

## 사용한 한우 깔짚에서 배출되는 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O의 배출 특성

박규현\* · 최동윤 · 유용희

농촌진흥청 국립축산과학원

### The Patterns of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from used Litter Stockpile from Korean Native Cattle (Hanwoo)

Park, Kyu-Hyun\*, Choi, Dong-Yoon and Yoo, Yong-Hee

National Institute of Animal Science, RDA, Suwon 441-350, Korea

#### Summary

This study was conducted to measure methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from the 6 month old litter stockpile used for korean native cattle (Hanwoo) from August 3, 2007 to October 4, 2007. Daily mean CH<sub>4</sub> emissions was peaked to 273.013  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (SE :  $\pm 1.047 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) on first day and then gradually decreased to 2.309  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (SE :  $\pm 0.061 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) at the end of this experiment. Daily mean N<sub>2</sub>O emissions was as little as 0.269  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (SE :  $\pm 0.018 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) on first day, but exponentially increased up to 3.569  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (SE :  $\pm 0.454 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) on 43rd day and then slowly decreased to 1.888  $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (SE :  $\pm 0.012 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) at the end of this experiment. Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-eq), calculated by global warming potentials of CH<sub>4</sub> or N<sub>2</sub>O, of CH<sub>4</sub> on first day occupied approximately 99% of sum of CO<sub>2</sub>-eq of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O. Methane emissions decreased and N<sub>2</sub>O emissions increased so that CO<sub>2</sub>-eq ratio of CH<sub>4</sub> to N<sub>2</sub>O was 50:50 on 34th day. The effect of N<sub>2</sub>O on the ratio was increase thereafter. The ratio of daily mean CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions to daily error of the mean was calculated to find daily fluctuation of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions. The ratio of CH<sub>4</sub> was less than 1.0% till 11th day but increased to 10.9% on 57th day. The ratio of N<sub>2</sub>O (0.4%~51.0%) was higher than that of CH<sub>4</sub>, showing high in early stage and then gradually decrease, which was different from the pattern of CH<sub>4</sub>. The ratio of daily mean emissions to daily error of the mean was little in case of active CH<sub>4</sub> or N<sub>2</sub>O generation period, which would be caused by the temporal and spatial heterogeneity of composting process. Hence more air supply on early stage to decrease CH<sub>4</sub> generation and proper turning to reduce spatial heterogeneity are needed to mitigate greenhouse gas emissions.

**(Key words :** Greenhouse gas, Methane, Nitrous oxide, litter, Korean native cattle)

#### 서 론

지난 200년간 지구 대기 중의 메탄(CH<sub>4</sub>), 이산화질소(N<sub>2</sub>O), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 농도는

지속적으로 증가하고 있다. 이러한 가스들의 농도 증가는 인류의 화석연료 사용 및 경제 활동으로 인해 유발된 것으로 보이며, 온실 효과(greenhouse gas effects)를 증대시키는 것

Corresponding author : Kyu-Hyun Park, National Institute of Animal Science, RDA, Suwon 441-350, Korea.

Tel: 031-290-1718, Fax: 031-290-1731, E-mail: kpark74@korea.kr

2012년 10월 22일 투고, 2012년 11월 15일 심사완료, 2012년 11월 26일 게재확정

으로 논의되고 있다 (IPCC, 2006).

우리나라는 1990년 이후 국민소득이 증가하면서 축산물 소비량에 대한 욕구가 증가하고 가축 사육 두수도 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 곧 축산 부문에서 배출되는 온실가스의 증가로 이어지고 있다. 이러한 기후변화에 효율적으로 대응하기 위해서는 온실가스 배출량에 대한 실제 활동자료가 반드시 필요하며 (노 등, 2009), 특히 국내 주요 온실가스 배출원 및 배출량 조사를 정확하게 실시해야 한다 (김득수, 2007).

축산부문 인벤토리 관련 온실가스는 장내 발효 과정에서 배출되는  $\text{CH}_4$ 과 가축분뇨 처리과정에서 배출되는  $\text{CH}_4$ , 그리고  $\text{N}_2\text{O}$ 이다 (IPCC, 1996). 온실가스종합정보센터 (2011)의 우리나라의 인벤토리별 온실가스 배출량에 대한 국가보고서에 따르면, 2009년도 온실가스 총 배출량은 이산화탄소 환산량( $\text{CO}_2$ -equivalent, 이후  $\text{CO}_2$ -eq)을 기준으로 607.6백만톤  $\text{CO}_2$ -eq였으며 1990년 배출량 294.4백만톤  $\text{CO}_2$ -eq을 기준으로 하여 약 105.0% 증가한 수치였다. 2009년도 농업부문의 총 배출량은 19.8백만톤  $\text{CO}_2$ -eq 였으며 이는 국가 배출량의 3.3%를 차지하였다. 농업부문의 배출량 중 축산부문은 7.6백만톤  $\text{CO}_2$ -eq로 농업부문의 약 38.4%를 차지했다. 또한 농업부문 중 경종부문의 배출량은 지속 감소하는 반면 축산부문의 배출량은 1990년도의 비중이 24.3%였던 것에 비해 2009년도의 비중은 38.5%로 지속 증가하고 있다.

이러한 축산부문의 온실가스 배출량 증가에 따라 국가 인벤토리에서 그 중요성과 비중이 높아지고 있다. 우리나라에서 수행된 관련 연구 중 장내발효 과정 중의 온실가스 배출량 관련 연구는 사료 급여 수준에 따른  $\text{CH}_4$  배출량 차이 (설 등, 2012; 김 등, 2011), 첨가제 급여에 따른  $\text{CH}_4$  배출량 차이 (김 등, 2007), 국가 인벤토리를 위한  $\text{CH}_4$  배출통계 (이와 이, 2003)와 관련된 연구가 수행되었

다. 가축분뇨 처리과정 중의 온실가스 배출량 관련 연구는 바이오가스 생산기술 (김 등, 2010; 정 등, 2011), 퇴비 및 액비 제조 과정의 온실가스 배출량 (Park et al. 2011; 최 등, 2011)과 관련된 연구가 수행되었다. 하지만 다양한 가축분뇨의 특성에 비해 연구는 부족하다. 본 연구의 목적은 사용한 한우 깔짚에서 배출되는 온실가스의 배출특성 및 배출량을 분석하여 축산부문 인벤토리를 위한 데이터 확보에 있다.

## 재료 및 방법

### 1. 시험장소 및 재료

본 시험은 국립축산과학원에서 2007년 8월 3일부터 2007년 10월 4일까지 수행하였다. 시험 재료로는 국립축산과학원 한우사에서 6개월간 사용했던 톱밥을 모아 만든 퇴비 더미 (이후 깔짚 더미)이었으며, 그 곳에서 배출되는  $\text{CH}_4$ 과  $\text{N}_2\text{O}$ 의 양을 측정하였다.

### 2. $\text{CH}_4$ 및 $\text{N}_2\text{O}$ 측정

한우 깔짚 더미에서 배출되는  $\text{CH}_4$ 과  $\text{N}_2\text{O}$ 의 양은 온실가스 분석 시스템을 이용하여 분석하였다. 온실가스 분석 시스템은 Tunable Diode Laser Trace Gas Analyzer (TGA) (TGA100A, Campbell Scientific Inc., Logan, Ut., USA), 16 intake manifold unit (Campbell Scientific Inc., Logan, Ut., USA), a vacuum pump (RA0021, Busch, Virginia Beach, Va., USA), 운용 컴퓨터로 구성되었다. 공기 샘플링은 진공펌프와 연결된 샘플러를 이용하여 16곳에서 각각  $0.5 \ell \text{ min}^{-1}$  연속적으로 샘플링을 하였다. 각각의 샘플러에는 먼지필터 (F series, pore size  $7 \mu\text{m}$ , Swagelok, Solon, Oh., USA)를 설치하여 먼지를 제거하였다. 컴퓨터의 연결된 manifold unit은 매 15초마다 16곳

의 샘플링 장소 중에서 한 곳을 순차적으로 선택하고 선택된 샘플링 장소의 공기는 dryer를 거쳐 수분을 제거한 후 레이저 분석기로 보냈다. 레이저 분석기는 공기 샘플을 10회 초<sup>-1</sup>의 속도로 분석하고 그 결과는 컴퓨터에 저장되었다. 따라서 한 사이클의 분석을 위해 4분이 필요하였으므로, 각각의 샘플링 장소에서 샘플링한 공기는 한 시간 당 2,250회 분석되었다.

본 실험을 위해 국립축산과학원 축산환경과의 유리 온실 안에 corn-shape 모양으로 타원형 바닥 면적이 20.9 m<sup>2</sup>이며 높이가 110 cm인 깔짚 더미를 만들었다. 깔짚 더미가 만들어진 유리온실(폭 9.3 m, 길이 6.0 m, 높이 2.7 m)은 각각 지름 0.3 m의 팬이 설치된 입기구와 배기구를 제외하고 밀폐하여 mega chamber를 만들었다. 입기구와 배기구에 설치된 팬의 풍량을 측정하기 위해 PVC 파이프(길이 3 m, 내경 0.3 m)를 이용하여 파이프 내 수평 및 수직 5곳의 풍속을 열선풍속계(8386-M-GB, TSI Inc., St. Paul., MN)로 측정하여 평균 풍량을 계산하였다. 깔짚 더미에서 배출되는 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 양을 측정하기 위해, 16개의 샘플러들 중 입기구와 배기구에 각각 4개를 사용하여 총 8개의 샘플러가 설치되었다.

### 3. 배출량 계산 및 분석

CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O 배출량은 아래의 식으로 계산하였다.

$$Flux = \frac{Flow\ rate \times \Delta c}{Area}$$

위 식에서 Flux는 면적 당 단위시간 당 CH<sub>4</sub> 또는 N<sub>2</sub>O 배출량(μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)을 의미하며, Flow rate는 풍량(m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), Δc는 입기구와 배기구의 농도차, Area는 배출원의 면적(m<sup>2</sup>)을 의미한다. 이 중 Δc를 계산하기 위해서 아래 식을 사용하였다.

$$\Delta c = \frac{(c_{exhaust} - c_{inhalc}) \times P \times M}{T \times R}$$

위 식에서 c<sub>exhaust</sub>는 배기구에서 측정된 CH<sub>4</sub> 또는 N<sub>2</sub>O 농도(ppm), c<sub>inhalc</sub>는 입기구에서 측정된 CH<sub>4</sub> 또는 N<sub>2</sub>O 농도(ppm), P는 대기압(Pa), M은 CH<sub>4</sub> 또는 N<sub>2</sub>O의 분자량, T는 절대 온도(K), 그리고 R은 universal gas constant(8.314×10<sup>3</sup> Pa m<sup>3</sup> kmol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)를 의미한다.

CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 온실가스 효과는 다르기 때문에 이를 비교하기 위해 각각의 온실가스를 CO<sub>2</sub>의 영향과 비교하는 IPCC(2006)의 지구 온난화지수(Global Warming Potential, 이후 GWP)를 사용하였다. CH<sub>4</sub>의 경우 GWP는 25였으며 N<sub>2</sub>O의 경우 298이었으며 이를 이용하여 CO<sub>2</sub>-eq를 계산하였다(ex. 1 g CH<sub>4</sub> = 25 g CO<sub>2</sub>-eq, 1 g N<sub>2</sub>O = 298 g CO<sub>2</sub>-eq).

### 결과 및 고찰

한우 깔짚 더미에서 배출되는 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O 배출량과 배출 패턴은 Fig. 1에서 볼 수 있다. CH<sub>4</sub>의 일별 배출량은 측정 시작일(Day of Year, DOY 215)의 273.013 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>(SE : ±1.047 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)을 최대로 하여 점차 감소하여 측정 마지막일(DOY 277)에는 2.309 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>(SE : ±0.061 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)이었다. N<sub>2</sub>O의 일별 배출량은 CH<sub>4</sub>의 배출량과 달리 측정 시작일(DOY 215)에는 0.267 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>(SE : ±0.018 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)로 미미하였으나 시간이 지남에 따라 지속적으로 증가하여 DOY 258에 3.596 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>(SE : ±0.454 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)로 최대를 기록한 후 서서히 감소하여 마지막 측정일인 DOY 277에는 1.888 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>(SE : ±0.012 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)이었다. Park et al. (2011)도 이러한 특성을 발표하였다.

CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O는 각 단위 양 당 온실효과에 미치는 영향이 다르고, 퇴비화 과정 중 배출되는 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 양이 시간에 따라 다르다. 따라서 이를 비교하기 위해 GWP를 이용

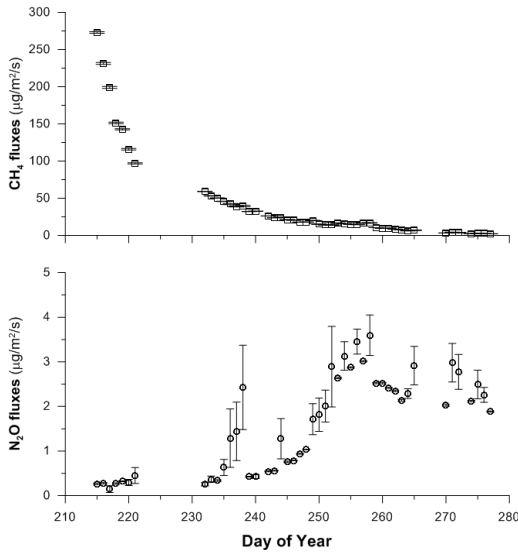


Fig. 1. Daily mean of CH<sub>4</sub> (□) and N<sub>2</sub>O (○) fluxes from the used litter stockpile for Korean cattle (Hanwoo). Vertical bars mean standard error of the mean.

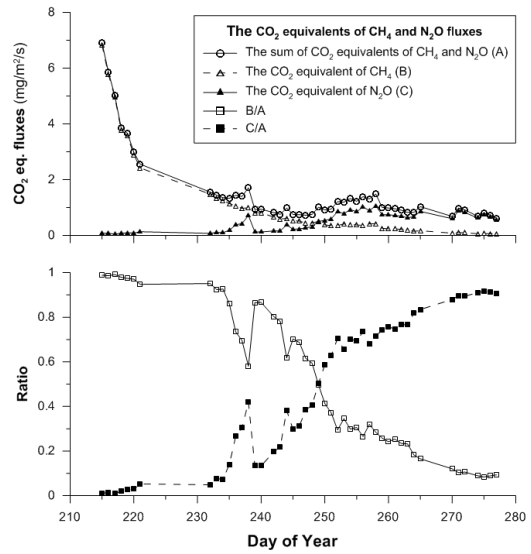


Fig. 2. Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-eq) fluxes calculated from CO<sub>2</sub>-eq of daily mean CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes and daily ratios of each CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O to total CO<sub>2</sub>-eq fluxes from the used litter stockpile for Korean cattle (Hanwoo).

하여 CO<sub>2</sub>-eq를 계산하였다 (Fig. 2). 시험 초기 (DOY 215)의 경우 CH<sub>4</sub> 배출량이 약 99%였으며 많은 양 (273.013 µg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)이 배출되었다. 이 때의 CO<sub>2</sub>-eq는 6,904.883 µg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>이었다. 이후 CH<sub>4</sub>의 배출량이 감소하고 N<sub>2</sub>O의 배출이 증가하면서 DOY 249에 CO<sub>2</sub>-eq에 대한 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 비율이 50:50이 되었고 이 때의 CO<sub>2</sub>-eq는 1,015.452 µg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>이었다. 이후에는 N<sub>2</sub>O의 영향이 더 컸다. 이산화탄소 환산량을 볼 때 초기에 CH<sub>4</sub> 배출량이 최대값을 보이며 급속히 감소하다가 N<sub>2</sub>O 배출량이 늘어나는 시점에서 CH<sub>4</sub>의 감소가 반영되어 DOY 239 이후로 1,000 µg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 내외의 양을 배출하는 것으로 나타났다.

Fig. 2에서 보듯, 사용한 한우 깔짚의 퇴비화 과정에서 초기에는 CH<sub>4</sub>의 배출량이 CO<sub>2</sub>-eq에 영향을 미치고 이후에는 N<sub>2</sub>O의 영향이 높은 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 1에서 보듯 CH<sub>4</sub>의 경우 하루 중 배출량 변동량이 작았으나 N<sub>2</sub>O의 하루 중 배출량 변동량은 크

게 나타났다. 따라서 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 하루 및 일별 배출 변동성을 보기 위해 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 일 평균 배출량에 대한 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 일별 표준오차의 비율을 계산하였다 (Fig. 3). Fig. 3에서 보듯 CH<sub>4</sub>의 경우 그 비율이 DOY 235까지는 1.0% 이하였으나 시간이 지날수록 증가하여 DOY 272의 경우 10.9%까지 증가하였다. 따라서 CH<sub>4</sub>의 경우 시간이 지날수록, 즉 CH<sub>4</sub> 배출량이 감소할 수록 비율이 증가하는 것으로 나타났다. N<sub>2</sub>O의 경우 CH<sub>4</sub>에 비해 그 비율이 컸는데 (0.4 %~51.0%) CH<sub>4</sub>의 경우와 달리 초기에 높았으며 시간이 지날수록 줄어들었다. 또한 비율의 일별 변동성도 높았다. 이러한 현상들은 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 배출 특성에 기인한다고 볼 수 있다. Park et al. (2011)는 퇴비더미에 공기를 넣었을 때 갑작스런 CH<sub>4</sub>의 감소와 N<sub>2</sub>O의 증가를 관측하였다. Sommer et al. (2004)는 퇴비더미의 윗부

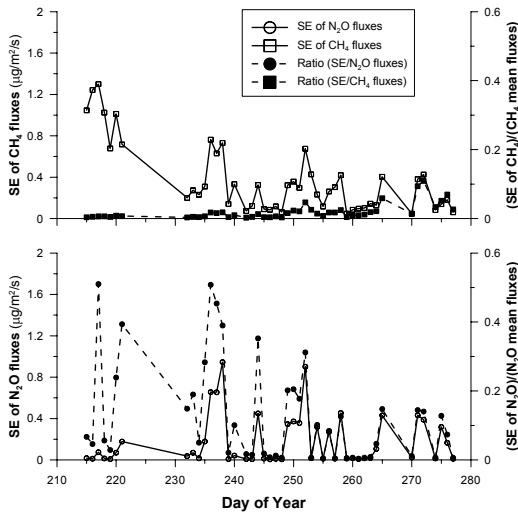


Fig. 3. The standard error of the mean (SE) and the daily ratio of SE to CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from the used litter stockpile for Korean cattle (Hanwoo).

분에서 가장 많은 CH<sub>4</sub>이 배출되며 옆 부분에서는 N<sub>2</sub>O가 많이 배출된다고 하였다. 이렇듯 공기와 접촉에 의해 배출가스 및 배출량의 변화가 심하고, N<sub>2</sub>O의 경우 초기에는 퇴비더미 외부에서 배출되다가 점차 심부에서도 배출되므로 그 변동성이 CH<sub>4</sub>에 비해 크다고 할 수 있다. 이는 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O 생성의 시간적, 공간적 비 균질성에 의한 것으로 볼 수 있다. 따라서 퇴비화 과정의 온실가스 배출량을 줄이기 위해서는 초기 공기 공급을 통해 CH<sub>4</sub> 배출량을 줄이고, 교반 등을 통해 공간적 비균질성을 감소시켜야 한다.

### 적 요

한우 깔짚 더미에서 배출되는 CH<sub>4</sub>의 일별 배출량은 측정 시작일의 273.013 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (SE: ± 1.047 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)을 최대로 하여 점차 감소하여 측정 마지막 일에는 2.309 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (SE: ± 0.061 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)이었다. N<sub>2</sub>O의 일별 배출량은 CH<sub>4</sub>의 배출량과 달리 측정 시작일

에는 0.267 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (SE: ± 0.018 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)로 미미하였으나 시간이 지남에 따라 지수적으로 증가하여 시험 시작 후 43일째에 3.596 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (SE: ± 0.454 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)로 최대를 기록한 후 서서히 감소하여 마지막 일에는 1.888 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (SE: ± 0.012 μg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)이었다. 지구온난화지수를 이용한 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O 배출량을 CO<sub>2</sub>-eq로 환산했을 때, 시험 첫 날 CH<sub>4</sub>에 의한 CO<sub>2</sub>-eq가 전체 환산량의 약 99%였다. 이후 CH<sub>4</sub>의 배출량이 감소하고 N<sub>2</sub>O의 배출이 증가하면서 34일 째에 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O에 의한 CO<sub>2</sub>-eq 비율이 50:50이 되었으며 이후 N<sub>2</sub>O의 영향이 더 컸다. CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 배출량 변동성을 보기 위해 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 일 평균 배출량에 대한 일별 표준오차의 비율을 계산하였다. CH<sub>4</sub>의 경우 그 비율이 11일째까지는 1.0% 이하였으나 시간이 지날수록 증가하여 57일 후에는 10.9%까지 증가하였다. N<sub>2</sub>O의 경우 CH<sub>4</sub>에 비해 그 비율이 컸는데 (0.4%~51.0%), CH<sub>4</sub>의 경우와 달리 초기에 높았으며 시간이 지날수록 줄었다. CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O의 생성이 활발할 경우 일 평균 배출량에 대한 일별 표준오차의 비율이 적으나 그렇지 않을 경우 비율이 높아졌는데 이는 배출장소의 비 균질성에 기인한다고 볼 수 있다. 따라서 퇴비화 과정의 온실가스 배출량을 줄이기 위해서는 CH<sub>4</sub> 감소를 위해 초기 공기 공급을 늘리며, 교반 등을 통해 비균질성을 감소시켜야 한다.

### 인 용 문 헌

1. IPCC. 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. Lim, K. Treanton, I. Mamaty, Y. Bonduki, D. J. Griggs and B. A. Callender eds.). UK Meteorological Office. Brackbell, UK.
2. IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for

- National Greenhouse Gas Inventories (S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe eds). The Institute for Global Environmental Strategies. Kanagawa, Japan.
3. Park, K. -H., Jeon, J. H., Jeon, J. H., Kwag, J. H., Choi, D. Y. 2011. Low greenhouse gas emissions during composting of solid swine manure. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:550-556.
  4. 김경훈, 설용주, 이성실, 오영균, 남인식, 김도형, 최창원. 2007. Caprylic acid와 Cyclodextrin 복합물이 *in vitro* 반추위 발효성상 및 메탄 생성에 미치는 영향. *한국동물자원과학회지* 49(5):657-666.
  5. 김두리, 하재정, 김종택, 송영한, 2011. 급여수준에 따른 한우 암소의 온실가스 배출량 평가. *한국동물자원과학회지* 53(5): 475-480.
  6. 김득수. 2007. 온실기체 (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) 의 하구엔갯벌 배출량과 배출특성연구. *한국대기환경학회지* 23(2):225-241.
  7. 김형진, 이대성, 장해남, 정태학. 2010. 유기성 폐기물의 혐기성 소화에 의한 바이오가스 생산 기술. *유기물자원화* 18(3): 50-59.
  8. 노기안, 김건엽, 심교문, 정현철, 이길재, 이덕배. 2009. 농경지 온실가스 배출 및 흡수 평가. *농촌진흥청*.
  9. 설용주, 김경훈, 백열창, 이상철, 옥지운, 이강연, 최창원, 이성실, 오영균. 2012. 한우 거세우의 반추위 메탄가스 생성량에 대한 곡류 사료원의 영향. *한국동물자원과학회지* 54(1):15-22.
  10. 온실가스종합정보센터. 2011. 2009년도 국가 온실가스 인벤토리 보고서.
  11. 이현정, 이상철. 2003. 가축 장내발효에 의한 국가단위 메탄 배출통계에 관한 연구. *한국동물자원과학회지* 45(6):997-1006.
  12. 정광화, 류승현, 남궁규철, 김재환, 곽정훈, 안희권, 유용희. 2011. 메탄생성 효율 증진을 위한 소화원료 전처리 연구. *한국축산시설환경학회지* 17(3):197-204.
  13. 최동윤, 박규현, 조성백, 양승학, 황옥화, 곽정훈, 안희권, 유용희. 2011. 돈분뇨 액비의 폭기 수준에 따른 여름철 온실가스 배출량 비교. *한국축산시설환경학회지* 17(3):163-170.