

취수원별 정수장 슬러지의 물리화학적 특성

문용택·김병균*

한국수자원공사·수자원연구원

Characteristics of water treatment plant sludges on raw water source

Yong-Taik Moon·Byung-Goon Kim

Korea Water Resources Research Institutes, KOWACO, Taejeon, Korea, 305-390

Abstract

Recently, needs for reuse of sludge produced from WTP(water treatment plant) have been increased with shortage of landfill sites and difficulties of the treatment and disposal processes. Therefore, Reusing is becoming an increasingly popular waste management alternative to divert waste from landfills. In order to research the characteristics of WTP sludges, we used the sludges of C WTP which intake the lake Dae-Cheong and the sludges of S WTP which intake Keum river. The specific surface area of C and S WTP sludges were 0.9986 m²/cc and 1.874 m²/cc, respectively. The gravity was about 2.0 ~ 2.4 which are scope of peat or loamy clay. The major minerals of C WTP sludges were kaolinite(48.4%), muscovite(19.5%), and quartz(16.7%). Also, muscovite(31.6%), quartz(30.3%), and kaolinite(17.3%) in S WTP sludges were major minerals.

Key words : water treatment plant, specific surface area, characteristics of sludges

*Corresponding author E-mail : ytmooon@kwater.or.kr

I. 서론

일반적으로 정수 처리 공정은 응집제에 의한 혼화-응집, 그리고 침전, 여과, 염소에 의한 소독 처리로 이루어지며, 필요에 따라 단위 공정에 소석회와 분말 활성탄이 첨가되기도 하고 입상활성탄, 미생물 등에 의한 산화, 흡착, 생물 분해를 이용한 고도 처리가 이루어지기도 한다. 이런 처리과정 중 폐기물로서 발생하는 슬러지는 주로 침전과 여과 공정에서 발생된다. 침전 공정의 침전 슬러지는 침전지 하부의 배출구로 배출되고, 여과 공정의 역세척수는 회수조에서 얼마간 정제된 후 상징수 회수 후 퇴적 슬러지로 배출되거나 또는 정제시키지 않고 그대로 침전지로 회수하여 침전지에서 슬러리로 배출된다.

정수 처리 과정에서 제거해야 할 원수의 불순물은 여러 형태의 고형물로 존재한다. 정수장에 유입되는 고형 물질은 통상 부유 물질, 콜로이드 물질, 용존 물질로 존재하는데 부유 고형물은 크기가 $0.1\mu\text{m}$ 이상으로 침전지에서 중력 침전으로도 쉽게 제거되며, 콜로이드 고형물은 크기가 $0.1 \sim 0.001\mu\text{m}$ 로 중력 침전과 여과 공정에서 제거가 불가능하여 응집제로 응집시킨 후 침전 및 여과 공정에서 제거한다. 용존 고형물은 산화하여 불용성 침전물로 변화하거나 흡착, 이온 교환 등으로 제거할 수 있지만 실제 대량 처리 공정에서는 어렵고, 상대적으로 슬러지량이 적어 무시할 정도이다. 그러나 때에 따라 용존 고형물도 응집제를 사용한 침전 공정에서 제거되기도 한다.

원수의 탁도와 색도를 유발하는 고형물은 주로 점토, 실트, 조류, 박테리아, 펠릭 또는 휴믹산, 광물질(장석, 사장석, 규조토, 규산염 등 주로 지표 구성 물질)과 각종 유기물질로 이루어져 있다. 원수에서 제거되는 고형물의 양은 원수와 정수의 총 고형물량의 차이로 쉽게 계산이 가능하나 응집제 처리 과정에서 투입되는 응집제에 의한 침전 고형물은 응집제의 종류와 사용량이 불규칙하여 발생 메카니즘이 복잡하다.

본 연구에서는 강과 저수지를 수원으로 하는 정수장 발생 슬러지의 물리 화학적 특성을 규명 함으로써 슬러지의 재이용 및 처분을 위한 기초 자료를 제공하는데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 실험재료

정수장 슬러지의 물리 화학적 특성을 조사하기 위하여 금강 수계의 대청댐을 취수원으로 하는 C 정수장, 금강을 취수원으로 하는 S 정수장에서 발생하는 슬러지를 이용하였다.

2. 실험방법

슬러지의 특성에 대한 분석항목으로는 슬러지의 물리·화학적 특성, 슬러지의 토성 및 토질역학적 특성, 재료학적 특성분석(시차열 분석, X-ray 회절 분석, 주사 전자현미경 관찰)을 하였으며, 농업토양화학적 성분으로는 유기물, 조회분, 총질소, 유효인산 및 교환성 양이온을 분석하였다. 분석방법은 Standard methods에 준하여 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 슬러지의 물리적 특성

1.1 슬러지의 비표면적

정수장 폐기물의 물리적 특성 결정은 고액 폐기물계에서 직접 유도되며, Knocke¹⁾는 슬러지의 특성을 거시적 특성과 미시적 특성으로 구분하였는데 거시적 특성은 비저항, 침강 속도, 고형물 농도의 Parameter이고, 미시적 특성은 입자의 입경분류와 밀도 등이다. Knocke에 의하면 저탁도 원수의 수산화 알루미늄은 밀도가 $1.002 \sim 1.008 \text{ g/m}^3$ 이고 보다 높은 탁도의 원수에서 alum 슬러지는 $1.008 \sim 1.018 \text{ g/m}^3$ 의 밀도를 갖고 있으며, 저탁도에서 보다 높은 고탁도의 원수에서 보다 높은 농도로 슬러지가 탈수 된다는 것을 발견하였다.

alum 슬러지 flocc 형상은 장축에 대한 단축의 비가 0.5~0.75인 타원형으로 된 입자이다. 주축의 길이는 조정이 안 된 alum 슬러지의 경우 5~50 μm 이고 폴리머로 조정된 슬러지는 5~100 μm 정도이다. 수자원 연구원³⁾에서 조사된 C와 S정수장 슬러지의 비표면적은 Table 1 과 같다.

Table 1. Average particle size of WTP sludges
unit : micron

WTP specific surface	C	S
	0.9986	1.8746

1.2 슬러지의 비저항

슬러지의 비저항 값은 슬러지의 탈수 효율을 평가하는데 사용되고 있으며, 또 탈수 효과를 최적화 하는데 사용이 가능하다. 또 비저항 시험은 full scale 설비에서 화학적 조정을 평가할 경우에 가장 유용한 정량적인 분석 방법이다. 간단한 Buchner Funnel 장치에 정수장 슬러지를 첨가하고 변화하는 시간에 따라 여과량을 기록한다.

처리 안 된 슬러지와 각종 약품 조정을 받은 슬러지에 대한 비저항 시험의 반복에 의하여 최적 약품 첨가량을 결정하는 것이 가능하다. 그러나 이것은 단지 실험에서 사용된 슬러지 고형물 농도에 대하여 최대일 뿐이다

Table 2. The specific resistance of sludges based on polymer dosage

Polymer dosage (mg/l)	Specific resistance ($10^6(\text{sec}^2/\text{g})$)
0	19.3
15	14.0
30	8.0
50	1.5
70	1.1
100	1.0
150	3.6

Sample : C WTP settling sludges (TS : 0.5%)
Polymer : RAYA FLOC A210

비저항 자료가 이론적으로 full scale 설비의 규모 설정에 이용될 수 있으나 이것이 곧바로 실제에 적용되기는 어렵다. 이 실험은 슬러지의 조정에 대한 연구에 유용 가능하다. 대부분의 슬러지는 압축성이 있고 압밀도는 적용된 진공압과 탈수 시스템의 기하학적 배열에 좌우되는 것으로 나타난다. 경험적으로 비저항과 진공압이 연관성이 있다는 것을 알 수 있다. 수자원연구원³⁾ 보고에 의하면, 폴리머로 조정된 정수장 슬러지의 비저항 값은 Table 2와 같다.

1.3 슬러지의 비중

Table 3. Gravity comparison of soil and WTP sludges

soil	gravity
transported soil	2.7~2.8
sandy soil	2.65~2.75
cohesive soil	2.60~2.70
loamy clay	2.30~2.65
peat	2.30 이하
WTP (Alum Sludge)	2.0~2.4

정수장 슬러지의 비중은 Table 3 과 같이 2.0~2.4 정도로서 일반 토질과 비교해 볼 때 유기질 점토와 이탄의 범위에 든다³⁾. 슬러지의 비중은 슬러지의 처리 형태 및 슬러지 처리 과정에서 사용된 각종 화학 약품의 종류에 따라 달라지나 기본적으로 슬러지에 함유된 고형물중 유기물 함량에 좌우되는 것으로 판단된다. 다음 Table 4는 C, S 정수장의 슬러지의 비중 나타내고 있다.

Table 4. Gravity of WTP sludges

WTP	C	S
gravity	2.095	2.422

1.4 슬러지의 입도 분포

수자원 연구소에 의한 정수장 슬러지의

입도 분포 분석 결과⁴⁾ C, S 정수장 슬러지는 submicron 입자 크기로 부터 50 micron 입자 크기의 넓은 입도 분포를 나타내고 있다. 이와 같이 넓은 입도 분포를 나타내는 원인은 슬러지가 건조되면서 입자 크기가 작은 미세한 분말들이 서로 응집되어 강하게 결합되었기 때문이라고 생각되며, 점토 광물의 입도 분석 결과와 유사한 결과를 나타내고 있다. Table 5 는 S, C 정수장 슬러지의 평균 입도이다.

Table 5. Average particle size of WTP sludges

unit : micron

WTP	C	S
average particle size	12.9	6.7

1.5 슬러지의 결정상

슬러지 원 상태에서의 결정상은 XRD 분석 결과 Table 6에서 보는 바와 같이 quartz, muscovite, kaolinite, albite, microcline 등의 다양한 광물로 구성되어 있으며, 정수장에 따라 각 결정상의 구성비가 상이함을 알 수 있다. 그러나 정수장의 위치에 관계없이 슬러지의 주된 구성 광물은 kaolinite, muscovite이며 소량의 점토질 광물을 함유하고 있다. 정수장별 결정상 분석 결과는 다음과 같다.

C 정수장 슬러지의 주된 구성광물은 kaolinite (48.4 %), muscovite (19.5 %), quartz (16.7 %) 그리고 chlorite (15.5%)로 구성되어 있다. S 정수장 슬러지 주된 구성광물은 muscovite (31.6 %), quartz (30.3 %), kaolinite (17.3 %) 그리고 albite (12.9

%)로 구성되어 있다.

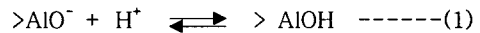
Table 6. Analysis results of mineral crystal phase based on WTP sludges

WTP	major mineral	ratio (%)
C	kaolinite	48.4
	muscovite	19.5
	quartz	16.7
	chlorite	15.5
S	muscovite	31.6
	quartz	30.3
	kaolinite	17.3
	albite	12.9

1.6 시간별 pH 변화

C 정수장 슬러지 1 g에 증류수 30 ml를 넣어 pH 2, 4, 7, 10 으로 조정 한 후 시간별 pH변화를 측정한 결과 Figure 1에 나타난 바와 같이, pH 4, 7, 10은 24 시간 이후 거의 pH 7로 변화했으나 pH 2는 24시간 이후 pH 4 부근으로 변화한 후 거의 변화가 없었다⁵⁾.

이는 C 정수장 슬러지가 결정 구조를 갖고 있어서 광물격자내에 Al 표면의 (-)전하에 의한 H⁺ 이온의 흡착으로 완충능을 갖고 있음을 알 수 있으며, Al의 완충작용은 반응식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.



이는 C 정수장 슬러지가 용출 Al에 의한 산성화를 야기시키는 것이 아니라 산성화를 억제하는 완충 능력을 갖고 있음을 입증한다.

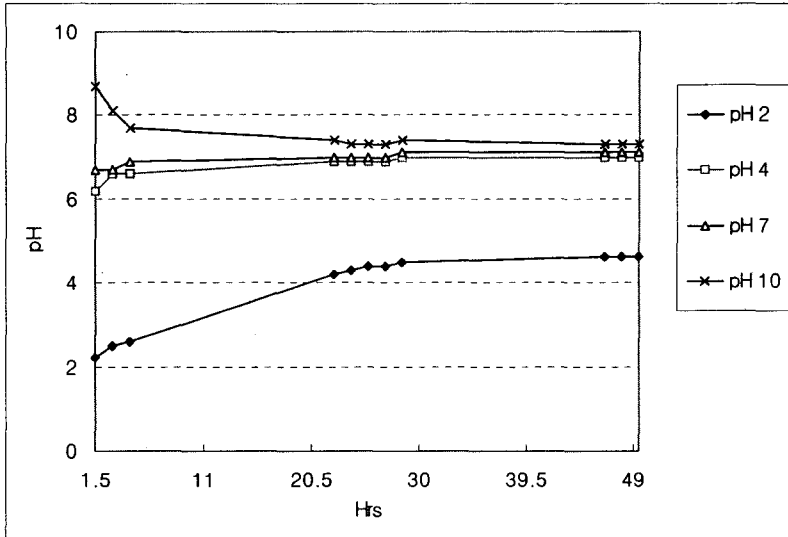


Fig. 1. Temporal variation of pH.

1.7 컨시스턴시

컨시스턴시는 연약토와 같은 세립자에 의력이 작용했을 때 유동 및 변형에 저항하는 정도를 나타내는 것으로서 액성 한계와 소성 한계가 대표적인 값이다. 흙의 액성 한계는 점토의 함유량과 유기물 함유량의 증가에 의하여 증가되며, 동일한 점토 함유량의 경우에도 점토 광물의 종류에 따라 크게 달라지고 점토 광물에 흡착된 이온의 종류에 의해서도 변화한다. C, S 정수장 슬러지에 대한 액성 한계 및 소성 한계의 비교⁵⁾는 Table 7과 같다.

Table 7. Atterberg limit of WTP sludges
unit : %

WTP	liquid limit	plastic limit
C	356.8~417.0	21.2~228.2
S	114.9~151.0	58.3~66.8

2. 슬러지의 화학적 특성

2.1 슬러지의 화학 조성

정수장 탈수여액에 대한 화학적 특성을

분석하는 목적이 고액 분리를 위한 탈수 효율을 평가하는데 있다면, 탈수된 슬러지 케이크의 화학적 성분을 분석하는 목적은 슬러지를 취급하거나, 처분 및 재이용하는 측면에서 찾아볼 수 있다. 슬러지의 화학적 조성은 원수 자체의 성분과 응집제 및 탈수제의 성분으로 구성되며 주로 실리카분, 알루미늄분, 강열 감량 등으로 구분되고 일반적인 조성 비율은 다음과 같다.

- o 실리카분 (SiO₂) : 35~50 %
- o 알루미늄분 (Al₂O₃) : 20~30 %
- o 강열 감량 : 15~30 %

여기서 강열 감량은 유기물, 탄소, 화학적 결합수 등으로 이루어져 있으며 200~400 °C 사이에서 급격한 감량을 나타내고 500 °C 정도에서 90 %이상, 600~800 °C에서 거의 전량이 감량된다. 이 감량 변화는 미세점토 및 Al(OH)₃의 감량 변화에도 영향을 미치는데 원수중의 미세점토 및 응집제에 기인하는 Al₂(OH)₃·3H₂O의 탈수에 의한 영향을 받고 있다.

2.2 휘발성 고형물 함량

슬러지의 휘발성 고형물 함량은 슬러지의 탈수와 취급성에 영향을 미칠 뿐 만 아니라, 탈수 처리된 슬러지 케이크의 재이용 가능성 분야를 검토하는 데 있어 매우 중요한 평가 지표가 된다. 예를 들어 유기물 함량이 많으면 유기질 비료나 농업용 토양 개량제로서의 이용가능성이 높으며, 휘발성 고형물 함량이 적으면 매립 성토 재료 또는 요업 재료로서의 이용 가능성이 높다. 따라서 휘발성 고형물 함량은 슬러지의 취급과 재이용 가능성을 평가하는데 있어 중요한 parameter이다.

본 연구에서 휘발성 고형물의 측정은 강열 감량법을 이용하였다. 강열 감량법은 600~800 °C에서 유기물의 분해, 시료내의 화학적 결정수의 분해 및 방출이 이루어지며 유기물은 모두 산화 연소되어 물과 탄산 가스등이 되어 없어진다. 휘발성 고형물 함량은 하천수를 사용하는 S 정수장에서는 10%였으나, 저수지 원수를 사용하는 C 정수장은 40% 정도의 매우 높은 값을 보이고 있으며, 다음 Table 8과 같다⁶⁾.

Table 8. Volatile solid content of WTP sludges

unit : %

WTP	C	S
volatile solid content	41.4	10

IV. 결론

호수를 수원으로하는 C 정수장과 하천을 수원으로하는 S 정수장 슬러지의 특성에 관한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. C 정수장 슬러지의 비표면적은 0.9986 m²/cc이고 S 정수장 슬러지의 비표면적은 1.7846 m²/cc로 나타났으며, 하천을 수원으로하는 정수장 슬러지 보다 호수를 수원으

로 하는 정수장 슬러지의 비표면적이 작았다.

2. C, S 정수장 슬러지의 비중은 2.0~2.4 정도로써 일반 토질과 비교해 볼 때 유기질 점토와 이탄의 범위이며 슬러지의 비중과 강열 감량의 관계에서 슬러지의 비중은 강열감량의 직접적인 함수로 강열 감량이 클수록 비중은 작아지고 있음을 알 수 있었다.

3. S, C 정수장 슬러지는 submicron 입자 크기로부터 50 micron 입자 크기의 넓은 입도분포를 나타내고 있으며 점토 광물의 입도 분석 결과와 유사한 결과를 나타냈다.

4. 슬러지의 결정상은 XRD 분석 결과 quartz, muscovite, kaolinite, albite, chlorite 등의 다양한 광물로 구성되어 있으며, C 정수장 슬러지의 주된 구성 광물은 kaolinite이고 S 정수장 슬러지의 주된 구성 광물은 muscovite, quartz였다.

5. pH 2, 4, 7, 10으로 조정 한 후 시간별 pH 변화는 24 시간 이후 pH 2를 제외하고는 pH 7로 변화하여 정수장 슬러지는 완충 능력을 가지고 있음을 알 수 있었다.

6. C 정수장의 액성 한계는 356.8~417.0 (%)로 나타났고, 소성 한계는 21.2~228.2 (%)였다. S 정수장의 액성 한계는 114.9~151.0 (%)였으며, 소성 한계는 58.3~66.8 (%)였다.

7. 휘발성 고형물 함량은 하천수를 취수하는 S 정수장 슬러지에서 10% 정도였으나 저수지 원수를 취수하는 C 정수장 슬러지에서는 40% 정도의 높은 값을 보였다.

참고문헌

1. Knocke, W.R. and D.L. Wakeland,

"Fundamental Characteristics of Water Treatment Plant Sludges," JAWWA, 75:10:516 (October, 1983).

2. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19 th.Ed., Eaton, A.D., Clesceri, L.S., and Greeberg, A.E. (Eds.), APHA,AWWA,WEF, 1995.

3. 한국수자원공사, 수자원연구원, "정수장

슬러지 처분 및 활용방안 연구," 1993.

4. 한국수자원공사, 수자원연구원, "정수장 슬러지 감량화 기초 연구," 1995.

5. 한국수자원공사, 수자원연구원, "정수장 슬러지 재활용 추진방안 연구," 1998.

6. 한국수자원공사, 수자원연구원, "탈수효율 향상에 의한 정수장 슬러지 감량화 방안 연구," 1999.