

## 작물재배용 복합비료 및 축산분뇨 퇴비에 함유된 온실가스

최만권<sup>1†</sup> · 윤성욱<sup>2†</sup> · 윤용철<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>국립원예특작과학원 시설원예연구소 연구사, <sup>2</sup>농촌진흥청 농업공학부 에너지환경공학과 연구사,

<sup>3</sup>경상국립대학교 지역환경기반공학과 교수(스마트팜연구소)

## Greenhouse Gases in Compound Fertilizer and Livestock Manure Compost for Crops Cultivation

Man Kwon Choi<sup>1†</sup>, Sung Wook Yun<sup>2†</sup>, and Yong Cheol Yoon<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman 52054, Korea

<sup>2</sup>Researcher, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Jeonju 54875, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University (Institute of Smart Farm, GNU), Jinju 52828, Korea

**Abstract.** An experiment was conducted for this survey to approximate the amounts of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> contained in composite fertilizers and livestock manure compost produced and commercialized for crop cultivation in South Korea. The results are summarized as follows. The average CO<sub>2</sub> concentration in one sack of a composite fertilizer was estimated at approximately 1,733.3 ppm, regardless of the date of measurement. Approximately 0.067 kg of the fertilizer was contained per sack, and the unit weight of the fertilizer was approximately  $3.35 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . An average of  $885,750 \text{ t} \cdot \text{yr}^{-1}$  of the composite fertilizer was shipped for agricultural use in South Korea. Approximately 2.9 million  $\text{t} \cdot \text{yr}^{-1}$  of CO<sub>2</sub> was estimated to be contained in the composite fertilizer itself based on this amount. In the case of CH<sub>4</sub>, it was no longer measured after 76.8 ppm ( $2.949 \times 10^{-3} \text{ kg}$  per sack,  $0.15 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  per unit weight) was indicated in one sack on the start date of measurement. The measurement could not be accurate since the amount of CO<sub>2</sub> contained in the compost exceeded 10,000 ppm, which is the maximum measurement range of the measuring instrument, regardless of the closure or opening of the hole or the measurement date. Therefore, the amount contained per sack was approximately 0.506 kg when it was examined by assuming that it is 10,000 ppm, which is the maximum. It was found that the concentration of CH<sub>4</sub> varied depending on the closure and opening of the compost hole. Approximately 2.53 kg of CH<sub>4</sub> was contained in one sack of the compost. It was estimated to be over 4.7 million  $\text{t} \cdot \text{yr}^{-1}$  when this amount was compared to the average production of solid compost in South Korea. Approximately 8,040 ppm of CO<sub>2</sub> was discharged from the red pepper cultivation package on average until the end of the measurement. In the case of bare soil, the concentration of CH<sub>4</sub> gradually decreased over time, and it took approximately 50 days for it to reach almost zero from a maximum of 1,700 ppm.

**Additional key words :** carbon dioxide, greenhouse, methan, pepper cultivation

### 서 론

주로 인간의 활동에 의해 발생하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF<sub>6</sub>) 등의 온실가스는 점차 증가하고 있으며, 전 세계적으로 심각한 문제로 대두되고 있다.

온실가스는 주로 공업·산업 활동에서 발생하지만, 농·축산

업에서도 상당량 발생하는 것으로 보고되고 있다(Lee, 2012). 특히 대표적인 온실가스인 이산화탄소와 메탄은 지표로부터 방출되는 장파인 적외선을 흡수하여 지구온난화를 유발하고 있으며, 이들의 대기 중 농도는 해마다 각각 0.5% 및 0.8% 증가하고 있다(IPCC, 2007; Kang, 2010; <http://www.ipcc.ch>). 특히, 2014년 말 현재 대기 중의 이산화탄소 농도는 산업혁명 이전 280ppm에 비하여 약 100ppm 증가한 380ppm으로 약 42% 증가하였다. 또한 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도는 최근 10년 동안 매년 2ppm의 속도로 빠르게 상승했으며, CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 농도도 크게 증가하였다. 이산화탄소의 농도 급등에는 에너지 사용이 주요 요인이며 농업부분의 가축과 배 재배에서 발생하는

†These authors contributed equally to this work

\*Corresponding author: ychyoon@gnu.ac.kr

Received February 15, 2021; Revised March 21, 2021;

Accepted March 23, 2021

메탄과 아산화질소, 산업공정부분의 불화가스 및 아산화질소 배출도 주요 요인이다. 2010년 세계 온실가스 배출(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O)의 주요 요인별로 보면, 에너지, 산업공정 및 농업부분이 각각 68.0, 7.0 및 11.0% 정도이고, 기타부분이 14.0% 정도 차지하였다(IPCC, 2014; <http://www.ipcc.ch>). 이러한 온실가스 농도의 증가로 지난 100년간 지구의 평균기온을 0.74°C 정도 상승시켰으며, 앞으로 더욱 상승할 것으로 예측되고 있다(IPCC, 2007; Kang, 2010; <http://www.ipcc.ch>).

대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 상승의 대부분은 인간 활동에 의한 화석연료의 사용과 숲의 개발이 원인이고, 이런 인간의 활동이 지속된다면 기후변화는 더욱 심각해질 것으로 우려되고 있다. 또한 습지에서 많이 발생하는 CH<sub>4</sub>의 경우, 논에서 발생하는 전체 발생량의 13.0% 정도를 차지하고 있고, 인구증가와 함께 식량 재배는 더욱 증가할 것으로 예상되기 때문에, 대기의 CH<sub>4</sub> 농도는 앞으로도 계속 증가할 것으로 판단된다(Kang, 2010). 따라서 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub> 농도의 증가는 기후변화에 막대한 영향을 끼칠 것으로 예상되고 있다. 따라서 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도 상승에 따른 작물의 생장, 군락 내 CO<sub>2</sub> 교환, CH<sub>4</sub> 방출에 대한 연구는 광범위하게 추진되고 있으나, 미래에 예측되는 기후변화는 대기 중의 온실가스 농도 증가뿐만 아니라 기온상승도 포함하고 있다(IPCC, 2007; Kang, 2010; <http://www.ipcc.ch>).

농업은 기후변화에 취약한 한 분야로서 지구온난화의 영향을 받기 쉽다. 그리고 기후변화의 영향과 더불어 인구증가와 토지이용 변화에 따른 농경지의 감소 등으로 미래에 대한 곡물생산량 예측의 중요성이 증가하고 있다. 기후변화에 따른 미래 곡물생산성 예측에 대한 연구는 지역적 또는 전 세계적 관점에서 많은 연구가 되었고, 국내에서도 일찍이 관심을 가지고 연구된 바 있다(Yun, 1990; Lee 등, 1991; Shin와 Lee, 1995; Shim 등, 2005; Chung 등, 2006; Shim 등, 2010). Shim 등(2010)의 연구결과에 의하면 30년 평년(1971~2000년) 평균온도보다 온도가 2.0~3.0°C 정도 상승하면 국내 벼의 총생산량은 4.5~8.2% 감소하는 것으로 나타났고, 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도가 2배로 증가하면, 벼의 평균 생산량은 14.9% 감소하는 것으로 예측하였다.

또한 작물을 재배할 경우, 토양수분 및 온도나 무기태 질소의 변화에 따른 온실가스 배출량 평가하였고 지구온난화 잠재력을 고려하여 토성별 온실가스 발생량을 평가하였다(Kim 등, 2008, 2010). Jung 등(2011)은 생산시스템에서의 온실가스 배출량을 평가하고 보고하기도 하였다.

따라서 본 조사는 국내에서 작물재배용으로 생산 및 시판되는 복합비료와 축산분뇨 퇴비에 함유된 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>의 양을 개략적으로 알아보고자 실험적으로 수행하였다.

## 재료 및 방법

실험은 경상대학교 기상대 내에 설치되어 있는 길이 20.0m, 폭 6.0m, 측고 2.6m, 동고 4.0m 정도인 2연동 1-2W형 플라스틱 필름 고추재배 온실에서 수행되었다. 온실의 바닥면적은 120.0m<sup>2</sup>이며, 이 중 고추재배 면적은 약 10.0m<sup>2</sup> 정도이다. 고추재배 이랑은 흙색 필름으로 멀칭하였다.

고추재배 시에 기비로 사용한 복합비료와 축산분뇨 퇴비는 시중에 판매되고 있는 것으로서 중량 20.0kg 내에 주요 비료 성분인 질소, 인산 및 칼리가 각각 21.0%, 17.0% 및 17.0% 포함되어 있다. 축산분뇨 퇴비는 1등급으로써 중량 20.0kg 내에 유기물, 염분 및 함유물이 각각 30.0% 이상, 1.8% 이하 및 55.0% 이하로 함유되어 있고, 퇴비의 부숙도는 종자발아법의 경우에 70.0 이상인 것이다. 배합비율의 경우, 계분, 우분, 돈분, 톱밥 및 수피, 기타(미강, 왕겨 및 고토석회)가 각각 40.0%, 20.0%, 10.0%, 25.0% 및 5.0% 정도이다.

고추는 2019년 4월 27일에 정식하였으며, 정식간격은 0.2×0.3m으로 한 이랑에 2줄씩 정식하였다. 복합비료 및 축산분뇨의 시비량은 표준시비량, 즉 재배면적 10.0a 기준으로 복합비료 및 축산분뇨 퇴비의 표준시비량 49.0kg 및 2,000kg을 참고하여 각각 약 0.5kg 및 20.0kg을 시비하였다. 주요 온실가스인 CO<sub>2</sub> 및 CH<sub>4</sub>의 함량은 복합비료 및 축산분뇨 퇴비의 포대를 개봉하지 않은 것과 포장에 시비한 후, 일정한 일 간격으로 오전 9시경에 측정하였다. 측정은 계측기의 프로브(감지부)가 삽입할 수 있는 크기, 즉 포대나 멀칭 필름 표면에 직경 5.0mm(CH<sub>4</sub> 측정용) 및 50.0mm(CO<sub>2</sub> 측정용) 정도의 측정구를 만들어 실시하였다. 배출가스를 측정 후, 측정구는 테이프 프로 밀폐시켰다. 포대 및 포장에서의 측정은 3반복으로 처리하였다. CH<sub>4</sub>의 경우, 온실 외부에서 면적이 1.75m<sup>2</sup> 인 나지를 대상으로 흑색 플라스틱 필름으로 멀칭한 장소를 대상으로도 측정하였다. CO<sub>2</sub> 측정은 측정범위 및 정도가 각각 0~10,000 ppm, ±2~3%FS인 계측기(AHLBORN CO., ALMEMO 2690, Germany)를 사용하였다. CH<sub>4</sub>의 측정은 측정범위 및 정도가 각각 0~100%LEL(50,000ppm), ±5~10%FS인 계측기(NEW COSMOS CO., LTD., XP-3110, Japan)를 사용하였다. 가스 측정은 1회에 약 10분간 연속 측정하여 최댓값을 평균하여 사용하였다. 온실 내 포장과 나지에서 측정 개시일은 각각 5월 07일 및 5월 17일이다. 종료일은 메탄 배출량을 기준으로 배출량이 거의 없을 때, 즉 7월 31일까지로 하였다.

대상 온실의 설정 온도는 25.0°C였고, 측창과 천창을 ON/OFF 상태로 자동제어하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 온실 내부와 나지의 전경을 나타낸 것이다.



Fig. 1. View of inside greenhouse.



Fig. 2. View of bare land.

## 결과 및 고찰

### 1. 복합비료

복합비료의 한 포대에서 계측된 CO<sub>2</sub>의 농도는 계측한 날짜와 관계없이 평균 약 1,733.3ppm 정도로 일정하게 나타났다. 복합비료 한 포대의 부피가 약 0.0384m<sup>3</sup>인 점을 고려하여 한 포대당 함유된 양을 무게로 환산하면 0.067kg 정도이고, 비료의 단위 무게로 환산하면 3.35×10<sup>-3</sup>kg·kg<sup>-1</sup> 정도이다. 보도자

료(<http://www.newsam.co.kr>)에 의하면, 2015~2018년 동안 국내 복합비료의 평균 생산량은 1,723,500t 정도이고, 이 중 농업용으로 출하된 양은 885,750t이다. 농업용으로 출하된 양은 44,287,500포대로서 복합비료 자체에 함유된 CO<sub>2</sub>의 양은 약 2.9백만 t·yr<sup>-1</sup> 정도로 추정할 수 있다. 이 양은 2018년 말 현재 우리나라에서 배출되는 CO<sub>2</sub>의 총량이 664.7백만 t 정도에 비하면 복합비료 자체에 함유된 양은 미량인 것으로 확인되었다(<http://www.gri.go.kr>). 또한 이것은 복합비료 제조 전 단계(원료 물질의 취득 및 조합과 천연가스, 증유 및 전기 등 공급에너지를 포함한 제조 전 단계와 생산단계)에서 1.66kg·kg<sup>-1</sup> 정도 배출된다고 보고한 Jung 등(2011)의 결과와는 많은 차이가 있었다. 본 실험과 Jung 등(2011)이 대상으로 한 복합비료는 동일하다. 그러나 이러한 차이는 본 실험의 경우, 시중에 시판되는 복합비료에 포함된 양이고 Jung 등(2011)은 복합비료 생산 전 단계인 복합비료 원료 물질의 취득 및 조합과 천연가스, 증유 및 전기 등 공급에너지를 포함한 제조 전 단계와 생산단계를 포함하였기 때문인 것으로 판단된다.

CH<sub>4</sub>의 경우, 측정 개시일에 한 포대에 76.8ppm(포대당 2.949×10<sup>-3</sup>kg, 단위 무게당 0.15×10<sup>-3</sup>kg·kg<sup>-1</sup>) 정도 나타낸 후, 그 이후에는 측정되지 않았다. 실험에 사용한 복합비료는 시판될 때, 거의 진공상태이다. 메탄의 경우, 공기에 대한 비중이 0.415 정도로 아주 가벼워 개봉과 동시에 공기 중으로 확산되기 때문인 것으로 판단된다. 한 포대에 함유된 양은 Jung 등(2011)의 연구결과인 3.32×10<sup>-3</sup>kg·kg<sup>-1</sup>과는 CO<sub>2</sub>와 마찬가지로 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과의 차이는 CO<sub>2</sub>와 마찬가지로 Jung 등(2011)의 경우, 비료생산 단계뿐만 아니라 생산단계 이전 단계까지 포함하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

### 2. 축산분뇨 퇴비

시판되고 있는 축산분뇨 퇴비의 경우, 퇴비에 함유되어 있는 수분이나 가스 등의 배출을 위하여 포대 앞뒤 면에 직경 5.0mm 정도인 18개의 구멍이 개봉되어 있다. 본 실험에서는 퇴비를 구매한 직후, 이들 구멍을 폐쇄 및 개방하여 퇴비에 함유된 가스를 측정하였다.

퇴비에 함유된 CO<sub>2</sub>의 양은 구멍의 폐쇄 및 개방 여부에 관계없이 측정 일이나 측정구에 따라 계측기의 최대 측정범위인 10,000ppm을 초과하는 경우도 있었지만, 최대인 10,000ppm이라고 가정하고 검토하였다. 한 포대(부피 0.0506m<sup>3</sup>)당 함유된 양을 무게로 환산하면, 0.506kg 정도이다. 자료에 의하면(RDA와 NIAS, 2015) 2011~2014년 동안 국내에서 생산된 고품퇴비의 생산량은 평균 36,910,000t 정도이고, 이 양은

1,845,500천포대에 해당한다. 국내에서 생산되는 퇴비에 함유된 CO<sub>2</sub>의 총 양은 약 0.9백만 t·yr<sup>-1</sup> 이상이 될 것으로 추정할 수 있다. 물론 이 양은 본 실험에 사용한 퇴비를 기준으로 한 것이고, 퇴비를 제조할 때 축분의 종류, 부재료의 종류나 배합비율 등에 따라 다를 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3은 퇴비 구멍의 폐쇄 및 개방 여부에 따른 CH<sub>4</sub>의 변화 양상을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 폐쇄하거나 개방하면 CH<sub>4</sub>의 농도가 증감하는 것으로 나타났다. 구멍을 폐쇄하는 경우, 일정 기간 동안 CH<sub>4</sub>의 양이 증가하여 계측기의 최대 측정범위인 50,000ppm에 근접하게 되고, 반대로 개방하면 공기 중으로 확산되기 때문에 감소하여 거의 제로 상태에 도달하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 시판되고 있는 퇴비가 완전히 부숙되지 않았기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.

최대농도일 경우, 퇴비 한 포대에 함유된 CH<sub>4</sub>의 양은 무게로 환산하면 약 2.53kg이다. 이 양을 CO<sub>2</sub>와 마찬가지로 국내에서 생산된 고휘퇴비의 평균 생산량과 비교하면, 약 4.7백만 t·yr<sup>-1</sup> 이상이 될 것으로 추정할 수 있다.

퇴비에 함유된 CH<sub>4</sub>의 양은 2018년 말 현재 우리나라에서 배출된 CH<sub>4</sub>의 총량이 1.4백만 t 정도인 것을 고려하면(<http://www.gri.go.kr>), 본 실험에 이용한 퇴비에는 함유된 CH<sub>4</sub>의 양은 지나치게 높은 것으로 확인되었다.

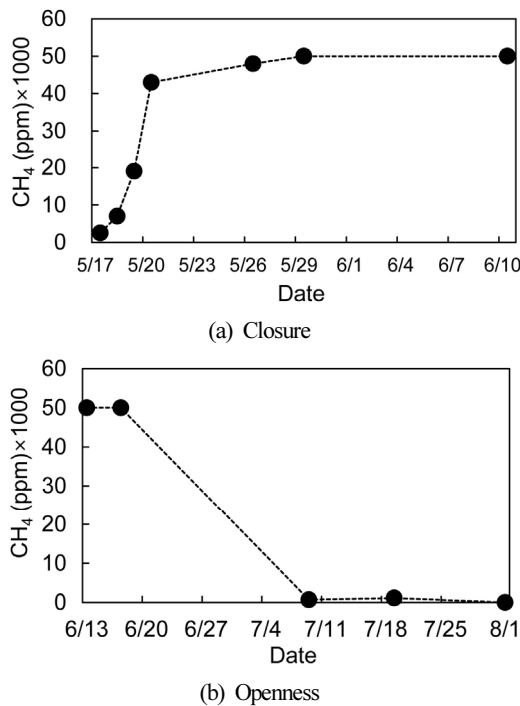


Fig. 3. Variations of CH<sub>4</sub> in livestock manure compost to close and open of hole on compost sack.

축산분뇨 퇴비의 경우, 퇴비제조 전체과정과 유통과정 및 재배지 살포 시 등을 고려한 온실가스 관련 연구나 작물 재배지 등에서 배출되는 온실가스 등에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다(Lee, 2012; Yun, 1990; Lee 등, 1991; Shin와 Lee, 1995; Shim 등, 2005; Chung 등, 2006; Shim 등, 2010). Shim 등(2010). 따라서 이들 분야 등에 대한 연구도 계속되어야 할 것으로 판단된다. 또한 국내 온실가스 인벤토리 보고양식 농업부분의 경우, 배출 및 흡수원 목록에 장내발효, 가축분뇨처리, 토양 등이 포함되어 있지만, CO<sub>2</sub>의 자료는 전무하다(<http://www.gri.go.kr>).

### 3. 고추재배 포장 및 나지

고추재배 포장에서 배출되는 CO<sub>2</sub>의 양은 측정 종료 때까지 평균적으로 8,040ppm 정도였다. 이 양은 작물을 재배하는 포장에서 일반적으로 제시하는 값(Chae 등, 2006; Nam 등, 2008), 즉 토층 10~30cm 깊이에 존재하는 20,000~26,600ppm 정도의 범위보다는 낮게 나타났다. 이것은 포장의 경우, 측정 위치가 토양 표면이고, 관개수에 의해 CO<sub>2</sub>가 용해되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4의 (a), (b)는 온실 내 고추 재배지 및 나지의 경우, CH<sub>4</sub> 농도의 변화 양상을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 경우, 고추를 2019년 4월 27일에 정식 한 후, 어느 정도 기간이 지나 측정을 시작한 직후에만 CH<sub>4</sub>의 농도를 측정할 수 있었다. 따라서 Fig.

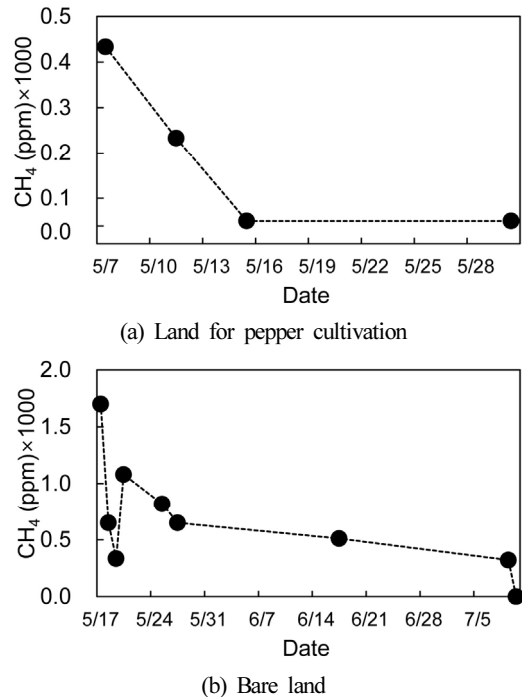


Fig. 4. Variations of CH<sub>4</sub> in pepper cultivation and bare land.

4의 (b)와 같이 나지에서 CH<sub>4</sub>의 농도변화를 측정하였다. Fig. 4의 (b)에서 알 수 있듯이 시간의 경과와 함께 CH<sub>4</sub>의 농도는 점차 감소하였고, 최대 1,700ppm에서 거의 제로 상태까지 약 50일이 소요되었다. 메탄은 공기 기준 비중이 0.415 정도밖에 되지 않기 때문에 완벽하게 밀폐되지 않으면 공기 중으로의 확산 속도가 빠르기 때문인 것으로 판단된다.

## 적 요

본 조사는 국내에서 작물재배용으로 생산 및 시판되는 복합 비료와 축산분뇨 퇴비에 함유된 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>의 양을 개략적으로 알아보고자 실험적으로 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 복합비료의 한 포대에서 측정한 CO<sub>2</sub>의 농도는 측정한 날짜와 관계없이 평균 약 1,733.3ppm 정도로 일정하게 나타났다. 비료 한 포대당 함유된 양은 0.067kg 정도였고, 비료의 단위 무게는  $3.35 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  정도였다. 국내에서 농업용으로 출하된 복합비료는 평균  $885,750 \text{t} \cdot \text{yr}^{-1}$  이었다. 이 양을 기준으로 복합비료 자체에 함유된 CO<sub>2</sub>의 양은 약 2.9백만 t·yr<sup>-1</sup> 정도로 추정할 수 있었다. CH<sub>4</sub>의 경우, 측정 개시일에 한 포대에 76.8ppm(포대당  $2.949 \times 10^{-3} \text{kg}$ , 단위 무게당  $0.15 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 정도 나타난 후, 그 이후에는 측정되지 않았다. 퇴비에 함유된 CO<sub>2</sub>의 양은 구멍의 폐쇄 및 개방 여부에 관계없이 측정 일이나 측정구에 따라 측정기의 최대 측정범위인 10,000ppm을 초과하는 경우도 있었지만, 최대인 10,000ppm이라고 가정하고 검토하였다. 따라서 최대인 10,000ppm이라고 가정하고 검토한 결과 한 포대당 함유된 양은 0.506kg 정도였다. 퇴비 구멍의 폐쇄 및 개방 여부에 따라 CH<sub>4</sub>의 농도가 증감하는 것으로 나타났다. 퇴비 한 포대에 함유된 CH<sub>4</sub>의 양은 약 2.53kg 정도였다. 이 양을 국내에서 생산된 고품퇴비의 평균 생산량과 비교하면, 약 4.7백만 t·yr<sup>-1</sup> 이상이 될 것으로 추정할 수 있었다. 고추재배 포장에서 배출되는 CO<sub>2</sub>의 양은 측정 종료 때까지 평균적으로 8,040ppm 정도였다. 나지의 경우, 시간의 경과와 함께 CH<sub>4</sub>의 농도는 점차 감소하였고, 최대 1,700ppm에서 거의 제로 상태까지 약 50일이 소요되었다.

**추가 주제어:** 고추재배, 메탄, 온실, 이산화탄소

## 사 사

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농식품기술융합창의 인재양성사업의 지원을 받아 연구되었음(717001-7).

## Literature Cited

- Chae J.C., S.J. Park, B.H. Kang, and S.H. Kim 2006, Theory of cultivation science. ed. Hyangmoonsa, Seoul, Korea, p. 143.
- Chung U.R., K.S. Cho, and B.W. Lee 2006, Evaluation of site-specific potential for rice production in Korea under the changing climate. Korean J of Agricultural and Forest Meteorology 8:229-241. (in Korean)  
<http://www.gri.go.kr>, Accessed 18 January 2021.  
<http://www.ipcc.ch>. Accessed 05 January 2021.  
<http://www.newsam.co.kr>, Accessed 18 January 2021.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2007, 2014. Climate Change 2007, 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. doi:10.1017/CBO9781107415416
- Jung S.C., J.A. Park, J.H. Huh, and K.H. So 2011, Estimation of greenhouse gas emissions of complex fertilizers production system by using life cycle assessment. Korean J Soil Sci Fert 44:256-262. (in Korean) doi:10.7745/KJSSF.2011.44.2.256
- Kang B.M. 2010, Canopy CO<sub>2</sub> exchange and CH<sub>4</sub> emission of rice under simulated global warming. MA Thesis. Department of Applied Plant Science Graduate School, Chonnam Natl. Univ., Gwanju, Korea.
- Kim G.Y., B.H. Song, K.A. Roh, S.Y. Hong, B.G. Ko, K.M. Shim, and K.H. So 2008, Evaluation of Green house gases emissions according to changes of soil water content, soil temperature and mineral N with different soil texture in pepper cultivation. Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer 41:399-407. (in Korean)
- Kim G.Y., K.H. So, H.C. Jeong, K.M. Shim, S.B. Lee, and D.B. Lee 2010, Assessment of Green house gases emissions using global warming potential in upland soil during pepper cultivation. Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer 43:886-891. (in Korean)
- Lee B.W., J.C. Shin, and J.H. Bong 1991, Impact of climate induced by the increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on agroclimatic resources, net primary productivity and rice yield potential in Korea. Korean J Crop Sci 36:112-126. (in Korean)
- Lee J.E. 2012, Emission amount of greenhouse gases from livestock manure. MA Thesis. Department of Animal Life System Graduate School, Kangwon Natl. Univ., Kangwon, Korea.
- Nam S.W., W.M. Suh, Y.C. Yoon, S.G. Lee, I.B. Lee, H.W. Lee, and B.G. Jo 2008, Engineering for bio-environment control. ed. Cheongsol, Daegu, Korea, p. 240.
- Rural Development Administration (RDA) and National Institute of Animal Science (NIAS) 2015, Symposium on development of energy technology using livestock manure.

- ed. RDA and NIAS, Jeonju, Korea, p. 40.
- Shim K.M., R.K. Roh, K.H. So, G.Y. Kim, H.C. Jeong, and D.B. Lee 2010, Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Climate Change Research* 1:121-131. (in Korean)
- Shim K.M., Y.S. Lee, Y.K. Shin, K.Y. Kim, and J.T. Lee 2005, Change in simulated rice yields under GCM 2×CO<sub>2</sub> climate change scenarios. *Proceedings of the Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology Conference* 13:88-92. (in Korean)
- Shin J.C., and M.H. Lee 1995, Rice production in south Korea under current and future climates. In: R.B. Matthews, M.J. Kropff, D. Bacheiet, and H.H. van Laar eds, *Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia*, IRRI & CAB International, Wallingford, UK, p. 119-215.
- Yun J.I. 1990, Analysis of the climatic impact on Korea rice production under the carbon dioxide scenario. *Asia-Pacific J of Atmospheric Sci* 26:263-274. (in Korean)