

비용편익분석을 통한 슬러지 처리공정 개선에 관한 연구

이종필[†] · 정경훈

조선대학교 환경생명공학과

A Study on the Improvement of Sludge Treatment Process by Cost-Benefit Analysis

Jong Pil Lee[†] and Kyung Hoon Cheong

Department of Life Environment Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

Received July 22, 2011/Accepted September 30, 2011

Cost-Benefit analysis was performed for optimization of sewage sludge treatment process in Public Owned Treatment Works (POTWs). The sludge treatment efficiencies were evaluated by thickening type(gravity and centrifugal), dewatering procedure (after thickening and after digestion) and dewatering type(belt press and screw decanter). Economical efficiency was evaluated by B/C ratio based on Cost-Benefit Analysis(CBA) for four types of sludge treatment processes. Regarding thickening type, the centrifugal thickening was more beneficial than gravity thickening in terms of solid recovery and sludge thickening rate. Results showed that after digestion type consumed 1.8 times as small as after thickening type. The digestion rate and the sludge reduction rate were 42.4% and 39.7%, respectively. Results showed that the screw decanter type was more effective as dewatering type because the moisture content of dewatering cake was 79.1%. However, the amount of dewatering chemicals was 1.3 times for large scale POTWs and 2.8 times for small scale POTWs. The result of CBA showed that the B/C ratios of centrifugal thickening and centrifugal thickening after digestion were 3.0 and 2.45, respectively. Therefore, these types were applicable to the sludge treatment in the aspect of cost benefit.

Key words: sludge treatment process, Cost-Benefit Analysis(CBA), thickening, dewatering, digestion

1. 서 론

1960년 이후 경제개발에 따른 산업의 급속한 발달과 인구의 대도시 집중화로 환경오염이 심각한 사회문제로 대두되면서 환경의 질을 향상시키고 쾌적한 생활을 영위하고자 막대한 예산을 투입하여 공공하수처리시설을 설치하였으나, 설계가 과다하고, 시공상태가 불량하며, 전문적인 운영관리 미흡으로 처리수질이 악화된 상태로 인근하천에 방류되어 환경오염이 유발되는 사례가 종종 발생하고 있다.

이러한 환경오염 문제에 대해 유럽 및 선진국에서는 각종규제 및 관계법령 정비와 다양한 고도처리공법 등

을 연구·개발하여 하수처리공정에 적용함으로써 오염물질의 하천 유출을 최소화하고 있다.

전국에 가동 중인 공공하수처리시설은 총 357개소(2007년 기준)로써 하수처리 과정에서 발생하는 슬러지는 347개소를 대상으로 연간 278만톤(2007년 기준), 일평균 7,631톤이 발생되었으며, 이러한 수치는 우리나라 전체 생활폐기물 발생량 48,844톤/일(2006년 자료)의 15.6%정도를 차지한다¹⁾.

환경부는 2006년 유기성 오니종합대책을 마련하여 2011년 까지 전량 육상처리를 목표로 해양투기를 억제('95년 77%→'11년 0%)하고, 재활용을 증가('95년 10%→'11년 64%)하기 위해 2011년까지 총 8,590억원

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-(0)32-590-3522, Fax: +82-(0)32-590-3519, E-mail: jpbank@keco.or.kr

을 투자하여 자치단체의 하수 및 폐수슬러지 처리시설을 지원하고, 재활용에 최우선을 두어 친환경적인 처리 대책을 수립하였다²⁾.

하수슬러지 처분은 수처리 공정에서 분리된 슬러지를 가능한 부패되기 전에 신속하게 처리하여 취급이 용이한 형태와 자원화에 필요한 성상으로 가공하는 것으로 슬러지 중의 수분 및 고형물량을 줄여 부피를 감소하고 슬러지를 안정화시키는데 목적이 있으며, 슬러지 부피를 획기적으로 감소시켜 슬러지 처분비용을 절감하고자 농축 및 소화, 개량, 탈수처리 등의 슬러지처리시설을 설치한다.³⁾

따라서, 본 연구는 슬러지 처리공정이 각기 다르게 구성된 하수처리장 4개소의 슬러지 특성분석(농도(TS, VS(%), Cake 함수율(%))으로 슬러지처리방법별 처리효율을 파악하고, 비용편익분석(CBA)을 이용한 경제성을 평가하여 슬러지 감량을 도모하는데 목적이 있다.

2. 실험 및 방법

2.1. 실험대상 및 처리공정

본 연구의 실험대상은 전국의 도시지역에 소재한 하수처리장 중 하수처리용량 및 공법과 슬러지 처리공정이 다르게 구성된 4개 하수처리시설을 대상으로 선정하였다.

Table 1은 하수처리시설의 처리용량 및 실제유입량과 처리공법을 나타낸 것으로, 하수처리용량은 처리규모에 따라 최소 25,000 m³/일에서 최대 982,500 m³/일로 평균 326,875 m³/일을 나타내고 있으며, 평균 하수유입량은 281,504 m³/일로 설계대비 86.1%의 하수 유입률을 보여주고 있다.

하수처리공법으로 DNR(Daewoo Nutrient Removal) 1개소, A²O(Anaerobic/Anoxic/Oxic) 1개소 및 표준 활성슬러지법 2개소이다.

4개소 하수처리장의 슬러지 처리공정은 1) 중력농축조에서 생슬러지와 잉여슬러지를 혼합 또는 분리하는 방식, 2) 농축방식으로 생슬러지는 중력농축, 잉여슬러지는 원심농축하는 방식, 3) 농축된 슬러지를 직접탈수 또는 소화과정을 거쳐 탈수하는 방식, 4) 탈수방식으로 벨트프레스 또는 원심탈수기에 의해 탈수하는 방식으로 구성되었다(Table 2).

2.2. 실험분석

2.2.1. 농도분석방법

본 연구대상 하수처리장의 슬러지 특성을 파악하고자 처리장별 슬러지(생슬러지, 잉여슬러지, 농축슬러지, 소화슬러지, 탈수슬러지)를 각각 1kg씩을 분취하여수질오염공정시험기준에 따라 시료를 전처리한 후 슬러지 농도(TS, VS)와 Cake함수율(%)을 분석하였다.

Table 1. Comparison of sewage treatment capacity and treatment processes (4EA)

하수처리시설	하수처리용량(m ³ /일)			처리공법
	설계	실제	유입률(%)	
A	25,000	18,600	74.4	DNR
B	130,000	118,825	91.4	Activated Sludge Process
C	170,000	133,845	78.7	A ² O
D	982,500	854,749	87.0	Activated Sludge Process
평균	326,875	281,504	86.1	-

Table 2. Comparison of sludge treatment processes (4EA)

하수처리시설	생·잉여슬러지		농축방식		소화여부	탈수방식	
	혼합농축	분리농축	중력농축	원심농축		벨트탈수기	원심탈수기
A	○	-	○	-	-	-	○
B	○	-	○	-	○	○	-
C	-	○	○	○	-	○	-
D	-	○	○	○	○	○	○

- A: 생슬러지+잉여슬러지(혼합)/농축(중력)/탈수(원심탈수기)
- B: 생슬러지+잉여슬러지(혼합)/농축(중력)/소화/탈수(벨트탈수기)
- C: 생슬러지·잉여슬러지(분리)/농축(중력·원심)/탈수(벨트탈수기)
- D: 생슬러지·잉여슬러지(분리)/농축(중력·원심)/소화/탈수(벨트·원심탈수기)

2.2.1.1. TS, VS(%)

슬러지 TS농도분석은 4개하수처리장의 슬러지(생슬러지, 잉여슬러지, 농축슬러지, 소화슬러지, 탈수슬러지)의 시료를 50g정도로 미리 칭량하여 무게를 단 증발접시에 취하고, 105~110°C의 건조기 안에서 2시간 정도 건조한 후 다시 데시케이터에서 방냉하여 무게를 달아 전후의 무게차를 이용하여 분석한다.

VS(%)농도분석의 경우에는 미리 농도를 측정한 TS 분석 증발접시를 550°C회화로 안에서 항량이 될 때까지 회화 및 방냉 후 무게를 달아 측정 한다⁴⁾.

2.2.1.2. 함수율

탈수 Cake 함수율 분석은 증발접시를 미리 105~110°C에서 1시간 건조시킨 다음 황산데시케이터 안에서 방냉하고 항량으로 무게를 정밀히 달고(W1) 여기에

시료 50g정도를 취하여 증발접시와 시료의 무게(W2)를 단다.

다음에 수욕상에서 수분을 거의 날려 보내고 105~110°C의 건조기 안에서 4시간 건조시킨 다음 황산데시케이터안에 넣어 방냉하고 항량으로 하여 무게(W3)를 정밀히 단다.

슬러지의 함수율⁵⁾ 식 (1)과 같다.

$$H_w(\%) = \frac{W2 - W3}{W2 - W1} \times 100 \quad (1)$$

2.2.1.3 실험기구

슬러지농도(TS, VS)와 탈수 Cake 함수율 측정에 필요한 실험기구로는 증발접시, 저울, 건조기 및 회화로 및 데시케이터 등을 사용하였다.

Table 3. The variation of TS, VS and moisture content according to the sludge type and POTWs

(단위 : %, m³/일)

구분	생슬러지		잉여슬러지		농축슬러지			
					중력		원심	
	TS	VS	TS	VS	TS	VS	TS	VS
A	1.7	70.0	0.8089	74.3	2.0	69.4	-	-
B	2.7	69.7	0.7484	71.9	2.3	64.4	-	-
C	1.9	69.1	0.5226	74.6	2.0	68.8	4.1	75.8
D	2.5	61.3	0.6950	68.3	2.2	60.5	3.3	72.5

구분	소화슬러지		탈수슬러지		슬러지 Cake			
					벨트탈수기		원심탈수기	
	TS	VS	TS	VS	탈수량	함수율	탈수량	함수율
A	-	-	2.0	68.2	-	-	9.3	81.0
B	2.7	58.3	2.7	58.3	27.6	83.1	-	-
C	-	-	2.7	68.9	45.0	82.7	-	-
D	2.9	57.1	2.9	57.1	90.0	81.7	230	79.1

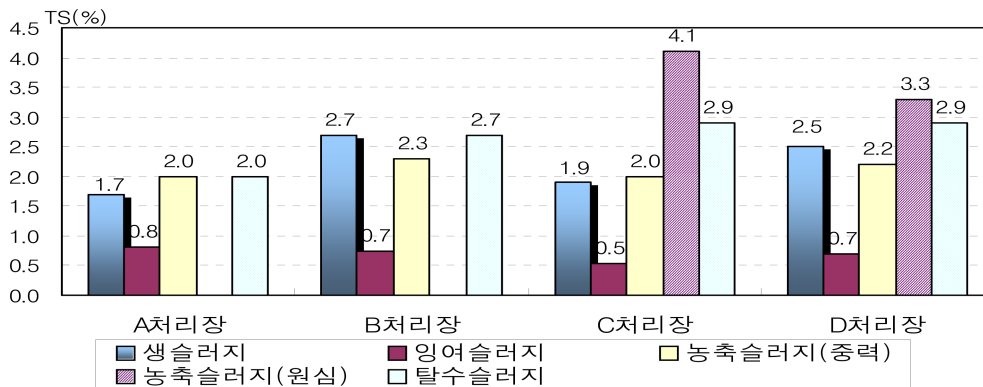


Fig. 1. Variation of total solid according to the sludge type and POTWs.

2.2.2. 농도분석결과

하수처리장별 슬러지 농도분석과 함수율 측정결과를 Table 3에 나타내었으며, Fig. 1은 처리장 별 슬러지별 농도(TS)변화추이를 보여주었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구대상 4개소 하수처리장의 슬러지 분석결과를 이용한 핵심연구사항은 슬러지 처리공정별 처리효율을 파악하고 경제성 분석을 통한 최적의 슬러지처리공정을 제시하여 슬러지 감량을 유도하는데 있다.

슬러지 처리방식별 처리효율은 1) 중력농축 및 원심농축방식 2) 농축탈수 및 소화 후 탈수 방식, 3) 벨트탈수 및 원심 탈수 방식으로 나타내었으며, 경제성 분석으로는 처리방식별 4) 비용편익분석(CBA)에 의한 경제성과 이에 따른 5) 최적 슬러지 처리공정을 제시하였다.

3.1. 처리방식별 처리효율 결과

3.1.1. 중력농축 및 원심농축방식

1차·2차침전지에서 인발된 생슬러지와 잉여슬러지를 혼합하여 중력 농축한 A, B처리장의 SS고형물회수율은 A 52.3, B 31.7%, 잉여슬러지만 원심 농축한 C, D처리장은 C 73.0, D 95.9%로 원심농축이 중력농축방식보다 높은 고형물회수율을 얻었다(Table 4).

슬러지 농축율(%)에서도 중력농축방식인 A, C처리장이 각각 30%, 50%이며, 원심농축방식 B, D처리장이 87.3%, 78.9%으로 원심농축방식이 2배 이상 높게 나타났다(Table 5).

일반적으로 하수처리장 중력농축조 혼합농축방식의 SS고형물제거효율 80~90%, 농축 슬러지(TS)농도 3~5% 내외로 설계한다⁶⁾.

그러나, 혼합농축방식으로 가동되고 있는 하수처리장에서는 슬러지 발생량이 계절적인 요인(장마철 유입고형물량 증가, 환절기(3~6월)에 미생물활성도 증가 등),

Table 5. Sludge thickening rate by thickening type

농축방식	처리장	농축전 (%)	농축후 (%)	슬러지 농축율(%)
중력농축	A	1.4	2.0	30.0
	C	1.2	2.3	50.0
원심농축	B	0.5226	4.1	87.3
	D	0.6950	3.3	78.9

운영인자 변화(체류시간, 생슬러지와 잉여슬러지의 인발량, 유기물량, 슬러지 부패, 고농도 상등수 등)와 운영미숙 등으로 처리효율이 낮아 고형물회수율이 60~80%, 농축 슬러지 TS 농도가 2~4% 내외로 운영되고 있다.

B처리장의 경우처럼 중력농축방식의 SS고형물회수율이 31.7%내외로 적어 농축조 상등수로 고형물이 높게 유출되어 처리장 유입부에 반류됨으로써 처리장 유입부하를 가중시킨다.

그러나, C, D 처리장의 생 슬러지만 중력농축 할 경우 85.7%, 잉여슬러지만 원심농축할 경우 95.9% 이상의 높은 고형물 회수율을 나타내고 있다.

최근에는 중력농축방식의 농축조운영의 어려움과 고농도 반류수로 인한 유입부하 증가를 감소시키기 위해 C, D처리장처럼 생 슬러지만 중력농축하고, 발생량이 많고 농축성이 상대적으로 낮으며 인이 다량 함유된 BPR(Biological Phosphorus Removal)슬러지의 잉여슬러지는 별도로 기계(원심)농축기를 설치하여 농축함으로써 높은 고형물 회수율을 기대하고 있는 추세이다.

3.1.2. 농축탈수와 소화탈수 방식

Table 6은 농축된 슬러지를 직접탈수 하였을 경우와 소화 후 탈수하였을 경우의 탈수약품 사용비를 비교분석한 결과이다.

소화과정을 거친 후 탈수한 D처리장의 약품사용비는 0.607(kg-Polymer/kg-DS탈수Cake)으로 농축 후 직접탈수한 C처리장의 약품사용비 1.091(kg-Polymer/kg-DS

Table 4. Solid recovery rate by thickening type

처리장	유입부하량(kg/일)		유출부하량(kg/일)		고형물회수율(%)	
	생슬러지	잉여슬러지	중력농축	원심농축	중력농축	원심농축
A	2,503	946	1,804	-	52.3	-
B	15,223	15,986	9,908	-	31.7	-
C	10,927	5,221	9,360	3,813	85.7	73.0
D	98,725	66,803	62,722	64,086	63.5	95.9

Table 6. The cost of chemicals between direct type and digestion type (단위 : m³/일, %)

방식	처리장	탈수슬러지			탈수Cake(%)		약품사용량 (kg/일)(a)		사용비 (kg-약품/kgDS-Cake)
		인발량	TS	VS	량(b)	함수율(c)	벨트	원심	a/((b(100-c)/100)×1,000)
농축 탈수	A	90.2	2.0	68.2	9.3	81.0	-	29.8	1.686
	C	297	2.7	68.9	45.0	82.7	85	-	1.091
소화 탈수	B	198	2.7	58.3	27.6	83.1	38	-	0.814
	D	700	2.8	57.1	90.0	81.7	100	-	0.607

탈수Cake)보다 1/2 적었으며, 농축 후 원심탈수기로 탈수한 A처리장의 약품사용비(1.686 kg-Polymer/kg-DS탈수Cake)보다도 1/3 적게 사용하였다.

이러한 이유는 소화과정을 거친 D처리장의 슬러지 VS비율이 57.1%으로 농축과정만 수행한 C처리장 VS비율 68.9%보다 11.8%정도 낮은데서 기인하는 것으로 이때의 탈수약품 사용비는 D처리장이 0.607(kg-Polymer/kg-DS탈수Cake), C처리장이 1.091(kg-Polymer/kg-DS탈수Cake)으로 소화 후 탈수방식이 VS비율을 낮게 유지함으로써 탈수약품을 적게 사용하였다.

하절기 강우 시에는 하수와 함께 침사물이 유입되어 TS농도가 높아져 VS함량이 상대적으로 감소하고, 동절기에는 유기물 유입량 증가로 VS함량이 높아지는 계절적 특성을 감안하면, 계절적으로 VS함량 변화에 따른 약품사용량과 탈수 Cake의 함수율 변화가 크게 변화되는 결과를 얻을 수 있다(Fig. 2).

한편, 탈수슬러지의 유기물(VS%)의 분석결과는 소화과정을 거친 B, D처리장이 58.3, 57.1%이며, 농축과정만 거친 A, C처리장은 68.2, 68.9%으로 소화과정을 거친 슬러지의 VS함량이 평균 10.8%이하로 낮았으며, 탈수 후 Cake 함수율은 81.0~83.1%로 거의 비슷한 결과를 얻었다.

3.1.3. 벨트탈수 및 원심탈수 방식

Table 7은 탈수슬러지를 벨트와 원심탈수기에서 동시에 탈수하는 D처리장의 탈수결과와 원심탈수기를 사용하는 A처리장(소규모)의 탈수결과를 비교하여 나타내었다.

D하수처리장의 탈수슬러지 투입량은 벨트탈수기가 700 m³/일, 원심탈수기가 2,200 m³/일로 원심탈수기가 3배이상 많았으며, 탈수 Cake발생량은 벨트탈수기가 90톤/일, 원심탈수기가 250톤/일로 원심탈수기가 2.8배 더 발생하였고, 이때의 함수율은 벨트탈수기가 81.7%, 원심탈수기가 79.1%로 원심탈수기가 2.6% 양호하였다.

한편, 탈수약품주입비(kg-약품/kg-투입고형물)는 벨트탈수기가 0.51, 원심탈수기가 0.63 소요되었으며, 함수율을 고려한 약품주입비(kg-약품/톤 DS-Cake)에서는 벨트가 0.607, 원심탈수기가 0.804로 원심탈수기의 약품주입비가 1.3배 더 소비되었다.

하수처리장 규모별로 벨트탈수기를 사용하는 D처리장(대규모)과 원심탈수기를 사용하는 A처리장(소규모)의 탈수결과, 탈수Cake량은 벨트탈수기가 10배정도 많았으나, 함수율은 원심탈수기가 0.7%정도 양호하였다.

탈수약품주입비(kg-약품/kg-투입고형물)는 벨트탈수기가 0.51, 원심탈수기가 1.65으로 원심탈수기가 벨트탈

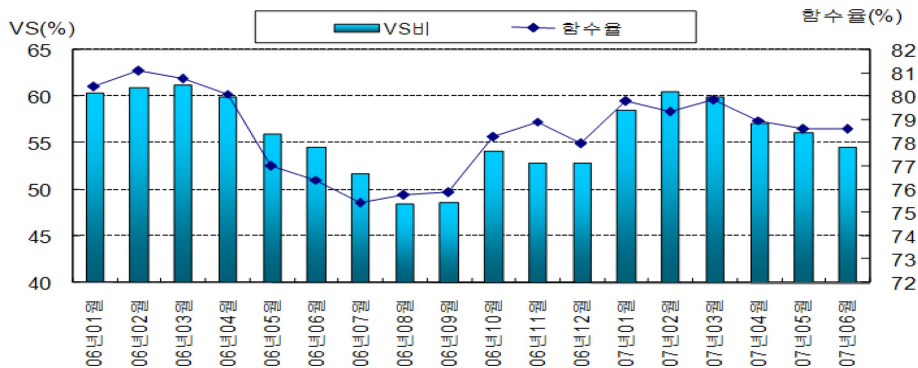


Fig. 2. Relationship between VS ratio and moisture content

Table 7. Comparisons of belt press and screw decanter (POTW D) and Dewatering performance comparison by POTW scale(POTW D and A)

구 분	벨트탈수기(D)	원심탈수기(D)	원심탈수기(A)
투입슬러지	700	2,200	90.2
투입농도(TS/VS)(%)	2.8/57.1	2.8/57.1	2.0/68.2
고형물량(kg)	19,600	61,600	1,804
탈수Cake량(톤)	90	250	9.3
함수율(%)	81.7	79.1	81.0
약품주입량(kg)	100.0	420.0	29.8
약품사용비(kg-약품/kg-투입고형물)	0.51	0.68	1.65
약품사용비(kg-약품/톤 DS-Cake)	0.607	0.804	1.686

수기보다 3.2배 더 소비되었으며, 함수율을 고려한 약품주입비(kg-약품/톤 DS-Cake)에서도 벨트가 0.607, 원심탈수기가 1.686으로 원심탈수기의 약품주입비가 2.8 배 더 소요되었다.

일반적으로 벨트탈수기를 운영하고 있는 하수처리장은 유입슬러지(TS,VS) 농도, 벨트장력 및 노후화 등에 따라 탈수Cake 함수율이 80~85%내외로 처리되며, 원심탈수기는 유입슬러지(TS,VS)농도, 원심력, 차속, 약품주입량 등에 따라 75~82%까지 처리된다.

본 연구대상인 벨트탈수기와 원심탈수기의 탈수결과 비교분석은 최근 탈수처리방식이 벨트탈수기에서 원심탈수기로 변경되고 있는 추세에 있어서 연구의 의의가 크다고 할 수 있다.

Table 7의 결과에서 보는 바와 같이 탈수Cake 함수율은 원심탈수기가 벨트탈수기보다 상대적으로 낮아 고형물 함량이 높은 Cake을 얻을 수 있었으나, 함수율을 고려한 약품주입비(kg-약품/톤 DS-Cake)에서는 벨트가 0.607, 원심탈수기가 0.804으로 원심탈수기의 약품주입비가 1.3배 더 소요되는 상반된 결과를 얻을 수 있었다.

이러한 이유는 원심탈수기 구조상 탈수약품과 탈수슬러지의 응집 및 응결이 필요한 반응구간이 짧은 투입관로에서만 이루어지고 있어 필요이상의 약품투입이 되고 있기 때문이며, 과잉 투입된 약품이 탈리여액에 포함되어 처리장 유입부에 반류됨으로써 유입수질에 악영향을 주고 있는 것으로 조사되었다.

이러한 결과는 소규모하수처리장 일수록 더욱 악화되는데 Table 6에서 보는 바와 같이 VS함량이 상대적으로 높은 슬러지를 원심농축 하였을 경우, 함수율은 벨트탈수기와 거의 유사한 반면, 탈수약품주입비(kg-약품/톤 DS-Cake)는 원심탈수기가 벨트탈수기보다 2.8 배 더 소비되는 결과를 보여주고 있다.

따라서, 원심탈수기의 탈수약품 증가 원인으로 벨트탈수기에 설치된 약품응집탱크와 같은 탈수약품과의 응집 및 응결에 필요한 충분한 체류(접촉)구간 확보가 필요한 연구과제이다.

3.2. 경제성 분석에 의한 결과

슬러지 처리공정별 경제성 분석에서 비용편익분석

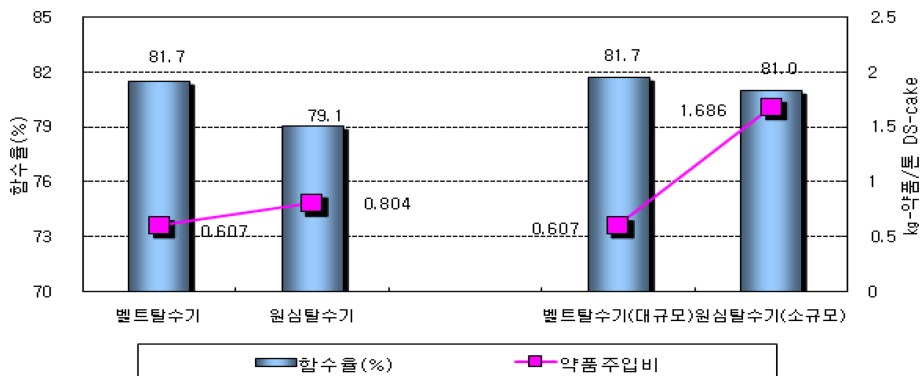


Fig. 3. Comparison with moisture content and chemical injection rate of belt press and screw decanter(by (by POTW D and POTW scale).

(Cost-Benefit Analysis, CBA)방법을 이용하여, 슬러지 처리공정별 투입되는 비용과 슬러지 처리 방식별 처리 효율 향상으로 얻을 수 있는 편익(이익)을 분석하였다. 비용적인 측면은 주로 금전적 가치로 평가되는 직접비용으로 산출하였으며, 처리효율향상의 편익으로는 직접 효과와 간접효과로 구분될 수 있으나, 여기서는 주로 금전적 가치인 직접효과를 분석하여 제시하였다(비용편익

분석으로 제시되는 편익/비용 비율(B/C Ratio)의 산정 값이 1.0이상이면, 경제성 측면에서 타당성 확보가능).

3.2.1. 원심농축 및 중력농축 방식

슬러지 농축방식에 있어 원심농축과 중력농축 사용 시 직접비용(Cost)과 편익(Benefit)을 구분하여 경제성을 평가한 결과를 Table 8에 나타내었다.

Table 8. Evaluation of economical efficiency between gravity thickening and centrifuge (base on treatment capacity of 10⁵ ton)

● 직접비용(Cost)

구분	원심농축기	중력식 농축조
농축설비	· 원심농축기 본체 17m ³ /hr×25kW×3(1)대 (1일 24시간 운전)	· 중력식 농축조 본체 ø15m×H3.5m×1.5kW×2대 (1일 24시간 운전)
펌프설비	-잉여슬러지 공급펌프 max 17m ³ /hr×2kg/cm ² ×3.7kW×3(1)대	-농축슬러지 인발펌프 max 0.5m ³ /min×10mH×3.7kW×2(1)대 -인발밸브 및 배관설비 200A×0.75kW×2대 배관설비 200A-STs×1식
탈취설비	-	-탈취장치 탈취포집 Cover 및 포집배관(FRP) 탈취팬 및 탈취장치 (공간면적×6회/hr) 53m ³ /min×1대 53m ³ /min×250Aq×5.5kW×2(1)대
기자재비용 (a)	819,000천원 -원심탈수기 250,000천원×3대 = 750,000천원 -잉여슬러지 공급펌프 18,000천원×3대 = 54,000천원 배관설비 15,000천원×1식 = 15,000천원	630,000천원 -농축 슬러지 수집기(Stainless Steel 재질) 100,000천원×2대 = 200,000천원 -농축슬러지 인발펌프 15,000천원×2대 = 30,000천원 -인발밸브 10,000천원×2대 = 20,000천원 -인발 및 이송배관 설비 30,000천원×1식 = 30,000천원 -탈취장치 200,000천원×1식 = 200,000천원 -탈취포집 Cover 및 포집배관 150,000천원×1식 = 150,000천원
설치비용	(기자재비에 포함)	(기자재비에 포함)
토목공사비용(b)	350,000천원(잉여슬러지 저류조 포함)	600,000천원
초기설치비용(a+b)	1,169,000천원	1,230,000천원
운전 전력비용	-소비전력(25kW+3.7kW = 28.7kW) 28.7kW×2대×24hr/일×365일/년 =502,824kWh/년 502,824kWh/년×55원/kWh=27,655천원	-소비전력 (1.5kW×2대)+(3.7kW×0.05)+5.5kW = 8.6kW 8.6kW×24hr/일×365일/년 = 75,336kWh/년×55원/kWh = 4,143천원
자재수리비용	-베어링 교체, 스크류 수리 등 10,000천원/년×3대 = 30,000천원	-구동장치 및 수집기 점검 수리 10,000천원/5년×2대 = 4,000천원
유지관리비용 (c)	57,655천원	4,147천원
비용분석(C)	57,655천원 + (1,169,000천원×0.1) = 174,555천원/년	4,147천원 + (1,230,000천원×0.1) = 127,147천원/년

비용분석(C) : (유지관리비용(c) + (초기투자비용(a+b) × 자본회수율(0.1))

Table 8. Continued

● **편익분석(Benefit)**

구분	원심농축기	중력식 농축조
슬러지감량화	-농축슬러지 800m ³ /일×(16.5) = 132m ³ /일 -탈수슬러지 cake 132m ³ /일×(3.7)%×100/(100-81.7)= 26.7톤/일× 365 일/년 =9,741톤/년 -처리비용(해양투기) 9,741톤/년×35,785원/톤=348,581천원	-농축슬러지 800m ³ /일×(60) = 480m ³ /일 -탈수슬러지 cake 480m ³ /일×(2.2%)×100/(100-81.7)= 57.7톤/일×365일/년 =21,062톤/년 -처리비용(해양투기) 21,062톤/년×35,785원/톤=753,700천원
슬러지 편익(d)	753,700천원- 348,581천원=405,119천원/년	-
약품절감(탈수시)	9,741톤/년×10,530원/톤=102,573천원	21,062톤/년×10,530원/톤=221,783천원
약품편익(e)	221,783천원-102,573천원=119,210천원/년	-
편익분석(B)	405,119천원/년+119,210천원/년=524,329천원/년	-

편익분석(B) : (슬러지감량화 절감액(d) + 약품절감액(e))

● **경제성 평가(B/C Ratio)**

$$E = \frac{B}{C} = \frac{524,329}{174,555} = 3.0$$

원심농축 및 중력농축방식에서 비용(Cost)은 원심농축기가 174,555천원/년, 중력식농축조가 127,147천원/년으로 초기 설치비 및 유지관리비(전력비 등)에서 중력농축조가 적었다.

편익(Benefit)으로는 원심농축기 가동으로 슬러지 감량화와 약품절감으로 인한 기대효과를 얻을 수 있으므로 중력농축조와 비교하여 연간 524,329천원의 이익이 발생하였다.

따라서, 비용편익분석으로 편익/비용비율(B/C Ratio) 산정결과, 3.0의 높은 경제적 타당성을 확보하여 원심농축기 운영이 경제성 평가에서 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

3.2.2 소화탈수 및 직접탈수방식

● **경제성 평가(B/C Ratio)**

$$E = \frac{B}{C} = \frac{613,367}{249,650} = 2.45$$

소화 후 탈수 및 농축 후 직접탈수의 비용(Cost)분석 결과에서는 소화 후 탈수가 249,650천원/년이 소요되었으며, 편익(Benefit)분석은 슬러지 소화조과정에서 기대할 수 있는 슬러지감량화와 약품절감 효과 및 소화가스 재활용의 금전적 가치를 농축 후 직접탈수와 비교하여 연간 613,367천원의 이익이 발생하였다.

따라서, 편익/비용비율(B/C Ratio) 산정결과, 2.45의 높은 경제적 타당성을 확보하여 소화 후 탈수공정이 농축 후 직접탈수 공정보다 경제성 평가에서 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

3.2.3 원심탈수와 벨트탈수 방식

● **경제성 평가(B/C Ratio)**

$$E = \frac{B}{C} = \frac{107,933}{119,957} = 0.90$$

원심탈수기와 벨트탈수기의 비용편익분석에 있어 비용(Cost)은 원심탈수기가 119,957천원/년, 벨트탈수기가 150,438천원/년으로 원심탈수기의 총 비용이 적은 것으로 분석되었다.

편익(Benefit)은 원심탈수기 가동에 따른 기대 효과로 슬러지 Cake함수율 저감, 운영인원 절약, 약취저감 시설 배제 등의 금전적 가치를 이익으로 산출하고, 탈수 약품 증가에 따른 손실을 비용으로 적용 시 총 107,933천원/년의 이익을 얻었다.

따라서, 비용편익분석으로 편익/비용비율(B/C Ratio) 산정결과, 0.90으로 경제성이 낮은 것으로 분석되었으나, 본 실험에서 경제적 타당성 기준으로 계량화된 편익만을 적용하였으므로 계량화되지 않은 편익(간접효과) 적용 시 경제적 타당성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

3.3. 최적의 슬러지 처리공정 평가

앞서 Table 2의 슬러지 처리공정의 슬러지 특성(TS,

Table 9. Improvement of sludge treatment process

하수처리시설	생·잉여슬러지		농축방식		소화 여부	탈수방식		비고 처리용량 (m ³ /일)
	혼합 농축	분리 농축	중력 농축	원심 농축		벨트 탈수기	원심 탈수기	
A	-	○(변경)	-	○(변경)	-	-	○	25,000
B	○	○(추가)	-	○(변경)	○(개선)	○	○(추가)	130,000
C	-	○	○	○	○(개선)	○	○(추가)	170,000
D	-	○	○	○	○	○	○	982,500

VS%)과 Cake 함수율(%)분석을 통한 각 슬러지 처리공정의 처리효율 및 그에 따른 비용편익 분석을 바탕으로 처리장 규모별 최적의 슬러지처리 공정을 Table 9에 제시하였으며, 본 연구과제에서 최적의 슬러지 처리 공정으로 D처리장이 가장 적합한 것으로 평가되었다.

4. 결 론

공공하수처리시설의 슬러지 처리방식별 처리효율분석과 비용편익분석(CBA)을 이용한 경제성 평가를 통하여 최적의 슬러지 처리공정을 제시하여 슬러지 감량을 유도한 연구결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 슬러지 처리방식별 처리효율 분석

중력농축 및 원심농축방식에서는 원심농축방식이 고형물회수율과 슬러지농축율에서 2배 이상 높았으며, 농축 및 소화 후 탈수 방식에서는 소화 후 탈수방식이 39.7%의 슬러지 감량율과 1/2적은 탈수약품을 사용하였다.

벨트 및 원심탈수방식에서는 탈수 Cake함수율이 원심탈수가 79.1%로 벨트탈수(81.7%)보다 양호하였으나, 약품사용은 1.3배 더 소비하였으며, 소규모 하수처리장(A)일수록 더욱 소비량이 증가하는 경향을 나타내었다.

(2) 비용편익분석(CBA)에 위한 경제성 평가

슬러지 처리공정별로 구분하여 투입되는 비용(Cost)과 그에 따른 기대효과인 편익(Benefit)의 비율(B/C Ratio)로 경제적 타당성을 분석한 결과, 원심농축방식 **3.0**, 소화 후 탈수방식 **2.45**로 비용적인 측면과 효율적인 측면에서 1.0이상의 높은 경제적 타당성을 확보하였다.

한편, 원심탈수방식은 **0.90**으로 경제적 타당성 기준

(1.0)보다 낮으나, 비 계량화된 간접효과를 적용할 경우 경제적 타당성 확보가 가능 할 것으로 평가되었다.

(3) 최적의 슬러지 처리공정 평가

생슬러지는 기존의 중력농축조를 이용하고, 잉여슬러지는 인의 재 용출을 방지하기 위해 원심농축기로 분리농축을 실시하며, 소화방식에 있어서는 초기투자비가 과다하므로 신규설치 보다는 기존의 소화조 개선사업을 통하여 처리효율(소화효율)을 향상시킬 필요가 있다.

탈수방식은 원심탈수방식의 경제적 타당성(B/C Ratio)이 0.9이하로 낮으나, 비 계량화된 간접효과(악취 저감, 운전의 편리성, 적은 인력투입, 저농도 탈리여액 등)를 적용할 경우, 경제적 타당성확보가 가능할 것으로 판단된다.

앞으로, 하수슬러지 처리공정의 신설과 처리효율 개선 및 노후화로 시설을 교체 할 경우에는 본 연구 결과가 충분히 활용되어 슬러지 처리효율 향상과 경제성 확보에 도움이 되기를 기대하며, 하수슬러지의 처리 및 처분의 궁극적 최종 목표인 슬러지 감량화와 안정화를 통한 최종 부산물의 자원화에 부단한 연구가 이루어져야 할 것으로 평가하였다.

참고문헌

1. 환경부, 2007년도 공공하수처리시설 운영관리 실태조사 결과, 2008, 18~19.
2. 환경부, 유기성오니 처리 종합대책, 2006, 1~11.
3. 환경부, 공공하수도시설 유지관리실무 지침서, 2005, 4-1~4-3.
4. 환경부, 수질오염공정시험기준, 2001. 188.
5. 환경부, 공공하수도시설기준, 2005. 690.
6. 환경부, 공공하수도시설기준, 2005. 572.