



## 음식물 쓰레기의 혐기성 소화 슬러지의 응집 및 탈수 특성에 미치는 영향

박종부, 최성수, 박승국, 허형우, 한승호

(주) 한화/건설 환경사업본부 환경연구소  
(2001년 8월 26일 접수, 2001년 9월 21일 채택)

### Effect of Sludge Conditioner on Dewaterability of Sludge Produced from the Anaerobic Digestion of Food Waste

Jong-Bu Park, Sung-Su Choi, Seung-Kook Park, Hyung-Woo Hur, Seung-Ho Han  
Hanwha ECO institute, Engineering & Construction Division, HANWHA Corp.

#### ABSTRACT

In this study, the effect of physico-chemical variables on sludge conditioning was determined to enhance dewaterability of effluent produced from the thermophilic anaerobic digestion of food waste. The gas production rate and methane content during the anaerobic digestion of food waste were  $1.1\text{m}^3/\text{kg VS}$  and 63%, respectively, and the biodegradability of volatile solids was 87.5%. The concentrations of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ , TKN and TP of effluent from digester were 18,500mg/L, 2,800mg/L, and 582mg/L, respectively. At the jar test to screen the flocculant for the dewatering of effluent from digester,  $\text{FeCl}_3$  and strong cationic polymer were effective on making flocs in the effluent. The condition of flocculation of effluent were 500mg/L of  $\text{FeCl}_3$  and 50 - 100 mg/L of strong cationic polymer, respectively. As the result of measuring of dewaterability potential of effluent to determine the mixing ratio between  $\text{FeCl}_3$  and polymer by capillary suction time (SCT), optimum condition was 500mg/L of  $\text{FeCl}_3$  and 80mg/L of strong cationic polymer.

Key Words : anaerobic, CST, food waste, sludge, thermophilic, two phase

#### 초 록

본 연구에서는 음식물 쓰레기의 혐기성 소화 슬러지의 탈수 효율을 증대시키기 위하여 응집제 및 응집보조제의 선정 및 탈수 특성을 규명하고자 하였다.

본 연구에서 사용한 혐기성 슬러지는 음식물 쓰레기를  $55^\circ\text{C}$ 에서 15일간 소화시켜 얻었으며 이 때의 평균 가스 발생량 및 메탄 함량은 각각  $1.1\text{m}^3/\text{kg VS}$  및 63%였으며 소화액의 성상은 각각 pH 7.8, 총고형물 1.5%,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  18,500mg/L이었다. 또한, TKN과 TP는 각각 2,800mg/L과 582mg/L이었으며 암모늄 이온과 인산이온은 2,077mg/L과 415mg/L이었다. 이러한 혐기성 소화액에 각종 응집제를 투입하여 응집 실험 결과,  $\text{FeCl}_3$ 와 강양이온계 고분자 응집제만이 응집 효과가 있었으며  $\text{FeCl}_3$ 와 강양이온계 고분자 응집제의 적정 투입 농도는 각각 500mg/L과 50 - 100mg/L였다. 또한,  $\text{FeCl}_3$  500mg/L을 첨가하여 1차 얻은 혐기성 슬러지에 고분자 응집제의 농도를 달리하면서 CST(Capillary Suction Time)를 측정 한 결과, 강양이온계 고분자 응집제 80mg/L을 혼합하였을 때 최적의 탈수 조건이 형성됨을 알 수 있었다.

## 1. 서론

'99년 기준 1일 11,230톤 발생하는 음식물 쓰레기는 전체 생활 쓰레기의 약 30%로 대부분 매립에 의존하고 있어 연간 8조원의 유효 자원이 낭비 되고 있다. 이러한 음식물 쓰레기는 보관 및 운반에 문제가 있으며 불완전 연소, 보조연료 사용량의 증대, 대기오염의 유발 및 침출수 발생에 따른 2차 환경오염의 유발, 매립 기간 단축 등 처리에 많은 문제점을 지니고 있어 퇴비나 사료 또는 에너지화를 통한 재활용 처리를 시도하고 있다. 그러나, 사료화의 경우 부패, 염분과 영양의 불균형, 및 가축의 식이 기피 등으로 재활용에 문제점이 있으며 퇴비화의 경우, 악취 발생, 염분, 부재료의 수급, Nimby 현상에 의한 부지 확보 곤란 등으로 감량화율이 미흡한 실정이다.

음식물 쓰레기의 혐기성 소화의 경우 하수 슬러지, 분뇨, 주정 슬러지 등의 처리에 100년 이상 활용되어 왔으며 혐기성 소화에 의해 발생된 Biogas를 이용한 스팀과 전기 생산 등의 이점을 가지고 있다<sup>3)</sup>. 그러나, 혐기성 소화의 경우, 암모늄 이온, 유기산 등의 외부 요인에 의해 민감하게 반응하여 운전이 까다롭고 소화액 및 소화 슬러지의 재처리 등의 문제점을 안고 있다. 현재, 혐기성 소화 조건의 최적화 조건의 선정을 위한 연구 등 유기성 쓰레기의 에너지화 관련 연구가 활발히 진행되고 있으나 소화과정을 통해 생산된 소화액의 처리에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 음식물 쓰레기의 혐기성 소화액을 대상으로 응집 및 탈수 조건을 최적화함으로써 탈리액의 오염 부하량을 최소화하고 탈수 슬러지의 생산량을 최대화하여 유효 자원의 회수 및 탈리액의 재처리 방안을 확립하고자 하였다.

혐기성 소화액의 탈수 특성의 평가는 SRF(Specific Resistance to Filtration)와 CST(Capillary Suction Time)법이 널리 사용된다. Coakley에 의해 개발된 SRF방법은 실험법이 복잡하고 8시간 이상의 많은 시간과 노동력 뿐만 아니라 실험 수행자의 숙련도가 요구된다<sup>2)</sup>. 또한, 시료의 특성, 여지의 유효면적, 실험 수행시의 압력, 시료의 부피 등에도 영향을 받는 것으로 나타나 정확한 SRF의 측정이 매우 어렵다<sup>3,4,5)</sup>. 반면 CST는 Gale과 Baskerville등에 의해 개발된 방

법으로 모세관을 통해 수분이 퍼져나가는 현상을 응용하여 수분이 일정구간을 통과하는데 걸리는 시간을 측정하여 탈수성을 평가하는 방법으로 슬러지의 탈수특성 뿐만 아니라 여지의 공극 크기 등 사용된 여지의 특성에도 영향을 받는다<sup>6)</sup>. 따라서 동일 여지와 동일 장치를 이용한다면 슬러지의 탈수특성을 CST 측정으로 평가할 수 있다<sup>7)</sup>. CST는 여과속도가 상당히 느린 물질의 실험에서도 짧은 시간이 소요되며, 비교적 덜 훈련된 사람이 실험하여도 결과를 얻을 수 있다. 또한 장치가 간단하면서도 재현성이 크다는 장점이 있다. 한편, CST를 변형한 LCST(linearly measured capillary suction time)를 이용한 탈수특성의 평가도 시도되고 있다<sup>8)</sup>.

본 연구에서는 간단하게 제작이 가능하며 측정시간이 짧고 재현성이 우수한 CST법을 이용하여 탈수 평가 실험을 수행하였다<sup>6,7)</sup>.

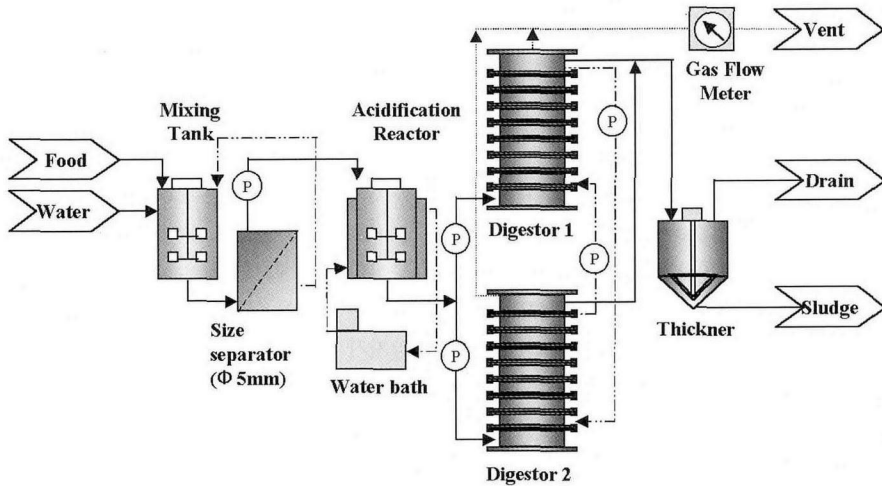
## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험장치 및 운전조건

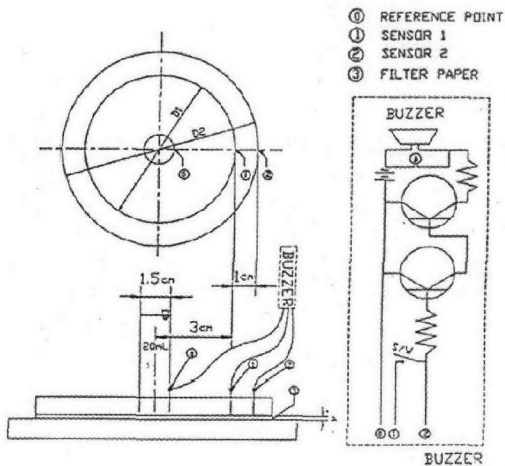
본 연구에서 사용한 혐기성 소화 실험장치는 혼합조와 산발효조 및 소화조로 구성하였다. 혼합조와 산발효조는 12L 원형 반응조로 35℃를 유지하였으며 교반 방식은 CSTR이었고 소화조는 Working Volume이 90L 인 원형 반응조 2기를 제작하여 사용하였고 운전 조건은 발효온도 55℃와 PFR type으로 설정하였다. 소화액은 각각의 소화조 하부로 반송하였으며 시료 이송은 Metering Pump (Model QG 50, FMI, U.S.A)를 이용하였다.

원료물질은 공정수와 1:1 혼합하여 투입하였으며 1일 처리량은 12L였다. 산발효 및 소화 시간은 각각 0.5일과 15일이었으며 OLR은 각각 174g VSS/L/d와 6g VSS/L/d (70g food waste/L/d)였다.

또한, 탈수 조건을 설정하기 위하여 Jar test를 통해 선정한 응집제를 이용하여 다량의 슬러지를 얻었으며 이 슬러지를 대상으로 CST 측정 실험을 실시하였다. 5종 A 여지(TOYO, Japan) 4매를 윗판과 아랫판 사이에 끼우고 중앙의 구멍에 적절한 처리한 슬러지 10ml를 넣은후 모세관 현상에 의해 퍼져나간 수분의 이동 시간을 측정하였다<sup>6,7)</sup>.



[Fig. 1] Schematic diagram of anaerobic pilot plant for the digestion of food waste.



[Fig. 2] Schematic diagram of CST system.

## 2.2 시료 조제 및 분석 방법

혐기성 소화액은 수거해 온 즉시 디스포저를 이용하여 파쇄한 음식 쓰레기를 15일간 고온 소화한 후 배출된 것을 일정시간 채취하여 사용하였다.

소화 및 탈수 특성을 평가하기 위하여 pH, 총질소, 총인,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ , CODcr, BOD 등을 공정 시험 방법에 준하여 측정하였다.

슬러지의 응집실험은 무기 응집제와 고분자 응집제를 일정량씩 소화액에 각각 넣은 후 Jar test를 수행하였으며 탈수 특성 평가 실험은 선정된 무기 응집제를 사용하여 침전된 슬러지를 회수한 후 이 슬러지에

고분자 응집제를 일정량씩 혼합하여 CST를 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 소화액의 분석

혐기성 처리에 사용되는 음식 쓰레기의 pH와 함수율은 각각 pH 4.5 - 6.5 및 75.4 - 84.3 %였으며 유기물 농도는 14.1 - 23.4 %였다. 또한, BOD<sub>5</sub>와 CODcr은 각각 60,000 - 150,000 mg/L 및 155,000 - 300,300 mg/L으로 큰 차이를 보였다. 음식물 쓰레기의 원소 분석 결과, 건조중량 기준으로 탄소 45.3%, 질소 3.5%, 산소 22.3%, 수소 5.8%, 황 0.1%였으며 회의 양은 23%였다<sup>9)</sup>.

소화 슬러지를 식중액으로 하여 음식물 쓰레기의 혐기성 소화 실험을 실시한 결과, 가스 발생량은 최소 0.92m<sup>3</sup>/kg VS에서 최대 1.34m<sup>3</sup>/kg VS이었으며 메탄 함량은 최소 5%에서 최대 70%로 평균 가스발생량 및 메탄 함량은 각각 1.1m<sup>3</sup>/kg VS 및 63%였다.

또한, 혐기성 소화액의 pH, 총고형물 함량은 각각 pH 7.8과 1.5%였으며 CODcr은 18,500mg/L이었다. 또한, TKN과 TP는 2,800mg/L과 582mg/L이었으며 암모늄 이온과 인산이온은 각각 2,077mg/L과 415mg/L이었다. 유기산인 acetate, propionate 및 butyrate의 농도는 각각 123, 29.7 및 6.5mg/L이었으며 valerate는 검출되지 않았다.

[Table 1] Characteristics of Raw Material and Effluent from Digester

구분	Raw material	Effluent from digester	Removal Eff. (%)
pH	4.8	7.8	-
CODcr (ppm)	166,800	18,500	88.9
BOD5 (ppm)	62.430	10,000	84.0
TKN (ppm)	3,134	2,800	10.7
T-P (ppm)	1,308	582	55.5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (ppm)	252	2,077	-
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P (ppm)	668	415	37.9
TS (%)	9.7	1.5	84.5
VS (%)	9.1	1.1	87.9

### 3.2 응집 실험

#### 3.2.1 응집제 선정 실험

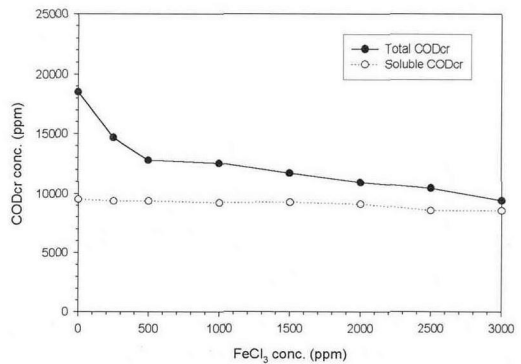
음식물 쓰레기의 혐기성 소화액에 응집 및 탈수에 적합한 응집제를 선정하기 위하여 철염, alum, 마그네슘 등의 무기 응집제와 음이온, 양이온 및 anion 계열의 고분자 응집제를 대상으로 jar test를 수행하였다.

Jar test 결과, 철염(FeCl<sub>3</sub>)과 강양이온계의 고분자 응집제에 의해서만 플록이 형성되었으며 기타 다른 응집제에서는 플록이 생성되지 않았다. 따라서 음식물 쓰레기의 혐기성 소화액의 응집 및 탈수에 적합한 응집제는 철염(FeCl<sub>3</sub>)과 강양이온계의 고분자 응집제로 1차 선정하였다.

#### 3.2.2 응집제에 의한 소화액의 응집실험

1차 선정된 철염(FeCl<sub>3</sub>)과 강양이온계의 고분자 응집제의 응집 특성을 규명하기 위하여 응집제의 농도에 따른 플록 형성과 상등액의 성상을 분석하였다.

철염(FeCl<sub>3</sub>)의 경우, CODcr은 초기 18,500ppm에서 철염(FeCl<sub>3</sub>)를 0.5g/L로 첨가하였을 때 CODcr이 12,780ppm으로 급격히 감소하여 CODcr의 제거효율이 30.9%였으나 그 이후 서서히 감소하여 철염(FeCl<sub>3</sub>)를 3g/L로 첨가하였을 때 CODcr이 9,400ppm으로 49.1%의 제거효율을 나타내었다. 따라서, 철염의 농도를 0.5g/L이상으로 조정하였을 경우 CODcr의 제거효율의 변화가 크지 않음을 알 수 있었다.

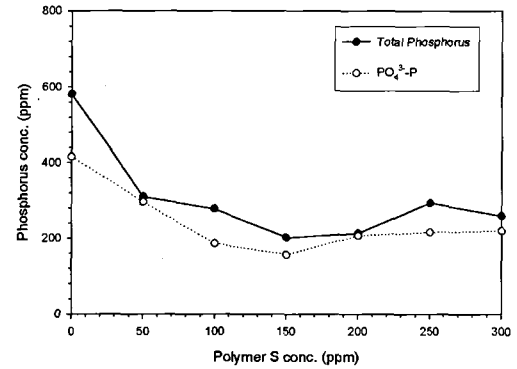
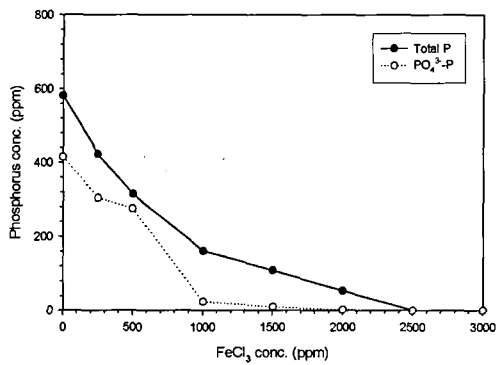
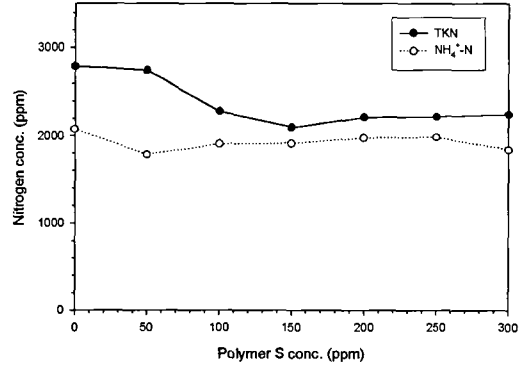
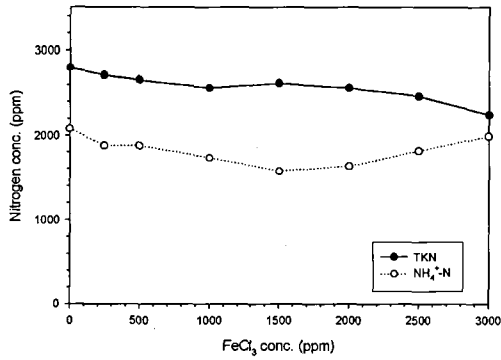


[Fig. 3] Change of CODcr and S-CODcr of supernatant according to the concentrations of FeCl<sub>3</sub>.

또한, 철염 주입에 따른 상등수의 TKN과 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도는 거의 변화가 없었으며 TKN의 제거율은 철염(FeCl<sub>3</sub>)를 3g/L로 첨가하였을 때 20%였다. 상등수의 총인과 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 농도는 철염(FeCl<sub>3</sub>)의 첨가량에 따라 급격하게 감소하여 총인의 경우 철염(FeCl<sub>3</sub>) 2.5g/L로 첨가하였을 때, 그리고 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 경우 철염(FeCl<sub>3</sub>) 1.0g/L로 첨가하였을 때 각각 인의 농도가 거의 검출되지 않았다. 이는 투입한 철염과 인산염의 결합에 의한 것으로 판단되었다.

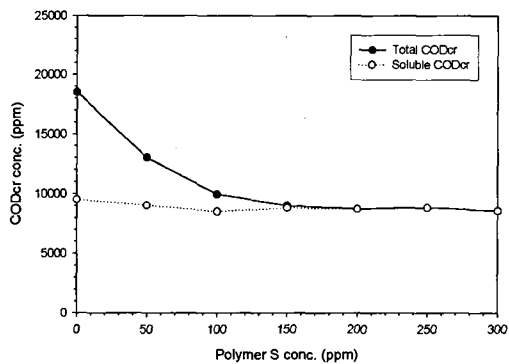
또한, 강양이온 계열의 고분자 응집제에 대한 응집 실험을 실시한 결과, 상등수의 CODcr 제거율은 고분자 응집제를 100mg/L와 150mg/L로 첨가하였을 때 각각 46.3%와 51.5%였으며 S-CODcr은 거의 변화가 없었다<sup>10)</sup>.

강양이온 계열의 고분자 응집제에 의한 상등수의



(Fig. 4) Changes of the concentrations of nitrogen and phosphorus of supernatant according to the concentrations of FeCl<sub>3</sub>.

(Fig. 6) Changes of the concentrations of nitrogen and phosphorus of supernatant according to the strong cationic polymer.



(Fig. 5) Change of CODcr and S-CODcr of supernatant according to the concentrations of the strong cationic polymer.

TKN과 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도는 철염을 첨가하였을 경우와 유사한 양상을 보였으며 응집제를 300mg/L으로 조정하였을 때 TKN의 제거율은 19.8%였다. 총인과

PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 농도는 철염을 첨가하였을 경우와 다른 양상을 보였으며 응집제의 농도를 150mg/L으로 조정하였을 때까지 서서히 감소하였으나 그 이후 다시 인의 농도가 상승하는 양상을 보였다. 최대 인의 제거는 응집제 농도를 150mg/L으로 조정하였을 때 나타났으며 이 때 제거율은 65.5%였다.

위의 실험 결과, 철염의 경우 인의 제거에 우수한 효과가 있었으며 고분자 응집제는 CODcr의 제거에 우수한 효과가 있었다.

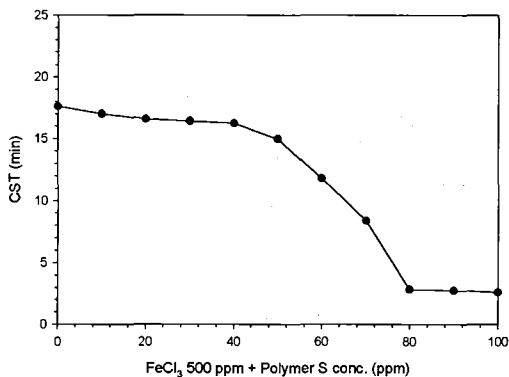
그러나, 철염의 경우 고농도로 투입할 경우, 고농도의 철을 함유한 흑색석의 다량의 슬러지가 발생하며 고분자 응집제의 경우, 가격이 고가로 처리 비용의 상승 우려가 있다. 따라서, CODcr과 인에 대해 각각 제거율이 우수한 철염과 고분자 응집제를 일정량 혼합하여줌으로써 CODcr과 인의 제거 및 슬러지 발생량 감소 등의 효과가 있을 것으로 판단되었다.

### 3.3 탈수 특성 평가

위의 실험에 따라 철염( $\text{FeCl}_3$ ) 500mg/L을 첨가하여 침전시킨 음식물 쓰레기의 혐기성 소화 슬러지에 고분자 응집제의 농도를 0 - 100mg/L로 달리하면서 CST를 측정하였다.

CST 측정 결과, 고분자 응집제를 50mg/L 첨가할 때까지 CST의 감소 속도는 완만하였으나 60mg/L 이상 첨가하였을 때 CST의 감소 속도가 급격하게 증가하여 고분자 응집제를 80mg/L 첨가하였을 때 CST의 감소 속도가 거의 변화가 없었다.

위의 실험 결과, 철염( $\text{FeCl}_3$ ) 500mg/L과 강양이온계 고분자 응집제 80mg/L을 혼합하였을 때 최적의 탈수 조건이 형성됨을 알 수 있었다<sup>6,7</sup>.



(Fig. 7) Change of CST(Capillary Suction Time) according to the concentration of the strong cationic polymer with 500 ppm of  $\text{FeCl}_3$ .

위의 실험에 의해 선정된 조건에 따라 음식물 쓰레기의 혐기성 소화액을 응집 침전후 GF/C로 여과한 탈리액을 분석한 결과, CODcr과 BOD<sub>5</sub>는 각각 8,316 ppm과 3,086ppm으로 소화액에 비해 CODcr과 BOD<sub>5</sub>는 각각 55.0%와 69.1% 제거되었다. 또한, TKN과 총인의 농도는 각각 1,023ppm과 284ppm으로 소화액에 비해 63.5%와 51.2% 제거되었다.

현재, 탈리액의 재이용 및 재처리에 대한 실험을 수행중이다.

### 4. 결론

1) 소화 슬러지를 식중액으로 하여 음식물 쓰레기의 혐기성 소화 실험을 실시한 결과, 가스 발생량은 최소

0.92m<sup>3</sup>/kg VS에서 최대 1.34m<sup>3</sup>/kg VS이었으며 메탄 함량은 최소 57%에서 최대 70%로 평균 가스발생량 및 메탄 함량은 각각 1.1m<sup>3</sup>/kg VS 및 63%였다.

2) 혐기성 소화액의 pH, 총고형물 함량은 각각 pH 7.8과 1.5%였으며 CODcr은 18,500mg/L이었다. 또한, TKN과 TP는 2,800mg/L과 582mg/L이었으며 암모늄 이온과 인산이온은 각각 2,077mg/L과 415mg/L이었다.

3) 각종 응집제에 의한 음식물 쓰레기의 혐기성 소화액의 응집 실험 결과, 철염과 강양이온계 고분자 응집제만이 응집 효과가 있었으며 철염과 강양이온계 고분자 응집제의 적정 투입 농도는 각각 500mg/L과 50 - 100mg/L였다.

4) 철염을 첨가하여 침전시킨 음식물 쓰레기의 혐기성 소화 슬러지에 고분자 응집제의 농도를 달리하면서 CST를 측정한 결과, 강양이온계 고분자 응집제 80mg/L을 혼합하였을 때 최적의 탈수 조건이 형성됨을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Peter Fox and Frederick g. Pohland, "Anaerobic treatment applications and fundamentals: substrate specificity during phase separation", Water Environ. Res., 66 (5), 716-724 (1994).
2. Coakley, P. and Jones B. R. S., "Vacuum sludge filtration," Sew. IND. Water, 28(8), 963-972 (1956).
3. Novak, J.T., Goodman, G.L., Pariroo, A. and Huang J.C., "The blinding of sludge during filtration," J. WPCF., 60(2), 206-214 (1988).
4. Kavanagh, B. V., "The dewatering of activated sludge measurement of specific resistance to filtration and capillary suction time," J WPCF. 19(3), 388-398 (1980).
5. Notemaert, F. F., "A new deduction with larger application of the specific resistance to filtration of sludge," Wat.

- Res., 9(6), 667-675 (1978).
6. Baskerville, R. C and Gale. R. S., "A simple automatic instrument for determining to filtrability of sewage sludge," J WPCF. 67(5), 233-246(1968).
  7. Langer, S.J. and Klute, R., "Rapid mixing in sludge conditioning with polymers," Wat. Sci. Tech., 28(1), 233-242 (1993).
  8. Frank, M., Tiller, Y. L. and Adin, S.A., "Capillary suction theory for rectangular cells," J WPCF, 62(2), 130-136 (1990).
  9. 박종부, 김윤석, 최성수, 한승호, "The Characteristics of physico-chemical and microbiological parameters on the composting of municipal food waste", 제3회 한일폐기물 심포지움, 오사카, 일본, 97-107 (2000).
  10. 이수구, 박상현, 손철목, "돈사 폐기물의 탈수 및 응집 처리에 관한 연구", 한국폐기물학회지, 9(1), 73-81 (1992). ☐