

## 암모니아성 질소 첨가에 따른 상향류 혐기성 블랭킷 반응조내 입상슬러지의 저해 기작

이채영<sup>†</sup> · 한선기<sup>\*</sup> · 신항식<sup>\*\*</sup>

수원대학교 토목공학과

<sup>\*</sup>한국방송통신대학교 환경보건학과

<sup>\*\*</sup>한국과학기술원 건설 및 환경공학과

### Inhibition Mechanism of Ammonia Nitrogen on the Granules in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor

Chae Young Lee<sup>†</sup> · Sun Kee Han<sup>\*</sup> · Hang Sik Shin<sup>\*\*</sup>

Department of Civil Engineering, The University of Suwon

<sup>\*</sup>Department of Environmental Health, Korea National Open University

<sup>\*\*</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

(Received 1 November 2007, Accepted 26 November 2007)

#### Abstract

The upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor can be effective for treating simple organic compounds containing high concentration of ammonia nitrogen. The chemical oxygen demand (COD) removal efficiency was about 80% at ammonia nitrogen concentration up to 6,000 mg-N/L. This result also showed that it would be possible to treat propionate effectively at free ammonia nitrogen concentration up to 724 mg-N/L if sufficient time was allowed for adaptation. However the specific methanogenic activity (SMA) of granule was lower than that of granule in the reactor with lower ammonia nitrogen concentration. At 8,000 mg-N/L, the inhibition of high ammonia concentration was observed with evidence of increase of the volatile suspended solids (VSS) concentration in the effluent. It might be ascribed to the decrease in the content of extracellular polymer (ECP), which resulted to the sloughing off of obligated proton-reducing acetogens and heterotrophic methanogens from the exterior of granular sludge. This caused a great portion of the finely sludge to be easily washed out. Therefore, failure to maintain the balance between these two groups of microorganism cause accumulation of the hydrogen partial pressure in the reactor, which could have inhibited the growth of acetate utilizing methanogens.

**keywords** : Ammonia nitrogen, Extracellular polymer, Upflow anaerobic sludge blanket, Volatile suspended solids

## 1. 서론

혐기성 반응은 복잡한 유기물질이 일련의 미생물 작용에 의해 이산화탄소와 메탄으로 분해되는 과정으로 생산된 메탄가스에 의해 에너지 회수가 가능하다. 그러나 메탄 생성균의 느린 증식속도로 인하여 반응조의 용량 증대와 더불어 처리효율이 낮은 단점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 반응조 내에 활성이 뛰어난 혐기성 미생물을 고농도로 유지시켜 비교적 짧은 수리학적 체류시간에 높은 농도의 유기물을 처리하려고 시도하여 왔다(대우건설기술연구소, 1990). 혐기성 공정과 미생물에 대한 이해 증진으로 인해 상향류 혐기성 슬러지 블랭킷 반응조, 혐기성 여상 및 하이브리드 반응조 등 다양한 고율 혐기성 공법들이 개발되어 고농도 유기성 폐수, 침출수, 축산분뇨, 음식폐기물 또는 단백질 함유한 폐기물의 처리에 널리

사용되고 있다(Calli et al., 2005).

폐수 및 폐기물에 함유되어 있는 암모니아성 질소 성분은 혐기성 미생물의 필수 영양분으로 작용하지만(Mah et al., 1978) 40~70 mg-N/L를 초과하는 경우 미생물의 활성을 저하시키는 것으로 알려져 있다(Takashima et al., 1989). 암모니아성 질소에 의한 혐기성 반응의 저해효과는 세포내 pH 변화, 특정 효소 반응 저해 또는 세포 유지 에너지 요구량 증대 등에 기인하는 것으로 알려져 있다(Whittmann et al., 1995). 수용액상의 암모니아성 질소는 암모늄 이온과 유리 암모니아성 질소로 존재하며 유리 암모니아성 질소가 저해를 일으키는 주요한 성분으로 알려져 있다(Sprott et al., 1986). Kayhanian(1999)에 의하면 혐기성 소화시 유리 암모니아성 질소에 의한 저해가 총 암모니아성 질소에 의한 영향보다 크며 한계농도는  $55 \pm 11 \sim 150$  mg NH<sub>3</sub>/L로 제시하고 있다. 다른 연구자들에 의하면 메탄균을 장기간 암모니아성 질소에 적용시 암모니아성 질소 농도 4,000 mg-N/L까지 안정적으로 축산분뇨의 처리가 가능하였으며 이때 유리 암모니아성 질소의 농도는 900 mg NH<sub>3</sub>/L로 제

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

chaeyoung@suwon.ac.kr

시하고 있다(Angelidaki et al., 1993). Velsen(1979)에 의하면 메탄균은 암모니아성 질소 농도 5,000 mg/L까지 적응이 가능하다고 제시하고 있다. 그러나 Lay 등(1998)은 기존 연구와 달리 기질에 대해 충분히 적응된 혐기성 반응조의 경우 총 암모니아성 질소 농도가 유리 암모니아성 질소 농도에 비해 저해효과가 크다고 제시하고 있다.

암모니아성 질소에 대한 미생물의 저해는 메탄균이 가장 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있으며 기존 연구결과 암모니아성 질소 농도 4,051~5,734 mg NH<sub>3</sub>-N/L로 증가시 메탄균의 활성은 약 57% 저감하나 입상슬러지의 산형성균은 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(Koster et al., 1988). 그러나 암모니아성 질소에 대한 메탄균에 대한 저해효과 중 초산 이용 메탄균(aceticlastic methanogens)과 수소 이용 메탄균(hydrogenotrophic methanogens)에 대한 저해효과는 서로 상반된 연구결과를 보이고 있다. 일부 연구자들에 의하면 암모니아 첨가시 메탄 발생 및 성장속도를 근거로 초산 이용 메탄균이 수소 이용 메탄균에 비해 저해를 많이 받는다고 제시하고 있다(Angelidaki et al., 1993; Bhattacharya et al., 1989; Borja et al., 1996; Koster et al., 1984; Robbins et al., 1989; Sprott et al., 1986; Zeeman et al., 1985). 반면 다른 연구자들에 의하면 고농도의 총 암모니아성 질소에 대해 초산 이용 메탄균이 수소 이용 메탄균에 비해 저해 영향이 적다고 보고되고 있다(Wiegant et al., 1986; Zeeman et al., 1985). Jarrell 등(1987)에 의하면 슬러지 소화조에 분리한 혐기성 미생물종에 대한 영향 연구결과 *Methanospirillum hungatei*, *Methanosarcina barkeri*, *Methanobacterium thermoautotrophicum*, *Methanobacterium formicicum* 중에서 *Methanospirillum hungatei*가 가장 민감하여 암모니아성 질소 농도 4,200 mg/L에서 저해를 받으며 나머지 종들은 10,000 mg/L 이상에서 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

고농도의 암모니아성 질소를 함유한 유기성 폐수 또는 폐기물의 상향류 혐기성 슬러지 블랭킷 반응조를 이용한 처리시 미생물에 대한 직접적인 저해효과뿐만 아니라 입상슬러지 특성 변화로 인한 반응조의 성능 저하도 예상되어진다. Hulshoff Pol(1989)에 의하면 암모니아성 질소 농도가 1,000 mg NH<sub>4</sub>/L 이상인 경우 입상화 과정에 영향을 주며 Guiot 등(1988)에 의하면 미생물의 활성 증가는 제외효소 생성을 향상시키며 이는 미생물의 응집을 유도하여 입상화 과정을 촉진하는 것으로 알려져 있다. 그러나 혐기성 공정의 암모니아성 질소에 대한 연구는 대부분 회분식 반응조 형태 또는 완전 혼합 반응조에 대해 이루어져 고율 혐기성 반응조의 일종인 상향류 혐기성 슬러지 블랭킷 반응조의 영향을 정확히 규명하기에는 한계가 있다. 또한 연구자들의 주된 관심사가 유기물 제거효율, 메탄 발생량 등에 한정되어 암모니아성 질소로 인한 입상슬러지 특성 변화로 인한 반응조 성능에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고율 혐기성 반응조의 안정성을 평가하기 위하여 암모니아성 질소 첨가에 따른 상향류 혐기성 블랭킷 반응조내 입상슬러지의 저해

기작을 평가하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

연속실험을 위해 유효용량 2.1 L의 상향류 혐기성 슬러지 블랭킷 반응조를 37°C에서 약 360일간 운전하였다. 기질은 프로피온산을 이용하였으며 기타 합성폐수의 조성은 Table 1에 제시되어 있다. 식종슬러지는 C 공장에서 채취한 입상슬러지를 이용하였으며, 암모니아성 질소는 NH<sub>4</sub>Cl를 이용하여 운전 초기 133 mg-N/L에서 최종적으로 8,000 mg-N/L까지 단계적으로 증가하였다. 반응조의 초기 수리학적 체류시간과 유기물 부하는 각각 2.3일과 0.73 kg COD/m<sup>3</sup>·d로 운전하였으며 미생물이 기질인 프로피온산에 적응함에 따라 수리학적 체류시간을 1.5일로 단축하였다. 반응조 운전조건에 따른 입상슬러지의 비메탄 활성도(specific methanogenic activity, SMA) 평가를 위해 Shelton 등(1984)이 제시한 방법을 수정하여 사용하였다.

**Table 1.** Composition of anaerobic mineral medium

Constituents & Concentration (per liter)	
Phosphate buffer	Trace metals
0.27 g of KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.5 mg of MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O
0.35 g of K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.05 mg of H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>
Mineral salts	0.05 mg of ZnCl <sub>2</sub>
0.53 g of NH <sub>4</sub> Cl	0.03 mg of CuCl <sub>2</sub>
0.075 g of CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.01 mg of Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O
0.1 g of MgCl <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	0.5 mg of CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O
0.02 g of FeCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	0.05 mg of Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>

반응조 유출수의 총 암모니아성 질소 중 유리 암모니아성 질소 농도의 분율을 아래의 식 (1)을 이용하여 산정하였다(Schroeder, 1977; Weast et al., 1985).

$$F_{NH_3} = (1 + 10^{(pK_w - pK_b - pH)})^{-1} \quad (1)$$

여기서, K<sub>w</sub> = 물의 해리 상수 (13.6, 37°C기준)

K<sub>b</sub> = 암모니아성 질소의 이온화 상수 (4.73, 37°C기준)

연속 및 회분식 반응조의 가스 조성은 TCD(thermal conductivity detector)가 장착된 GC(gas chromatography, Gow Mac series 580)를 이용하였다. 칼럼은 Porapak Q(80/100 mesh)를 충전제로 사용한 6 ft × 2 mm(i.d) stainless steel column을 사용하였다. Column, injector 및 detector의 온도는 각각 50, 80 및 90°C이며 운반기체로 헬륨(30 mL/min)을 사용하였다. VFA(volatil fatty acid)는 FID(flame ionization detector)가 장착된 GC(HP 5890 series II)를 이용하여 분석하였다. FFAP capillary column(50 m long, 0.2 mm(i.d), 0.17 μm(film thickness)을 사용하였으며 oven, injector 및 detector 온도는 각각 150, 230 및 250°C이며 질소를 운반기체로 이용하였다. 상향류 혐기성 슬러지 블랭

킷 반응조의 입상슬러지 특성과 미세구조는 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)과 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)을 이용하여 분석하였다. 입상슬러지에 함유한 ECP(extracellular polymer)의 탄수화물과 단백질 분석을 위해서는 열적 추출방법을 통해 Debois 등(1956)이 제시한 phenol/sulfuric acid 및 Smith 등(1985)이 제시한 bichinonic acid 방법을 이용하였다. 입상슬러지의 입경분석은 Image analyser(LEICA Q550 IWB)를 이용하였으며 기타 분석 항목은 Standard Methods에 준해 실험을 수행하였다(APHA-AWWA-WEF, 1992).

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1의 경우 암모니아성 질소 농도에 따른 반응조의 COD 제거율과 미생물의 비메탄 활성도를 제시하고 있다. 암모니아성 질소 농도 2,000 mg-N/L와 4,000 mg-N/L에서는 각각 97% 및 91%의 COD 제거율을 보였다. 암모니아성 질소 농도를 6,000 mg-N/L로 증가시 COD 제거율은 80%를 유지하였으나 8,000 mg-N/L으로 증가시 25%로 급격히 감소하였다. De Baere 등(1984)에 의하면 혐기성 필터를 이용한 경우 암모니아성 질소 농도 6,000 mg-N/L에서도 안정적인 처리가 가능하다고 제시하고 있다. 미생물의 비메탄 활성도의 경우 암모니아성 질소 농도 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 개미산을 기질로 사용한 경우가 초산 또는 프로피온산을 기질로 이용한 경우에 비해 암모니아성 질소 농도에 저해를 많이 받는 것으로 나타나 수소 이용 메탄균의 영향이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 2의 경우 암모니아성 질소 농도에 따른 반응조 유출수의 VFA와 유리 암모니아성 질소의 농도를 제시하고 있다. 암모니아성 질소 농도 2,000 mg-N/L까지 반응조 유출수의 VFA는 검출되지 않았으나 암모니아 질소 농도 증가에 따라 점차 증가하는 경향을 보였다. 특히, 암모니아성 질소 농도 8,000 mg-N/L에서는 프로피온산의 농도가 급격하게 증가하여 프로피온산의 초산으로의 전환이 저해를 받는 것으로 나타났다. Fig. 1과 2의 결과를 고려할 때 입상

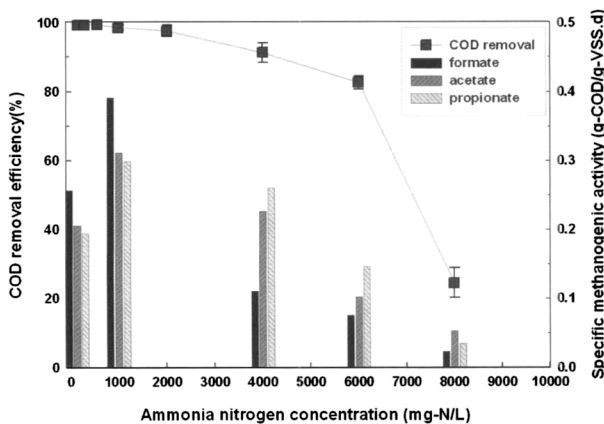


Fig. 1. COD removal efficiency and SMA at different ammonia nitrogen concentrations.

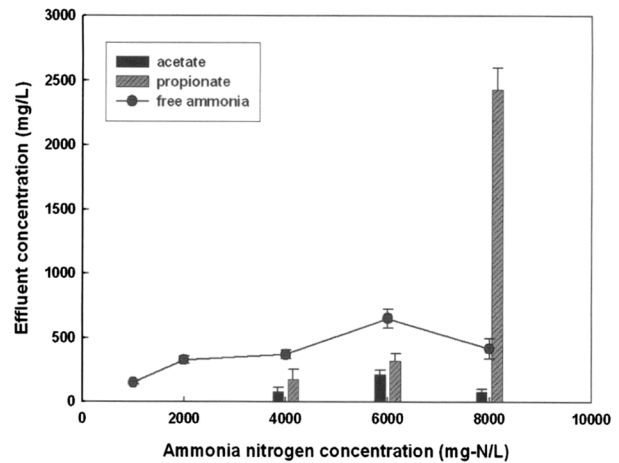


Fig. 2. VFA and free ammonia nitrogen concentration in the effluent at different ammonia nitrogen concentrations.

슬러지를 이용하는 고율 혐기성 반응조의 경우 충분한 적응기간을 거치는 경우 유리 암모니아성 질소 농도 724 mg-N/L까지 프로피온산의 처리가 가능한 것으로 나타났다. Calli 등(2005)에 의하면 암모니아성 질소에 적용된 슬러지를 이용하는 경우 적용되지 않은 슬러지에 비해 높은 유리 암모니아성 질소 750 mg-N/L까지 고율 혐기성 반응조의 운전이 가능한 것으로 제시하고 있다.

Fig. 3의 경우 암모니아성 질소 농도에 따른 반응조 입상슬러지의 ECP 함량, 유출수의 VSS 농도 및 입상슬러지의 입경 변화를 제시하고 있다. 암모니아성 질소 농도 증가에 따라 ECP 함량은 점차 감소하나 유출수의 VSS 농도는 증가하는 경향을 보이고 있다. 암모니아성 질소 농도 2,000 mg-N/L까지는 입상슬러지의 높은 침강 특성으로 인하여 유출수의 VSS 농도는 낮은 값을 유지하였다. 암모니아성 질소 농도 8,000 mg-N/L에서는 가스 발생량이 매우 낮아 입상슬러지에 작용하는 전단응력 또는 상항유속이 작음에도 불구하고 유출수의 VSS 농도는 높은 값을 보였다. 이 경우 입상슬러지 ECP 함량 중 단백질 성분의 급격한 감소가 나타났다. 암모니아 농도에 따른 입상슬러지의 입경변화는 기질 변화에 따른 초기 감소 이외에는 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 4의 경우 암모니아성 질소 농도 8,000 mg-N/L에서의 입상슬러지의 주사전자현미경 사진을 제시하고 있다. 입상슬러지는 대나무 모양의 *methanotrix* 형태의 미생물로 주로 구성되어 있으며 수소생성균과 수소이용 메탄균이 존재하고 있다. 주사전자현미경 분석 결과 ruthenium red로 염색한 ECP 성분이 일부 TEM 사진에서 검출되고 있으나 정상상태의 입상슬러지에 비해 매우 낮게 나타났다. 안정적으로 운전되는 고율혐기성 반응조의 입상슬러지의 경우 미생물 사이의 juxtapositioned syntrophic 관계를 통해 오염물질을 효과적으로 분해하여 최종적으로 메탄을 생성시킨다. 그러나 암모니아성 질소 농도가 고농도로 존재하는 경우 이들 미생물간의 syntrophic 반응에 저해를 주는 것으로 나타났다.

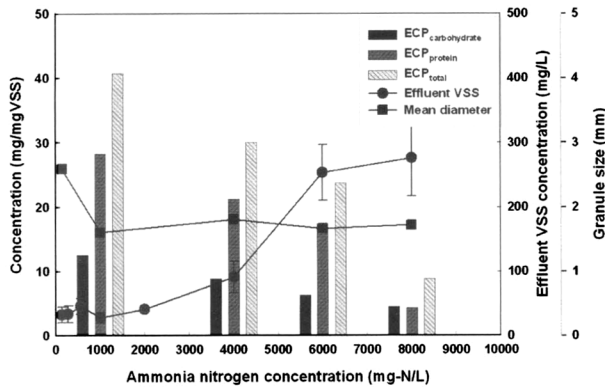


Fig. 3. ECP content, VSS concentration and granule size at different ammonia nitrogen concentrations.

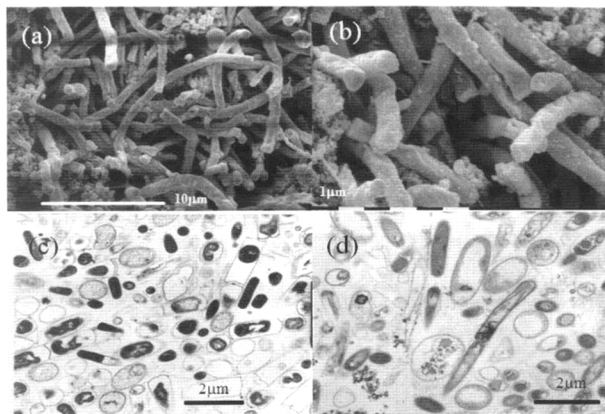


Fig. 4. Scanning and transmission electron microscopes of granule at the end of experiment (a, b) SEM of granules; (c, d) TEM of granules.

암모니아에 의한 입상슬러지의 저해효과 기작을 정리하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 정상상태의 입상슬러지의 경우 기질로 프로피온산을 이용하는 경우 초산, 수소

및 이산화탄소를 생성하는 obligate proton-reducing acetogens와 수소 및 초산 이용 메탄균이 균형있게 존재하여 최종적으로 메탄을 생성하게 된다. 그러나 암모니아성 질소가 고농도로 존재하게 되는 저해상태에서는 ECP 함량의 감소로 인하여 상대적으로 입상슬러지 바깥부분에 존재하는 obligate proton-reducing acetogens와 수소 이용 메탄균의 탈리와 함께 반응조 외부로 유출이 발생한다. 따라서 이들 미생물간의 균형이 깨지면 반응조내의 수소 분압을 효과적으로 저감하지 못하게 되며 최종적으로는 초산 이용 메탄균에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 4. 결론

프로피온산의 혐기성 분해시 암모니아성 질소에 의한 입상슬러지의 저해 영향을 평가하기 위하여 상항류 혐기성 슬러지 블랭킷 반응조를 약 360일간 운전하였다. COD 제거율은 암모니아성 질소 6,000 mg-N/L까지 80%의 효율을 보였다. 미생물의 비메탄 활성도의 경우 개미산을 기질로 사용한 경우가 초산 또는 프로피온산을 기질로 이용한 경우에 비해 암모니아성 질소 농도에 저해를 많이 받는 것으로 나타났다.

암모니아 농도 증가에 따라 입상슬러지의 ECP 함량과 유출수의 VSS 농도는 반비례 관계를 보였으며 입상슬러지의 입경변화는 기질 변화에 따른 초기 감소 이외에는 큰 차이를 보이지 않았다. 즉 암모니아성 질소에 의한 입상슬러지의 영향은 ECP 함량의 감소로 인하여 입상슬러지 바깥부분에 존재하는 obligate proton-reducing acetogens와 수소 이용 메탄균의 탈리와 함께 반응조 외부로의 유출로 미생물간의 균형이 깨져 반응조 내 수소 분압을 효과적으로 저감하지 못하여 발생하는 것으로 판단된다.

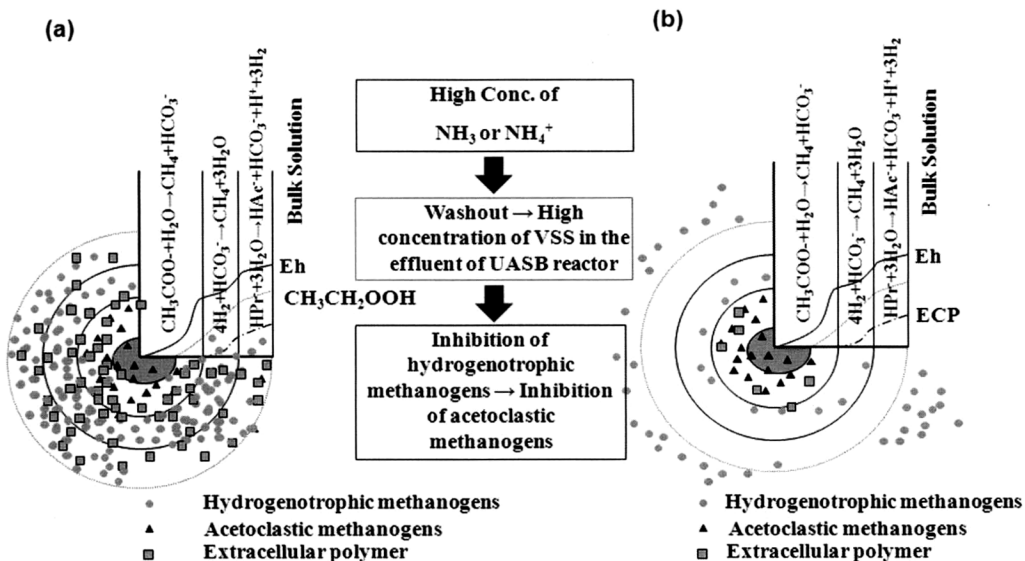


Fig. 5. Schematic metabolic process for methanogenesis of the granules at different conditions (a) normal condition; (b) inhibited condition.

참고문헌

- 대우건설기술연구소, 혐기성 입상슬러지 최적화 연구 (1990). American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Ed. Washington DC, USA (1992).
- Angelidaki, I. and Ahring, B. K., Thermophilic Anaerobic Digestion of Livestock Waste: the Effect of Ammonia, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **38**, pp. 560-564 (1993).
- Bhattacharya, S. K. and Parkin, G. F., The Effect of Ammonia on Methane Fermentation Process, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **61**(1), pp. 55-59 (1989).
- Borja, R., Sanchez, E. and Weiland, P., Influence of Ammonia Concentration on Thermophilic Anaerobic Digestion of Cattle Manure in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors, *Process Biochem.*, **31**(5), pp. 477-483 (1996).
- Calli, B., Mertoglu, B., Inanc, B. and Yenigun, O., Effects of High Free Ammonia Concentrations on the Performances of Anaerobic Reactors, *Process Biochem.*, **40**, pp. 1285-1292 (2005).
- De Baere, L. A., Devocht, M., Van Assche, P. and Verstraete, W., Influence of High NaCl and NH<sub>4</sub>Cl Salt Levels on Methanogenic Associations, *Wat. Res.*, **18**(5), pp. 543-548 (1984).
- Debois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith, F., Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances, *Analyst. Chem.*, **28**, pp. 350-356 (1956).
- Guiot, S. R., Gorur, S. S., Bourque, D. and Samson, R., Metal Effect on Microbial Aggregation during Anaerobic Sludge Bed Filter (UBF) Reactor Start-up, In: (G. Lettinga et al. eds.). *Granular Anaerobic Sludge; Microbiology and Technology*, Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 187-194 (1988).
- Hulshoff Pol, L. W., *The Phenomenon of Granulation of Anaerobic Sludge*, Ph.D. Thesis, Agricultural University Wageningen, The Netherlands (1989).
- Jarrell, K. F., Saulnier, M. and Ley, A., Inhibition of Methanogenesis in Pure Cultures by Ammonia, Fatty Acids, and Heavy Metals, and Protection against Heavy Metal Toxicity by Sewage Sludge, *Can. J. Microbiol.*, **33**, pp. 551-554 (1987).
- Kayhanian, M., Ammonia Inhibition in High Solids Biogasification: An Overview and Practical Solution, *Environ. Technol.*, **20**, pp. 355-365 (1999).
- Koster, I. W. and Lettinga, G., The Influence of Ammonium Nitrogen on the Specific Activity of Pelletized Methanogenic Sludge, *Agri. Waste*, **9**, pp. 205-216 (1984).
- Koster, I. W. and Lettinga, G., Anaerobic Digestion at Extreme Ammonia Concentration., *Biol. Wastes*, **25**, pp. 51-59 (1988).
- Lay, J. J., Li, Y. Y. and Noike, T., The Influence of pH and Ammonia Concentration on the Methane Production in High-solids Digestion Processes, *Wat. Env. Res.*, **70**(5), pp. 1075-1082 (1998).
- Mah, R. A., Smith, M. R. and Baresi, L., Studies on an Acetate-fermenting Strain of *Methanosarcina*, *Appl. Environ. Microbiol.*, **35**, pp. 1174-1184 (1978).
- Robbins, J. E., Gerhard, S. A. and Kappel, T. J., Effects of Ammonia in Anaerobic Digestion and An Example of Digester Performance from Cattle Manure Protein Mixture, *Biol. Wastes*, **27**, pp. 1-4 (1989).
- Schroeder, E. D., *Water and Wastewater Treatment*, McGraw-Hill International Editions, New York, N. Y. (1977).
- Shelton, D. R. and Tiedje, J. M., General Method for Determining Anaerobic Biodegradation Potential, *Appl. Environ. Microbiol.*, **47**(4), pp. 850-857 (1984).
- Smith, P. K., Krohn, R. I., Hermanson, G. T., Mallia, A. K., Gartner, F. H., Provenzano, M. D., Fujimoto, E. K., Goeke, N. M., Olson, B. J. and Klenk, D. C., Measurement of Protein Using Bicinchoninic Acid, *Anal. Biochem.*, **150**, pp. 76-85 (1985).
- Sprott, G. D. and Patel, G. B., Ammonia Toxicity in Pure Cultures of Methanogenic Bacteria, *System Appl. Microbiol.*, **7**, pp. 358-363 (1986).
- Takashima, M. and Speece, R. E., Mineral Nutrient Requirements for High Rate Methane Fermentation of Acetate at Low SRT, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **61**, pp. 1645-1650 (1989).
- Velsen, A. F. M., Adaptation of Methanogenic Sludge to High Ammonia Nitrogen Concentration, *Wat. Res.*, **13**, pp. 995-999 (1979).
- Weast, R. C., Astle, M. J. and Beyer, W. H., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 65th Ed., CRC Press Inc., Boca Raton, Fla (1985).
- Wiegant, W. M. and Zeeman, G., The Mechanism of Ammonia Inhibition in the Thermophilic Digestion of Livestock Waste, *Agri. Waste*, **16**, pp. 243-253 (1986).
- Whittmann, C., Zeng, A. P. and Deckwer, W. D., Growth Inhibition by Ammonia and Use of pH-controlled Feeding Strategy for the Effective Cultivation of *Mycobacterium chlorophenicum*, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **44**, pp. 519-525 (1995).
- Zeeman, G., Wiegant, W. M., Koster-Treffers, M. E. and Lettinga, G., The Influence of Total Ammonia Concentration on the Thermophilic Digestion of Cow Manure, *Agri. Waste*, **14**, pp. 19-35 (1985).