

정수슬러지 탈수효율 향상을 위한 전기필터프레스탈수에 관한 연구

이정언* · 이재근

*부산대학교 산학협력중심대학 · 부산대학교 기계공학부

(2006년 3월 27일 접수, 2006년 10월 2일 채택)

A Study on Electrodewatering Filter Press Technology for Improvement of Dewaterability of Waterworks Sludge

Jung-Eun Lee* · Jae-Keun Lee

*ILC Pusan National University, Department of Mechanical Engineering Pusan National University

ABSTRACT : The elctrodewatering filter press(EDFP) which had anode and cathod plates to be set between filter plates was built for reducing the waterworks sludge and improving performance of dewatering equipment. Several tests to compare the dewaterability with conventional mechanical filter press dewatering(MDFP) and EDFP was conducted through this equipment. As test results, filtration amount discharged from EDFP measured 43.2 kg which increased against MDFP, and cake weight measured 4 kg which was two times against MDFP. The water content of dewatered cake from EDFP was 55wt% and dewatering velocity was $2.3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{cycle}$. This water content decrease 20% and dewatering velocity increased 30% with compare to the MDFP. That is to say, EDFP constructed from electrodeewatering mechanism increase filtrate discharging amount, which make dewatering velocity increase and produce the low water content dewatered cake against MDFP. Energy consumption of EDFP is analysed to 400 kwh/DS ton. The results to analysis the economical aspect considering the power consumption and the handling cost decline as sludge volume reduction due to producing the low water content cake showed that expenses to handle sludge of 1 ton by dry solid base cut down on 20,000 won. If considering several test aspects, it was analysed that EDFP was excellent in the side of performance as well as economical suitability.

Key Words : Sludge, Electrodewatering Filter Press, Mechanical Dewatering Filter Press, Water Content, Dewatering Velocity, Dewaterability

요약 : 정수 슬러지의 감량화와 탈수장치의 성능향상을 위하여 필터프레스 탈수장치의 각 Plate 사이에 음극판과 양극판을 설치하여 케이크 층에 전기장을 투입하는 전기식 필터프레스 탈수장치(EDFP)를 구축하여 기존의 기계식 필터프레스 탈수장치(MDFP)와의 탈수성 비교, 그리고 EDFP의 탈수성 향상에 따른 경제적인 측면 등을 분석하였다. 동일조건에서 탈수실험을 수행한 결과 EDFP를 통해 배출된 여액량은 43.2 kg으로 MDFP에 비하여 증가하였으며, 케이크 무게는 4 kg으로 MDFP에 비해 2배 증가하였고 탈수 케이크의 함수율은 55 wt%로 MDFP에 비하여 약 20% 감소하였으며 탈수속도는 $2.3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{cycle}$ 로 약 30% 증가하였다. 즉 전기탈수(Electrodewatering)의 원리로 구축된 EDFP는 기계탈수(Mechanical Dewatering)에 의한 MDFP 비하여 여액배출량을 증가시키고 저함수율 탈수 케이크를 생산하며 탈수속도를 증가시키는 특성이 있다. EDFP의 소모된 전력량은 400 kwh/DS ton으로, 투입된 전력량과 저함수율 탈수 케이크 생산에 따른 부피 감소로 인한 처리경비 저하의 효과를 서로 고려하여 경제성을 분석한 결과 1 ton(Dry Solid base) 처리하는데 약 20,000원 경제적 절감 효과가 있었다. 이 외 탈수속도가 빨라진 부가적 이점을 감안하면, EDFP는 탈수 성능 면에서 우수할 뿐만 아니라 경제적 타당성이 있는 장치로 평가할 수 있다.

주제어 : 슬러지, 전기식 필터프레스 탈수장치, 기계식 필터프레스 탈수장치, 함수율, 탈수속도, 탈수성

1. 서론

국내에서 발생되는 상수 슬러지의 대부분은 벨트프레스, 필터프레스, 데칸터와 같은 기계식 탈수장로 탈수케이크화 되어 처리되는데, 이중 약 80% 이상은 해양투기로 처리되며, 나머지 20%는 매립 또는 재활용과 같은 방법으로 처리되고 있다. 해양투기에 의한 처리 비율이 높은 이유는 처리비용이 가장 저렴하기 때문이지만 이는 관련 국제 협약 또는 사화·

환경적 관점에서 적절한 방법이 아니다. 탈수 케이크를 친환경적이며 경제적으로 처리하기 위해서는 탈수속도가 빠르고 함수율이 낮은 탈수 케이크를 생산하는 것이 중요하다.

기존의 슬러지 탈수는 대부분 필터프레스, 벨트프레스, 그리고 원심식인 데칸터와 같은 기계식탈수장치로 처리하는데, 생산된 탈수케이크의 함수율은 80 wt% 정도로 매우 높다. 탈수 케이크 재활용을 위해서는 함수율 50 wt% 정도의 저함수율 탈수 케이크를 생산하여야 한다는 점¹⁾을 고려하면, 기계식 탈수장치는 적절한 방법이 아니다. 그래서 기계적인 힘으로 슬러지로부터 물을 제거하는 방식으로는 기계식 탈수의 한계를 극복하기 위한 방안으로 전기탈수 방법이 연구되

† Corresponding author
E-mail: jelee@pusan.ac.kr
Tel: 051-510-3694

Fax: 051-514-3690

었다. Lockhart는 피스톤형 전기탈수장치로 슬러지층에 1 V 부터 200 V까지 전압 변화를 시키면서 탈수율을 측정하였다. Ju는 벤토나이트 슬러지에 대한 전기탈수(electrodewatering)에 대해서 분석 연구하였다. Orsat는 bio-materials에도 전기탈수가 매우 효과적임을 실험을 통해 증명하였다. 이때까지 주로 전기탈수 관련 논문이 피스톤형 실험장치를 이용한 것이라면 Barton은 전기식 벨트프레스탈수장치를 구축하여 기계식 벨트프레스탈수장치와 탈수성(dewaterability)을 비교한 연구를 수행하여 전기식의 탈수성이 우수함을 증명하였다.⁵⁾ 하지만 이 방법은 드럼의 부식, 여과포(filter cloth)의 손상 등과 같은 문제점이 있는 기술로 분석되었다.

본 연구는 기존의 피스톤형 실험실 규모의 전기탈수에서 벗어나 Pilot 규모의 전기식 탈수장치를 구성하여 실험을 수행하였다. 필터프레스 탈수장치의 Head Filter Plate와 Tail Filter Plate에 각각 음극판을 설치하고 이들 판 사이에 양극판을 설치하여, 전극판 사이에 형성되어 있는 케이크 층에 전기장을 투입하여 탈수하는 전기식 필터프레스 탈수장치(Electrodewatering Filter Press: EDFP)를 구축하였다. 정수 슬러지의 유기물 함량에 따른 탈수 특성, EDFP와 MDEF의 탈수성 비교, EDFP의 경제성 등에 대한 기초자료를 확보하여 분석함으로써 정수슬러지 감광화를 위한 대안 장치로서 EDFP의 타당성을 밀도 있게 검토하였다.

2. 전기탈수 메카니즘

탈수란 각종 슬러지에 함유된 액체, 특히 물을 제거하는 것으로 기계식탈수 방법은 압착력, 또는 진공압과 같은 물리적 힘으로 물을 제거한다. 슬러지 상의 입자 표면에는 중성의 성질을 띄고 있는 자유수(Free Water)와 이온 농도가 높아 입자의 표면과 결합하고 있는 결합수(Bonder Water)로 이루어져 있는데, 각종 기계식 탈수장치는 물리적으로 단지 자유수만으로 제거시킬 수 있다. 즉 기계식 탈수장치에서 가압력 또는 진공압과 같은 물리적인 힘을 아무리 크게 가하더라도 자유수 제거는 가능하나 결합수 제거는 어렵다. 하지만 함수율을 저감시키기 위해서는 입자의 표면에 이온결합하고 있는 결합수를 반드시 제거하여야 한다. 그런데 이 결합수는 물에 녹아 있는 이온과 입자의 표면 전위차에 의해 형성된 포텐셜 의해 결합되어 있으므로 물리적 힘으로는 제거가 불가능하고 전기삼투압력에 의해서만 가능하다. Fig. 1은 슬러지내 입자 주위에 분포하고 있는 액체(물)에 작용하는 힘을 나타내고 있는데, 크게 자유수(Free Water)와 결합수(Bound Water)의 두 종류로 구성되어 있다. 자유수는 슬러지내 입자의 외곽부에 분포하고 있어 탈수에 용이하므로 가압력 혹은 진공압에 의한 기계적인 방법에 의해 쉽게 제거할 수 있으나 결합수는 입자와 강한 이온 결합력에 의해 결합되어 있어 기계적인 가압력으로는 제거가 어렵고, 대신 입자층에 전기장을 형성시킴으로써 발생하는 전기영동성과 전기삼투압력, 그리고 쿨롱력에 의해서만 제거가 가능하다. 따라서 슬러지의 함수율

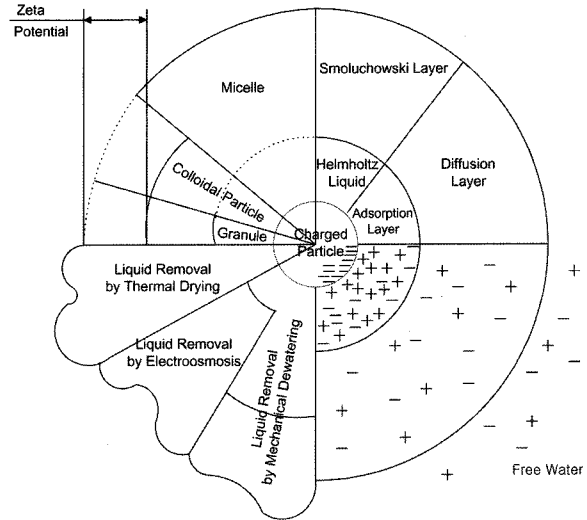


Fig. 1. Properties of water distribution bonded with particle surface.

저감을 위해서는 결합수를 제거시키는 것이 필수적이다. 자유수만의 제거로는 함수율 저감에 한계가 있다.

Fig. 2는 가압으로 입자의 모세관을 통해 수분을 강제적으로 탈수시킴과 동시에 전기장을 형성시켜 대전된 액체 슬러지 입자 주위의 물을 제거하는 방법으로, 물은 전기영동과 모세관 현상에 의해 슬러지 입자가 띄고 있는 전하와 반대 전극 측으로 이동하게 된다. 일단 압착에 의해 충분한 수분이 제거되어 케이크가 형성된 후, 수분 내에 용해되어 있는 이온이 전기적 삼투현상에 의해 반대 극으로 이동하면서 다시 수분이 제거되는 것이다. 슬러지 입자는 (-)표면전하를 띠므로 슬러지에 전기장을 형성시키면 슬러지 입자는 입자가 갖고 있는 전하와 반대전극인 (+)극으로 이동하게 된다. 반면 슬러지 입자층내의 수분은 (-)극으로 끌려당겨져 탈수가 촉진된다. 또한 입자층에 가한 전기력에 의해 발생하는 쿨롱열에 의한 탈수 효과가 첨가됨에 따라 효율은 더욱 증가하게 되는 것이다. 따라서 기존의 가압에 의한 기계적인 탈수장치에 전기영동성, 전기삼투압, 그리고 쿨롱열의 메카니즘이 첨가된 전기탈수장치의 탈수효과는 매우 뛰어나다.

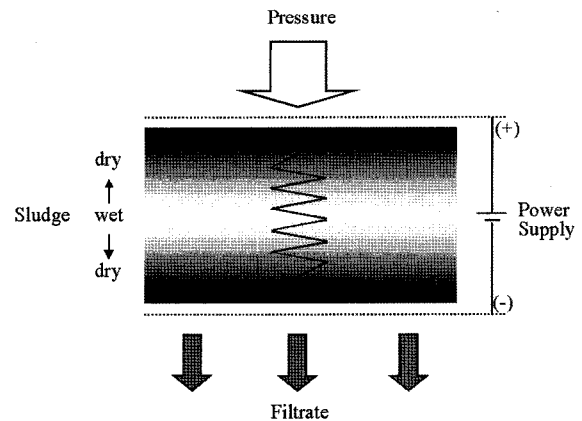


Fig. 2. Mechanism of Electrodeewatering.

3. 실험 및 분석방법

3.1. 실험장치 구성

Fig. 3은 2절에서 설명한 전기탈수 메커니즘을 바탕으로 구축한 전기식 필터프레스탈수장치(Electrodewatering Filter Press)의 개념도를 나타낸 것이고, Table 1은 장치의 설계인자와 운전 인자와 장치의 탈수성 평가를 위해 사용한 정수 슬러지의 초기 함수율, 유기물 함량 그리고 pH와 같은 실험 조건을 설명한 것이다. 기존의 기계식 필터프레스 탈수장치(Mechanical Dewatering Filter Press: MDFP)는 Head Filter Plate와 Tail Filter Plate(470×470 mm)사이 에 두께가 30mm인 챔버가 형성되어 있고, 슬러지 공급 펌프로부터 5.5 kg/cm²의 공급압력에 의해 공급된 슬러지는 챔버에 채워진다. 챔버에는 지속적으로 공급압력이 작용하므로, 이 압력에 의해 슬러지 내의 물은 여과포를 통해 챔버 밖으로 배출되고 입자는 케이크화(Cake Formation)된다. 여과포는 전기탈수에 의해 발생하는 콜로이드로 인한 손상을 방지하기 위해 110℃까지 견디는 PP재질의 여과포(PP 900 Denia)를 사용하였다. 케이크에 2차적으로 필터플레이트의 부풀임에 의한 15 kg/cm²의 압착력(Squeezing Press)에 의해 재차 탈수되어 최종 케이크를 생산한다. 케이크는 개판(Open Filter Plate)되어 배출되는데, 이때의 통상 함수율이 70~80 wt% 정도이다. 본 연구는 슬러지의 함수율 저감을 위해, 그림에서 보는 바와 같이 Head Filter Plate와 Tail Filter Plate에 음극판을 설치하고 챔버 중앙에는 양극판을 설치한 전기식 필터프레스 탈수장치(Electrodewatering Filter Press: EDFP)를 구축하였다.

EDFP의 전극판에는 직류전원이 투입되어 양극판과 음극판 사이에 전기장을 형성시킨다. 슬러지 공급 펌프로부터 공급된 슬러지는 양 극판 사이에 투입되고 공급압력과 압착압력에 의해 탈수가 이루어진 케이크 층에 전기장을 형성시켜 전기탈수를 수행함으로써 저 함수율 탈수 케이크를 생산하는 것이다. 이때 전기장의 세기는 전극의 부식현상, 전력 소모량 등을 고려하여 30 V/cm로 하였다. 본 장치의 설계와 운전에 있어 핵심요소는 양전극 판의 부식 현상이다. 양극판의 부식을 최소화하기 위해 SUS 316 L의 전극판에 Titanium을 코팅하여 제작하였다. 음극판은 부식현상이 없고 맨브레인판(압착수가 공급되면 표면이 부풀어 오르는 판)과 여과포 사이에 장착되므로 SUS 304로 제작된 메쉬를 이용하였다. 전기장 투입은 공급 압력에 의한 탈수가 종료되고 맨브레인 판이 부풀어 오르며 압착탈수가 시작되는 시점이다. 탈수시 배출되는 여액량은 시간별로 측정하여 탈수성 평가를 위한 그래프 작성의 자료로 활용하여 탈수성을 평가하였다. 그리고 탈수된 케이크는 무게, 함수율, 두께 등을 측정하여 탈수속도, 에너지 소모량 등을 분석하기 위한 기초자료로 활용하였다.

3.2. 실험 방법

슬러지의 탈수성을 평가하기 위해서는 정수 슬러지의 탈수 특성, 탈수 케이크의 함수율과 탈수속도를 분석하여야 한다. 정수슬러지의 탈수 특성은 슬러지의 유·무기물 함량, 고체

입자의 SiO₂/Al₂O₃ 성분 비율, 입도등에 의해 결정되는데 본 연구에서는 계절별 슬러지의 유기물 함량 변화에 따른 탈수 특성을 분석하기 위해 슬러지의 유·무기물 함량에 대한 분석을 수행하였다. 유·무기물의 함량은 폐기물공정시험법에 따라 전기로를 이용하여 분석하는데, 전기로로 정수 슬러지를 600℃ 가열한 후 가열 전 후 무게차로 측정한다.¹⁾ 탈수 케이크의 함수율은 슬러지 처리경비와 관련이 있으며, 탈수속도는 장치의 성능과 밀접한 관련이 있다. 즉 함수율이 낮은 탈수 케이크를 생산하면, 처리경비가 저렴하고 탈수속도가 빠르면 장치의 성능이 우수한 것으로 평가할 수 있다. 함수율은 탈수 후 형성된 케이크를 105℃에서 1시간 이상 건조하여 무게 감량 정도로 측정한다. 그리고 탈수시간, 탈수기간 별 여액량 무게, 탈수 케이크의 무게 등을 각각 측정하여 탈수속도와 에너지 소모량을 분석한다. 탈수속도는 슬러지 공급부터 개판을 통해 탈수 케이크를 배출하는 시간(Operating Cycle)동안 건조분말 기준(Dry Solid Base) 슬러지 생산량을 계산한 것이다.⁶⁾ EDFP와 MDFP의 성능비교 그래프로 표현하여 탈수 특성을 분석하였다. 탈수시간동안 배출되는 여액량을 측정하여 시간(θ)에 따른 여액량의 변화(ΣW/Σθ)의 관계를 그래프로 표현하였다. 즉 그래프의 기울기가 클수록 여액 배출되는 시간이 길어지기 때문에 탈수성이 저하되는 현상을 바탕으로 탈수성을 평가하였다.^{6,7)} EDFP는 MDFP에 비하여 추가적으로 전력량이 소모된다. 추가 전력량은 장치의 효율성과 밀접한 관련이 있기 때문에 매우 중요한 정보이다. 따라서 장치의 성능평가를 통해 측정된 자료를 바탕으로 건조분말 기준(Dry Solid Base) 슬러지 1톤을 처리하는데 소요되는 전력량을 계산하였다.

본 연구에서 사용된 정수 슬러지는 수계 슬러지에 해당한다. 즉 수계의 조건에 따라 슬러지의 특성이 변하는데 본 연구에서는 유기물의 함량에 따라 정수 슬러지의 수계 특성을 분석하였다. 유기물 함량은 전기로를 이용한 강열감량법으로 측정하였다.¹⁾ 계절별로 변화하는 슬러지의 유기물 함량에 따라 EDFP의 탈수성을 평가하여 본 장치가 슬러지의 특성 변화에도 능동적으로 대처한다는 점을 규명하였다.

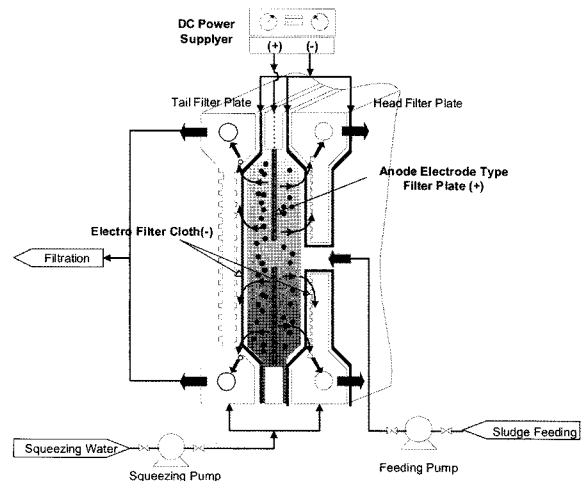


Fig. 3. Schematic diagram of electro-dewatering filter press.

Table 1. Conditions for testing the electrodeewatering filter press

Variables		Spec. and Value	
Design Variables	Filter Press Size	L 470(mm)×W 470(mm)	
	Filter Area	0.264 m ²	
	Chamber thickness	30 mm	
	Electrode	SUS 316 L coated by Titanium	
	Chamber Number	4 ea	
	Filter Cloth	PP 900 Denia	
Operating Variables	Dewatering Time	min	180
	Feeding Pressure	kg/cm ²	5.5
	Electric field	V/cm	30
Water works Sludge	Initial Water Content	wt%	96.6
	Organic Content	wt%	22.6
	pH	-	7.3

4. 결과 및 고찰

4.1. 우수기와 갈수기 정수 슬러지의 탈수 비교

수계 슬러지는 계절에 따라 슬러지의 특성이 변하는데, 그 중 가장 중요한 변화가 슬러지의 유기물 함량이다. 유기물 함량은 탈수와 밀접한 관계가 있는데 즉 소수성인 유기물 함량이 증가하면 슬러지에 함유되어 있는 입자의 표면 포텐셜이 감소하여 결국 탈수율을 저하시킨다. 반면 무기물 함량은 친수성과 관련이 있어 함량의 증가는 상대적으로 탈수성 향상에 영향을 준다. Table 2는 갈수기와 우수기 때의 정수 슬러지에 대한 유기물 함량 변화를 나타낸 것이다. 갈수기(1월~5월)때의 유기물 함량은 33.5~51.5 wt% 정도인 반면, 우수기(6월~9월) 때의 유기물 함량은 12.2~23.8 wt%로 갈수기 때에 발생하는 슬러지의 유기물 함량이 우수기에 비하여 약 1.5배 많다. 이와 같이 유기물 함량의 변화가 생기는 이유는 우수 또는 갈수기 때의 수량의 변화와 토사 유입 등의 주변의 지형학적 영향에 기인하는 것으로 분석 된다.¹⁾ 고효율 탈수장치는 유기물의 변화에 능동적으로 대응하는 장치이어야 하며, 탈수 케이크 처리시 경제적·환경적 유용성을 확보하기 위해서는 유기물 함량을 50 wt% 정도 함유하고 있는 갈수기 때의 슬러지도 저함수율 탈수 케이크(함수율 50wt%)를 생산하여야 한다.

Fig. 4는 갈수기와 우수기의 유기물 함량이 다른 슬러지에 대한 탈수 특성을 비교한 것이다. 그래프의 횡축은 탈수 시간에 따라 포집된 여액량이고 종축은 여액량과 탈수시간의 비를 나타낸 것이다. 이는 Ruth의 여과이론을 바탕으로 표현한 탈수특성 그래프로서 그래프의 기울기가 클수록 상대적 탈수시간이 길기 때문에 탈수성이 저하되는 현상을 나타낸다.⁶⁾ 그림에서 보는 바와 같이 우수기 때의 슬러지는 갈수기의 슬러지에 비하여 그래프의 기울기가 작으므로 케이크로부터 여액의 배출이 원활하게 이루어져 탈수가 잘 이루어져, 최종 탈수 케이크의 함수율이 64.8 wt%로 갈수기의 슬러지 탈수 케이크의 함수율 76 wt%보다 약 15% 낮았다. 이와 같이 우수기의 슬러지의 탈수성이 우수한 이유는 Table 2

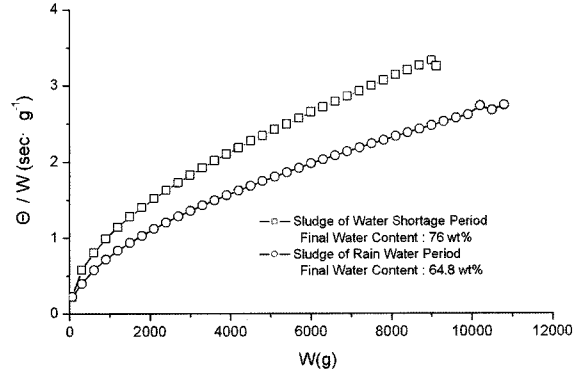


Fig. 4. Dewatering difference for two types sludge of water shortage and rain water period.

Table 2. Organic content of waterworks sludge as seasons

Period	Month of sampling	Organic/Inorganic content(wt%)
Water storage	January	51.5 / 48.5
	March	36.6 / 63.4
	May	33.5 / 66.5
Rainwater	June	23.8 / 76.3
	July	12.2 / 86.6
	September	15.2 / 84.8

에서 살펴본 바와 같이 슬러지내 유기물의 함량이 상대적으로 적기 때문이다.

4.2. MDFP와 EDFP의 탈수성 비교

Fig. 5는 압력 5.5 kg/cm²의 공급압력으로 MDFP의 챔버내 케이크 탈수 현상을 나타낸 표현한 것이다. 시간의 변화에 따른 탈수 특성 변화는 완만한 곡선을 그리며 상승한다. Ruth의 여과이론을 바탕으로 한 그래프의 특성 따르면 그래프의 기울기가 클수록 여액 배출량은 적어 탈수성이 저하되는 점을 고려하면 기계식 탈수는 시간이 경과 하더라도 여액의 배출량이 증가하지 않음을 알 수 있다. Fig. 6은 공급압력 5.5 kg/cm²와 전기장 30 V/cm를 케이크에 투입한 EDFP의 탈수특성을 Ruth 그래프로 표현한 것이다. 약 1시간 경과 시점까지 MDFP의 기계식 탈수가 진행되는 동안에는 Fig. 5의 탈수 특성과 동일 패턴으로 상승하며, 그래프의 기울기도 매우 크다. 즉 탈수여액의 배출이 잘 이루어지지 않아 탈수성이 매우 낮음을 알 수 있다. 하지만 탈수 1시간 경과 시점에서 케이크 층에 전기장을 투입하자 그래프의 패턴은 급격히 감소였다. 이는 케이크로부터 여액의 배출량이 급격히 증가하였다는 것을 의미한다. 케이크 층에 전기장을 투입하면 전기영동성, 전기삼투압 그리고 쿨롱열과 같은 전기탈수 메커니즘으로 인해 입자 간에 부착되어 있는 수분을 배출시키기 때문에 그래프의 패턴이 급격히 감소한 것이다.⁸⁾ Table 3은 Fig. 5(MDFP의 결과)와 Fig. 6(EDFP의 결과)의 결과를 정량적으로 비교한 것이다. MDFP의 실험을 통해 측정된 케이크로부터 배출되는 여액량(Filtration)의 무게는 35.2 kg이고, 케이크 무게는 2 kg, 함수율은 68.2 wt%로 측정되었다. 이

결과를 바탕으로 탈수 Mass Balance를 정리하면, 초기 슬러지(슬러지량 37.2 kg, 함수율 98.3 wt%)의 DS(Dry Solid)량은 0.64이고 탈수 후의 DS량은 실험으로 부터 도출된 결과(케이크량 2 kg, 함수율 68.2 wt%)를 고려하면 0.64를 얻을 수 있다. 즉 기계 및 전기식 탈수시의 동일한 Mass Balance의 값을 도출할 수 있어 장치의 신뢰도를 확보할 수 있다. 그리고 이들 측정값의 분석을 통해 탈수속도는 1.8 DS kg/m² · cycle를 얻었다. EDFP 탈수성 평가시 여액량은 43.2 kg으로 MDFP의 결과에 비하여 증가하였으며, 케이크 무게는 4 kg으로 MDFP에 비해 2배 증가하였고 함수율은 55 wt%로 MDFP에 비하여 24% 감소하였다. MDFP의 경우와 같이 DS 량에 의한 Mass Balance를 정리하면 1.48이다. 탈수속도는 2.3 kg/m² · cycle로 약 22% 증가하였다. 이 두 실험결과를 통해, 전기탈수(Electrodewatering)는 기계탈수(Mechanical Dewatering)에 비하여 여액배출량이 증가하고 함수율 감소하며 탈수속도가 증가함으로써 탈수성이 향상되는 결과를 보여 주고 있다.

Fig. 7은 유기물 함량이 50 wt%로 높은 슬러지에 대하여 전기탈수와 기계 탈수의 탈수성을 그래프로 표현하여 서로 비교한 것이다. 전기탈수의 그래프 기울기가 기계탈수 기울기에 비하여 작아, 여액의 배출량이 상대적으로 많아 저함수율 탈수 케이크(함수율 52.2 wt%)를 생산하였다. 사진에서 보는 바와 같이 기계탈수는 케이크의 형상을 만들지 못하였지만, 전기 탈수의 경우 케이크는 뚜렷한 형상을 만들었을 뿐만 아니라 케이크의 표면이 갈라지는 현상을 보이고 있다.

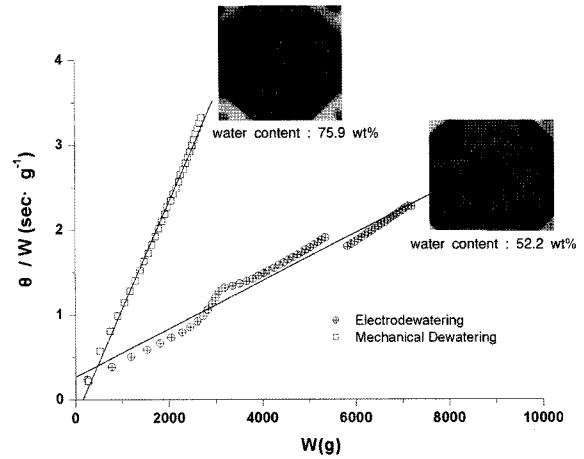


Fig. 7. Comparison of dewatering with EDFP and MDFP.

Table 3. Comparison of dewatering properties with MDFP and EDFP

Items	unit	MDFP	EDFP
		Filtration	kg
Weight of wet cake	kg	2.0	4.0
Thickness of wet cake	mm	27	27
Water content of wet cake	wt%	68.2	55
Dewatering velocity	DS kg/m ² · cycle	1.8	2.3

4.3. EDFP의 탈수성 평가

Fig. 8은 유기물 함량이 서로 다른 슬러지에 대하여 EDFP의 탈수성능을 그래프로 표현한 것이며, Table 4는 각 그래프에 대한 탈수속도와 에너지 소모량을 정량적 값으로 분석한 것이다. 유기물 함량이 24.8 wt%인 슬러지에 대하여 전기장을 투입하지 않은 경우, 함수율은 80.2 wt%이며 탈수속도는 1.8 DS kg/m² · cycle로 분석되었다. 슬러지의 유기물 함량이 17.6 wt%인 슬러지에 대하여 전기탈수를 수행한 결과 함수율 50 wt%인 슬러지를 생산하는데 소요되는 탈수속도는 8.2 DS kg/m² · cycle이고 이때 소비되는 에너지량은 404 kwh/DS-ton으로 계산되었다. 유기물 함량이 증가할수록 탈수케이크의 함수율은 증가하고 탈수속도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉 유기물 함량의 변화는 전기 탈수의 탈수성에 어느 정도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 소모되는 에너지 양은 유기물 함량에 따라 281~404 kwh/DS-ton로 분포하며, 에너지 소모량에 의해 경제성 평가시 전기 투입량은 400 kwh/DS-ton로 하였다. Fig. 9는 탈수 시간동안 슬러지층에 투입한 전류와 전압의 변화를 표현한 것이다. 전력량은 전류와 전압의 양 그리고 전력공급 시간에 의해 결정된다. 여기서 탈수 시간의 경과에 따라 전압이 증가하는 이유는 케이크 층으로부터 수분이 배출되면 상대적으로 케이크의 저항이 증가하기 때문에 전력 공급량을 증가할 수 있기 때문이다. 이들 전압과 전류의 분포 특성은 슬러지의 함수율, SS 농도 등에 따라 각각 다르게 나타난다. 그리고 수분이 배출된 케이크 층에 전기장을 인가하면 케이크의 온도가 상승한다. 케

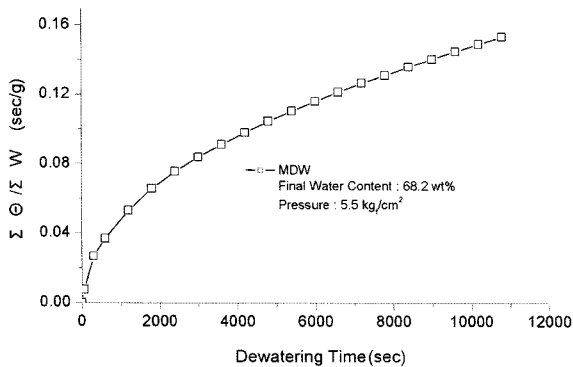


Fig. 5. Dewatering properties of MDFP.

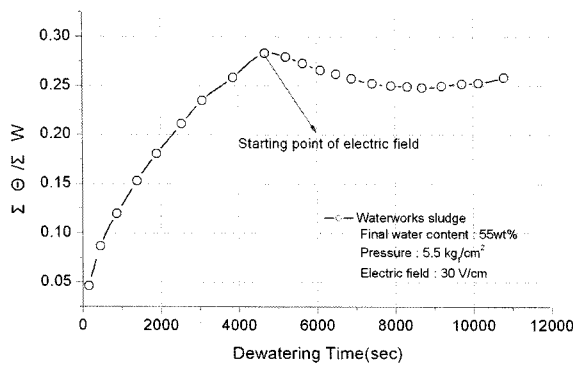


Fig. 6. Dewatering properties of EDFP.

이크 층 양단에 전기장을 형성 시키면 케이크는 자연스레 저항의 역할을 하게 되어 온도가 상승하는 것이다. Fig. 10은 전기탈수가 진행되는 동안 케이크 층의 온도 변화를 나타낸 것이다. 온도는 약 100℃까지 상승한다. 전기 탈수에 있어 탈수율을 향상시키는 현상 중 중요한 역할을 차지하는 것이 콜로이드에 의한 건조/탈수이다. 이 온도가 높으면 높을수록 탈수율은 향상되지만 100℃ 이상 온도가 상승하게 되면 여과포 손상을 초래할 수 있어 케이크의 온도는 100℃ 이하를 유지할 수 있도록 운영하는 것이 합리적이다.

EDFP의 탈수성능을 통해 도출된 결과를 요약하면, 400 kWh/DS ton의 전력량을 투입하여 정수 슬러지를 탈수하면 기존의 탈수장치에 비하여 탈수속도가 4배 이상 증가하고 함수율이 약 30% 감소한 저함수율 탈수 케이크를 생산할 수 있다. 관건은 투입된 전력량이다. 1 kWh의 전력요금이 약 60원인 점을 감안하면 전기 탈수를 이용하여 슬러지 1 ton(Dry Solid base) 처리하는데 약 24,000원 정도의 전력비가 추가된다. 슬러지 처리 공정에서 1 ton(Dry Solid base) 처리시 소요되는 경비가 150,000원 정도인데, 함수율 감량 24%를 부과감량으로 간주하면 함수율 감소로 인하여 약 45,000원 절감 효과가 있다. 즉 전력 투입으로 인한 추가 에너지가 투입량과 탈수 케이크 부과 감량으로 인해 처리비 감소를 고려하면 건량 기준 1톤 처리하는데, 기존의 탈수장치에 비하여 전기탈수 장치는 약 20,000원 절감 효과가 있다. 뿐만 아니라 이와 같은 산술적 계산에 포함하지는 않았지만 탈수속도가 4배 정도 빨라짐에 따른 부가적 이점을 감안하면, EDFP는

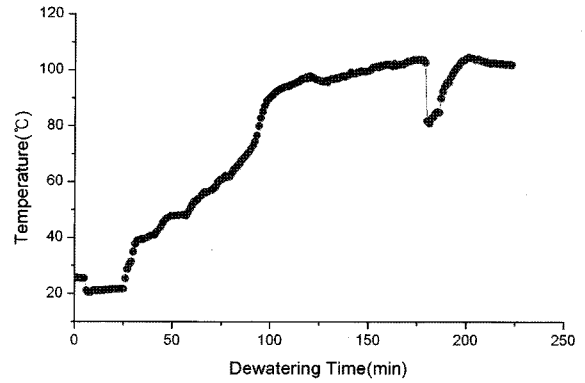


Fig. 10. Cake temperature as a function of dewatering time.

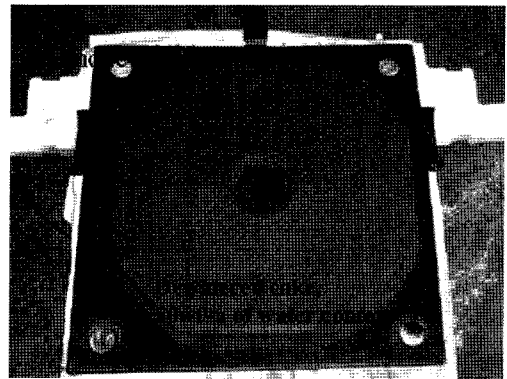


Fig. 11. Dewatered cake and anode plate.

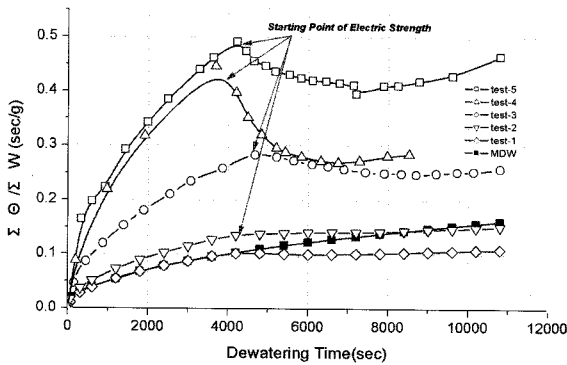


Fig. 8. Electrodewatering for waterworks sludge.

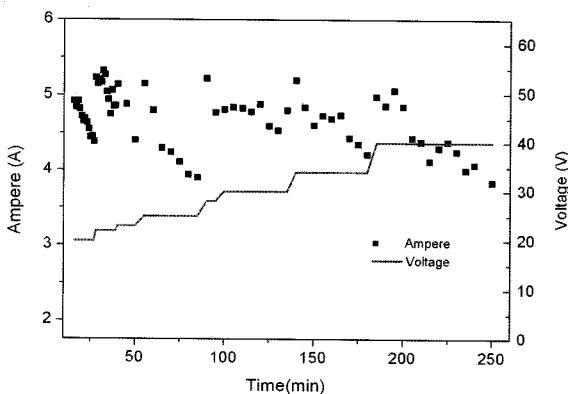


Fig. 9. Ampere and voltage applied to the cake.

Table 4. Test results of EDFP

Items	Organic content (wt%)	Final water content (wt%)	Dewatering velocity (DS kg/m ² · cycle)	Energy consumption (kwh/DS-ton)
MDW	24.8	80.2	1.8	0
EDW	TEST-1	17.6	50.0	404
	TEST-2	22.6	56.4	451
	TEST-3	51.5	62.3	281

DS : Dry Solid

탈수 성능 면에서 우수할 뿐만 아니라 경제적 타당성이 크다고 할 수 있다.

Fig. 11은 EDFP를 통해 생산한 탈수 케이크의 형상을 나타낸 것으로, 검은 부분은 양극판이며 갈색 부분은 탈수 케이크의 형상이다. 양극판에 부착된 탈수 케이크의 형상이 유지되고 있는 것은 수분이 케이크로부터 충분히 배출되었고 여과포와의 박리 현상이 잘 이루어 졌음을 알 수 있다. 이와 같이 형성된 저 함수율 탈수 케이크는 복토재와 같은 재활용 자원으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

케이크에 전기장을 투입하여 탈수속도를 향상시키면서 저함수율 탈수 케이크를 생산 가능한 전기 필터프레스 탈수장치(Electrodewatering Filter Press: EDFP)를 구축하여 정수

슬러지의 탈수 특성, 기존의 필터프레스 탈수장치와의 탈수성 비교, 그리고 EDFP의 탈수성 향상에 따른 경제적인 측면 등을 분석하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 우수기 때의 정수 슬러지는 유기물 함량이 갈수기의 슬러지에 비하여 약 1.5배 이상 함유되어있어 케이크로부터 여액의 배출이 잘 이루어져 탈수 케이크의 함수율이 64.8 wt%로 갈수기의 슬러지 탈수 케이크의 함수율 76 wt% 보다 약 15% 낮아 탈수성이 우수하였다. 즉 슬러의 특성을 바탕으로 분석한 결과 갈수기의 슬러지 탈수가 어렵다는 것을 파악하였다.

2) EDFP와 MDEF는 탈수성 비교를 위해 탈수속도, 함수율 등의 항목으로 분석하였는데, EDFP를 통해 배출된 여액량은 43.2 kg으로 MDEF의 결과에 비하여 증가하였으며, 케이크 무게는 4 kg으로 MDEF에 비해 2배 증가하였고 탈수 케이크의 함수율은 55 wt%로 MDEF에 비하여 약 24% 감소하였으며 탈수속도는 $2.3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{cycle}$ 로 약 22% 증가하였다. 이를 통해 전기탈수(Electrodewatering)의 원리로 구축된 EDFP는 기계탈수(Mechanical Dewatering)에 의한 MDEF 비하여 탈수성이 향상 되었을 뿐만 아니라 갈수기의 슬러지에 대해서도 우수한 탈수성을 보이고 있었다.

3) EDFP의 탈수성을 경제적인 측면에서 평가한 결과, 400 kWh/DS ton의 전력량을 투입하여 정수 슬러지를 탈수하였을 때 탈수속도는 4배, 탈수 케이크 함수율이 약 30% 감소한 효과가 있었다. 이때 투입된 전력량과 저함수율 탈수 케이크 생산에 따른 부피 감소로 인한 처리경비 저하의 효과를 서로 고려하여 경제성을 분석한 결과 1 ton(Dry Solid base) 처리하는데 약 20,000원 경제적 절감 효과가 있었다. 이 외 탈수속도가 4배 정도 빨라짐에 따른 부가적 이점을 감안하면, EDFP는 탈수 성능 면에서 우수할 뿐만 아니라 경제적 타당성이 있는 장치로 평가할 수 있다.

참고문헌

1. 이정언, "정수슬러지의 특성이 탈수성능에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **25**(8), 1059~1066(2003).
2. Lockhart, N. C., "Electro-osmotic Dewatering of Fine Tailings from Mineral Processing," *International Journal of Mineral Processing*, **10**, 141~160(1983).
3. Ju, S., Weber, M. E., and Mujumdar, A. S., "Electroosmotic Dewatering of Bentonite Suspension," *Separations Technology*, **1**, pp. 214~221(1991).
4. Orsat, V., Raghavan, G. S. V., Sotocinal, S., Lightfoot, D. G., and Gopalakrishnan, S., "Roller Press for Electro-osmotic Dewatering of Bio-Materials," *Drying Technology*, **17**(3), 523~538(1999).
5. Barton, W. A., Miller, S. A., and Veal, C. J., "The Electrodeposition of Sewage Sludge," *Drying Technology*, **17**(3), 497~522(2000).
6. Ruth, B. F., "Studies in filtration, III derivation of general filtration equation," *Ind. Eng. Chem.*, **27**, 708~723(1935).
7. 이정언, "혼합 슬러지의 탈수성에 관한 연구," 대한환경공학회지, **26**(8), 925~932(2004).
8. Vijn, A. K., "Electroosmotic Dewatering(EOD) of Clays and Suspensions: Components of Voltage in an Electroosmotic Cell," *Drying Technology*, **17**(3), 565~574(1999).