

정수장 배출수 처리를 위한 Crossflow 관형막 여과 공정의 운전 적용에 관한 연구

A Study about Applicability of Treatment for Water Treatment Residual Sludge Using Crossflow Tubular Membrane System

김영훈¹ · 김관엽¹ · 김지훈¹ · 이용수¹ · 이의종¹ · 엄정열¹ · 김형수¹ · 황선진^{2*}

Kim, Young Hoon¹ · Eom, Jung Yeol¹ · Kim, Kwan Yeop¹ · Kim, Ji Hoon¹ · Lee, Yong Soo¹
Lee, Eui Jong¹ · Kim, Hyung Soo¹ · Hwang, Sun Jin^{2*}

1 성균관대학교 건설환경시스템공학과, 2 경희대학교 환경 및 환경공학과

(2009년6월19일 접수 ; 2009년8월12일 수정 ; 2009년8월14일 채택)

Abstract

Many other countries have investigated the residual sludge treatment process to save the existing water resource and produce the high suspended solid concentration sludge. There are various methods for concentrating residual sludge, but the membrane system has received the most interest for its efficiency.

The objective of this study was to evaluate the application of membrane filtration system for the residual sludge treatment. The experiment equipment was composed of Lab scale Crossflow tubular membrane filtration system. Generally, crossflow operation mode demands high electric cost mainly for the pump energy. So to cut off electric cost, very low Crossflow velocity was used in this experiment.

Results confirmed that suspended solid concentration of residual sludge could be concentrated to 57,000mg/L in low Crossflow velocity tubular membrane system,. This concentration can be directly injected into the dehydrator. Based on the results, we know that the Crossflow tubular membrane system should be replaced conventional residual sludge treatment system.

Key words : Residual sludge treatment, tubular membrane, membrane filtration system, Crossflow, suspended solid concentration

주제어 : 배출수 처리, 관형막, 막여과 공정, 크로스플로우, 부유 고형물 농도

1. 서 론

국내의 정수처리과정에서 발생하는 배출수는 하수처리과정에 비하여 매우 적은 양이 발생되므로 정수장에서 처리된 부산물 대부분이 근처 하천에 직접 배출되어 왔으나, 정수시설의 대형화와 하천유량의 감소로 하천은 이런 방류처분을 더 이상 감당하기 어렵게 되었고, 또 환경에 대한 규제가

강화되면서 지표수에 슬러지를 직접 배출하거나 토지에 투기한다는 것은 이미 금지되고 있는 실정이다.

국내 대부분의 정수장의 경우 침전 슬러지는 배슬러리지(조정조)로 이송되어 농축조에서 농축되고 농축된 침전슬러지는 폐수처리시설을 거쳐 적정 처리되어 하천에 방류되고 있고, 역세척 배출수는 배출수조(회수조)에 저장하였다가 별도의 처리 없이 상등수를 전량 착수정정으로 회수하여

* Corresponding author Tel:+82-31-201-2697, Fax:+82-31-203-4589, E-mail: sjhwang@khu.ac.kr(Hwang, S.J.)

원수로 재사용하고 있다. 최근 미국, 일본 및 호주 등에서 지아디아(Giardia)와 크립토스포리디움(Cryptosporidium)이라는 원생동물에 의한 대규모 수돗물 오염사고가 발생한 이후, 이러한 수질오염 사고의 원인이 부적절한 정수장의 운영으로 밝혀지면서 “응집·침전·여과”의 기존의 정수처리 공정의 안정성 확보와 최적 운영에 주의를 기울이고 있다.

일본에서는 수자원의 확보 방법의 하나로 기존 정수장에서 발생하는 역세척수와 배슬러지의 회수를 위하여 기존의 중력 침전에 의한 상등수 재이용 방식이 아닌 고액 분리가 뛰어나며 수질적으로 안정한 처리수를 생산하는 막여과 공정을 적용하여 기존 정수장의 회수율을 높이는 배출수 처리 공정을 구상하였다. 특히 일본은 정부의 지원과 연구 발주를 통해 여러 연구단체가 막여과 공정을 이용한 배출수 처리공정의 최적 공정 구성에 대한 결과를 도출하였으며 (Japan Water Research Center, 2004), 일본 외에도 영국, 네덜란드 등 유럽 및 미국에서도 역세척수 및 배슬러지 재이용 및 처리를 위한 막여과 공정 도입에 관한 연구 결과를 발표하고 있다 (Brugger et al., 2000), (Willemse et al., 1999), (Ressmann et al., 1999). 국내에서는 엄(2008) 등이 관형막을 이용한 전량여과 방식으로 역세 배출수 처리를 행하여, 정수장 배출수 처리의 막여과 공정 적용 가능성에 대한 연구 결과를 발표하였다.

막여과 공정을 통한 배출수 처리 공정은 수질적으로 안정한 처리수를 생산할 수 있을 뿐 아니라 막여과 공정의 특성인 고액 분리의 우수성을 통해 SS 농도가 높은 슬러지를 배출함으로써 슬러지 탈수에 대한 이점까지 얻을 수 있다. 배출수의 일반 공정에서 배슬러지의 처리 공정을 살펴보면 Alum을 응집제로 사용하는 경우, 배슬러지의 고형물 함량은 대략 0.5% 정도로 조정조를 거친 후 농축조로 유입되어 약 2~3%의 고형물 농도를 갖는 농축 슬러지로 배출된다. 하지만 2~3%의 농도는 탈수 공정에 유입되기 낮은 농도이기 때문에 최소 5%의 고형물 농도가 되도록 석회나 고분자 응집제를 사용한 응집·집괴 과정이 슬러지 저류조에서 행해진다. 따라서 막여과 공정을 이용하여 슬러지를 5%까지 농축할 수 있다면 응집·집괴를 위한 약품의 구입비를 절감할 수 있다 (한국수자원공사, 2002). 또한 2%의 슬러지를 5%의 슬러지로 농축 시키면 슬러지량은 60%가 감소하게 되는데, 이는 후단 탈수기로 유입되는 슬러지량을 큰 폭으로 저감시킬 수가 있어 후단 탈수설비의 축소 등의 경제적 효과 또한 볼 수 있다.

본 연구에서는 기존 정수장 농축 슬러지 이상의 고농도 슬러지를 처리하기 위한 Crossflow 관형막 여과 운전 방식의 적용 가능성을 평가하고, 슬러지 농도 5% 이상의 고농도 슬러지의 생산 가능성을 판단하여 정수장 배출수 처리 막여

과 공정의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험방법 및 장치

본 연구에서의 실험 원수는 한강수계 원수를 사용하는 A정수장의 탈수기동 유입 전의 슬러지 저류조 슬러지를 이용하였다.

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig 1.과 같으며 2개의 관형막을 직렬로 연결하여 Crossflow 운전 방식으로 연구를 수행하였다. 펌프와 가까이 있는 전단 막을 UF1, 후단 막을 UF2로 정하였다. 사용된 관형막의 재원은 Table 1과 같다.

엄(2008)은 관형막의 전량여과 운전 방식에서 주기적인 배출을 통해 막 모듈 내 SS 농도를 배슬러지 평균 농도인 10,000mg/L로 유지시킨다면 관형막의 유로 폐색 없이 안정한 운전이 가능하다고 하였다. 그러나 추가 실험 결과 25,000mg/L의 농도에서는 유로 폐색이 발생하여 고농도의 원수를 처리함에 있어서 전량여과 방식의 적용은 어려운 것으로 밝혀졌다. 따라서, 본 연구에서는 고농도의 원수 처리를 위하여 관형막을 이용한 Crossflow 운전 방식을 적용하였다. 관형막은 모듈의 특성상 역세나 공기 세정에 어려움이 있어 Crossflow 운전 방식을 통한 막면유속으로 막오염 제거를 행한다. Crossflow 여과방식의 문제점인 에너지 손실 문제를 해결하기 위하여 낮은 막면 유속을 유지시켜 펌프 동력에 의한 에너지 절감을 달성하기로 하였다. 이에 따라 기존 Crossflow 막면유속 조건인 2~3m/s의 1/4 수준인 0.5 m/s로 막면유속을 설정하기로 하였다. 막면 유속은 인버터를 이용하여 조절하였으며 In-line 마그네틱 디지털 유량계를 통하여 막면 유속을 관찰하였다. 실험은 3회로 진행되었는데, RUN1에서는 초기 슬러지 농도를 A정수장에서 농축 슬러지의 SS 농도 수준인 28,000 mg/L로 설정하여 낮은 막면 유속 유지 상태에서 유로가 막히는지 확인하는 실험을 실시하였으며, RUN2, 3에서는 농축 슬러지 농도 이상의 슬러지를 유입시키는 실험을 진행하였다. 각 실험에서의 운전조건은 동일하였다.

본 실험의 분석 방법은 수온, 투과플럭스, 펌프 후단에서의 유입 슬러지 SS 농도를 실험 항목으로 선정하여 각 운전에서의 UF1과 UF2에 대한 각 항목들을 측정하였다. 또한 운전 종료 후 하우징에서 막을 분리하여 유로폐색 여부를 확인하였다.

투과플럭스와 온도는 현장에서 즉시 측정하였고, 유입 슬러지의 SS 농도는 시료 채취 후 Standard Methods에 의거하여 수행하였다. 수온은 pH/ORP/DO meter (Horiba D-25)를 사용하여 측정하였다.

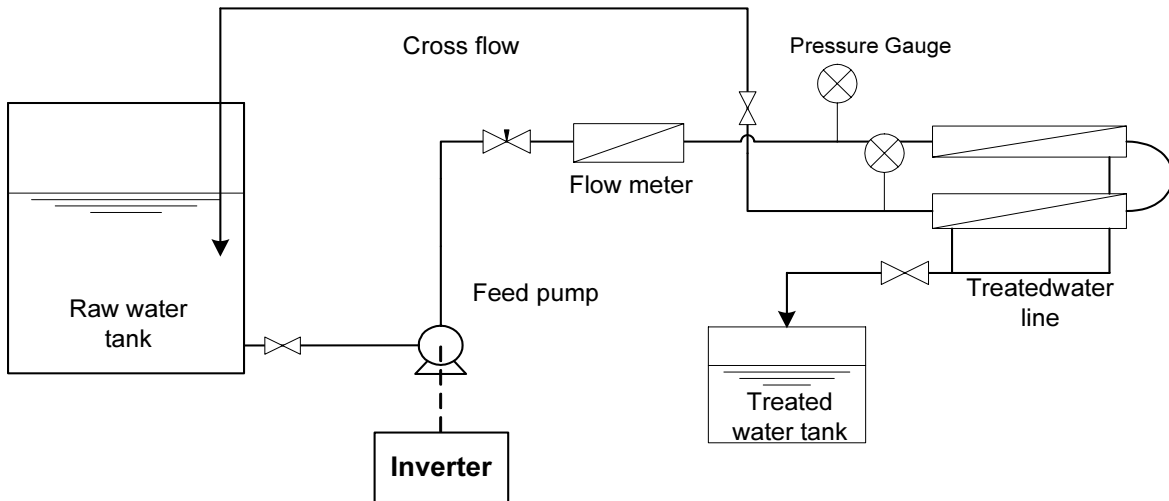


Fig. 1. Schematic diagram of Crossflow membrane system

Table 1. Characteristics of membrane module

Membrane Type	Ultrafiltration
Module Type	Tubular
MWCO	30kDa
Material	Polysulfone
Effective filtration area per module	0.5 m ² /module
Total area	1 m ²
Pure water flux	300 L/m ² ·hr (LMH, 25°C, 2kgf/cm ²)
Module structure	13mm(Ø)×2m(L)×7(tube)

3. 결과 및 고찰

3.1. A 정수장 농축 슬러지 SS 농도에서의 운전 결과 (RUN1)

RUN1에서는 A 정수장의 농축 슬러지 SS 농도 수준인 28,000mg/L을 초기 농도로 설정하여 실험을 진행하였다. 처리수를 원수조로 재순환시키는 Batch 실험을 행하여 막으로 유입되는 슬러지의 농도를 일정하게 유지시켜, 기존 정수장의 농축 슬러지 SS 농도에서의 Crossflow 운전 방식의 적용 가능성을 평가하였다.

RUN1 진행 동안 측정된 UF1과 UF2의 투과플럭스변화 및 25°C, 1kgf/cm²에서의 보정 투과플럭스는 Fig 2.와 같다. 실험방법에서 설명한 바와 같이 펌프와 가까이 위치한 막을 UF1, 후단에 위치한 막을 UF2로 표현하였다.

RUN1 진행 동안 TMP는 0.4 kgf/cm²에서 거의 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났으며 온도는 초기 21°C에서 펌프의 영향으로 26°C까지 증가한 후 변동이 나타나지 않았

다. UF1의 투과플럭스는 초기 35.2 L/m²·hr에서 점차 감소하여 운전 진행 3시간 이후부터 18 L/m²·hr로 일정하게 유지되었으며 UF2의 투과플럭스는 초기 34.8 L/m²·hr에서 점차

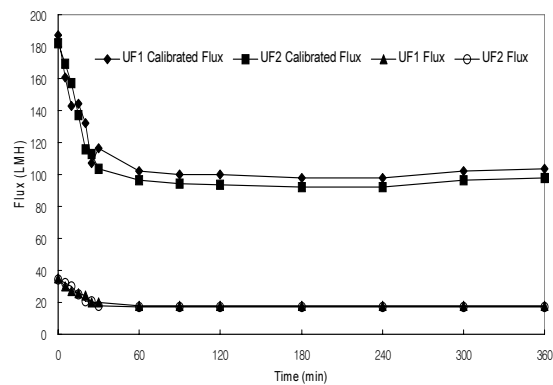


Fig. 2. Variation of permeate flux and Calibrated permeate flux over time of RUN1

감소하여 운전 진행 90분 이후부터 17.4 L/m²hr로 유지되었다. 이러한 양상은 막투과 플럭스에 의한 케이크 형성 속도와 막면유속에 의한 케이크 제거 속도가 같아져서 케이크 성장이 점차 멈춰지는 Steady-state 상태에 도달한 것으로 사료되며, Steady-state 상태로 도달하는 데 걸리는 시간은 농도가 클수록 빠르다 (Zang and Song, 2000). 6시간의 운전동안 별다른 특이사항은 발생하지 않았으며 투과플럭스가 안정화 된 후 급격한 저감이 발견되지 않아 막의 유로폐색이 발생하지 않았을 것이라 판단하였으며 보다 정확한 확인을 위하여 실험 종료 후 하우징에서 막을 분리해 확인한 결과 예상대로 막의 폐색이 발생하지 않았다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 A정수장의 농축 슬러지 SS 농도 수준인 28,000mg/L에서는 최저 막면유속으로 선정된 0.5 m/s에서 안정적으로 Crossflow 운전을 적용할 수 있을 것으로 사료되며, 이 후 A정수장 농축 슬러지 SS 농도 이상의 고농도 슬러지를 실험 대상 원수로 선정하여 추가 운전을 실시하였다.

3.2. A 정수장 농축 슬러지 SS 농도 이상에서의 운전 결과 (RUN2)

RUN2에서는 A 정수장의 농축 슬러지 SS 농도 이상인 37,000mg/L을 초기 농도로 설정하여 실험을 진행하였다.

RUN1에서는 처리수를 원수조로 순환시켜 막에 유입되는 슬러지 농도를 일정하게 유지하였으나 RUN2에서는 처리수를 처리수조로 유입시키는 연속 실험을 통해 실제적인 슬러지 농축 운전을 실시하였다.

RUN2 실험의 진행 동안 TMP는 약 0.24 kgf/cm²로 유지되었고 각 UF1과 UF2의 온도, 투과플럭스 변화 및 온도 25°C, TMP 1 kgf/cm²에서의 보정투과플럭스 변화를 Fig 3과 Fig 4에 나타내었다. UF1, UF2의 투과플럭스는 초기 25.6 L/m²hr, 37.5 L/m²hr에서 점차 감소하여 15 L/m²hr의 동일한 투과플럭스로 안정적으로 유지되는 Steady-

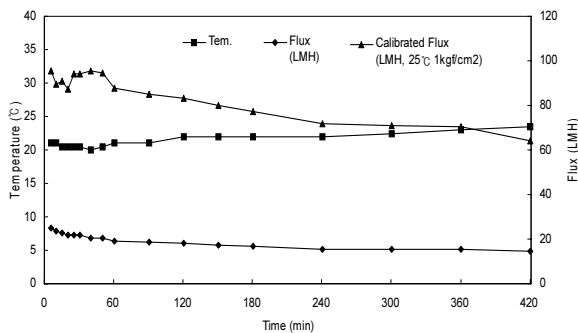


Fig. 3. Variation of Temperature, permeate flux and Calibrated permeate flux over time of RUN2 (UF1)

state에 단계에 도달하였다. RUN2 에서도 7시간의 운전 진행 동안 플럭스나 TMP의 급격한 저감은 나타나지 않았으며, 종료 직후의 유로폐색 유무 확인 결과 유로폐색은 나타나지 않았다.

Fig. 5는 RUN2에서의 관형막 유입 슬러지 SS 농도와 막 여과저항 변화를 나타내었다. 관형막에 유입된 슬러지의 SS 농도는 초기 37,000 mg/L에서 점차적으로 증가하여 7시간의 운전 이후에는 46,400 mg/L로 나타났다. 여과저항의 경우 UF1, UF2에서 각각 초기 4.1*10¹²/m, 2.2*10¹²/m 에서 운전 종료 직전에 6.1*10¹²/m, 5.1*10¹²/m 로 운전 초기에 조금씩 상승하다가 약 240분 이후 안정적으로 유지하는 경향을 보였다. RUN2의 연구 결과 A 정수장 농축 슬러지 농도 이상인 약 45,000mg/L 이상에서도 낮은 막면 유속을 유지하는 Cross flow 운전의 안정성은 확인할 수 있었다. 이 정도의 슬러지 농도는 응집-집괴 과정을 거치지 않고 직접적으로 탈수기로 유입이 가능한 슬러지 농도에 약간 못 미치는 정도이다. 따라서, 직탈수가 가능한 정도의 슬러지 농도(약 50,000mg/L) 이상에서 낮은 막면 유속을 유지하는 Crossflow 운전의 안정성을 확인하기로 하였다.

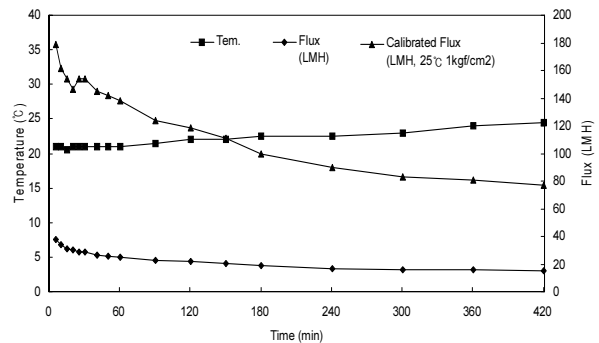


Fig. 4. Variation of Temperature, permeate flux and Calibrated permeate flux over time of RUN2 (UF2)

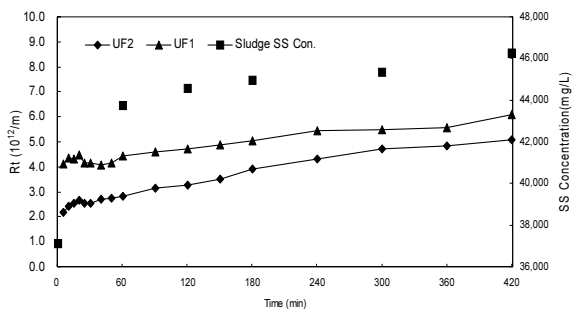


Fig. 5. Variation of Filtration Resistance, Sludge suspended solid concentration over time of RUN2

3.3. 직접적인 탈수기 유입 가능 슬러지 SS 농도에 서의 운전 결과 (RUN3)

RUN3 역시 RUN2와 같이 54,000 mg/L의 슬러지를 장치에 유입시켜 운전을 진행하며 직접 슬러지를 농축시켜 운전의 안정성을 확보해 보도록 하였다. RUN2에서는 최종 농축된 슬러지의 농도는 응집-집괴 과정을 거치지 않고 직접적으로 탈수기로 유입이 가능한 슬러지 농도에 못 미치는 바, 이보다 더 높은 농도의 슬러지를 초기 슬러지 농도로 설정한 RUN3에서의 투과플럭스 변화와 TMP 변화, 보정투과플럭스의 변화를 살펴 보았다.

RUN3에서의 TMP는 0.37 kgf/cm²으로 큰 변동 없이 유지 되었다. Fig 6.과 Fig 7. 에 UF1과 UF2의 온도, 투과플럭스, 보정투과플럭스 변화를 나타내었다. UF1의 투과플럭스는 초기 19.2 L/m²·hr에서 점차 감소하여 14.4 L/m²·hr로 유지되는 양상을 보였으며 UF2의 플럭스는 초기 20.4 L/m²·hr에서 점차 감소하여 15 L/m²·hr에서 유지되는 양상을 나타내었다. RUN3 역시 7시간 후 Steady-state 상태에 도달

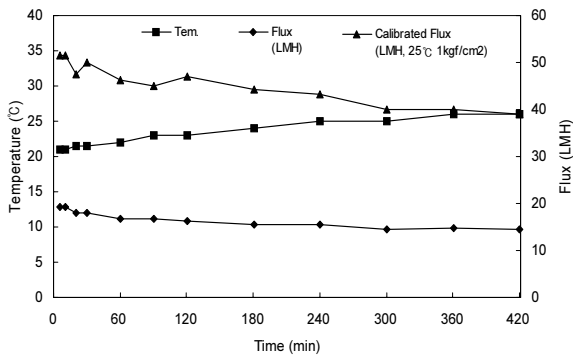


Fig. 6. Variation of Temperature, permeate flux and Calibrated permeate flux over time of RUN3 (UF1)

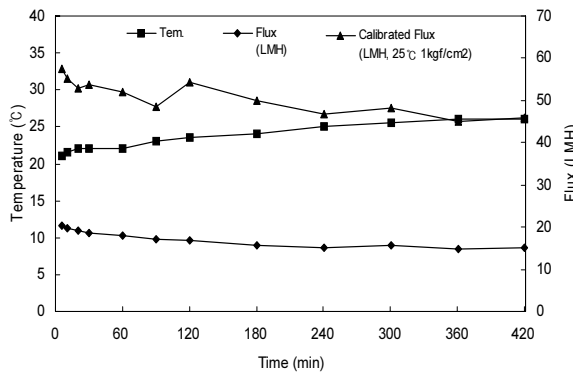


Fig. 7. Variation of Temperature, permeate flux and Calibrated permeate flux over time of RUN3 (UF2)

하였으며, 유로 폐색 없이 진행되었다.

관형막 초기 유입 슬러지 SS 농도는 54,000 mg/L에서 7시간의 운전 후 최종 농축 슬러지 SS 농도는 57,600 mg/L이며, UF1, UF2의 여과저항은 각각 초기 7.6*10¹²/m, 6.8*10¹²/m에서 운전 종료 직전에 10.0*10¹²/m, 8.5*10¹²/m로 RUN2와 유사한 양상의 진행을 보였다(Fig. 8). RUN3에서 실험 대상으로 삼았던 슬러지의 SS 농도는 직접적으로 탈수기에 유입시킬 수 있는 슬러지 SS 농도 50,000 mg/L 이상이었으며, 별다른 문제 발생 없이 안정적인 운전이 가능하였다.

Table 2는 RUN1~RUN3의 운전 결과를 나타낸 것이다. 연구 결과로부터 막면유속 0.5m/s인 경우 관형막 유입 슬러지의 SS 농도와 유입 압력과 관계없이 최종 투과플럭스는 14.4 ~ 18.0 LMH 범위의 값을 나타냈다. Song(1998)은 막투과 압력과 관계없이 일정한 값을 가진 투과플럭스를 한계 플럭스(Limiting Flux)라 정의 하여는데, 본 연구 결과에서 도출된 최종 투과플럭스가 한계 플럭스인지는 유입 압력 변화에 따른 충분한 실험 후 결론을 도출하여야 할 것이다.

RUN1~RUN3의 운전 결과로부터 A정수장의 농축 슬러지 SS 농도 정도의 고농도 슬러지를 관형막을 적용한 Crossflow 운전 방식으로 응집-집괴 과정을 거치지 않고 직접적인 탈수기 유입 가능 농도(50,000 mg/L 이상)까지 슬러지 농축 운전이 가능함을 알 수 있었으며, 또한 기존 막면 유속 조건의 약 1/4 수준의 낮은 막면 유속으로도 운전이 가능함이 밝혀져 Crossflow 운전 방식의 문제점으로 작용 하였던 펌프 전력에 의한 에너지 손실도 해결 할 수 있을 것으로 사료된다. 마지막으로 관형막을 적용한 Crossflow 운전 방식을 통한 슬러지 농축 공정은 기계적인 강제 농축으로 증력에 의한 수동적인 농축 공정인 기존 배출수 처리 공정의 농축조를 대신할 공정으로 충분한 가능성을 가지고 있다고 판단된다.

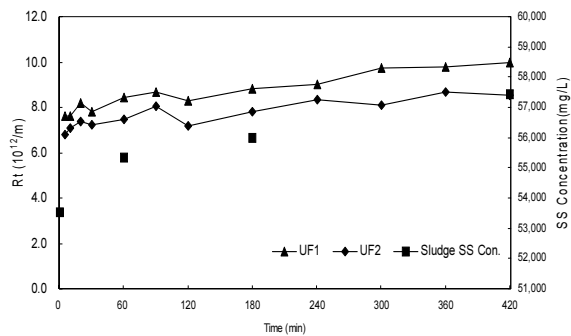


Fig. 8. Variation of Filtration Resistance, Sludge suspended solid concentration over time of RUN3

Table 2. Operating result for RUN1, RUN2, RUN3

	RUN1		RUN2		RUN3	
	UF1	UF2	UF1	UF2	UF1	UF2
Crossflow velocity(m/s)	0.5		0.5		0.5	
Inlet Pressure(kgf/cm ²)	0.4		0.24		0.37	
Permeate Flux(mg/L)	18.0	17.4	15.0	15.0	14.4	15
Resistance of Filtration(10 ¹² /m)	7.5	7.6	6.1	5.1	10.0	8.5
Sludge Concentraion(mg/L)	28,000		46,400		57,600	

4. 결론 및 향후 계획

엄(2008)은 역세 배출수 등의 저농도 원수 처리에 있어 관형막 전량여과 방식의 적용이 가능함을 밝혔다. 또한, 본 연구는 기존 정수장 농축 슬러지 이상의 고농도 원수 처리에서 에너지 절감을 위해 낮은 유속을 적용한 Crossflow 관형막 여과 방식의 적용 가능성에 대한 연구로써, 엄(2008)의 연구와 더불어 정수장에서 발생하는 배출수(역세 배출수, 침전 슬러지)를 처리하는 공정으로써 전량여과와 Crossflow 여과 방식을 조합한 관형막여과 공정은 기존 배출수 처리공정을 대체하는 공정으로의 가능성이 충분하다고 생각된다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 일반적인 관형막 운전방식인 Crossflow 여과 방식의 문제점인 에너지 손실을 최소화시키기 위하여 0.5m/s의 낮은 막면유속 하에서 각각의 실험을 진행하였다. 각 실험의 최종 투과 플럭스는 안정적으로 유지되었고, 운전 종료 후 하우징에서 막을 분리하여 확인해본 결과 유로의 폐색이 발생치 않아 낮은 막면 유속에서도 고농도의 원수의 안정적인 처리가 가능함을 확인할 수 있었다.

2. 본 실험에서는 원수의 슬러지 SS 농도가 증가할수록 투과 플럭스의 차이가 클 것으로 예상하였다. 그러나 실험에서는 막면유속 0.5m/s인 경우 초기 투과플럭스는 슬러지 농도가 증가할수록 감소하였으나, 최종 투과플럭스는 관형막 유입 슬러지의 SS 농도와 유입 압력과 관계없이 14.4 ~ 18.0 LMH 범위의 값을 나타냈다. 이는 고농도 슬러지를 사용하여 동일 막면유속으로 Crossflow 운전을 행할시 막면유속을 통한 막 유로내 케익층 두께 제어로 일정한 케익여과 저항을 형성하여 Steady-state에서의 한계 플럭스(Limiting Flux)에 도달한 것으로 사료되며, 향후 정확한 원인파악을 위한 연구를 진행할 예정이다.

3. 최종적으로 RUN1~RUN3의 운전 결과로부터 A정수

장의 농축 슬러지 SS 농도 정도(28,000 mg/L)의 고농도 슬러지를 에너지 절감형 저 막면유속 Crossflow 관형막 여과 공정을 적용하여 응집집괴 과정을 거치지 않고 직접적인 탈수기 유입이 가능한 농도인 50,000mg/L 이상까지 농축시킬 수있었다. 본 연구를 통한 Crossflow 관형막여과 공정은 기존의 중력 농축에 의한 농축조 공정을 대신할 수가 있으며, 슬러지 농축에서는 월등한 성능을 가진 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육인전자원부)의 재원으로 한국과학기술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임
“(KRF-2008-314-D00227)”

참고 문헌

1. Abdellah Beicha, et al., (2009), Dynamic ultrafiltration model based on concentration polarization-cake layer interplay, *Desalination*, **242**, pp. 138-148
2. A. Brugger et al., (2000), Reuse of filter backwash water using ultrafiltration technology, *Filtration & Separation*, **27**, 1, pp. 22-26
3. ACT 21 Project : *5th Group Final Report* (2001) Japan Water Technology Institute Center.
4. Chris Dotremont, et al., (1999) The recovery of backwash water from sand filters by ultrafiltration, *Desalination*, **126**, pp. 87-97.
5. E-WATER Project : *Final Report* (2005) Japan Water Technology Institute Center.
6. Ger Vos, et al., (1997) Full-scale treatment of filter backwash water in one step to drinking water, *Desalination*, **113**, pp. 283-284.

7. Mar a-Cinta et al., (2009), Ultrafiltration permeate flux decline prediction for gel layer forming solutes using monotubular ceramic membranes, *Desalination*, 240, pp. 89-93
8. Mark Wilf, et al, (2003) Reclamation of sand filter backwash effluent using capillary ultrafiltration, March Feature, *Membrane Technology*, pp. 85-92.
- 9 Report, (2004), Environmental, Ecological, Energy, saving and Economical Water Purification System, *Japan Water Research Center*
10. R. J. N. Willems et al, (1999) Full-scale recycling of backwash water from sand filters using dead-end membrane filtration, *Water Research*, **33**(15), pp. 3379-3385.
11. Song L. (1998), A new model for the calculation of the limiting flux in ultrafiltration, *Journal of Membrane Science*, 144, pp. 173-185
12. Zhang M., L. Song (2000), Mechanisms and parameters affecting flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration of colloids, *Environ. Sci. Technol.*, 34, pp. 3767-3773
13. 원수 특성을 고려한 상수도 배출수 처리시설 최적설계 연구 (2002), 한국수자원공사.
14. 문용택, et al., (2003) 역세척수의 원수로의 재이용 연구, *대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집*, pp. 1131-1135.
15. 엄정열, et al., (2008), 역세 배출수 처리를 위한 관형막의 전량여과 운전 적용에 대한 연구, *대한상하수도학회*, **22**, 4, pp. 437-444