

발간등록번호

11-1543000-000665-01

**시설 과채류 재배용 연소형 CO₂ 발생기 및
축열/난방 복합시스템 개발**

(Development of a combined system of a combustor type CO₂ generator and thermal storage/heating in a greenhouse for planting fruits and vegetables)

전남대학교

농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “시설 과채류 재배용 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템 개발”
과제의 보고서로 제출합니다.

2014년 10월 21일

주관연구기관명 : 전남대학교

주관연구책임자 : 최병철

세부연구책임자 : 이정현

협동연구기관명 : 대영지에스(주)

협동연구책임자 : 이범선

요 약 문

I. 제 목

시설 과채류 재배용 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

높은 수익을 올릴 수 있는 고품질 원예작물의 재배 조건에 있어서 광합성 속도는 광도, 온도, 이산화탄소(CO₂)의 농도에 크게 영향을 받는다. 현재 대기중의 CO₂농도는 약 380ppm이다. CO₂의 농도가 높아질수록 광합성 속도가 증가하지만, CO 포화점에 도달하면 더 이상 광합성 속도가 증가하지 않는다. 겨울철에 시설 하우스내의 CO₂ 농도는 일출과 동시에 급격하게 저감하여 식물의 생육에 지장을 초래한다. 그리고 시설 하우스의 실내 온도는 야간에는 영하이하로 떨어져 난방이 필요한 정도이고 주간에는 난방이 흑한기를 제외하면 크게 필요하지 않다.

원예작물에 CO₂를 공급하는 방법은 크게 연료의 연소식(combustor-type), 액화탄산가스의 기화식, 고체형 공급방식이 있다. 기화기식은 액화 CO₂를 저장용기에 보관한 후 호스로 연결하여 기화시키면서 시설 내로 공급한다. 이 방법은 시설하우스 내의 CO₂의 농도 조절이 용이하지만 액체가 기화하는데 필요한 에너지 때문에 시설 내부의 온도를 하강시키며, 액체 CO₂ 비등점이 -78℃이므로 저장용기의 보관이 어렵고 고가(0.3\$/kg)이다.

연료의 연소방식은 탄화수소계 연료를 연소시키는 방식으로, 사용할 수 있는 연료로는 LPG(liquefied petroleum gas), 천연가스, 등유 등이 있다. 연소형 CO₂ 발생장치는 가격이 저렴하지만, 불완전 연소에 의해 유해가스가 발생할 우려가 있다. 특히 등유를 사용하는 연소장치의 배출가스의 배출가스 저감을 위해서는 산화촉매와 입자상물질 제거 장치와 같은 후처리장치가 필요하다.

이 연구의 목적은 등유를 사용하는 저공해형 연소형 CO₂ 공급장치를 개발하는 것이다. 단, 이 장치는 주간에 CO₂ 공급을 위해 연소기를 가동할 경우 연소열을 축열하여 야간에 축열한 열에너지를 이용하여 시설 하우스를 난방할 수 있는 시스템을 가지고 있다. 그리고 연소형 CO₂ 발생기의 배출가스 농도에 따른 작물의 생육 영향 모니터링과 식물생육에 미치는 영향 파악하고, 최종적으로 실용화를 위한 축열/난방 기능을 가진 CO₂ 공급 시스템 및 온실 환경관리 시스템 제어 최적화하는 것이다.

III. 연구개발 내용 및 범위

- 등유를 연료로 하는 소형 보일러를 이용하여 연소 가스를 정화하여 시설내부에 CO₂로 사용하고 온수는 축열하여 야간에 난방에너지로 이용할 수 있는 저가형 등유 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 겸용 시스템을 개발
- CO₂ 생성을 위한 버너 연소기 선정 및 연소가스의 유해가스 배출 저감을 위한 촉매장치 및 연소가스내의 수증기 제거를 위한 열교환기 설계 및 제작
- 일사량, 온도, 습도 등의 복합 환경에 따른 CO₂ 농도 설정을 위한 제어 시스템 개발
- 배출 가스 농도에 따른 작물의 생육 영향 모니터링과 식물생육을 억제시키는 유해가스 최소 농도 규명
- 저가의 등유 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템을 소형 온실 설치후 CO₂ 작물생육 특성 연구
- 실용화를 위한 축열/난방 기능을 가진 CO₂ 공급 시스템 및 온실 환경관리 시스템 제어 최적화

IV. 연구개발 결과

1. 1차년도 결과

- 146 MJ/h급 CO₂ 발생기 설계 및 제작 완료
- 연소기의 배출가스 배출 특성 분석
- Oxidation Catalyst, Particulate Filter 촉매 개발 및 촉매 배출가스 및 PM 정화효율 평가
- CO₂ 발생기의 연소열 축열 시스템 평가
- 1, 2단 응축기 사용으로 배기온도 45.6℃(배기관 최종단 40℃ 이하)
- 소형 유리병 챔버(2리터)의 딸기묘의 CO와 에틸렌 가스를 주입시 엽록소 함량측정
- 광도에 따른 식물광합성 측정(CO₂ 농도를 1000ppm으로 유지 후 감소율 분석)
- CO₂농도에 따른 엽광합성 효율은 CO₂ 농도별 엽면적당 CO₂의 흡수율 분석
- PM의 분진이 식물광합성에 미치는 영향 평가
- 전동식 배기관 설치로 CO₂의 공급 및 배출 제어 가능
- 하우스내 CO₂ 공급을 위한 blower 및 열교환기 선정/설치

2. 2차년도 결과

- 시설하우스 요구 CO₂ 농도별 CO₂ 발생기의 가동 프로그램 개발
- 시설하우스의 온도를 1℃ 상승시키는데 필요한 CO₂ 발생기의 운전 시간은 약 70초임
- 메인 탱크의 축열량은 공급 열량 대비 약 77%, 보조 축열장치로부터 약 13%를 축열
- CO₂ 발생기로부터 배출되는 수분 중 약 69%를 응축수로 회수하는 열교환기 설치
- CO 정화율이 가장 높은 것은 SiC(half plugging), SiC(full plugging), OC+MPF(1차년도) 순
- SiC(full plugging)의 입자수 배출 특성은 거의 대기 수준
- 최종적으로 HC, CO와 PM 제거를 위해서 SiC(full plugging)를 제안
- 온실 내부에 소형 온실을 설치하여 3구역은 연소가스를 송풍장치를 통해 공급하였으며 3구역은 대조구로 사용
- 대조구와 처리구의 딸기 20주를 주기적으로 수확하여 생산량과 과실의 당도를 측정하여 수량과 품질 비교
- 압면큐브에 딸기 런너를 삼목하거나 어린 묘를 구입하여 뿌리를 세척한 후 압면큐브에서 6주동안 재배
- 3-4개의 엽병이 삼목이후 발육 된 후 밀폐된 플라스틱 용기에 CO, NOx, HC계의 가스인 CH₄, C₃H₈의를 주입하여 노출 시간대별로 엽광합성, 틸라코이트함량, rubisco 분석하고 광학 현미경을 통해 기공과 엽병의 손상 정도 파악
- 실험온실에 설치된 복합환경조절 시스템과 data 수집기를 이용하여 시설내외부 온도를 측정하고 온수의 온도 변화는 열전대를 이용하여 계측
- 실시간으로 모니터링한 환경자료를 이용하여 광도 변화에 따른 시설내부의 온도 변화율을 월별로 분석하고 이산화탄소 시용시 온수의 온도변화 분석
- CO₂ 시용을 위해 고려해야 할 환경조건과 시스템의 동작 정도를 p-band를 이용하여 최적 농도 조절에 대한 예시 제공
- 시험온실 내외부 온도 및 환경요인 변화 모니터링(3개월)
- 시험온실내 수경재배 딸기 일중 CO₂ 농도 변화 모니터링
- 3개월동안 시설내외부 CO₂ 농도, 온도, 광도 측정
- 시스템 모듈화를 위한 시스템 배치 재설계 및 On-board시스템 설계

3. 3 결과

- 후처리장치 CPF(pull plugged catalyzed particulate filter)의 배압이 높아 연소상태가 불안정하여 half plugged CPF로 변경함

- Half plugged CPF에 Pt을 코팅하였기 때문에 배출가스 중의 CO, HC의 저감은 탁월하지만, 연소기 초기 시동 후 2분간은 배출가스를 실외로 배출하기를 권장함
- CPF에 축적되는 PM은 1개월에 한 번 정도 압축공기로 불어 청소를 해주는 것이 바람직함
- 시설 하우스 내의 CO₂ 농도변화와 일사량, 온도, 습도 변화 측정
- 개발 CO₂ 발생기 시스템은 아침 일출이후, 7시~7시 30분 정도에 가동을 시작하였으며, 작동 구간은 최대 800ppm에서 멈추고, 최저 600ppm에서 작동되도록 하였는데, 가동후 약 5~10분 이내에 목표농도에 도달
- 보급형 CO₂ 발생기는 1800m² 형에 맞춰 발열량 약 500MJ/h로 하였으며, 온수탱크는 온수 예상온도 시뮬레이션 결과로부터 3톤 FRP탱크를 선정함
- 수경재배 딸기의 경우 겨울철의 경우 환기창의 개도율을 낮게 하여 이산화탄소 농도를 높게 설정하게 되면 과실의 당도의 향상시켰으며, 과실의 크기는 크게 영향을 주지 않았다.
- 딸기의 경우 이산화탄소 농도가 높아지더라도 화방당 화수의 증가는 나타나지 않고, 과실의 크기는 미약하게 증가한다. 반면 과실의 탄수화물의 농도가 약간 증가한다.
- 파프리카의 경우 착과수와 수확과수에 본 실험에서는 유의적인 차이는 나타나지 않았고, 영양생장량이 처리구에 미약하게 높게 나타났다.
- 하계 멜론 재배에서의 연소가스를 이용한 이산화탄소 공급은 과실이 무게와 볼륨을 증가시켰다.
- NOx, CO, SO₂가스 농도별처리에서 엽의 H₂O₂의 농도가 높아지며 산화작용이 농도가 높을수록 증가하였으며, 색소체의 농도를 감소, 기공의 공변세포의 손상이 기공이 밀폐되었다.

V. 연구성과 및 성과활용 계획

- (1) 연구성과: SCI 논문 1편, 국내논문 1편, 특허 1편 등록, 특허 1건 출원, 국내 학회논문발표 2건, 참여인력 : 박사배출 2명, 석사 2명, 학사 2명
- (2) 성과활용 : 2014년 4월 1일자로 다운테크에 기술이전(특허 제10-1361152, 식물 재배용 이산화탄소 발생장치) 완료, 기술이전료 : 4,000천원과 판매량의 3%, 사업화를 추진 중임.

SUMMARY

I. Title : Development of a combined system of a combustor type CO₂ generator and thermal storage/heating in a greenhouse for planting fruits and vegetables

II. Background and Objectives:

The rate of photosynthesis is affected by the conditions of luminous intensity, temperature, and CO₂ concentration. Horticultural crops using the CO₂ in the atmosphere produce anabolites for growth by photosynthesis. In winter, the ventilation in greenhouses is limited to minimize heat loss, so the internal CO₂ concentration may be reduced during the day. When the sun rises and plants start photosynthesis, the CO₂ concentration slowly decreases to a minimum during the daytime, and increases at night due to the respiration of plants and the dissolution activity of soil microbes.

Methods to supply CO₂ to horticultural crops mainly include combustor types, gasification by liquid, and solid types (dry ice). The gasification method involves the storage of CO₂ in a storage tank. Then, the is supplied to facilities by a connecting hose. This method can be easily used to control the CO₂ concentration in a greenhouse, but it reduces the temperature in the facility due to the energy required to gasify the liquid, which complicates storage, because the boiling point of liquid CO₂ is -78 °C, thus making the process expensive (0.3 \$/kg). The fuel combustor type involves the burning of hydrocarbon fuels, including liquefied petroleum gas (LPG), natural gas, light oil, kerosene. It features low installation cost compared to using liquid CO₂, but can emit harmful gases by incomplete combustion.

The combustor-type CO₂ supply methods, for the diffused-type system, harmful gases are generated together with CO₂ gas, and the incomplete combustion ratio is increased as the combustor ages. The exhaust gas may also damage crops. The combustor-type CO₂ supply is also preferable with regard to energy savings over waste heating systems. In order to increase energy efficiency and supply low-pollution CO₂, thermal storage systems are advantageous. It is appropriate to use kerosene as the fuel of the combustor, due to tax exemptions in agricultural districts, but there are problems with the emission of exhaust gases, especially hydrocarbons, CO, and PM (particulate matter) from the combustion of the kerosene. In order to reduce exhaust gas emission from the combustor using diesel oil or light oil, after-treatment devices such as oxidation catalysts (OC) and particulate filters for diesel vehicles are required.

The purpose of this study is to develop a combustor-type CO₂ generator with the after-treatment equipment and the thermal storage devices. The after-treatment device reduces the harmful gases in the exhaust gases of the combustor. The thermal storage device stores the heat of combustion, and the stored heat energy is available for the greenhouse when heating is needed. And we will investigate of the effect of exhaust gases of the developed combustor-type CO₂ generator on the horticultural crops, the optimization of control of the combustor type CO₂ generator with thermal storage/heating system for the suitable CO₂ atmosphere in the greenhouse.

III. Research details:

- Development of a light oil fueled with combustor-type CO₂ generator with the after-treatment equipment and the thermal storage devices
- Development of the after-treatment system for the light oil fueled with combustor-type

CO₂ generator, and development of the thermal recovery device of the exhaust gas has a function of heat recovery, as well as the ability to remove the moisture contained in the exhaust gas.

- Development of the control system for the CO₂ concentration by sunlight, temperature, humidity
- The minimum concentration of hazardous gas monitoring and impact identified that inhibit the growth of crop plants grown according to the exhaust gas concentration
- Research of crop growth characteristics of equipped with the combined system of low-cost CO₂ greenhouse(fueled kerosene) with heat storage/heating system
- Optimization of control system of the combined system of low-cost CO₂ greenhouse(fueled kerosene) with heat storage/heating system and environmental management of the greenhouse

IV. Research Results:

1. 1st year results

- Designed and manufactured CO₂ generator of heat capacity of 146 MJ/h
- Analyzed the emissions of the combustor-type CO₂ generator
- Estimation of conversions of the developed oxidation catalyst, particulate filter
- Estimation of thermal recovery devices of CO₂ generator
- Final emission temperature below 40°C by using 1st and 2nd heat exchangers
- Impact assessment of CO and ethylene on the chlorophyll of strawberries in a small chamber (2 liters)
- Photosynthetic efficiency of the input according to the CO₂ concentration and absorption analysis
- Impact assessment of PM particles on the plant photosynthesis
- Selection/installation of blower, heat exchangers and pipe line for CO₂ supply in the greenhouse

2. 2nd year results

- Development of control program of CO₂ generator according to CO₂ concentration of the green houses
- Operating time of CO₂ generator needs 70 sec for the rising 1 degC of inside of the 600m² green house.
- The stored heat in main tank from the exhaust heat is 77 % of the combustion heat.
- With about 69 % of the water vapor in the exhaust gas removed, it is possible to minimize the effects of excessive humidity on crops in the greenhouse.
- Order of higher CO conversion : SiC(half plugging)> SiC(full plugging)> OC+MPF
- PM number of the SiC(full plugging) PF emitted almost same particulate number in air.
- Suggested after-treatment system of SiC(full plugging) PF to reduce of HC, CO and PM
- Compare the quantity and quality by measuring the sugar content of the fruit yield and harvested periodically strawberries during 20 weeks
- Analysis of the rakoyi butyl content, rubisco analysis, photosynthesis of the plant leaves according to the exposure time to CO, NO_x, HC-based gas of the CH₄, C₃H₈, and determine degree of cell damage
- Analysis of the monthly monitoring data of inside and outside of the greenhouse to change sun radiation and temperature by using CO₂ and heat stored water
- An operating system level of the environmental conditions to be considered for use in

illustrating provide optimum CO₂ concentration control by using a p-band

- Monitoring diurnal variation of CO₂ concentration on indoor hydroponic test of strawberry
- System redesign for modularity and on-board system design

3. 3rd year results

- Change of the after-treatment system from SiC(pull plugged catalyzed particulate filter) to half plugged CPF because of unstable combustion of CO₂ generator
- Superior CO and HC conversions of half plugged CPF for the Pt catalyst coated, but during 2 minutes the exhaust gas from starting combustor have to bypass to outside of greenhouse, and the CPF have to clean up every 1 month by compressed air.
- If the supply of affordable CO₂ storage water tank capacity is 4 ton, the tank water temperature reached 80°C at 3:00PM after starting time of 7:00AM
- Measured CO₂ concentration, solar radiation, temperature and humidity of the green house
- Operating time the CO₂ generator was from 7:00 to 7:30 after sunrise, and operating set point was CO₂ concentrations up to 800 ppm, the lowest 600ppm, it was reached in about 5 - 10 minutes after the operation.
- According to the type 1800m² greenhouse, CO₂ generator was a calorific value of about 500MJ/h, water tank volume was selected 3 tons FRP tank by the simulation results.
- In case of hydroponic strawberries in winter to lower the rate of opening of ventilation windows, CO₂ enhanced the sweetness of the fruit was brought, does not affect significantly the size of the fruit
- In case of CO₂ concentration enhanced strawberry, increase of the number of flowers per plant not appeared, and the slight increase in the size of the fruit. While the slight increase in the concentration of carbohydrates in fruit.
- In the case of paprika were able to be harvested and fruit setting and experiments show significant differences, the vegetative growth is weak high.
- Increased the weight and volume of the summer fruit with melon cultivation by supply of CO₂ by combustion gas.
- NO_x, CO, SO₂ gas concentrations in the treatment to increase the amount of H₂O₂ concentration was increased oxidation of the leaves, the higher the concentration, the sealing of the pores reduce the density of the plastid, the damage of the guard cells of the pores.

V. Research Results and Utilization of Its

(1) Research results : SCI(E) journal publication : 2 papers, national journal publication: 1 paper, national patent : 1, submission patent : 1 , presentation in national conferences: 4 papers, educational results : Doctoral students : 3 person, master : 4 person, bachelor : 4 person

(2) Utilization of research results: Technology transfer (Patent 10-1361152, CO₂ generator) to Daon Technology Co. on 1st April 2014, 4,000,000Won and 3% of production cost, and promote the commercialization.

CONTENTS

제 1 장 Introduction	
1-1. Needs and background	11
1-2. Contents of research	17
1-3. Objectives of research	19
제 2 장 State-of-the-art of technology	
2-1 States of national patents	22
2-2 Relation of the research with published papers	23
제 3 장 Contents of research and developments	
3-1 Research results of 1st year	24
3-2 Research results of 2nd year	58
3-3 Research results of 3rd year	120
제 4 장 Achievement of objectives and contribution of related fields	
4-1 Objectives and achievement of 1st year	168
4-2 Objectives and achievement of 2nd year	169
4-3 Objectives and achievement of 3rd year	171
제 5 장 Research Results and Utilization of Its	
5-1 Plan of commercialization (technology transfer)	173
5-2 Plan of education and PR	173
5-3 Submission plan of patents, papers	173
5-4 Additional research and utilization to other research	174
제 6 장 Scientific information from oversea	175
제 7 장 Research equipments	177
제 8 장 References	178

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	
1-1.	연구개발의 배경 및 필요성	11
1-2.	연구 개발의 내용	17
1-3.	연구 개발 목표	19
제 2 장	국내외 기술개발 현황	
2-1	국내외 특허 동향	22
2-2	국내외 논문과 연구과제와의 관련성	23
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	
3-1 1	연구개발 수행내용	24
3-2	2차년도 연구개발 수행내용	58
3-3	3차년도 연구개발 수행내용	120
제 4 장	목표달성도 및 관련분야에의 기여도	
4-1	1차년도 연구개발의 목표 및 연구 목표 달성도	168
4-2	2차년도 연구개발의 목표 및 연구 목표 달성도	169
4-3	3차년도 연구개발의 목표 및 연구 목표 달성도	171
제 5 장	연구개발 성과 및 성과활용 계획	
5-1	실용화·산업화 계획(기술이전실시)	173
5-2	교육·지도·홍보 등 기술확산 계획	173
5-3	특허, 품종, 논문 등 지식재산권 확보계획	173
5-4	추가연구, 타 연구에 활용 계획	174
제 6 장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	175
제 7 장	연구시설·장비 현황	177
제 8 장	참고문헌	178

제 1 장 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발의 배경 및 필요성

(1) 시설원예 농가의 CO₂ 발생기 필요성

고품질과 고수익을 위한 원예작물의 재배 시 생육에 필요한 광합성 속도는 광도, 온도, 이산화탄소의 농도 등에 크게 영향을 받는다. 이중 이산화탄소(CO₂) 농도는 대기중에 약 350ppm 존재한다. 원예 작물은 대기중의 CO₂를 흡수하여 광합성하여 작물 생육에 필요한 동화산물을 생산하고 광합성 산물이 증가됨에 따라 작물의 수량과 품질이 향상된다. 따라서 적절한 CO₂의 공급은 원예작물 재배 시 가장 중요한 요인 중 하나이다. 겨울철 시설하우스 내의 환기는 매우 제한적이고, 밀폐된 재배환경에서는 광합성에 의한 이산화탄소의 일방적인 소모로 시설하우스 내의 이산화탄소 농도는 감소한다. 이때 일반적으로 50-125ppm 정도로 낮아진 이산화탄소의 농도는 작물의 이산화탄소 보상점보다 낮아져 광합성 속도가 zero에 도달할 수도 있다. 따라서 시설하우스 내의 CO₂ 농도는 작물 생육의 제한 요인의 하나가 된다.

(2) 원예작물의 생육에 미치는 적정 CO₂ 농도 및 공급량 산출

시설하우스내의 CO₂ 환경은 시간에 따라 이산화탄소의 농도 변화가 심하게 일어난다. 아침에 해가 뜨고 광합성이 시작되면 이산화탄소의 농도는 서서히 낮아지기 시작하고, 밤에는 식물호흡과 토양호흡(토양 미생물의 분해활동)에 의해 농도가 높아진다. 이산화탄소의 농도가 높아질수록 광합성 속도가 증가하나 CO₂ 포화점에 도달하면 더 이상 광합성 속도가 증가하지 않으므로, 적절한 CO₂ 공급량을 결정하여야 한다. 하우스내의 이산화탄소의 농도 분포는 바람이 없거나 적기 때문에 상하좌우 위치에 따라서 농도가 달라지며, 작물의 생육이 왕성한 잎과 줄기 주변의 농도가 특히 낮아진다. 따라서 적절한 CO₂ 공급과 순환에 의해 CO₂ 농도를 일정하게 유지하는 시스템이 필요하다. 표 0-1은 여러 가지 원예작물의 하우스시설 내 적정 이산화탄소 농도를 나타내었다.

Table 0-1. 원예작물의 하우스시설 내 적정 이산화탄소 농도

구 분	이산화탄소 최적 농도범위(ppm)
엽채류	1,500~2,500
근채류	1,000~3,000
과채류	500~1,500
오이, 피망, 가지, 강낭콩	800~1,500
토마토, 멜론, 딸기(완숙과채류)	500~800

이산화탄소의 시비는 일사량이 충분한 오전에 효과가 높으며, 비오는 날은 이산화탄소의 시비가 필요

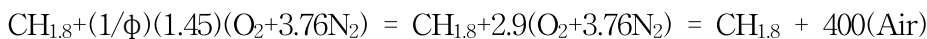
없으며, 흐린 날은 맑은 날의 적정 이산화탄소 농도보다 약 30-40% 낮은 농도의 이산화탄소를 공급한다. 이산화탄소 농도에 따른 작물의 생산량 변화는 하우스내의 이산화탄소 농도를 350ppm 기준으로 하여, 750ppm일 경우 30%의 생산량이 증대되고, 350ppm보다 낮은 250ppm인 경우 생산량이 약 20% 감소한다.

비닐하우스 한동의 크기는 폭 6m, 길이 100m, 그리고 높이를 3m로 가정하면, 1800m³이나, 아치형을 이루고 있기 때문에 전체 비닐하우스의 체적은 1560m³으로 한다(0-1). 원예작물의 하우스시설 내의 적정 이산화탄소의 농도는 작물의 종류에 따라 달라지나 이산화탄소 1000ppm을 확보하기 위한 등유 연료의 사용량은 아래의 계산식에 의해 결정한다. 이때 비닐하우스 내의 이산화탄소의 농도를 0이라고 가정하고 계산하였다.

이산화탄소 필요량 계산(예) :

- 실내 등유의 석유환산계수(순발열량 : 잠열제거)는 0.820, 탄소배출계수 0.812이므로 1리터의 실내등유로 생산할 수 있는 CO₂량은 2.44kg(실내 등유 고위발열량 : 36.8MJ(8800kcal), 저위발열량 : 34.3MJ)
- 보일러 등유(2011년 7월부터 생산 중단, 실내등유로 통일)의 석유환산계수(순발열량)는 0.835, 탄소배출계수 0.812이므로 1리터의 보일러 등유로 생산 가능한 CO₂량은 2.49kg
- 시설재배지 1동(660m²)의 체적: 1560m³, 1m³=1.286kg(공기), 비닐하우스 내 공기 무게: 2008kg이므로, 하우스내의 1000ppm CO₂량은 3.1kg (1,560,000L/22.4L=69,600mol, 69,600×(1,000×(44g/100만)) ≃ 3,100g)이다. 등유 1리터에 의해 생성되는 CO₂량이 2.44kg이므로, 3.1kg CO₂를 생성하기 위해 약 1.27리터의 등유(면세등유가격=800원/L, CO₂ 1kg 당 생산단가 : 327원/kg CO₂)가 필요하다.

이때 연소에 필요한 공기량(당량비 0.5)을 계산하면



1kg의 등유 연소(당량비 0.5) 시 22.4m³의 공기량이 필요하다.

표 2는 에너지 열량 환산 기준을 나타내었으며, 표 0-3은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 탄소배출계수를 나타내었다.

Table 0-2 에너지 열량 환산 기준(총발열량, 에너지 기본법 제5조 제1항 관련)

에너지종별	단위	총발열량		석유환산계수 (TOE)
		kcal	MJ	
원유	kg	10,750	45.0	1.075
실내등유	L	8,800	36.8	0.880
보일러등유	L	8,950	37.5	0.895
경유	L	9,050	37.9	0.905
프로판	kg	12,050	50.4	1.205
부탄	kg	11,850	49.6	1.185
천연가스(LNG)	kg	13,000	54.5	1.300
도시가스(LNG)	Nm ³	10,550	44.2	1.055
LPG	Nm ³	15,000	62.8	1.500
전력	kWh	2,150	9.0	0.215

- 주) 1. “총발열량”이라 함은 연료의 연소과정에서 발생하는 수증기의 잠열을 포함한 발열량을 말한다.
2. “석유환산계수”라 함은 에너지원별 열량을 석유환산량(TOE)로 환산하기 위한 계수임
3. TOE(Ton of Oil Equivalent)는 원유 1톤에 해당하는 열량으로 약 10^7 kcal를 말함
4. Nm^3 0℃, 1기압 상태의 체적을 말한다.

Table 0-3 IPCC의 탄소배출계수

에너지종별	탄소배출계수	
	(kg C/GJ)	Ton C/TOE
원유	20.00	0.829
휘발유	18.90	0.783
등유	19.60	0.812
경유	20.20	0.837
천연액화가스(LGL)	17.20	0.630
LNG	15.30	0.637

(3) 이산화탄소 공급 방법

원예작물에 이산화탄소를 공급하는 방법은 크게 연료의 연소식, 액화탄산가스의 기화식, 고체분말형 공급방식으로 나눌 수 있다. 기화기식은 이산화탄소를 액화시켜 저장용기에 보관한 후 호스를 연결하여 기화시켜 시설내로 공급하는 방식이다. 이 방법은 유해가스의 배출 염려가 없으며 하우스내의 이산화탄소의 농도 조절이 용이한 장점을 가지나 액체가 기화하는데 필요한 에너지 때문에 시설 내부의 온도를 약간 하강시키며, 보관을 위해 임계압력 72 기압 이상, 비등점 -78°C 이하로 유지해야 하므로 취급이 어렵다는 점과, 가격(330원/kg, 변동이 심함)이 고가이며, 조선사업소의 용접용으로 많이 사용하므로 수급이 불안정한 단점이 있다. 고체분말형 공급방식은 사용하기에는 편리하지만, CO_2 의 발생량이 낮으며, 농도를 임의로 조정하기 곤란하고, 단가가 비싸다. 연료의 연소식은 탄화수소계 연료를 연소시키는 방식으로, 사용할 수 있는 연료로는 LPG, 천연가스, 등유 등이 있다. 액화 이산화탄소를 사용하는 것에 비하여 설치비가 저렴하나, 불완전 연소에 의해 유해가스가 발생할 우려가 있다.



(a) 기화식 CO_2 발생기



(b) 연소식 CO_2 발생기

Fig. 0-1. CO₂ 공급 방식

연소식 CO₂ 공급방법에는 확산식, 폐열형, 그리고 축열형 시스템으로 구분되는데 확산식 시스템은 과잉열을 온실 안으로 방출하는 방식이며, 폐열형 시스템은 과잉열을 온실 밖으로 방출하는 방식이고, 축열형 시스템은 과잉열을 축열시켜 필요한 때 사용하는 방식이다. 현재 연소식 CO₂ 공급방식은 국내에 도입된 제품이나 국산품 모두 확산형 시스템을 사용하고 있다. 그러나 확산식 시스템을 사용할 경우 CO₂ 가스와 더불어 부산물인 유해가스가 발생되고 사용시간의 경과에 따라 내구성이 저하될 경우 불완전 연소율이 증가하여 유해가스 배출량이 증가하여 작물에 피해를 줄 수 있고, 한편 배출가스 중 수분(H₂O)이 증가하여 작물에 결로 현상이 발생하여 작물에 손상을 줄 수 있는 큰 단점을 가지고 있다. 에너지 절약 측면에서 볼 때 폐열형 보다 확산식이 온실 내부의 온도관리에 이용되는 것이 바람직하다. 그러나 확산식의 경우 연료의 조성비에 따라 다르나 C/H의 비가 낮을수록 CO₂ 생성에 따른 H₂O의 생성량이 높아지므로 이에 대한 대책이 필요하다. 여러 가지 상황을 고려해 볼 때 과잉에너지 재활용적 측면과 CO₂ 만을 공급하는 방식의 축열 시스템이 가장 바람직한 방법이다. 그리고 연소식 CO₂ 공급방식은 탄화수소계 연료만 공급하면 되므로 연료의 단가 변동에 따른 가격 변동이 생겨도 수급에는 안정성이 확보된다.

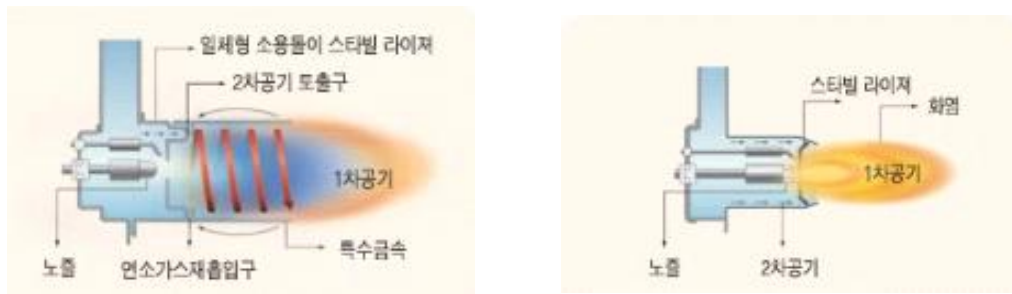
(4) 연소식 CO₂ 공급에 따른 배출가스 특성

동절기 난방 및 밀폐된 온실의 광합성 촉진을 위한 연소식 CO₂ 발생기가 많은 중소형 온실 운영 농가에 지자체의 보급 사업으로 보급이 점차 증가하고 있다. 연소식 CO₂ 발생기는 주로 등유, LPG, 그리고 LNG들 연료로 사용하고 있다. 사용 보일러의 열량은 196-418 MJ/h이며, 일본산, 네덜란드산, 그리고 국산이 주류를 이루고 있다(0-2). 비닐하우스 내부의 CO₂ 농도 1000ppm을 기준으로 하여 연소식 CO₂ 발생기에서 생성된 CO의 농도는 최고 340ppm까지 고농도로 배출되는데, 고농도의 CO는 불완전연소에 따른 현상이고, 평균적으로 약 2ppm을 유지하였다. NO_x 농도는 191-1681ppb로 모든 온실에서 2ppm 이하를 나타내었다. 이와 같이 불완전연소에 의해 생성되는 CO 300ppm은 작물의 생리 장애현상을 발생시킬 수 있으며, 불완전연소에서 생성되는 HC, CO를 산화촉매를 사용하여 저감할 필요성이 대두된다. LPG를 연료로 사용하였을 때 연소온도가 등유에 비해 높기 때문에 완전연소율의 향상은 CO의 농도가 크게 증가하지 않은 특징이 있다. 휘발성 물질 중 작물에 영향을 줄 수 있는 VOC(volatile organic compounds)는 Benzene, Toluene, Ethyl benzene, Xylene, Styrene 등이며 이들의 총량은 34-153ppb로 매우 낮은 값을 나타내었다. 온실의 배출가스 농도는 연소시간과 환기 횟수에 민감하게 반응하는데, NO의 경우 환기횟수가 약 0.2회(시간 당 환기횟수)의 조건에서 최대허용량은 35ppm이고, C₂H₄의 경우 약 0.5ppm 농도가 최대허용 농도로 매우 작물에 민감한 반응을 보인다고 보고되고 있는데, 불완전 연소의 배출가스를 촉매를 이용하여 정화하면 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단한다.

(5) 연소식 CO₂ 공급을 위한 연소기 및 축열

연소식 CO₂ 발생기의 배출가스 배출특성에서도 확인하였듯이 정상적인 연소에 의한 배출가스 농도는

식물의 생육에 큰 영향을 미치지 않는 반면, 불완전연소의 경우에 생성되는 높은 CO의 농도는 작물의 생리 장애현상을 발생시키는 특징이 있다. CO₂ 발생기도 고효율, 저공해화 기술이 적용되어야 하는데 이 기술은 본체, 연소기, 폐열회수장치 및 제어장치의 4가지 기술이 상호 조합되어야만 달성 가능하다. 보일러의 연소기는 주어진 보일러 내의 연소실에서 유해가스의 발생을 원천 저감하는 저 NO_x 연소기술과 높은 과잉공기 조건에서 완전연소가 가능한 고성능 연소기술 개발이 필수적이다. 산업용 보일러의 경우 연소기술은 에너지 효율증가와 저공해를 위해 내부재순환(IFGR, internal fuel gas recirculation), 선회기류(swirl)의 최적화, 급혼합연소(rapidly mixed combustion), 연료/공기 다단연소(fuel/air staged combustion) 등이 주류를 이루고 있다.



(a) 터보 소용돌이 버너구조

(b) 일반구조

Fig. 0-2. 버너의 구조

불완전 연소는 버너의 내구성 저하, 공연비 제어 불량, 초기 연소 시 주로 발생하는데 여러 방식의 향상된 기술을 적용하여 연소효율을 향상시키는 연구가 각 회사를 중심으로 활발하게 진행중이다. Fig. 0-2는 버너의 구조에 관한 실시 일례다. 터보 소용돌이 버너는 일반버너와 다르게 한번 연소된 가스를 800℃로 달구어진 특수 금속관에서 2차 연소시키는 신기술로 연료절감과 공해 방지에 탁월한 성능을 발휘한다.

축열 시스템은 잉여 열에너지를 저장하였다가 공급하는 시스템으로 열에너지의 공급과 수요 사이에 나타날 수 있는 시간적 또는 양적 격차를 해소하는 역할을 수행한다. 축열은 열을 저장하는 형태에 따라 현열, 잠열, 화학 축열로 구분(1-4)되는데 현열 축열이란 축열재의 열용량을 이용해서 열을 저장하는 방식으로 축열원리가 매우 단순하여 기술적인 문제는 거의 없으며, 물 등의 안정된 축열재가 많다는 장점이 있다. 그러나 단위 부피당 열을 저장할 수 있는 열량이 적어 큰 용량의 축열조가 필요하며(축열식 난방기의 열에너지 저장용량은 270kJ/kg(유효한 온도 구간대에서의 흡열량)), 사용온도 이상의 고온 또는 그 이하의 저온으로 축열해야 하므로 열손실이 크다는 단점도 갖고 있다. 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 현열 축열재는 액체인 물인데, 물의 밀도는 낮으나 비열이 높아서 단위 용적당 축열량이 많으며 화학적으로 안정된 물질이기 때문에 누출되어도 큰 문제가 발생되지 않은 반면 이용온도 범위가 0-100℃ 범위로 한정된다.

(6) 축열을 이용한 하우스 보조 난방

겨울철 하우스 난방은 전기 및 등유 연소를 이용한 온풍과 축열을 이용한(관형 열교환기 사용) 온풍 그리고 지하수를 이용한 수막 보온 등이 있다. 수막(water curtain)은 단어가 의미하듯 온실이나 비닐하우스에 지하수를 살수하여 보온 내지는 약간의 가온효과를 얻는 방식으로, 비교적 저렴한 비용으로 보온이나 단열효과를 통해 에너지를 절감할 수 있는 장점이 있는 반면, 피복재를 장기적으로 이용할 경우 또는 철분이 많은 지하수를 이용할 경우 피복재의 오염으로 인하여 광투과율이 낮아질 수 있고, 또한 우리나라가 OECD에서 분류한 물 부족 국가 중의 하나이므로 무분별한 지하수의 사용은 억제되어야 한다. 일반적으로 비닐하우스에 필요한 열량은 다음과 같은 식에서 계산할 수 있다(1-1).

필요열량 Q(kJ/h)

$$= (\text{시설표면적} \times \text{열관류율} + \text{공기비열} \times \text{공기밀도} \times \text{환기율} \times \text{시설용적}) \times (\text{설정온도} - \text{최저외기온})$$

위 식에서 시설 표면적은 외피복 비닐 폭이 10m이고 길이가 100m라면 약 1000m²이다. 열관류율은 비닐 외피가 5-6이고, 이중일 경우는 2-3이다. 공기 비열은 1.008kJ/kg°C이고, 밀도는 0.1293kg/m³이다. 환기율은 완전 밀폐일 경우에는 0이지만 틈새가 있기 때문에 시간당 2회로 가정한다. 하우스가 2중 피복이고 용적이 1560m³, 설정온도 10°C, 외기온이 -15°C로 가정한다. 이 때 필요열량(Q)은 다음과 같다.

$$Q(\text{kJ/h}) = (1000\text{m}^2 \times 3 + 1.008 \times 0.1293 \times 2 \times 1562\text{m}^3) \times (10 - (-15^\circ\text{C})) = 324\text{MJ/h}$$

여기에서 20%의 안전율과 난방기 연소효율 85%를 고려하고, 경유 1리터의 유효발열량이 372MJ이므로 시간당 필요한 경유는 10 리터이다.

수막에 의한 열교환량은 외기온도와 시설내 기온의 차에 비례하는데 수막의 총 방출열량 중 70-80%는 외기로 손실되고 나머지 20-30%가 실내 공기를 가열하거나 보온하는데 사용된다. 따라서 하우스의 수막 유량이 150리터/min, 수막에 사용할 지하수의 수온 15°C, 배출수온 5°C (지하수 온도차 10°C)라면, 수막 유량 9000리터/h로 열교환량을 30%로 하면 378MJ/h × 30% = 113MJ/h(27,000kcal/h)이다. 그러나 수막재배 시 지하수의 철분 한계 농도는 0.5ppm이며, 1.0ppm 이상이면 비닐오염으로 수막재배가 부적합한 특징을 가지고 있다. 축열 시스템을 사용할 경우 축열된 에너지와 동일한 열교환율을 가진다면 CO₂ 생성을 위해 사용한 연료의 소모량만큼 에너지를 저장할 수 있다.

Fig. 3은 상대습도와 온도에 따른 공기 중 수분량을 나타내었다. 축열시 열교환을 통한 응축수를 제거하여 작물의 생육에 영향을 미치는 하우스내의 상대습도를 낮추어야 한다.

작물의 결로(露)는 하우스 내의 습윤공기가 차가워진 작물에 접촉되면 온도가 내려가 일어난다. 더욱더 온도가 저하시키면 마침내 포화상태에 도달하고 이때 공기가 포화상태가 될 때의 온도를 그 공기의 노점온도 또는 노점(이슬점)이라고 한다. 시설하우스 내에서는 조금이라도 온도가 낮은 곳, 피복재 같은 곳에 이슬이 맺히면 투광량이 낮아져 작물의 생육에 영향을 미친다. 결로가 생기면 결로 부위의 온도가 매우 낮고, 표면을 덮고 있으므로 작물의 활력이 낮아진다

(증산속도가 낮고 뿌리활력도 낮음). 따라서 과실의 품질이 나빠지며, 병이 쉽게 발생하는 문제가 있다. 결로의 방지법으로는 일출 전부터 하우스 내부의 온도를 서서히 올려 일출 후 작물과 온실의 온도 편차에 의한 결로를 방지하여야 하며, CO₂ 공급을 위해 연소가스 내부에 수분의 함량을 낮추어야 한다. 이를 위하여 연소가스를 condensing하여 응축수를 제거함으로써 연소에 의한 수분 증가를 막을 필요가 있다.

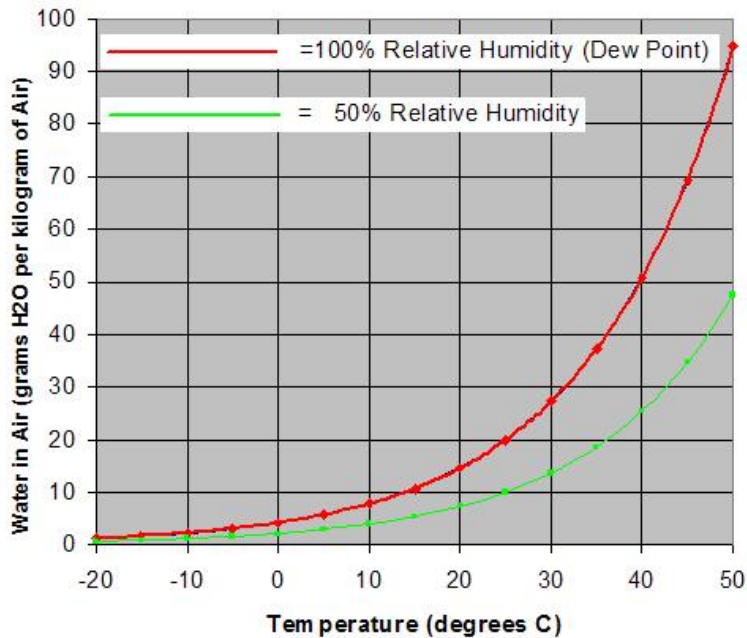


Fig. 0-3. 상대습도와 온도에 따른 공기 중 수분량

1-2. 연구 개발의 내용

(1) 연소형 CO₂ 발생기 개발

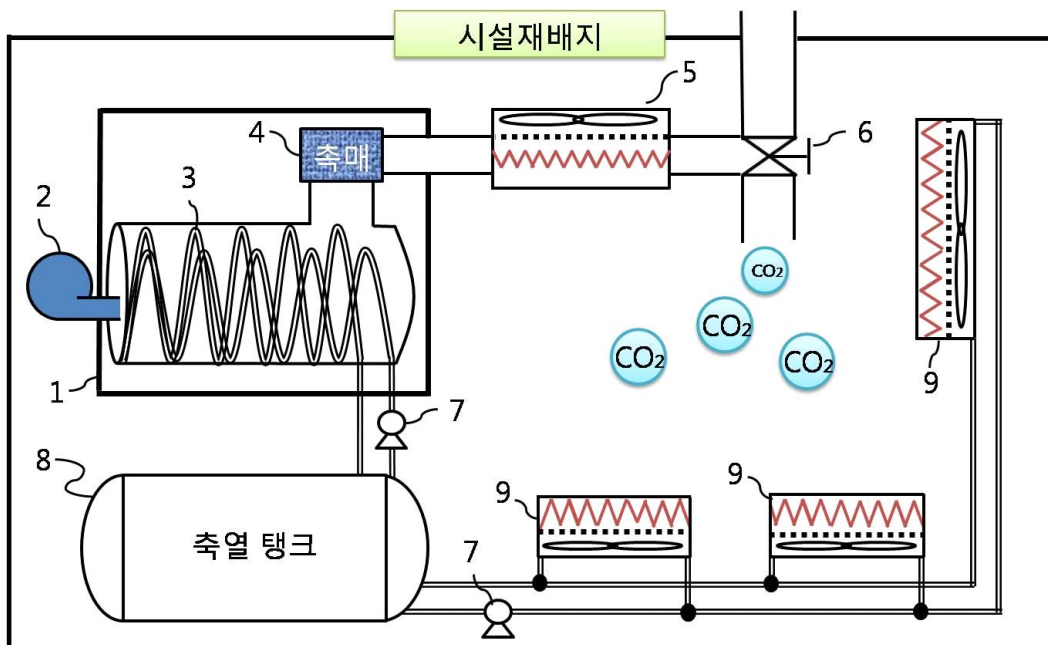
시설원에 농가의 플라스틱(비닐) 하우스 내 작물 재배 시 식물의 생육과 품질 향상을 위하여 광합성 작용을 향상시킬 필요가 있는데 CO₂의 공급으로 해결하고 있다. 현재 CO₂ 공급은 액화 CO₂를 분사하는 방식과 탄화수소계 연료의 연소 방식에 의해 CO₂를 공급하는 방식이 있다. 액상의 CO₂를 이용한 이산화탄소의 공급 방식이 가장 효과적인 방법이나 고비용이고, 등유, LPG, LNG 연료를 사용하는 연소방식은 불완전 연소 시 작물에 유해가스 피해를 초래할 위험이 있고, 판매가격이 고가여서 사용이 제한적이다. 또한 직화된 연소열을 온실 내부에 직접 전달되어 불필요한 열에너지와 내부의 습도를 증가시키는 결과를 초래하므로 이 연구에서 개발하고자 하는 폐열형 연소장치가 필요하며, 연소장치에서 발생한 열량의 효율적 이용방법으로 축열방식의 복합형이 필요하다.

Fig. 0-4는 CO₂ 발생기 및 축열 시스템의 개략도를 나타내었다. 보일러의 사용 연료는 등유(혹은 경유)이며, 연소기의 최대 발열량은 1560m³의 용량의 재배지에 공급할 수 있는 CO₂의

량으로 설계하여 168MJ(40,000kcal)/h로 한다. 이 연구에서 제작하고자 하는 연소형 CO₂ 발생기용 연소장치(1)는 연소 후 응축수를 제거할 수 있는 condensing 방식이 적합할 것으로 판단한다.

그리고 연소기 착화 직후 연소상태가 정상적으로 되기 전에 발생하는 HC, CO, VOC의 배출이 문제가 될 수 있으며, 정상상태일지라도 연소 시작 후 촉매온도가 충분히 활성온도에 도달하지 못할 경우 HC, CO, VOC 등이 배출될 수 있으므로, 배출가스 온도가 소정의 값에 도달하기 전에는 배출가스를 전환밸브(6)를 제어하여 배출가스를 시설재배지 밖으로 배출하고 충분히 촉매가 활성화되어 유해가스를 산화시키면 시설재배지에 CO₂를 공급한다. 연소기의 착화 후 불완전연소의 안정화는 1-2분 이내에 도달하며, 산화촉매의 활성온도 도달시간도 수분내에 200℃ 이상에 도달하여 HC나 CO를 효과적으로 저감시킬 수 있을 것이다. 배기 중 유해물질의 정화용 산화촉매(4)에는 귀금속(Pt, Pd)을 이용한다.

시설재배지 내의 CO₂ 농도는 계산된 CO₂의 초기 설계량에 적합하게 일정 사이클(예, 1 사이클 = 20분 운전 40분 휴지)을 가지고 운전 하게 하지만, 경우에 따라서는 환기량이 많을 경우나 특별한 상황에서 CO₂ 농도가 낮아질 경우를 대비하여 CO₂ 센서를 실내에 장착하여 상시 모니터링하며, 식물의 생육에 필요한 최저농도 약 500ppm 이하로 떨어지면 긴급히 연소장치를 정규 사이클 외에도 가동할 수 있게 제어장치의 최적화를 수행한다.



1. 보일러 2. Burner 3. 열교환기 4. 촉매 5. 배기 열교환기
6. 3way 밸브 7. 순환펌프 8. 축열탱크 9. 판형 열교환기

Fig. 0-4. CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템 개략도

(2) CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템 개발

현재의 액체 CO₂ 발생기나 확산형 CO₂ 발생기의 문제점을 해결하기 위하여 개발하는 연소

형 CO₂ 발생기에서는 CO₂의 유효이용 이외에 연소에 의해 발생한 과잉열을 축열하여 동계절 야간에 유효하게 사용할 수 있는 시스템을 구축한다. 축열 시스템은 연소열을 축열할 수 있는 용량 약 1-2톤 규모의 물저장 축열탱크(8), 순환펌프(7) 및 수관 관리용 온도센서로 구성하며, 물의 순환으로 연소기에서 발생한 열을 축열탱크로 보내어 저장한다. 축열 시스템은 단열재로 충분히 단열하여 주간에는 보온을 하고 야간에 유효하게 이용할 수 있게 한다. 배출가스 중 CO₂를 시설재배지에 공급하기 전의 가스의 온도를 40℃ 이하로 낮추기 위하여 2차 열교환기(5)를 설치하며, 이때 응축된 응축수를 제거하여 시설재배지의 수분농도가 증가하지 않도록 설계한다.

축열 탱크에 저장된 열에너지는 판형 열교환기(9)를 이용하여 필요시 시설하우스 내부에 보조 난방으로 이용한다. 그리고 이 시스템의 설치에 시설재배지의 공간 확보 정도에 따라 시설재배지 내에 설치를 하여도 되며, 외부에 설치하여도 무방하다.

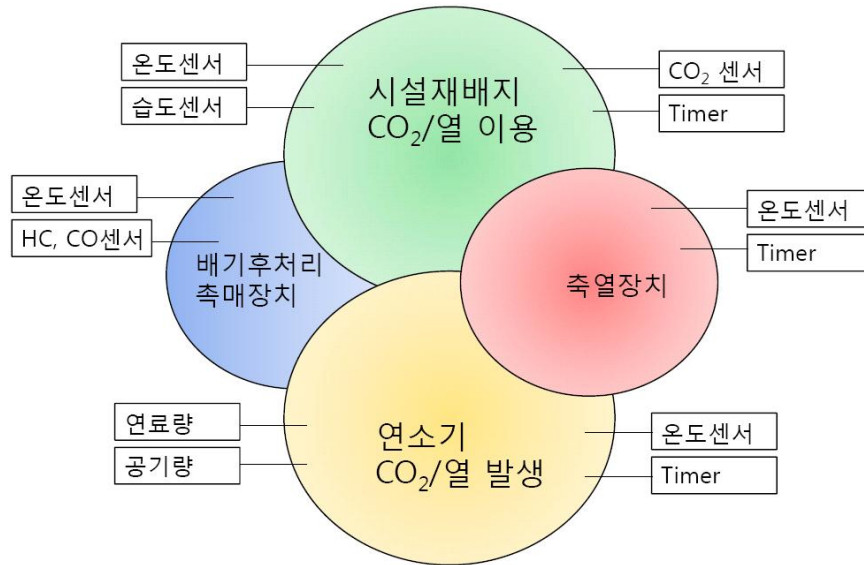


Fig. 1-5. CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 최적제어를 위한 센서류

Fig. 5는 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 최적제어를 위한 센서류를 나타낸 것으로, 전체 시스템에 있어서 연소기의 CO₂ 및 열 발생량제어, 시설재배지의 필요 CO₂ 농도, 습도 및 온도제어, 축열장치의 난방/축열 온도제어, 연소기 배기후처리 촉매장치의 유해가스(HC, CO) 농도 및 온도제어 등의 종합적인 시설재배지 환경관리 시스템 제어의 최적화가 필요하다.

1-3 연구개발 목표

(1) 연구개발의 최종목표

- 저가의 등유 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 겸용 복합시스템 개발
- 난방과 CO₂ 공급을 통한 수경재배 딸기 농가 화석에너지 사용 절감

(2) 연구개발의 주요 내용

- 등유를 연료로 하는 소형 보일러를 이용하여 연소 가스를 정화하여 시설내부에 CO₂로 사용하고 온수는 축열하여 야간에 난방에너지로 이용할 수 있는 저가형 등유 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 겸용 시스템을 개발
- CO₂ 생성을 위한 버너 연소기 선정 및 연소가스의 유해가스 배출 저감을 위한 촉매장치 및 연소가스내의 수증기 제거를 위한 열교환기 설계 및 제작
- 일사량, 온도, 습도 등의 복합 환경에 따른 CO₂ 농도 설정을 위한 제어 프로그램 개발
- 배출 가스 농도에 따른 작물의 생육 영향 모니터링과 식물생육을 억제시키는 유해가스 최소 농도 규명
- 저가의 등유 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템을 소형 온실 설치후 CO₂ 작물생육 특성 연구
- 실용화를 위한 축열/난방 기능을 가진 CO₂ 공급 시스템 및 온실 환경관리 시스템 제어 최적화

(3) 연차별 주요 연구내용 :

가. 1차년도

- 1) CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합형 연소 시스템의 구성 및 연소 제어장치 개발
 - CO₂ 생성을 위한 버너 및 축열 시스템의 설계 및 제작
 - 연소기 배출가스 저감을 위한 촉매장치 개발
 - 연소열 축열 시스템 설계 및 제작
 - 열교환기 설계 및 제작
- 2) 수경재배 딸기 재배온실에 연소 및 축열 복합시스템의 적용 및 유해가스 생육진단
 - 소형 실험용 플라스틱 하우스 제작 및 유해가스에 따른 피해증상 연구
 - CO₂ 농도에 엽 또는 식물 광합성량 특성분석
 - 유해가스에 의한 생리장해 지표 개발
- 3) 축열/난방 시스템 개발 및 사업화
 - CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합형 연소시스템 설계
 - 배기관로 시스템 최적화

나. 2차년도

- 1) CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합형 연소 시스템의 구성 및 연소 제어장치 개발
 - 축열장치 및 CO₂ 공급 최적화 - 축열용량 및 공급 방법 최적화
 - CO₂ 발생기 성능 향상 방안 - 운전조건에 따른 CO₂ 배출 특성 파악
 - 배출가스 저감을 위한 촉매장치 평가 및 최적화
- 2) 수경재배 딸기 재배온실에 연소 및 축열 복합시스템의 적용 및 유해가스 생육진단

- CO₂ 사용 유무에 따른 딸기 생산량 및 품질 구성
- 유해 가스농도에 따른 생리 장애 모니터링
- CO₂ 발생기 및 축열/난방 시스템의 적용 및 성능 개선
- 3) 축열/난방 시스템 개발 및 사업화
 - 연소 및 축열시스템의 문제점 도출 및 시스템 제어 최적화
 - 전체시스템 제어 최적화, On-board system 설계 및 사용자 매뉴얼 작성

다. 3차년도

- 1) CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 최종 평가
 - CO₂ 농도 및 온도 특성 최적화
 - 시설하우스 환경 최적화
- 2) 수정재배 딸기 재배온실에 연소 및 축열 복합시스템의 적용 및 유해가스 생육진단
 - CO₂ 사용 유무에 따른 실증 농가의 딸기 생육, 생산량 및 품질 비교
 - 하계고온기의 멜론, 파프리카의 이산화탄소 시용에 따른 생육비교분석
 - 유해 가스농도에 따른 딸기의 생리적 기능 장애모니터링 및 물질 분석
 - CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 적용에 따른 제어 방법 매뉴얼 작성
- 3) 축열/난방 시스템 개발 및 사업화
 - 농가 현장검증
 - 최종 시스템 문제점 수정보완 및 개발품 설계확정 및 최종시제품 제작
 - 사용자 매뉴얼 제작

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1 국내외 특허 동향

표 2-1 국내외 CO₂ 발생기 관련 특허 동향 분석

개발기술명		저가의 등유 연소형 CO ₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템 개발	난방과 CO ₂ 공급을 통한 수경재배 딸기농가 화석에너지 사용 절감
Keyword		이산화탄소 발생기, 연소, 난방	이산화탄소, 수경재배
검색건수		33	48
유효특허건수		5	3
핵심특허 및 관련성	특허명	이산화탄소 발생기	수경재배 장
	보유국	대한민국	대한민국
	등록년도	2005. 6	2006. 01
	관련성(%)	50	20
	유사점	시설재배지 내에 CO ₂ 공급시스템	소정의 이산화탄소 공급
	차이점	시설재배지의 축열/ 난방을 병행하고자 함	연소형 CO ₂ 공급 및 축열/난방 사용하지 않음

- 표 2-1은 과제 수행 전의 국내외 CO₂ 발생기의 특허 분석 결과임
- 우리 연구에서 개발하려고 시도하는 소형 저가의 CO₂ 발생기에 부가적으로 축열 및 난방시스템을 갖춘 복합시스템은 전무한 상태임
- 과제를 수행하면서 2건의 특허(출원 1: 식물 제배용 이산화탄소 발생 장치(출원번호 2013-0006914), 출원 2: 내연기관을 이용한 독립적 식물공장(출원번호: 2013-0115298))를 출원하여 1건은 등록(등록 1 : 식물 제배용 이산화탄소 발생 장치(특허 10-1361152)) 되었음

2-2 국내외 논문과 연구과제와의 관련성

표 2-2 국내외 CO₂ 발생기 관련 논문 동향 분석

개발기술명		저가의 등유 연소형 CO ₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템 개발	난방과 CO ₂ 공급을 통한 수경재배 딸기농가 화석에너지 사용 절감
Keyword		온실, CO ₂ , 이산화탄소 발생/ 공급	수경재배, 이산화탄소 발생/공급 온실
검색건수		3	70
유효논문건수		1	4
핵심논문 및 관련성	논문명	연소식 CO ₂ 발생기 사용시 온실 내 CO ₂ 및 유해가스 농도 분석	거봉 포도 2기작 재배 시 근권 가온 및 CO ₂ 시용이 생장 및 과실 품질에 미치는 영향
	학술지명	한국생물환경조절학회	원예과학기술지
	저 자	박종석, 신중화, 안태인, 손정익	오성도, 김용현, 최동근
	게재년도	2010. 12	2001
	관련성(%)	50	30
	유사점	온실내 연소식 CO ₂ 발생기 활용	과채류에 CO ₂ 공급 영향
	차이점	CO ₂ 발생기와 축열/난방 겸용 개발	CO ₂ 발생기와 축열/난방 겸용 개발

- 표 2-2는 과제 수행 전의 국내외 CO₂ 발생기 관련 논문의 분석 결과임
- 우리 연구에서 개발하려고 시도하는 소형 저가의 CO₂ 발생기에 부가적으로 축열 및 난방시스템을 갖춘 복합시스템은 전무한 상태임
- 과제 수행 결과 다수의 논문 게재함(국내 편, 국제 SCI(E)급 편)

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

3-1 1차년도 연구개발 수행내용

연구 범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
CO ₂ 생성을 위한 버너 연소기 설계 및 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 168MJ/h 버너연소기 설계 및 제작 - 버너연소기의 배출가스 특성 (CO, HC, NO_x, SO_x) 파악 - 세라믹, 터보 방식 적용 버너의 연소방법에 따른 CO, HC 저감 방안 강구 - CO₂ 생성량 결정 및 버너 연소 시간 결정 - 공연비에 따른 배출가스 특성 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 146MJ/h CO₂ 발생기 설계 및 제작 완료 - 연소기의 배출가스 배출 특성 분석 - CO₂ 생성량 결정 및 버너 연소 시간 결정 - 공연비에 따른 배출가스 특성 파악
연소가스의 배출가스 저감을 위한 촉매장치 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 촉매 설계(PF, OC(산화촉매)) 및 개발 - 촉매 장착 전과 후의 배출가스 정화효율 평가 (MEXA 540JK 등 사용) - 입자상물질의 촉매 전·후단의 비교 평가 - 배출가스 온도 분포와 촉매 설치 위치 선정 	<ul style="list-style-type: none"> - OC, PF 촉매 개발 - 배출가스 농도 및 촉매 정화효율 평가 - 입자상물질 배출특성 평가 - 촉매 조합(CO+MPF) 선정과 배출가스 온도 평가
연소열 축열 시스템 설계 및 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 168MJ/h 연소기의 배기열 회수 장치 설계(축열 시스템) 및 제작 - 보조 난방을 위한 축열 용량 결정 - 축열을 위한 순환펌프 용량 결정 	<ul style="list-style-type: none"> - 연소열 축열 시스템 평가 - 순환펌프에 의한 원활한 열교환 및 축열용량 등 평가
열교환기 설계 및 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 배기열의 응축을 위한 열교환기 설계 및 제작(배기온도 온도 40℃ 이하) - 축열 에너지의 재사용을 위한 판형 열교환기 설계 및 제작 	<ul style="list-style-type: none"> - 1, 2단 응축기 사용으로 배기온도 45.6℃(배기관 최종단 40℃ 이하) - 열교환기 제작 및 평가

배기관로 시스템 최적화	<ul style="list-style-type: none"> - 초기 보일러 연소시 배출가스 시설재배지 외부로 배출(필요시) - CO₂ 필요량 확보 후 배기 시설 재배지 외부로 배출 	<ul style="list-style-type: none"> - 전동식 배기관 설치로 필요시 CO₂의 시설재배지 및 내 외부로 공급/소기 제어 가능 - 하우스내 CO₂ 공급을 위한 blower 및 열교환기 설치
소형 실험용 플라스틱 하우스 제작 및 유해가스에 따른 피해증상 연구	<ul style="list-style-type: none"> - 연소 및 난방 시스템의 Parameter study를 위한 소형 플라스틱 하우스 제작 - 소형 챔버를 내에서의 표준 가스를 주입을 통한 농도별 CO와 HC 공급시 딸기 생리장해 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존의 비닐하우스로 대체(학교 토지 사용의 제한과 2013년도의 면적 확보 가능) - 소형 유리병 챔버(2리터)의 어린 딸기묘를 입상 시켜 표준 CO와 에틸렌 가스를 주입시켜 어린엽의 엽록소 함량측정
CO ₂ 농도에 엽 또는 식물 광합성량 특성분석	<ul style="list-style-type: none"> - 일중광도에 따른 식물광합성 특성 분석 - 광도와 CO₂ 농도에 따른 엽광합성 특성 분석 - CO₂농도에 따른 엽광합성 효율 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 광도에 따른 식물광합성 측정 (CO₂ 농도를 1000ppm으로 유지 후 감소율 분석) - 광도와 CO₂농도에 따른 엽광합성 특성은 식물광합성 특성으로 대체(엽광합성의 경우 변위가 심하여 식물체 전체를 측정하였음) - CO₂농도에 따른 엽광합성 효율은 CO₂농도별 단위 엽면적당 CO₂의 흡수율 분석
유해가스에 의한 생리장해 지표 개발	<ul style="list-style-type: none"> -CO와 HC의 농도가 딸기 어린엽의 생리장해 영향평가 -연소시 생성된 PM이 작물 생육에 미치는 영향 평가 - 온실피복재 내부의 PH변화 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> - 밀폐된 유리병에 표준 CO를 주입한 후 어린엽의 출엽시 엽록소함량을 측정함 - PM의 분진이 엽표면을 덮었을 거라 가정하고 엽위의 도포면적에 따른 식물광합성 측정량 비교 - 연소가스를 온실내부에 지속적으로 시용 시 피복재 내부에 공급되는 가스가 내부 결로에 의한 피복재에 부착된 경우

1. CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합형 연소 시스템 및 제어장치

가. 연구개발 내용

- CO₂ 생성을 위한 버너연소기 설계 및 제작(168MJ)
- 연소가스의 배출가스(HC, CO) 저감을 위한 촉매장치 개발(산화촉매 300°C, CO:80% 정화율)
- 입자상물질(soot, 그을음) 제거용 촉매필터 개발
- 연소열 축열 시스템 설계 및 제작
- 열교환기 설계 및 제작

. 연구방법 및 연구결과

동절기 고품질·고수익을 위한 원예작물의 재배 시 생육에 필요한 광합성 속도는 광도, 온도, 이산화탄소(CO₂) 농도 등에 큰 영향을 받는다. 이 중 이산화탄소는 대기 중에 약 350ppm이 포함되어 있다. 겨울철 시설하우스 내의 환기는 제한적이고, 밀폐된 재배 환경에서 광합성에 의한 CO₂의 일방적인 소모는 시설하우스 내의 CO₂ 농도를 감소시킨다. CO₂ 공급방법은 크게 탄화수소 연료의 연소식, 액상 탄산가스의 기화식, 그리고 고체 분말형 공급식 등이 있다. 사용 연료에 따라 LPG, NG(천연가스), 등유 등으로 구분되는 연소식은 액상탄산가스를 사용하는 것에 비해 설치비가 저렴하나, 불안전 연소에 의한 유해가스가 발생할 우려가 있다.

이 연구의 목적은 등유 연소형 CO₂ 발생기를 개발하고 연소기의 유해한 배출성분은 촉매를 사용하여 저감시키며, 연소열 및 배기열은 축열하여 난방이 필요할 때 선택적으로 사용할 수 있는 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템을 개발하는 것이다.

(1) 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 설계

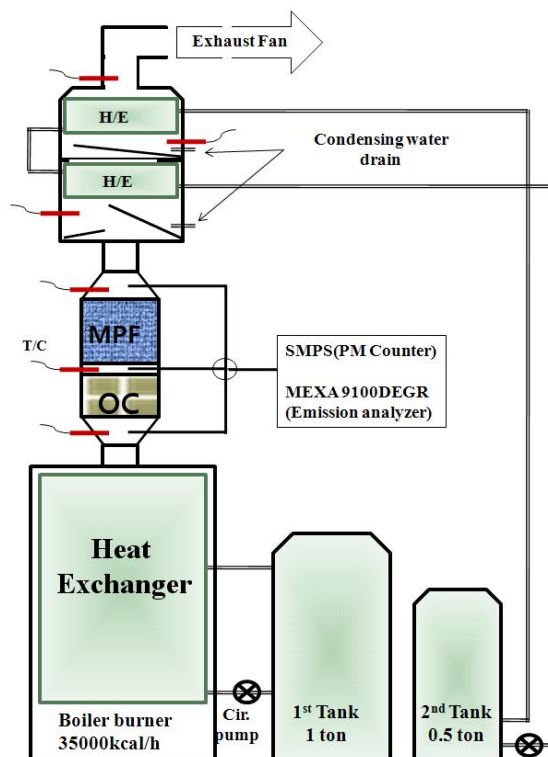


Fig. 1-1. 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 실험장치 개략도

- Fig. 1-1은 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 실험장치 개략도를 나타내었다. CO₂ 생성을 위한 연소기(경동 LFA-35K)는 147MJ/h 열용량과 난방효율 87%의 등유·경유 겸용이다.
- 연소기에서 배출되는 CO₂, CO, THC, O₂, 그리고 NO_x의 배출가스 농도는 MEXA-9100DEGR (Horiba)를 사용하여 촉매 전·중·후단에서 연속적으로 측정하였다.
- 배출가스 저감을 위한 후처리장치에는 전단에 cordierite 계열의 산화촉매(1.2L, 400cpsi, Pt: 2.12g/L), 후단에 입자상물질 제거를 위한 금속망 촉매(2.4L, 300cpsi, Pt: 0.53g/L)를 사용하였다.
- 보일러에서 배출되는 입자상물질의 입자수농도 분포의 측정은 CPC의 최대 입자수 측정 한계 때문에 자체 제작한 1, 2단 희석장치를 통해 132배 희석한 후 SMPS(Scanning mobility particle sizer, Model: 3080, TSI)를 이용하여 측정하였다.
- 응축형 열교환기의 회수 열량은 순환펌프에 의해 강제 순환되는 순환수 유량과 열교환기 입·출구단의 순환수 온도차로 측정하여 결정하였다. 열교환시 생성된 응축수의 질량은 정밀 저울을 사용하여 측정하였다. 또한 연소기 입·출구단, 연소기 열회수기의 입·출구단, 배기열 회수기의 입·출구단, 촉매 전·중·후단, 그리고 배출단의 온도는 각각 K-type 열전대(직경 1mm)를 사용하여 측정하였다.
- 배기팬(Exhaust fan)은 연소기의 배기관에 촉매와 열교환기 설치에 따른 유동저항의 극복하기 위하여 설치하였다. 각각 장치의 제원은 후에 상세히 설명한다.

(2) CO₂ 생성을 위한 버너연소기 설계 및 제작

- CO₂ 생성을 위한 버너 연소기의 선정은 경동보일러(LFA-35K)를 사용하였다. 열용량(출력)은 최초 계획했던 168MJ/h(40,126kcal/h) 보다 21MJ/h 낮은 147MJ/h(35,000kcal/h)를 사용하였다 (Table 1-1 참조). 최초 계획보다 열용량을 낮춘 이유는 이 보다 큰 연소기의 경우 209MJ/h (중형 연소기)로 높아 소형 보일러 버너 연소기 중 가장 용량이 높은 본 연소기를 선정하였다.

Table 1-1. 연소형 CO₂ 발생기 사양

Specifications		LFA-35K
난방, 온수출력	kJ/h(kcal/h)	146,540(35,000)
난방 전부하 열효율	%	87
저당량	L	40
배기관경	∅, mm	75
배관	A	난방 32, 온수 15
중량	kg	74(38*68*87)
연료소비율	L/h	4.68

- 버너연소기의 열효율은 동일한 체적의 열교환기 사용시 열교환기 재질(철, 스테인레스)에 따

라 달라진다. 철 재질의 제품을 사용한 이유는 일반 농가에서 가장 많이 보급되어 사용되고 있고, 연소기에서 배출되는 유해한 배출성분을 정화할 때 촉매의 온도가 상대적으로 높은 것이 유리하기 때문이다.

CO₂ 농도 및 공급량 산출

- 비닐하우스 한 동의 크기는 폭 6m, 길이 100m, 그리고 높이를 3m로 가정하면, 1800m³이나, 아치형을 이루고 있기 때문에 전체 비닐하우스의 체적은 1560m³으로 가정하였다. 원예작물의 하우스시설 내의 적정 이산화탄소의 농도는 작물의 종류에 따라 달라지나 이산화탄소 1000ppm을 확보하기 위한 등유 연료의 사용량은 아래의 계산식에 의해 결정한다. 이때 비닐하우스 내의 이산화탄소의 농도를 0이라고 가정하고 계산하였다.
- 실내 등유의 석유환산계수(순발열량 : 잠열제거)는 0.820, 탄소배출계수 0.812이므로 1리터의 실내등유로 생산할 수 있는 CO₂량은 2.44kg(실내 등유 고위발열량 : 36.8MJ(8800kcal), 저위발열량 : 34.3MJ)
- 시설재배지 1동(660m²)의 체적: 1560m³, 1m³=1.286kg(공기), 비닐하우스 내 공기 무게: 2008kg 이므로, 하우스내의 1000ppm CO₂량은 3.1kg (1,560,000L/22.4L=69,600mol, 69,600×(1,000×(44g/100만)) ≒ 3,100g)이다. 등유 1리터에 의해 생성되는 CO₂량이 2.44kg이므로, 3.1kg CO₂를 생성하기 위해 약 1.27리터의 등유가 필요하다.
- 따라서 시간당 연료소비율 4.68L를 고려하면 1시간 중 16분만 연소하면 필요한 CO₂ 공급이 가능하여 본 연소기로 충분한 CO₂ 생성 및 공급이 가능하다.

(3) 연소가스의 배출가스 저감을 위한 촉매장치 개발

- Fig. 1-2는 연소기의 배출가스 배출특성 및 촉매 전·후단의 배출가스 농도를 나타내었다.
- 촉매 및 열교환기가 제거된 연소기에서 연소 온도가 정상상태에 도달한 후 배출되는 배출가스 농도는 산소 농도 6%, CO₂ 10.5%, CO 24ppm, THC 8ppm, NOx 36ppm 수준이다. 하우스 내의 CO₂ 농도를 1000ppm(배출농도의 1/100 수준)으로 가정하면 하우스내의 CO, THC, NOx의 농도는 수십 ppb 수준이다. 따라서 정상적인 연소를 할 경우 촉매없이도 하우스내의 CO₂ 공급에는 큰 문제가 없을 것으로 판단한다.

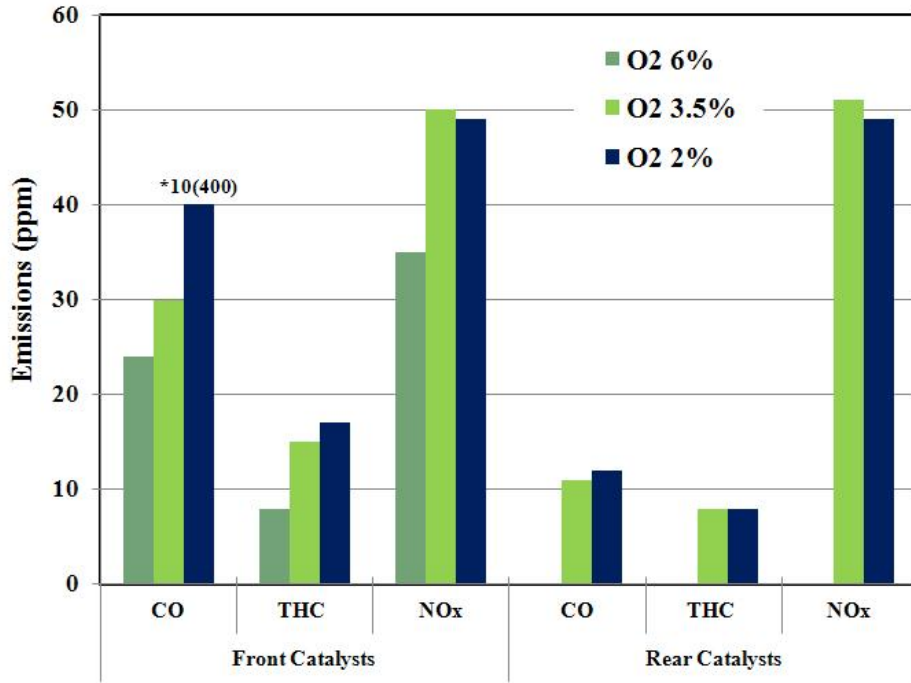


Fig. 1-2. 배출가스 배출특성 및 촉매 전·후의 배출가스 농도

- 연소기가 연소를 시작한지 1분 이내에 매우 높은 농도의 유해 배출가스를 배출하는데 이는 초기 연소온도가 매우 낮고, 연료의 벽면 wetting에 의한 현상으로 판단한다. 따라서 초기 연소온도가 정상상태에 도달할 때까지 하우스 내부에 CO₂를 공급하는 것은 바람직하지 않다.
- 연소기의 배출가스 중 CO 농도는 공연비(공기/연료비, 약 2% 산소($\lambda=1.1$))에 큰 영향을 받았으나, THC 및 NOx 배출농도는 큰 영향이 없었다.
- 배출가스 후처리장치의 산화촉매와 입자상물질 저감촉매의 효과로 CO는 약 60%, THC는 약 50% 이상 정화되었다.
- 특히 산소농도가 낮은 경우(O₂ 2%) CO의 배출농도는 약 400ppm이상 이였으나 촉매에서 95% 이상 정화되었다. 이때 촉매 전단의 배출가스온도는 약 250℃이다. 이는 왜 연소기에 배출가스 후처리장치가 필요한가를 단적으로 보여준다. 불안전 연소에서 생성되는 CO 및 THC는 후처리장치에 의해 효과적으로 저감되며 연소기에 촉매의 장착은 필수적이다.
- 배출가스 후처리장치 및 열교환기의 장착은 배기관의 저항을 증가시켜 연소에 필요한 공기를 원활하게 공급하는데 문제를 초래할 소지가 있어 배기관의 저항을 최소화하는 방안과 배기팬으로 공기를 배출하는 방안이 고려되어야 한다.
- 배출가스 온도는 산소농도가 높을수록 높은(270℃) 특징이 있는데 이는 연소기내의 열교환기에서 흡입 공기유량이 많을수록 충분한 열교환이 이루어 지지 못하고 배기되기 때문이다. 배출가스 후처리장치 및 열교환기를 장착하였을 때의 배출가스 온도는 촉매가 충분히 활성화될 수 있는 250℃을 유지하였다.

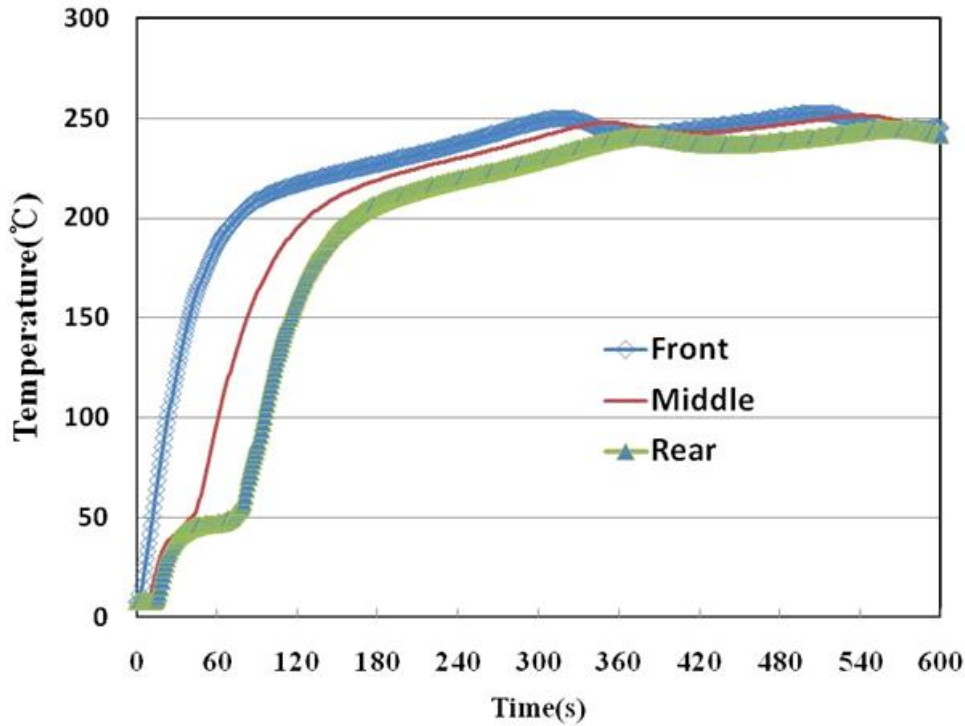


Fig. 1-3. 전·중·후단의 배출가스 온도

- Fig. 1-3은 촉매 전단, 산화촉매 후단, 그리고 입자상물질 제거 촉매 후단의 배출가스 온도를 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 초기 연소시 연소기에서 배출되는 배출가스 농도는 매우 높으며, 촉매가 충분히 활성화되는 온도까지 연소가스를 하우스 내부가 아닌 외부로 배출할 필요가 있다.
- 배출가스 온도는 약 60초 후 200°C 정도를 유지하여 연소가 안정화되나, 입자상물질 제거 촉매의 후단 온도는 약 165초 이후 200°C에 도달한다. 따라서 촉매가 충분히 활성화하는 3분 이내에는 가급적 연소가스를 외부로 배출하고 이후 하우스 내부로 공급하는 방안이 유력하다.
- 300초 이후 배출가스 온도의 변화는 연소기의 열교환 탱크 내부의 순환수 온도가 60°C 이상이면 저장되어 있던 물이 순환모터에 의해 강제로 순환하기 때문에 발생한다.

Table 1-2. 배출가스 유해성분 제거를 위한 사용 촉매 사양

Item	Cell density	PM loading
OC(Oxidation catalyst)	400cps(5.66"*3")	60g/ft3(2.12g/L)
	400cps(5.66"*2")	50g/ft3(1.77g/L)
MPF(Metal Particulate Matter Filter)	300cps(5.66"*6")	15g/ft3(0.53g/l)

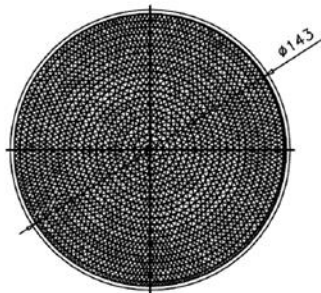
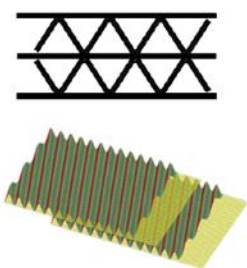
- Table 1-2는 유해한 연소가스의 정화에 사용한 촉매사양을 나타내었다. 배기후처리 시스템의 전단에 산화촉매(Oxidation Catalyst), 후단에 입자상물질을 제거할 수 있는 금속망 촉매(Metal Particulate Matter Filter)를 장착하였다.

- 전단의 OC는 CO 및 THC의 산화 저감과 입자상물질 산화에 사용될 NO₂ 생성에 사용되며, 후단의 MPF에 포집되는 PM(Particulate matter, soot)는 NO₂ 및 촉매 반응에 의해 산화된다.
- 촉매의 가격에 가장 큰 영향을 미치는 것은 귀금속의 담지량이기 때문에 시제품 제작시에는 OC 촉매의 귀금속 담지량을 낮추었고, 촉매의 크기도 3inch에서 2inch로 줄였다.



Fig. 1-4. 저감을 위한 촉매시스템의 구성

- Fig. 1-4는 배출가스 저감을 위한 촉매시스템 구성으로 좌측 상단의 촉매는 MPF이며, 우측 상단은 OC이다. Canning과 촉매 사이는 단열효과가 우수한 매트를 사용하여 단열하였고 캐닝은 촉매를 교환할 수 있는 형태로 설계 제작하였다.

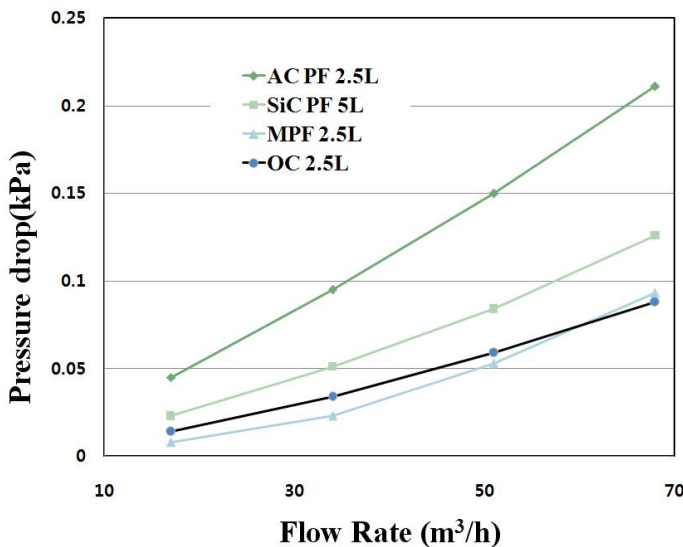


Item	Specifications
Material	SUS310s
Pitch	4mm
Density	300cps
Corrugation angle	18°
Mesh	80
Wire	0.14

Fig. 1-5. MDF 촉매의 형상과 사양

- Fig. 1-5는 MDF (Metal Particulate Matter Filter) 촉매의 형상 구조와 촉매 재질 사양을 나타내었다.
- 자동차에서 배출되는 입자상물질을 저감하는 촉매로는 세라믹 모노리스 필터가 사용되며, 약 90% 이상의 입자상물질의 저감이 가능하다. 그러나 필터의 재질이 코디어라이트(Cordierite), SiC, AT로 가격이 비싸고 후에 논하겠지만 과도한 배압상승을 초래하여 본 연소기에 적용은 불가하였다.
- 금속소재의 필터는 Partial DPF 구조로 배기가스 중 포함된 입자상물질(PM)의 약 50% 정도를 저감하는 효과가 있는 것으로 알려져 있으며, 낮은 배압 그리고 높은 열전도에 따른 필터의 내구성 확보가 가능하다.
- MPF는 복잡한 유로의 기공을 배기가스가 통과하게 되고 이때 입자상물질은 스크린 구조의 wire에 충돌하여 확산 및 간섭의 효과로 포집되는 구조를 갖는다.

후처리용 촉매 선정



(a) 차압특성

(b) 차압측정 장치

Fig. 1-6. 촉매 선정(촉매 종류와 유량에 따른 차압특성)

- 촉매는 낮은 온도에서 높은 정화성능을 나타내어야 하지만 유동 저항이 높을 경우 그 사용이 제한적이다. 자동차용 촉매로써는 사용이 가능하나 연소기의 촉매로써 사용 가능성을 파악할 필요가 있다.
- 연소를 위한 공기를 공급하는 여러 가지 방법 중 풍압에 따른 분류는 Fan: 1000mmH₂O(9.8kPa), Blower: 1000-10000mmH₂O, Compressor: 10000mmH₂O 이상으로 정의하는데 CO₂ 생성을 위한 연소기에 사용되는 팬은 풍압이 매우 낮기 때문에 유동저항이 낮은 촉매를 선정하여 한다.
- Fig. 1-6 (a)은 OC와 각종 입자상물질 저감촉매(AC, SiC, Metal)의 차압특성을 나타내었고 (b)는 압력측정기, laminar flow, 그리고 blower 등을 이용한 차압 측정장치를 나타내었다.
- OC 및 MPF 촉매의 경우 상대적으로 Full DPF(AC, SiC)에 비하여 차압이 낮았으며, Full

DPF 촉매의 경우 5L 이상이 되어야만 사용 가능한 압력을 유지하였다. Full DPF는 인접한 channel이 막혀있어 flow가 벽면의 기공을 따라 흐르는 구조로 PM 필터링시 차압이 크게 증가하는 특징이 있다.

- 따라서 본 연구에서는 차압이 낮고, 유동저항이 적어 연소상태가 우수한 OC와 MPF를 혼합하여 사용하였으며, Full DPF의 경우 연소상태가 급격하게 악화되어 CO 및 THC가 다량 발생하는 문제점이 있어 사용할 수 없었다.

SMPS(model: 3080, TSI)	
Description	Specification
Particle size range (L-DMA 3081)	Adjustable: 10 to 1000nm
Upper concentration limit (3025A CPC)	105(particles/cm3)
Scanning time	30-300sec
Diluter(ejector type, CNU)	
Diluter	Dilution ratio
1st diluter	1:12
2nd diluter	1:11 (TDR 1:132)



Fig. 1-7. 입자농도 분포 측정 장치 사양 및 시스템 구성도

- 연소기의 입자상물질의 입자농도 분포를 측정을 위한 실험장치는 Fig. 1-7에 나타내었다. 고농도의 입자수를 측정하기 위하여 희석과정은 필수적이며, 이때 1st diluter의 희석 혼합비는 1:12이며 응축된 수분도 입자수로 측정되기 때문에 희석공기를 150°C로 가열하여 응축 입자의 생성을 억제하였다.
- 입자농도 분포의 측정범위는 10.4-392.4nm이며, 1회 스캔시간은 1분이다. 연소상태가 안정화된 이후 3회 측정된 값의 평균값으로 입자농도 분포를 나타내었다.

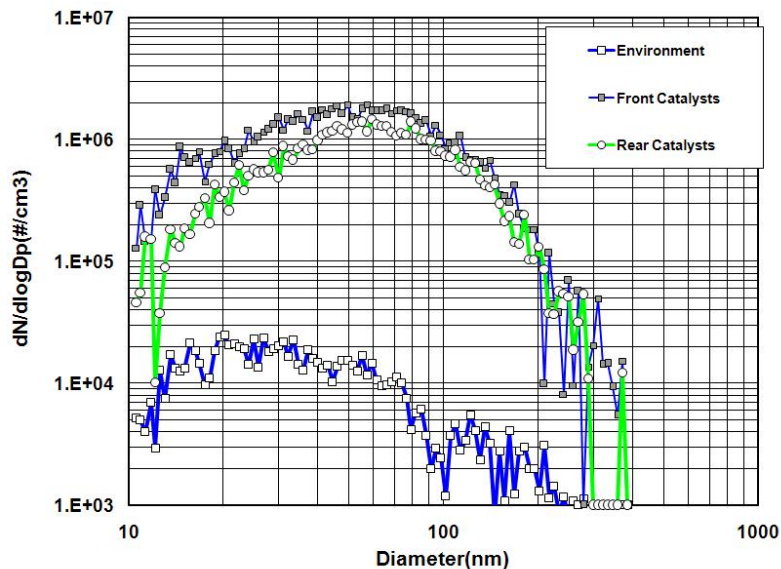


Fig. 1-8. 연소기의 입자농도 분포

- Fig. 1-8은 연소기에서 연소시 생성되는 입자농도 분포를 나타내었다. 대기 상태의 입자는

20-30nm의 입자수농도가 높았으며, 이는 미세 먼지와 수분에 의한 영향이다. 대기상태의 측정에서는 입자수 농도가 매우 낮기 때문에 희석과정을 생략하고 바로 대기상태의 입자수를 측정하였다.

- 연소기에서 생성된 입자상물질을 촉매 전단과 촉매 후단에서 각각 측정하였다. 입자상물질의 입자수농도는 디젤엔진의 경우 입자수가 $10^7 \sim 10^8/cm^3$ 수준이나, 연속적으로 연소하는 연소형 연소기의 경우 $10^5 \sim 10^6/cm^3$ 으로 낮았고, 약 60-70nm의 입자수가 가장 많이 배출되고 있다.
- 스크린 구조의 wire에 충돌하여 확산과 간섭효과로 포집되는 구조인 MPF의 입자수 저감율은 약 20-30%로 인체에 유해한 100nm 이하의 입자수 저감율이 높았다.
- Fig. 1-9는 연소기 후단의 산소농도(공연비)에 따른 입자수농도 분포를 나타내었다. 연소기는 항상 일정량의 연료를 동일한 분사압으로 분사하고 연속적으로 연소한다. 따라서 간헐적으로 연소하는 디젤엔진에 비해 입자수농도가 낮은 특징이 있으나, 불안전 연소율이 증가하면 입자수농도가 급격히 증가하는 특징이 있다.
- 연소기 흡입구의 흡입공기량을 조절하여 산소농도를 2% 정도로 낮추면 불안전 연소율이 급격하게 증가하고 입자수농도도 산소농도 3.5% 일 때 보다 약 8배 증가하는 특징이 있다. 이는 디젤 자동차에서 배출되는 입자수농도 수준으로 최근 1급 발암물질로 분류된 입자상물질의 저감은 꼭 필요하다.
- 그리고 연소기에서 배출가스나 입자상물질 배출농도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 산소농도이다.

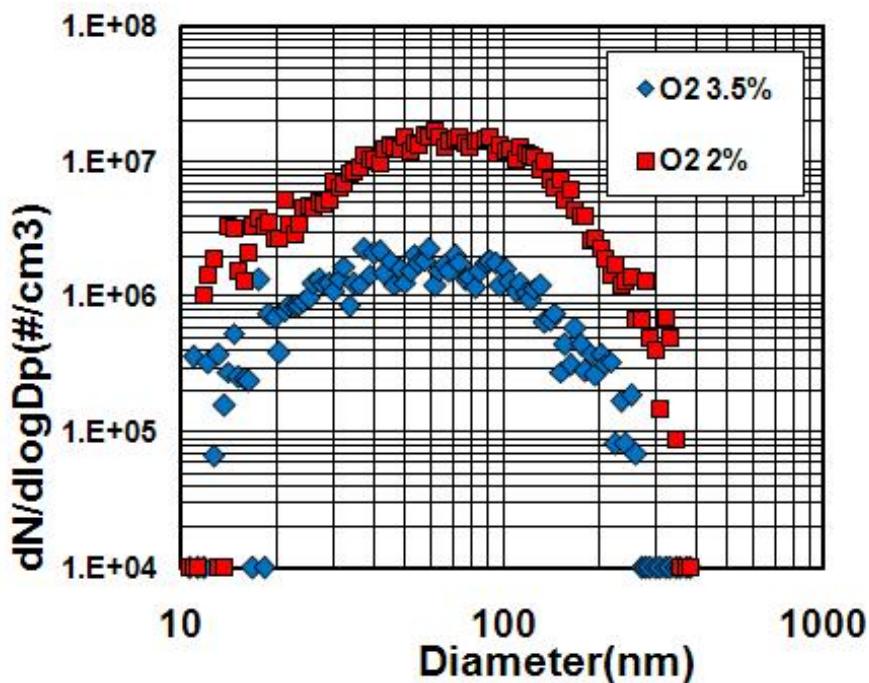


Fig. 1-9. 농도에 따른 입자수농도 분포

(4) 연소열 축열 시스템 설계 및 제작

- Fig. 1-10은 연소열 및 배기열 교환기의 축열시스템을 나타내었다. 축열탱크는 연소열 축열

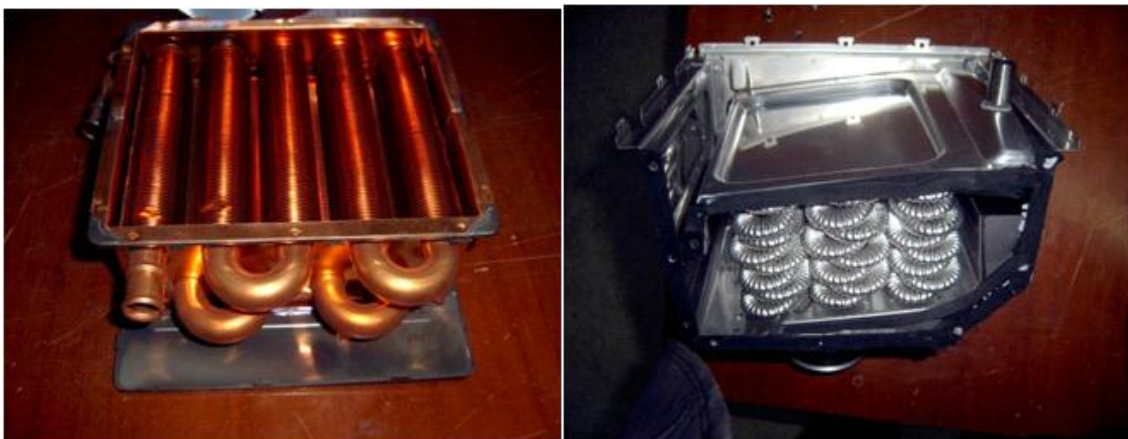
탱크 2ton, 배기열 축열탱크는 1ton으로 선정하였으며, 연소열 열교환의 경우 저탕(연소기 내부에 순환되는 순환수) 온수의 온도가 60℃에 도달하면 순환 펌프가 작동하여 열교환이 시작된다.

- 순환펌프의 용량은 사양상 45L/min(2.7m³/h)이나 유량계로 측정한 결과 1.8m³/h이다. 연소열 교환기의 입구단의 온도와 출구단의 온도차 그리고 순환 유량으로 계산한 연소열 교환량은 27,930kcal/h로 스펙상의 35,000kcal/h의 80% 수준이다.
- 그러나 이때 소모된 연료 소비율 역시 3.88L/h로 스펙상 4.68L/h의 82%임을 감안하면 대기중으로 일부 방열된 열손실을 제외하고 연소열은 축열됨을 확인하였다.



Fig. 1-10. 축열 시스템

(5) 열교환기 설계 및 제작



(a) 동형 열교환기

(b) 서스형 컨덴싱 열교환기

Fig. 1-11. 배기열 열교환기

- 배기열 열교환시 응축을 위한 열교환기 설계 및 제작에서 배기온도의 제약 조건을 40℃ 이하로 규정하였기 때문에 일반적인 열교환기(동형)로 설정 온도를 만족할 수 없었고, 컨덴싱이 가능한 열교환기의 적용이 필요하였다.
- Fig. 1-11은 배기열 회수를 위한 동(2단 열교환기), 서스(1단 열교환기) 일체형 열교환기를 나타내었다. 동형 열교환기는 가스버너 연소열의 열교환시 사용되는 열교환기이며, 서스형 열교환기는 배기를 응축시켜주는 타입의 열교환기로 총 열 교환량은 15,000kcal/h의 가스보일러

용 열교환기이다.

- 두 열교환기를 적용하여 배기 열교환시 동형 열교환기에서 응축이 일어나 응축수가 촉매위로 떨어지는 문제점이 발생하여 동형 열교환기 아랫부분에 응축수를 회수할 수 있도록 형상을 변경하였다.
- 두 개의 열교환기를 동시에 적용하면 배기의 유동저항이 높아지는 문제점이 있어 동형 열교환기를 제거하고 서스형 컨덴싱 열교환기의 용량을 늘려 시설하우스의 축열 난방시스템에 적용하였다.
- 또한 현재의 열교환기 타입이 직사각형이어서 농가에 적용하기 위해 최적의 열교환기를 자체 제작하고 있으며, 2차년도에 열교환기의 최적 설계를 통하여 보다 간단하고 배기열 교환율이 높은 열교환기를 제작할 계획이다.



Fig. 1-12. 열교환기 시스템

- Fig. 1-12는 촉매 후단에 설치한 배기열 회수 열교환 시스템을 나타내었다. 1단 열교환기만을 사용하였을 때 열교환기 후단의 배출가스 온도는 약 83.3℃ 이고, 1, 2단 열교환기를 모두 사용하였을 때 45.8℃ 이다. 배기온도의 제약 조건을 40℃ 이하로 설정한 곳은 하우스내부에서 CO₂를 공급하는 위치임으로 배기온도의 제약조건은 만족하리라 판단한다.
- 1, 2단 배기열 교환기를 조합하였을 때 축열 가능한 에너지는 5100kcal/h이고, 1단 열교환기만을 사용하였을 때의 축열 가능한 에너지는 3600kcal/h였다.
- CH_{1.8}+(1/∅)(1.45)(O₂+3.773N₂), 등유비중 0.82로 가정하여 계산하면 CO₂ 생성량: 2610g/L, H₂O 응축수량 962g/L이다. 이때 실측한 연료 소비율 3.88L/h 이므로 시간당 3.732kg의 응축수가 생성될 수 있다.
- 1, 2단 컨덴싱 열교환기를 사용하였을 때 생성된 응축수는 2.399kg/h이다. 따라서 약 64%의

연소 가스 중 포함된 수분이 응축하여 저감되었다.

(6) 정리

- 연소기에서 배출되는 배출가스는 촉매를 사용하여 정화하면 겨울철 시설하우스 내부의 광합성에 따른 부족 CO₂를 효과적으로 공급할 수 있다.
- 배기가스 후처리장치에서 배출가스 중 CO는 60-95%, THC는 50% 이상, 그리고 입자상물질은 약 20-30% 저감되어 이산화탄소 공급시 시설물 내에 영향을 최소화할 수 있다.
- 고온의 배출가스 열교환시 난방출력의 약 15%가 축열되었고, 등유 연소시 생성된 H₂O는 열교환시 약 64%가 응축, 저감하여 시설물 내 습도 증가를 막을 수 있음

2. 소형 실험용 플라스틱 하우스 제작 및 유해가스에 따른 피해증상 연구

가. 연구개발 내용

- 소형 터널형 플라스틱 온실을 시설하고자 하였으나 전남대학교 농생물관리단의 토지 이용계획에 2013년 토지를 사용할 수 있어 시설 증축은 연기하고, 기존의 플라스틱온실(600m²)의 온실을 사용하였음
- 소형 챔버 내에서의 표준 가스를 주입을 통한 농도별 CO와 HC 공급시 딸기 생리장해 연구를 수행하고자 하였으나, 시스템 설비의 미흡에 의한 차연도 연구수행을 연기하였음
- 석유 보일러의 연소가스를 시용하기 위해 온실의 공기와 연소가스의 비율을 조절하여야 하는데 적적 비율을 산정하지 못하여 본 연구에서는 불안전연소된 가스와 공기의 비율에서 발생될 수 있는 측정 가능한 가스와 공기와 연소가스를 혼합시 발생할 각 가스의 농도를 분석하여 연소가스와 공기의 비율을 최적화 하고자 하였음

나. 연구수행 방법

- 2리터의 유리병에 석유를 면에 소량 묻혀 점화 한 후 유리병 내부에서 소화된 이후의 가스를 포집한 후 GC로 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄, 에틸렌의 대기중의 공기와 비율적으로10ml의 진공 튜브에 공기: 연소가스의 비율을 각각 0:10, 2:8, 4:6, 6:4, 8:2, 10:0의 혼합하여 GC의 메타나이저와 FID를 이용하여 각각의 농도를 분석하였음.

다. 연구수행 내용 및 결과

- 불완전 연소 가스 3ml를 GC-FID에 주입하여 7가지의 종류만을 검사할 수 있었으며, 그중 표

준가스를 보정을 하였던, 일산화탄소, 메탄, 이산화탄소, 에틸렌 등을 정량적으로 분석하였다. 외부 공기가 유입되지 않았던 연소가스에서의 일산화탄소는 1997ppm, 메탄은 636ppm, 이산화탄소는 10027ppm, 511ppm으로 매우 높았다(Fig. 1-13).

- 연소가스에 혼합된 공기의 비율이 높아질수록 유해 가스의 농도는 감소하였다. 그중 과실의 숙기 및 식물의 노화 촉진을 시키는 에틸렌 가스의 경우 공기의 혼합비율이 낮아지면 에틸렌 가스의 농도가 급격히 증가하였으며(Fig. 1-14), 이는 딸기 재배에서의 에틸렌 가스의 노출된 딸기의 경우 유통기간동안 과실의 품질이 감소한다고 보고된바 있다 (1-1). 연소시스템에서의 에틸렌 가스의 농도를 줄이는 것은 완전연소 시스템이지만 석유보일러의 점화시 또는 소화시 미량이 불완전연소가 일어 날 수 있으므로 점화 후 또는 소화 전의 경우 발생된 가스는 외부로 배출되는 모듈이 필요할 것이다. 반면, 딸기 수경재배시 온도와 광도에 의해서 식물체 자체적으로 에틸렌이 발생되어지며 식물의 스트레스에 노출이 되면 에틸렌 생성이 증가하고 광도의 증가에서는 에틸렌 발생이 감소하며, 재배온도가 증가 시 에틸렌 가스 발생이 증가하다고 보고되었다(1-2).

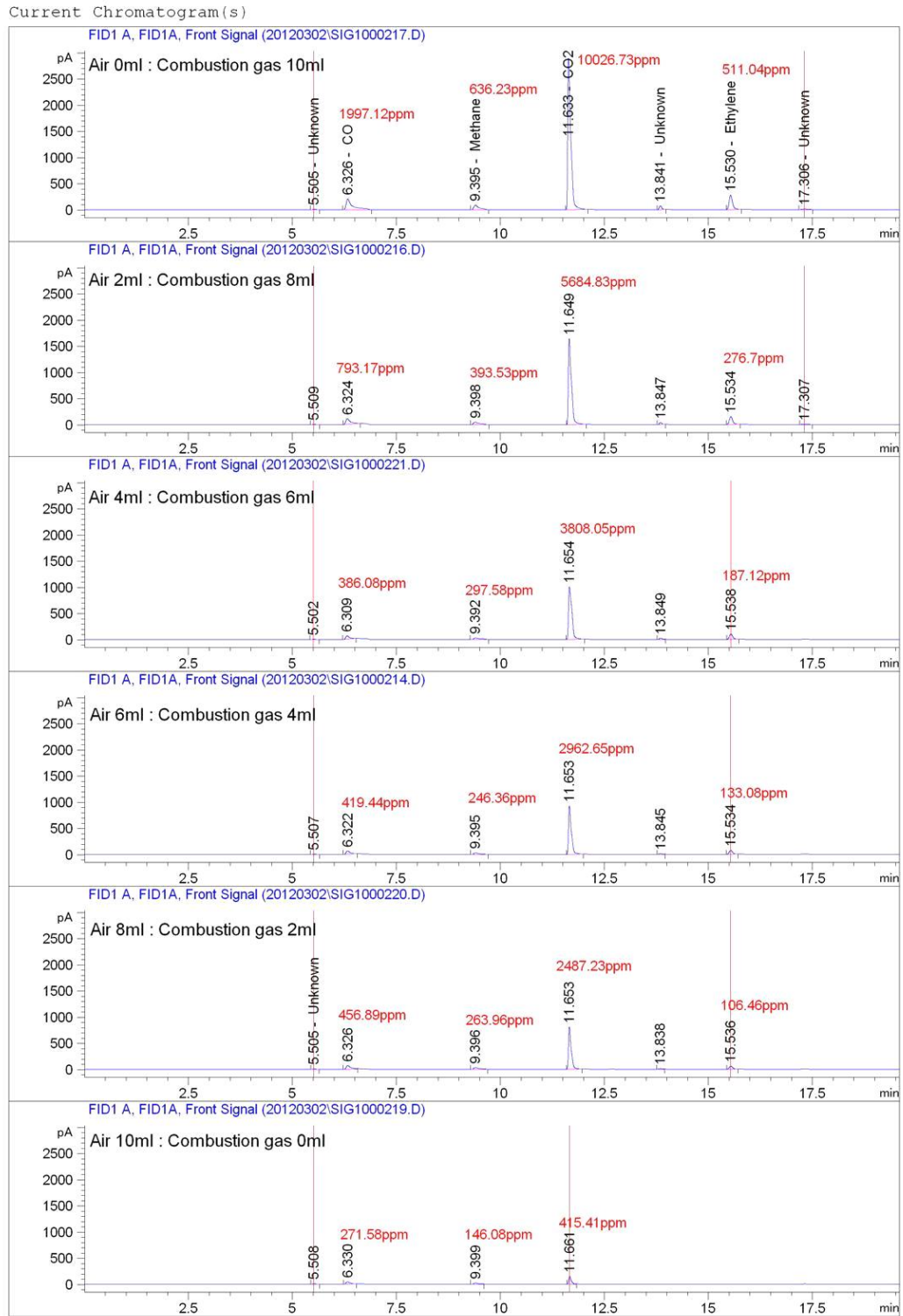


Fig. 1-13. Detection of several gases concentration of incomplete combustion light oil at different mixture ratio of air and combustion gas.

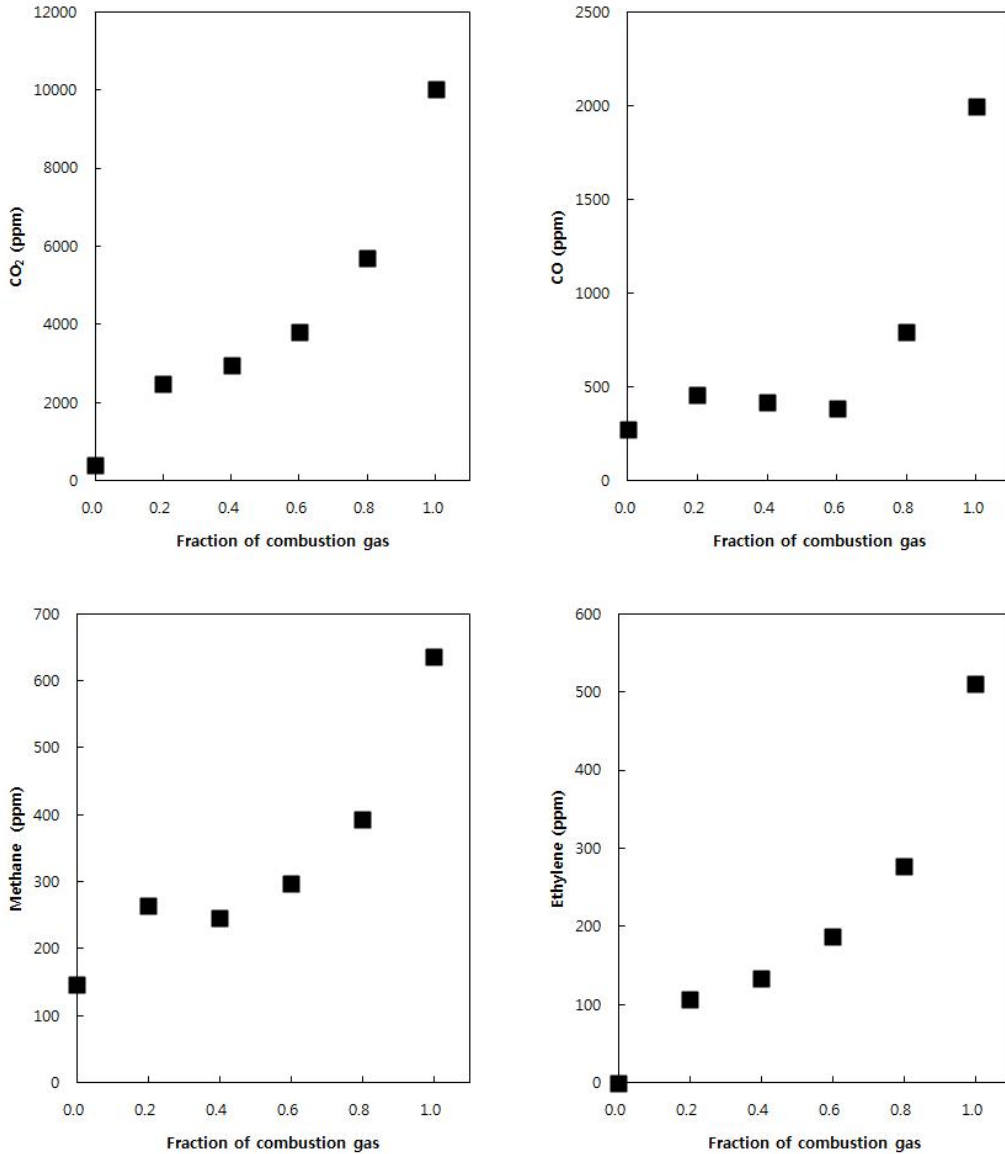


Fig. 1-14. CO, CO₂, Methane and Ethylene concentration as function of fraction of incomplete combustion gas of light oil. The fraction of combustion gas was computed with air volume.

- 에틸렌 가스와 일산화탄소는 공기의 혼합비율이 최소 40% 이상을 확보하여야 하며, 연소 시스템에서의 에틸렌 측정은 센서가 고가이므로 시스템의 전체의 비용이 증가하기 때문에 일산화탄소 농도의 상관을 이용하여 가스내 포함된 에틸렌 가스의 농도를 추정할 수 있을 것이다.
- 본 연구에서는 일산화탄소와 에틸렌 가스의 농도는 로그 관계식을 이용하여 추정한 결과 에틸렌 가스는 일산화탄소의 농도의 log 값에 비례하는 것으로 나타났다(Fig. 1-15). 본 연구에서는 에틸렌 위험수준을 찾고자 하였으나, 9월부터 정식이 들어가는 수정배매 딸기에 시스템이 가동시 공기의 회석비율에 따른 에틸렌 발생 농도를 먼저 규명하는 것이 순차적으로 진행하고자 2년차의 에틸렌 피해증상에 대한 연구를 수행하고자 한다. 딸기는 비급등형 과실이기 때문에 미숙과를 에틸렌 가스를 처리하더라도 후숙이 되질 않는 과실이다.

- 1년차 연구에서는 전체적인 시스템이 완성되지 못하여 재배과정에서의 연소가스가 공기와 혼합되었을 경우 시설 체적내부에 존재하는 공기의 성질을 분석하지 못하였으나, 재배과정에서 겨울철 측창이나 천창환기가 되지 않았을 경우 내부의 유해/무해가스의 농도를 시간대별로 분석하여 연소시간에 따른 알려져 있는 가스의 농도를 분석하였다.

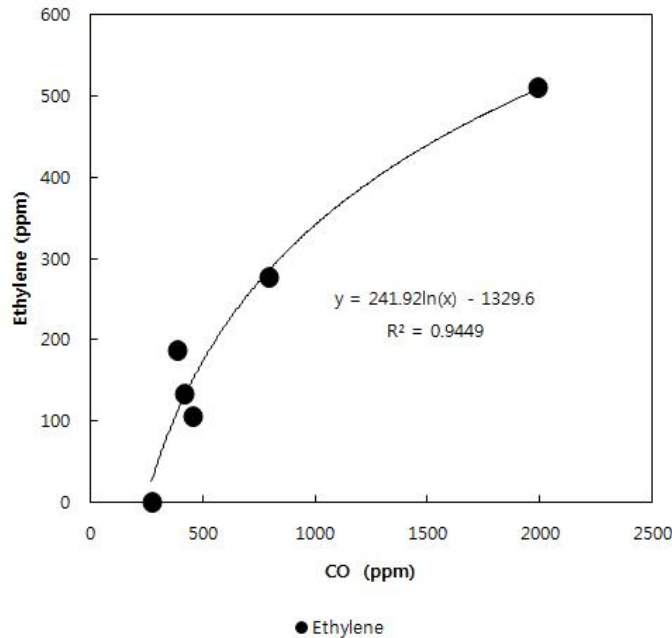


Fig. 1-15. log relationship between CO and Ethylene concentration from the incomplete combustion gas of light oil.

3. CO₂ 농도에 엽 또는 식물 광합성량 특성분석

가. 연구개발 내용

- CO₂ 농도에 엽 또는 식물 광합성량 특성분석
- 엽광합성은 일반적으로 식물의 엽의 위치별, 광도의 노출 기간과 sun leaf와 shaded leaf에 따라 동일한 광도에서도 엽광합성 특성(최대광합성 속도, 초기광합성효율 및 호흡량)이 다르기 때문에 식물광합성을 계측하여 시용하고자 하는 이산화탄소 농도의 최적화를 할 수 있을 것이다.
- 본 연구는 연소가스의 농도 조절에 필요한 적정 시비 기준을 마련하고자 이산화탄소 농도에 따른 식물 광합성을 측정하고 하였음
- 시설원에 작물의 광합성에 관련된 이산화탄소의 최적 농도는 1000ppm으로 알려져 있지만, 그이상의 농도에서도 광도와 온도의 증가에 따라 광합성 속도는 증가하게 된다.
- 외부 광환경에 따른 온도변화가 심한 시설내부에서는 환기를 하거나 겨울철임에도 불구하고 태양광의 적외선에 의한 시설내부의 온도는 고온이기 때문에 환기 또는 냉방이 필요하다.

- 냉방의 경우 시스템의 비용이 증가하고 유지관리 비용이 높기 때문에 환기가 현 시점에서는 가장 경제적인 온도 조절 방법이다.
- 이산화탄소의 시용은 식물 및 작물의 광합성속도를 증가하고 광합성량을 증가 태양 광도가 증가함에 따라 시설내부의 온도 증가에 의해 환기가 필요하게 됨

나. 연구수행 방법

- 딸기 품종 ‘설향’을 담액수경 시스템에서 형광등 하에서 재배하였다. 식물광합성 측정은 아크릴판 8mm로 제작된 바닥이 오픈된 챔버 내부 사이즈는 L450*W530*H185로 챔버를 스트로폼으로 30mm 높였다. 챔버를 놓은 테이블위는 고무판이 깔려 있으며, 스티로폼 (W30* H30*L500)를 고무판에 고정하고 고무판과 스티로폼 아래에 통신케이블들을 고정하고 PE비닐 테이프로 고정하고 빈틈을 바셀린을 주사하여 틈을 밀폐하였다. PE 테이프로 고정된 스티로폼 위에 아크릴 챔버 놓고 알루미늄 테이프로 밀폐할 수 있도록 하였다.
- 챔버는 CO₂를 주입하고 챔버내부의 공기를 회수하여 CO₂와 H₂O 분석 장치인 LI-840a (LI-COR, USA)에 거쳐 나온 가스를 다시 챔버내로 공기를 순환시켰다. CO₂ sampler (유니텍, 서울)을 이용하여 챔버내의 공기를 LI-840a로 이동하게 하고 측정된 공기는 다시 챔버내로 순환되게 하였다. CO₂ 농도는 1000ppm을 설정하여 설정된 농도가 일정한 기간이 지난 후부터 챔버내의 CO₂ 농도를 10초당 컴퓨터에 연결된 LI-840a로 측정하여 기록하였다.
- 인공광원은 Bar 형태의 된 청색광, 적색광, 청적색 혼합광으로 된 LED를 청색광과 적색광의 비율을 50:50%로 조절하여 딸기의 식물 광합성 특성을 조사하였으며, 챔버내의 CO₂의 흡수율, 단위 엽면적당 CO₂의 흡수율 및 단위 엽중에 따른 엽면적당 CO₂의 흡수율을 계측하고 분석하였다. 측정된 값은 독립변수를 180초간의 평균 CO₂ 농도와 180초간의 CO₂의 감소율 직선회귀 분석한 회귀계수를 작물의 CO₂ 흡수율로 환산하여 광합성속도로 나타냈으며 (ppm s⁻¹), 챔버내의 전체 식물체의 엽면적을 측정하고 비엽적은 계산하여 챔버내의 CO₂ 흡수율을 총엽면적 또는 평균 비엽면적으로 나뉘어 단위 엽면적당 광합성율 (ppm m⁻² s⁻¹)과 단위 비엽면적당 광합성율(ppm m⁻² g⁻¹ s⁻¹)을 비교하였다.
- 독립변수를 평균 CO₂ 농도로 종속변수를 챔버내 CO₂ 흡수율, 단위 엽면적당 광합성율 및 비엽면적당 광합성율을 negative exponential 함수를 이용하여 SPSS (SPSS, USA)의 비선형회귀분석 한 후 모수를 추정하였다. CO₂ Responses curve fitting을 위해 사용된 함수는 negative exponential curve를 이용하여 작물의 총광합성량 또는 CO₂ 총흡수율 (P_{gross}), 최대 총광합성율 및 최대 CO₂ 흡수율(C_{max}), 상대광합성율 및 상대 CO₂ 흡수율, 작물의 호흡량 또는 작물에 의한 CO₂ 방출율(R)의 모수를 추정하고 파장의 종류 및 PPFD 수준별의 모수를 비교하였다.

$$P_{gross} = C_{max} \cdot (1 - e^{-k \cdot I}) + R \quad \text{[식 1]}$$

P_{gross} : crop or plant gross photosynthesis rate, CO₂ uptake rate

C_{max} : maximum gross photosynthetic rate or maximum gross CO₂ uptake

k : relative photosynthetic rate or relative CO₂ uptake

R : crop or plant respiration rate

다. 연구수행 내용 및 결과

- 식물의 광합성은 광도, 온도, 이산화탄소농도간의 상호관계를 가지고 있으므로 이산화탄소 농도의 증가에 따른 광합성을 각 온도별로 분석하였다. 광합성 측정 시 개체간의 식물의 생육 오차를 최소화하기 위해 단위 엽면적당 이산화탄소 흡수율보다는 엽의 단위 무게 당 엽면적당 이산화탄소 흡수율을 분석하여 온도별 이산화탄소 흡수율을 비교 분석하였다.
- 시설딸기는 늦여름부터 초가을까지 정식하고 겨울철부터 수확하는 과실로서의 생육 초기에는 높은 광환경과 주야간 온도 편차가 생육에 적합하지만 겨울철은 낮은 광환경과 빈번한 저온에 노출되게 된다. 본 연구에서는 온도 범위를 10, 20, 25°C 조건에서의 이산화탄소 흡수율은 20도에서 가장 높았으며, 10°C에서 가장 낮았다. 최대 이산화탄소 흡수율은 20°C 조건 대비 25°C에서는 9.7%증가 하였고, 10°C 조건에서는 37.3% 감소하였다. 반면 상대CO₂흡수율은 10°C에서 가장 높게 나타났으며, 호흡량은10°C에서 가장 높았다 (Fig. 1-16과 Table 1-3).

Table 1-3. Fitted parameters of maximum CO₂ uptake area per unit of specific leaf area (SLA), C_{max} (ppm m⁻² g⁻¹ s⁻¹), relative CO₂ uptake, k (ppm⁻¹) and respiration rate per unit of SLA, R (ppm m⁻² g⁻¹ s⁻¹)

Temperature	C_{max} (ppm m ⁻² g ⁻¹ s ⁻¹)	k (ppm ⁻¹)	R (ppm m ⁻² g ⁻¹ s ⁻¹)
10	33.7±0.5	0.0024±0.0002	-6.49±0.5822
20	53.8±2.9	0.0016±0.0002	-6.83±0.9626
25	59.0±2.3	0.0014±0.0001	-9.75±0.5949

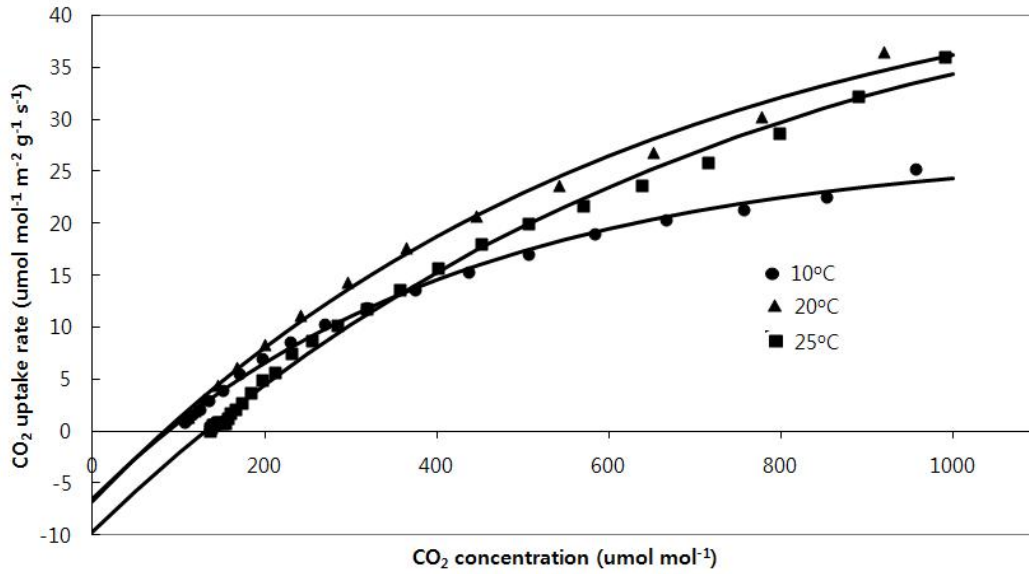


Fig. 1-16. CO₂ uptake of strawberry plant as function of CO₂ concentration. The CO₂ uptake rate was calculated based on the unit of specific leaf area.

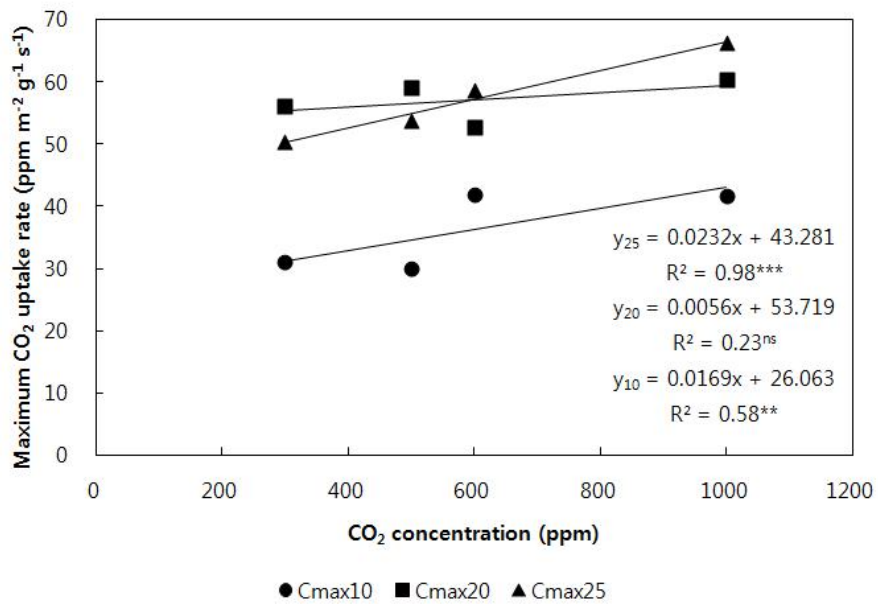


Fig. 1-17. Maximum CO₂ uptake rate per unit of specific leaf area (SLA) at different level of CO₂ concentration and air temperature of 10, 20 and 25°C.

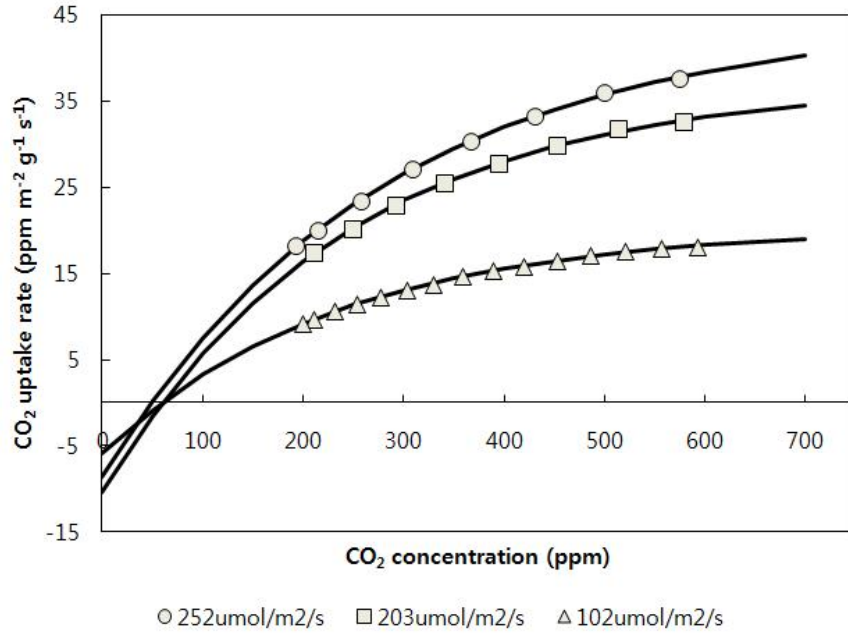


Fig. 1-18. CO₂ uptake rate per unit of specific leaf area (SLA) at different light photosynthetically photon flux density (PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) level as function of CO₂ concentration.

- 상이한 온도조건 하에서의 이산화탄소농도 증가에 따른 최대 CO₂ 흡수율(C_{max})은 10과 25°C에서는 CO₂ 농도가 증가 할수록 C_{max} 는 비례적으로 증가하였으나, 20°C 하에서는 300에서 1000ppm 범위내 에서는 차이를 나타내진 않았다(Fig. 5). 광도에 따른 이산화탄소 흡수율은 CO₂ 농도가 증가 할 수 록 증가 하였으나, 낮은 광도에서는 이산화탄소 흡수효율이 낮게 나타났다. 본 연구에서는 딸기도 다른 작물과 마찬가지로 CO₂ 농도를 높게 시용하더라도 식물이 많은 이산화탄소를 흡수하기보다는 온도 조건과 광도 조건에 매우 의존적이라는 것을 밝혀냈다. 또한 이산화탄소 이용 효율(Fig. 1-17의 직선회귀의 모수)은 25°C에서 가장 높았으며, 10°C에서도 20°C에서 보다 CO₂ 흡수 효율은 높았으나, 절대적인 총 광합성을 낮게 나타냈다(Fig. 1-18).
- 딸기의 식물광합성 특성 분석에 의하면 온도 12.5-25°C 사이에서는 최대 이산화탄소흡수율과 호흡량은 비례적으로 모든 온도에서 증가하였고, 반면 상대흡수율은 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 1-19). 광도와 온도가 증가할수록 최대이산화탄소 흡수율 급격히 증가하는 반면, 상대 이산화탄소흡수율 광도와 온도가 증가할 수 록 회귀의 모수가 감소하였으며, 호흡은 광도와 온도가 다소 적은 상호작용을 나타냈다. 동일한 이산화탄소 농도 조건에서의 딸기의 광합성은 광도와 온도간의 상호작용이 인정되었으므로 온실내부의 적정 CO₂ 농도를 유지 또는 제어하기 위해서는 반드시 광도와 온도 조건을 고려한 제어가 필요하며, 이는 화석에너지의 사용량의 감소시켜 최적 이산화탄소 시용과 동시에 에너지도 절감될 것으로 사료된다. 대부분의 시설원예 작물에서의 광합성 특성은 유사한 경향을 가지고 있으며, 이산화탄소의 시용효율은 온도, 광도, 온도와 광도의 상호작용에 의한 영향을 받는다.
- 본 연구에서의 각 환경 요인별로 딸기의 식물 광합성 특성을 분석한 결과 광도가 낮은 경우 이산화탄소의 농도는 400-500ppm 정도 유지 하되 낮은 광환경에서의 높은 온도는 호흡량을

증가시켜 순광합성량을 감소시키는 결과는 초래한다. 뿐만 아니라 겨울철 동절기에도 저광저온(10°C 이상)이더라도 딸기의 광합성이 이뤄지므로 최소 CO₂ 농도를 유지하여 생육을 촉진시키는 것이 바람직하다. 특히 저광기 주간에 온풍난방기의 가동은 많은 에너지가 소모되며, 에너지 이용효율이 낮아 생산비의 증가를 초래하며, 공기의 난방은 과실과 엽온을 증가시키는 기간이 길어 착과 불량과 수량을 감소시킬 수 있다. 본 시스템의 경우 주간의 온수보일러는 주로 이산화탄소의 시용 목적으로 사용되며, 폐열을 회수하여 생장 난방에 이용한다면 과실의 품질과 생산량의 증대를 꾀할 수 있을 것으로 사료된다.

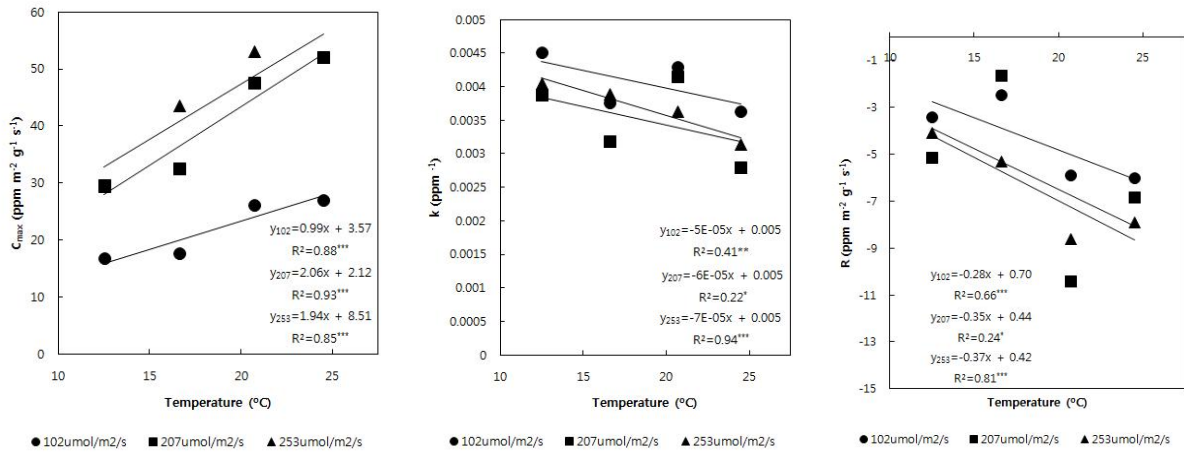


Fig 1-19. Effect of temperature and light level on maximum CO₂ uptake rate (C_{max}), relative CO₂ uptake rate (k) and respiration (R) of strawberry plant.

4. 유해가스에 의한 생리장애 지표 개발

가. 연구개발 목표

- 기존의 석유 보일러의 난방과 연소가스의 시용에 의한 불안전 연소시 발생가능한 문제점을 사전에 직시하고 유해가스가 딸기의 생육 특히 광합성에 미치는 영향을 규명하고 본 연구를 수행하였다.
- 연소 시스템에 여과기 및 현재 시중에 판매되고 있는 석유보일러의 PM 발생은 거의 없다고 볼 수 있지만 본 연구에서는 딸기 엽의 PM의 수준에 따른 딸기 광합성율에 미치는 영향을 규명할 필요가 있다. 특히, 시설 딸기의 경우 동계에 재배하고 수확하기 때문에 시설내부의 주야간 온도 편차가 매우 심하며, 일몰 이후 시설내부의 과습과 저온 조건에서 잎 가장자리에 일액현상과 과습조건에서의 작은 온도 변화에도 잎과 관부에 결로가 발생한다.
- 공기중에 이물질 또는 가스는 수증기와 응결되어 잎과 과실 표면에 지속적으로 누적될 수 있으므로 본 PM의 누적 정도가 딸기의 광합성율에 미치는 영향을 구명하여 딸기 생육에 저해되는 요인을 파악하고자 본 연구를 수행 하였다.

나. 연구수행 방법

- 본 연구는 석유보일러의 연소시스템에서 발생하는 가스를 사용하지 않고 레이저 프린터에 있는 카본의 양을 조절하여 앞에 살포한 뒤 밀폐형 아크릴 상자위에 RED:Blue LED를 조사한 뒤 챔버내에 들어 있는 딸기 식물체가 정해진 이산화탄소 농도 600ppm에서 400ppm으로 감소되는 속도를 측정하여 각 수준별로 비교 분석하였다.
- 식물 광합성 측정은 아크릴판 8mm두께로 제작된 아크릴 챔버를 이용하여 실험하였으며 챔버 내부 사이즈는 L450 *W530 *H185 이었다. 딸기 품종은 설향을 사용했으며 딸기의 모주에서 나온 러너를 담액수경 시스템에서 형광등하에서 재배하였다. 양액은 표준양액처방으로 사용하였고 EC는 평균적으로 1.56ds/m로 관리하여 사용하였다. 아크릴 챔버를 설치한 테이블에는 고무판에 깔려있으면 그 위에 스트로폼(L685 *W45 *H45)으로 고정하고 통신케이블들을 스트로폼 위에 두고 PE비닐테이프로 고정한 뒤 다시 그 위에 스트로폼(L685 *W45 *H140)을 깔았다. 스트로폼 사이는 PE비닐 테이프로 고정 한 뒤 틈새는 바셀린으로 밀폐시켰다. H₂O와 CO₂분석기인 LI-840a를 이용하여 챔버내의 CO₂농도를 측정하였다. 사용된 LED는 Bar 형태인 청색광, 청적광을 혼합하여 청색광 적색광의 비율을 50:50의 비율로 조절하였고 챔버내 온도 조절은 향온수조와 라디에이터를 이용하여 온도는 20℃로 유지하였으며 광도는 PFFD 250 μmol 하에서 측정하였다.

다. 연구수행 내용 및 결과

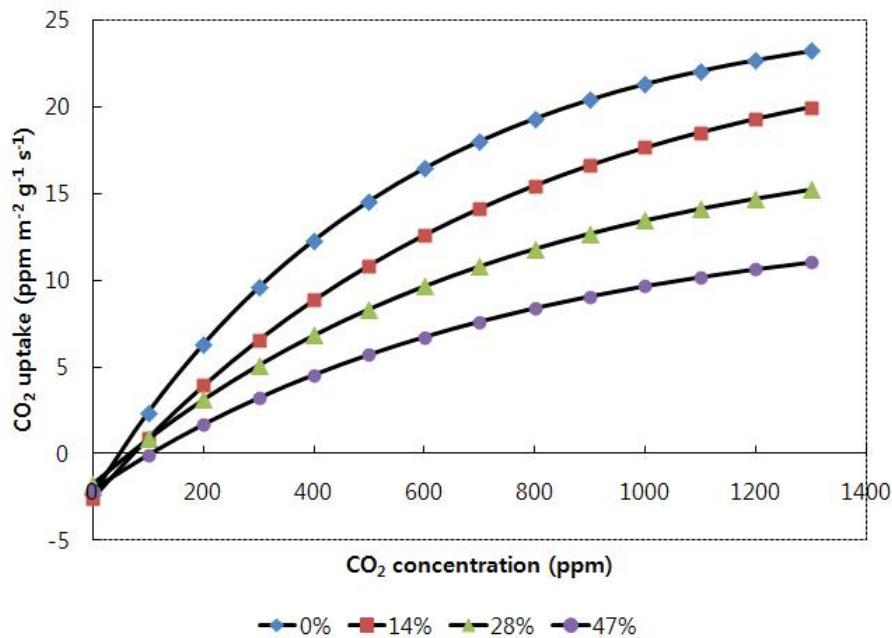


Fig. 1-20. Photosynthetic response curve as function of CO₂ concentration at different percentage of particle matter (PM) of incomplete combustion light oil on strawberry leaves.

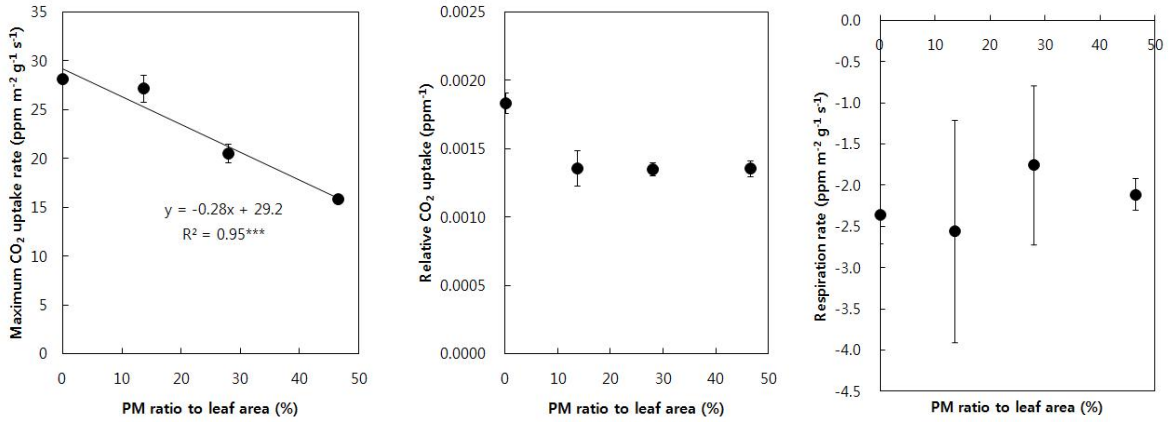


Fig. 1-21 Maximum CO₂ uptake rate, relative CO₂ uptake rate and respiration rate as function of percentage of particle matter (PM) of incomplete combustion light oil on strawberry leaves.

- 광도하에서 PM의 수준이 증가 할 수 록 각 CO₂ 농도별 광합성 속도는 감소 되었다(Fig. 1-20). 딸기 엽면적대비 PM의 면적이 대조구(0%)보다 이산화탄소 농도가 높을수록 PM 증가에 따른 광합성량은 감소되었다(Fig. 1-21). 최대CO₂의 흡수율은 엽면적의 PM%의 단위 증가량 광합성은 1%씩 감소하는 경향을 보였다. 상대 CO₂흡수율은 10%까지는 감소하다가 그 이후 거의 유사한 경향을 보였으며, 호흡량은 PM의 수준별 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 1-22).

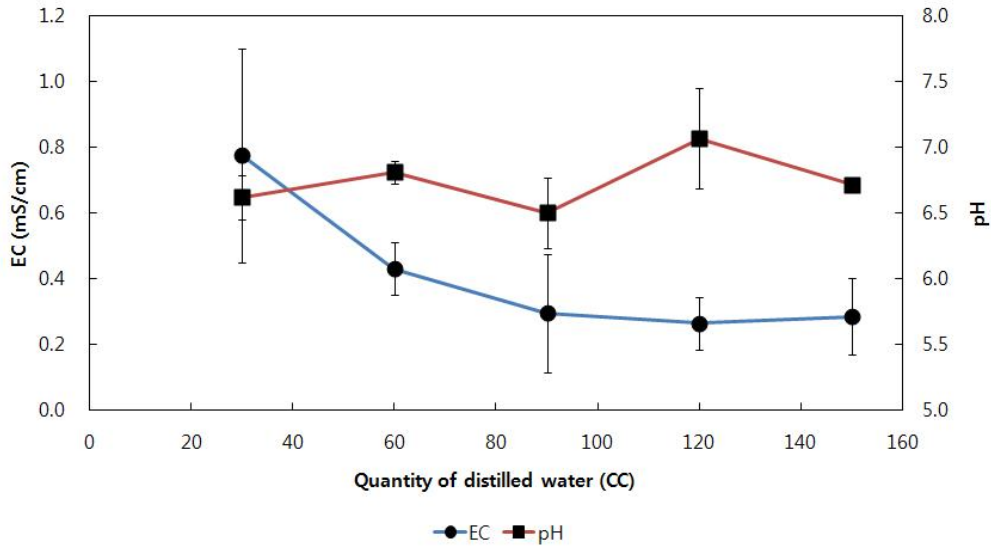


Fig. 1-22. The level of Electronic conductivity (EC) and pH as function of level of PM (particle matter) with quantity of distilled water.

- 딸기의 광도, 온도, 이산화탄소 농도별 실험에서 보다는 PM은 딸기 광합성에 매우 민감하게 영향을 미친 것으로 나타났다. 불완전연소된 가스의 PM이 온실내부의 피복재나 외부에 누적되었을 경우 PM에 의한 광투과율 감소를 초래하며 특히 광환경이 낮은 조건에선는 딸기 광합성에 매우 부정적인 영향을 줘 딸기의 생육량을 감소 시켜 생산성 및 품질에 영향을 미칠 것으로 사료된다.
- 겨울철 딸기 재배온실의 경우 저온 과습조건의 일수가 많아 시설내부나 작물에 쉽게 수증기가 응결되어 결로발생이 높다. 내부의 공기가 비닐 피복에 장기간 토출되었고 불완전연소가 빈번한 조건을 가

유리병 2리터 내부의 소량의 석유를 점화시켜 소화시킨 후 발생된 PM을 일정 비율의 증류수 혼합하여 EC와 pH를 측정하였다.

- 증류수 30cc와 혼합된 PM의 EC는 카본의 많아 0.8dS/m의 전기전도도를 보였지만, 증류수 90cc 까지 급격히 감소하다가 일정한 수준으로 유지되었다. PM의 pH는 증류수 희석 비율에 큰 영향을 미치지 않고 일정한 비율로 유지되었다. 검사된 EC와 pH는 값으로 만 볼 때 작물의 생육에 지장을 초래하지 않을 것라 사료되지만 내부 비닐 피복재의 결로가 작물위로 떨어질 경우 PM의 혼합될 경우 엽의 광합성을 저해 할 것으로 판단된다.

5. CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합형 연소 복합시스템 설계

- 본 복합시스템의 현장 설치 및 실험을 위한 장소는 전남대학교 농업생명과학대학 부속농장의 실험온실로 설정하였다. Fig. 1-23은 전남대학교 부속농장 딸기 양액재배용 실험온실(단동 2중 비닐온실)이다.



Fig. 1-23. 전남대학교 부속농장 딸기 양액재배용 실험온실(단동 2중 비닐온실)

- 복합시스템 중 온수를 이용한 난방시스템의 구성도는 Fig. 1-24 및 1-25와 같다. Fig. 1-24은 보일러의 열교환기에 연결된 순환펌프를 통해 보일러 가동시 온수를 온수 저장탱크에 저장하고, 저장된 온수를 야간난방 시 설정된 온도 이하로 내려갔을 때 온수펌프가 작동하여 팬 코일 유닛을 통해 난방을 하게 된다.
- Fig. 2는 보일러의 배기관을 통해 나오는 배기열을 회수하여 난방에 활용하도록 별도의 온수

탱크를 설치하여 이를 온실 내 성장점 난방을 하기 위한 시스템 모식도이다. 보일러 작동시 배출되는 배기열은 약 200℃ 정도로 이 온도로 CO₂가 공급되면 작물에 직접적으로 악 영향을 미치므로 배기열 회수기를 통해 약 50~80℃의 온도로 배기될 수 있도록 하고 이 장치를 통해 얻어진 온수는 작물의 성장점 난방에 이용함으로써 열 이용효율을 높이고자 하였다.

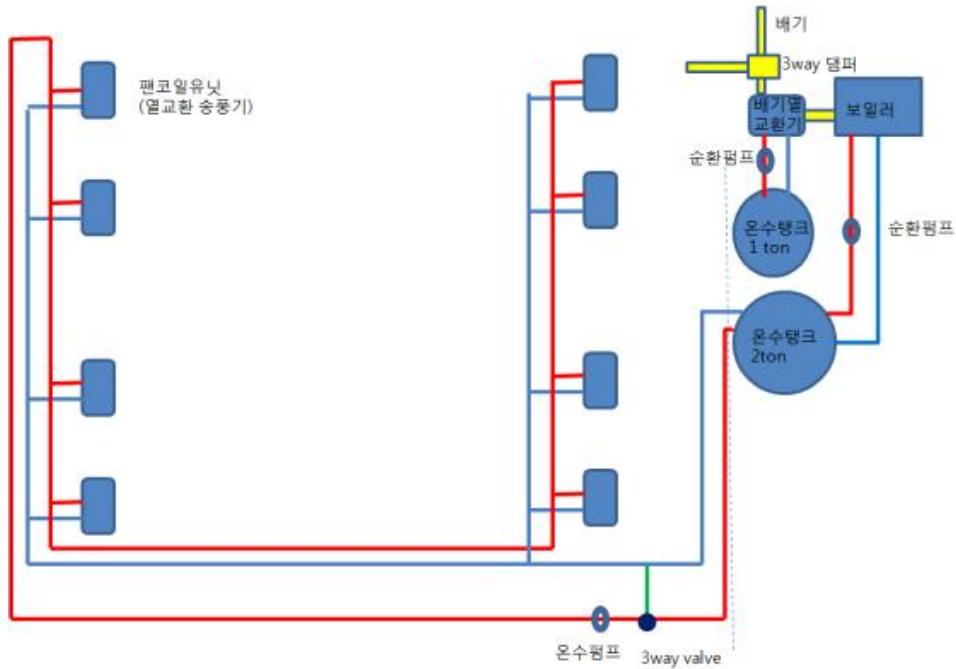


Fig. 1-24. 온수탱크 및 팬 코일 유닛을 이용한 난방시스템 모식도

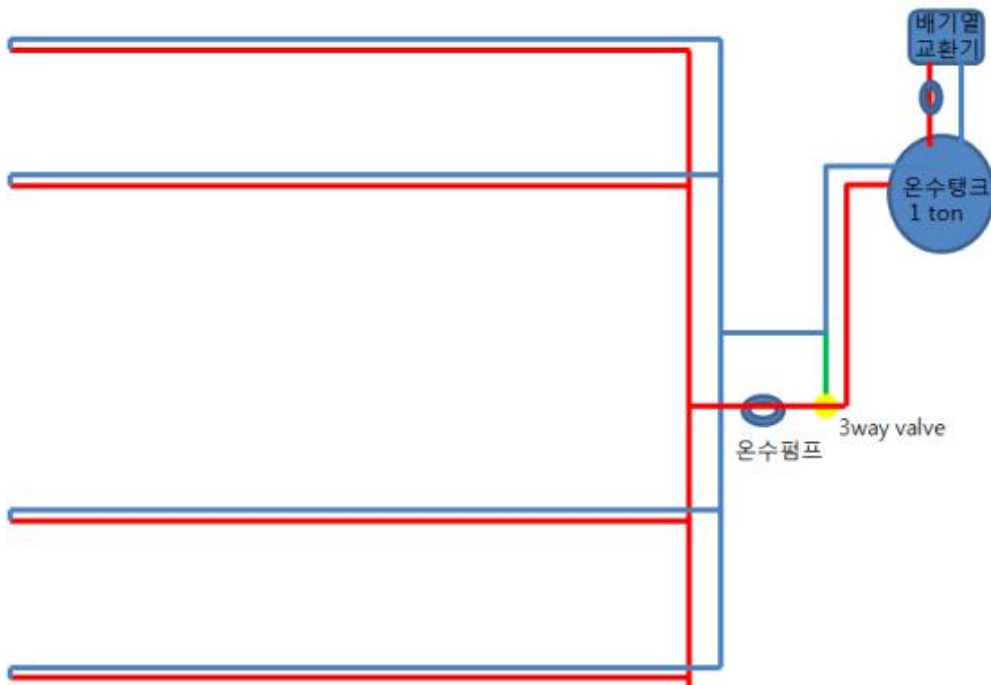


Fig. 1-25. 배기열교환기의 폐열을 이용한 성장점 난방 시스템

- 보일러의 가동에 따라 발생하는 배기가스 중 유해가스는 배출가스 저감 촉매로 정화하고 입자상물질중 일부를 필터를 통해 걸러낸다. 연소기 초기 가동시 유해한 배출가스가 다량 생성되는데 촉매의 온도가 낮아 그대로 시설내부로 공급하였을 때는 작물의 생육에 영향을 줄

수 있다. 3way 댐퍼의 역할은 이때 정화되지 못한 배출가스를 팬퍼의 작동으로 시설 내부로 유로를 제어하여 외부로 배출하고 축매 온도가 적정온도에 도달하는 시점에 댐퍼를 작동시켜 시설 내부로 유로를 바꿈으로서 하우스 내로 CO₂의 공급이 가능하며, 이때 송풍기를 통해 비닐덕트로 작물의 근처에 공급되도록 설계하였다(Fig. 1-26).

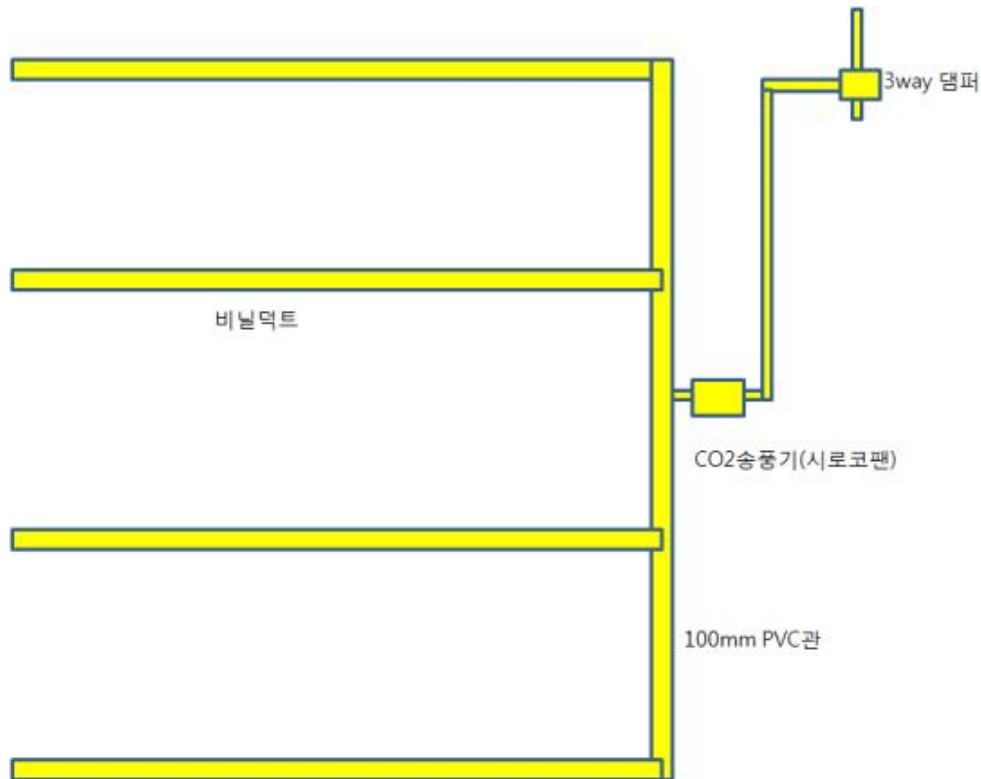


Fig. 1-26 배기 CO₂ 공급 시스템 모식도

6. CO₂ 발생기 복합시스템 제작 및 제어로직 개발

- 설계 초기에 복합제어시스템의 제어로직은 Fig. 1-27에 나타난 바와 같이 각종 설정치와 제어항목에 대해 순서도를 작성하여 프로그램화 하고자 하였다.

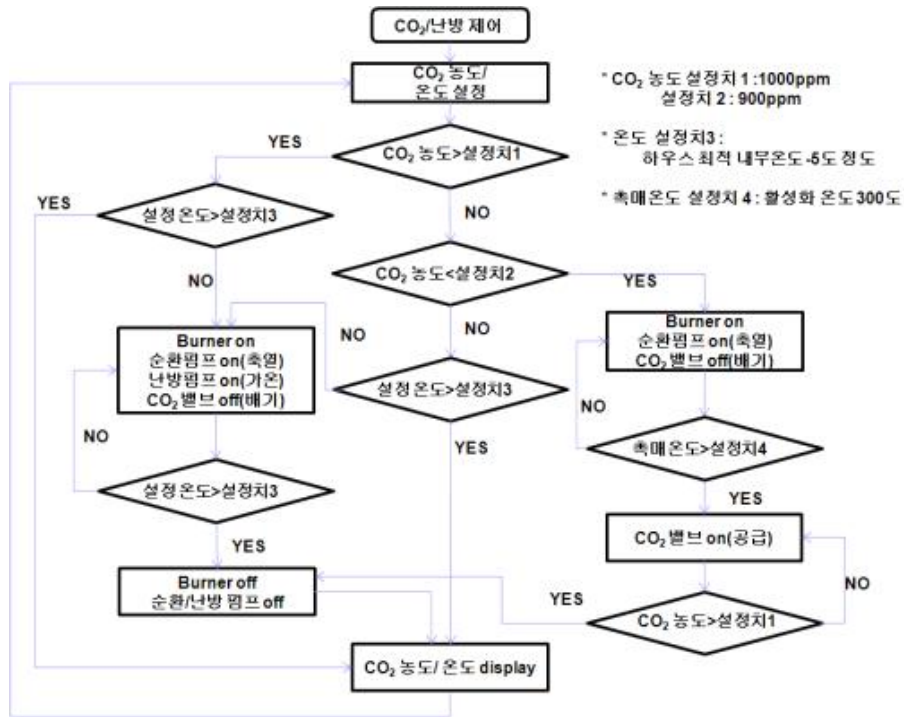


Fig. 1-27. 복합시스템의 제어로직

- 본 연구에 사용된 등유용 난방보일러는 경동보일러에서 생산되는 제품을 사용하였으며 그 개요와 제원은 표 1-4 및 표 1-5와 같다. 보일러는 통상 실내온도 및 급탕온수온도를 설정하게 되어있으나 본 연구에서는 보일러 작동을 CO₂센서에 연결하여 시설내 CO₂농도에 따라 작동하도록 설정하였다.



Fig. 1-28. 보일러 설치 현황

Table 1-4. 실험대상 보일러 개요

항목	내용
제조회사	경동보일러
모델명	LFA-35K
품명	기름 온수보일러
용도	난방 및 급탕
사용연료	실내등유, 경유

Table 1-5. 실험 보일러 성능 및 제원

항목	내용	항목	내용
연소방식	압력분무식	버너모델	LF-35K
가열방식	2회로식	급배기방식	반밀폐식 강제통기형
급수방식	시스틴식	저탕량	40.0 L
난방최고사용압력	98 kPa (1.0 kgf/cm ²)	전열면적	0.98 m ²
연료소비량	4.68 L/h	효율-난방	87.0%
출력-난방	146.537kJ/h(35,000kcal/h)	효율-연속급탕	87.0 %
출력-연속급탕	146.537kJ/h(35,000kcal/h)	소비전력-점화시	109W
사용전원	220V, 60 Hz	소비전력-연소시	88W

- 온수탱크와 연결하여 난방을 하게될 팬코일유닛은 온실용 냉난방기로 사용되고 있는 중앙냉동기의 시설원에 냉난방용 열교환기를 사용하였으며 그 개요와 제원은 표 1-6, 7과 같다. 팬코일 유닛과 온수탱크를 연결하였으며, 시설 내 적절한 송풍을 위해 덕트를 연결하기 위해 함석절곡을 하여 덕트 연결부를 부착하였다(Fig. 1-29 참조)

Table 1-6. 하우스 난방용 팬코일 유닛 개요

항목	내용
제조회사	중앙냉동기
모델명	CSTI-1
품명	하우스냉난방기
용도	시설원에 냉난방용 열교환기

Table 1-7. 하우스 난방용 팬코일 유닛 성능 및 제원

형식	항목
난방능력	10,000 Kcal/h 이상
온수 입구온도	80 ℃
외형규격	430 L * 370 H * 250 W mm
전원	AC 220V / 60Hz
소비전력	100 W
입출구 배관	15 A



Fig. 1-29. 난방용 팬코일 유닛 배관 및 덕트 연결부 부착



Fig. 1-30. 온수탱크 3톤 및 1톤 용량

- 보일러와 배기열 회수기에 연결된 온수 저장탱크는 3톤과 1톤 용량으로서 스테인레스로 제

작된 탱크를 2중 보온을 하고 외부마감재를 사용하여 단열효과를 높였다.(Fig. 1-30 참조)

- 시설내 온수배관에는 배관내 공기를 빼기위한 공급과 회수배관에 에어밸브를 설치하였으며, 온수탱크에 항상 일정 수위를 유지할 수 있도록 팽창탱크를 온수탱크 위 1m 지점에 설치하였다.(Fig. 1-31 참조)



Fig. 1-31. 온수배관의 에어밸브와 온수탱크에 연결된 팽창탱크

- Fig. 1-32는 배기관의 3-way 댐퍼이며, 보일러의 배기관은 3-way 댐퍼와 연결하여 보일러 가동초기에는 불완전연소로 인한 유해가스 함유량이 높으므로 시설내 유입을 막기 위해 유로가 시설외부로 향하게 하였으며, 일정시간 경과 후(2~3분) 시설내로 유입되도록 댐퍼의 전환이 타이머(또는 축매의 온도에 의한 제어)에 의해 이루어지도록 설계하였다.



Fig. 1-32. 배기관의 3-way 댐퍼



Fig. 1-33. 전원 공급장치 및 콘트롤 박스

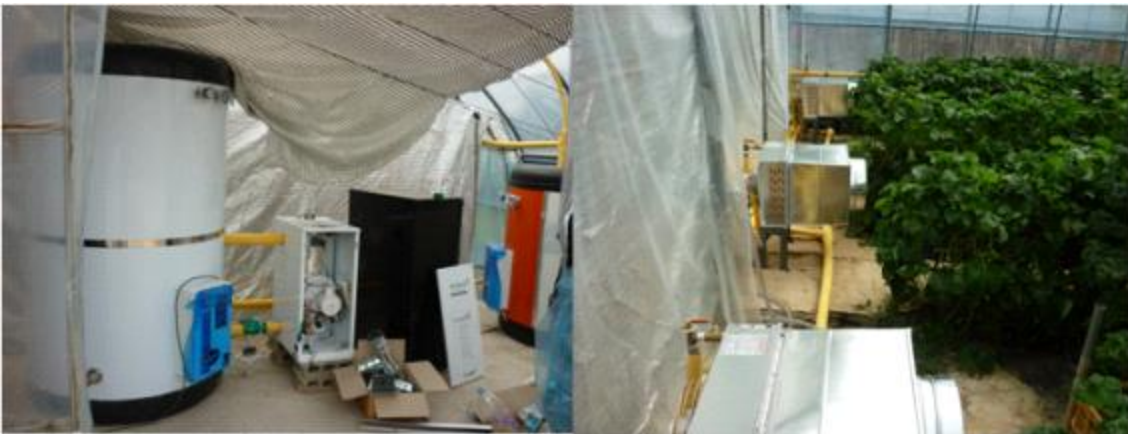


Fig. 1-34. 보일러실 전경과 온실 내부 전경

- Fig. 1-33은 이 모든 시스템의 전원을 공급하고 시스템을 제어하는 콘트롤박스의 부착모습이다. 본 시스템의 제어를 위한 콘트롤 박스와 온실의 환경제어를 위한 콘트롤 박스를 연계하여 제작하였으며, 각종 환경과 연동하여 각 기기의 제어가 가능하도록 설계하였다.
- Fig. 1-34는 보일러실에 설치된 보일러 및 온수탱크가 위치한 모습이며, 시설내부에 설치된 열교환기의 설치 모습이다.

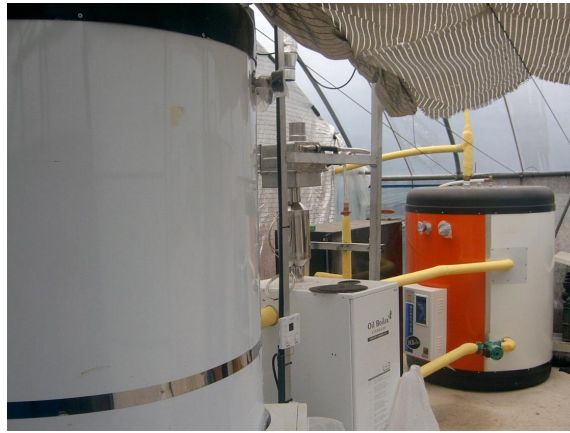


Fig. 1-35. 배출가스 유해성분 제거를 위한 촉매 장치 및 열교환기

- Fig. 1-35는 연소기에서 생성되는 배출가스의 유해성분을 저감하기 위한 촉매시스템과 배기열 회수를 위한 열교환기의 전경을 나타내었다. 촉매 시스템은 제 1세부에서 제작하여 공급하여 주었으며, 촉매의 제원은 1세부에 상세히 나타나있다. 배기열 교환기 역시 1세부에 제작한 것을 장착하였으며, 이때의 열교환기는 1 ton의 스테인레스 온수탱크에 직접 연결되어 배기열을 회수한다.

3-2 2

연구개발 수행내용

연구 범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
<p>○ 축열장치 및 CO₂ 공급 최적화 - 축열용량 및 공급 방법 최적화</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 시설하우스의 CO₂ 농도 측정 (제2세부 및 협동과제 협력) - 1 일 중 CO₂ 농도 소모 패턴 계산 - 딸기 재배를 위해 1000ppm의 CO₂를 공급 방법 시뮬레이션 	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ 배출능력은 53.68ppm/min이며, 시설하우스의 초기 CO₂ 농도가 380 ppm를 1000 ppm으로 올리는데 필요한 시간은 13.3분임 - 딸기 재배 온실(1560m³)의 CO₂ 소모속도는 일출 후 2.5시간 동안 약 0.8935ppm/min, 그 다음한 시간 동안은 5.27ppm/min 임 - 시설하우스 CO₂ 초기 농도가 380ppm일 경우, CO₂ 발생기의 가동은 처음 약 13분 동안 가동, 그 후 2.5시간 정지 후, 매 시간 마다 5분씩 가동하면 약 1000ppm의 CO₂ 농도 유지 가능
<p>○ CO₂ 발생기 성능 향상 방안 - 운전조건에 따른 CO₂ 배출 특성 파악</p>	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ 발생기의 배출가스 측정 - 시설하우스의 공급열량 계산 - 시스템의 축열량 측정 및 배출 가스 중 응축수 배출량 측정 	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ 발생기가 정상상태에서 운전 시 CO₂ 배출농도는 약 8.1% 임 - 시설하우스의 온도를 1℃ 상승시키는데 필요한 CO₂ 발생기의 운전 시간은 약 70초임 - 메인 탱크의 축열량은 공급 열량 대비 약 76.9%, 배기파이프에 설치된 보조 축열장치로부터 약 12.4%를 축열하였으며, CO₂ 발생기로부터 배출되는 수분 중 약 69%를 응축수로 회수하여 시설하우스의 습도 증가를 억제 가능 - 축열되는 축열량의 합은 공급 연료 대비 89.3%가 축열되는 것으로 산정되어 연소기의 공시 열효율 87%와 유사함

<p>○ 배출가스 저감을 위한 촉매장치 평가 및 최적화</p>	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ 발생기의 배기 후처리장치 성능평가 - 배출가스 배출특성 분석 - 배출가스 중 입자상물질(PM) 측정 - 최종 배기후처리장치 제안 	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ 발생기의 입구농도에 비교하여 CO 정화율이 가장 높은 것은 SiC(half plugging), SiC(full plugging), OC+MPF(1차년도) 순이며, 정상상태에서 SiC(Full Plugging)의 CO 정화율은 92%, SiC(Half Plugging)은 100% 임 - 연소초기 약 70초간 배출되는 CO, HC는 제올라이트와 같은 흡착제로 유도하여 흡착시킨 뒤, 배출가스 온도가 안정화되면 이를 촉매로 보내어 정화시키는 장치를 제안 - CO₂ 발생기에서 배출되는 농도는 대기 중의 입자상물질의 수보다 4-12배, MPF(1차년도)와 SiC(half plugging)가 거의 동등한 수분포, SiC(full plugging)의 입자수 배출 특성은 거의 대기 수준 - 최종적으로 HC, CO와 PM 제거를 위해서 SiC(full plugging)를 제안
<p>○ CO₂ 사용 유무에 따른 딸기 생산량 및 품질 구성</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 플라스틱 온실을 2구역으로 나뉘어 시설 CO₂ 공급 유무에 따른 생산량 및 품질 규명 	<ul style="list-style-type: none"> - 2012년 9월 18일 ‘딸기’ 설향을 정식하여 겨울 동안 보온 위주로 관리 한 후 2월부터 난방 시작 - 보일러의 작동 조건을 시설내부의 CO₂ 농도 1000ppm으로 설정하고 설정된 값의 변경은 측창의 개도율에 따라 감소 시켜 2월부터 4월 말까지 오전 3시간 동안만 시용 - 온실 내부에 소형 온실을 설치하여 3구역은 연소가스를 송풍장치를 통해 공급하였으며 3구역은 대조구로 사용 - 대조구와 처리구의 딸기 20주를 주기적으로 수확하여 생산량과 과실의 당도를 측정하여 수량과 품질 비교

<p>○ 유해 가스농도에 따른 생리 장애 모니터링</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 밀폐된 공간에서의 CO, HC 농도에 따른 신엽의 생리장애 영향 평가 및 농도에 따른 생리 장애 정도 	<ul style="list-style-type: none"> - 암면큐브에 딸기 런너를 삼목하거나 어린 묘를 구입하여 뿌리를 세척한 후 암면큐브에서 6주 동안 재배 - 3-4개의 엽병이 삼목이후 발육된 후 밀폐된 플라스틱 용기에 CO, NOx, HC계의 가스인 CH₄, C₃H₈의를 주입하여 노출 시간대 별로 엽광합성, 틸라코이트함량, rubisco 분석하고 광학현미경을 통해 기공과 엽병의 손상 정도 파악
<p>○ CO₂ 발생기 및 축열/난방 시스템의 적용 및 성능 개선</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 외부온도에 따른 시설내부의 온도습도 변화 모니터링 - CO₂ 공급시 광도 및 내외부 온도환경에 따른 온수온도의 변화 모니터링 및 분석 - 수경재배 딸기 생육단계에 따른 일중 적정 CO₂ 농도 변화 모니터링 및 CO₂ 농도의 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> - 실험온실에 설치된 복합환경조절 시스템과 data 수집기를 이용하여 시설내외부 온도를 측정하고 온수의 온도 변화는 열전대를 이용하여 계측 - 실시간으로 모니터링한 환경자료를 이용하여 광도 변화에 따른 시설내부의 온도 변화율을 월별로 분석하고 이산화탄소 시용시 온수의 온도변화 분석 - CO₂ 시용을 위해 고려해야 할 환경조건과 시스템의 동작 정도를 p-band를 이용하여 최적 농도 조절에 대한 예시 제공
<p>○ 연소 및 축열시스템의 문제점 도출 및 시스템 제어 최적화</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 외부온도에 따른 시설내부의 온도습도 변화 모니터링 - CO₂ 공급시 광도 및 내외부 온도환경에 따른 온수온도의 변화 모니터링 및 분석 - 수경재배 딸기 생육단계에 따른 일중 적정 CO₂ 농도 변화 모니터링 및 CO₂ 농도의 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> - 시험온실 내외부 온도 및 환경요인 변화 모니터링(3개월) - 주요 온수 및 배기열 통과지점 온도변화 모니터링 및 분석 - 시험온실내 수경재배 딸기 일중 CO₂ 농도 변화 모니터링 - 재배시험결과 분석

<p>○ 전체시스템 제어 최적화, On-board system 설계 및 사용자 매뉴얼 작성</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 습도, 온도 등의 복합 환경에 따른 CO₂ 농도 설정을 위한 마이컴 설계 - 전체시스템 제어방식을 위한 알고리즘 작성 및 프로그램 제작 - 각 시스템의 전체 모듈 통합화 - On-board system 설계 - 사용자 매뉴얼 작성 	<ul style="list-style-type: none"> - 3개월동안 시설내외부 CO₂ 농도, 온도, 광도 측정 - 시험온실 3개월 운용후 문제점 수정보완 및 제어로직 재설계 - 시스템 모듈화를 위한 시스템 배치 재설계 및 On-board시스템 설계 - 사용자 매뉴얼은 3차년도 현장 검증후 제작 예정
--	---	---

1. 축열장치 및 CO₂ 공급 최적화 - 축열용량 및 공급 방법 최적화

가. 연구개발 내용

- 축열장치 및 CO₂ 공급 최적화 - 축열용량 및 공급 방법 최적화
- CO₂ 발생기 성능 향상 방안 - 운전조건에 따른 CO₂ 배출 특성 파악
- 배출가스 저감을 위한 촉매장치 평가 및 최적화

. 연구 배경

- 높은 수익을 올릴 수 있는 고품질 원예작물(horticultural crops)의 재배 조건에 있어서 광합성 속도(the rate of)는 광도, 온도, 이산화탄소(CO₂)의 농도에 크게 영향을 받는다. 현재 대기 중의 CO₂농도는 약 380ppm이다[1-2].
- 원예 작물은 대기중의 CO₂를 흡수하여 광합성으로 작물 생육(crop growth)에 필요한 동화산물(anabolite)을 생산하는데, 광합성 산물의 증가에 따라 작물의 수량과 품질이 향상된다. 따라서 적절한 CO₂의 공급은 원예작물 재배 시 중요한 요인 중 하나이다.
- 겨울철 시설하우스 내의 환기(ventilation)는 열손실(heat loss)의 최소화를 위해 제한적으로 수행하고 있다. 이와 같이 밀폐된 재배환경에서 식물의 광합성이 일어나면 CO₂의 농도는 일방적으로 저감된다. 일반적으로 CO₂농도가 50-125ppm 정도로 낮아지면, 작물의 CO₂보상점보다 낮아져 광합성 속도가 zero에 도달할 수도 있다[2-1~2-2]. 따라서 시설하우스 내의 CO₂ 농도는 작물 생육의 제한 요인의 하나이다.
- 시설하우스내의 CO₂ 농도는 하루 중 시간대에 따라 심하게 변한다. 아침에 해가 뜨고 식물이 광합성을 시작하면 CO₂의 농도는 서서히 낮아지며, 낮에는 최저가 되고, 밤이 되면 CO₂ 농도는 식물호흡과 토양 미생물의 분해활동에 의해 높아진다.
- CO₂의 농도가 높아질수록 광합성 속도가 증가하지만, CO₂ 포화점에 도달하면 더 이상 광합성 속도가 증가하지 않는다. 시설하우스 내 적정 이산화탄소 농도는 원예작물 중 토마토, 멜론, 딸기가 500-800ppm, 오이, 피망, 가지가 800-1500ppm, 과채류가 500-1500ppm이다[2-2~2-4]. CO₂ 농도에 따른 작물의 생산량 변화는 비닐하우스내의 CO₂농도를 380ppm 기준으로 할 경우, CO₂ 농도가 750ppm이 되면 생산량이 30% 증대되고, CO₂ 농도가 250ppm이 되면 생산량이 약 20% 감소한다[2-3~2-5].

- 원예작물에 CO₂를 공급하는 방법은 크게 연료의 연소식(combustor-type), 액화탄산가스의 기화식(gasification method by liquid CO₂), 고체형(solid type(dry ice)) 공급방식이 있다.
- 기화기식은 액화 CO₂를 저장용기(storage tank)에 보관한 후 호스로 연결하여 기화시키면서 시설 내로 공급한다. 이 방법은 시설하우스 내의 CO₂의 농도 조절이 용이하지만 액체가 기화하는데 필요한 에너지 때문에 시설 내부의 온도를 하강시키며, 액체 CO₂ 비등점(boiling point)이 -78℃이므로 저장용기의 보관이 어렵고 고가(0.3\$/kg)이다.
- 표 2-1에 단위 CO₂ 질량을 발생시킬 경우 연료종류와 액체 CO₂의 경제성을 비교하고 있다. 면세 등유가 CO₂(질량)을 발생 시키는데 필요한 단가가 가장 낮고, 연료를 LPG로 할 경우 단가가 42%증가하고, 액체 CO₂를 사용할 경우는 그 단가가 면세등유의 3.3-4.1배나 많이 드는 것을 알 수 있다.
- 고체형 공급방식은 사용하기에는 편리하지만, CO₂ 발생량이 적으며, 농도 조절이 어렵고, 비싸다. - 연료의 연소방식은 탄화수소계 연료(hydrocarbon fuels)를 연소시키는 방식으로, 사용할 수 있는 연료로는 LPG(liquefied petroleum gas), 천연가스(natural gas), 등유(light oil) 등이 있다. 액화 이산화탄소(liquid CO₂)를 사용하는 것에 비하여 설치비가 저렴하나, 불완전 연소(incomplete combustion)에 의해 유해가스(harmful gases)가 발생할 우려가 있다[2-6~2-7].

Table 2-1 Comparison of economic price by unit mass of CO₂ supply with various fuels and liquid CO₂

연료	연료가격 (원/kg)	발열량 (kJ/kg)	CO ₂ 발생량 (kgC/GJ)	CO ₂ 발생량 (kg/fuel kg)	단가 (원/CO ₂ kg)
LPG	1280	50,160	17.2	3	427
등유(면세)	950	46,000	19.6	3.18	300
액화 CO ₂	350	-	-	1.0	350

- 연소식 CO₂공급방법에는 확산식(diffused type heating system), 폐열형(waste heating system), 그리고 축열형(regenerative heating system) 시스템이 있다. 확산식 시스템은 발생열을 온실 안으로 직접 방출하는 방식이며, 폐열형 시스템은 과잉열을 온실 밖으로 방출하는 방식이고, 축열형 시스템은 과잉열을 축열장치(heat storage tank)에 저장하여 필요한 때 사용하는 방식이다.
- 확산식 시스템을 사용할 경우 CO₂와 더불어 유해가스가 같이 발생되고 사용시간의 경과에 따라 연소장치(combustor)의 열화(aging)로 불완전 연소율이 증가하여 배출가스가 작물에 피해를 줄 수 있다. - 배출가스 중 수분(water vapor)이 포함되어 있어 시설하우스내의 습도증가로 작물에 결로현상(due condensation)이 발생하여 작물의 질병 발생률(disease incidence of plants)을 높일 수 있다. 에너지 절약 측면에서 볼 때 폐열형보다 확산식이 바람직하다.
- 이상의 상황을 고려할 때 에너지 효율 향상과 저공해의 CO₂를 공급하기 위해서는 축열시스템이 유리하다[2-8]. 연소기의 연료로는 농촌지역에서 면세유(tax exemption oil)로 사용하는 등유가 적절하지만, 등유 연소 시 배출가스, 특히 탄화수소, CO, 그리고 PM(particulate matter)의 배출이 문제가 될 수 있다.
- 등유를 사용하는 연소장치(combustor)의 배출가스(exhaust gas emission)의 배출가스 저감을

위해서는 디젤 자동차(diesel vehicle)에 사용하는 산화촉매(oxidation catalyst)[2-9~2-10]와 입자상물질 제거 장치(particulate filter)[2-9, 2-11]와 같은 후처리장치(after-treatment system)가 필요하다[2-12].

다. 연구결과

(1) 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템

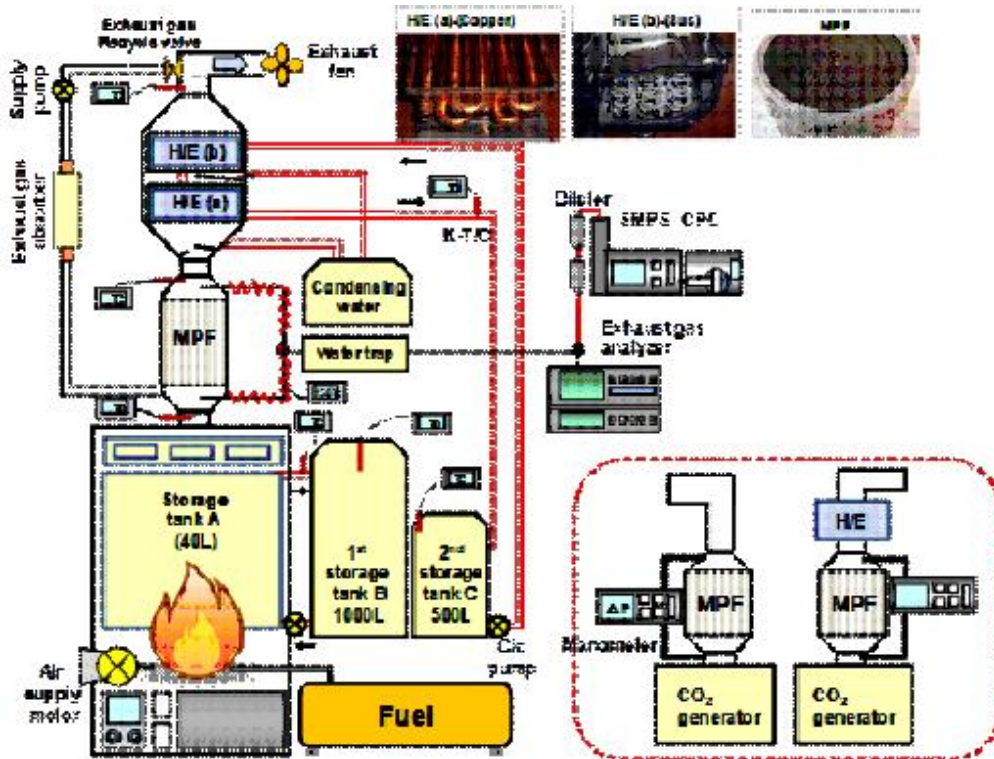


Fig. 2-1. Combustor-type CO₂ generator with emission after-treatment and regenerative heating devices.

- Fig. 2-1은 배기 후처리장치와 축열시스템을 가진 연소기형 CO₂ 발생장치를 나타내고 있다. CO₂ generator는 CO₂ 발생 연소기, 후처리시스템, 축열시스템, 그리고 응축수 회수시스템으로 구성되어 있다.
- CO₂ 발생 연소기는 등유를 연료로 사용하는 보일러이다. CO₂ 발생기에서 배출되는 유해 배출가스는 촉매를 사용하여 저감시켰다.
- 축열 시스템은 축열탱크B와 C로 구성되어 있고, CO₂ 발생 연소기로부터 회수된 열은 축열탱크 B, 배기열은 축열탱크 C에 각각 축열된다. 열교환기에서 제거된 응축수는 회수시스템에 모았다.
- 연소기의 연료 등유는 다양한 성분의 화합물이지만, C₁₁H₂₄로 대표 성분으로 가정하였다. 표 2-2은 CO₂ 발생기의 사양을 나타내고 있다. 연소기의 가열 열용량(tank A)은 146.54MJ/h이고, 연료소모율은 3.88 L/h 이다.
- 연소기의 연소용 공기는 공기공급용 팬(풍압 9.8 kPa)에 의해 공급된다. 배기후처리장치의

설치로 배기에 back pressure가 발생하기 때문에 배기흐름을 원활히 해주는 배기팬(유량 120 m³/h)을 설치하였으며, 가열된 온수는 순환펌프(용량 1.8m³/h)에 의해 탱크 B에 보내진다.

- 각부 온도는K-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 실험에 사용한 MPF촉매는 셀밀도300cps이며, 귀금속(Pt) 담지량은 0.53 g/L이다.
- 촉매의 압력강하 실험에 사용한 촉매는 advance cordierite (AC)와 SiC, metal particle filter (MPF), oxidation catalyst (OC)이다.
- 배기열 회수를 위해 사용한 열교환기는 전단에 copper (a), 후단에stainless steel (b)로 만들어졌다. 열교환기 (a, b)에는 응축수를 회수할 수 있는 plate와drain plug가 설치되어 있다.

Table 2-2. Specifications of combustor-type CO₂ generator

Specifications		Quantity
Heating capacity with tank A(MJ/h)		146.54
Storage tank volume (L)	Tank A	40
	Tank B	1000
	Tank C	500
Weight (kg)		74
Fuel consumption(L/h)		3.88

(가) 실험방법

- 후처리장치의 압력강하는 별도의 압력강하 lig 장치에서 측정하였는데, 촉매 전단에 블로워로 공기유량 10 - 70 m³/h로 공급하고 촉매 전/후단에서 압력차를 laminar flow meter (Meriam co.)로 측정하였다.
- 압력강하가 작은 촉매를 선정하여 CO₂ 발생기에 장착하였다. 배기 후처리장치와 열교환기를 장착한 CO₂ 발생기의 배압은 전자식 배압계 (Yakogawa)를 이용하여 측정하였다.
- 배기 후처리장치와 열교환기를 장착한 CO₂ 발생기에 장착하면 배압이 증가하므로 이 배압을 감소시키기 위해서 배기팬을 장착하였다.
- 모든 실험은 축열탱크 B, C의 입구온도가 20±2℃ 일 때 시작하였다. CO₂ 발생기의 촉매 전단과 후단에서 CO, HC, CO₂, O₂ 그리고 NO_x의 농도는 배출가스분석기 (MRU)를 사용하여 측정하였다.
- PM의 측정은 배출가스 온도가 245±5℃ 일 때 측정하였다. PM의 입자수와 크기는 condensation particle counter (CPC, TSI, 3025A) 와 scanning mobility particle sizer (SMPS, TSI, L-DMA 3081)로 측정하였다.
- 표 2-3은 SMPS와 ejector type의 diluter의 사양을 나타내고 있다. 연소기형 CO₂ 발생기에서 배출되는 PM의 입자수와 분포는 CPC에서 입자수를 측정 할 수 있는 한계가 10⁵개 (particles/cm³)이기 때문에 희석장치 (diluter)를 통해 배출가스를 공기로 132배 희석한 후 SMPS를 이용하여 10 - 400 nm 범위에서 측정하였다. 희석장치를 150℃로 가열하여 배출가스와 공기를 희석할 때 생성되는 입자를 억제하였고, 희석에 사용한 공기는 Hepa filter를 사용하여 입

자를 제거하였다. 그러나 대기 중의 PM 입자수를 측정할 때는 희석과정을 생략하였다.

- 측정값은 동일 조건에서 5회 측정한 평균값이다. CO₂ 발생기에 후처리시스템과 축열시스템을 장착했을 때 유동저항이 증가해 공기공급양은 감소한다. 축열탱크 B, C에 30분 동안 축적된 열량은 축열탱크 안의 물의 질량과 온도차를 이용하여 계산하였다.
- 열교환기로부터 생성된 응축수의 질량은 전자저울 (Shimadzu co.)을 사용하여 10분 간격으로 1시간 동안 측정하였으며, 등유(C₁₁H₂₄)에서 생성될 수 있는 이론적인 (stoichiometric) 수증기량과 비교하였다.

Table 2-3. Specifications of SMPS and diluter of ejector type

SMPS (TSI 3080)	
Description	Specification
Particle size range (L-DMA 3081)	Adjustable: From 10 nm to 1000 nm
Upper concentration limit (3025A CPC)	10 ⁵ (particles/cm ³)
Scanning time	From 30 sec to 300 sec
Diluter (ejector type)	
Diluter	Dilution ratio
1st diluter	1:12
2nd diluter	1:11 (TDR 1:132)

() CO₂ 생성을 위한 버너연소기 설계 및 제작

- CO₂ 생성을 위한 버너 연소기의 선정은 경동보일러(LFA-35K)를 사용하였다. 열용량(출력)은 최초 계획했던 168MJ/h(40,126kcal/h) 보다 21MJ/h 낮은 147MJ/h(35,000kcal/h)를 사용하였다. 최초 계획보다 열용량을 낮춘 이유는 이 보다 큰 연소기의 경우 209MJ/h(중형 연소기)로 높아 소형 보일러 버너 연소기 중 가장 용량이 높은 본 연소기를 선정하였다(표 2-4).

Table 2-4. Specifications of Combustor type CO₂ generator

Specifications (model)		LFA-35K
난방/온수출력	kJ/h (kcal/h)	146,540(35,000)
난방 전부하 열효율	%	87
저장량	L	40
배기관직경	mm	75
배관	A	난방 32, 온수 15
중량	kg	74(38*68*87)
연료소비율	L/h	4.68

- 버너연소기의 열효율은 동일한 체적의 열교환기 사용시 열교환기 재질(철, 스테인레스)에 따

라 달라진다. 철 재질의 제품을 사용한 이유는 일반 농가에서 가장 많이 보급되어 사용되고 있고, 연소기에서 배출되는 유해한 배출성분을 정화할 때 촉매의 온도가 상대적으로 높은 것이 유리하기 때문이다.

(다) 배기 정화를 위한 촉매장치



Fig. 2-2. Catalytic converter (MPF+OC)

- Fig. 2-2는 배출가스 저감을 위한 촉매시스템 구성으로 좌측 상단의 촉매는 MPF이며, 우측 상단은 OC이다. 캔닝과 촉매 사이는 단열효과가 우수한 매트를 사용하여 단열하였고 캔닝은 촉매를 교환할 수 있는 형태로 설계 제작하였다.
- Fig. 2-3은 메탈입자상물질 필터와 사양을 나타내고 있다. Fig. 2-4는 SiC Filter의 장착 모습을 나타내고 있다. Fig. 2-5는 반 플러징 SiC PF와 전 플러징 SiC PF의 모형을 나타내고 있다. 이들 필터의 종류에 따른 배압이나 PM의 배출 특성을 관찰한다.

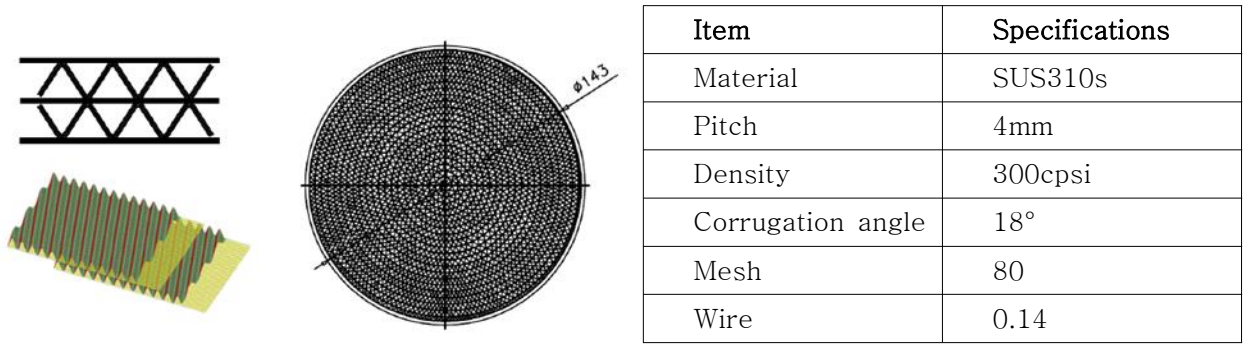


Fig. 2-3. MPF(metal particulate filter) shape and specifications

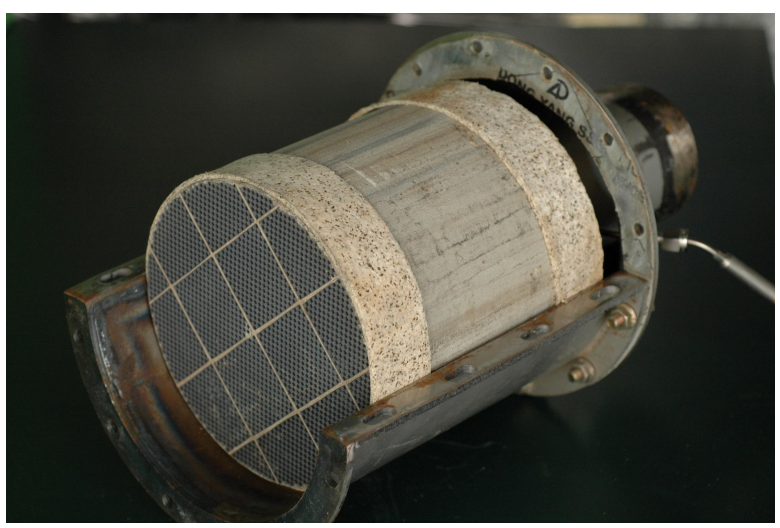
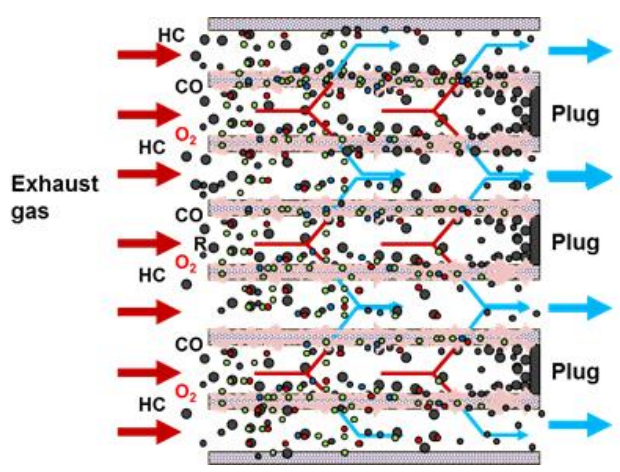
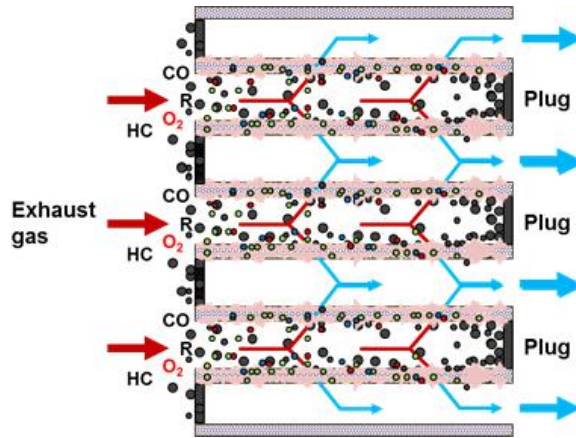


Fig. 2-4. SiC PF (full plugging)



(a) Half plugging SiC PF



(b) Full plugging SiC PF

Fig. 2-5. Shape of half plugging(a) and full plugging SiC PF(b)

(2) CO₂ 최적화 및 축열장치의 운전 최적화를 위한 CO₂ 배출특성

- Fig. 2-6은 제2세부과제에서 재배하고 있는 실제 시설하우스에서 딸기 시설하우스내외의 온도 및 CO₂ 농도, 일사량 측정 결과이다.

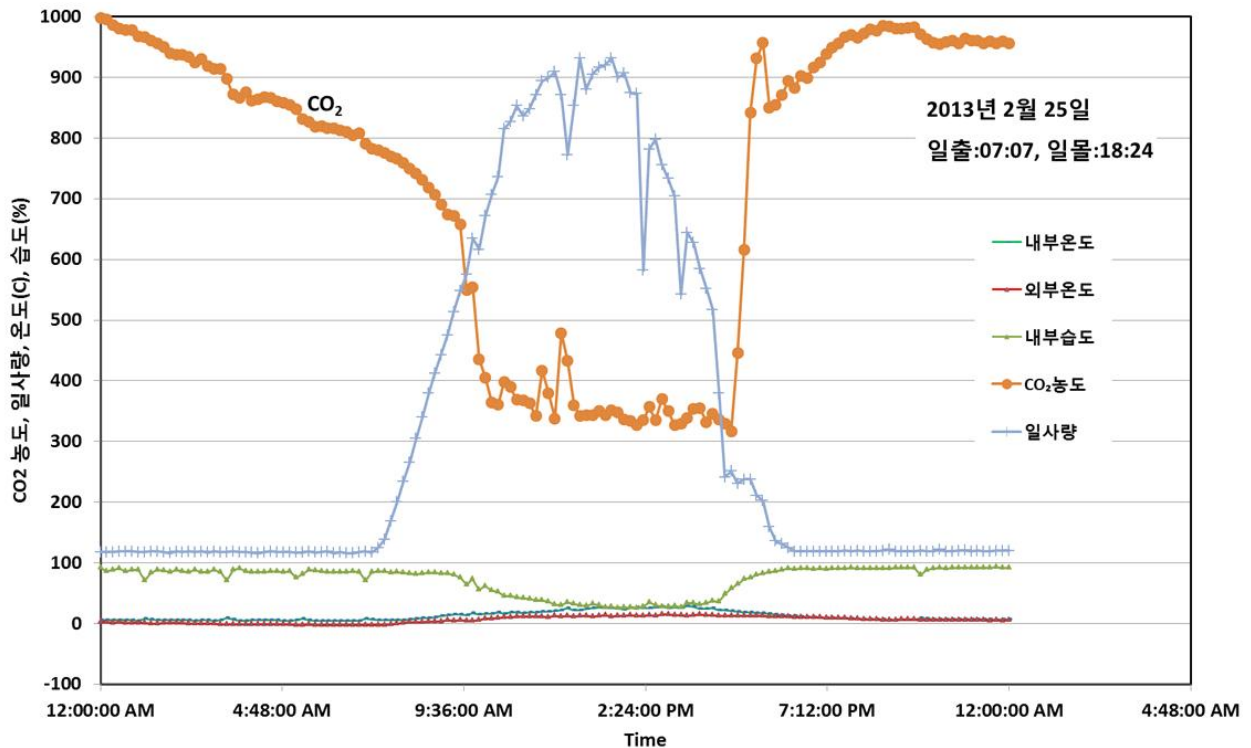


Fig. 2-6. Temperature profiles, CO₂ concentration, humidity and sunshine

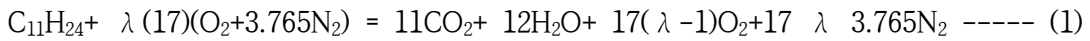
- 시간 7:00에 초기 시설하우스 내의 CO₂ 농도는 약 800ppm이며, 이는 일출과 동시에 점점 떨어지다가, 일출 후 약 2시간 반 까지 서서히 딸기의 광합성에 의해 줄어들다가 일출 후 2시간 반 이후부터는

1시간동안 급격하게 떨어지며, 그 후는 대기의 농도 380ppm 정도를 유지하고 있다.

- 일몰시간 18: 24의 약 한 시간 전 17:30부터 급격하게 다시 올라가는 현상이 보이고 있는데, 이 측정 데이터를 기초로 시설하우스내의 CO₂ 공급 최적 방법에 대해 검토해 본다.

- 집중적으로 가열하여 CO₂ 농도를 공급해야할 시기는 일출시간 7:00부터 17:30까지임

- 시설하우스의 크기는 폭 6 m, 길이 100 m, 그리고 높이 3 m의 아치형으로 전체 체적은 약 1560 m³ 이다. 시설하우스 내의 CO₂ 농도는 과채류 경작을 상정하여 1000 ppm 확보를 목표로 정한다. 시설하우스 내의 초기 CO₂ 농도는 380 ppm, 1 atm, 실내온도는 0°C로 가정한다. Air density는 1.286 kg/m³일 경우 시설하우스 내의 공기의 무게는 2,006 kg 이다. 등유의 밀도는 0.82 kg/L이다. 등유 (C₁₁H₂₄) 1L가 완전연소될 때 생성되는 CO₂는 다음 식(1)에서 계산할 수 있다.



일출 후 비닐하우스 내의 CO₂ 농도를 참조하여 이 때 필요한 CO₂ 량을 시뮬레이션하면 다음과 같다.

- 시설하우스 체적 = 1560 m³
- 시설하우스 내의 공기의 질량 = 1560 m³ x 1.286 kg/m³ = 2,006 kg
- 등유 (C₁₁H₂₄) 1mol(156g, 0.19L)을 완전연소시킬 때 생성되는 CO₂ = 2464L=0.2464m³
 등유 1g 연소시 CO₂ 생성량 = 0.2464/156 = 0.00158 m³/g
 등유 1L 연소시 CO₂ 생성량 = 1.2968 m³/L
- 연소율 : 약 87%
- 초기 380ppm에서 1000ppm까지, 620ppm 상승시키는데 필요한 CO₂ 량=1560m³ x 620 x 10⁻⁶/0.87 = 1.111m³
- CO₂ 1.111m³을 생성하는데 필요한 등유량(L) = 156 x 1.111/(0.2464 x 820)= 0.86L
- CO₂ 발생기의 연료 소비율 = 3.88L/h = 0.06467L/min (등유 밀도=0.82 kg/L) =53.1g/min
- CO₂ 발생기의 단위 시간당 CO₂ 생성량 = 53.1 x 0.00158 =0.08374 m³/min
 → 0.08374/1560 = 53.68 ppm/min
- 초기 380ppm이 1000ppm으로 올리는데 소요시간 = 0.86L/3.88L/h = 0.222h, 13.3 분
- 등유 1mol(156g)가 완전연소될 때 생성되는 CO₂는 2464L이다. 등유 1L 연소시 배출하는 CO₂량은 1.2968m³/L이며, 이는 등유 1g 연소시 배출하는 CO₂량은 0.00158m³/g이다. CO₂ 발생기의 연소효율은 87%이다. 따라서 시설하우스 내부의 CO₂ 농도를 초기상태 380 ppm에서 1000 ppm으로 올리는데 필요한 CO₂량은 약 1.111m³이다. CO₂량 1.111m³을 생성하는데 필요한 등유량(L)은 0.86 L이다.
- CO₂ 발생기의 연료소모율 3.88L/h임을 고려하면, 이 시설하우스에서 CO₂ 발생기의 CO₂ 배출능력은 53.68ppm/min이다. 따라서 CO₂ 농도를 초기상태 380 ppm에서 1000 ppm으로

올리는데 소요시간은 13.3분이 필요하다. 연소기는 초기 시동 시 많은 유해 배출가스(HC, CO)가 배출되기 때문에 on-off를 자주하면 배출가스 배출과 열효율 측면에서 불리하다.

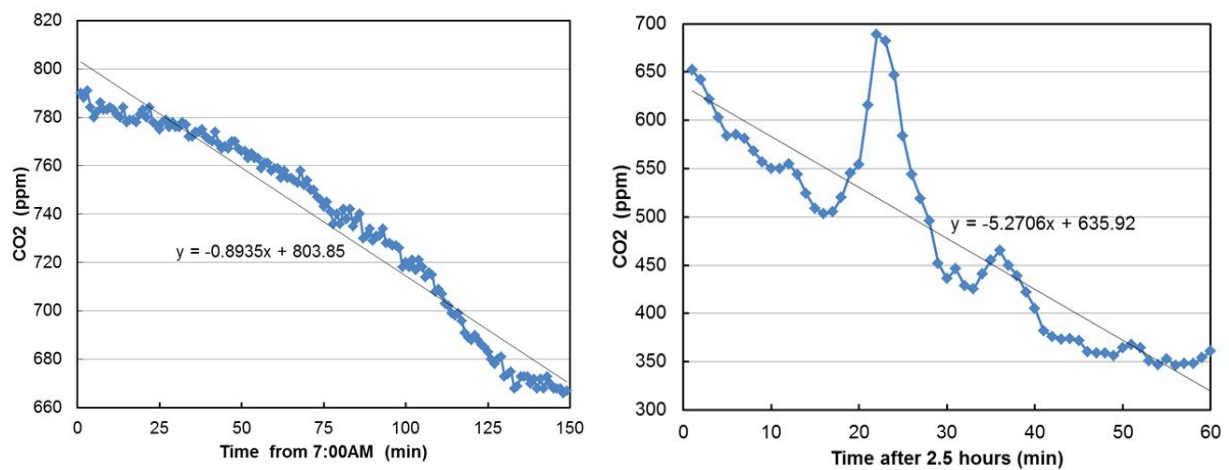


Fig. 2-7. CO₂ consumption rate of strawberry, (a) CO₂ consumption rate after sunrise, (b) CO₂ consumption rate after sunrise 2.5 hours

- Fig. 2-7은 2013년 2월 25일 일출 시간 7:00 이후의 딸기 재배 온실(1560m³)의 CO₂ 소모속도를 나타내고 있다. 처음 2시간 반동안 CO₂ 소모 속도는 0.8935ppm/min이며, 그 다음 한 시간 동안은 5.27ppm/min의 속도를 나타내고 있다.

- 시설하우스내 딸기의 CO₂ 소모율 (1)초기 150분 동안=0.89ppm/min, (2) 150분 이후 = 5.27ppm/min

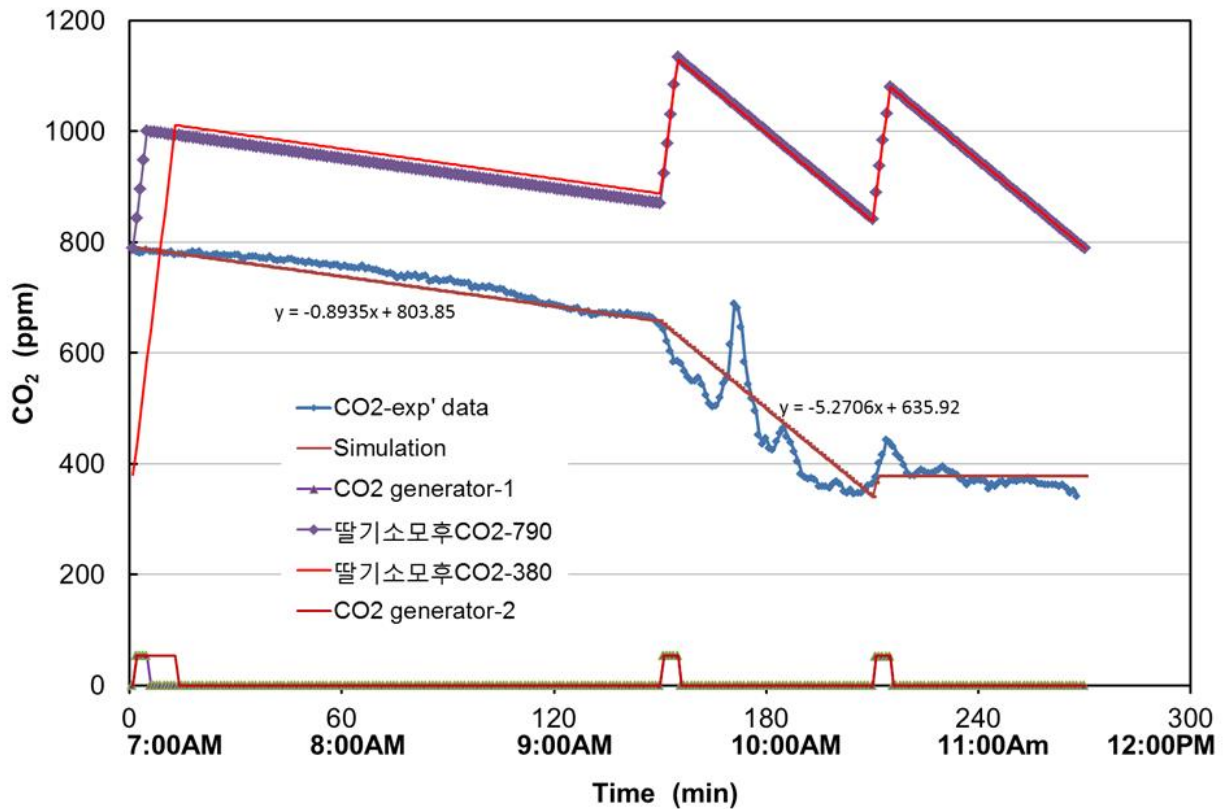


Fig. 2-8. Simulation results of CO₂ supply according to CO₂ consumption

- 이상의 CO₂ 방생장치의 CO₂ 배출량 계산 결과와 시설하우스 내에서 딸기의 CO₂ 소모율을 토대로 실제로 시설하우스 내의 CO₂ 농도를 1000ppm 유지하기 위한 최적의 방법을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.
- 초기 시설하우스 내의 CO₂ 농도를 800ppm으로 할 경우, 초기 CO₂ 발생기의 가동 시간은 5분으로 하면 내부 CO₂ 농도는 약 1000ppm에 도달한다. 그리고 일출 직후 2시간 반동안 CO₂ 소모율이 0.8935ppm/min로 적기 때문에 더 이상 가동을 하지 않고 있다가, 2시간 반에 다시 5분을 가동해주면 CO₂ 농도가 약 1100ppm으로 상승한다. 그 후 오후 5:30까지는 매 한 시간마다 5분씩 CO₂ 발생기를 가동을 해주면 CO₂ 농도를 약 1000ppm으로 유지해 줄 수 있다.
- 초기 시설하우스 내의 CO₂ 농도가 380ppm일 경우는, 위 계산에서 나온 것처럼 약 13분 동안 가동을 해주면 CO₂ 농도가 약 1000ppm에 도달한다. 그리고 일출(7:00) 후 2시간 반동안 정지했다가, 매시간마다 5분씩 CO₂ 발생기를 가동을 해주면 CO₂ 농도를 약 1000ppm으로 유지해 줄 수 있다.

(3) 연소가스의 배출가스 저감을 위한 촉매장치의 성능

- 촉매를 이용한 후처리시스템은 CO₂ 발생기에서 배출되는 유해배출가스 (CO, HC, PM)를 저감 시킬 수 있다. CO₂ 발생기의 연소기에 공기를 공급하는 팬의 풍압이 낮기 때문에 후처리시스템의 유동 저항(flow resistance)은 가능하면 낮아야 한다. CO₂ 발생기의 배출가스

유동 저항이 커지면 연소기에 공급되는 공기량이 줄어들어 불완전연소 되어 유해 배출가스를 많이 생성한다.

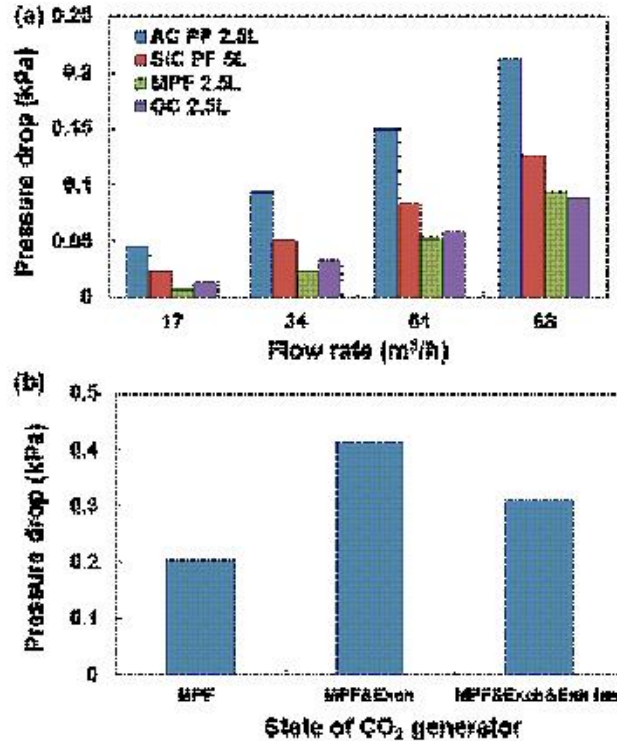


Fig. 2-9. Pressure drop depending on (a) the kinds of catalysts and (b) the state of the CO₂ generator.

- 배기 후처리용 촉매를 선택할 때는 유동저항 (배압)이 낮은 촉매를 선정해야 한다. 일반적으로 PF(particulate filter)는 인접한 channel의 끝부분이 막혀있어 flow가 벽면의 기공을 따라 흐르는 구조이어서 PM 저감 효율은 매우 높다. 반면에 MPF(metal particulate filter) 촉매는 plate 구조에 충돌하여 확산과 간섭효과로 포집되는 구조이며, PM 저감 효율은 낮다. CO₂ 발생기에 장착할 후보 촉매는 AC(advanced cordierite), SiC(silica carbide), MPF, 그리고 OC(oxidation catalyst)이다.

- Fig. 2-9(a)는 4종 촉매의 배압(back pressure)을 lig test에서 측정한 결과를 나타내고 있다. 공급 공기의 유량이 증가할수록 촉매의 배압은 증가한다. 공기 공급유량이 68 m³/h일 때 AC의 배압은 0.211 kPa, SiC의 배압은 0.126 kPa, MPF의 배압은 0.093 kPa, 그리고 OC의 배압은 0.088 kPa이다. MPF 촉매는 AC 및 SiC 촉매에 비해 배압이 낮다. AC와 SiC 촉매는 유해배출가스에 포함된 PM을 연속적으로 여과/재생시키지만 배압이 증가하여 공기 공급량이 감소하기 때문에 연소상태가 악화되어 후처리장치로서는 부적합하다.

- Fig. 2-9(b)는 CO₂ 발생기 배기 라인에 MPF 촉매, 열교환기와 배기팬의 존재여부에 따른 배압의 변화를 나타내고 있다. MPF 촉매를 장착한 CO₂ 발생기의 배압은 0.205 kPa이며, MPF 촉

매와 열교환기를 장착한 CO₂ 발생기의 배압은 0.412 kPa로 증가하였다. 이렇게 CO₂ 발생기의 배압의 상승은 연소기의 공기공급량을 감소시켜 유해 배출가스의 증가로 이어진다. 상승된 배압을 감소시키기 위해서, CO₂ 발생기의 배기라인 끝에 배기를 흡인하는 팬을 장착하였다. 그 결과 배압은 0.237 kPa로 감소하였다. 이 결과로부터 후처리장치 MPF 촉매와 배기열 회수용 열교환기를 장착한 CO₂ 발생기에는 배압을 감소시키기 위한 배기팬을 장착하기로 한다.

- Fig. 2-10은 새로 개발한 입자상물질 제거 필터와 1차년도에 개발한 MPF의 배압을 비교하였다. 배압은 연소장치에 직접 설치한 상태에서 측정한 결과이다. 1차년도의 OC+MPF의 차압은 0.31 kPa, 새로 개발한 SiC(half plugging)와 OC+MPF는 거의 같은 수준의 배압을 나타내고 있다. 그러나 SiC(full plugging)의 경우는 이 두 필터보다 높은 0.36 kPa를 나타내고 있다. 이와 같이 full plugging의 필터는 배압이 크기 때문에 이 배압을 감소하기 위해서는 배기팬의 용량을 증가시켜야 한다.

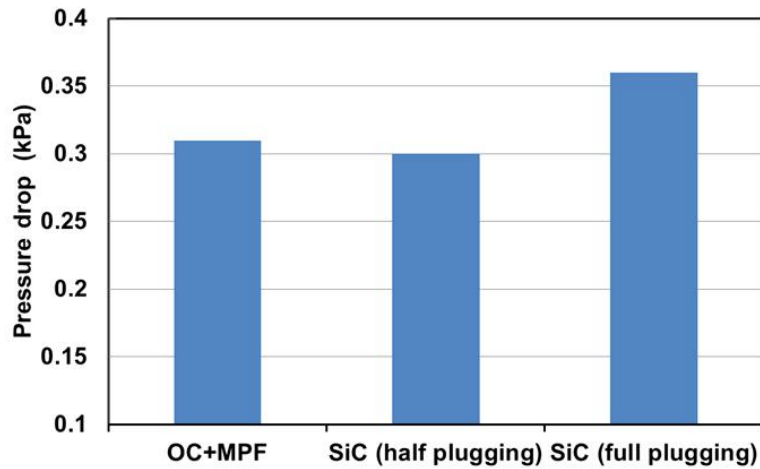


Fig. 2-10. Pressure drop of particulate filters

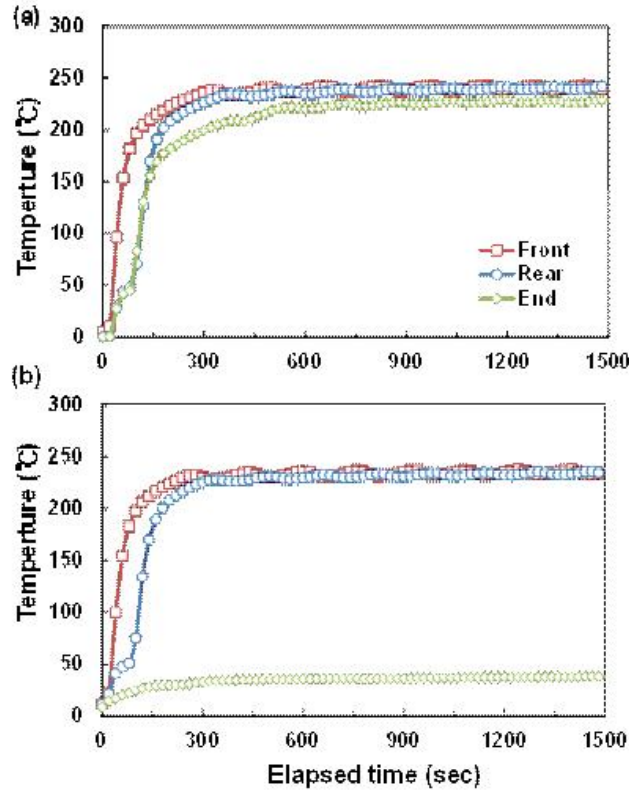


Fig. 2-11. Temperature profiles of exhaust gas for CO₂ generator (a) without and (b) with heat exchanger.

- 배기 후처리용 촉매온도는 유해 배출가스 저감에 있어서 매우 중요한 인자이다. 촉매의 온도는 CO₂ 발생기의 배기의 온도에 따라 변한다. Fig. 11은 CO₂ 발생기의 배출가스 온도특성을 나타내고 있다. Front는 촉매의 전단, rear는 촉매의 후단, 그리고 end는 배기 라인 맨 끝 위치의 온도를 각각 나타내고 있다. CO₂ 발생기의 연소상태는 배출가스 온도로부터 추측할 수 있다.

- Fig. 2-11(a)는 MPF 촉매를 가진 CO₂ 발생기의 배출가스 온도특성을 나타내고 있다. 배출가스 온도는 촉매를 장착하지 않았을 때 약 250°C를 유지하였지만, 촉매를 장착할 경우 배출가스 온도는 약간 감소하여 약 240°C를 나타내었다. MPF 촉매 전단(front)의 배출가스 온도는 시동 후 60초에 약 153°C 120초 후에 약 204°C 300초 후에 약 240°C에서 거의 일정하게 유지하고 있다. MPF 촉매 후단(rear)의 배출가스 온도는 120초 후에 약 130°C 360초 후에 약 240°C에 도달하고 있다. MPF 촉매의 열용량 때문에 촉매 전단, 후단에 온도차이가 나타난다. CO₂ 발생기의 배기 라인 끝단(end)의 온도는 열손실로 인해서 배출가스의 온도가 감소하여 600초 이후에 220°C를 유지하고 있다. 300초 이후 배출가스 온도의 변화는 CO₂ 발생기 내부에 있는 축열탱크 A의 온도가 60°C 이상이 되면 순환펌프가 물을 강제 순환시키기 때문에 발생하는 현상이다. CO₂ 발생기의 배출가스 온도는 240°C를 유지하기 때문에 MPF 촉매가 유해 배출가스 (CO, HC, PM) 를 저감 할 수 있을 것으로 판단한다.

- Fig. 2-11(b)는 MPF 촉매와 열교환기를 가진 CO₂ 발생기의 배출가스 온도특성을 나타내고 있다. CO₂ 발생기의 배기열을 회수하여 배기 중에 포함된 수증기를 응축시켜 제거하고 동시에

회수된 열은 축열탱크 C로 보내어 재사용하기 위해서 열교환기를 장착하였다. MPF 촉매의 전후단의 온도는 Fig. 11(a)와 비슷하다. 그러나 CO₂ 발생기의 배기 라인 끝단의 온도는 240초 이후 약 30℃ 유지하여 배기 중 수증기의 제거와 배기열 회수가 가능하였다.

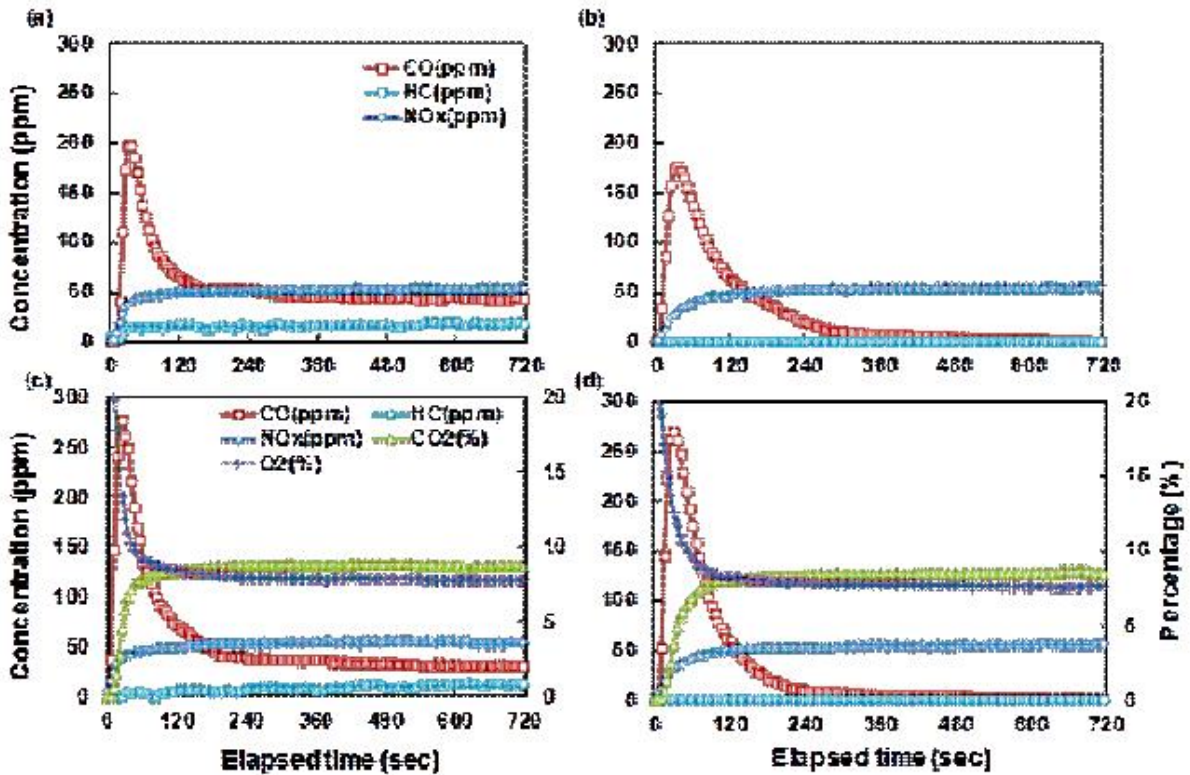


Fig. 2-12. Emission characteristics of CO₂ generator in the front and the rear of the MPF catalyst (1월 측정).

- Fig. 2-12(a, b)는 MPF 촉매를 장착한 CO₂ 발생기(excess air ratio=1.6)의 시동 후 배출가스 농도 특성을 나타내고 있다. MPF 촉매전단(a)에서 관찰한 CO 농도는 30초까지 급격히 증가하여 최대200 ppm까지 배출되지만, 이 후 감소하기 시작하여 240초 후 안정화 되어 약 40 ppm을 배출한다. MPF 촉매후단(b)에서 관찰한 CO 농도는 30초까지 역시 증가하지만, 300초 후 MPF 촉매가 95% 이상의 CO 정화율에 도달한다. MPF 촉매전단에서 HC는 약 20ppm 배출되지만, 촉매후단에서는 관찰되지 않는다. 정상상태에 도달한 후 CO₂ 농도는 약 8.1%를 나타내었다.

- Fig. 2-12(c, d)는 MPF 촉매와 열교환기를 장착한 CO₂ 발생기(excess air ratio=1.6)의 배출가스 변화 특성을 나타내고 있다. CO₂ 발생기에서 배출하는 CO₂ 농도는 약 8.1% 이다. MPF 촉매전단(c)에서 관찰한 CO 농도는 30초까지 급격히 증가하여 최대270 ppm까지 배출되지만, 이 후 감소하기 시작하여 240초 후 안정화 되어 약 40 ppm을 나타내고 있다. 그러나 MPF 촉매후단(d)에서 관찰한 CO 농도는 30초까지 역시 증가하지만, 240초 후 MPF 촉매에서 95% 이상의 CO 정화율에 도달한다.

- MPF 촉매전단(c)에서 관찰한 HC는 약 10 ppm이지만, 촉매후단에서는 측정되지 않는다.

반면에 MPF 촉매 전후단에서 관찰한 NOx 농도는 120초 후 약 50 ppm 배출되며, MPF 촉매는 NOx를 정화시키지 못한다. CO₂ 발생기는 시동 초기에 불완전한 연소 때문에 CO, HC 배출농도가 높지만, 시동 후 약 300초가 지나면 연소상태가 점차 안정되어 배출가스 온도가 240°C에 도달하여 90% 이상 저감되는 특성이 있다. 일반적으로 CO 농도가 300 ppm 일 경우 사람에게도 치명적인 영향을 줄 수 있으며, 작물에게는 기공 흡수를 통한 옆면 고사현상을 유도한다. 그러므로 연소초기 약 300초간 배출가스를 처리할 수 있는 후처리장치가 필요하다.

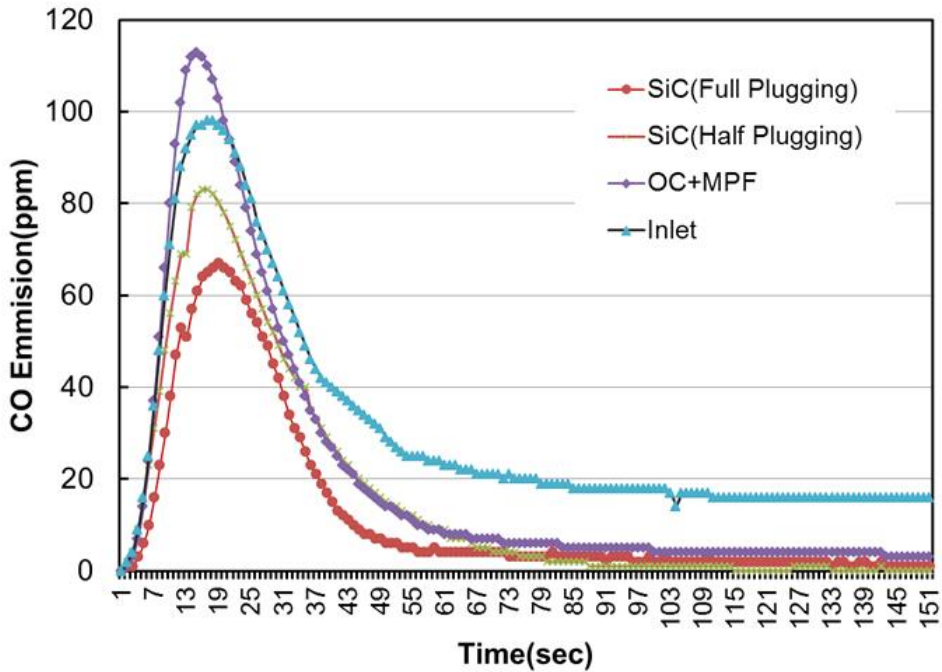


Fig. 2-13. CO emission (May,1 measurement).

- Fig. 2-13는 CO₂ 발생기의 착화 후 초기 약 150초 동안 SiC filter 2종과 OC+MPF 후단에서의 CO 농도를 나타내고 있다. 이 때 HC의 농도는 거의 0에 가까웠다. CO의 경우 초기 20초에 피크가 나타나고 있다. 이 초기 배출 농도는 연소기 출구의 농도와 후처리장치의 후반의 농도가 모두 높게 나타나고 있다. 이것은 촉매가 활성화 온도에 도달하지 못했기 때문이다. 그러나 착화 후 50초 정도 지난 후부터는 각 배기후처리장치에 의해 CO의 농도가 낮게 배출되고 있음을 알 수 있다.

- CO₂ 발생기의 입구농도에 비교하여 CO 정화율이 가장 높은 것은 SiC(half plugging), SiC(full plugging), OC+MPF 순이다. SiC(half plugging)의 CO 배출량이 SiC(full plugging) 보다 낮은 것은 full plugging의 경우 배출가스가 담체 wall을 통과하면서 일부 탄화수소가 불완전 연소반을 하여 CO로 되기 때문이다. 착화 후 2분 이후에 SiC(Full Plugging)의 정화율은 92%, SiC(Half Plugging)은 100%, OC+MPF는 75%의 정화율을 보이고 있다.

- 연소초기 약 70초간 배출가스 전환밸브를 통해 제올라이트와 같은 흡착제가 달린 다른 라인으로 유도하여 CO와 HC를 흡착시킨다. 그리고 70초 이후 배출가스 온도가 안정화되면 이 흡착된 CO를 촉매로 다시 보내어 정화시키는 장치를 제안한다.

- Fig. 2-14는 MPF 촉매를 장착한 CO₂ 발생기에서 배출되는 PM의 입자수와 입경분포를 나타내고 있다. 일반적으로 디젤엔진에서 배출되는 PM의 입자수는 약 10⁸ number/cm³ 이다. CO₂ 발생기는 항상 일정량의 연료를 분사하고 연속적으로 연소한다. 그러므로 간헐적으로 연소하는 디젤엔진에 비해 PM의 입자수가 적은 특징이 있으나, 유동저항이 발생하면 흡입공기량이 적어져 불완전 연소가 발생해 입자수가 증가한다. 공기 중(background)에 존재하는 PM의 입자수는 약 1.5x10⁵ number/cm³이며, 20 nm의 크기를 가진 입자가 3x10⁴ number/cm³로 가장 많다.

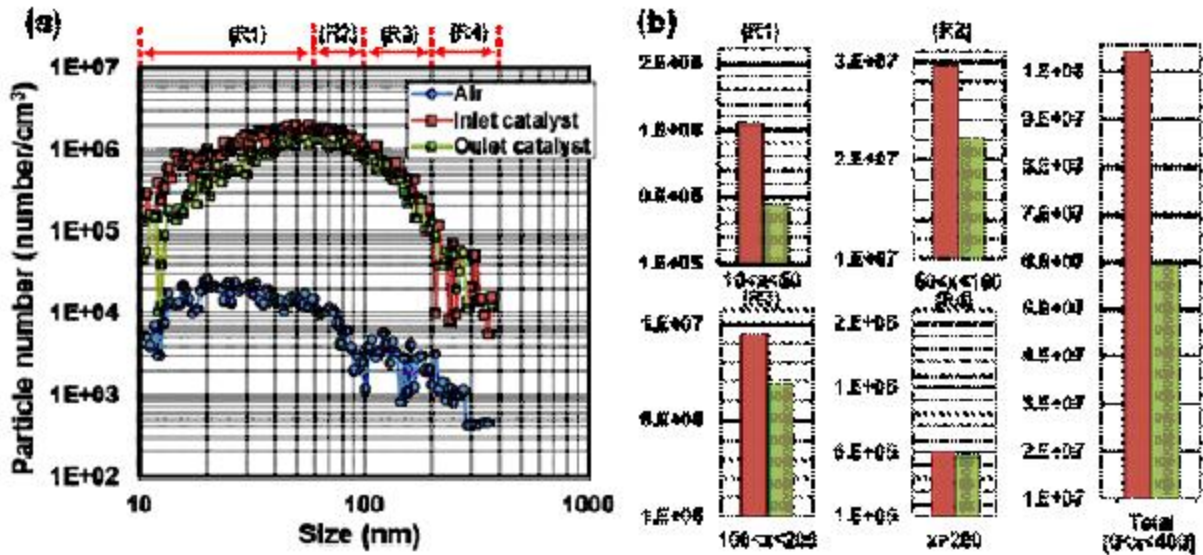


Fig. 2-14. PM number and size distribution of CO₂ generator with MPF catalyst.

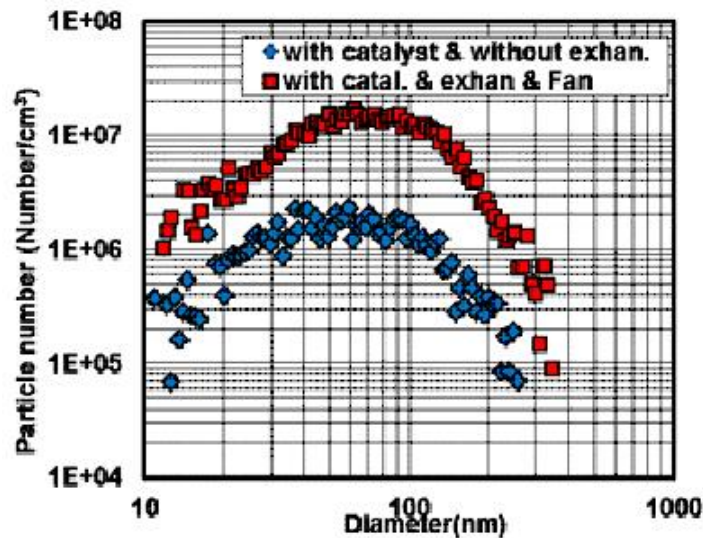


Fig. 2-15. PM number and size distribution of CO₂ generator with and without heat exchanger.

- 반면에 CO₂ 발생기는 50 - 60 nm 크기의 PM을 가장 많이 배출한다. MPF 촉매의 전단의 PM 총수(10 < x (입자 지름) < 400)는 약 6x10⁸ number/cm³이며, 후단에서 약 43% 저감되었다.

50 nm 이하의 PM의 입자수(a)는 약 10^6 number/cm³가 약 53% 저감되며, 50 -100 nm 크기의 PM 입자수(b)는 약 3×10^7 number/cm³가 약 25% 저감되며, 100 - 200 nm 크기의 PM 입자수(c)는 약 10^7 number/cm³가 약 25% 저감되며, 200 nm 이상의 PM의 입자수(d)는 약 6×10^5 number/cm³이며 약 5% 저감된다. MPF 촉매를 통해 PM의 입자수는 약 43% 감소되며, 인체에 유해한 50 nm 이하의 PM이 가장 높은 저감율을 보인다.

- Fig. 2-15은 MPF 촉매와 열교환기가 장착된 경우 CO₂ 발생기에서 배출한 PM의 입자수 및 분포를 나타내고 있다. CO₂ 발생기에 MPF 촉매, 열교환기를 장착했을 때 배압이 증가하여, MPF 촉매 후단에서 관찰한 PM의 입자수는 크게 증가한다. 열교환기가 있을 때 PM의 총수($10 < x$ (입자 지름) < 400)는 열교환기가 존재하지 않았을 때 8.8×10^7 number/cm³, 열교환기와 배기팬이 존재했을 때 약 6.6×10^8 number/cm³이며 약 760% 증가하였다. 이

- 와 같이 배기압의 증가로 인해 PM의 증가율은 50 nm 이하(a)의 크기에서 약 590%, 50 - 100 nm 범위(b)에서 약 850%, 100 nm 이상의 범위(c, d)에서 약 1000% 이상 증가한다. 열교환기 존재 여부에 따라 CO₂ 발생기에서 배출되는 PM의 입자수와 크기 분포는 배압 때문에 많은 영향을 받는다. 그러므로 후처리시스템과 열교환기의 설치로 인한 배기관의 배압을 최소화하기 위해 배기팬을 장착하였다.

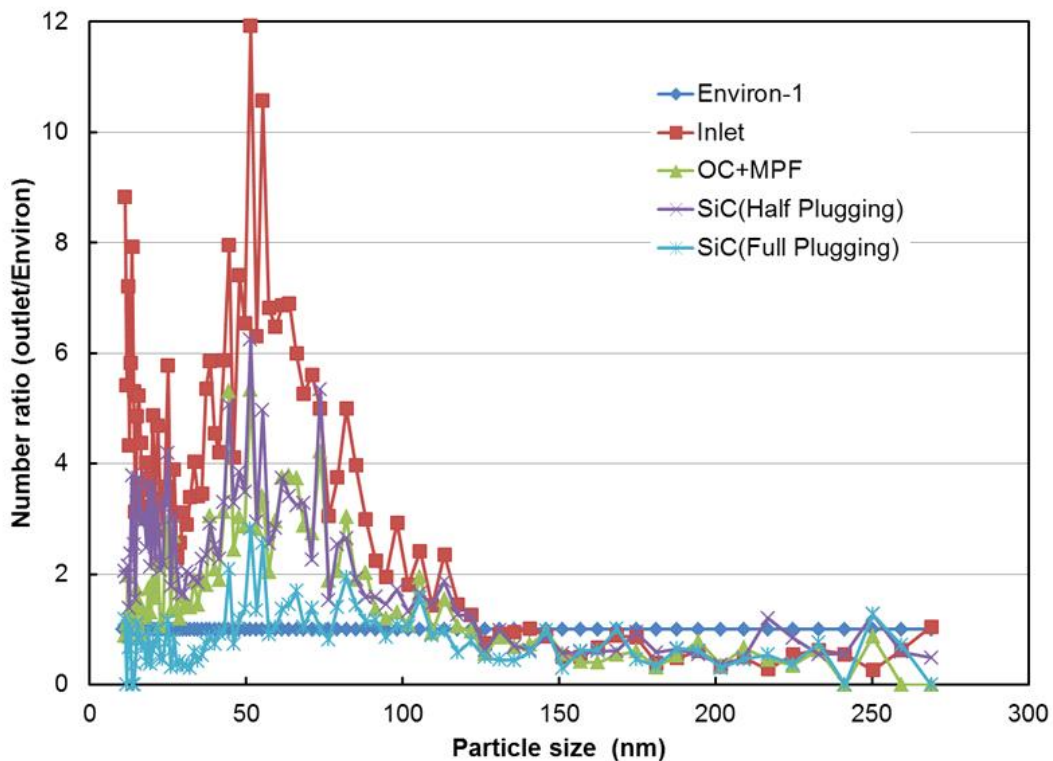


Fig. 2-16 Particulate emission characteristics of several after-treatment equipments.

- Fig. 2-16은 CO₂ 발생기의 정상상태에서의 SiC filter 2종과 OC+MPF 후단에서의 PM의 수분포의 상대 농도를 나타내고 있다. CO₂ 발생기의 PM수 분포는 참고로 대기(공기) 중의 농도를 기준으로 비교하였다. CO₂ 발생기에서 배출되는 농도는 대기 중의 입자상물질의

수보다 4-12배 정도 많은 입자를 배출함을 알 수 있다. 입자수는 1차년도에 제작한 OC+MPF와 SiC(half plugging)이 거의 동등한 수 분포를 나타내고 있다. 특히 120nm 이하의 작은 직경의 입자등은 대기보다 약 6배까지 많이 배출되고 있다. SiC(full plugging)의 입자수 배출 특성은 입자 직경 120nm 이하에서는 거의 대기 수준이며 120nm 이상에서는 대기보다 낮은 특성을 보이고 있다.

- 최종적으로 CO₂ 입자를 완전히 제거와 동시에 HC, CO를 제거하기 위해서는 SiC(full plugging)를 장착하고 배기압 증가를 만회시키기 위해서는 배기팬을 설치하는 것이 바람직하다.

(4) CO₂ 발생기 운전조건에 따른 CO₂ 배출 특성 및 축열특성 파악

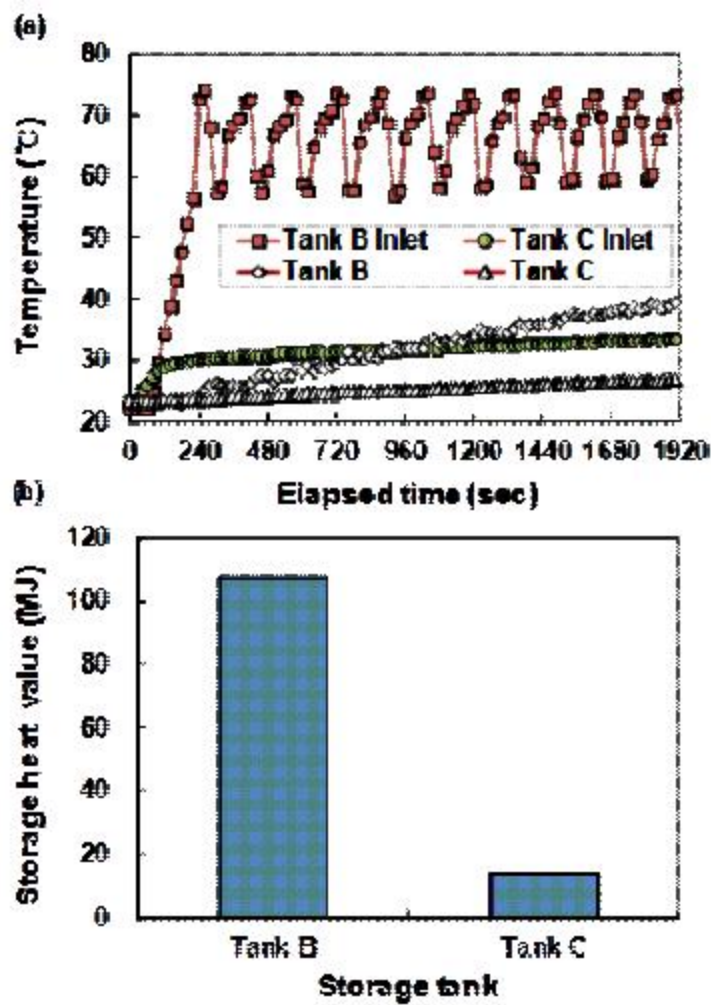


Fig. 2-17 Experimental results of (a) temperature profiles and (b) stored heat values for water tanks.

- Fig. 2-17(a)는 CO₂ 발생기의 연소열 및 배기열을 회수한 축열탱크 B와 C의 입구와 탱크 중앙의 물의 온도변화를 나타내고 있다. CO₂ 발생기 내부에 있는 축열탱크 A의 온도가 연소열에 의해 60°C에 도달하면 순환펌프가 작동하기 때문에 축열탱크 B의 입구 온도는 주기적으로 상승과 하강을 반복하며, 축열탱크 B의 중앙온도는 점진적으로 상승한다. 반면에,

축열탱크 C의 입구온도는 CO₂ 발생기의 배기파이프에 설치된 열교환기로부터 배기열을 회수하므로 시간이 경과함에 따라 축열탱크 C의 입구 및 중앙의 온도는 서서히 상승한다. 연소열과 배기열을 고려한 축열탱크 B, C의 축열량은 다음 (2)식으로 계산하였다.

$$Q = m C \Delta T \text{ ----- (2)}$$

여기서 m은 질량 (kg), C는 물의 비열(평균 온도값으로 고정) (kJ/kg·K), Δ는 온도차 (K)를 나타낸다. Fig. 2-17(b)는 CO₂ 발생기를 30분동안 운전하였을 때 축열탱크 B, C에 축적된 축열량이다. 연소열에 의해 축열탱크 B에 축적된 총축열량은 108 kJ이다. 그리고 배기열 회수에 의해 축열탱크 C에 축적된 축열량은 약 14 kJ이다. 배기열의 의한 회수된 축열량은 연소열에 의해 축적된 축열량의 약 13% 수준이다.

- 연소기형 CO₂ 발생기로 시설하우스 내부에 CO₂를 공급할 때 배출가스 중에 포함된 수분이 함께 공급된다. 수분은 시설하우스 내의 습도를 증가시키므로 작물에 곰팡이균과 같은 병충해를 유발할 수 있다. 그러므로 배출가스와 함께 배출되는 수분을 제거하여 시설하우스 내부에 일정한 습도를 유지할 필요가 있다.

- Fig. 2-18은 CO₂ 발생기를 1시간 동안 운전했을 때, 열교환기 (a, b)에서 회수되는 응축수의 양을 10분 간격으로 측정하여 나타낸 것이다. CO₂ 발생기는 이론적 (Stoichiometric)으로 3.2 kg/h의 수분을 생성한다. 연소 시작으로부터 초기 10분 동안 회수된 응축수의 질량은 약 300 g으로, 연소안정화 후에 회수된 양에 비해서 약간 적었다. 10분 이후부터 회수된 응축수의 질량은 약 360g으로 균일하다. CO₂ 발생기를 1시간 동안 운전한 후 회수된 수분의 총질량 (Total)은 2.2 kg/h으로 이론 수분 생성량 3.2kg/h에 비교하여 약 69%가 응축수로 회수되었다. 이 때 배출가스의 온도는 약 30°C이었다. 이 정도로 배출가스 중의 수분이 제거되면 시설하우스 내의 과도한 습도로 인한 작물에 미치는 영향은 최소화할 수 있다.

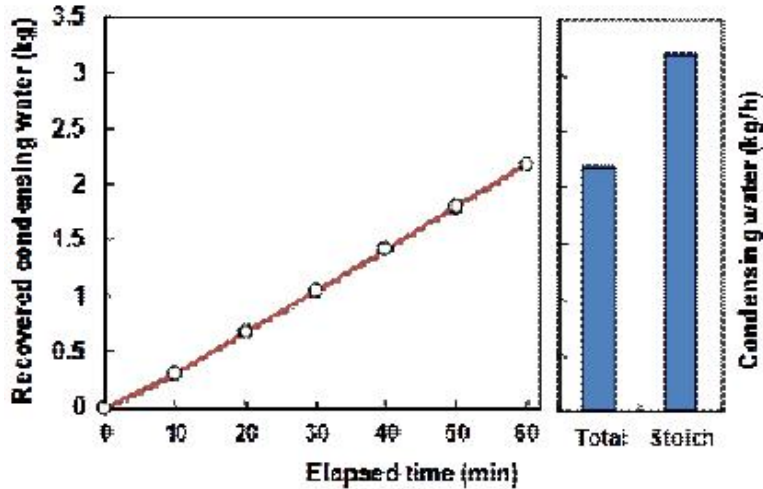


Fig. 2-18 Amount of condensing water according to elapsed time.

- 축열시스템은 축열탱크의 소형화와 축열효율이 중요하다. 일반적으로 축열 매체로는 물이 많이 사용되는데, 물은 열용량이 크고 또한 시스템의 조합이 쉽기 때문이다. CO₂ 발생장치에서 난방이 필요 없는 시기에 CO₂가 필요하게 되어 연소기를 가동하는 경우 발생한 열을 축열장치에 저장해 두었다가 기온이 내려가는 밤 시간대에 축열된 열을 이용하여 시설하우스를 난방한다.

- Fig. 2-19에 실제 온실에서 CO₂ 발생기를 가동할 경우 각부의 온도를 나타내고 있다. 온도 측정일은 2013년 2월 25일이다. 이 때 외기의 온도가 오전 2시부터 9시 사이 약 7시간 동안 영하를 유지하고 있다. 이 기간 중 오전 2시부터 일출 시간인 오전 7시까지는 난방만하면 된다. 그리고 오전 7시부터는 Fig. 8에 나타낸 것처럼 난방과 CO₂ 공급을 해주면 시설하우스 내부의 최적의 온도(5-10℃)와 CO₂ 농도(1000ppm)를 유지할 수 있다. 난방만 할 경우는 CO₂ 발생기의 배출가스 전환밸브를 외기로 배출하게 고정하여 두어야 한다. 어느 정도의 열량을 공급해야 하는지는 외기에 따라 다르지만, Fig. 8의 CO₂ 공급 최적조건과 같이 열공급 조건을 다음과 같이 시뮬레이션할 수 있다.

- 시설하우스 체적 = 1560 m³
- 시설하우스 내의 공기의 질량 = 1560 m³ x 1.286 kg/m³ = 2,006 kg
- CO₂ 발생기의 연료 소비율 = 3.88L/h = 0.06467L/min (등유 밀도=0.82 kg/L) =53.1g/min
- 연소율 : 약 87%
- 등유 발열량 : 46,000 kJ/kg
- 공기 정압비열 : 1.0035 kJ/(kg.K)
- CO₂ 발생기 난방능력 : 146, 540 kJ/h
- CO₂ 발생기의 연료 소비율 : 3.88L/h
- 시설하우스 공기를 1℃ 상승시키는데 필요한 열량: 2,006kg x1.0035kJ/(kg.K)x(1K)=2,013 kJ
- 시설하우스(2중)의 열손실율 : 약 30%(가정)

- 1°C 상승시키는데 필요한 CO₂ 발생기 운전시간 : $2013\text{kJ}/146540\text{kJ/h}/(1-0.3)=0.02\text{h} = 70 \text{ sec}$

- 이 실험의 시설하우스의 기온을 1°C 상승시키는데 필요한 열량은 약 2,013kJ이며, 열손실을 약 30%로 가정하면, 시설하우스(1560m³)의 기온을 1°C 상승시키는데 필요한 CO₂ 발생기의 운전 시간은 약 70초임을 알 수 있다.

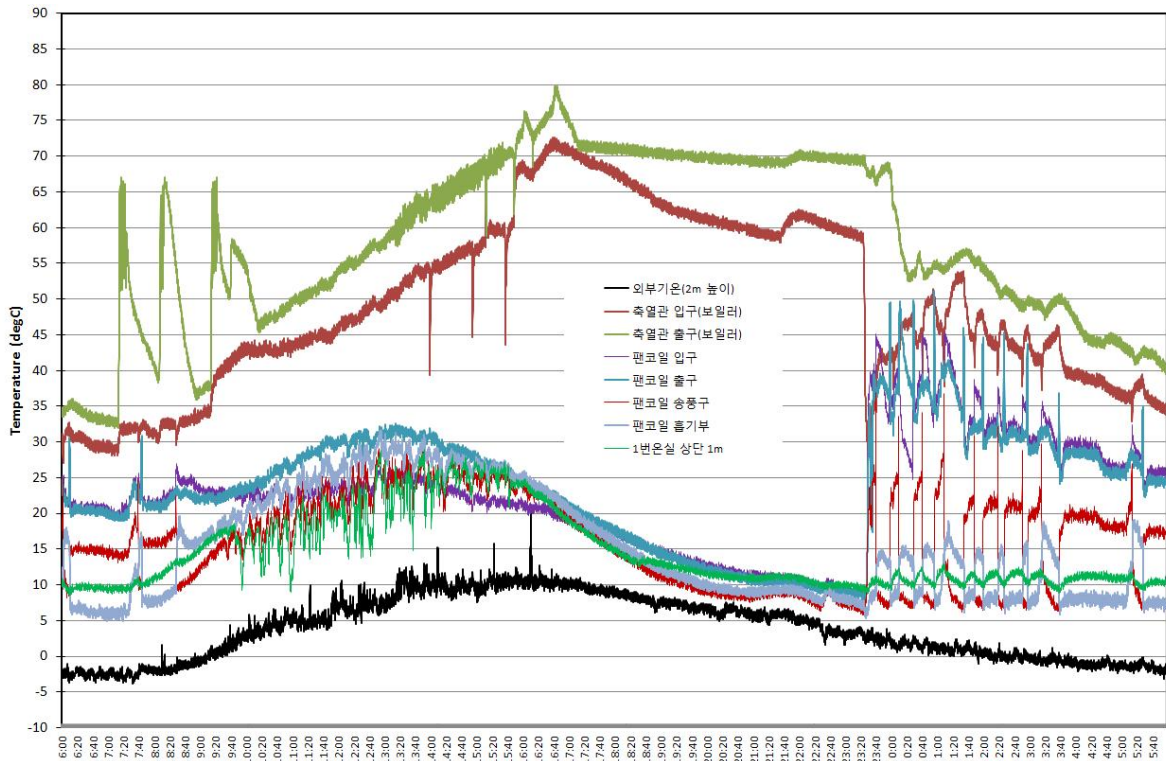


Fig. 2-19. Temperature profiles at several positions of a greenhouse and CO₂ generator.

- 축열탱크에 축열되는 열량은 열교환기에 공급하는 유량과 등유소비량, 등유 발열량과 급수탱크의 입구와 출구의 온도차를 측정하여 계산하였다. Fig. 2-20은 메인 탱크의 축열량을 계산하면 보일러에 공급한 연료의 열량 대비 약 76.9%가 축열됨을 알 수 있다.

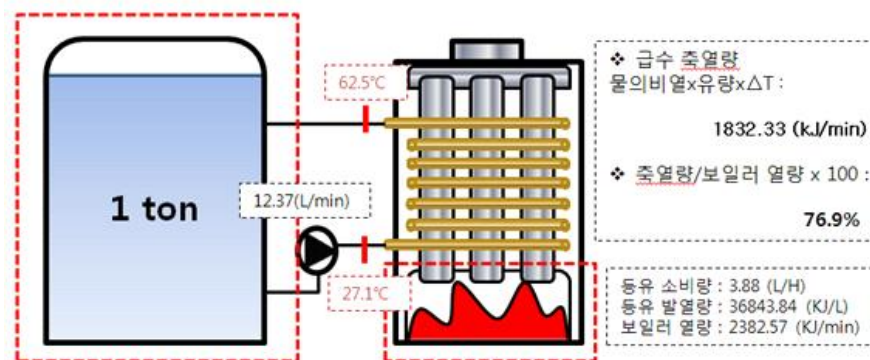


Fig. 2-20. Main heat storage tank and heat balance.

- Fig. 2-21은 배기열 회수를 위한 보조탱크의 축열량을 계산한 결과이다. 배기열에 의해 가열된 보조탱크의 입출구 온도차로부터 축열량을 계산하고, 공급한 연료의 발열량 대비 12.4%가 축열됨을 알 수 있다.

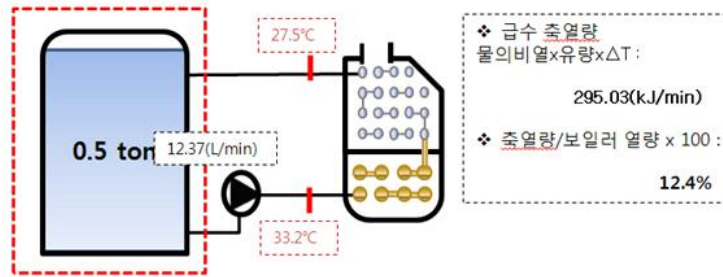


Fig. 2-21. Secondary heat storage tank and heat balance.

- 이상과 같이 축열장치(메인탱크와 보조탱크)에 축열되는 축열량의 합 대비 공급 연료 대비의 발열량 비는 89.3%로 연소장치의 공시 열효율 87%과 유사하게 산정되었다. 이 차이는 큰 체적의 축열탱크 물의 온도가 균일하지 않아 약간의 오차가 발생한 것으로 생각한다.

- 이상의 결과로부터 연소식 CO₂ 공급기의 장단점을 항목별로 비교하여 표 2-5에 나타내었다. 그 결과 축열/후처리 방식이 추가 비용이 들지만 식물의 성장과 시설하우스 관리인의 건강을 고려하여 가장 우수한 장치임을 알 수 있다.

Table 2-5. Merits and demerits comparison of CO₂ generators with combustion type.

연소기 형태	확산식	폐열형	축열/후처리방식
평가항목			
CO ₂ 공급방식	연소배기 직접 방출	연소배기직접 방출/과열 시 배기 밖으로 배출	정화된 배기를 실내로 직접 방출
축열기능	없음	없음	있음
배기 중 습기 조절 기능	없음	없음	있음
유해 배출가스 농도	높음	높음	낮음
배기후처리장치	없음	없음	있음
열손실량	없음	과다	없음
추가 장치	-	유로 변경 밸브	후처리장치 축열 탱크 열교환기 제어장치
추가장치의 비용	-	100,000원	70만 + 200만 + 10만 + 100만원 =3,800,000원

다. 연구 결과 요약

(1) CO₂ 공급 최적화 및 축열장치 최적 운영을 위한 CO₂ 배출특성 파악

- CO₂ 발생기의 CO₂ 배출능력은 53.68ppm/min이며, 시설하우스의 초기 CO₂ 농도가 380 ppm일 경우 이를 1000 ppm으로 올리는데 필요한 시간은 13.3분이다.
- 일출 시간 직후의 딸기 재배 온실(1560m³)의 CO₂ 소모속도는 2시간 반동안 약 0.8935ppm/min로 완만하고, 그 다음 한 시간 동안은 5.27ppm/min로 급격하게 떨어짐을 알았다.
- 시설하우스 내의 CO₂ 초기 농도가 380ppm일 경우, 처음 약 13분 동안 가동하면 CO₂ 농도가 약 1000ppm에 도달하고, 그후 2시간 반동안 정지했다가, 매시간 마다 5분씩 CO₂ 발생기를 가동을 해주면 CO₂ 농도를 약 1000ppm으로 유지해 줄 수 있다.

(2) 배출가스 저감을 위한 촉매장치 평가 및 최적화

- 1차년도의 OC+MPF의 차압은 0.31 kPa로 2차년도에 개발한 SiC(half plugging)와 거의 같은 수준의 배압을 나타내었다. SiC(full plugging)의 배압은 이 두 필터보다 높은 0.36 kPa을 나타내어, full plugging의 필터를 사용할 경우 이 배압을 감소시키기 위해 배기팬의 용량을 증가시켜야 한다.

- CO₂ 발생기의 입구농도에 비교하여 CO 정화율이 가장 높은 것은 SiC(half plugging), SiC(full plugging), OC+MPF 순이며, 정상상태에서 SiC(Full Plugging)의 CO 정화율은 92%, SiC(Half Plugging)은 100%, OC+MPF는 75%의 정화율을 보이고 있다.
- 연소초기 약 70초간 배출되는 CO는 전환밸브를 통해 제올라이트와 같은 흡착제로 유도하여 CO와 HC를 흡착시킨 뒤, 배출가스 온도가 안정화되면 이 흡착된 CO, HC를 촉매로 보내어 정화시키는 장치를 제안한다(특허 출원).
- CO₂ 발생기에서 배출되는 농도는 대기 중의 입자상물질의 수보다 4-12배 정도 많고, 1차년도 OC+MPF와 SiC(half plugging)가 거의 동등한 수 분포를 나타내고, 특히 120nm 이하의 작은 직경의 입자는 대기보다 약 6배까지 많이 배출되고 있다. SiC(full plugging)의 입자수 배출 특성은 입자 직경 120nm 이하에서는 거의 대기 수준이며 120nm 이상에서는 대기보다 낮은 특성을 보이고 있다.

(3) CO₂ 발생기 운전조건에 따른 CO₂ 배출 특성 및 축열특성 파악

- CO₂ 발생기가 정상상태에서 운전될 경우 CO₂ 농도는 약 8.1%임을 알았다.
- 시설하우스(1560m³)의 기온을 1℃ 상승시키는데 필요한 CO₂ 발생기의 운전 시간은 약 70초이다.
- 축열시스템은 CO₂ 발생기의 배기파이프에 설치된 열교환기를 통해 배기열을 회수해 13%를 축열하였으며, CO₂ 발생기로부터 배출되는 수분 중 약 69%를 응축수로 회수하여 시설하우스의 습도 증가를 억제할 수 있다.
- 축열장치(메인탱크와 보조탱크)에 축열되는 축열량의 합 대비 공급 연료 대비의 발열량 비는 89.3%로 연소장치의 공시 열효율 87%과 유사하게 산정되었다.

2. 수경재배 딸기 재배온실에 연소 및 축열 복합시스템의 적용 및 유해가스 생육진단

가. 연구개발 내용

- CO₂ 시용 유무에 따른 딸기 생산량 및 품질 구명
- 유해 가스농도에 따른 생리 장애 모니터링
- CO₂ 발생기 및 축열/난방 시스템의 적용 및 성능 개선

나. 연구결과

(1) CO₂ 시용 유무에 따른 딸기 생산량 및 품질 구명

(가) 연구개발 목표

CO₂ 시용 유무에 따른 딸기 생산량 및 품질 구명하기 위해 연소 및 축열복합시스템의 적용과 연소 가스를 이산화탄소 시용으로 하였을 때 딸기의 생육과 엽광합성의 특성을 조사하였다.

(나) 연구수행 방법

딸기 품종 ‘설향’을 육묘 생산자에게 구입하여 2012년 9월 18일 재식밀도 1m² 당 10주를 정식하여 EC 1.0-2.0mS/cm의 양액을 공급하였다. 온도관리는 측창환기와 난방으로 주간 20°C 야간 6°C 이상에서 환기창에 개폐 할 수 있도록 복합환경조절 시스템의 환기창 개폐시기를 설정하였으며, 난방온도는 5도씨 이하가 되면 석유보일러와 연결된 축열조의 순환 펌프가 작동되게 하여 팬코일 유닛을 이용하여 온풍 난방하였다. 시험구 배치는 총 6구역으로 나눠 CO₂ 시용구 3구역과 비시용구 3구역으로 배치하여 딸기 수경재배 하였다. 복합환경조절 시스템의 이산화탄소 농도는 500ppm-1000ppm으로 설정하였고 환기창의 개도율이 5% 이상이 되면 이산화탄소 설정 농도를 200-700ppm 으로 감소 시켰다. 시설내부의 이산화탄소 농도에 의해 석유 보일러가 일출 후부터 10시까지 시용하고, 일몰전 2시간 전까지 시용하게 하였으나 간헐적으로 외부 온도와 광도 및 환기창의 개도율에 따라 이산화탄소 설정값을 변경하였다. 이산화탄소 시용은 2월 10일 부터 환기창이 닫혀져 있는 오전 시간대에 보일러를 가동하여 연소가스를 시용 하였다. 급액관리는 일출과 일몰을 기준으로 외부의 누적광량에 따라 급액하였다. 광도 조건에 따라 일출 후 1시간부터 일몰 전 2시간까지 급액하였으며, 일회 급액 후 다음 급액시까지의 대기시간은 최소 20-30분으로 설정하였고, 흐른날에도 급액 할 수 있도록 최대 대기시간은 120-180분으로 설정하여 일일 2-4회 급액이 될 수 있도록 설정하였다.

딸기의 처리간 수량과 품질을 조사하기 위해 각 처리구의 과실이 익어 있는 일주일에 2회 20주에서 수확하였으며, 수확후 과실의 개수와 무게 및 각 과실의 당도를 측정하였다.

(다) 연구수행 내용 및 결과

온수보일러의 연소가스는 광폭형 온실내부의 중앙기둥과 측벽 사이에 소형온실을 길이 방향으로 제작하여 6구역으로 분리한 후 3구역에 온수 보일러의 연소 가스를 흡입하여 소형 유공 비닐 튜브(분수호스)를 이용하여 공급하였고 나머지 3구역은 공급하지 않았다. 연소가스 시용시 이산화탄소의 처리구의 평균 농도는 978ppm 이었고, 대조구는 702ppm 이었다. 유공 튜브를 통해 연소가스를 분배하기 위해 송풍기의 풍압이 높아 처리구의 이산화탄소가 확산되어 대조구의 이산화탄소 농도가 증가된 것으로 사료된다. Fig. 2-6은 3월부터 5월 초순까지 처리별 주당 수확 과수와 주당 누적수확량을 나타냈다.

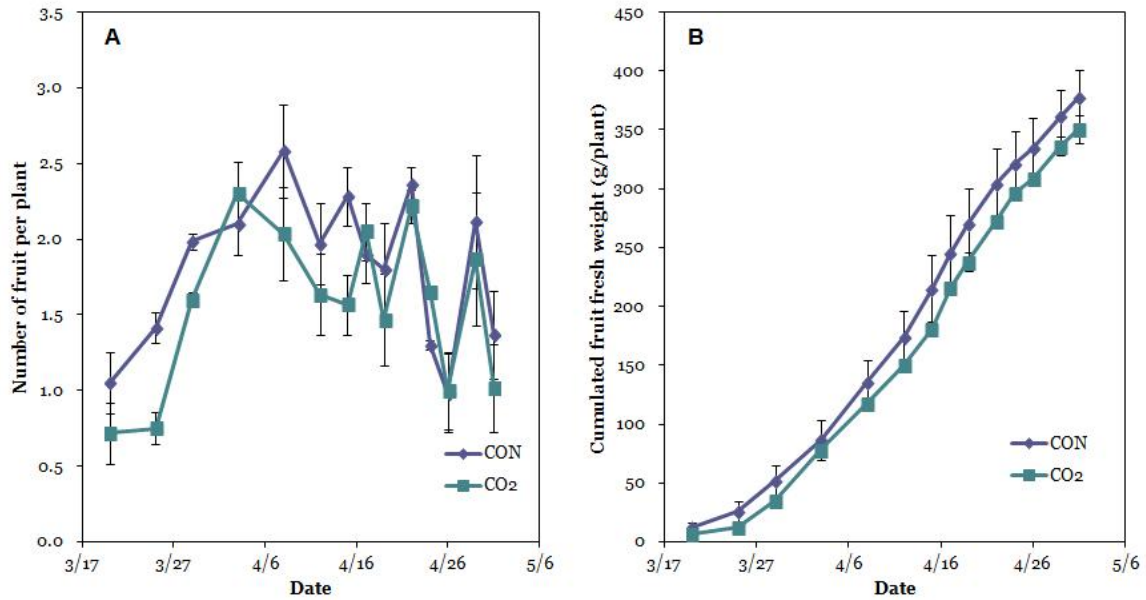


Fig. 2-6. Effect of CO₂ supplied from a direct combustion gases of light oil boiler on number of fruit per plant and cumulated fruit fresh weight per plant of strawberry, cv. Seolhyang' grown on soilless culture.

주당 수확 과수는 통계적으로 유의성은 없었으나 대조구가 처리구보다 높았으며(Fig. 2-6A), 주당 누적 수확량도 대조구가 377.7g, 처리구에서 350.8g 으로 대조구에서 처리구 보다8% 높은 수량을 나타냈다. 이산화탄소의 시용은 광합성을 증대 시켜 주지만, 본 연구에서는 통계적으로 유의성은 없었지만 생산성이 낮아진 이유는 오전에 온실의 환기를 억제 시켜, 내부의 연소가스의 농도가 높아져, 이산화탄소 이외의 유해 가스의 발생도 배제하지 않을 수 없을 것으로 사료된다.

수확과실의 당도는 이산화탄소의 농도가 높았던 3월 말부터 4월 초순까지 높았으나, 이후 대조구와 처리구의 당도의 차이는 유의성이 없게 나타났다. 특히 외부온도의 상승으로 인하여 오전 일찍 환기창이 열어져 이산화탄소 설정 값을 낮게 유지하기 때문으로 사료된다. 특히 일출 후 환기창을 강제로 개방 시간을 지연하였으나 시설내부의 급격한 온도 상승으로 인하여 이산화탄소 농도를 높게 유지 할 수 없었으며 일출 직전 30분에서 60 분 정도의 높은 이산화탄소 농도를 유지할 수 있었다(Fig. 2-7). 플라스틱 온실에 보온 스크린이 없고 2중 비닐 커버를 이용하여 보온하였으나, 외부 온도가 낮은 1월 초순부터 후반기까지는 딸기 생육에 적합한 온도를 유지 할 수 없었다. 특히 딸기의 경우 저온과 단일에 의한 휴면과 틱번이 발생이 많아 초기의 이산화탄소 농도 시용의 효과가 낮았을 것으로 사료된다(Fig. 2-8).

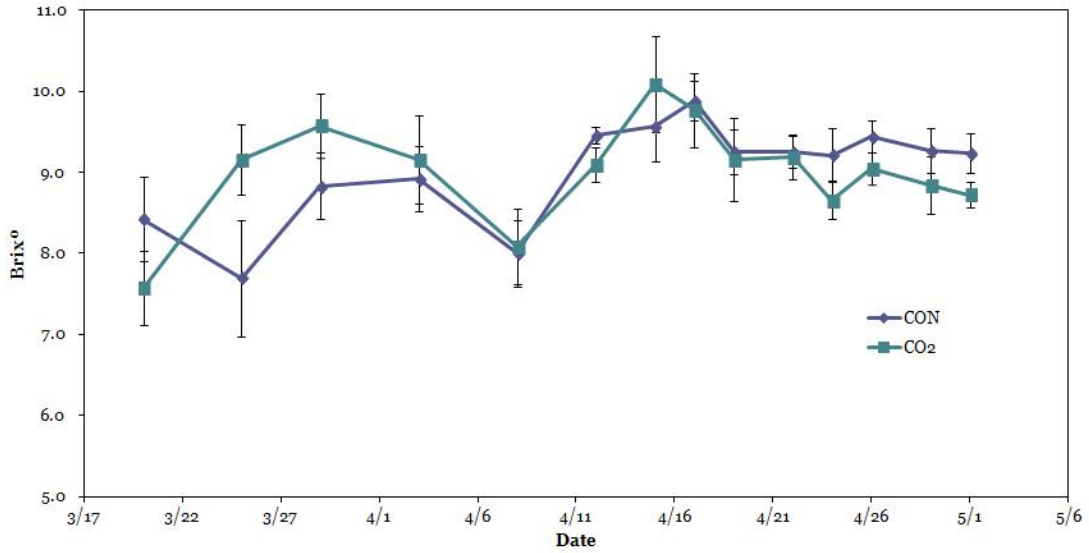


Fig. 2-7. Effect of CO₂ supplied from a direct combustion gases of light oil boiler on soluble sugar content of strawberry fruit, cv. Seolhyang' grown on soilless culture.

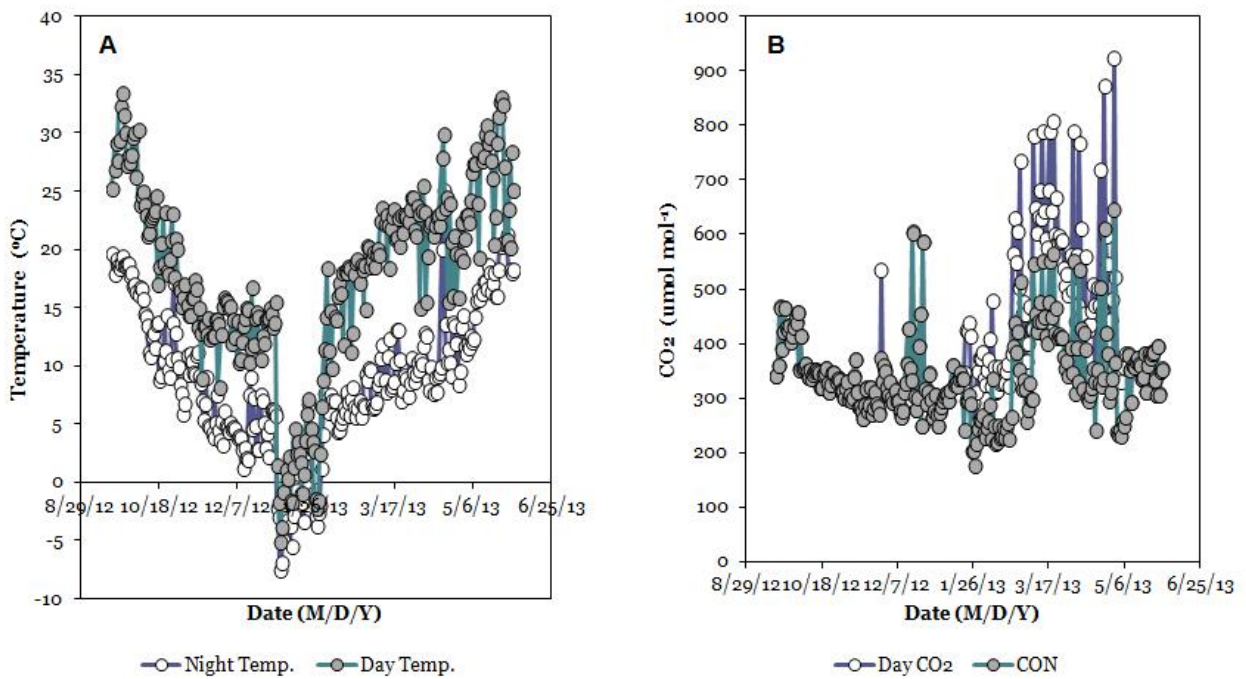


Fig. 2-8. Averaged day and night temperature (A) and CO₂ (B) supplied from a direct combustion gases of light oil boiler for growing strawberry plants, cv. Seolhyang' in plastic greenhouse without energy saving screen.

라. 연구 결과 요약

이산화탄소의 시용은 식물의 광합성을 촉진 시켜주며, 단위면적당 동화산물의 생산량이 증가하여 과실의 품질과 수량에 영향을 미친다는 사실은 일반적으로 잘알려져 있다. 본 연구에서는 연소식 축열난방시스템을 이용한 연소 가스의 딸기의 시용에서 생산성 및 품질의 차이가 미비한 이유는 오전의 짧은 시간동안 고농도의 이산화탄소를 시용하였고, 광도가 높은 10시 이후에는 온실의 측면의 환기창(측창)의 개도율이 증가하기 때문에 전체 연소가스의 효과가 낮게 나타났을 것으로 사료된다. 특히 이산화탄소 시용에 대한 식물의 반응은 광합성율에 직접적인 영향을 미치지만 생산성과 품질의 증가는 즉각 반응을 하지 않는다(1년차 연차보고서). 본 연구에서는 오전 중 짧은 시간의 이산화탄소 시용은 전체 생산성에 미비하였을 것으로 사료되며 통계적으로 유의성이 처리구와 대조구에는 없었지만 생산성이 낮은 이유에 있어 석유보일러의 연소가스를 여과하지 않고 바로 송풍하였기 때문으로 사료된다. 반면 환기율이 낮은 시기의 3월 동안의 당도의 향상은 보일러의 연소가스의 시용효과일 것으로 사료된다. 연구를 수행한 온실의 보온 시설이 부족하 예산으로 설치 할 수 없었지만 3차년 도에 보일러에 설치된 여과된 연소가스의 시용에 따른 식물체의 생장과 품질 및 생산성은 생산농가에 실증실험시 연구결과를 보충하고자 한다.

(2) 유해 가스농도에 따른 생리장해모니터링

(가) 연구개발 목표

석유 보일러의 연소시 발생되는 CO₂를 연소 및 축열 복합시스템의 적용을 위해 화석에너지의 연소시 발생되는 CO, NO_x, HC의에 의한 딸기의 내적 생리장해를 증상을 구명하고자 밀폐된 공간에서의 CO, HC 농도에 따른 신엽의 생리장해 영향 평가 및 농도에 따른 생리장해 정도 연구하였다.

(나) 연구수행 방법

딸기 ‘설향’의 런너를 암면 큐브에 삼목하여 6주를 동안 형광등 하에서 25°C로 재배한 후 3 리터의 플라스틱 투명용기에 일주씩 넣은 후 완전밀폐를 한 용기안에 8%CO, 1.5% NO_x, 5% CH₄, 2% C₃H₈의 가스를 주입하였다(Fig. 2-9). 각 가스는 3반복으로 처리하였다. 주입한 가스들은 0, 1, 3, 9, 24, 48시간동안 노출 시킨 후 딸기 엽의 총클로로필 함량과 카로티노이드 함량, 기공관찰, 순광합성, Fv/Famx 비, 틸라코이드 멤브레인 콤플렉스 (BN-PAGE)를 변화 및 조직화학적 변화 정도를 측정하였다.



Fig. 2-9. Strawberry plants grown Rock wool Cube and put into plastic bottle (3 liters) and inject CO, NO_x, CH₄, C₃H₈ gases.

(다) 연구수행 내용 및 결과

① 유해 가스 종류와 가스 노출 시간에 따른 순광합성과 Fv/Fmax

PPFD(photosynthetic photon flux density) $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 과 이산화탄소 600ppm 조건에서 CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈를 0, 1, 3, 9, 24, 48시간동안 노출 시킨 후 딸기 잎의 광합성과 가스 스트레스의 정도를 측정한 결과를 Fig. 2-10에 나타냈다. 밀폐된 플라스틱 병에 1시간 동안 노출된 딸기의 순광합성율은 대조구에 비해 NO_x에서 2%, CH₄ 7%, C₃H₈ 16%, CO 22%로 C₃H₈와 CO 가스 노출된 딸기 순광합성율이 급격히 감소하였으며 대조구에서도 밀폐된 공간에서의 시간에 따라 약간의 감소를 나타내었고, 모든 유해 가스에서는 노출 9시간 동안 급격한 순광합성율이 감소를 나타냈다. 48시간 동안 노출 된 딸기의 순광합성량은 CH₄ 가스에 노출된 딸기의 순광합성량이 대조구에 비해 86% 감소 하였으며, NO_x는 41%, C₃H₈에서는 35%, CO는 32%감소하였다.

식물의 광합성에 관여하는 외적 스트레스의 정도를 나타내는 Fv/Fmax를 측정하여 각 가스의 노출 시간에 따른 스트레스 정도를 비교 분석하한 결과 유해가스들에 노출된 딸기 잎에서는 Fv/Fmax의 비는 노출 3시간동안 급격히 감소하였고 일정한 비율을 유지하다가 노출 24시간 이후에 NO_x, CH₄, C₃H₈ 노출에서는 2차 적으로 Fv/Fmax의 비 감소하였다. 특히 HC의 가스에서의 광합성작용에 스트레스를 주는 것으로 사료되었다.

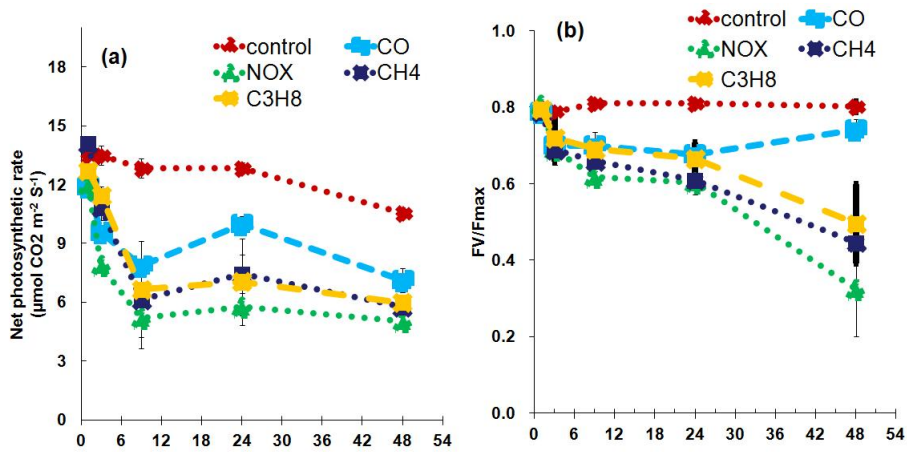


Fig 2-10. Changes in photosynthetic parameters (a) photosynthesis rate at $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ PPFD and $600 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \text{CO}_2$ (b) F_v/F_{max} , as affected by CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ for 24 (indicated by red line) and 48 (indicated by green line) HAT. Bars indicate standard error of means with n=3.

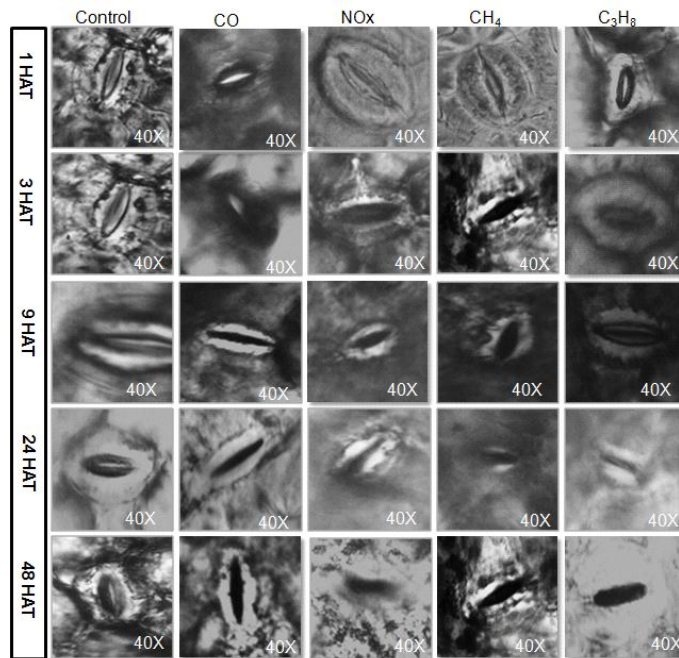


Fig 2-11. Representative images of stomata as affected by CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ for 1, 3, 9, 24 and 48 HAT. Thin layer of leaf outer covering were peeled off carefully and laid on a glass slide, covered with cover slip and were observed under light microscope (Leica CME) at 40 X magnification.

Fig. 2-11는 CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ 가스의 노출된 딸기의 식물체의 엽의 기공과 공변세포의 노출 시간대 별 변화를 광학현미경으로 모니터링한 사진이다. 한시간 동안 CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ 가스에 노출된 딸기 엽의 기공의 개폐와 공변세포의 변화를 광학현미경으로 관찰한 결과 노출 1시간 후에는 기공의 변화나 공변세포의 변화는 관측되지 않았지만, 가스 노출 3시

간 후에는 대조구에 비해 기공이 닫히고 공변세포의 변화는 관찰되지 않았다. 반면 노출 3시간을 지나고 24시간 후의 CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ 가스 노출된 딸기의 기공은 완전히 닫히고 공변 세포에 손상이 발생되지 시작하여 노출 48시간에는 공변세포의 손상은 매우 심하게 발생되었다.

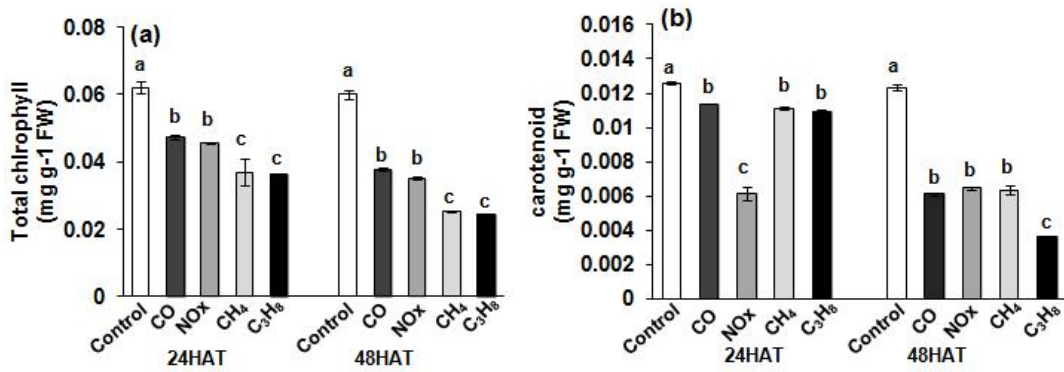


Fig 2-12. Determination of oxidative damage in leaves indicated by (a) H₂O₂ (b) O₂⁻¹ as affected by CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ compared to control at 24 and 48 HAT. Vertical bars indicate S.E. of means with n=3. Means denoted by the different letter are significantly different at $p < 0.05$ according to the Tukey's studentized range test.

Fig. 2-12는 CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ 가스에 24시간과 48시간 동안 노출된 딸기 엽의 생체 중 1 g 당 총 클로로필 함량과 카로티노이드 량을 측정한 결과 유해가스에 노출된 엽의 클로로필의 함량은 감소하였으며 24시간보다는 48시간 후의 감소량이 더 많았다. 카로티노이드의 함량은 NO_x 가스 24시간 후 노출의 함량이 가장 낮았으며, CO, CH₄, C₃H₈의 24시간 노출은 대조구에 비해 약간 낮게 나타났지만 48시간 후에는 대조구에 비해 매우 낮았다.

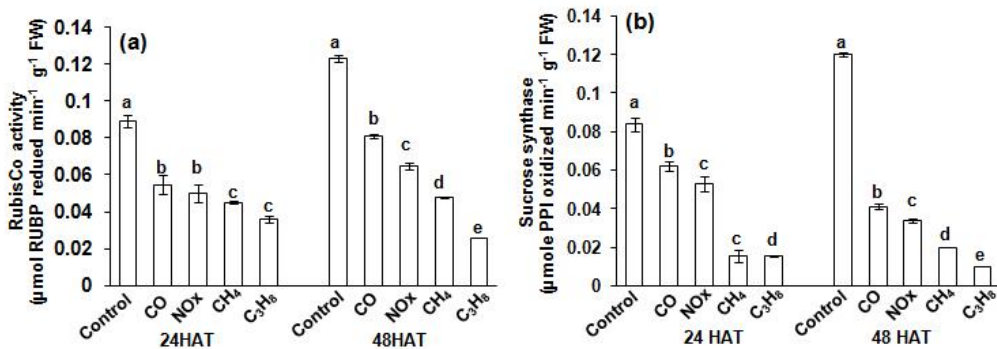


Fig 2-13. Changes in enzyme activities (a) RuBisCO (b) Sucrose synthetase as affected by CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ for 24 and 48 HAT. Vertical bars indicate \pm SE of means with n=3. Means denoted by the different letter are significantly different at $p < 0.05$ according to the Tukey's studentized range test.

Fig. 2-13은 밀폐된 용기내에 CO, CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ 가스를 유입시킨 후 24시간과 48간 동안 가스에 노출된 엽의 Rubisco의 활성도(a)와 Sucrose 합성을 분석하였다. Rubisco의 활성도는 대조구에 비해 가스 노출 24시간과 48시간 후 매우 낮아 졌으며, 특히 CH₄, C₃H₈에서 가장 낮았다(Fig. 2-13a, Fig. 2-14). a또한 sucrose 합성 또한 CO, CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ 가스 노출된 엽은 감소되었으며, CH₄, C₃H₈에서 가장 많이 감소하였다 (Fig. 2-13b)

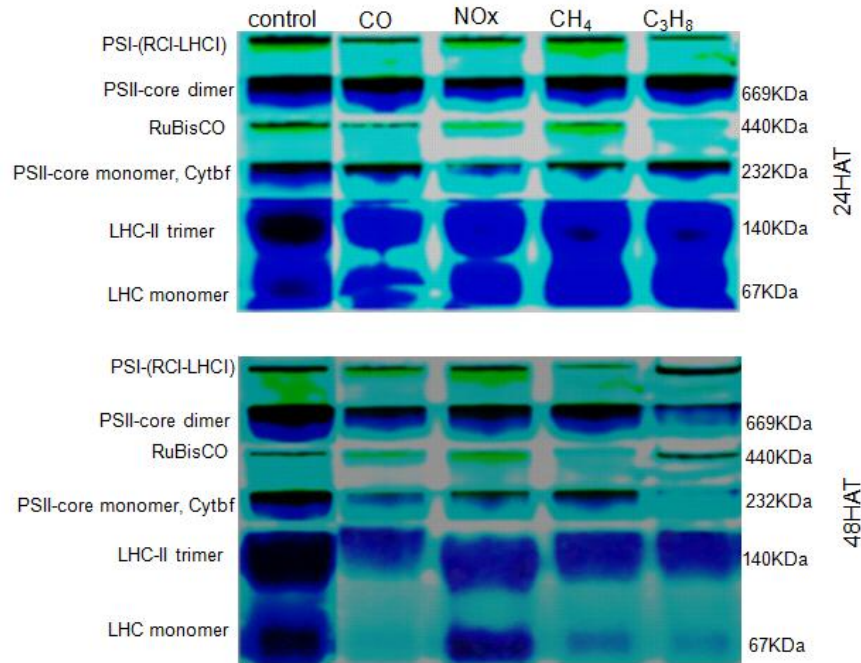


Fig 2-14. Analysis of thylakoid protein complex by BN-Page as affected by CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ for 24 and 48 HAT. Freshly thylakoid membranes from mature leaves were solubilized in 1% BDM at chlorophyll concentration of $1\mu\text{g}\ \mu\text{l}^{-1}$, and the protein sample was separated by 7-10% gradient BN-PAGE.

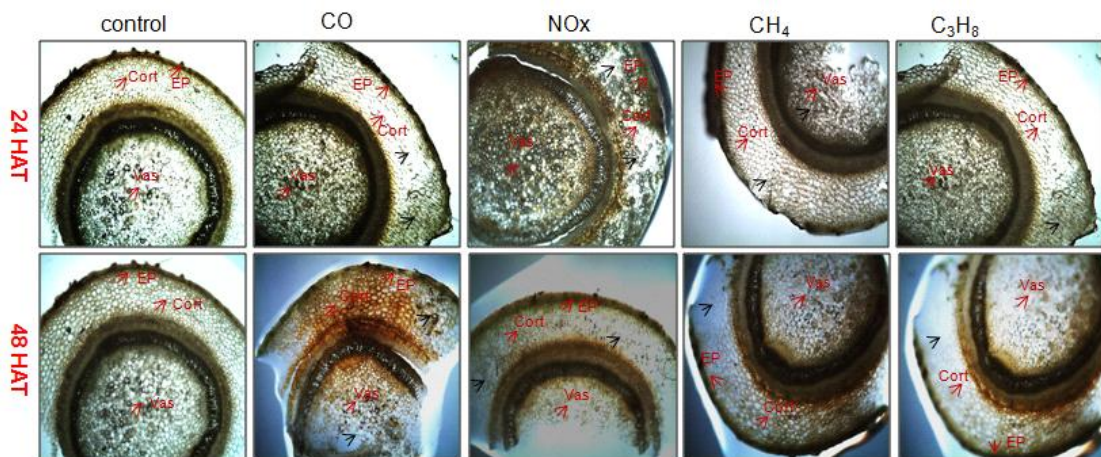


Fig 2-15. The response of structure of stem as affected by CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ for 24 and 48 HAT. Stems were fixed in distill water for 30 min for softening of tissues and were cut transversely into thin section on glass slides and mounted with glycerin, covered with cover slip. The glass slides were then observed carefully under microscope (10X). In figures EP indicated epidermis, Cort indicates cortex and vas indicates vascular cambium.

Fig. 2-15은 밀폐된 플라스틱 용기내 각 CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈의 가스 유입시킨 후 노출 24시간 후와 48시간 후 식물체의 엽병의 단면의 상피와 유관속의 관찰 한 결과이다. 대조구에 비해 엽병의 상피 세포 및 유관속의 손상이 되었고 유관속 형성층의 세포들의 개수(Fig. 2-15 검정색 화살표)의 감소와 유해 가스들에 의해 표피의 파열이 발생되었으며, 48시간 후의 유해 가스에 노출된 엽병에서 그 증상이 더 심각하였다.

(라) 연구 결과 요약

화석에너지의 연소시 발생하는 CO, NO_x, 와 HC의 종류의 가스인 CH₄ and C₃H₈의 가스가 노출되었을 경우 24시간 및 48시간 이후에도 신엽에 특이한 증상을 발견할 수 없었다. 48시간동안의 노출이 시간이 낮았을 수 있지만, 실제 완전 연소된 석유 보일러의 연소 가스를 온실내 유입은 24시간동안 하지는 않는다. 본 연구 결과에서 보는 바와 같이 엽의 기공이 변화와 유해가스의 노출에 의한 광합성 속도의 저하 및 틸라코이드, 카로티 노이드 등 엽내의 단백질 함량이 감소하게 되고, 유해가스 노출 시간이 길어 질수록 기공이 닫혀지고 공변 세포의 손상이 되었다. 밀폐된 공간내에 있는 CO, NO_x, 와 HC의 종류의 가스인 CH₄ and C₃H₈ 들은 기공을 통해 흡수 되기 때문에 공변세포와 엽병의 유관속과 상피 세포들을 손상 시켰다. 완전 연소된 석유보일러의 연소가스를 이산화탄소 공급원으로 활용하여 수경재배 딸기 재배에 사용하지만 장기간 노출의 경우 낮은 농도에서도 기공이나 공변세포의 손상이 갈 것으로 예측된다.

(3) CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 적용 및 성능 개선

(가) 연구개발 목표

CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 적용 및 성능 개선을 위해 온실내외부의 기상환경변화와 이산화탄소 공급시 온수 온도 변화를 모니터링하고 이산화탄소 시용시 최적 조건을 제시하고자 하였다.

(나) 연구수행 방법

제작된 석유 온수보일러와 보일러와 연결된 축열탱크의 온수의 온도 변화를 계측하기 위해 열전대를 data logger에 온실내부의 온도를 기록하였고, 온실 환경조절 시스템인 Magma (그린 CS, 한국) 복합환경조절 시스템을 이용하여 플라스틱 온실내부의 난방시스템, 이산화탄소 시용을 위한 시스템 작동을 자동으로 하였다. 일출 후 3시간 동안 이산화탄소를 시용하기 위해 환기 온도를 25°C로 설정하여, 환기창을 여는 시간을 지연시켰으며, 일출 3시간 이후 부터는 20°C를 설정하였다. 야간의 환기온도는 10°C로 설정하여 두었다. 석유보일러와 연결된 축열조의 순환펌프는 난방온도 설정값에 의해 작동되게 하였으며, 순환펌프가 작동되는 동안 온실내부의 팬코일 유니트의 팬이 작동되게 하였

다.

(다) 연구수행 내용 및 결과

① 외부온도에 따른 시설내부의 환경 및 CO₂ 공급시 광도 및 내외부 온도환경에 따른 온수온도의 변화 모니터링 및 분석

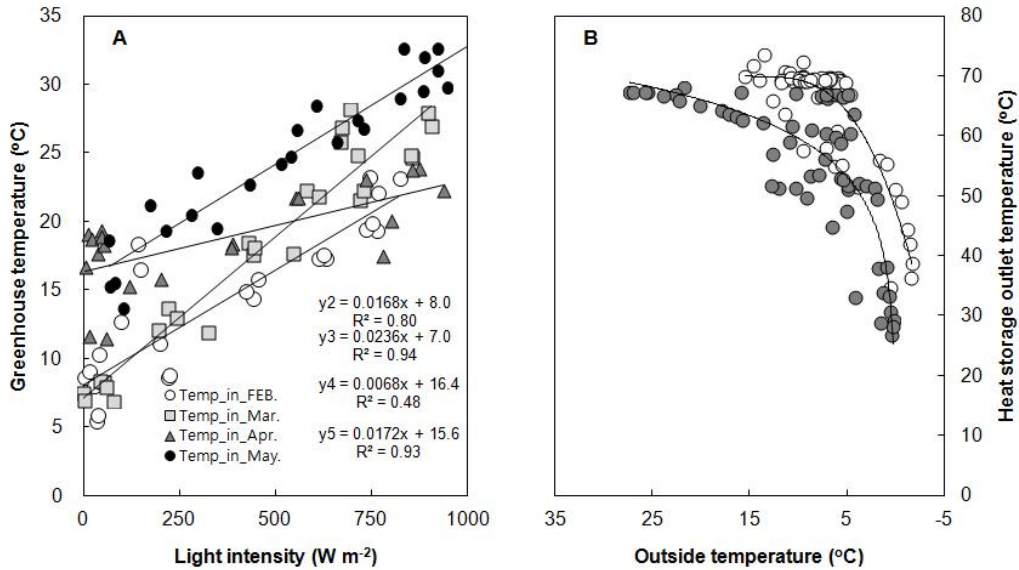


Fig. 2-16. Effect of light intensity from sunrise to midday on greenhouse temperature at the different month (A) and effect of outside temperature on heat storage outlet temperature for heating greenhouse (B) to grow strawberry plants.

온실내부의 온도는 외부 광도에 밀접한 영향을 받는다. 특히 외부 온도가 낮은 2월 말인 2월 24일부터 27일 ($y_2=0.0168X+8.0$)의 경우 외부광도가 $100W \cdot m^{-2}$ 증가시 내부 온도는 $1.68^{\circ}C$ 씩 증가하였다. 3월의 초순인 3월 9일부터 3월 12일의 경우 ($y_3=0.0236X+7.0$)는 $2.36^{\circ}C$ 씩 증가하여 본 실험에서 광도에 따른 급격한 내부 온도 증가를 보였다. 외부 온도가 높은 4월의 말의 경우 ($y_4=0.0068X+16.4$)는 $0.68^{\circ}C$ 씩 증가하였으며, 5월 중순인 5월 12일부터 15일까지의 일출부터 정오까지의 광도 증가에 따라 ($y_5=0.0172X+15.6$)로 $1.72^{\circ}C$ 씩 증가하였다. 일출전의 온도와 정오의 온도에 따라 단위 광도에 대한 온실내부 온도는 온실내부의 주야간 온도편차가 적은 4월에 광도에 대한 낮은 온도 증가율을 나타냈다. 시설내부의 온도는 외부의 광도 뿐만아니라 외부의 온도에도 영향을 받기 때문에 시설내부의 환기창의 개도율과 p-band의 조절은 시설내부의 온도 증가율에 관여하게 된다.

CO₂ 시용 시 축열조의 온도는 증가 하였으나, 플라스틱 온실에 보온 스크린이 설치가 되어 있지 않고 수막을 하지 않았기 때문에 시설내부의 난방 요구도가 외부 온도가 낮을수록 높게 나타나 외부 온도가 5도 이하로 떨어지게 되면 내부 난방시스템의 가동으로 축열조의 온수 토출라인의 온도가 급격히 하강하였으며, 온수 온도에 따른 석유보일러의 가동에 대한 제어가 되질 않았기 때문에 온수온도를 상승시킬 수 없었다(Fig. 2-16B).

② 수경재배 딸기 생육단계에 따른 일중 적정 CO₂ 농도 변화 모니터링 및 CO₂ 농도의 최적화

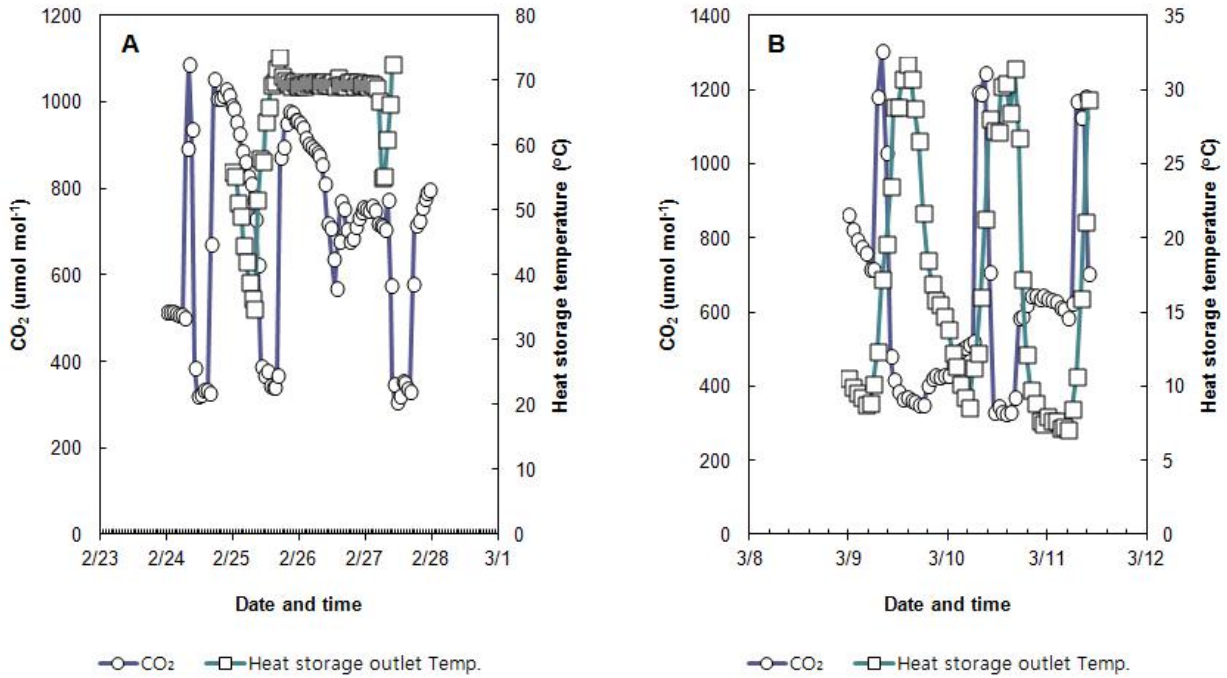


Fig. 2-17. CO₂ concentration and heat storage outlet temperature on the end of February and beginning of March in 2013.

Fig. 2-17 는 2월 24일부터 2월 28과 3월 9일부터 3월 11일 동안 주간에는 높은 CO₂ 농도를 설정하였을 때 주간의 축열조의 온도와 시설내부의 온도 및 환기창의 개도율에 따라 설정된 CO₂ 농도를 감소시켰을 경우 축열조의 온도 변화를 나타냈다. 시설내부의 이산화탄소 농도를 높게 설정높은 CO₂ 농도로 설정해 두면 야간동안 시설내부의 난방요구도가 낮을 경우 축열조의 온수온도를 70°C를 유지 할 수 있었지만, 야간에 외부온도가 낮아 축열조에 있는 온수의 열이 난방에 사용되게 되면 주간에는 이산화탄소를 시용하고 축열된 온수의 온도는 70°C를 유지 하지 못하였다. 이산화탄소를 시용하는 동안 축열조의 온도도 동시에 상승하나 동시에 시설내부의 난방을 하게 되면 축열조의 목표된 온도에 도달 하였지만 일몰 후부터 시설내부의 온도의 급격한 하강으로 시설내부의 난방 요구도가 높아지므로 축열조의 온수온도는 급격히 하강하였다 (Fig. 2-17B).

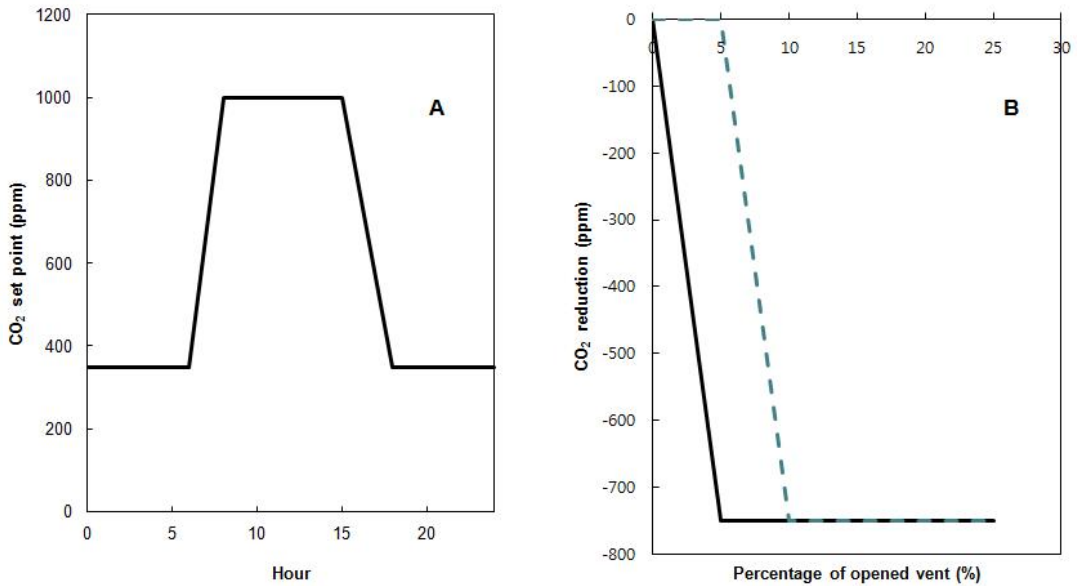


Fig. 2-19. Basic set point of supply CO₂ concentration for turn on boiler system (A) and CO₂ reduction base percentage of opened vent (B).

공급하기 위해 기본적으로 필요한 설정값(A)를 Fig. 2-19A와 같이 제시할 수 있다. 야간의 이산화탄소 농도의 설정값을 350ppm 주간은 1000ppm으로 설정해 둔다. 최대 공급하고자 하는 최대 이산화탄소 농도는 1000ppm 이지만 작물이 왕성이 성장하고 있고 외부광도에 의한 시설내부의 온도가 상승으로 환기를 온실의 측정, 천창, 배기팬의 작동으로 내부의 공기가 외부로 누출 되기 때문에 환기창이 열리거나, 배기팬이 작동하게 되면 설정된 이산화탄소 농도를 감소시켜 줘야 한다. 설정 값을 외적인 환경 요인에 의해 감소시켜 주지 않으면 외부 광도와 시설내외부 온도에 의한 환기창이 열려져 있음에도 보일러를 가동시켜 적정한 이산화탄소의 농도를 올리지 못하고 불필요한 에너지를 낭비하게 된다. 이러한 위험 요소를 감소시키기 위해 시설내부의 환기창의 개도율에 따라 설정값을 감소시켜 줘야 한다. 예를 들어 기본 설정값이 1000ppm이며, 환기창의 개도율이 5%인 경우 -750ppm을 감소시킨 계산된 공급 이산화탄소 농도는 350ppm 이며, 5%이상에서 이산화탄소 농도를 감소시켜 10%에 도달하게 되면 -750ppm을 감소시킬 수 있게 제어 알고리즘을 작성해야 한다. 뿐만 아니라 광도가 증가 할수록 작물에 의한 이산화탄소의 요구도가 높아지지만 시설내부의 온도는 선형적으로 증가하기 때문에 광도에 의한 이산화탄소 농도를 외부 온도와 연계하여 감소 또는 증가 시켜 줄 수 있는 영향 변수를 알고리즘 작성 시 프로그래밍을 하여야 한다. 외부의 풍속의 증가에 따라 시설내부와 외부의 공기교환 속도가 증가하기 때문에 이산화탄소의 설정값을 변경시켜 주는 것이 더 경제적이다.

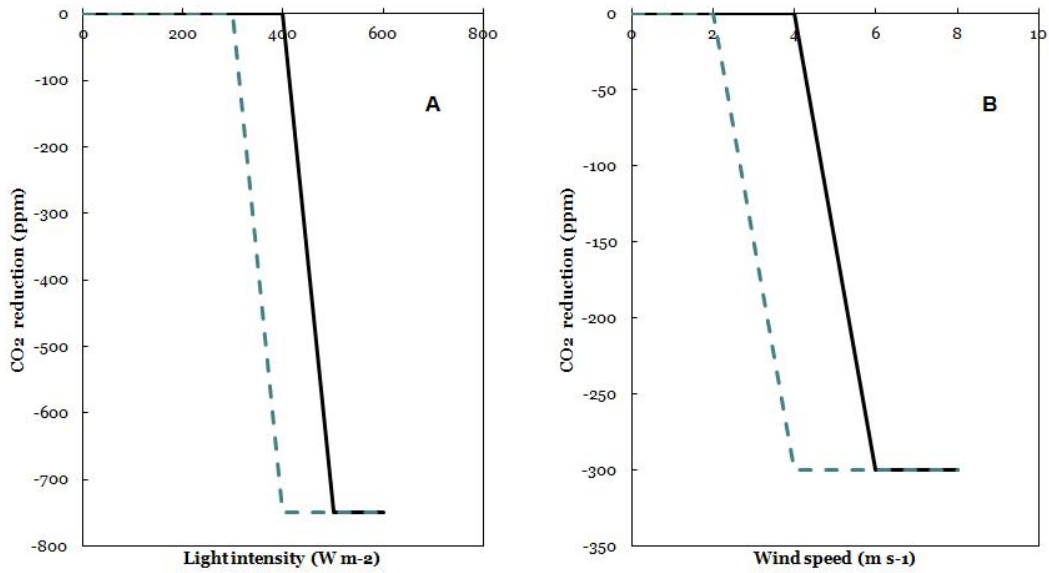


Fig. 2-20. Reduction of CO₂ concentration by light intensity (A) or wind speed for suppling CO₂ (B) by boiler ssystem.

온도는 외부 광도 200 W·m⁻² 정도에 도달하게 되면 증가하기 시작한다. 외부광도에 의한 시설내부의 온도 증가는 시설의 형태와 환기 방법, 외부온도에 따라 상이하지만 본 연구온실의 환기방법에서는 외부 광도가 100W/m² 증가시 시설내부의 온도는 평균 1.7°C씩 증가하였다. 딸기 재배에서 일출시 온도는 13°C가 적합하며 이는 온실에 태양광이 유입이 된 후 광합성을 촉진 시킬수 있고 동시에 시설내부의 온도의 증가는 시간당 1°C 이하로 증가하게 되면 과실의 결로 발생을 억제 할 수 있다. 예를 들어 일출 직후 시설내부의 온도를 13°C로 유지 되었다면 외부광도가 400 W·m⁻² 에 도달하게 되면 온실내부의 온도를 7°C 상승시켜 20°C에 도달하게 된다. 딸기 재배는 다른 과채류에 비해 시설내부의 습도에 매우 민감하고 습도에 의한 병해 발생률도 많아 지기때문에 시설내부의 습도에 따른 환기를 하므로 이산화탄소 시용을 위한 시스템의 작동은 단순히 시설내부의 이산화탄소 농도에 의해서만 작동을 하게 되면 많은 에너지 비용이 소모 된다. 즉 시설내부의 이산화탄소 농도가 낮으면 특히 외부 이산화탄소 농도보다 낮게 유지되었을 경우 시스템을 가동하여 시설내부의 이산화탄소 농도를 외부와 비슷하게 유지하는 것이 생산성이나 품질을 감소시키지 않는다.

<딸기 수경재배 온실내부의 이산화탄소 농도 조절을 위해 설정값 예시>

일출: 08:30 일몰: 17:00

이산화탄소 농도 설정: 1000ppm

환기창 개도율 영향 요인: 0%:0ppm, 5%:-500ppm

광도 영향: 400W/m²: 0ppm, 500W/m²:-750ppm

풍속의 영향: 2m/s:0ppm, 3m/s: -300ppm

상기의 조건으로 만약 시스템에 설정하였다면

환기창의 개도율:0% 이고, 광도가 500W/m² 이며 , 풍속이 1m/s인 환경조건이라면 계산된 이산화탄소 농도는 환기창과 풍속의 영향은 0 이지만 광도에 의한 값은 -750ppm이기 때문에 계산된 이산화 탄소 농도는 350ppm이 된다. 반면 광도의 영향 반대로 정의 값을 줘 이산화탄소 농도를 증가 시켜 줄 수 있다.

400W/m² 이하인 조건에서는 이산화탄소 농도의 감소에 영향을 주지 않고 풍속에 2.5m/s 라면 - 150ppm을 감소시킨 설정 농도는 750ppm이 된다.

(라) 연구 결과 요약

딸기 재배에 있어 이산화탄소의 최적 농도는 단순히 광합성을 촉진 시키기 위한 값을 산정하는 것보다는 외부환경, 작물의 생육 상태 및 시설내부의 환경요인들의 변화 및 환기창의 개도율이 따라 이산화탄소의 경제적인 사용을 고려하여야 하며, 특히 고농도를 짧은 시간에 사용하는 것보다 저 농도의 이산화탄소를 장기적으로 사용하여야 한다. 연소형 CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템 제어 중 이산화탄소 농도 제어 알고리즘 프로그램 시 환기창의 개도율과 광도에 의한 제어가 가능하도록 하여야 이산화탄소를 효율적으로 사용할 수 있을 것이다.

3. 연소 및 축열시스템 및 시스템 제어 최적화

가. 실험 내용

- 1차년도 연구개발을 통해 설계된 시스템을 전남대학교 소재 실험온실에 설치하였다. 온실 내에 딸기 양액재배 시스템을 설치하고, 2세부과제의 실험을 위한 소형터널온실을 내부에 설치한 후 시스템을 가동한다.
- 1차년도 개발된 시스템을 1월부터 시험가동하고, 내부 온실이 완성되어 온실 환경 측정이 가능한 2월부터 5월초까지 3개월 동안 온실 내외부 온도를 비롯하여 CO₂ 농도, 광도 및 시스템의 주요부위에 온도센서를 설치하여 온수의 이동경로 및 공기 이동경로의 온도를 측정하여 시스템 운용상의 정보를 파악한다.
- 전남대학교 실험온실에서의 시스템 가동을 통해 확보한 각종 정보를 토대로 제어시스템의 최적화를 시도하고, 특히 환경제어컴퓨터를 소유하지 못한 영세농가에도 대응하기 위해 제어기의 on-board 시스템을 설계 제작한다.

나. 실험 방법



Fig. 2-20. 환경변화 측정 대상 온실.



Fig. 2-21. 외부온도 측정 열전대(CH1).

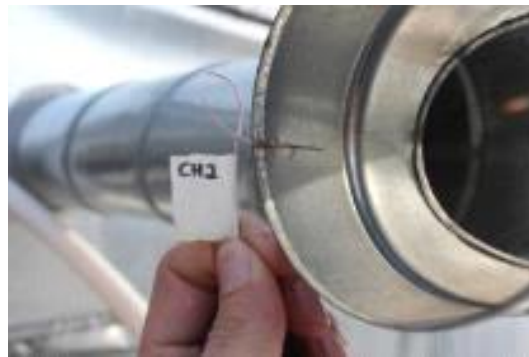


Fig. 2-22. 배기온도 측정 열전대(CH2).

외부온도(CH1)는 온실 외부 지상 2.5m 위치에 온도센서를 설치하여 온도를 측정하였으며, 배기온도(CH2)는 온실 외부에 노출된 배기연통 끝에 센서를 설치하여 보일러에서 배기되는 온도를 측정하였다.



Fig. 2-23. 배기관 내부 열전대 (CH3)
대.



Fig. 2-24. 열교환기 입구부(CH4)와 출구부(CH5) 열전

배기관 내부온도(CH3)는 보일러 연소기 직후의 배기관에 온도센서를 설치하여 측정하고, 또한 배기관에 설치된 열교환기 직후의 배기 온도를 측정하였다. 이 온도는 촉매필터의 입구 온도이다. 열교환기에 들어가는 물의 온도는 입구부(CH4) 및 출구부(CH5), 즉 소형 축열탱크(1톤)에서 배기열교환기로 들어가는 입구부와 축열탱크로 되돌아가는 출구부에서 온도를 측정하였다. 1차 보일러 내부의 열교환을 거쳐서 나오는 배기열이 필터를 통과하여 배기 중의 유해성분인 CO, HC, PM이 정화되고 걸러진 후 배기열교환기를 통해 열을 회수하여 소형축열탱크(1톤)에 열을 축적하는 시스템이다. 향후 촉매필터의 온도를 가능하면 고온에 노출시키켜 정화성능향상을 위해서는 촉매 필터를 연소기 출구 직후에 설치하고, 그 후 열교환기를 설치할 예정이다.



Fig. 2-25. 축열조 출구 열전대 (CH6).



Fig. 2-26. 축열조 열전대 (CH7).

대형축열조(3톤)의 하부에 설치된 순환모터 전단부에 센서를 설치하여 축열조의 출구(CH6)온도를 측정하였으며, 보일러에서 가열된 온수가 대형 축열조로 들어가는 부분 즉 축열조 입구(CH7)에서 온도를 측정하였다.



Fig. 2-27. 송풍기전 배관내 열전대(CH8).



Fig. 2-28. 송풍팬 입구 열전대 (CH9).

송풍기전 배관내 온도는 배기열교환기를 통해 열이 회수된 배기가스가 시설내부로 빠른 속도로 공급하기 위한 송풍기 유입 전의 온도이며, 송풍팬 입구온도(CH9)는 배기가스와 시설내 공기를 혼합시키는 송풍기의 유입되는 시설내 공기온도이다.



Fig. 2-29. CO₂ 배관 내부 열전대(CH10). Fig. 2-30. 온실 1 내부온도 측정용 열전대(CH 15).



Fig. 2-31. 온실 2 내부온도 측정용 열전대(CH 16). Fig. 2-31. 팬코일 유닛 온수 공급부 열전대 (CH 17)

CH10은 CO₂ 배관 내부온도로 송풍기에 공급된 배기가스와 내부공기의 혼합된 후의 온도이다. CH15의 온실1 내부온도는 소형터널온실 1의 시설내부온도이며, CH16는 소형터널온실 2의 시설내부온도이다. CH17은 팬코일 유닛 온수공급부, 대형축열조(3톤)에서 팬코일 유닛으로 공급되는 온수의 온도이며, 이 온수를 열교환기를 거쳐 팬에 의해 난방하게 된다.

CH18은 팬코일 유닛 온수출구 온도로, 팬코일 유닛을 통해 공기중으로 열교환된 이후의 온수의 온도이며, CH19는 팬코일 유닛 덕트 온도로, 열교환되어 가열된 공기의 온도이다. 또한 CH20은 팬코일 유닛으로 유입되는 공기의 온도이다.



Fig. 2-32. 팬코일 유닛 온수출구 온도 측정용 열전대(CH 18)



Fig. 2-33. 팬코일 유닛 덕트 온도 측정용 열전대(CH 19)



Fig. 2-34. 팬코일유닛 송풍구 온도 측정용 열전대(CH 20)

설치된 시스템은 아침 일출경 7시 30분경에 가동을 시작하여 CO₂ 공급하고, 오전 10시경 CO₂ 공급을 중단하였다. 야간에는 실내 설정온도를 5도로 하여 그 이하로 내려갈 경우는 축열 탱크내 온수를 이용한 난방을 실시하였다.

환경데이터 수집을 위해 실험을 실시한 2월부터 5월초까지 Datalogger로 20채널의 온도를 지속적으로 측정하였으며, 이들 중 특정 일자를 추출하여 환경데이터를 비교하였다. 특정추출일은 2월 23일, 3월 19일, 4월 29일에 주간(06:00~18:00) 및 야간(18:00~06:00)의 각 주요부분의 온도, CO₂ 농도, 광량을 조사하였다.

다. 실험결과

(1) 2월 23일 06:00부터 2월 24일 06:00 주야간 환경변화

Fig. 2-35은 2월 23일의 주야간 온도변화를 나타내고 있다. 오전 중 CO₂ 공급을 위한 시스템의 작동은 4회에 걸쳐 실시되었고, 이에 따라 CO₂ 농도의 변화가 500ppm에서 1200ppm으로 상

승하는 것을 볼 수 있다.

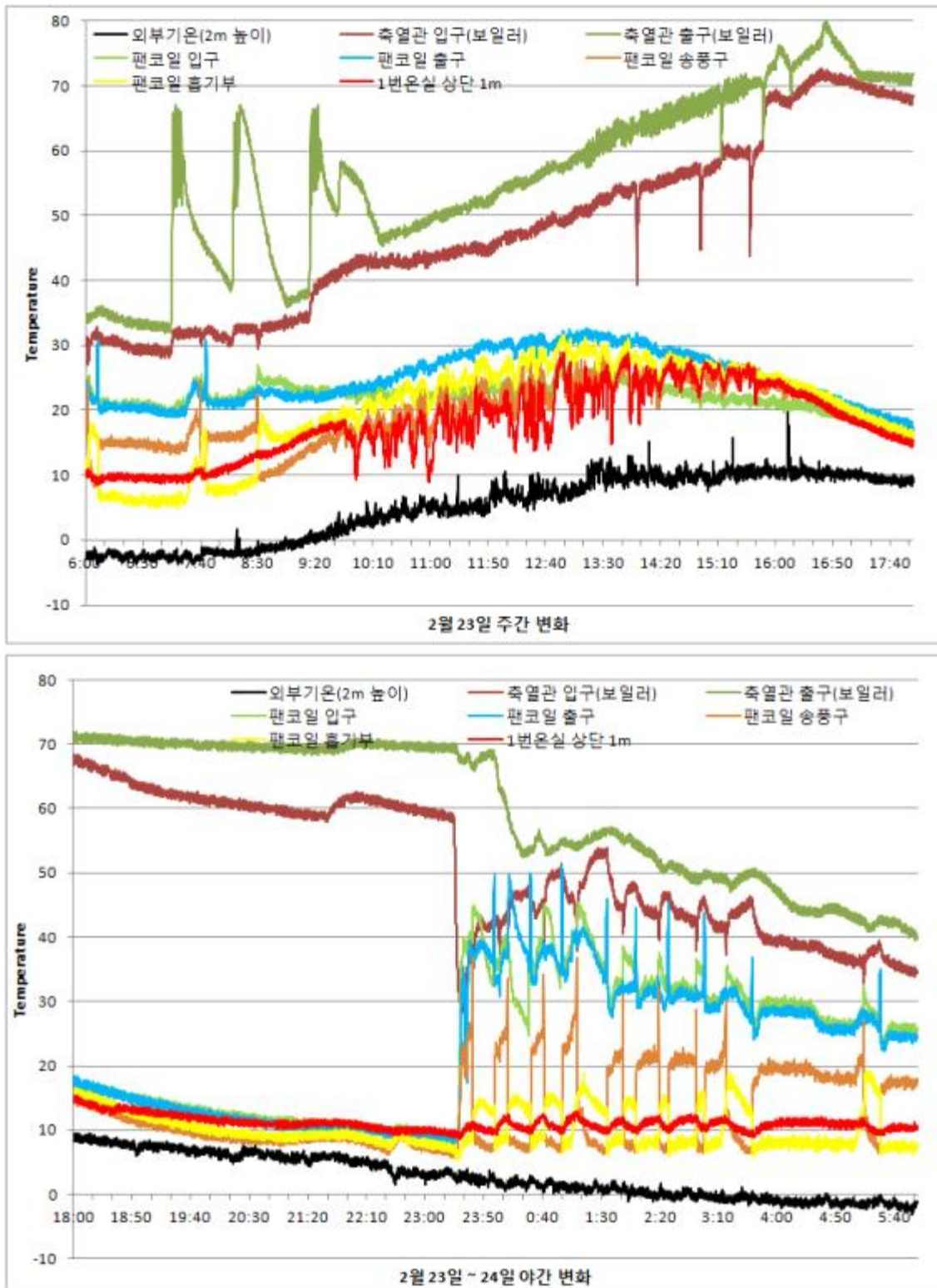


Fig. 2-35 2월 23일~24일 24시간 온도변화

주간동안 축열탱크의 온도상승 가능성을 보기위해 CO₂ 가스 보급을 위한 가동이후 배기관을 외부로 전환시키고 보일러를 지속적으로 가동시켜 3톤 축열탱크 내 온도변화를 측정하였다. 가

동 후 서서히 축열탱크의 온도가 상승하여 70~80℃의 온도범위에 도달하고 있다. 보일러 콘트롤러의 설정상 온수가 80℃가 되면 보일러가동이 멈추게 설계되어 있어 80℃ 이상으로 높일 수는 없다. CO₂ 가스 보급을 위해 오전 중 4회 가동에 의해서는 축열탱크의 온수온도가 33℃에서 45℃까지 약 12℃의 상승하였으며, 이는 야간난방을 위한 온수온도로는 부족하여 지속적 가동을 통해 축열탱크의 온수를 상승시킬 필요가 있다.

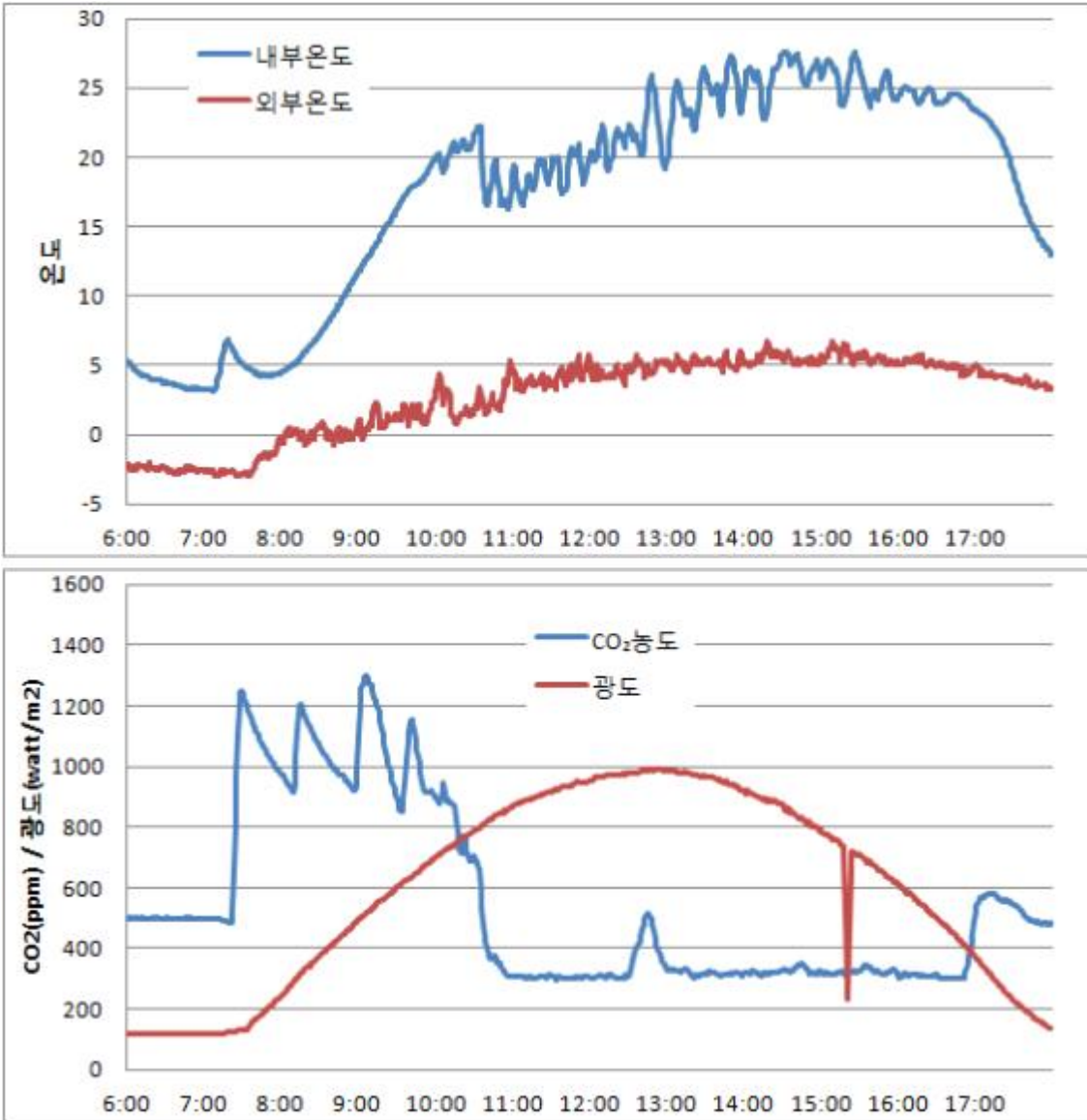


Fig. 2-36 2월 23일 주간 온실 내부 및 외부온도 변화와 CO₂ 농도변화

축열온수를 통한 야간난방 온도변화를 보면, 팬코일 유닛의 흡기부와 송풍구의 온도차이가 약 10℃ 이상의 차이를 나타내고 있으며, 팬코일유닛에 공급되는 온도는 약 35~45℃ 정도의 온도로 70℃의 축열탱크 온수가 아침 6시경에 약 40℃까지 떨어지는 것을 볼 수 있다. 외부온도가 오후 6시 10℃에서 아침 6시 -2℃까지 떨어지는 상황에서 시설내부의 온도를 10℃로 설정하여 가동한 결과 약 13회 펌프의 작동이 있었으며, 아침까지 10℃의 설정온도를 유지하는 것으로 나타났다.

Fig. 2-36의 주간동안의 온도와 CO₂ 가스 농도변화를 보면, CO₂ 가스 농도는 시스템 가동 후 1200ppm까지 상승하였으며, 그 후 약 320ppm까지 떨어져 광합성이 유효한 오후 3시까지 일사가 좋은 조건에서는 지속적인 가동이 필요한 것으로 나타났다.

이날은 일사조건이 매우 좋아 약 1000W/m²까지 상승하였으며, 이에 따라 광합성이 매우 활발하여 CO₂ 가스가 매우 급격하게 감소하고 있다. 내부온도는 측정장비가 Fig. 3-1의 지상 2m와 달라 CO₂ 측정기 내부에 있는 온도센서를 이용한 것으로 지상 50cm정도에 설치되어있어 약 5°C 정도의 차이를 보였다.

Fig. 2-37의 야간온도변화를 보면 외부온도가 영하로 지속적으로 하강하는데 비해 내부온도는 난방에 의해 5°C 이하로 내려가지 않는 것을 볼 수 있다. 야간동안의 CO₂ 농도는 주간 320ppm에 비해 호흡에 의한 농도의 상승 영향인지 약 500ppm정도로 주간보다 상승하였다.

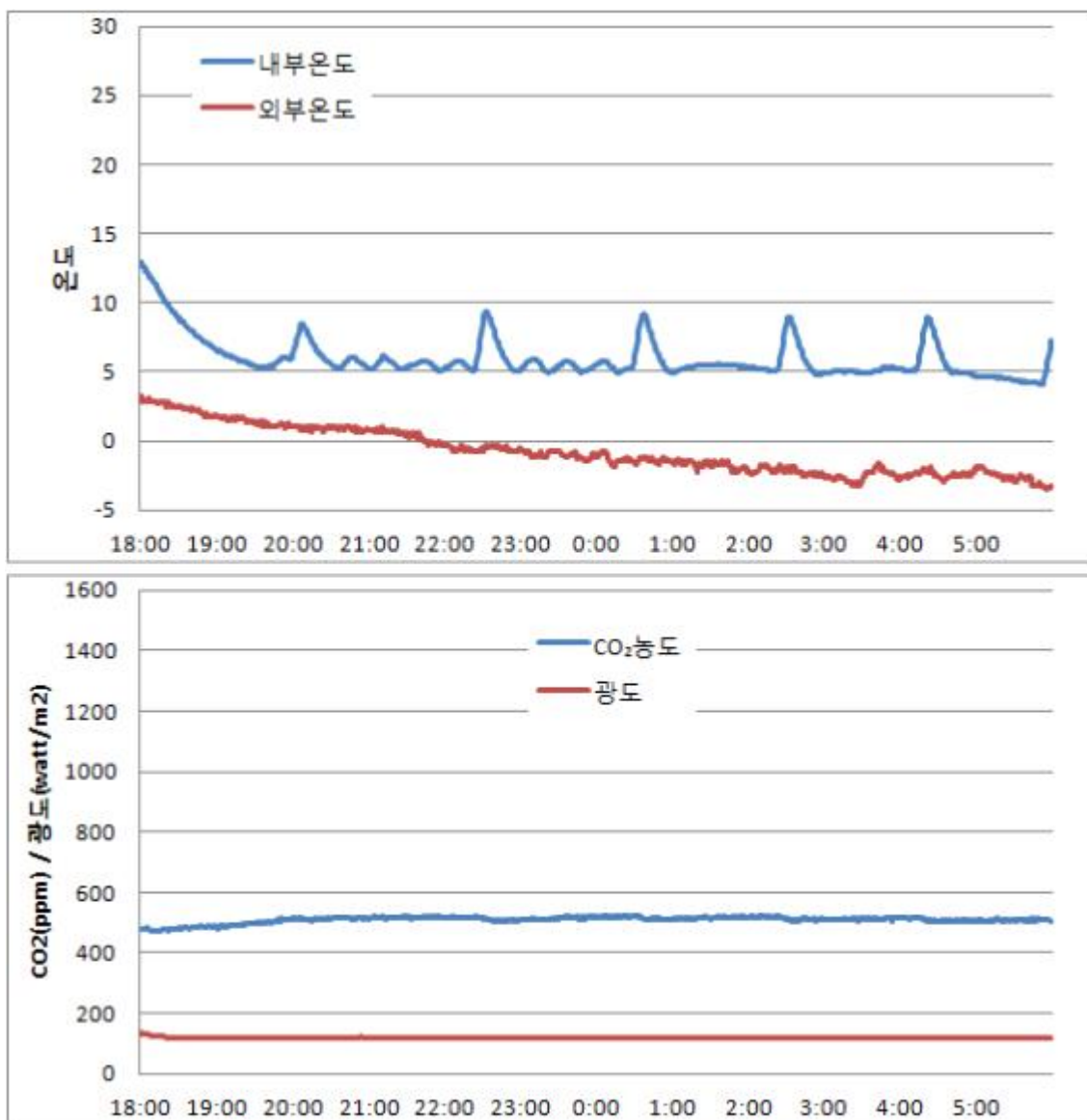


Fig. 2-37. 2월 23일 야간 온실 내부 및 외부온도 변화와 CO₂ 농도변화

(2) 3월 19일 06:00부터 3월 20일 06:00 주야간 환경변화

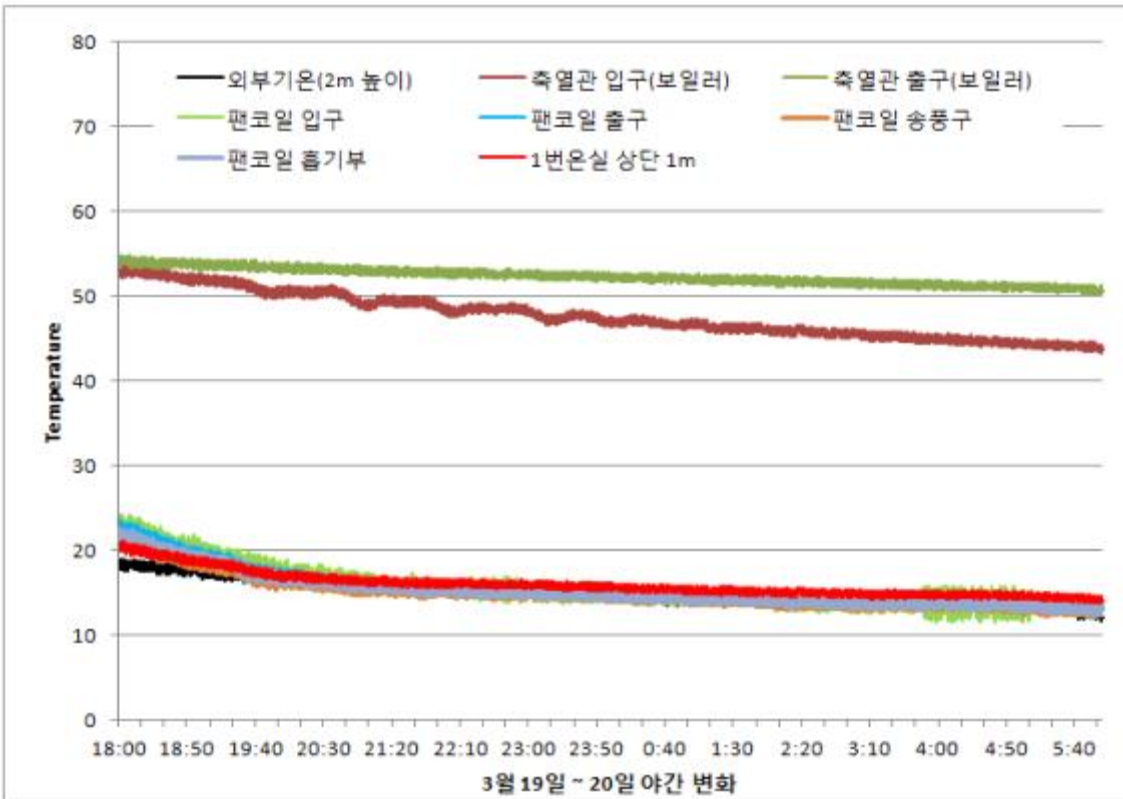
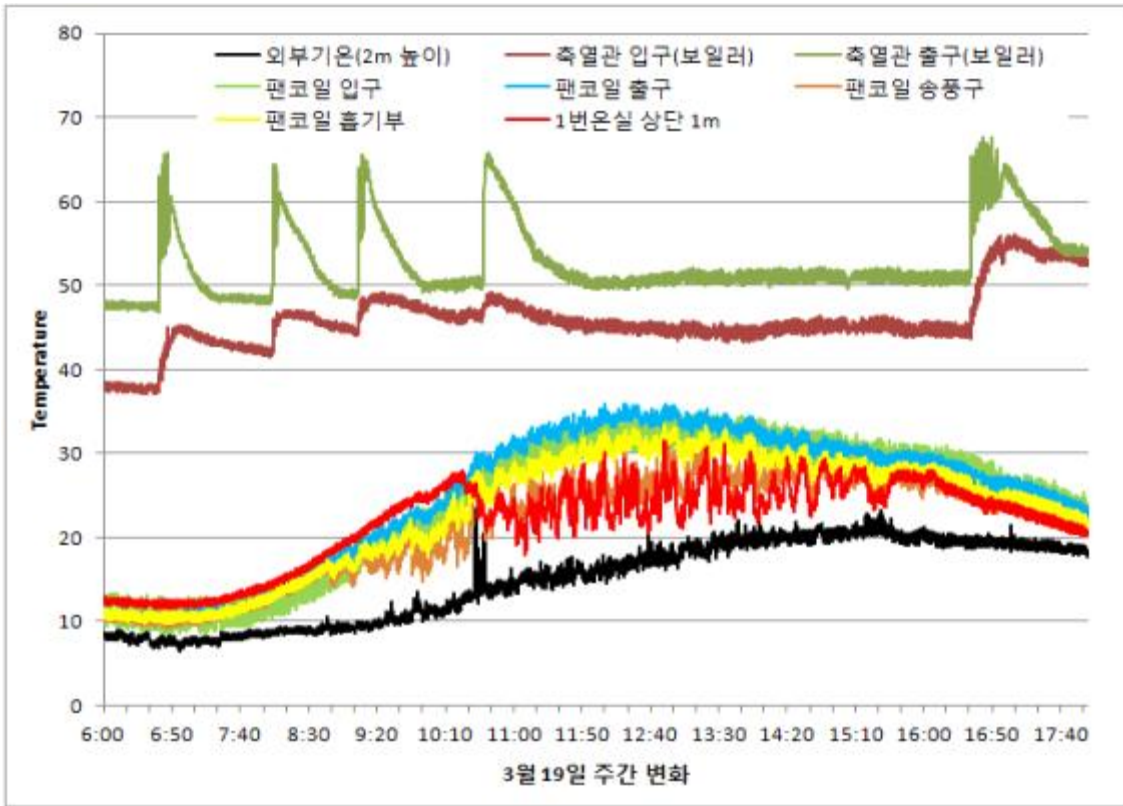


Fig. 2-38. 3월 19~20일 24시간 온도변화

Fig. 2-38의 3월 19일 주야간 온도환경 변화를 보면 주간 4회 CO₂ 공급을 위한 시스템의 작동이 이루어졌으며, 11시에 CO₂ 공급은 중지되었다. 시스템의 축열탱크의 온수온도는 약 50°C

정도를 계속적으로 유지하고 있으며, 시설내부의 온도는 주간 최고 25℃까지 상승하여 오후까지 유지되고 있다. 시설외부의 온도도 아침 8℃에서 서서히 상승하여 오후 3시에는 약 20℃까지 상승하였으며, 팬코일유닛 관련된 온도가 지속적으로 상승한 것은 온수의 순환이 아닌 팬코일 유닛이 일사에 의해 온도가 상승된 원인으로 판단된다.

야간온도는 외부기온이 18℃에서 12℃까지 하강하였으며, 내부의 온도도 20℃에서 14℃까지 하강하였다. 온도가 10℃ 이하로 하강하지 않아 난방을 위한 시스템 작동은 없었다.

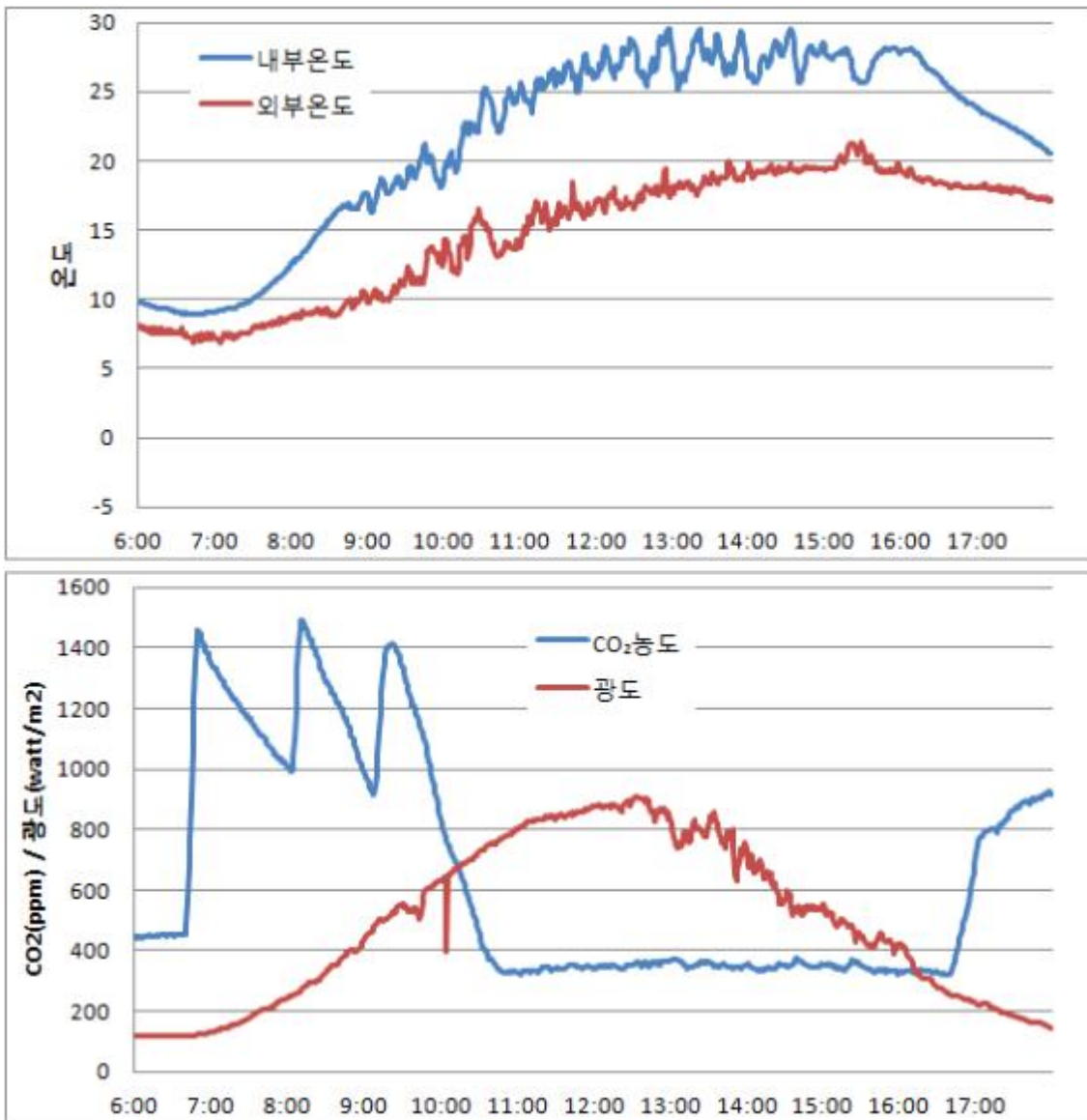


Fig. 2-39. 3월 19일 주간 온실 내부 및 외부온도 변화와 CO₂ 농도변화

Fig. 2-39의 3월 19일 주간 내부 온도는 정오 이후 25℃ 이상으로 올라 간 후 4시 이후에 하강하고 있다. CO₂ 농도는 7시부터 시스템 작동으로 1400ppm까지 상승하여 1000ppm이상으로 유지하다 이후 320ppm정도로 낮아 역시 오후에도 일정시간 CO₂ 공급을 위한 시스템의 가동이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2-40은 3월 19일 야간 동안의 온실내의 환경변화로 온도는 오후 6시 이후 지속적으로

하강하여 내부온도와 외부온도가 거의 같은 수준으로 변화하여 익일 아침 6시에 13°C 정도로 나타났습니다.

특이하게 CO₂의 농도가 오후에 급격히 증가하여 1000ppm에 이르렀다가 감소하여 600ppm정도를 나타내고 있다. 이는 밀폐한 후 외부에서의 공기유동이 적고, 딸기의 야간호흡에 의한 농도 상승으로 판단되나 초기의 CO₂ 농도가 급격히 증가한 것은 온실내 흡착한 CO₂가 서서히 탈착하여 나타난 것으로 생각한다.

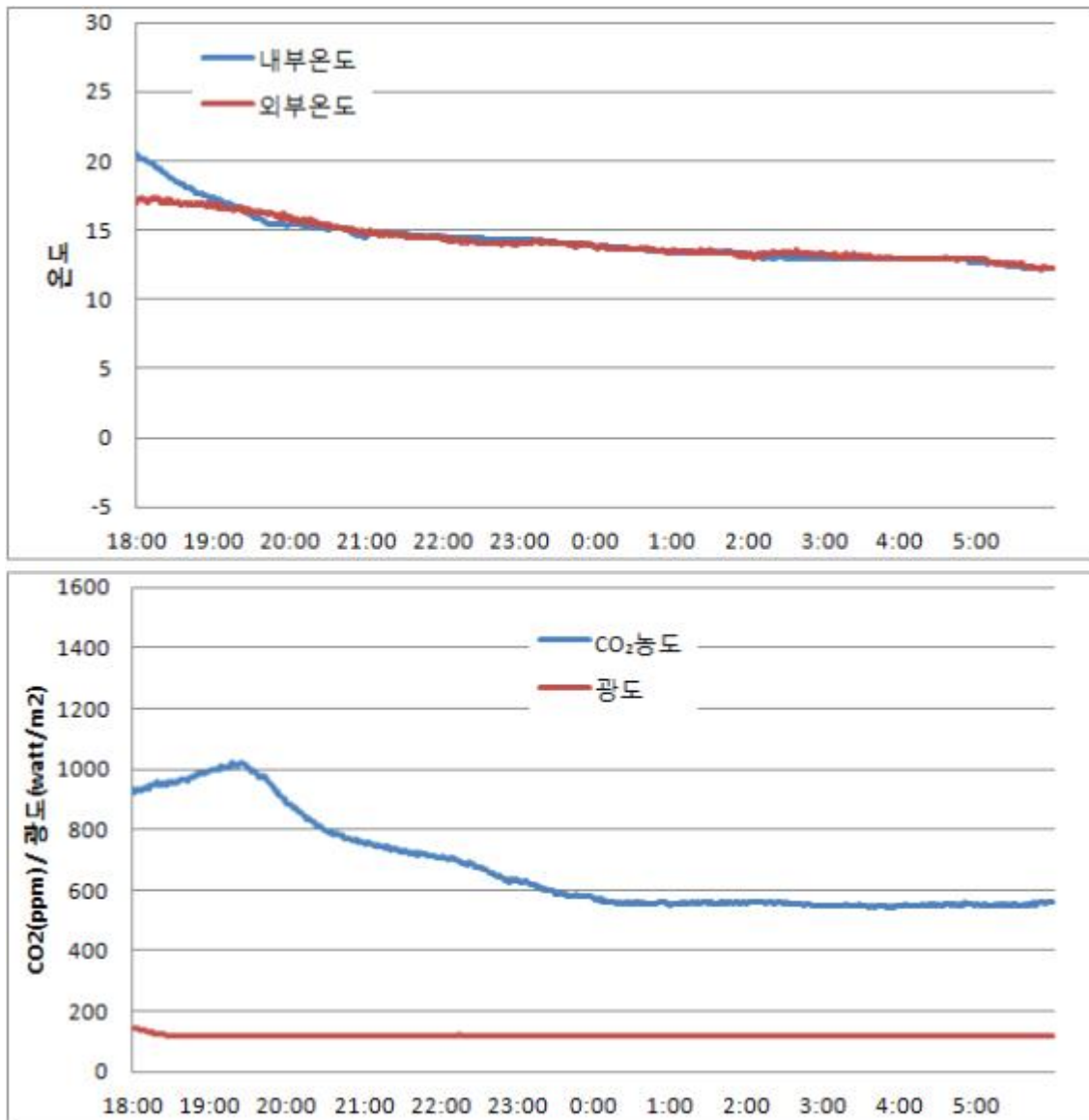


Fig. 2-40. 3월 19일 야간 온실 내부 및 외부온도 변화와 CO₂ 농도변화

(3) 4월 29일 06:00부터 4월 30일 06:00 주야간 환경변화

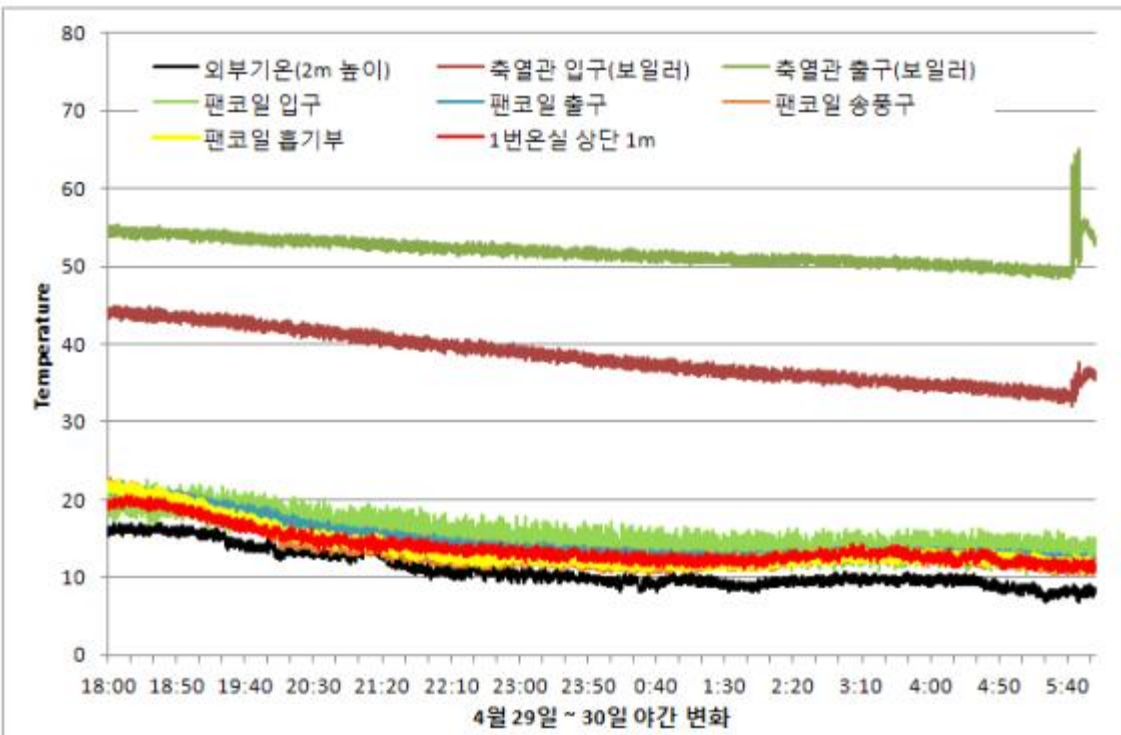
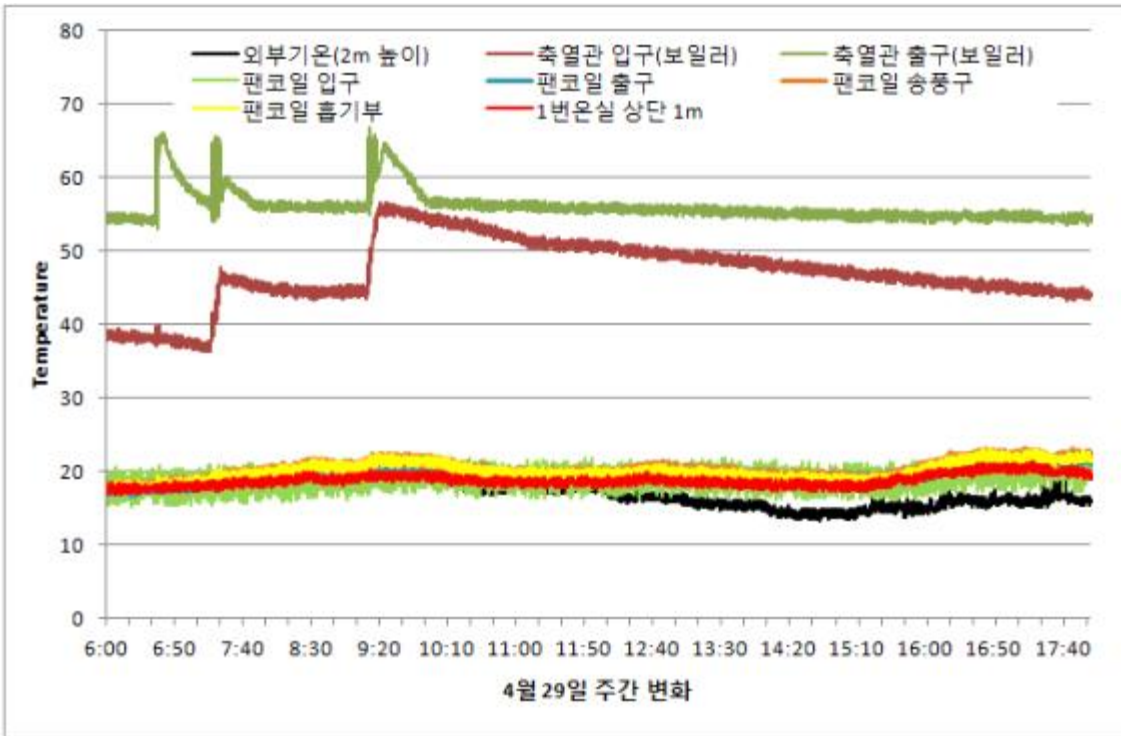


Fig. 2-41. 4월 29~30일 24시간 온도변화

Fig. 2-41은 4월 29일부터 4월30일 오전 6시까지의 주야간 온도변화를 나타낸 것이다. 3월 이후 야간온도의 상승으로 야간난방이 이루어지지 않고, 열손실 또한 적어 축열탱크의 온도는 55℃ 정도를 유지하고 있다. 오전 CO₂ 공급으로 인한 시스템 작동 후 축열관 입구부의 온도가

올라갔으나, 이후 점차 떨어져 약 44℃ 정도로 유지하고 있다. 축열관 입구와 축열관 출구의 온도가 약 10℃ 정도의 차이를 보이는 것으로 볼 때 탱크 내부의 상하부 온도차가 약 10℃ 정도에 이르는 것으로 판단된다.

또한 축열탱크 이외의 각부위의 온도변화도 큰 차이가 없다. 이날은 구름이 낀 날씨로 인해 일사에 의한 온도상승도 나타나지 않아 일정한 수준의 온도가 유지되고 있다.

야간에는 축열탱크의 온도변화는 5~8℃ 정도이며, 외부온도가 자정 이후 10℃ 이하로 내려가지만, 시설내부온도는 10℃ 이상을 유지하고 있다.

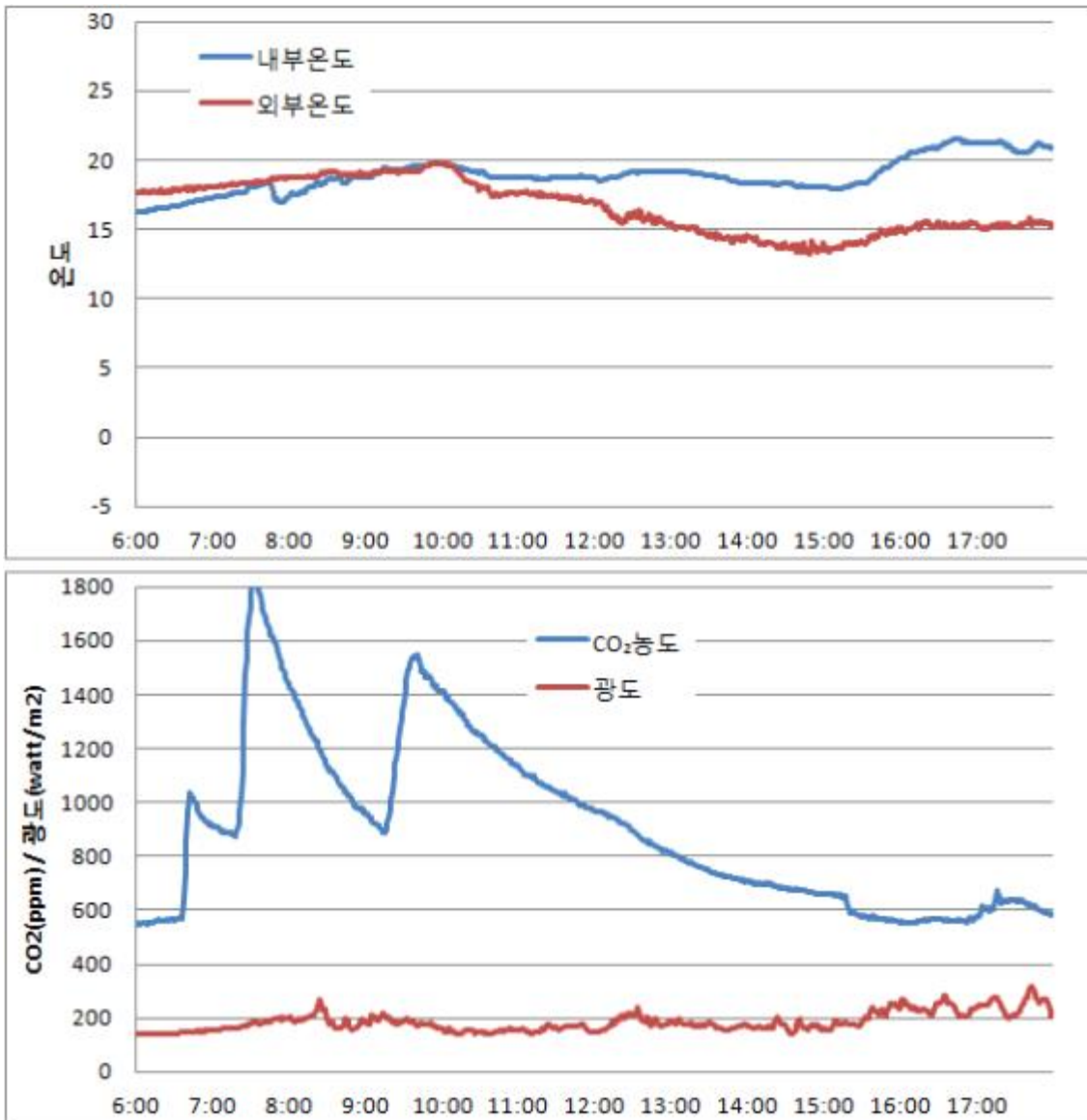


Fig. 2-42. 4월 29일 주간 온실 내부 및 외부온도 변화와 CO₂ 농도변화

Fig. 2-42에서 보는바와 같이 4월 29일은 비와 안개 및 천둥이 함께한 날씨로서 종일 광합성을 위한 일사량이 부족한 상태였으므로 3회에 걸쳐 CO₂ 발생 시스템이 작동하여 일순간 CO₂ 농도가 1800ppm까지 상승하였으며, 오후에도 1000~600ppm정도를 유지시켰다. 시설내외부 온도는 비로인해 15~20℃ 정도였으며 일중 변화가 적었다.

Fig. 2-43의 야간 환경변화를 보면 온도가 20°C 에서 점점 하강하여 외부온도는 자정이후 8°C 정도를 유지하고, 내부온도는 10°C 이상으로 유지하고 있다. CO₂의 농도는 약 600ppm정도를 지속적으로 유지하고 있다.

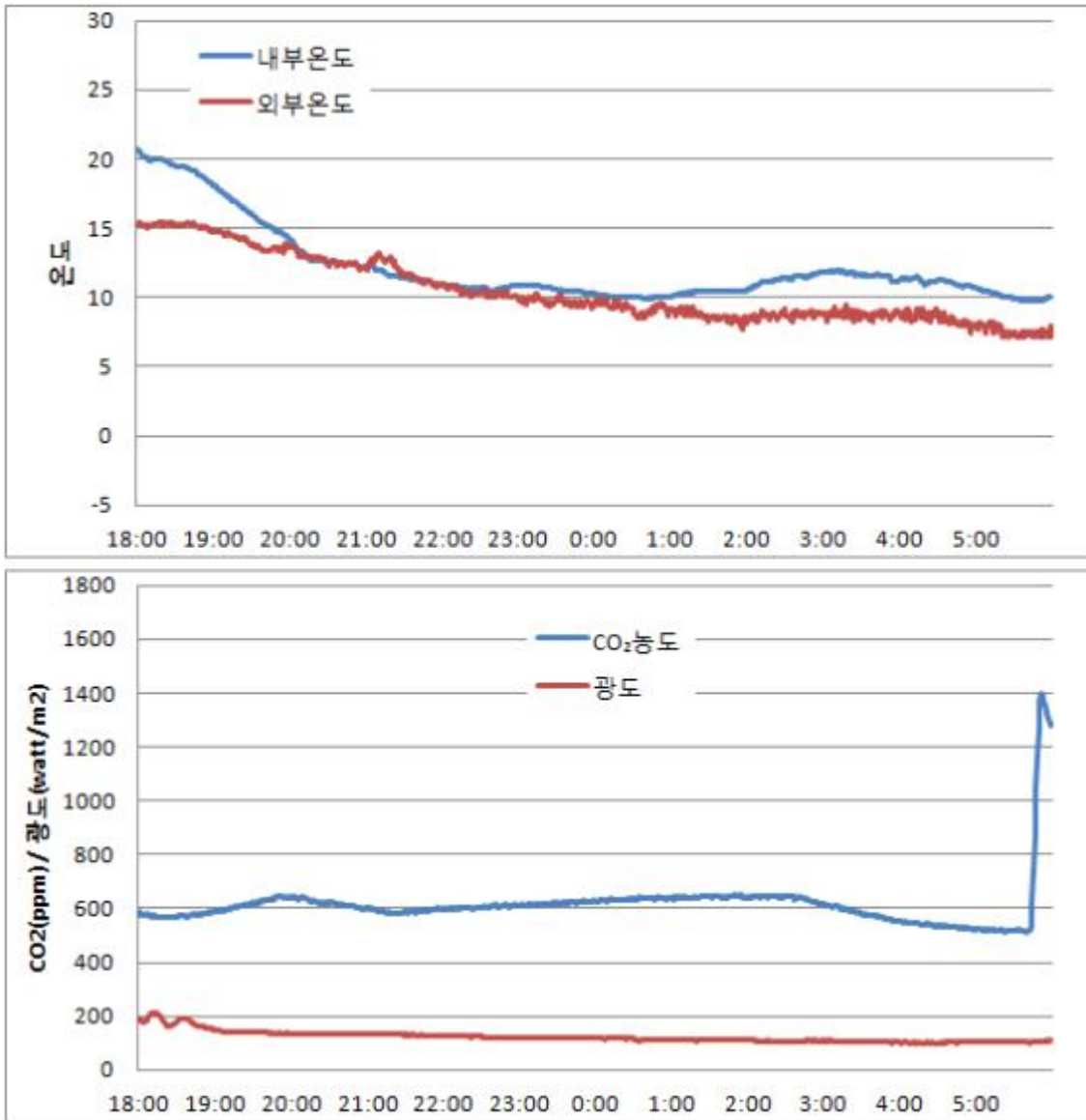


Fig. 2-43. 4월 29일 야간 온실 내부 및 외부온도 변화와 CO₂ 농도변화

4. 전체 시스템 제어 최적화, On-board system 설계

Fig. 2-44는 시설하우스용 CO₂ 발생기의 on-board 제어시스템 기본 도면을 나타내고 있다.

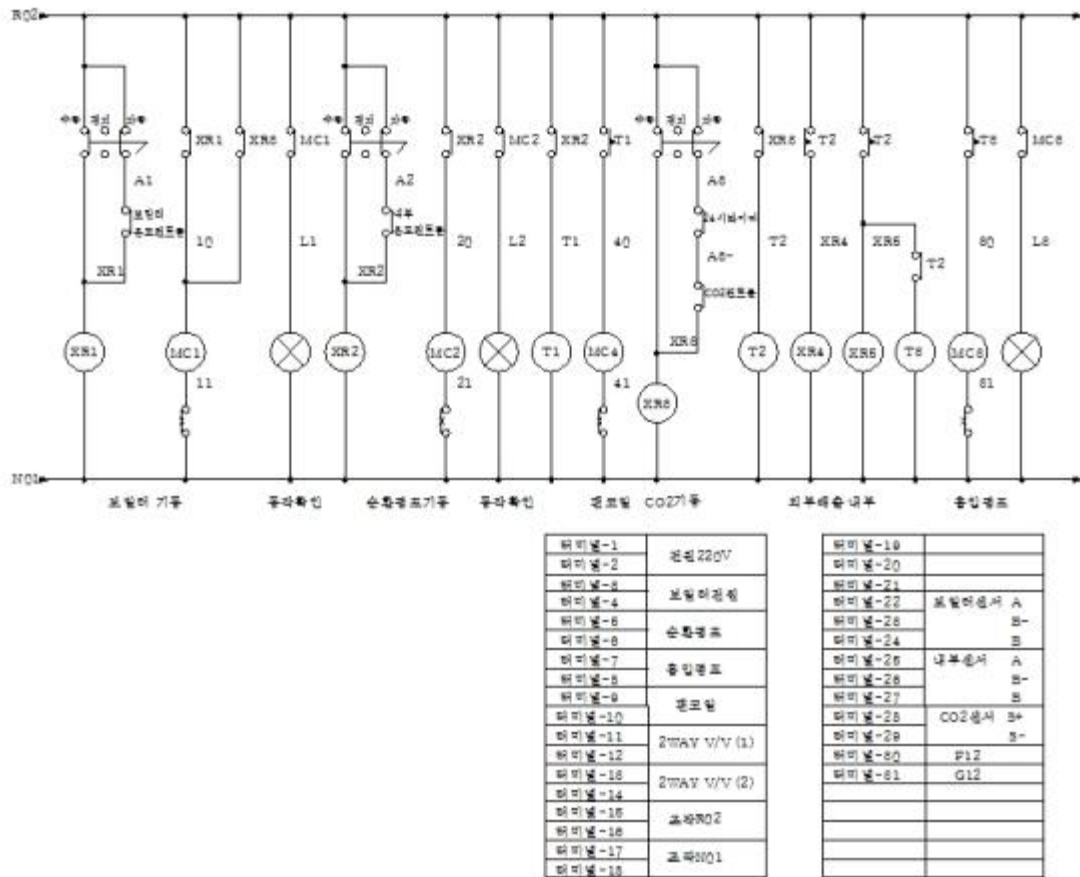


Fig. 2-44 On-board 시스템의 설계도

- 시설하우스에서 실험한 결과를 토대로 CO₂ 발생기의 on-board 제어시스템을 설계하여 제작하였으며, 3차년도 농가 현장검증을 위한 시스템을 제작하면서 모듈화시켜 제작하였다.
- 3차년도 실험은 2013년 9월 정식 계약 후 10월부터 가동에 들어가 2014년 5월까지 현장검증을 실시할 계획이다.

5. 현장 적용실험을 위한 준비

- 현장적용실험을 위해 실험을 협조해줄 딸기 양액재배 농가를 선정하였다. 위치는 당사의 사무실과 직선거리로 2.5km 떨어진 전남 담양군 봉산면 와우리 8**번지의 임** 농가이다. 와우리는 담양군내에서도 딸기 주산지로 약 40여년 전부터 딸기를 재배해온 곳이다. 이곳은 유기농 딸기와 양액재배 딸기농가가 혼재하고 있으며, 대상농가로 협조를 약속한 임** 농가는 딸기재배 10년차로 양액재배로 전환한 것이 4년차이다. 660m² 단동 비닐하우스 3동을 재배하고 있으며, 이중 1동을 현장실험을 위해 협조기로 하였다.

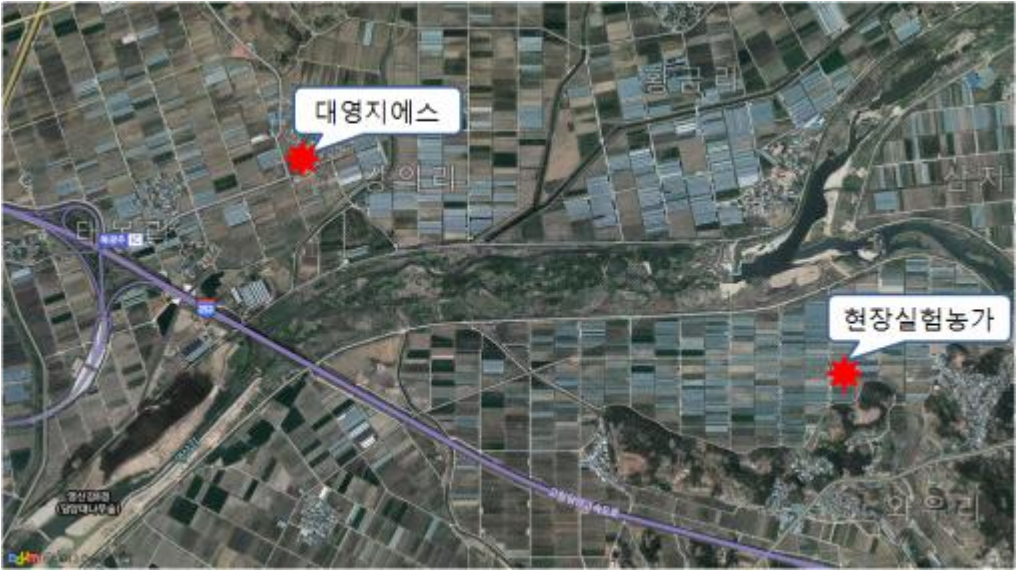


Fig. 2-45. 현장실험농가의 위치



Fig. 2-46. 현장 실험농가 비닐하우스 위치



Fig. 2-47. 대상 농가의 시설내부 딸기 양액재배 시스템



Fig. 2-48. 농가 시설외부에 설치된 3톤규모 축열탱크

1년차 개발시스템은 보일러와 배기열교환기의 축열탱크를 3톤과 1톤, 2개의 탱크를 활용하여 축열하였으나, 축열탱크가 고가이며, 농가 설치 시 장소를 차지하는 문제가 있어 3톤탱크 1대

만 설치하여 활용하고자 한다.

이상과 같이 현장에 시스템을 적용하기 위해서는 약간의 수정사항들이 발생한다. 이러한 문제점을 파악하여 현장 적용을 보다 원활히 하기 위해서는 시스템을 약간 수정보완할 예정이다.



Fig. 2-49. 온실 내부에 설치된 CO₂ 발생 시스템

현장검증을 위한 시스템은 Fig. 2-49와 같이 모듈화를 시도하였으며, 전체 프레임을 제작하고 공장에서 조립생산이 가능토록 설계하였다.



Fig. 2-50. 배기 열회수를 위한 열교환기

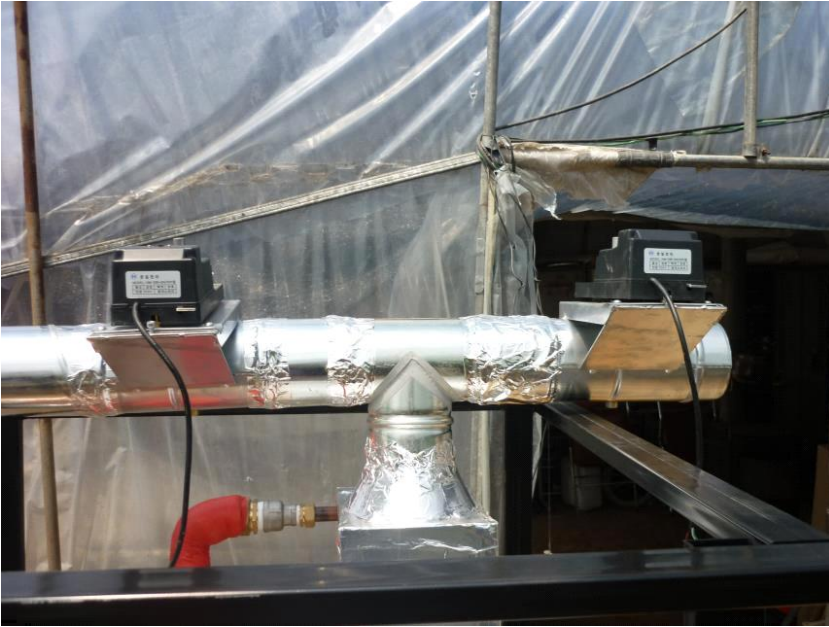


Fig. 2-51. 배기가스 실내외 전환용 전동 밸브



Fig. 2-52. 송풍장치와 공기유입 조절용 수동 밸브



Fig. 2-53. 배기가스 정화용 촉매 필터



Fig. 2-54. 보일러 온수 순환펌프

- 시설하우스에서 실험한 결과를 토대로 CO₂ 발생기의 on-board 제어시스템을 설계하여 제작하였다.
- 3차년도 실험은 2013년 9월 정식 계약 후 10월부터 가동에 들어가 2014년 5월까지 현장검증을 실시할 계획이다.

6. 요약

(1) 연소 및 축열시스템의 문제점 도출 및 시스템 제어 최적화

- 2월부터 5월초까지 3개월 동안 온실 내외부 온도를 비롯하여 CO₂ 농도, 광도 및 시스템의 주요부위에 온도센서를 설치하여 온수의 이동경로 및 공기 이동경로의 온도를 측정하여 시스템 운용상 참고점을 도출하였다.
- 특히 2월과 3월의 시설하우스의 CO₂ 발생기의 운전 패턴을 확인하였다.
- 3차년도 현장 적용 평가를 위한 준비를 완료하였다.

(2) 전체 시스템 제어 최적화 on-board system 설계

- 특히 환경제어컴퓨터를 소유하지 못한 영세농가에도 대응하기 위해 시설하우스용 CO₂ 발생기용 제어기의 on-board 시스템을 설계 제작하였다.

3-3 3

연구개발 수행내용

연구범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
<p>○ CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 최종 평가</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 최적화된 CO₂ 발생기를 600m² 규모의 상용화된 플라스틱 온실에 적용하여 각 시스템에 대한 최종평가 - 후처리 장치 문제점 파악 및 보완 - 시설내부의 CO₂ 농도, 온도 및 유해가스 분석 - 온실 면적에 따른 연소식 CO₂ 공급장치의 적정 규모, CO₂ 시비 및 보조 난방을 위한 축열 저수조의 적정 용량 설정 기준 검토 	<ul style="list-style-type: none"> - 후처리장치 CPF(pull plugged)의 배압이 높아 연소상태가 불안정하여 half plugged CPF로 변경함 - Half plugged CPF에 Pt을 코팅하였기 때문에 배출가스 중의 CO, HC의 저감은 탁월하여 시동 후 약 60sec 이후에는 거의 0ppm으로 떨어져 CPF의 산화특성이 매우 우수함 - 배출 CO₂ 농도는 약 8%이고, NO_x의 농도 약 45ppm 수준의 비닐하우스 내 식물의 성장에 미치는 영향 검토 필요 - CO₂ 공급기의 경우 CO₂ 농도가 380 ppm에서 1000 ppm으로 유지되기 위한 조건은, 일출시간 7:00 시부터 15분 가동 후 1시간 30분이 흐른 후 5분 가동하고, 이후 1시간 후 11분을 가동, 이후 30분마다 10.5분씩 17:30분까지 가동하면 CO₂를 1000ppm 유지 가능 - 보급형 CO₂ 공급기의 경우 축열조 물탱크 용량이 3톤일 경우 7시에서 오후 1시경까지 가동으로 축열조의 물 온도 80℃ 도달, 물탱크 용량이 4톤이면 오후 3시경까지 운전이 가능하지만, 설치장소 형편상 3톤을 선택
	<ul style="list-style-type: none"> - 외부환경에 따른 시설내부의 기상환경(온도, 습도)분석 - 외부 온도에 따른 온수 및 온풍온도에 따라 시설내부의 온습도환경 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 시설 내부습도는 일출과 동시에 하강하고 일몰과 동시에 다시 상승함 - 시설 하우스 내의 CO₂ 농도변화는 일출과 동시에 CO₂ 농도가 급격히 떨어져 380ppm 이하로 나타내고 있으며, 일몰 이후는 역광합성에 의해 다시 CO₂ 농도가 올라간다. 따라서 이 이출기간 중 CO₂ 농도를 딸기 생육에 적합한 약 1000ppm을 유지해주기 위해 CO₂ 공급장치를 가동하고, 주간 의 높은 온도 때는 CO₂ 발생기에서 발생한 열을 축열조에 저장하였다가 야간에 사용하도록 하는 시스템이 최적임

연구 범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
○ 수정재배 딸기 재배 온실에 연소 및 축열 복합시스템의 적용 및 유해가스 생육진단	- CO ₂ 시용 유무에 따른 실증 농가의 딸기 생육, 생산량 및 품질 비교	- 기존 플라스틱 온실을 2구역으로 나뉘어 시설 CO ₂ 공급 유무에 따른 생산량 및 품질 규명 - 이산화탄소 시용에 따른 실증 농가의 딸기 생육, 수량 및 과실의 품질(당도) 분석
	- 하계고온기의 멜론, 파프리카의 이산화탄소 시용에 따른 생육 비교분석	- 수정재배 딸기 후작으로 멜론과 파프리카의 재배와 시스템의 활용도 증가 시키 위한 방안제시 - 고온기의 이산화탄소의 시용에 따른 생리장해 모니터링
	- 유해 가스농도에 따른 딸기의 생리적 기능 장애모니터링 및 물질 분석	- 과실의 아미노산의 이산화탄소 공급에 따른 내적 품질 분석 - 연소가스 사용 기간에 따른 엽의 광합성 기능의 물질 분석 광합성 능력 평가
	- CO ₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 적용에 따른 제어 방법 매뉴얼 작성	- 외부환경요인에 따른 수동 및 자동 이산화탄소 농도 조절을 위한 제어 방법의 매뉴얼 작성 - 복합환경조절시스템의 이산화탄소 최적제어를 위한 설정값 결정 매뉴얼 작성
○ 축열/난방 시스템 개발 및 사업화	-최종 시스템 문제점 수정보완 및 개발품 설계확정 - 사용자 매뉴얼 제작	- 개발 CO ₂ 발생기 시스템은 아침 일출이후, 7시~7시 30분 정도에 가동을 시작하였으며, 작동구간은 최대 800ppm에서 멈추고, 최저 600ppm에서 작동되도록 하였는데, 가동후 약 5~10분 이내에 목표농도에 도달 - 보급형 CO ₂ 발생기는 1800m ² 형에 맞춰 발열량 약 500,000kJ/h로 하였으며, 온수탱크는 농가의 설치장소를 고려하여 용량이 약간 부족하지만 3톤 FRP탱크로 설치함 - 사용자 매뉴얼 작성함

1. CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 최종 평가

가. 연구개발 내용

(1) CO₂ 농도 및 시설 내 온도 최적화

- 최적화된 CO₂ 발생기를 600m² 규모의 상용화된 플라스틱 온실에 적용하여 각 시스템에 대한 최종평가
- 후처리 장치 문제점 파악 및 보완
- 시설내부의 CO₂ 농도, 온도 및 유해가스 분석
- 온실 면적에 따른 연소식 CO₂ 공급장치의 적정 규모, CO₂ 시비 및 보조 난방을 위한 축열 저수조의 적정 용량 설정 기준 검토

(2) 시설하우스 환경 최적화

- 외부환경에 따른 시설내부의 기상환경(온도, 습도)분석
- 외부 온도에 따른 온수 및 온풍온도에 따라 시설내부의 온습도환경 분석

나. 연구결과

(1) CO₂ 농도 및 시설 내 온도 최적화

(가) 후처리 장치 문제점 파악 및 보완

- 후처리장치는 SiC 담체의 PF(particulate filter)에 백금(Pt)을 약 2g/L로 코팅한 CPF(catalyzed particulate filter)를 사용하였다(Fig. 3-1).
- Pull plugged CPF의 경우 연소 배출가스의 배압이 높은 관계로 연소실의 착화 불안정과 연소의 불안정성이 발견되어 배압을 줄이기 위하여 half plugged CPF를 사용하였다.



(a) 백금이 코팅된 SiC CPF



(b) 캐닝한 CPF 1



(c) 캐닝한 CPF 2

Fig. 3-1. CO₂ 발생기용 배기후처리장치(CPF)

- Fig. 3-2는 두 종류(full plugged CPF, half plugged CPF)의 CPF의 나노입자들의 직경별 배출수 농도를 분석한 결과이다.
- 대기 중의 입자수는 10⁴개 정도가 배출된다. 이에 반해 CO₂ 발생기용 연소기의 입자수농도는 후처리 전에 10⁶개 오더로 배출된다. Full plugged CPF 실험 때와 half plugged CPF 실험 시 입구 농도가 약간틀리는 것은 배압의 차이로 연소특성이 달라지기 때문일 것이다.
- Full plugged CPF의 후처리장치 후의 입자수는 10⁶개에서 10⁵개 오더로 떨어지는 것을 알 수 있다.
- 그러나 half plugged CPF의 후처리장치 후의 입자수는 10⁶개에서 약 20-30%의 저감을 보이고 있다.
- 연소기의 배압의 증가로 인해 full plugged CPF를 사용할 수 없어 half plugged CPF를 사용하기로 함.
- 입자상물질의 경우, 연소기의 배압이 걸려 연소상태가 불안정할 경우, 혹은 사용 시간이 2개월 이상일 경우 후처리장치를 떼어내어 공기로 불어내어 축적된 PM을 제거해야함.
- CPF의 HC, CO, NO_x의 정화율 특성은 뒤에서 논하기로 한다.

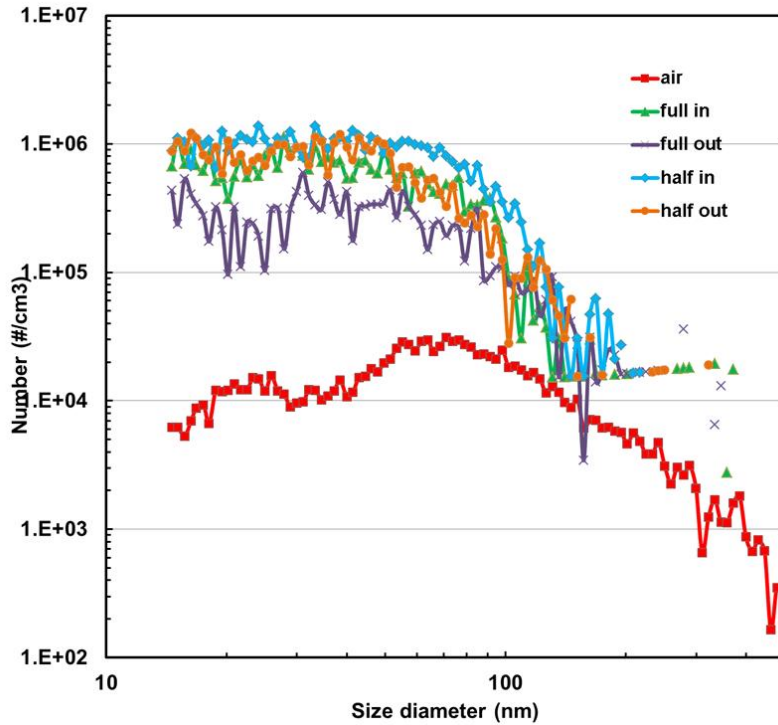


Fig. 3-2. CPF의 입자상물질의 배출 특성

(나) 시설내부의 CO₂ 농도, 온도 및 유해가스 분석

- Fig. 3-3에서 CO₂ 발생기에서 배출되는 CO₂의 농도는 약 8.2%임을 확인할 수 있음.
- CO는 초기에 약 22ppm 배출되지만 CPF 축매온도가 올라간 후 약 60sec 이후에는 거의 0ppm으로 떨어져 CPF의 산화특성이 매우 우수함을 알 수 있다.
- 따라서 초기에 배출되는 CO나 HC의 원예작물이나 원예시설 내 작업자들에게 피해를 주지 않게 하기 위해서는 연소기 시동 후 초기 2분간의 배출가스는 그대로 외부로 배출하는 것이 바람직하다.
- 연소기에서 배출되는 NO_x의 농도는 60sec 이후 약 50ppm이 배출되고 있으며, 이 중 NO₂가 약 7ppm임을 확인할 수 있다. 그런데 CDPF 이후에 NO의 농도는 점차 낮아져 150sec 이후에 거의 25ppm 수준으로 떨어지며, 반면에 NO₂ 농도는 점차로 올라가 22ppm까지 올라가고 있다. 이 NO₂ 농도의 증가는 CPF의 백금 축매상에서 NO가 과잉공기 중의 산소와 산화되어 NO₂로 전환된 것이다.
- NO_x의 CPF 후에서의 농도변화를 보면 입구와 비교하여 약 10ppm 정화가 되고 있다. 이는 산화분위기인 조건에서 NO_x의 정화율이 약 20%정도 유지가 되는 것은 CPF의 축매에서 백금의 탄화수소나 CO를 환원제로하는 선택적 축매반응으로 인해 NO_x가 정화되기 때문이다.
- 연소기에서 배출되는 NO_x의 농도 약 45ppm 수준의 비닐하우스 내 식물의 성장에 어떠한 영향을 미칠지에 대해서는 향후 좀 더 연구할 필요가 있다.

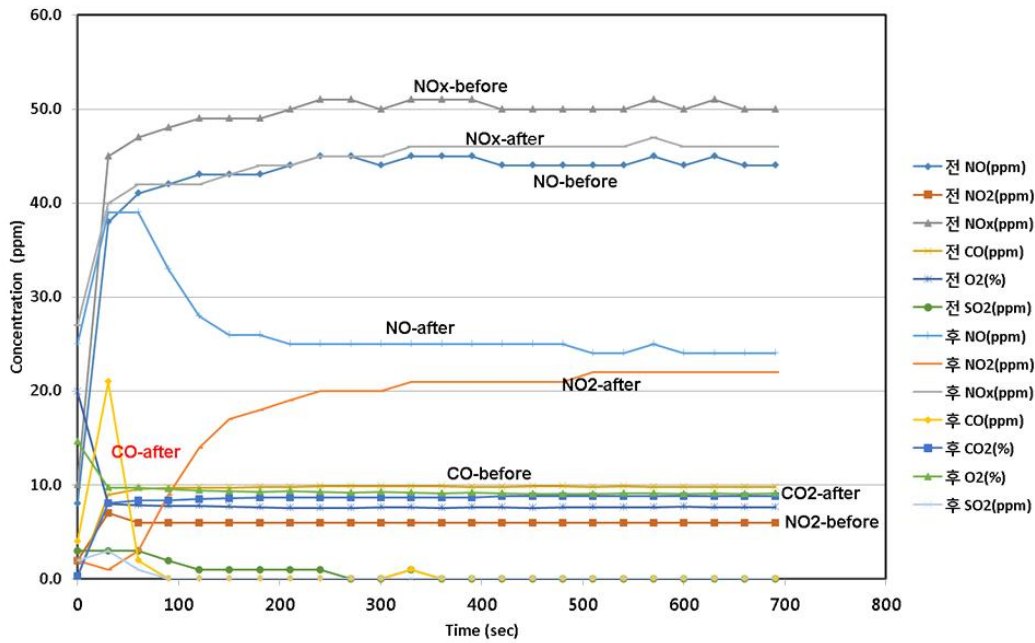


Fig. 3-3. 시설내부의 CO₂ 농도, 온도 및 유해가스 분석

(다) CO₂ 공급장치 규모 최적화, 축열 저수조의 적정용량 기준 검토

1) CO₂ 발생기 재원

- 소형 시설하우스를 위한 CO₂ 공급장치 규모 최적화, 축열 저수조의 적정용량 기준을 구하기 위해 사용한 연소기의 사양을 표 3-1 (146,000 kJ/h)에 나타낸다.
- 중형 시설하우스용 CO₂ 공급장치 규모 최적화, 축열 저수조의 적정용량 기준을 구하기 위해 사용한 연소기의 사양을 표 3-2 ((418,000 kJ/h)에 나타낸다.

Table 3-1 소형 CO₂ 발생기의 연소기 사양

Specifications (model)		LFA-35K
난방/온수출력	kJ/h (kcal/h)	146,540(35,000)
난방 열효율	%	87
저탕량	L	40
배기관직경	mm	75
배관	A	난방 32, 온수 15
중량	kg	74(38*68*87)
연료소비율	L/h	4.68

Table 3-2 중형 CO₂ 발생기의 연소기 사양

Specifications (model)		중형 1035RTD
난방/온수출력	kJ/h (kcal/h)	418,320(100,000)
난방 열효율	%	91.3
저당량	L	88
배기관직경	mm	200
배관	A	난방 65, 온수 25
중량	kg	173(687*1,016*1,267)
연료소비율	L/h	13.57
온수 공급량	L/min	42

2) CO₂ 발생기를 이용한 시설 하우스의 CO₂량 (소형 LFA-35K)

- 시설 하우스 체적 : 1560 m³
- 시설하우스 내의 공기의 질량 : 1560 m³ x 1.286 kg/m³ = 2,006 kg
- 등유 (C₁₁H₂₄) 1mol(156g, 0.19L)을 완전 연소시킬 때 생성되는 CO₂ : 2464 L =0.2463 m³
 등유 1g 연소 시 CO₂ 생성량 : 0.2464 / 156 =0.00158 m³/g
 등유 1L 연소 시 CO₂ 생성량 : 1.2968 m³/L
- 연소율 : 약 87%
- 초기 380 ppm에서 1000ppm 까지, 620ppm 상승시키는데 필요한 CO₂량 :
 $1560 \text{ m}^3 \times 620 \times 10^{-6} / 0.87 = 1.111 \text{ m}^3$
- CO₂ 1.111m³을 생성하는데 필요한 등유량 (L) : $156 \times 1.111 / (0.2464 \times 820) = 0.86 \text{ L}$
- CO₂ 발생기의 연료 소비율 : 3.88L/h =0.06467L/min(등유 밀도 : 0.82kg/L)=53.1g/min
- CO₂ 발생기의 단위 시간당 CO₂ 생성량 : 53.1 x 0.00158 =0.08374 m³/min
 (0.08374 / 1560 = 53.68 ppm/min)
- 초기 380 ppm이 1000 ppm으로 올리는데 소요되는 시간 : 0.86L/3.88L/h, 13.3분
- 초기 380 ppm에서 하우스의 CO₂가 1000 ppm으로 유지되기 위한 조건은 7:00시부터 13분 가동 후 2.5시간이 흐른 후 5분을 가동하고, 이후 50분마다 5분씩 17:30분까지 가동하면 CO₂를 1000ppm으로 유지할 수 있다.

3) CO₂ 발생기를 이용한 시설 하우스의 CO₂량 (중형 1035RTD)

- 시설 하우스 면적(Fig. 3-4) : 660평 = 2,181.82m²
- 시설 하우스 기본 제원하우스 (가정) : 50m x 6m = 300m² x 7동 =2,100 m²
- 하우스 아랫부분의 체적 : 50m x 6m x 2.5m = 750m³
- 하우스 윗부분의 체적 : (1/2 x 3.14 x 3m x 1m) x 50m = 235.5m³
- 시설 하우스 총 체적 : (750m³ +235.5m³) x 7동= 6898.5m³
- 시설하우스 내의 공기의 질량 : 6,898.5m³ x 1.286 kg/m³ = 8,871.471 kg
- 등유 (C₁₁H₂₄) 1mol(156g, 0.19L)을 완전 연소시킬 때 생성되는 CO₂ : 2464 L =0.2463 m³

등유 1g 연소 시 CO₂ 생성량 : $0.2464 / 156 = 0.00158 \text{ m}^3/\text{g}$

등유 1L 연소 시 CO₂ 생성량 : $1.2968 \text{ m}^3/\text{L}$

- 연소율 : 약 91.3%
- 초기 380 ppm에서 1000ppm 까지, 630ppm 상승시키는데 필요한 CO₂량 : $6,898.5 \text{ m}^3 \times 620 \times 10^{-6} / 0.913 = 4.685 \text{ m}^3$
- CO₂ 4.685 m³을 생성하는데 필요한 등유량 (L) : $156 \times 4.685 / (0.2464 \times 820) = 3.617 \text{ L}$
- CO₂ 발생기의 연료 소비율 : $13.57\text{L/h} = 0.22617\text{L/min}$ (등유 밀도 : 0.82kg/L) = 185.46g/min
- CO₂ 발생기의 단위 시간당 CO₂ 생성량 : $185.46 \times 0.00158 = 0.293 \text{ m}^3/\text{min}$
($0.293 \text{ m}^3/\text{min} / 6898.5 \text{ m}^3 = 42.47 \text{ ppm/min}$)
- 초기 380 ppm이 1000 ppm으로 올리는데 소요되는 시간 : $3.617\text{L} / 13.57\text{L/h}$, 15.99분

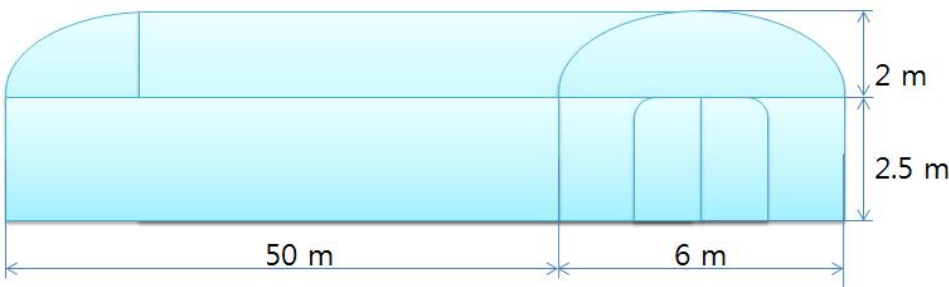


Fig. 3-4 비닐하우스 개략도

- 하우스내의 딸기가 소모하는 CO₂량은 600m² 면적에서 소모하는 양의 약 3배로 계산 (7시~9시 반까지 2.7ppm/min, 9시 반 이후 15.8ppm/min)
- Fig. 3-5는 중형 CO₂ 발생기 운전시간에 따른 시설하우스 내의 CO₂ 농도 예측결과이다.
- 초기 380 ppm에서 하우스의 CO₂가 1000 ppm으로 유지되기 위한 조건은 7:00시부터 15분 가동 후 1시간 30분이 흐른 후 5분을 가동하고, 이후 1시간 후 11분을 가동한다. 이후 30분마다 10.5분씩 17:30분까지 가동하면 CO₂를 1000ppm으로 유지할 수 있다.

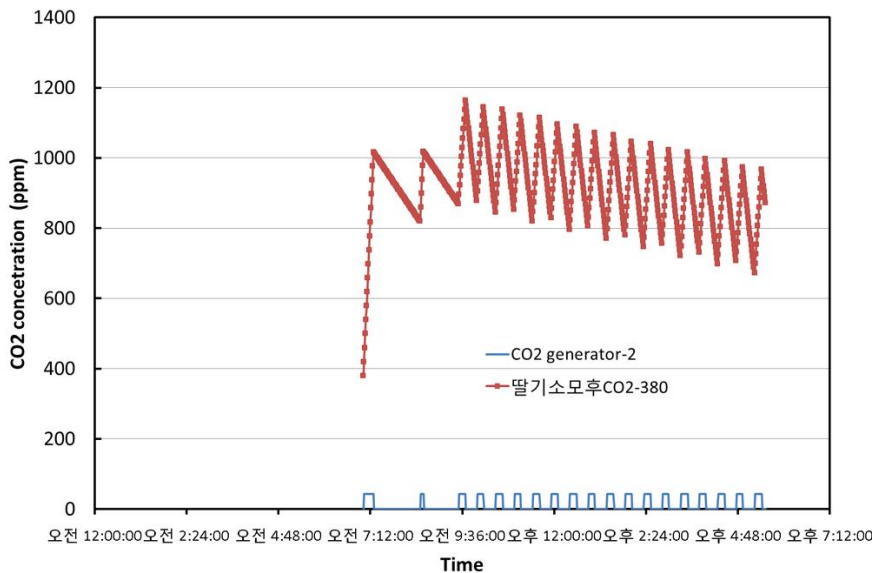


Fig. 3-5 중형 CO₂ 발생기 운전시간에 따른 시설하우스 내의 CO₂ 농도 예측결과

- 위 결과로부터 CO₂ 발생의 하루 충전시간은 일출 7:00부터 오후 5시 30분까지 약10시간 30분 동안 총 약 3시간 40분임

4) CO₂ 발생기의 물탱크 규격 및 특성

Table 3-3 CO₂ 발생기의 물탱크 규격

LFA-35K				중형 1035RTD			
열전달률 K=0.22							
용량	세로	가로	두께	용량	세로	가로	두께
0.5 ton	1000	720	5	1.5 ton	1252	1300	8
1 ton	1100	1150	6	3 ton	1620	1600	10

5) 물탱크에서의 열손실량 계산

Table 3-4 외부 평균 풍속 (기상청 자료)

평균풍속 (m/s)		
	2월	3월
1일	0.056667	0.056667
2일	0.04	0.041667
3일	0.03	0.025

Table 3-5 수치계산에 사용한 공기의 물성치

공기의 물성 값					
밀도(kg/m ³)	L(m)	μ(N*s/m ²)		Re	
1.2	1.06	0.000017		4600	4600
보정계수 c	보정계수 m	Pr	k	3247.059	3382.353
0.193	0.618	0.71	0.0243	2435.294	2029.412

$$Re_D = \rho v = 1.2 \text{ kg/m}^3 \times 0.056667 \text{ m/s} \times 1.15\text{m} / 0.000017 \text{ N*s/m}^2 = 4600$$

보정계수 C, m은 Re_D 4,000~40,000 사이 값 사용

- 열손실량 계산식

$$\text{대류열전달계수} : Nu = \frac{hD}{k} = CRe_D Pr^{1/3}$$

$$= \frac{kCRe Pr^{1/3}}{1.15} = \frac{0.0243 \times 0.193 \times 4600^{0.618} \times 0.71^{1/3}}{1.15} = 0.6675 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

열손실량 q : T₁은 물탱크 표면의 온도, T_∞은 외부온도, (T₁의 온도는 보일러가동에 따라 변동한다.)

T₁을 60℃로 가정하고, T_∞를 10℃로 가정하고 풀면,

$$\frac{T_1 - T_\infty}{\ln(r_2/r_1) + \frac{1}{2\pi kL} + \frac{1}{h2\pi r_2 l}} = \frac{60 - 10}{\ln(0.575/0.569) + \frac{1}{2\pi \times 0.22 \times 1.1} + \frac{1}{0.6675 \times 2\pi \times 0.575 \times 1.1}} = 68.206 \text{ W}$$

=4.092 kJ/min

6) 물탱크 내의 물의 온도 변화

Table 3-6 축열조 탱크내의 물의 용량과 물의 순환 유량

유량					
소형 LFA-35K			중형 1035RTD		
유량	물탱크 용량		유량	물탱크 용량	
L/min	kg		L/min	kg	
12.37	1ton	0.5ton	42	3ton	1.5ton

-CO₂ 발생기 1분 가동 후 물의 온도 변화

* 1ton tank : 유출되는 물의 온도 20℃, 유입되는 물의 온도 65℃

$$= ((\text{물탱크 내에 물의 양} \times \text{물의 온도}) + (\text{유입된 물의 양} \times \text{물의 온도})) / \text{전체 물의 양}$$

$$= ((987.63\text{L} \times 20^\circ\text{C}) + (12.37\text{L} \times 65^\circ\text{C})) / 1000\text{L} = 20.56^\circ\text{C}$$

* 0.5ton tank (배기열 회수용): 유출되는 물의 온도 20℃, 유입되는 물의 온도 33℃

$$= ((\text{물탱크 내에 물의 양} \times \text{물의 온도}) + (\text{유입된 물의 양} \times \text{물의 온도})) / \text{전체 물의 양}$$

$$= ((487.63\text{L} \times 20^\circ\text{C}) + (12.37 \times 33^\circ\text{C})) / 500\text{L} = 20.32^\circ\text{C}$$

*3ton tank : 유출되는 물의 온도 20℃, 유입되는 물의 온도 65℃

$$= ((\text{물탱크 내에 물의 양} \times \text{물의 온도}) + (\text{유입된 물의 양} \times \text{물의 온도})) / \text{전체 물의 양}$$

$$= ((2958\text{L} \times 20^\circ\text{C}) + (42\text{L} \times 65^\circ\text{C})) / 3000\text{L} = 20.63^\circ\text{C}$$

*1.5ton (배기열 회수용): 유출되는 물의 온도 20℃, 유입되는 물의 온도 33℃

$$= ((\text{물탱크 내에 물의 양} \times \text{물의 온도}) + (\text{유입된 물의 양} \times \text{물의 온도})) / \text{전체 물의 양}$$

$$= ((1458\text{L} \times 20^\circ\text{C}) + (42 \times 33^\circ\text{C})) / 500\text{L} = 20.364^\circ\text{C}$$

- 열손실을 포함한 물의 온도변화 계산

$$\text{온도} = \text{손실열량 (kJ)} / [\text{물의 무게 (kg)} \times \text{물의 비열(kJ/kg}\cdot\text{k)}]$$

- 보일러를 이용한 가열로 물의 온도가 변하고, 외부의 온도도 변하므로 변화하는 온도차에 따라 열손실량도 변하게 된다. 따라서, 변하는 열손실량에 따른 물의 온도를 계산해야 한다.

- 열손실이 일정할 때와 복합적으로 작용한다고 할 때 복합적으로 작용하였을 경우 물탱크의 온도가 더 낮게 측정되었다.
- 가정 값으로 인해 1.5ton 물탱크의 물의 온도가 가정 값 35℃에서 더 이상 올라갈 수 없다.

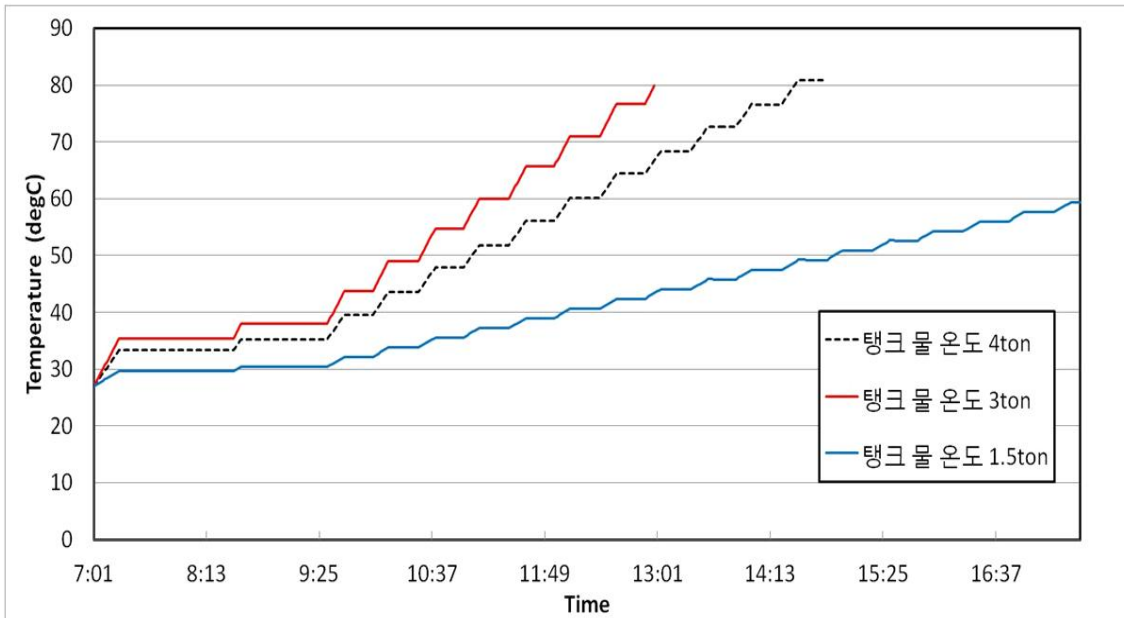


Fig. 3-6 CO₂ 발생기 가동에 따른 축열조 탱크 용량별 탱크내의 물의 온도 변화 예측 결과

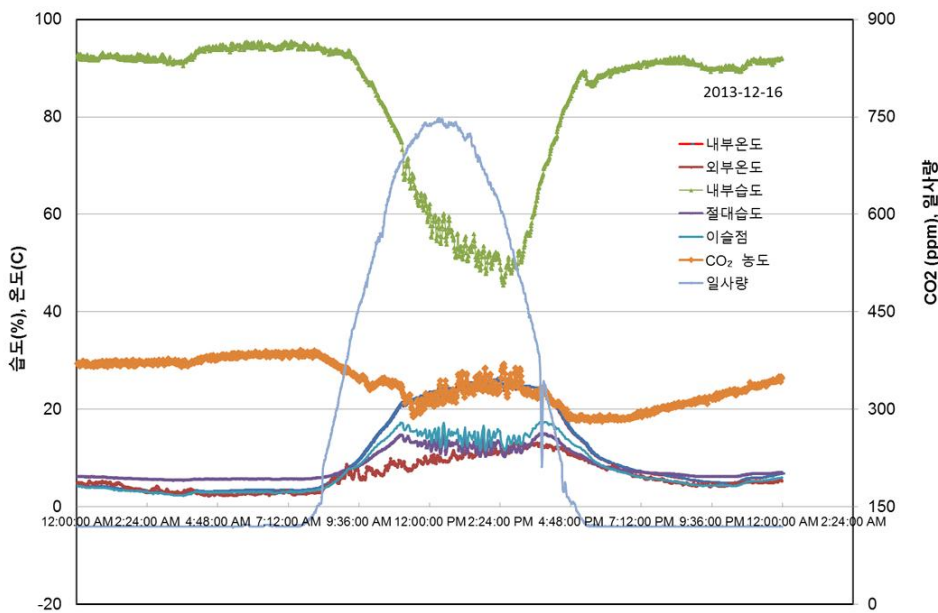
- Fig. 3-6은 CO₂ 발생기 가동에 따른 축열조 탱크 용량별 탱크내의 물의 온도 변화 예측 결과임
- CO₂ 발생기의 연소기 내의 물의 온도는 80℃ 이상이면 과열상태로 판단하여 연소가 중단된다. 따라서 축열조 탱크 물의 온도도 80℃ 이면 계산을 정지함.
- CO₂ 연소기(대형)가 연속으로 작동할 경우, Fig. 3-6의 결과로부터 축열조 물탱크 용량이 3톤일 경우 7시에 일출 때 가동하여 오후 1시경에 축열조의 물의 온도가 80℃에 달하므로 중형 CO₂ 발생기의 경우 축열조 용량이 3톤이면 용량이 부족함
- 축열조 물탱크 용량이 4톤일 경우에는 오후 3시경까지 연속운전이 가능함.
- 그러나 Fig. 3-5에서 예측한 결과 연소장치의 사용시간은 하루 중 약 3시간 40분이므로, 물탱크의 용량은 **3톤**일지라도 물의 온도가 약 60℃에 달하여 그 용량이 충분함
- 그리고 원예시설단지의 규모상 4톤의 탱크를 설치하는 것은 설치장소나 취급하기에 불편한 점이 있어 이 이상은 곤란함

(2) 시설 하우스 환경 최적화

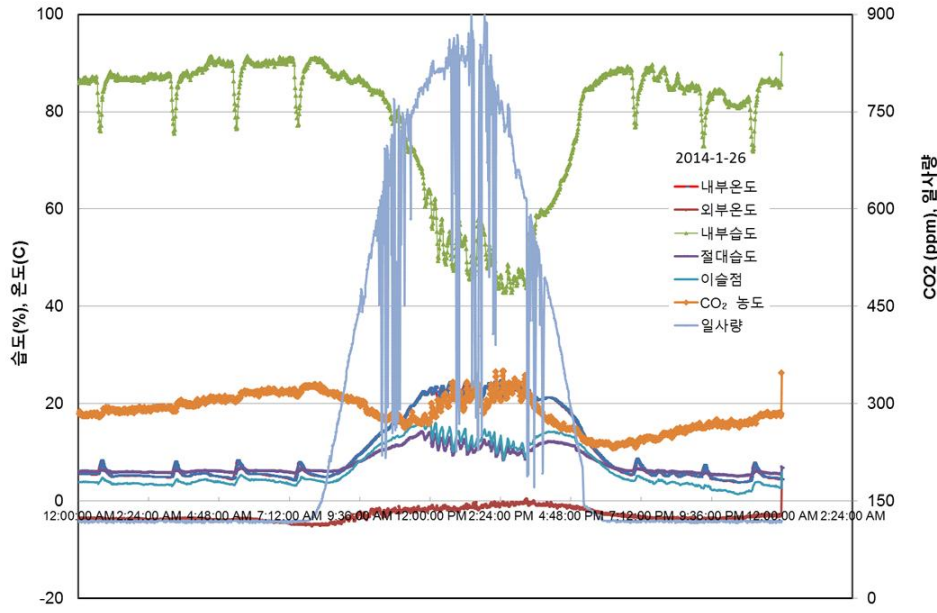
- 외부환경에 따른 시설내부의 기상환경(CO₂, 일사량(W/m²), 온도, 습도)분석 결과를 Fig. 3-7에 나타낸다.
- 월별 대표적인 시설내부의 기상환경(CO₂, 일사량, 온도, 습도)분석 결과를 보면, 12월의 시설

외부의 기온이 영상을 유지하고 있다. 1월의 경우는 외부 기온이 종일 영하의 기온(최저 약 -6°C)을 나타내고 있어, 1월에는 일몰 이후 난방이 필요하다. 2월의 경우는 새벽에 최저 -2°C 를 나타내어 약간의 난방이 필요하다. 그리고 3월에는 0시부터 일출시간까지 0°C 를 유지하고 있다. 따라서 가장 난방이 필요한 시기는 12월말과 1월이 되겠다. 그리고 온도차는 1월의 경우, 딸기의 양생온도를 8°C 라면 최고 온도차 14°C 정도이며, 2월의 경우는 온도차 8°C 정도가 필요하다.

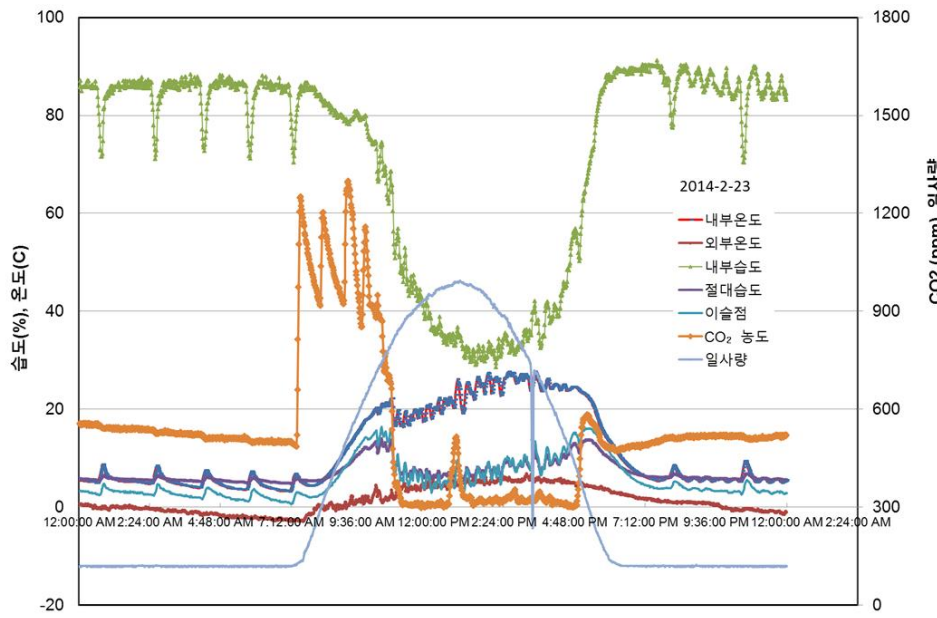
- 시설 내 내부습도는 일출과 동시에 하강하고 일몰과 동시에 다시 상승하는 경향을 보인다.
- 일사량(W/m^2)은 일출과 함께 상승하고 일몰과 동시에 떨어지며, 1월 26일의 경우 일사량의 변화가 심하게 나타나는 것은 구름이 끼어 일사량이 떨어진 것으로 추측한다.
- 시설 하우스 내의 CO_2 농도변화는 2월 과 3월의 결과를 보면 명확하게 나타난다. 일출과 동시에 CO_2 농도가 급격히 떨어져 대기 중의 380ppm 보다 낮은 농도를 나타내고 있으며, 일몰 이후는 역광합성에 의해 다시 CO_2 농도가 올라간다. 따라서 이 이출기간 중 CO_2 농도를 딸기 생육에 적합한 약 1000ppm 을 유지해주기 위해 CO_2 공급장치를 가동하고, 주간 기간에는 기온이 야간에 비하여 높기 때문에 CO_2 발생기에서 발생한 열을 축열조에 저장하였다가 야간에 사용하도록 한다.



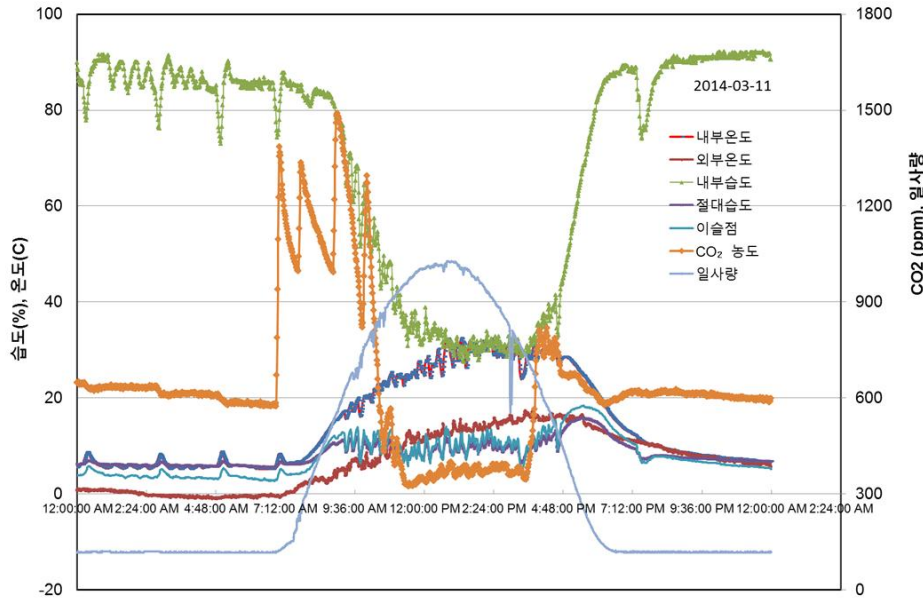
(a) 12월 16일



(b) 1월 26일



(c) 2월 23일



(c) 3월 11일

Fig. 3-7 외부환경에 따른 시설내부의 기상환경(CO₂, 일사량, 온도, 습도)분석

- 외부 온도에 따른 온수, 온풍기 온도에 따른 시설 내부 온습도 분석은 참여기업의 데이터를 이용하기로 한다.

다. 연구결과 요약

(1) CO₂ 농도 및 시설 내 온도 최적화

- 최적화된 CO₂ 발생기를 600m² 규모의 상용화된 플라스틱 온실에 적용하여 각 시스템에서 평가한 결과 후처리장치 CPF(pull plugged)의 배압이 높아 연소기의 연소상태가 불안정하여 half plugged CPF로 변경함

- Half plugged CPF에 Pt을 코팅하였기 때문에 배출가스 중의 CO, HC의 저감은 탁월하여 시동 후 약 60sec 이후에는 거의 0ppm으로 떨어져 CPF의 산화특성이 매우 우수함

- 입자상물질의 경우, 연소기의 배압이 걸려 연소상태가 불안정할 경우, 혹은 사용 시간이 2개월 이상일 경우 후처리장치를 떼어내어 공기로 불어내어 축적된 PM을 제거해야함

- 시설내부의 CO₂ 농도, 온도 및 유해가스 분석

연소기로부터 배출되는 CO₂ 농도는 약 8%이고, 유해 가스 CO, HC는 연소기 시동 후 약 60초 이후에 거의 0 수준으로 정화가 된다. 따라서 연소기 시동 후 초기 약 1-2분은 배출가스를 외기로 배출하는 것이 바람직하다. 그리고, 연소기에서 배출되는 NO_x의 농도 약 45ppm 수준의 비닐하우스 내 식물의 성장에 어떠한 영향을 미칠지에 대해서는 향후 좀 더 연구할 필요가 있다.

- 온실 면적에 따른 연소식 CO₂ 공급장치의 적정 규모, CO₂ 시비 및 보조 난방을 위한 축열저수조의 적정 용량 설정 기준 검토결과, 중형(418,000 kJ/h) CO₂ 공급기의 경우 CO₂ 농도가

380 ppm에서 1000 ppm으로 유지되기 위한 조건은, 일출시간 7:00시부터 15분 가동 후 1시간 30분이 흐른 후 5분 가동하고, 이후 1시간 후 11분을 가동한다. 이후 30분마다 10.5분씩 17:30분까지 가동하면 CO₂를 1000ppm으로 거의 유지할 수 있다.

- 중형 CO₂ 공급기의 경우 축열조 물탱크 용량은, 연소장치의 사용시간이 하루 중 약 3시간 40분이므로, 3톤일지라도 물의 온도가 약 60℃에 달하여 그 용량이 충분함

(2) 시설하우스 환경 최적화

- 시설 내부습도는 일출과 동시에 하강하고 일몰과 동시에 다시 상승하는 경향을 보였다.

- 시설 하우스 내의 CO₂ 농도변화는 일출과 동시에 CO₂ 농도가 급격히 떨어져 대기 중의 380ppm 보다 낮은 농도를 나타내고 있으며, 일몰 이후는 역광합성에 의해 다시 CO₂ 농도가 올라간다. 따라서 이 이출기간 중 CO₂ 농도를 딸기 생육에 적합한 약 1000ppm을 유지해 주기 위해 CO₂ 공급장치를 가동하고, 주간 기간에는 기온이 야간에 비하여 높기 때문에 CO₂ 발생기에서 발생한 열을 축열조에 저장하였다가 야간에 사용하도록 하였다.

2. 수경재배 딸기 재배온실에 연소/축열 복합시스템의 적용 및 유해가스 생육진단

가. 연구개발 내용

- (1) CO₂ 시용 유무에 따른 실증 농가의 딸기 생육, 생산량 및 품질 비교
 - 기존 플라스틱 온실을 2구역으로 나뉘어 시설 CO₂ 공급 유무에 따른 생산량 및 품질 규명
 - 이산화탄소 시용에 따른 실증 농가의 딸기 생육, 수량 및 과실의 품질(당도) 분석
- (2) 하계고온기의 멜론, 파프리카의 이산화탄소 시용에 따른 생육비교분석
 - 수경재배 딸기 후작으로 멜론과 파프리카의 재배와 시스템의 활용도 증가시키기 위한 방안제시
 - 고온기의 이산화탄소의 시용에 따른 생리장해 모니터링
- (3) 유해 가스농도에 따른 딸기의 생리적 기능 장애모니터링 및 물질 분석
 - 과실의 아미노산의 이산화탄소 공급에 따른 내적 품질 분석
 - 연소가스 사용 기간에 따른 엽의 광합성 기능의 물질 분석 광합성능력 평가
- (4) CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 적용에 따른 제어 방법 매뉴얼 작성
 - 외부환경요인에 따른 수동 및 자동 이산화탄소 농도 조절을 위한 제어 방법의 매뉴얼 작성
 - 복합환경조절시스템의 이산화탄소 최적제어를 위한 설정값 결정 매뉴얼 작성

나. 연구결과

- (1) CO₂ 시용 유무에 따른 실증 농가의 딸기 생육, 생산량 및 품질 비교
 - 축열 복합시스템의 적용에 따른 연소가스를 이용한 이산화탄소 시용시 시설내부의 환경변화와 연소가스를 이용한 이산화탄소 시용 유무에 따른 동계기간에 재배되고 있는 딸기의 생육 및 생산량 과실의 품질을 비교하고자 하였다. 딸기 ‘설향’을 공시하여 딸기 농가에게 구입한 묘를 2013년 9월 13일 전남대학교 농업생명과학대학 부속농자에 위하한 플라스틱 온실에 정식하였다.
 - 플라스틱 온실내부에 소형 온실을 제작하였고, 길이 방향으로 총 6구역을 분리시킨 후 1,3,5 구역은 대조구와 2,4,6구역은 석유보일러의 연소 가스를 복합환경조절 시스템에 연결하여 CO₂ 설정 값에 의해 보일러를 가동한 후 이산화탄소를 공급하게 하였다.
 - 이산화탄소의 공급을 위한 설정값은 외부 광도, 온실내부의 환기창의 개도율, 풍속에 따라 설정값을 달리 하였다. 기본 설정은 저광기에는 800ppm과 고광기에는 500ppm을 설정하였고 개도율이 5%에서 10% 상승하게 되면 200ppm을 감소 시켰으며 광도는 200W/m²에서 400W/m² 일 때 비례적으로 200ppm을 감소하도록 설정하였다. 양액의 공급은 EC1.0 mS/cm로 설정하였으며, 배지내의 함수율에 따라 급액 간격 및 급액량을 조절하였다. pH는 조절하지 않았으나 배액의 pH는 6.0-6.5이었다. 시설내부의 온도는 축열복합시스템의 온수탱크(2.5ton)을 이용하였으

며 온수의 온도는 50-58°C 주간에는 유지되었다가 시설내부의 설정온도 5-8°C에 따라 시설내부에 온수탱크와 연결된 웬코일 유니트에 의해 온수를 배송하게 하여 열교환기를 통해 난방을 하였다.

- 극저온기에는 온수탱크내의 온수를 이용하여 적정온도를 유지하지 못할 경우 시설내부에 설치된 온풍난방시스템을 이용하여 보조 난방을 할 수 있도록 복합 환경제어 시스템에 설정해 관리하였다.
- 총 태양 복사에너지(Fig. 3-8)는 12월에 가장 낮았으며, 온실내부에서의 주간온도는 태양 복사에너지에 의해 적정온도를 유지 할 수 있었으나, 야간에 단위면적당 표면적이 넓고 보온비가 낮은 실험온실의 경우 야간의 시설내부의 온도가 6도 이하의 경우도 12월과 2월사이 빈도수가 많은 경향을 보였다(Fig. 3-9와 Fig 3-10).

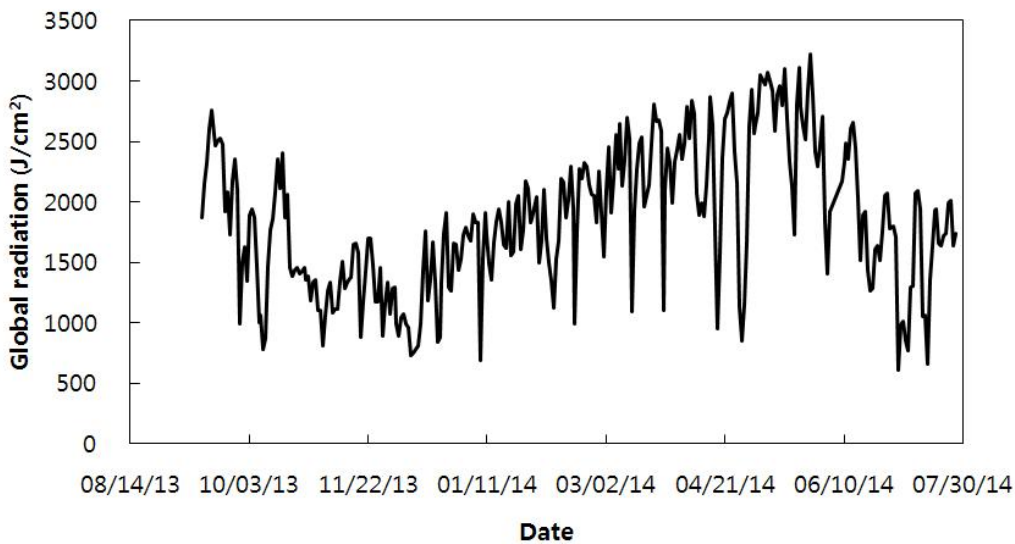


Fig. 3-8. 실험 기간 동안의 일중 총 복사에너지

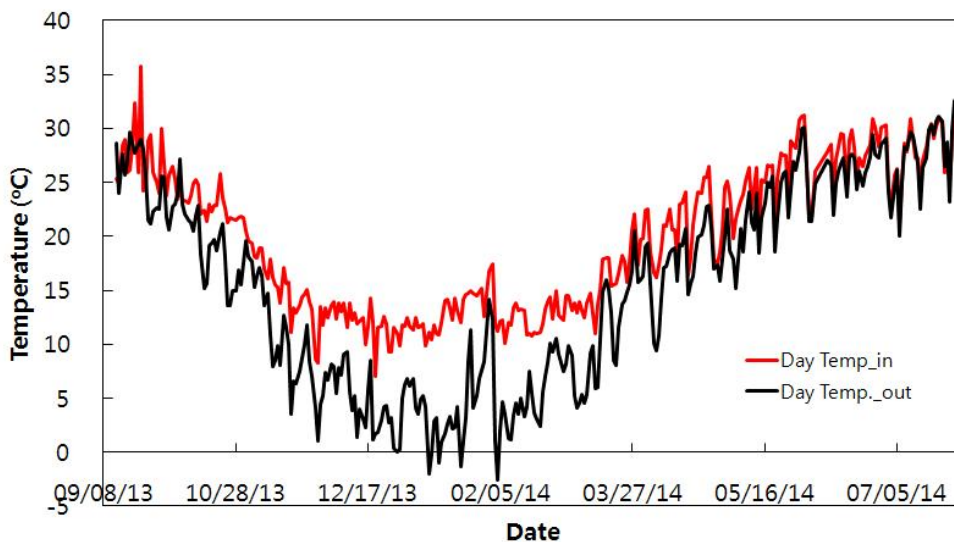


Fig. 3-9 Inside and outside of greenhouse temperature during the day time.

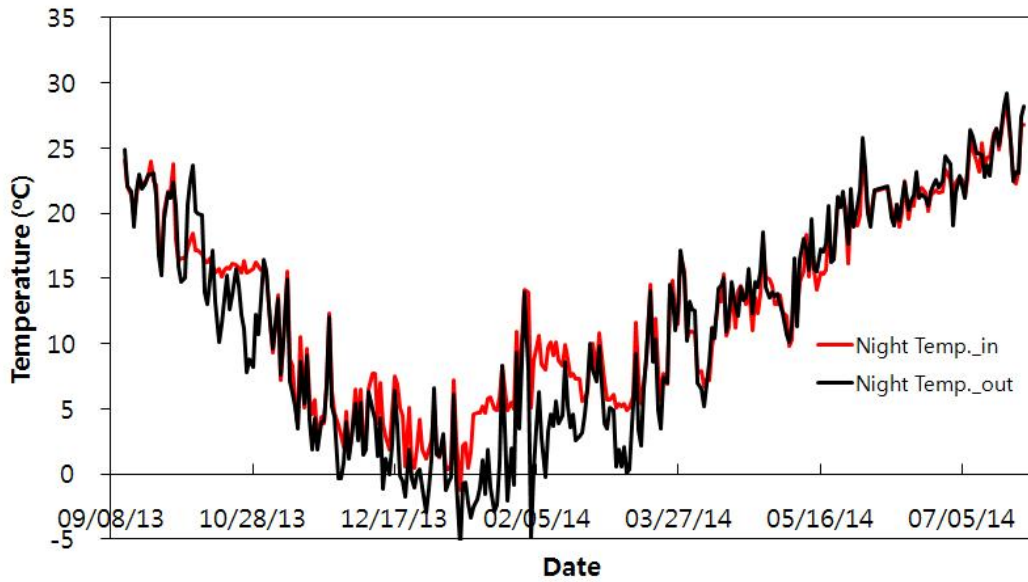


Fig. 3-10 Inside (Temp_in) and outside (Temp_out) of greenhouse temperature during the night time.

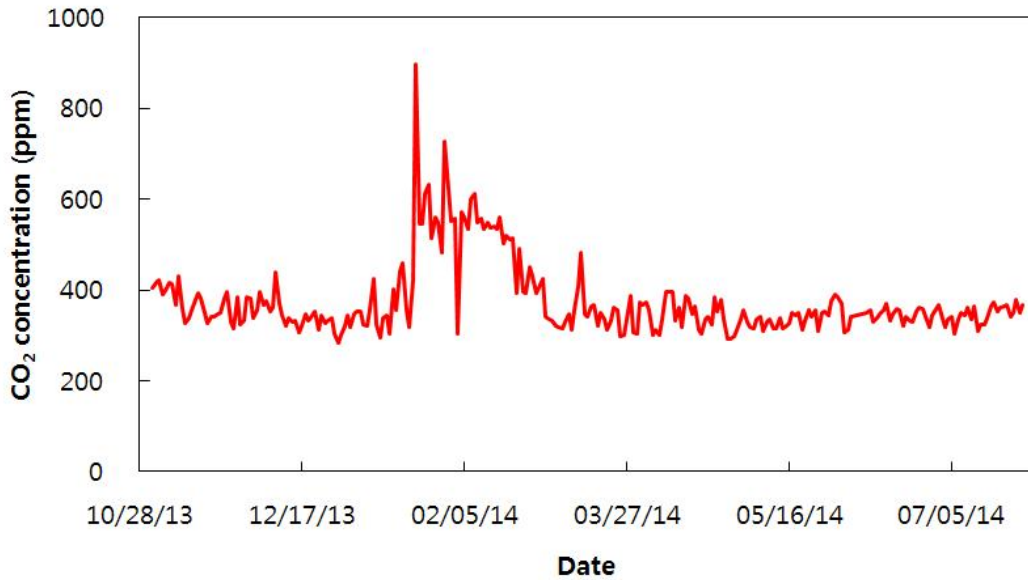


Fig. 3-11. 주간 평균(07:00-14:00) 이산화탄소 농도 변화

- 온실내부의 이산화탄소 농도는 난방 요구도가 높은 12월 중순부터 2월 중순까지 이산화탄소를 사용하여 일평균 이산화탄소 농도를 높게 유지 하도록 설정하였으며, 외부 광도의 증가에 따라 설정된 이산화탄소 농도 800ppm은 개도율이 5%이상에서 10%이내이면 -500ppm을 설정 값에서 농도를 낮춰 주었다 (Fig. 3-11).
- 외부 온도가 증가하는 2월 중순부터 일출 후 시설내부의 온도가 상승하여 측장이 열리는 시간이 단축되면서 오전의 이산화탄소 시용은 매우 짧은 시간동안만 시용하였다.

- 정식 이후의 경우 시설내부의 온도가 높더라도 오전의 연소기에 발생된 연소가스를 공급하였으며(Fig. 3-12), 외부 광도가 낮은 경우 환기창의 열리는 시간이 지연되면서 오전의 경우 높은 이산화탄소를 공급할 수 있었다(Fig. 3-13와 Fig. 3-14).
- 광도와 외부 온도가 높은 여름철의 경우 환기창이 대부분 열어져 있으므로 연소가스를 이용하여 강제로 공급을 하였으며 외부 이산화탄소농도와 유사한 농도를 유지할 수 있도록 석유 보일러르 가동시켰다(Fig. 3-15)

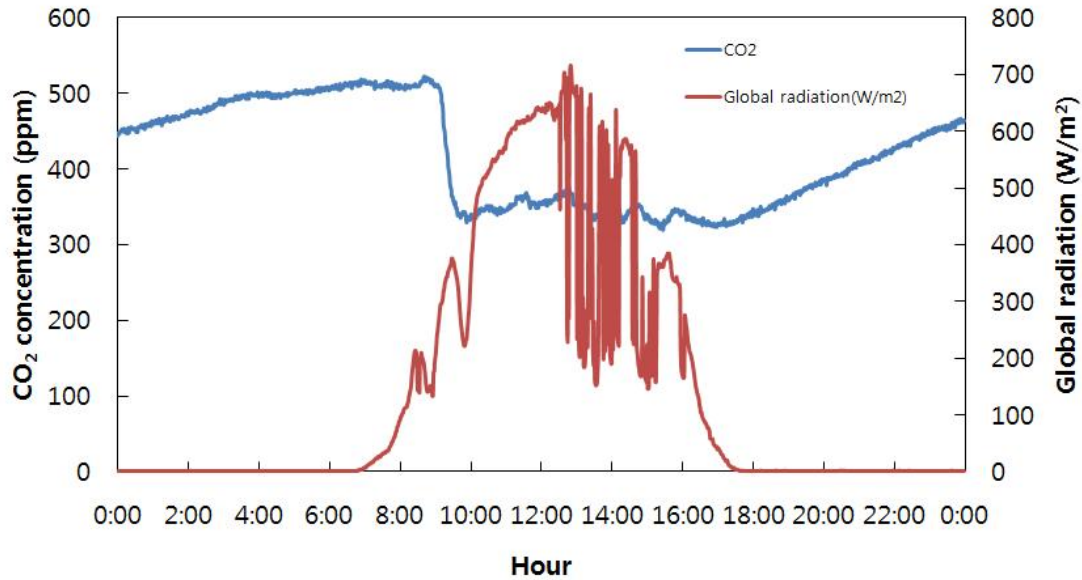


Fig. 3-12. Variation of CO₂ concentration and global radiation on 1st November, 2013 .

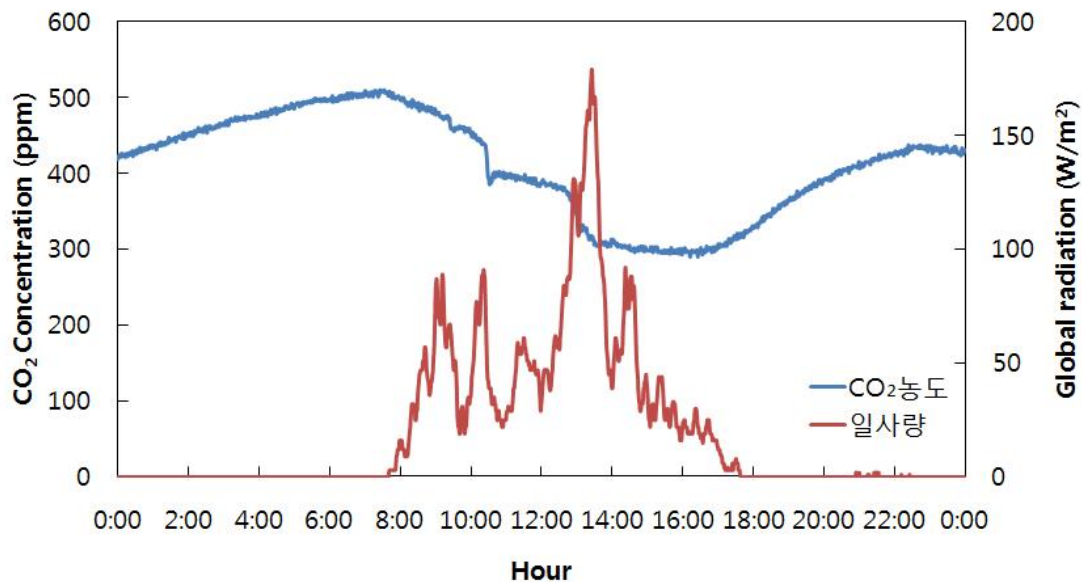


Fig. 3-13. Variation of CO₂ concentration and global radiation on 1st March, 2014 .

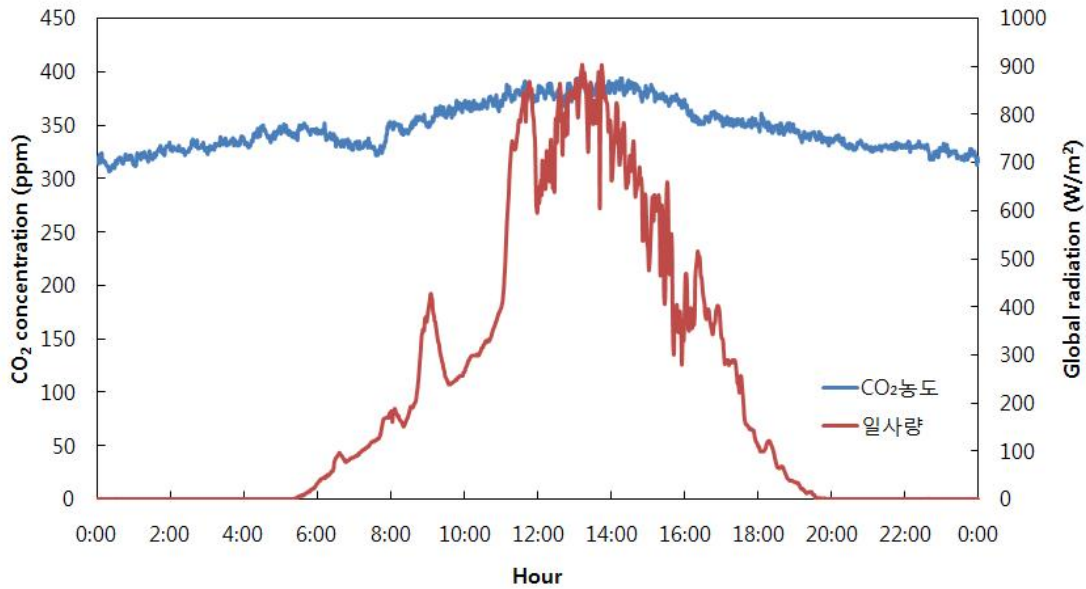


Fig. 3-14. Variation of CO₂ concentration and globla radiation on 1st July, 2014 .

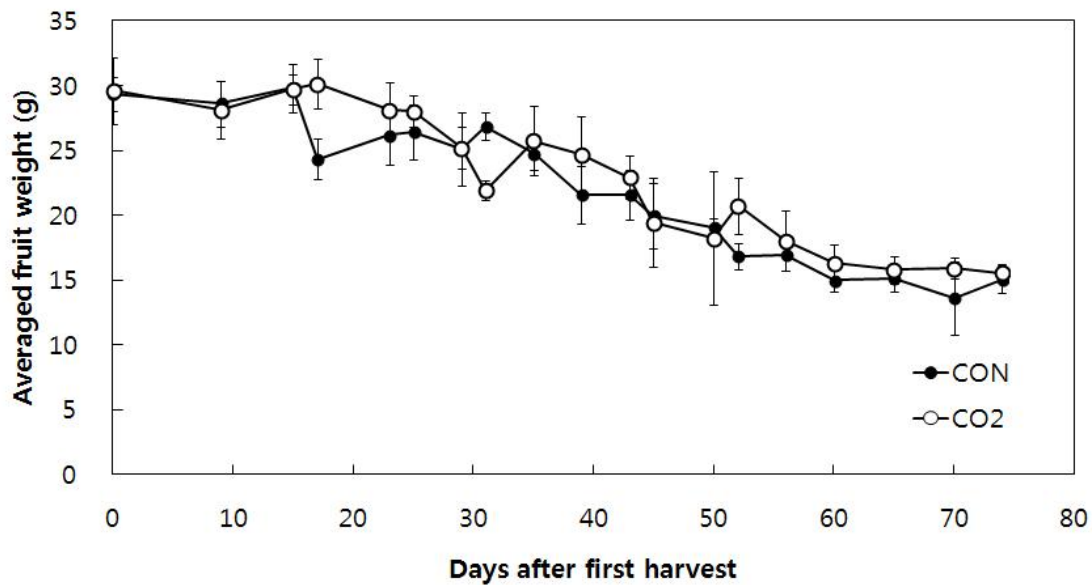


Fig. 3-15. Averaged fruit weight of strawberry grown with (CO₂) and without (CON) CO₂ supplement. The crops was grown by hygrosopically with coir substrate.

- 연소 가스를 이용한 이산화탄소 공급을 하였을 경우 수확된 딸기의 평균과중은 증가하는 경향을 보였으나 처리간의 전체 평균의 유의적 차이는 나타나지 않았다. 반면 12월 초순부터 중순까지 수확되었던 과실과 2월에 초순 경의 수확된 과실의 경우 과실의 평균과중은 높게 나타났다(Fig. 3-15).
- 첫 수확된 과실의 당도는 이산화탄소 처리구에서 높게 나타났으며, 총 수확된 과실의 평균 당도는 처리간 유의적 차이는 나타나질 않았다(Fig 3-16).

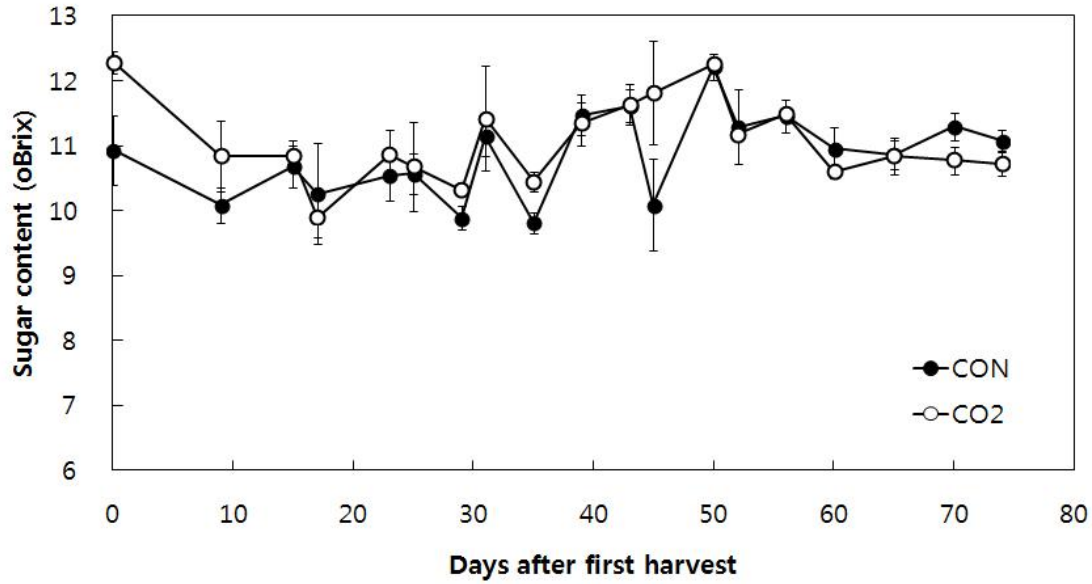


Fig. 3-16. Averaged sugar content of strawberry grown with (CO₂) and without (CON) CO₂ supplement. The crops was grown by hygroscopically with coir substrate.

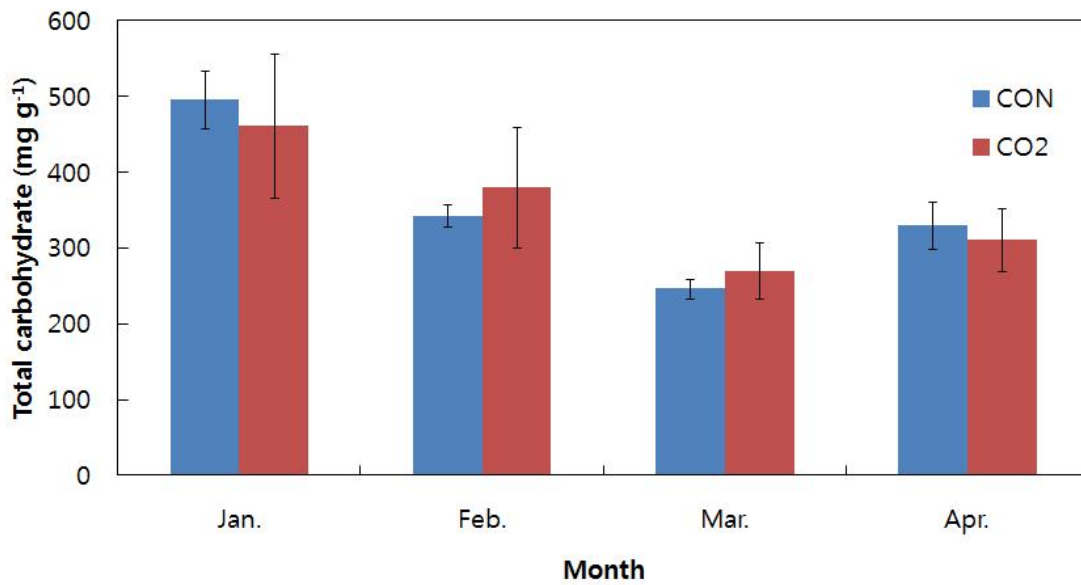


Fig. 3-17. Averaged total carbohydrate content of strawberry fruit grown with (CO₂) and without (CON) CO₂ supplement. The crops was grown by hygroscopically with coir substrate.

- 1g의 과실 건물중 당 전탄수화물의 양은 1월부터 4월까지 조사한 평균값을 2월을 제외하고 과실당 전탄수화물의 양의 차이에 대한 유의성은 없었다(Fig 3-17).

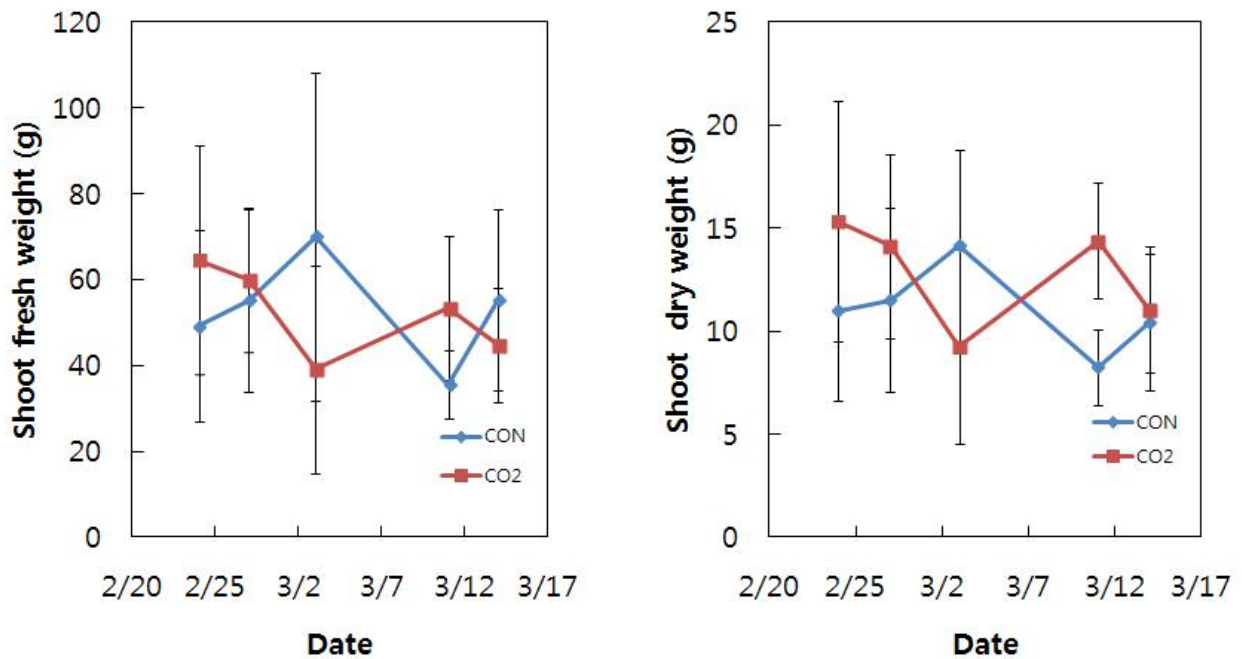


Fig. 3-18. 딸기 생산농가의 연소가스 처리구와 비처리구의 딸기 지상부 생체중 및 건물중 비교

- 수경재배 딸기 재배 농가에서의 실증실험에서의 연소된 가스를 여과시킨 후 시설내부에 유입되었을 경우 시설내부의 이산화탄소는 증가하였으나, 난방요구도가 높은 온실의 경우 야간의 이산화탄소가 매우 높았다.
- 오전의 환기전 연소된 이산화탄소를 사용하여 재배된 딸기의 생체중과 건물중은 대조구와 차이가 없었다. 겨울철 재배된 딸기의 생육이 매우 불균일하여 주간 이산화탄소 농가가 대조구보다 높았으나 모집단의 변이가 매우 심하여 처리간의 효과에 대한 분석이 미비하였다 (Fig. 3-18).

(2) 하계고온기의 멜론, 파프리카의 이산화탄소 시용에 따른 생육비교분석

- 난방요구도가 거의 없는 여름 동안 축열 복합시스템의 연소가스를 이용한 이산화탄소 시용 유무에 따른 기간에 재배되고 있는 파프리카와 멜론의 생육 및 생산량 과실의 품질을 비교하고자 하였다.

(가) 파프리카

- 공시재료는 파프리카 ‘페라리’ (Enza zaden, The Netherlands)을 공시하여 2014년 3월 24일 240공 암면트레이에 파종하여 2014년 5월 26일 전남대학교 농업생명과학대학 부속농장에 위치한 플라스틱 온실에 정식하였다(Fig. 3-19). 플라스틱 온실내부에 소형 온실을 제작하였고, 길이 방향으로 총 6구역을 분리시킨 후 1,3,5구역은 대조구와 2,4,6구역은 석유보일러의 연소 가스를

복합환경조절 시스템에 연결하여 CO₂ 설정 값에 의해 보일러를 가동한 후 이산화탄소를 공급하게 하였다. 각 구역에 두 개의 재배 베드를 설치되어 있어 각 베드에 18주씩 216주를 총 6구역에 정식하였다. 8월 14일 구역별 5주씩 식물체를 표본 조사하여 기관별 파괴조사와 과실의 생체중, 부피등을 측정하여 비교 하였다. 8월 7일과 9월 1일 두차례 더 수확 이후 완숙과의 과실의 개수 및 평균 과중등을 처리구와 대조구를 비교하였다.

- 이산화탄소의 공급을 위한 설정값은 외부 광도, 온실내부의 환기창의 개도율, 풍속에 따라 설정값을 달리 하였다. 기본 설정은 저광기에는 800ppm과 고광기에는 500ppm을 설정하였고 개도율이 5%에서 10% 상승하게 되면 200ppm을 감소 시켰으며 광도는 200W/m²에서 400W/m² 일 때 비례적으로 200ppm을 감소하도록 설정하였다.

- 양액의 공급은 EC2.5 mS/cm로 설정하였으며, 배지내의 함수율에 따라 급액 간격 및 급액량을 조절하였다. pH는 조절하지 않았으나 배액의 pH는 6.0-6.5이었다. 외부 온도가 높은 시기임에 따라 난방을 하지 않았으며, 축열복합시스템의 온수탱크(2.5ton)의 최소한의 온수만 저장할 수 있도록 석유보일러의 가동시간을 최소화하여 연소된 가스를 온실내부로 공급하였다.



Fig. 3-19. Sweet pepper crop at planting (A) and 39 days after planting (B)

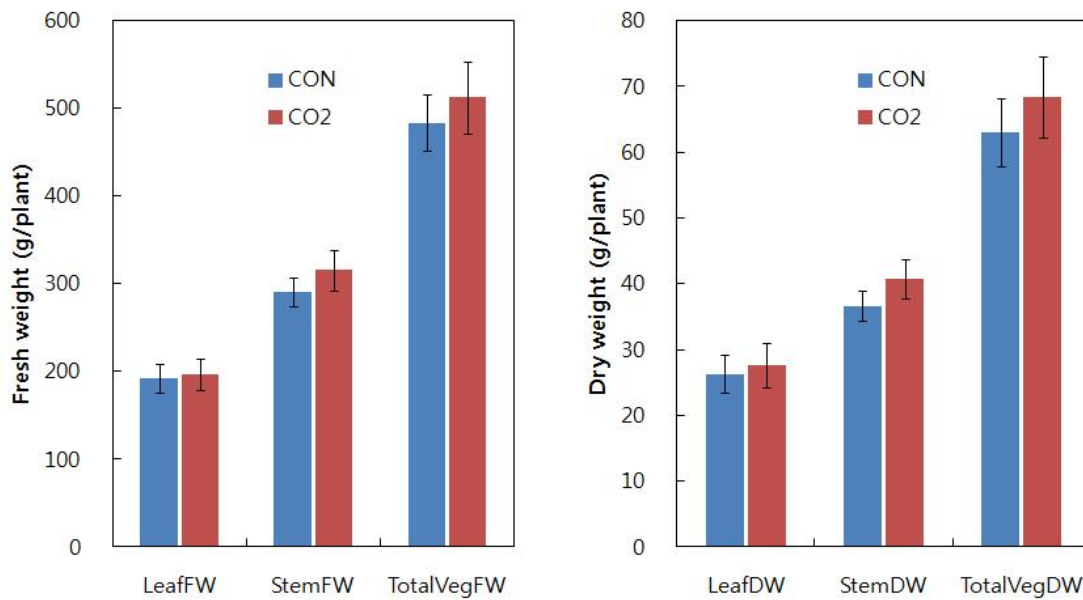


Fig. 3-20. Leaf, stem and total vegetative fresh weight (FW) and dry weight (DW) of sweet pepper grown with (CO₂) and without (CON) CO₂ supplement. The crops was grown by hygroscopically with coir substrate.

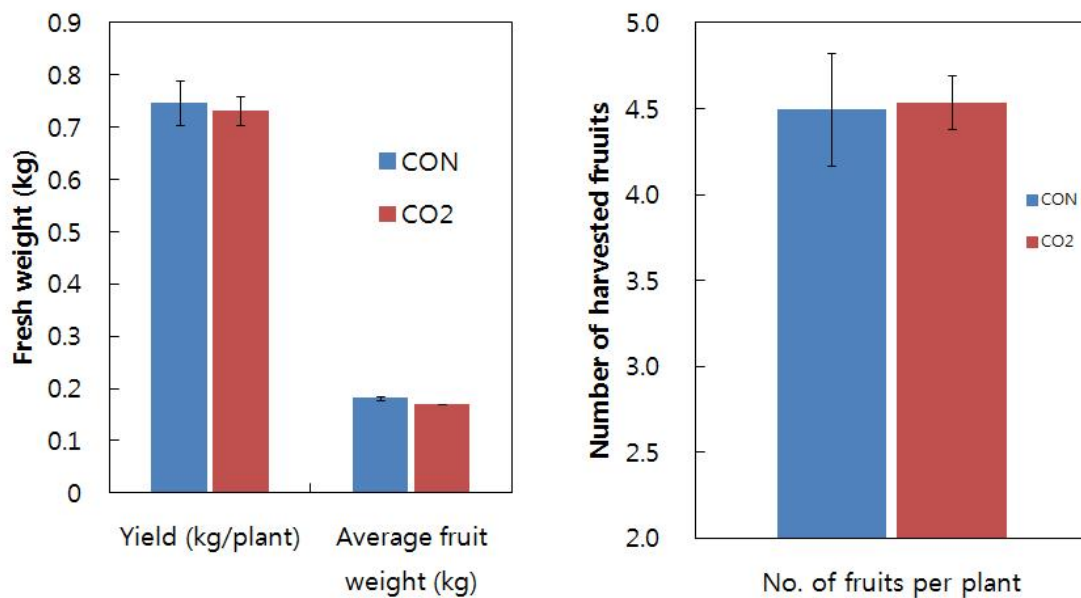


Fig. 3-21. Yield per plant and averaged fruit weight and number of harvested fruit per plant of sweet pepper grown with (CO₂) and without (CON) CO₂ supplement. The crops was grown by hygroscopically with coir substrate.

(나) 멜론

- 머스크 멜론 품종 ‘셈머에이스’ 를 공시하여 2014년 5월 28일 전남대학교 농업생명과학대학 부속농장에 위치한 플라스틱 온실에 정식하였다(Fig. 3-22).
- 플라스틱 온실내부에 소형 온실을 제작하였고, 길이 방향으로 총 6구역을 분리시킨 후 1,3,5 구역은 대조구와 2,4,6구역은 석유보일러의 연소 가스를 복합환경조절 시스템에 연결하여 CO₂ 설정 값에 의해 보일러를 가동한 후 이산화탄소를 공급하게 하였다.
- 각 구역에 두 개의 재배 베드를 설치되어 있어 각 베드에 12주씩 144주를 총 6구역에 정식 하였다. 8월 11일 수확한 멜론은 개별무게 측정한 후 둘레, 과장 과폭, 당도, 과실의 볼륨을 측정하여 처리구와 대조구간의 평균을 비교 분석하였다.
- 이산화탄소의 공급을 위한 설정값은 외부 광도, 온실내부의 환기창의 개도율, 풍속에 따라 설정값을 달리 하였다. 기본 설정은 저광기에는 800ppm과 고광기에는 500ppm을 설정하였고 개도율이 5%에서 10% 상승하게 되면 200ppm을 감소 시켰으며 광도는 200W/m²에서 400W/m² 일 때 비례적으로 200ppm을 감소하도록 설정하였다.
- 양액의 공급은 EC 2.5 mS/cm로 설정하였으며, 배지내의 함수율에 따라 급액 간격 및 급액량을 조절하였다. pH는 조절하지 않았으니 배액의 pH는 6.0-6.5이었다.
- 외부 온도가 높은 시기임에 따라 난방을 하지 않았으며, 축열복합시스템의 온수탱크(2.5ton)의 최저한의 온수만 저장할 수 있도록 석유보일러의 가동시간을 최소화하여 연소된 가스를 온실 내부로 공급하였다.



Fig. 3-22. Melon crop at planting (A) and 28 days after planting (B)

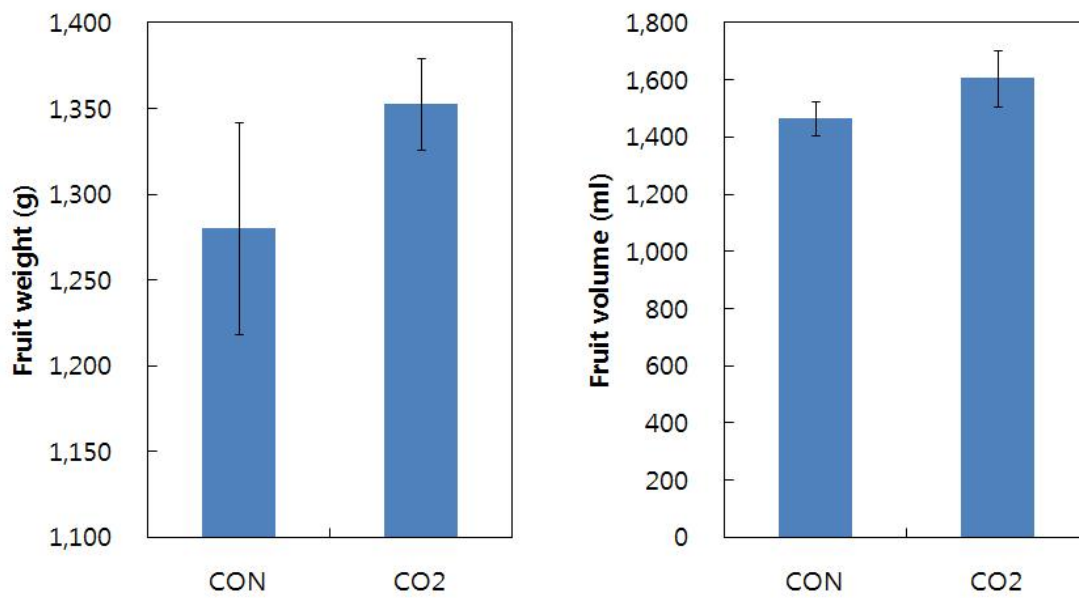


Fig. 3-23. Averaged fruit weight and fruit volume of muskmelon grown with (CO₂) and without (CON) CO₂ supplement. The crops was grown by hygrosopically with coir substrate.

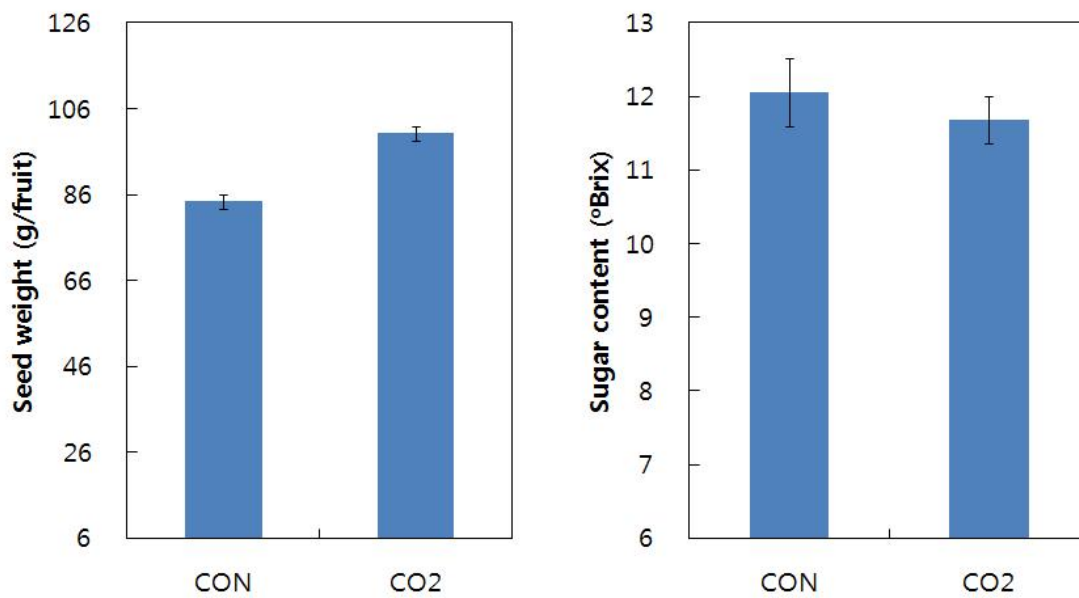


Fig. 3-24. Averaged seed weight and sugar content of muskmelon fruit grown with (CO₂) and without (CON) CO₂ supplement. The crops was grown by hygrosopically with coir substrate.

- 연소가스를 이용한 이산화탄소 시용은 멜론의 과실의 무게와 과실의 볼륨을 유의적으로 증가시켰다(Fig. 3-23). 이는 이산화탄소의 시용이 종자의 개수와 종자의 무게를 증가시켜 과실로의 동화산물의 이동을 촉진시켰을 것으로 사료된다(Fig. 3-24). 반면, 과육의 평균 당도는 대조구에 비해 다소 낮은 경향을 나타냈으나 통계적인 차이는 나타나지 않았다(Fig. 3-24).

(3) 유해 가스농도에 따른 딸기의 생리적 기능 장애모니터링 및 물질 분석

- CO, NO, SO₂의 표준가스를 이용하여 6주간 재배된 딸기를 5리터 PP 병에 밀폐한 이후 표준가스를 5, 10, 20ml을 혼합하여 24시간동안 엽내의 과산화수소의 변화, 색소체 및 단백질의 변화를 조사하였다.
- 가스장애는 표현적으로 나타나기 전에 2년차의 결과에서 보는 바와 같이 기공과 틸라코이드 단백질의 농도가 감소하여 엽광합성력이 급격히 저하된다.
- 가스장애와 같은 환경스트레스에 노출되었을 경우 세포막의 변성 및 과산화물질 분석을 통해 스트레스에 대한 반응을 정량화할 수 있다.
- 잎 조직에서 국소 H₂O₂를 시각화 24 HAT 절제 및 Tris-HCl 완충액 (pH 6.5)에 3,3'-미노벤지딘 (DAB)의 1% 용액에 침지 한 후 사 16 시간 동안 실온에 두었다.
- 잎은 H₂O₂와 DAB의 반응의 특성 갈색 반점의 모습까지 조명하였고, 잎은 갈색 반점을 시각화하기 위해 에탄올에 담가 표백하고, 디지털 카메라로 촬영하였다.
- Fig. 3-25에서 보는바와 같이 NO 가스의 농도가 증가함에 따라 엽의 탈색이 가장 심하였으며, 낮은 농도의 CO, SO₂의 경우 NO보다는 스트레스 정도가 낮게 나타났다. 반면 10cc이상의 농도에서는 모든 유해가스에서 가스장애가 매우 높은 것으로 나타났다. 특히 산화반응에서도 유해가스 중 NO가스가 가장 심하였으며, 세포막과 세포질의 손상이 초래하였다.
- 모든 유해 가스 처리 잎 (CO, NO_x를, SO₂)에서, 어두운 갈색 반점 영역은 컨트롤에 비해 널리 퍼져 있었다. 반대로 유해 가스의 피해는 5CC와 10CC에 비해 20 CC에서 관찰되었다
- 클로로필 및 카로티노이드 함량 Hiscox 및 Israclstam (1979)의 방법에 의해 추정 하였다. 신선한 잎을 10 ml의 디메틸 설피록 사이드 (DMSO)를 첨가하는 유리 튜브에 저장하였고, 1 시간 동안 65 °C에서 오븐에서 유지시켰다. 스펙트로미터 480, 645, 520 및 663 nm에서 그 함량을 조사하였다.
- 총 엽록소와 카로티노이드 함량과 엽내의 루비스코 함량은 대조구에 비해 CO, NO_x 와 SO₂ 가스 상태에서 급격히 감소하였으며, 유해가스는 그 농도가 높을수록 광합성 색소의 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며 농도가 높은 20CC에서 대조구에 비해 그 농도가 매우 낮았다. 특히 SO₂의 영향은 CO와 NO_x 보다 크게 나타났다(Fig. 3-26과 3-27)

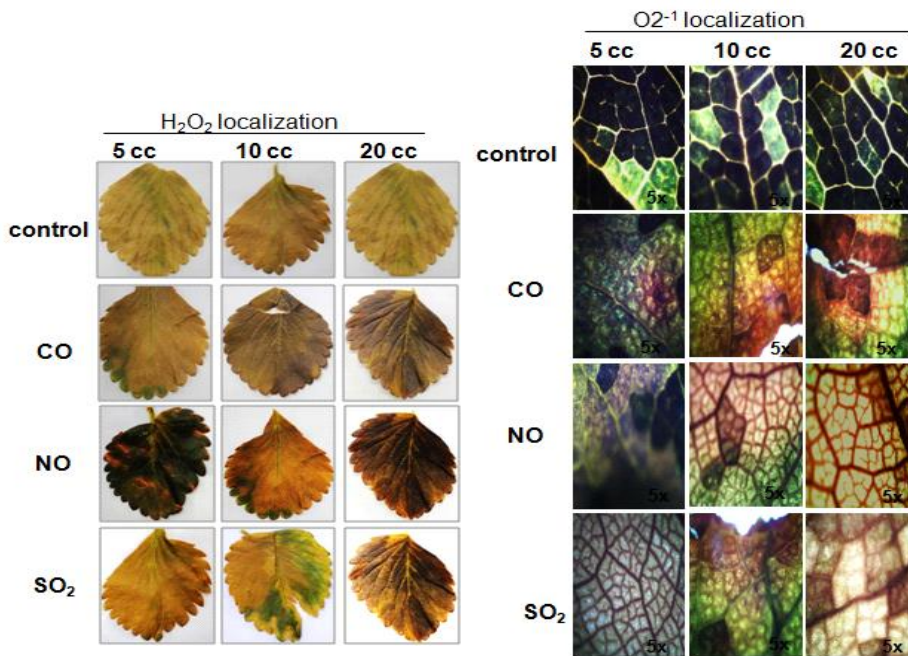


Fig. 3-25. Visualized H₂O₂ localized in leaf tissues, leaves from the four treatments after 24 HAT. Leaves were illuminated until appearance of brown spots characteristic of the reaction of DAB with H₂O₂.

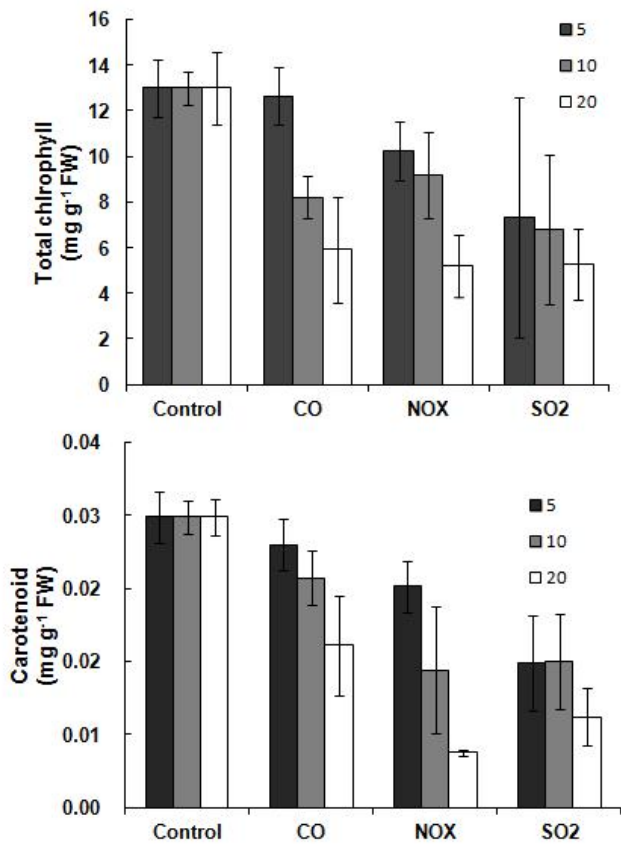


Fig. 3-26. Content of chlorophyll and carotenoid in strawberry leaf at CO, NO_x, and SO₂ gases compared to control plants with different concentration of CO, NO_x, and SO₂.

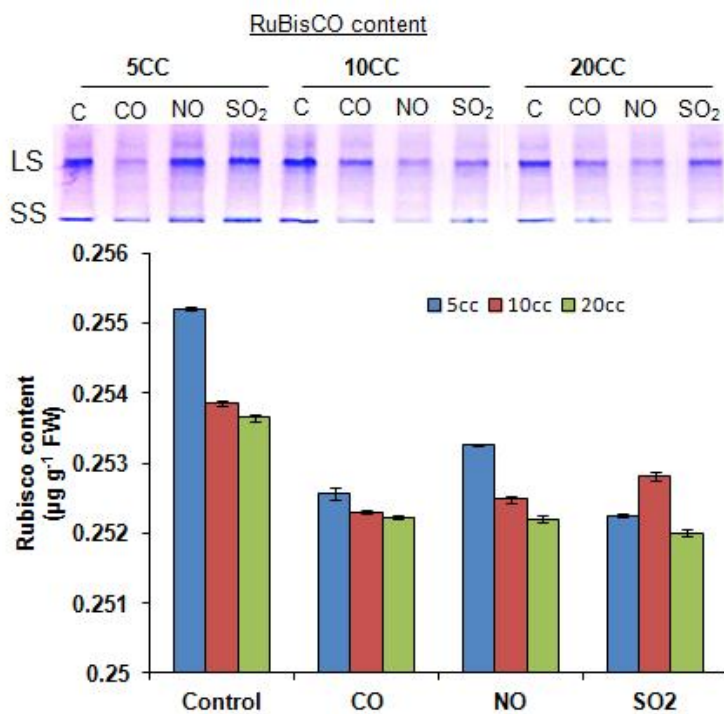


Fig. 3-27. Content of RuBisCO in strawberry leaf at CO, NO_x, and SO₂ gases compared to control plants with different concentration of CO, NO_x, and SO₂.

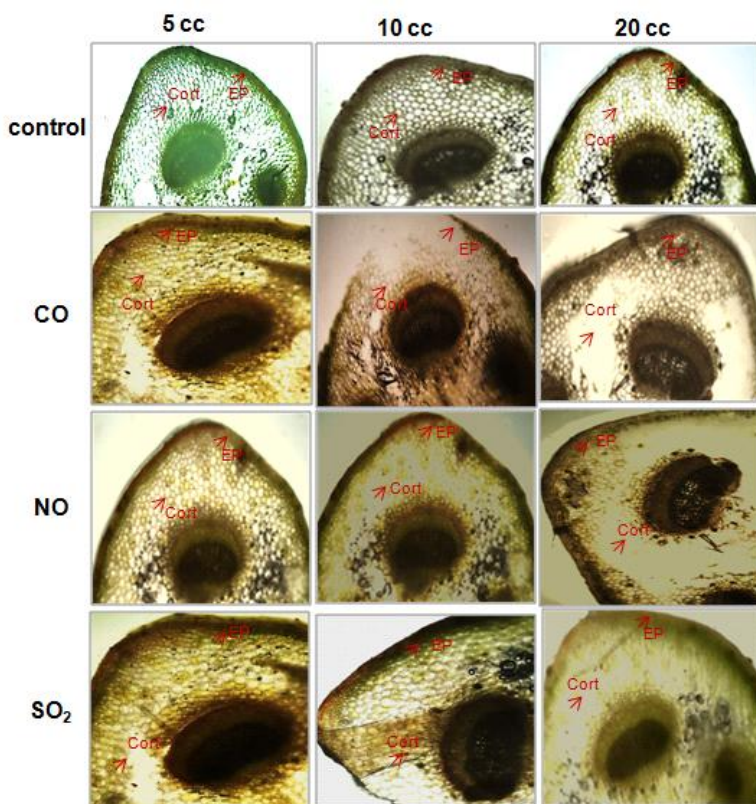


Fig. 3-28. Fresh petiole section of strawberry leaf exposed CO, NO_x, and SO₂ gases compared to control plants with different concentration of CO, NO_x, and SO₂.

- 유해 가스 처리에서 딸기의 엽병의 단면을 관찰하기 위해 30분 동안 증류수에 담귀 두었다가 엽병을 횡 방향 절단한 후 글리세린 탑재하고 커버슬립으로 덮어 광학현미경 10X 배율(라이카, Wetzlar의 독일 라이카 DM4000) 관찰 하였다(Fig. 3-28).
- 엽병의 도관부와 물관부 양수분을 이동하는 통로로서 CO, NO 및 SO₂의 영향이 물과 영양분의 이동과 전류를 영향을 받을 수 있다는 증거를 제시하였다.
- 100CC의 CO, NO 및 SO₂ 처리에서는 내부의 도관이나 체관의 파열 및 피질의 세포(빨간색 화살표) 분할을 중단하였고, 반면 유해 가스 처리의 5CC에서는 엽병의 구조에 아무런 영향이 없었다(Fig. 3-28).

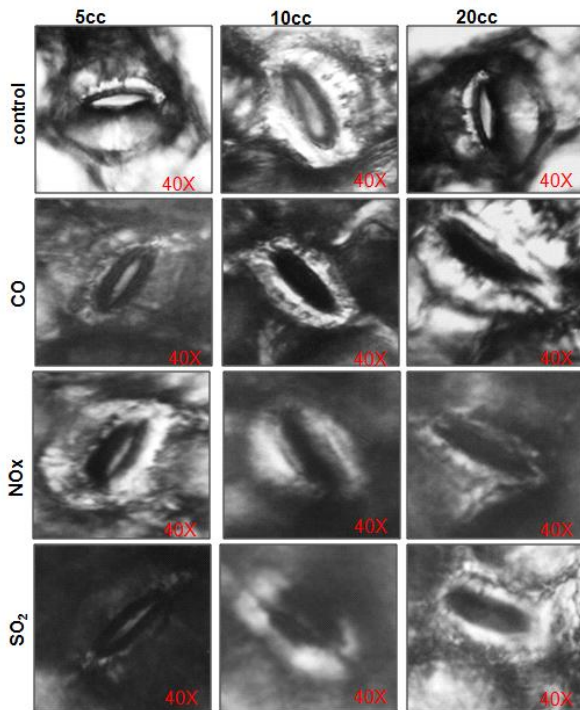


Fig. 3-29. stomatal observation of strawberry leaf exposed CO, NO_x, and SO₂ gases compared to control plants with different concentration of CO, NO_x, and SO₂.

- Fig. 3-25는 광학현미경 40 배율로 관찰한 기공이다. CO, NO_x와 SO₂ 처리 5CC에서는 기공의 공변세포의 변화는 나타나지 않았으나 10CC 부터는 기공은 약간 닫혀있었으며 CO, NO_x 및 SO₂ 가스에서는 기공의 20CC 후 완전히 닫혀 있었다. 뿐만아니라 공변세포는 세포는 대조구에 비해 처리구에서 손상되었다.

(4) CO₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 적용에 따른 제어 방법 매뉴얼 작성

(가) 온실 내부에 미치는 외적환경요인과 환경조절을 위한 제어 시스템들

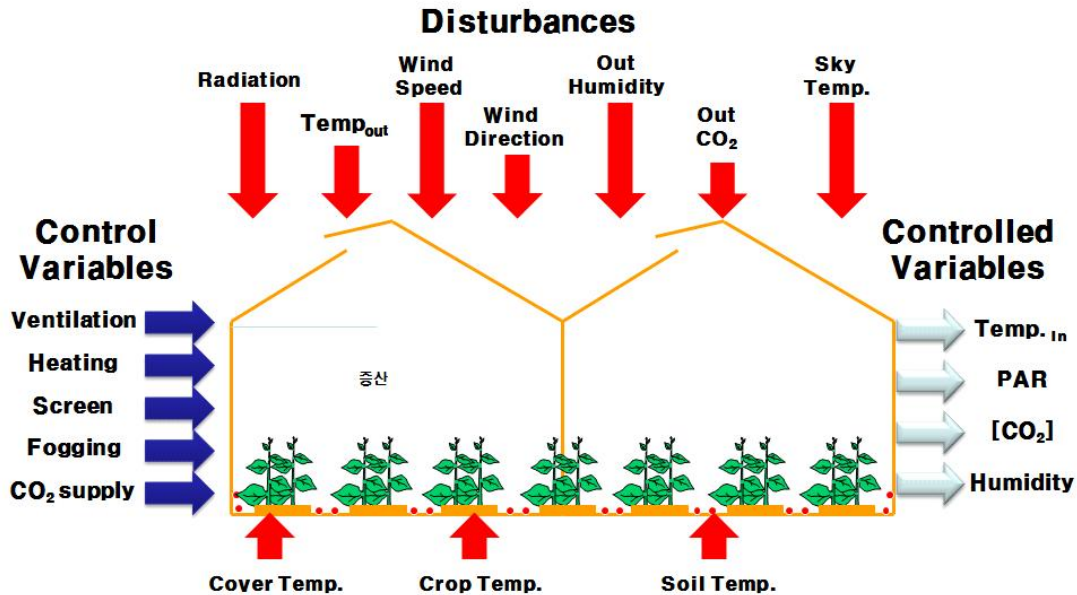


Fig. 3-30. Disturbances, Control and controlled variables in greenhouse (Pawlowski et al, 2010).

- 온실내부의 온도에 미치는 외부환경은 외부 광도, 외부 온도, 풍속과 이를 조절하기 위해 환기창, 난방, 스크린, 포그 시스템과 이산화탄소의 공급 시스템이다. 시설내부의 온도 변화는 시설내부의 습도 변화에 기인한다. 작물의 성장과 발육 조절 및 시설내부의 병원균의 전염을 억제하기 위해 습도조절도 매우 중요하다. 그러므로 시설내부의 온도와 습도 조절을 위해 환기창의 개도율과 난방을 하게된다(Fig. 3-30).
- 노지에서 재배되는 작물의 경우 공기중의 이산화탄소 농도가 일정하지만 온실내부에서 재배되는 작물의 경우 환기율에 따라 외부 이산화탄소 농도보다 훨씬 낮은 농도가 되는 경우가 많다. 온실 작물의 성장과 발육 및 생산성과 품질을 높이기 위해 근권부에 증산에 의한 부족한 수분을 공급하기 위해 급액을 하고 광합성량의 증가시키기 위해 온실내부의 공기중의 충분한 이산화탄소 농도를 유지시켜 주는 것이 매우 중요하다.
- 시설내부의 온도는 태양광이 시설내부로 투과되고 투과된 광에너지는 작물의 온도 증가와 동시에 증산작용을 초래하면서 시설내부의 습도가 상승하게 되며, 잎의 기공은 수증기를 방출하고 공기중의 이산화탄소와 교환이 이뤄지면서 시설내부의 습도는 증가하고 이산화탄소는 감소하게 된다. 작물 군락의 크기에 따라 시설내부의 이산화탄소 농도의 감소 속도는 변한다.
- 군락이 클수록 CO₂ 농도의 감소율은 증가하게 된다. 일반적으로 일출 후 30분에서 60분이면 대기 중의 이산화탄소 농도에 도달하게 된다. 외부 온도가 낮을 경우 시설내부의 온도의 상승은 완만하지만 환기창이 닫아져 있기 때문에 습도는 증가하게 된다. 이러한 경우 최소 환기를 하여 내부의 수증기를 외부로 방출시켜줘야 한다.
- 특히 호냉성 작물인 딸기와 같은 경우 오전에 시설내부의 습도가 높은 상태로 유지되면 식

물체에 결로가 발생되고 잿빛곰팡이 발생율이 증가한다.

(나) 온실 난방과 환기온도 기본 셋팅

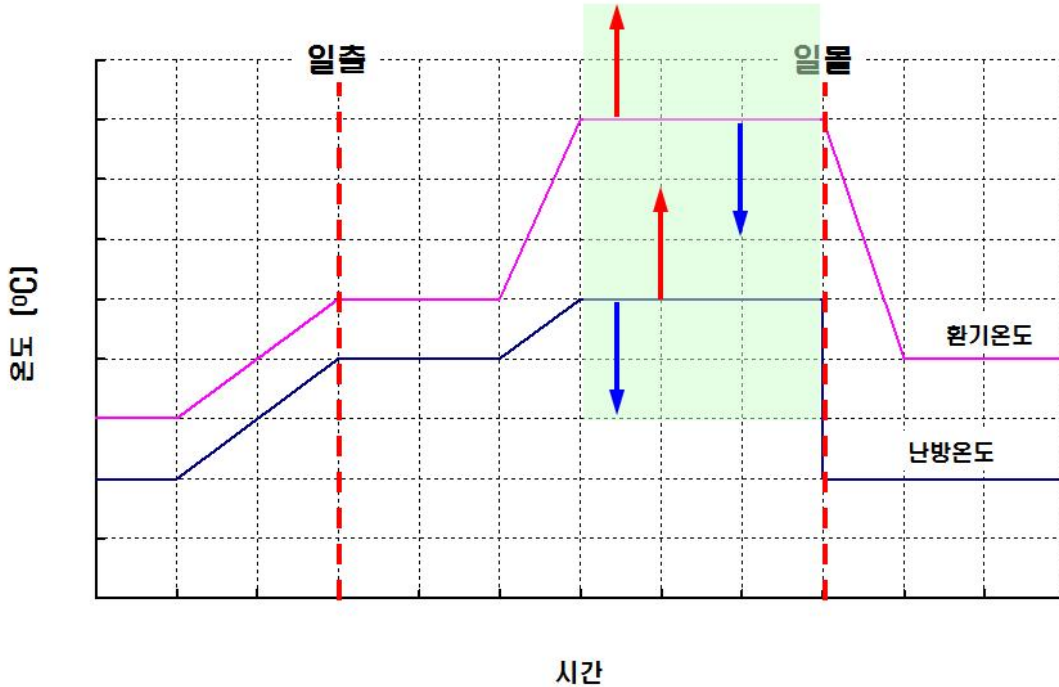


Fig. 3-31. Basic set point of heating and venting system based on sunrise and sunset.

- 품목에 따른 시설내부의 온도는 Fig. 3-31과 같이 환기온도와 난방온도를 설정한 이후 각 시간에 따른 시설내부의 습도, 이산화탄소 농도의 조절을 하며 광도와 광량에 따른 시설내부의 환기온도 증감시켜 준다.
- 시설내부의 작물에 결로 발생을 억제하기 위해서는 시설내부의 온도가 증가할 때 완만하게 증가시켜 줘야 한다. 예를 들어 일출전후 한 시간당 온도의 상승은 1°C씩 증가하도록 설정하고, 이후 식물체의 온도가 공기온도와 편차가 적고 내부의 습도가 하강하게 되면 온도 상승 폭을 크게 할 수 있다.
- 수경재배 딸기 재배에 있어 야간 난방온도는 6-7°C 설정하고 일출전 조조가온을 위해 한시간당 1°C 씩 증가시켜 주도록 난방온도를 설정한다. 일출 시 시설내부의 온도는 13°C를 목표로 하여 일출전 7-8시간 전부터 조조가온을 시작하여 과실, 딸기의 관부의 온도를 상승시켜 일출 후 시설내부의 온도가 급격히 상승되더라도 응결점이 낮아져 있기 때문에 과실에 결로가 발생될 확률이 낮아진다.

(다) 온실내부의 이산화탄소 농도 설정

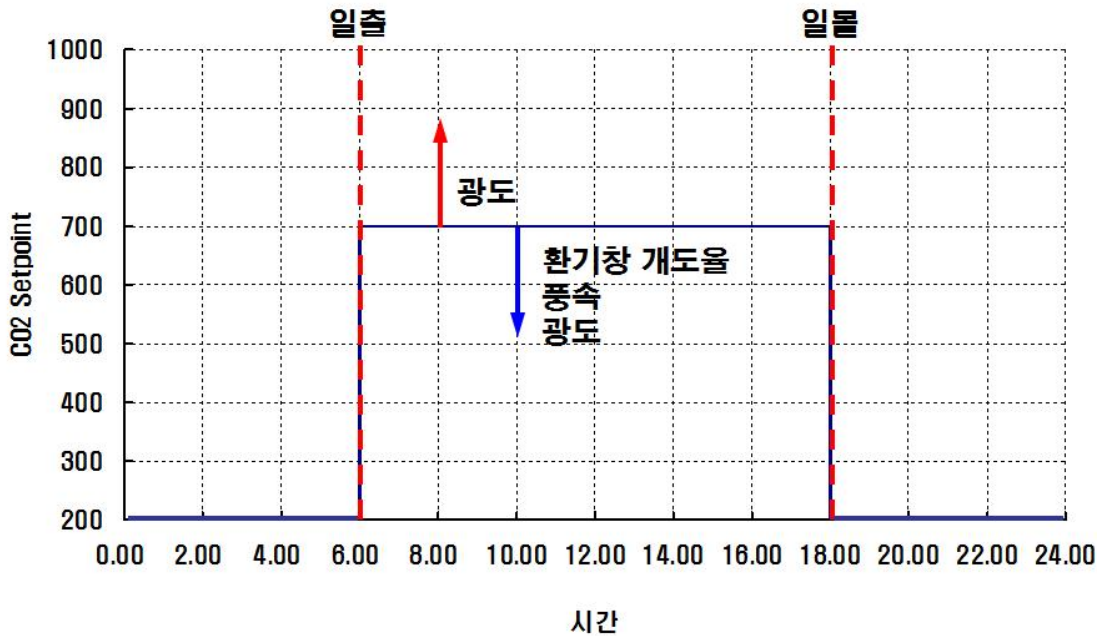
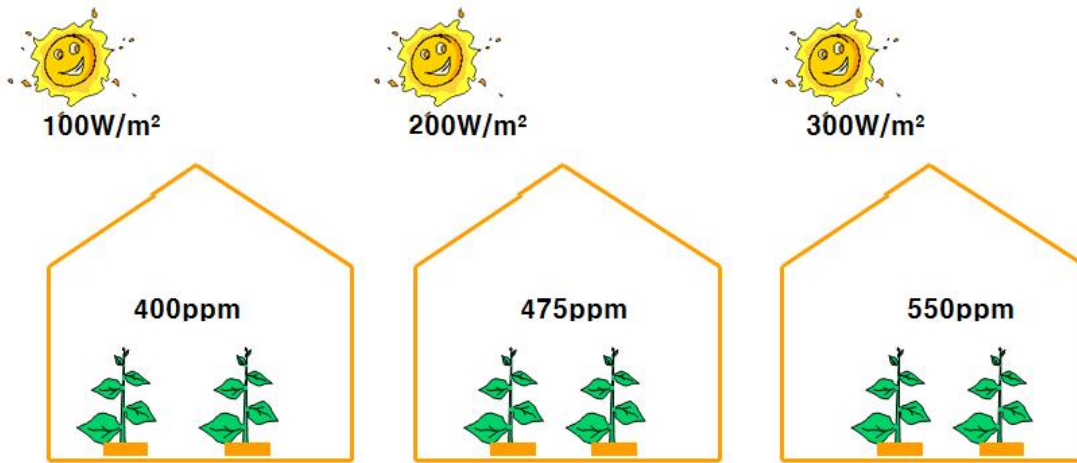


Fig. 3-32. Basic set point of CO₂ concentration during day time with influenced variables of vent position, light intensity, and wind speed.

- 시설내부의 이산화탄소의 농도는 일출 후 급격히 감소하게 된다. 반면 광도가 낮아 지는 일몰전의 경우 시설내부의 이산화탄소 농도가 온실내에 있는 작물의 호흡에 의한 것과 작물의 광합성량이 줄어들어 광합성량보다 호흡량이 상대적으로 높기 때문에 농도가 증가 하게된다.
- 시설내부의 이산화탄소는 일출전까지 계속 증가하다가 일출 후 급격히 감소하게 된다.
- 야간의 이산화탄소는 환기창이 닫아져 있을 경우 일출 후 1시간에서 1시간 30분부터 공급할 수 있도록 제어기에 설정해 둔다.
- 기본 농도의 설정은 400-700ppm을 설정해 두며 농도를 낮게 설정할 경우 야간 온도가 높은 경우 수경재배 딸기의 경우 대략 외부 온도가 6°C 이상일 경우 400ppm, 4-6°C인 경우 600ppm 그 이하인 경우 700ppm으로 농도를 설정한다(Fig 3-28).
- 일출 후 이산화탄소 농도는 급격히 감소하므로 시설내부의 이산화탄소 농도가 400ppm 정도 도달하면 이산화탄소를 사용하기 시작한다.
- 반면 광도의 증가에 따라 시설내부의 온도가 증가 하게 되는데 광도는 높을수록 시설내부의 이산화탄소농도의 감소율은 높아지므로 1차적으로 광도에 의한 이산화탄소 농도의 감소보다는 환기창의 개도율에 따른 이산화탄소 농도를 감소시켜야 에너지를 절약할 수 있다.
- 0-10%의 환기율에 따라 환기창이 10%이상이 열리게 되면 대기중의 이산화탄소 농도와 동일 하도록 감소시켜 준다.

(라) 광도에 따른 이산화탄소 농도 설정

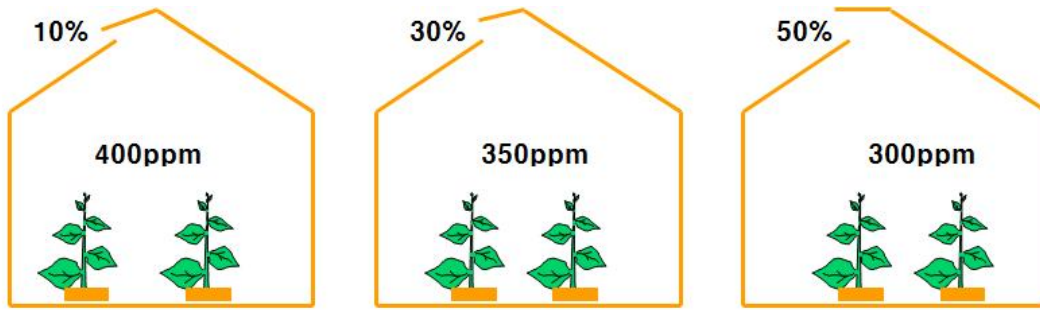


Set point [CO ₂] low	400ppm
Set point [CO ₂] high	800ppm
Start light influence [CO ₂]	100W/m ²
End light influence [CO ₂]	300W/m ²
Light influence [CO ₂]	150ppm

Fig. 3-33. Set point of CO₂ concentration influenced by light intensity(Kamp and Timmerman, 1996).

- 수경재배 딸기는 외부온도가 낮은 환경이 겨울철에 생산이 주로 이뤄지며 가격이 높은 시기이다. 때문에 품질의 증가를 위해 이산화탄소를 공급하여 주며, 이산화탄소 공시 시기는 광 환경에 따라 농도를 증가 시켜 줄 수있다.
- 광도에 따를 증가는 Fig. 3-33에서 보는 바와 같이 광영향을 받는 시점은 외부광도가 100W/m²에서부터 300W/m² 도달하게 되면 설정된 이산화탄소 농도를 150pp증가 시켜 주는 설정 방법이다.
- Fig.에서 외부 광도가 100W/m² 이하이면 최소 농도인 400ppm을 유지할 수 있도록 이산화탄소를 공급하고 외부 광도가 200W/m²이면 100과 300w/m²의 중간이기 때문에 증가 농도 150ppm의 50% 정도를 기본 농도에 더해 400ppm+75ppm으로 설정값이 475ppm으로 된다.
- 외부 광도가 300W/m²에 도달하게 되면 추가 농도 150ppm을 기본 설정농도 400ppm에 합산하여 550ppm 으로 공급할 수 있도록 설정값이 광도에 영향을 받게 된다.
- 반면 외부광도가 증가하게 되면 시설내부의 온도가 증가하여 이산화탄소 농도의 설정은 환기창의 개도율에 영향을 받게 설정한다(Fig. 3-34)
- Fig 3-34는 환기창의 개도율이 10%부터 50%까지 도달할대 기본 농도 설정값인 400ppm에서 50%이상이면 기본 농도에서 100ppm을 낮춰주는 설정이다. 환기창개도율 10%에서 50%의 중간인 30%인 경우 감소 농도가 50%이므로 기본 농도 400ppm-50ppm인 350ppm으로 설정

값이 변경되면 50% 부터는 100ppm을 뺀 300ppm으로 설정값은 변경된다.



Set point [CO ₂] low	400ppm
Start Vent position [CO ₂]	10%
End vent position [CO ₂]	50%
Vent influence [CO ₂]	100ppm

Fig. 3-34. Set point of CO₂ concentration influenced by vent position(Kamp and Timmerman, 1996).

(마) 일반적인 시설내부의 이산화탄소 농도에 의한 상대적인 생산량

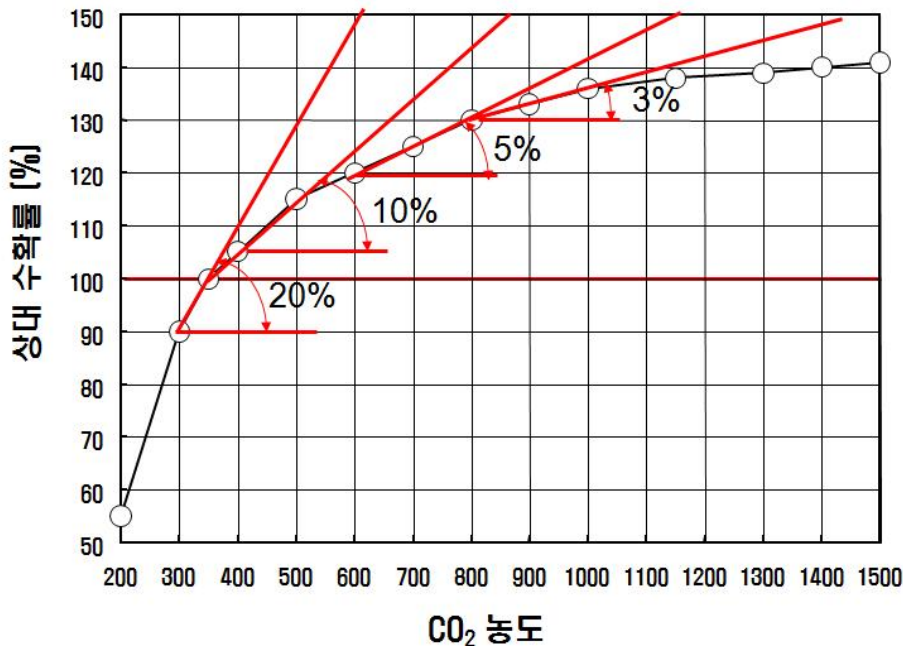


Fig. 3-35. Relative production to CO₂ concentration.

Fig 3-35.는 작물 재배시 시설내부의 주간 평균 CO₂ 농도를 일정하게 유지 시키고 장기간 그 농도를 유지하였을 경우 이산화탄소 농도에 따른 생산량을 시뮬레이션한 조건이다. 광량이 600W/m² 조건에서 이산화탄소 농도를 350ppm을 100% 수확하였다면 장시간 주간 평균 이산화탄소 농도가 낮아지게 되면 생산량이 급격히 감소한다. 예를 들어 기준 농도 350pp에서 시설 내부의 이산화탄소 농도가 50pp 감소하게 되면 수량은 10% 포인트 감소하게 된다. 반면 기준

농도 350ppm에서 50ppm 증가하게 되면 상대적인 생산량은 10%이상 증가 하게 된다. 하지만 온실내부의 농도가 높은 조건에서의 이산화탄소의 증가율에 따라 상대적인 수확량은 그리 증가하지 않게 된다. 예를 들어 350ppm 에서 450ppm으로 100ppm 증가하게 되면 수확량은 10% 포인트 증가하지만, 600ppm에서 700ppm으로 동일하게 100ppm 증가하게 되면 5% 포인트 증가하게 된다. 이와 같이 이산화탄소 적정한 농도는 광도가 높은 경우 생산량은 증가하나 이산화탄소 시용효율은 낮아지고 이산화탄소에 사용되는 비용은 증가한다.

(바) 일반적인 이산화탄소 시용에 대한 농가들의 오류

많은 생산자들이 오전의 광합성효율이 높고 오후에 광합성 효율이 낮기 때문에 오후의 광합성은 중요하지 않는다고 한다. 광합성 효율과 광합성량과는 다르다. 광도가 증가할수록 광합성량은 증가하지만 광에대한 광합성 효율은 낮아진다. 하지만 재배적인 측면에서의 태양광을 이용하는 경우 광합성량이 최대로 유지하는 것이 중요하다. 모든 작물은 일출 후 즉시 증산작용을 하게 되고 기공을 열려 외부공기중의 이산화탄소와 증산을 통한 수증기가 기공을 통해 교환이 이뤄진다. 또한 이러한 현상은 일몰되기 전까지 지속되므로 광합성이 되는 모든 시간에 이산화탄소는 공급하는 것이 옳다. 일반적으로 이산화탄소 시용은 일출 후 시설내부의 CO₂ 농도가 급격히 감소하게 되는 시점에서 공급하며 (일출 후 1시간에서 1시간 30분 경), 일몰 2시간전에 종료한다.

호린날의 이산화탄소의 시용을 미비한 효과가 있다. 이유는 증산작용이 약하고 광선이 부족하여 기공이 개도율이 낮기 때문에 가스교환속도가 늦어진다. 특히 직화식의 경우 내부의 유해가스가 증가할 수 있으므로 반드시 환기창을 5% 정도 열어 둔 상태에서 이산화탄소를 공급하는 것이 작물에게 유리하며, 또한 연소시 발생하는 수증기를 외부로 방출시킴으로써 시설내부의 습도를 낮게 유지 기공의 개도율을 증가시켜 이산화탄소와 수증기가 기공을 통해 교환될 수 있도록 촉진시켜 준다.

(사) 시설내부 환경조절과 이산화탄소 시용

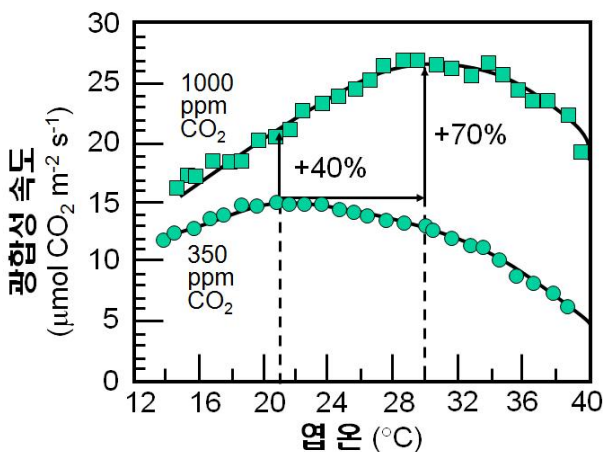


Fig. 3-36. Leaf photosynthesis to leaf temperature at saturated light condition (PTC⁺, 2005)

Fig. 3-36은 광포화점에서 엽온에 따른 엽광합성 속도에 미치는 영향이다. $1000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광량자속밀도하에서의 CO_2 농도 350ppm에서는 21°C 에서 최적 광합성 속도를 나타낸다. 동일 한 온도에서 CO_2 농도 1000ppm에서는 40% 엽광합성이 증가하고 엽온 30°C 에서 가장 높은 광합성 속도를 나타낸다고 보고되고 있다.

온실에서 작물을 재배하고 이산화탄소를 시용하는 경우 단순히 CO_2 의 농도에 의한 조절보다는 시설내부의 온도 조건에 맞게 조절되어야 한다. 뿐만 아니라 작물의 재배온도는 식물의 발육 속도에 영향을 미치므로 호냉성 작물의 경우 주간에 환기를 과도하게 하게 되면 24시간 평균 온도가 낮아져 생육이 저조해 진다.

딸기의 경우 오전의 온도가 높게 되면 야간온도가 낮게 관리되기 때문에 과실과 관부 및 엽의 온도가 일출시 낮게 되며 공기의 온도가 급격히 상승하게 됨으로써 과실과 관부에 아래 엽에 결로가 발생되어 잿빛곰팡이 발생율이 높아진다. 즉 오전에는 환기를 천천히 하면서 개도율이 10%이내 일 경우 이산화탄소를 시용하고 시설내부의 습도가 감소와 온도가 증가함에 따라 개도율이 증가되므로 이산화탄소 농도를 대기 중의 농도와 유사하게 관리하다가 환기창이 닫아 지는 오후에 이산화탄소를 높게 유지한다. 겨울철에 오후 1시 30분경부터 환기창을 닫고 시설 내부의 온도가 25도 까지 유지할 수 있도록 환기창을 닫고 이산화탄소를 최대한 시용하는 것이 광합성량과 수량 및 품질을 증대 시킬수 있다. 햇빛이 시설내부로 유입되는 조건에서의 오후에는 온도가 높게 유지 하고 딸기의 발육속도 및 이산화탄소를 최대한 시용하여 축열조의 열을 저장하고 연소된 가스는 시설내부로 유입시켜 일중 광합성량을 증가시켜 준다.

다. 시험결과 요약

- 연소가스를 이용한 이산화탄소 공급은 작물의 광합성을 촉진시킬 수 있지만, 난방요구도가 낮은 계절의 경우 광도, 외부온도, 환기창의 개도율에 따른 농도 감소를 크게 하면 일출 후 매우 짧은 시간동안 만 공급되기 때문에 이산화탄소 시용효과가 거의 나타나지 않았다.
- 수경재배 딸기의 경우 외부온도가 낮은 겨울철의 경우 환기창의 개도율을 낮게 하여 이산화탄소 농도를 높게 설정하게 되면 과실의 당도의 향상시켰으며, 과실의 크기는 크게 영향을 주지 않았다.
- 딸기의 경우 이산화탄소 농도가 높아지더라도 화방당 화수의 증가는 나타나지 않고, 과실의 크기는 미약하게 증가한다. 반면 과실의 탄수화물의 농도가 미약하게 증가한다. 외부 온도가 높은 시기에는 과실의 당도를 향상시켰다.
- 파프리카의 경우 착과수와 수확과수에 본 실험에서는 유의적인 차이는 나타나지 않았고, 영양생장량이 처리구에 미약하게 높게 나타났다.
- 하계 멜론 재배에서의 연소가스를 이용한 이산화탄소 공급은 과실이 무게와 볼륨을 증가시켰다.
- NO_x , CO , SO_2 가스 농도별처리에서 엽의 H_2O_2 의 농도가 높아지며 산화작용이 농도가 높을 수록 증가하였으며, 색소체의 농도를 감소, 기공의 공변세포의 손상이 기공이 밀폐되었다.

3. 축열/난방 시스템 개발 및 사업화

가. 연구개발 내용

- 농가 현장검증
- 최종 시스템 문제점 수정보완 및 개발품 설계확정 및 최종시제품 제작

나. 농가 현장검정

(1) 실험 준비

- 3년차 현장적용실험은 전남 담양군 봉산면 와우리 8**3번지의 임** 농가의 600m² 단동 비닐하우스의 양액재배 딸기 온실에서 실시하였다.
- 2년차 결과보고에서 밝힌바와 같이 아래 사진과 같은 시스템을 설치하였으며, 1~2년차와 다른점은 CO₂의 공급방식을 관수튜브를 이용한 방식에서 팬코일 유닛의 팬을 이용하여 송풍방식으로 공급하였다.

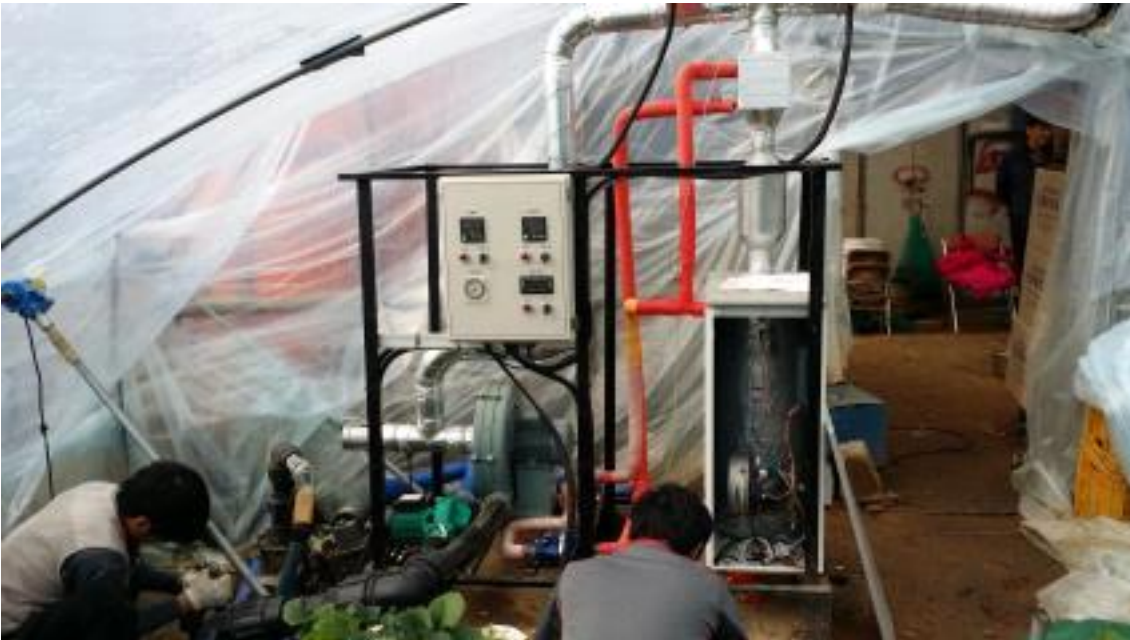


Fig. 3-37. 봉산면 와우리 소재 딸기 비닐하우스(600m²)에 설치된 시스템

- 2년차 연구를 통해 개발된 시스템의 현장적용 시험을 위해 600m² 비닐하우스의 비교실험을 실시하였다. 재배는 겨울 축성작형으로 9월초에 양액재배 시스템에 정식되었으며, 600m² 1개동은 본 시스템을 통해 난방 및 CO₂ 공급을 실시하였으며, 본 시스템과의 비교검토를 위해 인접한 600m² 비닐하우스를 대조구로 비교하였다.

- 대조구의 비닐하우스는 같은 사양의 비닐하우스이며, 난방은 수막을 통해 난방을 하는 방식이었다.

- 1, 2 연구개발과 다른 점은,

① 온수저장탱크 단일화 → 1년차 개발시에 보일러 온수와 배기열 회수 온수를 별도로 저장하였으나 별도의 저장탱크 설치에 따른 비용절감을 위해 단일화 시킴

② CO₂ 공급방식 → 1, 2년차에는 CO₂ 공급방식을 고압송풍팬과 레이저 타공 관수튜브를 이용하여 시설내부에 확산시켰으나, 팬코일유닛의 팬이 공기순환을 시키는 역할을 해주므로 3년차 시설에서는 팬코일 유닛의 송풍팬에 관로를 연결하여 시설 내 공급하는 시스템으로 변경하였다.(Fig. 3-37 참조)

③ 배출가스의 Full plugging 테스트 → 3년차 시험초기 배기가스의 완벽한 정화를 위해 Pull plugging한 필터를 사용하고, 배기쪽에서 흡기팬을 설치하여 배압을 통해 흡기하므로서 필터를 통과시키고자 하였다. 그러나 시험결과 필터의 차압이 너무 심해 정상적으로 배기되지 않아 보일러가 꺼지는 현상이 발생하였으며, 지속적으로 흡기량을 조절하여 시험하였으나 개선되지 않아 결국 half plugging으로 교체하여 배기하였다.



Fig. 3-38. 딸기 수경베드 하부에 설치된 팬코일 유닛 및 송풍장치

- Fig. 3-38은 벤치식 양액재배 베드 하단부에 난방 열교환기인 팬코일 유닛을 설치하여 온수배관을 연결한 것이며, 비닐하우스 한중상에 설치하여 양끝으로 공기가 순환되게 설치하였다. 온수를 통해 열교환된 공기를 이용하여 난방을 하며, 함께 배관된 CO₂ 관로를 통해 배기가스가 공급되어 시설내부 전체적으로 CO₂가 확산될 수 있도록 하였다. 또한 공기순환의 목적으로도 사용할 수 있어 적절한 공기의 유동을 통해 광합성 및 증산 촉진, 습도조절, 시설내 미기상 개선 등의 효과를 가져 올 수 있었다.



Fig. 3-39. 송풍팬 근처에 설치한 CO₂ 공급 관로 배관

- Fig. 3-39처럼 시설중앙에 설치된 팬코일 유닛의 흡기부에 CO₂ 관로를 배관하여 팬을 통해 순환되게 하였으며, Fig. 3-39의 비닐튜브가 비닐하우스 전체적으로 온풍과 공기순환, CO₂ 공급을 담당하게 된다.



Fig. 3-40. 팬코일 유닛의 송풍팬을 이용한 온풍 순환 및 CO₂ 공급



Fig. 3-41. 실험온실내 환경측정을 위한 Weather station 및 Data logger

- Fig. 3-41과 같이 시설내부의 환경측정을 위해 기상환경측정장치(weather station)와 데이터 저장장치(Data logger)를 설치하여 실험기간중의 환경변화를 측정하였다. 측정내용은 내외부 온도 및 습도, CO₂농도, 일사량 등을 측정하였다.

(2) 시설내부 환경 변화 측정

- 시설 내부 환경측정기를 이용하여 CO₂ 처리구와 대조구의 시설내 환경을 측정한 결과는 다음과 같다. 다음 Fig. 3-42는 2월 23일 모든 시스템 설치후 가동상황을 테스트 하기위해 CO₂ 농도에 의한 제어가 아닌 30분마다 타이머에 의해 가동하여 7회 동안 가동한 결과를 나타낸 것이다. 매회 가동시 300ppm정도씩 상승하는 것을 볼 수 있었으며, 시작 시 700ppm정도에서 최대 3200ppm까지 상승하였다. 이후 일출후 광합성을 시작하고 측창환기를 시작하면서 급격하게 감소하여 대기농도인 380ppm 부근까지 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있었다. CO₂를 처리하지 않은 대조구의 CO₂ 농도는 큰 변화 없이 500~650ppm정도에서 환기를 개시하는 10시이후에 350ppm 정도로 변화하였다.

- 시설내 광환경은 최고 550W/m² 정도이며, 이는 시설내 2중비닐의 피복과 3년정도 사용된 비닐피복으로 투과도가 매우 낮아 외부의 광에 비해 약 40% 정도 투과감소를 보이는 것이다.

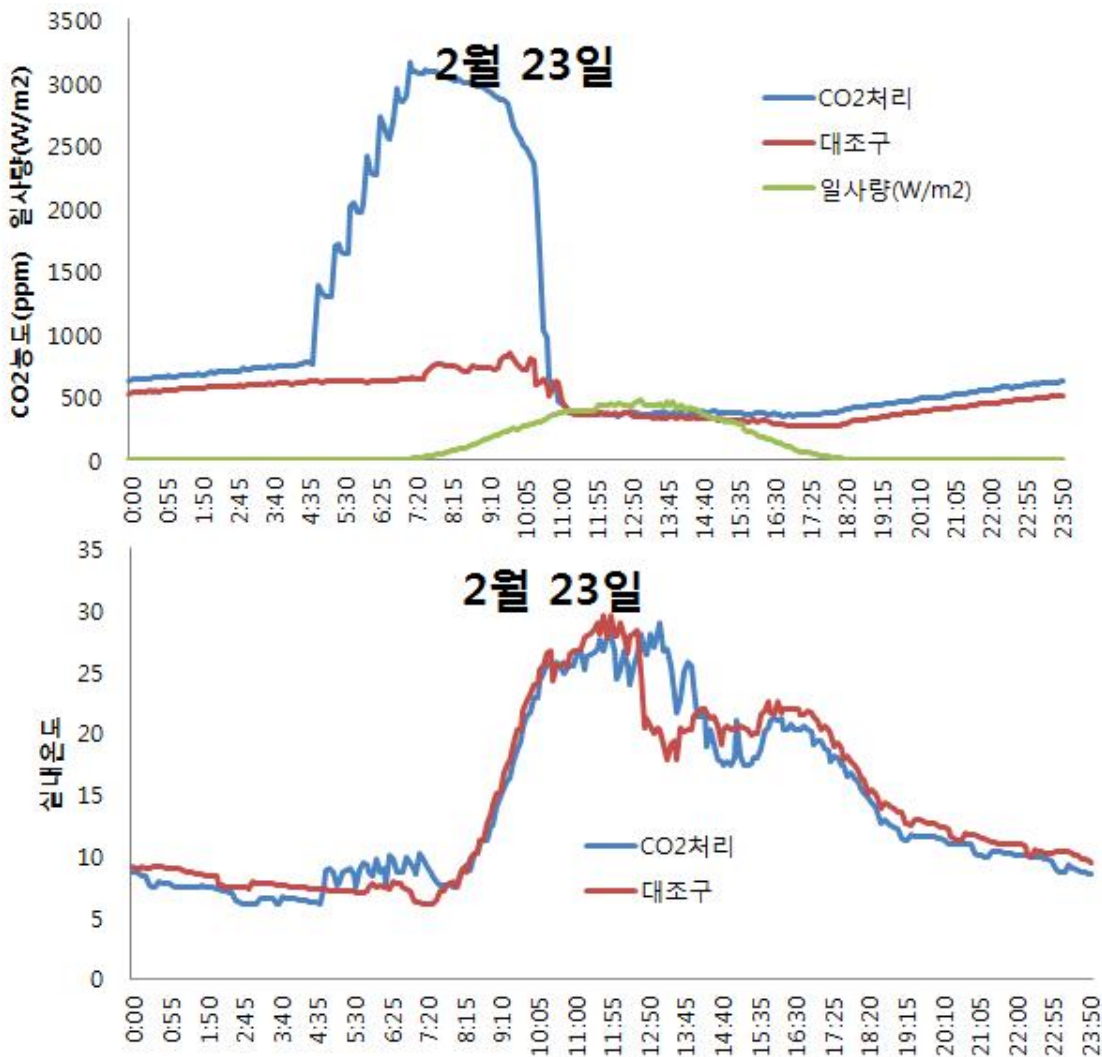


Fig. 3-42. 2월 23일 시설내 환경 변화

- Fig. 3-42의 시설내 온도환경은 보면 대조구와 CO₂ 처리구가 큰 차이를 나타내는 것은 아니

지만 보일러 가동시 배기가스가 정화되어 시설내부로 들어오면서 약 2도정도의 변화폭을 보였다. 일출후 급격하게 온도가 상승하여 9시 30분~10시경에 측창환기를 약 15~20℃ 정도에 실시하게 되는데 최대 28도까지 상승하는 것을 볼 수 있었다. 2월 23일의 시험가동시에는 처리구간 온도차이는 보일러가동시 나타나는 순간적인 온도상승 이외에는 큰 차이가 없었다.

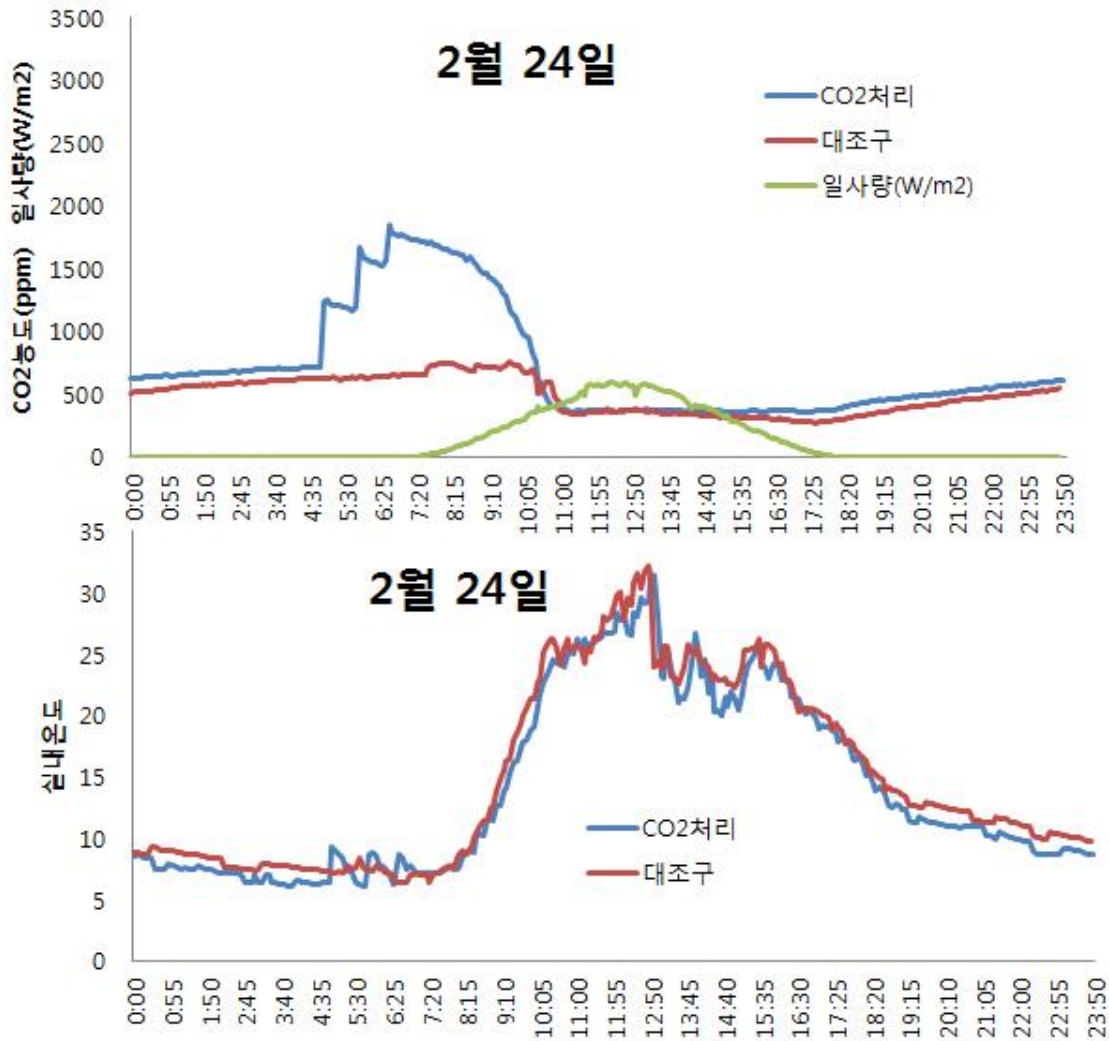


Fig. 3-43. 2월 24일 시설내 환경 변화

- Fig. 3-43은 23일 시험을 바탕으로 CO₂ 농도조절을 위해 가동횟수를 3회로 조절하여 CO₂ 상승폭을 조사하기 위하여 시험가동한 결과를 나타낸 것이다. 광합성에 의한 소비가 없는 새벽 4시 50분에 가동을 시작하여 1시간 간격으로 실시하였다. 4시 50분 시작시 단 5분 가동만에 약 500ppm이 상승하였으며, 6시 30분 3회차 작동시에 1840ppm까지 상승하였다. 가동시마다 300~500ppm의 CO₂ 농도가 상승하였으며, 해가 뜬 7시 20분 이후 점차 감소하다가 8시 이후 급격한 감소를 보인다 환기를 위해 측창을 개방하는 10시 이후에 대기의 농도와 같아지는 수준으로 변화하였다. 만약 측창환기를 하지 않았다면 대기수준 이하로 감소하였을 것이다.
- 시설내부 온도환경 변화는 처리구간 크게 차이를 나타내지 않았으며, 최저기온은 6.1℃ 까지 하강하였다. 시설내 온도환경의 경우 보일러 가동시 CO₂ 실내 유입으로 인해 2~3℃ 정도의 순간

적인 상승이 있었으나 크게 영향을 미치지 못했다.

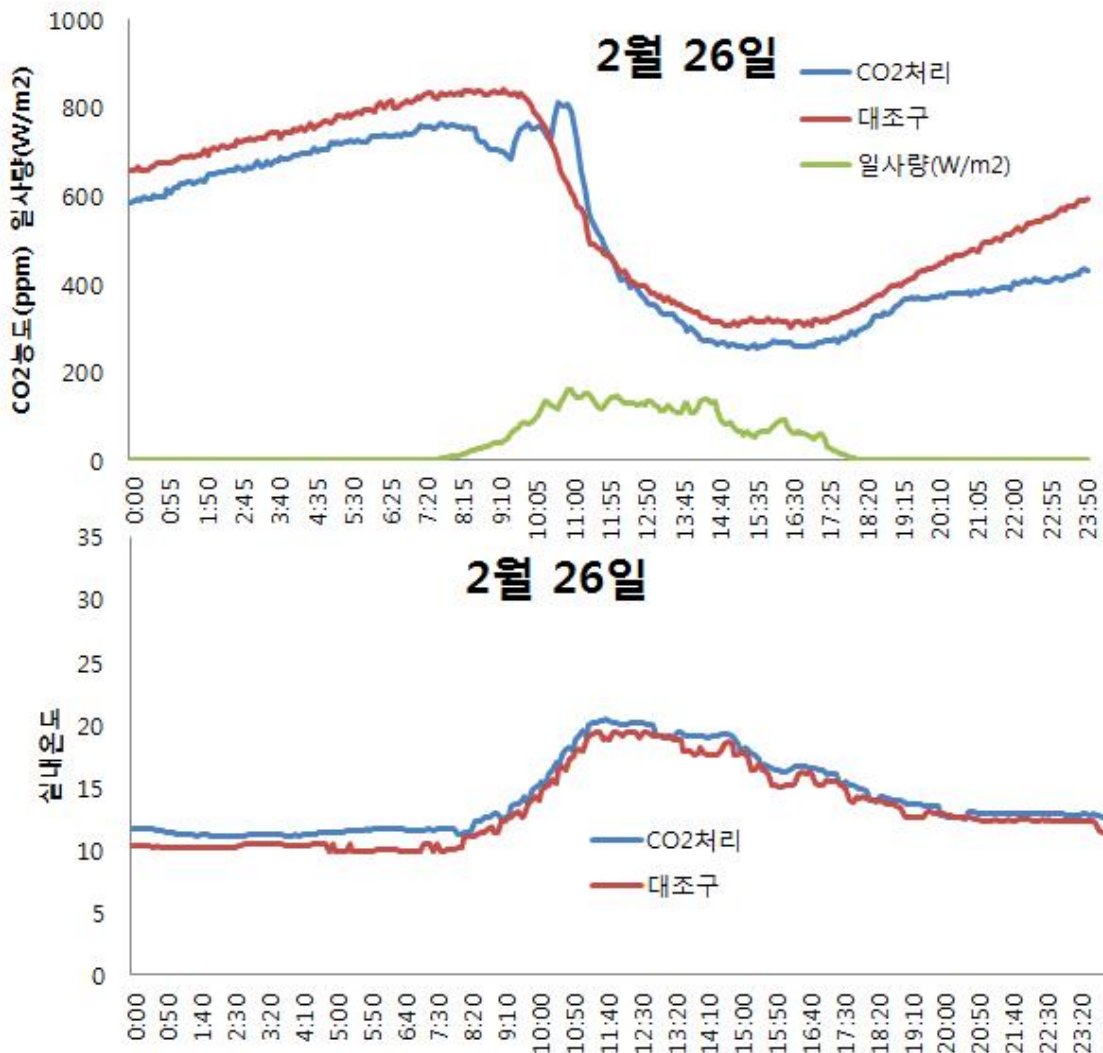


Fig. 3-44. 2월 26일 시설내 기상환경 변화

- Fig. 3-44는 2월 26일의 시설내 기상환경으로 이날은 매우 흐린 날로서 시설내부 광환경이 200W/m²을 넘지 못하는 수준으로 오후 1시경부터 비가 오는 왔으며, 오전에 안개와 박무가 계속된 날씨였다. 매우 불량한 광환경으로 시스템을 작동시키지 않은 상태에서의 기상환경을 지켜보았다. 자정 이후 아침 일출전까지 호흡에 의한 CO₂ 배출이 누적되면서 600ppm정도에서 800ppm정도까지 지속적인 상승이 이루어졌으나 광환경이 100W/m² 이상으로 올라가는 10시 이후에 대기농도인 350ppm정도까지 감소하였다. 이후 대기농도를 유지하다가 광환경이 100W/m² 이하로 떨어지자 점차 호흡에 의한 CO₂ 농도 집적이 시작되었다.

- 온도환경은 비가오지 않은 오전동안에는 약 8도 정도 상승하다가 이후 지속적으로 유지하면서 비가 오면서 서서히 낮아졌으며, 야간온도도 전일에 비해 15도 정도로 높게 유지되었다.

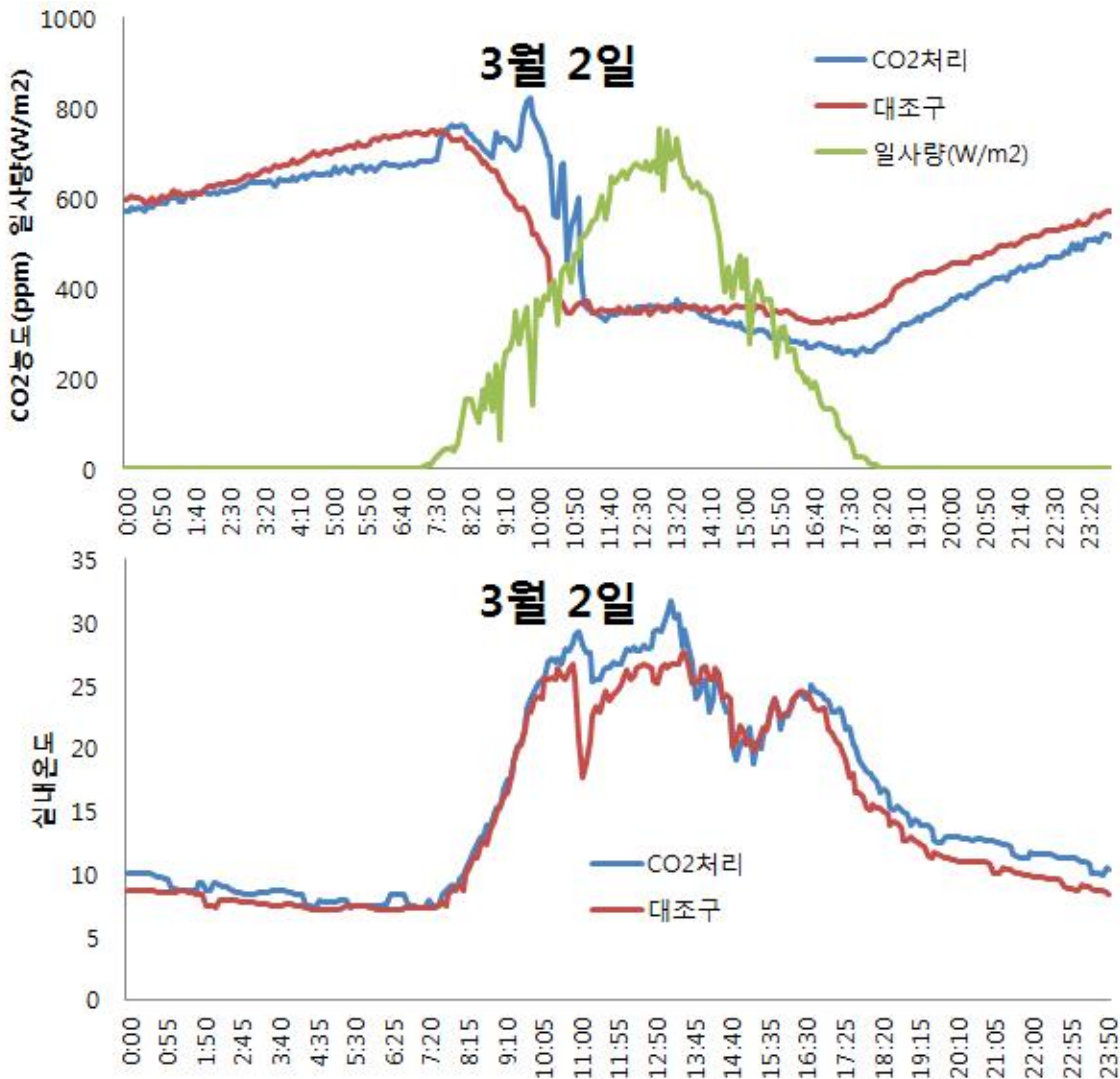


Fig. 3-45. 3월 2일 시설내 기상환경 변화

- Fig. 3-45는 날씨가 매우 좋아 광환경이 최고 680W/m²까지 상승하였으며, 이에따라 온도조건도 30℃는 넘어서는 날씨였다. CO₂ 농도는 야간 호흡에 의해 600ppm에서 700ppm까지 약 100ppm이 지속적으로 증가하다가 대조구의 경우 해가 뜨는 7시 30분 이후부터 10시경까지 급격하게 감소하여 350ppm까지 감소하였다. 그러나 CO₂ 처리구의 경우 7시 30분부터 가동이 시작되어 5회에 걸쳐 자동모드로 가동되어 환기가 시작되는 10시 30분에 가동을 멈추었다. 7시 30분부터 10시경까지 광합성량이 증가하는 시기로 이때 3회에 걸쳐 센서가 작동하여 가동되었으나 광합성에 의한 소비량이 많아 농도가 급격히 올라가지는 않은 것으로 나타났다. 특히 광환경이 400W/m²이상으로 증가하는 10시 이후에는 더욱 CO₂ 소비량이 늘어 가동 이후에도 목표로 하는 농도에 이르지 못하였으며, 특히 환기가 시작되어 더욱 목표치 농도를 도달하지 못하게 나타나는 것은 기상측정장치의 위치와 시스템의 센서위치가 달라서이며, 센서는 800 ppm으로 설정되어있어 시스템의 센서작동으로 자동으로 정지되어 이후 급격한 농도 저하로 피크형 그래프를 나타내었다.

- 온도환경은 11시경 환기에 의해 외부공기 유입으로 5도이상의 온도차로 급감하였으나 이후 서서히 증가하였고 오후에는 약간의 구름으로 인해 광환경이 낮아지고 이로인해 온도환경까지

낮아지는 경향을 보였다.

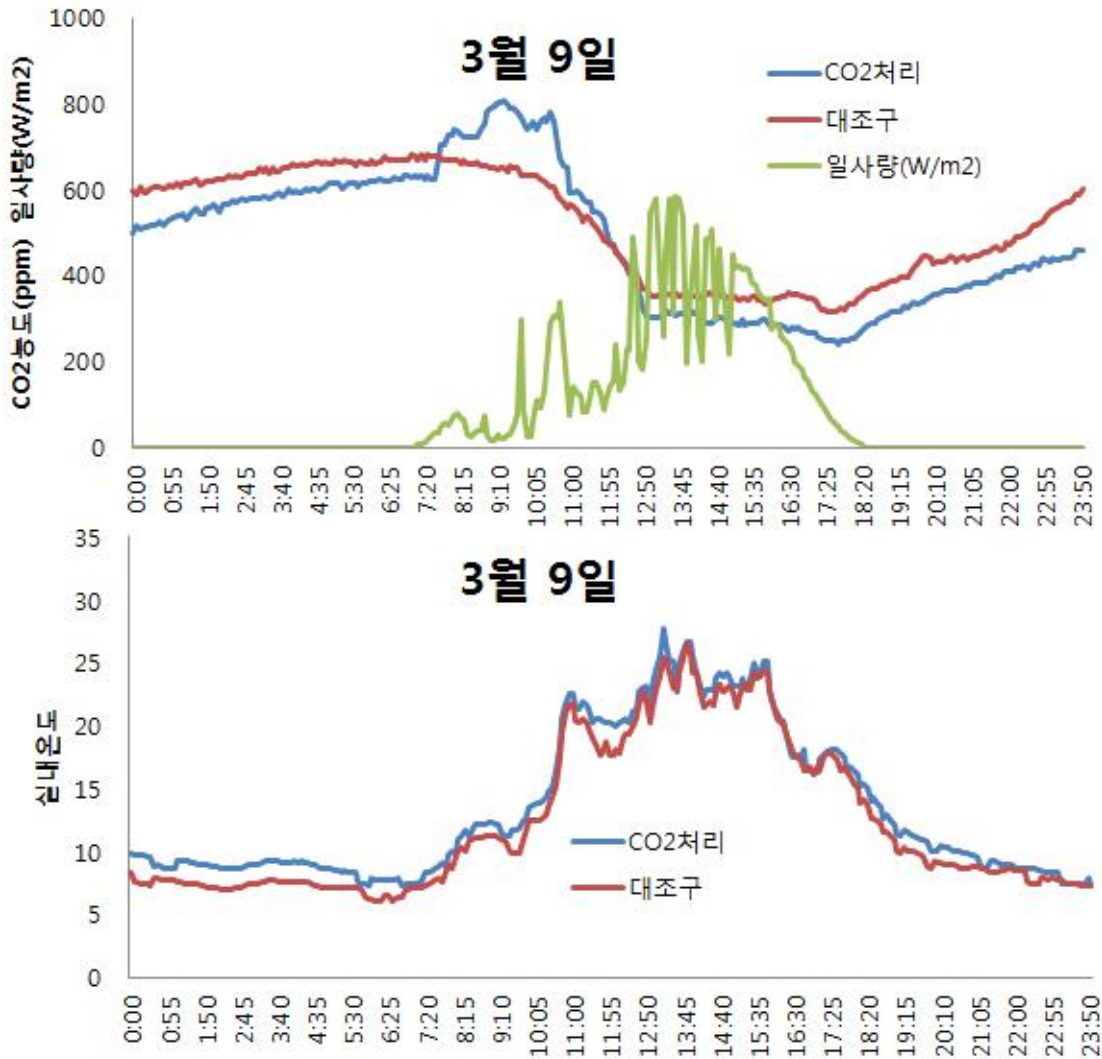


Fig. 3-46. 3월 9일 시설내 기상환경변화

- Fig. 3-46는 3월 9일의 시설내 환경변화로 이날은 구름과 햇빛이 교차하는 날로서 광환경 변화가 급격한 피크형을 나타내었다. 광량은 최대 580W/m²정도였으며, 구름이 햇빛을 가릴때마다 200W/m²이상의 차이로 급격히 광량이 떨어졌다. 시스템은 일출이후 아침 7시 30분경에 첫 가동되었으며, 야간동안 500~600ppm을 유지하다가 가동이후 목표치인 800ppm에 도달하였다. 4~5번의 가동이 있었으나 10시 이후 급격한 온도상승에 의해 측창을 열면서 외부공기의 유입이 시작되었으며, 11시 이후 약 2시간에 걸쳐 약 400ppm정도의 감소를 나타냈다. 측창이 열린 상태에서는 과도한 환기율에 의해 시스템이 가동하더라도 외부 유입공기에 의한 희석효과로 CO₂의 보급효과가 떨어지는 것으로 보였으나 농도로서 나타낼 수 없는 CO₂ 공급효과는 분명히 있을 것으로 사료되었다.

- 온도환경은 야간동안에 7~10°C 정도를 유지하였으며, 처리구에서 약 2°C 정도 높게 나타났으나 주간동안의 변화는 대조구와 처리구 모두 같은 온도의 변화패턴을 나타내었다.

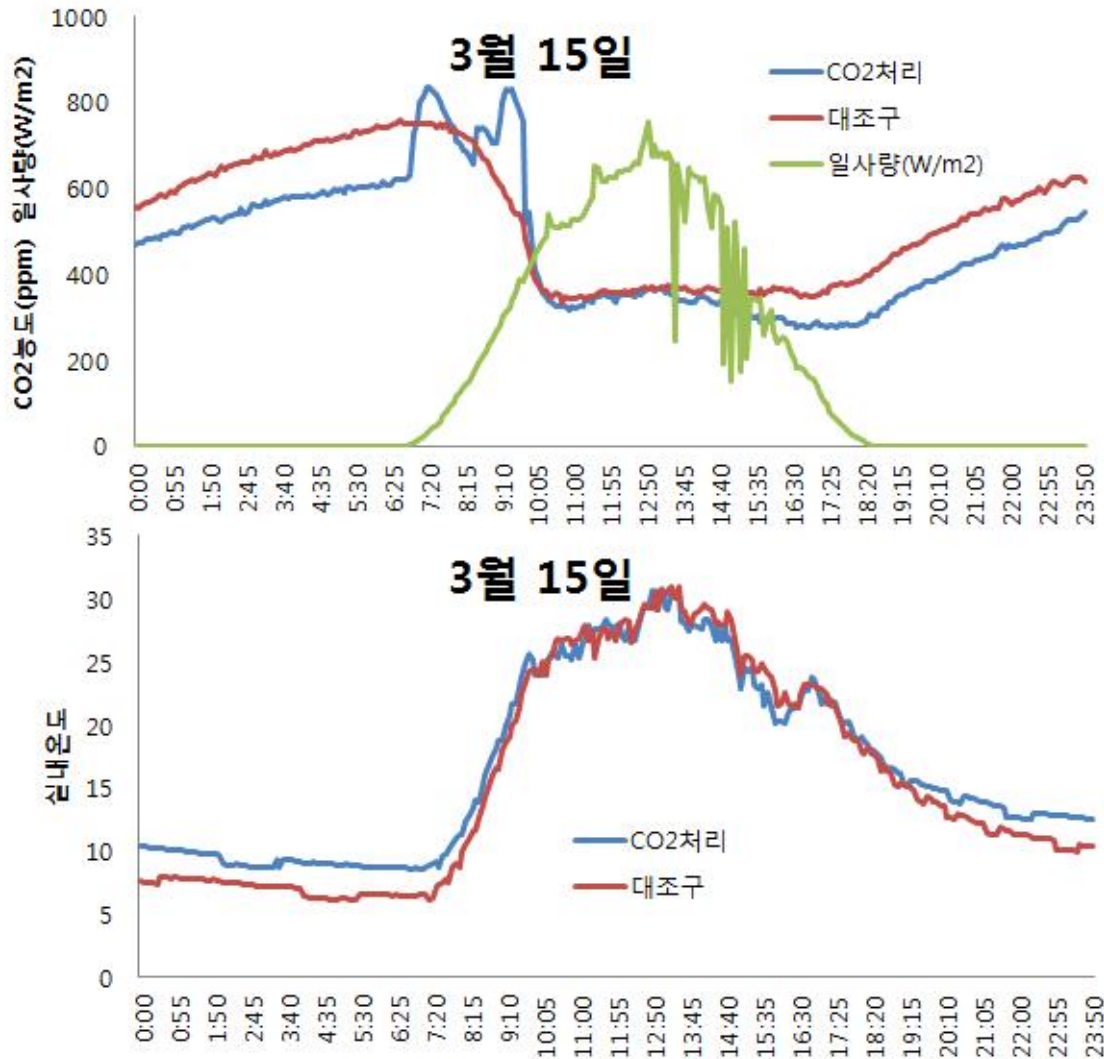


Fig. 3-47. 3월 15일 기상환경 변화

- Fig. 3-47은 3월 15일의 기상환경 변화를 나타낸 것이다. 3월 15일은 기상상태가 매우 좋은 하루였으며, 오후 약간의 구름이외에는 매우 청명한 날로서 일사와 함께 온도조건도 매우 좋은 하루였다. CO₂ 처리는 아침 7시경에 시작되어 4회정도 가동되었으며, 가동시 600~800ppm 구간을 반복한 것으로 나타났다.

- 높은 일사량 때문에 온도가 급격히 상승하여 오전 10시 이전에 25도까지 상승하여 환기가 시작되었으며, 환기의 시작과 함께 380ppm까지 급격하게 떨어졌다. 환기가 계속된 오전 10시부터 오후 4시까지는 환기로 인해 거의 대기상태의 CO₂ 농도가 유지되는 것을 볼 수 있었다.

- 시설내부의 온도도 10시 이전에 이미 25°C를 넘어섰으며, 최고 32°C까지 상승하였다. 급격한 온도의 상승으로 환기창을 최대로 개방하였으며, 낮의 복사열 영향으로 야간온도의 상승이 나타났다.

- 이상으로 나타난 시설내부의 기상환경변화로 볼 때 일반적으로 딸기 온실에서 야간의 CO₂ 농도는 500~600ppm 정도였으며, 주간에는 환기창을 열었을 시에는 350~400ppm 정도를 나타내었다.

- 딸기온실이 대부분 본 시험장소와 유사한 600m²형 단동 비닐하우스인데 이러한 시설의 경우 측창환기시 외부의 공기유입이 매우 빨라 급격한 환경변화를 보이는 것으로 나타났다. 온실의 폭이 6~6.5m이며, 환기창의 개방폭이 약 0.8~1m에 이르러 환기시 내부공기 교환율이 매우 높은 것으로 나타났다.
- 개발 시스템은 아침 일출이후 광합성에 의한 CO₂ 농도가 떨어지기 시작하기 전에 가동을 시작하도록 시간설정을 통해 작동되도록 하였다. 이에 따라 보통 7시~7시 30분 정도에 가동을 시작하였으며, 작동구간은 최대 800ppm에서 멈추고, 최저 600ppm에서 작동되도록 하였는데, 가동 후 약 5~10분 이내에 목표농도에 도달하는 것으로 나타났다.

다. 최종 시스템 문제점 수정보완 및 개발품 설계확정 및 최종시제품 제작

(1) CO₂ 발생기 상용화(1800m²형)

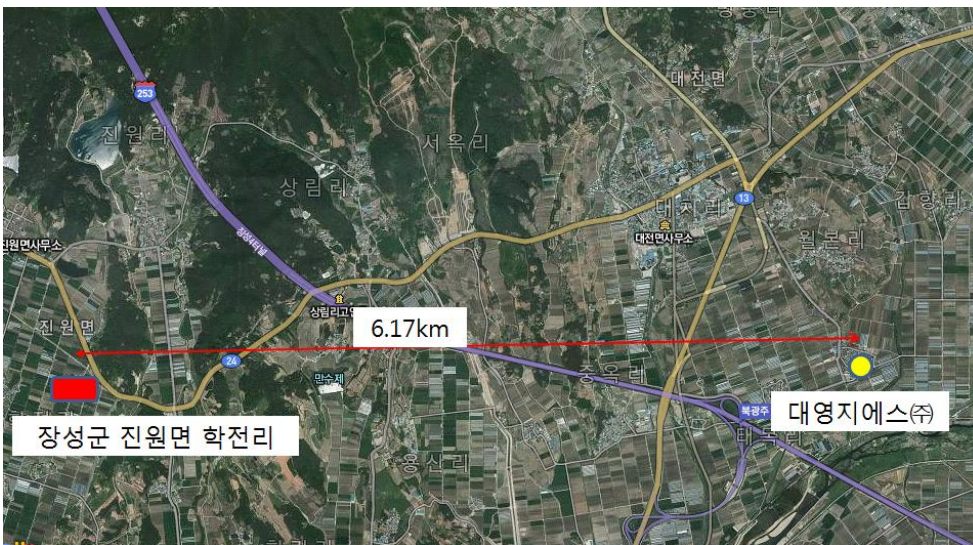


Fig. 3-48. 3년차 시험대상 온실 위치



Fig. 3-49. 3년차 시험대상 온실의 위치(1,800m²)

- 2년차에 개발되어 3년차에 시험한 시스템은 600m²형을 기준으로 시험한 것이었기에 대부분의 농가가 1800~3000m² 이상인 대부분의 농가에서는 적용에 한계가 있다. 따라서 최종적으로 통상적으로 보급할 수 있는 1800m²형 시스템을 개발하였다.
- 시험장소는 Fig. 3-48, 49과 같이 전남 장성군 진원면 학전리 967번지의 신축 딸기온실 1800m²(600m² 온실 3 개동)으로 박건태 농가를 선정하여 실행하였다. 2014년도 사업으로 양액 재배 시스템을 신규로 설치하였으며, 9월 10일 자가 육묘한 묘로 정식이 이루어졌다.

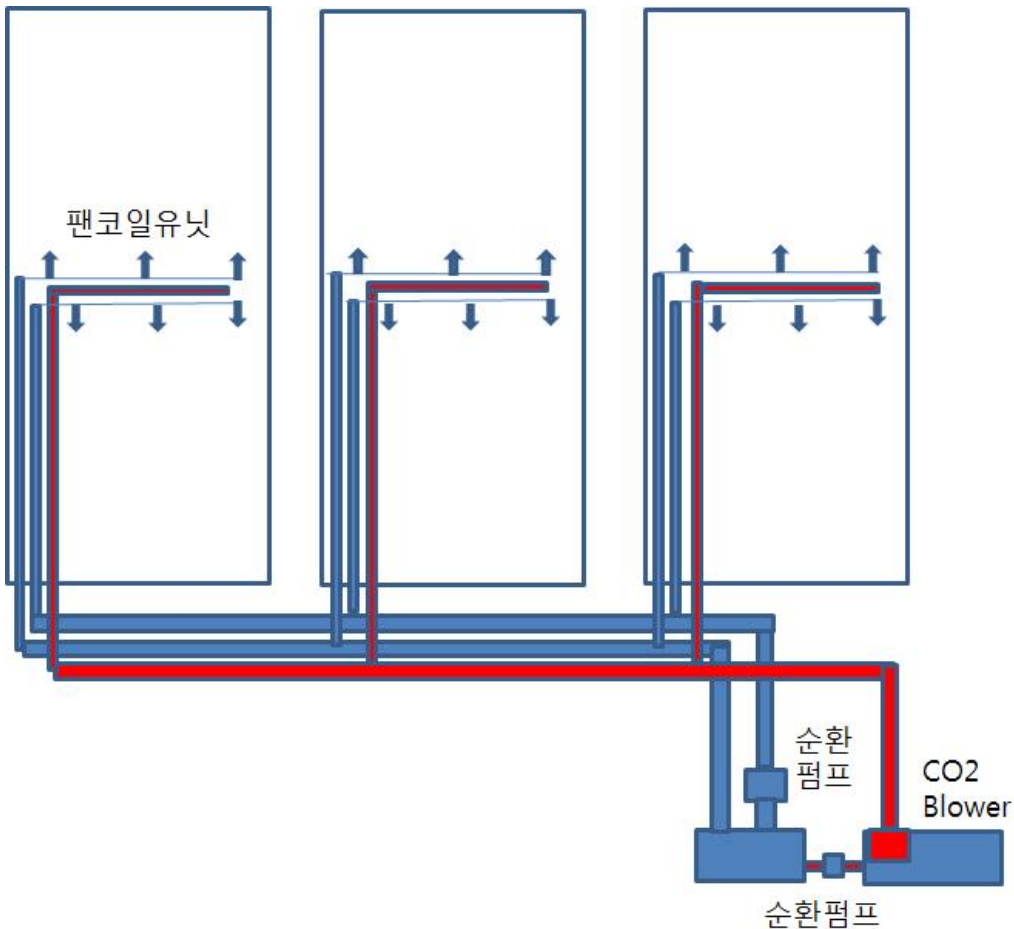


Fig. 3-50. 3년차 시험 온실의 배치도

- 600m² 형 3개동에 온수공급 및 회수 배관을 설치하고, 팬코일유닛을 1개동당 6개씩 온실의 한 중앙에 설치하여 양끝으로 공기를 순환시키는 방식을 택하였다. CO₂ 시스템은 온수배관과 함께 설치하여 팬코일 유닛의 송풍팬 앞으로 CO₂가 공급될 수 있도록 하였다.
- 사업화를 위한 CO₂ 발생기는 1800m² 형에 맞춰 발열량 약 500MJ/h로 하였으며, 보급형 시제품은 Fig. 3-51과 같다. 온수탱크는 농가의 설치장소와 Fig. 3-6의 열용량 예측결과를 반영하여 3톤 FRP탱크로 설치하였다.
- 본 시스템의 여름철 활용은 지하수를 이용한 냉방장치로서의 활용이 가능 할 것으로 본다. 지하수의 열원을 그대로 이용하여 시스템에 설치된 팬코일유닛을 통해 열교환시켜 여름철 고온기때 차광과 더불어 활용한다면 여름육묘시에 온도상승을 제한하여 건실한 육묘가 가능 할

것으로 본다. 단 팬코일 유닛을 통해 냉수를 순환시킬 때 모래여과기와 필터를 이용하여 이물질의 유입을 제한하여야 할 것이며, 특히 지하수에 철분이나 중탄산 함유량이 높은 지역은 이용에 유의하여야 한다. 팬코일 유닛에 철분이나 불순물이 집적하여 열교환 효율을 떨어뜨리며, 내구성이 낮아져 일찍 교환해야 하는 경제적 손실을 가져오게 될 것이다.

- 상업화를 위해 600m²와 1800m²의 두 가지 유형의 시스템을 개발하였으며, 면적에 따라 보일러의 사양이 더 큰 것으로 사용될 수 있으나 구성은 동일하게 적용될 것이다. 탱크의 용량과 펌프의 용량이 달라질 수 있으나 이는 현장의 상황에 따라 적용이 달라질 것이다.

- 상업화 모델(Fig. 3-51)을 위해 기술이전 업체인 다운테크와 협의를 통해 제작 및 설치비를 절감하고 현장에서의 작업소요가 감소할 수 있도록 추가적인 개발을 진행할 예정이다.



Fig. 3-51. 3년차 1800m²형 CO₂ 공급장치 개발 시제품

다. 시험 결과 요약

- 개발 CO₂ 발생기 시스템은 아침 일출이후, 7시~7시 30분 정도에 가동을 시작하였으며, 작동 구간은 최대 800ppm에서 멈추고, 최저 600ppm에서 작동되도록 하였는데, 가동후 약 5~10분 이내에 목표농도에 도달하는 것으로 나타났다.

- 보급형 CO₂ 발생기는 1800m² 형에 맞춰 발열량 약 500MJ/h로 하였으며, 온수탱크는 농가의 설치장소와 열용량 예측결과를 반영하여 3톤 FRP탱크로 설치하였다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

4-1 1 연구개발의 목표 및 연구 목표 달성도

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용 및 관련분야 기여도
1차 년도 (2012)	CO ₂ 발생기 및 축열/난방 복합 형 연소 시스템 의 구성 및 연소 제어장치 개발	○ CO ₂ 생성을 위한 버너 및 축열 시스템의 설계 및 제 작	100	- CO ₂ 생성을 위한 연소기 설 계 및 제작 - 축열시스템 설계 및 제작
		○ 연소기 배출가스 저감을 위한 촉매장치 개발	100	- 배출가스 저감을 위한 OC(산 화촉매)+MPF(입자상물질 저감 촉매) 촉매장치 개발
		○ 연소열 축열 시스템 설계 및 제작	100	- 연소열 축열시스템 설계 및 제작 - 축열용량 결정
		○ 열교환기 설계 및 제작	100	- 배기열 회수 열교환기 설계 및 제작 - 응축수량 측정
	수경재배 딸기 재배온실에 연소 및 축열 복합시 스템의 적용 및 유해가스 생육진 단	○ 소형 실험용 플라스틱 하 우스 제작 및 유해가스에 따른 피해증상 연구	100	- 연소 및 난방 시스템의 Parameter study를 위한 소형 플라스틱 하우스 제작 - 소형 챔버에 표준 가스 주입 을 통한 농도별 CO와 HC 공 급시 딸기 생리장해 연구
		○ CO ₂ 농도에 엽 또는 식물 광합성량 특성분석	100	- 일중광도에 따른 식물광합성 특성 분석 - 광도와 CO ₂ 농도에 따른 엽 광합성 특성 분석 - CO ₂ 농도에 따른 엽광합성 효 율 분석
		○ 유해가스에 의한 생리장 해 지표 개발	100	- CO와 HC의 농도가 딸기 어 린엽의 생리장해 영향 평가 - 연소시 생성된 PM이 작물 생 육에 미치는 영향 평가 - 온실 피복재 내부의 pH변화 모니터링
	축열/난방 시스 템 개발 및 사업 화	○ CO ₂ 발생기 및 축열/난방 복합형 연소시스템 설계	100	- CO ₂ 발생기 및 축열/난방 복 합형 연소시스템의 플라스틱 하우스 내 설치
		○ 배기관로 시스템 최적화	100	- CO ₂ 공급시 촉매의 온도가 일정온도에 도달전 대기중 방 출시스템 설계 및 제작 - 하우스내 CO ₂ 공급을 위한 blower 및 열교환기 설치

4-2 2

연구개발의 목표 및 연구 목표 달성도

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용 및 관련분야 기여도
2차 년도 (2013)	CO ₂ 발생기 및 축열/난방 복합 형 연소 시스템 의 구성 및 연소 제어장치 개발	○ 축열장치 및 CO ₂ 공급 최 적화 - 축열용량 및 공급 방법 최적화	100	- 시설하우스의 CO ₂ 농도 측정 (제2세부 및 협동과제 협력) - 1 일 중 CO ₂ 농도 소모 패턴 계산 - 딸기 재배를 위해 1000ppm의 CO ₂ 를 공급 방법 시뮬레이션
		○ CO ₂ 발생기 성능 향상 방 안 - 운전조건에 따른 CO ₂ 배출 특성 파악	100	- CO ₂ 발생기의 배출가스 측정 - 시설하우스의 공급열량 계산 - 시스템의 축열량 측정 및 배 출가스 중 응축수 배출량 측 정
		○ 배출가스 저감을 위한 축 매장치 평가 및 최적화	100	- CO ₂ 발생기의 배기 후처리장 치 성능평가 - 배출가스 배출특성 분석 - 배출가스 중 입자상물질(PM) 측정 - 최종 배기후처리장치 제안
	수경재배 딸기 재배온실에 연소 및 축열 복합시 스템의 적용 및 유해가스 생육진 단	○ CO ₂ 사용 유무에 따른 딸 기 생산량 및 품질 구성	100	- 기존 플라스틱 온실을 2구역 으로 나뉘어 시설 CO ₂ 공급 유무에 따른 생산량 및 품질 규명
		○ 유해 가스농도에 따른 생 리 장애 모니터링	100	- 밀폐된 공간에서의 CO, HC 농도에 따른 신엽의 생리 장애 영향 평가 및 농도에 따른 생리장애 정도
		○ CO ₂ 발생기 및 축열/난방 시스템의 적용 및 성능 개 선	100	- 외부온도에 따른 시설내부의 온도습도 변화 모니터링 - CO ₂ 공급시 광도 및 내외부 온도환경에 따른 온수온도의 변화 모니터링 및 분석 - 수경재배 딸기 생육단계에 따 른 일중 적정 CO ₂ 농도 변화 모니터링 및 CO ₂ 농도의 최 적화

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용 및 관련분야 기여도
2차 년도 (2013)	축열/난방 시스템 개발 및 사업화	○ 연소 및 축열시스템의 문제점 도출 및 시스템 제어 최적화	100	- CO ₂ 발생시간 조정 반영 - 흑한기 난방용량 부족시 축열 탱크 온도응답 가동 수정
		○ 전체시스템 제어 최적화, On-board system 설계 및 사용자 매뉴얼 작성	100	- 시스템의 최적화를 위해 각 장치의 모듈화 실시 - 환경제어기 없는 온실 대응을 위한 on-board 시스템 설계 - 현장검증 이후 시스템 보완후 매뉴얼 작성 - 사업화가 약간 미진함

4-3 3

연구개발의 목표 및 연구 목표 달성도

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용 및 관련분야 기여도
3차 년도 (2014)	CO ₂ 발생기 및 축열/난방 복합 시스템의 최종 평가	○ CO ₂ 농도 및 온도 특성 최적화	100	<ul style="list-style-type: none"> - 최적화된 CO₂ 발생기를 600m² 규모의 상용화된 플라스틱 온실에 적용하여 각 시스템에 대한 최종평가 - 후처리 장치 문제점 파악 및 보완 - 시설내부의 CO₂ 농도, 온도 및 유해가스 분석 - 온실 면적에 따른 연소식 CO₂ 공급장치의 적정 규모, CO₂ 시비 및 보조 난방을 위한 축열 저수조의 적정 용량 설정 기준 검토
		○ 시설하우스 환경 최적화	100	<ul style="list-style-type: none"> - 외부환경에 따른 시설내부의 기상환경(온도, 습도)분석 - 외부 온도에 따른 온수 및 온풍온도에 따라 시설내부의 온습도환경 분석
	수경재배 딸기 재배온실에 연소 및 축열 복합시 스템의 적용 및 유해가스 생육진 단	○ CO ₂ 시용 유무에 따른 실 증 농가의 딸기 생육 ,생 산량 및 품질 비교	100	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 플라스틱 온실을 2구역으로 나뉘어 시설 CO₂ 공급 유무에 따른 생산량 및 품질 규명 - 이산화탄소 시용에 따른 실 증 농가의 딸기 생육, 수량 및 과실의 품질(당도) 분석
		○ 하계고온기의 멜론, 파프 리카의 이산화탄소 시용에 따른 생육비교분석	100	<ul style="list-style-type: none"> - 수경재배 딸기 후작으로 멜 론과 파프리카의 재배와 시 스템의 활용도 증가시키 위 한 방안제시 - 고온기의 이산화탄소의 시용 에 따른 생리장해 모니터링
		○ 유해 가스농도에 따른 딸 기의 생리적 기능 장애모 니터링 및 물질 분석	100	<ul style="list-style-type: none"> - 과실의 아미노산의 이산화탄 소 공급에 따른 내적 품질 분석 - 연소가스 사용 기간에 따른 엽의 광합성 기능의 물질 분석 광합성능력 평가
		○ CO ₂ 발생기 및 축열/난방 복합시스템의 적용에 따른 제어 방법 매뉴얼 작성	100	<ul style="list-style-type: none"> - 외부환경요인에 따른 수동 및 자동 이산화탄소 농도 조 절을 위한 제어 방법의 매뉴 얼 작성 - 복합환경조절시스템의 이산 화탄소 최적제어를 위한 설 정값 결정 매뉴얼 작성

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
3차 년도 (2014)	축열/난방 시스템 개발 및 사업화	○ 농가 현장검증	100	<ul style="list-style-type: none"> - 600m² 수경재배 딸기 온실 임대 운영 - CO₂ 공급 및 축열난방 시스템 가동 - 대조구 온실과 비교를 위한 환경측정 - 대조구 온실과 생산성 비교
		○ 최종 시스템 문제점 수정 보완 및 개발품 설계확정 및 최종시제품 제작	100	<ul style="list-style-type: none"> - 현장검증에서 나타난 문제점 도출 및 시스템 설계 보완 - 개발품 설계 확정 및 출시용 시제품 제작 및 전시회 참석 홍보
		○ 사용자 매뉴얼 제작		<ul style="list-style-type: none"> - 사용자 매뉴얼 작성

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

5-1 실용화·산업화 계획(기술이전실시)

- 등록된 특허(등록번호 10-1361152 (등록일자 2014.2.4.), 식물 재배용 이산화탄소 발생 장치를 2014년 4월 1일자로 다운테크에 기술이전함.
- 기술이전 조건은 기술이전료 4,000,000원에 통상실시료 매출액의 3%로 함.

5-2 교육·지도·홍보 등 기술확산 계획

- 기존 액체형 이산화탄소 보급에 비해 에너지 절약, 에너지 유효이용, CO₂ 유효이용 측면에서 친환경적인 면을 부각하여 홍보하고, 장비 보급을 위한 홍보를 추진할 예정임.
- 예산이 허락한다면 이동형 소형 시스템을 구성하여 기술전시회 등에 참여하면 더욱 좋은 홍보가 될 것으로 생각함
- 딸기 밴드를 이용한 시설내부의 이산화탄소 시용 및 시스템 홍보(실증농가 자료)
- 시설내부의 최적환경 조절을 위한 수경재배 농가의 겨울철 온도, 환기 관리 방법 교육 (참여 업체 대영 GS의 딸기 농가의 모임을 통한 교육)

5-3 특허, 논문 등 지식재산권 확보계획

가. 특허

- (1) 등록번호 10-1361152 (등록일자 2014.2.4.), 식물 재배용 이산화탄소 발생 장치
- (2) 출원번호 10-2013-0115298 (출원일자 2013. 9.27), 내연기관을 이용한 독립적 식물공장

나. 논문

- (1) CO₂ 발생기 기술의 학문적 위치가 애매하여 SCI(E) 저널에 여러번 투고하였으나, 내용 불일치로 거절을 당하여서 최종적으로 논문 내용을 기계공학 기본으로 수정한 후 대한기계학회 영문 논문지 JMST(Journal of Mechanical Science and Technology)에 투고하여 논문 게재가 판정을 받고 출판 대기 중임.

Emission and Heat Recovery Characteristics of Combustor-type CO₂ Generator with an After-treatment Device and Regenerative Heating Device for Greenhouses, JMST(Journal of Mechanical Science and Technology), accepted.

- (2) 시설 과채류 재배용 연소형 CO₂ 발생기 및 축열 시스템 개발(한국생물환경조절학회, 춘계 공동학술발표논문집, 제21권 1호, 2012.6)
- (3) 광도, 이산화탄소 농도와 온도가 딸기 ‘설향’의 광합성 특성에 미치는 영향(한국원예학회, 원예과학기술지, 제30권 별호 2, 2012.10)
- (4) 그늘림의 정도가 딸기 ‘설향’의 광합성 특성에 미치는 영향(한국원예학회, 원예과학기술지, 제30권 별호 2, 2012.10)
- (5) Combusted source of CO, NO_x, CH₄ and C₃H₈ reduces photosynthesis in leaves of strawberry plants(*Fragaria* × *ananassa*)(한국원예학회, 원예과학기술지, 제31권 별호1, 2013.5)

- (6) Effect of CO₂, NO_x and SO₂ on free amino acid composition of strawberry plants(*Fragaria × annasa*) determined by gas chromatography with flame ionization, 한국원예학회, 원예과학기술지, 제31권 별호2, 2013.10.
- (7) 온실용 연소기형 이산화탄소 발생기의 배기 및 열회수 특성, 한국동력기계공학회 2013년도 추계학술대회, 2012.11.
- (8) 온실용 축열 연소기형 이산화탄소 발생기의 배기 및 열회수 특성, 한국동력기계공학회 논문집 18-4, 2014-8.
- (9) PM 정도에 따른 딸기 엽광합성 특성에 관한 연구(국내논문 투고예정)
- (10) 이산화탄소 농도가 따른 딸기 식물 광합성에 미치는 영향(국내논문 투고예정)
- (11) 유해가스 노출 시간에 따른 엽의 스트레스 및 틸라코이드단백질에 미치는 영향(SCI 투고예정)

5-4 추가연구, 타연구에 활용 계획

- 기 개발된 제품의 기본 제어프로그램은 개발되었으나 시설내부의 설치된 복합환경조절 시스템과 연동될 수 있는 프로토콜의 개발이 필요함

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 2nd Joint Workshop of US-ASIA TransTech R&D Cluster

July 11th - 12th, 2013
Argonne National Laboratory, 9700 South Cass Avenue,
Bldg. 401/E1100, Argonne, IL 60439, USA

참가하여 자동차용 PM-NO_x 동시저감 후처리장치의 동향에 관한 결과를 발표함.

July 11th (Thursday)

Topic: PM Emissions Characterization and Aftertreatment Systems
(Moderator: Kyeong Lee, Principal Research Engineer, Argonne)

8:30 AM Pick up Gate Pass (Bldg. 224 at North gate - Visitor Reception Center)
Coffee with Refreshment

9:00 AM Welcome speech

- *Argonne Introduction: Pam Sydelko, Deputy Associate Laboratory Director, Argonne*
- *DOE Aftertreatment System Program: Ken Howden, Manager, U.S. DOE Office of Vehicle Technologies*
- *Argonne's Transportation R&D: Larry Johnson, Former Director of Transportation Technology R&D Center*

9:35 AM INVITED TALK

- *David Kittelson, Professor, University of Minnesota*

10:20 AM "Morphological and Nanostructural Examinations of Particulates from Gasoline Direct Injection Engines: Effects of Fuel, Injection Timing and Air/Fuel Ratio" (35 minutes)

- *Heeje Seong, Research Staff, Argonne*

10:55 AM *Coffee Break with Refreshment*

11:10 AM "Progress of DME Fuel Standardization with Investigation of PM Emitted from a DME Powered Diesel Engine"

- *Mitsuharu Oguma, Combustion and Engine Research Team Lead, Advanced Industrial Science and Technology (AIST)*

11:45 AM "Development of Electric Heating System to Melt the Frozen Urea Solution for the Urea-SCR System on Commercial Vehicles" (35 minutes)

- *Chunhwan Lee, Director of Diesel Hybrid Research Center, Korea Automotive Technology Institute (KATECH)*

12:20 PM *Lunch and Poster Session*

1:50 PM "Characteristics of Spark-Ignition Engine Particulates"

- *David Rothamer, Professor, University of Wisconsin-Madison*

2:25 PM "Simultaneous Removal of NO_x and PM by Using a Combined System of LNT/CDPF and SCR/CDPF for Diesel Engines"

- *Byungchul Choi, Professor, Chonnam National University*

3:00 PM "Visualization of Soot Trapping and Oxidation in Particulate Filters for GDI Engine Application"

- *Seungmok Choi, Research Staff, Argonne*

3:35 PM *Coffee Break with Refreshment and Poster Session*

4:05 PM “Oxidation of Soot on the Surface of Membrane Filter made of SiC Nanoparticles with a Thin Oxide Layer including a Pt Nanoparticle”
- *Katsunori Hanamura, Professor, Tokyo Institute of Technology*

4:40 PM “Introduction of KATECH’s Exhaust Gas Simulator and its Application to Development of Aftertreatment System”
- *Chunbeom Lee, Executive Director, Korea Automotive Technology Institute (KATECH)*

5:15 PM DISCUSSIONS – Discuss research directions with comments from industry
(Moderator: *Kyeong Lee, Principal Research Engineer, Argonne*)

6:00 PM End of first day meeting

July 12th (Friday)

Topic: Fuel Sprays and Engine Combustion

(Moderator: *Thomas Wallner, Principal Mechanical Engineer, Argonne*)
Coffee with Refreshment

9:00 AM “Fuel Injection Studies using X-Ray Diagnostics”
- *Christopher Powell, Principal Engine Research Scientist, Argonne*

9:30 AM “Consideration of Direct Injection for Thermal Efficiency Improvement in a Compressed Natural Gas Engine” (30 minutes)
- *Seoksu Moon, Research Scientist, Advanced Industrial Science and Technology (AIST)*

10:00 AM “Gasoline Compression Ignition – A Promising Technology for High Efficiency, Low Emission Power for Transportation”
- *Stephen Ciatti, Principal Mechanical Engineer, Argonne*

10:30 AM *Coffee Break with Refreshment and Poster Session*

11:00 AM “Emission Characteristics of Dual-Fuel Combustion in a CI Engine” (30 minutes)
- *Kyoungdoug Min, Professor, Seoul National University*

11:30 AM “Effect of Fuel Molecular Structure on NO_x and Soot Emissions in Flames” (30 minutes)
- *Suresh Aggarwal, Professor, University of Illinois-Chicago*
Noon *Lunch and Poster Session*

1:30 PM DISCUSSIONS – Discuss research directions with comments from industry (45 minutes)
(Moderator: *Kyeong Lee, Principal Research Engineer, Argonne*)

2:15 PM **LAB TOURS**

Advanced Photon Source (APS)

- *Christopher Powell*

Center for Transportation Research (CTR)

- *Ann Schlenker; Stephen Ciatti; Steven McConnell; Thomas Wallner; Kyeong Lee*

우리와 직접적인 관련 정보는 많지 않지만, 배출가스 중 입자상물질제거 장치(CDPF, catalyzed diesel particulate filter)에 관한 최근 정보를 얻음

제 7 장 연구시설·장비 현황

도입한 시설 및 장비 없음

제 8 장 참고문헌

(2장)

- 0-1. 비닐하우스 수막재배 기술, 농촌진흥청 원예연구소, 11-1390191-000129-01, 2007.
- 0-2. 박종석, 신중화, 안태인, 손정익 “연소식 CO₂ 발생기 사용시 온실 내 CO₂ 및 유해가스 농도 분석” , Journal of Bio-Environment Control, pp. 177-183, 2010.
- 0-3. 연구보고서, “신소재 상변화물질(PCM253)을 이용한 농업용 잠열축열식 난방기 개발” , 농림부, 2007.
- 0-4. 이동원, 조수, 장철용 “축열 시스템의 종류 및 열에너지 공급시스템에서의 역할” 한국태양에너지 학회 추계학술대회 논문집, pp. 141-147, 2008.

(제3장)

- 1-1) Wills, R.B.H., Kim, G.H., 1995. Effect of ethylene on postharvest life of strawberries. Postharvest Biol. Technol.6, 249 /255.
- 1-2) Justin Donald Hogan, 2008 Ethylene production as an indicator of stress conditions in hydroponically-grown strawberries, PhD Dissertation, Marshall University.

- 2-1. Kim SH, Gitz DC, Sicher RC, Baker JT, Timlin DJ, Reddy VR, Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂, Environ. and Experiment. Botany, 2007;61: 224-36.
- 2-2. Ghannoum O, Phillip NG, Conroy JP, Smith RA, Attard RD, Woodfield R, Logan BA, Lewis JD, Tissue AT, Exposure to preindustrial, current and future atmospheric CO₂ and temperature differentially affects growth and photosynthesis in Eucalyptus, Global Change Biology 2010;16:303-19.
- 2-3. Kang KH, Kweon KB, Choi YH, Kim HT, Rhee HC, Effect of NaCl stress on the growth, photosynthetic rate and mineral uptake of tomato, red pepper, and egg plant in pot culture, J. of Bio-Environment Control, 2002;11:133-38.
- 2-4. Rhee HC, Cho MW, Lee SY, Choi GL, Lee JH, Effect of salt concentration in soil on the growth, yield, photosynthetic rate, and mineral uptake of tomato in protected cultivation, J. of Bio-Environment Control, 2007;16:328-32.
- 2-5. S. H. Han, Kim DH, Kim GN, Lee JC, Changes on growth, photosynthesis and pigment contents of the Maackia amurensis and Viburnum opulus var. calvescens under enhanced temperature and CO₂ concentration, Korean J. of Agricultural and Forest Meteorol., 2011;13:115-22.
- 2-6. Park JS, Shin JW, Ahn TI, Son JE, Analysis of CO₂ and harmful gases caused by using burn-type CO₂ generators in greenhouses“, J. of Bio-Environment Control, 2010;19:177-83.
- 2-7. Son JE, Park JS, NO₂ absorption and physiological response of lettuce in a semi-closed plant production system, J. of Bio-Environmental Control, 2001;10:207-12.
- 2-8. Shimaji H, Complex control of the environment and energy conservation technology: Greenhouse horticulture handbook 5th ed. by Japan Greenhouse Horticulture Association, Agri press, Tokyo, 2003:206-16.
- 2-9. Koltsakis GC, Katsaounis DK, Markomanolakis IA, Samaras ZC, Naumann D, Saberi S,

- Böhm, A, Metal Foam Substrate for DOC and DPF Applications, SAE Technical paper 2007-01-0659.
- 2-10. Gong C, Huang K, Deng B, Liu X, Catalyst light-off behavior of a spark-ignition LPG (liquefied petroleum gas) engine during cold start, *Energy* 2011;36:53-9.
- 2-11. Kim HN, Sung YH, Jung KS, Choi BC, Lim MT, Size distributions and number concentrations of particles from the DOC and CDPF, *J. of Mechanical Science and Technol.* 2008;22:1793-99.
- 2-12. Compernelle T, Witters N, Passel SV, Thewys T, Analyzing a self-managed CHP system for greenhouse cultivation as a profitable way to reduce CO₂ emissions, *Energy* 2011;36: 1940-47.
- Ahmad A, Abdin MZ. 2000. Photosynthesis and its related physiological variables in the leaves of *Brassica* genotypes as influenced by sulphur fertilization. *Physiol Plant* 110: 144-149
- Anderson CA. 1984. Development of leaf water deficits in detached green and lime-chlorotic leaves of seedlings from populations of *Eucalyptus oblique* L' Herit. *Plant Soil* 77:171-181
- Armstrong GA, Hearst JE. 1996. Carotenoids 2: Genetics and molecular biology of carotenoid pigment biosynthesis *The J of Fed of Amer Soci for Exper Biol* 10: 228-237
- Arnon JD, Israelstam GF. 1979. Copper enzymes in isolated chloroplast oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol* 42: 287-292
- Bailey JK, Schweitzer JA. 2010 The role of plant resistance and tolerance to herbivory in mediating the effects of introduced herbivores. *Biol Invasions* 12: 337-351
- Bedard K, Krause KH. 2010. The NO_x family of ROS generating NADPH oxidase: physiology and pathophysiology. *Phy Rev* 87: 245-313
- Briat JF, Curie C, Gaymard F. 2007. Iron utilization and metabolism in plants. *Current Opin in Plant Biol* 10: 276-282
- Compernelle T, Witters N, Passel SV, Thewys T, Analyzing a self-managed CHP system for greenhouse cultivation as a profitable way to reduce CO₂ emissions, *Energy* 2011;36: 1940-47.
- Demetriou G, Christina N, Eleni N, Kiriakos K. 2007. Salt stress impact on the molecular structure and function of the photosynthetic apparatus—The protective role of polyamines. *Biochemica et Biophysica Acta* 1767: 272-280
- Dulak J, Jozkowicz A. 2003. Regulation of vascular endothelial growth factor synthesis by nitric oxide: facts and controversies. *Antiox Redox Signal* 5:123-132
- Fernandez V, Eichert T, Del Rio V, Lopez-Casado G, Heredia-Guerrero JA, Anunciacion A, Heredia A, Abadia J. 2008. Leaf structural changes associated with iron deficiency chlorosis in field-grown pear and peach: Physiological implications. *Plant Soil* 311:161-172
- Ghannoum O, Phillip NG, Conroy JP, Smith RA, Attard RD, Woodfield R, Logan BA, Lewis JD, Tissue AT, Exposure to preindustrial, current and future atmospheric CO₂ and temperature differentially affects growth and photosynthesis in *Eucalyptus*, *Global Change Biology* 2010;16:303-19.
- Gladon RJ, Staby GL. 1979. Carbon monoxide formation in tomatoes. *J Amer Soc Hort Sci*

104: 74-76.

- Gong C, Huang K, Deng B, Liu X, Catalyst light-off behavior of a spark-ignition LPG (liquefied petroleum gas) engine during cold start, *Energy* 2011;36:53-9.
- Guo H, Sun Y, Qin R, Keyan ZS, Le K, Chenzhu W, Chuanyou L, Feng Ge. 2012. Elevated CO₂ Reduces the Resistance and Tolerance of Tomato Plants to *Helicoverpa armigera* by Suppressing the JA Signaling Pathway. *Plos One* 7: e41426
- Han SH, Kim DH, Kim GN, Lee JC, Changes on growth, photosynthesis and pigment contents of the *Maackia amurensis* and *Viburnum opulus* var. *calvescens* under enhanced temperature and CO₂ concentration, *Korean J. of Agricultural and Forest Meteorol.*, 2011;13:115-22.
- Halitschke R, Baldwin IT. 2004. Jasmonates and related compounds in plant insect interactions. *J Plant Growth Regul* 23: 238-245
- Hiscox JD, Israelstam GF. 1979. A method for interaction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Can J of Bot* 57: 1332-1334
- Hogan JD, 2008 Ethylene production as an indicator of stress conditions in hydroponically-grown strawberries, PhD Dissertation, Marshall University.
- Hutchinson TC. 1970. Lime chlorosis as a factor in seedling establishment on calcareous soils. II. The development of leaf water deficits in plants showing lime chlorosis. *New Phytol* 69: 143-157
- Imsande J. 1999. Iron-sulfur clusters: Formation, perturbation, and physiological functions. *Plant Physiol and Biochem* 37: 87-97
- Johnson DE, Ward GM. 1996 Estimates of animal methane emissions. *Environ Monit Assess* 42: 133-141
- Kader AA, Chastanger GA, Morris LL, Ogawa JM. 1978. Effects of carbon monoxide on decay, physiological responses, ripening, and composition of tomato fruits. *J Amer Soc Hort Sci* 103: 665-670
- Kamp PGH and Timmerman GJ, 1996. Computerized environmental control in greenhouse, a step by step approach. IPC-plant, ISBN 90-75627-01-7. 273p.
- Kang KH, Kweon KB, Choi YH, Kim HT, Rhee HC, Effect of NaCl stress on the growth, photosynthetic rate and mineral uptake of tomato, red pepper, and egg plant in pot culture, *J. of Bio-Environment Control*, 2002;11:133-38.
- Kim SH, Gitz DC, Sicher RC, Baker JT, Timlin DJ, Reddy VR, Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂, *Environ. and Experiment. Botany*, 2007;61: 224-36.
- Kim HN, Sung YH, Jung KS, Choi BC, Lim MT, Size distributions and number concentrations of particles from the DOC and CDPF, *J. of Mechanical Science and Technol.* 2008;22:1793-99.
- Koltsakis GC, Katsaounis DK, Markomanolakis IA, Samaras ZC, Naumann D, Saberi S, Böhm, A, Metal Foam Substrate for DOC and DPF Applications, SAE Technical paper 2007-01-0659.
- Kugler M, Jansch L, Krufft V, Schmitz UK, Braun HP. 1997. Analysis of the chloroplast protein complexes by blue native polyacrylamide gel electrophoresis (BN-PAGE). *Photo Res* 53: 35-44.

- Lawlor DW. 2001. Photosynthesis. Oxford: Bios Scientific Publishers: 309–351
- Lin CC, Kao CH. 2001. Abscisic acid induced changes in cell wall peroxidase activity and hydrogen peroxide level in roots of rice seedlings. *Plant Sci* 160:323–9
- Lu C, Vonshak A. 2002. Effects of salinity stress on photosystem II function in cyanobacterial *Spirulina platensis* cells. *Physiol Plant* 114: 405–413
- Lu Z, Streets DG. 2012. Increase in NO_x emission from Indian thermal power plants during 1996–2010: unit based inventories and multisatellite observations. *Environ Sci and Tech* 46: 7463–7470
- Mao HL, Wang JK, Zhou YY, Liu JX. 2010. Effects of addition of tea saponins and soybean oil on methane production, fermentation and microbial population in the rumen of growing lambs. *Livest Sci* 129: 56–62
- Marschner H. 1986. Mineral Nutrition in Higher Plants. Academic Press, London
- McGinn SM, Beauchemin KA, Coates T, Colombatto D. 2004. Methane emissions from beef cattle: Effects of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast, and fumaric acid. *J Anim Sci* 82: 3346–3356
- Muneer S, Ahmad J, Bashir H, Moiz S, Qureshi MI. 2011. Studies to reveal importance of Fe for Cd tolerance in *Brassica juncea*. *Int J of App Biotech and Biochem* 1(3): 321–338
- Muneer S, Kim TH, Qureshi MI. 2012. Fe Modulates Cd-induced Oxidative stress and the expression of Stress Responsive Proteins in the Nodules of *Vigna radiata*. *Plant grow reg* 68: 421–433
- Muola A, Mutikainen P, Laukkanen L, Lilley M, Leimu R. 2010. Genetic variation in herbivore resistance and tolerance: the role of plant life–history stage and type of damage. *J Evol Biol* 23: 2185–2196.
- Park JS, Shin JW, Ahn TI, Son JE, Analysis of CO₂ and harmful gases caused by using burn-type CO₂ generators in greenhouses“, *J. of Bio-Environment Control*, 2010;19:177–83.
- Parry MAJ, Andralojc PJ, Parmar S, Keys AJ, Habash DZ, Paul MJ, Alred R, Quick WP, Servaites JC. 1997. Regulation of RuBisCO by inhibitors in the light. *Plant Cell and Environ* 20: 528–534
- Pawlowski A, José L. Guzmán, Rodríguez F, Berenguel M, Sánchez J and Dormido S, 2010. Study of Event-Based Sampling Techniques and Their Influence on Greenhouse Climate Control with Wireless Sensors Network in Factory Automation edited by Javier Silvestre-Blanes, ISBN 978-953-307-024-7, 602p.
- Qureshi MI, Amici GMD, Fagioni M, Rinalducci S, Zolla L. 2010. Iron stabilizes thylakoid protein-pigment complexes in Indian mustard during Cd-phytoremediation as revealed by BN-SDS-PAGE and ESI-MS/MS. *J of Plant Physiol* 167: 761–770
- Satoh K, Smith CM, Fork DC. 1983. Effects of salinity on primary processes of photosynthesis in the red alga (*Porphyra perforate*). *Plant Physiol* 73: 643–647.
- Shimaji H, Complex control of the environment and energy conservation technology: Greenhouse horticulture handbook 5th ed. by Japan Greenhouse Horticulture Association, Agri press, Tokyo, 2003:206–16.
- Sommer NF, Fortlage RJ, Buchanan JR, Kader AA. 1981. Effect of oxygen on carbon

- monoxide suppression of postharvest pathogens of fruits. *Plant Dis* 65(4): 347-349
- Song XG, She XP, Zhang B. 2008. Carbon monoxide induced stomatal closure in *Vicia faba* is dependent on nitric oxide synthesis *Plant Dis* 92: 514-525
- Son JE, Park JS, NO₂ absorption and physiological response of lettuce in a semi-closed plant production system, *J. of Bio-Environmental Control*, 2001;10:207-12.
- Spiller S, Terry N. 1980. Limiting factors in photosynthesis. II. Iron stress diminishes photochemical capacity by reducing the number of photosynthetic units. *Plant Physiol* 65: 121-125
- Strauss SY, Agrawal AA. 1999. The ecology and evolution of plant tolerance to herbivory. *Trends Ecol Evol* 14: 179-185
- Swamy M, Siegers GM, Minguet S, Wollscheid, Schamel WWA. 2006. Blue native polyacrylamide Gel Electrophoresis (BN-PAGE) for the identification and Analysis of multiprotein complexes. *Nature*. 345: p. p14. [DOI: 10.1126/stke.3452006p14]
- Szaciłowski K, Chmura A, Stasicka Z. 2005. Interplay between iron complexes, nitric oxide and sulfur ligands: Structure, (photo) reactivity and biological importance. *Coord Chem Rev* 249: 2408-2436.
- Rhee HC, Cho MW, Lee SY, Choi GL, Lee JH, Effect of salt concentration in soil on the growth, yield, photosynthetic rate, and mineral uptake of tomato in protected cultivation, *J. of Bio-Environment Control*, 2007;16:328-32.
- Vandeleur RK, Mayo G, Sheldon MC, Gilliam M, Kaiser BN, Tyerman SD. 2009. The role of plasma membrane intrinsic protein aquaporins in water transport through roots: diurnal and drought stress responses reveal different strategies between isohydric and anisohydric cultivars of grapevine. *Plant Physiol* 149:445-460
- Verma A, Hirsch DJ, Glatt CF, Ronnett GV, Snyder SH. 1993. Carbon monoxide: A putative neural messenger. *Science* 259: 381-384
- Wills, RBH, Kim, GH, 1995. Effect of ethylene on postharvest life of strawberries. *Postharvest Biol. Technol.* 6, 249 -255.
- Xu J, Yin H, Liu X. 2010. Nitric oxide is associated with long term zinc tolerance in *Solanum nigrum*. *Plant Physiol* 154(3): 1319-1334
- Xu P, Sung SJS, Loboda T, Kormanik PP, Black CC. 1989. Characterization of sucrolysis via the Uridine diphosphate and pyrophosphate dependent sucrose synthase pathway. *Plant Physiol* 90: 635-642
- Yahia EM, Nelson KE, Kader AA. 1983. Postharvest quality and storage life of grapes as influenced by adding carbon monoxide to air or controlled atmosphere. *J Amer Hort Sci* 108: 1067-1071

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 생명산업기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 생명산업기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.