

## 도시하수슬러지의 농축과 탈수 : 1차와 2차슬러지의 분리 및 혼합처리특성비교

이진우\* · 최훈창 · 최정동 · 정경영\*\* · 전석주\*\* · 권수열\*\*\* · 안영호†

영남대학교 건설환경공학부 · \*(주)도화종합기술공사

\*\*대한주택공사 토목설계처 수질환경부 · \*\*\*한국방송통신대학교 환경보건학과

(2004년 9월 20일 접수, 2004년 12월 28일 채택)

### Thickening and Dewatering of Municipal Wastewater Sludge : Separate and Combined Treatment of Primary and Secondary Sludge

Lee, Jinwoo\* · Choi, Hoon-Chang · Choi, Jeong-Dong · Jung, Gyungyeung\*\*

Jun, Seokju\*\* · Kwon, Soo-Yul\*\*\* · Ahn, Young-Ho†

School of Civil and Environmental Engineering, Yeungnam University · \*Dohwa Consulting Engineers Co., Ltd.,

\*\*Korea National Housing Corporation · \*\*\*Department of Environmental Health, Korea National Open University

**ABSTRACT :** Comparative thickening and dewatering characteristics of municipal wastewater sludge were investigated in terms of separated and combined treatment of primary and secondary BNR sludge. Also, various conditioning methods such as cation polymer addition, steam and ultrasonication treatment were examined to improve dewaterability of sludge. The dewaterability was measured by using specific resistant test, wedge zone simulator and centrifuge. The result of the sludge thickening test revealed that separated thickening was better in terms of solids recovery and supernatant quality. Particularly, the thickening of primary sludge with high solids (about 3.5% TS) showed very poor solid separation. The addition of cation polymer showed better conditioning characteristic for dewatering and the optimal polymer dosage was 0.26% for primary sludge, 0.43% for secondary sludge and 0.38% for combined sludge. Contrary to the result of the thickening, the dewatering test revealed that dewatering of the combined sludge is better than that of separated sludge, representing better solids separation and filtrate quality. The polymer addition was essential to improve dewaterability in filter (belt) press type dewatering but it was inefficient for the dewatering of secondary sludge only. The centrifuge type dewatering showed better performance and the dewaterability was slightly improved when the polymer was added. Based on the results of this research a sustainable sludge treatment process, particularly in terms of the recycle water quality and solids recovery, was proposed.

**Key Words :** Conditioning, Dewatering, Municipal Sludge, Specific Resistant Coefficient, Thickening, Wedge Zone Simulator (WZS)

**요약 :** 본 연구는 1차슬러지와 생물학적 영양소제거 슬러지의 처리에 있어서 분리 및 혼합처리에 대한 농축과 탈수특성을 조사하였다. 슬러지의 탈수를 위해서는 고분자 폴리머, 증기주입 및 초음파처리등의 슬러지 개량방법을 이용하여 슬러지의 개량특성을 분석하였고, 비저항계수측정법과 Wedge zone simulator 그리고 원심분리를 이용하여 탈수특성을 분석하였다. 농축실험결과 1차슬러지와 생물학적 2차슬러지를 분리농축하는 것이 바람직한 것으로 나타났으며, 특히 3.5%이상의 고농도 1차슬러지의 경우는 농축단계에서 상정수의 고액분리는 부정적이었다. 농축된 슬러지의 개량에 있어서는 폴리머 주입, 증기처리 및 초음파처리 등의 개량법중에서 폴리머를 주입한 경우가 가장 우수한 탈수성을 나타내었다. 1차와 2차 및 혼합슬러지의 최적 폴리머 주입조건은 건조고형물 기준으로 각각 0.26%, 0.43% 및 0.38%이었다. 농축슬러지의 탈수실험에서는 1차와 2차슬러지를 혼합하여 처리하는 것이 고액분리측면에서나 반류수의 수질측면에서 보다 효과적으로 나타났다. 여과포를 이용하는 탈수방식은 폴리머의 사용이 필수적이었으나 이 경우 2차슬러지의 단독탈수는 효과가 없었다. 원심탈수 방법은 가장 우수한 탈수효율을 보였으며, 이때 폴리머의 주입으로 탈수케익의 고형물함량을 조금 더 향상시킬 수 있었다. 이상의 실험결과에 근거하여 반류수의 수질특성과 고형물회수를 고려한 합리적인 슬러지 처리공정을 제안하였다.

**주제어 :** 개량, 탈수, 하수슬러지, 비저항계수, 농축, wedge zone simulator (WZS)

## 1. 서 론

2003년 기준 총 242개의 하수처리시설로부터 발생되는

우리나라 하수슬러지의 양은 약 6,664 ton/day로, 지난 10년 동안 연간 약 12.5%의 증가율을 보이고 있다.<sup>1)</sup> 우리나라는 2003년 이후 하수슬러지를 포함한 모든 유기성 폐기물의 직매립금지 조치와 또한 해양투기와 관련한 런던협약 '96 의정서의 시행에 대비하여 하수슬러지의 감량화와 그 적절한 처리공법의 마련에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

† Corresponding author  
E-mail: yhahn@yu.ac.kr  
Tel: 053-810-3511

Fax: 053-810-4622

특히 우리나라는 발생하는 하수슬러지의 약 80% 이상을 해양투기와 직매립에 의한 처리방법에 의존하고 있기 때문에 슬러지 처리 및 처분문제는 현재 심각한 환경문제로 인식되고 있다.<sup>2-4)</sup> 대표적인 슬러지 감량화 방법 중 하나인 혐기성 소화법은 그 공정의 특성상 오랜 기간 대표적인 슬러지 처리공정으로 인식되어 왔으나, 최근에 국내의 대부분의 신설 및 개선중인 하수처리시설에서는 이를 제외시키는 경향을 보이고 있다. 그 주된 이유는 이 처리공정으로부터 수처리 공정으로 반송되는 반류수내 높은 영양염류(즉, 질소·인) 부하 때문으로 이는 영양소 제거공정이 도입된 대부분의 하수처리시설에서 중요한 운전상의 단점으로 여겨지기 때문이다. 이러한 배경하에서 환경부<sup>2)</sup>의 광역 슬러지 처리계획에 따라 중·소규모 하수처리장에서 발생하는 하수 슬러지는 대부분 농축/탈수/소각 혹은 퇴비화 등의 처리단계로 계획하고 있으며, 이 경우 슬러지 감량화의 측면에서 농축 및 탈수공정은 최종공정으로서 더욱 중요한 단위공정으로 인식되고있다.

현재 하수처리장은 생물학적 영양소 제거공정의 도입으로 인하여 1차침전지의 기능이 다소 변화되는 경향이 있는데, 이는 주로 1차슬러지로 부터의 탄소원 회수의 필요성에 따른 것으로, 그 대표적인 예로는 활성 1차침전지(activated primary tank)와 같이 1차침전지를 직접적으로 산발효공정으로 이용하는 경우<sup>5)</sup>가 있다. 이러한 경우 대체로 1차침전지는 보다 긴 체류시간으로 운전되며, 침전슬러지 역시 높은 고형물 농도를 가진 슬러지가 발생하게 된다. 이 경우 후속 슬러지 처리계통에서는 1차슬러지와 생물학적 2차슬러지의 혼합처리시 농축과 탈수특성 뿐만 아니라 반류수의 수질에 이르기까지 다양한 영향을 미치게 된다.

대표적인 슬러지 처리공정인 탈수에 있어서는 1970년 중반까지 가장 일반적으로 사용되던 기계식 탈수방법은 진공탈수(Vacuum filtration)방식으로 이는 1980년대 이후 벨트압력탈수(Belt filter presses)와 원심탈수(Centrifuges) 방식의 적용으로 점차 전환되는 추세를 보였고, 또한 1980년대 후반에는 고분자 폴리머(polymer)의 주입, 열처리 등 다양한 물리화학적 슬러지 개량법을 도입하여 압력탈수(Filter presses) 방식으로 적용하는 경향에 있다. 현장운전자료를 기초로 기계식 탈수기의 탈수능력을 상대적으로 비교한 자료에 의하면,<sup>6-8)</sup> 일반적으로 기계식 탈수기의 탈수능력은 TS 함량기준으로 16~20%부터 높게는 40%까지로 다양하게 나타나고 있다. 또한 탈수능력은 슬러지의 성상, 사용약품의 종류 및 주입량 등에 따라 상이하게 나타나는데, 특히 폴리머를 사용한 압력여과의 경우 가장 높은 고형물 함량을 가진 탈수 케이크를 얻을 수 있는 것으로 나타나고 있으나 폴리머 소요비용이 높게 나타나는 것이 대표적인 단점이다. 반면에 원심탈수의 경우나 저압 드럼/벨트(low press drum/belts)의 경우는 낮은 폴리머 소요량에도 불구하고 비교적 높은 고형물 회수율을 가지는 것으로 알려져 있다. 최근에는 탈수효율을 향상시키기 위해 전기탈수,<sup>9,10)</sup> 증기이용 고온탈수,<sup>11)</sup> 열탈수,<sup>12)</sup> 등의 방법들이 고안되고 있으나, 그 기계적 장치제작상의 어려움이나 에너지 소요량의

증가 등이 주된 단점으로 지적되고 있다.

이러한 배경하에서 본 연구는 비교적 고투도로 발생하는 1차슬러지와 생물학적 영양소제거 슬러지의 처리에 있어서 분리 및 혼합처리에 대한 농축과 탈수특성을 조사하였다. 슬러지의 탈수를 위해서는 고분자 폴리머, 증기(steam)주입 및 초음파처리(sonication)등의 다양한 슬러지 개량방법을 이용하여 슬러지의 개량특성을 분석하였고, 진공여과 탈수기와 벨트압력 탈수기 그리고 원심분리 탈수기를 각각 모사할 수 있는 비저항계수(specific resistant coefficient) 측정, Wedge zone simulator 그리고 원심분리기를 이용하여 탈수특성을 분석하였다. 아울러 유기물질과 질소·인 등을 포함한 탈리액의 성상을 비교·분석하고, 가장 합리적인 슬러지 처리방안을 제시하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 슬러지의 농축

농축단계에서 1차 및 2차슬러지의 혼합 및 분리농축에 따른 영향을 조사하기 위해서 약 40 L 용량의 실험실 규모 회분식 중력농축조(batch zone settling column)를 사용하였다. 이는 Standard Method<sup>13)</sup>에 기준을 두고 제작하였는데, 특히 고투도 슬러지의 농축에 있어서 wall effect에 의한 영향<sup>14)</sup>을 최소화하기 위해 내경 25 cm 및 높이 1 m 로 제작하였다. 또한 현장과는 달리 소규모인 실험실 농축실험에 따른 문제를 최소화하기 위하여 농축조 내부에 5 cm 간격으로 교반축(picket)을 설치하고 농축단계에서 모형 농축조내 교반기의 최외각 원주속도를 1 cm/sec 이하로 유지하였다.

본 실험에서는 1차슬러지와 2차슬러지 그리고 이들을 용적비 1:2 (1차:2차)로 혼합하여 각각 농축실험을 수행하였는데, 혼합슬러지의 경우 그 비율은 현장 처리장의 운전특성을 기준으로 선정하였다. 대상 슬러지는 K시 하수처리장으로부터 채취하였는데, 이 처리장은 1차침전지를 2~3 시간의 체류시간으로 또한 슬러지 탈질조/혐기조/무산소조/호기조의 배열을 가진 생물학적 영양소 제거공정을 총 9시간의 체류시간으로 운전하고 있었다. 1차 침전지의 농축실험은 각 3회씩 실시하여 평균값을 결과치로 사용하였다. 본 실험에서 사용된 대상 슬러지의 특성은 Table 1에 나타난 바와 같으며, 이어지는 탈수실험에서는 본 농축실험결과 얻어지는 농축슬러지를 대상으로 수행하였다.

Table 1. Characteristics of municipal sludge for this experiment

Type	COD (g/L)	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TS (g/L)	VS (g/L)	TKN (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	T-P (mg/L)	Soluble P (mg/L)
Primary sludge	32.7	31.4	16.8	34.8	18.6	826	50	238	10
Secondary sludge	4.05	4.21	2.73	4.62	2.97	53	5	153	11

## 2.2. 농축슬러지의 개량

농축슬러지의 탈수특성평가에 앞서 슬러지의 개량은 가장 대표적인 개량방법 중 하나인 고분자 폴리머 주입방법과 함께 슬러지내 간극수(bound water)를 제거할 수 있는 유용한 방법으로 비교적 최근에 관심의 대상이 되고 있는 증기주입 및 초음파 처리 방법을 각각 적용하였다. 각각의 방법에 따라 개량된 대상 농축슬러지의 탈수특성평가에 앞서 예비실험으로써 적절한 개량기준을 조사하였다. 고분자 폴리머를 이용한 경우에 있어서는 Jar test 실험결과 산정된 각 슬러지 종류별 최적 주입량을 기준으로 적용하였는데, 이때 사용된 폴리머는 대부분의 하수처리장에서 사용하고 있는 (주)E 화학공업의 cation계 폴리머를 사용하였으며, 그 주입량은 슬러지의 건조중량당 0~0.6% 정도로 조절하였다. 증기주입의 경우 0~20분간 증기를 주입하고, 초음파 처리의 경우 노출시간 0~120초 (700 W, 60 Hz)하에서 각 슬러지의 간극수 제거량을 조사하여 가장 최적의 운전조건을 개량기준으로 설정하였다. 슬러지내 간극수 제거량의 평가는 다음의 식을 기준으로 하였다.

$$SV_{30} = V_i / V_0$$

여기서,  $SV_{30}$  : 슬러지내 간극수 제거에 따른 개량 슬러지의 초기용적에 대한 용적비

$V_i$  : 침전시간(i) 30분 후 개량 슬러지의 용적 (mL)

$V_0$  : 초기 개량 슬러지의 용적 (200 mL)

## 2.3. 농축슬러지의 탈수

슬러지의 탈수특성을 정량화하기 위해 본 연구에서 적용한 방법으로는 진공여과 방식의 비저항계수 측정법과 벨트 압력방식의 Wedge zone simulator (WZS) 그리고 원심분리 탈수방법을 사용하였다. 비저항계수 측정실험에서 진공펌프 (GAST Model)는 1/3 HP (15 in Hg) 용량으로 진공압력을 고정하였고, Whatman No.40의 여과지와 50 mL의 시료량을 기준으로 수행되었다. Wedge zone simulator(WZS)를 이용한 탈수실험에서는 2 kg/cm<sup>2</sup>의 압력과 100 mL의 시료량을 기준으로 하였으며, 원심분리 탈수실험에서는 일반적인 현장 원심분리 농축조의 운전제원에 준하여 2,900 G-force로 설정하고 140 mL 용량의 시료량을 기준으로 실험실용 원심분리기 (mega 21 R)를 이용하여 실험하였다. 슬러지의 탈수실험은 대상슬러지의 종류별로 각 3회씩 실시하고 그 평균치를 대표 결과치로 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 슬러지의 농축

하수슬러지의 농축실험에서는 농축시간경과에 따른 슬러지 계면침강속도 그리고 상정수와 농축슬러지의 특성등이 조사되었는데, Fig. 1에는 시간에 따른 슬러지 계면침강곡선이 나타나 있다.

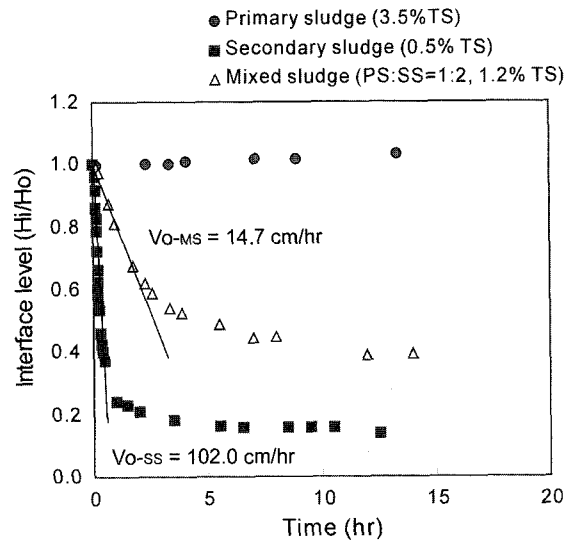


Fig. 1. Interface level vs. thickening time.

일반적으로 농축조의 설계와 운전은 고형물부하(solids flux)와 체류시간으로 평가되나,<sup>15-17)</sup> 본 실험에서는 주로 체류시간과 상정수의 수질 그리고 고형물회수에 주안점을 두고 평가하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 2차슬러지와 혼합슬러지의 초기침강속도는 각각 102.0 cm/hr와 14.7 cm/hr로 혼합농축의 경우 침강속도는 상당히 둔화되는 경향을 보였다. 2차와 혼합슬러지의 경우 각각 3시간 및 10시간이 경과한 후 각 슬러지 계면은 일정한 분리층을 이룬 반면, 1차슬러지의 경우는 분명한 계면변화가 관찰되지 않았는데, 오히려 약 11시간이 경과한 후에는 슬러지층이 상층과 하층으로 분리되어 중간층에 액상층이 형성되는 경향을 보였다. 즉, 1차슬러지의 경우 약 3.5% 정도의 고형물농도에서 농축이 어려우며 현재 대체로 12시간 이상의 체류시간으로 운전되는 농축조에서는 1차슬러지만의 단독농축시에는 이러한 설계조건이 오히려 상정수의 수질을 악화시킬 수 있음을 의미한다.<sup>15)</sup> 본 실험에서 농축된 각 슬러지의 평균농도는 1차와 2차 및 혼합슬러지의 경우 각각 4.6%, 2.8% 및 3.2% 이었는데, 농축슬러지의 TS기준 고형물 회수율(농축효율)은 1차와 2차 및 혼합 슬러지의 경우 각각 99.5%, 93.3% 및 96.5%이었다. 1차슬러지의 경우 높은 회수율을 보인 이유는 중간의 액상층을 분리하여 고농도의 농축슬러지를 확보하였기 때문으로 이는 후속하는 탈수실험을 위한 슬러지 시료를 준비하기 위함이었다.

Table 2 에는 분리 및 혼합농축의 특성과 각 상정수의 수질특성을 나타내었는데, 여기서 물질수지는 단위 슬러지 유입량(1 m<sup>3</sup>/day)을 기준으로 평가하였다. 분리농축과 혼합농축의 각 경우에 대하여 단위 고형물(TS) 유입당 상정수로 유출되는 오염물질 부하를 비교하면, 유기물질(COD와 SS), 질소 및 인의 경우는 혼합농축 하였을 때 더 높게 유지되었고, 특히 질소의 경우는 약 3배가량 높게 나타나고 있다. 반면에 TS의 경우는 혼합농축시 오히려 50% 정도 낮게 나타났고, T-P의 경우는 비슷한 경향을 보였다. 이는

**Table 2.** Comparative performance of combined and separated thickening

	Unit	Primary Sludge	Secondary Sludge	Mixed Sludge
Influent TS	(%) (kg/day)	3.5 34.8	0.5 4.6	1.2 13.0
Settling velocity	(cm/hr)	n.a.	102.0	14.7
Time for stable interface	(hr)	n.a.	3	10
Thickened sludge TS	(%)	4.6	2.8	3.2
	(kg/day)	34.6	4.3	11.6
<b>Effluent mass per unit TS loading</b>				
COD/TS	(kg/kg)	0.0037	0.0065	0.0192
TKN/TS	(kg/kg)	0.0007	0.0020	0.0082
T-P/TS	(kg/kg)	0.0001	0.0013	0.0015
TS/TS	(kg/kg)	0.0055	0.0632	0.0315
TSS/TS	(kg/kg)	0.0011	0.0044	0.0115
<b>Thickener supernatant</b>				
SS/COD	(g/g)	0.308	0.667	0.602
N/COD	(g/g)	0.185	0.300	0.428
P/COD	(g/g)	0.038	0.200	0.076

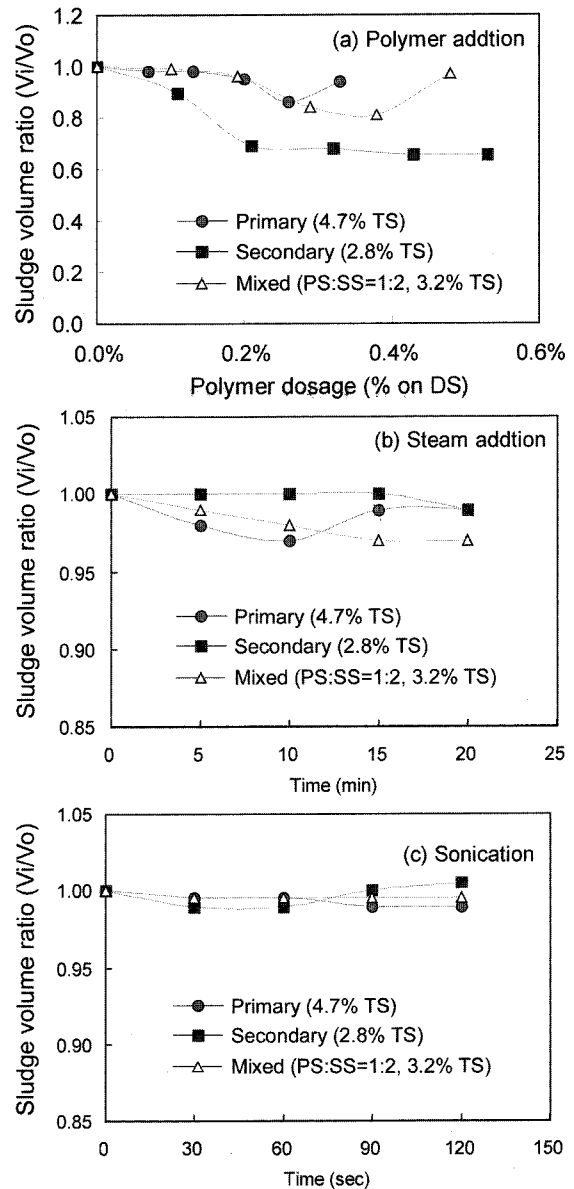
Note : mass balance based on unit flow rate (1 CMD)

12시간의 혼합농축과정에서 물리화학적 및 생화학적 반응이 일어나고 있음을 의미하는 것으로 농축조 상정수의 수질특성을 감안할 경우 혼합농축보다는 분리농축이 보다 더 효과적임을 의미한다. 이러한 점은 농축조 상정수의 수질특성 측면에서도 유사한 경향임을 알 수 있다. 분리농축시 2차슬러지의 농축 상정수의 SS/COD와 P/COD 비는 각각 0.667 g/g과 0.2 g/g으로 상당히 높게 나타났다.

**3.2. 슬러지의 개량**

Fig. 2에는 농축슬러지의 탈수특성향상을 위해 적용할 슬러지 개량방법에 대한 최적조건을 도출하기 위해 수행된 농축슬러지 개량실험결과를 나타내었다. Fig. 2(a)는 폴리머의 주입에 의한 개량 결과인데, 폴리머의 최적주입량은 대상 슬러지의 종류에 서로 상이하게 나타나고 있다. 즉, 건조 고형물기준으로 최적 폴리머 주입조건은 1차와 2차 및 혼합슬러지의 경우는 각각 0.26%, 0.43% 그리고 0.38% 이었다. 증기주입에 따른 개량효과는 Fig. 2(b)에 나타내었는데, 이는 슬러지의 종류별로 다소 차이를 보였다. 즉, 1차와 2차 및 혼합슬러지의 경우는 각각 10분, 20분 및 15분의 증기주입시간이 각각 최적조건이었다. 슬러지 개량방법으로써 초음파 처리를 적용하였을 경우에는 Fig. 2(c)에서 보이는 바와 같이 약 120초까지 노출한 경우에도 큰 효과를 보기 어려웠으나, 그 효과는 낮을지라도 약 60초 정도의 노출시간에서 대부분 약간의 긍정적인 효과를 보여 주었다.

이상의 슬러지 개량실험 결과 도출된 각 슬러지 개량 방법별 최적 운전조건을 기준으로 농축슬러지의 탈수특성평가를 수행하였다.



**Fig. 2.** Settling volume ratio of thickened sludge according to various conditioning methods.

**3.3. 슬러지의 탈수특성**

**1) 비저항계수 측정에 따른 탈수특성**

Fig. 3에는 슬러지 개량방법과 대상슬러지의 종류에 따라 측정된 비저항계수값의 평균치들을 정리하였다. 실험결과 1차, 2차 및 혼합슬러지 모든 경우에 있어서 농축된 슬러지는 농축하지 않은 슬러지에 비하여 더 낮은 탈수특성을 보였는데, 이는 아마도 슬러지내 고형물의 농도와 관련이 있을 것이다. 또한 농축된 슬러지의 개량에 있어서는 증기주입이나 초음파 처리의 경우보다 폴리머를 주입한 경우가 더 우수한 탈수특성을 가지는 것을 알 수 있다.

**2) WZS 및 원심분리에 의한 탈수**

Fig. 4에는 각 슬러지의 종류별 그리고 각각의 개량방법에

따른 WZS와 원심분리에 의한 탈수특성을 탈리액의 용적기준으로 나타내었다. 먼저 WZS에 의한 탈수특성을 보면, 농축된 1차 및 혼합슬러지는 모두 polymer를 주입한 경우가 가장 우수하게 나타났다. 그러나 농축된 2차슬러지의 경우는 전체적인 배수량은 타 종류의 슬러지에 비해 매우 우수하였으나, 슬러지 개량방법에 따라 비교할 때는 타 경우와는 달리 polymer의 주입이 오히려 탈수성을 더 악화시키는 경향을 보였다. 2차슬러지의 경우 타 개량방법에 비해 polymer 주입방법이 효과적이지 못한 이유는 생물학적 슬러지의 고유특성과 WZS에 의한 탈수방법 등에 원인이 있을 것으로 판단된다. WZS 실험결과와는 달리 원심탈수의 경우는 전체적으로 모두 상당한 탈수능력을 보였으며, 이 역시 슬러지 개량방법으로 폴리머를 사용한 경우가 효과적이었으나 슬러지의 개량에 따른 탈수능력의 향상은 그리 크지 않았다.

Fig. 5에는 탈리액의 용적과 총고형물(TS) 회수율을 기준

으로 평가된 탈수효율과 탈수케익의 함수율을 슬러지의 종류와 슬러지 개량방법에 따라 구별하여 나타내었다. 탈수효율은 모두 원심분리의 경우가 가장 우수하였으나, 농축된 2차슬러지의 경우는 타 슬러지에 비하여 상이한 결과를 보였다. 즉, WZS에 의한 탈수에서 탈리액 기준으로는 탈수효율이 우수한 반면 고형물기준으로 볼 때는 반대로 상당히 낮게 나타났는데, 이는 생물학적 슬러지를 구성하는 미생물의 크기가 작으므로 상당부분이 여과포를 통과하였기 때문일 것이다. 탈수케익의 함수율 측면에서 보면 여과포를 이용한 WZS탈수의 경우에 비하여 원심분리의 경우가 전체적으로 훨씬 낮은 경향을 보이는데, 이는 여과포를 이용한 탈수보다도 원심분리에 의한 탈수가 더욱 효과적임을 의미한다. 슬러지의 개량에 의한 영향도 앞선 실험결과와 동일하게 폴리머를 주입한 경우가 가장 우수하였고, 중기주입이

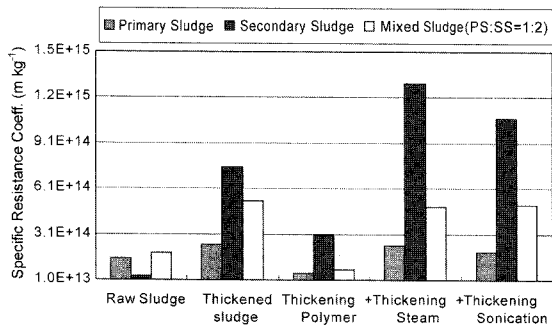


Fig. 3. Specific resistant coefficient.

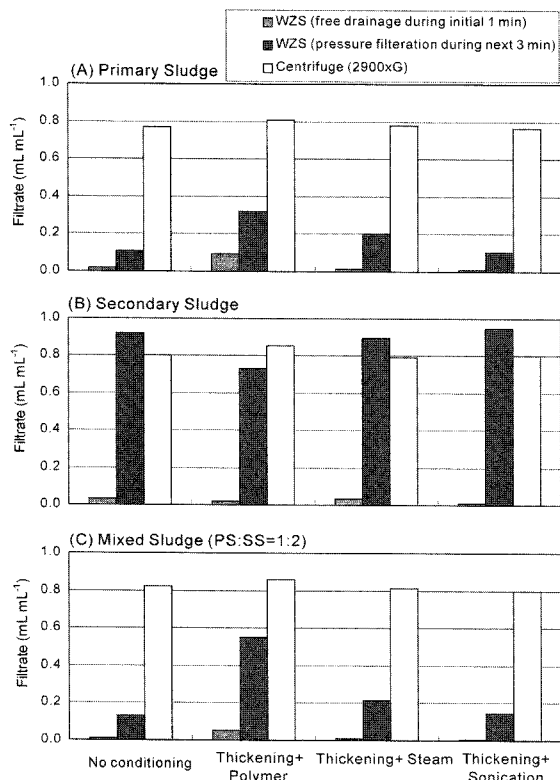


Fig. 4. Filtrate volume on various conditioning methods.

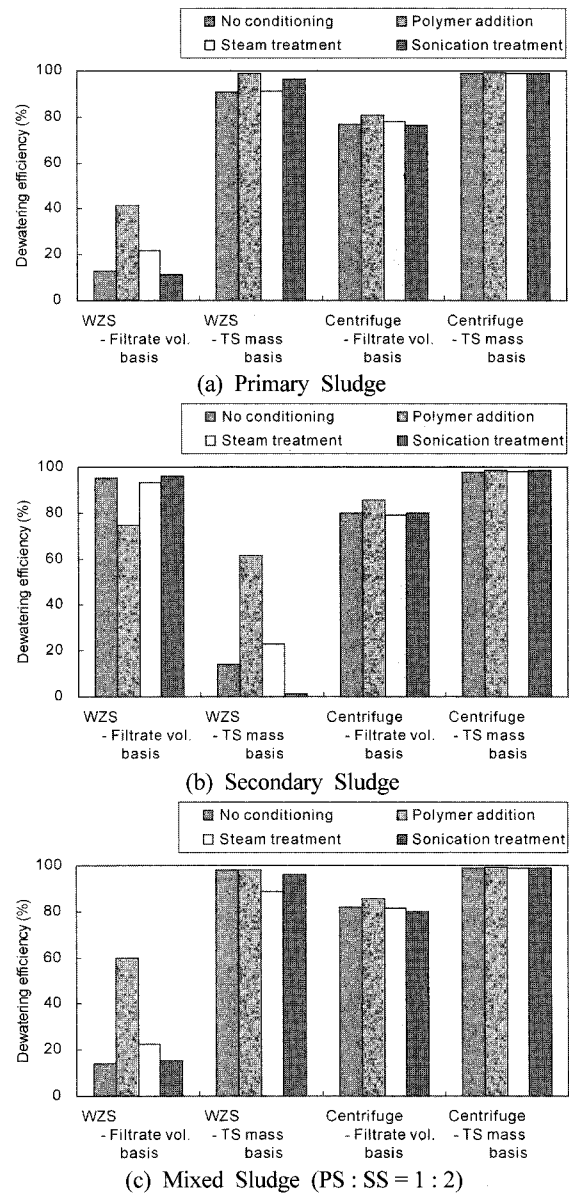


Fig. 5. Dewatering efficiencies and water contents of cake. (continued)

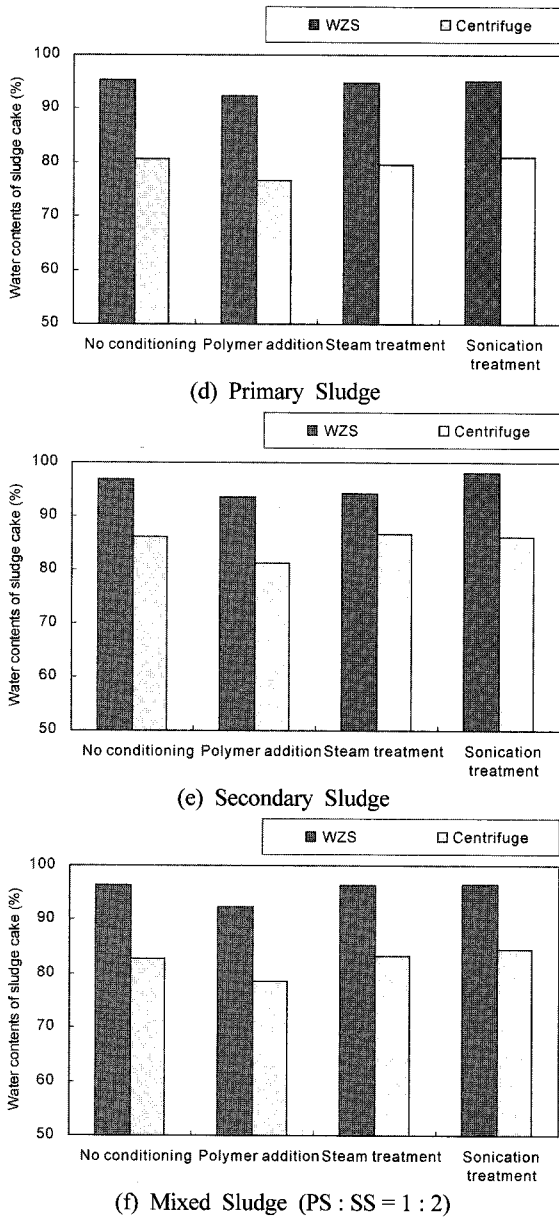


Fig. 5. Dewatering efficiencies and water contents of cake.

나 초음파 처리는 거의 효과가 없는 것으로 나타났다. 원심분리에 따른 탈수케익의 TS함량은 1차와 2차 그리고 혼합슬러지의 경우 각각 19.1~23.3%, 13.3~18.8% 및 15.5~21.5%이었는데, 특히 혼합슬러지의 경우 폴리머를 주입한 경우와 주입하지 않는 경우는 각각 21.5%와 17.3%로 나타났다.

Table 3에는 여과포를 이용한 탈수와 원심분리탈수의 특성과 각 상징수의 수질특성을 분리 및 혼합탈수로 구별하여 나타내었는데, 물질수지는 단위 슬러지 유입량(1 m<sup>3</sup>/day)을 기준으로 평가한 것이다. 단위 고형물(TS) 유입당 탈리액으로 유출되는 오염물질 부하량 측면에서 볼 때 여과포를 이용한 탈수와 원심분리 탈수 모두 분리탈수에 비하여 혼합탈수의 경우가 더 효과적이었다. 또한 탈수방법면에서

는 여과포 이용방식에 비해 원심분리 탈수가 더 우수한 것으로 나타났는데, 특히 원심분리에 의한 혼합슬러지의 탈수는 탈리액의 유기물질 (COD와 SS), 질소 및 인의 부하를 현저히 감소시킬 수 있는 방법이었다. 이러한 결과는 탈수 단계에서 1차와 2차슬러지 즉, 서로 입자의 크기가 상이한 고형물들의 혼합이 서로의 공극을 더 조밀하게 매움으로써 탈수능력을 더 향상시킨 것으로 판단된다. 이러한 경향은 탈리액의 수질특성 측면에서도 유사하게 나타나고 있는데, 원심분리의 경우 혼합슬러지 탈리액의 SS/COD, N/COD 및 P/COD 비는 각각 0.45 g/g, 0.25 g/g 및 0.08 g/g으로 상당히 낮게 나타났다.

Table 3. Comparative performance of dewatering (a) Belt press type (by WZS)

	Unit	Primary Sludge	Secondary Sludge	Mixed Sludge
Thickened sludge TS	(%)	4.6	2.8	3.2
	(kg/day)	45.5	28.1	31.5
Dewatered Cake TS	(%)	7.7	6.4	7.7
	(kg/day)	45.0	16.2	30.9
<b>Filtrate mass per unit TS loading</b>				
COD/TS	(kg/kg)	0.0090	0.3060	0.0054
TKN/TS	(kg/kg)	0.0026	0.0075	0.0003
T-P/TS	(kg/kg)	0.0003	0.0045	0.0010
TS/TS	(kg/kg)	0.0101	0.3875	0.0197
TSS/TS	(kg/kg)	0.0081	0.3267	0.0124
<b>Dewatering filtrate</b>				
SS/COD	(g/g)	0.902	1.067	2.294
N/COD	(g/g)	0.293	0.024	0.065
P/COD	(g/g)	0.034	0.015	0.176

Note : mass balance based on unit flow rate (1 CMD)

(b) Centrifuge type

	Unit	Primary Sludge	Secondary Sludge	Mixed Sludge
Thickened sludge TS	(%)	4.6	2.8	3.2
	(kg/day)	45.5	28.1	31.5
Dewatered Cake TS	(%)	19.4	13.7	17.2
	(kg/day)	45.0	27.5	30.8
<b>Filtrate mass per unit TS loading</b>				
COD/TS	(kg/kg)	0.0103	0.0060	0.0063
TKN/TS	(kg/kg)	0.0022	0.0014	0.0016
T-P/TS	(kg/kg)	0.0003	0.0021	0.0005
TS/TS	(kg/kg)	0.0103	0.0235	0.0225
TSS/TS	(kg/kg)	0.0029	0.0036	0.0029
<b>Dewatering filtrate</b>				
SS/COD	(g/g)	0.277	0.588	0.450
N/COD	(g/g)	0.213	0.235	0.250
P/COD	(g/g)	0.026	0.353	0.080

Note : mass balance based on unit flow rate (1 CMD)

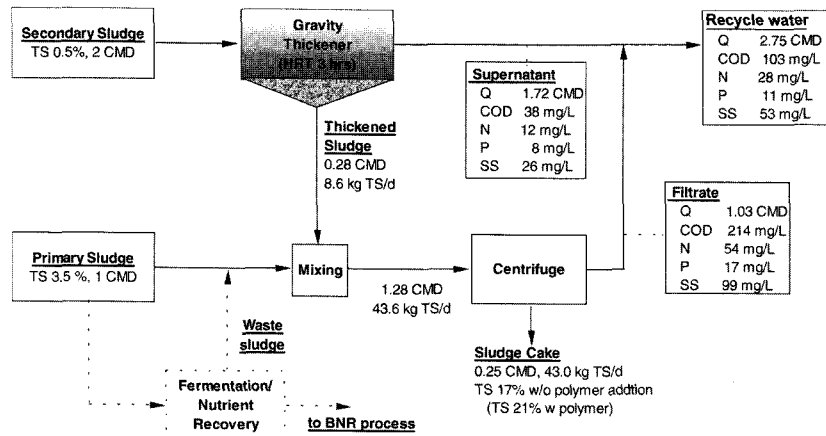


Fig. 6. Proposed sludge treatment process and its mass balance based on laboratory results.

### 3.4. 농축 및 탈수특성을 슬러지 처리공정

앞선 실험결과를 기준으로 종합적으로 판단할 때 하수슬러지의 농축공정에서는 1차슬러지와 생물학적 2차슬러지를 분리농축하는 것이 바람직하며, 고농도의 1차슬러지가 발생하는 경우 농축단계는 비효율적으로 혼합농축시에는 오히려 유출수질의 악화등 여러 가지 운전상의 단점을 야기할 수 있다. 탈수공정에 있어서는 1차와 2차슬러지를 혼합처리함이 고액분리 처리공정의 특성이나 반류수의 수질측면에서 보다 효과적으로 보인다. 슬러지의 개량에 있어서는 여과포를 이용하는 탈수방식은 폴리머의 사용이 필수적이고, 이 경우라도 2차슬러지의 단독탈수에 있어서는 부적절하다고 할 수 있다. 반면에 원심탈수 방법은 가장 효과적으로 적용될 수 있으며, 이 경우 폴리머의 사용이 탈수케익의 고형물함량을 조금 더 향상시킬 수 있으나 오히려 처리비용의 증가를 가져올 가능성이 있다. 본 연구의 결과는 실험실 규모에서 수행된 것으로 현장의 결과와는 다소의 차이가 있을 것이므로 현장규모에서 보다 면밀한 검토가 필요할 것이다. Fig. 6에는 이상의 연구결과를 바탕으로 제안된 슬러지 처리공정과 그 물질수지결과를 나타내었다. 분석결과에서 나타난 바와 같이 이러한 공정변형은 슬러지 처리공정으로부터의 반류수 수질을 향상시킬 수 있는 효과적인 방안이 될 것이며, 여기에 슬러지 감량화를 위해 적용가능한 한가지 방법으로 1차슬러지의 발효공정과 영양소 회수공정을 포함시킬 수 있다.<sup>4)</sup>

## 4. 결론

- 1) 도시하수슬러지의 농축실험에서 고형물의 물질수지결과 1차슬러지와 생물학적 2차슬러지를 분리농축하는 것이 바람직한 것으로 나타났으며, 특히 3.5% 이상의 고농도 1차슬러지의 경우는 농축단계에서 상정수의 고액분리는 부정적이었다.
- 2) 농축된 슬러지의 개량에 있어서는 polymer주입, 증기처리 및 초음파 처리 등의 개량법중에서 폴리머를 주입한 경우가 가장 우수한 탈수성을 나타내었다. 1차와 2차 및

혼합슬러지의 최적 폴리머 주입조건은 건조고형물 기준으로 각각 0.26%, 0.43% 및 0.38%이었다.

- 3) 농축슬러지의 탈수실험에서는 1차와 2차슬러지를 혼합하여 처리하는 것이 고액분리측면에서나 반류수의 수질측면에서 보다 효과적으로 나타났다.
- 4) 여과포를 이용하는 탈수방식은 폴리머의 사용이 필수적이었으나 이 경우 2차슬러지의 단독탈수는 효과가 없었다. 원심탈수 방법은 가장 우수한 탈수효율을 보였으며, 이때 폴리머의 주입으로 탈수케익의 고형물함량을 조금 더 향상시킬 수 있었다.
- 5) 이상의 실험결과에 근거하여 반류수의 수질특성을 고려한 합리적인 슬러지 처리공정을 제안하였다.

## 참고 문헌

1. 환경부, '03 하수종말처리시설 운영관리실태 분석(2004).
2. 환경부, 하수슬러지 처리 종합계획(2002).
3. 환경부, 하수슬러지 처리의 문제점 및 추진대책(직매립 금지 대응관련)(2003).
4. Ahn, Y. H. and Choi, H. C., Municipal sludge management and disposal in South Korea: status and a new sustainable approach, *Water Sci. Technol.*, **50**(9), 245~253(2004).
5. Barnard, J. L., Design of Prefermentation Processes. In Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal, C. W. Randall, J. L. Barnard, H. D. Stensel (Eds), *Water Quality Management Library*, **5**, 85(1992).
6. 최의소, 상하수도 공학, 청문각(2003).
7. USEPA, Design Manual of Dewatering Municipal Wastewater Sludge, EPA/625/1-87/014, U.S.A.(1987).
8. Nielson, B., Sludge dewatering methods and economy, *Proc. of Sludge Use and Disposal (Sludge 2000)*, Robinson College, Cambridge(1992).
9. Gopalakrishnan, S., Mujumdar, A. S., Weber, M. E.,

- Electrokinetically enhanced vacuum dewatering of mineral slurries, *Filtration & Technology*, Nov/Dec, 929 (1996).
10. Lee, J. E., Kim, M. J., Lee, J. K., Development of electrodeewatering filter press, *Proc. IWA 3<sup>rd</sup> World Water Congress 2002*, Melbourne, Australia, e21155a(2002).
  11. Peuker, U., Scale-up of steam pressure filtration, *Chem. Eng. Technol.*, **38**, 611~619(1999).
  12. 이정언, 하수슬러지의 탈수율 향상을 위한 열 탈수 연구, *대한환경공학회지*, **26**(5), 601~609(2004).
  13. APHA, WEF and ASCE, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20<sup>th</sup> Eds. Washington DC. USA(1998).
  14. Vesilind, P. A., *Treatment and Disposal of Wastewater Sludge*, rev. eds. Ann Arbor Science(1979).
  15. 최의소, 안영호, 도시하수슬러지의 농축특성에 관한 연구, *한국상하수도학회지*, **1**, 9~16(1991).
  16. 한국수도협회, 환경부 제정 하수도 시설기준(1997).
  17. WEF, ASCE, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants (MOP 8)*, 4th eds.(1998).