

세라믹 막 정수공정에서 발생하는 배출수의 농축특성

배병욱[†] · 신성해

대전대학교 환경공학과

Thickening Characteristics of Residual from a Ceramic Membrane Water Treatment Plant

Byung-Uk Bae[†] · Xing-Hai Shen

Department of Environmental Engineering, Daejeon University

(Received 9 March 2009, Revised 19 August 2009, Accepted 26 August 2009)

Abstract

For a more effectively designed gravity thickener, thickening experiments were conducted for residuals produced by a ceramic membrane water treatment plant (WTP). Two kinds of residuals, one from backwashing (BW) and the other from chemically enhanced backwashing (CEB) procedure, were separately collected during a pilot plant experiment and their limiting solid flux (SF_L) measured. Batch thickening experiments showed that the BW and CEB residual had SF_L of 10 and 25 $kg/m^2 \cdot d$, respectively. Continuous operation of a pilot-scale gravity thickener proved that a mixed BW and CEB residual could be successfully thickened at the solid loading rate (SLR) of 12 $kg/m^2 \cdot d$, allowing the concentration of the thickened residual to be about 15 $kg/m^2 \cdot d$. From the experimental results and consideration of the seasonal thickening characteristics of the residual, SLR of 15 $kg/m^2 \cdot d$ was proposed as a design parameter for full-scale gravity thickeners.

keywords : Ceramic membrane, Gravity thickener, Limiting solid flux, Residual, Solid loading rate

1. 서론

기존 정수공정보다 양질의 음용수를 생산할 수 있는 막여과 정수장이 전세계적으로 널리 보급되고 있고, 국내에서도 최근에 막여과 정수장에 대한 설치기준이 고시된 바 있다(환경부, 2008). 1979년에 준공된 거제 연초정수장(16,000 m^3/d)은 2004년 9월부터 한시적으로 운휴 중이었다. 그러나 한국수자원공사는 거제지역의 용수부족에 대비하기 위하여 국내에서 처음으로 세라믹 막여과 정수장으로 연초정수장을 전면 개량할 계획이다. 현재 현장에서는 최적의 설계인자를 도출하기 위하여 원수 → 전오존 → 응집/혼화 → 막여과 → 활성탄 → 소독 공정으로 구성된 세라믹 막여과 모형플랜트(250 m^3/d)가 운영되고 있으며, 일본 Metawater사의 세라믹막(직경 180 mm, 길이 1.5 m)이 사용되고 있다.

세라믹막은 입경이 일정한 입자를 소결하여 막을 제조하므로 공극분포가 균일하고 셀 내경이 크고 내압식임에도 탁질 제어능이 우수하다. 또한, 회수율과 플럭스(flux)가 양호하며, 역세척 배출수의 고형물질 농도가 높고 침전성이 양호한 것으로 알려져 있다(Mueller and Witte, 2007). 세라믹막의 역세척 배출수는 pellet 상태로 침강성이 우수하여 중력침강으로 충분한 농축이 가능하므로 일본 내 세라믹막

을 사용하는 정수장에는 기계식 탈수설비를 설치하는 경우는 거의 없는 것으로 보고되고 있다.

수질 및 수생태계 보전에 관한 법률에 의하면 정수능력 1,000 m^3/d 이상인 수도사업시설은 폐수배출시설로 분류되며, 이들 시설에서 발생하는 폐수는 배출허용기준에 적합하도록 처리시설을 설치하여야 한다. 막여과 공정에서 발생하는 배출수는 기존 정수공정에서 발생하는 배출수와 성상이 크게 다르고, 배출수 발생량이 막여과 공정의 회수율에 따라 달라지므로 막여과 배출수의 처리를 위해서는 새로운 설계기법이 필요한 실정이다. 이상과 같은 배경에서 본 연구에서는 세라믹 막여과 정수장으로 건설될 연초정수장 배출수의 농축특성을 파악하기 위해, 모형플랜트에서 발생하는 각종 막배출수(물리세정배출수, 화학유지세정폐액)를 대상으로 농축실험을 수행하였다. 이를 위하여 Standard Methods에 준하여 제작된 회분식 농축실험장치로 한계 고형물 플럭스(limiting solid flux, SF_L)를 측정하였고, 현장에서 연속식 pilot-scale 농축조를 운전하여 허용 가능한 고품물부하를 확인하였다.

2. 연구방법

2.1. 세라믹막 배출수

본 연구에서는 모형플랜트의 세라믹 막여과 공정이 Flux 2.5 $m^3/m^2 \cdot d$ 및 3.5 $m^3/m^2 \cdot d$ 로 운전될 때 발생하는 물리세

[†] To whom correspondence should be addressed.
baebu@dju.ac.kr

정배출수(backwash, BW)와 화학세정폐액(chemically enhanced backwash, CEB)에 대하여 농축실험을 진행하였다. 물리세정은 2시간에 1번씩 하루에 11번 수행하고, 화학유지세정은 11번의 물리세정이 끝난 후 황산(4,000 mg/L)과 차아염소산나트륨(200 mg/L)을 사용하여 교대로 진행된다(Lerch et al., 2005). 본 연구에서는 모형플랜트에서 발생하는 물리세정배출수와 화학세정폐액을 따로 모아 실험실로 운반하였고, 모든 실험은 2008년 10월부터 12월까지 진행되었다.

2.2. 회분식 농축실험

연조정수장 모형플랜트의 막배출수 종류별 농축특성을 조사하기 위하여 회분식 농축실험을 진행하였다. 농축실험은 Standard Methods(APHA, 1998)에 준하여 제작된 회분식 농축실험 장치(batch settling column)로 수행하였다. Fig. 1과 같이 농축실험 장치는 직경 26 cm, 높이 120 cm의 크기를 갖는 원통형으로 벽면효과(wall effect)를 방지하기 위하여 1 rpm 정도로 회전하는 패들을 내부에 설치하였다.

배출수의 고형물농도(total solids, TS)를 저농도에서 고농도로 증가시키면서 농축실험을 수행하고, 침강초기에 나타나는 고액계면의 높이 변화로부터 침강속도를 측정하였다. 이로부터 고형물농도에 따른 고액계면 침강속도 그래프를 작성하였으며, 최종적으로는 고형물농도에 따른 고형물 플럭스(solid flux) 그래프를 작성하였다. 여기서, 고형물 플럭스(kg/m²·d)란 고형물농도(kg/m³)와 침강속도(m/d)의 곱으로 정의된다. 이렇게 작성된 고형물 플럭스 그래프로부터 목표 고형물농도, 즉 농축조 하부에서 인발되는 고형물농도에 해당하는 한계 고형물 플럭스(limiting solid flux, SF_L)를 Yoshioka의 도식적인 방법으로 구하였다.



Fig. 1. Settling column for zone settling rate test.

2.3. 연속식 농축실험

중력식 농축조를 이용하여 막배출수를 농축할 때 허용 가능한 고형물부하를 확인하기 위하여 연속식 pilot-scale 농축실험을 수행하였다(Bae and Kim, 2008). 실험실에서 보유하고 있던 연속식 pilot-scale 농축조를 연조정수장 모형플랜트로 운반한 후, 막배출수 저류조에 저류된 막배출수가 연속식 pilot-scale 농축조로 바로 유입되도록 라인을 구성하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 연속식 pilot-scale 농축조의 제원은 직경 26 cm, 유효높이(수심) 150 cm이다. 농축조 내에 약 1 rpm의 속도로 회전하는 패들(paddle)을 설치하였고, 농축조 측벽에 10~15 cm 간격으로 시료 채취구를 설치하여 고형물 농도 profile을 조사할 수 있도록 하였다. 농축조 바닥에서 120 cm 지점에서 유입된 배출수는 농축된 후, 농축조 하부의 밸브를 통해 배출되었다. 유입 배출수의 성상을 일정하게 유지하기 위하여 막배출수 저류조를 충분히 교반하였다.

연속식 pilot-scale 농축조를 운전하면서 농축조 하부의 슬러지 베드층의 거동과 허용 가능한 고형물부하를 조사하였다. 즉, 농축조 유입 고형물부하를 변화(유입 배출수의 유량을 변화)시키면서 농축조를 운전할 때, 농축조가 처리할 수 있는 적정 고형물부하와 이때의 농축슬러지 농도를 확인하였다(배병욱 등, 2004). 또한 운전 중에 농축조 상단의 웨어를 통하여 유출되는 유출수의 수질을 분석하였다.

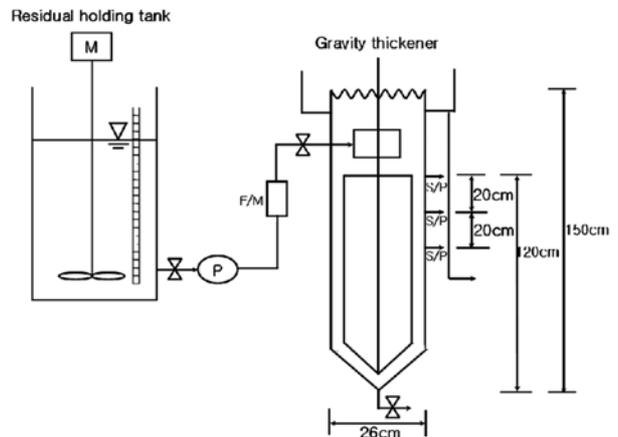


Fig. 2. Schematic diagram of pilot-scale gravity thickener operated in continuous mode

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분식 농축실험

Fig. 3과 Fig. 4에 막배출수를 대상으로 4회, 그리고 화학유지세정폐액을 대상으로 1회 수행한 농축실험 결과를 비교하였다. Fig. 3은 고액계면의 침강속도를 비교한 것이고, Fig. 4는 고형물 플럭스를 비교한 것이다. 일반적으로 농축된 슬러지는 탈수기에 의해 처리된 후 케이크 형태로 반출되는데, 탈수기의 원만한 운전을 위해서는 탈수기 유입 슬러지의 고형물농도가 최소 2%는 되어야 한다. 따라서 농축 슬러지의 목표 고형물농도를 20 kg/m²이크(2%)으로 할 때 실

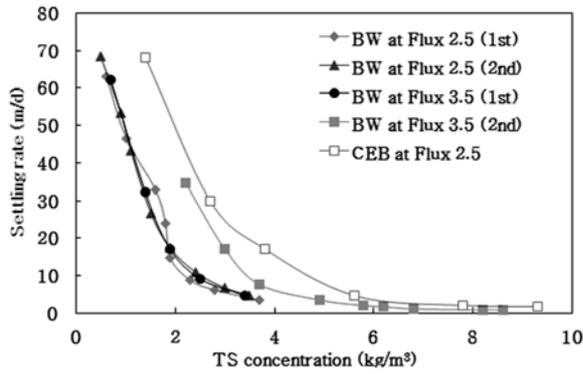


Fig. 3. Settling rates from batch thickening tests for different residuals.

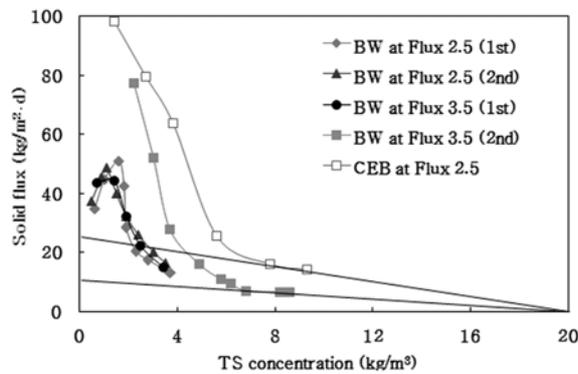


Fig. 4. Thickening characteristics of backwashing (BW) and chemically enhanced backwashing (CEB) residual.

험에 사용된 물리세정배출수(BW at Flux 3.5)의 한계 고형물 플럭스는 $10.0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 이었고, 화학세정폐액(CEB at Flux 2.5)의 한계 고형물 플럭스는 $25.0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 이었다. Table 1은 세라믹 막 공정에서 발생하는 각종 배출수의 목표 고형물 농도에 대응하는 한계 고형물 플럭스를 정리한 것이다. 연초정수장 막배출수의 농축특성을 기존 정수장 배출수

와 비교하였다. Table 2는 연초정수장과 같이 호소수를 원수로 사용하는 정수장에서 발생하는 배출수의 농축특성을 계절별로 측정된 결과이다(배병욱 등, 2003). 목표 고형물 농도가 20 kg/m^3 (2%)일 때 청주 및 화순정수장의 가을철 배출수의 한계 고형물 플럭스는 각각 8.0 및 $4.0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 이었다. 목표 고형물농도를 20 kg/m^3 (2%)로 할 때 연초정수장 가을철 막배출수의 한계 고형물 플럭스가 최소 $10 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 이라는 점을 고려하면, 연초정수장 막배출수의 농축특성은 기존 정수장에서 발생하는 배출수보다 상대적으로 양호한 것으로 판단된다.

3.2. 연속식 농축실험 결과

Fig. 5는 연초정수장 모형플랜트에서 발생하는 막배출수를 대상으로 연속식 농축실험을 약 2일간 수행한 결과이다. 먼저 Phase I에서는 고형물부하를 평균 $12 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 로 운전하면서 슬러지 베드층의 높이 변화를 관찰하였다. 슬러지 베드층의 높이는 최초 18 cm 에서 약 10시간 후에 58 cm 로 약 4 cm/hr 의 속도로 증가하였다. 이후 하부인발 밸브를 열어 슬러지 베드층을 약 40 cm 로 낮춘 후 Phase II의 고형물부하 $9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 실험을 수행하였는데, 이때 농축된 슬러지의 고형물농도(Cu)는 15 kg/m^3 이었다(Table 2 참고). Phase II 동안에는 슬러지 베드층이 약 2.5 cm/hr 의 속도로 증가하였고, Phase II가 끝난 후 채취한 농축슬러지의 고형물농도는 16 kg/m^3 이었다. Phase III의 고형물부하 $7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 동안에는 약 1 cm/hr 의 속도로 슬러지 베드층이 증가하였고, 하부배출농도는 14 kg/m^3 이었다.

연속식 pilot-scale 농축조를 고형물부하 $12 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 로 운전할 때 하부배출농도(Cu)가 15 kg/m^3 이었다는 사실은, Fig. 4의 회분식 농축실험 결과에서 목표 고형물농도를 20 kg/m^3 로 가정할 때 한계 고형물 플럭스가 $10 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 이었던 결과와 유사하다. 결론적으로 본 연속식 농축실험을 통해 겨울철 막배출수를 고형물부하 $12 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ 에서 안정적인

Table 1. Limiting solid flux (SF_L) measured by batch thickening tests for different residuals

BW at Flux 2.5	First	Target concentration of thickened residual (kg/m^3)	5	10	20
		SF _L ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$)	36.4	20.0	15.8
	Second	Target concentration of thickened residual (kg/m^3)	5	10	20
		SF _L ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$)	48.2	24.8	19.3
BW at Flux 3.5	First	Target concentration of thickened residual (kg/m^3)	5	10	20
		SF _L ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$)	43.5	22.7	16.9
	Second	Target concentration of thickened residual (kg/m^3)	5	10	20
		SF _L ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$)	102.4	22.0	10.0
CEB at Flux 2.5	First	Target concentration of thickened residual (kg/m^3)	5	10	20
		SF _L ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$)	133.6	51.2	25.0

Table 2. Limiting solid flux (SF_L) of residuals from conventional water treatment plant treating reservoir water

Water treatment plant		Autumn	Winter	Spring	Summer
Chungju	Target concentration of thickened residual (%)	2			
	SF _L ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$)	8.0	5.0	10.0	6.0
Whasun	Target concentration of thickened residual (%)	2			
	SF _L ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$)	4.0	3.0	4.0	3.0

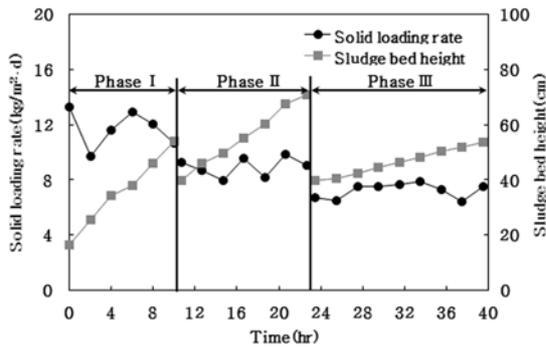


Fig. 5. Performance of pilot-scale gravity thickener as a function of solid loading rate.

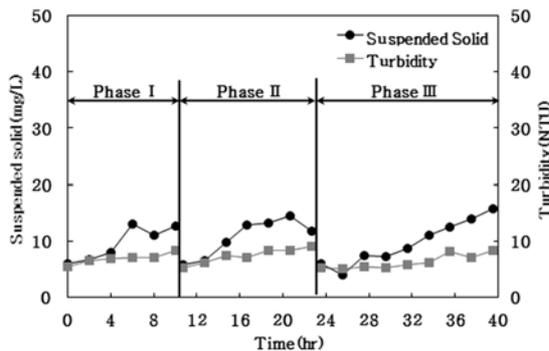


Fig. 6. Variation of SS concentration and turbidity in supernatant leaving pilot-scale gravity thickener.

으로 운전할 수 있음을 확인하였다. Fig. 6은 각 고형물부하로 운전하였을 때 시간에 따른 상등액의 SS와 탁도의 변화를 나타낸 것이다. Table 3에 연속식 농축실험의 운전조건과 상등액 수질결과를 정리하였다.

이상과 같은 회분식 및 연속식 실험결과와 여름철 고탁도 시기에 발생하는 배출수의 농축특성이 겨울철 배출수보다 양호하다는 점을 고려하여, 본 연구에서는 신설될 막여과 연초정수장의 배출수 처리를 위한 증력식 농축조의 설계인자로 고형물부하 15 kg/m²·d를 제시하였다. 이때 달성 가능한 목표 고형물농도, 즉 농축조 하부에 인발되는 농축 슬러지의 고형물농도를 20 kg/m³(2%)로 가정하였다.

Table 3. Operating conditions and results of pilot-scale gravity thickener

Phase	Operating conditions			Operating results			
	TSfeed ¹⁾	SLR ²⁾	Q ³⁾	Cu ⁴⁾	SS ⁵⁾	NTU ⁶⁾	CODMn ⁷⁾
I	1.0	12	450	15	9.6	6.9	6.3
II	0.9	9	350	16	10.6	7.4	6.0
III	1.1	7	250	14	9.6	6.3	5.8

¹⁾TS (total solids) concentration of sludge fed into the thickener (unit : kg/m³)

²⁾Solid loading rate applied to the thickener (unit : kg/m²·d)

³⁾Flow rate (unit : mL/min)

⁴⁾TS concentration of thickened sludge leaving thickener (unit : kg/m³)

⁵⁾Average SS (suspended solids) concentration of supernatant (unit : mg/L)

⁶⁾Average Turbidity of supernatant (unit : NTU)

⁷⁾Average COD_{Mn} concentration of supernatant (unit : mg/L)

4. 결론

국내 최초로 세라믹 막여과 정수장으로 신설될 예정인 연초정수장 모형플랜트에서 발생하는 막배출수(물리세정배출수 및 화학세정폐액)의 농축특성을 파악하기 위하여 회분식 및 연속식 농축실험을 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 물리세정배출수를 대상으로 4회, 그리고 화학세정폐액을 대상으로 1회에 걸쳐 회분식 농축실험을 수행한 결과, 목표고형물 농도를 2%(20 kg/m³)로 할 때 물리세정배출수의 한계 고형물 플럭스는 10.0 kg/m²·d였고, 화학세정폐액의 한계 고형물 플럭스는 25.0 kg/m²·d이었다.
- 2) 연초정수장 모형플랜트에서 발생하는 막배출수를 대상으로 연속식 농축실험을 수행한 결과, 겨울철 막여과 배출수를 고형물부하 12 kg/m²·d에서 안정적으로 농축할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 회분식 및 연속식 실험결과와 여름철 고탁도 시기에 발생하는 배출수의 농축특성이 겨울철 배출수보다 양호하다는 점을 고려하여, 본 연구에서는 연초정수장 배출수 처리공정에 포함될 증력식 농축조의 설계인자로 고형물부하 15 kg/m²·d를 제시하였다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사의 연초정수장 시설개량사업의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

배병욱, 박진호, 정연구, 임경호(2003). 상수원수 종류에 따른 정수장 슬러지의 농축특성. *대한환경공학회지*, **25**(11), pp. 1400-1404.

배병욱 정연구, 하창원(2004). 정수장 농축조의 최적 설계를 위한 Pilot Plant 연구. *대한환경공학회지*, **26**(7), pp. 772-777.

환경부(2008). 막여과 정수시설의 설치기준. 환경부고시 제 2008-198호.

APHA (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition.

Bae, B. U. and Kim, Y. I. (2008). Application of Solid Loading Rate and Limiting Solid Flux to Optimal Design of Gravitational Thickeners in Water Treatment Plants. *Journal of Environmental Engineering Science*, **25**, pp. 1273-1278.

Lerch, A., Panglish, S., Buchta, P., Tomita, Y., Yonekawa, H., Hattori, K., and Gimbel, R. (2005). Direct river water treatment using coagulation/ceramic membrane microfiltration. *Desalination*, **179**, pp. 41-50.

Mueller, U and Witte, M. (2007). Ceramic membranes - Case related protocol for optimal operational conditions to treat filter backwash water. Technau. <http://www.technau.org/fileadmin/files/Publications/Publications/Deliverables/D2.3.3.5.a.pdf/>.