

하수슬러지 건분화를 통한 시멘트 원료화 사례

반형준* · 임경태 · 김성수 · 정현일

<아세아시멘트>

1. 서 론

산업의 발달 및 도시 집중화에 따른 하수처리 시설의 증가로 우리 나라의 하수슬러지 발생량도 2002년말 기준 200만톤을 넘어서고 있으나, 그 처리방식 및 재활용 실적에 있어서는 아직도 전근대적인 수준에 머물러 있다.

2003년 7월부터 하수슬러지의 육상 직매립이 전면 금지됨에 따라 해양투기의 의존도가 점차 증가하고 있는 실정이나 가까운 장래에는 해양투기에 의한 규제 역시 강화될 전망이다. 이에 경제적이고 효율적인 처리방안이나 중장기적인 정책 방향에 대한 관심이 증대되고 있다.

최근 소각로 건설에 의한 처리사태가 증가하고 있으나, 소각 등에 의한 감량화 역시 고비용의 설비투자비와 운영비 및 2차 대기오염이 장애가 되고 있다. 또한 외국에서 많이 이용되는 비료, 퇴비화 방법은 법적인 제약뿐만 아니라 처리량, 처리시간, 부지문제 등으로 발생슬러지 전량을 처리하기에는 근본적인 해결방안이 되지 못하고 있다.

한편, 하수슬러지의 경제적이고 안정적인 처리

수단으로 시멘트 공장에서 재자원화하는 방안이 소개되고 있는데, 이 방법은 슬러지에 함유된 가연분 등의 유해물질을 고온의 시멘트 제조과정에서 열분해 또는 시멘트 광물 내에 효과적으로 고용시키고, 기타 무기물 성분은 시멘트의 원료 성분으로 재 이용할 수 있는 안정적이고 완전한 처리방법으로 알려져 있다.

본 보고에서는 이러한 하수슬러지의 시멘트 원료화에 가장 큰 장애가 되어 왔던 고함수율에 의한 취급, 운반, 투입의 문제와 악취 등의 냄새 문제에 효과적으로 대응할 수 있는 건분화 기술을 개발하여, 관내 지자체와 공동으로 시행한 하수슬러지의 시멘트 원료화 사례를 소개하고자 하였다.

2. 하수슬러지 현황

2-1 하수슬러지 발생 및 처리

2002년말 기준으로 전국 201개 하수종말처리 시설에서 일 평균 5,689톤의 하수슬러지가 발생되고 있으며, 그 처리현황은 아래 <표 1>과 같다.

<표 1> 하수슬러지 발생 및 처리현황 (톤/일)⁽¹⁾

년도	계	해양투기	매립	소각	재활용
1998	3,835	1,512 (39%)	2,172 (57%)	57 (2%)	94 (3%)
2000	4,758	3,056 (64%)	1,200 (25%)	254 (6%)	248 (5%)
2002	5,689	4,083 (72%)	530 (9%)	559 (10%)	517 (9%)

정부의 직매립 금지정책에 따라 해양투기 의존도가 급격히 증가하고, 소각 및 재활용 처리율이 매년 조금씩 증가하고 있음을 알 수 있다. 재활용 방법으로는 퇴비화, 시멘트 원·연료화, 녹생토 처리 등이 이용되고 있으나 각각의 제약요건 등으로 사용실적은 아직까지 활발하지 못한 실정이다.

2-2 하수슬러지의 특성

하수슬러지는 하수를 정화하는 과정에서 발생하는 고흡폐기물로서 최종 탈수설비에 의하여 탈수된 후에도 통상 75~85%의 수분을 포함하고 있으며, 나머지 약 15~25%의 고형분은 다시 60% 이상의 유기계 可燃分(LOI)과 무기계 성분으로 구성된다.

- 유기계 可燃分에 기인하여 건조 하수슬러지는 통상 2,000~4,000cal/g의 높은 발열량을 나타내나, 포함된 수분을 고려하면 슬러지 자체의 자연연소는 불가능하여 소각시 보조연료를 필요로 한다.
- 무기계 성분은 SiO₂, Al₂O₃, CaO 성분을 주요 성분으로 하며 기타 Fe₂O₃, SO₃, P₂O₅ 등을 포함하고 있다. 이들은 주로 하수 내에 우수, 토사류 등이 유입되어 존재하게 되며 우수와 하수관거의 분리가 불량한 우리나라는 외국에 비해 높은 함유량을 나타낸다. 특히 무기성분들은 시멘트 원료중 하나인 점토질 원료와 유사한 성분을 가지고 있어 시멘트 공장에서의 재활용에 대한 가능성을 부여하고 있다.

<표 2>에 제천지역에서 발생하는 하수슬러지의 화학 분석치를 나타내었다.

2-3 시멘트공장 재활용시의 장애요인

2-3-1 수분

일반적으로 하수슬러지는 탈수공정을 거치고서도 약 75~85%의 높은 수분을 가지고 있으며, 이러한 수분은 하수슬러지의 취급과 운반을 어렵게 함은 물론 2차 환경오염 발생의 원인이 될 뿐만 아니라, 시멘트 제조공정에 재활용하는데 가장 큰 장애요인으로 작용하고 있다.

소각, 건조, 약제를 이용한 건조, 고화 등 수분 제거를 위한 다양한 방법이 소개되고 있으나 이들 모두 고비용이 소요되어 재활용 실적이 미미하고, 매립을 전제로 한 탈수방법에 불과하다.

2-3-2 염소농도

염소성분은 저온 휘발성 성분으로 시멘트 제조공정 중 특히, 소성공정에 있어 연속 안정운전을 저해함은 물론 콘크리트의 철근부식 요인이 되기 때문에, 시멘트 원료중의 염소농도를 제한하고 있으며, 고가의 염소 Bypass장치를 설치하여 소성공정에서 염소농도를 관리하고 있다.

<표 2>에서와 같이 하수슬러지는 염소농도가 상대적으로 높기 때문에 탈수시 응집제 선정에 주의가 요구된다.

2-3-3 P₂O₅ 함량

하수슬러지의 화학성분중 시멘트 품질에 영향을 미칠 수 있는 유해성분으로는 P₂O₅ 함량을 들 수 있으며, 시멘트 중 P₂O₅ 함량이 0.5% 이상이면 시멘트의 압축강도가 하락하는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ 따라서, 일반적으로는 사용량에서 P₂O₅ 함량을 관리하되 부득이한 사용량 증가시는 별도의 품질대책이 필요하다. 원료중 P₂O₅는 대부분 클링커에 고용되어 밖으로 배출되므로 염소와 같은 공정문제를 야기하지 않는다.

<표 2> 하수슬러지의 화학성분(%)

LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Cl ⁻
61.94	15.58	8.74	2.26	3.84	1.26	3.61	0.72	0.54	2.1	0.34

<표 3> 시멘트공장 재활용 방법 사례

사용 방법		함수율	실시 예	특기사항
소 각	- 소각후 시멘트 원료화	-	- 일본 日本시멘트, (崎玉공장) - 한국 아세아시멘트	- 설치비, 운영비 과다 - 2차 환경오염 우려
건조 및 조립화	- 건조 또는 조립화 상태로 시멘트 원료화	10~20 %		- 설치비, 운영비 과다 - 2차 환경오염 우려
직투입	- 하수슬러지를 시멘트 킬른에 직접 투입	약 80%	- 일본 三菱 (黑崎공장)	- 설치비 과다 - 이송·투입 등 특수설비 필요
건분화	- 특수 약제, 생석회를 이용, 건분화 후 시멘트 원료화	10~30 %	- 일본 太平洋시멘트 (藤原공장)	- 약제, 재료비 상승 - 특수 이동차량 이용
	- 특정 연소재를 이용, 건분화 후 시멘트 원료화	35~45 %	- 한국 아세아시멘트	- 설치비용 적음 - 경제적임

2-3-4 냄새(악취)

하수슬러지에 대한 시멘트 원료화가 어려운 이유중의 하나는 냄새문제이다. 악취가스의 성분은 환경청 고시 제9호에 의하면, ① 암모니아 ② 메틸메카프탄, 유화수소, 유화메틸, 이 유화메틸 ③ 트리메틸아민 ④ 아세트알데히드 외에 하수슬러지에서 발생하는 이들, 스카들 등이 있다.

이러한 악취가스로 인해 시멘트 공장에서의 하수슬러지의 보관 및 취급을 어렵게 할뿐만 아니라 민원문제 발생 및 제반 환경문제의 주요원인이 된다.

2-4 시멘트공장 재활용 방법

한국 및 일본에 있어서 하수슬러지를 시멘트 공장에서 재활용하는 사례는 <표 3>과 같다.

3. 하수슬러지의 건분화 기술

3-1 개요

시멘트 원료화의 장애요인중 염소농도와 P₂O₅ 함량은 시멘트 원료중 허용치내의 관리가 가능한 범위로서 충분히 조절이 가능한 반면, 수분 및 냄새문제에 대하여는 보다 안정적인 처리대책이 요구되는 사항이다. 당사에서는 수분 및 악취를 효율적이고 경제적으로 제거하는 방법으로 산업부산물인 저온 연소조건의 연소재를 이용하기로 하고, 열병합발전소에서 발생하는 플라이애시를 건분화 재료로 사용하였다. 사용된 연소재의 입도는 20~30 μ m, 비표면적은 2,000~4,000cm²/g이며, 화학성분은 <표 4>와 같이 미연 카본 외에 SiO₂, Al₂O₃, CaO를 주성분으로 한다.

3-2 건분화 방법

실험방법은 자연상태의 하수슬러지와 건분화 재료인 연소재를 중량비 최대 1:1 까지 실험실 혼합기에서 충분히 혼합한 뒤, 건분화 상태의 육

<표 4> 연소재 화학성분(%)

구 분	수분	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O
연소재	-	11.52	53.77	20.39	4.27	4.94	1.42	0.82	0.88

<표 5> 혼합비 및 수분 측정 결과

시료 구분	혼합비		실험결과	
	하수슬러지(g)	연소재 (g)	수분 (%)	취기강도*
0	100	-	82.0	350
1	100	30	65.0	250
2		50	56.0	200
3		70	49.4	"
4		100	41.9	"

주) * 일본의 (주)KALMOR의 카다록 인용⁽³⁾

<취기강도와 사람 후각과의 관계>

취기강도	실용적 의미
180	후각이 예민한 사람도 냄새를 감지할 수 없는 정도(무취 수준)
200	보통의 사람이 냄새를 감지할 수 없는 정도
220	냄새 판별이 가능하지만 아무도 불만을 제기하지 않는 정도
250	냄새가 약간 감지되지만 불만을 제기하는 사람도 있는 정도
350	모든 사람에게 불쾌감을 주고, 환경대책이 필요한 정도

안관찰과 취기강도를 측정하고, 30분 방치 후 105°C Dry Oven에서 건조하여 전후 중량비로서 수분을 측정하였다.

3-3 실험결과

실험결과 건분화 재료의 사용량 증가에 따라 함수율 저감과 함께 연소재의 입자코팅 및 슬러지 분말화(解碎)에 의한 효과적인 건분화가 가능함은 물론 악취도 크게 감소되는 것으로 나타났다.

<표 5>에 의하면 건분화 슬러지는 연소재 첨가량 50% 이상에서 거의 무취(취기강도 200이하)에 가까운 양호한 상태를 나타냈다.

3-4 건분화 메카니즘 고찰

하수슬러지에 건분화 재료인 연소재를 혼합함으로써 효과적인 수분 감소와 악취가 저감되는 메카니즘은 다음과 같고 <그림 1>과 사진 1에 이해하기 쉽도록 정리하여 보았다.

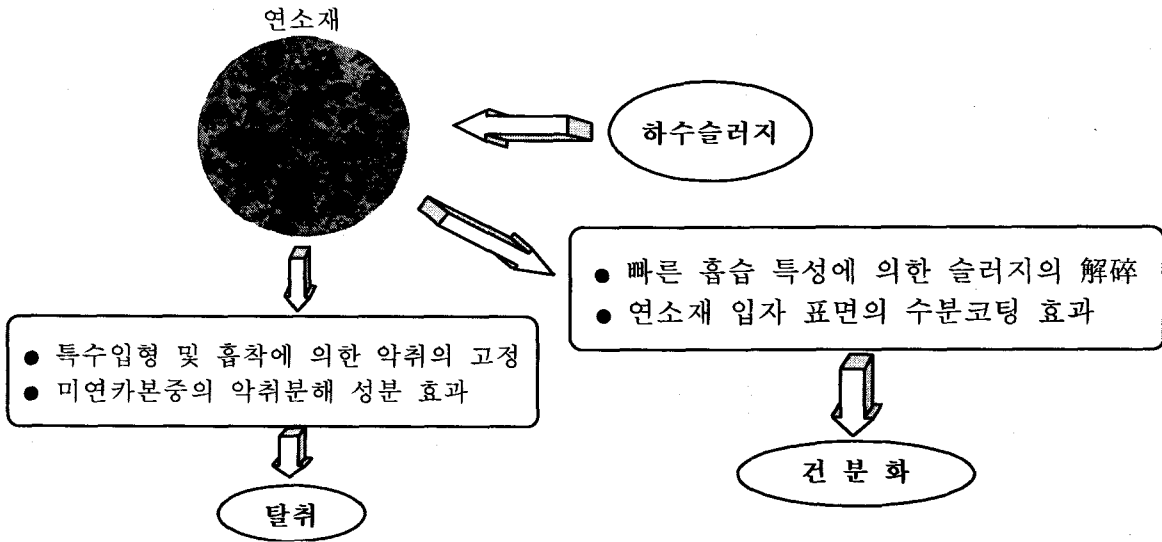
- 연소재는 비교적 저온영역에서 소각되므로 그

입형이 다공질 형태와 불규칙한 침상구조가 혼재된 형태를 띄게 되고, 이로인해 수분 흡수속도가 매우 빠른 것이 특징으로서 슬러지의 함유 수분을 빠른 속도로 흡수하여 분말화(解碎)를 유도하고, 연소재 자신은 수분으로 표면을 코팅함으로써 효과적인 건분화가 이루어진다. 한편 악취저감은 입형 특성과 빠른 흡수 및 흡착으로 인한 악취가 입자 내부로 포획되기 때문으로 판단되고, 이외에도 미연카본 중에 함유된 후민산 등 악취 분해성분에 의한 영향도 예상된다.⁽³⁾

- 공정시험에서는 혼합효율을 높이기 위해 강력한 Twin shaft와 체류시간 연장을 위한 차단판이 부착된 특수 패들믹서를 제작하여 적용하였다.

4. 건분화슬러지의 시멘트 품질에 미치는 영향

시멘트 품질에 영향을 미치는 하수슬러지 중의 대표적인 유해성분 중의 하나인 P_2O_5 함량은



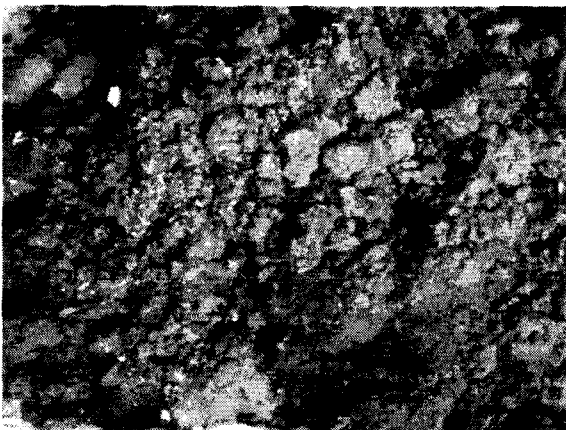
<그림 1> 건분화 모식도

그 양이 증가함에 따라 시멘트의 응결지연과 초기강도가 하락하는 것으로 알려져 있으나⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 당사 건분화 슬러지 사용기간 중에 시멘트 P₂O₅ 함량은 0.1~0.15%의 매우 낮은 수준으로서 품질에 영향은 없는 것으로 나타났으나 향후 하수 슬러지 사용량이 증가할 경우에는 이를 고려한 품질관리가 필요할 것으로 생각된다.

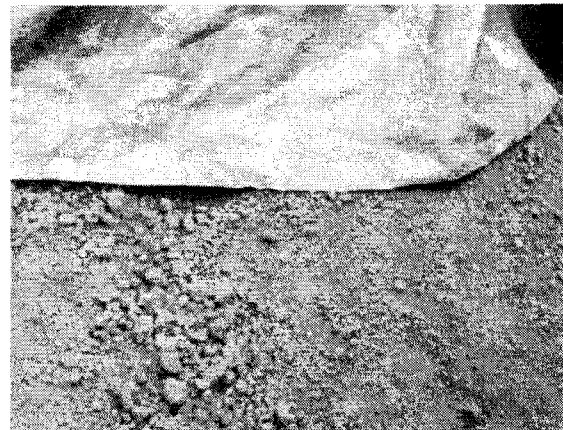
5. 하수슬러지의 재활용 사례 소개

5-1 사업개요

- 사업명 : 하수슬러지 건분화 시설공사 및 시멘트 원료화
- 위치 : 제천시 환경관리사업소 (충북 제천시 천남동 50)
- 슬러지발생량 : 6,500톤/년 (18톤/일)
- 주요설비 : 연소재 SILO, 특수 패들믹서, 이송콘베어, 저장 호퍼, B/F 등
- 투자비 : 2억 3천만원
- 가동 개시일 : 2000년 7월
- 혼합비 : 슬러지와 연소재를 중량비 1 : 1 혼합



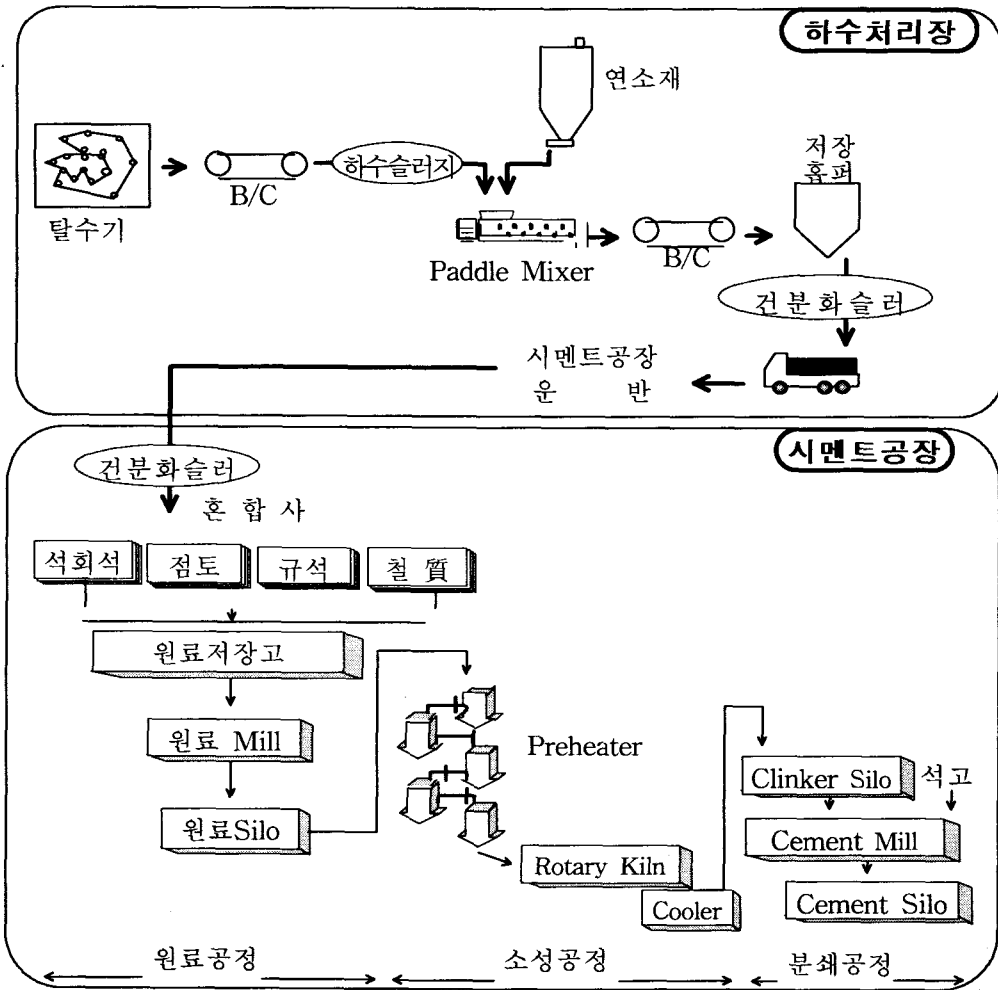
[하수슬러지]



[건분화슬러지]

사진 1. 건분화슬러지의 전·후 사진

5-2 처리공정



<그림 2> 하수슬러지의 건분화 및 재활용 처리 공정

5-3 건분화 시설

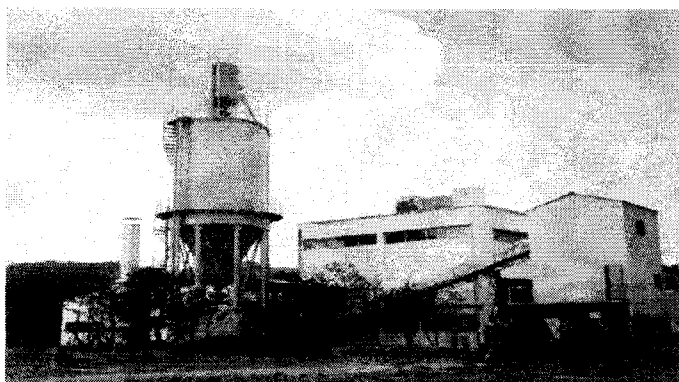


사진 2. 건분화 시설 전경(제천시 환경관리사업소 내)

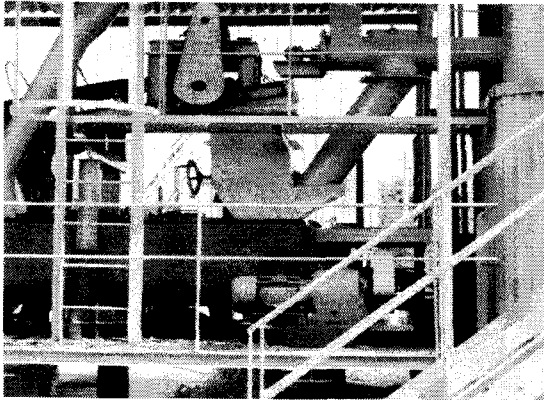


사진 3. 혼합설비

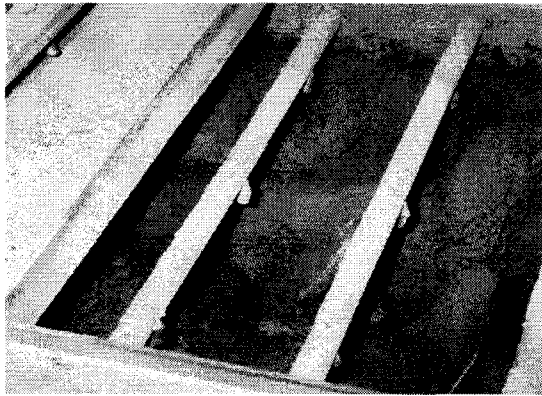


사진 4. Paddle Mixer

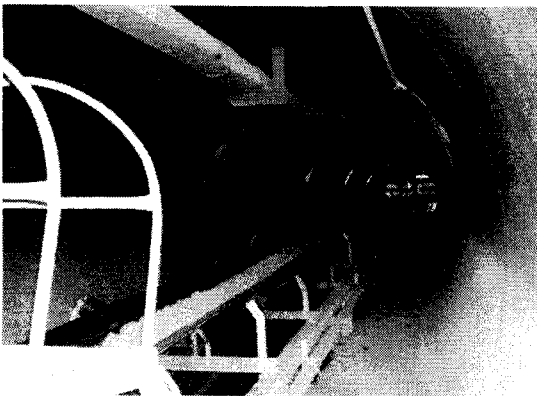


사진 5. 건분화슬러지 수송설비



사진 6. 인출설비

5-4 처리실적 및 경제성 분석

5-4-1 처리실적(톤/년)

년도	2000년도	2001년도	2002년도
처리량	2,300	10,300	8,600

5-4-2 처리효과 및 절감액

- 폐기물 자원화 및 완전처리로 2차 환경 오염 방지
- 2003년 직매립 금지에 따른 법규이행 충족
- 슬러지 미반입으로 쓰레기 매립장 사용기간 연장
- 매립장의 악취, 침출수, 병충해 발생 예방
- 절감금액 (2002년도 제천시 기준)
 - 슬러지 매립비용 절감 : 247 백만원/년 (매립장 시설비 및 운영비)

- 소각시설 설치비용 절감 : 3,600 백만원 (토지매입비, 민원보상비 등 제외)
- 소각시설 운영연료비 절감 : 260 백만원/년 (인건비, 보수유지비 등 제외)

6. 결 론

우리 나라의 경우 하수슬러지 발생량 증가에 비해 재활용율이 저조할 뿐 아니라 2003년 7월부터 육상 직매립이 금지되고 해양투기에 대한 규제강화가 예상되는 시기에 건분화 처리에 의한 시멘트 원료화는 경제적인 재활용뿐 아니라 유해 폐기물의 안정적 처리 측면에서 산업·환경사회에 기여할 수 있는 유용한 수단임을 확인하였다.

- 상기 기술은 저온연소 연소재가 갖는 빠른 흡수 및 탈취성능에 착안한 것이며, 함수율 저감을 통한 취급성 개선과 악취제거가 가장 큰 장점으로써 시멘트 원료화의 유해성분은 기준치 이하에서 충분한 관리가 가능하였다.
- 상기 건분화 공정은 기존시설을 최대한 이용할 수 있으며, 시스템이 단순하여 소각시설에 비해 초기 투자비와 유지비용이 크게 절감되며, 산업부산물인 연소재를 이용하므로 경제적이다 할 수 있다. 따라서 적정 연소재의 장기·안정적 확보가 필수적이다.
- 건분화 슬러지의 물류비 부담을 고려할 때, 우선적으로 입지조건이 양호한 시멘트 공장 인근지역이나 연소재 확보가 유리한 지역에서는 충분한 경제성이 있다고 판단된다.

<참고 문헌>

1. 이영기, “하수슬러지 처리 정책방향”, 폐기물 자원화 제11권 1호 (2003.4)
2. 田島忠彦 外, “セメント工場との提携による共同の汚泥処理”, 土木施工 38卷 11號 (1997. 10)
3. (株)エヌ・ティ・エス, “汚泥の処理と再資源化・再利用”, p136 (1996)
4. 山崎之典 外, “下水汚泥のセメント原料への有効利用” セメント・コンクリート 論文集 No48, p94~99 (1994)
5. 차완호 外, “P₂O₅가 클링커 광물생성 및 시멘트 품질에 미치는 영향”, 제29회 시멘트 심포지엄, p69~76 (2002)