

## 유제품 가공산업의 폐수처리시설로부터 발생하는 온실가스 배출 특성

김지혜\* · 오민희\* · 김지효\*\* · 강성민\*\*\* · 정재현\*\*\* · 사재환\*\*\*\* · 전의찬\*\*\*\*\*†

\*세종대학교 대학원 기후변화협동과정, \*\* (사)에코맘코리아,  
\*\*\*세종대학교 대학원 환경에너지융합학과, \*\*\*\*이투엠쓰리(주), \*\*\*\*\*세종대학교 환경에너지공간융합학과

## Characteristics of GHGs Emissions from Wastewater Treatment Process of Dairy Industry

Kim, Ji-Hye\*, Oh, Minhee\*, Kim, Ji-Hyo\*\*, Kang, Seong-Min\*\*\*, Jeong, Jae-Heon\*\*\*,  
Sa, Jae-Hwan\*\*\*\* and Jeon, Eui-Chan\*\*\*\*\*†

\*Cooperate Course for Climate Change, Sejong University, Seoul, Korea

\*\*Eco Mom Korea, Seoul, Korea

\*\*\*Dept. of Environment & Energy, Sejong University, Seoul, Korea

\*\*\*\*E2M3 Inc., Gyeonggi, Korea

\*\*\*\*\*Dept. of Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

In this study, we researched the characteristics of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission of the wastewater treatment (WWT) process in the dairy industry. For flux measurements at the air-water interface, a floating dynamic flow-through chamber was used above the water surface. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O concentration from the WWT process was measured by NDIR (Non-Dispersive Infrared) Analyser. In the study, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes results showed a distinct difference for each WWT process. 60% of the GHG emissions which was the highest percentage were from the equalization tank. Reactor tank was second with 27% of the total emissions from the WWT. Aeration tank was third with 12% of the total emissions. The tendency was that the more the wastewater was treated, the less GHGs were emitted. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O showed the same tendency. This indicates that the concentrations and properties of wastewater could affect the tendency.

**key words:** Food(dairy) Industry, Wastewater Treatment Process, CH<sub>4</sub> Flux, N<sub>2</sub>O Flux

### 1. 서 론

2012년 기준 국내 하·폐수처리 부분의 온실가스 배출량은 1,468천 ton/CO<sub>2</sub>eq.으로 폐기물분야 온실가스 총 배출량 중 약 10%를 차지한다(2014, 온실가스종합정보센터). 산업폐수 처리시설에서 발생하는 온실가스는 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등으로 알려져 있으며, CH<sub>4</sub>는 폐수의 유기물이 혐기적으로 산화되는 과정에서 발생되고, 폐수 내 질소성분의 질산화 탈질산화 과정에서 N<sub>2</sub>O가 발생된다(IPCC, 2006). 메탄과 아산화질소는 IPCC에서 지정하고 있는 7대 온실가스에 포함되며, 온실효과는 이산화탄소에 비해 각각 14배, 310배 높고, 폐수처리시설에서의

발생되는 온실가스가 적은 양이지만 지구온난화에 기여할 만큼 잠재력이 존재하므로, 산업폐수 처리시설에서 발생하는 온실가스 발생량에 대한 연구가 필요한 시점이다(Margarita P, Scarlett LG, 2007).

하·폐수처리과정으로부터의 호기성과 혐기성 처리방법에 의해 일반적으로 온실가스가 배출된다는 다수의 논문들이 있다(Ulo Mander *et al.*, 2014; El-Fadel M *et al.*, 2001). 산업폐수는 고농도의 유기물과 무기물을 함유하고 있으며, 오염물질의 농도와 형태에 따라 처리과정이 다양하다. 폐수처리시설에서의 온실가스 발생의 정도와 형태는 산업형태 및 폐수처리 과정에 따라 다른 것으로 조사되고 있다(M Bani Shahabadi *et*

† Corresponding author: [ecjeon@sejong.ac.kr](mailto:ecjeon@sejong.ac.kr)

Received August 12, 2015 / Revised October 19, 2015(1st), March 9, 2016(2nd) / Accepted June 10, 2016

al., 2009; Omid Ashrafi et al., 2013). 현재 폐수부문에서의 온실가스 관련 연구는 하수 및 축산폐수처리 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 산업폐수처리 분야에서의 실질적인 배출량 연구는 미미한 상황이다.

하·폐수 처리부분 중 음식료품부문 폐수발생량은 342천 m<sup>3</sup>/ day로 전체 산업폐수 발생량의 6%를 차지하고 있으며, BOD 발생 부하량은 790천 kg/day로 산업폐수 평균부하량의 약 5배 높은 부하량을 보이고 있다(환경부, 2014). 또한 2013년 기준 유제품 소비량은 2009년 대비 약 18%가 증가하였으며, 앞으로 유제품 소비량은 꾸준히 늘어날 것으로 전망되고 있어(낙농통계연보, 2013), 유제품 가공산업의 폐수발생량 증가에 따른 온실가스 배출량 파악의 중요성이 커지고 있다. 식품업 중에서 유제품 가공 폐수의 특성은 계절과 시간에 따라 변동이 심한 편이며, 우유의 유입량, 용기 및 바닥 세척회수 및 제품불량률에 따라 폐수량, 수질 농도 등이 크게 변화하는 경우가 많다. 또한 유제품 가공 폐수는 용존성 유기물을 다량 포함하고 있으며, 보통 생물학적 처리법인 표준 활성슬러지법, 라군폭기법과 장기폭기법에 의해 주로 처리되고 있다(산업폐수발생과 처리, 환경부, 2008).

따라서 본 연구에서는 국내 식품산업 중 유제품 가공업의 폐수처리시설을 대상으로 Dynamic Flux Chamber를 이용하여 폐수처리공정별 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 플럭스를 산정하였다. 이를 통해 유제품 가공업의 폐수처리 시설의 폐수처리 공정별 온실가스 배출량을 산정하고, 배출 특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험 및 분석방법

### 2.1 대상시설 및 시료채취 지점

유제품가공 폐수의 처리과정에서 발생하는 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 배출 특성을 파악하기 위하여 S시에 위치한 사업장을 대상으로 하였다. 대상 사업장은 하루 평균 2,000 m<sup>3</sup>의 폐수가 발생되며, 이를 물리, 화학, 생물학적 활성슬러지법을 이용하여 처리하고 있다. Fig. 1과 같이 폐수원수는 침사조와 유수분리조가 이어져 있는 유입조를 거쳐 스크린을 통해 협착물이 제거된다. 이후 폭 8 m, 길이 3 m의 유량조정조, 폭과 길이가 13 m인 정방형의 반응조, 폭과 길이가 13 m인 정방형의 폭기조 4조, 지름이 13 m인 1차 침전조와 2차 침전조를 거친 후, 최종 방류된다. 본 사업장의 주요 공정에 대한 계통도 및 온실가스의 시료채취 지점, 시설규모는 Fig. 1와 Table 1에 각각 나타내었다.

### 2.2 시료채취 및 온실가스 농도 분석

유제품가공업 폐수처리 시설에서 사용한 실험장치의 모식도는 Fig. 2와 같다. 본 실험에 사용된 실험장치는 (1) DFC (Dynamic Flux Chamber), (2) 수분제거장치(Pretreatment), (3) 비분산적외선 분석기(NDIR), (4) 자료수집장치(Data logger) 등 크게 4가지 장치로 구성된다.

일반적으로 표면플럭스를 측정하기 위하여 US EPA(Envi-

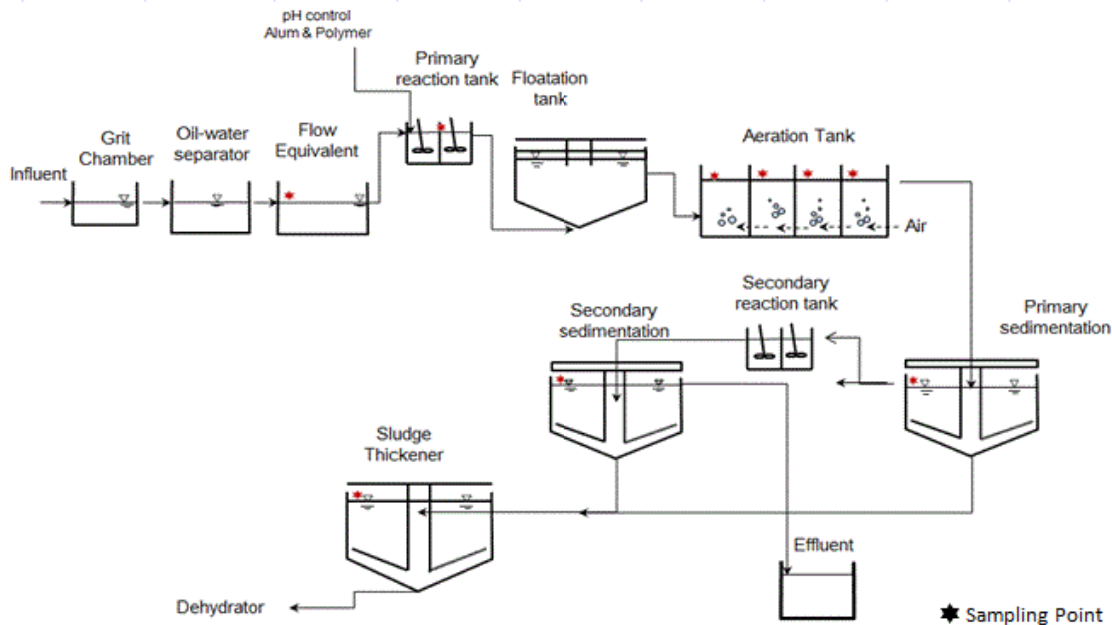


Fig. 1. Schematic diagram of the wastewater treatment process.

Table 1. Operational parameters of the wastewater treatment processes

Unit process (Basin)	Width (m)	Length (m)	Diameter (m)	Number	Area (m <sup>2</sup> )
Equalization	8	3		1	24
Reactor	13	13		1	169
Aeration	13	13		4	676
1 <sup>st</sup> sedimentation			13	1	177
2 <sup>nd</sup> sedimentation			13	1	177
Thickener			9	1	64
Wastewater flow (Average)			2,000 m <sup>3</sup> day <sup>-1</sup>		

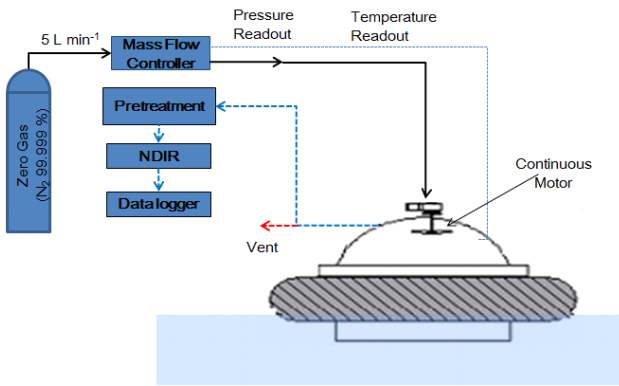


Fig. 2. Schematic diagram of dynamic flux chamber system configured to measure emission from a wastewater treatment tank.

ronmental Protection Agency)에서 제안한 Chamber법이 자주 이용되고 있다(Xu, 2014; 양형재 등, 2008; Viney *et al.*, 2006). 따라서 본 연구에서는 폐수처리 과정에서 발생하는 온실가스의 표면발산량을 조사하기 위하여 용량 30 L이고, 하부 원의 바닥면적이 0.13 m<sup>2</sup>인 DFC를 이용하였다. 또한, 고무튜브를 장착하여 수면에 띄운 DFC는 유속에 의해 이동하지 않도록 고정하였다(Sergio *et al.*, 2001; Viney *et al.*, 2006). DFC를 통하여 채취한 가스는 4°C로 설정된 수분제거장치 내부를 지나면서 수분이 제거된다. 이후 채취된 온실가스는 비분산적외선분석기(Non-Dispersive Infrared : SIENENS, ULTRAMAT)를 이용하여 현장에서 실시간으로 분석하였다. 측정기기의 교정은 제로가스(N<sub>2</sub>, 99.999%)와 스펠가스(CH<sub>4</sub> 894 μmol/mol,

N<sub>2</sub>O 179 μmol/mol)를 이용하였다. 또한 DFC 내부의 상부에 Thermocouple과 압력관을 설치하여 가스 채취 시 온도와 압력을 측정하였다. 온도와 압력은 NIDR 분석기를 통해 측정된 온실가스 농도와 함께 자료 수집장치(Dooil Tech, EMS-365)에 저장된다. 측정을 위하여 제로가스를 5 L min<sup>-1</sup>으로 일정하게 DFC에 흘려보냈고, CSRT(Continuous stirred tank reactor) 조건을 위하여 DFC 상부에 fan을 설치하였다. DFC 내의 이동가스 유입 및 유출 흐름이 안정한지를 확인한 후 Fig. 3과 같이 30분간 온실가스 농도 변화 추이를 확인하였다. 그 결과, 3 τ에서 5 τ까지 DFC 내부의 기체 흐름이 안정된 상태로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 3 τ에서 5 τ까지의 평균값을 채택하여 사용하였다. 일반적으로 이동가스 체류시간(τ)의 4 배가 될 때 안정된 상태로 가정되며, 여기서 τ는 DFC 부피(30 L)/이동가스의 유량조건(5 L min<sup>-1</sup>)이다(Viney *et al.*, 2006; M.R. Klenbusch, 1986). 현장조사는 2014년 7월부터 9월까지 총 3회에 걸쳐 수행되었으며, 처리공정별 온실가스 배출 특성을 파악하기 위하여 유량조정조, 반응조, 1차 침전조, 폭기조, 2차 침전조, 농축조를 대상으로 동일한 지점에서 연속하여 2 회씩 측정하였다. 시료의 분석작업이 완료되면 플럭스 챔버 내부의 오염 여부를 확인하고, 제로가스를 흘려보내어 다음 측정을 진행하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 가스 플럭스 산정

유제품가공업 폐수처리 시설의 각 처리과정별로 플럭스를 산정하여 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O의 배출 특성을 살펴보았다. 현장에서

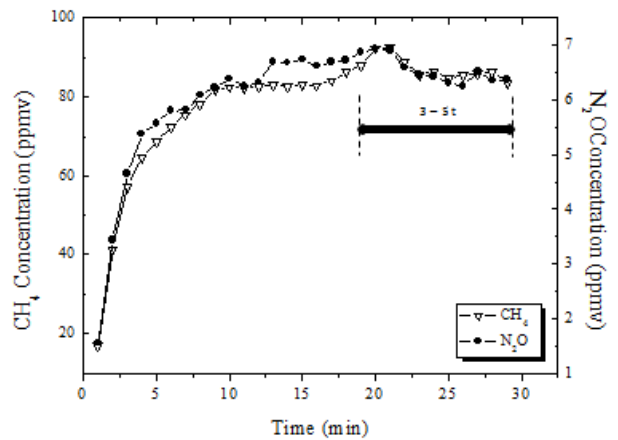


Fig. 3. Variations of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O concentrations from a wastewater treatment.

측정된 각 처리과정별 배출되는 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 농도(ppmv)를 이용하여 식 (1)과 같이 플럭스를 계산하였다(Nguyen, 2013; EPA, 1986).

$$F_i = \frac{C_i \cdot M_w \cdot P \cdot FR}{R \cdot T \cdot A} \quad (1)$$

여기서,  $F_i$ 는  $i$ 지점의 CH<sub>4</sub> 또는 N<sub>2</sub>O 플럭스( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{min}$ ),  $C_i$ 는  $i$ 지점에서 측정된 CH<sub>4</sub> 또는 N<sub>2</sub>O 농도(ppmv),  $M_w$ 는 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O의 몰질량(CH<sub>4</sub>: 16 g mol, N<sub>2</sub>O: 44 g mol),  $P$ 는 측정지점의 챔버 내부압력(atm),  $FR$ 은 챔버 내부 이동가스 유량(L/min),  $R$ 은 이상기체상수(82.0562 mL · atm/K · mol),  $T$ 는 챔버 내부 온도(K),  $A$ 는 챔버의 단면적( $\text{m}^2$ )이다.

### 3.2 처리과정별 온실가스 플럭스 특성

폐수처리 과정별로 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 농도를 측정하고, 플럭스를 산정하여 Fig. 4에 나타내었다. 박스그래프의 아래로부터 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 플럭스의 5-, 10-, 25-, median, 75-, 90-, 95-percentile이며, 검은 점은 평균값이다.

유제품 가공업의 폐수처리 과정에서 배출되는 온실가스 플럭스를 살펴보면 유량조정조 > 반응조 > 호기조 > 슬러지 농축조 > 2차 침전조 > 1차 침전조 순으로 폐수처리공정 뒷단으로 갈수록 온실가스 플럭스가 점차 감소되는 경향을 나타내고 있다. 유량조정조의 CH<sub>4</sub> 플럭스는 평균 29,870  $\mu\text{gCH}_4/\text{m}^2\text{min}$ 로 나타났고, N<sub>2</sub>O는 평균 4,299  $\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{min}$ 으로 처리과정 중에 가장 높은 값을 보였다. 일반적으로 혐기적인 상태에서 유기물농도가 높은 폐수의 경우 많은 CH<sub>4</sub>가 배출되는 것으로 알려져 있으며(환경부, 2000), 유제품 가공업의 경우에도 고농도의 유기물을 함유하는 유량조정조에서 다른 처리공정보다도 많은 양의 CH<sub>4</sub>가 발생하는 것을 알 수 있다.

pH 조절을 위하여 약품처리가 이루어지는 반응조에서의 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 플럭스가 두 번째로 높았는데, 각각 1,433  $\mu\text{gCH}_4/\text{m}^2\text{min}$ , 312  $\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{min}$ 로 산정되었다. 호기성 반응인 포기조에서의 CH<sub>4</sub> 플럭스는 168  $\mu\text{gCH}_4/\text{m}^2\text{min}$ , N<sub>2</sub>O는 34  $\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{min}$ 으로 조사되었고 1차 침전조에서의 CH<sub>4</sub> 플럭스는 11  $\mu\text{gCH}_4/\text{m}^2\text{min}$ , N<sub>2</sub>O는 4  $\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{min}$ , 2차 침전조에서의 CH<sub>4</sub> 플럭스는 19  $\mu\text{gCH}_4/\text{m}^2\text{min}$ , N<sub>2</sub>O는 9  $\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{min}$ 으로 산정되었다. 혐기성 반응인 슬러지 농축조의 CH<sub>4</sub> 플럭스는 평균 28  $\mu\text{gCH}_4/\text{m}^2\text{min}$ , N<sub>2</sub>O는 11  $\mu\text{gN}_2\text{O}/\text{m}^2\text{min}$ 으로 나타났다. CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 플럭스 모두 폐수처리 뒷단으로 갈수록 줄어드는 경향을 보였다.

호기성 환경보다 혐기성 환경에서 CH<sub>4</sub>가 배출된다고 알려

져 있으나(IPCC, 2006), 본 연구에서는 혐기성 반응인 슬러지 농축조보다 호기성 반응인 포기조에서 약 6배 정도 높게 배출되는 것으로 조사되었다. Marlies *et al.*(2009)에 따르면, 포기조의 경우 기계적 산소공급에 의해 수중에 녹아있는 N<sub>2</sub>O가 탈기현상으로 온실가스가 생성되는 것으로 나타났으며, CH<sub>4</sub> 또한 같은 기작으로 생성되었을 것으로 사료된다. 그러나 혐기성 조건으로 간주되는 농축조의 경우 유기물농도가 높으나, 슬러지를 농축시키는 과정에서 포기조보다 물의 흐름이 거의 없기 때문에 포기조보다 적은 양의 온실가스 배출되는 것으로 판단된다. 선행 연구를 살펴보면, Todd RW *et al.*(2011)은 미국의 뉴멕시코와 텍사스의 낙농업 농장에서 운영되고 있는 Lagoon에서의 CH<sub>4</sub> 배출량을 조사하였는데, 이 때 CH<sub>4</sub> 플럭스는 10,200~71,400  $\mu\text{g m}^{-2}\text{min}^{-1}$ 의 범위로 나타났다. 또한 그 외 유제품 가공산업에서의 CH<sub>4</sub> 배출량과 관련된 연구는 폐수처리과정에서보다는 대부분 낙농업 농장과 관련된 연구가 주를 이루고 있다(Gaodi, 2014; VanderZaag AC, 2011). Xu *et al.*(2014)은 폐수처리에 대한 A<sub>2</sub>O(Anaerobic-Anoxic-Oxic) 처리방법에 대한 연구로 공정 초기단계인 침사조에서의 CH<sub>4</sub> 플럭스가 다른 처리공정보다 높은 값을 나타낸 것으로 연구되었고, 본 연구처럼 유량조정조에서 높은 값을 가지는 것과 유사한 결과가 나타났다.

N<sub>2</sub>O는 일반적으로 생물학적 탈질시 질소원소가 형성되는 과정 중에 생성되는데, 질산화 과정 중에 생성되는 이유에 대해서는 정확히 알려져 있지 않다(임병란 등, 2011). Inamori *et al.*(2006)에서 BOD 농도가 높은 인공습지에서 N<sub>2</sub>O가 많이 발생됨을 관찰할 수 있었는데, BOD 농도에는 NH<sub>3</sub>-N 농도, 온도 등이 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 표준화슬러지법 처리공정에서 NH<sub>3</sub>-N의 농도상승에 따라 N<sub>2</sub>O 생성량이 증가됨이 조사되었다(水落等, 1999). 본 연구의 대상시설의 경우, 명확한 N<sub>2</sub>O 발생기작은 파악하기 어렵지만, 유제품에 포함된 유기물이 분해되어 생성된 NH<sub>3</sub>-N 농도 등이 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다.

측정기간 동안의 7월의 평균 기온은 26°C, 8월은 평균 24°C, 10월은 평균 19°C로 7월의 평균 기온은 10월에 비해 약 7°C 높았다. 7월의 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O의 플럭스가 가장 높았는데, 이는 폐수의 유기물의 농도에 의한 영향과 함께 대기의 온도에도 영향을 받았을 것으로 판단된다. 오원기 등(2009)에서 하수처리장 침사지에서 발생하는 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 농도를 조사하였는데, 침사지에 설치한 챔버 내 온도가 10월보다 11월이 10°C 이상 낮았다. 조사된 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O 농도 또한 11월이 10월보다 각각 78%, 70% 감소하여 본 연구와 같이 기온이 낮아질수록 온실가스도 낮은 농도로 발생하는 유사한 경향을 보였다. 하

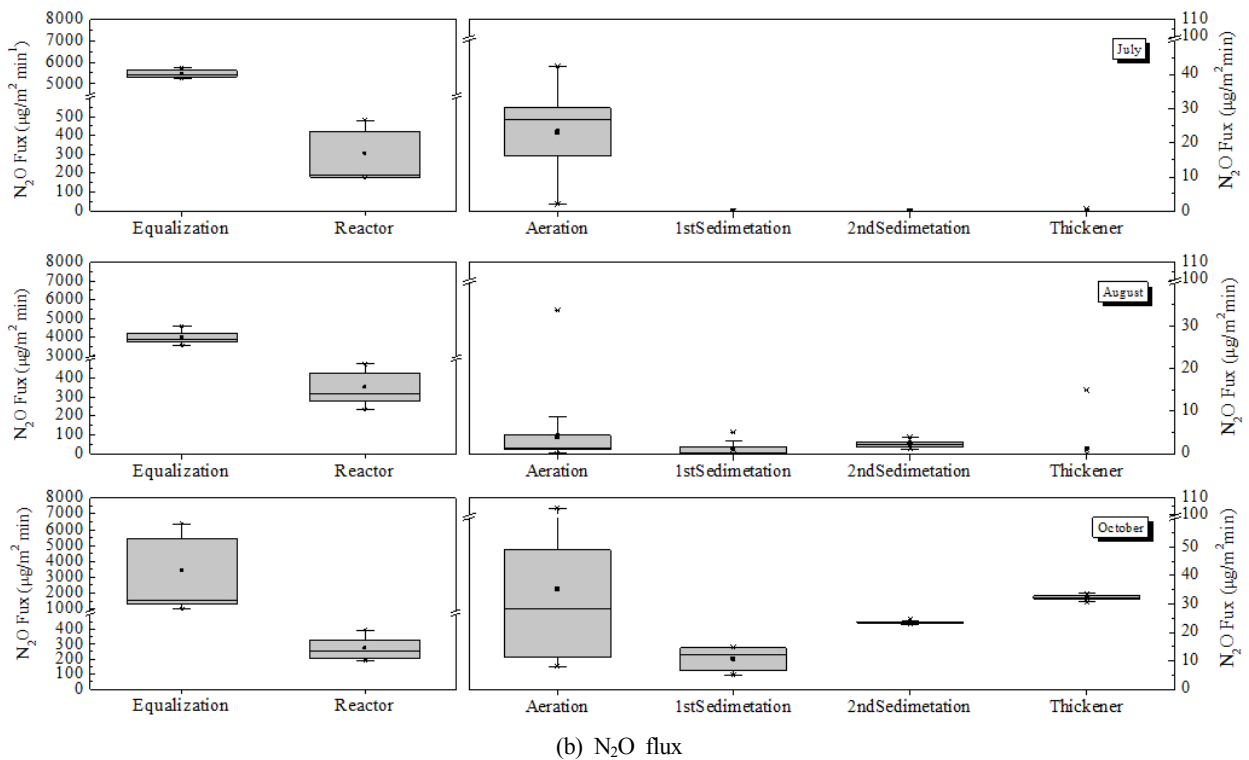
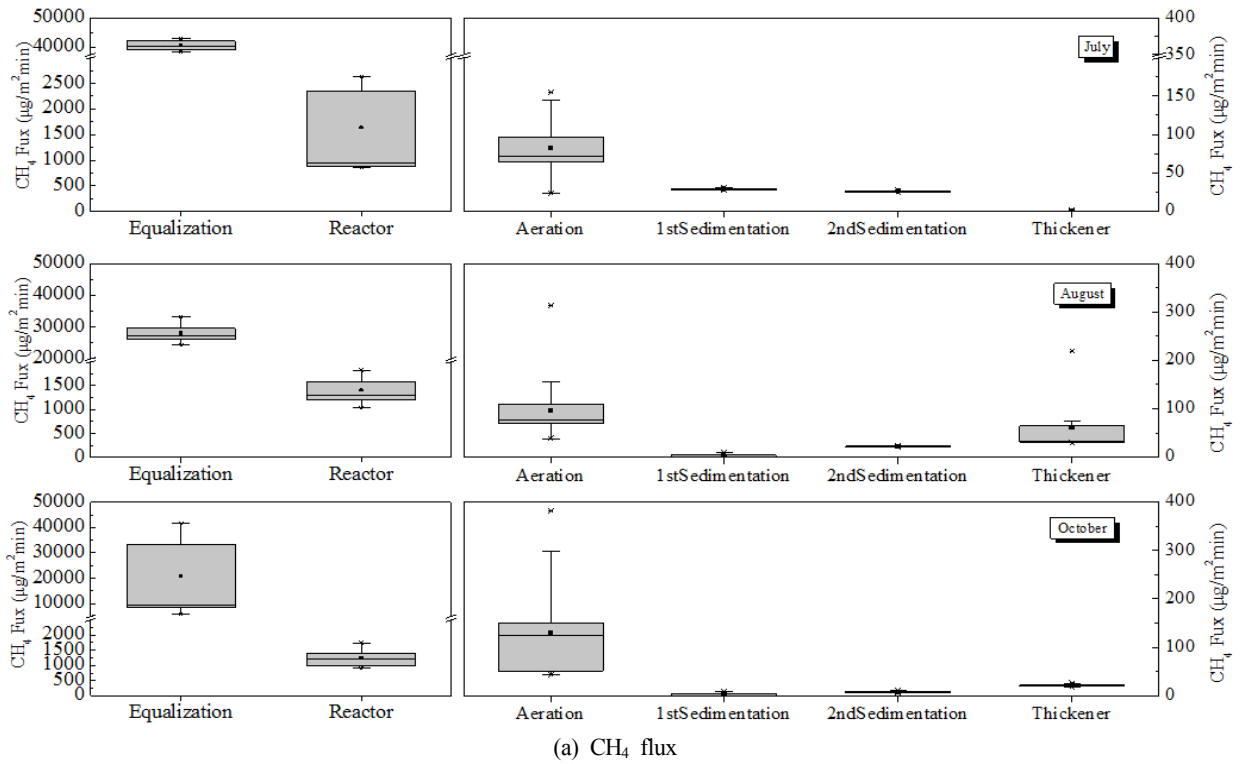


Fig. 4. A box diagram for seasonal variation of GHGs flux at each wastewater treatment plant (including (a) CH<sub>4</sub>, (b) N<sub>2</sub>O).

수에 포함된 유기물의 양은 CH<sub>4</sub> 발생량을 결정하는 주요 요소인 것으로 알려져 있으며, 온도는 CH<sub>4</sub> 생성미생물의 활성에 영향을 줄 수 있다(IPCC G/L, 2006).

한편, 10월에 측정된 유량조정조에서의 플럭스의 표준오차가 다른 측정지에 비해 높은 것을 확인할 수 있다. 현장 조사 시 1차 측정 이후 2차 측정 시 급격하게 유입폐수의 성상이 달라졌는데, 7월 측정일의 유량조정조 폐수 BOD와 TN이 각각 89.5 ppm, 6.3 ppm이었던 것에 반해 10월 측정일의 유량조정조의 폐수 BOD와 TN은 각각 1,444 ppm, 12.7 ppm으로 조사되어 10월의 유량조정조에서의 폐수의 유기물 농도가 다소 높았던 것으로 확인되었다. 따라서 이러한 이유로 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O 플럭스의 변화에 크게 영향을 미친 것으로 판단된다.

**3.3 유제품 가공업 폐수처리 공정에서 배출되는 온실가스 표면 배출량**

폐수처리 과정별로 현장측정을 통해 조사한 CH<sub>4</sub> 플럭스와 각 폐수처리 수조의 표면적을 이용하여 대상 폐수처리장에서 배출되는 온실가스 배출량을 계산하였다. 계산 결과를 토대로 시설별 CO<sub>2</sub> 환산배출량을 비교한 결과를 Table 2에 나타내었다. Fig. 5는 각 폐수처리과정이 차지하는 온실가스 배출량 비율을 보여주고 있다.

폐수처리과정 중 유량조정조에서의 CH<sub>4</sub> 배출량은 연평균 376.8 kgCH<sub>4</sub>/yr, N<sub>2</sub>O 배출량은 69.0 kgN<sub>2</sub>O/yr로 온실가스 배출량에서 기여하는 비율이 가장 높았다. 이를 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 배출량을 합한 후 CO<sub>2</sub> 배출량으로 환산하면 유량조정조에서 온실가스 총배출량의 약 60%를 배출하는 것으로 나타났다. 또한 반응조의 CH<sub>4</sub> 플럭스가 두 번째로 높은 값을 나타냈는데,

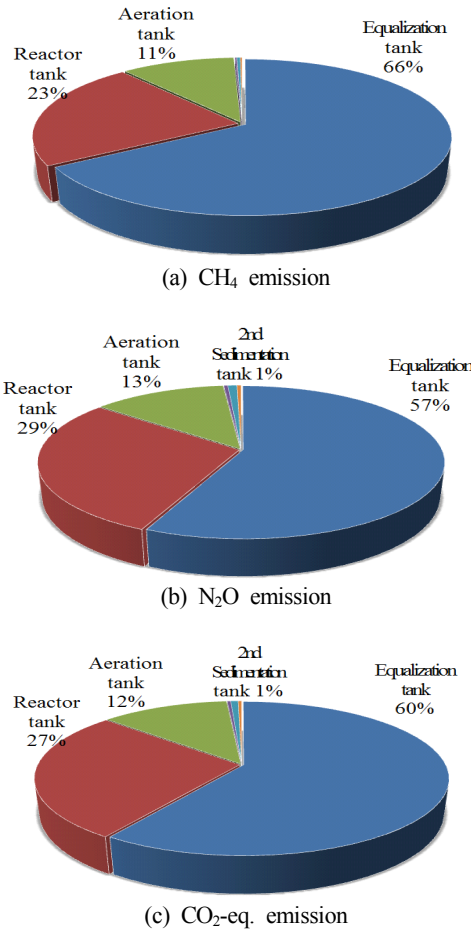


Fig. 5. Ratio of emissions from wastewater plants to total greenhouse gas emissions (including (a) CH<sub>4</sub>, (b) N<sub>2</sub>O, (c) CO<sub>2</sub> expressed as CO<sub>2</sub> equivalents)

Table 2. Estimation of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from the wastewater treatment plant

Treatment process	Emission of GHGs										tonCO <sub>2</sub> -eq./yr
	CH <sub>4</sub> (kg/yr)					N <sub>2</sub> O (kg/yr)					
	July	August	October	Mean	SD	July	August	October	Mean	SD	
Equalization	511.6	354.0	264.8	376.8	102.0	69.0	50.6	43.1	54.2	10.9	24.7
Reactor	145.4	125.0	111.3	127.3	14.0	27.3	31.4	24.4	27.7	2.9	11.3
Aeration	73.1	57.6	48.2	59.6	10.3	13.6	11.2	11.2	12.0	1.1	5.0
1 <sup>st</sup> sedimentation	2.7	0.3	0.3	1.1	1.1	0	0.1	1.0	0.4	0.4	0.1
2 <sup>nd</sup> sedimentation	2.4	2.1	0.7	1.7	0.7	0	0.2	2.2	0.8	1.0	0.3
Thickener	0.0	2.1	0.7	0.9	0.9	0.0	0.0	1.1	0.4	0.5	0.1
<b>Total</b>	<b>735.2</b>	<b>541.0</b>	<b>425.9</b>	<b>567.4</b>		<b>109.9</b>	<b>93.6</b>	<b>83.0</b>	<b>95.5</b>		<b>41.5</b>

반응조의 면적을 적용하였을 때 127.3 kgCH<sub>4</sub>/yr로 전체발생량의 27%를 차지하였고, 포기조의 경우는 평균 CH<sub>4</sub> 플럭스 22.2 mg/m<sup>2</sup>·min였지만, 포기조의 면적을 적용하면 평균 CH<sub>4</sub> 배출량은 263.0 kgCH<sub>4</sub>/yr로 전체 배출량의 12%를 차지하는 것으로 조사되었다. 비록 반응조의 CH<sub>4</sub> 플럭스와 N<sub>2</sub>O 플럭스는 포기조보다 각각 약 8배, 9배 높게 나타났지만, 포기조의 표면적이 반응조보다 넓은 면적을 차지함으로 인해 CO<sub>2</sub> 환산 배출량은 포기조보다 약 2배 더 높게 나타나는 것으로 조사되었다. 전체 배출량 중 유량조정조와 반응조, 포기조에서의 배출량이 99%를 차지하는 것으로 조사되어, 해당 유제품 가공업 폐수처리장에서 세 공정이 갖는 온실가스 배출량의 영향력이 가장 높은 것으로 판단된다. 계절별 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O의 배출량을 비교하면 7월의 총배출량이 많았으며, 특히 유량조정조에서의 계절 간 배출량 차이가 컸다.

#### 4. 결 론

본 연구는 폐수처리 시설에 대한 온실가스 배출에 관한 연구로, 유제품 가공업의 폐수처리장을 대상으로 현장측정을 실시하였고, 총 3회에 걸쳐 폐수처리 과정별로 온실가스배출 특성을 조사하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

유제품 가공업의 폐수처리 과정에서의 CH<sub>4</sub> 배출량은 7월 735.2 kgCH<sub>4</sub>/yr, 8월 541.0 kgCH<sub>4</sub>/yr, 10월 425.9 kgCH<sub>4</sub>/yr로 평균 567.4 kgCH<sub>4</sub>/yr이었다. 기온이 낮아질수록 CH<sub>4</sub> 배출량도 감소하는 경향을 보였다. 유기물 농도가 높을 것으로 예상되는 혐기성 조건인 유량조정조에서 전체 CH<sub>4</sub> 배출량 중 66%를 차지하는 것으로 나타났다.

N<sub>2</sub>O 총배출량은 7월 109.9 kgN<sub>2</sub>O/yr, 8월 93.6 kgN<sub>2</sub>O/yr로, 10월 63.0 kgN<sub>2</sub>O/yr로 평균 95.5 kgN<sub>2</sub>O/yr가 배출되는 것으로 조사되었으며, CH<sub>4</sub>와 마찬가지로 기온이 낮아질수록 N<sub>2</sub>O 배출량도 줄어들었다. 유량조정조에서 총 N<sub>2</sub>O 배출량의 57%를 차지하여 CH<sub>4</sub>와 같은 경향을 보였다.

유량조정조, 반응조, 포기조에서 발생하는 온실가스가 대상폐수처리장 온실가스 총배출량의 대부분인 99%를 차지하는 것으로 나타났다. 일반적으로 혐기성 조건에서 CH<sub>4</sub>가 많이 발생하는 것으로 알려져 있는데, 호기성 조건인 포기조보다 혐기성 조건인 농축조에서 온실가스 배출량이 낮았다.

대상폐수처리장에서는 처리공정 프로세스의 차이, 운영상황, 온도조건에 따라 온실가스 발생량이 변동이 생길 수 있음을 확인하였다. 따라서 신뢰성 있는 정확한 온실가스 배출량을 산정하기 위해서는 대상 폐수처리장의 특성과 운영상황을 충분히 고려해야 할 것으로 사료된다.

#### REFERENCES

- Bani Shahabadi M, Yerushalmi L, Haghghat F. 2009. Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants. *Water Research* 43:2679-2687.
- El-Fadel M, Massoud M. 2001. Methane emissions from wastewater management. *Environmental Pollution* 114: 177-185.
- Gang Y. 2004. Study on methane emissions from wastewater treatment facilities using the Floating flux chamber. *Environmental Management Association* 10(4):229-239.
- Greenhouse Gas Inventory & Research. 2014. National inventory report, pp 293-300.
- Inamori R, Gui P, Dass M, Matsumura K, Xu Q, Kondo T, Ebie Y, Inamori Y. 2006. Investigating CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from eco-engineering wastewater treatment process using constructed wetland microcosms. *Process Chemistry* 42(3):363-373.
- IPCC. 2014. Summary for policymakers: Climate change 2014; Impacts, adaptation, and vulnerability, part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Jang HS, Kim TH, Lee MJ, Hwang SJ. 2009. Effects of operational condition on N<sub>2</sub>O production from biological nitrogen removal process(in Korean with English abstract). *Korean Society of Water & Wastewater* 23(5):547-555.
- Johansson AE, Gustavssonb AM, O quiste MG, Svensson BH. 2004. Methane emissions from a constructed wetland treating wastewater - seasonal and spatial distribution and dependence on edaphic factors. *Water Research* 38:3960-3970.
- Klenbusch MR. 1986. Measurement of gaseous emission rates from land surfaces using an emission isolation flux chamber. *User's Guide*. EPA/600/8-86/008.
- Lim BR, Cho GJ, Jung YH, Yang JK, Lee SK. 2011. Estimation of greenhouse gas emission from livestock wastewater treatment plants(in Korean with English abstract). *Korea Society of Waste Management* 28(2):175- 183.

- Margarita P, Scarlette LG. 2007. Application of strategies for sanitation management in wastewater treatment plants in order to control reduce greenhouse gas emissions. *J Environ Manage* 88(4):658-664.
- Marlies JK, Hardy T, Robbert K, Mike SM, Jettena C, Mark CM van Loosdrecht. 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research* 43:4093-4103.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2013. Statistical yearbook of agriculture, food and rural affairs.
- Ministry of Environment. 2000. An assessment report of the potential greenhouse gas reduction on the environment.
- Ministry of Environment. 2014. Wastewater generation and treatment.
- Mizuochi M, Sato K, Inamori Y, Matsumura M. 1999. Comparative analysis of methane and nitrous oxide emitted from the conventional activated sludge process and the anaerobic anoxic oxic process as sewage treatment system. *Japanese Society of Water Treatment Biology* 35(2):109-119.
- National Institute of Environmental Research. 2006. Wastewater treatment facilities classification and unit ass discharge of wastewater discharge facilities.
- Nguyen TD, Samuel S, Lars L, Henrik R, Patrick C. 2013. Automated flux chamber for investigating gas flux at water-air interfaces. *Environmental Science & Technology* 47:968-975.
- Omid A, Laleh Y, Fariborz H. 2013. Greenhouse gas emission by wastewater treatment plants of the pulp and paper industry - Modeling and simulation. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 17:462-472.
- O W-k, Choo Y-y, Jung Y-m, Kim K-k, Jin B-b. 2009. Estimating the greenhouse gases emission rates and their emission factors of a wastewater treatment plant with an MLE process(in Korean with English abstract). *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis* 12(2):87-95.
- Sergio CC, Cale NB, Saqib M, Atilla M, Bryan WS, Ronald EL, Calvin BP Jr. 2001. Recovery of gaseous emission from ground level area sources of ammonia and hydrogen sulfide using dynamic isolation flux chambers. *The Canadian Society for Engineering in Agricultural, Food, and Biological Systems*.
- Simon E, Leandro B, Kyoko M, Todd N, Kiyoto T. 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. vol. 5, Waste, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- Todd RW, Cole NA, Casey KD, Hagevoort R, Auvermann BW. 2011. Methane emissions from southern high plains dairy wastewater lagoons in the summer. *Animal Feed Science and Technology* pp 166-167, 575-580.
- Ulo M, Gabriela D, Yoshitaka E, Sirintornthep T, Chart C, Sandra FN, Baasansuren J, Kuno K, Jaak T, Julien T, William JM. 2014. Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering* 66:19-35.
- VanderZaag AC, Wagner-Riddle C, Park K-H, Gordon RJ. 2011. Methane emissions from stored liquid dairy manure in a cold climate. *Animal Feed Science and Technology* pp 166-167, 581-589.
- Viney PA, Jessica B, Candis SC, Hugo HR. 2006. Dynamic chamber system to measure gaseous compounds emissions and atmospheric-biospheric interactions. *Environmental Simulation Chambers: Application to Atmospheric Chemical Processes* pp 97-109.
- Xu Y, Lin L, Junxin L. 2014. Characteristics of greenhouse gas emission in three full-scale wastewater treatment processes. *Journal of Environmental Sciences* 26:256-263.
- Yang HJ, Park JM, Kim MJ. 2008. Estimate of nitrous oxide emission factors from municipal wastewater treatment plants(in Korean with English abstract). *Korean Society of Environmental Engineers* 30(12):1281-1286.
- Zhu G, Ma X, Gao Z, Ma W, Li J, Cai Z. 2014. Characterizing CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from an intensive dairy operation in summer and fall in China. *Atmospheric Environment* 83:245-253.