

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

배지수, 이수영, 조윤아, 권영현, 이동진<sup>†</sup>

국립환경과학원 환경자원연구부

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

Jisu Bae, Suyoung Lee, Yuna Cho, Younghyun Kwon, Dongjin Lee<sup>†</sup>

Environmental Resource Research Department, National Institute of Environmental Research

(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. For the economical feasibility the 30 plants with anaerobic digestion treatment and the 17 plants without anaerobic digestion treatment were investigated. In regarding to the environmental assessment, the air emission pollutants (SOx, NOx, etc) from incineration and carbonization plants were assessed and 1~34 % of emission limits was emitted. Drying and solidification plants emitted about 30 % of odour limits. And the rest of the pollutants were emitted either at not-detectable level or at below the limits. When the by-products from the solidification treatment was used as landfill cover materials, the unconfined compression strength could be below the limit and it could cause an unsafe condition for those passing vehicles and the possibility of the ground subsidence. There has been a maintenance difficulty due to frequent blockage and operational failure. The result of the comparison of sewage sludge treatment options showed that anaerobic digestion+incineration was the most economically feasible considering incineration and drying. For smaller treatment capacity, solidification was the most economically feasible considering carbonization and solidification and anaerobic digestion+carbonization was the most economically feasible considering carbonization and solidification.

**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. 환경성 분석에 대하여, 소각 및 탄화로부터의 대기오염물질은 기준치의 1~34 % 수준으로 배출되고 있었다. 건조 및 고형화는 악취 기준치의 30 % 정도 배출되고 있었다. 나머지 오염물질들은 검출되지 않거나 기준치 이하에서 관리되고 있었다. 고형화에서 부산물은 매립지 복토재로서 사용될 때, 일축강도가 기준치보다 못미쳐서 차량 통해서 불안전하고 토양유실의 가능성이 있다. 또한 고형화는

<sup>†</sup> Corresponding Author (e-mail: dongj7@korea.kr)

빈번한 공정 막힘과 운전 중단 등의 어려움이 많은 것으로 조사되었다. 결과적으로, 환경성 및 경제성을 고려할 때 혐기소화 이후 후처리로 소각 또는 건조하는 경우가 가장 타당한 것으로 분석되었으며, 후처리로 탄화처리하는 경우가 가장 타당성이 적은 것으로 분석되었다. 고회화 처리는 가장 경제적이었으나 환경적 및 운전성이 부족하여 타당성이 부족한 것으로 분석되었다.

주제어: 하수슬러지, 경제성 평가, 환경성 평가, 혐기소화

### 3.4. 하수슬러지 처리 기술의 환경성 분석

#### 3.4.1. 환경성 분석 방법론

3.4.1.1. 하수슬러지 소화조 유·무의 환경부하 비교  
하수슬러지 처리시설에서 소화조 시설이 있는 시설과 없는 시설을 대상으로 [Fig 23]와 같이 탈수를 지나서 나온 슬러지의 BOD를 측정하였다.

#### 3.4.1.2. 처리방법별 환경성 고려인자

본 연구에서 고려하였던 4가지 하수슬러지 처리 방법은 탄화, 소각, 건조, 그리고 고회화 처리방법이다. 조사 대상시설은 2개소의 하수슬러지 탄화처리 시설, 5개소의 소각시설, 2개소의 건조시설, 1개소

의 고회화시설이다.

#### 3.4.1.2.1. 탄화

슬러지 등 유기성폐기물을 가열하여 노 (furnace) 내에서 수분 및 가스등이 발생하고 잔재물에는 무기물이 남는 기술이다. 공정도에서 볼 수 있듯이 탄화과정에서 나오는 악취물질을 연소처리를 통해서 제거하고 그 때 발생된 열을 이용하여 건조공정에 이용하고 있다. 1차건조 과정에서 발생하는 악취와 방지시설에 배출되는 대기오염 물질이 환경성 영향으로 고려할 인자이다. 탄화부산물은 발전소 및 시멘트 소성로 연료로 사용 가능하다.

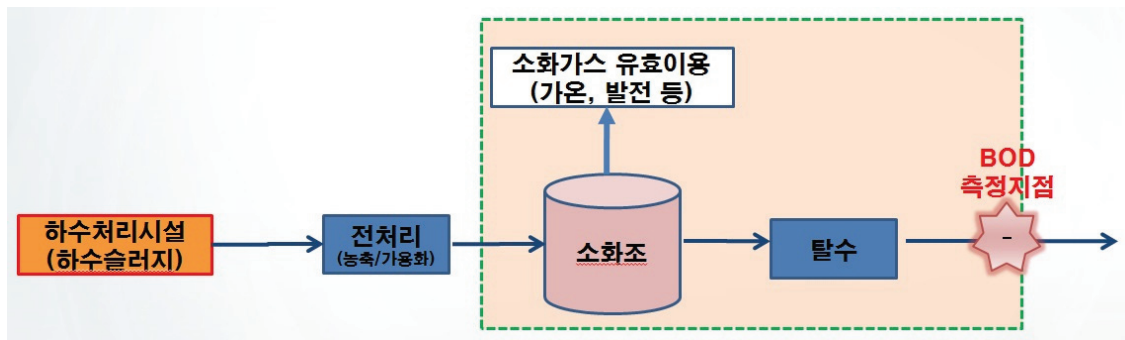


Fig. 23. Schematic diagram of the BOD measurement point.

Table 15. Environmental assessment parameters for four treatment processes

처리방법	시설	환경성 고려인자
탄화	2개소의 하수슬러지 탄화처리시설	대기오염물질/악취물질
소각	3개소의 하수슬러지 전용소각시설 1개소의 하·폐수슬러지 혼합소각시설 1개소의 생활폐기물과 혼합소각시설	
건조	2개소의 하수슬러지 건조시설	
고화	1개소의 고회화시설	악취/악취물질

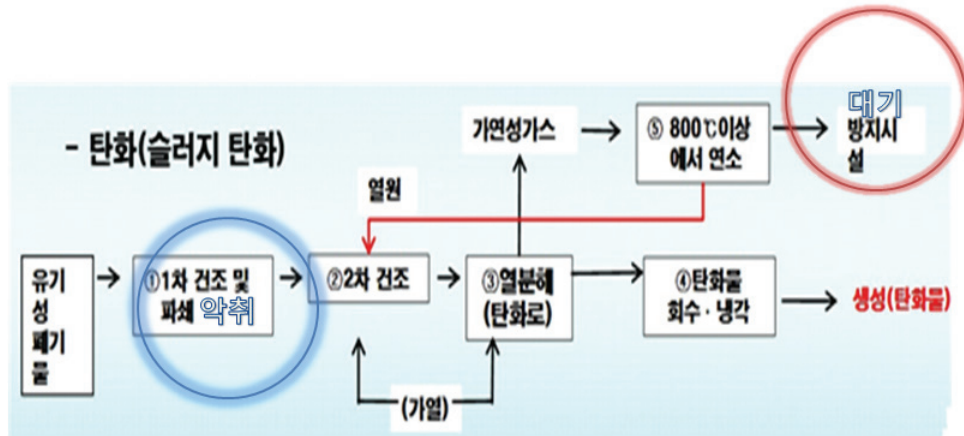


Fig. 24. Schematic diagram of carbonization process and the environmental assessment parameters.

3.4.1.2.2. 소각

소각처리는 슬러지내 가연성 성분을 단시간 내에 연소시켜 감용, 분해하고 안정화 시키는 기술이다. 공정도에서 볼 수 있듯이 소각처리를 통해서 나오는 대기오염 물질과 약취 물질이 환경성 영향으로 고려할 인자이다.

3.4.1.2.3. 건조

슬러지내 수분을 직접 또는 간접방식으로 열을 접촉시켜 수분을 제거하는 기술이다. 공정도에서

볼 수 있듯이 건조시설에서 환경적 영향을 주는 요인은 약취이다. 건조시설의 부산물은 발전소 및 시멘트 소성로 연료로 사용된다.

3.4.1.2.4. 고화

무기질 혼합재료를 고화공정의 첨가제로 사용하여 하수슬러지 고화물을 제조하는 기술이다. 공정도에서 볼 수 있듯이 고화처리를 통해서 나오는 약취 물질이 환경성 영향으로 고려할 인자이다.<sup>15)</sup>

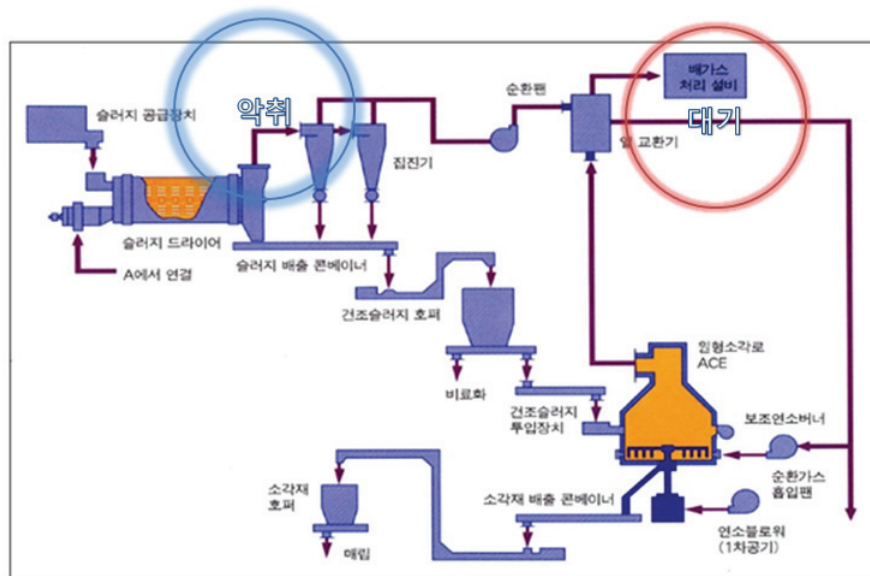


Fig. 25. Schematic diagram of incineration process and the environmental assessment parameters.

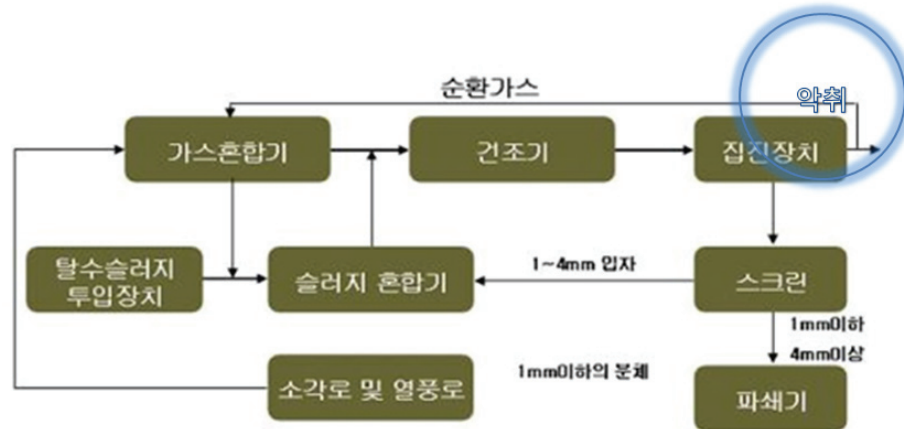


Fig. 26. Schematic diagram of drying process and the environmental assessment parameters.

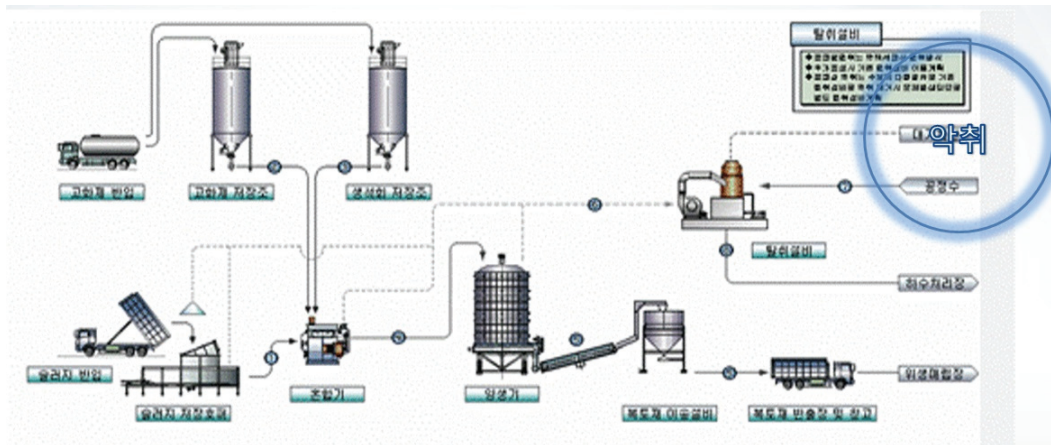


Fig. 27. Schematic diagram of solidification process and the environmental assessment parameters.

### 3.4.2. 4종류 처리방법별 환경성 분석 결과

#### 3.4.2.1. 처리방법별 환경성 결과

##### 3.4.2.1.1. 소각시설

국내 5개소의 하수슬러지 소각시설의 일반 대기 오염물질의 결과를 [Table 16]에서 보여주고 있다.<sup>15)</sup> A ~ D 시설은 유동상 소각로를 운영하고 있으며, E 시설은 스토커 소각로를 운영하고 있는 상황이다. 공정상으로 소각공정은 유지관리가 다른 시설 보다 용이하며 감량효과가 우수하여 보관 부피면에서 효과적인 공정이다. 배출허용기준과 비교하면 먼지는 최대 22 %에서 4 %까지 범위에 있고, NO<sub>x</sub>는 기준대비 34~6 % 범위안으로 배출된다. SO<sub>x</sub>는 기준대비 1~27 % 범위안에서 배출되고,

HCl은 기준대비 0.1~0.8 % 범위로 배출 되었다.

환경성영향에 대한 고려인자인 하수슬러지로 부터의 중금속 함량, 소각재와 대기배출에서의 중금속함량 중 본 연구에서는 일반대기오염물질의 결과만을 고려하여 하수슬러지 처리방법에 따른 환경성 분석을 실시하고자 한다.

소각 부산물은 장기보관이 가능하고 부산물 (시멘트 원료, 건설 자재)의 활용도가 높아서 폐기물 처리에 효과적이고 부산물의 수요처의 확보가 가능한 장점이 있다. 국내기술도 우수하며 폐열 활용의 가능성이 있어서 재생에너지의 효과를 기대하여 환경적으로 이로운 것으로 조사되었다. 여전히 대기 오염으로 인한 환경영향이 크므로 고도의 기술이 필요하며 방지시설과 관리 시스템 강화를 필요로 한다.

Table 16. Air emission results from incineration plants

구 분		먼 지 (mg/Sm <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)	HCl (ppm)
배출허용 기준		30	50	-	80	30	30
A	전단	17,544.3	12.2	<10	31.0	11.2	1.79
	후단	1.11	11.0	<10	27.0	1.0	0.18
	제거율(%)	99.9	9.8	-	12.9	91.1	89.9
B	전단	26,953.3	8.3	<10	23.7	11.0	0.40
	후단	2.21	6.3	<10	11.2	8.0	0.12
	제거율(%)	99.9	24.1	-	52.7	27.3	70.0
C	전단	1,429.1	3.2	<10	24.6	198.6	2.75
	후단	4.2	3.1	<10	8.4	0.3	0.24
	제거율(%)	99.7	3.1	-	65.9	99.8	91.3
D	전단	46,259.1	4.9	<10	19.3	13.6	6.12
	후단	6.7	3.7	<10	7.7	3.4	0.08
	제거율(%)	99.9	24.5	-	60.1	75.0	98.7
E	전단	1,076.0	6.8	<10	18.4	14.2	0.16
	후단	5.8	6.0	<10	5.1	1.0	0.05
	제거율(%)	99.5	11.8	-	72.3	92.9	68.8

\* 국립환경과학원, 하수슬러지 소각시설에서의 유해대기오염물질 배출특성 연구, 2006

3.4.2.1.2. 탄화시설

[Table 17]에서 G 하수 슬러지 탄화시설의 일반 대기오염물질과 악취 결과를 보여주고 있다. 탄화 시설은 배출기준이 정해져있지 않고, 소각시설의 배출기준에 준하여 관리되고 있다. 배출설계기준 대비 먼지는 10 % 범위내에서, CO는 25 % 범위내에서, NO<sub>x</sub>는 5 % 범위내에서, SO<sub>x</sub>와 HCl은 1 % 범위내에서 배출되었다.

일반적으로 탄화시설의 방지시설은 습식 세정탑과 SNCR 탈질 설비와 백필터를 갖추고 있다. 탄화

시설의 장점은 대기오염물질 및 악취등 2차 환경오염유발을 최소화 있고, 발생가스가 비교적 무해하며 배출량도 작아 환경적으로 다른 시설에 비해 우수한 것으로 보고된다.<sup>16)</sup>

공정상으로 감량효과가 우수하여 보관 부피면에서 효과적인 공정이다. 탄화 부산물은 장기보관이 가능하고 부산물 (시멘트 원료, 연료, 토양개량제, 활성탄원료)의 활용도가 높아 폐기물 처리에 효과적이다. 또한 폐열 활용의 가능성이 있어 재생에너지의 효과를 기대할 수 있다.

Table 17. Air emission results from carbonization plant - Plant G

항목	단위	배출허용기준	배출설계기준	평균배출농도
먼지	mg/Sm <sup>3</sup>	80	10	1.0
CO	ppm	200	60	15
NO <sub>x</sub>	ppm	150	60	3.15
SO <sub>x</sub>	ppm	70	10	1.0
HCl	ppm	40	10	1.0
악취	도	2	1	-
다이옥식	ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>	5	0.1	0.008

출처: G하수처리장, 2010년 조사자료.

3.4.2.1.3. 건조시설

국내 2개소의 하수슬러지 건조시설의 악취물질의 결과를 [Table 18]에 나타내었다. 건조시 발생하는 악취로 인한 환경영향이 있으며, 부산물을 에너지로서 활용할 수 있는 수요처를 구해야한다. 건조공정 중의 대기오염발생은 보통 수준인 것으로 보고

된다.

건조시설에 대한 환경영향 물질 중 복합악취는 기타지역 부지경계선 기준(희석배수)대비 20~47 % 범위내에서, 지정악취물질 중 암모니아는 9 % 수준이고, 황화수소는 50 % 수준이다. 나머지 악취물질은 불검출이다.

Table 18. Results of odor substances in drying plant of sewage sludge

구분	구분	배출허용기준(ppm)	
		공업지역	기타지역
복합악취(희석배수)	배출구	1000	500
	부지경계선	20	15
지정악취물질	암모니아	2	1
	메틸머captan	0.004	0.002
	황화수소	0.06	0.02
	다이메틸설파이드	0.05	0.01
	다이메틸다이설파이드	0.03	0.009
	트리메틸아민	0.02	0.005
	아세트알데히드	0.1	0.05
	스타이렌	0.8	0.4
	프로피온알데히드	0.1	0.05
	뷰티르알데히드	0.1	0.029
	n-발레르알데히드	0.02	0.009
	i-발레르알데히드	0.006	0.003

\* 배출허용기준의 측정은 복합악취를 측정하는 것을 원칙으로 한다. 다만 사업자의 악취물질 배출 여부를 확인할 필요가 있는 경우에는 지정악취물질을 측정할 수 있다. 이 경우 어느 하나의 측정방법에 의하여 기준을 초과한 때에는 배출허용기준을 초과한 것으로 본다.

Table 19. Odour results from drying plant H, I

	시험항목	시험결과	시험항목	시험결과 (ppm)
Plant I	복합악취(희석배수)	3	복합악취(희석배수)	3
Plant H	복합악취(희석배수)	7	-	-
	암모니아	0.09	톨루엔	0.008
	황화수소	0.01	자일렌	불검출
	메틸머captan	불검출	메틸에틸케톤	0.001
	다이메틸설파이드	불검출	메틸아이소뷰티르케톤	불검출
	다이메틸다이설파이드	불검출	뷰티르아세테이트	불검출
	트리메틸아미	불검출	프로피온산	불검출
	스타이렌	불검출	N-뷰티르산	불검출
	아세트알데히드	불검출	N-발레르산	불검출
	프로피온알데히드	불검출	i-발레르산	불검출
	뷰티르알데히드	불검출	i-뷰티르알코올	불검출
	N-발레르알데히드	불검출	i-발레르알데히드	불검출

자료: 한국종합플랜트, 2012년 조사자료, 녹색기술연구소, 2010년 조사자료

Table 20. Odour results from solidification plant J

시설	시험항목	시험결과	시험항목	시험결과 (ppm)
Plant J	복합악취(희석배수)	144	-	-
	암모니아	0.7	톨루엔	0.0313
	황화수소	불검출	자일렌	0.0018
	메틸머captan	불검출	메틸에틸케톤	0.0663
	다이메틸설파이드	0.0001	메틸아이스부티르케톤	0.0008
	다이메틸다이설파이드	0.009	뷰티르아세테이트	0.0009
	트리메틸아미	0.0004	프로피온산	0.0004
	스타이렌	0.0006	N-뷰티르산	0.0003
	아세트알데히드	0.018	N-발레르산	불검출
	프로피온알데히드	불검출	i-발레르산	0.0001
	뷰티르알데히드	0.098	i-뷰티르알코올	0.0033
	N-발레르알데히드	0.0037	i-발레르알데히드	0.0005

자료: 수도권매립지, 2012년 조사자료

3.4.2.1.4. 고화시설

하수슬러지 고화시설의 악취물질의 결과를 [Table 20]에서 보여주고 있다. 고화시설은 유기성오니와 고화제를 혼합하여 처리하는 시설로 건설비가 저렴하고, 대량으로 처리가능하나 공정상 막히거나 정지되는 등 조작이 어렵고, 매립지 복토재사용 논란이 있고, 악취 발생으로 환경적 영향을 준다.

고화시설에 대한 환경영향 물질 중 복합악취는 기타지역 배출구 기준(희석배수)대비 29 % 수준이고, 지정악취물질 중 암모니아는 공업지역 주변지역 기준 35 % 수준이고, 황화수소는 불검출이다. 나머지 악취물질은 낮게 분석되었다.

하수슬러지를 고화시설에서 처리하여 그 부산물을 복토재로 활용하고 있다. 일축압축 강도 실험에서 기준치 0.5 kgf/cm<sup>2</sup> (양생3일)보다 기준치 이하로 조사되었다 [출처: 포스코건설/기술연구소]. 이는 매립 작업시 작업차량의 주행에 악영향을 미친다. 지반하중이 받는 응력이 낮아져 지반침하 우려가 제기되는 것으로 조사되었다. 일축압축강도 실험에서 기준치 1 kgf/cm<sup>2</sup> (양생7일) 보다 5개 시료 중 2개가 기준치 이하로 나탄났다 [출처: 전자재시험 연구원]. 40 % 고화제를 사용해야 하며, 고화제 투입시 건조 량이 증가하고, 고화제 사용 비용, 고장 및 유지 보수가 잦은 것으로 보고되었다.

3.4.2.2. 종합비교

네 가지 하수슬러지 처리방법별 대기오염물질과 악취 결과를 비교하였다. 하수슬러지 소각시설은 배출오염물질 중 소각로 배출허용기준대비 먼지 22 %, NO<sub>x</sub> 34 %, SO<sub>x</sub> 27 % 범위내에서 배출되고 있고, 탄화기술은 배출 배출기준이 정해져 있지 않고, 소각시설의 배출기준에 준하여 관리되고 있는데, CO 25 %, NO<sub>x</sub> 5 %, SO<sub>x</sub>와 HCl은 각각 1 % 범위내에서 배출되고 있다. 탄화시설은 1시설만 조사되어 소각과 탄화 시설에 대한 환경성 비교는 어려움이 있었으며, 다만 배출허용기준보다는 훨씬 낮은 수준에서 관리되고 있었다.

건조시설 대한 악취/악취물질에 대한 자료를 보면, 부지경계선에서 복합악취는 기준대비 20~47 % 수준으로 지정악취물질 중 암모니아는 기준의 9 % 수준이나, 황화수소는 50 %수준에서 발생하고 있고, 고화시설에서 복합악취는 배출구 기준대비 29 %수준에서 발생하고 있다. 암모니아도 공업지역 주변지역 기준대비 35 %수준으로 발생되고 있다. 조사된 고화시설은 매립지에 위치하여서 부지경계선의 농도는 의미가 없기 때문에 건조와 고화 처리의 악취 부분의 환경성 직접 비교는 한계가 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 하수슬러지 처리에 있어 소화조 운영에 의한 바이오가스화 처리방법이 바람직한지, 바람직하다면 얼마 규모 이상에서 하는 것이 경제적인지를 조사하였다. 그리고 바이오가스화가 경제적이지만 않는 하수슬러지 처리는 소각, 탄화, 건조, 고화 등 4가지 처리방법들에 대한 환경성 및 경제성을 분석하였다.

1. 하수슬러지의 바이오가스화에 대한 경제성 분석 결과(유기물 분해율 45 % 적용시), 하수처리용량 270,000 m<sup>3</sup>/일 이상, 슬러지 투입량 1,150 m<sup>3</sup>/일 이상인 시설에서 경제성(B/C = 1)이 있는 것으로 나타났다. 슬러지 함수율을 현행 97%에서 95 %와 93 %로 적용할 경우에 경제성이 있는 규모는 각각 하수처리용량 100,000 m<sup>3</sup>/일 이상(하수슬러지량 400 m<sup>3</sup>/일 이상) 시설과 70,000 m<sup>3</sup>/일 이상(하수슬러지량 300 m<sup>3</sup>/일 이상) 시설로 분석되었다.
2. 슬러지 함수율을 97 %, 95 % 및 93 %로 적용시에 경제성 있는 하수처리장 시설수는 각각 전체의 5.2%(28개), 9.8%(53개) 및 12.2%(66개)등에 해당되고, 경제성 있는 하수슬러지 처리량은 각각 전체의 57.0%(183만톤/일), 72.8%(234만톤/일) 및 77.8%(250만톤/일) 등이다.
3. 소화조 운영 이후에 발생하는 소화슬러지의 처리방법별 경제성은 소화+고화 > 소화+소각 ≒ 소화+건조 > 소화+탄화 순으로 높게 나타났다. 소화조 운영에서 유기물 분해율을 45 %로 향상한 경우는 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 함수율을 95 %와 93 %로 낮춘 경우는 각각 톤당 500~2,000원과 톤당 500~1,000원 정도 낮아졌다.
4. 하수슬러지의 처리방법별 경제성은 소화 처리하는 경우(소화+소각, 소화+건조, 소화+탄화, 소화+ 고화)가 소화 처리하지 않는 경우

(소각, 건조, 탄화, 고화)보다 대부분 유리하였다. 다만 소규모 처리시설에서는 소화+탄화 처리보다 탄화 처리가, 소화+고화 처리보다 고화 처리가 경제성이 유리한 것으로 나타났다. 소화조를 운영하지 않는 경우의 처리방법별 경제성은 고화 > 소각 ≒ 건조 > 탄화 순으로 높게 나타났다.

5. 하수슬러지 처리에서 소각 및 탄화 전용시설의 대기오염물질(SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등)은 배출허용기준의 1~34 %가 배출되고 있었고, 건조 및 고화 전용시설에 대한 복합악취는 배출허용기준의 각각 약 30 % 정도였다.
6. 하수슬러지의 고화처리에서는 고화처리 부산물을 매립지 복토재로 활용할 경우 일축압축강도에서 기준치 이하로 나타나 작업용 차량주행에 악영향을 미치고 지반침하의 우려가 제기된다. 또한 고화처리는 원료의 공정내 막힘 현상 등 잦은 고장으로 유지보수에 많은 어려움이 있다. 따라서 하수슬러지 고화처리의 적정성은 경제성 뿐만 아니라 환경성 및 기술성 등이 종합적으로 검토되어야 한다.

#### 편집자 주

이 원고는 유기물자원화 24권 2호에 게재된 2편의 원고에 이어 계속되는 3편 중 마지막의 특집원고입니다.

#### References

1. Ocean dumping management system, <http://www.oceandumping.re.kr/london> convention, (2013).
2. Ministry of Environment, 2011 Sewer statistics, (2012).
3. 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. Ministry of Environment, Energy technology on the biogasification, Korean Environment Cooperation (2011).
7. Anti H., Addition of Esters on Anaerobic digestion: inhibiting or boosting biogas production, Master thesis, Chalmers University of Technology, Sweden (1912).
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 of Environment, An research on improvement plan of establishment • operation and economic analysis of each livestock excretion treatments, pp. 46~50 (2011).
14. Korea of Environment, An research on calculation of unit requirement of water and wastewater in housing area and cost of sewage treatment facilities, Korean Land Cooperation (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).