





무동력 역세척이 가능한 중력식 저압 막여과 공정

공학석사 학위논문

공학석사 학위논문

무동력 역세척이 가능한 중력식 저압 막여과 공정

지도교수 김 수 한

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



김동건의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



표 목차	iii
그림 목차	iv
Abstract	vi

제1장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 기본 가설 설정	3
1.3 연구내용	3
제2장 문헌연구	4
2.1 막여과 공정	4
2.1.1 개요	4
2.1.2 막여과의 기본 개념	8
2.1.3 파울링1	5
2.2 중력식 막여과 20	0
2.2.1 개요2	0
2.2.2 중력식 막여과의 선행연구 사례	0

제3장 연구방법	
----------	--

3.1	연구	개요	<u>2</u> 2	27
-----	----	----	------------	----

3.2	연구	방법	• • • • • • • • • • • • • •	•••••	•••••	•••••	••••••	•••••••	•••••	28
3.2	.1 실험	장치	구축…	•••••	•••••		•••••		••••••	28
3.2	.2 실험	방법		•••••	•••••	•••••			•••••	41

제4장 연구 결과
4.1 동일 수두에 대한 여과 및 역세 플럭스 확인 44
4.1.1 다우 막모듈 비교 실험44
4.1.2 코오롱 막모듈 비교 실험47
4.2 랩스케일 실험을 통한 무동력 역세척 장기운전 실험 50
4.2.1 다우 막모듈 장기운전
4.2.2 코오롱 막모듈 장기운전
4.2.3 운전 조건에 따른 플럭스 유지54
4.3 화학세척 회복률 확인60

제5장 결론		
5.1 연구 결과	요약	
5.2 향후 연구	내용	

표 목차

표	2.1	막 종류에 따른 분리경과 제거물질5
표	2.2	제거물질별 전처리방안
표	3.1	실험에 사용된 MF 막 사양
표	4.1	침적30분 역세 10분 역세수두 1.3 m
표	4.2	침적30분 역세 10분 역세수두 2.0 m
표	4.3	침적 90분 역세 30분 역세수두 2.0 m
표	4.4	침적 30분 역세 10분 역세수두 1.3 m



그림 목차

그림	2.1 막여과 종류별 제거능 범위	5
그림	2.2 저압 막여과 물질 제거 원리	8
그림	2.3 고압 막여과물질 제거 원리	9
그림	2.4 전량여과(Dead-end)와 순환여과(Cross-flow)	10
그림	2.5 침지식 막여과 공정	10
그림	2.6 중공사 막모듈의 형태	12
그림	2.7 막여과 방식에 따른 막차압 계산 방법	14
그림	2.8 막 오염 개념도	16
그림	2.9 중력식 막여과 운전 데이터	20
그림	2.10 초기 TMP별 플럭스 감소	21
그림	2.11 장기 운전 플럭스 결과	22
그림	2.12 운전조건에 따른 멤브레인의 바이오 필름	23
그림	2.13 AOC 농도 변화 ······	24
그림	2.14 Biopolymer 농도 변화 ······	25
그림	3.1 무동력 역세척이 가능한 중력식 막여과 여과/역세개념도	27
그림	3.2 다우 막모듈과 코오롱 막모듈	28
그림	3.3 미니 막모듈 제작 순서	29
그림	3.4 무동력 중력식 막여과 랩스케일 장치	30
그림	3.5 전자저울	31
그림	3.6 수온측정기	32
그림	3.7 휴대용 탁도계	32
그림	3.8 TOC 측정장치	33
그림	3.9 자동화 장치 개념 모식도	34
그림	3.10 무인 자동화 장기운전을 위한 랩스케일 장치	35
그림	3.11 전자저울 데이터 자동 수집 프로그램	36

그림	3.12 과정별 밸브 조작 개념도	39
그림	3.13 솔레노이드 밸브 구동방법	40
그림	3.14 화학세척 방법	43
그림	4.1 자연수두 범위의 여과, 역세플럭스 비교	45
그림	4.2 자연수두와 펌프 압력을 통한 여과플럭스 비교	46
그림	4.3 펌프로 압력 연장 여과, 역세플럭스 비교	47
그림	4.4 자연수두 범위의 여과, 역세플럭스 비교	48
그림	4.5 중공사 막 길이에 따른 플럭스 비교	49
그림	4.6 기존 중력식 막여과 방식으로 운전한 여과플럭스	51
그림	4.7 무동력 역세척을 진행한 중력식 막여과 여과플럭스	52
그림	4.8 기존 중력식 막여과 여과플럭스	53
그림	4.9 무동력 역세척을 진행한 중력식 막여과 여과플럭스	54
그림	4.10 모듈 배치 각도에 따른 배수 시간	55
그림	4.11 막모듈 수직 배치에 따른 여과플럭스 저하	56
그림	4.12 역세수두 및 역세시간에 따른 여과플럭스	58
그림	4.13 침전수를 원수로 사용한 운전의 여과플럭스	59

A low pressure gravity-driven membrane filtration process with non-powered backwash

Dongkeon Kim

Department of Civil Engineering, Graduate School Pukyong National University

Abstract

Gravity-driven membrane filtration refers to a low-pressure membrane filtration method that operates using natural head as operating energy. Unlike the membrane filtration that uses a pump as the driving force, the existing gravity-driven membrane filtration is characterized in that only filtration is performed without backwashing. Therefore, as the operation progresses, the production water quantity decreases compared to the initial filtered water quantity due to contamination, and the operation is performed while maintaining the filtration flux in a low range. The present, we developed a gravity-driven membrane filtration process that enables backwashing of power-type membrane filtration using natural head like gravity-driven membrane filtration. In order to confirm that backwashing is possible only with natural head, an experiment was conducted to confirm that the filtration and backwash fluxes are the same regardless of the incoming direction of the hollow fiber membrane under the same head level conditions. The experiment was conducted by configuring the device up to 2 m, which is the maximum head level that can be secured on the lab scale experimental device, and it was confirmed that the filtration and backwash fluxes were the same at the same head level. A long-term non-powered backwash

experiment was conducted under various conditions depending on the backwash head level, water quality, and arrangement of membrane modules. As a result of the experiment, assuming that the same amount of backwash water is used for backwashing, it was efficient to proceed with a high backwash flux in a short time and to arrange the membrane vertically. In the conventional gravity-driven membrane filtration method, the starting filtration flux of 25 LMH was reduced to about 6.1 LMH after 100 hours of operation, while the process of this study maintained 21.2 LMH compared to the same filtration flux and operating time. If this process is applied, the flux reduction can be delayed. Even if it is driven with the same mechanism as the powered membrane filtration, it is possible with little energy.



제1장 서론

1.1 연구배경

막여과 공정은 반투과성의 분리막을 이용하여 물리적으로 액상-액상, 고상-액상 및 고상-기상간의 혼합물로부터 분리, 농축, 정제하 여 제거하는 공정이다.

현재 국내에서는 2004년 지례정수장(300 m³/day)에서 시험연구를 시작하여 시흥정수장(3,600 m³/day), 이동정수장(1,500 m³/day), 양동 정수장과 같은 소규모 정수장뿐만 아니라 공주정수장(30,000 m³/day), 영등포정수장(50,000 m³/day)과 같은 중대형 정수장도 시범 운영하고 있다(한국수자원공사, 2011).

앞서 언급한 정수장들의 경우에는 정밀여과(microfiltraion; MF)나 한외여과(ultrafiltration; UF)막을 사용한다. 정밀여과와 한외여과 막 의 경우 일반적으로 막차압(trans membrane pressure; TMP)는 200~300 kPa이하로 운전되는 막을 말한다(남궁은, 2008). 여기서 TMP란 막을 통과하는 기준으로 원수 측 압력과 생산수 측 압력의 차로 발생하는 압력을 말한다.

정밀여과와 한외여과는 비교적 TMP가 낮은 저압 막여과 공정이 며, 막의 운전방식에 따라 가압식과 침지식 운전으로 나뉜다. 가압 식 막여과는 막을 통과하기 전 원수 측에서 펌프로 가압하여 생산 하는 방식을 말하며, 침지식의 경우 막을 통과한 후단에 펌프로 흡 입하여 물이 막을 통과하게 하는 여과방식을 말한다.

두 막여과 방식 모두 펌프를 사용하는 점에서는 동력공급 관점 에서 상동하며, 운전하는 내내 펌프를 사용하여 에너지를 필요로 한다는 점에서 기존 모래여과 방식의 정수처리에 비해 단점이 있 다. 하지만 기존 재래식 모래여과 방식에 비해 원수의 수질 변동에 크게 관계없이 안정적인 처리 수질을 기대할 수 있으며, 큰 부피를 차지하지 않고, 장치로 구성되어 있어 시스템을 구축하면 무인 자 동화가 가능하다는 장점이 있다(이길숙 등, 2005).

막여과 운전 방식에서 펌프를 사용하여 운전하는 막여과와 달리 펌프를 사용하지 않고 정수 처리를 할 수 있는 중력식 막여과 (gravity-driven membrane; GDM) 공정이 있다. 중력식 막여과 공정 이란 여과 시 필요한 에너지를 펌프의 동력이 아닌, 물의 위치수두 를 이용하여 물을 생산하는 여과방식을 말한다.

일반적인 막여과 공정에서는 주기적인 물리적 역세척이나 화학 세척을 하는 반면 중력식 막여과는 그러한 과정 없이 오염이 지속 되더라도, 역세척이나 화학세척을 진행하지 않고 여과한다. 이러한 특징 때문에 중력식 막여과 방식은 가압식 막여과와 비교하여 초 기에는 여과되는 수량이 비슷하지만 파울링에 대한 주기적인 세척 을 하지 않기 때문에 장기적으로 갈수록 막이 오염되어 초반 운전 대비 1/10 수준의 플럭스로 운전된다.

막모듈 형태 중 하나인 중공사형 막모듈에서 여과와 역세는 물 의 흐름만 서로 반대이고. 같은 수두일 때 흐름 방향에 관계없이 여과플럭스와 역세플럭스가 서로 같다는 것을 가정하여 연구를 진 행하였다.

본 연구에서는 여과와 역세척을 모두 중력식으로 운전하는 공정 에 대해 연구를 진행하였다. 가압식 막여과 운전과 같이 주기적인 역세척을 실시하면서 그 필요한 에너지를 펌프로 구동하지 않고 중력식 막여과와 같이 물의 위치수두를 이용하여 역세척을 진행하 며, 파울링에 대한 오염을 늦추고 에너지 소모는 적은 공정을 실험 으로 확인해보고자 한다. 중력식 막여과 운전에 필요한 수위를 분배하여 역세척을 가능하 게 한다면, 기존 중력식 막여과 방식에서 운전되는 저플럭스를 비 교적 높은 플럭스로 유지하고 가동 소요에너지에 많은 부분을 차 지하고 있는 펌프 소요 에너지를 줄여 저에너지 고플럭스 운전을 가능하게 할 수 있을 것이다.

1.3 연구내용

- 본 연구의 목적은 '중력식 막여과 공정의 역세척 효과 확인'으로 세부 연구내용은 다음과 같다.
- (1) 중력식 막여과 공정에서 동일수두 시 여과, 역세플럭스 비교
- (2) 운전 조건에 따른 플럭스 저하속도 및 역세효율 성능 확인

or u

(3) 침지식 화학세정의 세척효과 확인

제2장 문헌연구

2.1 막여과 공정

2.1.1 개요

막여과 정수처리공정 도입이 오래된 미국의 지표수관리법에서 막여과를 아래와 같이 정의하고 있다(한국수자원공사, 2011).

- 마여과는 가압 또는 부압으로 운전되고 1 µm이상의 입자성 물 질은 체거름 효과에 의해 제거되어야 한다.
- 2) 대상 특정물질의 제거효율은 직접적인 안전성 시험을 통해 입증할 수 있어야 한다.

국내 상수도시설기준에 따르면, 막여과란 막을 여재로 하여 물을 통과시켜서 원수 중의 불순물을 분리, 제거하여 깨끗한 여과수를 얻는 방법을 말한다(한국상하수도협회, 2010).

일반적으로 정수처리에 사용되는 막은 공극 크기(pore size)에 따 라 정밀여과(microfiltraion; MF), 한외여과(ultrafiltraion; UF), 나노여 과(nano filtraton; NF), 역삼투(reverse osmosis; RO)로 크게 네 종류 로 분류한다. 그림 2.1은 막 종류별 공극크기와 그에 따른 제거 가능대상 물질을 나타낸다. 여기서, 표 2.1의 제거가능 물질 column은 정밀여과에서 제거 가능한 물질은 한외여과에서 제거 가능하고, 추가로 제거되는 물질을 표기해두었다. 마찬가지로 한 외여과에서 제거 가능한 물질은 NF에서, NF에서 제거 가능한 물 질들은 RO에서 제거 가능하다.



그림 2.1 막여과 종류별 제거능 범위

(한국수자원공사, 2011)

표 2.1 막 종류에 따른 분리경과 제거물질

	GN		UNI
표 2.1 막 종·	류에 따른 ¦	분리경과 제거물	물질
사용막	여과법	분리경	제거 가능 물질
정밀여과막 (MF)	정밀여과법	공칭공경 0.01 μm 이상	부유물질, 콜로이드, 세균, 조류, 바이러스, 크립토스포리디움 난 포낭, 지아디아 난포낭 등
한외여과막 (UF)	한외여과법	분획 분자량 100,000 Dalton이하	부유물질, 콜로이드, 세균, 조류, 바이러스, 크립토스포리디움 난 포낭, 지아디아 난포낭, 부식산 등
나노여과막 (NF)	나노여과법	염화나트륨 제거율 5~93% 미만	유기물, 농약, 맛·냄새물질, 합 성세제, 칼슘이온, 마그네슘이온, 황산이온, 질산성질소 등
역삼투막 (RO)	역삼투법	염화나트륨 제거율 93% 이상	금속이온, 염소이온 등
해수담수화 역삼투막 (해수담수화 RO)	역삼투법	염화나트륨 제거율 99% 이상	해수의 염분

(한국상하수도협회, 2010)

(1) 정밀여과 막

정밀여과(microfiltraion; MF) 막은 체거름 원리에 의해 부유물질 이나 세균, 원충, 바이러스 등을 제거한다. 일반적인 멤브레인 제 조사에서 권장하는 모듈의 한계차압(critical TMP)는 0~200 kPa 정 도의 범위에서 운전이 된다. (Dow, 2006)다른 막에 비해 공극이 크기 때문에 상대적으로 적은 압력으로도 높은 막여과 유속을 가 지고 있다. 그에 따른 막의 내부폐색이 일어날 우려가 크지만 적 절한 공극, 공정 설계 및 운전을 통해 해결될 수 있다. 정밀여과 막은 높은 투과유속, 세척의 용이함, 적용의 유연성 및 경제성 등 다양한 장점을 가지고 있어 적용 분야가 빠르게 확대되고 있다.

(2) 한외여과 막

TIONAL

한외여과(ultrafiltraion; UF) 막은 정밀여과 막과 같은 체거름 원 리에 의해 부유물질이나 세균, 원충, 바이러스, 고분자량 물질 등 을 분자 크기로 분리한다. 한외여과 막은 저분자와 고분자 물질을 분리하기 때문에 수중에 용해된 고분자의 정제나 농축에 이용되 고 있다. 정밀여과과 막보다 더 세밀한 분리능을 가지고 있기에 공극을 µm단위로 표시하지 않고 분획분자량(molecular weight of cut-off; MWCO)으로 나타낸다. 정밀여과보다 더 미세한 공극을 가지고 있어 단백질, 효소와 같은 저분자 물질과 콜로이드성 물질 이나 고분자 물질을 분리할 수 있다. 그러나 염(이온)은 통과한다. 정밀여과 막에 비해 공극이 미세하여 막여과 유속은 감소하고 운전에 소요되는 에너지는 증가하며 제거된 용질의 크기도 감소 한다. 또한 막 표면에 생성된 농도분극층이나 Gel층의 저항이 막 여과 유속에 영향을 미치기 때문에 난류를 발생시키거나 인위적 으로 오염된 층을 제거해 주어야 한다(Flemming and Schaule, 1988). (3) 나노여과 막

나노여과(nanofiltration; NF) 막은 1986년에 상용화되어 주로 계면 활성법에 의한 복합 막으로 폴리아미드(polyamide), 술폰화폴리술폰 (sulfonated polysulfone) 등을 소재로 한 역삼투 막과 한외여과 막의 중간적인 특성을 보인다.

물질의 제거원리는 역삼투와 같이 물과 이온의 속도분리 차이로 이루어지며, 역삼투에 사용되는 막 비해 분획분자량이 크기 때문에 낮은 압력에서도 운전이 가능하다. 나노여과 막은 일부 이온을 저 지하고, 유기물 또한 제거가 가능하다.

나노여과 막은 주로 중·저분자 물질분리, 탈염 및 경수의 연화 등에 사용된다. 나노여과막은 염화나트륨에 대하여 60%(5 bar, 2,000 ppm 용질 기준), 중탄산칼슘은 80%, 황산마그네슘, 글루코스, 수크로스에 대해서는 98%의 제거율을 가진다(Crozes et al., 1993).

(4) 역삼투 막

역삼투(reverse osmosis; RO) 막은 용액과 용매가 격리되어 용매 가 용액 쪽으로 정삼투압 현상을 일으킬 때, 용액 쪽으로 정삼투 압력보다 더 큰 압력을 작용시키는 삼투압 방향의 역방향인 용액 쪽으로 용매가 반투막을 통과하여 용액은 농축되고 용매가 분리되 는 원리이다.

역삼투 막은 초기에는 전기투석법과 함께 해수담수화(탈염)를 목 적으로 사용되었지만 최근엔 담수의 TDS 및 1가 이온의 농도를 낮 추는 용도로도 사용된다(이성우 등, 2003). 또한 초순수 제조나 액 체식품의 탈염 등에도 사용되고 있다.

2.1.2 막여과의 기본 개념

다음은 막여과의 기초에 대해 문헌조사를 실시하였으며, 막여과 의 기본적 매커니즘과 여과방식에 따라 다음과 같이 정리했다.

(1) 막여과 원리

막여과는 정밀여과와 한외여과같은 저압 막여과와 나노여과, 역 삼투와 같은 고압 막여과 방식이 있고 이 둘의 물질 제거원리는 차이가 있다.

주로 저압 막여과는 공극 크기에 의한 체거름을 통해 현탁물 및 불용해성 물질들을 제거하고 공극보다 작은 물질은 통과하는 원리 이다.



그림 2.2 저압 막여과 물질 제거 원리

이와 다르게 고압 막여과는 물과 이온의 속도분리 차이를 이용 하여 물을 이온보다 많이 투과시키는 막여과 방법이다.





그림 2.3 고압 막여과물질 제거 원리

(2) 막여과 방식에 따른 분류

막 여과는 운영방식에 따라 가압식과 침지식, 정압 운전과 정유 량 운전과 같은 기준으로 나누어진다.

- 가압식과 침지식

가압식 막모듈은 원수 측에 압력을 형성해 여과수를 생산하는 공정으로 원수를 막에 공급하는 방향에 따라 크게 전량여과 (dead-end)방식과 순환여과(cross-flow)방식으로 나뉘게 된다.

전량여과의 경우 막의 방향에 수직으로 원수를 공급하여, 유입되는 원수에서 제거 대상 물질을 제외하고 전부 여과시키는 방법을 말한다. 주로 저압 막여과 공정인 정밀여과나 한외여과에 사용된다.

순환여과의 경우에는 원수를 막 면과 평행하게 흐르게 하여 일 부분만 투과하도록 운전하는 방식이다. 앞서 설명한 전량여과보다 플럭스의 저하가 적다는 장점이 있지만 높은 여과수량을 유지하기 위해 동력비가 많이 드는 단점이 있다. 다음 그림 2.4는 전량여과 와 순환여과의 모식도이다.





침지식의 경우 원수가 들어있는 탱크에 막을 침지한 상태로 막여 과를 진행하는 방법으로 아래 그림 2.5와 같은 방식으로 운전된다.



그림 2.5 침지식 막여과 공정

(Abdel-Kader et al., 2007)

- 정압 운전과 정유량 운전

막여과 공정의 운전은 통상 정유량 운전과 정압 운전으로 나뉜다. 막여과는 여과시간이 경과함에 따라 TMP가 서서히 증가되어 여과 유량이 줄어든다. 정압 운전은 원수에 가하는 압력을 일정하게 유지 하는 운전으로 파울링이 발생함에 따라 유량이 서서히 감소하게 된 다. 반면에, 정유량 운전은 여과수량을 일정하게 유지하기 위해서 원수펌프의 회전수를 제어하거나 배관에 유량 조절 밸브를 통해 제 어하여 막에 걸리는 압력을 증가시키는 방법이 있다.

정유량 운전에는 공급펌프에 인버터(펌프의 회전수 조절장치)를 추가로 부착하여 생산수 유량계와 연동시켜 유량이 줄어들면 회전 수를 높이는 운전 방식이 있고, 다른 하나는 공급펌프 측 후단에 유량 조절 밸브를 부착하여 생산수 유량계와 연동시키는 밸브 제 어 방식이 있다. 전자의 경우, 인버터의 비용으로 인해 건설비가 높아지게 되나, 회전수 제어를 통해 전력비가 절감되는 장점이 있 다. 후자의 경우, 유량 조절 밸브의 비용은 낮으나, 저압으로 운전 해도 충분히 목표 수량 생산이 가능할 때에도 펌프의 회전수는 일 정하기 때문에 전력비가 높다는 단점이 있다.

(3) 막모듈의 종류

실제 막여과 공정에 적용될 때에는 여러 개의 막을 모듈에 넣어 일체화시켜 사용한다. 막의 형태와 배열에 따라 평막형, 관상형, 중 공사형, 와권형 등으로 분류된다.

- 평막형(plate) 막모듈

평막형 막모듈은 막분리 공정에 가장 먼저 사용되었으며 구조가 간단하고, 다양한 분야에 사용되고 있지만 초기 시설비가 많이 드 는 단점이 있다. - 관상형(Tubular) 막모듈

관상형 막모듈은 주로 원형의 케이싱에 여러 개의 원통형 element막을 충진 시킨 형태이다. 원수가 지나가는 유로가 넓게 확 보되어 있어 고 탁질 원수의 처리에 적합하지만 원수를 높은 유속 으로 공급해야 하므로 운전비용이 증가하는 단점이 있다.

- 중공사형(hollow fiber) 막모듈

속이 비어있는 실 모양의 막 다발의 양쪽을 지지체에 고정시켜 만든 것으로 막의 충진 밀도가 높고 내압식과 외압식 두 가지 방 법으로 이용할 수 있다. 그러나 내압식의 경우에는 유로가 좁아 폐 색이 잦아 질 수 있어 고탁도의 원수에는 적합하지 않다.

중공사형 막모듈은 주로 정밀여과나 한외여과와 같은 저압 막여 과에서 사용되며, 본 연구에서 사용한 모듈도 중공사형 모듈이며 형태는 다음 그림 2.6과 같다.



그림 2.6 중공사 막모듈의 형태

(김경호, 2016)

(4) 막여과 유속

막여과 유속은 통칭 플럭스(flux)라고도 하며 단위시간당 단위 막 면적을 통과하는 수량으로 m³/m²·day, m/d, L/m²·h(LMH)와 같은 세 방법으로 나타낸다. 일반적인 저압 막여과 공정의 경우 0.5 ~ 1.0 m/d 정도를 목표로 한다. 플럭스는 막의 형태, 재질, 종류, 여과방 식, 수온 등에 따라 동일한 막차압이라도 플럭스는 달라진다. 저압 막여과와 고압 막여과에서 사용되는 플럭스 식은 물질의 제거 방 식에 차이가 있기에 계산식에 차이점이 있다. 먼저 저압용 막여과 는 식 (2.1)을 사용한다(Field et al., 1995).

$$J = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_f)}$$

(2.1)

여기서, *J*는 플릭스(m/d), *ΔP*는 막차압(Pa), μ는 물의 동점성계 수(Pa·s), *R_m*은 막 고유의 저항(m⁻¹), *R_f*는 막의 오염(fouling)에 의 한 저항(m⁻¹)이다.

고압 막여과에서 사용되는 플럭스에 대한 식은 저압용 막여과 식에서 삼투압을 나타내는 항이 추가된 다음 식 (2.2)를 사용한다.

$$J = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu (R_m + R_f)} \tag{2.2}$$

여기서, Δπ는 삼투압(Pa)이다.

(5) 막차압

막차압(trans membrane pressure; TMP)은 막을 기준으로 유입수와 생 산수의 압력 차이를 나타내는 것으로 막오염을 판단하고 막여과 시설 을 운영하는 데에 있어 중요한 지표가 된다. TMP는 여과방식(가압식/ 침지식, 전량여과/순환여과)에 따라 계산 방식에는 차이가 있으며, 그 림 2.7은 막여과 방식에 따른 차압 계산방법을 나타낸다.



(6) 온도보정차압

TMP는 플럭스가 동일한 경우, 수온에 대한 변화가 심하므로 25[®] 를 기준으로 보정차압으로 계산한다. 원수 수온이 낮은 경우 물의 점성증가로 인해 동점성계수가 커지게 되고 TMP이 상승한다, 예를 들어 일반적인 유기막 기준으로 수온이 25[®]에서 5[®]로 내려가면, 동 일압력에서 여과수량이 60%까지 저하된다. 보정차압을 구하는 계 산식은 아래 식 (2.3)과 같다(김민재 등, 2016).

$$\Delta P_{T=25^{\circ}C} = \Delta P \times \frac{\mu_{25}}{\mu_T} \tag{2.3}$$

여기서, ΔP는 앞서 언급한 것과 같이 TMP이고, μ는 온도(K)일 때의 물의 동점성계수이며, ΔP_{T=25℃}는 25℃의 수온으로 보정된 TMP이다. 이 때, 물의 동점성계수 μ는 아래 식 (2.4)를 통해 계산 된다.

$$\mu = A \exp\left[\frac{(1+B \cdot T)}{(C \cdot T+D \cdot T^2)}\right]$$
(2.4)

T는 절대온도(K)이고, 대괄호 안의 변수 A는 1.26×10⁻², B는 -5.81× 10⁻³, C는 1.13×10⁻³, D는 -5.72×10⁻7이다.

본 연구에서는 수두가 일정한 상태에서 실험을 진행하기 때문에 온도 보정 시 TMP를 보정하지 않고, 아래 식 (2.5)와 같이 플럭스 를 보정하였다.

$$J_{T=25\,\rm{°C}} = J \times \frac{\mu_{25}}{\mu_T} \tag{2.5}$$

2.1.3 파울링

모든 막여과 공정에서 경제성을 좌우하는 가장 큰 변수는 막 오 염에 의한 플럭스(flux)저하이다. 막여과 공정에서 경제적 측면의 장점을 가지기 위해서는 높은 플럭스는 꼭 필요하다. 파울링(fouling)이란 원수 내 이물질이 막의 표면이나 내부 공극에 부착되어 막 이 본래의 기능을 다하지 못하도록 억제하는 현상이라 정의할 수 있다(Belfort et al., 1994).

막 오염은 그림 2.8처럼 입자와 막의 공극 크기에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있다(Cha et al., 2012).



그림 2.8 막 오염 개념도 (Cha et al., 2012)

(1) 공극 축소(pore constriction): 막 공극의 지름보다 작은 입경의 입자가 공극 내부에 흡착되어 공극의 크기가 축소되는 현상이 다. 이 흡착 정도에 따라 공극이 완전히 막혀버리게 되는 경우 도 발생하게 된다.

- (2) 공극 막힘(pore blocking): 막 공극의 지름과 거의 동일한 입경의 입자가 공극을 완전히 막아버리는 현상을 말한다.
- (3) 케이크층 형성(cake layer formation): 막 공극의 지름보다 큰 입자 들이 원수 측 막 표면에 쌓이면서 폐색된 공극 위에 여러 입자들 이 계속 층이 형성되는 것으로, 이것을 케이크 층이라고 한다.

세 가지 파울링 현상 중, 공극 축소나 막힘 현상과 같이 입자가 공 극 안으로 침투하는 경우에 막의 회복이 매우 어려울 가능성이 있다. 회복이 불가능한 파울링은 비가역적 파울링이라고 하며, 이와 반대로 역세척으로 회복이 가능한 파울링을 가역적 파울링이라고 한다.

일반적으로 케이크 층은 원수를 급수하는 과정이나 막 세척에 의 해 파울링이 제거되어 막 성능 회복이 가능하기 때문에 가역적 파울 링에 속한다. 하여, 막의 공극 크기를 선정할 때에는 원수 내에 존재 하는 입자의 크기보다 작은 공극 크기를 결정하는 것이 처리 효율과 함께 비가역적인 파울링을 막기 위해서도 매우 중요하다. 이 점을 확 인하기 위해서 실제로 정수 공정에 정밀여과와 한외여과를 적용한 연구 결과가 있다(Rajesha, K. and Ismail, A. F., 2015). 운전 초에는 정밀여과 막이 여과플럭스가 높아 생산수를 많이 확보할 수 있으나, 막의 공극 내에 흡착된 입자들에 의해 급격히 플럭스가 저하되는 결 과를 보였다. 정밀여과 막보다 막 공극이 작은 한외여과 막에서는 초 기 여과플럭스는 낮았지만 막 오염의 진행속도가 느렸다. 따라서 장 기적으로 보자면 플럭스 측면에서 한외여과가 더 나은 결과를 보인 다. 따라서 원수를 구성하는 물질들이 막의 공극보다 작으면 파울링 의 진행속도를 지연시킬 수 있으며, 비가역적 파울링이 발생하는 것 도 억제가 가능하다. 한편으로 케이크 층은 laver 그 상태만으로 하나 의 막이 되어 유기물을 걸러내는 filter 역할을 할 수도 있다.

파울링에 대처하기 위한 방안으로는 막에 도달하기 전에 파울링 을 유발하는 물질을 막에 공급하기 전에 미리 제거하는 전처리 과 정을 실시하거나 파울링이 발생했을 때 물리적 또는 화학적으로 세척하여 주는 것이다.

(1) 전처리

앞서 언급한 바와 같이 전처리 공정은 막모듈에 원수를 공급하 기 전에 원수내의 파울링 유발 물질들을 처리하는 과정을 말한다.

모든 막여과 공정에서 유지관리나 경제적인 측면을 생각하면 전 처리과정은 필수적이다. 정수처리 용도로 사용되는 정밀여과 막, 한외여과 막으로 생산된 여과수가 먹는 물 수질기준에 만족하지 못하는 경우에는 전처리 과정이 도입되거나 다른 처리법과의 조합 공정이 추가적으로 요구된다. 특히, 무기물 중에서도 파울링을 발 생시키는 원인 물질 중 하나인 망간은 용존된 이온 상태일 때는 문제가 되지 않으나 자연적 또는 여과과정에서 산화되고 석출되어 막의 공극을 막는 등의 비가역적 파울링을 유발하는 원인이 되기 도 한다(Oh, 2007; Chang et al., 1998; Lee et al., 2002; Al-Malack and Anderson, 1996).

표 2.2 제거물질별 전처리방안

제거물질	전처리방안
용해성 무기물	이온교환(연수), 불용화(약품첨가, pH조정), 흡착제(Mn 등) 이온봉쇄제, 킬레이트제, pH조정 등에 의한 가용화
용해성 저분자 유기물	흡착제(이온교환수지, 활성탄 등), 산화제(오존, 염소 등), 생물처리, pH 조정(가용화)
용해성 고분자 유기물	염소/불용화(약품, pH, 가열), 막분리, 산화제, 염소/생물처 리 가용화 또는 불용화(약품, pH, 가열)
에멀젼/유지	유상분리, 원심분리, oil separator, 계면활성제, 상평형의 변 화
현탁물질/침전물	스크린, prefilter, 원심분리, 응집침전, 사여과, 규조토여과응 집, body feeder
미생물	필터, 산화제(염소 등), 살균(약품, 가열, 자외선), 응집여과 응집, body feeder

(WHO, 1993)

(2) 화학세척

막의 세척방법은 물리세척과 화학세척이 있다. 물리세척은 가압 식 정밀여과 막이나 한외여과 막을 사용한 막여과 공정에서 이루 어진다. 물리세척은 원수가 막을 거쳐 생산된 여과수를 여과되는 방향과 반대로 압을 가하여 생산수가 막을 거쳐 막의 표면 또는 내부에 흡착된 물질을 원수 측으로 빼주는 역할을 한다. 물리세척 은 일정 여과시간마다 바로 진행되어 파울링의 진행속도를 지연시 키는 효과를 볼 수 있다. 그리고 화학세척은 물리세척으로는 더 이 상 회복이 불가능한 오염 즉, 비가역적 파울링이 발생한 경우 실시 하게 된다. 화학세척은 막 표면 또는 공극 내부에 흡착되어 있는 무기물 및 유기물을 화학적인 방법으로 용존시켜 빼내거나 제거하 는 과정이다. 특히 철이나 망간과 같은 용존성 물질이 막 공극 내 부에서 산화, 석출되어 흡착된 경우라면 물리세척으로 제거가 힘들 기에 화학세척을 통해 제거한다. 화학세척은 또한 산세척과 염기세 척으로 나뉘게 되며, 산세척의 경우 구연산(C₆H₈O₇), 황산(HCl)을 사용하고, 염기세척의 경우 수산화나트륨(NaOH)이나 차아염소산나 트륨(NaOCl) 등을 사용한다.

대약교

2.2.1 중력식 막여과

중력식 막여과(gravity-driven membrane; GDM)란 저압 막여과 공 정에서 사용되는 가압식 중공사형 막모듈에 펌프로 구동력을 형성 하지 않고 물의 자연수두를 이용하여 여과하는 방식을 말한다.

2.2.2 GDM의 선행 연구 사례

중력식 막여과의 가장 큰 특징은 막여과 운전 시에 거의 필수적으 로 소요되는 동력 공급 펌프에 필요한 전기에너지를 사용하지 않는다 는 것에 있다. 또한 역세척을 실시하지 않으며, 그에 따라 플럭스가 빠른 속도로 저하된다. 하지만 어느 정도 여과플럭스가 저하되면 여 과플럭스가 안정화되어 낮은 플럭스의 상태로 여과가 진행된다. Peter-Varbanets (2011)가 연구한 그림 2.9는 역세척을 없이 운전된 중 력식 막여과의 플럭스 저하를 나타낸다.



그림 2.9 중력식 막여과 운전

(Peter-Varbanets et al., 2011)

위 그림 2.6과 같이 중력식 막여과 방식으로 운전을 하였을 때, 여과플럭스는 30일의 운전기간 중 2~3일 이내로 크게 저하되는 것 을 확인할 수 있다.

그러나 달리 생각해보면 중력식 막여과 방식에서 플럭스가 아무 리 감소되더라도 여과수두를 증대하여 운전하면 여과플럭스가 상 대적으로 줄어들지만 비교적 높은 플럭스를 유지할 수 있지 않을 까라는 의문이 들 수 있다. 그러나 초기 TMP를 높이고 높은 플럭 스에서 운전을 시작하더라도 플럭스가 안정화되는 정도는 거의 같 은 것을 확인할 수 있다(Peter-Varbanets et al., 2011).



그림 2.10 초기 TMP별 플럭스 감소 (Peter-Varbanets et al., 2011)

중력식 막여과는 동력식 막여과에서 진행되는 물리적 역세척을 진 행하지 않기 때문에 여과플럭스가 상대적으로 낮게 유지될 수밖에 없다. 일정 여과시간마다 주기적인 물리적 세척을 진행하지 않으면 여과플럭스는 저하되다가 일정하게 유지된다(Frechen et al., 2011).



그림 2.11 장기 운전 플럭스 결과

(Frechen et al., 2011)

위 그림 2.11과 같이 중력식 막여과 공정을 적용하여 운전을 진행하 면 빠른 시일 안에 여과플럭스가 저하되고 어떤 특정 여과플럭스로 안 정된다. 화학세척을 통해 막의 비가역적 파울링으로 인한 케이크 층을 제거하여 여과플럭스를 회복하더라도 다시 운전이 시작되면 여과플럭 스는 동일한 플럭스로 저하되어 유지되는 것을 확인할 수 있다.

따라서 위와 같은 중력식 막여과 공정의 안정화된 여과플럭스로 운전 을 진행한다고 가정하였을 때 동력식 막여과 공정과 같이 단위시간당 생 산수량을 같게 하려면 필수적으로 막 면적이 추가될 수밖에 없다. 예컨 대, 그림 2.11을 기준으로 초기 플럭스가 25 LMH로 운전될 때, 동력식 막여과 방식으로 정유량 운전을 진행하면 펌프의 회전수가 올라가더라도 플럭스는 25 LMH 부근으로 운전이 된다. 하지만 기존의 중력식 막여과 는 펌프의 에너지를 사용하지 않는 대신 약 5 LMH의 플럭스로 여과가 진행되기 때문에 단순히 산출을 해도 동력식 막여과 대비 막 소요면적이 5배 이상 필요하다는 것을 확인할 수 있다. 중력식 막여과 방식으로 운전하면 파울링을 지연시키지 못해 케 이크 층이 빠르게 형성되지만 바이오 파울링으로 인한 케이크 층 이 층적됨에 따라 유기물과 무기물인 철 망간 등도 제거할 수도 있다. 특히 중력식 막여과에서 바이오 파울링 층은 필수불가결한 것으로 일반적인 중력식 막여과를 연구하는 학자들은 이 케이크 층에서 제거되는 유기물의 제거율에 관심을 가지고 연구한 자료들 이 많다. 또한 이런 바이오 파울링 층을 바이오 필름이라고도 한다 (Tang et al., 2020).

Akhondi et al. (2015)의 연구에 따르면 온도나 여과압력이 다른 조건을 형성해 중력식 막여과를 진행하고 그에 따른 바이오 필름 에 대한 연구를 진행했다. Optical coherence tomography과 confocal laser scanning microscopy를 통해 시간이 지남에 따라 바이오 필름 의 두께의 증가와 다양한 바이오 필름의 구조가 관찰되었다.



그림 2.12 운전조건에 따른 멤브레인의 바이오 필름 (Akhondi et al., 2015)

결론적으로 바이오 필름의 두께와 구조는 여과플럭스에 대한 복 합적인 효과와 관련이 있다. 바이오 필름 구조의 변화는 아래 (1)~(3)과 같은 원인으로 변화한다는 것을 확인할 수 있다(Akhondi et al., 2015; Wu et al., 2016).

- (1) 바이오 필름으로 인해 이질적인 성질을 증가시킨 진핵생물의이동과 포식 행동
- (2) 다공성을 감소시킨 진핵생물 포식 활동에 의해 생성된 박테리아 파편
- (3) 지배적인 박테리아 종의 이동에 영향

또한 바이오 필름으로 인한 유기물의 제거는 중력식 막여과 운 전 초기와 운전이 지속되어 바이오 필름을 형성했을 때의 원수와 생산수를 동화성 유기탄소(AOC)와 바이오 폴리머와 같은 유기탄소 같은 물질의 함량으로 분석하여 제거율을 확인하였다(Derlon et al., 2014). 아래 그림 2.13과 그림 2.14는 그 실험에 대한 결과이다.



그림 2.13 AOC 농도 변화 (Derlon et al., 2014)



그림 2.14 Biopolymer 농도 변화

(Derlon et al., 2014)

초기 한외여과 막은 AOC 및 바이오 폴리머의 제거율 10%이내 라는 것을 보여준다. 한외여과 막 표면에 작고 얇은 바이오 필름이 존재하면 AOC(>80%)의 분해로 여과품질이 높아진다. 그러나 장기 간에 걸쳐 바이오 필름이 누적되면 막 표면에 축적된 유기물의 가 수분해로 인해 생산수의 AOC 함량을 증가하여 여과품질을 저하시 킨다. 플럭스는 평균 7.5-8.9 LMH로 안정화된다. 따라서 막 표면에 바이오 필름이 존재한다는 것이 여과수의 양이 줄어들더라도 여과 품질에 유익한 영향을 미치는 것은 맞으나 전처리를 적절히 제어 하는 것이 필요하다는 것을 시사한다(Derlon et al. 2012; Fortunato et al. 2016; Wang et al., 2017).

다른 연구사례를 보면 빗물을 원수로 사용하여 중력식 막여과 운전을 진행할 때 2개월을 운전하면서 저장된 빗물 처리를 위한 랩스케일 규모의 중력식 막여과 시스템을 구축하여, 저장된 수돗물 과 비교하여 투과성과 유기물 제거 성능을 평가한 연구 사례가 있 다. 그 결과 중력식 막여과는 박테리아와 탁도 제거에 좋은 성능을 보였지만, DOC의 제거 성능은 저분자량 풀빅의 거부반응이 낮아 바람직하지 않았다(Ding et al., 2017).
선행연구 결과와 같이 바이오 필름 층이 탁도와 박테리아, 유기 탄소 등의 제거 성능에 효과가 있긴 하지만 과도한 바이오 필름 층은 오히려 유기 탄소 제거에 도움이 되지 않아 적절한 제어가 필요하다는 것을 알 수 있다.



제3장 연구방법

3.1. 연구 개요

본 연구의 목적은 여과에 필요한 가용수두를 나누어 역세척을 실시하여 기존의 중력식 막여과보다 여과플럭스를 높여서 운전을 가능하게 하고 펌프를 사용하는 동력식 막여과보다 에너지 소모는 감소시키는 것이다. 개념도는 다음 그림 3.1과 같다.



그림 3.1 무동력 역세척이 가능한 중력식 막여과 여과/역세개념도

기본 개념은 수두의 구배가 있는 점을 활용하여 여과뿐만 아니 라 역세척 또한 진행하여 운전하면 파울링을 지연시켜 플럭스를 유지할 수 있다는 것을 확인하는 것으로 이러한 목표를 위하여 아 래와 같은 실험을 진행하였다.

- (1) 동일한 수두일 때 여과플럭스와 역세플럭스가 동일한 것을 확 인하기 위해 실험을 진행하였다.
- (2) 중력식 무동력 역세척 운전이 기존 중력식 막여과에 비해 높은 플럭스를 유지할 수 있는지 확인하기 위해 장기 실험을 진행하 였다.

3.2.1 실험 장치 구축

(1) 막모듈

실험에 사용된 막은 2가지로 다우社의 DMS-1(이하"다우 막")과 코오롱인더스트리社의 Cleanfil®-S20H(이하"코오롱 막")을 사용하였 고 두 막은 아래 그림 3.2와 같다, 상세한 막 사양은 다음 표와 같이 정리하였다.



¹⁾hollow fiber ²⁾polyvinylidene fluoride

다우 막모듈의 경우 모듈의 막 면적이 크기 때문에, 오랜 기간 실험이 불가하다. 따라서 코오롱 막을 미니 막모듈로 제작하여 실험을 진행하였 다. 미니 막모듈 제작방법은 다음 그림 3.4와 같은 과정으로 제작하였다.



2

원수 유입과 배수를 위 한 피팅을 체결한다.



י דו א

다시 실리콘 튜브를 피팅 반대편에 삽입하고, Vent 역할의 피팅을 삽입한다. 반대편 튀어나온 쪽에 다시 실리콘 튜브를 끼우고, 에폭시를 주입한다. 단, 막의 끝이 에폭시에 잠기지 않고 실리콘 튜브에 나오 게 제작한다.



(2) 무동력 역세척이 가능한 중력식 막여과 랩스케일 장치

다음 그림 3.4와 같이 중력식 막여과 장치를 구축하였다. 실험실 내에 설치하여 최대로 확보한 수두는 2.2 m로, 원수 탱크 및 역세수 탱크는 상단부에 있고 막모듈을 상하로 이동시켜 수두를 조절할 수 있도록 만들었으며, 그 간격은 0.25 m로 설치하였다. 장기실험을 위 한 설비는 따로 다음 3.2.3절에서 설명한다.



(3) 원수

실험에 사용된 원수는 총 3가지로 동일수두에서의 여과, 역세플릭 스를 확인하기 위한 실험에서는 수돗물로 실험을 진행하였다. 투수 율을 확인하기 위한 실험 진행시에는 원수로 파울링이 일어나지 않 는 초순수를 사용하는 것이 좋다. 그러나 수돗물의 탁도가 0 NTU이 기에, 투수에 큰 영향을 미치지 않고, 수돗물 내의 TOC의 경우 2.10±0.21 ppm이긴 하나, 정밀여과 막에서 거의 여과가 되지 않고 단 기간 실험 진행시 영향이 적기 때문에 수돗물로 실험을 진행해도 문 제가 없다고 판단하였다. 장기실험을 위한 원수로는 파울링을 가속화하기 위해 수질이 비교 적 나쁜 수질의 낙동강 지류의 맥도강 하천수와 하천수와 비교하기 위한 덕산정수장의 침전수를 사용하였다. 맥도강 하천수의 수질은 탁도 2-10 NTU, TOC 4.1±0.3 ppm이고, 정수장 침전수의 경우 탁도 0.5-1.5 NTU, TOC 2.0±0.2 ppm으로 측정되었다.

(4) 측정장비

- 전자저울

유량 측정을 위해서는 유량센서를 통해 측정하는 것이 효율적이 나, 미니 막모듈의 경우 여과되는 수량이 분당 1-15 g정도로 극히 미 량이기 때문에 분당 생산수의 무게를 측정하여 아래 식 3.1과 같이 환산하여 플럭스 J를 측정하였다.

$$J = mL/\min = \frac{60 \times mL}{1000 \times Area_m \times \min} = L/m^2 hour \quad (3.1)$$

사용된 저울은 AND社의 FX-5000i를 사용하여 측정하였다. 저울 의 측정가능 무게는 최대 5.2 kg까지이며, 0.01 g간격으로 측정가능 하다.



그림 3.5 전자저울

- 수온 측정기

실험 진행시 원수 및 생산수의 수온을 측정하기 위하여 Summit社 의 SDT25를 사용하였다. 측정범위는 -50-1000℃이고, 0.1℃간격으로 측 정가능하며, 정확도 ±0.5% 수준이다.



그림 3.6 수온측정기

- 휴대용 탁도계

원수의 초기 탁도와 여과후 생산수 탁도를 확인하기 위하여 HF scientific社의 MICROTPW를 사용하여 측정하였다. 측정범위는 0-1100 NTU이며 0.01 NTU 간격으로 측정가능하다.



그림 3.7 휴대용 탁도계

- 총유기탄소(TOC) 측정장치

원수의 총유기탄소를 측정하기 위해 Teledyne tekmar社의 Torch를 사용하여 측정하였다. 측정범위는 0.5-30,000 ppm이고, 정확도는 1.5%±0.05 ppm 수준이다.



- (5) 무인 장기 운전을 위한 랩스케일 장치 자동화무인장기 운전을 위해서는 다음과 같은 3가지 문제가 있었다.
 - 유량을 실시간으로 측정할 수 있어야 사이클마다 역세척 전과
 후의 플럭스 차이를 비교할 수 있다.
 - 사이클에서 밸브를 사이클(여과, 역세, 배수, 급수의 전환)마다
 사람이 수동으로 전환시켜 주어야 한다.

3) 여과를 지속함에 따른 원수 탱크의 수위가 계속 하락하기 때 문에 파울링에 의한 플럭스 저하인지 아니면 여과수두가 하락 하여 플럭스가 저하되는지 판별하기 어렵기 때문에 일정하게 원수 탱크의 수두를 유지시켜 주어야한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 몇 가지 개선을 통해 장기운전이 가능하도록 장치를 수정하였다. 전체적인 자동화 운전 설비의 모식도 는 다음 그림 3.9와 같고, 최종적으로 그림 3.10과 같이 구축하였다.



그림 3.9 자동화 장치 개념 모식도



여기서 (1)은 원수 탱크, (2)는 막모듈, (3)은 역세탱크이다.

- 실시간 생산수량 측정

실시간으로 유량을 측정하기 위해 지정시간 간격마다 생산수의 무 게를 측정하여 플럭스로 변경하였다. 노트북과 저울을 RS-232 방식 으로 연결한 뒤, AND社에서 제공되는 프로그램을 사용하여 1분마다 누적무게를 측정하였다. 누적무게를 1분당 수량으로 환산하고, 앞서 말한 여과, 역세플럭스를 비교할 때와 마찬가지로 여과플럭스를 산 출하였다.

	A&D	Company,Limited
RS232C Port :	COM5 -	Wanual/Repeat
Baud Rate	2400 -	Data Format
Parity	. E 💌	Command TPU T Beep
Length	7 💌	Received Data
Stop Bit Terminator	CR/LF •	Command Data
Clear	Save	Printer Start End

그림 3.11 전자저울 데이터 자동 수집 프로그램

AIIONA

- 자동밸브를 통한 사이클 변경

3.2.3절 2)에 언급한 것과 같이 사이클 별로 밸브의 조작을 자동으 로 진행하기 위해 라즈베리파이와 솔레노이드 밸브를 이용하여 자동 제어를 가능하게 하였다. 사이클 내 전환되는 과정은 여과, 역세-배 수-급수 순으로 각각의 시간은 여과(28분), 역세(30초 또는 90초), 배 수(21초), 급수(9초)이며 모든 장기 실험은 여과가 28초로 같고, 역세 수두에 따른 시간 분배 차이로 역세시간은 30초와 90초로 진행되었 다. 역세척을 30초로 진행한 실험의 경우, 90초로 실험을 진행한 실 험에 비해 1분이 잉여시간으로 남게 되는데, 정확한 비교를 위해 30 초, 역세실험에서는 잉여 1분을 아무런 흐름이 없도록 하였다. 배수 시간에는 배수가 진행될 때 배수과정 시작 후 12초 동안에는 원수공 급펌프를 통해 원수 탱크의 수위를 일정하게 조절할 수 있도록 하였 고, 원수 탱크의 기준 보다 수위가 높아질 경우를 대비하여 원수 탱 크의 기준선에 넘치는 수량은 다시 밑으로 돌아올 수 있도록 Overflow될 수 있는 배관을 설치하여 일정하게 수위의 조절이 가능 하게 하였다. 급수시간은 모듈 내 공기를 제거하기 위해 아래쪽 배수 측 밸브를 열어둔 상태(3초)로 유지했다가 닫은 뒤에 벤트로 공기가 다 나올 수 있도록 코딩을 진행했다.

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time
import datetime
relay1=19 # 원수 밸브
relay2=26 # 역세 밸브
relay3=13 # 배수 밸브
relay4=6 # 벤트 밸브
relay5=21 # 생산수 밸브
relay6=5 # 원수 공급펌프
```

while True:

s=datetime.datetime.now()
GPI0.setmode(GPI0.BCM)
GPI0.setwarnings(False)
GPI0.setup(relay1,GPI0.OUT)
GPI0.setup(relay2,GPI0.OUT)
GPI0.setup(relay3,GPI0.OUT)
GPI0.setup(relay4,GPI0.OUT)
GPI0.setup(relay5,GPI0.OUT)
GPI0.setup(relay6,GPI0.OUT)
print (Start)

```
GPI0.output(relay1,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay2,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay3,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay4,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay5,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay6,GPI0.HIGH)
```

```
time.sleep(60)
print (wating)
```

GPI0.output(relay1,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay2,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay3,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay4,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay5,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay6,GPI0.HIGH)
time.sleep(30)

GPI0.output(relay1,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay2,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay3,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay4,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay5,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay6,GPI0.LOW)
time.sleep(12)

GPI0.output(relay1,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay2,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay3,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay4,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay5,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay6,GPI0.HIGH)
time.sleep(9)

GPI0.output(relay1,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay2,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay3,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay4,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay5,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay6,GPI0.HIGH)
time.sleep(3)

GPI0.output(relay1,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay2,GPI0.HIGH)

```
GPI0.output(relay3,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay4,GPI0.LOW)
GPI0.output(relay5,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay6,GPI0.HIGH)
time.sleep(6)
```

GPI0.output(relay1,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay2,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay3,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay4,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay5,GPI0.HIGH)
GPI0.output(relay6,GPI0.HIGH)
time.sleep(1680)

코드를 실행하고 그에 대한 일련의 과정은 아래 그림 3.12처럼 진 행되고 코드가 다 실행되더라도 While True의 함수에 의해 실험자 가 중단하지 않는 한 계속 사이클이 순환하도록 코딩을 하였다.



그림 3.12 과정별 밸브 조작 개념도

랩스케일 실험에서는 부득이하게 생산수의 무게를 소량으로 측정 할 수밖에 없고, 그와 동시에 같은 탱크에서 역세를 진행하기 때문에 사이클 내의 여과와 역세 및 원수 공급펌프의 진동만으로도 발생하는 이레귤러가 크기 때문에 생산수의 측정에 어려움이 있었다. 때문에 생산수 측에 하나는 역세만을 위한 역세수 탱크와 생산수가 배관을 통해 바로 저울로 측정이 가능하도록 하여 현장에서 필요한 밸브 4개 보다 1개가 추가되어 총 5개의 밸브를 사용하여 실험을 진행하였다.

사용된 라즈베리파이는 라즈베리파이 모델 3B+를 사용하였고, 솔 레노이드 밸브는 Parker社의 직경 3/8 inch의 N.O.밸브 2개, N.C.밸 브 2개를 사용하였다. 구동방법은 다음 그림 3.13과 같다.

솔레노이드 밸브의 경우 사용전압이 220 V이고, 라즈베리파이에 서는 출력전압이 5 V이기 때문에 필수적으로 릴레이라는 장치를 추 가하여야 한다. 릴레이는 일종의 스위치로, 일반 220 V 콘센트와 밸 브를 교차연결하고, 라즈베리파이에서 전기신호로 릴레이를 on/off를 하면 220 V가 밸브에 연결되는 원리이다.

라즈베리파이		실레이	17
	N A	Stor O	외부 220 V
A ton Bar	코딩에 따른	and the second	ON/OFF 명령에
	신호전달		따른 전압공급
		솔레노	드이드 밸브 矣

그림 3.13 솔레노이드 밸브 구동방법

- 원수 탱크 수위 조절을 위한 원수 자동 공급

랩스케일 장치의 경우 수두가 일정한 정압운전으로 여과가 진행되 어 원수 탱크의 수위가 낮아지면 압력도 낮아져 플럭스가 떨어지게 된다. 수두하강에 따른 플럭스 저하를 최소화하기 위해 사이클마다 원수공급 펌프를 사용하여 원수 수위를 조절하였다.

장기 실험 전 동일한 수두라면 여과, 역세플럭스가 같다는 것을 확 인하기 위해 랩스케일 장치에서 다우 막과 코오롱 막을 이용하여 수 두별로 실험을 진행하였다.

3.2.2 실험 방법

(1) 여과, 역세플럭스 비교

자연수두 0.5 m에서 2 m까지 0.25 m 씩 수두를 이동해가며 여과와 역세플럭스를 비교하였다. 1분 동안 여과와 역세진행시 발생하는 수량 을 플럭스로 환산하여 계산한다. 플럭스 환산 방법은 수두별로 1분 동 안 여과와 역세척 되는 수량을 식 3.1을 이용하여 플럭스로 환산하였으 며, 그 플럭스를 식 2.5를 통해 25도로 온도 보정 후 비교하였다.

TIONAT

막 제조사가 권장하는 MF 막의 일반적인 최대 TMP의 경우 200 kPa인 반면, 랩스케일 장치에서 얻을 수 있는 최대 수두는 2 m로, 압 력으로 환산하면 20 kPa정도이다. 때문에 펌프와 자연수두가 같은 압력일 때 동일한 플럭스가 나오는 것을 확인하고, 랩스케일에서 자 연수두로 진행할 수 있는 실험은 자연수두로 진행하고, 그 이상의 범 위의 압력은 펌프를 이용하여 조건을 형성해 실험을 실시한다.

다우 막의 경우 모듈의 케이싱이 200 kPa까지 견디게 제작되어 펌프를 이용하여 실험을 진행할 수 있었으나, 코오롱 막의 경우 미니 막모듈로 제작되어 다우 막모듈과 다르게 내구성이 떨어져 펌프를 이용한 실험이 불가하여 자연수두만으로 실험을 진행하였다.

(2) 장기실험을 통한 역세효율 분석

기존 중력식 막여과 공정보다 플럭스 저하가 덜 진행되는 것을 비 교하기 위해 역세척을 진행하지 않고 장기 운전을 진행하였다.

다우 막의 경우에는 막 면적이 커서 사용되는 원수의 양이 많아 코오롱 막에 비해 장기적인 실험을 진행할 수 없다. 따라서 제조사에 상관없이 무동력 역세척을 진행해도 플럭스 저하를 늦추는 효과를 볼 수 있다는 것을 확인하고자 하였다.

고오롱 막을 사용한 실험은 원수와 모듈의 배치 형태 그리고 역 세수두에 대해서 실험을 진행하였다. 원수의 경우 앞서 언급한 3.2.1 (3) 원수 중에서 맥도강 하천수와, 정수장 침전수를 사용하여 수질에 따른 분석을 진행했으며, 모듈의 배치형태는 막모듈의 배치를 수직 배치와 수평 배치로 나누어 실험을 진행하였다. 역세수두의 경우에 는 1.3 m와 2 m의 역세수두를 각각 실험을 진행하였다.

(3) 화학세척

본 연구 기술에서의 화학세척은 일반적인 가압식 막여과 공정에 서 실시하는 순환세척 방법을 실시하기에는 펌프가 따로 존재하지 않기 때문에 단순히 모듈 내에 세척액을 주입하고 일정시간 동안 침 적하는 방식으로 화학세척을 진행하였다. 화학세척 과정은 다음과 같고, 실험실에서는 막모듈의 크기가 작아 탈부착이 가능한 수준으 로 용이하게 약품을 주입할 수 있으나 상용 막 모듈의 경우에는 모 듈 개당 무게가 50 kg정도로 무겁기 때문에 막이 설치되어 있는 상 태 그대로 화학세척을 진행하는 것이 용이하다.

화학세척은 막의 상태가 초기 오염이 되지 않은 코오롱 막모듈을

가지고 실시하였으며, 회복률은 초기 플럭스 대비 세척 후 동일 수두 에서의 여과플럭스를 계산하여 식 3.2와 같이 계산하였다.

여과플럭스는 모두 온도보정 플럭스로 환산하여 계산하였다.

아래 그림 3.14는 화학세척 방법이다.



그림 3.14 화학세척 방법

제4장 연구 결과

본 연구는 중공사 형태의 정밀여과 막이 인입방향에 상관없이 동 일한 수두라면 동일한 플럭스가 나온다는 가정을 통해, 수두를 나누 어 여과와 역세척을 진행하여 기존의 중력식 막여과 방식의 운전보 다 막의 오염을 늦추어 플럭스를 높게 유지하는 공정의 가능성을 확 인하는 연구를 진행하였다.

4.1 동일한 수두에서의 여과 및 역세플럭스 확인

동일한 압력에서 여과와 역세를 실시할 때 각각의 플럭스가 동일 하다는 것을 검증하기 위하여 다우 막모듈과 코오롱 막모듈을 통해 플럭스를 비교하였다.

4.1.1 다우 막모듈 비교 실험

(1) 자연수두 범위에서의 여과, 역세플럭스 비교

최대 2 m(20 kPa)까지 0.25 m간격으로 중력식 여과, 역세실험을 진행 하였다. 막 면적은 1 m²이며, 원수는 수돗물을 사용하여 실험하였고, 원 수 수온은 약 21.8℃에서 진행하였다. 플럭스 측정은 1분당 생산된 물의 무게를 측정하여 유량으로 환산 후 플럭스로 환산하였다. 앞서 언급한 대로 수온에 따른 플럭스 변화가 있으므로 식 2.5를 이용하여 수온 25℃ 기준으로 여과플럭스 환산을 통해 보정하였다. 다음 그림 4.1은 자연수 두 수두에서 여과플럭스와 역세플럭스를 비교한 그래프이며 *Fluxp*는 여 과플럭스이며, *Flux_B*는 역세플럭스를 나타낸다. 동일한 수두 기준 여과 와 역세진행 시 플럭스 차이가 없다는 것을 알 수 있다.



그림 4.1 자연수두 범위의 여과, 역세플럭스 비교

(다우 막)

(2) 펌프와 자연수두 간의 여과플럭스 비교
다우 막의 경우 일반적인 정밀여과 막의 권장 최대 TMP인 200
kPa까지 실험이 가능하며 우리 랩스케일 실험 장치의 한계로 인하여
비교적 높은 압력은 구현할 수 없어 펌프를 이용해 압력을 최대 80
kPa까지 연장하여 실험을 진행하였다. 펌프 압력을 연장하여 비교하
기 전에 앞서 자연수두와 펌프를 이용하여 형성한 압력이 여과플럭
스에 차이가 있는지 확인하기 위해 자연수두 범위의 압력을 펌프를
이용해 비교하였다. 실험 조건은 앞서 그림 4.1에서 제시한 조건과
동일하며, 온도 보정 플럭스로 나타냈다.

펌프수두의 측정값의 개수가 적은 원인은 펌프로 구현되는 압력을 밸브로 미세 조정하는데 시간이 오래 소요되고, 펌프의 부하가 걸려 수 온이 올라가는 등을 이유로 부득이하게 동일한 압력을 맞추어 진행을 하지 못하였다. 그림 4.2는 자연 수두를 통한 압력과 펌프를 사용해 구 현한 압력에서 여과플럭스가 서로 동일하다는 것을 확인할 수 있다. *Flux_{GDM}*은 자연수두로 운전한 여과플럭스이며, *Flux_{Pump}*는 펌프를 사용 한 여과플럭스를 나타낸다.



(다우 막)

(3) 펌프를 사용한 연장 압력에 대한 여과, 역세플럭스 비교

그림 4.2를 통해 같은 TMP라면 구동압력의 방법에 관계없이 같은 플릭스를 유지한다는 것을 확인하였다. 랩스케일 장치에서 구현할 수 없는 비교적 높은 압력(20 kPa이상)에서도 다우 막의 여과, 역세 플릭스가 동일한 압력에서 같다는 것을 확인하기 위하여 펌프를 사 용하여 약 75 kPa까지 TMP를 올려 실험을 진행하였다. 실험 조건은 자연수두를 통한 실험과 동일하다. 다우 막모듈로 실험을 진행한 결 과, 동일한 자연수두에서는 여과와 역세플럭스가 같다는 것을 확인 할 수 있었으며, 비교적 높은 압력에서도 결과는 같다는 것을 확인할 수 있었다. 그 결과는 다음 그림 4.3과 같다.



그림 4.3 펌프로 압력 연장 여과, 역세플럭스 비교

(다우 막)

다우 막모듈의 경우 막 상태가 초기에 비해 오염이 진행된 상태의 막을 사용하여 새 막보다 플럭스가 낮았다. 또한 향후 장기 실험에서 는 다우 막모듈의 면적이 크기 때문에, 사용되는 원수의 양이 많아 장기실험이 쉽지 않다.

모듈의 케이싱이 높은 압력에서도 견딜 수 있는 재질로 만들어져 펌프 를 사용한 실험을 진행할 수 있었고, 그에 관한 결과도출이 가능하였다.

4.1.2 코오롱 막모듈 비교 실험

(1) 자연수두 범위에서의 여과, 역세플럭스 비교

코오롱 막모듈을 사용한 경우에도 자연수두를 통해 여과와 역세플 럭스를 비교하였다. 막모듈 내 중공사 길이는 약 0.5 m이고 막 면적 은 0.0063 m²이다. 실험 방법은 다우 막모듈의 실험 진행방법과 동일 하며, 실험진행시 수온은 약 20.1℃였으며, 온도 보정한 플럭스로 결 과를 비교하였다. 그에 대한 결과는 다음 그림 4.4와 같다.



그림 4.4 자연수두 범위의 여과, 역세플럭스 비교

(코오롱 막)

다우 막모듈과 동일한 결과로 인입방향에 상관없이 여과플럭스 와 역세플럭스가 같다는 것을 확인할 수 있다.

(2) 중공사 막 길이에 따른 여과, 역세플럭스 비교

중공사 막모듈의 경우 원수의 유입되는 부분과 생산수가 유입되는 부분의 위치가 모듈의 양단 끝에 위치해 있다. 때문에 중공사의 길이가 길어질수록 중공사 막의 내측에서 손실이 발생할 수 있다는 가정에서 막 길이가 길어질수록 손실에 따른 플럭스 영향이 없는지 확인하였다. 중공사막의 길이를 2배 증가하여 1 m의 모듈을 제작하여 실험을 진행 하였고, 원수는 수돗물, 수온은 20.1℃이며 막 면적은 0.1225 m²이다. 플 럭스는 온도 보정하여 나타내었고, 결과는 다음 그림 4.5와 같다.



그림 4.5 중공사 막 길이에 따른 플럭스 비교 (코오롱 막 1 m)

앞의 그림 4.5는 중공사 막의 길이가 길어짐에 따라 중공사 안쪽 의 인입방향에 손실이 있을 것을 고려하여 실험을 진행하였다. 1 m 의 중공사 막도 동일수두에서 여과와 역세플럭스가 거의 동일한 것 을 확인할 수 있었다. 다만 상용 중공사 막모듈의 경우 2 m길이로 제 작되는 경우가 많기 때문에 추가적인 실험을 진행할 필요성이 있다. 4.2 랩스케일 실험을 통한 무동력 역세척 장기 운전 실험

동일한 압력에서 여과와 역세에 따른 플럭스가 동일하다는 것을 실험을 통해 검증하였고, 장기 실험을 통해 펌프를 사용하지 않고 무 동력 역세척을 실시하여 중력식 막여과 방식의 운전으로 플럭스를 유지하는 것이 가능한지 확인하기 위해 실험을 진행하였다.

4.2.1 다우 막모듈 장기운전

보유하고 있는 다우 모듈의 경우 모듈 수정이 불가능하고 앞서 언 급한대로 막 면적이 1 m²으로 자체 제작한 코오롱 모듈에 비해 소모 되는 원수 량이 크기 때문에 장기실험은 불가하였다. 본 연구에서 진 행한 공정으로 운전했을 시 기존 중력식 막여과보다 플럭스 저하를 막는 효과가 있는지 알아보기 위해 실험을 진행하였으며 코오롱 막 만을 사용한 것보다 다른 제조사의 막을 사용해도 무방하다는 결과 를 확인하기 위해 실험을 진행하였다.

(1) 기존 중력식 막여과 방식의 장기운전

본 연구에 앞서 기존 중력식 막여과 방식으로 운전했을 때 플럭스 저 하로 인해 여과플럭스가 얼마나 저하되는지 확인하기 위해 기존 중력식 막여과 실험을 진행하였다. 사용된 막은 다우 막을 사용하였고 구체적 인 제원은 3장 실험방법에 서술하였다. 원수는 빠른 파울링을 유도하기 위해 맥도강 하천수를 원수로 사용하였고, 수온은 23.1℃이며 온도 보정 된 플럭스로 여과플럭스를 나타냈다. 실험은 10시간동안 진행하였으며, 여과수두는 0.7 m이다. 더 높은 수두를 사용하지 않은 이유는 본 연구 에서 고안한 공정과 비교하여 플럭스 저하를 판단하기 위해 역세수두를 확보할 수 있는 선에서 진행하기 위해서 0.7 m로 결정하였다. 다음 그 림 4.6은 다우 막모듈로 기존 중력식 막여과 운전을 진행한 결과이다.



그림 4.6 기존 중력식 막여과 방식으로 운전한 여과플럭스 (다우 막)

위 그림 4.6과 같이 기존 중력식 막여과 방식으로 운전한 결과, 파 울링으로 인한 플럭스 저하가 진행되어 여과플럭스가 약 7.5 LMH에 서 10시간 운전 후 약 3 LMH까지 떨어지고 여과플럭스 유지되는 것 을 확인할 수 있다.

(2) 무동력 역세척을 진행한 중력식 막여과 장기운전

본 연구에서 진행한 무동력 역세척을 실시하여 장기운전을 진행하였다. 실험 조건은 여과수두 0.7 m, 역세수두 1.3 m로 설정하여 실험을 진행하였다. 여과와 역세운전시간은 각각 30분과 5분으로 진행하였다. 원수량이 한정적이기 때문에 실험은 4.2.1 (1)에서 진행한 기존 중력식 막여과 실험과 비교할 수 있게 10시간 가까이 운전을 진행하 였으며, 원수는 맥도강 하천수를 사용하였고, 수온은 22.7℃이며 온도 보정하여 여과플럭스로 나타냈고, 결과는 다음 그림 4.7과 같다.



그림 4.7 무동력 역세척을 진행한 중력식 막여과 여과플럭스 (다우 막)

그림 4.6에서 나타난 기존 중력식 막여과 운전의 결과와 비교할 때, 10시간 가까이 운전을 진행하여도 플럭스가 거의 떨어지지 않은 것을 확인할 수 있었다. 다만 운전시간이 하루 채 되지 않고, 운전에 소요되는 원수의 양이 많아, 다른 조건을 바꿔가며 장기운전을 진행 하기 어려운 점이 있다. 따라서 다음 절에서는 코오롱 막모듈을 가지 고 조건별로 실험을 진행하였다.

4.2.2 코오롱 막모듈 장기운전

다우 막모듈만으로는 한정된 양의 원수로 조건별로 실험을 진행하 기 어려워 코오롱 막모듈로 장기운전 실험을 진행하였다. (1) 기존 중력식 막여과 방식의 장기운전

코오롱 막모듈로도 여과만 진행하여 플럭스가 얼마나 떨어지는지 확인하였다. 원수는 파울링을 가속화하기 위해 맥도강 하천수를 사 용하였으며 수온은 19-20[°] 사이로 진행하였다. 여과수두는 0.75 m로 새 막 기준으로 온도 보정 환산 시 여과플럭스는 25 LMH정도이다.



코오롱 막으로 기존 중력식 막여과 운전을 실시한 결과, 파울링으 로 인한 플럭스 저하가 80시간 이후로 거의 떨어지지 않으며 최저 플럭스를 유지하였다. 여과플럭스는 약 25 LMH에서 75.6% 감소해 6.1 LMH까지 떨어졌다.

(2) 무동력 역세척을 진행한 중력식 막여과 장기운전

본 연구에서 무동력 역세척을 진행하였으며, 실험 조건은 여과 수두 0.75 m, 역세수두는 1.3 m, 여과시간 28분 역세시간 90초이다. 사용원수는 맥도강 하천수이며, 수온은 24-25[°] 사이에서 진행되었다. 마찬가지로 같은 수두라도 온도에 대한 플럭스가 달라지기 때문에 온 도 보정하여 여과플럭스를 나타냈으며, 결과는 다음 그림 4.9와 같다.



운전 경과 90시간 기준으로 봤을 때, 4.2.1 (1)에서 진행한 기존 중 력식 막여과 운전에서 약 75.6% 저하된 것과 비교하여 본 공정은 약 17.5 LMH까지 떨어져 초기 여과플럭스 대비 약 30%정도 저하된 것 을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 고안한 공정의 경우에는 역세척을 진행하기 때문에 전량 여과되는 기존 중력식 막여과와는 다르게 회수율이 100%가 아 니다. 이번 (2) 실험에서는 회수율이 90.8%로 약 10%의 차이가 발생 하나 플럭스는 동일 시간 대비 3배 가까이 여과플럭스가 높기 때문 에 보다 효율적이라고 판단된다.

4.2.3 운전 조건에 따른 플럭스 유지

이전 4.2.1장과 4.2.2 장에서 무동력 역세척을 진행하는 중력식 막여과 공정이 기존 중력식 막여과보다 효율적이라는 것을 확인하였다. 이번 장 에서는 코오롱 막모듈을 다양한 조건으로 변경해가며 실험을 진행하였다.

(1) 배수 효과에 따른 여과플럭스 유지

중력식 막여과의 경우 모듈을 수직으로 배치하여 여과를 진행하면 수두차가 모듈의 중간높이로 계산되고, 그만큼의 수두 손실이 일어 나기 때문에 일반적으로 수평으로 배치하여 운전한다. 그리고, 역세 척을 진행하지 않기 때문에 그에 따른 배수와 급수과정이 있지 않다. 동력식 막여과의 경우 모듈의 배치가 수직으로 세워 운전을 하는 경 우가 일반적이다. 기존 중력식 막여과의 경우 파울링이 발생하여도 그 상태로 여과가 계속 진행되기 때문에 상관이 없으나 본 연구에서 고안한 공정의 경우 운전은 동력식 막여과와 비슷하기 때문에 배수 및 급수과정의 영향도 중요하다.



그림 4.10 모듈 배치 각도에 따른 배수 시간

(코오롱 막)

위 그림 4.10은 코오롱 막모듈로 모듈의 기울기에 따른 막모듈 내 배수 시간을 측정한 것으로 0°의 기울기일 때에 21초가량 소요되면 서도 완벽하게 배수되었다고 할 수 없었으나 반면 30° 정도에서는 5 초만으로 배수가 완료되며, 그 이후의 각도로 실험을 진행할 때에는 배수시간이 완만하게 낮아지는 경향을 확인할 수 있다.

배수시간이 짧을수록 모듈 내 배수되는 물의 유속 또한 빠른 것을 통해 모듈의 배치에 따른 여과플럭스 저하 영향도 확인하기 위해 진행 했다. 실험 조건은 4.2.2 (2)의 실험 조건과 동일하며, 수온은 18-20℃로 진행되었으나 보정 및 환산하였고, 모듈의 배치각도만 30°에서 90°로 변경하여 실험을 진행하였다. 결과는 다음 그림 4.11에 나타내었다.



그림 4.11 막모듈 수직 배치에 따른 여과플럭스 저하 (코오롱 막)

막모듈의 배치각도를 제외한 실험 조건은 4.2.2 (2)에서 운전된 조 건과 같게 진행하고 모듈의 배치만 바꾸어도 그림 4.9에 비해 플럭스 저하가 덜한 것을 확인할 수 있다. 동일 운전시간(60시간 경과)기준 4.2.2 (2)의 실험에서는 25 LMH에서 18.7 LMH까지 떨어진 반면, 수 직으로 막모듈을 배치했을 때는 22.8 LMH까지만 떨어진 것으로 여 과플럭스 저하 폭이 1/3가량 밖에 감소하지 않아 수직으로 배치했을 때가 더 효율적이었다. 이번 실험의 경우, 비교된 실험에 비해 여과 플럭스가 26 LMH에서 시작되어 1 LMH가 높아 수치적으로 떨어진 플럭스가 23.2로 밖에 저하가 되지 않았다고 볼 수도 있다. 하지만 플럭스가 저하된 폭이 1 LMH보다 크기 때문에 시작 여과플럭스와 관계없이 효율적이라는 것을 확인할 수 있다.

(2) 역세수두에 따른 여과플럭스 유지

역세플럭스를 높이고, 역세척 시간을 높일수록 파울링을 늦춰 여 과플럭스를 유지할 수 있다. 그러나 플럭스와 세척시간을 높이면 회 수율이 떨어지기 때문에 적절한 조건을 설정하는 것이 중요하다. 또 한 본 연구에서 고안한 공정의 경우 역세플럭스를 높이려면 수두를 높여야 하고 이는 여과플럭스가 저하될 우려가 있다. 따라서 이번 실 험에서는 랩스케일 장치에서 가능한 역세수두로 최대한 높이고, 역 세시간은 줄이면서 운전을 진행하여 회수율은 향상시키고, 여과플럭 스의 저하는 낮출 수 있을지 확인하기 위해 실험을 진행하였다.

4.2.2 (2)의 실험과 비교하기 위해 실험조건은 여과수두 0.75 m, 여 과시간은 28분으로 설정하고, 역세수두는 기존 1.3 m에서 2 m로 증 가시키는 대신 역세시간은 기존 90초에서 30초로 단축하여 실험을 진행하였다. 모듈의 배치는 수평 배치이며 원수는 맥도강 하천수이 고 수온은 22-24℃로 진행되었다. 결과는 그림 4.12와 같다.



그림 4.12 역세수두 및 역세시간에 따른 여과플럭스

(코오롱 막)

운전은 90시간 가까이 진행되었다. 실험 시작 경과 후 40-50시간의 구간은 컴퓨터 문제로 데이터가 유실되었으나 운전은 중단 없이 진 행되었다. 운전 87시간 경과기준 4.2.2 (2)의 실험은 여과플럭스가 16.1 LMH까지 감소하였으나, 이번 실험은 21.2 LMH까지만 떨어진 것을 확인할 수 있다. 또한 회수율 관점에서 4.2.2 (2) 실험은 회수율 이 90.7%였던 것에 비해 95.2%로 더 높은 회수율로 플럭스 감소폭이 적은 것을 확인하였다.

(3) 원수 수질에 따른 여과플럭스 유지

앞에서 진행한 실험들은 파울링을 가속화하기 위해 실험을 진행하였다. 수질이 양호한 경우의 플럭스 저하를 확인하기 위해 정수장 침 전수를 원수로 하여 실험을 진행하였다. 실험 조건은 여과수두 0.75 m, 역세수두는 1.3 m, 여과시간 28분 역세시간 90초이다. 수온은 19.5-20.3℃ 범위에서 진행했으며 결과는 다음 그림 4.13과 같다.



그림 4.13 침전수를 원수로 사용한 운전의 여과플럭스

(코오롱 막)

비교적 짧은 기간 내 운전되었지만 수질이 기존 맥도강 원수에 비 하여 대단히 양호한 수준이기 때문에 초기 여과 플럭스 25 LMH에서 약 2.5 LMH정도 감소하였으며, 4.2.2 (2)의 실험의 동일한 경과 시간 기준 6.7 LMH만큼 감소한 것을 비교하여 원수의 수질이 양호할수록 플럭스 저하가 덜 유발된 것을 확인할 수 있다.

실험조건을 변경하며 장기운전을 진행한 결과 충분히 자연수두 만으로 역세 효율을 확인하였으며, 원수 특성상 급격한 파울링이 일어났지만 일반적인 막여과 정수장의 응집/침전과 같은 전처리를 실시한 원수라면 더 장기적으로 플럭스 유지가 가능할 것으로 보 여진다.

4.3 화학세척 회복률 확인

화학세척은 총 4번을 실시했으며 각 실험별로 침적시간과 침적 후 역세척을 실시한 시간을 다르게 진행하였다. 산세척에는 pH 2 이 하의 황산(H₂SO₄)이 사용되었고, 염기세척에는 pH 12 이상의 차아염 소산나트륨(NaOCl)을 사용하였다. 화학세척은 3장에서 서술한 것과 같이 일정 시간 약품 침적 후 역세척을 진행하였다. 각 실험별로 구 체적인 세척 조건은 표 제목에 정리하여 나타내었다.

표 4.1 침적30분 역세 10분 역세수두 1.3 m

침적 차수(차)	여과 플럭스(LMH)	누적 회복률(%)	세정약품
0	8.65	35.32	
1 /	14.54	59.34	염기세정
2	18.48	75.44	염기세정
3	19.77	80.69	염기세정
4	20.40	83.26	산세정

표 4.2 침적30분 역세 10분 역세수두 2 m

침적 차수(차)	여과 플럭스(LMH)	누적 회복률(%)	세정약품
0	15.00	61.22	
1	15.78	64.40	산세정
2	18.76	76.56	염기세정
3	21.02	85.81	염기세정
4	22.02	89.89	염기세정

표 4.3 침적 90분 역세 30분 역세수두 2 m

침적 차수(차)	여과 플럭스(LMH)	누적 회복률(%)	세정약품
0	20.30	82.86	
1	22.03	89.90	염기세정

표 4.4 침적 30분 역세 10분 역세수두 1.3 m

침적 차수(차)	여과 플럭스(LMH)	누적 회복률(%)	세정약품
0	21.6	77.98	
1	26.8	96.76	염기세정

통상 막의 화학세척은 산세척을 염기세척보다 먼저 진행하는 것이 일반적이다. 실험 초기에는 원수 특성상 하천수의 경우 무기물의 함 량이 적을 것으로 판단하여 산세척을 진행하지 않았으나, 초기 대비 80.69%라는 낮은 회복율을 보여 산세척도 진행하였다. 그러나 1차 세척 때 산세척의 회복율이 약 3% 가량으로 높지 않고 그 다음 2차 세척시 산세척을 먼저 진행하였으나, 큰 효과를 거두지 못해 그다음 세척부터는 염기세척만 진행하였다.

세척 결과는 위 표 4.1~4.4와 같으며, 0차는 운전 완료 후 여과플럭 스이다. 모든 실험은 25 LMH에서 파울링으로 인해 플럭스가 저하되 었으며, 최저 8.65 LMH까지 저하된 상태에서 세척을 진행하였다.

회복율은 최대 96.8%까지도 회복한 것을 확인할 수 있으나, 오염 이 많이 진행된 막에서는 83~89%내외로 회복되어 추가적인 효율적 세척조건 도출이 필요하다.

CH OL M
제5장 결론

5.1 연구 결과 요약

(1) 정밀여과 중공사 막을 사용하여 랩스케일 규모의 모듈로 제작하였고, 실험을 통해 막의 종류에 구분하지 않고 동일한 자연수두에서 인 입방향에 상관없이 여과와 역세플럭스가 동일하다는 점을 확인하였다.

(2) 현재 랩스케일 실험 장치에서 구현할 수 없는 20 kPa이상의 압력에 대해서는 펌프를 사용하여 동일한 압력에 대한 여과, 역세플럭 스가 같다는 결과를 확인하였으며, 따라서 높은 압력이라도 동일한 TMP라면 펌프와 자연수두에 상관없이 같은 플럭스를 확인하였다.

(3) 같은 제품의 막일지라도 막모듈의 길이에 따른 수두손실로 인한 플럭스 저하는 없는 것을 0.5 m와 1 m의 코오롱 미니 막모듈로 실험을 진행하여 확인하였으나, 상용 막모듈의 경우 중공사 막 한 가다의 길이가 2 m인 것을 감안하면 2 m 모듈로 실험을 진행해야할 필요가 있다.

(4) 다우 막모듈을 사용하여 기존 중력식 막여과와 무동력 역세척을 진행한 중력식 막여과 운전을 10시간 정도 진행하였다. 기존 중력식 막여과 운전의 경우 파울링으로 인해 여과플럭스가 크게 저하되어 운전 초기 대비 플럭스는 절반이상 감소했으나, 무동력 역세척을 실시한 중력식 막여과의 경우에는 비교적 플럭스 유지가 가능하여 역세척의 효과를 확인하였다.

 (5) 코오롱 막모듈의 경우, 100시간동안 운전된 기존 중력식 막여 과방식의 경우 25℃로 온도 보정된 플럭스를 기준으로 75.6% 감소하
여 25 LMH에서 6.1 LMH까지 감소한 것을 확인하였다.

(6) 역세수두를 약 1.5배 향상시키고 세척시간을 1/3로 감소시켜 회수율이 90.7%에서 95.2%까지 향상되게 운전을 진행해도, 플럭스 저하는 오히려 회수율이 높은 실험에서 덜 감소하였다.

(6) 모듈의 배치를 한 기준 선에서 수두가 같게 맞추고, 수직-수평 으로 다르게 배치하여 운전한 결과, 수직으로 배치하는 것이 수평으 로 배치한 것에 비해 여과플럭스를 장기적으로 유지할 수 있었다.

(7) 비교적 수질이 불량한 맥도강 원수를 사용한 실험보다 수질이 양호한 정수장 침전수를 사용해 실험을 진행한 결과 침전수로 운전 한 실험의 플럭스 저하속도가 더 낮을 것을 확인할 수 있다. 하지만 침전수의 실험의 결과가 다른 실험에 비해 오래 진행하지 않았기 때 문에 추가적인 검증이 필요한 것으로 생각된다.

(8) 화학세척의 경우 침적만으로도 90%내외의 회복율을 확인하였으며, 추가적으로 효율적인 세척조건의 도출이 필요할 것으로 생각된다.

TON

본 연구에서는 자연수두에서 인입방향에 따른 손실 없이 플럭스가 동 일한 점을 착안하여, 기존 자연수두의 위치에너지로 여과되던 중력식 막 여과을 동력식 막여과와 같은 방식으로 역세척을 진행하며 운전하여 기 존 중력식 막여과의 여과플럭스보다 2배 이상 높은 플럭스를 유지하면 서도 동력식 막여과에 비해 적은 에너지를 사용하는 공정을 개발하였다. 기존의 중력식 막여과 공정으로 운전했을 때 초기 25 LMH의 여과 플럭스를 시작으로 동일 운전시간 기준 플럭스가 75.4% 감소하여, 6.15 LMH정도까지 감소했으나, 본 연구에서 고안한 공정은 21.2 LMH로 약 15.2% 감소한 효과를 확인하였다.

5.2 향후 연구 내용

정압으로 운전하는 막여과는 파울링이 발생함에 따라 그에 따른 플럭스 저하가 일어난다. 일반적인 중력식 막여과 공정은 역세척을 진행하지 않기 때문에 플럭스 저하가 급속도로 일어나며, 여과플럭 스가 초기대비 10~30% 가까이 감소하게 된다. 그러나 여과를 계속 진행하여 파울링으로 인한 케이크 층이 형성되어도 최소한의 생산수 는 여과가 가능하다. 또한 저플럭스로 운전되어도 필요한 생산량을 맞추기 위해 그만큼 막 면적을 증가시키면 되고, 문헌연구에서 언급 한 것과 같이 케이크 층에서 추가적으로 여과되는 유기물에 대한 장 점도 존재한다.

본 연구에서 적용된 기술은 구동력이 자연수두를 이용할 뿐, 매커 니즘은 펌프를 사용하는 가압식 막여과와 같다. 가압식 막여과의 경 우에는 플럭스가 감소할수록 펌프의 인버터로 차압을 높여 플럭스를 유지하며 일정한 유량을 생산하는 정유량 운전이 가능하다. 따라서 본 연구기술도 정유량 운전을 가능하게 하는 추가적인 연구를 진행 해야 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 김경호 (2016). 나노여과 막의 기술 및 산업시장 동향, 한국과학기 술정보연구원 중소기업혁신본부.
- 김민재, 임재림, 이경혁, 이영주, 김수한 (2016). 막여과 정수처리 공 정에서 온도보정차압 식의 파울링 지표로서의 활용성 검토, 상 하수도학회지 **30**, 1-8.
- 남궁은 (2008). 국내 막분리 고도정수처리시스템의 도입에 대하여, 설비저널 **37**, 19-24.
- 이길숙, 이광윤, 이범구, 김영태 (2004). 막여과 고도정수처리 기술 개발, 유체기계 연구개발 발표회 논문집 12, 249-258.
- 이성우, 이현동, 한명호, 곽동희, 김충환 (2003). 고도상수처리 원리 및 응용, 동화기술.
- 한국상하수도협회 (2010). 환경부 제정 상수도시설기준, 건설도서.
- 한국수자원공사 (2011). 막여과 공정 설계·운영관리 매뉴얼, 한국수 자원공사.
- Abdel-Kader, A., and Fouladi, F. (2007). A review of membrane bioreactor (MBR) technology and their applications in the wastewater treatment systems, *Eleventh International Water Technology Conference, IWTC Sharm El-Sheikh*, 269-278.

- Akhondi, E., Wu, B., Sun, S. Y., Marxer, B., Lim, W. K., Gu, J., Liu, L. B., Burkhardt, M., McDougald, D., Pronk, W., and Fane, A. G. (2005). Gravity-driven membrane filtration as pretreatment for seawater reverse osmosis: linking biofouling layer morphology with flux stabilization. *Water Research* 70, 158-173.
- Al-Malack, M. H., and Anderson, G. K. (1996). Formation of dynamic membranes with crossflow microfiltration, *Journal of Membrane Science* 112, 287-296.
- Belfort, G., Davis, R. H., and Zidney, A. L. (1994). The behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration, *Journal of Membrane Science* 96, 1-58.
- Cha, D., Park, H., Kim, S., Lim, J.L., Kang, S., and Kim, C.H. (2012) A statistical approach to analyze factors affecting silt density index, *Desalination Water Treatment* 45, 276-283.
- Chang, Y. J., Choo, K. H., Benjamin, M. M., and Reiber, S. (1998). Combined adsorption/UF process increases TOC removal, *Journal of AWWA 90* (5), 90-102
- Crozes, G., Anselme, C., and Mallevialle, J. (1993). Effect of adsorption of organic matter on fouling of ultrafiltration membrane, *Journal of Membrane Science* 84, 61-77.

- Derlon, N., Mimoso, J., Klein, T., Koetzsch, S., and Morgenroth, E. (2014). Presence of biofilms on ultrafiltration membrane surfaces increases the quality of permeate produced during ultra-low pressure gravity-driven membrane filtration, *Water Science Technololgy Water Supply* **60** 164-173.
- Ding, A., Wang, J. L., Lin, D. C., Tang, X. B., Cheng, X. X., Wang, H., Bai, L. M., Li, G. B., and Liang, H. (2017). A low pressure gravity-driven membrane filtration (GDM) system for rainwater recycling: flux stabilization and removal performance, *Chemosphere* 172, 21-28.
- Dow Chemicals. (2011). Dow Ultrafiltration Product Manual. https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Ultrafiltration-Product-Manual-L.pdf, (accessed 08 September 2021).
- Field, R. W., Wu, D., Howell, J. A., and Gupta, B. B. (1995). Critical flux concept for microfiltration fouling, *Journal of Membrane Science* 100, 259-272.
- Flemming, H. C., and Schaule, G. (1988). Biofouling on membranes-A microbiological approach, *Desalination* **70**, 95-119.
- Fortunato, L., Jeong, S., Wang, Y. R., Behzad, A. R., and Leiknes, T. (2016). Integrated approach to characterize fouling on a flat sheet membrane gravity driven submerged membrane bioreactor, *Bioresource Technology* 222, 335-343.

- Frechen, F. -B., Exler, H., Romaker, J., and Schier, W. (2011). Long-term behaviour of a gravity-driven dead end membrane filtration unit for potable water supply in cases of disasters, *Water Supply* 11, 39-44.
- Lee, K. W., Choo, K. H., Choi, S. J., and Yamamoto, K. (2002). Development of an integrated iron oxide adsorption/membrane separation system for water treatment, *Water Science Technololgy Water Supply*, **2**, 293-300.
- Oh, I. T. (2007). Evaluation of UF Membrane Fouling Characteristics for Iron and Manganese in Bank-filtered Water. Master's Thesis, Chungbuk University, Cheongju, Korea
- Peter-Varbanets, M., Margot, J., Traber, J., Pronk, and W. (2011). Mechanisms of membrane fouling during ultra-low pressure ultrafiltration, *Journal of Membrane Science* 377, 42-53.

Rajesha, K. and Ismail, A. F. (2015). Fouling control on microfiltration/ ultrafiltration membranes: Effect of morphology, hydrophilicity, and charge, *Journal of Applied Polymer Science* **132**, 1-20.

- Ruiz-Garcia, A., Melian-Martel, N., and Nuez, I. (2017). Short Review on Predicting Fouling in RO Desalination, *Membranes* 7, 1-17.
- Tang, X., Xie, B., Chen, R., Wang, J., Huang, K., Zhu, X., Li, G., and Liang, H. (2020). Gravity-driven membrane filtration treating manganese-contaminated surface water: Flux stabilization and removal performance, *Chemical Engineering Journal* 397, 125248.

- Wang, Y. R., Fortunato, L., Jeong, S., and Leiknes, T. (2017). Gravity-driven membrane system for secondary wastewater effluent treatment: filtration performance and fouling characterization, *Separation and Purification Technology* 184, 26-33.
- WHO (1993) Guidelines for drinking water quality.
- Wu, B., Hochstrasser, F., Akhondi, E., Ambauen, N., Tschirren, L., Burkhardt, M., Fane, A. G., and Pronk, W. (2016). Optimization of gravity-driven membrane (GDM) filtration process for seawater pretreatment, *Water Research* 93, 133-140.

