

연소식 CO₂ 발생기 사용시 온실 내 CO₂ 및 유해가스 농도 분석

박종석¹ · 신종화² · 안태인² · 손정익^{2*}

¹포항산업과학연구원 광양환경연구본부,

²서울대학교 식물생산과학부 및 농업생명과학연구원

Analysis of CO₂ and Harmful Gases Caused by Using Burn-type CO₂ Generators in Greenhouses

Jong Seok Park¹, Jong Wha Shin², Tae In Ahn², and Jung Eek Son^{2*}

¹Research Institute of Industrial Science & Technology, Kwangyang 545-090, Korea

²Department of Plant Science and Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract. Burn-type CO₂ generators are widely used in greenhouses for the purpose of CO₂ supply for photosynthesis and greenhouse heating. However harmful gases included in the air might give severe effects on the plant growth. For investigating the possible emission of harmful gases from commercial burn-type CO₂ generators, we carried out the analysis of the harmful by-products (NO, NO_x, NO₂, CO, and VOCs) and CO₂ caused by using a burn-type CO₂ generator in greenhouses. And the harmful by-products from different type of fuels such as kerosene, LPG, and LNG were quantified. In order to minimize the uncertainties from a CO₂ generator, 4 different CO₂ generators were utilized in four plastic greenhouses and a glasshouse located at different places during the experimental works. The results showed that the concentration of NO_x is proportional to CO₂ concentration. Levels of harmful gases in the most of greenhouses, where the new burn-type CO₂ generators were installed, were lower than 1.0 ppm when CO₂ concentration was set at 1,000 ppm. In case of LNG combustion, the concentration of CO reached out up to 300 ppm and pre-treatment for CO reduction, such as the adsorption process, would be inevitable to abate the adverse effects on plant growth.

Key words : CO₂ enrichment, CO₂ generator, harmful gases, Kerosene, LPG

서 론

원예생산물의 고품질, 고수익을 지향하는 대형온실은 설치 수가 증가되며 경영 규모를 확대하는 경향을 보이고 있다. 이러한 대형온실의 성공 요인으로 생산성 향상을 최우선으로 둘 수 있다(Ikeda, 2003). 에너지 소비적 측면과 생산성 향상은 최적의 접점을 찾아야 하는 문제이며, 바이오매스를 이용하여 식물의 광합성에 이용하는 사례는 증가하고 있다(Chaua 등, 2009; Jaffrin 등, 2003; Jo, 2002). 시설원예에서도 동절기 난방 및 밀폐된 온실내의 광합성 촉진을 위한 연소식

CO₂ 발생기 이용도 이러한 시도의 하나이며, 많은 중소형 온실운영 농가에서도 지자체의 보급 사업 및 시장에서 품질 선호도의 영향으로 점차 확대 설치되고 있는 실정이다. 이에 많은 농가에서는 가격이 저렴한 국내산 발생기와 상대적으로 가격이 비싼 외국산을 놓고 많은 고민을 하고 있는 것이 현실이며, 정확한 가이드 라인도 없는 실정이다.

CO₂ 공급 시스템은 연소식과 기화식이 사용되고 있으며 각 방식별 최적 사용을 위한 전략이 검토되고 있다(Chalabi 등, 2002a, 2002b). 연소식으로는 CO₂ 시비와 함께 발생하는 열(잉여열)의 취급에 따라서 크게 3가지로 구분할 수 있다. 확산식 시스템은 잉여열을 온실 안으로 방출하는 방식, 폐열형 시스템은 잉여열을 온실 밖으로 방출하는 방식이며 축열형 시스템은

*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr
Received November 26, 2010; Revised December 9, 2010;
Accepted December 15, 2010

잉여열을 축열시켜 필요한 때에 사용하는 방식이다 (Kawamura 등, 2004). 에너지 재활용적 측면에서 가장 바람직한 방법은 축열형 시스템이라고 할 수 있으나, 중소형 온실에서는 현실적으로 축열시스템과 결합한 상품이나 지침이 없는 실정이다. 따라서 에너지 절약적 측면으로 볼 때는 폐열형 보다는 확산식으로 온실 내부의 온도관리에 이용되는 것이 보다 바람직한 방법이다(Kawamura, 2005). 그러나 확산식을 사용할 경우 CO₂ 가스와 더불어 부산물인 유해가스가 발생되고, 그 성능이 좋지 않을 경우 (내구적으로 오래되어 불완전 연소율이 높은 경우) 작물체에 미치는 영향을 돌이킬 수 없는 정도 일 수 있다(Son and Park, 2001; Shimaji, 2003). 따라서 국내 및 외국산 연소식 CO₂ 발생장치의 검토를 위하여 연료별 (백등유, LPG, LNG) 연소시 부산물인 유해가스(CO, NO, NO_x, NO₂ 및 VOC) 및 CO₂ 발생 특성을 분석하여, 연소식 CO₂ 발생기의 선정에 위한 기초 데이터로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 측정 온실

실제 온실에서 발생하는 CO₂와 유해가스 농도를 측정하기 위하여 경기도 지역의 온실 단지의 플라스틱 온실 4곳(A~D)과 전라남도 지역에 위치한 연소식 보일러를 이용하여 CO₂를 공급하는 유리온실(E)에서 가스 측정 및 분석을 실시하였다. 측정 장소를 결정하는 조건으로 등유를 사용하는 국내 제품이 설치된 온실, 외국제품이 설치된 온실, LPG를 사용하는 국산제품과 외국제품이 설치된 온실 2개소를 선정하였으며, 추가로 LNG를 사용하는 온실을 추가하였다. 측정 온실과 연소식 CO₂ 가스 발생기의 사양은 Table 1과 같다.

2. 가스 측정

모든 가스 측정은 서울대학교 농생명과학공동기기원(NICEM)의 실내공기질 분석 시스템의 일부 측정시스템을 온실로 이동하여 측정하였다. 온실에 설치된 연소식 CO₂ 발생기에서 발생하는 CO₂ 및 CO 가스는 비분산적외선(NDIR) 방식에 의해서 연속적으로 측정하였으며, NO, NO₂, NO_x의 농도는 화학발광법으로 연속 측정하였다. 또한 열탈착식 가스크로마토질량분석기(TDS-GC-MSD)를 이용하여 휘발성 물질(VOCs)의 질량을 측정하였다. 가스 측정시 온실 내에 설치된 CO₂ 발생기의 위치를 고려하여 발생기로부터 15~20m 거리에 측정 장비를 설치하여 측정하였다. 전라남도의 E 지역을 제외한 경기도 A~D 지역에서 측정한 시간은 오전에 시작하여 오후 1시까지 측정하였으며 보온을 위하여 설치된 보온 스크린을 모두 닫은 상태로 측정을 하였다. 측정 시 모든 온실의 환기횟수는 0.15~0.2 회/h 정도였다(Table 1).

결과 및 고찰

1. CO₂ 및 유해가스 농도변화

CO₂ 발생기를 작동하는 동안 모든 연료를 사용하여 CO₂를 발생시킨 온실에서 CO₂ 농도는 증가하였다(Fig. 1). 특히 등유를 사용한 A온실의 경우 발생기 작동에 따른 CO₂ 농도의 증가가 뚜렷하였으며, 유해가스 발생 역시 CO와 NO_x의 절대량에 있어서 비슷한 수준으로 발생되었다(Fig. 2). LPG를 사용한 B 온실의 경우 CO₂농도의 증가하는 속도가 매우 빠르며(Fig. 1), 설치년도가 가장 오래되었고 유해가스인 NO_x와 CO의 발생 절대값이 상대적으로 매우 높아 연료와는 상관없이 불완전 연소의 가능성이 높다고 사료되었다(Fig. 2). 등유사용 국산 CO₂ 발생기를 설치한

Table 1. Specifications of CO₂ generators installed in five greenhouses.

Greenhouse	A	B	C	D	E
Fuel	kerosene	LPG	kerosene	LPG	LNG
Heat capacity (kcal/h)	100,000	47,000	50,000	50,000	80,000
Greenhouse size (m ²)	4,290	2,970	3,960	4,220	7,920
Screen operation	Closed	Closed	Closed	Closed	Open
Installation year	2009	1998	2009	2009	2003
Producer (country)	Japan	Netherlands	Korea	Korea	Japan
Ventilation number (1/h)	0.19	0.2	0.15	0.19	0.18

연소식 CO₂ 발생기 사용시 온실 내 CO₂ 및 유해가스 농도 분석

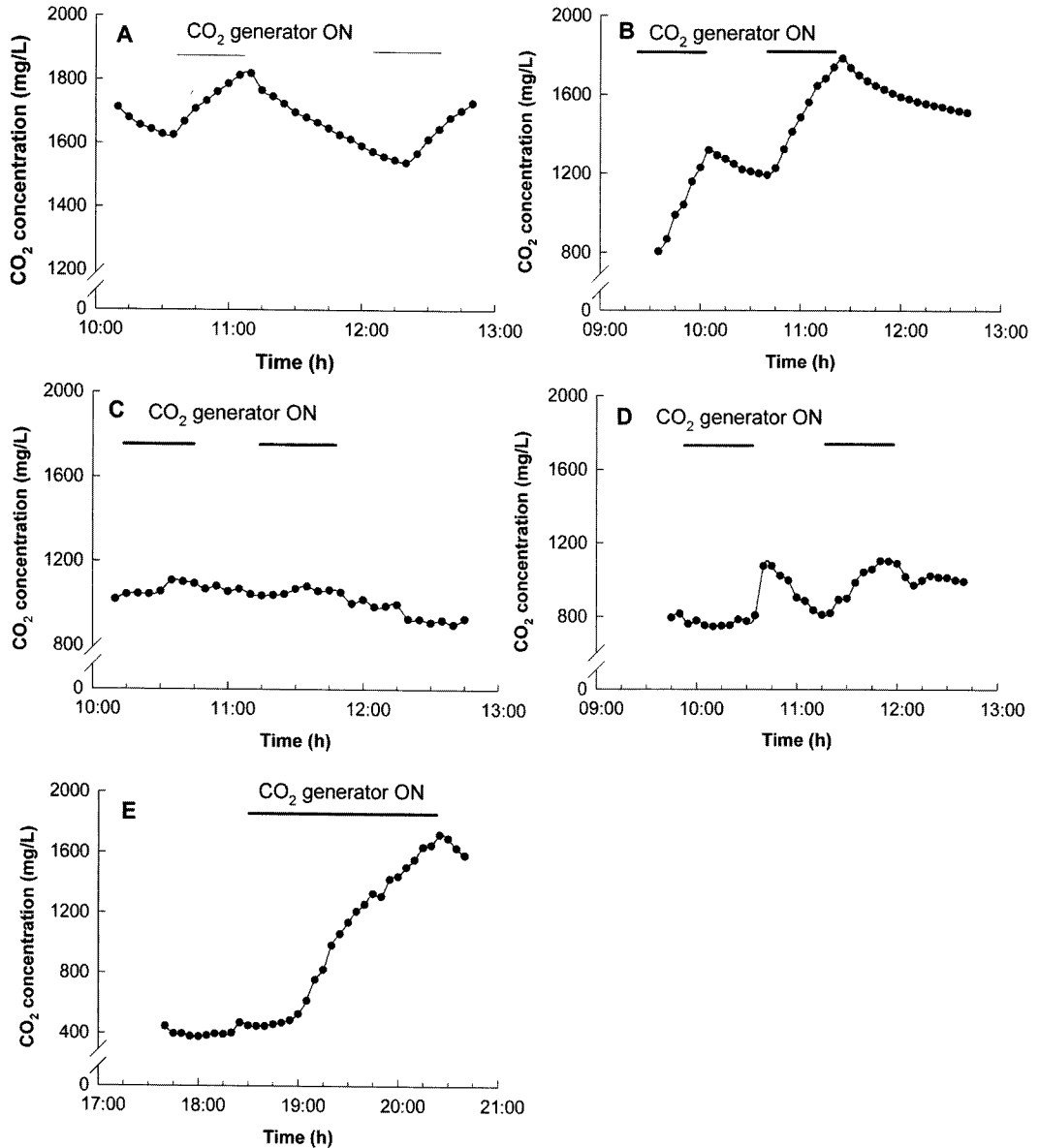


Fig. 1. Time courses of CO₂ concentrations in the greenhouses while burn-type CO₂ generators worked or not (A-Kerosene, B-LPG, C-Kerosene, D-LPG, E-LNG).

C온실의 경우 실제 측정하기 전 새벽부터 발생기를 가동 중에 있었기 때문에 높은 값을 유지하였으며 가동하지 않는 시간에도 크게 농도값이 떨어지지 않는 경향은 상대적으로 온실의 환기횟수가 적었기 때문으로 사료된다(Fig. 1과 Table 1). 등유를 사용한 A 온실과 비교할 경우 유해가스는 발생 절대값은 낮다고 할 수 있으나(Fig. 2) CO₂ 농도 1000ppm을 기준으로 판단

할 경우 CO의 경우 거의 차이가 없는 반면, NO_x의 경우 국산 CO₂ 발생기가 일본산의 CO₂ 발생기로부터 NO_x 발생량의 43%(A 온실-456ppb, C 온실-196ppb) 정도 발생되었다(Table 2). LPG 사용 국산 CO₂ 발생기를 설치한 D 온실의 경우 CO₂ 발생량은 같은 연료를 사용하는 B 온실과 비교하여 적었으며(Fig. 1), CO 및 NO_x류의 경우에도 각각의 CO₂ 발생기의 열

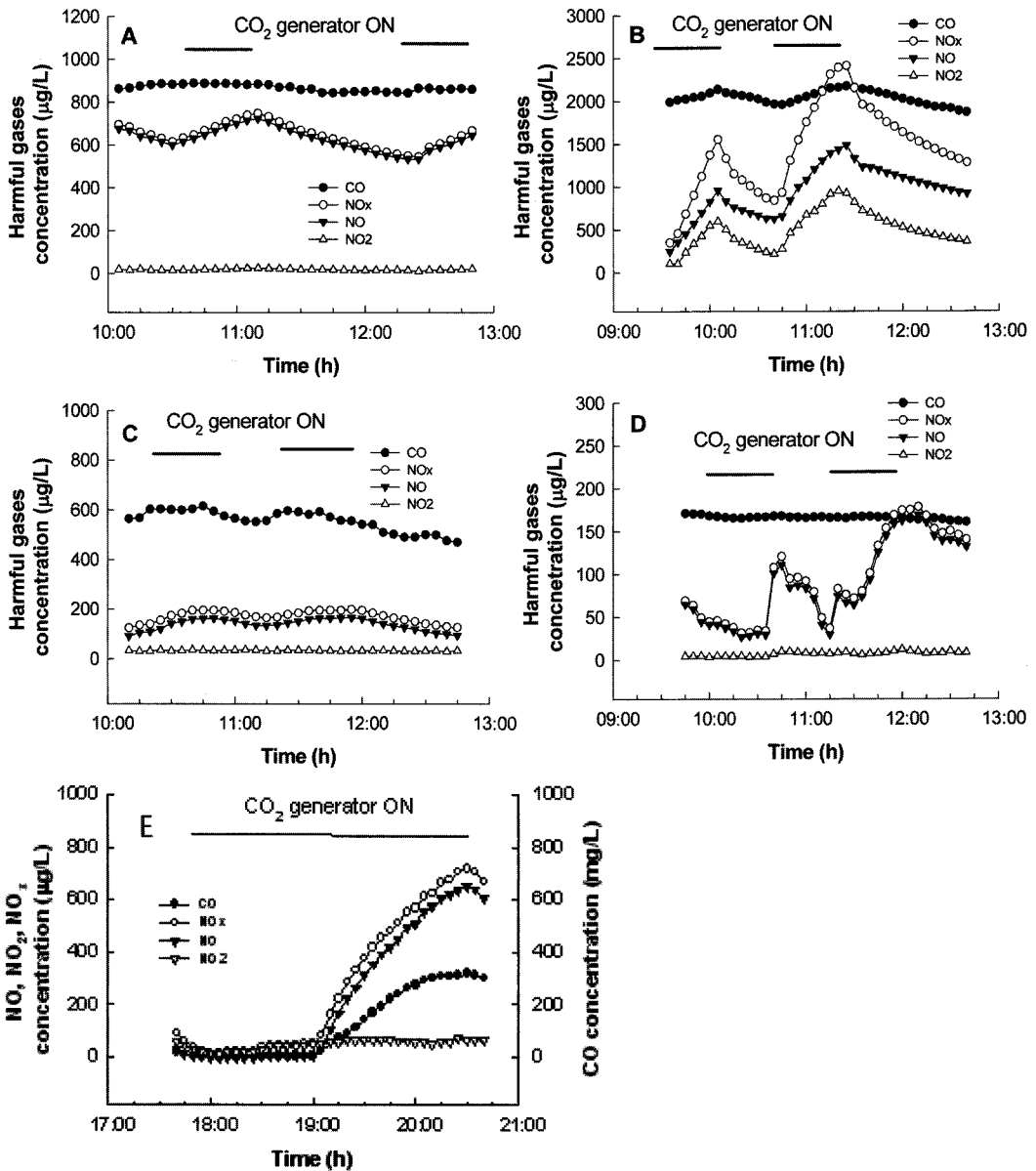


Fig. 2. Time courses of harmful gases (NO, NO₂, NO_x, and CO) concentrations (A, B, C, D) or NO, NO₂, NO_x concentration and CO concentration (E) in the greenhouses while burn-type CO₂ generators worked or not (A-Kerosene, B-LPG, C-Kerosene, D-LPG, E-LNG).

량은 차이가 없었지만 LPG 사용 국산 발생기가 약 10% 미만의 적은 유해가스를 발생시키는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 제조 연식의 차이에 의한 것으로 사료되며 국산의 저렴한 CO₂ 발생기도 매우 좋은 성능을 확인할 수 있었다. LNG를 사용한 E 온실의 경우 CO₂ 농도가 증가함에 따라서 NO_x 류도 함

께 증가하였으며 그 농도 역시 700ppb를 넘지 않는 수준이었으나, CO의 경우 300ppm까지 증가하였다. E 온실의 경우 CO₂ 공급을 하면서 토마토 작물의 생리 장애 현상이 발생되어 많은 고생을 한 농가로 유해가스 측정 의뢰가 있어서 측정한 경우로서 생리 장애의 여러 가지 원인 중에서 CO₂ 공급에 따른 유해가스

연소식 CO₂ 발생기 사용시 온실 내 CO₂ 및 유해가스 농도 분석

Table 2. Concentrations of harmful gases at CO₂ 1000 ppm.

Greenhouse	CO (µg/L)	NO _x (µg/L)	NO (µg/L)	NO ₂ (µg/L)	Fuel/Installation year
A	560 ± 23 ²	456 ± 4.9	441 ± 4.2	15 ± 0.6	Kerosene/2009
B	1,533 ± 7.3	1,682 ± 37.2	1,020 ± 32.8	66 ± 12.8	LPG/1998
C	591 ± 8.1	196 ± 2.1	164 ± 2.2	32 ± 1.0	Kerosene/2009
D	181 ± 2.5	191 ± 2.3	179 ± 3.6	11 ± 1.5	LPG/2009
E	340,000 ± 9900	781 ± 7.1	706 ± 8.2	75 ± 2.7	LNG/2003

²Maximum concentration of each gas with three replications ± SD

Table 3. Concentrations of harmful gases at maximum CO₂ concentration.

Greenhouse	CO ₂ (mg/L)	CO (µg/L)	NO _x (µg/L)	NO (µg/L)	NO ₂ (µg/L)	Fuel/Installation year
A	1822 ± 3.01 ²	887 ± 2.1	740 ± 8.0	715 ± 6.9	25 ± 1.1	Kerosene/2009
B	1754 ± 26.8	2111 ± 22.8	2370 ± 52.4	1439 ± 46.3	931 ± 18.1	LPG/1998
C	1102 ± 7.0	605 ± 10.5	196 ± 2.2	164 ± 2.2	32 ± 1.0	Kerosene/2009
D	1098 ± 6.6	166 ± 0.15	176 ± 2.1	165 ± 3.3	10 ± 1.4	LPG/2009
E	1689 ± 35.5	313,000 ± 38000	710 ± 6.5	642 ± 7.5	68 ± 2.4	LNG/2003

²Maximum concentration of each gas with three replications ± SD

장해로 판단이 되었다.

CO 농도가 300ppm 정도일 경우 사람에게도 치명적인 영향을 줄 수 있는 농도이며 작물에게는 기공 흡수를 통한 엽면 고사 현상을 유도시킬 수 있다. 이러한 경우에는 발생기내부에 컨버터를 설치하여 평소 운전시 유해가스 농도를 저감시킬 필요가 있다. 전체적으로 발생된 CO₂ 최대값과 그 때의 최대 유해가스 농도값을 비교하여 판단할 경우 D 온실의 LPG 사용 국산 CO₂ 발생기가 성능적으로 우수한 것으로 판단되었다. 이때 온실 내 유지된 CO₂ 농도는 1000ppm 수준이었으며 식물에 가장 유해하다고 할 수 있는 CO 농도가 매우 낮고 NO_x 류의 농도 또한 가장 낮은 값으로 유지되었다(Table 3).

2. CO₂ 농도에 대한 유해가스 분석

발생된 CO₂ 농도는 온실에서 작물의 광합성에 영향을 주어 생산성을 증대 시키는 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 연소식으로 CO₂를 공급할 경우 유해가스 발생이 우려되는데(Son 등, 1999), 연료별 CO₂ 농도 증가에 대한 CO 및 NO_x의 증가량에 대한 상관 분석을 통하여 유해가스의 발생량을 유추해 볼 수 있다. CO₂ 농도 증가에 대한 CO 증가에 관한 상관 분석을 해보면 LPG를 사용한 B와 D 온실에서는 낮은 값(B 온실: R²=0.079, D 온실: R²=0.11)을 나타내

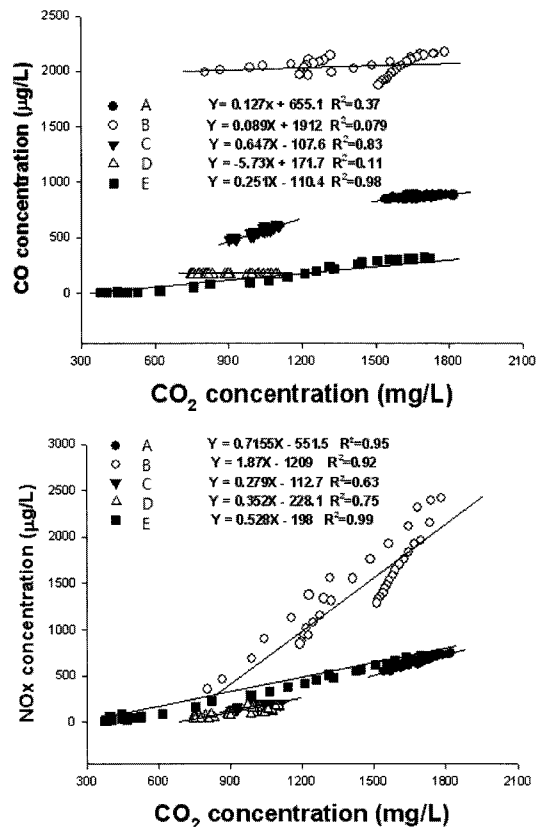


Fig. 3. Analysis of correlation between CO₂ concentration and CO or NO_x concentration while burn-type CO₂ generator worked or not.

었다(Fig. 3). 직선적인 경향은 모두 보였지만 CO₂ 농도가 증가함에 따라 CO 값이 전혀 증가하지 않는 경향이었다. 이는 기체상태인 LPG를 연소하므로 발생하는 특성인데, 연소온도가 등유에 비해 높기 때문에 완전연소에 가깝다고 할 수 있으며 이럴수록 CO 농도는 낮아지기 때문이다(Klimstra, 1998).

등유의 경우 CO₂ 농도에 대하여 CO 농도의 변화가 직선적으로 나타났으나, 높은 상관관을 보이지는 않았다(Fig. 3). CO₂ 농도 증가에 대한 NO_x 증가는 정의 상관관을 보이며 CO₂ 발생에 따라서 NO_x의 발생은 비례하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 특히 CO₂ 농도의 증감에 대한 각 유해가스의 변화패턴을 살펴보면 연료와는 크게 상관없이 NO_x가 CO₂ 농도의 증감에 유사한 값으로 증감하는 것으로 보아 연소시 비례하게 발생하는 것으로 알 수 있다(Klimstra, 1998).

그 밖에도 연소식 CO₂ 발생기를 사용할 경우 휘발성 물질들이 발생되어 작물에 큰 영향을 미칠 수 있으며, C₂H₄의 경우 0.5ppm 농도가 최대허용 농도로(환기횟수 0.2 기준) 매우 민감하게 작물은 반응할 수 있다. 측정된 15가지의 휘발성 물질 가운데 식물체에 영향을 줄 수 있는 5가지와 그 총량을 측정된 결과 적게는 34~153ppb의 농도값으로 계측되었다(Table 4). 이러한 농도는 매우 낮은 값으로 4개의 플라스틱 온실에서 사용된 연소식 CO₂ 발생기에서 부가적으로 발생하는 TVOC는 작물체의 생육에 영향을 미치지 못할 것으로 사료된다.

연소학적으로 백등유와 LPG를 비교할 경우 완전연소 할 수 있는 확률은 LPG가 높다. 기체 상태로 연소되기 때문인데, 등유와 같은 액체 상태로 연소할 경우 매우 높은 온도에서 연소할 경우(완전연소에 가까울 경우) 문제가 되지 않을 수 있지만 그렇지 못할 경우 유해가스 발생 확률이 매우 높아진다. 일반적으로 완전연소에 가까울수록 CO는 적어지고 NO_x는 많아지

고, 불완전연소에 가까울수록 CO는 높아지고 NO_x는 낮아진다. 등유를 연료로 이용할 경우 버너의 수명이 오래되거나 낮은 온도에서 연소될 때 숯(검댕)과 같은 고체로 떨어질 수 있으며 또는 유해가스 상태로 날아갈 수 있다(Nederlandse Gasunie 등, 1999; Kawamura 등, 2005). 이럴 경우 작물에 영향을 주는 요인은 유해가스로 날아가는 부분이라고 할 수 있고, 따라서 연료 종류별 최적 연소온도가 설정되고 이러한 최적온도에서는 각 유해가스 농도가 작물의 생육에 영향을 주지 않는 범위와 작업자의 공기환경에 나쁜 영향을 주지 않는 농도에서 발생되도록 해야 할 것이다.

연료에 따른 연소특성을 기본으로 온실 환경을 해석할 경우 작물에 미치는 CO와 NO_x 류의 임계 농도가 매우 중요하다고 할 수 있다(Nederlandse Gasunie 등, 1999). 실제로 NO의 경우 환기횟수가 약 0.2회의 조건에서 최대허용량이 약 35ppm, C₂H₄의 경우 약 0.5ppm으로 보고된 바 있다(Nederlandse Gasunie 등, 1999). 이러한 데이터를 기준으로 할 때 현재 시판되고 있는 CO₂ 발생기로부터 부가적으로 생성되는 NO_x 류가 작물에 미치는 영향은 매우 적을 것으로 판단되며, CO 값 또한 LNG를 사용한 E 온실의 경우를 제외하고 B 온실에서 2.1ppm까지 상승하였지만, 실제 수국의 재배에 전혀 문제가 없었다.

적 요

연소식 CO₂ 발생기 사용시 사용하는 연료에 따라서 발생하는 CO₂ 농도 및 유해가스 농도를 비교 분석하는 것을 목표로 하였다. 사용 연료로는 등유, LPG, LNG를 이용하였다. 연소식 CO₂ 발생기는 등유사용 국내제품을 설치한 온실(A), 외국제품을 설치한 온실(B), LPG 사용 국내제품과 외국제품을 설치한 온실 2개소(C와 D) 및 LNG 사용 온실(E)을 선정하였다.

Table 4. Concentrations of total volatile organic compounds (TVOC).

Green house	Benzene (µg/m ³)	Toluene (µg/m ³)	Ethyl benzene (µg/m ³)	Xylene (µg/m ³)	Stylene (µg/m ³)	TVOC (µg/m ³)
A	ND ^z	15.0	1.2	18.9	ND	34.8
B	2.3	17.2	10.7	13.8	3.7	153.2
C	1.9	14.1	8.6	11.6	ND	115.3
D	ND	7.7	3.6	7.3	ND	55.0

^zND-non detective

측정은 서울대학교 농생명과학공동기기원(NICEM)의 실내공기질 분석 시스템의 일부 측정시스템을 온실로 이동하여 측정하였다. 연소식 CO₂ 발생기 작동 유무에 따른 CO₂ 가스 증감은 NO_x류의 증감에 정의 상관을 보였으며, 사용 연식에 따른 버너의 내구성 저하에 따른 유해가스 발생량이 증가하였다. CO 농도가 매우 높게 나올 경우에는 발생기 내부에 컨버터를 장착하여 농도를 저감시켜 작물의 생리장해를 예방시킬 필요가 있었다. 전체적으로 CO₂ 발생에 따른 유해가스 농도는 최근 설치된 장치에서는 큰 문제가 없었으며 가장 낮은 유해가스 발생량은 국산 LPG 제품을 사용한 D 온실이었다.

주제어 : 등유, 유해가스, CO₂ 발생기, CO₂ 시비, LPG

사 사

이 논문은 농촌진흥청 아젠더 과제(식물생산공장)의 지원으로 수행되었음.

인 용 문 헌

- Chalabi, Z.S., A. Biro, B.J. Bailey, D.P. Aikman, and K.E. Cockshull. 2002a. SE - structures and environment: optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops. Part 1: Using pure carbon dioxide, Biosystems Engineering 81:421-431.
- Chalabi, Z.S., A. Biro, B.J. Bailey, D.P. Aikman, and K.E. Cockshull. 2002b. SE - structures and environment: optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops. Part II: Using the exhaust gases of natural gas fired boilers, Biosystems Engineering 81:323-332.
- Chaua, J., T. Sowlatia, S. Sokhansanj, F. Pretod, S. Meline, and X. Bib. 2009. Techno-economic analysis of wood biomass boilers for the greenhouse industry Applied Energy 86:364-371.
- Ikeda, H. 2003. Improving the performance and reducing the cost of facilities, In: Greenhouse horticulture handbook ed. 5, ed. by Japan Greenhouse Horticulture Association, Agripres, Tokyo, 56-60 (in Japanese).
- Jaffrin, A., N. Bentounes, A. M. Joan, and S. Makhlof. 2003. Landfill biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth. Biosystems Engineering 86:113-123.
- Jo, H.K. 2002. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. J. of Environmental Management 64:115-126.
- Kawamura, A. 2004. Gain and loss evaluation using numerical expression model of the various combustion type CO₂ application systems in greenhouse, J. SHITA. 16:50-62 (in Japanese).
- Kawamura, A., A. Akisawa, and T. Kashiwagi. 2005. Assessment of energy-conserving, environmental load-reducing, and cost-reducing performance of the combustion type thermal storage CO₂ fertilization system in a greenhouse. J. SHITA. 17:205-212 (in Japanese).
- Klimstra, J. 1998. Exhaust Treatment for CO₂ fertilization with reciprocation gas engines. International Gas Research Conference 391-403.
- Nederlandse Gasunie, N.V., M. Bekker, K. Hoving, and J. Klimstra. 1999. Increase in crop yields in greenhouse due to the combined heat and power using natural gas. New energy and industrial technology development organization (NEDO) abroad reports no. 816; <http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/816/caddet-816.html>.
- Shimaji, H. 2003. Complex control of the environment and energy conservation technology. In: Greenhouse horticulture handbook ed. 5, ed. by Japan Greenhouse Horticulture Association, Agripres, Tokyo, 206-216 (in Japanese).
- Son, J.E., J.S. Park, and H.Y. Park. 1999. Analysis of carbon dioxide changes in urban-type plant factory system. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 40:205-208.
- Son, J.E. and J.S. Park. 2001. NO₂ absorption and physiological response of lettuce in a semi-closed plant production system. Journal of Bio-Environmental Control 10:207-212.