특별강연 II

중공사 정밀여과막에 의한 세정배수의 농축

이병호, 이광호*
충북대학교 건설기술연구소, 충북대학교 도시공학과

Concentrate Thickening by hollow-fiber Microfilter

Lee, Byung-Ho, Takizawa, Satoshi, Lee, Kwang-Ho

Institute of Construction Technology, Chungbuk National University
Department of Urban Engineering, The University of Tokyo
Department of Urban Engineering, Chungbuk National University

1. 서 론

정수처리에 있어 막 여과법은 기존의 응집/침전/모래여과 등의 복잡한 공정을 단일의 막 여과 공정으로 대체한 것으로, 장치의 단순화, 운전의 자동화, 수질의 고품질화 등 많은 장점이 인정되어 새로운 정수처리방법으로 크게 주목받고 있다[1~4]. 그러나, 막 여과법을 정수처리 시스템으로 확립하기 위해서는 막의 열화 및 오염의 방지, 그리고 세정배수의 처리 등 해결하여야 할 문제가 아직도 많이 남아있다.

막이용형 정수처리 공정에서 발생하는 세정배수는 주로 막 여과성능을 유지하기 위해서 정기적으로 실시하는 공기세정이나 역세정에 의한 물리적 세정배수로써, 그 발생률은 원수의 약 10%로 정수의 회수율을 크게 저하시키는 원인이 되고 있다. 또한, 이 세정배수 중에는 막 여과에 의해 제거된 현탁물질, 금속류, 미생물 등이 포함되어 있고, 사용하는 막의 종류에 따라 미량의 유해물질도 농축되었을 가능성이 있다.

세정배수의 처리방법으로 기존의 중력침전에 의한 방법을 고려할 수 있지만, 일반적으로 막을 이용한 정수처리 공정은 응집제를 첨가하지 않기 때문에 세정배수를 중력침전 시키기 위해서는 커다란 침전시설이 필요하게 된다. 따라서, 보다 간단하고 효율적인 세정배수의 처리방법으로 재차 막을

이용하는 처리방법이 고려되고 있다[5].

본 연구에서는 침지형 중공사 정밀여과막을 이용한 막여과 농축장치를 개발하여 여과시간과 함께 나타나는 막간폐색(inter-fiber clogging) 현상을 방지하면서 고농도로 세정배수를 농축하는 방법에 대하여 고찰하였다. 또한, 개발한 막여과 농축장치를 실증하기 위해 파이롯트 플랜트 실험을 수행하여 운전의 안정성, 여과수의 수질, 회수율 등에 대하여 평가하였다.

2. 실험방법

2-1. 막충진밀도에 따른 영향

침지형 중공사 정밀여과막을 이용한 막여과 농축장치를 개발하기 위하여 막충진밀도(막 면적/여과조 용적)가 막 여과농축에 미치는 영향을 검토하였다.

실험에 사용한 막 모듈의 사양을 표-1에, 실험장치의 개략도를 그림-1에 나타내었다. 농축막여과조는 투명한 아크릴 관을 사용하여 막충진밀도가 다른 600m^2/m^3(직경4.4cm, 높이45cm)와 60m^2/m^3(직경14cm, 높이45cm)의 여과조를 제작하였으며, 공기세정시 막여과조에 퇴적한 현탁물질의 재부상을 방지하기 위하여 막 모듈의 하부에 방해판을 설치하였다. 막 여과는 흡입식 정유량(flux 0.5$m^3/(m^2 \cdot d)$) 여과방식으로 막 여과에 의해 조내의 세정배수가 배출되면 여과조 상부에 설치된 수위조절기에 의해 새로운 세정배수(포르마진 기준농도 100NTU)가 여과조 위에서 아래 방향으로 연속적으로 공급되도록 하였다. 운전은 자동제어장치(OMRON, Japan)의 ON/OFF에 의해 여과(60분), 배출(1초), 세정(1분)의 순서로 운전하였으며 농축배출수량은 0.07 ℓ/hr이었다.

표-1. 사용한 막 모듈의 사양

	Hollow-fiber Microfilter
Shape	U-type
Material	Hydrophilic polyethylene
Membrane area	0.42m^2
Pore size	0.1㎛
Inner diameter	410㎛
Outer diameter	270㎛
Hight	0.34m
Number of hollow-fiber	960

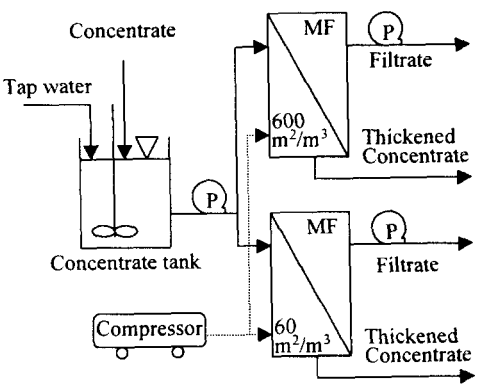


그림-1. 막여과 농축실험장치의 개략도

2-2. 실증 파이롯트 플랜트 실험

막충진밀도 600m^2/m^{3}의 농축막여과조를 약 10배 스케일 업 한 후, 실제의 막이용형 정수처리 공정에서 배출되는 물리적 세정배수를 이용하여 운전의 안정성, 여과수의 수질 그리고 회수율 등에 대하여 평가하였다.

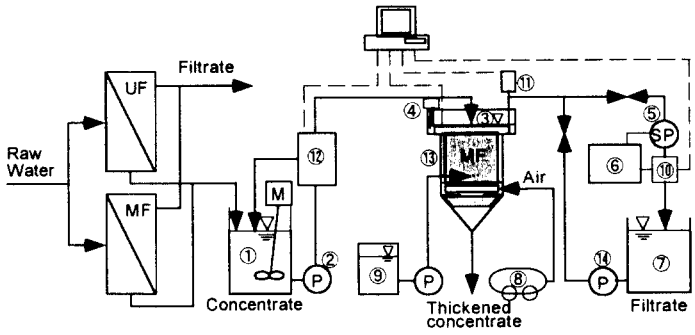
농축막여과조(가로57.5cm, 세로30cm, 폭13cm)는 투명한 아크릴 판을 사용하여 제작하였으며, 공기세정시 여과조 아래에 퇴적한 현탁물질이 재부상하는 것을 방지하기 위하여 막 모듈의 하부에 방해판을 설치하였다.

파이롯트 플랜트 실험에 사용된 막 모듈의 사양 및 운전조건을 표-2에, 실험장치의 개략도를 그림-2에 나타내었다. 막 여과는 흡입식 정유량 여과방식으로 여과(60분), 배출(1초), 세정(1분)의 공정을 반복하면서 방해판 아래에 침전된 농축액을 0.7 ℓ/hr로 배출하도록 하였다.

표-2. 파이롯트 플랜트 실험에 사용된 막 모듈 및 운전조건

	Purification system		Thickening system
	UF system	MF system	
Material	Cellulose acetate	Polyethylene	Polyethylene
Shape	Hollow-fiber	Hollow-fiber	Hollow-fiber
MWCO & Pore size	150,000	0.1㎛	0.1㎛
Membrane area	5.0m²	156.0m²	0.4m²
Filtration method	Internal closs flow	External Dead-end	External Dead-end
Flux	0.2 m³/(m²·d)	0.3 m³/(m²·d)	0.3 m³/(m²·d)
Recovery**	80	90	90

MWCO*: Molecular Weight Cut Off
Recovery**: (Filtrate)/(Fo;trate+Thikened concentrate)



①Concentrate tank②Pump③Housing④Level sensor⑤Suction pump⑥Inverter ⑦Filtrate tank⑧Blower ⑨NaClO tank ⑩Flow meter ⑪TMP meter ⑫Turbidimeter ⑬Thermometer ⑭Backwashing pump

그림-2. 파이롯트 플랜트 실험장치의 장치도

2-3. 수질분석 및 회수율

탁도는 일반탁도계(2100A, HACH, USA)와 자동탁도계(표면난반사식 탁도계6형, HACH, USA)를 이용하여 정기적 또는 연속적으로 측정하였다. 금속류(T-Fe, T-Mn, T-Al)는 원자흡광광도계(Z8270, HIDACHI, Japan)를, DOC는 전유기탄소계(TOC-5000, SHIMADZU, Japan)를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 막충진밀도에 따른 영향

3-1-1. 막 차압 및 탁도의 변화

시간에 따른 막 차압 및 탁도의 변화를 그림-3에 나타내었다. 막충진밀도 600㎡/㎥인 경우, 막 차압은 여과시간이 경과함에 따라 서서히 증가하여 여과개시 30일 후 15kPa에 도달하여 약 0.3kPa/d의 막차압 증가속도를 나타내었다. 이에 반하여 막충진밀도 60㎡/㎥인 경우에는 여과개시 10일 후 15kPa에 도달하여 약 1.0kPa/d의 막차압 증가속도를 나타내었다.

실험기간 동안 여과수의 탁도는 포르마진 농도기준 0.15NTU 이하로 막충진밀도에 따른 여과성능의 차이는 나타나지 않았다. 그러나, 농축배출수의 탁도는 막충진밀도 600㎡/㎥에서 약 11,000NTU(카오린농도 약 13,000㎎/ℓ), 60㎡/㎥에서 6,000NTU(약 7,200㎎/ℓ)를 나타내어 커다란 차이가 나타났다.

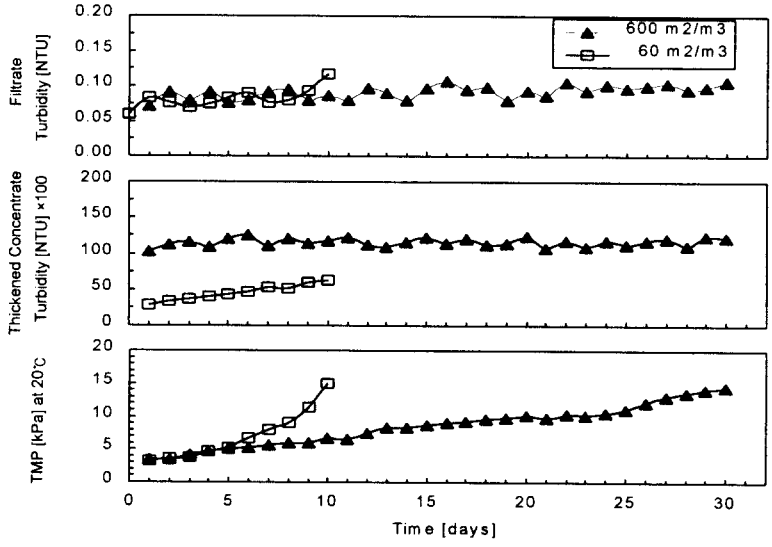
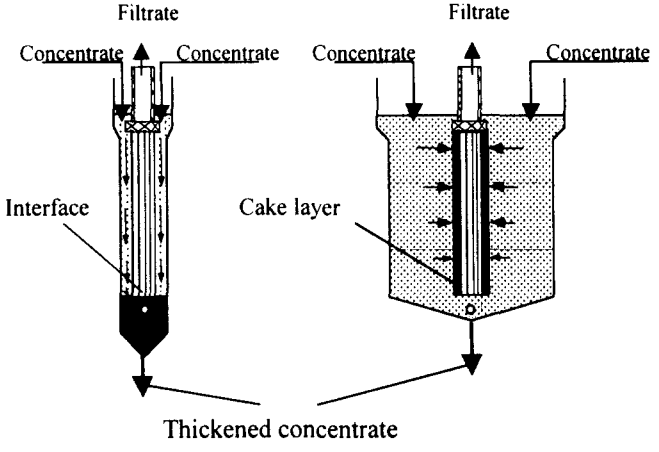


그림-3. 시간에 따른 막 차압 및 탁도의 변화

실험기간 중 농축막여과조의 내부를 관찰하면 막충진밀도 600㎡/㎥인 경우, 그림-4 (a)에 나타낸 것과 같이 공기세정에 의해 막 표면으로부터 떨어진 현탁물질에 의해 발생한 고농도의 현탁액(약 10,000NTU)과 막여과조의 상부로부터 새로이 공급된 세정배수(약 100NTU)와의 농도차에 의한 계면이 형성되었고, 이 계면은 막 여과에 따라 아래 방향으로 이동하여 막 모듈은 서서히 저농도의 세정배수와 접촉하였다. 이에 반하여 막충진밀도 60㎡/㎥에서는 계면의 형성이 관찰되지 않고, 그림-4 (b)에 나타낸 것과 같이 주로 국부적인 수평흐름에 의해 여과 시간이 경과함에 따라 막간폐색(inter-fiber clogging)이 점차 빠르게 진행되는 것을 관찰할 수 있었다.

이상의 실험결과로부터 막충진밀도 600㎡/㎥는 60㎡/㎥과 비교하여 막차압의 증가속도가 느렸고 농축배출수의 탁도가 높았다. 이와 같은 이유는 공기세정 후 60분간의 여과공정 중 관찰된 세정배수의 수직흐름에 의한 계면하강에 기인한다고 생각된다.



(a) 600㎡/㎥ (b) 60㎡/㎥

그림-4. 막충진밀도에 따른 물의 흐름과 농도분극

3-1-3. 계면 하강의 모델링

여과시간에 따른 막여과조내의 계면하강은 세정배수의 농축에 크게 영향을 미친다고 판단하여, 藤田 등[6]의 모델식을 응용하여 계면하강의 모델링을 시도하였다.

먼저 그림-5에 나타난 것과 같은 중공사 정밀여과막을 고려하면, 중공사막 내부를 통과하는 물의 흐름은 층류이기 때문에 *Bernoulli* 방정식과

*Hazen-Poiseulle*의 마찰손실 수두에 의해 식(1)이 성립한다.

$$p + x + \frac{v^2}{2g} = (p + dp) + (x + dx) + \frac{(v + dv)^2}{2g} + \frac{32\mu v}{\rho g D_i^2} dx \qquad (1)$$

또한 질량보존의 법칙에 의해 중공사막 내부의 유량은 막 외부로부터 유입하는 투과유량과 같기 때문에 식(2)가 성립한다.

$$\frac{\pi}{4} D_i^2 dv = \pi D_o u dx \qquad (2)$$

식(1)과 (2)를 이용하여 풀면 다음과 같이 시간 t에 따른 계면의 위치 h를 나타내는 식을 얻을 수 있다[7].

$$h = \frac{2}{\sqrt{\alpha}} \tanh^{-1}\left[\tanh\left(\frac{\sqrt{\alpha} h_o}{2}\right)\exp\left\{-\frac{\sqrt{\alpha}\beta v_f}{\sinh(\sqrt{\alpha}L)} t\right\}\right] \qquad (3)$$

여기서, $\alpha = 128\mu\kappa_o \frac{D_o}{\rho g D_i^4}$, $\beta = \frac{n D_i^2}{D^2 - n D_o^2}$

막충진밀도 600m^2/m^{3}에서 모델식에 의한 계면의 하강곡선과 실측값이 그림-6에 나타난 것과 같이 비교적 잘 일치하는 것으로 보아 계면의 하강은 막 여과에 따른 수직흐름에 기인하는 것을 알 수 있다. 한편, 60m^2/m^{3}에서도 그림-6에 나타낸 것과 같은 계면이 나타날 것으로 사료되지만, 실제적으로는 계면형성이 관찰되지 않았으며 실측에 의하면 막 여과에 따라 수평방향으로 물이 이동하였기 때문으로 사료된다.

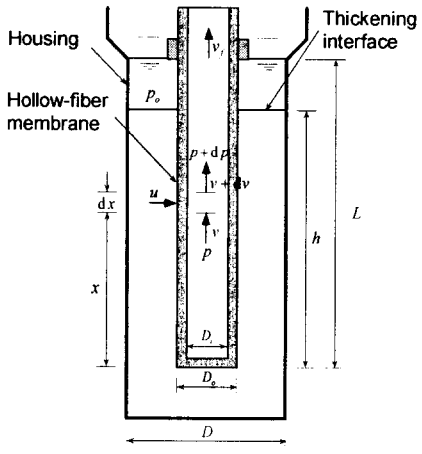


그림-5. 중공사 정밀여과막의 모델

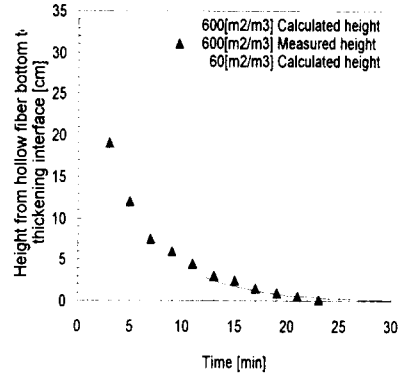


그림-6. 시간에 따른 계면의 위치

3-2. 실증 파이롯트 플랜트 실험

3-2-1. 막 차압 및 탁도의 변화

시간에 따른 막 차압 및 탁도의 변화를 그림-7에 나타내었다.

막충진밀도 600m^2/m^3의 농축막여과조를 약 10배 스케일 업 한 농축막여과장치는 그림-7에 나타난 것과 같이 세정배수의 탁도변화(80~280NTU)에도 불구하고 약품세정 없이 7~10kPa의 막 차압을 약 3개월간 유지하였다. 또한, 이 기간동안 농축배출수의 탁도는 포르마진 농도기준으로 10,000~12,000NTU(카오린농도 12,000~14,400㎎/ℓ)를 나타내어 세정배수의 농축시스템으로서 충분히 유효하다는 것이 실증되었다.

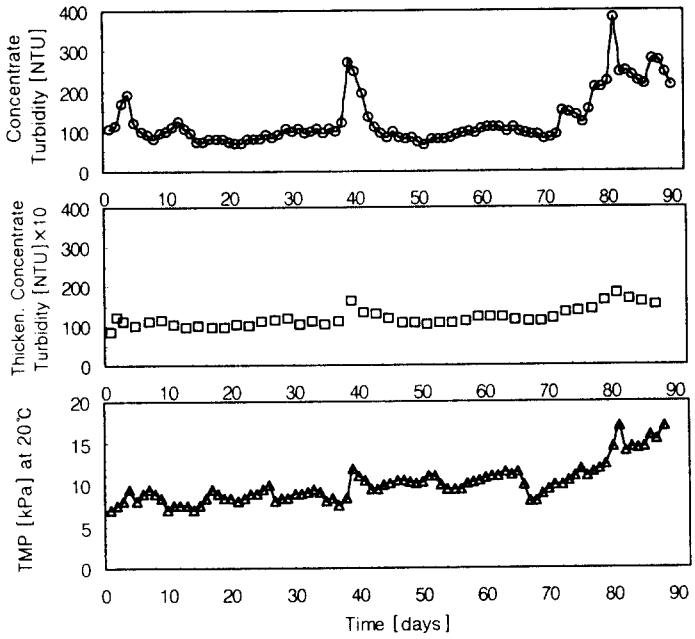


그림-7. 시간에 따른 막 차압 및 탁도의 변화

3-2-2. 수질분석 및 회수율

수질분석의 결과를 표-3에 나타내었다. 고농도의 세정배수에도 불구하고 막여과로 함께 얻어진 여과수의 탁도, 금속류(T-Fe, T-Mn, T-Al), 일반세균군, 대장균군 등 탁도성분은 거의 100% 제거되었으며, 용해성 성분인 DOC도 약 40%의 제거율을 나타내어 일반 막이용형 정수처리공정의 여과수와 거의 동등한 수질이 얻어졌다. 여과수의 재이용 방법으로는 정수처리시설의 원수로 되돌리거나 처리수로서 이용할 수 있는데, 어떠한 경우라도 막이

표-3. 파이롯트 플랜트 실험의 수질분석 결과

Item	Concentrate	Filtrate	Thickened concentrate	Removal
Temp. [℃]	22.6	22.7	23.5	-
pH [-]	7.62	7.74	7.55	-
DOC [㎎/ℓ]	2.61	1.62	-	37.8
T-Fe [㎎/ℓ]	13.43	0.017	1194.8	99.9
T-Mn [㎎/ℓ]	0.82	0.014	70.8	98.2
T-Al [㎎/ℓ]	15.16	0.021	1331.8	99.8
HPC [CFU/㎖]	1.7×10^{5}	6.4	6.5×10^{6}	99.9
E. Coliform [CFU/100㎖]	7.6×10^{3}	2	2.6×10^{5}	99.9

4. 결 론

침지형 중공사 정밀여과막을 이용하여 막이용형 정수처리공정에서 발생되는 물리적 세정배수를 농축하는 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 막충진밀도(막면적/막여과조 용적) 600㎡/㎥와 60㎡/㎥를 비교한 막여과 농축실험에서 막충진밀도는 막 차압의 증가속도와 농축배율에 커다란 영향을 미쳤으며, 이것은 막 여과에 따른 계면하강에 기인한다고 판단된다.

(2) 시간에 따른 계면의 하강위치를 모델식을 세워 실측값과 비교한 결과, 잘 일치하는 것으로 보아 계면의 하강은 막 여과에 따른 수류의 이동이 기인한다는 것이 확인되었다.

(3) 실제의 막이용형 정수처리공정에서 배출되는 물리적 세정배수를 이용한 한 파이롯트 플랜트 실험을 수행한 결과, 약품세정 없이 3개월 이상 연속운전 및 100배 이상의 농축배율을 얻었으며, 정수 회수율을 99.9%이상으로 향상시킬 수 있었다. 이상의 결과에 의해 본 침지형 막여과농축여과장치는 세정배수의 농축시스템으로서 충분히 유효하다는 것이 실증되었다.

참고문헌

1. AWWA Membrane Technology Research Committee (1992) "Membrane Process in Potable Water Treatment", Jour. AWWA, 84, 1, pp. 59~67.
2. Wiesner, M.R. et al. (1994) "Cost estimates for Membrane Filtration and Conventional Treatment", Jour. AWWA, 86, 12, pp. 33~41.
3. 藤田賢二 (1990) "膜分離技術による淨水場の試設計", 水道協會雜誌, 第59卷, 第4號, pp.10~18.
4. 藤田賢二 (1991) "膜濾過技術と上水處理", 工業用水, 第389卷, pp. 9~16.
5. 村田周和 等 (1997) 膜濾過法による排水處理 (I) 、全國水道研究發表會、48、268~269.
6. 藤田賢二, 龍澤 智 (1995) "外壓式中空絲膜における目詰まり過程のシミュレーションと操作方法の評價", 水道協會雜誌, 第64卷, 第3號, pp. 12~23.
7. 李秉鎬, 龍澤 智, 藤田賢二 (1996) "濃縮膜濾過裝置による膜洗淨排水の濃縮", 水道協會雜誌, 第66卷, 第8號, pp. 29~36.