



실내 수직형 스마트팜에서의 건물용 연료전지 포집 이산화탄소 활용성 실험 평가

Experimental Evaluation on Usability of Carbon Dioxide Captured from Fuel Cells in the Vertical Smart Farm Unit in a Building

하상우* · 송진희** · 문정수***

Sang-Woo Ha* · Jin-Hee Song** · Jung-Soo Mun***

* Main author, Associate, Research & Development Institute, LOTTE Engineering & Construction, South Korea (sangwoo.ha@lotte.net)

** Corresponding author, Manager, Ph.D, Research & Development Institute, LOTTE Engineering & Construction, South Korea (jinhee.song@lotte.net)

*** Coauthor, Team Manager, Ph.D, Research & Development Institute, LOTTE Engineering & Construction, South Korea (jungsoo.mun@lotte.net)

ABSTRACT

Purpose: While the supply of fuel cells for buildings is spreading, smart farms are being proposed as one of the methods to remove carbon dioxide emitted during the hydrogen reforming process. In order to prove the effectiveness of the smart farm system linked to the fuel cells in the building, it is necessary to check whether growing edible crops under high concentrations of carbon dioxide compared to the general environment promotes the photosynthesis of crops, helps them grow, and reduces the captured carbon dioxide concentration. **Method:** In this study, an experimental facility for growing crops was produced, and leafy vegetables and fruits were divided into a control group and an experimental group and cultivated under high-concentration carbon dioxide conditions. In addition, a smart farm that can be applied as a system to a building was designed and manufactured as a modular unit, and the effect of reducing carbon dioxide was to be evaluated through leafy cultivation. **Result:** In the high-concentration carbon dioxide experiment, the growth promotion effect was confirmed in weight and size for 4 out of 6 leafy vegetables (about 95-322% increase in weight), and in the case of strawberries, about 27% increase in weight and 18% increase in sugar content was confirmed. In addition, as a result of the unit-type smart farm pilot experiment, the effect of reducing carbon dioxide by about 1.25g per hour was confirmed. Therefore, both the effectiveness of crop growth and reducing carbon dioxide were confirmed.

KEYWORD

실내 스마트팜
이산화탄소 시비
연료전지
탄소포집

Indoor Smart Farm
Carbon Dioxide Fertilization
Fuel Cell
Carbon Capture

ACCEPTANCE INFO

Received Oct. 31, 2024

Final revision received Nov. 21, 2024

Accepted Nov. 27, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

지구 온난화와 그에 따른 이상기후 발생 등으로, 전세계적으로 온실가스 배출을 저감하고 전 산업 분야 탄소중립을 달성하기 위해 다양한 정책 및 제도를 시행하고 있다. 국내에서도 2050년 탄소중립 달성을 목표로, 산업 전반에 대해 온실가스 배출 저감 노력을 기울이고 있다. 이 중 건물 분야의 탄소중립 달성을 위해, 신축 건물의 점진적인 제로에너지 건축 의무화 추진, 기축 건물의 그린 리모델링 시행을 큰 틀로 잡고, 건물에서의 고단열 고기밀 달성, 설비 효율화, 신재생에너지 적용을 확대하고 있다.

건물에 적용 가능한 신재생에너지원인 수소 연료전지는 태양광, 태양열 등과는 다르게 일사, 외기온 등 외부 환경의 영향을 받지 않고 일정한 전력 생산이 가능하다는 장점이 있어, 건물 보급량이 꾸준히 증가하고 있다. 특히 산업통상자원부의 신재생에너지 보급 사업[1]에 의한 정부 보조금 등에 힘입어 연료전지 사용은 매년 확대되고 있다[2].

수소 연료전지는 물의 전기분해를 반대로 적용한 원리로, 이론상

수소를 연료로 하여 물과 전기만을 생산하는 무공해 에너지 발전 시스템이다. 하지만 연료전지 발전의 재료가 되는 수소의 경우, 자연 상태에서 바로 얻을 수 없어 화합물로부터 수소를 정제하는 개질 과정을 거쳐야 하는데, 이때 사용되는 탄화수소로부터 온실가스인 이산화탄소(CO₂)가 배출된다[3]. 대부분의 건물에 적용되는 연료전지는 도시가스(LNG, Liquefied Natural Gas)를 개질하여 수소를 얻어 연료전지 발전에 이용하고 개질기를 통과한 가스 중 수소는 발전에 사용되고 이산화탄소 등 나머지 가스는 별도의 처리 없이 배기하고 있다.

따라서 실질적인 탄소 중립을 달성하기 위해서는, 수소 인프라 확대 전까지 연료전지의 개질 과정에서 배출되는 이산화탄소를 포집하는 기술이 필요하다. 또한 포집된 다량의 이산화탄소를 저장 혹은 활용하는 방안이 동시에 고려될 필요가 있다. 이산화탄소 저장은 압축을 위한 별도의 고압 시설이 필요하여 일반 건축물에서는 적용이 쉽지 않을 것으로 판단되며, 연료전지 발전 시설의 경우 온실, 스마트팜 등에 주입 활용하여 식물의 광합성을 통한 이산화탄소 제거를 유도하는 사례들이 시도되고 있다[4]. 실제로 오피스 건물 혹은 공동주택 단위세대 내부 이산화탄소 농도를 실내 공간에 설치된 수직형 스마트팜을 통해 감소하고자 하는 연구가 있었으며[5] 그 효과를 입증했다[6, 7].

본 연구에서는 분리막 접촉기를 통한 이산화탄소 포집 기술[8]을 건물용 연료전지에 도입하고, 연료전지의 개질 과정에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 이를 건물 내 형성된 스마트팜에 주입하여 작물 생산성을 향상시키고 성장 속도를 높이는 이산화탄소 시비(Carbon dioxide fertilization)로 활용하는 방안을 제안하고자 한다. 이를 위해 고농도의 이산화탄소가 식물의 성장에 미치는 영향을 사전 평가한 후, 고농도의 이산화탄소 주입이 가능한 소형 수직형 스마트팜 유닛을 개발하고 연료전지와 이산화탄소 포집기, 스마트팜 유닛을 연계하여 이산화탄소 주입하여, 스마트팜에서의 이산화탄소 활용성을 실험을 통해 평가하였다. 개발한 수직형 스마트팜 유닛의 모니터링을 통해, 운전 특성, 단위 유닛에서의 이산화탄소 제거율을 평가하여, 향후 건물용 연료전지 연계 스마트팜의 설계를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 건물용 연료전지에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 건물 내 수직형 스마트팜에 이산화탄소 시비로 활용하는 방안의 실효성을 평가하기 위해 Fig. 1.과 같이 연구를 수행하였다.

우선 건물용 연료전지와 연계된 실내 스마트팜에서의 이산화탄소 활용성을 평가하기에 앞서, 대기 농도 대비 2배 혹은 3배 높은 고농도의 이산화탄소가 엽채류의 성장에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 고농도 이산화탄소 주입하여 작물을 재배할 수 있는 소규모의 실험시설을 제작하고, 2022년 7월~12월까지 실험을 진행하여, 식물의 성장에 이산화탄소가 미치는 영향을 확인하였다.

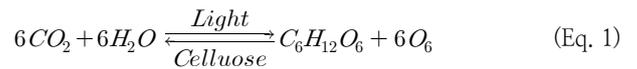
이후 건물용 연료전지와 연계된 실내 스마트팜에서의 이산화탄소의 활용성 평가를 위해 분리막 접촉기를 이용한 이산화탄소 포집기를 연결할 수 있는 수직형 스마트팜 유닛을 설계하여 실험이 가능한 실사이즈의 시작품을 제작하고, 이를 건물용 연료전지 10kW와 이산화탄소 포집기와 연결하여 2024년 7월~8월 동안 중 시운전 기간을 거쳐 연속 모니터링을 수행하였다. 스마트팜 내외부 유닛의 온도, 습도, 수직 높이에 따른 이산화탄소 농도와 양액 온도, pH, EC

등 스마트팜 내부 환경에 대한 연속 모니터링 및 데이터 분석을 통해, 개발 스마트팜 유닛의 운전 특성, 단위 유닛에서의 이산화탄소 제거율을 분석하였다.

2. 작물 성장에 미치는 이산화탄소 영향 평가

2.1. 실험 개요

국내외 다수의 국가에서 온실 혹은 스마트팜 작물 재배 시 이산화탄소를 주입하여 식물 생육을 증가시키는 이산화탄소 시비(Carbon dioxide fertilization)에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이산화탄소는 식물의 광합성에서 필수 성분으로 식물 체내로 흡수되어 포도당을 생성한다(Eq. 1). 어느 정도 높은 농도의 이산화탄소가 식물의 성장에 도움이 된다는 것은 알려져 있다[9-11]. 이산화탄소의 농도를 증가할 경우 광합성 속도가 증가하는데, 한국기계연구원은 이산화탄소 농도를 1,000ppm으로 증가할 경우 작물의 재배 기간을 5~10% 단축할 수 있으며, 수확량 증가 및 품질 개선에 효과가 있다고 보고한 바 있다[12]. 단, 작물의 종류, 광량 등에 따라 포화점이 존재하며, 포화점 이후에는 오히려 기공이 닫히고 증산작용이 감소하거나 혹은 잎이 타는 염소현상이 나타나기도 한다.



본 연구에서는 건물 내 스마트팜의 인공적인 환경 특성에서 손쉽게 재배가 가능한 엽채류 6종과 과일류 1종을 대상으로, 고농도 이산화탄소 주입 여부에 따른 작물의 성장을 평가하고자 하였다. 또한 이산화탄소 주입을 통해 생산성 향상 효과가 높은 작물을 선정하여 이를 연료전지 및 이산화탄소 포집기, 스마트팜 연계 실험 시 적용하고자 하였다.

1) 실험 시설

고농도 이산화탄소 주입 여부에 따른 작물 생육을 평가하기 위해, Fig. 2.와 같이 두 개의 동일한 수경 재배가 가능한 실험 시설을 구축하였다. 실험 시설은 Fig. 3(a)와 같이 내부 인공광(LED)만으로 성장 조절이 가능한 암실형 컨테이너와 Fig. 3(b)와 같이 내부 총 64구의 작물을 재배할 수 있는 2개 층의 베드, 그리고 자동 급수 및 양액

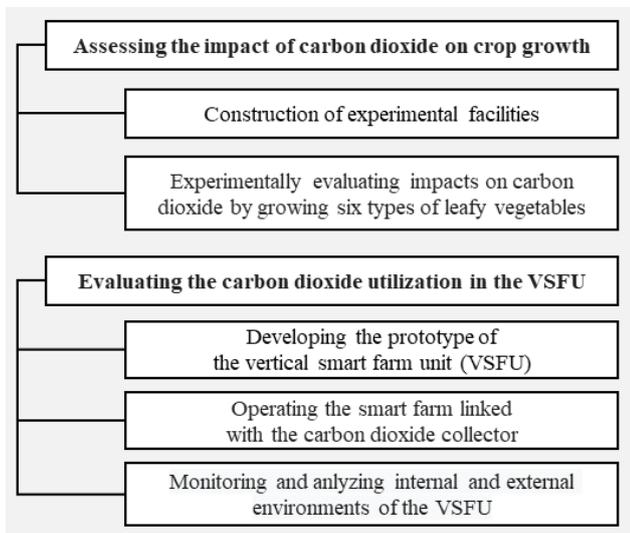


Fig. 1. Process of the research



Fig. 2. Experiment facilities

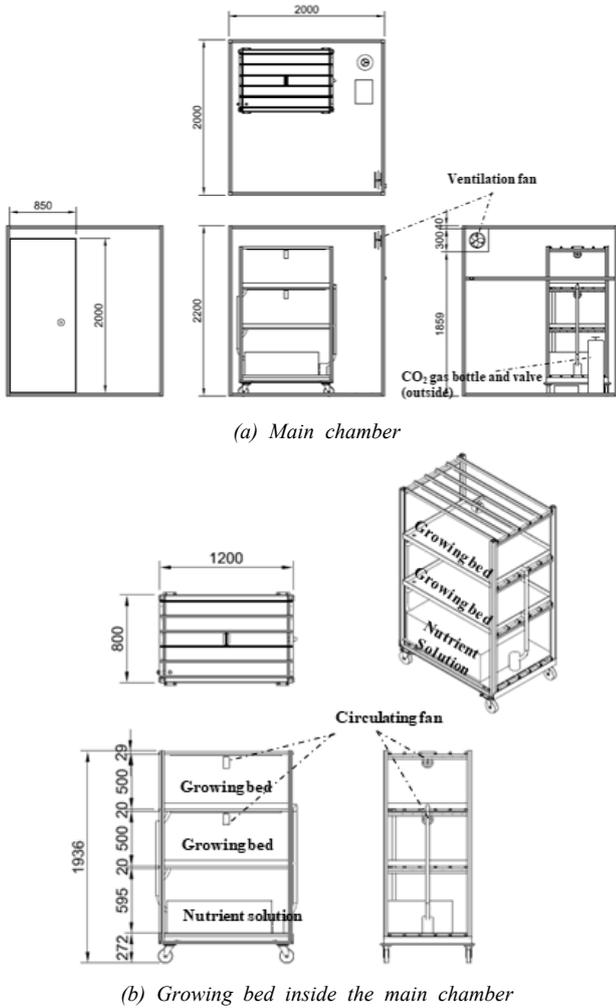


Fig. 3. Plans for experimental facilities

시설, 센서류(온습도, 이산화탄소, EC, pH 센서)로 이루어지며, 실험군의 경우 이산화탄소를 주입할 수 있는 액화 탱크 및 주입 밸브를 추가로 설치하였다.

2) 실험 계획

실험은 Table 1.과 같이 진행되었다. 이산화탄소를 일반 대기 농도(400~500ppm)로 유지한 챔버와 고농도(1,500ppm 이상)로 유지한 챔버에 동일한 작물을 재배하고 일정 기간 후에 수확하여 작물의 생육을 비교하였다. 작물의 생육은 엽채류의 특성을 반영할 수 있게 작물의 높이(cm), 잎 및 줄기의 무게(g), 잎의 장 수(개수) 및 두께(mm), 엽맥의 두께(mm)로 평가하였다. 각 실험 시 내부 재배 현황은 Fig. 4(a), (b)로, 발아율의 영향을 배제하기 위해 별도의 시설에서 약 15일 발아시킨 모종을 실험시설에 옮겨 심은 후 수확하였다.

2.2. 실험 결과

엽채류 6종에 대한 실험 결과는 Table 2.와 같다. 각 작물의 특성 값은 비교군과 실험군을 동일한 시기에 수확한 후 측정하였으며, 건체중(dry weight)의 경우 수확작물의 건조 후 더이상 무게 변화가 없을 때 측정된 값이다. 유럽형 상추인 큐오레(Cuore), 찰스(Charles)

Table 1. Experiment overview

Category		Values
Leafy vegetables (Fig. 4(a))	Type	Cuore, Teide, Charles, Red mustard, Pak choi, Spinach
	Period	2022.08.24.~2022.11.11.
	Environment	Nutrient solution pH : 5.5~6.5 Temp. : 22±2.0°C, Humi. : 70±5% LED : 12h/day (350µmol/m²s)
	Measured values	Plant height (cm), Fresh and dry weight of plant (g), Number of leaves (ea), Thickness of leaves and rib (mm)
Fruits (Fig. 4(b))	Type	Strawberry (Fragaria×ananaasa/sulhyang)
	Period	2022.11.16.~2023.06.16.
	Environment	Nutrient solution pH : 5.5~6.5 Nutrient solution Temp. : 20±2.5°C LED : 12h/day (350µmol/m²s)
	Measured values	Fruit weight (g), Fruit length (mm), Fruit width (mm), Sugar contents (Brix%)



(a) Leafy vegetables



(b) Strawberry

Fig. 4. Plants in the test facilities

품종과 적겨자(Red mustard), 청경채(Pak Choi)의 경우, 고농도의 이산화탄소 주입 시 생체중에서 2배 이상의 차이가 발생하였으며, 건체중을 측정한 적겨자와 청경채의 경우 건체중에서도 동일한 차이를 확인하였다. 또한 잎의 개수 및 두께도 고농도의 이산화탄소를 주입한 실험군에서 유의미하게 증가한 것을 확인하였다.

단, 테이데(Teide) 품종의 상추는 실험군과 차이가 거의 없었으며, 적색 발현이 나타나지 않은 것으로 보아 광 파장 및 광량의 부족으로 대조군과 실험군 모두에서 생장이 부족했던 것으로 판단된다. 시금치(Spinach)의 경우 재배기간이 45일 이상으로 30일 이내 수확이 가능한 다른 엽채류에 비해 길고 발아율이 낮아 순환식 수경재배로 재배하기는 어려울 것으로 보인다.

찰스와 청경채의 경우 실험군에서 생육이 뚜렷하게 증가하였고 결구 형성도 형성도 좋게 나타나(Fig. 5). 수경재배에 적합한 작물로 판단하여, 본 연구에서 개발한 실내 수직형 스마트팜의 재배 작물로 선정하였다.

Table 2. Results of the experiment for leafy vegetables

Type	CO ₂ Control	Height of plant (cm)	Fresh weight of plant (g)	Dry weight of plant (g)	Number of leaves	Thickness (mm)	
						Leaves	Rib
Cuore	Not controlled	28.6±0.7	47.7±9.0	no data	16.3±0.6	0.31±0.06	3.00±0.47
	1,500ppm	28.7±1.3	106.0±22.5		25.3±2.9	0.35±0.03	3.68±0.28
Teide	Not controlled	27.7±1.2	122.7±13.7		22.0±1.7	0.36±0.04	3.04±0.67
	1,500ppm	27.0±1.6	115.7±14.8		22.3±3.1	0.36±0.01	3.66±0.42
Charles	Not controlled	22.8±1.7	92.3±24.6		31.3±4.2	0.37±0.08	3.59±0.19
	1,500ppm	22.3±2.1	180.3±6.8		43.3±1.5	0.62±0.03	4.09±0.04
Red Mustard	Not controlled	18.6±0.9	10.0±1.2	0.76±0.10	5.7±0.6	0.27±0.02	1.64±0.04
	1,500ppm	24.3±2.0	42.2±8.0	2.76±0.46	7.7±0.6	0.43±0.07	4.47±0.41
Pak Choi	Not controlled	15.8±1.9	52.8±13.0	2.75±0.61	11.3±1.2	0.59±0.12	5.17±0.09
	1,500ppm	18.7±0.8	128.4±19.0	5.39±0.27	13.3±0.6	0.59±0.02	5.68±0.26
Spinach	Not controlled	23.1±1.5	72.0±12.4	5.50±1.00	84.7±4.7	0.26±0.04	2.29±0.16
	1,500ppm	21.2±4.1	72.5±14.2	5.20±0.60	95.3±6.7	0.22±0.02	2.55±0.17

Table 3. Results of the experiment for a strawberry

CO ₂ Control	Fruit weight (g)	Fruit length (mm)	Fruit width (mm)	Sugar contents (Brix%)
Not controlled (400~500ppm)	13.65	35.23	29.73	9.31
1,000~1,500ppm	17.27	37.16	32.98	11.01

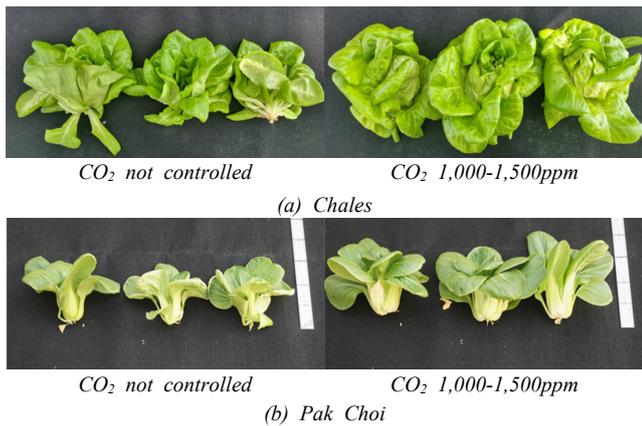


Fig. 5. Comparison between control and experimental vegetables

과채류인 딸기(Strawberry)의 실험 결과는 Table 3.과 같다. 딸기 생육 조사 결과, 농도의 이산화탄소 주입 시 과중, 과장, 과폭, 당도에서 유의미한 차이를 보였다. 실험군의 과중은 비교군의 평균 과중보다 3.62g 높았으며(p<0.001), 과장 및 과폭도 비교군 대비 1.93mm (p<0.05) 및 3.25mm (p<0.001) 크게 나타났으며, 평균 당도 역시 비교군의 평균 당도보다 1.7 Brix% 높게 나타나 이산화탄소 공급으로 인한 생육 증가를 확인하였다.

단, 기존 연구[13]에서 보고된 생산량 증가율(30~40%)에 비해 본 실험의 생산량 증가율이 다소 낮았으며, 이는 자연광을 배제한 인공광원 하의 실내 재배였고 1,500ppm의 이산화탄소 주입 환경을 장기간 유지되어 기공 전도도 감소로 인한 광합성 및 증산 작용의 저해[14] 등으로 인한 것으로 판단된다. 또한, 본 실험을 통해 수확한 실내 인공광원 재배 딸기의 경우, 일반적인 시설 원예 생산품 대비하여 당도 등의 품질과 생산량이 부족하여, 광원의 조절, 이산화탄소 주입 시기 등에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

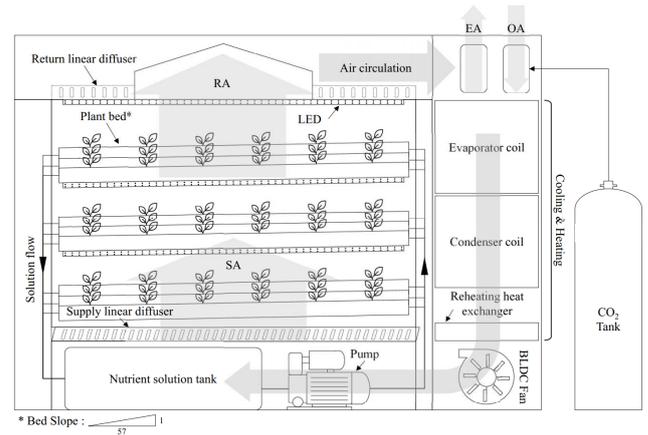


Fig. 6. VSFU (Vertical Smart Farm Unit) concept diagram

3. 실내 수직형 스마트팜 CO₂ 저감효과 실험

3.1. 스마트팜 유닛 모듈화 설계

앞서 진행한 이산화탄소의 성장촉진 효과 실험에 이어 본 연구에서는 건물용 연료전지에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 소비 및 활용하기 위한 실내 스마트팜을 개발하고자 하였다. 건물 실내 공간의 효율적인 활용을 위해, 스마트팜을 유닛 단위로 설계하여 모듈화 함으로써 설치 및 해체에 걸리는 시간과 비용을 절약하고, 수직형의 벽면 부착이 가능하도록 설계하여 건물 내 배치의 자유도를 높이고자 하였다.

Fig. 6.은 작물을 수경재배할 수 있는 수직형 스마트팜 유닛의 개념도이다. 3단의 작물 베드를 사용하고, 사용자의 눈높이에 맞춰 각 베드는 계단식으로 구성하였다. 내부는 크게 농도의 이산화탄소 주입 시 외부로의 누기를 최소화하기 위해 재배 챔버와 공조 챔버로 나누며, 작물의 원활한 성장을 위해 양액 사이클과 공조 사이클이 구

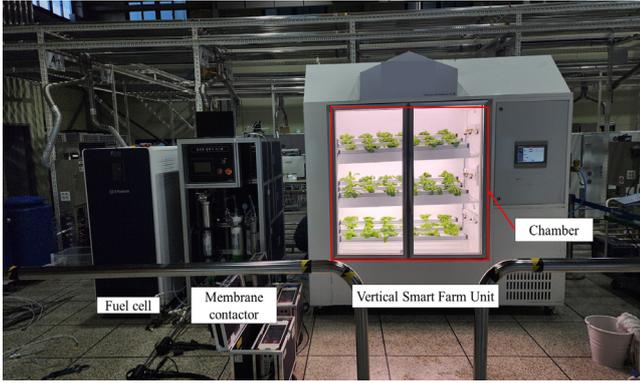


Fig. 7. VSFU (Vertical Smart Farm Unit) Pilot system

Table 4. Experiment condition

Category		Test condition
Target crop		Lactuca sativa var. capitata
Crop bed		6EA × 9beds = 54EA
Chamber size		1,420 × 780 × 1,720mm
Chamber temperature		20-35 °C
Ambient temperature		22-26 °C
Zone humidity		70-95 %
pH		7.5
EC (Electrical Conductivity)		1.00
LED		164W
Period	Case A	24/07/18, 9:00-17:00
	Case B	24/07/19, 9:00-17:00

현되어 있다. 양액 사이클은 작물에 영양분을 공급해주기 위한 순환 체계로, 수경식으로 재배되는 엽채류 작물이 심어진 베드에 양액이 포함된 물을 펌프를 통해 흘려 보내줌으로써 지속적인 수분 및 영양분을 공급한다. 공조 사이클은 작물이 잘 자랄 수 있도록 내부 환경을 일정하게 유지해주기 위한 공기 순환 체계로, 스마트팜 내부 챔버의 환기 및 냉·난방을 수행한다. 유닛 우측 상부로 유입된 공기는 공조 챔버를 통과하며 설정온도로 맞춰지며, 내부 팬을 통해 재배 챔버 하부 급기, 상부 배기된다.

Fig. 7.은 수직형 스마트팜의 단일 유닛 시작품과 5kW 용량의 건물용 연료전지, 이산화탄소 포집기와 연결하여 설치한 사진이다.

3.2. 실험 개요

1) 일반 사항

실험은 건물용 연료전지 연계 유닛형 스마트팜 파일럿이 설치되어 있는 경기도 소재의 연구 시설에서 진행되었다. 본 파일럿 시설은 연료전지, 이산화탄소 분리막 포집기, 유닛형 스마트팜이 연계되어 있어, 연료전지가 가동되게 되면 포집기 내부에 이산화탄소가 포집되게 되고 포집된 이산화탄소 중 일부를 배관과 솔레노이드 밸브를 통해 스마트팜 내부로 설정된 농도만큼 공급된다.

본 연구에서 개발한 스마트팜의 단위 유닛의 이산화탄소 저감율을 확인하기 위해, 육묘 기간을 거친 엽채류 모종을 일정 기간 동안 재배하였다. 실험의 전체적인 조건은 다음 Table 4.와 같다. 연료전지는 9시부터 17시까지 가동되었으며, 포집된 이산화탄소를 스마트

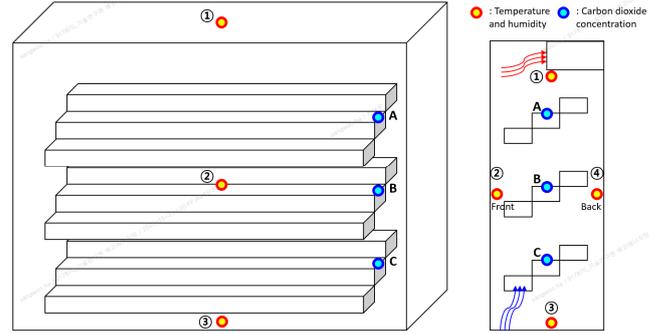


Fig. 8. Sensor installation location in chamber

팜 내부로 주입하였으며, 스마트팜 내부 이산화탄소 농도의 하락이 작물의 광합성으로 인한 것인지 확인하기 위해 1시간을 주기로 LED의 on/off 상태를 바꿔가며 농도를 측정하였다. 연료전지에서 포집된 이산화탄소는 챔버 내부의 CO₂ 농도가 2,500ppm이 될 때까지 주입함으로써 재배 챔버 내부가 충분히 고농도가 유지될 수 있도록 하였고, 내부 농도가 700ppm 이하로 떨어졌을 경우 재주입되도록 하였다. 단, 내부 온열 환경의 유지를 위해, 내부 공조 사이클을 가동해야 하나 챔버에 압력이 걸릴 경우 기밀하지 못한 틈 사이로 내부 공기가 빠져나가며 이산화탄소 농도 또한 유지되지 못하는 문제로, 본 기간 동안의 실험 시에는 공조 사이클 가동 없이 실험을 진행하였다. 실험은 하루에 한 번씩 총 2회를 2일에 걸쳐 진행하였다 (Case A, B).

2) 센서 설치

실험 중 챔버 내부 온도 및 이산화탄소 농도를 정확하게 모니터링하기 위해 다음 Fig. 8.과 같이 챔버 내부에 온도·습도 센서 및 이산화탄소 농도 센서를 설치하였다. 온도 센서는 챔버 중앙을 기준으로 앞면과 뒷면에, 그리고 좌, 우에 하나씩 설치하였으며, 각 센서에서 측정된 값의 평균값을 챔버 내부 온도로 보았다. 이산화탄소 농도 센서는 작물 베드가 총 3단으로 이루어져 있기 때문에 각 베드 우측에 센서를 설치하여 상단, 중단, 하단 총 3개의 센서를 설치 후 모니터링하였다.

3.3. 실험 결과

실험 결과는 Fig. 9. 및 Fig. 10.과 같다. Fig. 9.는 첫 번째 실험, Fig. 10.은 두 번째 실험의 결과이다. 데이터는 10분 단위로 로깅하였으며, 'LED ON'은 LED 전원을 켜 구간이며 'LED OFF'라고 된 구간은 LED 전원이 꺼진 구간이다. 그래프 상에서 볼 수 있듯이 LED가 켜졌을 때, 작물이 광합성이 발생하고 챔버 내부 온도가 상승하고 이산화탄소 농도가 하락하는 것을 확인할 수 있다. 반면, LED가 꺼졌을 때는 챔버 내부 온도가 하락하고 이산화탄소 농도의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 정확한 수치 비교를 위해 상·중·하단의 이산화탄소 평균 농도의 변화량을 각 구간의 평균변화율로 계산하여 Table 5.와 같이 나타내었다.

Table 5.에 나타난 것처럼 LED가 꺼졌을 때는 4ppm 미만으로 이산화탄소 농도에 거의 변화가 없으며, Case A의 경우에는 LED가 켜져있을 때 분당 약 9.84ppm의 이산화탄소 농도가 감소하며, Case B의 경우에 약 12ppm의 이산화탄소 농도가 감소하였다. 이로써 본

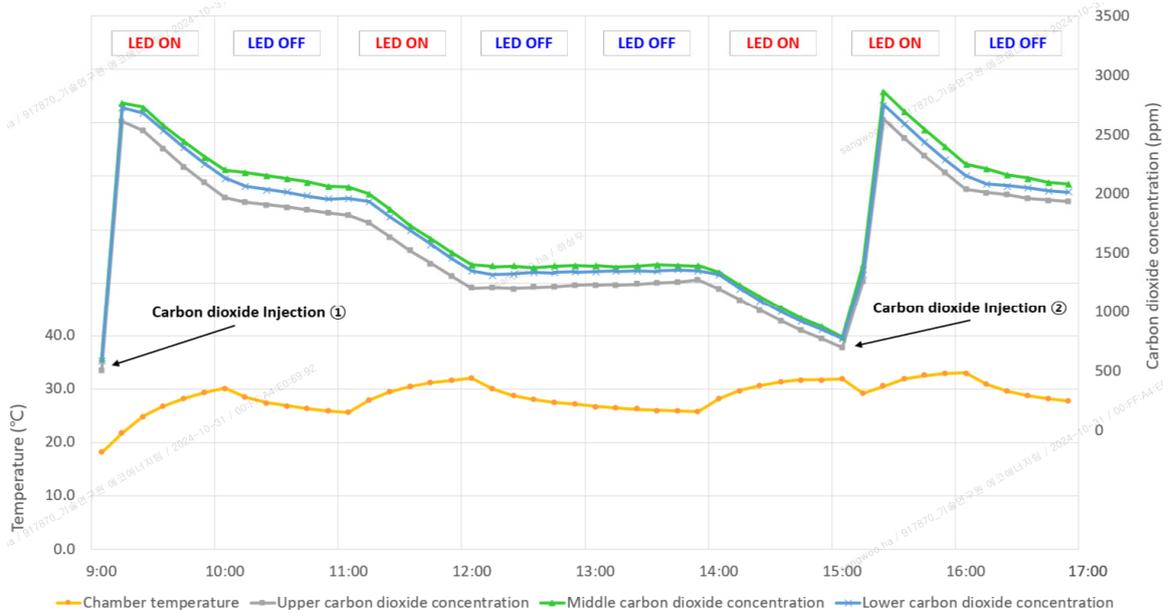


Fig. 9. Experiment result of carbon dioxide reduction in smart farm unit (case A)

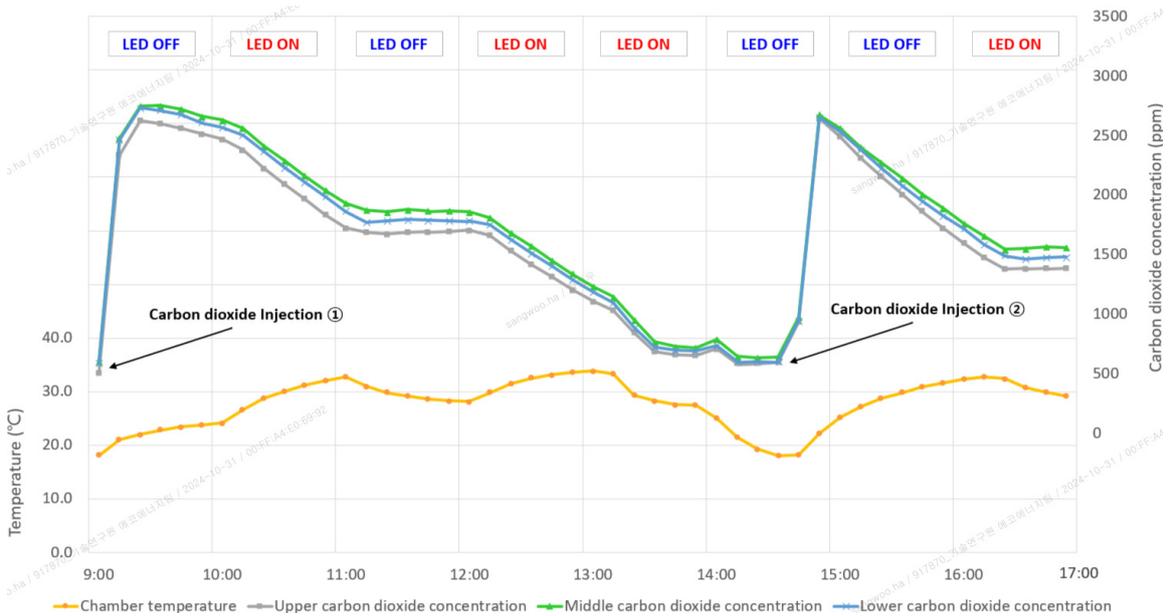


Fig. 10. Experiment result of carbon dioxide reduction in smart farm unit (case B)

Table 5. Average rate of CO₂ concentration decrease

Time	Case A (ppm/min)	Case B (ppm/min)
9:00~10:00	-10.05	2.12
10:00~11:00	-2.57	-11.93
11:00~12:00	-10.4	-0.95
12:00~13:00	+0.05	-10.12
13:00~14:00	-0.63	-2.52
14:00~15:00	-8.93	3.48
15:00~16:00	-9.97	-13.95
16:00~17:00	-2.27	-3.62

연구에서 제작한 유닛형 스마트팜에서는 엽채류를 심었을 경우 분당 약 10.92ppm의 이산화탄소를 감소시킬 수 있으며, 질량으로 환산할 경우 챔버 부피 기준 시간당 약 1.25g 가량 이산화탄소를 저감할 수 있는 것이 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 건물용 연료전지에 연계가 가능한 스마트팜의 실효성을 평가하기 위해 건물 내 입주민 혹은 재실자가 즉각적으로 소비가 가능한 몇 가지 작물을 대상으로 이산화탄소 저감 효과 실험을 진행하고 실제 건물에 하나의 설비로서 적용 가능한 유닛형 스마트팜을 설계 및 제작하여 실증하였다.

(1) 소비자 선호도가 높은 엽채류 6종과 딸기에 대해 고농도 이산화탄소 재배 실험을 진행하였다. 기존 4~500ppm 수준의 일반적인 환경 대비 약 1,500ppm의 고농도 이산화탄소 환경에서 자란 엽채류 6종 중 4종이 중량과 크기가 우월했으며, 딸기의 경우 중량은 약 27%, 당도는 약 18% 개선된 것을 확인할 수 있었다.

(2) 건물 내 공간에 일종의 설비 형태로 설치될 수 있는 유닛형 스마트팜을 설계하였으며, 실제 5kW 연료전지 및 이산화탄소 포집기와 연계하여 파일럿 시스템을 제작하고 열채류 재배 실험을 통해 스마트팜 단일 유닛을 통해 시간당 약 1.25g 가량의 이산화탄소 저감 효과를 확인하였다.

이러한 결과를 통해 스마트팜의 실효성이 확인되었으나, 실제 연료전지 개질 과정에서 발생하는 이산화탄소를 소화하기 위해서는 다수개의 유닛이 필요할 것으로 사료된다. 예를 들어, 건물에 적용되는 5kW 연료전지의 용량을 고려할 경우 하루 8시간 가동 시 시간당 약 2.7kg/h의 이산화탄소가 포집되는 것으로 추정할 수 있으며, 이산화탄소 포집량의 약 1%를 제거하고자 할 경우 약 20여개의 모듈이 필요할 것으로 판단된다. 다만 본 연구는 실내 스마트팜 용도로 내부 계단식 재배 베드를 사용하였기 때문에, 시설형 스마트팜 대비 식재 밀도가 낮다. 따라서 판형 베드 등을 사용하여 스마트팜 내부의 작물 식재 밀도를 높이거나 재배 베드 수를 증가시켜 이산화탄소 제거율을 높일 필요가 있다.

또한, 본 연구에서는 성체 상태의 작물을 이용하여 각 케이스 별 1 일씩만 실험하였지만, 실제 채소를 재배하여 이용할 때는 모종 상태로 시작하여 성체가 되는 생장 사이클이 존재하기 때문에 각 작물의 생장 주기에 따라 이산화탄소 소비 양상이 달라질 수 있으므로 전체 사이클에 대한 장기간의 실증이 필요하다. 딸기와 같은 일부 작물은 고농도의 이산화탄소에 장기간 노출되었을 경우 전체 생장 속도에 영향을 있으므로[14], 장기간의 재배실험 결과를 확인하여 작물별 생장 특성에 맞춘 이산화탄소 공급 전략이 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgement

본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호: 20213 030030240).

References

[1] 산업통상자원부, 제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획, 2020.12. // (Ministry of Trade, Industry and Energy, 5th basic plan for new and renewable energy technology development, utilization and distribution, 2020.12.)

[2] 한국에너지공단 신재생에너지센터, 2020년 신재생 에너지 보급통계, 2020. // (Korea Energy Agency Renewable Energy Center, 2020 Renewable energy distribution statistics, 2020.)

[3] 심중표, 이창래, 이흥기, 신재생에너지원인 수소연료전지의 원리와 응용, 전기의 세계, 제61권 제11호, 2012.11, pp.15-22. // (J.P. Shim, C.R. Lee, H.G. Lee, Principles and applications of hydrogen fuel cells, a new renewable energy source, KIEE Magazine, 61(11), 2012.11, pp.15-22.)

[4] 이철성, 스마트팜-연료전지 융합시스템, 태양에너지, 제20권 제1호, 2022.06, pp.23-28. // (C.S. Lee, Smart farm-fuel cell convergence systems, The Magazine of Korean Solar Energy Society, 20(1), 2022.06, pp.23-28.)

[5] 유승연, 김용성, 송석재, 단위세대 발코니를 활용한 기후변화 대응 스마트팜 적용방안에 관한 연구 -최근 3년간 서울시 전용면적 84㎡ 단위세대를 중심으로-, 한국공간디자인학회 논문집, 제17권 제3호, 2022.04, pp.139-154. // (S.Y. Yoo, Y.S. Kim, S.J. Song, A study on the application of smart farms to respond to climate change using the balcony of each household -Focused on unit households with an

exclusive area of 84m² in Seoul for the past 3 years-, Journal of Korea Institute of Spatial Design, 17(3), 2022.04, pp.139-154.)

[6] Y. Shao et al., The effects of vertical farming on indoor carbon dioxide concentration and fresh air energy consumption in office buildings, Building and Environment, 195, 2021.05, 1107766.

[7] 김준성, 공동주택 스마트 팜의 활성화를 위한 3차원적 적용 특성에 관한 연구: 수경재배식 스마트 팜을 중심으로, 국민대학교 석사학위논문, 2022. // (J.S. Kim, A study on the characteristics of three-dimensional application for activation of smart farms in apartment houses: Focusing on hydroponics smart farm, Master's Thesis, Kookmin University, 2022.)

[8] C. Jeong et al., CO₂ capture and H₂ recovery using a hollow fiber membrane contactor, Separations, 10(7), 2023.06, 367.

[9] S.G. Pritchard et al., Elevated CO₂ and plant structure: A review, Global Change Biology, 5(7), 1999.10, pp.807-837.

[10] A. Giri, B. Armstrong, C.B. Rajashekar, Elevated carbon dioxide level suppresses nutritional quality of lettuce and spinach, American Journal of Plant Sciences, 7(1), 2016.01, pp.246-258.

[11] K. Noh, B.R. Jeong, Increased carbon dioxide by occupants promotes growth of leafy vegetables grown in indoor cultivation system, Sustainability, 13(23), 2021.11, 13288.

[12] 한국기계연구원, 가스보일러를 이용한 시설원에 난방 및 CO₂ 시비 기술 개발에 관한 연구, 농촌진흥청, 2013.01. // (Korea Institute of Machinery and Materials, Development of greenhouse heating and CO₂ enrichment system using gas boilers, Rural Development Administration, 2013.01.)

[13] 김상수 외 4인, CO₂ 처리가 딸기의 광합성, 수량, 당 및 산함량에 미치는 영향, 한국원예학회지, 제37권 제6호, 1996.12, pp.736-740. // (S.S. Kim et al., Effects of CO₂ enrichment on the net photosynthesis, yield, content of sugar and organic acid in strawberry fruits, Journal of the Korean Society for Horticultural Science, 37(6), 1996.12, pp.736-740.)

[14] J. Yu et al., Analysis and evaluation of strawberry growth, photosynthetic characteristics, biomass yield and quality in an artificial closed ecosystem, Scientia Horticulturae, 195(12), 2015.11, pp.188-194.