하수슬러지를 발효, 고화하여 매립장 복토재로 재활용하는 기술(1)

김 세 범 | 홍진씨엔텍(주) 환경사업팀 대리

1. 기술개발의 필요성

우리나라는 2004년 말을 기준으로 전국 268개 하수종말처리시설(시설용량 21,392천 톤/일)에서 일평균 6,647톤의 하수슬러지가 발생되고 있으며, 해양배출 77%, 소각 12%, 재활용 9.8%, 매립 1.4%의 순으로 처리되고 있다.

<표 1> 연도별 하수슬러지 발생량 및 처리량

연 도	처리장수	년발생량(톤/년)	슬러지발생량(톤/일)	매 립	소 각	해양투기	재활용
1997	93	1,478,000	3,557	989(66.9%)	9(0.6%)	279(20.1%)	9(0.7%)
1998	92	1,695,000	4,049	792(46.8%)	27(1.5%)	552(32.6%)	8(0.5)
1999	150	1,593,000	3,964	641(40.7%)	33(2.1%)	820(52.1%)	
2000	172	1,741,000	4,770	439(25.2%)	93(5.3%)	1,118(64.2%)	0.92(0.05%)
2001	183	1,903,840	5,216	640(12%)	392(8%)	3,817(73%)	367(7%)
2002	201	2,076,485	5,689	530(9%)	559(10%)	4,083(72%)	517(9%)
2003	242	2,266,888	6,211	310(5%)	745(12%)	4,471(72%)	434(7%)
2004	268	2,426,070	6,647	93(1.4%)	778(11.7%)	5,157(77.1%)	651(9.8%)

<표 1>에서 보는 바와 같이 지금까지는 대부분 매립이나 해양투기를 주로 하여 왔으나, 2003년 7월부터 유기성 슬러지에 대한 직매립이 금지되어 직매립하던 하수슬러지의 대부분이 해양투기로 처리되고 있는 상황이다. 해양투기 또한 유기성오니종합처리대책에 따라 오는 2011년까지 전량 육상처리할 계획에 있어 처리방안의 모색이 시급히 필요한 실정이다.

하수슬러지의 처리대안으로 제시되고 있는 여러 방법들 중 소각방법은 기술의 노하우가 충분하고 실적이 많아 가장 선호되는 처리

– 목 차 –

1. 기술개발의 필요성

2. 기술의 개요 및 원리
가. 발효의 원리
나. 고화의 원리
다. 암모니아 발생 억제 원리

3. 기술의 개발된 내용
가. pH상승을 억제하여 암모니아의 발생을 줄이는 기술
나. 발효시킨 하수슬러지를 복토재로 사용가능하도록 물리적 특성을 개선한 기술
다. 공정 및 제품의 특성
라. 하수슬러지의 재활용 방안으로서의 장점

4. 처리 공정
가. 처리공정
나. 공정 설명
다. 참고사진

5. 처리성능

6. 맺음말

방식이나 건설비 및 투자비가 매우 높고, 또한 2004년 현재 2003년에 비하여 톤당 처리비가 30% 이상 인상되는 등(30,111원→ 38,313 원/톤, 환경부 2004 하수도통계) 비경제적인 문제가 있으며, 다이옥신 배출 등에 따른 민원발생 등 실제 적용에 어려움이 많다. 건조나 탄화방식의 처리방식의 경우에도 과다한 운영비와 최종생성물의 처리방법이 명확하지 않아 실제 적용이 어려운 상황이다. 따라서 이러한 국내외 조건 및 현실적인 문제점을 고려할 때, 하수슬러지의 효율적인 자원화 방안으로써 복토재 및 기타 재활용의 필요성이 증대되고 있다.

2. 기술의 개요 및 원리

본 기술은 하수슬러지의 고화처리 전에 발효시켜 고화효율을 향상시킴으로서, 고화제의 첨가량을 낮추고, 암모니아 가스 발생을 저감시켜, 생산된 하수슬러지 고화물을 매립시설 일일 및 중간 복토재로 재활용하는 기술이다.

가. 발효의 원리

1) 발효의 필요성

발효 과정의 특징은 온도의 상승이다. 재료가 50~65℃ 고온이 되면 병원세균, 병충란, 유해 곤충란, 바이러스 등 대부분이 불활성화 되어, 식물이나 사람, 가축에 무해하게 되고, 또 하수슬러지가 지닌 독특한 오물감이나 악취는 발효 과정을 거침으로서 현저히 줄어들고 다루기 쉬워진다.

2) 발효의 진행단계

본 기술에서 발효의 단계는 초기, 고온단계와 숙성단계(안정화단계)로 나누어지며 단계별로 살펴보면,

① 초기단계 : 발효의 초기 단계에서는 중온성 진균과 세균들이 주로 유기물을 분해하고 이들의 작용으로 온도가 상승한다. 온도가 상승됨에 따라 고온성 세균과 방선균으로 대체되기 시작한다.

② 고온단계 : 온도가 상승하게 되면 중온성 미생물의 밀도와 분해활동은 급격히 줄어들고 고온성미생물의 밀도가 증가하게 된다.

③ 숙성단계 : 고온성미생물의 작용에 의한 분해가 끝나면 대부분의 분해가능 한 유기물이 분해되었기 때문에 분해속도가 훨씬 느려지고 발효된 슬러지의 온도도 떨어지게 된다. 이때 다시 중온성 미생물인 스트렙토마이세스균이 재정착을 하여 잔여 유기물을 분해하게 된다.

$$C_5H_7NO_2 + 5O_2 \rightarrow 5CO_2 + NH_3 + 2H_2O$$

생물세균 산소 이산화탄소 암모니아 물

상기의 각 반응은 연소와 비슷한 반응들로서, 단순한 화학반응이라면 수백도의 고온이 아니면 일어나지 않는 반응이다.

유기물은 그만큼 안정적인 물질이면서 생물이 가지고 있는 산소가 작용하면 상온에서 반응이 진행된다. 유기물의 발효처리는 상온에서 생물반응에 의해 분해하기 쉬운 유기물을 보다 안정적인 물질로 만드는 처리라고 할 수 있다.

나. 고화의 원리

고화는 물리적인 유동성과 화학적인 불안정성을 가진 폐기물을 물리적으로 고정화하고 화학적으로 안정화 하는 기술로서, 본 기술에서는 고화 공정을 통해 하수슬러지의 유동성을 제어하여 용도에 맞게 물리적 특성을 가지도록 하고, 하수슬러지 내부의 중금속을 고정하는데 그 목적이 있다.

하수슬러지의 고화는 안정화보다는 고형화에 중점이 있기 때문에 주로 무기질계 고화제가 사용된다. 본 기술의 고화공정에는 주로 포틀랜트 시멘트 수화반응에 의한 고화가 진행되는 것으로 보여진다.

1) 포틀랜트 시멘트 반응

시멘트의 주성분은 SiO_2, Al_2O_3, CaO, Fe_2O_3 등의 산화물로서, 이들은 물과 반응하여 수화작용을 통하여 응결하게 되는데, 이 때 $3CaO \cdot SiO_2$와 $2CaO \cdot SiO_2$의 수화반응시 수산화칼슘이 발생함으로써 pH를 높이게 된다.

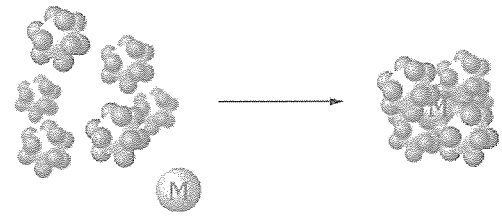
일반적으로 보통 포틀랜드계 시멘트를 그대로 사용하여 하수 슬러지를 고화한 경우에는 슬러지 내의 다량의 유기물에 의한 수화 반응의 방해 작용 및 과잉의 수분에 의한 희석 효과에 의해, 고화가 어렵고, 50% 이상의 대량 첨가가 반드시 필요하다. 여기서 말하는 시멘트 수화 반응의 저해 요인은 주로 가수 분해에 의해 생기는 칼슘이온의 탈수효과, 또는 경화에 기인하는 화합물의 침전에 의해 시멘트 입자 표면의 피막이 생기는데 이러한 작용은 유기물질에서 특히 심하다. 플라이애쉬 시멘트나 고로 슬래그 시멘트의 경우에 40% 이상 첨가하면 강도 발현이 어느 정도 되는 것으로 나타났는데 이는 칼슘-알루미네이트 형태가 보통 포틀랜트 시멘트에는 비교적 적기 때문에 계외로부터 이러한 성분들이 첨가되기 때문으로 추정된다.

또한 시멘트의 수화과정에서는 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)이 부수적으로 생성되며 pH를 상승시켜 암모니아의 발생량이 많아지게 되는데, 이는 시멘트 성분 중 60% 이상을 차지하는 CaO 성분에 의한 것이다. 하수슬러지의 경우 다량의 유기물을 포함하고 있으며 셀(Cell)구조를 형성하고 있어 고화 진행 시 유기물은 고화를 방해하는 요인이 되고 고화제의 사용량이 많아지게 된다. 따라서 어떤 방식으로든 하수슬러지 내의 유기물의 셀 구조를 깨뜨리고 난 후에서야 고화공정이 제대로 수행될 수 있다. 본 기술에서는 발효공정을 통해 유기물을 분해한 후 고화 공정을 수행하도록 하였다.

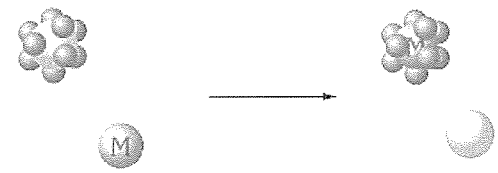
본 기술에 사용되는 고화제는 이런 조건들을 분석하여 시멘트의 구성 성분을 재조합, 소성하여 제조한 고화제이다.

<그림 1. 고화반응에 의한 중금속 고정원리>

· 부가반응 : CSH + M ---〉 MCSH(low C/S)



· 치환반응 : CSH + M ---〉 MSH + Ca(high C/S)



CSH : 규산칼슘수화물
($3CaO \cdot SiO_2$, 포틀랜트 시멘트의 주요 수화물)

규소 성분

M 중금속

2) 고화 메커니즘

수화에 의한 고화 메커니즘은 크게 두 가지로 제안되고 있다.

첫 번째 액상형 수화는 미수화 화합물이 그들 이온 성분에 용해하고, 용액 속에서 수화물을 형성하게 하여 수화물이 용해도가 낮으면 과포화 용액으로 된 결과 수화물이 침전하는 메커니즘으로, 고화제와 물이 다량 존재할 때 일어나는 반응 메커니즘이다.

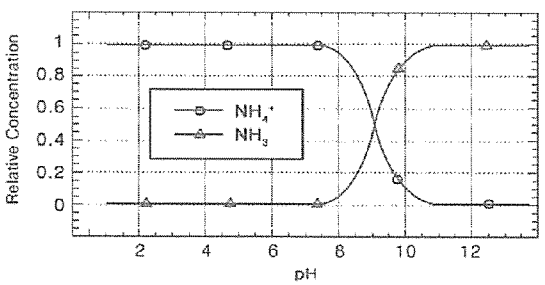
두 번째 고체형 수화는 미수화 반응 물질이 용액 속으로 이행하는 것이 아니고 미수화 시멘트 화합물 표면에서 직접 반응을 일으킨다. 고체형 수화는 고화제와 물이 소량 존재할 때 일어나는 반응 메커니즘으로, 액상형 수화에 비해 비교적 느리게 진행되는 반응이

다. 일반적인 시멘트 수화반응의 경우 물과 시멘트가 많은 조건에서 시작하므로, 액상형 수화가 먼저 진행되다가 점차 시멘트와 물이 반응에 의해 소모되어 줄어들게 되면 고체형 수화가 진행된다. 본 기술의 고화반응의 경우에는 처음부터 고화제와 물이 적게 존재하므로, 고체형 수화가 주로 진행되는 것으로 판단된다. 액상형 수화의 경우에는 시멘트의 주성분인 Ca이온이 액상에 많이 존재하기 때문에 강알칼리 분위기가 되나, 고체형 수화의 경우에는 시멘트 입자 표면에 존재하는 얇은 막의 물에서 수화반응이 진행되므로 약알칼리 분위기를 형성하게 된다.

다. 암모니아 발생 억제 원리

암모니아의 발생은 pH와 매우 밀접한 관계가 있는데, pH9 이상이 되면 암모늄이온에 비해 암모니아의 발생이 높아져 악취가 발생하게 된다. 본 기술에서는 발효, 고화 공정 시 발생하여 악취의 원인이 되는 암모니아의 발생을 억제하기 위하여 미생물의 산화작용 및 무기성 흡착성능을 가진 부원료에 의한 흡착반응, 고화제 성분 중 pH 상승의 직접원인이 되는 CaO 성분의 조정, 그리고 발효 공정을 통해 고화방해물질인 유기물을 분해하여 고화제 사용량을 감소시키는 등의 과정을 통하여 암모니아의 발생을 억제하고 있다.

<그림 2. pH변화에 따른 NH_3와 NH_4^+의 평형관계>



본 기술에서는 발효공정을 통하여 유기물을 분해함으로써 유기물에 의한 고화저해현상을 최소화하여 고화제의 투입량을 줄이고, 발효 시 투입하는 무기성 첨가제가 고화보조제의 역할을 하도록 하여 pH의 상승을 원천적으로 차단하였다.

2) 고화제의 성분 조정을 통한 악취발생억제

일반적으로 고화제로 사용되는 시멘트 등에는 CaO의 함량이 60% 내외가 함유되어 있다. CaO 성분은 유기물과 접촉하여 pH를 상승시키게 되고 이에 따라 다량의 암모니아를 발생하게 되는데, 본 기술에서는 고화제의 CaO 함량을 낮게 조정함으로써 pH의 상승을 억제하고 암모니아의 발생을 감소시키게 된다. 또한 발효 과정 중에 유기물이 분해되며, 유기물 분해를 통하여 하수슬러지의 Cell 구조가 파괴되기 때문에, 유기물로 인한 고화 저해 효과가 없어 고화제의 사용량이 3%정도로 매우 낮아 pH의 상승을 제어할 수 있다.

3. 기술의 개발된 내용

가. pH상승을 억제하여 암모니아의 발생을 줄이는 기술

하수슬러지의 고화 공정 시 하수 슬러지를 1차 발효하여 고화하는 공정으로서 기존의 고화 공정 시 다량으로 발생되어 악취와 원인이 되던 암모니아 가스를 pH의 상승을 억제하고 암모니아 발생을 줄여, 악취발생을 현저히 줄이는 기술이다.

기존의 하수슬러지 고화 공정에서는 고화 공정 시 생석회, 시멘트 등이 하수 슬러지의 수분과 결합하여 고화되는 과정에서 하수 슬러지 내부에 포함되어 있는 유기물 셀에 의한 고화 저해 현상으로 인해 정상적인 고화가 이루어지지 않아 다량의 고화제를 투입하였으며, 이로 인해 pH가 12이상으로 상승하고 pH의 상승에 따라 발생한 다량의 암모니아 가스로 인해 악취는 물론 현장 작업자들이 방독면을 쓰지 않고는 작업을 할 수 없을 정도의 열악한 조건이었으나, 본 기술에서는 고화 공정 시 고화제의 활동을 방해하는 하수

슬러지 내의 유기물 셀을 발효공정을 통해 분해 시켜 소량의 고화제를 투입할 수 있도록 하였으며, 또한 첨가된 무기성 흡착제의 흡착으로 암모니아 가스의 원인이 되는 암모늄이온을 흡착제거하여 pH 상승을 억제하고 악취 발생을 줄이는 기술이다.

나. 발효시킨 하수슬러지를 복토재로 사용 가능하도록 물리적 특성을 개선한 기술

매립장의 복토재 및 도로 기층제 등으로 사용하기 위하여 사용목적에 적합하도록 일정 기준 이상의 일축압축강도와 적당한 범위의 투수계수 등의 물리적 강도를 부여하는 기술이다. 단순 고화 공정을 거친 하수 슬러지는 고화 공정이 종료되는 시점에서는 일정한 강도를 유지하는 것처럼 보이지만, 고화 공정 시 파괴되지 않고 하수슬러지 내부에 포함되어 있는 유기물이 시간이 지나면서 파괴되어 내부의 수분이 밖으로 유출됨으로 인해 시간이 경과 하는 동안 물리지는 재슬러지화 현상을 보이게 된다. 또한 고화 공정이 없이 단순히 하수 슬러지를 발효처리만 하는 경우는 비료, 퇴비로서의 특성을 보여주기는 하지만, 매립장 복토재 등으로 사용하기에는 물리적인 기준을 만족하기 힘들다.

복토재의 사용목적과 그 물리적인 기준에 대한 법적 기준은 아직 정해지지 않았으나 일반적으로 알려진 기준은 다음과 같다.

1. 매립장 작업성 유지 및 붕괴 방지
   - 일축압축강도 0.5kgf/㎠ 이상
2. 빗물 침투 방지
   - 투수계수 1×10^{-3} ~ 1×10^{-6}㎝/sec
3. 기타 - 악취억제 및 해충방지 효과 등

매립장 복토재 등으로 사용하기 위한 이러한 조건을 만족시키기 위해 본 기술에서는 하수 슬러지의 발효공정 이 후 고화 공정을 추가하여, 물리적 강도를 나타낼 수 있도록 하였다.

다. 공정 및 제품의 특성

1) 기존의 복토재용 흙과 유사한 물리적 성능

본 기술을 통하여 생산된 복토재는 복토재로서의 일축압축강도와 투수 계수 등의 물리적인 성능을 만족하고, 기존의 고화처리된 하수슬러지 고화물과 비교하여 재슬러지화 및 부패, 악취발생 등의 2차 오염이 없다. 따라서 매립장 복토재로서의 활용뿐 아니라 도로 기층제를 비롯한 여러 가지 용도로의 활용이 가능하다.

2) 암모니아 발생을 현저히 감소시킨 제품

기존의 하수슬러지 고화처리시설의 고화 공정과 비교하여 악취의 원인이 되는 암모니아의 발생이 현저히 줄어들었다. pH가 상승할수록 암모니아의 발생이 증가하게 되는데 본 기술에서는 발효공정을 통해 유기물을 분해한 후 고화 공정을 진행함으로 인해 기존 고화 공정에 비해 고화제의 투입량이 현저히 줄어들어 pH 상승을 억제하고 암모니아의 발생을 줄였다.

3) 미생물의 서식으로 인한 토지개량 효과

단순 고화 처리된 제품의 경우 pH가 너무 높아 미생물이 증식할 수 없는 환경이었으나, 본 기술을 통해 생산된 제품은 pH 7~8의 중성, 약 알칼리성으로서 미생물이 증식하기 좋은 조건이며 발효 공정 시 식종된 각종 미생물과 균사체등이 최종 생산품에 정착되어 활동하게 되어 토지 개량제 등으로의 사용도 가능하다.

4) 무기성 첨가제로 인한 발효기간 단축, 물리적 강도 향상의 효과

종래의 일반적인 하수 슬러지나 가축분뇨, 음식물 등의 퇴비화 공정에서는 수분조절 및 통기 개량의 목적으로 톱밥, 왕겨 등의 유기물을 주로 사용하였으며,

이들 재료의 내부에는 발효에 의한 분해기간이 오래 걸리는 셀룰로우즈, 리그닌 등이 포함되어 있어 발효와 후부숙의 기간이 오래 소요되었다. 또한 사용되는 수분조절제의 특성에 의해 압축강도, 투수 계수등이 매립장 복토재 등으로 사용하기위한 기준에 미치지 못하는 단점이 있었다. 그러나 하수 슬러지가 하수처리장에서 최종 탈수, 배출되기 전 수일간의 혐기성 소화공정을 통하여 혐기성균의 활동에 의한 유기물의 분해, 액화, 가스화의 과정을 거치며, 이 과정에서 유기물이 분해하거나 또는 셀의 구조가 약해지게 되어 돈분, 계분 등의 축산폐기물에 비해 발효 시간이 대폭적으로 단축될 수 있다는 점에 착안하여 본 기술에서는 수분조절 및 통기 개량을 위해 주로 무기성 물질을 사용함으로써 발효 및 후부숙 기간을 단축시키고 또한 압축강도, 투수 계수 등의 기준 또한 만족할 수 있도록 하였다. 기존의 공정이 1차 발효 15일 이상 후부숙 20일 이상이 소요되었던 것에 비해 1차 발효 3~4일과 안정화 3~4일 등 7일 내외의 기간으로도 발효공정이 성공적으로 마무리 되는 것으로 나타났다.

라. 하수슬러지의 재활용 방안으로서의 장점

1) 해양 투기를 대체하는 가장 경제적인 재활용 방법

본 기술을 사용하여 하수슬러지를 처리하는 경우 처리비용은 지역 및 처리대상 하수슬러지의 특성에 따라 약 3만원대로서 소각(60,000원 이상), 건조(50,000원 이상) 등에 비해 처리비가 훨씬 저렴하며, 하수슬러지의 가장 저렴한 처리방법인 해양투기(25,000~28,000원)와 비슷한 수준으로서 가장 경제성 있는 재활용 수단이라 할 수 있다.

2) 국내 법규에 따른 적법한 재활용 방법

하수슬러지의 처리방법을 규정하고 있는 하수도시설기준 환경부공고 제1998-5호에 적합하며, 폐기물관리법 시행규칙 별표4의 폐기물 처리 기준과 별표8의 기준을 만족시키고 있다. 또한 환경부고시 2003-214호의 부숙토 "나"등급 및 토양오염방지법과 폐기물관리법의 중금속 함유량 기준 이내의 낮은 용출농도를 나타내고 있다.

3) 2차 처리가 필요 없고 수요처가 확보되어 있는 재활용 방법

하수슬러지의 재활용기술의 선정에 있어 가장 큰 문제점은 수요처의 문제이다. 아무리 좋은 기술로 재활용 하더라도 재활용품에 대한 수요처가 없으면 결국은 무용지물이 되고 만다. 그러나 본 기술에 의해 재활용된 하수 슬러지는 매립장 복토재로서 대량 소모됨으로 별도의 수요처개발이 필요치 않으며, 이외에도로 기층제 토양개량제 등 다방면으로 활용할 수 있는 장점이 있다. 서울시의 경우, 수도권매립지공사에서 사용하는 복토재의 양은 일일복토 600 m^3/일 및 중간복토 2,500 m^3/일로써 총 사용량이 3,100 m^3/일(약 4,500톤/일)인데 비해, 서울시에서 일일 발생하는 하수슬러지(1,995 톤/일)를 모두 복토재로 생산할 경우 약 1,400 톤/일이 되어, 수도권 매립지 공사에서 필요로 하는 복토재 수요량의 3분의 1에도 못 미칠 만큼 수요처가 충분하며, 하수처리장과 매립장을 동시에 운영중인 지자체를 대상으로 자체 조사한 결과 해당 지자체의 발생 슬러지를 모두 복토재로 재활용할 경우 매립장에서 소요되는 복토재의 20~30% 정도의 수요를 충당하는 것으로 나타났다.

4) 해양오염과 환경파괴를 방지하는 친환경적인 재활용 기술

본 기술에 의해 하수슬러지를 재활용하여 복토재로 사용할 경우 하수슬러지의 해양투기로 인한 바다의 오염을 방지할 수 있으며, 또한 매립장 복토재용 흙 채취로 인한 환경파괴를 감소시키는 효과가 있다.

〈다음호에 계속〉