⊙ 速報研究論文

전기응집 및 탈수 시스템을 이용한 슬러지 함수율 저감 특성

이재근* · 김영환** · 신희수***

Performance Evaluation of Electrocoagulation and Electrodewatering for the Reduction of Water Content in Wastewater Sludge

J-K Lee* · Y-W Kim** and H-S Shin***

Key words : Electrocoagulation(전기응집), Piston type filter press(피스톤형 필터프레스), Zeta potential(제타 전위), Water content(함수율), Electroflotation(전기부상)

Abstract

This study is to develop the pretreatment for the excess and digested sludge by electrocoagulation and dewatering. Electrocoagulation is applied to excess and digested sludge before transferring to the piston type press for dewatering. Piston type filter press as a laboratory scale plant was used to estimate the dewaterability.

MMD of excess sludge was increased from initial diameter of particles(34.16 ㎛) to the 87 %(64.01 ㎛) after electrocoagulation. Al electrode is more effective than Fe electrode for the dewaterability of excess sludge. Electrodewatering after electrocoagulation as pretreatment makes the water content of sludge cake 50~60 wt%.

1. 서 론

하수처리장과 산업체에서 발생되는 슬러지는 연간 150만톤('97년)으로서 이 중 대부분이 해양투기 및 육상매립 방법에 의해 처리되고 있다. 특히 부산지역에서 발생되는 대부분의 슬러지는 해양투기로 처리하고 있어 향후 예상되는 해양투기 금지조약에 의해 슬러지 처리방법이 큰 사회적 문제로 대두될 것으로 예상된다.

이러한 슬러지를 처리하기 위해서는 먼저 처리속도를 향상시키고 탈수된 슬러지의 함수율을 최소화하는 것이 무엇보다 중요하다. 슬러지 탈수는 크게 탈수 전처리 단계와 탈수 단계로 이루어져 있는데, 탈수 전처리 단계는 침전, 농축, 소화, 저류의 과정을 통해 슬러지가 탈수되기 용이하도록 처리하는 단계이며, 탈수 단계는 전처리된 슬러지를 가압 탈수장치에 투입하여 슬러지에 함유되어 있는 수분을 탈수하는 단계로서 최종적으로 함수율

* 부산대학교 기계공학부
** 부산광역시 공업기술과
*** 부산대학교 기계공학과 대학원

이 약 80 wt%인 탈수 슬러지를 생산하는 것이다. 이때 탈수 전처리 과정에서 슬러지의 함수율을 최소화하면, 탈수 단계에서 투입되는 에너지를 감소시킬 수 있으며, 탈수시간의 감소와 최종 함수율을 최소화할 수 있다.

전기 응집에 관한 선행연구는 1903년 전기 분해를 이용한 하수에서 오일을 분리하는 특허가 출원된 이후로 많은 연구가 이루어 졌다. Vik 등 (1984)은 식수 (Potable Water)에 알루미늄 전극을 이용하여 부유물질을 제거하는 데 전기 응집의 원리를 이용하여 실험을 수행하였으며 수소이온 농도, 알루미늄 전극의 용존량, 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand) 등에 대한 연구결과를 분석하였다. (-)극에서 발생한 수소의 영향으로 수소이온 농도는 4.8에서 7.0으로 상승하고 전극의 용존량은 전류밀도가 상승함에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 화학적 산소요구량의 경우는 실험 후 감소하였다.

Rubach 등 (1997)은 (+) 극에 알루미늄, (-) 극에 스테인레스 스틸을 설치하여 상수와 하수처리를 위한 전기 부상 (Electroflocculation) 처리 장치에 대한 연구를 수행하였다. 알루미늄의 용존량과 파일럿 장치의 입구와 출구의 농도를 측정하였으며, 에너지 소비량과 전기전도를 측정 및 분석하였다.

Ibanez 등 (1995)은 스테인리스 스틸 전극과 철 전극을 이용하여 기름이 함유된 하수와 식당에서 유출되는 하수를 사용하여 전기응집 연구를 수행하였다. 전기 응집 처리후의 수소이온 농도, 해바라기 기름의 농도가 감소한 결과를 얻었다.

Koren 등 (1995)은 알루미늄 전극을 사용하여 오일 하수, 냉각수 등을 전기 부상 처리하는 연구를 수행하였다. 에너지 소비량을 줄이기 위해 염화칼슘 ($CaCl_2$)을 슬러지에 주입하여 연구를 수행하였고, 장치의 입구와 출구에서의 분리도(Degree of Separation) 등을 측정하였다.

Chen 등 (2000)은 철 전극, 알루미늄 전극을 이용하여 오일 하수, 식당 하수의 전기 응집실험을 수행하였으며, 수소이온농도, 화학적 산소 요구량 (Chemical Oxygen Demand), 생화학적 산소 요구량 (Biochemical Oxygen Demand), 고체상 부유 물질 (Suspended Solid), 전기 전도도 (Conductivity) 등에 대한 연구를 수행한 결과, 전기 응집전후의 수소 이온 농도는 증가하는 경향을 보였으며 생화학적 산소 요구량 및 화학적 산소 요구량은 줄어듦을 파악하였다.

한기훈 등(1999)은 알루미늄 전극을 통해 매립지 침출수의 전기 응집 실험을 통해 수소 이온 농도, 탁도, 총 유기탄소 (Total Organic Carbon) 등에 대한 실험을 수행하였다. 수소 이온 농도의 경우 증가하였고 탁도, 총 유기산소는 감소하는 결과를 분석하였다. 최근에는 슬러지 뿐 만 아니라 농산물, 광물질 등 여러 가지 콜로이드 입자에 대한 전기 응집에 관한 연구가 활발히 진행중이다.

본 연구에서는 기존 탈수기의 탈수효과를 증대시키기 위해, 탈수 전처리 과정에서 슬러지 입자의 전기응집원리를 이용하여 슬러지 입자의 성상변화를 일으켜 탈수시간과 최종 함수율을 감소시키고, 전기응집에 의한 탈수 전처리 과정이 기존 하수처리장의 농축장치를 대신할 수 있는 가능성을 파악하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 전기응집

2.1.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로, 반응조와 교반기, 그리고 전기장을 형성시키는 전극(120×80×3 mm)과 전원공급장치로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용된 전기응집장치는 2종류로서, 전기응집장치(I)의 경우는 전극의 개수가 4개이며, 전기응집장치(II)의 경우는 전극 개수는 2개이다. 이는 전극의 개수에 따른 전기응집효과의 가능성을 파악하고 이에 따른 탈수효율의 감소 가능성을 파악하기 위해서이며 이때 사용된 전극의 단면은 사각형이다.

반응조에 슬러지 3 Liter를 투입하고 교반기를 이용하여 반응조 전체에 균일하게 분포시키고, 전원공급장치와 전극을 이용하여 반응조 내부에 전기장을 형성시킨다. 전극의 재질과 개수, 인가 전압의 세기에 따른 전기응집 성능을 분석하기 위하여, 전극은 철과 알루미늄 재질을 사용하였으며,

인가전압은 전원공급장치를 이용하여 조절할 수 있도록 하였다. 이러한 실험조건에서 전기응집후의 슬러지 입도, 유기물 함량, 함수율, 수소이온농도(pH) 등을 측정하였으며, 그 결과를 전기응집을 가하지 않은 생 슬러지의 결과와 비교하여 전기응집의 영향을 분석하였다.

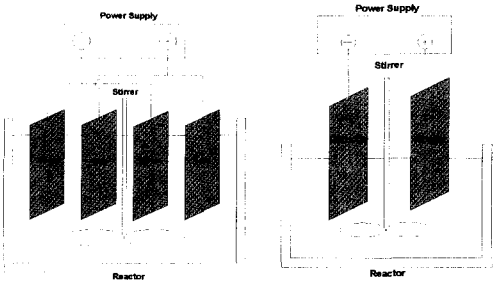


Fig. 1 Schematic diagram of the electrocoagulation system

2.1.2 실험방법

Fig. 2는 전기응집 실험 방법에 대한 처리 흐름도를 나타낸 것으로, 먼저 슬러지의 채취 후, 초기 함수율, 입자 크기 그리고 유·무기물 함유 정도 등의 분석을 수행한다. 분석된 슬러지를 전기응집 장치를 통해 슬러지를 응집시키고 응집된 슬러지의 특성을 파악하기 위해 슬러지의 분석을 다시 수행하고 최적의 슬러지 응집조건을 도출한다. 응집 슬러지의 분석이 끝난 후, 각각 가압탈수 실험과 전기탈수 실험을 수행하여 각 탈수장치에서의 탈수성능을 분석한다. 이러한 전기탈수 실험을 통해 슬러지의 전기응집 효과를 파악하고 최종 탈수 케익의 함수율을 측정한다.

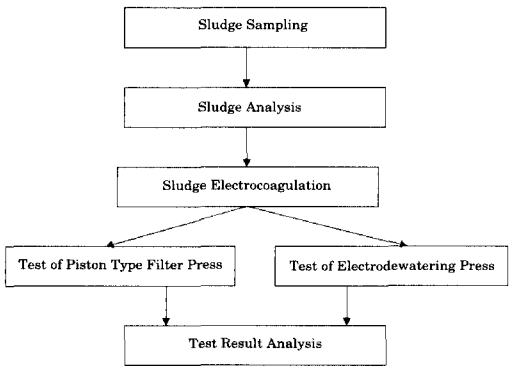


Fig. 2 Flow chart of electrocoagulation experiment

2.2 가압 및 전기/가압 탈수

2.2.1 실험장치

Fig. 3은 피스톤형 필터 프레스(piston type filter press) 전기탈수 장치의 전체 구성도를 나타내며 피스톤 실린더, 직류전원 공급장치, 유량계, 에어 컴프레서(air compressor), 압력 게이지(pressure gage), 전자 저울 (balance), 데이터 획득 시스템(data acquisition system)으로 구성되어 있다.

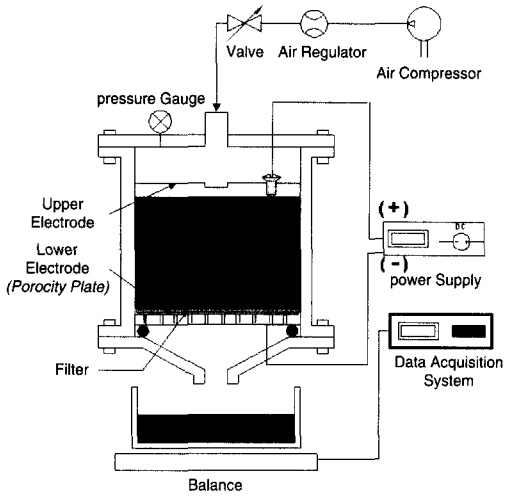


Fig. 3 Schematic diagram of an laborarory scale dewatering system

2.2.2 실험방법

가압탈수실험은 전기를 인가하지 않고 가압에 의한 분리실험을 실시하였으며, 가압에 의한 분리실험은 탈수장치를 이용하여 에어 컴프레서의 압력을 슬러지에 분리 추진력으로 하였다. 압력 조절기를 이용하여 적정 압력으로 조절하였으며 이 공기압으로 피스톤을 가압하게 되고 이 피스톤이 직접 슬러지를 압축하게 된다. 본 연구에서는 압력을 4 kgf/cm^2 고정하여 탈수 실험을 수행하였으며 탈수액은 실린더 바닥의 다공판에 40개의 지름 3 mm 구멍을 뚫어 밑으로 빠지도록 하였다. 시간의 흐름에 따라 여과된 물의 양의 전자저울을 통해 3초 단위로 컴퓨터에 자동적으로 획득할 수 있게 하

였다.

3. 실험 결과

3.1 입도변화

Table 1은 수영하수처리장의 소화 슬러지의 전기응집 실험조건을 나타내며, 전극 재질과 인가전압에 따른 전기응집 효과에 대한 실험을 수행하였다. 슬러지의 응집 전후의 유, 무기물 함량의 측정하였으며, (+)극에 인가된 전압은 43 V, (-)극은 접지를 하여 양극간의 전위차는 43 V로 하였으며, 인가 전류는 5 A, (+)극과 (-)극의 극판 간격은 3 cm로 실험하였다. 이때의 양극판에 인가되어지는 전류밀도는 0.03 A/cm^{2}이다. 인가 전압의 경우 (-)극에서 발생되어지는 수소의 양에는 큰 영향을 미치지 않으므로, 본 연구에서는 인가 전류에 대한 영향만을 고려하였다. 소화 슬러지 특성은 유기물의 함량을 줄이기 위해 무기 및 유기물을 미생물을 사용하여 분해한 슬러지이며, 잉여 슬러지에 비해 반응조내에서의 인가 전압이 높으며, 이는 소화 슬러지내에 포함되어 있는 콜로이드(colloid) 입자의 특징으로 소화 슬러지 내 유기물의 함량을 측정해 본 결과 잉여 슬러지에 비해 낮은 유기물 함량 때문이다. 이러한 유기물 함량은 슬러지의 비저항에 영향을 미치며, 탈수효율 저하의 원인이 된다. 소화 슬러지내에 포함되어 있는 부유 고형물(suspended solid)의 양은 전기응집 실험전후의 변화 때문이다.

Table 2는 수영하수처리장의 잉여 슬러지의 전기응집 실험조건을 나타내며, 전극 재질과 인가 전압에 따른 전기응집 효과에 대한 실험을 수행하였다. (+)극에 인가된 전압은 18 V, (-)극은 접지를 하여 양극간의 전위차는 18 V로 하였으며, 인가 전류는 5 A, (+)극과 (-)극의 극판 간격은 3cm로 실험하였다. 전기응집에 가장 영향을 미치는 인자는 전류밀도이며 소화 슬러지와 잉여 슬러지의 전기응집 특성을 파악하기 위해 동일한 전류밀도에서 실험하였다.

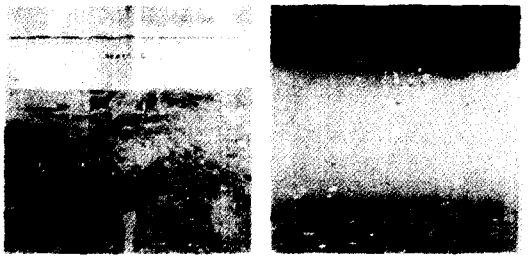
Fig. 4는 소화 슬러지의 전기응집 실험후의 사진으로, 전기응집후 슬러지가 상부층과 하부층으로

Table 1 Test conditions of electrocoagulation for digested sludge

Sludge type	Digested sludge in Sooyoung wastewater treatment plant		
Electrode material	Fe		Al
Applied voltage	43 V		43 V
Applied current	5 A		5 A
Electrode distance	3 cm		3 cm
Electrode number	2	4	2
Current density	0.03 A/cm^2		0.03 A/cm^2

Table 2 Test conditions of the electrocoagulation for excess sludge

Sludge type	Excess sludge in Sooyoung wastewater treatment plant	
Electrode material	Fe	Al
Applied voltage	18 V	18 V
Applied current	5 A	5 A
Electrode distance	3 cm	3 cm
Current density	0.03 A/cm^2	0.03 A/cm^2



(a) (b)

Fig. 4 Photographs of digested sludge during electrocoagulation process in the reactor (a) initial and (b) after electrocoagulation

나누어져 있는 모습이다. 이러한 현상이 생기는 원리는 전기부상(electroflotation) 처리와 전기응집에 따른 것이며, 전기부상처리의 원리는 (1) 가스 기포 생성(gas bubble generation), (2) 가스 기포와 콜로이드(colloid) 입자의 접촉, (3) 가스 기포의 콜로이드(colloid) 입자표면 흡수, (4) 가스 기포와 반응조 상부로의 부상과정이 포함되어진 것이다. (1)의 과정은 전기분해에 의해 (-)극에서 수소(H_2)가 발생되어지고 (+)극에서 산소(O_2)가 생성되어진다. 이러한 과정을 통해 반응조 내부에는 기포(bubble)가 생성되어 지게 되고, 수소 가스는 상부로 부상되면서 가스 기포와 콜로이드(colloid) 입자

의 접촉이 이루어지게 된다. 가스 기포와 콜로이드(colloid) 입자의 접촉을 통해 가스 기포는 콜로이드(colloid) 입자표면에 흡수되어지고 가스 기포에 의해 반응조 상부로의 부상이 이루어지게 된다. 일반적으로 전기부상 처리되어진 슬러지는 전극에 인가되어진 전류밀도에 의한 수소 가스의 발생량에 따라 그 양이 결정되어진다. 본 연구에서는 (+)극에서 발생되어지는 산소의 양은 (-)극에서 발생되어지는 수소 가스의 양에 비해 매우 적었다. 하부층의 슬러지 생성 메커니즘은 전기분해에 의해 발생되어진 금속이온에 의해 콜로이드(colloid) 입자들끼리 전기응집이 이루어지게 되는 것이다. 전기응집된 입자는 교반기의 완속 교반에 의해 응집되어진 입자들이 서로 플럭(floc)을 형성하게 되며 입경의 크기는 증가한다.

Fig. 5와 같이 잉여슬러지의 경우 전기응집전의 질량중앙입경 (MMD)은 34.16 ㎛, 전극의 재질은 알루미늄, 인가 전압 18 V, 인가 전류 5 A, 전극사이의 거리를 3 cm로 하였을 경우 상부로 부상 처리된 입경의 크기는 64.01 ㎛로 그 크기가 87 % 증가하였다. 이는 미세 입자가 전기응집을 하였을 경우 그 크기가 증가하며, 이는 전기응집 슬러지의 농축화, 입경의 조대화가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6은 전기응집 전후의 소화 슬러지의 입도 변화를 입자측정기 (Malvern, Mastersizer)로 분석한 결과를 나타낸 것으로, 초기 슬러지와 전기응집후의 입도 변화를 나타내었다. 소화 슬러지의 경우 슬러지 처리공정의 마지막 단계로 안정화된 슬러지이며, 유기물의 함량이 잉여 슬러지에 비해 적은 것으로 분석되었다. 슬러지 입경 분석 결과, 전기응집을 하지 않은 슬러지의 경우 질량중앙입경 (MMD)은 34.72 ㎛ 였으며, 전극의 재질은 알루미늄, 인가 전압 43 V, 인가 전류 5 A, 전극사이의 거리를 3 cm로 하였을 경우 상부로 부상 처리되어진 입경의 크기는 41.29 ㎛로 그 크기가 18.92 % 증가하였다. 이는 잉여 슬러지에 비해 소화 슬러지의 경우 입자의 농도 차이에 의한 것으로 소화 슬러지의 경우 잉여 슬러지에 비해 농축화 되어져 있고, 전기응집의 결과 미세입자의 영향이 잉여 슬러지에 비해 상대적으로 적기 때문이다.

Table 3은 철 전극을 사용하였을 경우의 슬러지

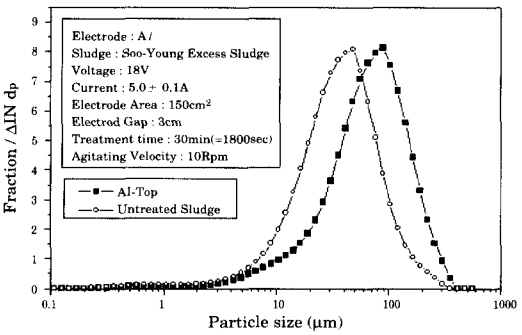


Fig. 5 Particle size distribution of the excess sludge during the electrocoagulation

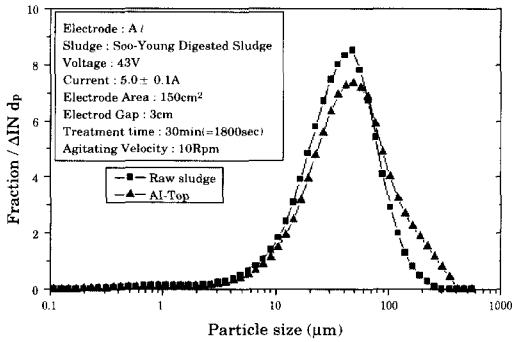


Fig. 6 Particle size distribution of the digested sludge during the electrocoagulation

Table 3 Result of water reduction in the electrocoagulation system using two Fe electrodes

Water content / Sludge	Initial wate content	Final water content after electrocoagulation		
		Upper		Lower
Excess sludge	99.65 wt%	95.13 wt%		99.07 wt%
Digested sludge	97.63 wt%	94.67 wt%	94.34 wt%*	95.42 wt%

Note : *electrode # 4

함수율 변화를 나타낸 것으로, 전기응집실험 후 상부로 부상 처리되어진 소화 슬러지의 경우 철 전극의 개수를 2개와 4개인 경우를 비교 분석한 결과이다. 전극수에 따른 함수율 변화는 전기응집전의 초기 슬러지의 함수율은 97.63 wt%, 전극의 개수가 2개일 경우는 94.67 wt%, 전극의 개수를 4개일 경우는 94.64 wt%로 큰 변화는 없었다. 이는 본 실험장치의 구조상의 특징으로 인한 것이며, 장치의

크기가 증가하였을 경우는 함수율 차이의 증가폭이 더 크게 나타날 것이다. 잉여 슬러지의 경우 철 전극을 사용하여 전기응집실험을 한 결과 원 슬러지의 함수율은 99.65 wt%, 전기부상 처리과정에 의해 발생되어져 상부로 부유되어진 상층부 슬러지 함수율은 95.13wt%로 4.52 wt% 감소하였고, 하부의 슬러지 함수율은 99.07 wt%로 0.58 wt% 감소하였다. 소화 슬러지의 경우 철 전극을 사용하였을 때 원 슬러지의 함수율은 97.63wt%, 전기 부상 처리과정에 의해 발생되어져 상부로 부유되어진 상층부 슬러지 함수율은 94.67 wt%로 2.96 wt% 감소하였고, 하부의 슬러지 함수율은 95.42 wt%로 2.21 wt% 감소하였다. 이는 상층부로 이동되어진 잉여 슬러지의 경우 응집으로 인한 슬러지의 함수율 변화의 효과가 나타난 결과이며, 하부 슬러지 차이는 함수율 감소의 효과가 상부 슬러지에 비해 함수율의 변화는 적은 것으로 분석되었다.

Table 4는 알루미늄 전극을 사용하였을 경우의 슬러지 함수율 변화를 나타낸 것으로, 전기응집 실험 후, 상부로 부상처리되어진 잉여 슬러지와 소화 슬러지의 결과를 분석한 것이다. 잉여 슬러지의 경우 알루미늄 전극을 사용하였을 때 전기응집전의 초기 함수율 99.65 wt%, 전기 부상처리과정에 의해 발생되어져 상부로 부유되어진 상층부 슬러지의 경우 94.78 wt%로 4.87 wt%의 함수율 저감 효과가 있으며, 하부 슬러지의 경우 98.99 wt%로 0.66 wt%의 함수율 저감 효과가 있었다. 소화 슬러지의 경우 전기응집 전의 초기 함수율 97.63 wt%, 전기 부상처리과정에 의해 발생되어져 상부로 부유되어진 상층부 슬러지의 경우 94.88 wt%로 2.75 wt%, 하부 슬러지의 경우 95.80 wt%로 1.83 wt%의 감소가 관찰할 수 있었다. 잉여 슬러지의 경우 유기물의 함량이 높은 반면 소화 슬러지의 경우는 유기물의 함량이 줄어들어 농축되어진 것으로 분석하였다. 소화 슬러지와 잉여 슬러지의 초기 슬러지 함수율은 잉여 슬러지가 원심 농축기를 거쳐 함수율은 감소되고, 소화조로 유입되어 소화 공정에 의해 최종 슬러지로 발생되기 때문에 잉여 슬러지보다 낮은 안정된 슬러지가 발생되어지며, 함수율은 소화 슬러지의 함수율이 낮게 분석되었다. 또한 전극의 재질 선정은 잉여 슬러지의 경우 알루미늄 전극을 사용하는 것이, 소화 슬러지의 경우에는 철전극을 사용하는 것이 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 4 Result of water reduction in the electrocoagulation system using two Al electrodes

Water content / Sludge	Initial wate before content electrocoagulation	Final water content after electrocoagulation	
		Upper	Lower
Excess sludge	99.65 wt%	94.78 wt%	98.99 wt%
Digested sludge	97.63 wt%	94.88 wt%	95.80 wt%

3.2 전극의 재질에 따른 부식량 분석

전극의 부식량을 실험적인 방법으로 계산하기 위한 실험조건이며 전극은 철과 알루미늄을 사용하였다. 전극의 부식량 계산은 철 전극의 경우 17 V, 알루미늄 전극의 경우 14 V로 인가하였으며 인가된 전류는 5±0.1 A였다. 본 실험조건에서 전극의 부식량의 가장 영향을 미치는 인자는 페러데이 법칙에 의해 양전극에 흐르는 전류의 밀도에 의한 것이며, 철전극과 알루미늄 전극의 선정을 위한 것이다. 또한 실험시간은 2시간, 교반 속도는 10 rpm이다.

Table 5는 실험에 의한 전극의 부식량과 이론적인 계산값을 비교한 결과이며, 알루미늄 전극의 경우 199.30 g에서 198.31 g으로 0.50 % 감소하였고, 철 전극의 경우 540.76 g에서 536.37 g으로 0.82 % 감소하였다. 이는 알루미늄 전극이 철 전극보다 전기응집 과정에서 발생하는 부식에 강하며, 전극의 내구성의 관점에서 철 전극보다 알루미늄이 우수함을 알 수 있다.

Table 5 Comparison of experimental and theoretical analysis of electrode corrosion

Electrode (Anode)		Al	Fe
Experiment	Before electrocoagulation	199.30 g	540.76 g
	After electrocoagulation	198.31 g	536.37 g
	Electrode corrosion	0.99 g	4.39 g
Theory	Molecular weight	26.98 g	55.85 g
	Theoretical corrosion	3.375 g	6.945 g

3.3 가압 탈수 실험결과

Fig. 7은 전기응집 유·무에 따른 소화 슬러지 가압탈수 측정결과를 나타낸 것으로, 실험 시간에 대한 함수율의 변화를 나타내었다.

전기응집 처리를 하지 않은 소화 슬러지에 전기장을 인가하지 않은 상태에서 압력만을 가하여 실시한 탈수실험 결과와 전기응집처리를 실시한 소화 슬러지의 함수율을 비교·분석하였다. 초기 함수율이 97.63 wt%인 슬러지 50 g을 피스톤형 필터 프레스(piston type filter press) 탈수장치에 투입한 후, 압력 4 kg_f/cm^2로 25분간 실험을 실시하였다. 초기 슬러지 높이는 1 cm 였으나 탈수후의 높이는 0.1 cm로 감소하였고, 최종 슬러지 케익의 함수율은 78.10 wt%가 되었다. 철 전극을 사용하여 전기응집 처리를 실시한 소화 슬러지에 전기장을 인가하지 않은 상태에서 압력만을 가하여 실시하였다. 철 전극을 사용한 전기응집 슬러지의 경우 상부로 부상 처리되어진 초기 함수율이 94.67 wt%인 슬러지 50 g을 피스톤형 필터프레스(piston type filter press) 탈수장치에 투입한 후, 압력 4 kg_f/cm^2로 25분간 실험을 실시하였다. 초기 슬러지 높이는 1cm 였으나 탈수후의 높이는 0.1cm로 감소하였고, 최종 슬러지 케익의 함수율은 75.93 wt%가 되었다.

알루미늄 전극을 사용하였을 경우 상부로 부상처리되어진 초기 함수율이 94.88 wt%인 슬러지 50 g을 앞서 기술한 같은 방법으로 실험한 후 최종 슬러지 케익의 함수율은 74.49 wt%가 되었다. 이는 전기응집처리된 슬러지의 경우에 원 슬러지에 비해 콜로이드(colloid) 입자의 입도와 가압 탈수에 영향을 미치는 유기물의 함량이 줄어들었기 때문이며, 전기응집처리의 특성을 잘 나타내었다.

가압 탈수시간의 경우 전기응집 처리를 하지 않은 초기 슬러지의 경우 함수율 80 wt%까지 이르는 시간이 20분이 소요되었으나, 철 전극을 사용하여 전기 응집을 가한 슬러지의 경우는 12분이 소요되었으며, 알루미늄 전극을 사용하였을 경우는 11분이 소요됨을 실험을 통해 분석하였다. 이는 전기응집 슬러지의 경우 탈수시간의 감소와 탈수효율의 저감이라는 두 가지 장점을 동시에 만족

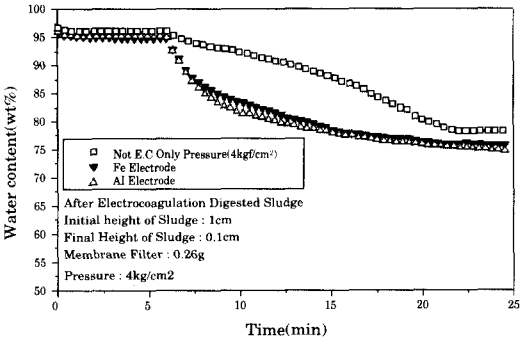


Fig. 7 Result of the sludge water content in the filter press system for the digested sludge using Fe and Al electrodes

하는 결과를 본 실험 결과에 의해 분석하였다.

3.4 전기가압 탈수 실험결과

Fig. 8은 전기응집 슬러지를 전기가압 탈수를 실시한 결과를 나타낸 것으로, 철 전극과 알루미늄 전극으로 전기응집 처리한 소화 슬러지에 전기장을 인가 전압 120 V로 고정하여 전극재질에 따라 압력과 전기를 동시에 투여하였을 경우의 전기탈수 실험결과이다. 전기 가압탈수의 경우 일반적으로 슬러지에서의 Colloid입자는 음전하를 띠고 있는 슬러지에 전압을 인가하여 입자의 전기영동성(Electrophoresis)을 부여하여, 이에 따라 슬러지의 함수율을 저감하는 잇점이 있다. 인가전압을 120 V로 고정한 이유는 가압 탈수와 전기 가압탈수 실험결과를 비교하기 위한 것이다. 초기 함수율이 94.67 wt%, 94.88 wt%인 슬러지 50 g을 피스톤형 필터 프레스(piston type filter press) 탈수장치에 투입한 후, 압력 4 kg_f/cm^2로 25분간 실험을 실시하면서 인가 전압을 120 V로 고정하였다. 필터는 나일론 멤브레인 필터를 사용했으며 초기 슬러지 높이는 1 cm 였으나 탈수 후의 높이는 0.1 cm로 감소하였고, 최종 슬러지 케익의 함수율은 철 전극의 경우 54.90 wt%, 알루미늄 전극의 경우 56.90 wt%가 되었다. 이는 전기응집 슬러지를 가압 탈수와 전기가압 탈수장치의 결과를 통해 본 연구의 목적인 전기응집 처리된 슬러지의 탈수시간을 줄이고 탈수효율 저감의 효과를 동시에 만족하는 결과를 나타내었다. 또한 잉여 슬러지를 농축시

키는 농축기의 경우는 함수율을 약 3~4 wt% 감소시키기 위해 하수 처리장에 사용되어지고 있는 본 연구에서의 전기응집장치를 이용하여 이러한 농축기를 대체하기에 충분한 함수율 감소의 결과를 실험을 통해 분석하였다. 하지만 이러한 전기응집 슬러지의 경우 화학응집에 비해 전극의 설치비용과 전극의 부식성 등의 문제점이 있으며, 전기인가에 따른 전력 소모의 단점이 있다.

또한 전기응집 처리를 하지 않은 초기 97.70 wt%의 함수율을 가지는 소화 슬러지의 경우 가압탈수를 통해 78.10 wt%의 함수율을 나타내었으며, 전기응집 처리를 한 소화 슬러지의 경우 인가전압을 0 V, 40 V, 80 V, 120 V로 증가하였을 때 최종 함수율은 75.63 wt%, 66.13 wt%, 63.46 wt%, 54.90 wt%로 실험을 통해 결과를 분석할 수 있었다. 인가 전압이 증가할수록 전기가압 탈수장치의 최종 함수율은 낮아진 결과를 나타내었으며, 120 V의 경우 최저 함수율 54.90 wt%의 낮은 함수율을 나타내었다.

Fig. 9은 전기응집 유·무 및 전기가압 탈수장치에서의 인가 전압 변화에 따른 탈수 결과와 원 슬러지의 최종 함수율을 시간에 따른 함수율로 나타내었다. 전체적으로 인가 전압이 높을수록 낮은 최종 함수율을 나타내며, 탈수시간의 측면에서 살펴보면 인가 전압이 높을수록 일정한 함수율까지 이르는 시간이 감소한 것으로 분석되었다.

Fig. 10은 전기탈수장치를 이용한 분리 실험에 의해 생성된 슬러지의 케익을 전자 현미경으로 촬영한 것으로, (a)는 양 (+)극쪽의 슬러지를 촬영한 것으로 음 (-)극 성질을 띤 입자들이 전기영동성에 의해 (+) 전극쪽으로 이동되어 올라온 모습을 확인할 수 있다. (b)는 (-)극 역할을 하는 다공판쪽의 탈수 슬러지를 촬영한 것으로, 전기삼투압에 의해 발생된 모세관 유로의 형태를 뚜렷하게 관찰할 수 있으며 전기가압 탈수방식에서 탈수효율이 우수한 원인이라는 분석이 가능하다. 즉 모세관 유로를 통해 입자 근처의 물들이 다공성 유로를 통해 제거됨을 쉽게 알 수 있다. 그러므로 전자현미경으로 촬영한 탈수 슬러지의 성상을 분석한 결과 각 탈수방법에 의한 입자와 액체의 분리효율과 탈수 메커니즘의 차이를 확인할 수 있었다.

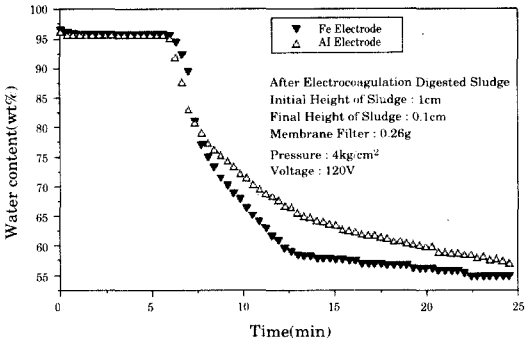


Fig. 8 Test results of the water reduction for the digested sludge electrocoagulated using the electrodewatering system

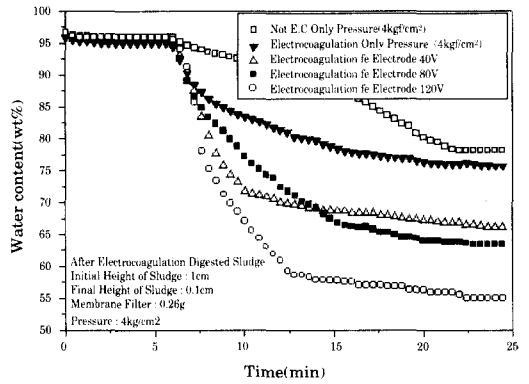


Fig. 9 Test results of the water reduction for the digested sludge using the electrodewatering system as a function of applied voltage

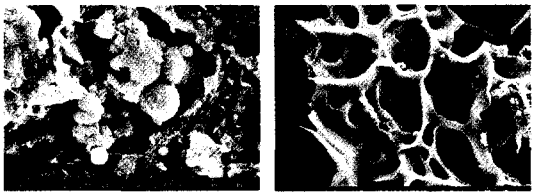


Fig. 10 Scanning electron micrographs of the surface layer of dewatered sludge cakes by electrodewatering

4. 결 론

본 연구는 기존 탈수기의 탈수효과를 증대시키기 위해, 탈수 전처리 과정에서 슬러지 입자의 전기응집 원리를 이용하여 탈수시간과 최종 함수율을 감소시키고, 하수 처리장의 농축장치를 대신할

수 있는 가능성을 파악하였다. 또한 슬러지의 입도 분석, 함수율, 수소이온농도, 유기물 함량을 측정하였으며, 전기응집 처리된 슬러지의 가압탈수 효과와 전기가압 탈수효과를 파악하기 위해 피스톤형 필터 프레스(piston type filter press) 전기탈수 장치를 설계, 제작 및 성능평가에 관한 연구를 수행하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 수영하수처리장에서 채취한 잉여 슬러지의 질량중앙입경(MMD)은 34.16 ㎛이며, 전기응집 후의 슬러지 질량중압입경은 64.01 ㎛로 87 % 증가하였으며, 소화 슬러지의 입도 측정결과 질량중앙입경(MMD)은 34.72 ㎛이며, 전기응집후의 질량중앙입경은 41.29 ㎛로 18.92 % 증가하였다.

(2) 슬러지 전기 응집 실험 전후의 유기물 함량은, 소화 슬러지의 경우 알루미늄 전극에서 약 24.3 %의 감소를 나타내었으며, 탈수 효과에 양호한 결과를 나타내는 것으로 분석되었다.

(3) 철 전극을 사용하여 전기응집 실험을 수행한 결과, 초기 함수율 97.63 wt% 소화 슬러지를 94.67 wt%로, 알루미늄 전극 사용시 초기 함수율 97.63 wt% 소화 슬러지가 94.88 wt%로 감소되어 전기응집처리로 슬러지의 함수율 3 %정도 감소시킬 수 있어 기존 농축장치의 성능과 유사하게 분석되었으며, 가압탈수시 전기응집 유무에 따라 3 %이상의 탈수효과와 탈수시간 감소효과가 있다.

(4) 전기응집에 의한 하수 슬러지 전처리 효과는 슬러지 입자 증가(2배), 유기물 감량(초기의 50 %), pH 증가(7.7), 슬러지 탁도 감소(초기의 15 %수준), 3 % 정도의 슬러지 함수율 감소와 기존 가압 탈수시 처리속도를 2배 이상 증가시킬 수 있는 장점이 있으나, 전극마모 및 전력소모량 증가라는 단점과 현장적용 실험을 통해 경제성 분석이 요구된다.

(5) 전기응집된 동일 슬러지에 대해 가압탈수 및 전기가압 탈수실험을 각각 수행하여 탈수효과를 분석하였다. 전기탈수장치에 의해 생성된 케이크의 함수율은 최적 조건에서 54.9 wt%로서 가압 탈수 케이크의 함수율이 78.1 wt%임을 고려하면, 전기 탈수가 가압 탈수에 비해 탈수 성능이 20 % 이상 증가함을 알 수 있었다.

(6) 가압 탈수와 전기 탈수의 탈수 소요시간을 비교한 결과, 초기 슬러지 함수율의 80 %에 도달하는 시간이 가압 탈수의 경우 20분이 경과되었으며, 전기 탈수의 경우 12분 이내에 초기 함수율의 80 %에 도달하여 슬러지 처리 속도 향상을 기대할 수 있다.

(7) 전기응집 전처리를 거친 후 전기 탈수에 의해 생산된 슬러지의 경우, 슬러지 처리속도 2배 향상과 기존 가압 탈수보다 30 %가 낮은 슬러지 함수율이 50~60 wt% 정도로 수송비를 절감, 매립지 감소 등의 경제적 이익 창출효과를 유발할 수 있을 뿐만 아니라 건축용 재료, 연료 등의 재활용율이 증가될 것으로 평가된다. 또한 슬러지 처리·처분 공법인 건조 및 소각공법이 적극적으로 이용됨에 따라 관련된 기술이 크게 향상될 것이 기대된다.

참 고 문 헌

1. Vik, E. A., D. A. Carlson, A. S. Eikum, and E. T. Gjessing, 1984, "Electrocoagulation of portable water", Water Res., Vol. 18, No. 11, pp. 1,355~1,360.
2. Rubach, S., and I. F. Saur, 1997, "Onshore testing of produced water by electroflocculation", Filtration & Separation, Vol. 34, No. 8, pp. 877~882.
3. Ibanez, J. G., M. M Takimoto, and R. C. Vasquez, 1995, " Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment: electrocoagulation of oily wastewater", Journal of Chemical Education, November 11, Vol. 72, pp. 1,050~1,052.
4. Koren J. P. F, and U. Syversen, 1995, "State-of-the-art electro- flocculation", Filteration & Seperation, February, Vol. 32, No. 2, pp. 153~156.
5. Chen, X., G. Chen and P. L. Yue, 2000, "Separation of pollutants from restaurant

wastewater by electrocoagulation", Separation and Purification Technology, Vol. 19, pp. 65~76.
6. 한기훈, 이태진, 이호상, 김장규, 1999, "매립지 침출수의 aluminum 전해응집 특성에 관한 연구", 대한환경공학회지, Vol. 21, No. 2, pp. 373~380.
7. Saur, I. F., S. Rubach, J. S. Forde, G. Kjaerheim, and U. Syversen, 1996, "Electroflocculation: removal of oil, heavy metals and organic compounds from oil-in-water emulsions", Fitration & Seperation, April, Vol. 33, No. 4, pp. 295~303.
8. Tsai, C. T., S. T. Lin, Y. C. Shue, and P. L. Su, 1997, "Electrolysis of soluble organic matter in leachate from landfills", Wat. Res., Vol. 31, pp. 3,073~3,081.
9. Pouet, M. F., and A. Grasmick, 1995, "Urban wastewater treatment by electrocoagulation and flotation", Wat. Sci. Tech., No. 3-4, pp. 275~283.
10. Matteson, M. J., R. L. Dobson, R. W. Glenn, and Jr. N. S. Kukunoor, 1995, "Electrocoagulation and seperation of aqueous suspensions of ultra fine particles", Colloids and Surfaces A: Phycochemical and Engineering Aspects, Vol. 104, pp. 101~109.
11. Park, C. J., H. S. Shin, Y. C. Ahn, J. E. Lee, and J. K. Lee, 2000, "A study on the removal of water content in the sewage sludge using the electrodewatering system", Proceedings of the 2nd Cross Straits Symposium on Materials, Energy and Environmental Sciences, pp. 145~146.
12. Smollen, M., and Kafaar, A., 1994, "Electroosmotically enhanced sludge dewatering: pilot-plant study", Wat. Sci. Tech., Vol. 30, No. 8, pp. 159~167.
13. Barton, W. A., Miller, S. A., and Veal, C. J., 1999 "The electrodewatering of sewage sludge", Drying Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 497~508.
14. Uhlig, H. H., 1948, "The corrosion handbook", John Wiley, Inc..

저 자 소 개

이재근(李在瑾)
1959년 10월 6일생, 1981년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1983년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학 석사, 1990년 미국 미네소타 대학교 기계공학 석사, 1992년 미국 미네소타 대학교(University of Minnesota) 기계공학 박사
1993. 3~현재 부산대학교 공과대학 기계공학부 부교수

김영환(金榮煥)
1959년 1월 15일생, 1981년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1989년 부산대학교 도시계획학과 행정학 석사
1997년 Syracuse university 토목환경공학과 공학석사, 2001년 부산대학교 청정공학협동과정 졸업 공학박사, 현~부산시청 공업기술과장

신희수(申喜守)
1972년 4월 21일 생, 1996년 진주산업대학교 기계공학과 졸업, 1998년 부산대학교 기계공학 석사, 2000년 부산대학교 일반대학원 기계공학과 박사과정