

여재 종류에 따른 역삼투법 해수담수화 시설 전처리 여과공정의 성능비교

Comparison of the filtration performance by different media in pretreatment of seawater desalination by reverse osmosis

김승현^{1*} · 윤종섭¹ · 이석현²

Seung-Hyun Kim^{1*} · Jong-Sup Yoon¹ · Seockheon Lee²

1 경남대학교 토목공학과, 2 한국과학기술연구원

1 Civil Engineering Department, Kyungnam University, 2 Korea Institute of Science and Technology

(2009년 1월 21일 접수; 2009년 3월 18일 수정; 2009년 3월 30일 채택)

Abstract

This study compares the performance of the filters with various media in pretreatment of seawater desalination by reverse osmosis. For this purpose, Masan bay seawater is used as raw water. The filter performance is evaluated by the filtrate quality and the head loss development. Five media is selected in this study: anthracite, Filtralite[®], sand, Pumice, AFM[®]. These media are used in combination for dual media filter and alone for mono media filter. The comparison results show that NC0.8-1.6 is the best Filtralite[®]. The dual media filter of NC0.8-1.6 and sand outperformed other filters in particle removal. The dual media filter of anthracite and sand showed good performance in organic removal. The mono media filter of Pumice produced the similar filtrate quality as the mono media filter of sand although the effective size of Pumice is considerably greater than that of sand. Due to big size, head loss development is maintained slow in the filtration of Pumice

Key words : Filtration, Media, Head loss, Filtrate quality

주제어 : 여과, 여재, 손실수두, 여과수질

1. 서론

역삼투법 해수담수화 시설의 전처리 공정으로는 이중여과가 가장 많이 사용된다 (김, 2000, Ebrahim 등, 1995, Shahalam 등, 2002, Isaias, 2001). 두 가지 종류의 여재를 포함하는 이중여과는 통상 여재 상층부에는 안쓰라사이트 (anthracite), 하층부에는 모래가 각각 충전 된다 (김, 2000). 최근에는 안쓰라사이트와 모래 외의 다른 재질의 여재가 활발히 개발되고 있다. 예를 들면, Active Filter Media (AFM[®])과 Pumice는 모래 대응으로, Filtralite[®]는

안쓰라사이트 대응으로 사용된다. AFM[®]을 제조한 Dryden Aqua은 AFM[®]은 표면촉매 특성과 높은 음전하를 소지하고 있다고 주장한다 (Dryden, 2007). 이런 특성은 여재 내 미생물의 번식을 최소화하는데 도움이 되므로, AFM[®]은 미생물로 인한 채널형성 등의 부작용을 줄이는데 효과적이다. 또한, 일반 모래와 비교할 때 수중의 입자 제거효율을 30% 이상 높일 수 있다 (Dryden, 2007). 화산재의 일종으로 저중량 콘크리트나 저밀도 벽돌을 만드는데 사용되는 Pumice는 U.A.E의 Fujairah 담수화 시설의 전처리 시설 여과지의 여재로 사용되었다. 다공성 구조의 저밀도 점토로 다양한

* Corresponding author Tel:+82-55-249-2671, Fax:+82-55-249-2664, E-mail: shkim@kyungnam.ac.kr(Kim, S.H.)

용도의 여재로 사용되고 있는 Filtralite[®]는 안쓰라사이트와 비교해서 손실수두가 적게 발생하는 것으로 알려져 있다 (Mitrouli 등, 2008).

이러한 종류의 여재들은 국내 해수수질에 적용한 경험이 없으며, 이들의 성능을 직접적으로 비교한 연구결과도 없다. 그러므로, 본 연구는 이와 같이 새롭게 개발된 여재들을 국내에서는 적조로 인한 오염이 가장 심한 곳으로 알려진 폐쇄성 해역의 마산만 해수에 적용해서, 이들의 성능을 비교하는 것을 목적으로 수행되었다.

2. 실험

여재의 종류에 따른 여과성능을 비교하는 실험은 Table 1에 제시된 바와 같이 세 번에 나누어 실시하였다. 첫 번째 실험에서는 비교대상의 여재를 Filtralite[®]에 국한하여, 여러 종류의 Filtralite[®]를 사용하며 이들의 여과성능을 조사하였다. Filtralite[®]는 네 가지 종류를 (NC0.8-1.6, NC1.5-2.5, HC0.8-1.6, MC0.8-1.5) 비교하였다. NC0.8-1.6는 입자의 크기가 0.8-1.6 mm를, NC1.5-2.5는 1.5-2.5 mm를 의미한다. 이들은 모두 안쓰라사이트 대신으로 사용되어 역삼투법 해수담수화 시설의 전처리 여과공정에서 가장 많이 사용되는 안쓰라사이트와 모래를 조합한 이중여과의 (AS 이중여과) 성능과 비교하였다. 첫 번째 실험에서 NC0.8-1.6의 성능이 가장 우수한 것으로 밝혀졌으므로, 이후의 실험부터는 NC0.8-1.5을 Filtralite[®]의 대표 여재로 사용하였다. 두 번째 실험에서는 여재를 다양하게 조합시킨 이중여과의 성능을 비교하였다. 이들은 AS 이중여과, Filtralite[®]와 모래를 조합한 FS 이중여과, 안쓰라사이트와 AFM[®]를 조합한 AM 이중여과, Filtralite[®]와 AFM[®]를 조합한 FM 이중여과이다. 그리고 세 번째 실험에서는 이중여과와 단일여과의 성능을 비교하였다. 이중여과에는 AS 이중여과 및 FS 이중여과를, 단일여과에는 모래여과와

Pumice여과를 (P여과) 사용하였다.

성능비교 실험은 여과 컬럼에서 실시하였으며 (Fig. 1 참조), 여재의 깊이는 첫 번째와 두 번째 실험에서는 100 cm, 세 번째 실험에서는 90 cm를 사용하였다. 여과 컬럼은 이전의 연구결과에서 최적조건으로 확인된 조건에서 운전하였다 (김 등, 2009). 여과속도는 5 m/h이었으며, 응집제가 주입된 경우에는 FeCl₃를 4 mg/L 주입하였다. 여과 컬럼은 24 시간 운전한 후 0.8 m/min의 속도로 역세척을 실시하였다. 역세척은 물 세척만 실시하고 공기세척은 실시하지 않았으며, 역세척 시 염소는 주입하지 않았다. 여과성능은 여과수질과 손실수두를 가지고 평가하였다. 여과수질은 탁도, 입자 수, COD, chlorophyll-a 농도와 해수담수화의 전처리 수질평가에 가장 많이 사용되는 SDI를 (Silt Density Index) 측정하였다. 실험 오차를 줄이기 위하여 3~6번의 반복실험을 실시하였다. 탁도는 2100N Turbidimeter (Hach)를, 입자 수는 PC 2400 PS (Chemtrac)을 이용하여 측정하였으며, COD와 chlorophyll-a 농도는 해양환경 공정시험법에 (해양수산부, 2005) 준하여 측정하였다. SDI는 ASTM에 (ASTM, 1995) 준하여 측정하였다.

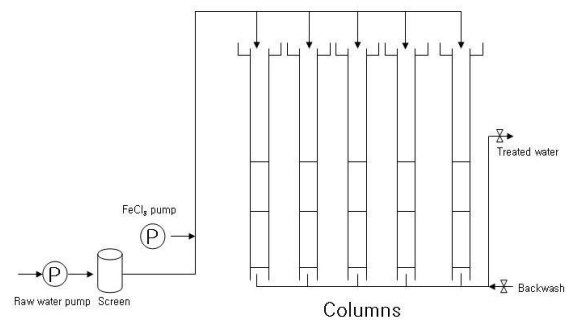


Fig. 1. Schematic diagram of the filter column used in this study

Table 1. Experimental conditions

Description	Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5
Experiment I*	Anthracite + Sand	NC0.8-1.6 + Sand	NC1.5-2.5 + Sand	HC0.8-1.6 + Sand	MC1.5-2.5 + Sand
Experiment II*	Anthracite + Sand	Filtralite [®] + Sand	Anthracite + AFM [®]	Filtralite [®] + AFM [®]	-
Experiment III**	Anthracite + Sand	Filtralite [®] + Sand	Sand	Pumice	-

*Media depth of 100 cm (50 cm each)

**Media depth of 90 cm (top layer 60 cm, bottom layer 30 cm)

3. 결과 및 고찰

3.1 해수 및 여재의 특성

본 연구에는 마산만 해수를 여과지 유입수로 사용하였다. 마산만 해수의 전반적 특성은 다른 연구에 (김 등, 2009) 잘 나타나 있으므로, 여기서는 연구기간 중에 관찰된 특성만을 Table 2에 요약하였다. 건기에 실시된 첫 번째 실험과 두 번째 실험 기간 중에는 해수의 특성이 유사하였다. 차이는 조류농도를 나타내는 chlorophyll-a 농도로, 두 번째 실험기간 중에는 첫 번째 실험기간보다 chlorophyll-a 농도가 상당히 더 높았다. 또한 비록 큰 폭은 아니지만 유기물 농도인 COD 농도도 더 높았다. 세 번째 실험기간의 특성은 강우이다. 이 기간 동안에는 이틀 동안 비가 연속적으로 내렸다. 강우로 인하여 해수의 탁도와 입자 수가 높아졌으며, 전기 전도도와 COD 농도는 낮아졌다.

본 연구에서 사용된 5가지 종류의 여재의 특성을 (모래, AFM®, Pumice, Filtralite®, 안쓰라사이트) Table 3에 요약하였다. Table 3에는 사양서에 제시된 수치와 실제로 체 분석을 실시하여 얻은 수치가 함께 제시되었다. 이 표에서 알 수 있듯이 모래의 대응으로 사용되는 AFM®과 Pumice는 모래와 비교하여 비중은 작은 반면, 크기는 컸다. 사양서에 의하면 AFM®의 유효입경은 0.5~0.7 mm로 나타나 있으나, 체 분석결과는 이보다 크게 나타났다 (1.0 mm). 체 분석결과 Pumice의 유효입경은 사양서에서 제시된 범위와 일치하여 (1.8 mm), 모래의 두 배 이상이었다. 체 분석결과 Filtralite®의 유효입경은 안쓰라사이트보다 큰 것으로 나타났다. 여재들의 균등계수는 작은 편이어서 AFM®을 제외하고는 모두 1.5 미만이었다.

Filtralite®와 안쓰라사이트의 구성성분을 비교하기 위하여 XRF 분석을 실시한 결과에 의하면, 주요 구성성분은 유사하였으나 이들의 구성비율은 달랐다. Filtralite®의 주요

Table 2. Characteristics of Masan bay seawater during the study period

Description	Concentration		
	Experiment I	Experiment II	Experiment III
Conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$	49.8~51.6 (50.7)	49.7~51.4 (50.4)	44.1~45.6 (45.0)
pH	7.45~7.70 (7.59)	7.58~7.84 (7.71)	7.64~8.01 (7.83)
Turbidity, NTU	1.3~1.4 (1.3)	1.1~1.6 (1.3)	2.3~7.6 (4.5)
Particle number > 2 μm , 1,000/mL	5.1~5.5 (5.2)	5.1~5.3 (5.2)	5.6~8.2 (7.3)
COD, mg/L	3.2~8.0 (5.3)	3.2~8.8 (6.9)	4.0~4.6 (4.3)
Chlorophyll-a, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2.0~2.1 (2.1)	7.6~20 (13.9)	13.4~16.3 (14.8)

Table 3. Characteristics of the filter media used in this study

Description	Specific gravity*	Effective size*,mm	Uniformity Coefficient*	Porosity*
Sand	2.65	(0.7)***	(1.4)	0.42~0.47**
AFM®	2.5	0.5~0.7 (1.0)	< 1.5 (1.6)	-
Pumice	2.3	1.95±9% (1.8)	< 1.5 (1.3)	-
Anthracite	1.5	(0.9)	(1.2)	0.56~0.60**
NC0.8-1.6	1.1±0.1	0.95±5% (1.2)	< 1.5 (1.4)	0.70
NC1.5-2.5	0.72±0.15, 1.038±0.15	1.7±0.3	< 1.5	0.67
HC0.8-1.6	1.65±0.15	0.9±10%	< 1.5	0.62
MC1.5-2.5	1.3±0.15	1.7±0.3	< 1.5	0.58

*Values for AFM®, Pumice, Filtralite® obtained from brochure

**Values for sand and anthracite obtained from Cleasby and Fan (1981), Dharmarajah and Cleasby (1986), Cleasby and Woods (1975)

***Values in parentheses being measured

성분비율은 SiO₂(62%), Al₂O₃(18%), Fe₂O₃(7%)이였으며, 안쓰라사이트는 SiO₂(49%), Al₂O₃(21%), Fe₂O₃(12%) 이었다. 안쓰라사이트와 비교하여 Filtralite[®]는 SiO₂의 비율이 큰 반면, Al₂O₃와 Fe₂O₃의 비율이 작았다.

3.2 Filtralite[®]의 종류 별 여과성능 비교

다양한 종류의 Filtralite[®]를 사용하여 이중여과를 구성한 후 그 여과성능을 비교한 결과를 Fig. 2와 3에 제시하였다. 이 그림들에는 응집제를 주입하지 않은 경우와 주입한 경우의 결과가 모두가 포함되었다. 이 그림들에서 알 수 있듯이 Filtralite[®]의 종류에 따라서 비록 큰 차이는 아니지만 여과수질이 다르게 나타났다. 여과수질로 평가하면, NC0.8-1.6이 전반적으로 다른 종류보다 우수한 성능을 나타내었다. NC0.8-1.6을 사용한 여과 컬럼은 여과수의 탁도, chlorophyll-a 농도, COD 농도가 가장 낮았으며 (Fig. 2), 그 결과가 반영되어 SDI 수치도 가장 낮았다 (Fig. 3). 입자수의 제거효율은 NC1.5-2.5을 사용한 여과 컬럼이 가장 우수하였으며, NC0.8-1.6이 그 다음이었다. 그러나, 입자수를 제외한 다른 항목의 여과수질은 NC0.8-1.6에 미치지 못했다.

입자크기는 여과수질과 밀접하게 연관되어 있다. 여과수질과 여과특성의 관계를 나타내는 아래의 식 1에 의하면, 여과수질은 여재의 직경, 여재층 높이, 공극의 영향을 받는다 (Yao, 1968; Yao 등, 1971). 여과수질은 여재의 직경이 작을수록, 여재층이 깊을수록, 공극이 작을수록 개선된다. 그러므로, 작은 입자인 NC0.8-1.6과 HC0.8-1.6이 큰 입자인 NC1.5-2.5와 MC1.5-2.5보다 우수한 수질의 여과수를 생산할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 실험결과 이론상 예측된 것처럼 NC0.8-1.6이 가장 우수한 수질의 여과수를 생산하였다. 입자크기의 영향은 여과수의 SDI 수치에도 나

타났다. NC0.8-1.6 및 HC0.8-1.6와 같이 작은 입자의 여재를 사용한 FS 이중여과는 AS 이중여과보다 SDI 수치가 작았으나, NC1.5-2.5 및 MC1.5-2.5와 같이 큰 입자의 여재를 사용한 FS 이중여과는 그렇지 못했다. 여재가 큰 경우에는 여재층 높이를 증가시키면, 수질을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서는 여재의 크기와 여재층 사이의 상관관계를 고려하여 여재층을 높인 후 여재의 성능을 비교하는 실험은 실시하지 않았다.

$$\ln \frac{N_{out}}{N_{in}} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{(1-\epsilon)\alpha\eta}{d_c} \cdot L \quad (1)$$

N_{in}: 유입입자 농도 (number concentration of influent particles)

N_{out}: 유출입자 농도 (number concentration of effluent particles)

e: 공극 (porosity)

α: 부착계수 (attachment efficiency factor)

η: 단독입자 운반효율 (single collector transport efficiency)

d_c: 여재 직경 (grain diameter)

L: 여재층 높이 (bed length)

그러나, 입자가 작다고 반드시 여과수질이 나빠지는 않았다. 예를 들면 NC1.5-2.5은 안쓰라사이트 보다 유효입경이 컸음에도 불구하고 양호한 수질을 생산하였다. 이는 이중여과를 사용하였기 때문으로 추정된다. 이중여과에서는 여과지 하층부를 차지하고 있는 모래가 오염물 제거에 상당부분 기여하였기 때문에 상층부 여재의 입자크기가 미치는 영향은 줄어든 것으로 판단된다.

전반적으로 Filtralite[®]가 안쓰라사이트보다는 손실수두를

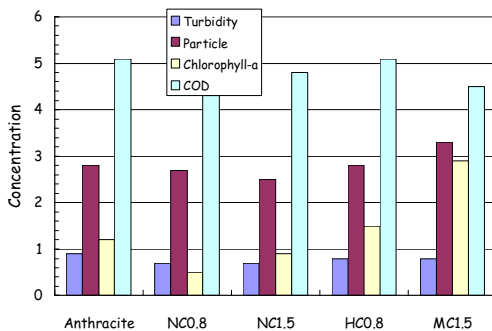


Fig. 2. Comparison of the filtrate qualities by different Filtralite[®] (NC0.8 = NC0.8-1.6; NC1.5 = NC1.5-2.5; HC0.8 = HC0.8-1.6; MC1.5 = MC1.5-2.5)

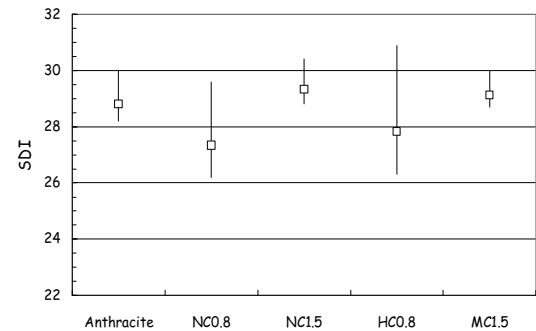


Fig. 3. Comparison of SDI values by different Filtralite[®] (NC0.8 = NC0.8-1.6; NC1.5 = NC1.5-2.5; HC0.8 = HC0.8-1.6; MC1.5 = MC1.5-2.5)

느리게 증가시켰으며, 그 증가 폭은 Filtralite®의 종류에 따라서 다르게 나타났다. 실험결과, AS 이중여과의 손실수두 증가율은 0.72 cm/h, NC0.8-1.6를 사용한 FS 이중여과는 0.32 cm/h, NC1.5-2.5를 사용한 FS 이중여과는 0.27 cm/h, HC0.8-1.6를 사용한 FS 이중여과는 0.47 cm/h, 그리고 MC1.5-2.5를 사용한 FS 이중여과는 0.27 cm/h이었다. 예상된 바와 같이 여재의 크기에 따라서 손실수두의 증가양상이 다르게 나타났다. 큰 입자인 MC1.5-2.5를 사용한 FS 이중여과의 손실수두 증가율이 가장 작았으며, 작은 입자인 HC0.8-1.6를 사용한 FS 이중여과가 가장 크게 나타났다. 손실수두의 증가를 나타내는 Carman-Kozeny 식에 의하면 (식 2), 손실수두는 여재 비표면적의 제곱에 (S_o²) 비례한다 (Fair 등, 1968). 입자가 작아질수록 비표면적이 커지므로, 손실수두는 여재의 입자크기에 반비례한다. 실험결과 식 2에서 예측된 바와 같이 입자가 클수록 손실수두는 느리게 증가하였으며, 입자가 작을수록 손실수두는 빠르게 증가하였다. 응집제를 주입한 후에는 손실수두의 증가율이 더 빨라졌다 (Fig. 4). 응집제 주입은 여과에 의한 입자 제거율을 향상시켜 여재에 역류되는 오염물의 양을 늘려나게 하며, 이는 여재 내 공극의 감소로 이어진다. 그리고 공극이 감소되면 손실수두도 증가된다 (식 2). 실험결과 응집제를 주입하자 손실수두의 증가율은 빠르게 증가하였다. 응집제를 주입하지 않은 경우와 마찬가지로 여재의 크기가 클수록 손실수두는 느리게 증가하였으며, 작을수록 손실수두는 빠르게 증가하였다.

$$\frac{\Delta h}{L} = k \cdot \frac{\mu}{\rho_w g} \cdot \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot S_o^2 \cdot V_o \quad (2)$$

Δh: 손실수두 (head loss)

L: 여재 깊이 (media depth)

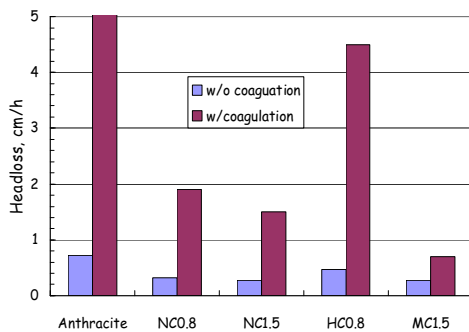


Fig. 4. Head loss development by different Filtralite® (NC0.8 = NC0.8-1.6; NC1.5 = NC1.5-2.5; HC0.8 = HC0.8-1.6; MC1.5 = MC1.5-2.5)

k: Carman-Kozeny 계수 (Carman-Kozeny coefficient)

ρ_w: 물 밀도 (water density)

g: 중력가속도 (gravity acceleration)

m: 물의 점성계수 (viscosity)

e: 공극 (porosity)

S_o: 여재 비표면적 (surface area per unit volume of grain)

V_o: 여과속도 (filtration velocity)

실험결과, NC0.8-1.6이 여과수질과 손실수두 기준으로 Filtralite® 종류 중에서는 가장 우수한 성능을 나타내는 것으로 평가되었다. 그러므로, 이후의 실험에서 Filtralite®가 필요한 경우에는 NC0.8-1.6이 사용되었다.

3.3 이중여과의 성능비교

다른 종류의 여재로 구성된 이중여과의 성능을 비교한 결과를 Fig. 5와 6에 제시하였다. 여과수의 탁도와 입자 수를 비교한 결과에 의하면, 비록 크지는 않지만 이들 이중여과들의 성능에는 차이가 있었다. AS 이중여과와 비교하여 FS 이중여과와 AM 이중여과가 입자제거에 우수하였다. 반면 FM 이중여과는 AS 이중여과보다 입자제거 성능이 우수하지 못했다. 여과수의 chlorophyll-a 농도를 비교한 결과도 유사하였다. FS 이중여과와 AM 이중여과가 AS 이중여과보다 우수한 반면, FM 이중여과는 AS 이중여과의 성능에 미치지 못하였다. 여과수의 COD 농도를 비교한 결과는 입자제거와는 다르게 나타났다. AS 이중여과가 AM 이중여과 및 FS 이중여과보다 우수한 성능을 나타내었다. 전반적으로는 안쓰라사이트와 모래 중 하나를 새로운 여재로 교체한 이중여과가 이 둘을 모두 교체한 이중여과보다 우수하였다. 여과수의 SDI 수치를 기준으로 하면 (Fig. 6), FS 이중여과

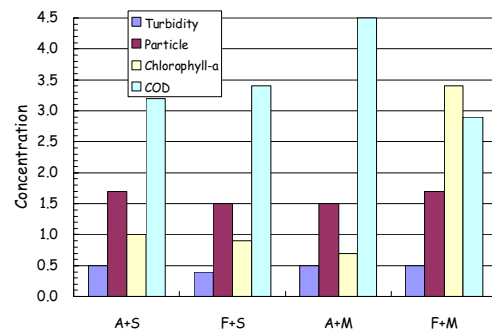


Fig. 5. Comparison of the filtrate qualities by various dual media filters (A+S = anthracite and sand; F+S = Filtralite® and sand; A+M = anthracite and AFM®; F+M = Filtralite® and AFM®)

가 가장 우수한 성능을 나타내었다. 그러나 역삼투막 제조업자가 요구하는 수준인 SDI (15 분) 3~4에는 미치지 못하였다 (Wolf 등, 2005).

AS 이중여과와 FS 이중여과의 유일한 차이는 여재의 상층부를 차지하는 안쓰라사이트와 Filtralite® (NC0.8-1.6)이다. 식 1에 의하면 여과수질에 영향을 미치는 인자는 여재층 높이, 여재의 크기, 그리고 공극이다. 두 여과의 여재층 높이는 동일한 반면 유효입경은 안쓰라사이트가 Filtralite®보다 작았다. 그러므로 여재의 크기가 작은 AS 이중여과가 FS 이중여과보다 우수한 여과수질을 생산할 것으로 기대되었으나, 실험결과는 그 반대로 FS 이중여과가 AS 이중여과보다 좋은 수질의 여과수를 생산하였다. 이러한 결과는 여과수질에는 여재층 높이, 여재의 크기 및 공극 외에 다른 인자도 중요할 수 있다는 것을 의미한다. 그 인자가 무엇인지는 명확히 밝혀지지는 않았으나 Filtralite®는 유효입경이 컸음에도 불구하고 안쓰라사이트가 사용된 조합보다 우수한 여과수질을 생산하였다.

손실수두 증가율은 AS 이중여과는 12.9 cm/h, FS 이중여과는 2.11 cm/h, AM 이중여과는 3.43 cm/h, FM 이중여과는 1.45 cm/h이었다. 여유수두를 100 cm로 가정하고 단위 여과량을 계산하면, AS 이중여과는 39 m³/m², FS 이중여과는 237 m³/m², AM 이중여과는 146 m³/m², FM 이중여과는 345 m³/m²이 된다. 그러므로, FS 이중여과와 FM 이중여과만 단위 여과량 200 m³/m²을 초과하였다. 단위 여과량이 200 m³/m²미만인 경우에는 여과시간이 짧은 것으로 인정되고 있다 (Kawamura, 1991). FM 이중여과의 손실수두 증가율이 느린 이유는 입자크기 때문이다. Table 3에서 알 수 있듯이, Filtralite®의 유효입경이 안쓰라사이트보다 컸으며, AFM®도 모래보다 유효입경이 컸다. 또한 공극의 영

향도 있다. Filtralite®의 공극은 0.70인 반면 안쓰라사이트의 공극은 0.56~0.70이었다 (Cleasby and Fan, 1981; Dharmarajah and Cleasby, 1986; Cleasby and Woods, 1975). 식 2에서 알 수 있듯이 손실수두는 입경 및 공극과 밀접하게 관계되어 입경과 공극이 클수록 손실수두가 작아진다. 실험결과, FS 이중여과가 여과수질과 손실수두 기준으로 가장 우수한 성능을 나타낸 것으로 평가되었다.

3.4 이중여과와 단일여과의 성능비교

여재의 종류에 따른 이중여과의 성능을 비교한 후에는, 이중여과와 단일여과의 성능을 비교하였다. 이중여과에는 여재 종류 별 이중여과의 성능을 비교한 앞의 연구결과 가장 성능이 우수한 것으로 평가된 FS 이중여과와 AS 이중여과를, 단일여과에는 P여과와 모래여과를 사용하였다. 비교결과는 Fig. 7과 8에 요약하였다. 여과수의 탁도와 입자 수를 비교한 결과에 의하면, 비록 크지는 않지만 여과성능에 차이가 있었다. 우선 이중여과 사이의 비교에서는 앞서서도 언급된 바와 같이, FS 이중여과가 AS 이중여과보다 입자제거에 우수하였다. FS 이중여과는 또한 단일여과보다 입자제거 성능이 우수하였다. 단일여과들은 서로 비슷한 성능을 나타내어, 여과수 탁도는 모래여과가 낮은 반면 입자 수는 P여과가 낮았다.

여과수의 COD 농도를 비교한 결과에 의하면, AS 이중여과가 유기물 제거에는 가장 우수하였다. P여과의 COD 제거성능이 AS 이중여과의 성능에 근접하였으며, FS 이중여과와 모래여과는 유기물 제거율이 상대적으로 낮았다. 여과수의 chlorophyll-a 농도를 비교한 결과에 의하면, chlorophyll-a 제거효율은 입자제거효율과 유사하였다. FS 이중여과가 가장 우수한 성능을 나타냈으며, AS 이중여

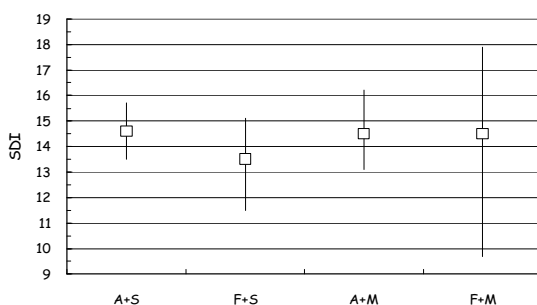


Fig. 6. Comparison of SDI values by various dual media filters (A+S = anthracite and sand; F+S = Filtralite® and sand; A+M = anthracite and AFM®; F+M = Filtralite® and AFM®)

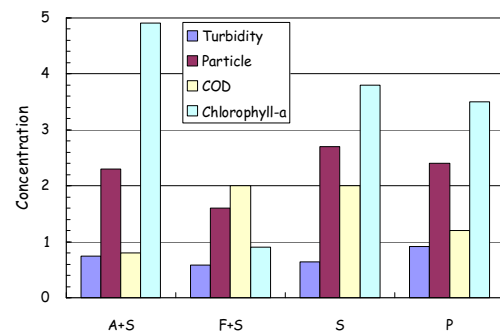


Fig. 7. Comparison of the filtrate qualities between dual media filters and mono media filters (A+S = anthracite and sand; F+S = Filtralite® and sand; S = sand; P = Pumice)

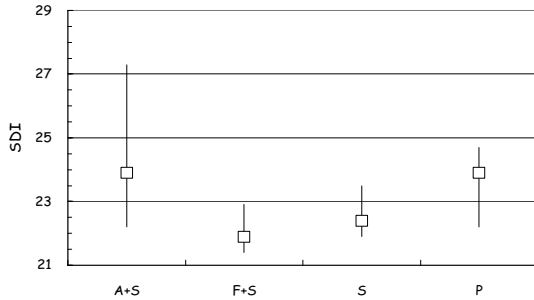


Fig. 8. Comparison of SDI values between dual media filters and mono media filters (A+S = anthracite and sand; F+S = Filtralite® and sand; S = sand; P = Pumice)

과가 가장 낮은 제거율을 나타냈다. 단일여과의 제거율은 이중여과들의 중간 정도였다. 여과수의 SDI 수치 기준으로도 (Fig. 8), FS 이중여과가 가장 우수한 성능을 나타내었다. 그러나 SDI (15 분) 3~4에는 미치지 못하였다. 이 결과는 마산만 해수의 경우 여과지만을 사용해서는 역삼투막 제조업자가 요구하는 SDI 기준을 만족시키지 못한다는 것을 의미한다. 여과공정에 의한 SDI 기준의 만족여부는 원수수질에 따라서 달라질 수 있다. 원수수질에 따라서 여과공정만으로 SDI 3~4를 만족시키는 경우도 있을 수 있고, 그렇지 못한 경우도 있을 수 있다. 이러한 이유 때문에 수질맞춤형 전처리 기술의 개발이 필요하다. 한편 여과수의 SDI 기준으로는 모래여과가 P여과와 AS 이중여과보다 우수한 성능을 나타냈다. 이는 다른 여재와 비교해서 모래 입자의 크기가 작았기 때문으로 판단된다.

P여과와 모래여과는 상당한 입자크기의 차이에도 불구하고 여과수질이 유사하였다. 식 1에 나타나있듯이 여과수질은 여재층 높이, 공극 및 여재의 입경과 밀접하게 연관되어 여재의 입경이 작을수록 여과수질이 우수하게 된다. Table 3에 의하면 모래의 유효입경은 0.7 mm인 반면 Pumice의 유효입경은 1.8 mm로 Pumice가 훨씬 컸다. 그럼에도 불구하고 이들의 여과수질은 유사하였다. P여과와 모래여과는 여재층 높이는 같았으며, 공극도 유사하였고, 유일한 차이는 입경이다. 그러므로, 이 세 가지 인자 외에 다른 인자로 인하여 P여과가 입자가 컸음에도 불구하고 모래여과와 유사한 여과수질을 생산할 수 있었던 것으로 추정할 수 있다.

손실수두 증가율은 FS 이중여과와 P여과가 0.5 cm/h, AS 이중여과가 0.7 cm/h, 모래여과가 3 cm/h 이었다. 앞서서도 확인된 바와 같이 FS 이중여과의 손실수두 증가율이 가장 낮았으며, 큰 입자로 구성된 P여과도 손실수두의 증가

율이 낮았다. 반면 작은 입자로 구성된 모래여과는 손실수두 증가율이 상당히 높았다. 여유수두 100 cm 기준 단위 여과량이 200 m³/m²에 미치지 못하였으므로, 만일 모래여과를 사용하여 마산만 해수를 처리할 경우에는 이보다 큰 여재를 사용하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

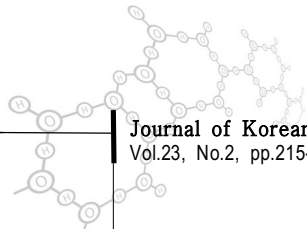
본 연구에서는 다양한 종류의 여재를 사용하여 역삼투법 해수담수화 시설의 전처리여과공정의 성능을 비교하였다. 이를 위하여 마산만 해수를 취수하여 실험에 사용하였으며, 여과성능은 여과수질과 손실수두를 가지고 평가하였다. 안쓰라사이트의 대응으로 사용되는 Filtralite®의 경우, NC 0.8-1.6의 성능이 가장 우수한 것으로 평가되었다. 다양한 여재를 사용하여 이중여과의 성능을 비교한 결과 Filtralite®와 모래를 조합한 이중여과가 가장 우수한 성능을 나타냈다. FS 이중여과는 Pumice와 모래의 단일여과보다 우수한 수질의 여과수를 생산하였다. FS 이중여과는 탁도와 입자 수로 대변되는 입자제거성능이 우수한 반면 AS 이중여과는 COD 농도로 나타나는 유기물 제거성능이 우수하였다. Chlorophyll-a 농도의 제거효율은 입자의 제거효율과 유사하게 나타났다. Pumice를 사용한 P여과의 경우 모래여과보다 입자가 컸음에도 불구하고 모래여과와 유사한 여과수질을 생산하였다. 반면 큰 입자로 인하여 손실수두의 증가율은 상당히 낮게 유지되었다.

사 사

본 연구는 건설교통부 플랜트기술고도화사업의 연구비지원(07해수담수B0102-03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김승현, 윤종섭, 이석현 (2009) 역삼투법 해수담수화 전처리 여과공정의 최적조건, 상하수도학회지, 제출
2. 김충환 (2000) 바닷물로 먹는물을 만드는 방법 역삼투법 해수담수화, 아카데미 서적, 서울.
3. 해양수산부고시 제2005-61호 (2005) 해양환경공정시험방법개정고시(안).
4. ASTM (1995) A Standard Test Method for Silt Density Index(SDI) of water, D4189-95.
5. Cleasby, J.L and Fan, K.S. (1981) Predicting fluidization and expansion of filter media, Journal of Environmental Engineering Division, ASCE, 107(EE3), pp.455~465.



6. Cleasby, J.L and Woods, C.W. (1975) Intermixing of dual and multi-media granular filters, *Journal of AWWA*, 67(4), pp.197~207.
7. Dharmarajah, A.H. and Cleasby, J.L. (1986) Predicting the expansion of filter media, *Journal of AWWA*, 78(12), pp.66~76.
8. Dryden, H. (2007) *Active Sand Filtration with AFM*, Dryden Aqua.
9. Ebrahim, S.H., Abdel-Jawad, M.M., Safar, M. (1995) Conventional pretreatment system for the Doha reverse osmosis plant: Technical and economic assessment, *Desalination*, 102, pp.179~187.
10. Fair, G.M., Geyer J.C., Okun D.A. (1968) *Water and Wastewater Engineering(Vol2)*, New York, John Wiley & Sons, Inc.
11. Isaias, N.P. (2001) Experience in reverse osmosis pretreatment, *Desalination*, 139, pp.57~64.
12. Kawamura, S. (1991) *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
13. Mitrouli, S.T., Yiantsios, S.G., Karabelas, A.J., Mitrakas, M., Føllesdal, M., Kjolseth, P.A. (2008) Pretreatment for desalination of seawater from an open intake by dual-media filtration: pilot testing and comparison of two different media, *Desalination*, 222, pp.24~37.
14. Shahalam, A.M., Al-Harthy, A., and Al-Zawhry, A. (2002) Feed water pretreatment in RO systems: Unit processes in the MiddleEast, *Desalination*, 150, pp.235~245.
15. Wolf, P.H., Siverns, S., and Monti, S. (2005) UF membranes for RO desalination pretreatment, *Desalination*, 182, pp.293~300.
16. Yao, K.M. (1968) *Influence of Suspended Particle Size on the Transport Aspect of Water Filtration*, Ph.D. dissertation, Dept. of Environmental Sciences and Engineering, Univ. of North Carolina, Chaper Hill, N. C.
17. Yao, K.M., Habibian, M.T., and O'Melia, C.R. (1971) Water and Wastewater Filtration: Concepts and Application, *Environmental Science and Technology*, 5, pp.1105~1112.