

1) 631.34  
2) 621.5  
L 2930

최 종  
연구보고서

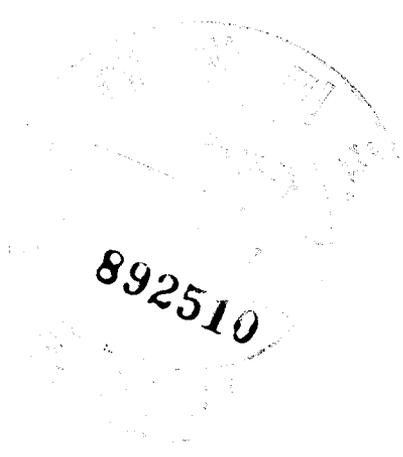
# 온실냉방시스템의 효율적 이용에 관한 연구

## Efficient Application of Greenhouse Cooling Systems

주관연구기관  
서울대학교

협동연구기관  
충남대학교

농 립 부



# 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “온실냉방시스템의 효율적 이용에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2001년 11월 18일

주관연구기관명 : 서울대학교

총괄연구책임자 : 김 문 기

연 구 원 : 김 기 성

협동연구기관명 : 충남대학교

협동연구책임자 : 남 상 운

# 요 약 문

## I. 제 목

온실냉방시스템의 효율적 이용에 관한 연구

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

원예산물의 주년안정생산에 있어 주된 문제는 겨울철의 난방과 여름철의 냉방이다. 지금까지 원예시설에 관한 연구는 1970년대 두 번의 에너지 파동과 국내 IMF 외환 위기 이후 겨울철 온실 난방에너지 절약에 초점을 맞추어 태양열 등의 자연에너지 이용기술 및 대체에너지 개발에 대해서는 여러 연구 성과가 보고되고 있으나 우리 나라 기후 조건을 고려하여 온실의 여름철 고온에 대한 체계적인 연구는 매우 미비한 상태로 일부 연구 결과가 보고되고 있는 실정이다.

우리 나라에서는 여름철에 태양복사에너지량이 연중 최고치로 상승하여 충분한 환기를 실시해도 온실 내기온이 외기온보다 몇 ℃이상 높고, 40℃를 넘어서는 경우도 흔히 발생한다. 이러한 고온 현상으로 인해 많은 자본과 기술이 투자된 현대화 온실에서조차도 작물의 정상적인 생육이 불가능하여 여름철 고온기 휴작으로 인해 시설의 주년 활용도가 떨어지게 된다. 따라서, 온실의 주년이용을 위한 여름철 온실환경의 적정화에 관한 연구는 시설원예 분야의 시급한 당면과제로 대두되고 있다.

온실 냉방은 온실의 주년이용과 고품질 상품 생산을 가능하게 하고, 계획적인 재배와 출하, 강광조건으로 작물의 생육 촉진과 조기수량 증가 및 조

기 출하, 관수 빈도 감소, 노동환경 개선 등의 여러 가지 장점이 있다.

주간의 온실내 기온 상승을 억제하는 수단으로 주로 차광이나 환기 등의 소극적인 방법이 이용되고 있는데, 과도한 차광은 작물의 생육에 제한요인이 될 수도 있으며 환기만으로는 역시 원하는 수준으로 온실내 온도를 떨어뜨릴 수 없다. 최근 온실내 물을 분무하여 물의 기화열을 이용한 증발냉각법을 이용하여 적은 물량으로 높은 냉방 효과를 얻을 수 있다는 연구 보고와 함께 증발냉각장치가 설치되는 사례가 증가하고 있지만 운영면에서 많은 문제점을 안고 있는 실정이다. 따라서, 여름철 온실내 고온 현상을 경제적으로 극복할 수 있는 방안에 대한 연구와 함께 증발냉각시스템의 설계 및 운영에 관한 체계적, 기술적 연구가 필요하다.

### III. 연구개발 내용 및 범위

본 과제는 경제적인 고온극복 방안과 증발냉각시스템의 설계 및 운용에 필요한 구체적인 자료를 제공하기 위하여 수행되었으며, 주요 연구내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

#### 1. 증발냉각시스템의 현장적용기술 개발

##### 1) 증발냉각시스템의 문제점 및 냉방효율 분석

- ① 국내외 온실냉방기술 현황 조사
- ② 증발냉각시스템 설치 온실의 운영실태 조사 및 환경 계측
- ③ 증발냉각시스템의 냉방효율 분석
- ④ 증발냉각시스템의 문제점 분석

2) 포그냉방시스템의 현장적용기술 정립

- ① 포그냉방시스템의 설계 알고리즘 개발
- ② 포그 노즐의 적정 배치 연구
- ③ 포그냉방을 위한 환기시스템 연구
- ④ 포그냉방시스템의 효율 극대화를 위한 연구

3) 포그냉방시스템 이용기술의 체계화 연구

- ① 포그냉방시스템의 현장 검증 실험
- ② 포그냉방시스템의 적용상의 문제점 도출 및 보완 연구
- ③ 포그냉방시스템의 설계 및 운영에 관한 지침 제시

**2. 온실의 경제적 고온극복 방안 연구**

1) 하절기 온실의 활용 실태조사 및 열환경 분석

- ① 하절기 온실활용실태 조사
- ② 하절기 온실의 열환경 분석
- ③ 냉방 및 보조냉방 방법별 고온억제효과 분석

2) 고온극복방안 설정을 위한 기준자료의 구축

- ① 고온극복 설계 제원 결정 알고리즘 개발
- ② 지역별 설계용 기상자료 분석
- ③ 작물별 고온기 재배환경 설정

3) 현장조건에 따른 경제적 고온극복 방안 도출

- ① 이용 가능한 온실의 고온극복방법과 특성 분석
- ② 고온극복 관련자재의 생산현황 조사
- ③ 현장조건에 따른 경제적 고온극복 방안 도출

## IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

### 1. 연구개발 결과

주간의 온실내 기온 상승을 억제하는 수단으로 주로 차광이나 환기 등의 소극적인 방법이 이용되고 있는데, 과도한 차광은 작물의 생육에 제한요인이 될 수도 있으며 환기만으로는 역시 원하는 수준으로 온실내 온도를 떨어뜨릴 수 없다. 최근 온실내 물을 분무하여 물의 기화열을 이용한 증발냉각법을 이용하여 적은 물량으로 높은 냉방 효과를 얻을 수 있다는 연구 보고와 함께 증발냉각장치가 설치되는 사례가 증가하고 있지만 운영면에서 많은 문제점을 안고 있는 실정이다. 따라서, 여름철 온실내 고온 현상을 경제적으로 극복할 수 있는 방안에 대한 연구와 함께 증발냉각시스템의 설계 및 운영에 관한 체계적, 기술적 연구가 필요하다.

본 과제는 경제적인 고온극복 방안과 증발냉각시스템의 설계 및 운용에 필요한 구체적인 자료를 제공하기 위하여 수행되었으며, 세부과제인 「증발냉각시스템의 현장적용기술 개발」과 「온실의 경제적 고온극복 방안 연구」로 구분하여 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

#### 1) 「증발냉각시스템의 현장적용기술 개발」과 관련된 연구개발 결과

① 국내에 증발냉각시스템을 설치한 농가는 전체 29곳으로, 이중 포그 시스템을 설치한 농가는 9곳, 패드앤팬시스템을 설치한 농가는 6곳, 디스크분사식을 설치한 농가는 14곳으로 조사되었다.

② 증발냉각시스템의 활용률을 살펴보면 포그시스템은 33.3%, 패드앤팬시스템은 66.7%, 디스크분사식은 100%로 조사되었다. 포그시스템의 활용

률이 가장 낮아 포그시스템의 분무수량, 노즐 배치, 운영 및 관리에 대한 연구가 시급한 것으로 나타났다.

③ 온실 내부의 온도를 냉방 목표온도로 유지하는데 필요한 분무수량을 결정하기 위해 냉방설계용 기상데이터와 온실(3-1G형) 구조 및 전열특성에 관한 정보를 이용하여 우리 나라 16개 지역의 냉방설계용 VETH선도를 작성하고, 필요 환기회수 및 분무수량을 제시하였다.

④ 차광에 따른 포그냉방온실의 열환경을 분석한 결과, 실험 온실의 온도가 70% 차광하에서는 외기온보다 1.2℃ 높았고, 무차광하에서는 외기온보다 1.3℃ 높았다. 무차광하에서 분무 입자의 증발률이 높기 때문에 70% 차광하에서와 비슷한 수준으로 온실의 온도가 유지된 것으로 판단된다. 따라서, 차광하에서는 분무 입자의 증발률이 떨어져 작물에 부착되는 입자가 많고, 작물 생육이나 환기, 증발률 측면에서 불리하게 작용할 수 있으므로 작물 생육을 고려하여 탄력적으로 차광을 실시하여야 할 것이다.

제습여부에 따른 열환경을 분석한 결과, 실험 온실의 상대습도가 무냉방 온실의 상대습도에 비해 제습한 경우 20.8%, 무제습의 경우 6.2% 높게 나타났다. 따라서, 제습을 함으로써 온실내 분무 입자의 증발률이 높아진 것으로 판단되므로 자연환기가 잘 되지 않는 다연동 온실에서는 포그냉방시 제습장치의 활용도 적극 검토하여야 할 것이다.

환기조건에 따른 열환경을 분석한 결과, 천창만 개방한 경우 무냉방 온실과 온도차가 없었으며, 환기회수가 증가할수록 분무 입자의 증발률이 증가하였으므로 가능한 환기가 원활하게 이루어지도록 해야 할 것이다.

제어방식에 따른 열환경을 분석한 결과, 타임제어를 한 경우는 실험 온실의 습도가 무냉방 온실의 습도보다 6.2% 높았고, 습도제어를 한 경우는 19.2% 높았다. 이는 습도제어를 할 경우 온실 내부의 습도에 따라 분무

량이 조절되어 분무 입자의 증발률이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서, 습도제어가 타임제어에 비해 더 효과적이다.

⑤ 포그냉방온실의 열환경 해석을 위해 개발된 CFD모형을 검증한 결과, 온도의 경우 무차광조건에서는 0.4~4.4%, 차광조건에서는 0.6~4.1%의 오차를 나타냈으며, 상대습도의 경우 무차광조건에서는 0.6~9.6%, 차광조건에서는 1.3~10.6%의 오차를 나타냈다. 따라서, 포그냉방온실의 열환경 해석에 CFD모형을 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

⑥ 분무 입자의 증발률은 온실 내부의 상대습도와 밀접한 관련이 있다. 포그시스템의 냉방효율을 높이기 위해 제습기를 개발하였으며, 제습기의 제습률은 평균 64.6%였다.

⑦ 포그냉방이 작물 생육에 미치는 영향을 분석한 결과, 포그시스템을 가동한 경우  $F_m/F_o$ (최대형광과 초기형광의 비)의 평균은 4.3이었고, 가동하지 않았을 경우  $F_m/F_o$ 의 평균은 3.82였다. 따라서, 냉방을 실시한 경우 작물이 스트레스를 덜 받는 것으로 나타났다.

⑧ 이상의 연구 결과를 토대로 하여 포그시스템의 설계 및 운영에 관한 지침을 제시하였다.

## 2) 「온실의 경제적 고온극복 방안 연구」와 관련된 연구개발 결과

① 온실의 경제적 고온극복 방안의 방향 설정을 위한 기초 자료를 얻기 위하여 하절기 온실의 활용실태를 조사한 결과 유리온실 18.7%, 비닐하우스 24.0%, 전체 21.6%의 시설재배 농가가 휴경하고 있었으며, 나머지 경우도 매우 열악한 환경하에서 재배가 이루어지고 있었고, 고온 극복을 위한 저비용 기술의 개발에 관한 요구가 매우 높았다.

② 냉방 및 보조냉방 처리별 온실의 열환경을 비교 측정된 결과 자연환

기만으로는 74.8%, 지붕살수시 58.2%가 35℃를 초과하여 작물재배가 곤란한 것으로 나타났다. 환기와 차광을 병행할 경우에는 26.9%만 35℃를 초과하는 것으로 나타나 조금만 개선하면 어느 정도의 고온극복은 가능할 것으로 판단되었다. 차광과 증발냉각의 일종인 에어쿨팬의 가동으로 자연환기 온실에 비하여 3.8~4.2℃의 냉방효과를 보였으며, 온실내의 기온을 대부분 35℃ 이내로 유지하는 것이 가능한 것으로 나타났다.

③ 온실의 고온극복 시스템의 설계 제원 결정을 위한 열평형식을 구성하였으며 현장 실험을 통하여 적용성을 검토한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 열평형 모델의 입력변수중 태양복사에 대한 증발산비의 값이 매우 중요하며, 온실의 환기 및 냉방 설계기준을 설정하기 위해서는 여러 가지 작물의 상태에 따른 실측 자료의 축적을 통한 선택의 가이드라인이 제시되어야 할 것으로 판단되었다.

④ 온실의 환경설계에 이용할 수 있는 몇 가지 기상자료의 분석방법과 위험률별 설계값을 비교 검토하고, 온실의 고온극복 설비용량 결정을 위한 설계용 기상자료의 선택 기준을 제시하였다. 주요 시설채소와 화훼의 생육 적정 온도와 최고 한계온도를 지상부와 근권부로 구분하여 분석하고, 작물별 적정 광강도와 여름철 일사량 수준을 분석하여 적정 차광률과 한계 차광률을 구하였다. 그리고 증발냉각, 차광 및 환기와 관련된 자재 생산 현황을 조사하여 온실의 고온극복 설계 기준 자료로 제시하였다.

⑤ 차광과 환기에 의한 고온극복 효과를 분석한 결과 약광 작물을 재배하는 경우에는 대부분 차광과 환기에 의해서 고온극복이 가능한 것으로 나타났다. 중광 작물의 경우에는 적정차광과 강제환기를 도입함으로써 어느 정도 고온 극복이 가능하지만, 차광을 충분히 할 수 없는 강광 작물의 경우에는 외기온 32℃ 이상에서 차광과 환기만으로는 실내온도를 35℃로 유지하는 것이 불가능한 것으로 나타났다.

⑥ 아치형 단동 온실의 지붕환기구조 실태조사 결과 폭 5~8m의 소형 온실에서는 플라스틱으로 제작된 원형환기창을, 폭 12~18m의 대형온실에서는 철재 파이프를 덧붙인 양권취식을 많이 사용하고 있었다. 지붕환기창 설치 온실과 관행의 권취식 측창만 설치된 온실에 대한 대조 실험 결과 비록 적은 면적의 지붕환기창을 설치하였지만 온도하강 1℃ 이상의 천창 환기 효과가 있었으며, 지붕환기를 실시함으로써 온도분포를 보다 균일하게 할 수 있는 것으로 나타났다.

⑦ 지중냉각 시스템의 열전달 실험을 실시하고, 함수비에 따른 지중 열류, 냉각열량에 따른 평균지온의 변화와 냉각 효과를 분석하였다. 일사량과 기온, 지온의 차이 및 토양의 함수비에 따른 지중냉각 부하량을 구하여 설계자료로 제시하였다. 또한 양액냉각과 엽면살수에 따른 수경재배 상추의 엽은 변화와 증산속도 및 흡수속도의 계측 실험을 통하여 근권냉각 효과를 검토하였다. 근권냉각 시스템은 경제적이면서 비교적 효과가 좋은 고온극복 방법으로 판단되었다.

⑧ 온실의 환경 설비 수준과 투자비 수준을 기준으로 고온극복 방안 설정을 위한 현장조건을 5단계로 분류하였다. 또한 이용 가능한 고온극복 설비의 설치 단가를 조사하여 온실의 종류별로 경제적인 고온극복 설비 수준을 기본설비, 적극적인 권장설비, 선택적인 권장설비로 구분하여 제시하였다. 그리고 온실의 경제적인 고온극복 방안으로 자연환기의 극대화 방안, 차광효율의 극대화 방안, 및 고비용 설비의 다목적 활용 방안 등을 제시하였다.

## 2. 활용에 대한 건의

온실의 주년이용을 위한 여름철 온실환경의 적정화에 관한 연구는 시설원

예분야의 시급한 당면과제라 할 수 있다. 현재 국내 농가에서 이용하고 있는 고온극복 수단은 주로 차광이나 환기 등이다. 온실의 냉방방식 중에는 증발냉각법이 가장 효과적인 방법이지만 설치 및 유지비용이 많이 들고 설계, 시공, 유지관리 등에 대한 체계적인 기술이 미비한 실정이다. 또한 비닐 하우스와 같이 시설투자가 많지 않은 경우에 증발냉각시스템과 같은 시설을 설치한다는 것은 거의 불가능한 현실이므로 보다 경제적인 고온극복 방안의 도출이 절실한 실정이다. 따라서, 본 과제는 경제적인 고온극복 방안과 증발냉각시스템의 설계 및 운용에 필요한 구체적인 자료를 제공하기 위하여 수행되었으며, 그 연구 결과를 효율적으로 활용하여 기대효과를 극대화시키기 위한 방안은 다음과 같다.

- 1) 연구 결과 보고서를 관련 기관, 농민단체 또는 개인 수요자에게 배부하여 홍보한다.
- 2) 온실 설계와 직접 관련된 정부산하기관, 시공업체 및 자재생산업체의 관련자를 대상으로 연구 결과를 홍보하고, 의사 결정시 참고자료로 활용할 수 있도록 한다.
- 3) 시설원예에 종사하는 농민들을 대상으로 교육을 실시하여 온실 냉방의 중요성에 대한 인식을 고취시키고, 각종 냉방 설비를 효율적으로 사용할 수 있도록 홍보한다.
- 4) 관련 분야 학술단체의 학술지에 연구 결과를 발표하고, 각종 세미나 및 학술회의에 연구 결과를 발표한다.
- 5) 여름철 온실의 고온현상 극복을 위한 체계적인 연구 추진, 시설원예 농가의 지도에 필요한 기술 개발 등이 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

# SUMMARY

## I . TITLE

**Efficient Application of Greenhouse Cooling Systems**

## II . OBJECTIVES AND NECESSITY

Some of the important problems in whole year consistent production of horticulture products may be heating during the winter and cooling against extreme summer weather conditions. The relevant investigation for greenhouse systems have been conducted since oil shocks in 1970's and IMF crisis in the end of 1990's.

However, the investigation were focused on mainly heating energy reduction ; such as nature energy application techniques and alternative energy development.

Consequently, under Korean summer climate condition the critical high temperature in greenhouse, systematic investigation are limited to incomplete situation.

During summer season in Korea, due to the extreme value of solar radiation energy, the temperature in greenhouse is several degree higher than the outside air temperature; it often reaches over 40°C.

Such a phenomenon of extreme temperature cause a handicap that ever in a of high invested and high-tech oriented greenhouse, crops not

grow properly or may suspend the crop growth temporally.

Therefore, for the purpose of the full operation of greenhouses, the efficient modification of greenhouse environment during the summer season should be studied.

Greenhouse cooling technique is one of the potential way of the efficient utilization of high-tech greenhouse, which give such advantages that : year round operation of greenhouse, production of high quality products, predicted production and marketing, accelerate the crop growth under strong light condition, and the improvement of labor environment, so on.

Even though shading and ventilation techniques are normally applied to reduce greenhouse temperature, excessive shading cause very often trouble the crop growth and ventilation itself is limited technique under extreme temperature condition.

One of most effective cooling techniques is the evaporative cooling method which provide spraying water to obtain cooling the inside air.

There have been many evaporative cooling equipment practically applied, still there many problems solved for further improvement.

The purpose of this investigation was to find some practices to overcome the extremely high temperature during the summer and to make a systematic techniques for designed and operation of most efficient evaporative cooling system.

### III. SCOPES OF THE STUDY

#### 1. Research on Development of Means of Practical Application of Evaporative Cooling Systems

- 1) Analysis of Trouble Points and the Efficiency in Evaporative Cooling Systems
  - ① Investigation of Current Situation of Greenhouse Cooling Systems in Domestic and Foreign
  - ② Investigation of the Actual Operation State of Evaporative Cooling Systems in Greenhouse
  - ③ Analysis of Cooling Efficiency of Evaporative Cooling Systems.
  - ④ Analysis of Trouble Points in Evaporative Cooling Systems
- 2) Setting-up Practical Application Techniques for the Fog Cooling System
  - ① Development of Design Algorithm for Fog Cooling System
  - ② Study on Optimum Distribution of Fog Nozzles
  - ③ Study on Ventilation System for Fog Cooling
  - ④ Study on Maximization of Cooling Efficiency for Fog Cooling System
- 3) Systemization Study on Application Techniques for Fog Cooling System
  - ① In-situ Application Tests for Fog Cooling System
  - ② Study on the Solution to Trouble Points in Practical Application of Fog Cooling System

- ③ Establishment of Guidelines in Design and Operation of Fog Cooling System

## **2. Research on Economical Methods for Overcoming High Temperature in Greenhouses**

- 1) Actual Utilization and Thermal Environment of Greenhouses during Summer Season
  - ① Actual Utilization of Greenhouses during Summer
  - ② Thermal Environment of Greenhouses during Summer
  - ③ Cooling Effect of Several Assistant Cooling Methods
- 2) Construction of Basic Data for Overcoming High Temperature
  - ① Development of Design Algorithm for Overcoming High Temperature
  - ② Analysis of Regional Design Weather Data
  - ③ Growth Environment Conditions of Greenhouse Crops in Hot Season
- 3) Economical Methods for Overcoming High Temperature in Greenhouses
  - ① Feature of Usable Methods for Overcoming High Temperature in Greenhouses
  - ② Survey on Material Related to Overcoming High Temperature
  - ③ Economical Methods for Overcoming High Temperature by Field Condition

## IV. RESULTS AND APPLICATIONS

### 1. Results of this study

#### 1) Results on 「Development of Means of Practical Application of Evaporative Cooling Systems」

① The total number of 29 farmers have evaporative cooling systems in greenhouses ; 9 farmers of fog cooling systems, 6 farmers pad-and-fan systems and 14 farmers of disc-spraying systems.

② The rate of the actual operation of evaporative cooling systems is ; 33.3 percent in fog cooling systems, 66.7 percent in pad-and-fan systems, 100 percent in disc-spraying systems. It is necessary to solve several trouble points in fog cooling systems.

③ VETH diagram for cooling system design in domestic 16 selected regions were constructed to find necessary ventilation rate and the amount of spraying water based on selected cooling conditions.

④ There was no significant difference in temperature reducing depending on shading. There was considerable cooling effects by reducing the absolute humidity in greenhouses. The ventilation rates and control schemes were also considerably affected on the evaporation rate of water particles and cooling performance.

⑤ CFD models developed for analysis of the thermal environment in fog cooling greenhouses were tested and concluded that the CFD models can be used for the purposes within tolerable errors.

⑥ Dehumidifier was developed for increasing cooling efficiency of evaporative cooling systems. The average humidity reducing rate was 64.6 percent.

⑦ It was concluded that the greenhouse cooling reduced in crop stress considerable level.

## 2) Results on 「Research on Economical Methods for Overcoming High Temperature in Greenhouses」

① The actual utilization of greenhouses during hot summer season showed that about 21.6% of the investigated greenhouse farms were in fallow state, and most of greenhouse farms were cultivated under the very inferior environment. There were many demands on the development of low cost methods for overcoming high temperature in greenhouse during summer.

② Thermal environment of greenhouses according to the evaporative cooling method and several assistant cooling methods such as ventilation, shading screen, roof sprinkling were examined. As the each assistant cooling method was used, about 74.8%, 26.9%, and 58.2% of temperatures in greenhouse were above 35°C. When shading screen and evaporative cooling system were operated, most greenhouse air temperatures were maintained below 35°C, and showed a drop of 3.8~4.2°C as compared with naturally ventilated greenhouse.

③ To determine the capacity of ventilation and cooling systems,

heat balance equations were established and verified by experimental results. The calculated ventilation rates from heat balance equations showed a good agreement with the measured ones. The evapotranspiration coefficient was the most important parameter affecting the ventilation requirement among input parameters except weather data. Therefore the data of evapotranspiration coefficient should be accumulated by various experiments, and then design standards and selection guidelines should be provided.

④ In designing the greenhouse cooling and ventilating, the guideline for selection of weather data was provided. The range of adequate light, ambient and root zone temperature for major greenhouse crops were analyzed, and adequate shading ratio and critical shading from design solar radiation level were estimated. Survey on materials related to evaporative cooling, shading, and ventilating was conducted, and some standard data for planning of overcoming high temperature were provided.

⑤ It was showed that the overcoming high temperature by shading and ventilating was mostly possible in greenhouses cultivating crops required low light intensity. In crops required medium light intensity, the use of adequate shading screen and ventilating fan was able to make the overcoming high temperature possible. But in crops required strong light intensity, it was impossible to maintain indoor temperature below 35°C even when shading material and a high level of ventilation are in use.

⑥ It is difficult to install a ventilation window on the roof of single

span greenhouse of arch shape. Investigation on the roof ventilation structure for those greenhouses was conducted. The effect of roof ventilation was evaluated by comparative experiments between two greenhouses. In greenhouse installing roof vent, average indoor temperature was lower and temperature distribution was more uniform than in greenhouse having controlled side vent only.

⑦ Experiment on the heat transfer of a soil cooling system was conducted in greenhouse. Cooling loads of the soil cooling system were calculated with solar radiation, temperature difference between inside air and root zone soil, and soil water content. Experiments on cooling the nutrient solution, spraying water on the leaf surface, and measuring the leaf temperature, transpiration and absorption rate were conducted. And also effects of root zone cooling were evaluated. Root zone cooling, such as soil or nutrient solution cooling, is much less expensive than cooling the whole greenhouse and might be effective in promoting root activity, improving water absorption rate of root, decreasing plant temperature, and reducing high temperature stress.

⑧ In order to set up methods for overcoming high temperature, field conditions were divided into five grades by a level of environmental facilities and investment for greenhouse. The unit costs of materials to install usable methods for overcoming high temperature were estimated. Not excepting basic equipment, for overcoming high temperature, actively and selectively recommended control equipments were provided with greenhouse grade, respectively.

# CONTENTS

Chapter 1. Introduction .....	25
1-1. Objectives and Necessity .....	25
1-2. Contents and Scopes .....	27
Chapter 2. Development of Means of Practical Application of Evaporative Cooling Systems .....	28
2-1. Introduction .....	28
2-2. Analysis of Trouble Points and the Efficiency in Evaporative Cooling Systems .....	30
1. Investigation of Current Situation of Greenhouse Cooling Systems in Domestic and Foreign .....	30
2. Invesigation of the Actual Operation State of Evaporative Cooling Systems in Greenhouse .....	34
3. Analysis of Cooling Efficiency of Evaporative Cooling Systems .....	40
4. Analysis of Trouble Points in Evaporative Cooling Systems .....	48
2-3. Setting-up Practical Application Techniques for the Fog Cooling System .....	50
1. Development of Design Algorithm for the Fog Cooing Systems .....	50
2. Analysis of the Thermal Environment in Fog Cooling Greenhouse Using Experiment .....	56

3. Analysis of the Thermal Environment in Fog Cooling Greenhouse Using Simulation .....	80
2-4. Systemization Study on Application Techniques for the Fog Cooling System .....	118
1. Increasing Cooling Efficiency of Fog Cooling System Using Dehumidifier .....	118
2. Effects of Fog Cooling on Crop Growth .....	141
3. Guidelines in Design and Operation of Fog Cooling System ..	145
2-5. Summary and Conclusions .....	150
 Chapter 3. Economical Methods for Overcoming High Temperature in Greenhouses .....	153
3-1. Introduction .....	153
3-2. Actual Utilization and Thermal Environment of Greenhouses during Summer Season .....	155
1. Actual Utilization of Greenhouses during Summer .....	155
2. Thermal Environment of Greenhouses during Summer .....	162
3. Cooling Effect of Several Assistant Cooling Methods .....	165
3-3. Construction of Basic Data for Overcoming High Temperature .....	170
1. Development of Design Algorithm for Overcoming High Temperature .....	170
2. Analysis of Regional Design Weather Data .....	181
3. Growth Environment Conditions of Greenhouse Crop in Hot Season .....	186

3-4. Economical Methods for Overcoming High Temperature in Greenhouses .....	189
1. Feature of Usable Methods for Overcoming High Temperature in Greenhouses .....	189
2. Basic Analysis to Derive Economical Methods for Overcoming High Temperature .....	194
3. Survey on Materials Related to Overcoming High Temperature .....	211
4. Economical Methods for Overcoming High Temperature by Field Condition .....	213
3-5. Summary and Conclusions .....	221
 Chapter 4. Conclusions .....	 224
 References .....	 229
 Appendix .....	 241

# 목 차

제 출 문 .....	1
요 약 문 .....	2
SUMMARY .....	11
CONTENTS .....	19
목 차 .....	22
제 1 장 서 론 .....	25
제1절 연구개발의 목적 및 중요성 .....	25
제2절 연구개발 내용 및 범위 .....	27
제 2 장 증발냉각시스템의 현장적용기술 개발 .....	28
제1절 서 론 .....	28
제2절 증발냉각시스템의 냉방효율 및 문제점 분석 .....	30
1. 국내외 온실냉방기술 현황 조사 .....	30
2. 증발냉각시스템 설치 온실의 운영 실태 조사 .....	34
3. 증발냉각시스템 설치 온실의 열환경 및 냉방효율 분석 .....	40
4. 증발냉각시스템의 문제점 분석 .....	48
제3절 포그냉방시스템의 현장적용기술 정립 .....	50
1. 포그냉방시스템의 설계 방법 .....	50
2. 실험에 의한 포그냉방온실의 열환경 분석 .....	56

3. 시뮬레이션에 의한 포그냉방온실의 열환경 분석 .....	80
제4절 포그냉방시스템 이용기술의 체계화 연구 .....	118
1. 제습기를 이용한 포그냉방시스템의 냉방효율 향상 .....	118
2. 포그냉방이 작물 생육에 미치는 영향 .....	141
3. 포그시스템의 설계 및 운영에 관한 지침 .....	145
제5절 요약 및 결론 .....	150
제 3 장 온실의 경제적 고온극복 방안 연구 .....	153
제1절 서 론 .....	153
제2절 하절기 온실의 활용실태 및 열환경 분석 .....	155
1. 하절기 온실의 활용실태 조사 .....	155
2. 하절기 온실의 열환경 분석 .....	162
3. 냉방 및 보조냉방 방법별 고온억제효과 분석 .....	165
제3절 고온극복방안 설정을 위한 기준자료의 구축 .....	170
1. 고온극복 설계 제원 결정 알고리즘 개발 .....	170
2. 지역별 설계용 기상자료 분석 .....	181
3. 작물별 고온기 재배환경 설정 .....	186
제4절 온실의 경제적 고온극복 방안 도출 .....	189
1. 이용 가능한 온실의 고온극복방법과 특성 분석 .....	189
2. 경제적 고온극복 방법 도출을 위한 기초 분석 .....	194
3. 고온극복 관련자재 생산현황 조사 .....	211
4. 현장조건에 따른 경제적 고온극복 방안 .....	213
제5절 요약 및 결론 .....	221

제 4 장 종합 결론 .....	224
참 고 문 헌 .....	229
부 록 .....	241
부록 1. 지역별 포그냉방설계용 VETH선도 .....	243
부록 2. 냉방 목표온도별 필요 환기회수 및 분무수량 .....	259

# 제 1 장 서 론

## 제1절 연구개발의 목적 및 중요성

원예산물의 주년안정생산에 있어 주된 문제는 겨울철의 난방과 여름철의 냉방이다. 지금까지 원예시설에 관한 연구는 1970년대 두 번의 에너지 파동과 국내 IMF 외환 위기 이후 겨울철 온실 난방에너지 절약에 초점을 맞추어 태양열 등의 자연에너지 이용기술 및 대체에너지 개발에 대해서는 여러 연구 성과가 보고되고 있으나 우리 나라 기후 조건을 고려하여 온실의 여름철 고온에 대한 체계적인 연구는 매우 미비한 상태로 일부 연구 결과가 보고되고 있는 실정이다.

우리 나라에서는 여름철에 태양복사에너지량이 연중 최고치로 상승하여 충분한 환기를 실시해도 온실 내기온이 외기온보다 몇 ℃이상 높고, 40℃를 넘어서는 경우도 흔히 발생한다. 이러한 고온 현상으로 인해 많은 자본과 기술이 투자된 현대화 온실에서조차도 작물의 정상적인 생육이 불가능하여 여름철 고온기 휴작으로 인해 시설의 주년 활용도가 떨어지게 된다. 따라서, 온실의 주년이용을 위한 여름철 온실환경의 적정화에 관한 연구는 시설원예 분야의 시급한 당면과제로 대두되고 있다.

온실 냉방은 온실의 주년이용과 고품질 상품 생산을 가능하게 하고, 계획적인 재배와 출하, 강광조건으로 작물의 생육 촉진과 조기수량 증가 및 조기 출하, 관수 빈도 감소, 노동환경 개선 등의 여러 가지 장점이 있다.

주간의 온실내 기온 상승을 억제하는 수단으로 주로 차광이나 환기 등의 소극적인 방법이 이용되고 있는데, 과도한 차광은 작물의 생육에 제한요인이 될 수도 있으며 환기만으로는 역시 원하는 수준으로 온실내 온도를 떨어

뜨릴 수 없다. 최근 온실내 물을 분무하여 물의 기화열을 이용한 증발냉각법을 이용하여 적은 물량으로 높은 냉방 효과를 얻을 수 있다는 연구 보고와 함께 증발냉각장치가 설치되는 사례가 증가하고 있지만 운영면에서 많은 문제점을 안고 있는 실정이다. 따라서, 여름철 온실내 고온 현상을 경제적으로 극복할 수 있는 방안에 대한 연구와 함께 증발냉각시스템의 설계 및 운영에 관한 체계적, 기술적 연구가 필요하다.

본 과제는 경제적인 고온극복 방안과 증발냉각시스템의 설계 및 운용에 필요한 구체적인 자료를 제공하기 위하여 수행되었으며, 주요 연구 목적을 요약하면 다음과 같다.

- ① 증발냉각시스템의 냉방효율 및 문제점 분석
- ② 포그냉방시스템의 현장적용기술 정립
- ③ 포그냉방시스템 이용기술의 체계화
- ④ 하절기 온실의 활용실태 조사 및 열환경 분석
- ⑤ 고온극복방안 설정을 위한 기준자료의 구축
- ⑥ 현장조건에 따른 경제적 고온극복방안 도출

## 제2절 연구개발 내용 및 범위

본 과제는 증발냉각시스템의 현장적용기술 개발과 온실의 경제적 고온극복방안 연구의 2개의 세부과제로 구성되어 있으며, 수행한 주요 연구 내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

세부과제	연구개발항목	연구개발 내용 및 범위
1. 증발냉각시스템의 현장적용기술 개발	1) 증발냉각시스템의 문제점 및 냉방효율 분석	① 국내외 온실냉방기술 현황 조사 ② 증발냉각시스템 설치 온실의 운영실태 조사 및 환경 계측 ③ 증발냉각시스템의 냉방효율 분석 ④ 증발냉각시스템의 문제점 분석
	2) 포그냉방시스템의 현장적용기술 정립	① 포그냉방시스템의 설계 알고리즘 개발 ② 포그 노출의 적정 배치 연구 ③ 포그냉방을 위한 환기시스템 연구 ④ 포그냉방시스템의 효율 극대화를 위한 연구
	3) 포그냉방시스템 이용기술의 체계화 연구	① 포그냉방시스템의 현장 검증 실험 ② 포그냉방시스템의 적용상의 문제점 도출 및 보완 연구 ③ 포그냉방시스템의 설계 및 운영에 관한 지침 제시
2. 온실의 경제적 고온극복방안 연구	1) 하절기 온실의 활용 실태조사 및 열환경 분석	① 하절기 온실활용실태 조사 ② 하절기 온실의 열환경 분석 ③ 냉방 및 보조냉방 방법별 고온억제효과 분석
	2) 고온극복방안 설정을 위한 기준자료의 구축	① 고온극복 설계 제원 결정 알고리즘 개발 ② 지역별 설계용 기상자료의 분석 ③ 작물별 고온기 재배환경 설정
	3) 현장조건에 따른 경제적 고온극복방안 도출	① 이용 가능한 온실의 고온극복방법과 특성 분석 ② 고온극복 관련자재의 생산현황 조사 ③ 현장조건에 따른 경제적 고온극복방안 도출

## 제 2 장 증발냉각시스템의 현장적용기술 개발

### 제1절 서 론

원예산물의 주년안정생산에 있어 주된 문제는 겨울철의 난방과 여름철의 냉방이다. 지금까지 원예시설에 관한 연구는 1970년대 두 번의 에너지 파동과 국내 IMF 외환 위기 이후 겨울철 온실 난방에너지 절약에 초점을 맞추어 태양열 등의 자연에너지 이용기술 및 대체에너지 개발에 대해서는 여러 연구 성과가 보고되고 있으나 우리 나라 기후 조건을 고려하여 온실의 여름철 고온에 대한 체계적인 연구는 매우 미비한 상태로 일부 연구 결과가 보고되고 있는 실정이다.

우리 나라에서는 여름철에 태양복사에너지량이 연중 최고치로 상승하여 충분한 환기를 실시해도 온실 내기온이 외기온보다 몇  $^{\circ}\text{C}$  이상 높고,  $40^{\circ}\text{C}$ 를 넘어서는 경우도 흔히 발생한다. 이러한 고온 현상으로 인해 많은 자본과 기술이 투자된 현대화 온실에서조차도 작물의 정상적인 생육이 불가능하여 여름철 고온기 휴작으로 인해 시설의 주년 활용도가 떨어지게 된다. 따라서, 온실의 주년이용을 위한 여름철 온실환경의 적정화에 관한 연구는 시설원예 분야의 시급한 당면과제로 대두되고 있다.

온실의 냉방은 온실의 주년이용과 고품질 상품 생산을 가능하게 하고, 계획적인 재배와 출하, 강광조건으로 작물의 생육 촉진과 조기수량 증가 및 조기 출하, 관수 빈도 감소, 노동환경 개선 등의 여러 가지 장점이 있다.

주간의 온실내 기온 상승을 억제하는 수단으로 주로 차광이나 환기 등의 소극적인 방법이 이용되고 있는데, 과도한 차광은 작물의 생육에 제한요인이 될 수도 있으며 환기만으로는 역시 원하는 수준으로 온실내 온도를 떨어

뜨릴 수 없다. 최근 온실내 물을 분무하여 물의 기화열을 이용한 증발냉각법을 이용하여 적은 물량으로 높은 냉방 효과를 얻을 수 있다는 연구 보고와 함께 증발냉각장치가 설치되는 사례가 증가하고 있지만 운영면에서 많은 문제점을 안고 있는 실정이다. 따라서, 여름철 온실내 고온 현상을 경제적으로 극복할 수 있는 방안에 대한 연구와 함께 증발냉각시스템의 설계 및 운영에 관한 체계적, 기술적 연구가 필요하다.

본 세부과제는 증발냉각시스템의 설계 및 운용에 필요한 구체적인 자료를 제공하기 위하여 수행되었으며, 주요 연구 목적을 요약하면 다음과 같다.

- ① 증발냉각시스템의 냉방효율 및 문제점 분석
- ② 포그냉방시스템의 현장적용기술 정립
- ③ 포그냉방시스템 이용기술의 체계화

## 제2절 증발냉각시스템의 냉방효율 및 문제점 분석

### 1. 국내의 온실냉방기술 현황 조사

#### 가. 온실냉방기술 관련 일반 현황

오늘날 시설농업이 상업화되면서 점차 생산시설의 단지화, 대형화 추세가 두드러지고 있으며, 이에 따른 연중 작물재배가 요구되어 고온기 온실의 과도한 온도 상승은 반드시 해결해야 할 과제로 대두되고 있다.

온실에 있어서 냉방방법의 선택은 온실내 재배작물의 종류와 재배조건, 시설 및 기상상태 등에 따라 결정된다. 지금까지 개발된 여름철 온실 냉방을 위한 수단으로는 첫째, 자연환기 및 환기팬을 이용한 온실내부의 공기치환방법(환기), 둘째, 온실 내외부에 그늘을 형성하여 유입되는 일사량의 일부를 차단하는 방법(차광), 셋째, 수막에 의한 방법, 넷째, 히트펌프와 같이 에어컨을 이용한 기계적인 방법, 다섯째, 수분의 증발 잠열을 이용하는 증발냉각시스템 등이 있다.

#### 1) 환기

자연환기는 온실 내부에서의 온도차 및 풍속에 의하여 이루어지므로 충분한 환기가 이루어지지 못하고, 또한 온실 내부의 온도분포도 균일하지 못하다. 강제환기는 자연환기보다 효율이 높고, 유공 덕트나 순환팬 등을 이용하면 온도분포도 균일하게 할 수 있다. 그러나, 이러한 환기만으로는 고온기 온실내의 온도를 외기온 이하로 낮출 수는 없다.

## 2) 차광

차광의 효과는 차광물의 차광률, 위치 등에 따라 다르지만, 연구결과에 따르면 대략 4℃ 정도의 온도강하 효과가 있는 것으로 보고되었다.

## 3) 수막

온실의 난방을 위해 일반적으로 이용되어 온 수막시설은 고온기 온실의 내외피복재에 스프링클러 및 노즐을 이용하여 살수하면 온실의 냉방효과도 얻을 수 있으며, 연구보고에 의하면 수막에 의한 여름철 온도강하효과는 차광을 병행할 경우에는 2~5℃ 정도이고, 수막만으로 인한 냉방효과는 대략 1℃ 정도인 것으로 보고되었다.

## 4) 에어컨

온실내 온도는 태양 일사량의 증가와 함께 상승하게 되는데, 쾌청한 여름날의 정오경에 옥외 일사량은 약  $800\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 온실내로는 약 30% 감소된  $560\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ 의 일사량이 유입된다. 에어컨을 이용할 경우 온실 1  $\text{m}^2$ 당  $560\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$  용량의 에어컨을 설치해야 실내온도를 외기온과 같이 유지시킬 수 있다. 그러므로, 히트펌프와 같은 에어컨을 이용한다는 것은 아주 비경제적인 방법이라 할 수 있다. 그러나, 최근 외국에서는 화훼류의 품질향상, 화아 분화의 유도 및 양질의 육묘 생산 등을 목적으로 고온기 야간 냉방에 히트펌프를 이용하는 사례가 있다.

## 5) 증발냉각시스템

경제성 및 냉방효과 면에서 가장 우수한 온실냉방시스템으로 평가받고 있는 것이 증발냉각시스템이다. 25℃의 공기 중에서 물 1ℓ가 완전히 증발하는데는 약 583kcal의 기화열이 필요하며 물의 증발과 동시에 상대습도가 증가하고 온도는 저하되는 원리를 도입한 것이다. 증발냉각시스템에는 포그엔팬시스템, 패드엔팬시스템, 디스크분사식시스템 등이 있다.

포그엔팬시스템은 유입환기창의 바로 안쪽에 포그 노즐을 설치하고 반대

편 벽에 설치된 배기팬에 의하여 유입된 외부공기가 포그를 스치면서 냉각된다. 가습냉각된 공기가 온실 내부를 지나는 동안 냉각공기의 수분이 주위공기의 열을 빼앗아 증발하면서 온실내 온도를 떨어뜨리는 냉방시스템이다. 냉각된 공기가 온실을 통과하는 과정에서 공기의 온도가 상승하게 되는데, 이러한 문제를 해결하기 위해 온실 내부에 2단계 노즐 세트가 설치된다. 온실내 수직 또는 수평 순환팬을 설치하면 포그 증발냉각효과를 상승시킬 수 있다. 국내에 보급된 방식은 포그시스템으로 이 시스템은 온실 내부에 일정간격으로 설치된 포그 노즐에서 분무된 물입자가 주위 공기로부터 열을 빼앗아 증발하고 증발된 수증기의 배출을 팬이 아닌 자연환기에 의존하는 방식이다.

패드앤팬시스템은 온실의 한쪽 측벽에 설치된 패드에 물을 흘려 패드를 적시고 패드의 반대편 벽에 설치된 배기팬으로 외부공기를 온실내로 도입시키는 방식이다. 따라서, 외부 공기가 젖은 패드를 통과하면서 가습냉각되어 온실내 온도를 떨어뜨리는 냉방시스템이다. 여기에 이용되는 패드는 전통적으로 톱밥이 이용되었으나 오늘날에는 일반적으로 골판지와 유사한 십자형 골이 파진 셀룰로우스 패드가 주로 이용되고 있다.

디스크분사식시스템은 온실 내에 일정한 간격으로 노즐이 부착된 순환팬을 설치하고 노즐에서 포그를 분사하는 동시에 온실내 공기를 순환시키고 수분 증발을 촉진시켜 온실내 온도를 떨어뜨리는 시스템이다.

#### 나. 증발냉각시스템 이용기술의 활용 및 주요 연구개발 성과

증발냉각시스템의 적용 가능성에 대한 연구를 살펴보면, 南(1998)은 충분한 환기시스템을 설치한 경우 남부서해안과 남해안, 제주도 등 일부지역을 제외한 대부분의 지역에서 증발냉각시스템을 이용하여 온실의 실내온도를

32.5℃ 이내로 제어하는 것이 가능하며, 증발냉각시스템에서의 냉각범위가 5℃ 이상인 것으로 보고하였다.

보조냉방방법과 포그시스템을 병행하여 실시한 연구를 살펴보면,禹 등(1994)은 중형하우스에서 포그시스템과 은색차광 및 송풍을 혼합하여 실험한 결과 기온과 지온은 외기온에 비하여 각각 최고 10℃, 4℃ 정도의 온도 하강효과가 있었다고 보고하였다.

세무냉방시스템에 관한 연구를 살펴보면,徐 등(1994)은 실험에 의해 세무냉방시스템을 이용해 온실내 기온을 평균 7℃까지 하강시킬 수 있었다고 보고하였다.

三原(1973)은 세무냉방시스템을 가동함과 동시에 실온이 급냉하여 외기온보다 2~4℃ 정도 낮아지게 되었다고 보고하였다.

武富(1979)의 실험결과에 의하면 펌프용량은  $10\sim 15\text{kg/cm}^2$  이상 되어야 하며, 노즐분무입자는  $30\mu\text{m}$  이하가 적합하고 온실내 풍속은  $0.6\sim 0.7\text{m/s}$ 가 되도록 환기설비를 하는 것이 바람직하다고 보고하였다.

金 등(1997)은 분무입자를 작게 하면 증발률을 증대시켜 분무량을 줄일 수 있으므로, 포그시스템의 설계에서 분무노즐의 크기와 분무압력의 중요성을 강조하였다.

Walker and Cotter(1968)은 증발냉각법중 포그엔팬시스템이 가장 효과적으로 온실내의 온도 상승을 억제하였고 또한, 냉방효과는 외부의 습구온도와 관련된다고 보고하였다.

패드엔팬시스템에 대한 연구를 살펴보면,李 등(1995)은 패드엔팬시스템을 이용한 온실냉방실험에서 패드와 팬축의 온도가 약 7℃의 차이를 보였으며, 높이가 증가할수록 기온이 높아지므로 패드엔팬시스템의 설계시 고려해야 한다고 보고하였다.

## 2. 증발냉각시스템 설치 온실의 운영 실태 조사

### 가. 조사 대상 및 방법

국내에 보급된 온실 냉방시스템의 운영실태를 파악하고 운영상 문제점을 분석하여 효율적인 냉방시스템 운영 방안을 연구하기 위하여 각 시군 농업기술센터의 증발냉각시스템 설치 농가 자료를 근거로 하여 29개 쏘농가를 방문하여 운영 실태를 설문조사하였으며, 지역별 증발냉각시스템 설치 현황은 표 2-1과 같다.

표 2-1. 지역별 증발냉각시스템 설치 현황

(단위 : 농가수)

지역 냉방시스템	강원	경기	경남	경북	전남	전북	충남	충북	계
포그시스템	2	1	3	0	0	3	0	0	9
패드엔팬시스템	1	1	1	2	1	0	0	0	6
디스크분사식	2	3	2	1	5	0	1	0	14
계	5	5	6	3	6	3	1	0	29

주) 디스크분사식은 에어쿨이라는 상품에 채택된 방식임.

### 나. 설문조사 내용

증발냉각시스템을 설치한 농가를 방문하여 설문조사한 내용은 표 2-2와 같다.

### 다. 조사 결과

#### 1) 온실의 종류 및 면적 현황

증발냉각시스템이 설치된 온실의 종류 및 면적 현황은 표 2-3과 같다.

표 2-2. 설문조사 내용

항 목	조 사 내 용
일반 현황	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시설종류, 시설면적, 연동수, 설치방향</li> <li>- 피복재 종류, 피복재 층수, 피복재 두께</li> <li>- 재배방식, 재배작목</li> <li>- 차광망 종류, 차광률, 차광망 설치방식, 차광망 개폐방식</li> </ul>
환기 현황	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 환기창 위치, 면적</li> <li>- 환기팬 용량, 환기팬 설치위치</li> <li>- 유동팬 용량, 설치위치, 설치방향</li> </ul>
냉방시스템 설치 및 이용 현황	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 포그시스템 : 노즐규격, 노즐간격</li> <li>- 패드앤팬시스템 : 패드재료, 패드두께, 패드-팬 거리, 팬용량</li> <li>- 디스크분사식 : 팬규격, 팬용량, 팬 설치방향</li> <li>- 냉방방식 선정 주체, 활용 여부, 제어방법, 용수공급방법 냉방효과, 설치비용, 문제점</li> </ul>

표 2-3. 온실의 종류 및 면적 현황

온실 종류		농가수						평균면적 (평)
		계	<600평	600평≤	1000평≤	1500평≤	3000평≤	
철골 온실	와이드스팬	12	0	1	1	5	5	3026
	벤로	8	0	0	1	3	4	6075
비닐하우스	1-2W	7	3	3	0	0	1	1155
	기타	2	1	0	0	0	1	2188
계		29	4	4	2	8	11	3358

2) 온실의 연동수 및 외부피복 현황

온실의 종류별 연동수 및 피복재 종류는 표 2-4와 같다.

표 2-4. 온실의 종류별 연동수 및 피복재 종류

(단위 : 농가수)

항 목		온실 종류				계
		와이드스팬	벤로	1-2W	기타	
연동수	<5	3	1	1	1	6
	5≤	5	1	5	1	12
	10≤	4	6	1	0	11
피복재 종류	유리	11	8	0	0	19
	PC	1	0	0	0	1
	PE	0	0	7	1	8
	F크린	0	0	0	1	1
계		12	8	7	2	29

3) 재배 현황

온실에서 재배되고 있는 작목 및 방식은 표 2-5와 같다.

표2-5. 재배 작목 및 방식

(단위 : 농가수)

재배 작목		재배 방식		계
		토양재배	양액재배	
채소류	과채류	1	10	11
	엽채류	1	2	3
	과채류+엽채류	1	1	2
화훼류	장미	1	7	8
	국화	2	0	2
	난	0	2	2
	관엽	1	0	1
계		7	22	29

#### 4) 차광 현황

온실에 설치된 차광망의 종류, 차광률, 차광망 설치위치 및 개폐방식은 표 2-6과 같다.

표 2-6. 온실의 종류별 차광 현황

(단위 : 농가수)

항 목		온실 종류				계
		와이드스팬	벤로	1-2W	기타	
차광망 종류	알루미늄	8	8	0	1	17
	부직포	2	0	3	0	5
	흑색망사	2	0	1	1	4
차광률	<50%	0	1	0	0	1
	50%≤	8	6	3	2	19
	70%≤	4	1	1	0	6
차광망설치위치	내부	12	8	4	2	26
차광망개폐방식	예인식	12	8	4	2	26
계		12	8	4	2	26

#### 5) 환기 현황

패드앤팬시스템이 설치된 6개 온실 중 5개 온실에는 환기팬이 온실 측벽에 설치되어 있었으며, 나머지 1개 온실에는 환기팬이 온실 박공벽에 설치되어 있었다. 측벽에 설치된 환기팬의 용량은 500~600m<sup>3</sup>/min, 박공벽에 설치된 환기팬의 용량은 180~250m<sup>3</sup>/min이었다. 유동팬이 설치된 모든 온실에서 유동팬은 각 동의 중앙에 설치되어 있었으며, 용량은 50~180m<sup>3</sup>/min로 다양했다. 유동팬 설치방향은 모두 온실 길이 방향이었으며, 4개 온실에는 각 동마다 송풍방향이 반대가 되도록 유동팬이 설치되어 있었다. 조사 온실의 환기 현황은 표 2-7과 같다.

표 2-7. 냉방시스템별 환기 현황

(단위 : 농가수)

냉방시스템	측창	천창	측창+천창	환기팬	유동팬
포그시스템	1	5	3	1	6
패드앤팬시스템	0	6	0	6	2
디스크분사식	1	3	10	4	14
계	2	14	13	11	22

6) 포그시스템의 제원

포그 입경이 30 $\mu$ m인 노즐을 사용하고 있었으나 분무된 대부분의 포그는 증발하지 못하고 낙하하는 것으로 관찰되었다. 노즐은 온실 길이방향으로 1동당 2줄씩 수평방향으로 배치되어 있었고, 1.5~2m간격으로 설치한 농가는 8곳, 2.25m간격으로 설치한 농가도 1곳 있었다. 분무펌프의 압력은 30~40 kgf/cm<sup>2</sup>인 것을 사용하였으나 35kgf/cm<sup>2</sup> 이상으로는 사용하지 않았다. 분무 간격은 3분 간격으로 1분씩 자동 분무하였으나 재배자가 수동으로 작동하는 곳도 있었다.

7) 패드앤팬시스템의 제원

패드재료는 모든 온실에서 외형이 골판지와 흡사한 셀룰로오즈를 사용하였다. 두께 10cm 패드를 사용한 농가는 4곳, 15cm 패드를 사용한 농가는 2곳이었다. 환기팬 용량은 500~600m<sup>3</sup>/min이었으며, 패드에서 팬까지의 거리는 30~50m인 농가가 3곳, 51m 이상인 농가도 3곳이 있었다. 패드면적은 한쪽 벽면의 대부분을 차지하였고, 팬 설치간격은 1~1.5m 간격이었다.

8) 디스크분사식시스템의 제원

분사디스크의 직경은 30~40cm이며, 회전속도는 3500rpm이다. 소비 수량은 개당 20 l/hr, 풍량은 90~120 m<sup>3</sup>/min이며, 유동팬의 회전각도는 90° 이다. 유동팬은 5평당 1개씩, 각 동의 중앙에 설치되어 있었다.

9) 냉방시스템 설치 및 이용 현황

냉방 방식을 본인이 선택한 경우는 24개 농가, 정부의 권유로 선택한 농가는 3곳, 업체의 권유로 선택한 농가는 2곳이었다. 냉방시스템에 이용되는 물은 모든 농가에서 지하수를 사용하고 있었고, 노즐의 막힘을 방지하기 위해 필터를 설치한 농가는 2곳이었으며, 물방울 드롭방지 장치가 있는 곳은 없었다.

각 냉방시스템별 재배자가 느낀 냉방효과를 살펴보면, 포그시스템을 가동하였을 때 온실내 온도가 가동하지 않았을 때 보다 3~5℃ 낮고, 패드앤팬시스템의 경우 온실내 기온이 외기온보다 3~5℃ 낮은 것으로 조사되었다. 포그시스템의 냉방효과가 매우 낮은 것으로 조사되었다. 증발냉각시스템의 설치 비용은 포그시스템이 평당 약 1만6천원, 패드앤팬시스템은 평당 약 3만6천원으로 조사되었다. 그 외 증발냉각시스템으로 디스크분사식(에어쿨)을 사용하는 농가가 14곳 있었는데, 냉방효과는 포그시스템과 비슷하였으며 설치비용은 평당 약 1만3천원으로 조사되었다.

표 2-8. 증발냉각시스템의 설치 및 이용 현황

항 목		냉방 방식		
		포그시스템	패드앤팬시스템	디스크분사식
활용 여부	활용(농가수)	3	6	14
	비활용(농가수)	6	0	0
	활용률(%)	33.3	100	100
제어 방법	자동(농가수)	3	4	6
	수동(농가수)	0	2	8
	자동화율(%)	100	66.7	42.9
냉방효과		무가동시보다 온실내 온도가 3~5℃ 낮음	온실내 온도가 외기온보다 3~5℃ 낮음	무가동시보다 온실내 온도가 3~5℃ 낮음
설치비용(평당)		1.6만원	3.6만원	1.3만원

### 3. 증발냉각시스템 설치 온실의 열환경 및 냉방효율 분석

실험에 사용된 온실은 패드앤팬시스템이 설치된 봉계농산(경북 칠곡군 왜관읍 봉계리, 57.6m×172m, 9연동, 실험일 1999년 8월 20일)의 벤로형 온실과 포그시스템이 설치된 감다리 화훼영농법인(전북 부안군 상서면 감교리, 115m×175m, 10연동, 실험일 1999년 9월 2일)의 Wide-Span형 온실이었으며, 건설방위는 남북동이며 재배 작물은 장미였다.

#### 가. 패드앤팬시스템 설치 온실

##### 1) 실험 온실

실험에 사용된 패드앤팬시스템 설치 온실은 그림 2-1과 같고 패드의 규격은 1800×300×100mm, 온실바닥에서 140cm 높이에 설치되어 있으며, 반대편 측벽에 크기 138cm×138cm, 용량 541m<sup>3</sup>/min의 팬이 온실바닥에서 160cm 높이에 42개가 설치되어 있다. 용량이 7마력인 펌프 2대를 이용하여 패드에 물을 공급하였다. 시스템의 냉방효과를 분석하기 위하여 온·습도 겸용센서(HOBO)를 그림 2-1과 같이 설치하여 10분간격으로 자동 기록하였다. 패드와 팬 사이의 풍속은 열선풍속계(testo 490)를 사용하여 바닥으로부터 170cm 높이에서 온·습도센서와 같은 위치에서 수동 측정하였다.

##### 2) 냉방효과 분석

그림 2-2는 높이 170cm의 내기온 변화를 나타낸 것이고 그림 2-3은 내부 상대습도 변화를 나타낸 것이다. 패드앤팬시스템을 가동하기 시작한 9시부터 18시까지의 기온 변화를 그림 2-3의 상대습도 변화와 비교하여 보면 외부의 상대습도가 60% 이하로 떨어지기 시작한 11시 이후에 내기온이 외기온보다 낮아지는 것을 볼 수 있다. 패드에서 팬으로 가까이 갈수록 기온이

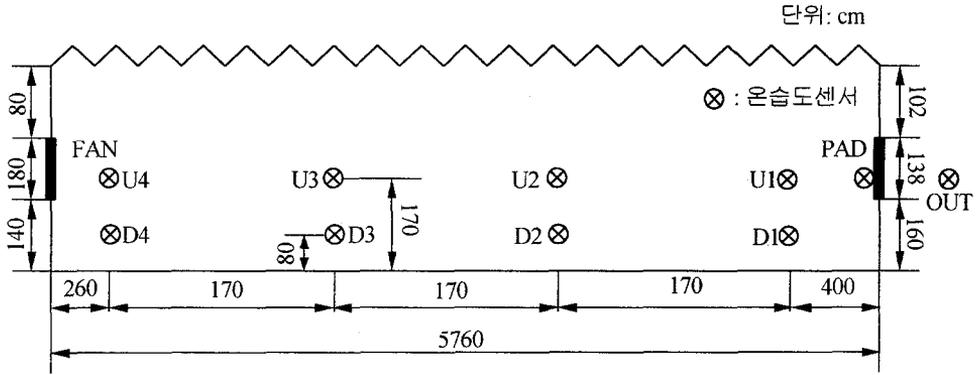


그림 2-1. 패드앤팬시스템 설치 온실의 규격과 센서 위치

상승하여 최고 4℃, 평균 2.5℃의 편차를 보였다. 표 2-9에서와 같이 최고 외기온이 36.6℃이었고 패드앤팬시스템 가동중의 내기온은 평균 30℃ 내외였으며, 최저치는 27℃ 내외였다. 높이에 따른 기온 변화는 없었다. 증발냉각시스템은 외부 상대습도가 냉방효과를 좌우하며 65%이상이 되면 냉방효과가 크게 떨어진다. 6월부터 8월까지 구미지역 기상자료를 보면 12시부터 15시사이의 상대습도가 65% 이상인 날은 26일이었다. 이 패드앤팬시스템의 냉방효율을 보면 최고 89.6%, 최저 64.7% 평균 77.4%로 나타났다. 패드앤팬시스템의 냉방효율은 식 (2-1)을 이용하여 구하였다.

$$\varepsilon = \frac{T_o - T_o'}{T_o - T_w} \times 100 \quad (\%) \quad (2-1)$$

여기서,  $T_o'$  : 증발냉각기의 출구온도(℃)

$T_o$  : 설계외기온(℃)

$T_w$  : 외기의 습구온도 (설계외기온, 상대습도로부터 구함)

$\varepsilon$  : 증발냉각기의 효율(%)

패드앤팬시스템 설치 온실은 분당 0.5회의 환기를 실시하였으며 내부 풍속은 패드를 통과 직후 1.17m/s, 온실 중앙 부분은 0.5~0.7m/s 이었다. 팬 쪽으로 갈수록 풍속이 증가하며 패드부분에서는 최고 1.15m/s, 팬부분에서는 최고 1.50m/s, 온실중앙에서는 0.5~0.65m/s의 풍속이 측정되었다. 일반적으로 사용되는 패드-팬 거리는 30~50m이다.

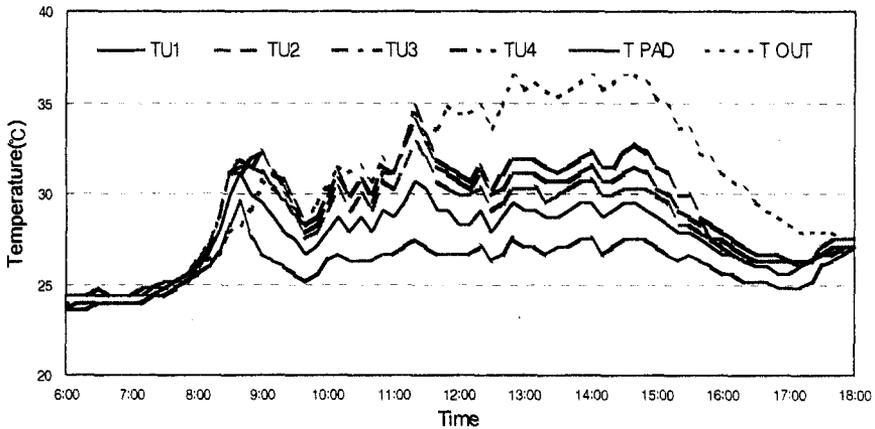


그림 2-2. 온실 내부의 기온 변화 (높이 170cm)

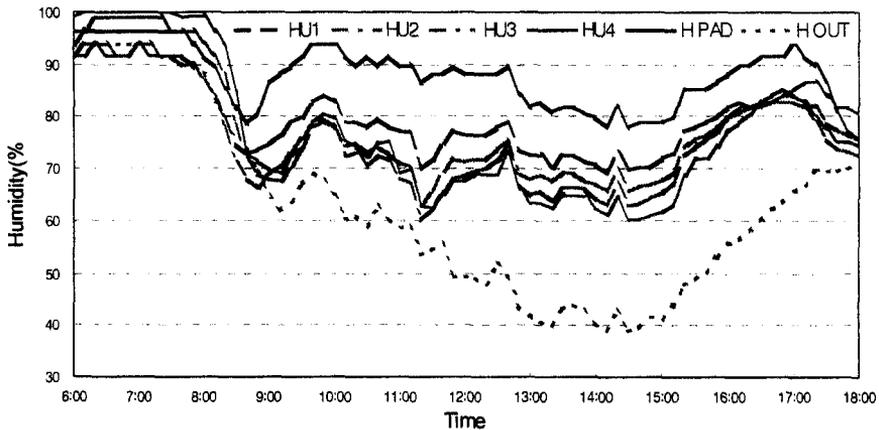


그림 2-3. 온실 내부의 상대습도 변화 (높이 170cm)

표 2-9. 패드엔팬시스템에서의 온도 비교

시간 항목 측점	AM 06:00~PM 06:00*		AM 09:00~PM 03:00**		
	최고기온 (°C)	평균기온 (°C)	최고기온 (°C)	최저기온 (°C)	평균기온 (°C)
T OUT	36.6	30.6	36.6	28.3	33.5
T PAD	29.5	26.2	27.5	25.2	26.8
TU1	31.1	27.6	30.7	26.7	28.8
TU2	32.8	28.4	32.8	27.5	30.1
TU3	34.0	28.7	34.0	27.9	30.8
TU4	34.8	29.1	34.8	28.3	31.3
TD1	31.1	27.8	31.1	26.7	29.0
TD2	32.8	28.5	32.8	27.5	30.2
TD3	31.9	27.7	31.9	26.7	29.3
TD4	34.4	28.7	34.4	28.3	30.9

주) \* : 측정시간, \*\* : 패드엔팬시스템 가동시간

표 2-10. 패드엔팬시스템에서의 상대습도 비교

시간 항목 측점	AM 06:00~PM 06:00*		AM 09:00~PM 03:00**		
	최고습도 (%)	평균습도 (%)	최고습도 (%)	최저습도 (%)	평균습도 (%)
H OUT	93.8	62.8	69.0	38.8	51.9
H PAD	96.3	87.9	93.8	78.0	86.4
HU1	93.8	79.4	84.0	69.4	75.3
HU2	93.8	76.4	79.7	62.8	70.8
HU3	99.1	76.9	78.8	60.1	68.4
HU4	100	77.5	80.6	60.1	68.1
HD1	96.3	82.6	88.1	70.8	77.9
HD2	96.3	76.9	79.8	62.8	70.8
HD3	100	81.7	84.0	67.5	74.6
HD4	99.1	78.1	78.8	61.6	68.9

주) \* : 측정시간, \*\* : 패드엔팬시스템 가동시간

나. 포그시스템 설치 온실

1) 실험 온실

실험에 사용된 포그시스템 설치 온실은 그림 2-4와 같고 바닥으로부터 5.65m 높이에 온실 길이방향으로 1동당 2줄씩, 포그 입경  $30\mu\text{m}$ 인 노즐이 2m 간격으로 170개가 설치되어 있으며, 9ℓ/min 용량의 펌프 8대를 이용하여 4분 간격으로 30초씩 분무하고 환기팬은 설치되어 있지 않다. 측창은 설치되어 있지 않으며 천장의 면적은  $2940\text{m}^2$ 으로 바닥면적( $20125\text{m}^2$ )의 14.6%이다. 시스템의 냉방효과를 분석하기 위하여 열전대(T형, 14점)와 건습구 온도계(3점)를 이용하여 온·습도를 측정하였고 차광망 위쪽과 아래에 각각 일사계(PCM-01)를 설치하여 일사량을 측정하였다. 모든 센서는 다점기록계(HR 2300)에 연결하여 10분 간격으로 자동 기록하였으며 포그시스템 가동 시간 중에는 1분 간격으로 자동 기록하였다. 온실 내부의 풍속은 열선풍속계(testo 490)를 사용하여 바닥으로부터 150cm 높이에서 수동 측정하였다.

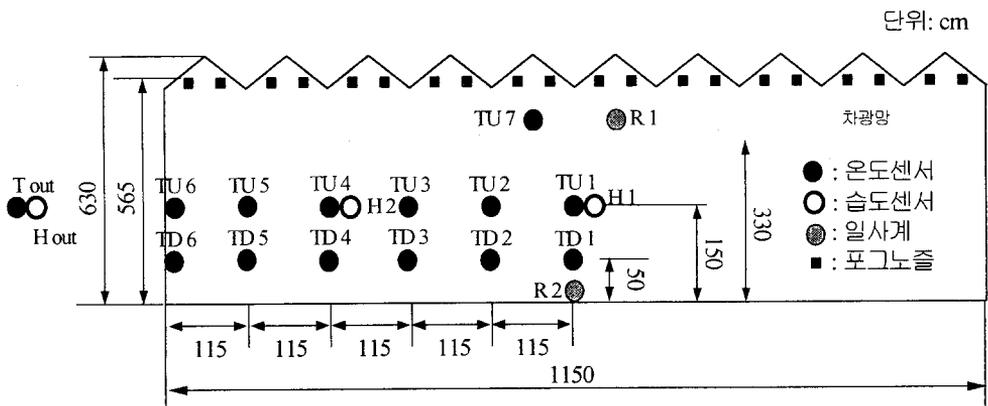


그림 2-4. 포그시스템 설치 온실의 규격과 센서 위치

## 2) 냉방효과 분석

포그시스템의 기온 변화를 살펴보면 그림 2-5와 같다. 외기온이 최고 31.3℃일 때 TU4 점에서 39.1℃가 측정되었다. 평균적으로 외기온과 비교하여 내기온이 5℃정도 높게 측정되었다. 오전 9시부터 오후 5시까지 차광을 실시하였고, 오전 12시부터 오후 4시까지 포그시스템을 가동하였다. 포그시스템은 4분 간격으로 30초간 분무하였으며, 이 시간에는 1분 간격으로 연속 측정을 하였다. 포그시스템이 가동중인 시간에도 기온은 꾸준히 상승하였고 상승비율도 감소하지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 2-6의 상대습도 변화를 살펴보면 외부 상대습도는 평균 77.4%이었고, 포그시스템이 가동중인 12시부터 16시까지의 외부 상대습도는 평균 65.6%이었다. 표 2-11을 보면 포그시스템 가동 시간에도 각 측정점의 온도가 35℃ 내외로 나타났다. 이와 같이 냉방효과가 나타나지 않은 이유는 포그 노즐의 설치 위치와 분무입자의 크기도 문제가 되었지만 상대습도가 높아 분무된 수분이 증발하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 부안 지역의 기상자료를 보면 6월부터 8월까지 상대습도가 65% 이상인 날이 44일로 나타났다. 우리나라의 경우 남부서해와 남해안 제주도 지방은 증발냉각시스템으로 충분한 냉방효과를 기대할 수 없는 것으로 보고되었다.

포그시스템 설치 온실의 내부의 풍속은 0.5m/s를 넘지 못하였고, 외부 풍속이 1.8m/s 이상일 때만 천창 바로 아래 부분에서 0.5m/s~0.7m/s의 풍속이 측정되었다. 이 온실은 자연환기에만 의존하므로 충분한 환기량을 확보하지 못하고 있어 추가적인 환기팬의 설치가 요구되었다.

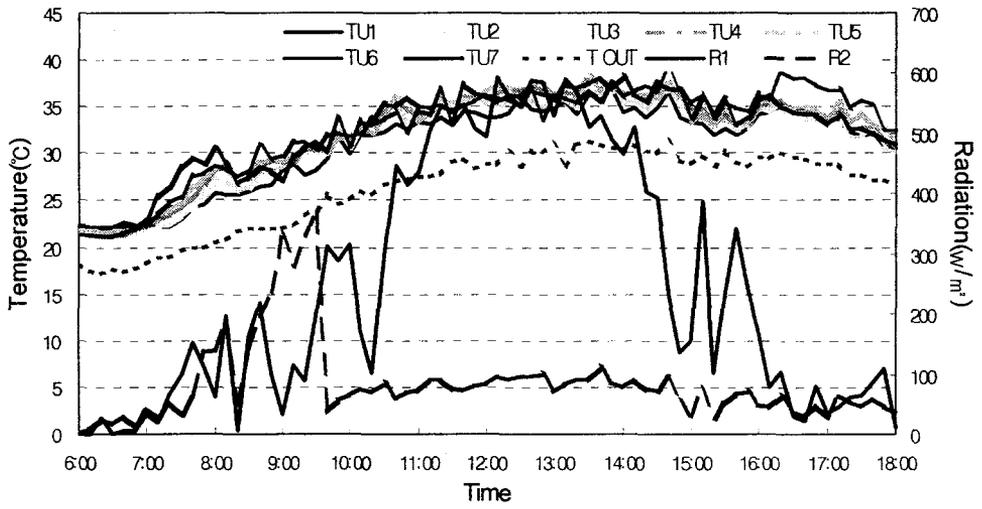


그림 2-5. 온실 내부의 온도 변화 (높이 150cm)

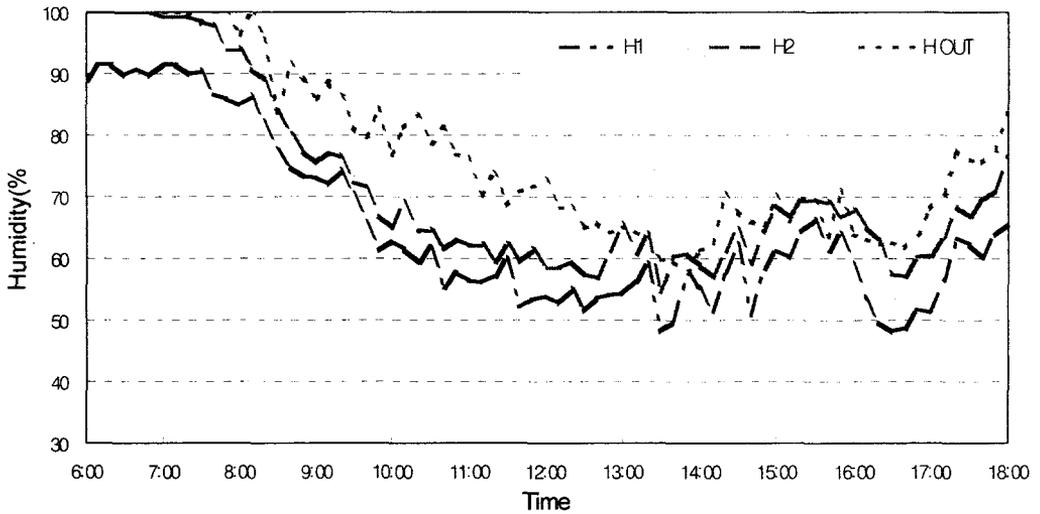


그림 2-6. 온실 내부의 상대습도 변화 (높이 150cm)

표2-11. 포그시스템에서의 온도 비교

측점	시간 항목	AM 06:00 ~ PM 06:00*		AM 12:00 ~ PM 04:00**		
		최고기온 (℃)	평균기온 (℃)	최고기온 (℃)	최저기온 (℃)	평균기온 (℃)
T OUT		31.3	26.1	31.3	28.5	29.9
TU1		36.9	30.9	36.9	32.0	34.4
TU2		38.2	31.5	38.2	32.9	35.2
TU3		38.1	31.4	38.1	32.4	35.3
TU4		38.1	32.0	38.1	33.2	35.9
TU5		38.0	32.1	38.0	33.0	35.8
TU6		39.1	32.8	39.1	33.8	36.1
TU7		38.1	32.2	38.1	32.9	36.0
TD1		36.8	31.2	36.8	32.0	34.5
TD2		37.9	31.6	37.9	33.1	35.6
TD3		37.7	31.6	37.7	32.9	35.6
TD4		38.4	32.0	38.4	33.0	36.1
TD5		37.7	32.0	37.7	33.4	35.8
TD6		36.9	31.0	36.9	30.6	34.0

주) \* : 측정시간, \*\* : 포그시스템 가동시간

표 2-12. 포그시스템에서의 상대습도 비교

측점	시간 항목	AM 06:00 ~ PM 06:00*		AM 12:00 ~ PM 04:00**		
		최고습도 (%)	평균습도 (%)	최고습도 (%)	최저습도 (%)	평균습도 (%)
H OUT		100	77.4	72.5	57.6	65.6
H1		91.6	65.2	66.4	48.1	56.7
H2		100	71.7	68.8	54.4	62.5

주) \* : 측정시간, \*\* : 포그시스템 가동시간

#### 4. 증발냉각시스템의 문제점 분석

증발냉각시스템이 온실 냉방법중 경제성 및 냉방효과 면에서 가장 우수한 것으로 평가받고 있지만 실제로 증발냉각시스템을 설치한 농가는 많지 않은 실정이다. 이러한 이유는 첫째, 냉방 필요기간이 6~9월에 걸쳐 4개월 정도로 비교적 단기간이기 때문에 설비투자의 효과가 적다는 점, 둘째, 물의 증발을 수반하기 때문에 온실내의 습도가 증가하거나 증발되지 않은 물방울이 작물체에 부착되는 점, 셋째, 냉방시의 온실내 기온분포가 불균일하게 되는 경우가 있어 이것이 작물의 생육을 불균일하게 한다는 점 등이다.

설문조사를 통해 나타난 각 방식별 문제점을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 패드-팬 시스템은 이끼, 패드의 건조 등 패드 관리의 어려움과 높은 전기료에 의한 운영비 문제, 설치비의 고가, 온도 불균일과 공간 활용률 저하 등이 문제점으로 조사되었다.
- ② 포그시스템은 분무된 물방울에 의한 작물스트레스, 노즐의 내구성과 막힘 문제가 가장 큰 개선 사항으로 조사되었다. 거의 대부분의 온실에서 노즐의 막힘을 방지하기 위한 필터링 시스템을 갖추지 못하고 있었다. 또한, 온실 크기와 기상 조건을 고려한 분무량의 기준이 없어 재배자의 경험에 의존하고 있었다. 배관연결부의 파손 등도 문제점으로 지적되었다.
- ③ 디스크분사식은 소음, 운영비, 회전판의 고장 등이 개선되어야 할 것으로 조사되었다.

포그시스템은 패드앤팬시스템에 비해 공간 활용률이나 온도 균일도면에서 우수하고 적은 관리노력으로 보다 큰 냉방효과를 가져오는 것으로 보고되고 있고, 설치 비용면에서도 포그시스템이 약 1만6천원, 패드앤팬시스템은 평당 약 3만6천원으로 포그시스템이 적게 소요된다. 우리나라에서는 환기량 및 분무수량에 따른 포그시스템의 냉방효과에 대한 연구가 미흡하고, 포그시스

템에 관한 설계 기준이나 관리 지침이 없어 시공 업체의 경험이나 판단에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 이유로 인해 포그시스템의 냉방효과가 떨어져 설문조사에서도 다른 증발냉각시스템에 비해 포그시스템의 활용률이 가장 낮게 나타난 것으로 판단되었다. 따라서, 본 세부과제에서는 증발냉각 시스템중 포그시스템의 설계와 효율적인 운영 방안에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

### 제3절 포그냉방시스템의 현장적용기술 정립

#### 1. 포그냉방시스템의 설계 방법

포그냉방설계에서 우선적으로 결정해야 할 인자는 주어진 기상조건에서 냉방 목표온도를 얻기 위한 분무수량, 소요환기량, 노즐배치 등이다.

포그냉방에 의한 온실내 기온 및 상대습도를 환기율과 실내증발산율(단위 시간 · 단위상면적당 증발산량)의 관계로부터 추정하기 위한 선도(VETH : Ventilation Evaporation Temperature Humidity)가 三原(1980)에 의해 제시되어 있다. VETH선도로부터 주어진 기상조건에 대해 냉방 목표온도별 필요환기회수 및 분무수량을 구할 수 있다.

#### 가. VETH선도 작성

##### 1) VETH선도 이론

바닥면적  $A(m^2)$ 의 온실에  $Q(m^3/min)$ 의 환기를 행하는 경우 배기의 온도, 절대습도, 증발량과 외기 조건과의 관계는 다음 4개의 식으로 표현된다.

$$\rho \cdot Q (x_{in} - x_a) = E \cdot A \quad (2-2)$$

$$(C_a \cdot \rho \cdot Q + k \cdot A_g)(t_{in} - t_a) = (R_n - IE) A \quad (2-3)$$

$$x_{in} = x_a + \frac{E}{\rho \left(\frac{Q}{A}\right)} \quad (2-4)$$

$$t_{in} = t_a + \frac{R_n - IE}{C_a \cdot \rho \left(\frac{Q}{A}\right) + \frac{k}{\beta}} \quad (2-5)$$

$\rho$  : 공기의 밀도( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $E$  : 실내의 증발산율( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )

$x_{in}$  : 실내 공기의 절대습도( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$x_a$  : 외부 공기의 절대습도( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$t_{in}$  : 실내 온도( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_a$  : 외부 온도( $^{\circ}\text{C}$ )

$C_a$  : 공기의 비열( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$k$  : 외면 열관류율( $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $A_g$  : 외표면적( $\text{m}^2$ )

$\beta$  : 보온비(바닥면적/외표면적),  $l$  : 물의 기화열 ( $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$R_n = \tau \cdot S \cdot (1-a)$  : 순복사량( $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )

$S$  : 실외 수평면 일사량( $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $\tau$  : 일사투과율

$a$  : 실내반사율

식 (2-4)를 (Q/A)에 대해 정리한 후 식 (2-5)에 대입하면 식 (2-6)을 얻을 수 있고, 식 (2-4)를 E에 대해 정리한 후 식 (2-5)에 대입하면 식 (2-7)을 얻을 수 있다.

$$t_{in} = t_a + \frac{(R_n - lE)\beta(x_{in} - x_a)}{C_a E \beta + k(x_{in} - x_a)} \quad (2-6)$$

$$t_{in} = t_a + \frac{R_n - l\rho q(x_{in} - x_a)}{C_a \rho q + \left(\frac{k}{\beta}\right)} \quad (2-7)$$

여기서,  $q$  : 환기율 ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )

절대습도( $x$ )와 상대습도(H)와의 관계를 근사적으로 나타낸 식 (2-8)을 식 (2-6)과 식 (2-7)에 대입함으로써  $t_{in}$ 과 H의 관계가 구해진다.

$$x = 8.18 \times 10^{-6} H(0.046t^2 - 0.87t + 16.5) \quad (2-8)$$

식 (2-6)에서 실내증발산율( $E$ )를 변화시켜가면서 온실 내부의 온도( $t_{in}$ ) 및 상대습도( $H$ )를 구하고, 식 (2-7)에서 환기율( $q$ )를 변화시키면서 온실 내부 온도와 상대습도를 구한다. VETH선도는 온도를 가로축으로, 상대습도를 세로축으로 하여 실내증발산율과 환기율 변화에 따른 온실 내부 온도와 상대습도 변화를 나타낸 그래프이다.

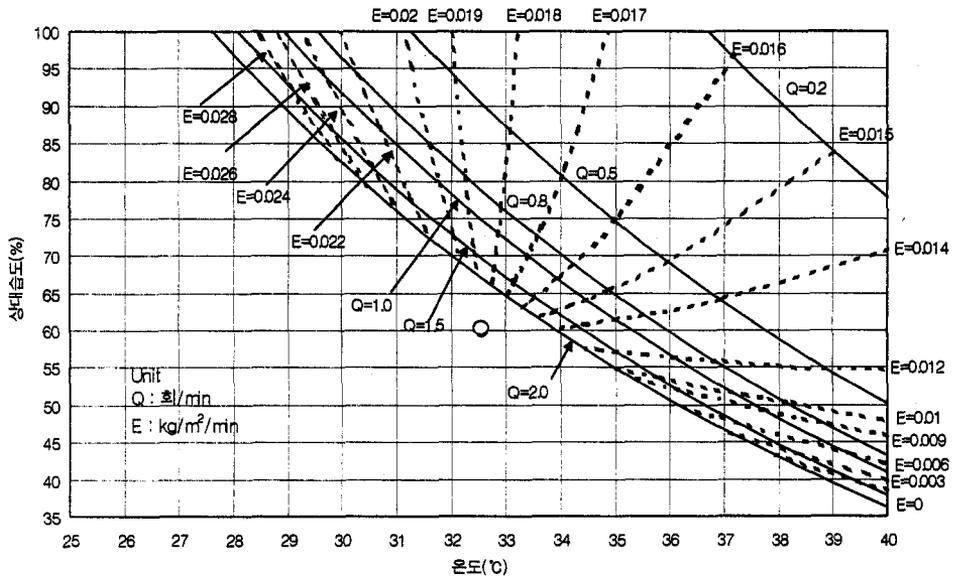
## 2) 지역별 VETH선도 작성

VETH선도를 작성한 지역은 한국공조학회에서 ASHRAE(미국공조학회) 방식으로 분석하여 제시하고 있는 전국 16개 지역이다. ASHRAE 방식의 냉방설계용 기상자료로부터 TAC 1%인 수원지역의 VETH선도를 작성하면 그림 2-7과 같다. 그림 2-7(a)는 3-1G형 3연동 유리온실(폭 7.5m, 길이 49.6m, 동고 4.25m, 바닥면적 1116m<sup>2</sup>)에 대한 무차광조건, 그림 2-7(b)는 차광(차광률 50%)조건에서의 VETH선도를 나타낸 것이다. 16개 지역의 VETH선도를 부록에 첨부하였다.

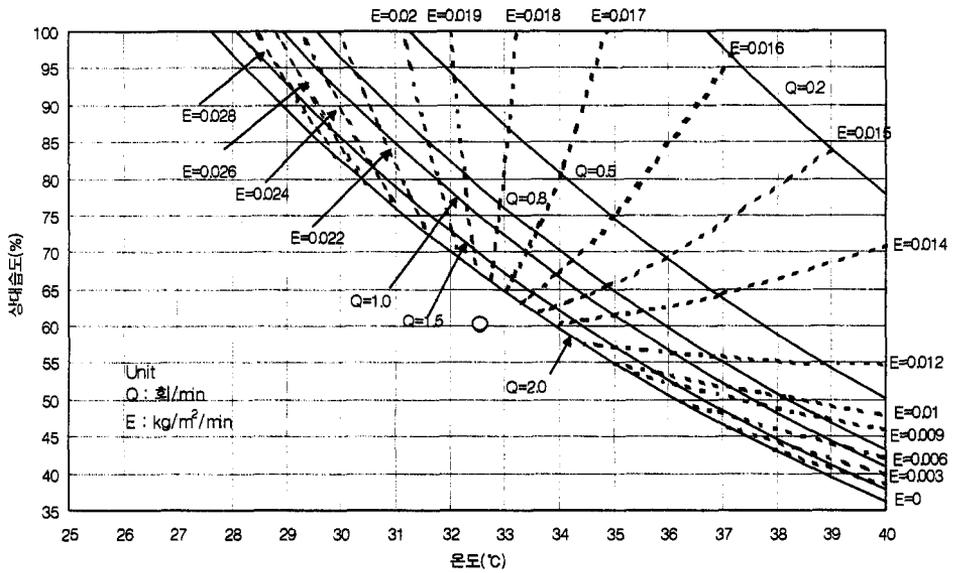
그림 2-7에서 ○ 표시는 수원지역의 냉방설계용 외부 온도 및 상대습도를 나타낸 것이며, Q곡선의 값은 환기율 대신에 분당 환기회수(환기량/온실체적)로 표시하였다.

### 나. VETH선도에 의한 포그시스템 설계

ASHRAE 방식의 냉방설계용 기상자료로부터 TAC 1%인 기상조건에 대해 수원지역의 VETH선도에 의한 냉방 목표온도별 필요환기량 및 분무수량을 구하면 표 2-13과 같다. 지역마다 기상조건이 다르므로 필요환기회수 및 분무수량은 지역간 차이가 있다. 16개 지역의 필요환기회수 및 분무수량을 표2-13과 같이 정리하여 부록에 첨부하였다.



(a) 무차광



(b) 차광

그림 2-7. 포그냉방설계를 위한 수원지역의 VETH선도

온실내 온도를 냉방 목표온도로 유지하는데 필요 환기회수 및 분무수량은 VETH선도에서 온도(냉방 목표온도)의 수직선과 교차하는 곡선(Q)의 값이 필요환기회수가 되고, 온도와 곡선(Q)의 교점을 통과하는 곡선(E)의 값이 실내증발산율이 된다.

필요 환기회수는 자연환기로 가능한 범위에서 낮은 쪽의 값을 선택하고, 자연환기로 필요 환기회수를 충족시키지 못한다면 팬을 이용한 강제환기의 도입도 적극 검토해야 한다.

VETH선도에서 구한 실내증발산율(E) 중에는 포그 노즐로 분무해야 할 수량 외에 실내 토양면과 작물에서의 증발산율(상면증발산율)도 포함되어 있다. VETH선도의 실내증발산율(E) 중에서 포그 노즐로 분무해야 할 수량을 구하는 식은 다음과 같다.

$$W = \frac{(E - E_f) \times A}{\varepsilon} \quad (2-9)$$

여기서,  $W$  : 포그 노즐로 분무해야 할 수량(kg/min)

$E$  : VETH선도에서의 실내증발산율( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )

$E_f$  : 상면증발산율( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )

$\varepsilon$  : 분무 입자의 증발률

$A$  : 온실의 바닥면적( $\text{m}^2$ )

상면증발산율은 실측 예가 적은데, 하루 중에는  $5 \sim 10 \text{g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$  정도로 본다. VETH선도에서는 분무 입자가 100% 증발하는 것으로 간주하지만 실제 분무 입자의 증발률은 70~90% 정도이다. 분무 입자의 증발률이 떨어짐으로써 감소된 실내증발산율을 상면증발산율이 보충해 주는 것으로, 즉  $E_f = (1 - \varepsilon)E$  로 간주하면, 실제 포그 노즐로 분무해야 할 수량은 다음의 식 (2-10)으로 표현할 수 있다.

$$W_t = E \times A \quad (2-10)$$

여기서,  $W_t$  : 실제 포그 노즐로 분무해야 할 수량(kg/min)

$E$  : VETH선도에서의 실내증발산율( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )

$A$  : 온실의 바닥면적( $\text{m}^2$ )

식 (2-10)에서 구한 분무수량을 노즐 1개당 분무수량으로 나누면 필요한 노즐 개수를 구할 수 있다. 표 2-13에서 나타낸 분무수량은 상면증발산율을 고려하지 않은 값이다.

표 2-13. VETH선도에 의한 냉방 목표온도별 필요환기회수 및 분무수량

냉방 목표온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	19.9	97.6
	1.5	***	***	24.2	93.8
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	13.4	92.5
	0.8	25.1	96.5	14.8	85.3
	1.0	26.0	91.8	15.8	82.8
	1.5	28.4	85.6	18.2	79.6
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	21.3	94.4	11.1	78.5
	0.8	21.7	82.3	11.4	72.3
	1.0	21.9	78.2	11.6	70.3
	1.5	22.4	72.8	12.2	67.5
34	0.2	***	***	9.6	87.5
	0.5	19.0	90.7	8.8	66.6
	0.8	18.2	70.2	8.0	61.3
	1.0	17.7	66.7	7.5	59.6
	1.5	16.4	62.0	6.2	57.3

주) 3-1G형 3연동 유리온실에 대한 값임.

## 2. 실험에 의한 포그냉방온실의 열환경 분석

### 가. 실험 장치 및 방법

#### 1) 실험 온실의 제원 및 계측 방법

실험에 사용된 온실은 경기도 안성시에 위치한 단동 유리온실로 폭 6.5m, 길이 19m, 높이 4m이다. 실험온실의 제원 및 센서의 배치는 그림 2-8에 나타낸 바와 같다. 온실은 두께 3mm의 유리로 피복되어 있으며, 피복재의 광투과율은 일사량에 따라 다소 차이는 있지만 약 63%, 차광망(알루미늄 증착 필름)의 차광률은 약 70%이다. 온실에서 재배되고 있는 작물은 온실의 왼쪽에는 높이 1m의 벤치 위에 국화가 포트재배되고 있었으며, 오른쪽에는 초장 2m의 토마토가 암면재배되고 있었다.

본 실험에 사용된 계측장치는 온·습도계측용 센서부, 풍속계측용, 일사량계측용센서부, 데이터 수집장치로 구성되어 있다. 온실 내부의 온도와 상대습도는 온실을 상·중·하부로 나누어 온습도계측 겸용센서(HOBO, Onset computer Corp.)를 이용하여 10초간격으로 데이터를 저장하였고, 온실 벽면 및 차광망, 바닥온도와 지하수 온도, 엽온의 측정에는 T형 열전대를 이용하였다. 풍속은 온실 길이방향의 중앙 단면의 측창과 천창에 미풍속센서(Series640, Dwyer Instrument)를 설치하여 온실의 길이방향에 수직으로 불어오는 바람에 대하여 일방향 풍속(x-velocity)을 측정하였다. 실내의 태양복사에너지는 온실 바닥으로부터 3.2m 높이에 일사센서(PCM-01, Prede)를 이용하여 측정하였다. T형 열전대, 미풍속 센서 및 일사센서에 의해 측정된 데이터는 디지털 다점 기록계(HR2300, Yokogawa)를 이용하여 1분간격으로 저장하였다. 또한 외부 기상자료의 수집을 위해 미기상 수집장치(CR10x, Campbell)를 실험온실로부터 10m 떨어진 위치에 설치하였으며, 외부 온도 및 상대습도, 풍속 및 풍향, 일사량 등의 자료를 1분간격으로 저장하였다.

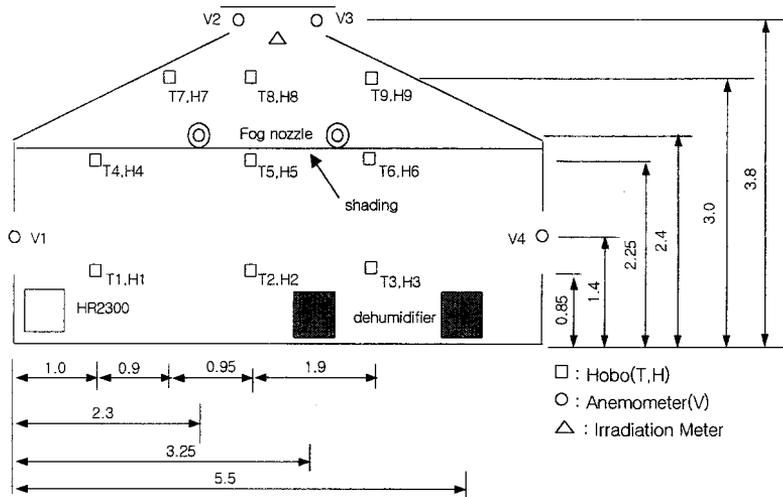


그림 2-8. 실험 온실의 제원 및 센서 배치도 (단위 : m)

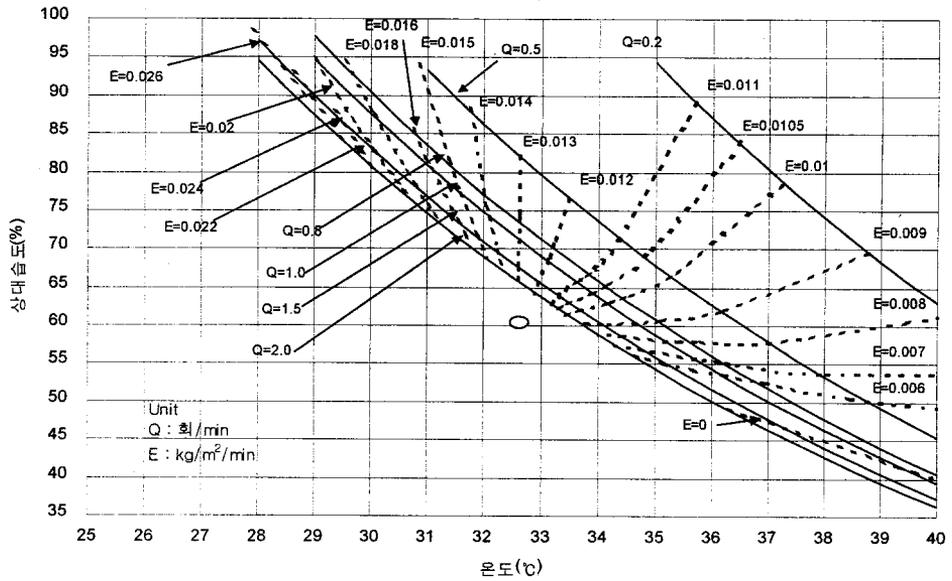
## 2) 포그시스템의 제원

실험에 사용된 포그 노즐(Impaction pin IP-16, Mee Industries Inc)은 분무압력이  $70\text{kg} \cdot \text{cm}^2$ 일 때 분사거리 0.9m, 분사폭 최대 0.75m이고, 노즐의 개당 분무수량은  $0.094\text{kg}/\text{min}$ 이며, 분무입자의 크기는  $20\mu\text{m}$  정도이다. 환기회수와 분무수량을 결정하기 위해 ASHRAE 방식의 냉방설계용 TAC 1%(건구온도 :  $32.6^\circ\text{C}$ , 습구온도 :  $26.1^\circ\text{C}$ , 일사량 :  $881\text{W} \cdot \text{m}^2$ )인 수원지역의 기상자료와 실험온실 특성(피복재 투과율, 온실체적 및 바닥면적)을 고려하여 VETH선도를 작성하면 그림 2-9와 같다. 실험 온실의 냉방 목표온도를  $30^\circ\text{C}$ 로 설정하고 VETH선도로부터 구한 필요환기회수 및 분무수량은 표 2-14와 같다. 표 2-14에서 환기회수를 0.8회로 설정하고 분무수량과 노즐의 분사거리, 분사폭을 고려하여 온실 양쪽 측벽으로부터 2.3m, 바닥으로부터 2.4m 높이에 1m간격으로 총 32개의 포그 노즐을 배치하였다. 분사방향은

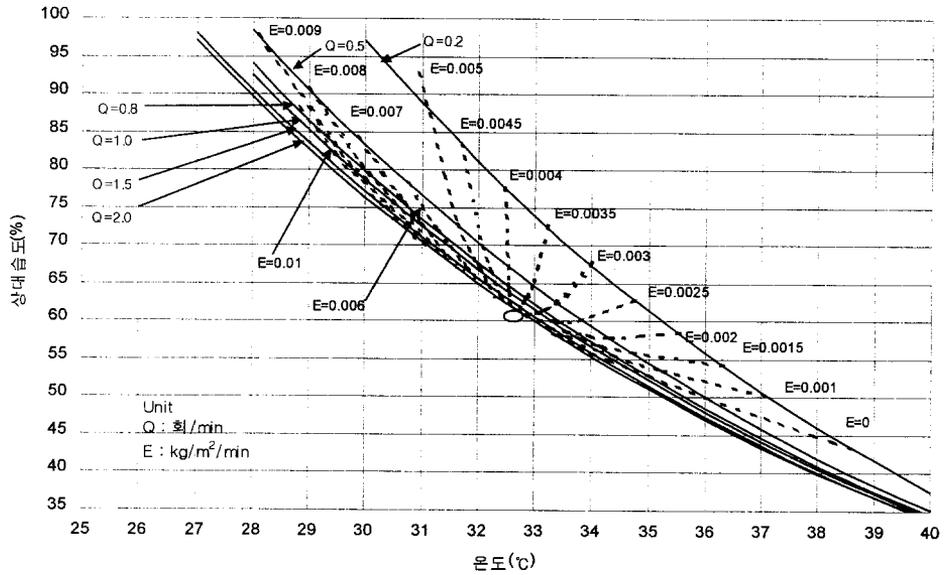
수직 상향으로 하였으며, 포그시스템 가동시간은 오전 10시부터 오후 4시까지로 하였다.

표 2-14. 실험 온실의 냉방 목표온도별 필요환기회수 및 분무수량

냉방 목표온도 (°C)	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (70%)	
		분무수량 (g/min)	상대습도 (%)	분무수량 (g/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	**	***	**
	0.5	***	**	1053	98
	0.8	***	**	1322	94
	1.0	***	**	1498	93
	1.5	3042	97	1931	91
30	0.2	***	**	655	97
	0.5	***	**	819	83
	0.8	2012	90	936	80
	1.0	2106	88	1053	79
	1.5	2340	83	1170	77
32	0.2	***	**	503	81
	0.5	1603	86	527	70
	0.8	1638	77	585	68
	1.0	1661	75	597	67
	1.5	1708	71	644	66
34	0.2	***	**	351	67
	0.5	1334	74	269	59
	0.8	1252	66	176	57
	1.0	1205	64	117	57
	1.5	1053	61	***	**



(a) 무차광



(b) 차광

그림 2-9. 실험 온실의 포그냉방설계를 위한 VETH선도

### 3) 실험 설계

냉방실험은 차광조건, 제어방식, 제습조건 등을 조합하여 실시하였으며, 환기조건은 천·측창 모두 개방한 상태로 실시하였다. 본 실험에서 실시한 포그시스템의 제어방식중 타임제어의 경우 표 2-14에 근거하여 차광상태에서는 분무시간 25초에 정지시간 45초, 무차광상태에서는 분무시간 45초에 정지시간 45초로 하였다. 습도제어의 경우는 적정 제어설정치를 찾기 위해 하한·상한치의 설정 범위를 3가지로 하였으며, 자세한 실험 설계는 표 2-15에 나타낸 바와 같다.

표 2-15. 실험 설계

실험 조건	차광여부 (○, ×)	제어방식 (타임, 습도)	제습여부 (○, ×)
Case 1	○	타임	○
Case 2	○	타임	×
Case 3	○	습도(50~55%)	×
Case 4	○	습도(55~60%)	×
Case 5	○	습도(55~65%)	○
Case 6	○	습도(55~65%)	×
Case 7	×	타임	○
Case 8	×	타임	×
Case 9	×	습도(55~60%)	×
Case 10	×	습도(55~65%)	○
Case 11	×	습도(55~65%)	×

#### 나. 결과 및 고찰

포그시스템의 냉방효과는 온실 내부의 상대습도, 공기유동과 밀접한 관계

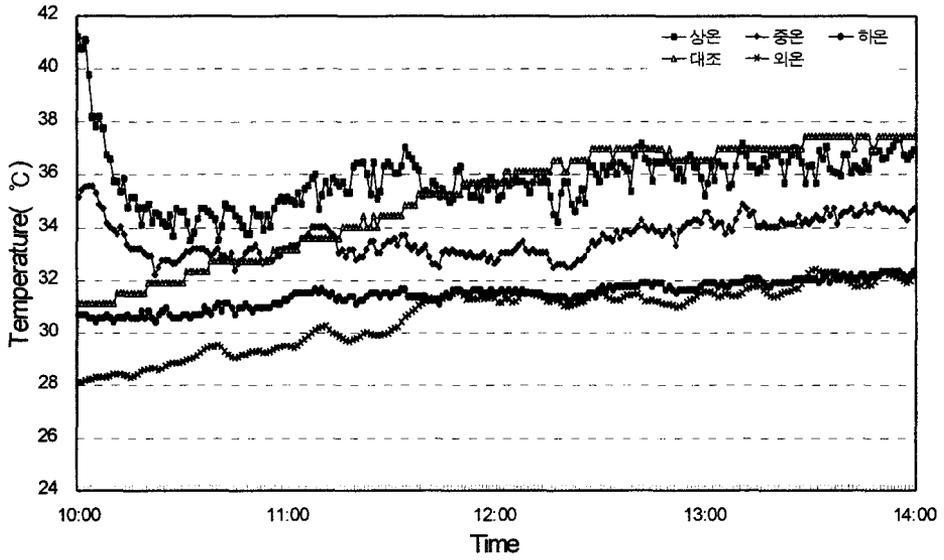
가 있다. 본 실험에서는 차광조건, 제어방식, 제습조건 등에 따른 냉방효과를 알아보기 위하여 실험 기간동안 기상여건이 비교적 유사한 경우를 선택하여 비교 분석하였다. 그러나, 시시각각으로 변하는 일사량, 풍속 등을 충분히 고려할 수 없어 냉방효과의 절대적인 비교는 어려워 상대적인 차이를 비교하였다. 대조구 온실은 실험온실로부터 약 4m 떨어져 있고 크기가 같은 차광(차광률 70%) 무냉방온실이다.

#### 1) 차광 여부에 따른 열환경 분석

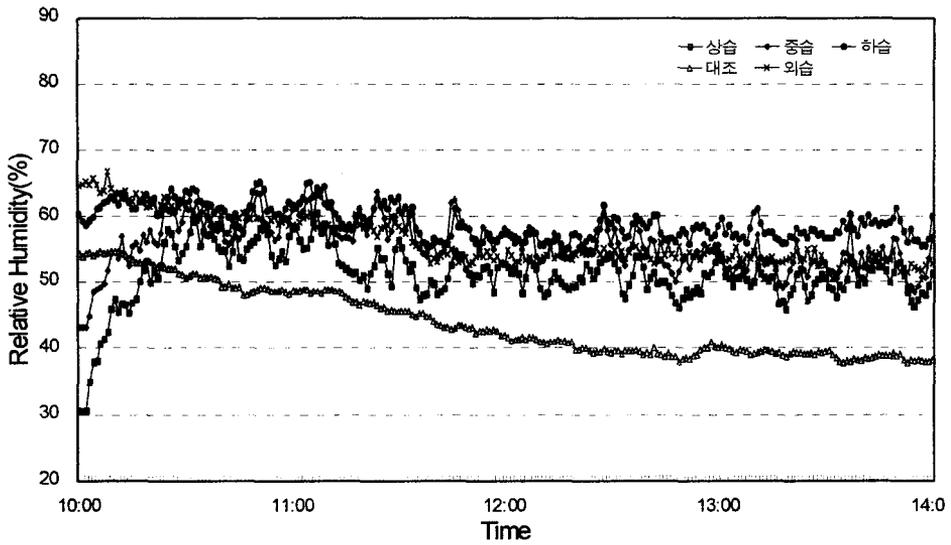
차광 여부에 따른 포그시스템의 냉방효과 분석은 제어방식과 제습조건이 동일한 상태에서 차광에 따른 차이만을 비교하였다. 제어방식은 타임제어이며 차광상태에서는 분무시간 25초에 정지시간 45초, 무차광상태에서는 분무시간 45초에 정지시간 45초로 하였다. 제습기는 가동하지 않았다.

##### 가) 70% 차광

그림 2-10은 차광상태에서 타임제어에 의해 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 온도 및 습도 변화를 나타낸 것이다. 그림 2-10(a)에서 하온은 그림 2-8의 T1~T3의 평균값이며 중온과 상온은 T4~T6과 T7~T9의 평균값이다. 그림 2-10(b)도 그림2-10(a)와 같은 지점의 평균 습도이다. 작물이 생육하는 공간은 온실의 중간 부분까지이므로 온실 내부의 평균 기온은 T1~T6의 평균값으로, 평균 습도는 H1~H6까지의 평균값으로 하였다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 32.4℃로 외기온보다 1.2℃ 높았고, 대조구 온실보다는 3.5℃ 낮았다. 포그시스템 가동직후에는 온실내 기온이 급격히 떨어지다가 어느 정도 시간이 지나면 거의 일정한 변화폭으로 낮아지는 경향을 보였다. 특히 오후 12시경부터는 실험 온실의 상부온도가 대조구 온실의 온도보다 낮았으며, 하부 온도는 거의 외기온 수준으로 유지되는 경향을 보였다.



(a) 온도



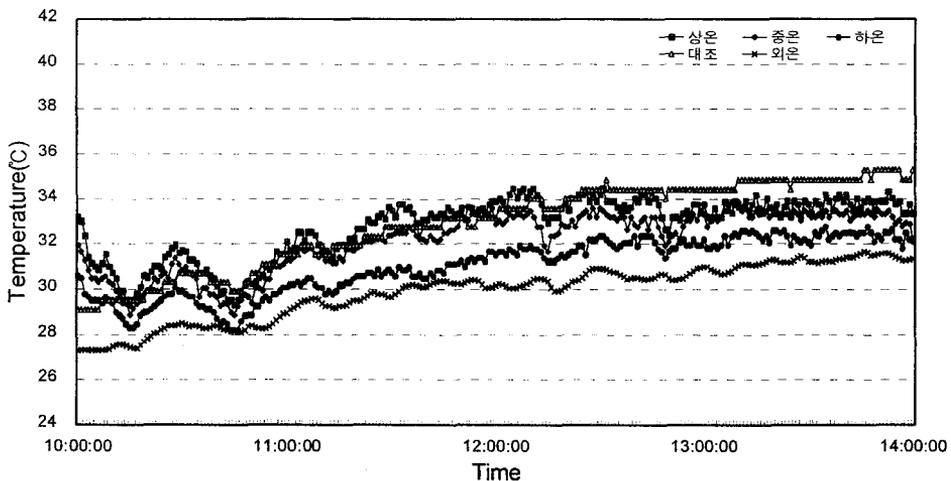
(b) 상대습도

그림 2-10. 차광상태에서의 온실 내부 온도 및 상대습도 변화

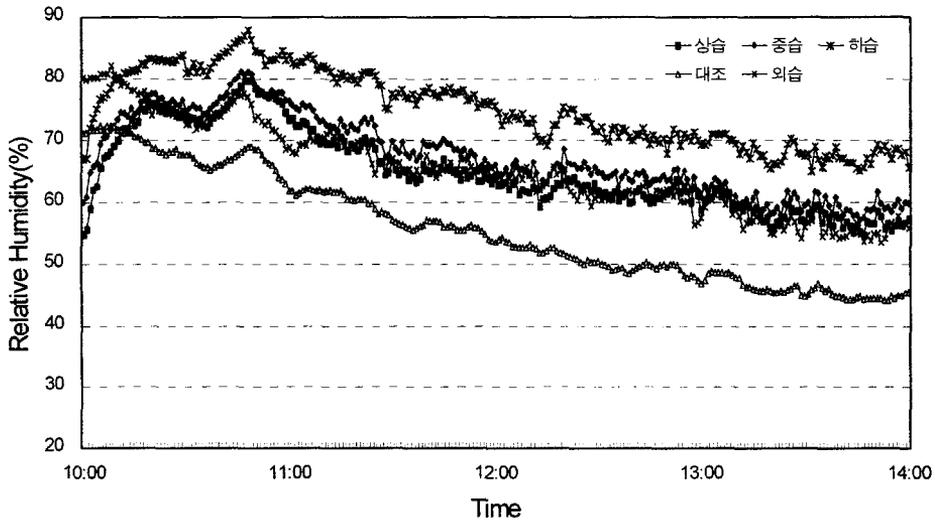
## 나) 무차광

그림 2-11은 무차광상태에서 타임제어에 의해 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 온도 및 습도 변화를 나타낸 것이다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 31.5℃로 외기온보다 1.3℃ 높았고, 대조구 온실보다는 2℃ 낮았다. 대조구 온실이 무차광상태였다면 실험 온실과의 온도차는 2℃보다 훨씬 컸을 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터, 차광에 따른 온실내 습도를 비교해 보면 외부 습도에 다소 차이가 있지만 전반적으로 무차광의 경우가 습도가 높게 나타났으며, 특히 하부에서는 차광한 경우보다 30%정도 높게 나타났다. 이는 무차광상태에서 차광상태보다 상대적으로 상면증발량이 많고 분무 입자의 증발률 또한 높았기 때문으로 판단된다. 차광은 온실내로 유입되는 일사량을 감소시켜 온실의 냉방부하량을 경감시켜주므로 온도면에서 유리할 수는 있지만, 분무 입자의 증발률이 떨어져 작물체에 부착되는 포그 입자가 많고, 작물 생육이나 환기, 증발률 측면에서 불리하게 작용할 수 있으므로 작물 생육을 고려하여 탄력적으로 차광을 실시하여야 할 것이다.



(a) 온도



(b) 상대습도

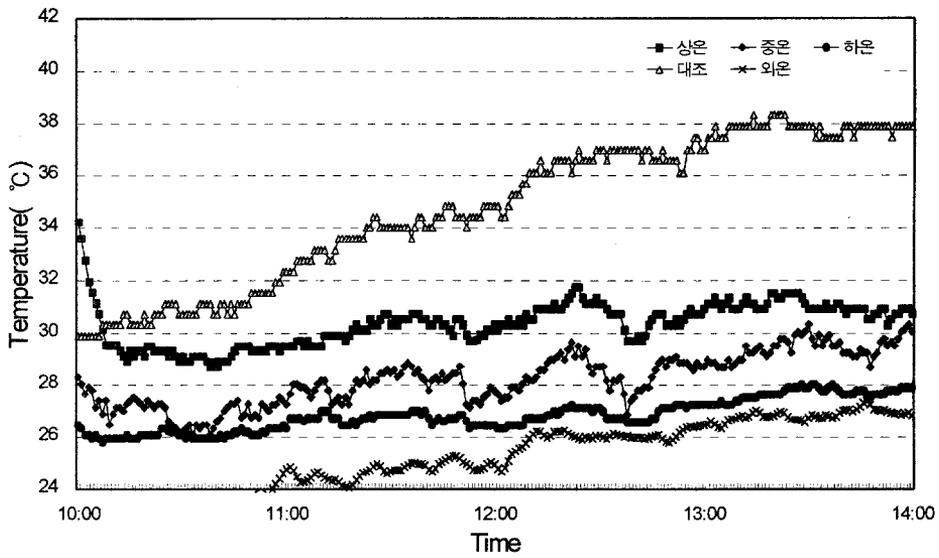
그림 2-11. 무차광상태에서의 온실 내부 온도 및 상대습도 변화

## 2) 제습 여부에 따른 열환경 분석

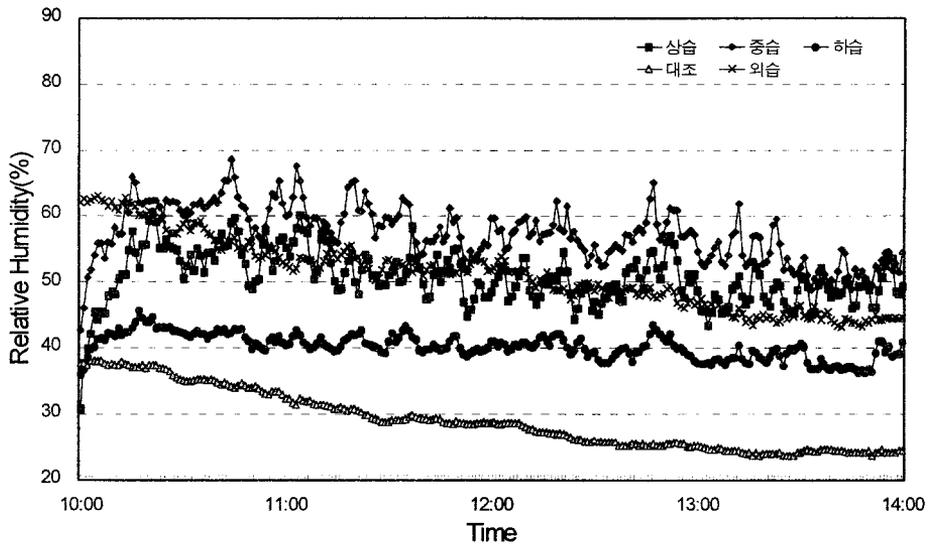
제습 여부에 따른 포그시스템의 냉방효과 분석은 차광상태에서 분무시간 25초에 정지시간 45초로 타임제어한 조건에서 제습 여부에 따른 차이만을 비교하였다.

### 가) 제습

그림 2-12는 제습을 하면서 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화를 나타낸 것이다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 27.6℃로 외기온보다 1.7℃ 높았고, 대조구 온실보다는 8℃ 낮았다. 온실 내부의 습도는 평균 48.4%로 대조구 온실보다 20.8% 높았다. 특히 제습기가 놓인 하부습도는 40%로 외부 습도보다도 훨씬 낮은 습도를 유지했다.



(a) 온도



(b) 상대습도

그림 2-12. 제습상태에서의 온실 내부 온도 및 상대습도 변화

## 나) 무제습

무제습상태로 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화는 앞의 그림 2-10과 같다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 32.4℃로 외기온보다 1.2℃정도 높았고, 대조구 온실보다는 3.5℃ 낮았다. 온실 내부의 습도는 평균 48.2%로 대조구 온실보다 6.2% 높았다.

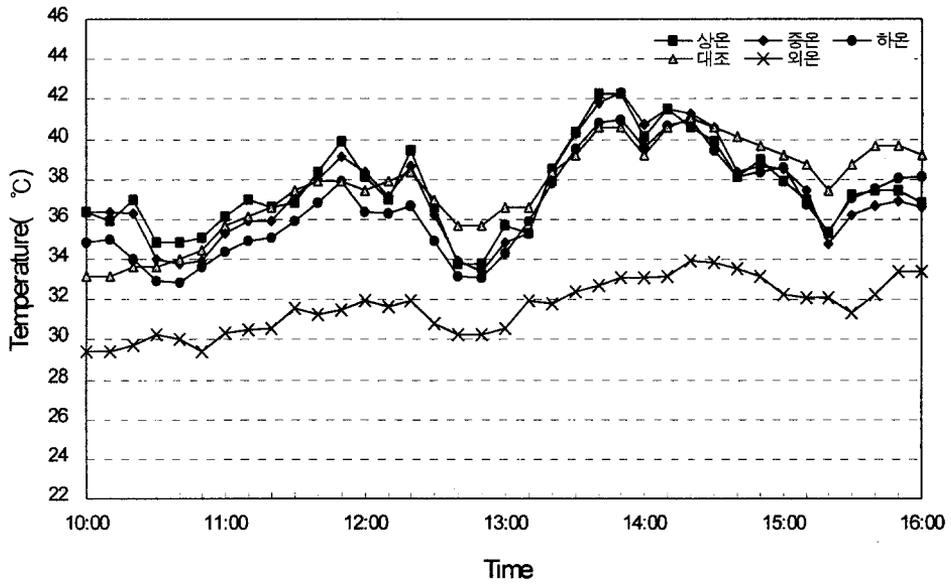
이상의 결과로부터, 외부 조건이 차이가 있어 절대적인 비교는 할 수 없지만, 각각의 경우 대조구 온실의 상대습도에 비해 제습한 경우 20.8%, 무제습의 경우 6.2% 높게 나타났다. 이는 제습을 함으로써 온실내 분무 입자의 증발률이 높아졌기 때문으로 판단된다.

## 3) 환기조건에 따른 열환경 분석

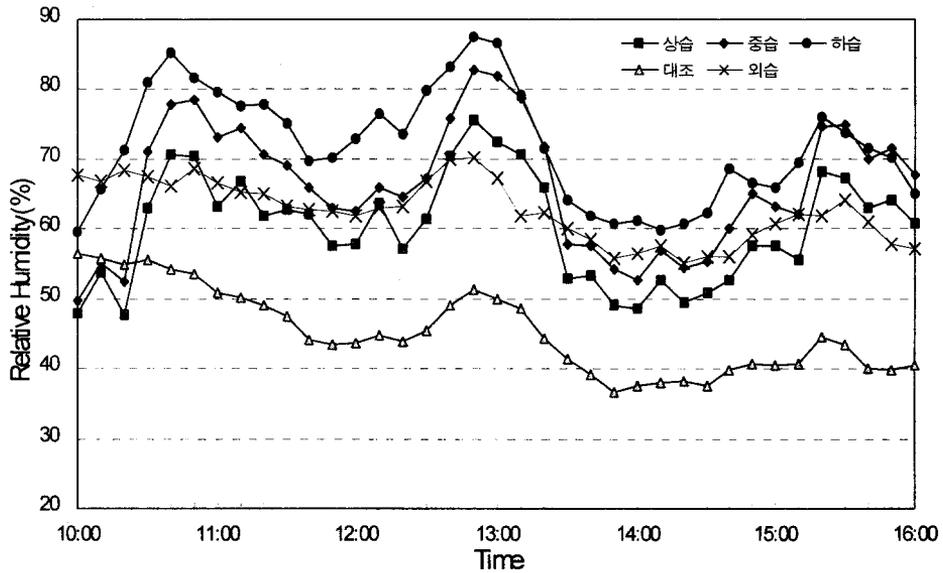
환기조건에 따른 포그시스템의 냉방효과를 분석하기 위하여 천창만 완전 개방한 경우, 천창은 완전 개방하고 측창은 1/2만 개방한 경우, 천창과 측창 모두 완전히 개방한 경우로 나누어 분석하였다. 세 조건 모두 제습을 하지 않았으며, 제어방식은 타임제어이다.

### 가) 천창만 완전 개방

무차광상태에서 분당 환기회수가 평균 0.26회이고, 오전 10시부터 오후 4시까지 일정간격(25초 분무, 90초 중지)으로 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화는 그림 2-13과 같다. 포그시스템 가동시간동안 중하부의 평균기온은 37.1℃이고, 평균 상대습도는 68.0 %이다. 대조구 온실과 온도 차이가 없었으며 외기온보다는 5℃정도 높았다. 포그시스템 가동 직후 냉방효과가 나타났으나 내부에 분사된 포그가 증발과 동시에 배출되지 못하여 시간이 지날수록 냉방효과가 감소한 것으로 나타났다.



(a) 온도

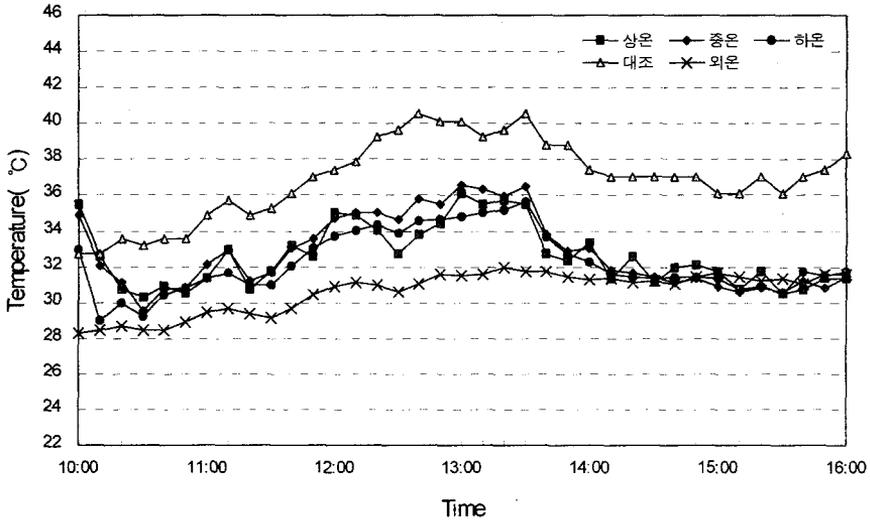


(b) 상대습도

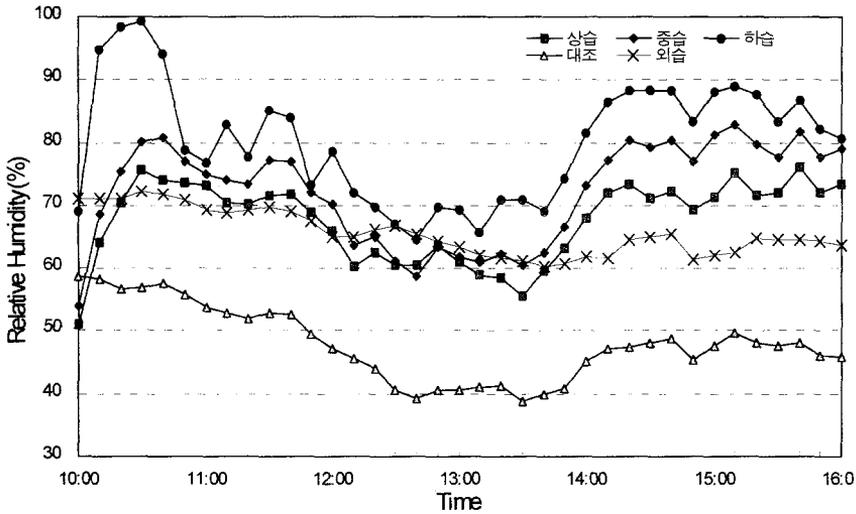
그림 2-13. 온실 내부 온도 및 상대습도 (천창만 완전 개방)

나) 천창 완전 개방, 측창 1/2 개방

무차광상태에서 분당 환기회수가 평균 0.77회이고, 오전 10시부터 오후 4시까지 일  
정간격(25초 분부, 90초 중지)으로 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및



(a) 온도



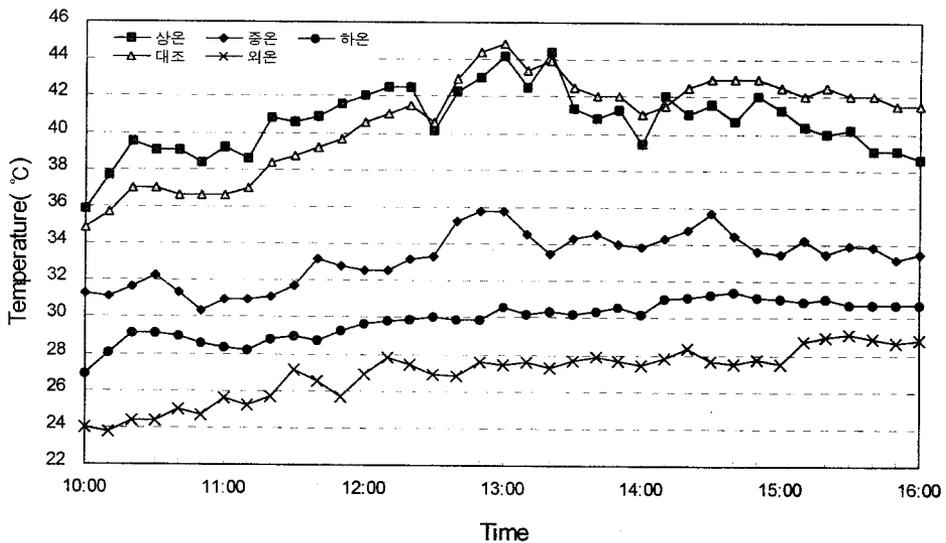
(b) 상대습도

그림 2-14. 온실 내부 온도 및 상대습도 (천창 완전 개방, 측창 1/2 개방)

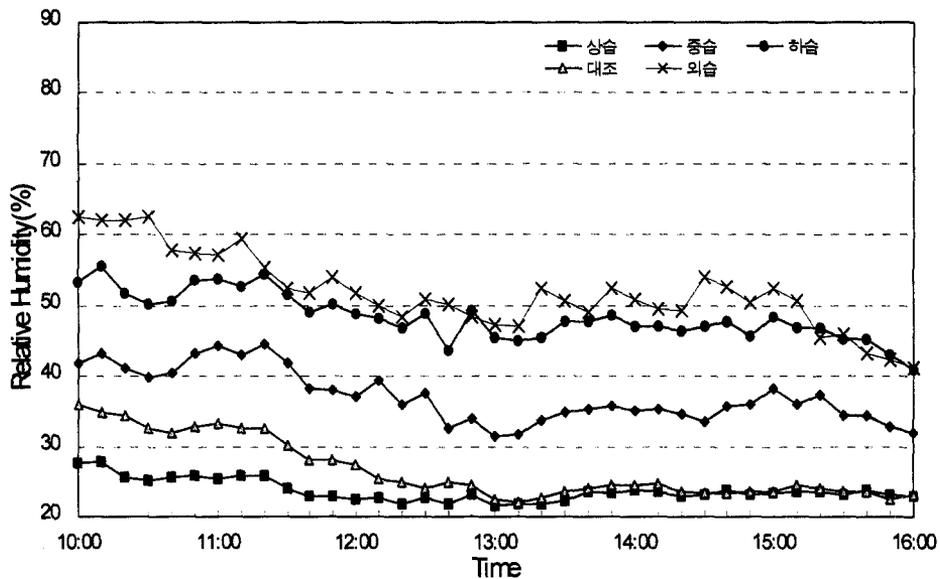
습도 변화는 그림 2-14와 같다. 포그시스템 가동과 동시에 온실 내부의 기온이 내려가는 것을 볼 수 있다. 포그시스템 가동시간동안 내부의 기온은 대조구 온실보다 4℃정도 낮았고, 외기온보다는 2℃ 높았다. 그러나, 풍속이 일정했던 오후 2시부터 4시까지 내부에서의 증발률이 82%로 높았으며, 온실 내부 기온은 31℃ 전후로 안정되게 나타났으며, 외기온과 같았다.

다) 천창과 측창 모두 완전 개방

차광상태에서 분당 환기회수가 평균 0.91회이고, 일정간격(40초 분무, 1분 중지)으로 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화는 그림 2-15와 같다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 외기온보다 4℃ 높았고, 대조구 온실 보다는 10℃ 낮았다. 온실 내부의 상대습도가 54%로 증발률이 떨어지고 실험온실의 규모가 작기 때문에 풍속의 영향을 크게 받아 온실 내부에서 증발하지 못한 채 외부로 배출되는 포그 입자가 관찰되었다.



(a) 온도

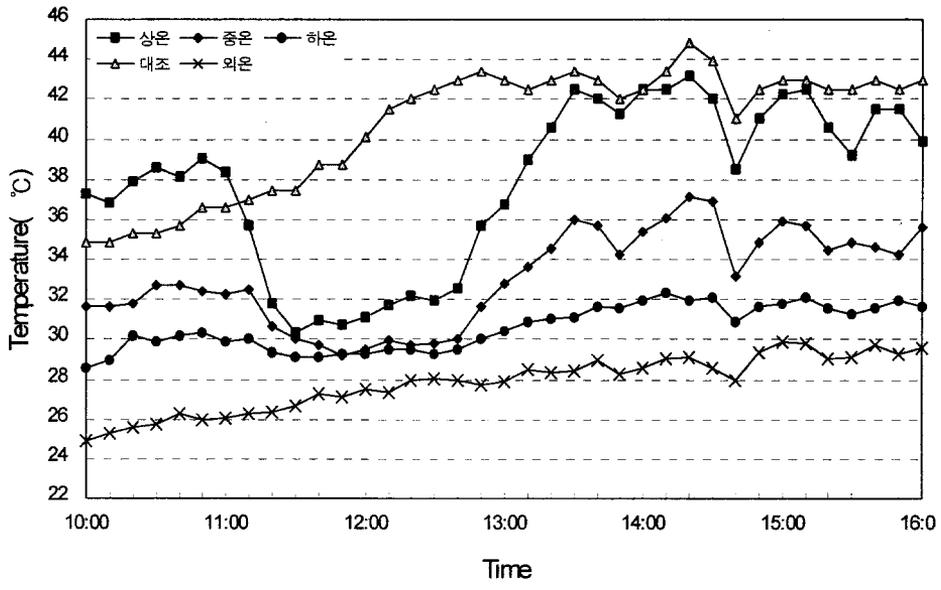


(b) 상대습도

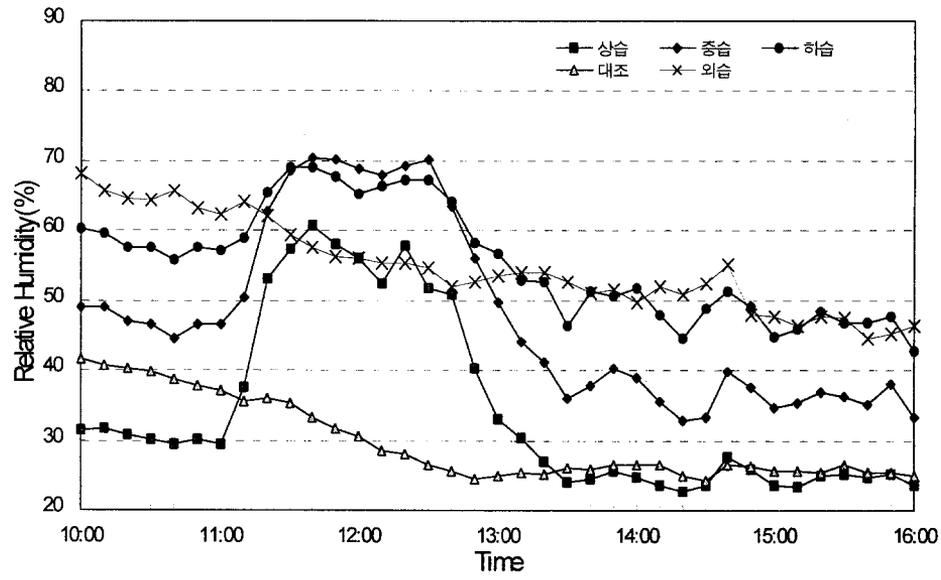
그림 2-15. 온실 내부 온도 및 상대습도 변화 (환기회수 0.91회/min)

그림 2-16은 차광상태에서 분당 환기회수가 평균 0.82회이고, 일정간격(40초 분무, 1분 중지)으로 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화를 나타낸 것이다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 32℃로 외기온보다 3℃ 높았고, 대조구 온실보다는 8℃ 낮았다. 특히 환기창의 풍속이 1.9 m/s인 12시를 전후하여 온실 내부의 기온이 급격하게 떨어진다. 이러한 현상은 강한 풍속이 차광망을 통과하여 온실 내부의 공기흐름이 원활하게 되어 증발률이 증가된 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터, 환기회수가 증가하고 일정한 풍속이 연속적으로 발생할 때 냉방효율이 증가하였다. 그러나, 자연환기 온실의 경우 외부기상 변화에 따라 환기회수의 변화가 크기 때문에 온실 내부의 환경도 불규칙하게 변한다. 특히 시간제어는 온실 내부의 환경변화를 고려한 제어가 어렵기 때문에 냉방효율을 감소시키는 것으로 판단되어 습도제어에 대한 실험을 수행하였다.



(a) 온도



(b) 상대습도

그림 2-16. 온실 내부 온도 및 상대습도 변화 (환기회수 0.82회/min)

#### 4) 제어방식에 따른 열환경 분석

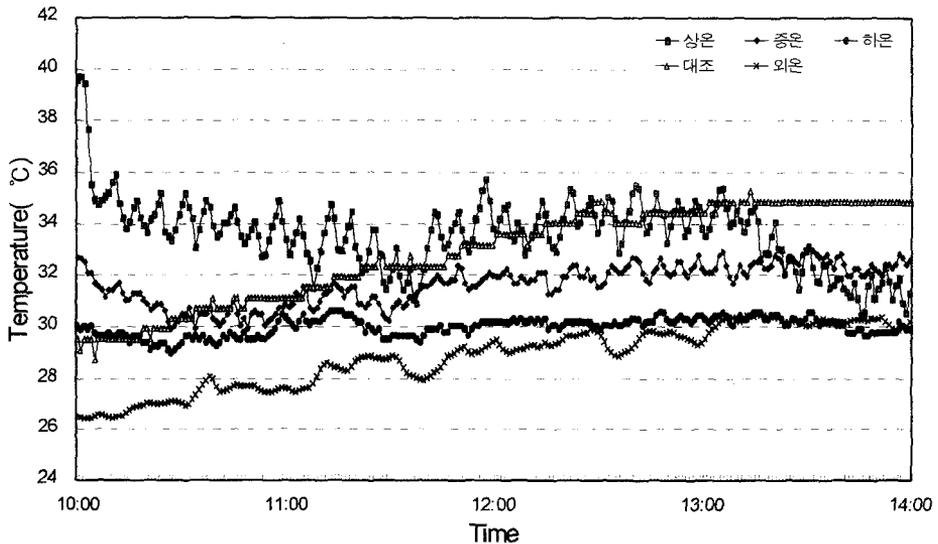
습도제어에 적절한 상·하한치를 설정하기 위해 제습을 하지 않고 차광과 무차광 각각의 경우에 대해 설정 범위를 세 가지로 바꾸어가면서 실험을 하였다. 제어방법에 따른 포그시스템의 냉방효과 분석은 차광상태에서 분무시간 25초에 정지시간 45초로 타임제어한 결과와 습도제어(하한 55%, 상한 65%)한 결과를 비교하였다.

##### 가) 습도제어 상·하한치 설정

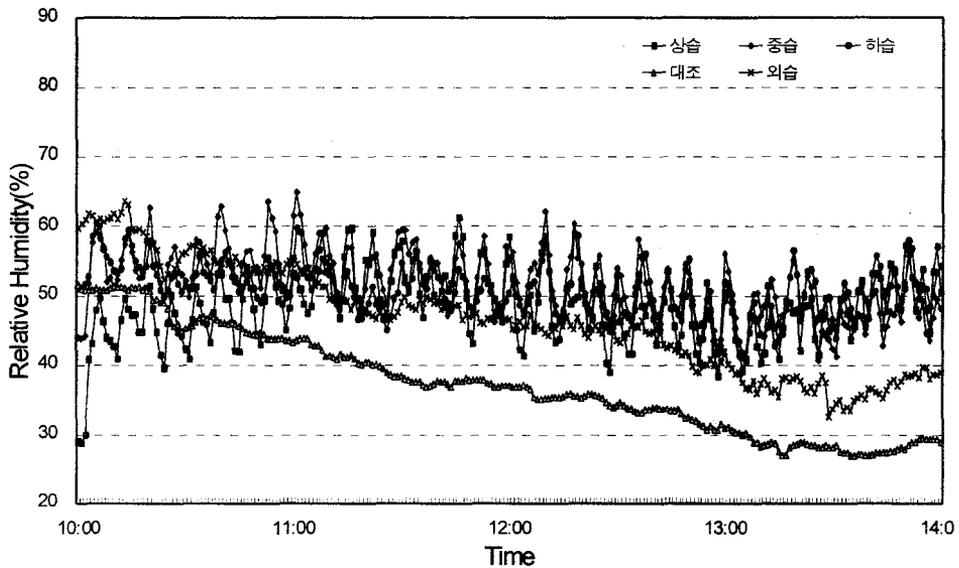
###### (1) 차광

###### (가) 하한 50%, 상한 55%

그림 2-17은 습도제어(하한 50%, 상한 55%)에 의해 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화를 나타낸 것이다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 30.5℃로 외기온보다 0.5℃ 높았고, 대조구 온실보다는 2.8℃ 낮았다. 온실 내부의 습도는 평균 50.8%로 대조구 온실보다 16.5% 높았다.



(a) 온도



(b) 상대습도

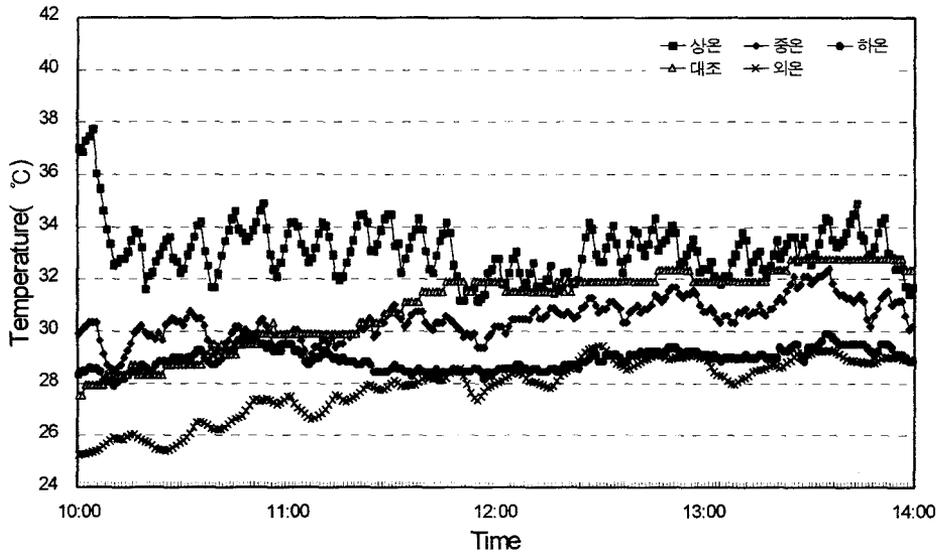
그림 2-17. 온실 내부 온도 및 상대습도 변화(하한 50%, 상한 55%)

(나) 하한 55%, 상한 60%

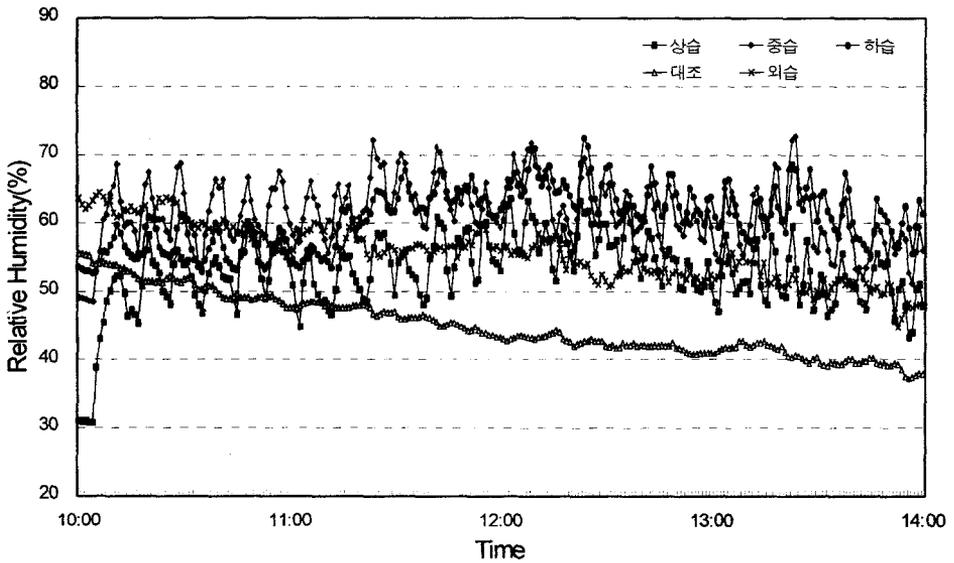
그림 2-18은 습도제어(하한 55%, 상한 60%)에 의해 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화를 나타낸 것이다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 29.8℃로 외기온보다 1.5℃ 높았고, 대조구 온실보다는 1.9℃ 낮았다. 온실 내부의 습도는 평균 59.9%로 대조구 온실보다 17.5% 높았다.

(다) 하한 55%, 상한 65%

그림 2-19는 습도제어(하한 55%, 상한 65%)에 의해 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화를 나타낸 것이다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 29.2℃로 외기온보다 1.2℃ 높았고, 대조구 온실보다는 3.2℃ 낮았다. 온실 내부의 습도는 평균 55.7%로 대조구 온실보다 19.2% 높았다.



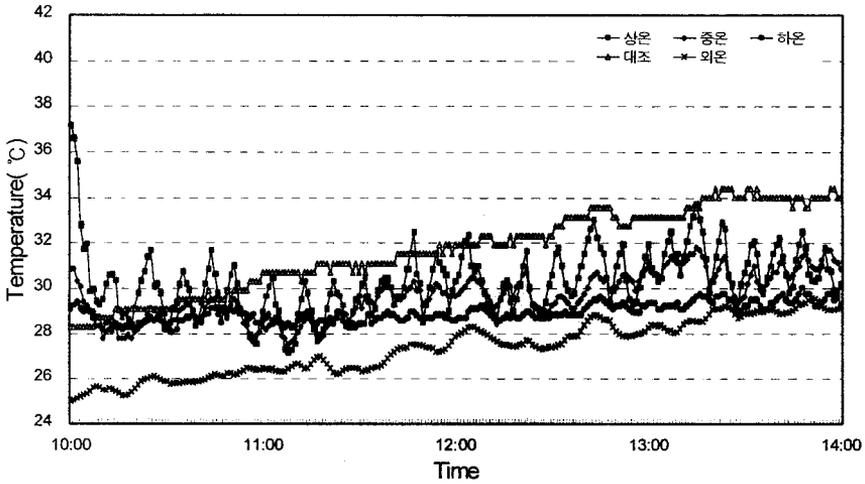
(a) 온도



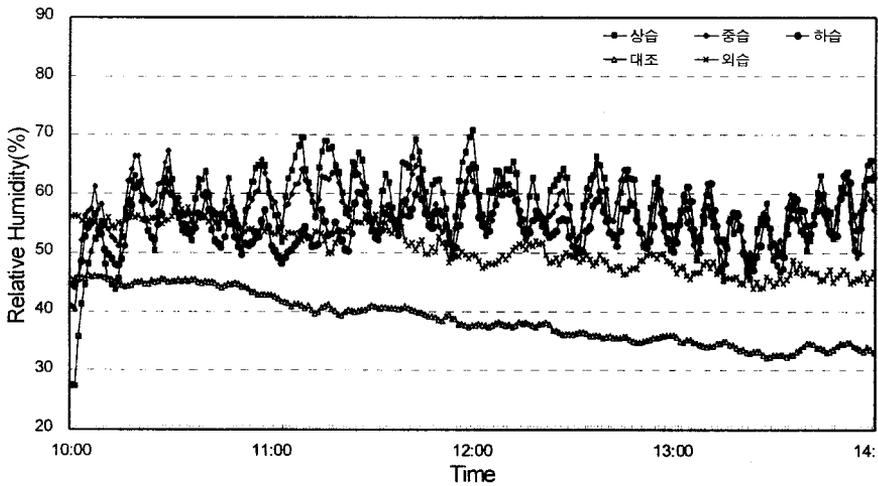
(b) 상대습도

그림 2-18. 온실 내부 온도 및 상대습도 변화(하한 55%, 상한 60%)

이상의 결과로부터, 습도제어를 통해 외부 습도나 풍속의 변화에도 불구하고 온실내 습도를 어느 정도 일정하게 유지시킬 수 있었다. 특히 하한 55%, 상한 65%로 설정한 경우 온실 상·중·하부의 온도 및 상대습도 편차가 다른 설정치에 비해 매우 작은 것으로 나타났다.



(a) 온도



(b) 상대습도

그림 2-19. 온실 내부 온도 및 상대습도 변화(하한 55%, 상한 65%)

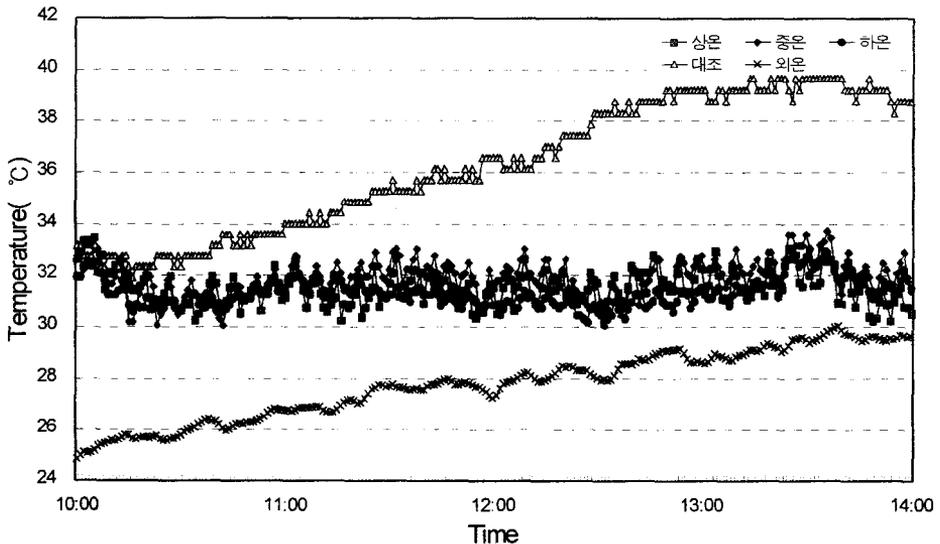
(2) 무차광

(가) 하한 55%, 상한 60%

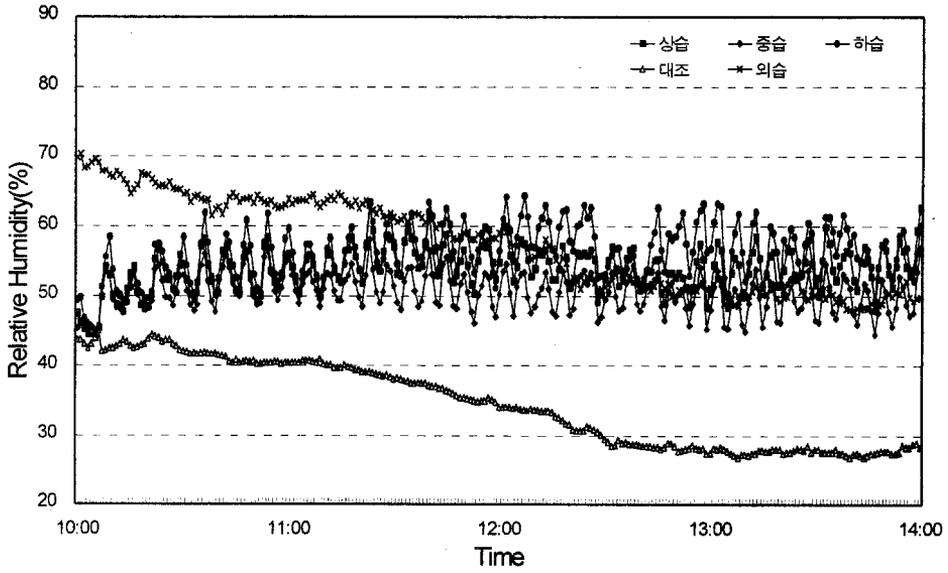
그림 2-20은 습도제어(하한 55%, 상한 60%)에 의해 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화를 나타낸 것이다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 31.6°C로 외기온보다 3.1°C 높았고, 대조구 온실보다는 5.7°C 낮았다. 온실 내부의 습도는 평균 53.5%로 대조구 온실보다 21% 높았다. 온실 상·중·하부의 온도 및 상대습도 차이가 거의 없이 고른 분포를 나타냈다.

(나) 하한 55%, 상한 65%

그림 2-21은 습도제어(하한 55%, 상한 65%)에 의해 포그시스템을 가동한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화를 나타낸 것이다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 30.4°C로 외기온보다 1.9°C 높았고, 대조구 온실보다는 2.5°C 낮았다. 온실 내부의 습도는 평균 56.4%로 대조구 온실보다 18.7% 높았다.

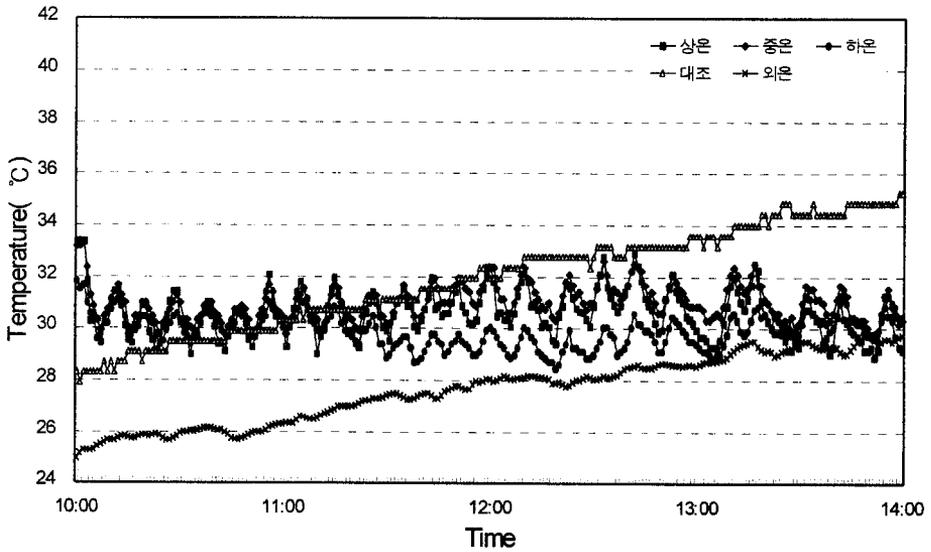


(a) 온도

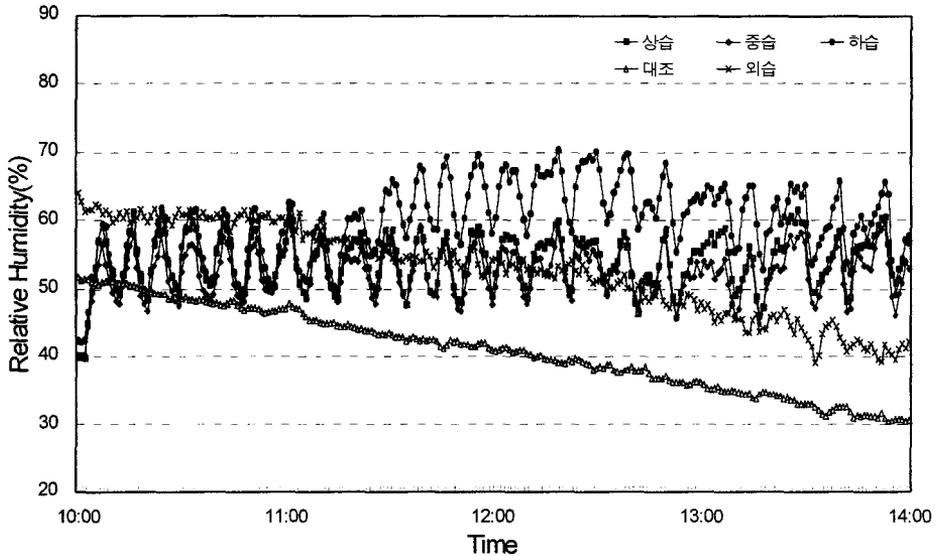


(b) 상대습도

그림 2-20. 온실 내부 온도 및 상대습도 변화(하한 55%, 상한 60%)



(a) 온도



(b) 상대습도

그림 2-21. 온실 내부 온도 및 상대습도 변화(하한 55%, 상한 65%)

이상의 결과로부터, 차광하지 않은 상태에서도 습도제어를 한 경우 온실 내부의 습도를 설정치 수준에서 일정하게 유지할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 설정치를 하한 55%, 상한 60%로 설정하였을 경우 온실 전체의 온도 및 상대습도 분포가 거의 비슷한 값을 보이는 것을 알 수 있지만, 설정치를 하한 55%, 상한 65%로 설정하였을 경우에는 온실하부의 온도와 상대습도가 상부와 중부의 값들과 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이것은 하한값과 상한값의 차이가 클 경우 분무 수량이 증가하게 되고, 하한 55%, 상한 60%의 경우는 분무시간이 2분 내외였고, 하한 55%, 상한 65%의 경우는 분무시간이 3~4분 내외였다. 분무 수량이 많아질수록 상·중부에서 증발되지 않은 분무 입자가 많아져 온실 하부에 축적되면서 온·습도 환경에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 특히 차광을 한 상태에서는 분무된 입자가 차광망에 의하여 온실 하부로 이동하는데 영향을 많이 받지만, 무차광 상태에서는 이러한 영향을 받지 않기 때문에 온실 하부의 환경에 더 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

다. 실제로 차광을 한 경우의 그래프에서는 온실 상부와 중부의 온·습도 변화가 하부에 비하여 더 크게 일어나는데, 이같은 현상도 차광망을 통과하지 못한 분무 입자가 온실의 상부와 중부에만 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

#### 나) 제어방식에 따른 열환경 분석

제어방식에 따른 포그시스템의 냉방효과 분석은 차광을 하고 제습을 하지 않은 동일한 조건에서 분무시간 25초에 정지시간 45초로 타임제어한 결과와 습도제어(하한 55%, 상한 65%)한 결과를 비교하였다

##### (1) 타임제어

무제습상태로 타임제어한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화는 앞의 그림 2-10과 같다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 32.4℃로 외기온보다 1.2℃ 높았고, 대조구 온실보다는 3.5℃ 낮았다. 온실 내부의 습도는 평균 48.2%로 대조구 온실보다 6.2% 높았다.

##### (2) 습도제어(하한 55%, 상한 65%)

무제습상태로 습도제어한 경우의 온실 내부 기온 및 습도 변화는 앞의 그림 2-19와 같다. 포그시스템 가동시간동안 온실 내부의 기온은 평균 29.2℃로 외기온보다 1.2℃ 높았고, 대조구 온실보다는 3.2℃ 낮았다. 온실 내부의 습도는 평균 55.7%로 대조구 온실보다 19.2% 높았다.

이상의 결과로부터, 타임제어는 일정 시간 간격으로 분무하기 때문에 외부 습도, 풍속 등 온실 외부의 환경에 의해 냉방효과가 많은 영향을 받으며, 특히 환기가 잘 안 될 경우에는 온실 내부에 과습한 환경이 조성되어 분무 입자의 증발률이 떨어지는 문제가 발생하게 된다. 습도제어는 온실 내부의 습도에 따라서 분무-가동을 반복하면서 분무량을 조절할 수 있으므로 온실 내부의 습도를 일정하게 유지시킬 수 있고 증발률도 높일 수 있다. 따라서, 타임제어에 비해 습도제어가 더 효과적인 것으로 판단된다.

### 3. 시뮬레이션에 의한 포그냉방온실의 열환경 해석

#### 가. 시뮬레이션의 목적, 이론 및 검증

포그시스템에 관한 연구는 대부분 VETH선도 등을 이용하여 온실 환경이 전체적으로 동질이라는 가정하에서 환기량 및 전체 분무수량 등을 계산하는 정도였으나, 1990년대 중반에 들어서면서 CFD 기법을 이용한 농업시설내의 공기 흐름과 열환경을 분석하는 연구가 관심을 모으기 시작했다.

윤(2000)과 Lee 등(1999)은 CFD 프로그램을 이용하여 다연동 자연환기 온실에서의 공기 유동을 해석한 바 있으며, Al-Arifi(1999)는 차광과 증발산이 온실 환경에 미치는 영향에 관한 연구에서 CFD 기법을 이용한 바 있다. Al-Helal(1998)은 자연환기 온실과 포그냉방온실에서의 온실내 온·습도, 환기율과 총소비수량을 예측하는 연구에서 에너지평형모델과 질량평형모델에 의해 예측된 온실내 온·습도와 CFD 모델에 의해 예측된 값들을 비교한 결과 CFD 모델에서 온·습도 각각 1℃, 2%씩 낮게 예측되는 것으로 보고하고 있다. 이처럼 농업시설내의 환경을 보다 정확하게 해석할 목적으로 CFD 기법을 이용하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

본 연구에서는 CFD 모델을 개발하고 차광과 무차광상태의 온실에서 직접 수집한 온·습도 데이터와 개발된 모델에 의해 예측된 값들을 비교하여 모델의 적합성을 검증한 후 포그냉방온실의 열환경해석 및 설계를 위해 검증된 CFD 모델을 이용하고자 한다.

#### 1) CFD 모델의 구성

##### 가) 모델의 해석 과정

CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션은 유체를 포함하는 시

시스템에 대하여 유체의 흐름, 열전달 그리고 화학적 반응 등과 같은 일련의 물리·화학적 현상들을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 수치적 해를 구하는 분석 도구이다.

이러한 CFD 시뮬레이션은 일반적으로 다음과 같은 몇 단계의 과정을 통하여 수행된다.

- ① 계산 영역의 기하학적 형태를 정의한다.
- ② 계산 영역의 각 하위 영역들에 대하여 mesh를 작성한다
- ③ 시뮬레이션 모델의 구성에 필요한 물리·화학적 현상들을 정의한다.
- ④ 시뮬레이션에 필요한 적절한 모델을 선택한다.
- ⑤ 유체 및 재료의 물리적 특성값과 계산에 필요한 경계조건들을 정의한다.
- ⑥ 적절한 수렴조건과 계산의 반복횟수를 지정하고, 시뮬레이션을 수행한다.

본 연구에서는 CFD 시뮬레이션을 위해 상용 CFD해석 패키지인 Fluent (version 5.4)를 사용하였으며, 기하학적 요소 및 계산 영역의 요소 분할 등은 GAMBIT(version 1.3)을 이용하였다. Fluent는 Fluent사에서 개발한 프로그램으로 C언어로 되어 있다.

패키지들간의 관계는 그림 2-22와 같으며 본 연구에서는 Gambit에서 기하학적 형상 및 격자를 생성하여 Fluent로 불러들인 다음 여러 가지 조건을 입력하여 시뮬레이션하는 방식을 채택하였다.

## 나) 모델의 기본 방정식

### (1) 기본방정식

CFD 기법은 일련의 이송방정식들을 수치해석적으로 풀어 줌으로써 유동의 평균속도벡터장의 계산을 가능하게 한다. 이 유동에 관련된 이송현상들을 나타내는 보존 또는 평형방정식들은 식 (2-11)과 같은 일반적인 형태를

갖는다.

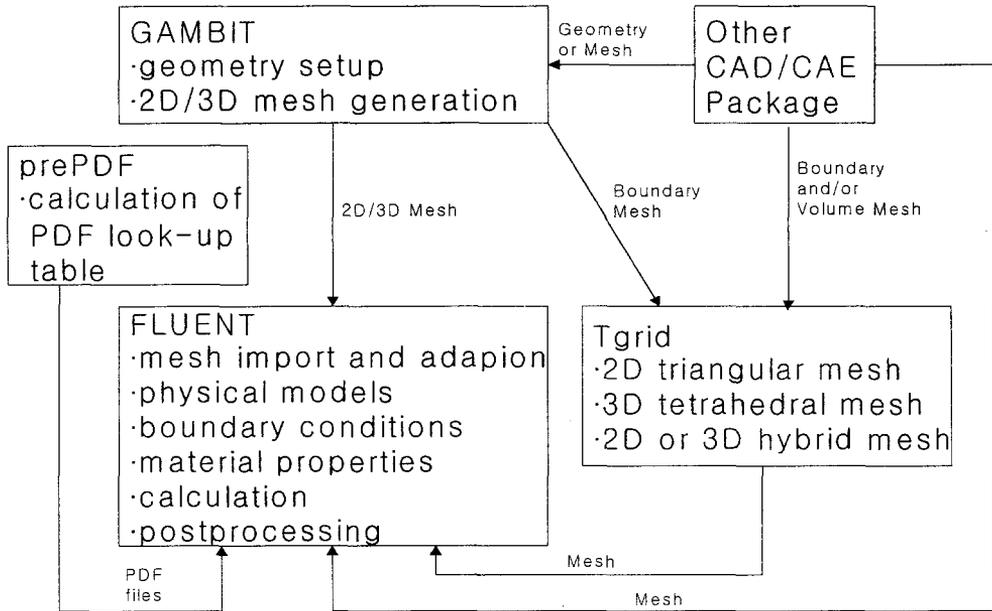


그림 2-22. Fluent CFD 모델의 해석 과정

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \phi \vec{v} = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\phi} \vec{\nabla} \phi) + S_{\phi} \quad (2-11)$$

$\vec{v}$  : 속도벡터,  $\Gamma_{\phi}$  : 확산계수

$S_{\phi}$  : 생성항,  $\phi$  : 이송된 양의 농도

전체질량의 평형방정식(연속방정식)에서는  $\phi$ 가 밀도  $\rho$ 에 해당된다. 유동장에서는 운동량이 이송되며  $\phi$ 는  $\rho \vec{v}$ 에 해당된다. 식 (2-11)은 세 개의  $\rho \vec{v}$ 에 관련된 세 개의 운동량 보존 방정식(Navier-Stokes 방정식)들을 나타내게 된다. 만약 유동장에서 에너지 또한 이송된다면,  $\phi$ 가  $\rho c_p T$ 에 해당

되는 별도의 방정식이 온도장을 묘사하게 된다. 또 중력이 고려될 때는 부력  $\rho \vec{g}$ 가 운동량 보존 방정식의 생성항에 추가되는데, 여기서  $\vec{g}$ 는 중력가속도이다. 이와 같이 식 (2-11)은 유동의 속도를 나타내는 운동량 보존방정식(Navier-Stokes equation)과 연속방정식, 그리고 온도장을 나타내는 에너지평형방정식 등을 포괄하여 표현한 편미분방정식들의 집합체라고 할 수 있다.

이 편미분방정식들을 동시에 풀기 위해 사용되는 해석기법이 CFD이다. CFD 기법을 이용한 열 및 유체의 유동해석에 있어 가장 일반적인 수치해법은 유한체적법(finite volume method, FVM)으로 이것은 공간과 시간을 이산화하고 격자상에서 이송방정식들을 풀어 그 해를 얻는 방법이다. 이 때 그 유동에 관계되는 바람, 태양복사 등과 같은 외적인 요인들의 영향은 경계조건으로써 고려된다. 제어체적을 기반으로 한 해석기법은 다음과 같은 과정을 거쳐 방정식의 해를 구한다.

우선, 격자에 의해 분리된 계산영역의 제어체적들을 이산화한다. 그리고 각각의 제어체적에 대한 지배방정식들을 적분하여 속도, 압력, 온도 등 미지의 이산화된 종속변수들에 대한 대수방정식들을 구성한다. 마지막으로 이산화된 방정식들을 선형화하고, 그 선형방정식들의 해를 종속변수들의 값으로 부여한다.

Fluent에서는 두 가지 형태의 수치해석방법을 제공하고 있는데, 분리해석법(segregated solver)과 동시해석법(coupled solver)이 그것이다. 이 두 가지 수치해석법은 모두 유한체적법이라는 유사한 이산화 과정을 채용하고 있지만, 이산화된 방정식을 선형화하고 풀어내는 방법이 서로 다르다. 분리해석법은 지배방정식들을 순서에 따라 연속적으로 푸는 방법이며, 동시해석법은 지배방정식들을 동시에 푸는 방법이다.

(가) 연속방정식

질량보존방정식 혹은 연속방정식은 식 (2-12)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (2-12)$$

$\rho$  : 유체의 밀도( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $u_i$  :  $i$  방향의 유속( $\text{m/s}$ )

$S_m$  : 단위 시간, 단위체적당 질량 생성율( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$t$  : 시간(sec),  $x$  : 길이(m)

이 방정식은 질량보존방정식의 일반적인 형태로서, 압축성 흐름뿐만 아니라 비압축성 흐름에 대해서도 타당하다. 질량의 생성항인  $S_m$ 은 물방울의 증발 등과 같은 추가적인 질량의 생성이 없는 경우에는 0이 되지만, 지속적인 질량의 공급원이 있는 경우에는 그 값을 고려해 주어야 한다. 예를 들면, 포그시스템과 같은 증발냉각시스템을 가동하는 경우나 식물의 증산작용 또는 식물의 재배과정에서 증발되는 수분의 양이 고려해야 할 만큼 큰 경우에는 그 질량생성율을 고려해 주어야만 한다. 이 방정식은 궁극적으로 유체의 밀도  $\rho$ 를 계산하기 위해 이용된다.

(나) 운동량보존 방정식

운동량보존방정식은 Navier-Stokes 방정식이라고도 불리우며 식 (2-13)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2-13)$$

여기서,  $p$ 는 정압을 나타내고,  $F_i$ 는 외력 또는 임의로 정의된 힘에 의한

작용을 나타낸다. 예를 들면, 온실내의 공기유동에 영향을 미치는 순환팬의 설치로 인한 영향 등이 이에 포함된다.  $g_i$ 는 중력가속도( $m/s^2$ )로서 이를 포함한 항은 부력효과가 공기유동에 미치는 영향을 나타내게 된다. 응력텐서  $\tau_{ij}$ 는 식 (2-14)와 같이 주어진다.

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (2-14)$$

여기서,  $\mu$ 는 분자의 점성계수를 나타내고, 우변의 두 번째 항은 체적팽창 효과를 나타낸다.

#### (다) 에너지 방정식

온도장(temperature field)을 나타내기 위한 에너지 방정식은 식 (2-15)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \rho c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (2-15)$$

$c_p$  : 비열( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $T$  : 온도(K)

$k$  : 열전도 계수( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $S_h$  : 단위체적당 에너지 발생률( $J \cdot m^{-3}$ )

#### (2) 난류 해석 모델

자연계 및 공학문제에 있어서 발생하는 대부분의 유동은 난류이며, 온실의 공기유동 문제 역시 난류이다. 온실의 공기유동에 대한 수치해석에 있어서 일반적으로 격자보다 더 작은 영역 내에서 발생하는 난류유동은 기본방정식들만으로는 풀 수 없으므로 복잡하고 난해한 난류유동을 단순화 할 수 있는 난류모델의 도입이 필수적이다. 난류는 비정규성을 갖는 유동이므로 결정론적인 접근이 어려워서 통계학적인 방법에 의존해왔다. 혼합의 속도를

증가시키고 운동량, 열 및 질량전달률을 높이는 역할을 하는 난류의 확산성 또한 난류유동의 중요한 특성 중 하나이다.

난류모델의 선택은 유동을 둘러싼 물리적 환경, 문제의 특성을 고려한 가정 조건, 요구되는 해의 정확도, 컴퓨터의 계산능력, 시뮬레이션을 위한 계산시간 등의 조건들에 따라 결정되어야 하는 일이다.

현재까지 기체인 공기의 유동해석에 있어서 가장 범용적인 난류모델은  $k$ - $\epsilon$ 모델(Harlow and Nakayama, 1968; Launder and Spalding, 1974)이다. 이 모델에서는 난류운동에너지  $k$ 와 그것의 소멸률  $\epsilon$ 의 두 현상학적 변수들의 향으로 난류점성을 표현한다. 이러한  $k$ - $\epsilon$ 모델을 이용해 공기의 유동을 해석할 경우에는 앞에서 소개한 일반적인 이송방정식 이외에 변수  $k$ 와  $\epsilon$ 에 대해 쓰여진 두 개의 방정식을 추가로 풀어야 한다.

$k$ - $\epsilon$ 난류모델에는 그 표현 방법에 따라서 표준  $k$ - $\epsilon$ 모델, RNG 모델, realizable  $k$ - $\epsilon$ 모델 등으로 발전되어 왔다. 각 모델에 대한 설명은 다음과 같다.

#### (가) 표준 $k$ - $\epsilon$ 모델

표준  $k$ - $\epsilon$ 모델은 가장 일반적인 난류해석에 적용되는 모델로서 가장 단순하고 완전한 난류모델로 평가된다. 이것은 각각 다른 두 개의 이송방정식을 통해 난류속도와 길이 척도를 독립적으로 결정할 수 있는 모델로서 공학적인 유동계산에 가장 널리 사용되어 왔다.

난류운동에너지 방정식( $k$ -방정식)은 식 (2-16)과 같다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (2-16)$$

$k$  : 난류운동에너지( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ),  $\epsilon$  :  $k$ 의 소멸률( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )

$\rho$  : 밀도( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $\mu$  : 점성계수,  $\sigma_k$  :  $k$ 에 대한 난류 Prandtl 수

$G_k$  : 평균 속도의 경사로 인해 발생하는 난류운동에너지

$G_b$  : 부력으로 인해 발생하는 난류운동에너지

$Y_M$  : 총소실률에 대한 압축성 난류에서 변동부의 팽창에 대한 기여도

또, 난류점성  $\mu_t$ 는 다음과 같이  $k$ 와  $\varepsilon$ 의 조합으로 계산된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2-17)$$

여기서,  $C_\mu$ 는 상수이다.

그리고, 난류운동에너지소산 방정식( $\varepsilon$ -방정식)은 식 (2-18)과 같다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (2-18)$$

$\sigma_\varepsilon$  :  $\varepsilon$ 에 대한 난류 Prandtl 수

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  : 모델의 상수

#### (나) RNG 모델

RNG(renormalization group) 모델은 표준  $k$ - $\varepsilon$ 모델의 일부 계수들을 수정한 것으로 엄격한 통계적 기법을 사용하여 유도된 것이다. RNG 모델의  $k$ 와  $\varepsilon$ 에 관한 두 방정식은 식 (2-19)와 식 (2-20)과 같다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (2-19)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \end{aligned} \quad (2-20)$$

$a_k$  :  $k$ 에 대한 유효 Prandtl 수의 역수

$a_k$  :  $\varepsilon$ 에 대한 유효 Prandtl 수의 역수

$\mu_{eff}$  : 유효점성계수

$$R = \frac{C_{\mu} \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \kappa \quad (2-21)$$

여기서,  $\eta \equiv (Sk)/\varepsilon$ ,  $\eta_0=4.38$ ,  $\beta=0.012$ 이고, 회전을  $S$ 는

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

이다.

#### (다) Realizable $k$ - $\varepsilon$ 모델

Realizable  $k$ - $\varepsilon$  모델은 상대적으로 최근에 개발된 것으로 두 가지 중요한 방법에 있어서 표준  $k$ - $\varepsilon$  모델과 차이가 있다.

첫째, Realizable  $k$ - $\varepsilon$  모델은 난류점성에 대한 새로운 공식을 포함한다. 둘째, 소실률  $\varepsilon$ 에 대한 새로운 이송방정식이 mean-square 와류 변동의 이송에 대한 정확한 방정식으로부터 유도되었다.

Realizable  $k$ - $\varepsilon$  모델의 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (2-22)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \\ &+ \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} C_{3\varepsilon} G_b \end{aligned} \quad (2-23)$$

$$\text{여기서, } C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (2-24)$$

$$C_2 = \text{Constant}$$

위 식에서 알 수 있듯이  $k$ -방정식은 표준  $k$ - $\epsilon$ 모델, RNG 모델의 경우와 상수값을 제외하고는 같음을 알 수 있다. 그러나,  $\epsilon$ -방정식은 다른 두 모델들과 전혀 다른 형태를 취하고 있다. 특히  $\epsilon$ -방정식의 오른쪽 두 번째항인 생성항에  $k$ 의 생성이 포함되지 않은 것은 그것이 다른  $k$ - $\epsilon$ 모델들의  $G_k$ 항과 다르다는 것을 나타낸다. 이 모델은 표준  $k$ - $\epsilon$ 모델보다 폭넓은 유동문제에 있어 타당한 결과를 보이는 것으로 연구되어 왔다.

realizable  $k$ - $\epsilon$ 모델에서 상수들의 기본값은 다음과 같다.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2$$

### (3) 복사 해석 모델

복사로 인한 열환경의 변화 및 에너지 방정식을 해석하기 위하여 Fluent (version 5.1)에서 제공하는 복사모델에는 DTRM(Discrete Transfer Radiation Model), P-1 복사모델, DO(Discrete Ordinates) 복사모델, Rosseland 복사모델 등이 있다. 이 중 DO 모델은 유리와 같은 투명한 벽 또는 표면에 대한 복사를 해석하기에 가장 적합한 모델로 알려져 있다. 또한 특정한 조건의 문제에만 뛰어난 성능을 발휘하는 다른 모델들과는 달리 DO 모델은 대부분의 일반적인 조건에 대하여 신뢰성 있는 해석결과를 제공하는 모델이다.

다음 식 (2-25)는 DO 모델을 위한 복사전달방정식(RTE)를 나타낸 것이다.

$$\frac{d(Is_i)}{dx_i} + (a + \sigma_s)I(r, s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s')\Phi(s \cdot s')d\Omega' \quad (2-25)$$

$r$  : 위치벡터,  $s$  : 방향벡터,  $s'$  : 분산되는 방향의 벡터

$s_i$  :  $s$ 의  $i$ 방향 구성요소,  $a$  : 흡수계수

$n$  : 굴절지수,  $\sigma_s$  : 분산계수

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수 ( $5.672 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )

$I$  : 총복사강도,  $T$  : 기온,  $\Phi$  : 형상함수,  $\Omega'$  : 입체각

굴절지수(refractive index)  $n$ 은 유리와 같은 semi-transparent 매체에서의 복사를 고려할 때 특히 중요한 값이다. 식 (2-25) 좌변의 두 번째 항,  $I(a + \sigma_s)$ 은 매체 내로 유입된 복사에너지( $I$ ) 중에서 흡수와 산란에 의해 손실되는 에너지를 의미하고, 우변의 첫 번째 항은 매체내의 gas emission에 의해 발생하는 복사에너지이며, 우변의 두 번째 항은 매체 내에서의 scattering에 의해 추가로 얻어지는 복사에너지를 의미한다.

#### (4) 부력 해석에 관한 모델

유선에서 중력 및 에너지에 대한 사항을 활성화하면 부력이 고려된다. 여기서 밀도가 온도에 대한 함수이지만 그 범위가 작다면 Boussinesq 모델을 사용하게 되는데 온실의 경우에 이용이 가능하다. 이것은 계산 속도를 증가시키면서도 정확한 해를 구할 수 있다. Boussinesq 모델은 식 (2-26)과 같다.

$$(\rho - \rho_0)g \cong -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (2-26)$$

$\beta$  : 열 확장 계수

유체의 밀도가 변하면 부력이 발생하게 되는데, 그러면 밀도가 온도의 함수가 되어 계산이 복잡해지고 계산시간이 오래 걸리므로 밀도의 변화 폭이 좁다면 밀도를 일정하게 놓고 근사식으로 계산하는 것이다. 자연대류에서

밀도가 작은 범위에서 변한다면 값이 거의 정확한 모델이다. 식 (2-26)을 정리하면 다음과 같다.

$$\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T) \quad (2-27)$$

#### (5) Discrete Phase 모델

유체 내에 분사된 입자에 의한 열환경 변화를 해석하기 위한 모델로서 포그냉방온실내 열환경 및 수분환경을 시뮬레이션할 때 포그 노즐부터 분사된 물입자에 대한 이동경로 해석과 공기와의 열전달에 관한 해석을 하는 것이 가능하다. 유체 내에 분사된 입자의 궤도를 계산하는 방정식은 식 (2-28)과 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho) + F_x \quad (2-28)$$

$F_D(u - u_p)$  : 포그입자의 단위질량당 drag force

$u$  : 유체의 속도(m/s),  $u_p$  : 입자의 속도(m/s)

$\rho$  : 유체의 밀도( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $\rho_p$  : 입자의 밀도( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

한편 Fluent(version 5.4)에서는 분사된 입자의 타입을 Inert, Droplet, Combusting의 세 가지 중에서 선택하도록 하고 있는데, 이 중에서 포그 노즐에서 분무된 입자와 같이 증발에 의한 열환경을 해석하기 위해서는 Droplet 타입을 선택해야 한다. Drop 타입 입자의 열전달은 식 (2-29)와 같다.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_r^4 - T_r^4) \quad (2-29)$$

$m_p$  : 입자의 질량(kg),  $c_p$  : 입자의 열용량( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$A_p$  : 입자의 표면적( $m^2$ ),  $T_\infty$  : 입자가 있는 곳의 유체온도(K)

$h$  : 대류열전달계수( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ),  $\varepsilon_p$  : 입자 방사율

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수( $5.672 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ )

$\theta_R$  : 복사온도(K)

#### 다) 격자망 생성

CFD 시뮬레이션을 위한 격자망을 구성하기 위하여 Gambit 프로그램을 이용하였다. 온실 내부의 온·습도 환경을 예측하기 위한 시뮬레이션이기 때문에 온실 내부의 격자는 조밀하게 하고 온실 외부로 갈수록 성기게 구성하였다. 모델의 외부 단면은 온실 구조로부터 20m 거리를 유지하도록 구성하여 외부 단면이 시뮬레이션의 정확성에 영향을 미치는 것을 방지하였고, 외부공기 흐름의 빠른 수렴을 위해 온실 위쪽의 경계면을 약간 경사지게 만들었다. 이렇게 만들어진 격자망은 그림 2-23과 같다.

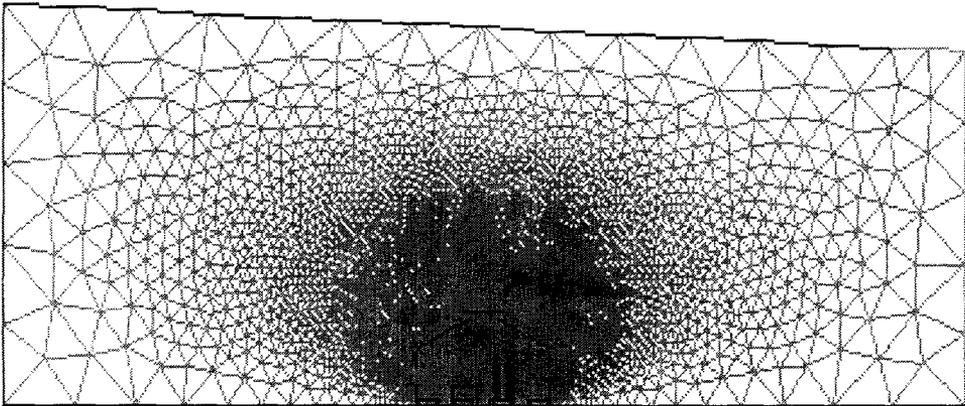


그림 2-23. 시뮬레이션을 위한 격자망

## 라) 모델의 구성

### (1) 해석 모델 선정

지배방정식은 유체해석을 위한 기본적인 3개의 방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 이외에 난류의 해석을 위한 realizable  $k-\epsilon$  난류 모델, 태양복사 및 복사열전달의 해석을 위한 DO 복사모델, 포그 입자의 해석을 위한 Discrete Phase 모델을 추가로 선택하였다.

비선형 형태인 이들 미분방정식들을 선형화하기 위해서 분리해석법 (segregated solver)을 적용하고, 포그가 분무되는 시간 중에는 비정상상태로 해석하였다.

Viscous 모델은 가장 최근에 도입되어 난류의 유동상태를 보다 사실적으로 묘사 가능하고 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 realizable  $k-\epsilon$  모델이 선택되었고, 모델의 상수값들은 일반적인 공기유동해석에 적용되는 추천값들을 사용하였다. 온실 피복재면이나 바닥면 근처에서의 공기흐름은 standard wall functions 방법을 적용하였다. 또한 열부력이 난류유동 및 공기의 흐름에 미치는 효과를 보다 사실적으로 묘사하기 위해 viscous heating 옵션을 추가로 선택하여 온도의 변화에 따른 공기의 밀도 변화가 유동에 미치는 영향이 고려되도록 하였다.

복사모델은 투명한 벽체에 대한 투과의 효과를 고려할 수 있는 DO 모델이 선택되었다. DO 모델의 복사열전달 방정식(RTE)을 이산화하기 위한 극좌표계의 요소분할은 Fluent사에서 권장하는 값을 사용하였다. 태양복사의 파장범위는  $0\sim 3\mu\text{m}$ 의 단파장영역에 집중되어 있고, 흡수계수, 분산계수, 굴절지수, 방사율 등의 파장 영역별 태양복사의 특성은 동일한 것으로 가정하여 non-gray 모델의 설정은 생략하였다. 계산은 기본방정식과 난류방정식을 5번씩 풀 때마다 복사모델의 방정식을 1회 풀도록 설정하였다.

Discrete Phase 모델은 포그 입자의 궤적을 추적하기 위한 모델로서 정확한 계산

이 필요하다고 판단되어 기본방정식을 1회 풀 때마다 1회 풀도록 설정이 되었고, 한번 분무된 입자는 100회 동안 계산을 하는 것으로 설정하였다. 분무 입자는 증발을 묘사할 수 있는 Droplet으로 지정하였고, 분무입자가 태양 복사에너지에 반응을 하는 것을 고려하는 옵션을 추가하였다.

한편, 자연조건하에서 공기 및 열의 유동은 3차원적인 이동경로를 나타낸다. 시뮬레이션을 통해 이러한 공기 및 열의 유동을 3차원으로 해석하는 문제는 컴퓨터의 계산 능력 및 계산 시간을 고려하고, 2차원 해석의 결과와 비교하여 계산 결과가 충분히 개선되는지의 여부를 검토한 후 결정하여야 한다. 실험을 통해 포그 냉방중인 실험온실의 길이 방향에 대한 온도편차를 알아본 결과 그림 2-24에 나타낸 바와 같이 온실의 길이방향에 대한 온도편차가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 계산시간을 고려하여 2차원으로 해석하였다.

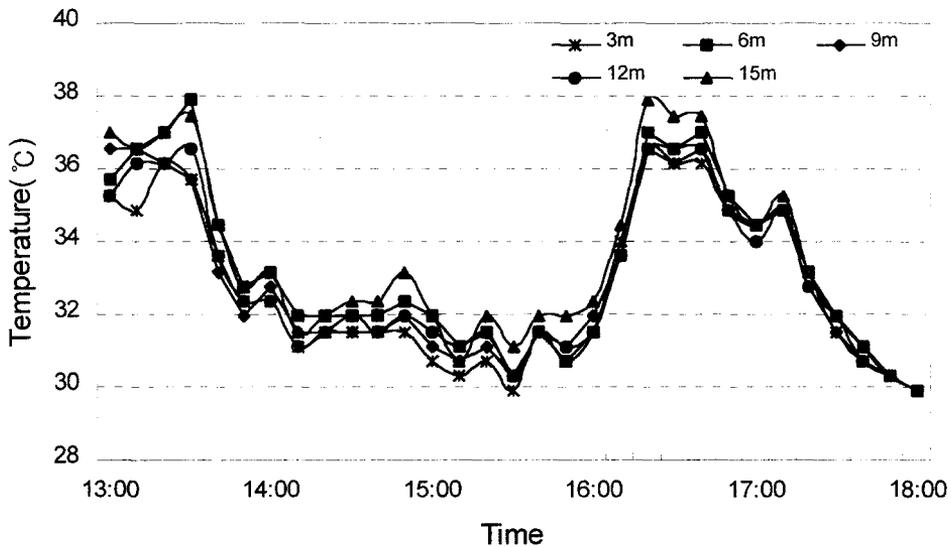


그림 2-24. 온실 길이방향에 따른 온도 변화

해석 모델의 구성을 정리하면 표 2-16과 같다.

표 2-16. 해석 모델의 구성

Classification	Setting of Method
solver	Segregated solver 2D simulation Implicit formulation Absolute velocity formation Unsteady state analysis (1st-order implicit)
Energy equation	Activated
Viscous model	Realized $\kappa$ - $\epsilon$ model
Radiation model	DO
Species model	Multiple species
Discrete phase model	Activated
Multiphase model	Inactivated
Pollutants	Inactivated

(2) 재료의 물리적 특성값 입력

공기의 비열, 전도열전달 계수, 점성계수 등의 값은 문헌의 자료를 이용하거나 Fluent 프로그램에서 제공하는 기본값을 사용하여 상수로 취급하였다. 모델에 입력된 재료들의 물리적 특성값은 표 2-17과 같다.

2) 온실 실험

실험 온실의 제원 및 센서 배치는 그림 2-25에 나타낸 바와 같다. 포그시스템 가동조건은 무차광의 경우 분무시간 45초에 정지시간 45초, 차광의 경우 분무시간 25초에 정지시간 45초로 하였다. 분사방향은 온실 바닥면에 수직방향 위로 하였다.

표 2-17. 모델에 입력된 재료들의 물성치

재료 물성치	Aluminum	Soil	Glass	Wood	PE	Concrete
밀도 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2719	1900	2700	700	960	2100
비열 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	871	2200	840	2310	2090	880
전도열전달계수 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )	202.4	2.0	0.78	0.173	0.33	1.4
흡수율	0.3	0.5	0.1	0.1	0.2	0.6
산란율	0	1	0	0.5	0.5	1
굴절계수	1	1	1	1	1	1
방사율	0.1	0.89	0.87	0.5	0.1	0.71

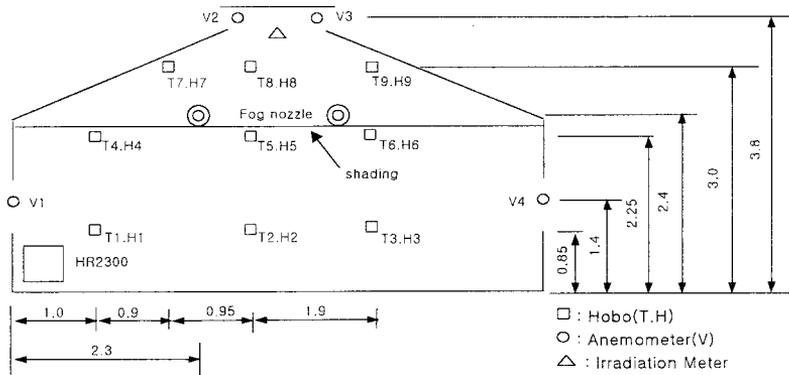


그림 2-25. 실험온실의 제원 및 센서 배치도 (단위 : m)

### 3) 결과 및 고찰

#### 가) 외부기상자료 및 입력값 선정

Fluent CFD 모델의 시뮬레이션에 필요한 외부 기상자료 및 입력값은 차광조건과 무차광조건으로 나누어서 선택을 하였으며, 풍향은 온실의 길이방향에 수직이고( $\pm 10^\circ$ ), 일사가 높으면서 거의 일정한 시간대의 자료를 선택

하였다. 각 조건별로 선택된 자료의 입력값을 살펴보면 표 2-18과 같다.

나) 모델의 검증

(1) 온도

표 2-19는 온실 내부의 각 측정별 온도에 대한 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교한 결과이다. 각 측정별로 무차광조건에서는 0.5~4.4 %의 오차를, 차광조건에서는 0.6~4.1%의 오차를 보였다. 두 조건에서 실측치와 예측치가 비교적 잘 일치하였다.

온실의 벽면에 가까운 지점과 온실의 상부에서 실측치 온도가 높게 나타났는데 이는 온실 벽면에 가까운 값의 경우는 온실 벽면에서의 열 이동량의 영향을 많이 받았기 때문으로 판단되며, 위쪽으로 분사된 입자가 온실 상부에서 일부 증발되고 낙하거리가 증가하면서 하부에서 많이 증발되기 때문으로 판단된다.

표 2-18. 선정된 외부기상자료 및 입력값

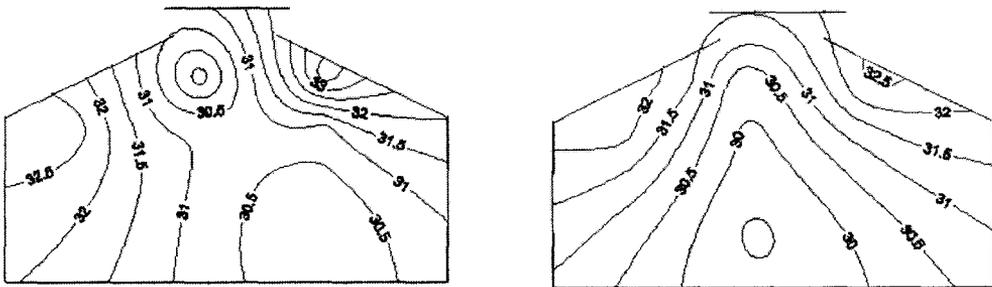
입력변수(단위)	무차광	차광
외부온도(K)	303.85	305.46
외부습도(%)	58.9	50.3
외부일사( $W \cdot m^{-2}$ )	678	902
외부풍속(m/s)	0.44	0.93
외부풍향(degree)	272	87.5
포화수증기압(Pa)	4430	4840
습구온도(K)	298.35	298.05
수온(K)	297.45	297.35
분무시간(sec)	45	25
정지시간(sec)	45	45
분무량(kg/s)	0.00157	0.00157
증발률(%)	70.8	76.3
분무입자크기( $\mu m$ )	20	20

표 2-19. 실측치와 예측치의 온도 비교

측점	무차광			차광		
	실측치 (°C)	예측치 (°C)	차이 (%)	실측치 (°C)	예측치 (°C)	차이 (%)
1	32.0	30.8	+1.2(3.8)	33.2	33.4	-0.2(0.7)
2	30.8	29.4	+1.4(4.4)	31.5	30.7	+0.8(2.6)
3	30.1	30.2	-0.1(0.5)	31.9	31.1	+0.8(2.7)
4	32.8	32.2	+0.6(1.7)	36.1	35.3	+0.7(2.0)
5	30.9	29.9	+1.0(3.3)	32.7	32.9	-0.2(0.7)
6	30.8	31.3	-0.5(1.5)	34.5	33.6	+0.9(2.7)
7	31.1	31.8	-0.7(2.2)	39.2	37.6	+1.6(4.1)
8	29.2	30.1	-0.9(3.0)	31.9	32.1	-0.2(0.6)
9	33.8	32.7	+1.1(3.3)	39.8	37.5	+2.3(5.7)

주) 오차항목에서 ( )안의 값은 상대오차(%)임.

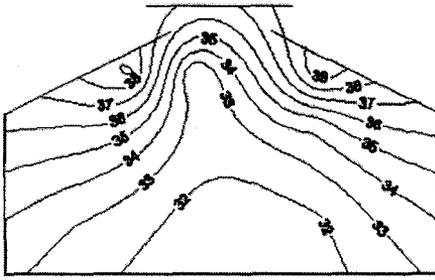
차광, 무차광조건에서의 실측치와 예측치의 온도 분포도를 그리면 각각 그림 2-26, 그림 2-27과 같다.



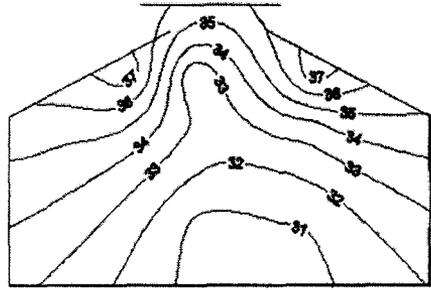
(a) 실측치

(b) 예측치

그림 2-26. 무차광조건에서의 실측치와 예측치의 온도 분포



(a) 실측치



(b) 예측치

그림 2-27. 차광조건에서의 실측치와 예측치의 온도 분포

(2) 상대습도

표 2-20은 온실 내부의 각 측정별 상대습도에 대한 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교한 결과이다. 각 측정별로 무차광 조건에서는 0.6~9.6 %의 오차를, 차광 조건에서는 1.3~10.6%의 오차를 나타내었다. 전반적으로는 온실 하부에서 습도가 높게 나타나는 경향을 보였는데, 이는 작물의 증발산 및 관수에 의하여 습도가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 시뮬레이션에서도 같은 경향을 보이는 것으로 나타났다.

표 2-20. 실측치와 예측치의 상대습도 비교

측점	무차광			차광		
	실측치 (%)	예측치 (%)	차이 (%)	실측치 (%)	예측치 (%)	차이 (%)
1	60.3	66.1	-5.8(9.6)	51.2	53.6	-2.4(4.7)
2	72.5	72.0	+0.5(0.7)	58.3	62.8	-4.5(7.8)
3	72.5	67.2	+5.3(7.3)	59.5	61.9	-2.4(4.1)
4	58.0	57.7	-0.3(0.6)	50.9	47.7	+3.2(6.3)
5	66.1	69.5	-3.4(5.2)	55.6	56.3	-0.7(1.3)
6	66.6	60.6	+6.0(9.0)	48.2	54.8	-6.6(13.8)
7	63.3	58.8	+4.5(7.1)	41.1	42.0	-0.9(2.2)
8	70.7	65.7	+5.0(7.0)	68.2	57.6	+10.6(15.6)
9	55.3	55.7	-0.4(0.7)	37.6	43.1	-5.5(14.5)

주) 오차항목에서 ( )안의 값은 상대오차(%)임.

차광, 무차광조건에서의 실측치와 예측치의 상대습도 분포도를 그리면 각각 그림 2-28, 그림 2-29와 같다.

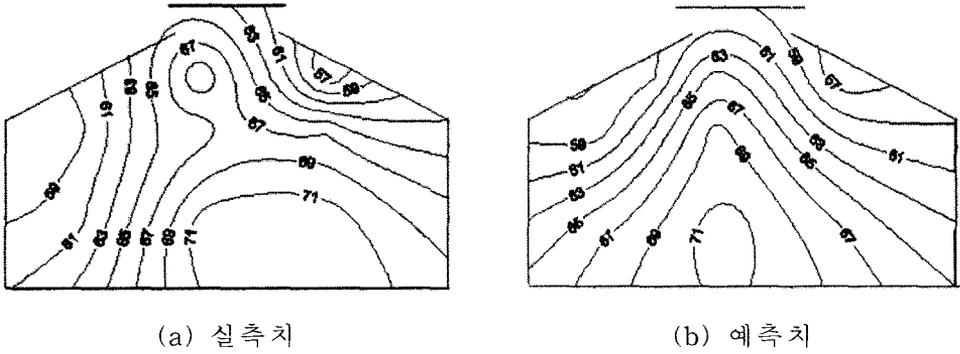


그림 2-28. 무차광조건에서의 실측치와 예측치의 상대습도 분포

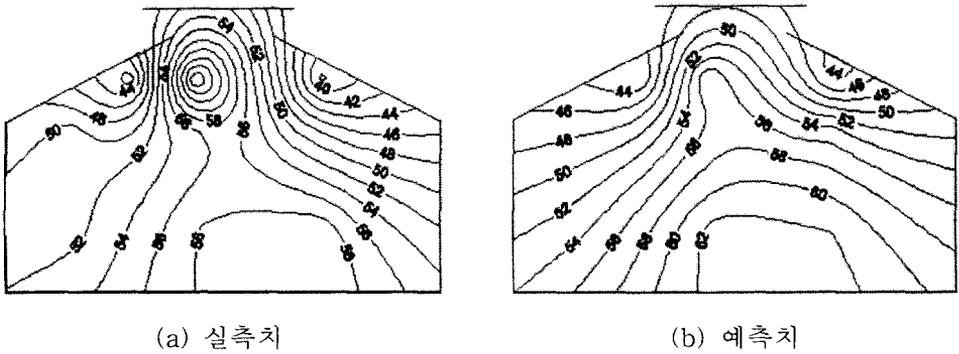


그림 2-29. 차광조건에서의 실측치와 예측치의 상대습도 분포

## 나. CFD 시뮬레이션 모델의 응용

검증된 CFD 시뮬레이션 모델을 이용하여 대형 온실의 냉방 설계를 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 적용된 온실은 3-1G형 3연동 유리 온실이며, 제원은 그림 2-30과 같다.

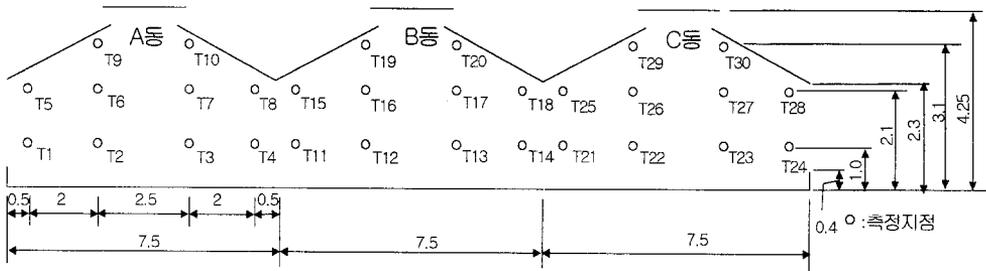


그림 2-30 시뮬레이션에 적용된 온실의 제원

Gambit을 이용하여 위의 온실에 대한 격자망을 그린 후 그림 2-30과 같이 동당 10점을 지정하여 총 30지점에 대하여 온·습도를 예측하였다.

위의 온실에 대하여 노즐 위치 및 환기, 차광 등의 조건을 달리하면서 냉방효과를 분석하였다.

### 1) 노즐 위치에 따른 냉방효과 분석

#### 가) 입력조건

노즐 위치에 따른 포그시스템의 효과를 분석하기 위하여 다른 입력조건은 같게 하고 노즐 위치를 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 외부 기온, 일사량, 습구온도 등의 기본적인 입력자료는 ASHRAE 방식의 냉방설계용 기상자료로부터 TAC 1%인 수원지역의 자료를 이용하였으며, 냉방 목표온도는 30℃, 환기회수는 0.8회, 분무 수량은 표 2-21과 같다. 노즐의 분사방향 및

위치는 표 2-22와 같다. 노즐의 위치는 바람이 불어오는 왼쪽 측벽을 기준으로 일정 간격을 두었고, 그 위치에서 분무 입자가 온실 지붕면에 직접 닿지 않는 한 최대한 높게 설정하였다. 분사방향은 낙하거리를 최대한 확보할 수 있도록 수직 상향으로 하였다.

표 2-21. 외부기상자료 및 입력값

입력변수(단위)	입력값
외부온도(K)	305.75
외부습도(%)	60.1
외부일사( $W \cdot m^{-2}$ )	881
외부풍속(m/s)	0.35
외부풍향(degree)	90
포화수증기압(Pa)	4490
습구온도(K)	299.25
수온(K)	291.15
분무시간(sec)	55
정지시간(sec)	75
분무수량(kg/sec)	0.00157
증발률(%)	85
분무입자크기( $\mu m$ )	20

표 2-22. 노즐 위치에 따른 시뮬레이션 조건

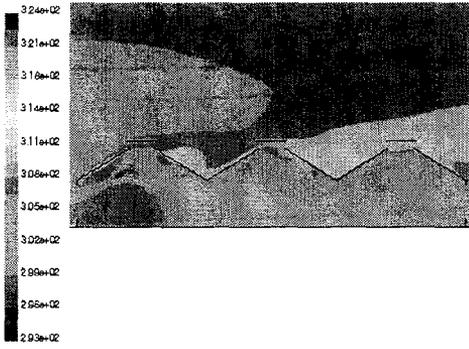
항 목		Case 1	Case 2
노즐 위치	폭방향(m)	1.9, 5.6, 9.4, 13.1, 16.9, 20.6	2.35, 5.15, 9.85, 12.65, 17.35, 20.15
	높이(m)	2.3	2.5
	분사방향	수직 상향	수직 상향
항 목		Case 3	Case 4
노즐 위치	폭방향(m)	2.8, 4.7, 10.3, 12.2, 17.8, 19.7	3.25, 4.25, 10.75, 11.75, 18.25, 19.25
	높이(m)	2.7	3.0
	분사방향	수직 상향	수직 상향

나) 시뮬레이션 결과

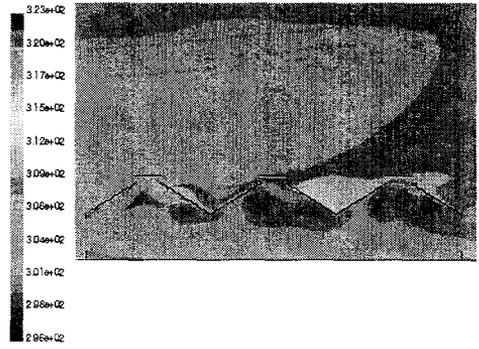
표 2-23은 그림 2-30 온실의 A, B, C동의 측점을 상부, 중부, 하부로 구분하여 평균한 값이다. 각 조건에서 모두 냉방 목표온도인 30℃와 근접한 값을 보였으며 각 조건간에 평균값의 차이는 그다지 크게 나타나지 않았다. 대체로 중부에서 온도가 가장 많이 떨어지는 것으로 나타났으며, 동별로 살펴보면 A동에 비하여 B, C동의 온도가 더 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 A동의 측창으로부터 불어오는 바람에 의하여 A동에서 분무된 입자는 B, C동쪽으로 이동하기 때문으로 판단된다.

표 2-23. 노즐 위치에 따른 각 지점의 평균값

조건 항목 구분		Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
		온도 (℃)	습도 (%)	온도 (℃)	습도 (%)	온도 (℃)	습도 (%)	온도 (℃)	습도 (%)
A동	하부	31.3	67.8	31.3	67.8	31.3	68.0	31.1	69.0
	중부	30.6	71.1	30.8	70.8	30.8	71.1	30.9	70.6
	상부	31.2	71.0	30.7	71.7	30.2	74.8	31.0	70.0
	전체	31.0	69.8	31.0	69.8	30.9	70.6	31.0	69.8
B동	하부	30.5	72.4	30.6	72.4	30.5	72.5	30.5	72.7
	중부	29.7	76.8	29.9	76.6	30.0	75.8	30.1	75.4
	상부	30.3	75.8	30.1	76.1	30.0	76.5	29.8	77.5
	전체	30.2	74.8	30.2	74.8	30.2	74.6	30.2	74.7
C동	하부	30.6	72.5	30.6	72.5	30.6	72.7	30.5	73.0
	중부	29.8	77.1	29.9	77.0	30.0	76.3	29.9	76.8
	상부	30.2	75.8	30.1	76.1	30.4	74.2	30.6	73.2
	전체	30.2	75.0	30.2	75.0	30.3	74.4	30.3	74.6
전체	하부	30.8	70.9	30.8	70.9	30.8	71.1	30.7	71.5
	중부	30.0	75.0	30.2	74.8	30.3	74.4	30.3	74.3
	상부	30.6	74.2	30.3	74.6	30.2	75.2	30.5	73.6
	전체	30.4	73.2	30.5	73.2	30.5	73.2	30.5	73.0



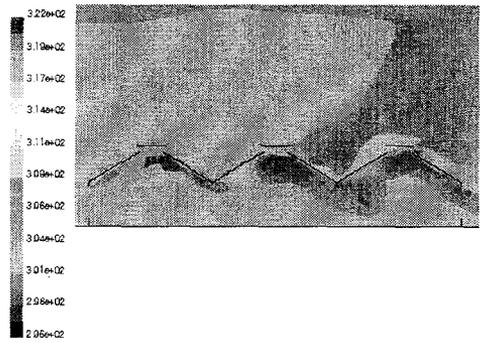
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



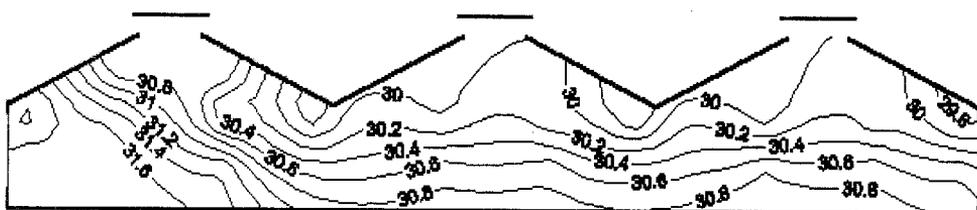
(d) Case 4

그림 2-31. 각 조건별 분무 종료시의 온도 분포

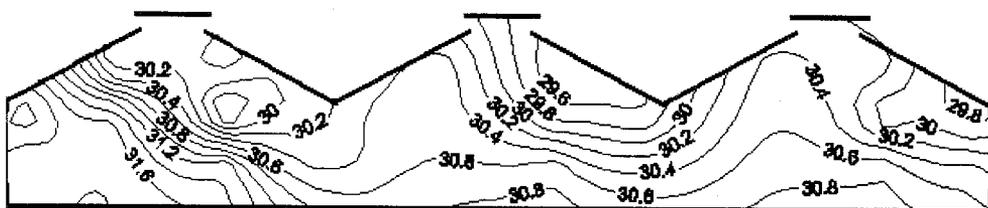
그림 2-31은 각 조건별로 분사가 종료된 시점의 온도 분포를 나타낸 것이다. Case 1의 결과가 분사 종료 후의 온도분포가 가장 고르게 나타났다. 따라서, 노즐의 위치는 작물의 초장, 차광망 높이, 노즐의 분사거리 등을 고려하여 가능한 낮게 설치하고, 측창으로부터 유입되는 바람에 의한 분무 입자의 쓸림현상을 고려하여 주풍향측의 측창에 최대한 근접하게 설치한다. 분사방향은 충분한 낙하거리를 확보할 수 있도록 수직 상향으로 한다. 그림 2-32와 그림 2-33은 각 조건별로 온도 및 상대습도의 분포를 나타낸 것이다.



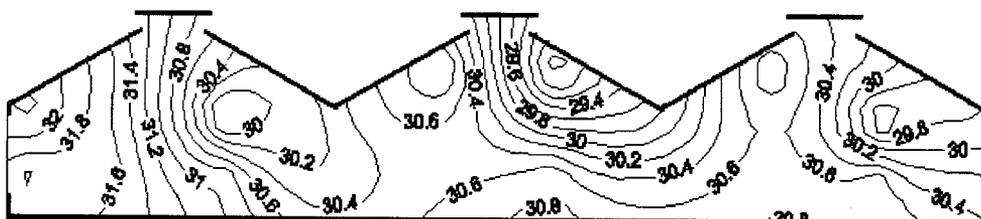
(a) Case 1



(b) Case 2

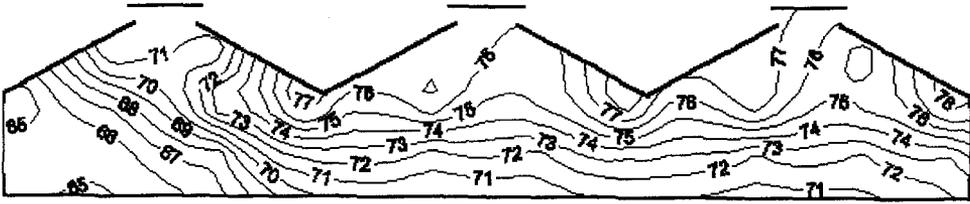


(c) Case 3

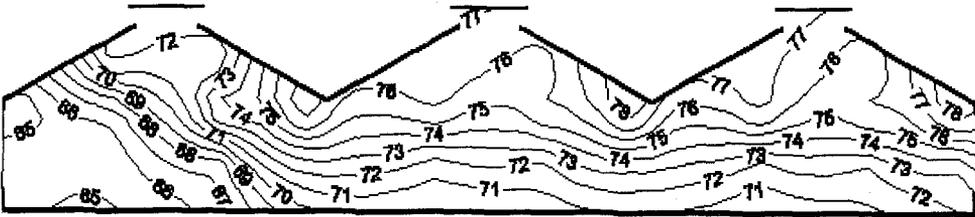


(d) Case 4

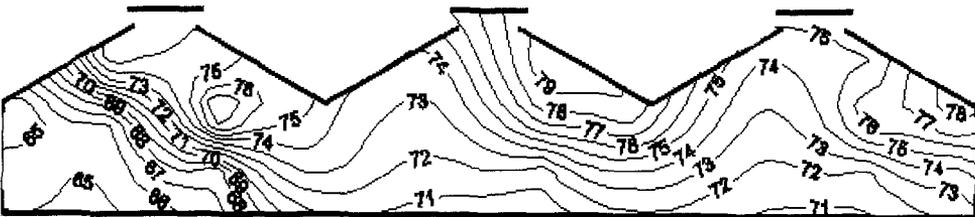
그림 2-32. 각 조건별 온실 내부의 온도 분포도



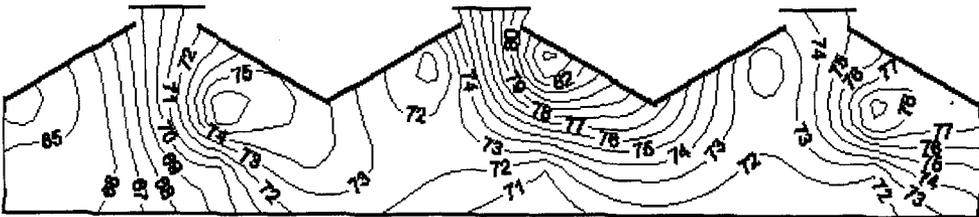
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

그림 2-33. 각 조건별 온실 내부의 상대습도 분포도

## 2) 환기조건에 따른 냉방효과 분석

### 가) 입력조건

실제 외부의 기상조건, 특히 풍속의 경우 시시각각 변화하기 때문에 외부 풍속의 변화에 따른 냉방효과를 예측하였다. 노즐 위치는 표 2-22의 Case 1 과 같으며, 표 2-24는 외부 풍속에 따른 시뮬레이션 조건을 나타낸 것이다.

표 2-24. 외부 풍속에 따른 시뮬레이션 조건

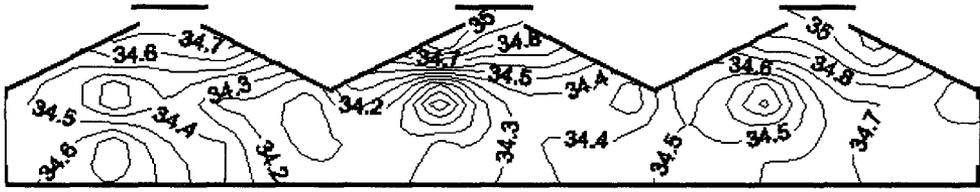
구분 \ 항목	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
풍속 (m/s)	0.1	0.5	1.0	2.0	4.0

### 나) 시뮬레이션 결과

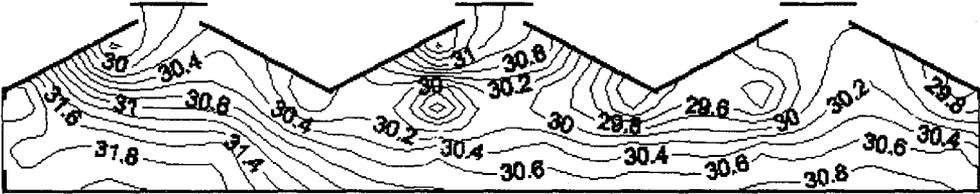
표 2-25는 환기조건에 따른 각 지점의 평균값을 나타낸 것이다. 외부 풍속이 증가할수록 온도가 감소하는 것으로 나타났고, 1m/s 이상의 풍속에서는 각 조건별로 서로 비슷한 값을 나타내었다. 그림 2-34와 그림 2-35는 각 조건별로 온도 및 상대습도의 분포를 나타낸 것이다.

표 2-25. 환기조건에 따른 각 지점의 평균값

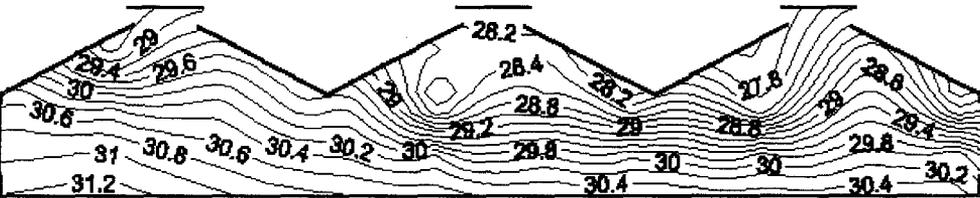
구분	조건 항목	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 5	
		온도 (℃)	습도 (%)								
A동	하부	34.5	56.0	31.5	66.7	30.7	70.1	30.8	69.7	30.6	70.2
	중부	34.2	57.0	30.9	70.4	30.1	74.3	30.2	73.1	29.8	74.5
	상부	34.7	55.1	30.0	75.9	28.3	85.5	29.2	79.2	29.2	78.5
	전체	34.4	56.3	31.0	70.0	30.0	74.8	30.2	73.0	30.0	73.6
B동	하부	34.3	57.0	30.5	72.8	29.8	76.0	30.1	73.6	30.2	72.5
	중부	34.1	58.0	29.4	79.6	28.4	85.6	28.6	84.1	28.7	82.4
	상부	34.9	54.9	31.2	69.8	29.0	82.1	28.5	85.4	28.1	86.3
	전체	34.4	57.0	30.2	74.9	29.1	81.0	29.2	80.2	29.2	79.2
C동	하부	34.7	56.0	30.6	72.9	29.8	76.4	30.0	74.6	30.1	73.2
	중부	34.5	56.9	29.6	78.9	28.0	88.8	28.3	86.1	28.7	81.9
	상부	35.0	54.9	30.0	76.7	28.6	85.0	28.2	87.5	28.1	85.2
	전체	34.7	56.1	30.1	76.1	28.8	83.1	28.9	81.8	29.1	79.1
전체	하부	34.5	56.4	30.8	70.8	30.1	74.2	30.3	72.6	30.3	71.9
	중부	34.3	57.3	30.0	76.3	28.8	82.9	29.0	81.1	29.1	79.6
	상부	34.9	55.0	30.4	74.1	28.6	84.2	28.6	84.0	28.5	83.3
	전체	34.5	56.5	30.4	73.7	29.3	79.6	29.4	78.3	29.4	77.3



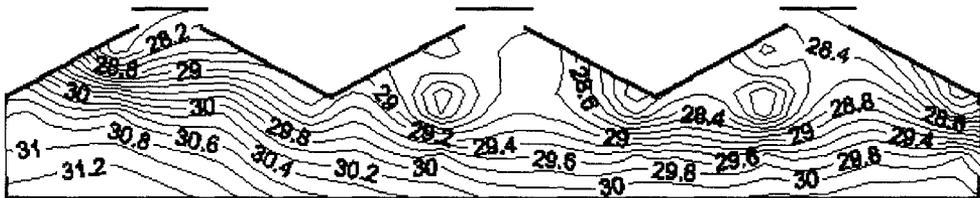
(a) Case 1



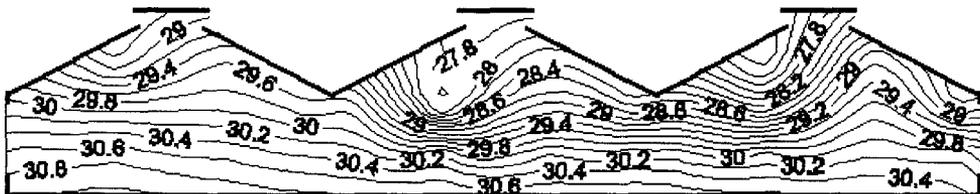
(b) Case 2



(c) Case 3

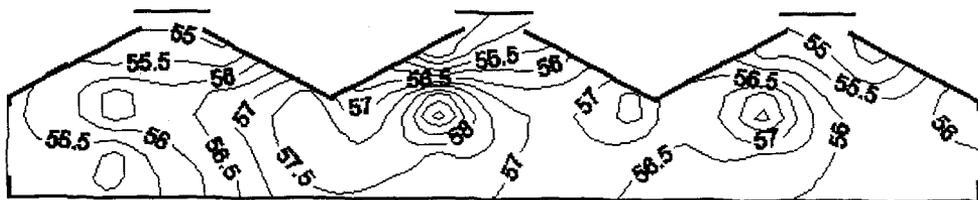


(d) Case 4

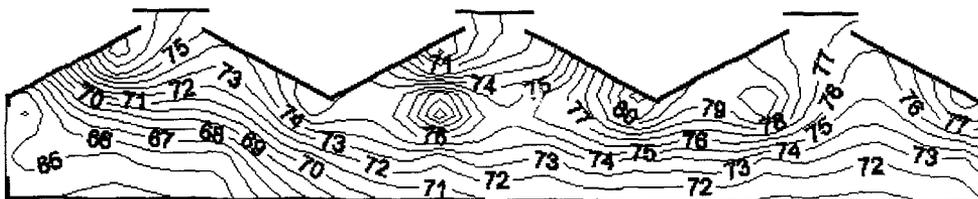


(e) Case 5

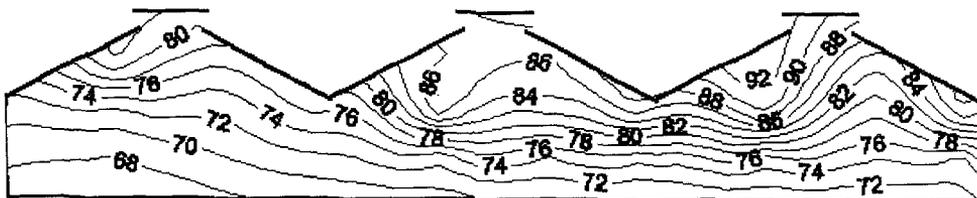
그림 2-34. 각 조건별 온실 내 온도 분포도



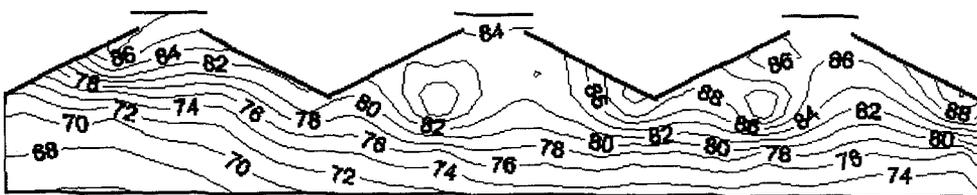
(a) Case 1



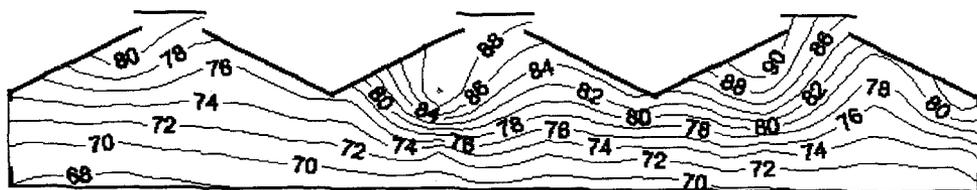
(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4



(e) Case 5

그림 2-35. 각 조건별 온실 내 상대습도 분포도

### 3) 차광 여부에 따른 냉방효과 분석

#### 가) 입력조건

차광여부에 따른 냉방효과를 분석해 보기 위하여 차광상태에 대한 시뮬레이션을 수행한 후 무차광상태에서 수행한 시뮬레이션과 결과를 비교하였다. 차광망을 표현하기 위하여 Gambit에서 차광망 부분에 대한 격자를 생성한 후 Fluent에서 이 부분을 wall boundary로 주고 차광망 재질인 알루미늄의 특성값을 입력하였다. 환기율과 풍속은 표 2-22의 Case 1(노즐 높이 2.3m)과 동일하게 하였고, 차광상태에서의 분무수량은 표 2-13에서 제시한 차광 조건에서의 분무수량을 입력하였다. 차광 여부에 따른 시뮬레이션 조건은 표 2-26과 같다.

표 2-26. 차광 여부에 따른 시뮬레이션 조건

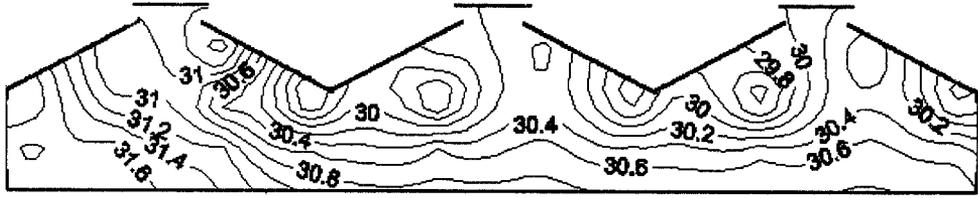
구분 항목	Case 1	Case 2
차광여부	무차광	차광(50%)

#### 나) 시뮬레이션 결과

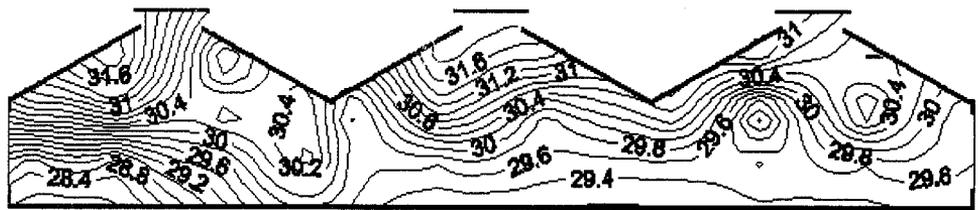
표 2-27은 무차광 및 차광 조건에서의 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 차광한 경우 일사 부하가 줄었음에도 불구하고 무차광의 경우와 온도차가 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 차광망으로 인해 분무된 입자의 흐름이 방해받았기 때문으로 판단되었다 따라서, 포그시스템을 가동할 경우에는 차광을 탄력적으로 실시하여야 할 것으로 판단되었다. 그림 2-36과 그림 2-37은 각 조건에서의 온도 및 상대습도의 분포를 나타낸 것이다.

표 2-27. 차광조건에 따른 각 지점의 평균값

조건 항목 구분		Case 1		Case 2	
		온도 (℃)	습도 (%)	온도 (℃)	습도 (%)
A동	하부	31.3	67.8	29.3	68.0
	중부	30.6	71.1	30.7	67.1
	상부	31.2	71.0	30.8	62.9
	전체	31.0	69.8	30.2	66.6
B동	하부	30.5	72.4	29.6	67.1
	중부	29.7	76.8	30.2	69.7
	상부	30.3	75.8	31.6	60.7
	전체	30.2	74.8	30.3	66.9
C동	하부	30.6	72.5	29.6	67.2
	중부	29.8	77.1	30.0	71.1
	상부	30.2	75.8	30.9	65.4
	전체	30.2	75.0	30.0	68.4
전체	하부	30.8	70.9	29.5	67.5
	중부	30.0	75.0	30.3	69.3
	상부	30.6	74.2	31.1	63.0
	전체	30.4	73.2	30.2	67.3

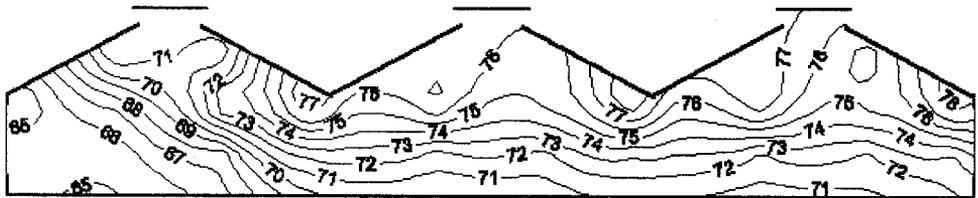


(a) Case 1

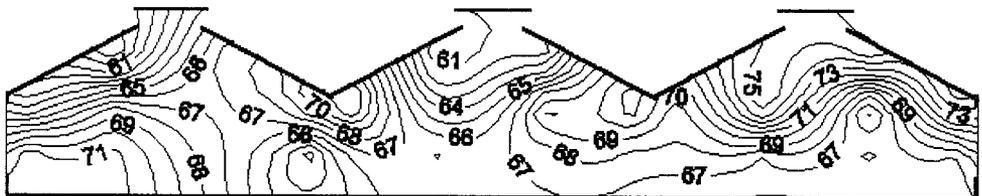


(b) Case 2

그림 2-36. 각 조건별 온실 내 온도 분포도



(a) Case 1



(b) Case 2

그림 2-37. 각 조건별 온실 내 상대습도 분포도

#### 4) 작물 유무에 따른 효과 분석

##### 가) 입력조건

지금까지의 시뮬레이션은 온실 내부의 작물을 고려하지 않고 수행하였다. 실제 온실에서는 작물이 자라고 있기 때문에 작물이 냉방효과에 미치는 영향을 살펴보았다. Gambit에서 작물을 표현하기 위하여 우선 각 동별로 3열로 토마토를 재배하고 있다고 가정하여 작물의 형상을 그리고 격자를 구성한 후 Fluent에서 작물의 증산을 고려하여 작물체 주변에서 일정량의 수증기가 분사되는 것으로 묘사하였다. 표 2-28은 각 조건별 차광여부 및 작물 고려에 대한 사항을 나타낸 것이다.

표 2-28. 작물 유무에 따른 시뮬레이션 조건

조 건	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
차광여부	×	×	○	○
작물유무	×	○	×	○
증산양	×	7 g/min	×	5 g/min

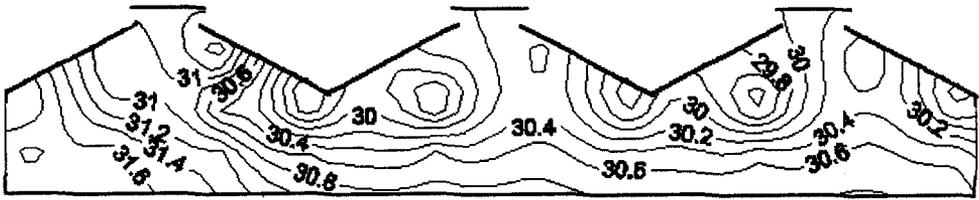
##### 나) 시뮬레이션 결과

표 2-29는 작물 유무에 따른 온·습도를 나타낸 것이다. 작물 유무에 따른 온도차는 없었으나, 작물의 증산양에 의한 내부의 습도 변화가 나타났다.

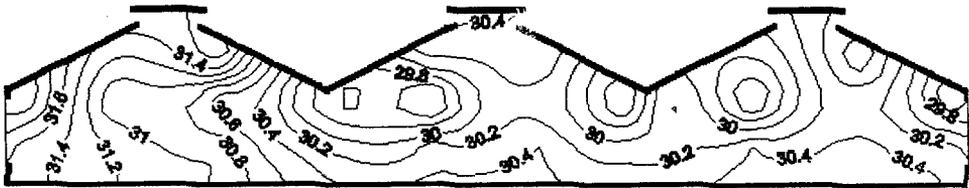
표 2-29. 작물을 고려한 경우의 각 지점의 평균값

조건 항목 구분		Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
		온도 (℃)	습도 (%)	온도 (℃)	습도 (%)	온도 (℃)	습도 (%)	온도 (℃)	습도 (%)
A 동	하부	31.3	67.8	31.0	72.4	31.3	67.3	31.2	70.9
	중부	30.6	71.1	30.8	74.7	34.5	58.5	33.8	63.9
	상부	31.2	71.0	31.5	71.1	34.0	57.7	33.8	61.4
	전체	31.0	69.8	31.0	73.1	33.1	61.7	32.7	66.2
B 동	하부	30.5	72.4	30.2	77.5	30.8	69.4	30.4	75.6
	중부	29.7	76.8	29.5	82.3	34.3	58.8	34.2	63.9
	상부	30.3	75.8	30.4	78.0	33.4	59.9	33.5	64.2
	전체	30.2	74.8	30.0	79.5	32.7	63.3	32.5	68.7
C 동	하부	30.6	72.5	30.3	77.4	30.6	70.3	30.2	77.5
	중부	29.8	77.1	29.8	81.3	34.6	58.5	33.8	65.2
	상부	30.2	75.8	30.3	78.5	33.3	61.1	33.7	63.7
	전체	30.2	75.0	30.1	79.2	32.7	63.7	32.3	69.8
전체	하부	30.8	70.9	30.5	75.8	30.9	69.0	30.6	74.7
	중부	30.0	75.0	30.0	79.5	34.5	58.6	33.9	64.3
	상부	30.6	74.2	30.7	75.9	33.6	59.3	33.7	63.1
	전체	30.4	73.2	30.4	77.3	32.9	62.9	32.5	68.2

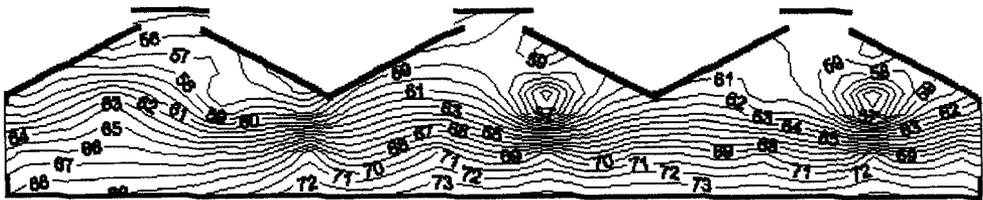
그림 2-38과 그림 2-39는 각 조건별로 온실 내부의 온도 및 상대습도 분포를 나타낸 것이다.



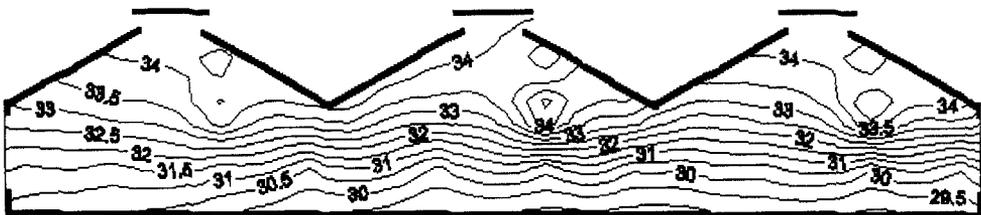
(a) Case 1



(b) Case 2

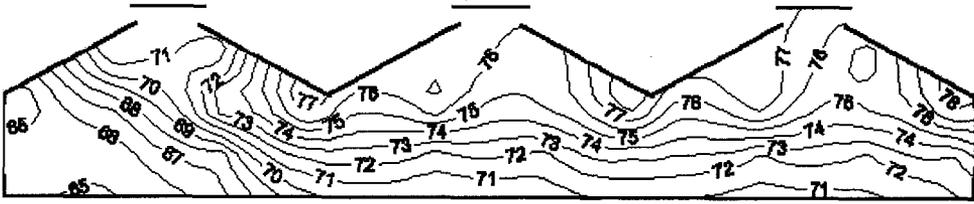


(c) Case 3

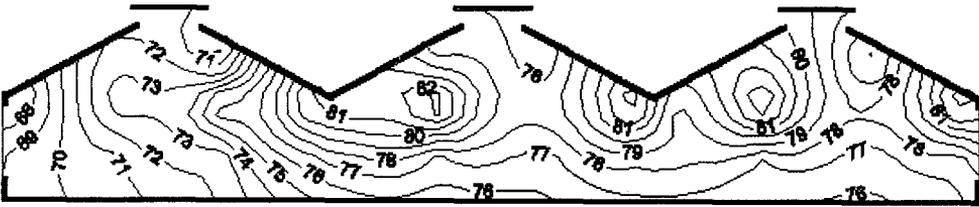


(d) Case 4

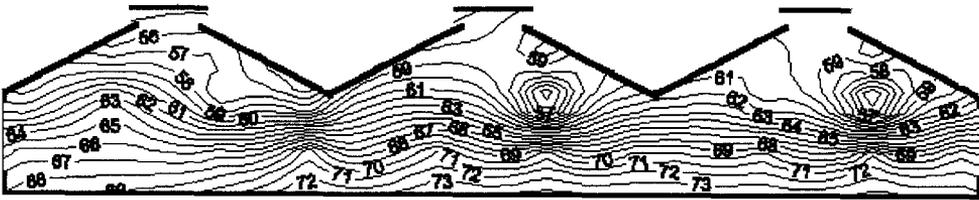
그림 2-38. 각 조건별 온실 내 온도 분포도



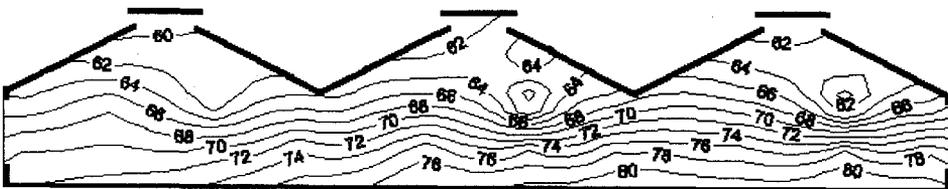
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

그림 2-39. 각 조건별 온실 내 상대습도 분포도

## 제4절 포그냉방시스템 이용기술의 체계화 연구

### 1. 제습기를 이용한 포그냉방시스템의 냉방효율 향상

온실 내부의 습도는 포그냉방시스템의 효율에 가장 큰 영향을 미친다. 온실 내부의 환기가 잘 이루어지지 않는 경우 분무된 물입자의 수분이 계속 온실 내부에 누적되고, 상대습도가 증가하여 냉방효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 온실 하부에서는 증발산에 의하여 상대습도가 항상 높게 유지되는 것으로 나타났다. 상대습도가 증가하면 습구온도도 증가하게 되고 냉방효율이 떨어진다. 실험에 의하면 환기율이 0.3회/min인 경우 온실 내부의 온도는 냉방을 하지 않는 온실의 온도와 거의 같아서 냉방효과가 없는 것으로 나타났다.

따라서, 온실 내부의 상대습도를 낮은 상태로 유지해주면 포그냉방시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 온실 내부에 누적된 수분을 제거할 수 있는 제습기를 개발하여 포그냉방시스템의 효율에 미치는 영향을 살펴보았다.

#### 가. 제습기 제작

본 연구에서 개발한 제습기는 수증기가 포화온도보다 낮은 고체 표면에 접촉하면 그 경계면에서 응축하여 기체상태에서 액체상태로 변하며 동시에 잠열을 방출하는 원리를 이용한 것이다. 즉, 고온 다습한 온실내 공기를 팬을 통해 장치내로 유입시켜 온도가 낮은 냉매가 흐르는 파이프 사이를 흐르게 하여 파이프 경계면에 수분을 응축시켜 제습하는 방식이다. 일반적인 응축기에서는 액화가스등을 냉매로 이용하지만, 본 제습기에서는 포그냉방 및

양액재배를 위해 사용되는 지하수를 냉매로 이용하였다.

1) 제습기의 설계

ASHRAE 방식의 냉방설계용 기상자료로부터 TAC 1%(건구온도 : 32.6℃, 습구온도 : 26.1℃, 일사량 : 881W·m<sup>2</sup>)인 수원지역의 자료를 이용하여 작성한 VETH선도에 의하면 실험 온실의 내부 온도를 30℃까지 떨어뜨리기 위해서는 분무 수량 2.009kg/min, 환기회수 0.8회/min가 되어야 한다. 이 경우 온실 내부의 공기가 1번 치환되어 습도가 외기 수준으로 떨어지는데는 75초의 시간이 소요된다. 실험에 의하면 분무 수량이 2.009kg/min이고 환기회수가 0.3회/min인 경우의 온실내 온도가 포그냉방을 실시하지 않는 온실내 온도와 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 본 설계에서는 환기 조건이 열악한 경우를 고려하여 환기회수를 0.3회/min(0.375회/75sec)로 설정하고 제습기를 설계하였다.

가) 제습요구량 산정

제습은 온실 환기에 의해서 온실 외부로 배출되지 못하고, 온실 내부에 누적되는 수분을 제거해야 되므로 먼저 분무 후 온실 내부에 남아 있는 수분량을 계산해야 한다. 이는 식 (2-30)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_l = W_s \times (1 - Q) \quad (2-30)$$

$W_l$  : 증발 후 온실내 남아있는 수분량(kg)

$W_s$  : 단위시간당 분무량(kg/min)

$Q$  : 분무정지시간 동안 환기회수(회)

식 (2-30)에서 계산된 수분량에 대하여 정지시간 동안 제습을 해야 하므로 단위

시간당 제습량은 식 (2-31)과 같이 구할 수 있다.

$$W_d = W_l / T \quad (2-31)$$

$W_l$  : 증발후 온실내 남아있는 수분량(kg)

$T$  : 정지시간(sec)

#### 나) 습공기 유입부의 팬 용량 결정

실험에 의하면 온실 하부로 내려갈수록 습도가 증가하는 것으로 나타났는데 이는 온실 상부에서는 환기에 의해 제습이 원활하게 이루어지는 반면 하부에서는 작물의 증발산 및 관수에 의하여 습도가 증가하기 때문이다. 따라서, 냉방효율을 높이기 위해서는 온실 하부의 습기를 제거하여 낙하하는 분무 입자가 하부에서도 원활하게 증발되도록 하여야 할 것이다. 따라서 온실 바닥면적과 바닥으로부터 제습을 원하는 공간의 높이를 고려하여 팬 용량을 구하게 된다. 이는 식 (2-32)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_F = (A \times h) / T \quad (2-32)$$

$Q_F$  : 팬의 용량( $m^3/min$ ),  $A$  : 온실 바닥면적( $m^2$ )

$h$  : 바닥으로부터 제습을 원하는 곳까지의 높이(m)

$T$  : 분무정지시간(min)

#### 다) 파이프 직경 및 간격 결정

팬을 통하여 유입된 기체는 파이프(Tube bank) 사이를 통과하면서 압력손실이 발생하는데 계산된 압력손실이 팬의 압력손실값보다 크게 될 경우에는 기체가 파이프 사이를 통과하지 못하는 문제가 발생한다. 압력손실을 결정하는 중요한 요소 중의 하나는 파이프 사이의 간격인데 계산된 압력손실이 크게 나올 경우에는 파이프 사이의 간격을 늘려서 허용 압력손실값의

90% 이내에 들도록 설계한다.

압력손실은 식 (2-33)으로 구할 수 있다.

$$\Delta P = 4f_t(L/D)(\rho V^2/2g)(N_p)\Phi_p \quad (2-33)$$

$\Delta P$  : 압력손실( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $f_t$  : 마찰계수,  $L$  : 파이프 길이(m)

$D$  : 파이프의 외부직경(m),  $V$  : 유입되는 공기의 속도(m/s)

$N_p$  : 파이프의 수,  $g$  : 중력가속도( $\text{m/s}^2$ )

$\rho$  : 공기의 밀도( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $\Phi_p$  : 점도 구배

#### 라) 대수평균온도차 계산

제습기의 전열량을 결정하는 요소 중의 하나는 장치로 유입되는 공기와 파이프 내를 흐르는 지하수의 온도변화이다. 이를 정확히 계산해야 장치에 소요되는 파이프의 전열면적을 구할 수 있다. 일반적으로 장치로 유입되는 공기와 파이프로 유입되는 지하수의 온도는 계속 변하게 되므로 평균적인 온도차를 구하기 위해서 대수평균온도차를 계산한다. 이는 식 (2-34)와 같이 표시된다.

$$LMTD = \frac{(\theta_{n1} - \theta_2) - (\theta_{n2} - \theta_1)}{\ln[(\theta_{n1} - \theta_2)/(\theta_{n2} - \theta_1)]} \quad (2-34)$$

$LMTD$  : 대수평균 온도차( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta_{n1}, \theta_{n2}$  : 장치 유입부, 유출부에서의 공기온도( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta_1, \theta_2$  : 파이프 입구와 출구에서의 수온( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 마) 총합열전달계수 계산

파이프 내를 흐르는 물과 장치로 유입되는 공기 사이에는 열교환이 일어나게 되는데 이를 해석하기 위해서 물과 파이프사이의 대류열전달, 파이프

내부와 외부의 전도열전달, 유입공기와 파이프외부의 대류열전달을 고려한 총합열전달계수를 계산한다. 이는 식 (2-35)와 같이 표시된다.

$$U = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o}} \quad (2-35)$$

$A_o, A_i$  : 파이프의 내부 및 외부 표면적( $m^2$ )

$h_o, h_i$  : 파이프의 내부 및 외부의 열전달 계수( $kcal \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ )

$r_o, r_i, L$  : 파이프의 외경과 내경, 길이( $m^2$ )

$k$  : 파이프의 열전도계수( $kcal \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ )

#### 바) 열교환량 결정

파이프 내의 유량은 파이프내의 지하수의 열량을 결정짓는 요소로 장치로 유입되는 기체의 열량과 열평형을 맞추기 위해서 설계된다. 팬으로 유입되는 공기의 열량은 식 (2-36)과 같이 표시된다.

$$Q_a = q_a \times [(C_a \times \Delta T) + (w \times L)] \quad (2-36)$$

$Q_a$  : 수증기의 열량( $kcal/hr$ )

$q_a$  : 유입되는 공기의 양( $kg/hr$ )

$C_a$  : 공기의 비열( $kcal \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )

$\Delta T$  : 유입부와 유출부의 온도차( $^\circ C$ )

$w$  : 유입공기중에 포함된 수분의 양( $kg \cdot kg^{-1}$ )

$L$  : 물의 기화열( $kcal/hr$ )

파이프로 유입되는 물의 열량은 다음의 식 (2-37)과 같이 표시된다.

$$Q_w = q_w \times C_w \times \Delta T \quad (2-37)$$

$Q_a$  : 파이프 내를 흐르는 물의 열량(kcal/hr)

$q_w$  : 유입되는 물의 양(kg/hr)

$C_w$  : 물의 비열(kcal · kg<sup>-1</sup> · °C<sup>-1</sup>)

한편, 환풍기 용량이 정해져 있기 때문에 팬으로 유입되는 공기의 열량은 정해져 있다. 따라서, 실제 열교환량은 파이프 내로 유입되는 물의 열량에 의하여 결정된다.

#### 사) 파이프 전열면적 계산

제습기에 이용되는 파이프의 개수를 구하려면 파이프의 전열면적을 구해야 되는데 파이프에 응축되는 열교환량과 총합열전달 계수에 의하여 다음의 식 (2-38)로 구할 수 있다.

$$A = \frac{Q}{U \cdot LMTD} \quad (2-38)$$

$A$  : 전열면적 (m<sup>2</sup>),  $Q$  : 열교환량(kcal/hr)

$LMTD$  : 대수평균 온도차(°C)

#### 아) 제습기의 제작

위에서 설명한 설계과정을 거쳐 표 2-30과 같이 제습기의 제원을 결정하였다. 실험온실의 통로가 60cm인 것을 고려하여 환기팬은 50m<sup>3</sup>/min의 환기팬(날개길이 35cm)을 사용하고 장치를 두 대 제작하였다. 그림 2-40은 제습기의 구조를 나타낸 것이고, 그림 2-41은 제작된 제습기의 모습을 나타낸 것이다.

표 2-30. 제습기의 제원

팬 용량	50m <sup>3</sup> /min	대수평균온도차	5.5℃
팬 허용압력	16mmAq	총합열전달 계수	1175kcal · m <sup>-2</sup> · hr <sup>-1</sup> · ℃ <sup>-1</sup>
파이프 재질	Copper	열교환량	8400kcal
파이프 외부직경	9.5mm	전열면적	1.3m <sup>2</sup>
파이프 내부직경	8.3mm	파이프내 지하수 유량	20kg/min
파이프 수직간격	2cm	파이프내 지하수 유속	0.31m/s
파이프 수평간격	2cm	제습요구량	0.48kg/min

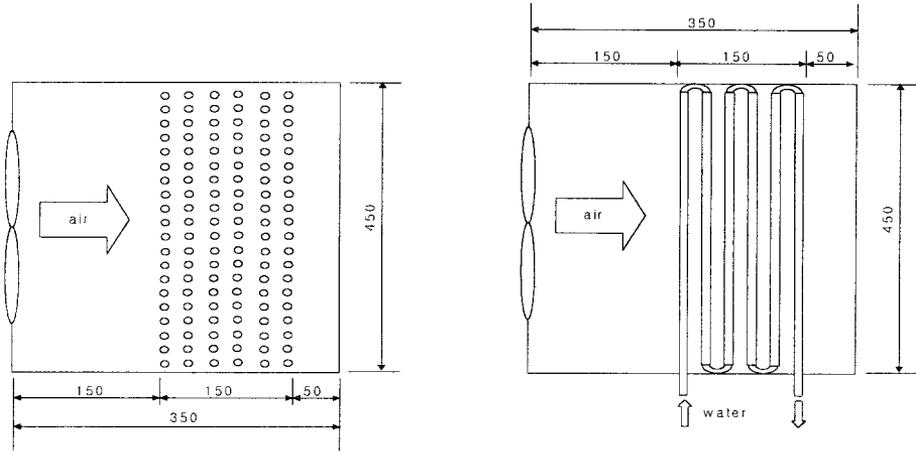


그림 2-40. 제습기의 구조 (좌 : 측면도, 우 : 평면도)

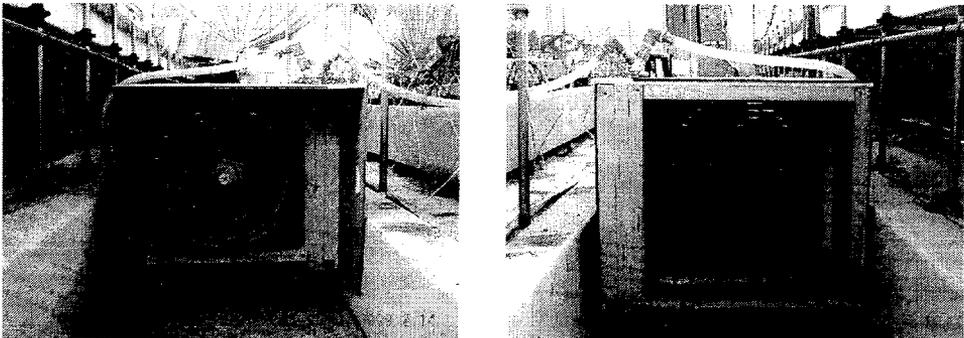


그림 2-41. 제작된 제습기의 모습 (좌: 공기유입부, 우: 공기유출부)

## 2) 제습기의 효율분석

### 가) 온실 실험

실험은 안성시에 위치한 유리온실에서 수행되었다. 온실내의 센서 배치는 그림 2-42와 같다. 우선 그림 2-42의 오른쪽 그림처럼 온실을 길이 방향으로 3등분 한 후에 온실의 중앙 단면인 B단면에 그림 2-42의 왼쪽 그림과 같이 센서를 배치하여 측정하였다. A단면과 C단면에는 온습도센서(HOBO)를 B단면의 T7, H7번을 제외한 지점과 동일한 지점에 설치하였다. 제습기는 온실의 중앙 단면인 B단면에 작업통로가 있는 부분인 온실 좌측벽에서 각각 3.25m와 5.5m인 위치에 설치를 하였다. 제습기의 공기 유입부와 유출부에도 온습도센서(HOBO)를 설치하여 제습기 유입 전과 후의 공기의 온습도 변화를 비교하였다. 또한 지하수가 흐르는 파이프의 유입부와 유출부에 T형 열전대를 설치하여 수온을 측정하였다. 포그시스템 가동조건은 무차광의 경우 분무시간 45초에 정지시간 45초, 차광의 경우 분무시간 25초에 정지시간 45초로 하였다. 분사방향은 온실 바닥면에 수직상향으로 하였다.

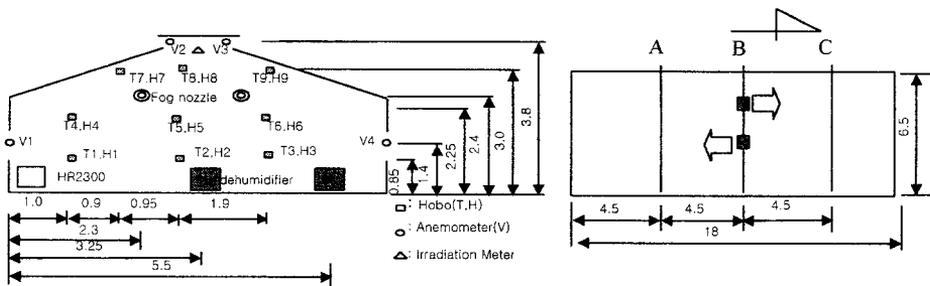


그림 2-42. 실험 온실의 단면 및 센서 배치도

(좌: 단면도, 우: 평면도, 단위 : m)

제습기의 효과를 알아보기 위한 시험은 크게 두 가지로 나누어 수행하였

다. 우선 제습기에 유입되는 지하수량의 변화시켜서 제습기의 성능을 실험해 보았고, 그 다음 제습기가 포그냉방시스템의 효율 향상에 미치는 영향을 실험해보았다. 실험은 표 2-31과 같이 5가지 조건으로 수행되었다.

표 2-31. 실험 설계

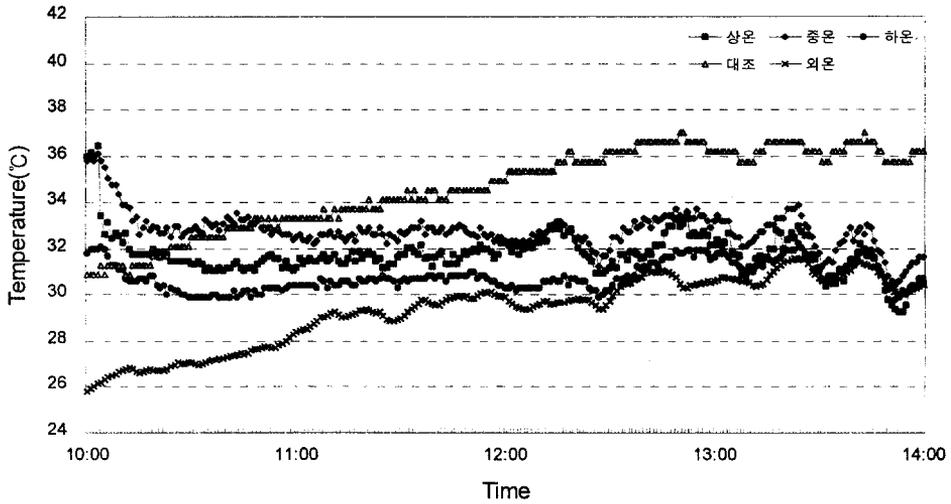
실험 조건	차광 여부 (○, ×)	제습여부 (○, ×)	지하수 유량 (kg/min)
Case 1	×	○	10
Case 2	×	○	15
Case 3	×	×	15
Case 4	○	×	15
Case 5	○	○	15

표 2-31에서 Case 1과 2는 유량의 변화에 따른 제습기의 성능을 알아보기 위한 실험이다. Case 2와 3은 무차광상태에서 포그냉방시스템에서의 제습기의 효과를 알아보기 위한 실험이고, Case 4와 5는 차광상태에서 포그냉방시스템에서의 제습기의 효과를 알아보기 위한 실험이다. 제습기의 지하수량은 설계시 20kg/min이었는데, 실험 온실에서의 최대유량이 15kg/min이었기 때문에 15kg/min으로 설정하였다.

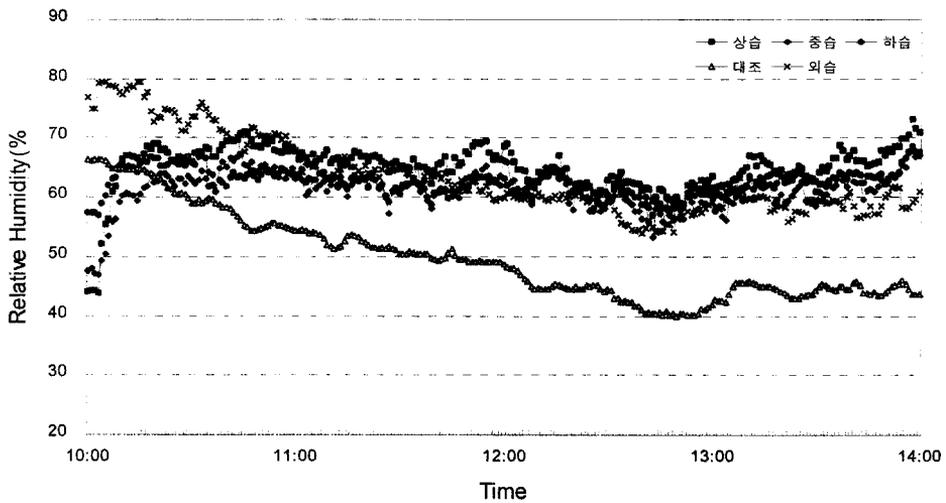
#### 나) 수량변화에 따른 제습효율

파이프로 유입되는 지하수의 유량이 제습기의 효과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 제습기의 공급유량을 10kg/min으로 줄이고 가동하여 무차광타임제어 상태에서 실험을 하여 공급유량이 15kg/min으로 제습기를 가동한 경우와 온실내 온·습도 환경변화를 비교하였다. 그림 2-43은 무차광 조건하에서 제습기내로 유입되는 지하수의 유량을 15kg/min으로 하였을 경우의

실험온실 내·외부, 대조구 온실의 온습도 변화를 나타낸 것이고, 그림 2-44는 지하수의 유량을 10kg/min으로 하였을 경우의 변화를 나타낸 것이다.

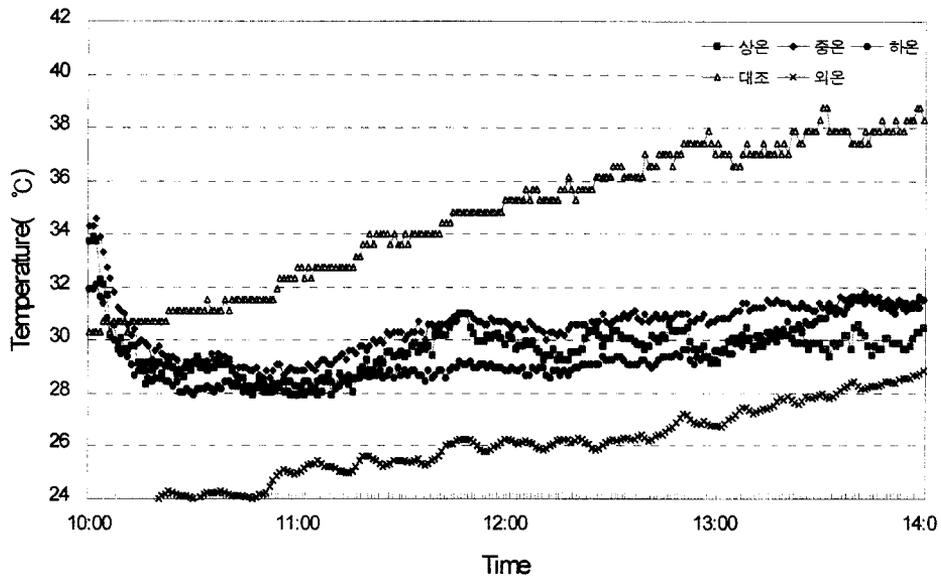


(a) 온도

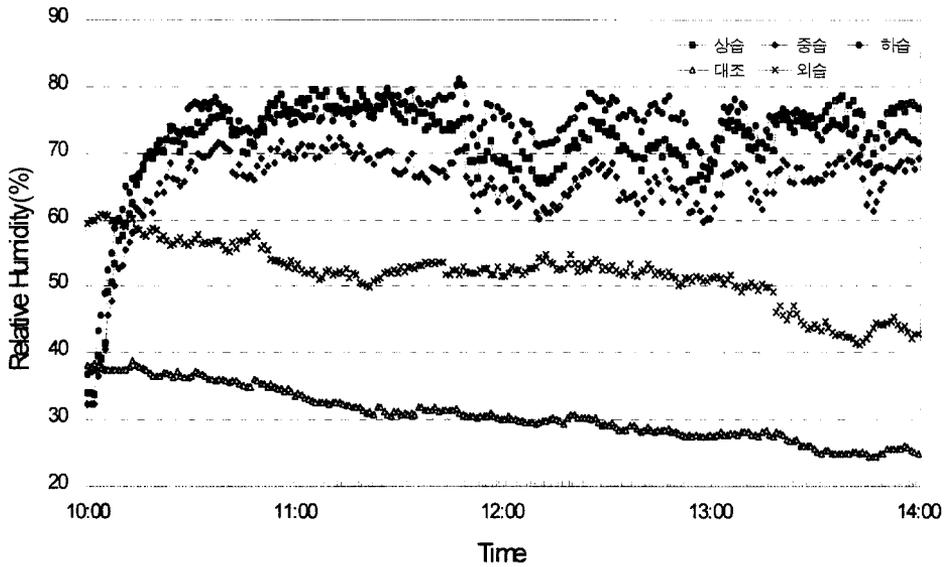


(b) 상대습도

그림 2-43. 온실 내부의 온도 및 상대습도 변화(지하수 유량 : 15kg/min)



(a) 온도



(b) 상대습도

그림 2-44. 온실 내부의 온도 및 상대습도 변화 (지하수 유량 : 10kg/min)

제습기에 유입되는 지하수의 유량을 15kg/min으로 가동하고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간동안 온실 하부의 평균 온도가 30.3℃이고, 온실 전체의 평균온도가 31.4℃였다. 외부의 평균온도는 31.2℃, 대조구 온실의 평균온도는 35.2℃인 것으로 나타났다. 냉방시간동안 온실 하부의 평균습도는 61.9%, 온실 전체의 평균습도는 62.4%였다. 외부의 평균습도는 60.5%, 대조구 온실의 평균습도는 46.6%인 것으로 나타났다. 제습률은 69.2%로 나타났다. 외부 일사량과 풍속은 각각  $706\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 0.8m/s였다.

제습기에 유입되는 지하수의 유량을 10kg/min으로 가동하고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간동안 온실 하부의 평균 온도가 29.8℃이고, 온실 전체의 평균온도가 29.9℃였다. 외부의 평균온도는 27.0℃, 대조구 온실의 평균온도는 35.9℃인 것으로 나타났다. 냉방시간동안 온실 하부의 평균 습도는 72.9%, 온실 전체는 72.3%였다. 외부의 평균습도는 49.6%, 대조구 온실의 평균습도는 29.3%인 것으로 나타났다. 외부 일사량과 풍속은 각각  $712\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 0.9m/s였다. 제습률은 41.3%로 나타났다.

지하수의 유량이 15kg/min일 경우 온실 내부의 습도가 외부 습도보다 1.9% 높은 반면에, 유량이 10kg/min일 경우 온실 내부의 습도가 외부 습도보다 22.7% 높은 것으로 나타나 유량이 줄어들게 되면 수분제거 효과가 떨어지게 되는 것으로 나타났다. 두 조건의 외부 환경에 다소 차이가 있어 절대적인 비교는 어렵지만, 온도 변화의 경향을 살펴보면 유량이 15kg/min일 경우, 외부의 온도가 증가하여도 온실 내부의 온도가 거의 일정하게 유지되는 것에 비해 유량이 10kg/min일 경우 외부 온도가 증가함에 따라 온실 내부의 온도가 증가하는 경향을 보여 유량이 줄어들수록 제습기의 효과가 떨어져 온실 내부의 상대습도가 증가하게 되고 이로 인하여 온실 내부의 온도가 점점 증가하게 됨을 알 수 있다. 제습기 내로 유입되는 지하수의 유량이 장치 내로 유입되는 외부공기와의 열교환량에 영향을 미치게 되고 이로 인

해 제습기의 효율에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

#### 다) 제습이 포그냉방에 미치는 영향분석

##### (1) 무차광 포그냉방조건에서의 제습기 효과

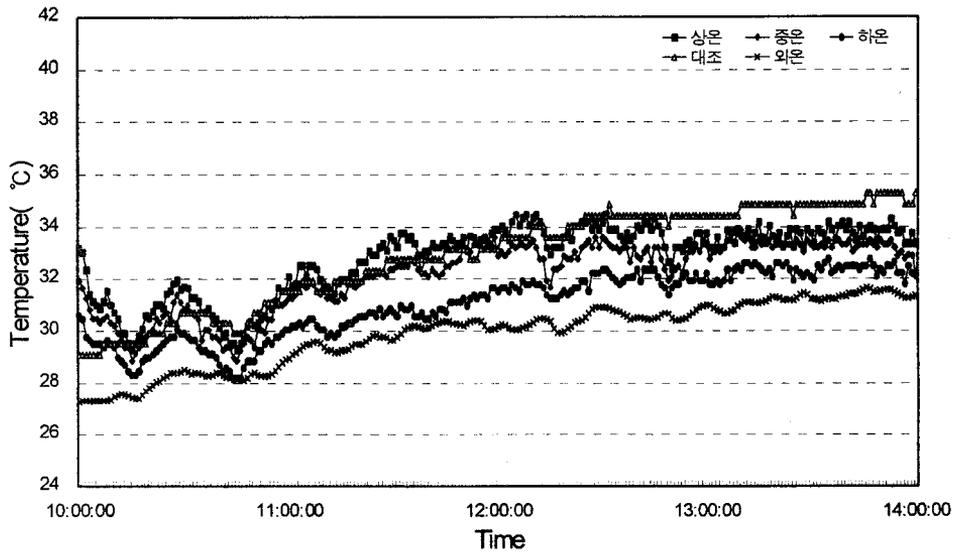
그림 2-43은 무차광 조건하에서 포그냉방시스템과 제습기를 함께 가동한 경우에서의 실험온실 내부 및 외부, 대조구 온실의 온습도 변화를 나타낸 것이고, 그림 2-45는 포그냉방시스템만 가동한 경우의 변화를 나타낸 것이다.

제습기를 가동하고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간 동안 온실 하부의 평균온도가  $30.3^{\circ}\text{C}$  이고, 온실 전체의 평균온도가  $31.4^{\circ}\text{C}$  였다. 외부의 평균온도는  $31.2^{\circ}\text{C}$ , 대조구 온실의 평균온도는  $35.2^{\circ}\text{C}$  인 것으로 나타났다. 냉방시간동안 온실 하부의 평균습도는 61.9%, 온실 전체는 62.4%였다. 외부의 평균습도는 60.5%, 대조구 온실의 평균습도는 46.6%인 것으로 나타났다. 외부 일사량과 풍속은 각각  $706\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $0.8\text{m/s}$ 였다.

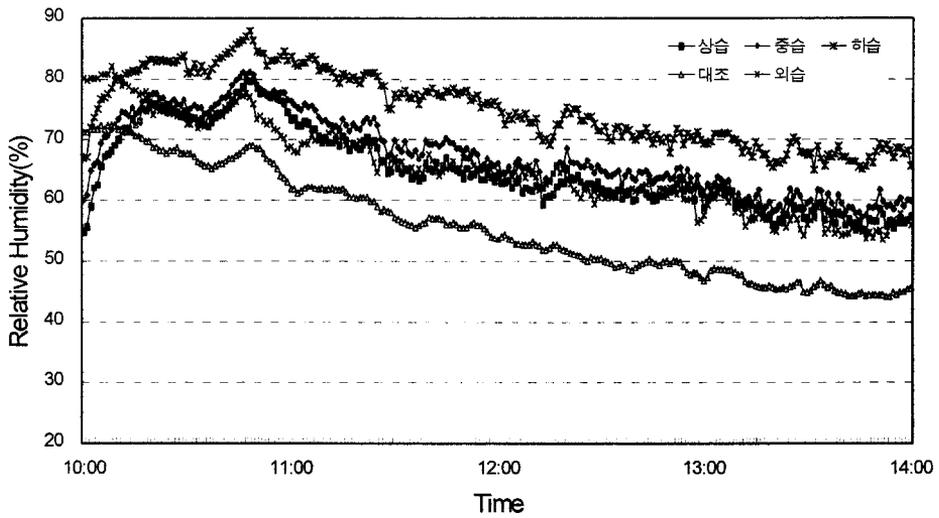
제습기를 가동하지 않고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간동안 온실 하부의 평균 온도가  $31.0^{\circ}\text{C}$  이고, 온실 전체의 평균온도가  $31.0^{\circ}\text{C}$  였다. 외부의 평균온도는  $30.2^{\circ}\text{C}$ , 대조구 온실의 평균온도는  $33.5^{\circ}\text{C}$  인 것으로 나타났다. 냉방시간동안 온실 하부의 평균습도는 73.4%, 온실 전체는 67.8%였다. 외부의 평균습도는 62.7%, 대조구 온실은 52.2%인 것으로 나타났다. 외부 일사량과 풍속은 각각  $758\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $1.0\text{m/s}$ 였다.

제습기를 가동한 경우 온실내 하부 기온이 대조구 온실에 비하여 온도가  $4.9^{\circ}\text{C}$ 가 감소하였고, 외부 기온보다  $0.9^{\circ}\text{C}$  감소하였다. 제습기를 가동하지 않았을 때의 경우는 대조구 온실보다는  $2.5^{\circ}\text{C}$  감소하고 외부기온과 같은 것으로 나타나 제습기의 의하여 온실내 기온 하강의 효과가 있었음을 알 수 있다. 습도의 경우는 제습기를 가동하였을 때 온실 하부의 습도가 온실 전체

의 습도와 외부의 습도와 비슷한 것으로 나타났고, 제습기를 가동하지 않았을 경우에는 온실 하부의 습도가 온실 전체 습도와 5.6%의 차이를 보였다.



(a) 온도



(b) 상대습도

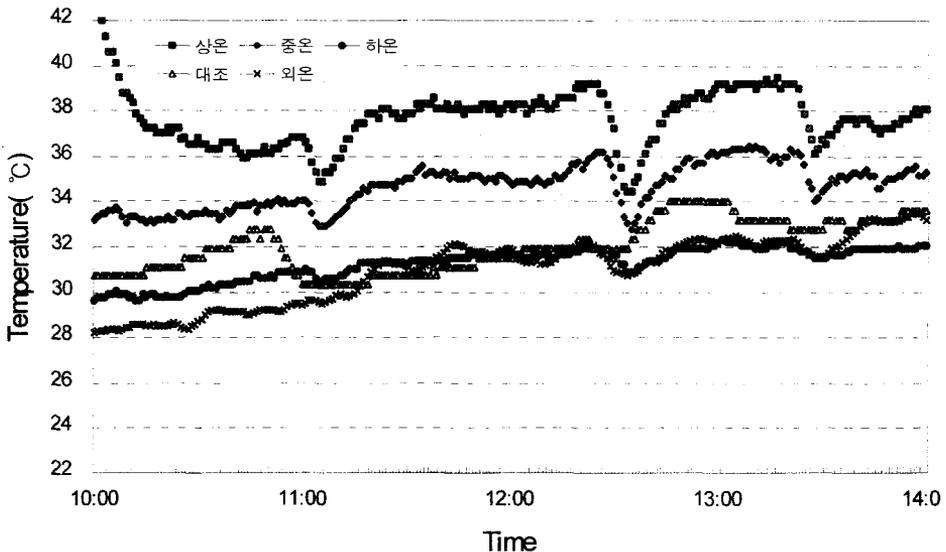
그림 2-45. 무제습상태에서의 온실 내부의 온도 및 상대습도 변화

온실 전체 습도가 두 실험간에 큰 차이가 없다는 것을 고려하면 제습기에 의하여 온실내 하부 습도가 감소하였음을 알 수 있다.

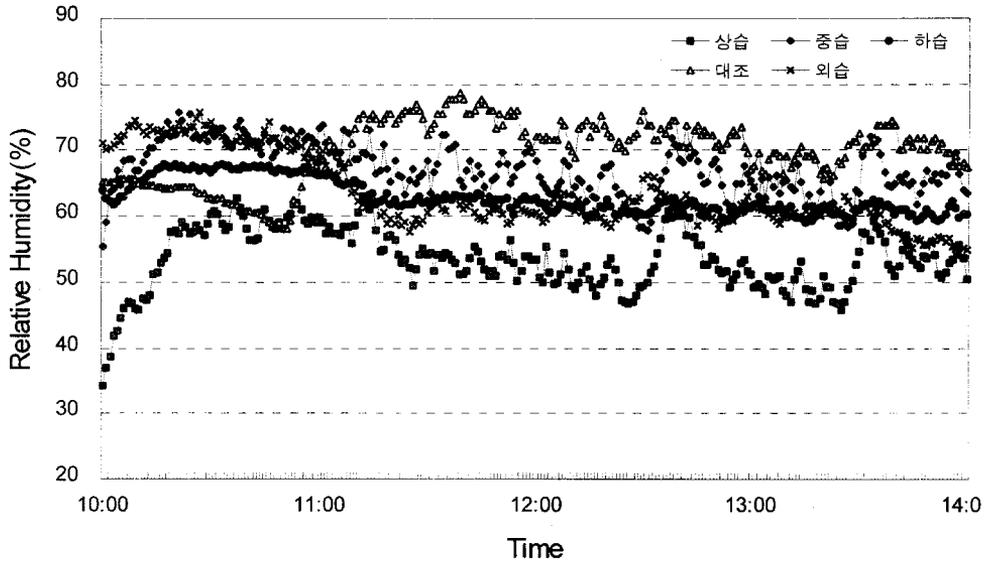
제습기를 사용하지 않은 실험에서 온실 내 하부온도는 시간이 지날수록 점점 증가하는 현상을 보이나 제습기를 사용한 경우에는 거의 일정하게 나타나는데, 이는 제습기를 사용하지 않은 경우에는 온실 내에 상대습도가 높아 증발효율이 점점 떨어지게 되지만, 제습기를 사용하는 경우에는 온실 내부의 습도를 일정하게 유지시켜 주기 때문에 온실의 냉방을 효율적으로 하게 된 것으로 판단된다.

(2) 차광, 포그냉방조건에서의 제습기 효과

그림 2-46은 차광조건하에서 포그냉방시스템과 제습기를 함께 가동한 경우에서의 온습도 변화를 나타낸 것이고, 그림 2-47은 포그냉방시스템만 가동한 경우의 변화를 나타낸 것이다.

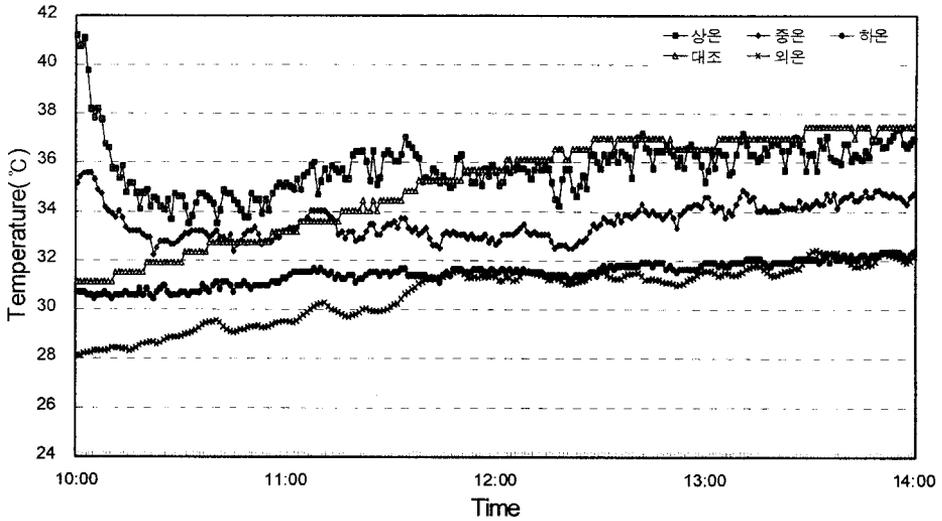


(a) 온도

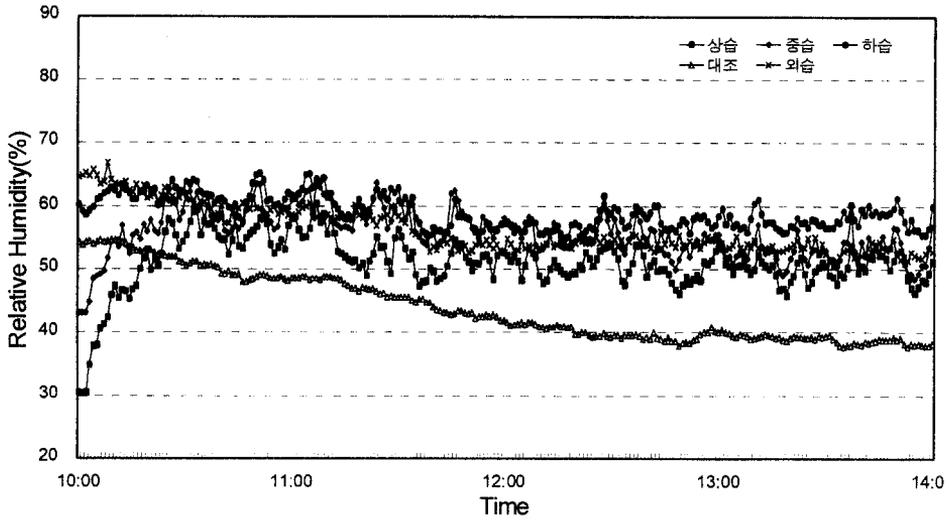


(b) 상대습도

그림 2-46. 제습상태에서의 온실 내부의 온도 및 상대습도 변화



(a) 온도



(b) 상대습도

그림 2-47. 무제습상태에서의 온실 내부의 온도 및 상대습도 변화

제습기를 가동하고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간 중 온실 하부의 평균 온도가 31.1℃ 이고, 온실 전체의 평균온도가 33.7℃였다. 외부의 평균온도는 31.3℃, 대조구 온실의 평균온도는 34.4℃인 것으로 나타났다. 냉방시간 중 온실 하부의 평균습도는 63.1%, 온실 전체의 평균습도는 63.1%였다. 외부의 평균습도는 62.5%, 대조구 온실의 평균습도는 53%인 것으로 나타났다. 외부 일사량과 풍속은 각각  $700\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $0.4\text{m/s}$ 였다.

제습기를 가동하지 않고 포그냉방을 실시한 경우에는 냉방시간 중 온실 하부의 평균 온도가 31.5℃ 이고, 온실 전체의 평균온도가 33.5℃였다. 외부의 평균온도가 31.2℃, 대조구 온실의 평균온도가 35.9℃인 것으로 나타났다. 냉방시간 중 온실 하부의 평균습도는 59.6%, 온실 전체의 평균습도는 56.2%였다. 외부의 평균습도는 54.7%, 대조구 온실의 평균습도는 42.0%인 것으로 나타났다. 외부 일사량과 풍속은 각각  $758\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $0.8\text{m/s}$ 였다.

제습기를 가동하였을 경우 온실 하부의 온도가 대조구 온실의 온도보다 3.3℃가 감소한 것으로 나타났고, 외부 온도보다는 0.2℃가 나타났다 반면, 제습기를 가동하지 않았을 경우는 대조구 온실의 온도보다는 4.4℃ 감소하고, 외부온도보다는 0.3℃ 증가한 것으로 나타나 제습기를 가동하였을 경우 온도하강 효과가 있었다고 판단되지만 무차광조건에 비해서 큰 차이를 보이지 않았다. 습도의 경우에는 제습기를 사용하였을 경우에는 온실 하부의 습도는 온실 전체의 습도와 같은 값을 나타내었고, 외부보다는 0.6% 증가한 것으로 나타났다. 제습기를 사용하지 않았을 경우의 온실하부 습도는 온실 전체의 습도보다 3.6% 높았고, 외부보다는 4.9% 증가한 것으로 나타났다. 두 실험 조건 사이에 외부 일사와 외부 기온이 비슷하고 풍속의 경우 제습기를 가동하지 않는 경우에 더 낮아서 환기가 덜 되었다는 것을 고려하면 제습기에 의해 냉방효율이 높아진 것으로 나타나 제습기의 사용이 포그냉방 시스템의 효율을 증가시켰다고 판단된다.

무차광 및 차광의 두 조건에 관한 실험 결과를 정리해 보면 우선 제습기를 가동한 경우 가동하지 않은 조건보다 냉방효과가 더 뛰어났다는 것을 알 수 있었다. 그렇지만, 두 조건 모두 온실 하부의 습도가 외부 습도 이하로 떨어질 것이라는 설계만큼 습도 감소가 일어나지 않은 것으로 나타났다. 이는 설계했던 응축량 보다 응축이 덜 되었기 때문으로 생각되는데, 우선 지하수를 공급하기 위한 수도에서 장치까지의 거리가 10m 정도 떨어져 있어서 지하수가 장치까지 이동하는 동안 이미 외부 공기와 열교환을 하는 바람에 장치로 유입되는 지하수의 온도가 예상했던 온도보다 상승했기 때문으로 판단된다. 설계시에는 유입되는 지하수의 온도가 18℃인 것으로 가정하여 설계를 하였으나 실험 중에는 22~24.5℃로 측정되어 제습기의 효율에 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

또 다른 원인은 지하수의 공급 유량이다. 설계시에는 제습기의 한 대당

유량이 20kg/min이 되도록 설계하였다. 실제 온실 내에서 최대로 공급 가능한 유량이 30kg/min이기 때문에 한 대당 공급되는 유량은 15kg/min이었다. 따라서, 지하수 공급 유량이 설계 유량의 75%가 되기 때문에 지하수와 외부공기와의 열교환량이 줄어들게 되어 응축량의 저하를 가져오게 된 것으로 판단된다.

#### 나. 시뮬레이션에 의한 제습효과 분석

##### 1) CFD를 이용한 온실 내부 습도분포 해석

###### 가) CFD 모델의 구성

###### (1) CFD 모델의 기본 구성

제습기를 이용하는 포그냉방온실의 습도제어 효과를 예측하기 위한 CFD 시뮬레이션을 위해서 앞 절에서 언급했던 CFD해석 패키지인 Fluent (version 5.4)를 사용하였으며, 기하학적 요소 및 계산 영역의 요소 분할 등은 Gambit(version 1.3)을 이용하였다.

앞 절과 동일한 방법으로 지배방정식은 유체해석을 위한 기본적인 3개의 방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 이외에 난류의 해석을 위한 realizable  $k-\epsilon$  난류모델, 태양복사 및 복사열전달의 해석을 위한 DO 복사모델, 포그 입자의 해석을 위한 Discrete Phase 모델을 추가로 이용하였다.

비선형 형태인 이들 미분방정식들을 선형화하기 위해서 분리해석법 (segregated solver)을 적용하고, 포그 노즐이 분사하는 시간동안에는 비정상상태로 해석하였고, 제습기에 의하여 발생하는 온실의 길이 방향에 대한 기류의 영향이 고려되어야 되므로 Gambit에서 3차원으로 격자를 구성하여 해석하였다. 경계조건을 설정할 때도 다른 부분의 경계조건은 2차원 시뮬레이션과 동일하게 하였고, 제습기의 유입부분은 Fan-boundary로 설정하여

장치내부로 유입되는 공기의 속도 및 압력 절대습도를 입력하였고, 유출부분은 Pressure-outlet으로 설정하여 유출부에서의 절대습도를 입력하여 제습기 외부에서 팬으로 유입된 공기가 제습기 내부에서 상대습도가 줄어들어 외부로 유출되는 것을 표현하였다. 해석 모델의 전체적인 구성은 표 2-32와 같다.

표 2-32. 해석 모델의 구성

Classification	Setting of Method
solver	Segregated solver 3D simulation Implicit formulation Absolute velocity formation Unsteady state analysis (1st-order implicit)
Energy equation	Activated
Viscous model	Realized $\kappa-\varepsilon$ model
Radiation model	DO
Species model	Multiple species
Discrete phase model	Activated
Multiphase model	Inactivated
Pollutants	Inactivated

(2) 외부기상자료 및 입력값 선정

CFD 모델을 구성하기 위한 입력값을 살펴보면 표 2-33과 같다. 우선 외부 기상자료의 선정은 일사와 외부온도가 일정하게 유지되는 시점을 선정하였으며, 3차원 시뮬레이션이기 때문에 풍향 및 일사량의 경우에는 온실이 동북방향으로 40° 지점에 위치한 것을 감안하여 방향 벡터 값을 계산하여 입력하였다.

표 2-33. 선정된 외부기상자료 및 입력값

입력변수(단위)	입력값
외부온도(K)	302.78
외부습도(%)	54.9
외부일사( $W \cdot m^{-2}$ )	853
외부풍속(m/s)	0.46
외부풍향(degree)	120.4
포화수증기압(Pa)	4160
습구온도(K)	297.25
수온(K)	296.00
분무시간(sec)	45
정지시간(sec)	45
분무량(kg/sec)	0.00157
분무입자크기( $\mu m$ )	20

나) CFD 모델의 검증

표 2-34와 표 2-35는 온실 내부의 각 측정별 온도 및 상대습도에 대한 실측치와 예측치를 비교한 결과를 각각 나타낸 것이다.

표 2-34. 실측치와 예측치의 온도 비교

측점	A			B			C		
	실측치 ( $^{\circ}C$ )	예측치 ( $^{\circ}C$ )	오차 ( $^{\circ}C$ )	실측치 ( $^{\circ}C$ )	예측치 ( $^{\circ}C$ )	오차 ( $^{\circ}C$ )	실측치 ( $^{\circ}C$ )	예측치 ( $^{\circ}C$ )	오차 ( $^{\circ}C$ )
1	32.8	30.6	+2.2(6.5)	29.5	28.6	+0.9(3.0)	33.5	31.5	+2.0(5.9)
2	31.9	29.0	+2.9(9.0)	31.1	30.0	+1.2(3.7)	32.8	30.0	+2.8(8.3)
3	33.1	30.8	+2.3(7.0)	31.2	30.8	+0.4(1.2)	31.8	29.9	+1.9(5.9)
4	29.6	30.8	-1.2(4.1)	35.3	32.4	+2.8(8.0)	28.5	28.9	-0.4(1.1)
5	28.3	32.0	-3.7(13.1)	27.0	28.3	-1.3(5.0)	29.0	30.1	-0.9(3.9)
6	30.9	32.0	-1.1(3.6)	36.1	32.8	+3.4(9.3)	30.5	30.1	+0.4(1.3)
7	31.9	30.1	-1.8(5.7)	34.3	32	+2.3(6.7)	31.2	30.3	+0.9(3.0)
8	33.7	30.1	-3.6(10.6)	32.3	31.8	+0.5(1.7)	29.5	30.2	-0.7(2.3)
9				32.2	31.0	+1.2(3.8)			

주) 오차항목에서 ( )안의 값은 상대오차(%)임.

표 2-35. 실측치와 예측치의 상대습도 비교

단면 측점	A			B			C		
	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)	실측치 (%)	예측치 (%)	오차 (%)
1	68.3	74.4	-6.1(8.9)	51.3	52.3	-1.0(2.0)	58.4	62.8	-4.4(7.6)
2	71.5	73.4	-1.9(2.6)	61.7	69.5	-7.8(12.6)	64.6	69.2	-4.6(7.2)
3	59.7	66.7	-7.0(11.7)	50.6	58.6	-8.0(15.0)	62.1	60.1	+2.0(3.3)
4	86.5	75.8	+10.7(12.4)	60.8	58.2	+2.6(4.2)	81.7	75.4	+5.3(7.1)
5	78.1	73.0	+5.1(6.6)	66.1	75.4	-9.3(14.0)	79.3	72.2	+7.1(8.3)
6	76.9	70.0	+6.9(9.0)	67.7	56.7	+11.0(16.2)	72.1	66.1	+6.0(8.3)
7	76.0	66.1	+9.9(13.0)	65.1	59.3	+5.9(9.0)	67.9	65.3	+2.6(3.4)
8	63.0	65.8	-2.8(4.4)	70.3	59.9	+10.4(4.8)	76.5	65.2	+11.3(14.8)
9				71.4	62.1	+9.3(11.2)			

주) 오차항목에서 ( )안의 값은 상대오차(%)임.

각 측정별로 온도는 1.1~13.1%, 습도는 2.0~16.2%의 오차를 나타내었다. 2차원 시뮬레이션에 비하여 오차가 크게 나타났는데 이는 Gambit에서 격자망을 구성할 때 계산시간을 고려하여 2차원 시뮬레이션보다 격자를 성기게 구성하였기 때문에 정확도가 다소 떨어지게 된 것으로 판단된다.

한편, 습도값의 경우는 중앙단면의 하부에서 가장 낮게 나오는 것으로 나타났는데, 제습기에 의하여 습기가 제거된 공기가 이동하면서 온실 중앙에 가장 많이 영향을 주게 된 것이라 판단된다.

#### 다) CFD 모델의 응용

##### (1) 시뮬레이션 조건

제습기에 의한 습도제거효과 및 냉방효과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 표 2-36의 두 조건으로 나누어 시뮬레이션을 하였다. 입력조건은 표 2-33의 조건을 이용하였다.

표 2-36. 제습 여부에 따른 시뮬레이션 조건

구분 \ 항목	Case 1	Case 2
	제습여부	제습

(2) 시뮬레이션 결과

표 2-37은 제습 및 무제습 조건에서의 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 제습한 경우 제습을 하지 않은 경우에 비하여 온실 전체의 평균 상대습도가 5.5% 감소한 것으로 나타났다. 특히 온실 하부의 평균 상대습도는 9.4% 감소한 것으로 나타나 제습기에 의하여 온실 내부의 습도감소 효과가 나타났음을 알 수 있다. 온도의 경우는 두 조건간의 차이가 거의 없는 것으로 나타나 현열교환은 크지 않은 것으로 나타났다.

표 2-37. 제습조건에 따른 각 단면의 평균값

구분 \ 조건 항목	Case 1		Case 2		
	온도 (°C)	습도 (%)	온도 (°C)	습도 (%)	
A 단면	하부	30.2	71.5	31.2	71.3
	중부	31.6	72.9	31.0	70.0
	상부	30.6	64.0	31.7	66.1
	전체	30.8	69.5	31.3	69.1
B 단면	하부	29.8	62.8	29.6	78.6
	중부	31.2	63.4	30.7	71.5
	상부	31.6	60.4	32.1	65.2
	전체	30.8	62.2	30.8	71.8
C 단면	하부	30.5	64.0	30.0	76.7
	중부	29.7	68.2	30.3	73.0
	상부	30.7	63.6	31.3	68.1
	전체	30.3	65.3	30.5	72.6
전체	하부	30.1	66.1	30.2	75.5
	중부	30.8	68.2	30.7	71.5
	상부	30.9	62.7	31.7	66.5
	전체	30.6	65.7	30.9	71.2

## 2. 포그냉방이 작물 생육에 미치는 영향

### 가. 엽록소형광을 이용한 광합성 분석

식물은 여러 환경 요인에 영향을 받아 생리 활성이 능동적 또는 수동적으로 달라진다. 그 중 광합성은 가장 민감한 대사과정의 하나라고 할 수 있다. 광합성은 명반응과 암반응으로 나눌 수 있고, 이 두 반응은 상호 작용하여 각 반응의 상태는 다른 반응의 활성화에 영향을 준다.

광합성 명반응은 엽록소에서 방출되는 형광으로 측정할 수 있다. 이 방법은 광합성 기구의 구조 및 기능의 변이를 잎의 파괴없이 직접 측정이 가능하기 때문에 일반적인 광합성 측정방법을 대체하거나 보완할 수 있다.

#### 1) 엽록소형광의 특성

빛에너지는 엽록소분자에 의해 흡수되어 광합성에 이용된다. 그러나 흡수된 빛에너지의 대부분은 열, 형광으로 다시 방사되어 결국에는 소멸된다. 태양에너지를 받아 들뜬 상태가 된 엽록소 에너지의 소멸과정은 상호 보완적이므로 광합성과 열방사의 변화는 형광의 강도를 변화시키는 원인이 된다. 엽록소형광과 광합성에너지 변환효율 사이의 양적인 관계는 명확히 구분할 수 있다. 형광과 에너지변환사이의 근본적인 특성은 광의 흡수에 의해 만들어진 동일한 여기상태에서 형광이 생긴다. 그러므로 형광과 광합성과의 관계는 바로 열역학 제 1법칙의 결과이며 이를 간단히 표현하면,  $\text{형광} + \text{광화학} + \text{열} = 1$ 이 된다. 형광과 열은 형광측정을 통하여 상대값으로 결정할 수 있으므로 광화학을 얻을 수 있다. 일반적으로 낮은 조도 하에서 높은 양자수율(quantum yield)일 때 흡수된 광자의 97%는 광화학에, 2.5%는 열로, 0.5%는 형광으로 방출된다.

#### 2) 광합성과 관련된 엽록소형광

엽록소에서 방출되는 형광은 광합성 초기 광화학 반응에 사용되지 못한 빛에너지

의 일부가 다시 빛으로 방출되는 것이다. 이와 같이 버려지는 에너지로서 형광은 식물에게는 쓸모가 없으나 광화학 반응이 감소하면 형광이 증가하며 반대의 경우에는 감소하는 상보적인 양상을 보이므로 형광의 측정 및 분석을 통하여 광합성의 변화를 민감하게 알 수 있다.

잎을 어두운 곳에 두어 암적응이 된, 다시 말하면 전자 전달과정의 전자 운반체들이 산화된 상태의 식물 잎에 빛을 쬐이면 그림 2-48과 같이 형광이 증가하였다가 감소하여 정류상태(steady state)에 도달하게 된다. 이 현상을 Kautsky 효과 또는 형광유도(fluorescence induction)과정이라고 부른다. 매우 약한 빛을 잎에 비추면 형광이 그림 2-48과 같이 0에서 순간적으로 증가하였다가 일정한 값을 유지하는데, 이를 초기형광( $F_0$ ; initial fluorescence)이라고 한다. 이 때 반응 중심은 열린 상태가 된다.  $F_0$ 를 측정할 때 보다 강한 포화광을 비추면 급격히 증가하여 최대형광( $F_m$ ; maximum fluorescence)에 도달하게 된다. 이 때 반응 중심의 전자 수용체는 모두 환원된 간헐 상태로 있다.

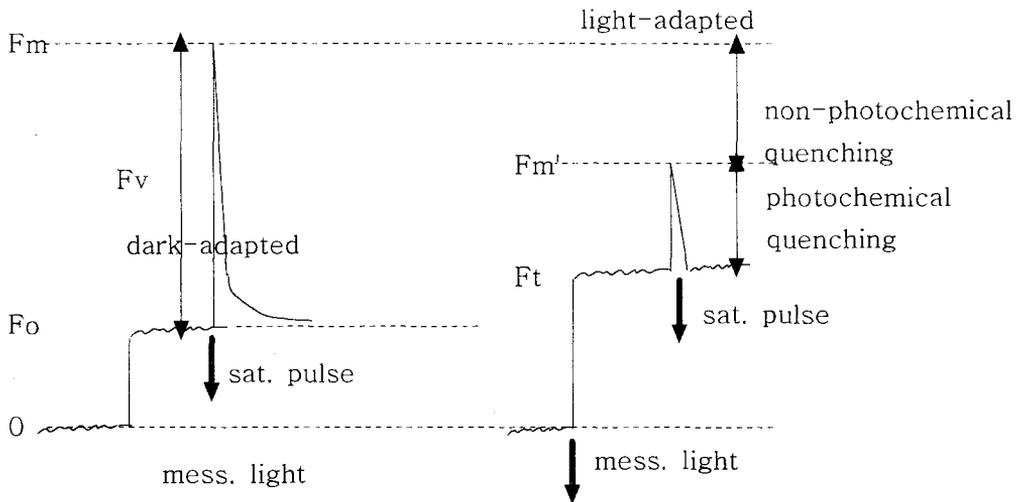


그림 2-48. 암적응 상태와 광적응 상태의 엽록소형광 유도곡선

빛이 약할 때 엽록소가 흡수한 빛 에너지는 광합성에 이용되지 못하고 형광으로 방출된다. 즉, 반응중심에 에너지를 전달을 할 수 없는 엽록소 분자들이 많아지면  $F_0$ 값이 증가한다. 일반적으로 식물이 고온스트레스를 받을 때  $F_0$ 값이 증가한다. 스트레스를 받은 식물에서는 보통  $F_m$ 의 값도 감소한다. 이들 두 값은 엽록소의 함량이 많으면 큰 값을 나타내므로 잎의 두께나 나이에 따라 값에 차이가 있으므로 두 값의 비, 즉  $F_m/F_0$ 를 스트레스 지표로 사용한다. 정상상태의 모든 식물의  $F_m/F_0$ 는 최대 6이며 5이상을 나타내면 열에 의한 스트레스를 받고 있지 않는 것이며, 5보다 작으면 작을수록 열에 의한 스트레스를 많이 받고 있는 것이다.

$F_m$ 에서  $F_0$ 를 뺀 값을  $F_v$ (variable fluorescence)라 하며  $F_v$ 를  $F_m$ 으로 나눈 값을 최대광자효율 또는 광합성 효율(photochemical efficiency)이라 한다. 이 값은 잎이 광합성을 수행할 수 있는 최대값 즉, 잠재력을 의미하며, 스트레스생리학을 포함하여 광합성 연구 분야에서 가장 널리 이용되는 지표이다. 정상상태의 모든 식물의 잎에서 측정된 최대광자효율(광합성효율)의 값은  $0.832 \pm 0.004$ 로 일정한 비율을 보인다.

#### 나. 포그냉방이 작물 생육에 미치는 영향

포그시스템을 가동하면 온실내부의 기온이 변화하게 된다. 이 기온 변화에 따른 작물의 열스트레스를 관찰하기 위하여 엽록소형광측정기(MINI-PAM, WALZ)를 사용하여 냉방유무에 따른  $F_m/F_0$ 값을 측정 비교하였다. 온실내부에서 재배되고 있는 토마토중 임의로 3본을 선정하여 외관상 상태가 좋은 잎을 한 개씩 선정하여 측정을 실시하였다. 토마토의 광합성효율은 평균 0.765로 생육 상태가 정상이 아니었으며, 포그시스템을 가동했을 때 작물 주변의 평균기온은  $23.5^{\circ}\text{C}$ 이었고, 가동하지 않았을 때의 작물 주변 평균기온은  $34^{\circ}\text{C}$  이었다. 그림 2-49는 냉방 유무에 따른 작물의  $F_m/F_0$ 의 변화를 나타낸 것이다. 포그시스템을 가동한 경우  $F_m/F_0$ 는 가동 직후 평균 4.42였고, 5시간 후에는 평균 5.18로 나타났다. 그러나, 포그시스템을 가동하지

않은 경우 평균 3.35~4.21의 값이 측정되었다. 따라서, 냉방을 실시한 경우 작물이 스트레스를 덜 받는 것으로 나타났다.

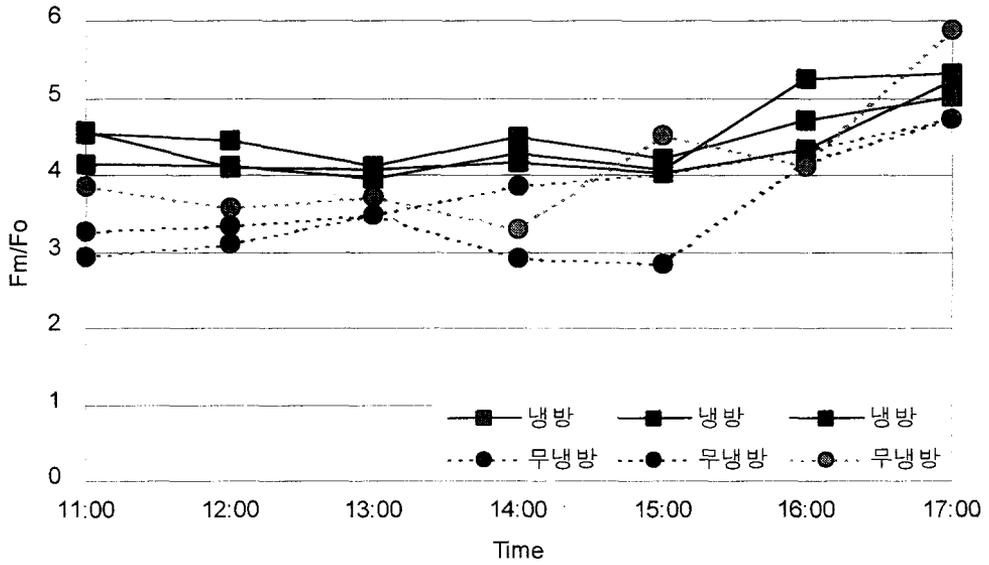


그림 2-49. 냉방유무에 따른 작물의 Fm/Fo 변화

### 3. 포그시스템의 설계 및 운영에 관한 지침

온실에서의 냉방은 강한 일사하에서 온실내 온도를 내부에 재배하고 있는 작물의 생육에 필요한 수준으로 유지하는 것을 목적으로 한다. 포그냉방 설계에서 우선적으로 결정해야 할 인자는 주어진 기상조건에 대해 냉방 목표 온도를 얻기 위한 분무수량, 노즐배치 등이다.

#### 가. 분무수량과 환기량

온실 내부의 온도를 냉방 목표온도로 유지하는데 필요한 분무수량을 결정하기 위해 온실이 위치한 지역의 냉방설계용 기상데이터와 온실 구조 및 전열특성에 관한 정보를 이용하여 냉방설계용 VETH선도를 작성한다. 우리나라 16개 지역의 냉방설계용 VETH선도, 필요 환기회수 및 분무수량을 각각 부록 1과 부록 2에 제시하였다.

VETH선도는 온도를 가로축으로, 상대습도를 세로축으로 하여 실내증발산율과 환기율 변화에 따른 온실 내부 온도( $t_{in}$ )와 상대습도(H) 변화를 나타낸 그래프이다.

온실내 온도를 냉방 목표온도로 유지하는데 필요환기회수 및 분무수량은 VETH선도에서 온도(냉방 목표온도)의 수직선과 교차하는 곡선(Q)의 값이 필요환기회수가 되고, 온도와 곡선(Q)의 교점을 통과하는 곡선(E)의 값이 실내증발산율이 된다.

VETH선도에서 구한 실내증발산율로부터 포그 노즐로 분무해야 할 수량을 구하는 식은 다음과 같다.

$$W_t = E \times A$$

여기서,  $W_t$  : 포그 노즐로 분무해야 할 수량(kg/min)

$E$  : VETH선도에서의 실내증발산율( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )

$A$  : 온실의 바닥면적( $\text{m}^2$ )

필요 환기회수는 자연환기로 가능한 범위에서 낮은 쪽의 값을 선택하고, 자연환기로 필요 환기회수를 충족시키지 못한다면 팬을 이용한 강제환기의 도입도 적극 검토해야 한다. 보다 자세한 내용은 본 보고서 2장 3절 1항을 참조하기 바란다.

#### 나. 노즐 배치

##### 1) 노즐의 개수

온실 내부 온도를 냉방 목표온도로 유지하는데 필요한 포그 노즐의 개수 ( $N$ )는 냉방설계용 VETH선도로부터 구한 분무수량을 노즐 1개당 분무수량으로 나누어 구한다.

$$N = \frac{\text{증발냉각 필요 분무수량}(\text{kg}/\text{min})}{\text{노즐 1개당 분무수량}(\text{kg}/\text{min})}$$

##### 2) 노즐의 배치 및 분사 방향

분무 입자의 직경이  $25\mu\text{m}$  이하이면 분무 후 낙하거리 2m 이내에서 분무량의 약 75%정도가 증발한다. 노즐의 설치 높이는 최소한 낙하거리 2m를 확보하지 못하면 증발되지 않은 분무 입자가 작물에 부착되어 작물 생육에 지장을 줄 수 있다. 국내에 보급되어 있는 대다수의 온실은 작물의 초장에 다 낙하거리 2m를 확보할 수 있을 만큼 높이가 높지 않다. 따라서, 분사방향은 충분한 낙하거리를 확보할 수 있도록 수직 상향으로 한다. 노즐의 위치는 작물의 초장, 차광망 높이, 노즐의 분사거리 등을 고려하여 가능한 낮게 설치하고, 측창으로부터 유입되는 바람에 의한 분무 입자의 쓸림현상을

고려하여 주풍향측의 측창쪽에 최대한 근접하게 설치한다.

### 3) 노즐의 설치 간격

노즐의 분사폭을 고려하여 옆 노즐의 분사에 영향을 주지 않는 범위에서 1동당 2~3개의 급수라인을 설치하고, 그 급수라인에 포그 노즐을 설치하는 간격은 다음의 식으로 계산한다.

$$l = \frac{n \times L}{N}$$

여기서,  $l$  : 노즐의 설치 간격(m)

$n$  : 온실 전체에 설치되는 급수라인의 개수

$L$  : 온실의 길이(m)

$N$  : 온실 전체에 설치되는 포그 노즐의 개수

### 다. 차광

차광은 온실내로 유입되는 일사량을 감소시켜 온실의 냉방부하량을 경감시켜주므로 온도면에서 다소 유리할 수 있지만, 분무 입자의 증발률이 떨어져 작물에 부착되는 입자가 많고, 작물 생육이나 환기, 증발률 측면에서 불리하게 작용할 수 있으므로 작물 생육을 고려하여 탄력적으로 차광을 실시하여야 한다. 작물의 광합성이 왕성한 오전에는 차광을 하지 않고, 오후에 2~3시간 정도는 차광한 상태에서 포그시스템을 가동하는 등 하루중 일사량의 변화에 따라 차광 여부를 결정하는 것이 유리하다. 또한, 차광망으로 인해 온실 내부의 공기 흐름을 방해받지 않기 위해서는 온실 외부에 차광망을 설치하는 것이 유리할 것으로 생각된다.

### 라. 냉방제어

타임제어는 냉방설계용 VETH선도에서 결정된 분무 수량을 공급할 수 있

는 일정 시간동안 분무하고, 분무 입자의 증발에 의해 다습해진 공기가 외부로 완전하게 배출될 수 있는 일정 시간동안 정지하는 것을 반복하는 방식이다. 따라서, 타임제어는 일정 시간 간격으로 분무하기 때문에 외부 습도, 풍속 등 온실 외부 환경에 의해 냉방효과가 많은 영향을 받으며, 특히 환기가 잘 안 될 경우에는 온실 내부에 과습한 환경이 조성되어 분무 입자의 증발률이 떨어지는 문제가 발생하게 된다. 습도제어는 온실 내부의 습도에 따라서 분무-가동을 반복하면서 분무량을 조절할 수 있으므로 온실 내부의 습도를 일정하게 유지시킬 수 있고 증발률도 높일 수 있다 따라서, 타임제어에 비해 습도제어가 더 유리하다. 포그냉방 온실에서의 실험과 시뮬레이션에 의하면, 단동 온실의 경우 상대습도가 60% 정도로 유지되었고, 3연동 온실의 경우 상대습도가 75% 정도로 유지되었다. 따라서, 단동 온실에서의 습도제어는 온실내 상대습도가 55% 이하일 때 분무하고, 65% 이상일 때 정지하는 것이 효율적이고, 3연동 이상의 온실에서는 온실내 상대습도가 70% 이하일 때 분무하고, 80% 이상일 때 정지하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

#### 마. 유지 관리

- ① 펌프는 증발냉각에 필요한 분무 수량을 만족하는 유량 이상의 것을 사용해야 하며, 포그 노즐의 사용 압력에 펌프의 실양정과 관로손실을 고려하여 용량을 선정한다.
- ② 노즐에 공급되는 물에 모래나 이물질이 섞여 있으면 포그 노즐의 구멍이 막히거나 노즐이 마모되어 구멍이 커지게 되므로 이를 방지하기 위해 반드시 필터를 설치하여 물이 필터를 거쳐 노즐로 공급되도록 하고, 필터 및 물탱크 청소를 자주 해야 한다. 또한, 노즐의 막힘 여부도 수시로 체크한다.
- ③ 분무 종료 직후 수압 때문에 일시적으로 물방울이 떨어지는 현상이 발생

하게 되는데 이런 현상을 방지하기 위해 드롭방지시스템을 갖춘다.

④ 노즐에서 분무되는 양은 분무압력에 비례하므로 분무 압력이 원하는 수준으로 일정하게 유지되는지를 수시로 체크한다.

⑤ 노즐에서 물이 분사될 때 압력에 의해 노즐이 흔들리게 되므로 노즐의 분사각도를 수시로 체크한다.

⑥ 냉방시스템을 사용하지 않는 기간에는 압력 펌프와 노즐, 배관 내부의 물을 완전히 제거한다. 내부에 물이 남아 있을 경우 겨울철 동파에 의한 시스템의 손상이 발생한다.

## 제5절 요약 및 결론

주간의 온실내 기온 상승을 억제하는 수단으로 주로 차광이나 환기 등의 소극적인 방법이 이용되고 있는데, 과도한 차광은 작물의 생육에 제한요인이 될 수도 있으며 환기만으로는 역시 원하는 수준으로 온실내 온도를 떨어뜨릴 수 없다. 최근 온실내 물을 분무하여 물의 기화열을 이용한 증발냉각법을 이용하여 적은 물량으로 높은 냉방 효과를 얻을 수 있다는 연구 보고와 함께 증발냉각장치가 설치되는 사례가 증가하고 있지만 운영 면에서 많은 문제점을 안고 있어 증발냉각시스템의 설계 및 운영에 관한 체계적, 기술적 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 증발냉각시스템의 설계 및 운용에 필요한 구체적인 자료를 제공하기 위하여 증발냉각시스템의 냉방효율 및 문제점 분석, 포그냉방시스템의 현장적용기술 정립, 포그냉방시스템 이용기술의 체계화에 관한 연구를 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 국내에 증발냉각시스템을 설치한 농가는 전체 29곳으로, 이중 포그시스템을 설치한 농가는 9곳, 패드-팬시스템을 설치한 농가는 6곳, 디스크분사식을 설치한 농가는 14곳으로 조사되었다.
2. 증발냉각시스템의 활용률을 살펴보면 포그시스템은 33.3%, 패드-팬시스템은 66.7%, 디스크분사식은 100%로 조사되었다. 포그시스템의 활용률이 가장 낮아 포그시스템의 분무수량, 노즐 배치, 운영 및 관리에 대한 연구가 시급한 것으로 나타났다.
3. 온실 내부의 온도를 냉방 목표온도로 유지하는데 필요한 분무수량을 결정하기 위해 냉방설계용 기상데이터와 온실(3-1G형) 구조 및 전열특성에

관한 정보를 이용하여 우리 나라 16개 지역의 냉방설계용 VETH선도를 작성하고, 필요 환기회수 및 분무수량을 제시하였다.

4. 차광에 따른 포그냉방온실의 열환경을 분석한 결과, 실험 온실의 온도가 70% 차광하에서는 외기온보다 1.2℃ 높았고, 무차광하에서는 외기온보다 1.3℃ 높았다. 무차광하에서 분무 입자의 증발률이 높기 때문에 70% 차광하에서와 비슷한 수준으로 온실의 온도가 유지된 것으로 판단된다. 따라서, 차광하에서는 분무 입자의 증발률이 떨어져 작물에 부착되는 입자가 많고, 작물 생육이나 환기, 증발률 측면에서 불리하게 작용할 수 있으므로 작물 생육을 고려하여 탄력적으로 차광을 실시하여야 할 것이다.

제습여부에 따른 열환경을 분석한 결과, 실험 온실의 상대습도가 무냉방 온실의 상대습도에 비해 제습한 경우 20.8%, 무제습의 경우 6.2% 높게 나타났다. 따라서, 제습을 함으로써 온실내 분무 입자의 증발률이 높아진 것으로 판단되므로 자연환기가 잘 되지 않는 다연동 온실에서는 포그냉방시 제습장치의 활용도 적극 검토하여야 할 것이다.

환기조건에 따른 열환경을 분석한 결과, 천창만 개방한 경우 무냉방 온실과 온도차가 없었으며, 환기회수가 증가할수록 분무 입자의 증발률이 증가하였으므로 가능한 환기가 원활하게 이루어지도록 해야 할 것이다.

제어방식에 따른 열환경을 분석한 결과, 타임제어를 한 경우는 실험 온실의 습도가 무냉방 온실의 습도보다 6.2% 높았고, 습도제어를 한 경우는 19.2% 높았다. 이는 습도제어를 할 경우 온실 내부의 습도에 따라 분무량이 조절되어 분무 입자의 증발률이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서, 습도제어가 타임제어에 비해 더 효과적이다.

5. 포그냉방온실의 열환경 해석을 위해 개발된 CFD모델을 검증한 결과, 온도의 경우 무차광조건에서는 0.4~4.4%, 차광조건에서는 0.6~4.1%의 오차를 나타냈으며, 상대습도의 경우 무차광조건에서는 0.6~9.6%, 차광조

건에서는 1.3~10.6%의 오차를 나타냈다. 따라서, 포그냉방온실의 열환경 해석에 CFD모형을 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 분무 입자의 증발률은 온실 내부의 상대습도와 밀접한 관련이 있다. 포그시스템의 냉방효율을 높이기 위해 제습기를 개발하였으며, 제습기의 제습률은 평균 64.6%였다.
7. 포그냉방이 작물 생육에 미치는 영향을 분석한 결과, 포그시스템을 가동한 경우  $F_m/F_o$ (최대형광과 초기형광의 비)의 평균은 4.3이었고, 가동하지 않았을 경우  $F_m/F_o$ 의 평균은 3.82였다. 따라서, 냉방을 실시한 경우 작물이 스트레스를 덜 받는 것으로 나타났다.
8. 이상의 연구 결과를 토대로 하여 포그시스템의 설계 및 운영에 관한 지침을 제시하였다.

# 제 3 장 온실의 경제적 고온극복 방안 연구

## 제1절 서 론

국내의 온실산업은 질적·양적으로 급속히 발전되고 있으며, 특히 수요의 고급화, 주년화에 대응하여 안정된 생산과 주년공급에 대한 요구가 날로 증대되고 있다. 원예산물의 주년안정생산을 위해서는 겨울철의 난방과 여름철의 고온극복이 과제이다. 난방에 관한 연구는 상당수 이루어져 있으며 최근의 유가 상승으로 에너지 비용의 절감을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으나 온실의 냉방에 관한 연구는 미미한 실정이다. 우리 나라의 기상조건상 여름철의 온실내 기온은 현저하게 높아서 작물의 정상적인 생육이 불가능하므로 여름철에 휴경을 하는 곳이 많아 연간 이용률이 저하하게 된다. 시설의 유효이용이나 수익성의 측면에서 볼 때 여름철 온실내 환경의 적정화를 통한 주년재배의 달성은 온실재배에 있어서 당면과제라 할 수 있다.

지금까지 개발된 하절기 온실의 냉방방법은 기계적인 환기와 차광에 의한 방법, 증발냉각법, 배양액 및 근권부 냉각법, 작물체 주위 국부냉방법, 지붕 살수법, 히트펌프에 의한 방법 등이 있다. 온실의 기온상승을 억제하기 위해서는 온실 안으로 흡수된 일사량에 해당되는 열을 제거해야만 하는데, 여름철의 일사부하는 매우 크기 때문에 히트펌프에 의한 방법은 경제적으로 사용하기 불가능하므로 야간냉방에만 일부 이용되고 있는 실정이다. 온실내부 기온은 환기율이 1회/min 일 때도 강한 일사조건하에서는 이론적으로 외기온보다 6~7℃ 정도 높으며, 50%의 차광 병행시 3~4℃ 정도 높다. 각종 보조적인 냉방방법들은 냉방효과가 정확히 알려져 있지 않으며 그다지 크지 않은 것으로 생각되고 있다.

증발냉각을 실시한 온실의 경우 각종 조건에 따라 다르겠지만, 팬앤티드 방식은 외기온보다 2℃ 정도 높고, 팬애포그 방식은 1~2℃ 낮은 것으로 보고되고 있다. 현재까지 개발되어 사용되고 있는 냉방방식 중에는 증발냉각법이 가장 효과적인 방법이지만 설치 및 유지비용이 많이 들고 설계, 시공, 유지관리 등의 체계적인 기술이 미비한 관계로 국내에는 널리 보급되어 사용되고 있지 못한 실정이다. 또한 단동 비닐하우스와 같이 시설투자가 많지 않은 경우에 증발냉각시스템과 같은 시설을 설치한다는 것은 거의 불가능한 현실이므로 보다 경제적인 고온극복 방안의 도출이 절실한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 국내의 상황을 고려하여 온실의 경제적 고온극복 방안을 도출하고, 합리적인 시설원예 경영과 원예시설의 계획 및 설계 방향 설정에 필요한 기초 자료를 축적하기 위하여 수행하였으며, 주요 연구 목적을 요약하면 다음과 같다.

- ① 하절기 온실의 활용실태 조사 및 열환경 분석
- ② 냉방 및 보조냉방 방법별 특성 및 고온억제효과 분석
- ③ 고온극복 설계 제원 결정 알고리즘 개발
- ④ 지역별 고온극복 설계용 기상자료 분석
- ⑤ 작물별 고온기 재배환경 설정
- ⑥ 고온극복 관련자재 생산현황 조사
- ⑦ 현장조건에 따른 경제적 고온극복 방안 도출

## 제2절 하절기 온실의 활용실태 및 열환경 분석

### 1. 하절기 온실의 활용실태 조사

#### 가. 조사대상 및 방법

조사대상은 영구 비닐하우스와 유리온실로 하였고, 표본조사 방법을 택하였으며 표본의 크기는 다음 식으로 구하였다.

$$n = \frac{N}{\left(\frac{e}{k}\right)^2 \frac{N-1}{P(1-P)} + 1} \quad (3-1)$$

여기서,  $N$ 은 모집단의 크기,  $P$ 는 모집단의 예상비율(예측할 수 없을 때 0.5),  $e$ 는 요구정밀도(허용 최대오차),  $k$ 는 신뢰도에 대응한 표준정규분포값(신뢰수준 95%일 때 1.96)이다.

모집단의 크기는 1995년도 농업총조사 자료를 이용하였고 표본수는 요구정밀도를 10%로 하여 비닐하우스 96농가, 유리온실 75농가로 설정하였으며, 표본추출은 층별다단추출법을 적용하였다. 1995년도 농업총조사에 의하면 비닐하우스는 일시 73,260농가, 영구 61,584농가, 유리온실은 329농가였으며, 전체농가중 시설재배 농가의 비율은 9.4%로서 경남 14.0%, 충남 12.1%, 경기 9.7%의 순으로 나타나고 있다(표 3-1).

특별시 및 광역시는 제외하고, 시설농가 비율이 높은 경기, 충남, 경남의 3개 도를 선정한 후, 각 도에서 유리온실 농가가 가장 많은 경기 이천, 충남 부여, 경남 김해 시·군을 선정하였으며, 유리온실 농가의 표본수가 부족한 경우에는 인접 시·군도 조사대상에 포함시켰다. 표본선정은 도별 농가수 및 면적 비율에 따라 표본 수를 산정한 후 무작위로 추출하였으며, 지역별

표 3-1. 시도별 시설재배농가(호) 및 시설면적(ha)

시도	시설 면적	비닐하우스				유리온실		기타		시설 농가 비율* (%)
		일시		영구		농가	면적	농가	면적	
		농가	면적	농가	면적					
서울	511	37	12	1354	498	-	-	9	1	51.0
부산	1206	1397	625	1250	577	2	0	25	3	27.3
대구	838	1371	604	651	233	2	0	12	1	15.5
인천	200	911	63	557	126	2	0	148	11	9.0
광주	976	600	160	1943	815	-	-	32	2	21.6
대전	259	332	96	521	162	-	-	9	1	11.0
경기	4665	4553	777	10190	3795	104	22	785	70	9.7
강원	1162	2621	447	3672	653	33	9	818	54	8.6
충북	1174	1893	357	2480	760	24	6	440	51	4.9
충남	6155	15262	4222	6913	1790	32	9	1061	133	12.1
전북	3039	6894	2037	3009	955	35	14	232	34	6.7
전남	3704	7449	1417	8628	2218	36	10	945	58	6.8
경북	8710	10174	3649	9729	4989	18	6	694	66	7.9
경남	9668	19662	7126	7595	2482	38	14	378	46	14.0
제주	1173	104	33	3092	1138	3	1	3	1	8.0
계	43440	73260	21624	61584	21192	329	92	2430	533	9.4

주) 자료 : 농업총조사(1995)

\* ) 시설농가 비율은 전체 농가 중 시설재배 농가의 비율임.

표 3-2. 선발된 조사대상지역 및 표본 수

지 역	비닐하우스	유리온실	계	인접지역	위도
경기 이천	40	37	77	여주, 안성, 용인	37° 17'
충남 부여	27	15	42	공주, 논산, 청양	36° 16'
경남 김해	29	23	52	창원, 밀양, 마산	35° 15'
계	96	75	171		

표본 수는 표 3-2와 같다.

실태조사는 1999년 6월 28일부터 7월 21일 사이에 조사원이 현장을 방문하여 면접으로 실시하였으며, 조사항목 및 조사내용은 다음과 같다.

- ① 일반현황, 시설면적, 시설종류, 경작여부.
- ② 휴경인 경우 : 휴경기간, 휴경이유, 대책.
- ③ 경작인 경우 : 재배작목, 재배방식, 고온극복방법.
- ④ 고온극복방법 : 환기방식, 차광실태, 지붕살수, 패드 증발냉각, 포그 증발냉각, 기타.
- ⑤ 경작중인 온실의 열환경 측정 : 측정시간, 실내 온습도, 실외 온습도, 기상상태.
- ⑥ 기타 사항 : 목표 한계 온도, 고온기 온실 운영의 문제점 및 애로사항, 고온극복 관련 개발 희망사항, 특이사항 등이다.

#### 나. 하절기 온실의 활용실태 조사결과

조사대상 농가의 시설 종류 및 면적 분포는 표 3-3과 같다. 유리온실은

와이드스팬형 59농가(78.7%), 벤로형 16농가(21.3%)였으며, 비닐하우스는 단동형 58농가(60.4%), 연동형 38농가(39.6%)로서 시설면적은 평균 1,370평으로 나타났다.

표 3-3. 조사대상 농가의 시설종류 및 면적 분포

시설 종류		농가수(호)						평균면적(평)
		계	<600평	600≤	1000≤	1500≤	3000≤	
유리온실	와이드스팬	59	4	24	19	8	4	1160
	벤로	16	0	3	3	6	4	2420
비닐하우스	단동	58	12	4	23	10	9	1460
	연동	38	0	16	13	8	1	1150
계		171	16	47	58	32	18	1370

여름철 고온기의 온실 활용실태(경작실태)는 표 3-4와 같았으며 유리온실 18.7%, 비닐하우스 24.0%, 전체 21.6%의 시설재배 농가가 휴경하고 있는 것으로 나타났다.

휴경 농가의 휴경 기간, 휴경 이유 및 향후 대책은 표 3-5와 같이 조사되었다. 휴경 기간은 30~60일이 23농가(62.2%)로 가장 많았고 60일 이상도 8농가(21.6%)나 되었으며, 평균 휴경 기간은 41일로 나타났다. 휴경 이유로는 작기 전환이 28농가(75.7%)로 가장 많았으며 고온재배가 불가능하여 재배를 포기한 농가가 5농가(13.5%)로 나타났다. 향후 대책으로는 시설투자 후에 경작을 하겠다는 농가가 23농가(62.2%)였으나 대책이 없으므로 계속 휴경하겠다는 농가도 5농가(13.5%)나 되었다.

표 3-4. 여름철 고온기 경작 실태

시설 종류		경작농가(호)	휴경농가(호)	휴경율(%)
유리온실	와이드스팬	47	12	20.3
	벤로	14	2	12.5
	소계	61	14	18.7
비닐하우스	단동	40	18	31.0
	연동	33	5	13.2
	소계	73	23	24.0
계		134	37	21.6

표 3-5. 휴경 농가의 실태

단위 : 농가수(%)

휴경 기간		휴경 이유		향후 대책	
30일미만	6(16.2)	고온재배불가	5(13.5)	계속휴경	5(13.5)
30~60일	23(62.2)	작기전환	28(75.7)	시설투자후 경작	23(62.2)
60일이상	8(21.6)	기타	4(10.8)	기타	9(24.3)
계	37(100.)	계	37(100.)	계	37(100.)

주) 휴경기간 평균 : 41일

다음은 고온기인 조사 당시에 경작을 하고 있던 134농가를 대상으로 조사한 결과를 정리한 것이다. 경작 농가의 재배 방식은 유리온실의 경우 토양재배가 18농가(29.5%), 양액재배가 43농가(70.5%)였으며, 비닐하우스의 경우

는 토양재배가 72농가(98.6%), 양액재배가 1농가( 1.4%)로 나타났다. 주요 재배작목은 유리온실의 경우 장미(24농가), 토마토(13농가), 방울토마토(7농가), 오이(4농가), 백합(3농가), 파프리카, 매론, 고추, 스타티스 등으로서 주로 화훼류와 과채류를 재배하고 있었고, 비닐하우스의 경우에는 오이(13농가), 수박(11농가), 고추(8농가), 토마토(7농가), 장미, 호박, 참외(5농가), 상추, 시금치, 국화(3농가), 열무, 쑥갓, 배추, 청경채, 카네이션 등으로서 다양하지만 비교적 채소류를 많이 재배하고 있었다(표 3-6).

표 3-6. 경작 농가의 재배방식 및 주요 재배작목

항 목	유리온실	비닐하우스
재배방식	토양재배 18농가(29.5%) 양액재배 43농가(70.5%)	토양재배 72농가(98.6%) 양액재배 1농가( 1.4%)
재배작목	장미(24농가) ; 토마토(13농가) 방울토마토(7농가) ; 오이(4농가) 백합(3농가) 기타 : 파프리카, 매론, 고추, 스타티스	오이(13농가) ; 수박(11농가) 고추(8농가) ; 토마토(7농가) 장미, 호박, 참외(5) 상추, 시금치, 국화(3) 기타 : 열무, 쑥갓, 배추, 청경채, 카네이션

고온극복을 위한 설비 현황은 표 3-7과 같다. 유리온실에는 환기팬 설치율이 93.4%로 대부분 설치되어 있었으나 비닐하우스에는 9.6%로 설치된 농가가 많지 않았다. 차광망은 유리온실 75.4%, 비닐하우스 39.7%로 전체 온실의 56.0%에 설치되어 있었으며, 유리온실의 32.8%, 비닐하우스의 4.1%에 지붕살수 장치가 설치되어 있는 것으로 나타났다. 증발냉각시스템은 유리온실에만 설치되어 있고 패드시스템이 3농가(4.9%), 포그시스템이 20농가

(32.8%)에 설치된 것으로 조사되었다.

패드시스템을 설치한 온실에서는 모두 가동하고 있었으나, 포그시스템은 노즐 구멍이 막히는 등 고장이 잦아 가동률이 매우 낮았다. 지붕살수의 경우도 효과가 별로 없으면서 막대한 지하수를 필요로 하고 운영비가 너무 많이 들기 때문에 설치만 해놓고 가동하지 않는 농가가 많았다. 실제 지붕살수 장치는 지붕세척용으로 포그시스템은 농약살포용으로만 이용하는 농가가 많았으며, 고온극복 수단으로 이용하는 농가(이용률)는 지붕살수 12농가(52.2%), 포그시스템 7농가(35.0%)로 매우 낮았다. 따라서 증발냉각 방식에 대한 기술의 체계화 및 저비용 기술의 개발이 시급한 것으로 판단되었다.

표 3-7. 고온극복을 위한 설비 현황

단위 : 농가수(설치율%)

시설종류	환기팬	차광망	지붕살수	증발냉각시스템	
				패드	포그
유리온실	57(93.4)	46(75.4)	20(32.8)	3(4.9)	20(32.8)
비닐하우스	7( 9.6)	29(39.7)	3( 4.1)	0(0.0)	0( 0.0)
계	64(47.8)	75(56.0)	23(17.2)	3(2.2)	20(14.9)

표 3-8은 경작 농가의 환기설태를 나타낸 것이다. 유리온실의 경우에는 거의 대부분이 측창, 천창 및 환기팬을 갖추고 있으며 여기에 유동팬까지 설치한 농가가 62.3%로 비교적 양호한 환기설비를 갖추고 있는 것으로 나타났다. 비닐하우스의 경우에는 측창만 설치된 온실이 52%나 되고 천측창과 환기팬을 설치한 농가는 9.6%에 불과해 매우 열악한 시설에서 재배가 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

표 3-8. 경작 농가의 환기실태

단위 : 농가수(%)

시설 종류	측창	측창, 천창	측창, 천창 환기팬	측창, 천창 환기팬, 유동팬	계
유리온실	0( 0.0)	4( 6.6)	19(31.1)	38(62.3)	61(100)
비닐하우스	38(52.0)	28(38.4)	6( 8.2)	1( 1.4)	73(100)
계	38(28.3)	32(23.9)	25(18.7)	39(29.1)	134(100)

표 3-9는 경작 농가의 차광실태를 나타낸 것이다. 유리온실의 경우에는 차광망으로 알루미늄 스크린을 가장 많이 사용하고 있었으며(71.7%), 비닐하우스에서는 흑색망사를 79.3%로 가장 많이 사용하는 것으로 나타났다. 차광률은 농가마다 큰 편차를 보이고 있었으며 평균 57.6%로 나타났고, 차광망 설치방식은 유리온실의 경우 100% 내부 커튼식으로 비닐하우스의 경우 내부커튼식 41.4%, 외부 피복식 58.6%로 나타났다.

## 2. 하절기 온실의 열환경 분석

경작중인 농민들이 설문에 응답한 재배시 목표로 하는 최고 한계 온도는 표 3-10과 같았다. 유리온실에서는 거의 절반인 50.8%가 32.5℃ 이하로 응답하였으며, 비닐하우스에서는 무응답이 43.8%였고 응답자 중에는 32.5℃ 이하가 24.6%로 가장 많았다. 전체 응답자의 평균은 33.1℃로서 외기온 가까이 떨어뜨리는 것을 목표로 하고 있었으나 실제 상황은 표 3-11에서 보는 바와 같이 매우 열악한 환경 하에서 재배가 이루어지고 있었다. 표 3-11은 온실

표 3-9. 경작 농가의 차광실태

단위 : 농가수(%)

항 목		유리온실	비닐하우스	계
차광망종류	흑색망사	1( 2.2)	23(79.3)	24(32.0)
	부직포	12(26.1)	4(13.8)	16(21.3)
	알루미늄	33(71.7)	2( 6.9)	35(46.7)
차광률	30%미만	5(10.9)	8(27.6)	13(17.3)
	30~50	4( 8.7)	4(13.8)	8(10.7)
	50~70	21(45.6)	8(27.6)	29(38.7)
	70%이상	16(34.8)	9(31.0)	25(33.3)
설치방식	내부	46(100.)	12(41.4)	58(77.3)
	외부	0( 0.0)	17(58.6)	17(22.7)
계		46(100.)	29(100.)	75(100.)

주) 차광률 평균 : 57.6%

의 현장조사시 휴대용 디지털 온·습도계를 이용하여 측정한 실내외 온·습도를 시간대별로 분석한 결과이다. 비가 내린 날은 분석에서 제외하였으며 실제 재배가 이루어지고 있는 온실내부의 기온은 외기온에 비하여 평균 2.7~4.2℃, 최대 5.0~9.0℃ 높게 나타나고 있고, 최고 42.0℃ 까지 관측되었다.

하절기 온실 운영의 문제점 및 애로사항으로는 고온으로 작물재배 어려움, 생산성 저하, 작업환경 열악, 품질저하, 병충해 다발 등의 의견이 있었다. 그밖에 지하수를 이용하여 근권부를 냉각하는 사례가 6농가 있었는데,

표 3-10. 재배할 때 목표로 하는 최고한계온도

단위 : 농가수(%)

시설 종류	무응답	≤30℃	≤32.5℃	≤35℃	≤37.5℃	계
유리온실	11(18.0)	5( 8.2)	31(50.8)	12(19.7)	2( 3.3)	61(100)
비닐하우스	32(43.8)	13(17.8)	18(24.6)	5( 6.9)	5( 6.9)	73(100)
계	43(32.1)	18(13.4)	49(36.6)	17(12.7)	7( 5.2)	134(100)

표 3-11. 경작온실의 열환경 측정 결과

측정 시간	실내외 기온차(℃)		실내외 습도차 (%)	측정 온실수
	최대	평균		
10~12시	6.0	3.8	-11~13	18
12~14시	9.0	4.2	- 7~13	16
14~16시	6.0	3.3	-12~17	31
16~18시	5.0	2.7	-19~ 9	25

주) 비온 날 제외, 관측 최고실내기온 : 42℃

비교적 효과가 좋은 것으로 생각하고 있었다. 실제 근권부의 냉각은 뿌리의 활력을 증진시켜 흡수력을 좋게 함과 동시에 냉각수가 흡수됨으로써 약간의 체온 저하 효과를 나타내고 고온 스트레스를 경감시키는 것으로 보고되고 있어 엽채류의 재배에서는 경제적인 고온극복 방안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

시설재배 농민들이 고온기 재배와 관련하여 개발되기 바라는 내용을 조사

한 결과 무엇보다도 저비용 기술의 개발에 관한 요구가 매우 높았다. 이들의 고온극복 관련 희망사항으로는 외부공기 차단후 냉방기술, 지하수 이용 기술, 수막재배 기술, 고온품종 개발, 그리고 온도조절이 용이한 온실 구조 (환기창 면적 확대, 환기창 개폐 각도 문제 개선, 유리온실의 측면을 비닐 권취식으로 교체하여 개폐면적 확대 등)의 개발 등이었다.

### 3. 냉방 및 보조냉방 방법별 고온억제 효과 분석

#### 가. 재료 및 방법

냉방 및 보조냉방 방법별 고온 억제효과를 분석하기 위하여 충남대학교 부속 농장에 설치된 단동 플라스틱 온실(6m×18m)에서 실험을 실시하였다. 실험온실은 인접한 4개동에 자연환기, 자연환기+50%차광, 자연환기+지붕살수, 증발냉각의 일종인 에어쿨팬의 가동 등 4가지로 처리하였다.

자연환기는 측면을 1m 폭으로 개방하고 앞 뒤 출입문을 완전히 개방한 상태로 하였으며, 차광은 흑색망사를 지붕 외면에 피복한 상태로 하였고, 지붕살수는 맑은날 오전 10시부터 오후 5시까지, 에어쿨팬은 32℃ 이상인 경우에만 가동되도록 제어하였다. 실험은 1999년 7월 11일부터 30일 사이에 실시하였으며, 외부일사량, 외기 온습도, 처리별 실내 온습도를 온습도측정 겸용센서(HOBO ; Onset computer co.)를 이용하여 계측하였다.

#### 나. 냉방 및 보조냉방 처리별 열환경 분석

표 3-12는 실험기간동안의 외부 기상 특성을 정리한 것이다. 낮 최고 기

온은 28.7~34.1℃의 범위에 평균 31.8℃였고, 최저 상대습도는 40.1~65.3%(평균 47.5%)의 범위를 보였다. 수평면 일사량은 6.37~23.45 MJ/m<sup>2</sup>/day(평균 15.96 MJ/m<sup>2</sup>/day)의 범위였고, 비가 내린 날은 5일에 총 강우량은 40.1 mm로서 전체적으로 맑은 날이 많았다.

표 3-12. 실험기간 동안의 온실 외부 기상특성

항 목		평 균	범 위
기 온 (℃)	일 평균	26.6	23.7~28.9
	일 최고	31.8	28.7~34.1
	일 최저	22.5	20.1~25.4
습 도 (%)	일 평균	71.6	61.9~88.9
	일 최고	90.8	74.6~99.2
	일 최저	47.5	40.1~65.3
일 사 (MJ/m <sup>2</sup> )	일 적산	15.96	6.37~23.45
강 우	강우일 5일, 총강우량 40.1 mm		

주) 계측기간 : 1999년 7월 11일 ~ 7월 30일

냉방 및 보조냉방 처리별 온실의 열환경을 비교 측정 한 결과를 분석하여 표 3-13 및 표 3-14에 나타내었으며 관측 예를 그림 3-1에 나타내었다.

표 3-13은 처리별 자연환기 대비 냉방효과를 나타낸 것으로서 자연환기시 온도 분포는 외기온에 비하여 대체로 5.9~6.3℃(최대 10.7℃) 상승하는 것으로 나타났으며, 차광을 병행할 경우에는 자연환기만 실시하는 경우에 비하

여 약 3℃ 정도의 온도 하강효과를 보였고, 차광과 증발냉각의 일종인 에어쿨팬의 가동으로 3.8~4.2℃의 냉방효과를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 지붕살수의 냉방효과는 거의 기대할 수 없는 것으로 나타났다.

표 3-13. 처리별 자연환기 대비 냉방효과

항 목		95% 신뢰수준	최대관측치
자연환기시 온도분포(외기온 +℃)		5.9 ~ 6.3	10.7
냉방효과 (자연환기 +℃)	차광환기	-2.9 ~ -3.1	-5.8
	지붕살수	-1.0 ~ -1.2	-3.4
	에어쿨팬	-3.8 ~ -4.2	-8.3

표 3-14는 처리별 열환경을 비교한 것으로서 실험기간동안 강우시는 제외하고 오전 10시부터 오후 5시까지의 10분간격 데이터를 분석한 결과이다. 자연환기만으로는 최고 42.4℃까지 실내온도가 상승하고 거의 대부분 35℃를 초과하여 작물재배가 곤란한 것으로 나타났다. 차광을 병행할 경우에는 26.9%(일평균 1.9시간)만 35℃를 초과하는 것으로 나타나 조금만 개선하면 어느 정도의 고온극복은 가능할 것으로 판단되었다. 차광과 증발냉각의 일종인 에어쿨팬의 가동은 온실내의 기온을 대부분 35℃ 이내로 유지하는 것이 가능한 것으로 나타났다. 따라서, 철골 유리온실과 같이 시설비가 많이 투자된 경우나 고부가가치의 작물을 재배하는 경우에는 증발냉각시스템을 도입하고, 그 외에는 경제적인 고온극복 방안으로 적절한 차광과 환기시스템의 도입이 필요할 것으로 판단되었다. 즉, 충분한 환기가 이루어질 수 있도록 환기창의 구조를 개선하고 강제환기시설을 도입하는 등의 환기시스템

과 차광방법 개선에 관한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

표 3-14. 냉방 및 보조냉방 처리별 열환경 비교

항 목	외부 기상		온실 내부 기온(°C)			
	기 온 (°C)	상대습도 (%)	자연환기	차광환기	지붕살수	에어쿨팬
평 균	30.5	54.1	36.6	33.6	35.5	32.6
표준편차	1.8	8.9	2.7	2.5	2.6	1.9
최 대	34.1	89.8	42.4	39.1	41.4	37.1
최 소	26.3	40.1	27.9	26.3	27.5	27.5
35°C 초과	초과율(%) <sup>1)</sup>		74.8	26.9	58.2	8.1
	일평균 초과시간 <sup>2)</sup>		5.2	1.9	4.1	0.6

주) 1999년 7월 11일 ~ 7월 30일까지 10:00~17:00(7시간) 사이의 10분간격 데이터를 분석하였으며, 강우시간의 데이터는 제외하였다.

- 1) 초과율은 전체 계측데이터 중 35°C 이상인 데이터 수의 비율.
- 2) 일평균 초과시간은 초과율×7시간(계측시간)으로 구하였다.

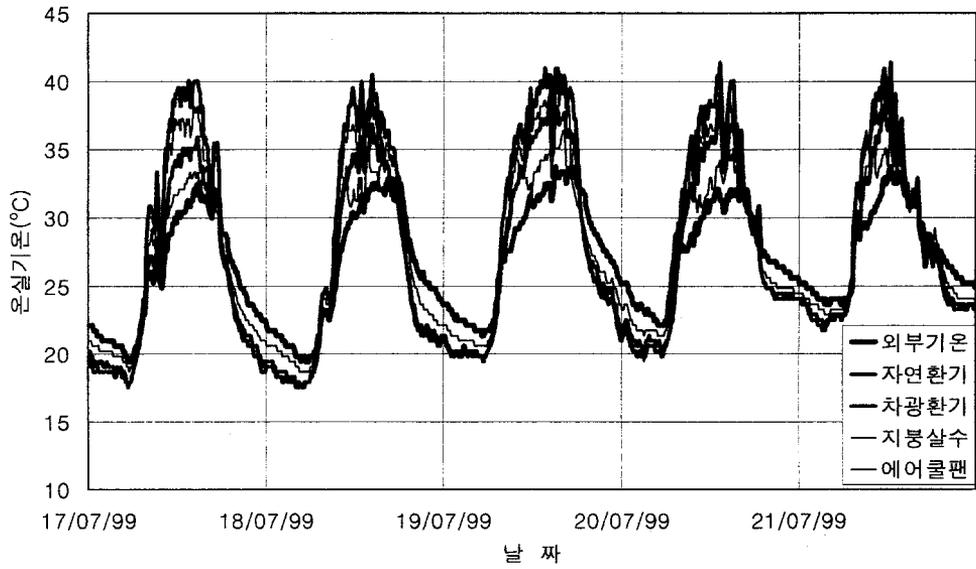


그림 3-1. 냉방 및 보조냉방 처리별 온도관측 예

### 제3절 고온극복방안 설정을 위한 기준자료의 구축

#### 1. 고온극복 설계 재원 결정 알고리즘 개발

온실 산업의 발전으로 많은 시설비를 투자한 주년재배용 고정식 온실이 급속히 증가하였으나 여름철 고온극복의 문제로 연간 시설 이용율이 낮은 실정이다. 하절기 온실의 활용실태 조사에 의하면 유리온실은 18.7%, 비닐하우스는 24.0%의 농가가 휴경하고 있으며, 나머지 경우도 매우 열악한 환경하에서 재배가 이루어지고 있는 것으로 나타나고 있다(제3장 제2절 참조). 온실의 고온극복 방법으로는 차광, 환기, 증발냉각, 근권부나 작물체 주위 등의 국부냉방, 히트펌프, 지붕살수 등의 방법이 있으나 적극적인 환기와 차광의 병행 그리고 증발냉각시스템을 제외하고는 그다지 실용성이 높지 않은 것으로 알려져 있으며, 환기 및 냉방 설계기술의 정립, 비용절감 및 체계화 기술 개발이 과제로 남아 있다.

여름철 고온기에 시설 이용률을 높이고 안정적인 생산을 하기 위하여는 적극적인 차광환기시스템과 증발냉각시스템을 도입하는 것이 필요하다. 이러한 시스템을 도입하기 위하여는 적정 설비용량의 결정이 중요하며, 이는 지역별 외부의 설계 기상자료로부터 구할 수 있다. 차광환기시스템에서 적정 차광률은 작물의 종류에 따라서 결정되어야 하며 따라서, 온실의 환기 및 냉방 시스템 설계에서 기본적으로 결정해야 될 설계 인자는 목표온도를 달성하기 위한 필요환기율과 증발냉각시스템의 분무수량이다.

필요환기율과 증발냉각에 필요한 분무수량을 결정하기 위한 열평형 모델은 많지만 대부분 차광환기시스템과 패드앤팬시스템에만 적용이 가능하고, 포트시스템에 적용할 수 있는 VETH 선도는 작성이 번거로우며 모든 경우

에 적용이 불가능하고 조건에 따라 각각 작성해야하는 불편이 있다. 패드앤 팬시스템의 경우에는 측벽에 설치된 패드에서 증발이 일어나고, 냉각된 공기가 환기시스템에 의하여 실내로 유입되는 것이므로 일반 환기시스템과 비슷하다. 그러나 포그시스템의 경우에는 실내에서 분무되고 증발이 일어나므로 일반 환기시스템과는 다른 식이 필요하다.

따라서 본 절에서는 온실의 고온극복 방법을 차광환기시스템, 차광환기 패드시스템(pad and fan system with screen), 차광환기 포그시스템(fog system with screen)으로 설정하고, 온실의 고온극복을 위한 시스템의 설계 제원 결정 알고리즘을 제공할 목적으로 각각의 시스템에 대한 열평형식을 구성하고 현장 실험을 통하여 적용성을 검토하였다.

#### 가. 열평형식의 구성

온실의 고온극복방법은 차광환기시스템, 차광환기 패드시스템, 차광환기 포그시스템으로 설정하였으며, 미국농공학회의 Design Standards(ASAE, 1997)에서 제시하고 있는 온실의 환기 및 냉방에 관한 열평형식을 기초로 수정식을 구성하였다.

##### 1) 차광환기시스템

$$\alpha I_s A_f - UA_c (T_i - T_o) - \frac{QC_p}{v} (T_i - T_o) = 0 \quad (3-2)$$

$$\alpha = (1 - E)(\tau)(1 - r_s) \quad (3-3)$$

여기서, E는 태양복사에 대하여 작물의 증발산에 의해 잠열형태로 소비되는 에너지의 비율,  $\tau$ 는 피복재의 일사 투과율,  $r_s$ 는 차광률,  $I_s$ 는 외부 수평면 일사량( $W \cdot m^2$ ), U는 열관류율( $W \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $A_f$ 는 온실의 바닥면적

( $m^2$ ),  $A_c$ 는 온실의 표면적( $m^2$ ),  $T_i$ 와  $T_o$ 는 실내 및 실외 설계온도( $^{\circ}C$ ),  $Q$ 는 환기량( $m^3/s$ ),  $C_p$ 는 공기의 비열( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ),  $v$ 는 실내공기의 비체적( $m^3 \cdot kg^{-1}$ )이다.

## 2) 차광환기 패드시스템

차광환기 패드시스템은 패드엔팬시스템에 차광을 결합한 형태로서 열평형식은 차광환기시스템과 같으나, 환기전열량의  $T_o$  대신  $T_o'$ 을 사용한다.

$$T_o' = T_o - \varepsilon(T_o - T_w) \quad (3-4)$$

여기서,  $T_o'$ 은 패드시스템의 출구온도( $^{\circ}C$ ),  $T_w$ 는 외기의 설계 습구온도( $^{\circ}C$ ),  $\varepsilon$ 은 증발냉각 효율이다. 증발수량  $E_w$ ( $kg/s$ )는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$E_w = \frac{Q}{v}(W_o' - W_o) \quad (3-5)$$

여기서,  $W_o$ 는 실외 습도비( $kg \cdot kg^{-1}$ ),  $W_o'$ 은 패드시스템을 통과한 공기의 습도비이다.

## 3) 차광환기 포그시스템

차광환기 포그시스템은 포그시스템에 차광환기시스템을 결합한 형태로서 열평형식은 차광환기시스템의 열평형식에 실내에 분무된 물의 증발에 의한 잠열손실항이 추가되어 식(3-6)과 같이 되며, 이 때의 수분평형식은 식(3-7)로 표현할 수 있다.

$$\alpha I_s A_f - \left( UA_c + \frac{QC_p}{v} \right) (T_i - T_o) - \lambda M = 0 \quad (3-6)$$

$$\frac{\beta I_s A_f}{\lambda} + M - \frac{Q}{v} (W_i - W_o) = 0 \quad (3-7)$$

$$\beta = (E)(\tau)(1 - r_s) \quad (3-8)$$

여기서,  $M$ 은 포그노즐의 분무량(kg/s),  $\lambda$ 는 수분증발잠열( $2.5 \times 10^6$  J · kg<sup>-1</sup>),  $W_i$ 는 실내 습도비(kg · kg<sup>-1</sup>; 목표 온도 및 상대습도로부터 계산),  $W_o$ 는 실외 습도비(kg · kg<sup>-1</sup>; 설계용 기상자료로 제공 또는 건습구 온도로 부터 계산)이다.

한편 식(3-6)과 식(3-7)을 연립으로 풀면 포그시스템의 필요 환기량과 필요 수량은 다음 식으로 구할 수 있다. 공급수량은 필요수량을 증발효율로 나누면 된다.

$$Q = v \frac{(\alpha + \beta)I_s A_f - UA_c(T_i - T_o)}{C_p(T_i - T_o) + \lambda(W_i - W_o)} \quad (3-9)$$

$$M = \frac{Q}{v}(W_i - W_o) - \frac{\beta I_s A_f}{\lambda} \quad (3-10)$$

## 나. 열평형 모델의 검증 및 보정

### 1) 차광환기시스템의 열평형식 검증 실험

실험은 충북 음성에 위치한 길이 80m, 면적 1600m<sup>2</sup>인 아치형 3연동 온실(그림 3-2)에서 2000년 5월중에 실시하였다. 실내외 온습도는 온습도측정 겸 용 센서(HOBO; Onset computer co.)를 사용하여 계측하였으며, 실내온도는 6개 측정점(각동의 중앙단면의 1.3m, 2.3m 높이)에서 각각 측정하여 평균값을 취하였다. 실내외 일사량은 LI200X pyranometer(Campbell scientific Inc.)를 이용하여 측정하였다. 모든 환기창의 중앙단면에 1점씩 일방향 Air velocity transmitter(Dwyer instruments Inc.)를 수직방향으로 설치하여 환기창의 단면수직 풍속을 계측하였다. 재배작물은 포도(본엽 4~5매)였으며 환기량의 표준오차가 최소로 되는 E값을 추정하였다. 모델의 검증은 실내외 온습도와

일사량으로부터 모델에 의하여 환기량을 계산하고 실측치와 비교하였다. 환기량의 실측치는 환기창 단면 수직 풍속 측정치로부터 환산( $Q=AV$ )하였다.

2) 차광환기 포그시스템의 모델 검증 및 적용

모델 검증을 위한 실험은 포그시스템이 가동중인 폭 6.5m, 길이 18m의 단동 유리온실(처마높이 2.5m, 지붕높이 4.0m)에서 2000년 8월중에 실시하였다. 각종 계측 방법은 차광환기시스템의 실험과 동일하다. 포그시스템의 분무입자는 3~30 $\mu\text{m}$ 의 범위였으며 12 $\mu\text{m}$ 이하의 분무입자가 91.2%인 노즐이 1m 간격으로 설치되어 있다. 포그시스템 가동시의 열평형식에 의한 환기량 계산치와 실측치의 비교를 통하여 검증하였으며, 포그시스템의 실제 분무량과 수분평형식에 의한 증발량을 비교하여 증발률을 검토하였다.

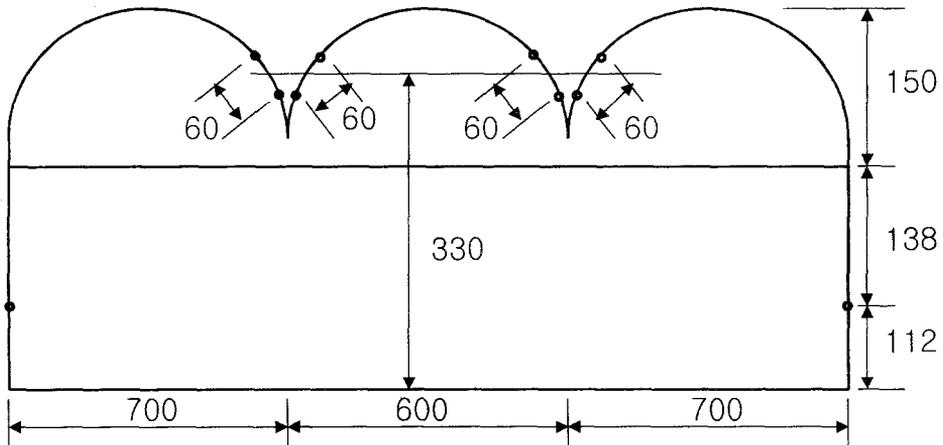


그림 3-2. 실험 온실 및 환기창의 크기 (단위 : cm)

또한 개발된 열평형 모델을 적용하여 표 3-15와 같은 6가지 조건에 대해

여 각각 패드앤팬시스템과 포그시스템의 필요 환기량 및 증발수량을 결정하고 비교하였다.

표 3-15. 열평형 모델 적용을 위한 설계 조건

Case	설계용 외부기상 데이터				실내온도 (°C)
	일사량 (W·m <sup>2</sup> )	건구온도 (°C)	습구온도 (°C)	상대습도 (%)	
1	900	33	26	57.7	32
2	900	35	26	49.3	32
3	900	35	27	54.1	32
4	1,000	33	26	57.7	32
5	1,000	35	26	49.3	32
6	1,000	35	27	54.1	32

#### 다. 결과 및 고찰

열평형 모델에서 E값은 작물의 상태에 따라 달라지는 값이다. 본 실험 결과의 분석에서는 환기량의 표준오차가 최소로 되는 값을 사용하였으며, 그림 3-3에서 보는 바와 같이 0.29로 추정되었다. 차광환기시스템의 열평형식을 이용하여 계산한 환기량(m<sup>3</sup>/s)과 실측치를 비교한 결과 그림 3-4와 같이 비교적 잘 일치하였다(r=0.638, 유의한 F=1.8×10<sup>-26</sup>).

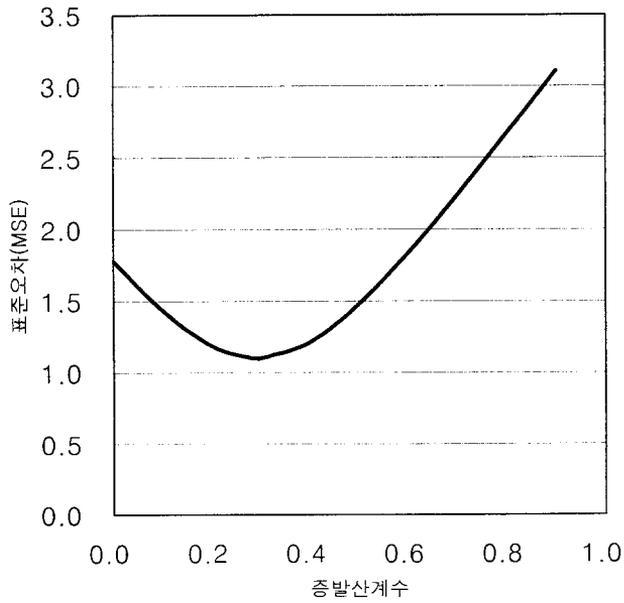


그림 3-3. 증발산계수에 따른 환기율의 표준오차 변화  
(단위 :  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )

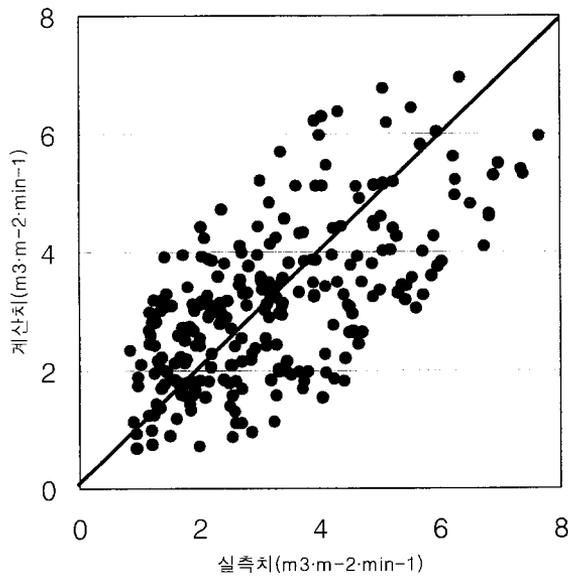


그림 3-4. 열평형 모델에 의해 계산한 환기율과 실측치의 비교

포그시스템 가동시의 실험 온실은 각종 채소를 바닥 면적의 40% 정도에 재배하고 있었으며 E값은 0.25로 추정되었다. 그림 3-5는 차광환기 포그시스템의 열평형 모델을 이용하여 계산한 환기량과 포그시스템 가동온실의 환기량 실측 결과를 비교한 것이다. 환기창 단면 풍속을 1분 간격으로 측정하여 유량으로 환산한 값을 환기량의 실측치로 하였기 때문에 큰 차이를 보이는 부분이 일부 있으나 비교적 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

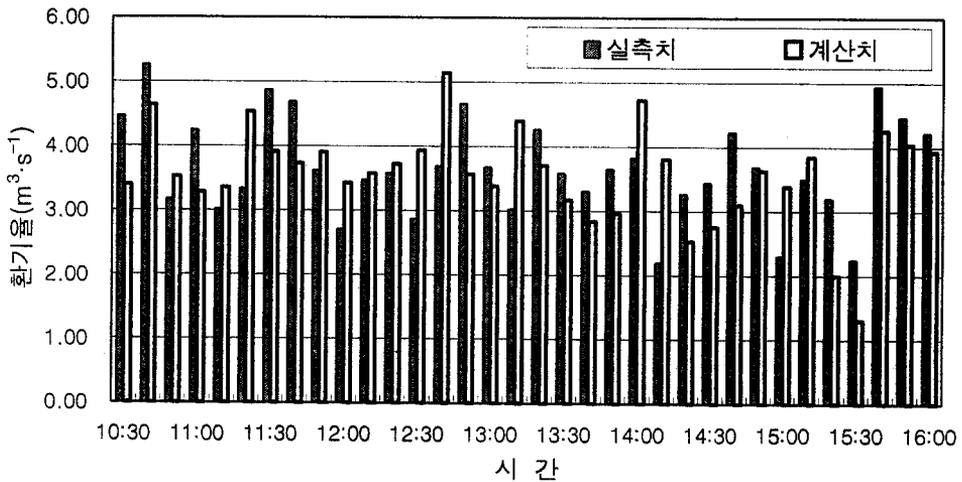


그림 3-5. 포그시스템 가동 온실의 환기량 실측치와 계산치의 비교  
(2000년 8월 14일)

한편, 포그시스템의 실제 분무량과 수분평형식에 의해 구한 증발량을 비교하여 증발률을 검토해 보았다. 실험온실은 자연환기 상태에서 분무량 1.57 g/s인 노즐 32개를 설치하여 40초 분무, 1분 30초 정지를 반복하도록 타이머로 세팅되어 있다. 증발률은 최소 21.3%, 최대 96.1%, 평균 54.4%로 나타났다. 포그냉방을 실시한 10시~16시 사이의 실내평균기온은 34.5℃, 평균 습도는 62.6%로 증발효율(냉방효율)이 그다지 좋지 못했다.

환기 및 냉방설비의 용량을 결정하기 위한 열평형 모델의 입력변수중 설계자가 값을 선택해야 할 주요 매개변수는 피복재의 열관류율(U)과 태양복사에 대하여 작물의 증발산에 의해 잠열형태로 소비되는 에너지의 비율(E)이다. 이들 매개변수가 필요 환기량에 미치는 영향을 평가하기 위해서 각각의 매개변수 값을 기본값( $U = 6.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ ,  $E = 0.5$ )에 대하여  $\pm 60\%$  범위에서 변화시키면서 시뮬레이션을 실시하였으며, 그림 3-6은 각 매개변수의 증가율에 따른 필요환기량의 변화를 나타낸 것이다. U값이 1% 증가할 때 필요환기량은 0.3% 감소하는 것으로 나타났으며, E값이 1% 증가할 때 필요환기량은 1.3%나 감소하는 것으로 나타나 E값의 선택이 매우 중요함을 알 수 있다. 따라서, 온실의 환기 및 냉방 설계기준을 설정하기 위해서는 여러 가지 작물의 상태에 따른 E값의 변화를 실측한 자료의 축적이 필요할 것으로 판단되었다.

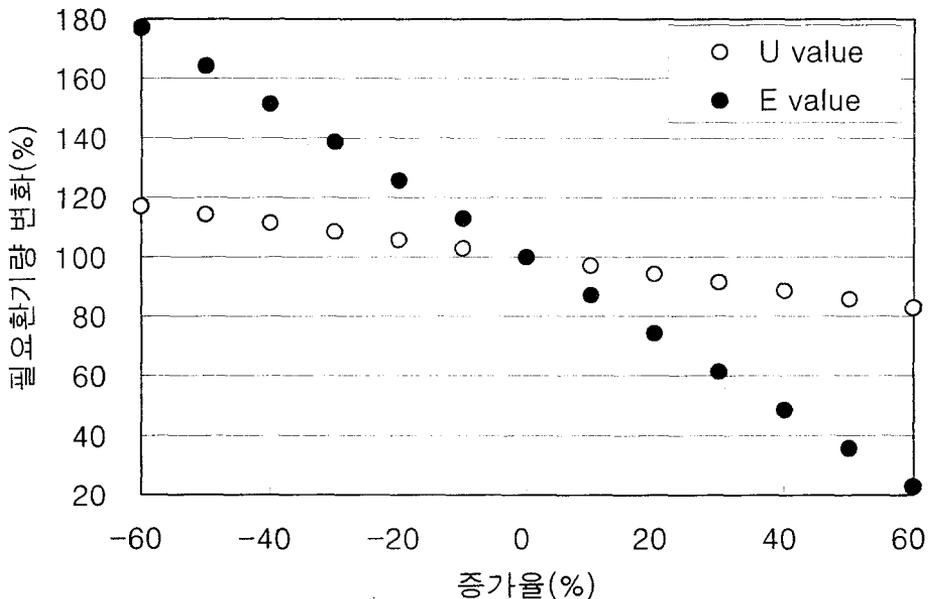


그림 3-6. 매개변수 U 및 E 값의 변화에 따른 필요환기량의 변화

표 3-16은 온실의 환기 및 냉방 설계시 설비 용량 결정을 위한 열평형 모델의 적용성을 검토하기 위하여 6가지 조건의 외부기상자료에 대하여 실내 목표온도를 32℃로 유지하는데 필요한 단위면적당 환기율과 증발수량을 구해본 결과이다. 설계조건은 2,000m<sup>2</sup>(평균높이 3.0m, 피복면적 3,000m<sup>2</sup>)의 플라스틱 온실(열관류율 6.8 W·m<sup>-2</sup>·℃<sup>-1</sup>, 광투과율 0.88)에 E=0.3, 차광률 50%로 설정하였다. 일사량 900 W·m<sup>-2</sup>, 온도 35℃, 습도 49.3%의 외부기상 조건에서 실내온도를 32℃로 유지하기 위해서는 패드엔팬시스템에서 4.29 m<sup>3</sup>·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>의 환기율과 14.08 mL·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>의 증발수량이 필요하고, 포그시스템에서는 환기율 3.96 m<sup>3</sup>·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>, 증발수량 12.77 mL·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>가 필요한 것으로 나타났다. 패드엔팬시스템을 가동할 경우의 실내습도는 71.1~75.2%로 예측되었으며, 포그시스템에서는 이와 동일한 조건의 습도에 해당되는 실내습도비를 입력자료로 사용하였다.

표 3-16. 패드엔팬시스템과 포그시스템의 필요환기율과 증발수량 비교

조건	실내 습도 (%)	패드엔팬시스템		포그시스템	
		환기율 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·min)	증발수량 (mL/m <sup>2</sup> ·min)	환기율 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·min)	증발수량 (mL/m <sup>2</sup> ·min)
1	71.9	3.09	8.82	2.91	8.22
2	71.1	3.51	12.89	3.27	11.84
3	75.2	4.29	14.08	3.96	12.77
4	71.9	3.42	9.77	3.24	9.10
5	71.2	3.87	14.18	3.60	13.02
6	75.2	4.74	15.49	4.38	14.05

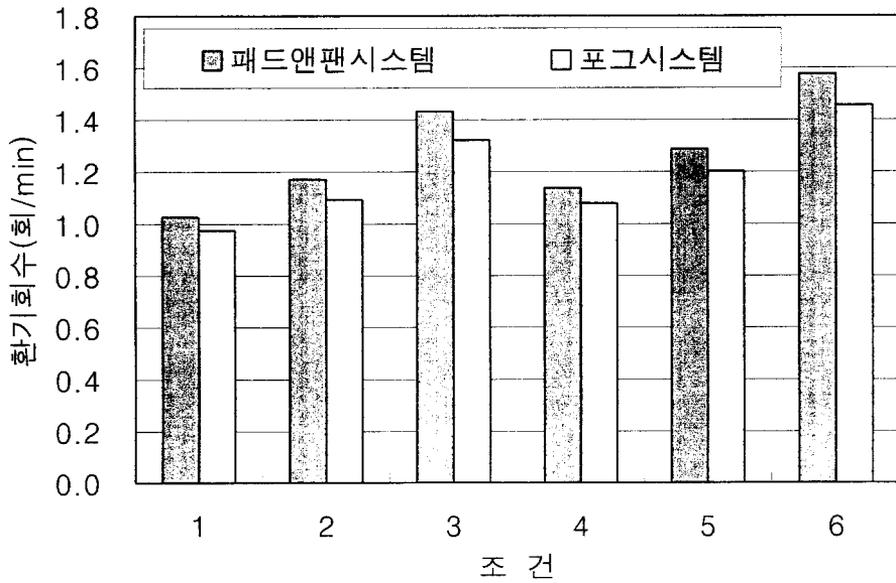


그림 3-7. 패드엔팬시스템과 포그시스템의 필요 환기회수 비교

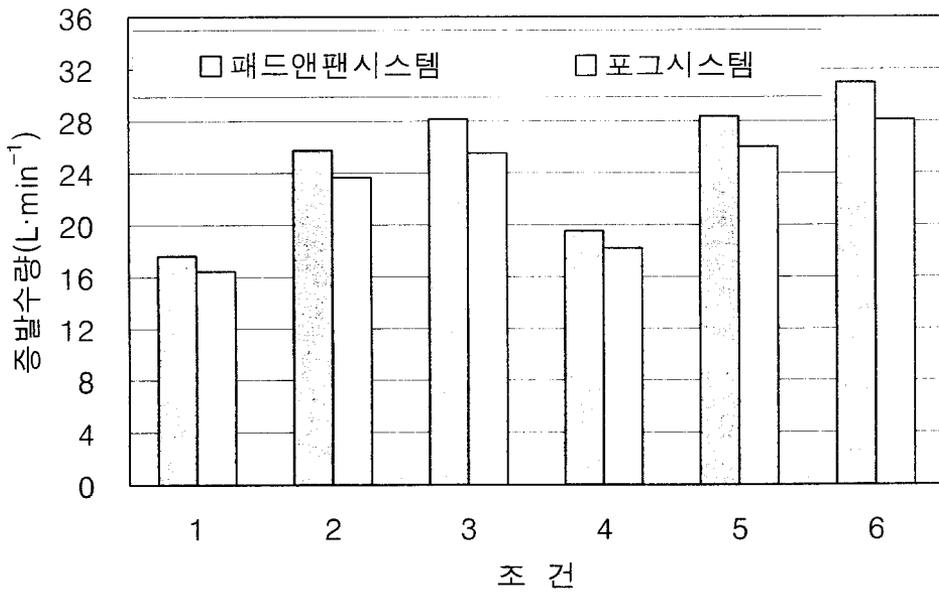


그림 3-8. 패드엔팬시스템과 포그시스템의 필요 증발수량 비교

그림 3-7 및 그림 3-8은 패드앤팬시스템 및 포그시스템 설계온실의 외부 기상조건에 따른 필요 공기교환율과 증발수량을 비교한 것이다. 동일한 조건하에서 필요 공기교환율은 5.1~7.7%정도, 증발수량은 6.8~9.3%정도 패드 앤팬시스템이 포그시스템에 비하여 큰 것으로 나타났다.

## 2. 지역별 설계용 기상자료 분석

온실의 환경설계 중에서 가장 기본이 되는 냉·난방 설비용량의 결정을 위하여는 설계외기온(냉·난방설계), 외기의 습구온도 및 수평면 일사량(냉방설계)과 같은 기상자료가 필요하다. 시설재배에 있어서 환경설비의 용량 부족은 혹한기 또는 혹서기에 작물의 생육에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 또한 설비용량의 과대설계는 설치비 면에서 비경제적일 뿐만 아니라 에너지의 효율적 이용 측면에서도 불리하므로 적정 설비용량의 결정은 매우 중요하고, 따라서 설계용 기상자료의 선택은 매우 신중을 기하여야 한다.

온실의 냉·난방 설계에 이용할 수 있는 기상자료는 몇 가지가 있으나, 분석 방법이 상이하므로 그 값은 상당한 차이를 보이고 있다. 미국 농공학회의 ASAE Standards에서는 온실의 냉·난방설계시 ASHRAE(미국 공기조화 냉동공학회)의 TAC(Technical Advisory Committee) 1%의 설계기온을 적용하고 있으며, 우리나라의 건축설비 설계에는 TAC 2.5%를 적용하고 있고 현재 한국 공기조화 냉동공학회에서 전국 16개 지역의 TAC 1%, 2.5% 자료를 제시하고 있다. 일본 시설원예협회에서는 10년빈도의 설계기온을 적용하고 있으며 국내에는 이 방법의 적용 사례가 없다. 원예시설의 환경설계기준 작성연구(김 등, 1997)에서는 전국 71개 지역의 위험률별(1, 2.5, 5, 10%) 설계기온 자료를 제시하고 있다. 본 절에서는 이상의 3가지 분석 방법별 설계 기상 자료를 비교 검토하여 온실의 냉방과 난방 설계시 적용해

야 할 기상자료의 선택을 위한 가이드라인을 제시하고자 한다.

### 가. 분석자료 및 방법

TAC법이란 전체 자료기간의 기온 자료에 대해 크기 순으로 배열하여 극치(냉방설계시에는 최고기온, 난방설계시에는 최저기온)로 부더의 순위에 따라 위험률을 설정하여 선발하는 것이다. ASHRAE방식의 경우 하절기는 6, 7, 8, 9월의 매시간(총 2,928시간) 기온을, 동절기는 12, 1, 2월의 매시간(총 2,160시간)기온을 TAC법으로 분석한 것이고(이하 I 방법이라 함), 위험률별 설계기온(김 등, 1997)의 경우 매시간 자료를 구하기가 어렵기 때문에 하절기는 6, 7, 8월의 일 최고기온을 동절기는 12, 1, 2월의 일 최저기온을 TAC법으로 분석한 것(이하 II 방법이라 함)이 차이점이다. 한편, 일본 시설원예협회 방식의 설계기온을 구하는 방법(이하 III 방법이라 함)은 다음과 같다.

$$t_d = \overline{t}_{\max} + n \cdot \sigma \quad (3-11)$$

여기서,  $\overline{t}_{\max}$ 은 최고(최저)기온 시계열의 평균,  $\sigma$ 는 표준편차,  $n$ 은 4년 빈도일 때 1.0, 10년 빈도 1.6, 20년 빈도 2.0으로 주어지는 재현기간에 따른 값이다.

ASHRAE 방식의 설계용 기상자료는 한국 공조학회에서 제시하고 있는 자료(분석자료기간 ; 1983~1994년)를 이용하였고, 위험률별 설계기온 자료는 김 등(1997)의 보고서 자료(분석자료기간 ; 지역별 기상관측 시작년~1994년)를 이용하였으며, 일본 시설원예협회 방식은 한국 건설기술연구원에서 제공하는 기상청 데이터베이스 HISS를 사용하여 식(3-11)의 방법으로 분석(자료기간 ; 1970~1996년)하였다.

### 나. 분석결과 및 고찰

우리 나라 건축법중 건축물의 설비기준에 관한 규칙에는 건물벽의 열관류율을 중부지방에서는  $0.5 \text{ kcal} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$  이하, 남부지방에서는  $0.65 \text{ kcal} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$  이하로 하도록 규정하고 있다. 이에 대하여 온실의 경우에는 홑겹피복  $5.3 \sim 5.7 \text{ kcal} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ , 보온피복  $2.1 \sim 2.3 \text{ kcal} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ 으로서 일반 건물에 비하여 열관류율이 훨씬 높으므로 건축기준보다는 위험률이 낮은 설계기준이 필요하다.

전국 16개 지역에 대하여 I, II, III방법의 설계기온을 비교한 결과는 그림 3-9 및 표 3-17과 같다. II방법은 1일의 극치를 사용하여 분석했기 때문에 다른 방법에 비하여 냉방 설계기온은 훨씬 높고, 난방 설계기온은 훨씬 낮게 나타나고 있다. II방법의 위험률 1% 및 2.5%는 과대 설계될 가능성이 많을 것으로 사료되지만 시설의 종류(고투자 시설 등)에 따라서는 II방법의 위험률 2.5% 값을 적용하는 것도 괜찮을 것으로 생각된다. ASHRAE방식의 TAC 1% 및 일본 시설원예협회 방식의 10년 빈도는 대부분 III방법에서의 위험률 5%~10% 사이에 있는 것으로 나타났다.

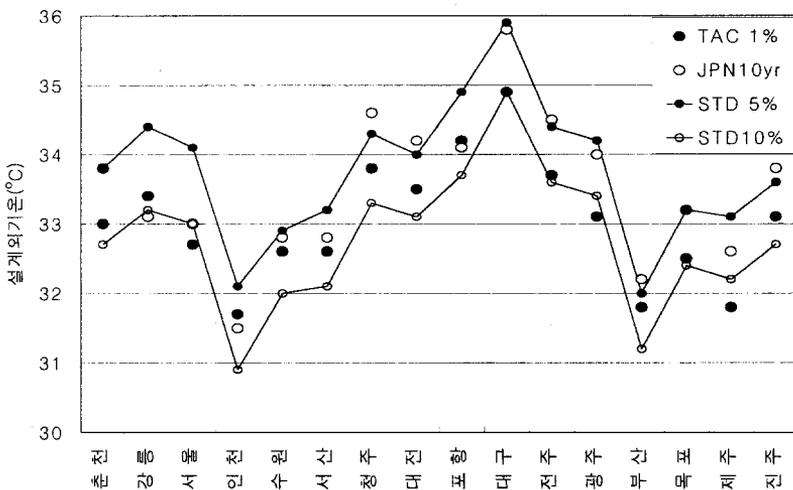


그림 3-9. 기상자료 분석방법별 냉방 설계기온의 비교

표 3-17. 기상자료 분석방법에 따른 지역별 냉방설계기온

지역	TAC온도 <sup>1)</sup>			위험률별설계기온 <sup>2)</sup>			일본시설원예협회방식 <sup>3)</sup>		
	1%	2.5%	5%	2.5%	5%	10%	4년빈도	10년	20년
춘천	33.0	31.6	30.2	34.6	33.8	32.7	31.6	33.8	35.3
강릉	33.4	31.6	30.0	35.4	34.4	33.2	30.5	33.1	34.8
서울	32.7	31.2	29.9	35.0	34.1	33.0	31.0	33.0	34.4
인천	31.7	30.1	28.8	33.0	32.1	30.9	29.6	31.5	32.8
수원	32.6	31.2	29.9	33.7	32.9	32.0	30.8	32.8	34.1
서산	32.6	31.1	29.8	34.1	33.2	32.1	30.8	32.8	34.1
청주	33.8	32.5	31.1	35.1	34.3	33.3	32.4	34.6	36.0
대전	33.5	32.3	31.0	34.6	34.0	33.1	32.1	34.2	35.6
포항	34.2	32.5	30.9	35.9	34.9	33.7	31.5	34.1	35.8
대구	34.9	33.3	31.8	36.8	35.9	34.9	33.3	35.8	37.5
전주	33.7	32.4	31.1	35.1	34.4	33.6	32.3	34.5	35.9
광주	33.1	31.8	30.6	35.0	34.2	33.4	32.0	34.0	35.4
부산	31.8	30.7	29.7	32.6	32.0	31.2	30.2	32.2	33.6
목포	32.5	31.1	29.9	33.9	33.2	32.4	31.2	33.2	34.5
제주	31.8	30.9	29.9	33.8	33.1	32.2	30.6	32.6	34.0
진주	33.1	31.6	30.4	34.7	33.6	32.7	31.7	33.8	35.2

주) 1) TAC온도 : ASHRAE 방식으로 분석한 위험률별 설계기온

2) 위험률별 설계기온 : 제Ⅱ방법(환경설계기준연구의 분석방법)

3) 일본시설원예협회방식 : 식 (3-11)에 의한 재현기간별 설계기온

표 3-18. ASHRAE방식의 온실 냉·난방 설계용 기상자료

지역	난방설계용		냉방설계용					
	건구온도(℃)		건구온도(℃)		습구온도(℃)		일사량(W·m <sup>-2</sup> )	
	1%	2.5%	1%	2.5%	1%	2.5%	1%	2.5%
춘천	-17.3	-14.7	33.0	31.6	26.0	25.2	980	938
강릉	-9.5	-7.9	33.4	31.6	25.7	25.1	967	942
서울	-12.9	-11.3	32.7	31.2	26.2	25.5	911	890
인천	-11.9	-10.4	31.7	30.1	25.6	25.0	880	857
수원	-14.5	-12.4	32.6	31.2	26.1	25.5	881	850
서산	-11.2	-9.6	32.6	31.1	26.5	25.8	1017	973
청주	-14.4	-12.1	33.8	32.5	26.4	25.8	934	910
대전	-11.9	-10.3	33.5	32.3	26.1	25.5	960	932
포항	-7.9	-6.4	34.2	32.5	26.7	26.0	957	929
대구	-9.2	-7.6	34.9	33.3	26.4	25.8	921	902
전주	-10.4	-8.7	33.7	32.4	26.5	25.8	912	892
광주	-7.9	-6.6	33.1	31.8	26.5	26.0	947	928
부산	-6.7	-5.3	31.8	30.7	26.7	26.2	1015	963
목포	-6.0	-4.7	32.5	31.1	26.2	25.6	995	972
제주	-1.1	0.1	31.8	30.9	26.8	26.3	987	968
진주	-10.0	-8.4	33.1	31.6	26.9	26.3	963	947

따라서, 우리 나라의 온실설계에 있어서는 ASAE 권장사항과 같이 건축 설계 기준에서 제공하는 TAC 1%의 기상자료(표 2)를 이용하면 될 것으로 판단된다. 설비수준이 비교적 낮은 온실의 경우에는 TAC 2.5%를 적용한다. 단, 여기서 제공되는 자료를 이용하기 곤란한 지역에서는 기상 관측자료의 통계분석에 의하되 매시간 데이터를 구하기는 어려우므로 II방법으로 구하고, 시설의 설비수준에 따라서 5% 또는 10%의 위험률을 적용하면 될 것으로 판단된다.

TAC 1%와 2.5%의 난방 설계기온 차이는 평균 1.7℃, 냉방 설계기온 차이는 평균 1.4℃ 정도이다. 그러나 열절감률 50% 정도의 보온커튼을 설치한 1,000평의 연동 플라스틱 온실 설계(보온비 0.8)를 예로 들면 외기온이 1.7℃ 낮을 경우 난방설비 용량은 24,000 kcal/hr 정도나 커지므로 선택에 신중을 기하여야 한다.

따라서, 전문가들로 구성된 원예시설 설계위원회와 같은 기구의 설치가 절실히 요청되며 위원회에서 자료기간에 대한 기준을 설정하고 정기적으로 (예를 들면 10년 간격) 기상자료를 분석하여 설계기준 및 가이드라인을 제시할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

### 3. 작물별 고온기 재배환경 설정

작물별로 지상부와 근권부로 구분하여 생육 적정온도와 최고 한계온도를 분석하고, 적정 광강도 및 차광 한계를 분석하여 온실의 고온극복 설계기준 자료로 제시하였다.

표 3-19는 주요 시설채소 및 화훼의 적정온도와 최고 한계온도를 지상부와 지하부로 구분하여 정리한 것이다. 우리 나라의 여름철 기상 특성과 온실의 열환경 분석 결과로 볼 때 온실의 실내 온도를 연속해서 생육 적온으

표 3-19. 시설채소 및 시설화훼의 생육 적정온도

(단위 : °C)

구 분		기온(지상부)		지온(근권부)	
		적 온	최고한계	적 온	최고한계
과채류	토마토	20~25	35	15~18	25
	가지	23~28	35	18~20	25
	고추	25~30	35	18~20	25
	오이	23~28	35	18~20	25
	수박	23~28	35	18~20	25
	참외	20~25	35	15~18	25
	멜론	25~30	35	18~20	25
	호박	20~25	35	15~18	25
	딸기	18~23	30	15~18	25
	피망	25~30	35	18~20	25
엽근채류	시금치	15~20	25	15~20	25
	무	15~20	25	16~18	25
	배추	18~23	25	15~18	23
	샐러리	15~20	23	15~20	25
	숙갓	15~20	25	18~22	25
	상추	15~21	25	15~20	25
화훼류	장미	20~25	35	17~22	25
	국화	15~20	30	18~23	25
	카네이션	15~20	30	18~23	25
	시클라멘	16~22	30	18~23	25
	거베라	20~25	35	15~22	25

주) 근권부 온도는 적정지온 또는 적정 양액온도 범위를 참고로 정리함.

로 유지하는 것은 거의 불가능하므로, 고온극복 설비의 용량을 결정할 때 설정온도는 최고 한계온도를 기준으로 적절한 위험률을 고려하여 선택하지 않으면 안된다. 시설 투자비가 높고 고소득 작물을 재배하는 경우에는 최고 한계온도보다 2~3℃ 정도 낮게 설정하고, 그 밖의 시설에서는 최고한계온도로 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

표 3-20은 주요 시설 작물의 적정 광강도 및 한계 차광률을 분석한 것으로서 광강도는 일사량의 단위로 환산하였고, 우리나라의 냉방 설계용 일사량 수준 880~1017 W·m<sup>2</sup>를 기준으로 적정 차광률과 한계 차광률을 구하였다. 온실의 고온 극복을 위하여 차광을 실시하는 경우가 많은데, 지나친 차광은 작물의 정상적인 생육을 방해하므로 적절한 차광이 되도록 하여야 한다. 차광설비를 설계할 때에는 차광률이 최고 한계 차광률을 넘지 않도록 하고, 차광 스크린의 개폐는 온도 계측에 의하는 것이 아니라 일사량의 계측에 의하여 제어하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

표 3-20. 시설채소 및 시설화훼의 적정광강도 및 최고한계 차광률

구분	광량목표치 <sup>1)</sup> (klux)	광포화점 (klux)	채 소 류	화 훼 류	차광률(%) <sup>2)</sup>	
					적정	한계
강광	40 이상	60~70	멜론, 토마토, 수박, 참외, 호박, 오이, 피망, 가지, 감자	장미, 국화, 카네이션, 거베라	30~40	55~60
중광	10~40	40~45	딸기, 완두, 강남콩, 셀러리, 순무, 배추, 고추	시클라멘, 프리지아, 샤코바	50~60	75~80
약광	10	20~25	파드득 나물, 생강, 상추, 머위, 시금치, 쑥갓	그록시니아, 칼라디움, 몬스 테라, 아나나스	70~80	-

주 1) 여름철 1000 W/m<sup>2</sup> 정도의 일사강도에서 1 klux ≒ 10 W/m<sup>2</sup>로 환산됨.

2) 우리나라의 냉방설계용 일사량은 1%수준에서 880~1017 W/m<sup>2</sup>임.

## 제4절 온실의 경제적 고온극복 방안 도출

### 1. 이용 가능한 온실의 고온극복 방법과 특성 분석

#### 가. 증발냉각법

##### 1) 패드앤 팬시스템

온실 측벽 부분에 패드를 설치하고 여기에 물을 유하시키며, 이것을 통하여 외부 공기를 실내로 도입하는 방법이다. 외부공기는 패드부분을 통과할 때 가습냉각되어 냉각공기가 온실내로 유입되고 반대측 벽면에 있는 압력형 환기팬으로 배출된다. 패드는 이전에는 목질계 섬유물질이 사용되었으나 내구성이나 통기성에 문제가 있어 최근에는 플라스틱 섬유 등이 사용되고 있다. 온실의 규모가 커서 팬과 패드 사이의 거리가 길게되면 내부로 공기가 통과하면서 온도가 상승하여 기온이 불균일하게 되므로 대형 연동온실에서는 적당하지 않다.

##### 2) 미스트앤 팬시스템

온실 흡기구의 외측에 분무실을 설치하고 세무(fog)보다 입경이 큰 지름 0.1mm정도의 미스트를 분무하여, 이것을 통과하는 공기를 가습냉각하는 방식이다. 증발되지 않은 물방울이 온실내로 유입되는 것을 방지하기 위하여 온실과의 경계는 벽 대신에 물방울 제거장치(eliminator)를 설치해야 한다. 미스트의 물방울은 비교적 크기 때문에 공기 중에서 가라앉으면서 작물의 표면을 비롯하여 토양이나 사람의 표면을 적시게 되며, 요즘에는 거의 사용되지 않고 있다.

### 3) 포그시스템

직경 0.05mm이하의 세무(fog)를 온실내로 분무하여 가습냉각하는 방식이다. 온실의 흡기구 부분에서 세무를 노즐로 분무하고 이것을 통과하여 가습냉각된 공기는 온실내부를 통과한 후 천창측 또는 반대측의 환기팬으로 배출된다. 흡기구는 온실 외측에 벽을 따라서 설치하고 외부공기를 온실내 천정방향으로 상승하도록 하면 입자가 큰 물방울은 온실의 외측으로 떨어지고 세무만이 기류를 타고 온실 안으로 유입되어 기화한다. 온실내부에는 일사열의 흡수가 있으므로 온실의 길이가 30~40m이상인 경우에는 온실내에서도 세무를 분무시켜 기온이 불균일하게 되는 것을 피한다. 세무냉방용 노즐은 보통  $7\sim 15\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 수압으로 세무를 분무한다. 노즐 1개당 분무량은 분당 50~150cc정도이고 300평당 120~180개의 분무노즐이 필요하다. 이 방식은 세무의 입경을 가능한 가늘게 하여 기화하기 쉽도록 하는 것이 목표이다. 물의 증발속도, 즉 공기의 냉각율은 물방울의 크기가 작아지는데 비례해서 증가한다. 세무 입경을 가늘게 하기 위해서는 노즐의 분무 구멍을 작게 하면 되지만 그에 따라서 구멍이 막히기 쉬우므로 실용상의 문제가 있고, 사용하는 물의 수질과 필터의 사용이 필수적이다.

### 4) 수막식 세무냉방장치

이 방식은 온실의 상부에 수막커튼을 설치하고 그 위에서 세무를 분무한다. 외부공기는 천창으로 들어오고 커튼 위에서 냉각된 공기는 온실 안을 통과한 후 양끝에 설치된 환기팬으로 배기된다. 세무에 의한 작물체의 젖음을 방지할 수 있으나 일사 투과율이 저하되기 때문에 강광을 필요로 하지 않는 작물에 적합하다. 구조는 수막커튼 난방방식과 거의 같으므로 분무량을 약 10배정도로 많게 하면 겨울철 수막커튼 난방방식으로 겸용할 수도 있다.

패드엔팬 방식은 설치비가 고가이며 냉방시 이외에는 작업성을 떨어뜨리고, 미스트엔팬 방식 또한 물방울 제거장치 등의 부대시설이 필요하고 증발효율도 떨어지므로 보다 효율적이고 설치가 간단하며 저비용의 장치를 개발하는 것이 필요하다고 생각한다. 포그시스템은 환기창만으로 환기되도록 건설된 온실에서도 사용할 수 있고, 배기팬으로 환기되도록 장치된 온실은 그 배기팬 자체를 포그냉방용으로 활용할 수 있다. 또한 온실내 수직 또는 수평 순환팬을 이용하여 포그 증발냉각 효과를 상승시킬 수 있다. 따라서 앞으로는 포그시스템 방식의 증발냉각시스템 도입이 바람직할 것으로 생각하며 이를 위해서는 고품질, 저가의 국산 포그 노즐을 개발하고, 적절한 필터와 화학적인 처리제의 공급 등에 의한 노즐 구멍 막힘을 방지할 수 있는 기술의 개발 및 냉방제어기술의 개발 등이 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

#### 나. 국부냉방법

##### 1) 작물체 주위 국부냉방

대표적인 국부냉방 방식으로는 과실 주위에 튜브를 설치하여 그 안에 냉기를 불어넣는 방식이 있는데 이 방법으로 토마토의 배꼽 썩음병을 방제하는 효과가 있음이 보고되고 있다. 또한 벤치 재배용으로 고안된 시스템으로서 작물체 부근과 근권부의 국부냉방을 목적으로 하는 덕트쿨러 방식이 있다. 온실 양면에 흡기구와 압력형 송풍팬을 설치하고 덕트를 연결하여 외부 공기를 벤치의 아래로 끌어들인다. 벤치 아래에는 플라스틱제 패드가 소형 터널의 지붕면에 설치되어 있고 살수튜브로 물이 공급된다. 패드 터널안으로 불어넣은 공기는 패드 통과시에 가습냉각되고 이 냉풍이 상부의 벤치네트 틈을 통하여 재배공간으로 들어가게 된다. 배기는 천창 또는 측창을 통해서 이루어진다.

## 2) 근권부 냉각(배양액 냉각, 지중 냉각)

양액의 냉각에는 히트펌프를 이용하는 방식과 지하수를 이용하는 방식이 있다. 지하수를 이용하는 방식의 경우 양액 탱크내에 튜브를 설치하고 그 안에 지하수를 흘려주는 방식과 열교환기를 이용하는 방식으로 나눌 수 있는데, 전자의 경우 충분한 냉각을 위해서는 막대한 양의 지하수가 필요하다.

최근 온실밀감 또는 화훼류의 화아 분화 유도의 목적으로 지중냉각 시스템이 일부에서 시험적으로 도입되기 시작하고 있다. 지표면은 차광시트로 덮고 지중 5~10cm에 직경 20mm의 PVC파이프를 30cm간격으로 매설하고 그 안에 5℃로 냉각된 물을 흘려주면, 여름철에 표층 수십cm의 지온을 15℃ 이하로 낮추어 줄 수가 있다.

## 3) 작물체 분무

미스트 노즐 등을 사용해서 작물체를 적시고 기화냉각에 의해서 작물체 자체의 온도를 하강 시키는 방법이다. 난 재배 등에서 일부 채용되고 있으나 우리 나라와 같이 여름철 습도가 높은 지역에서는 적당하지 못하다.

### 다. 야간냉방(히트펌프)

야간에는 일사 부하가 없으므로 냉방으로 제거해야할 열량이 대략 주간 10~20% 정도이다. 따라서 부가가치가 높은 작물에는 히트펌프를 이용한 냉방도 경제성이 있는 것으로 판단된다. 그러나, 야간에는 상대습도가 높기 때문에 증발냉각 방식은 사용이 불가능하다. 히트펌프를 사용한 냉방시스템이 딸기 등의 화아 분화 유도 또는 야냉 육묘 등에 사용되고 있으며, 야간 냉방에 적용 가능한 작물은 보다 확대될 전망이다. 한편 약광하에서 재배가 가능한 호접란 등은 80%이상의 차광 병행으로 주간에도 적용할 수 있다.

## 라. 보조냉방법

### 1) 냉수(지하수)냉방법

지하수 온도는 다소의 지역차이는 있으나 여름철에도 15~18℃ 정도이다. 그러므로 지하수를 물-공기 열교환기에 흘려서 열교환하면 20~25℃ 정도의 냉풍을 얻을 수 있다. 그러나 온실 전체를 냉방하기 위해서는 막대한 양의 지하수가 필요하므로, 덕트 등을 이용해서 작물체 부근에 냉풍을 보내는 국부냉방이나 냉방부하가 작은 야간냉방에 이용이 가능하다. 여름철 주간에도 증발냉각법과 병행하여 작물의 생장점 근처에 냉수파이프를 배관하고 지하수를 흘려주면 국부냉방 효과와 함께 제습효과도 있기 때문에 증발냉각 효율을 증대시키는 결과도 기대할 수 있다.

### 2) 피복(차광, 열선흡수유리)

이상에서 살펴본 여러 가지 냉방방법들은 단독으로 실행할 때보다는 차광과 함께 실시할 때 훨씬 효율이 높으며, 냉방부하가 크지 않은 경우에는 차광만으로도 고온극복의 수단이 될 수 있다. 차광재료는 한랭사, 은색 및 흑색 차광망 등이 있다. 우리 나라에서는 주로 흑색차광망이 사용되고 있고, 대부분 차광망을 피복재 위에 덮어 씌우는 방법을 사용하고 있는데, 이 방법은 광강도를 줄일 수는 있지만 차광망에 흡수된 태양복사가 피복재를 통하여 실내공기에 전달되므로 실내온도 상승을 억제하는데는 효과적이지 못하다. 따라서 차광망을 피복재와 간격을 띄워서 설치하는 방법을 강구할 필요가 있다. 은색 차광망을 온실 내부에 설치하는 경우에는 열보존 기능도 있기 때문에 난방이 필요한 계절에 보온커튼으로 이용할 수 있는 이점도 있으나 완전히 닫혔을 때 천창의 자연환기에 영향을 준다. 즉, 지붕 환기구가 커튼 위의 열을 제거하는 데는 효과적이지만 커튼아래 재배공간으로부터의

환기를 방해하게 된다.

한편, 가시광선을 투과시키면서 적외선(열선)을 흡수하는 열선흡수유리를 피복재로 사용하여 시설내의 온도상승을 억제하는 방법이 있다. 열선흡수유리는 보통유리에 비하여 적외선 흡수율은 높지만 재복사가 많고 광합성에 유효한 적색광 부근의 광이 차단되는 결점이 있어 좀더 보완된 제품의 개발이 필요하다.

### 3) 지붕살수

지붕의 바깥면에 물을 뿌려서 지붕면을 냉각시키고, 그로 인해서 실내온도를 하강시키는 방법이다. 지붕에 뿌린 물이 수막을 형성하여 지붕면을 흘러내리므로 일종의 냉수냉방법에 속하는데 온도하강 효과는 대략 1℃ 정도로 그다지 크지 않으므로 보조적인 수단으로 사용되고 있다.

## 2. 경제적 고온극복 방법 도출을 위한 기초 분석

### 가. 차광에 의한 고온극복 효과

차광을 통하여 온실내로 유입되는 일사량을 차단할 경우 상당한 고온극복 효과가 있는 것으로 나타나고 있다. 이 등(1998)은 40%차광시 1.5~3.7℃, 60%차광시 2.4~6.0℃, 80%차광시 3.6~9.0℃의 승온억제 효과가 있는 것으로 보고하고 있으며, 온실내부차광보다 외부차광의 경우가 0.5~1.2℃ 더 효과가 있는 것으로 보고하고 있다. 남(1995)은 차광망을 피복재 위에 직접 덮어씌우는 것 보다 간격을 띄우고 설치하는 경우가 최대 1.8℃ 정도 더 승온억제 효과가 있는 것으로 보고하고 있다. 우(2000)는 은색차광망이 흑색차광망보다 2.3℃정도 하강효과가 있으며, 차광망에 의한 기온 하강은 별로 없고

지온 하강에 더 효과적이라고 하였다. 또한 차광률에 따라 생육 지장을 초래할 가능성이 있고, 차광망은 온실 지붕위로 30cm 떨어져서 설치할 때 가장 큰 기온 강하 효과가 있는 것으로 보고하고 있다.

알루미늄 스크린은 차광을 위주로 한 열린 구조 스크린과 차광과 보온의 2가지 효과를 동시에 갖는 닫힌 구조 스크린이 있다. 닫힌 구조 스크린은 공기 소동을 제한하므로 강제환기와 냉방설비를 갖춘 경우에는 효과적이지만 일반 온실에서 차광에 의한 고온극복에는 효과적이지 못하다. 전(2000)은 65%의 차광률에서 열린 구조가 닫힌 구조에 비하여 5℃ 정도 온도가 낮은 것으로 보고하고 있다.

온실의 차광방법은 3가지로 구분할 수 있으며, 그것은 내부 스크린 방식, 외부 피복 방식, 그리고 외부에 간격을 두고 설치하는 방식이다. 외부에 간격을 두고 설치하는 방식이 가장 효율이 높지만 별도의 구조물을 설치해야 되므로 투자비가 많이 든다. 내부 스크린 방식은 스크린의 종류에 따라 자연환기 성능에 큰 영향을 미치므로 주의해야 한다.

#### 나. 환기에 의한 고온극복 효과

##### 1) 온실의 환기특성과 고온극복 효과

가장 경제적인 고온극복 방법은 자연환기에 의한 것이므로 온실의 자연환기 성능을 극대화하는 것이 가장 중요하다고 생각한다. 표 3-21은 온실의 자연환기 성능에 관한 실험 예이다. 단동 온실에서 측창만 개방시 풍속 2.9 m/s일 때에도 환기회수는 0.57회/min이지만, 천측창을 모두 개방하면 풍속 0.9 m/s에서도 0.75회/min로 커진다(Hellickson, 1983). 우리 나라 남부지방에서 1-2W형 연동온실에서 실험한 예는 풍속 2m/s에서 0.52~0.9회/min으로 나타나고 있다(민, 2000).

표 3-21. 온실의 자연환기 성능 실험 예

온실 구조	측창	천창	풍속 (m/s)	환기회수 (회/min)	비 고
단동온실	개방	폐쇄	1.2	0.23	천, 측창 각각 바닥면적의 15% 창문 개방각 45° (Hellickson, 1983)
			2.7	0.33	
			2.9	0.57	
	개방	개방	0.6	0.68	
			0.9	0.75	
연동온실	개방	개방	1.0	0.80	남부지방 1-2W형 비닐하우스 권취식 환기창 (민, 2000)
			2.0	0.90	
			3.0	1.05	
	폐쇄	개방	1.0	0.45	
			2.0	0.52	
			3.0	0.60	

그러나, 연동 온실에서는 연동수의 증가에 따라 자연환기능력이 감소하는 것으로 알려져 있다. 남(1995)은 6연동에서의 자연환기 성능이 2연동에 비하여 46%로 감소하므로 연동수를 5연동 이내로 제한할 필요가 있다고 하였으며, 이 등(1998)은 연동수가 커지면 측창효과가 없어지는 것으로 보고하고 있다.

우리 나라의 여름철 풍속은 평균 2.0 m/s 이하인 날이 30%정도 되므로 자연환기에 의해서 기대할 수 있는 환기회수는 0.7~0.8회/min정도(최대 0.9회/min)로 판단된다. 표 3-22는 차광환기시스템의 열평형식(제3장 제3절 참조)을 이용하여 목표온도를 35℃로 설정하여 구한 외기온과 적정 차광률에

따른 필요 환기회수를 나타낸 것이다.

강광을 요구하는 경우에는 자연환기만으로 실내온도를 35℃로 유지하는 것이 불가능하며, 중광의 경우 외기온 30℃, 약광의 경우 외기온 32℃ 이하에서는 차광과 자연환기만으로 실내온도를 35℃ 이내로 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 팬의 용량이나 설치할 수 있는 온실의 벽면 등을 고려할 때 강제환기를 실시하여도 환기회수는 1.5~1.6회/min 정도가 한계로 생각된다. 따라서 차광과 강제환기에 의해서 실내온도를 35℃ 이내로 유지하는 것은 강광 조건에서는 외기온 31℃이하, 중광 조건에서는 32℃이하, 약광 조건에서는 33℃이하에서만 가능한 것으로 판단된다.

따라서 강광을 필요로 하는 작물의 경우에는 차광과 환기만으로는 고온 극복이 곤란하므로 고온 장애의 위험을 감수하든지 또는 차광률을 높여 일시적인 광부족을 감수하는 선택이 필요하며, 그렇지 않으면 추가적인 대책을 강구해야 한다. 중광 또는 약광 조건의 작물을 재배하는 경우에는 차광과 환기만으로 고온을 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3-22. 목표온도 35℃를 유지하기 위해 필요한 환기회수

(단위 : 회/min)

실 내 일사량 (W · m <sup>2</sup> )	적 정 차광률 (%)	외기온(℃)					비고
		30	31	32	33	34	
600	30~40	1.19	1.54	2.13	3.31	6.83	강광
400	50~60	0.72	0.96	1.35	2.13	4.48	중광
200	70~80	0.25	0.37	0.56	0.96	2.13	약광

주) 음영부분은 차광과 자연환기만으로 가능한 범위, 굵은실선 부분은 강제 환기로 가능한 범위이고, 나머지는 차광과 환기만으로는 불가능함.

## 2) 단동온실의 지붕환기구조와 천창효과

우리 나라의 온실은 거의 대부분이 아치형 플라스틱 온실이며, 그 중에서도 60%정도는 단동 온실로 구성되어 있다. 아치형 연동 온실의 경우에는 연동 꼭부에 천창을 설치할 수 있으나 단동 온실의 경우에는 천창을 설치하기가 어려운 구조로 되어 있어서 대부분이 측창만을 설치하여 운영하고 있다. 그러나, 측창만으로는 중력환기가 불량하므로 바람이 불지 않을 경우 환기효과를 기대하기는 어렵다. 본 절에서는 아치형 단동 온실에서 천창을 설치하여 운영하고 있는 사례 조사를 통하여 지붕환기구조의 특징을 분석하고, 지붕 환기구 설치 온실과 관행의 측면 권취식 단동 온실의 대조 실험을 통하여 천창 설치효과를 검토하였으며, 천측창 개폐 조작 실험을 실시하여 환기효율을 분석하였다.

### 가) 조사 및 실험 방법

충청, 영남, 호남지방의 국도변을 중심으로 전국의 시설원에 단지를 방문하여 아치형 단동 온실의 지붕환기구조 실태를 조사하였다. 조사항목은 온실규모, 재배 작목과 방식, 작기, 지붕환기창의 종류 및 구조, 개구부 면적과 설치간격, 개구부 높이, 개폐방식 등이다.

천창설치 효과를 검토하기 위하여 지붕 환기구 설치 온실과 관행의 측면 권취식 단동 온실의 대조 실험을 실시하였다. 실험은 2001년 8월중에 충남대학교 부속 농장에 설치된 아치형 단동 플라스틱 온실에서 비교적 일사가 강한 오전 10시부터 오후 4시 사이에 실험을 실시하였다. 실험 온실의 크기는 폭 5.4m, 길이 18m, 측고 1.6m, 동고 2.8m이고, 측창 개폐폭은 0.6m, 지붕 환기창은 원형( $\phi 60$ )을 6m 간격으로 3대 설치하여 온실면적  $97.2\text{m}^2$ , 측창면적  $21.6\text{m}^2$ , 천창면적  $0.85\text{m}^2$ 로 하였다. 환기효율을 분석하기 위하여 환기창 개폐에 따른 온도변화를 실측하였다. 30분 간격으로 ① 밀폐-측창열음

-천창열음, ② 밀폐-천창열음-측창열음, ③ 밀폐-천측창 동시열음 조작을 반복하면서 실험을 실시하였다. 온실내외 온습도(HOBO), 일사량(LI200X), 풍속(Dwyer640)을 계측하였으며, 실내온도는 온실중앙에 높이를 4등분하여 0.7, 1.4, 2.1m의 높이에서 측정하였고 외기온과 풍속은 온실의 중간높이, 일사는 바닥에서 측정하였다. 대조 실험은 10분간격으로 개폐조작 실험은 10초간격으로 계측자료를 기록하였다.

#### 나) 결과 및 고찰

아치형 단동 온실의 지붕환기구조 실태조사 결과는 표 3-23과 같고, 소형 온실에서는 플라스틱으로 제작된 원형과 굴뚝형의 환기창이, 대형 온실에서는 양권취식이 많이 사용되고 있었다. 기타 사각형은 경남 김해, 편권취식은 충북 청원 지역에 일부 분포하고 있었다.

표 3-23. 지붕환기구조 실태

종 류	환기창크기 (cm)	설치간격 (m)	개구부* 높이(cm)	환기면적비(%)		재 질	비 고
				측창대비	바닥대비		
원 형	∅ 60	6.0	25	3.9	0.8	플라스틱	소형온실 폭 5-8m
굴뚝형	∅ 30	4.2	40	1.4	0.3	플라스틱	
사각형	60×60	4.8	0	6.0	1.2	목재	
편권취식	폭60	전체	30	37.5	3.3	철파이프	대형온실 폭12-18m
양권취식	폭60	전체	20	75.0	10.0	철파이프	

주) 개구부 높이 : 지붕면으로부터 개구부 중심까지의 수직높이

실험 온실의 평균 일사투과율은 74.6%였다. 온실의 상하(높이 0.7, 2.1m) 온도 편차는 평균적으로 천창만 개방시 1.5℃, 모두 개방시 1.8℃, 측창만 개방시 2.8℃로써, 천창이 온도분포를 균일하게 하는 것으로 나타났다. 또한 표 3-24에서 보는 바와 같이 지붕환기창을 설치할 경우 비록 적은 천창 면적이지만 온도하강 1℃이상의 천창 환기효과가 있는 것으로 나타났다. 천창 효과는 측창 효과의 22%정도로 나타났다.

표 3-24. 원형 지붕환기창 설치 온실과 관행 측창 온실의 대조실험 결과

구 분	온실 외부 기상			실내외 기온차(℃)		$\frac{A-B}{A}$ (%)
	일사량 ( $W \cdot m^{-2}$ )	풍 속 (m/s)	기 온 (℃)	측창만(A)	천측창(B)	
평 균	602	0.7	29.9	4.9	3.8	22.4
표준편차	284	0.7	2.7	2.1	1.6	-
최 대	1070	3.8	35.7	10.2	7.7	24.5

그림 3-10 및 그림 3-11은 지붕환기창의 유무와 풍속 및 일사량에 따른 실내온도 상승을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 일사량이 커짐에 따라 모든 경우에 온도상승폭도 커지는 경향을 볼 수 있으나 지붕환기창의 유무와 풍속에 따라서 그 차이는 뚜렷하게 나타나고 있다.

그림 3-10을 보면 평균풍속 이하에서 측창만 열었을 때 온도는 가장 높이 상승하고, 풍속이 낮은 경우에 지붕환기 효과는 커짐을 알 수 있었다. 그림의 가는 점선과 굵은 실선을 비교해 보면, 지붕환기창이 있으면서 풍속이 낮아도 측창만 있고 풍속이 높은 경우보다 환기 효율이 높은 것으로 나타나고 있다. 그림 3-11을 보면 일사량이 낮고 풍속이 커지면 천창 효과는 거의

없고 측창만 있는 경우와 같아지는 경향을 보이고 있다(그림의 가는 점선과 가는 실선 비교).

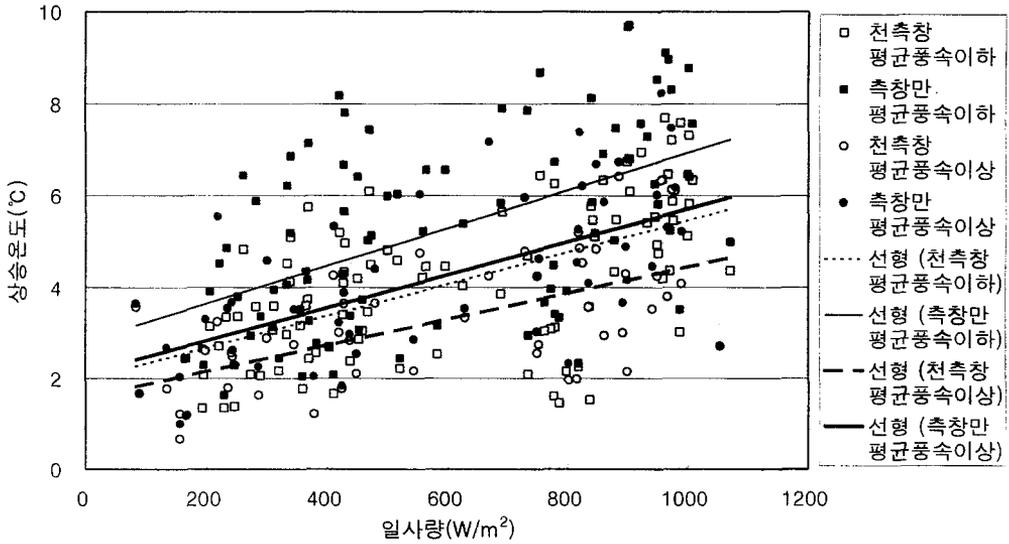


그림 3-10. 지붕환기창 유무 및 일사량에 따른 실내온도 상승

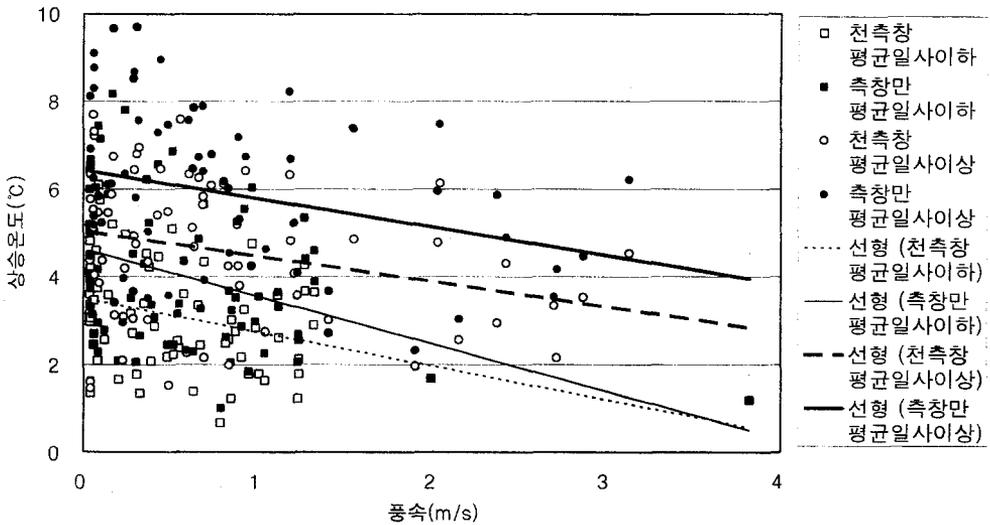


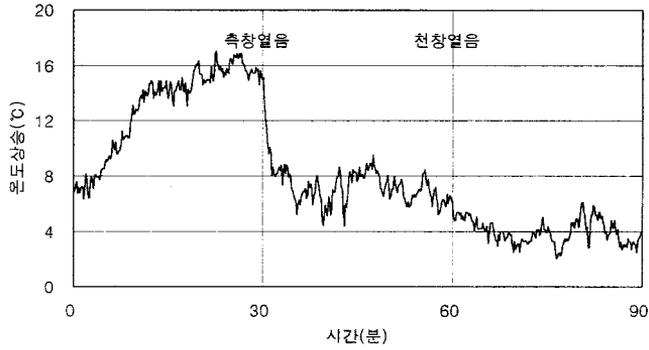
그림 3-11. 지붕환기창 유무 및 풍속에 따른 실내온도 상승

표 3-25 및 그림 3-12는 환기창 개폐조작에 따른 온실의 온도 변화를 나타낸 것이다. 환기창을 모두 밀폐했을 때 외기온보다 10.8~17.4℃ 상승하고 환기창을 모두 열면 7.5~15℃정도 하강하여 측창과 천창 환기를 실시할 경우 외기온보다 1.7~6.4℃정도 높은 범위에서 실내온도를 유지하는 것으로 나타났다.

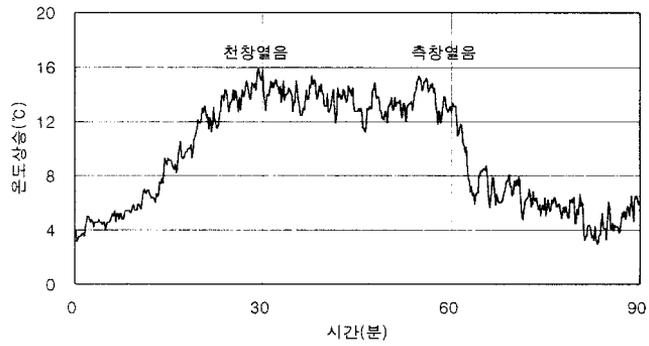
환기창의 개폐순서에 따른 전체적인 온도 하강의 차이는 없으나, 측창을 먼저 여는 경우가 온도 하강 속도는 더 빠르게 나타났다. 여름철에 고온을

표 3-25. 환기창 개폐순서에 따른 온실 내부 온도변화 실험 결과

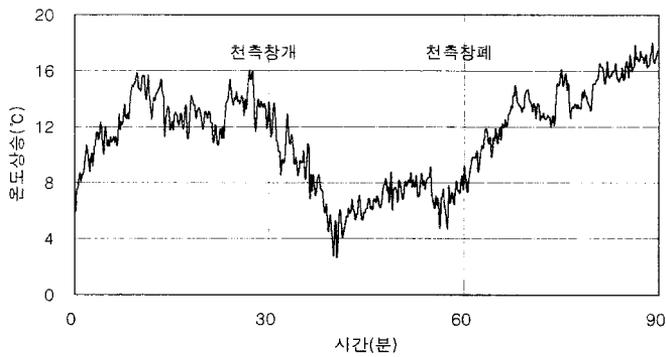
조건	온실외부 평균기상			밀폐시 상승 온도 (℃)	환기창 개방시 최대하강온도(℃)					비고
	일사량 ( $W \cdot m^{-2}$ )	풍속 ( $m \cdot s^{-1}$ )	기온 (℃)		측창	천창	측창	천창 측창	계	
1	419.9	2.3	32.0	14.2	9.6	2.2			11.8	측창은 후 천창 열음
2	367.7	0.9	28.6	11.8	7.7	1.6			9.3	
3	629.2	1.2	34.3	14.9	10.3	2.3			12.6	
4	674.7	2.3	29.6	17.4	12.3	2.7			15.0	
5	849.1	1.3	30.8	14.3	10.5	2.1			12.6	
평균	588.1	1.6	31.1	14.5	10.1	2.2			12.3	
6	439.0	0.8	33.1	10.8		3.4	4.1		7.5	천창은 후 측창 열음
7	519.4	1.6	33.5	12.2		4.2	6.0		10.2	
8	321.9	1.1	32.2	11.3		2.7	6.2		8.9	
9	937.6	2.1	31.6	16.7		2.6	10.0		12.6	
10	698.1	1.0	30.6	15.4		3.3	8.7		12.0	
평균	583.2	1.3	32.2	13.3		3.2	7.0		10.2	
11	847.3	2.0	32.6	16.1				9.7	9.7	천창 측창 동시 열음
12	865.7	1.5	32.9	15.1				10.7	10.7	
13	912.3	1.3	34.4	17.3				12.8	12.8	
14	758.0	1.4	34.8	15.8				12.1	12.1	
15	453.0	1.2	29.7	11.8				9.0	9.0	
평균	767.3	1.5	32.9	15.2				10.9	10.9	
전체 평균	646.2	1.5	32.1	14.3	10.1	2.7	7.0	10.9	11.1	



(a) 측창 열은 후 천창 열음



(b) 천창 열은 후 측창 열음



(c) 천측창 동시에 열음

그림 3-12. 환기창 개폐 순서에 따른 온도변화 특성 관측 예

극복하기 위해 환기창을 대부분 열어두는 경우에는 상관없으나, 봄과 가을철에 환기로 온도를 제어하는 경우에는 온도분포의 균일화나 서서히 변화하는 것 등을 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 환기창 조작순서는 실내온도가 설정온도보다 높을 때는 천창을 열은 후 측창을 열고, 반대의 경우에는 측창을 닫은 후 천창을 닫는 것이 바람직하다고 생각한다.

#### 다. 근권냉각에 의한 고온극복 효과

##### 1) 지중냉각시스템

대부분의 작물이 생육하기에 적합한 지온은 18~20℃ 정도이고 최고한계는 23~25℃로 알려져 있으나, 2001년 8월에 온실내의 지온을 계측해본 결과 표층으로부터 5~35cm 깊이의 평균 지온은 27~29.4℃까지 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 지중 냉각의 필요성이 인정되며, 정 등(1997)의 보고에 의하면 무처리시 지온 25.7℃에 대하여 지하수 냉각으로 지온을 19~19.6℃로 냉각해줄 경우 배추 수량이 8~11% 증수되었다.

지중냉각시스템에 관한 보고는 많지 않으나 한 예를 살펴보면, 5~7℃로 냉각된 물을 지중에 매설된 파이프로 공급시 평균 지온을 15~17℃로 유지할 수 있었으며, 지하수로 냉각시 3.3℃정도 지온이 강하하는 것으로 나타났다(Rynk, 1985). 그러나 유량은 보고되지 않아 알 수 없으며, 파이프의 재질은 PVC, 매설깊이는 10~40cm, 매설간격은 15~40cm, 표면은 폴리스틸렌 멀칭으로 되어 있었다.

본 연구에서는 지중냉각시스템을 경제적인 고온극복 방법중의 하나로 생각하고, 기술을 체계화하기 위한 시도로 지중냉각시스템의 열전달 특성을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 그림 3-12는 지중냉각시스템의 열전달 실험 모식도이다.

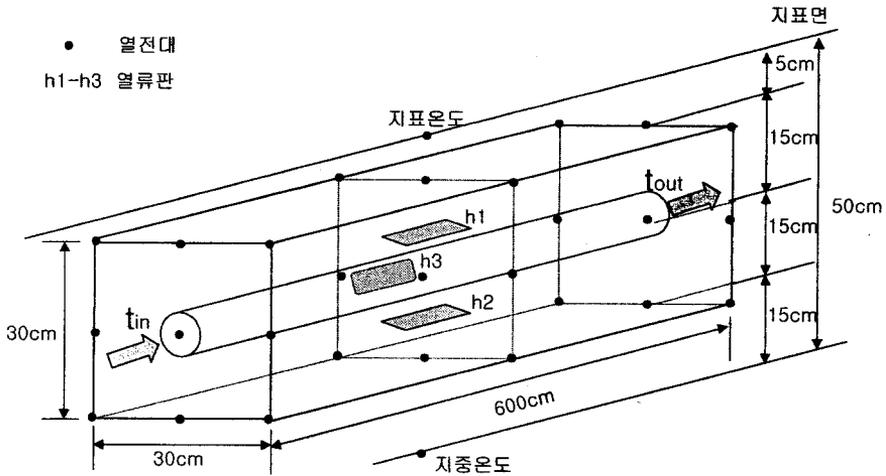


그림 3-13. 지중냉각시스템의 열전달 실험 모식도

외경 27.2mm, 두께 3mm, 길이 6m인 스테인레스 파이프를 지중 20cm의 깊이에 매설하고, 지하수를 흘리면서 지중냉각 실험을 수행하였다. 그림에서와 같이 토양층에 격자망을 구성하여 열전대로 온도를 계측하고, 파이프 상, 하, 수평 방향의 열류 및 토양수분을 열류판과 텐시오미터로 각각 계측하였다. 또한 지하수 유량과 수온, 지표 및 지중온도, 온실 내의 기온, 일사량, 풍속 등을 동시에 계측하였다.

실험 온실 토양의 토성은 국제토양학회법에 의해 사양토(SL)로 분류되었으며, 실험기간 동안의 지면 50cm 높이의 실내풍속은 0.1~0.4 m/s의 범위로 나타났다. 토양의 함수비는 18.7~36%의 범위에서 변화하였으며, 함수비에 따른 지중열류는 그림 3-14와 같이 나타났다. 함수비가 증가함에 따라 열전도율이 커지기 때문에 열류도 증가하지만, 적정 함수비 범위에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 지표에서의 일사 흡수 및 냉각파이프와 지온의 차이가 큰 파이프 상부의 수직 열류가 가장 커서 40~120 W·m<sup>-2</sup>의 범위를 보였고, 하부는 약 3%, 수평 방향은 10% 정도로 작게 나타났다.

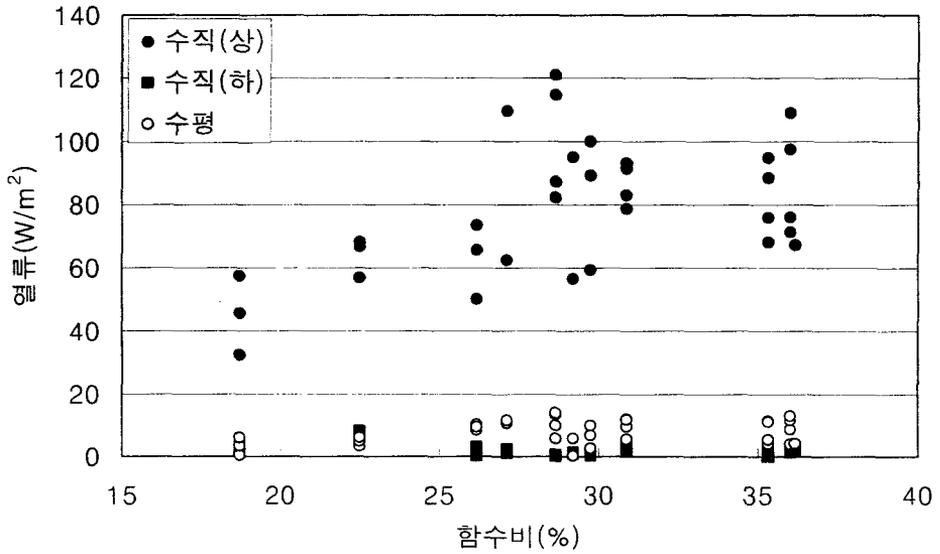


그림 3-14. 토양 함수비에 따른 지중열류 계측 결과

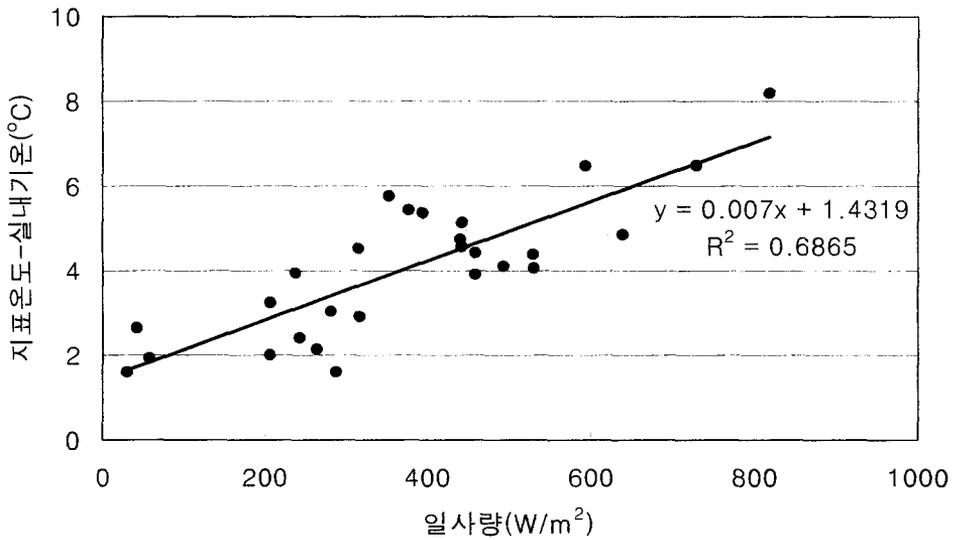


그림 3-15. 일사량에 따른 지표온도와 실내온도 차이

그림 3-15는 일사량에 따른 지표온도의 상승을 실내온도의 차이로 나타낸 것이다. 일사량의 증가에 따라 지표온도는 거의 직선적으로 상승하는 것으로 나타났다. 이것은 온실의 열환경을 시뮬레이션할 때 지표면에서의 대류 열전달을 구하는데 유의한 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 3-16은 지하수 유량에 따른 지중냉각 열량을 나타낸 것으로서 유량이 증가함에 따라 지중냉각 열량도 증가하지만 그 증가율은 감소하는 것으로 나타났다. 실험기간동안 냉각파이프 입구의 지하수 수온은 18.2~21.4 °C (평균 19.9°C)로 비교적 높았다.

그림 3-17은 냉각열량에 따른 평균 지온의 변화를 나타낸 것이다. 평균 지온은 냉각 파이프의 중심으로부터 15cm 떨어진 격자망의 지온 전체를 평균한 것이다. 무냉각시 평균 지온 27.8°C 정도에서 지하수 유량 30 L/min의 냉각에 의해 평균 지온은 약 25.6°C로 약 2.2°C 정도의 냉각효과가 있었다. 그러나 열원인 지하수의 수온이 비교적 높아서 지온을 25°C 이하로 냉각하는 것은 어려웠다.

우리 나라의 여름철 지하수 수온은 대체로 15~18°C 정도이므로 지하수만으로 적정 지온의 범위인 18~20°C 까지 냉각하는 것은 불가능하다. 그러나 한계 지온인 23~25°C의 범위로 냉각하는 것은 지하수를 이용하여도 충분한 것으로 판단되므로 경제적인 고온극복 수단으로는 지하수를 이용한 지중냉각시스템이 적당할 것으로 생각된다. 보다 고도의 환경조절을 요구하는 시설의 경우에는 히트펌프 등을 이용하여 10°C 이하로 냉각한 물을 지중냉각시스템에 흘려주어야만 소기의 목적을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

한편 파이프의 매설 깊이와 간격은 작물의 재식 거리와 뿌리의 분포, 즉 근근역의 범위를 고려하여 결정하고, 파이프의 길이가 너무 길면 냉각수의 수온이 상승하여 후반부의 냉각효과가 떨어지므로 냉각수의 입구와 출구를 분리한 병렬 연결의 파이프라인을 구성하는 것이 바람직하다.

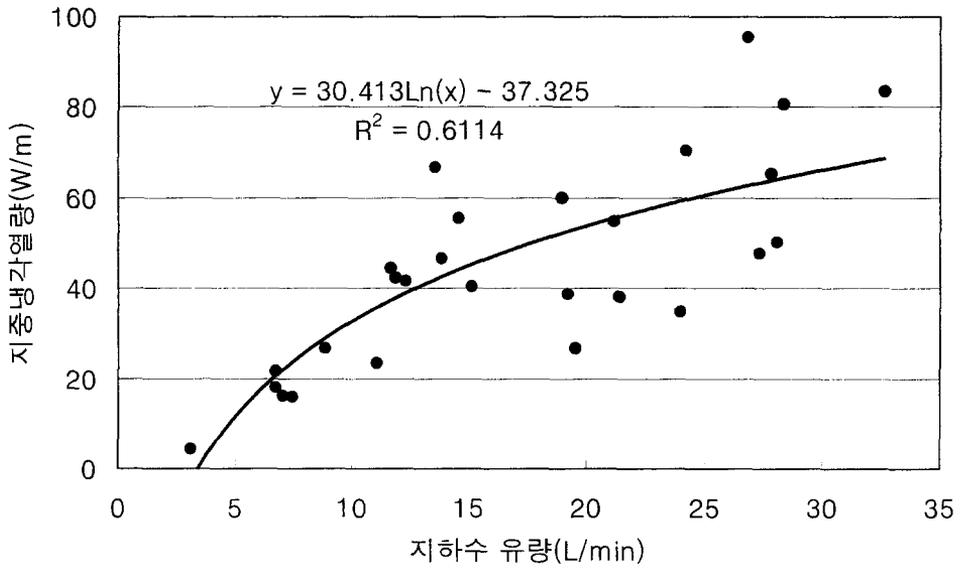


그림 3-16. 지하수 유량에 따른 지중냉각열량 변화

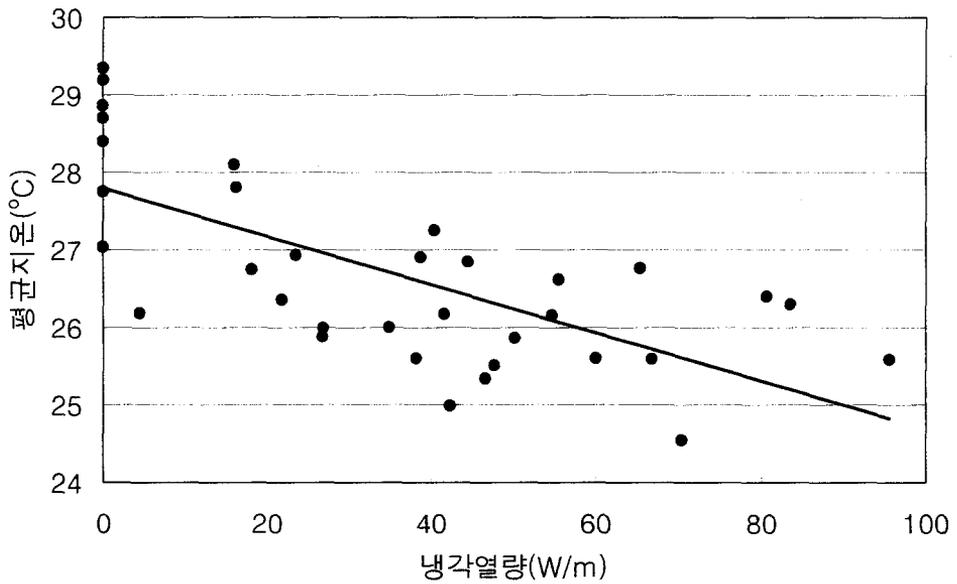


그림 3-17. 냉각 열량에 따른 평균지온 변화

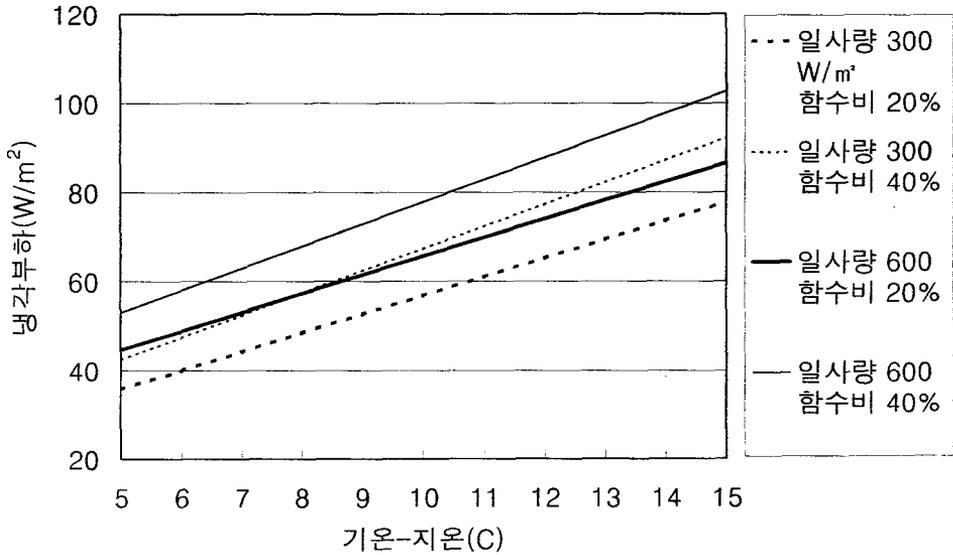


그림 3-18. 단위 면적당 지중 냉각 부하량

그림 3-18은 실험 결과를 분석하여 단위면적당 지중냉각 부하량을 구한 것이다. 일사량에 따른 지표온도와 기온의 차이(그림 3-15), 지중열류 계측치로부터 구한 습수비에 따른 열전도율, 그리고 지중 목표온도를 입력자료로 하고, 지중 20cm에 매설된 파이프의 상부로부터 토양을 통하여 전달되는 전도열 전달량을 구하여 냉각부하로 하였다. 차광에 의하여 실내 일사량이  $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 이고 실내온도  $35^\circ\text{C}$ 인 경우 습수비 40% 상태에서 지중의 목표온도를  $25^\circ\text{C}$ 로 하기 위하여는  $67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 의 냉각열량이 필요한 것으로 나타났다.

## 2) 양액냉각시스템

여름철 고온기에 비교적 저온 작물인 상추 재배를 성공적으로 실행하고 있는 농가의 사례를 분석하였다. 고온극복 방법으로는 차광과 자연환기, 그리고 양액 냉각과 엽면 살수의 방법을 사용하고 있었다. 대상 온실에서 양

액 냉각의 효과를 실험하였다. 실험 내용은 온실의 환경요인을 계측하고, 복사온도계로 엽온을, 플레니미터로 엽면적을 측정하였으며, 로드셀을 이용하여 증산속도 및 양액의 흡수속도를 측정하였다.

온실내 기상조건은 기온 33~35℃, 상대습도 60~73%의 범위였으며, 양액을 20℃로 냉각하고 엽면 살수시의 엽온은 30~32℃로 관측되었다. 엽면적은 396~415 cm<sup>2</sup>/주, 증산속도는 42.5~45.1 mg · cm<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>로 측정되었으며 흡수속도는 증산속도와 거의 같았다. 그러나 냉각 및 엽면 살수의 조치가 없는 경우 상추는 시들고, 엽온은 35~37℃까지 상승하였다. 또한 이 경우의 증산속도는 흡수속도보다 컸으며, 증산속도와 흡수속도의 차이는 약 4.1~7.5 mg · cm<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>이었다. 즉, 양액의 냉각은 뿌리의 활력을 좋게하여 양분과 수분의 흡수를 촉진하므로 엽면에서의 증산이 과도하게 일어나는 환경조건에서도 정상적인 생육을 할 수 있는 것으로 판단되었다.

양액 냉각을 실시하지 않을 경우 액온은 NFT 방식에서 31.7~32.1℃(吉田, 1987)까지 상승하는 것으로 관측되었고, 수기경에서 29.5~30℃(박 등, 1990), DFT 방식에서 29.4~31.7℃ 양액이 순환되지 않을 경우 29.5~32.7℃(남 등, 1992)까지 상승하는 것으로 보고되고 있다. 이것은 적정 근권 온도 범위를 크게 상회하는 것으로서 여름철 양액재배시 양액의 냉각은 필수적인 것으로 생각할 수 있다.

근권 온도가 작물의 체온에 미치는 영향에 관한 실험 결과 남 등(1992)은 30℃ 전후의 양액을 24℃로 냉각시 상추의 엽온이 0.6~1.5℃ 낮아지는 것으로 보고하고 있다. Matsuoka(1992)는 양액 냉각시 지상 30cm 높이의 토마토 줄기 온도가 5℃나 강하하는 것으로 보고하고 있다. 이 등(1999)은 펄라이트 배지내에 냉각파이프를 매설하고 15~17℃의 지하수로 냉각을 실시한 결과 배지 온도가 22.8~24.7℃로 대조구의 25.9~29.6℃보다 3.1~4.9℃정도 낮았고, 토마토의 수량이 23% 증대하였으며 뿌리의 활력이 35% 증가한 것

으로 보고하였다.

이와 같이 지중 또는 양액의 냉각을 통한 근권 온도의 조절은 작물의 생육을 크게 개선하는 효과를 보이며, 또한 여름철 지상부의 막대한 냉방부하에 비하여 근권부의 냉각부하는 비교적 작으므로 경제적인 고온극복 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

양액의 냉각 방법으로 고행배지경에서는 배지내에 냉각파이프를 매설하여 지하수 또는 냉각수를 흘려주는 방식이 있고, 수경재배에서는 양액탱크내에 열교환기를 설치하고 지하수나 히트펌프에 의한 냉각수를 이용하는 방식과 베드의 바닥에 냉각파이프를 설치하는 방식, 그리고 양액 공급 파이프라인에 이중관식 열교환기를 설치하는 방식 등이 있다.

### 3. 고온극복 관련자재 생산현황 조사

우리 나라에서 하질기 온실의 고온 극복을 위하여 사용할 수 있는 관련 자재의 생산 현황을 한국 농자재 산업 협회 회원사를 중심으로 조사하였다. 이들을 증발냉각, 차광, 환기 관련으로 분류하여 정리하면 다음과 같다.

#### 가. 증발냉각관련 자재 생산 현황

##### 1) 포그노즐

A사 : 압력  $35\text{kg}/\text{cm}^2$ , 분무량  $100\sim 150\text{ml}/\text{min}$ , 입경  $15\mu\text{m}$ 이하

B사 : 압력  $70\text{kg}/\text{cm}^2$ , 분무량  $100\sim 120\text{ml}/\text{min}$ , 입경  $10\mu\text{m}$

C사 : 압력  $50\sim 100\text{kg}/\text{cm}^2$ , 분무량  $70\sim 150\text{ml}/\text{min}$ , 입경  $3\sim 30\mu\text{m}$

2) 여과기

A사 : 스크린 120 mesh, 200 mesh

B사 : 스크린 40, 120, 150 mesh

3) 냉각패드

A사 : 높이 1, 1.5, 2m, 두께 10cm, 길이 9.76m

B사 : 높이 12, 24, 36, 48, 60, 72 inch,

두께 2, 4, 6, 8 inch, 폭 12, 24 inch

4) 기타

원심력 디스크 분사식 증발냉각장치 : 분무입자 20~40 $\mu$ m

나. 차광관련 자재 생산 현황

1) 알루미늄 스크린

A사 : 차광률 55, 75, 85%, 폭 215, 330, 400, 430 cm

B사 : 차광률 40, 50, 65, 75, 85%, 폭 330, 430 cm

C사 : 차광률 45, 55, 65, 75%, 폭 325, 340, 430, 480 cm

2) 흑색차광망

A사 : 차광률 35, 55, 75, 85, 90%, 폭 300, 600 cm

B사 : 차광률 35, 75, 90%, 폭 300, 600 cm, 길이 50, 100 m

3) 녹색차광망

A사 : 차광률 35, 75, 85, 90%, 폭×길이 6×50, 3×100

## 다. 환기관련 자재 생산 현황

### 1) 환기팬

A사 : 직경 50, 80, 100cm, 풍량 180, 250, 400 m<sup>3</sup>/min

B사 : 직경 60, 80, 100, 120cm, 풍량 200, 350, 450, 600 m<sup>3</sup>/min

### 2) 환기창

아치형 단동 온실의 지붕에 장착 가능한 환기창

원형 : 직경 56, 75cm, 굴뚝형 : 직경 20, 30cm

## 4. 현장조건에 따른 경제적 고온극복 방안

### 가. 고온극복 방안 설정을 위한 현장조건의 분류

고온극복 방법은 냉동기를 이용하는 방법부터 자연환기에 의존하는 방법까지 여러 가지가 있으며 또한 이들 방법에 따라 설치 및 유지비용도 차이가 크다. 비용에 따른 제약 조건이 선택의 가장 큰 변수가 될 것으로 판단되므로 고온극복 방안 설정을 위한 현장조건은 표 3-26과 같이 온실의 환경 설비 수준 또는 투자비 수준을 기준으로 분류하였다.

대부분의 환경조절 설비를 갖추고 있으며 평당 시설비가 25만원 이상 투자된 유리온실이나 경질판온실 등의 철골온실은 매우 높은 수준으로 분류하였다. 다음으로는 철골온실 보다는 낮지만 상당히 높은 수준의 설비를 갖추고 있으면서 평당 시설비 12~15만원 정도의 자동화 연동온실을 높은 수준으로 분류하였다. 평당 7~8만원 정도의 투자비에 자동화 수준은 낮은 일반

연동온실과 광폭형 단동온실은 보통 수준, 평당 3~4만원 정도의 일반 단동 온실은 낮은 수준으로 분류하였으며, 수동의 축창 개폐시설 이외에는 환경 설비가 거의 없는 평당 3만원 미만의 터널형 온실은 매우 낮은 수준으로 분류하였다. 이와 같은 기준을 바탕으로 경제적인 고온극복 설비 수준을 검토 하였다.

표 3-26. 고온극복 방안 설정을 위한 현장조건 분류

온실의 종류		환경설비수준	투자비수준
철골 온실	유리온실	천·축창 자동 개폐시설, 환기 팬 및 공기 유동팬, 보온커튼, 양액재배/관비 시스템, 난방 및 환경제어시스템 등을 갖춘	매우높다 (평당 시설비 40~50만원)
	경질판온실	유리온실과 거의 같은 수준의 설비 보유, 구조만 경량 골조	매우높다 (25~30만원)
파이프 온실 (비닐하우스)	자동화 연동 온실	유리온실 보다는 낮지만 상당히 높은 수준의 설비를 갖추고 부분적인 자동화가 이루어짐	높다 (12만원 이상)
	일반 연동 온실	천·축창 개폐시설, 보온커튼, 난방시설 등만 갖추고 있고 자동화는 낮은 수준	보통 (7만원 이상)
	광폭형 단동 온실	천·축창 개폐시설, 보온커튼, 난방시설 등만 갖추고 있고 자동화는 낮은 수준	보통 (7만원 이상)
	일반 단동 온실	축창 개폐시설, 보온 커튼, 난방시설 등만 갖추고 있고 자동화는 매우 낮은 수준	낮다 (3만원 이상)
	터널형 온실	수동의 축창 개폐시설 뿐으로 환경 설비가 거의 없는 수준	매우낮다 (3만원 미만)

나. 고온극복 방법별 설치 단가 비교

표 3-27. 고온극복 설비 설치 단가

고온극복 설비 명칭		평당단가(원)	비 고
증발냉각시스템	패드엔 팬시스템	36,200	강제환기포함
	포그시스템	16,400	환기시설 미포함
	원심력디스크분사식	13,000	환기시설 미포함
차광시스템	내부알루미늄스크린	7,100	자동개폐장치포함
	외부알루미늄스크린	9,100	외부골조포함
	흑색차광망피복	800	개폐불가
환기시스템	강제환기시스템	8,200	환기팬
	천측창개폐시설	2,700	자동개폐기
	측창개폐시설(단동)	1,400	자동개폐기
	측창개폐시설(단동)	900	수동개폐기
	지붕환기창(단동)	1,100	원형, 6m간격
지붕살수시스템(스프링클러)		1,300	펌프, 배관포함
지중냉각시스템(PVC파이프)		3,400	펌프, 배관포함

주) 길이 94m, 폭 7m, 5연동의 비닐하우스에 설치할 경우의 시설비용을  
 관련업체의 견적에 의해 구하고 평당 단가로 환산함. 단, 여기서의  
 단가는 재료비로만 구성되어 있으며 시공비는 포함되지 않음.

표 3-27은 고온 극복 설비의 설치 단가를 정리한 것이다. 표의 설치 단가는 1,000평(길이 94m, 폭 7m, 5연동)의 비닐하우스에 설치할 경우의 시설비용을 관련업계의 견적에 의해 구하고 평당 단가로 환산한 것이다. 또한 여기서의 단가는 재료비로만 구성되어 있으며 시공비는 포함되지 않았다.

#### 다. 경제적 고온극복방안

유리온실의 경우 난방 설비 공사비가 전체 공사비의 15.5%, 자동화 비닐온실은 12.2%로 되어 있다. 냉방 설비에 대한 투자도 이와 같은 수준으로 가정하고, 고온극복 설비의 투자한계를 설정하였다. 이 경우 유리온실은 평당 6~8만원, 자동화 비닐온실은 평당 1.5~2만원 정도이다.

표 3-27의 단가는 재료비를 중심으로 구성되어 있으므로 설치에 따른 기술자 등의 노무비와 간접 경비 등을 포함하면 실제 공사비는 공종에 따라 1.2~2배정도 증가할 것으로 판단된다. 이러한 상황을 고려할 때 시설 수준별로 도입 가능한 고온극복 설비 수준을 정리하면 표 3-28과 같다. 여기서 표 3-26의 환경설비 수준은 기본 시설로 취급하고 고온극복을 위해 추가로 들어가는 부분을 고온극복 설비의 투자비로 취급하여 검토하였다.

매우 높은 수준의 철골 온실은 포그 방식의 증발냉각 시스템과 강제환기 설비 및 근권냉각 설비를 갖추고 고부가가치 작물을 재배할 필요가 있으며, 경우에 따라서는 패드앤팬 시스템이나 외부 이격 차광 시설까지도 고려해볼 수 있을 것으로 판단된다. 높은 수준의 자동화 연동온실은 강제환기 및 근권냉각 설비와 외부 이격 차광 시설을 적극 권장하며, 포그 시스템이나 지붕살수 시설도 고려해볼 수 있을 것으로 판단된다. 보통 수준의 일반 연동온실이나 광폭형 단동온실은 강제환기와 근권냉각 및 차광설비를 권장하며, 낮은 수준의 일반 단동 온실은 천창시설 및 차광시설을 적극적으로 권장한

다. 매우 낮은 수준의 터널형 온실은 비가림 수준이므로 추가적인 투자는 어렵다고 생각되며, 축창시설은 반드시 갖추고 천창이나 차광시설을 고려할 수 있으며 혹서기를 피하는 작부체계 도입이 필요할 것으로 판단된다.

표 3-28. 온실의 종류별 경제적인 고온극복 설비 수준

투자비 수준	고온극복 설비										해당온실의 종류
	증발냉각		차광설비			환기설비			기타		
	패드	포그	알미 늄스 크린	외부 이격 차광	후색 차광 망	강제 환기	천창 개폐	축창 개폐	지붕 살수	근권 냉각	
매우높음	△	○	◎	△		○	◎	◎	◎	○	철골 온실 (유리, 경질판)
높음		△	△	○		○	◎	◎	△	○	자동화 연동온실
보통			△		○	○	◎	◎	△	○	일반 연동온실 광폭형 단동온실
낮음					○		○	◎		△	일반 단동온실
매우낮음					△		△	○			터널형 온실

주) ◎ 기본시설, ○ 적극적인 권장설비, △ 선택적인 권장설비

결국 자연환기 및 차광효율을 극대화하는 것이 경제적인 고온극복 방안이라고 결론지을 수 있으며, 이를 포함하여 경제적인 고온극복 방안을 정리하면 다음과 같다.

- ① 자연환기의 극대화 및 적극적인 강제환기의 도입
- ② 외부 이격 설치 등의 적정 차광 및 차광의 효율적인 제어

- ③ 보조적인 고온극복 방법의 적극적인 도입
- ④ 자연에너지의 적극적인 활용 및 온실 구조 개선
- ⑤ 고부가가치 시설에서는 증발냉각시스템의 도입

#### 1) 자연환기 극대화 방안

우리 나라의 온실은 기본적으로 겨울철 에너지 절약을 위한 보온형 구조로 되어 있어서 여름철 고온 극복에는 불리한 구조로 되어 있다. 따라서 자연환기를 극대화하기 위해서는 온실 구조의 개선이 필요하다. 그러나 4계절 활용할 수 있는 온실 구조는 많은 에너지를 투입해야 하므로 이원화 방향도 고려해볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 즉, 겨울철의 보온에 유리한 온실 구조로 하여 혹서기에는 휴경하는 시설을 남부지방에 보급하고, 여름철의 고온극복에 유리한 온실 구조로 하여 혹한기에는 휴경하는 시설을 강원도나 고랭지 등에 보급하는 것이다.

자연환기를 극대화하기 위해서는 현행 온실의 환기 구조를 개선할 필요가 있다. 단동의 비닐하우스는 현재 대부분 권취식 측창뿐이나 천창을 설치할 수 있는 구조로 개선해야 한다. 연동의 비닐하우스는 권취식 천·측창을 갖추고 있으나 연동곡부의 천창은 환기효율이 떨어진다. 따라서 연동곡부의 천창을 지붕 아치 상부로 이동하는 방법, 천·측창 개구 면적의 확대 방안 등의 구조 개선이 필요하다.

또한 연동수의 제한이 필요하며, 다연동을 설치할 때에는 4~5연동 마다 분리하여 설치하는 것이 바람직하다. 철골 온실의 경우에도 측면은 유리나 경질판 대신 연질필름으로 피복하여 권취식 측창 구조로 하면 환기면적을 확대시킬 수 있다. 작물체 분무나 포그시스템의 가동 등에도 환기는 필수조건이므로 자연환기가 극대화될 수 있는 모든 방법을 동원해야 하며, 필요시에는 강제환기의 도입도 적극적으로 검토할 필요가 있다.

## 2) 차광효율의 극대화 방안

차광스크린을 고온극복 수단으로 사용할 경우에 가장 효율적인 방법은 온실의 외부에 간격을 두고 차광스크린을 설치하는 것이다. 그러나 별도의 구조물을 설치해야 하므로 비용이 많이 드는 문제가 있어 널리 보급되지는 못하고 있다. 안전하고 효율적인 설치를 위한 구조 문제와 비용 문제를 해결하여 외부 차광 방식을 적극적으로 도입할 필요가 있을 것으로 판단된다.

내부에 차광스크린을 사용할 경우에는 스크린의 선택에 주의해야 한다. 보온 겸용 스크린을 사용할 경우 환기가 불량해져 고온극복에 역효과를 가져오므로 차광 전용 열린 구조의 스크린을 선택하는 것이 바람직하다. 만약 보온 겸용 스크린을 사용할 경우에는 간격을 띄우고 환기가 충분히 이루어지도록 조치를 취하여야 한다.

한편 차광으로 광이 부족할 경우에는 광합성이 저하하여 생산성이 떨어지므로 적정 차광이 필요하다. 차광스크린의 개폐를 온도에 따라서 제어할 경우에는 광부족 현상이 발생되기 쉬우므로 일사량에 따라서 제어하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 약광 작물을 재배하는 경우를 제외하고는 고정식 차광 방법을 사용하지 않는 것이 바람직하다.

## 3) 기타 경제적인 고온극복을 위한 방안

고비용의 냉방 설비는 다목적으로 활용함으로써 경제성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들면 포그 노즐은 농약살포, 냉방, 관수, 가습, 엽면 살포 등으로 다목적화하고, 지붕 스프링클러는 지붕살수 냉각과 지붕세척 겸용으로 활용하면 투자 가치를 높일 수 있다.

또한 경제적인 측면에서 온실의 종류에 따라 작목과 작부체계의 선택이 필요하고, 온실의 계획 및 설계 단계에서도 재배계획에 맞추어 설비의 투자 수준을 결정할 필요성이 있다.

여름철 고온기에는 시설보수, 토양소독, 집적된 염류의 제거 등을 위해서 휴경 또는 작기를 전환하는 방법도 가능하지만 주년 안정생산 및 생산물의 품질향상을 도모하기 위해서는 이용 가능한 보조적인 고온극복 방법을 적극적으로 도입 활용하는 자세가 필요하다.

양액 냉각이나 지중 냉각 등과 같은 근권부 냉각은 부하가 지상부에 비하여 훨씬 작으면서 작물의 생육 환경 개선 효과는 비교적 크므로 경제적인 고온극복 방법으로써 적극적인 도입을 권장할 필요가 있다. 이와 함께 근권 냉각시스템의 설치, 운영에 필요한 각종 설계 기준 및 운영 지침을 조속히 마련해야 할 것으로 판단된다.

야간 냉방이나 약광 작물을 90% 정도의 차광하에서 재배하는 경우에는 히트펌프 냉방도 경제성 있으므로 적극적으로 활용할 필요가 있다.

에너지 비용은 온실 경영을 어렵게 하는 큰 요인이 되고 있으므로 자연에너지 이용에 관한 기술 개발도 적극적으로 하지 않으면 안 될 것이다. 특히 비교적 지하수 자원이 풍부한 우리나라에서는 발용수로 300평당 하루 6시간 기준으로 시간당 약 2톤 정도의 지하수를 이용할 수 있는 것으로 보고되어 있고, 댐이나 농업용 저수지의 심층에서 나오는 냉수는 냉방의 보조열원으로 이용할 가치가 매우 높다. 따라서 이들 냉수나 지하수 이용을 위한 각종 열교환기의 개발에 많은 연구를 투자할 필요가 있다.

마지막으로 고온 극복 효과를 극대화하기 위해서는 차광, 환기 및 냉방의 복합 제어 기술 개발이 필요할 것으로 사료된다.

## 제5절 요약 및 결론

시설의 유효 이용이나 수익성의 측면에서 볼 때 여름철 온실내 환경의 적정화를 통한 주년재배의 달성은 온실재배에 있어서 당면과제라 할 수 있다. 현재까지 개발되어 사용되고 있는 온실의 냉방 방식 중에는 증발냉각법이 가장 효과적인 방법이지만 설치 및 유지비용이 많이 들고 설계, 시공, 유지관리 등의 체계적인 기술이 미비한 관계로 국내에는 널리 보급되어 사용되고 있지 못한 실정이다. 또한 비닐하우스와 같이 시설투자가 많지 않은 경우에 증발냉각시스템과 같은 시설을 설치한다는 것은 거의 불가능한 현실이므로 보다 경제적인 고온극복 방안의 도출이 절실한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 국내의 상황을 고려하여 온실의 경제적 고온극복 방안을 도출하고, 합리적인 시설원예 경영과 원예시설의 계획 및 설계 방향 설정에 필요한 기초 자료를 축적하기 위하여 수행하였으며, 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 온실의 경제적 고온극복 방안의 방향 설정을 위한 기초 자료를 얻기 위하여 하절기 온실의 활용실태를 조사한 결과 유리온실 18.7%, 비닐하우스 24.0%, 전체 21.6%의 시설재배 농가가 휴경하고 있었으며, 나머지 경우도 매우 열악한 환경하에서 재배가 이루어지고 있었고, 고온 극복을 위한 저비용 기술의 개발에 관한 요구가 매우 높았다.
2. 냉방 및 보조냉방 처리별 온실의 열환경을 비교 측정된 결과 자연환기만으로는 74.8%, 지붕살수시 58.2%가 35℃를 초과하여 작물재배가 곤란한 것으로 나타났다. 환기와 차광을 병행할 경우에는 26.9%만 35℃를 초과하는 것으로 나타나 조금만 개선하면 어느 정도의 고온극복은 가능할 것

으로 판단되었다. 차광과 증발냉각의 일종인 에어쿨팬의 가동으로 자연환기 온실에 비하여 3.8~4.2℃의 냉방효과를 보였으며, 온실내의 기온을 대부분 35℃ 이내로 유지하는 것이 가능한 것으로 나타났다.

3. 온실의 고온극복 시스템의 설계 제원 결정을 위한 열평형식을 구성하였으며 현장 실험을 통하여 적용성을 검토한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 열평형 모델의 입력변수중 태양복사에 대한 증발산비의 값이 매우 중요하며, 온실의 환기 및 냉방 설계기준을 설정하기 위해서는 여러 가지 작물의 상태에 따른 실측 자료의 축적을 통한 선택의 가이드라인이 제시되어야 할 것으로 판단되었다.
4. 온실의 환경설계에 이용할 수 있는 몇 가지 기상자료의 분석방법과 위험률별 설계값을 비교 검토하고, 온실의 고온극복 설비용량 결정을 위한 설계용 기상자료의 선택 기준을 제시하였다. 주요 시설채소와 화훼의 생육 적정 온도와 최고 한계온도를 지상부와 근권부로 구분하여 분석하고, 작물별 적정 광강도와 여름철 일사량 수준을 분석하여 적정 차광률과 한계 차광률을 구하였다. 그리고 증발냉각, 차광 및 환기와 관련된 자재 생산 현황을 조사하여 온실의 고온극복 설계 기준 자료로 제시하였다.
5. 차광과 환기에 의한 고온극복 효과를 분석한 결과 약광 작물을 재배하는 경우에는 대부분 차광과 환기에 의해서 고온극복이 가능한 것으로 나타났다. 중광 작물의 경우에는 적정차광과 강제환기를 도입함으로써 어느 정도 고온 극복이 가능하지만, 차광을 충분히 할 수 없는 강광 작물의 경우에는 외기온 32℃ 이상에서 차광과 환기만으로는 실내온도를 35℃로 유지하는 것이 불가능한 것으로 나타났다.
6. 아치형 단동 온실의 지붕환기구조 실태조사 결과 폭 5~8m의 소형 온실에서는 플라스틱으로 제작된 원형환기창을, 폭 12~18m의 대형온실에서는 철재 파이프를 덧붙인 양권취식을 많이 사용하고 있었다. 지붕환기창

설치 온실과 관행의 권취식 측창만 설치된 온실에 대한 대조 실험 결과 비록 적은 면적의 지붕환기창을 설치하였지만 온도하강 1℃ 이상의 천창 환기 효과가 있었으며, 지붕환기를 실시함으로써 온도분포를 보다 균일하게 할 수 있는 것으로 나타났다.

7. 지중냉각 시스템의 열전달 실험을 실시하고, 함수비에 따른 지중 열류, 냉각열량에 따른 평균지온의 변화와 냉각 효과를 분석하였다. 일사량과 지온, 지온의 차이 및 토양의 함수비에 따른 지중냉각 부하량을 구하여 설계자료로 제시하였다. 또한 양액냉각과 엽면살수에 따른 수경재배 상추의 엽온 변화와 증산속도 및 흡수속도의 계측 실험을 통하여 근권냉각 효과를 검토하였다. 근권냉각 시스템은 경제적이면서 비교적 효과가 좋은 고온극복 방법으로 판단되었다.
8. 온실의 환경 설비 수준과 투자비 수준을 기준으로 고온극복 방안 설정을 위한 현장조건을 5단계로 분류하였다. 또한 이용 가능한 고온극복 설비의 설치 단가를 조사하여 온실의 종류별로 경제적인 고온극복 설비 수준을 기본설비, 적극적인 권장설비, 선택적인 권장설비로 구분하여 제시하였다. 그리고 온실의 경제적인 고온극복 방안으로 자연환기의 극대화 방안, 차광효율의 극대화 방안 및 고비용 설비의 다목적 활용 방안 등을 제시하였다.

## 제 4 장 총 합 결 론

온실의 주년이용을 위한 여름철 온실환경의 적정화에 관한 연구는 시설원예분야의 시급한 당면과제라 할 수 있다. 현재 국내 농가에서 이용하고 있는 고온극복 수단은 주로 차광이나 환기 등이다. 온실의 냉방방식 중에는 증발냉각법이 가장 효과적인 방법이지만 설치 및 유지비용이 많이 들고 설계, 시공, 유지관리 등에 대한 체계적인 기술이 미비한 실정이다. 또한 비닐하우스와 같이 시설투자가 많지 않은 경우에 증발냉각시스템과 같은 시설을 설치한다는 것은 거의 불가능한 현실이므로 보다 경제적인 고온극복 방안의 도출이 절실한 실정이다. 따라서 본 과제는 경제적인 고온극복 방안과 증발냉각시스템의 설계 및 운용에 필요한 구체적인 자료를 제공하기 위하여 수행되었으며, 세부과제인 「증발냉각시스템의 현장적용기술 개발」과 「온실의 경제적 고온극복 방안 연구」로 구분하여 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

### 1. 「증발냉각시스템의 현장적용기술 개발」과 관련된 연구개발 결과

- 1) 국내에 증발냉각시스템을 설치한 농가는 전체 29곳으로, 이중 포그시스템을 설치한 농가는 9곳, 패드-팬시스템을 설치한 농가는 6곳, 디스크분사식을 설치한 농가는 14곳으로 조사되었다.
- 2) 증발냉각시스템의 활용률을 살펴보면 포그시스템은 33.3%, 패드-팬시스템은 66.7%, 디스크분사식은 100%로 조사되었다. 포그시스템의 활용률이 가장 낮아 포그시스템의 분무수량, 노즐 배치, 운영 및 관리에 대한 연구가 시급한 것으로 나타났다.

3) 온실 내부의 온도를 냉방 목표온도로 유지하는데 필요한 분무수량을 결정하기 위해 냉방설계용 기상데이터와 온실(3-1G형) 구조 및 전열특성에 관한 정보를 이용하여 우리 나라 16개 지역의 냉방설계용 VETH선도를 작성하고, 필요 환기회수 및 분무수량을 제시하였다.

4) 차광에 따른 포그냉방온실의 열환경을 분석한 결과, 실험 온실의 온도가 70% 차광하에서는 외기온보다 1.2℃ 높았고, 무차광하에서는 외기온보다 1.3℃ 높았다. 무차광하에서 분무 입자의 증발률이 높기 때문에 70% 차광하에서와 비슷한 수준으로 온실의 온도가 유지된 것으로 판단된다. 따라서, 차광하에서는 분무 입자의 증발률이 떨어져 작물에 부착되는 입자가 많고, 작물 생육이나 환기, 증발률 측면에서 불리하게 작용할 수 있으므로 작물 생육을 고려하여 탄력적으로 차광을 실시하여야 할 것이다.

제습여부에 따른 열환경을 분석한 결과, 실험 온실의 상대습도가 무냉방 온실의 상대습도에 비해 제습한 경우 20.8%, 무제습의 경우 6.2% 높게 나타났다. 따라서, 제습을 함으로써 온실내 분무 입자의 증발률이 높아진 것으로 판단되므로 포그냉방시 제습장치의 활용도 적극 검토하여야 할 것이다.

환기조건에 따른 열환경을 분석한 결과, 천창만 개방한 경우 무냉방 온실과 온도차가 없었으며, 환기회수가 증가할수록 분무 입자의 증발률이 증가하였으므로 가능한 환기가 원활하게 이루어지도록 해야 할 것이다.

제어방식에 따른 열환경을 분석한 결과, 타임제어를 한 경우는 실험 온실의 습도가 무냉방 온실의 습도보다 6.2% 높았고, 습도제어를 한 경우는 19.2% 높았다. 이는 습도제어를 할 경우 온실 내부의 습도에 따라 분무량이 조절되어 분무 입자의 증발률이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서, 습도제어가 타임제어에 비해 더 효과적이다.

5) 포그냉방온실의 열환경 해석을 위해 개발된 CFD모델을 검증한 결과,

온도의 경우 무차광조건에서는 0.4~4.4%, 차광조건에서는 0.6~4.1%의 오차를 나타냈으며, 상대습도의 경우 무차광조건에서는 0.6~9.6%, 차광조건에서는 1.3~10.6%의 오차를 나타냈다. 따라서, 포그냉방온실의 열환경 해석에 CFD모형을 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

6) 분무 입자의 증발률은 온실 내부의 상대습도와 밀접한 관련이 있다. 포그시스템의 냉방효율을 높이기 위해 제습기를 개발하였으며, 제습기의 제습률은 평균 64.6%였다.

7) 포그냉방이 작물 생육에 미치는 영향을 분석한 결과, 포그시스템을 가동한 경우  $F_m/F_o$ (최대형광과 초기형광의 비)의 평균은 4.3이었고, 가동하지 않았을 경우  $F_m/F_o$ 의 평균은 3.82였다. 따라서, 냉방을 실시한 경우 작물이 스트레스를 덜 받는 것으로 나타났다.

8) 이상의 연구 결과를 토대로 하여 포그시스템의 설계 및 운영에 관한 지침을 제시하였다.

## 2. 「온실의 경제적 고온극복 방안 연구」와 관련된 연구개발 결과

1) 온실의 경제적 고온극복 방안의 방향 설정을 위한 기초 자료를 얻기 위하여 하절기 온실의 활용실태를 조사한 결과 유리온실 18.7%, 비닐하우스 24.0%, 전체 21.6%의 시설재배 농가가 휴경하고 있었으며, 나머지 경우도 매우 열악한 환경하에서 재배가 이루어지고 있었고, 고온 극복을 위한 저비용 기술의 개발에 관한 요구가 매우 높았다.

2) 냉방 및 보조냉방 처리별 온실의 열환경을 비교 측정한 결과 자연환기만으로는 74.8%, 지붕살수시 58.2%가 35℃를 초과하여 작물재배가 곤란한 것으로 나타났다. 환기와 차광을 병행할 경우에는 26.9%만 35℃를 초과하는 것으로 나타나 조금만 개선하면 어느 정도의 고온극복은 가능할

것으로 판단되었다. 차광과 증발냉각의 일종인 에어쿨팬의 가동으로 자연 환기 온실에 비하여 3.8~4.2℃의 냉방효과를 보였으며, 온실내의 기온을 대부분 35℃ 이내로 유지하는 것이 가능한 것으로 나타났다.

3) 온실의 고온극복 시스템의 설계 제원 결정을 위한 열평형식을 구성하였으며 현장 실험을 통하여 적용성을 검토한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 열평형 모델의 입력변수중 태양복사에 대한 증발산비의 값이 매우 중요하며, 온실의 환기 및 냉방 설계기준을 설정하기 위해서는 여러 가지 작물의 상태에 따른 실측 자료의 축적을 통한 선택의 가이드 라인이 제시되어야 할 것으로 판단되었다.

4) 온실의 환경설계에 이용할 수 있는 몇 가지 기상자료의 분석방법과 위험률별 설계값을 비교 검토하고, 온실의 고온극복 설비용량 결정을 위한 설계용 기상자료의 선택 기준을 제시하였다. 주요 시설채소와 화훼의 생육 적정 온도와 최고 한계온도를 지상부와 근권부로 구분하여 분석하고, 작물별 적정 광강도와 여름철 일사량 수준을 분석하여 적정 차광률과 한계 차광률을 구하였다. 그리고 증발냉각, 차광 및 환기와 관련된 자재 생산 현황을 조사하여 온실의 고온극복 설계 기준 자료로 제시하였다.

5) 차광과 환기에 의한 고온극복 효과를 분석한 결과 약광 작물을 재배하는 경우에는 대부분 차광과 환기에 의해서 고온극복이 가능한 것으로 나타났다. 중광 작물의 경우에는 적정차광과 강제환기를 도입함으로써 어느 정도 고온 극복이 가능하지만, 차광을 충분히 할 수 없는 강광 작물의 경우에는 외기온 32℃ 이상에서 차광과 환기만으로는 실내온도를 35℃로 유지하는 것이 불가능한 것으로 나타났다.

6) 아치형 단동 온실의 지붕환기구조 실태조사 결과 폭 5~8m의 소형 온실에서는 플라스틱으로 제작된 원형환기장을, 폭 12~18m의 대형온실에서는 철재 파이프를 덧붙인 양권취식을 많이 사용하고 있었다. 지붕환기

창 설치 온실과 관행의 권취식 측창만 설치된 온실에 대한 대조 실험 결과 비록 적은 면적의 지붕환기창을 설치하였지만 온도하강 1℃ 이상의 천창 환기 효과가 있었으며, 지붕환기를 실시함으로써 온도분포를 보다 균일하게 할 수 있는 것으로 나타났다.

- 7) 지중냉각 시스템의 열전달 실험을 실시하고, 함수비에 따른 지중 열류, 냉각열량에 따른 평균지온의 변화와 냉각 효과를 분석하였다. 일사량과 지온, 지온의 차이 및 토양의 함수비에 따른 지중냉각 부하량을 구하여 설계자료로 제시하였다. 또한 양액냉각과 엽면살수에 따른 수경재배 상추의 엽온 변화와 증산속도 및 흡수속도의 계측 실험을 통하여 근권냉각 효과를 검토하였다. 근권냉각 시스템은 경제적이면서 비교적 효과가 좋은 고온극복 방법으로 판단되었다.
8. 온실의 환경 설비 수준과 투자비 수준을 기준으로 고온극복 방안 설정을 위한 현장조건을 5단계로 분류하였다. 또한 이용 가능한 고온극복 설비의 설치 단가를 조사하여 온실의 종류별로 경제적인 고온극복 설비 수준을 기본설비, 적극적인 권장설비, 선택적인 권장설비로 구분하여 제시하였다. 그리고 온실의 경제적인 고온극복 방안으로 자연환기의 극대화 방안, 차광효율의 극대화 방안, 및 고비용 설비의 다목적 활용 방안 등을 제시하였다.

## 참 고 문 헌

1. 고재균, 김문기, 서원명, 이석건, 최홍림. 1990. 농업시설공학. 서울대학교 출판부.
2. 김광식. 1995. 증보 농업기상학. 향문사.
3. 권영삼. 1995. 시설원에 환경조절기술의 현황과 전망. 한국첨단농업시설협회의 세미나자료집 : 63-100.
4. 김기성, 김문기, 유인호. 1999. 증발냉각시스템의 활용실태 및 냉방효과. 생물환경조절학회지 8(4) : 281-287.
5. 김교두. 1998. 공기조화설비설계핸드북(상)(하). 한미출판사.
6. 김문기, 김기성, 권혁진. 2001. 자연환기 온실의 환기회수에 따른 포그냉방시스템의 냉방효과. 생물환경조절학회지 10(1) : 10-14.
7. 김문기, 이석건, 서원명, 이현우, 윤용철, 남상운, 손정익, 정순주. 1997. 원예시설의 환경설계기준 작성연구(Ⅱ). 농어촌진흥공사 연구보고서.
8. 김신, 정범진. 1998. 난류입문. 대영사.
9. 김영중, 유명선, 윤진하, 오권영, 김승희. 1997. 포그노즐을 이용한 온실냉방시스템분석. 생물생산시설환경 6(1) : 48-54.
10. 김정석. 1994. 공기조화·위생공학편람 I-1, I-2, II-1, II-2. 한미출판사.
12. 김찬중. 1998. 길잡이 전산유체역학. 문운당.
13. 남상운, 김문기, 손정익. 1992. 수경재배시스템의 전열특성 및 양액냉각이 작물체온에 미치는 효과. 서울대 농학연구 17(2) : 97-104.
14. 남상운, 김문기, 손정익. 1993. 수경온실의 양액냉각부하 예측모델 개발. 생물생산시설환경 2(2) : 99-109.
15. 남상운, 김문기, 1994. 수경재배 온실의 양액냉각시스템 개발. 한국농공

- 학회지 36(3) : 113-121.
16. 남상운. 1995. 아치형 온실의 자연환기 및 차광방법 개선 연구. 안성산업대논문집 27 : 237-249.
  17. 남상운. 1996. 온실 냉방 기술의 현황 및 과제. 한국첨단농업시설협의회 연구발표자료집 : 57-88.
  18. 남상운. 1997. 농업환경조절공학. 안성산업대학교 출판부.
  19. 남상운. 2000. 온실의 냉·난방 설계용 기상자료의 비교분석. 한국생물환경조절학회 발표논문집 9(2) : 94-97.
  20. 남상운. 2000. 온실의 환기 및 냉방 설계를 위한 열평형 모델의 적용. 생물환경조절학회지 9(4) : 201-206.
  21. 민영봉. 2000. 증발냉각에 의한 냉방효과와 적합설비. 농업기계화연구소 2000 세미나 발표문 : 31-68.
  22. 박상근, 권영삼, 이용범, 임채일. 1982. 하절기 비닐하우스에 차광과 Fog Mist System의 이용이 엽채류 생육에 미치는 영향. 농시보고 24 : 106-116.
  23. 박상근, 김광용, 이용호. 1990. 하절기 양액재배시 지하수를 이용한 액온강하 효과. 농시논문집 원예편 32 : 12-25.
  24. 박재복. 1986. 플라스틱 온실의 일사량 분석과 열적 환경의 시뮬레이션에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
  25. 서원명, 윤용철. 1996. 시뮬레이션 모형에 의한 온실의 열환경 분석. 생물생산시설환경 5(2) : 215-235.
  26. 서원명, 윤용철, 박중춘, 손영걸. 1995. 우리나라 온실의 냉방시스템 도입검정. 경상대 시설원에연구 2 : 123-145.
  27. 송현갑, 금동혁, 류관희, 이기명, 이종호, 정두호. 1996. 시설원에 자동화 - 기초와 응용. 문운당.

28. 우영희. 2000. 원예작물의 고온기 효율적인 재배관리기술. 농업기계화 연구소 2000 세미나 발표문 : 3-30.
29. 우영희 외. 1994. 하절기 효율적인 하우스 온도 습도 관리에 관한 연구. 생물생산시설환경 3(1) : 58-65.
30. 우영희, 김형준, 김동억, 김완순. 1998. 여름철 유리온실의 증발냉각시 목표온도유지를 위한 필요 환기회수 및 분무수량과 냉방효율 분석. 농경농기계연구논문집 40(2) : 209-215.
31. 우영희, 이정명, 권영삼. 1996. 여름철 플라스틱 하우스에서 세무냉방과 차광이 시금치 생육에 미치는 영향과 주요 환경요인 분석. 한국원예학회지 37(5) : 638-644.
32. 우영희, 이정명, 김형준, 권영삼. 1996. 여름철 유리온실의 최고기온 추정과 냉방부하. 한국원예학회지 37(3) : 479-485.
33. 우영희, 이정명, 남윤일. 1995. 여름철 유리온실의 목표온도 유지를 위한 강제 환기 회수. 한국생물생산시설환경학회지 4(2) : 223-231.
34. 유영선. 2000. 히트펌프를 이용한 온실 냉방설비기술. 농업기계화 연구소 2000 세미나 발표문 : 69-94.
35. 윤남규. 2000. CFD 시뮬레이션에 의한 온실의 자연환기 및 공기유동 특성. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
36. 윤남규, 김문기, 남상운. 1998. 냉수파이프에 의한 온실의 제습 및 증발냉각효율. 생물생산시설환경 7(3) : 237-245.
37. 윤용철, 서원명, 이종열. 1998. 온실 냉방용 분무노즐의 분무 특성. 생물생산시설환경 7(4) : 298-310.
38. 이기명. 1995. 고온기 시설채소 안정생산을 위한 환경관리 기술. 시설원예연구 8(1) : 17-30.
39. 이범선. 2000. 에어쿨의 원리와 효과. 농업기계화 연구소 2000 세미나 발

표문 : 95-126.

40. 이병일 외. 1995. 신제 시설원예학. 향문사.
41. 이석건, 이현우, 김성식, 이종원. 1995. Fan and Pad Cooling System의 냉방효과. 생물생산시설환경학회 학술논문발표 요지 4(2) : 78-81.
42. 이석건 외. 1998. 고효율 환경조절 및 에너지 절약형 온실구조의 최적설계, 농림부 최종보고서.
43. 이성수. 2000. 패드앤팬의 원리와 효과. 농업기계화 연구소 2000 세미나 발표문 : 127-138.
44. 이양근, 김영복, 김성태, 나우정, 김창수. 1997. 농업시설 분무냉방을 위한 분사 노즐의 분무특성. 한국농업기계학회 학술대회논문집 : 74-79.
45. 이인복, T. H. Short. 1999. CFD 시뮬레이션을 이용한 연동형 온실 내 자연환기의 효율성 분석. 생물환경조절학회지 8(1) : 9-18.
46. 이재한 외. 1999. 고온기 근권 냉방방식에 따른 냉방효율과 토마토 생육에 미치는 영향. 한국생물환경조절학회 학술발표논문집 8(2) : 130-133.
47. 이정식 외. 1997. 화훼류 여름시설재배 온도하강방법 구명 연구. 농림부 최종보고서.
48. 전현철. 2000. 차광막에 의한 냉방효과. 농업기계화 연구소 2000 세미나 발표문 : 139-146.
49. 정재현, 주선종, 이경희. 1998. 근권냉방에 의한 엽채류 품질향상 시험. 충북진흥원 시험연구보고서 : 788-790.
50. 최홍립, 김현대. 1992. 실험축사의 공기유동예측을 위한  $\kappa - \epsilon$  난류모형적용. 생물생산시설환경(1) : 72-83.
51. 한정희, 정현규, 허문도. 1996. 하절기 모든형 냉방장치 개발에 관한 연구. 양돈산학연구회주관, 농림부 최종보고서.
52. Al-arifi, A.. 1999. The Influence of Shading and Evapotranspiration

- on a Ventilated Greenhouse Environment. Ph. D. dissertation, the Ohio State University.
53. Albright, L. D.. 1990. Environment Control for Animals and Plants. ASAE Textbook, Michigan, USA.
  54. Albright, M. and D. Asimakopoulos. 1996. Passive cooling of buildings, JAMES.
  55. Al-helal, I. 1998. Computational Fluid Dynamics Study of Natural Ventilation in Arid Region Greenhouse. Ph. D. dissertation, the Ohio State University.
  56. ASAE. 1997. ASAE Standards - Structures, Livestock and Environment.
  57. ASHRAE. 1993. ASHRAE Handbook of Fundamentals.
  58. Arinze, E. A., G. J. S. Choenau and R. W. Besant. 1984. A Dynamic Thermal Performance Simulation Model of an Energy Conserving Greenhouse with Thermal Storage. Transaction of the ASAE 27 : 508-519.
  59. Bailey, W. M., T. E. Divine, G. A. Kranzler and W. F McClure. 1983. Instrumentation and measurement for environmental sciences. ASAE.
  60. Bakker, J. C. et al. 1995. Greenhouse Climate Control - An Integrated Approach. Wageningen Press, Wageningen.
  61. Barre, H. J., L. L. Sammet and G. L. Nelson. 1988. Environmental and functional engineering of agricultural buidings. An avi Book.
  62. Berry, J. and D. Bjorkman. 1980. Photosynthesis response and adaptation to temperature in higher plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 31 : 491-543.

63. Bottcher, R. W. and G. R. Baughman 1990, Analysis of misting and ventilation cycling for broiler housing, Transactions of the ASAE 33(3) : 925-932.
64. Bottcher, R. W., G. R. Baughman and D. J. Kesler. 1989. Evaporative cooling using a pneumatic misting system. Transactions of the ASAE 32(2) : 671-676.
65. Bottcher, R. W., G. R. Baughman, R. S. gates and M. B. Timmons. 1991. Characterizing efficiency of misting systems for poultry. Transactions of the ASAE 34(2) : 586-590.
66. Boulard, T. and A. Baille. 1993. A Simple Greenhouse Climate Control Model Incorporating Effects of Ventilation and Evaporative Cooling. Agri. and Forest Meteorology 65 : 145-157.
67. Boulard, T. and A. Baille. 1995. Modeling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. J. Agric. Engng. Res. 61 : 37-48.
68. Boulard, T. and B. Draoui. 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents : Measurements and data analysis. J. Agric. Engng. Res. 61 : 27-36.
69. Boulard, T. et al. 1996. The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouse. Agri. and forest meteorology 79 : 61-77.
70. Boulard, T. et al. 1997. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. J. Agric. Engng. Res. 67 : 249-266.
71. Boulard, T. G. Papadakis, C. Kittas and M Mermier. 1997. Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse. Agri. and Forest Meteorology. 88 : 111-119.

72. Bouse, L. F. 1994. Effect of nozzle type and operation on spray droplet size. Transactions of the ASAE 35(7) : 1389-1400.
73. Brockett, B. L. and L. D. Albright. 1987. Natural ventilation in single airspace buildings. J. Agric. Engng. Res. 37 : 141-154.
74. Bruce, J. M. 1982. Ventilation of a model livestock building by thermal buoyancy. Transactions of the ASAE 25(6) : 1724-1726.
75. Chen, Y. S. and S. W. Kim. 1988. Computation of turbulent flows using an extended  $\kappa - \epsilon$  model. NASA CR-179204.
76. Clark, J. A., K. Gregson and R. A. saffell. 1987. Computer Applications in Agricultural Environments. Butterworths.
77. Esmay, M. L. and J. E. John. 1986. Environmental Control for Agricultural Buildings. The AVI Publishing Company, Inc.
78. Faye, C. M. and J. D. Parker. 1994. Heating, Ventilating, and Air Conditioning - Analysis and Design. John Wiley & Sons, Inc.
79. Fernandez, J. E. and B. J. Baildey. 1992. Measurement and Prediction of greenhouse ventilations rates. Agri. and Forest Meteorology 58 : 229-245.
80. Fitter, A. H. and R. K. M. Hay. 1987. Environmental Physiology of Plants. Academic Press.
81. Fluent Inc. 1998. FLUENT5 Users Guide.
82. Gates, R. S., M. E. Timmons and R. W. Bottcher. 1991. Numerical Optimization of Evaporative Misting Systems. Transactions of the ASAE, 34(1) : 275-280.
83. Hanan, J. J.. 1997. Greenhouses(Advanced Technology for Protected Horticulture). CRC.

84. Harral, B. B. and C. R. Boon. 1997. Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *J. Agric. Engng. Res.* 66 : 221-228.
85. Hellicson. 1989. 농업시설물의 환기. 최홍림 역. 대광문화사.
86. Holman, J. P.. 1990. Heat Transfer. McGraw-Hill.
87. Jan, E. E., G. A. Giacomelli and K. C. Ting. 1991. Validation of a Greenhouse Cooling Model. ASAE paper No.914040.
88. John, F. W.. 1991. Computational Fluid Dynamics - An Introduction. A von Karman Institute Book.
89. John, R., P. E. Walk, K. Will and P. E. Brown. 1997. Evaporative air conditioning handbook. The Fairmont Press.
90. Jolliet, O.. 1994. A model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouse. *J. Agric. Engng. Res.* 51 : 23-37.
91. Kacira M., T. H. Short and R. R. Stowell. 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated, multi-span, sawtooth greenhouses. *Transactions of the ASAE* 41(3) : 833-836.
92. Kittas C., T. Boulard, M. Mermier and G. Papadakis. 1996. Wind induced air exchange rate in a greenhouse tunnel with continuous side openings. *J. Agric. Engng. Res.* 65 : 37-49.
93. Kittas C., T. Boulard and G. Papadakis. 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings : Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE* 40(2) : 415-425.
94. Klaus A. H. 1989. Computational Fluid Dynamics for Engineers. Engineering Education System, USA.
95. Krause, G. H. and E. Weis. 1991. Chlorophyll Fluorescence and

- photosynthesis. *Ann. Rev. Physiol. Plant Mol. Biol.* 42 : 313-349.
96. Lee, I. B.. 1998. Fluid dynamic simulation and validation of a naturally ventilated multi-span greenhouse. Ph.D. Thesis, The Ohio State University.
97. Lee, I. B. and T. H. Short. 1998. A CFD model of volumetric flow rates for a naturally ventilated muti-span greenhouse. ASAE paper No.987011.
98. Maron, M. J. and R. J. Lopez. 1991. Numerical Analysis - A practical approach. Wadsworth, Inc.
99. Matsuoka, T. and H. Suhardiyanto. 1992. Thermal and flowing aspects of growing petty tomato in cooled NFT solution during summer. *Environ. Control in Biol.* 30 : 119-125.
100. Michael, T. and S. M. Jeter. 1995. An experimental investigation of water evaporation into low-velocity air currents. *ASHRAE Transactions* 101(1): 90-96.
101. Miguel, A. F., A. M. Silva and R. Rosa. 1994. Solar Irradiation Inside a Single-Span Greenhouse with Shading Screens. *J. Agric. Engng. Res.* 59(1) : 61-72.
102. Mills, A. F. 1992. Heat Transfer. Irwin, Boston, USA.
103. Mistriotis, A. et al. 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agri. and Forest Meteorology.* 85 : 217-228.
104. Mistriotis, A. et al. 1997. Computational analysis of ventilation in greenhouse at zero- and low-wind-speeds. *Agri. and Forest Meteorology.* 88 : 121-135.

105. Montero, J. I. and A. Anton. 1994. Greenhouse Cooling During Warm Periods. *Acta Horticulturae* 357 : 49-62.
106. Nederhoff, E. M., J. van de Vooren and A. J. Udink. 1985. A practical tracer gas method to determine ventilation in greenhouses. *J. Agric. Engng. Res.* 31 : 309-319.
107. Nelson, P. V. 1995. 온실의 운영과 관리. 농어촌진흥공사 역. 농어촌진흥공사.
108. Papadakis, G., M. Mermier, J. F. Meneses and T. Boulard. 1996. Measurement and analysis of air exchange rate in a greenhouse with continuous roof and side opening. *J. Agric. Engng. Res.* 63 : 219-228.
109. Reddy, J. N. and D. K. Gartling. 1994. The finite element method in heat transfer and fluid dynamics. CRC Press.
110. Rynk, R. and F. Green. 1985. Greenhouse root zone soil cooling. ASAE paper No. 85-4532.
111. Seki, H., T. Komori and T. Takada. 1995. Mathematical modeling on greenhouse microclimate with the combination of population dynamics and transport process analysis. *Acta Horticulturae* 399 : 215-222.
112. Sidahmed, M. 1996. A model for predicting the droplet size from liquid sheets in airstreams. *Transactions of the ASAE* 39(5) : 1651-1655.
113. Suhardiyanto, S. and T. Matsuoka. 1992. Studies on a zone cooling system in a greenhouse. *Environ. Control in Biol.* 30 : 143-151.
114. Suhas, V. P. 1997. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. 이재현 역. 대한교과서주식회사.
115. Takakura, T.. 1993. Climate under cover. Kluwer, The Netherlands.

116. Thomas, E. and P. E. Maul. 1995. Introduction to Heating, ventilation, and Air Conditioning(How to Calculate Heating and Cooling Loads). Business News Publishing Company.
117. Versteeg, H. K. and W. Malalasekera. 1995. An introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method. Longman.
118. Vijay, K. G.. 1998. Applied Computational Fluid Dynamics. Marcel Dekker, Inc., USA.
119. Walker, J. N. and D. J. Cotter. 1968. Cooling of greenhouses with various water evaporation systems, Transactions of the ASAE 11(1) : 116-119.
120. Walker, J. N. and G. A. Duncan. 1978. Engineering considerations of energy problems in protected cultivation. Acta Horticulturae 76 : 67-76.
121. Walker, J. N.. 1978. Surface Heating Greenhouses with Power Plant Cooling Water. Transactions of the ASAE 21(2) : 322-324.
122. Woodruff, V. I.. 1997. Analysis of vent designs for naturally ventilated gutter-connected greenhouses using FLUENT. M. S. Thesis, The Ohio State University.
123. Worley, M. S. and H. B. Manbeck. 1995. Modeling particle transport and air flow in ceiling inlet ventilation systems. Transactions of the ASAE 38(1) : 231-239.
124. Zhang, J. S., K. A. Janni and L. D. Jacobson. 1989. Modeling natural ventilation induced by combined thermal buoyancy and wind. Transactions of the ASAE 32(6) : 2165-2174.
125. 古在豊樹, 權 在永, 林 眞紀夫, 渡部一郎. 1985. 温室の冷房負荷に關す

- る 研究(1) 夏期夜間の 負荷特性. 農業氣象. 41(2) : 121-130.
126. 古在豊樹, 權 在永, 林 眞紀夫, 渡部一郎, 新古忠之, 桶口春三. 1986. 温室の冷房負荷に關する研究(2) 夏期夜間 負荷特性輕減. 農業氣象. 41(4) : 351-357.
127. 古在豊樹 外. 1985. 温室におけるヒートポンプ利用-夏期夜間冷房システムの運轉特性. 農業氣象 41(3) : 231-240.
128. 吉田裕一, 大井美知男, 藤本辛平. 1987. NFTにおける培養液冷却の効果. 農業および園藝 62 : 650-652.
129. 農業施設學會. 1990. 農業施設ハンドブック. 東洋書店.
130. 三原義秋, 古牧 弘. 1973. 温室の細霧冷房(fog & fan)法の實施例について. 農業氣象 28 : 231-236.
131. 武富 猛. 1979. ハウスの噴霧冷房による夏季高温對策. 農業および園藝 54 : 648-652.
132. (社)日本施設園藝協會. 1994. 施設園藝ハンドブック.
133. 矢吹萬壽 外. 1992. 農業環境調節工學. 이석건 역. 도서출판 좋은 사람들.
134. 奥島里美, 佐瀬勘紀, 前川孝昭, 池田厚男. 1998. フェンロ型温室における風力換氣時の氣流性状. 農業施設 29(3) : 159-167.
135. 日本施設園藝協會. 1994. 施設園藝ハンドブック, 園藝情報センター.
136. 立花一雄 外. 1980. 施設園藝ハウスの設計と施工, オーム社.

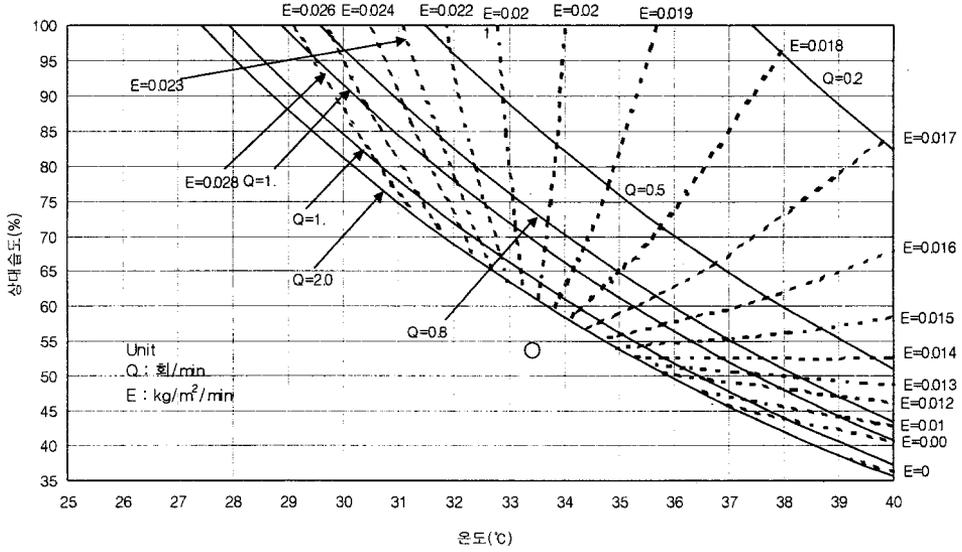
# 부 록

1. 지역별 포그냉방설계용 VETH선도
2. 냉방 목표온도별 필요 환기회수 및 분무수량

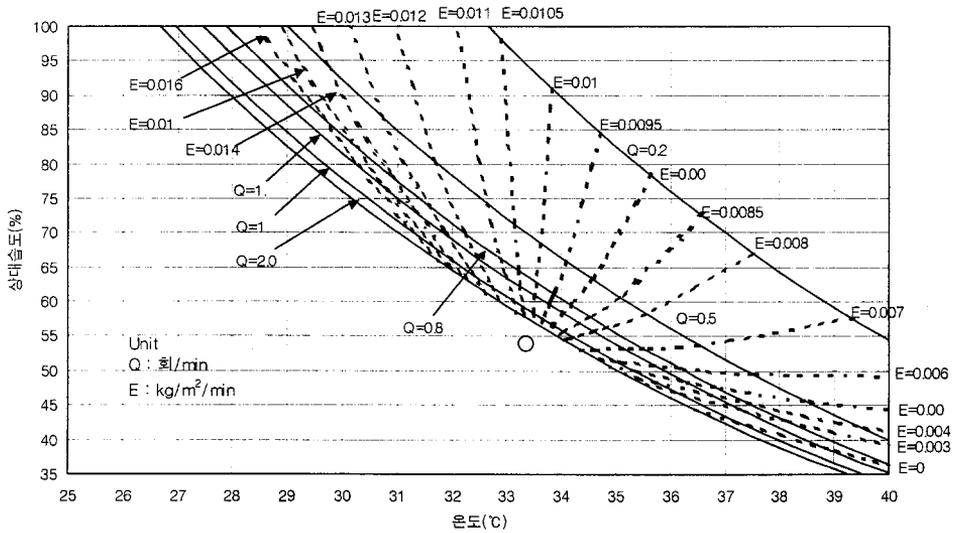
여 백

# 부록 1. 지역별 포그냉방설계용 VETH선도

## 1. 강릉

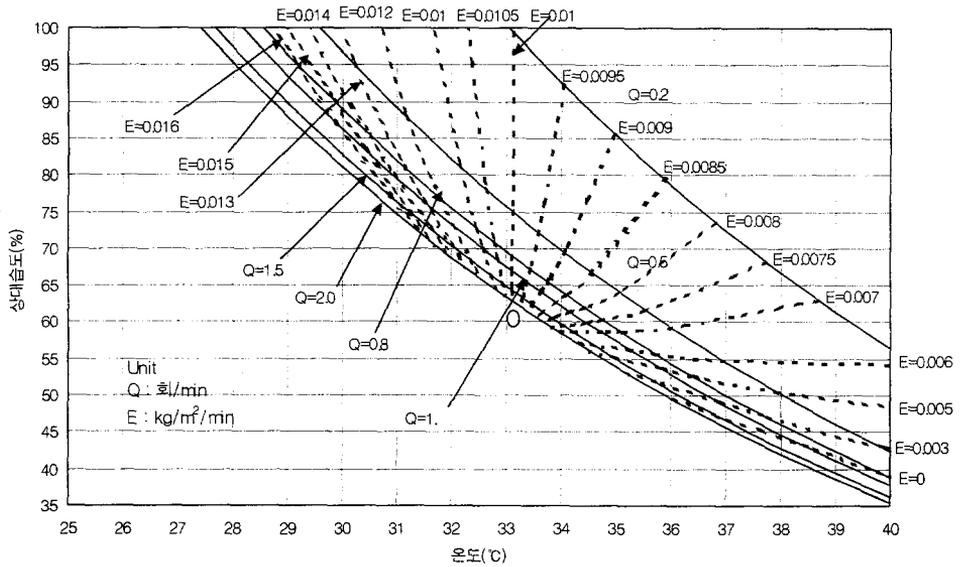
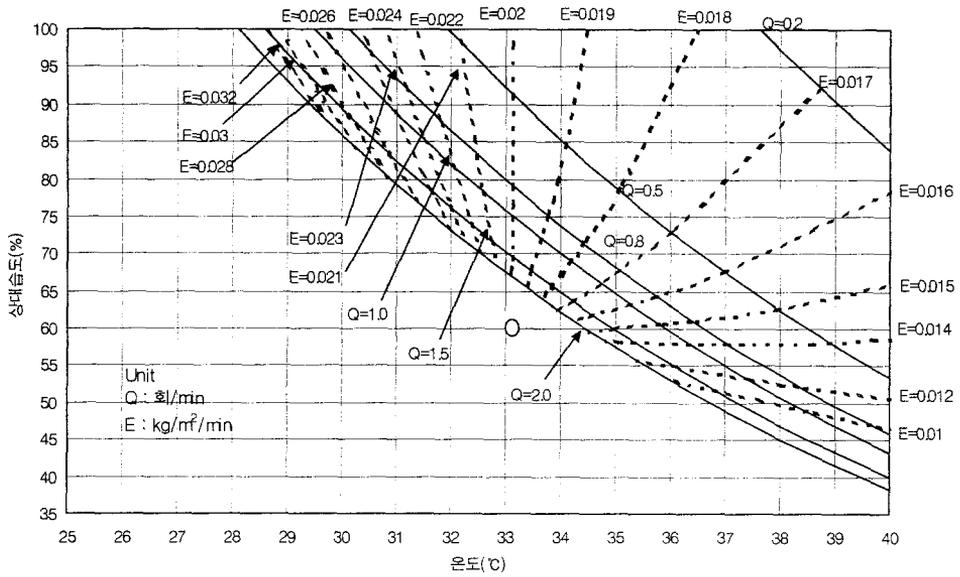


(a) 무차광

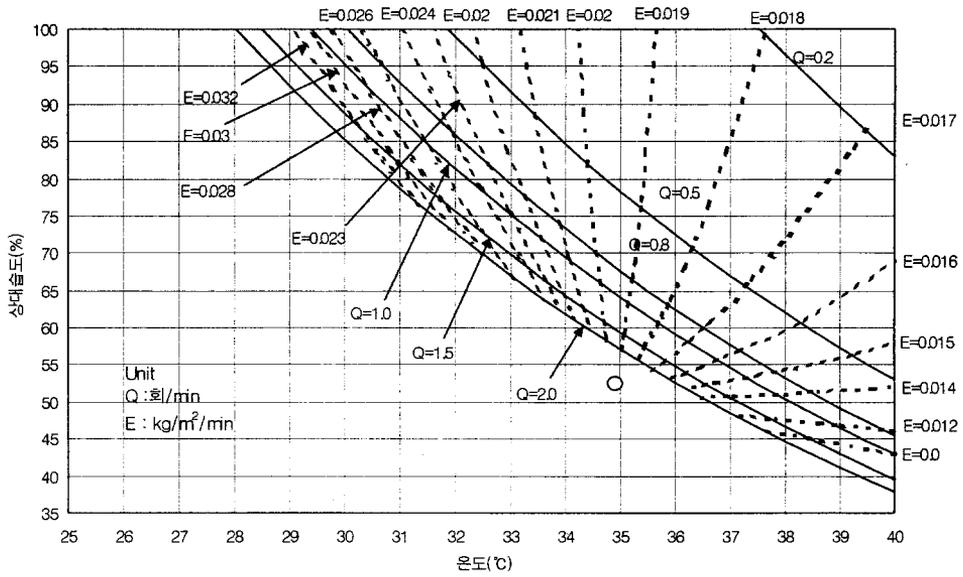


(b) 차광 50%

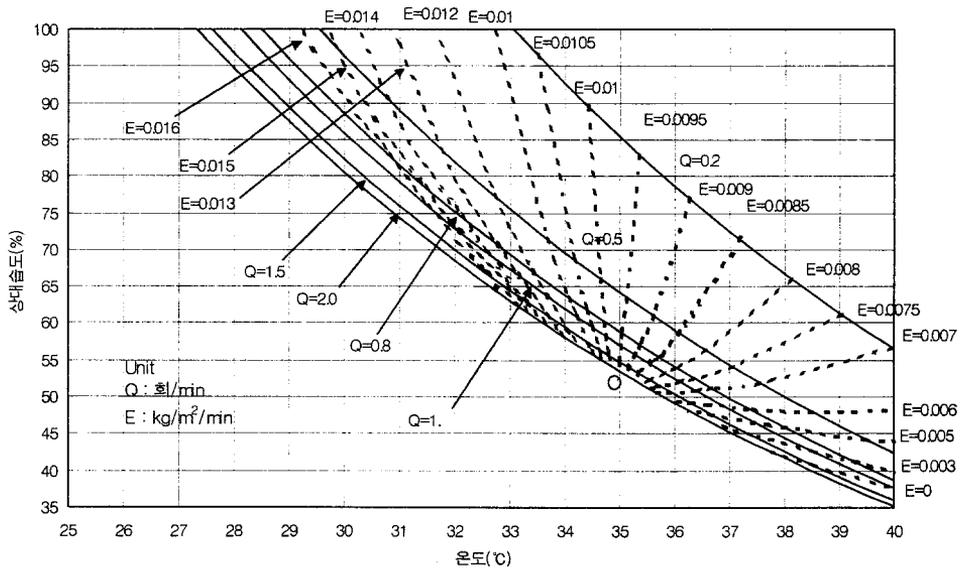
## 2. 광주



### 3. 대구

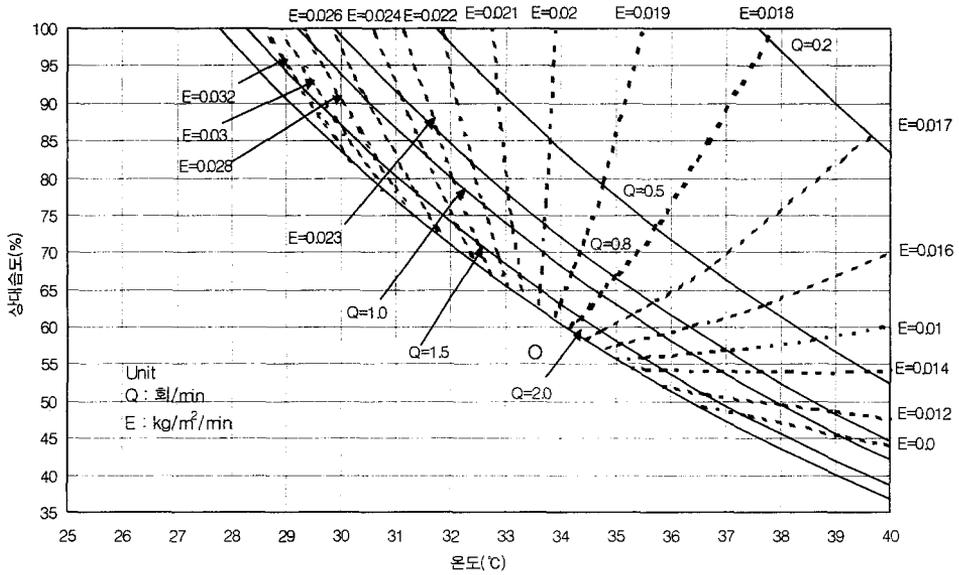


(a) 무차광

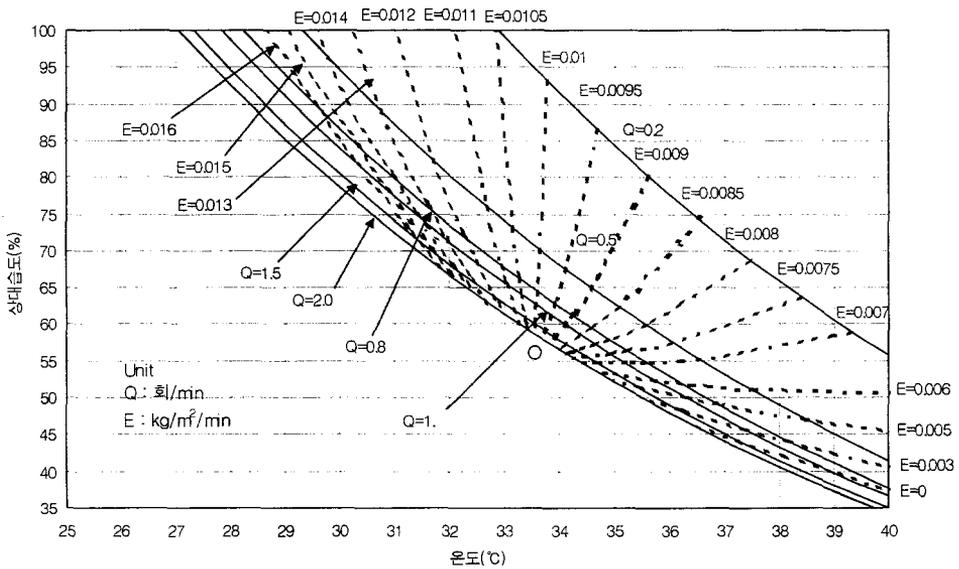


(b) 차광 50%

#### 4. 대전

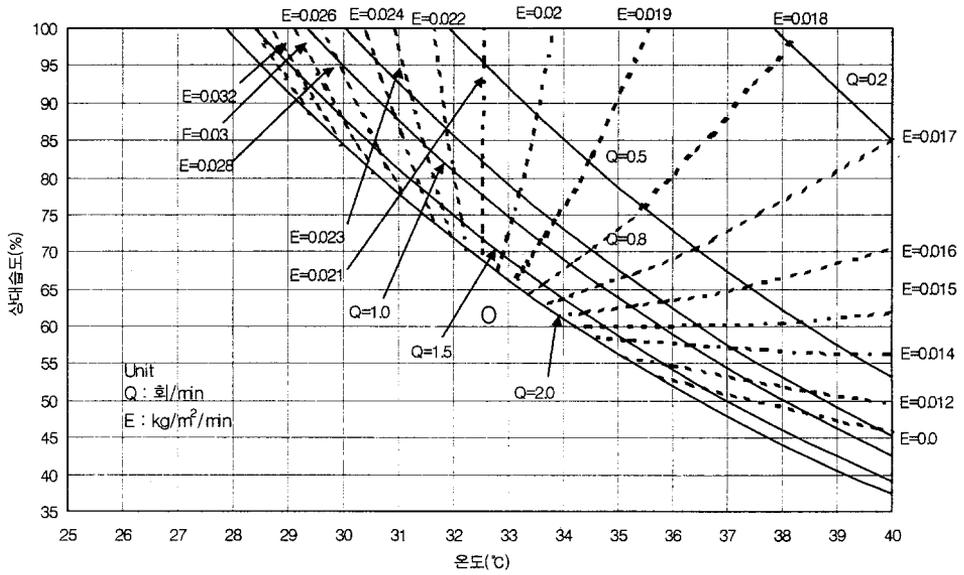


(a) 무차광

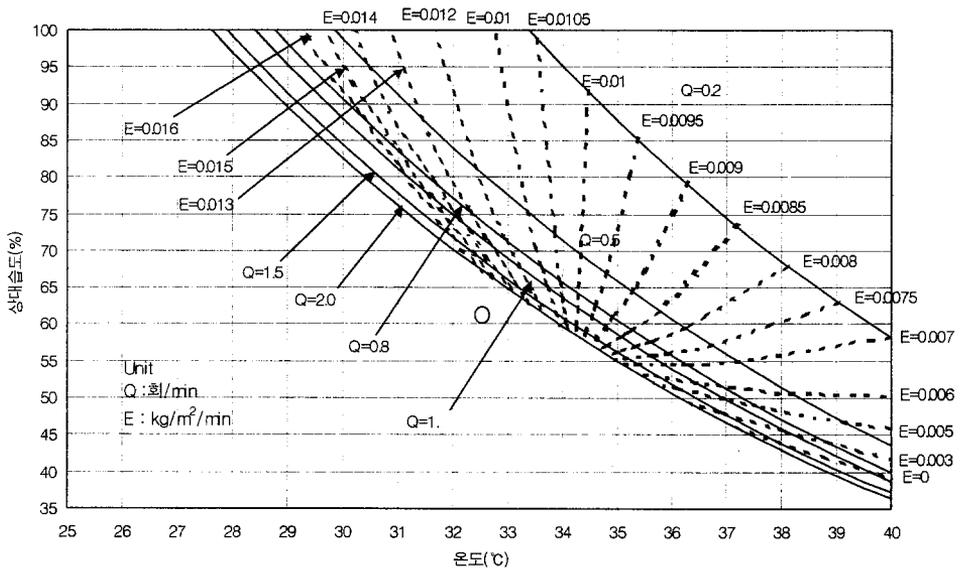


(b) 차광 50%

5. 목포

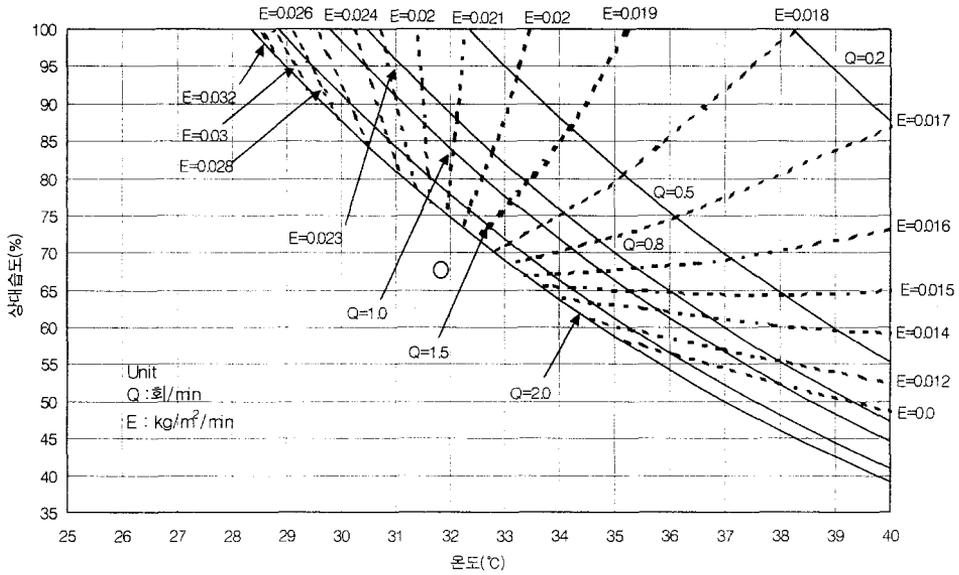


(a) 무차광

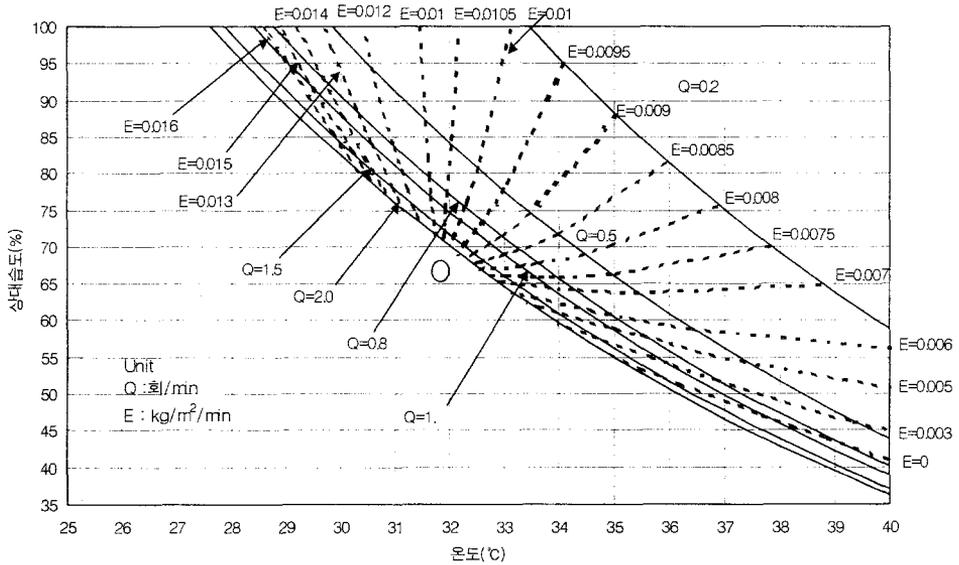


(b) 차광 50%

6. 부산

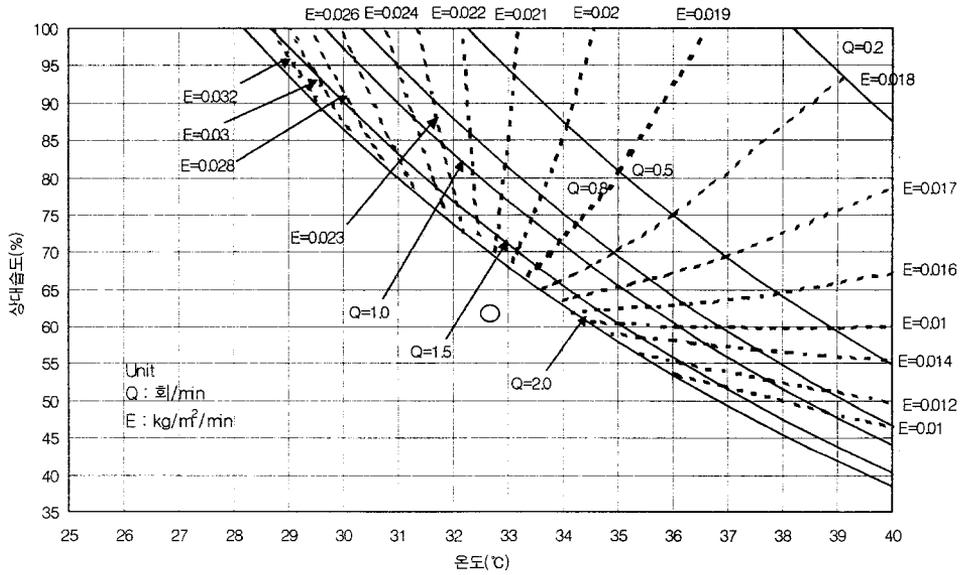


(a) 무차광

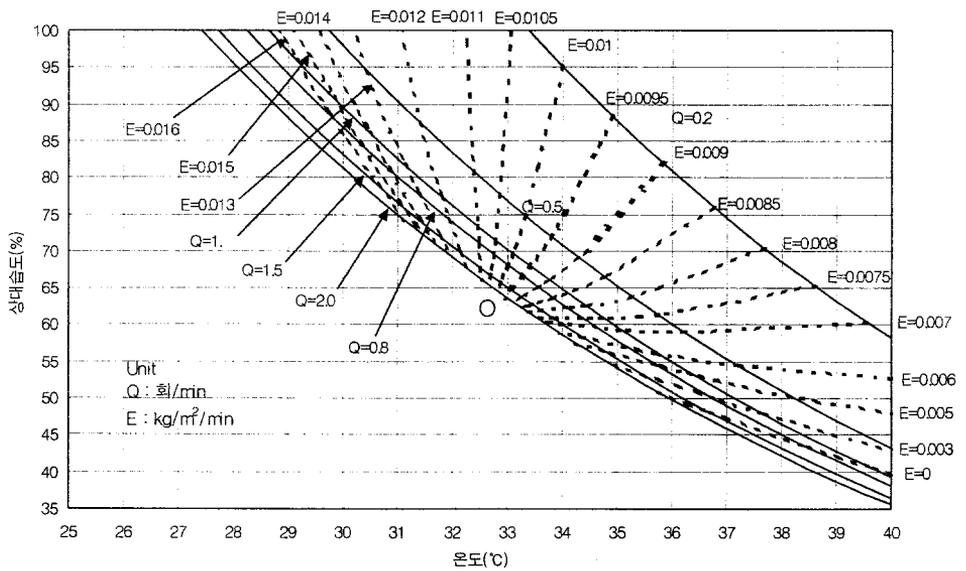


(b) 차광 50%

## 7. 서산

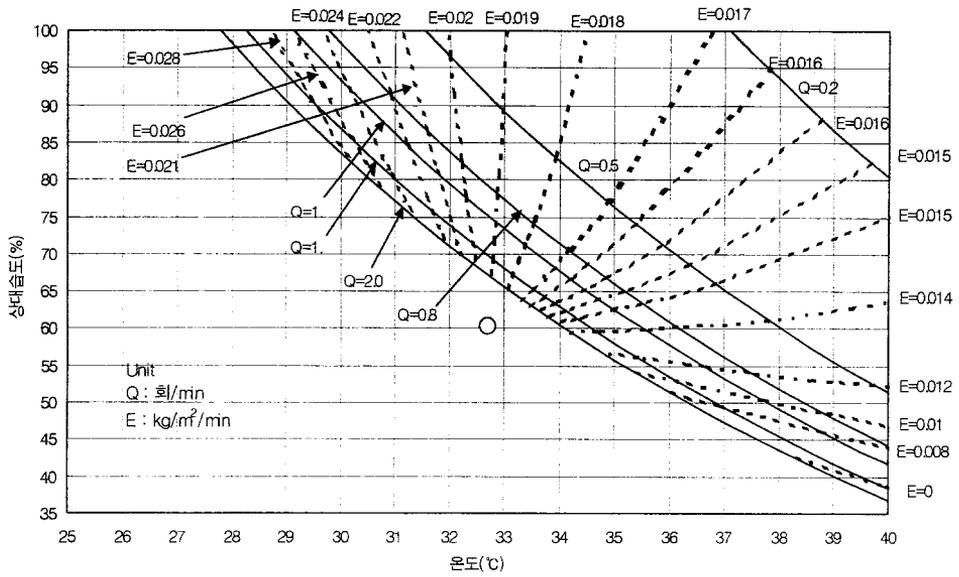


(a) 무차광

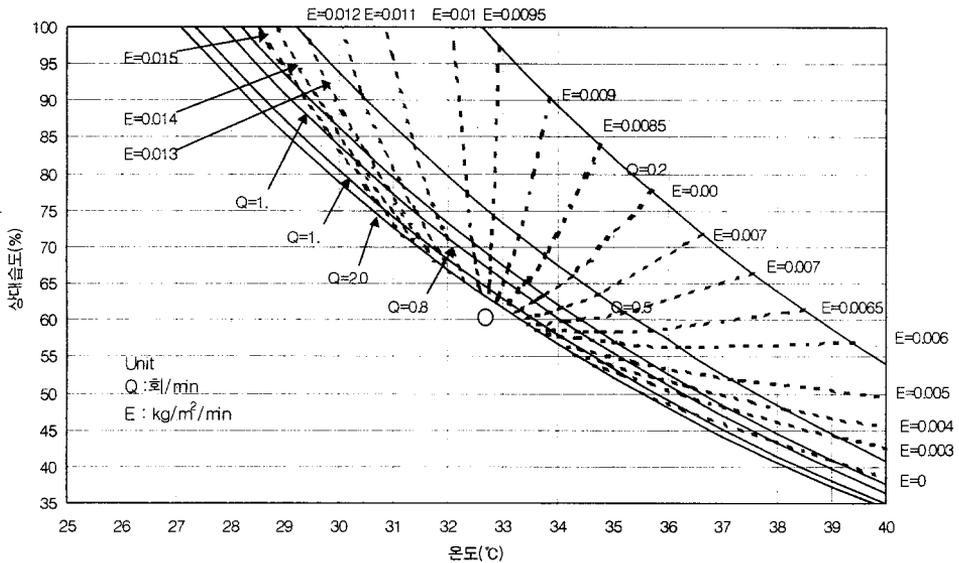


(b) 차광 50%

8. 서울

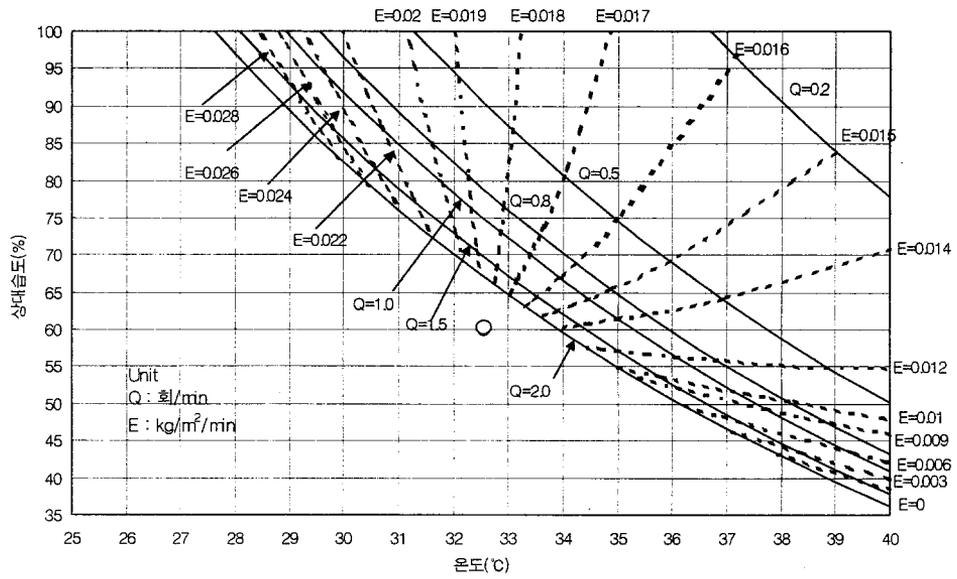


(a) 무차광

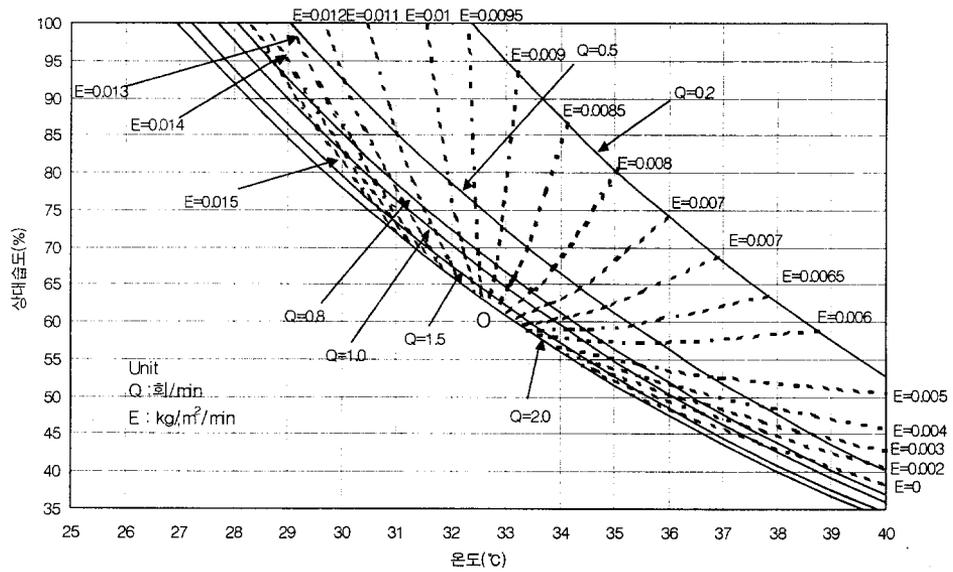


(b) 차광 50%

9. 수원

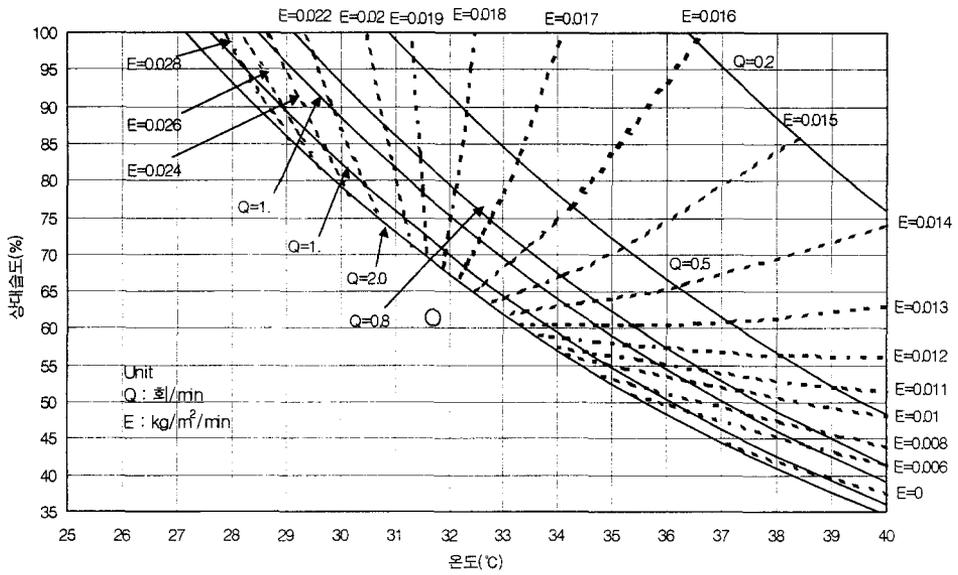


(a) 무차광

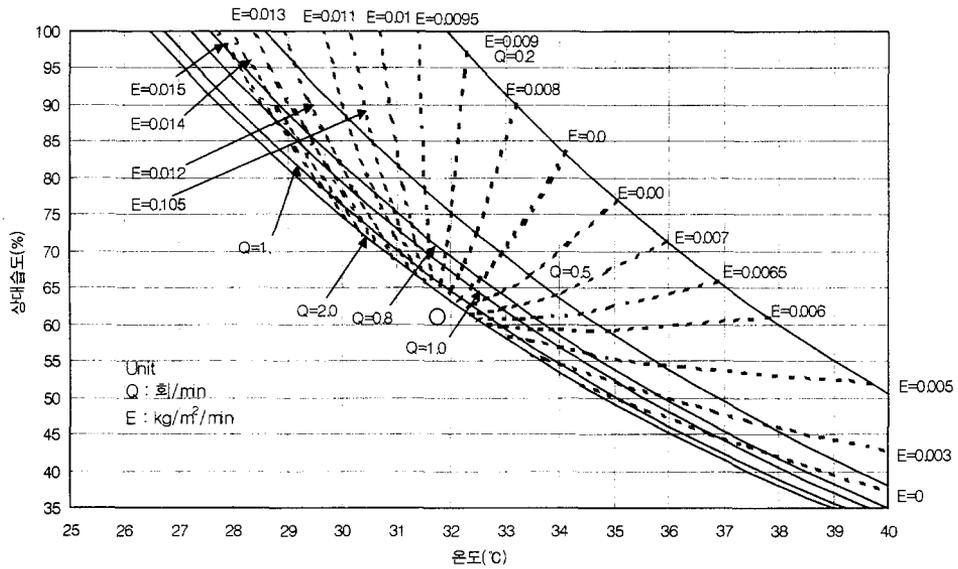


(b) 차광 50%

10. 인천

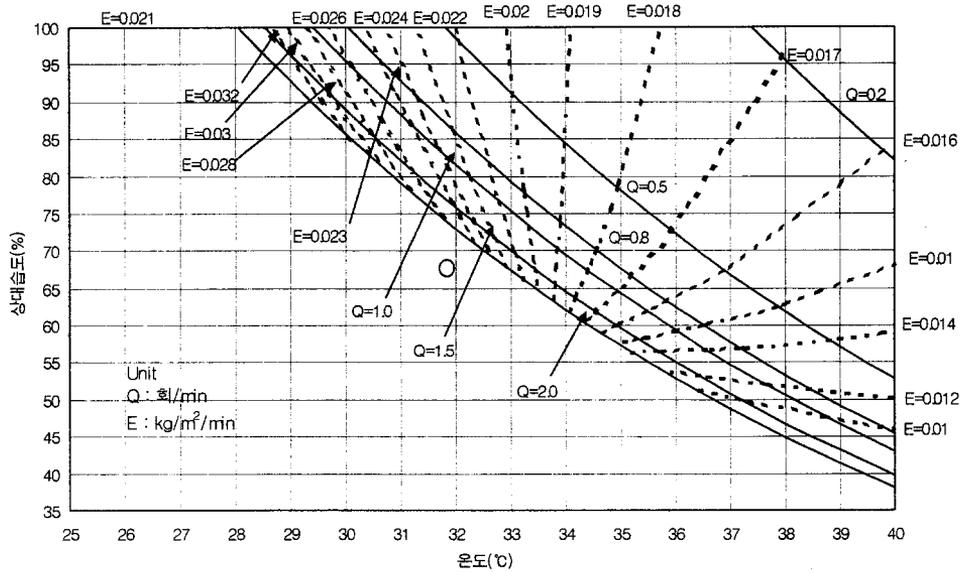


(a) 무차광

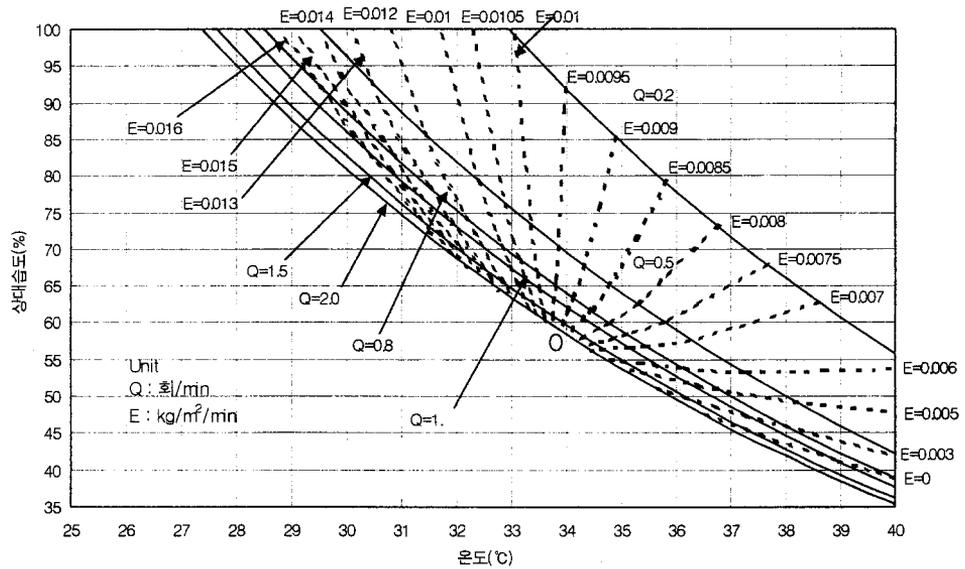


(b) 차광 50%

11. 전주

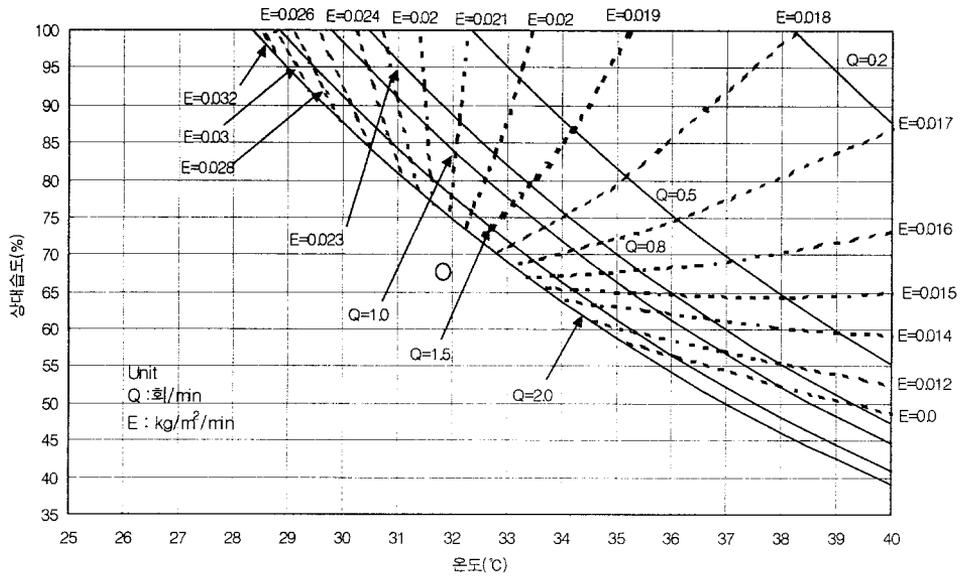


(a) 무차광

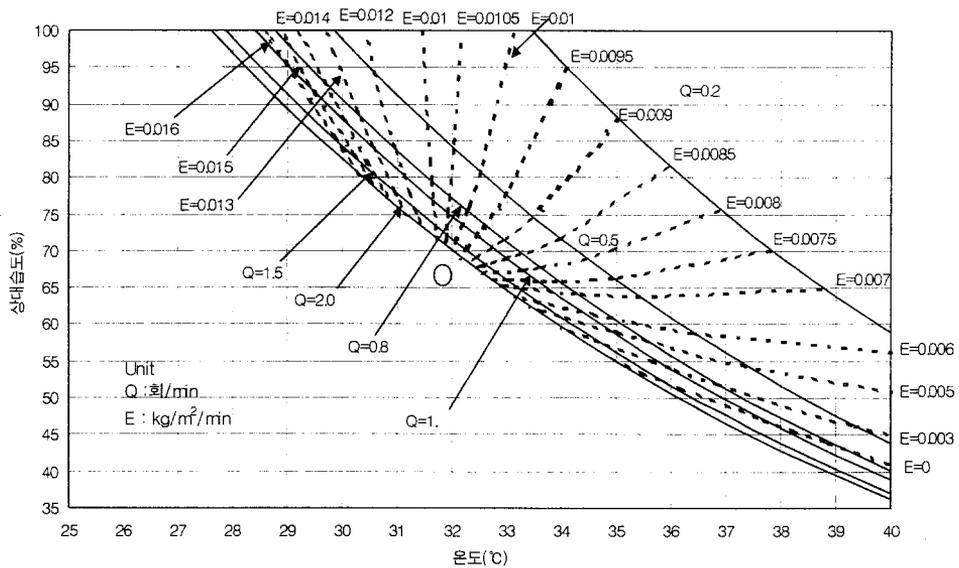


(b) 차광 50%

12. 제주

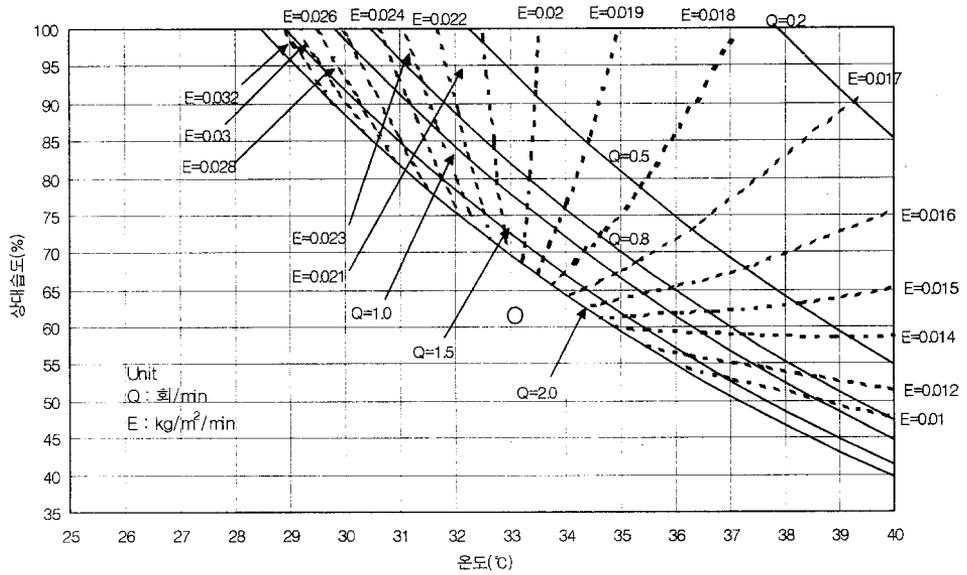


(a) 무차광

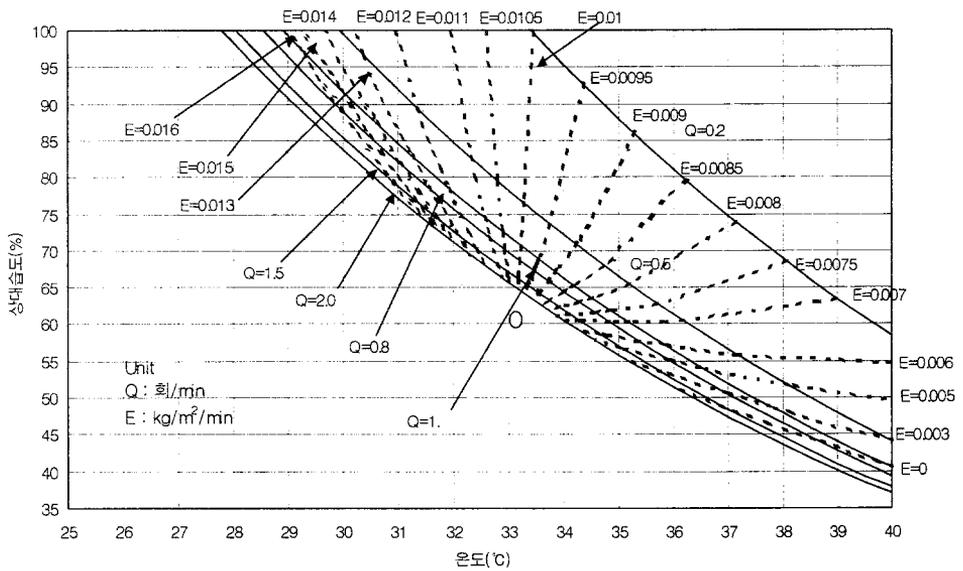


(b) 차광 50%

13. 진주

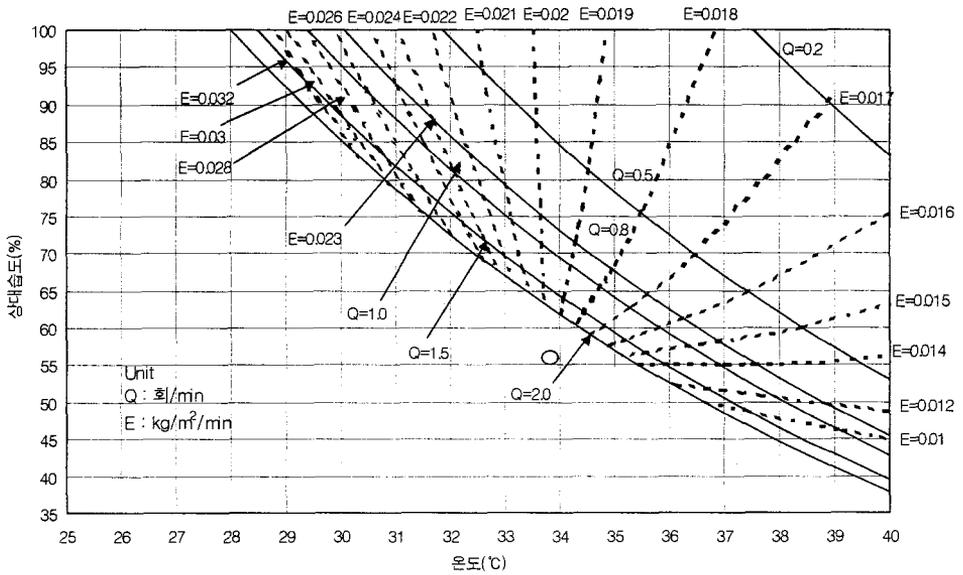


(a) 무차광

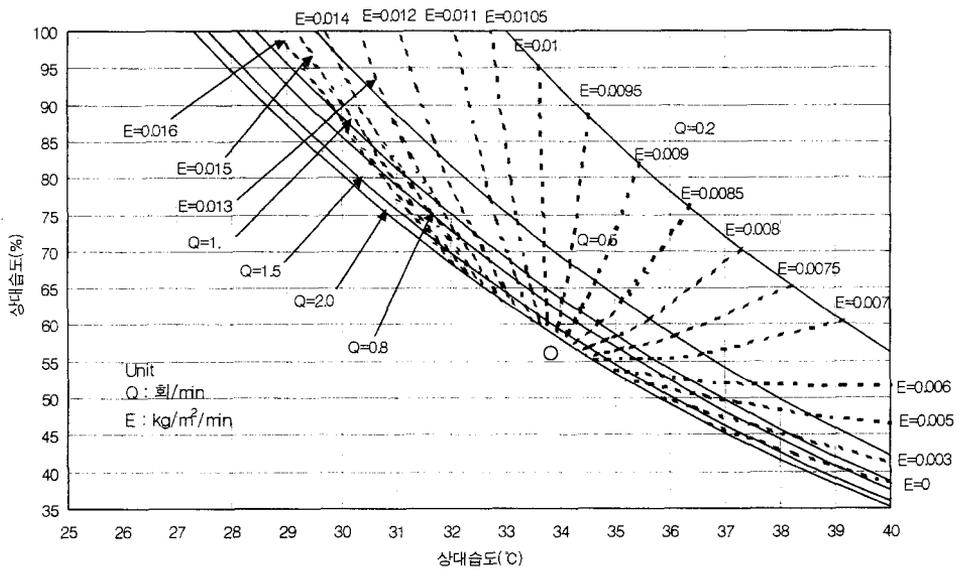


(b) 차광 50%

14. 청주

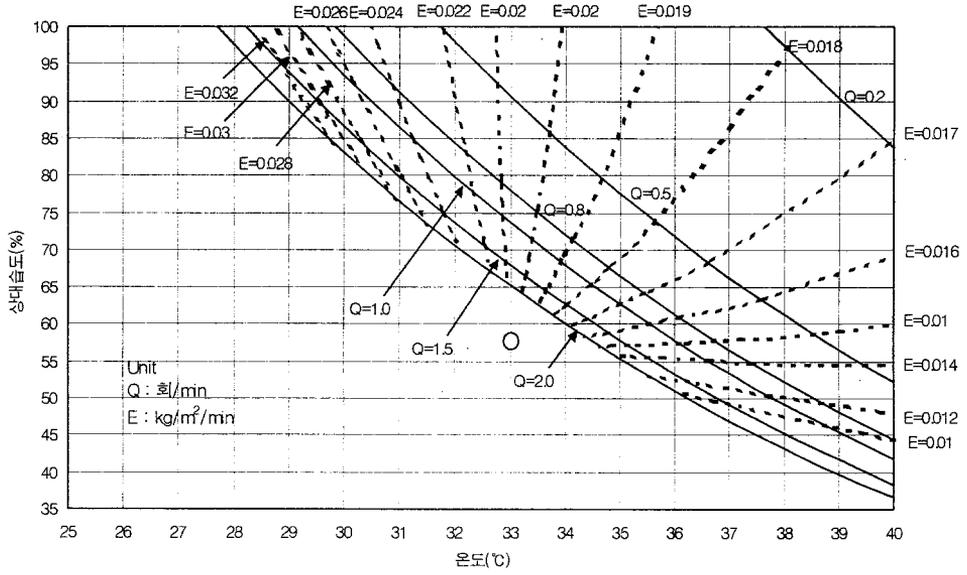


(a) 무차광

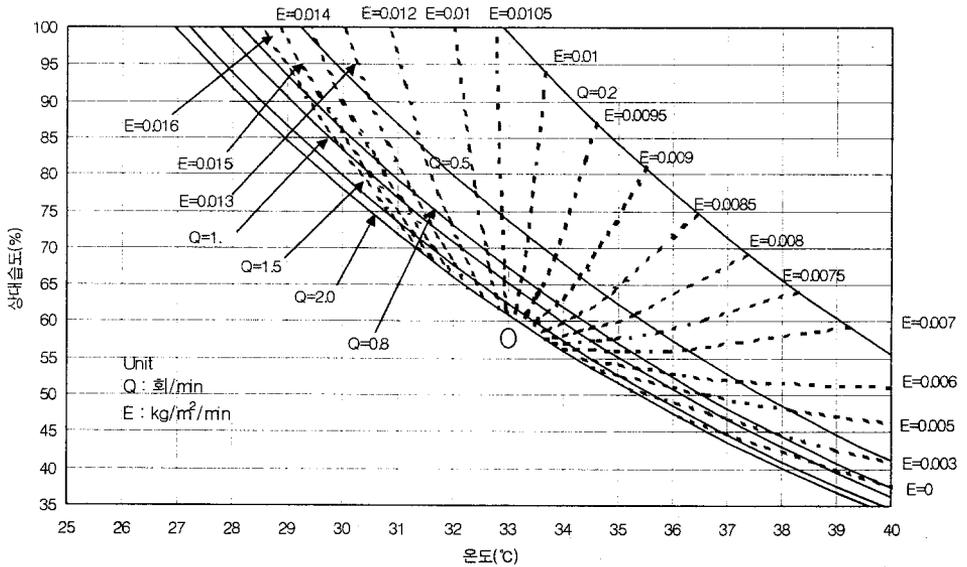


(b) 차광 50%

15. 춘천

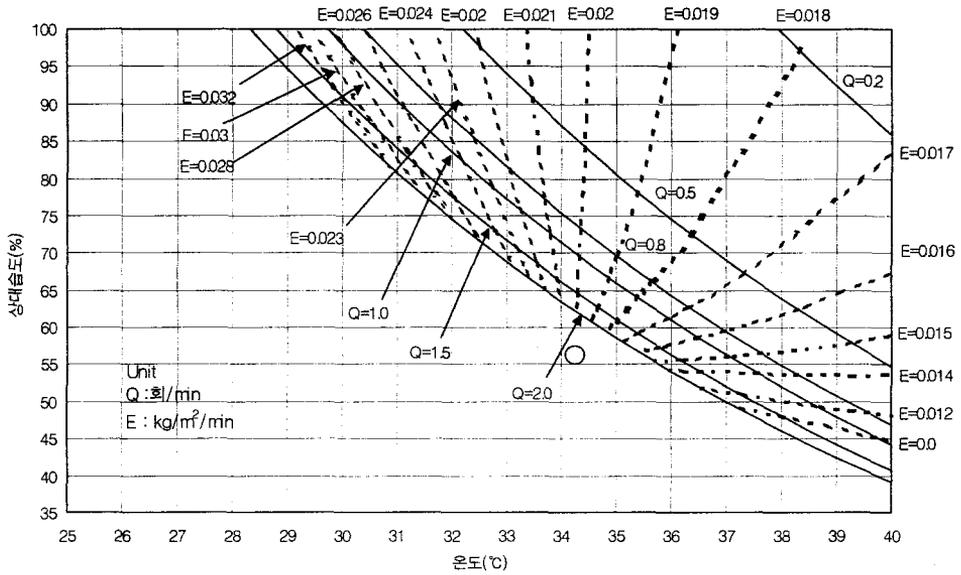


(a) 무차광

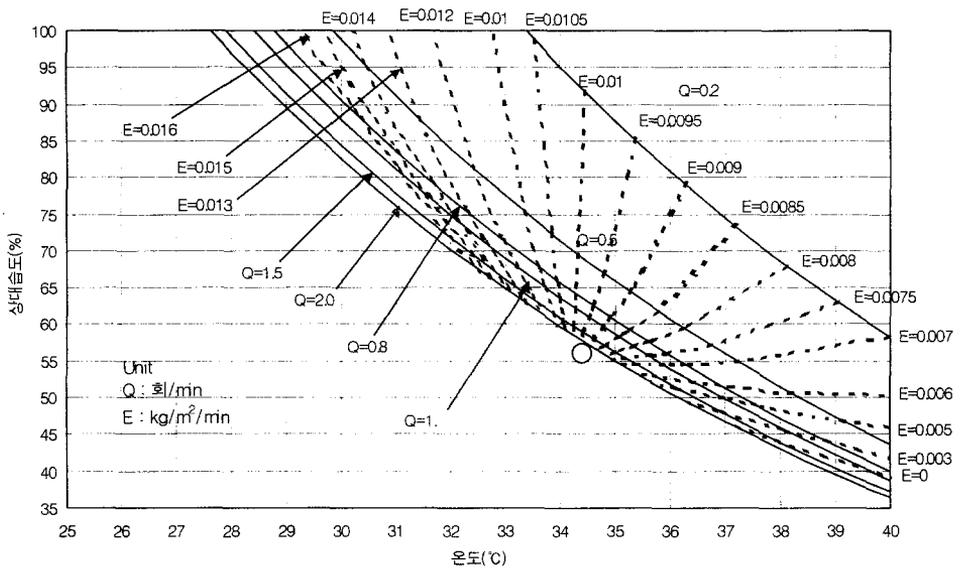


(b) 차광 50%

16. 포항



(a) 무차광



(b) 차광 50%

부록 2. 냉방 목표온도별 필요 환기회수 및 분무수량

1. 강릉

냉방 목표온도 (℃)	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	20.6	99.1
	1.0	***	***	22.6	96.0
	1.5	39.0	99.3	27.6	91.8
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.3	92.2
	0.8	28.6	96.7	17.2	84.1
	1.0	29.9	91.5	18.5	81.5
	1.5	33.0	84.6	21.6	77.8
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.5	96.0	13.0	78.2
	0.8	25.2	82.5	13.8	71.3
	1.0	25.7	78.0	14.3	69.1
	1.5	27.0	71.9	15.6	66.0
34	0.2	***	***	14.7	89.7
	0.5	22.1	82.1	10.7	66.3
	0.8	21.8	70.3	10.4	60.4
	1.0	21.6	66.4	10.2	58.5
	1.5	21.0	61.2	9.6	55.9

2. 광주

냉 방 목표온도 (℃)	환 기 회 수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	22.7	98.8
	1.5	***	***	27.8	94.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	94.6
	0.8	28.6	99.0	17.3	86.6
	1.0	29.9	93.9	18.6	83.9
	1.5	33.1	87.0	21.8	80.4
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.4	98.0	13.1	80.4
	0.8	25.2	84.6	13.9	73.5
	1.0	25.8	80.1	14.4	71.2
	1.5	27.2	74.1	15.8	68.2
34	0.2	***	***	11.0	91.5
	0.5	22.1	83.9	10.8	68.2
	0.8	21.8	72.2	10.5	62.4
	1.0	21.6	68.3	10.3	60.4
	1.5	21.2	63.1	9.8	57.8

3. 대구

냉 방 목표온도 (℃)	환 기 회 수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	22.7	98.8
	1.5	***	***	27.8	94.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	94.6
	0.8	28.6	99.0	17.3	86.6
	1.0	29.9	93.9	18.6	83.9
	1.5	33.1	87.0	21.8	80.4
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.4	98.0	13.1	80.4
	0.8	25.2	84.6	13.9	73.5
	1.0	25.8	80.1	14.4	71.2
	1.5	27.2	74.1	15.8	68.2
34	0.2	***	***	11.0	91.5
	0.5	22.1	83.9	10.8	68.2
	0.8	21.8	72.2	10.5	62.4
	1.0	21.6	68.3	10.3	60.4
	1.5	21.2	63.1	9.8	57.8

4. 대전

냉방 목표온도 (℃)	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	22.7	98.8
	1.5	***	***	27.8	94.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	94.6
	0.8	28.6	99.0	17.3	86.6
	1.0	29.9	93.9	18.6	83.9
	1.5	33.1	87.0	21.8	80.4
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.4	98.0	13.1	80.4
	0.8	25.2	84.6	13.9	73.5
	1.0	25.8	80.1	14.4	71.2
	1.5	27.2	74.1	15.8	68.2
34	0.2	***	***	11.0	91.5
	0.5	22.1	83.9	10.8	68.2
	0.8	21.8	72.2	10.5	62.4
	1.0	21.6	68.3	10.3	60.4
	1.5	21.2	63.1	9.8	57.8

5. 목포

냉 방 목표온도 (℃)	환 기 회 수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	22.7	98.8
	1.5	***	***	27.8	94.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	94.6
	0.8	28.6	99.0	17.3	86.6
	1.0	29.9	93.9	18.6	83.9
	1.5	33.1	87.0	21.8	80.4
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.4	98.0	13.1	80.4
	0.8	25.2	84.6	13.9	73.5
	1.0	25.8	80.1	14.4	71.2
	1.5	27.2	74.1	15.8	68.2
34	0.2	***	***	11.0	91.5
	0.5	22.1	83.9	10.8	68.2
	0.8	21.8	72.2	10.5	62.4
	1.0	21.6	68.3	10.3	60.4
	1.5	21.2	63.1	9.8	57.8

6. 부산

냉 방 목표온도 (℃)	환 기 회 수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	22.7	98.8
	1.5	***	***	27.8	94.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	94.6
	0.8	28.6	99.0	17.3	86.6
	1.0	29.9	93.9	18.6	83.9
	1.5	33.1	87.0	21.8	80.4
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.4	98.0	13.1	80.4
	0.8	25.2	84.6	13.9	73.5
	1.0	25.8	80.1	14.4	71.2
	1.5	27.2	74.1	15.8	68.2
34	0.2	***	***	11.0	91.5
	0.5	22.1	83.9	10.8	68.2
	0.8	21.8	72.2	10.5	62.4
	1.0	21.6	68.3	10.3	60.4
	1.5	21.2	63.1	9.8	57.8

7. 서산

냉방 목표온도 (℃)	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	***	***
	1.5	***	***	25.8	97.7
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.0	97.9
	0.8	***	***	16.4	89.6
	1.0	29.4	97.3	17.4	86.8
	1.5	31.8	90.1	19.8	83.1
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	12.7	83.3
	0.8	25.0	87.9	13.0	76.1
	1.0	25.3	83.2	13.3	73.8
	1.5	25.8	76.9	13.8	70.7
34	0.2	***	***	11.2	95.0
	0.5	22.4	87.4	10.4	70.8
	0.8	21.6	75.1	9.6	64.7
	1.0	21.1	71.0	9.1	62.7
	1.5	19.8	65.6	7.8	60.0

8. 서울

냉방 목표온도 (℃)	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	20.5	98.7
	1.5	***	***	24.8	94.7
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	13.9	93.8
	0.8	26.1	98.1	15.4	86.3
	1.0	27.1	93.3	16.4	83.8
	1.5	29.6	86.8	18.8	80.5
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	22.3	96.4	11.6	79.7
	0.8	22.7	83.8	12.0	73.3
	1.0	23.0	79.5	12.2	71.2
	1.5	23.6	73.9	12.9	68.3
34	0.2	***	***	10.0	89.3
	0.5	20.0	82.5	9.3	67.6
	0.8	19.3	71.5	8.5	62.2
	1.0	18.8	67.8	8.1	60.3
	1.5	17.6	62.9	6.9	57.9

9. 수원

냉방 목표온도 (℃)	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	19.9	97.6
	1.5	***	***	24.2	93.8
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	13.4	92.5
	0.8	25.1	96.5	14.8	85.3
	1.0	26.0	91.8	15.8	82.8
	1.5	28.4	85.6	18.2	79.6
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	21.3	94.4	11.1	78.5
	0.8	21.7	82.3	11.4	72.3
	1.0	21.9	78.2	11.6	70.3
	1.5	22.4	72.8	12.2	67.5
34	0.2	***	***	9.6	87.5
	0.5	19.0	90.7	8.8	66.6
	0.8	18.2	70.2	8.0	61.3
	1.0	17.7	66.7	7.5	59.6
	1.5	16.4	62.0	6.2	57.3

10. 인천

냉방 목표온도 (℃)	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	16.7	96.5
	1.0	***	***	18.1	93.7
	1.5	31.9	96.9	21.5	90.0
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	12.4	88.9
	0.8	23.7	93.2	13.3	81.8
	1.0	24.3	88.6	13.9	79.4
	1.5	25.9	82.4	15.5	76.3
32	0.2	***	***	10.2	99.4
	0.5	20.4	91.5	10.0	75.3
	0.8	20.3	79.4	9.9	69.3
	1.0	20.2	75.4	9.8	67.3
	1.5	19.9	70.0	9.5	64.6
34	0.2	***	***	9.0	84.2
	0.5	18.1	78.1	7.7	63.7
	0.8	16.9	67.6	6.5	58.6
	1.0	16.0	64.1	5.6	56.9
	1.5	13.4	59.4	3.5	54.6

11. 전주

냉 방 목표온도 (℃)	환 기 회 수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	22.7	98.8
	1.5	***	***	27.8	94.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	94.6
	0.8	28.6	99.0	17.3	86.6
	1.0	29.9	93.9	18.6	83.9
	1.5	33.1	87.0	21.8	80.4
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.4	98.0	13.1	80.4
	0.8	25.2	84.6	13.9	73.5
	1.0	25.8	80.1	14.4	71.2
	1.5	27.2	74.1	15.8	68.2
34	0.2	***	***	11.0	91.5
	0.5	22.1	83.9	10.8	68.2
	0.8	21.8	72.2	10.5	62.4
	1.0	21.6	68.3	10.3	60.4
	1.5	21.2	63.1	9.8	57.8

12. 제주

냉 방 목표온도 (℃)	환 기 회 수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	22.7	98.8
	1.5	***	***	27.8	94.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	94.6
	0.8	28.6	99.0	17.3	86.6
	1.0	29.9	93.9	18.6	83.9
	1.5	33.1	87.0	21.8	80.4
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.4	98.0	13.1	80.4
	0.8	25.2	84.6	13.9	73.5
	1.0	25.8	80.1	14.4	71.2
	1.5	27.2	74.1	15.8	68.2
34	0.2	***	***	11.0	91.5
	0.5	22.1	83.9	10.8	68.2
	0.8	21.8	72.2	10.5	62.4
	1.0	21.6	68.3	10.3	60.4
	1.5	21.2	63.1	9.8	57.8

13. 진주

냉 방 목표온도 (℃)	환 기 회 수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	22.7	98.8
	1.5	***	***	27.8	94.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	94.6
	0.8	28.6	99.0	17.3	86.6
	1.0	29.9	93.9	18.6	83.9
	1.5	33.1	87.0	21.8	80.4
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.4	98.0	13.1	80.4
	0.8	25.2	84.6	13.9	73.5
	1.0	25.8	80.1	14.4	71.2
	1.5	27.2	74.1	15.8	68.2
34	0.2	***	***	11.0	91.5
	0.5	22.1	83.9	10.8	68.2
	0.8	21.8	72.2	10.5	62.4
	1.0	21.6	68.3	10.3	60.4
	1.5	21.2	63.1	9.8	57.8

14. 청주

냉방 목표온도 (℃)	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	***	***
	1.5	***	***	28.4	96.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	96.1
	0.8	***	***	17.5	88.3
	1.0	29.9	95.3	18.9	85.6
	1.5	33.4	88.6	22.4	82.2
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.1	98.9	13.1	81.7
	0.8	25.1	85.8	14.1	75.0
	1.0	25.8	81.4	14.8	72.8
	1.5	27.4	75.5	16.4	69.8
34	0.2	***	***	10.9	92.2
	0.5	21.8	84.7	10.8	69.4
	0.8	21.7	73.2	10.7	63.7
	1.0	21.6	69.4	10.6	61.8
	1.5	21.5	64.3	10.4	59.3

15. 춘천

냉방 목표온도 (℃)	환기 회수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	20.1	***
	1.0	***	***	21.9	98.1
	1.5	***	***	26.5	93.9
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.0	94.1
	0.8	28.3	98.7	16.7	86.0
	1.0	29.4	93.5	17.8	83.3
	1.5	32.1	86.5	20.6	79.7
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.3	98.0	12.7	79.9
	0.8	24.8	84.3	13.3	73.0
	1.0	25.2	79.8	13.6	70.7
	1.5	26.1	73.7	14.6	67.7
34	0.2	***	***	11.0	91.4
	0.5	22.0	83.8	10.4	67.8
	0.8	21.4	72.0	9.9	61.9
	1.0	21.1	68.0	9.5	60.0
	1.5	20.1	62.7	8.6	57.4

16. 포항

냉 방 목표온도 (℃)	환 기 회 수 (회/min)	무 차 광		차 광 (50%)	
		분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)	분무수량 (kg/min)	상대습도 (%)
28	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	***	***
	0.8	***	***	***	***
	1.0	***	***	***	***
	1.5	***	***	28.4	96.6
30	0.2	***	***	***	***
	0.5	***	***	15.4	96.1
	0.8	***	***	17.5	88.3
	1.0	29.9	95.3	18.9	85.6
	1.5	33.4	88.6	22.4	82.2
32	0.2	***	***	***	***
	0.5	24.1	98.9	13.1	81.7
	0.8	25.1	85.8	14.1	75.0
	1.0	25.8	81.4	14.8	72.8
	1.5	27.4	75.5	16.4	69.8
34	0.2	***	***	10.9	92.2
	0.5	21.8	84.7	10.8	69.4
	0.8	21.7	73.2	10.7	63.7
	1.0	21.6	69.4	10.6	61.8
	1.5	21.5	64.3	10.4	59.3