

## 물리화학적 분석을 통한 하·폐수처리 슬러지류의 특성평가

권기홍<sup>†</sup>

영남이공대학 보건환경계열

### A Study on the Characteristic Evaluation of Sewage and Industrial Wastewater Treatment Sludges by Physico-chemical Analysis

G. H. Kwon<sup>†</sup>

Division of Health & Environment, Yeungnam College of Science & Technology

(Received February 7, 2005; Accepted March 4, 2005)

#### ABSTRACT

Because generally large amount of sludges are generated from the process of sewage and wastewater treatment, the management and controlment of those sludge has become a important issue in many researches. In this dissertation, we conducted the research to see the physico-chemical characteristics of sludges generated from various sources. Moisture of sludges were 81.5% in textile industries, 81.4% in frame metal industries, 80.7% in 1st metal industries. Volatile solid were 22.1% in hide·rubber industries, 21.9% in coke·petroleum industries. Fixed solid were 18.5% and 17.7% in the 1st metal industries and frame metal industries. High heating value by wet base were 1,850 kcal/kg in coke·petroleum industries, 1,220 kcal/kg in hide·rubber industries, but sludges from the 1st metal industries and frame metal industries were impossible to incinerate because most of those sludges were inorganic. The leaching test showed that hazardous materials was detected in nearly every kinds of sludges. Some of sludges from hide·rubber industries and frame metal industries exceeded the leaching criteria and so they were classified as specific wastes. And other sludges generated in sewage treatment plants or other industries was below the leaching criteria.

**Keywords :** sewage and wastewater treatment sludges, proximate analysis, higher heating value, leaching concentration, hazardous sludge

#### I. 서 론

정부에서는 2004년 7월부터 유기성슬러지의 직매립을 금지하고 있고, 또한 가까운 장래에 해양투기도 금지될 단계에 있으므로 이에 대한 대안의 도출이 절실한 시점에 와 있다.<sup>1,2)</sup> 우리나라 폐기물관리법<sup>3)</sup>에서는 슬러지의 처리 및 처분방법으로 소각, 고형화, 퇴비화, 복토제 또는 토지개량제 등의 방법을 제시하고 있다. 일반적으로 하·폐수처리과정에서는 그 처리공정에 따라 슬러지류가 필연적으로 발생하게 되며, 이들 슬러지류에 포함된 오염물질의 농도도 처리공정의 효율증대에 비례하여 점차 고농도화되어 가고 있다. 양적인 면

에서도 정부의 맑은 물 공급대책에 따라 하수처리율은 증가되고 있으며, 또한 각 배출업체에서도 배출허용기준의 강화에 따라 슬러지류의 양도 증가추세에 있다. 슬러지의 종류별 처리현황을 살펴보면 매립되는 유기성 슬러지는 하루 2,200톤 가량이며, 이중 하수처리 슬러지가 가장 많은 1,095톤, 폐수처리 슬러지가 701톤으로 대부분을 차지하고 있으며, 해양투기되는 유기성 슬러지는 하루 4,200톤 가량으로 매립 양의 2배나 된다. 이렇게 최근까지도 하·폐수처리장에서 발생하는 슬러지류의 처리는 탈수하여 직접 매립하거나 해양투기에 의존하여 왔으나 매립의 경우는 매립지의 확보가 어려워지며, 매립장에서 슬러지의 매립작업시 작업성이 나쁘고 슬러지에 함유되어 있는 각종 유해 중금속이 토양에 잔류하게 되어 지하수 및 지표수를 오염시키며 침출수량의 증가를 초래하게 된다.<sup>4,5)</sup>

해양투기의 경우는 국제적인 차원에서 공유해상을

<sup>†</sup>Corresponding author : Division of Health & Environment, Yeungnam College of Science & Technology  
Tel: 82-53-650-9283, Fax: 82-53-625-5722  
E-mail: ghkwn@ync.ac.kr

보호하기 위하여 금지될 단계에 있으므로 새로운 방법을 강구하여야 할 단계에 와 있다. 이러한 분위기에 편승하여 최근에는 슬러지류의 재활용을 위한 연구가 많이 수행되고 있다.<sup>6-10)</sup> 슬러지류의 재활용을 위해서 인체 및 환경에 영향을 미치지 않아야 하며, 이러한 전제조건이 충족된다면 경제적인 측면과 환경적인 측면에서 슬러지류의 재활용은 매우 중요한 과제이다. 하·폐수처리 공정에서 발생하는 슬러지류는 크게 하수처리 슬러지류와 폐수처리 슬러지류로 나눌 수 있으며 다양한 슬러지류종에는 중금속류등과 같이 유해물질이 함유되어 있으므로 관리가 부적절하면 수질, 대기, 토양등 각종 자연환경에 위해를 끼친다. 또한 국민의 건강이나 생태계의 파괴에까지 그 영향이 매우 크기 때문에 재활용을 위하여 사전에 슬러지류의 물리화학적 특성의 평가가 선행되어야 하지만 현재까지 다양한 산업의 업종별 슬러지에 대한 물성평가 사례가 전무한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 하·폐수처리 슬러지류의 특성을 평가하기 위하여 우리나라의 하수처리장을 비롯하여 폐기물 문제가 심각한 대표적인 업종을 선정하여 당해 업체에서 발생하는 슬러지류의 삼성분 분석, 발열량 분석 및 용출시험등의 물리화학적인 특성을 조사연구함으로써 장래 산업체 폐기물중 슬러지류의 처리 및 처분방법의 결정에 도움을 주고자 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 실험재료

시료는 주로 대구 경북지역에 위치한 기업체를 중심으로 폐기물관리법<sup>3)</sup>에 의하여 지정폐기물과 일반폐기물로 분류되는 주요 업종 중에서 슬러지 처리 문제로 곤란을 겪고 있는 7개 업종을 선정하여 채취하였다. 업종에 따른 시료의 채취는 Table 1에서 나타낸 바와 같이 각 업체의 폐수처리장에서 발생하는 탈수슬러지들

대상으로 슬러지 더미에서 5개 이상의 지점으로부터 시료를 골고루 채취하였다.

업종별로 생산제품에 따른 시료채취 공장의 수를 보면 섬유산업에서는 방직등 15개 업체, 가죽·가방·마구류 및 신발제조업에서는 모든 업체가 피혁을 제조하는 업체로 13개 업체이고, 코크스·석유제품제조업에서는 석유정제등 6개 업체, 화합물 및 화학제품제조업에서는 산, 알카리등 12개 업체, 1차금속제조업에서는 제철등 7개 업체, 조립금속제품제조업에서는 가전제품등 8개 업체 그리고 공공하수처리장에서 발생하는 탈수슬러지 6개에서 시료를 채취하였다.

### 2. 실험방법

각종 사업장에서 발생하는 슬러지류는 발생원에 따라 상당한 물성의 차이가 있다. 이들의 물성분석 항목으로는 기본적으로 수분, 가연분(VS), 회분(FS)으로 측정하는 3성분 분석과 소각가능성을 조사하기 위한 발열량 측정 및 슬러지중에 함유된 중금속류를 정량하여 그 유해정도를 평가하기 위하여 용출시험을 실시하였다. 모든 시험방법은 폐기물관정시험방법<sup>11)</sup>에 따라 수행하였다.

#### 1) 삼성분 분석

삼성분 분석은 폐기물의 분석에 있어서 가장 오차가 많이 발생할 수 있는 항목이므로 분석에 주의할 하여야 한다. 따라서 본 실험에서도 이를 고려하여 현장에서 채취한 시료 1 kg을 유리병에 밀봉하여 실험실에 운반하여 곧바로 잘 섞은 후 약 10 g을 도가니에 정평하여 105~110°C에서 항량이 될 때까지 약 5시간 이상 충분히 건조시킨 후 이를 냉각시켜 평량하였다. 이때 수분함량은 미리 건조 및 항량한 도가니 무게(W<sub>1</sub>), 건조전 시료와 도가니 무게(W<sub>2</sub>), 건조 후 시료와 도가니 무게(W<sub>3</sub>)에 대하여 식 (1)를 사용하여 산출하였다.

$$\text{Moisture}(\%) = \frac{W_2(\text{g}) - W_3(\text{g})}{W_2(\text{g})} \times 100 \quad (1)$$

슬러지 중의 회분을 분석을 위하여 수분 측정 후의 건조시료와 도가니를 600±25°C의 전기로속에 넣어 약 2시간 강열하여 완전 연소시킨 재와 도가니 무게(W<sub>4</sub>)를 이용하여 회분함량은 식 (2)로 계산하였다.

$$\text{FS}(\%) = \frac{W_4(\text{g}) - W_1(\text{g})}{W_2(\text{g})} \times 100 \quad (2)$$

그리고 슬러지 중의 가연분 함량은 수분과 회분시험 결과를 이용하여 식 (3)으로 계산하였다.

$$\text{VS}(\%) = 100 - \text{Moisture}(\%) - \text{FS}(\%) \quad (3)$$

Table 1. Types of industries and sample collection

Industry types	No. of sampling site	Remarks
Textile industries(S1)	15	
Hide·rubber industries(S2)	13	
Coke·petroleum industries(S3)	6	
Chemical pant industries(S4)	12	
1st metal industries(S5)	7	
Framing metal industries(S6)	8	
Sewage treatment plants(S7)	6	

2) 발열량 측정

일반적으로 발열량의 측정은 크게 bomb calorimeter에 의한 직접분석방법, 삼성분석 및 원소분석 자료를 이용하는 방법 등이 있으나 여기서는 가장 정확도가 높은 bomb calorimeter에 의하여 측정하였다. 발열량은 폐기물을 소각처리하거나 소각 열 회수를 할 경우에 가장 중요한 인자이다. 젖은 슬러지류를 사용하여 발열량을 측정하기는 곤란하므로 완전 건조시킨 건조슬러지를 사용하였다. 건조슬러지 1~2 g을 정평하여 Parr bomb calorimeter(Parr Serial No. 2608, USA)를 이용하여 측정하여 건량기준 고위발열량을 계산하였다. 폐기물의 소각가능성의 평가에는 저위발열량이 주로 사용되지만 여기서는 복잡한 슬러지류의 성질로 인하여 원소분석을 실시치 못한 관계로 습량기준 고위 발열량으로 평가를 대신하였다. 분석된 건량기준 고위발열량(H<sub>dry</sub>)을 이용하여 슬러지류중의 수분량(W<sub>i</sub>)을 보정하여 습량기준 고위발열량(H<sub>wet</sub>)을 식 (4)로 계산하였다.

$$H_{wet} = H_{dry} \times \frac{100 - W_i(\%)}{100} \quad (4)$$

3) 용출실험

슬러지류의 유해성을 평가하기 위한 용출시험방법은 각국마다 다소 차이가 있으나<sup>12)</sup> 본 연구에서는 국내 폐기물공정시험방법에 의거 실험을 하였으며 그 과정은 Fig. 1과 같다. 중금속류의 분석기기로는 SHIMADZU社 AA-6401F의 원자흡광광도계를 사용하였으며, 유기인, 트리클로로에틸렌과 테트라클로로에틸렌의 경우는 HP社 5890II의 가스크로마토그래프를 사용하여 분석하

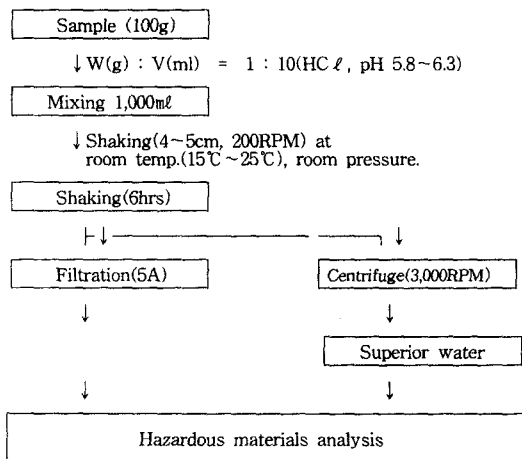


Fig. 1. Schematic diagram by the Korean Standard Leaching Procedure(KSLP).

였다.

가스크로마토그래프의 분석조건으로는 칼럼은 유리제로서 내경 3 mm, 길이 3 m의 것을 사용하였고, 칼럼충진제는 크로마토그래프용 크로모솔브 W(AW-DMCS : 177~250 m)에 가스크로마토그래프용 실리콘 DC-200을 20% 피복한 칼럼충진제를 사용하였다. 또한 운반가스는 순도 99.999 V/V%의 질소를 이용하여 유량 60 ml/분으로 하였으며, 시료도입부와 오븐, 검출기의 온도는 각각 250°C, 80°C 및 250°C로 하였다. 그리고 분석용 시료는 전처리가 끝난 검액 10 ml를 20 ml 마개있는 시험관에 조용히 옮기고 가스크로마토그래프용 n-Hexane 10 ml를 넣어 밀봉한 다음 약 3분간 세게 흔들어서 섞고 정치한 후 상등액을 분취하여 분석시료로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 삼성분 분석

슬러지나 폐기물의 삼성분 분석은 성분분석에서 가장 기본적인 항목으로서 효율적인 슬러지의 처리·처분법을 강구하기 위하여 우선적으로 평가되어야 할 항목이다. 각 종업종별 사업장에서 발생한 슬러지류에 대한 폐기물의 평균 삼성분분석을 실시한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 슬러지류의 함수율을 보면 섬유제품제조업(S1), 조립금속제품제조업(S6) 및 제1차금속제품제조업(S5)이 각각 81.5%, 81.4% 및 80.7%로서 80% 이상을 나타내었고 그외 코크스·석유제품제조업(S3), 가

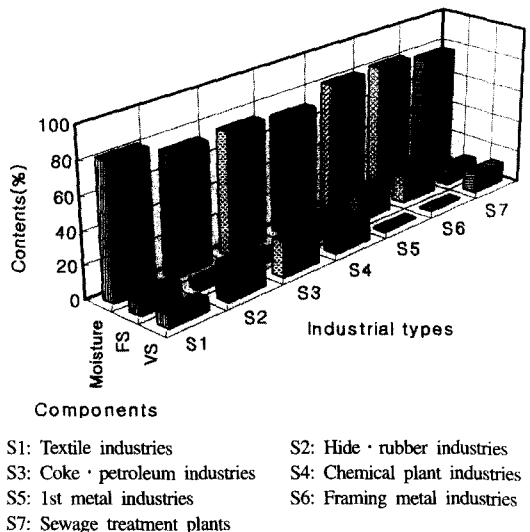


Fig. 2. Three components analysis of sludges in each industries.

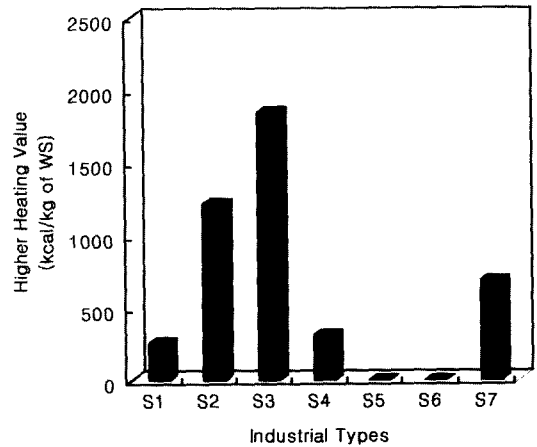
죽·가방·마구류 및 신발제조업(S2) 그리고 화합물 및 화학제품제조업(S4), 공공하수처리장(S7) 등은 80% 이하를 나타내었다.

이러한 슬러지류중에 함유된 수분은 다양한 형태로 존재하고, 존재형태에 따라서 분리특성이 변화한다. 수분의 존재형태는 슬러지류의 고액분리성이나 탈수성과 밀접한 관계가 있다. 슬러지중의 물의 존재형태를 크게 분류하면 슬러지입자와 직접 결합하지 않은 용이하게 분리되는 자유수와 슬러지입자와 결합하여 존재하는 수분으로 구분할 수 있다. 슬러지입자에 구속되어 있는 수분에 대해서는 입자와의 결합형태에 따라서 기계적인 입자의 구성을 변형, 압축할 필요가 있는 모관결합수, 응집제를 사용함으로써 분리가 가능한 표면부착수, 기계적인 방법으로는 제거되지 않고, 생물학적인 분해나, 열처리 및 냉동처리에 의해서 세포막을 파괴함으로써 제거되는 내부수로 나누어진다.<sup>13)</sup>

또한 각 업종별 슬러지류의 휘발성 유기물질의 함량을 보면 가죽·가방·마구류 및 신발제조업(S2), 코크스·석유제품제조업(S3), 화합물 및 화학제품제조업(S4), 공공하수처리장(S7)에서 각각 22.1%, 21.9%, 15.3% 및 12.7%를 보였으며, 그외 섬유제품제조업(S1)에서 8.1%, 조립금속제조업(S6)에서 0.9%, 제1차금속제조업(S5)에서 0.8%로 조사되었다. 그리고 회분의 함량을 보면 제1차금속제조업(S5)에서 18.5%, 조립금속제품제조업(S6)에서 17.7%, 화합물 및 화학제품제조업(S4)에서 13.3%, 섬유제품제조업(S1)에서 10.4% 그외 공공하수처리장(S7), 가죽·가방·마구류 및 신발제조업(S2), 코크스·석유제품제조업(S3)에서는 각각 9.8%, 4.5% 및 3.7%로 나타났다.

이상의 결과에서 보듯이 슬러지류중에 포함된 유기물질의 함량은 매립, 소각, 퇴비화, 고형화등 처리방법의 선정에 매우 중요한 인자이며, 소각의 경우 유기물 함량은 가연성분으로 발열량과 감량율을 결정하는 중요한 인자이다. 유기물을 다량 함유한 슬러지류의 경우는 퇴비화에 있어서 탄질비(C/N)와 퇴비화 속도를 결정하는 인자이며, 고형화의 경우는 일축 압축강도, 감량율 및 함수율을 결정하는 영향인자이다.

가죽·가방·마구류 및 신발제조업(S2), 코크스·석유제품제조업(S3) 등에서 발생하는 슬러지류의 경우에는 유기물의 함량이 높게 나타나 소각등에 의한 방법으로 처리하는 것이 효과적인 것으로 판단된다. 특히 하수처리 슬러지류의 경우도 유기물질과 수분의 함량이 높은 편이지만 다른 슬러지에 비하여 성상이 균일한 미세입자로 되어 있어서 유동상 소각처리법과 같이 고온의 공기와 잘 접촉시킬 경우 미세한 입자로 건조



S1: Textile industries S2: Hide · rubber industries  
S3: Coke · petroleum industries S4: Chemical plant industries  
S5: 1st metal industries S6: Framing metal industries  
S7: Sewage treatment plants

Fig. 3. Higher heating value of sludges in each industries.

되어 부유되므로 완전한 소각이 가능한 성질을 가지고 있다고 생각된다.

## 2. 발열량 측정

슬러지류에 대한 발열량은 소각처리의 타당성 여부와 또한 열회수 등에 있어서 중요한 지표가 되는 항목으로서 통상 소각물에 함유된 유기물의 함량과 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서 실시한 발열량 측정 결과를 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 유기물 함량과 밀접한 관계를 가지고 있다. 유기물 함량이 21.9%인 코크스·석유제품제조업(S3)에서 발생하는 슬러지류는 1,850 kcal/kg으로 가장 높았고, 유기물 함량이 22.1%인 가죽·가방·신발제조업(S2)에서 발생하는 슬러지류의 경우가 1,220 kcal/kg이었으며, 공공처리장(S7)에서 발생하는 슬러지류의 경우는 유기물 함량은 12.7%이나 발열량은 689 kcal/kg으로 낮은 편에 속하였다. 유기물 함량이 상대적으로 낮은 섬유제품제조업(S1)이나 화합물 및 화학제품제조업(S4)에서의 경우는 모두 500 kcal/kg 이하였다. 이와 같이 업종자체는 유기물을 가공·생산하는 업종이라도 발열량이 낮은 슬러지가 다양하게 혼합되어 있다는 의미로 해석이 가능하다. 그리고 제1차금속제조업(S5)이나 조립금속제조업(S6)의 슬러지는 대부분 무기성슬러지로 열량측정이 불필요하였다. 이러한 슬러지류 중 유기물의 함량과 발열량과의 상관성을 회귀분석한 결과를 Fig. 4에서 나타내었다. 상관계수( $R^2$ )가 0.77로서 비교적 유기물함량과 발열량은 밀접한 관계가 있

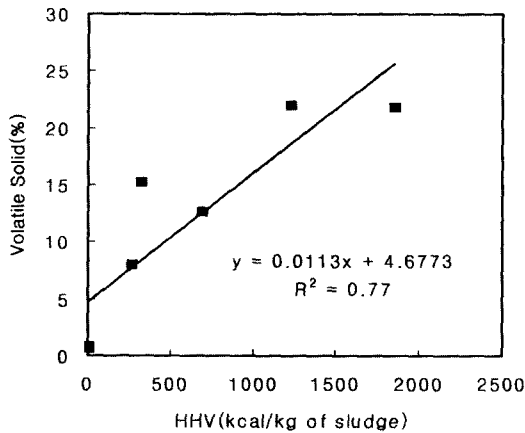


Fig. 4. Relationship between higher heating value and content of volatile solid.

음을 알 수 있다. 따라서 유기물을 다량 함유하는 슬러지의 경우는 발열량이 비교적 높아 소각하는 것이 효과적이며 이를 통하여 스팀 등 새로운 에너지를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 어떤 폐기물에 대한 소각가능 여부는 저위발열량으로 설명될 수 있으나 여기서는 시료의 특성에 따라 전시료에 대한 원소 분석이 불가능하여 실제 calorimeter에서 측정된 고위발

열량으로 대신하였으며 본 연구결과로 판단한다면 가죽·가방·신발제조업(S2)이나 코크스·석유정제품제조업(S3)에서 발생하는 슬러지는 소각처리가 효과적인 것으로 생각된다.

3. 유해물질의 용출

다양한 폐기물의 유해성을 평가하기 위한 용출실험방법으로는 동적 혹은 정적조건에 의한 회분식 용출실험과 폐기물을 column에 채워 현장조건과 유사하게 실험하는 column에 의한 연속식 용출실험 등으로 나눌 수 있으나.<sup>14)</sup> 현행 우리나라 폐기물관리법에서는 지정폐기물을 분류하는 방법으로 회분식 용출시험에 의해 용출되는 유해물질의 농도에 근거하고 있다.<sup>3)</sup> 이러한 용출시험방법은 주로 산업폐기물이 위생매립지에서 처분될 경우 침출되는 것을 예측하기 위하여 고안된 방법이다. 미국 캘리포니아주에서는 용출시험 이외에도 전량 시험결과를 같이 적용하여 유해물질여부를 평가하고 있다.<sup>15)</sup> 슬러지류중에 포함된 중금속 성분은 배출원의 종류에 따라 차이가 있으며, 유해 중금속이 다량 포함된 슬러지류를 그대로 매립할 경우 토양에 잔류하게 되어 토양, 지하수 및 지표수를 오염시키는 원인이 된다.

산업장에서 발생하는 폐기물 가운데 슬러지류를 대상으로 하여 폐기물공정시험방법에 따라 용출시험을 실

Table 2. Criteria for designating specified wastes in Korea

Items	Pb	Cu	As	Hg	Cr <sup>6+</sup>	Cd	CN	Org.P	TCE*	TeCE**
Leaching threshold limit (mg/l)	3	3	1.5	0.005	1.5	0.3	1	1	0.3	0.1

\*: Trichloroethylene, \*\*: Tetrachloroethylene.

Table 3. Results of the KSLP for each sludges (Units : mg/l)

Items	Textile industries (n=15)*	Hide·rubber industries (n=13)	Coke·petroleum industries (n=6)	Chemical plant industries (n=12)	1st metal industries (n=7)	Framing metal industries (n=8)	Sewage treatment plants (n=6)
	AVG±STD*	AVG±STD	AVG±STD	AVG±STD	AVG±STD	AVG±STD	AVG±STD
Pb	0.013±0.020	0.088±0.263	0.004±0.004	0.411±0.811	0.092±0.109	0.189±0.219	0.038±0.010
Cu	0.191±0.500	0.030±0.077	0.014±0.009	0.256±0.790	0.072±0.061	1.066±1.888	0.035±0.031
As	0.002±0.004	0.004±0.006	0.003±0.002	0.011±0.020	0.002±0.004	0.002±0.004	0.001±0.001
Hg	ND	ND	ND	0.001±0.001	ND	ND	ND
Cd	0.009±0.019	0.011±0.012	0.009±0.006	0.019±0.026	0.002±0.003	0.013±0.014	0.013±0.010
Cr <sup>6+</sup>	0.017±0.041	0.551±1.000	0.005±0.005	0.180±0.476	0.036±0.050	0.409±0.931	0.045±0.031
CN	ND	0.005±0.004	0.011±0.007	0.007±0.013	ND	0.225±0.423	ND
Org-P	ND	ND	ND	0.001±0.001	ND	ND	ND
TCE	ND	ND	0.008±0.004	0.007±0.027	ND	0.007±0.008	ND
TeCE	ND	ND	0.018±0.007	0.005±0.010	ND	0.014±0.018	ND

\*: sample number, +: average±standard deviation, ND: not detected.

**Table 4.** Hazardous material detection of sludges by the KSLP (Units : %)

Items	Textile industries	Hide · rubber industries	Coke · petroleum industries	Chemical plant industries	1st metal industries	Framing metal industries	Sewage treatment plants
Pb	47	85	83	100(5)*	100	90	100
Cu	93	100	100	100(5)*	86	100(15)*	100
As	40	85	100	75	29	40	50
Hg	ND	ND	17	40	ND	ND	ND
Cd	40	92	100	85	29	70	75
Cr <sup>6+</sup>	33	100(23)*	83	85(5)*	43	55(15)*	75
CN	ND	100	100	30	ND	40(10)*	ND
Org-P	ND	ND	ND	20	ND	ND	ND
TCE	ND	ND	100	25	ND	50	ND
TeCE	ND	ND	100	30	ND	45	ND

ND: not detected, \*: above threshold limit.

시하여 Table 2에서 나타난 지정폐기물의 판정기준에 따라 평가하였다.

다양한 슬러지류에 대한 유해물질의 용출농도와 검출율을 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 섬유제품제조업(S1)에서 발생하는 슬러지에 대한 용출실험결과 Cu가 평균 0.191 mg/l로 높은 농도를 나타내었으며, 다음으로 Cr<sup>6+</sup>, Pb, Cd, As가 각각 0.017 mg/l, 0.013 mg/l, 0.009 mg/l, 0.002 mg/l로서 항목에 따라 업체간의 평균 농도에 대한 표준편차도 상당히 크게 나타났다. 이러한 연구결과는 선행의 연구결과<sup>12,16)</sup>와 유사하게 나타났다. 또한 각 항목별 검출율을 보면 Cu의 경우는 93%로 다른 중금속에 비하여 높은 검출율을 나타내었으며, 다음으로 Pb, As, Cd, Cr<sup>6+</sup>가 각각 47%, 40%, 40% 및 33%로 검출되었고, 나머지 Hg, CN, Org-P, Trichloroethylene(이하 TCE), Tetrachloroethylene(이하 TeCE) 등은 검출한계 이하로 분석되었다. 이와 같이 섬유제품제조업(S1)에서 발생하는 슬러지류는 모두 지정폐기물의 판정기준 이하로 나타났다.

또한 가죽·가방·신발제조업(S2)에서 발생하는 슬러지에서는 Cr<sup>6+</sup>의 경우 평균 0.551 mg/l로 높은 값을 나타내었고, 그 다음으로 Pb, Cu, Cd, CN, As가 각각 0.088 mg/l, 0.030 mg/l, 0.011 mg/l, 0.005 mg/l, 0.004 mg/l를 나타내었다. 이들 중 Cu, Cr<sup>6+</sup> 및 CN이 100%의 검출빈도를 나타내었고, Cd, Pb, As가 각각 92%, 85%, 85%의 검출빈도를 나타내었으며, 그 중 Cr<sup>6+</sup>은 23%가 용출허용기준을 초과하는 것으로 분석되었다. 또한 Hg, Org-P, TCE, TeCE 등의 항목은 검출농도 한계 이하로 나타났으나 가죽·가방·신발제조업(S2)에서 발생하는 슬러지의 경우 일부는 지정폐기물의 판정기준이 되는 유해물질의 농도가 초과하여 지정폐기물

로 구분되었으므로 특별한 관리가 요망된다.

코크스·석유제품제조업(S3)의 슬러지에 대한 유해물질의 용출농도는 TeCE의 경우가 0.018 mg/l로 다른 중금속에 비하여 높은 값을 나타내었으며, 다음으로 Cu, CN, Cd등이 각각 0.014 mg/l, 0.011 mg/l, 0.009 mg/l의 용출농도를 나타내어 다른 업종에 비하여 동종 업체간의 각 유해물질농도에 따른 표준편차는 비교적 낮은 값을 나타내었다. 그리고 검출율을 보면 Cu, As, Cd, CN, TCE 및 TeCE 등의 유해물질이 100%를 나타내었고 Pb와 Cr<sup>6+</sup>이 83%로 같은 값을 나타내었으며, Hg는 17%의 검출율을 나타내어 전반적으로 용출허용기준을 기준을 초과하는 물질은 없었다. 이와 같은 결과로부터 코크스·석유제품제조업(S3)의 슬러지는 모두 지정폐기물의 판정기준 이하의 농도를 나타내었다.

화학제품제조업(S4)에서 발생하는 슬러지의 경우는 Pb가 0.411 mg/l로 높은 용출농도를 나타내었고, 다음으로 Cu, Cr<sup>6+</sup>, Cd이 각각 0.256 mg/l, 0.180 mg/l, 0.019 mg/l의 순이었으며, 그 외 항목들은 비교적 낮은 농도를 나타내었다. 또한 검출율을 보면 다른 업종의 경우와 달리 본 연구의 실험대상항목 10가지가 모두 검출되었고 그 중에서 Pb와 Cu가 100%, 그리고 Cr<sup>6+</sup>, Cd, As, Hg가 각각 85%, 85%, 75%, 40%의 검출율을 나타내었으며 이들 중 Cr<sup>6+</sup>에서 5%가 지정폐기물의 판정기준을 초과하는 값을 나타내어 화학제품제조업(S4)에서 발생하는 슬러지류의 일부가 지정폐기물로 분류되어 관리상의 중요성을 알 수 있었다.

제1차금속제조업(S5)에서 발생하는 슬러지에 대한 용출실험결과를 보면 Pb와 Cu가 각각 0.092 mg/l 및 0.072 mg/l의 값을 나타내어 다른 항목들에 비하여 높은 값을 나타내었으며, 다음으로는 Cr<sup>6+</sup>이 0.036 mg/l가

용출되었다. 그리고 Hg, CN, Org-P, TCE, TeCE는 검출한계 이하의 농도를 나타내었다. 전반적으로 볼 때 다른 업종에 비하여 제1차금속제조업(S5)에서 발생하는 슬러지류에는 중금속 등 유해물질의 용출농도가 낮게 용출되었다. 그리고 검출율을 보면 용출시험대상 항목 중 Pb와 Cu가 각각 100%와 86%의 높은 검출율을 나타내었으며 그의 As, Cd 및 Cr<sup>6+</sup>이 낮은 검출율을 보였다. 이와 같은 실험결과를 보면 제1차금속제조업(S5)에서 발생하는 모든 슬러지류는 지정폐기물의 용출기준이하의 농도로 분석되었다.

조립금속제품제조업(S6)에서 발생하는 슬러지의 경우는 Cu가 1.066 mg/l로 다른 항목에 비하여 높은 값을 나타내었고, 다음으로 Cr<sup>6+</sup>, CN, Pb가 0.409 mg/l, 0.225 mg/l, 0.189 mg/l로 용출되었으며, 그 외 TeCE, Cd, TCE, As가 미량 용출되었다. 그리고 Hg, Org-P는 검출한계 이하의 값을 나타내었다. 검출율을 보면 Cu, Pb 및 Cd가 각각 100%, 90% 및 70%의 검출율을 나타내었으며 그 외는 낮은 검출율을 보였다. 검출된 항목중에서 Cu, Cr<sup>6+</sup> 및 CN은 각각 15%, 15%, 10%의 슬러지가 지정폐기물의 용출허용기준을 초과하는 농도로 검출되었다. 따라서 조립금속제품제조업(S6)에서 발생하는 슬러지류의 경우도 다른 업종에 비하여 많은 폐기물이 지정폐기물로 판정되어 관리 및 처리·처분에 특별한 주의가 요망된다.

한편 공공하수처리장(S7)에 대한 용출실험결과를 보면 조사대상 슬러지의 평균농도는 Cr<sup>6+</sup>이 0.045 mg/l로 높은 값을 나타내었고, 그 다음으로 Pb, Cu, Cd가 각각 0.038 mg/l, 0.035 mg/l, 0.013 mg/l로 나타났다. 그의 As가 미량 용출되었으며, Hg, CN, Org-P, TCE, TeCE는 검출한계 이하였다. 공공처리장에서 발생하는 슬러지류에 대한 용출실험결과 각 슬러지에 대한 항목별 표준편차는 상당히 낮은 값을 나타내어 다른 업종에서 발생하는 슬러지류에 비하여 균일한 성상을 가졌다고 할 수 있다. 그리고 검출율을 보면 조사대상 슬러지중 Pb와 Cu가 100%의 검출율을 보였으며, Cd와 Cr<sup>6+</sup>이 75%의 검출율을, 그리고 As가 50%의 검출율을 나타내었다. 이와 같이 본 연구에서 시료로 채취한 하수슬러지들은 모든 항목에서 지정폐기물의 용출허용기준 이하로 용출되어 일반사업장폐기물로 취급된다고 할 수 있다.

위에서 언급된 바와 같이 다양한 업종에서 발생하는 하·폐수처리 슬러지류에 대하여 물리화화학적 특성을 조사 연구한 결과 가죽·가방·신발제조업(S2), 화학제품제조업(S4), 조립금속제품제조업(S6)에서와 같이 일부 업종에서 발생하는 슬러지류는 지정폐기물로 분류

되어 처리 및 처분과정에서 유해물질이 환경 중으로 유입되지 않도록 특별한 주의가 요망된다. 또 섬유제품제조업(S1), 코크스·석유제품제조업(S3), 제1차금속제조업(S5), 공공하수처리장(S7)에서 발생하는 슬러지와 같이 일부의 슬러지류는 모든 항목이 지정폐기물 용출기준 이하로 나타나 일반사업장폐기물로 취급될 수 있지만 이들 슬러지중에 포함된 미량 중금속류, CN 등의 유해물질과 TCE, TeCE 등 유기용제류는 환경과 인체의 건강에 심각한 악영향을 미칠 수 있으므로 특별한 관리가 선행되어야 한다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 대구경북지역에서 슬러지 처리 문제가 심각한 대표적인 산업을 선정하여 당해 업체의 하·폐수처리장에서 발생하는 슬러지를 채취하여 물리화학적 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 슬러지중의 수분함량은 섬유제품 제조업에서 81.5%, 조립금속제품제조업에서 81.4%, 제1차금속제품 제조업에서 80.7%를 나타내었고, 휘발성분은 가죽·가방·마구류 및 신발제조업에서 22.1%, 코크스·석유 제품 제조업에서는 21.9%, 그리고 회분은 제1차금속제조업과 조립금속제품제조업에서 각각 18.5%와 17.7%를 나타내었다.

2) 슬량기준 고위발열량은 코크스·석유제품제조업에서 1,850 kcal/kg로 가장 높았고, 가죽·가방·신발제조업에서 1,220 kcal/kg이었으며, 제1차금속제조업이나 조립금속제조업의 슬러지는 대부분 무기슬러지로 소각 처리가 불가능함을 알 수 있었다.

3) 각종 슬러지류의 용출실험결과 코크스·석유제품 제조업, 화합물 및 화학제품제조업, 조립금속제조업등이 대부분의 슬러지에서 거의 전항목이 검출되었고 섬유제품제조업, 가죽·가방·마구류 및 신발제조업, 제1차금속제조업등에서 발생하는 슬러지류에서도 일부 항목이 검출되었다.

4) 용출기준과 비교할 경우 가죽·가방·마구류 및 신발제조업, 화합물 및 화학제품제조업, 조립금속제조업에서 발생하는 슬러지류중 일부가 용출기준을 초과하여 지정폐기물로 분류되었으며 그 외 공공하수처리장 등에서 발생하는 슬러지는 용출기준 이하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2004년도 영남이공대학 연구조성비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 권기홍, 조병락 : 염색슬러지를 이용한 경량골재 제조 기술 개발. 제29회 추계보건의학종합학술대회논문집, 265-268, 2004.
2. 권기홍, 남창모, 서유덕, 조병락, 임수택 : 유기물을 다량 함유한 염색폐수처리슬러지에 대한 건축재료의 재활용 가능성 평가. 2004학년도 한국산업융용학회 추계학술대회 논문집, 1-6, 2004.
3. 환경부 : 폐기물관리법, 동법시행령, 동법시행규칙, 2003.
4. Tchobanoglous, G., Theiaen, H. and Vigil, S. : *Integrated Solid Waste Management*. McGraw Hill Inc., New York, 1993.
5. 어명철, 이승목, 이일영, 김영익 : 스크류 농축기와 PCD를 이용한 하수슬러지 탈수성 연구. 대한환경공학회지, **26**(9), 1045-1051, 2004.
6. Yasuda, Y. : Sewage Sludge Utilization Technology in Tokyo. *Wat. Sci. Tech.*, **23**, 1743-1752, 1991.
7. Tay, J. H. : Sludge ash as lightweight concrete material. *ASCE Environ. Eng.*, **115**, 345-350, 1989.
8. Bhatt, J. H. : Compressive strength of municipal sludge ash mortars. *ACI Mater. J.*, **86**, 394-400, 1989.
9. 金刺敏明 : 下水汚泥の建設資材化. *土木技術*. **45**(4), 117-122, 1990.
10. Sandvik, M. and Hammer, T. A. : The Development and Use of High Performance Lightweight Aggregate Concrete in Norway. *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, 20-24. June, Sandefjord, Norway, 617-627, 1995.
11. 환경부 : 폐기물공정시험방법, 2003.
12. 남궁완, 허 평, 김철수 : 업종별 산업폐기물 용출특성에 관한 연구. *한국폐기물학회지*, **13**(2), 186-192, 1996.
13. 岡田和男 : 下水汚泥の處理・處分. *環境公害新聞社*, 45-46, 1983.
14. Shivery, W., Bishop, P., Gress, D. and Brown, T. : Leaching tests of heavy metals stabilized with portland cement. *Journal WPCF*, **58**(3), 234-241, 1986.
15. Bishop, P. L. : Leaching of inorganic constituents from stabilized hazardous wastes. *Hazardous Wastes & Hazardous Materials*, **5**(2), 129-143, 1988.
16. 권기홍, 임우성 : 염색슬러지 연소재를 이용한 보도블럭의 제작과 물성평가. *한국환경위생학회지*, **30**(2), 167-172, 2004.