

# 하수 슬러지의 재활용 기준 및 기술

## 1. 머리말

하수슬러지의 발생은 하수처리시설의 증가 및 보급률의 증가와 더불어 지속적인 증가 추세를 보이고 있으며, 기존의 대부분의 슬러지가 매립에 의하여 처리되었으나, 2003년 7월부터 시행되고 있는 하수슬러지의 직매립 금지와 관련되어 향후 이에 대한 처리대책이 시급히 요구되고 있다. 현재 많은 지자체들은 매립처리에 대한 대안책으로 처리비가 비교적 낮고 별도의 시설투자가 필요하지 않은 해양투매로 방향을 전환하고 있다. 그러나 이미 미국에서는 1980년대 슬러지의 해양투기를 금지하였고, 일본의 경우도 일부지역을 제외하고 사실상 슬러지의 해양투기가 금지되어 있으며, 런던조약 등의 국제적인 규제로 인하여 사실상 해양투매는 향후 5년 안에 불가능하여 질 것이라는 것은 기지의 사실이다. 이와 같은 면을 고려할 때 슬러지를 적정처리 하는 일은 매우 중요하며, 향후 하수처리보급을 확대하는 장애요인을 제거하는 중요한 노력이라고 사료된다.

하수 슬러지의 처리에는 중간처리, 최종처리(처분, 재활용)으로 구분지어 생각하여 볼 수 있으며, 중간처리의 경우 잔유물이 존재하여 이 부분을 다시 처분하는 노력이 필요하다. 한편 재활용의 경우 슬러지를 특정형태로 자원화하여 사회로 환원시킨다는 면에서 바람직한 처리의 방법이라고 할 수 있다. 하지만, 이러한 하수 슬러지의 사회적 환원은 환원되어 적용되어지는 사회에 직간접적 오염 및 위생적 위험성 등의 문제점을 발생시킬 수 있는 가능성이 있으며, 이러한 문제에 대한 해결 및 대책이 전제되어야 한다. 결과적으로 슬러지

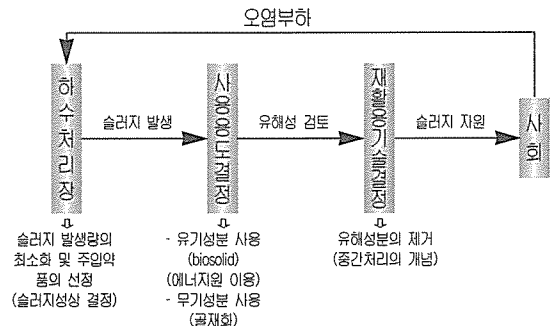


이원준 교수  
여수대학교 건설환경공학부

의 유해성에 대한 평가를 정확히 하고, 이에 따른 문제점을 최소화시키는 기술이 재활용 기술의 대부분이라 할 수 있다.

슬러지를 재활용하는 것은 결과적으로 슬러지를 특정한 자원으로 하여 사회로 환원시키는 작업이므로, 슬러지의 유효성을 보는 시각에 따라 차이점이 존재할 수 있다. 즉 이용하고자 하는 유효자원이 슬러지 중의 유기성분인지, 또는 무기성분인지에 따라 처리의 방법이 결정되며, 이에 따른 처리의 정도 및 중간처리의 필요성이 결정된다. 이러한 점에서 슬러지의 재활용을 위하여 구성성분 및 유해물질의 함유량 등을 고려하여 재활용되는 용도를 결정하고 이에 필요한 기술을 적용하는 것이 필요하다. 다음 그림은 슬러지를 재활용하는 단계를 모식적으로 설명하고 있다.

하수슬러지 재활용을 위한 작업계통도



## 2. 하수슬러지의 위해성

하수슬러지의 위해성은 슬러지 중의 특정물질에 또는 특정미생물에 의하여 결정되는 것으로 재활용을 위하여 적절한 처리를 필요로 하거나, 적절한 관리를 요하는 부분이라고 할 수 있다. 하수슬러지의 위해성을 특정물질에 의하여 발생하는 문제라는 측면에서 보면 대표적인 환경오염 물질인 중금속 및 PCB, 농약류 등이 이에 속한다고 볼 수 있다. 특히 하수슬러지의 중금속의 경우 주된 유해물질로서 농도에 따라 사용용도 및 사용량이 제한되는 경우가 많아 주된 관심의 대상으로 볼 수 있다. 반면, 유기성 유해물질로서 대변될 수 있는 유기염소화합물의 경우, 일반생활에서의 사용이 극히 제한되어 있으며, 슬러지 중에 존재하는 경우가 특정 경우를 제외하고는 미비하다고 할 수 있다. 특정한 미생물의 경우는 주로 유해한 병원균 및 Vector-Attraction 등과 같은 위생적인 면에 영향을 주는 것으로 슬러지를 토양 시비하는 경우와 같이 우리의 생활환경과 직접 관련된다는 면에서 최근 관심이 높아지고 있다.

### 2.1 화학물질에 의한 위해성

유해성을 일으키는 특정물질은 주로 자체독성을 가진 화학물질로서 중금속과 유기염소화합물을 중심으로 하는 유기성 유해물질로 나누어 볼 수 있다. 이 중 특히 중금속의 경우 매우 중요한 의미를 가지고 있으며, 이에 의하여 슬러지의 재활용에 걸림돌이 되는 경우가 많다. 특히 기존의 하수처리장의 유입수 중 일부가 사업장에서 1차 처리를 마치고 방류되는 폐수를 포함하는 경우 중금속의 문제가 심각하게 나타날 수 있으며, 우리의 생활 중에서 사용되는 린스 등과 같은 일부 공산품에도 중금속이 포함된 경우가 있음을 고려할 때 유입수질 관리 및 지속적인 모니터링은 슬러지의 안정적인 재활용을 위하여 매우 중요하다고 할 수 있다. 각각에 대한 위해성을 살펴보면 다음과 같다.

#### < 중금속 기준 >

현재 국내의 경우 하수슬러지를 직접 토양 시비하는 방법에 대한 기준은 마련되어 있지 않으며, 하수슬러지

는 원칙적으로 퇴비화(Composting) 공정을 거쳐 부숙토를 생산하는 것을 기본으로 하고 있다. 이러한 기준에서 원료공급자는 하수슬러지의 공급자이며, 부숙토의 생산자는 하수슬러지를 퇴비화하여 부숙토라는 제품을 만드는 사업자이다. 또한 시비량에 대한 기준이 미비하여 부숙토의 과다시비로 인한 토양 중 질소성분의 과다로 인한 문제가 발생할 수 있는 여지가 있다. 생산된 부숙토 중의 중금속 기준을 살펴보면 다음과 같다. (유기성오니 등을 토지개량제 및 매립시설복토용도로의 재활용방법에 관한 고시, 별표2 및 별표3)

< 표 1 > 부숙토 원료 및 제품기준

(하수 슬러지 기준) 단위 : mg/kg

구 분	등 급		
	가 등급	나 등급	
유해 물질 함량	비소 (As)	50 이하	50 이하
	카드뮴 (Cd)	5 이하	8 이하
	크롬 (Cr)	300 이하	370 이하
	구리 (Cu)	500 이하	750 이하
	납 (Pb)	150 이하	225 이하
	수은 (Hg)	2 이하	3 이하

(부숙토 제품 기준) 단위 : mg/kg

구 분	등 급		
	가 등급	나 등급	
유해 물질 함량	비소 (As)	50 이하	50 이하
	카드뮴 (Cd)	5 이하	8 이하
	크롬 (Cr)	300 이하	이하
	구리 (Cu)	500 이하	750 이하
	납 (Pb)	150 이하	225 이하
	수은 (Hg)	2 이하	3 이하

한편, 일본의 중금속에 대한 기준은 하수 슬러지를 보통비료로 사용하는 경우와 특수비료로 사용하는 경우로 나누어 허가대상을 구분지어 지정하고 있었다. 일반적으로 사용되는 비료는 보통비료로서 토양시비가 허용되는 중금속 함유량에 대한 기준은 다음 표와 같다.

< 표 2 > 하수슬러지를 보통비료로

이용하는 경우 중금속 함유량 기준

중금속의 종류	허용농도 (mg/kg)
비소	50
카드뮴	5
크롬	500
납	100
니켈	300
수은	2

위의 결과에서처럼 일본의 경우 한국과 비슷한 규제를 실시하고 있으나, 니켈을 구리 대신 규제하고 있는 점이 다르다고 할 수 있다. 그러나 규제하는 농도의 범위의 차이는 크게 없었으며, 이는 중금속이 토양에 장기적으로 축적되는 경우에 대한 유해성 평가를 기준으로 설정된 농도라고 볼 수 있다. 다만 지역적 특성(토양의 특성)을 고려하여 규제하는 물질의 차이가 보여진다고 생각되었다.

유럽의 경우를 살펴보면 슬러지를 퇴비로 사용하면서 토양 중 축적되는 중금속의 정도를 고려하여 사용기간에 따른 중금속의 농도를 제한하고 있으며, 이에 대한 기준은 다음 표에 나타나있다.

〈표3〉 하수슬러지를 토양 시비하는 경우의 중금속 제한농도

중금속의 종류	단기적 이용 (mg/kg)	중기적 이용 (mg/kg)	장기적 이용 (mg/kg)
카드뮴	10	5	2
구리	1,000	800	600
수은	10	5	2
니켈	300	200	100
납	750	500	200
아연	2,500	2,000	1,500

한편, 미국의 경우 토양시비를 하는 경우의 중금속 농도를 좀더 구체적으로 구분하여 제한하고 있으며, 한계중금속농도와 중금속오염 농도로 나누어 슬러지를 관리하고 있으며, 축적중금속 오염물질 부하율과 연간 오염물질 부하율을 규정하여 사용방법에 대하여도 구체적인 기준을 준비하고 있다. 이에 대한 기준은 다음 표와 같다.

〈표4〉 토양시비를 위한 중금속 농도 기준

중금속의 종류	한계중금속농도 (절대값) mg/kg	축적 중금속 부하율, mg/ha	중금속 오염농도 (월평균), mg/kg	연간 중금속 부하율, mg/ha·a
비스	75	41	41	2.0
카드뮴	85	39	39	1.9
구리	4,300	1,500	1,500	75
납	840	300	300	15
수은	57	17	17	0.85
몰리브덴	75	-	-	-
니켈	420	420	420	21
셀레늄	100	100	36	5.0
아연	7,500	2,800	2,800	140

위의 기준에서 슬러지 및 처리된 슬러지를 토양시비하기 위해서는 적어도 한계중금속 농도를 초과하지 않아야 하며, 정원 또는 비료로 판매하는 경우에는 중금속오염농도를 초과하지 않아야한다. 또한 슬러지를 시비한 토양의 경우 계속적으로 모니터링을 실시하여 중금속 축적여부를 판단하도록 하고 있다.

중금속의 독성은 일반적으로 식물, 동물, 인체에 대한 독성으로 나누어 생각할 수 있으며, 일부 중금속은 식물 생장에 필수적인 요소로 작용하는 면을 가지고 있으므로 단순히 중금속의 존재 유무 보다는 잔유농도에 의미를 두는 것이 필요하다. 각 중금속의 식물, 동물, 인체에 대한 독성 및 식물생장에 필수요소인지의 여부는 다음 표에 요약되어 있다.

〈표5〉 중금속의 유해성과 식물의 영향

중금속의 종류	식물생장에 요소	독성
비스	아님	식물, 동물, 인체
카드뮴	아님	식물, 동물, 인체
구리	요소	식물
납	아님	동물, 인체
수은	아님	동물, 인체
몰리브덴	요소	식물, 동물, 인체
니켈	요소	동물, 인체
셀레늄	아님	식물, 동물, 인체
아연	요소	동물, 인체

#### 〈유기성 유해물질 기준〉

유기성 유해물질은 주로 농약을 중심으로 규제가 되어 왔다. 이는 특히 농촌과 같은 면오염원으로부터 상당량의 농약이 하수처리장으로 유입되어 슬러지 중에 포함될 수 있는 문제점을 고려한 것이라 할 수 있다. 따라서 주된 규제 대상은 유기염소화합물 계통이며, 이에 PCB, 다이옥신 등이 최근에 많은 관심을 보이고 있다. 이러한 규제의 움직임은 특히 유럽을 중심으로 발전되고 있으며, 유럽의 기준을 살펴보면 아래와 같다.

아래의 기준에서 보듯이 특히 유기 방향족 화합물에 대한 규제가 심하며, 이는 이러한 물질의 발암성 및 축적성이 강하다는 면에서 기인된 것이라고 할 수 있다.

또한 최근 관심이 되고 있는 다이옥신에 대한 규제를 실시하고 있으며, 이는 유럽이 쓰레기의 소각 펄프 밀의 산업의 영향으로 자연 중 및 산업체에서 발생되는

다이옥신에 의한 피해를 줄이기 위하여 시행된 것으로 보여 진다.

〈표6〉 하수슬러지를 토양 시비하는 경우의 유해 유기물질의 규제농도

유해 유기물질의 종류	허용농도 (mg/kg)
할로겐 유기화합물의 총합 (AOX)	500
Linear alkylbenzene sulphonates	2,600
Di(2-ethylhexyl phthalate)	100
NPE(certain nonphenol and nonylphenolethoxylates)	50
PAH	6
PCB	0.8
PCDD/PCDFs	0.1 (Toxic Equivalent)

미국의 경우 슬러지 중의 다이옥신 농도 약 300ppt 를 기준으로 유해성 평가를 실시하였으며, 이는 노출경로를 단순히 모유에 근거를 두고 한 것이며, 독성평가 역시 아이가 아닌 산모를 중심으로 실시되어 유해성 평가에 대한 문제점이 지적되고 있다. 특히 다이옥신의 경우 퇴비화에 의하여 슬러지 중의 다이옥신 농도가 증가한다는 보고가 있으므로 이러한 문제점은 처리방법의 선정 시 고려 되어져야 한다.

### 2.2 병원균 및 Vector-attraction에 의한 유해성

앞에서 본 내용은 주로 토양에 슬러지를 직접 시비하는 경우, 토양에 오염물질이 축적되어 발생하는 식물, 동물, 인체에 대한 장기적 유해성이라고 할 수 있다. 병원균 및 세균에 의한 유해성의 경우, 인체의 노출에 의하여 직간접적으로 감염이 발생하는 단기적이며 직접적인 인체의 유해성이다. 또한 감염이 발생하는 경우도 인체에서 질병을 일으키는지의 여부는 사람에 따라 다르다. 최근 미국의 경우 이러한 병원균에 대한 최소감염 복용량 (minimum infective dose : MID)를 정하였으며, 이는 일반인들에 대한 기준으로서, 노약자, 어린이, 질병자 들에 대한 기준은 정확히 제시되고 있지 않다. 이밖에 토양 시비된 슬러지의 경우 gram-negative bacteria라고 하는 슬러지 중에 일반적으로 작용하는 bacteria가 객체내 독소물질을 대량으로 배출하며, 이밖에 암모니아 등의 화학물질 역시 2차적으로 발생하는 문제점을 가진다. 따라서 미국의 경우 토

양시비를 위한 슬러지의 경우 특별한 처리를 요구하고 있으며, 이렇게 처리된 슬러지는 감염성 및 용도에 의하여 Class A Biosolid와 Class B Biosolid로 나누어진다. 먼저 용도에 따라 보면 잔디, 집의 마당, 포장되어 공급되는 Biosolid의 경우는 Class A에 해당되어야 하며, 이밖에 농업용 또는 비농업용으로 사용되는 경우는 Class B에 해당되어야 한다.

그러나 농업용으로 Classe B를 이용하는 경우 많은 제한이 있다. 따라서 슬러지에 의한 병원균 독성에 대한 기준은 Class A로 구분되는 Biosolid의 기준을 보면 알 수 있다.

### ▶ Class A Biosolid 요구조건

- Fecal Coliform density < 1000 MPN/g total dry solid
- Salmonella sp. density < 3 MPN/4g of total dry solid < (MPN : most probable number )

## 3. 하수슬러지 재활용 기술

하수 슬러지의 재활용은 슬러지를 유효하게 이용하는 방법으로서 여러 가지의 방법이 존재하지만 크게 나누어 토양시비, 건설재료로서 이용, 에너지의 이용으로 나누어 볼 수 있다. 각각의 유효이용 방법은 슬러지의 성상 및 지역적 여건 등에 따라 장단점이 존재할 수 있으며, 일본의 경우는 건설재료 및 에너지의 이용에 비중이 높아가는 반면 미국 및 유럽의 경우는 토양시비에 의한 유효활용이 증가하는 것이 현실이다. 각각의 기술을 살펴보면 다음과 같다.

### 3.1 토양시비 (Land Application)

토양시비의 경우는 하수슬러지 중의 유기성분을 이용하는 것으로 처리장에 따라 다소 차이가 있지만, 대개의 경우 슬러지의 유기성분은 전체 고형물 중 40~80%의 범위를 차지한다. 이러한 차이는 과거 시스템 및 계절적 변화 등의 여러가지 요인에 의하여 달라지며, 국내의 경우 대개 유기성분의 비율이 낮은 편이다. 토양시비하는 경우 평가지표로는 ①위생면, ②안전성 ③퇴비성 ④취급의 용이성 등을 들 수 있다. 이러한 조건을 만족시키기 위한 기술로는 다음과 같다.

- 퇴비화

퇴비화는 하수슬러지를 토양시비하는 경우 가장 일반적으로 적용될 수 있는 기술로서, 퇴비화 과정 중에 유기물이 안정되어지며, 발효과정 중에 발생하는 열로 인하여 병원성미생물 역시 불활성화되는 장점이 있다. 또한 C/N비가 낮아 상대적으로 퇴비화의 속도가 빠르며, 완전히 부숙된 퇴비의 경우 침출수의 COD가 매우 낮으며, 이온교환 능력이 높아져 퇴비로서의 가치를 충분히 가지게 된다. 결과적으로 퇴비화된 슬러지는 유효 성분이라고 할 수 있는 인과 질소를 토양에 공급하는 역할을 한다. 다만, 칼륨 등의 무기영양분은 부족하여 슬러지를 비료로 사용하는 경우 이러한 무기성분에 대한 보충이 필요하다. 최근에는 C/N비가 높아 퇴비화의 속도가 늦지만 칼륨 등의 무기분이 상대적으로 풍부한 축산분뇨와 혼합하여 퇴비화시키는 방법도 연구되고 있다. 그러나 퇴비화는 슬러지의 적정 수분함유율의 유지, 퇴비화 중 발생하는 암모니아 및 악취가스의 발생, 처리비의 고액 등에 대한 과제가 남아있다.

- 직접 토양시비

직접 토양시비의 경우는 미국 및 유럽 등지에서 주로 사용되고 있는 방법으로 슬러지를 적정 처리하여 농지 및 녹지에 살포하는 방법으로, 적정 처리된 슬러지를 Biosolid라 하여 슬러지를 유기자원화하는 개념에서 시작되었다. 퇴비화에 비하여 시간이 적게 소요되며 경제적이라는 장점이 있지만, 위생적인 면에서 많은 논란이 있다. 일반적으로 시비된 Biosolid 중의 병원성 미생물은 Bioaerosol 상태로 호흡기를 통해 인간에 영향을 줄 수 있으며, 피부 등의 접촉을 통하여 감염이 일어날 수 있다고 보고되고 있다. 그러나, 일반적으로 적절히 관리된 Biosolid의 경우 이러한 위험성이 없다는 의견 역시 많은 것이 현재의 추세이다. 이러한 이유로는 미생물의 움직임이 토양에 의하여 물리적으로 방해받으며, 토양입자에 의하여 이러한 미생물이 흡착된다는 면에서 토양자체가 효과적인 여과막이 될 수 있다는 점 때문이며, 또한 토양자체에는 기존에 많은 종류의 미생물들이 번식하고 있어 병원균 등이 생존할 확률이 낮다는 점이다. 따라서 Biosolid의 경우 슬러지에 내포된 위험성(주로 중금속) 및 위생적인 면을 적절히 관리하는

방법이 중요하다. 미국의 경우 1993년도에 공표된 503Rule에 따라 처리된 슬러지 (Biosolid라고도 함)의 토양시비를 허락하는 법률이 공표되었으며, 이에 대하여 Class A와 ClassB Biosolid로 구분하여 구체적인 관리방법이 제시되어 있다.

▶ Class A Biosolid 요구조건

- Fecal Coliform density < 1000 MPN/g total dry solid
- Salmonella sp. density < 3 MPN/4g of total dry solid < MPN : most probable number >

▶ Class A Biosolid의 추가조건으로 다음 중 하나의 처리를 선택

- 가열 : 일정온도를 일정시간이상 가열하며, 기준은 다음 표에 있다.

<표7> 시간 온도에 대한 기준

TS(Total Solid)	온도 (°C)	시간	비 고
≥ 7%	≥ 50	≥ 20 분	작은입자의 가스 또는 액체가열 없음
≥ 7%	≥ 50	> 15초	작은입자의 가스 또는 액체가열 있음
< 7%	> 50	15초~30분	
< 7%	≥ 50	≥ 30분	

- 알칼리 처리 : pH12을 72시간동안, 이때 온도는 52°C이상 최소 12시간, 또한 72시간의 처리 후 50% total solid가되도록 공기건조

- enteric virus/viable helminth ova의 실험 : Biosolid 중의 enteric virus/viable helminth ova의 존재 확인. (PFU-Plaque-forminf unit)

▶ Class A Biosolid 만족조건

- Fecal Coliform 확인 (7 samples)
- Geometric mean of the density <  $2.0 \times 10^6$  MNP/g of TS 또는
- Geometric mean of the density <  $2.0 \times 10^6$  colony forming unit/g of TS

위의 병원성 세균에 대한 저감 방향 및 규제에 추가적으로 Vector-attraction을 최소화 하는 방법이 의무화 되어 있으며, 이러한 방법은 아래와 같은 총 10가지로 들 수 있다.

- 1) Aerobic or Anaerobic digestion : 휘발성분을 38% 이상제거
- 2) Anaerobic digestion : 휘발성분을 38% 이상제거가 불가능한 경우 별도의 Bench-Scale 장치에서 30~37°C로 40일간 가열하여 추가적 휘발성분 감소가 17% 이상이 일어나지 않음을 증명

- 3) Aerobic digestion : 휘발성분을 38% 이상제거가 불가능한 경우 별도의 Bench-Scale 장치에서 20℃로 30일간 가열하여 추가적 휘발성분 감소가 15% 이상이 일어나지 않음을 증명
- 4) Aerobic digestion : specific oxygen uptake rate 을 1.5 mg O<sub>2</sub>/g of TS at 20℃ 만일 만족시키지 못하면 3)의 방법선택
- 5) Aerobic process : 예를 들어 퇴비화의 경우, 40℃이상으로 14일간유지 (단 평균온도는 45℃이상)
- 6) 알칼리 안정화 : 알칼리의 첨가로 pH를 12이상 올리고, 추가적인 알칼리의 투입없이 pH 12이상을 2시간, pH 11.5이상을 11.5시간유지
- 7) 건조 : 안정화 되지 않은 Primary solid를 함유하고 있지 않은 경우 TS를 75% 이상(단 TS를 맞추기 위한 혼합은 인정되지 않음)
- 8) 건조 : 안정화되지 않은 Primary Solid를 포함한 경우 TS를 90% 이상
- 그밖에 9) Injection, 10) Incorporation, 11) surface disposal daily cover, 12) domestic septage treatment 등이 있다. 위의 방법 중 1)~10)은 Class A의 Biosolid의 생산에 사용된다.

한편 Class B Biosolid의 경우는 다음과 같은 요구조건을 만족시켜야 한다.

- ▶ Class B Biosolid 요구조건  
(7개 샘플 중 기하학적 평균치 기준)
- Fecal Coliform density < 2.0 × 10<sup>6</sup> MPN/g total dry solid, 또는
  - Fecal Coliform < 2.0 × 10<sup>6</sup> colony forming unit/g total dry < MPN : most probable number >

<표8> 하수슬러지 성분의 차이 (일본의 예)

	탈수제	유기물 (건조%)	C/N 비	총질소 (건조%)	인산 (건조%)	칼륨 (건조%)	알칼리분 (건조%)
퇴비화 슬러지	석회계	36	9.3	2.0	3.6	0.21	19
	고분자계	53	9.4	2.7	3.2	0.36	6.4
건조 슬러지	석회계	42	8.2	2.7	2.3	0.15	21
	고분자계	56	6.1	4.5	3.6	0.30	3.7
탈수 슬러지	석회계	51	7.9	3.2	3.5	0.21	23
	고분자계	70	6.5	5.2	5.8	0.36	8.1

위의 기준에서 토양시비를 위하여 퇴비화와 건조방법이 일반적으로 사용될 수 있으며, 이에 따른 하수슬러지 성분의 차이를 <표 8>에 정리되어있다.

### 3.2 건설재료이용

건설재료이용의 경우 슬러지 중의 무기성분을 건설재료로서 이용하는 기술로서, 슬러지 중의 유기성분을 사전에 제거하는 처리가 필요하다. 따라서, 건설재료로서 슬러지를 재활용하는 경우 1차적으로 슬러지를 소각하여, 발생된 재성분을 이용하는 방법과 슬러지를 선회식 용융로에 직접 용융시켜 발생된 용융슬래그를 이용하는 방법으로 나누어 볼 수 있다. 이러한 방법은 슬러지의 소각이 일반화되어 있는 일본을 중심으로 실행되고 있으며, 현재 일본의 경우 건설재료로서 슬러지가 재활용되는 비율이 전체의 60%를 넘어서고 있다. 미국의 경우도 대도시를 중심으로 슬러지의 소각비율이 높으나, 소각로의 형식이 주로 다단식소각로이므로 최근 Clean Air Act를 만족시키지 못하는 경우가 증가하고 있어 소각의 비율이 감소하는 추세이며, 대부분의 소각재는 매립되고 있으나, 최근 토질개량재로서의 소각재를 이용하는 부분에 대하여 검토 중이다.

#### - 소각재를 이용하는 방법

소각재를 건설재료로 이용하는 방법은 슬러지의 발생과정에 따라 용도가 달라진다. 즉 슬러지의 탈수공정 등에 석회계의 탈수 보조제가 사용된 경우, 소각 후 남은 소각재에도 칼슘성분이 많아 토질 개량제 및 노반재료로서 재활용되는 경우가 많다. 반면, 고분자계 탈수 보조제를 사용한 경우는 소각재에 알루미늄성분이 존재하므로 벽돌의 제조 및 시멘트의 제조 등에 이용되는 경우가 많다. 특히 최근에는 아스팔트 필러(Asphalt Filler)로 사용되는 경우가 증가하고 있다.

다음 표는 슬러지의 소각 후 남은 소각재의 특성을 요약하였다.

<표9> 소각재의 물성

	비중	함수비	강열감량	특징
석탄계 소각재	2.8 - 3.4	0 - 0.5(건조) 20 - 30, 60 - 80 (가습)	6% 이하	흡수성이 강함 (수화반응)
고분자계 소각재	1.8 - 3.0	0 - 0.5 (건조) 20 - 60 (가습)	3% 이하	알루미늄의 함유량이 15%

〈표10〉 소각재의 조성

석탄계 소각재	고분자계 소각재
1) 칼슘의 함유율은 일반적으로 CaO로서 30%	1) 알루미늄의 함유율은 $Al_2O_3$ 로서 30~40%
2) 탈수시 첨가된 염화제2철에 의하여 $Fe_2O_3$ 로서 10%	2) 인의 함유율은 $P_2O_5$ 로서 15~25% 정도
3) 규소의 함유량은 대략 10~30% 정도	3) 칼슘의 함유율은 CaO로서 10% 정도 이하
	4) 규소의 함유량은 대략 10~30% 정도

– 용융슬래그를 이용하는 방법

하수슬러지를 용융하는 경우 수분은 증발되고 유기 성분은 가스화되어 분리된다. 한편 잔존하는 고형물은 용융에 의하여 액화되어 어느 정도의 유동성을 가지게 되며, 일반적으로 슬러지의 용융방법으로는 선회식용 용로가 가장 많이 사용된다. 슬러지를 직접 용융하는 기술은 소각과 마찬가지로 일본을 중심으로 많이 이용되고 있다. 용융슬래그는 유효이용이라는 관점에서 냉각 및 고화방식에 따라 다음과 같이 분류된다.

1) 급냉 슬래그(수냉식 슬래그)

용융된 슬래그를 물에 직접 접촉시켜 급속히 냉각시키는 방식으로 생산된 슬래그로서 일반적으로 입경이 작다.

2) 서냉 슬래그(공냉식 슬래그)

용융된 슬래그를 용기에 담아 대기 중에서 서서히 냉각시키는 방식으로 생산된 슬래그로서 일반적으로 입경이 크며, 채거름 등으로 입경분포를 조절할 수 있다.

3) 결정화 슬래그

용융된 슬래그의 결정화를 촉진시켜 슬래그의 물성을 개선하는 방법이다. 결정화의 방법으로는 일단 냉각된 슬래그를 재가열하여 핵생성범위의 온도에서 일정 시간 방치하고 핵이 충분히 생성된 후 결정화 온도까지

〈표11〉 하수슬러지 용융슬래그의 이용 및 특성

	내부구조	절대밀도	입도	재활용 용도
급냉 슬래그	유리질	2.5~2.9	3 mm 이하	노반골재, 아스팔트골재, 인터로킹블록
서냉 슬래그	일부 결정질	2.5~2.7	20~200 mm	노반골재, 콘크리트2차제품, 인터로킹블록, 콘크리트골재
결정화 슬래그	결정질	2.8~3.0	40 - 129 mm	노반골재, 콘크리트2차제품, 인터로킹블록, 콘크리트골재

재가열하는 방법으로 생성된 슬래그이다. 이때 슬래그의 결정화율을 충분히 형성시키기 위해서는 서서히 냉각시키는 것이 필요하며, 이러한 면에서 결정화 슬래그를 서냉 슬래그에 포함시키기도 한다. 〈표 11〉에는 용융슬래그의 유효이용 방법 및 특성이 요약되어 있다.

3.3 에너지의 이용

슬러지 중에는 유기성분이 다량 포함되어 있으며, 이러한 유기물을 이용하는 방법에 따라 슬러지를 에너지로서 이용하는 방법에 대하여 구분 지을 수 있다. 먼저 슬러지의 유기성분을 그 자체로서 이용하는 방법으로는 시멘트의 원료로 사용하는 방법이 대표적이며, 유기성분을 특정하게 가공하여 이용하는 방법이 메탄발효와 슬러지액화의 기술이라고 할 수 있다.

– 시멘트의 원료로 사용하는 방법

먼저 시멘트의 제조공정을 살펴보면, 원료공정 → 소성공정 → 완성공정으로 나누어 볼 수 있다. 원료공정에서는 석회석, 점토, 규석, 철원료 등을 혼합하여 소성공정에 투입하는 공정이며, 소성공정은 원료를 사전 가열하고 로타리킬른에서 원료를 소성하여 CaO를 생성시키는 공정이다. 또한 완성공정에서는 킬른에서 배출된 소성물에 석고를 투입시켜 시멘트를 완성시키는 공정이다. 이때 로타리킬른의 1100℃ 영역에 슬러지를 직접 투입시켜 이를 이용하는 방법이다. 이 방법의 장점은

- 1) 슬러지 중의 가연분을 열로서 회수가 가능하며,
- 2) 고온의 영역에서 슬러지 중의 악취물질 및 유해물질이 완전히 분해되며,
- 3) 슬러지 중의 무기물이 시멘트의 원료로 이용되며,
- 4) 슬러지 중에 포함된 암모니아에 의하여 킬른에서 배출되는 NOx가 환원되어 배기가스 오염물질의 발생이 억제되며,
- 5) 슬러지의 연소에 필요한 보조연료가 없으므로 경제적으로 환경적으로 친화적이다.

최근 시멘트의 원료로 슬러지를 사용하는 경우가 증가하고 있으나, 슬러지를 시멘트의 원료로 사용하는 경우 시멘트의 품질에 영향을 주지 않는 범위에서 슬러지를 사용하여야 한다. 따라서 슬러지 중의 염소 및 인의

농도에 대한 관리가 필요하다. 최근 음식물 폐기물을 발효시켜 탄소원으로 사용하는 경우가 있으나, 이 경우 슬러지 중의 염소농도를 높일 수 있는 가능성이 있어 이에 대한 주의가 필요하다.

#### - 발효를 이용한 메탄가스의 생성

슬러지를 혐기성 소화시켜 메탄가스를 발생시키고, 이렇게 발생한 가스를 에너지원으로 이용하는 방법은 과거부터 이용되어온 가장 오래된 슬러지의 유효이용 방법이다. 이 방법의 경우 상당부분의 유기물을 분해시켜 안정화시키며, 대부분의 병원성 미생물 역시 불활성화시킬 수 있다는 장점이 있지만, 발생된 가스의 저장 및 발효조의 온도유지 등의 해결하여야 할 문제도 있다. 최근에는 가스의 저장 및 유효이용 문제에 대한 대안으로 발생된 메탄가스를 용기가 아닌 활성탄을 이용하여 저장하고, 이를 연료전지에 이용하는 등의 노력이 시도되고 있다.

#### - 슬러지 액화연료화 기술

슬러지를 액화하는 기술은 일본에서 개발되었다. 즉 슬러지를 100 mg/cm<sup>2</sup>로 가압한 후 연속적 교반장치가 부착된 반응기로 보내져 무산소상태에서 약 300℃로 가

열하여 슬러지를 열분해하는 기술이다. 반응기로부터 배출되는 수증기를 응축시킨 후 물과 기름을 분리시키며, 열분해로부터 발생된 Char성분은 반응기를 가열하는데 사용된다. 실험에 사용된 장치는 외부로부터 열원을 별도로 사용하지 않고 1일 60톤의 슬러지로부터 15톤의 기름을 생산하였다. 이 기름의 발열량은 약 9,000 kcal/mg 정도였으며, Bunker B유와 비슷한 발열량이었으나, 상당부분의 질소와 산소를 포함하여 일반적인 중유와는 다른 연소 특성을 보였다.

## 4. 맺음말

위에서 서술된 재활용기술 이외에도 고화처리를 이용한 복토재로서의 재활용 등 슬러지를 재활용하는 방법은 매우 많으며, 이러한 부분을 전부 나타내지는 못하였으나 이러한 재활용의 방법의 경우 토양시비와 같은 분류의 재활용방법이라고 할 수 있다. 위의 방법 중 우리의 현실에 가장 적합한 방법을 찾아 현재의 슬러지 문제를 해결해 나아가는 노력이 중요하리라고 사료된다.

## 참고문헌

1. 유기성 오니 등을 토지개량제 및 매립시설복토용도로의 재활용방법에 관한 고시, 별표2 및 별표3
2. Water Environmental Federation, and American Society of Civil Engineers, "Design of Municipal Wastewater Treatment Plant" 4th Edition, Volume 3, 1998
3. 最新リサイクル技術の實際, 村田徳治, オーム社
4. 下水汚泥の綠農地利用, 下水汚泥資源利用協議會, 1982
5. 第2回 下水汚泥の綠農地利用に関する國際シンポジウム講演集, 1988
6. 직매립금지때문에 하수슬러지 처리를 위한 Symposium, 한밭대학교 환경보전 방재연구소, 2003
7. 下水汚泥の建設材料利用マニュアル(案), 日本下水道協會, 2001
8. 하수슬러지의 재자원화기술[II], 첨단환경기술, 1999