

적조대응을 위한 산화철 다이나믹 막여과 해수담수화 전처리 기술의 Pilot 규모 평가

토목연구지원팀
김병철 차장



1 연구 배경 및 필요성

1.1 적조에 의한 해수담수화 플랜트 영향

세계적인 물 부족 문제를 해결하고 대체 수자원을 확보하기 위한 방안으로 1960년대부터 해수담수화 기술이 주목받기 시작하였으며, 증발법 대비 에너지 소모가 낮은 역삼투 방식(SWRO)이 현재 시장 주도적인 기술이라 할 수 있다. 하지만 역삼투법은 증발법 대비 원수의 성상 조건에 민감한 방식이며 특히 적조 현상 발생 시에 취약하다. 흔히 적조라 불리는 harmful algal blooms(HAB)의 발생은 해수 내에 존재하는 지나치게 높은 미생물 양과 그들이 생산하는 다양한 대사물질로 인해 해수 담수화 플랜트에서 큰 문제를 야기하고 있다. 적조 발생 시 유입되는 해수는 급격한 막 오염 등으로 인해 심각한 운영상의 문제를 발생하며, 심한 경우 플랜트의 운전이 중단되기도 한다. 적조에 의한 막 오염으로 인해 2008년 아랍에미리트(United Arab Emirates, UAE)의 최소 5개의 SWRO 플랜트가 적조가 사라질 때까지 운영을 멈추었으며, 일부 플랜트에서는 담수 생산량이 30~40%까지 감소하였다. 또한 국내에서도 마산만에 발생한 적조에 의해 50%까지 담수 생산량이 감소한 사례가 있다.

1.2 조류 부산물질(AOM)

적조를 유발하는 조류들은 5~50 μ m의 크기를 가져, 전처리막(MF/UF)에 의해 쉽게 제거될 수 있지만 급격한 투과수량 감소를 유발하며, 높은 농도로 존재할 경우 cake layer를 빠르게 형성하며, 막표면에서 세포벽이 파괴될 시 고농도의 유기물을 방출하여 막 오염을 심화시킨다. 조류가 MF/UF 막에서 일으키는 막 오염의 메커니즘은 세 단계로 설명할 수 있다. 조류가 막에 유입되는 초기 단계에는 pore blocking 현상이 발생하고, 사이클(여과+역세)이 진행됨에 따라 intermediate blocking 메커니즘이 나타나며, 최종적으로 공극이 비가역적으로 막히고 남아있는 공극의 크

기가 작아지면서 cake filtration 과 compaction 이 발생한다. 또한, 조류 자체보다는 조류로부터 발생하는 유기물질 등이 막의 오염에 더 큰 영향을 미친다는 여러 연구 결과가 보고되었다. 조류로부터 발생하는 유기물질을 algal organic matter(AOM)이라 하며, 주로 hydrophilic 물질(protein and polysaccharide), 일부의 hydrophobic 물질과 transphilic (TPI) acids로 구성된다. 이들 유기물질은 박테리아로부터 생성되는 EPS와 유사한 성분을 가지며, 특히 polysaccharide와 protein 등은 강력한 막 오염을 유발한다. 일부 AOM은 MF/UF 막을 통과하여 직접적으로 RO막 오염을 유발할 수 있으며, 해수 내 존재하는 박테리아의 기질로 작용할 수 있기 때문에 조류 자체보다 더 심각한 막오염 물질로 여겨진다. 따라서, 적조 발생시 해수 중에 고농도로 발생하는 AOM을 전처리 과정에서 효과적으로 제거하여 적조 발생시에도 안정적으로 플랜트 운전이 가능한 기술을 개발하는 것이 필요하다.

2 기술개발 방법

2.1 주요 유기물 제거 공정

적조발생시 심각한 막오염을 일으키는 적조부산물질(AOM)을 제어하는 기술을 개발하기 위해 [표 1]과 같이 응집, 산화, 흡착 등 다양한 유기물 제거 기작들을 조사하였다. 이중 용존공기부상(DAF), 전기분해(Electrolysis), 고급산화(AOP), 활성탄(Activated Carbon), 산화철(Iron Oxide) 등 다양한 유기물 제거 공정을 랩규모로 테스트하였다.

[표 1] 주요 유기물 제거 가능 공정

처리 방법	처리 공정	처리원리와 특징
화학적 처리	응집	수산화물 입자표면 흡착 등에 의한 유기물 제거
산화 제거	염소 산화	염소를 분해하여 생성되는 유효염소(HClO, ClO-)의 산화력을 이용하여 유기물과 반응하여 분해 제거 함
	과산화수소에 의한 산화	과산화수소가 분해할 때에 발생하는 발생기의 산소가 유기물을 산화하여 제거 함
	Fenton 산화	철과 같은 다가금속염(2가 이상)을 촉매로 사용하여 과산화수소의 주입으로 산화력이 강한 OH·를 발생하여 유기물을 제거 함
	자외선 산화	자외선이 갖는 에너지로 유기물을 제거 하며 직접 유기물에 작용하는 경우와, 자외선과 산화제를 이용하여 OH·를 생성하여 유기물을 제거 할 수 있음
	오존 산화	과산화수소에 오존을 첨가하여 발생한 OH·의 산화력을 이용해서 유기물을 산화, 분해하는 방법
흡착 제거	활성탄 흡착	유기물의 흡착이 가능한 활성탄을 이용하는 방법으로 활성탄 기공에 유기물이 흡착되어 제거됨
	산화철 흡착	산화철을 이용한 유기물질의 표면흡착제거

2.2 이온강도에 따른 산화철의 흡착 효율 평가

산화철은 자연유기물질 natural organic matter(NOM)을 흡착할 수 있는 능력을 가진 것으로 알려져 있으며, 이러한 흡착 능력이 해수에서도 유효한지 여부를 확인하기 위해, 이온 강도(Ionic Strength) 변화에 따른 산화철의 흡착 효율을 산화철 농도 및 흡착 시간 변화에 따라 분석하였다. 증류수와 인공해수(TDS = 38,000mg/L)에서의 산화철의 흡착효율을 평가 하였으며, 사전 실험 결과 가장 좋은 효율을 보였던 침철석(Geothite)을 구입하여 사용하였다. 적조 부산물중 가장 높은 비율을 차지하는 Polysaccharide는 alginic acid 주입을 통해 모사하였으며, 일반적인 해수의 DOC 농도를 ~2ppm 정도로 봤을 때, 매우 높은 수준의 적조 발생시를 가정하여 ~12ppm as DOC의 Alginate를 주입 하였다.

2.3 Pilot plant 개요

국내 남해안에 위치한 A 하수처리장 내에 산화철 다이나믹 막여과 평가를 위한 pilot plant를 설치하여 2017년 04월부터 현재까지 연속운영 중이며, 공정은 해수-DAF-(산화철 주입)-MF-RO로 구성하였다. 다양한 산화철 적용 방법 중 적조 발생시에만 일시적으로 가동한다는 측면에서 CAPEX 증가가 가장 낮은 다이나믹 막여과 방법이 적용되었다. 다이나믹 막여과는 막표면에 cake layer를 형성하여 원수에 포함된 오염 물질로부터 막을 보호하는 방법으로, 본 공정에서는 분말 산화철을 적용하였다. 본 pilot plant는 MF 생산수 기준 85m³/일 규모로 산화철 주입은 적조현상 발생여부 및 유기물 농도 증가에 따라 선택적으로 적용이 가능토록 설치하였다.

[그림 1] 산화철 다이나믹 막여과 공정 Pilot Plant



2.4 산화철 다이나믹 막여과 실험 방법

랩규모 실험결과를 통해 적조발생시 막오염 저감 효과가 있다고 판단된 산화철 다이나믹 막여과 공정을 파일럿 규모에서 평가를 실시하였다. 막여과 운전 조건은 막 제조사에서 제시하는 운전 조건을 기반으로 하였으며, 산화철 주입 농도, 흡착 반응조 HRT 등의 운전 조건은 랩 규모 실험 결과를 바탕으로 도출된 값을 사용하였다. Pilot plant 운영 기간 동안 적조가 발생하지 않음에 따라, 실험실 규모에서와 같이 적조부산물질(AOM)을 모사하기 위해 Alginate를 원수에 주입하여 평가를 실시하였다.

Pilot plant의 운전조건은 [표 2]와 같다. 본 개발 기술인 산화철 다이나믹 막여과 기술은 적조 발생시 비상 대책으로서의 운전 모드와 평상시의 일반 운전 모드 2가지 운전 모드로 구분하여 개발되었다. Control은 alginate 및 산화철을 주입하지 않은 일반 실제 해수를 원수하여 Flux 56.5 LMH 및 Recovery 91% 조건에 운전을 실시하였다. 조건 1-1 및 1-2에서는 고농도의 적조 발생시를 가정하여 Alginate 5.0mg/L을 주입하였고, 조건 1-2에서만 산화철을 0.5g/L 및 HRT 30분 조건에서 주입하였다. 조건 2-1 및 2-2에서는 저농도의 적조 발생시를 가정하여 Alginate 2.0mg/L를 주입하였으며, 조건 2-2 조건에서만 산화철이 주입되었다. 마지막으로 조건3에서는 평시 조건에서 초기 산화철 cake layer 형성 후 막여과 운전을 실시하였다. 적조 운전모드에서는 산화철이 연속적으로 주입되는 반면 평시 운전모드에서는 운전 첫 cycle에서 산화철 cake layer를 형성 후 산화철을 주입하지 않고 운전을 진행하며, cake layer의 탈착을 최소화하기 위해 역세 Flux 및 시간을 줄여 운전을 실시하였다.

[표 2] Pilot plant 운전 조건

구분			Control	조건 1-1	조건 1-2	조건 2-1	조건 2-2	조건 3
			평시	적조시				평시
운 전 조 건	Alginate Conc.	mg/L	×	5.0	5.0	2.0	2.0	×
	pre-Coated Iron Oxide	g/m ²	×	×	42.4	×	17.0	2.8
	Filtration Flux	ℓ/m ² /hr	56.5					
	Backwashing Flux		1.46Q					1Q
	Filtration Time	min	30					
	B.W. Time		1					0.5
	Aeration	ℓ/min	200					-
	Recovery	%	91.0					94.4

3 연구결과

3.1 해수 중 유기물제거 공정 평가

적조 발생시 문제가 되는 해수 중 적조 부산물질(AOM)을 제거 하기 위해 용존공기부상(DAF), 전기분해(Electrolysis), 고급산화(AOP), 활성탄(Activated Carobn), 산화철(iron Oxide) 등 다양한 유기물 제거 공정을 랩규모로 테스트 하였으며 그 결과는 아래와 같다.

- 1) 용존공기부상(DAF)에 의해 조류 부산물질(AOM)은 30~60% 정도 제거 되었으며, 특히 고분자 유기물질이 주로 제거 됨에 따라, 후속 공정에서 변화 된 성상에 적합한 유기물 제어 공정 필요성이 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 전기분해(Electrolysis) 반응에 따른 고농도의 산화제 발생을 확인 하였으나 산화력 충분치 않아 주요 막 오염 물질인 polysaccharide를 완전히 제거 하지는 못하는 것으로 나타났다. 또한 전처리막 및 역삼투막을 손상 시킬 수 있는 고농도의 잔류 염소가 발생함에 따라, 환원제인 SBS(Sodium Bisulfite)를 과량 주입해야 하는 문제가 발생한다.
- 3) 고급산화법(AOP) 중 시설비가 크지 않고 적조 발생시에만 한시적으로 약품을 주입하여 운전이 가능하다는 점에서 펜톤산화법을 적조부산물 제거 공정으로 고려하였으나, 염소 이온의 Scavenging Effect로 인해 해수에서는 효과가 없거나 효율이 매우 낮을 것으로 보인다. 펜톤산화 뿐만 아니라 OH radical을 발생시키는 AOP 공정의 적용은 해수담수화공정에서 비효율적인 것으로 판단된다.

4) 활성탄(Activated Carbon)은 해수의 높은 이온강도 영향으로 흡착능이 매우 낮았다. 또한 저분자 유기물은 쉽게 흡착하나 polysaccharide 와 같은 고분자물질에 대한 흡착능이 떨어져 적조발생시 전처리막의 오염을 저감하는데 한계가 있을 것으로 보인다.

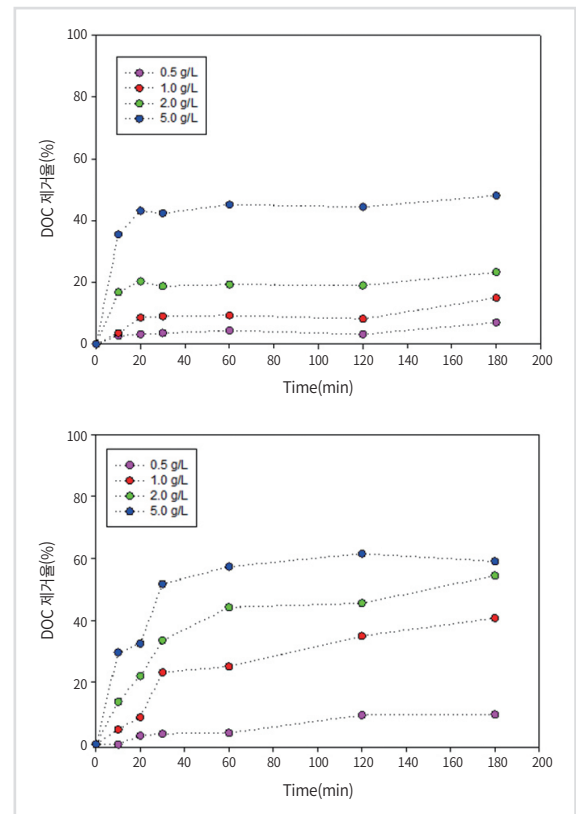
5) 산화철(iron Oxide)을 이용하여, 유기물 제거 효율 평가 및 막 오염 평가를 실시 하였으며, 실험 결과 산화철은 최대 67% 정도의 제거 효율을 보였으며 특히 막 오염에 직접적인 영향을 끼치는 고분자 유기물을 흡착하여 막 오염 저감에 큰 효과를 보였다. 또한 활성탄과 달리 해수 수준 높은 이온강도에서 흡착능이 오히려 증가하였다.

3.2 이온강도에 따른 산화철의 흡착 효율 평가 실험 결과

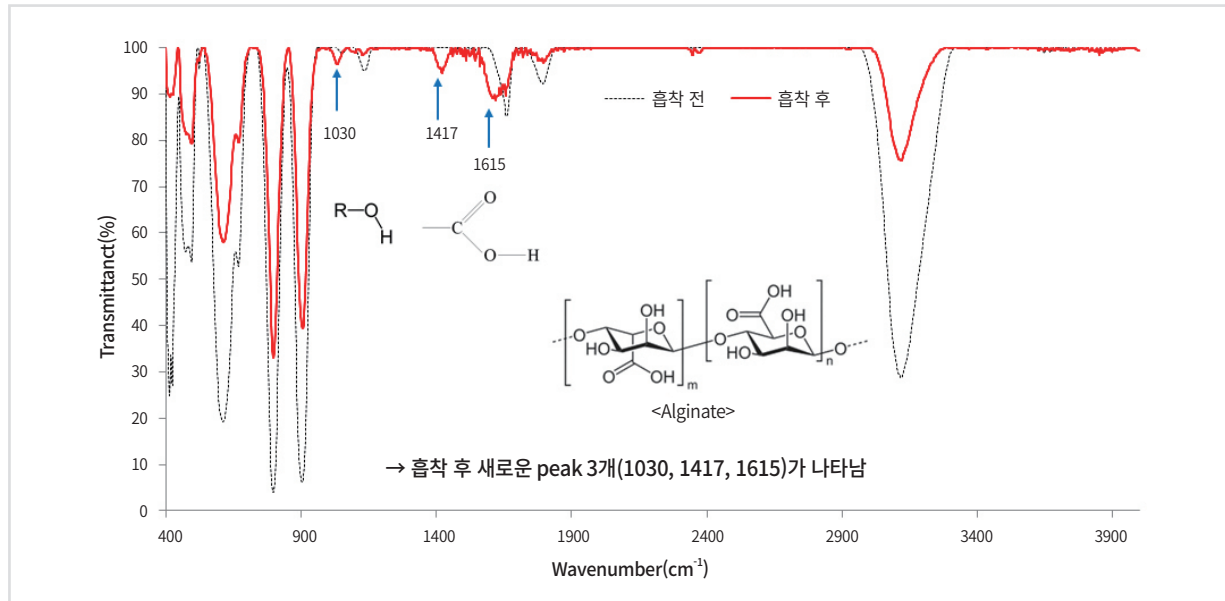
[그림 2]는 이온강도에 따른 산화철의 흡착 효율 평가 결과이다. 산화철의 주입 농도가 높아질수록 유기물을 흡착할 수 있는 표면적이 넓어져, 유기물 제거 효율이 높아졌다. 초기 30분 까지 흡착 반응이 대부분 진행 되었으며, 이후에는 제거율에 있어 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 실험 결과 증류수에서 산화철 5.0g/L 주입시 최대 48.1%의 제거 효율을 보인 반면, 인공해수 (TDS = 38,000mg/L)에서 최대 61.5%의 제거 효율을 보여, 높은 이온 강도에서 오히려 산화철이 더 높은 제거 효율을 나타냈다. 염소 이온에 의해 유기물 흡착에 방해가 받는 활성탄과 달리, 산화철의 경우 해수에서도 흡착 반응이 일어나며, 높은 이온강도가 오히려 더 유리한 조건임을 알 수 있다. 이는 유기물질이 분산·확산되어 공극 표면에 흡착되는 활성탄의 유기물 제거 기작과 산화철에 의한 유기물의 흡착 메커니즘이 상이하기 때문이다. 산화철에 의한 유기물 흡착시 주요한 제거 기작은 Ligand Exchange-Surface Complexation 으로 알려져 있다. 산화철 표면의 hydroxide groups 과 NOM 의 carboxyl, benzoic, and phenolic groups 등이 surface complexation - ligand exchange reactions 을 통해 흡착되며, pH가 반응의 주요한 인자이다. 해수와 같은 높은 이온강도에서 NOM은 좀더 dense 하고 작은 size의 분자 구조가 형성되며, 이는 Ligand Exchange 또는 다른 메커니즘을 통해 NOM이 산화철에 쉽게 흡착되는데 도움이 된다. 따라서, 산화철은 해수 중 유기물을 흡착 제거 하는 공정에 적용 가능할 것으로 판단된다.

산화철 흡착 전후의 FT-IR 분석을 통해 어떠한 메커니즘으로 유기물이 제거되는지 확인하고자 하였다. 적조 발생 해수를 모사하기 위해 AOM의 model compound인 alginate의 흡착 전후 FT-IR 분석 결과, 흡착 후 alginate로부터 유래된 새로운 피크점 3개(1030, 1417, 1615)가 산화철에서 발견되었다. 이는 산화철의 표면과 고분자 유기물의 카르복실기가 화학적으로 결합하였기 때문이며 이를 통해 산화철의 Alginate의 흡착 여부 및 흡착 메커니즘을 확인하였다.

[그림 2] 이온강도에 따른 산화철의 흡착 효율 평가 결과



[그림 3] 산화철 흡착 전후 FT-IR 분석 결과



3.3 산화철 다이내믹 막여과 실험 결과

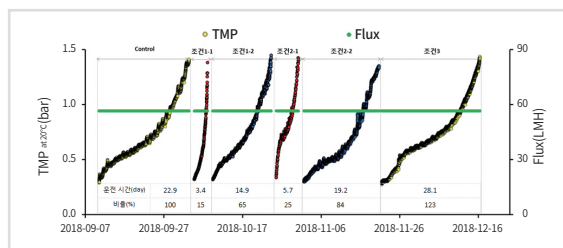
다양한 운전 조건에 따른 산화철 다이내믹 막여과 공정의 Pilot plant 장기 연속 운전 결과는 [그림 4] 및 [표 3]과 같다. 평시 해수를 사용하여 Flux 56.5LMH 및 회수율 91% 조건에서 운전을 실시하였으며(Control), 약 22.9일 동안 운전 후 TMP가 1.41 bar에 도달하여 $\Delta\text{TMP}/\Delta t$ 는 0.049 bar/day를 나타냈다. 고농도의 적조 발생시(조건 1-1), 해수원수에 alginate 5mg/L를 주입하였으며, 그 결과 급격한 막오염이 발생하여 약 3.4일 만에 TMP가 1.38bar에 도달함에 따라 Alginate(AOM)가 주요한 막오염 인자라는 것을 확인하였다. $\Delta\text{TMP}/\Delta t$ 는 0.316 bar/day로 Alginate 주입전 대비 급하게 증가하였다. 산화철 다이내믹 막여과 기술을 적용한 고농도 적조 발생 운전시(조건 1-2), 약 14.9일 동안 운전이 가능해짐에 따라 일반 공정 대비 약 4.4배 긴 운전 가능시간이 확보하여 고농도 적조 발생시에도 평시대 대비 65% 수준의 운전이 가능할 것으로 보인다. 저농도의 적조 발생시(조건 2-1, 2-2)에서는 alginate 2mg/L가 주입되었으며, 일반 공정에서 약 5.7일이 운전된 반면, 신정기술 적용시에는 약 19.2일이 운전되어 적조가 발생하지 않은 평시 운전 대비 84% 수준까지 운영이 가능하였다.

평시 운전조건에서 개발 기술 적용시(조건 3)에는 실험실 규모 연속운전을 통해 도출된 결과를 바탕으로 하여 역세 시간 및 유량을 감소시켜 회수율을 91.0%에서 94.4%로 증가하여 운전을 실시하였으며, 운전 결과 약 28.1일 동안 운전이 가능하여 control 운전 조건 대비 운전 가능 시간이 23% 증가하였다. 이에 따라 산화철 다이내믹 막여과 공정 적용에 따른 운전 기간 증가, 회수율 증가, 공기주입 중단에 따른 에너지 절감 효과 등이 기대된다.

[표 3] Pilot plant 운전 조건별 운전 결과

구분			Control	조건1-1	조건1-2	조건2-1	조건2-2	조건 3
			평시	적조시				
운전결과	연속 운전기간	day	22.9	3.4	14.9	5.7	19.2	28.1
	Control 대비 운전기간	%	100	15	65	25	84	123
	초기 TMP	bar	0.29	0.32	0.32	0.34	0.30	0.28
	최종 TMP		1.41	1.38	1.45	1.41	1.34	1.42
	Δ TMP/ Δ t	bar/day	0.049	0.316	0.076	0.189	0.054	0.041

[그림 4] Pilot plant 연속 운전 결과



평시, 고농도 적조 발생시, 저농도 적조 발생시 3가지 조건에 대한 운전 가능 시간 비교한 결과 모든 조건에서 산화철 다이나믹 막여과를 적용하였을 시 운전 가능시간이 증가하였으며, 막오염 증가 속도($\Delta\text{TMP}/\Delta t$)가 감소하였다. 고농도 적조 발생시에는 산화철 적용 후 약 4.4배, 저농도 적조 발생시에는 3.4배, 평시에는 23% 증가 효과를 나타냈다. 결과적으로, 산화철 다이나믹 막여과는 추가적인 CAPEX 증가가 크지 않으면서 적조 발생시 emergency plan으로서의 효과 및 평시에도 적용 가능한 기술로 판단된다.

4 결론

최근 지구 온난화로 인해 적조 현상이 보다 빈번해지고 오랜 기간 지속됨에 따라 역삼투막 방식의 해수담수화 플랜트의 피해가 점점 더 심각해지고 있다. 이에 따라 적조 발생시 대응 가능한 전처리 기술 개발의 필요성이 증대되고 있으며 본 실험 결과 분말 산화철을 이용한 다이나믹 막여과 공정은 적조 대응형 전처리 공정으로서 많은 이점을 보여준다. 활성탄, AOP 등과 같은 용존 유기물 제거 공정의 경우 해수에 포함된 다양한 이온에 의해 유기물 제거를 방해받는 것과 달리, 산화철의 유기물 제거 효율은 해수의 높은

이온 강도 조건에서 오히려 증가하여 해수에서의 높은 활용 가능성을 보여준다. 또한 산화철이 주요 막오염 물질인 고분자 유기물질을 주로 흡착함에 따라 전처리 막 오염 저감 효과가 매우 뛰어났으며, 전처리 과정에서 처리수의 유기물 농도를 감소시켜 후속 공정인 RO막 오염 또한 저감하다. 적조 현상 발생시 일시적으로만 작동되는 공정이기 때문에 추가 설치 비용 및 면적이 불필요한 것은 산화철 다이나믹 막여과의 주요한 장점이다. Pilot plant 운전 결과 실험실 규모 연속 운전 결과와 유사하게 적조 발생시에도 막오염을 완화하여 운전 시간 연장이 가능하였으며, 일반 공정 대비 고농도 적조 발생시에는 산화철 적용 후 약 4.4배, 저농도 적조 발생시에는 3.4배 운전 시간 연장이 가능하였음. 이와 같이 산화철 다이나믹 막여과가 적조 발생시에 대응가능한 해수담수화 전처리 공정으로서 매우 뛰어난 가능성을 보임에 따라 향후에는 1,000톤/일 규모로 scale-up을 통해 성능 검증 및 최적화를 수행하여 실 규모에서 적용 가능한 기술개발을 수행할 예정이다.

참고문헌

1. Algal blooms: an emerging threat to seawater reverse osmosis desalination
L. Villacorte, S. Tabatabai, N. Dhakal, G. Amy, J. Schippers, M. Kennedy, Desalination and Water Treatment, (2014) 1-11.
2. Seawater reverse osmosis desalination and (harmful) algal blooms
L.O. Villacorte, S.A.A. Tabatabai, D.M. Anderson, G.L. Amy, J.C. Schippers, M.D. Kennedy, Desalination, 360 (2015) 61-80.
3. MF/UF rejection and fouling potential of algal organic matter from bloom-forming marine and freshwater algae
L. Villacorte, Y. Ekowati, H. Winters, G. Amy, J. Schippers, M. Kennedy, Desalination, 367 (2015) 1-10.
4. The fate of transparent exopolymer particles (TEP) in integrated membrane systems: removal through pre-treatment processes and deposition on reverse osmosis membranes
L.O. Villacorte, M.D. Kennedy, G.L. Amy, J.C. Schippers, Water Research, 43 (2009) 5039-5052.
5. Reverse osmosis desalination system and algal blooms Part I: harmful algal blooms (HABs) species and toxicity
M.A. Darwish, H.K. Abdulrahim, A.S. Hassan, B. Shomar, Desalination and Water Treatment, (2016) 1-22.
6. Characterisation of transparent exopolymer particles (TEP) produced during algal bloom: a membrane treatment perspective
L.O. Villacorte, Y. Ekowati, H. Winters, G.L. Amy, J.C. Schippers, M. Kennedy, Desalination and Water Treatment, 51 (2013) 1021-1033.
7. NOM characterization by LC-OCD in a SWRO desalination line
F.X. Simon, Y. Penru, A.R. Guastalli, S. Esplugas, J. Llorens, S. Baig, Desalination and Water Treatment, 51 (2013) 1776-1780.
8. Effect of coagulation on fouling potential and removal of algal organic matter in ultrafiltration pretreatment to seawater reverse osmosis
S.A. Alizadeh Tabatabai, J.C. Schippers, M.D. Kennedy, Water Research, 59 (2014) 283-294.
9. MF/UF rejection and fouling potential of algal organic matter from bloom-forming marine and freshwater algae
L.O. Villacorte, Y. Ekowati, H. Winters, G. Amy, J.C. Schippers, M.D. Kennedy, Desalination, 367 (2015) 1-10.
10. Three years operational experience with ultrafiltration as SWRO pre-treatment during algal bloom
R. Schurer, A. Tabatabai, L. Villacorte, J. Schippers, M. Kennedy, Desalination and Water Treatment, 51 (2013) 1034-1042.
11. Coagulation and ultrafiltration in seawater reverse osmosis pretreatment
S. Tabatabai, TU Delft, Delft University of Technology, 2014.
12. Effect of coagulation on fouling potential and removal of algal organic matter in ultrafiltration pretreatment to seawater reverse osmosis
S.A.A. Tabatabai, J.C. Schippers, M.D. Kennedy, Water Research, 59 (2014) 283-294.
13. Adsorption of NOM onto activated carbon: effect of surface charge, ionic strength, and pore volume distribution
M. Bjelopavlic, G. Newcombe, R. Hayes, Journal of Colloid and Interface Science, 210 (1999) 271-280.

14. Assessing PAC contribution to the NOM fouling control in PAC/UF systems
M. Campinas, M.J. Rosa, Water Research, 44 (2010) 1636-1644.
15. Ultrafiltration processes for removing humic substances: effect of molecular weight fractions and PAC treatment
C.-F. Lin, Y.-J. Huang, O.J. Hao, Water Research, 33 (1999) 1252-1264.
16. Effects of adsorbents on membrane fouling by natural organic matter
J. Kim, Z. Cai, M.M. Benjamin, Journal of Membrane Science, 310 (2008) 356-364.
17. Photocatalytic degradation of seawater organic matter using a submerged membrane reactor
M.-J. Kim, K.-H. Choo, H.-S. Park, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 216 (2010) 215-220.
18. Adsorption and desorption of natural organic matter on iron oxide: mechanisms and models
B. Gu, J. Schmitt, Z. Chen, L. Liang, J.F. McCarthy, Environmental Science & Technology, 28 (1994) 38-46.
19. Adsorption and desorption of different organic matter fractions on iron oxide
B. Gu, J. Schmitt, Z. Chen, L. Liang, J.F. McCarthy, Geochimica et Cosmochimica Acta, 59 (1995) 219-229.
20. Removal of natural organic matter using surfactant-modified iron oxide-coated sand
C. Ding, X. Yang, W. Liu, Y. Chang, C. Shang, Journal of hazardous materials, 174 (2010) 567-572.
21. Modeling ionic strength effects on anion adsorption at hydrous oxide/solution interfaces
K.F. Hayes, C. Papelis, J.O. Leckie, Journal of Colloid and Interface Science, 125 (1988) 717-726.
22. Adsorption of polyelectrolytes onto oxides—the influence of ionic strength, molar mass, and Ca²⁺ ions
K. Vermöhlen, H. Lewandowski, H.-D. Narres, M. Schwuger, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 163 (2000) 45-53.
23. Effect of cationic polymer additives on the adsorption of humic acid onto iron oxide particles
E.K. Kim, H.W. Walker, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 194 (2001) 123-131.
24. Granular iron oxide adsorbents to control natural organic matter and membrane fouling in ultrafiltration water treatment
X. Cui, K.-H. Choo, Water Research, 47 (2013) 4227-4237.
25. Molecular size distributions of dissolved organic matter
G.L. Amy, R.A. Sierka, J. Bedessem, D. Price, L. Tan, Journal (American Water Works Association), (1992) 67-75.
26. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications
K.-H. Kang, H.S. Shin, H. Park, Water Research, 36 (2002) 4023-4032.
27. Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes
S. Hong, M. Elimelech, Journal of Membrane Science, 132 (1997) 159-181.
28. Macromolecular structures of humic substances
K. Ghosh, M. Schnitzer, Soil Science, 129 (1980) 266-276.
29. Natural organic matter removal and fouling control in low-pressure membrane filtration for water treatment
X. Cui, K.-H. Choo, Environmental Engineering Research, 19 (2014) 1-8