

직류전기를 이용한 하수슬러지 함수율 변화특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Water Content Changes of Wastewater Sludge Using Direct Current Electricity

안정모¹ · 송지윤² · 주재영² · 배윤선² · 박철휘^{2*}

Ahn, Jeong-mo¹ · Song, Ji-yun² · Joo, Jae-young² · Bae, yun-sun² · Park, Chul-hwi^{2*}

1 (주) 두산, 2 서울시립대학교 환경공학부

(2009년 12월 17일 접수 ; 2010년 4월 21일 1차수정 ; 2010년 10월 12일 2차수정; 2010년 10월 14일 채택)

Abstract

This study examined the change of water content in sludge using direct current electric equipment for decreasing the amount of sludge.

The experiment showed that the average density of solids in the sludge treated by direct current before the centrifugal dewatering process was increased by 47.8%, when compared to those not treated by direct current. From the result of measuring the granularity of the sludge by the direct current treatment, that the average particle size of the sludge that was not exposed to the electric current was 52.36 μm , and more than 90% of the sludge was <94.29 μm in size. On the other hand, the average particle size of the sludge passed through the direct current was 28.67 μm , and more than 90% of the sludge was 52.46 μm . This means that the average particle size of the sludge treated by the direct current was 45.2% smaller, and the standard deviation of granularity was improved. Because of water that separated from sludge moves to the (+) pole, larger particles become smaller and fine particles combine together, resulting in the equalization of the particle size. On the sludge after the centrifugal dehydrator, the change of the water content by the direct current was measured. The results showed that the average density of the solids was increased by 44.2% compared.

Key words : wastewater sludge, electric dewatering, water content, direct current electricity

주제어 : 하수슬러지, 전기탈수, 함수율, 직류전기

1. 서론

경제발전 및 생활의 향상은 생활하수 및 폐수의 증가를 가져왔고 이런 폐수를 처리하기 위한 정화활동이 증가함에 따라 폐슬러지의 양도 증가하는 추세이다¹⁾. 따라서 부가적으로 생산되는 슬러지의 적절한 처리·처분은 큰 문제점으로 대두되고 있다.

이러한 슬러지는 대부분 매립과 해양투기에 의해 처리되고 있지만 2003년부터 OECD 국가는 이와 같은 처리 방법이 금지되어 왔고, 우리나라도 2012년에 전면금지 될 예정으로써 슬러지 감량화 및 재활용 기술이 반드시 확보되어야한다²⁾.

슬러지 감량화 및 재활용을 위해서는 슬러지 탈수가 중요

* Corresponding author Tel:+82-2-2210-2576, Fax:+82-2-2210-2914, E-mail: chpark@uos.ac.kr(Park, C.)

한 요인으로 작용한다. 탈수란 각종 슬러지에 함유된 액체, 특히 물을 제거하는 것⁴⁾으로 그 방법에는 동결-해빙, 원심력, 기계적 탈수, 태양건조 등의 방법이 적용될 수 있다. 동결-해빙 방법은 슬러지 함수율을 50-60% 감소시킬 수 있지만, 에너지 소비와 고분자전해질이 경제적 제한요소로 작용한다. 원심력과 기계적 탈수방법은 슬러지 내 결합수를 제거하지 못한다는 단점을 가지고 있으며, 태양건조의 방법은 넓은 공간과 상당한 시간(7일 이상)이 요구 된다³⁾.

응집보조제 또한 슬러지의 탈수 효율을 높이기 위해 사용되어지고 있다. 응집보조제는 응집제 분자를 통해 부유물질에 가교의 형성을 발생시켜 부유물질의 플록형성을 도와주는 것으로⁸⁾, 응집보조제와 슬러지의 반응 결과 슬러지 입자가 서로 결합하고 얇은 층이 형성되게 된다. 그 결과 탈수 슬러지 내 건조 고형물의 함량이 높아지게 되고, 다음 공정에 더욱 효과적으로 적용 된다⁷⁾.

기계적 힘으로 슬러지 탈수를 수행하는 동안 생기는 한계를 극복하기 위한 방안으로 전기탈수 방법이 연구되었다⁴⁾. 전기에 의한 탈수법은 토양과 슬러지로부터 유기오염물질과 중금속을 분리하고 추출할 수 있는 기술로 알려져 있으며³⁾, 교류전기에 의한 방법과 직류전기에 의한 방법으로 나누어진다. 교류전기는 전류의 흐름이 일정하지 못하므로, 흔히 직류전기가 많이 사용되어지고 있으며 본 연구에서는 직류전기로 슬러지를 처리한 후 슬러지의 함수율과 입도 분석을 통해 슬러지 탈수특성을 알아보고자 하였다.

2. 이론적배경

2.1 입자주위의 액체 분포특성

슬러지의 탈수성은 슬러지 내에 있는 수분의 물리적 성질에 영향을 받으며, 슬러지 입자 주변의 액체는 물리적 결합과 화학적 결합으로 이루어져 있다. 슬러지 내의 수분은 자

유수, 간극수, 모관수, 결합수로 구성되어 있으며, 자유수는 입자의 최외곽에 위치한 물로서 입자의 표면전위와 무관하여 슬러지 고형물의 영향 없이 자유로운 유동이 가능한 수분이다. 간극수는 플러크와 유기물질들의 갈라진 틈새와 간극에 있는 수분으로 일부는 플러크 구조 내에, 일부는 세포 구조 내에 존재한다. 이 간극수에 대한 입자표면 전위의 영향은 불분명하고, 자유수와 같은 물리적 자유거동은 미약하다. 모관수는 수표결합에 의해 입자표면에 조밀하게 결합되어 있는 수분으로, 플러크의 물리적 응력변형에 의하여 제거가 가능하다. 마지막으로 결합수는 화학적으로 각각의 슬러지 고형물에 구속되어 있는 수분으로 기계적 탈수로는 제거가 불가능한 것으로 알려져 있다⁵⁾.

2.2 전기탈수 원리

전기 탈수는 기계적 압착탈수와 하이드로졸의 전기적 성질을 이용하여 슬러지에 함유된 수분을 효과적으로 제거하는 것으로, 압착에 의한 탈수(Pressure filtration) 외에 슬러지 층에 전기장을 형성시켜 전기삼투성(Electroosmosis)과 전기영동성(Electrophoresis)이 입자에 작용하여 탈수를 유도하는 원리이다. 압착에 의해 입자의 기공 혹은 모세관을 통해 수분을 강제적으로 탈수시키고 동시에 전기장을 형성함에 따라서 생성된 전기영동 현상에 의해 슬러지 입자가 띠고 있는 전하와 반대 전극 측으로 이동하게 된다. 일단 압착에 의해 충분한 수분이 제거되어 케이크가 형성된 후, 수분 내에 용해되어 있는 이온이 전기적 삼투현상(Electroosmosis)에 의해 반대 극으로 이동하여 다시 수분이 제거된다.

Fig.1에서 보여주는 것과 같이 일반적으로 슬러지 입자는 (-) 표면전하를 띠므로 슬러지에 전기장을 형성시키면 슬러지 입자는 입자가 갖고 있는 전하와 반대전극인 (+)극으로 이동하게 된다. 반면 슬러지 입자층 내의 수분은 (-)

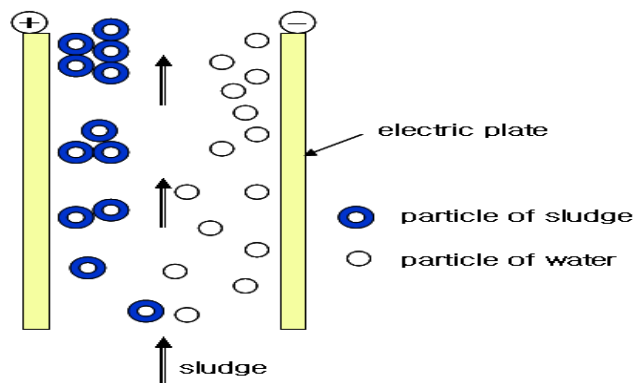


Fig. 1 Separation process of sludge and water particle.

극으로 끌어당겨져 탈수가 촉진된다. 전기 침투식 탈수장치는 종래의 기계적인 압착력에만 의존한 고압 탈수식으로 탈수하기 어려운 난탈수성 수분을 많이 함유한 슬러지에서 수분을 제거하거나 탈수의 효율을 증대시키는데 매우 효과적인 방법이다. 결국 전기 탈수원리는 종래의 기계적인 압착 방법과 입자표면에 나타나는 전기적 potential에 의해 작용하는 전기삼투압을 복합적으로 이용한 방법이다. 따라서 전기탈수의 주요 메카니즘은 모세관 압력, 전기삼투현상, 부수적으로 작용하는 전기영동성과 쿨롱 열에 의해 입자와 액체의 분리가 이루어진다⁶⁾.

3. 실험장치 및 방법

3.1 직류전기장치

본 실험에 사용된 직류전기장치는 Fig.2와 같이 유입구(Inlet hole), 배출구(Outlet hole), 배수구(Drain hole), 분배파이프(Distribution pipe), 전극판으로 구성되며, 2개조, 4개의 cell, 120개의 전극판이 있으며 전극판은 (+), (-) 전극이 교대로 연결되어 있다. Fig.2에서는 직류전기장치의 모형과 각 단면의 모형을 A면, B면, C면으로 나타내고 있다. 직류전기장치의 처리용량은 유입 슬러지 기준으로

7m³/h, 접촉시간은 5분이며, 전압은 5V, 전류는 250A로 설정하였다.

슬러지 저류조에서 이송된 슬러지가 유입구로 유입되어 하부에 있는 분배파이프를 통해 슬러지가 바닥부터 상부로 이동하면서 전극판을 거쳐 슬러지와 수분이 분리되고, 상부에 있는 웨어(weir)를 거쳐 외부로 배출된다.

본 실험 장치는 1시 하수처리장의 슬러지 처리 공정 중 슬러지 저류조와 원심탈수기 사이에 설치하였다. Fig. 3은 원래 공정을 나타냈고, Fig. 4에서는 직류전기장치를 설치한 공정도를 나타내고 있다.

3.2 탈수기 통과 전 슬러지 함수율 측정

이 실험은 원심탈수기전에 직류 전기 장치만으로도 함수율 변화가 있는지 알아보기 위해 실험하였다. 우선 슬러지 저류조에서 나온 슬러지를 원심분리기에 넣고, 3000rpm에서 5분간 가동시킨 후, 여액을 버리고 남은 슬러지 10g을 채취하였다. 다음으로 슬러지 저류조에서 나온 슬러지 100ml를 채취하여 응집보조제(Polymer) 10ml를 혼합한 다음, 원심분리기에 넣고 3000rpm에서 5분간 가동한 다음, 여액은 버리고 남은 슬러지의 함수율을 측정하였다. 마지막으로 직류전기장치를 가동하였다. 이 때, 보일러를 가

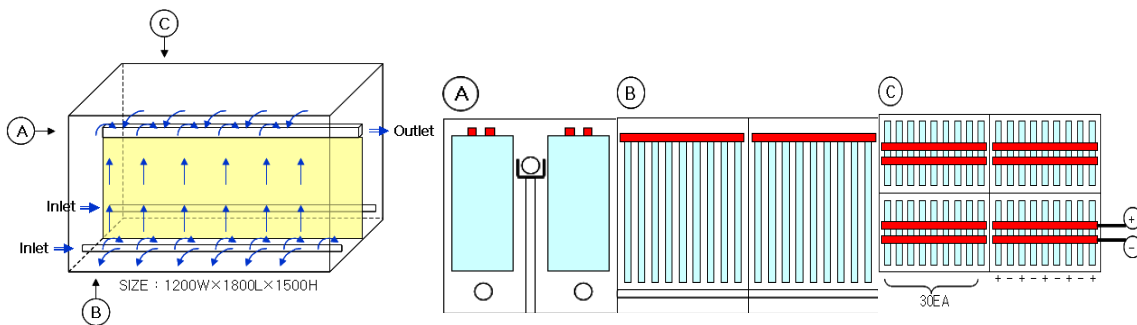


Fig. 2 Inside picture of direct current electric apparatus

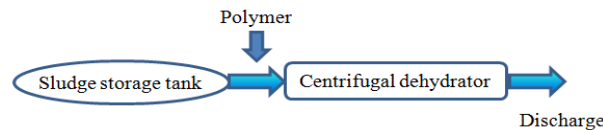


Fig. 3 Flow diagram of present process

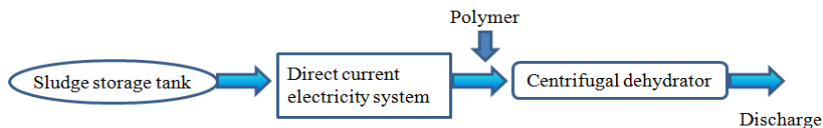


Fig. 4 Flow diagram after installing direct current electric apparatus

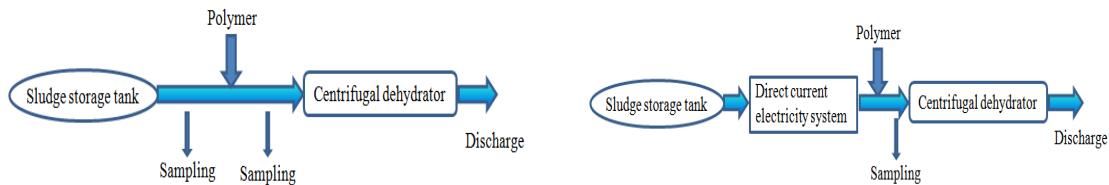


Fig. 5 Sampling site for sludge (before the centrifugal dehydrator)

동하여 유입슬러지의 온도를 37°C로 맞추고, 전압 5V, 전류 250A로 한 다음 60분 동안 가동한 후 슬러지를 100ml 채취하여 응집보조제를 혼합하고 원심분리기를 가동시킨 후 남은 슬러지의 함수율을 측정하였다.

함수율 측정은 먼저 빈 도가니 무게(W_1)를 측정하고 도가니에 슬러지 약 10g을 넣은 뒤 다시 무게(W_2)를 측정한다. 그리고 110°C의 오븐에서 4시간 동안 건조 후에 다시 무게(W_3)를 측정하여 아래의 식으로 계산하였다.

$$\text{고형물 농도}(\%) = (W_3 - W_1) / (W_2 - W_1) \times 100$$

$$\text{함수율}(\%) = 100 - \text{고형물 농도}(\%)$$

3.3 슬러지 입도 측정

직류전기장치 전후의 슬러지 입도를 측정하여 입도변화를 알아보기 위해 슬러지 저류조에서 나온 슬러지를 원심분리기에 넣고, 3000rpm에서 5분간 가동시킨 다음, 여액은 버리고 남은 슬러지 10g을 샘플링 하였다. 마지막으로 유입 슬러지의 온도를 37°C로 맞추고, 전류를 250A로 한 다음 직류전기장치를 60분 동안 가동한 후 슬러지를 원심분리기에 넣고, 3000rpm에서 5분간 가동시킨 다음, 여액은 버리고 남은 슬러지 10g을 샘플링 하였다. 두 지점에서 채취한 슬러지를 주사전자현미경(SEM)으로 20,000배 확대 촬영하고, 입도 분석을 하였다.

3.4 탈수기 통과 후 슬러지 함수율 측정

직류전기장치를 통과한 슬러지와 통과하지 않은 슬러지를 원심탈수기에서 탈수시킬 경우, 함수율의 변화가 있는지 알아보기 위해 우선 슬러지 저류조에서 나온 슬러지를 원심분리기에 넣고, 3000rpm에서 5분간 가동시킨 다음, 여액은 버리고 남은 슬러지 10g을 샘플링 하였다. 그리고 응집보조제 0.75m³/h와 슬러지 저류조에서 나온 슬러지 9m³/h를 투입한다. 원심탈수기의 차속(backdrive)은 보울(bowl) 회전속도를 60Hz, 2,749rpm으로 하고 스크류(screw) 회전속도를 60~67Hz까지 조정하여 차속값을 조절하였다. 약 30분 정도 가동 후에 여액이 안정되면 슬러지를 10g씩 샘플링 하였다. 마지막으로 직류전기장치를 가동

하였다. 이 때, 보일러를 가동하여 유입 슬러지의 온도를 37°C로 맞추고, 전류를 250A로 하여 60분 동안 가동한 후 슬러지를 원심탈수기에 넣어 탈수시킨 후 10g을 채취하였다. 채취한 슬러지는 3.2에 나온 방법으로 함수율을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 원심탈수기 통과 전 슬러지 함수율 분석

시료 채취는 Fig. 5에서 보여주는 것과 같이 슬러지 저류조 후단부의 슬러지, 슬러지 저류조 후단부에서 응집보조제를 투입하여 교반한 슬러지, 슬러지 저류조 후 직류전기장치를 통과하고 응집보조제를 투입하여 교반한 슬러지, 이렇게 총 3개소에서 채취한 슬러지의 함수율 측정을 하였다.

Fig. 6과 같이 슬러지 저류조 후단부에서 채취한 슬러지의 평균 고형물 농도는 1.56%, 슬러지 저류조 후단부에서 응집보조제를 투입하여 교반한 슬러지의 평균 고형물 농도는 5.7%, 직류전기장치를 통과하고 응집보조제를 투입하여 교반한 슬러지의 평균 고형물 농도는 8.4%로 나타났다. 즉 직류전기장치를 통과한 슬러지가 직류전기장치를 통과하지 않은 폴리머만 주입한 슬러지에 비하여 평균 고형물 농도가 47.8% 증가함을 알 수 있었다. 이것은 슬러지가 전기영동 작용에 의해 슬러지 입자에서 수분이 분리되고, 슬러지 입자들이 뭉쳐 플러를 형성하여 고형물 농도가 높은 것으로 판단된다.

4.2 슬러지 입도 분석

시료는 Fig. 7에 나타난 것과 같이 슬러지 저류조 후단부에서 채취한 슬러지, 직류전기장치를 통과하고 난 후 슬러지 총 2개소에서 채취한 슬러지의 입도를 측정을 하였다.

Fig. 8은 입도측정 결과로 슬러지 저류조 후단부에서 채취한 슬러지의 평균 크기는 52.36 μ m이며 슬러지의 90% 이상이 94.29 μ m 이하로 나타났으며, 직류전기장치를 통과하고 난 후 슬러지의 평균 크기는 28.67 μ m이며, 슬러지의 90% 이상이 52.46 μ m 이하로 나타났다.

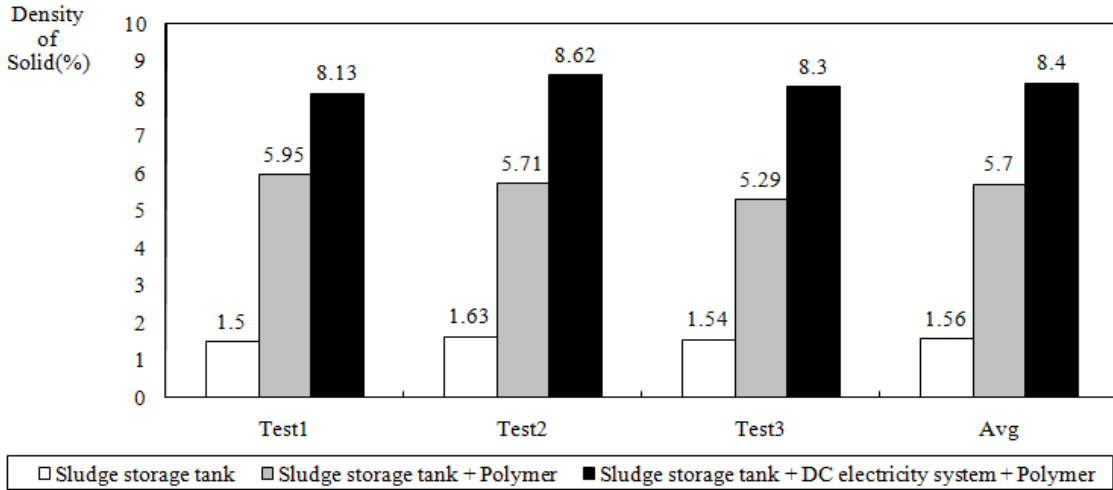


Fig. 6 The result of water content of sludge before the centrifugal dehydrator.

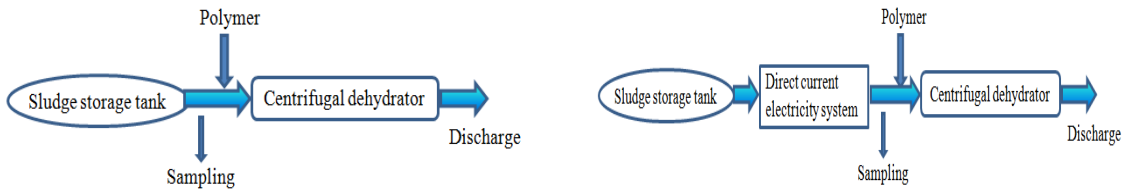


Fig. 7 Sampling site for sludge (particle size measuring)

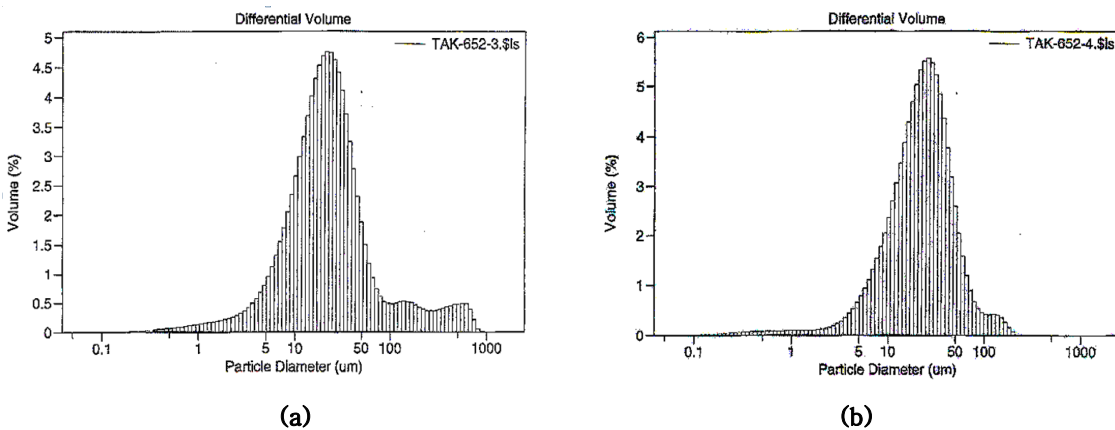


Fig. 8 Result of particle size measuring.
(a) Sludge storage tank + DC electricity system (b) Sludge storage tank

두 결과를 비교해 보면 직류전기장치를 통과한 슬러지의 평균 크기가 45.2 % 감소하였고 입도의 표준편차도 많이 개선되었다. 이것은 슬러지가 수분과 분리되어 (+)극으로 이동하면서 큰 입자는 줄어들고 작은 입자는 결합하면서 슬

러지의 크기가 균일화되었기 때문으로 판단된다.

Fig.9 에서는 SEM을 이용하여 슬러지 저류조 후단부에서 채취한 슬러지, 직류전기장치를 통과한 슬러지를 촬영하였다.

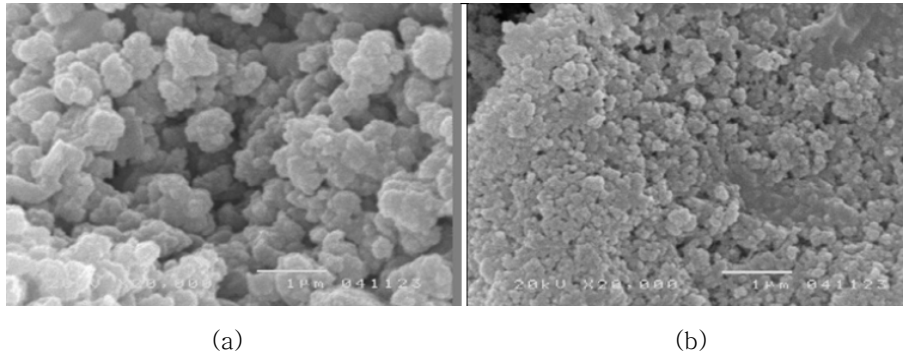


Fig. 9 SEM picture. ($\times 20,000$)
(a) Sludge storage tank (b) Sludge storage tank + DC electricity system

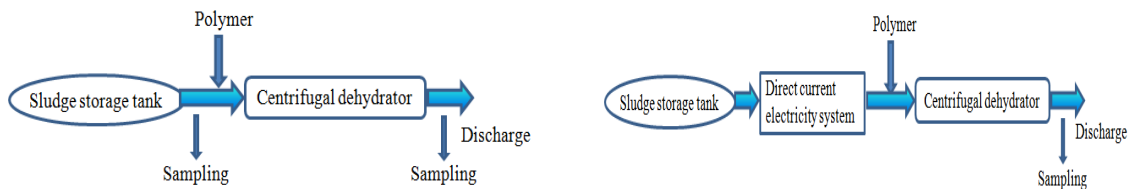


Fig. 10 Sampling site for the sludge(after the centrifugal dehydrator)

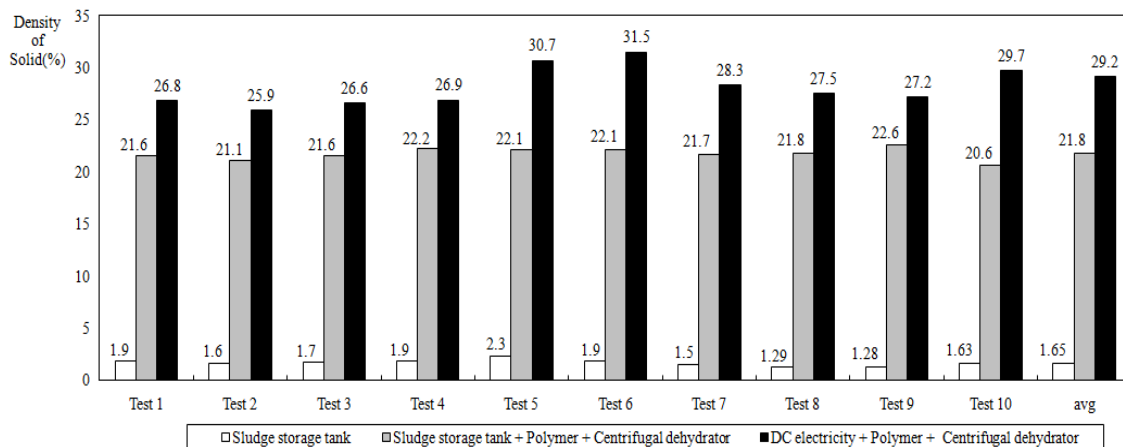


Fig. 11 Result of water content of sludge after the centrifugal dehydrator.

SEM 사진을 살펴보면 직류전기장치를 통과한 슬러지 입자가 슬러지 저류조 후단부에서 채취한 슬러지보다 작고 균일함을 확인할 수 있다.

4.3 원심탈수기 통과 후 슬러지 함수율 분석

시료채취는 Fig. 10과 같이 슬러지 저류조 후단부에서 채취한 슬러지, 슬러지 저류조 후단부에서 채취한 슬러지에 응집보조제를 투입하고 원심탈수기에 탈수시킨 슬러지, 직류전기장치를 통과하고 응집보조제를 투입하여 원심탈수

기에 탈수시킨 슬러지 이렇게 총 3개소에서 채취하여 슬러지의 함수율을 측정하였다.

Fig. 11 과 같이 슬러지 저류조 후단부에서 채취한 슬러지의 평균 고형물 농도는 1.65 %, 슬러지 저류조 후단부에서 채취한 슬러지에 응집보조제를 투입하고 원심탈수기에 탈수시킨 슬러지의 평균 고형물 농도는 21.87 %, 직류전기장치를 통과하고 응집보조제를 투입하여 원심탈수기에 탈수시킨 슬러지의 평균 고형물 농도는 29.2 % 로 나타났다. 즉 직류전기장치를 통과한 슬러지가 슬러지 저류조 후단부

에서 채취한 슬러지에 응집보조제를 투입하고 원심탈수기에 탈수시킨 슬러지보다 평균 고형물 농도가 44.2 % 증가함을 알 수 있었다.

이것은 슬러지 입자가 균일화되고 서로 뭉치면서 플러키 형성되어 원심탈수기를 통과한 후에도 고형물의 농도가 증가된 것으로 판단된다.

5. 결론

원심탈수기 주입 전에 직류전기장치를 이용할 경우 기존 공정에 비하여 슬러지 함수율의 저하가 가능하였으며 이러한 공정의 도입을 통하여 함수율 저하에 따른 최종 처분되는 슬러지량의 저감에 따른 경제적인 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되며 본 연구를 통해 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 원심탈수기를 통과하기 전, 직류전기장치를 통과한 슬러지는 직류전기장치를 통과하지 않은 슬러지와 비교하여 슬러지의 평균 고형물 농도가 47.8% 증가함을 알 수 있었다. 이것은 전기영동 작용에 의해 슬러지입자와 물입자가 분리되고, 슬러지 입자들이 뭉쳐 floc을 형성하여 고형물 농도가 높아지기 때문으로 판단된다.
- (2) 직류전기장치 전후의 슬러지의 입도를 측정한 결과 직류전기장치를 통과한 슬러지의 경우, 슬러지의 평균 크기는 28.67 μm 로 직류전기장치를 통과하지 않은 슬러지의 평균 크기는 52.36 μm 와 비교하여, 직류전기장치를 통과한 슬러지의 평균 크기가 45.2% 감소하였다. 이것은 슬러지가 물과 분리되어 (+)극으로 이동하면서 큰 입자는 줄어들고 작은 입자는 결합해서 슬러지의 크기가 균일화 된 것으로 판단된다.
- (3) 원심탈수기를 통과한 슬러지 중, 직류전기장치를 통과한 슬러지는 직류전기장치를 통과하지 않은 슬러지와 함수율 변화를 비교한 결과, 슬러지의 평균 고형물 농도가 44.2% 증가함을 알 수 있었다. 이것은 슬러지 입자가 균일화되고 서로 뭉쳐 floc이 형성되면서 고형물의 농도가 증가되었기 때문으로 판단된다.

6. References

- Ching Yuan, Chih-huang Weng, (2003) Sludge dewatering by electrokinetic technique: effect of processing time and potential gradient, *Advances in Environmental Research* 7, pp.727-732
- Jaroslav Boran, Lucie Houdkova, Thomas Elsaber, (2010) Processing of sewage sludge: Dependence of sludge dewatering efficiency on amount of flocculant, *Resource, Conservation and Recycling* 54, pp.278-282
- Pham-Anh Tuan, Mika Sillanpaa, (2010) Migration of ions and organic matter during electro-dewatering of anaerobic sludge, *Journal of Hazardous Materials* 173, pp. 54-61
- Shuji Sakohara, Eiichi Ochiai, Tomoaki Kusaka, (2007) Dewatering activated sludge by thermosensitive polymer, *Separation and Purification Technology* 56, pp.296-302
- 박찬정, 이정언, 안영철, 신희수, 이재근, (2000) 전기탈수방법에 의한 하수 슬러지 탈수 특성, *대한기계학회 추계학술대회논문집 B*, pp.526-531
- 삼진 EST(주), 필터프레스 압착력과 전기영동성을 이용한 저함수율, 1999-2003
- 이정언, 이재근, (2006) 정수슬러지 탈수효율 향상을 위한 전기필터프레스탈수에 관한 연구, *대한환경공학회지 論文-Original Paper*, pp.1009-1015
- 정종식, 김정대, 이재복, 이재근, 정원섭, (2003) 정수 슬러지의 전기탈수에서 전기화학적 전처리의 응용에 관한 연구, *대한환경공학회지 논문*, pp.1092-1099