



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

막여과 공정 온도보정차압 수식의  
현장 적용성 연구



2014년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

김 민 재

공학석사 학위논문

막여과 공정 온도보정차압 수식의  
현장 적용성 연구

지도교수 김 수 한

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2014년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

김 민 재

김민재의 공학석사 학위논문을  
인준함.

2014년 2월 21일



주 심 공학박사 이 상 호 (인)

위 원 공학박사 이 종 섭 (인)

위 원 공학박사 김 수 한 (인)

# 목 차

표 목차	vi
그림 목차	vii
Abstract	x
제1장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구의 기본 가설 설정	3
1.3 연구내용	3
제2장 문헌연구	4
2.1 막여과	4
2.1.1 막여과의 정의 및 분류	4
2.1.2 막여과 기초	8
2.1.3 막 재질, 모듈 및 시스템	11
2.2 보정차압	21
2.2.1 보정차압의 정의	21
2.2.2 보정차압 계산	21
2.3 막 오염	22
2.3.1 막 오염의 정의	22
2.3.2 막 오염 대처방안	24
2.4 막 저항	26

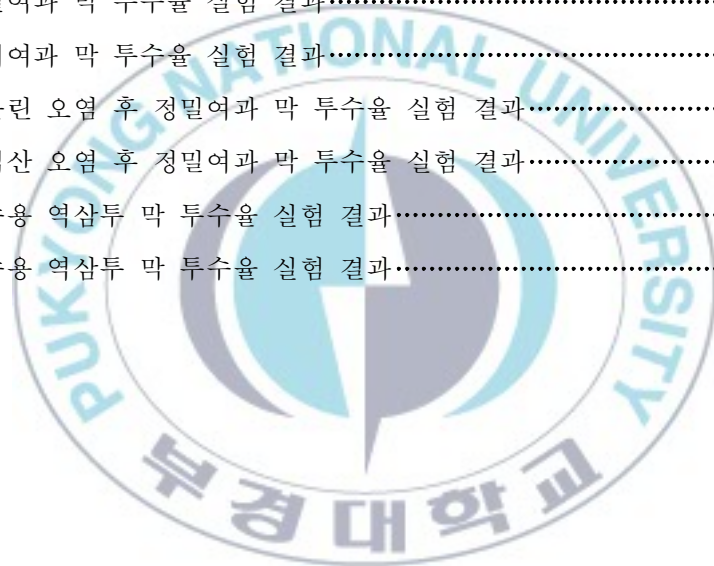
2.4.1 막 저항의 정의.....	26
2.4.2 막 저항의 분류와 계산.....	26
<b>제3장 연구방법.....</b>	<b>28</b>
3.1 실험 개요.....	28
3.2 실험 재료 및 장치.....	28
3.2.1 막.....	28
3.2.2 원수.....	31
3.2.3 오염물질.....	32
3.2.4 실험실 규모 막여과 장치.....	33
3.2.5 수질분석 장치.....	36
3.3 실험방법.....	37
3.3.1 투수율 실험.....	37
3.3.2 막 오염 실험.....	39
3.4 실험 결과 분석.....	40
3.4.1 실험 결과의 추정과 검정(t-분포).....	41
3.4.2 두 분포의 차이 여부를 검정하는 방법(F-분포).....	42
3.4.3 단순회귀분석.....	43
<b>제4장 연구결과.....</b>	<b>46</b>
4.1 막 고유의 저항 변화(정밀여과 막, 한외여과 막).....	46
4.1.1 정밀여과 막.....	46
4.1.2 한외여과 막.....	50
4.2 막 오염의 저항 변화.....	54
4.2.1 카올린 오염.....	54

4.2.2 휴믹산 오염	59
4.3 막 고유의 저항 변화(역삼투 막)	63
4.3.1 기수용 역삼투 막	63
4.3.2 해수용 역삼투 막	68
<b>제5장 결론</b>	<b>72</b>
5.1 연구 결과 요약 및 결론	72
5.2 향후 연구 방향 제안	73
참고문헌	75
감사의글	79



## 표 목차

표 2.1 막 종류에 따른 분리경과 제거물질(한국상하수도협회, 2010).....	5
표 2.2 막 종류에 따른 분리경과 제거물질(한국수자원공사, 2011).....	13
표 2.3 제거물질별 전처리방안(WHO, 1993).....	25
표 3.1 막 종류별 투수율 실험 방법.....	39
표 3.2 단순회귀분석에서의 분산분석표.....	45
표 4.1 정밀여과 막 투수율 실험 결과.....	47
표 4.2 한외여과 막 투수율 실험 결과.....	51
표 4.3 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과.....	55
표 4.4 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과.....	60
표 4.5 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과.....	64
표 4.6 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과.....	68





# 그림 목차

그림 2.1 막의 공칭 공정에 따른 제거물질.....	5
그림 2.2 저압 막여과 물질 제거 원리.....	8
그림 2.3 고압 막여과 물질 제거 원리.....	9
그림 2.4 막여과 방식에 따른 차압계산 방법(한국수자원공사, 2011).....	10
그림 2.5 평막형 모듈(한국수자원공사, 2011).....	14
그림 2.6 관상형 모듈(한국수자원공사, 2011).....	15
그림 2.7 중공사형 모듈(한국수자원공사, 2011).....	16
그림 2.8 나권형 모듈(한국수자원공사, 2011).....	16
그림 2.9 모노리스형 모듈(Mueller and Witte, 2008).....	17
그림 2.10 가압방식에 따른 분류(한국수자원공사, 2011).....	18
그림 2.11 전량여과 방식과 순환여과 방식(한국수자원공사, 2011).....	19
그림 2.12 차압방향에 따른 분류(한국수자원공사, 2011).....	20
그림 2.13 정유량 제어(펌프 회전수 제어) 방식(한국수자원공사, 2011).....	20
그림 2.14 막 오염 모식도(Cha et al., 2012).....	22
그림 3.1 정밀여과 막모듈.....	29
그림 3.2 한외여과 막모듈.....	30
그림 3.3 기수용 역삼투 막.....	30
그림 3.4 저압 막여과 장치 모식도.....	34
그림 3.5 저압 막여과 장치 사진.....	34
그림 3.6 고압 막여과 장치 모식도.....	35
그림 3.7 고압 막여과 장치 사진.....	35
그림 3.8 수온 및 전도도 측정기.....	36
그림 3.9 휴대용 탁도계.....	36
그림 3.10 UV/VIS 분광광도계.....	37
그림 4.1 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=9.7 °C).....	47

그림 4.2 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=14.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	48
그림 4.3 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=17.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	48
그림 4.4 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=20.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	49
그림 4.5 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=24.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	49
그림 4.6 수온에 따른 막 고유의 저항 변화(정밀여과 막)	50
그림 4.7 한외여과 막 투수율 실험 결과( $T=9.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	51
그림 4.8 한외여과 막 투수율 실험 결과( $T=13.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	52
그림 4.9 한외여과 막 투수율 실험 결과( $T=17.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	52
그림 4.10 한외여과 막 투수율 실험 결과( $T=20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	53
그림 4.11 한외여과 막 투수율 실험 결과( $T=25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	53
그림 4.12 수온에 따른 막 고유의 저항 변화(한외여과 막)	54
그림 4.13 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=15.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	56
그림 4.14 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=22.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	56
그림 4.15 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	57
그림 4.16 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=29.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	57
그림 4.17 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=33.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	58
그림 4.18 카올린 오염 후 수온에 따른 막 저항 변화(정밀여과 막)	58
그림 4.19 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	60
그림 4.20 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	61
그림 4.21 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	61
그림 4.22 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	62
그림 4.23 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과( $T=29.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	62
그림 4.24 휴믹산 오염 후 수온에 따른 막 저항 변화(정밀여과 막)	63
그림 4.25 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과( $T=12.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	65
그림 4.26 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과( $T=18.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	65
그림 4.27 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과( $T=25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	66
그림 4.28 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과( $T=32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	66
그림 4.29 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과( $T=38.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	67

그림 4.30 수온에 따른 막 저항 변화(기수용 역삼투 막).....	67
그림 4.31 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=13.4 °C).....	69
그림 4.32 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=18.5 °C).....	69
그림 4.33 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=25.4 °C).....	70
그림 4.34 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=32.7 °C).....	70
그림 4.35 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=39.2 °C).....	71
그림 4.36 수온에 따른 막 저항 변화(해수용 역삼투 막).....	71



# Applicability of Temperature-corrected Trans-membrane Pressure Equation in Real-field Membrane Water Treatment Plants

Minjae Kim

Department of Civil Engineering, The Graduate School,  
Pukyong National University

## Abstract

It is well known that membrane permeability is affected by temperature. In real-field application, the effect of temperature on membrane permeability is considered by using the temperature corrected flux equation, where the viscosity of water is the only variable related to temperature.

This study starts from a question whether membrane intrinsic and fouling resistances may be affected by temperature or not. If the answer for the question is yes, we should modify the temperature corrected flux equation used in real-field application. In order to investigate the effect of membrane intrinsic and fouling resistances, lab-scale experiments were carried out using several hollow-fiber microfiltration (MF) and ultrafiltration (UF) modules, and flat sheet coupons of brackish reverse osmosis (BWRO) and seawater reverse osmosis (SWRO) membranes.

As a result, membrane intrinsic resistance was not affected by temperature in MF and UF processes. In addition, membrane fouling resistance was not significantly

affected by temperature according to our experimental results. Therefore, the application of the temperature-corrected trans-membrane pressure equation is limited to the MF and UF processes.

Keyword: temperature, membrane intrinsic resistance, fouling resistance, membrane processes



# 제1장 서론

## 1.1 연구배경

막여과 공정은 선택적 투과성을 갖는 분리막을 이용하여 물리적으로 액상-액상, 고상-액상 및 고상-기상의 혼합물로부터 분리, 농축, 정제하여 제거하는 공정을 말한다.

현재 국내에서는 지례정수장(300 m<sup>3</sup>/일, 2004년) 시험연구를 시작으로 시흥정수장(3,600 m<sup>3</sup>/일, 2004년), 이동정수장(1,500 m<sup>3</sup>/일, 2005년), 양동정수장(1,000 m<sup>3</sup>/일, 2005년)등과 같은 소규모 시설에 적용되었으며, 최근에는 공주정수장(30,000 m<sup>3</sup>/일, 2009년), 영등포정수장(50,000 m<sup>3</sup>/일, 2011년)등 중, 대규모 정수장을 건설하고 있다(한국수자원공사, 2011).

이러한 막여과 정수장에서 사용되는 막모듈은 주로 정밀여과 막 또는 한외여과 막을 사용하고 있다. 막여과 정수처리시설의 경제성을 결정짓는 인자는 막의 비가역적 파울링(막 오염 현상)을 판단하는 기준인 막간 차압(원수 측과 여과수 측의 압력차)이다. 정유량 제어를 도입한 막여과 공정에서 파울링이 증가할수록 동일한 유량을 생산하기 위해 차압을 증가시킨다.

여기서 막간 차압은 원수의 수온에 영향을 받기에 막의 파울링을 나타내는 진정한 지표는 온도의 영향을 고려해 준 온도보정차압이 된다. 이 보정차압은 실제 차압에 온도보정계수를 나눠서 구하게 되고, 원수의 점성계수만을 고려하고 있다(한국수자원공사, 2011).

주로 정유량제어로 운전하는 막여과 시설에서 이 온도보정차압은 화학세척 시기를 결정하는데 있어 매우 중요하다. 온도보정계수는 25 °C를 기준으로 온도가 높은 경우 보정차압이 실제차압보다 크게 나타나게 되고,

온도가 낮은 경우 실제차압이 보정차압보다 크게 나타난다. 따라서 안정적인 화학세척 시기를 결정하기 위해서는 원수 수온 25 °C를 기준으로 높은 경우에는 보정차압, 낮은 경우에는 실제차압을 판단기준으로 하는 것이 좋다. 실제 현장에서는 대부분 한계차압이라는 개념을 도입하여 화학세척시기를 판단한다. 한계차압으로 화학세척시기를 결정짓는 이유는 막여과 공정에서 버터줄 수 있는 기계적인 압력을 초과하지 않도록 주의하기 위해서이다. 중요한 점은 한계차압이 있다고 하더라도 막여과 공정의 유지관리적 측면에서 막의 오염이 어느 정도 진행이 되고 있는지는 쉽고, 정확하며 빠르게 판단이 가능하여야 한다.

막여과 유속(투과유속) 식을 살펴보면 막간차압, 원수의 점성계수, 막의 저항 세 가지로 막여과 유속을 나타낸다. 차압을 원수의 수온을 고려하여 보정을 해 준다고 할 때, 막의 저항 또한 수온에 영향을 받을 것이라 생각되기에 이 연구를 시작하였다.

실제로 나노여과 막과 역삼투 막의 경우 원수 수온에 따라 막 저항의 변화가 관찰된 보고가 있다. 그 중 하나는 원수 수온에 따라 투수율을 모델링 하여 실제 실험결과와 비교하였을 때, 원수 수온 25 °C를 기준으로 수온이 높은 경우 투수율은 더 높게, 25 °C 보다 낮은 경우는 더 낮은 투수율 값을 나타냈다(Jin et al., 2009).

이 외에 나노여과 막을 대상으로 온도에 따른 막의 공경 변화를 관찰한 논문이 있다. 실험결과 원수의 수온에 따라 막의 공경 변화가 있었고, 막의 재질에 따라 공극의 변화 정도도 다르다고 기술되어있다(Sharma, 2005).

나노여과막과 역삼투막에서 원수의 수온에 따라 막 저항의 변화가 관찰되는 것을 볼 때, 정밀여과막과 한외여과 막에서도 원수의 수온에 따라 막 저항의 변화가 있을 것이라고 생각되며 이를 알아보하고자 한다. 추가로

막에 오염이 진행된 경우 케이크층 형성, 내부 흡착, 공극 막힘 등으로 인한 막 오염에 의한 저항도 변화가 있는지 확인하였다.

추가로 나노여과 막과 역삼투 막의 투수율과 공극 크기 변화를 막 저항의 변화로 확인할 수 없기에 역삼투 막 두 종류(기수용 역삼투 막, 해수용 역삼투 막)를 사용하여 원수 수온에 따라 막 저항이 얼마나 변하는지 확인하고자 한다.

## 1.2 연구의 기본 가설 설정

본 연구의 서론의 내용을 정리하면, 정밀여과 막과 한외여과 막의 막 고유의 저항과 막 오염에 의한 저항이 원수 수온에 영향을 받을 것이라고 생각된다. 따라서 본 연구의 가설은 다음과 같다.

- 원수의 수온에 따라 막 고유의 저항, 막 오염의 저항은 변한다.

## 1.3 연구내용

본 연구의 목적은 원수 수온에 따른 막 저항의 변화를 확인하는 것이다. 본 연구의 목적을 달성하기 위한 상세한 연구 내용은 다음과 같다.

- (1) 정밀여과 막과 한외여과 막의 원수 수온에 따른 막 고유의 저항 변화 조사
- (2) 정밀여과 막 오염 후 원수 수온에 따른 막 오염의 저항 변화 조사
- (3) 역삼투 막의 원수 수온에 따른 막 고유의 저항 변화 조사



## 제2장 문헌연구

### 2.1 막여과

#### 2.1.1 막여과의 정의 및 분류

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

- 막여과는 가압 또는 부압으로 운전되고 1  $\mu\text{m}$ 이상의 입자성 물질은 체거름 효과에 의해 제거되어야 한다.
- 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 공칭 공경에 따라 정밀여과(micro Filtration; MF) 막, 한외여과(ultra filtraion; UF) 막, 나노여과(nano filtraton; NF) 막, 역삼투(reverse osmosis; RO) 막으로 크게 네 개로 분류한다. 그림 2.1과 표 2.1은 각 막의 공칭공경 범위와 제거대상물질을 정리한 것이다.

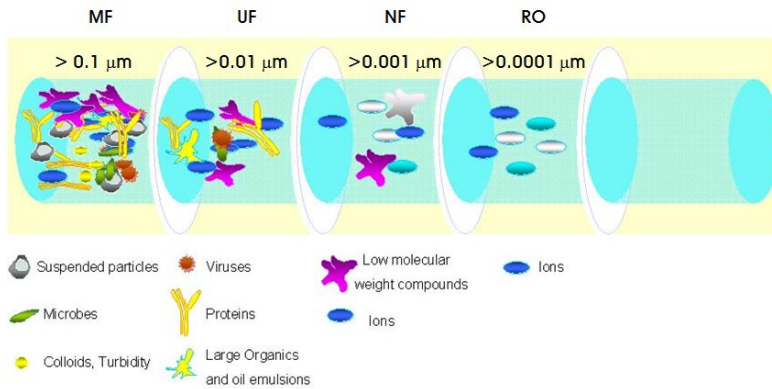


그림 2.1 막의 공칭 공경에 따른 제거물질

표 2.1 막 종류에 따른 분리경과 제거물질(한국상하수도협회, 2010)

사용막	여과법	분리경	제거가능 물질
정밀여과막 (MF)	정밀여과법	공칭공경 0.1μm 이상	부유물질, 콜로이드, 세균, 조류, 바이러스, 크립토포리디움 난포낭, 지아디아 난포낭 등
한외여과막 (UF)	한외여과법	분획 분자량 100,000 Dalton이하	부유물질, 콜로이드, 세균, 조류, 바이러스, 크립토포리디움 난포낭, 지아디아 난포낭, 부식산 등
나노여과막 (NF)	나노여과법	염화나트륨 제거율 5~93% 미만	유기물, 농약, 맛·냄새물질, 합성세제, 칼슘이온, 마그네슘이온, 황산이온, 질산성질소 등
역삼투막 (RO)	역삼투법	염화나트륨 제거율 93% 이상	금속이온, 염소이온 등
해수담수화 역삼투막 (해수담수화RO)	역삼투법	염화나트륨 제거율 99% 이상	해수 중의 염분

### (1) 정밀여과 막

정밀여과 막은 체거름 원리에 의해 부유물질이나 원충, 세균, 바이러스 등을 제거한다. 다른 여과 막에 비해 공경이 크기에 높은 막여과 유속을 가지고 있다. 하지만 막의 내부폐색이 일어날 우려가 크다. 이러한 문제는 적절한 공경, 공정 설계 및 운전을 통해 해결할 수 있다. 정밀여과 막은 높은 투과막여과 유속, 세척의 용이함, 적용의 유연성 및 경제성 등 다양한 장점을 가지고 있어 적용 분야가 빠르게 확대되고 있다. 정밀여과 막은 정수처리 뿐만 아니라 식품산업, 화학공업, 금속공업, 생화학공업, 제지펄프공업, 제약산업 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

### (2) 한외여과 막

한외여과 막은 정밀여과막과 마찬가지로 체거름 원리에 의해 부유물질이나 원충, 세균, 바이러스, 고분자량 물질 등을 분자의 크기로 분리한다. 한외여과 막은 저분자와 고분자 물질을 분리하기에 수중에 용해된 고분자의 농축이나 정제에 이용되고 있다. 정밀여과 막 보다 더 세밀한 분리능을 가지고 있기에 공경을  $\mu\text{m}$ 로 표시하지 않고 분획분자량(molecular weight of cut-off; MWCO)으로 나타낸다. 이처럼 정밀여과 보다 미세공을 가지고 있어 저분자 물질 및 단백질, 효소 등 고분자 물질이나 콜로이드성 물질을 분리할 수 있다. 단, 염은 통과한다.

정밀여과 막에 비해 공경이 미세하기에 운전에 소요되는 에너지는 증가하고 막여과 유속은 감소하며 제거된 용질의 크기 또한 감소한다. 또한 막면에 생성된 농도분극층 또는 Gel층의 저항이 막여과 유속에 영향을 미치기에 난류를 발생시키거나 인위적으로 오염층을 제거해 주어야 한다 (Flemming and Schaule, 1988).

수처리에서는 초순수와 무균수의 제조, 폐액·폐수처리, 배출수의 재

이용 등에 사용되고 있다.

### (3) 나노여과 막

나노여과막은 1986년에 상용화된 막으로 주로 계면활성법에 의한 복합막으로 폴리아미드, 술폰화폴리술폰 등을 소재로 한 역삼투막과 한외여과막의 중간적인 특성을 보인다.

물질제거원리는 역삼투막과 같이 물과 이온의 속도분리차로 이루어지며, 역삼투막에 비해 분획분자량이 크기에 낮은 압력에서도 운전이 가능하다. 나노여과막은 일부 염을 저지하며, 유기물 또한 제거가 가능하다.

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

### (4) 역삼투 막

역삼투막은 용액과 용매가 격리되어 용매가 용액 쪽으로 정삼투압 현상을 일으킬 때 용액 쪽으로 정삼투압보다 더 큰 압력을 작용시키는 삼투압 방향의 역방향인 용액 쪽으로 용매가 반투막을 통과하여 용액은 농축되고 용매가 분리되는 원리이다.

역삼투막은 초기에는 전기투석법과 더불어 해수담수화(탈염)를 목적으로 사용되었지만 최근에는 담수의 TDS 및 1가 이온의 농도를 낮추기 위해서도 사용된다(이성우 등, 2004). 또한 초순수 제조나 액체식품의 탈염 등에도 사용되고 있다.

## 2.1.2 막여과 기초

본 절에서는 막여과의 기초에 대해 문헌조사를 실시하였으며, 주로 저압 막여과와 고압 막여과로 구분이 되어 있기에 그 각각의 원리 및 유속을 다루고자 한다.

### (1) 막여과 원리

막여과의 원리는 정밀여과, 한외여과와 같은 저압 막여과와 나노여과, 역삼투여과와 같은 고압 막여과의 물질 제거 원리는 차이가 있다.

주로 저압 막여과에서는 막공극 크기에 의한 체거름 기작을 통해 현탁물, 불용해성 물질들을 제거하고 공극보다 작은 물질은 통과하는 원리이다.



그림 2.2 저압 막여과 물질 제거 원리

이와 다르게 고압 막여과에서는 물과 이온의 속도분리 차를 이용하여 물을 이온보다 많이 투과시키는 막여과 방법이다.

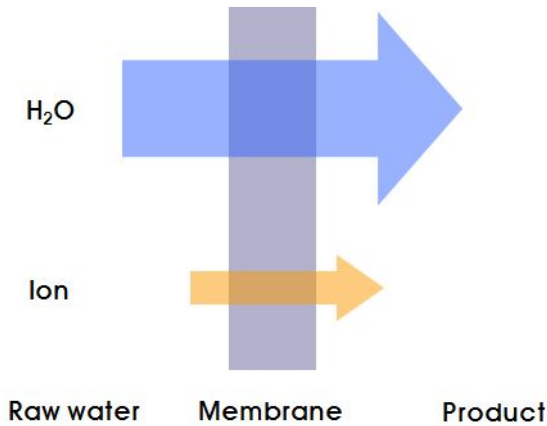


그림 2.3 고압 막여과 물질 제거 원리

(2) 막여과 유속(flux)

막여과 유속은 단위시간에 단위 막면적을 통과하는 수량으로 일반적으로  $m^3/m^2 \cdot day$  또는  $m/d$ 로 나타낸다. 일반적으로 저압 막여과의 경우  $0.5 \sim 1.0 m/d$  정도를 목표로 한다. 막여과 유속은 막의 재질, 종류, 여과 방식 수온 등에 따라 동일한 막간 차압이라도 막여과 유속은 달라진다. 저압용 막여과와 고압용 막여과에서 사용되는 막여과 유속 식은 물질의 제거 원리에 차이가 있기에 계산식에 차이점이 있다. 우선 저압용 막여과에서는 식 (2.1)을 사용한다.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_f)} \quad (2.1)$$

여기서,  $J$ 는 막여과 유속( $m/d$ ),  $\Delta P$ 는 막간 차압( $Pa$ ),  $\mu$ 는 물의 동점성계수( $Pa \cdot s$ ),  $R_m$ 은 막 고유의 저항( $m^{-1}$ ),  $R_f$ 는 막 오염에 의한 저항( $m^{-1}$ )이다.

고압용 막여과에서 사용되는 막여과 유속 식은 저압용 막여과 식에서

삼투압이 추가된 다음 식 (2.2)를 사용한다.

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

여기서,  $\Delta \pi$ 는 삼투압(Pa) 이다.

### (3) 막간 차압

막간 차압은 막을 기준으로 유입수와 생산수의 압력차를 나타내는 것으로 막 오염을 판단하고 막여과 시설을 운영하는데 중요한 지표가 된다. 막간 차압은 여과방식(가압/침지, 전량/순환)에 따라 계산 방식에는 차이가 있으며, 그림 2.4는 막여과 방식에 따른 차압계산 방법을 나타낸다.

가압식 막여과	침지식 막여과
<p>차압 = <math>\{(P1-h1)+P3\}/2-P2</math></p> <p>※P1, P2, P3: 측정압                  ※전량여과(P3 미측정)로 고려한 경우                  차압 = <math>(P1-h1)-P2</math></p>	<p>차압 = <math>P1+h1</math></p> <p>※P1 : 측정압(음압)</p>

그림 2.4 막여과 방식에 따른 차압계산 방법(한국수자원공사, 2011)

막간 차압은 막여과 유속과 막 저항이 같다면 수온에 따라 변화를 보인다. 따라서 이러한 변화를 수온 25 °C를 기준으로 보정한 보정차압을

도입하여 막 오염을 판단하는데 사용한다. 보정차압에 대한 상세한 내용은 2.2 보정차압에 다루기로 한다.

### 2.1.3 막 재질, 모듈 및 시스템

#### (1) 막 재질 특성 및 제조

막의 종류는 막세공의 특성, 막 단면의 구조, 친화성 여부, 막 제조에 사용된 재료의 성질에 따라 구분할 수 있다.

##### (가) 다공질막과 비다공질막

막의 세공의 특성에 따라 다공질막과 비다공질막으로 구분한다. 다공질막과 비다공질막의 차이는 막의 직경과 세공의 개수로 구분 지을 수 있다. 다공질막은 직경이 수 nm 이상이며 많은 세공을 가진 막으로 주로 콜로이드성 물질 제거에 사용되며, 비다공질막은 직경이 수 nm 이하의 세공을 가진 막으로 다공질막에서 제거하지 못하는 무기이온이나 저분자 물질을 분리하는데 용이하다.

##### (나) 대칭막과 비대칭막

막 단면기 구조에 따라서는 대칭막과 비대칭막으로 구분 지을 수 있다. 막 단면의 중심을 기준으로 대칭인 구조를 대칭막이라 하고, 비대칭막은 비교적 미세한 공격을 가진 표면층과 이 표면층을 지지하는 스펀지 형태의 지지층으로 이루어진 구조이며 대칭막보다 막의 막힘 현상이 적게 발생한다.



#### (다) 친수성막과 소수성막

물과의 친화성 여부에 따라 친수성막과 소수성막으로 구분할 수 있다. 친수성은 막의 제조에 사용된 막 재질에 의해 결정되게 된다. 셀룰로오스 계열이나 유리 등을 주성분으로 한 막의 경우 친수성을 가지게 되고, 테프론(polytetrafluoroethylene; PTFE), 폴리프로필렌(polypropylene; PP) 등으로 만들어진 막은 소수성을 가진다. 친수성막은 소수성막에 비해 투수율이 높고 막의 폐색이 적은 장점이 있다. 이렇기에 소수성 막을 화학적 처리를 통해 표면을 친수화시켜 투수율을 높게하여 이용하는 경우가 많다.

#### (라) 유기성막과 무기성막

막의 재질에 따라 유기(polymeric)막과 무기(ceramic or metallic)막으로 분류할 수 있다. 사용되는 재질에 따라 생산방법 또한 차이가 있다.

유기성막은 일반적으로 폴리머계통의 소재를 이용한다. 다양한 제조 방식이 있지만 기본적으로는 소재를 액상으로 용해시켜 이를 성형틀에 넣어 응결시키는 원리로 제조되며 상전환법, 연신법, 추출법 등의 방법이 이용된다. 대표적인 유기막은 폴리아크릴로니트릴(polyacrylonitrile; PAN), 폴리술폰(polysulfone; PS), 초산셀룰로오스(cellulose acetate; CA), 폴리에틸렌(polyethylene; PE), 폴리프로필렌(polypropylene; PP), 폴리불소화비닐리덴(Polyvinylidene fluoride; PVDF) 등 다양한 재질을 사용하여 제작 중이다.

무기성막은 주로 금속산화물이 이용되며 미세분말형태의 원료를 주입, 압축, 규화시켜 제작하며, 이 과정에서 많은 비용이 소모되기에 유기성막에 비해 고가의 막이다. 무기성막은 금속소재를 이용하여 제작하기에 유기성 막에 비해 내열성, 내약품성이 강하나 물리적 충격이 약하다는 단

점이 있다. 막의 재질별 개량적인 장단점은 아래 표 2.2와 같다.

**표 2.2 막 종류에 따른 분리경과 제거물질(한국수자원공사, 2011)**

구분	종류	장점	단점
유기 성막	폴리아크릴 로니트릴 (PAN)	· 친수성, 막 폐색에 강함 · 내약품성, 염소소독에 강함	-
	폴리술폰 (PS)	· 내약품성, 염소소독에 강함	· 소수성, 막 폐색이 잘됨
	셀룰로오스 아세테이트 (CA)	· 친수성, 막 폐색에 강함	· 화학약품에 약함 · 세균 번식의 우려가 있음 · 좁은 pH 허용 범위
	폴리 프로필렌 (PP)	· 높은 내구성	· 화학약품에 약함 · 염소소독에 약함
	폴리불소화 비닐리덴 (PVDF)	· 내약품성이 뛰어남	-
무기 성막	세라믹	· 내열성, 내약품성, 긴 수명 · 다양한 배열과 형상을 지닌 막 제조 가능	· 고가(expensive)임 · 물리적 충격 및 전단에 약함

주로 저압 막여과 공정에서는 PVDF 재질의 정밀여과 막과 한외여과 막을 사용하고 있다. 세라믹 막의 경우 아직 국내 적용사례는 많지 않으나, 원수 중의 철이나 망간 등의 제어를 위해 오존공정이 들어간 경우 막의 내화화성을 사유로 무기막인 세라믹 막을 적용한 사례도 있다.

막의 재질을 선택하는 것은 막여과 공정의 경제성을 결정짓는 주요한 인자이기에 원수의 특성, 제거대상물질 등에 따라 막의 재질을 선택하는 것이 중요하다.

## (2) 막 모듈의 종류 및 특징

실제 막여과 공정에는 여러 개의 막을 용기에 넣어 일체화한 모듈형태로 사용하는데 이러한 막모듈은 막의 형태와 배열 방식에 따라 평막형, 관상형, 중공사형, 나권형 모듈 등으로 구분한다.

### (가) 평막형 모듈(flat sheet type module)

평막형 모듈은 막여과 공정에서 가장 먼저 사용된 모듈로 구조가 간단하며 여러 분야에 광범위하게 사용되고 있으나 시설비가 과다한 단점이 있다.

평막 두장의 비활성층 부분을 스페이서를 사이에 두고 서로 마주보게 한 후 끝을 접착시켜 만들어진 원형 또는 일정한 형태의 막을 기계적 지지체 역할을 할 판의 위, 아래에 놓고 스페이서를 샌드위치 식으로 쌓은 후 틀에 장착시킨 것을 평판형 모듈이라 한다. 막의 배치형태에 따라 plate&frame형과 stack형으로 구분한다. 막을 수직으로 배치한 경우 plate&frame형, 수평으로 배치한 것을 stack형이라 한다. 일반적으로 순환여과방식으로 운전하는 것이 보통이다. 또한 평판막을 원판상으로 하여 회전시키는 형식도 존재한다(김종두, 2008).



그림 2.5 평막형 모듈(한국수자원공사, 2011)

(나) 관상형 모듈(tubular type module)

주로 원형의 housing에 여러개의 원통형 막을 충전 시킨 형태이며, 주입 원수가 지나가는 유로를 넓게 확보할 수 있기에 고탁도 원수 처리에는 용이하지만, 원수를 높은 유속으로 공급해야 하기에 운전비용이 증가하는 단점이 있다.



그림 2.6 관상형 모듈(한국수자원공사, 2011)

(다) 중공사형 모듈(hollow fiber type module)

중공사형 모듈은 주로 정밀여과나 한외여과 막에 적용되며, 속이 빈 실 모양의 막다발의 양쪽을 지지체에 고정시켜 만든 것으로 막의 충전 밀도가 높고 내압식과 외압식 두 가지 방법으로 사용할 수 있다. 내압식의 경우 유로가 좁아 폐색이 잦아 질 수 있어 고탁도 원수에는 적합하지 않다.



그림 2.7 중공사형 모듈(한국수자원공사, 2011)

(라) 나권형 모듈(spiral wound type module)

나권형은 주로 NF/RO 막에 이용된다. 나권형 모듈은 나권형 또는 와권형이라고도 부른다. 막의 구조는 평막을 말아놓은 모양으로 막과 막 사이에 막을 지지해주는 지지층이 있고, 이 지지층으로 원수를 투과시켜 생산수를 얻는다. 막의 충전 밀도가 높고 막의 간격이 좁기 때문에 현탁 물질이 포함된 원수를 투과시키기는 어렵다는 단점이 있다.



그림 2.8 나권형 모듈(한국수자원공사, 2011)

(마) 모노리스형 모듈(monolith type module)

모노리스형은 관상형막의 변종으로 주상에 성형한 지지체에 복수의 유로를 설치하여, 내벽면에 치밀층을 형성한 막이다. 그 막의 형상은 기둥의 석주(monolith)를 닮아 있어 모노리스형 막모듈이라 한다. 일반적으로 세라믹 재질을 사용하여 제작되며 운전은 내압식으로 한정되어 있다 (Mueller and Witte, 2008).

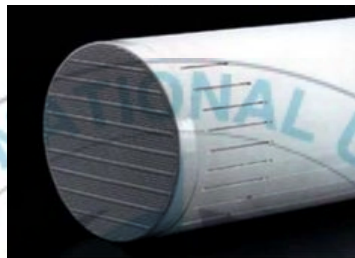


그림 2.9 모노리스형 모듈(Mueller and Witte, 2008)

(3) 막여과 운영방식

막여과 운영방식은 가압방식, 차압방향, 유량제어방식에 따라 분류할 수 있다. 가압방식에는 가압식, 침지식 두 가지로 분류되고 주로 가압식이 적용되고 있으나, 최근 서울시 영등포 정수장에서는 침지식 막이 적용된 사례가 있다. 가압식의 경우 막면에 원수를 공급하는 방식에 따라 전량여과방식과 순환여과 방식으로 분류할 수 있다. 차압방향에 따라서는 외압식과 내압식으로 분류되며, 유량제어방식에 따라 정압제어방식, 정유량제어방식으로 분류할 수 있다.

(가) 가압방식에 따른 분류

막여과의 기본 구동력은 막간 차압이다. 이 막간 차압을 발생시키는 방법에 따라 가압식과 침지식으로 분류할 수 있다.

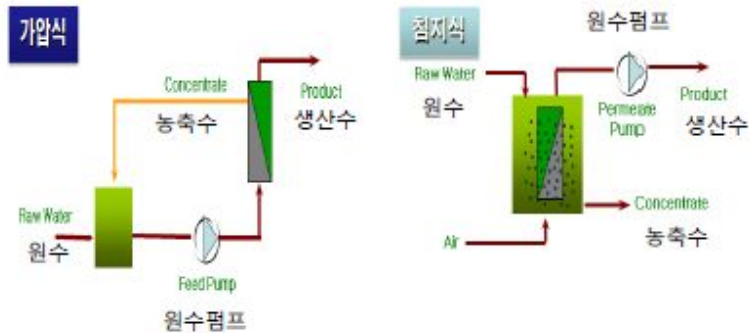


그림 2.10 가압방식에 따른 분류(한국수자원공사, 2011)

가압식과 침지식을 비교하면 목표수량 확보면에 있어서 가압식이 여과유속을 조정하기 편하여 유리하다. 또한 건설부지 측면에서도 침지조가 설치되는 침지식에 비해 가압식이 유리하며, 막의 유지관리 측면에서도 유리하다. 막에 오염이 발생하여 약품세정을 하는 경우 약품세척수량이 적으며 그 공정 또한 간편하여 온라인으로도 세척이 가능하다. 하지만 고탁도 원수 또는 원수의 수질이 좋지 않은 경우에는 침지식이 가압식에 비해 유연하게 대처할 수 있다는 장점이 있다.

가압식은 전량여과방식과 순환여과방식으로 한 번 더 분류를 할 수 있다. 전량여과방식이란 원수를 막면에 수직으로 전량 투과시키는 방법으로 기존의 모래여과방식과 같은 원리이다. 전량여과방식의 장점으로는 원수의 재순환이 없기에 펌프의 사용량이 작아 에너지 효율이 좋으며, 공기 세정을 추가하여 배수량을 줄이는 것도 가능하다. 단점으로는 원수의 전량이 모두 막을 투과하기에 막의 오염이 빨리 발생하며 역세척으로 회복이 불가능한 비가역적 막힘 현상이 발생하기 쉽다.

이와 달리 순환여과방식은 원수를 막면과 수평으로 흘러 원수의 일부만을 투과시키는 방법으로 수평으로 흐르는 원수로 인해 전량여과방식보

다는 막표면 부착량이 적게되어 높은 막여과 유속을 유지할 수 있으며, 비가역적 막힘 현상이 발생하기 어렵다. 단 원수를 계속 재순환하여 사용하기에 펌프의 사용량이 많은 단점이 있다.



그림 2.11 전량여과 방식과 순환여과 방식(한국수자원공사, 2011)

침지식은 가압식과는 달리 개방형 또는 밀폐형 막모듈을 사용하여 침지조 내에 설치하여 여과하는 방식이다. 기본적으로 전량여과방식으로 운전된다.

(나) 차압방향에 따른 분류

가압식 중공사형 여과방식에서 막모듈로 원수가 유입되는 방향에 따라 외압식과 내압식으로 분류할 수 있다. 외압식은 원수가 막의 외부에서 내부로 통과하며, 내압식은 막의 내부에서 외부로 통과하게 된다.

가압식 중공사형 막의 경우 동일 막여과 유속에서는 외압식이 내압식에 비해 넓은 여과면적을 확보할 수 있으며, 막면의 오염현상도 외압식이 내압식에 비해 적게 발생하기에 외압식이 많이 사용되고 있다.



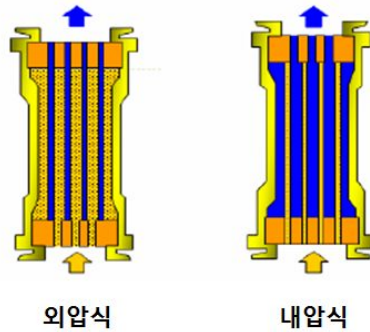


그림 2.12 차압방향에 따른 분류(한국수자원공사, 2011)

(다) 유량제어방식에 따른 분류

마지막으로 유량제어방식은 정유량 제어와 정압 제어 두 가지가 있다. 정압제어방식은 막간 차압을 일정하게 유지시켜 여과시간이 증가할수록 여과수량이 줄어드는 방법이다.

정유량 제어방식은 여과유량을 일정하게 원수 공급 펌프의 회전수를 조절하는 방식과 막 후단에 여과수 유량계와 막 전단의 밸브를 연계하여 밸브를 제어하는 방식이 있다.

일반적으로 정유량 제어방식이 많이 사용되고 있으며, 그 중에서 펌프의 회전수를 조절하는 방식이 초기 건설비는 높으나, 전력비가 절감되기에 많이 사용되고 있다.

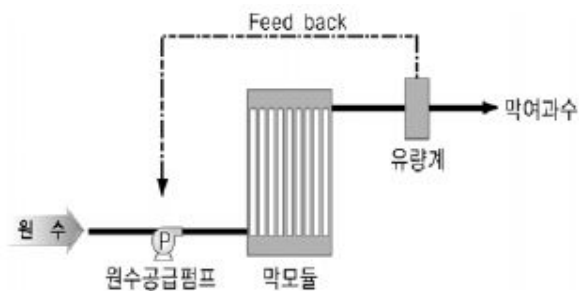


그림 2.13 정유량 제어(펌프 회전수 제어) 방식(한국수자원공사, 2011)

## 2.2 보정차압

### 2.2.1 보정차압의 정의

2.1.2 막여과 기초에서 막간 차압을 다루며 잠시 언급한 것처럼 보정차압이란 실제 막간 차압이 원수의 수온에 따라 변하게 되므로 수온의 영향을 차압에 반영하여 실제 막에 오염이 발생하였는지, 아니면 수온이 낮아짐에 따라 차압이 상승하여 이것이 막이 오염된 것처럼 보이는 것인지 알아보기 위해 보정차압을 사용한다. 따라서 보정차압을 간단히 요약하자면 원수 수온의 영향을 배제한 막간 차압이라고 정의할 수 있다.

### 2.2.2 보정차압 계산

보정차압은 실제 막간 차압에 온도보정계수를 곱하여 계산한다. 온도보정계수는 수온 25 °C일 때를 표준온도로 하여 25 °C 점성계수에 실제 수온의 점성계수를 나누어 계산하게 되며 식 (2.3)과 같다.

$$\Delta P_{T=25^{\circ}\text{C}} = \Delta P \times \frac{\mu_{25}}{\mu_T} \quad (2.3)$$

여기서,  $\Delta P_{T=25^{\circ}\text{C}}$  는 보정차압,  $\Delta P$ 는 막간 차압,  $\mu_T$ 는 온도 T °C일 때 물의 동점성계수이다.

물의 동점성계수는 다음 식 (2.4)로 계산된다.

$$\mu_T = A \exp\left[\frac{(1 + BT)}{(CT + DT^2)}\right] \quad (2.4)$$

여기서, A는  $0.1257187 \times 10^{-1}$ , B는  $-0.5806436 \times 10^{-2}$ , C는  $0.1130911 \times 10^{-2}$ , D는  $-0.5723952 \times 10^{-6}$ , T는 온도(°F)이다(김수한, 2013).

## 2.3 막 오염

### 2.3.1 막 오염의 정의

모든 막여과 공정의 경제성을 좌우하는 가장 큰 요인은 막 오염에 의한 막여과 유속 감소이다. 막여과 공정의 경제적인 측면에서의 장점을 가지기 위해서는 높은 막여과 유속은 꼭 필요하다. 막 오염을 정의하자면, 원수 내 이물질이 막의 표면이나 내부공극에 부착되어 막이 본래의 기능을 다하지 못하도록 억제하는 현상이라 정의할 수 있다(Belfort et al., 1994).

막 오염은 그림 2.14 처럼 입자와 막의 공극 크기에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있다(Cha et al., 2012).

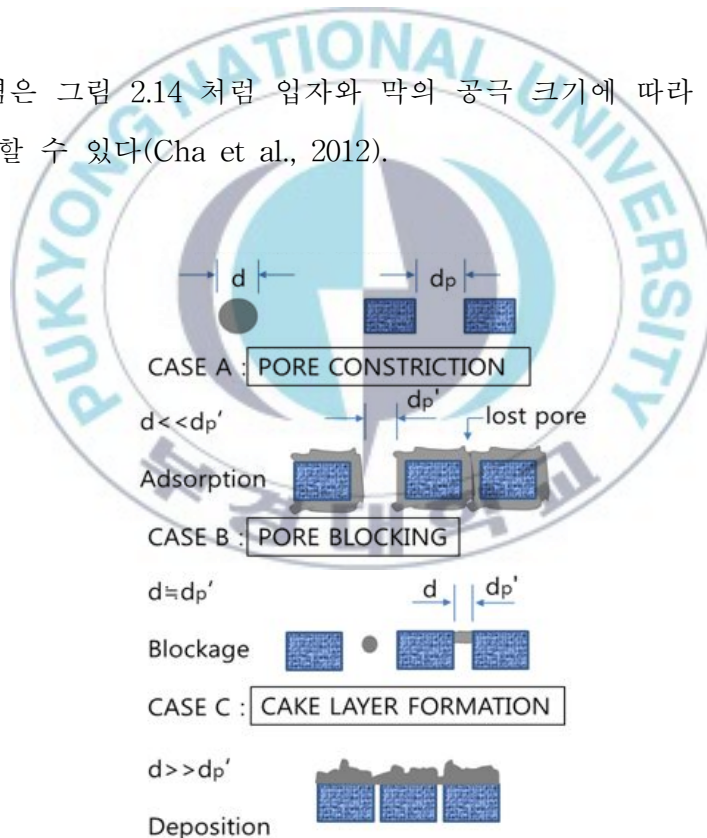


그림 2.14 막 오염 모식도(Cha et al., 2012)

(1) 공극 축소(pore constriction): 막 공극의 지름보다 작은 공경의 입

자가 공극 내부에 흡착하여 공극의 크기가 축소되는 현상이다. 이 흡착 정도에 따라 공극이 완전히 막아버리는 경우도 발생하게 된다.

(2) 공극 막힘(pore blocking): 막 공극의 지름과 거의 같은 공경의 입자가 공극을 완전히 막아버리는 현상을 말한다.

(3) 케이크층 형성(cake layer formation): 막 공극의 지름보다 큰 입자들이 막 표면에 쌓이면서 막힌 공극 위에 여러 입자들이 계속 층을 형성하는 것으로, 이를 케이크층이라 한다.

총 세 가지 파울링 현상 중에서 공극 축소나 공극 막힘 현상과 같이 입자가 공극 내부로 침투한 경우에는 막의 회복이 매우 어려울 가능성이 있다. 회복이 불가능한 파울링을 비가역적 파울링이라 하며, 이와 반대로 세척으로 회복이 가능한 파울링을 가역적 파울링이라 한다.

일반적으로 케이크층 형성은 원수를 급수하는 과정 또는 막 세척에 의해 회복이 가능하므로 가역적 파울링에 속한다. 따라서 막의 공극 크기를 선정할 때 원수 내에 존재하는 입자의 크기보다 작은 공극 크기를 결정하는 것이 처리 효율과 더불어 비가역적인 파울링을 막기 위해서도 매우 중요하다고 할 수 있다. 이러한 이론을 확인하기 위해 실제로 정수 공정에 정밀여과와 한외여과를 적용시켜 본 연구 결과가 있다(Hiroyuki et al., 1998). 운전 초기에는 정밀여과 막이 막여과 유속이 높아 생산수를 많이 확보할 수 있으나, 막의 공극 내에 흡착한 입자들에 의해 급격히 막여과 유속이 저하되는 결과를 보였다. 정밀여과 막보다 공극이 작은 한외여과 막에서는 초기 막여과 유속은 낮았지만 막 오염의 진행속도가 느렸다. 따라서 장기적으로 보자면 막여과 유속 측면에서는 한외여과가 더 나은 결

과를 보인다. 그러므로 원수를 구성하는 물질이 막의 공극보다 작은 경우 막 오염의 진행속도도 늦출 수 있으며, 비가역적인 파울링이 발생하는 것도 억제 가능하다.

### 2.3.2 막 오염 대처방안

막 오염을 대처하기 위한 방안으로는 두 가지를 생각할 수 있다. 하나는 막에 공급되는 원수에서 막 오염을 일으킬 물질을 미리 제거하는 전처리를 실시하는 것이고, 다른 하나는 막 오염이 발생했을 때 이를 물리적 또는 화학적으로 세정하여 주는 것이다.

#### (1) 전처리

모든 막여과 공정에서 유지관리, 경제적인 측면을 생각하면 전처리는 꼭 필요하다. 유기막의 경우 원수 중의 협잡물과 토사 등에 의해 막의 표면에 손상이 발생할 수 있고, 협잡물에 의해 유로의 폐색 등에 의한 문제를 방지할 수 있다. 이와 같이 원수 중에 협잡물 등의 오염물질이 유입되지 않도록 스크린이나 프리필터 등이 전처리에 사용된다(표 2.3 참조).

정수처리용으로 사용되는 정밀여과막, 한외여과막의 여과수가 먹는물 수질기준을 만족하지 못하는 경우 전처리가 도입되거나 다른 처리법과의 조합 공정이 요구된다. 특히 소량의 망간이 여과수에 함량 된 경우 염소 소독(후처리)에 의해 질산화를 일으키게 되고, 이를 물리세정수로 사용하는 경우 막 차압의 상승을 초래할 수 있다. 따라서 막 여과법에서는 망간에 대한 제어가 필요한 경우 전처리로 제거한다.

또한 유기물질이 막에 흡착되어 물리세정으로도 회복이 불가능한 비가역적 오염이 발생한 경우, 원수 내 유기물 농도가 높은 경우 막여과 공정의 부하를 저감하기 위해서도 전처리를 사용한다. 주로 탁질부하가 높

은 경우에는 응집제를 사용하고, 유기물의 농도가 높은 경우에는 분말활성탄 및 오존 등의 산화제를 주입하여 전처리를 실시한다(WHO, 1993).

표 2.3 제거물질별 전처리방안(WHO, 1993)

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/생물처리 가용화 또는 불용화(약품, pH, 가열)
에멀전/유지	유상분리, 원심분리, oil separator, 계면활성제, 상평형의 변화
현탁물질/침전물	스크린, prefilter, 원심분리, 응집침전, 사여과, 규조토여과 응집, body feeder
미생물	필터, 산화제(염소 등), 살균(약품, 가열, 자외선), 응집여과 응집, body feeder

## (2) 막의 세정

막의 세정방법은 물리세정과 화학세정 두 가지가 있다. 물리세정은 가압식 MF/UF 막여과 공정에서 이루어진다. 물리세정은 원수가 막을 거쳐 생산수가 되는 여과 과정을 역으로 하여 생산수가 막을 거쳐 막의 표면 또는 내부에 흡착된 물질을 빼내어주는 역할을 한다. 이러한 물리세정은 일정 여과 시간 이후 바로 진행되어 막 오염의 진행속도를 더디게 하는 효과를 볼 수 있다. 화학세정은 이러한 물리세척으로도 회복이 불가능한 오염 즉, 비가역적 막 오염이 발생한 경우 실시하게 된다. 특히 철이나 망간과 같은 용존성 물질이 막 공극 내부에서 산화, 석출되어 흡착된 경우라면 물리세척으로 제거가 힘들기에 화학세척을 통해 제거한다.

## 2.4 막 저항

### 2.4.1 막 저항의 정의

막 저항이란 막을 통과하는 원수에 대한 저항이라고 정의할 수 있다. 이러한 막 저항은 크게 막 고유의 저항과 막 오염에 의한 저항으로 구분할 수 있다.

### 2.4.2 막 저항의 분류와 계산

#### (1) 막 고유의 저항

막 고유의 저항은 오염에 의한 저항이 아닌 막의 구조, 즉 막 자체에 의한 저항이다. 막 고유의 저항은 막에 어떠한 오염이 발생하더라도 변하지 않고 일정한 값을 유지한다. 막 고유의 저항을 계산하는 이론적인 식은 식 (2.5)와 같다.

$$R_m = \frac{K(1-\varepsilon)^2 S^2 l}{\varepsilon^3} \quad (2.5)$$

여기서,  $R_m$ 은 막 고유의 저항,  $\varepsilon$ 는 공극률,  $S$ 는 단위 부피당 공극 표면적,  $l$ 은 막 두께,  $K$ 는 상수이다. 본 연구에서 사용된 막의 공극률, 단위 부피당 공극 표면적, 막 두께, 상수 등을 알기 어렵다. 이런 경우 막에 오염을 일으키지 않는 초순수를 사용하여 막여과 유속과 막간 차압 그리고 원수의 점성계수를 사용하여 막 저항을 역으로 계산할 수 있다.

본 연구에서는 원수를 일정 온도로 설정한 다음 막여과 유속을 변동시켜 가며 차압을 측정하여 막여과 유속식을 통해 막저항을 계산하였다.

## (2) 막 오염의 저항

2.3 막 오염에서 다룬대로 막여과 공정을 운전하게 되면 막의 공극 크기와 오염 물질의 크기로 인해 케이크층, 공극 흡착, 공극 막힘 등 여러 가지 오염이 발생한다. 이 외에도 외/내부 농도분극, 스케일, 미생물 파울링, 가역적 막 오염으로 인한 저항, 비가역적 막 오염으로 인한 저항 등 다양한 종류의 막 오염을 다룬다(Lim and bai, 2003; Schafer et al., 2000; Fan et al., 2001; 김수한, 2003; Hong and Elimelech, 1997).

이 중에서도 거의 모든 논문에서 빠지지 않고 다루는 막 오염의 저항은 케이크 층에 의한 저항이다. 이는 막 고유의 저항 보다는 케이크 층 형성에 의한 저항이 막여과 유속에 더 큰 영향을 미치는 인자로 나타나고 있으며, 케이크 층 저항을 입자성 물질의 직경으로 구하는 계산식 또한 있다(김수한, 2003).

본 연구에서는 오염 물질의 크기로 인해 케이크 층 형성에 의한 저항과 공극 흡착 또는 막힘에 의한 저항 두 가지로 분류하였으며, 실제 막 저항의 계산은 막 고유의 저항까지 포함하여 막 전체의 저항을 계산하여 온도에 따른 막 저항의 변화를 확인하였다.



## 제3장 연구방법

### 3.1 실험 개요

본 연구의 목적은 온도에 따른 막 저항의 변화를 관찰하는 것이다. 목적을 달성하기 위해 다음과 같은 실험을 진행하였다.

(1) 정밀여과 막, 한외여과 막 고유의 저항 변화: 정밀여과, 한외여과 막 고유의 저항 변화를 알아보기 위해 수돗물을 샘플로 하여 온도에 따라 투수율 실험을 진행하여 막 고유의 저항을 측정하였다.

(2) 정밀여과 막 오염에 의한 저항 변화: 정밀여과 막에 오염을 가하기 위해 수돗물에 카올린과 휴믹산을 각각 첨가한 원수를 제조, 막에 각기 다른 오염을 가한 후 온도에 따른 투수율 실험을 진행하여 막 오염의 저항을 조사하였다.

(3) 역삼투 막의 원수 수온에 따른 막 저항 변화: 초순수를 샘플로 하여 기수용, 해수용 역삼투 막을 이용하여 온도에 따른 투수율 실험을 진행하여 막 고유의 저항 변화를 조사하였다.

### 3.2 실험 재료 및 장치

#### 3.2.1 막

실험에 사용된 막은 국내업체의 정밀여과 막, 기수용 역삼투 막, 해수용 역삼투 막을 사용하였고, 국외업체의 한외여과 막을 사용하였다.

(1) 정밀여과 막

정밀여과 막은 국내 A사의 중공사형 미니 막모듈을 사용하였다. 막의 재질은 PVDF이며, 공극 크기는  $0.1\ \mu\text{m}$ , 막면적은  $1.0\ \text{m}^2$ 이다.



그림 3.1 정밀여과 막모듈

(2) 한외여과 막

한외여과 막은 국외 B사의 중공사형 미니 막모듈을 사용하였다. 재질은 정밀여과 막과 마찬가지로 PVDF이며, 공극은  $0.03\ \mu\text{m}$ , 막면적은  $0.3\ \text{m}^2$ 으로 공극과 막면적은 정밀여과 막보다 작은 것을 사용하였다.

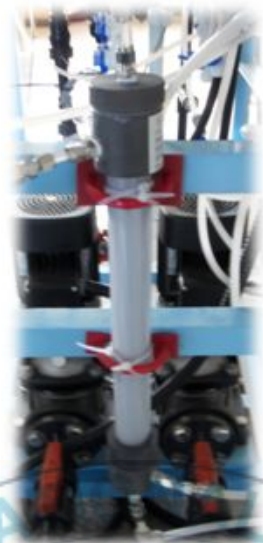


그림 3.2 한외여과 막모듈

(3) 기수용 역삼투 막

기수용 역삼투 막은 웅진케미칼 사의 RE8040-BE 제품의 평막을 사용하였다. 막의 재질은 PA(polyamid)이고, 염제거율은 99.7 %이다. 평막은 고압 막여과 장치 Cell에 맞게끔 차단하여 사용하였기에 막면적은  $0.0066 \text{ m}^2$ 이다. 기수용 역삼투막은 그림 3.3과 같다.



그림 3.3 기수용 역삼투 막

#### (4) 해수용 역삼투 막

해수용 역삼투 막은 기수용 역삼투 막과 같은 국내 웅진케미칼사의 RE16040 평막을 사용하였다. 막 재질은 PA이고, 염제거율은 99.75 %이고, 막면적은 기수용 역삼투 막과 동일한  $0.0066 \text{ m}^2$ 이다.

### 3.2.2 원수

#### (1) 수돗물

정밀여과 및 한외여과 막 실험에 사용된 원수는 수돗물이다. 투수율 실험 시 원수에 아무런 물질이 없는 초순수를 사용하여 확인하는 것이 좋다. 하지만 실제 실험에 필요한 원수의 양은 100 L 이상을 필요로 하고, 투수율 실험, 막 오염 실험을 진행하기에 수돗물을 사용하였다. 수돗물을 한 시간 가량 막에 여과시켜 막 오염의 증가가 발생하는지 확인한 결과 차압은 상승하지 않았고, 투수율 실험 기간은 30 분 이내이기에 수돗물을 사용하여도 문제가 없을 것이라 판단된다.

#### (2) 초순수

역삼투 막 실험에서는 정밀여과 및 한외여과 막 실험과는 달리 초순수를 사용하였다. 정수장에서 나오는 원수에는 급수과정에서 발생할 수 있는 오염을 방지하기 위해 주로 차아염소산을 사용하여 소독한다.

수돗물 내에 잔류염소가 존재하는 경우, 잔류염소가 폴리아미드계 역삼투 막과 접촉하는 경우 막을 분해한다(Potts et al., 1981; Glater et al., 1994). 수돗물에는 급수과정에서 미생물에 의한 오염을 방지하기 위해 미량의 잔류염소가 남아있다. 이럴 경우 막의 분해로 인해 막 저항의 변화

를 명확히 확인할 수 없다. 또한 역삼투 막 고유의 저항을 조사하기 위해서는 삼투압이 없어야 한다. 따라서 역삼투막 실험에서는 원수의 전기전도도가 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이하인 초순수를 사용하였다. 초순수는 실험실 내 초순수 장치를 사용하여 제조하였다.

### 3.2.3 오염물질

온도에 따른 막 오염에 의한 저항의 변화를 알아보기 위해 사용한 오염물질은 카올린과 휴믹산이다. 막 오염, 막 저항 부분에서도 언급하였지만, 막의 저항은 다양한 종류가 있다. 그 중에서 케이크층 저항과 공극 내부 흡착, 공극 막힘 등의 저항을 분리하여 수온에 따른 변화를 관찰하고자 한다.

#### (1) 카올린

실험에 사용한 카올린은 대정화금 사의 카올린 제품(CAS No. 1332-58-7)을 사용하였으며, 화학식은  $\text{H}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$  이다. 카올린의 입경은 평균 직경은 2  $\mu\text{m}$ 이다(Carroll, 1970). 정밀여과 막의 공경인 0.1  $\mu\text{m}$  보다 20 배 가량 크기에 막 표면에 케이크 층 만을 형성하는 것이 가능하다. 카올린을 사용하여 막 표면에 케이크 층을 형성하여 막의 저항이 원수 수온에 영향을 받는지 확인하고자 한다.

#### (2) 휴믹산

실험에 사용한 휴믹산은 대정화금 사를 통해 Wako 사의 휴믹산 제품(CAS No. 1415-93-6)을 구매하여 사용하였다. 휴믹산은 자연유기물(natural organic material; NOM)의 구성물질 중 하나로 자연유기물에서 약 50% 이상을 차지하고 있다(Thurman, 1985). 휴믹산은 보통 토양에 존

재하며, 갈색 또는 흑색의 유기 물질 형태로 남아 있다(Jucker and Clark, 1994). 이러한 휴믹산은 분자크기에 대해서는 아직 명확하게 정의가 이루어지지 않았다. 그 이유는 분자량의 분산도가 높고, 이들 분자크기가 분자량의 영향만 받는 것이 아니라 pH, 이온강도 등에 따라 달라지기 때문이다(Katsoufidou et al., 2008). 하지만 Jin et al. (2009)는 수온에 따른 휴믹산의 입경 크기 분포를 확인한 결과 70 ~ 110 nm 입경 분포를 보였으며, 수온이 낮을수록 큰 입경이 많이 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 정밀여과 막 공극 내부에 흡착 현상을 유발할 것이라 생각되기에 실험에 사용하였다.

#### 3.2.4 실험실 규모 막여과 장치

실험에 사용된 막여과 장치는 실험실 내에 보유하고 있는 저압 막여과 장치와 고압 막여과 장치를 사용하였다.

##### (1) 저압 막여과 장치

정밀여과 막과 한외여과 막의 투수율 실험과 막 오염 실험은 저압 막여과 장치로 실험하였다. 원수탱크와 온도조절장치를 연결하여 원수의 수온을 일정하게 유지시켜 줄 수 있도록 하였으며, 전량여과 방식으로 운전하였다. 유량제어방식은 정유량제어로 펌프 인버터 조절 방식을 사용하였으며, 생산수 유량계를 통해 막여과 막여과 유속을 계산하여 펌프의 인버터로 막여과 유속을 설정한 다음 원수측과 생산수측 압력계의 값을 기록하여 차압을 계산하였다.

막 오염 실험을 진행할 때는 원수탱크에 교반기를 설치하여 원수 내 카올린, 휴믹산 입자들이 탱크 내에 침전하지 않도록 하였다.

현재 막여과 장치에 역세척을 하기 위한 역세펌프와 역세 배관도 포

함되어 있으나, 본 연구에서는 막 오염 후 온도에 따른 막 저항을 관찰하고자 하기에 역세척은 실시하지 않았다. 장치의 공정도 및 사진은 그림 3.4, 3.5와 같다.

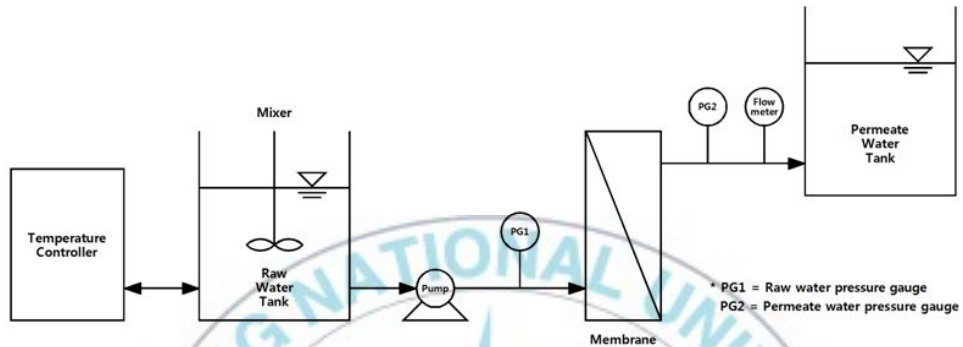


그림 3.4 저압 막여과 장치 모식도



그림 3.5 저압 막여과 장치 사진

## (2) 고압 막여과 장치

역삼투 막 실험에 사용된 고압 막여과 장치의 구성은 저압 막여과 장치의 구성과 크게 다르지 않다. 차이가 있는 점은 역삼투 막에서 원수에

고압을 주어야 하기에 고압펌프가 사용되었으며, 고압의 원수가 막에 접촉되기에 그 압력을 견뎌주기 위해 스테인레스 재질의 RO Cell에 평막을 설치하여 실험하였다. 또한 역삼투 막 실험은 전량여과가 아닌 순환여과로 이루어지며, 생산수 유량계가 없기에 저압 막여과 실험처럼 막여과 유속을 변화 시켜가며 압력을 조절하기란 매우 어렵다. 그렇기에 농축수 유량을 고정시키고, 원수 펌프의 압력을 인버터로 조절하여 생산수 유량을 저울로 측정하여 막여과 유속을 계산하였다. 장치의 공정도 및 사진은 그림 3.6, 3.7과 같다.

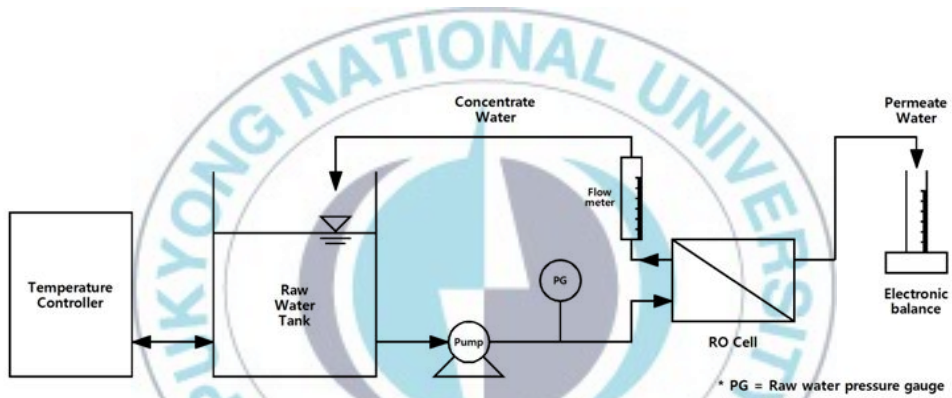


그림 3.6 고압 막여과 장치 모식도



그림 3.7 고압 막여과 장치 사진



### 3.2.5 수질분석 장치

#### (1) 수온 및 전도도 측정기

원수 및 생산수의 온도와 전도도를 측정하기 위해서 YSI 사의 YSI 63 제품을 사용하여 측정하였다. 수온의 측정범위는  $-5 \sim 75$  °C이며, 전도도의 측정범위는  $0 \sim 200$  mS/cm 이다.



그림 3.8 수온 및 전도도 측정기

#### (2) 휴대용 탁도계

막 오염 실험시 막에 이상 유무를 판단하기 위해 원수와 생산수의 탁도를 측정하기 위해 사용하였으며, HF scientific 사의 MicroTPI Handheld Turbidimeter 제품을 사용하였다. 탁도의 측정범위는  $0.01 \sim 1,100$  NTU(nephelometry turbidity unit)이다.



그림 3.9 휴대용 탁도계

### (3) UV/VIS 분광광도계

UV/VIS 분광광도계는 휴믹산을 이용한 막 오염 실험 시 막에 휴믹산이 잘 흡착되는지 등을 확인하기 위해서 원수와 생산수의 UV<sub>254</sub>를 측정하는데 사용하였다. UV/VIS 분광광도계는 Shimadzu사의 UV1240-mini 제품을 사용하였다.



그림 3.10 UV/VIS 분광광도계

## 3.3 실험방법

### 3.3.1 투수율 실험

투수율 실험의 목적은 온도에 따른 막 저항의 변화를 확인하기 위해서 실시한다.

투수율이란 원수가 막을 얼마나 쉽게 통과하는지를 나타내는 지표이며, 다음 식 (3.1)로 계산된다.

$$k = \frac{J}{\Delta P} \quad (3.1)$$

여기서,  $k$ 는 투수율(m/Pa·s),  $J$ 는 막여과 유속(m/s),  $\Delta P$ 는 막간 차

압(Pa)이다. 본 실험에서는 위 식을 이용하여 실험의 신뢰성을 높이고자 한다. 막여과 유속 식에서도 알 수 있듯이 막간 차압과 막여과 유속은 서로 비례하는 관계를 가진다. 따라서 원수의 수온이 일정하게 유지되고, 막 오염이 진행되지 않는다면 막여과 유속과 막간 차압의 비(투수율)는 일정하게 나타나야 한다. 따라서 한 개의 수온 조건에서 5개의 막여과 유속 또는 막간 차압을 변화하여 실험을 진행한 후, 투수율이 일정하게 나타나는지 확인하고, 막여과 유속 식을 통해 막 저항을 계산하였다.

실험에 사용된 막은 네 종류로 막의 종류별로 실험 방법에는 차이가 있다.

공통적인 부분은 원수의 온도 범위이다. 원수의 온도 범위는 5 ~ 40 °C로 하였으며, 이 중 다섯 개의 온도를 임의로 설정하여 투수율 실험을 진행하였다. 현장의 정밀여과, 한외여과 막을 사용하는 막여과 공정의 경우 원수를 하천수, 호소수, 복소수 등을 사용하게 되고, 원수의 온도 범위는 각 지역에 따라 미세한 차이를 보이거나 주로 5 ~ 30 °C 범위로 나타남을 알 수 있다(유명진 등, 2006). 하지만 정밀여과 막과 한외여과 막은 역삼투 공정의 전처리로도 사용되고 있기에 해수의 온도 범위인 5 ~ 40 °C 로 더 넓은 범위로 설정하였다.

투수율을 측정하는 방법은 정밀여과 막과 한외여과 막의 경우, 막여과 유속을 기준으로 실험을 진행하였으며, 기수용 역삼투 막과 해수용 역삼투 막의 경우 막여과 유속을 기준으로 실험하기 어렵다고 판단되기에 원수 압력을 기준으로 실험을 진행하였다. 막의 종류별 투수율 실험은 표 3.1 과 같이 진행하였다.

표 3.1 막 종류별 투수율 실험 방법

구분	정밀여과막	한외여과막	기수용 역삼투막	해수용 역삼투막
원수	수돗물		초순수	
수온 조건	5 ~ 40°C			
막여과 유속(m/d) 조건	0.5 ~ 2.5	1.0 ~ 5.0	-	
압력(MPa) 조건	-		1.0 ~ 3.0	

### 3.3.2 막 오염 실험

막 오염의 저항이 온도에 따른 변화가 있는지를 확인하기 위해서 막에 유/무기 오염을 실시하여 차압을 상승시킨 후 그 변화를 알아보았다.

막 오염 실험을 하는데 있어서 원수의 수온은 막 오염 진행속도에 미세하게 영향을 끼치겠지만 본 연구에서 알아보하고자 하는 바는 막에 오염이 진행된 후 온도에 따른 막 저항의 변화이므로 상온에서 실험을 실시하였다. 막에 오염을 가하는 것이 목적이기에 실험시 막여과 유속은 막의 최대 허용 차압 이하의 유속 범위에서 운전하였으며, 전량여과, 정유량 제어 방식으로 실험하였다.

무기오염에 사용된 약품은 앞서 설명한 카올린이며, 3,000 ppm의 고농도 원수를 제조하여 실험에 이용하였다. 실험시 카올린이 원수 탱크 내에 침전하는 것을 방지하기 위해 교반기를 사용하였다. 원수의 탁도는 1,100 NTU 이상으로 보유중인 탁도계로는 측정이 불가능하였다. 카올린에 의한 막 오염은 차압으로 판단하였으며, 초기 차압 16 kPa에서 26 kPa 까지 10 kPa 상승(약 162 % 상승)시킨 후 투수율 실험을 진행하였다.

유기오염에 사용된 약품은 휴믹산으로 1,000 ppm 이상의 고농도 원수를 제조하여 실험에 이용하였다. 원수의 탁도는 카울린의 경우와 마찬가지로 1,100 NTU 이상이었으며,  $UV_{254}$ 는  $0.409 \text{ cm}^{-1}$ 로 낙동강 원수의  $UV_{254}$   $0.054 \text{ cm}^{-1}$ (정철우 등, 2002)에 약 7.6배 높은 원수를 사용하여 막을 오염하였다. 휴믹산 용액의 경우 초기 생산수의  $UV_{254}$ 는  $0.149 \text{ cm}^{-1}$ 로 낙동강 원수의  $UV_{254}$  보다 2 배 이상 높은 값을 나타내었다. 실험 계획시 100 L의 원수로 충분히 막이 오염이 될 것이라 생각했으나 예상과는 달리 막 오염의 진행속도가 느리고, 고농도의 휴믹산 원수를 계속 만들어서 사용하는 것이 어렵다고 판단하여 생산수를 다시 원수로 순환시키는 방법으로 장기간 막 오염 실험을 진행하였다. 원수의  $UV_{254}$  값을 지속적으로 측정하여 값이 낮아지는 경우 휴믹산을 추가로 주입하여 원수 내  $UV_{254}$  농도를 높여주었다. 휴믹산에 의한 막 오염은 초기 차압 15 kPa에서 25 kPa로 10 kPa 상승(약 167% 상승)시킨 후 투수율 실험을 진행하여 온도에 따른 막 오염에 의한 저항 변화를 확인하였다.

### 3.4 실험 결과 분석

대부분의 연구는 연구하고자 하는 내용에 대해 가설을 세우고, 그것을 검증하기 위해 가장 좋은 방법은 실험을 하는 것이다. 그러나 모든 실험에는 많은 변수가 존재하고 있으며, 실험을 반복하여 똑같은 결과를 얻는 것은 불가능에 가깝다. 따라서 실험 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 여러 번의 반복 실험을 하는 것이 좋다. 하지만 이는 현실적으로 불가능할 수도 있으며, 시간, 경비가 많이 필요하다(김수한, 2003). 본 연구에서는 연구 가설을 검증하기 위해 실험을 하였으며, 실험 결과의 정확도와 신뢰성을 높이고자 통계적 분석방법인 t-분포, F-분포, 회귀분석을 실시하였다.

각 통계분석에 대한 이론은 아래 간략히 표시하였으며, 이론에 대한 자세한 내용은 통계학 책을 참고하기 바란다.

본 연구의 실험 결과 분석은 MS Office Excel의 데이터 분석을 이용하여 실시하였다.

### 3.4.1 실험 결과의 추정과 검정(t-분포)

대부분의 실제 문제에서는 모분산  $\sigma^2$ 은 알려져 있지 않은 경우가 대부분이며, 오히려 모분산에 대해 추정하기를 원하는 경우가 많다. 이러한 경우에는 모분산을 알고 있다는 가정 하에 사용된 확률변수  $Z$ 는 통계적 추론에 사용할 수 없다.

t-분포는 아일랜드의 맥주회사 기사였던 W.S. Gosset에 의해 처음으로 제시되었다. 재료와 온도를 변화함에 따라 맥주의 품질이 어떻게 변하는지를 실험을 통해 과학적으로 분석하고자 하였으나, 실험으로부터 얻을 수 있는 자료의 수가 적었기 때문에 이 문제를 해결할 수가 없었다. 이에 그는 정규분포를 모집단으로부터 추출된 표본의 크기가 작을 경우 유용하게 사용될 수 있는 t-분포를 고안하여 제시하였다. 즉 모분산  $\sigma^2$ 을 모르고 표본의 크기  $n$ 이 작을 경우에는 확률변수  $Z$ 에서 모분산 대신 표본표준편차를 사용하여 생긴 새로운 확률변수  $T$ 는 자유도가  $n-1$ 인 t-분포를 따른다는 사실을 보였다(배현웅, 2001).

이 분포는 다음 식 (3.2)로 계산된다.

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}} \quad (3.2)$$

t-분포는 자유도  $n$ 에 따라 그 분포의 모양이 변하며, 자유도가 높을수록 표준정규분포에 가까워지고, 자유도가 30 이상이면 표준정규분포와 거

의 일치함을 알 수 있다.

확률변수  $T$ 가 자유도  $n$ 인  $t$ -분포를 따르는 경우,  $P(T > t) = \alpha$ 를 만족하는  $t$ 값을 자유도  $n$ 인  $t$ -분포의 상위  $100\alpha\%$  백분위수라고 하며,  $t(n, \alpha)$ 라고 표기한다.  $t$ -분포에 대한 확률은 통계책의  $t$ -분포표를 이용하여 쉽게 계산이 가능하다.

### 3.4.2 두 분포의 차이 여부를 검정하는 방법(F-분포)

두 분포의 차이를 검정하기 위해 사용한 방법은 F-분포이다. 한 개의 수온에서 막 저항을 계산하여 검정하는 것은 앞의  $t$ -분포로 추정 및 검정하였다. 본 연구에서는 한 개의 수온이 아닌 수온의 변화에 따라 막 저항이 변하는 것인지를 확인하고자 한다. F-분포는 서로 독립인 두 확률변수  $V_1, V_2$ 가 각각 자유도  $n_1, n_2$ 인  $\chi^2$  분포를 할 때, 확률변수  $F$ 는 식 (3.3)과 같다.

$$F = \frac{V_1/n_1}{V_2/n_2} \quad (3.3)$$

이 확률변수  $F$ 는 자유도  $(n_1, n_2)$ 인 F-분포를 따르고, 이 분포는  $F(n_1, n_2)$ 로 표기한다. F-분포는 두 개의 자유도에 의해 분포의 모양이 결정되며,  $\chi^2$ 분포와 마찬가지로 자유도에 따라 그 모양이 변하나 대체로 왼쪽에 치우치게 된다. 그러나 두 자유도 모두 또는 둘 중 하나의 자유도가 증가함에 따라 분포의 모양은 점점 대칭형에 가까워진다.

F-분포는 두 분포가 다른 성질을 가지고 있다는 가설을 검정할 때 적절하고, 두 분포가 같은 성질을 가지고 있다는 가설을 검정할 때는  $\chi^2$ -분포를 사용하는 것이 적절하며 식 (3.4)는  $\chi^2$ -분포값을 나타낸다.

$$x^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(x_{ij} - \bar{x})^2}{\bar{x}} \quad (3.4)$$

여기서,  $r$ 은 비교대상 분포의 수를 나타내고,  $c$ 는 각 분포별 데이터 수를 뜻한다.  $x^2$ -분포값은 자유도가  $(r-1)(c-1)$ 인 분포를 따르게 된다. 이 분포값이 작을수록 각 분포는 같은 성질을 가지고 있을 확률이 높다. t-분포, F-분포와 마찬가지로  $x^2$ -분포표를 이용하여 유의수준 범위를 구해 기준으로 정한 유의수준과 비교하여 실험 결과를 검정한다.

### 3.4.3 단순회귀분석

회귀분석은 두 변수 사이의 관계를 식으로 도출하는 것이다. 이 식은 주로 직선을 나타내는 일차함수를 많이 사용한다. 일차함수는 수학적으로도 간단하며 여러 분야에서 발생하는 많은 형상은 실제 직선관계에 가깝고, 두 변수 사이에 비직선적인 함수관계가 성립한다 하더라도 변수변환을 통해 함수를 일차함수 형태로 바꿀 수 있기 때문이다. 독립변수가 한 개 이면서 종속변수와의 관계를 직선형태의 모형으로 가정하여 이루어지는 분석을 단순회귀분석이라 한다.

단순회귀분석을 통해서는 두 변수  $X$ 와  $Y$ 의 관계를 회귀계수  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 통해 식 (3.5)와 같이 나타낼 수 있으며, 이 식을 추정된 회귀직선 (estimated regression line) 또는 표본회귀식(sample regression equation) 이라고 부른다.

$$Y = \alpha X + \beta \quad (3.5)$$



이러한 회귀직선의 적합성은 측정값  $Y_i$ 와 측정값들의 평균  $\bar{Y}$ 의 차이를 편차라고하며, 이 편차는 식 (3.6)과 같이 두 종류의 편차합으로 볼 수 있다.

$$(Y_i - \bar{Y}) = (Y_i - \hat{Y}_i) + (\hat{Y}_i - \bar{Y}) \quad (3.6)$$

여기서 관측이 불가능한 오차를 나타내는 잔차  $(Y_i - \hat{Y}_i)$ 는 편차 중에서 회귀식으로 설명되지 않는 것을 나타내며,  $(\hat{Y}_i - \bar{Y})$ 는 편차 중에서 회귀식으로 설명되는 것을 나타낸다. 식 (3.6)의 양변을 각각 제곱하면 식 (3.7)과 같은 관계식이 성립한다.

$$\sum (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 + \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (3.7)$$

$$SST = SSE + SSR$$

여기서 식의 좌변을 총변동(total variation) 또는 총제곱합(total sum of squares; SST)이라 하며, 우변의 첫 번째 부분은 오차제곱합(error sum of square; SSE), 두 번째 부분은 회귀제곱합(regression sum of squares; SSR)이라 부른다. 총제곱합은  $(n-1)$ , 오차제곱합은  $(n-2)$ , 그리고 회귀제곱합은 1의 자유도를 가지게 된다.

총변동을 발생 요인에 따라 분류하여 그 상태적인 크기로서 요인에 대한 효과를 검정하는 통계적 분석기법을 분산분석(analysis of variance; ANOVA)이라 하며, 이를 표로 정리한 것을 분산분석표라 한다(표 3.2 참조).

표 3.2 단순회귀분석에서의 분산분석표

요인	제곱합	자유도	평균제곱합	$F_0$
회귀	$SSR$	1	$MSR$	$MSR/MSE$
오차	$SSE$	$n-2$	$MSE$	
계	$SST$	$n-1$		

위 표에서 회귀모형의 검정은 통계량  $F_0$ 가 자유도  $(1, n-2)$ 인 F-분포를 따른다는 사실을 이용하여 이루어진다.  $F_0$ 는 오차에 의해 설명되는 변동과 회귀직선에 의해 설명되는 변동을 비교하는 값으로 그 값이 클수록 직선모형이 주어진 자료에 적합하다는 것을 의미한다.

이 외에 추정된 회귀식이 자료에 얼마나 잘 적합하고 있는지의 정도를 결정계수(coefficient of determination)로 판단하기도 한다.

결정계수는 회귀식에 의해 설명되는 총변동 중에서 설명되는 변동이 차지하고 있는 비율로 식 (3.8)과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (3.8)$$

결정계수  $R^2$ 는 항상 0과 1사이에 존재하며, 1에 가까울수록 회귀식이 자료를 잘 설명하고 있다는 것이라 볼 수 있고, 0에 가까운 경우 추정된 회귀식이 두 변수의 관계를 설명하지 못한다는 것을 의미한다.

## 제4장 연구결과

### 4.1 막 고유의 저항 변화(정밀여과 막, 한외여과 막)

#### 4.1.1 정밀여과 막

정밀여과 막의 투수율 실험은 9.7, 14.1, 17.4, 20.6, 24.7 °C의 온도에서 실험을 실시하였다. 막여과 유속은 0.5 ~ 2.5 m/d 범위에서 0.5 m/d 간격으로 설정하고, 한 개의 유속 조건에서 차압을 2회씩 측정 하였다.

실험결과 각각의 온도 조건에서 막간 차압과 막여과 유속은 일정한 기울기(투수율)를 가지며, 엑셀을 통해 투수율 실험 결과를 확인했으며, 그 결과 최소 0.992 이상의 결정계수로 차압과 플럭스의 관계를 잘 나타내고 있다.

막여과 유속식에서도 알 수 있듯이 원수 수온이 증가함에 따라(점성계수가 감소함에 따라) 투수율이 증가하는 것을 알 수 있다.

투수율과 원수 수온을 회귀분석 한 결과 결정계수는 0.988이며, 분산분석의 F통계량의 유의확률(P-value)은 0.0005로 유의수준 0.05 보다 매우 낮은 값을 가진다. 따라서 수온에 따른 투수율의 변화는 있다고 볼 수 있다.

막 저항의 경우 온도에 따라 증가 또는 감소의 경향을 전혀 보이지 않았다. 회귀분석 결과 결정계수가 1.01E-06으로 0에 매우 가깝기 때문에 정밀여과 막에서는 수온에 따른 막 저항의 변화는 없다고 할 수 있다.

원수 수온별 투수율과 막 저항은 표 4.1과 같으며, 각 원수 수온별 투수율 실험 결과는 그림 4.1에서 4.5와 같다. 수온별 막 저항 결과는 그림 4.6과 같다.

표 4.1 정밀여과 막 투수율 실험 결과

수온 (°C)	투수율 (m/Pa · s)		막 저항 (m <sup>-1</sup> )	
	평균	표준편차	평균	표준편차
9.7	7.48E-10	4.69E-11	1.02E+12	6.712E+10
14.1	8.58E-10	4.29E-11	1.00E+12	4.70E+10
17.4	9.62E-10	1.02E-10	9.83E+11	9.30E+10
20.6	1.00E-09	6.79E-11	1.02E+12	6.49E+10
24.7	1.12E-09	1.24E-10	1.01E+12	9.62E+10

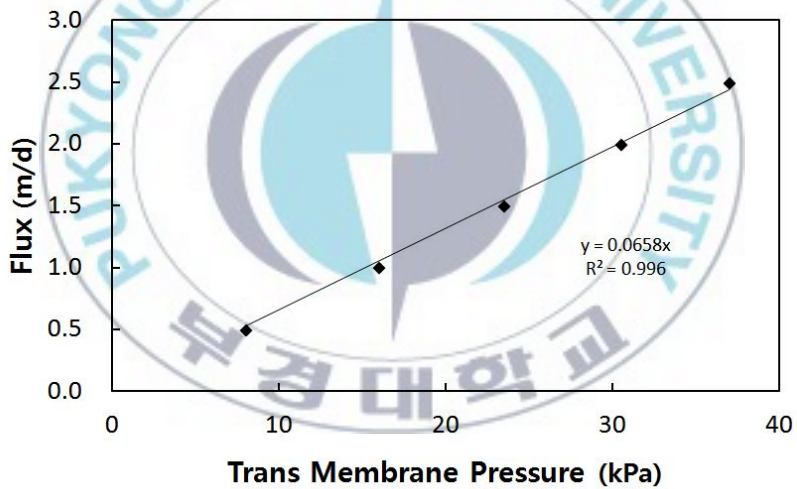


그림 4.1 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=9.7 °C)

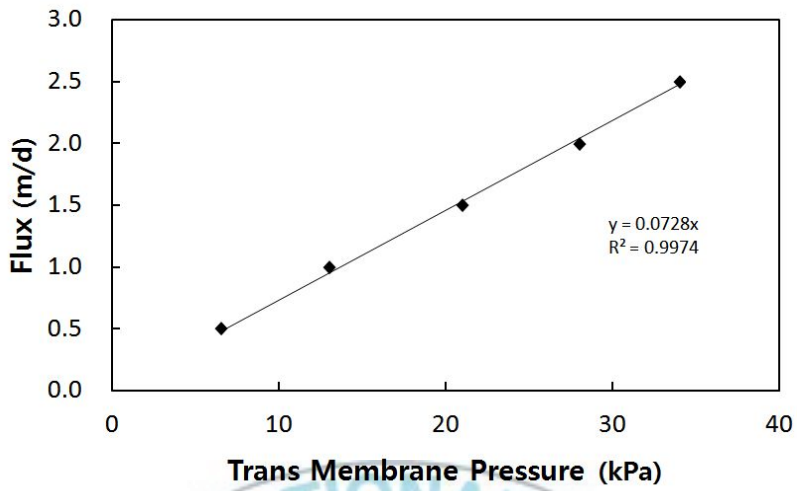


그림 4.2 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=14.1 °C)

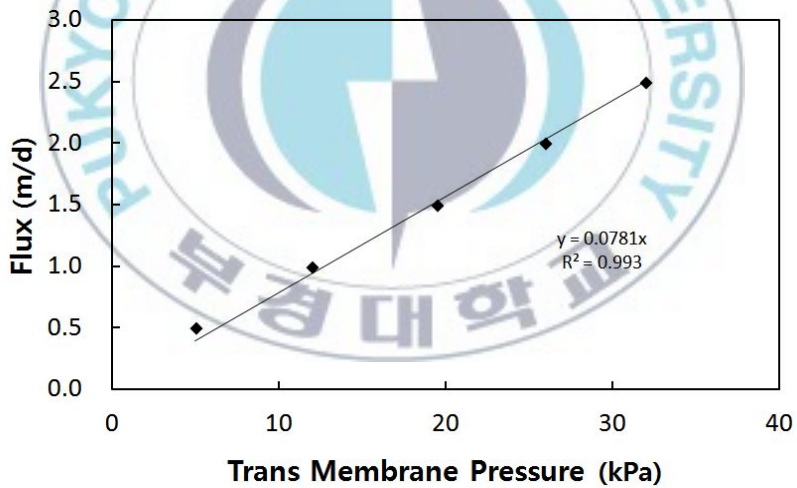


그림 4.3 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=17.4 °C)

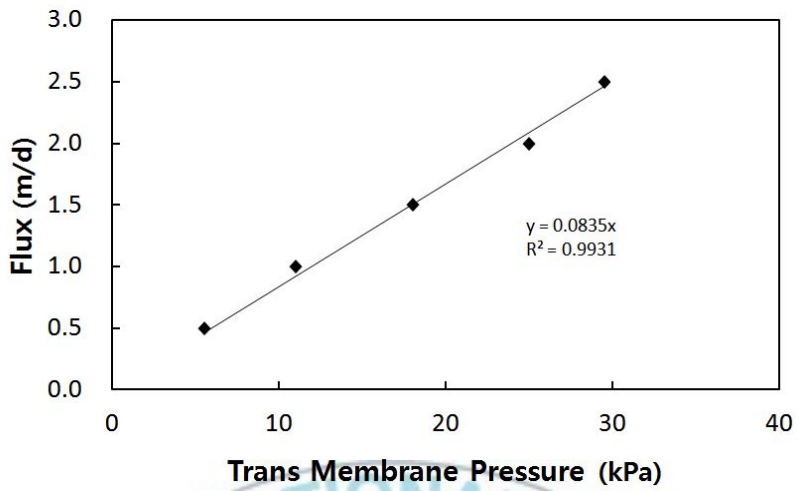


그림 4.4 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=20.6 °C)

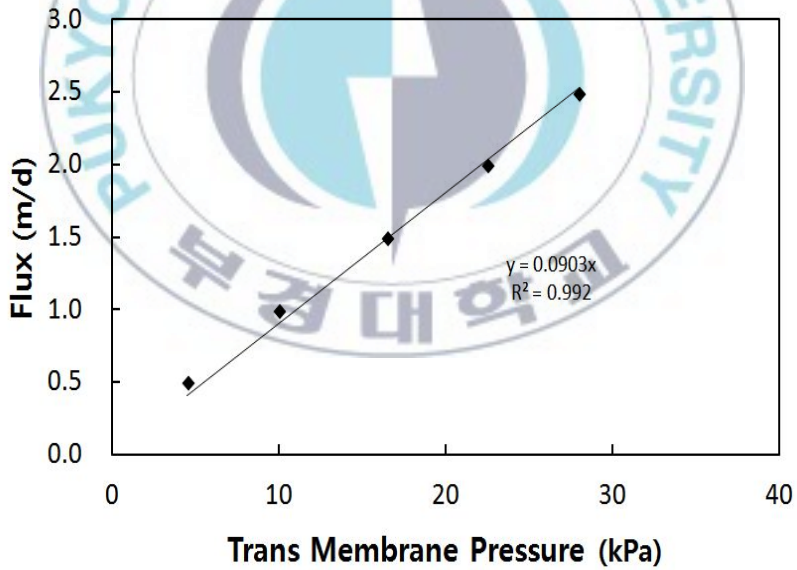


그림 4.5 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=24.7 °C)

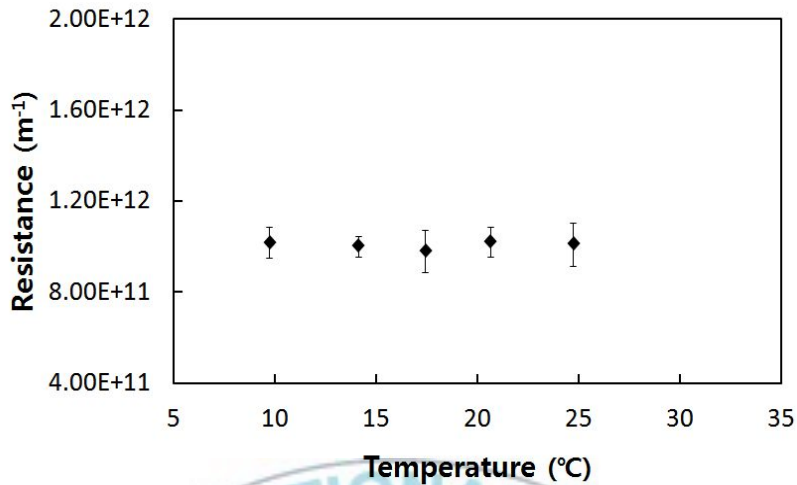


그림 4.6 수온에 따른 막 고유의 저항 변화(정밀여과 막)

#### 4.2.2 한외여과 막

한외여과 막의 투수율 실험은 9.7, 13.3, 17.6, 20.0, 25.5 °C의 온도에서 실험을 실시하였다. 막여과 유속은 1.0 ~ 3.0 m/d 범위에서 1.0 m/d 간격으로 설정하고, 한 개의 유속 조건에서 차압을 2회씩 측정 하였다.

실험결과 각각의 온도 조건에서 막간 차압과 막여과 유속은 최소 0.997 이상의 결정계수로 차압과 플럭스의 관계를 잘 나타내고 있다. 투수율과 원수 수온을 회귀분석 한 결과 결정계수는 0.997이며, 분산분석의 F 통계량의 유의확률(P-value)은 7.37E-05로 유의수준 0.05 보다 매우 낮은 값을 가진다. 한외여과 막의 실험결과는 정밀여과 막의 실험결과 보다 수온과 투수율의 관계가 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다.

막 저항의 경우 온도에 따라 어떠한 경향을 보이지 않았다. 회귀분석 결과 결정계수가 0.539로 정밀여과 막보다 높은 결정계수를 나타내지만, 막 저항의 P-value는 0.157로 0.05 보다 높은 값을 나타내고 있으며 온도에 따른 막 저항 변화 그래프를 보아도 막 저항의 변화는 없다고 할 수

있다.

원수 수온별 투수율과 막 저항은 표 4.2와 같으며, 각 원수 수온별 투수율 실험 결과는 그림 4.7에서 4.11과 같다. 수온에 따른 막 저항 변화는 그림 4.12와 같다.

표 4.2 한외여과 막 투수율 실험 결과

수온 (°C)	투수율(m/Pa · s)		막 저항(m <sup>-1</sup> )	
	평균	표준편차	평균	표준편차
9.7	5.84E-10	1.68E-11	1.30E+ 12	3.72E+ 10
13.3	6.36E-10	1.41E-11	1.32E+ 12	2.95E+ 10
17.6	7.29E-10	2.19E-11	1.29E+ 12	3.93E+ 10
20.0	7.76E-10	1.33E-11	1.29E+ 12	2.17E+ 10
25.5	8.88E-10	2.30E-11	1.28E+ 12	3.29E+ 10

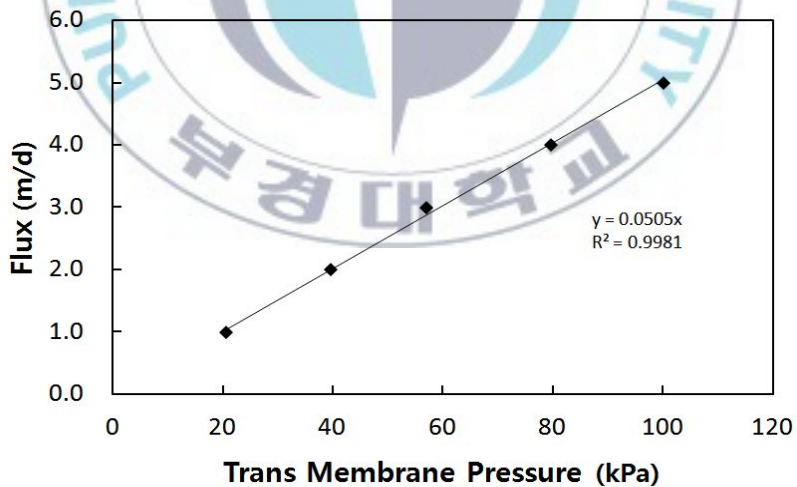


그림 4.7 한외여과 막 투수율 실험 결과(T=9.7 °C)



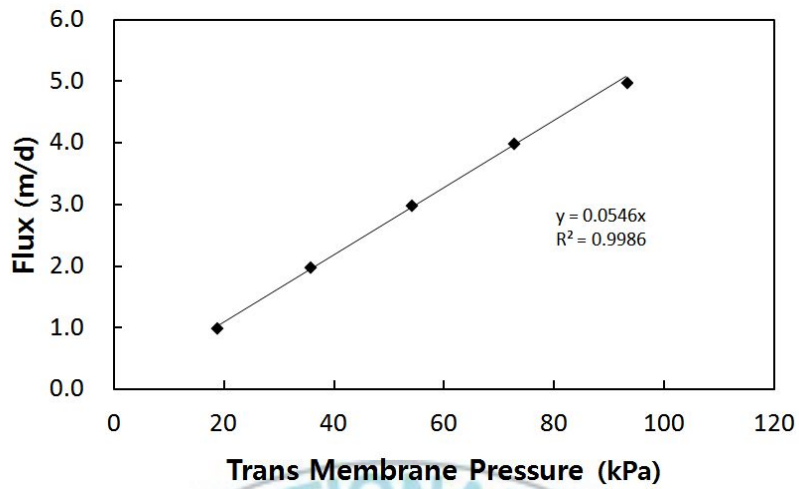


그림 4.8 한외여과 막 투수율 실험 결과(T=13.3 °C)

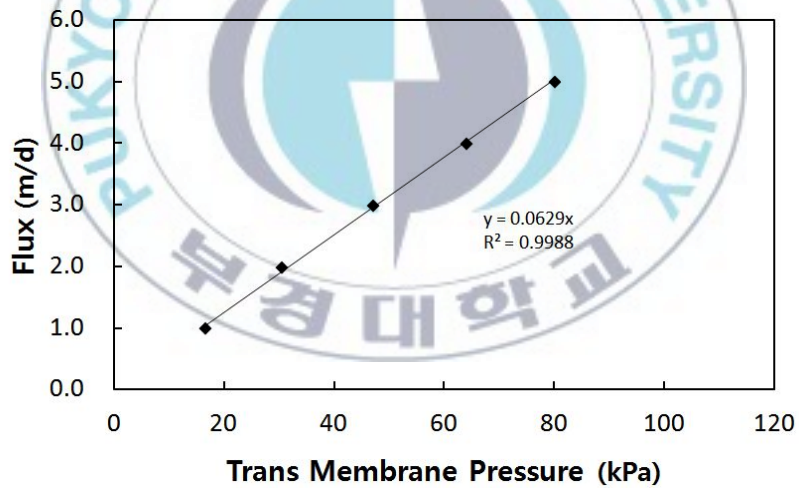


그림 4.9 한외여과 막 투수율 실험 결과(T=17.6 °C)

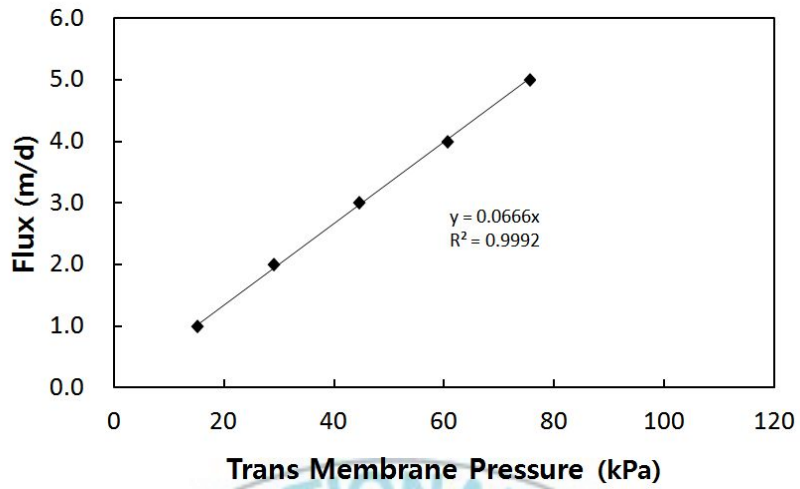


그림 4.10 한외여과 막 투수율 실험 결과(T=20.0 °C)

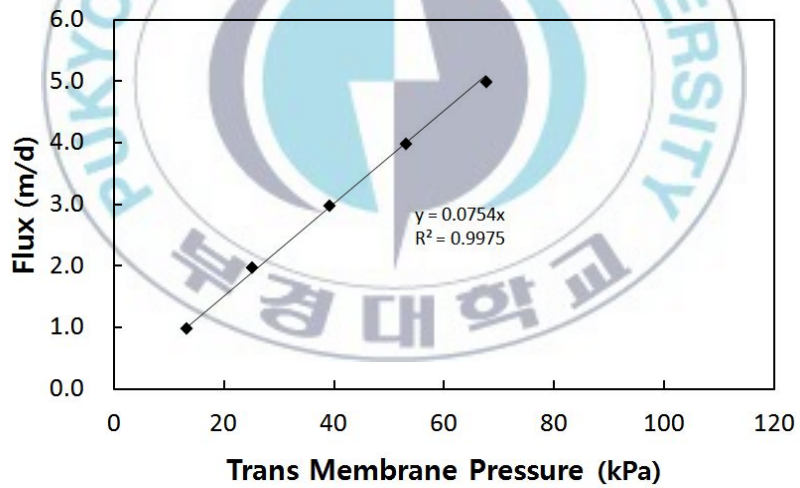


그림 4.11 한외여과 막 투수율 실험 결과(T=25.5 °C)

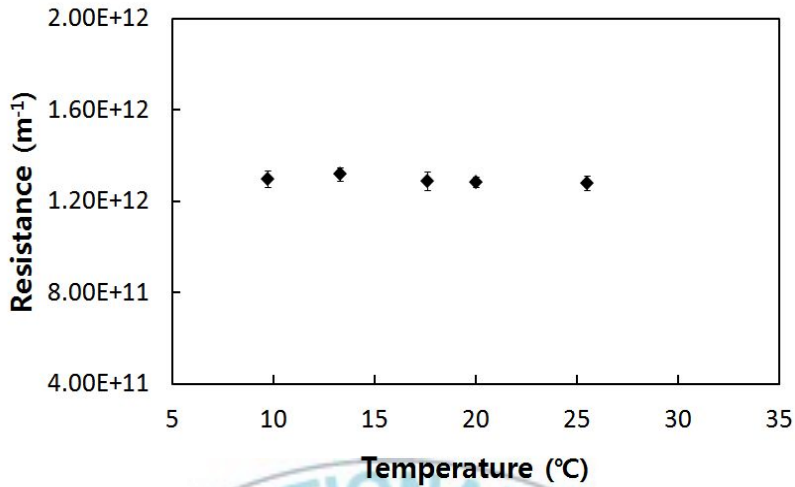


그림 4.12 수온에 따른 막 고유의 저항 변화(한외여과 막)

## 4.2 막 오염의 저항 변화

### 4.2.1 카울린 오염

정밀여과 막에 카울린이 포함된 원수로 막을 오염 시킨 후 투수율 실험을 진행하였다. 실험 온도는 15.9, 22.1, 23.9, 29.0, 33.0 °C 범위에서 실험하였다. 막여과 유속은 1.0 ~ 2.5 m/d 범위에서 0.5 m/d 간격으로, 한 개의 유속 조건에서 2회씩 차압을 측정 하였다.

투수율 실험 결과 막간 차압과 막여과 유속은 최소 0.978 이상의 결정계수로 이전 정밀여과 투수율 실험에 비해 낮기는 하나 충분히 차압과 막여과 유속의 관계를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 투수율과 원수 수온을 회귀분석 한 결과 결정계수는 0.943이며, 분산분석의 F통계량의 유의확률(P-value)은 0.006으로 유의수준 0.05에 가까운 값을 가진다. 오염 전 에 비해 수온과 투수율의 관계는 막의 오염으로 인해 떨어진 것을 알 수 있다.

막 저항과 원수 수온 회귀분석 결과 결정계수가 0.222로 오염 전보다는 높게 나타났지만 이 결과로 막 저항이 변화가 있다고 할 수는 없다. 또한 막 저항의 표준편차가 크고 P-value는 0.422로 0.05 보다 높은 값을 나타낸다. 수온에 따른 막 저항 변화 그래프를 확인하였을 때, 막 저항의 변화라고 하기 부족하며, 수온의 증가에 따라 일정하게 증가 또는 감소하는 경향도 찾아볼 수 없었다.

원수 수온별 투수율과 막 저항은 표 4.3과 같으며, 각 원수 수온별 투수율 실험 결과는 그림 4.13에서 4.17과 같다. 수온에 따른 막 저항의 변화는 그림 4.18과 같다.

표 4.3 카울린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과

수온 (°C)	투수율 (m/Pa · s)		막 저항 (m <sup>-1</sup> )	
	평균	표준편차	평균	표준편차
15.9	8.06E-10	9.29E-11	1.13E+12	1.24E+11
22.1	1.07E-09	1.42E+11	9.95E+11	1.12E+11
23.9	1.04E-09	8.38E-11	1.06E+12	8.23E+10
29.0	1.23E-09	2.61E-10	1.03E+12	1.64E+11
33.0	1.27E-09	1.04E-10	1.06E+12	8.36E+10

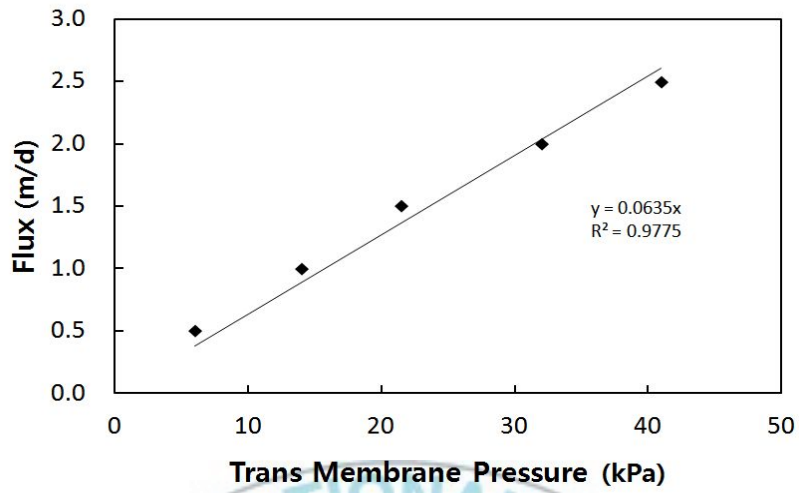


그림 4.13 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=15.9 °C)

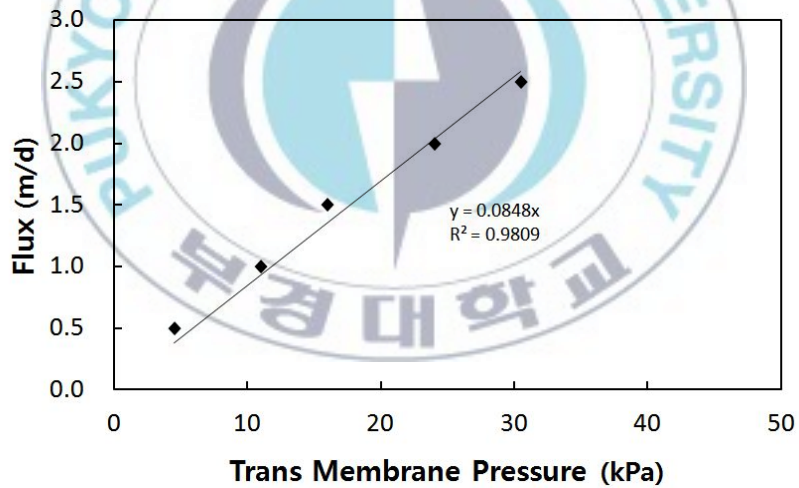


그림 4.14 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=22.1 °C)

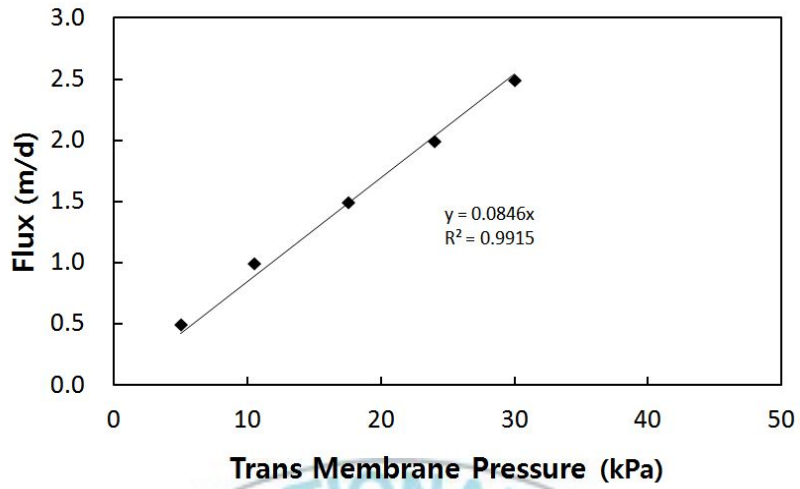


그림 4.15 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=23.9 °C)

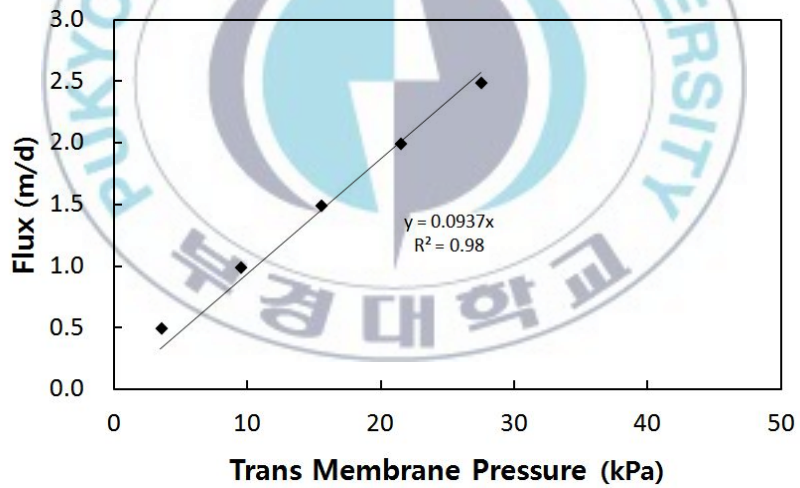


그림 4.16 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=29.0 °C)

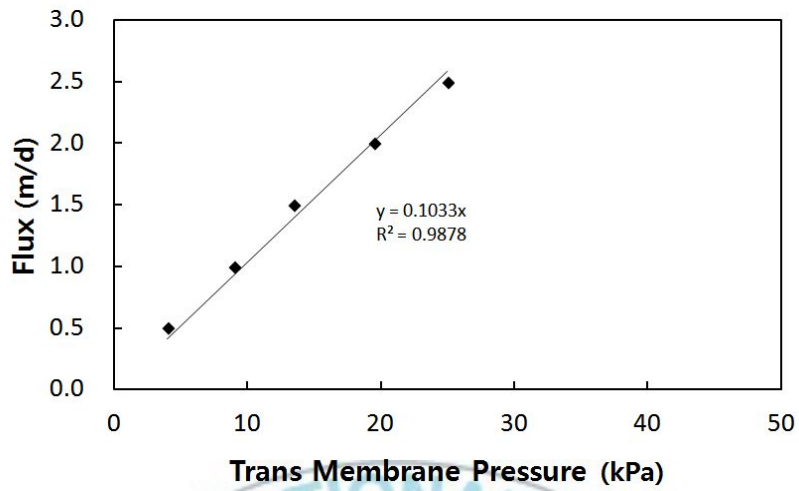


그림 4.17 카올린 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=33.0 °C)

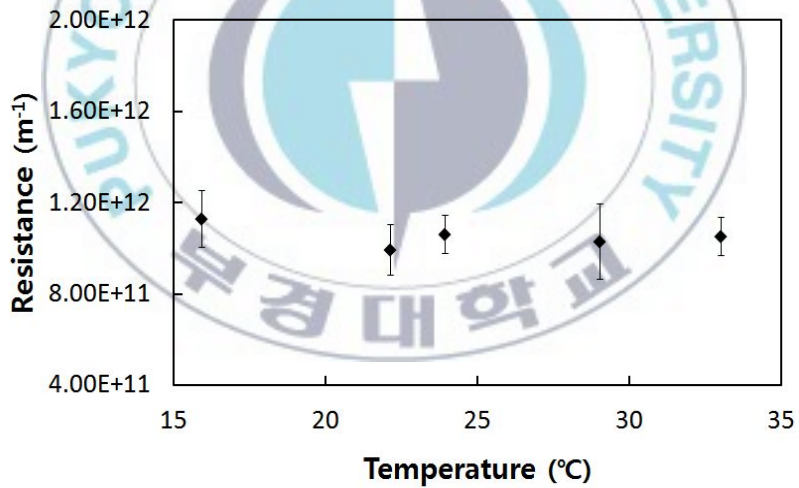


그림 4.18 카올린 오염 후 수온에 따른 막 저항 변화(정밀여과 막)

#### 4.2.2 휴믹산 오염

정밀여과 막에 휴믹산이 포함된 원수로 막을 오염 시킨 후 투수율 실험을 진행하였다. 실험 온도는 7.1, 12.3, 18.8, 23.7, 29.6 °C 범위에서 실험하였다. 막여과 유속은 1.0 ~ 2.5 m/d 범위에서 0.5 m/d 간격으로, 한 개의 유속 조건에서 2회씩 차압을 측정 하였다.

투수율과 원수 수온을 회귀분석 한 결과 결정계수는 0.976이며, 분산분석의 F통계량의 유의확률(P-value)은 0.002으로 유의수준 0.05보다 낮은 값을 가진다.

막 저항과 원수 수온 회귀분석 결과 결정계수가 0.372로 카울린 오염보다 더 높은 결정계수를 나타냈으나, P-value는 0.274로 0.05보다 높은 값을 나타낸다. 수온에 따른 막 저항 변화 그래프를 확인하였을 때, 초기 7.1 °C에서 12.3 °C는 막 저항이 증가하였고 이후 수온이 높아질수록 점점 막 저항이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이전 실험들에서는 막 저항이 수온 변화에 일정한 경향을 보이지 않았으나, 휴믹산 오염의 경우 12.3°C 이후 막 저항이 꾸준히 감소하는 것을 볼 수 있었다. 수온 7.1 °C 일 때를 제외하고 회귀분석을 실시한 결과, 결정계수는 0.995로 높게 나타났으며 P-value 또한 0.002로 0.05보다 낮게 나타나 수온에 따라 막저항의 변화가 있다고 볼 수 있다. 현재는 실험의 횟수와 결과가 부족하기에 추가적인 실험을 통해 이러한 결과를 재확인할 필요가 있다.

원수 수온별 투수율과 막 저항은 표 4.4와 같으며, 각 원수 수온별 투수율 실험 결과는 그림 4.19에서 4.23과 같다. 수온에 따른 막 저항의 변화는 그림 4.24와 같다.



표 4.4 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과

수온 (°C)	투수율 (m/Pa · s)		막 저항 (m <sup>-1</sup> )	
	평균	표준편차	평균	표준편차
7.1	4.49E-10	2.08E-11	1.57E+12	7.35E+10
12.3	4.91E-10	2.00E-11	1.67E+12	6.61E+10
18.8	6.07E-10	6.13E-11	1.61E+12	1.47E+11
23.7	7.01E-10	6.59E-11	1.57E+12	1.33E+11
29.6	8.42E-10	1.20E-10	1.50E+12	1.74E+11

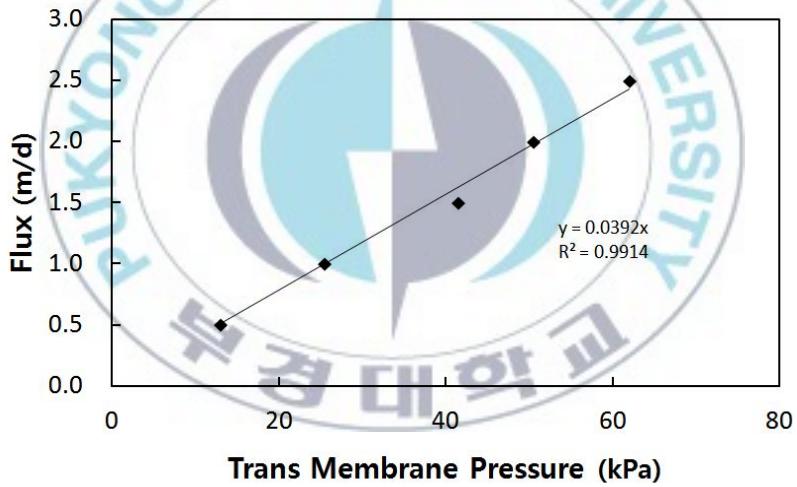


그림 4.19 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=7.1 °C)

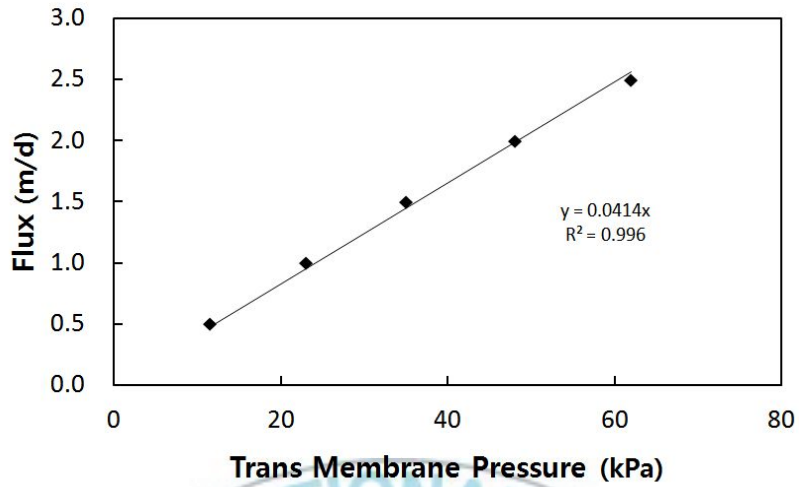


그림 4.20 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=12.3 °C)

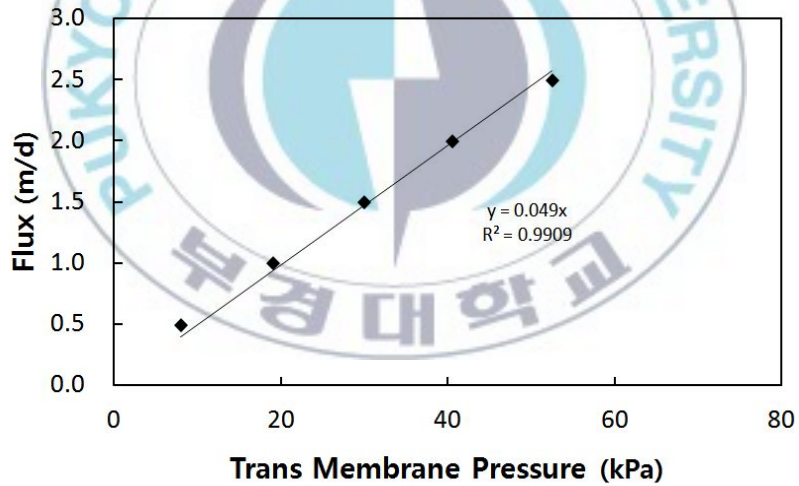


그림 4.21 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=18.8 °C)

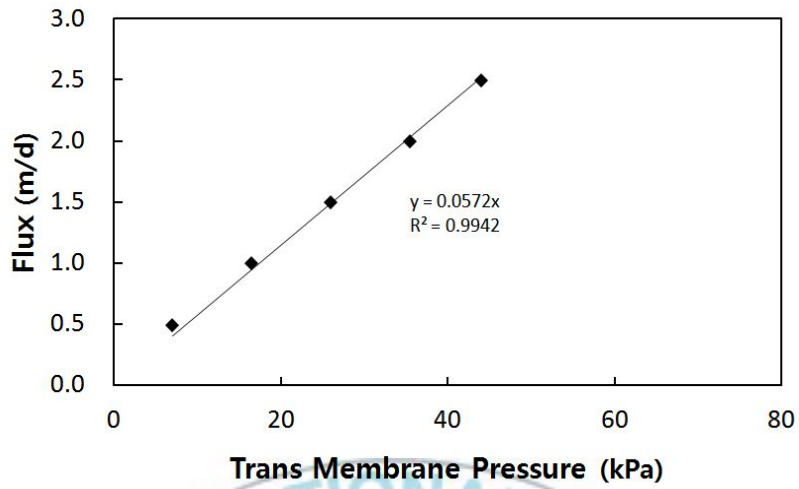


그림 4.22 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=23.7 °C)

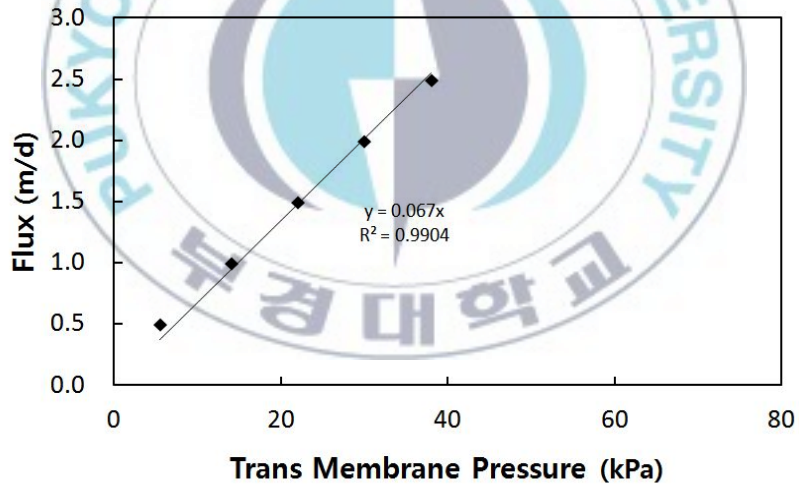


그림 4.23 휴믹산 오염 후 정밀여과 막 투수율 실험 결과(T=29.6 °C)

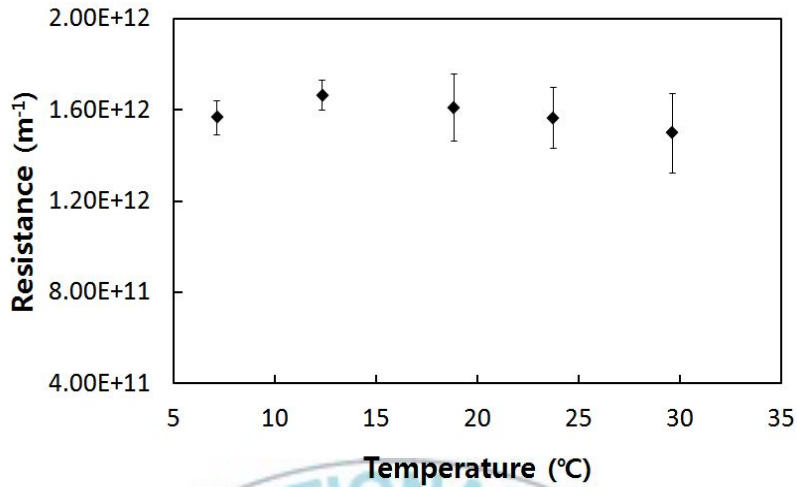


그림 4.24 휴믹산 오염 후 수온에 따른 막 저항 변화(정밀여과 막)

### 4.3 막 고유의 저항 변화(역삼투 막)

#### 4.3.1 기수용 역삼투 막

기수용 역삼투 막의 투수율은 실험 온도는 12.6, 18.6, 25.0, 32.6, 38.8 °C 에서 실험하였다. 정밀여과와 한외여과와는 달리 원수 압력을 1.0 ~ 3.0 MPa 범위에서 0.5 MPa 간격으로 실험을 하였다. 막여과 유속을 체크하기 위해 생산수 유량을 측정하게 되는데 2 분간 생산수 유량을 채수하여 전자저울에서 측정하는 방법으로 오차가 많이 발생할 것 같아 측정횟수를 압력조건 별 4회로 하여 실험결과의 신뢰성을 높이고자 하였다.

원수 수온에 따른 투수율의 결정계수는 0.9858, P-value는 0.0007로 원수 수온이 증가함에 따라 투수율은 증가하는 것을 알 수 있었다.

막저항의 경우에는 결정계수 0.9903, P-value는 0.0004로 정밀여과 막이나 한외여과 막과는 달리 원수 수온에 따라 막 고유의 저항이 변하는 것을 확인할 수 있다. 기존 문헌에서 알아본 바와 같이 원수 수온이 증가

하는 경우 투수율은 점성계수 보정만으로 이루어진 것과 차이가 있었으며, 실제 막의 공극이 커지는 것은 직접 확인하지 못하였으나 투수율 실험을 통해 간접적으로 막 저항이 감소하는 것을 확인하였기에, 수온이 증가할수록 공극이 커지는 것을 확인할 수 있었다.

원수 수온별 투수율과 막 저항은 표 4.5와 같으며, 각 원수 수온별 투수율 실험 결과는 그림 4.25에서 4.29와 같다. 수온에 따른 막 저항의 변화는 그림 4.30과 같다.

표 4.5 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과

수온 (°C)	투수율 (m/Pa·s)		막 저항 (m <sup>-1</sup> )	
	평균	표준편차	평균	표준편차
12.6	9.32E-12	1.17E-13	8.84E+13	1.11E+12
18.6	1.18E-11	1.42E-13	8.20E+13	9.78E+11
25.0	1.57E-11	3.61E-13	7.15E+13	1.61E+12
32.6	2.03E-11	3.06E-13	6.53E+13	9.96E+11
38.8	2.58E-11	4.90E-13	5.82E+13	1.10E+12

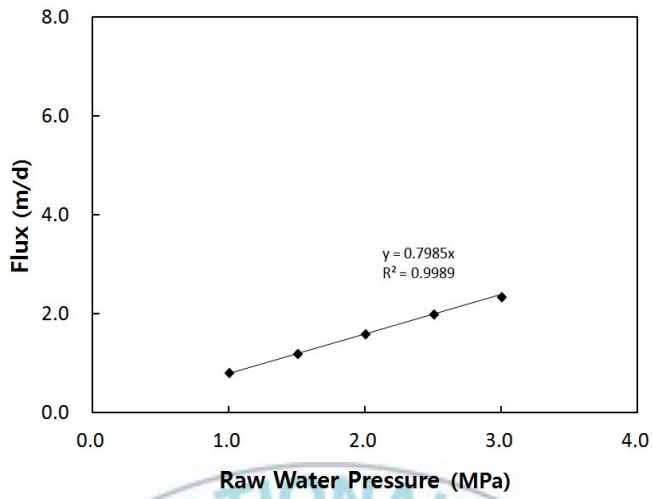


그림 4.25 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=12.6 °C)

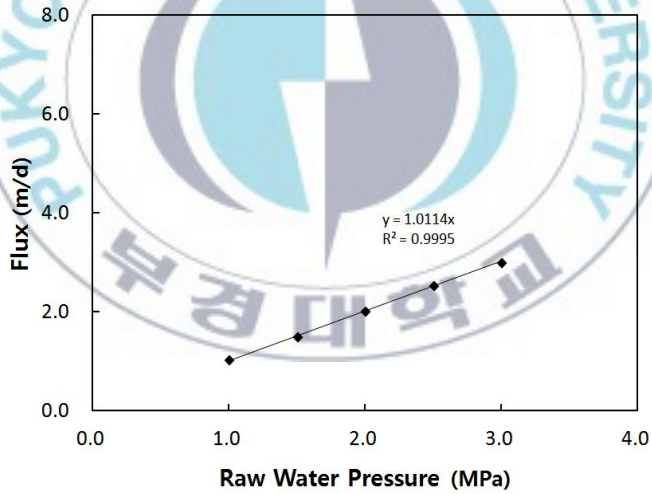


그림 4.26 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=18.6 °C)

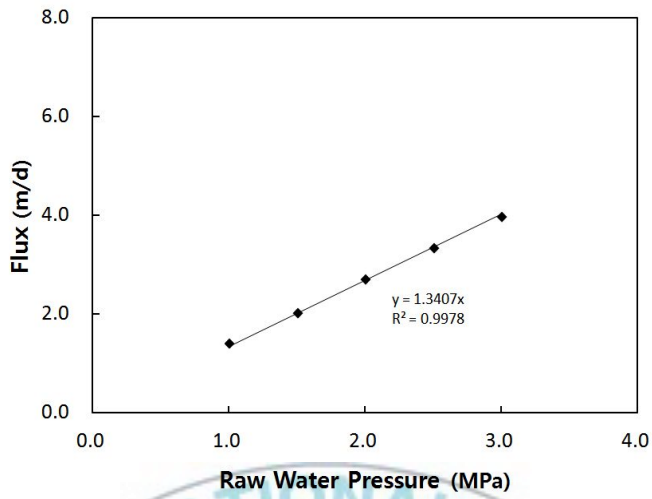


그림 4.27 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=25.0 °C)

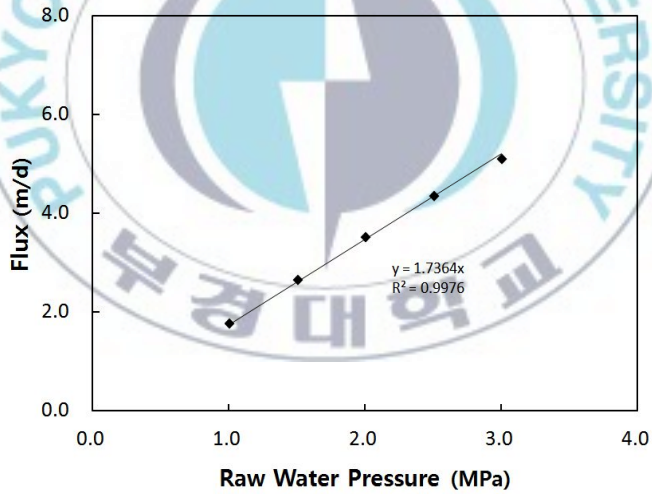


그림 4.28 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=32.6 °C)

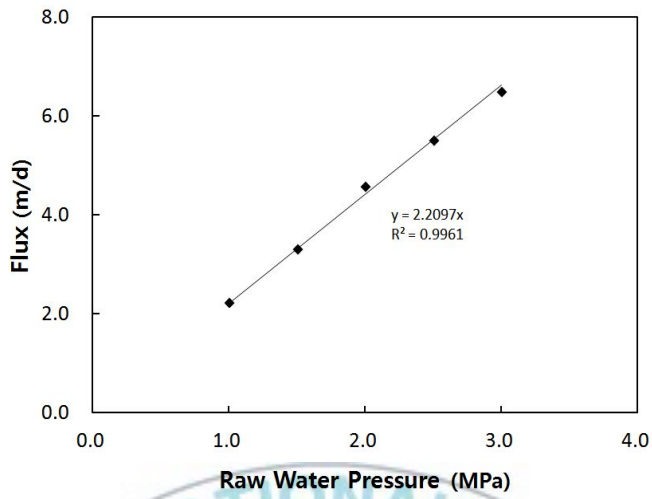


그림 4.29 기수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=38.8 °C)

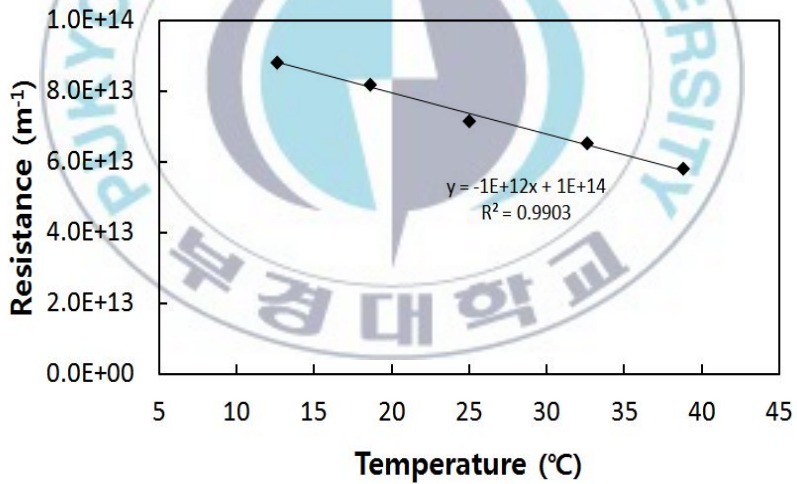


그림 4.30 수온에 따른 막 저항 변화(기수용 역삼투 막)



### 4.3.2 해수용 역삼투 막

해수용 역삼투 막의 투수율은 실험 온도는 13.4, 18.5, 25.4, 32.7, 39.2 °C 에서 측정하였으며, 그 외는 기수용 역삼투 막 실험과 동일하게 진행하였다.

원수 수온에 따른 투수율의 결정계수는 0.9836, P-value는 0.0009로 원수 수온이 증가함에 따라 투수율은 증가하는 것을 알 수 있었다.

막 저항의 경우에는 결정계수 0.9530, P-value는 0.004로 기수용 역삼투 막과 같은 경향을 볼 수 있었다. 기수용 역삼투 막에 비해 공극이 더 작은 해수용 역삼투 막 저항은 기수용 역삼투 막 저항보다 4배 가량 큰 변화율을 가지는 것을 회귀식을 통해 알 수 있다.

원수 수온별 투수율과 막 저항은 표 4.6과 같으며, 각 원수 수온별 투수율 실험 결과는 그림 4.31에서 4.35와 같다. 수온에 따른 막저항의 변화는 그림 4.36과 같다.

표 4.6 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과

수온 (°C)	투수율 (m/Pa · s)		막 저항 (m <sup>-1</sup> )	
	평균	표준편차	평균	표준편차
13.4	2.29E-12	5.69E-14	3.67E+14	9.02E+12
18.5	2.89E-12	5.95E-14	3.33E+14	6.93E+12
25.4	3.78E-12	7.13E-14	3.00E+14	5.65E+12
32.7	5.01E-12	5.07E-14	2.90E+14	2.92E+12
39.2	6.47E-12	1.14E-13	2.33E+14	4.10E+12

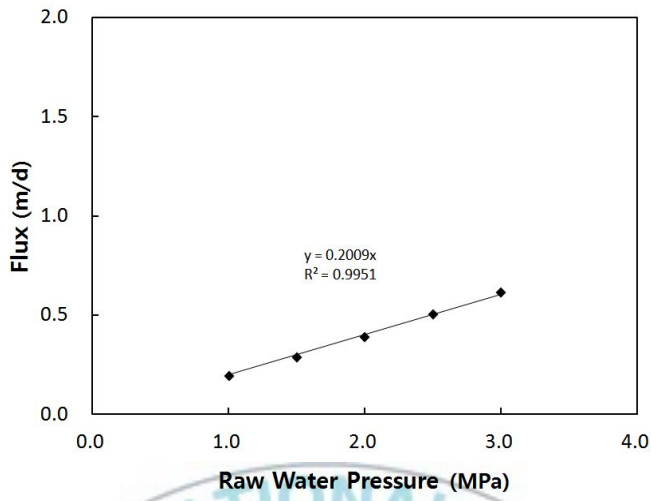


그림 4.31 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=13.4 °C)

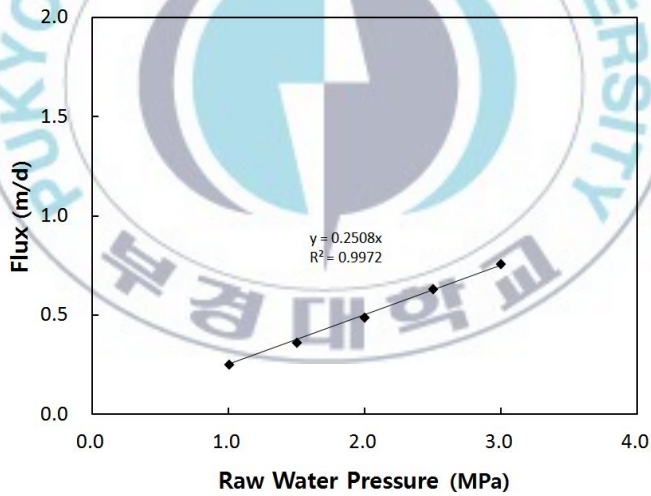


그림 4.32 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=18.5 °C)

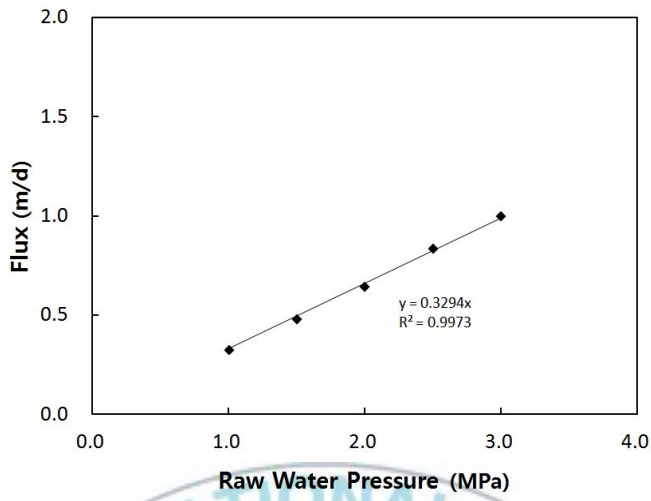


그림 4.33 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=25.4 °C)

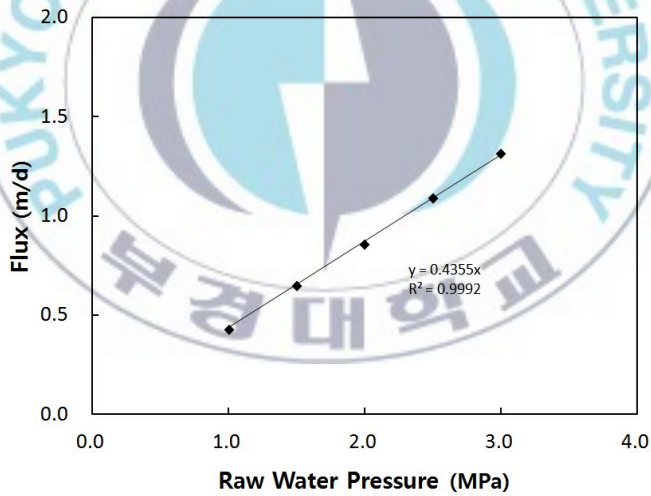


그림 4.34 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=32.7 °C)

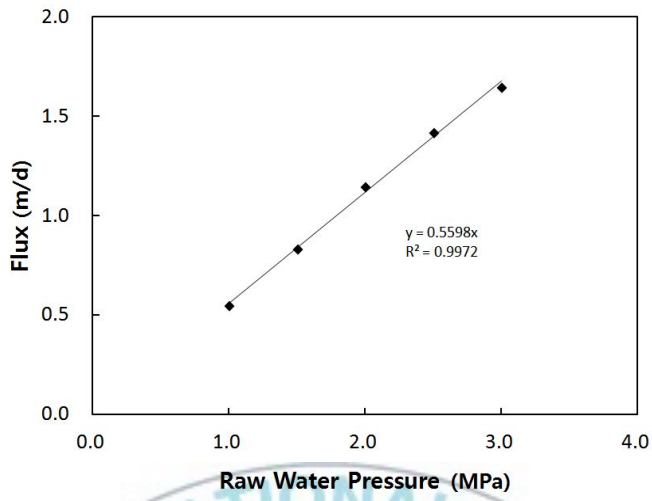


그림 4.35 해수용 역삼투 막 투수율 실험 결과(T=39.2 °C)

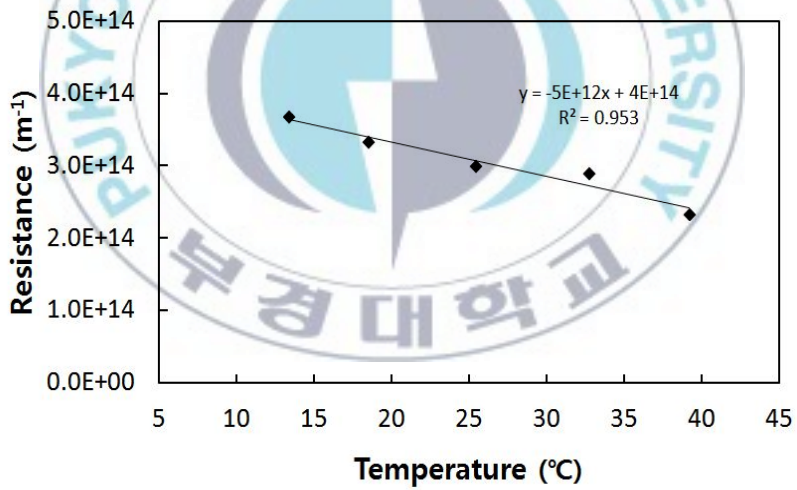


그림 4.36 수온에 따른 막 저항 변화(해수용 역삼투 막)

## 제5장 결론

### 5.1 연구 결과 요약 및 결론

본 연구는 현장 막여과 수처리 시설에서 사용되어지고 있는 온도보정 차압 수직이 원수의 점성계수만을 반영하고 있고, 나노여과 막과 역삼투 막에서 원수 수온이 막 저항의 변화를 주는 것에 착안하여 정밀여과 막과 한외여과 막의 막 저항이 수온에 영향을 받을 것이라는 가설을 설정하여 이를 실험실 규모의 실험을 통해 수온에 따른 막 고유의 저항과 막 오염의 저항의 변화에 관한 연구를 진행하였다.

(1) 정밀여과 막과 한외여과 막의 원수 수온에 따른 막 고유의 저항에 대해 조사한 결과 현재까지는 두 개 막 모두 원수 수온 변화에 의해 막 고유의 저항에 영향을 주지 않았다. 하지만 현재 실험의 횟수가 적기에 추가적인 실험을 통해 막 고유의 저항 변화를 확실히 할 필요가 있다.

(2) 카올린을 오염물질로 하여 정밀여과 막 표면에 케이크 층을 생성한 뒤 원수 수온에 따른 막 저항의 변화를 관찰한 결과 편차가 매우 크고, 그 변화 또한 증가, 감소의 경향을 보이지 않았기에 막 저항의 변화는 없다고 할 수 있다. 또한 막 표면에 케이크 층을 생성한 후 투수율 실험을 하게 되면 막 모듈 내 급수 과정에서 원수가 막 표면의 케이크 층을 제거하면서 막 저항값의 편차가 초기보다 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

(3) 휴믹산을 오염물질로 하여 정밀여과 막 공극 내부 흡착을 유발시

킨 경우, 수온에 따른 막 저항의 변화는 최저 수온일 때의 막 저항을 제외한다면 온도가 증가함에 따라 막 저항이 낮아지는 것 확인할 수 있었다. 이는 휴믹 물질이 공극 내부에 흡착되어 있다가 수온의 증가로 인해 흡착되어 있던 유기 물질이 탈착되었다고 생각할 수 있다.

(4) 역삼투 막의 경우 기수용, 해수용 두 막을 사용하여 온도에 따른 막 고유의 저항 변화를 확인하였다. 두 막 모두 수온이 증가함에 따라 막 저항은 감소하는 경향을 확연히 나타내고 있었다. 그리고 공극이 더 작은 해수용 역삼투 막의 저항 변화가 기수용 역삼투 막에 비해 큰 것으로 보아, 공극 크기가 더 작을수록 원수 수온에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

본 연구의 실험 결과를 참고한 최종 결론은 정밀여과 막과 한외여과 막을 사용하는 막여과 공정에서 사용되는 원수에는 입자성 물질과 유기물 그 외 많은 오염물질들이 존재를 하고 있기 때문에 현재 사용 중인 온도 보정차압 수식 외에 막 저항에 대한 보정도 필요할 것이라 판단된다.

## 5.2 향후 연구 방향 제안

본 연구를 통해 향후 연구 방향을 두 가지 제안하고자 한다.

(1) 휴믹산 오염 후 투수율 실험 결과 최저 수온 한 개를 제외하면, 막 저항의 변화를 명확히 확인할 수 있었다. 따라서 반복 실험을 통해 정말로 영향이 있는지 확인할 필요가 있다. 실험 이전에 휴믹산의 특성(수온에 따른 입경 분포, 흡착능 등)에 대해 충분한 조사가 이루어져야 할 것

이고, 투수율 실험을 진행하며 생산수의 수질을 측정하여 수온 증가에 의해 흡착되어 있던 휴믹산이 수온 변화에 따라 얼마나 탈착이 되는지도 확인해 볼 필요가 있다. 또한 본 연구에서는 막간 차압을 초기 대비 10 kPa 상승시켜 막 저항의 변화를 확인하였다. 하지만 실제 막여과 공정에서 발생하는 막 오염은 초기 차압 대비 80 ~ 100 kPa 이상 오염이 진행되기에 막을 충분히 오염 시킨 후 막 저항의 변화를 관찰하면 실제 공정에 적용이 가능한 결과를 얻을 것이라 생각된다.

(2) 기수용 역삼투 막과 해수용 역삼투 막 투수율 실험을 통해 공극이 작을수록 막 고유의 저항 변화가 크게 관찰되는 것을 확인할 수 있었다. 역삼투 막에 비해 공극이 100 배 이상 작은 정밀여과 막과 한외여과 막에서는 수온 변화에 따라 막 고유의 저항 변화가 미비하게 나타나는 것일 가능성이 있다. 이를 통해 막의 공경 크기에 따른 막 고유의 저항 변화가 있는지 확인해 볼 필요가 있다.

## 참고문헌

김수한 (2003) Polydispersity 조건에서 Crossflow 방식 정밀여과의 케이크 형성 특성 및 제어방안에 관한 연구, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사논문.

김수한 (2013) 정유량 막여과 파울링 모델을 이용한 막여과 정수 플랜트 공정 진단 기법, 대한상하수도학회지, Vol.27, No.1, 139-146.

김종두 (2008) 정밀여과막 시스템을 이용한 정수처리의 최적운전조건 도출, 서울시립대학교 환경공학과 석사논문.

대정화금 홈페이지, <http://www.daejungchem.co.kr/>.

배현웅 (2001) (엑셀을 이용한)통계학의 기초와 활용기법, 교우사.

웅진케미칼 홈페이지, <http://www.wjchemical.co.kr/>.

유명진, 방기웅, 구자용, 명규남, 이준호, 정신호, 구윤희, 박귀수, 장미정 (2006) 상수도 공학 -계획, 설계 및 운전-, 동화기술.

이성우, 이현동, 한명호, 광동희, 김충환 (2003) 고도상수처리 -원리 및 응용-, 동화기술.

정철우, 한승우, 강임석 (2002) 막의 재질에 따른 유기물질 성상별 흡착 특성, 대한환경공학회지 논문, Vol.24, No.8, 1339-1348.

한국상하수도협회 (2010) 환경부 제정 상수도시설기준, 건설도서.

한국수자원공사 (2011) 막여과공정 설계·운영관리 매뉴얼, 한국수자원공사.



Belfort R., Robert H.D., and Andrew L.Z. (1994) Review: The behavior of suspensions and macromolecular solution in crossflow microfiltration, *Journal of Membrane Science*, Vol. 96: 1-58.

Carroll, D. (1970) Clay minerals: a guide to their X-ray identification, The Geological Society of America, INC, Colorado.

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, *Desal. Water Treat.*, 45, 276 - 283.

Crozes, G., Anselme, C., and Mallevalle, J. (1993) Effect of adsorption of organic matter on fouling of ultrafiltration membrane, *Journal of membrane science*, Vol. 84, Issues 1-2, 61-77.

Fan, L., Harris, J.L., Roddick, F.A., and Booker, N.A. (2001) Influence of the characteristics of natural organic matter on the fouling of microfiltration membranes, *Wat. Res.*, Vol. 35, No. 18, 4455-4463.

Flemming, H.C., Schaule, G. (1988) Biofouling on membranes-A microbiological approach, *Desalination*, Vol. 70, Issues 1-3, 95-119.

Glater, J., Hong, S.K., and Elimelech, M. (1994) The search for a chlorine-resistant reverse osmosis membrane, *Desalination*, 95, 325-345.

HF scientific 홈페이지, <http://www.hfscientific.com/>.

Hiroyuki et al. (1998) 막여과를 이용한 정수처리방법의 연구 · 개발상황과 과제, 첨단환경기술, 제4권, 제5호, 11-19.

Hong, S., Elimelech, M. (1997) Chemical and physical aspects of

natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes, *Journal of membrane science*, 132, 159–181.

Jin, X., Jawor, A., Kim, S., and Hoek, Eric M.V.. (2009) Effects of feed water temperature on separation performance and organic fouling of brackish water RO membranes, *Desalination*, 239, 346–359.

Juncker C., Clark M.M. (1994) Adsorption of aquatic humic substances on hydrophobic ultrafiltration membranes, *Journal of membrane science*, 97, 37–52.

Katsoufidoua K., Yiantsiosa S.G, and Karabelas A.J. (2008) An experimental study of UF membrane fouling by humic acid and sodium alginate solutions: the effect of backwashing on flux recovery, *Desalination*, 220, 214–227.

Lim A.L., Bai Renbi (2003) Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater, *Journal of membrane science*, 216, 279–290.

Mueller, U., Witte, M. (2008) Ceramic membrane application for spent filter backwash water treatment, *Techneau*.

Potts, D.E., Ahlert R.C., and Wang S.S. (1981) A critical review of fouling of reverse osmosis membranes, *Desalination*, 36, 235–264.

Schafer, A.I., Fane, A.G., and Waite, T.D. (2000) Fouling effects on rejection in the membrane filtration of natural waters, *Desalination*, 131, 215–224.

Sharma, R.R. (2005) Temperature effects on transport of water, charged, and uncharged solutes across polymeric thin film composite

nanofiltration membranes: an investigation into pore-transport mechanisms and electrokinetic properties, A Dissertation Presented to the Faculty of The Department of Civil and Environmental Engineering University of Houston.

Shimadzu 홈페이지, <http://www.shimadzu.com/>.

Thurman E.M. (1985) Organic Geochemistry of natural water. Boston, MA: Martinus Nijhoff, Dr W. Junk Publishers.

WHO (1993) Guidelines for drinking water quality.

YSI 홈페이지, <http://www.ysi.com/>.



## 감사의 글

대학원을 졸업하면서 학부생 시절부터 많이 부족했던 저를 따뜻한 사랑과 끊임없는 격려, 그리고 다양한 경험을 할 수 있게 지도해주신 김수한 교수님께 깊은 감사의 인사를 올립니다.

학부생 시절 지도교수님이자 본 논문의 심사를 해주시며 많은 가르침과 격려를 해주신 이종섭 교수님과 이상호 교수님께도 감사의 마음을 전하고자 합니다.

학부과정부터 석사과정에 이르기까지 많은 가르침을 주셨던 부경대학교 토목공학과 교수님들에게도 감사의 마음을 전하고자 합니다.

전공 공부를 하면서 환경 공학에 관한 부족한 지식을 채워주셨던 부경대학교 환경공학과 강임석 교수님께 감사의 인사를 올립니다. 또한 환경공학과 연구실 선배들에게도 감사의 인사를 드립니다.

초기 연구실과 실험실 정리와 학부, 대학원 생활을 함께한 홍주형과 민석이에게도 감사의 인사를 전합니다. 또한 지금 연구실에서 같이 생활하는 범석이와 영훈이에게도 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 대학원 생활을 함께했던 선, 후배 분들이 있어 즐거운 대학원 생활을 할 수 있었던 듯합니다. 앞으로도 서로에게 도움을 줄 수 있는 사이가 되기를 바랍니다.

제가 같은 토목인의 길을 걷는다고 하여 항상 신경써주신 큰외삼촌에게 감사함을 전합니다. 큰외삼촌 회사에서 아르바이트를 하며 배웠던 것들이 대학원 생활을 하는데 큰 도움이 되었습니다.

마지막으로 석사과정을 무사히 마칠 수 있도록 항상 곁에서 격려해주신 부모님 그리고 저를 믿고 잘 따라주는 동생 민서와 서희, 지금은 돌아가고 안계시지만 저를 잘 키워주신 할아버지, 할머니에게도 감사의 말을 올립니다.