

역삼투 공정 파울링 지표로서 SDI(Silt Density Index)의 적합성 검증

Verification of Silt Density Index (SDI) as a fouling index for reverse osmosis (RO) feed water

김수한¹ · 김충환² · 강석형² · 이원태³ · 임재림^{2*}

Suhan Kim¹ · Chung H. Kim² · Suk H. Kang² · Won T. Lee³ · Jae L. Lim^{2*}

1 부경대학교 토목공학과, 2 한국수자원공사 K-water연구원 상하수도연구소, 3 한국건설기술연구원 건설환경연구소

(2010년 11월 8일 접수 ; 2011년 6월 9일 수정 , 2011년 7월 14일 채택)

Abstract

Silt Density Index (SDI) has been used as a fouling index for reverse osmosis (RO) processes for decades. In order to decrease RO fouling, feed water should meet SDI standard, which was used to select a proper pretreatment system for RO processes. However, SDI is supposed to be sensitive only to particles larger than 0.45 μm in terms of diameters while nanoparticles and dissolved organic matter can be potent foulants for RO processes. Our study started from the suspected performance of SDI as a RO fouling index. SDI data from pilot plants located world wide including South Korea were collected and analyzed. Suspended particle concentration (*i.e.*, turbidity and particle counts), and dissolved organic matter concentration (*i.e.*, dissolved organic carbon (DOC) concentration) data were also collected and compared to SDI values of same water samples. We found that SDI values were not only affected by suspended particle concentration but also by dissolved organic matter concentration. Therefore SDI can be used as a reasonable fouling index for RO feed water because the main foulants for RO processes are suspended particle and dissolved organic matter.

Key words : Silte Density Index (SDI), Pretreatment, Reverse Osmosis (RO) Process

주제어 : SDI, 전처리, 역삼투 공정

1. 서 론

21세기 들어, 상하수도 관련분야 중 가장 각광 받는 세부 분야 중 하나는 막여과를 이용한 수처리 기술이라는 것에 이견을 달 연구자나 실무자가 별로 없을 거라 판단된다. 막여과 기술은 환경오염과 기후변화 등으로 인해 가용할 수 있는 수자원이 부족해지는 현실을 극복하기 위한 효과적인 수단 중 하나로 각광 받고 있다.

막여과 기술은 정수처리나 하수처리(생물막 공정, membrane bioreactor; MBR)에 활용되는 정밀여과(Microfiltration; MF)나 한외여과(Ultrafiltration; UF)와 같은 저압 막여과 기술과 고도정수처리, 연수화, 담수화 등에 적용되는 나노여과(Nanofiltration; NF)나 역삼투(Reverse Osmosis; RO)와 같은 고압 막여과 기술로 분류된다. 저압과 고압 막여과 기술 모두, 폭발적으로 증가하는 국내외 시장 추세에 맞추어 연구단계에서 실증단계를 거쳐,

* Corresponding author Tel:+82-42-870-7523, Fax:+82-42-870-7549, E-mail: jllim@kwater.or.kr(Lim, J.L.)

실용화 단계로 들어섰다고 볼 수 있다.

언제나 회자되듯이, 막여과 기술의 아킬레스건은 막오염으로 인한 운영 효율 저하, 즉, 파울링 현상이다. 전처리를 도입하거나 주기적으로 역세척을 함으로써 파울링 현상을 저감시키는 것이 일반적인 추세이다. NF나 RO의 경우에는 고압에서 운전되고 있기 때문에 역세척보다 전처리에 집중한 파울링 대책을 세워야 하고, 전처리를 거친 공급수의 수질을 평가하는 기준으로 Silt Density Index(SDI)라는 지표를 주로 쓰고 있다(AWWA, 2006).

SDI는 용어로부터 알 수 있듯이, 물속에 있는 점토질의 농도를 계수화한 것이다. 측정방법은 '2.연구방법'에 정리하였다. SDI가 기준값(3에서 5 사이, 현장 조건에 따라 달라짐)을 초과하면, NF나 RO의 공급수로서 부적합하다(D4189-95 ASTM). SDI의 가장 큰 강점은 측정이 상대적으로 간편하다는 점으로, 이로 인해 현재까지도 가장 널리 사용되고 있는 파울링 지표, 즉 RO 공급수의 수질 기준이 되고 있다. 그러나, SDI의 높고 낮음으로 나타내는 점토질의 농도(혹은 부유물질의 농도)와 NF 및 RO의 파울링과의 연계성은 다소 떨어진다. SDI 측정을 위해서 0.45 μm 필터를 사용하는 데(D4189-95 ASTM), 실제 NF나 RO에 파울링을 일으키는 물질은 0.45 μm 미만의 크기를 가진 유기물질이나 나노입자라는 것이다(Butt et al., 1997; Boerlage et al., 2003; Schippers et al., 2003). 이는 SDI의 파울링 지표로서의 가장 큰 약점으로 오랜 시간 지적되어 왔다.

SDI의 약점을 해결하고, 좀더 현실적인 파울링 지표를 찾기 위한 노력은 오래전부터 계속되어 왔다. Schippers와 Verdow(1980)는 MFI(Membrane Fouling Index)라는 지표를 제안하였고, MFI의 연장선 및 미세 입자 및 유기물에 대한 파울링 지표로서 MFI-UF 및 MFI-NF가 제안되었다(Boerlage et al., 2002; Khirani et al., 2006). Kim 등(2009)은 전처리를 거친 공급수의 수질을 평가하기 위한 기준으로서의 파울링 지표가 아닌, 파울링에 강한 막을 찾기 위하여 SDI 및 MFI 계열의 지표가 아닌 독자적인 지표를 개발하였다. 이는 막과 오염물질의 상호작용을 측정하는 방법으로, 막표면과 오염물질 간의 물리화학적 상호작용력에 따라 파울링 경향이 영향을 받는다는 사실에 근거한 것이다(Kim and Hoek, 2007).

이와 같이 SDI의 약점을 개선한 지표들이 여러 가지 제안되고 있지만, 아직은 연구단계에 머물러 있다. 오랜 기간 별다른 대안 없이 사용되어 왔기에 실적이 풍부하다는 점은, 현장 실무자 입장에서 다른 지표들의 적용을 꺼리게 하는 SDI의 가장 큰 강점이다. 즉, SDI에 대해 문제가 제기되기 시작한지 30여년이 지난 지금까지도, 현장에서는 SDI가 전

처리 생산수의 품질을 가늠하는 파울링 지표로서 사용되고 있다.

본 연구에서는 서로 상반되는 다음 두 가지 질문으로 SDI를 고찰하고자 한다. 첫째, SDI는 RO 파울링 지표로서 본질적인 약점이 있지만 마땅한 대안이 없어서 사용되는 인자에 불과한가? 둘째, SDI는 이론적인 한계가 있지만, 실용적인 측면에서 유용하게 활용될 수 있는 지표인가? 두 질문에 대한 답변을 이끌어내기 위해 SDI와 RO 파울링에 영향을 주는 주요 수질 인자들과의 관계를 통계적으로 분석하였다.

RO 파울링은 오염물질에 의한 침적형 파울링과 무기물질의 석출에 의해 발생하는 스케일링 파울링으로 나눌 수 있다. 전자의 경우 전처리의 성능에 영향을 많이 받고, 후자의 경우 RO 공정의 운영(예: 적정 회수율 운전 등)에 영향을 많이 받는다. 따라서, RO 공정을 위한 적절한 전처리 공정 선정 지표로도 활용되는 SDI에 적합한 파울링 항목은 침적형 파울링이라 할 수 있다. 즉, SDI와 연계될 수 있는 RO 파울링에 영향을 주는 주요 수질인자는 침적형 파울링과 관련이 있다. 침적형 파울링 관련 수질 인자는 크게는 부유성 입자 농도와 유기물 농도로 나눌 수 있다. 좀더 세부적으로 들어가면, 바이오파울링에 영향을 주는 미생물 농도, 친수성 물질, 소수성 물질 등 다양한 항목이 제안될 수 있지만(Kim and Hoek, 2007), 다양한 사례에 대해 통계 분석을 하기 위해서는 가장 일반적인 항목이 선택되어야 하므로 본 연구에서는 부유성 입자 농도를 대표하는 탁도와 유기물 농도를 대표하는 DOC(Dissolved Organic Carbon)를 주요 수질인자로 선정하였고, 추가적으로 입자수의 영향도 함께 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 SDI 측정방법

SDI 측정은 미국 ASTM에 제시된 표준 방법을 따른다(D 4189-95 ASTM). Fig. 1의 개념도에 나타난 바와 같이 압력탱크에 적당량의 시료를 넣어 206 kPa의 압력을 가하여 0.45 μm 의 필터를 통해 여과시킨다. 여과된 시료를 500 ml 취수하는 데 걸린 시간(T_0)을 측정하고, 이후 15분간 여과를 계속한 후(이때는 여과량을 측정하지 않아도 됨), 다시 시료를 500 ml 취수하는 데 걸리는 시간(T_{15})을 측정하여 식 1과 같이 구한다.

$$SDI = (1 - T_0/T_{15}) \times 100/15 \quad (1)$$

측정 필요 시료량은 10~20l 범위인데, SDI가 낮을 것으로 예상되는 시료일수록(즉, 깨끗한 시료일수록), 많은 양

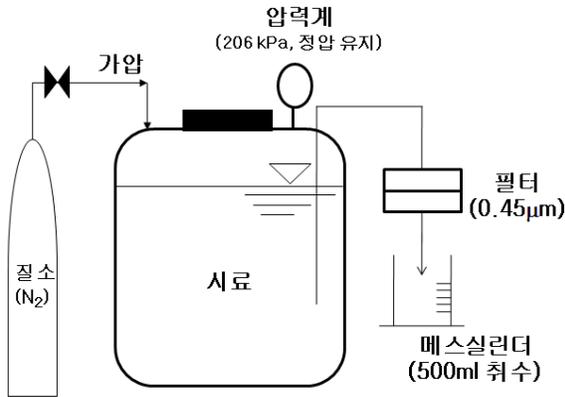


Fig. 1. SDI 측정 개념도

이 필요하다. 실험 중 필터가 완전히 막히게 되면, 실험을 종료하고, T₁₅를 무한대로 간주한다. 즉 식 1의 값이 100/15≃6.67이 되는 것이다. 본 논문에서 SDI가 6.67로 표시된 경우는 실험 중 필터가 막혀서 SDI 측정이 불가능하다는 것을 의미한다. 이 경우에는 취수시간 간격을 15분이 아닌, 10분, 5분으로 줄여서 SDI₁₀, SDI₅로 나타내기도 한다. 하지만, 현장에서 적용되는 SDI 기준치는 취수시간 간격 15분을 기준으로 한 것이므로, SDI₁₀, SDI₅는 잘 적용되지 않는다. RO 유입수로서 적절한 SDI 기준치는 설계자에 따라 3~5 범위에 있다.

2.2 SDI 데이터 확보 및 통계분석 방법

SDI 데이터는 주로 한국수자원공사에서 수행된 RO관련 프로젝트를 통해 직접 측정된 값을 활용하였다(한국수자원공사, 2008; 한국수자원공사, 2009). 통계 분석의 신뢰성을 높이기 위해 해수담수화, 하수재이용 등 해외 사례를 일부 추가하여 데이터를 다양화하였다(Halpern et al., 2005; Mosset et al., 2008; Qin et al., 2004; Gilron et al., 2000; Zhang et al., 2006; Mitrouli et al., 2008).

탁도, 입자수, 유기물 농도 등 각 수질인자와 SDI의 통계적 상관관계를 분석하기 위해 널리 알려져 있는 통계 기법인 상관분석과 회귀분석을 활용하였다. 상관분석은 SDI에 가장 큰 영향을 미치는 수질 인자를 알아보기 위해 수행되었으며, SDI와 각 수질인자의 Pearson 상관관계수(r)를 식 2와 같이 구하였다.

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{\{n\sum X^2 - (\sum X)^2\}\{n\sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \quad (2)$$

식 2에서 X, Y는 상관관계 분석대상 변수, n은 X, Y 데이터

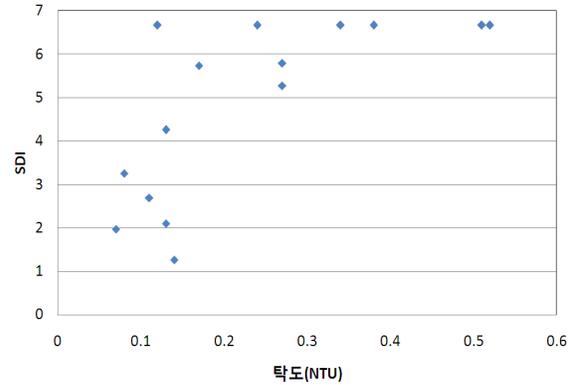


Fig. 2. 탁도와 SDI의 상관관계(원수가 호소수인 경우)

쌍 개수를 나타낸다. 상관계수 r이 1에 가까울수록 X, Y의 상관관계가 높다는 것을 의미한다. 회귀분석은 두 개 이상의 수질인자가 복합적으로 SDI에 영향을 주는 경향을 분석하기 위해 수행되었다. F-검정, t-검정을 통해 도출된 회귀식을 검정하여, 통계적으로 적합한 회귀 모델 식을 도출하였다(김수한, 2003).

3. 연구결과 및 토의

3.1 부유성 입자와 SDI의 관계

일반적으로 부유성 입자 농도가 높을수록 SDI가 증가할 것으로 예측된다. SDI가 RO 공급수의 수질 적합성을 판단하는 공인 기준이지만, SDI보다 현장 측정이 용이한 탁도나 입자수를 이용해 SDI 값을 예측할 수 있다면 RO 운영자들에게 편리할 것으로 판단된다.

앞서 언급되었듯이, 부유성 입자 농도가 매우 높다면 SDI 값은 측정불가를 의미하는 6.67이 되고, 이 경우는 예측을 위한 데이터 분석에서 배제하였다. 데이터 분석 시, 우선적으로 RO 공급수 SDI의 기준치 상한인 5를 넘지 않는 부유성 입자 농도 중 최대값을 도출하였고, 이를 각 수질인자에 따라 한계 탁도, 한계 입자수로 명명하였다.

Fig. 2는 원수 종류가 호소수인 경우와 상수원수인 경우에 대해서 탁도와 SDI의 관계를 도식화한 것이다. 탁도가 0.15를 초과하는 경우에 SDI는 기준치 상한인 5를 초과하였다. 즉, 한계 탁도를 0.15로 볼 수 있다. SDI가 측정 불가능인 6.67로 나타난 데이터를 제외하면 탁도와 SDI의 양의 상관관계가 관찰되고, Pearson 상관관계수는 0.729이었다. 그러나, SDI가 5미만인 경우에는 탁도와 SDI의 상관관계가 크게 나타나지 않고, Pearson 상관관계수가 -0.0736로 계산되었다.

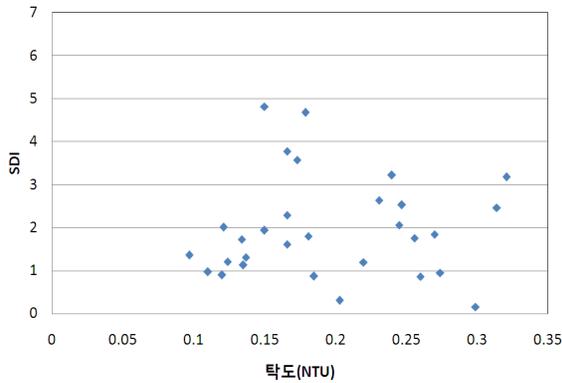


Fig. 3. 탁도와 SDI의 상관관계(원수가 해수(심층취수)인 경우)

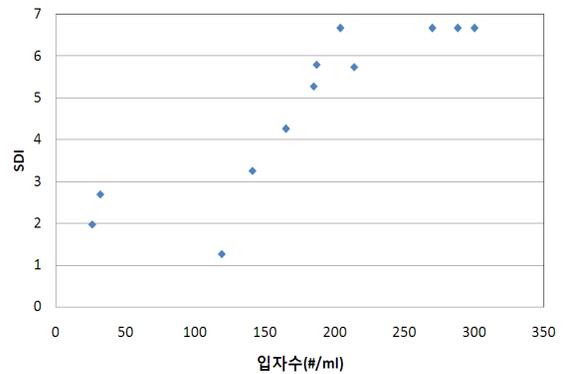
Fig. 3은 Table 1에서 원수 종류가 해수(심층취수)인 경우에 탁도와 SDI의 관계를 도식화한 것이다. Fig. 2의 경우와 달리 탁도가 0.3을 초과하여도 SDI는 5 미만을 유지하였다. 원수의 종류가 달라짐으로써, SDI 기준치를 넘지 않는 한계 탁도가 달라진 것이다. 또한, Fig. 3에서도 Fig. 2에서 보인 바와 같이 SDI가 5미만인 경우에 탁도와 SDI의 상관관계가 거의 나타나지 않았고, Pearson 상관계수의 값은 0.02921이었다.

Fig. 2와 Fig. 3을 통해 다음 두 가지 사실을 도출할 수 있다. 한계 탁도는 원수의 종류에 따라 달라진다. RO 공급수 SDI 조건을 만족시키는 경우에는 탁도의 SDI 예측능력이 현저하게 감소한다. 따라서, SDI는 탁도 외 다른 수질인자에 영향을 받는 지표로 결론내릴 수 있다.

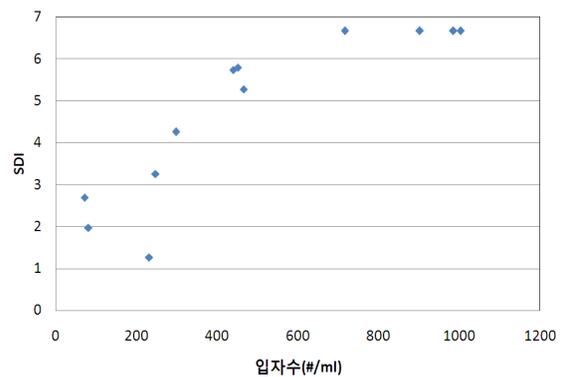
Fig. 4는 Fig. 2의 SDI 데이터와 각각에 해당되는 입자수를 도식화한 것이다. 입도분석계로는 Chemtrac의 PC 2400PS를 사용하였는데, light blockage volumetric 방법을 사용하여 입자수를 측정하는 장치이다. Fig. 4에 따르면, SDI 기준치를 넘지 않는 한계 입자수가 약 180개/ml (2~4 μm), 약 400개/ml (2~100 μm)로 나타났다. 탁도의 경우(Fig. 2, 3)와는 달리 SDI가 5 미만인 경우에도 입자수와 SDI의 상관관계가 어느 정도 있는 것으로 관찰되고, Pearson 상관계수도 각각 0.397 (2~4 μm), 0.378 (2~100 μm)로 계산되었다. 탁도에 비해서는 입자수의 SDI 예측 능력이 높다는 의미이긴 하지만, Pearson 상관계수가 1에 비해서는 현저히 낮기 때문에 SDI가 입자수만으로 예측된다고 결론내릴 수 없다. 즉, 탁도나 입자 수와 같은 부유성 물질의 농도를 나타내는 인자 외 다른 수질인자가 SDI 값에 영향을 미친다는 판단을 내릴 수 있다.

3.2 용존성 유기물 농도와 SDI의 상관관계

3.1절에서 논의되었듯이 부유성 물질 외의 수질 인자가



(a) 직경 2~4 μm 인 입자수와 SDI의 상관관계



(b) 직경 2~100 μm 인 입자수와 SDI의 상관관계

Fig. 4. 입자수와 SDI의 상관관계

SDI 값에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 부유성 물질 외의 수질인자는 넓게 용존성 유기물과 용존성 무기물로 나뉜다. 용존성 무기물은 RO의 스케일링에 영향을 주는 인자로 SDI와의 연관성이 떨어진다. 따라서, 용존성 유기물 농도(DOC)와 SDI의 상관관계를 분석하였다. 만약 SDI가 유기물 농도에 전혀 영향을 받지 않는다면, RO의 파울링 지표로서 본질적인 약점이 있다고 할 수 있다. 용존성 유기물은 RO의 파울링에 큰 영향을 미치는 인자로 알려져 있기 때문이다(Kim and Hoek, 2007).

용존성 유기물과 SDI를 함께 측정한 데이터가 통계분석을 실시할 만큼 많지 않아서 참고문헌에서 제시한 데이터를 조사하여 함께 분석하였다. Table 1은 다양한 원수, 전처리 공정 조건에서 SDI 및 RO 파울링에 영향을 주는 주요 수질인자(탁도, 입자수, DOC)를 정리한 것이다.

Table 1. 다양한 원수, 전처리공정 조건에서의 SDI 측정 결과

원수 종류	전처리 공정	탁도 (NTU)	DOC (mg/l)	SDI	출처
해수 (심해취수)	-	0.1~0.35	0.79~1.03	0.1~4.9	한국수자원공사, 2008; 한국수자원공사, 2009
호소수	응집-침전	0.12~2.0	2.0~5.0	6.67	
	응집-침전-MF	0.07~0.14	2.0~5.0	1.27~2.70	
상수원수	응집-침전-모래여과	0.13	1.4~2.0	2.1	
해수 (지하취수)	-	> 0.22	N.A.	6.67	Halpern et al., 2005
해수 (표면취수)	UF	0.2~0.4	N.A.	0.4~1.8	Mosset et al., 2008
하수처리수	응집-UF	0.12~0.14	N.A.	1.1~2.1	Qin et al., 2004
기수 (표면취수)	CAPS ¹	0.08	8	4.6	Gilron et al., 2000
해수 (표면취수)	UF	0.05~0.2	0.4~2.0 ²	1.2~3.0	Zhang et al., 2006
해수 (표면취수)	DMF ³ (5m/h)	0.3	N.A.	5.2~5.3	Mitrouli et al., 2008
	응집-DMF (5m/h)	0.1	1.9~2.2	3.4	
	응집-DMF (10m/h)	0.1	1.4~2.8	4.4	

1 CAPS: Compact Accelerated Precipitation Softening
2 COD값으로부터 산출한 이론적 DOC 값: DOC = COD×12/32
3 Duel Media Filter

Table 1에서 SDI가 RO 공급수 기준치 상한인 5를 넘는 경우가 3가지 있고, 이때의 탁도는 0.12, 0.22, 0.3 NTU이다. 즉, SDI가 5를 넘지 않도록 하는 한계 탁도는 원수 및 전처리 공정의 종류에 따라 달라짐을 알 수 있다. 이는 SDI가 탁도만으로 설명될 수 있는 지표가 아님을 다시 한번 증명해준다. Table 1에 사용된 데이터를 활용하여 SDI와 DOC, 탁도와 상관계수를 Fig. 5와 같이 도식화하였다.

DOC는 취수한 샘플을 0.45 μm의 필터를 통해 여과한 후, 투과수를 물리화학적 방법으로 산화시켜 발생한 무기탄소원의 농도를 측정 후 탄소기준 질량으로 환산하여 계산된다. 이론상으로는 동일한 공칭공경의 필터를 사용하여 측정되는 SDI와 관련성이 없어야 한다. 그러나, Fig. 5에 따르면 MF나 UF와 같은 막여과 전처리를 거친 경우를 제외하면, SDI값이 탁도가 감소하는데도 불구하고 증가하는 경향을 보였고, DOC의 증가와 동조현상을 보였다. SDI와 탁도의 Pearson 상관계수는 -0.469, SDI와 DOC의 Pearson 상관계수는 0.588이었다. 즉, DOC가 SDI에 어느 정도 영향을 미친다는 의미이다. 따라서, 탁도 외에 DOC가 SDI에 영향을 미치는 인자가 될 수 있다는

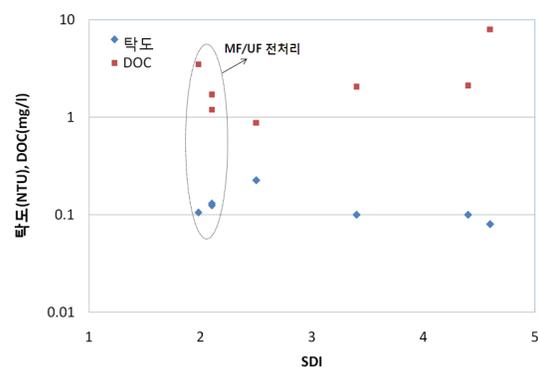


Fig. 5. SDI와 탁도, DOC와의 상관관계

결론을 얻을 수 있다.

탁도와 DOC가 SDI에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 다중회귀모형을 도출하였다. 모델 선정 기준은 회귀식의 F-검정, t-검정 결과가 모두 신뢰기준 95% 범위에서 만족되고, 결정계수(R²)가 1에 가까운 회귀식 중에 가장 단순한 형태이다. 식 3은 선정된 회귀식을 나타낸다.

$$SDI = 0.487DOC + 12.3Turbidity \quad (3)$$

식 3에서 *DOC*는 mg/l 단위, *Turbidity*는 NTU 단위이고, 결정계수(R^2) 값은 0.89이다. 결정계수를 높이기 위해서, 즉, 모델의 정확도를 높이기 위해서는 인자를 좀더 세분화할 필요는 있다. 예를 들어, *DOC*를 친수성과 소수성 성분으로 나누고, *Turbidity*를 입자의 크기에 따라 재분류하는 것이다. 하지만, 본 연구의 목적이 SDI를 정확하게 예측하는 모델식을 도출하는 것이 아니기 때문에 0.89라는 결정계수 값도 충분히 의미 있다고 볼 수 있다. F-검정 결과, 식 3이 회귀식으로 성립할 확률이 99.2%이었고, t-검정 결과, *DOC*의 계수 및 *Turbidity*의 계수가 통계적으로 의미가 있을 확률이 각각 96.0%, 97.0%이었다. 비록 식 3이 모든 경우에 대해 SDI를 예측할 수 있는 모델은 아니지만, 적어도 *DOC*와 탁도가 동시에 SDI에 영향을 미친다는 결론을 도출하는 데는 큰 무리가 없다.

위 결론으로부터 0.45 μm보다 작은 크기의 용존성 유기물이 SDI 필터의 공극 내부에 침적하여 높은 SDI값을 유발할 수 있다는 논리를 도출할 수 있다. 단, Fig. 5에 별도로 나타낸 바와 같이 MF/UF 막분리를 이용한 전처리에서는 *DOC*의 변화가 SDI값의 변화에 미치는 영향이 미미했다. MF/UF 전처리를 거친 물은 다른 전처리 공정을 거친 물에 비해 SDI 필터 공극 내부에 침적하는 미세 입자 수가 적을 것으로 예상할 수 있고, 이에 의해 Fig. 5와 같은 MF/UF 전처리에서의 SDI 값 경향이 나온 것으로 조심스럽게 예측할 수 있지만, 추후 좀더 많은 데이터를 이용해 분석해 볼 필요가 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

SDI는 Silt Density Index라는 명칭에서 알 수 있듯이 부유성 입자 위주의 지표로 알려져 있고, RO의 파울링 지표로 사용되기에는 부족한 점이 많은 것으로 보인다. 본 연구에서는 위와 같은 일반적인 인식에 대해서 정량적인 검증을 실시하였다. 그 결과, SDI 값은 RO의 주요 파울링 유발물질인 부유성 입자뿐 아니라 용존성 유기물의 농도도 반영하고 있다는 사실을 밝혀냈다. 따라서, SDI라는 파울링 지표는 비록 최선의 지표는 아닐지라도, RO 공급수의 수질기준을 평가하기에는 큰 문제가 없는 지표라는 결론을 내릴 수 있었다.

추가로 언급하자면, RO 플랜트의 운영자들 입장에서는 현장에서 측정하기가 번거로운 SDI보다는 온라인 측정이 간편한 탁도를 모니터링하여 전처리 공정의 운영 적합성을

평가하는 편이 선호될 것이다. 그러나, 본 연구결과로부터 알 수 있듯이 SDI는 탁도 외에 용존성 유기물 농도 등의 영향을 받는 지표이기 때문에, 탁도만으로는 SDI를 추정하기가 어렵다. 그 대안으로, RO 플랜트 현장의 특성에 따라 달라지는 한계 탁도(SDI 기준치를 만족시키는 탁도 중 최대값; 본 논문 3장 참조)를 자체적으로 확보하고, 그 값을 기준으로 전처리 생산수의 수질을 모니터링하는 방안이 추천된다. 탁도가 한계 탁도 미만이면 SDI도 기준치를 만족하는 것으로 간주하고, 탁도가 한계 탁도를 초과하면 현장에서 즉시 SDI를 측정하여 전처리 생산수의 수질을 확인하는 방법이다.

참고문헌

- 김수한 (2003) Polydispersity 조건에서 Crossflow 방식 정밀여과의 케이크 형성 특성 및 제어방안에 관한 연구, KAIST 건설및환경공학과 박사논문
- 한국수자원공사 (2008) 해양심층수를 이용한 해수담수화, 한국수자원공사
- 한국수자원공사 (2009) 산업용수제조 역삼투시스템의 설계 및 운영기술 개발, 한국수자원공사
- 환경부 (2002) 해수담수화시설 적정설치운영방안 조사연구, 환경부.
- AWWA (2006) Desalination of seawater and brackish water, American Water Works Association.
- ASTM, Standard test method for silt density index (SDI) of water, D 4189-95 ASTM.
- Boerlage, S.F.E., Kennedy, M., Aniye, M.P. and Schippers, J.C. (2003) Applications of the MFI-UF to measure and predict particulate fouling in RO systems, *J. Membr. Sci.* **220** pp.97-116.
- Boerlage, S.F.E. Kennedy, M.D., Dickson, M.R., El-Hodali D.Y., and Schippers, J.C. (2002) The modified fouling index using ultrafiltration membranes (MFI-UF): characterisation, filtration mechanisms and proposed reference membrane, *J. Membr. Sci.* **197** pp.1-21.
- Butt, F.H., Rahman, F. and Baduruthamal, U. (1997) Hollow fine fiber VS. spiral-wound RO desalination membranes part 1: pilot plant evaluation, *Desalination* **109** pp.67-82.
- Gilron, J., Chaikin, D., Daltrophe N. (2000) Demonstration of CAPS pretreatment of surface water for RO, *Desalination* **127** pp.271-282.
- Halpern, D.F., McArdle, J., Antrim, B. (2005) UF

- pretreatment for SWRO: pilot studies, *Desalination* **182** pp.323-332.
- Khirani, S., Ain, R.B. and Manero, M.-H. (2006) Improving the measurement of the modified fouling index using nanofiltration membranes (NF-MFI), *Desalination* **191** pp.1-7.
- Kim, S., and Hoek E.M.V. (2007) Interactions controlling biopolymer fouling of reverse osmosis membranes, *Desalination* **202**, pp.333-342.
- Kim, S., Lee, S., Kim, C.H. and Cho, J. (2009) A new membrane performance index using flow field flow fractionation (fl-FFF), *Desalination* **247**
- Mitrouli, S.T., Yiantsios S.G., Karabelas, A.J., Mitrakas, M., Follesdal, 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.
- Mosset, A., Bonnelye, V., Petry, M., Sanz, M.A. (2008) The sensitivity of SDI analysis: from RO feed water to raw water, *Desalination* **222** pp.17-23.
- Qin, J.J., Oo, M.H., Lee, H., Kolkman, R. (2004) Dead-end ultrafiltration for pretreatment of RO in reclamation of municipal wastewater effluent, *J. Membr. Sci.* **243** pp.107-113.
- Schippers, J.C., and Verdouw, J. (1980) A method of determining the fouling characteristics of water, *Desalination* **32** pp.137-148.
- Schippers, J.C., Hanemaayer, J.H., Smolders, C.A., and Kostense, A. (1981) Predicting flux decline of reverse osmosis membranes, *Desalination*, **38** pp.339-348.
- Zhang, J.D., Liu, Y.W. Gao, S.M., Li, C.Z., Zhang, F., Zen, H.M., Ye, C.S. (2006) Pilot testing of outside-in UF pretreatment prior to RO for high turbidity seawater desalination, *Desalination* **189** pp.269-277.