

# 초음파와 전기장 처리에 의한 하수슬러지 탈수성 향상 Enhancement of Dewaterability of Sewage Sludge by Ultrasonification and Electric Field Treatment

모우종 · 한지선 · 안창민 · 윤순옥 · 석희정 · 김창균<sup>†</sup>

Woojong Mo · Jisun Han · Changmin Ahn · Soonuk Yoon · Heejeung Seok · Changgyun Kim<sup>†</sup>

인하대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Inha University

(2012년 5월 2일 접수, 2012년 11월 23일 채택)

**Abstract :** The sludge disposal is a major economic factor in the sewage treatment facility operation. Moreover, since the ocean dumping will be prohibited by Korean environmental law from 2013, sludge should be eliminated or sludge volumetric reduction should be performed urgently. In this study, improvement of the sewage sludge dewaterability was investigated by ultrasound and electric field treatment. Sludge was treated by a single or in combination of either the electric field or ultrasound on a pilot pre-treatment facility, then it was dewatered by lab-scale filter press. The operating input energy of ultrasound device was varied from 225~1,200 kJ/L and electric field device was varied from 4.5~24 kJ/L. The water contents of dewatered sludge cake treated with ultrasound (1,200 kJ/L) and combination of ultrasound/electric field (1,224 kJ/L) were decreased 10~12% by comparing non-treated sludge. At that time, water contents were 65~66%. The combination treatment of ultrasound/electric field was effective to reduce water content of dewatered sludge cake, however, water content was not changed by a single treatment of electric field because of low energy density.

**Key Words :** Sludge, Dewaterability, Ultrasound, Electric Field, Sludge Pre-treatment

**요약 :** 슬러지 처분비용은 하수처리장 운영에 있어서 중요한 경제적 요소이다. 더욱이, 2013년부터 유기성 폐기물의 해양투기가 금지되면서 대부분의 슬러지가 육상 처리 되어야 하기 때문에 슬러지의 발생량을 줄이는 것이 시급한 상황이다. 본 연구에서는, 초음파와 전기장 처리에 의한 하수슬러지의 탈수성 향상을 확인하고자 하였다. 슬러지는 pilot-scale의 전처리 장치로 초음파와 전기장 단독처리 그리고 초음파 및 전기장 병합처리 되었으며, 처리 후 lab-scale 필터프레스 장치로 탈수되었다. 실험한 초음파 에너지 밀도 범위는 225~1,200 kJ/L였고 전기장 처리장치는 4.5~24 kJ/L였다. 초음파 단독처리와 초음파 및 전기장 병합처리 된 슬러지의 탈수 cake 함수율은 에너지 밀도 1,200 kJ/L일 때, 처리하지 않은 슬러지보다 각각 10~12% 감소하였으며 이 때 슬러지 함수율은 65~66%였다. 초음파 및 전기장 병합처리가 초음파 단독처리보다 탈수된 슬러지 cake의 함수율을 낮추는데 효과적이었으나, 전기장 단독처리의 경우 에너지 밀도가 낮아 함수율의 변화는 거의 없었다.

**주제어 :** 슬러지, 탈수성, 초음파, 전기장, 슬러지 전처리

## 1. 서론

2010년 기준으로 우리나라에는 하루 8,438톤에 달하는 막대한 양의 하수슬러지가 발생하고 있으며 2012년에는 약 10,000톤의 하수슬러지가 발생할 것으로 예상하고 있다. 2010년 발생 하수슬러지 중 약 40%는 재활용되나 27.4%는 해양투기, 23.1%는 소각되었으며 나머지는 건조연료화(7.9%) 및 매립(1.1%) 방법으로 처분되었다. 그러나 런던협약에 의한 유기성 폐기물 해양투기 금지와 2차 오염, 좁은 국토면적에 의한 육상매립의 한계 등에 따라 환경부에서는 2015년까지 42.5%의 슬러지를 건조연료화 하고 나머지는 재활용과 소각처리하려는 계획을 세우고 있다.<sup>1)</sup> 따라서 슬러지 최종처분에 대한 새로운 방안과 슬러지 저감 방안이 매우 시급하다. 슬러지 재이용 또는 효율적인 슬러지 처리를 위해서는 저함수율의 탈수 cake 생산에 따른 슬러지 감량화가 반드시 이루어져야 한다. 현재 대부분의 하수처리장에서

는 소화공정 이후 슬러지를 탈수공정을 거쳐 슬러지를 최종 처분 한다. 이때 80% 전후의 높은 함수율을 갖는 탈수 cake 이 발생하며 고함수율의 슬러지 cake은 매립, 재활용 등에 어려움을 야기한다.<sup>2)</sup>

슬러지의 탈수성은 일반적으로 슬러지의 입자의 전하, 결합수의 함량, 고형물 및 유기물의 함량, 입자의 크기 및 기계적 강도, 공극률, 압축계수 등 슬러지의 물리·화학적 성질에 크게 의존하며, 개량제 종류 및 탈수 압력과 속도 등의 조건에도 크게 영향을 받는다.<sup>3)</sup> 슬러지 탈수성 개선을 위한 전처리방법으로는 냉·해동 처리,<sup>4)</sup> 산처리,<sup>5)</sup> 생물학적 처리 등<sup>6)</sup>이 있으나, 아직까지 슬러지 개량제에 의한 탈수성 개선 방법<sup>7-9)</sup>이 일반적으로 사용되고 있다. 개량제에 의해 슬러지의 압축성이 개선되어 탈수 cake의 공극률이 향상되고 여과 비저항이 감소하여 탈수 속도가 빨라져 슬러지 탈수성이 향상된다.<sup>10)</sup> 개량제 투여로 인해 슬러지 내 존재하는 자유수는 비교적 쉽게 외부로 배출될 수 있지만 슬러지 내

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: cgk@inha.ac.kr Tel: 032-860-7561 Fax: 032-865-1425

부의 모세관에 존재하거나 슬러지 세포 내 물질과 결합되어 있는 수분을 제거하기에는 역부족이다. 최근 초음파처리<sup>11,12)</sup> 또는 전기장 처리<sup>13)</sup>를 이용하여 슬러지 탈수성을 향상시키는 연구가 진행되어 왔다. 이러한 방법은 슬러지 세포를 파괴함으로써 슬러지 내 수분을 외부로 유출시키므로 슬러지의 탈수성을 향상시키고 저함수율의 탈수 cake 생산을 가능케 할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 하수슬러지 탈수성 향상을 위한 실질적 방안으로서 파일럿 스케일의 초음파 및 전기장 처리 후 필터프레스를 이용하여 저함수율의 탈수 cake을 생산하고자 하였으며, 초음파와 전기장 단독처리 그리고 초음파 및 전기장 병합처리를 비교하고 개량계를 함께 투여하여 효과적인 슬러지 전처리 방법을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 대상슬러지 시료 및 시료채취

본 연구에서는 인천광역시 G하수종말처리장 내 고도처리 공정의 잉여슬러지 저장조에서 슬러지를 채취하여 실험하였다. 채취된 슬러지는 pilot-scale의 초음파 및 전기장 처리 장치를 이용하여 처리되었으며, 처리된 슬러지는 정상변화 관찰 실험을 위해 4°C 냉장고에 보관하였다.

### 2.2. Pilot-scale 초음파 및 전기장 처리 장치

본 실험에서 사용된 Pilot-scale의 초음파 및 전기장 처리 장치는 Fig. 1과 같이 200 L의 슬러지 저장조와 전기장 처리 장치, 초음파 처리 장치 그리고 펌프로 구성되어 있다. 초음파 및 전기장 처리 장치는 연속순환시스템으로 슬러지 공급펌프와 순환펌프에 의해 슬러지 저장조에 있는 총 100 L의 슬러지가 전기장 처리 장치와 초음파 처리 장치를 차례로 지나 다시 슬러지 저장조로 유입된다. 전기장 또는 초음파 단독 처리 시에는 사용하지 않는 장치를 작동시키지 않은 상태로 운전하였다.

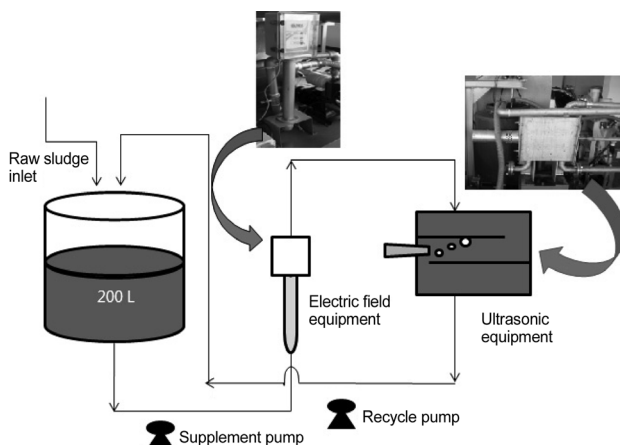


Fig. 1. Diagram of pilot-scale ultrasound/electric-field pre-treatment device.

실험에 사용된 초음파 처리 장치는 독일, Sonotronic Nageal사의 제품으로 주파수 20 kHz, 출력 1 kW이었으며, 전기장 처리 장치는 한국, Leetech사의 제품으로 단상교류 전압 220 V를 직류전압 24 V, 전류 1.5 A로 변환시키고 변환된 직류 전압은 증폭되어 최대 40 kV, 0.75 mA로 출력된다.

슬러지는 특정 초음파 에너지 밀도로 처리되었으며 초음파 에너지 밀도는 식 (1)에 의해 계산되었다.

$$\text{Ultrasound energy density (kJ/L)} = \frac{P \times T}{V} \quad (1)$$

P : Ultrasound power (kW)

T : Ultrasound treatment time (s)

V : Sludge volume (L)

본 실험은 초음파 에너지 밀도 225~1,200 kJ/L 범위에서 실시하였고, 초음파 및 전기장 병합처리의 경우, 전기장 처리 장치에 의한 에너지 주입량은 산정하지 않았다. 전기장 단독 처리의 경우, 초음파 발생 장치에 비해 전기장 발생 장치의 출력이 현저히 낮아(4.5~24 kJ/L; 초음파 처리의 약 2%) 전기장 장치만으로 초음파 장치와 동일한 에너지 밀도로 슬러지를 처리하기 어려워 초음파 및 전기장 병합처리 시 처리시간과 동일한 시간으로 슬러지를 처리하여 전기장 처리가 슬러지 탈수성에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

### 2.3. 슬러지 탈수 장치

초음파와 전기장 단독처리 그리고 초음파 및 전기장 병합처리된 슬러지는 Poly Aluminum Chloride (PAC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12.5%)를 10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TS g의 농도로 주입하여 개량한 후, 필터프레스에 의해 탈수되었다. Fig. 2는 슬러지 탈수 실험에 사용된 lab-scale 필터프레스장치이다. 필터프레스 사양은 discharge rate 20 L/min, pumping pressure 8 kgf/cm<sup>2</sup>, filter space 100 mL, pore size 15 μm였으며, 탈수시간 1 day, 탈수압력 4~5 bar의 조건으로 슬러지 탈수 실험을 실시하였다.

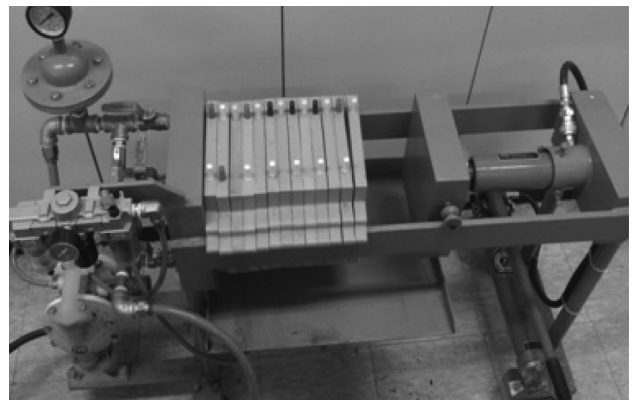


Fig. 2. Lab-scale filter press for sludge dewatering.

### 2.4. 모세관 흡입실험(Capillary Suction Time, CST)

CST는 간단하게 슬러지의 탈수성을 측정할 수 있는 실험으로 여과지의 일정한 거리를 시료의 물이 흡수되어 전파되어 가는 시간을 측정할 수 있다. 탈수성이 불량할 경우 CST 값이 크게 나타나고 탈수성이 양호한 경우 작은 값을 나타낸다.

Darcy의 이론을 기초로 한 CST 관한 식은 식 (2)와 같다.

$$t = \frac{(D_2^2 - D_1^2)\pi d}{P\mu C} \chi \quad (2)$$

- $D_1, D_2$  : 수분이 퍼져나가는 동심원의 직경(m)
- $d$  : 여지의 두께(m)
- $A$  : 액주의 바닥면적( $m^2$ )
- $P$  : 모세관압( $N/m^2$ )
- $\mu$  : 여액의 점성계수( $kg/m \cdot sec$ )
- $C$  : 고형물 농도( $kg/m^2$ )
- $\chi$  : 실험조건에 따른 계수( $kg/m^2 \cdot sec^2$ )
- $t$  : CST (sec)

### 2.5. 분석항목 및 방법

초음파와 전기장 단독처리 그리고 초음파 및 전기장 병합처리가 탈수성에 미치는 영향과 처리 전·후 슬러지의 성상 변화를 알아보기 위해 CST (capillary suction time), 입도분포(size distribution), TCOD, SCOD, 체외고분자물질(extracellular polymeric substances, EPS), 함수율(water content)을 측정하였다. 분석방법은 Table 1과 같다. EPS는 용존성 단백질과 다당류를 분석하였으며, 용존성 물질의 측정을 위해 3,000 rpm으로 원심분리(HA-1000-3, Hanil Science)한 후 0.45  $\mu m$  pore size의 membrane filter (Advantec)를 이용하여 여과하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1. 전처리 후 가용화율(Solubilization) 변화

초음파와 전기장 단독처리 그리고 초음파 및 전기장 병합처리에 따른 가용화율 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 에너지

Table 1. Analysis methods of sludge

Classification	Analytical methods/devices
Size distribution	Mastersizer 2000 (Malvern)
TCOD	Standard Methods <sup>14)</sup>
SCOD	Centrifuge 3,000 rpm for 15 min, filtering with 0.45 $\mu m$ membrane, Standard Method
CST	Type 304M Capillary Suction Timer (Triton Electronics Ltd.)
Protein	Hartee-Lory Method, UV (HP-agilent 8453)
Polysaccharide	Dubois Method, UV (HP-agilent 8453)
Water content	Dry at 105 $^{\circ}C$ oven for 4 hours

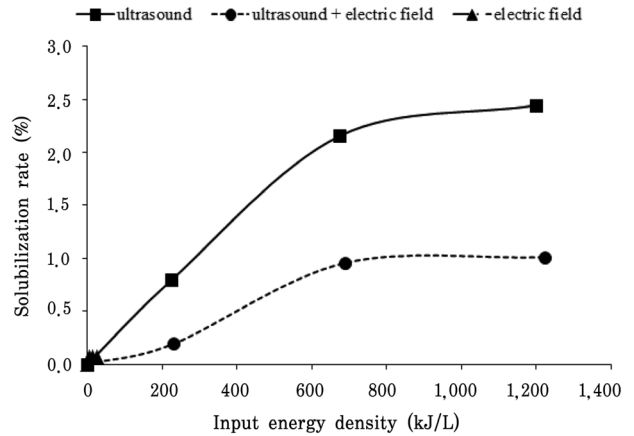


Fig. 3. Variation of solubilization rate along with input energy density.

가 '0'인 것은 처리되지 않은 원슬러지를 의미하며 COD기준의 가용화율은 식 (3)에 의해 계산하였다.<sup>12)</sup>

$$\text{Solubilization rate (\%)} = \frac{(\text{SCOD} - \text{SCOD}_0)}{(\text{TCOD}_0 - \text{SCOD}_0)} \times 100\% \quad (3)$$

SCOD : 전처리 후 용존 COD (mg/L)

SCOD<sub>0</sub> : 전처리 전 용존 COD (mg/L)

TCOD<sub>0</sub> : 전처리 전 총 COD (mg/L)

TCOD는 초음파와 전기장 처리시 에너지 밀도 변화에 거의 영향을 받지 않고 약 8,000~11,000 mg/L 정도로 거의 변화되지 않았다. 에너지 밀도가 커질수록 SCOD가 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 가용화율은 초음파 및 전기장 병합처리했을 때 초음파 단독처리 보다 더 높았다. 그러나 상대적으로 전기장 단독처리는 SCOD 변화에 큰 영향을 미치지 않았다. 초음파 단독 처리의 경우 원슬러지 대비 슬러지 가용화율은 초음파 에너지 밀도가 225 kJ/L, 675 kJ/L, 1,200 kJ/L일 때, 각각 0.8, 2.2, 2.5%였으며, 초음파 및 전기장 병합처리의 경우 각각 0.2, 1.0, 1.0%였다. 전기장 처리를 초음파처리와 병행 시 가용화율은 오히려 감소하는 것을 확인할 수 있어 전기장 처리가 가용화율을 저해할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 가용화율은 초음파 에너지밀도 225~675 kJ/L 범위에서 급격하게 증가하였으며, 초음파 에너지 밀도가 675 kJ/L 보다 커지면 가용화율은 둔화되어 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있었다. 초음파 및 전기장 병합처리와 동일한 처리시간으로 전기장 단독처리를 한 경우, 가용화율은 0.07%로 다소 증가 후 더 이상 변화하지 않았다.

초음파 및 전기장 처리에 의해 SCOD가 증가하여 슬러지 가용화율이 증가하는 것은 입자상 유기물질이 분해되어 용해성 유기물로 변환되고, 슬러지 내 미생물 세포가 파괴되면서 세포 내 용해성 유기물질의 방출에 의한 것으로 판단된다.

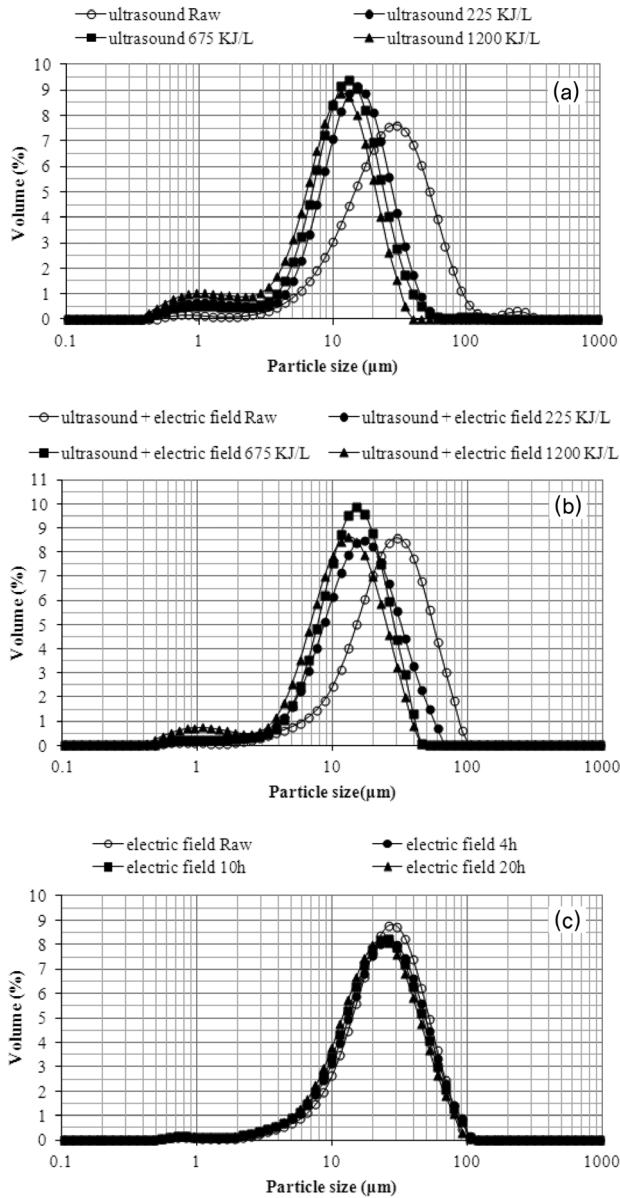


Fig. 4. Variation of size distribution (volume %) of sludge treated with ultrasound (a), ultrasound + electric field (b), and electric field (c).

### 3.2. 전처리 후 입도분포(size distribution) 변화

초음파와 전기장 단독처리 그리고 초음파 및 전기장 병합처리 전·후의 슬러지 입도분포 결과를 Fig. 4와 5에 각각 나타내었다. Raw와 에너지가 '0'인 것은 초음파 및 전기장 처리되지 않은 원슬러지를 의미한다.

Fig. 4는 전체 고형물 volume을 100%로 보고 특정 크기의 입자가 차지하는 부피를 log 그래프로 나타낸 것이다. 초음파 단독처리와 초음파 및 전기장 병합처리의 경우 슬러지 입자의 크기가 초음파 에너지 밀도가 증가함에 따라 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 전기장 단독처리의 경우 입도변화가 거의 일어나지 않은 것을 확인할 수 있다. 전기장 단독처리의 경우, 약간의 SCOD 증가율은 나타냈지만 입도분포의 변화는 일어나지 않은 것으로 보아 전기삼투 현상에

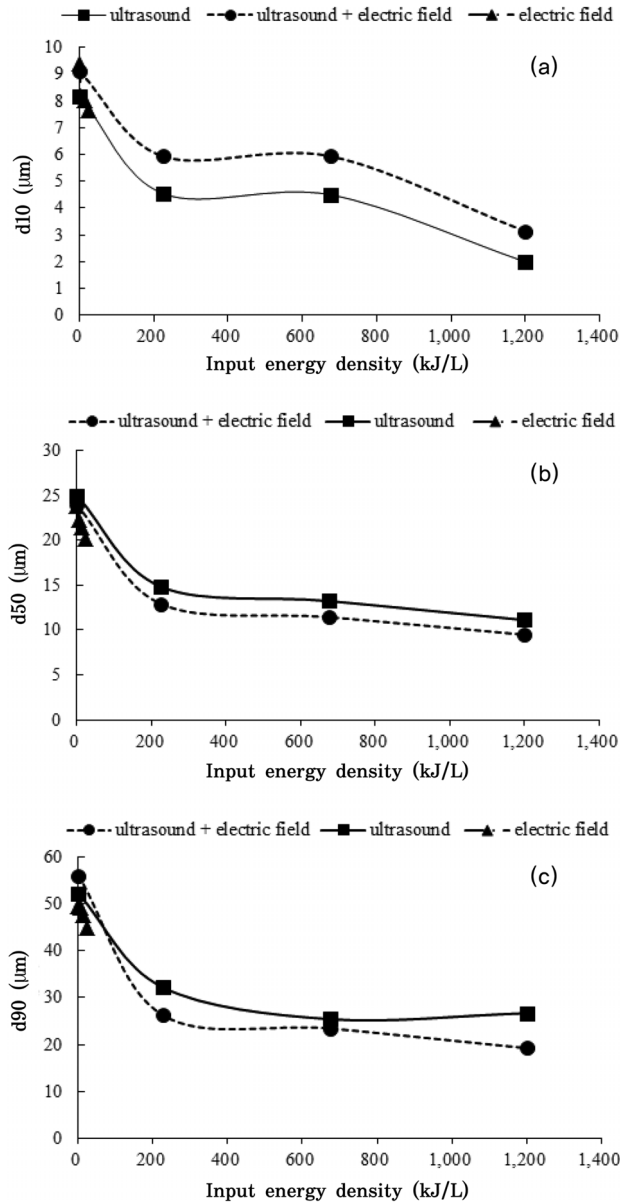


Fig. 5. Variation of d(10), d(50), d(90) of sludge treated with ultrasound (a), ultrasound + electric field (b), and electric field (c) along with input energy density.

의해 세포 내부 물질의 이동은 있으나 세포 파괴는 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 초음파 단독처리와 초음파 및 전기장 병합처리 한 경우, 초음파에 의한 공동화현상으로 인해 슬러지 입자가 작게 쪼개지는 현상이 발생하는 것으로, 초음파 에너지 밀도가 증가하면서 1 μm 이하의 작은 입자들이 생기고, 30 μm 이상의 입자들이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 입도가 작아지는 것을 확인하게 확인할 수 있으나 SCOD 기준이 되는 0.45 μm 이하로 작아지는 입자의 비중은 크지 않았다.

Fig. 5는 전체 고형물 volume중 10%, 50%, 90%를 차지할 때 입자의 크기를 각각 d(10), d(50), d(90)로 나타낸 것이다. 이 그래프로 판단하였을 때 d(10)을 차지하는 아주 작은 입자는 초음파 단독처리 하였을 때 가장 많았지만 전체적

인 입자의 크기를 알 수 있는  $d(50)$ 과  $d(90)$ 은 초음파 및 전기장 병합처리 하였을 때 가장 작은 것을 확인할 수 있었다. Kozeny-Carman식에서 슬러지 케익의 비저항은 입자크기에 비례하므로 슬러지 입자의 크기가 작아질수록 CST가 증가하는 등 탈수성이 나빠진다는 연구결과가 있으나,<sup>15)</sup> 슬러지 비저항에 대한 입자크기의 영향은 분산이 매우 커서 슬러지의 탈수 특성은 입자크기보다 밀도나 결합수량이 더 중요한 인자라는 반론 또한 제시되었다.<sup>16)</sup> 유와 명은 슬러지 탈수성에 입자의 크기 분포가 중요한 인자이며 큰 입자와 작은 입자의 비(입경비)가 크면 작은 입자가 큰 입자 사이에 끼어 공극률이 작아진다고 밝혔다. 따라서 본 실험 결과, 전처리시 작은 입자가 증가하였지만, 큰 입자의 입경 또한 작아지므로 전체적으로 큰 입자와 작은 입자의 입경비가 작아지면서 탈수성이 증대될 수 있는 것으로 판단되었다.

### 3.3. 전처리 후 용존 EPS 변화

본 연구에서 EPS는 protein과 polysaccharide의 농도를 측정하여 확인하였다. Fig. 6(a)는 초음파와 전기장 단독처리 그리고 초음파 및 전기장 병합처리에 따른 protein 농도 증가량을 나타낸 것이다. 초음파 단독처리의 경우, 원슬러지 대비 protein 농도 증가율은 초음파 에너지 밀도가 225에서 1,200 kJ/L까지 증가하며, 400~500 mg/L 증가하였고, 초음파 및 전기장 병합처리 한 경우, 650 mg/L 이상 증가하였다.

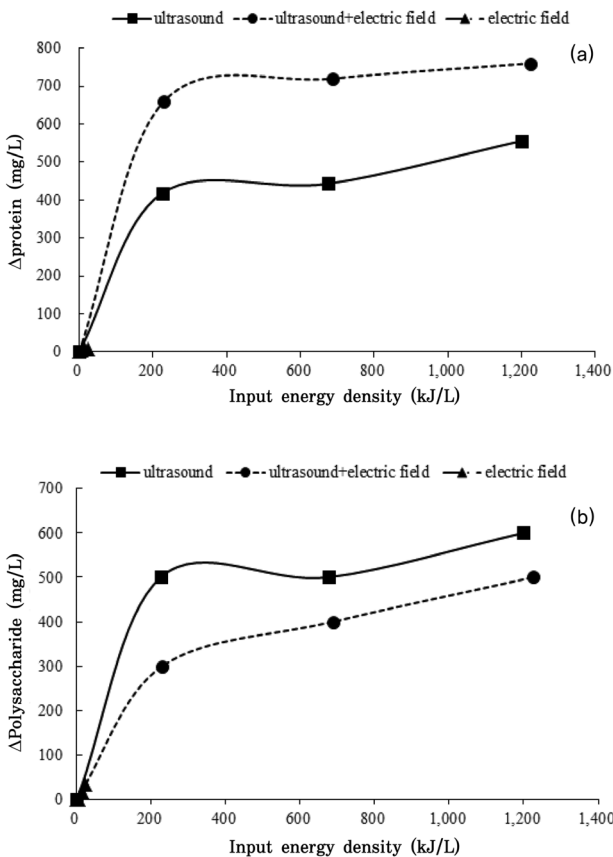


Fig. 6. Increasing amount of protein (a) and polysaccharide (b) along with input energy density.

하지만 전기장 단독처리 했을 때의 protein 농도 변화는 거의 없는 것을 알 수 있었다. Fig. 6(b)는 초음파 및 전기장 처리 후 polysaccharide 농도 증가량을 나타낸 것이다. 초음파 단독처리 한 경우, 원슬러지 대비 polysaccharide 농도 증가량은 초음파 에너지 밀도가 225~1,200 kJ/L일 때, 500~600 mg/L 증가하였고, 초음파 및 전기장 병합처리 한 경우에도, 300~500 mg/L까지 증가하였다.

이처럼 초음파 및 전기장 처리 후 polysaccharide 농도가 증가하는 것은 protein과 마찬가지로 초음파에 의해 공동화 현상이 일어나 슬러지 세포가 파괴되고, 세포내 존재하는 EPS가 수용액상으로 유출된 것으로 판단된다. 또한 초음파 및 전기장 처리에 의해 EPS가 파괴되면서 슬러지 내 EPS와 결합되어 있었거나 세포 내 존재했던 수분이 수용액상으로 유출되고 이를 기계적 탈수로 제거할 수 있을 것으로 사료된다. EPS는 슬러지의 탈수성과 안정성에 중요한 물질로 작용하는 것으로 알려져 있다. EPS가 슬러지에 존재하는 간극수를 더욱 함유하게 하여 침전을 방해하는 역할을 하기 때문이다.<sup>17)</sup> 그러나 EPS의 양보다는 EPS의 생화학적 특성에 의해 탈수성이 더 영향을 받는다고 알려져 있다.<sup>7)</sup>

### 3.4. 전처리 후 슬러지 개량제 투입에 의한 CST 변화

가용화 효율이 가장 높았던 초음파 단독처리 한 슬러지를 대상으로 가장 효과적인 개량제를 알아보기 위해 alum, ferric, PAC 세 가지 개량제를 사용하여 CST 실험을 실시하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Alum, ferric, PAC의 주입량은 실제 하수슬러지 처리시설에서 사용하는 개량제의 양을 문의하여 결정하였으며, 각각 1 mmol Al/g TS, 1 mmol Fe/g TS, 10 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/g TS로 하였다. 본 실험에서 원(Raw) 슬러지는 input energy density에 따라 초음파 전처리한 것으로서 개량제만 투입하지 않은 것을 나타내며, 개량제를 투입한 원슬러지의 CST값은 각 개량제(Alum, Ferric, PAC)의 그래프 중 input energy density가 0인 데이터이다. 실험 결과, 개량제를 투여하지 않은 전처리한 슬러지는 input energy density 증가에 따라 탈수성이 나빠지다가 1,200 kJ/L에서는 초기상태보다 탈수성이 좋아졌으며, 전처리한 슬러

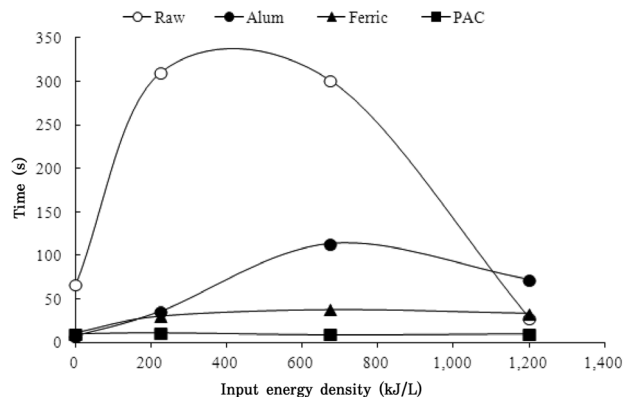


Fig. 7. Variation of CST along with input energy density and different coagulants.

지에 개량제를 투여하는 경우는 input energy density를 증가시키더라도 탈수성이 전처리를 하지 않은 경우와 유사거나 다소 나빠지는 경향을 보였다. 그러나, 개량제 중 PAC가 슬러지 탈수성을 가장 효과적으로 향상 시키는 것으로 나타났고, 그 때 초음파 에너지 밀도는 225 kJ/L였다.

### 3.5. 전처리 후 함수율 변화

Fig. 8은 초음파와 전기장 단독처리 그리고 초음파 및 전기장 병합처리 전·후 슬러지의 탈수 cake 함수율을 나타낸 것이다. 에너지가 '0'인 것은 처리되지 않은 원슬러지를 의미하며 초음파 단독처리 한 경우, 원슬러지의 탈수 cake 함수율은 76.3%였으며 초음파 에너지 밀도가 225 kJ/L, 675 kJ/L, 1,200 kJ/L일 때, 탈수 cake 함수율은 각각 75.6, 74.0, 65.3%였다. 초음파 및 전기장 병합처리한 경우, 원슬러지의 탈수 cake 함수율은 78.5%였고 초음파 에너지 밀도가 225 kJ/L, 675 kJ/L, 1,200 kJ/L일 때, 탈수 cake 함수율은 각각 72.1, 72.6, 66.0%였으나 전기장 단독처리 했을 때 탈수 cake 함수율 변화는 거의 없었다. 초음파 단독처리 한 경우, 초음파 에너지 밀도가 1,200 kJ/L일 때 함수율은 초음파 처리하지 않은 원슬러지의 탈수 cake 함수율인 75.6%에 비해 약 10% 감소한 65.3%이며 이것은 최종슬러지 부피를 약 32% 줄일 수 있으며 초음파 및 전기장 병합처리 한 경우, 초음파 에너지 밀도가 1,200 kJ/L일 때 함수율은 처리하지 않은 원슬러지의 탈수 cake 함수율인 78.5%에 비해 약 12% 감소한 66.0%이고 이것은 최종슬러지 부피를 약 34% 줄이는 효과를 가져 올 수 있다.

본 실험 결과는 1 A로 전기탈수를 한 Yang<sup>18)</sup>이 최대로 얻은 함수율 65%와 유사한 결과이며, 박 외<sup>8)</sup>의 연구에서 개량제인 alum을 이용한 슬러지의 압력여과 후 함수율인 78%보다 좋은 탈수성을 보였으나 마이크로파를 이용한 탈수 슬러지의 최대 함수율인 52.2%에 도달하진 못하였다. 또한 이<sup>2)</sup>의 연구결과에서 하수슬러지를 기계 탈수하여 얻은 함수율인 88%에 비해 매우 좋은 탈수율을 보였으나 같은 연구에서 열탈수법을 이용해 얻은 62.7%보다는 높은 함수율을 가진 슬러지를 얻었다. 결과적으로, 본 연구 결과는 열탈수 및 마이크로 탈수법에서 얻을 수 있는 정도의 낮은 함수율을 얻지

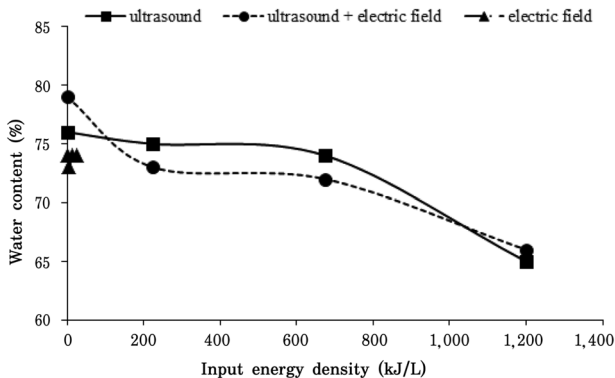


Fig. 8. Variation of water content along with ultrasound energy density.

못하였으나 일반적인 기계탈수 및 개량제에 의해 얻을 수 있는 탈수성에 비해 높은 효율을 보였다.

### 3.6. 가용화율과 함수율의 관계

Fig. 9는 가용화율과 함수율과의 관계를 나타낸 것이다. 초음파 단독처리와 초음파 및 전기장 병합처리 한 경우를 보면 탈수 cake의 함수율과 가용화율은 반비례 관계에 있으며 가용화율이 가장 클 때의 초음파 에너지 밀도보다 더 큰 초음파 에너지 밀도로 슬러지를 처리했을 때 함수율이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 초음파에 의해 슬러지 세

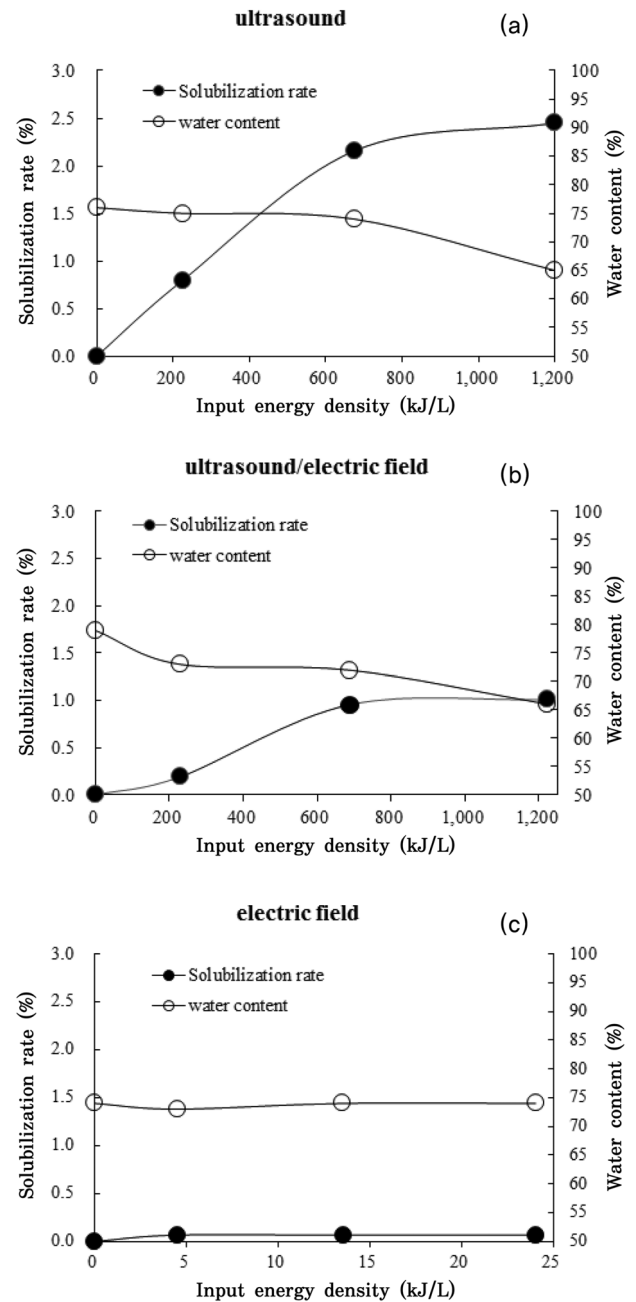


Fig. 9. Relationship between solubilization rate and water content of sludge treated by ultrasound (a), ultrasound/electric field (b), and electric field (c).

포가 파괴되고 슬러지 내 유기물질이 용출되어 SCOD가 증가하지만 EPS와 수분 결합을 깨기 위해서는 가용화율이 최대일 때의 초음파 에너지 밀도보다 더 큰 초음파 에너지 밀도가 요구되는 것을 알 수 있다. 하지만 전기장 단독처리의 경우, 가용화율은 현저하게 작으며 그에 따라 함수율 변화는 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 가용화율이 증가하면 슬러지의 탈수성이 나빠져 함수율이 증가하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구의 결과는 그와 반대로서 슬러지 가용화와 관계없이 전처리에 따라 입자크기의 전체적인 변화가 일어나 탈수성 향상에 기여한 것으로 판단할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초음파와 전기장 단독처리 그리고 초음파 및 전기장 병합처리가 슬러지 탈수성에 미치는 영향을 알아보고자 하였으며, 초음파 에너지 밀도에 따른 슬러지 탈수성 향상 효과와 전기장 처리가 슬러지 탈수성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

1) 초음파 단독처리와 초음파 및 전기장 병합처리 한 슬러지의 경우 처리하지 않은 슬러지에 비해 가용화율은 상당히 증가하였으나 전기장 단독처리 한 슬러지의 경우 초음파 단독처리와 초음파 및 전기장 병합처리에 비해 가용화율이 상당히 적었다.

2) 초음파 에너지 밀도 225~675 kJ/L에서 가용화율이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있으며, 초음파 에너지 밀도가 675 kJ/L 보다 커지면서 가용화율이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3) 슬러지 개량제로 Alum, Ferric, PAC를 사용하였으며, PAC가 초음파 및 전기장 처리한 슬러지의 탈수성을 가장 효과적으로 향상시키는 것을 확인하였다.

4) 입도분포 결과를 보면, 초음파 단독처리와 초음파 및 전기장 병합처리 한 경우 초음파 에너지 밀도가 증가할수록 슬러지 입자가 작게 쪼개지는 것을 확인할 수 있으며 가장 큰 입도분포의 변화는 초음파 에너지 밀도가 225 kJ/L 일 때 일어났고 에너지 밀도가 증가하면서 1 μm 이하의 작은 입자들이 생기고, 30 μm 이상의 입자들이 크게 줄어들었다.

5) 초음파 단독처리와 초음파 및 전기장 병합처리 한 경우 초음파 에너지 밀도가 1,200 kJ/L일 때 탈수 cake 함수율은 원슬러지(전처리 하지 않은 슬러지의 탈수 cake)와 비교하였을 때, 각각 10%, 12% 감소하였다. 이 결과는 일반적인 기계탈수 및 개량제에 의해 얻을 수 있는 탈수성에 비해 높은 효율을 보였으며 이 때의 이 때 슬러지 감량률은 각각 32%, 34%이었다.

6) 본 연구에서의 가용화율과 함수율 변화는 반비례 관계에 있으며, 가용화율이 가장 클 때 초음파 에너지 밀도보다

더 큰 초음파 에너지 밀도로 처리하였을 때 함수율이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 가용화율이 증가하면 슬러지의 탈수성이 나빠져 함수율이 증가하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구의 결과는 그와 반대로서 슬러지 가용화와 관계없이 전처리에 따라 입자크기의 전체적인 변화가 일어나 탈수성 향상에 기여한 것으로 판단할 수 있었다.

따라서 초음파 에너지 밀도가 1,200 kJ/L일 때, 초음파 단독처리와 초음파 및 전기장 병합처리가 슬러지 함수율을 저감하는데 효과적이며 전기장 단독처리의 경우 함수율 저감에 효과가 없었지만, 초음파와 병합처리 했을 때 초음파 단독처리 보다 함수율 저감에 더 효과적 이었다. 전기장의 출력을 보다 향상시킨다면 전기장 처리장치의 낮은 전력소비로 인한 경제적 효과와 더불어 초음파 및 전기장 병합처리가 하수슬러지 감량화에 더욱 효과적일 것으로 판단된다.

KSEE

#### 참고문헌

1. Ministry of Environment, "A Master plan for Sewage Sludge Treatment," Republic of Korea, (2008). "A sewage sludge treatment master plan for prohibiting ocean dumping 12," (2012)
2. Lee, J.-E., "A Study on Thermal Dewatering for Improving the Dewaterability of the Municipal Wastewater Sludge," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **26**(5), 601~609(2004).
3. Lee, K.-H. and Shin, K.-H., "Optimal Conditions of Sewage Sludge Dewatering," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **17**(2), 177~185(2000).
4. Wang, Q., Fujisaki, K., Ohsumi, Y., O. and H. I., "Enhancement of dewaterability of thickened waste activated sludge by freezing and thawing treatment," *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.*, **36**(7), 1361~71(2001).
5. Huang, S. H., Chen, J. L., Chiang, K. Y. and Wu, C. C., "Effects of acidification on dewaterability and aluminum concentration of alum sludge," *Sep. Sci. Technol.*, **45**(8), 1165~1169(2010).
6. Fakhru'l-Razi, A. and Molla, A. H., "Enhancement of bioseparation and dewaterability of domestic wastewater sludge by fungal treated dewatered sludge," *J. Hazard. Mater.*, **147** (1-2), 350~356(2007).
7. Yin, X., Han, P., Lu, X. and Wang, Y., "A review on the dewaterability of bio-sludge and ultrasound pretreatment," *Ultrason. Sonochem.*, **11**(6), 337~348(2004).
8. Park, S.-S., Kang, H.-Y. and Wang, S.-H., "Effect of Microwave Irradiation and Chemical Conditioning for Dewatering Characteristics of Sludge," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **27**(7), 732~738(2005).
9. Qi, Y., Thapa, K. B. and Hoadley, A. F. A., "Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties-A review," *Chem. Eng. J.*, **171**(2), 373~384(2011).
10. Lee, C.-H., "Bioflocculation and dewatering characteristics of waste sludge for coagulant of metal salt," Ph. D. thesis,

- Busan National University(2002).
11. Feng, X., Deng, J., Lei, H., Bai, T., Fan, Q. and Li, Z., "Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning," *Bioresour. Technol.*, **100**(3), 1074~1081(2009).
  12. Yoon, Y.-S., Kim, D.-J., You, I.-K. and Ahn, D.-H., "A study on the solubilization and dewaterability of ultrasonically treated wastewater sludge," *J. Environ. Sci. Soc.*, **18**(6), 675~682(2009).
  13. Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J. and Hoadley, A. F. A., "Electrical field: A historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering," *Water Res.*, **44**(8), 2381~2407(2010).
  14. APHA, "Standard methods for the examination of water and wastewater," 20th edition, American Public Health Association, Washington, D.C., U.S.A. (1998).
  15. Liming, S. H. A. O., Peipei, H. E., Guanghui, Y. U. and Pinjing, H. E., "Effect of proteins, polysaccharides, and particle sizes on sludge dewaterability," *J. Environ. Sci.*, **21**(1), 83~88(2009).
  16. Knocke, W. R., Hamon, J. R. and Dulin, B. E., "Effects of coagulation on sludge thickening and dewatering," *J. AWWA*, **79**(6), 89~98(1987).
  17. Chen, Y., Yang, H. and Gu, G., "Effect of acid and surfactant treatment on activated sludge dewatering and settling," *Water Res.*, **35**(11), 2615~2620(2001).
  18. Yang, G. C. C., Chen, M. C. and Yeh, C. F., "Dewatering of a biological industrial sludge by electrokinetics-assisted filter press," *Sep. Purif. Technol.*, **79**(2), 177~182(2011).