육전	3.64	9.43	7.41	1.92	10.15	0.89
	sand:zeolite (5:1)		생육후	2.37	7.02	6.21	1.32	72.42	0.50
4	sand:zeolite (2:1)	0%	생육전	0.99	14.23	7.10	1.33	18.51	0.38
	sand:zeolite (2:1)		생육후	0.88	13.32	6.27	1.08	16.39	0.64
5	sand:zeolite (2:1)	50%	생육전	4.21	12.29	9.89	2.21	14.52	0.97
	sand:zeolite (2:1)		생육후	3.27	10.94	8.77	1.58	10.94	0.64
6	sand:zeolite (1:1)	0%	생육전	1.12	11.68	7.84	1.38	18.59	0.44
	sand:zeolite (1:1)		생육후	1.09	11.35	5.47	0.96	14.02	0.42
7	sand:zeolite (1:1)	50%	생육전	3.55	11.48	9.29	2.09	15.21	0.86
	sand:zeolite (1:1)		생육후	2.79	12.07	8.55	1.54	12.32	0.71
8	부엽토	100%	생육전	9.87	10.63	12.49	2.45	7.30	1.45
	부엽토		생육후	9.53	9.70	12.43	2.42	2.49	0.82

7. 결과 7

다음은 여과기능이 다한 90cm의 모래여과기 내용물(sand, 천연 zeolite)을 사용하여 상토를 만들어 오이(*Cucumis sativus* L.)를 재배하였다. 재배기간 동안 2회에 나누어 생육조사를 하여 처리간 생육을 비교 분석하였다(그림 27, 그림 28, 그림 29). 초기 생육조사 결과 초장은 대조구에서 가장 낮았고 zeolite의 함량이 높고 부엽토가 첨가된 처리구에서 높은 수치를 나타냈다. 엽장, 엽폭 모두 대조구에서 가장 낮았고 zeolite의 함량이 높고 부엽토가 첨가된 처리구에서 높은 수치를 나타냈다.

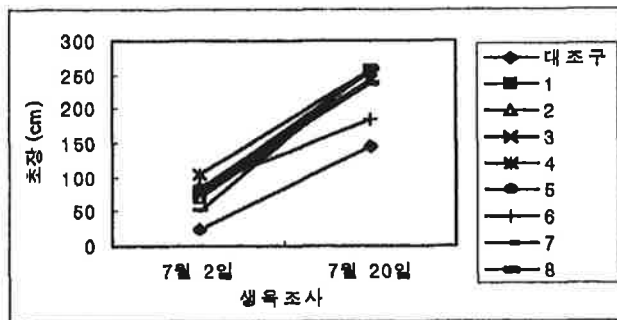


그림 27. 생육기간 중 초장의 변화

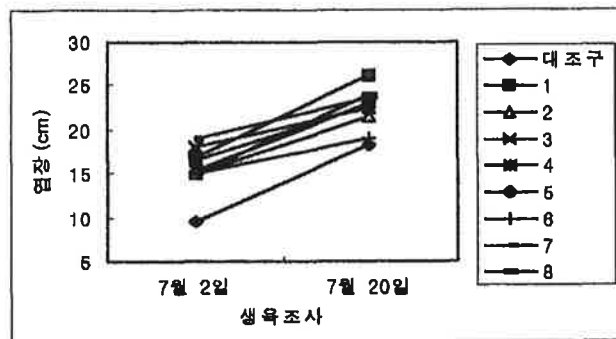


그림 28. 생육기간 중 엽장의 변화

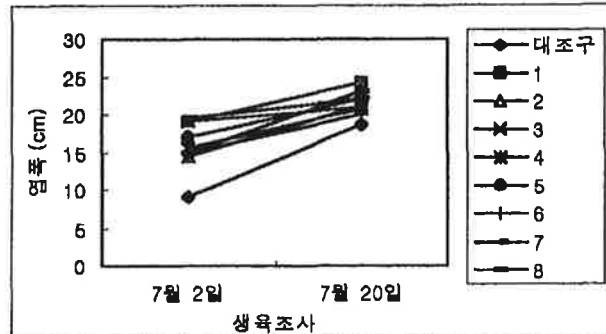


그림 29. 생육기간 중 엽폭의 변화

- 대조구: sand 100% + 부엽토 첨가율 0%
- 1: sand 100% + 부엽토 첨가율 50%
- 2: sand:zeolite(5:1) + 부엽토 첨가율 0%
- 3: sand:zeolite(5:1) + 부엽토 첨가율 50%
- 4: sand:zeolite(2:1) + 부엽토 첨가율 0%
- 5: sand:zeolite(2:1) + 부엽토 첨가율 50%
- 6: sand:zeolite(1:1) + 부엽토 첨가율 0%
- 7: sand:zeolite(1:1) + 부엽토 첨가율 50%
- 8: 부엽토 100%

2회 생육조사 결과 초장은 대조구에서 가장 낮았고 부엽토만 첨가된 8에서 가장 높게 나타났다. 엽장과 엽폭도 대조구는 다른 처리구에 비해 매우 낮았고 엽장, 엽폭 모두 처리구 1에서 가장 높은 수치를 나타냈다.

표 32는 최종적으로 오이의 엽수, 경경, 생체중, 건물중을 조사한 결과이다. 엽수는 모래만 들어있는 여과기 내용물을 이용한 대조구에서 가장 낮았고 모래와 zeolite의 배합비율이 2:1과 부엽토를 처리한 처리구 5와 부엽토만 처리한 처리구 8에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 경경은 대조구에서 가장 낮았고 모래와 zeolite의 비율이 2:1로 배합된 모래여과기의 내용물에 부엽토를 첨가한 처리구 5에서 가장 높았다. 생체중과 건물중은 줄기와 잎 모두 대조구에서 가장 낮았다. 모래만 100%인 모래여과기의 내용물에 부엽토를 첨가한 처리구 1에서 높은 수치를 나타냈다. 생체중과 건물중 모두 여과기 내용물에 부엽토를 첨가한 처리구는 부엽토를 처리하지 않은 처리구에 비해 높은 수치를 나타냈다.

표 32. 최종 생육 조사 결과(엽수, 경경, 생체중, 건물중)

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율(%)	엽수 (개수)	경경 (mm)	생체중 (g)		건물중 (g)	
					줄기	잎	줄기	잎
대조구	sand 100%	0%	19.5	0.55	52.5	32.5	2.8	4.2
1	sand 100%	50%	28.5	0.62	158.0	131.0	8.9	14.1
2	sand:zeolite (5:1)	0%	28.0	0.64	102.5	82.0	9.2	6.0
3	sand:zeolite (5:1)	50%	28.0	0.66	140.5	112.0	8.9	13.4
4	sand:zeolite (2:1)	0%	28.0	0.53	129.5	96.5	7.6	10.7
5	sand:zeolite (2:1)	50%	32.0	0.67	141.5	111.5	8.2	12.5
6	sand:zeolite (1:1)	0%	24.5	0.56	93.5	73.0	5.6	8.3
7	sand:zeolite (1:1)	50%	30.5	0.64	149.5	122.0	8.4	13.4
8	부엽토	100%	32.0	0.64	140.5	107.0	8.3	12.7

표 33과 표 34는 오이를 생육시키기전과 생육시킨후 상토의 화학적 성분을 나타낸 것이다. pH는 처리간 큰 차이는 보이지 않았다. 생육전 상토의 pH는 5.61~7.09의 범위로 처리간 일정한 경향을 나타내지 않았고 zeolite와 부엽토가 첨가된 상토의 pH가 zeolite와 부엽토가 첨가되지 않은 상토에 비해 높게 나타났다. 생육후 상토의 pH는 대부분 생육전에 비해 다소 높아졌고 생육전 상토와 생육후 상토 모두 부엽토가 첨가되었을 때 높은 pH를 나타냈다. 생육전 상토의 EC는 대조구에서 가장 낮았고 zeolite

비율이 높고 부엽토가 첨가된 처리구는 zeolite의 함량이 낮고 부엽토가 첨가되지 않은 처리구에 비해 높은 수치를 나타냈다. 생육후 상토의 EC는 생육전에 비해 낮아졌고 zeolite 비율이 높고 부엽토가 첨가된 처리구는 zeolite의 함량이 낮고 부엽토가 첨가되지 않은 처리구에 비해 높은 수치를 나타냈다. 상토의 전질소 함량은 대조구에서 생육전과 생육후 모두 가장 낮은 수치를 나타냈고 부엽토를 첨가하지 않을 경우 상토의 전질소 함량은 생육후가 생육전에 비해 높게 나타났다. 또한 식물을 생육시킨 후 상토의 질소 함량은 부엽토를 첨가했을 때 생육전에 비해 다소 낮아지는 경향을 보였고 부엽토를 첨가하지 않고 모래여과기의 내용물만 사용하여 상토로 만들었을때는 생육시킨 후 상토의 전질소 함량이 생육전 상토의 전질소 함량보다 다소 높아지는 경향을 나타냈다. 처리구에 따른 상토내 전질소 함량은 zeolite 비율이 높고 부엽토가 첨가된 처리구에서 생육전과 생육후 상토 모두 다른 처리구에 비해 높은 수치를 보였다. 인 함량은 zeolite의 비율이 낮고 부엽토가 첨가되지 않은 처리구인 대조구, 처리구 2, 처리구 4에서 낮게 나타났고 zeolite의 배합비율이 높고 부엽토가 첨가된 처리구에서는 높은 수치를 나타냈다.

생육전 상토의 인 함량은 생육후 상토의 인 함량보다 높게 나타날 때도 있고 생육전이 생육후에 비해 낮게 나타나기도 하여 규칙적인 경향을 나타내지는 않았다. 유기물 함량은 대조구에서 생육전과 생육 후 모두 다른 처리구에 비해 낮은 수치를 보였고 처리구 1을 제외하고는 처리구 8에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 부엽토가 첨가된 상토의 유기물 함량은 부엽토를 첨가하지 않은 상토에 비해 생육전 후 모두 높은 수치를 나타냈다. 양이온 치환용량은 대조구와 처리구 1이 다른 처리구에 비해 매우 낮은 수치를 나타냈고, 생육후 상토의 양이온 치환용량은 생육전에 비해 높게 나타났다. 양이온 치환용량은 부엽토의 첨가에 따른 영향은 받지 않았으나 zeolite의 비율이 높을수록 높은 경향을 보였다. 상토의 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 나트륨 함량은 대조구에서 가장 낮은 수치를 보였다. 칼슘은 부엽토가 첨가되고 zeolite의 함량이 높을수록 높게 나타났고 처리구 8을 제외하고는 생육후가 생육전에 비해 높은 수치를 보였다. 마그네슘은 부엽토가 첨가되고 zeolite 비율이 높을수록 높은 수치를 나타냈고 생육후가 생육전에 비해 낮은 수치를 보였다. 칼륨의 함량은 부엽토의 영향을 받지 않았고 zeolite의 함량이 높을수록 높은 수치를 나타냈다. 상토의 나트륨 함량은 부엽토가 첨가되고 zeolite 함량이 높을수록 높게 나타났다.

33. 오이 생육 전 후 상토 분석 결과

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율(%)		pH (1:5)	EC (dS cm ⁻¹)	T-N (%)	P (ppm)
대조구	sand 100%	0%	생육전	5.94	0.05	0.0019	113.20
	sand 100%		생육후	6.11	0.10	0.0033	381.63
1	sand 100%	50%	생육전	7.00	0.54	0.1293	407.82
	sand 100%		생육후	6.78	0.38	0.1282	413.77
2	sand:zeolite (5:1)	0%	생육전	5.81	0.18	0.0113	100.15
	sand:zeolite (5:1)		생육후	6.26	0.04	0.0135	121.41
3	sand:zeolite (5:1)	50%	생육전	7.00	0.48	0.1318	469.33
	sand:zeolite (5:1)		생육후	7.14	0.06	0.1123	460.89
4	sand:zeolite (2:1)	0%	생육전	5.70	0.09	0.0154	108.49
	sand:zeolite (2:1)		생육후	6.12	0.03	0.0187	154.58
5	sand:zeolite (2:1)	50%	생육전	6.95	0.45	0.1332	396.33
	sand:zeolite (2:1)		생육후	7.00	0.11	0.1147	365.96
6	sand:zeolite (1:1)	0%	생육전	5.61	0.17	0.0146	133.03
	sand:zeolite (1:1)		생육후	6.23	0.03	0.0248	160.86
7	sand:zeolite (1:1)	50%	생육전	7.09	0.78	0.1489	509.38
	sand:zeolite (1:1)		생육후	6.90	0.14	0.1334	425.10
8	부엽토	100%	생육전	6.70	0.78	0.2998	846.32
	부엽토		생육후	7.32	0.21	0.1992	672.1

표 34. 오이 생육 전 후 상토 분석 결과

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율(%)	생육 시기	OM	CEC	Ca	Mg	K	Na
				(%)	cmol kg ⁻¹				
대조구	sand 100%	0%	생육전	0.34	2.26	0.53	0.23	0.17	0.06
	sand 100%		생육후	0.53	1.43	0.60	0.17	0.16	0.13
1	sand 100%	50%	생육전	15.72	4.20	3.80	1.65	1.38	0.49
	sand 100%		생육후	3.25	4.43	4.87	1.07	0.45	0.34
2	sand:zeolite (5:1)	0%	생육전	0.56	11.23	5.13	1.13	7.57	0.22
	sand:zeolite (5:1)		생육후	0.61	12.18	6.55	0.96	8.02	0.37
3	sand:zeolite (5:1)	50%	생육전	3.47	10.13	8.20	2.47	6.16	0.71
	sand:zeolite (5:1)		생육후	2.48	11.86	8.45	1.81	6.37	0.32
4	sand:zeolite (2:1)	0%	생육전	0.65	14.12	6.65	1.50	8.74	0.26
	sand:zeolite (2:1)		생육후	0.68	15.30	9.04	1.43	9.61	0.44
5	sand:zeolite (2:1)	50%	생육전	2.25	12.02	8.96	2.61	7.72	0.70
	sand:zeolite (2:1)		생육후	2.72	14.25	10.20	2.31	8.10	0.61
6	sand:zeolite (1:1)	0%	생육전	0.34	17.01	8.54	2.08	10.38	0.38
	sand:zeolite (1:1)		생육후	0.61	20.66	12.18	2.06	11.89	0.56
7	sand:zeolite (1:1)	50%	생육전	3.20	13.27	9.43	2.88	7.66	0.78
	sand:zeolite (1:1)		생육후	3.13	18.35	12.48	2.70	10.13	0.74
8	부엽토	100%	생육전	7.55	10.75	8.25	4.58	3.79	1.21
	부엽토		생육후	7.50	6.22	7.20	4.50	1.14	0.51

다음은 모래여과기내에 인공 zeolite가 첨가된 여과기의 내용물을 가지고 상토로 만들어 오이를 재배하였다. 생육 초기 초장은 대조구에서 가장 낮았고 처리 1과 3이 높았으며 생육후기에도 대조구의 초장이 다른 처리구에 비해 가장 낮게 나타났다. 엽장과 엽폭은 모두 대조구가 다른 처리구에 비해 작았고 처리구에 따른 오이 초기생육을 비교해보면 zeolite가 첨가된 상토에서 생육한 오이의 생장이 zeolite가 첨가되지 않은 상토에서 생육한 오이에 비해 양호함을 알 수 있다. 최종 생육 조사 결과 초장은 부엽토만 처리한 처리구 6에서 가장 높았고 대조구에서 가장 낮았다. 엽장과 엽폭은 처리구 4와 6에서 높았고 대조구에서 가장 낮은 수치를 나타냈다(그림 30, 그림 31, 그림 32).

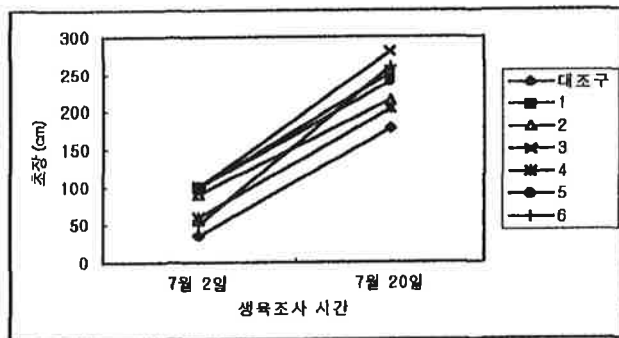


그림 30. 초장의 변화

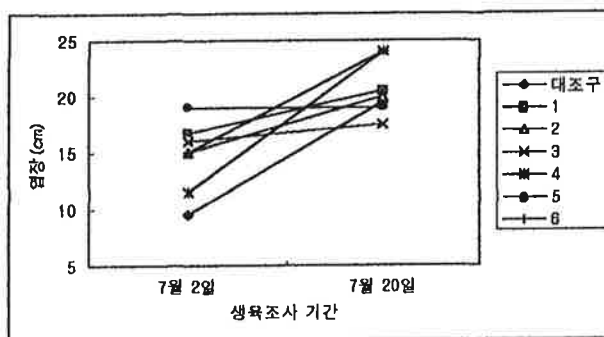


그림 31. 엽장의 변화

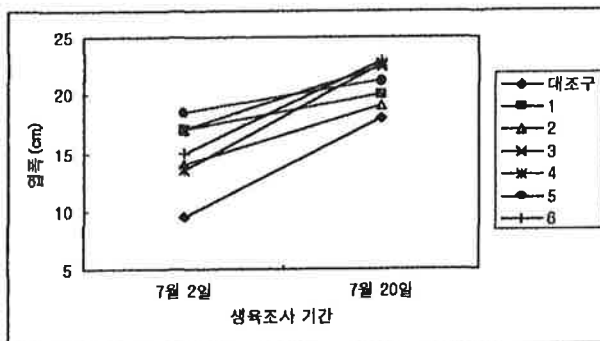


그림 32. 엽폭의 변화

대조구: sand 100% + 부엽토 첨가율 0%,
 1: sand 100% + 부엽토 첨가율 50%
 2: sand:zeolite(1:1) + 부엽토 첨가율 0%
 3: sand:zeolite(1:1) + 부엽토 첨가율 50%
 4: sand:zeolite(1:1) + 부엽토 첨가율 0%
 5: sand:zeolite(1:1) + 부엽토 첨가율 50%
 6: 부엽토 100%

최종적으로 오이 생육조사를 실시하여 엽수, 경경, 생체중, 건물중을 조사하였다(표 35, 표 36). 엽수, 경경, 생체중, 건물중은 모두 대조구에서 가장 낮은 수치를 나타냈다. 생체중은 zeolite의 첨가 비율이 높고 부엽토가 배합된 상토가 부엽토가 없는 상토에서의 생육한 오이의 생체중보다 더 높았고 건물중도 생체중과 비슷한 경향을 나타냈다. 표 37과 표 38은 인공 zeolite를 이용하여 오이를 생육시키기 전 상토와 생육시키고 난 후 상토의 화학적 성분을 비교 분한 결과이다. pH는 처리구에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다. pH는 처리구 4에서 5.61로 가장 낮은 수치를 나타냈고 모래여과기 내용물과 부엽토를 혼합하여 만든 상토인 처리구 6에서 7.32로 가장 높은 수치를 나타냈다. EC는 대조구에서 가장 낮은 수치를 보였고 인공 zeolite와 부엽토가 첨가된 상토는 인공 zeolite와 부엽토가 첨가되지 않은 다른 처리구에 비해 높은 수치를 나타냈다. 오이를 생육시킨 후 상토의 EC는 생육전 상토의 EC에 비해 낮은 수치를 나타냈다. 상토의 전질소를 비교해보면 대조구에서 가장 낮게 나타났고 zeolite의 첨가비율이 높고 부엽토가 첨가된 상토에서 높은 수치를 나타냈다. 유기물 함량은 zeolite와 부엽토가 첨가된 처리구의 상토에서 높게 나타났다. 유기물 함량은 생육전과 생육후 간에 차이는 나타내지 않았고 대조구에서 가장 낮은 수치를 보였다. 대조구의 양이온 치환용량은 대조구가 다른 처리구에 비해 매우 낮은 수치를 나타냈고 인공 zeolite가 첨가된 처리구 2, 처리구 3, 처리구 4, 처리구 5에서는 생육전과 생육후 모두 양이온 치환용량이 매우 높게 나타났다. 칼슘은 대조구에서 가장 낮은 수치를 나타냈고 인공 zeolite가 첨가된 처리구의 상토에서 높게 나타났다. 특히 2~3 mm 의 인공 zeolite 상토에서 매우 높게 나타났다. 마그네슘과 칼륨, 나트륨 함량은 대조구에서 가장 낮은 수치를 보였고 zeolite가 첨가된 상토가 zeolite가 첨가되지 않은 상토에 비해 높게 나타났다.

표 35. 최종 오이 생육 조사 결과

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율(%)	초장 ———— (cm)	엽장 ———— (cm)	엽폭 ———— (cm)	엽수 (개수)	경경 (mm)
대조구	sand 100%	0%	179.0	19.5	18.0	21.5	0.45
1	sand 100%	50%	250.5	20.5	20.0	28.5	0.64
2	sand:zeolite (1:1)	0%	214.8	20.0	19.0	25.0	0.54
3	sand:zeolite (1:1)	50%	281.0	17.5	22.5	29.5	0.62
4	sand:zeolite (1:1)	0%	203.5	24.0	22.8	23.5	0.56
5	sand:zeolite (1:1)	50%	240.0	19.0	21.3	24.5	0.67
6	부엽토	100%	260.0	24.0	23.0	32.0	0.64

2, 3: 인공 zeolite (2 ~3 mm)

4, 5: 인공 zeolite (0.5~1 mm)

표. 36. 최종 오이 생육 조사 결과

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율(%)	생체중 (g)		건물중(g)	
			줄기	잎	줄기	잎
대조구	sand 100%	0%	51.0	44.5	3.0	5.0
1	sand 100%	50%	78.5	88.8	7.5	10.8
2	sand:zeolite (1:1)	0%	64.8	66.5	5.3	7.9
3	sand:zeolite (1:1)	50%	130.5	117.0	8.2	12.2
4	sand:zeolite (1:1)	0%	105.0	76.0	5.7	7.8
5	sand:zeolite (1:1)	50%	126.5	100.5	8.6	12.1
6	부엽토	100%	140.5	107.0	8.3	12.7

표 37. 오이 생육 전 후 상토 분석 결과

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율(%)		pH (1:5)	EC (dS cm ⁻¹)	T-N (%)	P (ppm)
대조구	sand 100%	0%	생육전	6.65	0.11	0.0039	122.49
	sand 100%		생육후	6.72	0.04	0.0050	87.63
1	sand 100%	50%	생육전	7.21	0.41	0.1356	509.63
	sand 100%		생육후	7.17	0.23	0.1202	496.33
2	sand:zeolite (1:1)	0%	생육전	7.11	0.31	0.0014	34.13
	sand:zeolite (1:1)		생육후	7.30	0.04	0.0050	46.97
3	sand:zeolite (1:1)	50%	생육전	7.47	0.60	0.1158	272.57
	sand:zeolite (1:1)		생육후	7.47	0.14	0.1169	253.49
4	sand:zeolite (1:1)	0%	생육전	5.61	0.19	0.0256	157.17
	sand:zeolite (1:1)		생육후	6.16	0.04	0.0261	194.79
5	sand:zeolite (1:1)	50%	생육전	7.00	0.57	0.1381	489.06
	sand:zeolite (1:1)		생육후	6.81	0.18	0.1323	371.75
6	부엽토	100%	생육전	6.70	0.78	0.2998	846.42
	부엽토		생육후	7.32	0.21	0.1992	672.10

2, 3: 인공 zeolite (2 ~3 mm)

4, 5: 인공 zeolite (0.5~1 mm)

표 38. 오이 생육 전 후 상토 분석 결과

처리	모래여과기 내용물	부엽토 첨가율(%)	생육 시기	OM	CEC	Ca	Mg	K	Na
				(%)	cmol/kg				
대조구	sand 100%	0%	생육전	0.34	0.98	0.70	0.30	0.53	0.06
	sand 100%		생육후	0.61	1.09	0.76	0.23	0.19	0.06
1	sand 100%	50%	생육전	2.86	5.75	0.65	1.73	1.79	0.53
	sand 100%		생육후	2.52	3.92	5.84	1.74	0.87	0.31
2	sand:zeolite (1:1)	0%	생육전	0.59	32.41	22.53	2.94	10.58	5.02
	sand:zeolite (1:1)		생육후	0.68	38.63	41.05	4.27	13.84	4.09
3	sand:zeolite (1:1)	50%	생육전	2.69	26.00	21.13	3.68	9.81	4.44
	sand:zeolite (1:1)		생육후	2.55	25.25	26.95	3.49	9.75	2.94
4	sand:zeolite (1:1)	0%	생육전	0.34	20.90	12.07	2.67	12.15	0.48
	sand:zeolite (1:1)		생육후	0.48	18.97	11.46	2.55	10.85	0.54
5	sand:zeolite (1:1)	50%	생육전	2.65	16.20	12.09	3.32	9.20	0.81
	sand:zeolite (1:1)		생육후	3.33	15.80	13.59	2.66	8.92	0.81
6	부엽토	100%	생육전	7.55	10.75	8.25	4.58	3.70	1.21
	부엽토		생육후	7.50	6.22	7.20	4.50	1.14	0.51

2, 3: 인공 zeolite (2 ~3 mm)

4, 5: 인공 zeolite (0.5~1 mm)

제 2 절 결론

zeolite의 입자크기를 달리하고 배합비율을 다르게 하여 폐양액의 조성에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같았다. 모래만 처리하여 여과기를 통과시킨 후 폐액의 무기이온 함량을 보면 이온간의 변화가 별로 없었는데 zeolite가 처리된 여과기를 통과한 폐액의 이온에는 여과전에 비해 차이가 있었다. 특히 토양을 부영양화시켜 오염의 주원인이 되고 있는 인과 $\text{NH}_4\text{-N}$ 제거에 효과적이었고 칼륨, 칼슘, 인, 아연의 함량도 낮추었으며 특히 zeolite의 입자가 작은 경우에 인의 제거에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

입자크기가 1~3mm 범위인 입자의 zeolite보다 미립자의 zeolite를 이용할 경우에는 인의 제거에 효과적이었으나 유속이 느려진다는 문제점이 있었고 zeolite를 처리한 구에서는 나트륨 함량이 높게 나타났는데 이는 zeolite자체가 지닌 나트륨 함량에 의한 결과로 추측되어진다.

천연 zeolite와 인공 zeolite를 이용하여 여과한 결과 비슷한 결과를 나타냈는데 인공 zeolite의 경우 천연 zeolite에 비하여 $\text{NH}_4\text{-N}$ 과 칼리, 칼슘, 중금속 제거효율이 다소 높았다. 여과횟수에 따라 여과효율을 보면 대부분 처음과 비교하여 후반부로 갈수록 다소 감소하였는데 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 제거효과는 높아졌다. 그러나 여과횟수가 증가함에 어느 정도 차이는 있었지만 천연 zeolite, 인공 zeolite 모두 양이온 흡착효과가 낮아졌다.

여과기의 기능이 다한 모래여과기의 내용물을 가지고 상토로 만들어 상추 종자를 파종하고 상추를 생육시켜 본 결과 zeolite가 많이 첨가된 배지를 이용하여 만든 상토일수록 발아세, 평균발아율이 높았고 평균발아일수가 짧게 나타났다. 상추의 생육을 보면 zeolite의 함량이 높은 배지에서 생육된 상추의 초기 생육은 다른 처리구에 비하여 초장이나 초폭, 엽수의 수치가 높았다. 생체중과 엽면적도 zeolite함량이 높은 상토에서 높은 수치를 나타냈다. 오이의 생육 또한 생육 초기에는 zeolite의 함량이 높은 상토에서 생육시킨 오이의 생육이 zeolite를 첨가하지 않은 상토에서 생육시킨 오이에 비해 양호했다. 상추와 오이를 생육시킨 상토의 화학적 성분을 분석한 결과 식물 성장에 중요한 역할을 하는 전질소, 인의 함량은 상토내에 zeolite의 비율이 높을수록 더 높게 나타났다. 또한 그 외 식물체 생육에 중요한 영향을 미치는 무기이온의 함량은 zeolite의 함량이 높고 여기에 부엽토를 혼합한 상토에서 생육전후 모두 비교적 높은 수치를 나타냈다. 지금까지 실험결과를 보면 zeolite가 첨가된 모래여과기의 내용물을 가지고 상토로 만들어 식물을 생육시켰을 때 양호한 생육상태와 발아율을 보였는데 특

히 식물 초기 생육에 효과적임을 알 수 있었다. 따라서 더 이상 여과효과가 없는 모래 여과기의 내용물을 버리지 않고 상토로 이용할 수 있는 가능성을 알 수 있었다.

참고문헌

- 박권우, 이궁표, 김민순. 1999. 환경보전형 첨단 Recycling 양액 재배 시스템 개발. 경기도 농업기술원 제 3년차 보고서. pp. 67-97
- Carling, J.L., K. Williams, and E.R. Allen. 1998. Evaluation of Zeolite-based Soilless Root Media for Potted Chrysanthemum Production, HortTechnology 8(3):373-378.
- Huang, Z.T. and A.M. Petrovic. 1992. Clinoptilolite Zeolite Influence on Nitrate Leaching and Nitrogen Use Efficiency in Simulated Sand Based Golf Greens, J. Environ. Qual. 23:1190-1194.
- Kapetanions, E.G. and M. Loizidou. 1992. Heavy Metal Removal by Zeolite in Tomato Cultivation using Compost. Act. Hort. 302:63-71.
- 계봉명, 송광석, 조창환. 1987. zeolite 시용에 의한 비의 증수효과 및 요인 해석. 한국작물학회 32(4):403-408.
- Kithome, M., J.W. Paul., L.M. Lavkulich, and A.A. Bomke. 1998. Kinetics of Ammonium Adsorption and Desorption by the Natural Zeolite Clinoptilolite. Soil Sci Soc. Am. J. 62:622-629.
- Kristiansen, R. and S.J. Cripps. 1996. Treatment of Fish Farm Wastewater Using Sand Filtration. Published in J. Environ. Qual. 25:545-551.
- 김성수, 박만, 허남호. 1991. 천연 Zeolite를 이용한 중금속 흡착제의 개발. 한국환경농학회지. 10(1):11-19.

- 이덕배, 이경보, 이상복, 한상수, 曉見障男. 1998. 인공제올라이트에 의한 폐수중 중금속 흡착. 한국토비학회지 31(1):61-66.
- 이동훈, 최정. 1996. 우사 폐수중 암모니아태 질소 제거를 위한 zeolite column의 적정조건. 한국환경농학회지 15(2):232-238.
- 이재영, 조승래, 이흥기, 시미자, 이주성, 김상욱. 1995. 천연 벤토나이트로부터 합성된 제올라이트 A의 특성. 한국재료학회지. 5(8):1035-1039.
- 이정식, 이정재, 최정. 1987. 폐수처리제로서의 zeolite의 이용. 한국환경농학회지 6(2):46-52.
- 이해일, 부경민, 최명원, 김창원. 1998. 침적형 호기성 생물막 반응기와 모래여과지를 이용한 하·폐수처리. 한국수질보전학회지. 14(1):57-64.
- 유명진, 조용모. 1995. 토수처리. 기보당출판사. pp. 93-110.
- Martin, E.J. and E.T. Martin. 1991. TECHNOLOGIES FOR SMALL WATER AND WASTEWATER SYSTEMS. pp. 21-27. VAN NOSTRAND REINHOLD, New York.
- Ming, D.W. and F.A. Mumpton. 1989. Zeolites in Soils. pp. 873-893. In: J.B. Dixon and S. B. Weed(ed). Minerals in Soil Environments. Soil Science Society of America, Madison and Wisconsin.
- Park, M. and S. Komarneni. 1998. Ammonium Nitrate Occlusion vs. Nitrate Ion Exchange in Natural Zeolites. Soil Sci Soc. Am. J. 62:1455-1459.
- Passikallio, A. 1999. Effect of biltite, zeolite, heavy clay, bentonite and apatite on the uptake of radiocesium by grass form peat soil. plant and soil 206:212-222.

- Runia, W.T. 1994. Disinfection of recirculation water from closed cultivation system with ozen. Act. Hort. 361:388-396.
- Runia, W.T. 1995. A REVIEW OF POSSIBILITIES FOR DISINFECTION OF RECIRULATION WATER FROM SOILLESS CULTURESS. Act. Hor. 382:221-229.
- Van Os, E.A., J.V. Bruins., D.J. van der Veer, and H. Willers. 1996. PHYSICAL AND CHEMICAL MEASUREMENTS IN SLOW SAND FILTERS TO DISINFECT RECIRCULATING NUTRIENT SOLUTIONS. ISI. PRO. 313-327.
- Van Os, E.A., F.J. van Kuik, W.Th. Runia, and J. van Buren. 1998. PROSPECTS OF SLOW SAND FILTRATION TO ELIMINATE PATHOGENS FROM RECIRCULATIONG NUTRIENT SOLUTIONS. Act. Hort. 458:377-382.
- Widrig, D.L., J.A. Peebles, and K.M. Mancl. 1996. INTERMITTENT SAND FILTRATION FOR DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT EFFECTS OF FILTER DEPTH AND HYDRAULIC PARAMETERS. Appl. Eng. Agr. 2(4):451-459.
- Wohanka, W. 1995. DISINFECTION OF RECIRCULATION NUTRIENT SOLUTIONS BY SAND FILTRATION. Act. Hort. 382:246-255.