

하수슬러지 처리방법별 환경성 및 경제성 분석에 대한 연구(Ⅱ) - 경제성 분석 중심으로 -

이동진, 이수영, 권영현, 조윤아, 배지수[†]

국립환경과학원 환경자원연구부

A Study on Environmental and Economic Analysis for Each Treatment of Sewage Sludge(Ⅱ) - Results of Economic Analysis -

Dongjin Lee, Suyoung Lee, Younghyun Kwon, Yuna Cho, Jisu Bae[†]

National Institute of Environmental Research, Environmental Resource Research Department

(Received: May 10, 2016 / Revised: Jun. 9, 2016 / Accepted: Jun. 13, 2016)

ABSTRACT: This study investigated the environmental and economical assessment for sewage sludge treatment options including biogasification, incineration, carbonization, drying, and solidification. Considering B/C ratio for an anaerobic digestion treatment, for 270,000 m³/d (over 1,150 m³/day), B/C was 1, as the moisture content increased to 95 %, B/C was 1 for 100000 m³/d (capacity of 400 m³/day). Anaerobic digestion+solidification was the most economically feasible, then Anaerobic digestion+incineration and anaerobic digestion+drying were the next economically feasible and then anaerobic digestion+carbonization was the least economically feasible.

If anaerobic digestion efficiency was improved to 45%, the treatment costs for anaerobic digestion+carbonization, anaerobic digestion+incineration and anaerobic digestion+drying were decreased to 3,000~5,000 won/t and the costs for anaerobic digestion+solidification was decreased to 2,000~3,000 won/t due to increasing of the beneficial cost of the biogas production.

Keywords: sewage sludge, economical assessment, environmental assessment, anaerobic digestion

초 록: 본 연구는 바이오가스화 처리 유·무에 따라 하수슬러지 처리방법별, 즉 소각, 탄화, 건조, 고형화 등에 대한 환경성 및 경제성 분석을 실시하였다. 혐기소화에 대한 B/C분석에 대하여, 하수처리장 시설규모 270,000 m³/d (하수슬러지 처리규모 1,150 m³/day)에서 B/C가 1이 되었다. 함수율을 95 %일 경우, B/C는 하수처리장 규모 100000 m³/d (하수슬러지 처리규모 400 m³/day)에서 1이 되었다. 혐기소화 + 고형화가 가장 경제성이 있었으며, 다음으로는 혐기소화 +소각과 혐기소화 + 건조였으며, 혐기소화 + 탄화가 가장 경제성이 약한 것으로 분석되었다. 유기물 분해율을 45 % 까지 증대시킨 경우 혐기소화를 시키지 않는 경우보다 혐기소화를 하여 후처리를 하는 경우가 처리비용이 3,000 - 5,000 원/톤 감소하고, 다만, 고형화로 후처리 하는 경우는 처리비용이 2,000 - 3,000 원/톤 감소하는 것으로 분석되었다.

주제어: 하수슬러지, 경제성 평가, 환경성 평가, 혐기소화

3.3. 하수슬러지 처리 기술의 경제성 분석

3.3.1. 경제성 분석 방법론

3.3.1.1. 경제성 분석방법 이론

비용편익분석(Cost - Benefit Analysis)은 하수 슬러지 처리 및 최종처분까지의 모든 비용을 분석하고, 발생한 편익도 분석하는 것이다. 주로 장기간에 걸쳐서 투자되고 회수되는 것을 현재의 시점에서 평가하기 위해서 들어간 모든 비용과 편익을 현재가치로 환산해 평가하게 된다.¹²⁾

비용편익을 위한 경제성 분석은 크게 편익/비용 비율, 순현재가치(Net Present Value), 내부수익률(Internal Rate of Return), 생애주기비용(Life Cycle Cost) 등으로 평가하게 된다. 편익/비용의 비율 ≥ 1이거나, NPV ≥ 0, 또는 IRR이 예정하는 할인율(R)보다 크면 타당한 것으로 판단하게 된다.¹³⁾

경제성 분석을 위해서 2012년 기준 운영 중인 공공하수처리시설에서 혐기성 소화조시설을 가동하고 있는 시설과 미설치된(미가동시설 포함) 시설을 대상으로 하였다. 공공하수처리 시설용량 100 천톤/일 이하인 경우는 20 천톤/일 단위로 구분하여 2개소 이상을 선정하였다. 경제성 분석을 위한 대상시설은 공공하수처리 시설용량 100 천톤/일 초과되는 경우는 250 천톤/일 단위로 구분하여 2개소 이상을 선정하기로 하고, 공공하수처리시설에 설치되어 가동 중인 소화조 시설 57개소 중 33개소를 선정하고, 소화조 미설치(미가동)시설은 선정기준에 준하여 17개소를 선정하였다. 그리고 소화조 가동시설 중 80천m³/일은 많으나 80~1000천m³/일 미만시설은 수가 적어 1개 시설만 조사대상에 포함되었다.

조사를 위해서 선정된 50개 시설에 대해서 2013년 7월에서 11월까지 설문조사를 통해서 운영실태 조사서 수집, 현장방문 조사, 환경부 자료 및 준공



Fig. 11. Methodology of economic analysis.

Table 5. Comparison of economic analysis

분석기법	판 단	장 점	단 점
편익/비용 비율 (B/C)	B/C ≥ 1	- 이해용이, 사업규모 고려 가능	- 상호배타적 대안 선택의 오류 발생 가능
순현재가치 (NPV)	B/C ≥ 0	- 대안 선택 시 명확한 기준 제시 - 장래 발생 편익의 현재 가치 제시 - 한계 순현재 가치 고려 - 다른 분석에 이용 가능	- 이해의 어려움 - 대안 우선순위 결정 시 오류 발생 가능
내부수익률 (IRR)	IRR ≥ r	- 사업의 수익성 측정 가능 - 다른 대안과 비교가 용이 - 평가 과정과 이해가 용이	- 사업의 절대적 규모를 고려하지 않음 - 몇 개의 내부수익률이 동시 도출될 가능성 내재

도시 등을 활용하여 2010년에서 2012년까지 3년간의 자료를 수집하였다.

Table 6은 공공하수처리시설에서 하수처리장 용량별 소화조 유·무 시설수를 나타낸 것으로 대부

분 하수처리시설용량 10 만톤/일 이상의 중대형 공공하수처리장에 소화조 시설이 설치되어있다.

대상 시설 50개 중 3곳은 자료가 부족하여 제외하고 47개를 대상으로 경제성 분석을 수행하였다.



Fig. 12. Field research methods used in the economic analysis.

Table 6. Capacity of surveyed facilities

(단위 : 개)

시설용량 (천m ³ /일)	소화조 시설	소화조 없는 시설	소 계	비 고
500 이상	4	—	4	
250 ~ 500 미만	6	2	8	
100 ~ 250 미만	3	3	6	
80 ~ 100 미만	1	2	3	
60 ~ 80 미만	7	2	9	
40 ~ 60 미만	5	2	7	
20 ~ 40 미만	6	4	10	
20 이하	1	2	3	
합 계	33	17	50	

Table 7. Treatment methods and regional areas of surveyed facilities

구분	소 화						계	소각	건조	탄화	고화	민간 위탁	Total
	소각	건조	탄화	고화	민간 위탁	계							
시설수 (개)	6	5	3	11	5	30	4	2	3	3	5	47	
서울 1	부산 4	인천 2	경기도 18	강원도 3	충청북도 4	충청남도 2	전라북도 3	전라남도 2	경상북도 4	경상남도 5	대구 2		
서남	강변	가좌	성남	군포	강릉	청주	전안	익산	남해	김천	진주	신천	
	남부	남향	역곡	박달	속초	충주	서산	정읍	나주	안동	삼천포	북부	
	북산		석수	안산	삼척	제천	삼례	상주	경산	화곡	장유		
	동부		용인	기흥	속천	죽전		경산		장유	밀양		
			구갈	동북									
			장당	안성									
			부곡	과천									
			일산	벽제									
			동두천	원능									

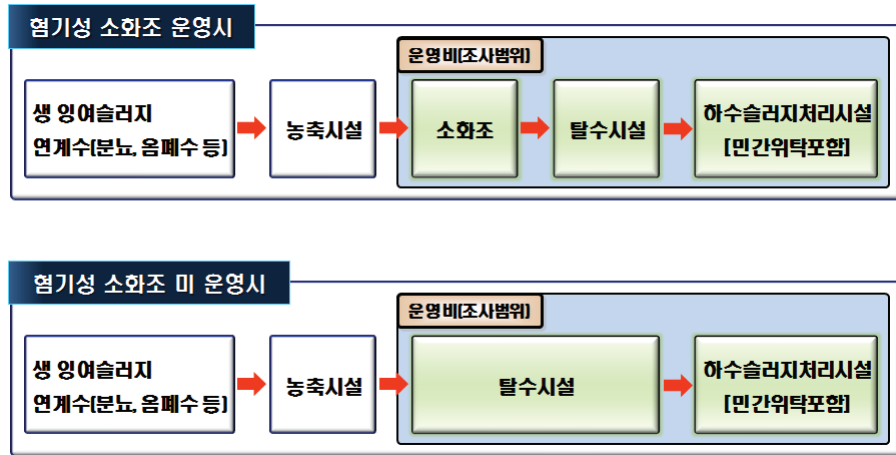


Fig. 13. Range of economic analysis.

3.3.1.2. 하수슬러지 처리비용 분석을 위한 항목 및 조사방법

슬러지처리 계통은 소화조로만 이루어진 것이 아니라 다양한 단위공정으로 구성되어 있기 때문에 보다 효율적인 경제성 분석을 위해 경제성에 대한 범위의 분할이 필요하다. 경제성 분석 분할 범위는 슬러지 처리계통 중 소화조만을 경제성 분석하는 방법과 소화조 있는 시설과 다른 처리방법들을 경제성 분석하기 위해서는 소화조와 탈수케익 최종처분을 같이 분석하는 방법으로 구분하였다.

실태조사 자료를 바탕으로 비용항목과 편익항목

으로 구분하여 분석을 진행하였다. 비용항목의 개별 항목은 건설비, 인건비, 전력비, 개보수비, 슬러지처분비, 환경비용으로 구분하였고, 편익비용은 소화가스 편익으로 분석하였다.

3.3.1.3. 비용항목 산정방안

인건비는 하수처리장 전체 인건비에 전체 운영인원 중 슬러지 계통 또는 소화조 운영 등의 인원 비율을 곱하여 산출하였다.

전력비는 공공하수처리장의 대상시설을 직접 방문하여 준공도서(기본 및 실시설계 보고서, 부록)를

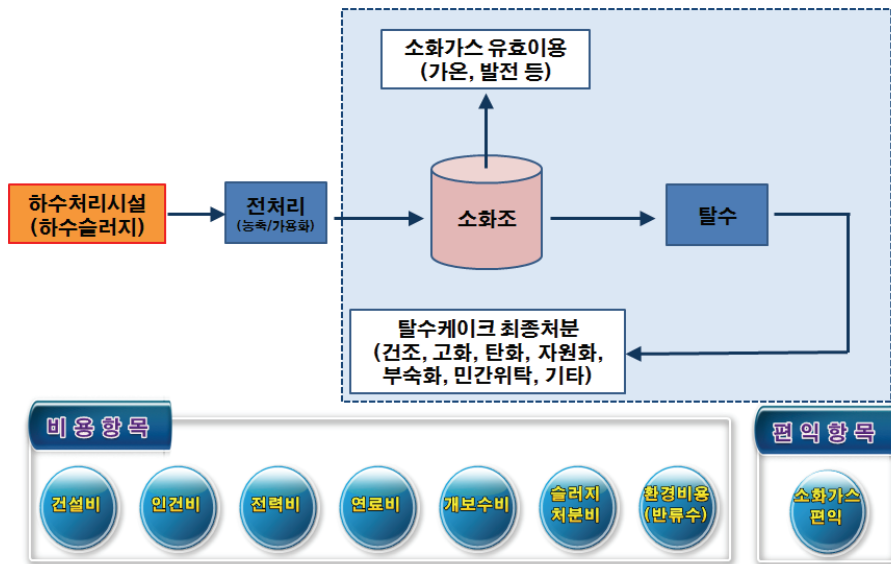


Fig. 14. Items for economic analysis of sewage sludge item processing system the entire.

Table 8. The calculated measures of each cost items

비용항목	산정방안	산정근거
소화시설 설치비	환경부 자료중 신설 소화조 용량 별 건설비 관계로부터 산정	환경부 2030 연구보고서
인 건 비	하수처리시설 슬러지 처리계통 관련 인건비만 산출	실태설문조사 기입 및 문의
전 력 비	전체 전력비 중 슬러지 처리계통 관련 전력비만 산출	실시설계보고서(준공도서) 전력산출 집계표
슬러지 처리비	건조, 소각, 탄화, 고화 등 탈수케이이크 최종 처분비	실태설문조사 기입 및 문의
연 료 비	소화조 가온에 활용하는 연료비	실태설문조사 기입 및 문의
약 품 비	슬러지 탈수에 필요한 약품비	실태설문조사 기입 및 문의
개보수비	대수선/ 소수선 비용	소화조관련 보수비, 실태조사시 문의
환경비용	반류수 처리 비용	반류수 영향에 의한 비용
최종처분시설 설치비	부지내 탈수케이이크 최종처분시설 설치비	실태설문조사 기입 및 문의

조사하여 설비별 전력소요량을 구분하여 전체 전력 소비량 중 슬러지 처리계통 또는 소화조 전력량의 비율을 적용하여 산정하였다.

슬러지처분비는 탈수케이이크의 최종 처분비로 소각, 탄화, 건조 등 여러 가지 슬러지 최종 처분까지 소요되는 금액을 산정하고, 두 가지 이상의 최종 처분 방안을 채택한 처리시설의 경우, 각 처리방법별 처리량 만큼씩을 비용으로 합산하였다. 2012년 이전 슬러지 최종 처분방법이 해양투기였던 처리시설의 경우, 해양투기 대신 다른 처분방법을 채택한 2012년 처분비 자료를 사용하였으며, 해양투기가 기존 슬러지 최종 처분방법이 아니었던 처리시설의 경우, 최근 3개년 처분비 평균으로 산정하였다.

약품비는 슬러지 처리계통에 사용하는 약품비를 산정하였고, 개보수비는 실태조사서에 나타난 슬러지 처리 계통의 소화시설 및 탈수시설의 대수선 및 소수선 비용을 합하여 산정하였다.

연료비는 소화조 가온에 필요한 연료 사용에 따른 비용으로 산정하고, 소화조 발생 소화가스 전량을 소화조 가온에 사용할 경우, 등가에너지에 해당하는 LNG양의 가격으로 환산하였고, 소화조 가온에 소화가스 외에 다른 연료를 추가로 사용할 경우, 소화가스의 등가에너지에 해당하는 LNG양의 가격과 추가 연료의 사용 금액을 합산하여 산정하였다.

환경비용은 소화처리 후 발생에 따른 하수처리

비용으로 폐수 내 BOD 처리비용으로 산정하였다.

슬러지 최종 처분시설 설치비는 하수처리시설 부지 내에 있는 슬러지 최종 처분시설의 설치비로 슬러지 처리 계통 경제성 검토에만 사용하였다. 슬러지 케이이크의 외부 민간 위탁 처리의 경우, 최종 처분비에 처분시설의 설치비가 포함되어 있다고 가정하였다.

소화조 건설비 산정을 위해 환경부와 한국토지공사 공동 발간한 “주택단지 내 상수·오수 발생량 원단위 산정 및 하수처리시설 소요비용 연구”에서의 산정 방법을 적용하였다¹⁴⁾.

현재 가동하고 있는 소화시설의 운영기간은 평균 15년이상 오래되었고 당시의 설치비 자료가 대부분 부재한 실정이다. 그래서 자료에 있는 11개 시설에 대한 사업비의 회귀분석에서 도출된 비용함수식으로 사업비를 산출하였다. 일반적인 비용함수식 형태는 $Y=A \times (\text{용량})^B$ 이나 B가 1에 가까워지면 선형으로 나타난다. 결과적으로 시설용량이 커짐에 따라 사업비 증가분은 점차 감소하는 경향을 나타낼 수 있는 형태의 비용 함수식으로부터 소화시설 사업비를 산출했다.

$$\text{설치비} = 366.36 \times (\text{시설용량})^{0.7577}$$

산출식에 사용한 시설은 아래표와 같다.

Table 9. The installation cost of digester in 11 facilities

시설명	굴포	신천	안산	남부	익산	통북	제천	정읍	밀양	삼례
하수처리 시설용량 (천m ³ /일)	900	680	534	340	100	75	70	58.6	30	32
소화조 용량 (m ³)	82,776	39,412	17,500	21,000	10,000	2,828	7,234	3,215	4,008	2,124
소화조 설치비 (백만원)	63,436	51,297	42,713	30,339	12,003	9,652	9,160	8,006	4,820	5,062

3.3.1.4. 편익항목 산정방안

편익비용은 소화가스의 유효이용에 따른 편익비용으로 소화조에서 발생하는 소화가스를 모두 소화조 가온에만 사용하고 있을 경우에는 소화가스 발생량을 등가 에너지에 해당하는 LNG 양의 가격으로 환산하여 사용하였다. 소화조 가온에 사용하고 남은 소화가스를 다른 용도(발전, 기타 등)로 사용할 경우에는 소화조 가온에 사용한 소화가스량은 등가 에너지에 해당하는 LNG 양의 가격으로 환산하여 사용하였다. 소화조 가온 외에 사용한 소화가스량은 사용 형태에 따라 변환효율 등을 적용하고 해당 에너지 형태의 단가를 적용하여 산정하고 발전의 경우, 발전효율을 적용하여 소화가스로부터의 발전량을 구한 후 매전단가를 곱하여 산정하였다.

Table 10. Calculation method of benefit items

편익항목	산정방안	산정근거
소화가스 이용편익	소화가스 발생량을 등가에너지의 LNG량으로 환산	소화조가온 및 발전활용 자료 발전효율 제곱후 매전단가를 곱함

3.3.2. 비용·편익 산정

3.3.2.1. 경제성 분석의 가정 및 한계점

경제성 분석을 하는 대에는 비용 및 편익 항목 자료들을 수집하는데 가정이나 제한적인 한계점이 있다. 비용 항목에서는 우선 건설비 산정시 기존 환경부 문헌을 이용하여 비용함수식을 구하여 사용했는데, 실제 하수처리장 건설이 턴키사업으로 진행될 때에는 서로 다른 낙찰률 등으로 인해 실제 건설비는 본 연구에서 제시한 비용이 차이가 발생할 수 있다. 운영비에서도 하수처리 운영비에서 슬러지 처

리계통 비용 또는 혐기성 소화조만의 비용을 별도로 관리하는 사업체가 없기에 본 연구에서 사용되는 실태조사표 또는 현장방문 조사 자료가 참값과 차이가 발생할 수도 있다. 소화조 가온에 필요한 연료비는 바이오가스를 전량 가온에 사용한 것으로 가정하였고 모자란 부분만큼만 별도의 열원을 사용한 것으로 가정하여서 추정하였다. 이는 바이오가스를 가온에 사용한 연료비를 별도로 비용으로 산정하는 시설은 없었기 때문이다.

편익 항목에서 최종 처분비 절감액을 산정시 탈수케이크 발생량, 탈수 전 슬러지의함수율, TS, VS, 소화효율 등 항목에 대하여 실측한 것도 있지만 불충분한 경우는 평균 가정치를 사용하였다. 환경 편익 항목으로는 최종 배출수에서 COD 저감량만큼을 감안하여 주었으나, 실제적으로는 다른 많은 오염원들의 반영을 처리 방법별로 하지는 못하였다.

3.3.2.2. 비용·편익 산정

3.3.2.2.1. 운영비

소화조를 운영하는 경우 슬러지 처리비는 소화처리하고 남은 소화슬러지 처분비가 전체 비용의 약 70% 정도를 차지하며 약품비와 연료비가 각각 10% 내외를 차지하고 있다. 톤당 처리비에 사용된 슬러지는 탈수한 후에 발생하는 탈수케익슬러지가 아니라 소화조에 투입되는 슬러지 투입량으로 하였다. 슬러지 투입량은 탈수율이 80~83% 정도로 이루어지는 것을 감안할 때 탈수케익슬러지량의 약 9배 정도에 해당된다. 환경비용은 탈수하고 배출되는 말단부분에서 실측한 생화학적 산소요구량을 톤당 처리비를 감안하여 산출하였다. 그 비용은 운영비에서 매우 미미한 것으로 계산되었다. 슬러지 톤

당 운영비는 시설용량과 운영에 따라서 다르게 나타났다.

소화조를 운영하지 않고 슬러지를 소각, 탄화, 건조, 고화 등 처리를 하는 경우는 슬러지 처분비가 소화조를 운영하는 경우보다는 높게 나타나고 있다. 전체 운영비에서 슬러지 처분비가 차지하는 비용도 70~80 % 정도를 소화조 운영시 슬러지 처분비보다 높게 나타났다. 물론 슬러지 처분비가 연료비나 개·보수비용도 포함되어 있어서 높게 나타나는 경향도 있다.

3.3.2.2.2. 편익

소화조 운영에 따른 소화가스 편익은 톤당 총운영비의 약 5~20 % 정도로 발생되고 있다. 이 편익은 시설마다 다른 소화효율을 감안하여 산정되었다. 소화가스를 소화조 온도를 중온이나 고온으로 유지하기 위하여 사용된 경우 연료비 감소분이 발생되므로 운영비중 연료비에서 소화가스 편익만큼을 차감해주어 이중 편익으로 계산되지 않도록 하였다.

Table 11. Comparison of costs for various sewage sludge treatment options (with Anaerobic digestion treatment).

(단위 : 원/톤)

최종처분 형태	시설	슬러지계통 유입총량 (m ³ /년)	탈수케익량 (톤/년)	인건비	전력비	약품비	연료비	슬러지최종 처분비	개보 수비	환경 비용	슬러지톤당 비용합계 (건설비제외)	소화가스 편익	순톤당 처리비
소화 + 탄화	D-1	269,192	31,294	382	780	1,160	1,010	9,100	-	0.16	12,432	1,010	11,422
	D-2	222,298	25,842	566	528	835	3,266	11,243	23	0.16	16,462	3,266	13,196
	D-3	47,286	4,877	1,776	120	342	561	15,366	55	0.12	18,220	561	17,659
소화 + 고화	D-4	811,656	94,355	397	257	1,268	1,305	3,301	-	0.16	6,528	2,040	4,487
	D-5	241,750	28,103	1,090	302	1,115	1,128	2,275	208	0.16	6,118	2,589	3,530
	D-6	612,736	71,231	354	214	1,115	1,265	3,173	-	0.16	6,121	2,487	3,634
	D-7	97,530	11,338	539	224	554	1,403	8,169	113	0.15	11,003	1,403	9,601
	D-8	32,659	3,797	904	410	351	917	8,805	936	0.15	12,323	917	11,406
	D-9	1,033,785	104,260	272	150	755	890	2,193	25	0.14	4,285	2,367	1,918
	D-10	510,587	59,356	437	588	601	-	1,577	68	0.21	3,271	-	3,271
	D-11	174,927	20,335	727	447	940	-	3,243	202	0.16	5,558	-	5,558
	D-12	34,100	3,715	4,974	2,400	522	817	6,447	168	0.14	15,327	817	14,511
	D-13	104,409	12,138	976	553	2,326	1,377	15,694	-	0.15	20,926	1,377	19,549
	D-14	96,644	7,024	818	490	1,289	1,260	6,309	-	0.09	10,165	1,260	8,905
소화 + 민간위탁	D-15	112,055	13,026	519	631	896	952	4,841	369	0.16	8,210	952	7,257
	D-16	131,112	15,242	564	327	531	718	3,415	240	0.16	5,794	718	5,076
	D-17	145,466	16,368	697	719	737	981	4,446	-	0.15	7,581	1,812	5,769
	D-18	45,984	5,346	1,862	263	250	228	2,265	-	0.15	4,868	228	4,641
	D-19	262,528	20,590	300	246	517	1,755	8,736	36	0.11	11,590	2,914	8,676
소화 + 소각	D-20	1,536,177	178,581	260	306	531	354	2,905	7	0.16	4,363	482	3,882
	D-21	75,858	8,819	1,414	1,262	2,852	1,889	20,149	326	0.16	27,891	1,889	26,002
	D-22	906,723	93,298	310	250	685	290	7,936	-	0.14	9,472	290	9,182
	D-23	401,258	44,748	420	437	2,241	2,113	10,068	43	0.16	15,322	2,113	13,208
	D-24	143,518	12,726	507	133	347	162	3,132	10	0.12	4,292	2,594	1,698
	D-25	82,550	8,199	584	1,051	1,295	-	11,415	-	0.13	14,346	-	14,346
소화 + 건조	D-26	447,314	49,501	459	209	1,237	2,150	5,015	558	0.15	9,626	2,150	7,477
	D-27	115,780	13,459	1,345	447	1,702	1,268	9,204	115	0.15	14,082	1,268	12,814
	D-28	118,438	12,555	2,429	134	1,556	527	61	468	0.15	5,175	1,770	3,405
	D-29	99,411	9,690	684	317	566	2,541	3,360	6	0.13	7,475	2,541	4,934
	D-30	141,179	15,692	1,366	445	1,107	933	11,762	36	0.14	15,649	941	14,708

Table 12. Comparison of basic costs for various sewage sludge treatment options (without Anaerobic digestion treatment)

(단위: 원/톤)

최종처분 형태	시설명	슬러지계통 유입총량 (m³/년)	탈수케익량 (톤/년)	인건비	전력비	약품비	연료비	슬러지최종 처분비	개보 수비	환경 비용	슬러지톤당 비용합계 (건설비제외)
소각	ND-1	58,732	7,786	1,623	845	1,471	-	14,755	-	0.23	18,694
	ND-2	47,927	7,189	869	848	2,340	-	14,885	-	0.26	18,943
	ND-3	55,158	8,274	2,621	493	1,268	-	10,128	-	0.26	14,511
	ND-4	401,607	60,241	1,099	1,043	3,562	-	13,639	-	0.27	19,343
탄화	ND-5	306,453	32,932	514		2,339	-	15,771	-	0.19	18,624
	ND-6	32,711	4,907	1,925	527	293	-	17,156	-	0.24	19,901
	ND-7	39,404	5,653	861	1,086	888	-	7,077	-	0.26	9,913
건조	ND-8	22,075	3,280	1,731	415	422	-	17,898	-	0.22	20,466
	ND-9	91,529	13,729	1,398	415	1,315	-	17,889	-	0.26	21,017
고화	ND-10	105,386	15,808	1,458	591	1,151	-	4,389	-	0.27	7,589
	ND-11	386,230	54,291	553		1,219	-	7,494	-	0.25	9,266
	ND-12	134,439	20,166	739	196	796	-	2,898	-	0.27	4,631
민간위탁	ND-13	178,171	26,726	761	302	1,471	-	10,660	-	0.27	13,194
	ND-14	34,669	5,200	1,075	590	2,844	-	14,299	-	0.26	18,808
	ND-15	105,495	15,824	358	756	2,350	-	26,879	-	0.27	30,344
	ND-16	40,221	6,033	878	1,125	595	-	10,826	-	0.26	13,424
	ND-17	67,681	10,152	908	627	1,797	-	19,358	-	0.27	22,691

3.3.2.3. 하수슬러지 투입량 대비 슬러지처리 총 비용 항목(건설비 포함)
 하수슬러지 투입량 대비 슬러지처리 총비용은

Fig. 15에서 나타냈다. 소화조 운영한 경우의 총비용은 하수슬러지 투입량이 증가함에 따라서 비용이 감소하는 규모의 경제성이 어느 정도 나타나고 있

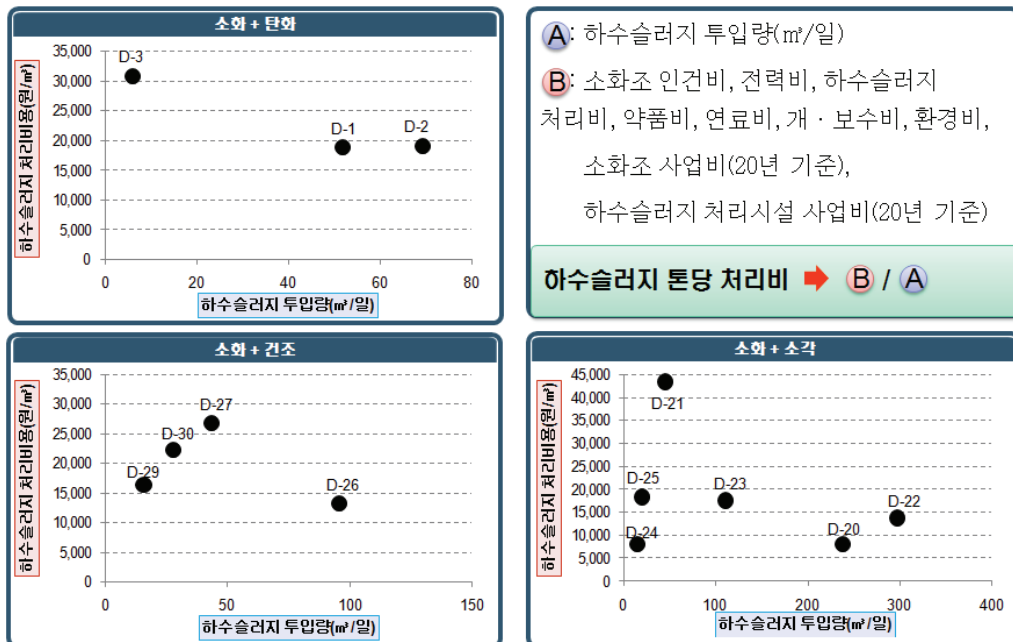


Fig. 15. Treatment costs vs. amount sewage sludge added (continued).

다. 소화조 운영 후에 고화처리하는 경우가 총비용은 가장 저렴하게 나타났으며, 소화 후 탄화처리가 다른 것들에 비해서는 비용이 다소 많은 것으로 나타났다.

소화조를 운영하지 않는 경우의 총비용은 규모의 경제성이 전혀 나타나지 않고 있다. 고화처리의 경

우 총비용은 수도권매립지에서 저렴한 비용으로 위탁처리가 가능하여 낮게 나타나고 있다. 다른 처리 방법들은 소화조를 운영하는 경우의 총비용보다 다소 높게 나타나고 있다. 슬러지 처리용량이 적은 경우임에도 다른 시설의 슬러지와 통합처리 하는 경우가 많아서 비용이 감소되는 경향을 보이고 있다.

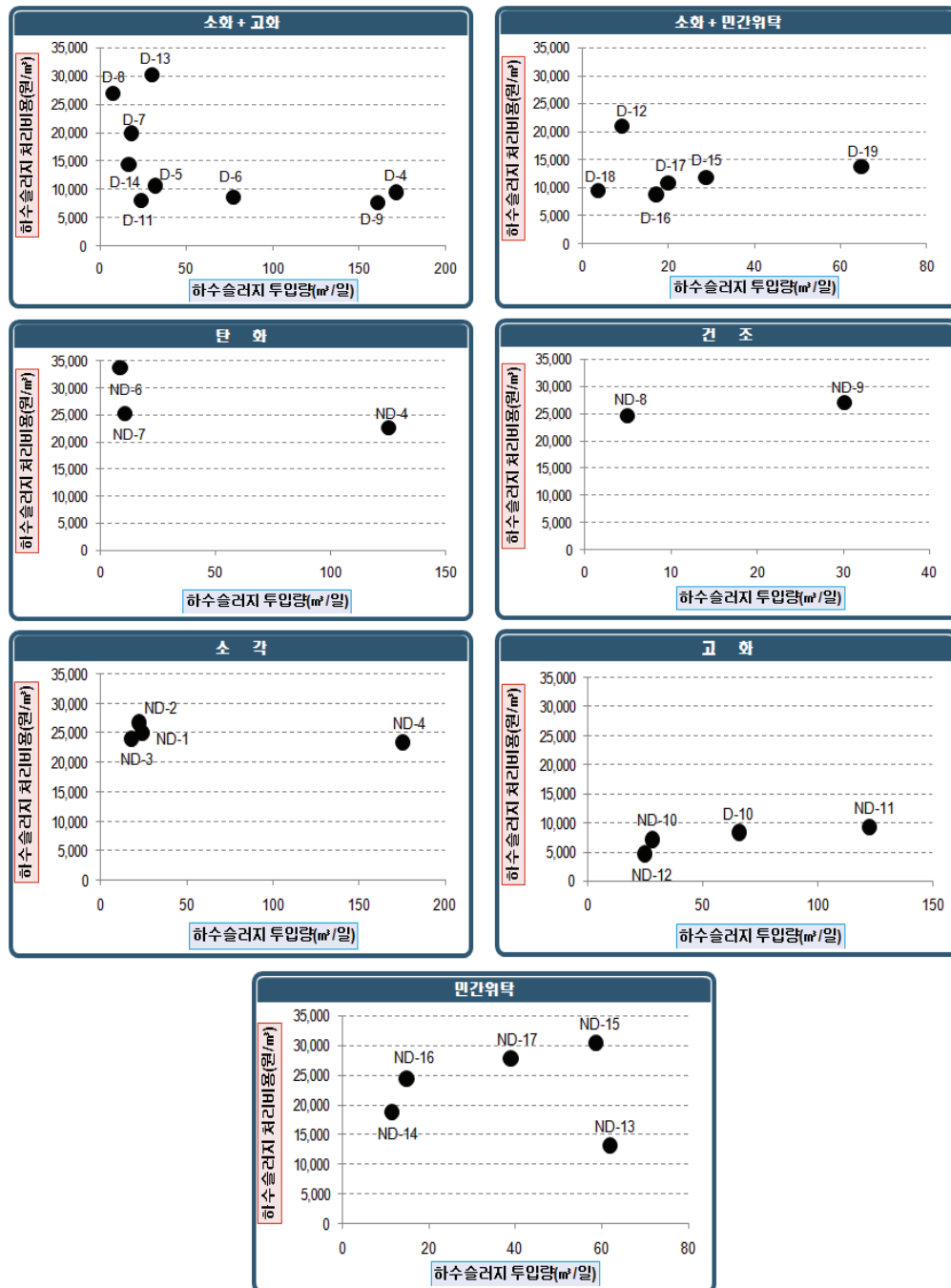


Fig. 16. Treatment costs vs. amount sewage sludge added (continued).

3.3.3. 소화조 설치에 따른 경제성 분석 및 적정 처리량 도출

소화시설의 설치에 대한 B/C 분석을 실시한 결과, 유기물 분해율을 환경부의 에너지자립화에서 추진하고 있는 소화효율 45%를 적용시 하수처리장 처리용량 270,000 m³/일, 소화조 투입 슬러지량으로는 1,150 m³/일 규모에서부터 B/C=1로 되었다. 소화조 투입하는 슬러지를 농축조에서 함수율을 95%로 하여 소화조를 운영하는 경우는 하수처리장 처리용량 100,000 m³/일, 소화조 투입 슬러지량으로는 400 m³/일 규모, 그리고 투입 슬러지의 함수율을 93%로 하여 소화조를 운영할시에는 하수처리장 처리용량 70,000 m³/일, 소화조 투입 슬러지량

으로는 300 m³/일 규모에서부터 B/C=1로 되었다.

B/C 분석에 근거하여 경제성이 있는 시설수는 전체 543개소 중에서 5.2%에 해당하는 28개소이고, 하수슬러지 투입량으로는 전체 발생량 중에서 57.0%에 해당하는 1,831,222 톤/일이다. 슬러지 함수율을 95%로 가정시에는 B/C 분석에 근거하여 경제성이 있는 시설수는 9.8%에 해당하는 53개소이고, 하수슬러지 투입량으로는 전체 발생량 중에서 72.8%에 해당하는 2,339,143 톤/일이다. 슬러지 함수율을 93%로 가정시에는 B/C 분석에 근거하여 경제성이 있는 시설수는 12.2%에 해당하는 66개소이고, 하수슬러지 투입량으로는 전체 발생량 중에서 77.8%에 해당하는 2,498,212톤/일이다.

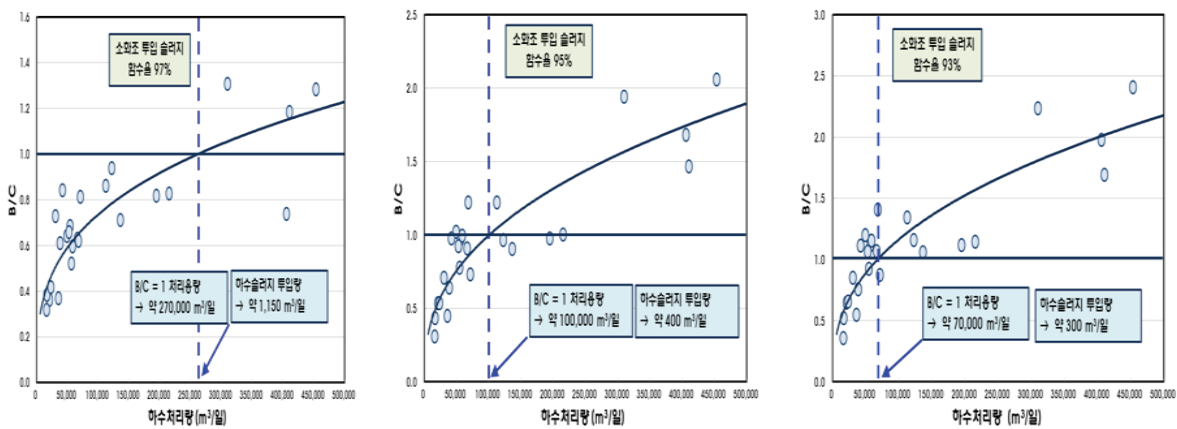


Fig. 17. Anaerobic digestion treatment B/C ratio analysis (digestion efficiency of organic wastes = 45%).

Table 13. Possible capacity of sewage sludge facility using digester

시설 용량	하수처리 시설 시설수 (개)	누적 비중 (%)	하수슬러지 투입량 (톤/일)	누적 비중 (%)
500천톤 이상	12	2.2	1,143,695	35.6
400천톤 이상	5	3.1	252,233	43.5
300천톤 이상	5	4.1	167,023	48.7
270천톤 이상	6	5.2	268,271	57.0
200천톤 이상	2	5.5	41,472	58.3
100천톤 이상	23	9.8	466,448	72.8
90천톤 이상	2	10.1	21,445	73.5
80천톤 이상	5	11.0	59,259	75.3
70천톤 이상	6	12.2	78,366	77.8
60천톤 이상	8	13.6	75,142	80.1
50천톤 이상	10	15.5	69,602	82.3
50천톤 미만	459	100.0	569,380	100.0
계	543		3,212,337	

주) 2012년 공공하수처리시설 운영현황 분석자료

3.3.4. 소화조 운영시 슬러지 처리방법별 경제성 비교분석 (탈수케익 처리 포함)

소화조 운영시의 처리방법별 경제성 비교에서는 소화슬러지를 탄화처리(소화+탄화)하는 경우의 처리비가 높게 나타났으며, 소화슬러지의 소각(소화+소각) 및 건조(소화+건조) 처리의 경우는 비슷한 처리비로 나타났다. 소화조 운영후 소화슬러지의 고화(소화+고화) 처리 경우가 가장 저렴하게 나타났으나, 고화처리의 환경성 및 기술성 분석에서 살펴 보았듯이 고화 복토재 활용시 일축압축강도가 기준치 보다 미만이어서 매립시 작업차량의 주행에 영향을 미치며, 지반하중이 받는 응력이 낮아져 지반 침하가 우려되며 시설의 잦은 고장으로 유지보수가 많은 단점이 나타나고 있다.

유기물 분해효율을 45 %로 향상 시키는 경우에는 소화+탄화처리의 경우가 현행 보다 급격하게 떨어지며 소화+소각 및 소화+건조 처리는 비슷하게 떨어진다. 소화+고화 처리의 경우는 상대적으로 조금 떨어지지만 경제적으로는 가장 저렴하게 나타나고 있다. 농축조에서 슬러지를 함수율 95%와 93%로 떨어뜨려서 소화조 유입시에는 추가적으로 처리 비용이 톤당 5,000~2,000원 및 3,000~1,000원

이 각각 떨어진다. 유기물 분해율과 슬러지 함수율 변화 모든 경우에 경제성은 고화 > 소각 ≒ 건조 > 탄화의 순으로 양호한 것으로 나타났다.

3.3.5. 하수슬러지 처리방법별 경제성 비교분석 종합

하수슬러지 처리에서 소화조 운영 및 미운영시에 처리방법별 경제성 비교 분석을 위하여는 조사 시설수가 함수관계식을 산정하기에는 부족하지만 전수 조사의 물리적 한계 때문에 표본조사를 실시하였다. 이런 조사 결과를 바탕으로 보면, 소화조 운영시 소화슬러지의 소각처리 경우(소화+소각)에는 슬러지 유입량 전체 규모에서 소화조 운영을 하지 않는 처리(소각)보다 경제적인 것으로 나타났다. 또한 소화+건조 처리의 경우도 소화 처리만의 경우보다는 경제적인 것으로 나타났다. 소화+탄화 처리 경우는 보편적으로 탄화 처리만의 경우보다 비용이 더욱 높은 것으로 되었으나 소형의 한 시설에서 비용이 상대적으로 높게 나타나서 생긴 현상으로 보인다. 고화처리의 경우는 대용량을 저렴한 가격에 처리해주는 수도권 소재 시설들에서 매우 낮게 나타났다으며, 또한 부산도 대용량 처리 시설을 갖고 있

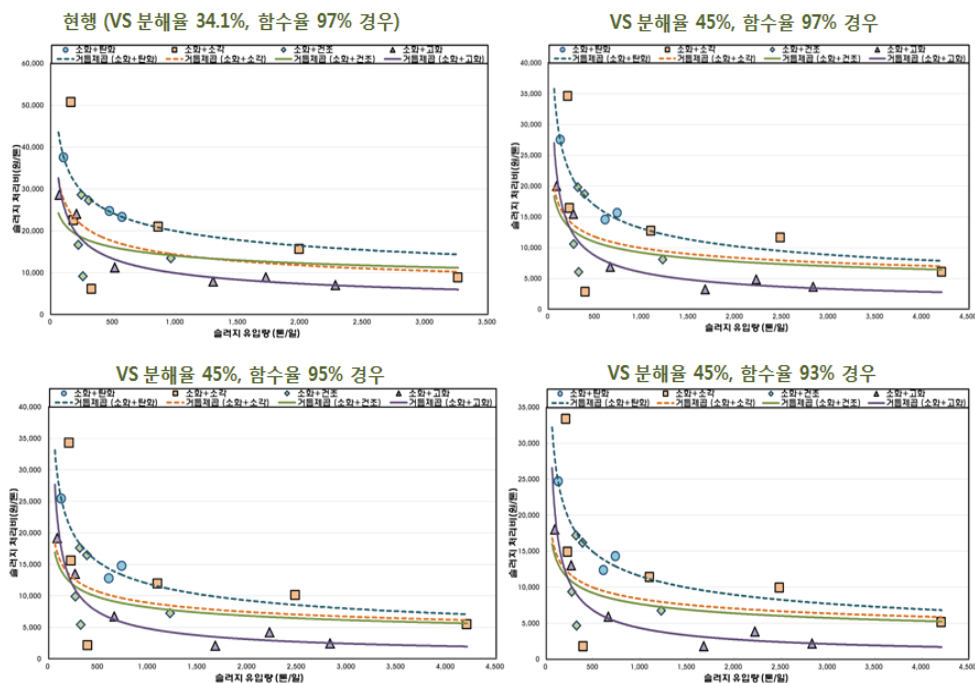


Fig. 18. Comparison of costs for sewage sludge treatment options.

Table 14. Comparison on costs of sludge treatment options for various treatment capacities

(단위: 원/톤)

구분	하수슬러지 투입량 (시설 규모)			
	500톤/일	1,000톤/일	2,000톤/일	3,000톤/일
소화+탄화	25,000	21,500	19,000	18,000
소화+소각	18,500	16,000	14,500	14,000
소화+건조	17,000	16,000	15,000	14,500
소화+고화	14,000	11,000	8,500	7,500

기 때문에 저렴하게 나타났다. 반면 안동, 나주, 정읍 등 별도의 소화 후에 고화처리 시설을 운영하고 있는 경우는 상대적으로 비용이 높게 나타났다. 이러한 소화+고화의 3개 처리시설을 제외하면 고화처리의 경우는 시설규모와 상관없이 비슷한 처리비로 매우 저렴하게 나타나고 있다.

유기물 분해율을 45 %로 향상시켰을 경우의 경제성 분석을 실시한 결과, 소화+탄화, 소화+소각 및 소화+건조 처리의 경우에 바이오가스 생성에 의한 편익 증가로 처리비가 톤당 3,000~5,000원 정도, 소화+고화 처리의 경우 처리비는 톤당 약 2,000~3,000원 정도 낮아졌다.

농축후 슬러지 함유율을 95 %와 93 %로 낮추어서 소화조에 유입하는 경우의 경제성 분석 결과, 소화+탄화 처리의 경우 바이오가스 생성에 의한 편익 증가로 처리비가 함유율 95 %와 93 %에 대해 각각 톤당 약 2,000원과 1,000원 정도 낮아졌다. 소화+소각 처리의 경우 처리비는 함유율 95 %와 93 %에 대해 각각 톤당 500~1,500과 500~1,000원 정도, 소화+건조 처리의 경우 처리비는 95 %와 93 %에 대해 각각 톤당 500~1,000원과 500원 정도 낮아지는 것으로 분석되었다. 소화+고화 처리의 경우 처리비는 함유율 95 %와 93 %에 대해 각각 톤당 약 1,000~2,000원과 500~1,000원 정도 낮아졌다.

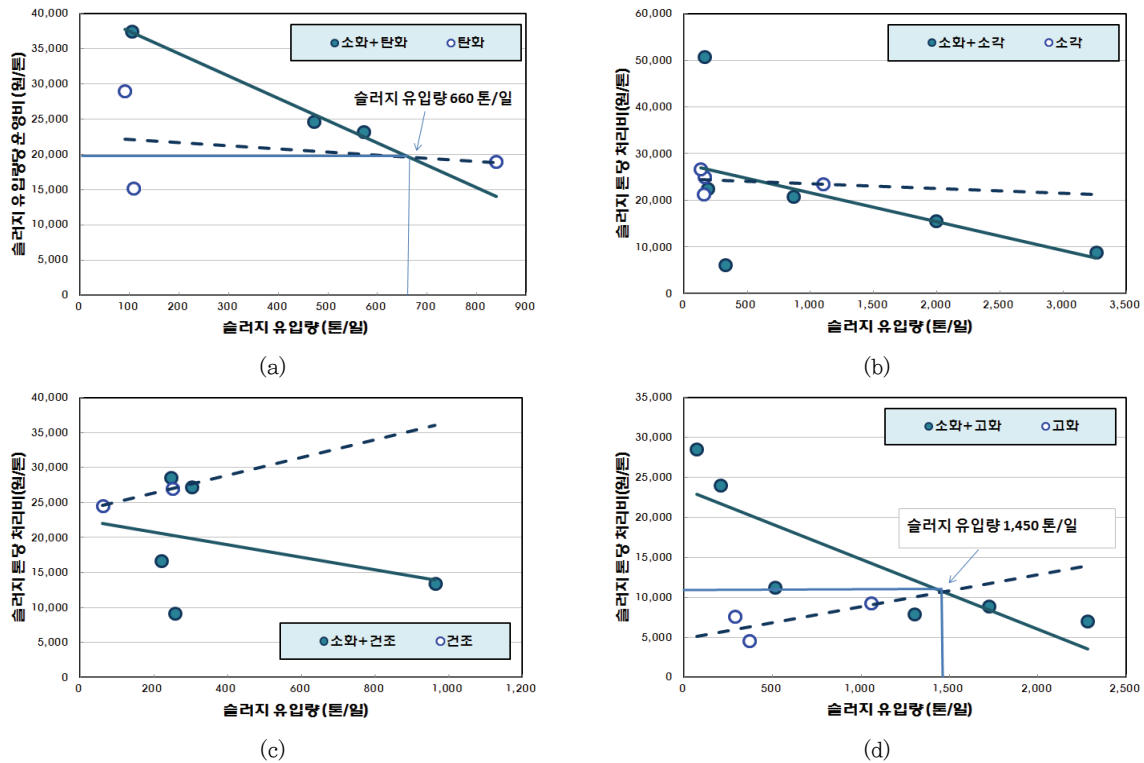


Fig. 19. Comparison of costs per tonnes for sewage sludge treatment options with/without anaerobic digestion treatment (hypothesis: digestion efficiency of organic wastes = 34.1 %, Moisture content of sludge = 97 %).

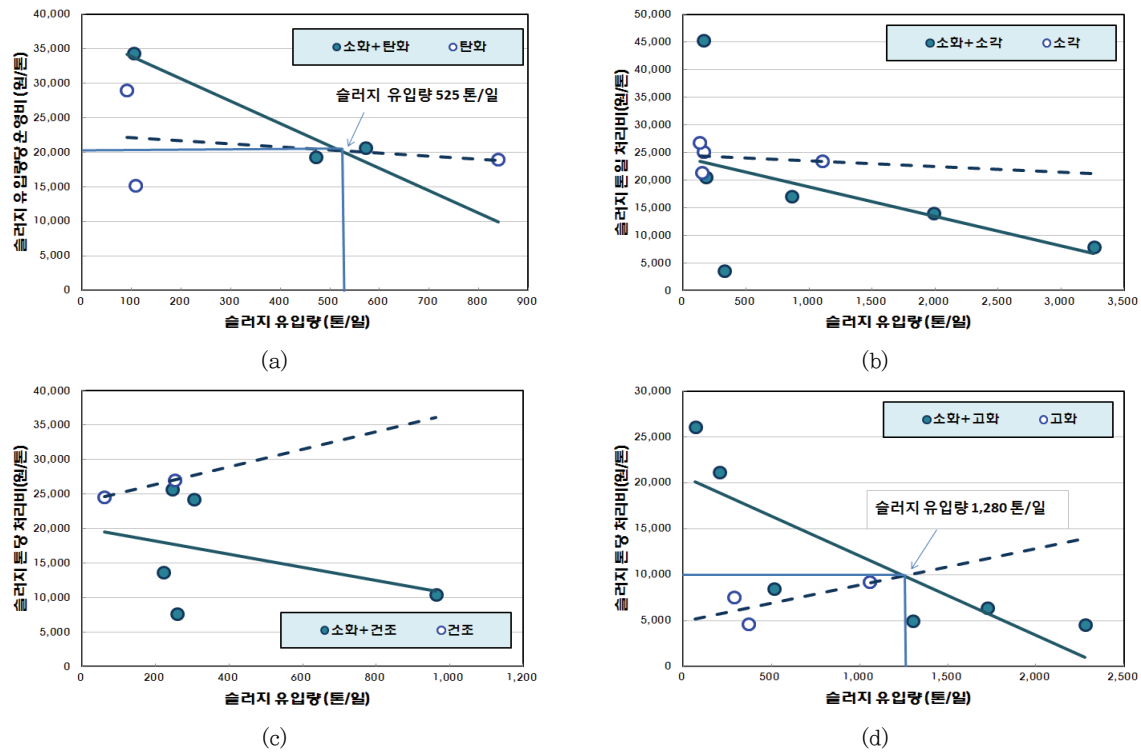


Fig. 20. Comparison of costs per tonnes for sewage sludge treatment options with/without anaerobic digestion treatment (hypothesis : digestion efficiency of organic wastes = 45 %, moisture content of sludge = 97 %).

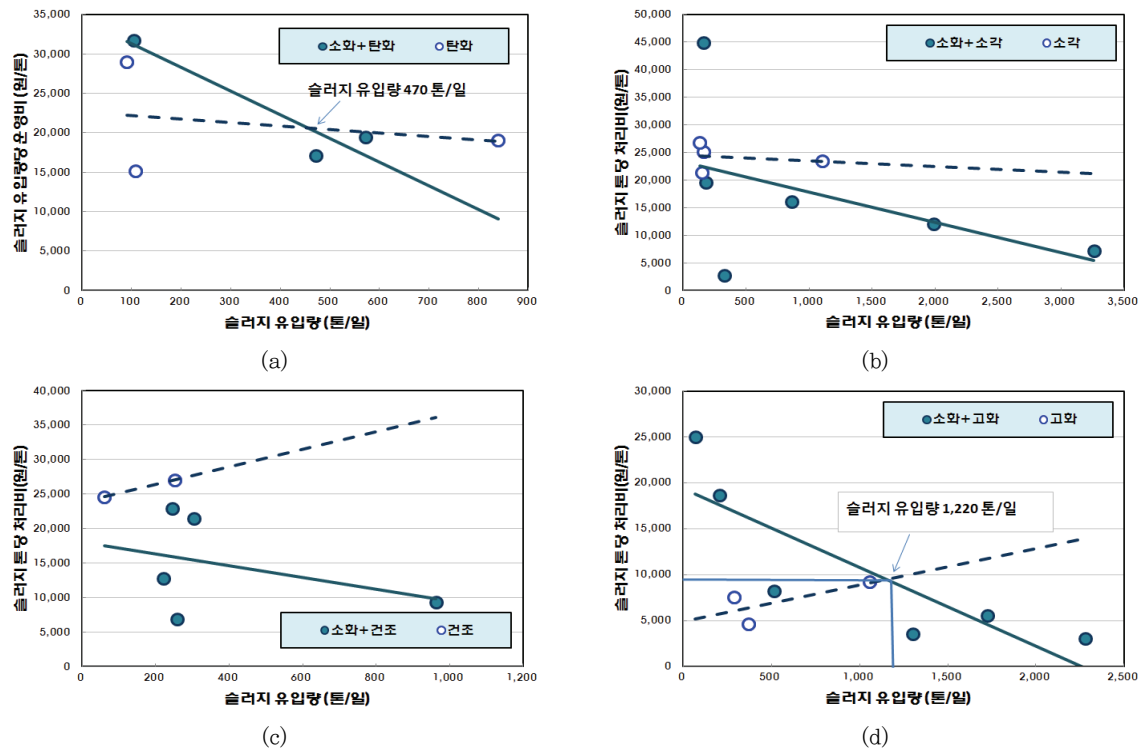


Fig. 21. Comparison of costs per tonnes for sewage sludge treatment options with/without anaerobic digestion treatment (hypothesis : digestion efficiency of organic wastes = 45 %, moisture content of sludge = 95 %).

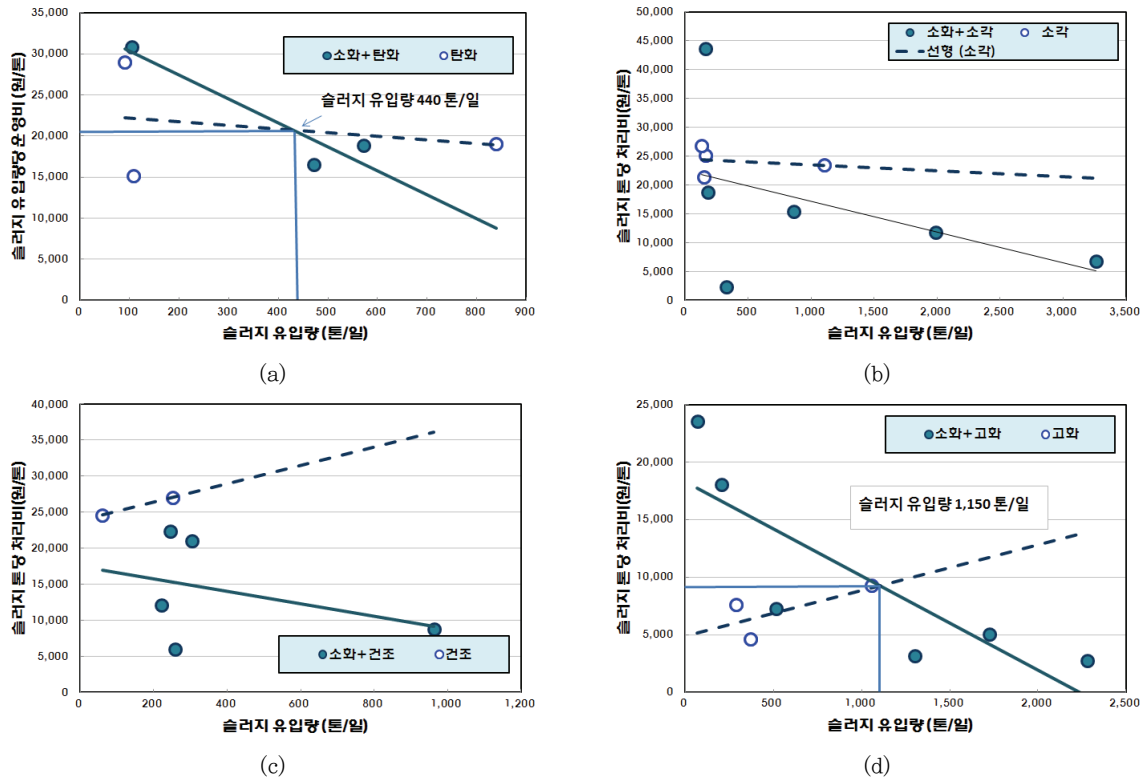


Fig. 22. Comparison of costs per tonnes for sewage sludge treatment options with/without anaerobic digestion treatment (hypothesis : digestion efficiency of organic wastes = 45 %, moisture content of sludge = 93 %).

References

1. Ocean dumping management system, [http://www.oceandumping.re.kr/lundon convention](http://www.oceandumping.re.kr/lundon%20convention), (2013).
2. Korea Ministry of Environment, 2011 Sewer statistics, (2012).
3. Korea Ministry of Environment, Official testing method on wastes, (2012).
4. Buswell, A. M. and Muller, H. F., "Mechanism of methane formation", *Industrial and Engineering Chemistry*, 44, pp. 550~552 (1952).
5. Angelidak, I. and Sanders, W., "Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3, pp. 117~129. (2004).
6. Korea Ministry of Environment, Energy technology on the biogasification, Korean Environment Corporation (2011).
7. Anti, H., Addition of Esters on Anaerobic digestion:

8. Appels et al., "Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge", *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, pp. 755~781, (2006).
9. Yiyang, J., "Biomass-biogas recycling technique studies of municipal food waste disposal: a review", *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 14, pp. 21~55. (2012).
10. Kim, M., "Monitoring of digester optimum and impediment factors in intermediate temperature anaerobic digestion using high-concentration food wastes", *J. Korean Soc. Urban Environment*, 11(2), pp. 161~167. (2011).
11. Lee, J., "Effect of ammonia and salinity in the anaerobic digestion using food waste", *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 19(9), pp. 1185~1192. (1997).
12. Korean Institute of Development Research, An

- research on supplementary revision of general manual of preliminary feasibility plan, (2004).
13. Korea Ministry of Environment, An research on improvement plan of establishment · operation and economic analysis of each livestock excretion treatments, pp. 46~50. (2011).
 14. Korea Ministry of Environment, An research on calculation of unit requirement of water and wastewater in housing area and cost of sewage treatment facilities, Korean Land Corporation (2001).
 15. Park, J., An research on emission characteristic of hazardous air pollution matters in incineration of sewage sludge, National Institute of Environmental Research (2006).
 16. Wang, et al., “Environmental effects of sewage sludge carbonization and other treatment alternatives”, *Energies*, 6, pp. 871~883. (2013).