

pH 조절을 통한 폐활성 슬러지의 COD 가용화 및 감량화 평가

Evaluation of COD Solubilization and Reduction of Waste Activated Sludge by pH Control

김연권* · 문용택 · 김지연 · 서인석

Kim, Youn Kwon* · Moon, Yong Taik · Kim, Ji Yeon · Seo, In Seok

한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소

(2007년 6월 22일 논문 접수; 2007년 10월 1일 최종 수정논문 채택)

Abstract

From the view point of biological wastewater treatment, C/N ratio is one of the most important factor in biological nutrient removal process. However, municipal sewage in Korea is characterized by extremely low content of carbon source and relatively higher portion of N source. Accordingly, it is necessary to dose external carbon source in order to obtain higher degree of carbon source within the process. In this study, the effects of pH pretreatment as an alternative plan for increasing carbon source on the cell disruption and COD solubility of waste activated sludge were conducted under well defined experimental conditions. During 5 hours, the value of COD solubilization rate (S_R) at pH 11.5 is approximately 4.4 times higher than the value of S_R at pH 9.5. It is expected that the level of SCOD increased due to the result from cell disruption. However, VSS/TSS ratio was not significantly changed after 5 hours. As Alkalinity changes gradually from less than 15, 30 and 60 meq NaOH/L, average RBCOD/SCOD fraction showed 34, 36 and 45%, respectively.

Key words: Waste activated sludge, pH control, COD solubilization, RBCOD fraction

주제어: 폐활성슬러지, pH 조정, COD 가용화, RBCOD 분율

1. 서 론

하수처리장에서 발생하는 하수슬러지는 1차 침전조 슬러지(Primary sludge), 폐활성 슬러지(WAS; waste activated sludge), 1차 침전조 슬러지와 폐활성

슬러지가 혼합된 농축슬러지(Thickened sludge) 그리고 소화슬러지(Digested sludge) 등으로 구분할 수 있다. Porge 등(1956)에 의해 제안된 박테리아의 유기물 화학식($C_5H_7O_2N$)을 통해 약 53%가 탄소, 12%가 질소로 구성되어 있는 것으로 알려져 왔으며, 이후 많은 연구자들에 의한 실험결과 박테리아의 약

*Corresponding author Tel: +82-42-870-7554, FAX: +82-42-870-7549, E-mail: 201commando@hanmail.net (Kim, Y.K.)

Table 1. Typical elemental composition of different sewage sludge

Sludge type	Elemental composition (wt % VS)					
	C	H	O	N	S	C/N
Primary sludge	60.0	7.5	28.0	3.0	1.5	20.0
Waste activated sludge	53.0	7.0	30.5	9.0	0.5	5.89
Thickened sludge	57.0	7.0	30.0	5.0	1.0	11.4
Digested sludge	67.0	5.0	25.0	2.2	0.8	30.5

80%가 수분으로 20%가 고형물로 이루어져 있고, 고형물중 약 90%의 유기물과 10%의 무기물로 구성되어 있는 것으로 알려져 있다. 이렇게 구분된 하수슬러지별 원소조성특성은 **Table 1**에서와 같이 슬러지 고유특성에 따라 상이하하며, 이들 원소조성특성은 소화조운영에 있어 biogas 생성량 및 조성, 생분해도 예측에 활용할 수 있는 중요한 자료로 활용되고 있다 (Vesilind and Spinosa, 2001; Mininni, 2001).

슬러지를 이용한 유용자원의 활용과 감량화를 위한 슬러지내 미생물 세포조직의 파괴과정은 대상 슬러지의 물리·화학적 특성에 따라 달라지게 되는데, 1차 침전조 슬러지의 경우 생물학적 가수분해가 용이한 입자상 유기물로서 생분해가 용이한 반면, 폐활성 슬러지의 경우 박테리아의 세포벽으로 인해 가수분해가 어려운 특성을 가지고 있다. 최근에는 슬러지 세포벽을 파괴하기 위해 기계적 전처리법, 초음파 및 전자선을 이용법, 열 이용법, 산 또는 알칼리 처리법, 오존 이용법 등 다양한 방법이 활용되고 있다 (Müller, 2001). 이 중에서도 산 또는 알칼리제를 이용한 전처리 방법은 하수슬러지 전처리 방법으로 가장 많이 연구된 방법 중 하나로서 강산성 조건에 비해 NaOH를 이용한 알칼리성 조건에서의 슬러지 가용화 및 생분해 효과가 뛰어난 것으로 보고되고 있다 (Ray et al., 1990; Beccari et al., 1993; Saiki et al., 1999; 허, 2004). Aravinthan 등(2001)은 130°C에서 1 시간 동안 알칼리 가수분해를 거친 폐활성 슬러지의 탈질효율을 평가한 결과 BNR 공정에서 질소제거를 위한 외부탄소원으로서의 활용 가능성이 있음을 주장하였는데, 이와 같은 결과는 우리나라처럼 유입하수내 탄소원이 부족한 지역에서 대체 탄소원으로 큰 활용가치가 있는 기술로 사료된다.

이렇듯, 슬러지를 구성하는 미생물의 세포는 탄소원으로 활용이 가능한 물질들을 함유하고 있어 적절

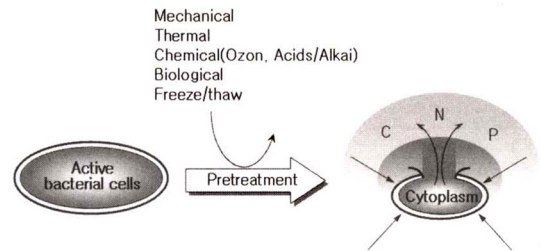


Fig. 1. Schematic representation of the different disintegration methods on subsequent sludge treatment process.

한 전처리 방법을 이용할 경우, 미생물의 세포벽을 파괴함으로써 세포내 탄소원 성분 및 특정성분을 유출시켜 공정에 재활용 할 수 있다(**Fig. 1**). 또한 다양한 세포벽 파괴기술을 단독 또는 연계처리 하였을 경우 슬러지 고형물 부분에 대한 원천감량화가 가능하여 최근에는 해당분야와 관련한 단위조작 기술분야에 많은 관심이 증대되고 있는 추세이다.

본 연구는 폐활성 슬러지의 세포질 구성성분을 이용한 공정내 탄소원 재이용 가능성과 감량화 효과에 대해 평가하고자 슬러지 전처리 공법의 일환으로 pH 조절을 통한 미생물 활성도 변화 및 물질거동 변화특성을 모니터링 하였다. 본 연구 결과는 화학적 슬러지 전처리 공정의 주요 변수인 알칼리 농도, 반응시간 및 가용화율 등에 대한 정보제공과 함께 후속 슬러지처리 공정 선정에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험장치

pH 조절에 따른 하수처리장 미생물의 세포파괴현상을 모니터링 하기 위해 미생물의 산소이용율 (OUR: oxygen utilization rate, mg O₂/L/hr) 측정법을

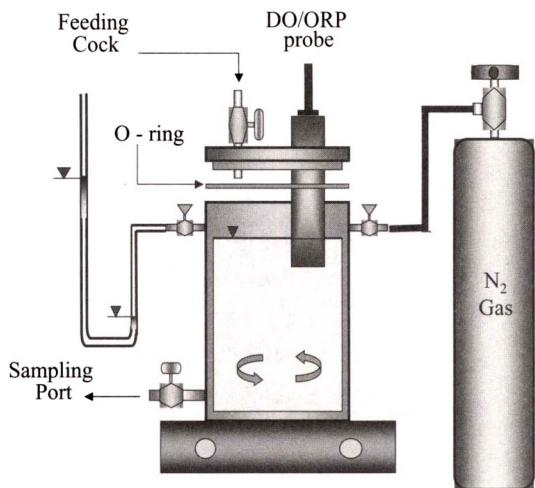


Fig. 2. Schematic diagram of batch reactor for RBCOD fractionation.

이용하여 pH 변화에 따른 미생물의 활성도 변화를 평가하였다(Wentzel et al., 2002; Kim, 2003). 또한, 슬러지 파괴에 따른 오염물질의 거동특성을 평가하기 위해 Jar tester와 별도의 회분식 실험기(Fig. 2)를 이용하여 TSS, VSS, TCOD_{cr}, SCOD_{cr}, TN, NH₃-N, NO₃-N, TP, PO₄-P 등의 항목을 Standard Methods에 준하여 분석하였으며, 미생물의 floc 변화를 확인하기 위해 광학현미경(Leica, Q600)을 사용하였다. 이 외에도 COD 가용화율 평가실험 및 가용화된 COD 성분 중 RBCOD(Readily biodegradable COD)의 분율평가 실험을 수행하였다.

2.2. 실험방법

실험에 사용된 슬러지는 도시하수가 유입되는 D 하수처리장(900,000m³/d)의 반송슬러지를 별도의 전처리 없이 사용하였으며, 실험 초기조건에서의 반송슬러지 특성은 TSS 1%, TCOD 10,380mg/L, SCOD 50mg/L, NH₄-N 8.6mg/L, PO₄-P 37.5mg/L를 나타내었다.

2.2.1. pH 변화에 따른 미생물 OUR 변화 평가

pH 변화에 따른 미생물 활성도 변화를 측정하기 위해 F/M비가 상이한 3종류의 시료(S1, S2, S3)를 이용하여 pH를 2~11까지 변화시켜가며 OUR 변화를 측정하였고, 사전실험을 통해 pH 조정 후 안정적

Table 2. pH vs. F/M load test samples

Sample number	F/M ratio
S 1	0.012
S 2	0.05
S 3	0.1

Table 3. pH vs. pollutants test samples

Sample number	pH
S 0 (Blank)	7
S 4	9.5
S 5	10.5
S 6	11.5

인 OUR 값을 나타내는 30분 이후의 결과치를 실험값으로 사용하였다(Table 2). F/M비 변화에 사용된 기질은 인공합성폐수(Kim, 2003)를 사용했으며, 질산화 방지를 위해 ATU(1-Allyl-2-thiourea)를 반응조 내 20mg/L가 되도록 주입하였다(Orhon et al., 1997).

2.2.2. 알칼리 조건에서의 오염물질 거동특성 평가
채취된 D 하수처리장 폐활성 슬러지를 Jar tester에 각각 2L 씩 주입 후 NaOH를 이용하여 약알칼리로부터 강알칼리 조건(pH 9.5~11.5)에서 0, 1, 3, 5 시간 간격으로 일정 시료를 채취하여 NH₄-N, PO₄-P 등 물질거동 특성을 평가하였다(Table 3). 또한 pH 변화에 따른 암모니아 탈기특성을 비교하기 위해 미생물을 주입하지 않은 시료에 대해 알칼리 조건(pH 6.5~13)에서 시간대별 NH₄-N 농도변화를 모니터링 하였다.

2.2.3. 알칼리 조건별 COD 가용화율 변화 및 고품질 감량화 특성 평가

알칼리 조건에서 미생물 세포벽 파괴정도와 세포질 구성성분을 이용한 탄소원으로 재이용 가능성을 확인하기 위해 COD 가용화율(Solubilization rate, S_R)을 평가하였다. 식 (1)에서 보는 바와 같이, S_R 값은 세포벽 파괴 후 시료의 SCOD 농도와 세포벽 파괴 전 시료의 SCOD 농도차를 폐활성 슬러지의 TCOD 농도로 나눈 값으로 표현할 수 있다. 즉, 특정 pH에서 S_R 값이 높을수록 재이용이 가능한 용존성 탄소원의 확보가 용이하므로 후속 공정의 선정 및 연계방법

을 결정할 수 있는 중요한 판단자료가 될 수 있다.

$$S_R(\%) = \frac{SCOD_f - SCOD_i}{TCOD_{RWS}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, SCOD_f: pH 처리 후의 SCOD 농도 (mg/L)

SCOD_i: pH 처리 전의 SCOD 농도 (mg/L)

TCOD_{RWS}: 폐활성슬러지 TCOD 농도 (mg/L)

이 외에도 알칼리 조건에서의 세포벽 파괴에 의한 슬러지 감량화 특성을 알아보기 위해 pH 9.5, 10.5, 11.5 조건에서 5시간 동안 VSS/TSS의 분율변화 특성을 평가 하였다.

2.2.4. 알칼리 조건별 RBCOD 변화특성 평가

pH 조절을 통한 슬러지 가용화로 생성된 용존성 COD 성분의 유기물을 이용한 하수처리공정 외부탄소원으로의 활용성 여부를 평가하기 위해 가용화된 COD 중 S-protein의 변화와 NUR(Nitrate utilization rate, mg NO₃-N/L/hr) 측정법을 이용하여 RBCOD와 SBCOD 분율변화 평가실험을 수행하였다(Kujawa and Klapwijk, 1999). 일반적으로 미생물이 쉽게 활용하는 RBCOD 성분(S₁)과 미생물이 쉽게 이용하기 어려운 SBCOD 성분(X₁)은 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. NUR 실험은 분말형태의 NaOH를 하수슬러지 1000mL에 주입하고 Alkali 농도를 각각 15meq, 30meq, 60meq NaOH/L가 되도록 조정하여 실험을 수행하였다(Table 4). NUR 실험시 초기 SCOD 농도는 150mg/L로 맞추어 실시하였다.

Table 4. Alkalinity vs. RBCOD fraction evaluation

Sample number	NaOH (meq)
S 0 (Blank)	-
S 7	15
S 8	30
S 9	60

$$S_s = \frac{2.86(NO_3 - N)_1 - 1.72(NO_2 - N)_1}{(1 - Y_{HD})} \times \frac{1}{f_{ww}} \quad (2)$$

$$X_s = \frac{2.86(NO_3 - N)_2 - 1.72(NO_2 - N)_2}{(1 - Y_{HD})} \times \frac{1}{f_{ww}} \quad (3)$$

여기서, Y_{HD} = 무산소상태에서의 미생물 생산계수 (mg COD/mg COD)

2.86 = 산화 환원 작용에서 NO₃의 Oxygen equivalent(mg COD/mg NO₃-N)

1.72 = 산화 환원 작용에서 NO₂의 Oxygen equivalent(mg COD/mg NO₂-N)

f_{ww} = activated sludge mixed liquor의 총 부피에서 wastewater 부피의 분율

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. pH 변화에 따른 미생물 활성도 변화 특성

일반적으로 하수처리공정내 미생물은 pH 변화에 매우 민감하여 강산 또는 강알칼리의 하·폐수가 유입될 경우 하수처리에 관여하는 미생물의 활성도를 저하시킬 뿐만 아니라, 심할 경우 미생물의 세포벽과 조직을 파괴함으로써 해당 공정의 하·폐수처리기능을 원천적으로 파괴하기도 한다. pH 변화에 따른 미생물의 거동특성에 대한 연구결과 중 Kim(2003)의 연구결과에 따르면, 미생물의 활성도는 산과 알칼리에 노출시간에 따라 감소하며 약산과 약알칼리 범위에서는 F/M비가 클수록 변화가 적은 것으로 보고되었다. 본 연구에서는 pH 변화에 따라 산성과 알칼리성 구역에서의 미생물 활성도 변화특성을 관찰·비교하고자 OUR 측정법을 이용하였다. 실험결과 미생물의 활성도는 pH 6.5~7.5에서 가장 높은 것으로 나타났으며, pH 5 이하 또는 pH 9 이상의 구간에서는 미생물 활성도가 1/2 이상 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 강산과 강알칼리 구간에서는 미생물의 활성도가 공통적으로 급감하며, 이 영역에서부터 pH 변화에 의한 저해(Inhibition)와 세포벽 파괴 등의 현상이 복합적으로 나타나고 있는 것으로 사료되었다. 일반적으로 pH 조절을 통한 슬러지 전처리의 효과는 슬러지 입자의 가용화도, 생분해도, 그리고 후속처리 공정과의 연계 효율성 등을 고려해 산에 비해 알칼리

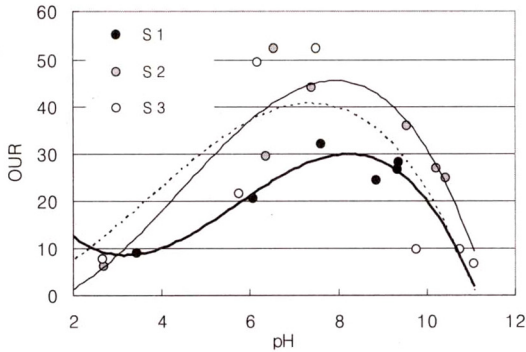


Fig. 3. Typical OUR response under different pH range.

처리가 더 많이 이용되고 있다(허, 2004).

pH 조정에 의한 폐활성 슬러지의 세포벽 파괴방법은 슬러지내 구성성분의 외부용출 뿐만 아니라 Floc의 구성형태에도 영향을 미칠 것으로 판단되어 폐활성 슬러지의 pH 전처리시 변화특성을 관찰하기 위해 광학현미경(400배 배율)을 이용하여 pH 전처리를 실시하지 않은 폐활성 슬러지 Floc과 pH 조정 후의 슬러지 Floc을 비교하였다. Fig. 4에서 확인 할 수 있듯이 pH 전처리를 실시한 Floc이 pH 전처리를 실시하지 않은 폐활성 슬러지에 비해 Floc의 밀집도가 파괴되어 있는 것을 확인 할 수 있었다.

3.2. pH 변화에 따른 오염물질의 거동 특성

pH를 중성으로 조절한 공시료(Blank sample)과 pH 9.5, 10.5, 11.5로 조절된 시료 S4, S5, S6을 이용하여 pH 변화에 따른 각 시료별 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 물질

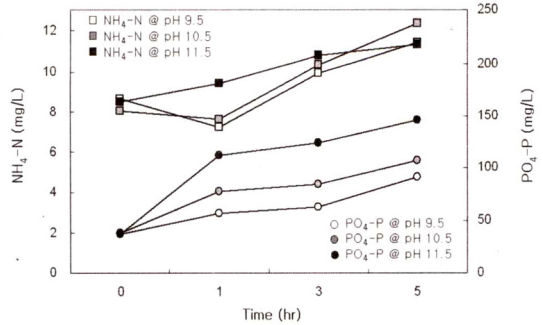


Fig. 5. Variation of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ profile for each pH.

거동특성을 조사하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 초기 8.6mg/L에서 최대 12mg/L 증가하였으나 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 초기 37mg/L에서 최대 146mg/L까지 증가하였고, 증가추이는 pH 10.5에서 약 2.4배, pH 11.5에서 약 3.6배 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 미생물 활성도 변화특성 결과와 함께 pH 조절에 의한 미생물 세포벽 파괴의 결과로 해석할 수 있으나 실험결과는 Porge 등(1956)이 제안한 박테리아 유기물 화학식에 비교할 경우 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 농도증가에 비해 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도증가가 매우 미미한 것으로 나타났다. 이는 짧은 반응시간과 pH 증가에 의한 미생물 대사활동저해, ATU 주입 등 질산화(Nitrification) 반응이 일어날 수 없다고 가정했을 경우, 또 다른 N 제거기작이 존재함을 가정 할 수 있다.

이를 증명하기 위해 미생물이 주입되지 않은 시료에 대해 다양한 pH 조건(pH 6.6~pH 13.0)에서 암



(a) Before



(b) After

Fig. 4. Effect of pH pretreatment on WAS (NaOH 7g/L).

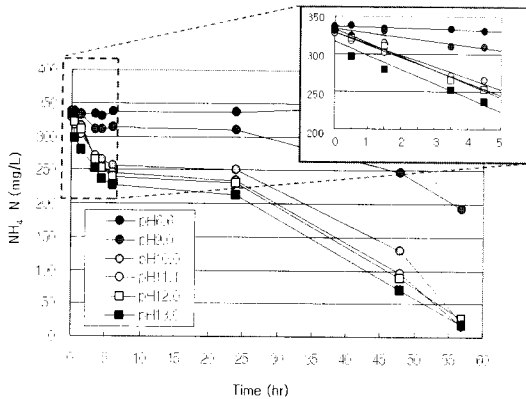


Fig. 6. Variation of ammonia stripping profile with time.

Table 5. Summarized the results of ammonia stripping experiment at each pH

pH	Equations	R ²
6.6	$y = -0.728x + 338.18$	0.8845
9.0	$y = -2.851x + 336.49$	0.8274
10.0	$y = -7.61x + 336.48$	0.9441
11.1	$y = -8.438x + 337.34$	0.9956
12.0	$y = -9.1583x + 342.47$	0.9901
13.0	$y = -9.428x + 326.68$	0.9168

모니아 탈기(Ammonia stripping)실험을 수행 하였고 그 결과는 Fig. 6와 같다. 암모니아 탈기반응은 5시간 이내의 범위에서 1차 반응형태의 탈기특성을 나타냈으며 pH가 높을수록 빠른 암모니아 탈기특성을 보였다. 또한 Table 5에서 보는 바와 같이, pH 9와 pH 10을 경계로 암모니아 탈기속도가 달라짐을 확인 할 수 있었는데, 이는 암모니아 탈기반응이 높은 용존성을 가진 암모니아(NH₃-N)와 암모늄 이온(NH₄⁺)과의 산화 환원반응과 관련되어 있으므로 효과적인 암모니아 탈기를 위해서는 이론적으로 pH가 10 이상으로 조절해야 한다는 결과로 해석할 수 있다(채 등, 2000). 이상의 결과는 미생물 세포벽을 파괴하여 세포질 구성 성분인 탄소원을 후속공정의 탄소원으로 재이용 하고자 할 경우, 함께 유출된 고농도의 N과 P 성분이 생물학적처리를 위한 적정 C/N/P비에 악영향을 유발할 수 있으나 pH를 높여 N 성분을 자연탈기시킴으로써 후속 공정과의 연계를 보다 원활하게 구성 할 수 있음을 내포하고 있는 결과라 할 수 있다.

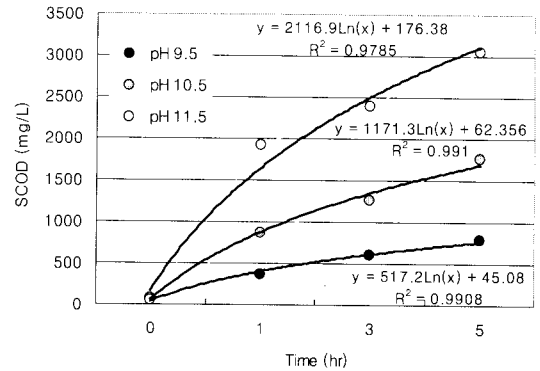


Fig. 7. Variation of SCOD profile with time.

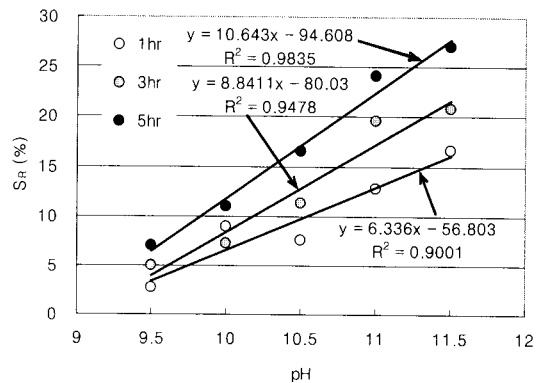


Fig. 8. Correlation between pH and reaction time.

3.3. pH 변화에 따른 COD 가용화율(S_R) 및 감량화 평가

TCOD(Total COD)로 표현되는 폐활성 슬러지와 알칼리 처리에 의한 세포벽 파괴시 유출되는 세포질 중 탄소원 성분은 용존성 COD(SCOD: Soluble COD)의 변화로 나타낼 수 있다. pH 범위가 상이한 3개의 시료(pH 9.5, 10.5, 11.5)에 대해 알칼리 5시간 동안 반응시간별 SCOD의 변화를 측정된 결과는 Fig. 7과 같다. 5시간 동안 모든 시료에 대해 TCOD의 증감은 나타나지 않았으나, SCOD는 pH가 높아짐에 따라, 반응시간이 길어짐에 따라 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다. 알칼리 조건에서 일정시간 경과 후, 세포벽 파괴의 결과로 증가하게 되는 SCOD의 변화추이와 특성은 후속공정에서 활용 가능한 대체 탄소원으로서의 방법을 결정하는 중요한 인자가 될 수 있다.

식 (1)을 이용하여 pH 변화에 따른 각 반응시간대

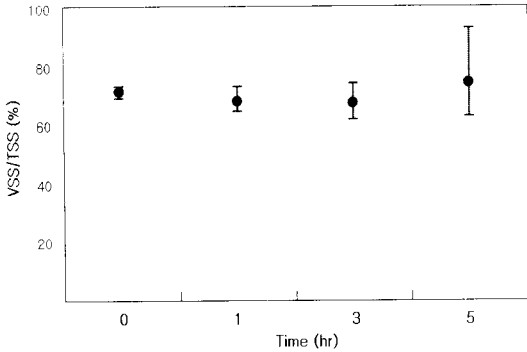


Fig. 9. Ratio of VSS and TSS concentration with time.

별 S_R 을 Fig. 8에 나타내었다. 실험결과 S_R 은 알칼리 반응시간이 길어질수록, pH가 증가할수록 비례적으로 증가하는 선형적 관계가 있음을 확인 할 수 있었으며, 동일 반응시간에 대해 pH가 9.5에서 pH 11.5로 증가함에 따라 S_R 은 약 4.4배 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 슬러지 알칼리 처리시 접촉시간과 pH 변화에 따른 획득 가능한 SCOD의 정량적 비율을 예측할 수 있는 중요한 결과로 사료된다.

폐활성 슬러지에 대해 알칼리 처리를 실시 할 경우, 세포벽 파괴로 인한 고형물량 감량효과를 평가하기 위해 pH 9.5, 10.5, 11.5의 조건에서 폐활성 슬러지의 VSS/TSS 분율변화를 모니터링 하였다. 실험결과 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 알칼리 조건에서 VSS/TSS 분율변화는 시간경과에 상관없이 약 65~70% 수준으로 나타났다. 이와 같은 결과는 장 등 (2003)에 의해 연구된 결과에서도 확인할 수 있는데 다양한 슬러지 전처리 실험결과 각각의 실험조건에서 SS와 VSS의 감소율은 차이가 크지 않은 것으로 보고하고 있다. 이는 세포벽이 파괴되어 세포질이 용출되어 증가하는 COD 성분이 모두 VSS에서 기인하지 않음을 의미하며, 폐활성 슬러지에 대한 알칼리 처리를 실시할 경우 일정 조건에서 외부탄소원 대신 활용이 가능한 SCOD 성분의 획득은 가능한 반면 슬러지 감량화를 위해서 별도의 물리, 화학적 방법이 필요한 것으로 사료되었다.

3.4. 알칼리 조건별 RBCOD 발생특성

국내 하수처리장의 유입하수는 대부분 낮은 유기물 농도로 인해 C/N Ratio가 3 이하로 유입됨으로서

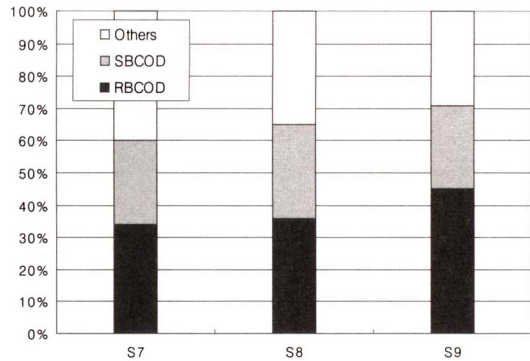


Fig. 10. RBCOD fraction in solubilized waste activated sludge after pH pretreatment.

생물학적 고도하수처리공정에서 영양염류를 제거하기 위한 탄소원 확보에 어려움이 많다. 이와 같은 문제에 대한 해결방법으로 메탄을 또는 분뇨와 같은 외부탄소원을 직접 주입하는 방식이 일반적이거나 공정의 안정성 측면과 경제적 측면에서 문제가 많이 발생해왔다. 폐활성 슬러지의 세포벽을 파괴시켜 외부로 용출된 세포내 구성성분 중 탄소원으로서의 재이용 가능성을 확인하고자 NUR 기법을 이용하여 가용화된 슬러지 용출액의 RBCOD 분율을 평가하였다. RBCOD를 계산하기 위해 초기 30분간 측정된 비탈질율(SDNR: specific denitrification rate, mg NO₃-N/g VSS/hr)은 S7, S8, S9 시료에 대해 각각 2.6, 2.8, 3.4 mg NO₃-N/g VSS/hr로 나타났다. S7, S8, S9의 RBCOD 분율은 각각 34, 36, 45%로 나타났으며, Fig. 10에서 확인할 수 있듯이, S7과 S8의 RBCOD 분율은 차이가 미미하였으나 알칼리도가 높을수록 RBCOD 분율이 높아짐을 알 수 있었다.

4. 결론

pH 변화와 반응시간에 따른 하수처리장 폐활성 슬러지의 COD 가용화 및 감량화 평가결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 미생물의 활성도 저하현상은 산성과 알칼리성 구간에 관계 없이 동일하게 발생하였으며, 특히, pH가 높은 알칼리성 구간에서는 세포벽 파괴현상으로 인해 용출된 N 성분이 암모니아 탈기현상으로 인해 대부분 자연 제거됨을 확인 할 수 있었다.

2. 세포벽 파괴현상으로 유출되는 세포질 구성성분 중 생물학적 하수처리공정에서 외부 탄소원으로 직접 활용이 가능한 SCOD의 변화추이를 COD 가용화율 (S_R)로 나타냈을 경우, pH가 높아질수록, 반응시간이 길어질수록 선형적으로 증가하는 관계를 나타내었다.

3. VSS/TSS 실험결과 알칼리처리를 통해 S_R 을 높였을 경우라 하더라도 슬러지 감량화 효과는 미미한 것으로 평가되어 슬러지 감량화를 위해서는 별도의 물리·화학적 공정이 후속공정으로 추가되어야 할 필요가 있는 것으로 사료되었다.

4. 가용화된 SCOD 성분에서의 RBCOD 분율은 약 34~45%로 나타났으며 알칼리도가 높을수록 RBCOD 분율이 높아짐을 알 수 있었다.

이상의 결과는 우리나라와 같이 하수내 탄소원 부족과 C/N비 불균형 등으로 인해 야기되는 하수처리장의 정상운전방안 마련과 폐활성 슬러지 이용 및 감량화 관련 연구분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 장은수, 최영균, 김형수, 엄익태 (2003) 하수슬러지의 전처리가 슬러지의 생분해성에 미치는 영향, *상하수도학회지*, **17**(5), pp. 633-639.
2. 채규정, 임성균, 최광호, 김도연, 황규대 (2000) 축산폐수의 질소·인 동시제거를 위한 전처리 연구: 암모니아 스트리핑과 Struvite 침전, *한국폐기물학회 2000년 추계 학술발표회 논문집*.
3. 허남효 (2004) Biogas 회수를 위한 음식물쓰레기와 하수 슬러지의 고율 혐기성 통합소화, *충남대학교, 박사학위논문*.
4. Aravinthan V., Mino T., Takizawa S., Satoh H. and Matsuo T. (2001) Sludge hydrolysate as a carbon source for denitrification. *Wat. Sci. Tech.* **43**(1), pp. 191-199.
5. Beccari M., Long G., Majone M., Rolle E. and Scarinci A. (1993) Modelling of pretreatment and acidogenic fermentation of the organic fraction of municipal solid waste. *Wat. Sci. Tech.* **27**(2), pp. 193-200.
6. Kim Y.K. (2003) Respirometric monitoring of a microbial behavioral characteristics change through the retrofitting process, Ph. D. Thesis, Hanyang University.
7. Kujawa K. and Klappwijk B. (1999) A method to estimate denitrification potential for predenitrification systems using NUR batch test. *Wat. Res.*, **33**(10), pp. 2291-2300.
8. Mininni G. (2001) Incineration with energy recovery, Sludge into Biosolids-Processing, Disposal, Utilization, Spinosa, L. and Vesilind, P.A. (Eds.), IWA Publishing, London, pp. 101-129.
9. Müller, J.A. (2001) Prospects and problems of sludge pretreatment processes, *Wat. Sci. Tech.* **44**(10), pp. 121-128.
10. Orhon D. and okg r E. U. (1997) COD fractionation wastewater characterization-The state of the art. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **68**, pp. 283-293.
11. Porges N., Jasewicz L. and Hoover S.R. (1956) Principles of biological oxidation. In *Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes*. eds. J. McCabe and W.W. Eckenfelder. New York: Reinhold Publ.
12. Ray B.T., Lin J.G. and Rajan R.V. (1990) Low-level alkaline solubilization for enhanced anaerobic digestion. *J. Water Pollut. Control Fed.* **62**(1), pp. 81-87.
13. Saiki Y., Imabayashi S., Iwabuchi C., Kitagawa Y., Okumura Y. and Kawamura H. (1999) Solubilization of excess activated sludge by self-digestion. *Wat. Res.* **33**(8), pp. 1864-1870.
14. Vesilind P.A. and Spinosa L. (2001) Production and regulations Sludge Into Biosolids - Processing, Disposal, Utilization, Spinosa, L. and Vesilind, P.A. (Eds.), IWA Publishing, London, 3-18.
15. Wentzel, M.C., Ekama, G.A., Cronje, G.L., Beeharry, A.O. (2002) Active biomass in activated sludge mixed liquor, *Wat. Res.*, **36**, pp. 439-444.