

최 종
연구보고서

가시광 응답형 산화티탄의 광촉매에 의한 수경재배의
배양액 재이용 살균 및 정화 시스템 개발

Development of a Hydroponic Recycle System using the
Visible Light-reactive Titanium Oxide Photocatalyst
for Sterilization and Purification of Nutrient Solution

주 관 연구 기 관
경 북 대 학 교

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “가시광 응답형 산화티탄의 광촉매에 의한 수경재배의 배양액 재이용 살균 및 정화 시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2007년 5월 20일

주관연구기관명 : 경북대학교

총괄연구책임자 : 이 기 명

연 구 원 : 이 준 탁

연 구 원 : 임 학 규

연 구 원 : 정 성 원

연 구 원 : 이 한 용

연 구 원 : 박 철 우

요 약 문

I. 제 목

가시광 응답형 산화티탄의 광촉매에 의한 수경재배의 배양액 재이용 살균 및 정화 시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

수경재배는 비료성분의 공급과 관리를 정밀하게 할 수 있고 토양의 연작장해 등의 염려가 없어 점차 그 면적이 증가되고 있다. 그러나 순환식 수경재배의 경우 배양액이 전체 베드를 순환하기 때문에 피썴(Pythium)이나 푸사리움(Fusarium)속 균과 같은 유해세균이 발생할 경우, 순환되는 배양액을 따라 순식간에 전 재배상으로 전염되는 단점이 있다. 반면 비순환식 수경재배의 경우는 사용한 배양액을 정화처리하거나 재사용 장치를 통하여 재활용되지 못하고 하천에 흘러보내는데, 이것이 하천수 오염의 원인이 되므로 금후 규제 대상이 될 것이 예상되고 있다. 따라서 수경재배 시스템으로부터 흘러나오는 배양액을 살균 정화하여 재이용하는 기술 및 장치 개발은 시급한 과제이다.

이에 본 연구에서는 태양광 등 가시광에 응답하는 산화티탄 광촉매를 이용하여 수경재배의 배양액 재이용 살균 및 정화 시스템을 개발하고자 하며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 및 정화 요인 구명
2. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 및 정화 시스템 개발
3. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 정화 실용화 시스템 개발

III. 연구개발 내용 및 범위

1. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액의 살균 및 정화 요인시험

가시광 응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 필터의 종류별, 광원별 살균 및 정화 효과 시험을 통하여 광촉매의 살균 및 정화 요인을 구명하였다.

2. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액의 살균 및 정화 기본 시스템 개발

요인 시험에서 얻어진 자료를 토대로 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 코팅 필터의 특성을 이용하여 배양액의 살균 및 정화 처리의 기본 시스템을 설계 제작하여 성능 시험을 실시하였다.

3. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 성능의 지속성 향상 기술 개발

가시광 응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 필터를 산과 알칼리 용액 처리에 의한 지속성시험을 실시하여 지속성이 향상된 필터의 규격 및 광촉매 코팅방법 등의 개선을 시도하였다.

4. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의 살균 및 정화 시스템 모델 개발

기본 시스템의 성능시험에서 얻어진 자료를 이용하여 배양액을 효율적으로 살균 및 정화처리 할 수 있는 필터의 매수, 배열방법 등을 산정하여 시스템을 설계 제작하고 성능시험을 통하여 모델을 개발하였다.

5. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의 재이용을 위한 살균 및 정화 실용화 시스템 개발

딸기 고설수경재배에 적용할 수 있는 실용적인 배양액 살균 및 정화 시스템을 설계 제작하여, 성능시험과 딸기 재배 농가의 실증시험을 통하여 시스템을 개발하였다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발 결과

가. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매의 살균 및 정화 요인 시험

1) 에코디바이스사(Ecodevice Co., Ltd.)의 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 분말을 도입하여 전문 업체에 의뢰, 필터 모재를 세라믹, 메탈(니켈)로 하고 300×300×13mm 규격의 산화티탄 광촉매를 코팅한 필터를 설계 제작하여 필터 종류별, 광원별 요인 시험을 실시하였다.

2) 필터 종류별 살균성능 시험에서 세라믹 모재 필터가 살균 성능이 우수하였다.

3) 광원별 살균성능 시험에서 태양광이 자외광보다 살균 성능이 우수하였다.

나. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의 살균 및 정화 기본 시스템 개발

1) 요인시험에서 얻어진 자료를 토대로 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 필터 5매를 설치한 처리채널을 높이차를 두어 4열로 구성하여 총 산화티탄광촉매 필터 15매를 통과하는 동안 배양액의 살균 및 정화 처리가 되도록 구성한 기본 시스템을 설계

제작하여 성능시험을 실시하였다.

2) 배양액을 필터 위를 흘려서 살균 처리할 때 누적통과 필터 매수가 같은 경우, 소수의 필터에 여러 번 통과시키는 것이 다수의 필터에 동시에 통과시키는 것에 비하여 살균성은 우수하였다. 그러나 실제 시스템의 설계 시에는 처리용량 등을 고려하면 연속 처리에 의한 성능저하를 고려해서 소수의 필터에 여러 번 반복하여 통과하도록 하는 것보다 다수의 필터에 연속 통과 처리하도록 구성하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

다. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 성능의 지속성 향상 기술 개발

배양액의 pH로 인한 광촉매성능 및 강도성능 변화를 확인하기 위하여 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 코팅 필터를 산(pH 2.0, 4.0, 6.0)과 알칼리(pH 8.0) 용액 처리에 의한 지속성시험을 실시하여, 지속성이 향상된 필터의 규격 및 광촉매 코팅방법 등의 개선을 시도하였다.

세라믹 모재의 필터는 pH 4.0의 이상의 용액에서는 1년 정도 침적했을 경우 광촉매 성능, 강도면에서 문제가 없었으며, 또한 필터는 기공율 15PPI, 필터 두께 20mm, 산화티탄 코팅 3회로 하는 것이 강도, 살균성능 면에서 바람직하다고 분석되었다.

라. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의 살균 및 정화 시스템 모델 개발

기본 시스템의 성능시험에서 얻어진 자료를 토대로 배양액을 효율적으로 살균 및 정화처리 할 수 있는 필터 5매 설치의 처리채널 4개를 단차를 두어 4열로 배열하여 배양액이 연속으로 처리되도록 구성한 시스템을 설계 제작하고, 각 단마다의 배양액 살균 정화 성능을 시험하여 모델을 개발하였다.

마. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의 재이용을 위한 살균 및 정화 실용화 시스템 개발

딸기 고설 수경재배 농가 온실에 필터 5매 설치의 처리채널 4개를 단차를 두어 4열로 배열하여 구성한 시스템을 설치하여 배출되는 배양액을 처리하여 실용성을 검토하였다. 개발된 시스템은 맑은 날을 기준으로 할 때 1,000m²에서 배출되는 배양액 약 200ℓ를 3시간 동안에 처리하여 실용성이 확인되었다.

2. 활용에 대한 건의

가. 본 연구에서 개발된 시스템을 농가에 보급할 수 있도록 정책 및 지도사업에 반영하는 것이 바람직 함

나. 이 연구에 참여하여 개발과정의 기술 정보나 농가 현장의 기술 요구도를 충분히 파악하고 있는 참여기업에게 기술 이전을 할 수 있도록 지원이 필요함

다. 얻어진 기술에 대한 지적 재산권(특히, 실용신안)을 출원함

SUMMARY

I. Title

Development of a hydroponic recycle system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution

II. Objective and Necessity

Recently, the number of hydroponic system has been increasing because of the accurate management of nutrient supply without continuous cropping hindrance. In the circulating hydroponic system, the nutrient solution is repeatedly re-circulated through the whole cultivation bed; the system can be infected in a minute when nutrient solution is contaminated by some harmful organisms such as Pythium or Fusarium. On the other hand, the nutrient solution drained out of the non-circulating hydroponic system, may contaminate the sewer without purified nor re-used. This is one of the causes of water pollution, and sooner or later the prohibition of the nutrient solution spillages will be expected. Therefore the development of a circulating hydroponic recycle system with sterilization and purification of nutrient solution is needed.

On this research, we developed a hydroponic recycle system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for the sterilization and purification of nutrient solution, and the detailed objectives were as follows;

1. Determination of factors for the sterilization and purification of nutrient solution by visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.
2. Development of a system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution.
3. Development of a practical system using the developed recycle system.

III. Contents and Scope

1. Determining factors of sterilization and purification of nutrient solution by visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.

To determine factors of sterilization and purification of nutrient solution by visible light-reactive titanium oxide photocatalyst, we tested the several filter materials coated by titanium oxide photocatalyst under visible light and UV light.

2. Development of a basic system using the visible light-reactive titanium oxide

photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution.

According to the findings of the first stage, we produced a basic system of sterilization and purification of nutrient solution based on the characteristics of coated filter with the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.

3. Development of a method for improving the durability of the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst

To improve the durability of the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst coating filter, we studied the filter durability under acid and alkali solution.

4. Development of a model system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution.

According to the findings from the basic performance test, we developed a model system with a proper number, arrangement of filter elements and the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.

5. Development of a practical recycle system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.

We designed a practical recycle system of nutrient solution and applied to the elevated-bench hydroponic system of strawberry cultivation. The performance of the recycle system was verified in strawberry farms.

IV. Study Results and Recommendations for Practical Utilization

1. Results

1) The factors of sterilization and purification of nutrient solution by visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.

(1) The filters, ceramic and nickel blocks 300x30x13mm in size, were coated

with the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst, powder form from Ecodevice Co. Ltd.

(2) The ceramic filters showed the best performance of sterilization and purification of nutrient solution.

(3) The visible light-reactive titanium oxide photocatalyst sterilized more effectively the nutrient solution under the sunlight than UV light

2) Development of a basic system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution.

(1) We made a basic sterilization and purification system by arranging 3 rows of treat tanks that contained 5 filters each. Nutrient solution passed through the total of 15 filters of the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.

(2) The sterilization performance by passing repeatedly through a few filters was more efficient than that by treating simultaneously with a large number of filters.

However, for the practical purpose a recycle system with multiple sequential filters would be desirable, considering the capacity of treatment volume, rather than the repeated treating system.

3) Development of a method for improving the durability of the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst

The quality deterioration rates of the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst under acid (pH 2.0, 4.0, 6.0) and alkali (pH 8.0) solutions were measured.

The durability of photocatalyst ability and the strength of ceramic filter did not change in the solution condition over pH 4.0 for one year. The filter with 15PPL in pore size, 20mm in thickness, and 3 layers in titanium oxide coating was desirable in the intensity and sterilization performance.

4) Development of a model system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution.

According to the findings from the basic system, we designed the system with 4 rows of treat channel containing 5 filters each. The channels were located in different heights, so that the nutrient solution passed though the water channel

successively. We tested the ability of sterilization and purification of each channel and the developed model system.

5) Development of a practical system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.

We designed a practical system of the sterilization and purification of nutrient solution and applied to an elevated-bench hydroponic system of strawberry cultivation. The recycle system could sterilize and purify the volume of nutrient solution discharged from 1,000 m² of greenhouse for 3 hours on a clear day. According to this test, the hydroponic recycle system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution was verified and proven to be feasible and useful.

2. Recommendations for application

1) A farm policy and extension service should be considered for supplying the hydroponic recycle system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst, developed in this research.

2) Involved manufacturers in this research should be financially supported to transfer the know-how and techniques.

3) A patent on the technology obtained from this study has been filed.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction

Chapter 2. Research history

Chapter 3. Contents and results

Section 1. The factors of sterilization and purification of nutrient solution by visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.

Section 2. Development of a basic system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution.

Section 3. Development of a methods for improving the durability of the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst

Section 4. Development of a model system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst for sterilization and purification of nutrient solution.

Section 5. Development of a practical system using the visible light-reactive titanium oxide photocatalyst.

목 차

제 축 문

요 약 문

Summary

CONTENTS

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 살균 및 정화 요인 시험

제 2 절 가시광 응답형 산화티탄에 의한 수경재배 배양액의 살균
및 정화 기본 시스템 개발

제 3 절 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 성능의 지속성 향상 기술 개발

제 4 절 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의
살균 및 정화 시스템 모델 개발

제 5 절 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의
재이용을 위한 살균 및 정화 실용화 시스템 개발

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 목적

본 연구에서는 태양광 등 가시광에 응답하는 산화티탄의 광촉매를 이용하여 수경재배의 배양액 재이용 살균 및 정화 시스템을 개발하고자 하며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 및 정화 요인 구명
2. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 및 정화 시스템 개발
3. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 정화 실용화 시스템 개발

2. 연구개발의 필요성

1) 기술적 측면

수경재배는 비료성분의 공급과 관리가 정밀하고 토양의 연작장애와 같은 염려가 없는 장점이 있어 점차 그 면적이 증가되고 있다. 그러나 순환식 수경재배에서는 배양액이 전체 베드를 순환하기 때문에 배양액 중에 피썸(Pythium)이나 푸사리움(Fusarium)속 균과 같은 유해세균이 침입하여 배양액이 오염되면 순식간에 시설 전체에 병원균이 확산되어 회복 불가능한 피해가 발생할 위험이 있으며 보다 확실한 배양액 살균 기술이 필요하다.

또한 비순환식의 경우에는 사용한 배양액을 재처리하거나 정화처리하여 재사용하는 장치가 활용되지 않고 하천에 흘러보내 하천수 오염의 원인이 되고 있어 수경재배에서 배양액을 하천에 흘러보내는 것은 앞으로 규제 대상이 예상되고 있어 시스템으로부터 흘러나오는 배양액을 살균 정화하여 재이용하는 기술 및 장치개발은 시급한 과제이다.

현재 배양액의 살균이나 정화, 유기물의 분해 등을 위한 몇 가지 장치가 있지만 비용이 많이 드는 등 문제로 경제적이고 효율적인 장치는 아직은 찾아보기 어려운 실정이다. 특히 1996년~1999년에 「산화티탄의 광촉매작용에 의한 배양액 살균 등 재순환 시스템 개발에 관한 연구」를 농림기술개발과제 첨단기술개발사업으로 추진하여 좋은 연구결과를 얻은 바 있다. 그러나 이 연구에서는 자외선 응답형 산화티탄의 광촉매에 의한 것으로 장치의 운전에 자외선램프를 이용하는 등으로 인하여 농업에의 적용에는 비용 절감을 위한 램프 문제 등이 해결되어야 할 것으로 생각된다.

최근 일본의 (주)에코디바이스사가 태양광, 형광등 등 가시광 응답형의 신물질 산화티탄 광촉매 자재의 개발에 성공하여 시험판매를 시작하였다. 일본의 모 시험장에서는 2002~2003년에 태양광을 이용한 광촉매 작용을 수경 배양액의 정화, 소독 등 농업적 이용에 관한 연구를 시도하여 가능성을 입증한 바 있다. 그러나 이것은 자외선 응답형 필터를 사용한 것으로 가시광 응답형에 관한 연구는 시도한 바 없다.

따라서 수경재배 분야의 큰 과제인 배양액의 정화 및 소독에 자연 에너지인 태양광 등 가시광에 응답하는 산화티탄을 이용하는 연구가 시급히 요청된다.

2) 경제·산업적 측면

수경재배는 일반적인 온실 설비 이외에 배양액의 관리나 재배베드 등의 기계설비에

평당 10만원 정도 소요되는 고가의 설비비가 투입되는 재배방법이다. 수경재배에서 배양액의 감염은 농약살포 등 방제로서 회복하는 것은 아주 어려우며, 수확 전 감염인 경우에는 초기 투입된 농자재나 종묘, 난방 유류비, 비료 등의 비용 전액이 손해로 이어진다.

또한 비순환식 수경재배에서는 식물이 흡수하지 못한 폐배양액은 하천에 유출되어 상수원이나 하천수의 오염원으로 지적되고 있다. 이에 폐배양액을 재이용하는 순환식으로의 전환이 바람직하다. 그러나 코코피트 등 유기질 배지를 사용할 경우 폐배양액을 버리지 않고 재이용하기 위해서는 배양액 중에 유기질배지에서 용출한 유기오염물질의 분해 및 병해확산 방지를 위한 살균을 해야 하지만 아직까지 좋은 방법이 확립되어 있지 않고 있다.

따라서 수경재배 농가 경영의 성공여부는 배양액의 관리가 거의 대부분을 차지하고 있기 때문에 배양액의 살균이나 유기물의 분해에 의한 폐배양액의 정화기술 및 장치개발은 요구도가 높고 시급한 과제이다.

3) 사회·문화적 측면

국민소득의 상승으로 청정농산물 또는 무공해 농산물에 대한 수요와 사회적인 관심은 계속적으로 증가하고 있고 재배농가에 대한 신뢰가 더욱 요구되고 있다. 또한 현재 폐배양액의 하천 유출로 인한 하천수 오염에 대한 문제가 법적 규제로 이어질 것으로 전망되고 있다. 따라서 친환경적인 방법으로 배양액이나 폐배양액의 살균, 정화 등이 가능하게 될 경우 재배 농가는 재배 생산원가의 절감은 물론 관리에 대한 스트레스를 줄일 수 있으며 경제적인 경영이 가능하게 되고 청정 안전 농산물의 주년 재배는 더욱 확산될 것으로 판단된다.

3. 연구개발의 목표와 범위

표 1(1) 1차년도(2004. 5. ~ 2005. 5.)

연구개발목표	연구개발내용 및 범위
<ul style="list-style-type: none"> 가시광 응답형 산화티탄의 살균효과 요인 시험 	<ul style="list-style-type: none"> 가시광 응답형 신물질 산화티탄 광촉매 요인 시험 가시광 응답형 산화티탄의 처리시스템별 살균효과 시험
<ul style="list-style-type: none"> 가시광 응답형 산화티탄에 의한 배양액의 유기물 분해 및 살균 기본 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 수경재배 배양액의 유기물 및 세균 조사 가시광 응답형 산화티탄에 의한 배양액의 살균 및 유기물 분해 기본 시스템 개발

표 1(2) 2차년도(2005. 5. ~ 2006. 5.)

<ul style="list-style-type: none"> 가시광 응답형 산화티탄에 의한 배양액의 유기물 분해 및 살균처리 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 가시광 응답형 산화티탄의 광촉매 성능의 지속성 향상 기술 개발
<ul style="list-style-type: none"> 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 시스템 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 가시광 응답형 산화티탄의 재배형식별 배양액의 살균 및 유기물 시스템의 모델 개발

표 1(3) 3차년도(2006. 5. ~ 2007. 5.)

<p>1. 가시광 응답형 산화티탄에 의한 배양액의 살균 및 유기물 분해 시스템 실용화 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> 가시광 응답형 산화티탄에 의한 각종 수경재배 배양액의 유기물 분해 및 살균 실용화 시스템 개발 가시광 응답형 산화티탄에 의한 배양액의 살균 및 유기물 분해 실용화 시스템의 실증 및 현장 시험
--	---

제 2 장 국내외 기술개발 현황

국내에서 광촉매 작용에 의한 배양액 살균 등 재순환 시스템 개발에 관한 연구로는 이 등(1999)에 의해 오이 수경재배에 광촉매 살균장치를 도입하여 처리하지 않은 대조구에 비해 오존-자외선을 이용하여 살균한 시험구에서 10%의 출수율 증가를 보였고, 병충해 발생도 없는 것으로 보고하였다. 그러나 이 연구에서는 자외선 응답형 산화티탄의 광촉매에 의한 것으로 장치의 운전에 자외선램프를 이용하는 등 고가의 장비를 이용함으로써 처리 배양액량의 한계와 장치의 고비용 등 농업적 이용에는 실용성 면에서 개선이 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 도입하고자 하는 가시광(태양광, 형광등) 응답형 산화티탄은 2002년 상품화된 신물질로서 일본의 에코디바이스사가 개발하여 시판 하는 것으로 아직까지 광촉매 작용으로 배양액의 살균, 유기물의 분해 효과에 대한 연구 개발에 도입한 적이 없다.

다만 2002년 일본의 카나가와현에서 자외선 응답형 산화티탄 광촉매가 코팅된 필터를 사용하여 태양광을 이용한 배양액 살균 등 농업적 이용에 대하여 토마토에 적용한 실험을 통하여 가능성을 확인한 바 있다.

이에 본 연구에서 가시광인 태양광에 응답하는 산화티탄의 광촉매 효과는 살균, 유기물분해, 탈취, 공기청정 등 다양한 기능이 인정되었으며, 국내에서는 이 가시광 응답형 신물질 산화티탄에 대한 연구는 아직 시도된 바가 없었다.

여기서는 최근의 다양한 배양액 살균기술과 광촉매의 농업적 이용에 대하여 소개한다.

1. 배양액의 미생물 오염과 피해

수경재배에서 발생하는 피해는 그 방식에 따라 다르다. 담액식 수경에서는 일반적으로 편모균류(Pythium속균이나 Phytophthora속균)와 같이 배양액 중에 전염기관을 방출하여 2차 오염을 주체로 하여 피해가 확산되는 병해발생이 많으며 특히 Pythium속균에 의한 근부병의 발생이 80%이상에 달한다. 한편 고행배지 방식에서는 이들 편모균류에 의한 병해 발생은 적으며, 이를테면 Fusarium속균 등, 배지 중에 전염기관을 축적하여 만연하는 병해의 피해가 많다. 또한 토마토 등 가지과 작물을 중심으로 침입하는 청고병(Ralstonia solanacearum)은 담액식, 고행배지방식에 공통으로 발생하는 경향이 있다.

담액식이나 NFT 등에는 고행배지는 없고 대량의 배양액이 순환하여 작물의 뿌리에 양분을 공급하기 때문에 배양액 중에 생식하는 미생물은 적고 10⁴-10⁵cfu/ml의 범위이지만 락울 등 고행배지방식에서는 배지표면, 뿌리 표면에 다수의 미생물이 생식하고 있으며, 배양액 중에도 10⁶cfu/ml 이상의 미생물이 생식하고 있으며 길항작용도 있어서 비교적 근부장해는 적다. 수경재배에서는 재배방식과 병해의 발생생태를 고려하여 배양액의 살균법을 고려할 필요가 있다.

2. 배양액의 살균방법

수경재배에서 발생하는 병해나 위생 미생물에 의한 생산물의 오염방지에는 배양액의 살균기술이 불가결하다. 배양액의 살균법은 오래전부터 검토되어 왔지만 실용적인 기술이 등장한 것은 최근이다.

표 2에 보급되고 있거나 또는 실용화 단계인 살균방법에 대해서 정리했다. 또한 이들 살균방법 중에서 실용화된 것에 대하여 소개한다.

3. 자외선 · 오존

자외선이나 오존은 배양액 살균에 오래전부터 검토되어온 살균 방법이다. 자외선 살균은 가장 역사 있는 살균방법으로 생물에 유해한 UV-C(260nm)을 조사하여 살균한다. 음료수, 산업용수, 양어용수 등에 이용되며 양액재배시설에도 이용되고 있다. 자외선 살균의 특징은 미생물의 종류에 관계없이 효과가 얻어지지만 배양액 중의 칼레이트철이 분해되어 철 결핍이 발생하는 결점이 있다. 또한 자외선램프의 표면이 오염되어 조사효율이 저하하는 것, 램프에는 수명이 있으며, 또한 고가인 점 등이 결점이다.

Nagae(長江春季, 1977) 등은 수경재배에 있어서 오이 역병 방제에 관해서 자외선 이용에 의한 물리적 소독에 대해서 자외선 조사장치 Steritron R (SF-INSH) 100V-150W를 실험에 이용하였다. 두개의 수경재배 A, B를 파이프로 연결, 배양액의 순환회로를 만들어, 이 사이에 Steritron R을 넣고, A조에 병원균을 접종해서 A→Steritron R→B→A와 배양액을 순환시켰다. 이 경우, A조에서는 균집중 후 3-5일후에 발병이 확인되었지만 B조에서는 약 4일정도 늦게 발병되었다. Steritron R의 전단에 필터를 붙여 피해세균의 통과를 차단하면 B조로의 전반(傳搬)을 확실히 방지하게 되었다. 이 경우 필터의 망(메시), Steritron R을 통과하는 유량에 따라 효과의 발현은 크게 다르게 되어 압착 필터 망 150 μ , 유량 6-7 ℓ /min, plankton filter 100 μ -8 ℓ /min으로 완전히 전반(傳搬)이

억제되었다.

표 2 수경재배의 배양액 살균법

분 류	살균법	장 점	단 점	비 고
물리적 살균	열	미생물 살균법으로서 안전성·살균 효율·확실성은 높다	장치의 대형화·배양액의 온도상승, 설비투자, 운전비용(열원)	배양액 살균에 대한 이용 사례는 적다. 자체의 살균에는 다수 이용
	자외선	안전성·살균 효율은 높다	설비투자, 운전비용(전력), 킬레이트철의 불용화	용수살균, 배양액살균 사례 다수 있음
	완속여과	안전성·운전비용이 낮다	설비투자, 방식에 따라서는 도입이 어렵다(유량)	NFT에 이용되고 있음
	여과	안전성·살균 효율성은 높다	장치에 따라서는 설비투자가 필요(중공사 등 세균여과 용도는 고가)	중공사(中空系) 이용에 의한 살균필터 이용의 사례는 없다
	항균필터(살균필터)	안전·저가이다. 필터의 성능에 따라서 살균 효율성은 높아진다	필터의 교환이 필요하다. 고농도 오염에는 문제가 있다	(주)TYK:세라믹필터, (주)카나이중공업:부직포·사권필터
	광촉매(산화티탄·은)	안전성은 높고, 배양액중의 유기물도 분해된다	단독기술로는 살균 효율에 문제가 있다. 여과 등과 조합시킬 필요가 있다	카나가와현:산화티탄, 토쿠시마현:은광촉매
화학적 살균	차아염소산	살균력은 오존 다음으로 높다. 산성 전해수 생성장치는 오존수 생성장치보다 저가	식물에 장해가 있다	마츠시타나백(주):전해산성수
	오존	안전성·살균 효율성·확실성은 높다	장치가 고가이다. 설비투자. 킬레이트철의 불용화	오존가스에 의한 살균(햇신, 노무라전자공업(주)이 이용하고 있음)
	무기금속(금속은제:옥토크로스)	저가, 살균효율이 높다. 도입이 간단	치료효과는 없다. 장치에 따라서는 도입이 어려운 경우도 있다	옥토크로스로서 판매(주)사토센), 이용하고 있음
	과산화수소	저가, 살균력은 높다	독성이 문제(농약등록이 필요)	사례 없음

그러나 plankton filter 100 μ -11 ℓ /min, plankton filter 158 μ -9-10 ℓ /min에서는 7-15일 후에 발병되는 경우가 있고, 그 이상의 유량에서는 효과가 나타나지 않았다.

오존은 산소원자 3개로 된 분자로서 높은 산화환원 전위를 가져 대부분의 미생물에 대하여 높은 살균력을 나타낸다. 오존은 수돗물의 살균에도 이용되고 있으며 살균력과 안전성은 염소보다 높으며, 친환경 살균제로서 주목받고 있다. 배양액은 오존가스를 배양액에 폭기함으로써 미생물을 살균할 수가 있으며, 50~500ppm 정도의 오존가스를 매분 8~10 ℓ 정도 처리하면 된다. 살균처리에는 오존가스와 배양액이 충분히 섞일 필요가 있으며 가능한 한 미세한 기포로 함으로써 살균효과가 높게 되며 오존가스의 양은 적어도 된다.

오존은 쉽게 물에 용해하여 오존수로 된다. 오존이 수ppm~20ppm 정도 용해된 오존수는 높은 살균력이 있으며, 자재나 종자의 살균, 병해방제에 이용된다. 고농도의 오존가스를 배양액에 폭기하면 망간, 철이 침전하지만 저농도의 오존수는 그 영향도 적다. 또한 오존수는 높은 용존산소 농도를 유지하기 때문에 작물의 생육에도 유리하다.

수경재배에 있어서 가장 문제로 되는 근부병해를 물리적 수단(계면활성, 이온농도, 자외선, 고온, 원심분리, 오존 등)으로 방제하는 것에 대해서는 이미 보고되었다(환경조절학회, 1975). Aoyama(青山博一, 1988) 등은 그 중 가장 실용성이 높다고 생각되는 자외선과 오존을 조합한 살균처리장치의 개발을 시도하였다. 기본장치(특수광선제 UZ-40G)는 살균자외선부(254.7nm)와 오존발생부(자외선184.9nm)에서 이루어지고, 살균처리 원통 내에 오존을 기포혼입하면서 배양액을 순환처리(1.6 t/h)한다. 교토부립대 농학부 부속농장의 수경재배장치에 의해 여름 작기(5 - 7월)와 겨울 작기(10 - 2월)의 토마토에서 시험하였다. 배양액 탱크(3t)에 장치하여 주야 3시간씩의 처리에서 거의 완전한 살균효과를 확인하였다. 처리구는 근모의 발달이 매우 양호하였고, 생육은 촉진(초장 14.3 %, 근중 9.2%, 수량은 집계 중)되었으며, 재배후기의 뿌리 썩음 증상도 억제되었다.

배양액의 마이크로 플로라 검정에 있어서도 부수성의 유모류(turikanemusi) 또는 율형동물(wamusi)류가 처리구에서는 거의 보이지 않았다.

따라서 효과를 높이기 위해 자외선관 벽의 흐림방지와 양액순환을 저해하는 미생물 유해의 제거방법 등에 대해서 검토 중이다.

또한 Kusakari(草刈眞一, 1992) 등은 오존에 의한 양액재배에서 근부 병해 방제의 시도가 연구되었는데 어느 것이나 배양액에 직접 공기-오존을 통기하는 방법이 이루어지

고 있다. 오존을 배양액에 직접 도입하면 배양액중의 Mn, Fe 등의 양액성분을 불용화하고, 오존의 살균효과가 저하하게 된다. 그리하여, 오존이 용해된 용액(오존수)를 조제하여 기존의 양액재배장치에 배양액 순환 시스템과는 별도로 오존수의 환류 시스템을 부가해서 발병 억제효과를 검토하였다. 배양액량 1t의 재배장치에 *Pythium aphanidermatum*의 유주자 현탁액을 접종하여 오이자묘를 정식, 1일 3회 배양액환류를 한 재배를 하였다. 오존수는 배양액 환류후, 배양액의 배수가 종료한 직후에 뿌리가 충분히 잠기도록 하였다. 관행재배구에서는 정식 3일후부터 오이 뿌리썩음병이 확인되었고, 3주간 후에는 거의 전멸하였다. 오존수처리구는 대부분 발병하지 않았다. 그러나 오존수 환류를 1일 1회(배양액 환류는 3회)로 한 구는 60% 이상이 발병되어 방제효과가 인정되지 않았다. 오존수에 의한 장해는 오존수 주입구 부근에서 근량이 저하하였지만 지상부에서의 장해는 없었다.

4. 무기 금속이온

대부분의 금속은 미생물에 대한 살균력을 가지고 있으며 무기 동(Cu)은 농약으로서 오래전부터 이용되어 왔다. 은은 미생물에 대하여 금속 중에 가장 높은 살균력이 있으며, ppb의 농도로 세균·사상균을 살균할 수가 있다. 그러나 은염은 할로겐원소와 결합하여 불용화 하며, 또한 쉽게 석출(析出)하는 성질이 있어 용액 중의 은이온 농도를 유지하는 것은 어렵다. 배양액 중에서 은을 살균소재로서 이용하는 데는 일 정량의 은을 제방(除放)시킬 필요가 있다. 금속은제 「옥토크로스」는 폴리에스텔제의 포(布) 표면에 은을 단지(担持)한 소재로서 배양액 중에 은이온을 서서히 제방한다. 배양액량 1t 당 3000cm²의 포(布)를 침적함으로써 16시간 후에는 배양액 중에 30~40ppb의 은이온이 방출되어 수경재배에서 문제로 되는 근부병이 방제된다. 현재 「옥토크로스」는 수경재배의 채소류에 대한 농약등록이 되어 있으며 합법적으로 이용되는 방제 소재이다. 은에 의한 방제는 용수의 성질로서 용해하는 은의 농도가 다른 점이 있으며 사용에 있어서 생육단계 등을 고려하여 첨가물을 조절할 필요가 있지만 대규모 장치의 필요도 없고 정식 전에 배양액에 첨가하는 것만으로 병해로부터 식물을 보호할 수가 있는 특징이 있다.

Kusakari(草刈眞一, 1994) 등은 산화은을 피복한 섬유포에 의한 *Pythium*, *Fusarium* 속 균의 생육억제 효과에 대해서 이미 보고한 바 있으나 실제로 사용되고 있는 수경재배에서 그 발병 억제효과를 검토한 결과, 높은 방제효과가 얻어졌다. 수경장치는 Hiponica 방식으로 일본 원시처방 균형배양액(EC1.8, pH6.0) 1.6t을 사용하여 오이(품종;

북진)를 재배하였다. 2개의 수경장치에는 각각 *Pythium aphanidermatum*을 접종하고, 한쪽의 장치에는 정식 전일에 은피복섬유포(Oktochrose)를 넣어 발병조사를 하였다. 무처리구에서는 재배개시부터 5일후에 발병주율이 46%로 되고, 그 후, 발병주가 증가해서 정식 2주간 후에 100% 발병하여 모두 고사하였다. 은피복섬유포를 넣은 구에서는 정식 5일후에는 발병이 되지 않았으나 2주간후의 발병주율은 8%로 높은 방제효과가 얻어졌다. 은피복섬유포구의 배양액중의 은이온농도는 20~40ppb의 범위로 추이하였다. 또한, 은피복섬유포구에서 오이의 생육장해는 지상, 지하부에도 전혀 나타나지 않았다. (오사카 농업기술센터)

Morita(森田 壽, 1986), Nagae(長江春季, 1974), Seki (1999), Kusakari(草刈眞一, 1997) 는 산화은 및 산화은을 이용한 은피복섬유포(octocloth)가 수경재배에서 발생하는 *P. aphanidermatum*에 의한 오이 근부병에 대해서 방제효과를 나타낸다는 것을 보고했다. *Pythium*속균에 의한 파드득나물 근부병균에 대한 이들 자재의 억제 효과에 대해서 조사한 결과, 산화은, 은지올라이트, 은피복섬유포와도 유주자에 대해서 높은 살균효과를 나타냈다. 유주자에 대한 운동억제는 산화은에서 0.03 ppm, 은zeolite (sinanenzeomix)에서 0.2 ppm, 살균효과는 산화은에서 0.05 ppm, 은지올라이트에서는 1.0ppm에서 인정되었다. 수경재배 액중에서 (피습)*Pythium* sp. type F의 유주자를 10^2 cfu/ml 현탁하고, 산화은 및 은지올라이트 2 ppm, octocloth를($10\text{cm}^2/\ell$)를 첨가한 경우, 15분후에 유주자는 전혀 검출되지 않았다. 산화은 및 은지올라이트로 처리한 유주자를 회수하여 주사전자현미경으로 관찰한 결과, 표층이 파괴된 유주자가 관찰되었다. 또한 이들 수경재배액에 파드득나물을 이식한 결과, 발병되지 않았다.

Fukuoka(2004) 수경재배 시스템에서 요오드(옥도, I_2) 살균기술에 의한 방제효과에 대해서 검토하였다. In vitro의 시험에서는 *Ralstonia solanacearum*의 세균 현탁액에 I_2 를 $1\mu\text{g}/\text{ml}$ 의 밀도로 오염 후, I_2 를 1, 3, $5\mu\text{g}/\text{ml}$ 로 첨가하였다. 첨가한 15분후에 airtation에 의해 I_2 를 제거하고, 토마토를 정식하여 발병의 추이를 본 결과, 무처리구에서는 포기 전체가 발병한데 대해 I_2 처리구에서는 $1\mu\text{g}/\text{ml}$ 구에서 6포기 중 1포기가 발병한 이외는 어느 구에서도 정식 1개월 후에는 전혀 발병되지 않았다. 양액 중에서는 I_2 처리구중 $1\mu\text{g}/\text{ml}$ 구에서만 병원세균이 검출되었다. 한편 토마토 모종 정식후의 배양액에 대해서는 병원세균을 주입 후 0, 3, 6, 12, 24시간 후에 I_2 를 $5\mu\text{g}/\text{ml}$ 첨가하여 각각 1시간 처리하였다. 그 결과, 각 처리구에서 양액중의 균수는 처리직후에는 거의 검출되지 않았지만 그 효과의 지속기간은 병원균 접종후의 처리시간이 빠르면 길어졌다.

5. 광촉매

산화티탄은 광량의 작용으로 물분자를 분해하여 활성산소를 생성시켜 미생물을 살균하거나 유기물을 분해하는 것이다. 광촉매에 의한 살균에는 중금속의 용해 등이 수반되지 않는 점에서 친환경 살균기술로서 주목을 받고 있으며, 산화티탄, 은광촉매에 의한 배양액 살균이 검토되고 있다(산화티탄 : 카나가와현, 은광촉매 : 토쿠시마현). 은광촉매는 가시광선으로 은광촉매를 여기하여 배양액중의 미생물을 살균하는 방식으로 원통형 용기 내에 세트한 은 단지 폴리에스텔 섬유 층을 통과하는 시점에서 광조사로 수반되어 미생물이 살균되는 원리로 되어 있다. 용액 중의 미생물에 대한 살균효율은 높고, 광촉매로서는 처음으로 수경재배에서 발생하는 오이 뿌리썩음병의 방제가 실증되었다. 광촉매 살균에는 광촉매 자체의 효율이 중요하며, 또한 대량의 배양액을 처리하는 경우, 살균되지 않는 병원균에 의한 감염이 문제로 되는 수도 있어 병원균의 누설이 없는 장치가 되도록 할 필요가 있다.

6. 여과살균

해외의 수경재배에서는 모래를 여과제로 사용한 완속여과가 수경재배의 병해방제에 이용되고 있다. 모래에 의한 여과작용과 모래 중에 생식하는 미생물의 길항작용으로 식물병원균이 억제되어 발병에 이르지 않는 것이다. 여과는 의료분야에 있어서도 대단한 제균 시스템으로서 필터에 의하여 바이러스부터 무기이온까지 제거할 수 있는 것이다. 필터의 결점은 눈막힘이며, 오염된 배양액을 대량으로 처리하기 위해서 충분한 유량에 견딜 수 있어서 장기간 사용이 가능한 필터 개발이 과제이다.

섬유나 세라믹 표면에 은을 담지한 자재로는 수용액 중의 미생물이 은입자와 접촉함으로써 살균된다. 섬유표면이나 세라믹에 은을 담지하여 여과 살균자재로서 이용하는 기술이 개발되었다. 세라믹은을 이용한 항균자재를 저면급수에 이용함으로써 미니장미의 뿌리썩음병을 방제할 수 있는 기술이 일본 기후현에서 보고되어 이 세라믹을 필터로 가공한 배양액 살균에 이용하는 기술이 실용화되었다. 또한 은 단지 섬유에 의한 사권(絲卷)필터를 배양액의 통과경로에 세트함으로써 뿌리썩음병 균유주자를 포착, 살균할 수가 있으며 살균여과자재로서도 주목을 받고 있다. 여과방식은 살균 필터의 눈막힘이 문제가 되지만 필터의 설치나 여과필터의 개구계수의 조정으로 방지할 수 있다. 살균자재로서 선진적 채소 생산기술 연구 중에서 「요소흡착수지」를 사용한 새로운 자재도 검토되고 있다. 여과제에 사용되고 있는 항균제는 불용성으로 장기간 사용에 견디고 필터가 눈막힘이 없는 한 사용할 수가 있으며 장치

화의 경비가 저렴한 점에서 저가인 살균기술이 될 가능성이 있다.

토마토, 오이, 파드득나물의 뿌리썩음병 감염율은 0.1cfu/ml로 되며, 낮은 균밀도에서 발병하는 점에서 필터가 원패스(용수의 1회 통과)로 어느 정도 제균이 될 것인가가 중요하다. 뿌리썩음병은 필터를 통과하여 병원균이 검출되지 않으면 방제는 성공한다. 또한 청고병균이나 Fusarium속 균에서는 발병에 1/1000정도로 균수가 감소하면 효과가 기대되지만 안전성은 보증되지 않는다.

Kuroda(黒田克利, 1994) 등은 양액재배에서 한번 사용한 배양액(이하 배액이라 한다)을 재이용하기 위해 배액중의 병원균을 살균하는 시스템으로 자외선·세라믹 병용 살균장치를 시작하였다. 본 장치는 세라믹 여과와 자외선 살균부로 구성되어 있다. 여과장치는 2조로서 각각에 볼모양의 세라믹을 충전하고, 자외선 살균장치로서 UVC 램프를 이용하였다. 장치의 통과 유량은 20 l/min, 장치 통과 중의 UVC 램프의 조사량은 575, 200 $\mu\text{W sec/cm}^2$ 였다. 토마토 근부위조병균을 접종한 락울재배에 본 장치를 조립하여 근부위조병의 방제효과를 조사한 결과, 배액중의 균이 장기간(정식후 144일간) 검출되지 않았다. 토마토의 생육 스테이지가 진행됨에 따라 회수되는 배액의 투명도가 저하하지만 세라믹 여과조를 통과시킴으로써 배액의 투명도가 통과 전에 비해서 높게 되고, 자외선의 투과율이 높아지면 살균력의 유지에 유효하였다. 또한 토마토의 락울재배에서 보관한 배액을 본 장치에서 살균처리 후 재이용하였지만 이 병의 발생은 없이 높은 효과가 인정되었다.

수경재배에 발생하는 병해의 방제에는 배양액의 살균만으로 방제하는 것은 완벽하지 않다. 재배시설이 오염되면 병원균은 배양액, 재배장치 전체에 확산되어 모든 것을 오염시킨다. 병해가 발생한 시설에는 차아염소산칼슘 등을 사용하여 소독하지만 가끔 피해를 반복하는 사례가 있다. 병원균은 갈 수 있는 데까지 확산될 위험이 있으며, 대책이 필요하다. 수경재배에서는 정식용의 패널 등으로 스티로폼이 많이 사용되고 있으며 이 스티로폼이 새로운 오염의 원인이 되는 사례가 많이 있다. 스티로폼은 표면이 소수성(疏水性)으로 차아염소산염으로 충분히 살균되지 않는 수가 있다. 또한 내부에 병원균이 침입한 경우는 더욱 살균이 곤란하다. 이들 패널의 살균에는 열에 의한 살균이 효과적이다. 자재의 살균, 건전묘의 육묘, 이들이 철저히면 또한 배양액의 살균처리가 되어 처음 수경재배의 무병관리가 실현된다. 신선한 채소의 생산에는 식품위생상에서도 포장위생의 관리가 중요하다. 물의 위생을 포함하여 먹거리 안전·위생관리를 목표로 새로운 기술의 도입이 바람직하다.

현재의 토마토 양액재배에서는 광물을 가공한 락울배지를 사용하는 방식이 많다.

그러나 사용한 후의 락울은 자연 환원이 어렵기 때문에 산업폐기물로서 처분이 필요하며, 환경보전의 관점에서 자연환원 하기 쉬운 야자피, 왕겨 등 천연 유기질 자재가 대체배지로서 바람직하다.

또한 배양액은 토마토 1포기당 하루 수백ml부터 2ℓ 정도를 공급하여 관리하는 것이 보통인데, 식물이 흡수하지 못한 배양액은 배액되어 하천이나 지하수의 오염으로 이어질 가능성이 지적되고 있다. 또한 배액을 재이용하는 순환식으로의 전환이 바람직하다.

그러나 야자피 등 유기질 배지를 사용하여 배액을 버리지 않고 순환 이용하기 위해서는 배양액 중에 유기질 배지로부터 용출한 유기 오염물의 분해를 비롯하여 병해 확산 방지를 위하여 살균을 할 필요가 있지만 그 방법은 아직 확립되지 못하고 있다.

천연 유기질 배지를 사용하여 배양액을 리사이클 함으로써 산업폐기물로 되는 락울과 폐액 양쪽의 문제점 해결을 도모하기 위하여 산화티탄 광촉매를 사용한 배양액의 정화, 살균효과에 대하여 검토했다.

광촉매를 이용한 물처리 장치에는 콤팩트한 장치 중에서 산화티탄에 자외선램프 등을 비추면서 행하는 것이 많다. 그러나 장치가 고가로 됨과 동시에 처리비용도 많아지며 사람의 손이 가지 않고 대량 처리가 요구되어 산업액체의 처리에는 적합하지 않다. 또한 광촉매를 사용하여 농업용 액체를 처리하는 데는 아주 큰 광 조사용 면적이 요구된다고 생각하는 것, 또한 통상적인 피처리 액체를 농축한 상태로 처리하는 것이 효과적이지만 대량의 농업용 액체를 농축하는 데는 곤란하기 때문에 광촉매를 농업용 액체의 처리에 적용하는 것은 비현실적라고 생각하였다.

그러나 자연 에너지인 태양광만을 이용한다는 전연 새로운 발상에 착안하여 처리 방법을 고안하여 실험을 실시하였다. 농업은 태양 아래에서 하는 것이기 때문에 태양광이 비치는 장소는 넓게 취한다. 태양 에너지는 비교적 희박 에너지이지만 면적으로 커버하여 충분히 실용적인 처리효과가 확보될 수 있도록 하였다. 또한 피처리액의 농축처리를 필요하지 않고 예를 들면 빗물 등에 의해서 희석된 상태에 있어서도 충분히 실용적인 수준까지 처리하는 목표로 하였다. 또한 태양광 이용에 의하여 실용화의 포인트로 되는 저비용 운전이 가능하게 되었다.

또한, 이 등(2002)은 분리여과막을 이용한 폐양액의 박막여과장치를 개발하여 제균 성능 및 양액성분변화를 조사한 결과 풋마름병균 및 시들음병균 제거율은 정밀여과

막에서 각각 99.5%, 98.5%, 한외여과막에서 각각 99.9%, 100%로 나타났고, 처리전과 처리후의 양액의 다량요소 및 미량요소의 성분에 영향을 미치지 않는 것으로 보고함으로써 분리여과막에 의한 폐배양액의 재처리 가능성을 제시하였다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 살균 및 정화 요인 시험

1. 산화티탄 광촉매 코팅 필터 설계 제작

광촉매 효과 요인시험을 위하여 가시광 응답형 광촉매 반응이 효과적으로 작용할 수 있는 일본 미야마 등(2003)이 시도한 필터 형태로 구성하는 것을 전제로 하여 그림 1과 같이 300×300mm 크기에 두께 13mm의 세라믹 모재를 사용한 필터와 니켈을 사용한 메탈 필터 2종류로 하고 각각 가시광 응답형 산화티탄(TiO_2)과 자외광 응답형

산화티탄을 코팅하여 제작하였다.



그림 1 실험에 사용한 산화티탄 광촉매를 코팅한 필터

여기서 TiO_2 광촉매 코팅방법의 제원은 표 3과 같이 요약할 수 있다. 즉 코팅 방법은 슬러리 스프레이 방식을 사용하였으며, 또한 코팅제의 주요 성분은 가시광 응답형 산화티탄 광촉매(일본 에코디바이스주식회사 제품, $TiO_2 : SiO_2 = 70 : 30$) 분말로서 코팅압력 $3\sim 4kg/cm^2$ 에 필터 양면에 코팅하여 사용하였고, 코팅두께는 평균 $20\mu m$, 최대 $150\mu m$ 이하로 하였다. 이와 같이 코팅하였을 경우 코팅제의 담지량은 $3\sim 5g/plate$ (코팅전후 무게 비교) 로 추정된다.

표 3 산화티탄(TiO_2) 광촉매 코팅 제원

구 분	TiO_2 광촉매 코팅	비 고
코팅 방법	슬러리 스프레이 방식	
주용 성분	$TiO_2:SiO_2 = 70:30$	에코디바이스(주)
코팅 압력	$3\sim 4kg/cm^2$	
코팅 면	$300\times 300mm$ 양면	모재 규격
코팅 두께	평균 $20\mu m$, 최대 $150\mu m$ 이하	
담 지 량	$3\sim 5g/plate$	코팅전후 무게 비교

특히 세라믹 필터는 표 4와 같이 Porous형태의 세라믹(SiC, Al₂O₃의 복합세라믹) 모재의 기공율을 15ppi 및 40ppi로 2종류로 하여 TiO₂ 광촉매 분말을 슬러리화 시켜 스프레이 방식으로 코팅한 후 열처리하여 제작하였다.

표 4 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 코팅 필터

제품명	NTC-CF	비 고
규 격	300×300×13T mm	기본 설정
형 태	Porous Ceramic	모재 형태
재 질	SiC, Al ₂ O ₃ 의 복합세라믹 재질	
기공율(2종)	15ppi, 40ppi	pore per inch

여기서 세라믹 필터의 형상은 공기 정화용에 사용하는 모양으로 기체의 흐름을 원활하도록 하기 위하여 단위 기공이 크게 형성되도록 전체 기공율을 15ppi(pore/in)로 하고 있다. 본 연구에서 우수한 필터의 개발을 위하여 광촉매 필터 전문생산업체와 협의하여 그림 2와 같이 15ppi 및 40ppi인 세라믹 필터를 제작하여 성능을 비교하였다.



세라믹필터
15ppi

세라믹필터
40ppi

그림 2 기공율을 달리한 세라믹 광촉매 필터

2. 요인시험 장치 구성 및 시험방법

가. 장치구성

그림 3에서 보는 바와 같이 폭 303mm 길이 700mm 높이 30mm의 처리채널 내에 300×300×13mm의 광촉매필터 1개를 평면으로 설치하여 용량 15ℓ의 공급탱크에 배양한 탄저균을 수돗물에 현탁하여 두고 공급시의 균밀도를 측정한 후 수중펌프를 이용하여 유량 1ℓ/min를 공급하여 광촉매필터 위를 통과한 현탁액을 집수탱크에 집수하여 샘플을 채취하여 균밀도를 측정한다. 수집된 처리수를 다시 수중펌프를 이용하여 공급탱크로 보내고 이것을 다시 광촉매 필터 위를 통과시키는 실험을 반복하여 균밀도가 감소되는 양상을 조사할 수 있도록 시험 장치를 구성하였다.

여기서 배양액을 살균 정화 처리를 위하여 시스템에 배양액을 공급하는 펌프는 그림 4와 같은 소형 수중펌프로 배출구경 10mm, 양정 1.3m, 최대 양수량 1ℓ/min이며, 전원은 단상 220V, 11W이다.

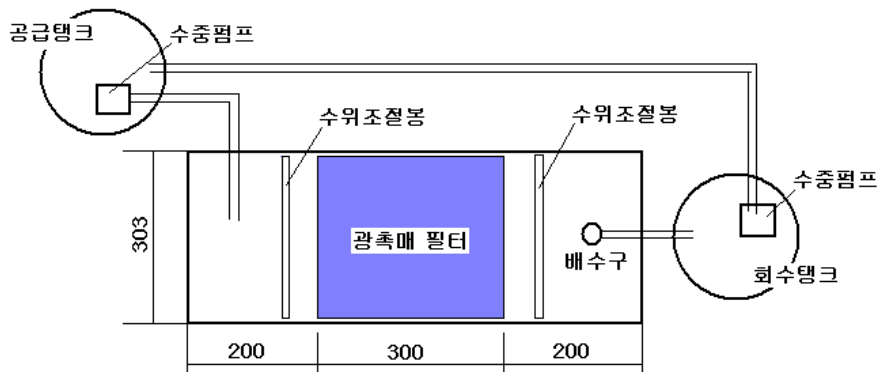


그림 3 광촉매 살균 정화 요인시험장치 기본 구성도



그림 4 수중펌프

1) 태양광시험

가시광 응답형 광촉매 시스템을 이용하여 배양액의 살균 및 정화 시스템을 실용화 함에 있어서 운전비용을 최소화하기 위하여 태양광을 이용하는 살균 및 정화 시스템을 구성하여 시험을 실시하였다.

그림 3과 같이 구성한 기본 시스템을 겨울철에는 동결을 방지하기 위하여 그림 5와 같이 처리채널 내의 광촉매 필터가 실험실 창밖의 태양광에 노출되도록 설치하고 탄저균 현탁액의 균농도를 측정한 후 현탁액을 공급하여 처리채널을 통과하여 나오는 현탁액을 수집탱크에 집수하여 균농도를 측정하여 1회 처리로 하고, 이것을 다시 수집탱크내의 수중펌프를 사용하여 공급탱크로 보내서 다시 처리채널을 통과시켜 현탁액의 탄저균을 처리하는 것을 반복하여 총 14회 실시하였다.



그림 5 태양광 이용 가시광 응답형 광촉매 살균 요인시험 장치

한편 그림 6은 겨울철을 피하여 동결되지 않는 시기에 야외에서 성능시험을 하기 위하여 개발한 시험장치로서, 채널이가 2열로 구성되어 2종의 광촉매 필터의 성능시험을 동시에 실시할 수 있는 단위 광촉매 성능시험 장치이다. 또한 광촉매에 의한 살균처리채널을 필터 2매를 설치할 수 있도록 길이를 길게 하여 설치 필터매수에 따른 성능도 비교할 수 있도록 구성하였다.



그림 6 단위 광촉매 필터 살균 성능시험 장치

2) 인공광시험

태양광에 대한 가시광 응답형 광촉매 시스템에 의한 배양액 살균 및 정화 성능의 비교를 위하여 자외광을 조사했을 때의 광촉매에 의한 배양액의 살균 및 정화 성능을 시험하기 위하여 그림 3의 처리채널 내의 광촉매 필터 위에 그림 7과 같이 자외광 조사장치를 설치하여 실시하였다.

실내에서 자외선등(일본, Sankyo Denki Co. 15W) 2개를 20cm, 30cm, 40cm, 50cm 높이에서 조사할 수 있도록 시스템을 구성하였으며, 자외선이 조사되는 동안 산화티탄 필터에 태양광선 등 외부광이 들어가지 않도록 하기 위하여 검은 막으로 차단하였다. 공급탱크와 집수탱크는 15ℓ의 용량이며, 각 탱크 내에는 수중펌프를 설치하여 현탁액의 공급과 처리 후 집수액을 다시 반복 처리할 수 있도록 공급탱크로 회수하

도록 하였다. 또한 각 탱크 내에 소형 수중펌프를 설치 가동하여 탱크 내 균밀도 분포가 균일하게 되도록 휘저어 주었다.



그림 7 인공광 이용 가시광 응답형 광축매반응 요인시험장치

나. 살균처리 시험 방법

1) 공시병원균 : 탄저병균(*Colletotrichum* sp.), 시들음병균(*Fusarium* sp.)

탄저병은 과채류의 유효기부터 피해가 심하여 재배농가에서 가장 문제시 되고 있는 병으로서 이 병은 토양전염, 수매전염 및 병든 모주로부터 분주하여 증식한 모에 의해서 전염되는 병이지만 주로 물에 의하여 전파된다. 또한 고히베지수경에서 배지 중에 전염기관을 축적하여 만연하는 시들음병균(*Fusarium*속균) 등 병해의 피해가 많다.

시설재배에 있어서 수경재배를 할 경우, 가장 문제시 되는 병원균은 세균(bacteria), 탄저병균(*Colletotrichum* sp.), 역병균(*Phytophthora* sp.), 시들음병균(*Fusarium* sp.) 등 수매전반을 하는 병원균이지만 본 연구에서는 분생포자를 짧은 기간 내에 생성시킬 수 있고, 물에 현탁성이 높으며, 포자가 물속에 침전되어도 장시간 생존하여 전염력을 유지하므로 본 실험의 실험재료로 탄저병균 및 시들음병균을 배양하여 이용하였다.

탄저병균 및 시들음병균의 배양은 그림 8과 같이 풋고추를 배지에 균을 접종하여 온도 28~30℃의 인큐베이터에서 1주일 정도 배양하여 균이 왕성하게 번식하였을 때 포자를 형성하도록 하여 포자를 증류수에 수집하였다. 이 수집된 포자를 수돗물에 현탁하여 광축매 필터를 설치한 시스템에 처리하였다. 이 때 처리 전후의 균밀도를 조사 분석하는 방법을 도입하여 성능을 시험하였다.

여기서 수경재배에 발생하는 다양한 병원균에 대한 살균 성능을 검증하지 않고 탄저

병원균 및 시들음병원균 만에 의한 시험을 실시한 것은 모든 균은 유기물이고 본 연구에서 개발한 광촉매 살균 정화 시스템은 유기물을 분해하는 원리를 이용하기 때문에 포자를 이룬 탄저균이 포자수를 카운트하기가 편리하여 이용한 것으로 탄저균 포자를 분해할 수 있으면 모든 병원균을 살균할 수 있기 때문에 도입한 방법이다.



그림 8 병원균의 배양

2) 처리방법

풋고추에 배양한 탄저병원균의 분생포자를 증류수로 채취하여 요인시험장치의 배양액 공급탱크의 수돗물에 초기 균밀도를 100개/0.9mm³ 전후가 되도록 현탁하여 시험에 이용하였다. 이 때 균밀도는 실제 수경재배 폐배양액에서 나타나는 균 밀도(20개/0.05ml)의 300~500배로 하여 성능시험의 유효성 면을 고려하였다. 또한 탄저병원균의 분생포자는 정채된 물에서 서서히 바닥에 침전되므로 탱크의 바닥에 소형 수중 펌프를 설치하여 시험 중 계속 가동하여 탄저병원균이 물에 고르게 현탁되도록 하였다.

살균처리에 대한 살균성능의 평가는 산화티탄 광촉매가 가진 유기물 분해력에 의하여 유기물인 병원균이 탄산가스와 물로 분해되기 때문에, 처리 전후에 탄저병원균 현탁액을 샘플링하여 광학현미경으로 탄저병원균의 포자를 계수하여 균밀도의 변화로서 살균성능을 나타냈다. 여기서 포자의 계수는 혈구계산기를 이용하였다. 또한 최종적으로 남아 있는 포자의 발아 시험을 통하여 발아능력을 검정하여 분해되지 않은 병원균의 살균력도 조사하였다.

다. 시험결과

1) 자외광 조사높이별 살균성능

인공광원인 자외광의 조사 높이에 따른 시스템의 살균성능을 조사한 결과를 표 5

와 그림 9에 나타냈다. 이것은 시스템의 살균성능의 비교를 위해서 사용한 자외광응답형 세라믹 필터의 살균성능 시험에 자외선등의 조사높이를 결정하기 위한 것이다.

표 5 자외광 조사 높이별 광촉매 필터 누적처리매수별 균밀도 변화
(균밀도 : 개/0.9mm³)

누적통과 필터매수 조사높이	처리전	2	4	6	8	10	12	14	
		20cm	191.4	162.5	130.2	101.9	99.2	80.4	66.6
	%	100	84.9	68.0	58.2	51.8	42.0	34.8	22.1
30cm	184.8	109.8	106.1	98.5	79.5	75.7	60.6	43.4	
	%	100	59.4	57.4	53.3	43.0	41.0	32.8	23.5
40cm	176.4	85.5	72.8	64.7	56.9	44.1	30.7	21.7	
	%	100	48.5	41.3	36.7	32.3	25.0	17.4	12.3
50cm	173.4	94.3	90.7	81.5	67.6	61.0	46.8	32.1	
	%	100	54.4	52.3	47.0	39.0	35.2	27.0	18.5

주) 자외광응답형 세라믹 필터 사용, 균밀도는 10점 측정치의 평균

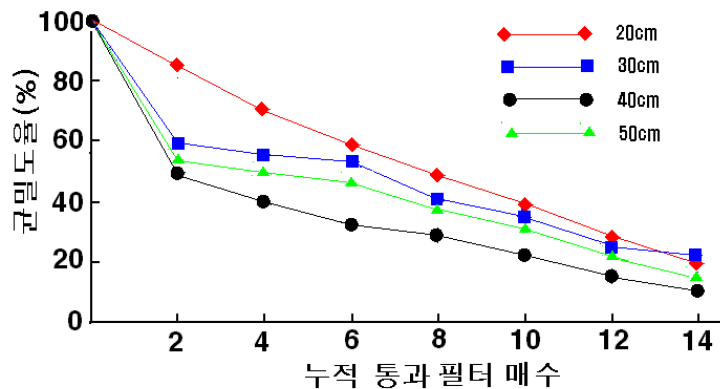


그림 9 광조사 높이별 처리회수별 균밀도 변화

표 5 및 그림 9에서 보는 바와 같이 조사높이 20, 30, 40, 50cm 4가지 수준의 시험에서 40cm에서 가장 좋은 살균성능을 나타냈다. 이것은 자외선등(일본, Sankyo

Denki Co. 15W) 2개와 광촉매 필터의 크기와의 적합성에 기인한 것으로 판단된다. 이 성적 이용하여 앞으로의 요인 시험에 자외선등의 조사높이를 40cm로 고정하여 실시하였다.

2) 산화티탄 광촉매 필터 종류별 살균성능

산화티탄 광촉매를 코팅한 필터의 종류별로 자외광을 조사하였을 때의 살균성능을 표 6과 그림 10에 나타냈다.

표와 그림에서 보는 바와 같이 같은 크기의 필터를 사용하는 경우 세라믹필터가 메탈필터보다 살균성능이 우수하게 나타났으며, 가시광 응답형과 자외광 응답형과의 차이는 적었다. 이것은 광원으로 자외광을 조사하였기 때문에 가시광 응답형 산화티탄 광촉매는 가시광에 응답하지만 자외광에서도 광촉매 작용을 하기 때문이다. 그러나 후술하는 태양광에서는 자외광이 부족하여 광원에 의한 살균성능에 차이가 크게 나타났다.

여기서 필터의 모재를 세라믹으로 한 경우와 메탈(니켈)로 한 경우를 비교하였으며 세라믹을 모재로 한 필터가 메탈을 모재로 한 필터에 비하여 성능이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 메탈 필터의 경우 0.2mm 정도의 메탈(니켈)선을 필터 모양으로 성형 가공한 것으로 미세한 선에 산화티탄을 코팅한 것으로 세라믹(Porous Ceramic) 모재에 비하여 기공율이 과대하게 크기 때문에 산화티탄 코팅면이 적어 세균과의 접촉이 잘 이루어 지지 못하여 광촉매 기능이 저하된 것으로 판단된다.

표 6 필터 종류별 누적 통과필터 매수에 따른 균밀도 변화

(균밀도 : 개/0.9mm²)

누적 통과 필터매수 필터종류		처리전	2	4	6	8	10	12	14
		가시광 응답형	세라믹	194.8	82.8	71.1	60.6	54.5	41.7
100	42.5			36.5	31.1	28.0	21.4	14.5	9.1
메탈	167.1		123.3	103.9	93.1	85.1	77.2	71.5	65.3
	100		73.8	62.2	55.7	50.9	46.2	42.8	39.1
자외광 응답형	세라믹	176.4	85.5	72.8	64.7	56.9	44.1	30.7	21.7
		100	48.5	41.3	36.7	32.3	25.0	17.4	12.3
	메탈	172.3	137.0	117.5	104.8	97.7	89.2	81.8	76.3
		100	79.5	68.2	60.8	56.7	51.8	47.5	44.3

주) 자외광 조사, 균밀도는 10점 측정치의 평균

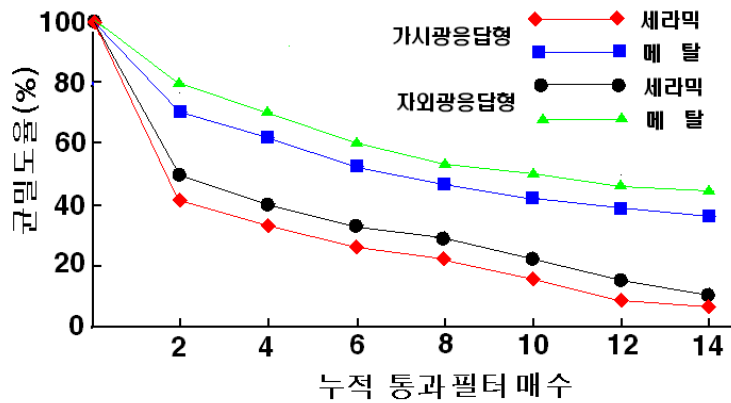


그림 10 필터 종류별 처리회수별 균밀도 변화

표7 및 그림 11은 세라믹 필터의 기공율에 따른 살균성능을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기공율 15 ppi의 경우 처리전 균밀도 103.2개/0.9mm²에서 처리 후 누적 통과필터 매수 14에서 14.2개/0.9mm²(13.8%)로 감소하였으며, 40ppi의 경우는 처리전 균밀도 98.5개/0.9mm²에서 처리 후 누적 통과필터 매수 14에서 23.2개/0.9mm² (23.6%)로 감소하였다. 따라서 필터 기공율 15ppi가 40ppi에 비해서 9.8%point 우수

하게 나타났다. 이것은 기공을 15ppi가 40ppi에 비해서 단위 기공이 크기 때문에 태양광이 필터 내부까지 침투하여 광촉매 작용을 하기 때문이라고 판단된다.

따라서 세라믹 모재의 광촉매 코팅 필터의 기공율은 15ppi로 제작하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

표 7 세라믹 광촉매 필터의 기공율별 살균 성능 (균밀도 : 개/0.9mm²)

누적통과 필터매수		처리전	2	4	6	8	10	12	14
15ppi	균밀도	103.2	67.9	48.3	32.7	24.6	19.9	17.8	14.2
	%	100	65.8	46.8	31.7	23.8	19.3	17.2	13.8
40ppi	균밀도	98.5	74.3	56.3	42.8	37.7	30.7	27.4	23.2
	%	100	75.4	57.2	43.5	38.3	31.2	27.8	23.6

주) 균밀도는 10점 측정치의 평균

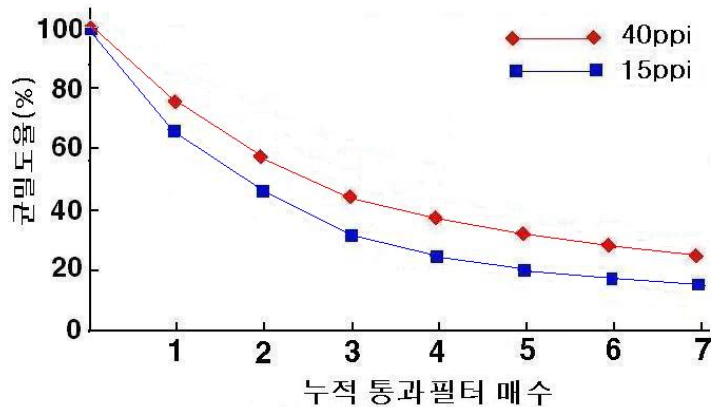


그림 11 세라믹 광촉매 필터의 기공율별 살균 성능

3) 단위 처리패널 내 광촉매 필터의 설치 매수별 살균성능

동일한 처리채널 내에 설치한 광촉매 필터의 매수에 따른 광촉매의 살균 처리성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 누적통과 필터 매수는 동일하게 하고 통과 광촉매 매수에 따른 살균 성능을 그림 12에 나타냈다. 다시 말하면 이것은 동일한 처리 채널 내에 설치한 광촉매 필터의 매수에 따라 1매의 광촉매 필터에 대하여 비례적으

로 다수배의 성능을 나타내는가를 알아보기 위한 것이다.

단위 광촉매필터의 살균 성능시험 장치를 이용하여 처리채널 내에 광촉매 필터 2매를 설치하여 살균 처리한 것과 처리채널 내에 1매를 설치하여 2회 통과 처리한 것을 서로 비교하여 누적 광촉매 통과매수를 같게 하여 비교하였다.

그림에서 보는 바와 같이 처리채널에 1매를 설치하여 2회 처리채널을 통과시킨 것과 처리채널에 2매를 설치하여 1회 처리채널을 통과시킨 살균 성능은 1매 설치하여 2회 통과시킨 것이 2회 설치하여 1회 통과시킨 것에 비하여 살균 성능이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 처리채널에 2매를 설치하여 연속으로 배양액을 흘릴 경우와 1매를 설치하여 2회 통과시킨 경우에 비하여 현탁액의 상하 섞임이 적어 필터와 균의 접촉이 균일하지 못하기 때문이라고 판단된다.

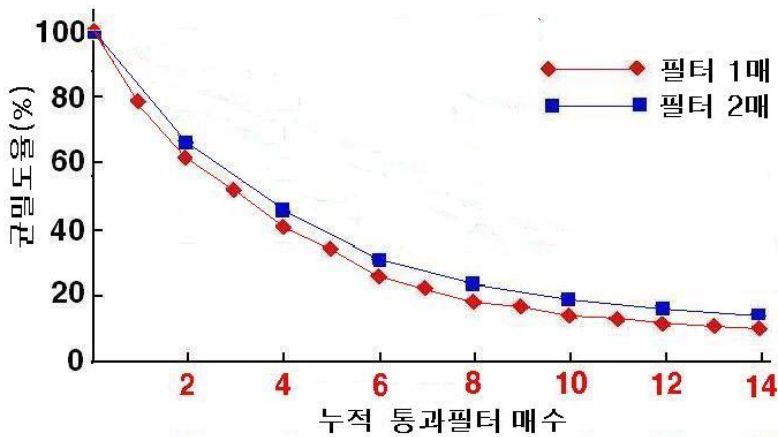


그림 12 동일 처리채널 내 광촉매 필터 설치매수에 따른 살균 성능

3) 광원별 살균성능

가시광응답형 광촉매를 코팅한 필터의 종류별로 태양광 및 자외광의 광원별 살균 성능을 처리회수별로 균밀도로 나타낸 것이 표 8 및 그림 13이다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 세라믹 필터가 메탈 필터 보다 살균성능이 우수하였으며, 또한 태양광이 자외광보다 우수한 살균성능을 보였다. 여기서는 가시광 응답형 필터만의 시험이기 때문에 광원의 차이는 크지 않고 필터의 종류별 살균성능 차이가 크게 나타났지만 현재 분석중인 자외광응답형 필터보다 가시광응답형의 우수할 것으로 기대된다.

표 8 광원별 필터종류별 처리회수에 따른 균밀도 변화(균밀도 : 개/0.9mm³)

광원	처리회수 필터	처리전	2	4	6	8	10	12	14
		자외광	세라믹	194.8	82.8	71.1	60.6	54.5	41.7
100	42.5			36.5	31.1	28.0	21.4	14.5	9.1
메탈	167.1		123.3	103.9	93.1	85.1	77.2	71.5	65.3
	100		73.8	62.2	55.7	50.9	46.2	42.8	39.1
태양광	세라믹	160.6	65.7	56.4	48.5	39.2	29.4	19.8	13.3
		100	40.9	35.1	30.2	24.4	18.3	12.3	8.3
	메탈	177.4	126.8	116.7	105.2	96.2	89.1	83.0	76.8
		100	71.5	59.8	53.3	48.5	43.8	40.5	37.6

주) 균밀도는 10점 측정치의 평균

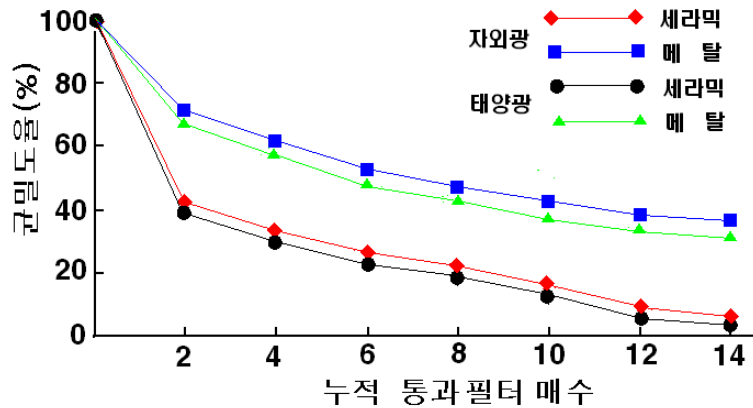


그림 13 광원별 필터종류별 처리회수에 따른 균밀도 변화

제2절 가시광 응답형 산화티탄에 의한 수경재배 배양액의 살균 및 정화 기본 시스템 개발

1. 기본구성

가시광 응답형 산화티탄에 의한 배양액의 유기물 분해 및 살균 시스템 개발에 있

어서 그림 14와 같이 수경재배 고휘배지에 배양액을 급액하여 배액을 흘려보내는 비순환 시스템의 폐액을 살균 및 정화 처리하여 재이용하는 것을 목표로 하였다. 이때 처리한 배액을 급액탱크에 섞어 넣지 않고 별개의 라인을 통하여 급액에 이용하는 것으로 구성한 것이 특징이다. 이것은 일본 치바농업종합연구센터의 우다가와 등의 연구결과에서 얻어진 바와 같이 하루 급액 중 오후 4시경에 급액하는 가장 최종 급액시에 이용함으로써 비료성분의 언밸런스를 극복하도록 구성한 것이다.

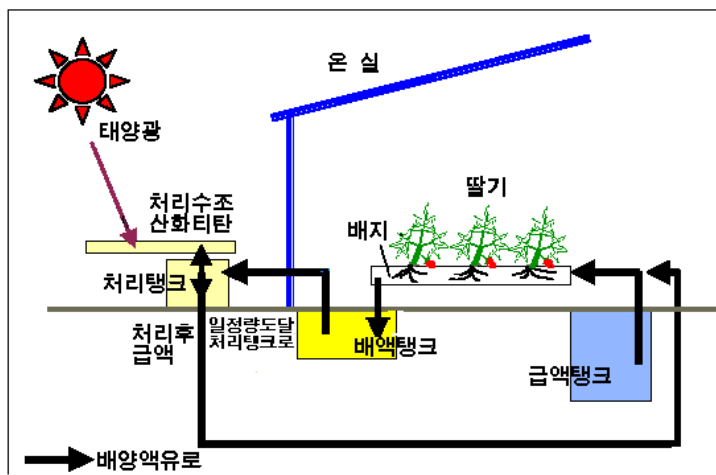


그림 14 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 및 정화 시스템 도입을 위한 수경 시스템의 기본 구성

2. 설계 및 제작

가시광 응답형 산화티탄에 의한 배양액의 살균 및 정화를 위한 기본 시스템은 요 인시험에서 사용한 광촉매 필터(300×300×13mm) 15매를 그림 15와 같이 광촉매 필터 5매를 설치한 처리채널(폭 303mm, 길이 2100mm, 높이 30mm)을 낙차를 두어 3열로 설치하고, 상부 처리채널 하부에 수돗물에 탄저균 포자를 현탁한 현탁액을 공급하는 200ℓ 용량의 탱크1과 그리고 처리한 탄저균 현탁액을 집수하는 200ℓ 용량의 탱크 2를 처리채널 하부에 각각 설치하였다. 또한 탱크1 내에는 공급용 수중펌프를 설치하고 탱크2에는 탱크1로의 순환용 수중펌프를 설치하였다.

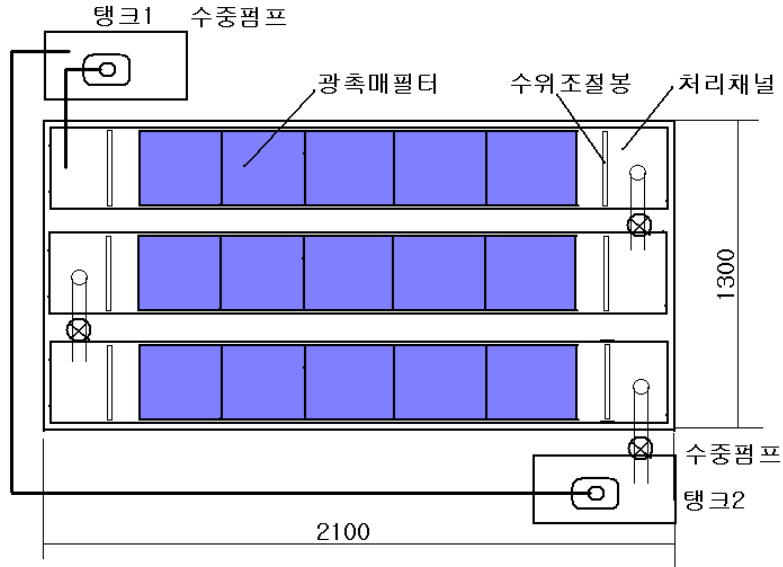


그림 15 가시광응답형 산화티탄에 의한 배양액 및 유기물 살균분해 장치
기본구성도

여기서 처리채널을 낙차를 두어 3열로 설치한 것은 각 처리채널 내에서 배양액이 광촉매 코팅 필터 위의 전면에 고르게 접촉하면서 흐르게 하여 광촉매 작용이 효율적으로 작용하도록 시도한 것이다. 일본에서 자외광 응답형 광촉매 세라믹 필터를 사용하여 시도한 방법은 그림 16에서 보는 바와 같이 전 광촉매 필터 30매를 평면으로 구성하여 배양액의 입구와 출구를 맞모금 방향으로 설치함으로써 배양액이 광촉매 필터 위 전면에 접촉하여 흐르지 못하는 결점을 고려하여 본 연구에서는 처리 채널로 구성하여 배양액이 필터 위 전면을 고르게 흐르도록 시도한 것으로 본 연구에서 최초로 구상한 것이다.



그림 16 일본 카나가와현 농업기술센터에서 시도한 광촉매에 의한
배양액 살균 시스템

공급용 수중펌프에는 밸브를 설치하여 공급유량을 조절할 수 있도록 구성하여 광촉매 필터 위를 흐르는 수위가 2mm 정도가 되도록 조정하였으며, 1000m² 규모의 비순환식 수경시스템으로부터의 배액(급액량의 20~30%)을 처리할 수 있는 시스템을 목표로 구성하였다.

또한 여기서 광촉매 필터의 매수를 15대로 한 것은 요인 시험에서 광촉매 필터 1대로서 처리할 수 있는 용량의 15배의 능력을 상정하여 구성한 것이다.

그림 17은 실제로 구성한 산화티탄 광촉매에 의한 배양액의 살균 및 유기물 분해의 기본 시스템이다. 그림에서 보는 바와 같이 4조의 시스템을 구성하여 가시광 응답형 광촉매 필터 2종류(세라믹, 메탈), 자외선 응답형 광촉매 필터 2종류(세라믹, 메탈)의 4처리 시험을 동시에 할 수 있도록 구성한 것이다.

시험은 공급탱크 내에 수돗물을 채우고 배양한 탄저균을 현탁하여 공급시의 균밀도를 측정 후 수중펌프를 이용하여 유량 1ℓ/min로 최상부의 처리채널에 현탁액을 공급하여 광촉매필터 위를 통하여 흘러 처리한 현탁액을 집수탱크에 집수하여 샘플을 채취하고 균밀도를 측정하였다. 수집된 처리수를 다시 수중펌프를 이용하여 공급탱크로 보내고 이것을 다시 광촉매 필터 위를 흘러 처리하는 실험을 반복하여 균밀도의 변화를 조사하였다.



그림 17 가시광 응답형 산화티탄에 의한 배양액 살균 및 정화 기본 시스템

3. 성능시험

가. 시험방법

제작한 시스템의 배양액 살균 및 정화 능력을 평가하기 위하여 태양광에 노출할 수 있도록 야외에 설치하여 시험하였다. 실제 시설재배에서 1000m²에 1회의 급액량 이상인 크기의 탱크(200ℓ) 내에 수중펌프를 설치하여 5매의 산화티탄 광촉매가 코팅된 처리채널을 3단으로 구성하여 총계 15매의 필터 위를 흘려 통과시킨 후 처리액을 다시 집수탱크에 집수하여 이것을 집수탱크 내에 설치된 수중펌프로 공급탱크에 보내 살균 및 정화처리를 반복 하도록 하여 1시간마다 샘플링하여 광학현미경으로 탄저병균의 포자를 계수하여 균밀도의 변화로서 성능을 평가하였다. 여기서 포자의 계수는 혈구계산기를 이용하였다.

나. 시험결과

표 9에서 보는 바와 같이 가시광 응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 세라믹필터와 자외광 응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 세라믹필터를 비교하여 살균성능을 나타내는 균밀도 변화를 보면 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 필터에서 처리전 균밀도가 95.4개/0.9mm³(100%)였던 것이 3시간 처리 후에는 균밀도가 3.2개/0.9mm³(3.4%)로 탄저균 포자가 거의 없는 상태로 되었다. 남아 있는 포자도 발아시험을 하여 확인 한 바, 대부분 발아되지 않는 것으로 나타났다. 한편 자외광 응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 세라믹필터의 경우는 처리전 균밀도가 88.6개/0.9mm³(100%)였던 것이 3시간 처리 후에는 균밀도가 17.2개/0.9mm³(19.4%)로 가시광 응답형에 비하여 태양광에서는 성능이 크게 떨어지는 것으로 나타나 자외광 응답형은 실용성이 떨어지는 것으로 나타났다.

표 9 처리경과 시간별 균밀도 변화 (2004년 11월 19일 처리)

(균밀도 : 개/0.9mm³)

필터종류		처리시간			
		처리전	1시간	2시간	3시간
가시광 응답형	균밀도	95.4	33.7	12.2	3.2
	%	100	35.3	12.8	3.4
자외과 응답형	균밀도	88.6	44.6	24.6	17.2
	%	100	50.3	27.8	19.4

주) 균밀도는 20점 측정치의 평균치임

제3절 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 성능의 지속성 향상 기술 개발

1. 산성 배양액에 의한 광촉매 성능 지속성 시험방법

산화티탄 광촉매 필터의 광촉매 성능의 지속성을 검증하기 위하여 수경재배 배양액의 적정 산도인 pH 5.5~6.5보다 산성이 강하도록 질산으로 배양액을 pH 2.0, 4.0, 6.0 등으로 조정하여 그림 18과 같이 광촉매 필터를 침적시켜 광촉매 필터와 침적기간별 광촉매 성능을 시험하여 비교하였다.

현재 침적은 매월 시행한 성능 시험에서 pH 4.0, 6.0에 대하여 수돗물과 광촉매 필터의 성능에 유의차를 나타내지 않아 산성 배양액에 대한 필터의 지속성은 장기간 더 결과를 분석하여 보아야 하겠지만 지금까지의 필터의 표면 형상이나 성능의 변화로 미루어 보아 광촉매 성능에는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 그러나 pH 2.0인 강산에서는 필터가 부스러지는 등 세라믹 필터의 강도에 이상이 있었다. 실제 배양액의 경우 pH 2.0 정도의 강산에 필터가 노출되는 일은 없기 때문에 문제는 없을 것으로 판단된다.



그림 18 산성 배양액에 침적한 광촉매 세라믹 코팅 필터의
광촉매 성능 변화 시험

2. 공기 중 노출에 의한 광촉매 필터 성능 지속성

그림 19는 1차년에 구성된 기본 시스템의 광촉매 필터를 1년간 공기 중에 방치하여 신품 광촉매 필터와 살균 성능을 비교하여 광촉매 지속성을 검증하였다.



그림 19 공기중 노출에 의한 광촉매 필터 성능 변화 시험

현재 신품 광촉매 필터와 공기 중에 2년간 노출 시킨 필터는 서로 성능에 유의차를 나타내지 않았으며, 지금까지의 필터의 표면 형상이나 성능의 변화로 미루어 보아 공기 중 노출에 의한 광촉매 필터의 성능에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

3. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 성능의 지속성 향상 기술 개발

가시광 응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 필터를 배양액의 pH로 인한 광촉매 성능 및 강도성능 변화를 고려하여 지속성이 향상된 필터의 규격 및 광촉매 코팅방법 등의 개선을 시도하였다. 시험 결과 필터는 알칼리에는 광촉매 성능 및 강도에 변화가 없었지만 전술한 바와 같이 pH 2.0의 강산에 1년 정도 침적할 경우 세라믹 모재 필터는 부스러지는 등 필터 형상 및 강도에 문제가 있어 지속성에 문제가 있다고 판단되었다. 그러나 실제 배양액의 경우 pH가 2.0 정도인 경우는 식물의 재배를 할 수 없기 때문에 pH 4.0에서는 광촉매 성능 및 강도에 문제가 없었던 점을 고려하면 지속성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

그러나 광촉매 필터의 취급상 부러지는 등 강도의 보강이 요구되었으며, 보다 살균 성능이 우수한 필터를 개발하기 위하여 필터 규격, 산화티탄 코팅방법 등에 대한 검토를 하였다.

가. 광촉매 코팅 필터의 규격 및 코팅 방법 개선

가시광 응답형 산화티탄 광촉매 코팅 필터는 표 10과 같이 300×300mm 크기에 두께를 요인시험에 사용한 13mm를 20mm로 개선하여 광촉매 성능과 강도의 개선을 시도하였다. 기공율은 15ppi의 Porous형태의 세라믹(SiC, Al₂O₃의 복합세라믹) 모재에 산화티탄(TiO₂) 광촉매 분말을 슬러리화 시켜 스프레이 방식으로 코팅한 후 열처리한 것으로 광촉매 필터 전문 제조회사인 (주)나노에 의뢰하여 제작하였다. 여기서 표 11에서 보는 바와 같이 산화티탄 광촉매 코팅을 3회 스프레이 하여 코팅이 균일하고 두껍게 되도록 하였으며, 이와 같이 코팅하였을 경우 코팅두께는 평균 50 μ m, 최대 400 μ m이하이며, 코팅재의 담지량은 8~10g/plate(코팅전후 무게 비교)로 추정되었다.

이와 같이 광촉매 필터의 두께와 코팅방법을 개선하여 광촉매 성능과 강도의 개선을 시도하였다.

표 10 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 코팅 필터

제품명	NTC-CF	비 고
규 격	300×300×20T mm	두께 보강
형 태	Porous Ceramic	
재 질	SiC, Al ₂ O ₃ 의 복합세라믹 재질	
기공율	15ppi	

표 11 산화티탄(TiO₂) 광촉매 코팅 제원

구 분	TiO ₂ 광촉매 코팅	비 고
코팅 방법	슬러리 스프레이 방식	
주용 성분	TiO ₂ :SiO ₂ = 70:30	에코디바이스(주)
코팅 압력	3~4kg/cm ²	
코팅 면	300×300mm 양면	모재 규격
코팅 두께	평균 50 μ m, 최대 400 μ m이하	
코팅 회수	3회 도포	
담 지 량	8~10g/plate	코팅전후 무게 비교

나. 개선결과

1) 살균성능 향상

전술한 그림 6과 같은 단위 광촉매 필터 살균 성능시험 장치의 처리채널에 가시광 응답형 세라믹필터(기공율 15ppi)를 두께(13mm, 20mm)별로 2매씩을 처리채널에 설치하여 태양광하에서의 살균성능 시험을 실시하여 표 12와 그림 20에 나타냈다.

표와 그림에서 보는 바와 같이 단위 광촉매 필터 시험장치의 처리채널에 필터를 2매씩 설치하여 10회 반복 처리하여 누적 통과필터 매수가 20매인 경우의 균밀도율은 필터두께 13mm에서는 초기 균밀도 112.5개/0.9mm²에서 처리 후 최종 균밀도 25.4개/0.9mm²인 균밀도율 22.6%로 감소하였으며 20mm를 사용한 경우에는 초기 균밀도 122개/0.9mm²에서 처리 후 최종 균밀도 17.9개/0.9mm²인 균밀도율 17.9%로 감소하였다. 필터 두께 13mm에 비하여 두께 20mm가 누적 통과필터 매수 20일 때 7.9%point 살균 성능이 우수하게 나타났다. 이것은 필터의 두께가 두꺼우면 태양광이 필터의 기공을 통하여 내부까지 침투해서 광촉매에 의한 살균 효과가 증가하기 때문으로 판단된다.

표 12 필터 두께 및 누적 통과필터매수별 균밀도 변화 (균밀도 : 개/0.9mm²)

필터 수		누적통과 필터매수					
		처리전	4	8	12	16	20
두께 13 mm	균밀도	112.5	78.9	57.8	46.5	35.8	25.4
	%	100	70.1	51.4	41.3	31.8	22.6
두께 20 mm	균밀도	122.0	77.7	53.4	40.1	28.3	17.9
	%	100	63.7	43.8	32.9	23.2	14.7

주) 태양광하 시험, 균밀도는 10점 측정치의 평균

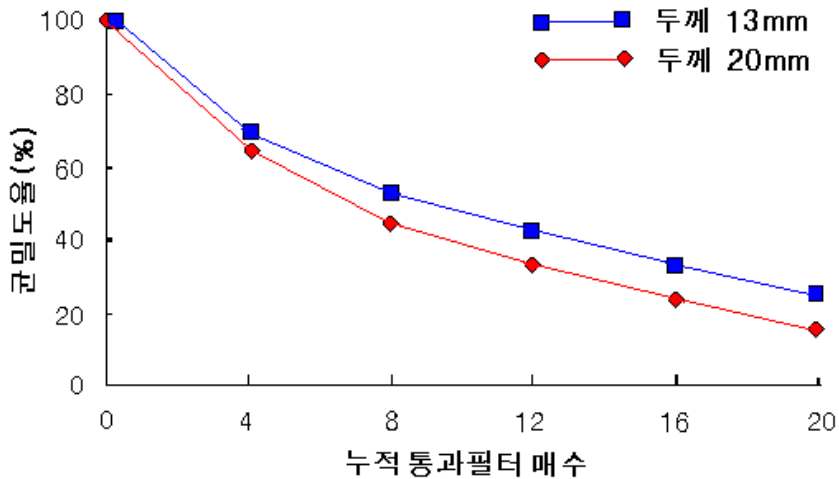


그림 20 필터 두께별 균밀도 변화

2) 강도 향상

세라믹 필터의 종류별 원재료에 대한 압축강도의 실험값을 표 13에 나타내었다. 본 실험에 사용된 세라믹 필터는 크기가 300×300mm², 무게가 8~10g, 두께가 13, 20mm로서 표면적이 넓고 가볍기 때문에 약한 충격에서도 쉽게 파괴되는 경향이 있으며 또한 수분을 포함하게 되면 필터의 강도는 더욱 저하하게 된다. 필터의 적정 강도는 취급 시의 파손을 줄일 수 있기 때문에 경제적인 손실을 최소화 할 수 있다. 따라서 필터의 규격별 강도의 차이를 알아보기 위해서 만능강도시험기(Universal Tester, KSC-4MV)를 이용하여 압축강도를 측정하여 비교하였다. 두께별 압축강도는 필터

두께 20mm가 13mm의 필터 보다 60~70(kgf/cm²)정도 높게 나타났으며, 기공율에 따른 압축강도는 40ppi가 15ppi의 필터에 비해서 약 10kgf/cm² 높게 나타났지만 유의차 범위 내에 있었다.

표 13 세라믹 필터의 압축강도

규 격(mm)	기공율(ppi)	압축강도(kgf/cm ²)
300×300×20T(±1.5)	15	300~310
	40	315~325
300×300×13T(±1.5)	15	240~250
	40	250~255

이상의 결과에서 광촉매 필터는 살균 성능과 강도 면을 고려하여 두께를 20mm 정도로 하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

제4절 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의 살균 및 정화 시스템 모델 개발

가. 시스템 구성

가시광 응답형 산화티탄에 의한 배양액의 살균 및 정화 시스템 개발에 있어서 그림 21과 같이 수경재배 고품배지에 배양액을 급액하여 배액을 흘려보내는 비순환 시스템의 배액을 살균 및 정화 처리하여 재이용하는 것을 목표로 하였다. 이 때 처리한 배액을 급액탱크에 섞어 넣지 않고 별개의 라인을 통하여 급액에 이용하는 것으로 구성한 것이 특징이다. 이것은 일본 치바농업총합시험장의 우다가와 등의 연구결과에서 얻어진 바와 같이 하루 급액 중 가장 최종 급액 시간인 오후 4시경의 급액에 이용함으로써 비료성분의 언밸런스를 극복하도록 구성한 것이다.

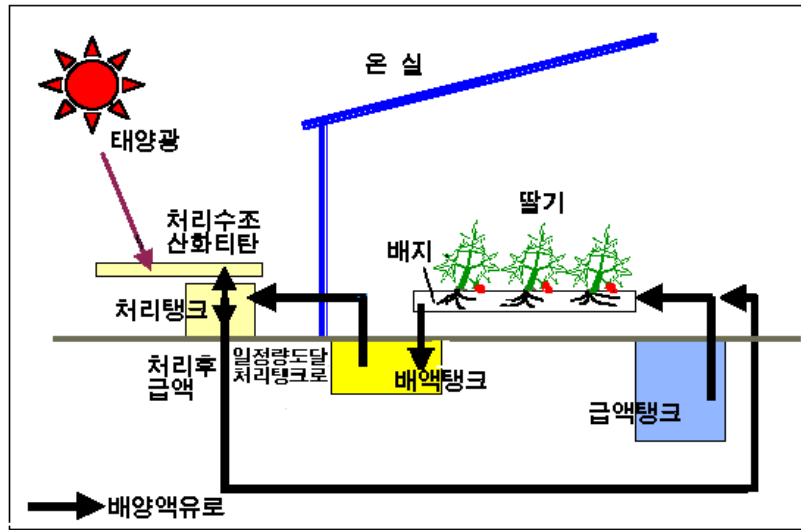


그림 21 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 및 정화 시스템 도입을 위한 수정 시스템의 급액라인 구성

나. 설계 및 제작

가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 살균 및 정화를 위한 시스템의 모델은 요 인시험과 시스템의 지속성 향상 등의 결과를 고려하여 광촉매 코팅 필터는 두께 20 mm의 필터(300×300×20mm) 20매를 사용하여 구성하였다. 그림 22와 같이 광촉매 필터 5매씩을 설치한 처리채널(폭 305mm, 길이 2100mm, 높이 30mm)을 낙차를 두어 4열로 설치하였다. 처리채널 하부에 처리 배양액을 공급하는 200ℓ 용량의 탱크1과 처리한 배양액을 집수하는 200ℓ 용량의 탱크2를 설치하였다. 여기서 탱크용량을 200ℓ로 한 것은 실제 딸기 고설 수경재배에서 1000㎡에 1회의 급액량 이상인 크기의 탱크(200ℓ)를 감안하여 선정한 것이다.

또한 각 탱크 내에는 공급용 수중펌프와 수위계를 그림 23과 같이 탱크 바닥면을 오목(凹)하게 소용량의 잔량부를 구성하여 여기에 수중펌프(그림 24)와 수위센서(그림 25)를 설치함으로써 공급탱크 내 현탁액의 잔량을 최소화 하여 미처리 현탁액이 최소화 되도록 하였다. 즉 이 잔량부에 설치한 수위센서에 의하여 잔량부의 수위가 10mm 이하가 되면 처리 종료를 확인하고 집수탱크의 배양액을 재 순환처리 할 수 있도록 배양액 순환 처리 제어장치에 의하여 공급탱크와 집수탱크가 서로 반대 기능을 하도록 구성하여 반복 처리가 가능하도록 하였다.

배양액 처리 시스템의 공급용 수중펌프에는 밸브를 설치하여 공급유량을 조절할 수 있도록 구성하여 광촉매 필터 위를 흐르는 수위가 2mm 정도가 되도록 조절하였으며, 1000m² 규모의 비순환식 수경시스템으로부터의 배액(급액량의 20~30%)을 처리하여 재이용할 수 있는 시스템을 목표로 구성하였다.

또한 여기서 처리채널 당 5매의 광촉매 필터를 설치하여 4단의 처리채널에 광촉매 필터 총 매수를 20매로 한 것은 1차년 시험결과에서 광촉매 필터 15매의 시스템이 광촉매 필터 1매를 설치한 처리채널의 살균 성능에 15배가 될 것으로 상정하여 시스템을 설계 제작하였으나, 실제 성능시험에서는 1조의 처리채널에 광촉매 필터 5매씩 3단으로 구성하여 총 15매의 광촉매 필터로 구성된 시스템이 광촉매 1매의 성능에 비하여 15배의 성능에 미달한 결과를 나타내었으므로 이를 보완하기 위하여 1개 처리채널, 즉 5매의 광촉매 필터를 추가하여 구성한 것이다.

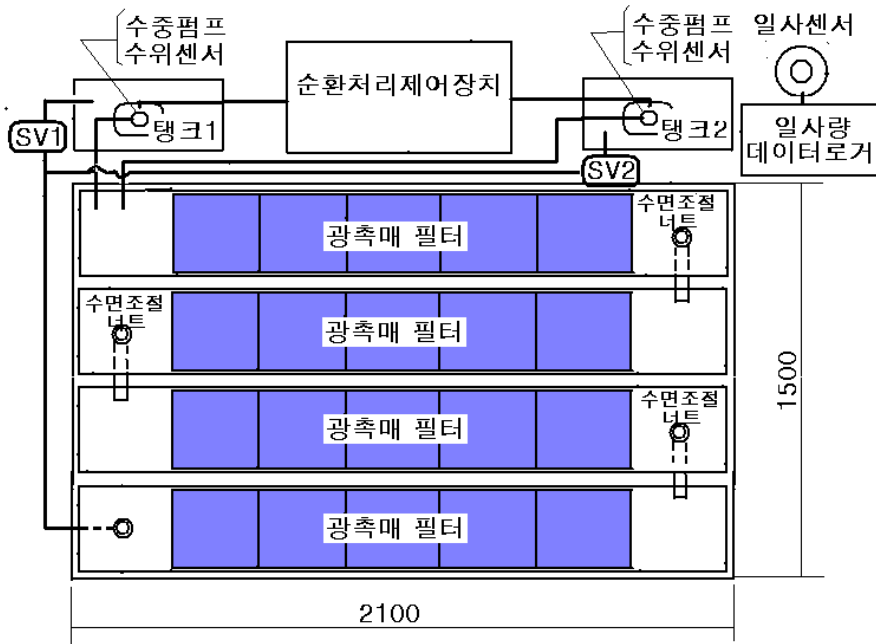


그림 22 가시광응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 및 정화 시스템 구성도

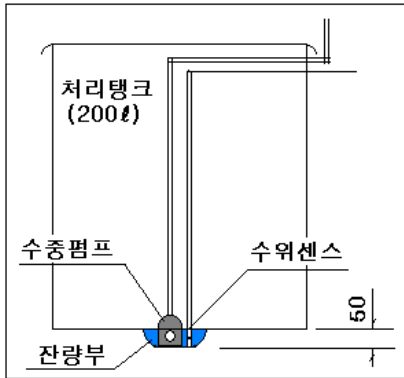


그림 23 집수 및 처리탱크 바닥면에 설치한 잔량부, 수중펌프 및 수위센서 위치



그림 24 소형 수중펌프



그림 25 수위센서의 구조

그림 26은 실제로 설계 제작한 산화티탄 광촉매에 의한 배양액의 살균 및 정화 시스템 모델의 시작기이다. 그림에서 보는 바와 같이 광촉매 코팅 필터 5매가 설치된 처리채널 4조를 계단상으로 시스템을 구성하였다. 이러한 시스템을 2조 설치하여 동일한 광조건에서 2처리의 시험을 동시에 할 수 있도록 구성하였다.



그림 26 가시광응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 및 정화 시스템 모델

가시광응답형 광촉매 필터의 살균 성능은 일사량에 영향을 크게 받기 때문에 그림 27에서 보는 바와 같은 일사량 센서를 시스템에 설치하여 10분 간격으로 측정된 데이터를 연속 저장하였다.



그림 27 일사센서 설치 및 데이터 로거

다. 배양액 순환처리 제어 시스템

개발한 가시광응답형 산화티탄 광촉매에 의한 배양액 살균 및 정화 시스템 모델을 이용하여 폐 배양액을 정화 및 살균 처리하는데 있어서 배양액을 시스템에 통과 처리시키면 목표로 하는 살균 정화 처리가 될 것으로 기대된다.

그러나 비가 오거나 흐린 날 등 일사량 부족으로 완전한 처리가 이루어지지 못한 경우 1차 처리에서 수집한 배양액을 순환시켜 재처리를 해야 하는 경우가 발생한다. 이런 경우 1차년 연구에서는 수집한 배양액을 집수탱크로부터 수중펌프를 이용하여 다시 처리탱크로 보낸 후 처리탱크로부터 시스템의 최상단 처리채널로 배양액을 흘러 처리하였으나, 본 시스템은 처리 후 흘러나오는 배양액을 2개의 전자밸브를 이용하여 공급탱크와 집수탱크를 서로 기능을 바꾸어 이용할 수 있도록 그림 28의 배양액의 순환처리 제어 흐름도와 동일한 알고리즘의 제어 시스템(그림 29)을 설계 제작하였다.

라. 성능시험

1) 시험방법

시험은 배양한 탄저균 포자를 수돗물에 현탁하여 공급시의 균밀도를 측정 후 수중펌프를 이용하여 유량 1 ℓ/min로 최상단의 처리채널에 공급하여 각단 처리채널의 광촉매 필터 위에 2mm 정도가 되도록 흘러 살균 처리한다. 이 때 각단 처리채널의 말단부 밸브에서 현탁액의 샘플을 채취하고 마지막 처리채널을 통과한 현탁액을 집수탱크에 집수하여 샘플을 채취하여 각단의 처리마다 균밀도를 측정하였다. 집수된 처리 현탁액을 순환처리 하도록 다시 수중펌프를 이용하여 시스템의 최상단 처리채널에 공급하여 각단의 처리채널에 설치된 광촉매 필터 위를 흘러 처리 통과시키는 실험을 반복하여 균밀도의 변화를 조사하였다. 균밀도의 변화 조사는 1회 시험에서 200 ℓ의 탄저균 현탁액을 시스템을 통과 시키는 중 통과한 처리 현탁액을 3회 샘플링하여 각 샘플마다 10점의 샘플을 취하여 각각 광학현미경으로 탄저병균의 포자를 계수하여 균밀도의 변화로서 성능을 평가하였다. 여기서 포자의 계수는 혈구계산기를 이용하였다.

성능시험에서 시스템은 실제 온실에 적용할 수 있도록 태양광에 의한 배양액 살균 및 정화 능력을 평가하기 위하여 야외에 설치하여 태양광 하에서 시험하였다.

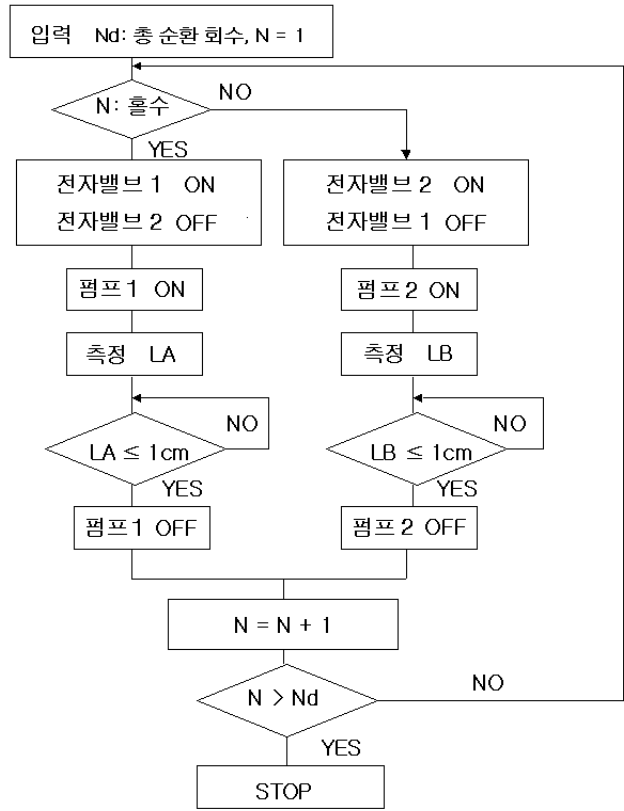


그림 28 배양액 순환처리 제어 흐름도

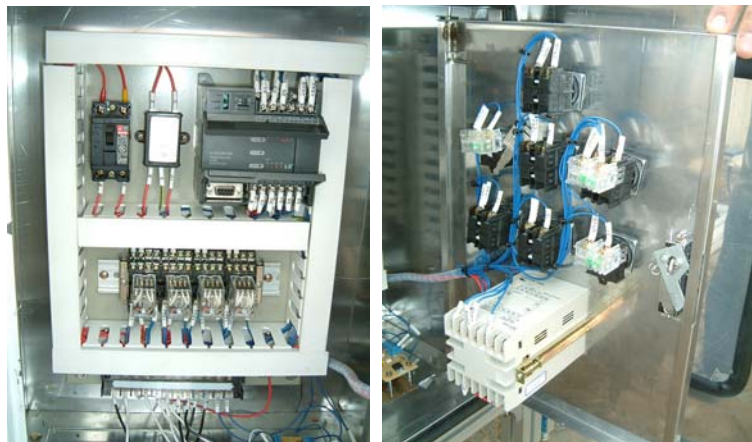


그림 29 배양액 순환처리 제어 시스템

2) 시험결과

가) 1조의 처리채널 내에 설치한 필터매수별 살균성능

전술한 요인시험(그림 12)에서 누적 통과필터 매수가 같을 때 동일한 처리채널에 설치한 광촉매 필터의 매수 많은 것이 살균 성능이 저하한다는 것을 밝혔다. 그러나 실용적 시스템을 구성하는 데 있어서는 시스템의 효율적인 운영과 처리량 등을 고려하여 1매의 필터를 설치한 시스템으로 반복 처리하는 것보다 다수의 필터를 설치하여 연속처리 하는 것이 유리하다고 판단된다.

따라서 그림 30은 요인시험의 결과와 5매의 필터를 설치한 처리채널 4조를 계단상으로 구성된 배양액 살균 및 정화 모델 시스템의 성능을 비교한 것이다. 즉, 요인시험(그림 12)의 결과에서 1조의 처리채널 내에 설치한 필터매수(1매, 2매)와 1조의 처리채널에 5매를 설치하여 4단 연속으로 흘린 시스템의 3가지 처리를 비교한 것이다.

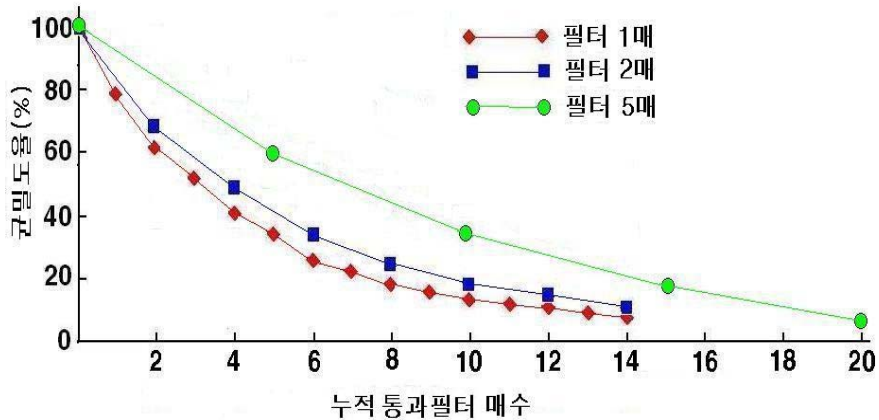


그림 30 동일 처리채널 내에 설치한 필터매수별 균밀도 변화

이것은 실제 시스템 설계에 있어서 배양액의 효율적인 처리를 위한 적정 필터 수와 처리채널 수의 결정에 중요한 설계 인자라고 판단하여 실시한 것이다.

전술한 바와 같이 1조의 처리채널에 광촉매필터 1매를 설치하여 14회 통과 처리하여 누적통과매수 14매인 경우가 1조의 처리채널에 광촉매필터 2매를 설치하여 7회 통과 처리하여 누적통과 매수가 14매로 동일한 경우보다 살균 성능이 우수하였다. 또한 1조의 처리채널에 광촉매 필터 5매를 설치하여 처리채널 4단 연속된 시스템의 누적통과 필터 매수 20매인 경우는 필터 1매의 처리채널에 14회 반복 통과시킨 것과 비슷한 성능을 나타냈다. 따라서 광촉매 필터의 누적 통과처리 매수가 같은 경우, 필

터 1매의 처리채널에 반복하여 여러번 통과 처리하는 경우가 연속된 필터에 한번 통과 처리하는 경우보다 성능이 우수한 것으로 확인되었다. 이것은 통과처리 후 집수하여 다시 시스템에 흘려보낼 경우는 현탁액이 다시 섞여 필터 표면에 접촉할 확률이 높아지기 때문으로 판단된다.

표 14와 그림 31은 누적 통과처리 필터 매수를 20매로 하였을 때 동일 처리채널내 설치 필터 매수에 따른 설균 성능을 비교한 것이다.

표 14 동일 처리채널내에 설치한 필터매수별 균밀도 변화

누적통과 필터매수 구분		처리 전	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			1매	균밀도	90.5	81.8	75.7	69.0	64.1	60.2	56.5	51.6
	%	100	90.4	83.7	76.2	70.8	66.5	62.4	57.0	51.7	46.5	41.3
2매	균밀도	91.2	-	80.4	-	69.4	-	56.6	-	52.7	-	43.5
	%	100	-	88.2	-	76.1	-	62.1	-	57.8	-	47.7
5매	균밀도	90.8	-	-	-	-	69.6	-	-	-	-	41.9
	%	100	-	-	-	-	76.6	-	-	-	-	46.2
통과매수 구분		처리 전	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
			1매	균밀도	90.5	31.7	26.2	22.6	19.1	14.9	11.1	9.1
	%	100	35.0	28.9	25.0	21.1	16.5	12.3	10.1	8.2	7.1	6.2
2매	균밀도	91.2	-	34.6	-	26.2	-	18.0	-	14.3	-	10.8
	%	100	-	37.9	-	28.7	-	19.7	-	15.7	-	11.8
5매	균밀도	90.8	-	-	-	-	32.8	-	-	-	-	24.1
	%	100	-	-	-	-	36.1	-	-	-	-	26.5

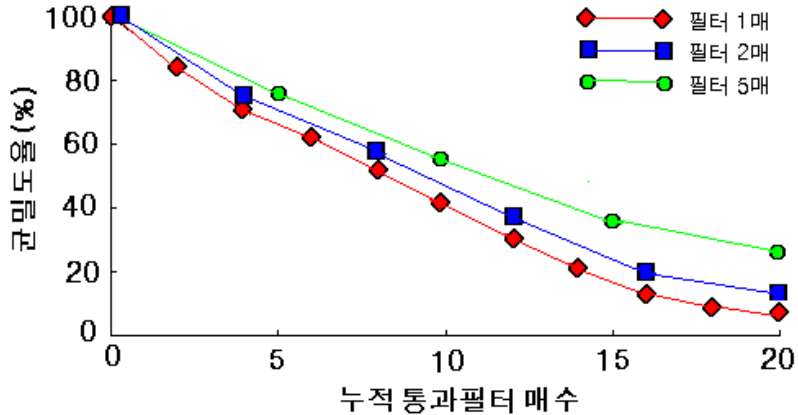


그림 31 동일 처리채널내에 설치한 필터매수별 균밀도 변화

표와 그림에서 보는 바와 같이 1조의 처리채널 내에 1매의 필터를 설치한 단위 처리 시스템을 사용하여 20회 반복 처리하여 누적 처리통과 필터 매수 20매인 경우의 초기 균밀도가 90.5개/0.9mm²에서 처리 후 최종 균밀도는 5.6개/0.9mm²로 탄저균 포자의 균밀도율은 6.2%로 나타나 탄저균 포자가 거의 분해되어 사멸된 상태이다. 또한 1조의 처리채널 내에 2매의 필터를 설치한 경우는 10회 반복 통과 처리하여 누적 통과 처리필터 매수 20매인 경우 초기 균밀도가 91.2개/0.9mm²에서 처리 후 최종 균밀도는 10.8개/0.9mm²로 균밀도율은 11.8%로 나타났다. 한편 배양액을 1조의 처리채널에 광촉매 필터 5매를 설치한 경우는 채널을 4단으로 하여 연속 처리하여 누적 통과 처리필터 매수 20매인 경우는 초기 균밀도가 90.8개/0.9mm²에서 처리 후 최종 균밀도는 24.1개/0.9mm²로 균밀도율은 26.5%를 나타냈다.

이상에서와 같이 누적 통과처리 필터 매수가 같은 경우, 1조의 처리채널에 설치하는 광촉매 필터 1매의 필터에 반복하여 여러 번 통과 처리하는 경우가 연속된 필터에 한번 통과 처리하는 경우보다 성능이 우수한 것으로 확인되었다. 그러나 실제로 시스템을 구성할 경우에는 시스템의 운영과 처리 용량 등을 고려하여야 하기 때문에 여러 매의 필터를 연속하여 통과 처리하는 것이 효율적이라고 판단된다. 따라서 실용적 시스템에서는 연속 통과 처리 시의 성능 저하를 고려하여 설계해야 한다.

나) 처리 배양액의 초기 균밀도에 따른 살균성능

표 15와 그림 32는 단차 두어 설치한 4단 처리채널의 각 단별로 필터 5매씩 총 20

매를 사용하여 배양액의 농도별 누적 통과 필터매수에 따른 균밀도의 변화를 나타낸 것이다.

표 15 농도별 누적통과매수에 따른 균밀도 변화 (균밀도 : 개/0.9mm²)

누적통과 초기 균밀도		필터매수				
		처리전	5	10	15	20
저	균밀도	26.0	15.5	6.3	3.0	2.0
	%	100	59.6	24.4	11.5	7.7
중	균밀도	91.2	59.6	32.3	18.0	12.4
	%	100	65.4	35.4	19.7	13.6
고	균밀도	440.3	332.0	224.6	192.9	139.1
	%	100	75.4	51.0	43.8	31.6

주) 태양광조사, 균밀도는 10점 측정치의 평균

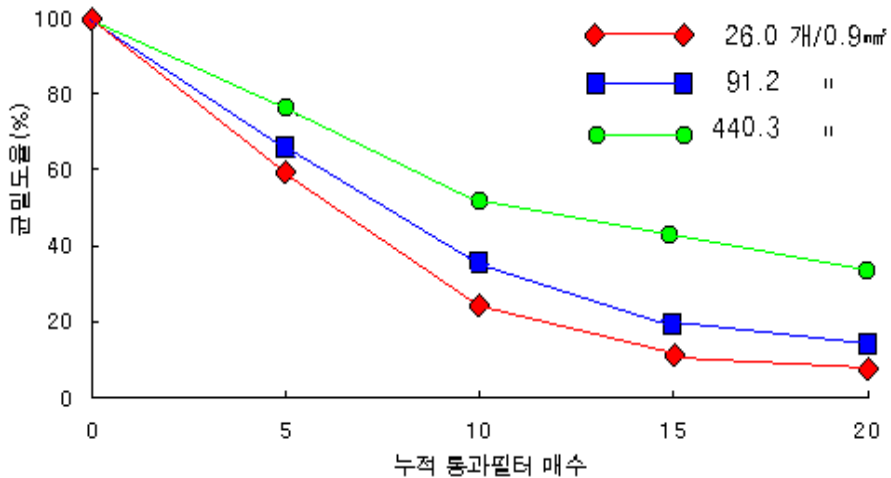


그림 32 초기 균밀도별 균밀도율 변화(기공율 15ppi)

초기 균밀도에 따른 살균성능은 초기 균밀도가 26개/0.9mm²인 낮은 균밀도에서는 처리 후 최종 균밀도가 2.0개/0.9mm²로 균밀도율은 7.7%로 나타났다. 또한 초기 균밀

도가 91.2개/0.9mm³인 중간 정도의 균밀도에서는 처리 후 최종 균밀도가 12.4개/0.9mm³로 균밀도율은 13.6%로 나타났다. 한편 초기 균밀도가 440.3개/0.9mm³로 높은 균밀도에서는 처리 후 최종 균밀도는 139.1개/0.9mm³로 균밀도율은 31.6%로 나타났다. 이와 같이 초기 균밀도가 낮을수록 살균성능이 우수하게 나타났다.

이것은 광촉매에 의한 유기물 분해 성능이 초기 균밀도가 큰 경우가 분해 부하가 크기 때문에 살균에 시간이 소요되어 균밀도의 감소에 시간이 걸려 살균 성능이 감소되는 것으로 판단된다. 따라서 살균 성능은 유기물 총량으로 나타내는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

다) 병원균 종류별 살균성능

광촉매에 의한 살균의 메카니즘은 광촉매에 의하여 유기물이 분해되는 것이다. 모든 세균은 유기물이기 때문에 세균의 종류에 상관없이 분해되어 살균된다. 그러나 세균의 종류에 따라 포자의 크기나 무게가 다르기 때문에 광촉매에 의한 분해의 속도에 차이가 생겨 살균 성능이 다르다고 판단된다.

표 16과 그림 33은 가시광 응답형 광촉매 필터 5매가 설치된 처리채널 4열로 구성된 시스템 즉 총 광촉매 필터 20매를 사용한 살균 시스템을 사용하여 병원균 2종류에 대한 누적 통과필터 매수에 따른 균밀도의 변화를 나타낸 것이다. 시험에 사용된 병원균은 탄저균과 시들음병원균(푸사리움)이다.

살균성능은 시들음병원균이 초기 균밀도 90.5개/0.9mm³에서 처리 후 최종 균밀도 20.6개/0.9mm³인 균밀도율 22.8%로 감소하였으며 탄저균은 초기 균밀도 91.2개/0.9mm³에서 처리 후 최종 균밀도 17.0개/0.9mm³인 균밀도율 18.6%로 감소하였다. 여기서 탄저병원균이 시들음병원균에 비하여 4.2%point 살균성능이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 시들음병원균의 포자가 탄저균 포자에 비해 크기 때문에 광촉매에 의한 유기물 분해속도의 차이에 의한 것으로 판단된다. 이와 같이 광촉매에 의한 살균은 농약과는 달리 균의 크기 즉 무게에 따라 살균 정도가 결정되기 때문에 살균 성능을 유기물 총량의 감소로 나타내는 것이 바람직하다고 판단된다.

표 16 병원균별 누적통과매수에 따른 균밀도의 변화 (균밀도 : 개/0.9mm³)

병원균		누적통과 필터매수				
		처리전	5	10	15	20
시들음병균 (푸사리움)	균밀도	90.5	62.3	43.3	29.1	20.6
	%	100	68.8	47.8	32.1	22.8
탄저균	균밀도	91.2	57.8	28.8	24.4	17.0
	%	100	63.4	31.6	36.7	18.6

주) 태양광조사, 균밀도는 10점 측정치의 평균

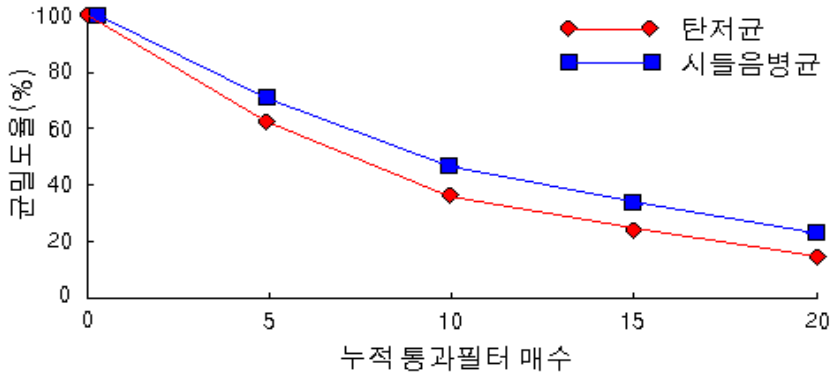


그림 33 병원균 종류별 누적통과매수에 따른 균밀도율의 변화

라) 배양액 처리 유량별 살균성능

표 17과 그림 34는 가시광 응답형 광촉매 필터 5매가 설치된 처리채널 4열로 구성된 시스템 즉 총 광촉매 필터 20매를 사용한 살균 시스템을 사용하여 배양액 처리 유량별 누적 통과필터 매수에 따른 균밀도의 변화를 나타낸 것이다. 배양액 처리 유량별 살균성능은 0.5 l/min의 경우 초기 균밀도가 99.2개/0.9mm³에서 최종 균밀도 11.5개/0.9mm³로 균밀도율은 11.6%로 나타났으며, 처리유량 1.0 l/min에서는 초기 균밀도가 103.2개/0.9mm³에서 처리 후 최종 균밀도 21.3개/0.9mm³로 균밀도율은 20.6%로 나타났다. 이와 같이 배양액 처리유량이 0.5 l/min에서 2배인 1.0 l/min로 증가함에 따라 균밀도율이 9.0%point 증가하여 살균 성능이 저하하였다. 그러나 처리유량별 살균성능은 초기 균밀도, 균의 크기 등에 영향을 받기 때문에 이들 인자를 종합적으로

포함하여 고려하여야 할 것이다.

표 17 처리유량별 균밀도 변화

(균밀도 : 개/0.9mm³)

누적 통과 처리유량		누적 통과 필터매수	처리전	5	10	15	20
0.5 l/min	균밀도		99.2	66.9	38.3	22.5	11.5
	%		100	67.4	38.6	22.7	11.6
1.0 l/min	균밀도		103.2	77.8	49.7	31.86	21.3
	%		100	75.4	48.2	30.8	20.6

주) 태양광조사, 균밀도는 10점 측정치의 평균

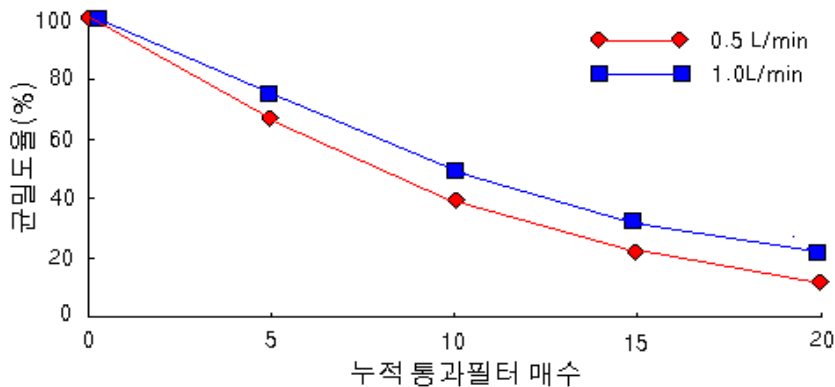


그림 34 배양액 처리 유량별 누적통과매수에 따른 균밀도율의 변화

마) 비닐 피복 하우스 내 시스템 설치에 의한 살균성능 저하

온실 내부에 시스템을 설치했을 때 비닐 등 피복자재에 의한 태양광의 차광에 의한 살균성능의 저하 정도를 알아보기 위하여 전술한 그림 6과 같은 2열의 단위 광촉매 필터 살균 성능시험 장치를 이용하여 실외의 태양광 하에서 살균실험을 수행하였다. 2열 중 1열은 비닐하우스에 상응하는 소형 비닐 덮개를 그림 35와 같이 설치하여 비닐 피복 하우스 내에 설치했을 때의 효과를 나타내도록 하여 덮개를 설치하지 않았을 때와 비교하였다.



그림 35 비닐 피복 하우스 내 시스템 설치 시 살균성능 저하 시험장치

시험은 가시광 응답형 산화티탄 광촉매를 필터(300*300*20mm, 15ppi) 1매를 설치했을 때 비닐을 피복하였을 경우(온실내부)와 설치하지 않은 경우(온실외부)에 대해서 누적 통과필터 매수가 14매가 되도록 탄저균 포자 현탁액을 14회 흘려 처리한 결과를 표 17 및 그림 36에 나타냈으며, 광촉매 필터 2매를 설치했을 때에 대하여 비닐을 피복하였을 경우(온실내부)와 설치하지 않은 경우(온실외부)에 대해서 누적 통과필터 매수가 20매가 되도록 탄저균 포자 현탁액을 10회 흘려 처리한 결과를 표 18 및 그림 37에 나타냈다.

표 18 및 그림 36에서 보는 바와 같이 시스템을 실외에 설치하여 태양광을 직접 받았을 경우에 비하여 비닐 피복한 하우스 내에 설치하였을 경우에 해당하는 비닐 덮개를 설치했을 경우에는 누적 통과필터 매수가 14매에서 초기 균밀도가 93.3개/0.9mm³에서 처리 후 최종 균밀도는 23.5개/0.9mm³로 균밀도율이 25.2%로 나타났다. 한편 온실외부에 해당하는 비닐 미피복인 경우에는 초기 균밀도 97.5개/0.9mm³에서 처리 후 최종 균밀도는 18.2개/0.9mm³로 균밀도율은 18.7%로 나타났다. 이와 같이 비닐 피복에 의하여 살균성능이 6.5%point 저하하였다. 따라서 온실 내부에 시스템을 설치할 경우에는 이와 같은 살균성능의 저하를 고려하여야 한다.

표 18 비닐 피복에 의한 균밀도 변화 (균밀도 : 개/0.9mm²)

구분 \ 처리횟수		처리전	2	4	6	8	10	12	14
		1매	비닐 피복	93.3	72.1	58.1	50.1	44.5	36.9
100	77.3			62.3	53.7	47.7	39.5	33.4	25.2
비닐 미피복	97.5		71.8	56.7	47.0	38.8	31.7	23.5	18.2
	100		73.6	58.2	48.2	39.8	32.5	24.1	18.7

주) 평균일사량 780.4W/m², 균밀도는 10점 측정치의 평균

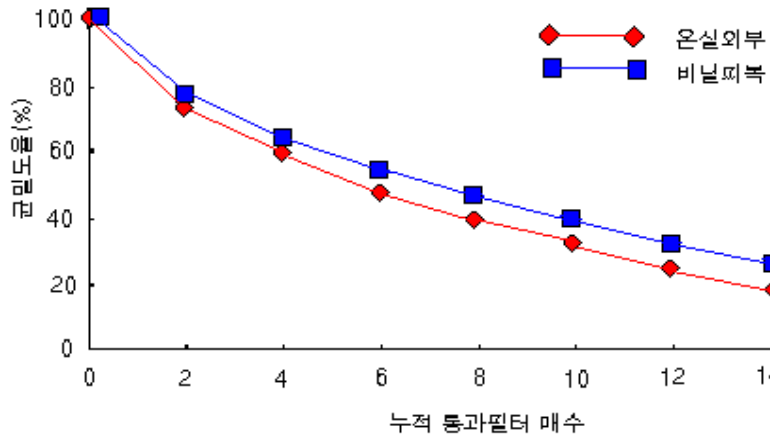


그림 36 온실 내·외부에서의 처리횟수별 균밀도율의 변화

한편 표 19 및 그림 37에서 보는 바와 같이 필터를 2매 설치한 경우에도 시스템을 실외에 설치하여 태양광을 직접 받았을 경우에 비하여 비닐 피복한 하우스 내에 설치하였을 경우에 해당하는 비닐 덮개를 덮었을 경우에 탄저균 포자 현탁액을 10회 흘려, 누적 통과필터 매수 20매 될 때까지 균밀도율의 변화를 나타냈다. 누적 통과필터 매수가 20인 경우에 균밀도율은 온실내부에 해당하는 비닐 피복한 경우는 22.8%였으며, 온실외부에서는 13.8%였다. 이것은 비닐 피복에 의하여 살균성능이 9.0%point 저하한 것이다.

표 19 온실 내·외부에서의 처리횟수별 균밀도 변화 (균밀도 : 개/0.9mm²)

구분		처리횟수										
		처리전	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2매	비닐 피복	91.8	72.6	65.4	58.4	52.4	46.0	39.8	34.1	28.0	25.0	20.9
		100	79.1	71.2	63.7	57.1	50.1	43.4	37.2	30.5	27.2	22.8
	비닐 미피복	96.4	75.7	60.9	53.2	45.6	40.1	32.6	26.6	21.0	16.6	13.3
		100	78.5	63.2	55.2	47.3	41.4	33.8	27.6	21.8	17.2	13.8

주) 평균일사량 922.6W/m², 균밀도는 10점 측정치의 평균

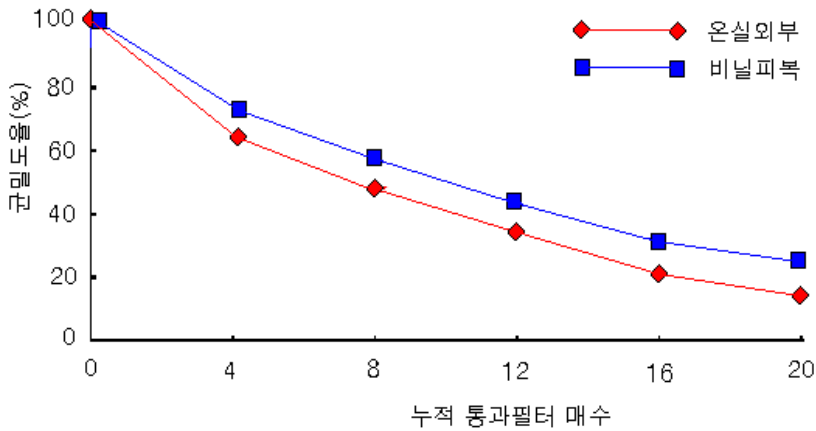


그림 37 온실 내·외부에서의 처리횟수별 균밀도율의 변화

위의 2가지 시험 결과에서와 같이 시스템을 온실외부에 설치하는 것이 살균성능이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 겨울철 배양액이 동결되는 염려 등을 고려하여 온실 내부에 광촉매에 의한 살균 시스템을 설치할 때는 비닐 피복에 의한 살균 성능저하 정도를 고려하여 6~9%point 정도의 성능저하를 반영하여 설계하여야 할 것이다.

바. 일사량에 따른 살균 성능 모델화

그림 38은 탄저균을 기준으로 하루의 시스템 운전 시간동안 평균일사량과 「단위 균밀도저하율 강도」와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 「단위 균밀도저하율 강도」는 처리필터 1매당 균밀도저하율을 초기 균밀도로 나눈 값에 1000배하여 나타낸 값이다. 이 「단위 균밀도저하율 강도」의 계산은 살균 시험에서 최종 균밀도 저하

율(초기균밀도에서 최종균밀도로 저하한 비율)을 누적필터매수로 나누어 1매당 균밀도저하율을 구하고 다시 초기 균밀도로 나누어 산출한 것으로 본 연구에서 처음 도입한 개념이다. 여기서 시스템의 누적 필터 매수와 초기 균밀도 요소를 배제하여 일사량만의 살균 성능을 나타내 모델화 하여 실용화 시스템 설계의 기준을 삼고자 하였다.

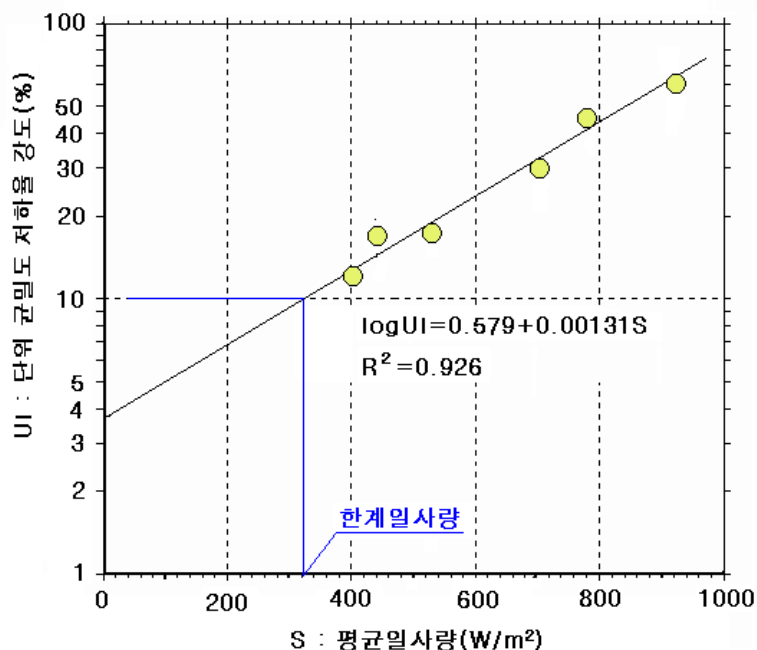


그림 38 일사량과 균밀도와의 관계

그림에서 보는 바와 같이 시스템 살균처리 운전시간 동안의 평균일사량과 「단위 균밀도저하율 강도」와는 고도의 상관관을 나타냈다.

또한 전술한 바와 같이 실제 수경재배 시스템으로부터 배출되는 배양액의 균밀도는 본 연구의 성능시험에 사용한 균밀도의 1/(300~500) 정도이기 때문에 이것을 실제 시스템 설계에 반영 하고자 하며, 살균처리 정도를 일사량 기준으로 나타내어 일사부족에 의한 배양액의 재이용 가능 여부의 기준을 삼고자 하였다. 그림에서 한계 일사량은 온실 내에 시스템을 설치했을 경우의 재이용 가능 한계를 나타내는 일사량을 나타낸 것이다.

제5절 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액 재이용을 위한 살균 및 정화 실용화 시스템 개발

1. 현장 적용 시스템 구성

처리장치는 광촉매 코팅 필터(300×300×20mm) 5매를 설치할 수 있는 처리채널(1.2t 스테인리스, 내부규격 305×2100×40mm) 4조를 단차를 두어 4단으로 탑재한 그림 39와 같은 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 살균 및 정화 처리 시스템을 제작하여 사용하였다. 이 때 각 단의 처리채널은 프레임에 고정하였으며, 고정장치는 수평을 조절할 수 있도록 구성하였다. 처리탱크는 용량 200ℓ의 스테인리스 원통형으로 하고, 배액탱크도 200ℓ의 스테인리스의 원통형 탱크로 하였다.

현장 시험장치의 설치는 그림 40과 같이 딸기 고설수경 재배 시스템(베드 길이 10m 2열)에 적용할 수 있도록 구성하였으며, 경북대학교 구내 온실에 설치한 딸기 고설수경재배 시스템에 적용하여 성능 및 적응성을 검토하였다. 또한 농가 적용시험을 위하여 경남 산청의 고설 수경재배 딸기 온실(베드 80m 2열)에 같은 시스템을 설치하였다.

광촉매 처리시스템을 딸기 고설수경재배 비닐하우스 내에 설치하고, 고설 딸기재배 베드(80m 2열)에서 흘러나오는 사용한 배양액의 배액을 그림 41과 같이 집수탱크를 설치하여 그림 40과 같이 광촉매 살균 처리 시스템과 연결하여 처리한 후 재이용하는 시스템을 구성하였다.

여기서 신선 배양액 공급 장치는 농가의 고설 딸기재배에 사용하는 급액 장치를 그대로 이용하도록 하였다.



그림 39 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 살균 정화 시스템
(산청 딸기 고설 수경재배 온실내)

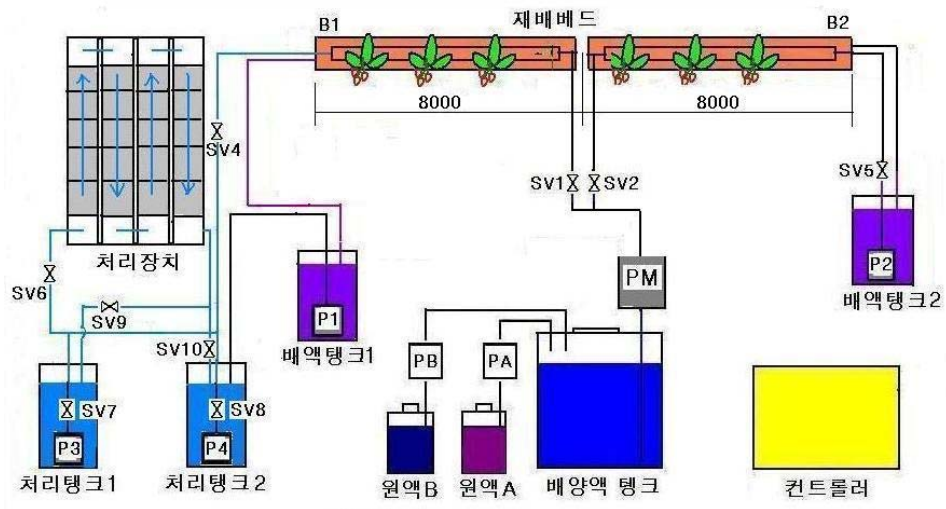


그림 40 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 살균 정화 시스템
농가 적용시험 구성도



그림 41 딸기 고설수경재배 베드로부터의 폐 배양액 수집탱크

시스템 처리용 펌프는 소형 수중펌프(1:5 ℓ/min) 4대(P1~P4)를 사용하였으며, 급액용 펌프는 그림 42와 같이 중형의 수중펌프로 배출구경 20mm, 양정 7m, 양수량 80 ℓ/min이며, 전원은 단상 220V, 230W이다. 이 때 처리탱크 내 배양액의 수위가 5 cm이하로 떨어지면 급액펌프를 정지시키는 시점을 판단하기 위하여 그림과 같이 플로트 스위치를 사용하였다.



그림 42 급액용 중형 수중펌프 및 플로트 스위치

여기서 광촉매 처리의 효과를 비교하기 위하여 처리하지 않은 배액을 급액하는 시스템과 배액을 재이용하지 않고 시스템 외부로 흘려버리는 비순환 시스템을 비교의 대상으로 하였다.

2. 제어장치

제어 시스템은 그림 43에 나타낸 바와 같은 흐름의 알고리즘으로 그림 44와 같이 하드웨어를 구성하였다. 하드웨어는 기본적으로 PLC(K7M-DR30S)를 주체로 3개의 타이머를 사용하여 시퀀스적으로 제어 되도록 하였다. 작동기로서 수중펌프, 솔레노이드 밸브 및 구동용 릴레이로서 구성하였다.

제어 프로그램 리스트는 그림 45(1)(2)(3)과 같이 작성하여 이용하였으며, 구성한 하드웨어의 회로도 는 그림 46(1)(2)(3)(4)와 같다.

배양액 살균처리를 위한 제어 시스템의 흐름을 순차적으로 설명하면

1) 시스템의 시작으로 초기 값의 입력과 준비

관수시간(IT1~ITN), 관수지속시간(IDT관수량), 관수회수(IN)를 입력하고 전체 솔레노이드밸브(SV1~SV10)(이후 솔밸브라 함)를 OFF하고 전체 수중펌프(P1~P4)를 OFF한다.

2) 잉여 배양액을 수집한 배액탱크1의 수집배액을 처리조로 이송

현재시간(T)이 오전 7:00가 되면 배드로부터 흘러나온 잉여 배양액을 수집한 배액탱크1 내의 수중펌프 P1을 ON하여 배액탱크1 내 수위(DTL)가 5cm이하로 떨어질 때까지 배양액탱크내의 잉여 배양액을 처리탱크2로 보내고 P1을 OFF하여 송수를 종료한다.

3) 급액(관수)

현재시간(T)이 오전 9:00가 지나 제1차 관수시간(IT1)이 되면 배양액 공급펌프(PM)를 ON, 솔밸브 SV1, SV2, SV3 ON 관수지속시간(IDT)동안 관수한 후 공급펌프(PM)를 OFF하고 N+1을 N으로 하고 ITN을 IT1으로 하여 제2차 관수시간, 제3차 관수시간 . . . 제N-1차 관수까지 관수를 실시한다.

4) 잉여 배양액(폐배양액) 처리

한편 현재시간(T)이 오전 9:00가 지나면 처리탱크2 내의 수증펌프 P4를 ON 하고, 솔밸브6(SV6) ON, 솔밸브7(SV7) OFF, 솔밸브8(SV8) ON, 솔밸브9(SV9) ON, 솔밸브10(SV10) OFF하고 잉여배양액을 처리하고 처리가 끝나면 다시 처리탱크1 내의 수증펌프P3를 ON하고 솔밸브6(SV6) ON, 솔밸브7(SV7) ON, 솔밸브8(SV8) OFF, 솔밸브9(SV9) OFF, 솔밸브10(SV10) ON하여 폐배양액을 처리한다.

5) 처리 배양액 최종 관수

현재시간(T)이 오후 4:00(16:00)가 되면 배액탱크2의 수증펌프(P2) ON, 처리탱크2의 수증펌프(P4) ON하고 솔밸브1(SV1) OFF, 솔밸브2(SV2) OFF, 솔밸브3(SV3) ON, 솔밸브4(SV4) ON, 솔밸브5(SV5) ON하여 탱크 내 배액을 전량 급액하면 하루 일정이 끝나도록 구성하였다.

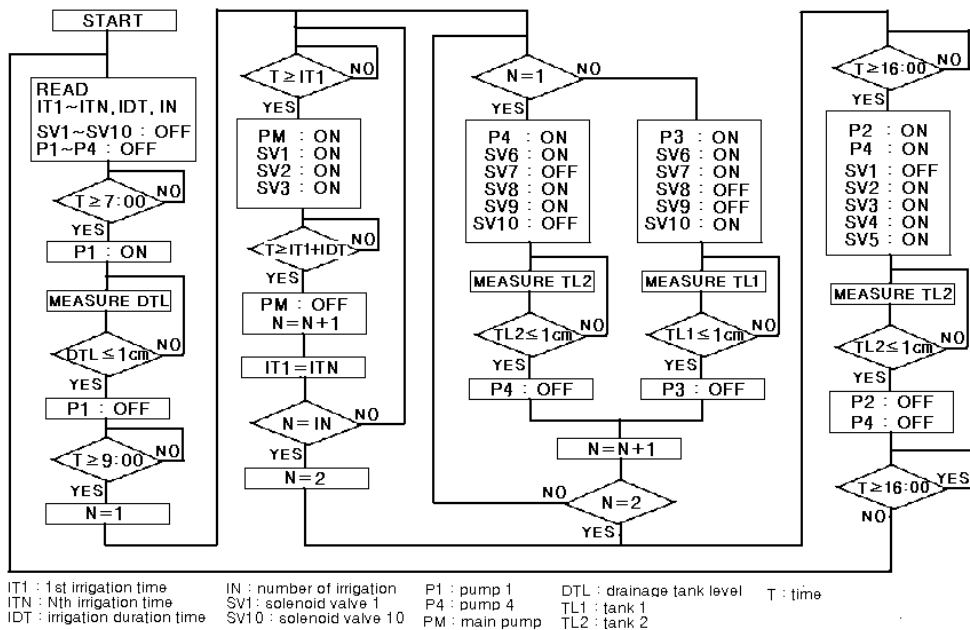


그림 43 가시광 응답형 광측매에 의한 살균 정화 실용화 시스템 제어 흐름도

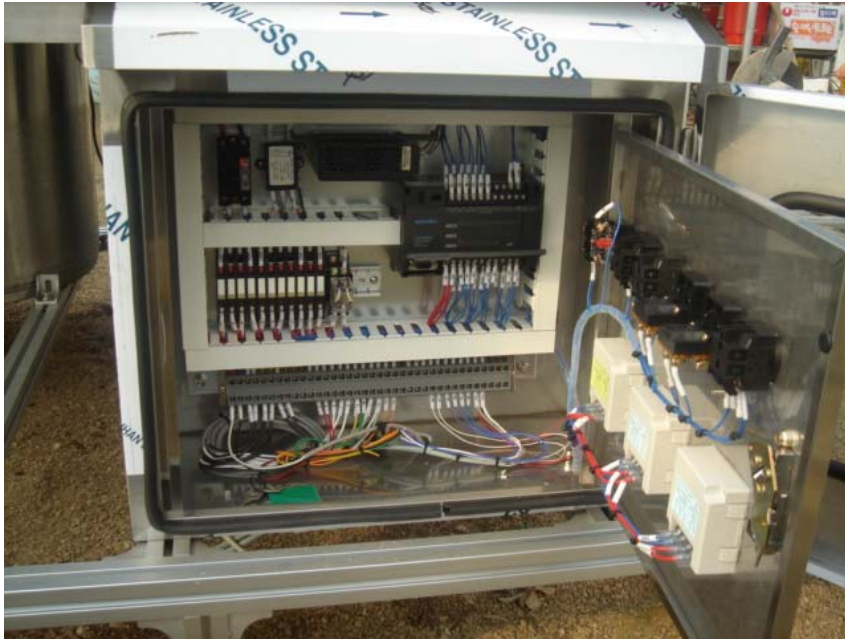


그림 44 살균 정화 실용화 시스템의 살균 처리 제어 시스템

6) 일사량 부족으로 배양액 처리 불량 시의 대응

전술한 바와 같이 비가 오거나 흐린 날 적산일사량이 부족(그림 38의 한계일사량 이하인 경우)하여 만족한 처리가 기대되지 못하여 재급액할 수 없을 때는 잉여 배양액을 방류하도록 하였다. 즉 하루 처리시간 동안 평균일사량이 처리 기준 한계일사량에 미달될 때는 다음날의 처리를 위하여 수집한 잉여배양액을 시스템 외부로 방류되도록 구성하였다.

재급액 여부의 판단은 균밀도를 기준으로 하는 것이 확실하지만 균밀도를 온라인으로 측정하는 센서는 현재의 기술로는 어렵다고 판단되며, 여기서는 처리시간 동안 평균 일사량을 기준으로 한 한계일사량을 도입하였다.

한계일사량 이하의 미처리 배양액은 별도로 수집하여 처리할 수 있도록 시스템을 구성할 수 있지만, 이런 경우 별도의 집수탱크 등 시스템의 구성에 비용이 추가되어 수경배양액의 방류가 법적 규제를 받을 때까지는 방류하도록 하고 규제가 실시되면 집수탱크를 대용량으로 변경하는 등 조치를 취하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

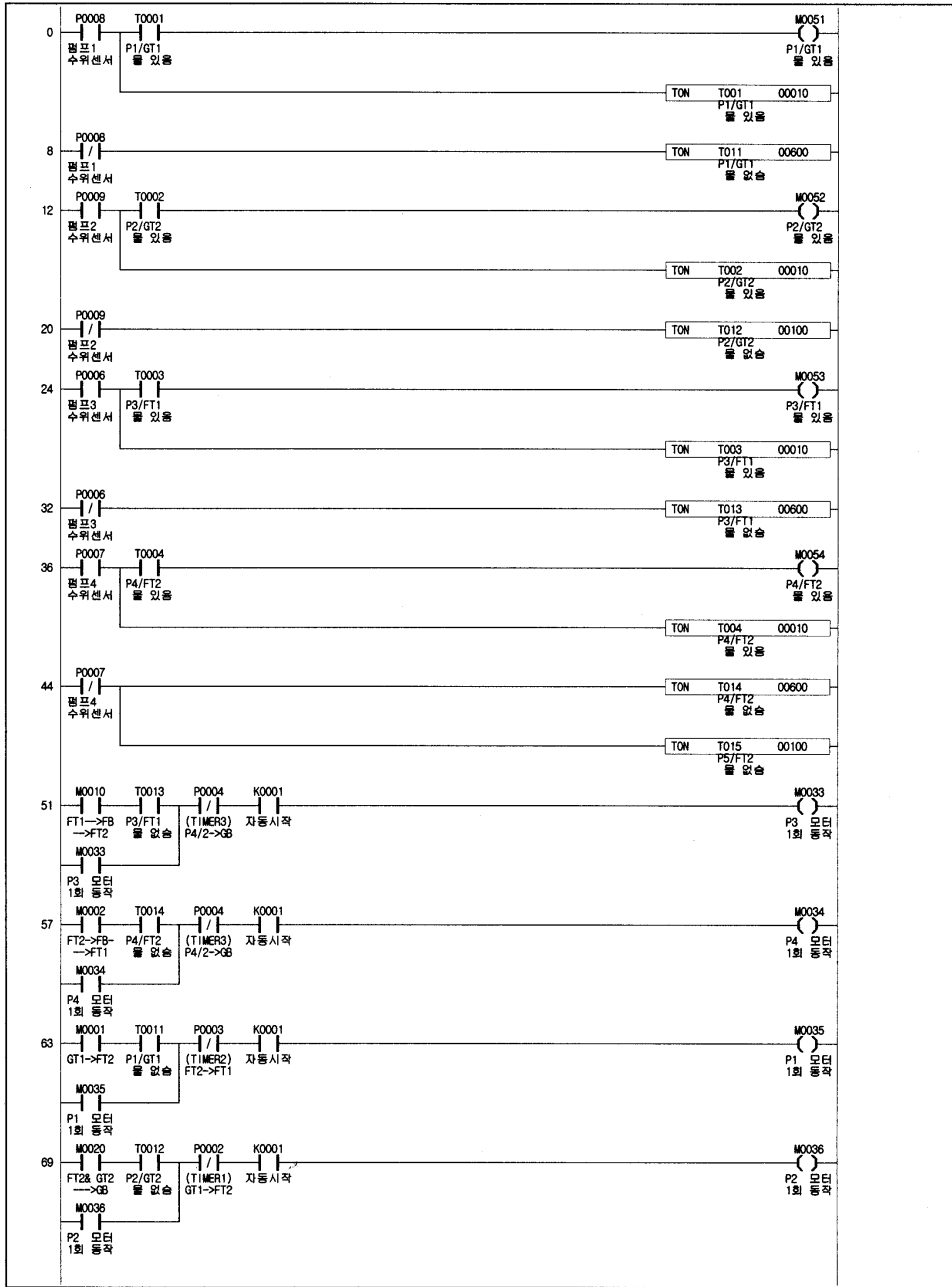


그림 45(1) 가시광 응답형 광축매에 의한 살균 정화 실용화 시스템
구동 프로그램 리스트(1)

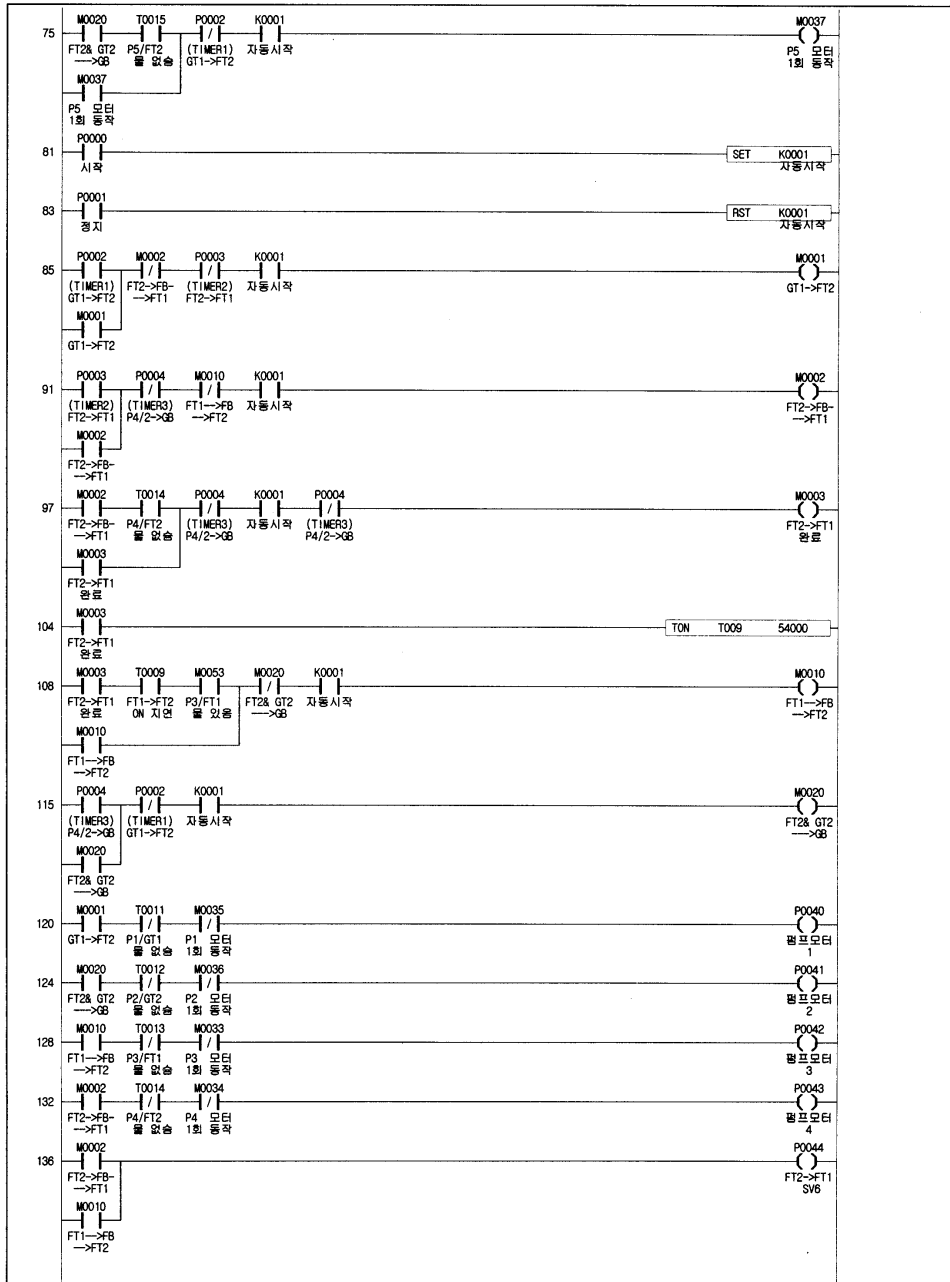


그림 45(2) 가시광 응답형 광축매에 의한 살균 정화 실용화 시스템
구동 프로그램 리스트(2)

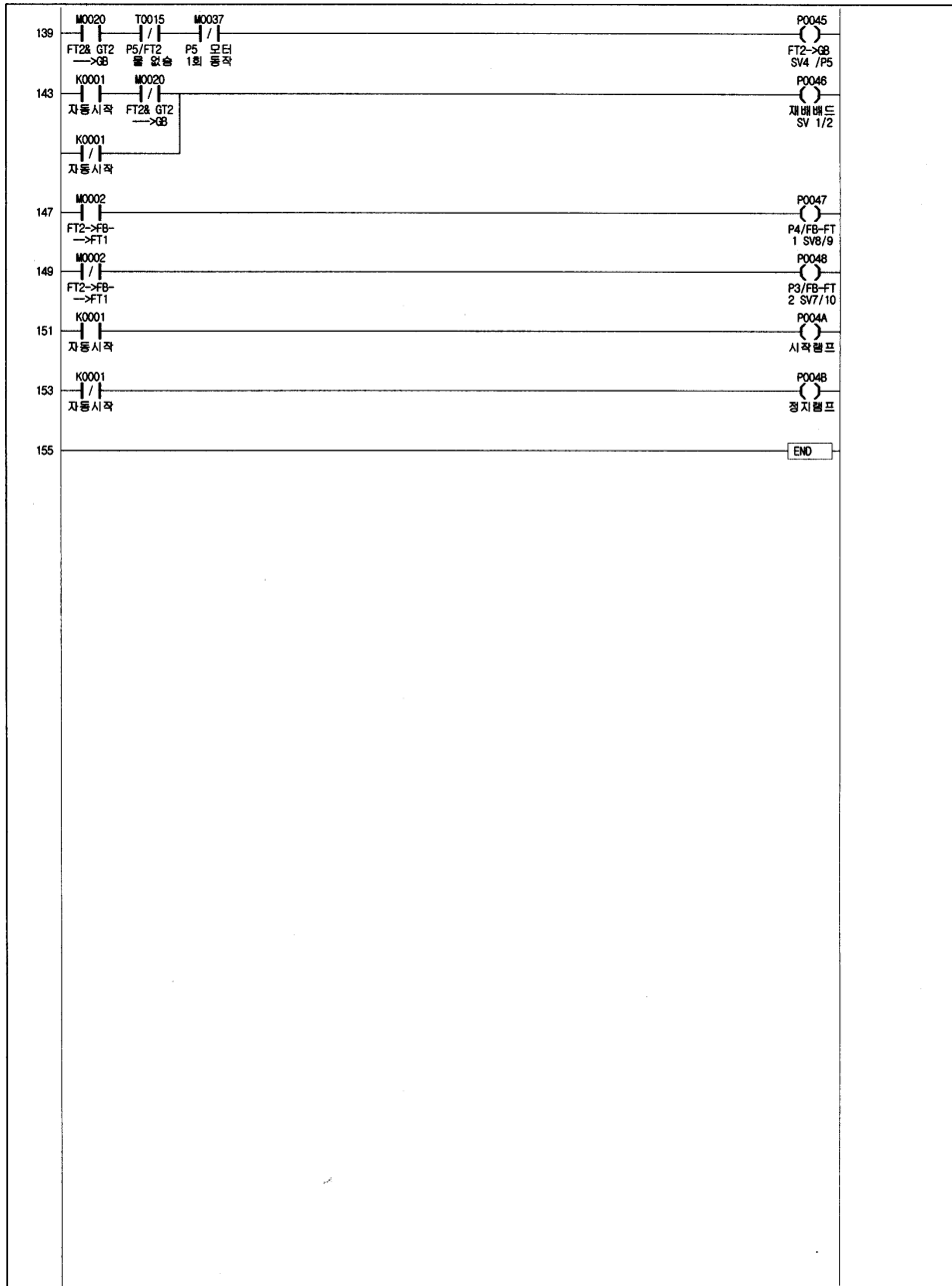


그림 45(3) 가시광 응답형 광축매에 의한 살균 정화 실용화 시스템
구동 프로그램 리스트(3)

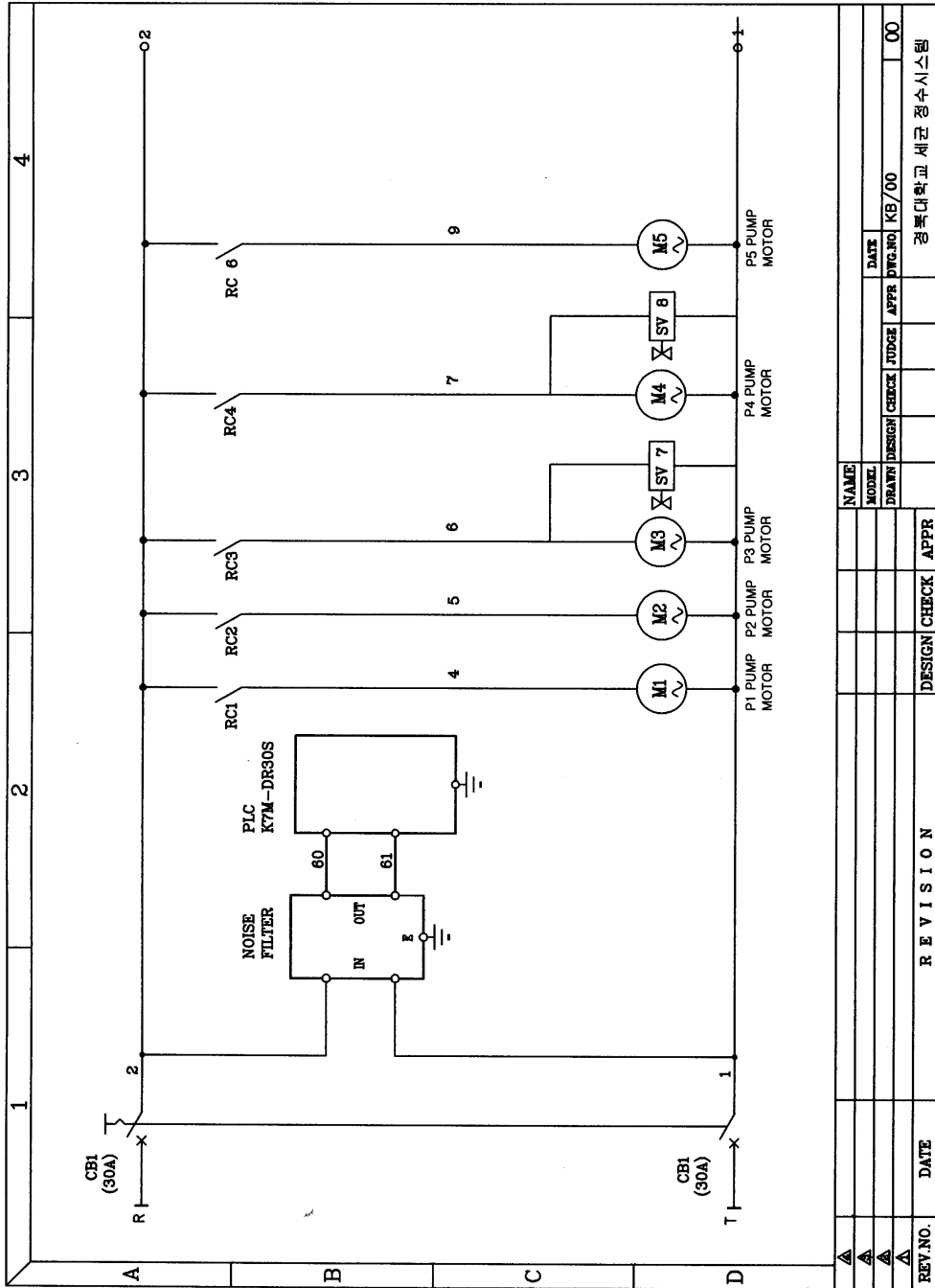


그림 46(1) 가시광 응답형 광측매에 의한 살균 정화 실용화 시스템
구동 전기 회로도(1)

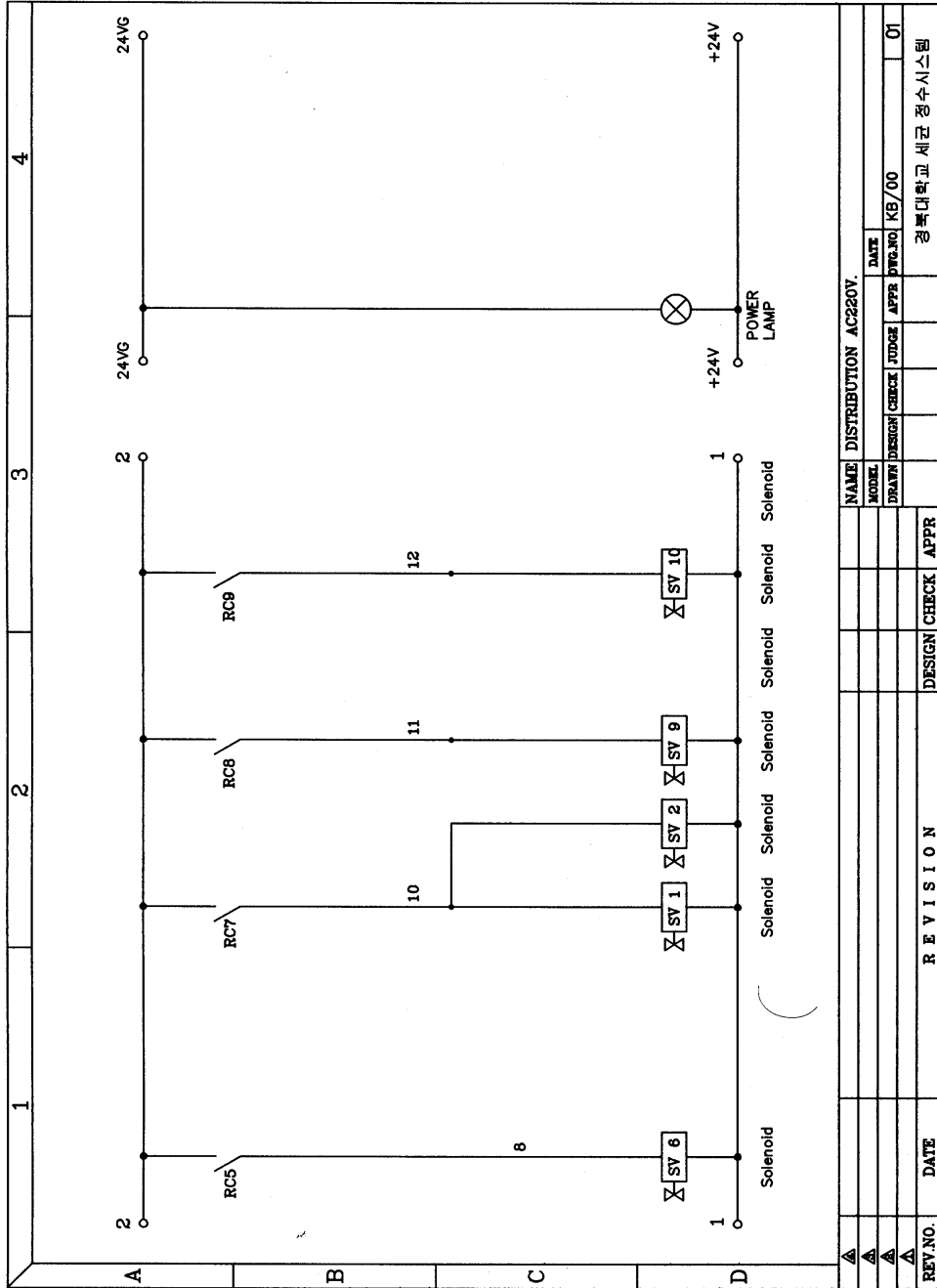


그림 46(2) 가시광 응답형 광축매에 의한 살균 정화 실용화 시스템
구동 전기 회로도(2)

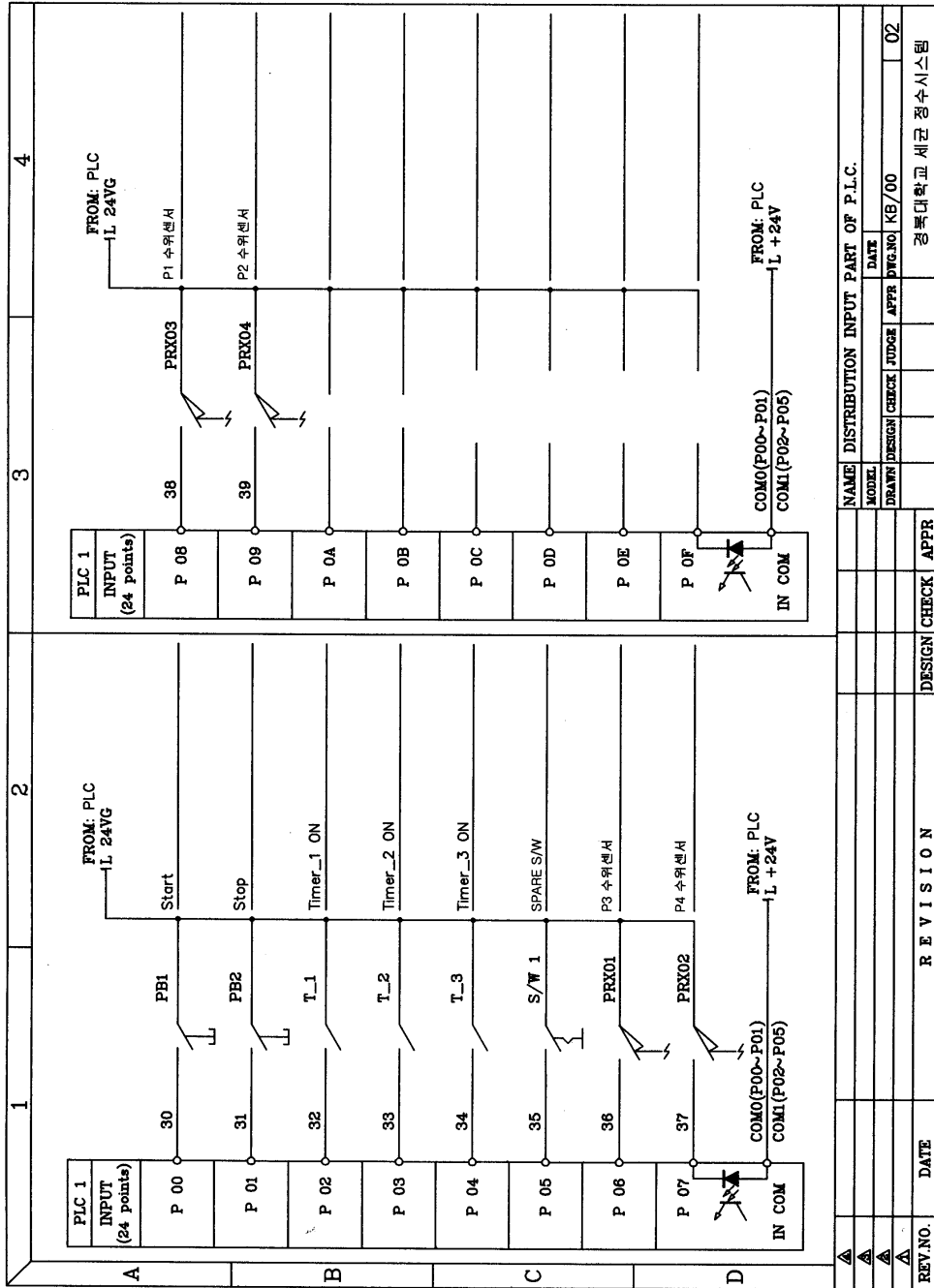


그림 46(3) 가시광 응답형 광축매에 의한 살균 정화 실용화 시스템
구동 전기 회로도(3)

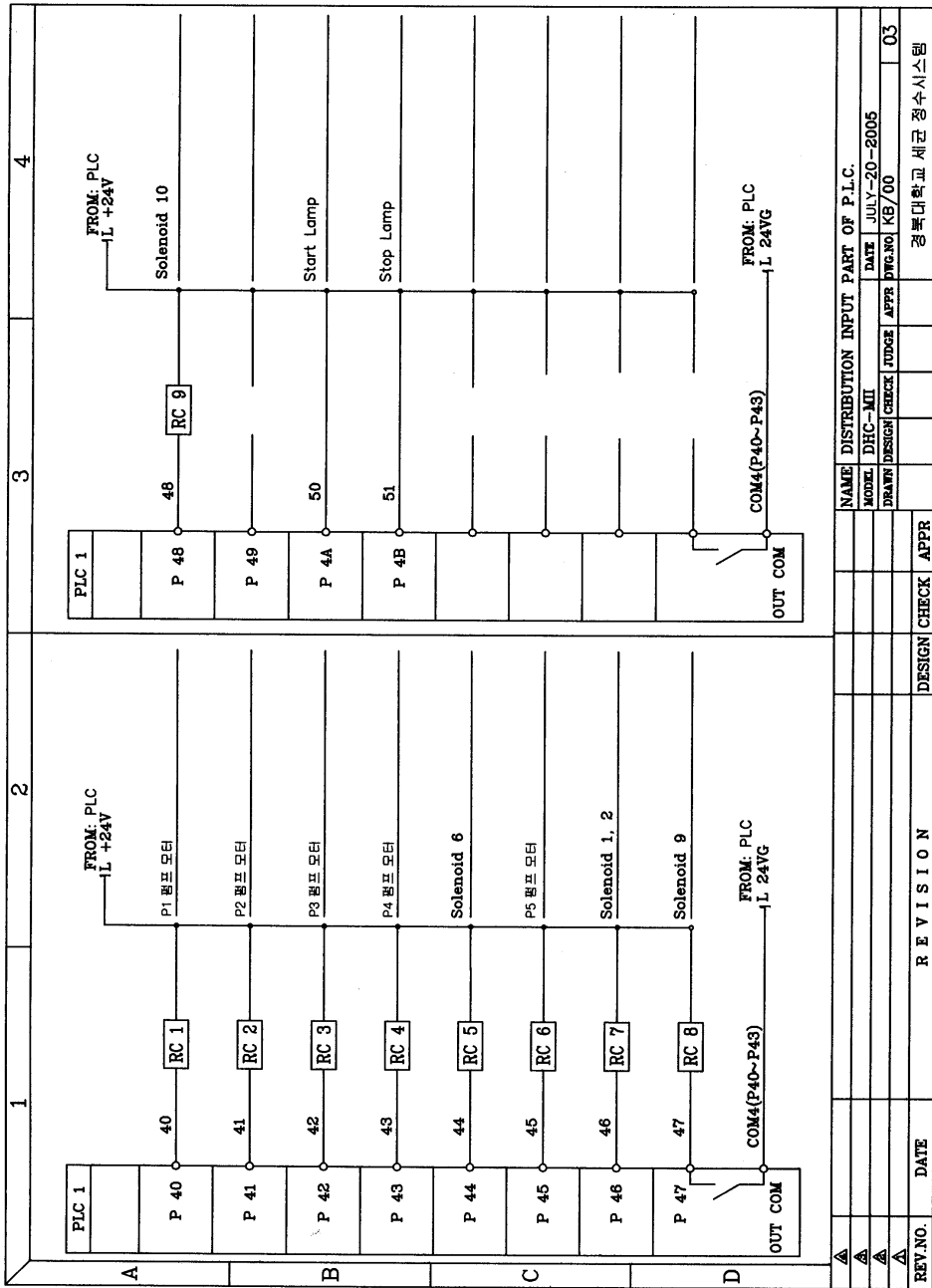


그림 46(4) 가시광 응답형 광축매에 의한 살균 정화 실험용 시스템
구동 전기 회로도(4)

3. 현장 적용시험 결과

가. 경북대 구내 온실

1) 제어성능

시스템이 설정한 알고리즘의 기능을 정상적으로 실행하는가를 검증하기 위하여 1차로 타이머의 현재시간을 수동으로 조작하여 펌프 및 솔레노이드 밸브의 작동을 확인하였으며, 2차로 하루 동안 각 작동기의 작동이 정상적으로 작동됨을 확인하였다.



그림 47 제어성능 시험 광경

2) 광촉매 시스템의 살균성능

시스템의 살균성능을 검증하기 위하여 먼저 시스템을 가동하기 전에 잉여 배양액 (폐배양액)에 들어 있는 세균을 조사하였다. 조사는 배액율을 20% 정도 되도록 급액을 조정하여 흘러나오는 잉여 배양액을 샘플링하여 현미경으로 조사하였으며 발견된 균의 종류와 균밀도는 다음 표 20과 같다. 표에서 보는 바와 같이 조사에서 나타난 균은 탄저균과 잿빛곰팡이병균의 포자가 발견되었다. 조사중 탄저균의 최대 균밀도는 11개/0.05ml 였으며, 잿빛곰팡이병균의 최대 균밀도는 15개/0.05ml로 나타났다.

표 20 딸기 고설수경재배의 폐배양액 균 종류 균밀도(경북대 구내 온실)

균 종류	균 밀도(개/0.05ml)	비 고
탄저균	0~11	10회 조사
젯빛곰팡이병균	0~15	"

시험용 시스템은 베드 3열로 구성하고, 그 중 제1열은 비순환으로 하여 배액을 방류하고, 제2열은 배액을 처리하여 재급액하며, 제3열은 배액을 처리하지 않고 재급액하도록 하여 서로 비교하였다. 여기서 처리후 재급액하는 경우 처리후 급액을 샘플링 하여 균밀도를 조사하였다. 본 성능시험에서는 표 21에서 보는 바와 같이 실제로 배양액에 있는 균밀도가 낮아 발병할 정도가 되지 못하였다. 다만 시스템의 성능은 우수한 것으로 파악되었다.

표 21 딸기 고설수경재배의 폐배양액 세균종류별 균밀도(경북대 구내 온실)

구 분		균 밀도(개/0.05ml)					
		2006 11.08	2007 1.11	2007 1.18	2007 1.25	2007 4.06	2007 4.19
평균 일사량		783.2	436.4	575.3	532.3	780.4	922.6
탄저균	처리전	9.8	7.2	6.8	6.5	2.1	1.7
	처리후	1.7	2.5	1.9	2.1	0.3	0.2
	균밀도 저감율	82.7	65.2	71.1	67.7	88.7	88.2
젯빛곰팡이병균	처리전	13.6	9.7	9.6	8.7	4.5	4.4
	처리후	2.0	2.7	2.8	2.6	0.4	0.3
	균밀도 저감율	85.3	61.9	70.8	70.1	91.1	93.2

주) 처리전 균밀도는 10점 평균

3) 생육 및 수량

딸기는 9월 20일 1열당 100주(2줄심기 주간 20cm)를 전술한 바와 같이 처리별 열씩 정식하여 11월 말부터 수확을 시작하였다. 표 22는 시스템 도입 후의 생육 및 수확량을 나타낸 것이다. 일부 젯빛곰팡이병이 발병했지만 이것은 육묘시 감염된 것으로

로 판단된다.

수확량은 개발된 시스템을 이용하여 폐배양액을 처리하여 급액한 것과 비순환식과는 별 차이가 없어 시스템의 도입 효과 인정되며, 폐배양액을 처리하지 않고 급액할 경우 다소 수량이 떨어졌다.

표 22 생육 및 수량

구 분	생 육	수확량 (kg)			
		12~1월	2~3	3~4	계
처리후 급액	양 호	23.8	31.2	35.4	90.4
무처리 급액	일부 잿빛 곰팡이 발병 미감염주 정상	22.3	28.7	28.1	79.1
비 순환	정 상	24.5	31.3	34.8	90.6

나. 농가 현장 시험

1) 제어성능

농가 시스템도 알고리즘의 기능을 정상적으로 실행하는가를 검증하는 것을 확인한 후 딸기 고설수경재배 시스템에 도입하였다. 그러나 농가의 급액을 배액율이 20~30%되도록 설정하지 않고 10%이하로 잡아 3일간 집수하여 처리하도록 프로그램을 변경하여 3일에 1회 폐배양액을 처리하여 급액하도록 하였다.

2) 광촉매 시스템의 살균성능

시스템의 살균성능을 검증하기 위하여 먼저 시스템을 가동하기 전 잉여배양액(폐배양액)에 들어 있는 세균을 조사하였다. 조사는 급액하여 흘러나오는 잉여배양액을 샘플링하여 현미경으로 조사하였으며 발견된 균의 종류와 균밀도는 다음 표 23과 같다. 표에서 보는 바와 같이 농가 수경베드의 배지가 신규로 설치하여 신선배지를 사용하였기 때문에 균 밀도가 아주 낮았다. 따라서 배양액 중에 탄저균은 가끔씩 보이며 알트나리아 등 부패균이 일부 보이지만 딸기 병해와는 관련이 없는 균으로 무시하였다.

따라서 농가에 설치한 시스템은 살균 성능보다는 시스템의 제어성능에 관심을 두었으며, 시스템은 설치 후 5개월간 정상적인 작동이 되어 제어성능은 우수한 것으로 판단되었다.

표 23 세균 종류 균밀도

구분	균밀도(개/0.05ml)	비고
탄저균	0~2	10회 조사
알트나리아	20	"

3) 생육 및 수량

시스템 설치 농가는 9월 28일 정식하여 수확은 12월 말부터 시작하였으며 5월말까지 수확을 예정하고 있다.

따라서 처리별 생육은 큰 차이를 보이지 않지만 농가의 배수경 시스템은 비순환식으로 그 중 2열만 배액을 집수하여 살균처리한 후 재 급액시킨 베드와 무처리로 재 급액한 것을 비교하였다.

표 24에서 보는 바와 같이 처리후 급액과 비순환은 큰 차이를 보이지 않았으나 무처리 급액은 약간 수량이 떨어졌다. 그러나 본 연구에서 균이 발병하지 않은 상태이지만 비순환 시스템의 배액을 재이용할 수 있다는 것을 확인하였다.

표 24 생육 및 수량

구 분	생 육	수 량 (kg)			
		12~1월	2~3	3~4	계
처리후 급액	양 호	145	273	325	743
무처리 급액	양 호	140	262	312	714
비 순환	양 호	141	285	332	758

3. 경제성 분석

경제성 분석은 농촌진흥청 시험연구결과 경제성 분석방법과 사례를 근거로 하여 분석하였다. 시작기와 전기가열식 배양액살균장치와의 경제성을 분석한 결과를 표 25에 나타냈다.

표에서 보는 바와 같이 연간 이용비용은 시작기는 1,074,122원으로 전기가열식 1,420,625에 비하여 약 13% 비용 절감효과가 있는 것으로 나타났다. 연간 고정비에 영향을 주는 구입 가격이 20% 저렴하여 경제성이 유리하게 나타났다. 그러나 유동비는 개발기가 태양광을 이용하기 때문에 컨트롤러의 전기구동 전력(100W)이 대부분인데 비하여 전기가열식은 컨트롤러를 제외한 전기가열기만의 전기료를 반영하였기 때문에 추후 컨

트롤러에 대한 전기료를 반영하면 더욱 차이가 날 것으로 판단된다.

표 25 경제성 분석

(1000m² 기준, 단위:원)

구 분		개발기	전기가열식
구 입 가 격 (원)		4,000,000	5,000,000
내 구 연 한 (년)		5	5
연간 고정비 (원/년)	감가상각비	684,000	855,000
	수 리 비	216,000	270,000
	이 자	94,400	118,000
	소 계	994,400	1,243,125
연간 유동비 (원/시간)	전 기 료 9~3월(7개월)	552,434	532,539
연간 이용비용(원/년)		1,546,834	1,775,664
지 수(%)		87.1	100

※ 수리비 계수 : 연 6%, 이자율 : 5%

전기료(농업용 병) : 기본료 1,060원+36.1원/kWh(계약전력 10kW)

컨트롤 시스템 전원(200W) : 작기(9월~3월)동안 매일 24시간 사용

PLC 및 릴레이 구동 포함

[결론]

수경재배는 비료성분의 공급과 관리가 정밀하고 토양의 연작장애와 같은 염려가 없는 장점이 있어 점차 그 면적이 증가되고 있다. 그러나 순환식 수경재배에서는 배양액이 전체 베드를 순환하기 때문에 피습이나 푸사리움과 같은 유해세균이 발생할 경우, 배양액의 순환으로 순식간에 전 재배상으로 전염되는 등의 단점이 있다. 또한

비순환식의 경우에는 사용한 배양액을 재처리하거나 정화처리하여 재사용하는 장치가 활용되지 않고 하천에 흘려보내 하천수 오염의 원인이 되고 있어 수경재배에서 배양액을 하천에 흘려보내는 것은 앞으로 규제의 대상이 예상되고 있어 시스템으로부터 흘러나오는 배양액을 살균 정화하여 재이용하는 기술 및 장치개발은 시급한 과제이다.

이에 본 연구에서는 태양광 등 가시광에 응답하는 산화티탄 광촉매를 이용하여 수경재배의 배양액 재이용 살균 및 정화 시스템을 개발하고자 수행하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 분말을 도입하여 필터 모재를 세라믹, 메탈(니켈)로 하고 300×300×13mm 규격의 산화티탄 광촉매를 코팅한 필터를 설계 제작하여 필터 종류별, 광원별 요인시험을 실시한 결과, 필터 종류별 살균성능은 세라믹 모재 필터가 살균 성능이 우수하였다. 또한 가시광응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 세라믹 필터 광촉매의 살균성능은 태양광이 자외광보다 우수하였다.

2. 요인시험에서 얻어진 자료를 토대로 가시광응답형 산화티탄 광촉매 필터 5매를 설치한 처리조를 높이차를 두어 3열로 구성하여 전 산화티탄광촉매 필터 15매를 통과하는 동안 배양액의 살균 및 정화 처리가 되도록 구성한 기본 시스템을 설계 제작하여 실시한 성능시험에서 누적통과 필터 매수가 같은 경우, 소수의 필터에 여러 번 통과시키는 것이 다수의 필터에 동시에 통과시키는 것에 비하여 살균성능은 우수하였다. 그러나 실제 시스템의 설계 시에는 처리용량 등을 고려하여 소수의 필터에 여러 번 반복하여 통과하도록 하는 것보다 연속처리에 의한 성능저하를 고려한 다수의 필터에 연속 통과처리 하도록 구성하는 것이 바람직하다.

3. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 필터를 배양액의 pH로 인한 광촉매성능 및 강도성능 변화를 고려하여 산(pH 2.0, 4.0, 6.0)과 알칼리(pH 8.0) 용액 처리에 의한 지속성시험을 실시하였으며, 세라믹 모재의 필터는 pH 4.0 이상의 용액에서는 1년 정도 침적했을 경우, 광촉매 성능, 강도면에서 문제가 없었으며, 또한 필터는 기공율 15PPI, 필터 두께 20mm, 산화티탄 코팅 3회 등으로 하는 것이 강도, 살균성면에서 우수하였다.

4. 수경 배양액을 효율적으로 살균 및 정화처리 할 수 있는 필터 5매 설치의 처리조 4개를 단차를 두어 4열로 배열하여 배양액이 연속으로 처리되도록 구성한 시스템을 설계 제작하고 각 처리조 단마다의 배양액 살균 정화 성능을 시험하여 모델을 개발하였다.

5. 필터 5매를 연속으로 설치한 처리조 4개를 단차를 두어 4열로 배열하여 구성된 시스템을 딸기 고설수경재배 농가 온실에 설치하여 배출되는 배양액을 처리하여 실용성을 검토하였다. 개발된 시스템은 1,000m²에서 배출되는 배양액을 맑은 날에 3시간 동안에 처리하여 실용성을 확인할 수 있었다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 가시광 응답형 산화티탄의 광촉매 살균 및 정화 요인 구명

○ 가시광 응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 필터의 종류별, 광원별 살균 및 정화 효과 시험을 통하여 광촉매의 살균 및 정화 요인을 구명하였다.

2. 가시광 응답형 산화티탄에 의한 수경재배 배양액의 살균 및 정화 기본 시스템 개발

○ 요인 시험에서 얻어진 자료를 토대로 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 코팅 필터의 특성을 이용하여 배양액의 살균 및 정화 처리의 기본 시스템을 설계 제작하여 성능시험을 통하여 기본 시스템을 개발하였다.

3. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매 성능의 지속성 향상 기술 개발

○ 가시광 응답형 산화티탄 광촉매를 코팅한 필터를 산과 알칼리 용액 처리에 의한 지속성 시험을 실시하여 지속성이 향상된 필터의 규격 및 광촉매 코팅방법 등의 개선을 시도하여 광촉매 필터의 성능과 지속성의 향상 기술을 개발하였다.

4. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의 살균 및 정화 시스템 모델 개발

○ 기본 시스템의 성능시험에서 얻어진 자료를 이용하여 배양액을 효율적으로 살균 및 정화처리 할 수 있는 필터의 매수, 배열방법 등을 산정하여 시스템을 설계 제작하고 성능시험을 통하여 모델을 개발하였다.

5. 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 수경재배 배양액의 재이용을 위한 살균 및 정화 실용화 시스템 개발

○ 딸기 고설수경재배에 적용할 수 있는 실용적인 배양액 살균 및 정화 시스템을 설계 제작하여, 성능시험과 딸기 재배 농가의 실증시험을 통하여 시스템을 개발하였다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

이번 연구에서 도입한 가시광 응답형 산화티탄 광촉매에 의한 처리방법은 수경재배의 배양액 살균 및 정화에 한정되지 않고 농업용 지하수의 처리, 소독 등에 사용된 농약함유 잔액의 처리 등, 농업·축산업 분야에 광범위하게 응용이 가능하다고

생각되며, 친환경 농업·축산업의 실현에 크게 기여할 것으로 기대된다.

현재 특허 출원을 위하여 특허법률사무소에 의하여 작성 중임

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보

제1절 산화티탄 관련 산업 정보 수집

1. 산화티탄 관련 단체 구성
2. 일본 광촉매제품기술협의회

제2절 타 분야의 산화티탄 광촉매 이용

1. 공기정화
2. 수처리
3. 친환경 농업 실현

제 7 장 참고문헌

- 1) 경기도 농업기술원; 1999, 환경보전형 첨단 Recycling 수경재배 시스템 개발, 농촌진흥청, pp5-30
- 2) 노건길, 박권우, 이용범; 1997, 온실작물의 물, 배지, 양분
- 3) 박권우; 1998, 외국의 환경 친화적 관비 및 순환식 수경재배 현황, 한국수경재배 연구회 '98 국제 심포지움 pp6-20

- 4) 박권우, 김영식; 1998, 수경재배, 아카데미
- 5) 이공인 외 4명. 2002. 양액순환재배를 위한 막 제균기술 개발. 한국생물환경조절학회 추계학술대회 학술발표논문집 11(2): 285-288.
- 6) 이기명, 우다가와 유지, 박규식. 2005. 딸기 시설재배의 이론과 실제. 일일사. 대구
- 7) 이인화 외 14명. 1999. 자외선 광촉매 살균장치를 이용한 유리하우스 재배용수 재순환 장치개발. pp136. 농림기술개발사업 연구보고서.
- 8) 전하준, 이기명; 1995. 생력적 및 환경친화적인 딸기의 고설수경재배를 위한 배지 및 시스템 개발, 농림부, pp155-221
- 9) 정순주; 1993, 우리나라 수경재배 현황과 발전 전망, 호남지역 수경재배 발전 전망과 기술적 대응세미나, pp3-70
- 10) 青山博一, 寺田友良, 今井俊夫, 足立和義, 宮田善雄. 1988. 水耕病害防除のためのオゾン紫外線殺菌処理装置の開発と効果試験. 日本植物病理学会報(Ann. Phytopathol. Soc. Japan) 54(3) 412 -413.
- 11) 木曾 皓, 藤村俊彦. 1998. ハウス野菜の病虫害防除. (社)家の光協会
- 12) 草刈眞一. 1992. トマト, キュウリ, カイワレダイコンの養液栽培におけるオゾン水処理について. 施設園藝 34(8): 49-51.
- 13) 草刈眞一. 2006. 最先端の培養液殺菌技術, 施設と園藝134 : 41-45
- 14) 草刈眞一, 中曾根 渡, 岡田清嗣, 川端利昭, 岡村 昭, 円藤英雄. 1992. オゾン水 還流法による養液栽培病害. 日本植物病理学会報 58(1):143(講要).
- 15) 関山 哲雄. 2005. 施設園芸の環境調節と省エネ技術. 農林統計協会. 東京
- 16) 長江春季. 1974. 養液栽培에 있어서 蔬菜 主要病害의 生態와 防除. 農業及園芸 49:1374-1378.
- 17) 長江春季, 田上征夫, 富川 章. 1977. 水耕栽培下における紫外線利用によるキュウリ疫病防除の検討. 日本植物病理学会報 43(3):344(講要).
- 18) 橋本和仁, 藤嶋 昭; 2003, 図解光触媒のすべて, (株)工業調査会, 東京
- 19) 橋本和仁, 入江 寛, 砂田香矢乃. 2004, 室内対応形光触媒への挑戦, (株)工業調査会, 東京
- 20) 伏原 肇. 2004. イチゴの高設栽培. 農山漁村文化協会. 東京
- 21) 藤嶋 昭, 橋本和仁, 渡部俊也. 2003, 光触媒のしくみ, (株)日本実業出版社, 東京
- 22) 深山陽子, 砂田香矢乃. 2002, 太陽光による農業廃液処理, 神奈川県地域結集型共同研究事業2002年度研究成果(橋本グループ)
- 23) 深山陽子, 橋本和仁. 2003, 太陽光と光触媒を用いた養液栽培における培養液の浄化, 農業電化

56(7), pp17-19

- 24) 森田 寿, 手塚信夫. 1986. 養液栽培에 있어서 病害와 対策, 農業及園芸 61:229-235.
- 25) 加藤公彦. 1991. 養液栽培病原菌の侵入と培養液の消毒法. 施設園藝 33(2): 38-41.
- 26) 田中和夫, 馬場勝, 島地英夫. 1992. ロックウールに栽培おける排出液の加熱殺菌による再利用. 生物環境調節30(1): 17-22.
- 27) 三重縣農業技術センター, 郡馬縣農業試験場, 千葉縣農業試験場. 1994. ハイテク利用による養液栽培野菜根部病害の綜合制御技術の開発. pp.120. 三重縣農業技術センター.
- 28) Runia, W. T., E. A. Van Os, and G. J. Bollen. 1995. Disinfection of drainwater from soilless cultures by heat treatment. Neth. Journ. of Agric. Sci. 36:231-238.
- 29) 李公仁. 1999. 養液循環栽培のための電気加熱式養液殺菌装置の開発. 日本農業施設學會大會 78-79.
- 30) Dogo, M., Toyoda, H., Matsuda, K., Bingo, M., Naoki, Y., Kato, Y., Matsuda, Y., Tampo, H., and Ouchi, S. 1997. Control of bacterial wilt of tomato in hydroponic culture by 3-indolepropionic acid and its detoxification in tomato plants. Ann. Phytopathol. Soc. Jpn.
- 31) Fukuoka, M., Ogai, R., Yamaguchi, H., Maruo, T., Shinohara, Y., Usami, T Shishido, M., and Amemiya, Y. 2004. Control of bacterial wilt of tomato by iodine in a hydroponics system. Jpn. J. Phytopathol. 70(3):251.63(5):406-408.
- 32) Kuroda, K., Kohno, M., and Tomikawa, A. 1994. Development of sterilizer with ultraviolet rays and ceramics in hydroponic culture. Ann. Phytopathol. Soc. Japan 60(6):788
- 33) Kusakari, S., Okada, K., Eguchi, S., and Sumi, T. 1994. Control of Pythium root-rot of cucumber by silver coated cloth in hydroponics. Ann. Phytopathol. Soc. Japan 60(6)788-789.
- 34) Kusakari, S. Okada, K., and Kawaradani, M. 1997. Effects of inorganic antimicrobial agents on sterilization of zoospores of *Pythium* sp. type F and protection of root rot disease of mitsuba (japanese hornwort) in hydroponics. Ann. Phytopathol. Soc. Jpn. 63(3):221-222.
- 35) Seki, A. and Atsumi, K. 1999. Efficacy of soluble silver material on control of tomato bacterial wilt at hydroponics culture. Ann. Phytopathol. Soc. Jpn. 65(3):376.
- 36) Beata Wawrzyniak, Antoni Waldemar Morawski, and Beata Traba. 2006. Preparation of TiO₂-Nitrogen-Doped Photocatalyst Active under Visible Light. International Journal of Photoenergy Volume 2006, Article ID 68248, pp1-8

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

