

MLE공법과 황이용 탈질 프로세스의 전과정 탄소 배출량 평가

Life Cycle Assessment of the Carbon Emissions of MLE process and Denitrification Process Using Granular Sulfur

문진영 · 황용우*

Jin-young Moon · Yong-woo Hwang*

인하대학교 환경공학과

(2012년 1월9일 접수; 2012년 10월5일 수정; 2012년 10월8일 채택)

Abstract

In order to determine reduction of greenhouse gas emissions (GHGs) when the submerged membrane bioreactor with granular sulfur (MBR-GS) is used in wastewater treatment plant (WTP), the amount of GHGs was compared and analyzed in the advanced treatment process of P wastewater treatment plant (WTP).

The amount of GHGs was estimated by classifying as construction and operation phase in WTP. The amount of GHGs in construction phase was evaluated from multiplying raw materials by using carbon emission factors. Also the amount of GHGs in operating phase was calculated by using total electricity consumption and carbon emission factor.

The construction of anoxic tank and secondary settling tank is unnecessary, because the MBR-GS conducts simultaneously the nitrification and denitrification in aeration tank and filtration by hollow fiber membrane. The amount of CO₂, CH₄, and N₂O emitted by constructing the MBR-GS was 6.44E+06 kg, 8.16E+03 kg and 1.38E+01 kg, respectively. The result shows that the GHGs were reduced about 47 % as compared with the construction in the MLE process. In operating the MBR-GS, the electricity is not required in the biological reactor and secondary setting tank. Thus, the amount of CO₂, CH₄, and N₂O emitted by operating in the MBR-GS was 7.39E+05 kg/yr, 5.80E+02 kg/yr and 2.44E+00 kg/yr, respectively. The result shows that the GHGs were reduced about 37 % as compared with the operation in the MLE process. Also, LCCO₂(Life Cycle CO₂) was compared and analyzed between MLE process and MBR-GS. The amount of LCCO₂ emitted from the MLE process and MBR-GS was 3.56E+04 ton CO₂ and 2.12E+04 ton CO₂, respectively. The result shows that the GHGs in MBR-GS were reduced to about 40 % as compared in the MLE process during life cycle.

As a result, sulfur-utilizing autotrophic denitrification process (SADP) is expected to be utilized as the cost-effective advanced treatment process, owing to not only high nitrogen removal efficiency but also the GHGs reduction in construction and operation stage.

Key words : greenhouse gas emissions (GHGs), membrane bioreactor packed with granular sulfur (MBR-GS), LCCO₂(Life Cycle CO₂), sulfur-utilizing autotrophic denitrification process (SADP)

주제어 : 온실가스, 황 충전 MBR, 생애 이산화탄소 발생량, 황 이용 탈질공법

1. 서론

최근 들어 중요한 이슈로 부각되고 있는 지구 온난화의 관점에서 현재 운영 중인 하수처리장과

황이용 탈질 프로세스로의 개조 시 배출되는 온실가스의 발생량을 비교 평가 하였다.

하수도시설로부터 배출되는 온실효과 가스가운데, 주배출원으로는 「전력 석유 등의 에너지 생

*Corresponding author : Tel. : +82-32-860-7501, Fax : +82-32-863-4267, E-mail : hwangyw@inha.ac.kr(Y. W. Hwang)

성 소비에 의해 배출되는 CO₂», 「슬러지 소각 시에 배출되는 N₂O», 「수처리 시에 배출되는 CH₄, N₂O」의 3가지가 있다(양 등, 2008). 지구온난화를 일으키는 온실가스 중 온실화를 일으키는 잠재능력(global warming potential)은 CO₂를 1로 하여 계산하면 CH₄는 20 ~ 30배, N₂O는 200 ~ 300배가 된다고 한다(김 등, 2001).

수처리 시 배출되는 대표적인 온실가스인 CH₄과 N₂O는 IPCC 가이드라인의 폐기물 분야에 속한다. 첫 번째로 CH₄는 하·폐수의 혐기성 처리 시에 발생될 수 있다(Prendez와 Lara-Gonzalez, 2008, Rittman과 McCarty, 2002). 혐기성 소화는 CH₄발효라고도 할 수 있으며 산소가 없는 혐기 상태에서 분해 가능한 유기물을 분해시켜 CH₄로 전환시키는 것을 의미한다. CH₄는 유기물이 분해될 때 주로 발생되며, 소나 닭과 같은 가축 배설물의 분해 과정에서도 발생된다. 따라서 CH₄의 발생가능성을 결정짓는 주요인은 하·폐수 내 포함되어 있는 분해 가능한 유기물질의 양이라고 볼 수 있다(환경부, 2008). 하·폐수 내에 포함되어 있는 유기물을 나타낼 수 있는 간접적인 지표로서 BOD와 COD를 들 수 있는데, BOD와 COD의 농도가 높을수록 발생하는 CH₄의 양도 비례적으로 증가할 것이다.

두 번째로 수처리 시 발생할 수 있는 온실가스 중 N₂O는 폐수 내 질소성분, 즉 요소, 질산염, 단백질의 분해와 관련되어 있다(환경부, 2008, Kampschreur 등, 2008, Tallec 등, 2006). N₂O는 대기 중의 농도가 매우 낮게 존재하고 있으나, 잠재능력이 매우 크며, 그 수명이 150년 정도로 매우 안정한 물질로 알려져 있다. 따라서 배출량이 적다고 하더라도 그 효과는 상당히 큰 물질로 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 N₂O 배출에 대한 자료는 매우 불확실하거나 존재하지 않는 것이 일반적이다. 이로 인해 N₂O 발생원에 대해 규명하고 N₂O 배출을 감소시키는 일은 매우 어려울 수밖에 없는 실정이다. 분명한 것은 계산에 의하면 N₂O의 약 19%정도가 하수처

리로부터 발생할 가능성이 있다고 보고되었으며(김 등, 2001), 따라서 하수처리는 잠정적인 N₂O 발생원이라 할 수 있다는 것이다.

따라서 본 연구에서는 잠정적인 온실가스 배출원이라고 할 수 있는 하수처리장의 시공 및 운영단계에서 탄소배출량을 산정함으로써 온실가스 저감방안 및 온실가스의 에너지 활용방안 여부를 검토 하였다.

2. 연구방법

2.1 온실가스 발생량 산정

본 연구에서는 실시 설계된 하수처리장과 황충진 MBR의 시공 및 운영 단계에서의 탄소배출량을 비교 분석함으로써 황충진 MBR의 온실가스 저감 기여도에 대하여 파악하였다. 대상으로 한 하수처리장은 S시 P하수처리장의 고도처리공정이었으며, 약 47,000 m³/day의 설계유량으로 설계되었고, 그 중 질소제거에 해당하는 반응조를 대상으로 온실가스 발생량을 산정하였다. P하수처리장의 고도처리공정은 순환식 질산화·탈질 공법(MLE)으로 설계되었으며, 황충진 MBR공정과의 비교대상으로 MLE공법을 선택한 이유는 질소제거 공법 중 가장 대표적이며 미생물의 이용 형태 즉, 부유성장 및 부착성장에 따른 질소제거 공정의 시공 및 운영에 따른 온실가스 배출량 평가가 용이할 것으로 판단하였다.

질소제거를 위한 MLE공법과 본 연구의 황충진 MBR공법의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 두 공정 모두 혐잡물 제거 등의 전처리 공정을 위한 1차 침전지의 시공 및 운영은 동일하게 진행될 것이다. 그러나 MLE공법은 질소제거를 위해 무산소조와 호기조를 두고 호기조에서 질산화된 질산화액을 무산소조로 내부반송시켜 탈질을 시키는 공정으로 무산소조의 시공이 불가피하며, 또한 미생물 혼합액을 침전분리 하기 위해 2차 침전지의 시공 및 운영이 필요하게 된다. 이에 반해 황충진 MBR공정은 포기조 내에서 질산화·탈질을 동시에 수행함으로써 무산소

조의 시공이 불필요하며, 중공사막의 여과기능이 수반됨으로써 2차 침전지의 시공 또한 불필요하게 된다. 또한 MBR공정의 경우 생물반응조 내의 MLSS농도를 보다 높게 유지할 수 있기 때문에 SRT(Solids Retention Time)가 매우 길어져 MLE공법의 호기조 용적과 동일한 생물반응조의 시공만으로도 질소제거가 가능한 공정이라고 할 수 있다.

따라서 MLE공법과 황 충전 MBR공정에서는 반응조의 시공 및 운영에 차이가 발생하게 되고 이에 따라 시공에 필요한 원자재의 사용 및 운영에 필요한 전력사용 등에 따라 온실가스 발생량에도 차이가 발생하게 될 것이다.

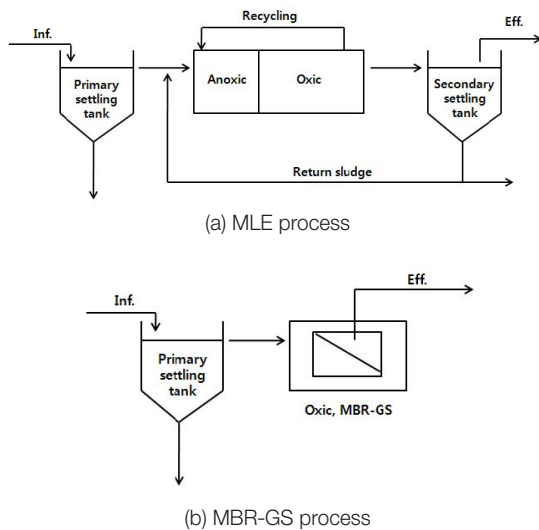


Fig. 1. Schematic diagram of MLE process and MBR-GS process

본 연구에서는 온실가스 발생량, 즉 탄소배출량을 산정하기 위하여 적산방식(Process Analysis)을 이용하였다. 적산방식에 의한 탄소배출량 산정 방법은 IPCC 등에서 국제적 표준으로 제정하여 공표하고 있으며, 국내에서도 국가 온실가스 통계, 탄소배출계수 산정 등에 활용하고 있다. 적산방식에 의한 탄소배출량 산정을 위해 국내에서 활용하고 있는 LCI DB(Life Cycle Inventory Database)의 탄소배출계수(한국환경산업기술원)를 이용하여 하수처리장의 시공 및 운영에 따른 온실가스 발생량을 산정하였다.

2.1.1 시공단계에서의 온실가스 발생량

본 연구에서는 하수처리장 건설공사시의 설계보고서(포스코건설, 2006)를 이용하여 반응조 별로 건설공사에 투입되는 원자재 목록을 분석하고 그에 따른 탄소배출계수를 적용하여 온실가스 발생량을 산정하였다.

하수처리공정은 1차 침전지, 생물반응조, 2차 침전지로 구분하여 각각의 반응조를 시공할 때 투입되는 원자재를 바탕으로 온실가스 발생량을 산정하였다. 시공 시 투입되는 원자재의 목록과 항목별 탄소배출계수를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 콘크리트, 시멘트, 모래 등의 원자재는 MLE공법 및 황 충전 MBR공법에 공통으로 투입되는 목록이며, ABS, EPDM, SUS 및 PET 등은 황 충전 모듈의 시공 시 투입되는 원자재로 구분하였다. 탄소배출계수는 온실가스의 종류에 따라 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 CO₂, CH₄ 및 N₂O를 대상으로 하였다.

Table 1. Raw materials inventory and carbon emission factor(CEF)

Raw materials	Carbon emission factor		
	CO ₂ (kg CO ₂ /kg materials)	CH ₄ (kg CH ₄ /kg materials)	N ₂ O (kg N ₂ O/kg materials)
concrete (kg /m ³ materials)	3.30E+02	3.77E-01	4.50E-04
cement	8.43E-01	7.50E-04	3.41E-07
sand	8.46E-06	1.12E-08	2.71E-11
ascon	8.46E-03	1.12E-05	2.71E-08
asphalt	8.46E-03	1.12E-05	2.71E-08
steel reinforcement	3.40E-01	5.57E-04	1.38E-06
cast iron	3.13E+00	1.24E-04	3.00E-07
PVC	1.26E+00	5.47E-04	2.08E-04
stainless	6.05E-01	3.02E-04	4.09E-05
ABS	2.84E+00	5.01E-03	8.28E-05
EPDM	4.31E+03	3.19E+00	3.72E-01
SUS	2.80E+00	5.37E-03	3.10E-06
PET	3.86E+03	1.91E+01	6.22E-02

2.1.2 운영단계에서의 온실가스 발생량

하수처리장의 운영단계에서는 공정 중 사용되는 전력량에 따라서 온실가스 발생량을 산정할 수 있다. 하수처리 각 공정별로 전처리공정에서는 협잡물 제거, 생물반응조에서는 송풍량 및 교반, 내부반송, 2차 침전지에서는 슬러지 수집 및 슬러지 반송 등에 의해 전력이 사용된다.

Table 2에 하수처리공정별 전력이 사용되는 기기의 목록 및 전력량에 따른 탄소배출계수를 정리하여 나타내었다. 운영단계에서도 시공단계와 마찬가지로 CO₂, CH₄ 및 N₂O를 대상으로 사용 전력에 따른 온실가스 발생량을 산정하였다. 또한 황 충전 MBR공정의 경우 운영 시 황 소모에 따른 온실가스 발생량을 고려하였다.

배출계수(한국환경산업기술원)를 이용한 온실가스 발생량 산정방법의 예로 CO₂ 발생량 산정방법(환경관리공단, 2008)을 아래에 나타내었다.

$$BE_y = EG_y \times EF_{BL}$$

BE_y : CO₂ 배출량(kg CO₂/yr)

EG_y : 전력량(kWh)

EF_{BL} : 배출계수(kg CO₂/kWh) - 0.495 kg CO₂/kWh

3. 연구결과

3.1 시공단계에서의 온실가스 배출

Table 3에 MLE공정과 황 충전 MBR공정의 시공 시 온실가스 발생량에 대하여 비교하여 나타내었다. 시공단계에서는 콘크리트, 시멘트, 모래, 철근 및 아스콘 등의 자재가 사용되는 것으로 조사되었으며 이에 따른 온실가스 발생량을 자재 투입량 및 자재별 배출계수를 이용하여 계산하였다.

앞서 설명한 바와 같이 두 공정에서는 공통적으로 1차 침전지의 시공이 필요하다. 따라서 1차 침전지 시공에 따른 온실가스의 발생량은 CO₂, CH₄ 및 N₂O가 각각 1.07E+06 kg, 1.29E+03 kg 및 1.88E+00 kg으로 동일하게 산정되었다.

생물반응조의 경우 MLE공정은 질산화·탈질을 수행하기 위하여 무산소조와 호기조의 시공이 불가피하다. 그러나 황 충전 MBR공정의 경우 포기조 내에서 질산화·탈질을 동시에 수행하는 공정이기 때문에 무산소조의 시공이 필요하지 않다. 따라서 생물반응조 시공에 의해 발생하는 온실가스량의 차이가 발생하게 된다. MLE공정의 경우 생물반응조 시공으로 인한

Table 2. Inventory of power consumption equipment and carbon emission factor(CEF)

Power consumption equipment			
Grit chambers	Primary settling tank	Bioreactor	Secondary settling tank
grit removal, hoist, drainage pump	Sludge Collector, excess pump, return pump, scum screen, drainage pump	agitator, recycling pump, drainage pump, blower	Sludge Collector, excess pump, return pump, scum screen, drainage pump
Carbon emission factor	CO ₂ (kg CO ₂ /kg kWh)	CH ₄ (kg CH ₄ /kg kWh)	N ₂ O (kg N ₂ O/kg kWh)
	4.87E-01	0.35E-03	0.15E-05
	Consumes of sulfur		
	CO ₂ (kg CO ₂ /kg S)	CH ₄ (kg CH ₄ /kg S)	N ₂ O (kg N ₂ O/kg S)
5.22E-02	8.95E-05	3.05E-07	

CO₂, CH₄ 및 N₂O의 발생량이 각각 8.98E+06 kg, 1.08E+04 kg 및 1.57E+01 kg으로 산정되었으며, 황 충진 MBR공정의 생물반응조 시공 시에는 CO₂, CH₄ 및 N₂O의 발생량이 각각 5.37E+06 kg, 6.86E+03 kg 및 1.20E+01 kg으로 산정되었다.

2차 침전지의 경우 혼합액의 침전분리를 위하여 MLE공정에만 시공이 필요하다. 황 충진 MBR공정의 경우 포기조 내의 중공사막에 의해 여과공정이 진행되기 때문에 2차 침전지 시공이 불필요하게 된다. 따라서 2차 침전지 시공 시 발생하는 온실가스는 모두 MLE공정의 시공 시 발생하는 영향으로 볼 수 있으며 황 충진 MBR공정의 시공 시에는 고려할 필요성이 없다. 2차 침전지 시공으로 인한 CO₂, CH₄ 및 N₂O의 발생량은 각각 2.15E+06 kg, 2.59E+03 kg 및 3.75E+00 kg으로 산정되었다.

하수처리장의 시공 시에 발생하는 온실가스에 대한 영향을 파악한 결과 황 충진 MBR공정에 대한 시공의 경우 무산소조 및 2차 침전지의 시공이 필요하지 않기 때문에 온실가스 발생량의 47%정도가 감소하게 될 것으로 파악되었다. 따라서 질소제거 공정으로 황 충진 MBR공정의 시공으로 인한 온실가스 발생 저감을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

하수처리장의 시공 시에 발생하는 온실가스 중 본 연구의 대상으로 한 세 가지의 온실가스, 즉 CO₂, CH₄ 및 N₂O를 대상으로 반응조 용적당 발생량을 비교 분석하였다. 설계된 MLE공

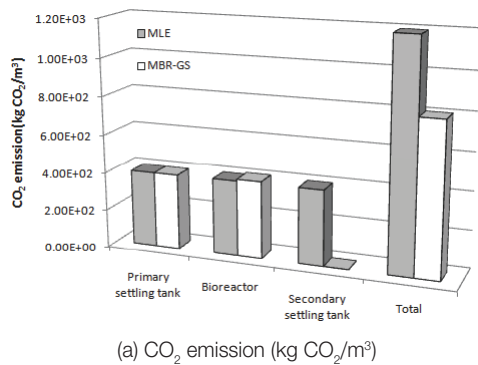
정의 1차 침전지, 생물반응조(무산소조, 호기조) 및 2차 침전지의 용적은 각각 2,700 m³, 22,580 m³(9,380 m³, 13,200 m³) 및 5,400 m³로 조사되었다. 황 충진 MBR공정의 경우 생물반응조의 용적은 호기조만을 대상으로 하기 때문에 그 용적이 13,200 m³였다. 온실가스 별로 발생량을 각 반응조 용적으로 나누어 하수처리장 시공 시의 반응조 용적 당 온실가스 발생량을 산정하여 Fig. 2에 나타내었다.

용적 당 발생하는 온실가스량의 결과를 살펴보면 MLE공정과 황 충진 MBR공정에 공통으로 적용되는 1차 침전지의 경우 용적당 발생하는 CO₂의 양은 3.96E+02 CO₂/m³로 동일하였으며, 생물반응조의 경우에는 용적당 발생하는 CO₂의 양이 황 충진 MBR에서 다소 높게 나타났다. 이것은 황 충진 MBR공정의 경우 무산소조의 시공은 필요하지 않지만 호기조의 경우 MLE공정에 비해 추가적으로 투입되는 원자재가 발생하기 때문에 나타난 결과이다.

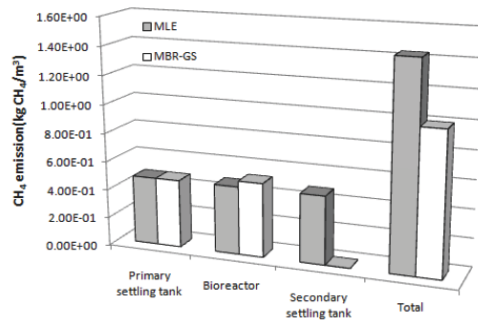
반응조 용적 당 발생하는 CO₂의 양은 MLE공정에서 1.19E+03 kg CO₂/m³이었으며, 황 충진 MBR공정에서는 8.03E+02 kg CO₂/m³으로 나타나, 황 충진 MBR공정에서 약 3.89E+02 kg CO₂/m³정도의 온실가스 저감에 기여하는 것으로 나타났다. 이것은 질소제거공정으로 MLE공정 등을 시공하는 것보다 황 충진 MBR공정을 시공할 경우 용적 당 약 33%정도의 온실가스 저감량을 나타내는 것이다.

Table 3. Comparison of carbon emission in MLE and MBR-GS construction

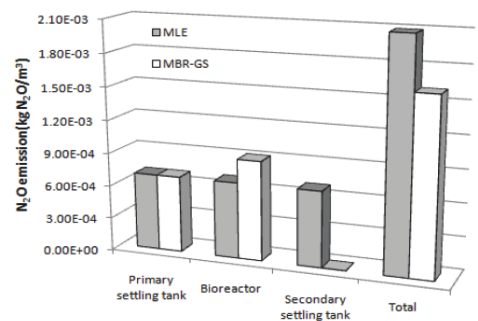
Item	MLE (kg)			MBR-GS (kg)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Primary settling tank	1.07E+06	1.29E+03	1.88E+00	1.07E+06	1.29E+03	1.88E+00
Bioreactor	8.98E+06	1.08E+04	1.57E+01	5.37E+06	6.86E+03	1.20E+01
Secondary settling tank	2.15E+06	2.59E+03	3.75E+00	-	-	-
Total	1.22E+07	1.47E+04	2.13E+01	6.44E+06	8.16E+03	1.38E+01



(a) CO₂ emission (kg CO₂/m³)



(b) CH₄ emission (kg CH₄/m³)



(c) N₂O emission (kg N₂O/m³)

Fig. 2. Comparison of greenhouse gas emissions (GHGs) in MLE and MBR-GS construction

3.2 운영단계에서의 온실가스 배출

Table 4에 MLE공정과 황 충전 MBR공정의 운영 시 온실가스 발생량에 대하여 비교하여 나타내었다. 운영단계에서의 온실가스 배출은 운영 시 사용되는 전력에 의한 발생을 고려하였으며, 전력이 사용되는 공정으로는 혐잡물 제거,

송풍기 가동, 교반, 내부반송 및 슬러지 수집 등에 전력이 사용되고 있었다.

두 공정에서는 공통적으로 1차 침전지의 운영이 필요하다. 따라서 1차 침전지 운영에 따른 온실가스의 발생량은 동일하게 산정되었다.

생물반응조의 경우 MLE공정은 질산화·탈질을 수행하기 위하여 무산소조와 호기조를 운영하게 되며, 황 충전 MBR공정의 경우 포기조 내에서 질산화·탈질을 동시에 수행하는 공정이기 때문에 무산소조의 운영이 필요하지 않다. 따라서 MLE공정의 경우 생물반응조 운영으로 인한 CO₂, CH₄ 및 N₂O의 발생량이 각각 7.41E+05 kg/yr, 5.37E+02 kg/yr 및 2.33E+00 kg/yr로 산정되었으며, 황 충전 MBR공정의 생물반응조 운영 시에는 CO₂, CH₄ 및 N₂O의 발생량이 각각 7.28E+05 kg/yr, 5.72E+02 kg/yr 및 2.41E+00 kg/yr로 산정되었다.

2차 침전지의 경우 혼합액의 침전분리를 위하여 MLE공정에서만 운영이 필요하다. 따라서 2차 침전지 운영 시 발생하는 온실가스는 황 충전 MBR공정의 운영 시에는 고려할 필요가 없다. MLE공정의 2차 침전지 운영으로 인한 CO₂, CH₄ 및 N₂O의 발생량은 각각 4.17E+05 kg/yr, 3.02E+02 kg/yr 및 1.31E+00 kg/yr로 산정되었다.

MLE공정 전체를 운영함에 따라 발생하는 CO₂, CH₄ 및 N₂O의 발생량은 각각 1.17E+06 kg/yr, 8.47E+02 kg/yr 및 3.67E+00 kg/yr로 산정되었으며, 황 충전 MBR공정의 경우 CO₂, CH₄ 및 N₂O의 발생량은 각각 7.39E+05 kg/yr, 5.80E+02 kg/yr 및 2.44E+00 kg/yr로 산정되었다. 황 충전 MBR공정을 운영할 경우 무산소조와 2차 침전지의 운영이 불필요하게 됨에 따라 약 37%정도의 CO₂ 발생 저감효과를 얻을 수 있는 것으로 확인되었다.

이러한 결과로부터 하수처리장의 고도처리 공정 개조 및 신설 시 황이용 탈질 공법을 이용한 포기조 내 동시 질산화·탈질 공법을 도입하게

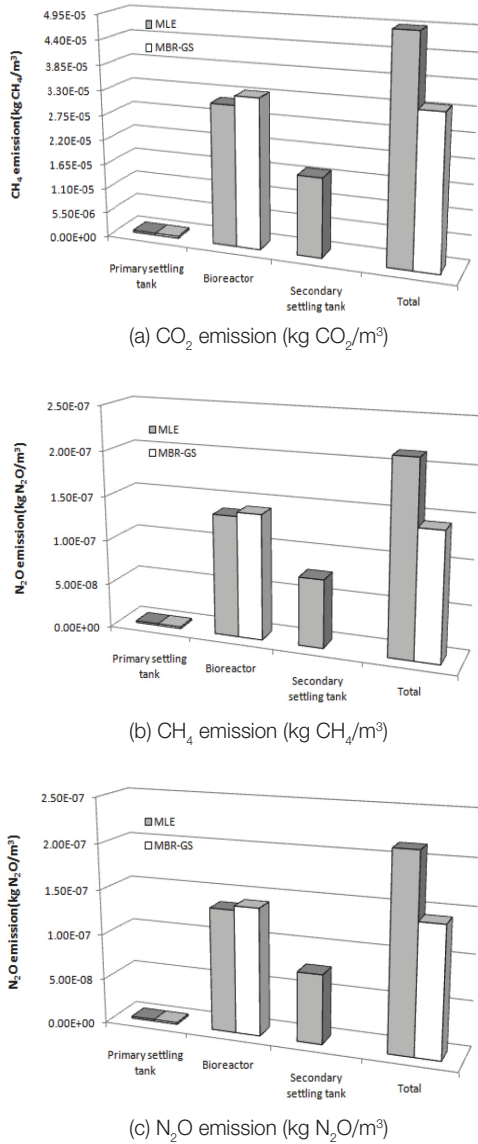


Fig. 3. Comparison of greenhouse gas emissions (GHGs) in MLE and MBR-GS operating

되면 부지활용에 대한 경제성은 물론 온실가스 저감효과를 동시에 얻을 수 있는 장점을 갖게 될 것으로 사료된다.

위의 결과는 P하수처리장의 설계용량인 약 47,000 m³/day를 처리할 경우 발생하는 연간 온실가스 발생량으로 볼 수 있다. 따라서 하수처리장 운영 시 단위 용량 당 발생하는 온실가스량을 파악하기 위해 각 항목별 연간 발생량을 설계용량으로 나누어 비교 분석하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

앞서 설명한 바와 같이 MLE공정 및 황 충진 MBR공정은 협잡물 제거 등의 전처리를 위한 1차 침전지의 운영은 동일하게 진행된다. 따라서 침사지 및 1차 침전지의 운영에 따른 온실가스 발생량의 차이는 나타나지 않았다.

그러나 MLE공정의 경우 질소제거를 위해 질산화액을 무산소조로 내부반응을 시켜야 하며, 무산소조에서는 미생물과의 혼합을 위한 교반시설이 필요하다. 따라서 생물반응조의 운영에 사용되는 전력량은 포기조 내에서 동시 질산화·탈질을 수행하는 황 충진 MBR공정에 비하여 많아지게 될 것이다. 또한 중공사막의 여과기능으로 인하여 황 충진 MBR공정의 경우 2차 침전지가 불필요하므로 MLE공정에서는 그에 따른 추가적인 전력이 필요하게 될 것이다. 즉 질소제거를 위한 하수처리장 운영으로 인한 온실가스의 발생량은 생물반응조의 무산소조 및 2차 침전지 운영에 따라 좌우하게 되며, 단위 용량 당 사용되는 전력 또한 MLE공정에서 더욱 증가하

Table 4. Comparison of carbon emission in MLE and MBR-GS operating

Item	MLE (kg)			MBR-GS (kg)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Primary settling tank	1.05E+04	7.58E+00	3.28E+02	1.05E+04	7.58E+00	3.28E+02
Bioreactor	7.41E+05	5.37E+02	2.33E+00	7.28E+05	5.72E+02	2.41E+00
Secondary settling tank	4.17E+05	3.02E+03	1.31E+00	-	-	-
Total	1.17E+06	8.47E+02	3.67E+00	7.39E+05	5.80E+02	2.44E+00

게 될 것이다.

대표적으로 단위 용량 당 발생하는 CO₂의 양은 MLE공정에서 6.81E-02 kg CO₂/m³이었으며, 황 충전 MBR공정에서는 4.30E-02 kg CO₂/m³으로 나타나, 황 충전 MBR공정에서 약 2.51E-02 kg CO₂/m³정도의 온실가스 저감에 기여하였다. 이것은 질소제거공정으로 MLE공정 등을 운영하는 것보다 황 충전 MBR공정을 운영할 경우 단위용량 당 약 35 %이상의 온실가스 저감효과를 나타내는 것이라 할 수 있다.

CH₄ 및 N₂O의 경우도 황 충전 MBR공정을 운영할 경우 단위용량 당 약 1.56E-02 kg CH₄/m³ 및 1.56E-02 kg N₂O/m³의 저감효과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 LCCO₂(Life cycle CO₂) 평가

MLE공정 및 황 충전 MBR공정의 탄소배출량, 즉 온실가스 배출량을 종합적으로 평가하기 위해 LCCO₂(Life cycle CO₂)개념을 활용하였다. LCCO₂는 건설을 위한 시공단계에서부터 해체, 폐기단계 동안 발생한 CO₂의 총량을 의미한다.

본 연구에서는 하수처리장의 시공에서부터 20년간 운영한다는 전제로 CO₂발생량을 산정하여 MLE공정 및 황 충전 MBR공정의 LCCO₂를 비교 분석하였다. 그 결과를 Table 5 및 Fig. 4에 나타내었다.

시공에 따른 CO₂ 배출량은 MLE공정 및 황 충전 MBR공정에서 각각 1.22E+04 ton CO₂ 및 6.44E+03 ton CO₂로 산정되었으며, 20년간 운영 시에는 각각 2.34E+04 ton CO₂ 및 1.48E+04 ton CO₂로 산정되었다. 시공과 운영 단계에서 산정된 CO₂발생량을 합하여 LCCO₂로 나타내면 MLE공정 및 황 충전 MBR공정에서 각각 3.56E+04 ton CO₂ 및 2.12E+04 ton CO₂로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 질소제거공정 운영의 life cycle동안 황 충전 MBR공정에서 약 1.43E+04 ton의 CO₂

발생을 저감할 수 있으며, 이것은 life cycle동안 약 40 %이상의 온실가스 저감에 기여하는 값으로 나타났다. 이로써 질소제거공정으로서의 황 충전 MBR공정 도입은 질소제거효율은 물론 온실가스저감에도 상당한 기여를 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 5. Comparison of LCCO₂ in MLE and MBR-GS

Item	CO ₂ emission (ton)	
	MLE	MBR-GS
Construction	1.22E+04	6.44E+03
Operating for 20 years	2.34E+04	1.48E+04
LCCO ₂	3.56E+04	2.12E+04

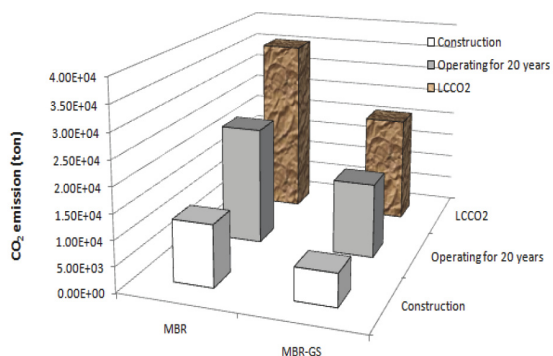


Fig. 4. Comparison of LCCO₂ in MLE and MBR-GS

4. 결론

질소제거공정으로 대부분 이용되고 있는 MLE공정과 황 충전 MBR공정의 시공 및 운영 시에 발생하는 온실가스량을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 본 연구에서 수행한 황 충전 MBR공정의 경우 포기조 내 질산화·탈질 및 증공사막에 의한 여과기능을 동시에 수행하기 때문에 무산소조 및 2차 침전지의 시공이 불필요하다. 따라서 황 충전 MBR공정의 시공 시 CO₂, CH₄ 및 N₂O 발생량은 각각 6.44E+06 kg, 8.16E+03 kg 및 1.38E+01 kg으로 나타나 MLE공정의 시

- 공에서 보다 약 47 % 정도의 온실가스 저감을 기대할 수 있을 것이다.
- ② 공정의 운영에서도 마찬가지로 황 충전 MBR공정의 경우 무산소조 및 2차 침전지의 운영이 불필요하다. 따라서 교반, 내부 반송 및 슬러지 수집 등에 의한 전력사용이 필요하지 않게 된다. 황 충전 MBR공정 운영 시의 CO₂, CH₄ 및 N₂O 발생량은 각각 7.39E+05 kg/yr, 5.80E+02 kg/yr 및 2.44E+00 kg/yr으로 나타나 MLE공정의 운영에서 보다 약 37 % 정도의 온실가스 저감을 기대할 수 있을 것이다.
- ③ 시공과 운영 단계에서 산정된 CO₂ 발생량을 합하여 LCCO₂로 나타내면 MLE공정 및 황 충전 MBR공정에서 각각 3.56E+04 ton CO₂ 및 2.12E+04 ton CO₂로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 질소 제거공정 운영의 life cycle 동안 황 충전 MBR공정에서 약 40 % 이상의 CO₂ 발생을 저감할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 인하대학교의 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

양형재, 박정민, 김민정, “하수처리 공정별 아산화질소(N₂O) 배출계수 산정”, 대한환경공학회, 30(12), 1281 ~ 1286(2008).

- 김정숙, 김시준, 稻森悠平, “*Alcaligenes faecalis*에 의한 질소제거 특성과 N₂O제어를 위한 유동층공법의 적용가능성”, 대한환경공학회지, 23(8) 1295 ~ 1303(2001).
- Prendez, M., Lara-Gonzalez, S., “Application of strategies for sanitation management in wastewater treatment plants in order to control/reduce greenhouse gas emission”, *J. Environmental Management*, 88, 658 ~ 664(2008).
- Rittman, B. E., and McCarty, P. L, *Environmental Biotechnology : Principal and Applications*, McGraw-Hill, (2002).
- 환경부, 환경관리공단, 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인(2008).
- Kampschreur, M. J., van der Star, W. R. L., Wielders, H. A., Muder, J. W., Jetten, M. S. M., van Loosdrecht, M. C. M., “Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject water treatment”, *Wat. Res.*, 42, 812 ~ 826(2008).
- Tallec, G., Garnier, J., Billen, G., Gossailles, M., “Nitrous oxide emissions from secondary activated sludge in nitrifying conditions of urban wastewater treatment plants: effect of oxygenation level”, *Wat. Res.*, 40(15), 2972 ~ 2980(2006).
- 한국환경산업기술원, 국가 LCI 데이터베이스 정보망, <http://www.edp.or.kr/>
- 포스코건설, “판교 하수처리장 고도처리 시설공사”, 기본설계보고서(2006).
- 환경관리공단, “기후변화에 대비한 공공하수도시설 에너지 자립화 타당성 조사 연구”, 최종보고서(2008).