

전기탈수방법에 의한 하수 슬러지 탈수 특성

박찬정* · 이정언** · 안영철* · 신희수* · 이재근***

Efficient Dewatering of the Sewage Sludge by Electrodeewatering System

Chan-Jung Park, Jung-Eun Lee, Young-Chull Ahn, Hee-Soo Shin,
and Jae-Keun Lee

Key Words: 전기탈수 시스템(Electrodeewatering System), 전기영동성(Electrophoresis), 전기삼투압(Electroosmosis), 수분 함수율(Water Content).

Abstract

Application of electrodeewatering (EDW) to mechanical dewatering system was studied to decrease water content in the sludge generated from waste water treatment process. Experiments realized the reduction of water content in the sewage sludge. EDW enhancing the conventional filtration by an electric field is an emerging technology with the potential to improve dewatering. In this study, a piston filter press was constructed, the digested sludges were dewatered by EDW under conditions of DC electric field and constant pressure in the piston filter press. Constant electric field from 0~120 V/cm and constant pressure 98.1~392.4 kPa were used. The results showed that as electric field was increased the dewatering rates increased and as pressure was increased the dewatering rates decreased. Also as polymer was added the dewatering rates increased. This experiments produced final sludge cake with water content of 60 wt% using EDW, compared with 80 wt% using pressure filtration alone.

기호설명

V_E = The velocity of charged particles
 ζ = zeta potential of the particles(mV)
 ϵ = the permittivity of the fluid
 K = particle shape factor
 η = viscosity of the fluid
 $f(\rho, \rho_1)$ = function of fluid and
 particle's electrical resistivity
 E = the applied electric field strength

V_{eo} = Electro-osmotic flow velocity
 U_{eo} = Electroosmotic mobility
 λ = sludge cake water content (wt%)
 W_w = wet weight (g)
 W_D = dry weight (g)

1. 서론

기존의 가압 탈수 시스템에 의해 생산되는 탈수 슬러지의 함수율은 약 80 wt%로 수송비 과다, 재활용 어려움 등과 같은 문제점이 있어 슬러지를 효율적으로 처리하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구는 가압 탈수 장치에 전기 삼투압의 원리를 적용하

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 부산대학교 환경기술산업 연구 센터

*** 부산대학교 기계공학부

여 함수율이 약 50 wt%인 고탈수 케이크를 생산할 수 있는 전기식 탈수장치를 개발하고자 하는 것이다. 이와 같은 목적을 달성함으로써 슬러지의 재활용율을 향상시키고, 더 나아가 슬러지의 해양 투기, 매립으로 인해 발생하는 제반 문제들을 해결하고자 하는 것이다. 현재 국내에서 발생하는 하·폐수 슬러지는 전국 290여개의 도시 하수처리장과 100여개의 공단 및 농공단지 폐수처리장에서 처리하고 있으며 슬러지 발생량 (건량)은 1996년 기준으로 2,796 ton/day에 이르고 있고 환경부 보고에 의하면 향후 2005년까지 소규모 하·폐수처리장까지 합하여 약 2000여 개의 하·폐수처리장이 가동될 것으로 전망되며 이에 따라 슬러지의 발생이 가속화될 것으로 전망된다.

슬러지의 발생량은 기본적으로 유입수의 상태에 따라 달라지나 최종적으로는 탈수케이크의 함수율에 따라 달라지므로 슬러지의 탈수는 슬러지 발생량에 가장 큰 영향을 미친다. 기존의 슬러지의 대부분은 해양투기, 매립 그리고 소각 등의 방법으로 처분되고 있으나 해양투기 및 매립과 같은 슬러지 처분 방법은 지가의 상승, 침출수 발생, 환경오염 유발, 지역주민과의 갈등 등과 같은 문제를 안고 있으며 소각에 의한 방법은 처리비용이 높아 효율적인 해결책이 되지 못하고 있는 실정이다. 그래서 최근 들어 퇴비, 아스팔트 충전재, 경량골재, 시멘트 원료 등과 같은 자원화로 이용하는 방법을 통해 슬러지를 재활용하여 최종 발생 슬러지 량을 최소화하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 그러나 슬러지 자원화 및 최적의 매립효과를 얻기 위해서는 최종 처분 단계에서 슬러지의 함수율을 최소화시키는 것이 무엇보다 중요하다. 이에 본 연구에서 압력과 전기삼투를 동시에 이용한 전기탈수장치의 개발과 그 효과를 검토하고자 한다.

2. 전기탈수 원리

2.1 전기탈수 메카니즘

전기 탈수는 기계적 압착탈수와 하이드로졸의 전기적 성질을 이용하여 슬러지에 함유된 수분을 효과적으로 제거하는 것이다. 압착에 의한 탈수(Pressure Filtration)외에 슬러지 층에 전기장을 형성시켜 전기 영동성(Electrophoresis)과 전기 삼투

성(Electroosmosis)이 입자에 작용하여 탈수를 유도하는 원리가 병용되어 있는 것이다. 압착에 의해 입자의 기공 혹은 모세관을 통해 수분을 강제적으로 탈수시키며 동시에 전기장이 형성되어 있으므로 액체 슬러지에 대전된 입자는 전기영동현상에 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 이동하면서 다시 수분이 제거되는 것이다. 일반적으로 슬러지 입자는 (-) 표면전하를 띠므로 슬러지에 전기장을 형성시키면 슬러지 입자는 입자가 갖고 있는 전하와 반대전극인 (+)극으로 이동하게 된다. 반면 슬러지 입자층내의 수분은 (-)극으로 끌어당겨져 탈수가 촉진된다. 전기 탈수장치의 장점은 종래의 기계적인 압착력에만 의존한 고압탈수식으로 탈수하기 어려운 난 탈수성 수분을 많이 함유한 슬러지에서 수분을 제거하거나 탈수의 효율을 증대시키는데 매우 효과적인 방법이다. Fig. 2.1은 슬러지의 전기적 특성과 기계적인 탈수방법에 의해 제거되는 수분의 한계와 전기적 탈수방법에 의해 제거되는 수분의 범위를 표현한 그림이며, Fig. 2.2는 전기탈수메카니즘의 원리를 나타낸 그림이다.

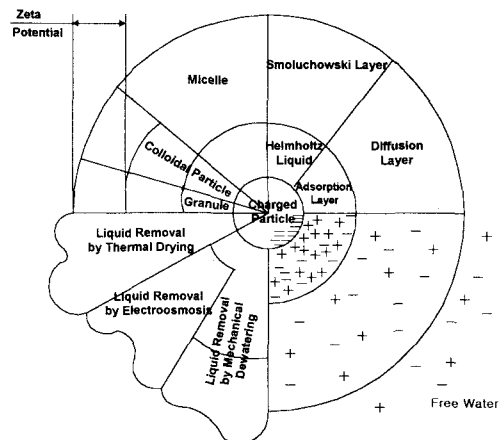


Fig. 2.1 Sludge particle liquid in an electric double layer in relation to the moisture removal method.

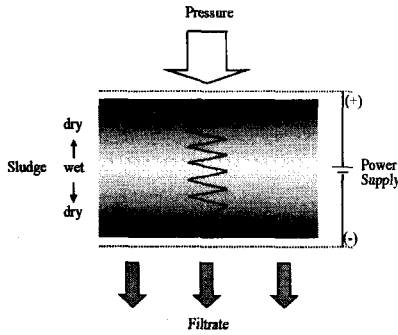


Fig. 2.1 Schematic Representation of Electrodeewatering

2.2.1 전기영동성

전기 영동성은 전기장 하에서 용액중에 분산되어있는 전기적으로 대전된 물질의 이동현상을 나타내는 것으로서, 물과같은 액체중에 분산되어있는 고체입자들은 대개 (-)전하를 띠며 분산되어있는데 (+)전극을 액중에 설치하면 전기적 인력에 의해 입자들이 (+)극 주위에 집중되는 현상을 말한다. 슬러지의 탈수에 있어서도 슬러지 입자의 대부분은 (-)의 전하를 띠고 있으므로 (+)전극을 슬러지내에 설치하면 고체 입자들이 전극 주위에 집중하게 되고 그로 인해 탈수가 촉진되는 특성이 있다. Helmholtz-Smolushowski 방정식에서 전기적 영동성에 의해 움직이는 입자의 속도는 식 (2.1) 과 같이 표현된다.

$$V_E = (\zeta \cdot \epsilon) \cdot (K \cdot \eta)^{-1} \cdot f(\rho, \rho_1) \cdot E \quad (2.1)$$

여기서 V_E = The velocity of charged particles

ζ = zeta potential of the particles(mV)

ϵ = the permittivity of the fluid

K = particle shape factor

η = viscosity of the fluid

$f(\rho, \rho_1)$ = function of fluid and particle's electrical resistivity

E = the applied electric field strength

2.2.2 전기삼투압

전기 삼투는 고체, 액체의 혼합체의 상하에 전기를 공급함으로써 액체가 이동하는 현상이다.

입자주위에 전기력이 작용할 경우 전기가중층이 형성되어 인접 입자를 서로 밀어내려는 반발력이 존재하여 어떤 거리를 두고서 존재하게 된다. 따라서, 슬러지의 상하에 양(+), 음(-)전극을 걸어주면 입자는 고정상태가 되고 입자 사이로 물의 이동을 야기 시키는 전기삼투 유동현상이 발생하며 이때의 물 이동 속도는 식 (2.2)과 같다.

$$V_{eo} = U_{eo} \cdot E$$

$$U_{eo} = \frac{V_{eo}}{E} = -\frac{\epsilon \cdot \zeta}{\eta} \quad (2.2)$$

여기서 V_{eo} = Electro-osmotic flow velocity

U_{eo} = Electroosmotic mobility

ϵ = the permittivity of the fluid

η = the viscosity of the fluid

ζ = the zeta potential of the particles

E = the applied electric field strength

zeta potential은 전단면과 액체 사이의 potential 차이로서 음극으로 대전된 전단면에서 멀어질수록 작게 나타난다. 전기장내의 액체의 대류속도는 zeta potential 과 전기장의 세기에 비례한다는 것을 알 수 있으며 zeta potential과 전기장의 세기는 액체가 함유하고 있는 이온 농도와 pH에 의해 변한다.

2.2.3 쿨롱열

쿨롱열은 전류가 슬러지를 통과할 때 발생하여, 물의 점성을 감소시키게 되고 그 때문에, 탈수능력을 증대시키게 한다. 쿨롱열은 슬러지 케익의 수분 함수율과 전기적 비저항을 상당히 감소시키는 특징을 가진다. [Barton, W. A., et al., 1999]

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

실험장치는 Fig. 3.1에 표시된 바와 같이 피스톤, 실린더, DC전원 공급장치 및 데이터 획득 시스템으로 구성되어 있다. 전체 높이는 500 mm이

고 내부 폭은 70 mm로 제작되었다. 공기압으로 압력을 조절하기 위해 상부에 10 mm로 Tapping 했으며, 하부 역시 탈수된 물이 빠져나갈 수 있도록 Tapping을 하였다. 전하가 슬러지만을 통하여 이동되게 하기 위해 실린더의 재질은 절연체인 테프론으로 제작하였고, 피스톤은 지름은 70 mm이고 높이는 30 mm인 구리를 사용하였다. 이 피스톤에 Air Purge Bolt를 설치하여 외부의 전원 공급장치로부터 전원을 연결할 수 있는 구조로 설계하였다. 그리고 내부 Sealing을 위해 양쪽에 2개씩의 O-Ring을 부착하였다. 실린더 하단 부분의 다공판은 지름이 90 mm이고, 5 mm 간격으로 3 mm 구멍을 가진 구리 재질로 제작하였다. 이 다공판 역시 전기장의 인가를 위하여 Air Purge Bolt를 설치하여 외부의 전원 공급장치로부터 전원을 연결할 수 있는 구조로 설계하였다.

3.2 실험방법

부산광역시 환경 관리 공단의 협조에 의해 부산시의 도시 하수 슬러지를 샘플링 한 후 초기 함수율, 전기전도도, 유·무기물 함량 정도, 입자 크기를 파악한 다음 탈수 실험을 실시하였다. 압착에 의한 탈수실험의 결과를 파악한 후 전기탈수 실험을 실시하여 비교하였다. 전기탈수 실험은 샘플링 한 슬러지를 실린더 내에는 슬러지를 투입하고서 전기를 침투시키기 위해 피스톤 부분에 양(+)전극, 실린더 다공판에 음(-)전극을 걸어 주어 실린더 내의 물질이 대전되도록 하였으며 피스톤 상면에 압축 공기로서 압축시켰다. 압축은 공기압으로 압력수준에 맞추어 사용하였다. 이때 전압과 하중은 탈수과정 동안 항상 일정하도록 하였다. 대전체를 통과하는 전류의 세기를 측정하기 위해 전류측정기를 직렬로 연결하였고 하중과 전압에 의해 발생하는 대전체의 두께를 측정하였고, 탈수액은 실린더 바닥의 다공판에 40개의 지름 3 mm짜리 구멍을 뚫어 밑으로 빠지도록 하였다. 시간의 흐름에 따라 여과된 물의 양이 많아지는데 이 물의 양을 Balance에서 측정하여 3초 단위로 컴퓨터에 자동적으로 이 값을 입력시킨다. 이 입력값을 가지고 초기 함수율과 탈수후의 시료 무게를 측정하여 최종 슬러지 함수율을 식 (3.1)과 같이 계산하게 된다.

$$\lambda(\text{wt}\%) = \frac{W_w - W_D}{W_w} \times 100 \quad (3.1)$$

여기서 λ : sludge cake water content (wt%)
 W_w : wet weight (g)
 W_D : dry weight (g)

식(3.1)에 의해 구해진 값은 건조오븐에서 슬러지 케익의 중량을 110℃로 KS B 6332에 의하여 건조시켜 측정하여 계산된 함수율과 비교하였다.

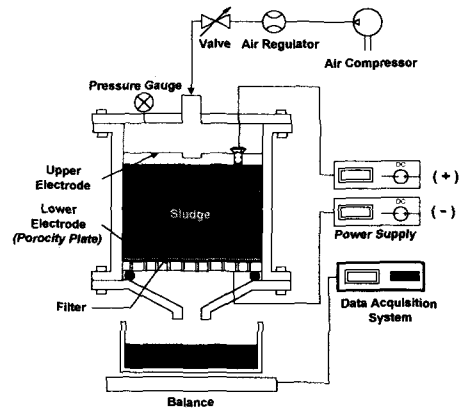


Fig. 3.1 Schematic diagram of Electrodewatering System

4. 결과 및 고찰

4.1 기계적인 방법 의한 탈수 실험 결과

Fig 3.1의 장치에 전기장을 인가하지 않고 공기압만으로 피스톤을 밀착 시켜 탈수를 실시하였다. Fig. 4.1은 각 압력별 탈수실험 결과를 보여 준다. 압력이 98.1, 192.6, 194.3, 392.4 kPa로 변할 때 최종 슬러지 케익 수분 함수율은 84.2, 82.8, 79, 78 wt%로 감소한다. 압력이 98.1 kPa에서 증가할수록 슬러지의 함수율은 조금씩 감소하나 294.3 kPa 이상에서는 거의 일정한 결과를 보이고 있다. 이는 슬러지에서 기계적인 탈수 방법으로 제거 할 수 있는 수분의 한계와 필터 블록킹 현상에 의한 것으로 판단되어진다.

Fig 4.2는 기계적인 압착에 의해 탈수된 슬러지의 모습을 전자 현미경(SEM)으로 촬영한 사진이

다. Fig. 4.2 (a)는 슬러지의 위쪽 부분을 찍은 것으로 피스톤에 의한 압착된 모습을 보여준다. Fig 4.2 (b)는 슬러지의 다공판면에 접한 부분을 보여주고 있는데 부분적으로 유로의 모습이 관찰되어진다.

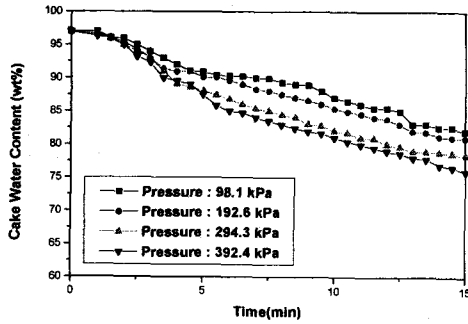
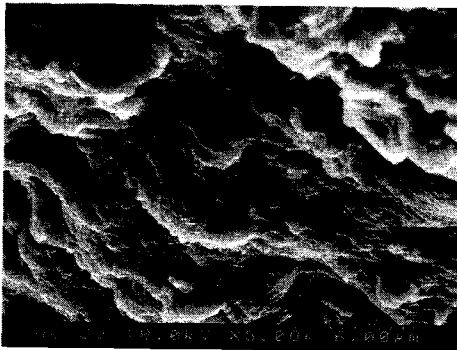


Fig. 4.1 Effect of Mechanical Dewatering



(a) Upper Side



(b) Lower Side

Fig. 4.2 Surface layer of dewatered cake by mechanical dewatering

4.2 전기탈수 방법에 의한 탈수실험 결과

Fig 3.1의 실험장치에 392.4 kPa의 압력과 동시에 전기장을 생성시켜 탈수 실험을 한 결과이다. Fig. 4.3은 전기장의 강도가 0, 40, 80, 120 V/cm로 변함에 따라 최종 슬러지 케이크 수분 함수율은 78, 68, 58, 58 wt%로 감소함을 보여준다. 식 (2.1)(2.2)에 의한 것과 같이 전기장의 세기가 강해질수록 전기탈수의 효과가 커짐을 보여주고는 있으나 일정 전기장 이상에서는 그 효과가 둔화됨을 보여준다. Fig 4.4는 전기탈수방법에 의해 탈수된 슬러지의 모습을 전자 현미경(SEM)으로 촬영한 사진이다. Fig. 4.4 (a)는 양극(+)쪽의 슬러지 표면을 찍은 것으로 전기영동성에 의해 (-)로 대전된 슬러지 입자가 (+)극 쪽으로 이동한 모습을 관찰할 수 있다. Fig 4.4 (b)는 음극(-)쪽의 슬러지 표면을 찍은 것으로 전류의 흐름과 전기삼투압에 의해 생성된 유로의 모습을 확실히 관찰 할 수 있다.

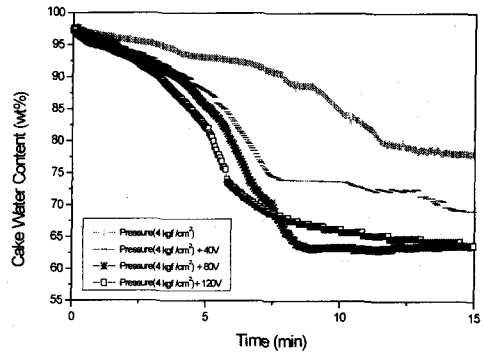
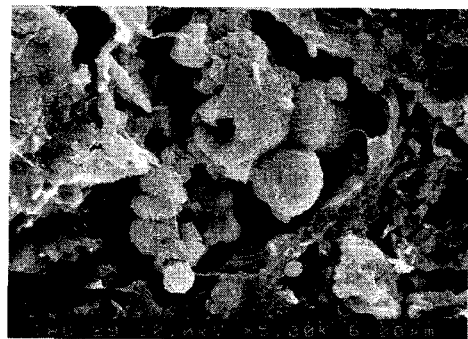
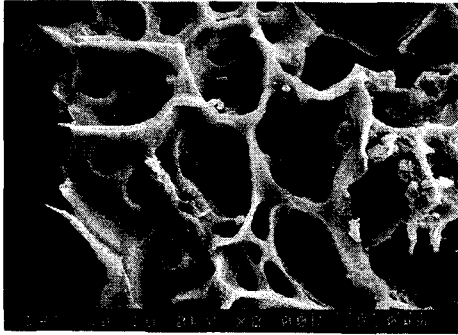


Fig. 4.3 Effect of Electro-dewatering



(a) Anode Side



(b) Cathode Side

Fig. 4.4 Surface layer of dewatered cake by electrodeewatering

5. 결론

전기탈수시스템을 이용한 슬러지의 탈수실험 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전기탈수시스템을 이용한 탈수실험 결과는 단순히 기계적인 방법에 의한 탈수실험 결과에 비해 슬러지의 최종 함수율을 줄일 수가 있었다. 전기탈수시스템을 이용한 슬러지의 최종 함수율은 58 wt%까지 감소시킬 수 있었으며 기계적인 탈수방법으로는 최종 함수율 78 wt%의 슬러지를 얻을 수 있었다.
- (2) 전기 탈수시 전압과 전류가 증가함에 따라 탈수 케익의 함수율이 저하가 뚜렷하게 나타나지만 일정 전압 이상 투입시 함수율 감소 현상은 둔화되는 경향을 나타내고 있다
- (3) 슬러지의 수분 함수율은 전기장의 세기와 탈수시간에 의해 어느 정도 조절 될 수 있었다.
- (4) SEM을 통해 전기탈수에 의해 형성되는 유로와 입자의 이동 현상을 파악 할 수 있었다.

후기

이 연구는 부산대학교 환경기술산업개발 연구센터와 산업자원부의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Barton, W. A., Miller, S. A., and Veal, C. J., "The Electrodeewatering of Sewage Sludge", *Drying Technology*, 17(3), 497 (1999).
- (2) Bustamante, H. A., Lockhart, N. C., and Veal, C. J., "Electrodeewatering of Water Treatment Plant Alum Sludges", *16th Federal Convention Sydney*, (1995).
- (3) Gazber, S., Abadie, J. M., and Colin, F., "Combined Action of Electro-osmotic Drainage And Mechanical Compression on Sludge Dewatering", *Water. Sci. Tech.* 30(8), 169 (1994).
- (4) Ju, S., Weber, M. E., and Mujumder, A. S., "Electroosmotic dewatering of bentonite suspension", *Separation Technology*, 1, 214 (1991).
- (5) Kondoh, S., and Hiraoka. "Commercialization of pressurized electroosmotic dehydrator", *Wat. Sci. Tech.*, 22, 259 (1990).
- (6) Kuhn, R., and Hoffstetter-Kuhn, S., "Capillary Electrophoresis: Principles and Practice", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg* (1993).
- (7) Park, C. J., Lee, J. E., Ahn, Y. C., Shin, H. S., and Lee, J. K., "Performance Evaluation of Electrodeewatering System for the Removal of Water Content in the Sewage Sludge", *The 2st Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, Yongpyeng*, (2000)