

## Cavitation에 의한 슬러지 가용화와 PGA를 이용한 하수고도처리에 관한 연구

### Advanced Wastewater Treatment using Sludge Solubilization by the Cavitation and PGA addition

김 동 하\*

Dongha KIM\*

국민대학교 건설시스템공학부

(2008년 6월 4일 접수 ; 2008년 7월 10일 1차 수정 ; 2008년 8월 4일 2차 수정 ; 2008년 8월 8일 최종채택)

#### Abstract

Some pretreatment methods have been proposed to enhance the biodegradability and to shorten the hydrolysis reaction time. By means of efficient pretreatment the suspended solids (SS) can be made of better accessible for the anaerobic bacteria. There are several ways how this can be accomplished, which include biological, mechanical, thermal, and chemical methods. For the sludge solubilization using the cavitation phenomenon, we have tried to develop a pretreatment process consisted of a reactor and pumps. The objectives of this study were to develop a advanced wastewater treatment consisted of IABR and the cavitation with PGA. The most effective removal for organic matter and nutrients were occurred when both cavitation pretreatment and  $\gamma$ -PGA were applied at the IABR process. Only small portion of  $\gamma$ -PGA at a rate of 1.38mg/L, was enough to improve sedimentation ability, SS removal efficiencies, and sludge volume reduction. After the sludge solubilization by the cavitation, SCOD increased to 193% and SS decreased to 36%. The removal ratio of BOD was 94.5%, T-N removal ratio was 85.5% and T-P removal ratio was 84.9%. The combination process of the IABR with the cavitation and PGA addition seems to be very effective alternative wastewater treatment process.

**Key words :** Cavitation, Sludge pretreatment, Poly- $\gamma$ -glutamic acid, Advanced wastewater treatment

**주 제 어 :** 공동화 현상, 슬러지 전처리, 폴리감마글루탐산, 하수 고도처리

#### 1. 서론

최근 몇 년 동안 하수의 고도처리 분야에서 많은 연구가 진행되어 유기물과 영양염류를 동시에 고효율로 제거할 수 있는 고도처리공법이 다양하게 개발되어져 왔으며, 간헐폭기를 이용한 공법개발도 많이 연구되고 있다(이해군 외,

1998 ; 양태두, 2002). 한편 대부분의 처리장에서 설계값보다 크게 낮은 저농도의 하수유입으로 인하여 고도처리 효율이 떨어질 것으로 예상된다. 그에 따라 국내 실정을 감안한 보다 높은 처리효율과 에너지 절감, 그리고 기존 처리장을 활용한 효율적 시설보완 사업이 시행될 수 있도록 운전개선 혹은 시설개선 차원의 고도처리설비가 현실적으로 시급하다

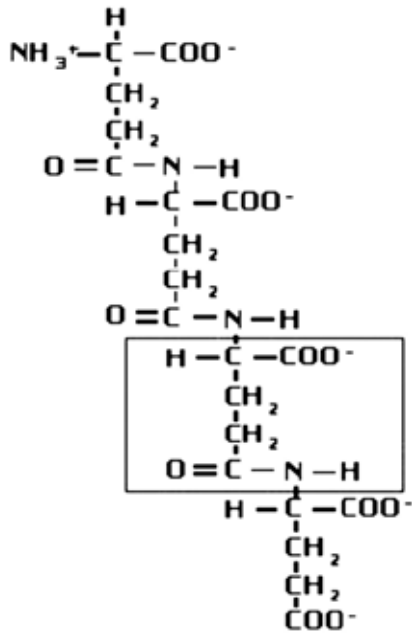


Fig. 1. Structure of poly- $\gamma$ -glutamic acid(PGA).

하겠다. 국내의 경우 05년 말 현재 하수슬러지의 77%를 해양배출하고 있고, '96의정서 발효와 함께 폐기물의 해양배출기준을 대폭 강화하였다. 따라서 하수슬러지의 육상처리 기반을 확충하기 위한 체계적인 계획 수립 필요하다(하수도 통계, 2006).

하수슬러지 및 음식물쓰레기 등의 유기성폐기물 처리에 대한 연구 및 개발은 국내·외적인 주요 관심사 중의 하나이다. 그러나 지금까지 개발된 초음파, 오존처리, 전자빔, 분쇄, 가온처리, 열적처리, 화학적처리 등의 전처리 공정들은 복잡성과 처리과정의 문제가 발생되었고, 처리효율 자체가 낮거나 처리효율 대비 경제성이 떨어지는 단점이 있었다(김명숙 외, 2004; 이원식 외, 2006). 현재 기술들은 국내 적용 실적이 부족하며, 환경신기술은 오존을 이용한 슬러지 가용화 방법만이 지정되어 있는 실정이다(권재련 외, 2003).

공동화(cavitation)는 유체 내의 압력이 국소적으로 액체의 포화 증기압 이하로 저하되는데, 이 때 유체 내에는 cavitation cloud가 발생한다. 이후 유속이 감소하면서 압력이 회복되면 각각의 cavitation bubble은 수축-재팽창(rebound)-붕괴의 과정을 거친다(Caupin, 2006). 공동화에 의해 발생하는 순간적인 고압, 전단응력 및 고온의 에너지에 의하여 슬러지 구조에 물리-화학적 변화를 일으켜 미생물의 세포막(벽)이 파괴(분해)된다. 충격에 따른 세포막의 파괴로 세포 내부의 차단되었던 유효 탄소원이 방출되는데 이를 난분해성 물질의 저분자화(유기물 가수분해)라고 한다(신성하 외, 2002; 이상익 외, 2005). 본 연구실에서는 공동화 현상을 이용하여 간단하면서도 경제적인 유기성 폐기물

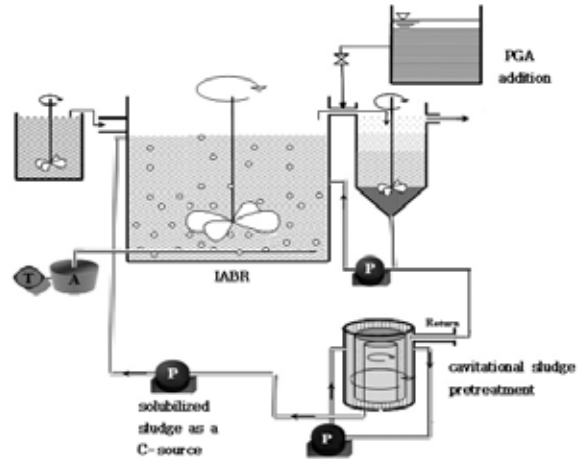


Fig. 2. Schematic diagram of the advanced treatment system consisted of the PGA and cavitation pretreatment.

의 가용화장치를 개발하였다.

PGA(Poly- $\gamma$ -glutamic acid)는 최근에 일본과 한국에서 개발된 신소재로서 식물(콩)을 발효시켜 생성된 수백만 달톤(Da)의 분자량을 가진 음이온성 유기고분자이다. 이미 일본에서는 낫또(納豆, fermented soybeans)에서 추출한 PGA를 가공한 신소재의 제품화가 이루어져 호소수의 정화에 사용하고 있는데 실험결과, 탁도 뿐 아니라 유기물까지도 효과적으로 제거시킬 수 있었다. PGA의 분자구조는 Fig.1과 같이 carboxyl group의 음이온으로 이루어져 있어 양이온 흡착과 가교제역할을 할 것으로 사료된다(김동하 외, 2005; Kang et al, 2005).

본 연구는 공동화 현상을 이용한 하수슬러지의 가용화, PGA(Poly- $\gamma$ -glutamic acid)의 주입, 간헐폭기(intermittently aerated bioreactor, IABR)를 조합한 하수고도처리의 개발에 관한 연구이다. 즉, 2차 슬러지를 대상으로 cavitation을 이용하여 슬러지를 가용화시킨 다음, 가용화된 슬러지를 외부탄소원으로 간헐폭기의 탈질반응에 투입하였으며, 반응조 후단에 PGA주입을 통하여 침전 성능을 향상을 도모하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 실험장치

하수고도처리의 장치는 lab-scale로 설계되었으며, Fig. 2와 같이 크게 가용화장치, 간헐폭기조 (intermittently aerated bioreactor, IABR), 침전조, PGA 투입장치로 구성되어 있다.

간헐폭기조는 부피 8.0ℓ 로 5mm 투명 아크릴재질로 제작되었으며, 독일 Theben사의 절전형 콘덴서타이머

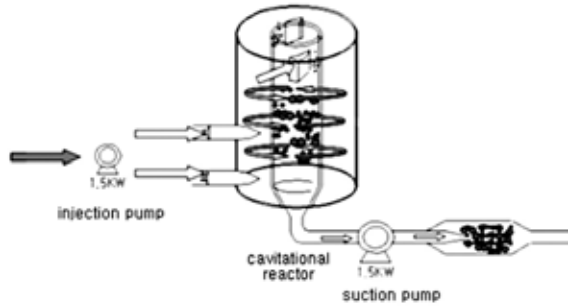


Fig. 3. Schematic diagram of the cavitation reactor.

(220v/60Hz, 7×7cm)를 폭기 전원에 부착시켜 폭기/비폭기를 유도하였다. DO, ORP, pH, 온도를 측정하기 위한 센서를 반응기 내부에 부착하였다. 반응조의 운전조건은 Table 1에 나타내었다.

반응조 내부의 MLSS 농도는 2000 ~ 3000mg/l 로 유지하였고, SRT는 13 일로 유지하였다. 폭기시 반응조의 DO는 0.5 ~ 4.0mg/l 로 조절하였다. 침전지는 상부에 교반감속기를 설치하여 0.5rpm으로 저속 회전하도록 하였고, 슬러지의 반송을 원활히 하기 위하여 감속기 축 하부에 스테인리스 재질의 스크레이퍼를 제작 설치하였다.

슬러지 가용화장치는 침전지에서 폐기되는 슬러지를 공동화(cavitation) 원리를 이용하여 가용화시키는 장치이다. 가용화장치의 원수탱크는 40l 의 FRP 재질로 제작되었으며, 원수탱크내부의 슬러지를 이송하기 위한 양정 20m의 수중펌프가 장착되어있다. 수중펌프에 의해 전처리장치 도입부에서 관 지름이 50mm에서 10mm로 축소되면서 1차 cavitation을 유도하였다. 전처리장치는 20l 이며, 유입된 유체는 Fig. 3과 같이 제 1내통의 하부에서 상향으로 고속회전을 하면서 외통과 제 2내통으로 이동하게 된다. 빠른 유속과 마찰이 발생하도록 제 1내통 외벽에 각 2×2cm의 홈을 2

~ 3개 두어 노즐효과를 유도하였다.

가용화된 슬러지는 전처리장치 상부 50mm의 2개의 관을 통하여 원수탱크로 다시 유입된다. 전처리장치 하부 50mm의 관으로부터 2차 cavitation발생을 유도하기 위해 양정 10m, vortex type의 진공 펌프 관경 32mm로 전처리장치에 재유입시켜, cavitation이 극대화 되도록 하였다. PGA 주입은 펌프를 이용하여, 간헐폭기조에서 침전조로 이송되는 부분에 1.4mg/l 농도로 연속주입 하였다.

## 2.2. 실험방법

실험에 사용된 슬러지는 J 하수종말처리장의 반송슬러지를 이용하였다. cavitation을 이용한 슬러지의 가용화는 회분식 실험을 통하여 SCOD 증가율을 이용하여 측정하였다. 2차침전지의 반송슬러지(MLSS 8,000 ~ 10,000mg/l)를 이용하여 가용화실험을 수행하였다. 공동화 현상에 의하여 가용화된 슬러지는 외부탄소원으로 탈질공정에 공급하여 원활한 탈질이 이루어지도록 하였다.

간헐폭기 공정은 효율적인 질소, 인제거를 위한 고도처리 공법으로 두달 이상의 운전을 통하여 시스템을 안정화 시킨 후에 실시하였다. 회분식 실험을 통하여 탈질을 위한 폭기/비폭기 조건을 선정하였다. 간헐폭기 연속운전에서는, 폭기/비폭기의 주기를 60분/60분(IA-1), 90분/90분(IA-2), 120분/60분(IA-3)로 구분하여 운전 하였다. IA-1은 1 ~ 8 days, IA-2는 9 ~ 30 days, IA-3는 31 ~ 36 days이다. 각 조건은 Table 2와 같다. IA-3에서 가용화된 슬러지의 상등액을 주입하여 적절한 탈질이 이루어지도록 한 후 수질을 분석하였다. 본 연구에 이용된 PGA (Poly-γ-Glutamic Acid)는 국내 기업의 B사에서 생산되고 있는 6000KDa, power type을 사용하였다.

## 2.3. 시료 및 분석방법

간헐폭기 공정의 유입원수는 일반 하수와 유사하게 glucose, starch, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 등을 투여하여 인공 하수를 조제한 후 사용하였다. 실험에 사용된 시료의 성상은 Table 2와 같다. 유입수의 평균 농도는 BOD<sub>5</sub> 142.9mg/l , COD<sub>Cr</sub> 171.5mg/l , T-N 26.4mg/l , T-P 6.15mg/l ,

Table 1 . Operation parameters of wastewater treatment reactor

Item	Data
SRT	13 days
BOD loading rate	0.56 kg BOD/m <sup>3</sup> · day
F/M ratio	0.28 Kg BOD/Kg MLSS · day
HRT	5.1 hr

Table 2. Characteristics of artificial wastewater (Unit : mg/l)

Item	Range	Average
pH	7.26 ~ 7.15	7.20
Temp.(°C)	27.1 ~ 21.2	23.2
BOD <sub>5</sub>	153.2 ~ 138.5	142.9
COD <sub>Cr</sub>	183.8 ~ 166.2	171.5
SS	132.4 ~ 109.2	120.7
T-N	28.6 ~ 22.7	26.4
T-P	6.67 ~ 5.30	6.15

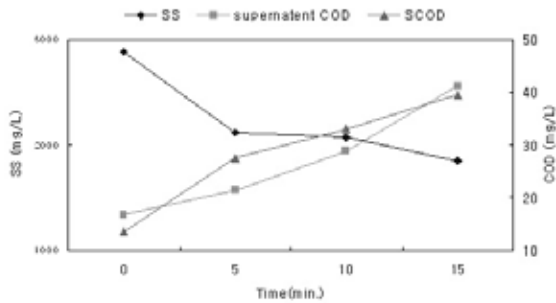


Fig. 4. Effect of cavitation pretreatment on the sludge solubilization.

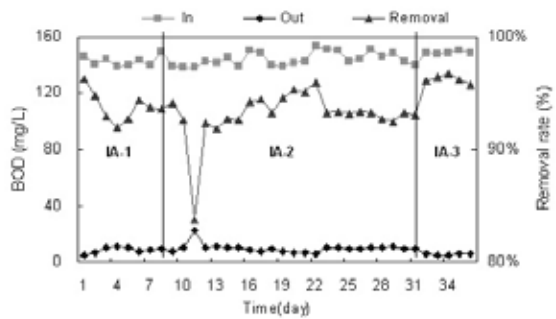


Fig. 5. Variation of BOD and its removal rate.

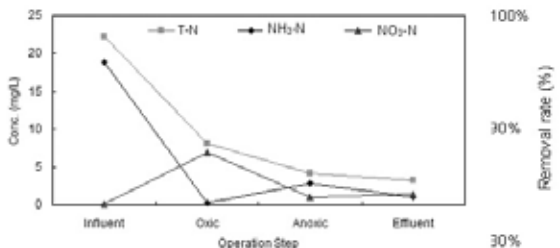


Fig. 6. Changes of nitrogen concentrations at each stage.

SS 120.7mg/l 이었다. 수질에 대한 분석은 시료채취 후 실험실에서 즉시 실험하였다. 경우에 따라 4℃ 냉장소에 보관한 후 24시간 이내에 실험하였다. 각 항목별 수질분석은 미국의 Standard Method (21<sup>st</sup> ed.) 및 환경오염공정시험법을 참고하여 분석하였다.

### 3. 결과

#### 3.1. Cavitation을 이용한 슬러지 가용화

탈질공정에 사용되는 외부탄소원인 SCOD를 얻기 위하여 2차 슬러지를 이용하여 가용화 실험을 실시하였다. 15분간의 가용화를 실시하였고, 각 시간별 SS, COD, SCOD를 분석하였다. 유입 슬러지 원수는 J하수처리장의 반송슬러지 SS 7640mg/l 를 폭기조 내의 SS에 맞게 희석하였으며, 희석원수의 SS는 2880mg/l 였다. 희석원수 중 평균 COD 혼합농

도는 135.4mg/l , 상등액COD는16.7mg/l , SCOD는 16.3mg/l 이었다. 가용화 장치를 이용하여 15분동안 슬러지를 가용화 시킨 결과는 Fig. 4와 같다.

SS는 2880mg/l 에서 15분 가용화를 수행한 후 1850mg/l 로 35.8%가 감소되었다. 가용화 5분 후 SS가 크게 감소하였다. 본 장치를 이용할 경우 짧은 시간의 가용화만으로 충분한 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다. 상등액 COD는 16.6mg/l 에서 최종 41.2mg/l 로 147%의 높은 증가율을 나타내었고, SCOD도 16.3mg/L에서 39.5mg/l 로 193% 증가하였다.

#### 3.2. 연속운전

본 공정의 운전은 약 12주간 수행되었으며, 분석일은 총 36일간 수행되었다. pH는 운전기간동안 7.1 ~ 7.2 범위로 큰 변화는 없었으며, 수온도 25±1℃로 미생물 활성에 적절한 온도가 유지 되었다. 실험기간동안 MLSS는 2138.4 ~ 2482.2mg/l 로 유지되었고, SVI는 134.8 ~ 168.4mL/l 로 양호한 침전성능을 나타내었다.

Fig. 5는 운전기간동안의 BOD 결과를 나타낸 것이다. BOD 처리효율은 IA-1 93.8%, IA-2 93.1%, IA-3 94.5%로써 높은 제거율을 나타내었다. IA-1의 초기의 경우 수온의 상승으로 인하여 제거율이 다소 높아진 것으로 사료된다. SS 제거율은 IA-1 80.3%, IA-2 85.5%, IA-3 85.7%를 나타내었다.

고도처리에서 C/N비는 질소 및 인 제거 효율에 중요한 인자로 작용한다. 일반적인 하수처리를 위한 C/N비는 6.5 ~ 7.5의 범위이며, 본 실험에서의 C/N비는 6.84였다. 질산화 및 탈질화가 원활하게 이루어지고 있는지 알아보기 위하여, IA-2에서 각 반응단계별로 질소 화합물의 농도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

탈질 반응에 이용되는 NO<sub>3</sub>-N은 폭기가 끝난 시점에서 분석하였다. 질산화가 진행되면서 호기조건의 T-N은 8.1mg/l , NH<sub>3</sub>-N 0.8mg/l 로 감소하였고 질산화에 의한 NO<sub>3</sub>-N은 6.9mg/l 로 증가하였다. 무산소 조건에서는 T-N과 NO<sub>3</sub>-N가 4.1mg/l , 2.8mg/l 로 감소하였고, NH<sub>3</sub>-N은 1.3mg/l 로 약간 증가되었다. pH의 경우에는 초기에 7.1이었으나 질산화 반응종료 후에는 7.0로 pH가 감소되다가 탈질이 끝난 시점에는 7.3으로 증가한 것을 알 수 있다. 탈질과정에서 알칼리도가 증가하는 이론을 증명할 수 있다.

연속운전 결과, IA-1에서의 평균 질소의 처리율은 63.5%였고, IA-2에서는 72.6%이었다. 외부탄소원(슬러지가용화액, SCOD 39.2mg/L)을 주입한 시점인 IA-3에서는 T-N이 22.3mg/l 에서 3.2mg/l 로 감소하여, 평균 질소 제거율은 85.5%로 높게 나타났다 (Fig. 7). 가용화된 슬러지가 탈질 반응시 외부탄소원으로 매우 유용하게 사용할 수 있음을 확인하였다.

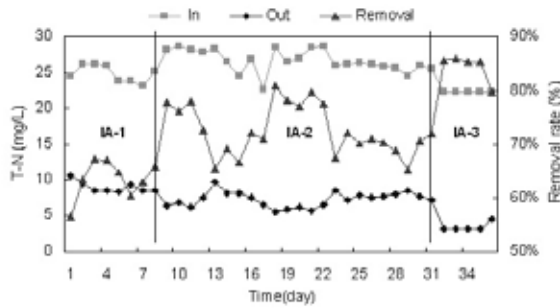


Fig. 7. Variation and its removal rate of T-N concentration.

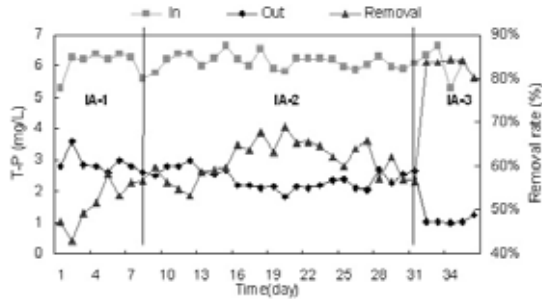


Fig. 8. Variation and its removal rate of T-P concentration.

Fig. 8은 연속운전에 따른 인의 제거에 대한 변화를 보여주고 있다. IA-1에서의 평균 제거율은 51.9%, IA-2에서는 61.5%였다. 외부탄소원을 주입한 시점인 IA-3에서는 84.9%의 높은 제거율을 보였다. IA-3에서 인이 높게 제거된 이유는 슬러지 가용화액 주입으로 인하여 인산염의 응집반응과 SS의 침전성이 향상되어졌기 때문인 것으로 보이나 추가적인 연구가 필요하다.

### 3.3. 가용화, PGA 주입, 간헐폭기에 의한 고도처리

슬러지가용화, PGA주입, 간헐폭기 공정을 조합한 고도처리과정에서, 각 조건별 유출수의 수질특성을 분석하였다. Fig. 9, 10과 같이 간헐폭기 생물공정인 IABR에서 BOD, SS의 평균제거율은 93.1%, 85.1%이고, 슬러지가용화+IABR과 비교했을 때 큰 차이는 나타나지 않았다. SS의 경우 간헐폭기 공정에 PGA를 주입하였을 경우 PGA에 의하여 95% 이상의 높은 SS제거율을 나타냈다. 간헐폭기+PGA+슬러지가용화에서는 SS와 BOD의 제거율은 점차적으로 증가되는 것을 알 수 있다.

간헐폭기(IABR)에서 T-N, T-P는 각각 69.7%, 61.7%의 제거율을 나타내었다. 슬러지가용화+간헐폭기의 경우, 슬러지가용화를 통한 외부탄소원의 주입으로 인하여 질소의 제거율은 88.4%로 높게 나타났다. 간헐폭기+PGA에서는 T-N과 T-P의 제거율이 각각 78.5%, 68.1%로 PGA주입에 따른 제거율은 각각 10%p 정도씩 IABR보다 상승하였다.

간헐폭기를 단독으로 운영할 때 보다, 간헐폭기+슬러지가

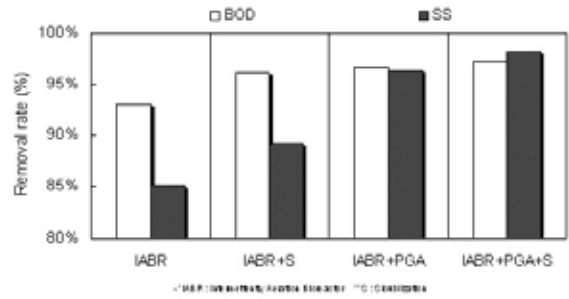


Fig. 9. Removal rates of BOD and SS under the several treatment combinations.

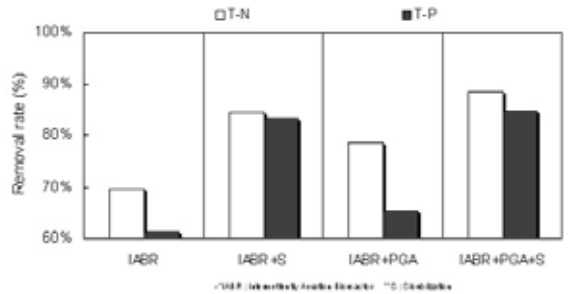


Fig. 10. Removal rates of T-N and T-P under the several treatment combinations.

용화+PGA조합을 사용하였을 경우 BOD, SS 제거율은 4.2%p, 13.1%p가 상승했다. SS 제거율이 크게 증가한 것은 PGA의 주입에 의하여 침전성이 크게 향상이 되어졌기 때문이다(김동하 외, 2005). 회분식 실험에서 PGA를 2.0mg/l 주입했을 경우 SV<sub>10</sub>은 300ml/l 로 주입하지 않을 경우보다 1.6배 침전능력이 향상되었다. T-N과 T-P 제거율 역시 IABR 단독보다 18.7%p, 23.7%p가 상승하였다. 간헐폭기+슬러지가용화+PGA조합을 이용하여 고도처리 할 경우 2008년부터 강화되는 방류수 수질기준을 충분히 만족할 수 있을 것으로 예측된다.

## 4. 결론

Cavitation에 의한 슬러지의 가용화는 평균 30% 정도의 SS감량화와 200%의 SCOD증가를 가져왔다. 이러한 SCOD 증가는 유용한 외부탄소원으로써 탈질 반응에 이용할 수 있다. 간헐폭기 공정 단독으로 운영할 때 보다, 탈질에 가용화된 슬러지를 이용했을 경우 T-N 처리효율이 20%p 향상되었다. 간헐폭기+슬러지 가용화+PGA조합을 하였을 때, 처리수질 면에서 상당한 효과가 있음을 알 수 있었다. 80% 이상의 T-N과 T-P의 안정적인 제거, PGA에 의한 침강성 향상, 95% 이상의 SS 및 탁도 제거 효율을 나타내었다. 따라서 본 병합처리를 이용하여 하수고도처리 할 경우 매우 유용할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경기술진흥원 "07차세대핵심과제-유체회전에 의한 유기성 고형물의 가용화 장치개발과 병합처리에 의한 자원화 가능성 연구"의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 권재현 외, "전처리 방법에 따른 하수슬러지 가용화 비교 연구", *상하수도학회지*, 17(4), pp 567-573, 2003.
2. 김동하 외, "poly- $\gamma$ -glutamic acid(PGA)를 이용한 폐수의 응집 특성", *상하수도학회지*, 19(3), pp. 357-362, 2005.
3. 김명숙, 고현웅, 성낙창, 강동효, 김형석, "음식물쓰레기 처분 : 초음파처리에 의한 하수슬러지의 분해향상과 외부탄소원의 개발", *KSEE, 춘계학술연구발표회*, pp. 602-608, 2004.
4. 신용배, 박주섭, 이두진, 주봉현, "간헐폭기를 이용한 고도처리 공정에서 SRT 와 인제거의 상관관계", *대한환경공학회지*, 23(2), pp. 251-260, 2001.
5. 신성하 외, "초음파와 오존처리에 의한 도시하수 슬러지의 처리", 6(1), pp. 276-279, 2002.
6. 양태두, "자동제어 간헐폭기 공정을 이용한 질소제거 시스템", 장안대학논문집. 제25집, pp. 495-541, 2005.
7. 이상익, 김창중, 오세현, 김영욱, "공동현상이론을 고압분사주입공법에 적용하기 위한 실험적 연구", *한국지반공학회는논문집*, 12(1), pp. 43-50, 2005.
8. 이원식, 홍승모, 민경석, "Microwave를 이용한 하수슬러지의 전처리 특성 및 회분식 세정발효를 이용한 슬러지 가용화", *수질보전 학회지*, 22(6), pp. 1130-1136, 2006.
9. 이해군 외 4인, "간헐폭기 활성슬러지에서 질소제거를 위한 폭기-비폭기 주기 및 ORP 적용성 평가", *대한환경공학회지*, 20(1), pp. 9-18, 1998.
10. Frdric Caupin, Eric Herbert, "Cavitation in water: a review", *Comptes Rendus Physique*, 7(9, 10), pp. 1000-1017, November-December, 2006.
11. Seong Eun Kang, Joo Hyung Rhee, Chung Park, Moon Hee Sung, In Hyung Lee, Distribution of poly- $\gamma$ -glutamate ( $\gamma$ -PGA) producers in Korean fermented foods, Cheongkukjang, Doenjang, and Kochujang. *Food Science and Biotechnology*, 14(5), pp. 704-708, 2005.