

## 바이오가스에 포함된 고농도 황화수소의 효율적 제거를 위한 미생물반응기

### A Bioreactor for the Effective Removal of the Hydrogen Sulfide from Biogas

남궁 형규 · 윤 창 노<sup>1)</sup> · 송 지 현\*

세종대학교 건설환경공학과, <sup>1)</sup>한국과학기술연구원 분자인식연구센터  
(2013년 9월 3일 접수, 2013년 9월 28일 수정, 2013년 10월 18일 채택)

Hyeong-Kyu Namgung, Chang No Yoon<sup>1)</sup> and JiHyeon Song\*

*Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University*

<sup>1)</sup>*Molecular Recognition Research Center, Korea Institute of Science and Technology*

(Received 3 September 2013, revised 28 September 2013, accepted 18 October 2013)

#### Abstract

A two-stage bioreactor system using sulfur-oxidizing bacteria was studied to abate high strength hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) from biogas. The two-stage bioreactor consisted of a H<sub>2</sub>S absorption column (0.5 L) and a microbial oxidation column (1 L) in series, and the liquid medium was continuously recirculated through the columns. The objectives of this study were to determine the feasibility of the bioreactor for biogas desulfurization and to investigate the effect of the medium circulation rate on the system performance. An averaged concentration of H<sub>2</sub>S introduced to the bioreactor was 530 ppm, corresponding to an overall loading rate of 44.4 g/m<sup>3</sup>/hr. During the initial 20 days period at the medium recirculation rate of 8 reactor volumes per hour (12 L/hr), the dissolved oxygen (DO) concentration in the oxidation column was 6 mg/L, while the DO in the absorption column was 0.5 mg/L showing that the oxygen contents of the biogas stream was not altered. Because of the biological oxidation of H<sub>2</sub>S in the oxidation column, the sulfate concentration increased from 200 mg/L to 5,600 mg/L in the liquid medium. The removal efficiency of H<sub>2</sub>S was greater than 99% in the initial operation period. After the initial period, the medium recirculation rate between the two columns was stepwise changed eight times from 1.0 to 40 vol/hr (1.5 ~ 60 L/hr). At the recirculation rate of faster than 4 vol/hr, the H<sub>2</sub>S removal efficiencies were found to be high, but the efficiency declined at the lower recirculation rates than the threshold.

**Key words** : Hydrogen sulfide, Bioreactor, Biogas, Sulfur oxidizing bacteria

---

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)2-3408-3819, E-mail : [songjh@sejong.ac.kr](mailto:songjh@sejong.ac.kr)

## 1. 서 론

최근 산업화에 의해 온실가스의 대기 중 농도가 높아지고 있으며, 그로 인한 지구온난화가 심각한 문제로 대두되고 있다. 바이오가스의 주요성분인 메탄(CH<sub>4</sub>)은 기후변화협약 관련 국제기구인 IPCC에서 이산화탄소 대비 21배의 온실효과 유발 가스로 규정하고 있으며, 교토의정서에서는 각 국가별로 저감 대책을 수립하여 이행할 것을 권고하고 있다(Kim *et al.*, 2007). 이와 함께 천연자원 고갈에 따른 재생에너지 개발의 필요성이 요구되고 있으며, 바이오가스에 포함된 메탄에 대한 재이용과 자원화가 중요한 과제로 대두되었다(Kim *et al.*, 2012; Nizami and Murphy, 2010). 하·폐수 슬러지, 유기성폐기물(음식폐기물, 가축분뇨, 농축산 부산물 등) 등의 혐기성 소화에 의해 발생하는 바이오가스에는 메탄, 이산화탄소, 질소, 황화수소, 실록산 등의 다양한 물질들이 혼합되어 있으며, 이 중 메탄과 이산화탄소가 각각 45~75%, 30~50% 정도의 성분을 차지한다(Takuwa *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2003).

바이오가스에 포함된 메탄을 에너지로 활용하기 위해서는 90% 이상의 메탄 성분율을 유지하여야 하며, 현재 수도권매립지를 포함한 국내 다수의 매립지에서 바이오가스에 포함된 메탄을 자원화하기 위한 설비를 운영중에 있다(Lee *et al.*, 2011). 하지만 바이오가스에 포함된 다양한 종류의 미량가스성분은 가스 자체가 갖는 부식성과 결정화 현상에 의해 바이오가스 자원화 설비의 잦은 고장 및 교체의 원인이 되고 있다(Rasi *et al.*, 2011). 특히 혐기성 바이오가스에는 적게는 수백 ppm에서 많게는 5,000 ppm 이상의 고농도 황화수소가 포함되어 있으며, 고농도 황화수소는 바이오가스 포집 설비 및 엔진 등에 부식 문제를 발생시켜 궁극적으로 자원화 시설의 수명 단축을 야기한다. 따라서 바이오가스의 효과적인 재이용을 위해서는 메탄을 제외한 이산화탄소, 황화수소, 실록산 성분의 전처리가 이루어져야 하며, 특히 고농도 황화수소의 효과적인 제거를 필요로 한다(Peu *et al.*, 2012).

기체상으로 배출되는 고농도 황화수소의 일반적인 제거방법으로는 흡착, 수세, 희석 등의 물리·화학적 처리방법과 약액흡수, 중화, 연소 등의 화학적인 처리방법, 그리고 활성슬러지, 바이오필터 방식 등의

생물학적 처리방법 등을 들 수 있다(Lin *et al.*, 2013; Petersson and Wellinger, 2007). 물리·화학적 방법을 이용한 고농도 황화수소의 제거 방식은 흡착제나 흡수액 등이 빠르게 과포점에 도달하게 되어 수명이 짧고, 2차 오염물질이 배출되는 단점이 대두된다(Panza and Belgiorno, 2010). 이에 반해 생물학적 처리기술 중에서 충전담체형(packed bed) 바이오필터는 물리·화학적 처리방법에 비해 운전이 용이하며 처리비용이 낮고 부산물에 의한 2차오염이 적다는 장점이 있어 다양한 기체상 오염물질 제거에 사용되어지고 있다(Lin *et al.*, 2013; Ramirez *et al.*, 2011; Elias *et al.*, 2002). 하지만 일반적인 생물학적 황화수소 제거는 미생물에 의한 산화로 이루어지기 때문에 산소를 꼭 필요로 하며, 산소의 주입은 바이오가스에 포함된 메탄의 성분율을 에너지화에 필요한 수준으로 유지하는데 문제를 야기한다. 또한 고농도 황화수소의 산화를 통해 액상 pH가 지속적으로 낮아져 미생물의 활성도를 감소시키기도 한다.

본 연구에서는 이와 같은 생물학적 시스템이 갖는 한계를 극복하기 위하여 낮은 pH에서도 황화수소를 효과적으로 산화시킬 수 있는 황산화균(Sulfur Oxidizing Bacteria, SOB)을 적용하여 실험을 실시하였다(Ramirez *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2006; Park and Cho, 1999). 또한 바이오가스에 포함된 고농도 황화수소의 효율적인 제거를 위해서 바이오가스의 혐기상태를 유지하며 황화수소를 흡수하는 흡수컬럼과 미생물 산화를 위한 산화컬럼으로 구성된 이단 미생물반응기를 구성하여 운전하였다. 이단 미생물반응기 운전 중 기상 황화수소 농도와 액상의 pH, 황산이온 농도 등의 측정을 통해 이단 미생물반응기가 바이오가스의 황화수소 처리 공정에서의 적합성 여부를 확인하였으며, 액상 순환율 변화에 따른 제거효율 확인을 통해 최적 운전조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 미생물반응기

본 연구에 적용된 실험실 규모의 미생물반응기 모식도를 그림 1에 표기하였다. 이단 미생물반응기(two-stage bioreactor)는 아크릴로 제작되었으며 유입된 황화수소를 액상으로 흡수하는 흡수컬럼과 흡수된 황

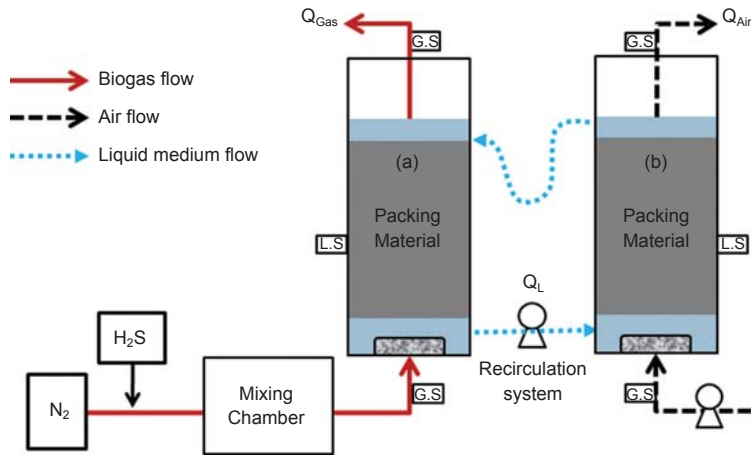


Fig. 1. Schematics of a two-stage bioreactor (a) Absorption column (b) Oxidation column.

황화수소가 미생물에 의해 산화되는 산화컬럼으로 구성되어 있다. 반응기에서의 단면적은  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 이고 흡수컬럼과 산화컬럼의 높이는 각각 250 mm, 450 mm의 사각 컬럼형태로 제작되었다. 이단 미생물반응기 흡수컬럼과 산화컬럼에서의 유효부피는 각각 0.5 L, 1.0L이며, 각 컬럼에는 기상으로 유입되는 황화수소와 산소가 액상으로 효과적으로 물질전달이 될 수 있도록 폴리프로필렌 재질의 충전재 (비표면적  $433 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , Q-PAC, LANTEC, USA)를 반응기 유효부피의 70%에 해당하는 부피만큼 충전하였다.

실험에 적용되는 가스는 바이오가스의 혐기성 상태를 모사하기 위하여 바이오가스와 유사한 조성을 갖는 혼합가스를 기반으로 일정 농도의 황화수소를 유입시키며 조절하는 것이 바람직하다 (Charnnok *et al.*, 2013; Lin *et al.*, 2013). 하지만 메탄가스의 폭발 위험성과 안정성을 고려하여 흡수컬럼으로 유입되는 기상은 질소를 기본가스로 구성하였고, 1% 황화수소 (Nitrogen 99%)를 이용하여 유입 황화수소의 농도를 조절하였다. 산화컬럼에 유입되는 공기는 에어펌프로 부터 필터링을 거쳐 유입되며, 반응기내의 액상은 정량펌프를 이용하여 순환하였다.

## 2. 2 미생물

본 연구에서는 고농도 황화수소의 유입에 의한 pH 하락과 미생물 활성도 저하를 방지하기 위하여, 낮은 pH에서도 높은 황화수소 제거 활성을 갖는 *Acidithi-*

*obacillus thiooxidans* (ATCC19377)를 적용하였다 (Lee *et al.*, 2006). 미생물반응기에 적용하기 전에 황산화균은 2L 플라스크에 미생물 배양액을 넣고 산소를 유입시켜 배양하였다. 플라스크 배양에서 황산화균을 위한 배양액은 sodium thiosulfate ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 5.1 g/L를 포함한  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  2 g/L,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  2 g/L,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.40 g/L,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.18 g/L,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.01 g/L로 구성되어 있으며, 미생물반응기의 운전을 위한 배양액에서는 미생물에 의한 황화수소 제거가 효과적으로 일어날 수 있도록 thiosulfate를 제외하고 적용하였다.

## 2. 3 운전조건

이단 미생물반응기에서 흡수컬럼과 산화컬럼으로 유입되는 기상 유량은 각각 0.5, 1.0L/min이며, 각 반응기의 기상 체류시간은 60초로 운전되었다. 이단 미생물반응기에 유입되는 황화수소의 유입농도는 약 530 ppm으로 유지되었으며, 총 85일간 운전되었다. 배지상태로 배양되던 미생물은 thiosulfate에 포함된 황 성분을 산화시키는데 순응되어 있기 때문에, 기상으로 유입되는 황화수소를 안정적으로 제거하기 위해서는 미생물의 농도와 활성도가 확보되는 기간이 필요하다. 따라서 운전 초기 19일은 순응기간으로 미생물반응기에서의 액상 순환유량은 12L/hr를 유지하였으며, 액상 전체 부피를 기준으로 순환율은 8회/hr로 운전되었다. 미생물 순응기간 이후에는 모든 조건을 동일하게 유지하며 액상 순환 유량을 1.5 L/hr

(1회/hr)에서 60 L/hr (40회/hr)로 순차적으로 변화시켜주며 운전하였다.

## 2. 4 분석방법

황화수소의 제거효율을 확인하기 위하여 미생물반응기의 유입과 유출부에서의 가스상 샘플을 각 샘플당 2L씩 테들러백에 채취하여 전기화학식 황화수소 측정기(GFM series, GASDATA, UK)를 이용하여 농도를 확인하였다. 이단 미생물반응기의 흡수컬럼과 산화컬럼에서의 액상샘플은 채취 즉시 pH와 용존산소(DO, dissolved oxygen) 농도를 pH meter (PB-10, Satorious, USA)와 DO meter (YSI-5000, YSI, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한 액상에서의 미생물 농도를 확인하기 위하여 액상의 초음파 분해 후 단백질 분석킷(Bio-Rad, USA)을 이용하여 미생물의 활성도를 확인하였고, 액상 황산염이온(sulfate,  $\text{SO}_4^{2-}$ -S)의 농도는 액상에 포함된 음이온 성분을 분리할 수 있는 A-supp 5 컬럼을 장착한 Ion Chromatograph (Methorm 792 basic IC, Methorm, Switzerland)를 이용하여 측정하였다. IC 측정을 위한 황산염 이온의 검량선은  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 로 제조한 0~100 mg-S/L 농도 범위의 표준시약을 이용하여 작성되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3. 1 용존산소(DO) 농도

액상 용존산소 농도의 측정은 이단 미생물반응기 흡수컬럼에서 바이오가스의 혐기상태 유지여부를 직접적으로 확인할 수 있고, 산화컬럼에 황화수소의 미생물 산화가 일어나기에 충분한 양의 산소가 유입되고 있는지를 알 수 있다. 그림 2에 이단 미생물반응기 운전 초기 19일 동안 측정된 용존산소 농도를 표기하였다. 이단 미생물반응기의 운전동안 흡수컬럼에서의 용존산소 농도는 1 mg/L 이하로 유지됨으로써 바이오가스의 혐기성 상태를 유지하며 황화수소를 효과적으로 흡수할 수 있는 것으로 확인되었으며, 흡수컬럼 상부 가스배출구에서의 산소( $\text{O}_2$ )유출은 없었다. 또한 산화컬럼에서의 용존산소 농도는 5 mg/L 이상으로 미생물에 의한 황화수소 산화가 효과적으로 일어날 수 있음을 확인하였으며, 이는 기존 Charnnok *et al.* (2013) 등의 연구에서 용존산소 4.5 mg/L 이상이

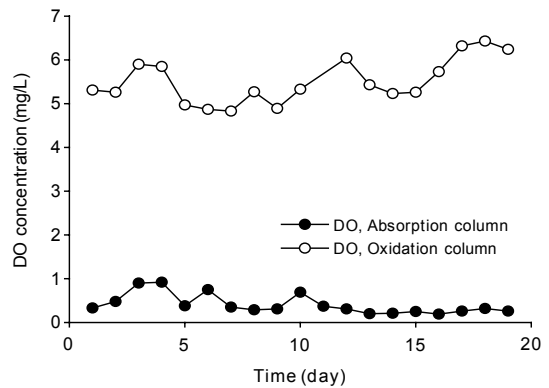


Fig. 2. Dissolved oxygen (DO) concentration during the initial period of the two-stage bioreactor.

유지될 경우 미생물에 의한 산화가 활발히 일어난 결과와 일치한다. 초기 순응기간 이후에 수행된 액상 순환을 변화 실험에서도 액상순환율에 따른 차이는 발생하지만 흡수컬럼과 산화컬럼에서의 용존산소 농도는 각각 4.0 mg/L 이상, 1.5 mg/L 이하를 지속적으로 유지하였다. 따라서 본 연구에 적용된 이단 미생물반응기는 바이오가스의 혐기성 상태를 유지하며 고농도 황화수소를 흡수하고 산화시켜 제거하는데 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 2 미생물 활성도와 pH

일반적으로 생물학적 미생물반응기에 적용된 황산화균은 pH 7 수준에서 가장 높은 활성도를 보이는 것으로 알려져 있다. 하지만 본 연구에 적용된 황산화균은 낮은 pH에서 황화수소제거가 가능하다는 이점을 가지고 있으며, 이를 증명하기 위해 이단 미생물반응기 운전 초기의 pH와 미생물 농도 변화를 확인하였다. 그림 3에서 보면, 실험 초기 19일의 운전에서 액상의 pH가 1.5 이하로 유지되는 것을 확인할 수 있으며, 그림에 표시되지 않은 순응기간 이후의 실험에서도 액상의 pH는 1.2~1.3 수준을 유지하였다. 이러한 낮은 pH에서도 미생물 농도를 간접적으로 알 수 있는 액상의 protein 농도는 꾸준히 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 운전 시작단계에서 20  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 이었던 protein 농도가 19일간의 미생물반응기 운전 후에는 약 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$  까지 증가한 것을 확인하였다.

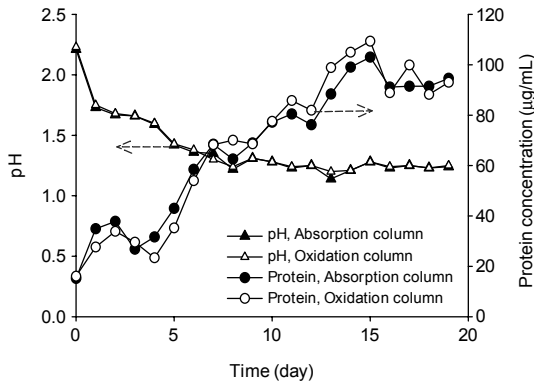


Fig. 3. pH and protein concentration during the initial period of the two-stage bioreactor.

본 연구에 적용된 이단 미생물반응기는 흡수컬럼과 산화컬럼으로 분리가 되어 있지만 액상의 순환으로 인하여 흡수된 황화수소와 미생물이 지속적으로 순환되고 있다. 따라서 산화컬럼에서 충분한 산소와 황화수소를 공급받아 활성화된 황산화균이 8회/hr의 순환율로 흡수컬럼을 통과하게 되며, 충분한 순환율에 의해 각 컬럼의 액상에 포함된 황산화균의 활성도 및 pH 변화가 항상 유사한 경향을 보였다. 또한 이단 미생물반응기에 적용된 황산화균이 기존 Lee *et al.* (2007), Chairapat *et al.* (2011)에서의 연구결과와 유사하게 pH 2 이하의 매우 강한 산성조건에서도 생존가능하고 높은 성장율을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 Ramirez *et al.* (2009) 등 다른 종류의 황산화균을 사용한 실험에서 pH의 하락에 의한 미생물 활성도 저하를 방지하고자 순환액상에 염기성 액을 주입하여 중성의 pH를 유지하는 경우에 비해 유지관리가 수월하며, 지속적인 pH 하락에서도 미생물 활성을 지속하는데 유리하다. 따라서 향후 본 연구에 적용된 해당 미생물을 이용한 생물학적 반응기는 pH 감소에 따른 미생물 활성도 저하에 대하여 특별한 조치가 수반되지 않더라도 고농도 황화수소 제거를 위해 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 황화수소 제거

이단 미생물반응기 초기 운전 기간 동안의 황화수소 제거효율과 액상에서의 황산염 농도를 그림 4에

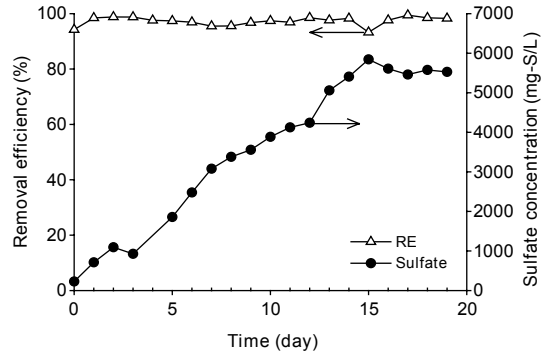


Fig. 4. Removal efficiency and sulfate ion concentration during the initial period of the two-stage bioreactor.

표기하였다. 실험을 실시하는 동안 황화수소의 유입 농도는 약 530 ppm이며, 유입부하는 약 44.4 g-S/m<sup>3</sup>/hr로 유지되었다. 총 19일의 초기 운전기간동안 황화수소의 제거효율은 97% 이상으로 꾸준히 유지되었으며, 액상에서의 황화수소 산화물인 황산염이온 농도는 약 5,500 mg-S/L 수준까지 상승하였다. 기존 Lee *et al.* (2007) 등의 연구결과와 유사하게 액상 황산염이온의 농도는 황산화균의 활성도에 영향을 끼치며, 미생물 액상의 황산염 이온 농도가 5,000 mg-S/L 이상으로 유지되는 동안 액상 미생물 농도가 더 이상 증가하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 황산화균을 이용한 고농도 황화수소의 제거를 위해서는 황화수소 부하와 산화량을 고려한 최소한의 medium 교체를 통한 액상 황산염이온의 농도 조절은 필수적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 3.4 액상순환율

반응기 운전 19일 이후에는 이단 미생물반응기에 서 액상순환율의 변화가 황화수소의 제거효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 액상순환율을 1회/hr에서 40회/hr (1.5~60 L/hr)로 변화시키며 황화수소 분해능을 확인하였다. 액상순환율 실험을 실시하는 동안의 액상 pH는 1.2~1.3 수준으로 유지되었으며, 용존산소 농도는 흡수컬럼과 산화컬럼에서 각각 1.5 mg/L 이하, 4.5 mg/L 이상이 지속적으로 유지되었다. 또한 황산염 이온의 농도는 약 5,000 mg/L 수준을 유지하며 실험을 진행하였다.

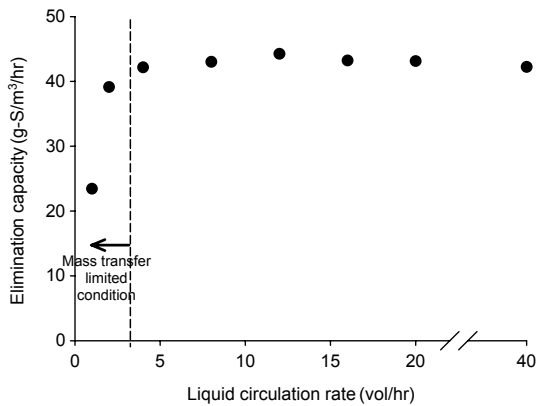


Fig. 5. Elimination capacity of hydrogen sulfide at different liquid circulation rates in the two-stage bioreactor.

황화수소의 유입부하가 약 44.4 g-S/m<sup>3</sup>/hr로 일정하게 유지될 때, 1~2회/hr의 낮은 액상순환율에서는 황화수소의 분해능이 각각 23.4, 39.1 g-S/m<sup>3</sup>/hr으로 유지되는 것을 확인하였다. 액상 순환속도가 느려짐에 따라 흡수컬럼에서 황화수소가 시간당 교차하는 액상의 양이 줄어들게 되며, 그에 따라 액상으로 흡수되는 황화수소의 양이 줄어들게 된다. 이는 흡수컬럼으로 유입된 기체상 황화수소가 액상에 흡수되는 기-액간의 물리적인 물질전달 자체에는 영향이 크지 않지만, 시간당 흡수되는 양에 차이가 생김으로써 물질전달율에 한계를 발생시키기 때문으로 생각된다. 이와 같은 결과로 이단 미생물반응기를 적용하여 효과적으로 황화수소를 제거하기 위해서는 4회/hr 이상의 액상 순환율을 유지해야만 하는 것으로 확인되었으며, 액상 순환율 변화가 기상과 액상의 물질전달율에 주는 영향에 대해 물리적 해석이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 바이오가스에 포함된 고농도의 황화수소를 제거하기 위하여 황산화균을 적용한 이단 미생물반응기를 구성하여 황화수소 제거실험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 이단 미생물반응기에서의 용존산소 농도와 흡수

컬럼 유출가스에서의 산소농도 확인을 통해 유입가스의 조성변화 없이 효과적인 황화수소의 제거가 되는 것을 확인하였고, 이를 통해 이단 미생물반응기를 적용하였을 경우 바이오가스의 조성변화 없이 황화수소 처리가 가능함을 확인하였다.

- *A. thiooxidans*는 낮은 pH에서도 고농도 황화수소의 제거가 가능함을 확인하였지만, 기존문헌에서의 연구결과와 동일하게 미생물활성도 유지를 위하여 액상 황산이온 농도의 제어가 필요할 것으로 판단된다.

- 낮은 액상 순환율은 기상으로 유입되는 황화수소가 액상으로 흡수되는 물질전달율에 한계를 발생시키는 것으로 판단되며, 4회/hr 이상으로 운전시 효과적인 황화수소 제거 가능하였다.

위와 같은 결과로, 본 연구에서 적용된 이단 미생물반응기와 황산화균은 바이오가스에서 발생하는 고농도 황화수소의 제거를 위해 효과적인 처리방법이 될 수 있다. 하지만 질소를 바이오가스 대체가스로 사용한 본 연구결과에 대한 신뢰성 확보를 위해서 실제 바이오가스 또는 유사한 조성의 혼합가스가 유입될 경우의 황화수소 제거 실험을 통한 연구결과 검증이 필요할 것으로 판단된다. 또한 더 효과적인 황화수소의 제거를 위해서는, 이단 미생물반응기 각 컬럼에서의 유량 및 체류시간변화, 황화수소 농도변화 등 다양한 조건에 따른 기-액간의 물질전달에 대한 추가연구가 필요 수행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 환경부의 차세대 에코이노베이션 기술개발사업 (과제번호: e.g. 2012000710002)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

#### References

Chaiprapat, S., R. Mardthing, D. Kantachote, and S. Karnchanawong (2011) Removal of hydrogen sulfide by complete aerobic oxidation in acidic biofiltration, *Process Biochemistry*, 46, 344-352.

Charnnok, B., T. Suksaroj, P. Boonswang, and S. Chaiprapat

- (2013) Oxidation of hydrogen sulfide in biogas using dissolved oxygen in the extreme acidic biofiltration operation, *Bioresource Technology*, 131, 492-499.
- Elias, A., A. Barona, A. Arreguy, J. Rios, I. Aranguiz, and J. Penas (2002) Evaluation of a packing material for the biodegradation of H<sub>2</sub>S and product analysis, *Process Biochemistry*, 37, 813-820.
- Kim, H.-S., E.-H. Choi, N.-H. Lee, S.-H. Lee, J.-P. Cheong, C.-Y. Lee and S.-M. Yi (2007) Comparison of greenhouse gas emission from landfills by different scenarios, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(3), 344-352. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.-S., Y.-M. Yoon, C.-H. Kim, and J. Giersdorf (2012) Status of biogas technologies and policies in South Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3430-3438.
- Lee, E.-Y., N.-Y. Lee, K.-S. Cho, and H.-W. Ryu (2006) Removal of hydrogen sulfide by sulfate-resistant *Acidithiobacillus thiooxidans* AZ11, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(4), 309-314.
- Lee, J.-G. and J.-H. Jun (2007) Biogas purifying for fuel cell power plant, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 21(4), 439-444. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.-S., J.-P. Lee, J.-Y. Park, J.-H. Lee, and S.-C. Park (2011) Status and perspectives on bioenergy in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4884-4890.
- Lin, W.-C., Y.-P. Chen, and C.-P. Tseng (2013) Pilot-scale chemical biological system for efficient H<sub>2</sub>S removal from biogas, *Bioresource Technology*, 135, 283-291.
- Lee, S.-H., D.-H. Moon and D.-S. Cho (2003) A study on the resource of landfill gas in the solid waste landfill site, *Journal of Nakdonggang Environmental Research Institute*, 8(1), 203-213. (in Korean with English abstract)
- Nizami, A.-S. and J.D. Murphy (2010) What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1558-1568.
- Panza, D. and V. Belgiorno (2010) Hydrogen sulphide removal from landfill gas, *Process Safety and Environmental Protection*, 88, 420-424.
- Park, S.-J. and K.-S. Cho (1999) Removal of hydrogen sulfide using porous ceramic biofilter inoculated with sulfur oxidizing bacteria, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 15(5), 649-655. (in Korean with English abstract)
- Petersson, A. and A. Wellinger (2007) Biogas upgrading technologies developments and innovations, IEA Bioenergy, Task 37.
- Peu, P., S. Picard, A. Diara, R. Girault, F. Beline, G. Bridoux, and P. Dabert (2012) Prediction of hydrogen sulphide production during anaerobic digestion, *Bioresource Technology*, 121, 419-424.
- Rasi, S., J. Lantela, and J. Rintala (2011) Trace compounds affection biogas energy utilisation - A review, *Energy Conversion and Management*, 52, 3369-3375.
- Ramirez, M., J.M. Gomez, G. Aroca, and D. Cantero (2009) Removal of hydrogen sulfide by immobilized *Thiobacillus thioparus* in a biotrickling filter packed with polyurethane foam, *Bioresource Technology*, 100, 4989-4995.
- Ramirez, M., M. Fernandez, C. Granada, S.L. Borgne, J.M. Gomez, and D. Cantero (2011) Biofiltration of reduced sulphur compounds and community analysis of sulphur-oxidizing bacteria, *Bioresource Technology*, 102, 4047-4053.
- Takuwa, Y., T. Matsumoto, and K. Oshita (2009) Characterization of trace constituents in landfill gas and a comparison of sites in Asia, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 11, 305-311.