

고효율 열 탈수장치 개발에 관한 연구

이정언*

A Study for Developing the Thermal Dehydrator

Jung-Eun Lee*

Key Words: Thermal dehydrator (열 탈수), Sludge (오니), Dewatering (탈수), Water content (함수율), Dewatering velocity (탈수속도), Cake specific resistance (케이크 비저항)

ABSTRACT

A generation rate of sludge in Korea had increased dramatically about 200 % for a decade. A requirement for high efficiency dewatering system being possible to produce the low water content cake have suggested due to the appearance of commercial and social problems about handling of dewatered cake. The conventional dewatering system with mechanical compression device was not suitable to produce the low water content cake and didn't cope with lots of requirements. Therefore, this paper was to develop the high efficient filter press with the compressive and heating forces through the heating plate to be built between membrane filter plates. It is possible to produce the low water content cake and improve the dewatering rate, so this equipment positively coped with several types of problems related to the sludge dewatering. The plate heated by heat transfer materials such as steam, hot water and thermo-oil made the sludge make the residual moisture within the cake to discharge easily and to improve the dewatering efficiency of equipment. The pilot scale experiment with 500kg of cake production showed that the dewatering efficiency determined by the final water content and dewatering velocity was improved 30% more than the conventional dewatering equipment.

1. 서론

하수 또는 상수처리와 산업폐수 처리시 최종적으로 발생하는 슬러지는 매립과 해양투기 등의 폐기방법과 소각 및 비료화와 같은 재활용 자원화 방법 등으로 관리되고 있다. 상·하수 처리장에서 발생하는 탈수 케이크는 약 300만톤/년 정도이며 제지, 철강, 염/안료, 정류 등 산업체에서 발생하는 탈수케이크는 약 1,000만톤/년 정도이다. 이들 슬러지 중 자원화 방법에 의한

관리 슬러지는 불과 12%에 지나지 않고, 대부분의 슬러지는 매립 (12%)과 해양투기 (76%)로 관리되고 있다. 환경부의 슬러지 처리에 관한 종합 대책에 따르면 슬러지 처리에 관한 정책방향은 해양투기 및 직 매립을 지양하고 재자원화를 방향으로 선취하고 있는데, 이때 가장 중요한 필요조건은 탈수속도가 빠르며 함수율이 50 wt%이하인 저 함수율 탈수 케이크를 생산하여야 하는 것이다. 현재 국내에서 각종 슬러지의 탈수에 사용되고 있는 장치는 벨트프레스, 필터프레스, 진공탈수, 그리고 원심탈수장치 등이 이용되고 있다. 이와 같은 탈수장치는 슬러지층에 기계적인 힘 (가압력, 진공압, 원심력)을 인가하여 탈수하는 것으로, 함수율

* 섬진 EST(주) 부설 HydroLAB연구소
책임저자 E-mail : hydrosol@hanmail.net

은 약 80wt%인 고탄수율 탈수 케이크를 생산하며, 유기물 함량이 50% 이상인 난 탈수성 슬러지의 경우 탈수가 매우 어렵다. 따라서 슬러지 처리의 효율성을 확보하기 위해서는 고효율 탈수 시스템에 대한 기술이 선행되어야 함에도 불구하고 현재 국내외 탈수 기술은 기계적인 힘에 의존하는 탈수방법에 한정되어 있다. 본 시스템은 슬러지 층 외부에 가압력을 인가함과 동시에 탈수 케이크 내부에 약 60℃이하의 저온 열을 인가하여 탈수 케이크 층 내부의 모세관에 부착되어 있는 잔류여액에 증발압 인가를 통한 여액 배출의 용이하게 함과 동시에 여액의 점성을 낮추어 유동성을 증대함으로써 탈수율을 향상시키는 것이다. 이와 같은 원리에 의해 구축된 열 탈수 장치 (thermal dehydrator : TDH)은 함수율 50wt% 이하인 저함수율 탈수케이크의 생산이 가능하며 탈수 속도는 약 30% 향상되기 때문에 국가의 슬러지 처리에 관한 종합 대책에 부합할 수 있고, 나아가 국내 탈수 기술의 향상에 따른 기술 경쟁력 우위를 확보할 수 있는 시스템으로 평가된다⁽¹⁻³⁾.

2. 열 탈수 이론

열 탈수는 기존의 기계식 탈수장치의 한계성을 극복하여 탈수속도의 증가뿐만 아니라 저 함수율 탈수 케이크 생산이 가능하도록 하는 탈수 방법이다. 이는 기존의 기계식 탈수장치에 비하여 탈수율을 획기적으로 향상시킬 수 있기 때문에 현재 국내적으로 요구하고 있는 고효율 저 함수 탈수 케이크 생산 시스템 구축에 대응할 수 있다. 기계식 탈수가 슬러지 층에 공급압력과 압착력과 같은 외부가압력 인가로 고액을 분리하지만 열 탈수는 이 가압력 외에 슬러지 층에 저온 열을 인가하여 탈수하는 것이다. 케이크 층 내부에 형성되어 있는 모세관에 잔류하고 있는 여액은 외부 가압력에 의해 쉽게 배출되지 않는다. 하지만 슬러지 층으로 전도된 열은 모세관내의 잔류 여액 증발을 유도하고, 이 증발 압력은 잔류여액을 배출하게 하는 내부 증발압력으로 작용한다. 뿐만 아니라 케이크 층의 온도 상승에 따라 잔류 여액의 점도가 낮아져 모세관내에서의 유동성이 증가하여 여액 배출을 용이하게 한다.

2.1 슬러지층 내부 증발압

Fig. 1은 슬러지 층에 내부가압력을 형성시켜 인가하는 원리를 나타낸 것이다. 슬러지층 상층부에 열층

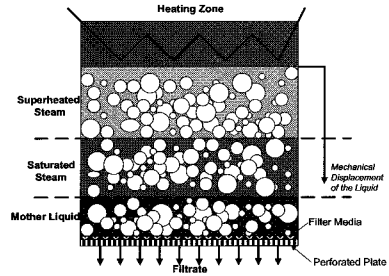


Fig. 1 Scientific fundamental of TDH

(heating zone)으로부터 방출되는 열은 주위의 액체를 증발시킨다. 밀폐된 슬러지층에서 증발된 수증기는 압력이 상승하게되며 모세관을 통해 슬러지의 하층부로 이동한다. 탈수 케이크내로 유도된 증발압은 케이크의 기공에 의해 형성된 모세관과 접촉하게 되고 모세관의 표면은 유도된 증발압과 모세관 내 잔류여액의 증발 steam으로 인하여 가열된다. steam이 케이크의 기공을 침투할 때 침투 저항성은 기공의 직경 크기에 따라 결정된다⁽⁴⁾.

$$P_{ke} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \nu \tag{1}$$

- P_{ke} = 모세관 압 (capillary pressure)
- r = 모세관 직경 (m)
- ν = 표면장력 (surface tension: Nm⁻¹)

기존의 기계식 탈수에서도 기공의 직경이 작을수록 탈수작용 (dewatering kinetic)이 지체되는 이유는 위의 식에서 보는 바와 같이 기공의 직경이 작음에 따라 모세관 압력이 작기 때문이다. 즉 외부에서 인가하는 압력이 증대하더라도 튜브형 기공 (cylindrical pore)인 모세관 압의 상승을 유도할 수 없고 오히려 기공의 직경을 감소시키므로 기공내의 잔류여액의 흐름을 확보할 수 없다. 따라서 튜브형 기공에 잔류하고 있는 탈수 여액을 효과적으로 배출하기 위해서는 그 여액에 열을 인가하여 증발하게 하고 이에 따라 여액이 증발 팽창함으로써 잔류여액을 모세관 밖으로 밀어내는 것이다. 탈수에 있어 기공체계 (pore system) 또한 중요한 변수로서 작용한다. 외부 인가 압이 증가하면 기공의 직경이 줄어들어 기공체계가 탈수 여액의 배출을 어렵게 만든다. 하지만 외부가압력을 일정하게 유지한 상태에서 열을 인가하면, 기공의 직경변화는 없고 기공내의 증발압에 의해 잔류여액이 배출된다. 결국 열탈수는 열층

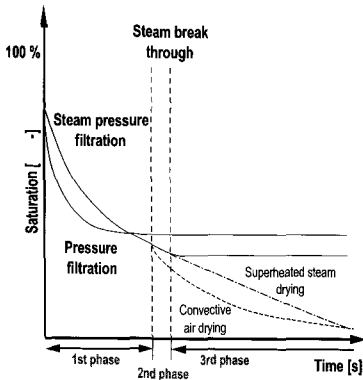


Fig. 2 Heat transfer during the TDH

에서 증발된 수증기가 응축되면서 슬러지층에 압력차 (내부가압력)를 형성시키고, 이 압력에 의해 슬러지에 잔존해 있던 액체 (mother liquid)를 모세관을 통해 배출시키는 원리이다⁽⁵⁾.

2.2 슬러지층의 열 전도

Fig. 2는 열 탈수 과정에 대한 개념도를 나타낸 것으로 외부 공급열에 의해 형성된 내부 증발압과 잔류 여액에 의해 생성된 기공내의 스팀 전파 과정이 3 단계로 이루어진다. 제 1단계는 외부 공급 열이 케이크 내로 침투해 들어가는 단계로 안정화된 열 이송 경계층이 형성되며 점성을 저하시키고, 표면장력을 줄일 뿐만 아니라 케이크 내의 액체가교 (liquid bridge)를 최대한 줄일 수 있기 때문에 탈수를 향상에 도움을 준다. 2단계는 내부 증발압을 받은 유체와 스팀이 케이크 층을 투과하는 단계이다.

탈수에서 입자 표면에 부착되어 있는 물과 모세관 내의 물이 기계적인 방법으로 제거되며 동시에 열적 건조가 발생한다. 2단계와 3단계 현상에서 건조 메카니즘은 동일하다. 3단계가 진행되는 동안, 열적 건조에 의해 추가 수분 감소가 일어난다. 케이크 내에서 물이 끓어 증발하여 공기 유동으로 바뀌어 케이크내의 물을 밖으로 끌어내게 한다. 입자 표면과 액체 가교로부터 공기 유동으로의 물질전달은 열역학적 균형을 유지한다. 공기는 물과 더불어 증발된다. 케이크 내 수분의 증발에 소요되는 대부분의 에너지는 가열된 케이크 자체로부터 제공받는다.

2.3 슬러지층의 열 전도

탈수는 기본적으로 고액 상태에서 입자와 액체를

분리하는 과정인데, 액체의 점도는 탈수가 낮을수록 케이크 내 기공에서의 유동성이 증가하여 탈수가 잘 이루어진다. 식 (2)은 액체의 점도와 온도간의 상관관계를 나타낸 것인데, 온도가 높을수록 액체의 점도가 감소한다. 점도의 감소는 함수율의 향상에 영향을 준다⁽⁶⁾.

$$\ln \mu = A + \frac{B}{T} \quad (2)$$

여기서 μ 는 여액의 점성, A와 B는 절대온도 (T)와 임계절대온도 (T_c)의 비인 T_r 의 값이 0.75 보다 작을 때 결정되는 실험상수이고이다. 케이크 층에 열의 인가에 따라 내부 증발압력에 의해 탈수가 유도되며, 아울러 잔류 여액의 점도가 작아지면서 모세관 내에서 탈수 여액의 유동성 증가로 탈수율이 향상되는 것이다. 열 탈수 시스템 구축에서 스팀 또는 열수에 의해 공급된 열로 인해 열판이 가열되고, 이 열은 다시 케이크 층으로 전파되면서 기공에 잔류되어 있는 유체의 유동성 향상과 내부 증발압에 의해 탈수가 이루어지는 것이다. 열 탈수는 기본적으로 케이크 층 내의 기공체계를 유지하면서 모세관 튜브내의 잔류 여액 유동성을 증대시키기 때문에, 케이크 비저항의 저하를 유도한다. 케이크의 비저항 감소는 탈수율 향상시킨다. 결론적으로 열 탈수는 기존의 탈수 이론에서 탈수율 향상에 필요한 인자인 인가압력, 여액의 점도, 그리고 케이크의 비저항 등을 각각 친수성으로 유도하여 탈수율을 향상 시키는 방법이다.

3. 열 탈수 장치

Fig. 3은 고효율 열 필터프레스 탈수장치에 대한 개략도를 표현한 것이다. 기계식 필터프레스 탈수장치와 같이 필터플레이트 챔버내로 슬러지를 공급한 후 공급압력과 맨브레인 플레이트의 압착력에 의해 기계탈수가 이루어진다. 이때 맨브레인 플레이트 중간의 열판으로 공급된 열이 챔버내의 슬러지 층으로 전달된다. 이 열은 열 영역 (hot zone)이 되며, 열은 케이크 층으로 전도됨에 전 절에서 언급한 바와 같이 열 탈수의 원리에 따라 탈수가 이루어진다. Fig. 4는 파이로트 열 탈수장치 사진을 나타낸 것으로, 함수율 97wt%인 슬러지가 열 탈수 장치의 필터플레이트 챔버 내로 유입되고, 이 슬러지에 열이 인가되어 함수율이 약 45wt%

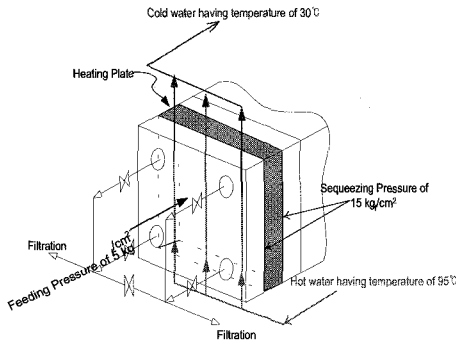


Fig. 3 Schematic diagram for TDH mechanism

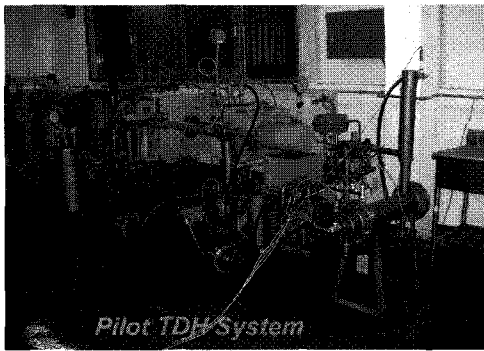


Fig. 4 Photograph of pilot TDH

정도의 저함수율 탈수 케이크가 생산되고 열판으로 공급된 열매체는 열을 슬러지로 전달한 후 응축액으로 배출되는 메카니즘이다. 이 장치는 기계적인 외부가압 에너지 외에 열에 의해 전달되는 내부 가압력이 동시에 작용하므로 열 효율을 최대한 높일 필요가 있다. 열매는 열 수를 이용하며 열판의 재질은 SUS로 구성되어져 있다. Table 1은 열 탈수 실험 (성능평가)를 위한 설계 조건 및 운전 조건을 나타낸 것이다. Pilot 열 탈수 장치의 크기는 470×470 mm이며, 여과압력은 5~7 kgf/cm², 그리고 슬러지 온도는 약 60℃로 하여 탈수운전을 수행하였다. 탈수대상 슬러지의 특성은 하수 및 상수 슬러지에 따라 다르지만, 초기함수율이 95wt%이며, 유기물 함량이 약 20wt%인 슬러지를 이용하였다.

3. 결과

3.1 상·하수 슬러지의 탈수 특성

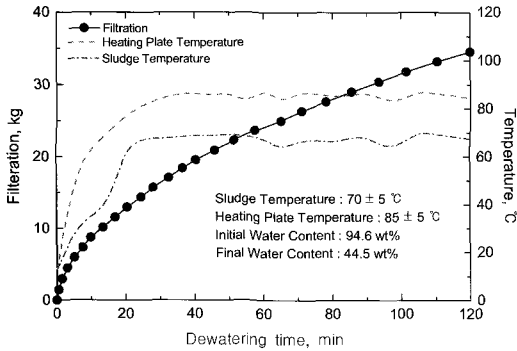
덕산 정수장에서 수 처리 후 발생하는 슬러지를

Table 1 Experimental conditions of TDH

Items		Variables
Design Conditions	Size (mm)	470 × 470
	Filter Area (m ² /CH)	0.29
	Filter Volume (dm ³ /CH)	3.15
	Thickness (mm/CH)	24
	Plate Material	SUS304
Operating Conditions	Dewatering Time (min)	120
	Applied Pr. (kgf/cm ²)	5~7
	Sludge Temp. (°C)	60±5
Raw Sludge	Plate Temp. (°C)	85±5
	pH	7.00
	SS (wt%)	94.6
	Organic content (wt%)	22.4

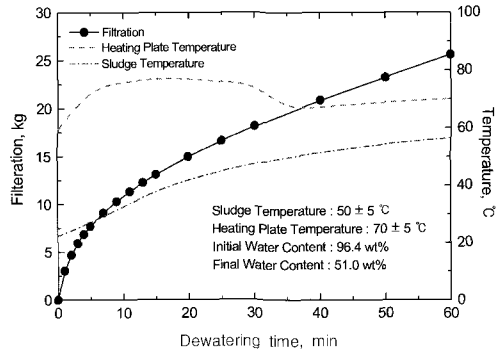
저류조에서 채취하여 탈수율 평가를 수행하였다. 전 절에서 언급한 바와 같은 탈수장치 사양, 운전조건에 따라 열 탈수 실험을 수행하였다. 열 탈수는 무약조 (폴리머에 의한 플록을 형성하지 않음)이며 총 탈수 시간은 150분 동안 기계적인 공급압력, 압착압력, 그리고 열을 슬러지 층에 공급한다. 이때 슬러지 층 (중심에서 2/3 위치)의 온도는 70℃이다. Fig. 5는 덕산 정수장 슬러지의 열 탈수에 따른 탈수율을 평가한 것이다. 탈수후 형성된 탈수 케이크의 무게는 2.05 kg/CH이며, 탈수케이크의 두께는 12.5 mm/CH로 최종함수율은 44.5wt%이었으며 탈수 속도는 1.56 DS kg/m²·hr 이었다. 수분이 제거된 탈수 케이크는 균열이 생기고, 여과포에는 탈수 케이크의 부착성이 매우 낮아 탈기현상 (탈수케이크가 여과포의 표면에서 떨어지는 현상)이 매우 우수하였다. 기존의 기계식 탈수장치는 탈수 전 폴리머를 투입하여 플록을 만든 후 탈수를 수행하여 약 75wt%의 함수율을 갖는 케이크를 생산하고 또한 케이크가 여과포의 표면에서 떨어지지 않는 현상이 발생하여 여과포 세정 비용의 증대 및 수명감소의 현상이 발생한다. 본 열 탈수장치는 탈수 전 폴리머를 이용한 전 처리 공정 없이 함수율이 44.5wt%인 저 함수율 탈수 케이크를 생산 할 수 있어 기존의 기계식 탈수장치에 비하여 매우 우수한 성능을 발휘하고 있다.

상수 슬러지의 열 탈수 평가를 통해, 장치의 성능 향상을 분석하였다. 열 탈수 메카니즘을 하수 슬러지



Analysis Items	Values
Final Water Content (wt%)	44.5
Wet Cake Weight (kg/CH)	2.05
Wet Cake Thickness (mm/CH)	12.5
Dewatering Velocity (DS kg/m ² hr)	1.6

Fig. 5 TDH results of waterworks sludge



Analysis Items	Values
Final Water Content (wt%)	51
Wet Cake Weight (kg/CH)	0.95
Wet Cake Thickness (mm/CH)	5.0
Dewatering Velocity (DS kg/m ² hr)	1.0

Fig. 6 TDH results of wastewater sludge

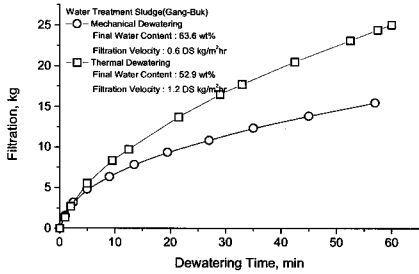
에 적용하여 평가하고자 한다. 하수슬러지는 유기물 함량이 49.4wt%로 매우 높아 난 탈수성 슬러지에 해당하므로 기계식 탈수가 어렵다. 하수처리장에서 발생하는 슬러지에 대한 열 탈수 장치의 성능평가 수행을 위한 조건은 전절에서 언급한 정수 슬러지의 탈수 조건과 유사한 방법으로 하였다. 슬러지 공급 시간 60분, 압착시간 (25분)과 air blowing 시간 (5분)을 포함하여 탈수시간은 총 90분정도이며, 슬러지층에 인가된 온도는 50°C이다. 그리고 탈수 전 염화 제 2 철과 소석회, 그리고 폴리머를 각각 0.4wt%, 0.3wt%, 그리고 20 ppm 혼합하였다. 그 결과 Fig. 6은 열 탈수 성능평가의 결과를 나타낸 것이다. 최종 탈수케이크의 함수율은 51wt%인 저함수율 탈수 케이크를 1.07 DS kg/m²·hr의 속도로 탈수되었다. 탈수 케이크의 형상은 정수 슬러지의 열 탈수 실험 결과 형성된 케이크의 형상과 같이 수분의 함유량이 적은 모양을 갖추고 있다.

3.2 열 탈수와 기계 탈수 비교

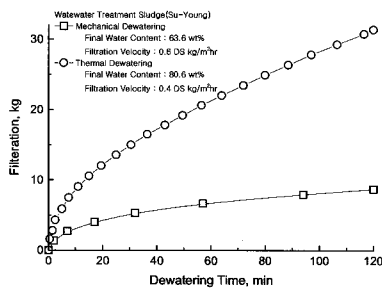
Fig. 7(a)은 정수 슬러지에 대한 열 탈수와 기계 탈수의 탈수 성능을 비교한 것으로, 탈수 진행 시간동안 배출되는 여액량을 그래프로 표현하였다. 그리고 최종 생산된 탈수 케이크의 함수율을 측정하였고, 탈수속도를 계산하여 표현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 탈

수가 진행되는 60분 동안 배출되는 여액량에는 뚜렷한 차이가 있다. 기계 탈수의 경우 최종 여액량은 약 15 kg 인 반면 열 탈수는 25 kg이 배출되었다. 동일 시간 동안 탈수를 수행하였을 때 열 탈수의 여액량이 많이 배출된 것은 열 탈수 이론에서 언급한 바와 같이 탈수 진행시, 탈수 케이크 내의 증발압과 여액 유동성의 증가 때문이다. 탈수 종료 후 생성된 탈수 케이크의 함수율을 분석한 결과 기계 탈수의 경우 63.6wt% 인 반면 열 탈수는 52.9wt%, 그리고 탈수 속도는 각각 0.6과 1.2 DS kg/m²hr로 분석되었다. 즉 열 탈수는 기계 탈수에 비하여 함수율이 저하되었을 뿐만 아니라 탈수 속도 또한 동시에 향상되었다. Fig. 7(b)는 하수 슬러지에 대한 기계 탈수와 열 탈수의 탈수 성능을 비교한 것이다. 기계탈수의 경우 여액 배출량은 약 10 kg 정도인데 반해 열 탈수는 30 kg으로 여액 배출량이 기계 탈수에 비하여 매우 높았다. 최종 탈수 케이크의 함수율이 각각 80.6과 63.6wt%, 탈수속도가 각각 0.6과 0.4 DS kg/m²hr로 분석되었다. 하수 슬러지는 상수 슬러지에 비하여 유기물이 약 2배 이상 함유되어 있기 때문에 탈수 어렵다. 그래서 탈수 시간을 약 2 배로 하였기 때문에 탈수 속도가 1/2로 줄어 든 것이다. 하수 슬러지의 경우에도 기계 탈수와 열 탈수를 비교해 본 결과, 열 탈수율의 탈수 성능이 매우 향상된 것을 분석하였다.

상기 두 종류의 슬러지에 대하여 기계탈수와 열탈수의



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison with TDH and MDW of waterworks sludge (a) and wastewater sludge (b).

탈수 성능을 평가해 본 결과 열 탈수 장치는 저 함수율 탈수 케이크를 생산하였을 뿐만 아니라 탈수 속도 또한 2배 이상 증가하였다. 따라서 열 탈수는 기존의 기계식 탈수에 의한 처리에 비하여, 저 함수율 탈수 케이크 생산이 가능하므로 기존의 해양투기에 의한 슬러지 처리를 지양하고 슬러지의 토양 적용 재활용 및 매립에 의한 처리 방안이 가능하게 하였다. 뿐만 아니라 탈수 속도가 2 배 이상 증가하기 때문에 단위 장치의 슬러지 탈수 생산 능력의 향상으로 수처리 공정 효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 평가한다.

4. 결론

국내에서 발생되는 슬러지에 대하여 탈수율 향상을 위한 고효율 열 탈수 시스템 개발하기 위하여 열 탈수에 대한 메카니즘 해석연구, 요소장치 개발 및 제작성능

평가를 수행하였다. 기존의 탈수가 물리적인 힘에 의해 입자와 물을 분리하는 것으로 탈수에 영향을 미치는 주요 인자는 슬러지층의 미세다공성 체계 (porous structure)의 형성 (기공형성 정도), 가압력, 탈수액의 점도 등의 요소에 의해 결정되지만 열 탈수는 슬러지층에 기공형성을 용이하게 하고, 내부가압력을 인가할 뿐만 아니라 탈수여액의 점도를 줄여 유동성을 증가시켜 탈수율을 향상되었다. 이와 같은 열 탈수 이론을 바탕으로 성능평가를 수행한 결과 상수 슬러지의 경우 함수율이 약 40wt%, 하수슬러지는 50wt%인 저함수율 탈수 케이크를 생산하였으며 탈수 속도 또한 향상되었다. 기계 탈수와 비교에서도 탈수율이 약 30% 향상되었음을 분석하였다. 그리고 현재 열 탈수 시스템은 덕산정수장에 실증 장치를 운영하고 있으며, 함수율이 약 35wt%인 저 함수율 탈수 케이크를 생산하고 있다.

참고문헌

- (1) 이정연, 유병순, 김택준, 지용대, “열 탈수장치에 관한 연구”, 한국화학공학회(추계), 2003.
- (2) 이정연, “정수슬러지의 특성이 탈수에 미치는 영향”, 2003, 25, 8, p 1059.
- (3) 김남호, 이정연, “저온 열 인가에 따른 슬러지 탈수율 향상에 관한연구”, 2003, 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동추진학술발표회, p 335.
- (4) Peuker, U.A., Stahl, W., 1999, “Scale-up of Steam Pressure Filtration”, Chemical Engineering and Processing, Vol.38, pp.611~619.
- (5) Urs Peuker, Werner Stahl, 2001, “Mechanisch-thermische Entfeuchtung der Dampf-Drucküberlagerten Zentrifugation Chemie Ingenieur Technik, Vol.73, pp.1018~1024.
- (6) Perry, R.H., 1984, Perry’s Chemical Engineers’ Handbook, McGraw-Hill Inc., pp.3-280-3-283
- (7) Karl Strauß, Susanne Berger, Christian Bergins, “Mechanical/Thermal Brown Coal Dewatering”, XX IMPC Aachen 1997, 75-82 + Poster Guide 42.